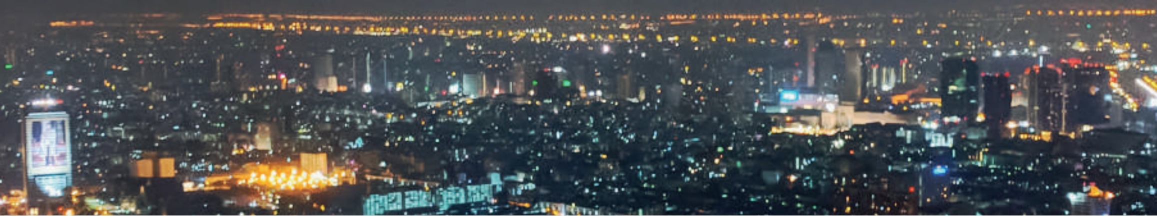
BCC
BANGKOK CABLE

HIGH VOLTAGE CABLE

การออกแบบและติดตั้งระบบสายไฟฟ้าแรงดันสูง

ผศ.ดร.คมสัน เพ็ชรรักษ์



บริษัท สายไฟฟ้าบางกอกเคเบิ้ล จำกัด ดำเนินแผนกลยุทธ์ในการพัฒนาองค์กรสู่การเติบโตอย่างยั่งยืน โดยคำนึงถึงผู้มีส่วนเกี่ยวข้องทางธุรกิจให้ได้รับประโยชน์ร่วมกัน เพื่อให้ธุรกิจอยู่รอดและเติบโตไปพร้อม ๆ กัน ควบคู่กับวิสัยทัศน์เพื่อก้าวสู่ความเป็นหนึ่งของผู้นำผลิตภัณฑ์สายไฟฟ้าและสายเคเบิ้ลระดับ ASEAN และต่อยอดเทคโนโลยีสู่นวัตกรรมที่หลากหลายในผลิตภัณฑ์สายไฟฟ้า สายส่งสัญญาณ และสายสื่อสาร พร้อมกำกับการดำเนินงานด้วยแนวคิดที่ให้ความสำคัญกับเศรษฐกิจที่เชื่อมโยงกับคุณภาพชีวิตของผู้คนและสิ่งแวดล้อม

ชื่อหนังสือ
High Voltage Cable การออกแบบ
และติดตั้งระบบสายไฟฟ้าแรงดันสูง
ชื่อผู้แต่ง
อาจารย์ คมสัน เพ็ชรรักษ์
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ISBN : 978-616-93970-0-7

พิมพ์ครั้งที่ 1 : พ.ศ.2565
จำนวน : 3,000 เล่ม
จำนวนหน้า : 379 หน้า

อำนวยการผลิต :
บริษัท สายไฟฟ้าบางกอกเคเบิ้ล จำกัด
โทร. 0 2651 9221-9, 0 2651 9252-7
โทรสาร. 0 2253 6028, 0 2253 5973

จัดพิมพ์โดย :
บริษัท เซจ อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด
17 ถนนเทศบาลนฤมาณ แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร 10900

สารจากประธานกรรมการบริหาร

บริษัท สายไฟฟ้าบางกอกเคเบิ้ล จำกัด ได้จัดทำคู่มือการออกแบบและการติดตั้งสายไฟฟ้ามาตั้งแต่ปี 2520 เพื่อเป็นข้อมูลและคู่มือให้กับวิศวกรและช่างไฟฟ้า สำหรับการใช้งานได้อย่างสะดวกและอ้างอิงได้ ซึ่งเป็นที่ยอมรับและได้รับความเชื่อถือสำหรับระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำ

มาครั้งนี้ ความเจริญเติบโต การพัฒนาการของระบบการส่งและจ่ายกำลังไฟฟ้าทางด้านระบบแรงดันปานกลางและแรงดันสูงมีการพัฒนาและใช้งานมากขึ้น ทั้งระบบสายส่งไฟฟ้าเหนือพื้นดินและสายส่งไฟฟ้าใต้ดิน ซึ่งมีความลึกซึ้งและซับซ้อนมากยิ่งขึ้น

เพื่อให้ง่ายต่อการเข้าใจ การออกแบบ การติดตั้ง การนำไปใช้งาน ตลอดจนการยืนยันผลด้านคุณภาพของสายไฟฟ้าทั้งก่อนและหลังการติดตั้ง เป็นภาระหน้าที่ที่สำคัญของวิศวกรและช่างไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องจักต้องเข้าใจอย่างถ่องแท้และนำไปใช้งานให้เกิดประโยชน์และความปลอดภัยอย่างสูงสุด

โดยความอนุเคราะห์ของ ผศ.ดร.คมสัน เพ็ชรรักษ์ อดีตหัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ท่านมีปณิธานที่ต้องการเผยแพร่ความรู้จากประสบการณ์ในการสอนทางด้านระบบไฟฟ้ากำลังและการทำวิจัย ตลอดจนการทำการทดสอบทั้งสายไฟและอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงมาตลอดกว่า 30 ปี จึงได้ช่วยจัดทำหนังสือเล่มนี้ และจักสามารถใช้เป็นคู่มือเสริมในการเรียนการสอนของอาจารย์และนักศึกษาได้ด้วยเช่นกัน

ด้วยจิตอันเป็นวิทยาทาน เพื่อคุณประโยชน์ต่อสังคมและประเทศชาติ บริษัท สายไฟฟ้าบางกอกเคเบิ้ล จำกัด หวังเป็นอย่างยิ่งที่หนังสือเล่มนี้จะช่วยอำนวยประโยชน์ต่อวิศวกร ช่างไฟฟ้า ผู้ออกแบบ ผู้รับเหมา และผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องในการนำไปใช้งานได้เกิดประโยชน์อันจะเป็นผลต่อความมั่นคงในระบบพลังงานของประเทศชาติได้เป็นอย่างดี และขอขอบพระคุณต่ออาจารย์รวมถึงคณะผู้จัดทำทุกท่านมา ณ ที่นี้

(นายสมพงศ์ นครศรี)
ประธานกรรมการบริหาร
บริษัท สายไฟฟ้าบางกอกเคเบิ้ล จำกัด
พฤษภาคม 2565

COMPANY
PROFILE

บริษัท สายไฟฟ้าบางกอกเคเบิ้ล จำกัด ก่อตั้งเมื่อเดือนสิงหาคม พ.ศ.2507 เพื่อดำเนินกิจการผลิตและจำหน่ายผลิตภัณฑ์สายไฟฟ้าชนิดตัวนำทองแดงและตัวนำอะลูมิเนียม โดยมีผู้บริหารและผู้ถือหุ้นเป็นคนไทยทั้งหมด มีทุนจดทะเบียน 1,300 ล้านบาท

สายไฟฟ้าบางกอกเคเบิ้ล เป็นโรงงานผลิตขนาดใหญ่ มีกำลังการผลิตที่สูงสามารถผลิตสายไฟฟ้าได้หลากหลายชนิด อีกทั้งยังมีทีมวิศวกรที่มีความรู้ ความสามารถ และความเชี่ยวชาญ และด้วยประสบการณ์อันยาวนานของบริษัทฯ ที่สามารถผลิตได้ทั้งสายไฟฟ้ากำลัง สายคอนโทรล สายอินสทรูเม้นท์ และสายสื่อสาร เป็นต้น

บริษัทฯ ดำเนินธุรกิจด้วยระบบบริหารการจัดการสมัยใหม่ มีการพัฒนาคุณภาพมาตรฐานผลิตภัณฑ์อย่างต่อเนื่อง โดยมุ่งเน้นการบริหารการจัดการใช้ประโยชน์จากวัตถุดิบอย่างมีประสิทธิภาพและประสิทธิผลเต็มเปี่ยม สอดคล้องกับการเสริมด้วยระบบเทคโนโลยีสารสนเทศ เพื่อเพิ่มศักยภาพสูงสุดในกระบวนการผลิตทั้งในปัจจุบันและอนาคต

BCC BANGKOK CABLE

BANGKOK CABLE

บริษัท สายไฟฟ้าบางกอกเคเบิ้ล จำกัด

สำนักงานใหญ่

187/1 ถนนราชดำริ แขวงลุมพินี
เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330
โทร. 0 2651 9221-9, 0 2651 9252-7, 0 2254 4550-9
โทรสาร. 0 2253 6028, 0 2253 5973, 0 2254 3859

MAP

โรงงานสมุทรปราการ

93 หมู่ 11 ถนนสุขสวัสดิ์ ตำบลในคลองบางปลากด
อำเภอพระสมุทรเจดีย์ จังหวัดสมุทรปราการ 10290
โทร. 0 2425 0441-3 โทรสาร. 0 2815 6296

MAP

โรงงานฉะเชิงเทรา

39/1 หมู่ 1 ถนนบางปะกง-ฉะเชิงเทรา ตำบลแสนภูดาษ
อำเภอบ้านโพธิ์ จังหวัดฉะเชิงเทรา 24140
โทร. 0 3857 7266-9 โทรสาร. 0 3857 7270-1

MAP

www.bangkokcable.com
@bangkokcablebcc
bangkokcablebcc

CABLES UNDER FIRE CONDITIONS LABORATORY

ห้องปฏิบัติการทดสอบสายเคเบิ้ลภายใต้สภาวะเผาไหม้แห่งแรกของประเทศไทย ที่ได้รับการรับรองความสามารถห้องปฏิบัติการทดสอบตามมาตรฐาน มอก.17025 (ISO/IEC 17025) ห้องปฏิบัติการที่ทันสมัยแห่งนี้สามารถดำเนินการทดสอบการต้านทานการลุกไหม้ ความหนาแน่นของควันไฟ ความสามารถในการส่งผ่านกระแสไฟฟ้าได้ขณะเกิดเพลิงไหม้ ตลอดจนการปล่อยก๊าซฮาโลเจนและกรดตามมาตรฐานต่าง ๆ ที่ได้รับการยอมรับในระดับสากล

LABORATORY FOR TESTING MEDIUM AND HIGH VOLTAGE CABLES

ห้องปฏิบัติการทดสอบสายไฟฟ้าแรงดันปานกลางและแรงดันสูง ที่ได้รับการรับรองความสามารถห้องปฏิบัติการทดสอบตามมาตรฐาน มอก.17025 (ISO/IEC 17025) เป็นห้องปฏิบัติการที่มีมาตรฐานการทดสอบที่แม่นยำและเชื่อถือได้ในระดับสากล

HIGH VOLTAGE
Underground Power Cables

69, 115 kV CV or CE Cables

การออกแบบที่ได้มาตราฐาน และการผลิตจากเทคโนโลยีที่ทันสมัยทำให้ได้สายไฟฟ้าแรงสูงที่เป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60840 และมอก 2202-2547เพื่อเหมาะต่อการใช้งานในสถานีไฟฟ้าย่อยและตามภูมิภาคอย่างเหมาะสม

สายไฟฟ้าแรงสูงนี้สามารถใช้งานได้ทั้งการเดินในท่อร้อยสายในรางเคเบิลการฝังใต้ดินหรือวางแช่ในน้ำได้ตลอดเวลา

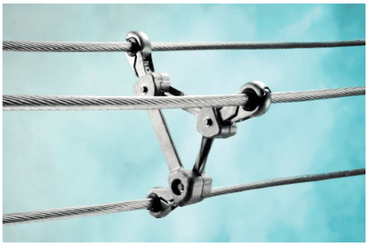
HIGH VOLTAGE

Transmission Line Conductors

69, 115, 230, 500 kV AAC, ACSR & ACCC Conductors

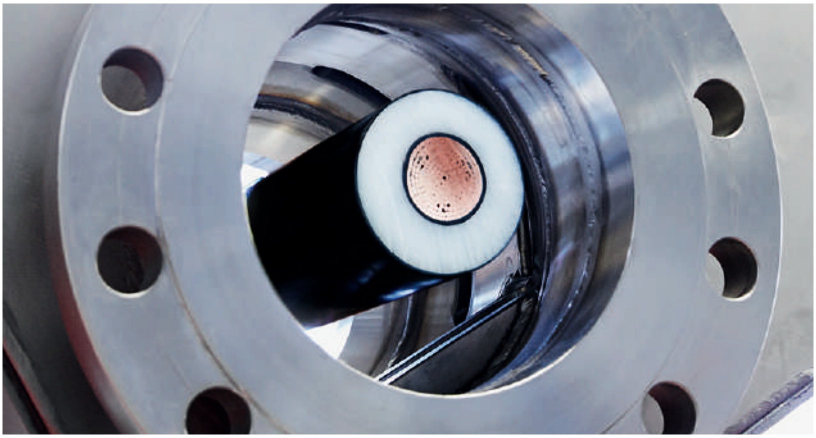
ระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงเป็นเสมือนเส้นเลือดใหญ่แห่งพลังงานไฟฟ้าของไทย ถูกส่งผ่านตัวนำที่มีขนาดแรงดัน 69, 115, 230 และ 500 kV ในระบบส่ง

สาย AAC, ACSR และ ACCC ถูกออกแบบและผลิตบนมาตรฐานเพื่อความปลอดภัย ความมีเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า และการลดความสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบส่ง




ADVANCED

CCV LINE
กระบวนการผลิตสายหุ้มฉนวน XLPE



CCV Line เป็นกระบวนการหุ้มฉนวนด้วย Polyethylene (PE) ที่ผสมกับ Peroxide แล้ววิ่งไปตามท่อในแนวเอียง ซึ่งเป็นการบ่มความร้อนแบบคาเทอนารี (Continuous Caetenary Valcanization) จึงเรียกว่ากระบวนการผลิตลักษณะนี้ว่า CCV Line เพื่อทำให้ PE เกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนโครงสร้างโมเลกุลแบบ Cross Linking หรือ XLPE ใช้สำหรับผลิตสาย CV (สายไฟฟ้าฉนวน XLPE เปลือกนอก PVC) หรือ CE (สายไฟฟ้าฉนวน XLPE เปลือกนอก PE) แรงดันปานกลาง (Medium Voltage, MV) แรงดันสูง (High Voltage, HV) และแรงดันสูงพิเศษ (Extra High Voltage, EHV)

ในการหุ้มฉนวน จะมีการหุ้ม Conductor Screen และ Insulation Screen ไปพร้อมกันโดยใช้ Co-Extruder เพื่อให้แต่ละชั้นแนบสนิทพอดีโดยไม่มีช่องว่าง มีการควบคุมความสะอาด ความหนา และเส้นผ่านศูนย์กลางของแต่ละชั้นด้วยเทคโนโลยีชั้นสูง เพื่อให้มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีเยี่ยม และตอบสนองความต้องการของลูกค้าได้เป็นอย่างดี

BCC
BANGKOK CABLE

MOBILE TESTING UNIT

TECHNICAL DATA

- Rated voltage : 135 kV
- Rated current : 96 A
- Frequency range : 30 - 300 Hz
- Load range : 0.03786 - 3.7867 μF

OPERATING CONDITION

- Temperature : -15 - 45 °C
- Humidity : ≤ 90 %
- Testing duration : 1 hour / circuit
- Longest cable length : 17 km for 115 kV CE 800 mm^2

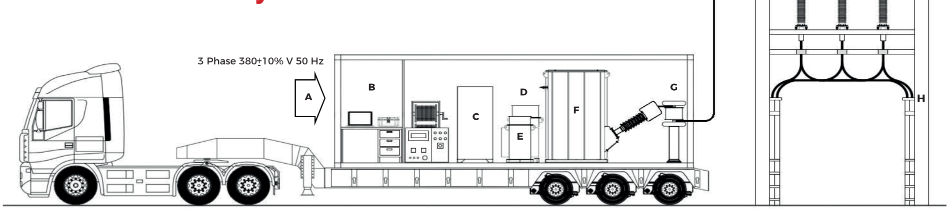
TEST ITEMS

- AC Resonance Test according to IEC 60840
- Cable fault location
- Partial Discharge Test

BKD
BANGKOK DIELEC CO., LTD.

BANGKOK CABLE

Test devices layout and its wire connection



A	:	Power source	E	:	Isolation transformer
B	:	Control room	F	:	Variable frequency reactor
C	:	Variable frequency power supply	G	:	Coupling capacitor
D	:	Exiting transformer	H	:	Test object

Size of Mobile Testing Unit : W 2.55 m x L 16.6 m x H 3.85 m

BCC
BANGKOK CABLE

Management System

ISO 9001	QMS02093/538
ISO 14001	EMS07007/266
ISO 45001	OHSMS20033/111

bsi. ISO/IEC 27001 Information Security Management CERTIFIED

ISO 27001	IS752238

สถาบันรับรองมาตรฐานไอเอสโอ (MASCI)

ระบบบริหารงานคุณภาพ มอก. 9001 – 2559 (ISO 9001: 2015)

ระบบการจัดการสิ่งแวดล้อม มอก. 14001– 2559 (ISO 14001: 2015)

ระบบการจัดการอาชีวอนามัยและความปลอดภัย มอก. 45001– 2561 (ISO 45001: 2018)

British Standards Institution (BSI)

ระบบบริหารจัดการความปลอดภัยของข้อมูล ISO/IEC 27001 : 2013

ใช้ไฟฟ้าปลอดภัย ใช้สายไฟฟ้า *บางกอกเคเบิ้ล*

SUCCESS STORIES

INDUSTRIES


Oil & Gas


Petrochemicals


Renewable Energy


Mining

TRANSPORTATION & MOBILITY


Sky Train


Railway Networks


Mass Rapid Transit


Automotive

UTILITIES & POWER GRIDS


Transmission Lines


Substations

CONSTRUCTION & INFRASTRUCTURES


Underground Cable Systems


Airport Solutions

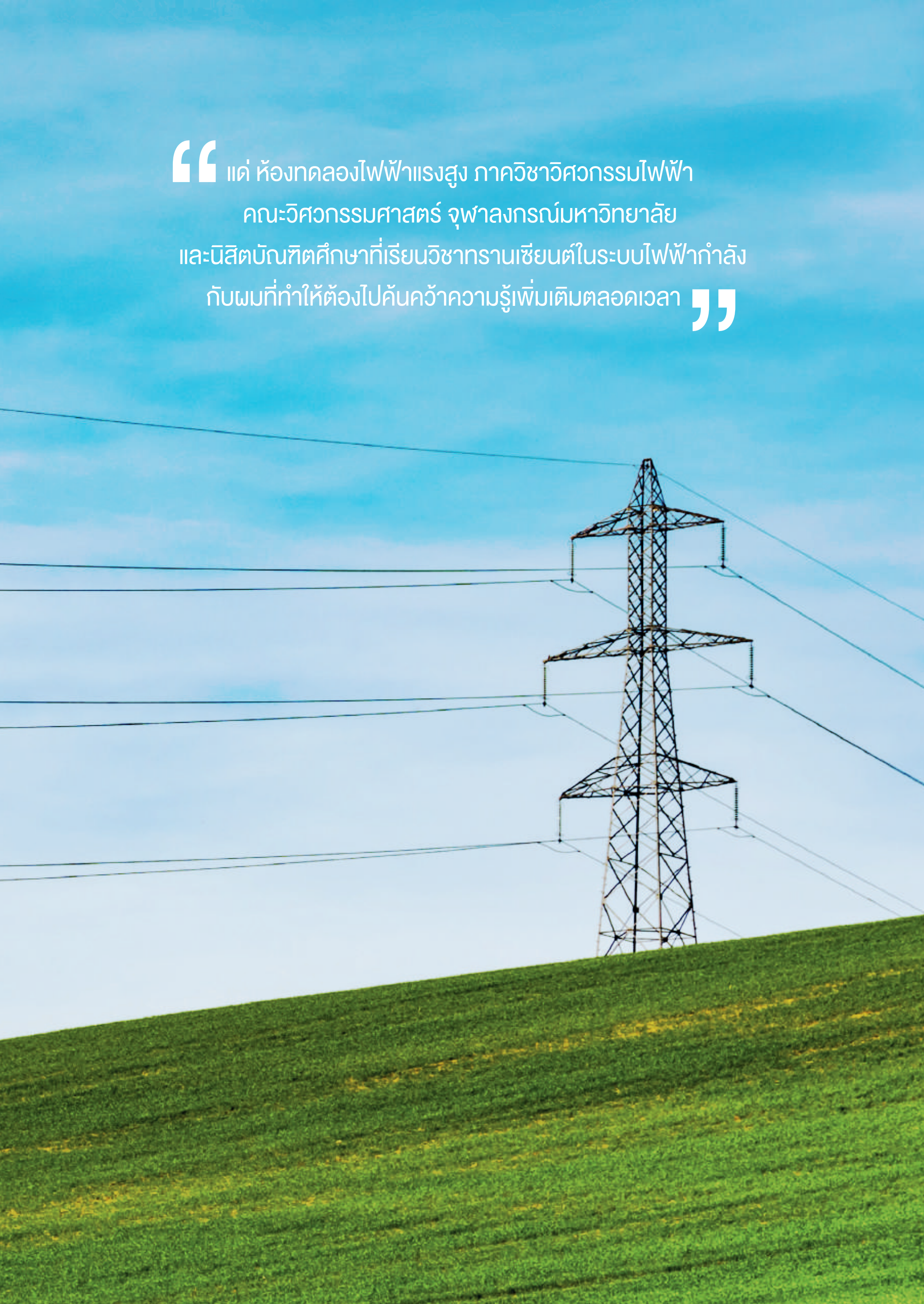
TELECOMMUNICATION


5G Transmission Towers

INDUSTRIAL AND ELECTRONICS


Machinery and Automation Solutions

“แด่ ห้องทดลองไฟฟ้าแรงสูง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
และนิสิตบัณฑิตศึกษาที่เรียนวิชาทรานเซียนต์ในระบบไฟฟ้ากำลัง
กับผมที่ทำให้ต้องไปค้นคว้าความรู้เพิ่มเติมตลอดเวลา”



กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ คุณแคทรียา ชูพุ่ม, คุณนงลักษณ์ สุวรรณจำรัส, คุณภัทระ นาคอ่อน, คุณกนกวรรณ ประทีปคีรี, คุณวรภร แกล้วทนงค์, คุณศรัณย์รัตน์ ทองเที่ยว และคุณวิชัย เจริญสุข ที่ช่วยตรวจทานและแก้ไขข้อบกพร่องในหนังสือเล่มนี้

คุณถาวร เอื้อดี และคุณเกรียงไกร โอษฐ์ธนู ที่ช่วยเหลือทางด้านการทดลองต่าง ๆ ที่ทำ ณ ห้องทดลองไฟฟ้าแรงสูง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งผมได้ยกขึ้นมาประกอบในหนังสือ

ขอขอบคุณ ศ.ดร.มานะ ศรียุทธศักดิ์ ที่อนุญาตให้นำการคำนวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามาใช้ในบทที่ 4 และผศ.ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล ที่อนุญาตให้นำการคำนวณแรงดันเกินสวิตชิง มาใช้ในหัวข้อที่ 2.3.2 ในหนังสือ

ขอขอบคุณ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, การไฟฟ้านครหลวง และการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่ได้ให้โอกาสผมได้ร่วมทำงานวิจัยต่าง ๆ ทำให้ได้ทราบถึงข้อขัดข้องต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในการทำงาน และบริษัท สายไฟฟ้าบางกอกเคเบิ้ล จำกัด ที่ให้โอกาสผมได้เขียนหนังสือเล่มนี้

ขอขอบคุณท่านอื่น ๆ ที่ไม่ได้เอ่ยนามไว้ ณ ที่นี้ที่ช่วยให้ความเห็น, ให้ข้อมูล และให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ในการเขียนหนังสือ และขอบคุณครอบครัวเพ็ชรรักษ์ ที่ให้กำลังใจผมเสมอมา

ท้ายนี้ หากหนังสือเล่มนี้มีข้อบกพร่องใด ๆ ผมขอน้อมรับไว้แต่เพียงผู้เดียว และหากท่านผู้อ่านจะกรุณาก็ขอให้ส่งข้อเสนอแนะต่าง ๆ มาที่ Komson.p@chula.ac.th เพื่อที่ผมจะได้นำไปปรับปรุงหนังสือเล่มนี้ให้ถูกต้องยิ่งขึ้นในลำดับต่อไป

ผศ.ดร.คมสัน เพ็ชรรักษ์

คำนำ

หนังสือเล่มนี้เขียนขึ้นจากประสบการณ์ในการสอนวิชาทรานเซียนต์ในระบบไฟฟ้ากำลัง (2102650 Electrical transient in power system) ซึ่งผมได้สอนมากว่า 30 ปี และจากประสบการณ์ในการทำวิจัยที่ได้ทำร่วมกับ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, การไฟฟ้านครหลวง และการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

หนังสือ ***"คู่มือการออกแบบและทดสอบระบบสายส่งไฟฟ้า"*** เล่มนี้ แบ่งออกเป็น 6 บท คือ

บทที่ 1 เป็นความรู้ทั่วไปที่จำเป็นต้องใช้ในการอ่านบทต่อไปในหนังสือ โดยกล่าวถึงปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อมีคลื่นเคลื่อนที่ในสายไฟฟ้า (สายไฟฟ้าในที่นี้หมายถึงสายไฟฟ้าแรงสูงที่ระดับแรงดันเป็นร้อย ๆ กิโลโวลต์ จนไปถึงลายทองแดงในแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ -print circuit board- และสายต่อต่าง ๆ ใน วงจรรวม -integrated circuit- เช่น IC หรือไมโครโปรเซสเซอร์ ที่มีแรงดันเพียงไม่กี่โวลต์) โดยเฉพาะอย่างยิ่งปรากฏการณ์การสะท้อนของคลื่นที่มีข้อเสียคือ บางครั้งจะทำให้เกิดแรงดันเกินที่สูงมากในระบบไฟฟ้ากำลังหรือทำให้การส่งข้อมูลดิจิทัลเกิดความผิดพลาด แต่ก็มีข้อดีคือเราสามารถใช้หลักการสะท้อนของคลื่นในการหาตำแหน่งที่เกิดความผิดพร่อง (fault) ในระบบสายส่งไฟฟ้าได้

บทที่ 2 กล่าวถึงการออกแบบระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงเหนือพื้นดิน ซึ่งก็คือการใช้ตัวนำเปลือย เช่น สายอลูมิเนียมเสริมแกนเหล็ก (aluminium conductor steel reinforced, ACSR) ที่เป็นสายไฟฟ้าที่นำกำลังไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าไปยังผู้ใช้ไฟฟ้าโดยสายไฟฟ้านี้จะใช้อากาศเป็นฉนวน ในบทนี้จะกล่าวถึงพารามิเตอร์ (ความต้านทานตัวนำ, ความเหนี่ยวนำ และความจุไฟฟ้า) ของสาย ACSR แบบต่าง ๆ จากนั้นได้แสดงการคำนวณระยะห่างในอากาศระหว่างสายไฟฟ้ากับสายไฟฟ้า (line-line arcing distance) และระยะห่างในอากาศระหว่างสายไฟฟ้ากับเสาส่งไฟฟ้า (line-ground arcing distance) รวมถึงจำนวนลูกถ้วยแขวนในพวงลูกถ้วยที่จำเป็นต้องใช้เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการเบรกดาวน์ในอากาศในกรณีที่สายส่งไฟฟ้าเดินผ่านบริเวณที่มลภาวะสูงหรือในกรณีที่มีแรงดันเกิน เนื่องจากฟ้าผ่าหรือจากการปลด/ต่อสายส่งไฟฟ้าออก/เข้าระบบไฟฟ้า นอกจากนั้นยังกล่าวถึงมิติของเสาส่งไฟฟ้าที่ต้องใช้เมื่อพิจารณาถึงแรงลมที่มาปะทะสายไฟฟ้า อนึ่งในบทนี้ยังได้กล่าวถึงการใช้แขนเสาไฟฟ้าแบบฉนวน (insulated crossarm) แทนการใช้แขนเสาไฟฟ้าแบบเหล็กถัก (lattice steel crossarm) แบบที่ใช้ในปัจจุบัน

บทที่ 3 กล่าวถึงการออกแบบระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงใต้ดินซึ่งก็คือสายเคเบิลนั่นเอง โดยเริ่มตั้งแต่โครงสร้างของสายเคเบิลที่มีชั้นวัสดุต่าง ๆ จำนวนมากซ้อนกันเป็นทรงกระบอกที่มีแกนร่วมกัน ทำให้พารามิเตอร์ของสายไฟฟ้ามีความซับซ้อนมากกว่าสาย ACSR ที่กล่าวถึง

ในบทที่ 2 (มีความต้านทานของฉนวนเพิ่มขึ้นมา) จากนั้นก็กล่าวถึง พิกัดการนำกระแสของสายเคเบิลที่ขึ้นอยู่กับการระบายความร้อนของวัสดุชั้นต่าง ๆ ที่ใช้ประกอบกันเป็นสายเคเบิลและสภาพรอบ ๆ สายเคเบิล, แรงดันเหนี่ยวนำที่เปลือกโลหะของสายเคเบิลและวิธีแก้ไข นอกจากนั้นยังกล่าวถึงขั้นตอนการผลิตและการติดตั้งสายเคเบิลใต้ดินอีกด้วย

บทที่ 4 กล่าวถึงการคำนวณสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นบนผิวดิน เมื่อสายส่งไฟฟ้าส่งกำลังไฟฟ้าไปให้ผู้ใช้ แม้ว่าการคำนวณในบทนี้จะกล่าวถึงระบบสายส่งไฟฟ้าเหนือพื้นดิน แต่การคำนวณดังกล่าวก็สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับสายเคเบิลใต้ดินได้ ในกรณีของสายเคเบิลใต้ดิน สนามไฟฟ้าจะถูกกั้นด้วยเปลือก/ชีลด์โลหะของสายเคเบิลทำให้ไม่มีสนามไฟฟ้าที่ผิวดิน แต่ก็ยังมีสนามแม่เหล็กที่ผิวดินเพราะเปลือก/ชีลด์โลหะของสายเคเบิลและดินไม่สามารถกั้นสนามแม่เหล็กทั้งหมดได้

บทที่ 5 กล่าวถึงการทดสอบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง โดยเริ่มจากการทดสอบเพื่อตรวจสอบสภาพ (condition assessment test) หรือที่บางครั้งก็มักเรียกว่า การทดสอบแบบไม่ทำลาย (non-destructive test) ได้แก่ การวัดความต้านทานฉนวน (insulation resistance measurement), การวัดกำลังสูญเสียของฉนวน (insulation loss / power, Tg δ, Measurement) และการวัดดีสชาร์จบางส่วน (partial discharge, PD, measurement) จากนั้นได้กล่าวถึงการสร้างแรงดันสูงประเภทต่าง ๆ ที่ใช้ทดสอบสายส่งไฟฟ้าที่หน้างาน ได้แก่ แรงดันกระแสสลับด้วยวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม ที่ปัจจุบันนิยมใช้กันมากในการทดสอบสายส่งไฟฟ้าเหนือพื้นดิน/สถานีไฟฟ้าทั้งแบบฉนวนด้วยอากาศ (air-insulated substation, AIS) และฉนวนด้วยก๊าซ (gas-insulated substation, GIS), แรงดันกระแสสลับแบบหน่วง, แรงดันกระแสสลับความถี่ต่ำมาก ที่มักใช้ในการทดสอบสายเคเบิล, แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า/สวิตชิงรูปคลื่นเต็ม และแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นแกว่ง และท้ายที่สุดในบทนี้ได้กล่าวถึงการทดสอบเฉพาะแบบและการทดสอบเพื่อตรวจรับที่หน้างานของสายเคเบิล

บทที่ 6 กล่าวถึงวิธีต่าง ๆ ที่ใช้หลักการของการสะท้อนของคลื่น-ซึ่งมีชื่อเรียกโดยทั่วไปว่า time domain reflectometry, TDR ที่กล่าวถึงในบทที่ 1-และวิธีบริจด์ ในการหาจุดที่เกิดผิดพร่องในสายเคเบิลโดยประมาณ จากนั้นได้กล่าวถึงการหาตำแหน่งที่ผิดพร่องให้แม่นยำขึ้นด้วยวิธีการฟังเสียง, วิธีวัดแรงดันช่วงก้าวบนผิวดิน และวิธีวัดสนามแม่เหล็ก

ผศ.ดร.คมสัน เพ็ชรรักษ์
วิศวกรทดสอบ
หน่วยทดสอบและบริการ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผศ.ดร.คมสัน เพ็ชรรักษ์

วิศวกรทดสอบ
หน่วยทดสอบและบริการ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คมสัน เพ็ชรรักษ์ เกิดที่จังหวัดเชียงราย เมื่อปี พ.ศ. 2503 จบการศึกษา ระดับปริญญตรี และปริญญาโท สาขาไฟฟ้ากำลังจากภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2525 และ 2529 ตามลำดับ เข้ารับราชการเป็นอาจารย์ประจำภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2529 จากนั้นระหว่างปี พ.ศ. 2532 ถึง พ.ศ. 2538 ได้ลาราชการเพื่อไปศึกษาต่อระดับปริญญาเอกที่ Swiss Federal Institute of Technology, ETH-Zurich จนสำเร็จการศึกษาเมื่อปี พ.ศ. 2538 และกลับมารับราชการเป็นอาจารย์ประจำต่อ ที่ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จนเกษียณอายุราชการในปี พ.ศ. 2563

ขณะที่ศึกษาในชั้นปีที่ 4 ระดับปริญญาตรี ได้รับความกรุณาจาก รศ.ดร.สำรวย สังข์สะอาด ให้ทำหน้าที่เป็นผู้ช่วยในการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง อาทิ หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง, ลูกถ้วยไฟฟ้า, สายเคเบิลแรงสูง, สอบเทียบระบบวัดแรงดันสูงทั้งแรงดันกระสสลับและแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า ฯลฯ ที่ห้องทดลองไฟฟ้าแรงสูง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และได้ทำการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงตลอดมาจนเกษียณอายุราชการ

นอกนั้นระหว่างที่รับราชการก็ได้ทำงานวิจัยร่วมกับการไฟฟ้าฝ่ายผลิต, การไฟฟ้านครหลวง, และ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค รวมถึงบริษัทต่าง ๆ เป็นจำนวนมาก และยังได้ร่วมเป็นกรรมการวิชาการ เพื่อร่าง มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) หลายฉบับ

ปัจจุบันทำหน้าที่เป็นวิศวกรทดสอบและผู้สังเกตการณ์ทดสอบ ประจำหน่วยทดสอบและบริการ ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้าที่

หน้าที่

หน้าที่

หน้าที่

รายการรูป

รูปที่	คำอธิบาย	หน้าที่

รายการตาราง

ตารางที่	คำอธิบาย	หน้าที่
4.1	ข้อกำหนดของสนามไฟฟ้า E และสนามแม่เหล็ก B	4-1
4.2	พารามิเตอร์ของตัวนำที่ใช้ในการคำนวณค่าสนามไฟฟ้า –บริเวณทั้งหมดที่อยู่เหนือระดับดินว่างเปล่า	4-3
4.3	พารามิเตอร์ของตัวนำที่ใช้ในการคำนวณค่าสนามไฟฟ้า -มีสิ่งปลูกสร้างขนาดใหญ่ที่ RoW	4-7
4.4	กระแส I_n และเฟส ϕ ของกระแสที่ไหลในตัวนำต่างๆ	4-8
5.1	ความหมายของรหัส IP ตัวแรกและตัวที่ 2	5-3
5.2	ความหมายของรหัส IP ตัวที่ 3 และ 4	5-4
5.3	ค่าความต้านทานฉนวนต่ำสุดสำหรับการทดสอบเพื่อตรวจรับและการทดสอบเพื่อการบำรุงรักษา	5-10
5.4	ค่า PI ที่แสดงถึงสภาพของฉนวน	5-12
5.5	ค่า tan δ และค่า tan δ ที่เพิ่มสูงสุด ของปลอกฉนวนนำสายไฟฟ้า	5-22
5.6	แรงดัน U_b และ U_c เมื่อ C_a และ C_c มีค่าต่างๆ (C_b = 1 pF; U_a = 1kV)	5-28
5.7	ความแม่นยำของระบบวัดดีสชาร์จบางส่วนในการวัดประจุ q_0 ที่เกิดซ้ำ N ครั้ง/s	5-32
5.8	ความถี่ในการวัด RIV ที่ NEMA107 แนะนำ	5-35
5.9	ขนาดของแรงดันรูปขั้น U_0 ที่ต้องการเพื่อจ่ายประจุ q_0	5-37
5.10	ค่ายอดแรก $U_{t,1st\ peak}$ ของแรงดันกระแสสลับแบบหน่วง	5-52
5.11	แรงดันทดสอบ U_t ที่ใช้ในการทดสอบความทนแรงดันของสายเคเบิล	5-72
5.12	พารามิเตอร์ α_1 และ α_2 สำหรับแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นต่างๆ	5-80
5.13	พารามิเตอร์ T_1/T_2 ที่วัดได้จากรูปที่ 5.80	5-83
5.14	หัวข้อการทดสอบทางไฟฟ้าของสายเคเบิลตาม IEC	5-87
5.15	ความต้านทานสูงสุด $R_{DC,max}$ ของตัวนำที่ 20 °C	5-92
5.16	ขนาดและเวลาป้อนแรงดันในการทดสอบความทนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้สายเคเบิล	5-96
5.17	ขนาดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า U_t ที่ใช้ในการทดสอบ	5-97
5.18	ขนาดแรงดันที่ใช้ในการทดสอบความทนแรงดันไฟฟ้าของฉนวน	5-98
5.19	เส้นผ่านศูนย์กลาง $\varnothing$ ต่ำสุดของวัตถุรูปทรงกระบอกที่ใช้ดัดสายเคเบิล	5-99
5.20	ช่วงเวลาร้อน-เย็นในการทดสอบวัฏจักรความร้อนและการป้อนแรงดันให้สายเคเบิล	5-100
5.21	แรงดันทดสอบสำหรับสายเคเบิลที่ใช้ในระบบส่ง	5-102
6.1	ค่า ν/2 ของสายเคเบิลที่ใช้ฉนวนประเภทต่างๆ	6-4

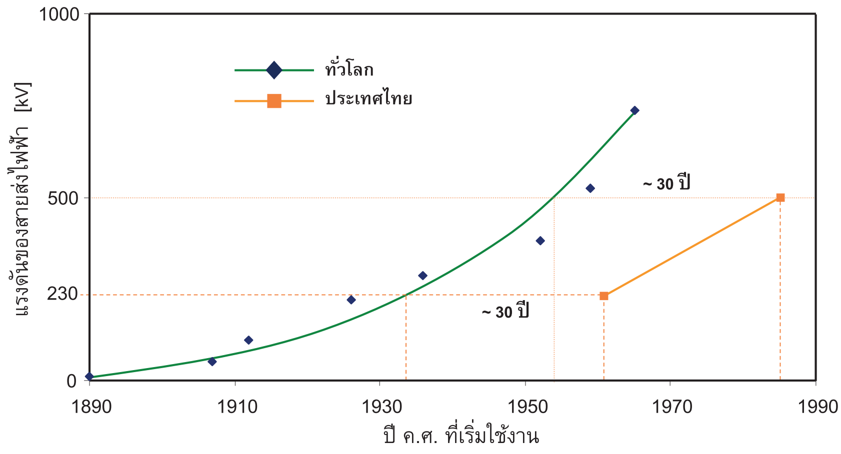
บทที่ 1. บทนำ

ปัจจุบันทั่วโลกมีความสนใจและลงทุนทางด้านการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดพลังงานหมุนเวียน เช่น แสงอาทิตย์, ลม, คลื่นจากน้ำทะเล ฯลฯ เป็นจำนวนมาก ประเทศไทยของเราเองก็เช่นกัน โดยที่พลังงานหมุนเวียนที่กล่าวถึงและได้รับการส่งเสริมมากที่สุด คือ พลังงานจากแสงอาทิตย์ เพราะประเทศของเราเป็นประเทศในเขตศูนย์สูตร

อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาถึงกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแสงอาทิตย์แล้ว เราต้องใช้พื้นที่ถึง 1000 m^2 ในการผลิตกำลังไฟฟ้า 1 MW (~1 kW/m^2) ซึ่งเหมาะกับสภาพพื้นที่ๆ ไม่หนาแน่นมากนัก เพราะหากต้องการใช้พลังงานจำนวนมากในพื้นที่จำกัด เช่น อาคารสำนักงานขนาดใหญ่, ศูนย์การค้า ฯลฯ ที่ติดตั้งเครื่องปรับอากาศจำนวนมาก พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแสงอาทิตย์จะไม่เพียงพอต่อความต้องการ อาคารเหล่านั้นจึงต้องใช้พลังงานไฟฟ้าที่จ่ายมาจากการไฟฟ้าอยู่ดี

แต่เป็นที่ทราบกันดีว่าแหล่งพลังงาน เช่น น้ำ, ถ่านหิน, ก๊าซ ฯลฯ ที่ใช้เป็นต้นกำเนิดพลังงานไฟฟ้ามักอยู่ห่างไกลจากแหล่งที่ใช้พลังงานไฟฟ้า เช่น กรุงเทพฯ -เนื่องมาจากความจริงที่ว่าไม่มีใครในโลกต้องการให้มีโรงไฟฟ้าอยู่ใกล้ๆ บ้าน เพราะโรงไฟฟ้าจะมีผลกระทบต่อสภาวะแวดล้อมและสภาพรอบๆ เสมอไม่มากก็น้อย- ทำให้เราต้องใช้สายไฟฟ้าในการส่งพลังงานไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าไปยังจุดที่ใช้งานและสายไฟฟ้านั้นมักมีแรงดันสูงมาก

รูปที่ 1.1 แสดงถึงระดับแรงดันของสายส่งไฟฟ้าตั้งแต่เริ่มใช้พลังงานไฟฟ้าจนถึงปัจจุบัน จากรูปจะเห็นว่าระดับแรงดันของสายส่งไฟฟ้าสูงมากขึ้นๆ ตามเวลา ซึ่งอธิบายได้ไม่ยากเพราะเราใช้พลังงานมากขึ้นตลอดเวลา หลายท่านอาจแย้งว่าด้วยเทคโนโลยีในปัจจุบัน เครื่องใช้ไฟฟ้ามีขนาดเล็กลงและมีประสิทธิภาพสูงขึ้น ดังนั้นการใช้กำลังไฟฟ้าควรจะลดลง แต่อย่าลืมว่าราคาของเครื่องใช้ไฟฟ้านั้นก็ถูกลงมาก ทำให้ประชาชนซื้อเครื่องใช้ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นมากมาย ความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าจึงสูงขึ้น



รูปที่ 1.1 ระดับแรงดันของสายส่งไฟฟ้าตั้งแต่เริ่มมีการใช้พลังงานไฟฟ้าจนถึงปัจจุบัน

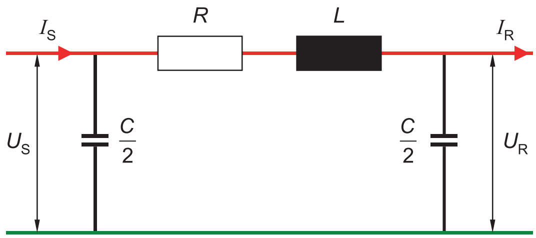
ท่านผู้อ่านอาจเข้าใจว่าการที่เราต้องส่งพลังงานจำนวนมากด้วยแรงดันไฟฟ้าสูงก็เพราะต้องการลดกำลังสูญเสียในสายส่งไฟฟ้า ซึ่งก็ถูกต้องเพียงบางส่วนเท่านั้น เพราะการลดกำลังสูญเสียในสายส่งไฟฟ้าสามารถทำได้ด้วยวิธีอื่น เช่น การเพิ่มพื้นที่หน้าตัดของสายไฟฟ้า, ใช้วัสดุที่มี สภาพนำไฟฟ้า (electric conductivity, σ) ต่ำ ฯลฯ

เหตุผลหลักที่เราต้องส่งพลังงานไฟฟ้าด้วยแรงดันสูงก็เพราะกำลังงานไฟฟ้าที่ส่งได้จะแปรตามระดับแรงดันยกกำลังสอง ดังที่จะกล่าวถึงต่อไป

$$P \propto U^2 \tag{1.1}$$

1.1 กำลังไฟฟ้าของสายส่งไฟฟ้า

สายส่งไฟฟ้าที่มีความยาวโดยปกติสามารถแทนได้ด้วยวงจร π ดังแสดงในรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 วงจรสมมูลของสายส่งไฟฟ้าที่มีความยาวมาก

U_S และ I_S เป็นแรงดันและกระแสทางด้านส่ง ส่วน U_R และ I_R เป็นแรงดันและกระแสทางด้านรับ พารามิเตอร์ของตัวนำที่ทำหน้าที่เป็นสายไฟฟ้าประกอบด้วย R คือความต้านทาน L คือความเหนี่ยวนำ และ C คือความจุไฟฟ้าต่อลงดิน -หลายท่านอาจสงสัยว่าทำไมถึงไม่มีความนำไฟฟ้าต่อลงดิน G ในรูป ทั้งนี้เนื่องจาก ระบบส่งกำลังไฟฟ้า (electric power transmission system) มักใช้อากาศเป็นฉนวนระหว่างสายไฟฟ้ากับสายไฟฟ้า และสายไฟฟ้ากับพื้นดิน เพราะอากาศเป็นฉนวนที่ดีมาก ดังนั้นความนำไฟฟ้าต่อลงดินจึงน้อยมากและละเลยได้-

ในกรณีที่กำลังสูญเสียในความต้านทานมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับกำลังไฟฟ้าที่ส่งผ่านสายไฟฟ้า และละเลยความจุไฟฟ้าของสายส่งไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า P ที่ส่งผ่านสายไฟฟ้าสามารถหาได้จากสมการ

$$P = \frac{U_S U_R}{X_L} \sin\delta \tag{1.2}$$

เมื่อ X_L = รีแอกแตนซ์เหนี่ยวนำ (inductive reactance) ทั้งหมดระหว่าง U_S และ U_R มีค่าเท่ากับ $2\pi f L$ [Ω]

δ = มุมระหว่าง U_S และ U_R ซึ่งมีชื่อพิเศษเรียกว่า power angle [rad]

ดังนั้นกำลังไฟฟ้าสูงสุด P_{max} ที่ส่งผ่านสายไฟฟ้าจึงมีค่าเท่ากับ

$$P_{max} = \frac{U_S U_R}{X_L} \tag{1.3}$$

เมื่อ $\delta = \pi/2$ (ในการทำงานปกติค่า δ จะอยู่ระหว่าง $\pi/6$-$\pi/4$)

จากสมการข้างต้น เราจะเห็นว่ามีพารามิเตอร์ 2 ตัว ที่สำคัญ คือ

- ***ระดับแรงดัน*** กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ส่งผ่านสายส่งไฟฟ้าขึ้นกับผลคูณของ U_S และ U_R แต่โดยปกติค่า U_S และ U_R จะแตกต่างกันไม่มากนัก ดังนั้นเราจึงกล่าวได้ว่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดแปรตามกำลังสองของแรงดัน ซึ่งเป็นเหตุผลสำคัญที่ทำให้การไฟฟ้าต้องใช้แรงดันสูงในการส่งพลังงานไฟฟ้า
- ***รีแอกแตนซ์เหนี่ยวนำ*** กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ส่งผ่านสายไฟฟ้าแปรผกผันกับรีแอกแตนซ์เหนี่ยวนำ ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดสายไฟฟ้า, การจัดสายไฟฟ้า (ใช้สายไฟฟ้าเส้นเดียวหรือใช้สายควบ), ระยะห่างระหว่างสายเฟส และความยาวของสายส่งไฟฟ้า

  สำหรับสายส่งไฟฟ้าฉนวนด้วยอากาศ กำลังไฟฟ้าสูงสุดจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่ารีแอกแตนซ์เหนี่ยวนำลดลง ซึ่งทำได้โดยลดระยะห่างระหว่างสายเฟส หรือใช้สายควบหลายเส้นประกอบกันเป็นสายเฟสซึ่งจะกล่าวถึงในบทต่อไป และในกรณีที่สายส่งไฟฟ้ามีความยาวมาก ๆ บางครั้งเราจะลดรีแอกแตนซ์เหนี่ยวนำโดยติดตั้งตัวเก็บประจุอนุกรม (series capacitor) เข้ากับสายส่ง

กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ส่งได้ของสายส่ง (เมื่อคำนึงถึงความจุไฟฟ้าของสายส่งด้วย) ในการออกแบบเบื้องต้นนี้ เรียกว่า Surge Impedance Loading, SIL, ซึ่งคำนวณได้จากสมการ

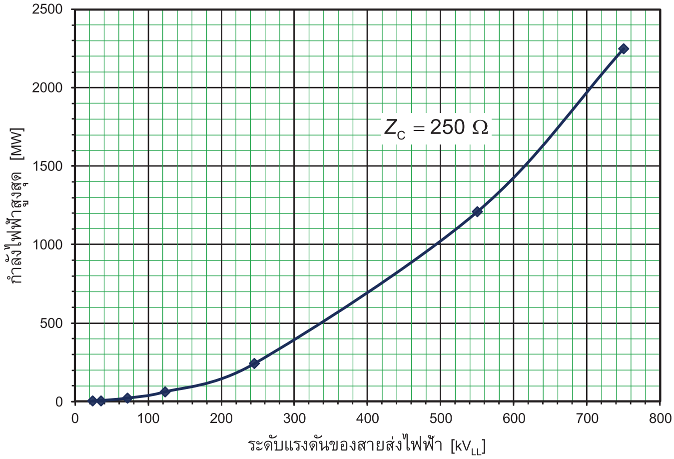
$$P_{max} = \frac{kV_{LL}^{2}}{Z_C} \quad [MW] \tag{1.4}$$

เมื่อ

$Z_C = \sqrt{X_L X_C}$ = อิมพีแดนซ์ลักษณะเฉพาะ (characteristic impedance) [Ω]

X_C = รีแอกแตนซ์ความจุไฟฟ้า (capacitive reactance) มีค่าเท่ากับ $1/(2\pi fC)$ [Ω]

รูปที่ 1.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง P_{max} กับระดับแรงดันของสายส่งไฟฟ้า เมื่อสมมุติว่า Z_C มีค่าเท่ากับ 250 Ω



รูปที่ 1.3 กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ส่งได้ของสายส่งไฟฟ้าที่ระดับแรงดันต่าง ๆ

SIL เป็นกำลังไฟฟ้าที่ส่งผ่านสายส่งไฟฟ้าที่ไม่มีความต้านทาน (สมมุติว่าค่า R น้อยกว่าค่า X_L มาก) ไปยังโหลดที่มีค่าความต้านทานเท่ากับ Z_S ซึ่งในกรณีนี้แรงดัน U_S และ U_R จะมีขนาดเท่ากันแต่ U_R จะตามหลัง U_S อยู่ δ rad

เมื่อสมมุติว่าแรงดันไฟฟ้าเคลื่อนที่ในสายส่งไฟฟ้าที่ฉนวนด้วยอากาศด้วยความเร็วเท่ากับแสง มุม δ สามารถคำนวณได้จากสายส่งไฟฟ้าที่มีความยาว ℓ km และความถี่ f Hz ของระบบไฟฟ้า จากสมการ

$$\delta = \frac{\ell f \cdot 2\pi}{3 \cdot 10^5}\ \text{[rad]} = \frac{\ell f \cdot 360}{3 \cdot 10^5}\ \text{[degree]} \tag{1.5}$$

อย่างไรก็ตาม กำลังไฟฟ้าที่ส่งได้จริงจะต้องคำนึงถึง

1) *ขีดจำกัดความร้อน* (thermal limit) เพราะถ้าสายไฟฟ้ามีอุณหภูมิสูงเกินไปจะทำให้สายตกท้องช้าง (sag) มาก ระยะห่างระหว่างสายไฟฟ้ากับพื้นดินจึงน้อยลงจนอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตได้

2) *แรงดันตก* (voltage drop) ในสายมักกำหนดให้มีค่าไม่เกิน 5%

3) *เสถียรภาพ* คือกำหนดให้มุม δ ระหว่าง U_S และ U_R มีค่าไม่เกินเท่าใดจึงทำให้ระบบมีเสถียรภาพที่ยอมรับได้ ซึ่งมักกำหนดจากสมการ

$$\text{Stability margin} = \frac{P_{max} - P}{P_{max}} \cdot 100 = (1 - \sin\delta) \cdot 100\ \ [\%] \tag{1.6}$$

เช่น ถ้ากำหนดให้ stability margin เท่ากับ 30% มุม δ จะมีค่าประมาณ 44°

1.1.1 ระดับแรงดันมาตรฐานของระบบส่งไฟฟ้า

ดังที่กล่าวมาแล้วว่ากำลังไฟฟ้าที่ส่งได้ขึ้นกับกำลังสองของแรงดันระบบ แต่เราไม่สามารถกำหนดค่าระดับแรงดันตามที่เราต้องการได้ เพราะถูกกำหนดเป็นมาตรฐานไว้แล้วดังแสดงในตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 ระดับแรงดันมาตรฐาน (แรงดันสูงสุดของอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบ (highest voltage for equipment, U_m))

สหรัฐอเมริกา [$kV_{LL,rms}$] [IEEE C62.82.1-2010]	ยุโรป [$kV_{LL,rms}$] [IEC60071-1, 2019]
72.5	72.5
121	123
145	145
242	245
362	362
420	420
550	550
800	800
-	1000
1200	1200

1.1.2 วัสดุที่ใช้ทำตัวนำของสายไฟฟ้า

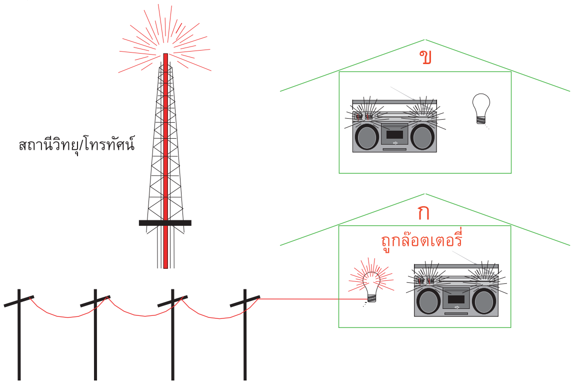
คุณสมบัติของวัสดุที่นิยมใช้ทำเป็นตัวนำของสายส่งไฟฟ้า ได้แสดงตารางที่ 1.2

ตารางที่ 1.2 คุณสมบัติของวัสดุที่นิยมใช้ทำตัวนำ

วัสดุ	ความหนาแน่น [kg/m^3]	จุดหลอมเหลว [^{o}C]	ความต้านทานจำเพาะ [μΩ·cm]	ความนำจำเพาะ [% IACS]	ความนำความร้อน [cal/cm^2/s /^{o}C/cm]	สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทาน [1/^{o}C]	ความแข็งแรงทางกล [ksi]	สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้น [1/^{o}C]
ทองแดงรีดแข็ง (hard drawn Cu)	8890	1083	1.77	97.6	0.92	0.00382	500 - 700	17E-6
ทองแดงอบนิ่ม (annealed Cu)	8890	1083	1.72	100	0.92	0.00393	300 - 400	17E-6
อะลูมิเนียมรีดแข็ง (hard drawn Al)	2707	660	2.83	61	0.52	0.004	240 - 290	24E-6
เหล็กกล้ารีดแข็ง (hard drawn steel)	7688 - 7849	1500	24	7.2	0.11	0.003	700 - 3600	13E-6
เหล็ก (Iron wrought)	7689 - 7849	1530	20	8.6	0.14	0.004	400 - 500	11E-6
สังกะสี (Zinc)	6888 - 7208	420	5.7	30	0.27	0.0037	70 - 300	26E-6
ดีบุก (Tin)	6968 - 7288	232	11.5	15	0.16	0.0042	40 - 50	25E-6
ตะกั่ว (Lead)	11341	327	22	7.8	0.083	0.0043	26 - 23	29E-6

1.2 ทำไมเราต้องใช้ตัวนำในการส่งกำลังไฟฟ้า?

รูปที่ 1.4 แสดงการส่งแรงดันไฟฟ้าความถี่ 50 Hz และสัญญาณคลื่นวิทยุ/โทรทัศน์จากแหล่งกำเนิดไปยังผู้ใช้งาน



รูปที่ 1.4 การส่งกำลังไฟฟ้าความถี่ 50 Hz และสัญญาณคลื่นวิทยุ/โทรทัศน์

บ้านนาย ก และนาย ข ในรูปที่ 1.4 ต่างก็มีเครื่องรับวิทยุแบบที่ใช้ถ่านไฟฉายด้วยกันทั้งคู่ หากทั้งสองบ้านอยู่ห่างจากจากสถานีวิทยุออกไปไม่มากนัก บ้านทั้งสองหลังก็สามารถรับฟังรายการต่างๆ ได้โดยไม่ต้องใช้สายสัญญาณวิทยุ

ต่อมา นาย ก ถูกล๊อตเตอรี่รางวัลที่หนึ่ง นาย ก จึงให้ช่างมาเดินระบบไฟฟ้า 230 V 50 Hz ที่บ้านพร้อมกับติดหลอดนีออนและให้การไฟฟ้าต่อไฟฟ้าให้ ส่วนนาย ข ไม่มีเงิน จึงซื้อเพียงหลอดนีออนมาติดไว้เท่านั้น เมื่อนาย ก เปิดไฟนีออนขณะที่ฟังเพลงโปรด ไฟที่บ้านก็สว่างตามที่ควรจะเป็น ในขณะที่เมื่อนาย ข เปิดไฟนีออนขณะที่ฟังเพลงโปรด ไฟไม่สว่าง -ความจริงแล้วถ้าบ้านนาย ข อยู่ใกล้กับสายส่งไฟฟ้าแรงสูง เช่นสายส่ง 230 kV หรือ 500 kV มากพอ หลอดนีออนที่บ้านนาย ข ก็จะเรืองแสงขึ้นมาจนพอมองเห็นอะไรๆ ได้บ้าง แต่นาย ข จะรำคาญมากเพราะอาจจะรู้สึกเหมือนถูกไฟดูดทุกครั้งที่นาย ข สัมผัสกับ โลหะที่ไม่ต่อลงดิน (ungrounded metallic objects) ใดๆ ในบ้าน-

ทั้งแรงดันไฟฟ้าความถี่ 50 Hz และสัญญาณคลื่นวิทยุ/โทรทัศน์ ต่างก็เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า แต่ทำไมเราถึงต้องใช้สายไฟฟ้าในการส่งพลังงานไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าไปยังบ้านเรือน ในขณะที่เราไม่ต้องใช้สายสัญญาณในการส่งคลื่นคลื่นวิทยุ/โทรทัศน์จากสถานีกระจายเสียงไปยังบ้านเรือนที่อยู่ห่างออกไป

หลายท่านคงทราบคำตอบกันดีอยู่แล้วว่า สายไฟฟ้าทำหน้าที่นำพลังงานไฟฟ้าไปยังตำแหน่งที่เราต้องการส่งไปเท่านั้นไม่ส่งไปที่อื่น ในขณะที่สัญญาณคลื่นวิทยุ/โทรทัศน์นั้น ต้องการส่งให้กระจายไปในทุกทิศทางเพื่อให้บ้านเรือนจำนวนมากๆ รับสัญญาณได้พร้อมกัน แต่ความแรงของสัญญาณก็จะลดลงตามระยะทางที่ห่างออกไปจากเสาส่งวิทยุ/โทรทัศน์ ทำให้บ้านเรือนที่อยู่ไกลๆ ไม่สามารถฟังหรือดูรายการโปรดได้ -โปรดสังเกตว่าจากห้องจัดรายการวิทยุ/โทรทัศน์ต้องมีสายเคเบิลนำคลื่นสัญญาณจากเครื่องส่งไปยังเสาส่งวิทยุ/โทรทัศน์เสมอ-

กำลังไฟฟ้าที่ส่งไปตามสายไฟฟ้าสามารถหาได้จาก สมการของพอยน์ติ้ง (Pointing vector) คือ

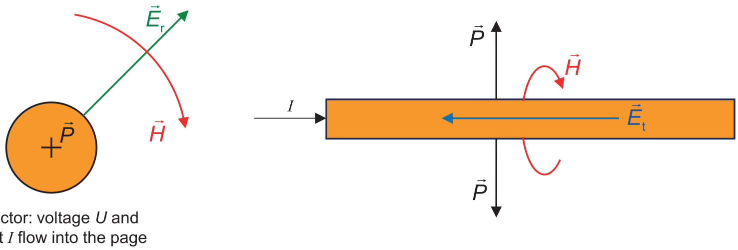
$$\vec{P} = \vec{E} \times \vec{H} \quad [\mathrm{W/m^2}] \tag{1.7}$$

เมื่อ $\vec{P}$ = กำลังของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า [W/m^2]

$\vec{E}$ = สนามไฟฟ้า (electric field) [V/m] แปรผกผันกับระยะห่าง ℓ ยกกำลังสองจากแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

$\vec{H}$ = ความเข้มสนามแม่เหล็ก (magnetic field intensity) [A/m] แปรผกผันกับระยะห่าง ℓ จากแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

ดังแสดงในรูปที่ 1.5



รูปที่ 1.5 กำลังไฟฟ้าที่ส่งไปตามสายไฟฟ้าและกระจายไปรอบ ๆ สายไฟฟ้า

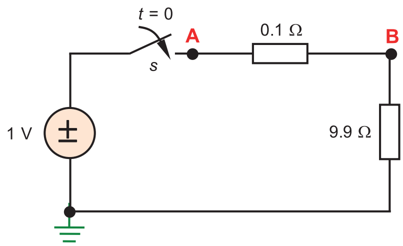
เมื่อ $\vec{P}$ = กำลังที่ไหลไปตามสายไฟฟ้า (รูปซ้าย) = กำลังที่กระจายไปรอบ ๆ สายไฟฟ้า (รูปขวา)

$\vec{E}_r$ = สนามไฟฟ้าในแนวรัศมีของสายไฟฟ้าเนื่องจากความต่างศักย์ระหว่างสายไฟฟ้ากับกราวน์

$\vec{E}_t$ = สนามไฟฟ้าตามความยาวสายไฟฟ้าเนื่องจากมีแรงดันตกคร่อม R และ L ของสายไฟฟ้า

$\vec{H}$ = ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กรอบ ๆ สายไฟฟ้าเนื่องจากมีกระแส I ไหลในสายไฟฟ้า

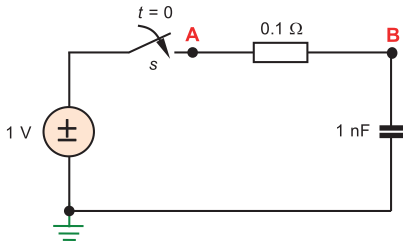
การแก้ปัญหาทางไฟฟ้าโดยปกติที่เราได้เรียนกันมามักใช้ กฎของโอห์ม หรือกฎแรงดันและกระแสของเคอร์ชอฟ ยกตัวอย่างเช่นวงจรในรูปที่ 1.6 ซึ่งเป็นวงจรกระแสตรงที่มีแหล่งจ่ายขนาด 1 V จ่ายแรงดันให้กับโหลดขนาด 9.9 Ω ผ่านสายไฟที่มีความต้านทาน 0.1 Ω ถ้าเราปิดสวิตซ์ s ที่เวลา $t = 0$ แรงดันที่จุด B จะมีค่าเท่ากับ 0.99 V และเกิดขึ้นที่เวลา $t = 0$ s เช่นกัน



รูปที่ 1.6 วงจรกระแสตรงที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน

ทั้งนี้เพราะในการแก้ปัญหาทางไฟฟ้าประเภทนี้ เราสมมุติว่าโหลดเป็น องค์ประกอบแบบก้อน (lump component) และสายไฟฟ้าที่ต่อระหว่างแหล่งจ่ายแรงดันกับโหลดสามารถแทนได้ด้วยความต้านทาน 0.1 Ω เท่านั้น แรงดันที่เกิดขึ้น ณ ส่วนต่าง ๆ ของวงจรจึงเกิดขึ้นพร้อมกัน

หลายท่านอาจแย้งว่าถ้าเปลี่ยนโหลดตัวต้านทาน 9.9 Ω ไปเป็นตัวเก็บประจุขนาด 1 nF ดังแสดงในรูปที่ 1.7 จะเกิดอะไรขึ้น? เพราะเป็นที่ทราบกันดีว่าแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุที่จุด B ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดได้



รูปที่ 1.7 วงจรกระแสตรงที่มีโหลดเป็นตัวเก็บประจุ

คำตอบคือ เมื่อเราปิดสวิตซ์ *s* ที่เวลา $t = 0$ s แรงดันที่จุด A จะมีค่าเท่า 1 V และที่จุด B ก็จะมีค่าเท่ากับ 0 V ซึ่งเกิดขึ้นพร้อมกันที่เวลา $t = 0$ s แต่แรงดันที่จุด B จะเพิ่มขึ้นตามเวลาแบบเลขชี้กำลังจาก 0 V ที่เวลา $t = 0$ s จนมีค่าเท่ากับ 1 V ที่เวลาเป็นอนันต์ (แรงดันคร่อมตัวต้านทานก็ลดลงตามเวลาแบบเลขชี้กำลังเช่นกัน)

เกร็ดความรู้ 1.1 แรงดัน ณ จุดต่างๆ ในวงจร *RC* มีค่าประมาณคงที่ ที่เวลาเท่าใด?

แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุในรูปที่ 1.7 จะเพิ่มขึ้นตามสมการ

$$U_B = 1 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad [\mathrm{V}]$$

เมื่อ $\tau = RC = 0.1 \cdot 1 \cdot 10^{-9} = 0.1$ ns

ที่เวลา $t = \tau$ แรงดัน U_B จะมีค่าเท่ากับ 0.632 V, $t = 3\tau$ แรงดัน $U_B = 0.950$ V, $t = 5\tau$ แรงดัน $U_B = 0.993$ V หรือกล่าวได้อีกอย่างหนึ่งว่าแรงดันต่างๆ ในวงจร *RC* จะมีค่าประมาณคงที่ในเวลา 3τ-5τ เพราะแรงดันที่เวลา 3τ-5τ แตกต่างจากแรงดันค่าสุดท้ายประมาณ 1-5% เท่านั้น

หากสายไฟฟ้ายาวมาก -คำว่า “ยาว” ในที่นี้มักเทียบกับความยาวคลื่นของความถี่ที่สูงที่สุดในวงจรไฟฟ้าที่เรากำลังพิจารณา- เราต้องแทนสายไฟฟ้าด้วย พารามิเตอร์แบบกระจาย (distributed parameter) -ในบางกรณี ขดลวดที่มีความยาวมากๆ ของหม้อแปลงไฟฟ้าหรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าก็ต้องแทนด้วยพารามิเตอร์แบบกระจายเช่นกัน- และไม่สามารถใช้กฎของโอห์ม หรือกฎแรงดันและกระแสของเคอร์ชอฟแก้ปัญหาทางไฟฟ้าได้อีกต่อไป เราต้องใช้ ทฤษฎีสายส่ง (transmission line theory) ซึ่งที่คำนึงถึงข้อเท็จจริงที่สำคัญคือ คลื่นแรงดันหรือกระแสต้องใช้เวลาในการเคลื่อนที่ คลื่นแรงดันหรือกระแสอาจเกิดการสะท้อนไป-มาในสายส่งได้ และขนาดของคลื่นแรงดันหรือกระแสจะถูกลดทอนเมื่อเคลื่อนที่ในสายส่งที่มีความต้านทาน

1.3 เวลาที่คลื่นใช้ในการเคลื่อนที่

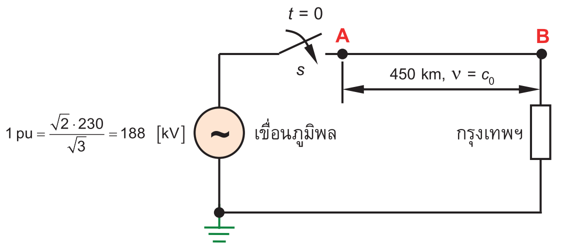
เราทราบกันดีว่าวัตถุที่เคลื่อนที่ได้เร็วที่สุดที่มนุษย์รู้จักคือ *แสง* โดยความเร็วแสงในสุญญากาศ c_0 มีประมาณ

$$c_0 = 3 \cdot 10^8 \left[\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}\right] = 300 \left[\frac{\mathrm{m}}{\mu\mathrm{s}}\right] = 30 \left[\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{ns}}\right] \qquad (1.8)$$

กระแสไฟฟ้า I ที่ไหลในสายไฟฟ้าจึงไม่สามารถไหลจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งด้วยความเร็วที่มากกว่าความเร็วแสง ดังนั้นที่เวลาเดียวกัน แรงดันที่ต้นทางและแรงดันที่ตำแหน่งต่างๆ ในสายไฟฟ้าจึงมีค่าไม่เท่ากัน

ถ้าพิจารณาการส่งพลังงานไฟฟ้าที่ระดับแรงดัน 230 kV_{LL} จากเขื่อนภูมิพลไปยังกรุงเทพฯ ในรูปที่ 1.8 ที่ใช้สายส่งขึงในอากาศยาว 450 km และความถี่ของแรงดันไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 50 Hz เคลื่อนที่ในสายส่งขึงในอากาศด้วยความเร็ว $\nu = c_0$

เมื่อปิดสวิตซ์ s ที่เวลา t = 0 s เราจะพบว่าที่เวลา t = 0 s แรงดันที่จุด B มีค่าเท่ากับศูนย์



รูปที่ 1.8 สายส่งกำลังไฟฟ้าจากเขื่อนภูมิพลไปที่กรุงเทพฯ

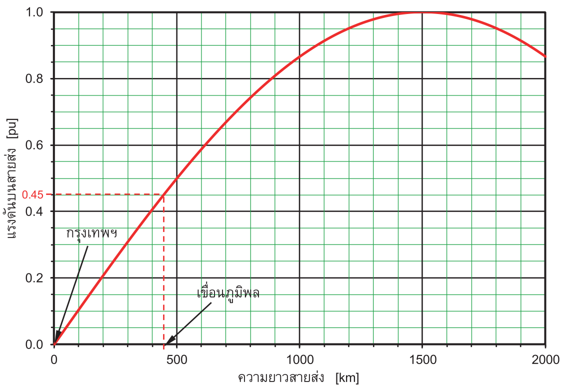
แต่เวลาที่แรงดัน 50 Hz (ความยาวคลื่นเท่ากับ 6000 km) ใช้ในการเคลื่อนที่หรือ เวลาในการเคลื่อนที่ (transit time, τ) จากเขื่อนภูมิพลไปยังกรุงเทพฯ มีค่าเท่ากับ

$$\tau = \frac{450 \cdot 10^3}{3 \cdot 10^8} = 1.5 \quad [\text{ms}] \tag{1.9}$$

ดังนั้นเมื่อแรงดัน 50 Hz ค่าเท่ากับ 0 V เคลื่อนที่ไปถึงกรุงเทพฯ (จุด B) ที่เวลา t = 1.5 ms แรงดันที่เขื่อนภูมิพล (จุด A) จะมีค่าประมาณ

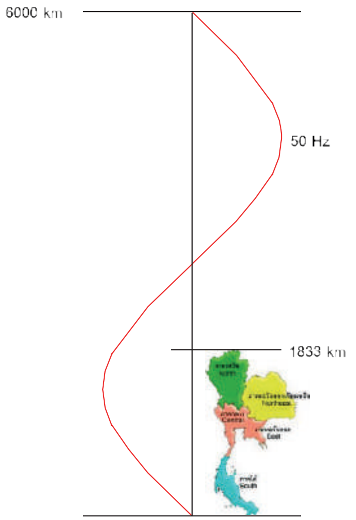
$$U_A = \sin\left(2\pi \frac{450 \cdot 10^3}{6000 \cdot 10^3}\right) \cong 0.45 \quad [\text{pu}] \tag{1.10}$$

ดังแสดงในรูปที่ 1.9 ซึ่งจะเห็นว่าที่เวลาเดียวกัน แรงดัน ณ จุดต่างๆ ในสายส่งมีค่าไม่เท่ากัน



รูปที่ 1.9 ความแตกต่างของแรงดันไฟฟ้าที่เขื่อนภูมิพลกับกรุงเทพฯ

ถ้าเราพิจารณาระบบส่งพลังงานไฟฟ้าทั้งประเทศ เราจะพบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆ ของประเทศที่เวลาเดียวกันจะมีค่าไม่เท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 1.10



รูปที่ 1.10 ขนาดของประเทศไทยเมื่อเทียบกับความยาวคลื่น 6,000 km (ความถี่ 50 Hz)

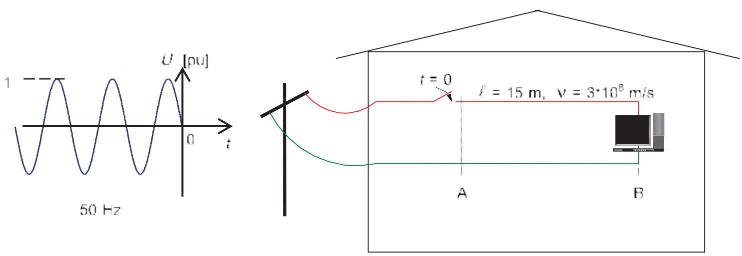
ในทางกลับกัน สำหรับบ้านเล็กๆ หลังหนึ่งในรูปที่ 1.11 เราจะพบว่าเมื่อเราปิดสวิตซ์ที่เวลา t = 0 s แรงดัน 0 V จะเคลื่อนที่จากจุด A ไปยังจุด B และถึงจุด B เมื่อเวลาผ่านไป

$$\tau = \frac{15}{3 \cdot 10^8} = 50 \quad [\text{ns}] \tag{1.11}$$

ณ เวลานี้แรงดันที่จุด A (U_A) มีค่าเท่ากับ

$$U_A = \sin\left(2\pi \frac{15}{6000 \cdot 10^3}\right) = 0.000016 \quad [\text{pu}] \tag{1.12}$$

ซึ่งจะเห็นว่าแรงดันที่จุด A และ B แทบจะไม่แตกต่างกัน การคำนวณต่างๆ จึงสมมุติให้องค์ประกอบเป็นแบบก้อน เราจึงใช้กฎของโอห์มหรือกฎแรงดันและกระแสของเคอร์ชอฟ ในการแก้ปัญหาได้



รูปที่ 1.11 ขนาดของแรงดัน ณ ตำแหน่งต่างๆ ในบ้านหลังหนึ่ง

เกร็ดความรู้ 1.2 ความเร็ว v ของคลื่นที่เคลื่อนที่ในสายเคเบิลมีค่าประมาณเท่าใด?

เนื่องจากเคเบิลมีโครงสร้างแบบ ทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม (coaxial cylinder) ความเร็วในการเคลื่อนที่ของคลื่นจึงสามารถหาได้จากสมการ

$$v = \frac{c_0}{\sqrt{\varepsilon_r}} \quad \left[\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}\right]$$

เมื่อ ε_r คือ เปอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์ของเนื้อฉนวน

ในกรณีที่สายเคเบิลใช้ PE (polyethylene) หรือ XLPE (cross-linked polyethylene) เป็นฉนวน (ε_r ~ 2.3) ความเร็วในการเคลื่อนที่ของคลื่นในสายเคเบิลจะมีค่าประมาณ $2c_0/3$ และโปรดสังเกตว่าความยาวคลื่นที่ความถี่ 50 Hz มีค่า ประมาณ 4000 km เท่านั้น

1.4 การสะท้อนของคลื่น

ตัวอย่าง 1.1 สมมุติว่าเราหลับตาขับรถยนต์บนทางหลวงที่เรียบและตรง จะเกิดอะไรขึ้นในเวลาอีก 30 s ข้างหน้า?

คำตอบคือ เราไม่ทราบเพราะหลับตาอยู่ เหตุการณ์ที่อาจเกิดขึ้น อาจเป็น

- *ข้างหน้าเป็นทางลูกรัง* ดังแสดงในรูป

รถยนต์ของเราคงกระเด้งไปมาทำให้ความเร็วของรถยนต์ลดลง และในทางกลับกันถ้าข้างหน้ามีฝนตกทำให้ทางหลวงลื่นขึ้นก็จะทำให้ความเร็วของรถยนต์เพิ่มขึ้น

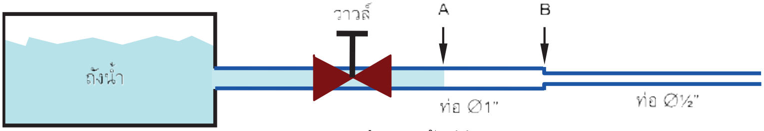
- *ข้างหน้าเป็นภูเขา* ดังแสดงในรูป

รถยนต์ของเราจะกระเด็นย้อนกลับมา ซึ่งเป็นการสะท้อนแบบหนึ่ง

- *ข้างหน้าเป็นเหว* ดังแสดงในรูป

รถยนต์ของเราจะตกลงไปที่พื้นข้างล่าง ซึ่งเป็นการสะท้อนอีกแบบหนึ่ง

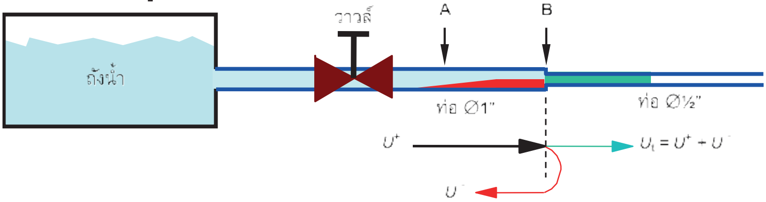
คลื่นที่วิ่งบนสายส่งก็คล้ายกับน้ำที่วิ่งในท่อ ในรูปที่ 1.12



รูปที่ 1.12 น้ำที่วิ่งในท่อ

เมื่อเปิดวาวล์น้ำที่เวลา t = 0 s น้ำ -สมมุติว่าน้ำเต็มท่อ- จะเริ่มไหลตามท่อ ∅1" ไปยังจุด A และถึงจุด A ที่เวลา t_A ณ ตำแหน่งนี้น้ำจะไม่ทราบว่าที่จุด B ขนาดของท่อเปลี่ยนจาก ∅1" ไปเป็น ∅½" น้ำจะทราบก็ต่อเมื่อวิ่งไปถึงจุด B ที่เวลา t_B

เมื่อน้ำวิ่งไปถึงจุด B ก็เป็นไปไม่ได้ที่น้ำทั้งหมดในท่อ ∅1" จะไหลเข้าท่อ ∅½" น้ำบางส่วนจึงสะท้อนกลับ ดังแสดงในรูปที่ 1.13



รูปที่ 1.13 น้ำที่วิ่งในท่อเกิดการสะท้อนที่รอยต่อ

เมื่อเทียบน้ำที่ไหลในท่อกับคลื่นในสายส่ง คลื่นตกกระทบ (incident/approaching wave, U^+) ที่วิ่งในสายส่งที่มีอิมพีแดนซ์ลักษณะเฉพาะ Z_1 เมื่อพบกับอิมพีแดนซ์ Z_2 จะเกิด คลื่นสะท้อน (reflected wave, U^-) ขึ้น โดยคลื่น U^- จะวิ่งสวนทางกับคลื่น U^+ ย้อนกลับไปตามสายส่งที่มีอิมพีแดนซ์ลักษณะเฉพาะ Z_1 (U^+ และ U^- ระบุทิศทางในการเคลื่อนที่ของคลื่นเท่านั้น ไม่ได้ระบุถึงขั้วของแรงดันว่าเป็นขั้วบวกหรือขั้วลบ)

ส่วน คลื่นส่งผ่าน (refracted/transmitted wave) ซึ่งเคลื่อนที่ในอิมพีแดนซ์ Z_2 ซึ่งอาจเป็นโหลดหรืออิมพีแดนซ์ลักษณะเฉพาะก็ได้ จะมีค่าเท่ากับ

$$U_t = U^+ + U^- \tag{1.13}$$

ความสัมพันธ์ของคลื่น U^+ และ U^- ได้แสดงไว้ในสมการที่ 1.14

$$U^- = \Gamma U^+ \tag{1.14}$$

เมื่อ สัมประสิทธิ์การสะท้อนแรงดัน (voltage reflection coefficient, Γ) มีค่าเท่ากับ

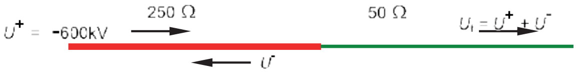
$$\Gamma = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \tag{1.15}$$

ดังนั้น U_t จึงมีค่าเท่ากับ

$$U_t = U^+ + U^- = U^+(1+\Gamma) = \left(1 + \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2}\right) = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \tag{1.16}$$

ตัวอย่าง 1.2 สมมุติว่ามีแรงดันฟ้าผ่า U^+ = -600 kV วิ่งบนสายส่งขึงในอากาศที่มี Z_1 = 250 Ω ไปยังสายเคเบิลที่มี Z_2 = 50 Ω จงคำนวณหาแรงดันที่รอยต่อระหว่างสายส่งขึงในอากาศกับสายเคเบิล

ในการทำโจทย์ถ้าเป็นไปได้ควรวาดรูปขึ้นมาก่อน แล้วกำหนดสัญลักษณ์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ดังแสดงในรูป



$$\Gamma = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} = \frac{50 - 250}{50 + 250} = -\frac{2}{3}$$

ดังนั้น

$$U^- = \Gamma U^+ = -\frac{2}{3} \cdot -600 = 400 \text{ kV}$$

$$U_t = U^+ + U^- = -600 + 400 = -200 \text{ kV}$$

ซึ่งหมายความว่าแรงดันที่รอยต่อมีค่าเท่ากับ -200 kV

คลื่นแรงดันขนาด -200 kV จะวิ่งในสายเคเบิลไปทางด้านขวามือในรูป และมีคลื่นแรงดันสะท้อนขนาด +400 kV วิ่งย้อนกลับไปทางซ้ายมือในสายส่งขึงในอากาศ

เนื่องจากอิมพีแดนซ์ Z_2 มีค่าอยู่ระหว่างศูนย์กับอนันต์ (ลัดวงจรหรือเปิดวงจรที่ปลายสายส่ง) สัมประสิทธิ์การสะท้อนแรงดัน Γ จึงมีค่าอยู่ระหว่าง

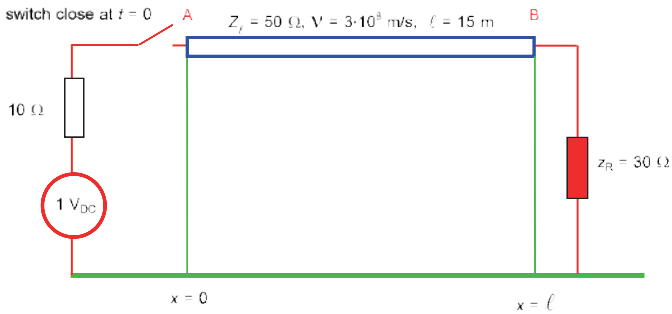
$$-1 \leq \Gamma \leq +1 \qquad (1.17)$$

ทำให้แรงดันที่รอยต่อ U_t มีค่าระหว่าง

$$0 \leq U_t \leq 2U^+ \qquad (1.18)$$

ในกรณีที่พิเศษคือ $Z_2 = Z_1$ ซึ่งหมายถึง ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์ของสายส่งหรือโหลดมีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับสายส่ง Γ จึงมีค่าเท่ากับศูนย์และไม่เกิดการสะท้อนของคลื่นที่รอยต่อ (เรียกว่า *แมตช์*) หาก Z_2 เป็นโหลด Z_2 จะรับพลังงานทั้งหมดที่มากับ U^+

ตัวอย่าง 1.3 สมมุติว่ามีแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรงขนาด 1 V ที่มีความต้านทานภายในเท่ากับ 10 Ω จ่ายแรงดันให้โหลด Z_R = 30 Ω ผ่านสายส่งที่มีอิมพีแดนซ์ลักษณะเฉพาะ Z_ℓ = 50 Ω ดังแสดงในรูป



จงวาดกราฟแรงดันที่จุด A (ต้นทางของสายส่ง) และที่จุด B (แรงดันคร่อมโหลด Z_R) ตั้งแต่เวลา t = 0-500 ns หลังจากปิดสวิตซ์ที่เวลา t = 0 s

1. เวลาที่คลื่นใช้ในการเคลื่อนที่จากจุด A ไปยังจุด B

$$\tau = \frac{\ell}{v} = \frac{15}{3\cdot 10^8} = 50 \text{ ns}$$

2. ขนาดของคลื่นที่จุด A หลังจากปิดสวิตซ์ที่เวลา t = 0 s

อิมพีแดนซ์ลักษณะเฉพาะ Z_ℓ มีลักษณะเป็นอิมพีแดนซ์ที่ต่อลงดิน ซึ่งหมายถึงเมื่อคลื่นวิ่งมาถึงที่จุด A คลื่นจะมองเห็นอิมพีแดนซ์ 50 Ω ต่อลงดิน เมื่อคลื่นวิ่งมาถึงกลางสายส่ง คลื่นก็มองเห็นอิมพีแดนซ์ 50 Ω ต่อลงดินเหมือนเดิม และเมื่อคลื่นวิ่งมาใกล้จุด B คลื่นก็ยังมองเห็นอิมพีแดนซ์ 50 Ω ต่อลงดิน

ดังนั้นที่เวลา t = 0 คลื่นที่วิ่งเข้าไปในสายเคเบิลที่จุด A จึงมีค่าเท่ากับ

$$U^+ = \frac{Z_\ell}{10+Z_\ell}\cdot 1 = \frac{50}{10+50}\cdot 1 = \frac{5}{6} \quad \text{[V]}$$

3. ขนาดของแรงดันที่จุด B ณ เวลา t = 50 ns

คลื่นแรงดันขนาด 5/6 V จะวิ่งมาถึงจุด B ที่เวลา 50 ns แต่เนื่องจากโหลด Z_R มีค่าไม่เท่ากับ Z_ℓ ดังนั้นจึงเกิดการสะท้อนขึ้น โดยสัมประสิทธิ์การสะท้อนแรงดันที่จุด B มีค่าเท่ากับ

$$\Gamma_B = \frac{Z_R - Z_\ell}{Z_\ell + Z_R} = \frac{30-50}{50+30} = -\frac{1}{4}$$

คลื่นสะท้อนที่วิ่งย้อนกลับไปยังจุด A จึงมีค่าเท่ากับ

$$U^- = \Gamma_B U^+ = \frac{5}{6}\cdot\left(-\frac{1}{4}\right) = -\frac{5}{24} \quad \text{[V]}$$

และแรงดันที่จุด B มีค่าเท่ากับ

$$U_B = U^+ + U^- = \frac{5}{6} - \frac{5}{24} = \frac{5}{8} \quad \text{[V]}$$

4. ขนาดของแรงดันที่จุด A ณ เวลา t = 100 ns

คลื่นแรงดัน U^- ขนาด -5/24 V ที่วิ่งย้อนมาจากจุด B ก็คือ U^+ ที่วิ่งเข้าสู่จุด A ซึ่งจะวิ่งมาถึงจุด A ที่เวลา t = 100 ns แต่เนื่องจากแหล่งจ่ายแรงดันมีค่าความต้านทานภายในไม่เท่ากับ Z_ℓ ดังนั้นจึงเกิดการสะท้อนขึ้น โดยสัมประสิทธิ์การสะท้อนแรงดันที่จุด A มีค่าเท่ากับ

$$\Gamma_A = \frac{10 - Z_\ell}{Z_\ell + 10} = \frac{10-50}{50+10} = -\frac{2}{3}$$

คลื่นสะท้อนที่วิ่งย้อนกลับไปยังจุด B จึงมีค่าเท่ากับ

$$U^- = \Gamma_A U^+ = \left(-\frac{2}{3}\right)\cdot\left(-\frac{5}{24}\right) = \frac{5}{36} \quad \text{[V]}$$

และแรงดันที่เข้าสู่จุด A มีค่าเท่ากับ

$$U_A = U^+ + U^- = -\frac{5}{24} + \frac{5}{36} = -\frac{5}{72} \quad \text{[V]}$$

แรงดันรวมที่จุด A จึงมีค่าเท่ากับ (5/6 V คือแรงดันจากข้อ 2)

$$\frac{5}{6} - \frac{5}{72} = \frac{55}{72} \quad \text{V}$$

5. ขนาดของแรงดันที่จุด B ณ เวลา t = 150 ns

คลื่นแรงดัน U^- ขนาด 5/36 V ที่วิ่งย้อนมาจากจุด A ก็คือ U^+ ที่วิ่งเข้าสู่จุด B ซึ่งจะวิ่งมาถึงจุด B ที่เวลา t = 150 ns ดังนั้นคลื่นสะท้อนที่วิ่งย้อนกลับไปยังจุด A จึงมีค่าเท่ากับ

$$U^- = \Gamma_B U^+ = \frac{5}{36}\cdot\left(-\frac{1}{4}\right) = -\frac{5}{144}\ \text{V}$$

และแรงดันที่เข้าสู่จุด B มีค่าเท่ากับ

$$U_B = U^+ + U^- = \frac{5}{36} - \frac{5}{144} = \frac{5}{48}\ \text{V}$$

แรงดันรวมที่จุด B จึงมีค่าเท่ากับ (5/8 V คือแรงดันจากข้อ 3)

$$\frac{5}{8} + \frac{5}{48} = \frac{35}{48}\ \text{V}$$

6. ขนาดของแรงดันที่จุด A ณ เวลา t = 200 ns

คลื่นแรงดัน U^- ขนาด -5/144 V ที่วิ่งย้อนมาจากจุด B ก็คือ U^+ ที่วิ่งเข้าสู่จุด A ซึ่งจะวิ่งมาถึงจุด A ที่เวลา t = 200 ns ดังนั้นคลื่นสะท้อนที่วิ่งย้อนกลับไปยังจุด B จึงมีค่าเท่ากับ

$$U^- = \Gamma_A U^+ = \left(-\frac{2}{3}\right)\cdot\left(-\frac{5}{144}\right) = \frac{5}{216}\ \text{V}$$

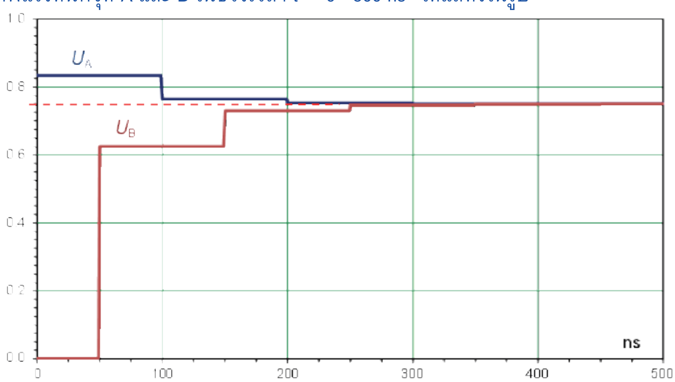
และแรงดันที่เข้าสู่จุด A มีค่าเท่ากับ

$$U_A = U^+ + U^- = -\frac{5}{144} + \frac{5}{216} = -\frac{5}{432}\ \text{V}$$

แรงดันรวมที่จุด A จึงมีค่าเท่ากับ (55/72 V คือแรงดันจากข้อ 4)

$$\frac{55}{72} - \frac{5}{432} = \frac{325}{432}\ \text{V}$$

7. กราฟแรงดันที่จุด A และ B ในช่วงเวลา t = 0 - 500 ns ได้แสดงในรูป



8. แรงดันที่ สถานะอยู่ตัว (steady state)

คลื่นจะสะท้อนไป-มา ระหว่างจุด A และ B ตลอดเวลา แต่ด้วยขนาดที่ลดลงเรื่อยๆ ที่สถานะอยู่ตัว คลื่นที่จุด A และ B จะมีค่าเท่ากัน เท่ากับ

$$U_A = U_B = \frac{10}{10+Z_R}\cdot 1 = \frac{10}{10+30}\cdot 1 = 0.75\ \text{V}$$

ซึ่งสอดคล้องกับค่าแรงดันที่จุด A และ B ที่เวลา t = 500 ns ในรูปในข้อที่ 7

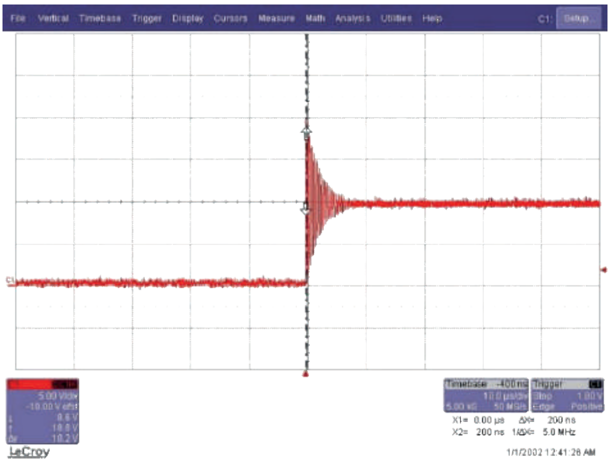
เราสามารถกล่าวได้อีกอย่างหนึ่ง คือ อิมพีแดนซ์ลักษณะเฉพาะของสายส่งไฟฟ้าจะไม่มีความหมายที่สถานะอยู่ตัว ทั้งนี้เพราะแหล่งจ่ายเป็นแรงดันกระแสตรงและสายส่งประกอบด้วย L และ C กระจายไปทั่วตามความยาวของสายส่งเท่านั้น (ในที่นี้ความต้านทานของสายส่งมีค่าเท่ากับศูนย์)

เกร็ดความรู้ 1.3 ทำไมแรงดันที่จุด A ในข้อที่ 4. ในตัวอย่าง 1.3 จึงเท่ากับ แรงดันเดิม + แรงดันที่เข้ามาใหม่?

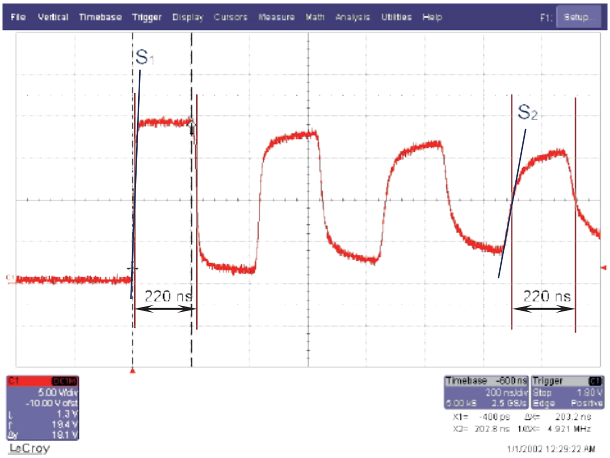
สมมุติว่าผู้อ่านถือลูกเหล็กทรงกลมเหนือพื้นดินเหนียว 1 m แล้วปล่อยลูกเหล็กทรงกลมลงบนพื้นดินเหนียว พื้นดินเหนียวจะยุบลงไป เช่น 1 mm จากนั้นผู้อ่านถือลูกเหล็กทรงกลมเหนือพื้นดินเหนียว 0.9 m แล้วปล่อยลูกเหล็กทรงกลมซ้ำไปที่ตำแหน่งเดิม พื้นดินเหนียวจะยุบลงไปอีก แต่จะยุบลงไม่ถึง 2 mm เพราะผู้อ่านทิ้งลูกเหล็กทรงกลมเหนือพื้นดินเหนียวน้อยกว่าครั้งแรก 0.1 m

ถ้าผู้อ่านถือลูกเหล็กทรงกลมเหนือพื้นดินเหนียวลดลงจาก 0.9 m เป็น 0.8 m, 0.7 m … แล้วปล่อยลูกเหล็กทรงกลมซ้ำไปที่ตำแหน่งเดิม พื้นดินเหนียวก็จะยุบลงไปน้อยลงๆ ตามไปด้วยและในที่สุดพื้นดินเหนียวจะไม่ยุบลงอีก

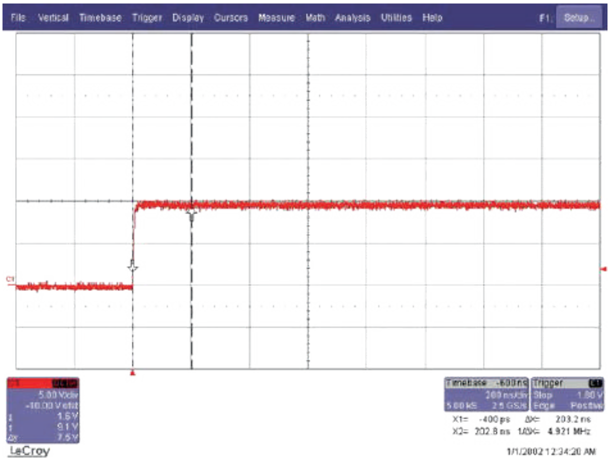
รูปที่ 1.14 แสดงภาพแรงดันที่จุด B ที่บันทึกได้จากการทดลองที่คล้ายกับรูปในตัวอย่างที่ 1.3 เมื่อใช้แรงดันกระแสตรงเท่ากับ 10 V, ความต้านทานภายในของแหล่งจ่าย ~1 Ω, สายเคเบิลซ้อนแกนร่วม (coaxial cable) RG59 B/U (Z_ℓ = 75 Ω) ยาว 22 m และ Z_R = 1 MΩ -อิมพีแดนซ์ขาเข้า (input impedance, Z_{in}) ของออสซิลโลสโคป- และ 75 Ω -ใช้ความต้านทาน 75 Ω ต่อขนานกับ Z_{in} = 1 MΩ ของออสซิลโลสโคป-



ก) Z_R = 1 MΩ, 10 µs/div



ข) Z_R = 1 MΩ, 200 ns/div



ค) Z_R = 75 Ω, 200 ns/div

รูปที่ 1.14 ภาพแรงดันที่จุด B ที่บันทึกได้จากการทดลอง ในกรณีที่ Z_R = 1 MΩ และ 75 Ω

จากรูป 1.14 ก) จะเห็นว่าในช่วงแรกที่คลื่นวิ่งมาถึงออสซิลโลสโคป (เวลา t = 0 s คือเวลาที่คลื่นวิ่งมาถึงออสซิลโลสโคป) คลื่นจะแกว่งไปมาอย่างชัดเจน และที่เวลาประมาณ 10 μs หลังจากคลื่นวิ่งมาถึงออสซิลโลสโคป แรงดันมีค่าประมาณ 10 V เท่ากับแหล่งจ่ายแรงดัน (แรงดันที่สถานะอยู่ตัว)

เมื่อขยายสเกลเวลาดังแสดงในรูปที่ 1.14 ข) เราจะเห็นผลของคลื่นที่สะท้อนไปมาระหว่างแหล่งจ่ายแรงดันกับออสซิลโลสโคป โดยมีข้อสังเกตดังนี้

1) คลื่นที่ออสซิลโลสโคปมีขนาด 19 V แต่ในทางทฤษฎีคลื่นควรมีขนาด 20 V ทั้งนี้เพราะ U^+ = 10 V, $\Gamma = 1$ ดังนั้น $U^- = \Gamma U^+$ = 10 V ดังนั้น $U^+ + U^-$ = 20 V การที่ขนาดของคลื่นมีค่าลดลงหมายถึง คลื่นที่วิ่งผ่านสาย RG59 B/U เกิดการลดทอน
2) ความชันหน้าคลื่นมีขนาดลดลงเมื่อเวลาผ่านไป คือ S_1 ชันกว่า S_2
3) ความกว้างของคลื่นมีค่าเท่ากันคือ 220 ns

ปรากฏการณ์ข้างต้นสามารถอธิบายได้ไม่ยากนักถ้าเราพิจารณาข้อกำหนดของสาย RG59 B/U ที่แสดงในรูปที่ 1.15

RG59 Analog Coax

RG59 B/U

- Precision Coaxial Cable
- Solid Bare Copper Conductor
- Durable PVC Jacket

RG59 B/U Video Cable -
The RG59B/U cable is a very flexible, low cost, high quality RG59-type cable. Offering a 23 AWG solid center conductor and full 95% B.C. braid, this cable is the perfect fit when a digital cable is not required.

Specifications

Part #	Center Cond. / DCR	Insulation	Shielding/DCR	Jacket	O.D.	Vel. of Prop.	Wt. per 1000'
RG59B/U	23 Awg Solid B.C. / 4.9 Ohms	PE	95% B.C. Braid 2.6 Ohms/kft	PVC	.242"	66%	39 Lbs.

การลดทอนของคลื่นที่ความถี่สูง

2/3 ความเร็วแสง

Nominal Attenuation

Frequency (MHz)	Loss (dB / 100 ft.)	Loss (dB / 100 m)
250	5.5	18.04
270	5.7	18.70
300	6.0	19.68
360	6.6	21.65
400	7.0	22.97
500	7.8	25.60
720	9.8	32.15
800	10.5	34.45
1000	12.0	39.37
2000	17.0	55.78
3000	20.8	68.25

รูปที่ 1.15 ข้อกำหนดของสาย RG59 U/B

ข้อกำหนดในรูปที่ 1.15 ระบุว่าความเร็วของคลื่นในสาย RG59 U/B มีค่า 66% ของความเร็วแสง คือคลื่นมีความเร็วเท่ากับ $2 \cdot 10^8$ m/s ดังนั้นเวลาที่คลื่นเคลื่อนที่ในสายเคเบิลยาว 22 m จึงมีค่าเท่ากับ

$$\tau = \frac{\ell}{v} = \frac{22}{2 \cdot 10^8} = 110 \ \text{[ns]}$$

ในรูปที่ 1.14 ข) สมมุติว่าคลื่นจะวิ่งมาถึงออสซิลโลสโคปที่เวลา t = 0 s คลื่นที่สะท้อนจากออสซิลโลสโคปจะย้อนกลับไปถึงแหล่งจ่ายแรงดันที่เวลา t = 110 ns และคลื่นที่สะท้อนจากแหล่งจ่ายแรงดันจะย้อนกลับไปถึงออสซิลโลสโคปอีกครั้งที่เวลา t = 220 ns

นอกจากนั้นในรูปที่ 1.14 ข) เราจะเห็นว่าคลื่นมี การลดทอน (attenuation) เมื่อวิ่งผ่านสาย RG59 U/B และที่สำคัญคือ การลดทอนขึ้นอยู่กับความถี่ของสัญญาณที่วิ่งในสาย RG59 U/B ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

จากรูป 1.14 ค) เราจะพบว่าแรงดันที่ออสซิลโลสโคปมีค่าประมาณ 10 V เท่ากับแหล่งจ่ายโดยไม่มีการสะท้อนเกิดขึ้น ทั้งนี้เพราะเราแมตช์สาย RG59 U/B ด้วยการใช้ตัวต้านทาน 75 Ω ต่อขนานเข้ากับอิมพีแดนซ์ขาเข้าของออสซิลโลสโคป (75 Ω || 1 MΩ ~75 Ω) ดังนั้นพลังงานของคลื่นทั้งหมดจึงสูญเสียไปในตัวต้านทานนี้

เกร็ดความรู้ 1.4 เราควรเลือกใช้สายเคเบิลส่งสัญญาณที่มี Z_0 = 50 Ω หรือ 75 Ω ?

ก่อนอื่นเราจะพิจารณาสมการพื้นฐานของสายเคเบิลที่ทำหน้าที่ส่งสัญญาณความถี่สูงกันก่อน [Wiki, 2018a]

$$C' = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r}{\ln(\varnothing_{out}/\varnothing_{in})} \ \text{[F/m]}; \quad L' = \frac{\mu_0\mu_r \ln(\varnothing_{out}/\varnothing_{in})}{2\pi} \ \text{[H/m]};$$

$$R' = \frac{\rho_{in}}{\pi(\varnothing_{in}/2)^2} + \frac{\rho_{out}}{\pi(\varnothing_{out}/2)^2} \ [\Omega/\text{m}]; \quad G' < 10^{-12} \ [1/\Omega\text{m}];$$

$$v_0 \approx \frac{1}{\sqrt{L'C'}} \approx \frac{1}{\sqrt{\frac{\mu_0\mu_r \ln(\varnothing_{in}/\varnothing_{out})}{2\pi} \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r}{\ln(\varnothing_{in}/\varnothing_{out})}}} \approx \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r}} \ \text{[m/s]}$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R' + j\omega L'}{G' + j\omega C'}} \approx \sqrt{\frac{L'}{C'}} \approx \sqrt{\frac{\mu_0\mu_r \ln(\varnothing_{in}/\varnothing_{out})}{2\pi} \frac{\ln(\varnothing_{in}/\varnothing_{out})}{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r}} \approx \frac{60}{\sqrt{\varepsilon_r}} \ln(\varnothing_{out}/\varnothing_{in}) \ [\Omega]$$

เมื่อ $\varnothing_{in}$ และ ρ_{in} คือเส้นผ่านศูนย์กลาง [m] และความต้านทานจำเพาะ [Ωm] ของตัวนำ, $\varnothing_{out}$ และ ρ_{out} คือเส้นผ่านศูนย์กลาง [m] และความต้านทานจำเพาะ [Ωm] ของชีลด์, μ_r และ ε_r คือเปอร์มีอบิลิตี้สัมพัทธ์ = 1 และเปอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์ของฉนวน และ c คือความเร็วแสงในสุญญากาศ

โปรดสังเกตว่าค่าโดย ประมาณของ Z_0 มาจากสมมุติฐานที่ว่า G' มีค่าน้อยมากเพราะเป็นฉนวน ส่วน R' มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับ $j\omega C'$ และ $j\omega L'$ ที่ความถี่สูง

ฉนวนของสายเคเบิลมักทำจาก พอลิเอทิลีน (polyethylene, PE), โฟมพอลิเอทิลีน (foamed poly-ethylene, FPE) ซึ่งเป็นพอลิเอทีลีนที่มีฟองอากาศแทรกอยู่, XLPE ซึ่งมีคุณสมบัติดังแสดงในตารางที่ 1.3

ตารางที่ 1.3 คุณสมบัติของฉนวนสายเคเบิล

	ε_r	v_0 [m/μs]	τ [ns/m]	E_b [MV/m]	tan δ
PE	2.25	200	5	35 -50	$3{\cdot}10^{-4}$
FPE	1.44	250	4	10	$1{\cdot}10^{-4}$
XLPE	2.25	200	5	35 - 50	< $10{\cdot}10^{-4}$

ดังนั้นเมื่อใช้มิติที่เหมาะสม $\varnothing_{out}/\varnothing_{in} = e$ แรงดันสูงสุดที่สายเคเบิลรับได้และ Z_0 จึงมีค่าเท่ากับ

$$U_{peak} = E_b(\varnothing_{in}/2)\ln(\varnothing_{out}/\varnothing_{in}) = (\varnothing_{in}/2)E_b \text{ [V]};\quad Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\varepsilon_r}}\ln(\varnothing_{out}/\varnothing_{in}) = \frac{60}{\sqrt{\varepsilon_r}} \text{ [}\Omega\text{]}$$

ทำให้กำลังที่สามารถส่งผ่านสายเคเบิลมีค่าเท่ากับ [Microwaves101, 2018]

$$P_{peak} = \frac{U_{peak}^2}{2Z_0} = \frac{\sqrt{\varepsilon_r}\left((\varnothing_{in}/2)E_b\right)^2}{120} \text{ [W]}$$

และสำหรับอัตราส่วน $\varnothing_{out}/\varnothing_{in}$ อื่น

$$P_{peak} = \frac{U_{peak}^2}{2Z_0} = \frac{\sqrt{\varepsilon_r}\left((\varnothing_{in}/2)E_b\right)^2\ln(\varnothing_{out}/\varnothing_{in})}{120} \text{ [W]}$$

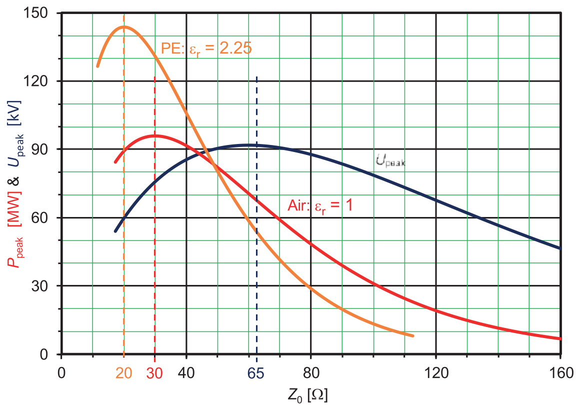
เราจึงสามารถหาค่าสูงสุดจากได้สมการ

$$\frac{\partial P_{Peak}}{\partial \varnothing_{in}} = 0 \Rightarrow \varnothing_{out}/\varnothing_{in} = e^{0.5} = 1.6487$$

ทำให้ Z_0 ของอากาศมีค่าเท่ากับ 30 Ω และ $P_{peak,max}$ ของฉนวนทั่วไปมีค่า

$$P_{peak,max} = \frac{\sqrt{\varepsilon_r}\left((\varnothing_{in}/2)E_b\right)^2}{240} \text{ [W]}$$

หากสมมุติให้ $\varnothing_{out}$ = 10 mm และ E_b = 70 MV/m สายเคเบิลที่ใช้อากาศเป็นฉนวนจึงส่งกำลังและทนแรงดันได้ตามรูปที่ 1.16 ซึ่งจะเห็นว่าถ้า ε_r มีค่าเพิ่มขึ้น $P_{peak,max}$ ก็สูงขึ้นแต่ Z_0 จะมีค่าลดลงจาก 30 Ω และโปรดสังเกตว่าค่า $P_{peak,max}$ ของอากาศเกิดที่แรงดันต่ำกว่าแรงดันสูงสุดที่ฉนวนทนได้ ถ้าเราเพิ่ม Z_0 ขึ้น $P_{peak,max}$ จะลดลงเรื่อยๆ แต่ U_{peak} จะเพิ่มขึ้นจนถึงค่าสูงสุดที่ Z_0 = 65 Ω



รูปที่ 1.16 กำลัง P_{peak} ที่สามารถส่งผ่านสายเคเบิล

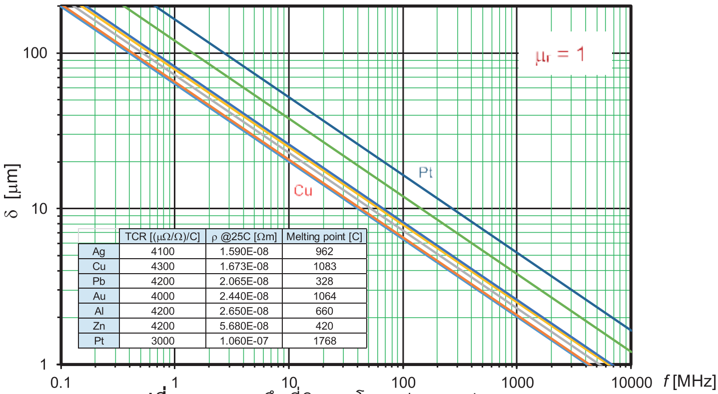
เมื่อส่งสัญญาณความถี่สูงเข้าไปในสายเคเบิล เป็นที่ทราบกันดีว่ากระแสที่ไหลผ่านตัวนำมีแนวโน้มที่จะไหลตามผิวของตัวนำเนื่องจากผลของ ปรากฏการณ์ที่ผิว (skin effect) ทำให้พื้นที่หน้าตัดที่กระแสไหลลดลง โดยที่

$$A_{\text{in}} = 2\pi\delta_{\text{in}}\left[\frac{\varnothing_{\text{in}}}{2} + \delta_{\text{in}}\left(e^{-\frac{\varnothing_{\text{in}}}{2\delta_{\text{in}}}} - 1\right)\right]\ [\text{m}^2];\quad A_{\text{out}} = 2\pi\delta_{\text{out}}\left[(\varnothing_{\text{out}} - t) + \delta_{\text{out}} - (\varnothing_{\text{out}} + \delta_{\text{out}})e^{-\frac{t}{\delta_{\text{out}}}}\right]\ [\text{m}^2];$$

$$\delta_{\text{in}} = \sqrt{\frac{2\rho_{\text{in}}}{\omega\mu_0\mu_{\text{r,in}}}}\ [\text{m}];\quad \delta_{\text{out}} = \sqrt{\frac{2\rho_{\text{out}}}{\omega\mu_0\mu_{\text{r,out}}}}\ [\text{m}];$$

เมื่อ δ_{in} และ δ_{out} คือ ความลึกที่ผิว (skin depth) [m] ของตัวนำและชีลด์, t คือ ความหนาของชีลด์ [m]

โลหะที่ใช้ทำตัวนำหรือชีลด์ของสายเคเบิลมักเป็น ทองแดง (Cu), อะลูมิเนียม (Al), เงิน (Ag), ทอง (Au), สังกะสี (Zn), ตะกั่ว (Pb), หรือ แพลตินัม (Pt) จึงมีความลึกที่ผิวดังแสดงในรูปที่ ก.12 ซึ่งจะเห็นว่าเงินมีค่าต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับโลหะประเภทอื่น



	TCR [(μΩ/Ω)/C]	ρ @25C [Ωm]	Melting point [C]
Ag	4100	1.590E-08	962
Cu	4300	1.673E-08	1083
Pb	4200	2.065E-08	328
Au	4000	2.440E-08	1064
Al	4200	2.650E-08	660
Zn	4200	5.680E-08	420
Pt	3000	1.060E-07	1768

รูปที่ 1.17 ความลึกที่ผิวของโลหะประเภทต่างๆ

ดังนั้นความต้านทานของตัวนำจึงมีค่าประมาณ [Microwaves101, 2018]

$$R_{\text{in}} = \frac{\rho_{\text{in}}}{A_{\text{in}}} \sim \frac{\rho_{\text{in}}}{\pi\varnothing_{\text{in}}\delta_{\text{in}}} \sim \frac{\sqrt{\pi f \rho_{\text{in}}\mu_0\mu_{\text{r,in}}}}{\pi\varnothing_{\text{in}}}\ [\Omega/\text{m}];\quad R_{\text{out}} \sim \frac{\sqrt{\pi f \rho_{\text{out}}\mu_0\mu_{\text{r,out}}}}{\pi\varnothing_{\text{out}}}\ [\Omega/\text{m}]$$

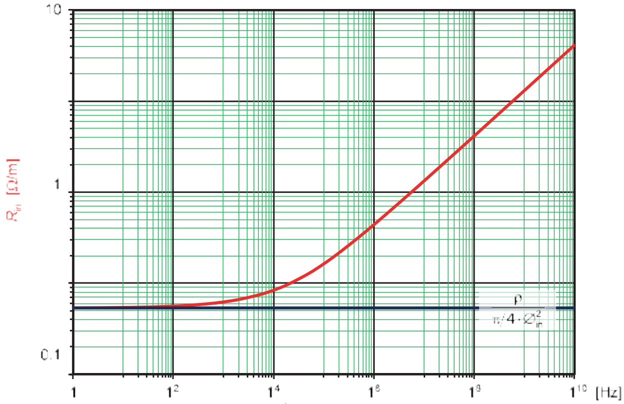
$$R_{\text{total}} = \sqrt{\frac{f\mu_0}{\pi}}\left(\frac{\sqrt{\rho_{\text{in}}\mu_{\text{r,in}}}}{\varnothing_{\text{in}}} + \frac{\sqrt{\rho_{\text{out}}\mu_{\text{r,out}}}}{\varnothing_{\text{out}}}\right)\ [\Omega/\text{m}]$$

กราฟความต้านทาน R_{in} ของสายเคเบิลที่ใช้ตัวนำทองแดง $\varnothing_{\text{in}}$ = 2 mm และมีฉนวนเป็นอากาศ ที่ความถี่ต่างๆ แสดงไว้ในรูปที่ 1.18

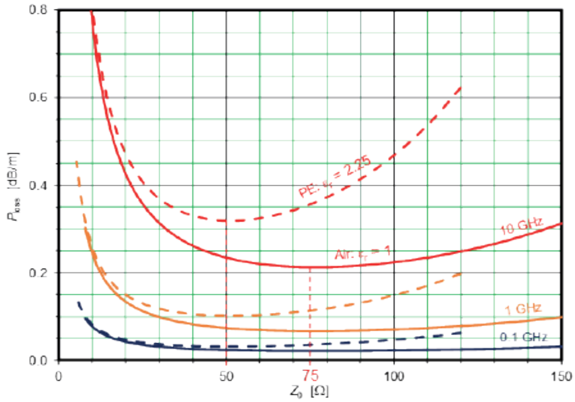
ส่วนกำลังสูญเสียหรือการลดทอนสามารถหาได้จากสมการ

$$P_{\text{loss}} = 8.686\frac{R_{\text{total}}}{2Z_0}\ [\text{dB/m}]$$

ดังแสดงในรูปที่ 1.19 สำหรับสายเคเบิลที่ใช้ตัวนำทองแดง $\varnothing_{\text{out}}$ = 10 mm เราจะเห็นว่าการลดทอนที่น้อยที่สุดเกิดขึ้นที่ 50 Ω สำหรับฉนวน PE และ 75 Ω สำหรับอากาศ โดยไม่ขึ้นกับความถี่ของสัญญาณ



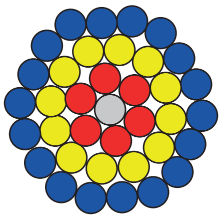
รูปที่ 1.18 ความต้านทานของสายเคเบิลที่ใช้ตัวนำทองแดง $\varnothing_{in}$ = 2 mm และมีฉนวนเป็นอากาศ



รูปที่ 1.19 การลดทอนของสายเคเบิลที่ใช้ตัวนำทองแดง $\varnothing_{out}$ = 10 mm

1.5 การลดทอนของคลื่น

ตัวนำของสายไฟฟ้าแรงสูงทั้งที่ใช้ในลักษณะของสายขึงในอากาศและสายเคเบิล มักทำจากลวดตัวนำตีเกลียวดังแสดงในรูปที่ 1.20



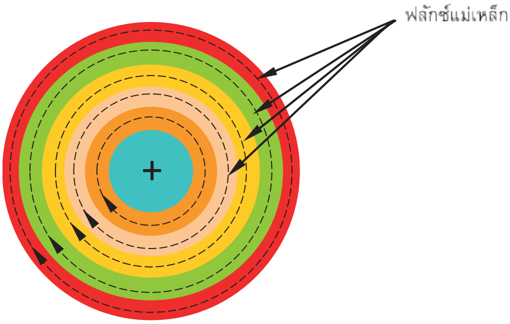
รูปที่ 1.20 ลักษณะตัวนำของสายไฟฟ้าแรงสูง

ตัวนำของสายไฟฟ้าที่ขึงในอากาศมักทำจากอะลูมิเนียมไม่นิยมใช้ทองแดง เพราะทองแดงมีน้ำหนักมากกว่าอะลูมิเนียมสามเท่า แต่ความต้านทานจำเพาะของอะลูมิเนียมสูงกว่าทองแดงเพียง 1.6 เท่า ดังนั้นเมื่อคำนึงถึงความจริงที่ว่าสายไฟฟ้าขึงในอากาศต้องรับน้ำหนักของตัวสายไฟเอง เราจึงนิยมใช้อะลูมิเนียมทำเป็นสายไฟฟ้าขึงในอากาศ ในขณะที่สายเคเบิลแรงสูงมักฝังอยู่ใต้ดิน ไม่ต้องรับน้ำหนักมากจึงนิยมใช้ทองแดงทำเป็นสายไฟฟ้า

แต่ไม่ว่าตัวนำของสายไฟฟ้าจะทำจากอะลูมิเนียมหรือทองแดงก็ตาม คลื่นที่วิ่งผ่านตัวนำจะเกิดกำลังสูญเสียเสมอ ทำให้คลื่นที่วิ่งในสายไฟฟ้ามีขนาดลดลง (ถูกลดทอน) โดยเฉพาะเมื่อมีคลื่นความถี่สูงไหลผ่านตัวนำ กระแสจะไหลไม่เท่ากันทั่วทั้งพื้นที่หน้าตัดของตัวนำเนื่องจากผลของปรากฏการณ์ที่ผิว และ ปรากฏการณ์ใกล้ชิด (proximity effect) [Bungay, 1990]

1.5.1 ปรากฏการณ์ที่ผิว

หากสมมุติว่าสายไฟฟ้าประกอบขึ้นจากกระบอกที่มีขนาดต่างๆ ซ้อนกัน ดังแสดงในรูปที่ 1.21 เราจะพบว่าจำนวนฟลักซ์แม่เหล็กที่คล้องวงกลมสีฟ้าจะมากกว่าจำนวน ฟลักซ์แม่เหล็กที่คล้องวงกลมสีเขียว



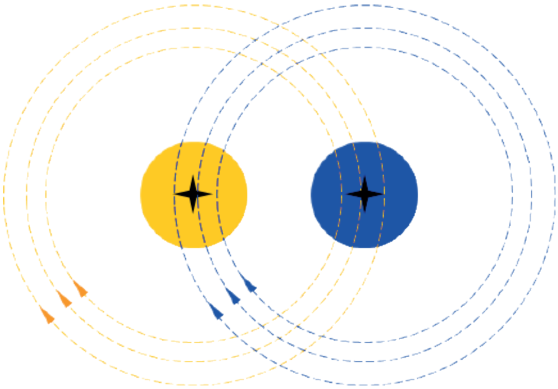
รูปที่ 1.21 ปรากฏการณ์ที่ผิว

ดังนั้น แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ (induced e.m.f.) จะสูงใกล้กับจุดศูนย์กลางของตัวนำและมีค่าลดลงเมื่อห่างจากจุดศูนย์กลางออกไป แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำดังกล่าวจะต้านการไหลของกระแสทำให้ความหนาแน่นกระแสที่ใกล้กับจุดศูนย์กลางมีค่าน้อยกว่าความหนาแน่นกระแสที่บริเวณผิวทรงกระบอก กล่าวอีกอย่างหนึ่งก็คือกระแสมีแนวโน้มที่จะไหลมากที่ผิว เราจึงเรียกปรากฏการณ์นี้ว่าปรากฏการณ์ที่ผิว

การที่กระแสไหลมากขึ้นที่ผิวจะทำให้ความต้านทานประสิทธิผลของตัวนำเพิ่มขึ้น ปรากฏการณ์ที่ผิวจะมากหรือน้อยขึ้นกับเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ, ความถี่ของกระแส และขนาดของกระแส

1.5.2 ปรากฏการณ์ใกล้ชิด

ปรากฏการณ์ใกล้ชิดเกิดขึ้นเมื่อตัวนำที่มีกระแสไหลผ่านวางอยู่ใกล้กันดังแสดงในรูปที่ 1.22

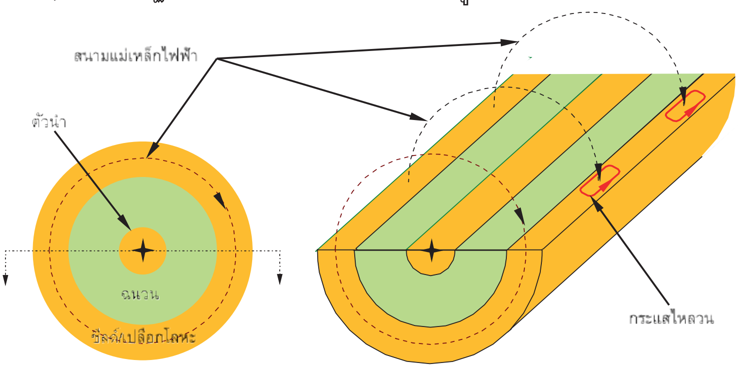


รูปที่ 1.22 ปรากฏการณ์ใกล้ชิด

ถ้าเราสมมุติว่ากระแสที่ไหลในตัวนำทั้งสองเส้นมีทิศทางเดียวกันและพุ่งเข้าไปในกระดาษ เราจะพบว่าครึ่งขวาของตัวนำสีเหลือง (ครึ่งที่อยู่ใกล้กับตัวนำสีฟ้า) มีสนามแม่เหล็กความเข้มสูงตัดผ่านมากกว่าครึ่งซ้าย จึงทำให้กระแสไหลไม่เท่ากันทั่วทั้งพื้นที่หน้าตัด ครึ่งซ้ายของตัวนำสีเหลืองจึงมีกระแสไหลมากกว่าครึ่งขวา แต่ถ้ากระแสที่ไหลในตัวนำทั้งสองเส้นมีทิศสวนกัน ครึ่งซ้ายของตัวนำสีเหลืองจะมีกระแสไหลน้อยครึ่งขวา ทั้งสองกรณีจะทำให้ความต้านทานประสิทธิผลของตัวนำเพิ่มขึ้น ปรากฏการณ์ใกล้ชิดจะมากหรือน้อยขึ้นกับระยะห่างระหว่างตัวนำ

1.5.3 กระแสไหลวนและกระแสเหนี่ยวนำ

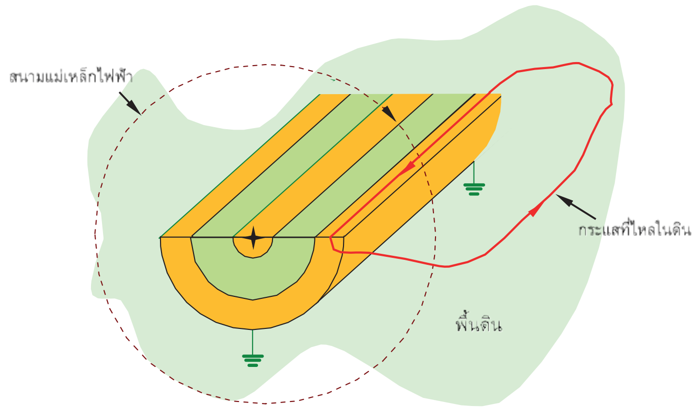
ในกรณีของกระแสสลับ สายเคเบิลจะมีกำลังสูญเสียเพิ่มขึ้นในชีลด์/เปลือกโลหะเนื่องจากผลของปรากฏการณ์กระแสไหลวน (eddy current effect) และปรากฏการณ์กระแสเหนี่ยวนำ (induction current effect) โดยปรากฏการณ์กระแสไหลวนได้แสดงไว้ในรูปที่ 1.23



รูปที่ 1.23 กระแสไหลวนในสายเคเบิล

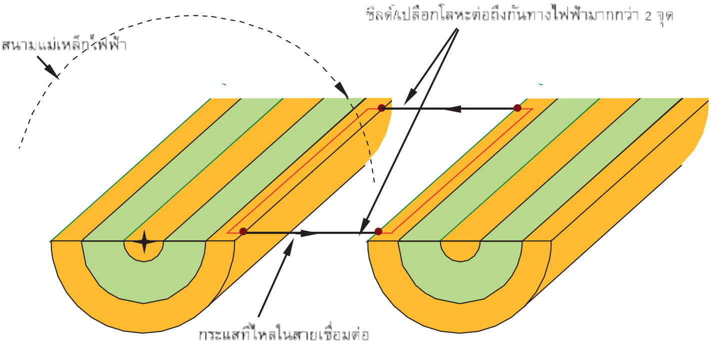
สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากกระแสที่ไหลผ่านตัวนำจะตัดผ่านเนื้อโลหะที่ใช้ทำชีลด์/เปลือกโลหะทำให้เกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำขึ้นจึงเกิดกระแสไหลวนในเนื้อโลหะ ถึงแม้ว่าโลหะจะมีความต้านทานน้อยมากก็ตามแต่ก็ยังมีความต้านทานอยู่ดี ดังนั้นจึงเกิดกำลังสูญเสียในเนื้อโลหะที่ใช้ทำชีลด์/เปลือกโลหะ

ปรากฏการณ์กระแสเหนี่ยวนำเกิดขึ้นเพราะชีลด์/เปลือกโลหะ ต่อกับกราวนด์มากกว่าหนึ่งจุดขึ้นไป เช่น ต่อชีลด์/เปลือกโลหะลงกราวนด์ที่ปลายสายทั้งสองด้าน ดังแสดงในรูปที่ 1.24



รูปที่ 1.24 กระแสเหนี่ยวนำในสายเคเบิล เมื่อต่อชีลด์/เปลือกโลหะลงกราวนด์ที่ปลายสายทั้งสองด้าน

หรือต่อชีลด์/เปลือกโลหะของสายเคเบิลสองเส้นถึงกัน ดังแสดงในรูปที่ 1.25

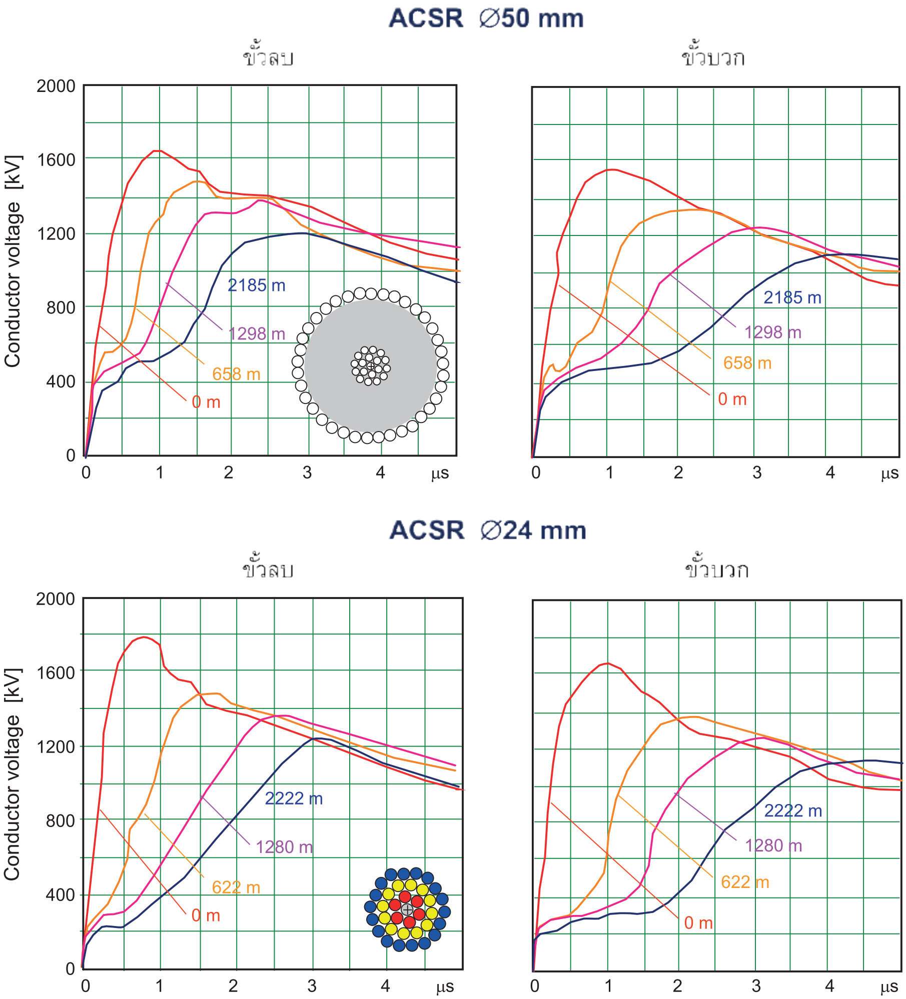


รูปที่ 1.25 กระแสเหนี่ยวนำในสายเคเบิล เมื่อต่อชีลด์/เปลือกโลหะของสายเคเบิลสองเส้นถึงกัน

สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากกระแสที่ไหลผ่านตัวนำจะตัดผ่าน วงรอบปิด (loop) ดังแสดงในรูปที่ 1.24 และ 1.25 ทำให้เกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำจากกฎของฟาราเดย์ และเกิดกระแสเหนี่ยวนำไหลในวงรอบปิด จึงเกิดกำลังสูญเสียในเนื้อโลหะที่ทำเป็นชีลด์/เปลือกโลหะ

1.5.4 โคโรนา

การลดทอนของคลื่นที่สำคัญที่สุดในสายไฟขึงในอากาศเกิดจากผลของโคโรนา (สายเคเบิลไม่มีโคโรนาเกิดขึ้น) ดังแสดงในรูปที่ 1.26 โดยตัวเลขที่กำกับรูปคลื่นแต่ละรูปหมายถึงรูปคลื่นที่วัดได้ ณ ตำแหน่งห่างจากจุดที่ป้อนแรงดันเท่าใด



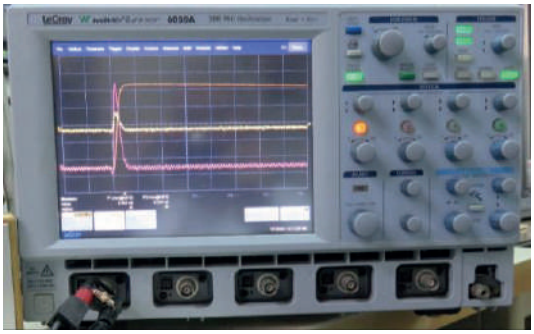
รูปที่ 1.26 ผลของการเกิดโคโรนาในสายไฟขึงในอากาศ

จากรูปที่ 1.26 จะเห็นว่าโคโรนาในสายไฟขึงในอากาศทำให้เกิดเหตุการณ์ที่สำคัญ 3 ประการ คือ

1. ค่ายอดของแรงดันมีขนาดลดลงตามระยะทาง ขณะที่คลื่นเคลื่อนที่ห่างออกไปจากจุดที่เกิดแรงดันเกิน
2. ค่ายอดของแรงดันขั้วบวกลดลงมากกว่าขั้วลบ
3. ความชันของแรงดันมีขนาดลดลงตามระยะทาง ขณะที่คลื่นเคลื่อนที่ห่างออกไปจากจุดที่เกิดแรงดันเกิน

1.6 การวัดสัญญาณพัลส์

ปกติในการวัดสัญญาณที่มี เวลาขาขึ้น (rise time, t_r) เร็วมากๆ ต้องใช้เครื่องวัดที่เร็วมากเช่นกัน เช่น *ดิจิทัลออสซิลโลสโคป* (digital oscilloscope, DSO) -บางครั้งก็เรียกว่า *ตัวแปลงดิจิทัล* (digitizer)- ที่แสดงในรูปที่ 1.27

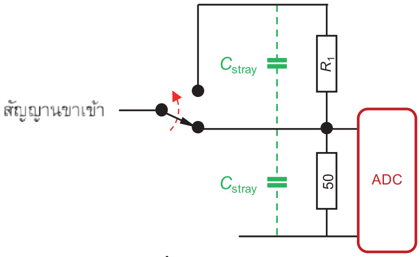


รูปที่ 1.27 ภาพถ่าย DSO ที่ห้องทดลองไฟฟ้าแรงสูง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ออสซิลโลสโคปทั้งหมดในปัจจุบันเป็นแบบดิจิทัล ซึ่งใช้ *ตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล* (analog to digital converter, ADC) แปลงสัญญาณแบบต่อเนื่องที่ต้องการวัดไปเป็นข้อมูลดิจิทัลเพื่อแสดงผล ดังนั้นภาครับสัญญาณเข้าของ DSO จึงเป็นส่วนที่สำคัญที่สุด ADC มีข้อกำหนดที่สำคัญ 3 ประการ คือ *อัตราการสุ่มสัญญาณ* (sampling rate, MS/s) เช่น 5 ล้านครั้งต่อวินาที, *ความละเอียด* (resolution) เช่น 8 bits และขนาดสัญญาณแรงดันที่วัดได้ เช่น 0 - +5 V, 0 - +10 V หรือ -5 V - +5V เป็นต้น

แต่การแสดงผลของ DSO เป็นรูปภาพให้มนุษย์เข้าใจทำด้วยการแสดงรูปสัญญาณในแกนนอน x ซึ่งเป็นแกนเวลาในหน่วย s/div. และแกนตั้ง y ซึ่งเป็นแกนแรงดันในหน่วย V/div. เท่านั้น จึงต้องมีการแปลงข้อกำหนดดังกล่าวให้สอดคล้องกับสัญญาณแอนะล็อก คือต้องแปลง MS/S ไปเป็น *แบนด์วิดท์* (bandwidth, BW) ส่วนขนาดสัญญาณแรงดันที่วัดได้ระบุจากอิมพีแดนซ์ขาเข้า และความถูกต้องในการวัดระบุจากความละเอียด

ก) <u>อิมพีแดนซ์ขาเข้า</u> ปกติจะมี R_{in} = 1 MΩ เท่านั้น DSO จึงต้องมีโวลเตจดิไวเดอร์ภายในตัวเองเพื่อลดแรงดันให้เหมาะกับ ADC ยกเว้น DSO ที่วัดสัญญาณที่มีเวลาขาขึ้นเร็วมาก DSO จะมีตัวเลือกให้ R_{in} = 50 Ω (ดูเกร็ดความรู้ 1.4) ซึ่งในกรณีนี้สัญญาณจะต่อเข้า ADC โดยตรงดังแสดงในรูปที่ 1.28



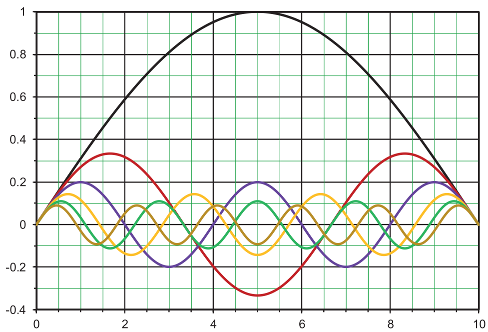
รูปที่ 1.28 อิมพีแดนซ์ขาเข้าของ DSO

ค่าคงตัวเวลา (time constant, τ) ของ DSO, τ_{DSO} จึงเท่ากับ $R_{in} \cdot C_{stray}$ -C_{stray} คือ ตัวเก็บประจุแฝง (stray capacitance) ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ เช่นระหว่างสายไฟ 2 เส้น, หัวต่อ BNC ของสายเคเบิล, ระหว่างสายไฟแรงสูงกับกราวนด์, ฯลฯ-

ในกรณีที่ R_{in} = 1 MΩ DSO มักรับแรงดันขาเข้าได้ไม่เกิน 250 V_{peak} แต่ถ้า R_{in} = 50 Ω DSO มักรับแรงดันขาเข้าได้ไม่เกิน 5 V_{rms} อนึ่ง DSO จะมีแกน y จำนวน 8 ช่อง (division, div.) เสมอ แต่ละช่องสามารถเลือกแสดงผลได้เป็นขั้น 2-5-10 เสมอเช่นกัน (ซึ่งผู้เขียนคาดว่าเพื่อความง่ายในการวัดขนาดของสัญญาณ เพราะคนเรามี 2 มือ แต่ละมือมี 5 นิ้ว ดังนั้น 2·5 = 10 และ 10/5 = 2 แต่ยังไม่พบเหตุผลว่าทำไมถึงต้องมี 8 ช่อง)

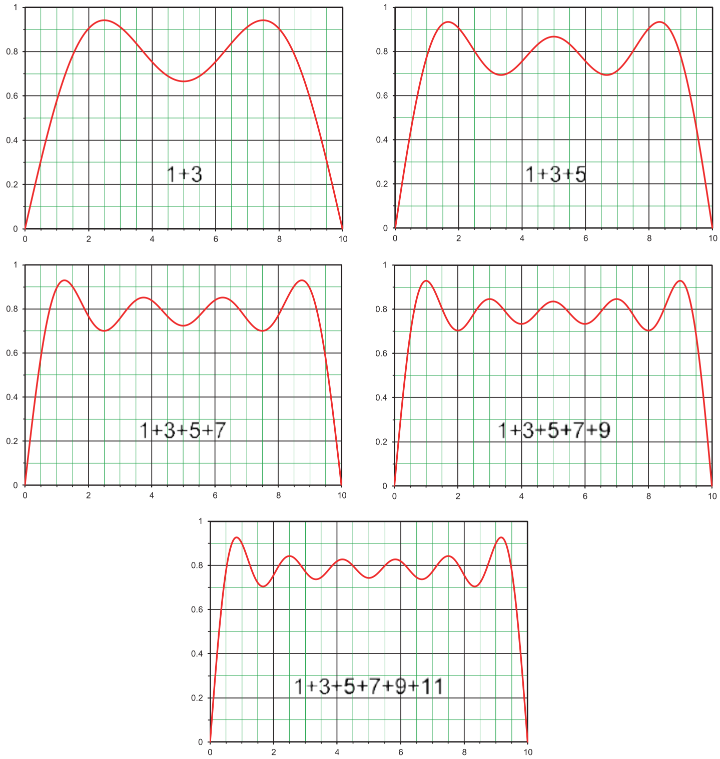
ข) <u>แบนด์วิดท์</u> สมมุติว่าเราต้องการวัดสัญญาณรูปขั้นที่มีความถี่ 100 MHz เราต้องใช้ DSO ที่มี BW_{DSO} เท่าใด?

เกร็ดความรู้ 1.5 รูปคลื่นแบบขั้น (step wave) สามารถสร้างได้จากการรวมความถี่มูลฐาน (เช่น 50 Hz) เข้ากับฮาร์มอนิกส์เลขคี่ (3, 5, 7, 9,..) ไปจนถึงอนันต์ โดยขนาดของฮาร์มอนิกส์ที่ 3 เท่ากับ 1/3 ของความถี่มูลฐาน, ขนาดของฮาร์มอนิกส์ที่ 5 เท่ากับ 1/5 ของความถี่มูลฐาน, ขนาดของฮาร์มอนิกส์ที่ 7 เท่ากับ 1/7 ของความถี่มูลฐาน, ... ดังแสดงในรูป



ฮาร์มอนิกส์เลขคี่ของความถี่ 50 Hz

ผลของการรวมความถี่มูลฐาน 50 Hz เข้ากับฮาร์มอนิกส์เลขคี่ ได้แสดงไว้ในรูป

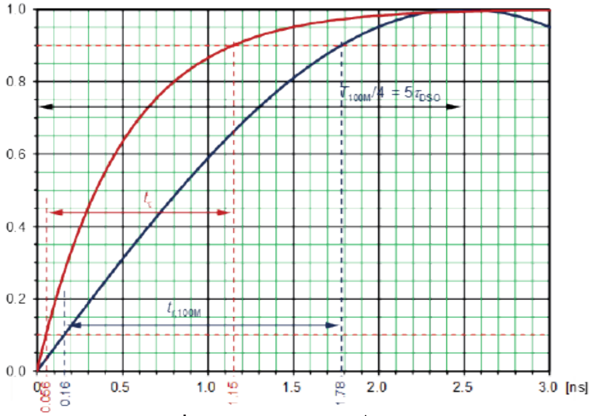


โปรดสังเกตว่าความชันของหน้าคลื่น 1+3 น้อยกว่าความชันของหน้าคลื่น 1+3+5+7+9 ซึ่งหมายความว่าความถี่สูงของคลื่นถูกลดทอนลงจากผลของปรากฏการณ์ที่ผิวทำให้ความชันของหน้าคลื่นลดลงในขณะที่คลื่นวิ่งไปตามสายไฟฟ้า นอกจากความชันจะลดลงแล้วขนาดของคลื่นยังลดลงตามไปด้วย

ในการวัดสัญญาณรูปขั้นความถี่ 100 MHz ที่เกิดซ้ำๆ กัน DSO มักใช้เทคนิคเลื่อนเวลาในการสุ่มสัญญาณขาเข้า ทำให้เราสามารถใช้ DSO ที่มี BW_{DSO} = 20 MHz ในการวัดสัญญาณได้ แต่ถ้าต้องการวัดคลื่นที่เกิดขึ้นเพียงครั้งเดียว DSO ควรมี BW_{DSO} สูงเท่าใดจึงจะวัดความถี่ 100 MHZ อย่างถูกต้อง เช่น ต้องมี BW_{DSO} = 900 MHz (ถึงฮาร์มอนิกส์ที่ 9)?

ขณะนี้เรามีพารามิเตอร์ 3 ตัว ที่กำลังพิจารณาคือ ความถี่ของสัญญาณ $f_{100M} = 1/T_{100M}$, BW_{DSO} และเวลาคงตัว τ_{DSO} ของ DSO (เช่น $R_{in} = 50\ \Omega$ และ C_{stray} = 10 pF τ_{DSO} จะมีค่าเท่ากับ 0.5 ns) ซึ่งมี $t_{r,DSO} = 2.2\tau_{DSO}$ แต่ในเอกสารทั่วไป เช่น [NI, 2018] มักระบุว่าสำหรับวงจร RC ค่า $BW_{DSO} \cdot t_{r,DSO} = 0.35$ ดังนั้นเราจึงมีพารามิเตอร์เพิ่มขึ้นมาอีก 1 ตัว คือ $t_{r,DSO}$

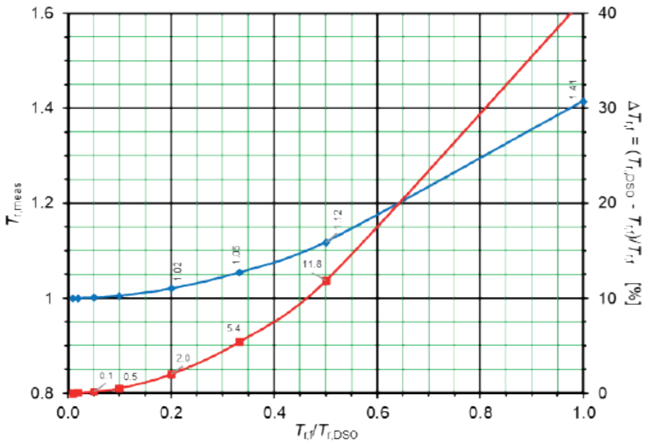
รูปที่ 1.29 แสดงสัญญาณรูปไซน์ความถี่ 100 MHz: มี $t_{r,100M}$ = (t_{90}- t_{10}) = (1.62· 10^{-9}/10·10^{-9})T = 0.16T -สำหรับสัญญาณความถี่สูงโดยทั่วไปเราอาจประมาณให้ $t_{r,f}$ = 0.8T/4 = 0.2T- เมื่อเทียบกับสัญญาณเลขชี้กำลังที่มีเวลา 5τ_{DSO} = T_{100M}/4 ดังนั้นค่าคงตัวเวลา τ_{DSO} = T_{100M}/20 และเวลาขาขึ้น t_τ = (t_{90}- t_{10}) = (1.09·10^{-9}/10·10^{-9})T_{100M} = 0.11T_{100M}



รูปที่ 1.29 สัญญาณความถี่ 100 MHz

เวลาขาขึ้น $t_{r,meas}$ ที่ DSO วัดได้ (ค่าที่ DSO แสดงผลบนจอให้เราทราบ) สามารถหาได้จากสมการ (1.19) และรูปที่ 1.30

$$t_{t,meas} = \sqrt{t_{r,f}^2 + t_{r,DSO}^2} \qquad (1.19)$$



รูปที่ 1.30 สัญญาณเวลาขาขึ้นที่ DSO วัดได้ $t_{r,meas}$ เมื่อ $t_{r,DSO}$ มีค่าต่างๆ

เกร็ดความรู้ 1.6 เมื่อป้อนแรงดันรูปขั้นที่มีเวลาขาขึ้นเท่ากับ t_r ให้ระบบวัดที่มีเวลาขาขึ้นเท่ากับ $t_{r,sys}$ เวลาขาขึ้นที่เราวัดได้จากออสซิลโลสโคป $t_{r,meas}$ จะมีค่าเท่ากับ

$$t_{r,meas} = \sqrt{t_r^2 + t_{r,sys}^2}$$

$$t_{r,sys} = \sqrt{t_{r,DSO}^2 + t_{r,cable}^2}$$

เมื่อ $t_{r,cable}$ คือ เวลาขาขึ้นของสายไฟที่ใช้วัดสัญญาณ $t_{r,DSO}$ คือ เวลาขาขึ้นของ DSO

ถ้า $t_{r,sys} = t_r/10$ เราจะพบว่า $t_{r,meas} = 1.005t_r$ ซึ่งหมายความว่าถ้าระบบวัดมีเวลาขาขึ้นเร็วมาก ๆ เมื่อเทียบกับเวลาขาขึ้นของสัญญาณ เวลาขาขึ้นที่วัดได้ $t_{r,meas}$ จะมีค่าประมาณเท่ากับ t_r

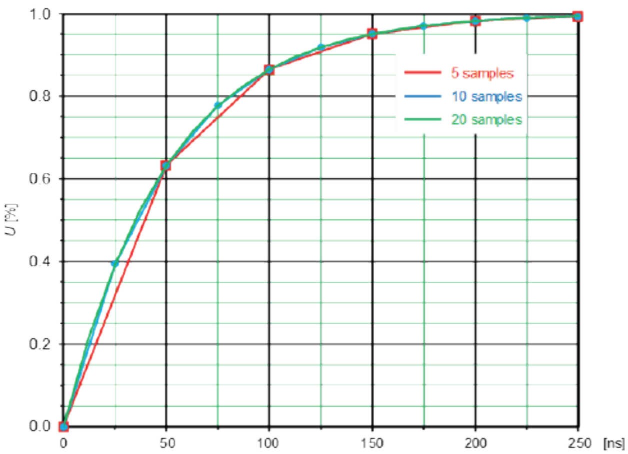
ถ้า $t_{r,sys} = t_r/5$ เราจะพบว่า $t_{r,meas} = 1.02t_r$ หรือคลาดเคลื่อนไป 2%

ถ้า $t_{r,sys} = t_r/3$ เราจะพบว่า $t_{r,meas} = 1.05t_r$ หรือคลาดเคลื่อนไป 5%

ถ้า $t_{r,sys} = t_r/2$ เราจะพบว่า $t_{r,meas} = 1.12t_r$ หรือคลาดเคลื่อนไป 12%

ดังนั้นถ้าต้องการวัดความถี่ 100 MHz (T = 100 ns, $t_{r,100M}$ = 16 ns) โดยมีความผิดพลาดไม่เกิน 2% เราต้องใช้ DSO ที่มีเวลาขาขึ้นเร็วกว่า 5 เท่า หรือมี $t_{r,DSO}$ = 3.2 ns (ไม่คำนึงถึงเวลาขาขึ้นของสายเคเบิล $t_{r,cable}$ เพราะในการใช้งานจริงเราไม่ทราบว่าผู้ทำการวัดสัญญาณใช้สายไฟแบบใด) หรือ BW_{DSO} = 500 MHz

ขั้นต่อไปก็ต้องพิจารณาว่าเราต้องการวัดเวลาให้ละเอียดขนาดไหน? ยกตัวอย่างเช่น การวัดสัญญาณแบบเลขชี้กำลังด้วยจำนวนการสุ่มสัญญาณที่ต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 1.31



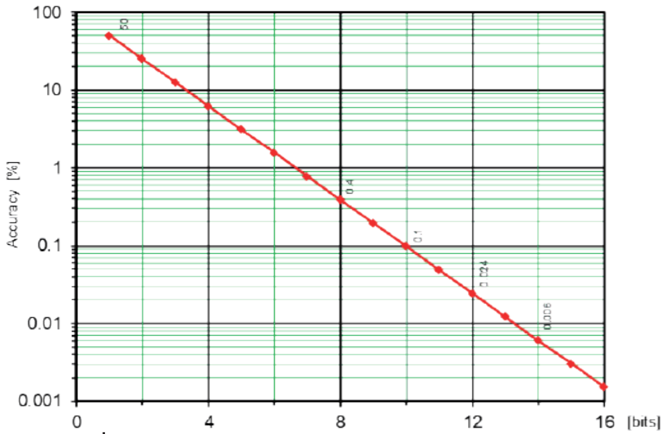
รูปที่ 1.31 การวัดสัญญาณแบบเลขชี้กำลังที่มี t_r = 16 ns ด้วยจำนวนการสุ่มสัญญาณที่ต่างกัน

จากรูปที่ 1.31 จะเห็นว่าภาพที่แสดงด้วยการสุ่มสัญญาณด้วยอัตรา 5 ครั้ง ในเวลา 250 ns (20 MS/S) และด้วยอัตรา 10 ครั้ง ในเวลา 250 ns (40 MS/S) ก็ดูคล้ายสัญญาณแบบเลขชี้กำลัง ส่วนภาพที่แสดงด้วยการสุ่มสัญญาณด้วยอัตรา 20 ครั้ง ในเวลา 250 ns (80 MS/S) ก็ดูดีขึ้นอีก

แต่ข้อมูลทั้งหมดที่ DSO บันทึกไว้อาจไม่มีข้อมูลที่เวลา t_{10} และ t_{90} ต้องประมาณค่าจากข้อมูลที่เวลาใกล้เคียง ดังนั้นเพื่อให้มีข้อมูลที่เวลาดังกล่าว เราอาจต้องสุ่มสัญญาณด้วยอัตรา 400 MS/S ขึ้นไป

ค) <u>ความถูกต้องในการวัด</u> การแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล มีขีดจำกัดอยู่ที่ความไม่แน่นอนของตัวเลขที่แทนสัญญาณแอนะล็อก เช่น สัญญาณแอนะล็อก 1 V ถ้าแทนด้วยตัวเลขฐานสอง 2 ตัว โอกาสเป็นไปได้ของข้อมูลจะมีเพียง 2 อย่าง คือ 1 (ถูกต้อง 100%) และ 0 (ผิด 100%) เท่านั้น (ความถูกต้องเฉลี่ยคือ 50%) ถ้าแทนสัญญาณแอนะล็อก 1 V นี้ ด้วยตัวเลขฐานสอง *n* ตัว (*n* bits) ความถูกต้องจะเท่ากับ $1/(2^n)$ ดังแสดงในรูปที่ 1.32

ดังนั้นการแยกสัญญาณเล็กๆ ที่ต้องการวัด ซึ่งซ้อนมากับสัญญาณขนาดใหญ่ จึงต้องใช้ DSO ที่มีความละเอียดสูง ยกตัวอย่างเช่นการวัดดีสชาร์จบางส่วนที่เกิดในหม้อแปลงหรือสายเคเบิล เราต้องใช้ DSO ที่มีความละเอียด 10 บิท ขึ้นไป -ปัจจุบันนี้ DSO ที่มีความละเอียด 12 หรือ 14 บิท มีจำหน่ายทั่วไปและมีราคาไม่สูงมากนัก-

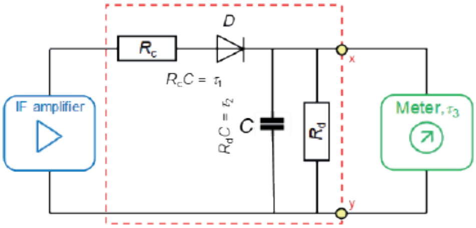


รูปที่ 1.32 ความถูกต้องในการแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ในการวัดสัญญาณความถี่ 100 MHz เราจึงต้องใช้ DSO ที่มีแบนด์วิดท์ 500 MHz 400 MS/S 10 bits หากต้องการวัดให้ถูกต้อง 0.1%

นอกจากการวัดสัญญาณพัลส์ด้วย DSO แล้ว ยังมีวิธีการวัดขนาดของพัลส์แบบอื่น เช่น ใช้เครื่องวัดตาม [CISPR16-1-1, 2016]

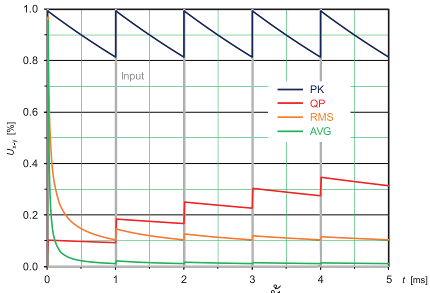
ก่อนอื่นเราจะพิจารณาหลักการวัดสัญญาณพัลส์ที่แสดงในรูป 1.33 [Schwarzbeck, 2018] ซึ่งจะเห็นว่าประกอบไปด้วยวงจรขยายสัญญาณ IF ที่ส่งสัญญาณไปที่วงจรอินทีเกรเตอร์ที่ประกอบด้วย R_c, C และ R_d โดย $R_cC = \tau_1$ เป็นค่าคงตัวในการอัดประจุ และ $R_dC = \tau_2$ เป็นค่าคงตัวในการคายประจุ สัญญาณขาออกที่จุด *x-y* จะแสดงผลด้วยมิเตอร์ที่มีค่าคงตัวเวลา τ_3



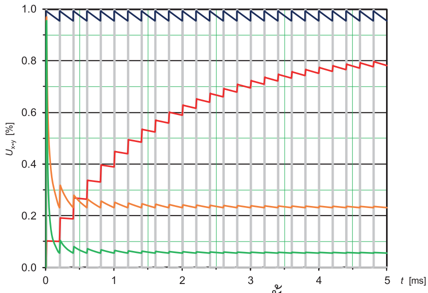
รูปที่ 1.33 หลักการวัดสัญญาณพัลส์ตาม CISPR

ในการวัดค่ายอด (peak, PK) ของพัลส์ ค่า τ_1 ควรมีค่าน้อยมาก ส่วน τ_2 ควรมีค่านานมาก เพื่อให้วงจรวัดสามารถติดตามค่าของ PK ได้ทันและคงค่ายอดไว้ได้นาน หากต้องการวัด *ค่ายอดถ่วงน้ำหนัก* (quasi-peak, QP) τ_1 มักมีค่าน้อย ส่วน τ_2 จะมีค่าไม่นานมากนัก เช่น เครื่องวัดค่ายอดแบบถ่วงน้ำหนักตาม [CISPR16-1-1, 2016] แบนด์วิดท์ BW ต้องมี τ_1 และ τ_2 ไม่เกิน 1 ms และ 160 ms ตามลำดับ

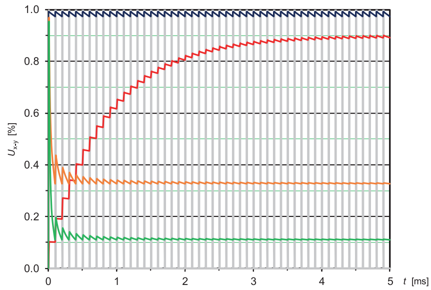
ลักษณะของสัญญาณขาออกที่จุด *x-y* เมื่อวัดพัลส์ขนาด 1 V ความกว้างพัลส์ 1 μs, เวลาขาขึ้น t_r และเวลาขาลง t_d เท่ากับ 1 μs ที่มีอัตราการเกิด *n* ครั้งต่อวินาที จากการจำลองแบบได้ [Pspice, 2016] แสดงในรูปที่ 1.34



ก) *n* = 1000 ครั้ง/s



ข) *n* = 5000 ครั้ง/s



ค) *n* = 10 000 ครั้ง/s]

รูปที่ 1.34 การวัดขนาดของพัลส์แบบ PK, QP, RMS, และ AVG

ในรูปที่ 1.34 การวัดแบบแสดงค่ายอด PK จะวัดค่ายอดของพัลส์เสมอ ไม่ว่าอัตราการเกิดพัลส์จะเป็นเท่าใดก็ตาม ความถูกต้องในการวัดค่าจะขึ้นกับ τ_1 ว่าติดตาม t_1 ได้เร็วเพียงใด ส่วนเวลาที่ต้องคงขนาดค่ายอดซึ่งขึ้นกับ τ_2 ต้องนานพอที่เครื่องวัดที่มี τ_3 สามารถแสดงผลได้ถูกต้อง เหตุผลที่เราวัด PK เพราะต้องการทราบความแรงของสัญญาณที่อาจก่อให้เกิดการรบกวนสัญญาณอื่นหรือการทำลายเนื้อฉนวน

การวัดค่ายอดถ่วงน้ำหนัก QP เป็นการจำลองการตอบสนองต่อเสียงของมนุษย์ซึ่งรับรู้เสียงดังและจะรู้สึกว่าดังมากขึ้นเรื่อยๆ เมื่อเสียงดังนั้นเกิดซ้ำๆ กัน ยิ่งซ้ำมากยิ่งดังมาก เช่นเดียวกับความเสียหายที่มักเกิดจากพัลส์ที่เกิดขึ้นซ้ำๆ กัน ดังนั้นการเกิดพัลส์นานๆ ครั้งจึงอาจไม่ก่อให้เกิดความเสียหายมากนัก เราจึงใช้การวัดค่ายอดถ่วงน้ำหนัก QP เพราะขนาดของ QP จะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการเกิดพัลส์สูงขึ้น

ส่วนการวัดค่ารากกำลังสองเฉลี่ย RMS เป็นการวัดถึงพลังงานของพัลส์เพื่อเปรียบเทียบในเชิงความร้อน และการวัดค่าเฉลี่ย AVG ก็เพื่อเปรียบเทียบขนาดกับแรงดันกระแสตรง

1.7 เอกสารอ้างอิงบทที่ 1

[Bungay, 1990], "*Electric cables handbook*", Bungay, E.W.G. and McAlisster, D., 2nd edition, CRC press, 1990.

[CISPR16-1-1, 2015], "*Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods - Part 1: Radio disturbance and immunity measuring apparatus - Measuring apparatus*", International Special Committee on Radio Disturbance, CISPR, 2015

[IEEE C62.82.1-2010], "*Insulation coordination – Definitions, Principles and Rules*", IEEE, 2010.

[IEC60071-1, 2019], "*Insulation co-ordination, Part 1: Definitions, principles and rules*", IEC, 201.

[Microwaves101, 2018], "*Coax loss calculation*", https://www.microwaves101.com/encyclopedias/coax-power-handling, 2018.

[NI, 2018], "*Top 10 Things to Consider When Selecting a Digitizer/Oscilloscope*", http://www.ni.com/white-paper/4333/en/, National instrument, 2018.

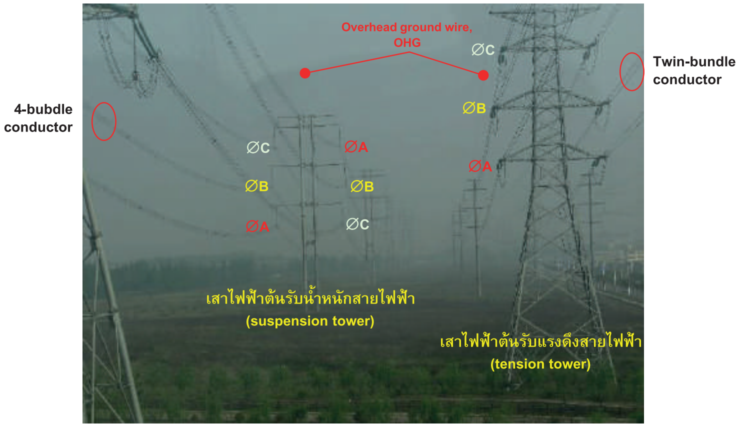
[Pspice, 2016], "*PSPICE 9.1 Student version*", Cadence PCB solution, 2016.

[Schwarzbeck, 2018], "*The EMI-Receiver according to CISPR 16-1-1*", Schwarzbeck Mess-Elektronik, 2018.

[Wiki, 2018a], "*Coaxial cable*", https://en.wikipedia.org/wiki/Coaxial_cable, 2018.

บทที่ 2. สายส่งไฟฟ้าแรงสูงเหนือพื้นดิน

ระบบส่งกำลังไฟฟ้าระยะทางไกลๆ มักใช้สายไฟฟ้าแรงสูงประเภทที่ใช้ฉนวนระหว่างสายเฟสกับสายเฟสและสายเฟสกับกราวน์เป็นอากาศเสมอ สายไฟฟ้าแรงสูงดังกล่าวจึงต้องแขวนอยู่ในอากาศสูงจากพื้นดิน ซึ่งไม่มีปัญหาอะไรเพราะมักมีแนวเดินสายส่งไฟฟ้าในบริเวณที่โล่งแจ้งหรือผ่านป่าเขาที่มีผู้อาศัยไม่มากนัก ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ทำให้ไม่มีปัญหาใน การรอนสิทธิการใช้พื้นที่ในการก่อสร้างสายส่งไฟฟ้า -ปัญหาการรอนสิทธิในปัจจุบัน มักเกิดจากการที่พื้นที่อยู่อาศัยในเมืองขยายตัวกว้างออกไปมากขึ้นจนไปทับกับแนวสายส่งไฟฟ้าเดิม- ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างสายส่งไฟฟ้าต่อกิโลเมตรจึงต่ำ และที่สำคัญคือ เมื่อมีการเบรกดาวน์เกิดขึ้น อากาศที่ทำหน้าที่เป็นฉนวนจะไม่เกิดความเสียหายอย่างถาวร แต่สายส่งแบบนี้จะมีปัญหาเรื่องของโคโรนาที่ก่อให้เกิดความหวาดกลัวเพราะเกิดเสียงดัง และในบางกรณีก็อาจทำให้ผู้ที่เดินใกล้สายส่งรู้สึกเป็นอันตรายเนื่องจากเห็นแสงที่เกิดจากดีสชาร์จในอากาศ



รูปที่ 2.1 ระบบส่งกำลังไฟฟ้าเหนือพื้นดินบริเวณเมืองปักกิ่ง สาธารณรัฐประชาชนจีน

ในรูปที่ 2.1 เราจะเห็นว่าระบบส่งกำลังไฟฟ้าเหนือพื้นดินประกอบไปด้วยส่วนประกอบหลัก คือ

1. สายส่งไฟฟ้า โดยที่สายไฟฟ้าแต่ละเฟสอาจใช้ตัวนำเพียงเส้นเดียวหรือใช้ตัวนำหลายเส้นประกอบกันเป็น สายควบ (bundle conductor);
2. พวงลูกถ้วยไฟฟ้า (insulator string) ทำหน้าที่รับน้ำหนักหรือรับแรงดึงสายไฟฟ้า ทั้งยังทำหน้าที่เป็นฉนวนระหว่างสายไฟฟ้ากับเสาส่งไฟฟ้าด้วย; และ
3. เสาส่งไฟฟ้า

ส่วนประกอบทั้ง 3 ส่วนต้องออกแบบไปพร้อมๆ กัน แต่มักเริ่มต้นจาก

1. กำลังไฟฟ้าที่ต้องการส่งไปตามสายส่งไฟฟ้า ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่กำหนดแรงดันของระบบส่งกำลังไฟฟ้าเหนือพื้นดิน;

2. ประเภทและขนาดของตัวนำที่ใช้เป็นสายเฟส - มักใช้ลวดอะลูมิเนียมตีเกลียว - และจำนวนตัวนำในสายเฟส ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่กำหนดแรงดันเริ่มเกิดโคโรนาของสายส่งไฟฟ้า;
3. จำนวนและประเภทของลูกถ้วยแขวนในพวงลูกถ้วย เป็นตัวกำหนด กระแสรั่ว (leakage current) จากสายส่งไฟฟ้าไปลงดินที่เสาส่งไฟฟ้า ซึ่งจะขึ้นกับพื้นที่ๆ สายส่งไฟฟ้าเดินผ่าน ว่ามีความรุนแรงของ ระดับมลภาวะในพื้นที่ (site pollution severity, SPS) มากน้อยเพียงใด และยังเป็นตัวที่กำหนดความทนแรงดันเกินประเภทต่างๆ เช่น แรงดันเกินชั่วคราว (temporary overvoltage, TOV), แรงดันเกินอิมพัลส์ฟ้าผ่า (lightning impulse overvoltage, SOV) และ แรงดันเกินอิมพัลส์สวิตชิง (switching impulse overvoltage, SOV) อีกด้วย;
4. ความแข็งแรงทางกลของเสาส่งไฟฟ้า เป็นพารามิเตอร์ที่กำหนด ระยะระหว่างเสาส่งไฟฟ้า (span, S) ซึ่งจะกำหนด ระยะปลอดภัย (safety distance) เหนือพื้นดิน ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่สุดในการออกแบบระบบสายส่งไฟฟ้าเพราะเป็นระยะที่ประกันความปลอดภัยของสิ่งมีชีวิตที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียงสายส่งไฟฟ้า

2.1 กำลังไฟฟ้าของสายส่งไฟฟ้าในทางปฏิบัติ

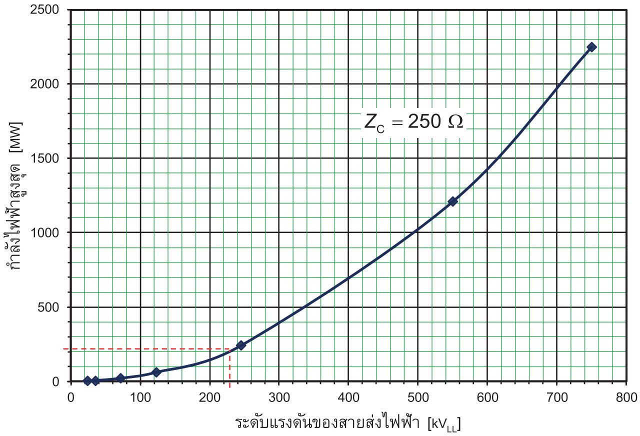
ดังที่กล่าวไว้แล้วในบทที่ 1 ว่า เหตุผลหลักที่เราต้องส่งพลังงานไฟฟ้าด้วยแรงดันสูงก็เพราะกำลังไฟฟ้าที่ส่งได้จะแปรตามระดับแรงดันยกกำลังสอง คือ $P \propto U^2$ และเมื่อไม่คำนึงถึงกำลังสูญเสียของตัวนำที่ใช้ทำสายไฟฟ้า เราจะพบว่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ส่งผ่านสายไฟฟ้า -หรือ surge impedance loading, SIL- หาได้จากสมการที่ 2.1 และตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 2.2

$$P_{max} = \frac{kV_{LL}^{\ 2}}{Z_C} \quad [MW] \tag{2.1}$$

เมื่อ

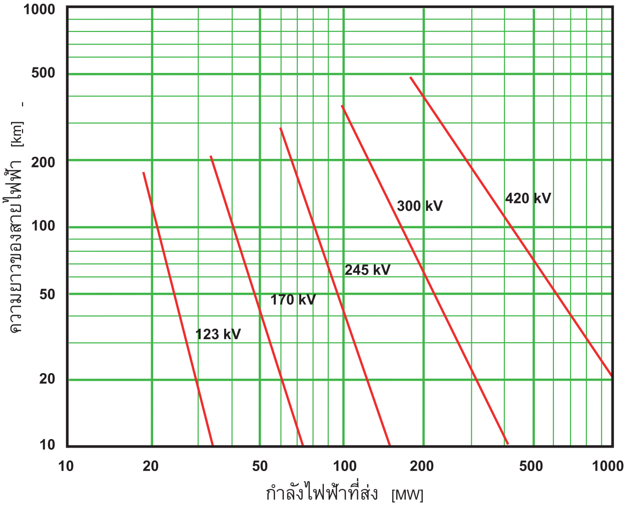
Z_C = $\sqrt{X_L X_C}$ = อิมพีแดนซ์ลักษณะเฉพาะ (characteristic impedance)

X_C = รีแอกแตนซ์ความจุไฟฟ้า (capacitive reactance) มีค่าเท่ากับ $1/(2\pi fC)$



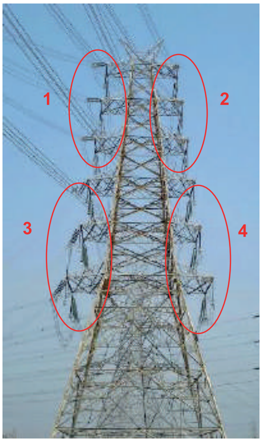
รูปที่ 2.2 กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ส่งได้ที่ระดับแรงดันต่างๆ ของสายส่งไฟฟ้า

แต่ในทางปฏิบัติเราต้องคำนึงถึงปัจจัยอื่นๆ เช่น ทางด้านเศรษฐศาสตร์, แรงดันตกในสายไฟฟ้า, ระยะปลอดภัยเหนือพื้นดิน ฯลฯ กำลังไฟฟ้าที่ส่งได้ที่ระดับแรงดันหนึ่งๆ จึงมีขีดจำกัด ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 2.3 [Diesendorf, 1974]



รูปที่ 2.3 กำลังไฟฟ้าที่ส่งได้ที่ระดับแรงดันต่างๆ ของสายส่งไฟฟ้าในทางปฏิบัติ

จากรูปที่ 2.3 จะเห็นว่าสายส่งไฟฟ้าวงจรเดี่ยวที่ใช้ระดับแรงดัน 245 kV จะส่งกำลัง 80 MW ได้เป็นระยะทางเพียง 100 km เท่านั้นจึงจะคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ -กราฟในรูปที่ 2.3 ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขต่างๆ ที่การไฟฟ้าแต่ละแห่งกำหนด- หากเราต้องการให้สายส่งไฟฟ้าเส้นหนึ่งสามารถส่งกำลังไฟฟ้าได้มากขึ้นก็สามารถทำได้โดยสร้างสายส่งไฟฟ้าที่มี 2 วงจร ดังที่แสดงในรูปที่ 2.1 หรือ 4 วงจร ดังที่แสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 สายส่งไฟฟ้าแบบ 4 วงจร

ในรูปที่ 2.1 เราจะเห็นว่ามีสายส่งไฟฟ้า 2 เส้น แต่ละเส้นมี 2 วงจร แต่ละวงจรประกอบด้วยสายเฟส 3 เส้น คือ ABC โดยที่ สายเฟสเรียงในแนวตั้ง (vertical phase configuration) แต่สายส่งไฟฟ้าทางด้านซ้ายใช้สายเฟสแบบควบที่ใช้ตัวนำอะลูมิเนียมเปลือยตีเกลียว 4 เส้น (4-bundle conductor) ส่วนสายส่งทางด้านขวาใช้สายเฟสแบบควบเช่นกัน แต่ใช้สายอะลูมิเนียมเปลือยตีเกลียวเพียง 2 เส้น (twin-bundle conductor) สำหรับรูปที่ 2.4 สายส่งไฟฟ้ามี 4 วงจร สายเฟสทุกเส้นใช้สายแบบควบที่ใช้สายอะลูมิเนียมเปลือยตีเกลียว 4 เส้น

2.2 สายเฟสของสายส่งไฟฟ้า

สายเฟสของสายส่งไฟฟ้าประกอบขึ้นจาก สายอะลูมิเนียมเปลือยตีเกลียว (bare aluminium stranded conductor) ซึ่งประเภทที่รู้จักกันดีก็คือ สายอะลูมิเนียมล้วน (all aluminium conductor, AAC) ที่ใช้กับสายส่งไฟฟ้าที่มีระดับแรงดันไม่เกิน 132 kV_{LL} และ สายอะลูมิเนียมเสริมเหล็กกล้า (aluminium conductor steel reinforced, ACSR) หรือ สายอะลูมิเนียมเสริมเหล็กกล้ากะทัดรัด (aluminium conductor steel reinforced-trapezoidal wire, ACSR/TW) ที่ใช้ในสายส่งไฟฟ้าที่มีระดับแรงดันที่สูงกว่า 132 kV_{LL} ขึ้นไป ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งต่อไปนี้จะเรียกสั้นๆ ว่า “ตัวนำ”

ก) AAC ข) ACSR ค) ACSR/TW

รูปที่ 2.5 สายอะลูมิเนียมเปลือยตีเกลียวแบบต่างๆ ที่ใช้ในระบบส่งไฟฟ้า

ตัวนำมีชื่อเรียกแตกต่างกันเพื่อให้ทราบว่าเป็นสายประเภทใด เช่น ในสหรัฐอเมริกา สาย AAC จะตั้งชื่อตามดอกไม้ เช่น ดอกนาซิซัส (Narcissus, 1272 MCM), ดอกกล้วยไม้ (Orchid, 636 MCM) ฯลฯ, สาย ACSR หรือ ACSR/AW จะตั้งชื่อตามสัตว์ปีก เช่น นกกระยาง (Bittern, 1272 MCM), เป็ดตัวผู้ (Drake, 795 MCM) ฯลฯ ส่วนสาย ACSR/TW จะตั้งชื่อตามสัตว์ปีกเช่นเดียวกับสาย ACSR หรือตั้งชื่อตามแม่น้ำ เช่น คาเทาบา (Catawba/TW, 1272 MCM), โปโตแมค (Potomac/TW, 1557 MCM) ฯลฯ ดังตัวอย่างที่แสดงในตารางที่ 2.1 [EPRI, 2006] [EPRI, 1987] และ 2.2 [EPRI, 2006]

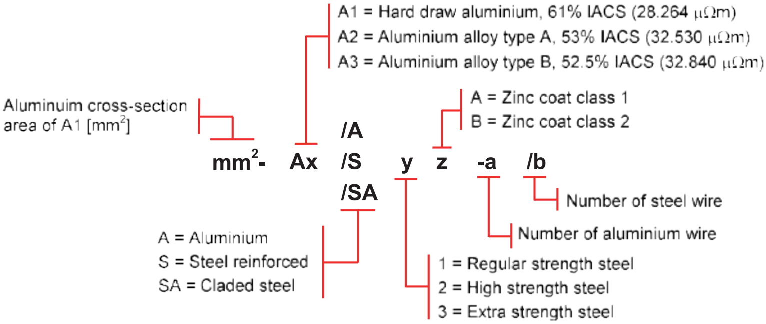
ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของสาย ACSR ที่นิยมใช้ในประเทศสหรัฐอเมริกา

Name	No of Al/Fe wire	No. of layer	Ø [mm]	Cross section area of conductor [kcmil]	GMR @60 Hz [mm]	R_{DC} @25 °C [Ω/km]	R_{AC} @25 °C 60 Hz [Ω/km]	R_{AC} @75 °C 60 Hz [Ω/km]	X_a @50 Hz [Ω/km]	X_a' @50 Hz [MΩ/km]	GMR/ radius [%]
ROOK	24/7	2	24.8	636	9.9670	0.0899	0.0907	0.1081	0.2897	0.2512	80.4
GROSBEAK	26/7	2	25.1	636	10.2108	0.0895	0.0901	0.1075	0.2882	0.2505	81.4
EGRET	30/19	2	25.9	636	10.6985	0.0889	0.0895	0.1069	0.2853	0.2487	82.6
FLAMINGO	24/7	2	25.4	666.6	10.2108	0.0857	0.0864	0.1031	0.2882	0.2498	80.4
GANNET	26/7	2	25.8	666.6	10.4546	0.0854	0.0864	0.1031	0.2867	0.2489	81.0
CROW	54/7	3	26.3	715.5	11.3386	0.0799	0.0795	0.0951	0.2816	0.2479	86.2
STARLING	26/7	2	26.7	715.5	10.8204	0.0795	0.0802	0.0957	0.2845	0.2470	81.1
REDWING	30/19	2	27.5	715.5	11.3386	0.0791	0.0795	0.0951	0.2816	0.2453	82.5
TERN	45/7	3	27.0	795	10.7290	0.0726	0.0739	0.0876	0.2851	0.2463	79.5
COOT	36/1	3	26.4	795	10.2108	0.0725	0.0739	0.0882	0.2882	0.2476	77.4
CUCKOO	24/7	2	27.7	795	11.0033	0.0719	0.0727	0.0870	0.2835	0.2449	79.4
CONDOR	54/7	3	27.7	795	11.2166	0.0720	0.0727	0.0870	0.2823	0.2449	81.0
DRAKE	26/7	2	28.1	795	11.4300	0.0716	0.0727	0.0864	0.2811	0.2441	81.4
SKIMMER	30/7	2	29.0	795	11.9482	0.0710	0.0718	0.0857	0.2783	0.2423	82.4
MALLARD	30/19	2	29.0	795	11.9482	0.0711	0.0721	0.0857	0.2783	0.2423	82.4
WILLET	45/7	3	28.3	874	11.2471	0.0659	0.0671	0.0795	0.2821	0.2437	79.5
CRANE	54/7	3	29.1	874	11.7958	0.0653	0.0665	0.0789	0.2791	0.2421	81.1
RUDDY	45/7	3	28.7	900	11.3995	0.0641	0.0659	0.0777	0.2813	0.2429	79.4
CANARY	54/7	3	29.5	900	11.9482	0.0635	0.0646	0.0771	0.2783	0.2413	81.0
BALDPATE	30/7	2	30.8	900	12.7102	0.0628	0.0634	0.0758	0.2744	0.2388	82.5
CORNCRAKE	20/7	2	29.6	954	11.6129	0.0604	0.0618	0.0733	0.2801	0.2411	78.5
RAIL	45/7	3	29.6	954	11.7348	0.0604	0.0618	0.0733	0.2794	0.2411	79.3
CARDINAL	54/7	3	30.4	954	12.3139	0.0599	0.0611	0.0727	0.2764	0.2396	81.0
REDBIRD	24/7	2	30.4	954	12.1920	0.0599	0.0610	0.0727	0.2770	0.2396	80.2
ORTOLAN	45/7	3	30.8	1033	12.2225	0.0558	0.0573	0.0684	0.2769	0.2388	79.4
CURLEW	54/7	3	31.6	1033	12.8016	0.0553	0.0565	0.0671	0.2740	0.2373	81.0
BLUEJAY	45/7	3	32.0	1113	12.6797	0.0518	0.0534	0.0634	0.2746	0.2366	79.2
FINCH	54/19	3	32.8	1113	13.2893	0.0516	0.0529	0.0628	0.2716	0.2352	81.0
BUNTING	45/7	3	33.1	1192	13.1369	0.0483	0.0500	0.0593	0.2723	0.2347	79.4
GRACKLE	54/19	3	34.0	1192	13.7465	0.0482	0.0496	0.0588	0.2695	0.2332	80.9
BITTERN	45/7	3	34.2	1272	13.5636	0.0453	0.0472	0.0558	0.2703	0.2328	79.3
PHEASANT	54/19	3	35.1	1272	14.2037	0.0452	0.0467	0.0553	0.2674	0.2313	80.9
DIPPER	45/7	3	35.2	1351	13.9903	0.0426	0.0446	0.0527	0.2684	0.2312	79.5
MARTIN	54/19	3	36.2	1351	14.6304	0.0425	0.0441	0.0522	0.2656	0.2296	80.8
BOBOLINK	45/7	3	36.2	1431	14.3866	0.0403	0.0423	0.0500	0.2666	0.2296	79.5
PLOVER	54/19	3	37.2	1431	15.0571	0.0401	0.0418	0.0495	0.2638	0.2280	81.0
NUTHATCH	45/7	3	37.2	1510	14.7828	0.0382	0.0403	0.0475	0.2649	0.2280	79.5
PARROT	54/19	3	38.2	1510	15.4838	0.0380	0.0398	0.0470	0.2620	0.2265	81.1
LAPWING	45/7	3	38.2	1590	15.1486	0.0362	0.0385	0.0453	0.2634	0.2265	79.3
FALCON	54/19	3	39.2	1590	15.8801	0.0361	0.0380	0.0448	0.2604	0.2250	81.0
CHUKAR	84/19	4	40.7	1781	16.2763	0.0324	0.0349	0.0409	0.2589	0.2229	80.0
BLUEBIRD	84/19	4	44.8	2156	17.9222	0.0268	0.0296	0.0345	0.2528	0.2174	80.0
KIWI	72/7	4	44.1	2167	17.3736	0.0268	0.0301	0.0349	0.2548	0.2183	78.8
THRASHER	76/19	4	45.8	2312	18.1356	0.0251	0.0282	0.0328	0.2521	0.2161	79.2
JOREE	76/19	4	47.8	2515	18.9281	0.0231	0.0281	0.0305	0.2494	0.2137	79.2

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของสาย AAC ที่นิยมใช้ในประเทศสหรัฐอเมริกา

Name	No of Al wire	No. of layer	Ø [mm]	Cross section area of conductor [kcmil]	GMR @60 Hz [mm]	R_{DC} @25 °C [Ω/km]	R_{AC} @25 °C 60 Hz [Ω/km]	R_{AC} @75 °C 60 Hz [Ω/km]	X_a @50 Hz [Ω/km]	X_a' @50 Hz [MΩ/km]	GMR/ radius [%]
Daisy	7	1	14.9	266.8	5.3950	0.2169	0.2175	0.2604	0.3283	0.2804	72.4
Laurel	19	2	14.9	266.8	5.6998	0.2169	0.2175	0.2604	0.3248	0.2804	76.5
Tulip	19	2	16.9	336.4	6.4008	0.1719	0.1727	0.2063	0.3175	0.2732	75.7
Canna	19	2	18.4	397.5	6.9494	0.1454	0.1460	0.1752	0.3124	0.2683	75.5
Cosmos	19	2	20.2	477.0	7.6200	0.1214	0.1224	0.1460	0.3066	0.2630	75.4
Syringa	37	3	20.1	477.0	7.7419	0.1214	0.1224	0.1460	0.3056	0.2632	77.0
Dahlia	19	2	21.8	556.5	8.2296	0.1040	0.1050	0.1255	0.3017	0.2586	75.5
Mistletoe	37	3	21.7	556.5	8.3820	0.1040	0.1050	0.1255	0.3006	0.2589	77.3
Orchid	37	3	23.3	636.0	8.9611	0.0910	0.0926	0.1100	0.2964	0.2548	76.9
Nasturtium	61	4	24.8	715.5	9.5098	0.0808	0.0826	0.0982	0.2927	0.2512	76.7
Violet	37	3	24.7	715.5	9.5707	0.0808	0.0826	0.0982	0.2923	0.2514	77.5
Arbutus	37	3	30.1	795.0	9.9974	0.0727	0.0746	0.0882	0.2895	0.2401	66.4
Lilac	61	4	26.1	795.0	10.0889	0.0727	0.0746	0.0882	0.2889	0.2483	77.3
Anemone	37	3	27.4	874.5	10.4851	0.0661	0.0677	0.0808	0.2865	0.2455	76.5
Crocus	61	4	27.4	874.5	10.5766	0.0661	0.0677	0.0808	0.2860	0.2455	77.2
Goldenrod	61	4	33.0	954.0	10.9728	0.0606	0.0628	0.0746	0.2837	0.2349	66.5
Magnolia	37	3	28.6	954.0	11.0338	0.0606	0.0628	0.0739	0.2833	0.2431	77.2
Bluebell	37	3	29.8	1033.5	11.3995	0.0559	0.0580	0.0690	0.2813	0.2407	76.5
Larkspur	61	4	29.7	1033.5	11.4910	0.0559	0.0580	0.0690	0.2808	0.2409	77.4
Marigold	61	4	35.6	1113.0	11.9177	0.0519	0.0542	0.0640	0.2785	0.2305	67.0
Hawthorn	61	4	36.8	1192.5	12.3444	0.0485	0.0509	0.0601	0.2763	0.2286	67.1
Narcissus	61	4	33.0	1272.0	12.7406	0.0455	0.0480	0.0566	0.2743	0.2349	77.2
Columbine	61	4	34.0	1351.5	13.1369	0.0428	0.0454	0.0535	0.2723	0.2332	77.3
Carnation	61	4	35.0	1431.0	13.5331	0.0404	0.0432	0.0508	0.2705	0.2315	77.3
Gladiolus	61	4	36.0	1511.0	13.8989	0.0383	0.0412	0.0483	0.2688	0.2299	77.2
Coreopsis	61	4	42.7	1590.0	14.2646	0.0364	0.0394	0.0456	0.2672	0.2201	66.8
Jessamine	61	4	38.7	1750.0	14.9352	0.0331	0.0364	0.0424	0.2643	0.2257	77.2
Cowslip	91	5	41.4	2000.0	16.0325	0.0290	0.0326	0.0378	0.2598	0.2219	77.5
Lupine	91	5	46.3	2500.0	17.9222	0.0234	0.0277	0.0318	0.2528	0.2155	77.4
Trillium	127	6	50.8	3000.0	19.6901	0.0194	0.0244	0.0277	0.2469	0.2102	77.5
Bluebonnet	127	6	54.8	3500.0	21.2446	0.0168	0.0222	0.0250	0.2421	0.2058	77.5

สำหรับ IEC ตัวนำจะเรียกด้วยรหัสดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ชื่อตัวนำตาม [IEC61089, 1991]

ตัวอย่างที่ 2.1 ตัวนำที่ใช้ในระบบส่งไฟฟ้าตาม IEC61089

500-A1-37: ตัวนำทำจากลวดอะลูมิเนียม A1 ตีเกลียว จำนวน 37 เส้น, พื้นที่หน้าตัดอะลูมิเนียม 500 mm^2

500-A2-37: ตัวนำทำจากลวดอะลูมิเนียม A2 ตีเกลียว จำนวน 37 เส้น, พื้นที่หน้าตัดอะลูมิเนียม 575 mm^2 ซึ่งทำให้มีความนำไฟฟ้าเท่ากับตัวนำที่ทำจากลวดอะลูมิเนียม A1 พื้นที่หน้าตัด 500 mm^2

500-A1/S1A-45/7: ตัวนำทำจากลวดอะลูมิเนียม A1 ตีเกลียว จำนวน 45 เส้น พันรอบแกนลวดเหล็กตีเกลียวแบบรับแรงดึงธรรมดาที่อาบสังกะสี class 1 จำนวน 7 เส้น, พื้นที่หน้าตัดอะลูมิเนียม 500 mm^2 และจากตารางใน IEC จะเห็นว่าตัวนำ S1A มีพื้นที่หน้าตัด 34.6 mm^2

500-A3/S3A-54/7: ตัวนำทำจากลวดอะลูมิเนียม A3 ตีเกลียว จำนวน 54 เส้น พันรอบแกนลวดเหล็กตีเกลียวแบบรับแรงดึงสูงพิเศษที่อาบสังกะสี class 1 จำนวน 7 เส้น, พื้นที่หน้าตัดอะลูมิเนียม 581 mm^2 และจากตารางใน IEC จะเห็นว่าตัวนำ S3A มีพื้นที่หน้าตัด 75.3 mm^2

500-A1/SA1A-54/7: ตัวนำทำจากลวดอะลูมิเนียม A1 ตีเกลียว จำนวน 54 เส้นพันรอบแกนลวดเหล็กที่อาบสังกะสี class 1 หุ้มอะลูมิเนียมจำนวน 7 เส้น, พื้นที่หน้าตัดอะลูมิเนียม 484 mm^2 และจากตารางใน IEC จะเห็นว่าตัวนำ SA1A มีพื้นที่ หน้าตัด 62.8 mm^2

40-S1A-19: ตัวนำทำจากลวดเหล็กตีเกลียวแบบรับแรงดึงธรรมดาที่อาบสังกะสี class 1 จำนวน 19 เส้น, พื้นที่หน้าตัด 271 mm^2 ซึ่งทำให้มีความนำไฟฟ้าเท่ากับตัวนำที่ทำจากลวดอะลูมิเนียม A1 พื้นที่หน้าตัด 40 mm^2

40-SA1A-19: ตัวนำทำจากลวดเหล็กที่อาบสังกะสี class 1 หุ้มอะลูมิเนียมจำนวน 19 เส้น, พื้นที่หน้าตัด 120 mm^2 ซึ่งทำให้มีความนำไฟฟ้าเท่ากับตัวนำที่ทำจากลวดอะลูมิเนียม A1 พื้นที่หน้าตัด 40 mm^2

เราจะเห็นว่าวัสดุที่ใช้ทำตัวนำมีหลายประเภท แต่ละประเภทก็มีคุณสมบัติต่างกันไปดังแสดงในตารางที่ 2.3 [TB601, 2014]

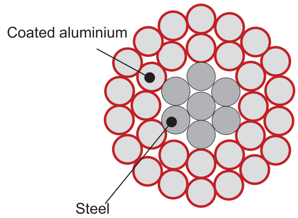
ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติทั่วไปของวัสดุที่ใช้ทำตัวนำ

Material	γ [kg/m^3]	c [(J/kg)/K]	β [1/K]	ρ_{DC} [nΩ·m]	α [1/K]	ζ [1/K^2]	λ_a [(W/m)/K]
Aluminium	2703	897	$3.8 \cdot 10^{-4}$	28.264	$4.03 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-7}$	240
Aluminium alloy	2703	909	$4.5 \cdot 10^{-4}$	32.7	$3.6 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-7}$	210
Galvanized steel	7780	481	$1.0 \cdot 10^{-4}$	287.36 (6% IACS) 191.57 (9% IACS) 215.1 (8% IACS)	$4.5 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-7}$	24
SA1 (20SA)	6590	518	$1.4 \cdot 10^{-4}$	84.8	$3.6 \cdot 10^{-3}$	-	80
SA1 (27SA)	5910	551	$1.4 \cdot 10^{-4}$	63.86	$3.6 \cdot 10^{-3}$	-	110

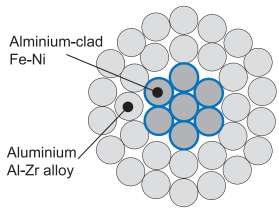
γ = mass density [kg/m^3], c = Specific heat [(J/kg)/K], β = Thermal coefficient of specific heat [1/K], ρ_{DC} = Resistivity [nΩ·m],
α = Thermal coefficient of resistance [(Ω/Ω)/K], ζ = Thermal coefficient of resistance (quadratic) [(Ω/Ω)/K^2],
λ_a = Thermal conductivity [(W/m)/K]

ในปัจจุบัน มีตัวนำอะลูมิเนียมประเภทอื่นที่นำมาใช้ทดแทนสาย ACSR ที่ใช้ทั่วไป ดังนี้

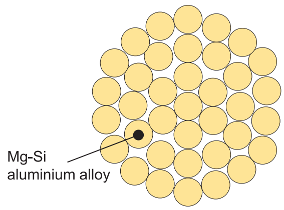
ก. Alumoweld ใช้ลวดอะลูมิเนียมเคลือบสารกันสนิม เพราะอะลูมิเนียมโดยทั่วไปจะเกิดออกไซด์เมื่อสัมผัสกับอากาศ (O_2) ทำให้การระบายความร้อนจากตัวนำเนื่องจากการแผ่รังสีไม่ดีนัก การเคลือบสารกันสนิมจะทำให้การแผ่รังสีดีขึ้นทำให้สาย Alumoweld นำกระแสได้มากขึ้นที่อุณหภูมิเดียวกันกับสาย ACSR แบบกติ -ที่กระแสค่าเดียวกันท้องช้างจึงต่ำกว่า- นอกจากนั้นยังช่วยป้องกันสายจากการสึกกร่อนจากสภาพแวดล้อม จึงมักนำมาใช้ในบริเวณพื้นที่อุตสาหกรรมหรือชายทะเล



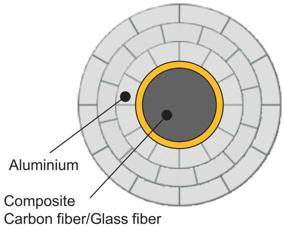
ข. Invar [Sumitomo, 20xx] [Sterlite, 2021] ใช้แกนตัวนำอะลูมิเนียมที่เคลือบ Invar -invariable- ทำให้มี สัมประสิทธิ์การขยายตัวตามอุณหภูมิ (temperature coefficient of expansion, TCE) ต่ำ และลวดอลูมินิเนียมก็ทำจากอัลลอยด์ Al-Zr ที่ทนความร้อนได้สูงมาก จึงสามารถนำกระแสได้สูงเกือบ 2 เท่า ของสาย ACSR ทั่วไปที่ระยะท้องช้างเดียวกัน



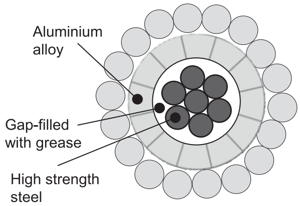
ค. AAAC (All aluminum alloy conductor) [Atanasovski, 2019] สร้างจากลวดอะลูมิเนียมที่มีส่วนผสมของแมกนีเซียม Mg และซิลิกอน Si -น่าจะเป็น Mg_2Si- สามารถทนแรงดึงได้สูงแต่สายไฟฟ้ามีสภาพนำไฟฟ้าต่ำกว่าสาย ACSR ทั่วไป



ง. ACCC (Aluminum conductor with composite core) [CTC, 2019] สร้างจากลวดอะลูมิเนียมกลมหรือสี่เหลี่ยมคางหมูพันเป็นชั้น พันรอบแกนคอมโพสิตพอลิเมอร์ (polymer composite) -เส้นใยแก้วหุ้มรอบเส้นใยคาร์บอน- มีค่า TCE ต่ำ จึงนำกระแสได้สูงเกือบ 2 เท่าของสาย ACSR ทั่วไปที่ระยะท้องช้างเดียวกัน



จ. Gap type ACSR [Lamifil, 20xx] ทำจากลวดอะลูมิเนียมหุ้มแกนเหล็กเหมือนกับสาย ACSR ทั่วไปแต่มีช่องว่างระหว่างแกนเหล็กกับชั้นลวดอะลูมิเนียมทำให้แกนเหล็กเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ตัวลวดอะลูมิเนียมทำจากอัลลอยด์ Al-Zr ที่ทนความร้อนได้สูงมาก จึงสามารถนำกระแสได้สูงเกือบ 2 เท่า ของสาย ACSR ทั่วไปที่ระยะท้องช้างเดียวกัน



คุณสมบัติของตัวนำทั้ง 5 ประเภทได้แสดงในตารางที่ 2.4

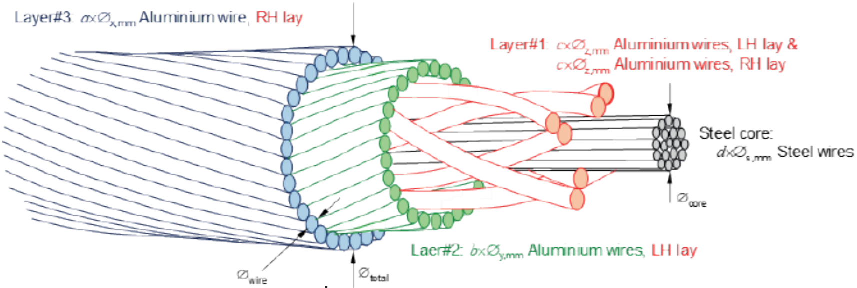
ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติของตัวนำอะลูมิเนียมที่มักใช้ทดแทนสาย ACSR

Parameter	ACSR a)	Alumoweld b)	Invar c)	AAAC a)	ACCC d)	Gap e)
Crossection MCM]	1034	1034	1178	927	1120	1026
Overall diameter [mm]	30.8	30.8	31.8	28.1	29.1	26.9
Weight [kN/km]	1579	1538	1993	1180	1681	1856
Rate tensile strength [kN]	123	121	144	136	188	159
R_{DC} @20 °C [Ω/km]	0.0548	0.0551	0.0600	0.0712	0.0494	0.0570
T_{max} [°C]	75	75	210	75	200	210
I @T_{max} [A]	1043	1050	1871	908	1985	1667

a) Priority wire&cable, inc.(www.PriorityWire.com), b) CME wire and cable (www.cmewire.com/), c) Sterlite Power (www.thegrid.sterlitepower.com/), d) CTC global (www.ctcglobal.com), e) JPower Systems Corp. (www.jpowers.co.jp)

2.2.1 ความต้านทานของตัวนำ

เป็นที่ทราบกันดีว่าสาย ACSR สร้างจากแกนที่เป็นลวดเหล็กตีเกลียวแล้วพันทับด้วยลวดอะลูมิเนียมเปลือยตีเกลียวเป็นชั้นๆ (layer) โดยมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.7 [Al.Assoc., 1989]



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของสาย ACSR

ลวดเหล็กสามารถรับแรงดึงได้สูงกว่าอะลูมิเนียมมากจึงมีหน้าที่รับแรงดึงที่ทำกับตัวนำ -ทำให้ระยะตกท้องช้างน้อย- ไม่ได้ทำหน้าที่นำกระแสไฟฟ้าแม้ว่าจะมีกระแสไหลบ้างในขณะที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำ ส่วนอะลูมิเนียมที่ทำหน้าที่นำกระแสไฟฟ้าจะพันทับลวดเหล็กเป็นชั้นๆ แต่ละชั้นจะพันสวนทางกัน แต่ชั้นนอกสุดจะพันทวนเข็มนาฬิกาเสมอ (พันทวนขวา, RH lay)

ในรูปที่ 2.7: $a \times \varnothing_{x,mm}$, $b \times \varnothing_{y,mm}$, $2c \times \varnothing_{z,mm}$, และ $d \times \varnothing_{s,mm}$ เป็นจำนวนและเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดในแต่ละชั้น โดยโปรดสังเกตว่าการพันชั้นที่ 1 ในรูป เป็นการพันแบบพิเศษคือ ลวด c เส้น พันทวนซ้าย ส่วนอีก c เส้น พันทวนขวา ซึ่งจะกล่าวถึงต่อไป

ความต้านทานของสายอะลูมิเนียมเปลือยตีเกลียวขึ้นกับ ความต้านทานจำเพาะ (resistivity, ρ) ของอะลูมิเนียม ความยาวจริงของลวดอะลูมิเนียม พื้นที่หน้าตัดของลวด อุณภูมิของสายไฟ และความถี่ของกระแสที่ไหลในสายไฟ เพราะเมื่อมีกระแสสลับไหลผ่านตัวนำ ก็จะเกิดปรากฏการณ์ต่างๆ เหล่านี้ขึ้นเสมอ

- ปรากฏการณ์ที่ผิว (skin effect) จะทำให้กระแสมีแนวโน้มที่จะไหลมากที่บริเวณผิวของตัวนำ ทำให้ความต้านทานสูงขึ้น โดยทั่วไปมักจะแสดงด้วยอัตราส่วน R_{ac}/R_{dc} ซึ่งจะมีค่าแปรไปตามเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ
- ในกรณีของสายไฟฟ้า ACSR ก็จะซับซ้อนขึ้นเพราะตัวนำมีหลายชั้น ถ้าจำนวนชั้นของลวดอะลูมิเนียมเป็นเลขคู่ ผลของปรากฏการณ์ที่ผิวจะน้อยเพราะชั้นอะลูมิเนียมที่ติดกันตีเกลียวสวนทางกัน สนามแม่เหล็กบางส่วนที่เกิดขึ้นจึงหักล้างกัน แต่ถ้าชั้นอะลูมิเนียมเป็นเลขคี่จะมีกระแสไหลในลวดเหล็ก ปรากฏการณ์ที่ผิว (รวมทั้ง R_{ac}/R_{dc}) จึงขึ้นอยู่กับขนาดของกระแสที่ไหลในลวดเหล็กด้วย ผู้ที่สนใจสามารถศึกษาเพิ่มได้จาก [Al.Assoc., 1989] และ [TB345, 2008]
- ปรากฏการณ์ใกล้ชิด (proximity effect) ในกรณีมีกระแสไหลผ่านตัวนำ 2 ตัว ที่วางใกล้กัน กระแสที่ไหลผ่านตัวนำจะมีการกระจายไม่เท่ากันตลอดทั้งตัวนำเนื่องจากทิศทางของสนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้นมาจากสายแต่ละเส้น (จะเสริมกันหรือหักล้างกันก็ขึ้นกับทิศทางของกระแสในตัวนำ ว่าสวนทางกันหรือไปทางเดียวกัน) ทำให้ความต้านทานเปลี่ยนไป แต่เราละเลยผลของปรากฏการณ์ใกล้ชิดได้ ถ้าระยะห่างระหว่างตัวนำทั้ง 2 เส้น มากกว่า 10 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางตัวนำ
- ปรากฏการณ์ฮิสเทอรีซิส (hysteresis effect) และกระแสไหลวนที่เกิดขึ้นเนื่องจากขนาดของกระแสที่ไหลในตัวนำแล้วทำให้เกิดกำลังสูญเสียในโลหะที่อยู่ใกล้เคียง เช่นแคลมป์ยึดตัวนำ, เสาไฟฟ้า, ฯลฯ ก็มีผลต่อ R_{ac}/R_{dc} แต่ส่วนใหญ่เราจะละเลยผลนี้เพราะเราไม่ทราบว่าในการใช้งานจริง มีโลหะประเภท/ลักษณะใดบ้างที่อยู่ใกล้ตัวนำและอยู่ห่างเท่าใด

2.2.1.1 ความต้านทานจำเพาะ มักบอกเป็น %IACS (International Annealed Copper Standard) โดย 100 %IACS คือความต้านทานจำเพาะเท่ากับ 1.7241 $\mu\Omega$-cm ที่อุณหภูมิ 20 ^{o}C

ตัวอย่างที่ 2.2 สายอะลูมิเนียมรีดแข็งมีค่าความนำจำเพาะ 61 %IACS สายอะลูมิเนียมจึงมีความต้านทานจำเพาะ ρ ที่ 20 ^{o}C เท่าใด

$$\rho = \frac{1.7241 \cdot 100}{61} = 2.8264 \quad [\mu\Omega \cdot \mathrm{cm}]$$

2.2.1.2 ความต้านทานกระแสตรง สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$R_{DC,1} = \frac{\rho \ell}{A} \quad [\Omega] \tag{2.2}$$

เมื่อ ρ = ความต้านทานจำเพาะของอะลูมิเนียม [$\Omega \cdot$m] ที่อุณหภูมิ T_{REF}

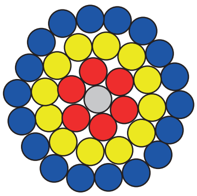
ℓ = ความยาวของลวดอะลูมิเนียม [m]

A = พื้นที่หน้าตัดของลวดอะลูมิเนียม 1 เส้น [m^2]

แต่ไม่สามารถทำได้ง่ายๆ โดยการนำความต้านทานลวดของอะลูมิเนียม 1 เส้น ($R_{DC,1}$) ไปคูณกับจำนวนลวดอะลูมิเนียมที่ประกอบเป็นสายตีเกลียว เพราะ

ก) ความยาวของลวดอะลูมิเนียม ℓ แต่ละเส้นในสมการที่ (2.2) มีความยาวไม่เท่ากับสายไฟฟ้าที่ตีเกลียวเสร็จแล้ว

ข) ลวดอะลูมิเนียมในแต่ละชั้น (Layer) มีความยาวไม่เท่ากันดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ลวดอะลูมิเนียมในแต่ละชั้น (Layer) ที่ประกอบเป็นสายตีเกลียว

ซึ่งจะเห็นว่าลวดอะลูมิเนียมสีแดงจะมีความยาวไม่เท่ากับสีน้ำเงิน

ความต้านทานกระแสตรง ($R_{dc,Tref}$) ของสายอะลูมิเนียมตีเกลียว ต้องใช้สมการที่ซับซ้อนในการคำนวณหรือได้จากการวัดที่อุณหภูมิ T_{ref} ส่วนในกรณีของสาย ACSR นั้น เนื่องจากแกนเหล็กจะมีค่าความนำจำเพาะเพียง 8% IACS ดังนั้นความต้านทานกระแสตรงของสาย ACSR จึงมีค่าเพิ่มขึ้นเพียง 1-2% เท่านั้น

ความต้านทานกระแสตรงของตัวนำที่อุณหภูมิ T_{REF} = 20 °C มักระบุไว้เสมอในข้อกำหนดของตัวนำตามมาตรฐาน IEC เช่น ตัวนำ 645-A1/S1A-42/7 มี $R_{dc,20}$ = 45.9 $\mu\Omega$/m ส่วนตัวนำที่ใช้มาตรฐานของประเทศสหรัฐอเมริกาก็จะระบุความต้านทานกระแสตรงของตัวนำที่อุณหภูมิ T_{REF} = 25 °C เช่น ตัวนำ Bittern มี $R_{dc,25}$ = 45.3 $\mu\Omega$/m

2.2.1.3 ผลของอุณหภูมิ ความต้านทานกระแสตรงของสายอะลูมิเนียมเปลือยตีเกลียวที่อุณหภูมิ T_C สามารถหาได้จากสมการ

$$R_{dc,Tc} = R_{dc,Tref} \cdot \left[1 + \alpha_{ref}\left(T_C - T_{ref}\right) + \xi_{ref}\left(T_C - T_{ref}\right)^2\right] \quad [\Omega] \tag{2.3}$$

เมื่อ α_{ref} คือ สัมประสิทธิ์ความต้านทานตามอุณหภูมิลำดับที่ 1 (1st thermal coefficient of resistance) ที่อุณหภูมิ T_{ref} [1/K] ดังที่แสดงในตารางที่ 2.5 [Fink, 1987]

ξ_{ref} คือ สัมประสิทธิ์ความต้านทานตามอุณหภูมิลำดับที่ 2 (2nd thermal coefficient of resistance) ที่อุณหภูมิ T_{ref} [1/K^2] ซึ่งมักไม่คำนึงถึง

ตารางที่ 2.5 สัมประสิทธิ์ความต้านทานตามอุณหภูมิลำดับที่ 1 ของอะลูมิเนียมและทองแดง

	% IACS	Temperature coefficient of resistance, α_{ref} [1/ °C] at the temperature [°C]						Zero resistance Temperature.[°C]
		0	15	20	25	30	50	
Aluminium (Al)	55	0.00392	0.00370	0.00363	0.00357	0.00351	0.00328	255.2
	56	0.00400	0.00377	0.00370	0.00363	0.00357	0.00333	250.3
	57	0.00407	0.00384	0.00377	0.00370	0.00363	0.00338	245.6
	58	0.00415	0.00391	0.00383	0.00376	0.00369	0.00344	241.0
	59	0.00423	0.00398	0.00390	0.00382	0.00375	0.00349	236.6
	60	0.00431	0.00404	0.00396	0.00389	0.00381	0.00354	232.3
	60.6	0.00435	0.00409	0.00400	0.00393	0.00385	0.00357	229.8
	60.97	0.00438	0.00411	0.00403	0.00395	0.00387	0.00359	228.3
	61	0.00438	0.00411	0.00403	0.00395	0.00387	0.00360	228.1
	61.2	0.00440	0.00412	0.00404	0.00396	0.00388	0.00360	227.3
	61.3	0.00441	0.00413	0.00405	0.00397	0.00389	0.00361	226.9
	61.4	0.00441	0.00414	0.00406	0.00398	0.00390	0.00362	226.5
	61.5	0.00442	0.00415	0.00406	0.00398	0.00390	0.00362	226.1
	61.8	0.00445	0.00417	0.00408	0.00400	0.00392	0.00364	224.9
	62.0	0.00460	0.00418	0.00410	0.00401	0.00393	0.00365	224.1
	63	0.00454	0.00425	0.00416	0.00408	0.00400	0.00370	220.3
	64	0.00462	0.00432	0.00423	0.00414	0.00406	0.00375	216.5
	65	0.00470	0.00439	0.00429	0.00420	0.00412	0.00380	212.9
Copper (Cu)	95	0.00403	0.00380	0.00373	0.00367	0.00360	0.00336	247.8
	96	0.00408	0.00385	0.00377	0.00370	0.00364	0.00339	245.1
	97	0.00413	0.00389	0.00381	0.00374	0.00367	0.00342	242.3
	97.5	0.00415	0.00391	0.00383	0.00376	0.00369	0.00344	241.0
	98	0.00417	0.00393	0.00385	0.00378	0.00371	0.00345	239.6
	99	0.00422	0.00397	0.00389	0.00382	0.00374	0.00348	237.0
	100	0.00427	0.00401	0.00398	0.00385	0.00378	0.00352	234.5
	101	0.00431	0.00405	0.00397	0.00389	0.00382	0.00355	231.9
	102	0.00436	0.00409	0.00401	0.00393	0.00385	0.00358	229.5

จากตารางจะเห็นว่า α_{ref} มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น เช่น อะลูมิเนียม 61 % IACS มีค่า α_{ref} เท่ากับ 0.00403 ที่อุณหภูมิ 20 °C แต่ลดลงเหลือ 0.00360 ที่อุณหภูมิ 50 °C หรือลดลงไป 11%

โปรดสังเกตว่าสำหรับสาย ACSR นั้น ถ้าต้องการแก้ค่าผลของอุณหภูมิ ต้องแยกการแก้ค่าความต้านทานของลวดอะลูมิเนียมและลวดเหล็กออกจากกัน เพราะลวดเหล็กมีค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานตามอุณหภูมิที่ 20 °C ประมาณ 0.003 ต่างไปจากอะลูมิเนียม

2.2.1.4 ผลของความถี่ ความต้านทานกระแสสลับ (R_{AC}) ที่ความถี่ต่างๆ ของสายไฟฟ้าจะสูงกว่าความต้านทานกระแสตรง เนื่องจากผลของปรากฏการณ์ที่ผิวซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่กระแสไฟฟ้าไหลไม่สม่ำเสมอทั่วพื้นที่หน้าตัดของสายไฟ โดยกระแสมักจะไหลในบริเวณผิวของสายไฟมากกว่าที่บริเวณศูนย์กลางของสายไฟเนื่องจากผลของสนามแม่เหล็ก

ในกรณีของสาย ACSR นั้น ความต้านทานกระแสตรงของสายไฟ ยังขึ้นกับขนาดของกระแสที่ไหลผ่านสายไฟด้วย เพราะขนาดของกระแสทำให้ Magnetization ในลวดเหล็กเปลี่ยนไป

ความต้านทานกระแสสลับที่ความถี่ต่างๆ ซึ่งนำมาจากตารางที่ 4-30 ของเอกสาร [Fink, 1987] ได้แสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ความต้านทานกระแสตรงและกระแสสลับของสาย ACSR ที่ใช้ในสหรัฐอเมริกา

พื้นที่หน้าตัดของ Al [kcmil]	GMR @ 60Hz [mm]	*R* @25 °C (กระแสต่ำ) [Ω/km]				*R* @50 °C (กระแส ~70%) [Ω/km]				Capacity @ 60Hz [A]
		DC	25Hz	50Hz	60Hz	DC	25Hz	50Hz	60Hz	
1590	15.8496	0.0365	0.0365	0.0367	0.0367	0.0401	0.0408	0.0419	0.0425	1380
1510.5	15.4534	0.0384	0.0385	0.0386	0.0386	0.0423	0.0429	0.0441	0.0447	1340
1431	15.0266	0.0405	0.0406	0.0407	0.0408	0.0446	0.0453	0.0465	0.0472	1300
1351	14.5999	0.0429	0.0430	0.0431	0.0432	0.0473	0.0479	0.0492	0.0499	1250
1272	14.1732	0.0456	0.0457	0.0458	0.0459	0.0502	0.0509	0.0522	0.0529	1200
1192.5	13.7160	0.0487	0.0487	0.0488	0.0490	0.0536	0.0542	0.0556	0.0563	1160
1113	13.2588	0.0521	0.0522	0.0523	0.0524	0.0574	0.0581	0.0595	0.0602	1110
1033.5	12.8016	0.0561	0.0561	0.0564	0.0565	0.0618	0.0624	0.0637	0.0643	1060
954	12.2834	0.0608	0.0608	0.0610	0.0610	0.0670	0.0676	0.0695	0.0701	1010
900	11.9177	0.0646	0.0646	0.0646	0.0065	0.0711	0.0718	0.0730	0.0736	970
874.5	11.7653	0.0665	0.0665	0.0665	0.0671	0.0732	0.0738	0.0757	0.0763	950
795	11.2166	0.0727	0.0733	0.0733	0.0739	0.0800	0.0813	0.0844	0.0856	900
795	11.4300	0.0727	0.0727	0.0727	0.0727	0.0800	0.0800	0.0800	0.0800	900
795	11.9786	0.0727	0.0727	0.0727	0.0727	0.0800	0.0800	0.0800	0.0800	910
715.5	10.6375	0.0814	0.0814	0.0820	0.0820	0.0896	0.0902	0.0915	0.0921	830
715.5	10.8204	0.0814	0.0814	0.0814	0.0814	0.0896	0.0896	0.0896	0.0896	840
715.5	11.3386	0.0814	0.0814	0.0814	0.0814	0.0896	0.0896	0.0896	0.0896	840
666.6	10.2718	0.0870	0.0870	0.0876	0.0876	0.0958	0.0976	0.0989	0.0995	800
636	10.0279	0.0913	0.0913	0.0920	0.0920	0.1005	0.1018	0.1043	0.1049	770
636	10.2108	0.0913	0.0913	0.0913	0.0913	0.1005	0.1005	0.1005	0.1005	780
636	10.6985	0.0913	0.0913	0.0913	0.0913	0.1005	0.1005	00.1005	00.1005	780
605	9.7841	0.0957	0.0963	0.0963	0.0963	0.1053	0.1066	0.1091	0.1103	750
605	9.9670	0.0957	0.0957	0.0957	0.0957	0.1056	0.1069	0.1069	0.1069	760
556.5	9.5402	0.1044	0.1044	0.1044	0.1044	0.1149	0.1155	0.1155	0.1155	730
556.5	9.9974	0.1044	0.1044	0.1044	0.1044	0.1149	0.1155	0.1155	0.1155	730
500	9.4793	0.1162	0.1162	0.1162	0.1162	0.1280	0.1280	0.1280	0.1280	690
477	8.8392	0.1218	0.1218	0.1218	0.1218	0.1342	0.1342	0.1342	0.1342	670
477	9.2659	0.1218	0.1218	0.1218	0.1218	0.1342	0.1342	0.1342	0.1342	670
397.5	8.0772	0.1460	0.1460	0.1460	0.1460	0.1609	0.1609	0.1609	0.1609	590
397.5	8.4734	0.1460	0.1460	0.1460	0.1460	0.1609	0.1609	0.1609	0.1609	600
336.4	7.4371	0.1727	0.1727	0.1727	0.1727	0.1901	0.1901	0.1901	0.1901	530
336.4	7.7724	0.1727	0.1727	0.1727	0.1727	0.1901	0.1901	0.1901	0.1901	530
300	7.0104	0.1932	0.1932	0.1932	0.1932	0.2125	0.2125	0.2125	0.2125	490

300	7.3457	0.1932	0.1932	0.1932	0.1932	0.2125	0.2125	0.2125	0.2125	500
266.8	6.6142	0.2175	0.2175	0.2175	0.2175	0.2392	0.2392	0.2392	0.2392	460

เมื่อพิจารณาแล้วจะเห็นว่าความต้านทานกระแสสลับที่ 50 Hz และ 60 Hz จะแตกต่างกันในกรณีที่สายไฟฟ้ามีพื้นที่หน้าตัดโตเท่านั้น โดยมีความแตกต่างกันน้อยกว่า 2% ในขณะที่ผลของอุณหภูมิจะมีค่ามากกว่า คือ ความต้านทานกระแสสลับ 50 Hz ของสายไฟที่อุณหภูมิ 25 °C กับ 50 °C มีค่าความแตกต่างกันถึง 13%

ดังนั้นการใช้ค่าความต้านทานกระแสสลับ 60 Hz ในการคำนวณต่างๆ เมื่อความถี่ของระบบที่เป็น 50 Hz จึงมีความผิดพลาดไม่มากนัก

2.2.2 ความเหนี่ยวนำของตัวนำ

ความเหนี่ยวนำของสายอะลูมิเนียมเปลือยตีเกลียวจะแสดงด้วยรีแอกแตนซ์เหนี่ยวนำเสมอ โดยรีแอกแตนซ์เหนี่ยวนำลำดับบวก (positive sequence inductive reactance, X_L) ในระบบส่ง 3 เฟส ขึ้นกับคุณสมบัติของสายไฟและลักษณะการจัดสายไฟแต่ละเฟส โดยปกติจะแยกออกเป็น 2 ส่วน คือ

2.2.2.1 รีแอกแตนซ์เหนี่ยวนำ “ถึง 1 เมตร” (inductive reactance “to one meter”)

เป็นรีแอกแตนซ์ของสายไฟเอง, X_a ที่มักเรียกว่า reactance to one meter ซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสายไฟ หาได้จากสมการ

$$\begin{aligned} X_a &= 2.895\cdot 10^{-6}\cdot f\cdot \log\left(\frac{1}{\text{GMR}}\right) \quad \left[\frac{\Omega}{\text{m}}\right] \\ &= 2.895\cdot 10^{-3}\cdot f\cdot \log\left(\frac{1}{\text{GMR}}\right) \quad \left[\frac{\Omega}{\text{km}}\right] \end{aligned} \tag{2.4}$$

โดยที่ค่า GMR (Geometric Mean Raduis) [m] เป็นค่าประจำตัวของสายไฟฟ้า ดังที่แสดงในตารางที่ 2.1 และ 2.2 ซึ่งนำมาจาก [EPRI, 2006] [EPRI, 1987] แต่แปลงค่าให้เป็น SI ยกเว้นขนาดพื้นที่หน้าตัดของสายไฟที่ยังใช้ [kcmil]

โปรดสังเกตว่า ค่า GMR ในตารางเป็นค่าที่ความถี่ 60 Hz แต่การนำค่านี้ไปใช้กับความถี่ 50 Hz ก็ให้ผลการคำนวณที่มีความผิดพลาดไม่มากเพราะค่า $\log\left(\frac{1}{\text{GMR}}\right)$ เปลี่ยนแปลงน้อย เมื่อเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของค่า GMR เอง นอกจากนั้นจากตารางของสาย ACSR จะพบว่า GMR มีค่าประมาณ 80% ของรัศมีของสายไฟฟ้า ส่วนของสาย AAC จะพบว่า GMR มีค่าประมาณ 75% ของรัศมีของสายไฟฟ้า

ตัวอย่างที่ 2.3 จงหาค่า X_a ของสายไฟ Bittern ในตารางที่ 2.1

จากตารางจะพบว่า GMR ของสาย Bittern มีค่า 13.5636 mm ดังนั้น

$$X_a = 2.895\cdot 10^{-3}\cdot f\cdot \log\left(\frac{1}{\text{GMR}}\right) = 2.895\cdot 10^{-3}\cdot 50\cdot \log\left(\frac{1}{13.5636/1000}\right) = 0.2703 \quad [\Omega/\text{km}]$$

หากใช้ GMR เท่ากับ 80% ของรัศมีสายไฟฟ้า Bittern

$$X_a = 2.895\cdot 10^{-3}\cdot f\cdot \log\left(\frac{1}{0.8\cdot r}\right) = 2.895\cdot 10^{-3}\cdot 50\cdot \log\left(\frac{1}{0.8\cdot((34.2/2)/1000)}\right) = 0.2698 \quad [\Omega/\text{km}]$$

ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนเพียง 0.2% เท่านั้น

2.2.2.2 รีแอกแตนซ์เหนี่ยวนำเนื่องจากระยะห่างระหว่างสายเฟส

รีแอกแตนซ์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากระยะห่างระหว่างสายเฟส X_d หาได้จากสมการ

$$\begin{aligned} X_d &= 2.895 \cdot 10^{-6} \cdot f \cdot \log(\mathrm{GMD}) \quad [\Omega/\mathrm{m}] \\ &= 2.895 \cdot 10^{-3} \cdot f \cdot \log(\mathrm{GMD}) \quad [\Omega/\mathrm{km}] \end{aligned} \tag{2.5}$$

ค่า GMD (geometric mean distance) [m] ขึ้นกับระยะห่างระหว่างเฟส โดยในระบบ 3 เฟสนั้น การจัดสายเฟสของสายส่งไฟฟ้ามีหลายรูปแบบ แต่ที่นิยมใช้กันมีอยู่ 3 รูปแบบดังแสดงในรูปที่ 2.9 โดยที่ GMD หาได้จากสมการ

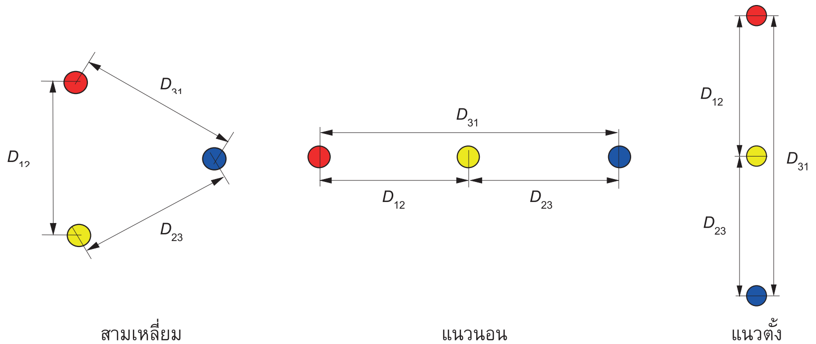
$$\mathrm{GMD} = \sqrt[3]{D_{12} \cdot D_{23} \cdot D_{31}} \tag{2.6}$$

ในกรณีที่สายเฟสเป็นสายแบบควบที่วางแบบสมมาตรดังแสดงในรูปที่ 2.10 (ค่า s [m]) โดยที่ค่า GMR ของสายควบสามารถหาได้จากสมการ

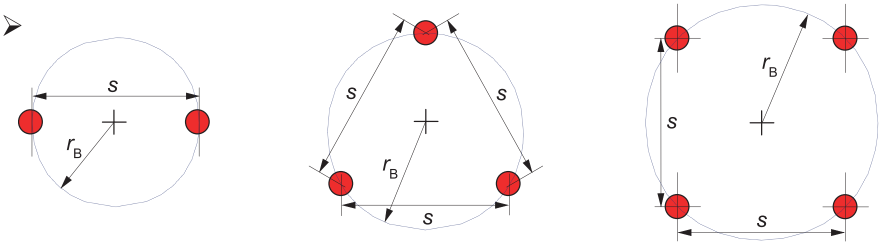
$$\mathrm{GMR_B} = \sqrt[n]{n \cdot \mathrm{GMR} \cdot r_\mathrm{B}^{(n-1)}} \tag{2.7}$$

เมื่อ n = จำนวนตัวนำในสายควบ

r_B = รัศมีของสายควบซึ่งหาได้จากสมการ $r_\mathrm{B} = \dfrac{s}{2 \cdot \sin\left(\dfrac{\pi}{n}\right)} \quad (n > 1)$



รูปที่ 2.9 การจัดวางสายเฟสในระบบ 3 เฟส



รูปที่ 2.10 รัศมีของสายเฟสแบบสายควบ

ตัวอย่างที่ 2.4 สายส่ง 500 kV ระบบหนึ่งใช้สาย ACSR แบบ Bittern โดยที่สายไฟแต่ละเฟสเป็นสายควบ 4 เส้น ตัวนำแต่ละเส้นวางห่างกัน 18" (457 mm) สายเฟสวางในแนวนอน โดยมีระยะห่างระหว่างสายเฟสเท่ากับ 10 m จงหาค่ารีแอกแตนซ์เหนี่ยวนำลำดับบวกของสายส่ง

r_B ของ Bundle มีค่าเท่ากับ

$$r_B = \frac{s}{2\cdot\sin\left(\frac{\pi}{n}\right)} = \frac{0.457}{2\cdot\sin\left(\frac{\pi}{4}\right)} = 0.323 \quad [\text{m}]$$

GMR_B และ X_a จึงมีค่าเท่ากับ

$$GMR_B = \sqrt[n]{n\cdot GMR\cdot r_B^{(n-1)}} = \sqrt[4]{4\cdot\left(\frac{13.5636}{1000}\right)\cdot 0.323^3} = 0.2068 \quad [\text{m}]$$

$$X_a = 2.895\cdot10^{-3}\cdot f\cdot\log\left(\frac{1}{GMR_B}\right) = 2.895\cdot10^{-3}\cdot50\cdot\log\left(\frac{1}{0.2068}\right) = 0.0991 \quad \left[\frac{\Omega}{\text{km}}\right]$$

ส่วนค่า GMD และ X_d มีค่าเท่ากับ

$$GMD = \sqrt[3]{D_{12}\cdot D_{23}\cdot D_{31}} = \sqrt[3]{10\cdot10\cdot20} = 12.5992 \quad [\text{m}]$$

$$X_d = 2.895\cdot10^{-3}\cdot f\cdot\log(GMD) = 2.895\cdot10^{-3}\cdot50\cdot\log(12.5992) = 0.1593 \quad \left[\frac{\Omega}{\text{km}}\right]$$

ค่ารีแอกแตนซ์เหนี่ยวนำลำดับบวกของสายส่งจึงมีค่าเท่ากับ

$$X_L = X_a + X_d = 0.0991 + 0.1593 = 0.2584 \quad \left[\frac{\Omega}{\text{km}}\right]$$

ตารางที่ 2.7 แสดงผลของการใช้สาย ACSR แบบควบที่มีต่อค่ารีแอกแตนซ์เหนี่ยวนำลำดับบวก เมื่อกำหนดให้ระยะระหว่างเฟสเท่ากับ 14 m (X_d มีค่าคงที่เท่ากับ 0.1659 Ω/km)

ตารางที่ 2.7 ผลของการใช้สายควบที่มีต่อค่ารีแอกแตนซ์เหนี่ยวนำลำดับบวกเมื่อใช้ตัวนำประเภทต่างๆ

No. of conduc-tor	Name	Cross section area of Al [kcmil]	GMR @ 60Hz [mm]	Distance between conductor, S [m]	Bundle radius, r_B [m]	GMR_B [m]	X @ 50Hz [Ω/km]			X_L [pu]
							X_a	X_d	X_L	
1	Joree	1×2515	18.928	-	-	0.0189	0.249	0.165	0.415	1.00
2	Pheasant	2×1272	14.203	0.4572	0.2286	0.0806	0.158	0.165	0.324	0.78
3	Crane	3×875	11.795	0.4572	0.2640	0.1351	0.125	0.165	0.291	0.70
4	Grosbeak	4×636	10.210	0.4572	0.3233	0.1927	0.103	0.165	0.269	0.65
1	Bittern	1×1272	13.563	-	-	0.0136	0.270	0.165	0.436	1.05
2	Bittern	2×1272	13.563	0.4572	0.2286	0.0787	0.159	0.165	0.325	0.78
3	Bittern	3×1272	13.563	0.4572	0.2640	0.1415	0.122	0.165	0.288	0.70
4	Bittern	4×1272	13.563	0.4572	0.3233	0.2069	0.099	0.165	0.264	0.64

2.2.3 ความจุไฟฟ้าของตัวนำ

ความจุไฟฟ้าของสายอลูมิเนียมเปลือยตีเกลียวจะแสดงด้วยรีแอกแตนซ์ความจุไฟฟ้าเสมอ โดยรีแอกแตนซ์ความจุไฟฟ้าลำดับบวก (Positive sequence capacitive reactance): X_C ในระบบส่ง 3 เฟส ขึ้นกับรัศมีของสายไฟฟ้าและระยะห่างระหว่างสายไฟฟ้า โดยปกติจะแยกออกเป็น 2 ส่วน คือ

2.2.3.1 รีแอกแตนซ์ความจุไฟฟ้า “ถึง 1 เมตร” (capactive reactance “to one meter”)

เป็นรีแอกแตนซ์ของสายไฟเอง: X_a' ที่มักเรียกว่า reactance to one meter ซึ่งขึ้นอยู่กับรัศมีของสายไฟฟ้า หาได้จากสมการ

$$\begin{aligned} X_a' &= \frac{6.588 \cdot 10^9}{f} \cdot \log\left(\frac{1}{r}\right) \quad [\Omega \cdot \mathrm{m}] \\ &= \frac{6.588}{f} \cdot \log\left(\frac{1}{r}\right) \quad [\mathrm{M}\Omega \cdot \mathrm{km}] \end{aligned} \tag{2.8}$$

ตัวอย่างที่ 2.5 จงหาค่า X_a' ของสายไฟ Bittern ในตารางที่ 2.1

จากตารางจะพบว่า ∅ ของสาย Bittern มีค่า 34.2 mm ดังนั้น

$$X_a' = \frac{6.588}{f} \cdot \log\left(\frac{1}{r}\right) = \frac{6.588}{50} \cdot \log\left(\frac{1}{(34.2/2)/1000}\right) = 0.2328 \quad [\mathrm{M}\Omega \cdot \mathrm{km}]$$

2.2.3.2 รีแอกแตนซ์ความจุไฟฟ้าเนื่องจากระยะห่างระหว่างสายเฟส

รีแอกแตนซ์ที่เกิดจากระยะห่างระหว่างสายเฟส X_d' หาได้จากสมการ

$$\begin{aligned} X_d' &= \frac{6.588 \cdot 10^9}{f} \cdot \log(\mathrm{GMD}) \quad [\Omega \cdot \mathrm{m}] \\ &= \frac{6.588}{f} \cdot \log(\mathrm{GMD}) \quad [\mathrm{M}\Omega \cdot \mathrm{km}] \end{aligned} \tag{2.9}$$

GMD เป็นค่าเดียวกันกับในกรณีที่ต้องการหาค่ารีแอกแตนซ์เหนี่ยวนำลำดับบวก แต่ในกรณีที่สายเฟสเป็นสายควบ เราต้องหาค่า r_{eq} ของสายควบจากสมการ

$$r_{eq} = \sqrt[n]{n \cdot r \cdot r_b^{(n-1)}} \tag{2.10}$$

เมื่อ n = จำนวนสายไฟในสายควบ

r = รัศมีของสายไฟฟ้า

r_B = รัศมีของสายควบดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

ตัวอย่างที่ 2.6 สายส่ง 500 kV ระบบหนึ่ง ใช้สาย ACSR แบบ Bittern โดยที่สายไฟแต่ละเฟสเป็นสายควบ 4 เส้น ตัวนำแต่ละเส้นวางห่างกัน 18” (457 mm) สายเฟสวางในแนวนอน โดยมีระยะห่างระหว่างสายเฟสเท่ากับ 10 m จงหาค่ารีแอกแตนซ์ความจุไฟฟ้าลำดับบวกของสายส่ง

r_B ของ Bundle มีค่าเท่ากับ

$$r_B = \frac{s}{2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{n}\right)} = \frac{0.457}{2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{4}\right)} = 0.323 \quad [\mathrm{m}]$$

r_{eq} ของ Bundle จึงมีค่าเท่ากับ

$$r_{eq} = \sqrt[n]{n \cdot r \cdot r_b^{(n-1)}} = \sqrt[4]{4 \cdot \left(\frac{34.2/2}{1000}\right) \cdot 0.323^3} = 0.2193 \quad [\mathrm{m}]$$

X_a' จึงมีค่าเท่ากับ

$$X_a' = \frac{6.588}{f} \cdot \log\left(\frac{1}{r_{eq}}\right) = \frac{6.588}{50} \cdot \log\left(\frac{1}{0.2193}\right) = 0.0868 \quad [\mathrm{M}\Omega \cdot \mathrm{km}]$$

ส่วนค่า GMD และ X_d' มีค่าเท่ากับ

$$\text{GMD} = \sqrt[3]{D_{12} \cdot D_{23} \cdot D_{31}} = \sqrt[3]{10 \cdot 10 \cdot 20} = 12.5992 \quad [\text{m}]$$

$$X_d' = \frac{6.588}{f} \cdot \log(\text{GMD}) = \frac{6.588}{50} \cdot \log(12.5992) = 0.1450 \quad [\text{M}\Omega \cdot \text{km}]$$

ค่ารีแอกแตนซ์เหนี่ยวนำลำดับบวกของสายส่งจึงมีค่าเท่ากับ

$$X_C = X_a' + X_d' = 0.0868 + 0.1450 = 0.2316 \quad [\text{M}\Omega \cdot \text{km}]$$

ตารางที่ 2.8 แสดงผลของการใช้สาย ACSR แบบควบที่มีต่อค่ารีแอกแตนซ์ความจุไฟฟ้าลำดับบวก เมื่อกำหนดให้ระยะระหว่างเฟสเท่ากับ 14 m (X_d' มีค่าคงที่เท่ากับ 0.1510 MΩ/km)

ตารางที่ 2.8 ผลของการใช้สายควบที่มีต่อค่ารีแอกแตนซ์ความจุไฟฟ้าดับบวกเมื่อใช้ตัวนำประเภทต่าง ๆ

No. of conductor	Name	Cross section area of Al [kcmil]	Conductor radius [mm]	Distance between conductor, S [m]	Bundle radius, r_B [m]	r_{eq} [m]	X @ 50Hz [MΩ·km]			X_C [pu]
							X_a'	X_d'	X_C	
1	Joree	1×2515	18.928	-	-	0.0189	0.2137	0.1510	0.3647	1.00
2	Pheasant	2×1272	14.203	0.4572	0.2286	0.0806	0.1381	0.1510	0.2891	0.79
3	Crane	3×875	11.795	0.4572	0.2640	0.1351	0.1105	0.1510	0.2615	0.72
4	Grosbeak	4×636	10.210	0.4572	0.3233	0.1927	0.0913	0.1510	0.2423	0.66
1	Bittern	1×1272	13.563	-	-	0.0171	0.2328	0.1510	0.3838	1.05
2	Bittern	2×1272	13.563	0.4572	0.2286	0.0884	0.1388	0.1510	0.2898	0.79
3	Bittern	3×1272	13.563	0.4572	0.2640	0.1529	0.1075	0.1510	0.2585	0.71
4	Bittern	4×1272	13.563	0.4572	0.3233	0.2193	0.0868	0.1510	0.2378	0.65

2.2.4 อิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์และลำดับลบ (Zero and negative sequence impedance)

ค่าความต้านทาน รีแอกแตนซ์เหนี่ยวนำ และรีแอกแตนซ์ความจุไฟฟ้า ที่กล่าวถึงในหัวข้อข้างต้นประกอบกันเป็นอิมพีแดนซ์ลำดับบวก ซึ่งเหมาะกับการศึกษาระบบไฟฟ้าในภาวะอยู่ตัว (Steady state) เมื่อระบบทำงานในภาวะสมดุล

ในกรณีที่ต้องการศึกษาระบบไฟฟ้าในภาวะไม่สมดุล เช่น มีการลัดวงจรเกิดขึ้นในระบบทำให้เกิดมีกระแสไหลในดิน ฯลฯ เราจำเป็นต้องทราบค่าอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์ และ ลำดับลบในการคำนวณ

สำหรับสายส่ง อิมพีแดนซ์ลำดับลบมีค่าเท่ากับอิมพีแดนซ์ลำดับบวก ส่วนอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์นั้นยุ่งยากในการคำนวณเพราะกระแสที่ไหลลงดินมีหลายทาง เช่น มีกระแสไหลลงดินผ่านทางสายดินขึงอากาศ (overhead ground wire) หรือไม่? ตำแหน่งของสายดินขึงอากาศเมื่อเทียบกับสายเฟส จำนวนของสายดินขึงอากาศ ความต้านทานจำเพาะของดินแต่ละพื้นที่ ๆ ไม่เท่ากัน ฯลฯ ตารางที่ 2.9 แสดงค่าทั่วไปของอิมพีแดนซ์ของสายส่ง ซึ่งนำมาจากตารางที่ 14-3 ของ [Fink, 1987]

ตารางที่ 2.9 ค่าทั่วไปของอิมพีแดนซ์ของสายส่งไฟฟ้า

$[kV_{LL,rms}]$	Positive sequence			Negative sequence			X_{L0}/X_{L1}
	R_1 [Ω]	X_{L1} [Ω/km]	X_{C1} [MΩ·km]	R_0 [Ω]	X_{L0} [Ω/km]	X_{C0} [MΩ·km]	
69	0.1740	0.4406	0.2671	0.4257	1.7029	0.5068	3.86
115	0.0740	0.4493	0.2719	0.3884	1.5227	0.4264	3.39
230	0.0622	0.4829	0.2928	0.3673	1.4046	0.4425	2.91
345	0.0373	0.3667	0.2220	0.3424	1.2368	0.3347	3.37
500	0.0174	0.3375	0.2043	0.2878	1.1809	0.3186	3.50
765	0.0118	0.3406	0.2060	0.2660	1.1001	0.2977	3.23

2.2.5 อิมพีแดนซ์ลักษณะเฉพาะ Z_c และ SIL

เมื่อไม่คำนึงถึงความต้านทาน R และความนำไฟฟ้า G ค่า Z_C จะสามารถหาได้จากสมการ

$$Z_C = \sqrt{X_L \cdot X_C} \quad [\Omega] \tag{2.11}$$

เมื่อ X_L และ X_C เป็นค่ารีแอกแตนซ์เหนี่ยวนำ [Ω/m] และค่ารีแอกแตนซ์ความจุไฟฟ้า [Ω·m] ตามลำดับ

โปรดสังเกตว่าในกรณีนี้ อิมพีแดนซ์ลักษณะเฉพาะจะเป็นจำนวนจริง (real number) และขึ้นอยู่กับลักษณะของระบบสายส่งกำลังไฟฟ้า เช่น ประเภทของตัวนำที่ใช้เป็นสายเฟส, จำนวนตัวนำในแต่ละเฟส, ระยะห่างระหว่างสายเฟส ฯลฯ โดยเมื่อใช้รีแอกแตนซ์ลำดับบวกในการคำนวณ สมการข้างต้นจะให้ค่าของอิมพีแดนซ์ลักษณะเฉพาะลำดับบวกเช่นกัน

เราจึงสามารถหากำลังไฟฟ้าสูงสุด SIL ที่สายส่งไฟฟ้าวงจรเดี่ยวที่ส่งได้ที่ระดับแรงดันค่าต่าง ๆ ของระบบ (สมการที่ 2.1) ดังตัวอย่างที่แสดงในตารางที่ 2.10 ที่แสดงค่า SIL ของสายส่งไฟฟ้าแบบต่าง ๆ ที่ระดับแรงดันเท่ากัน และตารางที่ 2.11 ที่แสดงค่า SIL ของสายส่งขนาดเดียวกันที่ระดับแรงดันต่างกัน

ตารางที่ 2.10 ค่า SIL ของสายส่งแบบต่าง ๆ ที่ระดับแรงดันเท่ากัน

No of conductor	Name	Cross section area of Al [kcmil]	Distance between conductor, S [m]	Bundle radius, r_B [m]	Z_c [Ω]	SIL [pu]
1	Joree	1×2515	-	-	389	1.00
2	Pheasant	2×1272	0.4572	0.2286	306	1.27
3	Crane	3×875	0.4572	0.2640	276	1.41
4	Grosbeak	4×636	0.4572	0.3233	255	1.52
1	Bittern	1×1272	-	-	409	0.95
2	Bittern	2×1272	0.4572	0.2286	307	1.27
3	Bittern	3×1272	0.4572	0.2640	273	1.42
4	Bittern	4×1272	0.4572	0.3233	251	1.55

ค่า SIL ในตารางที่ 2.10 แสดงให้เห็นถึงผลของการเลือกใช้ตัวนำและจำนวนตัวนำในแต่ละเฟส โดยพื้นที่หน้าตัดของสาย Joree 1 เส้น มีค่าโดยประมาณเท่ากับสายไฟ Pheasant 2 เส้น และเท่ากับสายไฟ Grosbeak 4 เส้น การใช้สายไฟ Joree เพียงเส้นเดียวจะสามารถส่งกำลังได้ 1 p.u. แต่ถ้าใช้สายไฟ Pheasant 2 เส้น จะส่งกำลังได้เพิ่มขึ้น 25% และถ้าใช้สายไฟ Grosbeak 4 เส้นจะส่งกำลังได้เพิ่มขึ้นถึง 50%

ตารางที่ 2.11 ค่า SIL ของสายส่ง Bittern ที่ระดับแรงดันต่างๆ

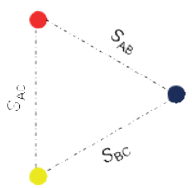
System voltage [$kV_{LL,rms}$]	No of conductor	Z_c [Ω]	SIL [MW]	SIL [pu]
230	2	307	172	0.82
	4	251	211	1.00
345	2	307	388	1.84
	4	251	474	2.25
500	2	307	814	3.86
	4	251	996	4.73

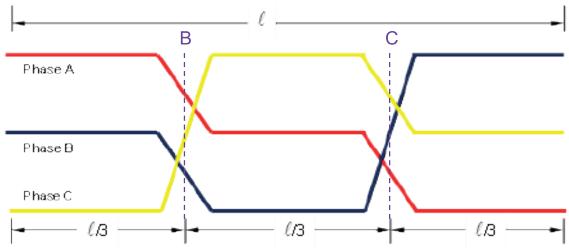
ค่า SIL ในตารางที่ 2.11 แสดงให้เห็นถึงผลของระดับแรงดันในการส่งกำลังไฟฟ้า โดยเมื่อใช้ตัวนำ Bittern 4 เส้นเท่ากัน กำลังไฟฟ้าที่ส่งได้ที่ระดับแรงดัน 345 kV และ 500 kV จะเพิ่มขึ้นเป็น 2.25 เท่า และ 4.73 เท่า เมื่อเทียบกับการส่งกำลังไฟฟ้าที่ระดับแรงดัน 230 kV

2.2.6 การสลับสายเฟส

การสลับสายเฟส (line transposition) จะช่วยแก้ปัญหาเรื่อง ค่า *L* และ *C* ของสายไฟฟ้าแต่ละเฟสไม่เท่ากัน (เช่น สายไฟฟ้าแต่ละเฟสอยู่สูงจากพื้นดินไม่เท่ากัน) ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมสายไฟฟ้าแต่ละเฟสไม่เท่ากันแม้ว่าจะจ่ายกระแสให้โหลดสามเฟสแบบสมดุล

ในทางปฏิบัติ เราจะทำการสลับเฟสสายไฟฟ้าในช่วง ℓ หนึ่งๆ 2 ครั้ง โดยสร้างเสาเหล็กแบบพิเศษขึ้นสองต้น ที่จุด B และ C ในรูปที่ 2.11 การสลับเฟสสายส่งอาจไม่จำเป็นต้องทำทุกๆ ช่วงสาย เพราะถ้าเป็นสายช่วงสั้นๆ แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมสายไฟฟ้าจะแตกต่างกันน้อยมาก





รูปที่ 2.11 การสลับสายเฟส

2.3 จำนวนและประเภทของลูกถ้วยแขวนในพวงลูกถ้วย

แรงดันเกินในระบบไฟฟ้าประกอบไปด้วย แรงดันเกินชั่วครู่ TOV, แรงดันเกินอิมพัลส์สวิตชิง SOV และแรงดันเกินอิมพัลส์ฟ้าผ่า LOV โดยเราต้องเลือกความคงทนแรงดันของอุปกรณ์ไฟฟ้าและระยะห่างในอากาศของระบบไฟฟ้าให้สูงกว่าแรงดันเกินดังกล่าวเพื่อให้ระบบทำงานได้อย่างถูกต้อง วิธีการที่ทำได้มีอยู่ 2 แนวทางคือ

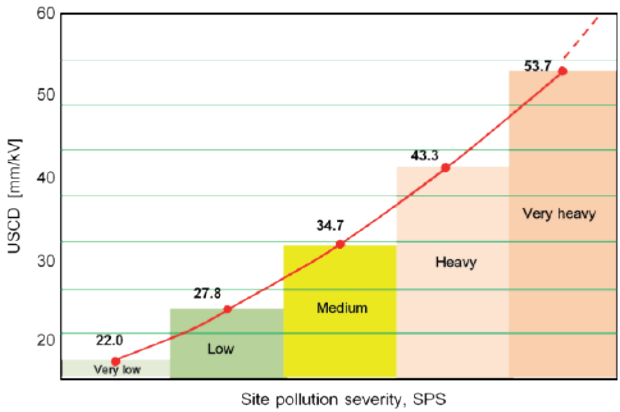
1. เลือกความคงทนแรงดันของอุปกรณ์ไฟฟ้าสูงที่สุดตามที่ [IEC60071-1, 2018] กำหนด ซึ่งการไฟฟ้าส่วนใหญ่จะใช้วิธีนี้เพราะไม่ซับซ้อน หรือ
2. หาแรงดันเกินต่างๆ แล้วเลือกความคงทนแรงดันของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่เหมาะสมตามที่ [IEC60071-1, 2018] มีให้เลือก

ในหัวข้อนี้เราจะพิจารณาถึงพารามิเตอร์ของสายส่งไฟฟ้าที่ประกอบไปด้วยความยาวของพวงลูกถ้วยและระยะห่างในอากาศ เพื่อให้สายส่งไฟฟ้าทนแรงดันเกินด้วยวิธีที่ 1 เท่านั้น

2.3.1 ความทนแรงดันกระแสสลับระหว่างเฟสกับกราวน์ $U_{w\text{-}AC,p\text{-}e}$

ความทนแรงดันกระแสสลับ (short duration withstand voltage, SDWV) เป็นค่าแรงดันทดสอบที่ป้อนให้อุปกรณ์ไฟฟ้าเพื่อให้เรามั่นใจว่าอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ติดตั้งในระบบไฟฟ้าสามารถทน TOV ได้โดยไม่เกิดความเสียหาย แต่ก็ใช้สำหรับอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าเท่านั้น ไม่ใช้กับพวงลูกถ้วยที่ใช้ในสายส่งไฟฟ้า

แต่เนื่องจากพวงลูกถ้วยที่ติดตั้งในพื้นที่ต่างๆ อาจได้รับมลภาวะมาเกาะที่ผิวทำให้ความทนแรงดันกระแสสลับลดลง ดังนั้น [IEC/TS60815-2, 2008] และ [IEC/TS60815-3, 2008] จึงแนะนำให้ฉนวนมี ระยะรั่วจำเพาะอ้างอิง (reference unified specific creepage distance, RUSCD) ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง SPS กับ USCD

จุดสีแดงในรูปคือ RUSCD ต่ำสุดสำหรับ ระดับมลภาวะในพื้นที่ (site pollution severity, SPS) แต่ละระดับ โดยหากในพื้นที่ใดมี SPS ค่อนไปทางสูงขึ้นหรือทราบค่า SPS ก็สามารถให้ใช้ค่าตามเส้นกราฟได้ และโปรดสังเกตว่าค่า RUSCD ตาม [IEC/TS60815-1, 2018] เป็นระยะรั่ว ℓ_{leak} ต่อแรงดันที่ตกคร่อมฉนวน [kV_{rms}] ไม่ใช่ค่าแรงดันสูงสุดของอุปกรณ์ U_m เหมือนใน [IEC60815, 1986] RUSCD จึงมีค่าเป็น √3 เท่าของค่าที่ระบุใน [IEC60815, 1986]

ดังนั้น ℓ_{leak} สำหรับระดับความรุนแรงของมลภาวะที่การไฟฟ้ามักใช้กันที่ระดับมลภาวะปานกลางและน้อย คือ 20 kV/mm และ 16 kV/mm จึงมีค่า RUSCD เท่ากับ 34.7 kV/mm และ 27.8 kV/mm ตามลำดับ จำนวนลูกถ้วย 52-8-H ตาม [ANSI/NEMA c29.2B, 2013] -ระยะรั่วของลูกถ้วยเท่ากับ 279 mm- ที่ต้องใช้ในพวงลูกถ้วยจึงสามารถหาได้จากตารางที่ 2.12

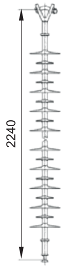
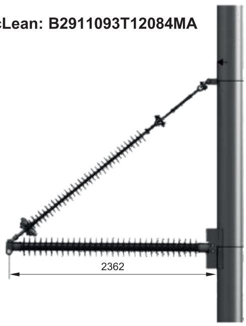
ตารางที่ 2.12 จำนวนลูกถ้วย 52-8 (254×146 mm -ℓ_{leak} = 279 mm) ในพวงลูกถ้วยที่ต้องใช้ในระดับมลภาวะต่างๆ

SPS	RUSCD [kV/mm]	ℓ_{leak} [mm]	Number of insulator
Very low	22.0	3112	11
Low	27.8	3932	14
Medium	34.7	4908	18
High	43.3	6125	22
Very high	53.7	7596	27

จากตารางที่ 2.12 เราจะเห็นว่าการที่การไฟฟ้าใช้ลูกถ้วย 52-8 (254×146 mm -ℓ_{leak} = 279 mm) จำนวน 14 ลูก สำหรับพวงลูกถ้วยที่ใช้ในระบบ 230 kV นั้น เหมาะสมแล้วสำหรับบริเวณที่มี SPS น้อย แต่อาจไม่เพียงพอหากบริเวณนั้นมี SPS ปานกลาง วิธีแก้ไขคือใช้ลูกถ้วยแขวนที่มีรูปร่างอื่นเช่น ลูกถ้วยไฟฟ้าแบบทนหมอก (fog type insulator) ซึ่งมีระยะรั่วของลูกถ้วยสูงขึ้น เช่น

1. ใช้ลูกถ้วยแขวนแบบ CA-825MC (254×146 mm -ℓ_{leak} = 432 mm) ผลิตภัณฑ์ NGK [NGK, 19xx] ที่มีระยะรั่วของลูกถ้วยเท่ากับ 432 mm ซึ่งจะทำให้การไฟฟ้าสามารถใช้ลูกถ้วยเพียง 14 ลูก (14×432 = 6048 mm) ในบริเวณที่มี SPS สูงได้ หรือ
2. ใช้ ลูกถ้วยแท่งยาวแบบคอมโพสิต (composite long rod insulator) ที่เป็นไปตามข้อกำหนดของ [ANSI/NEMA C29.12, 2013] Class 60-8 ยกตัวอย่างเช่น ลูกถ้วยแบบ CS25YB088U-B ผลิตภัณฑ์ Nanjing [Nanjing, 2020] หรือลูกถ้วยแบบ B2911093T12084MA ผลิตภัณฑ์ MacLean [MacLean, 2020] ที่มีข้อกำหนดดังแสดงในตารางที่ 2.13 ซึ่งจะเห็นว่ามีระยะรั่วมากพอที่จะใช้ในบริเวณที่มี SPS ระดับปานกลางได้และมีความทนแรงดันกระแสสลับสูงกว่า 600 kV ซึ่งมากกว่า 460 kV ตามที่ IEC กำหนดมาก

ตารางที่ 2.13 ข้อกำหนดของลูกถ้วยแบบคอมโพสิตที่เป็นไปตาม ANSI Class 60-8 ของผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ

Model	Type	ℓ_{leak} [mm]	ℓ_{ins} [mm]	AC wet flashover voltage [kV]	+CFO/-CFO [kV]
Nanjing: CS25YB088U-B 	Vertical	5715	2240	620	1185/1190
MacLean: B2911093T12084MA 	Braced post	5654	2362	651	1256/1283

อย่างไรก็ตาม การจัดวางลูกถ้วยเพื่อรับสายส่งไฟฟ้าจะมีลักษณะแตกต่างกัน ลูกถ้วยแบบ CS25YB088U-B จะใช้ในแนวตั้งเหมือนพวงลูกถ้วยแขวนพอร์ซเลนทั่วไป ทำให้ต้องมีแขนเสาไฟฟ้าแบบเหล็กถักเพื่อป้องกันการวาบไฟระหว่างสายเฟสกับเสาไฟฟ้า ในขณะที่ลูกถ้วยแบบ B2911093T12084MA จะใช้ในแนวนอนจึงทำหน้าที่เป็นแขนเสาไฟฟ้าและป้องกันการวาบไฟระหว่างสายเฟสกับเสาไฟฟ้าไปในตัว ทำให้ความสูงของเสาส่งไฟฟ้าลดลงซึ่งจะกล่าวถึงต่อไป

2.3.2 ความทนแรงดันอิมพัลส์สวิตชิง

เมื่อมีการปิด-เปิดเซอร์กิตเบรกเกอร์เพื่อจ่ายไฟให้กับสายส่งไฟฟ้าจะเกิดการถ่ายโอนพลังงานระหว่างตัวเหนี่ยวนำกับตัวเก็บประจุไฟฟ้าของแหล่งจ่ายและสายส่งไฟฟ้า ทำให้อาจเกิดการแกว่งตัวของแรงดันเกิดเป็นแรงดันเกินซึ่งมีความถี่เท่ากับความถี่ธรรมชาติซึ่งขึ้นกับค่าความเหนี่ยวนำและค่าความจุไฟฟ้า แต่อย่างไรก็ตามตัวต้านทานในระบบไฟฟ้าจะช่วยลดขนาดของแรงดันเกินจนกลับสู่ระดับแรงดันปกติภายในระยะเวลา ms

เนื่องจากแรงดันเกินนี้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเราจึงมักเรียกว่า แรงดันเกินอิมพัลส์สวิตชิง, SOV ซึ่งจะสร้างความเครียดให้กับฉนวนต่าง ๆ ในระบบไฟฟ้า ดังนั้นในการออกแบบเสาส่งไฟฟ้าจึงควรมีการศึกษาระดับของ SOV ที่เกิดขึ้น เพื่อให้มั่นใจว่าระบบส่งสามารถทน SOV ได้หรือมีอัตราการเกิดความผิดพร่องเนื่องจาก SOV อยู่ในระดับที่ยอมรับได้

คนทั่วไปมักเข้าใจผิดว่า หากระดับแรงดันของระบบไฟฟ้ามีค่าต่ำกว่า 300 kV แล้ว เราไม่ต้องคำนึงถึงแรงดันเกินสวิตชิง -อาจเนื่องมาจาก [IEC60071-1, 2018] ไม่ได้กำหนดให้ทดสอบ ความทนแรงดันอิมพัลส์สวิตชิง (switching impulse insulation level, SIL หรือ basic switching impulse insulation level BSL) หากพิกัดสูงสุดของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงมีค่าต่ากว่า 300 kV (ตารางที่ 1 ในมาตรฐาน)- ซึ่งเป็นความเข้าใจที่คลาดเคลื่อน ทั้งนี้เพราะแรงดันเกินสวิตชิงเกิดขึ้นได้ในทุกระดับแรงดันไฟฟ้า ดังนั้นมาตรฐานอุปกรณ์บางประเภท เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า [IEC60076-3, 2013] จึงมีการทดสอบ BSL สำหรับหม้อแปลงที่ใช้ในระบบไฟฟ้าที่ระดับแรงดันต่ำกว่า 300 kV ในหัวข้อ *การทดสอบพิเศษ* (special test)

2.3.2.1 ความยาวของพวงลูกถ้วย $\ell_{\text{ins-SI,p-e}}$

แรงดันเกินอิมพัลส์สวิตชิงที่อากาศระหว่าง ช่องว่างแท่ง-ระนาบ (rod-plane gap) ทนได้ 50%, $U_{\text{50-SI,p-e}}$ สามารถหาได้จาก -เป็นที่ทราบกันดีว่าแรงดันดังกล่าวหมายถึงแรงดันอิมพัลส์สวิตชิงขั้วบวกที่อากาศทนได้ในภาวะเปียก (ตัวประกอบ 0.96)-

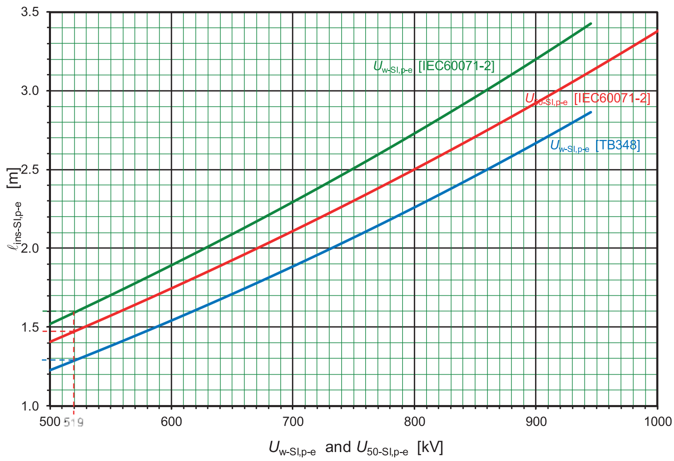
$$U_{\text{50-SI,p-e}} = \left(0.96\frac{3400}{1+8/\ell_{\text{air-SI,p-e}}}\right) \quad [\text{kV}] \tag{2.12}$$

เมื่อ $\ell_{\text{air-SI,p-e}}$ คือ ระยะห่างในอากาศ [m] และหากเราสมมุติว่าแรงดันเกินสวิตชิงมีการกระจายแบบปกติ ความทนแรงดันอิมพัลส์สวิตชิง $U_{\text{w-SI,p-e}}$ ก็สามารถหาได้จาก

$$U_{\text{w-SI,p-e}} = U_{\text{50-SI,p-e}}\left(1-1.28\frac{\sigma}{U_{\text{50-SI,p-e}}}\right) \quad [\text{kV}] \tag{2.13}$$

เมื่อ $\sigma/U_{\text{50-SI,p-e}}$ มีค่า 5-7%

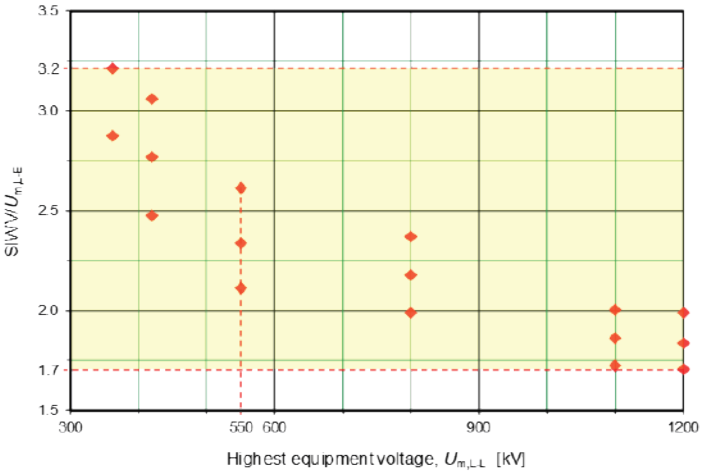
ในกรณีที่มีพวงลูกถ้วยคั่นอยู่ ระยะ $\ell_{\text{air-SI,p-e}}$ จะเพิ่มขึ้นประมาณ 5% หรือ $\ell_{\text{ins-SI,p-e}} = 1.05\ell_{\text{air-SI,p-e}}$ ดังนั้นความยาวของพวงลูกถ้วยที่ต้องการเพื่อให้ทนแรงดันอิมพัลส์สวิตชิง $U_{\text{w-SI,p-e}}$ และแรงดันอิมพัลส์สวิตชิง 50% $U_{\text{50-SI,p-e}}$ จึงมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ความยาวลูกถ้วย $\ell_{\text{ins-SI,p-e}}$ ที่ต้องการเพื่อให้ทนแรงดันอิมพัลส์สวิตชิง $U_{\text{w-SI,p-e}}$ และ $U_{\text{50-SI,p-e}}$ ที่ภาวะบรรยากาศมาตรฐาน

เราจะเห็นว่าพวงลูกถ้วยต้องมีระยะวาบไฟตามผิวประมาณ 3 m ซึ่งหมายความว่าเราต้องใช้จำนวนลูกถ้วยเท่ากับ 3/0.146 = 20 ลูกเพื่อให้ทนแรงดันอิมพัลส์สวิตชิงได้ 850 kV -ค่าสูงสุดสำหรับระบบแรงดันไฟฟ้า 230 kV- ซึ่งมีจำนวนมากไปเพราะในปัจจุบันการไฟฟ้าใช้ลูกถ้วยเพียง 14 ลูก เท่านั้นสำหรับ พวงลูกถ้วยแขวนที่รับน้ำหนักสายส่งไฟฟ้า (suspension insulator string)

แรงดันอิมพัลส์สวิตชิง 850 kV สำหรับสายส่งไฟฟ้าที่ใช้แรงดัน $U_{m,L\text{-}L}$ = 245 kV จะมีค่าประมาณ 4.25 pu -1 pu = $\sqrt{2}/\sqrt{3}\cdot U_{m,L\text{-}L}$ = 200 kV- ซึ่งสูงมาก เพราะถ้าเราพิจารณาค่า BSL ของอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบส่งไฟฟ้าที่มีแรงดันของระบบไฟฟ้า $U_{m,L\text{-}L}$ สูงกว่า 300 kV ในรูปที่ 2.14 [IEC60071-1, 2018] ก็จะเห็นว่าค่า BSL จะมีค่าอยู่ในช่วง 1.7-2.9 pu เท่านั้น การกำหนดให้อุปกรณ์ต่างๆ ในระบบ 245 kV ต้องมี BSL = 850 kV จึงทำให้ราคาของอุปกรณ์แพงมาก



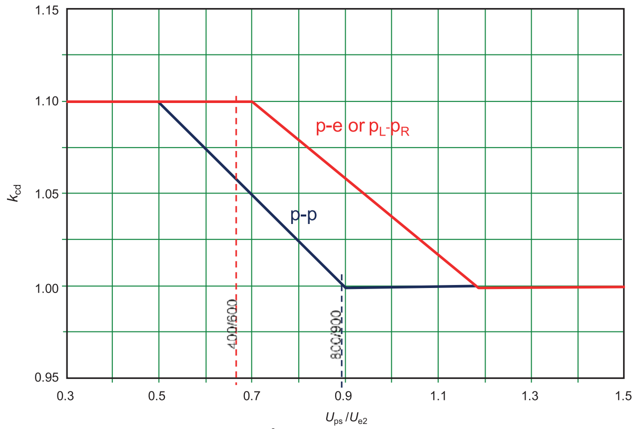
รูปที่ 2.14 ค่า BSL ของอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบส่งไฟฟ้าที่มีแรงดันของระบบไฟฟ้า $U_{m,L\text{-}L}$ สูงกว่า 300 kV

เราจึงใช้วิธีอื่นในการจำกัดขนาดแรงดันเกินสวิตชิง SOV ที่เกิดขึ้นในสถานีไฟฟ้า เช่น *ควบคุมการปิด-เปิดเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่มุมของแรงดัน* (point-on-wave switching) ตามที่เราต้องการ, *ใส่ตัวต้านทานขณะที่ปิด-เปิดเซอร์กิตเบรกเกอร์* (insertion resistance switching), ใช้ *กับดักฟ้าผ่าแบบออกไซด์โลหะ* (metal oxide surge arrester, MOSA) ฯลฯ

หากเราสมมุติว่า SOV ที่เกิดขึ้นในสถานีไฟฟ้ามีค่า U_{e2} ไม่เกิน 3 pu = 600 kV ([TB348, 2008] ใช้ U_{et} = 3 pu ในกรณีที่เซอร์กิตเบรกเกอร์ทำงานซ้ำ) และเลือก MOSA ที่มี *ระดับการป้องกันแรงดันสวิตชิง* (switching protective level, U_{ps}) เท่ากับ 2 pu = 400 kV -ค่าที่เลือกนี้จะเปลี่ยนไปตามผลิตภัณฑ์และค่าพิกัดแรงดัน U_r ของ MOSA- เราก็จะพบว่า ความทนแรงดันอิมพัลส์สวิตชิงที่ต้องการ (switching impulse witsthand voltage, SIWV) ของอุปกรณ์ จะหาได้จาก

$$\begin{aligned} U_{cw\text{-}SI} &= k_{cd} U_{ps} \quad [\text{kV}] \\ U_{rw\text{-}SI} &= k_s k_a U_{cw\text{-}SI} \quad [\text{kV}] \end{aligned} \tag{2.14}$$

เมื่อ k_{cd} คือ ตัวประกอบที่คำนึงถึงความไม่แน่นอนของ U_{ps} ของ MOSA ที่แสดงในรูปที่ 2.15

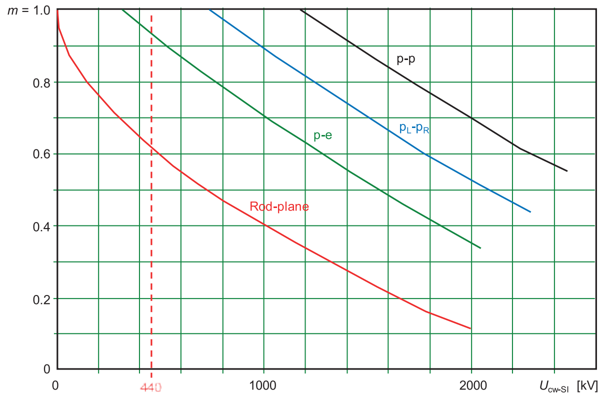


รูปที่ 2.15 ตัวประกอบ k_{cd}

k_s คือ ตัวประกอบความปลอดภัยสำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้า = 1.15 หรือสำหรับระยะห่างในอากาศ = 1.05

k_a คือ ตัวประกอบแก้ค่าสภาวะบรรยากาศ หาได้จากสมการ $k_a = e^{m\frac{H}{8150}}$

เมื่อ H คือระดับความสูงเหนือน้ำทะเล [m] และเลขชี้กำลัง m หาได้จากรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 เลขชี้กำลัง m

ตัวอย่างที่ 2.7 จงหาค่าความทนแรงดันอิมพัลส์สวิตชิงที่ต้องการของอุปกรณ์ไฟฟ้า $U_{rw\text{-}SI,equipment,}$ และความทนแรงดันอิมพัลส์สวิตชิงที่ต้องการของอากาศ $U_{rw\text{-}SI,air}$ ของสถานีไฟฟ้า 245 kV ที่อยู่สูงจากระดับน้ำทะเล 1 km เมื่อใช้ MOSA ที่มีระดับการป้องกันแรงดันสวิตชิง U_{ps} = 2 pu

$$U_{cw\text{-}SI} = k_{cd}U_{ps} = 1.1 \cdot 400 = 440 \ \text{[kV]}$$

$$U_{rw\text{-}SI,equipment} = k_s k_a U_{cw\text{-}SI} = k_s e^{m\frac{H}{8150}} U_{cw\text{-}SI} = 1.15 \cdot e^{0.95\frac{1000}{8150}} \cdot 440 = 569 \ \text{[kV]}$$

$$U_{rw\text{-}SI,air} = k_s k_a U_{cw\text{-}SI} = k_s e^{m\frac{H}{8150}} U_{cw\text{-}SI} = 1.05 \cdot e^{0.95\frac{1000}{8150}} \cdot 440 = 519 \ \text{[kV]}$$

สำหรับสถานีไฟฟ้าโดยทั่วไป อุปกรณ์ไฟฟ้าที่สำคัญที่สุดคือหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ดังนั้น [IEC50076-3, 2013] จึงกำหนดให้มีการทดสอบความทนแรงดันสวิตชิงอิมพัลส์สำหรับหม้อแปลงที่ใช้ในระบบไฟฟ้าที่มีระดับแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่า 300 kV ด้วย ดังที่แสดงในตารางที่ 2.14 แต่การทดสอบนี้เป็นการทดสอบพิเศษ คือผู้ขายไม่จำเป็นต้องทำการทดสอบหากผู้ซื้อไม่ได้ระบุไว้

ตารางที่ 2.14 BIL และ BSL ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่มี U_m ค่าต่างๆ

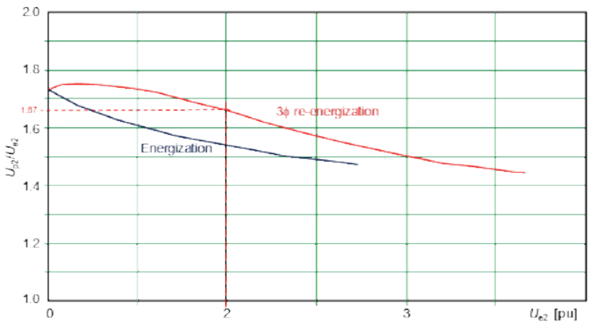
U_m [kV]	BIL [kV]		BSL [kV]	U_m [kV]	BIL [kV]		BSL [kV]
	FWV	CWV			FWV	CWV	
< 1.1	-	-	-	245	850	935	700
24	125	138	-		950	1045	750
	145	160	-		1050	1155	850
	150	165	-	550	1300	1430	1050
36	170	187	-		1425	1570	1175
	200	220	-		1550	1705	1300
123	550	605	460		1675	1845	1390
The lowest values given in the table for a particular value of U_m represent the minimum test voltage levels and shall be used if nothing else is specified.							

จากตารางที่ 2.14 เราจึงสามารถเลือก $U_{w\text{-SI,p-e}}$ ของอุปกรณ์ให้มีค่า 700 kV ได้ (SIWV ≤ BSL) และเมื่อทำการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าระหว่างเฟสกับกราวน์ด้วยค่าดังกล่าว เราก็ไม่จำเป็นที่จะต้องทดสอบความทนแรงดันอิมพัลส์สวิตชิงระหว่างเฟสอีก

ดังนั้นจากรูปที่ 2.13 ความยาวของพวงลูกถ้วย $\ell_{ins\text{-SI,p-e}}$ ที่ต้องการเพื่อให้ทนแรงดันอิมพัลส์สวิตชิง $U_{w\text{-SI,p-e}}$ และ $U_{50\text{-SI,p-e}}$ จึงเท่ากับ 1.6 m และ 1.5 m ตามลำดับ -ใช้ลูกถ้วย 52-8 จำนวน 11 ลูก และ 10 ลูก ตามลำดับ-

2.3.2.2 ระยะห่างในอากาศหว่างเฟส $\ell_{air\text{-SI,p-p}}$

เราสามารถหา SIWV ระหว่างเฟส U_{p2} ได้จาก U_{e2} โดยใช้รูปที่ 2.17 [IEC60071-2, 2018] ซึ่งจะเห็นว่า U_{p2} มีค่าเท่ากับ $2{\cdot}1.67 = 3.34$ pu = 668 kV ดังนั้นเราจึงเลือก SIWV ให้มีค่าเท่ากับ 668 kV เนื่องจากมาตราฐานให้ใช้ค่าที่น้อยกว่าระหว่าง U_{p2} หรือ $2U_{ps}$ ในกรณีนี้จะเหมือนกับไม่มี MOSA ดังนั้นค่า k_{cd} จึงเท่ากับ 1



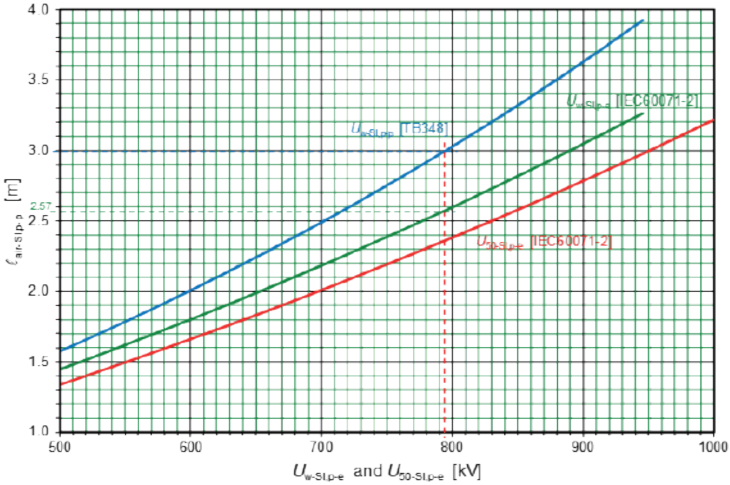
รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ของ U_{p2} และ U_{e2} ในกรณีที่เราปิดเซอร์กิตเบรกเกอร์

ตัวอย่างที่ 2.8 จงหาค่าความทนแรงดันอิมพัลส์สวิตชิงระหว่างเฟสที่ต้องการของอากาศ $U_{rw\text{-}SI,air}$ ในสถานีไฟฟ้าในตัวอย่างที่ 2.7

$$U_{cw\text{-}SI} = k_{cd} \cdot 1.67 \cdot U_{ps} = 1 \cdot 1.67 \cdot 400 = 668 \ \ [\text{kV}]$$

$$U_{rw,air\text{-}SI} = k_s k_a U_{cw\text{-}SI} = k_s e^{m\frac{H}{8150}} U_{cw\text{-}SI} = 1.05 \cdot e^{1\frac{1000}{8150}} \cdot 668 = 793 \ \ [\text{kV}]$$

จากรูปที่ 2.18 ระยะห่างในอากาศ $\ell_{air\text{-}SI,p\text{-}p}$ ที่ต้องการเพื่อให้ทนแรงดันอิมพัลส์สวิตชิง $U_{w\text{-}SI,p\text{-}p}$ และ $U_{50\text{-}SI,p\text{-}p}$ จึงเท่ากับ 2.57 m และ 2.35 m ตามลำดับ



รูปที่ 2.18 ระยะห่างในอากาศระหว่างเฟส $\ell_{air\text{-}SI,p\text{-}p}$ ที่ต้องการเพื่อให้ทน $U_{w\text{-}SI,p\text{-}p}$ และ $U_{50\text{-}SI,p\text{-}p}$ ที่ภาวะบรรยากาศมาตรฐาน เมื่อ $\sigma/U_{50\text{-}SI,p\text{-}p}$ = 5%

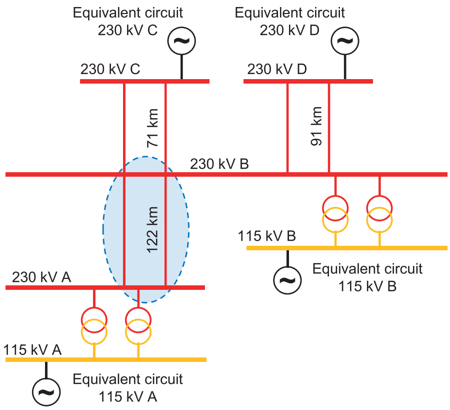
2.3.2.3 การหาค่า SOV ด้วยการจำลองแบบ

การศึกษา SOV และ อัตราการการเกิดวาบไฟเนื่องจาก SOV (switching surge flashover rate, SSFOR) ทำโดยการใช้โปรแกรม EMTP-ATP จำลองระบบส่งไฟฟ้าแล้วคำนวณหาขนาดแรงดันเกินในเชิงสถิติ จากนั้นนำผลที่ได้ไปวิเคราะห์ร่วมกับการแจกแจงเชิงสถิติของโอกาสการเกิดวาบไฟของฉนวนจะทำให้ทราบอัตราความเสี่ยงที่จะเกิดการวาบไฟจาก SOV

ยกตัวอย่างเช่นการจำลองแบบของสายส่งไฟฟ้าระหว่าง สถานีไฟฟ้า A – สถานีไฟฟ้า B โดยสมมุติกรณีที่จะเปลี่ยนจากสายส่งไฟฟ้า 115 kV มาเป็นสายส่งไฟฟ้า 230 kV การจำลองระบบจะสร้างแบบจำลองขยายกว้างออกไปจากสายส่งที่กำลังศึกษาถึงสถานีไฟฟ้าข้างเคียง ดังแสดงในรูปที่ 2.19 โดยพารามิเตอร์ของแหล่งจ่ายที่สถานีไฟฟ้าต่างๆ ได้แสดงในตารางที่ 2.15

ตารางที่ 2.15 พารามิเตอร์ของของแหล่งจ่ายแรงดันที่สถานีไฟฟ้าต่าง ๆ

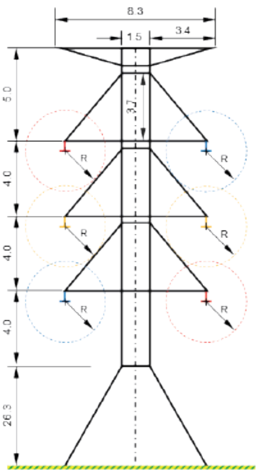
Thevenin Impedance at	Positive Sequence (Ω)		Zero Sequence (Ω)	
	R_1	X_1	R_0	X_0
115 kV A	8.986	29.966	1.917	21.206
115 kV B	3.055	11.297	2.348	14.620
230 kV C	3.534	28.620	3.634	27.557
230 kV D	0.565	8.879	1.151	10.625



รูปที่ 2.19 สายส่งไฟฟ้าระหว่างสถานีไฟฟ้า A-สถานีไฟฟ้า B ที่ใช้ในการจำลองแบบ

รูปที่ 2.20 แสดงมิติของเสาส่งไฟฟ้าและตำแหน่งของสายไฟฟ้า 645-A1/ S1A-42/7 เพื่อหาอิมพีแดนซ์ต่างๆ ของสายเฟสและสายดินขึงอากาศ โดยใช้ *แบบจำลองสายไฟฟ้าที่พารามิเตอร์ขึ้นกับความถี่* (frequency-dependent model) และกำหนดให้ ρ ของดินมีค่าเท่ากับ 100 Ωm

พารามิเตอร์	ค่า
จำนวนวงจรของเสาส่งไฟฟ้า [วงจร]	2
จำนวนตัวนำของสายควบต่อเฟส [เส้น]	2
ระยะระหว่างตัวนำในสายควบ [mm]	475
เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ [mm]	33.91
ความต้านทานกระแสสลับของสายเฟส [Ω/km]	0.0482
เส้นผ่านศูนย์กลางของ OHG [mm]	13.5
ความต้านทานกระแสสลับของ OHG [Ω/km]	0.273



รูปที่ 2.20 เสาส่งไฟฟ้า 230 kV และพารามิเตอร์ของสายไฟฟ้าที่ใช้ในการจำลองแบบ

การจำลองการปิด-เปิดเซอร์กิตเบรกเกอร์เพื่อจ่ายไฟให้สายส่งไฟฟ้าใช้สวิตช์ที่สามารถกำหนดเวลา -มุมเฟสของแรงดัน- ให้สวิตช์ปิดวงจรในจังหวะที่ต้องการ แต่ในทางปฏิบัติเวลาการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์มีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่ต้องใช้แรงกลในการปิด-เปิดเซอร์กิตเบรกเกอร์ ดังนั้นจึงสมมุติให้เวลาในการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์มีการกระจายเป็นแบบเกาส์ที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน σ = 2 ms

ก. ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของ SOV

เมื่อปิดเซอร์กิตเบรกเกอร์ โปรแกรมจะคำนวณทุกๆ *ก้าวเวลา* (time step) โดยใช้ค่าเท่ากับ 1 μs แล้วหาแรงดันเกินในหน่วย pu (1 pu = 230·√2/√3 = 188 kV เป็นค่าแรงดันฐาน) กำหนดการสุ่มเวลาความคลาดเคลื่อนในการปิดเซอร์กิตเบรกเกอร์ 100 ครั้ง จากนั้นนำค่าแรงดันเกินในเฟสที่สูงที่สุดในแต่ละครั้งมาหาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และสร้างกราฟฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของ SOV, $F(U)$

ข. ฟังก์ชันความน่าจะเป็นของการเกิดวาบไฟตามผิวฉนวน

การแจกแจงความน่าจะเป็นของการเกิดวาบไฟตามผิวฉนวน $P(U)$ สามารถแสดงได้ด้วยฟังก์ชันการแจกแจงสะสมแบบเกาส์เซียนตามสมการ

$$P(U)=\frac{1}{\sigma_f\sqrt{2\pi}}\int_{U_{0,SI}}^{U} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{U-CFO_{SI}}{\sigma_f}\right)^2}dU \qquad (2.15)$$

เมื่อ CFO_{SI} คือ แรงดันสวิตชิงซึ่งมีความน่าจะเป็นที่จะเกิดการวาบไฟตามผิวฉนวน 50% = $U_{50,SI}$

σ_f คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการกระแจกแจงแบบเกาส์เซียน = $U_{50,SI}$ - $U_{16,SI}$

$U_{0,SI}$ คือ แรงดันสวิตชิงต่ำสุดที่มีโอกาสจะเกิดวาบไฟตามผิวฉนวน = U_{50} - $4\sigma_f$

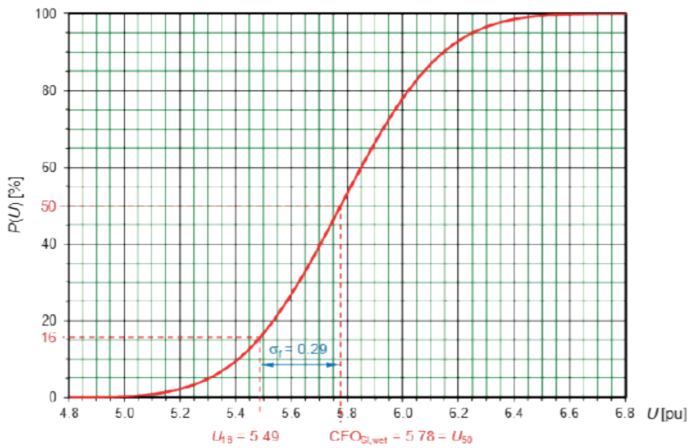
ค่า CFO_{SI} ต่ำสุดเมื่อเกิด SOV ที่เกิดขึ้นมี *หน้าคลื่นวิกฤต* (critical wavefront, CWF) สามารถประเมินได้จากสมการ

$$CFO_{SI}=k_g 1080\cdot\ln(0.46\ell+1)\ \ [kV] \qquad (2.16)$$

เมื่อ k_g คือ *ตัวประกอบแกป* (gap factor) ซึ่งในที่นี้กำหนดให้มีค่า 1.23

ℓ คือ ระยะห่างต่ำสุดซึ่งในการศึกษานี้กำหนดให้มีค่า 3.16 m

ผลจากการคำนวณได้ค่า CFO_{SI} ในสภาวะแห้งเท่ากับ 1,192 kV หรือ 6.35 pu ค่า CFO_{SI} ในสภาวะเปียกจะมีค่าต่ำกว่าสภาวะแห้ง 4-9% ถ้าพิจารณาในกรณีที่เลวร้ายที่สุดคือลดลง 9% ดังนั้น CFO_{SI} ในสภาวะเปียกจะมีค่าเท่ากับ 1,085 kV หรือ 5.78 pu ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน σ_f สำหรับการกระจายแบบปกติสามารถประมาณค่าได้เป็น 5% ของค่า CFO_{SI} หรือเท่ากับ 0.29 pu ในสภาวะเปียก ดังนั้นค่าแรงดันสวิตชิงต่ำสุดที่มีโอกาสจะเกิดวาบไฟตามผิว $U_{0,SI}$ จึงมีค่าเท่ากับ 4.62 pu = 1050 kV เมื่อนำค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดไปวาดกราฟตามสมการที่ 2.15 ก็จะได้ความน่าจะเป็นของการเกิดวาบไฟตามผิวฉนวนเนื่องจาก SOV ดังแสดงในรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 ความน่าจะเป็น $P(U)$ ของการเกิดวาบไฟตามผิวฉนวนในสภาวะเปียก

ค. ความเสี่ยงที่จะเกิดความผิดพร่อง

เมื่อนำความน่าจะเป็นของการเกิด SOV ขนาดต่างๆ $F(U)$ มาวิเคราะห์ร่วมกับความน่าจะเป็นของการเกิดวาบไฟตามผิวฉนวน $P(U)$ ตามสมการที่ 2.15 ก็จะได้ *ความเสี่ยงที่จะเกิดความผิดพร่อง* (Risk of failure, RoF) จากการปิด-เปิดเซอร์กิตเบรกเกอร์ -ค่า ½ มาจากที่คุณสมบัติของอากาศที่สามารถทน SOV ขั้วบวกได้สูงกว่า SOV ขั้วลบมาก-

$$\text{RoF} = \frac{1}{2}\int_{U_{min}}^{U_{max}} P(U)\cdot F(U)\,dU \qquad (2.17)$$

เมื่อ U_{min} และ U_{max} คือ SOV ต่ำที่สุดและสูงที่สุดที่อาจเกิดขึ้นในระบบส่งไฟฟ้าที่กำลังพิจารณา

ง. ผลการจำลองแบบ

เนื่องจากขนาดของ SOV ขึ้นกับองค์ประกอบหลายอย่าง เช่น *รูปแบบของระบบส่งไฟฟ้า* (circuit configuration), *ประจุค้าง* (trapped charge) ฯลฯ จึงต้องทำการจำลองแบบ SOV ในหลายๆ กรณี ซึ่งในที่นี้จะจำลองแบบเพียง 2 กรณี ดังนี้

<u>กรณีที่ 1</u> การจ่ายไฟให้สายส่งไฟฟ้าไร้โหลด (ขณะที่ปลายสายอีกด้านเปิดวงจร)

กรณีนี้เป็นการศึกษาการปิดเซอร์กิตเบรกเกอร์เพื่อจ่ายไฟให้สายส่งไฟฟ้าจากแต่ละด้านเพียง 1 วงจร โดยแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ คือ

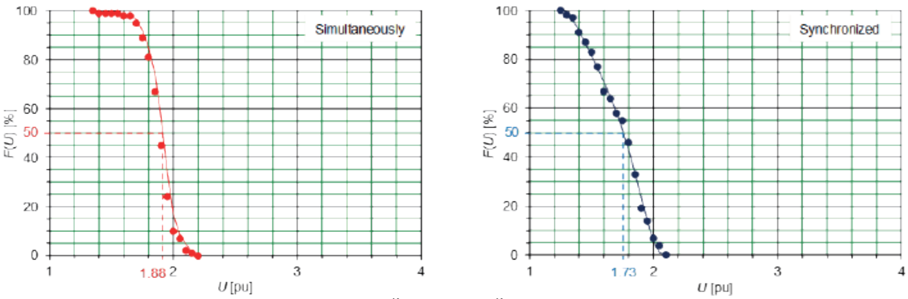
- ไม่มีการ synchronization: เซอร์กิตเบรกเกอร์ปิดพร้อมกันทั้ง 3 เฟสในขณะที่แรงดันไฟฟ้าที่บัส A มีค่าสูงสุด
- มีการ synchronization: โดยสั่งให้เซอร์กิตเบรกเกอร์แต่ละเฟสปิดขณะที่แรงดันไฟฟ้าที่บัสเป็นศูนย์ (เซอร์กิตเบรกเกอร์เฟส B และ C ปิดช้ากว่าเฟส A ที่มุม 120° และ 240° ตามลำดับ)

และจำลองแบบเพื่อหา SOV ในกรณีจ่ายไฟทางด้านสถานีไฟฟ้า B และทางด้านสถานีไฟฟ้า A โดยกำหนดให้เวลาในการปิดเซอร์กิตเบรกเกอร์แต่ละเฟสมีค่าเบี่ยงเบน 2 ms และไม่มีการติดตั้งกับดักเสิร์จ

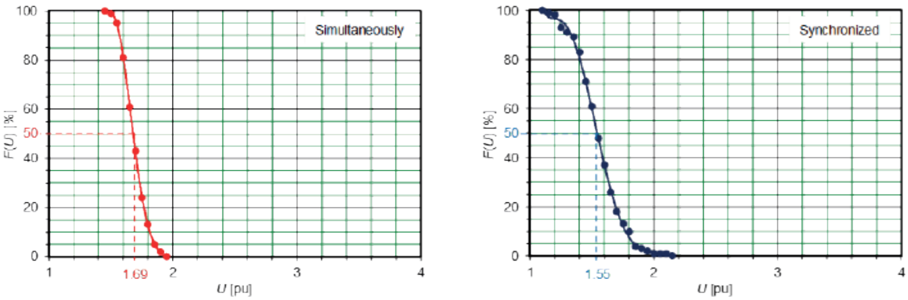
ผลการศึกษาแสดงในตารางที่ 2.16 และรูปที่ 2.22 โดยได้แสดงค่าเฉลี่ย μ และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน σ ของ SOV ในแต่ละรูปแบบพร้อมทั้งผลการคำนวณ RoF

ตารางที่ 2.16 ค่า SOV ในกรณีที่จ่ายไฟให้สายส่งไฟฟ้าไร้โหลด

กรณี	SOV เมื่อปิดพร้อมกันทั้งสามเฟส			SOV เมื่อแต่ละเฟสปิดที่แรงดันศูนย์		
	μ [pu]	σ [pu]	RoF [%]	μ [pu]	σ [pu]	RoF [%]
1.1 จ่ายไฟจากทางด้าน B	1.88	0.115	0	1.73	0.208	0
1.2 จ่ายไฟจากทางด้าน A	1.69	0.095	0	1.55	0.181	0



ก) จ่ายไฟจากสถานีไฟฟ้า B



ข) จ่ายไฟจากสถานีไฟฟ้า A

รูปที่ 2.22 ความน่าจะเป็น *F*(*U*) ที่จะเกิด SOV ในกรณีที่จ่ายไฟให้สายส่งไฟฟ้าไร้โหลด

จากผลการจำลองแบบเราจะเห็นว่าการจ่ายไฟฟ้าให้สายส่งไร้โหลด ทำให้เกิด SOV มีขนาดไม่เกิน 2.2 pu ซึ่งมีขนาดต่ำกว่าค่าแรงดันที่มีโอกาสทำให้เกิดวาบไฟตามผิวฉนวน $-U_{0,SI}$ = 4.62 pu- ดังนั้นจึงไม่มีความเสี่ยงที่จะเกิดความผิดพร่องเพราะ RoF = 0

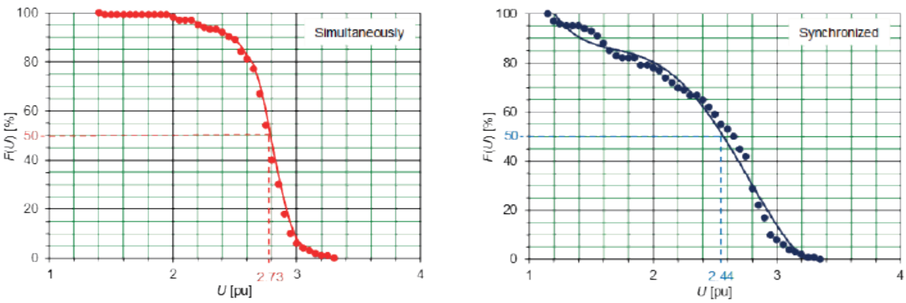
<u>กรณีที่ 2</u> ผลของประจุค้างในสายส่งไฟฟ้าขณะที่ปิดเซอร์กิตเบรกเกอร์

ในกรณีนี้จะจำลองแบบกรณีที่เกิดความผิดพร่องที่สายส่งไฟฟ้าวงจร 1 แล้วเซอร์กิตเบรกเกอร์เปิดวงจรเพื่อปลดสายส่งไฟฟ้าออกจากแหล่งจ่ายทำให้มีประจุค้างที่สายส่ง -สมมุติให้เป็นกรณีเลวร้ายคือมีประจุค้างเท่ากับ 1 pu- หลังจากนั้นเซอร์กิตเบรกเกอร์ก็ปิดอีกครั้ง (reclose) หรือที่เรียกว่า re-energization เพื่อจ่ายไฟคืนให้สายส่งไฟฟ้า โดยศึกษาใน 2 รูปแบบ คือ

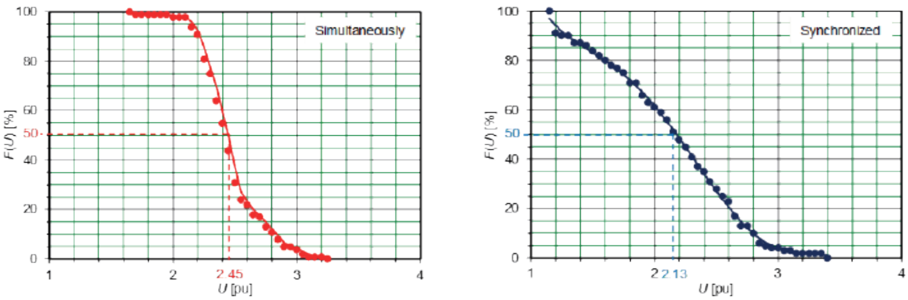
- ไม่มีการ synchronization: เซอร์กิตเบรกเกอร์ปิดพร้อมกันทั้ง 3 เฟสในขณะที่แรงดันไฟฟ้าที่บัส A มีค่าสูงสุด
- มีการ synchronization: โดยสั่งให้เซอร์กิตเบรกเกอร์แต่ละเฟสปิดขณะที่แรงดันไฟฟ้าที่บัสเป็นศูนย์ (เซอร์กิตเบรกเกอร์เฟส B และ C ปิดช้ากว่าเฟส A ที่มุม 120° และ 240° ตามลำดับ)

และจำลองแบบเพื่อหา SOV ในกรณีจ่ายไฟทางด้านสถานีไฟฟ้า B และทางด้านสถานีไฟฟ้า A โดยกำหนดให้เวลาในการปิดเซอร์กิตเบรกเกอร์แต่ละเฟสมีค่าเบี่ยงเบน 2 ms และไม่มีการติดตั้งกับดักเสิร์จ

ผลการศึกษาแสดงในตารางที่ 2.17 และรูปที่ 2.23 โดยได้แสดงค่าเฉลี่ย μ และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน σ ของ SOV ในแต่ละรูปแบบพร้อมทั้งผลการคำนวณ RoF



ก) จ่ายไฟจากสถานีไฟฟ้า B



ข) จ่ายไฟจากสถานีไฟฟ้า A

รูปที่ 2.23 ความน่าจะเป็น *F*(*U*) ที่จะเกิด SOV ในกรณีที่จ่ายไฟให้สายส่งไฟฟ้าไร้โหลดแต่มีประจุค้าง ขณะที่ปลายสายอีกด้านเปิดวงจร

ตารางที่ 2.17 ค่า SOV ในกรณีที่จ่ายไฟให้สายส่งไฟฟ้าไร้โหลดแต่มีประจุค้าง ขณะที่ปลายสายอีกด้านเปิดวงจร

กรณี	SOV เมื่อปิดพร้อมกันทั้งสามเฟส			SOV เมื่อแต่ละเฟสปิดที่แรงดันศูนย์		
	μ [pu]	σ [pu]	RoF [%]	μ [pu]	σ [pu]	RoF [%]
1.1 จ่ายไฟจากทางด้าน B	2.73	0.255	0%	2.44	0.547	0%
1.2 จ่ายไฟจากทางด้าน A	2.45	0.247	0%	2.13	0.548	0%

จากผลการจำลองแบบเราจะเห็นว่าการจ่ายไฟฟ้าให้สายส่งไร้โหลดแต่มีประจุค้าง ขณะที่ปลายสายอีกด้านเปิดวงจรทำให้เกิด SOV มีขนาดสูงถึง 3.4 pu = 639 kV แต่ก็ยังมีขนาดต่ำกว่าค่าแรงดันที่มีโอกาสทำให้เกิดวาบไฟตามผิวฉนวน -$U_{0,SI}$ = 4.62 pu = 1047 kV- ดังนั้นจึงไม่มีความเสี่ยงที่จะเกิดความผิดพร่องเพราะ RoF = 0

จ. สรุปผลการจำลองแบบ

ค่า SOV สูงสุดจากการจำลองแบบมีขนาดสูง 3.4 pu = 639 kV ซึ่งจากการสมมุติให้ SOV ที่เกิดขึ้นในสถานีไฟฟ้ามีค่า U_{e2} ไม่เกิน 3 pu = 600 kV ก็ใกล้เคียงกันมาก และมีค่าต่ำกว่าแรงดันทดสอบความทนแรงดันสวิตชิง BSL = 700 kV ของหม้อแปลงไฟฟ้าที่แสดงในตารางที่ 2.14

อย่างไรก็ตามการติดตั้งกับดักเสิร์จเพื่อใช้ในการป้องกัน SOV จะช่วยให้อุปกรณ์ต่างๆ ในสถานีไฟฟ้าปลอดภัยมากขึ้น ดังนั้นการไฟฟ้าจึงควรติดตั้ง MOSA ที่มี U_{ps} = 2 pu = 400 kV ที่สถานีไฟฟ้าทั้งสองแห่ง

2.3.3 ความทนแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า

2.3.3.1 ความยาวของพวงลูกถ้วย $\ell_{ins\text{-}LI,p\text{-}e}$

เนื่องจาก [IEC60071-1, 2018] ได้กำหนดค่า BIL = 1050 kV ดังนั้นก็ไม่ยากอะไรที่จะหาความยาวของพวงลูกถ้วย $\ell_{ins\text{-}LI,p\text{-}e}$ จากระยะห่างในอากาศ $\ell_{air\text{-}LI,p\text{-}e}$ ที่ [IEC60071-1, 2018] แนะนำในรูปที่ 2.24 ซึ่งถ้ากำหนดให้ความยาวของลูกถ้วยมากกว่าระยะห่างในอากาศ $\ell_{air\text{-}LI,p\text{-}e}$ 5% ค่า $\ell_{ins\text{-}LI,p\text{-}e}$ จะมีค่าเท่ากับ

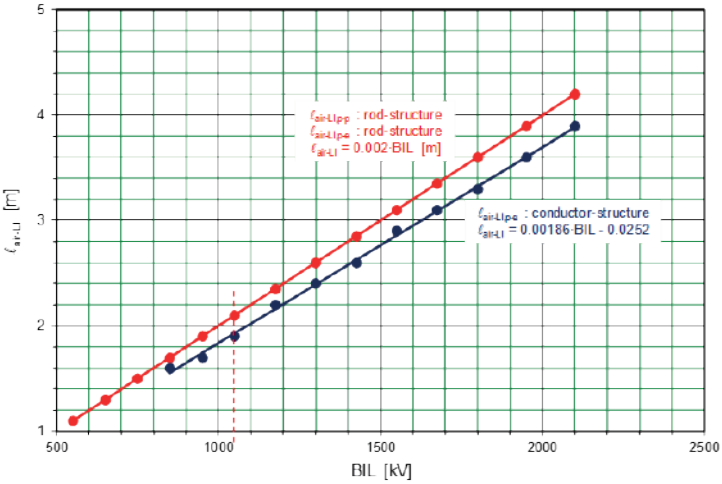
$$\ell_{ins\text{-}LI,p\text{-}e} = 1.05 \cdot \ell_{air\text{-}LI,p\text{-}e} = 1.05 \cdot 1.9 = 2.00 \quad [\mathrm{m}] \tag{2.18}$$

และหากเราสมมุติว่าแรงดันเกินอิมพัลส์ฟ้าผ่ามีการกระจายแบบปกติ ความทนแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า $U_{w\text{-}LI,p\text{-}e}$ ก็จะสามารถหาได้จาก

$$U_{w\text{-}LI,p\text{-}e} = U_{50\text{-}LI,p\text{-}e}\left(1 - 1.28\frac{\sigma}{U_{50\text{-}LI,p\text{-}e}}\right) \quad [\mathrm{kV}] \tag{2.19}$$

เมื่อ $\sigma/U_{50\text{-}LI,p\text{-}e}$ มีค่า 3-5% ดังนั้น

$$\begin{aligned}
U_{w\text{-}LI,p\text{-}e} &= U_{50\text{-}LI,p\text{-}e}\left(1 - 1.28\frac{\sigma}{U_{50\text{-}LI,p\text{-}e}}\right) U_{50\text{-}LI,p\text{-}e}(1 - 1.28 \cdot 0.03) = 0.96U_{50\text{-}LI,p\text{-}e} \quad [\mathrm{kV}] \\
\ell_{air\text{-}LI,p\text{-}e} &= \frac{1050}{0.96 \cdot 490(0.74 + 0.26 \cdot 1.45)} = 2.00 \quad [\mathrm{m}] \\
\ell_{ins\text{-}LI,p\text{-}e} &= 1.05 \cdot \ell_{air\text{-}LI,p\text{-}e} = 1.05 \cdot 2.0 = 2.1 \quad [\mathrm{m}]
\end{aligned} \tag{2.20}$$



รูปที่ 2.24 ระยะห่างในอากาศระหว่าง ℓ_{air-LI} ที่ต้องการเพื่อให้ทน BIL ได้ ที่ภาวะบรรยากาศมาตรฐาน

2.3.3.2 ระยะห่างในอากาศหว่างเฟส $\ell_{air-LI,p-p}$

ระยะห่างในอากาศ $\ell_{air-LI,p-p}$ ในกรณีของ [TB384, 2008] สามารถหาได้จากสมการ

$$\ell_{air-LI,p-p} = 1.2 \cdot \ell_{air-LI,p-e} = 1.2 \cdot 2.0 = 2.4 \;\; [m] \qquad (2.21)$$

ซึ่งแตกต่างจาก [IEC60071-1, 2014] ในรูปที่ 2.23 ประมาณ 14%

2.3.3.3 พารามิเตอร์ที่มีผลต่อสมรรถนะของสายส่งไฟฟ้า

ก่อนอื่นเราต้องยอมรับก่อนว่าฟ้าผ่าเป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติที่จะเกิดขึ้นหรือไม่เกิดขึ้นก็ได้ ในบางบริเวณของประเทศอาจไม่เคยเกิดฟ้าผ่าขึ้นเลย -เช่น ในช่วง 40 ปีที่ผ่านมา ไม่เคยพบว่ามีฟ้าผ่าลงมาที่ห้องทดลองไฟฟ้าแรงสูง จุฬาลงกรณ์มหาวิยาลัย แม้แต่เพียงครั้งเดียว- ขณะเดียวกันในบางพื้นที่ในกรุงเทพฯ เช่น ต.แหลมฟ้าผ่า จ.สมุทรปราการ เกิดฟ้าผ่าขึ้นบ่อยมาก นอกจากนั้นจำนวนการเกิดฟ้าผ่าในบริเวณใดบริเวณหนึ่งก็ไม่แน่นอน บางปีเกิดมากบางปีเกิดน้อย และช่วงเวลาที่เกิดก็ไม่แน่นอน ดังนั้นฟ้าผ่าจึงถือว่าเป็นเหตุการณ์ทางสถิติที่ต้องใช้เวลาในการรวบรวมข้อมูลเป็นเวลานาน

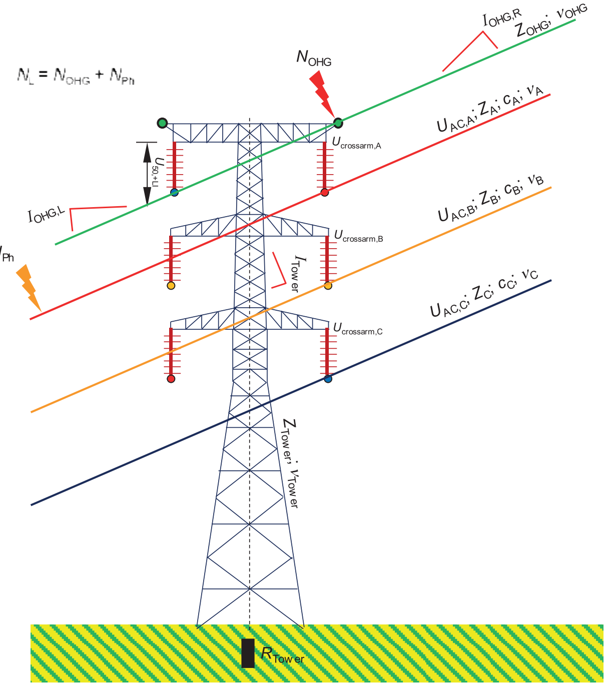
สำหรับสายส่งไฟฟ้า เนื่องจากสายส่งไฟฟ้ามีความยาวมากจึงพาดผ่านพื้นที่ต่างๆ เป็นบริเวณกว้าง โอกาสที่จะถูกฟ้าผ่าจึงมีมาก แต่เนื่องจากฟ้าที่ผ่าแต่ละครั้งมีความรุนแรงไม่เท่ากัน -เรามักวัดความรุนแรงด้วยขนาดของกระแสฟ้าผ่าเป็น kA- โอกาสที่จะเกิดเบรกดาวน์ในอากาศระหว่างสายเฟสกับกราวน์หรือเกิดวาบไฟตามผิวลูกถ้วยจึงไม่แน่นอน อย่างไรก็ตามการเกิดเบรกดาวน์หรือวาบไฟที่สายส่งไฟฟ้าจะทำให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ที่สถานีไฟฟ้าเปิดวงจร (trip) และโดยปกติระบบไฟฟ้าจะตั้งเวลาหน่วงไว้เพื่อให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ปิดวงจรอีกครั้งหนึ่ง (reclose) ทำให้เกิดไฟกระพริบขึ้นในระบบ ซึ่งบางครั้งเป็นสิ่งที่เราไม่ต้องการเพราะอาจมีผลกระทบต่อผู้ใช้ไฟบางราย เช่น อุตสาหกรรมการผลิตหรือกิจกรรมต่างๆ ที่มีการรับส่งข้อมูลตลอดเวลา

นอกจากนั้น ในกรณีที่ฟ้าผ่ารุนแรงมาก ๆ การเกิดวาบไฟตามผิวลูกถ้วยจะทำให้อากาศรอบ ๆ ลูกถ้วยร้อนจัดและขยายตัวอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดความดันอากาศสูงมากจนสามารถกดปีกลูกถ้วยให้แตกหักเสียหายได้ดังแสดงในรูปที่ 2.25 ซึ่งเราจะเห็นว่าแม้ลูกถ้วยจำนวนมากในพวงลูกถ้วยเกิดความเสียหาย แต่พวงลูกถ้วยก็ยังสามารถรับน้ำหนักของสายไฟฟ้าได้ตามปกติเพราะได้รับการออกแบบมาเป็นอย่างดี

รูปที่ 2.25 พวงลูกถ้วยที่เสียหายเนื่องจากเกิดวาบไฟตามผิวจากฟ้าผ่า

เราจึงมักป้องกันสายส่งไฟฟ้าจากการถูกฟ้าผ่าโดยตรงด้วยการขึง สายดินขึงอากาศ (overhead ground wire, OHG) ไว้เหนือสายเฟส แต่ก็ไม่สามารถป้องกันสายเฟสจากการถูกฟ้าผ่าโดยตรงได้ 100% ดังแสดงในรูปที่ 2.26 ซึ่งในที่นี้ได้สมมุติให้จำนวนฟ้าผ่าทั้งหมด N_L ที่ผ่าลงสายส่งไฟฟ้ามีจำนวน 100 (ครั้ง/100 km)/ปี แบ่งเป็นฟ้าผ่าลงที่สายดินขึงอากาศจำนวน N_{OHG} = 90 (ครั้ง/100 km)/ปี และฟ้าผ่าลงที่สายเฟสจำนวน N_{Ph} = 10 (ครั้ง/100 km)/ปี

ในกรณีที่เกิดฟ้าผ่าลงบนสายเฟสของสายส่งไฟฟ้า เราจึงเรียกว่า ชีลด์ล้มเหลว (shielding failure) เพราะสายดินขึงอากาศไม่สามารถป้องกันฟ้าผ่าสายเฟสได้ ค่า N_{Ph} = 10 (ครั้ง/100 km)/ปี จึงเรียกว่า อัตราล้มเหลวของชีลด์ (shielding failure rate, SFR) แต่ฟ้าที่ผ่าลงบนสายเฟสนี้อาจทำให้เกิดเบรกดาวน์ที่สายส่งไฟฟ้าหรือไม่ก็ได้ ขึ้นอยู่กับความรุนแรงของฟ้าผ่าและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของเสาส่งและสายส่งไฟฟ้า หากฟ้าผ่าที่สายเฟสแล้วทำให้เกิดเบรกดาวน์ เราก็เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า อัตราล้มเหลวของชีลด์ที่ทำให้เกิดวาบไฟ (shielding failure flashover rate, SFFOR) เช่น N_{Ph} = 10 (ครั้ง/100 km)/ปี แต่มี SFFOR เพียง 2 (ครั้ง/100 km)/ปี เท่านั้น



รูปที่ 2.26 จำนวนครั้งที่ฟ้าผ่าลงบนสายส่งไฟฟ้า

ส่วนในกรณีที่ฟ้าผ่าลงบนสายดินขึงอากาศ กระแสฟ้าผ่า I_{OHG} จะวิ่งไปบนสายดินขึงอากาศทั้งสองข้างแล้วไหลลงกราวน์ที่เสาส่งไฟฟ้า แต่เนื่องจาก อิมพีแดนซ์ของสายดินขึงอากาศ (overhead ground wire impedance, Z_{OHG}), อิมพีแดนซ์ของเสาส่งไฟฟ้า (tower impedance, Z_{Tower}) และ ความต้านทานดินที่ฐานเสาส่งไฟฟ้า (footing resistance, R_{Tower}) มักมีค่าไม่เท่ากัน คลื่นกระแสฟ้าผ่าจึงสะท้อนไปมาในเสาไฟฟ้าทำให้เกิดแรงดันสูงขึ้นที่แขนเสาส่งไฟฟ้า ($U_{crossarm,x}$) ซึ่งหากแรงดันนี้มีขนาดมากกว่า $U_{ins-LI,p-e}$ -หรือที่มักเรียกว่า *แรงดันวาบไปตามผิวอิมพัลส์วิกฤติ* (critical impulse flashover voltage, CFO)- ของพวงลูกถ้วยไฟฟ้าก็จะทำให้เกิดวาบไฟตามผิวขึ้น และมักเรียกจำนวนครั้งของการเกิดเบรกดาวน์ในลักษณะนี้ว่า อัตราการเกิดวาบไฟย้อนกลับ (back flashover rate, BFR) เช่น N_{OHG} = 90 (ครั้ง/100 km)/ปี แต่มี BFR เพียง 2 (ครั้ง/100 km)/ปี เท่านั้น

ดังนั้นจำนวนการเกิดเบรกดาวน์ในสายส่งไฟฟ้าทั้งหมดเนื่องจากฟ้าผ่าจึงเท่ากับ SFFOR + BFR = 4 (ครั้ง/100 km)/ปี ซึ่งมีชื่อเรียกพิเศษว่า สมรรถนะของสายส่งไฟฟ้า (lightning performance, R_a)

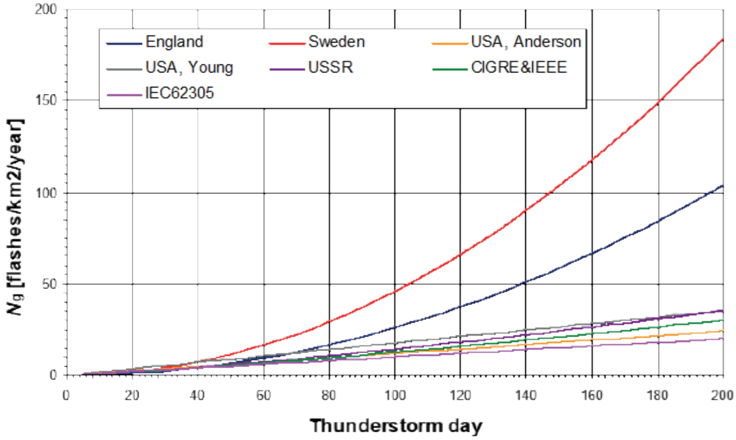
ก. พารามิเตอร์ของฟ้าผ่า

บริเวณต่างๆ ในโลกมีจำนวนฟ้าผ่าเกิดขึ้นไม่เท่ากัน ดังนั้นในสมัยก่อนเราจึงประมาณ ความหนาแน่นของฟ้าผ่า (ground flash density, (flash/km^2)/yr) ที่สอดคล้องกับ จำนวนวันที่เกิดฝนตกฟ้าคะนองในรอบหนึ่งปี (thunderstorm day/year) ตามสมการที่ 2.22 และตารางที่ 2.18 ซึ่งสามารถนำมาวาดกราฟได้ดังที่แสดงในรูปที่ 2.27

$$N_g = k \cdot T_d^a \tag{2.22}$$

ตารางที่ 2.18 ความหนาแน่นของฟ้าผ่า N_g ตามสมการที่ 2.22 ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของ N_g ~ 32%

Location	*k*	*a*
England	0.0026	2
Sweden	0.0046	2
USA, Anderson	0.12	1
USA, Young	0.177	1
USSR	0.036	1.3
South Africa (accepted by CIGRE & IEEE)	0.04	1.25
IEC62305-1	0.1	1



รูปที่ 2.27 ความสัมพันธ์ของ N_g กับจำนวนวันที่เกิดฝนตกฟ้าคะนองในรอบหนึ่งปี T_d

จากรูปที่ 2.26 เราจะเห็นว่าแต่ละประเทศมีจำนวนวันที่เกิดฝนตกฟ้าคะนอง T_d แตกต่างกัน โดยประเทศที่อยู่ในเขตหนาว เช่น อังกฤษและสวีเดน จะมี T_d น้อย ส่วนประเทศที่พื้นที่กว้างมากๆ เช่น สหรัฐอเมริกาจะมีบางพื้นที่ซึ่งต่ำลงมาใกล้กับเส้นศูนย์สูตร ทำให้ T_d เพิ่มขึ้น และในกรณีของอัฟริกาใต้ซึ่งอยู่ใกล้เส้นศูนย์สูตรก็จะมี T_d เพิ่มขึ้นอีก การใช้สมการที่ 2.22 ด้วยพารามิเตอร์ในที่ตารางที่ 2.18 จึงต้องทำด้วยความระมัดระวัง เพราะใช้แทนกันไม่ได้

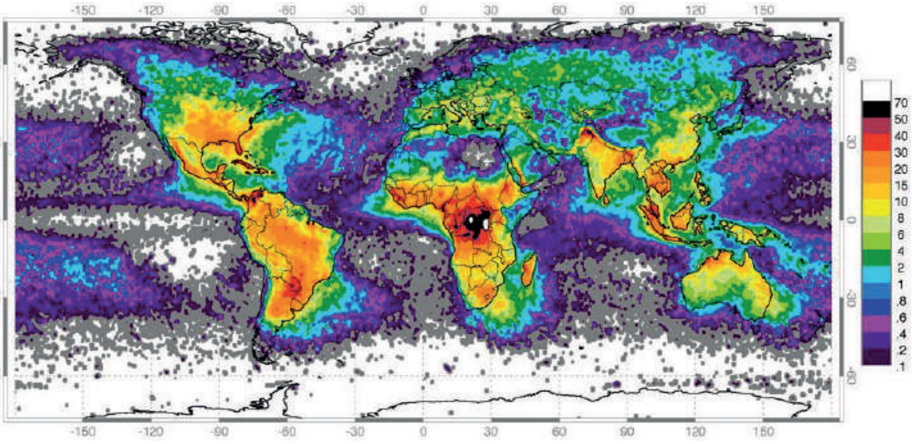
ตัวอย่างที่ 2.9 จงหาความหนาแน่นของฟ้าผ่า N_g ของประเทศไทยด้วยสมการที่ 2.22 จากประเทศสวีเดน เมื่อสมมุติให้จำนวนวันที่เกิดฝนตกฟ้าคะนองในรอบหนึ่งปี T_d = 140 วัน/ปี

จากสมการที่ 2.22 จะพบว่า

$$N_g = k \cdot T_d^a = 0.0046 \cdot 140^2 = 90 \quad [(\text{flash/km}^2)/\text{year}]$$

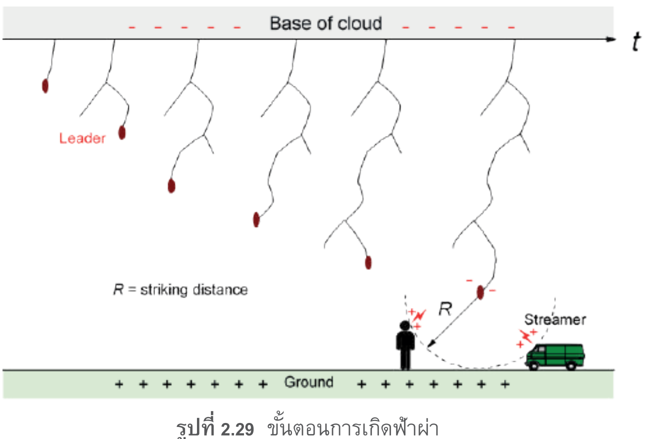
ซึ่งเราจะเห็นว่ามีค่าสูงผิดปกติ

ด้วยเทคโนโลยีที่ก้าวหน้าในปัจจุบัน ความหนาแน่นของฟ้าผ่าสามารถหาได้จากระบบ LPTS (lightning positioning and tracking system) หรือภาพจากดาวเทียมที่แสดงในรูปที่ 2.28 [Wiki, 2018a]



รูปที่ 2.28 แผนที่ดาวเทียมแสดง**ความหนาแน่นของฟ้าผ่า** N_g

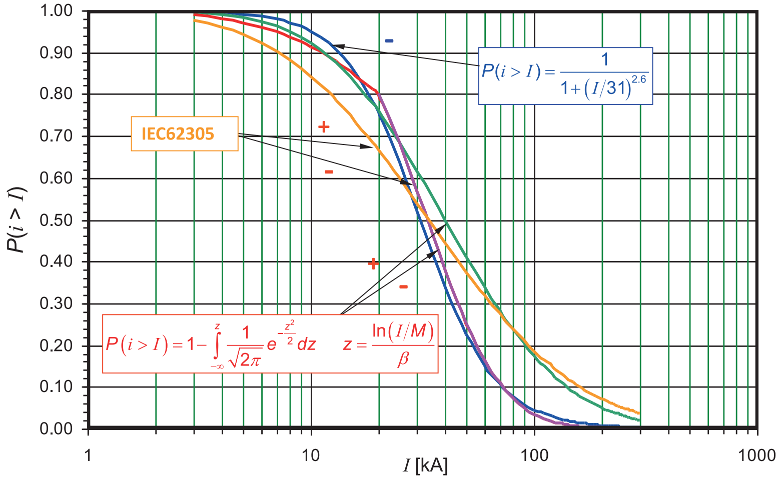
การเกิดฟ้าผ่าเริ่มจากการมีประจุสะสมขึ้นที่ด้านล่างของก้อนเมฆ -ในที่นี้จะสมมุติว่าเป็นประจุลบ จึงเกิดการเหนี่ยวนำประจุบวกขึ้นบนพื้นโลก- ทำให้สนามไฟฟ้าในบริเวณนี้มีค่าสูง เมื่อประจุมีค่าสูงพอ สนามไฟฟ้าจะสูงมากจนทำให้อากาศที่อยู่ในบริเวณนี้เบรกดาวน์ ประจุลบจำนวนหนึ่งที่เรียกว่า *หัวนำร่อง* (leader) จะเริ่มไหลลงสู่พื้นดิน และเมื่อเคลื่อนที่ไปได้เป็นระยะทางหนึ่งก็จะหยุดเพราะประจุที่ส่วนหัวของหัวนำร่องลดลง สนามไฟฟ้าจึงลดลงจนไม่สามารถทำให้อากาศเบรกดาวน์ได้ ต้องรอให้ประจุลบจากก้อนเมฆวิ่งลงมาเสริม เมื่อสนามไฟฟ้าสูงที่หัวนำร่องสูงพอ อากาศก็เกิดเบรกดาวน์อีกครั้งหนึ่ง หัวนำร่องก็เริ่มเคลื่อนที่ลงสู่พื้นดินต่อไป และทิศทางการเคลื่อนที่ของหัวนำร่องจะไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับว่าทิศทางใดจะเคลื่อนที่ได้ง่ายที่สุด การเคลื่อนที่ของหัวนำร่องแล้วหยุด เคลื่อนที่แล้วหยุด จะเกิดขึ้นหลายครั้งจนถึงขั้นสุดท้ายที่แสดงในรูปที่ 2.29



รูปที่ 2.29 ขั้นตอนการเกิดฟ้าผ่า

ณ เวลานี้ ที่ตำแหน่งต่างๆ บนพื้นโลกจะมีประจุบวกสะสมอยู่เนื่องจากการเหนี่ยวนำของประจุลบในหัวนำร่อง เมื่อประจุบวกที่ตำแหน่งใดสูงมากพอ อากาศจะเกิดเบรกดาวน์เป็นสายเรียกว่า *สตรีมเมอร์* (streamer) วิ่งขึ้นไปหาหัวนำร่อง เมื่อหัวนำร่องและสตรีมเมอร์บรรจบกันก็จะทำให้ประจุจำนวนมากที่สะสมอยู่ในก้อนเมฆถ่ายเทลงสู่พื้นดินซึ่งก็คือ *ฟ้าผ่า* (lightning strike) นั่นเอง ระยะห่างระหว่างหัวนำร่องกับวัตถุบนพื้นโลกขั้นสุดท้ายก่อนที่เกิดฟ้าผ่า มักเรียกว่า ระยะฟ้าผ่า (striking distance, R) จะขึ้นอยู่กับจำนวนประจุในหัวนำร่องซึ่งแปรโดยตรงกับขนาดของกระแสฟ้าผ่า I

ดังนั้น นอกจากความหนาแน่นของฟ้าผ่า N_g แล้ว พารามิเตอร์ที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งที่สำคัญคือขนาดของกระแสฟ้าผ่า I ซึ่งเป็นค่าทางสถิติเช่นกัน ดังแสดงรูปที่ 2.30 [IEC62305-1, 2010], [IEEE1243, 1997], [TB549, 2013]



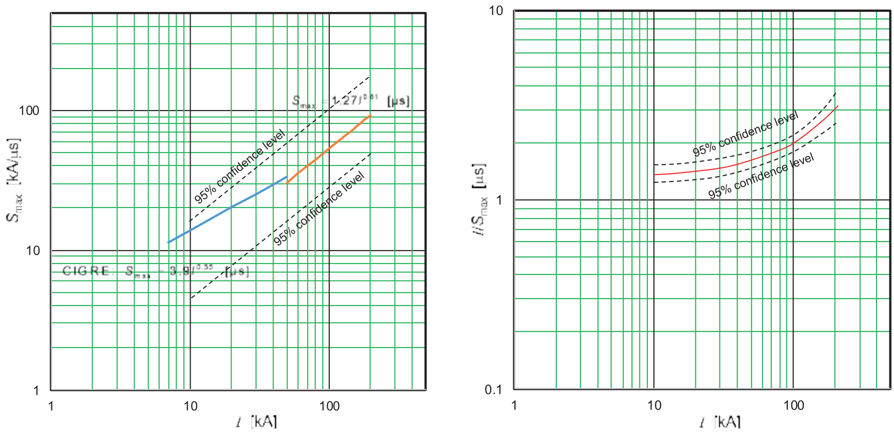
รูปที่ 2.30 ขนาดของกระแสฟ้าผ่าทางสถิติ

ซึ่งจากรูปจะเห็นว่าสำหรับฟ้าผ่าขั้วลบ โอกาสที่กระแสฟ้าผ่า i จะมีค่าสูงกว่ากระแส I , $P(i > I)$, จากทั้ง [IEC 62305-1, 2010], [IEEE1243, 1997] และ [TB549, 2013] มีค่าใกล้เคียงกัน ประกอบกับ 80-90% ของฟ้าผ่าเป็นขั้วลบ ดังนั้นการออกแบบโดยทั่วไปจึงใช้สมการที่ 2.23 ในการคำนวณโอกาสที่กระแสฟ้าผ่า i จะมีค่าสูงกว่ากระแส I

$$P(i>I)=\frac{1}{1+(I/31)^{2.6}} \tag{2.23}$$

เมื่อ I ในสมการมีหน่วยเป็น [kA]

พารามิเตอร์ที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งความชัน S ของกระแสฟ้าผ่าที่แสดงในรูปที่ 2.31 [TB542, 2013] เพราะเป็นที่ทราบกันดีว่าการเกิดเบรกดาวน์ในอากาศนอกจากจะขึ้นอยู่กับขนาดของแรงดันแล้วยังขึ้นอยู่กับรูปคลื่นแรงดันด้วย

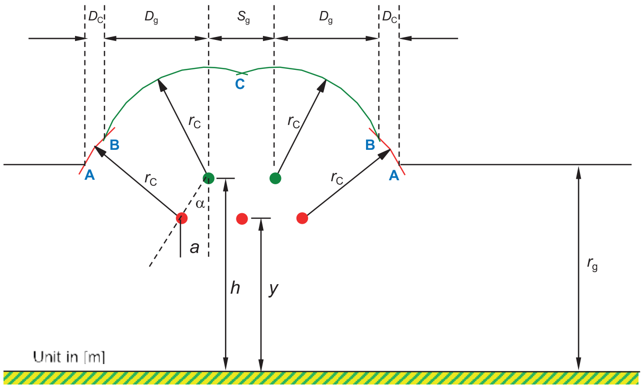


รูปที่ 2.31 ความชันสูงสุด S_{max} ของกระแสฟ้าผ่าขนาด I

ข. อัตราล้มเหลวของชีลด์ที่ทำให้เกิดวาบไฟ

ฟ้าผ่าที่ผ่าลงบนสายส่งไฟฟ้าทั้งหมดไม่ได้ผ่าลงที่ OHG เพราะ OHG ไม่สามารถป้องกันฟ้าผ่าได้ 100% และฟ้าที่ผ่าลงบนสายเฟสก็อาจทำให้เกิดวาบไฟที่พวงลูกถ้วยไฟฟ้าหรือไม่ก็ได้ ในกรณีที่เกิดวาบไฟจะเรียกว่าอัตราล้มเหลวของชีลด์ที่ทำให้เกิดวาบไฟ, SFFOR, ซึ่งโดยปกติมักจะไม่เกิดขึ้นในระบบสายส่ง EHV และ UHV เพราะพวงลูกถ้วยมีความยาวมาก

รูปที่ 2.32 แสดงลักษณะของฟ้าที่ผ่าลงบนสายส่งไฟฟ้า -ในที่นี้จะสมมุติว่าฟ้าผ่าลงมาในแนวตั้งฉากกับพื้นโลก โดยไม่คำนึงถึงฟ้าผ่าทางด้านข้าง (side flash)-



รูปที่ 2.32 ลักษณะของฟ้าที่ผ่าลงบนสายส่งไฟฟ้าเมื่อกระแสฟ้าผ่ามีขนาด I

โดยในรูป OHG และสายเฟสมี**ความสูงเฉลี่ย**เหนือพื้นดิน h [m] และ y [m] ตามลำดับ และทำมุมกัน α ซึ่งมีชื่อเรียกว่า มุมป้องกัน (protective angle)

นอกจากนั้นเราจะเห็นว่ามีระยะฟ้าผ่า R อยู่ 2 ค่า คือ ระยะฟ้าผ่าลงตัวนำ r_C และ ระยะฟ้าผ่าลงดิน r_g ซึ่งมีความสัมพันธ์กับขนาดของกระแสฟ้าผ่า I ดังแสดงในตารางที่ 2.19 [Hileman, 1999] โดยในที่นี้จะใช้ความสัมพันธ์ที่เสนอโดย [IEEE1243, 1997] คือ

$$\begin{aligned} r_C &= 10 \cdot I^{0.65} \quad [\text{m}] \\ r_g &= \left(0.36 + 0.17\ln\left(43 - h\right)\right) \cdot r_C \quad [\text{m}];\; h_{avg} < 40 \text{ m} \\ &= 5.5 \cdot I^{0.65} \quad [\text{m}];\; h_{avg} \geq 40 \text{ m} \end{aligned} \tag{2.24}$$

ตารางที่ 2.19 ระยะฟ้าผ่าลงตัวนำ r_c และระยะฟ้าผ่าลงดิน r_g

Source	r_g to earth		r_c to conductor	
	A	*b*	*A*	*b*
Wagner	14.2	0.42	14.2	0.42
Young	27.0	0.32	γr_g [e]	
Armstrong and Whitehead	6.0	0.80	6.7	0.80
Brown and Whitehead	6.4	0.75	7.1	0.75
Love	10.0	0.65	10.0	0.65
Anderson and IEEE-1985	βr_c [a]		8.0	0.65
IEEE-1991	βr_c [b]		8.0	0.65
IEEE-1992	βr_c [c]		10.0	0.65
Mousa and IEEE-1995 [d]	8.0	0.65	8.0	0.65
Eriksson	To phase: r_c = 0.67(y^0.6)(I^0.74) To OHG: r_a = 0.67(h^0.6)(I^0.74) To earth: none			

[a] β = 0.64 for UHV lines, 0.80 for EHV lines, and 1.00 for others
[b] β = 22/y, y = conductor height, 0.6 < β < 0.9
[c] β = 0.36 + 0.17*ln(43-h), if h > 40 then h = 40
[d] Foe masts, Mousa uses A = 8.8
[e] γ = 444/(462-h) for h > 18 m, γ = 1 for h < 18 m

$$r = A \cdot I^b$$

ตัวอย่างที่ 2.10 จงคำนวณ r_C และ r_g เมื่อ OHG มีความสูง 40 m เหนือพื้นดิน ขณะที่เกิดฟ้าผ่าซึ่งมีกระแสฟ้าผ่า I = 20 kA

จากสมการที่ 2.24 จะพบว่า

$$\begin{aligned} r_C &= 10 \cdot I^{0.65} = 10 \cdot 20^{0.65} = 70.1 \quad [\text{m}] \\ r_g &= 5.5 \cdot I^{0.65} = 5.5 \cdot 20^{0.65} = 38.55 \quad [\text{m}] \end{aligned}$$

จากรูปที่ 2.32 จะเห็นว่าถ้ามีฟ้าผ่าลงในบริเวณ D_C ฟ้าจะผ่าลงบนสายเฟส ซึ่งหมายถึง OHG ล้มเหลวในการป้องกันสายเฟส แต่ขนาดของกระแสฟ้าผ่ามีค่าไม่แน่นอน ดังนั้น อัตราล้มเหลวของชีลด์ SFR จึงต้องหาจากสมการ

$$\text{SFR} = 2N_g \ell \int_3^{I_{Dc=0}} D_C f(I)\, dI \tag{2.25}$$

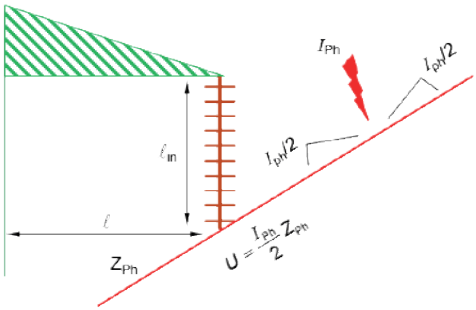
เมื่อ ℓ = ความยาวของสายส่งไฟฟ้า [m]

$I_{Dc=0}$ = ขนาดของกระแสฟ้าผ่าสูงสุด [kA] ที่ทำให้ D_C = 0

$f(I)$ = ฟังก์ชันการกระจายของขนาดกระแสฟ้าผ่า

โดยตัวเลข 3 ในสมการ คือ ขนาดกระแสฟ้าผ่าน้อยที่สุดที่เคยบันทึกได้ เท่ากับ 3 kA

ดังที่ทราบแล้วว่าฟ้าที่ผ่าลงบนสายส่งไฟฟ้าอาจไม่ทำให้เกิดวาบไฟที่สายส่งไฟฟ้าทุกครั้งเพราะขนาดของกระแสฟ้าผ่าแต่ละครั้งไม่เท่ากัน เราจึงต้องหาขนาดของกระแสฟ้าผ่าที่ทำให้เกิดวาบไฟที่สายส่งไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 2.33

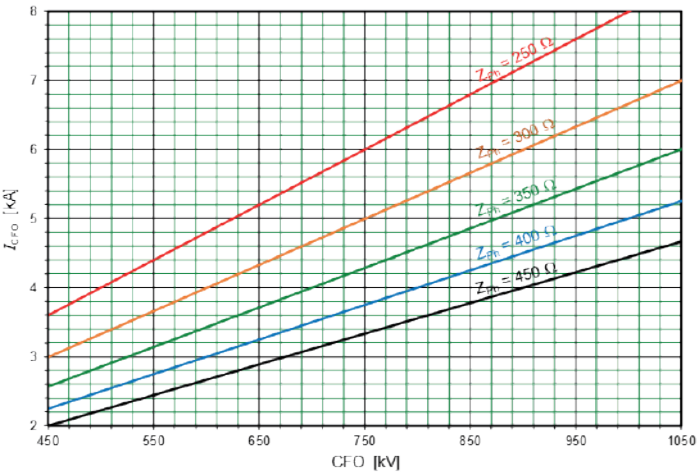


รูปที่ 2.33 ขนาดของกระแสฟ้าผ่า I_{CFO} ที่ทำให้เกิดวาบไฟตามผิวพวงลูกถ้วยไฟฟ้า

ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อมีฟ้าผ่าลงบนสายเฟส กระแสฟ้าผ่า I_{Ph} จะแยกไหลไปทางซ้ายและขวาอย่าละครึ่งหนึ่ง แต่เนื่องจากสายเฟสมีอิมพีแดนซ์เท่ากับ Z_{Ph} แรงดันที่เกิดขึ้นบนสายเฟสจึงมีขนาดเท่ากับ U ที่แสดงในรูป และหาก U มีค่าเท่ากับ CFO ของพวงลูกถ้วยไฟฟ้า โอกาสที่พวงลูกถ้วยไฟฟ้าจะเกิดวาบไฟตามผิวก็จะมีค่าเท่ากับ 50% ดังนั้นเราจึงคำนวณหากระแส I_{CFO} ได้จากสมการ

$$I_{CFO} = \frac{2 \cdot \mathrm{CFO}}{Z_{Ph}} \quad [\mathrm{kA}] \tag{2.26}$$

เมื่อ CFO มีหน่วยเป็น [kV] และ Z_{Ph} มีหน่วยเป็น [Ω] **ความสัมพันธ์ของกระแส** I_{CFO} กับ CFO ของพวงลูกถ้วยไฟฟ้า **เมื่อสายเฟสมีอิมพีแดนซ์** Z_{Ph} ค่าต่างๆ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.34

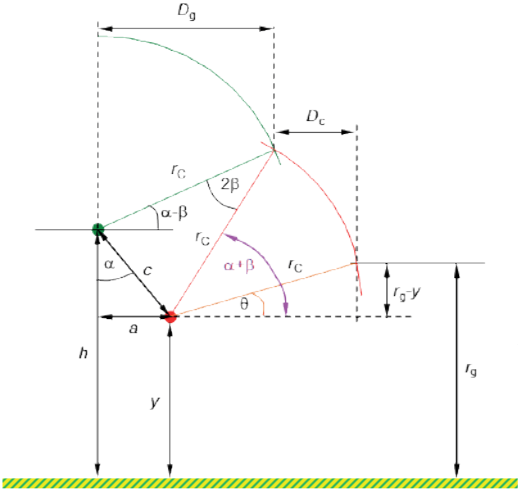


รูปที่ 2.34 ความสัมพันธ์ของขนาดของกระแสฟ้าผ่า I_{CFO} กับ CFO ของพวงลูกถ้วยไฟฟ้า

ดังนั้น SFFOR จึงมีค่าเท่ากับ

$$\mathrm{SFFOR} = 2N_g \ell \int_{I_{CFO}}^{I_{Dc=0}} D_c f(I)\, dI \tag{2.27}$$

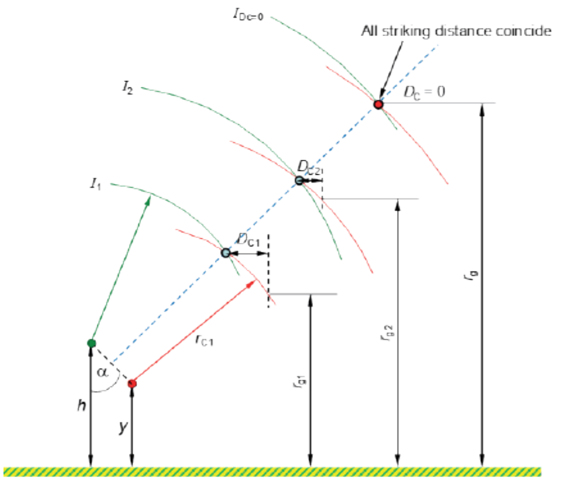
ที่มุมป้องกัน α ใดๆ เราจึงสามารถหาช่วงที่ฟ้าจะผ่าลงสายเฟส D_C ได้จากรูปที่ 2.35



$$D_C = r_C\left[\cos\theta - \cos(\alpha+\beta)\right]$$
$$D_g = r_C\cos(\alpha-\beta)$$
$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{a}{h-y}\right)$$
$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{r_g-y}{r_C}\right) = 0 \quad \text{if } r_g \le y$$
$$\beta = \sin^{-1}\left(\frac{c/2}{r_C}\right) = \sin^{-1}\left(\frac{\sqrt{a^2+(h-y)^2}}{2r_C}\right)$$
$$= \sin^{-1}\left(\frac{(h-y)\sqrt{1+(\tan\alpha)^2}}{2r_C}\right)$$

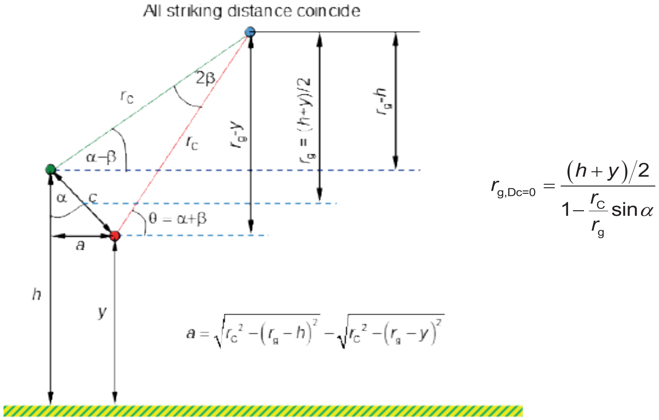
รูปที่ 2.35 ช่วงที่ฟ้าจะผ่าลงสายเฟส D_C ที่มุมป้องกัน α ใดๆ

ในรูปที่ 2.36 เมื่อกระแสฟ้าผ่า I_1 เพิ่มขึ้นเป็น I_2 ระยะฟ้าผ่าลงตัวนำจะเพิ่มขึ้นจาก r_{C1} ไปเป็น r_{C2} เช่นกัน แต่ช่วงที่ฟ้าจะผ่าลงสายเฟสจะลดลงจาก D_{C1} ไปเป็น D_{C2} และที่กระแสฟ้าผ่าขนาด $I_{Dc=0}$ ระยะ D_C จะมีค่าเท่ากับศูนย์ ซึ่งหมายถึง OHG ป้องกันฟ้าผ่าลงที่สายเฟสได้ 100% (SFFOR = 0)



รูปที่ 2.36 ระยะที่ฟ้าจะผ่าลงสายเฟส D_C เมื่อขนาดกระแสฟ้าผ่า I_{Ph} เพิ่มขึ้น

มุมป้องกัน α ที่ทำให้ D_C = 0 สามารถหาได้จากรูปที่ 2.37 โดยใช้สมการ



รูปที่ 2.37 วิธีหามุมป้องกันสมบูรณ์ α_p

$$\alpha = \frac{1}{2}\left[\sin^{-1}\left(\frac{r_g - h}{r_C}\right) + \sin^{-1}\left(\frac{r_g - y}{r_C}\right)\right] \tag{2.28}$$

และ

$$I_{Dc=0} = \sqrt[b]{\frac{r_{g,Dc=0}}{A}} = \sqrt[0.65]{\frac{r_{g,Dc=0}}{10}} \tag{2.29}$$

ซึ่งจะเห็นว่าไม่ง่ายนัก แต่ทางหนึ่งที่ทำได้คือกำหนดให้ $I_{Dc=0} = I_{CFO}$ โดยในกรณีนี้เราจะเรียกมุมป้องกันดังกล่าวว่า มุมป้องกันสมบูรณ์ (perfect shielding angle, α_p)

ตัวอย่างที่ 2.11 จงหาค่า $I_{Dc=0}$ ของสายส่ง 230 kV ที่ใช้มุมป้องกัน 15° เมื่อสายเฟสบนสุดมีอิมพีแดนซ์ Z_{Ph} = 500 Ω และมีความสูงเฉลี่ย y = 40 m ส่วนสาย OHG มีอิมพีแดนซ์ Z_{OHG} = 500 Ω มีความสูงเฉลี่ย h = 45 m และใช้พวงลูกถ้วยมีค่า BIL = 1050 kV

ก่อนอื่นเราต้องหาค่า CFO ของพวงลูกถ้วยจากสมการ

$$\text{CFO} = \frac{\text{BIL}}{[1 - 1.28(\sigma/\text{CFO})]}$$

เมื่อ σ/CFO มีค่า 3-5%

ในที่นี้จะใช้ σ/CFO = 0.03 ทำให้ CFO = 1092 kV, I_{CFO} จึงมีค่าเท่ากับ

$$I_{CFO} = \frac{2 \cdot \text{CFO}}{Z_{Ph}} = \frac{2 \cdot 1092}{500} = 4.37 \text{ [kA]}$$

ดังนั้นระยะฟ้าผ่าลงตัวนำ r_C และระยะฟ้าผ่าลงดิน r_g ตาม [IEEE1243, 1997] จึงมีค่าเท่ากับ

$$r_C = 10 \cdot I^{0.65} = 10 \cdot 4.37^{0.65} = 26.1 \text{ [m]}$$

$$r_g = 5.5 \cdot I^{0.65} = 5.5 \cdot 4.37^{0.65} = 14.3 \text{ [m]}$$

และ

$$r_{g,Dc=0} = \frac{(h+y)/2}{1 - \dfrac{r_C}{r_g}\sin\alpha} = \frac{(45+40)/2}{1 - \dfrac{26.1}{14.3}\sin 15} = 80.3 \text{ [m]}$$

ดังนั้น

$$I_{Dc=0} = \sqrt[0.65]{\frac{r_{g,Dc=0}}{10}} = \sqrt[0.65]{\frac{80.3}{10}} = 24.6 \text{ [kA]}$$

จากสมการที่ 2.27 จะเห็นว่าการอินตีเกรตสมการเพื่อหา SFFOR ทำได้ไม่ง่ายนัก เพราะนอกจากขนาดของกระแสฟ้าผ่า I_{Ph} จะเป็นค่าทางสถิติแล้ว ช่วงที่ฟ้าผ่าลงสายส่ง D_C ยังขึ้นอยู่กับของกระแสฟ้าผ่า I_{Ph} และมุมป้องกัน α อีกด้วย [Anderson, 1987] จึงเสนอวิธีการแก้สมการง่ายๆ ขึ้นมาโดยกำหนดให้ช่วงที่ฟ้าผ่าลงสายส่ง D_C มีค่าคงที่เท่ากับ

$$D_{C,avg} = \frac{D_C(I_{CFO}) - D_C(I_{Dc=0})}{2} = \frac{D_C(I_{CFO})}{2}$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} \text{SFFOR} &= 2N_g \ell D_{C,avg} \int_{I_{CFO}}^{I_{Dc=0}} f(I)\,dI = 2N_g \ell D_{C,avg} P(I_{Dc=0} > i > I_{CFO}) \\ &= N_g \ell D_{C,CFO}\left[P(i > I_{CFO}) - P(i > I_{DC=0})\right] \quad [\text{flash/yr}];\ D_{C,CFO} \text{ in [km]} \\ &= \frac{N_g}{10} D_{C,CFO}\left[P(i > I_{CFO}) - P(i > I_{DC=0})\right] \quad [(\text{flash/100km})/\text{yr}];\ D_{C,CFO} \text{ in [m]} \end{aligned} \tag{2.30}$$

ตัวอย่างที่ 2.12 จงหาค่า SFFOR ในตัวอย่างที่ 2.11 เมื่อ N_g = 1 (flash/km^2)/yr

จากค่า r_C ที่คำนวณได้จากตัวอย่างที่ 2.11

$$\theta = 0$$

$$\beta = \sin^{-1}\left(\frac{(h-y)\sqrt{1+(\tan\alpha)^2}}{2r_C}\right) = \sin^{-1}\left(\frac{(45-40)\sqrt{1+(\tan 15)^2}}{2\cdot 26.1}\right) = 5.7^\circ$$

ทำให้

$$\begin{aligned} D_{C,CFO} &= r_C\left[\cos\theta - \cos(\alpha+\beta)\right] = 26.1\cdot\left[\cos(0) - \cos(15+5.7)\right] \\ &= 1.7 \quad [\text{m}] \end{aligned}$$

ส่วนโอกาสที่จะเกิด I_{Ph} ค่าต่างๆ ก็หาได้จาก

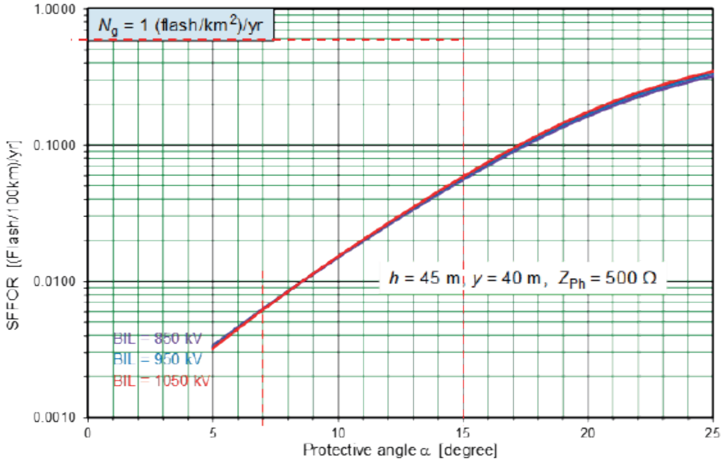
$$P(I_{Ph} > I_{CFO}) = \frac{1}{1+(I_{CFO}/31)^{2.6}} = \frac{1}{1+(4.37/31)^{2.6}} = 0.994$$

$$P(I_{Ph} > I_{Dc=0}) = \frac{1}{1+(I_{Dc=0}/31)^{2.6}} = \frac{1}{1+(24.6/31)^{2.6}} = 0.645$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} \text{SFFOR} &= \frac{N_g}{10} D_{C,CFO}\left[P(i > I_{CFO}) - P(i > I_{DC=0})\right] = \frac{1}{10}1.7[0.994 - 0.645] \\ &= 0.06 \quad [(\text{flash/100km})/\text{yr}] \end{aligned}$$

จากตัวอย่างข้างต้น เราสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างมุมป้องกัน α กับ SFFOR ของสายส่ง 230 kV ที่ OHG และสายเฟสมีความสูงเฉลี่ยเหนือพื้นดิน h = 45 m และ y = 40 m และสายเฟสมีอิมพีแดนซ์ Z_{Ph} = 500 Ω สำหรับ BIL ค่าต่างๆ ได้ ดังแสดงรูปที่ 2.38



รูปที่ 2.38 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมป้องกัน α กับ SFFOR ของสายส่งไฟฟ้า 230 kV ที่ BIL ค่าต่าง ๆ

จากรูปที่ 2.38 จะเห็นว่าที่มุมป้องกัน $\alpha < 7^\circ$ ค่า SFFOR จะลดลงตาม BIL ของพวงลูกถ้วยไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น แต่จะกลับกันเมื่อ α เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งตรงข้ามกับความเข้าใจโดยทั่วไป สาเหตุที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะอัตราส่วน r_C/r_g มีค่าคงที่จึงทำให้ $r_{Dc=0}$ คงที่ ทำให้ $I_{Dc=0}$ และ $P(I_{Ph} > I_{Dc=0})$ มีค่าคงที่ด้วย ส่วน $P(I_{Ph} > I_{CFO})$ จะมีค่าลดลงตามค่า BIL ที่สูงขึ้นทำให้ $[P(I_{Ph} > I_{CFO}) - P(I_{Ph} > I_{Dc=0})]$ ลดลง แต่ $D_{D,CFO}$ ซึ่งเพิ่มขึ้นตาม I_{CFO} จะเพิ่มขึ้นด้วยอัตราที่เร็วกว่า ดังนั้น SFFOR จึงเพิ่มขึ้นตาม BIL ของพวงลูกถ้วยไฟฟ้า แต่ก็เพิ่มขึ้นไม่มากนัก (เช่น ที่มุมป้องกัน $\alpha = 25^\circ$ ถ้าเราเพิ่ม BIL ของพวงลูกถ้วยไฟฟ้าจาก 850 kV ไปเป็น 1050 kV -ประมาณ 24%- ค่า SFFOR จะเพิ่มขึ้นเพียง 11% เท่านั้น) และโปรดสังเกตว่าเราสามารถหา SFFOR ในพื้นที่ใด ๆ ที่มีความหนาแน่นของฟ้าผ่าเท่ากับ N_g ได้โดยคูณค่า N_g กับค่าที่อ่านได้จากกราฟรูปที่ 2.30 เนื่องจาก SFFOR แปรผันโดยตรงกับ N_g

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้นเราสามารถสรุปได้ว่า ในกรณีของสายส่งไฟฟ้า 230 kV ที่ออกแบบ

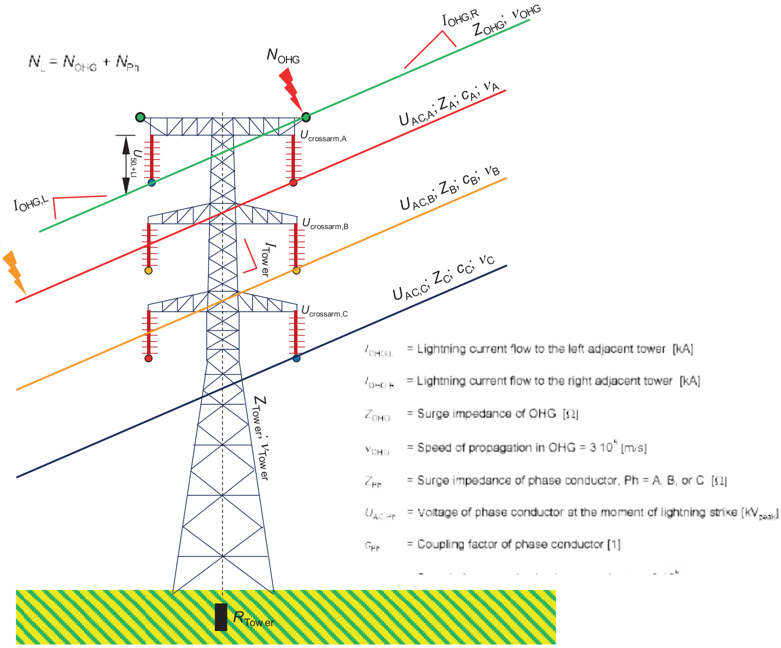
1. ค่า BIL ของพวงลูกถ้วยไฟฟ้ามีผลไม่มากนักต่อ SFFOR
2. เนื่องจากค่า $a = \tan(\alpha)*(h-y)$ ดังนั้นถ้ามุมป้องกัน $\alpha = 15^\circ$ และ $(h-y) = 5$ m ค่า a จะเท่ากับ 1.3 m ซึ่งหมายถึงแขนของสาย OHG จะสั้นกว่าแขนของสายเฟสประมาณ 1.3 m
3. หากเราใช้มุมป้องกัน $\alpha = 0^\circ$ ค่าก่อสร้างจะเพิ่มขึ้นไม่มากนัก แต่สามารถป้องกันสายเฟสเส้นล่างสุดไม่ให้ถูกฟ้าผ่าจากทางด้านข้างได้เป็นอย่างดี คือ SFFOR ~ 0

อนึ่ง การหา SFFOR ที่กล่าวข้างต้นใช้วิธีป้องกันฟ้าผ่าด้วยหลักการที่เรียกว่า Electro-geometrical model, EGM, [TB063, 1991] แต่ในปัจจุบัน [TB633, 2015] พบว่าสายส่ง UHV เกิดอัตราการเกิดวาบไฟสูงมาก เช่น ที่ประเทศญี่ปุ่น สายส่งไฟฟ้า 1000 kV มีสมรรถนะของสายส่ง 0.42 โดยแยกเป็น SFFOR = 0.37 และ BFR = 0.05 ส่วนสายส่งไฟฟ้า 500 kV มีสมรรถนะของสายส่ง 0.98 โดยแยกเป็น SFFOR = 0.39 และ BFR = 0.59 ซึ่งสันนิษฐานว่าเกิดจาก *ฟ้าผ่าขึ้น* (upward lightning)

[TB633, 2015] จึงสรุปว่า EGM ไม่เหมาะกับการออกแบบระบบป้องกันสายส่งไฟฟ้า UHV และ [TB704, 2017] ได้เสนอวิธี leader propagation model, LPM, ในการออกแบบแทน ส่วนสายส่งไฟฟ้า 500 kV แบบที่ใช้สายเฟสในแนวตั้งนั้น ก็ไม่เหมาะในการใช้ EGC ออกแบบเช่นกัน เพราะอาจเกิดฟ้าผ่าที่สายเฟสเส้นล่างสุด อย่างไรก็ตาม [Pakdee, 2014] ได้แสดงให้เห็นว่า EGM สามารถใช้ในการออกแบบระบบป้องกันสายส่งไฟฟ้า 500 kV ได้

ค. อัตราการเกิดวาบไฟย้อนกลับ, BFR

เมื่อเกิดฟ้าผ่าลงที่ยอดเสาส่งไฟฟ้าในรูปที่ 2.39 เหตุการณ์ต่อไปนี้จะเกิดขึ้น



รูปที่ 2.39 การเกิดฟ้าผ่าที่ยอดเสาส่งไฟฟ้า

1. กระแสฟ้าผ่า I จะแยกไหลออกเป็น 3 ทาง คือ $I_{OHG,L}$, $I_{OHG,R}$ และ I_{Tower}
2. $I_{OHG,L}$ และ $I_{OHG,R}$ จะทำให้เกิดแรงดันบน OHG เช่น แรงดัน $U_{OHG,R}$ จะมีขนาด $I_{OHG,R} \cdot Z_{OHG}$ ซึ่งวิ่งด้วยความเร็ว $v_{OHG,R}$ ไปยังเสาส่งไฟฟ้าทางด้านขวามือของเสาส่งไฟฟ้าต้นที่ถูกฟ้าผ่า และเกิดคลื่นสะท้อนย้อนกลับมา แต่เนื่องจากระยะห่างระหว่างเสาส่งไฟฟ้ามากกว่าความสูงของเสาส่งไฟฟ้ามาก คลื่นสะท้อนจึงไม่มีผลต่อแรงดันเกินที่เกิดขึ้นบนเสาส่งไฟฟ้าที่ถูกฟ้าผ่า

   ในทำนองเดียวกัน I_{Tower} จะทำให้เกิดแรงดัน U_{Tower} ในเสาส่งไฟฟ้าที่ถูกฟ้าผ่าขนาด $I_{Tower} \cdot Z_{Tower}$ ซึ่งจะวิ่งด้วยความเร็ว v_{Tower} ไปยังฐานเสาส่งไฟฟ้าซึ่งมี ความต้านทานดินที่ฐานเสาส่งไฟฟ้า R_{Tower} ไม่เท่ากับ Z_{Tower} ทำให้เกิดการสะท้อนไปมาในเสาส่งไฟฟ้า จึงเกิดแรงดันที่แขนเสาส่งไฟฟ้าที่แขวนสายเฟสขนาด $U_{crossarm,Ph}$ ขึ้น

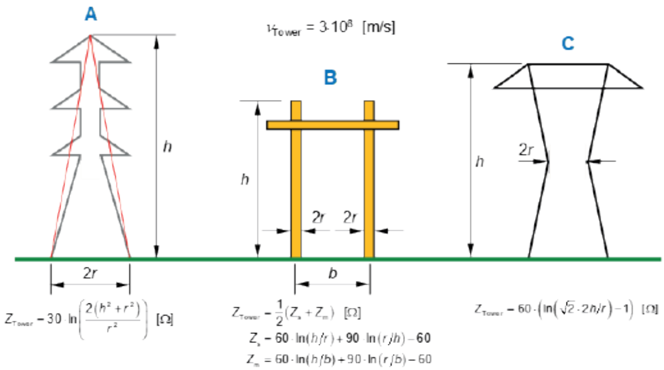
3. $I_{\mathrm{OHG,L}}$ และ $I_{\mathrm{OHG,R}}$ ที่ไหลใน OHG จะทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นบนสายเฟสขนาด $U_{\mathrm{c,Ph}} = I_{\mathrm{OHG,R}} \cdot c_{\mathrm{Ph}}$
4. ขณะที่เกิดฟ้าผ่าที่เสาส่งไฟฟ้า แรงดันที่สายเฟสมีค่าเท่ากับ $U_{\mathrm{AC,Ph}}$
5. เมื่อเวลาผ่านไป แรงดันที่สายไฟฟ้าสายเฟส U_{Ph} จึงมีค่าเท่ากับ $U_{\mathrm{c,Ph}} + U_{\mathrm{AC,Ph}}$ ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมพวงลูกถ้วย $U_{\mathrm{ins}} = U_{\mathrm{crossarm,Ph}} - U_{\mathrm{Ph}}$
6. ถ้า $U_{\mathrm{ins}} \geq$ CFO ก็จะเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ

โปรดสังเกตว่า 1. โอกาสที่ฟ้าจะผ่าลงยอดเสาตรงๆ มีน้อยมาก เราต้องคำนึงถึงฟ้าที่ผ่าลงที่ระหว่างเสาส่งไฟฟ้าด้วย; 2. CFO ของพวงลูกถ้วยทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นมาตรฐานในขณะที่ U_{ins} มีรูปร่างไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับรูปคลื่นของกระแสฟ้าผ่า ดังนั้นเราต้องคำนึงถึง แรงดันวาบไฟตามผิวอิมพัลส์ฟ้าผ่าวิกฤติรูปคลื่นไม่มาตรฐาน (non-standard critical lightning impulse flashover, $U_{50,\mathrm{NSI}}$) ด้วย [TB542, 2013] [IEC60071-2, 2019]; 3. โคโรนาที่เกิดบนสายเฟส; 4. แรงดันของสายเฟส $U_{\mathrm{AC,x}}$ ขณะที่เกิดฟ้าผ่า; ฯลฯ

กระแส I ที่ฟ้าผ่าลงมาที่เสาส่งไฟฟ้าจะแยกเป็น 3 ทาง โดยขนาดของกระแสที่ไหลในเสาไฟฟ้า I_{Tower} สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$I_{\mathrm{Tower}} = \frac{Z_{\mathrm{OHG}}/2}{Z_{\mathrm{OHG}}/2 + Z_{\mathrm{Tower}}} I \quad [\mathrm{kA}] \tag{2.31}$$

เมื่อ Z_{OHG} และ Z_{Tower} คือ อิมพีแดนซ์ของ OHG และเสาส่งไฟฟ้าตามลำดับ มีหน่วยเป็น [Ω] เมื่ออิมพีแดนซ์ของเสาส่งไฟฟ้าแบบต่างๆ โดยประมาณ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.40 [Anderson, 1987]



รูปที่ 2.40 อิมพีแดนซ์โดยประมาณของเสาส่งไฟฟ้ารูปร่างต่างๆ

กระแส I_{Tower} จะไหลผ่านเสาไฟฟ้าลงสู่ระบบรากสายดินของเสาส่งไฟฟ้าที่มี ความต้านทานดินที่ฐานเสาส่งไฟฟ้า เท่ากับ R_{Tower} -R_{Tower} เป็นความต้านทานอิมพัลส์ไม่ใช่ความต้านทานความถี่ต่ำของระบบรากสายดินของเสาส่งไฟฟ้า R_0 ที่ออกแบบหรือที่วัดได้เมื่อก่อสร้างเสร็จ- ซึ่งมักมีค่าไม่เท่ากับ Z_{Tower} ทำให้เกิดการสะท้อนไปมาของคลื่นกระแสระหว่างยอดกับฐานของเสาส่งไฟฟ้า แรงดันที่ตำแหน่งต่างๆ ของเสาส่งไฟฟ้าจึงเพิ่มขึ้นทำให้แรงดันที่ตกคร่อมพวงลูกถ้วยไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลง หากแรงดันนี้สูงกว่าแรงดันที่พวงลูกถ้วยทนได้ก็จะเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับขึ้น

กระแสฟ้าผ่า I ที่ทำให้วาบไฟตามผิวย้อนกลับมักเรียกว่า กระแสวิกฤติ (critical current, I_c) หาได้จากสมการ [Hileman, 1999]

$$I_{c,Ph} = \frac{\text{CFO}_{NS}}{K_{sp}K_{TT}\left(1-c_{Ph}\right)} \quad \text{[kA]} \tag{2.32}$$

เมื่อ CFO_{NS} = แรงดันวาบไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤติรูปคลื่นไม่มาตรฐาน ของพวงลูกถ้วย [kV]

c_{Ph} = คัปปลิงแฟกเตอร์ระหว่าง OHG กับสายเฟส, Ph = A, B หรือ C

K_{TT} = แฟกเตอร์ที่หาได้จากสมการ

$$K_{TT} = R_e + \alpha_{Foot} Z_{Tower} \frac{\tau_{Tower}}{t_f} \quad [\Omega] \tag{2.33}$$

เมื่อ

$$R_e = \frac{Z_{OHG}R_{Tower}}{Z_{OHG}+2R_{Tower}} \quad [\Omega] \qquad \alpha_{Foot} = \frac{Z_{Tower}-R_{Tower}}{Z_{Tower}+R_{Tower}} \approx \frac{Z_{OHG}-2R_{Tower}}{Z_{OHG}+2R_{Tower}}$$

$$\tau_{Tower} = \frac{h}{v_{Tower}} \quad \text{[s]} \qquad t_f = \text{Time to peak value of lightning current [s]}$$

K_{sp} = แฟกเตอร์ที่หาได้จากสมการ

$$K_{sp} = 1-\alpha_{Top}\left(1-\alpha_{Foot}\right)\cdot\sum_{n=1}^{\infty}\left[\left(\alpha_{Top}\alpha_{Foot}\right)^{n-1}\left(1-2n\frac{\tau_{span}}{t_f}\right)\right]$$

เมื่อ

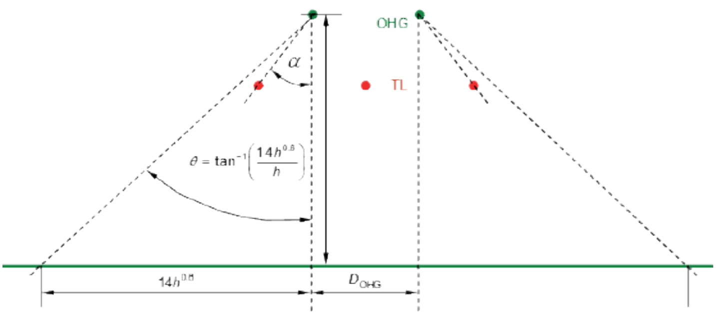
$$\alpha_{Top} = \frac{Z_{OHG}}{Z_{OHG}+2R_{Tower}}; \qquad \tau_{span} = \frac{\text{span}}{v_{OHG}}$$

อัตราการเกิดวาบไฟย้อนกลับจึงหาได้จากสมการ

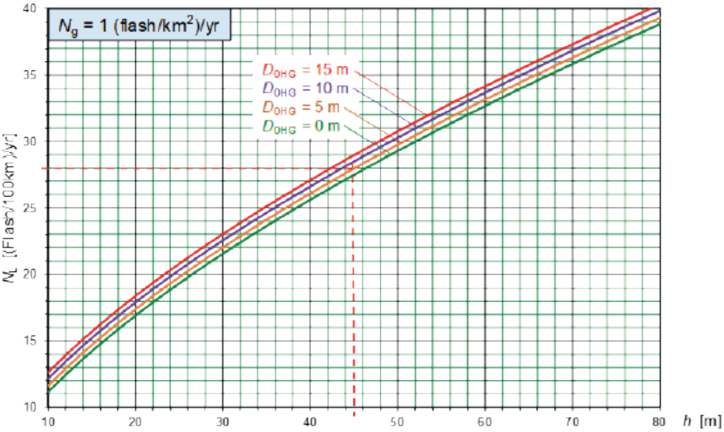
$$\text{BFR} = \frac{N_g}{10}\int_{I_c}^{\infty} D_g \cdot f(I)\,dI \quad \text{[(flash/100km)/yr]} \tag{2.34}$$

ซึ่งไม่ได้คำนึงถึงความสูงของเสาส่งไฟฟ้า

เนื่องจากโอกาสที่เสาส่งไฟฟ้าจะถูกฟ้าผ่า เพิ่มขึ้นตามความสูงของเสาส่งไฟฟ้าและช่วงที่ฟ้าผ่าลง OHG เพิ่มขึ้นตามระยะฟ้าผ่า [IEEE1243, 1987] จึงเสนอให้คำนวณจำนวนที่ฟ้าผ่าลงสายส่งไฟฟ้าในรูปที่ 2.41 [IEEE1243, 1987] ด้วยสมการที่ 2.35 เมื่อ D_{OHG} คือ ระยะห่างระหว่าง OHG ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 2.42



รูปที่ 2.41 ช่วงที่รับฟ้าผ่าของ OHG



รูปที่ 2.42 จำนวนฟ้าผ่า N_L ที่ผ่าลงเสาส่งไฟฟ้าซึ่งมีความสูง h

$$N_L = \frac{N_g}{10}\left(28h^{0.6} + D_{OHG}\right) \quad [(\text{flash}/100\text{km})/\text{yr}] \tag{2.35}$$

ดังนั้นสมการที่ 2.34 เมื่อพิจารณาถึงความสูงของสาย OHG จึงสามารถเขียนได้ใหม่เป็น

$$\text{BFR} = N_L \int_{I_c}^{\infty} f(I)dI = \frac{N_g}{10}\left(28h^{0.6} + D_{OHG}\right) P\left(i > I_c\right) \quad [(\text{flash}/100\text{km})/\text{yr}] \tag{2.36}$$

แต่ก่อนที่จะหาค่า BFR ที่แสดงในสมการที่ 2.36 เราจำเป็นจะต้องพิจารณาถึงผลกระทบต่างๆ ที่มีผลต่อพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณ ดังนี้

1) **ฟ้าผ่าที่กลาง span** ฟ้าผ่าที่สายส่งไฟฟ้าแทบทั้งหมดจะผ่าลงบน OHG ที่ขึงระหว่างเสาส่งไฟฟ้า โดยแทบจะไม่มีโอกาสผ่าลงที่ตำแหน่งยอดเสาส่งไฟฟ้าเลย ดังนั้นกระแสฟ้าผ่าจากฟ้าที่ผ่าลงบน OHG ที่ขึงระหว่างเสาส่งไฟฟ้าจะวิ่งไปที่ยอดเสาและเกิดการสะท้อนไปมาระหว่างเสาส่งไฟฟ้ากับจุดที่ถูกฟ้าผ่า แต่ผลการสะท้อนนี้จะทำให้แรงดันที่ยอดเสาส่งไฟฟ้าลดลง ค่า BFR จึงลดลง จากการวิเคราะห์พบว่า BFR จะลงลงประมาณ 40% ดังนั้นสมการที่ 2.37 จึงเขียนใหม่ได้เป็น

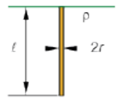
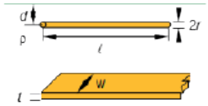
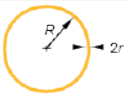
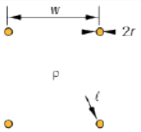
$$\text{BFR} = 0.6N_L \int_{I_c}^{\infty} f(I)dI \quad [(\text{flash}/100\text{km})/\text{yr}] \tag{2.37}$$

คำถามที่พบบ่อยคือ ฟ้าที่ผ่ากลาง span จะทำให้เบรกดาวน์ในอากาศระหว่าง OHG กับสายเฟสหรือไม่ คำตอบคือไม่เกิดเพราะระยะห่างระหว่าง OHG กับสายเฟสจะเพิ่มขึ้นจากยอดสายส่งไฟฟ้าไปจนถึงกึ่งกลาง span เนื่องจากในทางปฏิบัติระยะตกท้องช้างของสายเฟสจะมากกว่าของ OHG เสมอ [Hileman, 1999]

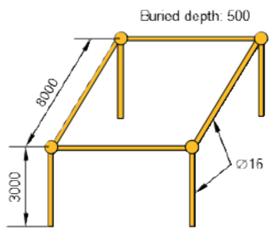
2) **ความต้านทานดินที่ฐานเสาส่งไฟฟ้า, R_{Tower}** เป็นความต้านทานของระบบรากสายดินที่ฐานเสาส่งไฟฟ้าในกรณีที่ดินเกิดไอออไนซ์เมื่อมีกระแสสูงไหลผ่านดิน ไม่ใช่ความต้านทานของระบบรากสายดิน R_0 ที่ออกแบบไว้หรือค่าที่วัดได้ที่หน้างาน

ค่า R_0 จะขึ้นกับรูปแบบของรากสายดิน -อาจเป็นแท่งโลหะ, ตัวนำ, หรือทั้งสองแบบผสมกัน- ดังแสดงในตัวอย่างที่แสดงในตารางที่ 2.20 โดยโปรดสังเกตว่าเมื่อเราใช้แท่งโลหะและตัวนำร่วมกันทำเป็นระบบรากสายดิน ความต้านทานของระบบรากสายดิน $R_{0,rod+wire}$ จะสูงกว่าผลการคำนวณจากการนำค่าความต้านทานของแท่งโลหะ $R_{0,rod}$ มาขนานกับความต้านทานของตัวนำ $R_{0,wire}$ เสมอ -$R_{0,rod+wire} > R_{0,rod} || R_{0,rod+wire}$- เนื่องจากแท่งโลหะและตัวนำวางห่างกันไม่มากนัก และการต่อแท่งโลหะให้ถึงกันด้วยตัวนำจะทำให้ความต้านทานรวมของแท่งโลหะลดลงประมาณ 10-15% ในขณะที่เมื่อต่อเพิ่มแท่งโลหะให้กับตัวนำจะทำให้ความต้านทานของตัวนำลดลงประมาณ 25-30% เท่านั้น

ตารางที่ 2.20 ค่า R_0 ของระบบรากสายดินที่ใช้อิเล็กโตรดรูปร่างต่างๆ

Layout	R_0
	$R_0 = \frac{\rho}{2\pi\ell}\left[\ln\left(\frac{4\ell}{r}\right)-1\right]$
	$R_0 = \frac{\rho}{\pi\ell}\left[\ln\left(\frac{2\ell}{\sqrt{2rd}}\right)-1\right]$ When $t \ll w$: $r = 0.22w$
	$R_{0n} = \frac{\rho}{n\pi\ell}\left[\ln\left(\frac{2\ell}{\sqrt{2rd}}\right)-1+N(n)\right]$ $N(n)=\sum_{m=1}^{n-1}\ln\left[\frac{1+\sin\left(\frac{\pi m}{n}\right)}{\sin\left(\frac{\pi m}{n}\right)}\right]$
	$R_0 = \frac{\rho}{2\pi}\cdot\frac{1}{\pi R}\cdot\ln\left(\frac{8R}{\sqrt{2rd}}\right)$
	$R_0 = \frac{\rho}{2\pi\ell}\left[\ln\left(\frac{4\ell}{r}\right)-1\right]\cdot(0.25+0.677\cdot\alpha)$ $\alpha = \frac{\ell}{w\left[\ln\left(\frac{4\ell}{r}\right)-1\right]}$

ตัวอย่างที่ 2.13 ในรูปเป็นระบบรากสายดินของเสาส่งไฟฟ้าต้นหนึ่ง จงหาค่าความต้านทาน R_0 เมื่อกำหนดให้ดินมีความต้านทานจำเพาะ ρ = 100 Ωm



ระบบรากสายดินในรูปเป็นการต่อรากสายดินที่เป็นแท่งโลหะ 4 แท่ง แบบ hollow squre ซึ่งมีความต้านทานเท่ากับ

$$R_{0,rods} = \frac{\rho}{2\pi\ell}\left[\ln\left(\frac{4\ell}{r}\right)-1\right]\cdot\left(0.25+0.677\frac{\ell}{w\left[\ln\left(\frac{4\ell}{r}\right)-1\right]}\right)$$

$$= \frac{100}{2\pi\cdot 3}\left[\ln\left(\frac{4\cdot 3}{0.008}\right)-1\right]\cdot\left(0.25+0.677\frac{3}{8\left[\ln\left(\frac{4\cdot 3}{0.008}\right)-1\right]}\right)$$

$$= 9.7 \ [\Omega]$$

เนื่องจากวางตัวนำเป็นรูปสี่เหลี่ยม ในที่นี้จะประมาณให้เป็นวงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 8 m ซึ่งมีความต้านทานเท่ากับ

$$R_{0,\text{ring}} = \frac{\rho}{2\pi}\frac{1}{\pi R}\ln\left(\frac{8R}{\sqrt{2rd}}\right) = \frac{100}{2\pi}\frac{1}{\pi 4}\ln\left(\frac{8\cdot 4}{\sqrt{2\cdot 0.008\cdot 0.5}}\right) = 7.4 \quad [\Omega]$$

ดังนั้นหากนำค่าความต้านทานมาขนานกันเราจะพบว่า R_0 = 4.2 Ω แต่การต่อแท่งโลหะให้ถึงกันด้วยตัวนำจะทำให้ความต้านทานของแท่งโลหะลดลงประมาณ 20-30% เท่านั้น ดังนั้นความต้านทาน R_0 ของระบบรากสายดินในรูปจึงมีค่าประมาณ 6.8-7.8 Ω หรือประมาณ 7.3 Ω

พารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อความต้านทานรากสายดินมากที่สุดคือ ความต้านทานจำเพาะของดิน (earth resistivity, ρ [Ωm]) ซึ่งขึ้นอยู่กับประเภทของดินที่เสาส่งไฟฟ้าตั้งอยู่ -เช่น เป็น หิน, ดินทราย, ดินร่วน, ดินเหนียว, ฯลฯ- และสภาพของดิน -เช่น เป็นดินเดิมหรือเป็นดินถม, มีวัตถุแปลกปลอมฝังในดินหรือไม่, มีความเป็นกรด/ด่างอย่างไร, ฯลฯ- แต่ที่สำคัญที่สุดคือน้ำ/ความชื้นในดินซึ่งเปลี่ยนไปตามฤดูกาล (แต่การเปลี่ยนแปลงของความชื้น/น้ำในดินจะลดลงเมื่อลึกลงไปในดินมากขึ้น) [IEEE80, 2015] ดังนั้นเราจึงควรวัดความต้านทานจำเพาะของดิน [IEEE81, 2013] ในช่วงหน้าแล้ง เพื่อให้ค่าที่วัดได้มีค่าสูงที่สุด ซึ่งจะทำให้ R_0 ของระบบรากสายดินสูงสุดตามไปด้วย

เมื่อมีกระแสฟ้าผ่า I_{Tower} ไหลผ่านดิน ดินจะไอออไนซ์หากขนาดกระแสมีค่าสูงพอทำให้เหมือนกับระบบรากสายดินใหญ่ขึ้น ความต้านทานรากสายดิน R_0 จึงลดลงเป็นความต้านทานฐานเสา R_T ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ

$$R_T = \frac{R_0}{\sqrt{1+\left(I_{\text{Tower}}/I_g\right)}} \quad [\Omega] \tag{2.38}$$

เมื่อ I_g คือกระแสฟ้าผ่าที่ทำให้ดินเกิดไอออไนซ์ [kA] ซึ่งหาได้จากสมการ

$$I_g = \frac{1}{2\pi}\frac{\rho E_0}{R_0^{\,2}} \quad [\text{kA}] \tag{2.39}$$

เมื่อ E_0 คือ เกรเดียนต์ที่ทำให้ดินเกิดไอออไนซ์ = 400 [kV/m]

3) **แรงดันกระแสสลับของสายเฟส, U_{LN}** จากรูปที่ 2.39 เมื่อแรงดันที่ตกคร่อมพวงลูกถ้วยไฟฟ้าเกินค่า CFO ก็จะทำให้เกิดวาบไฟตามผิวของพวงลูกถ้วยไฟฟ้า แต่ขณะที่ฟ้าผ่าลงมาที่สายส่งไฟฟ้าแรงดันกระแสสลับ 50 Hz ของสายเฟสอาจมีค่าเท่าใดก็ได้ -และในขณะนั้นแรงดัน 50 Hz ของเฟส A-B-C ไม่เท่ากันเพราะเฟสต่างกัน 120°- เราจึงต้องคำนึงถึงค่าแรงดันนี้ด้วย แรงดันที่ตกคร่อมพวงลูกถ้วย U_{Ph} จึงสามารถเขียนสมการได้เป็น

$$\begin{aligned}
U_A &= K_{sp}K_{TT}\left(1-c_A\right)I + U_{LN}\sin\left(\omega t\right)\\
U_B &= K_{sp}K_{TT}\left(1-c_B\right)I + U_{LN}\sin\left(\omega t - 120\right)\\
U_C &= K_{sp}K_{TT}\left(1-c_C\right)I + U_{LN}\sin\left(\omega t + 120\right)
\end{aligned}$$

ซึ่งจะเห็นว่าค่า I มากที่สุดที่ทำให้ U_A, U_B หรือ U_C มีค่าเท่ากับ CFO ของพวงลูกถ้วยไฟฟ้าจะทำให้เกิดวาบไฟที่พวงลูกถ้วยไฟฟ้าของเฟสนั้นก่อน โดยจากการจำลองแบบให้เกิดฟ้าผ่าที่มุมเฟสต่างๆ จะพบว่า

$$I_c = \frac{\text{CFO}_{NS} - K_{50Hz}U_{LN}}{K_{sp}K_{TT}\left(1-c_{Ph}\right)} \quad [\text{kA}] \tag{2.40}$$

เมื่อ c_{Ph} คือคัปปลิงแฟกเตอร์ระหว่าง OHG กับสายเฟส A-B-C ที่น้อยที่สุด และ U_{LN} มีค่าเท่ากับ $\sqrt{2}U_{L\text{-}L}/\sqrt{3}$ [kV] ส่วน K_{50Hz} มีค่าเท่ากับ [Hileman, 1999]

สำหรับสายส่งที่จัดสายเฟสแนวตั้ง: K_{50Hz} = 0.25 - 0.55 แนะนำให้ใช้ 0.4

สำหรับสายส่งที่จัดสายเฟสแนวนอน: K_{50Hz} = 0.65 - 0.76 แนะนำให้ใช้ 0.7

4) **แรงดันวาบไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤติรูปคลื่นไม่มาตรฐาน, CFO_{NS}** เนื่องจากรูปคลื่นของแรงดันที่เกิดขึ้นเนื่องจากฟ้าผ่ามีรูปร่างไม่แน่นอนและไม่ใช่รูปคลื่นมาตรฐาน 1.2/50 μs ที่เราใช้ทดสอบหาค่า LIWV หรือ CFO ของพวงลูกถ้วยไฟฟ้า เราจึงต้องแปลงค่า CFO ของพวงลูกถ้วยไฟฟ้าไปเป็น CFO_{NS} ด้วยสมการ

$$\mathrm{CFO_{NS}} = \mathrm{CFO}\left[0.977 + \frac{2.82}{\tau}\right]\left[1 - 0.2\frac{U_{50Hz}}{\mathrm{CFO}}\right] \tag{2.41}$$

เมื่อ $\tau = (Z_{OHG}/R_{Tower})\cdot\tau_s$

5) **เวลาหน้าคลื่นของกระแสฟ้าผ่า, τ_f** เวลาหน้าคลื่นของกระแสฟ้าผ่าที่แสดงในรูปที่ 2.31 มีความสำคัญเนื่องจากมีความสัมพันธ์กับลักษณะสมบัติ *U-t* ของพวงลูกถ้วยไฟฟ้า โดยในที่นี้จะกำหนดให้เท่ากับ [Hileman, 1999]

$$t_f = 0.207 I_c^{\,0.53} \tag{2.42}$$

6) **โคโรนา** โคโรนาจะทำให้ความชันของแรงดันที่เกิดขึ้นจากฟ้าผ่าลดลง ที่เวลา *t* เดียวกันขนาดของแรงดันจึงลดลงทำให้เกิดวาบไฟที่พวงลูกถ้วยยากขึ้น BFR จึงลดลงซึ่งเป็นผลดี แต่เรามักละเลยผลของโคโรนาเพราะ BFR ที่คำนวณได้จะสูงกว่า ซึ่งถือว่าเป็นการคำนวณที่ให้ความมั่นใจมากกว่า

ขั้นตอนการคำนวณ BFR จะทำดังต่อไปนี้

Set iteration difference to the desired Δt and ΔR

IF U_m < 300 kV THEN t_{f1} = 2.5 μs ELSE set t_{f1} = 4 μs

Repeat iteration to determine t_f

    Set $t_{f0} = t_{f1}$

    Set $R_{Tower1} = 0.5R_0$

    REPEAT iteration to determine R_{Tower}

        Set $R_{Tower0} = R_{Tower1}$

$$I_c = \frac{\mathrm{CFO_{NS}} - K_{50Hz}U_{LN}}{K_{sp}K_{TT}(1 - c_{Ph})}$$

$$I_R = \frac{R_e}{R_{Tower0}} I_c$$

$$R_{Tower1} = \frac{R_0}{\sqrt{1 + (I_R/I_g)}} \quad [\Omega]$$

        UNTIL $|R_{Tower0} - R_{Tower1}| < \Delta R$

$$t_{f1} = 0.207 I_c^{\,0.53}$$

    UNTIL $|t_{f0} - t_{f1}| < \Delta t$

$$\mathrm{BFR} = 0.6\frac{N_g}{10}\left(28h^{0.6} + D_{OHG}\right)P(i > I_c) \quad \text{[(flash/100km)/yr]}$$

ซึ่งจะเห็นว่ามีลูปซ้อนกันอยู่ โดยลูปในเป็นลูปที่หา R_{Tower} ที่ทำให้ได้ค่า I_c ที่ความชันของกระแสฟ้าผ่า t_{f0} ที่เลือกไว้ ส่วนลูปนอกเป็นลูปที่หา t_f ที่ทำให้ได้ I_c ค่าสุดท้ายจากค่า R_{Tower} และ t_f ค่าเดียวกัน

อนึ่งถ้าเราสมมุติให้ไม่มีการสะท้อนไปมาในเสาส่งไฟฟ้าก็จะพบว่า $\tau_{\text{Tower}} = 0$ และ $\alpha_{\text{Foot}} = 0$ ทำให้ไม่ต้องคำนึงถึงค่า t_f สมการในการหากระแสวิกฤติ I_c จึงเปลี่ยนไปเป็น

$$I_c = \frac{\text{CFO}_{\text{NS}} - K_{50\text{Hz}} U_{\text{LN}}}{R_e (1 - c_{\text{Ph}})} \tag{2.43}$$

เราจึงตัดลูปนอกสุดทิ้งไปได้ แต่ต้องระมัดระวังเพราะการคำนวณอาจให้ BFR ที่แตกต่างกับการที่ไม่ตัดลูปนอกทิ้งไปหลายเท่า

ตัวอย่างที่ 2.14 จงหา BFR ของสายส่งไฟฟ้า 230 kV ในตัวอย่างที่ 2.11 และ 2.13 โดยมีข้อมูลเพิ่มเติมดังต่อไปนี้: $c_{\text{Ph}} = 0.27$, $K_{50\text{Hz}} = 0.4$, ระยะห่างระหว่างเสาส่งไฟฟ้า span = 400 m, ระยะห่างระหว่าง OHG $D_{\text{OHG}} = 8$ m

ก่อนอื่นเราต้องคำนวณพารามิเตอร์พื้นฐานที่ต้องใช้ดังนี้

$$I_g = \frac{1}{2\pi}\frac{\rho E_0}{R_0^2} = \frac{1}{2\pi}\frac{100 \cdot 400}{7.3^2} = 119.5 \ \text{[kA]} \qquad \frac{U_{50\text{Hz}}}{\text{CFO}} = \frac{U_m/\sqrt{3}}{\text{CFO}} = \frac{245/\sqrt{3}}{1092} = 0.1295 \ [1]$$

$$N_L = \frac{N_g}{10}\left(28h^{0.6} + D_{\text{OHG}}\right) = \frac{1}{10}\left(28 \cdot 45^{0.6} + 8\right) = 28.3 \ \text{[(flash/100km)/yr]}$$

$$\tau_{\text{span}} = \frac{\text{span}}{v_{\text{OHG}}} = \frac{400}{3 \cdot 10^8} = 1.33 \ [\mu\text{s}]$$

จากนั้นใช้สมการต่างๆ ต่อไปนี้ในการคำนวณ

$$R_e = \frac{Z_{\text{OHG}} R_{\text{Tower}}}{Z_{\text{OHG}} + 2R_{\text{Tower}}} \qquad \tau = \frac{Z_{\text{OHG}}}{R_{\text{Tower}}}\tau_{\text{span}} \qquad \text{CFO}_{\text{NS}} = \text{CFO}\left[0.977 + \frac{2.82}{\tau}\right]\left[1 - 0.2\frac{U_{50\text{Hz}}}{\text{CFO}}\right]$$

$$I_c = \frac{\text{CFO}_{\text{NS}} - K_{50\text{Hz}} U_{\text{LN}}}{R_e(1 - c_{\text{Ph}})} \qquad I_R = \frac{R_e}{R_{\text{Tower}}} I_c \qquad R_{\text{Tower}} = \frac{R_0}{\sqrt{1 + I_R/I_g}}$$

โดยเริ่มจากกำหนดให้ $R_{\text{Tower}} = 0.5R_0$ แล้วคำนวณซ้ำตามขั้นตอนที่แสดงในตารางข้างล่าง จนความแตกต่างของ R_{Tower} ที่คำนวณได้มีค่าไม่เกิน Δ ตามที่ตั้งไว้ เช่น 1%

R_{Tower}	R_e	τ	CFO_{NS}	I_c	I_R	R_{Tower}	Δ[%]
3.65	3.60	182.65	1055.60	380.41	374.94	3.59	1.72
3.59	3.54	185.78	1055.32	386.74	381.27	3.57	0.64
3.57	3.52	186.97	1055.22	389.13	383.66	3.56	0.24
3.56	3.51	187.42	1055.18	390.03	384.56	3.55	0.09
3.55	3.50	187.58	1055.17	390.37	384.90	3.55	0.03
3.55	3.50	187.65	1055.16	390.50	385.03	3.55	0.01
3.55	3.50	187.67	1055.16	390.55	385.08	3.55	0.00

ผลการทำซ้ำพบว่า I_c มีค่าเท่ากับ 390 kA จึงทำให้ BFR มีค่า

$$\begin{aligned}\text{BFR} &= 0.6N_L \cdot P(i > I_c) = 0.6N_L \frac{1}{1 + (I_c/31)^{2.6}} = 0.6 \cdot 28.3 \frac{1}{1 + (390/31)^{2.6}} \\ &= 0.02 \ \text{[(flash/100km)/yr]}\end{aligned}$$

แต่โปรดระวัง การคำนวณโดยไม่ตัดลูปนอกสุดทิ้งไปจะให้ BFR สูงขึ้นกว่านี้

2.3.3.4 สมรรถนะของสายส่งไฟฟ้า, R_a

สมรรถนะของสายส่งไฟฟ้า R_a ที่เราต้องการ -IEC เรียกว่า อัตราความล้มเหลวที่ยอมรับได้ (acceptable failure rate)- จะเป็นเท่าใดขึ้นอยู่กับความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ซึ่งต้องคำนึงถึงความต้องการของลูกค้าเป็นหลัก รวมทั้งระดับแรงดันของสายส่งไฟฟ้าเพราะถ้าเซอร์กิตเบรกเกอร์ในระบบส่งไฟฟ้าทำงานจะส่งผลกระทบไปถึงระบบจำหน่ายด้วย แต่การที่เซอร์กิตเบรกเกอร์ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าทำงานอาจไม่มีผลกระทบต่อระบบส่งไฟฟ้า โดยยิ่งระดับแรงดันของสายส่งไฟฟ้าสูงขึ้น ค่า R_a จะต่ำลง เช่น ตามข้อแนะนำของ [IEC60071-2, 1996] -[IEC60071-2, 2018] ไม่ได้แนะนำค่าดังกล่าวอีกต่อไป ซึ่งคาดว่าเป็นเพราะเหตุผลที่กล่าวมาแล้วข้างต้น-$R_a R_a$จากการคำนวณค่า SFFOR และ BFR ที่กล่าวมาแล้ว เราจะหาสมรรถนะของสายส่งไฟฟ้าจากสมการ

$$R_{risk} = \text{SFFOR} + \text{BFR} \quad [(\text{flash}/100\text{km})/\text{yr}] \tag{2.44}$$

แล้วนำไปเปรียบเทียบกับสมรรถนะของสายส่งไฟฟ้าที่ต้องการ R_a ถ้า $R_{risk} > R_a$ ก็ต้องออกแบบกันใหม่ โดยกลับไปพิจารณาถึงค่า CFO ของพวงลูกถ้วยไฟฟ้า, ความต้านทานฐานเสา R_T, จำนวนและมุมป้องกันของ OHG และในกรณีของสายส่งที่มี 2 วงจร ก็พิจารณาถึงการจัดเรียงเฟสและข้อกำหนดของฉนวน

ในบางพื้นที่ซึ่งมีความต้านจำเพาะของดินสูง เช่น บริเวณภูเขา, เสาส่งไฟฟ้าข้ามแม่น้ำที่สูงเป็นพิเศษหรือเสาส่งไฟฟ้าบนเนินเขา -มีโอกาสถูกฟ้าผ่ามากขึ้น- หรือสายส่งไฟฟ้าเส้นที่ต้องการความมั่นคงสูง เราอาจใช้ MOSA [TB440, 2013] [IEC60099-8,2017] ป้องกันการเกิดวาบไฟตามผิวพวงลูกถ้วยไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้สายส่งไฟฟ้าที่ออกแบบมี $R_{risk} < R_a$ ตามที่ต้องการ

2.3.4 สรุป

จากข้อ 2.3.1 - 2.3.3 เราสามารถสรุปได้ว่าความความยาวของพวงลูกถ้วยไฟฟ้าและระยะห่างต่าง ๆ ในอากาศควรมีค่าดังแสดงในตารางที่ 2.21

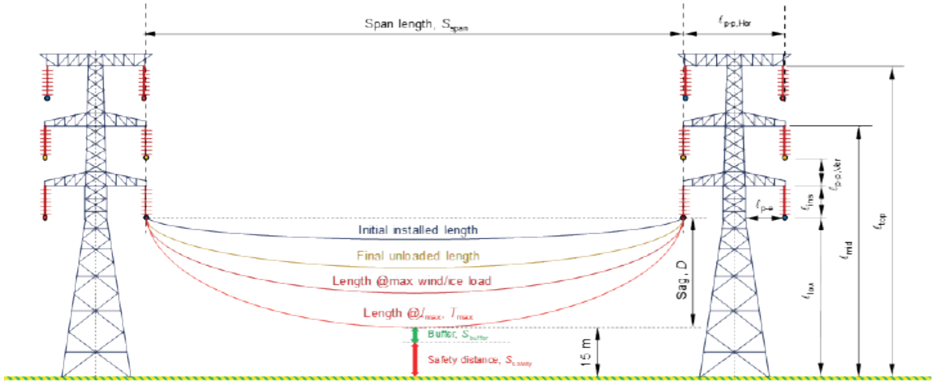
ตารางที่ 2.21 ระยะห่างในอากาศและความยาวลูกถ้วยจากผลการคำนวณในข้อ 2.3.1 - 2.3.3 สำหรับพวงลูกถ้วย 52-8 fog-type

	Reference	$\ell_{air,p\text{-}e}$ [mm]	$\ell_{ins,p\text{-}e}$ [mm] (No. of insulator)	$\ell_{air,p\text{-}p}$ [mm]
AC	IEC60815	-	2044 (14)	-
SOV	IEC60071-1, 2018	1513	1588 (11)	2567
	TB348, 2008	1222	1284 (9)	2990
LOV	IEC60071-1, 2018	1900	1955 (14)	2100
	TB348, 2008	1998	2098 (14)	2398
	Maximum	**1998**	**2098 (14)**	**2990**

2.4 เสาส่งไฟฟ้า

เมื่อเราขึงสายไฟฟ้าระหว่างเสาส่งไฟฟ้า สายไฟฟ้าจะหย่อนหรือที่เรียกว่า ระยะตกท้องช้าง (sag, D) เสมอ ดังนั้นความสูงของสายไฟฟ้าเหนือระดับพื้นดินที่ต่ำที่สุดต้องมากพอเพื่อให้มีความปลอดภัยต่อสาธารณะชนและทำให้ระบบส่งกำลังไฟฟ้ามีความมั่นคง ระยะดังกล่าวมักเรียกว่า ระยะปลอดภัย S_{safety} ซึ่งต้องคำนวณด้วยการใช้พารามิเตอร์ที่ทำให้ท้องช้างมีค่ามากที่สุดในภาวะการทำงานของสายไฟฟ้าที่เลวร้ายที่สุด

ระยะปลอดภัยสำหรับระบบส่งกำลังไฟฟ้าที่ระดับแรงดัน 230 kV ของประเทศเรา กำหนดไว้ที่ 12 m และเมื่อคำนึงถึงความจริงที่ว่าพารามิเตอร์ที่ทำให้ท้องช้างมีค่ามากที่สุดในภาวะการทำงานของสายส่งไฟฟ้าที่เลวร้ายที่สุดนั้นมีความไม่แน่นอนอยู่ด้วย เราจึงเพิ่ม *ระยะเผื่อ* (buffer distance, S_{buffer}) อีก 25% คือ 3 m ทำให้ความสูงของสายไฟฟ้าเหนือระดับพื้นดินต้องไม่น้อยกว่า 15 m ดังแสดงในรูปที่ 2.43 การออกแบบระบบสายส่งไฟฟ้าจึงต้องประกอบไปด้วยการออกแบบทางกลและทางไฟฟ้า โดยไม่สามารถแยกเป็นอิสระออกจากกันได้ดังแสดงในรูปซึ่งเป็นโครงสร้างของเสาส่งไฟฟ้าแบบ *เหล็กถัก* (lattice steel)



เมื่อ S_{span} = ระยะห่างระหว่างเสาส่ง [m] D = ระยะตกท้องช้าง [m]

ℓ_{low} = ระยะของสายเฟสเส้นล่างสุดเหนือพื้นดิน [m] ℓ_{ins} = ความยาวของพวงลูกถ้วย [m]

$\ell_{p\text{-}p}$ = ระยะห่างระหว่างเฟส [m] $\ell_{p\text{-}e}$ = ระยะห่างระหว่างเฟสกับกราวนด์ [m]

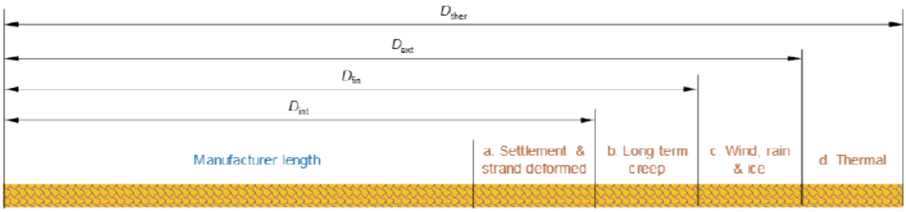
รูปที่ 2.43 ลักษณะของโครงสร้างเสาส่งไฟฟ้าแบบเหล็กถัก

ในตอนแรกที่สร้างสายส่งไฟฟ้า เราจะดึงสายไฟฟ้าด้วยแรง T ขนาดหนึ่ง ซึ่งมักมีค่าประมาณ 15-25% ของ พิกัดแรงดึงของสายไฟฟ้า (rated tensile strength, RTS) ก่อนการจ่ายไฟฟ้าสายส่งไฟฟ้าจึงมีระยะตกท้องช้าง D_{init} อยู่ค่าๆ หนึ่ง เมื่อเวลาผ่านไปนานๆ (มักสมมุติให้เท่ากับ 10 ปี) สายไฟฟ้าจะเกิด *ความล้า* (creep) ทำให้สายไฟฟ้ายาวขึ้น ระยะตกท้องช้างจึงมีค่ามากขึ้นเป็น D_{fin}

ขณะที่เกิดปรากฏการณ์ธรรมชาติ เช่น ลม, ฝน หรือ หิมะ ฝนหรือหิมะที่มาเกาะบนสายไฟฟ้าจะทำให้น้ำหนักของสายไฟฟ้ามากขึ้น ทำให้แรงดึงในสายไฟฟ้า T และระยะตกท้องช้าง D มากขึ้น ระยะตกท้องช้างจึงมีค่ามากขึ้นเป็น D_{ext}

นอกจากนั้นเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลในสายไฟฟ้าก็จะเกิดความร้อนที่สายไฟฟ้าทำให้สายไฟฟ้ายาวขึ้นอีก ระยะตกท้องช้างจึงมีค่ามากขึ้นเป็น D_{ther} แต่อุณหภูมิสูงสุดของสายไฟฟ้าไม่ควรเกิน 80 °C เพราะถ้าสูงกว่านี้สายไฟจะมีความทนแรงดึงลดลง [IEC61597, 1995] อย่างไรก็ตามอุณหภูมิของสายไฟฟ้าขณะที่นำกระแสจะขึ้นอยู่กับขนาดของกระแสที่ไหล, การพาความร้อนเนื่องจากลมที่พัดผ่านสายไฟฟ้า, การแผ่รังสีจากสายไฟฟ้า และความร้อนจากแสงอาทิตย์ที่ส่องมาที่สายไฟฟ้า จึงขึ้นอยู่กับสภาพพื้นที่ๆ สายไฟฟ้าพาดผ่านและช่วงเวลาของวันที่ร้อนที่สุดของปี -จังหวัดที่ร้อนที่สุดคือ จ.เลย- ขณะที่มีกระแสสูงสุด $I_{max,@T}$ ไหลผ่านสายไฟฟ้า

ดังนั้นระยะตกท้องช้างต่างๆ ของสายไฟฟ้า จึงมีลักษณะดังที่แสดงในรูปที่ 2.44



รูปที่ 2.44 ระยะตกท้องช้างต่างๆ ของสายไฟฟ้า

หลังจากนั้น เราจึงคำนวณความยาวของพวงลูกถ้วย ℓ_{ins} จากแรงดันเกินประเภทต่างๆ ที่อาจเกิดขึ้นในสายส่งไฟฟ้าเพื่อกำหนดความสูงของ *แขนเสาไฟฟ้า* (crossarm) ตัวล่างสุดเหนือพื้นดิน ($\ell_{ins}+\ell_{low}$) และระยะห่างระหว่างสายไฟฟ้ากับเสาส่งไฟฟ้า $\ell_{p\text{-}e}$ รวมทั้งระยะห่างระหว่างเฟสในอากาศ $\ell_{p\text{-}p}$ ดังที่กล่าวแล้วในหัวข้อที่ 2.2 และ 2.3

ดังนั้น ในหัวข้อนี้จึงจะกล่าวถึงการคำนวณระยะ D โดยข้อมูลที่จำเป็นในการออกแบบสายส่งไฟฟ้าได้แสดงในตารางที่ 2.22 ซึ่งเราจะเห็นว่าส่วนใหญ่เป็นข้อกำหนดของความทนแรงดันไฟฟ้าในภาวะต่างๆ แต่ก็มีข้อกำหนดทางกลแฝงอยู่คือ พิกัดกระแสสูงสุด I_{max} ที่อุณหภูมิของตัวนำสูงสุด T_{max} ซึ่งขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างเสา S_{span} และระยะปลอดภัย S_{safety} โดยเสาส่งไฟฟ้าต้องแข็งแรงพอที่จะรับน้ำหนักส่วนประกอบทุกอย่างของสายส่งไฟฟ้าทั้ง 3 เฟส รวมถึง สายดินขึงอากาศ ที่ใช้ป้องกันฟ้าผ่าโดยตรงลงสายเฟส -ในปัจจุบันมักมีแกนเป็น *ใยแก้วนำแสง* (optical fiber) เพื่อใช้ประโยชน์ในการสื่อสารข้อมูล- อนึ่งสายไฟฟ้าและเสาส่งไฟฟ้าทั้งหมดต้องอยู่ภายใน RoW

2.4.1 การคำนวณระยะตกท้องช้าง *D*

การคำนวณทุกประเภทมีความไม่แน่นอนเสมอเพราะเราไม่ทราบค่าที่ถูกต้องของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณ ดังนั้นเราต้องคำนึงเสมอว่าระยะตกท้องช้าง D ที่เราคำนวณได้มีความไม่แน่นอนเนื่องจากสาเหตุต่างๆ ดังนี้

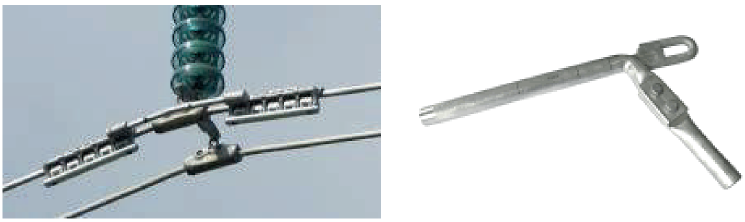
1. *ความไม่แน่นอนของน้ำหนักตัวนำ w:* โดยปกติจะสูงกว่าค่าที่ระบุประมาณ 0.2-0.6% และในระหว่างการใช้งานก็จะมีคราบสกปรกมาเกาะที่ผิวตัวนำทำให้น้ำหนักเพิ่มขึ้น แต่ที่สำคัญคือการที่ตัวนำเปียกเพราะจะทำให้ตัวนำมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น 1.5-2.5% -เช่น มีน้ำค้างเกาะสายไฟฟ้าในตอนเช้า-

ตารางที่ 2.22 ข้อกำหนดของสายส่งไฟฟ้า 230 kV

230 kV Transmission line specifications			
Item	**Description**	**Requirement**	**Remark**
1	System voltage, U_m [kV]	245	
2	Norminal current, I_{rate} [A]	1000	
3	Number of sub-conductor per phase, n	2	
4	Bundle diameter, b [m]	0.40	
5	Maximum operating temperature T_{cond} [^{o}C]	75	
6	Right of way, RoW [m]	12	
7	Safety distance above ground, S_{safety} [m]	12	
8	Buffer distance, S_{buffer} [m]	3	25% of S_{safety}
9	Span, S_{span} [m]	400	
10	E field @1m above ground at RoW [kV/m]	2	
11	H field @1m above ground at RoW [μT]	2000	
12	Short duration withstand voltage, SDWV [kV]	460	
13	Switching impulse withstand voltage, SIWV [kV]	850	
14	Lightning impulse withstand voltage, LIWV [kV]	1050	
15	Lightning performance [(flash/100km)/year]	2	@ 100 TD/yr 1050 BIL
16	Switching performance [flash/100CB operations]	-	as specified by SIWV
17	Pollution level: Medium [mm/kV]	20	
18	Pollution level: Light [mm/kV]	16	

2. *จุดที่ยึดตัวนำกับเสาส่งไฟฟ้า:* การคำนวณต่างๆ จะสมมุติว่าตัวนำมีลักษณะคล้ายเชือกเสมอ ดังนั้นในการคำนวณจึงสมมุติว่าตัวนำจะหย่อนจากแนวระดับเป็นรูป แคทีนารี (catenary) -อาจใช้สมการพาราโบลาในการคำนวณโดยประมาณได้-

   แต่ที่ เสาส่งไฟฟ้าแบบรับน้ำหนักสายไฟฟ้า (suspension tower) เราต้องยึดตัวนำเข้ากับพวงลูกถ้วยที่แขวนในแนวตั้งด้วยอุปกรณ์ที่เรียกว่า *แคลมป์รับน้ำหนักสายไฟฟ้า* (suspension clamp) ในขณะที่ ณ เสาส่งไฟฟ้าแบบรับแรงดึงสายไฟฟ้า (tension tower) เราต้องยึดตัวนำเข้ากับพวงลูกถ้วยที่แขวนในแนวนอนด้วยอุปกรณ์ที่เรียกว่า *แคลมป์รับแรงดึงสายไฟฟ้า* (tension clamp) ดังแสดงในรูปที่ 2.45 อุปกรณ์ดังกล่าวจะไม่โค้งแบบแคทนารีเช่นเดียวกับตัวนำ ทำให้ผลการคำนวณต่างๆ มีความไม่แน่นอนอยู่บ้าง



ก) แคลมป์รับน้ำหนักสายไฟฟ้า ข) แคลมป์รับแรงดึงสายไฟฟ้า

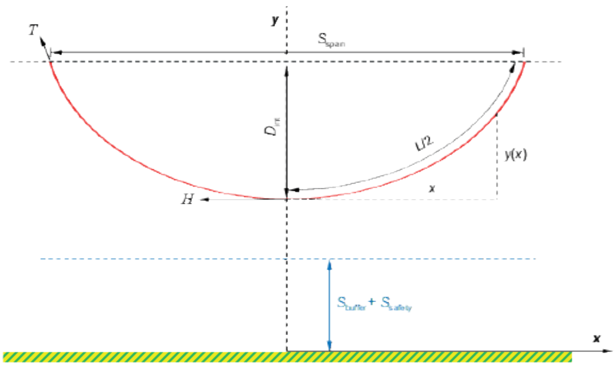
รูปที่ 2.45 แคลมป์ยึดตัวนำเข้ากับพวงลูกถ้วยแบบต่างๆ

3. *เสาส่งไฟฟ้าโค้งตัว*: เรามักสมมุติให้ระยะห่างระหว่างเสาส่งไฟฟ้า S_{span} มีค่าคงที่ แต่ในทางปฏิบัติ S_{span} อาจเปลี่ยนไปเพราะเสาส่งไฟฟ้าจะโค้งตัวเพราะต้องรับแรงดึงสายไฟฟ้า

ทั้งนี้ยังไม่นับถึงความไม่แน่นอนในการวัดค่าต่างๆ เช่น ความยาวของสายไฟฟ้า, แรงดึงสายไฟฟ้า, อุณหภูมิ, ฯลฯ ดังนั้นระยะตกท้องช้าง D ที่คำนวณได้จึงอาจมีความไม่แน่นอนสูงถึง 10%

2.4.1.1 ระยะตกท้องช้างเริ่มต้น D_{init} [TB324, 2016]

ตัวนำที่ขึงระหว่างเสาส่งไฟฟ้าจะหย่อนเสมอเนื่องจากน้ำหนักของวัสดุที่ทำตัวนำเอง ดังแสดงในรูปที่ 2.46



รูปที่ 2.46 ระยะตกท้องช้างเริ่มต้น D_{init}

การหย่อนนี้จะมีรูปร่างแบบแคทีนารี ซึ่งมีสมการเป็น

$$y(x) = \frac{H}{w}\left[\cosh\left(\frac{wx}{H}\right) - 1\right] \cong \frac{wx^2}{2H}$$

ดังนั้นที่จุดต่ำสุดเหนือพื้นดิน ระยะตกท้องช้าง D จึงมีค่าเท่ากับ

$$D = \frac{H}{w}\left[\cosh\left(\frac{wS_{span}}{2H}\right) - 1\right] \cong \frac{{S_{span}}^2}{8(H/w)} \quad [\text{m}] \qquad (2.45)$$

เมื่อ H คือ แรงดึง**ตัวนำ**ในแนวนอน (horizontal tension) [N] และ w คือ น้ำหนัก**ตัวนำ** [N/m]

เทอมสุดท้ายทางด้านขวามือของสมการที่ 2.45 เป็นการประมาณด้วยสมการพาราโบลา -ใช้ได้ดีเมื่อ ${S_{span}}^2/48(H/w)^2$ << 1- ซึ่งจะเห็นว่า *ระยะตกท้องช้างจะแปรตามระยะห่างระหว่างเสาไฟฟ้ายกกำลังสอง* แต่ *ระยะตกท้องช้างจะผกผันกับแรงที่เราใช้ดึงตัวนำ*

ความยาว**ตัวนำ** L สามารถหาได้จากสมการ

$$L = \frac{2H}{w}\sinh\left(\frac{S_{span}}{2(H/w)}\right) \cong S_{span}\left(1 + \left(\frac{{S_{span}}^2}{24(H/w)^2}\right)\right) \cong S_{span} + \frac{8D^2}{3S_{span}} \quad [\text{m}] \qquad (2.46)$$

ดังนั้น**ตัวนำ**จึงยาวกว่าระหว่างเสาไฟฟ้าเท่ากับ

$$L - S_{span} \cong \left(\frac{{S_{span}}^3}{24(H/w)^2}\right) \cong \frac{8D^2}{3S_{span}} \quad [\text{m}] \qquad (2.47)$$

ซึ่งมีชื่อเรียกพิเศษว่า *แสลก* (slack) โดยจะเห็นว่า *แสลกแปรตามระยะห่างระหว่างเสาไฟฟ้ายกกำลังสาม*

ตัวอย่างที่ 2.15 สายส่งไฟฟ้า 230 kV ใช้ตัวนำ 645-A1/S1A-42/7 เป็นสายเฟส ที่มีคุณสมบัติดังนี้

1. พื้นที่หน้าตัดของอะลูมิเนียม, A_{Al}: 644.5 [mm^2]
2. พื้นที่พื้นที่หน้าตัดรวมของตัวนำ, A_{total}: 678 [mm^2]
3. น้ำหนักตัวนำ, w: 20.04 [N/m]
4. พิกัดแรงดึง, RTS: 137.80 [kN]
5. ระยะห่างระหว่างเสา, S_{span}: 400 [m]
6. แรงดึงตัวนำในแนวนอน, H: 22% RTS = 30.316 [kN]
7. อุณหภูมิขณะที่ดึงตัวนำ, T_{amb}: 27 [^oC]

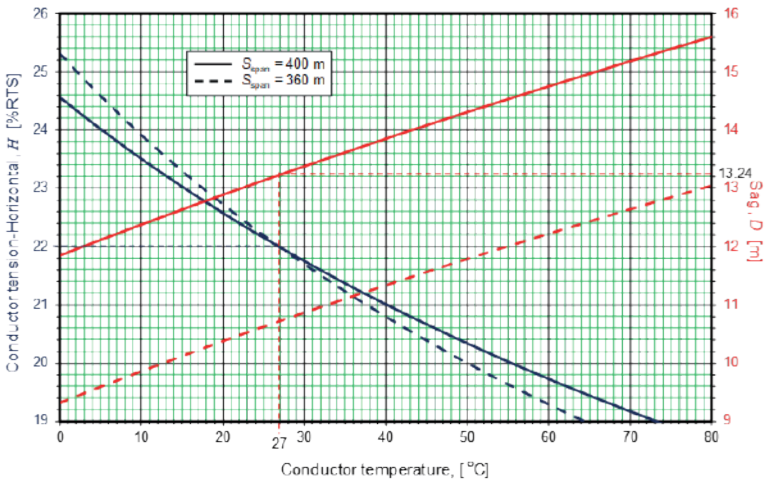
จงคำนวณ D, L และ $L - S_{span}$

$$D = \frac{H}{w}\left[\cosh\left(\frac{wS_{span}}{2H}\right)-1\right] = \frac{30316}{20.04}\left[\cosh\left(\frac{20.04\cdot 400}{2\cdot 30316}\right)-1\right]$$
$$= 13.24 \quad [m]$$
$$L = \frac{2H}{w}\sinh\left(\frac{wS_{span}}{2H}\right) = \frac{2\cdot 30316}{20.04}\sinh\left(\frac{20.04\cdot 400}{2\cdot 30316}\right)$$
$$= 401.17 \quad [m]$$
$$L - S_{span} = 401.17 - 400 = 1.17 \quad [m]$$

ถ้าเราใช้สมการพาราโบลา เราจะพบว่า

$$D \cong \sqrt{\frac{3S_{span}\cdot\left(L - S_{span}\right)}{8}} \quad [m]$$
$$H \cong \frac{wS_{span}}{2}\sqrt{\frac{S_{span}}{6\cdot\left(L - S_{span}\right)}} \quad [N] \qquad (2.48)$$

ทำให้เมื่อตัวนำยาวขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิ ระยะตกท้องช้างก็จะมากขึ้นแต่แรงดึงตัวนำในแนวนอนจะลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.47



รูปที่ 2.47 แรงดึงตัวนำในแนวนอน H และระยะตกท้องช้าง D ที่อุณหภูมิต่างๆ เมื่อใช้สมการที่ 2.48 คำนวณ

สำหรับแรงดึงตัวนำ T ที่เสาส่งไฟฟ้าในรูปที่ 2.46 นั้น เราสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$T = H + wD \quad [\text{N}] \tag{2.49}$$

ตัวอย่างที่ 2.16 จากตัวอย่างที่ 2.15 จงคำนวณแรงดึงตัวนำ T ที่เสาส่งไฟฟ้า และความเค้น (Stress) H/A_{total}

$$T = H + wD = 30316 + 20.04 \cdot 13.24$$
$$= 30.58 \quad [\text{kN}] \quad = 22.2\ \%\text{RTS}$$

ซึ่งจะเห็นว่าไม่สูงไปกว่าแรงดึงตัวนำในแนวนอนมากนัก

$$\text{Stress} = \frac{H}{A_{\text{total}}} = \frac{30316}{6.78 \cdot 10^{-4}} = 44.71 \quad [\text{MPa}]$$

2.4.1.2 ระยะตกท้องช้างเมื่อเวลาผ่านไปนาน ๆ D_{fin} [IEC61597, 1995]

แรงดึงในตัวนำ ACSR, H_{ACSR} จะมีค่าเท่ากับแรงดึงในลวดอะลูมิเนียม H_{Al} บวกกับแรงดึงในลวดเหล็ก H_{St} จึงทำให้ตัวนำ ACSR ยาวขึ้น $\varepsilon_{\text{ACSR}}$ -เท่ากับลวดอะลูมิเนียมและลวดเหล็กที่ยาวขึ้น ε_{Al} และ ε_{St} ตามลำดับ- ตามสมการ

$$H_{\text{ACSR}} = H_{\text{Al}} + H_{\text{St}}$$
$$\varepsilon_{\text{ACSR}} = \varepsilon_{\text{Al}} = \varepsilon_{\text{St}} \Rightarrow \frac{H_{\text{ACSR}}}{A_{\text{ACSR}}E_{\text{ACSR}}} = \frac{H_{\text{Al}}}{A_{\text{Al}}E_{\text{Al}}} = \frac{H_{\text{St}}}{A_{\text{St}}E_{\text{St}}} \tag{2.50}$$

ดังนั้น มอดูลัสของยังของตัวนำ ACSR, E_{ACSR} จึงหาได้จาก

$$E_{\text{ACSR}} = E_{\text{Al}}\frac{A_{\text{Al}}}{A_{\text{ACSR}}} + E_{\text{St}}\frac{A_{\text{St}}}{A_{\text{ACSR}}} \tag{2.51}$$

แต่ลวดอะลูมิเนียมจะล้าเมื่อใช้เป็นเวลานานๆ ทำให้ลวดยาวขึ้น ดังนั้น

$$\frac{H_{\text{ACSR}}}{A_{\text{ACSR}}E_{\text{ACSR}}} = \frac{H_{\text{Al}}}{A_{\text{Al}}E_{\text{Al}}} + \varepsilon_{\text{creep}} = \frac{H_{\text{St}}}{A_{\text{St}}E_{\text{St}}}$$

และเมื่อจัดรูปสมการใหม่ เราจะพบว่า

$$\begin{aligned} H_{\text{Al}} &= H_{\text{ACSR}}\frac{A_{\text{Al}}E_{\text{Al}}}{A_{\text{ACSR}}E_{\text{ACSR}}}\left(1 - \varepsilon_{\text{creep}}\frac{A_{\text{St}}E_{\text{St}}}{H_{\text{ACSR}}}\right) \\ H_{\text{St}} &= H_{\text{ACSR}}\frac{A_{\text{St}}E_{\text{St}}}{A_{\text{ACSR}}E_{\text{ACSR}}}\left(1 + \varepsilon_{\text{creep}}\frac{A_{\text{Al}}E_{\text{Al}}}{H_{\text{ACSR}}}\right) \end{aligned} \tag{2.52}$$

ดังนั้นเมื่อถึงแรงดึงตัวนำค่าหนึ่ง แรงดึงในลวดอะลูมิเนียมจะเท่ากับศูนย์ -$\varepsilon_{\text{creep}} = H_{\text{ACSR}}/(A_{\text{St}}E_{\text{St}})$- ทำให้ลวดเหล็กต้องรับแรงดึงทั้งหมดของตัวนำ ซึ่งเรามักเรียกจุดนี้ว่า knee point

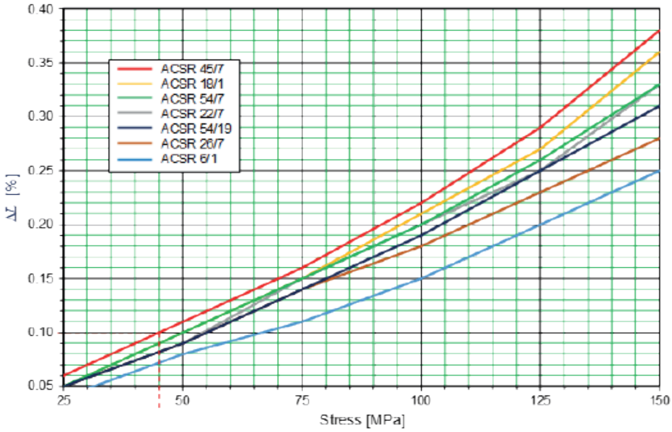
อนึ่ง เนื่องจากตัวนำ ACSR เป็นสายตีเกลียว ดังนั้นความยาวของตัวนำที่เพิ่มขึ้นจึงน้อยกว่าความยาวของลวดที่เพิ่มขึ้นทำให้ E_{ACSR} ลดลงเล็กน้อย แต่การที่ E_{ACSR} เปลี่ยนแปลงไป 5% จะทำให้ระยะตกท้องช้าง D เปลี่ยนไปเพียง 1% เท่านั้น

ดังนั้นระยะตกท้องช้างเมื่อเวลาผ่านไปนาน ๆ จึงมักหาจากความยาวที่เพิ่มขึ้น $\varepsilon_{\text{creep}}$ ด้วยวิธีดังต่อไปนี้

1. ใช้ค่าจากผลการทดสอบ: เช่นข้อมูลจาก [Al.Assoc., 1989] [IEC61597, 1995] ที่แสดงในตารางที่ 2.23 หรือกราฟในรูปที่ 2.48

ตารางที่ 2.23 ความยาวของตัวนำที่เพิ่มขึ้น ε_{ACSR} เมื่อเวลาผ่านไปนานๆ จากผลการทดสอบ

Conductor	#Al wire	#St wire	E_{ACSR} [GPA]	ε_{ACSR} [%] @stress [MPa]					
				25	50	75	100	125	150
Ax	7	0	63.3	0.05	0.11	0.17	0.26	0.39	0.58
	19		61.2	0.05	0.11	0.18	0.27	0.41	0.60
	37		58.9	0.05	0.11	0.18	0.27	0.41	0.60
	61		58.3	0.06	0.12	0.20	0.30	0.44	0.64
Ax/Syz	6	1	79.0	0.04	0.08	0.11	0.15	0.20	0.25
	18	1	68.0	0.05	0.10	0.15	0.21	0.27	0.36
	22	7	71.0	0.05	0.09	0.15	0.20	0.25	0.33
	26	7	74.2	0.05	0.09	0.14	0.18	0.23	0.28
	45	7	64.5	0.06	0.11	0.16	0.22	0.29	0.38
	54	7	67.1	0.05	0.10	0.15	0.20	0.26	0.33
	54	19	69.7	0.05	0.09	0.14	0.19	0.25	0.31



รูปที่ **2.48** ความยาวของตัวนำที่เพิ่มขึ้น ε_{ACSR} เมื่อเวลาผ่านไปนานๆ

2. ใช้สมการที่ 2.51 ในการคำนวณ E_{ACSR}: โดยกำหนดให้ E_{Al} = 55 [GPa] และ E_{St} = 190 [GPa] ดังแสดงในตารางที่ 2.24 [IEC61597, 1995] ซึ่งแตกต่างจาก 1. ไม่เกิน 5%

ตารางที่ 2.24 มอดูลัสของยัง E_{ACSR} จากการคำนวณ

Conductor	#Al wire	#St wire	E_{ACSR} [GPA]
Ax/Syz	6	1	76.7
	18	1	63.1
	22	7	67.1
	26	7	73.9
	45	7	63.7
	54	7	70.5
	54	19	70.2

3. ใช้การประมาณแบบเชิงเส้น: โดยลดค่า E_{Al} และ E_{St} ในข้อ 2. ด้วยแฟกเตอร์

A1: 0.8-0.9; A2 & A3: 0.85-0.95

Sx: 0.90-0.95

แม้ว่ามอดูลัสของยังที่หาได้จากวิธีต่างๆ ข้างต้นจะแตกต่างกันถึง 5% แต่ระยะตกท้องช้าง D จะเปลี่ยนไปเพียง 1% เท่านั้น

โดยสรุป [IEC61597, 1995] ได้ประมาณว่าความล้าในภาวะปกติของตัวนำที่ใช้นานไป 10 ปี จะทำให้ตัวนำยาวเพิ่มขึ้นดังแสดงในตารางที่ 2.25

ตารางที่ 2.25 ความยาวของตัวนำที่เพิ่มขึ้น ε_{ACSR} เมื่อเวลาผ่านไป 10 ปี

Conductor	ε_{ACSR} after 10 years [%]	Equivalent temperature difference [K]
A1	0.08	35
A2, A3	0.05	22
A1/A2, A1/A3	0.07	30
A1/Syz	0.05	25

ตัวอย่างที่ 2.17 จงคำนวณระยะตกท้องช้าง D_{fin} @75 °C ของตัวนำ 645-A1/S1A-42/7 ในตัวอย่างที่ 2.15

จากตัวอย่างที่ 2.15 ความยาวของตัวนำ L_{init} มีค่าเท่ากับ 401.17 m ดังนั้น

$$L_{fin} = L_{init} + L_{init}\varepsilon_{creep} = L_{init} + \Delta L = 401.17 + 401.17 \cdot 500 \cdot 10^{-6} = 401.37 \quad [\text{m}]$$

$$D_{fin} \cong \sqrt{\frac{3S_{span} \cdot \left(L_{fin} - S_{span}\right)}{8}} = \sqrt{\frac{3 \cdot 400 \cdot (401.37 - 400)}{8}} = 14.34 \quad [\text{m}]$$

ถ้าใช้ ε_{ACSR} = 0.08% ซึ่งเป็นค่าที่สูงสุดในตารางที่ 2.25 ในการคำนวณ ค่า D_{fin} จะเท่ากับ 14.95 m ซึ่งแตกต่างกันประมาณ 4% เท่านั้น

2.4.1.3 ระยะตกท้องช้างจากปรากฏการณ์ธรรมชาติ D_{ext}

ลมที่พัดมาปะทะตัวนำหรือฝน/หิมะที่มาเกาะที่ตัวนำจะทำให้ตัวนำยาวขึ้น ซึ่งเป็นความยาวแบบยืดหยุ่นเพราะเมื่อลมหรือฝนหยุดความยาวของตัวนำจะหดลงมาเหลือเท่าเดิม ในขั้นแรกนี้เราจะพิจารณาถึงผลของลมที่พัดมาปะทะตัวนำก่อน จากนั้นจะรวมถึงน้ำหนักของน้ำฝน/หิมะที่มาเกาะที่ตัวนำ

1) ผลของลมที่มาปะทะตัวนำ [IEC60826, 2017]

ความเร็วลมที่มาปะทะตัวนำจะขึ้นกับลักษณะของพื้นที่ๆ เสาส่งไฟฟ้าตั้งอยู่ เราจึงแบ่งลักษณะของพื้นที่ๆ มีผลต่อความเร็วลม ดังแสดงในตารางที่ 2.26 [IEC60826, 2017]

ตารางที่ 2.26 ลักษณะของพื้นที่ๆ มีผลต่อความเร็วลม

พื้นที่	ลักษณะ
A	มีพื้นน้ำขนาดใหญ่ใกล้กับแนวสายส่งไฟฟ้า, พื้นที่ราบชายทะเล (พื้นที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิสูง)
B	พื้นที่ราบมีสิ่งกีดขวางไม่มาก เช่น สนามบิน, พื้นที่เกษตรกรรมที่มีต้นไม้หรือสิ่งปลูกสร้างไม่มากนัก
C	มีสิ่งกีดขวาง เช่น ต้นไม้, อาคาร, แนวรั้ว, แนวพุ่มไม้, ฯลฯ ขนาดเล็กที่สูงไม่มากนักจำนวนมาก
D	พื้นที่ชานเมืองหรือบริเวณที่มีต้นไม้สูงๆ จำนวนมาก

โดย ความเร็วลมอ้างอิง (reference wind speed, V_R [m/s]) ที่เกิดขึ้นทุกช่วงเวลา T_{return} [yr] -เป็นความเร็วลมเฉลี่ยทุก 10 นาที ที่ระดับ 10 m เหนือพื้นดินในพื้นที่ลักษณะใดๆ- สามารถคำนวณได้จากความเร็วลม V_{RB} ที่วัดโดยกรมอุตุนิยมวิทยาในพื้นที่ลักษณะ B -สถานีวัดสภาพอากาศมักตั้งในบริเวณสนามบิน- ตามสมการ

$$V_R = K_R V_{RB} \tag{2.53}$$

และความเร็วลม V_Z ที่ความสูง H_{wind} ใดๆ -ความสูงเหนือพื้นดิน ไม่ใช่ความสูงเหนือระดับน้ำทะเล- สามารถหาได้จากสมการ

$$V_Z = V_R \left(\frac{H_{wind}}{10} \right)^{\alpha} \tag{2.54}$$

เมื่อ K_R และ α มีค่าดังแสดงในตารางที่ 2.27

ตารางที่ 2.27 ค่า K_R และ α

	ลักษณะพื้นที่			
	A	B	C	D
α	0.10-0.12	0.16	0.22	0.28
K_R	1.08	1.00	0.85	0.67

โปรดสังเกตว่าความเร็วลมอ้างอิงมักไม่เกิดขึ้นในขณะที่อากาศเย็น ดังนั้นการคำนวณผลของแรงลมจึงควรพิจารณาในสภาวะที่:

1. *ความเร็วลมมากขณะที่มีอุณหภูมิต่ำสุดเฉลี่ยของวัน*: โดยใช้ V_R ในการคำนวณ
2. *ความเร็วลมต่ำๆ ขณะที่มีอุณหภูมิต่ำสุด*: โดยใช้แฟกเตอร์ที่ได้จากกรมอุตุนิยมวิทยาคูณกับ V_R ถ้าไม่ทราบค่าให้ใช้ 0.6 โดยสมมุติให้อุณหภูมิเป็นค่าต่ำสุดในรอบปีที่เกิดขึ้นทุก T_{return} [yr]

โหลดทางกลที่ตัวนำรับเพิ่มขึ้นเนื่องจากลม w_{wind} จึงสามารถได้จากสมการ

$$w_{wind} = q_0 C_{XC} G_C G_L \varnothing_{total} S_{span} \sin^2 \delta \quad [\text{N}] \tag{2.55}$$

เมื่อ

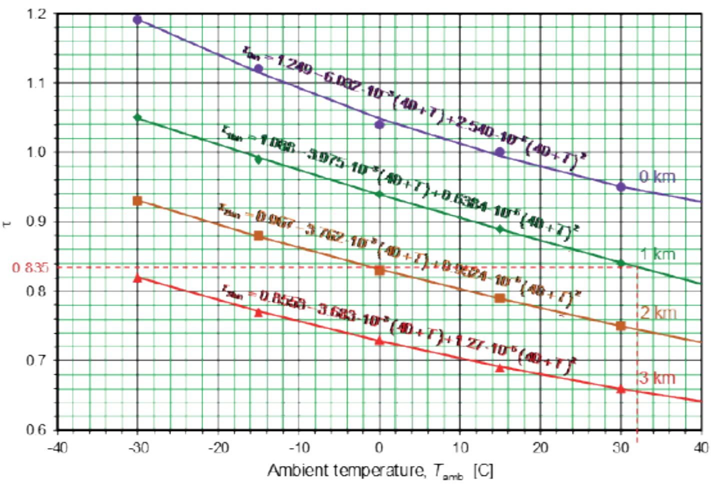
q_0 = $\frac{1}{2}\tau\mu V_z^2$ [N/m^2]

μ = ความหนาแน่นของอากาศ = 1.225 kg/m^3 ที่อุณหภูมิ 15 °C และความดัน 101.3 kPa ที่ระดับน้ำทะเล

τ = แฟกเตอร์แก้ค่าความหนาแน่นของอากาศ หากพื้นที่ๆ กำลังพิจารณามีอุณหภูมิหรือความสูงแตกต่างไปจาก 15 °C หรือระดับน้ำทะเลมาก โดยใช้ค่าที่แสดงในตารางที่ 2.28 หรือรูปที่ 2.49

ตารางที่ 2.28 แฟกเตอร์แก้ค่าความหนาแน่นของอากาศ τ

Temperature [°C]	Altitude [m]			
	0	1000	2000	3000
-30	1.19	1.05	0.93	0.82
-15	1.12	0.99	0.88	0.77
0	1.04	0.94	0.83	0.73
15	1.00	0.89	0.79	0.69
30	0.95	0.84	0.75	0.66



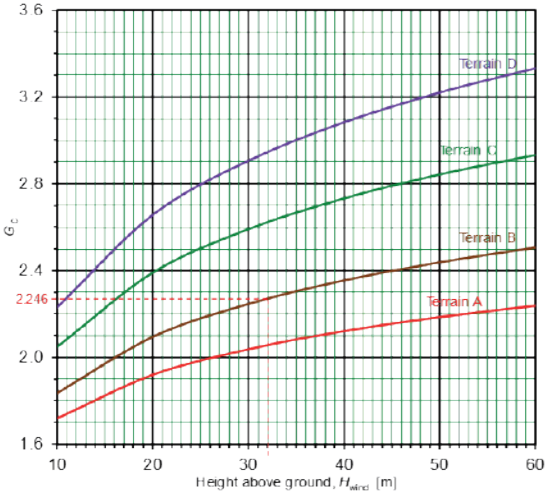
รูปที่ 2.49 แฟกเตอร์แก้ค่าความหนาแน่นของอากาศ τ

C_{XC} = *สัมประสิทธิ์แรงฉุดของตัวนำ* (drag coefficient of conductor)

= 1 สำหรับตัวนำตีเกลียวและความเร็วลมปกติ

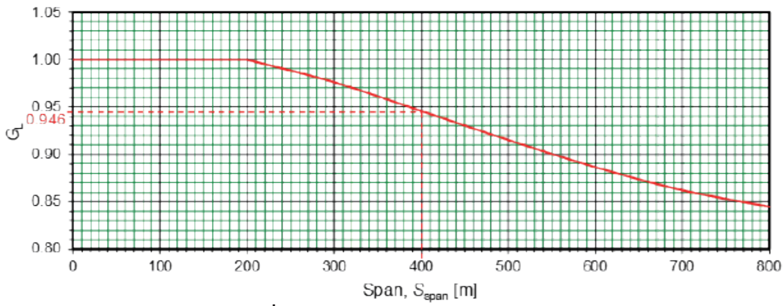
= 1.2 สำหรับลมพัดทาง EW หรือตัวนำที่มี $\varnothing_{total} \leq 15$ mm

G_C = แฟกเตอร์รวมของลมในรูปที่ 2.50



รูปที่ 2.50 แฟกเตอร์รวมของลม G_C

G_L = แฟกเตอร์ของระยะห่างระหว่างเสาในรูปที่ 2.51



รูปที่ 2.51 แฟกเตอร์ระยะห่างระหว่างเสา G_L

$\varnothing_{total}$ = เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ [m]

S_{span} = ความยาวตัวนำที่ลมพัดผ่าน = $½(S_{span,\ left}+S_{span,\ rigth})$

δ = มุมที่ลมปะทะตัวนำ

ตัวอย่างที่ 2.18 จงคำนวณระยะตกท้องช้าง D_{ext} ของตัวนำ 645-A1/S1A-42/7 ในตัวอย่างที่ 2.15 โดยใช้ข้อมูลของลมที่มาปะทะตัวนำดังนี้

1. ลักษณะพื้นที่: B
2. ความเร็วลมสูงสุดอ้างอิง $V_{RB,max}$ @10m: 30 [m/s]
3. แฟกเตอร์ K_R: 1.00
4. ความสูงเหนือพื้นดินที่ลมมาปะทะตัวนำ, H_{wind}: 30 [m]
5. แฟกเตอร์ α: 0.16
6. ความหนาแน่นของอากาศที่ระดับน้ำทะเล, μ: 1.225 [kg/m^3]
7. อุณหภูมิของอากาศ, T_{amb}: 32 [^{o}C]
8. แฟกเตอร์แก้ค่าความหนาแน่นของอากาศ, τ: 0.835
9. แฟกเตอร์, G_C: 2.246
10. แฟกเตอร์, G_L: 0.9459
11. มุมที่ลมมาปะทะตัวนำ, δ: 5 deg (เนื่องจากเป็นที่ราบดังนั้นลมจึงมาะทะตัวนำจากทางด้านข้าง ไม่ใช่กดลงจากด้านบน)

ความเร็วลม V_Z ที่มาปะทะตัวนำที่ความสูง H_{wind} มีค่าเท่ากับ

$$V_Z = k_R V_{RB,max}\left(\frac{H_{wind}}{10}\right)^{\alpha} = 1.0\cdot 30\cdot\left(\frac{30}{10}\right)^{0.16} = 35.765 \quad \text{[m/s]}$$

$$q_0 = \frac{1}{2}\tau\mu V_Z^{\,2} = \frac{1}{2}0.835\cdot 1.225\cdot(1.0\cdot 35.756)^2 = 654.2 \quad \text{[Pa]}$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} w_{wind} &= q_0 C_{XC} G_C G_L \varnothing_{total} S_{span}\sin^2\delta \\ &= 654.2\cdot 1.0\cdot 2.246\cdot 0.9459\cdot 3.391\cdot 10^{-2}\cdot 400\cdot\sin^2 5 \\ &= 157.5 \quad \text{[N]} \end{aligned}$$

$$D = \frac{H}{\sqrt{w^2+w_{wind}^{\;2}}}\left[\cosh\left(\frac{\sqrt{w^2+w_{wind}^{\;2}}\,S_{span}}{2H}\right)-1\right] = \frac{30316}{\sqrt{20.04^2+\left(\frac{153}{400}\right)^2}}\left[\cosh\left(\frac{\sqrt{20.04^2+\left(\frac{157.5}{400}\right)^2}\cdot 400}{2\cdot 30316}\right)-1\right]$$

$$= 13.50 \quad \text{[m]}$$

$$L = \frac{2H}{\sqrt{w^2+w_{wind}^{\;2}}}\sinh\left(\frac{\sqrt{w^2+w_{wind}^{\;2}}\cdot S_{span}}{2H}\right) = \frac{2\cdot 30316}{\sqrt{20.04^2+\left(\frac{153}{400}\right)^2}}\sinh\left(\frac{\sqrt{20.04^2+\left(\frac{157.5}{400}\right)^2}\cdot 400}{2\cdot 30316}\right)$$

$$= 401.2 \quad \text{[m]}$$

และเมื่อรวมความล้าจากตัวอย่างที่ 2.17 เราจะพบว่าระยะตกท้องช้างจะเพิ่มขึ้นเป็น

$$L_{wind+creep} = L + \Delta L = 401.2 + 0.201 = 401.4 \quad \text{[m]}$$

$$D_{wind+creep} \cong \sqrt{\frac{3S_{span}\cdot\left(L_{wind+creep}-S_{span}\right)}{8}} = \sqrt{\frac{3\cdot 400\cdot(401.4-400)}{8}} = 14.49 \quad \text{[m]}$$

โปรดสังเกตว่าผลของลมที่มาปะทะตัวนำที่มีต่อระยะตกท้องช้าง D ไม่มากนัก -เพิ่มขึ้นเพียง (14.49-14.34) = 0.15 m- ทั้งนี้เพราะเราสมมุติว่าสายส่งไฟฟ้าอยู่ในบริเวณพื้นที่ราบ ลมส่วนมากจึงมาปะทะตัวนำทางด้านข้างเท่านั้น

ดังนั้น ถ้าสร้างสายส่งไฟฟ้าในหุบเขา ลมที่ปะทะตัวนำจะกดตัวนำลงทำให้ D มีค่าสูงมากจนทำให้ระยะปลอดภัยอาจน้อยกว่าที่เราออกแบบไว้

2) ผลของน้ำฝน/หิมะที่มาเกาะตัวนำ

ในปัจจุบัน ยังไม่พบการคำนวณหาน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของตัวนำเนื่องจากมีหยดน้ำฝนมาเกาะตัวนำจากเอกสารอ้างอิงใดๆ ยกเว้น [TB324, 2016] ที่กล่าวว่าตัวนำจะมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น 1.5-2.5% เมื่อตัวนำเปียก ดังนั้นจึงไม่คำนึงถึงผลของน้ำฝนในที่นี้ และเนื่องจากประเทศไทยไม่มีหิมะตก จึงจะไม่กล่าวถึงเช่นกัน แต่ผู้ที่สนใจสามารถหาข้อมูลเพิ่มเติมได้จาก [IEC60826, 2017], [IEC61597, 1995], [TB324, 2016]

2.4.1.4 ระยะตกท้องช้างเนื่องจากความร้อน D_{ther}

ดังที่กล่าวมาแล้วว่าความร้อนที่เกิดในตัวนำเกิดจากมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำของสายเฟส Q_{I2Rac} [W/m] (รวมถึงความร้อนที่เกิดจากสนามแม่เหล็กหากระบุโดยผู้ผลิต) และแสงอาทิตย์ที่มาตกกระทบ Q_S [W/m] แต่ความร้อนดังกล่าวก็ระบายออกไปยังอากาศรอบข้างจากการแผ่รังสี Q_R [W/m] และลมที่พัดผ่านตัวนำ Q_C [W/m]

ความร้อนที่เกิดขึ้นในตัวนำจะทำให้อุณหภูมิของตัวนำสูงขึ้น ตัวนำจึงยาวขึ้น แต่ที่จุดสมดุลอุณหภูมิของตัวนำจะคงที่เพราะความร้อนที่เกิดและระบายออกจากตัวนำจะเท่ากัน ดังนั้น

$$Q_{I^2R_{ac}} + Q_S = Q_R + Q_C \quad \text{[W/m]} \qquad (2.56)$$

โดยความร้อนต่างๆ ที่เกิดกับตัวนำ สามารถหาได้ดังนี้

1) ความร้อนที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลในตัวนำ Q_{I2Rac}

เราทราบกันดีว่าตัวนำประเภท Ax/Syz สร้างจากแกนที่เป็นลวดเหล็กตีเกลียวแล้วพันทับด้วยลวดอะลูมิเนียมตีเกลียวเป็นชั้นๆ ดังที่กล่าวแล้วในหัวข้อที่ 2.2.2 โดยที่ความต้านทานกระแสสลับของตัวนำสามารถหาได้จากสมการ

$$R_{ac,T} = k_{skin}\left(\frac{\rho_T}{\rho_{20}} R_{dc,20}\right) \quad [\Omega/\text{m}] \qquad (2.57a)$$

เมื่อ $R_{ac,T}$ = ความต้านทานกระแสตรงของตัวนำ [Ω/m] ที่อุณหภูมิ T [°C]

k_{skin} = *แฟกเตอร์แก้ค่าปรากฏการณ์ที่ผิว* (skin effect factor) ~ 1.02-1.08

ρ_T = ความต้านทานจำเพาะของตัวนำที่อุณหภูมิ T [Ωm]

ρ_{20} = ความต้านทานจำเพาะของตัวนำที่อุณหภูมิ 20 °C [Ωm] ซึ่งหาได้จากสมการ

$$\rho_T = \rho_{20}\left[1 + \alpha_{20}(T_{cond} - 20) + \zeta_{20}(T_{cond} - 20)^2\right] \quad [\Omega\text{m}] \qquad (2.57b)$$

$R_{dc,20}$ = ความต้านทานกระแสตรงของสายตัวนำที่อุณหภูมิ 20 °C [Ω/m]

α_{20} = สัมประสิทธิ์ความต้านทานตามอุณหภูมิเพิ่มตามอุณหภูมิลำดับที่ 1 [1/K]

ζ_{20} = สัมประสิทธิ์ความต้านทานตามอุณหภูมิเพิ่มตามอุณหภูมิลำดับที่ 2 [1/K^2]

T_{cond} = อุณหภูมิเฉลี่ยของตัวนำ [°C]

ดังนั้นความร้อนที่เกิดขึ้นจึงมีค่าเท่ากับ

$$Q_{I^2R_{ac,T}} = I^2 R_{ac,T} \quad \text{[W/m]} \qquad (2.58)$$

แต่โปรดสังเกตว่าโดยปกติเรามักใช้ค่า $R_{ac,T}$ จากผู้ผลิตโดยไม่ต้องใช้สมการที่ 2.57a ในการคำนวณ เช่น ค่าที่แสดงในตารางที่ 2.1 หรือ 2.6

2) ความร้อนที่เกิดในตัวนำเนื่องจากแสงอาทิตย์ Q_S

ความร้อนในตัวนำที่เพิ่มขึ้นจากแสงอาทิตย์ที่มาตกกระทบตัวนำ หาได้จากสมการ

$$Q_S = \alpha_S I_S \varnothing_{total} \quad [\mathrm{W/m}] \tag{2.59}$$

เมื่อ α_S = *สภาพดูดกลืนของผิวตัวนำ* (absorptivity of conductor surface)

I_S = ความเข้มแสงอาทิตย์ [W/m^2]

$\varnothing_{total}$ = เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ [m]

อย่างไรก็ตาม ความเข้มแสงอาทิตย์จะเปลี่ยนไปตามสภาพของท้องฟ้าที่มีค่าไม่แน่นนอนในแต่ละวัน ทำให้การคำนวณอาจเกิดความผิดพลาดหากเรานำค่าเฉลี่ยของความเข้มแสงอาทิตย์มาใช้ ดังนั้น ความเข้มแสงอาทิตย์จึงอาจหาได้จากตำแหน่งที่ติดตั้งตัวนำจากสมการ [TB601, 2014]

$$I_S = I_B\left(\sin\eta + \frac{\pi}{2}F\cdot\sin(H_S)\right) + I_d\left(1+\frac{\pi}{2}F\right)$$

เมื่อ I_B = ความเข้มแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบตั้งฉากกับตัวนำ [W/m^2] ซึ่งหาได้จากสมการ

$$I_B = I_{B(0)}\left(1+1.4\cdot10^{-4}\cdot h_{location}\cdot\left(\frac{1367}{I_{B(0)}}-1\right)\right); \quad I_{B(0)} = N_S\left(\frac{1280\cdot\sin(H_S)}{\sin(H_S)+0.314}\right)$$

เมื่อ $h_{location}$ = ความสูงของตัวนำเหนือระดับน้ำทะเล [m]

N_S = สภาพของท้องฟ้า = 0.8-1.2 สำหรับฟ้าโปร่ง

I_d = ความเข้มแสงอาทิตย์ที่ส่องมาจากด้านข้างของตัวนำ [W/m^2]

$$I_d = (430.5 - 0.3288 I_B)\cdot\sin(H_S)$$

F = แฟกเตอร์แสงอาทิตย์ที่สะท้อนจากพื้นดิน (albedo)

H_S = ตำแหน่งของดวงอาทิตย์ [°] หาได้จากสมการ

$$H_S = \sin^{-1}(\sin\varphi\cdot\sin\delta_s + \cos\varphi\cdot\cos\delta_s\cdot\cos Z)$$

เมื่อ φ = เส้นรุ้ง (latitude) ที่ติดตั้งตัวนำ [°]

δ_S = มุมเอียง [°] ซึ่งหาได้จากสมการ

$$\delta_S = 23.4\cdot\sin\left(2\pi\frac{284+N^*}{365}\right)$$

เมื่อ N* = วันที่ร้อนที่สุดในรอบปี (1 มกราคม = 1)

Z = มุมของดวงอาทิตย์ ณ เวลาของวันที่ร้อนที่สุด หาจาก

$$Z = 15\cdot(\mathrm{Hr}-12)\ [°]; \quad 0 \le \mathrm{Hr} \le 24$$

η = มุมที่แสงอาทิตย์ตกกระทบแนวสายไฟฟ้า [°] ซึ่งหาได้จากสมการ

$$\eta = \cos^{-1}(\cos H_S\cdot\cos(\gamma_S - \gamma_{cond}))$$

เมื่อ γ_S = มุมแอซิมัท (azimuth angle) ของดวงอาทิตย์ [°] ซึ่งหาได้จากสมการ

$$\gamma_S = \sin^{-1}\left(\frac{\cos\delta_S\cdot\sin Z}{\cos H_S}\right)$$

γ_{cond} = มุมแอซิมัทของตัวนำ [°]

ตัวอย่างที่ 2.19 จงหาความร้อนที่เกิดในตัวนำ 645-A1/S1A-42/7 เนื่องจากแสงอาทิตย์ Q_S โดยใช้ข้อมูลของตำแหน่งตัวนำดังนี้

1. เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ $\varnothing_{total}$: $3.391\ 10^{-2}$ [m]
2. สภาพดูดกลืนของผิวสายไฟฟ้า α_S: 0.75
3. เส้นรุ้ง ณ ตำแหน่งที่ติดตั้งตัวนำ φ: 17.564933 [°]
4. วันที่ร้อนที่สุดในรอบปี N*: 115
5. เวลาที่ร้อนที่สุด: Hr = 12
6. มุมแอซิมัทของตัวนำ γ_{cond}: 0 [°]
7. สภาพของท้องฟ้า N_S: 1
8. แฟกเตอร์แสงอาทิตย์ที่สะท้อนจากพื้นดิน F: 0.1
9. ความสูงของตัวนำเหนือระดับน้ำทะเล h_{cond}: 1000 [m]

ก่อนอื่นเราต้องคำนวณพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ต้องใช้ ดังนี้

$$\delta_S = 23.4\cdot\sin\left(2\pi\frac{284+N^*}{365}\right) = 23.4\cdot\sin\left(2\pi\frac{284+115}{365}\right) = 12.93 \quad [\,^\circ\,]$$

$$Z = 15\cdot(12-\mathrm{Hr}) = 15\cdot(12-\mathrm{Hr}) = 0 \quad [\,^\circ\,]$$

$$\gamma_S = \sin^{-1}\left(\frac{\cos\delta_S\cdot\sin Z}{\cos H_S}\right) = \sin^{-1}\left(\frac{\cos 12.93\cdot\sin 0}{\cos 85.362}\right) = 0 \quad [\,^\circ\,]$$

$$H_S = \sin^{-1}\left(\sin\varphi\cdot\sin\delta_s + \cos\varphi\cdot\cos\delta_s\cdot\cos Z\right) = \sin^{-1}\left(\sin 17.565\cdot\sin 12.93 + \cos 17.565\cdot\cos 12.93\cdot\cos 0\right)$$
$$= 85.362 \quad [\,^\circ\,]$$

$$\eta = \cos^{-1}\left(\cos H_S\cdot\cos\left(\gamma_S - \gamma_{cond}\right)\right) = \cos^{-1}\left(\cos 85.362\cdot\cos(0-0)\right) = 85.362 \quad [\,^\circ\,]$$

ความเข้มแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบตั้งฉากกับตัวนำ I_B จึงมีค่าเท่ากับ

$$I_{B(0)} = N_S\left(\frac{1280\cdot\sin(H_S)}{\sin(H_S)+0.314}\right) = 1\cdot\left(\frac{1280\cdot\sin(85.3621)}{\sin(85.3621)+0.314}\right) = 973.36$$

$$I_B = I_{B(0)}\left(1+1.4\cdot10^{-4}\cdot h_{cond}\cdot\left(\frac{1367}{I_{B(0)}}-1\right)\right) = 973.36\left(1+1.4\cdot10^{-4}\cdot1000\cdot\left(\frac{1367}{973.36}-1\right)\right) = 1028.5 \quad [\mathrm{W/m^2}]$$

และความเข้มแสงอาทิตย์ที่ส่องมาจากด้านข้างของตัวนำ I_d จึงมีค่าเท่ากับ

$$I_d = (430.5 - 0.3288 I_B)\cdot\sin(H_S) = (430.5 - 0.3288\cdot1028.5)\cdot\sin(85.362) = 92.04 \quad [\mathrm{W/m^2}]$$

ดังนั้นความเข้มของแสงอาทิตย์ I_S ที่ตกกระทบตัวนำจึงมีค่าเท่ากับ

$$I_S = I_B\left(\sin\eta + \frac{\pi}{2}F\cdot\sin(H_S)\right) + I_d\left(1+\frac{\pi}{2}F\right) = 1028.5\left(\sin 85.362 + \frac{\pi}{2}\cdot0.1\cdot\sin(85.362)\right) + 92.04\left(1+\frac{\pi}{2}\cdot0.1\right)$$
$$= 1292.62 \quad [\mathrm{W/m^2}]$$

ความร้อนที่เกิดขึ้นในตัวนำจึงมีค่า

$$Q_S = \alpha_S I_S \varnothing_{total} = 0.75\cdot1292.62\cdot3.391\cdot10^{-2} = 32.87 \quad [\mathrm{W/m}]$$

3) ความร้อนที่ระบายออกไปยังอากาศรอบข้างจากการแผ่รังสี Q_R

ความร้อนในตัวนำที่ลดลงเนื่องจากการแผ่รังสีออกไปในอากาศรอบ ๆ ตัวนำ หาได้จากสมการ

$$Q_R = \pi\varnothing_{total}\sigma_B\varepsilon_S\left[(273+T_{cond})^4 - (273+T_{amb})^4\right] \quad [\mathrm{W/m}] \qquad (2.60)$$

เมื่อ ε_S = *สัมประสิทธิการแผ่รังสีของผิวตัวนำ* (emissivity of conductor surface)

σ_B = ค่าคงที่ของสเตฟาน-โบลส์มาน (Stefan-Boltzmann constsnt)

$\varnothing_{total}$ = เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ [m]

T_{cond} = อุณหภูมิเฉลี่ยของตัวนำ [°C]

T_{amb} = อุณหภูมิของอากาศรอบ ๆ ตัวนำ [°C]

ตัวอย่างที่ 2.20 จงหาความร้อนที่สูญเสียไปเนื่องจากการแผ่รังสีของตัวนำ 645-A1/S1A-42/7 โดยใช้ข้อมูลต่อไปนี้

1. เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ $\varnothing_{total}$: 3.391 10^{-2} [m]
2. ค่าคงที่ของสเตฟาน-โบลส์มาน σ_B: 5.6697 10^{-8} [W/(m^{2}K^4)]
3. สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของผิวสายไฟฟ้า ε_S: 0.8
4. อุณหภูมิเฉลี่ยของตัวนำ T_{cond}: 75 [°C]
5. อุณหภูมิของอากาศรอบ ๆ ตัวนำ T_{amb}: 32 [°C]

ความร้อนที่สูญเสียไปเนื่องจากการแผ่รังสีของตัวนำ มีค่าเท่ากับ

$$Q_R = \pi\varnothing_{total}\sigma_B\varepsilon_S\left[(273+T_{cond})^4-(273+T_{amb})^4\right] = \pi\cdot 3.391\cdot 10^{-2}\cdot 5.67\cdot 10^{-8}\cdot 0.8\left[(273+75)^4-(273+32)^4\right]$$
$$= 29.05 \text{ [W/m]}$$

3) ความร้อนที่ระบายออกจากตัวนำไปยังอากาศรอบ ๆ Q_C

ความร้อนที่ระบายออกจากตัวนำไปยังอากาศรอบ ๆ หาได้จากสมการ

$$Q_C = \pi\lambda_f\left(T_{cond}-T_{amb}\right)\nu \text{ [W/m]} \tag{2.61}$$

เมื่อ λ_f = *ความนำความร้อนของอากาศ* (air thermal conductivity) ที่อุณหภูมิ T_f = ½(T_{cond} + T_{amb}) ซึ่งหาได้จาก

$$\lambda_f = 2.368\cdot 10^{-2}+7.23\cdot 10^{-5}T_f-2.763\cdot 10^{-8}T_f^2 \text{ [(W/m)/°C]}$$

ν = Nusselt number ซึ่งขึ้นอยู่กับว่ามีหรือไม่มีลมพัดมาปะทะตัวนำ โดยเลือกใช้ค่าที่มากกว่า ซึ่งได้จากการคำนวณตามสมการที่ 2.62 หรือ 2.63

ก) ν_{forced} เมื่อมีลมพัดปะทะตัวนำ (forced convection)

Nusselt number ในกรณีที่มีลมพัดมาปะทะตัวนำ หาได้จาก

$$\nu_{forced} = \nu_{90}\cdot\left(0.42+0.58(\sin\delta)^{0.90}\right); \quad \delta > 24° \tag{2.62}$$

เมื่อ δ = มุมที่ลมพัดมาปะทะตัวนำ [°] และ

ν_{90} = B Re^n โดยที่ Re คือ Reynolds number หาได้จาก

$$\text{Re} = \frac{V_{typ}\varnothing_{total}}{\nu_f}$$

เมื่อ ν_f คือ *ความหนืดของอากาศ* (air viscosity) [m^2/s] ซึ่งคำนวณจาก μ_f/γ โดยที่

$$\mu_f = \left(17.239+4.635\cdot 10^{-2}\cdot T_f-2.03\cdot 10^{-5}\cdot T_f^2\right)\cdot 10^{-6}$$

$$\gamma = \frac{1.293-1.525\cdot 10^{-4}\cdot h_{cond}+6.379\cdot 10^{-9}\cdot h_{cond}^2}{1+0.00367\cdot T_f}$$

ส่วนตัวประกอบ B และเลขชี้กำลัง n หาได้จากตารางที่ 2.29 โดยที่ R_s = $\varnothing_{wire}$/(2($\varnothing_{total}$ - $\varnothing_{wire}$))

ตารางที่ 2.29 ตัวประกอบ B และเลขชี้กำลัง n

	Re	*B*	n
$R_s \leq 0.05$	100 - 2,650	0.641	0.471
	2,650 - 50,000	0.178	0.633
$R_s > 0.05$	100 - 2,650	0.641	0.471
	2,650 - 50,000	0.048	0.800

ข) ν_{nat} เมื่อไม่มีลมพัด (natural convection)

Nusselt number ในกรณีที่มีไม่ลมพัดมาปะทะตัวนำ หาได้จาก

$$\nu_{nat} = \nu_0 \cdot \left(1 - 1.76 \cdot 10^{-6} \cdot \beta^{2.5}\right); \quad \beta < 80^\circ \tag{2.63}$$

เมื่อ β = มุมเงยที่ตัวนำทำกับพื้นดิน [$^\circ$] และ

ν_0 = A (Gr Pr)^m

โดยที่ Gr คือ Grashof number และ Pr คือ Prandtl number หาได้จาก

$$\mathrm{Gr} = \frac{g\varnothing_{total}^{\ 3}\left(T_{cond} - T_{amb}\right)}{\nu_f^{\ 2}\left(T_f + 273\right)}; \qquad \mathrm{Pr} = c_f \frac{\mu_f}{\lambda_f}$$

เมื่อ g คือ *ความเร่งของแรงโน้มถ่วง* (acceleration of gravity) [m/s^2], c_f คือ *ความหนาแน่นของอากาศ* (air density) ที่ความดันอากาศ ณ ความสูงของตัวนำเหนือระดับน้ำทะเล h_{cond} [g/m^3] และ λ_f คำนวณได้จาก

$$\lambda_f = 2.368 \cdot 10^{-2} + 7.23 \cdot 10^{-5} \cdot T_f - 2.763 \cdot 10^{-8} \cdot T_f^2$$

ส่วนตัวประกอบ A และเลขชี้กำลัง m หาได้จากตารางที่ 2.30

ตารางที่ 2.30 ตัวประกอบ A และเลขชี้กำลัง m

Range of Gr Pr	*A*	m
0.01 - 100	1.020	0.148
100 - 10^4	0.850	0.188
10^4 - 10^7	0.480	0.250
10^7 - 10^{12}	0.125	0.333

ตัวอย่างที่ 2.21 จงหาความร้อนที่ระบายออกจากตัวนำ 645-A1/S1A-42/7 เนื่องจากการพาไปยังอากาศรอบ ๆ โดยใช้ข้อมูลต่อ ไปนี้

1. ความสูงของตัวนำเหนือระดับน้ำทะเล h_{cond}: 1000 [m]
2. มุมเงยที่ตัวนำทำกับพื้นดิน β: 0 [$^\circ$]
2. อุณหภูมิเฉลี่ยของตัวนำ T_{cond}: 75 [$^\circ$C]
3. อุณหภูมิของอากาศรอบ ๆ ตัวนำ T_{amb}: 32 [$^\circ$C]
4. เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ $\varnothing_{total}$: 3.391 10^{-2} [m]
5. ความเร็วลมปกติอ้างอิง $V_{RB,typ}$ @10m: 0.60 [m/s]
6. มุมที่ลมพัดมาปะทะตัวนำ δ: 90 [$^\circ$]
7. ความหนาแน่นของอากาศ c_f: 1005 [g/m^3]

ก่อนอื่นเราต้องคำนวณพารามิเตอร์ที่ต้องใช้ ดังนี้

$$T_f = \frac{\left(T_{cond} + T_{amb}\right)}{2} = \frac{(75 + 32)}{2} = 53.5 \ \ [^\circ\mathrm{C}]$$

$$\mu_f = \left(17.239 + 4.635 \cdot 10^{-2} \cdot T_f - 2.03 \cdot 10^{-5} \cdot T_f^2\right) \cdot 10^{-6}$$

$$= \left(17.239 + 4.635 \cdot 10^{-2} \cdot 53.5 - 2.03 \cdot 10^{-5} \cdot 53.5^2\right) \cdot 10^{-6} = 1.966 \cdot 10^{-5}$$

$$\gamma = \frac{1.293 - 1.525 \cdot 10^{-4} \cdot h_{cond} + 6.379 \cdot 10^{-9} \cdot h_{cond}^{\ 2}}{1 + 0.00367 \cdot T_f} = \frac{1.293 - 1.525 \cdot 10^{-4} \cdot 1000 + 6.379 \cdot 10^{-9} \cdot 1000^2}{1 + 0.00367 \cdot 53.5} = 1.063$$

$$\nu_f = \frac{\mu_f}{\gamma} = \frac{1.966}{1.063} = 1.85 \cdot 10^{-5}$$

$$\lambda_f = 2.368 \cdot 10^{-2} + 7.23 \cdot 10^{-5} \cdot T_f - 2.763 \cdot 10^{-8} \cdot T_f^2 = 2.368 \cdot 10^{-2} + 7.23 \cdot 10^{-5} \cdot 53.5 - 2.763 \cdot 10^{-8} \cdot 53.5^2 = 0.028$$

$$\mathrm{Re}=\frac{V_{\mathrm{RB,typ}}\varnothing_{\mathrm{total}}}{\nu_{\mathrm{f}}}=\frac{0.60\cdot 3.391\cdot 10^{-2}}{1.85\cdot 10^{-5}}=1099.8$$

$$\mathrm{Gr}=\frac{g\varnothing_{\mathrm{total}}^{3}\left(T_{\mathrm{cond}}-T_{\mathrm{amb}}\right)}{\nu_{\mathrm{f}}^{2}\left(T_{\mathrm{f}}+273\right)}=\frac{9.087\cdot\left(3.391\cdot 10^{-2}\right)^{3}\left(75-32\right)}{\left(1.89\cdot 10^{-5}\right)^{2}\left(53.5+273\right)}=1.47\cdot 10^{5}$$

$$\mathrm{Pr}=c_{\mathrm{f}}\frac{\mu_{\mathrm{f}}}{\lambda_{\mathrm{f}}}=1005\frac{1.966\cdot 10^{-5}}{0.0275}=0.719$$

$$\mathrm{Gr}\cdot\mathrm{Pr}=1.058\cdot 10^{5}$$

ตัวประกอบ B และเลขชี้กำลัง n จากตารางที่ 2.29 จึงมีค่าเท่ากับ 0.641 และ 0.471 ตามลำดับ และตัวประกอบ A และเลขชี้กำลัง m จากตารางที่ 2.30 จึงมีค่าเท่ากับ 0.48 และ 0.25 ตามลำดับ

Q_{C} เมื่อมีลมพัดปะทะตัวนำ

$$\nu_{90}=B\cdot\mathrm{Re}^{n}=0.641\cdot 1099.8^{0.471}=17.35$$

ดังนั้น ν_{forced} เมื่อมีลมพัดปะทะตัวนำจึงมีค่าเท่ากับ

$$\nu_{\mathrm{forced}}=\nu_{90}\cdot\left(0.42+0.58\left(\sin\delta\right)^{0.90}\right)=17.35\cdot\left(0.42+0.58\left(\sin 90\right)^{0.90}\right)=17.35$$

ความร้อน $Q_{C,forced}$ ที่ระบายออกจากตัวนำในกรณีนี้จึงมีค่าเท่ากับ

$$Q_{\mathrm{C,forced}}=\pi\lambda_{\mathrm{f}}\left(T_{\mathrm{cond}}-T_{\mathrm{amb}}\right)\nu_{\mathrm{forced}}=\pi\cdot 0.0275\left(75-32\right)\cdot 17.35=64.38\quad[\mathrm{W/m}]$$

Q_{C} เมื่อลมสงบ

$$\nu_{0}=A\left(\mathrm{Gr}\cdot\mathrm{Pr}\right)^{m}=0.48\left(1.058\cdot 10^{5}\right)^{0.25}=8.658$$

ดังนั้น ν_{nat} เมื่อลมสงบจึงมีค่าเท่ากับ

$$\nu_{\mathrm{nat}}=\nu_{0}\cdot\left(1-1.76\cdot 10^{-6}\cdot\beta^{2.5}\right)=8.658\cdot\left(1-1.76\cdot 10^{-6}\cdot 0^{2.5}\right)=8.658$$

ความร้อน $Q_{C,nat}$ ที่ระบายออกจากตัวนำในกรณีนี้จึงมีค่าเท่ากับ

$$Q_{\mathrm{C,nat}}=\pi\lambda_{\mathrm{f}}\left(T_{\mathrm{cond}}-T_{\mathrm{amb}}\right)\nu_{\mathrm{nat}}=\pi\cdot 0.0275\left(75-32\right)\cdot 8.658=32.13\quad[\mathrm{W/m}]$$

เราจะเห็นว่าเมื่อมีลมความเร็ว 0.6 m/s พัดมาปะทะตัวนำ ความร้อนที่ระบายออกจากตัวนำ $Q_{C,forced}$ เท่ากับ 64.38 W/m ในขณะที่เมื่อลมสงบความร้อนที่ระบายออกจากตัวนำ $Q_{C,nat}$ เท่ากับ 32.13 W/m ดังนั้นเราจึงเลือกค่าที่มากกว่า ในกรณีนี้ Q_{C} = 64.38 W/m

ตัวอย่างที่ 2.22 จากตัวอย่างที่ 2.19-2.21 จงหากระแสที่ไหลผ่านตัวนำ 645-A1/S1A-42/7 โดยใช้ข้อมูลต่อไปนี้

1. ความต้านทานกระแสสลับ R_{AC} @75C 60Hz: $5.580\cdot 10^{-5}$ [Ω/m]

เราจะพบว่ากระแสสูงสุดที่ไหลผ่านตัวนำ โดยที่ทำให้อุณหภูมิของตัวนำเท่ากับ 75 °C มีค่าเท่ากับ

$$I^{2}R_{\mathrm{ac,T}}+Q_{\mathrm{S}}=Q_{\mathrm{R}}+Q_{\mathrm{C}}$$

$$I=\sqrt{\frac{Q_{\mathrm{R}}+Q_{\mathrm{C}}-Q_{\mathrm{S}}}{R_{\mathrm{ac,75}}}}=\sqrt{\frac{29.05+64.38-32.87}{55.8\cdot 10^{-6}}}=1042\quad[\mathrm{A}]$$

เราจะเห็นว่ากระแสที่ไหลผ่านสายไฟฟ้าที่คำนวณได้ ณ ตำแหน่งและสถาพอากาศที่กำหนดในตัวอย่างที่ 2.19-2.22 มีค่า I_{max} = 1042 A ซึ่งสูงกว่าค่าที่กำหนดในตารางที่ 2.22 ซึ่งก็ไม่น่าแปลกใจ เพราะเราไม่ทราบว่า I_{max} ที่กำหนดในตารางที่ 2.22 นั้นคำนวณจาก ณ ตำแหน่งและสภาพอากาศรอบ ๆ ตัวนำมีค่าเท่าใด แต่มีข้อสังเกตคือถ้าใช้ T_{amb} ต่างไปจาก 32 °C ในการคำนวณ I_{max} ค่า I_{max} จะลดลงถ้า T_{amb} เพิ่มขึ้น โดยสรุป

1) ถ้าเรากำหนดให้อุณหภูมิสูงสุดของตัวนำ T_{cond} ให้มีค่าตามที่เราต้องการ -มักมีค่าไม่เกิน 80 °C เพราะถ้าสูงกว่านี้จะทำให้ความสามารถของตัวนำในการรับแรงดึงมีค่าลดลง- กระแสที่ไหลผ่านตัวนำอาจมีค่าต่ำกว่า I_{max} ที่ต้องการ
2) ถ้าเรากำหนดค่า I_{max} เราต้องทำซ้ำเพื่อหาค่า T_{cond} ซึ่งอาจมีค่าสูงกว่า 80 °C นอกจากนั้นยังต้องหาค่า $R_{ac}@T_{cond}$ ใหม่ ซึ่งทำได้ไม่ง่ายนักเพราะไม่ทราบค่าจากบริษัทที่ผลิตสายไฟฟ้า และ
3) ถ้าเรากำหนดทั้งค่า I_{max} และ T_{cond} เราต้องเลือกตัวนำประเภทอื่น ทำให้ต้องคำนวณระยะตกท้องช้าง D อีกครั้งหนึ่ง

ตัวอย่างที่ 2-23 จงคำนวณระยะตกท้องช้างในขณะที่ตัวนำ 645-A1/S1A-42/7 มีอุณหภูมิ 75 °C ในกรณีที่ตัวนำใช้งานไปเป็นเวลา นานๆ

ก่อนอื่นเราต้องคำนวณสัมประสิทธิ์ความยาวตามอุณหภูมิของตัวนำ ACSR ซึ่งหาได้จากคุณสมบัติของตัวนำ 645-A1/ S1A-42/7 จากสมการ

$$\mathrm{TCE}_{\mathrm{ACSR}} = \frac{E_{\mathrm{Al}}A_{\mathrm{Al}}\mathrm{TCE}_{\mathrm{Al}} + E_{\mathrm{St}}A_{\mathrm{St}}\mathrm{TCE}_{\mathrm{St}}}{E_{\mathrm{Al}}A_{\mathrm{Al}} + E_{\mathrm{St}}A_{\mathrm{St}}} = \frac{55.0\cdot 6.445\cdot 10^{-4}\cdot 2.3\cdot 10^{-5} + 190\cdot 3.35\cdot 10^{-5}\cdot 1.15\cdot 10^{-5}}{55.0\cdot 6.445\cdot 10^{-4} + 190\cdot 3.35\cdot 10^{-5}}$$
$$= 2.125\cdot 10^{-5} \quad [1/\mathrm{K}]$$

<u>ในกรณีที่ไม่คำนึงถึงผลของแรงลม</u>

$$L_{\mathrm{ther}} = L_{\mathrm{fin}}\left(1 + \mathrm{TCE}_{\mathrm{ACSR}}\cdot\Delta T\right) = 401.37\left(1 + 2.125\cdot 10^{-5}\cdot(75-27)\right) = 401.8 \quad [\mathrm{m}]$$

$$D_{\mathrm{ther}} \cong \sqrt{\frac{3S_{\mathrm{span}}\cdot\left(L_{\mathrm{ther}} - S_{\mathrm{span}}\right)}{8}} = \sqrt{\frac{3\cdot 400\cdot(401.8-400)}{8}} = 16.32 \quad [\mathrm{m}]$$

<u>ในกรณีที่คำนึงถึงผลของแรงลม</u>

$$L_{\mathrm{ther}} = L_{\mathrm{wind+creep}}\left(1 + \mathrm{TCE}_{\mathrm{ACSR}}\cdot\Delta T\right) = 401.41\left(1 + 2.125\cdot 10^{-5}\cdot(75-27)\right) = 401.82 \quad [\mathrm{m}]$$

$$D_{\mathrm{ther}} \cong \sqrt{\frac{3S_{\mathrm{span}}\cdot\left(L_{\mathrm{ther}} - S_{\mathrm{span}}\right)}{8}} = \sqrt{\frac{3\cdot 400\cdot(401.82-400)}{8}} = 16.53 \quad [\mathrm{m}]$$

อนึ่ง อุณหภูมิของตัวนำ T_{cond}, อุณหภูมิของอากาศ T_{amb}, ความเร็วและทิศทางลม ฯลฯ ควรวัด ณ ตำแหน่งที่ติดตั้งสายไฟฟ้า ซึ่งทำได้ตามคำแนะนำใน [IEC61850-90-3, 2016] และ [TB498-2012]

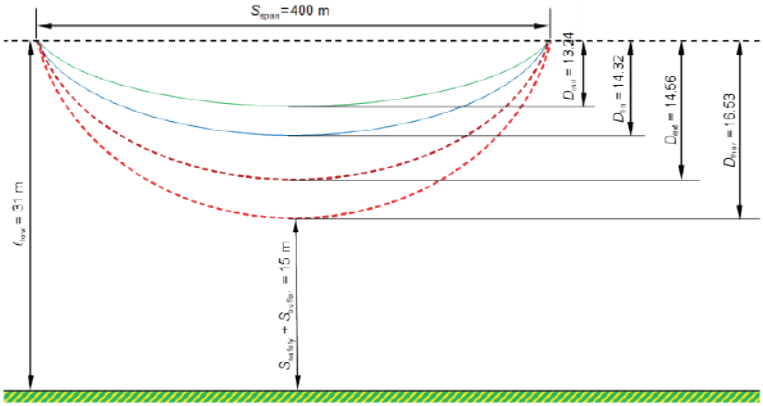
2.4.2 โครงสร้างเสาส่งไฟฟ้าที่ใช้แขนเสาไฟฟ้าแบบเหล็กถัก

ระยะตกท้องช้าง D ที่คำนวณได้ในตัวอย่างที่ 2.23 เป็นระยะตกท้องช้างที่กึ่งกลางระยะห่างระหว่างเสาส่งไฟฟ้าซึ่งต้องสูงจากพื้นดินไม่น้อยกว่าระยะปลอดภัย S_{safety} ดังนั้นความสูงของสายไฟฟ้าเส้นล่างสุดที่เสาไฟฟ้าจึงหาได้จากสมการที่ 2.64 และรูปที่ 2.52 เมื่อเสาส่งไฟฟ้าใช้ แขนเสาส่งไฟฟ้าแบบเหล็กถัก (lattice steel crossarm)

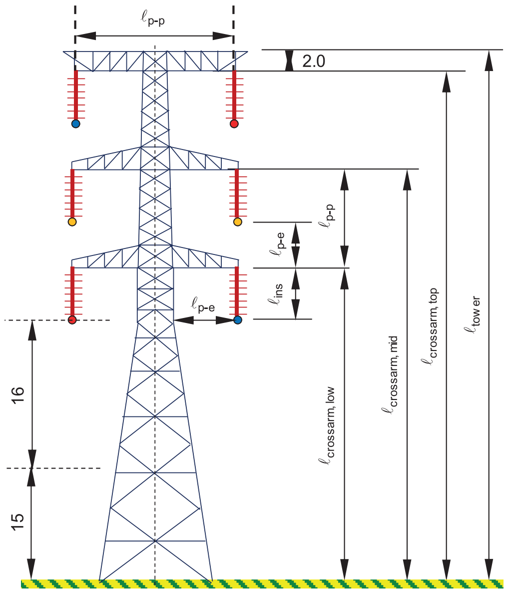
$$\ell_{\mathrm{low}} = S_{\mathrm{safety}} + S_{\mathrm{buffer}} + D = 12 + 3 + 16.53 \sim 31 \quad [\mathrm{m}] \qquad (2.64)$$

โดยที่ S_{buffer} = 3 m เป็นระยะเผื่อที่เพิ่มขึ้นมาเนื่องจากความไม่แน่นอนของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณระยะตกท้องช้าง D ดังนั้นความสูงของสายไฟฟ้าเส้นล่างสุดที่เสาไฟฟ้า ℓ_{low} จึงปัดเศษลง

เราจะพบว่าเสาส่งไฟฟ้าจะมีความสูงดังแสดงในรูปที่ 2.53 โดยที่เราต้องหาระยะ ℓ ต่างๆ ที่เหลือในรูปจากความยาวพวงลูกถ้วย $\ell_{ins,p\text{-}e}$, ระยะห่างในอากาศระหว่างสายเฟสกับกราวน์ $\ell_{air,p\text{-}e}$ และระยะห่างระหว่างสายเฟส $\ell_{air,p\text{-}p}$ ในตารางที่ 2.21 และความสูงของสายไฟฟ้าเส้นล่างสุดที่เสาไฟฟ้า ℓ_{low}



รูปที่ 2.52 ความสูงของสายไฟฟ้าเส้นล่างสุดที่เสาส่งไฟฟ้า ℓ_{low}



รูปที่ 2.53 โครงสร้างของเสาส่งไฟฟ้าที่ใช้แขนเสาไฟฟ้าแบบเหล็กถัก

จากตารางที่ 2.21 ถ้าเราใช้ค่าสูงสุดในตารางก็จะหาความยาว ℓ ต่างๆ ในรูปที่ 2.45 ได้ดังนี้

$$\ell_{p\text{-}e} = \ell_{air,p\text{-}e} = 2.0 \ \ [\text{m}]$$

$$\ell_{ins} = 1.05 \cdot \ell_{air,p\text{-}e} + \ell_{fitting} = 2.1 + 1.0 = 3.1 \ \ [\text{m}]$$

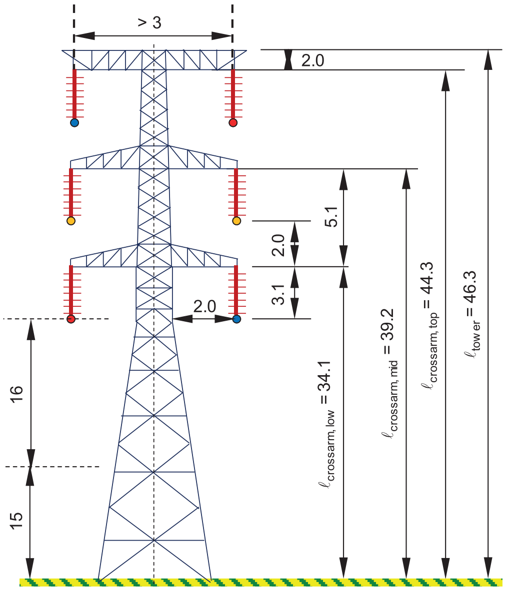
$$\ell_{ins} + \ell_{p\text{-}e} = 3.1 + 2.0 = 5.1 \ \ [\text{m}]$$

$$\ell_{p\text{-}p} = \ell_{air,p\text{-}p} = 3.0 \ \ [\text{m}]$$

ทั้งนี้เราต้องเลือกค่าที่มากกว่าระหว่าง $\ell_{ins}+\ell_{p\text{-}e}$ กับ $\ell_{p\text{-}p}$ ดังนั้นจึงต้องเลือกค่า 5.1 m ทำให้ความสูงของแขนเสาไฟฟ้ามีค่าดังนี้

$$\ell_{crossarm,low} = 31+\ell_{ins} = 31+3.1 = 34.1 \text{ [m]}$$
$$\ell_{crossarm,mid} = \ell_{crossarm,low} + 5.1 = 34.1+5.1 = 39.2 \text{ [m]}$$
$$\ell_{crossarm,top} = \ell_{crossarm,mid} + 5.1 = 39.2+5.1 = 44.3 \text{ [m]}$$

ความสูงของเสาไฟฟ้าจึงมีค่าต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.54



รูปที่ 2.54 ความสูงของเสาส่งไฟฟ้าที่ใช้แขนเสาไฟฟ้าแบบเหล็กถัก

ซึ่งถ้ารวมระยะห่างระหว่างสายดินขึงอากาศกับสายส่งไฟฟ้าเส้นบนสุด $\ell_{p\text{-}e}$ อีก 2 m ก็จะพบว่าความสูงของเสาส่งไฟฟ้ารวมทั้งหมด ℓ_{tower} จะประมาณ 46 m

อนึ่ง ระยะห่างตามแนวนอน $\ell_{p\text{-}e}$ และ $\ell_{p\text{-}p}$ ที่แสดงในรูปยังไม่ได้คำนึงถึงการแกว่งของสายส่งไฟฟ้าเมื่อมีลมมาปะทะ เนื่องจากยังมีโครงสร้างของเสาไฟฟ้าแบบอื่นที่เราควรจะพิจารณาก่อนที่จะคำนวณการแกว่งของสายส่งไฟฟ้าดังกล่าว

2.4.3 โครงสร้างเสาส่งไฟฟ้าที่ใช้แขนเสาไฟฟ้าแบบฉนวน

เทคโนโลยีทางด้านวัสดุศาสตร์ในปัจจุบันมีความก้าวหน้าไปมากจนวิศวกรได้นำวัสดุประเภทพอลิเมอร์และ composite มาใช้งานทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง เพราะนอกจากจะขึ้นรูปได้ง่ายแล้วยังมีน้ำหนักที่เบากว่าพอรซ์เลนที่ใช้ในอดีต ยกตัวอย่าง เช่น แขนเสาส่งไฟฟ้าแบบฉนวน (composite insulator cross arm, CICA) ที่แสดงในรูปที่ 2.55 [Shermar, 201x]

รูปที่ 2.55 ภาพถ่ายเสาส่งไฟฟ้า 750 kV ที่ใช้แขนเสาไฟฟ้าแบบฉนวน

ดังนั้นถ้าเสาส่งไฟฟ้าใช้แขนเสาไฟฟ้าแบบฉนวนดังแสดงในรูปที่ 2.55 เราจะสามารถคำนวณระยะห่างต่างๆ ได้ดังนี้

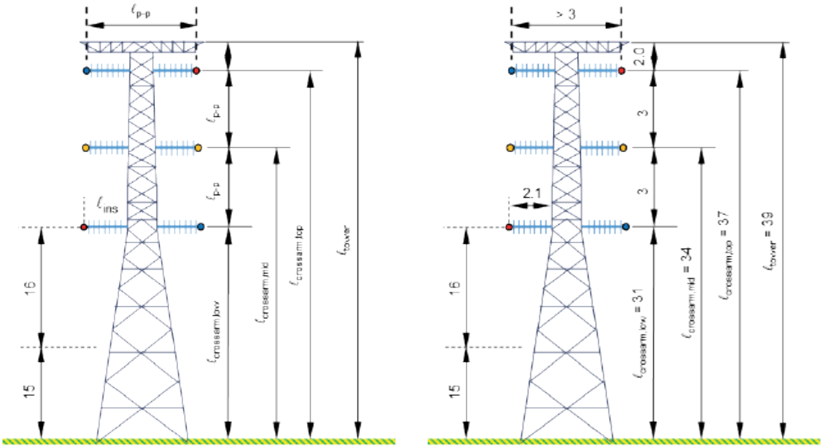
$$\ell_{ins} = \ell_{ins,p\text{-}e} = 2.1 \;\; [m]$$

$$\ell_{crossarm,low} = 31 \;\; [m]$$

$$\ell_{crossarm,mid} = \ell_{crossarm,low} + \ell_{p\text{-}p} = 31.0 + 3.0 = 34 \;\; [m]$$

$$\ell_{crossarm,top} = \ell_{crossarm,mid} + \ell_{p\text{-}p} = 34.0 + 3.0 = 37 \;\; [m]$$

ซึ่งถ้ารวมระยะห่างระหว่างสายดึงขึงอากาศกับสายส่งไฟฟ้าเส้นบนสุด $\ell_{p\text{-}e}$ อีก 2 m ก็จะพบว่าความสูงของเสาส่งไฟฟ้ารวมทั้งหมด ℓ_{tower} จะประมาณ 39 m ซึ่งจะเห็นว่าความสูงของเสาส่งไฟฟ้าแบบนี้จะต่ำลง 7 m (15%) เมื่อเทียบกับความสูงของเสาส่งไฟฟ้าที่ใช้แขนเสาไฟฟ้าแบบเหล็กถัก



รูปที่ 2.56 ความสูงของเสาส่งไฟฟ้าที่ใช้แขนเสาไฟฟ้าแบบฉนวน

2.4.4 การแกว่งของสายเฟสเมื่อมีลมปะทะ

เราต้องพิจารณาถึงการแกว่งของสายส่งไฟฟ้าที่ทำให้โครงสร้างของเสาส่งไฟฟ้าเปลี่ยนไป เนื่องจากมีลมมาปะทะสายส่งไฟฟ้าเพราะเราต้องป้องกันไม่ให้เกิดเบรกดาวน์ในอากาศระหว่างสายเฟสกับสายเฟส, สายเฟสกับเสาส่งไฟฟ้า และสายเฟสกับกราวนด์ที่ขอบ RoW

ลมที่ปะทะสายส่งไฟฟ้าไม่น่าจะมีผลต่อระยะตกท้องช้าง D มากนัก เพราะลมที่มาปะทะทางด้านข้างสายส่งไฟฟ้าจะทำให้สายส่งแกว่งไปทางเสาส่งไฟฟ้า ไม่ได้กดลงมาบนสายส่งไฟฟ้าโดยตรงซึ่งจะทำให้น้ำหนักของสายไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ยกเว้นจะเกิด *ลมแปรปรวน* (turbulence wind) ซึ่งไม่สามารถทำนายได้ว่าจะเกิดขึ้นหรือไม่ ดังนั้นในที่นี้จึงไม่คำนึงถึงแรงลมที่ปะทะสายทางด้านข้างที่มีต่อน้ำหนักของสายส่งไฟฟ้า

ระยะห่างในอากาศเพื่อหา SDWV, SIWV และ LIWV แบ่งออกเป็น 3 แบบ ตามความเร็วลมที่พิจารณา ดังแสดงในตารางที่ 2.31 [TB348, 2008], [EN50341-1, 2001]

ตารางที่ 2.31 ความเร็วลมที่ใช้ในการออกแบบระยะห่างในอากาศ

แบบที่	ความทนแรงดัน	ความเร็วลม
1	SDWV	ความเร็วลมสูงสุด (T = 50 yr)
2	Reduced LIWV / SIWV	ความเร็วลมไม่สูงมาก (T = 3 yr)
3	LIWV / SIWV	ลมสงบในกรณีที่สายส่งไฟฟ้ามีอุณหภูมิสูงสุดหรือมีฝนมาเกาะ

แบบที่ 1 เป็นการออกแบบให้ระยะห่างในอากาศระหว่างสายไฟฟ้ากับเสาส่งไฟฟ้าหรือสายไฟฟ้ากับสายดินขึงอากาศ $\ell_{\text{p-e}}$ ทนแรงดัน SDWV ในกรณีความเร็วลมสูงสุดที่เกิดขึ้นทุก 50 ปี โดยที่มีโอกาสในการเกิดเบรกดาวน์ไม่เกิน 1% ส่วนแบบที่ 3 เป็นการออกแบบให้ระยะห่างในอากาศระหว่างเฟส $\ell_{\text{p-p}}$ ทนแรงดัน SIWV หรือ LIWV ในกรณีลมสงบหรือความเร็วลมที่มีโอกาสเกิด 99% โดยที่มีโอกาสในการเกิดเบรกดาวน์ไม่เกิน 10% ส่วนแบบที่ 2 มักไม่นิยมใช้ในการออกแบบ ดังนั้นเราจึงมีกรณีที่ต้องพิจารณาเพียง 2 กรณีเท่านั้น ดังแสดงในตารางที่ 2.32

ตารางที่ 2.32 ความเร็วลมที่เลือกใช้ในการออกแบบระยะห่างในอากาศ

		ความเร็วลม	
		ลมสงบหรือลมที่มีโอกาสเกิด 99% (โอกาสเกิดสูง)	ความเร็วลมสูงสุด (T = 50 yr) (โอกาสเกิดต่ำ)
แรงดัน	U_m (โอกาสเกิดสูง)	แบบที่ 1 & 3	แบบที่ 1
	SOV / LOV (โอกาสเกิดต่ำ)	แบบที่ 3	-

2.4.4.1 ค่าทางสถิติของของลมที่ปะทะสายส่งไฟฟ้า

ในที่นี้ โอกาส P ที่จะเกิดลมใดๆ ที่มีความเร็วลม v [m/s] จะสมมุติให้มีการกระจายแบบ Gumble [IEC60826, 2017] ซึ่งมีสมการเป็น

$$P\left(v > V_{\text{RB,1yr-Xmin}}\right) = 1 - e^{-e^{\frac{-\pi\left(v - V_{\text{RB,1yr-Xmin}} + 0.45\sigma_v\right)}{\sigma_v\sqrt{6}}}}$$

เมื่อ v = ความเร็วลมที่กำหนด เช่น ความเร็วลมสูงสุดที่เกิดขึ้นทุก T yr [m/s]

$V_{RB,1yr\text{-}Xmin}$ = ค่าเฉลี่ยหลายๆ ปี ของความเร็วลมสูงสุดเฉลี่ยในรอบ 1 yr -พื้นที่แบบ B ในตารางที่ 2-26- ที่นำค่าความเร็วลมในช่วงเวลา x_{min} มาเฉลี่ย โดยที่ x มักใช้ 10 min [m/s]

σ_v = ความเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดย [TB348, 2008] แนะนำให้ใช้ σ_v = 2.8 [m/s]

ความเร็วลมสูงสุดที่เกิดขึ้นทุก T yr จึงสามารถหาได้จากสมการ

$$V_{RB,Tyr\text{-}10min} = V_{RB,1yr\text{-}10min} - \sigma_V \left[0.45 + \frac{\ln\left(-\ln\left(1-\frac{1}{T}\right)\right)\cdot\sqrt{6}}{\pi} \right] \text{ [m/s]} \tag{2.65}$$

และโปรดสังเกตว่าจำนวนครั้งในการบันทึกค่าความเร็วลมต่อชั่วโมงจะมีผลต่อจำนวนข้อมูลที่บันทึกได้ใน 1 yr

ตัวอย่างที่ 2.24 จงหาจำนวนข้อมูลที่บันทึกได้ใน 1 yr เมื่อเราบันทึกข้อมูลเฉลี่ยของความเร็วลมในช่วง 10 min ทุก 10 min, 1 hr, 3 hr และ 6 hr

	จำนวนข้อมูลที่บันทึกได้ [ครั้ง]		
บันทึกข้อมูลทุก	**1 hr**	**1 day**	**1 yr**
10 min	6	144	52560
1 hr	1	24	8760
3 hr	1/3	8	2920
6 hr	1/6	4	1460

ซึ่งเราสามารถนำไปใช้ในการคำนวณโอกาสที่จะเกิดความเร็วลมสูงสุดที่คำนวณจากสมการที่ 2.65 ได้

ตัวอย่างที่ 2.25 จงหาโอกาสที่จะเกิดความเร็วลมสูงสุดที่เกิดขึ้นทุก 2 yr, $P(V_{RB,2yr\text{-}10min})$, หากเราใช้ข้อมูลที่ทำการบันทึกไว้ทุก 6 hr

จากตัวอย่างที่ 2.24 จำนวนข้อมูลที่บันทึกได้ใน 1 yr มี 1460 ข้อมูล ดังนั้นในระยะเวลา 2 yr จึงมีข้อมูลเท่ากับ $2\cdot1460 = 2920$ ครั้ง $P(V_{RB,2yr\text{-}10min})$ จึงมีค่าเท่ากับ $1/2920 = 3.425\cdot10^{-4}$ ครั้ง/yr หรือเราอาจกล่าวได้ว่าความเร็วลม v ที่สูงกว่า $V_{RB,2yr\text{-}10min}$ จะเกิดขึ้นเป็นเวลานานไม่เกิน $3.425\cdot10^{-4}\ 8760 = 3$ hr ใน 1 yr

ส่วนภายในรอบปี เราจะสมมุติให้ความเร็วลม v มี *การกระจายแบบไวบูล* (Weibull distribution) ตามสมการ

$$P(v) = e^{-\left(\frac{v}{V_\eta}\right)^\beta} \tag{2.66}$$

เมื่อ V_η = ความเร็วลม v ที่ทำให้โอกาสเกิดขึ้น $P(v)$ มีค่า 36.8% [m/s]

β = พารามิเตอร์รูปร่างมีค่า 1.8-2.2 โดย [TB348, 2008] แนะนำให้ใช้ β = 2

ตัวอย่างที่ 2.26 จงหา V_η ของ $v = V_{\text{RB,2yr-10min}}$ ในตัวอย่างที่ 2.25 เมื่อกำหนดให้ $\beta = 2$

จากตัวอย่างที่ 2.25 $P(v_{\text{RB,2yr-10min}}) = 3.425 \cdot 10^{-4}$ ดังนั้น

$$P(V) = e^{-\left(\frac{V}{V_\eta}\right)^\beta} \Rightarrow 3.425 \cdot 10^{-4} = e^{-\left(\frac{V_{\text{RB,2yr-10min}}}{V_\eta}\right)^2}$$

$$V_\eta = \frac{V_{\text{RB,2yr-10min}}}{\sqrt{-\ln\left(3.425 \cdot 10^{-4}\right)}} = \frac{V_{\text{RB,2yr-10min}}}{2.8248}$$

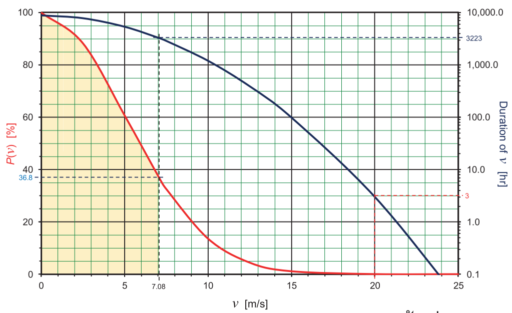
ตัวอย่างที่ 2.27 จงหา $P(v)$ ในช่วงความเร็วลม $0 < v < 25$ m/s เมื่อกำหนดให้ $V_{\text{RB,2yr-10min}} = 20$ m/s และ $\beta = 2$

จากตัวอย่างที่ 2.26

$$V_\eta = \frac{V_{\text{RB,2yr-10min}}}{2.8248} = \frac{20}{2.8248} = 7.08 \text{ [m/s]}$$

ดังนั้น

การกระจายของความเร็วลมในรอบปี		
V [m/s]	$P(V)$ [%]	ช่วงเวลาที่เกิน V [hr]
0.00	100.0	8760
2.50	88.3	7733
5.00	60.7	5320
7.08 (V_η)	36.8	3223
7.50	32.6	2852
10.00	13.6	1192
12.50	4.43	388
15.00	1.12	98.45
20.00 ($V_{\text{RB,2yr-10min}}$)	3.425E-02	3.00
25.00	3.849E-04	0.034 (2 min)



ในรูปข้างบน พื้นที่ใต้กราฟ $P(v)$ ตั้งแต่ความเร็วสูงกว่า 7.08 m/s จะเท่ากับ 36.8% ของพื้นที่ใต้กราฟทั้งหมด หรือกล่าวได้อีกอย่างหนึ่งว่าโอกาสที่ความเร็วลมจะมีค่าต่ำกว่า 7.08 m/s มีค่าเท่ากับ 63.2% (พื้นที่แรเงา)

ความเร็วลมที่ความสูง z [m] เหนือระดับพื้นดินจึงสามารถหาได้จากสมการ

$$V_{\text{z,Tyr-10min}} = K_R V_{\text{RB,Tyr-10min}} \left(\frac{z}{10}\right)^\alpha \quad \text{[m/s]} \tag{2.67}$$

เมื่อ K_R และ α มีค่าดังแสดงในตารางที่ 2.33

ตารางที่ 2.33 ค่า K_R และ α

	ลักษณะพื้นที่			
	A	B	C	D
α	0.10-0.12	0.16	0.22	0.28
K_R	1.08	1.00	0.85	0.67

ส่วนความสัมพันธ์ของเร็วลมที่ความสูง z ที่ใช้ข้อมูลเฉลี่ยของความเร็วลมในช่วง 5 min $V_{\text{z,Tyr-5min}}$ กับ $V_{\text{z,Tyr-10min}}$ ก็สามารถหาได้จาก

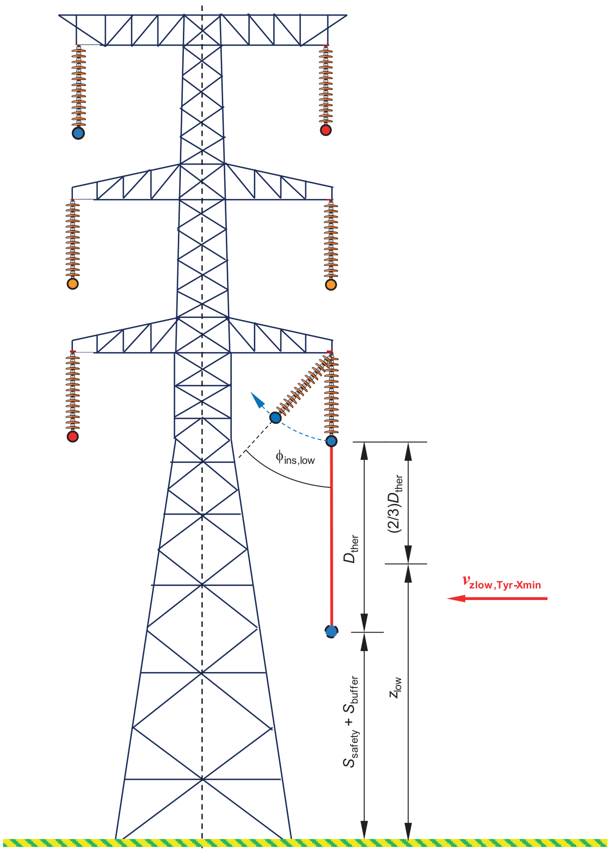
$$V_{\text{z,Tyr-5min}} = 1.05 \cdot V_{\text{z,Tyr-10min}} \quad \text{[m/s]} \tag{2.68}$$

2.4.4.2 มุมแกว่งของพวงลูกถ้วยและสายส่งไฟฟ้าเมื่อมีลมปะทะ

ก) มุมแกว่งของพวงลูกถ้วยเมื่อมีลม 50yr มาปะทะ

มุมที่พวงลูกถ้วยชุดล่างสุดแกว่งจากแนวดิ่ง $\phi_{\text{ins-low}}$ เมื่อมีลมมาปะทะสายทางด้านข้างที่แสดงในรูปที่ 2.57 ขึ้นกับแรงที่เกิดจากลมที่มาปะทะสายส่งไฟฟ้า F_{cond} [N], แรงที่เกิดจากลมที่มาปะทะพวงลูกถ้วย F_{ins} [N], น้ำหนักของสายส่งไฟฟ้า M_{cond} [N] และน้ำหนักของพวงลูกถ้วย M_{ins} [N] ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 2.69

$$\begin{aligned}\phi_{\text{ins-low}} &= \tan^{-1}\left(\frac{F_{\text{cond}}+F_{\text{ins}}}{M_{\text{cond}}+M_{\text{ins}}}\right)\\ &= \tan^{-1}\left(\frac{q_{\text{zlow}}C_{\text{x-cond}}G_G G_L \varnothing_{\text{total}} nL_{\text{wind}} + q_{\text{zlow}}C_{\text{x-ins}}A_{\text{ins}}/2}{wgnL_{\text{weight}} + w_{\text{ins}}\cdot g/2}\right) \quad [\,^{\circ}\,]\end{aligned} \tag{2.69}$$



รูปที่ 2.57 มุมแกว่ง $\phi_{\text{ins-low}}$ ของพวงลูกถ้วยไฟฟ้าจากแนวดิ่งเมื่อมีลม 50yr ปะทะสายทางด้านข้าง

เมื่อ q_{zlow} = แรงเฉลี่ยของลมที่มาปะทะสายส่งไฟฟ้า [N/m^2] ซึ่งหาได้จาก

$$q_{zlow} = \frac{\mu'}{2}\left(V_{zlow,50yr\text{-}5min}\right)^2 \quad [N/m^2]$$

μ' = ความหนาหนาแน่นของอากาศ [kg/m^3] ที่อุณหภูมิ T_{amb} [C] และที่ระดับความสูง $H_{location}$ [m] เหนือระดับน้ำทะเล โดยหาได้จาก [EN5034-1, 2001]

$$\mu' = \mu\frac{288}{273+T_{amb}}e^{-1.2\cdot10^{-4}H_{location}} \quad [kg/m^3]$$

μ = ความหนาหนาแน่นของอากาศที่อุณหภูมิ 15 C ที่ระดับน้ำทะเล = 1.225 kg/m^3

ตัวอย่างที่ 2.28 จงหาค่า μ' จากข้อมูลต่อไปนี้

1. ความสูงของสายส่งไฟฟ้าเหนือระดับน้ำทะเล $H_{location}$: 1000 m
2. อุณหภูมิบริเวณสายส่งไฟฟ้า T_{amb}: 32 C

$$\mu' = \mu\frac{288}{273+T_{amb}}e^{-1.2\cdot10^{-4}H_{location}} = 1.225\frac{288}{273+32}e^{-1.2\cdot10^{-4}\cdot1000}$$
$$= 1.026 \quad [kg/m^3]$$

$V_{zlow,50yr\text{-}5min}$ = ความเร็วลมที่เกิดขึ้นทุก 50 yr ที่มาปะทะพวงลูกถ้วยและสายส่งไฟฟ้าเส้นล่างสุด [m/s] ที่อยู่เหนือระดับพื้นดินเท่ากับ z_{low} [m]

ตัวอย่างที่ 2.29 จงหาค่า $v_{zlow,50yr\text{-}5min}$ จากข้อมูลต่อไปนี้

1. S_{safety} + S_{buffer} : 15 m
2. D_{ther} : 16.32 m จากตัวอย่างที่ 2.23
3. ลักษณะของพื้นที่: B
4. $v_{RB,50yr\text{-}10min}$: 30 m/s

ดังนั้น

$$z_{low} = \left(S_{safety}+S_{buffer}+D_{ther}\right)-\frac{2}{3}D_{ther} = 31-\frac{2}{3}16.32 = 20.118 \quad [m]$$

และเนื่องจากลักษณะของพื้นที่เป็นแบบ B ค่า K_R และ α จากตารางที่ 2.33 จึงมีค่า 1.00 และ 0.16 ตาม ลำดับ ดังนั้น

$$V_{zlow,50yr\text{-}10min} = K_R V_{RB,50yr\text{-}10min}\left(\frac{z_{low}}{10}\right)^{\alpha}$$
$$= 1.00\cdot30\left(\frac{20.118}{10}\right)^{0.16} = 33.55 \quad [m/s]$$
$$V_{zlow,50yr\text{-}5min} = 1.05V_{zlow,50yr\text{-}5min} = 1.05\cdot33.55 = 35.23 \quad [m/s]$$

ตัวอย่างที่ 2.30 จงหาค่า q_{zlow} โดยใช้ผลที่คำนวณได้จากตัวอย่างที่ 2.28 และ 2.29

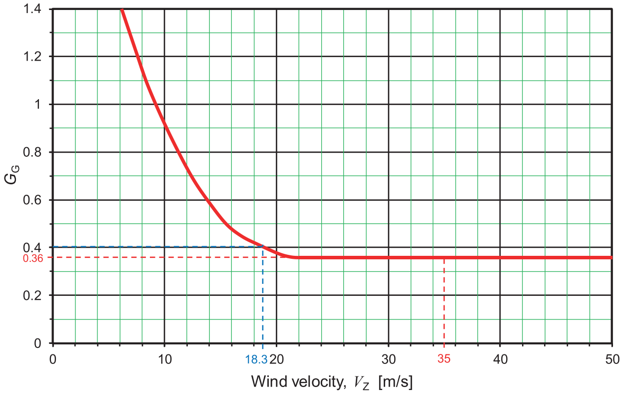
$$q_{zlow} = \frac{\mu'}{2}\left(V_{zlow,50yr\text{-}10min}\right)^2 = \frac{1.026}{2}(35.23)^2 = 636.6 \quad [N/m^2]$$

$C_{x\text{-}cond}$ = *สัมประสิทธิ์แรงฉุด* (drag coefficient) ของสายส่งไฟฟ้า = 1.0 [TB348, 2008]

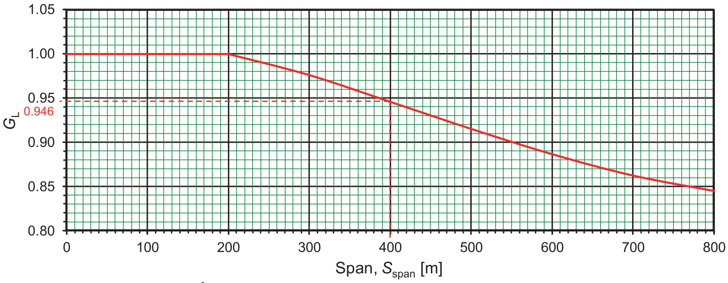
$C_{x\text{-}ins}$ = สัมประสิทธิ์แรงฉุดของพวงลูกถ้วย = 1.2 [TB348, 2008]

G_G = แฟกเตอร์ลมกระโชก (gust factor) ของสายส่งไฟฟ้า ซึ่งหาได้จากกราฟในรูปที่ 2.58 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.36 เมื่อความเร็วลม $V_z \geq 20$ m/s

G_L = *แฟกเตอร์ระยะห่างระหว่างเสาส่งไฟฟ้า* (span factor) ซึ่งหาได้จากกราฟในรูปที่ 2.59



รูปที่ 2.58 แฟกเตอร์ลมกระโชก G_G



รูปที่ 2.59 แฟกเตอร์ระยะห่างระหว่างเสาส่งไฟฟ้า G_L

$\varnothing_{total}$ = เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ [m]

n = จำนวนตัวนำย่อยของสายส่งไฟฟ้า

L_{wind} = *ความยาวของสายส่งไฟฟ้าที่ลมมาปะทะ* (wind span of conductor) [m] โดยปกติจะกำหนดให้มีค่าเท่ากับระยะห่างระหว่างเสาส่งไฟฟ้า S_{span} เนื่องจากสแลกมีค่าน้อย [m]

L_{weight} = *ความยาวของสายส่งไฟฟ้าระหว่างเสาส่งไฟฟ้า* (weight span of conductor) [m]

A_{ins} = พื้นที่ผิวของลูกถ้วยที่ลมปะทะ [m^2]

w = น้ำหนักของตัวนำย่อยของสายส่งไฟฟ้า [kg/m]

w_{ins} = น้ำหนักของพวงลูกถ้วย [kg]

g = ความเร่งแรงโน้มถ่วงของโลก [m/s^2]

ตัวอย่างที่ 2.31 จงหามุมที่พวงลูกถ้วยชุดล่างสุดแกว่งจากแนวดิ่ง $\phi_{ins,low}$ จากตัวอย่างที่ 2.28-2.30 และข้อมูลต่อไปนี้

1. เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ $\varnothing_{total}$: 0.03285 m
2. จำนวนตัวนำย่อยของสายส่งไฟฟ้า n : 2
3. ความยาวของสายส่งไฟฟ้าที่ลมมาปะทะ L_{wind} : 400 m
4. พื้นที่ผิวของลูกถ้วยที่ลมปะทะ A_{ins} : 0.519 m^2
5. น้ำหนักของตัวนำย่อยของสายส่งไฟฟ้า w : 2.043 kg/m
6. น้ำหนักของพวงลูกถ้วย w_{ins} : 56 kg
7. ความเร่งแรงโน้มถ่วงของโลก g : 9.807 m/s^2

จากรูปที่ 2.58 และ 2.59 G_G และ G_L มีค่า 0.36 และ 0.946 ตามลำดับ ดังนั้น

$$\begin{aligned}\phi_{ins\text{-}low} &= \tan^{-1}\left(\frac{q_{zlow}C_{x\text{-}cond}G_G G_L \varnothing_{total} n L_{wind} + q_{zlow}C_{x\text{-}ins}A_{ins}/2}{wgnL_{weight} + w_{ins}\cdot g/2}\right)\\ &= \tan^{-1}\left(\frac{636.58\cdot 1.0\cdot 0.36\cdot 0.946\cdot 0.03391\cdot 2\cdot 400 + 636.58\cdot 1.2\cdot 0.519/2}{2.0434\cdot 9.807\cdot 2\cdot 400 + 56\cdot 9.807/2}\right)\\ &= \tan^{-1}\left(\frac{6079}{16307}\right) = 20.45\ [^\circ]\end{aligned}$$

เนื่องจากความเร็วลม $V_{zlow,50yr\text{-}5min}$ มีความไม่แน่นอนอยู่ มุม $\phi_{ins\text{-}low}$ จึงมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ

$$\sigma_{\phi,ins} = 2.25\left(1 - e^{\left(\frac{-V_{Zlow,50yr\text{-}5min}^2}{230}\right)}\right) = 2.25\left(1 - e^{\left(\frac{-35.23^2}{230}\right)}\right) = 2.24\ [^\circ]$$

ดังนั้น 95% ของ $\phi_{ins,low}$ จะมีค่าไม่เกิน

$$\phi_{ins\text{-}low,max} = \phi_{ins\text{-}low} + 2\sigma_{\phi,zlow} = 20.45 + 2\cdot 2.24 = 24.92\ [^\circ]$$

ส่วนมุมที่พวงลูกถ้วยชุดกลางและชุดบนแกว่งจากแนวดิ่ง $\phi_{ins\text{-}mid}$ และ $\phi_{ins\text{-}top}$ ก็หาได้ในทำนองเดียวกัน ซึ่งเราจะพบว่า $\phi_{ins\text{-}mid,max}$ และ $\phi_{ins\text{-}top,max}$ มีค่าเท่ากับ 26.32° และ 27.52° ตามลำดับ

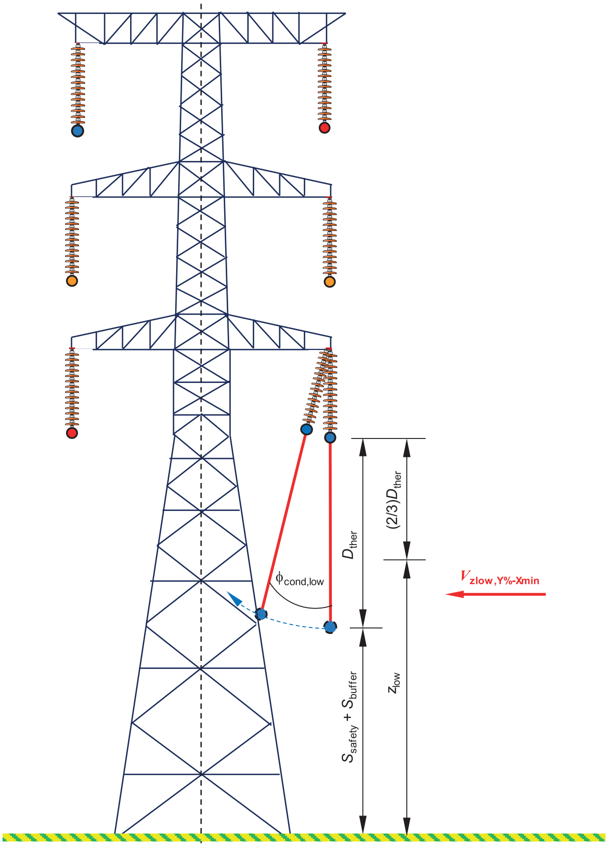
ข) มุมแกว่งของพวงลูกถ้วยเมื่อมีลม 1% มาปะทะ

มุมที่สายส่งไฟฟ้าเส้นล่างสุดแกว่งจากแนวดิ่ง $\phi_{cond\text{-}low}$ เมื่อมีลมมาปะทะสายทางด้านข้างที่แสดงในรูปที่ 2.60 ขึ้นกับแรงที่เกิดจากลมที่มาปะทะสายส่งไฟฟ้า F_{cond} [N] และน้ำหนักของสายส่งไฟฟ้า M_{cond} [N] ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 2.70

$$\phi_{cond\text{-}low} = \tan^{-1}\left(\frac{F_{cond}}{M_{cond}}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{q_{zlow}C_{x\text{-}cond}G_G G_L \varnothing_{total} n L_{wind}}{wgnL_{weight}}\right)\ [^\circ] \qquad (2.70)$$

เมื่อ q_{zlow} = แรงเฉลี่ยของลมที่มาปะทะสายส่งไฟฟ้า [N/m^2] ซึ่งหาได้จาก

$$q_{zlow} = \frac{\mu'}{2}\left(V_{zlow,1\%\text{-}5min}\right)^2\ [\text{N/m}^2]$$



รูปที่ 2.60 มุมแกว่ง $\phi_{cond\text{-}low}$ ของสายส่งไฟฟ้าจากแนวดิ่งเมื่อมีลม 1% ปะทะสายทางด้านข้าง

ความเร็วลม $V_{zlow,1\%\text{-}5min}$ เป็นความเร็วที่มีโอกาสเกิดขึ้น 99% หรือกล่าวได้อีกอย่างหนึ่งว่า ลมที่มีความเร็วสูงกว่า $V_{zlow,1\%\text{-}5min}$ มีโอกาสเกิดขึ้นเพียง 1% เท่านั้น มักคำนวณจากความเร็วลม $V_{zlow,2yr\text{-}5min}$ ดังนี้

1. คำนวณความเร็วลม $V_{RB,1yr\text{-}10min}$ จาก $V_{RB,50yr\text{-}10min}$ โดยใช้สมการ

$$V_{RB,1yr\text{-}10min} = V_{RB,50yr\text{-}10min} - 7.2585 \ \text{[m/s]}$$

2. คำนวณความเร็วลม $V_{RB,2yr\text{-}10min}$ จาก $V_{RB,1yr\text{-}10min}$ โดยใช้สมการ

$$V_{RB,2yr\text{-}10min} = V_{RB,1yr\text{-}10min} - 0.4598 \ \text{[m/s]}$$

3. คำนวณความเร็วลม V_{η} จากสมการที่ 2.66

4. คำนวณความเร็วลม $V_{RB,1\%\text{-}10min}$ โดยใช้สมการ

$$V_{RB,1\%\text{-}10min} = V_{\eta}\sqrt{-\ln(2\cdot 0.01)} \ \text{[m/s]}$$

5. คำนวณความเร็วลม $V_{\text{zlow,1\%-5min}}$ จาก $V_{\text{RB,1\%-10min}}$ โดยใช้สมการ

$$V_{\text{zlow,1\%-5min}} = 1.05 K_R V_{\text{RB,1\%-10min}} \left(\frac{z_{\text{low}}}{10}\right)^{\alpha} \quad \text{[m/s]}$$

ตัวอย่างที่ 2.32 จงหาค่า $V_{\text{zlow,1\%-5min}}$ จากข้อมูลต่อไปนี้

1. $S_{\text{safety}} + S_{\text{buffer}} + D_{\text{ther}}$: 31 m
2. ลักษณะของพื้นที่: B
4. $V_{\text{RB,50yr-10min}}$: 30 m/s

ดังนั้น

$$z_{\text{low}} = \left(S_{\text{safety}} + S_{\text{buffer}} + D_{\text{ther}}\right) - \frac{2}{3} D_{\text{ther}} = 31 - \frac{2}{3} 16.32 = 20.12 \quad \text{[m]}$$

และเนื่องจากลักษณะของพื้นที่เป็นแบบ B ค่า K_R และ α จากตารางที่ 2.33 จึงมีค่า 1.00 และ 0.16 ตาม ลำดับ ดังนั้น

$$V_{\text{RB,1yr-10min}} = V_{\text{RB,50yr-10min}} - 7.2585 = 30 - 7.2585 = 22.7415 \quad \text{[m/s]}$$

$$V_{\text{RB,2yr-10min}} = V_{\text{RB,1yr-10min}} - 0.4598 = V_{\text{RB,1yr-10min}} - 0.4598 = 22.7415 - 0.4598 = 22.2817 \quad \text{[m/s]}$$

$$V_{\eta} = \frac{V_{\text{RB,2yr-10min}}}{\sqrt{-\ln\left(3.425 \cdot 10^{-4}\right)}} = \frac{22.2817}{2.8248} = 7.8879 \quad \text{[m/s]}$$

$$V_{\text{RB,1\%-10min}} = V_{\eta} \sqrt{-\ln\left(2 \cdot 0.01\right)} = 7.8879 \sqrt{-\ln\left(2 \cdot 0.01\right)} = 15.60 \quad \text{[m/s]}$$

$$V_{\text{zlow,1\%-5min}} = 1.05 K_R V_{\text{RB,1\%-10min}} \left(\frac{z_{\text{low}}}{10}\right)^{\alpha} = 1.05 \cdot 1.0 \cdot 15.60 \left(\frac{20.12}{10}\right)^{0.16} = 18.32 \quad \text{[m/s]}$$

ตัวอย่างที่ 2.33 จงหามุมที่สายส่งไฟฟ้าเส้นล่างสุดแกว่งจากแนวดิ่ง $\phi_{\text{cond,low}}$ จากข้อมูลในตัวอย่างที่ 2.28 และ 2.32

ดังนั้น

$$q_{\text{zlow}} = \frac{\mu'}{2}\left(V_{\text{zlow,1\%-5min}}\right)^2 = \frac{1.026}{2}(18.32)^2 = 172.16 \ \text{[N/m}^2\text{]}$$

จากรูปที่ 2.58 และ 2.59 G_G และ G_L มีค่า 0.4 และ 0.946 ตามลำดับ ดังนั้น

$$\phi_{\text{cond-low}} = \tan^{-1}\left(\frac{q_{\text{zlow}} C_{\text{x-cond}} G_G G_L \varnothing_{\text{total}} n L_{\text{wind}}}{w g n L_{\text{weight}}}\right)$$

$$= \tan^{-1}\left(\frac{172.16 \cdot 1.0 \cdot 0.4 \cdot 0.946 \cdot 0.03391 \cdot 2 \cdot 400}{2.0434 \cdot 9.807 \cdot 2 \cdot 400}\right)$$

$$= \tan^{-1}\left(\frac{1767}{16032}\right) = 6.29 \quad [\,^{\circ}\,]$$

เนื่องจากความเร็วลม $V_{\text{zlow,1\%-5min}}$ มีความไม่แน่นอนอยู่ มุม $\phi_{\text{con-low}}$ จึงมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ

$$\sigma_{\phi,\text{cond}} = 2.25\left(1 - e^{\left(\frac{-V_{\text{zlow,1\%-5min}}^{2}}{230}\right)}\right) = 2.25\left(1 - e^{\left(\frac{-18.32^2}{230}\right)}\right) = 1.73 \quad [\,^{\circ}\,]$$

ดังนั้น 95% ของ $\phi_{\text{cond,low}}$ จะมีค่าไม่เกิน

$$\phi_{\text{cond-low,max}} = \phi_{\text{cond-low}} + 2\sigma_{\phi,\text{zlow}} = 6.29 + 2 \cdot 1.73 = 9.74 \quad [\,^{\circ}\,]$$

ส่วนมุมที่พวงลูกถ้วยชุดกลางและชุดบนสุดแกว่งจากแนวดิ่ง $\phi_{cond\text{-}mid}$ และ $\phi_{cond\text{-}top}$ ก็หาได้ในทำนองเดียวกัน ซึ่งเราจะพบว่า $\phi_{cond\text{-}mid,max}$ และ $\phi_{cond\text{-}top,max}$ มีค่าเท่ากับ 10.32 ° และ 10.81 ° ตามลำดับ นอกจากนั้น 95% ของ $\phi_{cond,low}$ จะมีค่าสูงกว่า

$$\phi_{cond\text{-}low,min} = \phi_{cond\text{-}low} - 2\sigma_{\phi,zlow} = 6.29 - 2 \cdot 1.73 = 2.84 \ [^\circ]$$

ส่วนมุมที่พวงลูกถ้วยชุดกลางและชุดบนสุดแกว่งจากแนวดิ่ง $\phi_{cond\text{-}mid}$ และ $\phi_{cond\text{-}top}$ ก็หาได้ในทำนองเดียวกันซึ่งเราจะพบว่า $\phi_{cond\text{-}mid,min}$ และ $\phi_{cond\text{-}top,min}$ มีค่าเท่ากับ 3.19 ° และ 3.52 ° ตามลำดับ

2.4.4.3 ระยะห่างในอากาศที่ต้องการเมื่อพิจารณามุมแกว่ง

การออกแบบโครงสร้างของเสาส่งไฟฟ้าจะพิจารณาถึงโอกาสที่จะเกิดเบรกดาวน์ในอากาศมีค่าต่ำ โดยพิจารณาถึง

1. ตำแหน่งของสายไฟฟ้าที่มีโอกาสเกิดขึ้นน้อย เช่นเมื่อมีลม $V_{z,50yr\text{-}5min}$ มาปะทะพวงลูกถ้วย ซึ่งต้องทนแรงดันกระแสสลับของระบบส่งไฟฟ้าได้ และ
2. ตำแหน่งโดยปกติของสายไฟฟ้าเมื่อลมสงบหรือลมที่มีความเร็วต่ำเช่น $V_{z,1\%\text{-}5min}$ ที่กล่าวถึงในหัวข้อที่ผ่านมา ซึ่งต้องทนแรงดันเกินฟ้าผ่าและสวิตชิงที่อาจเกิดขึ้น

ก) ระยะห่างในอากาศที่ต้องการเมื่อมีลม 50yr มาปะทะพวงลูกถ้วย

ระยะห่างในอากาศระหว่างสายเฟสและเสาไฟฟ้า $\ell_{AC,p\text{-}e}$ และระหว่างสายเฟส $\ell_{AC,p\text{-}p}$ ต้องมากพอที่จะทน SDWV ได้ตามสมการ

$$\begin{aligned} \ell_{AC,p\text{-}e} &= \left(\frac{U_m}{350 k_\alpha k_a K_g}\right)^N = \left(\frac{U_m}{350 \cdot 0.88 \cdot k_a \cdot 1.25}\right)^N \quad [m] \\ \ell_{AC,p\text{-}p} &= \left(\frac{\sqrt{3} U_m}{350 k_\alpha k_a K_g}\right)^N \left(\frac{\sqrt{3} U_m}{350 \cdot 0.88 \cdot k_a \cdot 1.65}\right)^N \quad [m] \end{aligned} \tag{2.71}$$

เมื่อ k_α = ตัวประกอบมีค่าเท่ากับ 0.88

k_a = ตัวประกอบแก้ค่าสภาวะบรรยากาศ หาได้จากสมการ

$$k_{a,TB348} = \frac{1}{e^{\left(\frac{H_{location}}{8150}\right)^m}} \tag{2.72}$$

เมื่อ H คือ ความสูงเหนือระดับน้ำทะเล [m] และ m มีค่า 0.7-1.0

อนึ่ง ค่า k_a ที่แนะนำใน [IEC60071-2, 2018] จะหาจากสมการ

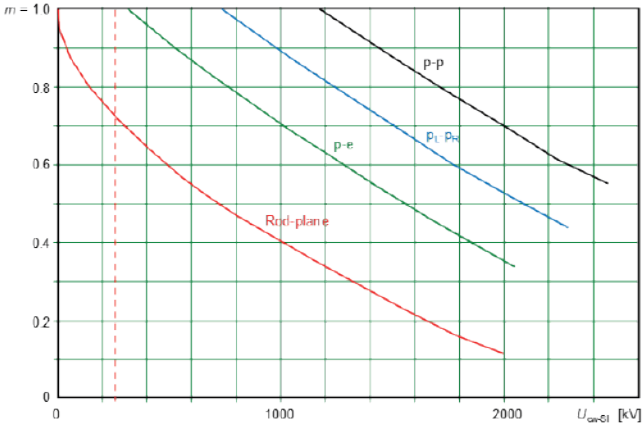
$$k_{a,IEC60071\text{-}2} = e^{m\left(\frac{H_{location}}{8150}\right)} \tag{2.73}$$

โดยที่ m มีค่าแตกต่างกันไปสำหรับแรงดันแต่ละประเภท

SDWV: m = 1 สำหรับลูกถ้วยที่สะอาด, m = 0.5 สำหรับลูกถ้วยในบริเวณภาวะเปรอะเปื้อน

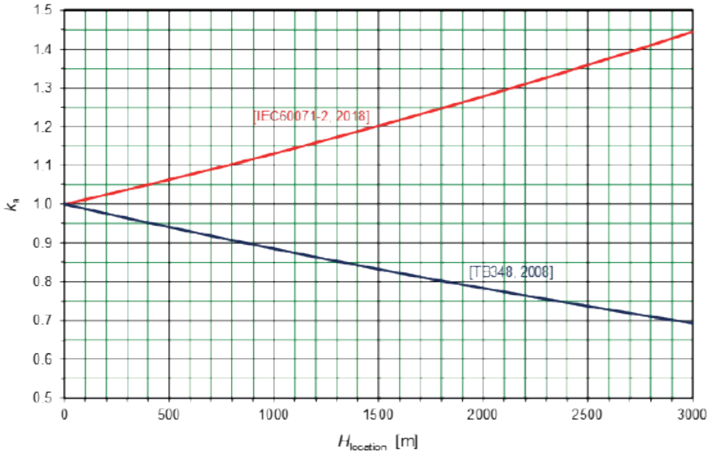
LIWV: m = 1

SIWV: m มีค่าดังแสดงในรูปที่ 2.61 [IEC60071-2, 2018]



รูปที่ 2.61 เลขชี้กำลัง m สำหรับแรงดันอิมพัลส์สวิตชิง

ผลการเปรียบเทียบค่า k_a จากสมการที่ 2.72 และ 2.73 ได้แสดงในรูปที่ 2.62



รูปที่ 2.62 แฟกเตอร์ k_a จากการคำนวณตาม [TB348, 2008] และ [IEC60071-2, 2018]

เราจะเห็นว่าค่า k_a ในรูปที่ 2.54 มีแนวโน้มสวนทางกัน ซึ่งไม่น่าแปลกใจเพราะ k_a ตาม [IEC60071-2, 2018] ใช้เป็นตัวคูณในการคำนวณค่าความทนแรงดัน ส่วน k_a ตาม [TB348, 2008] ใช้เป็นตัวหารในการคำนวณระยะห่างในอากาศที่ต้องการ และเป็นที่ทราบกันดีว่าความทนแรงดันจะแปรตามระยะห่างในอากาศที่ต้องการ

เนื่องจาก [TB348, 2008] ระบุไว้เพียงว่า m มีค่า 0.7-1.0 ทำให้ไม่ทราบค่าที่แน่นอนในการคำนวณ ดังนั้นต่อไปนี้เราจึงใช้ m ตามที่ [IEC60071-2, 2018] แนะนำ

K_g = แกปแฟกเตอร์

= 1.25 สำหรับระยะห่างระหว่างสายเฟส กับ เสาส่งไฟฟ้าหรือระนาบ

= 1.40 สำหรับระยะห่างระหว่างสายเฟสกับหลังคา, วัตถุเล็กๆ

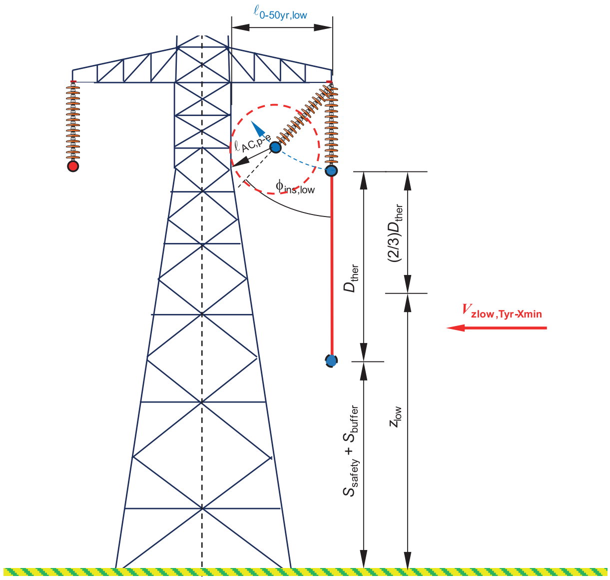
= 1.65 สำหรับระยะห่างระหว่างเฟส

N = 1.0 สำหรับ $U_m \leq 400$ kV หรือ 1.67 สำหรับ $U_m > 400$ kV

ความยาวของแขนเสาไฟฟ้า $\ell_{0\text{-}50yr}$ ในรูปที่ 2.63 จึงหาได้จากสมการ

$$\ell_{0\text{-}50yr} = \ell_{AC,p\text{-}e} + \ell_{ins}\sin(\phi_{ins} + 2\sigma_V) + b/2 \quad [m] \tag{2.74}$$

เมื่อ b = ระยะห่างระหว่างตัวนำย่อยของสายส่งไฟฟ้า [m]



รูปที่ 2.63 ความยาวของแขนเสาไฟฟ้าแบบเหล็กถัก $\ell_{0\text{-}50yr,low}$

ตัวอย่างที่ 2.34 จงหาความยาวของแขนเสาไฟฟ้า $\ell_{0\text{-}50yr}$ จากข้อมูลในตัวอย่างที่ 2.31 และข้อมูลเพิ่มเติมต่อไปนี้

1. แรงดันของระบบส่งไฟฟ้า U_m : 245 kV
2. ความสูงของสายเฟสเหนือระดับน้ำทะเล $H_{location}$: 1000 m
3. ความยาวของพวงลูกถ้วย $H_{location}$: 3.098 m
4. ระยะห่างระหว่างตัวนำย่อยของสายส่งไฟฟ้า b: 0.4 m

แฟกเตอร์ k_a มีค่าเท่ากับ

$$k_a = \frac{1}{e^{\left(\frac{H_{location}}{8150}\right)^m}} = \frac{1}{e^{\left(\frac{1000}{8150}\right)^{0.5}}} = 0.9405$$

ดังนั้น

$$\ell_{AC,p\text{-}e} = \left(\frac{U_m}{350 k_\alpha k_a K_g}\right)^N = \left(\frac{245}{350\cdot 0.88\cdot 0.9405\cdot 1.25}\right)^1 = 0.677 \quad [m]$$

ทำให้

$$\ell_{\text{0-50yr,low}} = \ell_{\text{AC,p-e}} + \ell_{\text{ins}} \sin\left(\phi_{\text{ins,low}} + 2\sigma_{\text{V}}\right) + b/2 = 0.677 + 3.098 \cdot \sin(24.92) + 0.4/2$$
$$= 2.18 \ \text{[m]}$$
$$\ell_{\text{0-50yr,mid}} = \ell_{\text{AC,p-e}} + \ell_{\text{ins}} \sin\left(\phi_{\text{ins,mid}} + 2\sigma_{\text{V}}\right) + b/2 = 0.677 + 3.098 \cdot \sin(26.32) + 0.4/2$$
$$= 2.25 \ \text{[m]}$$
$$\ell_{\text{0-50yr,top}} = \ell_{\text{AC,p-e}} + \ell_{\text{ins}} \sin\left(\phi_{\text{ins,top}} + 2\sigma_{\text{V}}\right) + b/2 = 0.677 + 3.098 \cdot \sin(27.52) + 0.4/2$$
$$= 2.31 \ \text{[m]}$$

ข) ระยะห่างในอากาศที่ต้องการเมื่อมีลม 1% มาปะทะสายส่งไฟฟ้า

ระยะห่างในอากาศระหว่างสายส่งไฟฟ้ากับเสาส่งที่ต้องการ หาได้จากสมการ

$$\ell_{\text{LI,p-e}} = \frac{U_{\text{50,p-e}}}{490\left(0.74 + 0.26K_{\text{g}}\right)} = \frac{\text{LIWV}/0.96}{490\left(0.74 + 0.26K_{\text{g}}\right)} \ \text{[m]}$$
$$\ell_{\text{SI,p-e}} = 2.17\left(e^{\left(\frac{\text{SIWV}}{981k_{\text{a}}K_{\text{g}}}\right)} - 1\right) \ \text{[m]} \qquad (2.75)$$

โดยใช้แกปแฟกเตอร์ K_g = 1.25 แต่ในกรณีของระยะห่างในอากาศระหว่างสายส่งไฟฟ้ากับสายดินขึงอากาศ จะใช้ K_g = 1.65

ตัวอย่างที่ 2.35 จงหาระยะห่างระหว่างสายส่งไฟฟ้ากับเสาส่งไฟฟ้าและสายส่งไฟฟ้ากับสายดินขึงอากาศ จากข้อมูลต่อไปนี้

1. LIWV: 1050 kV
2. SIWV: 519 kV (ดูตัวอย่างที่ 2.7)

<u>ระยะห่างระหว่างสายส่งไฟฟ้ากับเสาส่งไฟฟ้า</u>

สำหรับ LIWV แฟกเตอร์ m = 1 ส่วนในกรณีของ SIWV แฟกเตอร์ m จากรูปที่ 2.61 มีค่าเท่ากับ 1 เช่นกัน ดังนั้น

$$k_{\text{a}} = \frac{1}{e^{\left(\frac{H_{\text{location}}}{8150}\right)^{m}}} = \frac{1}{e^{\left(\frac{1000}{8150}\right)^{1}}} = 0.8845$$

ระยะห่างที่ต้องการจึงมีค่าเท่ากับ

$$\ell_{\text{LI,p-e}} = \frac{U_{\text{50,p-e}}}{490\left(0.74 + 0.26K_{\text{g}}\right)} = \frac{1050/0.96}{490\left(0.74 + 0.26 \cdot 1.25\right)} = 2.10 \ \text{[m]}$$
$$\ell_{\text{SI,p-e}} = 2.17\left(e^{\left(\frac{\text{SIWV}}{981k_{\text{a}}K_{\text{g}}}\right)} - 1\right) = 2.17\left(e^{\left(\frac{519}{981 \cdot 0.8845 \cdot 1.25}\right)} - 1\right) = 1.33 \ \text{[m]}$$

เราจึงต้องเลือกค่าที่มากกว่าคือ $\ell_{\text{LI,p-e}}$ = 2.10 m

<u>ระยะห่างระหว่างสายส่งไฟฟ้ากับสายดินขึงอากาศ</u>

$$\ell_{\text{LI,p-e}} = \frac{U_{\text{50,p-e}}}{490\left(0.74 + 0.26K_{\text{g}}\right)} = \frac{1050/0.96}{490\left(0.74 + 0.26 \cdot 1.65\right)} = 1.91 \ \text{[m]}$$
$$\ell_{\text{SI,p-e}} = 2.17\left(e^{\left(\frac{\text{SIWV}}{981k_{\text{a}}K_{\text{g}}}\right)} - 1\right) = 2.17\left(e^{\left(\frac{519}{981 \cdot 0.8845 \cdot 1.65}\right)} - 1\right) = 0.95 \ \text{[m]}$$

เราจึงต้องเลือกค่าที่มากกว่าคือ $\ell_{\text{LI,p-e}}$ = 1.91 m

ส่วนระยะห่างในอากาศระหว่างสายเฟส หาได้จากสมการ

$$\ell_{\text{LI,p-p}} = 1.2\ell_{\text{LI,p-e}} \text{ [m]}$$

$$\ell_{\text{SI,p-p}} = 2.17\left(e^{\left(\frac{1.4\cdot \text{SIWV}}{981k_a k_g}\right)} - 1\right) \text{ [m]}$$

โดยใช้แกปแฟกเตอร์ K_g = 1.6

ตัวอย่างที่ 2.36 จงหาระยะห่างระหว่างสายเฟส จากตัวอย่างที่ จากข้อมูลต่อไปนี้

1. SIWV: 793 kV

แฟกเตอร์ m จากรูปที่ 2.61 มีค่าเท่ากับ 1

$$k_a = \frac{1}{e^{\left(\frac{H_{\text{location}}}{8150}\right)^m}} = \frac{1}{e^{\left(\frac{1000}{8150}\right)^1}} = 0.8845$$

ระยะห่างที่ต้องการจึงมีค่าเท่ากับ

$$\ell_{\text{LI,p-p}} = 1.2\ell_{\text{LI,p-e}} = 1.2\cdot 1.91 = 2.29 \text{ [m]}$$

$$\ell_{\text{SI,p-p}} = 2.17\left(e^{\left(\frac{1.4\cdot \text{SIWV}}{981k_a k_g}\right)} - 1\right) = 2.17\left(e^{\left(\frac{1.4\cdot 793}{981\cdot 0.8845\cdot 1.6}\right)} - 1\right) = 2.66 \text{ [m]}$$

เราจึงต้องเลือกค่าที่มากกว่าคือ $\ell_{\text{SI,p-p}}$ = 2.66 m

ระยะห่างระหว่างสายเฟสกับเสาส่งไฟฟ้า $\ell_{0\text{-}1\%}$ และระยะห่างระหว่างสายเฟส $\ell_{1\text{-}1\%}$ ในรูปที่ 2.64 จึงหาได้จาก

$$\begin{aligned}
\ell_{0\text{-}1\%} &= \ell_{\text{LI,p-e}} + \ell_{\text{ins}} \sin(\phi_{\text{cond}} + 2\sigma_V) + b/2 \text{ [m]} \\
\ell_{1\text{-}1\%} &= \ell_h + \sqrt{\ell_{\text{SI,p-p}}^{\,2} - \ell_v^{\,2}} + b \text{ [m]} \\
\ell_h &= (D_{\text{ther}} + \ell_{\text{ins}})(\sin(\phi_{\text{cond}} + 2\sigma_V) - \sin(\phi_{\text{cond}} - 2\sigma_V)) \text{ [m]} \\
\ell_v &= (D_{\text{ther}} + \ell_{\text{ins}})(\cos(\phi_{\text{cond}} - 2\sigma_V) - \cos(\phi_{\text{cond}} + 2\sigma_V)) \text{ [m]}
\end{aligned} \tag{2.76}$$

เมื่อ b = ระยะห่างระหว่างตัวนำย่อยของสายส่งไฟฟ้า [m]

ตัวอย่างที่ 2.37 จงหาระยะห่างระหว่างสายส่งไฟฟ้ากับเสาส่งไฟฟ้า $\ell_{0\text{-}1\%}$ จากข้อมูลในตัวอย่างที่ 2.20 และ 2.21 และข้อมูลต่อไปนี้

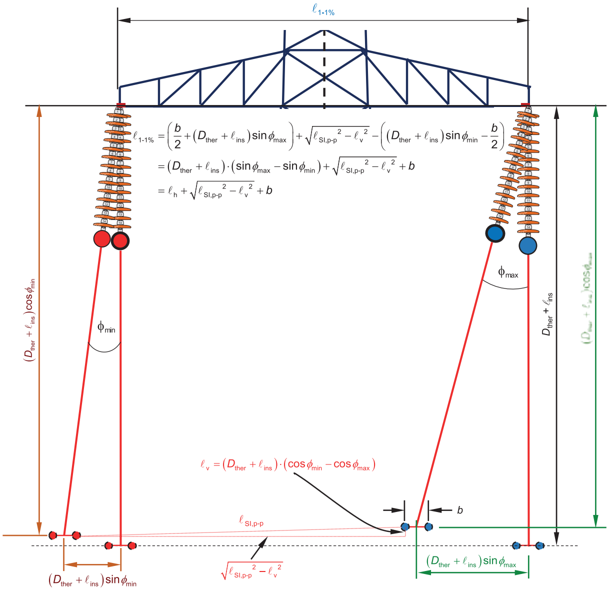
1. ความยาวของพวงลูกถ้วย ℓ_{ins}: 3.098 m

ดังนั้น

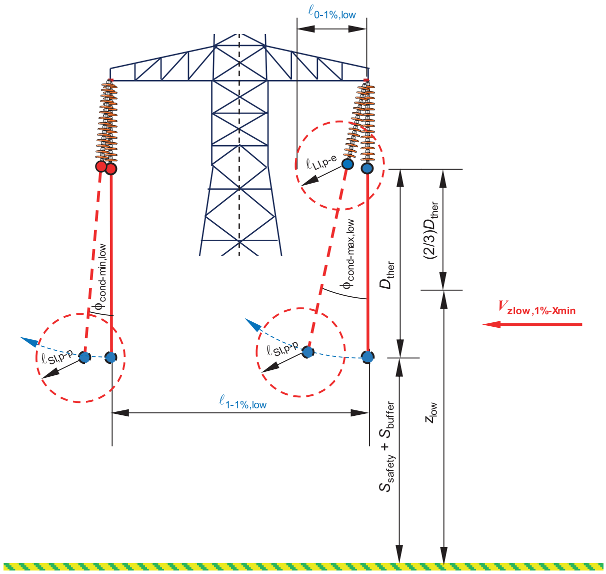
$$\ell_{0\text{-}1\%,\text{low}} = \ell_{\text{LI,p-e}} + \ell_{\text{ins}} \sin(\phi_{\text{cond,low}} + 2\sigma_V) + b/2 = 2.10 + 3.098\sin(9.74) + 0.4/2 = 2.84 \text{ [m]}$$

$$\ell_{0\text{-}1\%,\text{mid}} = \ell_{\text{LI,p-e}} + \ell_{\text{ins}} \sin(\phi_{\text{cond,mid}} + 2\sigma_V) + b/2 = 2.10 + 3.098\sin(10.32) + 0.4/2 = 2.85 \text{ [m]}$$

$$\ell_{0\text{-}1\%,\text{top}} = \ell_{\text{LI,p-e}} + \ell_{\text{ins}} \sin(\phi_{\text{cond,top}} + 2\sigma_V) + b/2 = 2.10 + 3.098\sin(10.81) + 0.4/2 = 2.88 \text{ [m]}$$



ก) รายละเอียดระยะห่างระหว่างสายเฟส $\ell_{1\text{-}1\%}$



ข) $\ell_{0\text{-}1\%,low}$ และ $\ell_{1\text{-}1\%,low}$ ของสายไฟฟ้าเส้นล่างสุด

รูปที่ 2.64 ระยะห่างระหว่างสายเฟสกับเสาส่งไฟฟ้าของแขนเสาไฟฟ้าแบบเหล็กถัก $\ell_{0\text{-}1\%,low}$ และระยะห่างระหว่างสายเฟส $\ell_{1\text{-}1\%,low}$

ตัวอย่างที่ 2.38 จงหาระยะห่างระหว่างเฟส $\ell_{1\text{-}1\%}$ จากข้อมูลในตัวอย่างที่ 2.33 และ 2.35 และข้อมูลต่อไปนี้

1. ระยะตกท้องช้างเมื่อโหลดสูงสุด D_{ther}: 16.3 m
2. ความยาวของพวงลูกถ้วย ℓ_{ins} : 3.098 m

ดังนั้น

ระยะห่างระหว่างเฟสล่าง

$$\ell_{h,low} = (D_{ther} + \ell_{ins})(\sin(\phi_{cond,low} + 2\sigma_V) - \sin(\phi_{cond,low} - 2\sigma_V)) = (16.3 + 3.089)(\sin(9.74) - \sin(2.84)) = 2.33 \ \text{[m]}$$

$$\ell_{v,low} = (D_{ther} + \ell_{ins})(\cos(\phi_{cond,low} - 2\sigma_V) - \cos(\phi_{cond,low} + 2\sigma_V)) = (16.3 + 3.089)(\cos(2.84) - \cos(9.74)) = 0.26 \ \text{[m]}$$

$$\ell_{1\text{-}1\%,low} = \ell_{h,low} + \sqrt{\ell_{SI,p\text{-}p}{}^2 - \ell_{v,low}{}^2} + b = 2.33 + \sqrt{2.66^2 - 0.26^2} + 0.4 = 5.37 \ \text{[m]}$$

ระยะห่างระหว่างเฟสกลาง

$$\ell_{h,mid} = (D_{ther} + \ell_{ins})(\sin(\phi_{cond,mid} + 2\sigma_V) - \sin(\phi_{cond,mid} - 2\sigma_V)) = (16.3 + 3.089)(\sin(10.32) - \sin(3.91)) = 2.40 \ \text{[m]}$$

$$\ell_{v,mid} = (D_{ther} + \ell_{ins})(\cos(\phi_{cond,mid} - 2\sigma_V) - \cos(\phi_{cond,mid} + 2\sigma_V)) = (16.3 + 3.089)(\cos(3.91) - \cos(10.32)) = 0.28 \ \text{[m]}$$

$$\ell_{1\text{-}1\%,mid} = \ell_{h,mid} + \sqrt{\ell_{SI,p\text{-}p}{}^2 - \ell_{v,mid}{}^2} + b = 2.40 + \sqrt{2.66^2 - 0.28^2} + 0.4 = 5.44 \ \text{[m]}$$

ระยะห่างระหว่างเฟสบน

$$\ell_{h,top} = (D_{ther} + \ell_{ins})(\sin(\phi_{cond,top} + 2\sigma_V) - \sin(\phi_{cond,top} - 2\sigma_V)) = (16.3 + 3.089)(\sin(10.81) - \sin(3.52)) = 2.45 \ \text{[m]}$$

$$\ell_{v,top} = (D_{ther} + \ell_{ins})(\cos(\phi_{cond,top} - 2\sigma_V) - \cos(\phi_{cond,top} + 2\sigma_V)) = (16.3 + 3.089)(\cos(3.52) - \cos(10.81)) = 0.31 \ \text{[m]}$$

$$\ell_{1\text{-}1\%,top} = \ell_{h,top} + \sqrt{\ell_{SI,p\text{-}p}{}^2 - \ell_{v,top}{}^2} + b = 2.45 + \sqrt{2.66^2 - 0.31^2} + 0.4 = 5.49 \ \text{[m]}$$

2.4.5 ความสูงของเสาส่งไฟฟ้า

2.4.5.1 แขนเสาส่งไฟฟ้าแบบเหล็กถัก

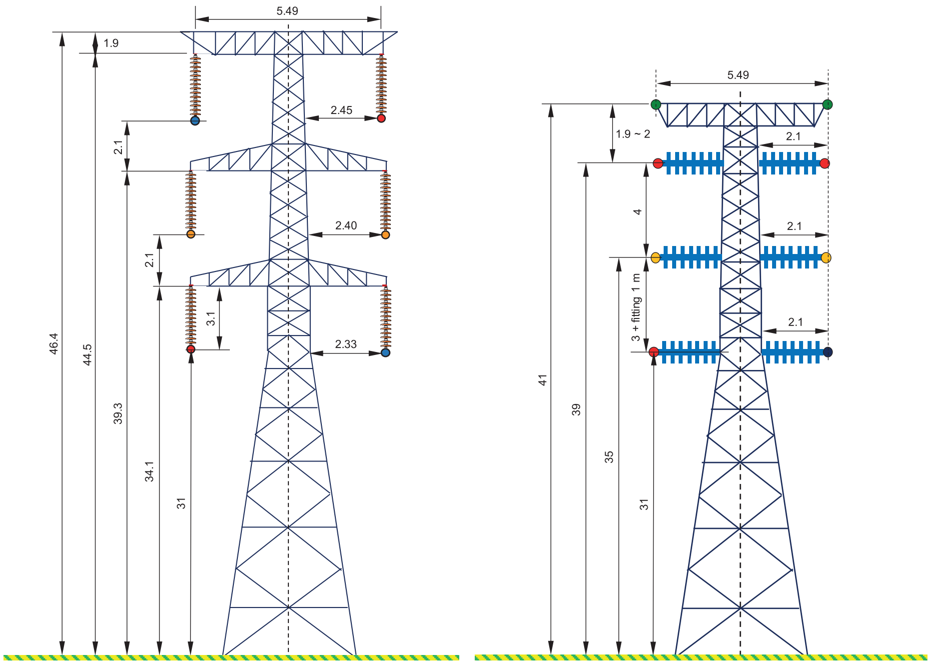
ความสูงของเสาส่งไฟฟ้าที่ใช้แขนแบบเหล็กถักจากตัวอย่างที่ 2.28 ถึง 2.37 ได้แสดงในรูปที่ 2.65 ก)

ค่าระยะห่างระหว่างเฟส 5.49 m ใช้การคำนวณตามรูป 2.64 ก) ถ้าใช้แนวปฏิบัติที่กำหนดให้ ϕ_{min} = 0° ระยะห่างระหว่างเฟสจะต้องเท่ากับ 6.68 m แต่ถ้าคิดว่าสายเฟสที่ระดับเดียวกันแกว่งเข้าหากัน คือให้ $\phi_{min} = -\phi_{max}$ ระยะห่างระหว่างเฟสจะต้องเท่ากับ 10.34 m

2.4.5.2 แขนเสาส่งไฟฟ้าแบบฉนวน

ความสูงของเสาส่งไฟฟ้าที่ใช้แขนแบบฉนวนจะใช้วิธีการคำนวณคล้ายกับที่กล่าวมาแล้ว เพียงแต่กำหนดให้ ℓ_{ins} ในแนวตั้งเท่ากับ 0 m และให้ความยาวของแขนฉนวน $\ell_{ins,LI}$ = 2.1 m ได้แสดงในรูปที่ 2.65 ข)

ค่าระยะห่างระหว่างเฟส 5.49 m ใช้การคำนวณตามรูป 2.64 ก) ถ้าใช้แนวปฏิบัติที่กำหนดให้ ϕ_{min} = 0° ระยะห่างระหว่างเฟสจะต้องเท่ากับ 6.68 m และถ้าคิดว่าสายเฟสที่ระดับเดียวกันแกว่งเข้าหากัน คือให้ $\phi_{min} = -\phi_{max}$ ระยะห่างระหว่างเฟสจะต้องเท่ากับ 10.34 m เช่นเดียวกับในกรณีของแขนเสาส่งไฟฟ้าแบบเหล็กถัก



ก) แขนเสาไฟฟ้าแบบเหล็กถัก ข) แขนเสาไฟฟ้าแบบฉนวน

รูปที่ 2.65 ความสูงของเสาส่งไฟฟ้า

2.4.6 ระยะการแกว่งทางด้านข้างของสายไฟฟ้าเมื่อมีลมปะทะ

2.4.6.1 แขนเสาส่งไฟฟ้าแบบฉนวน

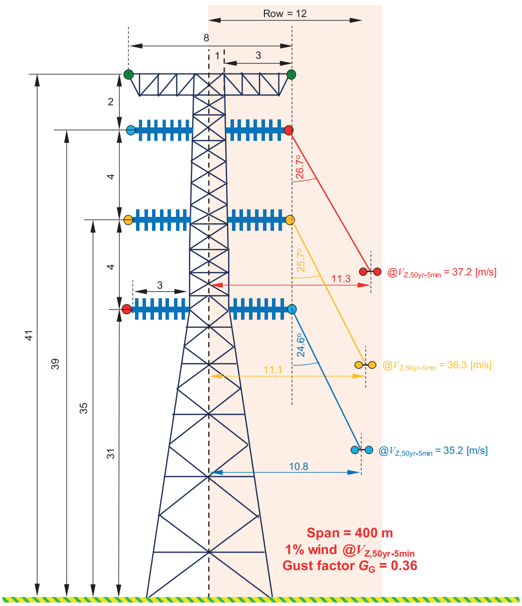
ความเร็วลมที่ปะทะสายเฟสมี 2 แบบ คือลมสงบที่มีความเร็วลม $V_{z,99\%\text{-}5min}$ ~ 18-19 m/s (มีโอกาสเกิดขึ้น 99%) และลมความเร็วสูงสุดในรอบ 50 ปี $V_{z,50yr\text{-}5min}$ ~ 35-37 m/s (มีโอกาสเกิดขึ้น 1%) –ซึ่งความเร็วลมทั้งสองแบบขึ้นอยู่กับความสูง *z* ของสายเฟสเหนือพื้นดิน- เพื่อใช้ในการออกแบบระยะห่างระหว่างสายเฟสกับสายเฟสให้ทนแรงดันเกิน SOV/LOV ที่เกิดขึ้น และระยะห่างระหว่างสายเฟสกับเสาส่งไฟฟ้าให้ทนแรงดันเกิน TOV ได้ตามลำดับ

ผลการคำนวณระยะการแกว่งของสายเฟสทางด้านข้างโดยสรุป เมื่อระยะห่างระหว่างเสาไฟฟ้าเท่ากับ *S* = 400 m ได้แสดงในตารางที่ 2.34 และรูปที่ 2.66 และ 2.67

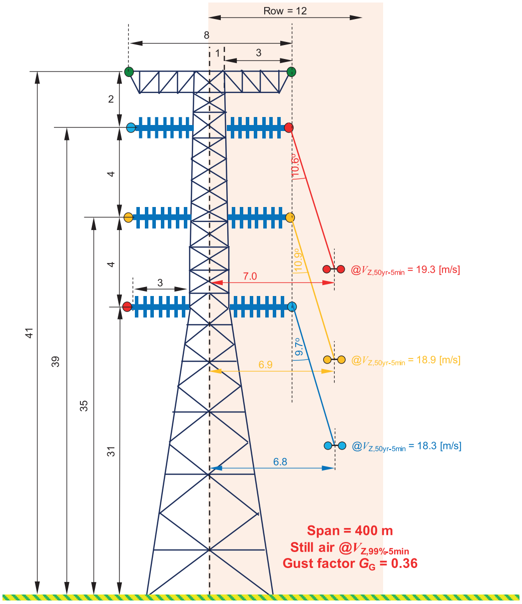
ตารางที่ 2.34 ระยะการแกว่งของสายเฟสทางด้านข้าง S = 400 m เมื่อดึงสายด้วยแรงกลในแนวนอน H = 22% RTS

Span, S_{span} [m]	**400**		
Sag thermal, no wind, D_{ther} [m] @H = 22% RTS	16.32		
CICA length [m]	3.00		
Tower width [m]	2.00		
Gust factor, G_G	**0.36**		
Crossarm positon, x	Low	Mid	Top
Conductor height above ground, z [m]	20.12	24.12	28.12
1% probability wind speed, $v_{z,50yr\text{-}5min}$ [m/s]	35.23	36.26	37.17
Maximum conductor swing angle, $\phi_{z,50yr\text{-}5min}$ [°]	24.62	25.73	26.70
Maximum conductor swing distance, $\ell_{swing,1\%,max}$ [m]	10.80	11.09	11.33
99% probability wind speed, $v_{z,99\%\text{-}5min}$ [m/s]	18.32	18.86	19.33
Maximum. conductor swing angle, $\phi_{z,99\%\text{-}5min}$ [degree]	9.74	10.20	10.61
Maximum conductor swing distance, $\ell_{swing,99\%,max}$ [m]	6.76	6.89	7.00

จากรูปที่ 2.66 และ 2.67 เราจะเห็นว่าลมที่มาปะทะสายเฟสเมื่อ span = 400 m มีผลต่อการแกว่งของสายเฟสไปทางด้านข้างอย่างมาก โดยลมที่มีความเร็วสูงสุด $V_{z,50yr\text{-}5min}$ ~ 35-37 m/s เมื่อปะทะสายเฟสทำให้สายส่งแกว่งไม่เกิน RoW ที่กำหนดไว้ 12 m แต่ก็ใกล้มาก แต่มีโอกาสเกิดขึ้นเพียง 1% เท่านั้น



รูปที่ 2.66 ระยะการแกว่งของสายเฟสทางด้านข้างเมื่อมีลม $V_{z,50yr\text{-}5min}$ ที่มีโอกาสเกิดขึ้น 1% มาปะทะสายเฟส, S = 400 m -แขนเสาส่งไฟฟ้าแบบฉนวน Gust factor G_G = 0.36



รูปที่ 2.67 ระยะการแกว่งของสายเฟสทางด้านข้างเมื่อมีลม $V_{z,99\%r\text{-}5min}$ ที่มีโอกาสเกิดขึ้น 99% มาปะทะสายเฟส, S = 400 m -แขนเสาส่งไฟฟ้าแบบฉนวน Gust factor G_G = 0.36

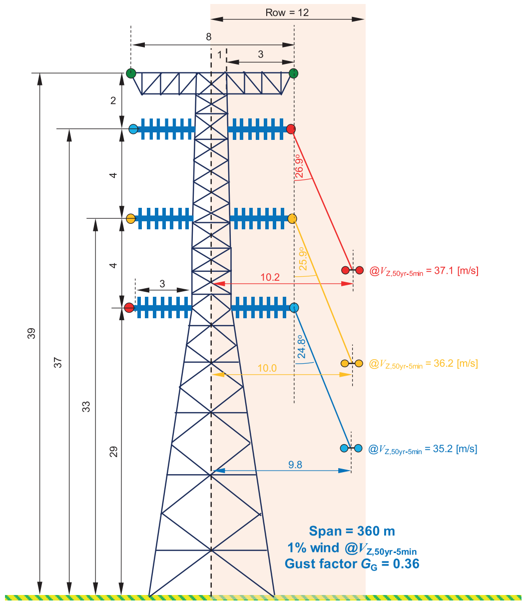
วิธีแก้ไขข้องขัดข้องดังกล่าวที่ทำได้อีกวิธีหนึ่งคือ ลดระยะห่างระหว่างเสาส่งไฟฟ้า เช่น ลด span ลงเหลือ 360 m -ลดลง 10% จากค่าที่กำหนด- ดังแสดงในตารางที่ 2.35 และรูปที่ 2.68 และ 2.69

ตารางที่ 2.35 ระยะการแกว่งของสายเฟสทางด้านข้าง S = 360 m เมื่อดึงสายด้วยแรงกลในแนวนอน H = 22% RTS

Span, S_{span} [m]	**360**		
Sag thermal, no wind, D_{ther} [m] @H = 22% RTS	13.74		
CICA length [m]	3.00		
Tower width [m]	2.00		
Gust factor, G_G	**0.36**		
Crossarm positon, x	Low	Mid	Top
Conductor height above ground, z [m]	19.84	23.84	27.84
1% probability wind speed, $v_{z,50yr\text{-}5min}$ [m/s]	35.15	36.20	37.11
Maximum conductor swing angle, $\phi_{z,50yr\text{-}5min}$ [°]	24.78	25.90	26.89
Maximum conductor swing distance, $\ell_{swing,1\%,max}$ [m]	9.76	10.00	10.22
99% probability wind speed, $v_{z,99\%\text{-}5min}$ [m/s]	18.28	18.82	19.30
Maximum conductor swing angle, $\phi_{z,99\%\text{-}5min}$ [°]	9.79	10.26	10.67
Maximum conductor swing distance, $\ell_{swing,99\%,max}$ [m]	6.34	6.45	6.54

ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อระยะห่างช่วงเสาลดลงจาก 400 m เหลือเพียง 360 m ระยะตกท้องช้าง D_{ther} และความเร็วลมที่ปะทะสายส่งไฟฟ้า $V_{z,50yr\text{-}5min}$ จะลดลง และจะเห็นว่าถ้าเราคำนวณการแกว่งของสายเฟสด้วยแฟกเตอร์ลมกระโชก G_G = 1.0 ถ้ามีลมความเร็ว $V_{z,50yr\text{-}5min}$ ~ 35-37 m/s มาปะทะสายเฟสก็จะทำให้สายเฟสแกว่งเกินจาก RoW ไปมากถึง 3 m

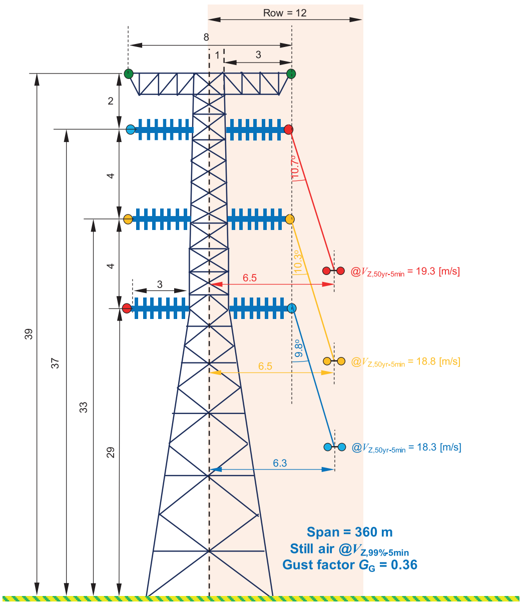
อย่างไรก็ตามเพื่อให้เกิดความมั่นใจเพิ่มขึ้นในกรณีที่เราเดินเสาส่งไฟฟ้าในโครงการนี้ในบริเวณที่มีตึกสูงด้านข้าง RoW เช่น ในกรณีที่เดินเสาส่งไฟฟ้าผ่านตัวเมือง เราอาจกำหนดให้ระยะห่างระหว่างช่วงเสาส่งไฟฟ้าไม่เกิน 300 m ได้



รูปที่ 2.68 ระยะการแกว่งของสายเฟสทางด้านข้างเมื่อมีลม $V_{z,50yr\text{-}5min}$ ที่มีโอกาสเกิดขึ้น 1% มาปะทะสายเฟส, S = 360 m -แขนเสาส่งไฟฟ้าแบบฉนวน Gust factor G_G = 0.36

2.4.6.2 แขนเสาส่งไฟฟ้าแบบเหล็กถัก

ระยะการแกว่งทางด้านข้างของสายไฟฟ้าเมื่อมีลมปะทะของแขนเสาส่งไฟฟ้าแบบเหล็กถักจะเหมือนกับแขนเสาส่งไฟฟ้าแบบฉนวนเพราะเราใช้แขนเสาส่งไฟฟ้าแบบเหล็กถักสำหรับเสาส่งไฟฟ้าต้นที่รับแรงดึงสายเฟส ดังนั้นพวงลูกถ้วยที่ตำแหน่งเสาส่งไฟฟ้าจึงไม่สามารถแกว่งเข้าหาตัวเสาส่งไฟฟ้าได้



รูปที่ 2.69 ระยะการแกว่งของสายเฟสทางด้านข้างเมื่อมีลม $V_{z,99\%r\text{-}5min}$ ที่มีโอกาสเกิดขึ้น 99% มาปะทะสายเฟส, S = 360 m -แขนเสาส่งไฟฟ้าแบบฉนวน Gust factor G_G = 0.36

2.5 เอกสารอ้างอิงบทที่ 2

[ASCE74, 2003], "*Guidelines for electrical transmission line structure loading*", American society of civil engineers, New York, USA.

[Al.Assoc., 1989], "*Aluminium electrical conductor handbook*", The Aluminium Association, 3rd edition, Washington D.C., 1989.

[Andeson, 1987], Anderson, J.G., "*Transmission line reference book - 345 kV and above*", Ch.12, EPRI, 1987.

[ANSI/NEMA C29.2B, 2013], "*Wet process porcelain and toughened glass - Transmission suspension type*", ANSI/NEMA, 2013.

[ANSI/NEMA C29.12, 2013], "*Composite insulator - Transmission suspension type*", ANSI/NEMA, 2013.

[Atanasovski, 2019], "*Comparison of ACSR, ACCC and AAAC conductors for overhead transmission lines*", IECST, 2019.

[CTC, 2019], "*ACCC® -High performance conductors for a low carbon world*", CTCglobal, USA, 2019.

[Diesendorf, 1974], "Insulation co-ordination in high-voltage electric power systems", Diesendorf, W., Butterworths, London, 1974.

[EGAT, 2020], "*Design of a 230 kV compact transmission line for using in limited area*", Final report, CEPT, 2020. (in Thai)

[EN50341-1,2001], "*Overhead electrical lines exceeding 45 kV Part1: General requirements – Common specification*", European Committee for Electrotechnical Standardization (CENELEC), 2001.

[EPRI, 2006], "*AC transmission line reference book - 200 kV and above*", 3rd edition, EPRI, 2006.

[EPRI, 1987], "*Transmission line reference book - 345 kV and above*", 2nd edition, EPRI, 1987.

[Fink, 1987], Fink, D.G. and Beaty, H.W., "*Standard handbook for electrical engineers*", 12th edition, McGraw-Hill, 1987.

[IEC60071-1, 2018], "*Insulation coordination Part 1 - Definitions, Principles and rules*", IEC, 2018.

[IEC60071-2, 2019], "*Insulation coordination Part 2 – Application guidelines*", IEC, 2019.

IEC60076-3, 2013], "*Power transformer - Part 3 Insulation levels, dielectric tests and external clearances in air*", IEC, 2013.

[IEC60099-8, 2017], "*Surge arresters - Part 8: Metal-oxide surge arresters with external series gap (EGLA) for overhead transmission and distribution lines of a.c. systems above 1 kV*", IEC, 2017.

[IEC/TS60815-1, 2008], "*Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions – Part 1: Definitions, information and general principles*", IEC, 2008.

[IEC/TS60815-2, 2008], "*Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions – Part 2: Ceramic and glass insulators for a.c. systems*", IEC, 2008.

[IEC/TS60815-3, 2008], "*Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions - Part 3: Polymer insulators for a.c. systems*", IEC, 2008.

[IEC60815, 1986], "*Guide for the selection of insulators for respect of polluted conditions*", IEC, 1968.

[IEC60826, 2017], "*Overhead transmission lines – Design criteria*", IEC, 2017.

[IEC61597, 1995], "*Overhead electrical conductors – Calculation methods for stranded bare conductors*", IEC, 1995.

[IEC61850-90-3, 2016], "*Communication networks and systems for utility automation - Part 90-3: Using IEC61850 for condition monitoring diagnosis and analysis*", IEC, 2016.

[IEC62305-1, 2010], "*Protection against lightning - Part 1: General principles*", IEC, 2010.

[IEEE80, 2015], "*Guide for safety in AC substation grounding*", IEEE, 2015.

[IEEE81, 2013], "*Guide for measuring earth resistivity of a grounding system*", IEEE, 2013.

[IEEE1243, 1997], "*Guide for improving the performance of transmission lines*", IEEE, 1997.

[Hileman, 1999], Hileman, A.R., "*Insulation coordination for power systems*", CRC press, Florida, 1999.

[Lamifil, 20xx], "*The improved gap conductor-GZTACSR*", Lamifil nv, Belgium, 20xx.

[MacLean, 2020], "*Transmision product catalog*", MacLean Power Systems, Fort Mill, Santa cruz, USA, 2020.

[Nanjing, 2020], "*Composte insulator upto 765 kV application*", Nanjing catalog, Nanjing Electric (Group) Co., Ltd., China, 2020.

[NGK, 19xx], "*NGK insulators*", Catalog No.65, NGK insulators, Ltd., Nagoya, Japan, 19xx.

[Pakdee, 2014], Pakdee, W. and Petcharaks, K. "*The impact of striking distance on shielding failure*", EECON-2014, Khonkan, Thailand, 2014. (in Thai)

[Shemar, 201x], "*Composite long rod insulator*", Catalog, Jiangsu shema electric co., Ltd., Jiangsu, China, 201x.

[Sterlite, 20xx], "*Sterlite® Super thermal alloy conductor invar reinforced (STACIR)* ", Sterlite power, 2021.

[Sumitomo, 20xx], "*Invar core conductor: ZTACIR/AS Super thermal resistance aluminium alloy conductor Al-clad invar reinforce*", Sumitomo electric industries, Ltd., Japan, 20x.

[TB324, 2016], "*Sag-Tension Calculation Method for Overhead Lines*", Technical Brochur 324, CIGRE, 2016.

[TB345, 2008], "*Alternating current (AC) resistance of helically stranded conductors*", Technical Brochur 345, CIGRE, 2008.

[TB348, 2008], "*Top tower geometry and mid span clearance*", Technical Brochur 348, CIGRE, 2008.

[TB440, 2010], "*Use of surge arresters for lightning protection of transmission lines*", CIGRE technical brochure 440, 2010. [TB542, 2013], "*Insulation Coordination for UHV AC Systems*", Technical Brochur 542, CIGRE, 2013.

[TB498-2012], "*Guide for application of direct real-time monitoring systems*", Technical Brochur 498, CIGRE, 2012.

[TB549, 2013], "*Lightning parameters for engineering applications*", CIGRE technical brochure 549, 2013.

[TB601, 2014], "*Guide for thermal rating calculations of Overhead Lines*", Technical Brochur 601, CIGRE, 2014.

[TB633, 2015], "*Lightning striking characteristics to very high structures*", CIGRE technical brochure 633, 2015.

[TB704, 2017], "*Evaluation of lightning shield analysis methods for EHV & UHV, DC & AC transmission lines*", CIGRE technical brochure 704, 2017.

[Wiki, 2018a], "*Distribution of lightning*", https://en.wikipedia.org/wiki/Distribution_of_lightning, 2018.

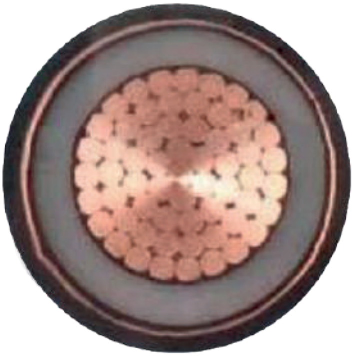
บทที่ 3. สายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน

สายส่งไฟฟ้าแรงสูงเหนือพื้นดินในบทที่ 2 เหมาะสำหรับการส่งกำลังไฟฟ้าเป็นระยะทางไกลๆ ที่ผ่านบริเวณที่โล่ง, ป่าเขา, ไร่นา หรือบริเวณที่มีสิ่งมีชีวิตอยู่อาศัยไม่หนาแน่นมากนัก หากเราต้องเดินสายส่งไฟฟ้าในบริเวณพื้นที่เมืองหรือพื้นที่ท่องเที่ยว เรามักใช้สายเคเบิลแรงสูงใต้พื้นดิน -บางครั้งจะเรียกสั้นๆ ว่า "เคเบิล"- เดินไปตามแนวถนนเพื่อให้ไม่ต้องรอนสิทธิ์การใช้พื้นที่จากประชาชน นอกจากนั้นสายส่งไฟฟ้ายังไม่บดบังภูมิทัศน์ทำให้พื้นที่ๆ สายส่งไฟฟ้าเดินผ่านยังคงมีความสวยงามเหมือนเดิม

3.1 สนามไฟฟ้าในทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม

ระบบอิเล็กโทรดแบบทรงกระบอกซ้อนแกนร่วมเป็นโครงสร้างพื้นฐานของสายเคเบิลที่ใช้กันทั่วไป ดังที่แสดงในรูปที่ 3.1

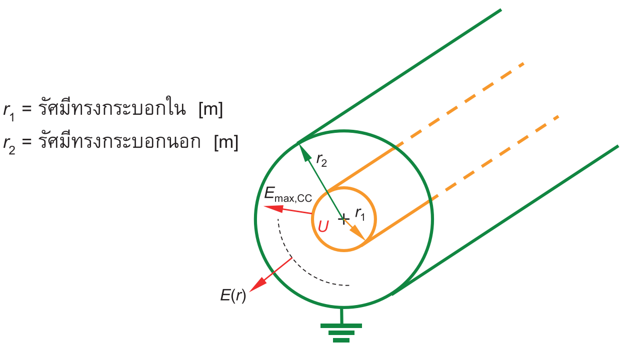
ก) สายเคเบิลใต้น้ำแบบสามแกน



ข) ภาพตัดของสายเคเบิลแกนเดี่ยว

รูปที่ 3.1 สายเคเบิลแรงสูง

โดยโครงสร้างพื้นฐานของทรงกระบอกซ้อนแกนร่วมได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 อิเล็กโทรดแบบทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม

สมมุติว่า *เส้นประจุ* (line charge) เส้นหนึ่ง มีประจุต่อหน่วยความยาวเท่ากับ Q/ℓ [C/m] เราจะพบว่าสนามไฟฟ้าตามแนวรัศมี r ในตัวกลางรอบๆ เส้นประจุ สามารถหาได้จากสมการ

$$E(r)=\frac{Q/\ell}{2\pi\varepsilon}\frac{1}{r} \tag{3.1}$$

เมื่อ ε เป็น เปอร์มิตติวิตี้ของตัวกลาง [F/m]

หากเรากำหนดให้ทรงกระบอกในมีรัศมี r_1 และทรงกระบอกนอกมีรัศมี r_2 ความต่างศักย์ U ระหว่างทรงกระบอกในกับทรงกระบอกนอกจะหาได้จาก

$$\begin{aligned} U &= \int_{r_1}^{r_2} E(r)\,dr = \frac{Q/\ell}{2\pi\varepsilon}\int_{r_1}^{r_2}\frac{1}{r}dr = \frac{Q/\ell}{2\pi\varepsilon}\left[\ln r_2 - \ln r_1\right] \\ &= \frac{Q/\ell}{2\pi\varepsilon}\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \end{aligned}$$

ดังนั้น

$$E(r)=\frac{1}{r}\frac{U}{\ln(r_2/r_1)} \tag{3.2}$$

และโปรดสังเกตว่า สนามไฟฟ้าในฉนวนไม่ขึ้นอยู่กับค่าเปอร์มิตติวิตี้ของตัวกลาง

สนามไฟฟ้าสูงสุดจะเกิดขึ้นที่ผิวของทรงกระบอกใน โดยมีค่าเท่ากับ

$$E_{\max}=\frac{U}{r_1\cdot\ln(r_2/r_1)} \tag{3.3}$$

ส่วนค่าความจุไฟฟ้าและความเหนี่ยวนำของทรงกระบอกซ้อนแกนร่วมนั้น สามารถหาได้จากสมการ

$$C=\frac{2\pi\varepsilon\ell}{\ln(r_2/r_1)};\quad \varepsilon=\varepsilon_r\varepsilon_0 \tag{3.4a}$$

$$L=\frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi\mu\ell};\quad \mu=\mu_r\mu_0 \tag{3.4b}$$

เมื่อ ε_0 คือค่าเปอร์มิตติวิตี้ของสุญญากาศมีค่าเท่ากับ $8.854\cdot10^{-12}$ [F/m] และ μ_0 คือ ค่าเปอร์มีอบิลีตี้ของสุญญากาศมีค่าเท่ากับ $4\pi\cdot10^{-7}$ [H/m]

เกร็ดความรู้ 3.1 จงหาความเร็วของคลื่นในอากาศ c_{air} และอิมพีแดนซ์ลักษณะเฉพาะของอากาศ Z_{air}

ความเร็วของคลื่นในสุญญากาศ c_0 และอิมพีแดนซลักษณะเฉพาะของสุญญากาศ Z_0 หาได้จาก

$$c_0=\frac{1}{\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}}=\frac{1}{\sqrt{4\pi\cdot10^{-7}\times8.854\cdot10^{-12}}}=3\cdot10^8;\ \ \text{[m/s]}$$

$$Z_0=\sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}}=\sqrt{\frac{4\pi\cdot10^{-7}}{8.854\cdot10^{-12}}}=376.7\ \ [\Omega]$$

ดังนั้น

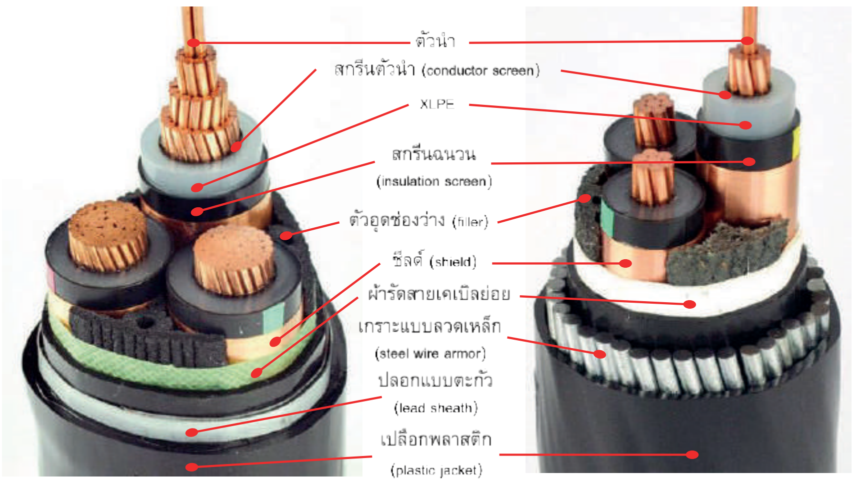
$$c_{air}=\frac{c_0}{\sqrt{\mu_r\varepsilon_r}}\ \ \text{[m/s]};\quad Z_{air}=Z_0\sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}}\ \ [\Omega]$$

แต่อากาศมีค่า $\varepsilon_r \sim 1$ และ $\mu_r \sim 1$ ดังนั้นความเร็วของคลื่นและอิมพีแดนซ์ลักษณะเฉพาะของอากาศจึงมีค่าประมาณเท่ากับสุญญากาศ

3.2 โครงสร้างของสายเคเบิล

สายเคเบิลอาจมีแกนเดี่ยว (single core) หรือ 3 แกน (3 core) ดังแสดงในรูปที่ 3.3

ก) สายเคเบิลแกนเดี่ยว



ข) สายเคเบิล 3 แกน

รูปที่ 3.3 สายเคเบิลแกนเดี่ยวและ 3 แกน

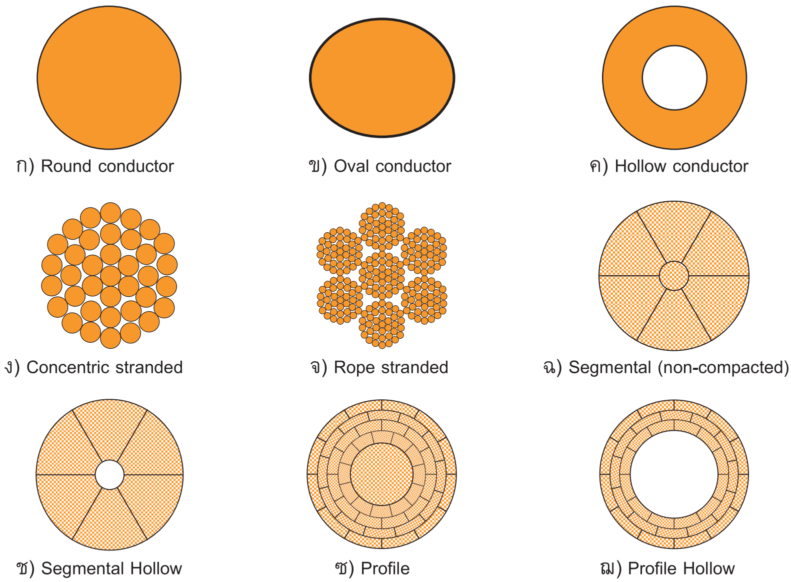
สายแกนเดี่ยวมักใช้ทั้งในระบบจำหน่ายและระบบส่งกำลังไฟฟ้า โดยตัวนำที่ผลิตมีขนาด 50-1200 mm^2 ในขณะสาย 3 แกนจะใช้ในระบบจำหน่ายเท่านั้น และตัวนำมักมีพื้นที่หน้าตัดไม่เกิน 400 mm^2

ข้อดีของสายแกนเดี่ยวคือ หากสายเคเบิลเฟสใดเสียหายก็เปลี่ยนเฉพาะสายเคเบิลเฟสนั้น แต่ราคาในการผลิตสายเคเบิล 3 เส้น และการเดินสาย 3 เส้น มีค่าใช้จ่ายสูง ส่วนสายเคเบิล 3 แกน มีข้อดีคือราคาในการผลิตต่ำกว่าและเดินสายง่ายกว่าเพราะเดินสายเคเบิลเพียงเส้นเดียว แต่ก็มีข้อเสีย คือหากสายเคเบิลเฟสใดเสียหาย เราต้องเปลี่ยนสายเคเบิล 3 แกน ทั้งเส้น โครงสร้างหลักของสายเคเบิลแกนเดี่ยวและสายเคเบิลย่อยของสายเคเบิล 3 แกน เหมือนกัน การผลิตสายเคเบิลจึงเหมือนกันแทบทุกประการ

โครงสร้างของสายเคเบิลประกอบไปด้วย

3.2.1 ตัวนำ

ตัวนำทำจากลวดตีเกลียวเสมอและการตีเกลียวอาจมีหลายชั้น ดังที่แสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ลักษณะของตัวนำแบบต่างๆ

คุณสมบัติของโลหะที่มักใช้เป็นตัวนำได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.1 ถึง 3.3

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของทองแดง (Cu) เมื่อเปรียบเทียบกับอะลูมิเนียม (Al)

คุณสมบัติ	Cu	Al
ความนำไฟฟ้า (พื้นที่หน้าตัดเท่ากัน)	1	0.6
พื้นที่หน้าตัด (ที่ความต้านทานเท่ากัน)		1.66
เส้นผ่านศูนย์กลาง (ที่ความต้านทานเท่ากัน)		1.29
น้ำหนัก (ที่พื้นที่หน้าตัดเท่ากัน)		0.3
น้ำหนัก (ที่ความต้านทานเท่ากัน)		0.5

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของทองแดง (Cu) และอะลูมิเนียม (Al)

คุณสมบัติ	Cu	Al
ความนำไฟฟ้า [%IACS]	100	61
ความต้านทานไฟฟ้าที่ 20°C [Ωm]	1.724E-08	2.803E-08
สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน [1/°C]	1.70E-05	2.30E-05
จุดหลอมเหลว [°C]	1083	659
ความนำความร้อน [W/cm°C]	3.8	2.4
ความหนาแน่นที่ 20°C [g/cm^3]	8.89	2.7

ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของโลหะที่มักใช้ทำสายเคเบิล

Material	%IACS	Resistivity @ 20 °C [×1E-8 Ωm]	Temperature coefficient of resistance α_{20} [1/°C]
Silver	106	1.626	0.0041
Copper (HC, annealed)	100	1.724	0.0039
Copper (HC, hard drawn)	97	1.777	0.0069
Tinned copper	95-99	1.741-1.814	0.0039
Aluminum (EC grade, solft)	61	2.803	0.004
Aluminum (EC grade, ½ H-H)	61	2.826	0.004
Mild steel	12	13.80	0.0045
Lead	8	21.40	0.0041

ในกรณีที่ตัวนำมีพื้นที่หน้าตัดตั้งแต่ 1000 mm^2 ขึ้นไป ตัวนำมักจะถูกแบ่งเป็นชิ้นย่อยๆ คล้ายรูปสามเหลี่ยม เพื่อลดปรากฏการณ์ที่ผิวซึ่งมักเรียกว่าสาย Milliken (รูป 3.4 ฉ)) ระหว่างที่ตีเกลียวลวดเพื่อทำเป็นตัวนำ เราอาจตี *เทปกันน้ำ* (water blocking tape) แทรกระหว่างลวดด้วย เพื่อป้องกันน้ำซึมเข้าไปในตัวนำหากมีน้ำเข้ามาที่หัวสายเคเบิล

3.2.2 สกรีนตัวนำ

ทำหน้าที่เป็นผิวนอกของทรงกระบอกในของทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม เนื่องจากรูปร่างของตัวนำมีลักษณะที่ไม่เป็นทรงกระบอกผิวเรียบเพราะประกอบจากลวดตีเกลียว สกรีนตัวนำทำจากสารกึ่งตัวนำ -บางครั้งจึงเรียกว่าชั้นเซมิ- ทำให้เมื่อหุ้มตัวนำแล้ว แรงดันสูงของตัวนำจะไปปรากฏที่ผิวนอกของสารกึ่งตัวนำ (ดูเกร็ดความรู้ 3.2)

สายเคเบิลจะมีสกรีนตัวนำและสกรีนฉนวนหรือไม่มีก็ได้ ขึ้นอยู่กับระดับแรงดันของระบบดังแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 การใช้สกรีนสำหรับสายเคเบิลที่มีพิกัดแรงดันต่างๆ

Type	Conductor screen	Insulation	Insulation screen
Low voltage: 600 V	-	Regular	-
Medium voltage: 3.3-6.6 kV	Bond type	Regular Water tree retardant	Strippable type
Medium voltage: 22-33 kV		Regular	
High voltage: 66-154 kV	Bond type (Super smooth)	Super clean	Bond type (Super smooth)
Extra high voltage: 275-500kV		Ultra super clean	
หมายเหตุ: Bond type เป็นชนิดที่สกรีนยึดติดแน่นไม่สามารถลอกออกได้ ส่วน Strippable type เป็นชนิดที่ลอกออกได้			

3.2.3 ฉนวน

ฉนวนหลักของสายเคเบิลส่วนใหญ่จะทำจากพลาสติกหรือกระดาษจุ่มน้ำมัน ในที่นี้จะกล่าวถึงฉนวนพลาสติกเท่านั้น เพราะในประเทศของเราไม่ผลิตสายเคเบิลประเภทที่มีฉนวนเป็นกระดาษจุ่มน้ำมัน

พลาสติกที่ใช้ทำฉนวนของสายเคเบิลแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ *เทอร์โมเซตติง* (thermo-setting) และ *เทอร์โมพลาสติก* (thermoplastics) ซึ่งนอกจากจะใช้เป็นฉนวนหลักแล้ว พลาสติกดังกล่าวยังใช้ทำเปลือกหุ้มและวัสดุประกอบอื่นๆ โดยพลาสติกที่นิยมใช้ทำสายเคเบิลประกอบไปด้วย PVC, PE และ XLPE ซึ่งมีคุณสมบัติดังแสดงในตารางที่ 3.5 [Moore, 2006]

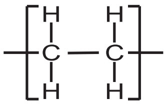
ตารางที่ 3.5 คุณสมบัติของฉนวนและเปลือกที่ใช้ทำสายเคเบิล

วัสดุ	หน้าที่	ความทนแรงดึง [MPa]	ความยาวก่อนขาด [%]	ขีดจำกัดอุณหภูมิ [°C] พิกัด	ขีดจำกัดอุณหภูมิ [°C] ต่ำสุด
PVC	ฉนวน	12.5	125	70	5
	เปลือก	12.5	125	90	-15
PE	ฉนวน	7	300	70	-60
	เปลือก	12.5	300	90	-
XLPE	ฉนวน	12.5	200	90	-40

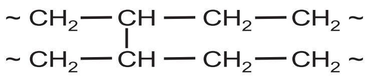
เหตุผลที่นิยมใช้ XLPE เป็นฉนวนของสายเคเบิล คือ ราคาไม่แพงจนเกินไป, ความง่ายของกระบวนการผลิต, ค่าความต้านทานของฉนวนสูง, ค่าความทนต่อแรงดันสูง, ค่า ε_r ต่ำทำให้ค่า tan δ ต่ำ, การดูดซึมน้ำต่ำมาก, ทนทานสารเคมีดีมาก, ต้านทานต่อการสูญเสียรูปเนื่องจากความร้อนได้ดี, มีความต้านทานอุณหภูมิต่ำ ฯลฯ

แต่อย่างไรก็ตาม เราต้องคำนึงถึง สิ่งสกปรก, ช่องว่างและความชื้นในเนื้อฉนวน และความขรุขระที่รอยต่อของวัสดุแต่ละชั้นที่อาจก่อให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูงผิดปกติที่บริเวณดังกล่าว ซึ่งนำไปสู่การเกิด ดีสชาร์จบางส่วน (partial discharge, PD) ซึ่งท้ายที่สุดจะทำให้ฉนวนเบรกดาวน์

PE (polyethylene) ประกอบด้วยโมเลกุลของคาร์บอน C และไฮโดรเจน H เรียงต่อกัน เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีมาก โดยถ้าเรานำ PE ไปผ่านกระบวนการก็จะได้โครงสร้าง PE ที่เป็น *ร่างแห* (cross-linking) ที่เรียกว่า XLPE ดังแสดงในรูปที่ 3.5



ก) PE

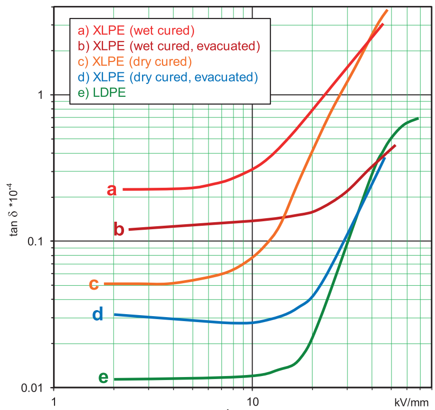


ข) XLPE

รูปที่ 3.5 โครงสร้างโมเลกุลของ PE และ XLPE

กระบวนการทำ PE ให้เป็น XLPE โดยส่วนใหญ่ใช้ *การบ่มความร้อน* (vulcanization) -ค้นพบโดย Goodyear ในปี 1839- ซึ่งทำให้ XLPE มีคุณสมบัติเป็นพลาสติกแบบเทอร์โมเซ็ตที่แข็งแรง, *ยืดหยุ่น* (elastic), *ไม่เหนียวหนืด* (non-tacky) และ *ไม่ละลาย* (insoluble)

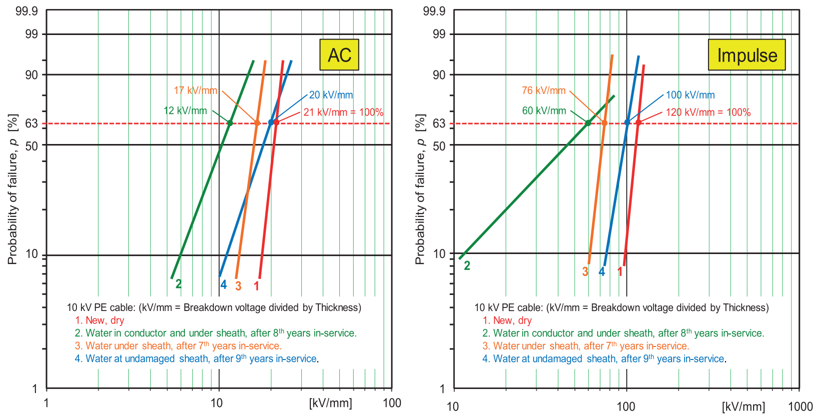
การบ่มความร้อนมี 2 วิธี คือ แบบแห้งและแบบเปียกที่มีผลต่อค่า tan δ ของ XLPE ดังแสดงในรูปที่ 3.6 โดยจะเห็นว่าการทำ XLPE ด้วยการอบความร้อนแบบเปียกจะมีค่า tan δ สูงกว่าแบบแห้ง



รูปที่ 3.6 ผลของวิธีอบความร้อนที่มีต่อค่า tan δ ของ XLPE @85 °C

นอกจากนั้น การใช้ PE ทั้งในรูปของเทอร์โมพลาสติก PE หรือ XLPE มีข้อเสียคือเกิดดีสชาร์จบางส่วนได้ง่ายหากมีสิ่งแปลกปลอมในเนื้อฉนวน ดังนั้นการหุ้มฉนวน XLPE จึงต้องระมัดระวังเป็นพิเศษเพื่อไม่ให้มีฟองอากาศหรือน้ำแทรกในเนื้อของ XLPE

ผลการทดสอบหาแรงดันเบรกดาวน์กระแสสลับและอิมพัลส์ของสายเคเบิลที่ผ่านการใช้งานประมาณ 8 ปี -ในการติดตั้ง/ใช้งาน มีน้ำซึมเข้าไปในตัวนำและสกรีน- ได้แสดงในรูปที่ 3.7 [Siemens, 1990] โดยค่า kV/mm ในรูปไม่ใช่ค่าสนามไฟฟ้าแต่เป็นเกรเดียนต์ของแรงดัน -มีค่าเท่ากับแรงดันเบรกดาวน์หารด้วยความหนาของฉนวน-



ก) ทดสอบด้วยแรงดันกระแสสลับ ข) ทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์

รูปที่ 3.7 ผลการทดสอบหาแรงดันเบรกดาวน์ของสายเคเบิลที่ผ่านการใช้งาน

กราฟแต่ละเส้นในรูปที่ 3.7 ได้ทำการทดสอบกับตัวอย่างสายเคเบิลจำนวนหนึ่ง โดยป้อนแรงดัน *x* คงที่ไว้เพื่อดูว่าจะเกิดเบรกดาวน์หรือไม่ จากนั้นนำโอกาสที่ตัวอย่างจะเกิดเบรกดาวน์ *p* มาวิเคราะห์ด้วยการแจกแจงแบบไวบูล ซึ่งเราจะเห็นว่า

- แรงดันเบรกดาวน์อิมพัลส์มีค่าสูงกว่าแรงดันเบรกดาวน์กระแสสลับประมาณ 5-6 เท่า
- ที่โอกาสเกิดเบรกดาวน์ 63.2% ($1 - e^{-1}$) แรงดันเบรกดาวน์ของสายเคเบิลที่มีน้ำเข้ามีค่าต่ำกว่าสายเคเบิลปกติประมาณ 2 เท่า

ดังนั้นการป้องกันฟองอากาศหรือน้ำในเนื้อฉนวนจึงมักทำด้วย

- หุ้มฉนวนไปกับสกรีนตัวนำและสกรีนฉนวนพร้อมกัน ด้วยการใช้หัวฉีดแบบพิเศษ
- ใช้เทปกันน้ำที่ตัวนำและชีลด์โลหะ

XLPE เป็นฉนวนหลักของสายเคเบิล ความหนาของฉนวนจึงขึ้นอยู่กับแรงดันใช้งานของสายเคเบิล [IEC60502-2] จึงกำหนดความหนาของ XLPE สำหรับสายเคเบิลในระบบจำหน่ายไฟฟ้าไว้เท่ากับ 3.4, 5.5, และ 8 mm สำหรับสายเคเบิลในระบบแรงดัน 12, 24 และ 36 kV ตามลำดับ ส่วนสายเคเบิลในระบบส่งไฟฟ้าไม่มีการกำหนดไว้

3.2.4 สกรีนฉนวน

สกรีนฉนวนทำจากสารกึ่งตัวนำเช่นเดียวกับสกรีนตัวนำ ไม่ได้มีหน้าที่ทำให้ผิวของฉนวนเรียบขึ้น แต่ทำหน้าที่เป็นผิวในของทรงกระบอกนอกของทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม เพราะเมื่อพันชีลด์โลหะทับลงไปผิวของฉนวนชีลด์โลหะจะไม่เรียบ อนึ่งบางครั้งผู้ผลิตอาจพันเทปสารกึ่งตัวนำรอบสกรีนฉนวนก่อนที่จะพันชีลด์โลหะเพื่อป้องกันไม่ให้ผิวของสกรีนฉนวนเสียหาย

3.2.5 ชีลด์โลหะ

แม้ว่าสกรีนฉนวนสามารถทำหน้าที่เป็นทรงกระบอกใน/นอกของโครงสร้างได้เป็นอย่างดี แต่ก็นำกระแสอัดประจุของสายเคเบิลได้ไม่ดีเพราะเป็นสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นจึงต้องใช้ ชีลด์โลหะ (metallic shield) พันรอบสกรีนฉนวน -บางครั้งก็เรียกว่าสกรีน (screen)- โดยชีลด์โลหะอาจเป็นลวดทองแดงตีเกลียวห่างๆ แล้วใช้เทปทองแดงพันห่างๆ ทับอีกครั้งเพื่อให้ลวดแนบกับสกรีนตัวนำ หรืออาจใช้เพียงเทปทองแดงพันทับเป็นเกลียวรอบสกรีนฉนวนเท่านั้น อนึ่งพื้นที่หน้าตัดของชีลด์มักไม่พอที่จะรับกระแสลัดวงจร ดังที่แสดงในตารางที่ 3.6 [Siemens, 1990]

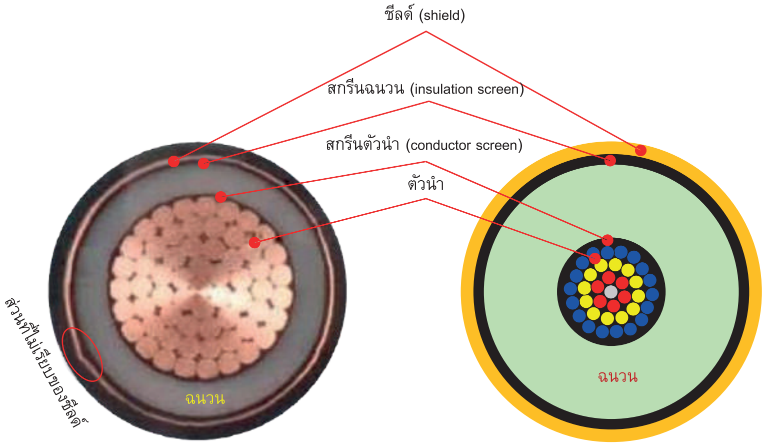
ตารางที่ 3.6 พื้นที่หน้าตัดของชีลด์โลหะตาม VDE

พื้นที่หน้าตัดตัวนำ [mm^2]	25-120	150-240	400
พื้นที่หน้าตัดชีลด์ [mm^2]	16	25	35

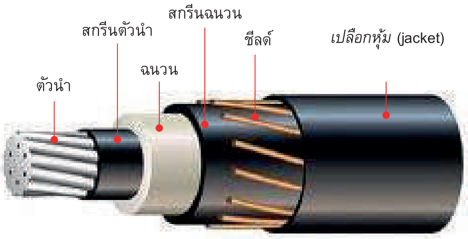
อนึ่ง ในการใช้งานเราจะต่อชีลด์โลหะลงกราวนด์เสมอ (อาจต่อทั้งสองปลายหรือปลายใดปลายหนึ่งลงกราวนด์ก็ได้) เพื่อให้ชีลด์โลหะทำหน้าที่เป็นทรงกระบอกนอกของทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม นอกจากนั้นชีลด์โลหะยังทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้สนามไฟฟ้ากระจายออกไปสู่ภายนอกอีกด้วย

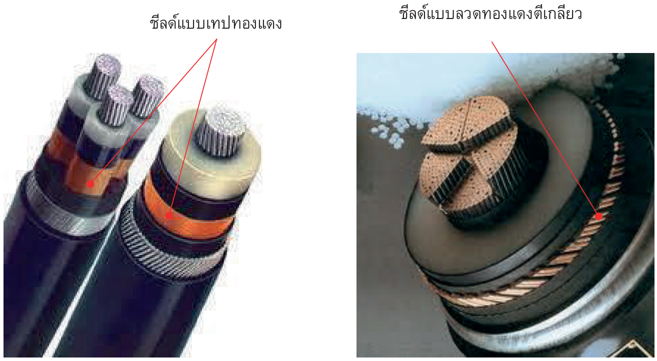
เกร็ดความรู้ 3.2 สมการที่ (3.2) และ (3.3) ใช้กับทรงกระบอกในและทรงกระบอกนอกที่มีผิวเรียบเท่านั้น เราจะนำสมการดังกล่าวไปใช้กับสายเคเบิลที่มีผิวไม่เรียบได้อย่างไร?

ก่อนอื่นลองพิจารณาโครงสร้างของสายเคเบิลในรูปต่อไปนี้

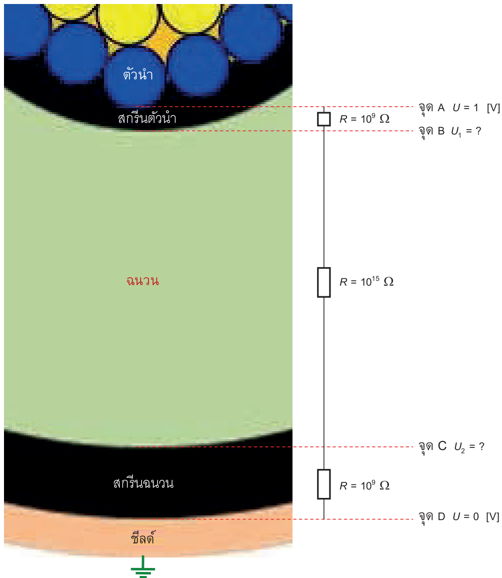


เราจะเห็นว่า ผิวโดยรอบของตัวนำไม่เรียบเพราะประกอบขึ้นจากลวดทองแดงตีเกลียว และผิวของชีลด์โลหะก็ไม่เรียบเช่นกันเพราะสร้างจากเทปทองแดงพันเป็นเกลียวหรือลวดทองแดงตีเกลียว ดังแสดงในรูป





การทำให้ตัวนำและชีลด์โลหะเรียบในทางไฟฟ้าเหมือนกับทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม จะใช้สกรีนตัวนำและสกรีนฉนวนที่ทำจากสารกึ่งตัวนำ โดยหลักการดังแสดงในรูป



จากรูปสมมุติว่าระบบฉนวนของสายเคเบิลสามารถแทนได้ด้วยความต้านทาน โดยกำหนดให้สกรีนตัวนำและสกรีนฉนวนมีความต้านทานเท่ากับ $10^9\ \Omega$ ส่วนฉนวนกำหนดให้มีความต้านทานเท่ากับ $10^{15}\ \Omega$ โครงสร้างของฉนวนจึงคล้ายกับตัวแบ่งแรงดันซึ่งเราสามารถคำนวณค่าแรงดันที่ผิวสัมผัสระหว่างฉนวนกับสกรีนตัวนำ (U_1) และแรงดันที่ผิวสัมผัสระหว่างฉนวนกับสกรีนฉนวน (U_2) ได้โดยง่ายดังนี้

ความต้านทานรวมของสายเคเบิลทั้งหมดมีค่าเท่ากับ

$$10^9 + 10^{15} + 10^9 = 1.000002 \cdot 10^{15}$$

ดังนั้น จุด B จึงมีแรงดันเท่ากับ

$$U_1 = \frac{1.000001 \cdot 10^{15}}{1.000002 \cdot 10^{15}} \cdot 1 = 0.99999 \sim 1$$

และจุด C มีแรงดันเท่ากับ

$$U_2 = \frac{10^9}{1.000002 \cdot 10^{15}} \cdot 1 = 0.000001 \sim 0$$

แรงดันที่ตัวนำตีเกลียวจึงไปปรากฏที่ผิวนอกของสกรีนตัวนำซึ่งมีลักษณะเรียบ ($U_1 \sim U \sim 1$) และ แรงดันที่ชีลด์โลหะ ($U_2 \sim 0$) จึงไปปรากฏที่ผิวในของสกรีนฉนวนซึ่งมีลักษณะเรียบเช่นกัน

อนึ่ง กระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านตัวนำและชีลด์โลหะเท่านั้น ไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลในสกรีนตัวนำและสกรีนฉนวน

3.2.6 วัสดุประกอบอื่น ๆ

สายเคเบิลบางประเภทอาจมีวัสดุเพิ่มเติมดังนี้

ก) เทปกันน้ำ (ถ้ามี) ใช้ป้องกันน้ำซึมเข้าไปตามชีลด์โลหะในสภาพแวดล้อมที่น้ำอาจเข้าไปในสายเคเบิลได้ เช่น เคเบิลที่วางในทะเล, เคเบิลที่ฝังในดินโดยตรงในบริเวณที่มีฝนตกชุก ฯลฯ เทปกันน้ำจะช่วยป้องกันไม่ให้น้ำกระจายออกไปไกลจากจุดที่น้ำซึมเข้าไปในเปลือกสายเคเบิล เพราะเมื่อโดนน้ำหรือความชื้น เทปกันน้ำจะบวมขึ้นปิดช่องว่างต่าง ๆ ทั้งหมด ทำให้การซ่อมสายเคเบิลในจุดนี้ทำได้สะดวกเพราะใช้สายเคเบิลใหม่ที่มีความยาวไม่มากนัก

ข) ผ้ารัดชีลด์ ใช้รัดชีลด์โลหะให้แน่นในกรณีที่เป็นสายเคเบิลแกนเดียว

ค) ปลอกโลหะ (metallic sheath) เราใช้ปลอกโลหะทั้งในการป้องกันน้ำสัมผัสกับเนื้อฉนวน และในบริเวณที่มีการกัดกร่อนสูง, อาจเกิดไฟไหม้, อาจเกิดการระเบิด ฯลฯ เช่น ปั๊มน้ำมัน/ก๊าซ, โรงงานผลิตน้ำมัน/ก๊าซ/สารเคมี, คลังแสง/โรงงานผลิตวัตถุระเบิด ฯลฯ โดยวัสดุที่ใช้ทำปลอกโลหะในปัจจุบันมีอยู่ 2 ประเภท คือ ตะกั่วและอะลูมิเนียม ซึ่งมีคุณสมบัติดังแสดงในตารางที่ 3.7 [Siemens, 1990]

ตารางที่ 3.7 คุณสมบัติของตะกั่วและอะลูมิเนียมที่ใช้ทำปลอกโลหะ

คุณสมบัติ	Kb-Pb	Pb alloy	Al
ความหนาแน่น [g/cm^3]	11.34	11.34	2.7
ความทนแรงดึง [N/mm^2]	13-18	16-26	55-65
ความยาวก่อนขาด [%]	140-150	125-135	125-135
ความแข็ง Brinell	4-5	5.0-6.5	16-18
จุดหลอมเหลว [$^\circ$C]	327	327	658
ความต้านทานจำเพาะ @20 $^\circ$C [Ω·m]	$21.4 \cdot 10^{-6}$	$20.65 \cdot 10^{-6}$	$2.84 \cdot 10^{-6}$
ความนำความร้อน [(W/m)/K]	34.8	35.3	218
ความจุความร้อนจำเพาะ [(J/m^3)/K]	$1.45 \cdot 10^6$	$1.31 \cdot 10^6$	$2.5 \cdot 10^6$

ตะกั่วหนักแต่นิ่มจึงต้องการทักษะสูงในการผลิต/ประกอบ และสึกกร่อนได้ง่ายใน *ดินที่เป็นด่าง* (alkaline soil) บางครั้งเราจึงใช้เทปที่ทำจากบิทูมินัสเคลือบไว้ นอกจากนั้นตะกั่วยัง *ทนการสั่นสะเทือนได้ไม่ดี* (fatigue) สายเคเบิลที่มีปลอกทำจากตะกั่วซึ่งวางบนสะพาน, ข้างทางรถไฟ ฯลฯ จึงต้องผสม *เทลลูเรียม* (Tellurium, Te) ไว้

อะลูมิเนียมมีเสถียรภาพและนำไฟฟ้าได้ดีกว่าตะกั่วจึงทำให้ป้องกันสนามไฟฟ้าและสัญญาณรบกวนที่แพร่ออกจากสายเคเบิลได้ดีกว่า และเนื่องจากมีความหนากว่าจึงทนการสั่นสะเทือนได้ดีกว่าตะกั่ว

นอกจากนั้นเราอาจใช้ปลอกอะลูมิเนียมเป็น *สายกลาง-ดินป้องกัน* (protective earth-neutral, PEN) ในระบบ 3 เฟส 4 สายได้ด้วย แต่ปลอกโลหะต้องมีพื้นที่หน้าตัดมากพอเพื่อให้มีความนำไฟฟ้ามากกว่าสาย PEN ที่ต้องการ

สำหรับสายเคเบิลแกนเดี่ยวก็จะมี

ง) เกราะ (armour) อาจมีหรือไม่มีก็ได้ขึ้นอยู่กับวิธีวางสายเคเบิล ถ้าวางสายเคเบิลในท่อหรือในรางซึ่งอาจเป็นรางเหล็กหรือคอนกรีต สายเคเบิลมักไม่มีเกราะ แต่ถ้า *ฝังสายเคเบิลในดินโดยตรง* (direct bury) ก็มักมีเกราะทำหน้าที่ป้องกันแรงทางกล เช่น จอบ/เสียม, รถขุดดิน, ฯลฯ เกราะมักทำจาก *ลวดเหล็กชุบสังกะสี* (galvanized steel wire, GSW) หรือ *ลวดเหล็กแบน* (steel tape armour, STA) ตีเกลียว, ทองแดงหรือทองแดงเคลือบ หรืออะลูมิเนียม

จ) เปลือกพลาสติก (oversheath หรือ jacket) ทำหน้าที่หุ้มส่วนประกอบทุกอย่างข้างต้นให้แน่นเป็นชิ้นเดียวและป้องกันการสึกกร่อนของสายเคเบิลจากสภาพความเป็นกรดหรือด่างของสิ่งแวดล้อมรอบๆ สายเคเบิล และยังป้องกันแรงกลเบาๆ เช่นการกระแทกหรือการลากสายขณะที่วางสายเคเบิล

เปลือกมักมีสีดำโดยทำจาก PVC, PE หรือพอลิเมอร์ โดยเรามักใช้สายเคเบิลที่มีเปลือกทำจาก PE ในกรณีที่วางสายในท่อหรือฝังดินโดยตรงเพราะ PE ไม่ค่อยดูดน้ำ ส่วนสายเคเบิลที่มีเปลือกทำจาก PVC มักใช้ในสถานีไฟฟ้าหรือในห้องสายเคเบิล -บางครั้งอาจมีสีอื่น เช่น สีแดงหรือสีส้ม ซึ่งต้องระวังในการสัมผัสเพราะผู้ผลิตอาจใส่สารป้องกันสัตว์ เช่น หนูหรือปลวกแทะสายเคเบิล โดยผสมยาฆ่าแมลง เช่น aldrin, dieldrin, lindane หรือ naphthenates ลงในเนื้อพลาสติก แต่ในปัจจุบันก็ต้องระวังในการใช้เพราะสารเหล่านี้จะไปทำลายสภาพแวดล้อม (ดูสารป้องกันที่ไม่ให้ใช้ในข้อ 14 ของ [IEC60502-2, 2514])- และอย่างน้อยที่สุดต้องพิมพ์ชื่อสายเคเบิลซึ่งผู้ผลิตตั้งขึ้นเพื่อใช้เรียกสายเคเบิลบนเปลือกของสายเคเบิล

สำหรับสายเคเบิล 3 แกน ก็นำสายเคเบิลแกนเดี่ยวที่หุ้มชีลด์แล้วจำนวน 3 เส้น มาตีเป็นเกลียวแล้วใส่ตัวอุดช่องว่างเพื่อให้สายเคเบิลทั้ง 3 เส้น มีลักษณะเป็นทรงกระบอก

ง) พลาสติกหุ้ม ทำหน้าที่รัดสายเคเบิลและตัวอุดช่องว่างเข้าด้วยกันให้แน่น

จ) เกราะ อาจมีหรือไม่ก็ได้ดังที่อธิบายมาแล้ว

ฉ) เปลือกพลาสติก ทำหน้าที่ดังที่อธิบายมาแล้ว

จากนั้นก็ม้วนเข้าล้อสายไฟ (reel หรือ drum) เพื่อรอทำการทดสอบประจำก่อนนำออกจำหน่ายต่อไป

เกร็ดความรู้ 3.3 ตัวเลข 3 ชุดที่พิมพ์บนสายเคเบิลแกนเดี่ยวหรือ 3 แกน หมายถึงอะไร?

IEC ระบุให้ผู้ผลิตพิมพ์ตัวเลข 3 ชุด บนเปลือกสายเคเบิลทุกเส้น ดังนี้

$$U_0/U(U_m)$$

เมื่อ U_0 คือ พิกัดความทนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับระหว่างตัวนำกับชีลด์โลหะ U คือ แรงดันของระบบไฟฟ้า และ U_m คือ แรงดันสูงสุดของอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบ ที่นำสายเคเบิลไปใช้ เช่น

a) 12/20 (24) หมายถึงสายเคเบิลในระบบจำหน่ายที่มีแรงดันไฟฟ้าสูงสุด 24 kV, พิกัดแรงดันของสาย 12 kV และแรงดันใช้งานของระบบจำหน่ายเท่ากับ 20 kV (การไฟฟ้านครหลวงใช้ในระบบ 24 kV ส่วนการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคใช้ในระบบ 22 kV)

b) 64/115(123) หมายถึงสายเคเบิลในระบบส่งมีแรงดันไฟฟ้าสูงสุด 123 kV, พิกัดแรงดันของสาย 64 kV และแรงดันใช้งานของระบบส่งไฟฟ้าเท่ากับ 115 kV (การไฟฟ้าทั้ง 3 แห่งใช้ในระบบ 115 kV)

c) 127/230(245) หมายถึงสายเคเบิลในระบบส่งมีแรงดันไฟฟ้าสูงสุด 245 kV, พิกัดแรงดันของสาย 127 kV และแรงดันใช้งานของระบบเส่งไฟฟ้าเท่ากับ 245 kV (การไฟฟ้านครหลวงและการไฟฟ้าฝ่ายผลิต ใช้ในระบบ 230 kV)

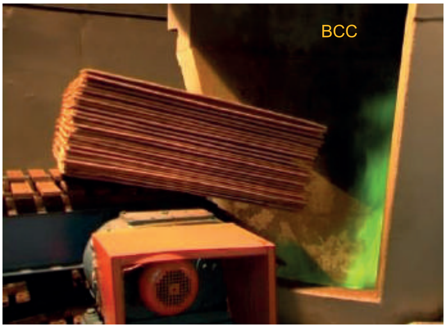
โปรดสังเกตว่า U_0 จะมีค่าประมาณ $U/\sqrt{3}$ และสำหรับระบบจำหน่าย U_m จะมีค่าเป็นสองเท่าของ U_0 และแรงดันกระแสสลับที่ใช้ในการทดสอบสายเคเบิลจะเป็นมีค่าเป็นจำนวนเท่าของ U_0 เสมอ

3.3 ขั้นตอนการผลิตสายเคเบิล

ขั้นตอนต่างๆ ในหัวข้อนี้ได้รับความอนุเคราะห์คำอธิบายและรูปต่างๆ จากบริษัท สายไฟฟ้าบางกอกเคเบิ้ล จำกัด ซึ่งต่อไปนี้จะเรียกว่า BCC

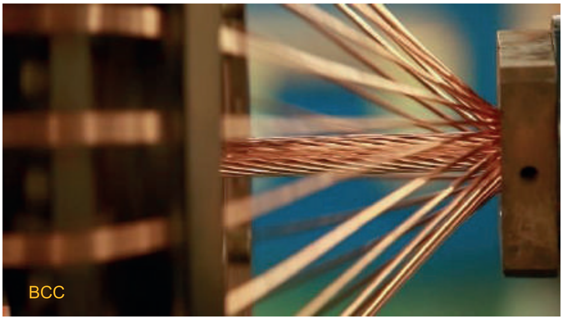
3.3.1 การทำตัวนำ

เริ่มด้วยการนำแผ่นทองแดงบริสุทธิ 99.99% ไปหลอมที่อุณหภูมิ 1,200 °C แล้วขึ้นรูปเป็นลวดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 mm จากนั้นก็นำไปรีดเป็นขั้นๆ ให้ลวดมีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลงๆ จนได้ขนาดตามที่ต้องการ แล้วนำลวดหลายๆ เส้นดังกล่าวไปตีเกลียวเข้าด้วยกัน เพื่อเพิ่มพื้นที่หน้าตัดให้เป็นตัวนำที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตามที่ต้องการอีกครั้งหนึ่ง -บางครั้งจะตีเทปกันน้ำไปพร้อมกัน- ดังที่แสดงในรูปที่ 3.8



ก) หลอมทองแดงที่อุณหภูมิ 1,200 °C

ข) ขึ้นรูปเป็นลวด ∅8 mm



ค) ตีเกลียวลวดให้เป็นตัวนำที่มีพื้นที่หน้าตัดตามที่ต้องการ

รูปที่ 3.8 การทำตัวนำ

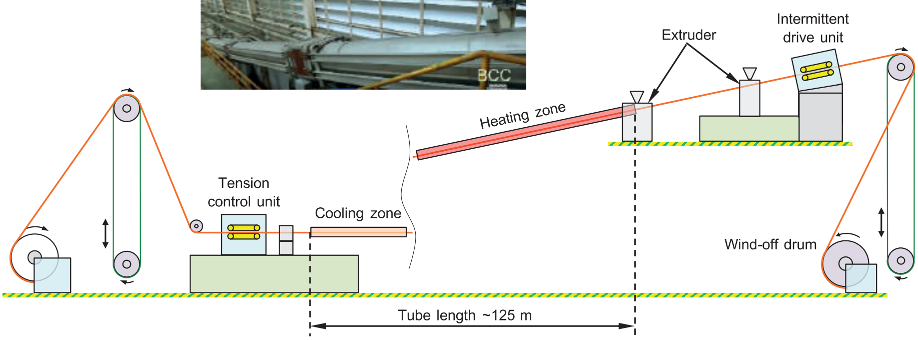
3.3.2 หุ้มฉนวนและสารกึ่งตัวนำ

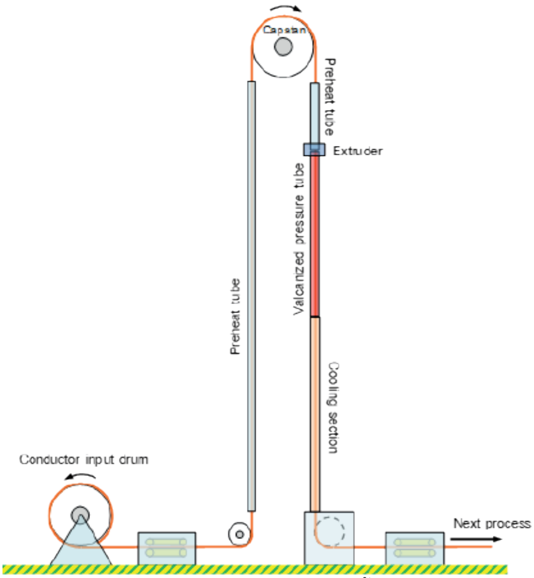
ในขั้นตอนนี้ [Siemens, 1990] ซึ่งมักเรียกว่า *การบ่มความร้อนแบบต่อเนื่อง* (continuous vulcanization, CV) เราจะหุ้มตัวนำด้วย PE ที่ผสมกับเปอร์ออกไซด์ (peroxide, มักใช้ dicumyl peroxide) ที่อุณหภูมิ ~130 °C -ต่ำกว่าอุณหภูมิที่เปอร์ออกไซด์แตกตัว- แล้วอัดไปตามท่อที่ยาวประมาณ 125 m โดยท่อดังกล่าวอาจวางในแนวเอียงซึ่งเป็น *การบ่มความร้อนแบบคาเทอนารี* (continuous catenary vulcanization, CCV) หรือ *การบ่มความร้อนแนวตั้ง* (vertical catenary vulcanization, VCV) ดังแสดงในรูปที่ 3.9

ในบางครั้งขณะที่หุ้มตัวนำ เราอาจหุ้มสกรีนตัวนำและสกรีนฉนวนไปพร้อมกันด้วยหัวฉีด (extruder) พิเศษ เพื่อให้สกรีนและฉนวนแนบกันสนิทโดยไม่มีช่องว่าง

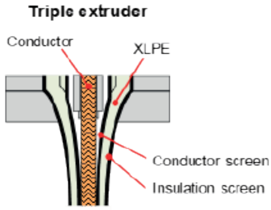
ภายในท่ออาจมี ไอน้ำอิ่มตัวที่มีความดัน 16-22 bar ที่อุณหภูมิ 200-220 °C ซึ่งเป็น กระบวนการอบแบบเปียก (wet-cured precess) หรือ ก๊าซร้อนอุณหภูมิสูงที่มีความดัน 5-10 bar ซึ่งเป็น กระบวนการอบแบบแห้ง (dry-cured precess) จึงทำให้เปอร์ออกไซด์แตกตัวและประสาน PE เป็นร่างแห จากนั้นทำให้อุณหภูมิเย็นลงทันทีในท่อเดียวกันที่มีความยาว 25-50 m เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดช่องว่างในเนื้อฉนวน

ก) การบ่มความร้อนแบบคาเทอนารี





ข) การบ่มความร้อนแนวตั้ง

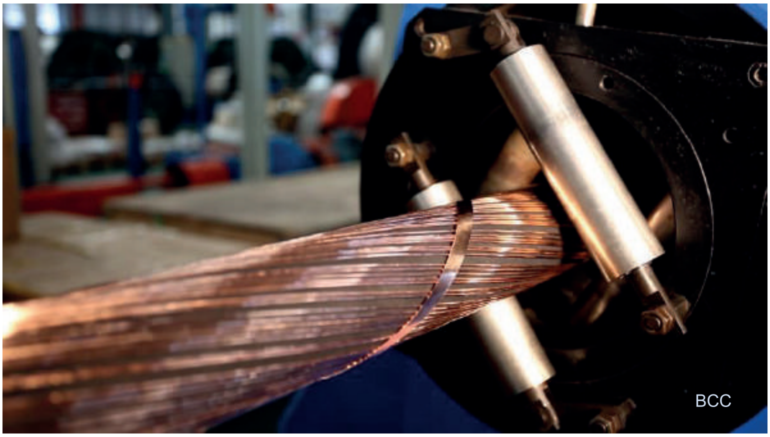


ค) หัวฉีดหุ้มฉนวนพร้อมสกรีน

รูปที่ 3.9 การบ่มความร้อนเพื่อเปลี่ยนโครงสร้างโมเลกุลของ PE ไปเป็น XLPE

3.3.3 หุ้มชีลด์โลหะ

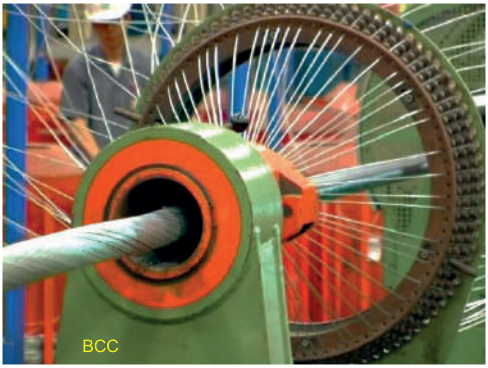
จากนั้นใช้ลวดทองแดง 20-80 เส้น ตีเกลียวพันทับสกรีนฉนวน แล้วใช้เทปทองแดงพันทับห่างๆ อีกครั้งเพื่อรัดชีลด์โลหะให้แนบกับสกรีนดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 การหุ้มชีลด์โลหะรอบสกรีนฉนวนของสาย XLPE

3.3.4 หุ้มเกราะ (ถ้ามี)

สายเคเบิลที่ฝังในดินโดยตรงมักจะมีเกราะเพื่อป้องกันแรงทางกลที่อาจมากระทบสายเคเบิลจากภายนอก



รูปที่ 3.11 การหุ้มเกราะเพื่อป้องกันแรงทางกลที่อาจมากระทบสายเคเบิล

3.3.5 หุ้มเปลือกพลาสติก

รูปที่ 3.12 หุ้มเปลือกพลาสติกและพิมพ์ข้อมูลต่าง ๆ ของสายเคเบิล (ในรูปเป็นสายเคเบิลที่ใช้ในระบบ 115 kV)

3.3.6 พันสายเคเบิลเข้าล้อสายไฟ

ขั้นสุดท้ายก็พันเข้าล้อสายไฟ (drum) เพื่อส่งให้ลูกค้า

ก) ล้อสายเคเบิลที่วางในทะเล ข) ล้อสายเคเบิลฝังใต้ดินหรือร้อยในท่อ

รูปที่ 3.13 ล้อสายเคเบิลที่พร้อมส่งให้ลูกค้า

3.4 พารามิเตอร์ของสายเคเบิล

พารามิเตอร์ของสายเคเบิลประกอบไปด้วย ความต้านทาน R, ความต้านทานฉนวน R_{INS} , -เป็นส่วนกลับของค่าความนำไฟฟ้า G-, ความเหนี่ยวนำ L และความจุไฟฟ้า C

3.4.1 ความต้านทานตัวนำ *R*

ความต้านทานกระแสตรงของตัวนำในสายเคเบิลขึ้นกับความต้านทานจำเพาะของวัสดุ และ*สิ่งเจือปน* (impurity) ในวัสดุ การหาความต้านทานของสายไฟตีเกลียวค่อนข้างซับซ้อนดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 สายส่งไฟฟ้าแรงสูงเหนือพื้นดิน โดยความต้านทานกระแสตรง R_T ที่อุณหภูมิ T ใดๆ หาได้จาก

$$R_T = R_{20}\left[1+\alpha_{20}\left(T-20\right)\right] \quad \Omega \tag{3.5}$$

เมื่อ R_{20} คือ ความต้านทานที่อุณหภูมิ 20 ^{o}C [Ω]

α_{20} คือ สัมประสิทธิ์ความต้านทานตามอุณหภูมิลำดับที่ 1 ของวัสดุที่ 20 ^{o}C [1/ ^{o}C]

T คือ อุณหภูมิของตัวนำ โดยปกติจะคำนวณที่อุณหภูมิสูงสุดที่ฉนวนทนได้ [^{o}C]

เมื่อมีกระแสสลับไหลผ่านตัวนำ กระแสจะไหลไม่เท่ากันทั่วทั้งพื้นที่หน้าตัดของตัวนำเนื่องจากผลของปรากฏการณ์ที่ผิวและปรากฏการณ์ใกล้ชิดดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 1.5 ดังนั้นความต้านทานกระแสสลับ R_{ac} ของตัวนำจึงสูงกว่าความต้านทานกระแสตรง R_T โดยสามารถหาได้จากสมการ

$$R_{ac} = R_T\left(1+y_S+y_P\right) \tag{3.6}$$

ค่าความต้านทาน R_{ac} มีหน่วยเดียวกับความต้านทาน R_T มักแสดงในหน่วย Ω/m หรือ Ω/km

ค่า y_S เป็นแฟกเตอร์แก้ค่าปรากฏการณ์ที่ผิวหาได้จากสมการ (ค่า y_S ที่คำนวณได้มีความแม่นยำเมื่อ x_S มีค่าไม่เกิน 2.8)

$$y_S = \frac{x_S^{\,4}}{192+0.8x_S^{\,4}}; \quad x_S = k_S\cdot\frac{8\pi f}{R_T}\cdot 10^{-7}$$

เมื่อ f เป็นความถี่ของระบบ [Hz] และ k_S เป็นค่าคงที่ขึ้นกับประเภทของสายเคเบิล ดังแสดงในตารางที่ 3.8 [IEC60287-1-1, 2006]

ตารางที่ 3.8 ค่า k_S และ k_P ที่ได้จากการทดลอง เพื่อแก้ค่าปรากฏการที่ผิวและปรากฏการณ์ใกล้ชิด

Type of conductor	Dried and impregnated?	k_S	k_P
Copper			
Round, stranded	Yes	1	0.8
	No	1	1
Round, segmental*		0.435	0.37
Sector-shaped	Yes	1	0.8
	No	1	1
Aluminium			
Round, stranded	Either	1	**
Round, 4 segment	Either	0.28	
Round, 5 segment	Either	0.19	
Round, 6 segment	Either	0.12	

* สำหรับ 4 segment (มีหรือไม่มีท่อน้ำมัน) พื้นที่หน้าตัด $\leq$ 1600 mm^2

** ยังไม่มีผลจากการทดลอง แต่สำหรับสายอะลูมิเนียมตีเกลียว แนะนำให้ใช้ค่าของสายทองแดงที่มีลักษณะคล้ายกัน

ส่วนค่า y_P เป็นแฟกเตอร์แก้ค่าปรากฏการณ์ใกล้ชิดสำหรับตัวนำกลม หาได้จากสมการ

$$y_P = A + \left(\frac{2r}{D}\right)^2 \left[0.312\left(\frac{2r}{D}\right)^2 + \frac{1.18}{A+0.27}\right] \tag{3.7}$$

เมื่อ

$$A = \frac{x_P^{\ 4}}{192+0.8x_P^{\ 4}}; \quad x_P = k_P \cdot \frac{8\pi f}{R_T} \cdot 10^{-7}$$

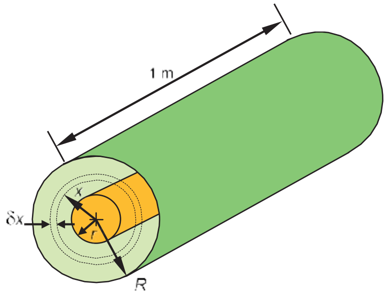
โดยที่ r เป็นรัศมีของตัวนำและ และ D เป็นระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของตัวนำที่มีหน่วยเดียวกัน ส่วน k_P เป็นค่าคงที่ขึ้นกับประเภทของสายเคเบิล ดังแสดงในตารางที่ 3.8

3.4.2 ความต้านทานฉนวน R_{INS}

สำหรับสายส่งไฟฟ้าเหนือพื้นดิน เราได้ทราบแล้วว่าระบบส่งกำลังไฟฟ้าใช้อากาศเป็นฉนวนระหว่างสายเฟสกับสายเฟสและสายเฟสกับกราวน์ ซึ่งอากาศเป็นฉนวนที่ดีมาก ดังนั้นค่าความนำไฟฟ้าต่อลงดิน G จึงน้อยมากและละเลยได้

ส่วนในกรณีของสายเคเบิลนั้น ฉนวนที่คั่นระหว่างตัวนำกับเปลือกโลหะที่ต่อลงดินจะมีความต้านทาน R_{INS} (G มีค่าเท่ากับ $1/R_{INS}$) อยู่ค่าหนึ่ง ซึ่งแม้จะมีค่าสูงมาก แต่ในบางกรณีเราก็ไม่อาจสามารถละเลยได้

ค่า R_{INS} สามารถหาได้จากโครงสร้างของสายเคเบิลที่แสดงในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 ความต้านทานฉนวน R_{INS} ของสายเคเบิล

พื้นที่ผิวของฉนวน A_X ที่มีความหนา δx และห่าง x จากจุดศูนย์กลางของตัวนำหาได้จากสมการ

$$A_X = 2\pi x \cdot \ell$$

ดังนั้นความต้านทานฉนวนของวงแหวนฉนวนที่มีความหนา δx ที่ยาว 1 m จึงมีค่าเท่ากับ

$$R'_{ins,\delta x} = \frac{\rho \cdot \delta x}{A_X} = \frac{\rho \cdot \delta x}{2\pi x} \quad \Omega \cdot m$$

ความต้านทานฉนวนที่ยาว 1 m ทั้งหมด จึงมีค่า

$$R'_{ins} = \frac{\rho}{2\pi}\int_r^R \frac{\delta x}{x} dx = \frac{\rho}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{R}{r}\right) \tag{3.8}$$

โดยความต้านทานจำเพาะของฉนวน ρ_T ที่อุณหภูมิ T °C ใดๆ สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\rho_T = \rho_{20} \cdot e^{-\alpha_{20} T}$$

เมื่อ ρ_{20} เป็นความต้านทานจำเพาะของฉนวนที่อุณหภูมิ 20 °C

α_{20} เป็นสัมประสิทธิ์ความต้านทานของฉนวนที่อุณหภูมิ 20 °C [1/°C]

ดังนั้นความต้านทานฉนวนของสายเคเบิลที่มีความยาว ℓ จึงมีค่าเท่ากับ

$$R_{ins} = \frac{R'_{ins}}{\ell} \quad \Omega \tag{3.9}$$

3.4.3 ความเหนี่ยวนำ *L*

ความเหนี่ยวนำของสายเคเบิลขึ้นอยู่กับ รัศมีของตัวนำ, ลักษณะการตีเกลียว, และระยะห่างระหว่างสายเคเบิล ความเหนี่ยวนำต่อแกน (core) ของสายเคเบิลสามแกน หรือความเหนี่ยวนำของสายเคเบิลแกนเดียว 3 เส้น สามารถหาได้จากสมการ

$$L = 0.2 \cdot \ln\left(\frac{S}{r}\right) + K \quad [mH/km] \tag{3.10}$$

เมื่อ r = รัศมีของตัวนำ [mm]

S = ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของตัวนำสำหรับ การวางสายเคเบิลแบบสามเหลี่ยม (trefoil cable lay) [mm]

= 1.26 เท่าของระยะระหว่างเฟสสำหรับ การวางสายเบิลแนวนอน (flat cable lay) [mm]

K = ค่าคงที่ขึ้นกับลักษณะการตีเกลียว ดังแสดงในตารางที่ 3.9 [IEC60287-1-1, 2006]

ตารางที่ 3.9 ค่าคงที่ *K* ที่ขึ้นอยู่กับลักษณะการตีเกลียวตัวนำ

จำนวนลวดในตัวนำ	*K* @50Hz
3	0.0778
7	0.0642
19	0.0554
37	0.0528
$\geq$ 61	0.0514
Hollow-core conductor, 12 mm duct	0.0383

ในกรณีของสาย 2 แกนและ 3 แกน ให้คูณค่าความเหนี่ยวนำที่คำนวณได้ด้วยแฟกเตอร์ 1.02 เมื่อตัวนำมีลักษณะกลม และคูณด้วยแฟกเตอร์ 0.97 สำหรับสาย 3 แกนที่ตัวนำรูปไข่ (oval conductor)

จากความเหนี่ยวนำที่คำนวณได้ เราสามารถหารีแอกแตนซ์เหนี่ยวนำ ที่ความถี่ *f* ได้จากสมการ

$$X_L = 2\pi f \cdot L \cdot 10^{-3} \quad [\Omega/\text{km}] \tag{3.11}$$

ดังนั้นอิมพีแดนซ์อนุกรมของสายเคเบิลจึงหาได้จาก

$$Z = \sqrt{R_{ac}^{\ 2} + X_L^{\ 2}} \quad [\Omega/\text{km}] \tag{3.12}$$

3.4.4 ความจุไฟฟ้า *C*

สายเคเบิลแกนเดียวที่ใช้ในระบบส่งและระบบจำหน่ายมักมีชีลด์โลหะที่ต่อลงกราวด์ ดังนั้นสนามไฟฟ้าในเนื้อฉนวนจึงมีทิศทางตามแนวรัศมีและถูกจำกัดไว้ด้วยชีลด์โลหะ

ความจุไฟฟ้าต่อหนึ่งความยาวของสายเคเบิลจึงหาได้จากสมการ

$$C = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r}{\ln(R/r)} = \frac{\varepsilon_r}{18 \cdot \ln(R/r)} \quad [\mu\text{F/km}] \tag{3.13}$$

เมื่อ ε_0 = เปอร์มิตติวิตี้ของสุญญากาศ มีค่าเท่ากับ $8.854 \cdot 10^{-12}$ [F/m]

ε_r = เปอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิลในตารางที่ 3.10 [IEC60287-1-1, 2006]

R = รัศมีนอกของฉนวน (ไม่รวม insulation screen ถ้ามี) [mm]

r = รัศมีของตัวนำ (รวม conductor screen ถ้ามี) [mm]

ตารางที่ 3.10 ค่าเปอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์ของฉนวน ε_r

Type of cable	ε_r	tan δ
Impregnated paper	3.4-3.6	0.003-0.005
EPR	3	0.005-0.020
PVC	8	0.1
PE (HD and LD)	2.3	0.001
XLPE (unfilled)	2.5	0.001-0.004
XLPE (filled)	3	0.005
PPL	2.8	0.0014

3.5 พิกัดกระแสของสายเคเบิล

เมื่อเคเบิลจ่ายกระแสให้โหลดจะเกิดกำลังสูญเสียในรูปของความร้อนขึ้น ความร้อนที่เกิดจากตัวนำและจากเนื้อฉนวนเองจะระบายผ่านฉนวนออกไปยัง ปลอก/ชีลด์โลหะ (metallic sheath/screen) ที่ปลอก/ชีลด์โลหะเองก็มีความร้อนเกิดขึ้นเพราะมีกระแสเหนี่ยวนำและกระแสไหลวนในปลอก/ชีลด์โลหะ ความร้อนทั้งหมดจะระบายผ่านเปลือกพลาสติกชั้นนอกของเคเบิลไปสู่สภาพแวดล้อมภายนอกเคเบิล -ถ้าเคเบิลมีเกราะหรือร้อยเคเบิลในท่อเหล็กก็จะมีความร้อนเกิดขึ้นที่ส่วนเหล่านี้ด้วย-

ดังนั้นความร้อนที่เกิดขึ้นจึงเป็นตัวกำหนดความสามารถในการจ่ายกระแสของเคเบิล

3.5.1 กำลังสูญเสียในสายเคเบิล

3.5.1.1 กำลังสูญเสียในตัวนำ

กำลังสูญเสียในตัวนำ (Conductor loss) W_{CON} สามารถคำนวณได้จากสมการ

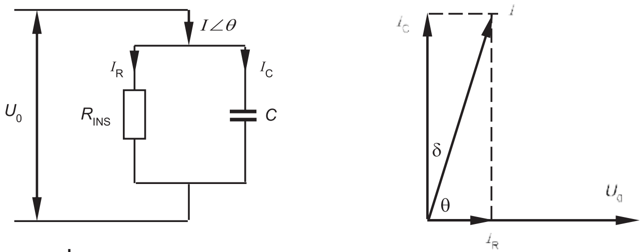
$$W_{CON} = I^2 R_{ac} \quad \text{[W/m]} \tag{3.14}$$

เมื่อ I คือ กระแสที่ไหลผ่านตัวนำ [A] และ

R_{ac} คือ ความต้านทานกระแสสลับของตัวนำ [Ω/m] ซึ่งมักคำนวณที่อุณหภูมิสูงสุดที่ฉนวนทนได้

3.5.1.2 กำลังสูญเสียในเนื้อฉนวน

วงจรสมมูลของฉนวนแสดงไว้ในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 วงจรสมมูลและเวกเตอร์ไดอะแกรมของกำลังสูญเสียในฉนวน

กำลังสูญเสียของฉนวน (dielectric loss) หาได้จากสมการ

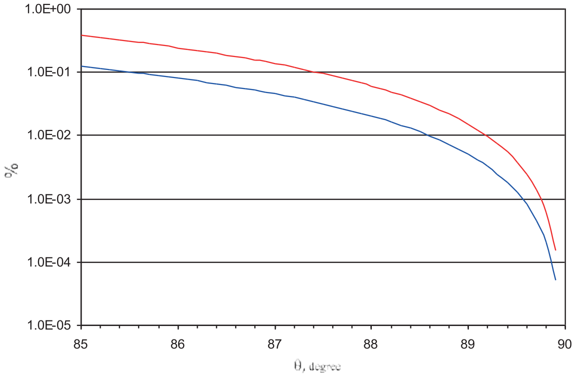
$$W_{INS} = U_0 I \cdot \cos\theta \quad \text{W} \tag{3.15}$$

แต่เมื่อมุม θ เข้าใกล้ 90° ค่า I จะมีค่าใกล้เคียงกับ I_C ทำให้ค่า δ, tan δ และ cos θ มีค่าใกล้เคียงกันด้วย ดังแสดงในรูปที่ 3.16 โดยกราฟเส้นสีแดงแสดงความแตกต่างระหว่าง tan δ กับ cos θ เป็น % ส่วนกราฟเส้นสีน้ำเงินแสดงความแตกต่างระหว่าง δ กับ cos θ เป็น % เช่นกัน ซึ่งจะเห็นว่าแตกต่างกันน้อยมากถ้า θ เข้าใกล้ 90° บางครั้ง IEEE จึงเรียก tan δ ว่าเป็น ตัวประกอบกำลังของฉนวน (dielectric power factor) หรือ มุมกำลังสูญเสียของฉนวน (dielectric loss angle: DLA)

กำลังสูญเสียของฉนวนเคเบิลแกนเดี่ยว 1 เส้น จากสมการ

$$W_{INS} = 2\pi f C U_0^2 \cdot \tan\delta \quad \text{[W/m]} \tag{3.16}$$

เมื่อ f เป็นความถี่ของระบบ [Hz], C เป็นความจุไฟฟ้าของสายเคเบิล [μF/m] และ U_0 เป็นแรงดันเฟสของระบบ [kV]



รูปที่ 3.16 กราฟแสดงความแตกต่างระหว่าง tan δ กับ cos θ (สีแดง) และ δ กับ cos θ (สีน้ำเงิน)

3.5.1.3 กำลังสูญเสียในปลอก/ชีลด์โลหะ

เมื่อมีกระแสไหลผ่านตัวนำจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นเสมอ ในกรณีของสายเคเบิลจะทำให้เกิดกำลังสูญเสียในปลอก/ชีลด์โลหะอยู่ 2 ประเภท คือ กระแสไหลวนและกระแสเหนี่ยวนำ ดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 1 หัวข้อที่ 1.5.3

สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากกระแสที่ไหลผ่านตัวนำจะตัดผ่านวงรอบปิดที่เป็นตัวนำ จึงเกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำจากกฎของฟาราเดย์ -บางครั้งเรียกว่า transformer action- จึงเกิดกระแสเหนี่ยวนำไหลในวงรอบปิด และเกิดกำลังสูญเสียในเนื้อโลหะที่ทำปลอก/ชีลด์โลหะ ถ้าต่อปลอก/ชีลด์โลหะลงกราวน์ที่ปลายสายเคเบิลทั้งสองด้าน

[IEC60287-1-1, 2006] ให้สมการคำนวณกำลังสูญเสียในปลอก/ชีลด์ λ_1 ที่คิดเป็น % ของกำลังสูญเสียทั้งหมดในตัวนำดังนี้

$$\lambda_1 = \lambda_1' + \lambda_1''$$

เมื่อ λ_1' เป็นกำลังสูญเสียเนื่องจากกระแสเหนี่ยวนำ และ

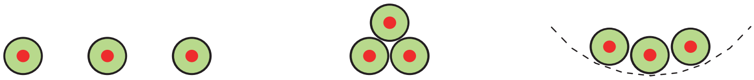
λ_1'' เป็นกำลังสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน

ดังนั้นกำลังสูญเสียในปลอก/ชีลด์โลหะ W_{SC} จึงหาได้จากสมการ

$$W_{SC} = \lambda_1 \cdot W_{CON} \tag{3.17}$$

และโปรดสังเกตว่าค่า λ_1 อาจมีหรือไม่มีกำลังสูญเสียเนื่องจากกระแสเหนี่ยวนำก็ได้ ขึ้นกับลักษณะการต่อปลอก/ชีลด์โลหะลงกราวน์ เช่น การต่อปลอก/ชีลด์ลงกราวน์ที่ปลายด้านเดียวของเคเบิลจะไม่มีกระแสเหนี่ยวนำไหลในปลอก/ชีลด์โลหะ

กำลังสูญเสียเนื่องจากกระแสเหนี่ยวนำและกระแสไหลวน สำหรับเคเบิลที่วางแบบต่างๆ ที่แสดงในรูปที่ 3.17 หาได้ดังนี้



วางแนวนอน (flat) วางแบบสามเหลี่ยม (trefoil) วางแบบเปล (cradle)

รูปที่ 3.17 การวางสายเคเบิล 3 เส้น แบบต่างๆ

1. เคเบิลแกนเดี่ยว 2 หรือ 3 เส้น วางแบบสามเหลี่ยม -ต่อปลอก/ชีลด์ถึงกันที่ปลายสายเคเบิลทั้งสองด้าน

ค่า λ_1' หาได้จากสมการ

$$\lambda_1' = \frac{R_S}{R_{ac}} \frac{1}{1+\left(\dfrac{R_S}{X}\right)^2} \qquad (3.18)$$

เมื่อ R_S = ความต้านทานของปลอก/ชีลด์โลหะต่อหนึ่งหน่วยความยาว [Ω/m] เมื่อปลอก/ชีลด์มีอุณหภูมิสูงสุด θ_{SC}

$$R_S = R_{S,20C}\left[1+\alpha_{S,20C}\left(\theta_S-20\right)\right] \ [\Omega/m]; \quad \theta_S = \theta_C - \left(I^2R_{ac}+0.5W_{INS}\right)T_1 \ [^{\circ}C]$$

$R_{S,20C}$ = ความต้านทานของปลอก/ชีลด์โลหะต่อหนึ่งหน่วยความยาวที่อุณหภูมิ 20 °C [Ω/m]

$\alpha_{S,20C}$ = สัมประสิทธิ์ความต้านทานของปลอก/ชีลด์โลหะที่ 20 °C [1/°C] (ดูตารางที่ 3.11)

ตารางที่ 3.11 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของโลหะที่มักใช้ทำของปลอก/ชีลด์โลหะของสายเคเบิล

Material	Resistivity @ 20 °C [×1E-8 Ωm]	Temperature coefficient of resistance α_{20} [1/°C]
Copper (HC, annealed)	1.724	0.0039
Lead or lead alloy	21.4	0.0040
Aluminum	2.84	0.0040
Steel	13.8	0.0045
Stainless steel	70	negligible
Bronze	3.5	0.0040

T_1 = ความต้านทานความร้อนระหว่างตัวนำกับปลอก/ชีลด์ [K·m/W]

X = รีแอกแตนซ์เหนี่ยวนำต่อหนึ่งหน่วยความยาว [Ω/m] หาได้จาก

$$X = 2\cdot10^{-7}\omega\cdot\ln\left(\frac{2S}{d}\right) \qquad (3.19)$$

S = ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางตัวนำ [mm]

d = เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของปลอก/ชีลด์มีค่าเท่ากับ $0.5\cdot(\varnothing_{in}+\varnothing_{out})$

ส่วนค่า $\lambda_1'' = 0$ ยกเว้นกรณีที่ตัวนำมีโครงสร้างแบบ segment และมีพื้นที่หน้าตัดขนาดใหญ่ (ดูข้อ 4.)

2. เคเบิลแกนเดี่ยว 3 เส้น วางแนวนอน มีการไขว้ -ต่อปลอก/ชีลด์ถึงกันที่ปลายสายเคเบิลทั้งสองด้าน

ค่า λ_1' หาได้จากสมการ

$$\lambda_1' = \frac{R_S}{R_{ac}} \frac{1}{1+\left(\dfrac{R_S}{X_1}\right)^2} \qquad (3.20)$$

เมื่อ X_1 = รีแอกแตนซ์เหนี่ยวนำต่อหนึ่งหน่วยความยาว [Ω/m] หาได้จาก

$$X_1 = 2\cdot10^{-7}\omega\ln\left(2\cdot\sqrt[3]{2}\frac{S}{d}\right) \qquad (3.21)$$

ส่วนค่า $\lambda_1'' = 0$ ยกเว้นกรณีที่ตัวนำมีโครงสร้างแบบ segment และมีพื้นที่หน้าตัดขนาดใหญ่ (ดูข้อ 4.)

3. เคเบิลแกนเดี่ยว 3 เส้น วางแนวนอน ไม่มีการไขว้ -ต่อปลอก/ชีลด์ถึงกันที่ปลายสายเคเบิลทั้งสองด้าน

ในกรณีนี้กำลังสูญเสียเนื่องจากกระแสเหนี่ยวนำในปลอก/ชีลด์ของเคเบิลแต่ละเส้นมีค่าไม่เท่ากัน โดยที่กำลังสูญเสียเนื่องจากกระแสเหนี่ยวนำของเคเบิลเส้นนอกที่มีเฟสล้าหลัง λ_{11}' หาได้จาก

$$\lambda_{11}' = \frac{R_S}{R_{ac}}\left[\frac{0.75P^2}{R_S^2+P^2}+\frac{0.25Q^2}{R_S^2+Q^2}+\frac{2R_SPQX_M}{\sqrt{3}\cdot\left(R_S^2+P^2\right)\cdot\left(R_S^2+Q^2\right)}\right] \qquad (3.22a)$$

กำลังสูญเสียเนื่องจากกระแสเหนี่ยวนำของเคเบิลเส้นนอกอีกเส้นหนึ่ง λ_{12}' หาได้จาก

$$\lambda_{12}' = \frac{R_S}{R_{ac}}\left[\frac{0.75P^2}{R_S^2+P^2}+\frac{0.25Q^2}{R_S^2+Q^2}+\frac{2R_SPQX_M}{\sqrt{3}\cdot\left(R_S^2+P^2\right)\cdot\left(R_S^2+Q^2\right)}\right] \qquad (3.22b)$$

และกำลังสูญเสียเนื่องจากกระแสเหนี่ยวนำของเคเบิลเส้นกลาง λ_{1m}' หาได้จาก

$$\lambda_{1m}' = \frac{R_S}{R_{ac}}\frac{Q^2}{R_S^2+Q^2} \qquad (3.22c)$$

โดย P และ Q หาจากสมการ

$$P = X + X_M; \quad Q = X - \frac{X_M}{3}$$

ส่วน X เป็นรีแอกแตนซ์เหนี่ยวนำต่อหนึ่งหน่วยความยาว [Ω/m] ของสายเคเบิลแกนเดี่ยวที่วางใกล้กัน หาได้จาก

$$X = 2\cdot10^{-7}\omega\ln\left(\frac{2S}{d}\right) \qquad (3.23)$$

และ X_M เป็นรีแอกแตนซ์เหนี่ยวนำร่วมต่อหนึ่งหน่วยความยาว [Ω/m] หาได้จาก

$$X_M = 2\cdot10^{-7}\omega\ln(2) \qquad (3.24)$$

ส่วนค่า $\lambda_1'' = 0$ ยกเว้นกรณีที่ตัวนำมีโครงสร้างแบบ segment และมีพื้นที่หน้าตัดขนาดใหญ่ (ดูข้อ 4.)

4. ตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ segment และมีพื้นที่หน้าตัดโต

ในกรณีที่ไม่สามารถละเลย λ_1'' ได้ ให้คูณค่าแฟกเตอร์ F ที่หาได้จากสมการต่อไปนี้ เข้ากับค่า λ_1'' ที่คำนวณได้ในข้อ 5.

$$F = \frac{4M^2N^2+(M+N)^2}{4\left(M^2+1\right)\left(N^2+1\right)} \qquad (3.25)$$

<u>เคเบิลที่วางแบบสามเหลี่ยม</u>:

$$M = N = \frac{R_S}{X} \qquad (3.26)$$

<u>เคเบิลที่วางแนวนอน</u>: (ระยะห่างเท่ากัน)

$$M = \frac{R_S}{X+X_M}; \quad N = \frac{R_S}{X-\frac{X_M}{3}} \qquad (3.27)$$

5. เคเบิลแกนเดียว -ต่อปลอก/ชีลด์ที่ปลายสายเคเบิลด้านเดียวหรือทำการ ประสานศักย์แบบไขว้ (cross-bonded)

ค่า λ_1'' หาได้จากสมการ

$$\lambda_1'' = \frac{R_S}{R_{ac}}\left[g_S\lambda_0\left(1+\Delta_1+\Delta_2\right)+\frac{\left(\beta_1t_S\right)^4}{12\cdot10^{12}}\right] \qquad (3.28)$$

โดย g_S และ β_1 หาจากสมการ

$$g_S = 1 + \left(\frac{t_S}{D_S}\right)^{1.74}\left(\beta_1 D_S \cdot 10^{-3} - 1.6\right); \quad \beta_1 = \sqrt{\frac{4\pi\omega}{\rho_S \cdot 10^7}} \tag{3.29}$$

เมื่อ ρ_1 = ความต้านทานจำเพาะของปลอก/ชีลด์โลหะ ที่อุณหภูมิของสายเคเบิล [Ω/m]

D_S = เส้นผ่านศูนย์กลางนอกของปลอก/ชีลด์ [mm]

t_S = ความหนาของปลอก/ชีลด์โลหะ [mm]

สำหรับสายเคเบิลที่มีปลอก/ชีลด์โลหะทำจากตะกั่ว ให้ใช้ค่า g_S = 1 และให้ละเลยเทอม $\frac{(\beta_1 t_S)^4}{12 \cdot 10^{12}}$ ส่วนในกรณีที่ปลอก/ชีลด์โลหะทำจากอะลูมิเนียมและมี $D_S \le 70$ mm ให้ละเลยทั้งสองเทอมที่กล่าว

สมการที่ใช้คำนวณค่า λ_0, Δ_1, และ Δ_2 มีดังนี้ ($m = \frac{\omega}{R_S} \cdot 10^{-7}$ แต่ถ้า $m \le 0.1$ ให้ละเลยค่า Δ_1 และ Δ_2)

<u>เคเบิลแกนเดี่ยว 3 เส้น วางแบบสามเหลี่ยม:</u>

$$\lambda_0 = 3\left(\frac{m^2}{1+m^2}\right)\left(\frac{d}{2S}\right)^2; \quad \Delta_1 = \left(1.14 \cdot m^{2.45} + 0.33\right)\left(\frac{d}{2S}\right)^{(0.92m+1.66)}; \quad \Delta_2 = 0$$

<u>เคเบิลแกนเดี่ยว 3 เส้น วางแนวนอน:</u>

- *เคเบิลเส้นกลาง*

$$\lambda_0 = 6\left(\frac{m^2}{1+m^2}\right)\left(\frac{d}{2S}\right)^2; \quad \Delta_1 = 0.86 \cdot m^{3.08}\left(\frac{d}{2S}\right)^{(1.4m+0.7)}; \quad \Delta_2 = 0$$

- *เคเบิลเส้นนอกที่มีเฟสนำหน้า*

$$\lambda_0 = 1.5\left(\frac{m^2}{1+m^2}\right)\left(\frac{d}{2S}\right)^2; \quad \Delta_1 = 4.7 \cdot m^{0.7}\left(\frac{d}{2S}\right)^{(0.16m+2)}; \quad \Delta_2 = 21 \cdot m^{3.3}\left(\frac{d}{2S}\right)^{(1.47m+5.06)}$$

- *เคเบิลเส้นนอกที่มีเฟสล้าหลัง*

$$\lambda_0 = 1.5\left(\frac{m^2}{1+m^2}\right)\left(\frac{d}{2S}\right)^2; \quad \Delta_1 = -\frac{0.74 \cdot (m+2) \cdot m^{0.5}}{2 + (m-0.3)^2}\left(\frac{d}{2S}\right)^{(m+1)}; \quad \Delta_2 = 0.92 \cdot m^{3.7}\left(\frac{d}{2S}\right)^{(m+2)}$$

ส่วนค่า λ_1'' = 0 เมื่อต่อเปลือกโลหะ/สกรีนที่ปลายข้างเดียว

6. เคเบิลแบบอื่นๆ

ดูได้ใน clause 2.3 ของ [IEC60287-1-1, 2006]

3.5.1.4 กำลังสูญเสียในเกราะ, อุปกรณ์เสริมความแข็งแรง และท่อเหล็ก

[IEC60287-1-1, 2006] ให้สมการคำนวณกำลังสูญเสียในเกราะ, อุปกรณ์เสริมความแข็งแรง (reinforcement) หรือท่อเหล็ก ในรูปของกำลังสูญเสียในตัวนำทุกเส้นที่เพิ่มขึ้น λ_2 ดังนี้

1. เกราะหรืออุปกรณ์เสริมความแข็งแรง -ทำจากโลหะที่ไม่เป็นแม่เหล็ก (Non-magnetic)

กำลังสูญเสียหาโดยใช้สมการที่กล่าวถึงในหัวข้อ 3.5.1.3 แต่ R_S ในสมการต่างๆ ใช้ค่าความต้านทานของปลอก/ชีลด์โลหะขนานกับความต้านทานของอุปกรณ์เสริมความแข็งแรง และค่า d ในสมการต่างๆ หาได้จาก

$$d = \sqrt{\frac{(\text{sheath diameter})^2 + (\text{reinforcement diameter})^2}{2}}$$

ซึ่งใช้ได้กับทั้งเคเบิลแกนเดี่ยวหรือหลายแกน

2. เคเบิล 3 แกน -เกราะเป็นลวดเหล็ก

เคเบิลที่มีตัวนำกลม: (ไม่ต้องแก้ความไม่สม่ำเสมอของ I ในตัวนำเมื่อพื้นที่หน้าตัด $\leq 400\ \text{mm}^2$)

$$\lambda_2 = 1.23\frac{R_A}{R_{ac}}\left(\frac{2c}{d_A}\right)^2 \frac{1}{\left(\frac{2.77 \cdot R_A \cdot 10^6}{\omega}\right)^2 + 1} \tag{3.30}$$

เมื่อ R_A = ความต้านทานของเกราะต่อหนึ่งหน่วยความยาว [Ω/m] เมื่อเกราะมีอุณหภูมิสูงสุด

d_A = รัศมีเฉลี่ยของเกราะ [mm]

c = ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางตัวนำกับจุดศูนย์กลางเคเบิล [mm]

เคเบิลที่มีตัวนำเป็นเซกเตอร์: (Sector conductor cables)

$$\lambda_2 = 0.358\frac{R_A}{R_{ac}}\left(\frac{2r_1}{d_A}\right)^2 \frac{1}{\left(\frac{2.77 \cdot R_A \cdot 10^6}{\omega}\right)^2 + 1}$$

เมื่อ r_1 เป็นรัศมีของวงกลมที่ล้อมรอบตัวนำทั้งสาม [mm]

3. เคเบิล 3 แกน -เกราะหรืออุปกรณ์เสริมความแข็งแรงเป็นเทปเหล็ก (เทปมีความหนา 0.3-1 mm)

กำลังสูญเสียฮีสเทอรีซิส: หาได้จากสมการ

$$\lambda_2' = \frac{s^2 k^2 \cdot 10^{-7}}{R_{ac} d_A \delta}$$

เมื่อ s = ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของตัวนำ [mm]

δ = ความหนาสมมูลของเกราะ [mm] มีค่าเท่ากับ $\frac{A}{\pi d_A}$

A = พื้นที่หน้าตัดของเกราะ [mm^2]

d_A = รัศมีเฉลี่ยของเกราะ [mm]

ส่วนแฟกเตอร์ k หาจากสมการ

$$k = \frac{f}{50} \cdot \frac{1}{1 + d_A / \mu\delta}$$

โดยที่ μ คือ เปอร์มีอบิลิตีสัมพัทธ์ของเทปเหล็ก โดยปกติจะใช้ค่า 300

กำลังสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน λ_2": หาได้จาก

$$\lambda_2'' = \left(\frac{f}{50}\right)^2 \frac{2.25 \cdot s^2 k^2 \delta \cdot 10^{-8}}{R_{ac} d_A}$$

ดังนั้นกำลังสูญเสียทั้งหมด λ_2 จึงเท่ากับ $\lambda_2' + \lambda_2''$

4. กำลังสูญเสียในท่อเหล็ก

สมการที่ใช้ในการหากำลังสูญเสียในท่อเหล็กมีอยู่ 2 สมการ คือ

เคเบิลที่วางชิดกันแบบสามเหลี่ยมในท่อ:

$$\lambda_2 = \left(\frac{0.0115s - 0.001485d_D}{R_{ac}}\right) \cdot 10^{-5}$$

เคเบิลที่วางแบบเปลในท่อ:

$$\lambda_2 = \left(\frac{0.00438s - 0.00226d_D}{R_{ac}} \right) \cdot 10^{-5}$$

เมื่อ s = ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของตัวนำ [mm]

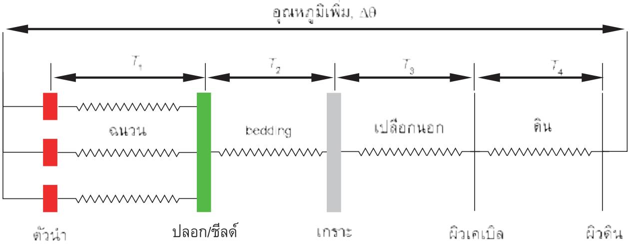
d_D = เส้นผ่านศูนย์กลางในของท่อ [mm]

ทั้ง 2 สมการใช้กับความถี่ 60 Hz สำหรับความถี่ 50 Hz ให้คูณค่าที่คำนวณได้ด้วย 0.76

3.5.2 การระบายความร้อนของสายเคเบิล

การระบายความร้อนจากตัวนำไปยังสภาวะแวดล้อมของสายเคเบิล ขึ้นกับ ความต้านทานความร้อน (thermal resistance) ของวัสดุประเภทต่างๆ ที่ใช้ทำเคเบิลรวมถึงสภาพรอบๆ เคเบิล โดย [IEC60287-2-1, 2015] แบ่งความต้านทานความร้อนของเคเบิลออกเป็น 4 ส่วน ดังแสดงในรูปที่ 3.18 คือ

- ความต้านทานความร้อนระหว่างตัวนำกับปลอก/ชีลด์ (T_1)
- ความต้านทานความร้อนระหว่างปลอก/ชีลด์กับเกราะ (T_2)
- ความต้านทานความร้อนของเปลือกนอกพลาสติก (T_3) และ
- ความต้านทานความร้อนภายนอกเคเบิล (T_4)



รูปที่ 3.18 วงจรสมมูลของสายเคเบิล 3 แกนมีปลอก/ชีลด์โลหะร่วมกัน, มีเกราะและฝังโดยตรงในดิน

โดยความต้านทานความร้อนทั้งหมดมีหน่วยเป็น [K·m/W]

สัมประสิทธิ์ความต้านทานความร้อนของวัสดุที่ใช้ทำเป็นฉนวนและเปลือกนอกได้แสดงไว้ใน ตารางที่ 3.12

ในกรณีที่มีชั้นสกรีนโลหะให้ถือว่าเทปโลหะเป็นส่วนหนึ่งของตัวนำหรือเปลือกโลหะ และให้ถือว่าชั้นสารกึ่งตัวนำเป็นส่วนหนึ่งของฉนวนในการคำนวณ

ตารางที่ 3.12 สัมประสิทธิ์ความต้านทานความร้อนของวัสดุต่างๆ ที่ใช้ทำเคเบิล

Material	Thermal resistivity, ρ_T [K·m/W]
Insulation*	
PE	3.5
XLPE	3.5
PPL	5.5
PVC ($\leq$ 3kV cable)	5.0
PVC (> 3kV cable)	6.0
EPR ($\leq$ 3kV cable)	3.5
EPR (> 3kV cable)	5.0
Rubber	5.0
Protective coverings	
Rubber sandwich protection	6.0
Polychloropoprene	5.5
PVC ($\leq$ 35kV cable)	5.0
PVC (> 35kV cable)	6.0
PE	3.5
Material for duct installations	
Concrete	1.0
Fiber	4.8
Earthenware	1.2
PVC	6.0
PE	3.5

* สมมุติว่าสารกึ่งตัวนำที่ใช้ทำสกรีนตัวนำและสกรีนฉนวนมีสัมประสิทธิ์ความต้านทานความร้อนเท่ากับฉนวนที่อยู่ติดกับสารกึ่งตัวนำ

3.5.2.1 ความต้านทานความร้อนระหว่างตัวนำกับปลอก/ชีลด์โลหะ, T_1

1. เคเบิลแกนเดียว

$$T_1 = \frac{\rho_T}{2\pi}\ln\left(1+\frac{2t_1}{d_C}\right) \tag{3.31a}$$

เมื่อ ρ_T = สัมประสิทธิ์ความต้านทานความร้อนของฉนวน [K·m/W]

d_C = เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ [mm]

t_1 = ความหนาของฉนวนระหว่างตัวนำกับปลอก/ชีลด์โลหะ [mm]

2. เคเบิล 3 แกน ที่มีปลอก/ชีลด์โลหะทำจากทองแดง

เคเบิล 3 แกน ที่มีฉนวนเป็นพลาสติกและแต่ละแกนมีปลอก/ชีลด์โลหะทำจาก *เทปทองแดง* ดู 1.

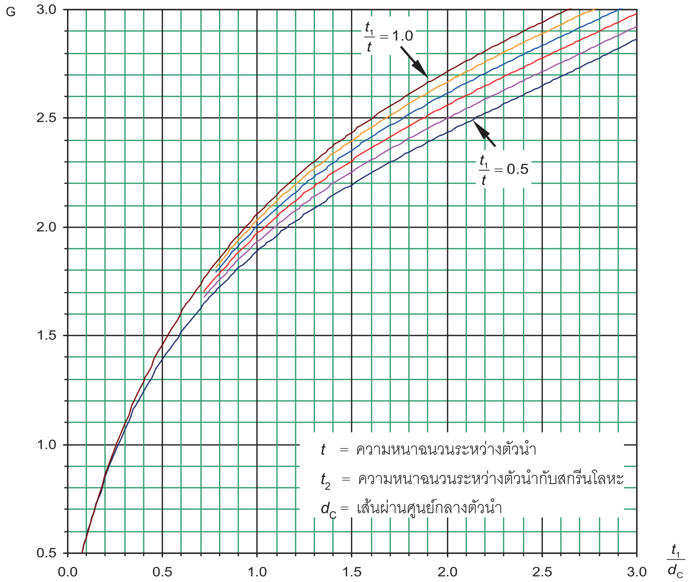
เคเบิล 3 แกน ที่มีฉนวนเป็นพลาสติกและแต่ละแกนมีปลอก/ชีลด์โลหะทำจาก *ลวดทองแดง* และเคเบิล 3 แกนที่มีปลอก/ชีลด์ร่วมกัน

$$T_1 = \frac{\rho_1}{2\pi}G + 0.031\cdot(\rho_F - \rho_1)\cdot e^{0.67\frac{t}{d_C}} \tag{3.31b}$$

เมื่อ ρ_I = สัมประสิทธิ์ความต้านทานความร้อนของฉนวน [K·m/W]

ρ_F = สัมประสิทธิ์ความต้านทานความร้อนของ filler [K·m/W] มีค่าอยู่ระหว่าง 6-13 K·m/W แนะนำให้ใช้ค่า 10 K·m/W สำหรับ filler ที่ทำจาก *พอลิพอพิลีน* (polypropylene)

G = แฟกเตอร์เรขาคณิตที่แสดงในรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 แฟกเตอร์เรขาคณิต G สำหรับเคเบิล 3 แกน ที่มีฉนวนเป็นพลาสติก แต่ละแกนมีเปลือกโลหะทำจากลวดทองแดง และ เคเบิล 3 แกนที่มีเปลือกโลหะร่วมกัน

3.5.2.2 ความต้านทานความร้อนระหว่างปลอก/ชีลด์โลหะกับเกราะ, T_2

ความต้านทานความร้อนระหว่างปลอก/ชีลด์โลหะกับเกราะ T_2 ของสายเคเบิลแกนเดียวและสายเคเบิล 3 แกน ที่มีปลอก/ชีลด์โลหะร่วมกัน หาได้จากสมการ

$$T_2 = \frac{\rho_T}{2\pi} \ln\left(1 + \frac{2t_2}{D_S}\right) \quad (3.32)$$

เมื่อ D_S = เส้นผ่านศูนย์กลางนอกของปลอก/ชีลด์โลหะ [mm]

t_2 = ความหนาของเกราะ [mm]

3.5.2.3 ความต้านทานความร้อนของเปลือกนอก, T_3

ความต้านทานความร้อนของเปลือกนอก (jacket) T_3 หาได้จากสมการ

$$T_3 = \frac{\rho_T}{2\pi} \ln\left(1 + \frac{2t_3}{D_A'}\right) \quad (3.33)$$

เมื่อ D_A' เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางนอกของเกราะ [mm] มีค่าเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางนอกของส่วนประกอบที่อยู่ติดกับเปลือกนอก (เช่น ปลอก/ชีลด์ หรือเกราะ) ในกรณีที่สายเคเบิลไม่มีเกราะให้ใช้เส้นผ่านศูนย์กลางนอกของปลอกโลหะ [mm]

t_3 เป็นความหนาของเปลือกนอก [mm]

3.5.2.4 ความต้านทานความร้อนภายนอกเคเบิล, T_4

1. เคเบิลเส้นเดียวฝังในดิน

$$T_4 = \frac{\rho_T}{2\pi}\ln\left(u+\sqrt{u^2-1}\right); \quad u=\frac{2L}{D_E} \tag{3.34}$$

เมื่อ ρ_T = สัมประสิทธิ์ความต้านทานความร้อนของดิน [K·m/W]

L = ระยะห่างระหว่างผิวดินถึงจุดศูนย์กลางเคเบิล [mm]

D_E = เส้นผ่านศูนย์กลางนอกของเคเบิล [mm]

2. เคเบิลหลายเส้นที่จ่ายกระแสเท่ากันฝังในดิน -ผิวสายเคเบิลสัมผัสกัน

เคเบิลแกนเดียว 3 เส้น วางแนวนอน มีชั้นโลหะที่ติดกับปลอก/ชีลด์โลหะซึ่งทำให้ความร้อนที่ผิวเคเบิลมีค่าสม่ำเสมอ

$$T_4 = \rho_T\left[0.475\cdot\ln(2u)-0.346\right] \quad \text{for } u \ge 5 \tag{3.35a}$$

เคเบิลแกนเดียว 3 เส้น วางแนวนอน มีชั้นโลหะที่ติดกับปลอก/ชีลด์โลหะซึ่งทำให้ความร้อนที่ผิวเคเบิลมีค่าไม่สม่ำเสมอ

$$T_4 = \rho_T\left[0.475\cdot\ln(2u)-0.142\right] \quad \text{for } u \ge 5 \tag{3.35b}$$

เคเบิลแกนเดียว 3 เส้น วางแบบสามเหลี่ยม มีปลอก/ชีลด์โลหะ

$$T_4 = \frac{1.5\rho_T}{\pi}\left[\ln(2u)-0.630\right] \tag{3.35c}$$

ในกรณีนี้ให้คูณความต้านทานความร้อนของเปลือกนอก (jacket) T_3 ด้วยแฟกเตอร์ 1.6

3. เคเบิลวางในท่อ

ความต้านทานความร้อนภายนอกเคเบิลที่วางในท่อประกอบจาก 3 ส่วน คือ

ก) ความต้านทานความร้อนของอากาศที่คั่นระหว่างผิวนอกเคเบิลกับผิวในของท่อ T_4'

ข) ความต้านทานความร้อนของท่อ T_4'' =0 ถ้าเป็นท่อโลหะ

ค) ความต้านทานความร้อนภายนอกท่อ T_4'''

ดังนั้นความต้านทานภายนอกเคเบิลจึงคำนวณจาก

$$T_4 = T_4' + T_4'' + T_4''' \tag{3.36}$$

ก) ความต้านทานความร้อนของระหว่างผิวนอกเคเบิลกับผิวในของท่อ T_4'

สำหรับสายเคเบิลที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 25-100 mm สามารถใช้สมการ

$$T_4' = \frac{\mathrm{U}}{1+0.1\cdot(\mathrm{V}+\mathrm{Y}\theta_M)D_E} \tag{3.37a}$$

เมื่อ D_E = เส้นผ่านศูนย์กลางนอกของเคเบิล [mm]

θ_M = อุณหภูมิเฉลี่ยของตัวกลางระหว่างเคเบิลกับท่อ [°C] (อาจต้องทำซ้ำไปมาเพื่อให้ถึงจุดสมดุลความร้อน)

U, V, Y = ค่าคงที่ขึ้นกับประเภทของท่อร้อยสายเคเบิล ที่แสดงในตารางที่ 3.13

ตารางที่ 3.13 ค่าคงที่ U, V, Y ที่ขึ้นกับประเภทของท่อร้อยสายเคเบิล

ลักษณะการติดตั้ง	U	V	Y
ในท่อโลหะ	5.2	1.4	0.011
ในท่อ fiber วางในอากาศ	5.2	0.83	0.006
ในท่อ fiber วางในคอนกรีต	5.2	0.91	0.010
ในท่อพลาสติก	1.87	0.312	0.0037
ในท่อดินเผา (earthenware)	1.87	0.28	0.0036

ข) ความต้านทานความร้อนของท่อเอง T_4''

$$T_4'' = \frac{1}{2\pi}\rho_T \cdot \ln\left(\frac{D_O}{D_D}\right) \tag{3.37b}$$

เมื่อ D_O = เส้นผ่านศูนย์กลางนอกของท่อ [mm]

D_D = เส้นผ่านศูนย์กลางในของท่อ [mm]

ρ_T = สัมประสิทธิ์ความต้านทานความร้อนของท่อ [K·m/W]

ค) ความต้านทานความร้อนภายนอกท่อหรือ duct bank T_4'''

สำหรับท่อที่มีคอนกรีตหุ้ม ให้คำนวณความต้านทานความร้อนภายนอกท่อโดยสมมุติให้ตัวกลางภายนอกท่อทั้งหมดมีสัมประสิทธิ์ความต้านทานความร้อนเท่ากับคอนกรีต แล้วบวกด้วยค่าแก้ (correction) เนื่องจากความแตกต่างระหว่างสัมประสิทธิ์ความต้านทานความร้อนของคอนกรีตและของดินที่ล้อมรอบคอนกรีต โดยหาได้จากสมการ

$$\text{correction} = \frac{N}{2\pi}(\rho_E - \rho_C)\cdot \ln\left(u + \sqrt{u^2 - 1}\right) \tag{3.37c}$$

เมื่อ N = จำนวนเคเบิลใน duct bank คอนกรีตที่มีกระแสไหล

ρ_E = สัมประสิทธิ์ความต้านทานความร้อนของดินรอบคอนกรีต [K·m/W]

ρ_C = สัมประสิทธิ์ความต้านทานความร้อนของคอนกรีต [K·m/W]

u = ค่าที่หาจากสมการ $u = \frac{L_G}{r_B}$

L_G = ความลึกของท่อจากศูนย์กลาง duct bank คอนกรีต [mm]

r_B = รัศมีสมมูลของ duct back คอนกรีต [mm] หาจากสมการ

$$\ln(r_B) = \frac{1}{2}\frac{x}{y}\left(\frac{4}{\pi} - \frac{x}{y}\right)\cdot \ln\left(1 + \frac{y^2}{x^2}\right) + \ln\left(\frac{x}{2}\right)$$

โดย x เป็นด้านสั้นและ y เป็นด้านยาวของ duct bank

3.5.3 พิกัดกระแส

จากความต้านทานความร้อนของส่วนต่างๆ ของเคเบิลในรูปที่ 3.18 การคำนวณพิกัดกระแสตาม [IEC60287-1-1, 2006] ในกรณีที่ดินมีความชุ่มชื้นตลอดเวลา เริ่มจากสมการของอุณหภูมิเพิ่ม ดังนี้

$$\Delta\theta = \left(I^2R_{ac} + 0.5W_{INS}\right)T_1 + \left[I^2R_{ac}\left(1+\lambda_1\right) + W_{INS}\right]\cdot nT_2 + \left[I^2R_{ac}\left(1+\lambda_1+\lambda_2\right) + W_{INS}\right]\cdot n\left(T_3+T_4\right) \quad (3.38)$$

เมื่อ I = กระแสที่ไหลในตัวนำหนึ่งเส้น [A]

$\Delta\theta$ = เป็นอุณหภูมิเพิ่ม [K]

R_{ac} = ความต้านทานกระแสสลับต่อหนึ่งหน่วยความยาวของตัวนำ [Ω/m] เมื่อตัวนำมีอุณหภูมิสูงสุด

W_{INS} = กำลังสูญเสียในเนื้อฉนวนต่อหนึ่งหน่วยความยาว [W/m]

n = จำนวนตัวนำที่มีกระแสไหลผ่าน (มีขนาดเดียวกันและมีกระแสไหลเท่ากัน)

ดังนั้นพิกัดกระแสจึงมีค่าเท่ากับ

$$I = \sqrt{\frac{\Delta\theta - W_{INS}\left[0.5\cdot T_1 + n\left(T_2+T_3+T_4\right)\right]}{R_{ac}T_1 + nR_{ac}\left(1+\lambda_1\right)T_2 + nR_{ac}\left(1+\lambda_1+\lambda_2\right)\left(T_3+T_4\right)}} \quad (3.39)$$

3.6 แรงดันเหนี่ยวนำที่เปลือกโลหะของสายเคเบิล

กำลังสูญเสียในตัวนำในข้อ 3.5.1.1 และกำลังสูญเสียในเนื้อฉนวนในข้อ 3.5.1.2 เกิดขึ้นตลอดเวลาในขณะที่เคเบิลจ่ายกระแสให้โหลดจึงไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ แต่กำลังสูญเสียในปลอก/ชีลด์โลหะในข้อ 3.5.1.3 และเกราะในข้อ 3.5.1.4 สามารถหลีกเลี่ยงได้โดยการไม่ต่อเปลือกโลหะ -ในที่นี้คือปลอก/ชีลด์โลหะและเกราะลงกราวน์- หรือต่อปลอก/ชีลด์โลหะและเกราะลงกราวน์ที่ปลายสายเคเบิลเพียงด้านเดียว

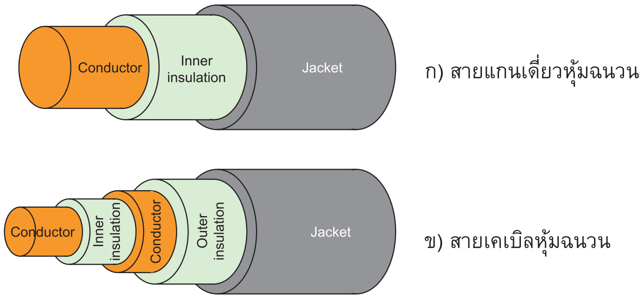
แต่ปัญหาที่ตามมาก็คือแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนปลอก/ชีลด์โลหะและเกราะอาจมีค่าสูงจนเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตหรือทำให้เปลือกหุ้มพลาสติกของเคเบิลเบรกดาวน์ (ทำให้น้ำเข้า) -ดังนั้นมาตรฐานจึงกำหนดให้ทดสอบความทนแรงดันของเปลือกหุ้มพลาสติกของสายเคเบิลที่โรงงานหรือตอนที่ตรวจรับงาน-

นอกจากนั้นข้อ 354D ใน [NESC, 2017] ยังกำหนดไว้ว่าสายเบิลที่ฝังร่วมกันไปกับสายเคเบิลสื่อสารต้องทำการประสานศักย์เข้าด้วยกันและต่อลงกราวน์ที่ทุกระยะทาง 300 m ดังนั้นเราจึงหาทางลดกำลังสูญเสียที่ปลอก/ชีลด์โลหะและเกราะของเคเบิลขณะที่ทำงาน -สายเคเบิลสามารถจ่ายกระแสได้เพิ่มขึ้นเพราะความร้อนเนื่องจากมีกระแสเหนี่ยวนำไหลในปลอก/ชีลด์โลหะและเกราะลดลง- โดยยังมีความปลอดภัยต่อสิ่งมีชีวิตและต่อสายเคเบิลเองด้วยการประสานศักย์เปลือกโลหะและต่อลงกราวน์แบบพิเศษ (special bonding techniques) การเลือกวิธีใดก็ขึ้นอยู่กับความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

การประสานศักย์แบบพิเศษอาจเป็น [IEEE575,2014]

- ประสานศักย์จุดเดียว (single-point bonding, SPB)
- ประสานศักย์จุดเดียวหลายตำแหน่ง (multiple single-point bonding, MSPB)
- ประสานศักย์ผ่านอิมพีแดนซ์ (impedance bonding, IB)
- ประสานศักย์แบบไขว้เป็นช่วง (sectionalized cross bonding, SCB) และ
- ประสานศักย์แบบไขว้ตลอดความยาวสายเคเบิล (continuous cross bonding, CCB)

ส่วนต่างๆ ในการประสานศักย์ประกอบไปด้วย [TB797, 2020]: 1. ตัวนำประสานศักย์ (bonding lead) ดูรูปที่ 3.20, 2. ตัวต่อตัวนำประสานศักย์, 3. กล่องทำการประสานศักย์ (link box or link enclosure), 4. อุปกรณ์จำกัดแรงดันที่เปลือกโลหะ (sheath voltage limiter, SVL), 5. สายดินที่เดินขนานไปกับสายเคเบิล (parallel ground continuity conductor, GCC), 6. เปลือกโลหะเอง และ 7. จุดต่อลงดิน ส่วนต่างๆ เหล่านี้ทั้งหมดต้องสามารถรับกระแสลัดวงจรได้ถ้าจำเป็น



รูปที่ 3.20 ตัวนำประสานศักย์

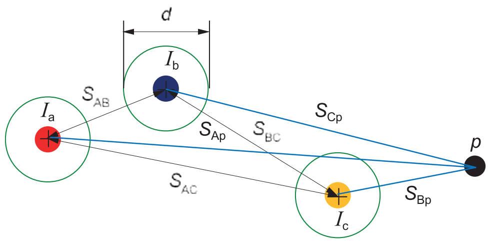
นอกจากนั้น ส่วนต่างข้างต้นอาจมีแรงดันที่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตทั้งในขณะที่สายเคเบิลทำงานปกติ, ขณะที่เกิดลัดวงจร หรือขณะที่เกิดแรงดันเกินขึ้น ดังนั้นจึงต้องป้องกันอันตรายจากการสัมผัสของสิ่งมีชีวิต *-โปรดระลึกไว้เสมอว่าเปลือกโลหะของสายเคเบิลและโลหะเปลือยต่างๆ ที่ต่ออยู่กับเปลือกโลหะไม่ได้มีศักย์เป็นศูนย์แม้ว่าจะต่อลงดินก็ตาม-*

3.6.1 การประสานศักย์เปลือกโลหะและต่อลงดินที่ปลายสายเคเบิลเพียงจุดเดียว

หากสมมุติให้กระแสที่ไหลในสายเคเบิลแต่เฟสมีค่าเท่ากับ

$$I_A = I_0\angle 120^\circ \quad I_B = I_0\angle 0^\circ \quad I_C = I_0\angle -120^\circ$$

แรงดันเหนี่ยวนำต่อหนึ่งหน่วยความยาว ที่เกิดขึ้นบนตัวนำใดๆ ที่วางขนานกับสายเคเบิลแกนเดี่ยว 3 เส้น ที่วางในลักษณะใดๆ ในรูปที่ 3.21 สามารถคำนวณได้จากสมการ



รูปที่ 3.21 แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำบนตัวนำที่วางขนานกับสายเคเบิลแกนเดี่ยว 3 เส้น

$$E_p = j\omega I_b \cdot 2\cdot 10^{-7}\cdot\left(\frac{1}{2}\ln\left(\frac{2S_{Ap}S_{Cp}}{S_{Bp}^{\ 2}}\right)+j\frac{\sqrt{3}}{2}\ln\left(\frac{S_{Cp}}{S_{Ap}}\right)\right) \quad [\text{V/m}]$$

$$I_a = \left(-\frac{1}{2}+j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)I_0;\quad I_b = (1+j0)I_0;\quad I_c = \left(-\frac{1}{2}-j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)I_0 \qquad (3.40)$$

เมื่อ I_0 = กระแสที่ไหลในตัวนำ [A_{rms}]

d = เส้นผ่านศูนย์กลางของเปลือกโลหะ [m]

S_{AB} = ระยะห่างระหว่างแกนของตัวนำเฟส A กับเฟส B [m]

S_{AC} = ระยะห่างระหว่างแกนของตัวนำเฟส A กับเฟส C [m]

S_{BC} = ระยะห่างระหว่างแกนของตัวนำเฟส B กับเฟส C [m]

S_{Ap} = ระยะห่างระหว่างแกนของตัวนำเฟส A กับตัวนำ p [m]

S_{Bp} = ระยะห่างระหว่างแกนของตัวนำเฟส B กับตัวนำ p [m]

S_{Cp} = ระยะห่างระหว่างแกนของตัวนำเฟส C กับตัวนำ p [m]

โดยที่ตัวนำ p เป็นเปลือกโลหะของสายเคเบิลเอง

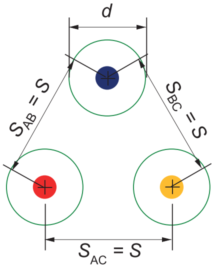
ประเทศต่างๆ ได้กำหนดให้แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นนี้ต้องมีค่าไม่เกินค่าที่แสดงในตารางที่ 3.14

ตารางที่ 3.14 ค่าสูงสุดของแรงดันเหนี่ยวนำที่เปลือกโลหะ

Country	System voltage [kV_{L-L}]	Shield/sheath voltage limit [V]
Australia	132	150
	330	250
Japan	-	< 200
Kuwait	275	65
	400	200
Oman	132	65
Saudi Arabia	132	100
	230-380	200
Turkey	154	150
	380	200
Singapore	66	60
	330	120
South Korea	154-345	100
UAE/Dubai	132	65
UAE/others	132	12
UK	-	65
USA	-	100-200

ก. เคเบิล 3 เส้น วางแบบสามเหลี่ยม -วงจรเดียว

แรงดันเหนี่ยวนำต่อหนึ่งหน่วยความยาวที่เปลือกโลหะของสายเคเบิลแกนเดียวที่วางแบบสามเหลี่ยม ที่แสดงในรูปที่ 3.22 จึงสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.41



รูปที่ 3.22 การวางสายเคเบิลแบบสามเหลี่ยม

$$E_A = j\omega I_0 \cdot 2 \cdot 10^{-7} \cdot \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \ln\left(\frac{2S}{d}\right) \quad \text{V/m}$$

$$E_B = j\omega I_0 \cdot 2 \cdot 10^{-7} \cdot \ln\left(\frac{2S}{d}\right) \quad \text{V/m} \tag{3.41}$$

$$E_C = j\omega I_0 \cdot 2 \cdot 10^{-7} \cdot \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \ln\left(\frac{2S}{d}\right) \quad \text{V/m}$$

ซึ่งจะเห็นว่าแรงดันเหนี่ยวนำต่อหนึ่งหน่วยความยาวที่เปลือกโลหะของสายเคเบิลมีขนาดเท่ากัน

ตัวอย่างที่ 3.1 จงหาแรงดันเหนี่ยวนำต่อหนึ่งหน่วยความยาวที่เปลือกโลหะของเคเบิล เมื่อเคเบิลจ่ายกระแสขนาด 1 kA 50 Hz และวางสายเคเบิลแบบสามเหลี่ยมที่มี $S/d = 2$

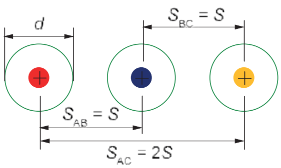
$$E_A = E_B = E_C = \omega I_0 \cdot 2 \cdot 10^{-7} \cdot \ln\left(\frac{2S}{d}\right)$$

$$= 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 1000 \cdot 2 \cdot 10^{-7} \cdot \ln(2 \cdot 2) = 0.0871 \quad \text{V/m}$$

$$= 87.1 \quad \text{V/km}$$

ข. เคเบิล 3 เส้น วางแนวนอน -วงจรเดียว

แรงดันเหนี่ยวนำต่อหนึ่งหน่วยความยาวที่เปลือกโลหะของสายเคเบิลแกนเดียวที่วางแนวนอนที่แสดงในรูปที่ 3.23 สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.42



รูปที่ 3.23 การวางสายเคเบิลแนวนอน

$$E_A = j\omega I_0 \cdot 2 \cdot 10^{-7} \cdot \left(-\frac{1}{2}\ln\left(\frac{S}{d}\right) + j\frac{\sqrt{3}}{2}\ln\left(\frac{4S}{d}\right)\right) \quad \text{V/m}$$

$$E_B = j\omega I_0 \cdot 2 \cdot 10^{-7} \cdot \ln\left(\frac{2S}{d}\right) \quad \text{V/m} \tag{3.42}$$

$$E_C = j\omega I_0 \cdot 2 \cdot 10^{-7} \cdot \left(-\frac{1}{2}\ln\left(\frac{S}{d}\right) - j\frac{\sqrt{3}}{2}\ln\left(\frac{4S}{d}\right)\right) \quad \text{V/m}$$

ซึ่งจะเห็นว่าแรงดันเหนี่ยวนำต่อหนึ่งหน่วยความยาวที่เปลือกโลหะของสายเคเบิลเส้นกลาง (เฟส B) มีขนาดเท่ากับแรงดันเหนี่ยวนำต่อหนึ่งหน่วยความยาวที่เปลือกโลหะของสายเคเบิลที่วางแบบสามเหลี่ยม ส่วนแรงดันเหนี่ยวนำต่อหนึ่งหน่วยความยาวที่เปลือกโลหะของสายเคเบิลที่อยู่ด้านข้าง (เฟส A และ C) จะมีค่าเท่ากัน แต่เฟสจะแตกต่างกัน

ตัวอย่างที่ 3.2 จงหาแรงดันเหนี่ยวนำต่อหนึ่งหน่วยความยาวที่เปลือกโลหะของเคเบิล เมื่อเคเบิลจ่ายกระแสขนาด 1 kA 50 Hz และวางเคเบิลแนวนอน และ $S/d = 2$

แรงดันเหนี่ยวนำต่อหนึ่งหน่วยความยาวที่เปลือกโลหะของสายเคเบิลเฟส B จะเท่ากับค่าที่คำนวณได้ในตัวอย่างที่ 3.1 ส่วนแรงดันเหนี่ยวนำต่อหนึ่งหน่วยความยาวที่เปลือกโลหะของสายเคเบิลเฟส A และ C สามารถคำนวณได้จาก

$$E_A = E_C = j\omega I_0 \cdot 2\cdot 10^{-7} \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{2}\ln\left(\frac{S}{d}\right)\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\ln\left(\frac{4S}{d}\right)\right)^2}$$

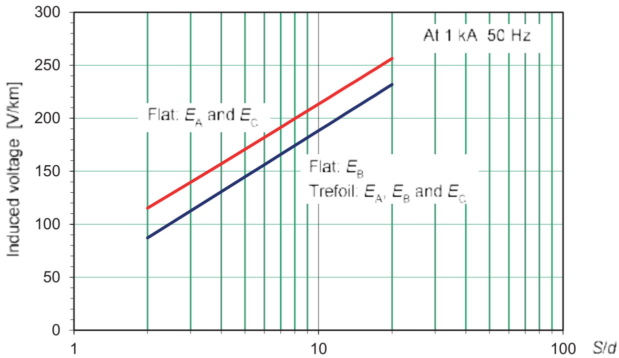
$$= 2\cdot\pi\cdot 50\cdot 1000\cdot 2\cdot 10^{-7}\cdot\sqrt{\left(\frac{1}{2}\ln(2)\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\ln(4\cdot 2)\right)^2}$$

$$= 2\cdot\pi\cdot 10^{-2}\cdot\sqrt{(0.346)^2 + (1.801)^2} = 0.115 \quad \text{V/m}$$

$$= 115 \quad \text{V/km}$$

ซึ่งจะเห็นว่ามีค่าสูงกว่าแรงดันเหนี่ยวนำต่อหนึ่งหน่วยความยาวที่ชีลด์ของสายเคเบิลเส้นกลาง

รูปที่ 3.23 แสดงผลการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำต่อหนึ่งหน่วยความยาวที่เปลือกโลหะของสายเคเบิล เมื่อมีกระแสขนาด 1 kA 50 Hz ไหลในตัวนำ เมื่อวางสายเคเบิลแนวนอนและแบบสามเหลี่ยม



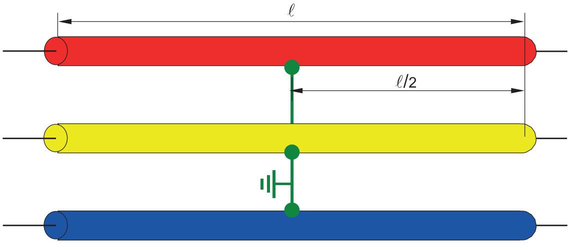
รูปที่ 3.23 แรงดันเหนี่ยวนำต่อหนึ่งหน่วยความยาวที่ชีลด์ของสายเคเบิล -S/d = 1 คือวางสายเคเบิลชิดกัน-

ค. เคเบิล 3 เส้น วงจรคู่

ดู appendix D.2.4 ใน [IEEE575, 2014]

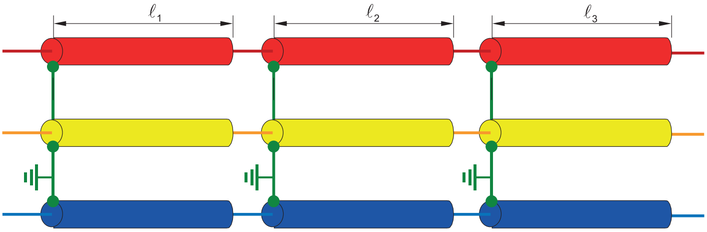
3.6.2 การประสานศักย์เปลือกโลหะและต่อลงดินเพียงจุดเดียวหลายตำแหน่ง

ถ้าแรงดันเหนี่ยวนำที่เปลือกโลหะสูงเกินไป เราสามารถต่อเปลือกโลหะของสายเคเบิลที่ตำแหน่งอื่น เช่น กลางสายเคเบิล ดังที่แสดงในรูปที่ 3.24 ก็จะทำให้แรงดันเหนี่ยวนำที่ปลายสายลดลง



รูปที่ 3.24 การประสานศักย์เปลือกโลหะและต่อลงดินเพียงจุดเดียวที่จุดอื่นที่ไม่ใช่ปลายสายเคเบิล

ถ้าแรงดันเหนี่ยวนำที่เปลือกโลหะยังสูงอยู่อีกก็แบ่งสายเคเบิลเป็นหลาย *ตอน* (section) แล้วประสานศักย์เปลือกโลหะและต่อลงดินที่ปลายสายแต่ละตอนเพียงจุดเดียว ดังแสดงในรูปที่ 3.25



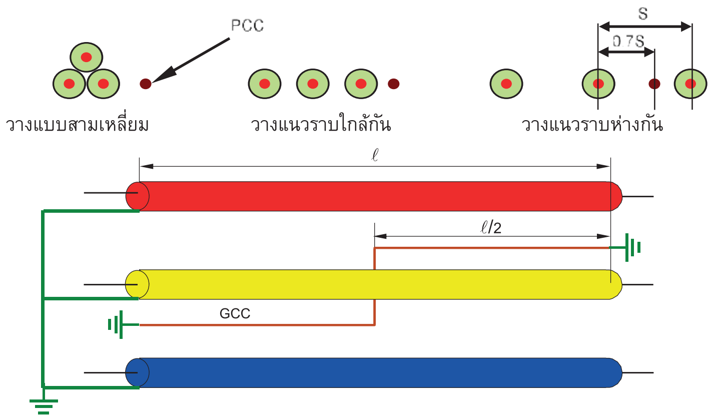
รูปที่ 3.25 การประสานศักย์เปลือกโลหะและต่อลงดินเพียงจุดเดียวหลายตำแหน่ง

3.6.3 การเดินสายกราวน์ขนานกับสายเคเบิล

เมื่อเกิดลัดวงจรขึ้น กระแสลัดวงจรลำดับศูนย์จะไหลกลับไปที่แหล่งจ่ายในทุกเส้นทางที่เป็นไปได้ แต่ในกรณีที่เราต่อเปลือกโลหะของสายเคเบิลลงกราวน์ที่ปลายสายเคเบิลเพียงด้านเดียว กระแสลัดวงจรจึงไม่สามารถไหลในเปลือกโลหะต้องไหลผ่านดินเท่านั้น ทำให้กระแสลัดวงจรกระจายในพื้นดินทั่วไปหมด จนอาจทำให้แรงดันเหนี่ยวนำในเปลือกโลหะจึงสูงขึ้น -ความเหนี่ยวนำของสายเคเบิลเพิ่มขึ้นเพราะลูปใหญ่ขึ้น-

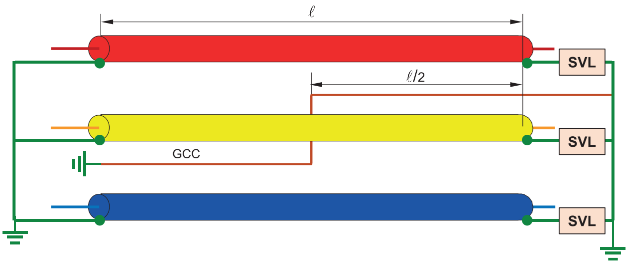
นอกจากนั้นกระแสลัดวงจรดังกล่าวยังอาจทำให้ ศักย์ที่ผิวดิน (ground potential rise, GPR) ระหว่างปลายทั้งสองของสายเคเบิลเพิ่มขึ้นจนอาจเป็นอันตรายต่อทั้งสิ่งมีชีวิตและอุปกรณ์อื่นๆ ดังนั้นจึงแนะนำให้ติดตั้ง สายดินที่เดินขนานไปกับสายเคเบิล, GCC ที่ต่องลงกราวน์ทั้งสองปลาย เมื่อเราต่อเปลือกโลหะของสายเคเบิลลงกราวน์ที่ปลายสายเคเบิลเพียงด้านเดียวหรือต่อเปลือกโลหะของสายเคเบิลลงกราวน์ ณ ตำแหน่งใดๆ เพียงจุดเดียว -พื้นที่หน้าตัดของ GCC ต้องมีขนาดพอที่จะรับกระแสลัดวงจรสูงสุดได้และมักหุ้มฉนวนเพื่อป้องกันการสึกกร่อน-

ในกรณีนี้ แม้ว่าจะไม่มีกำลังสูญเสียเนื่องจากกระแสเหนี่ยวนำในเปลือกโลหะของสายเคเบิลแต่ก็ยังมีกำลังสูญเสียเนื่องจากกระแสเหนี่ยวนำใน GCC ดังนั้นจึงควรไขว้สาย GCC ดังที่แสดงรูปที่ 3.26

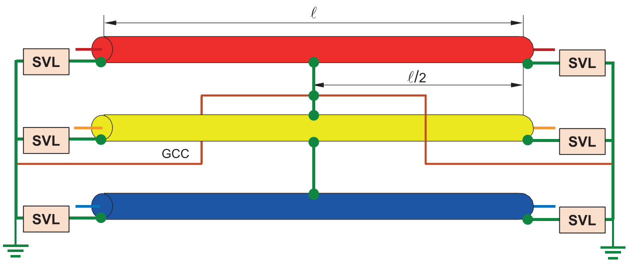


รูปที่ 3.26 การลดแรงดันเหนี่ยวนำที่เปลือกโลหะของสายเคเบิลเมื่อต่อเปลือกโลหะของสายเคเบิลลงกราวน์ที่จุดเดียว โดยการใช้และไขว้ตัวนำขนาน

นอกจากนั้น เพื่อให้มั่นใจว่าแรงดันเหนี่ยวนำในเปลือกโลหะของสายเคเบิลมีค่าไม่เกินค่าที่กำหนดในกรณีที่เกิดลัดวงจร, แรงดันเกินฟ้าผ่า หรือแรงดันเกินสวิตชิง เราอาจติดตั้ง SVL ซึ่งเป็นอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกิน เช่น MOSA หรือ สปาร์กแกป ดังแสดงในรูปที่ 3.27



ก) ต่อเปลือกโลหะของสายเคเบิลลงกราวน์โดยตรงที่ปลายเคเบิลเพียงด้านเดียวส่วนอีกซีลด์อีกปลายต่อผ่าน SVL

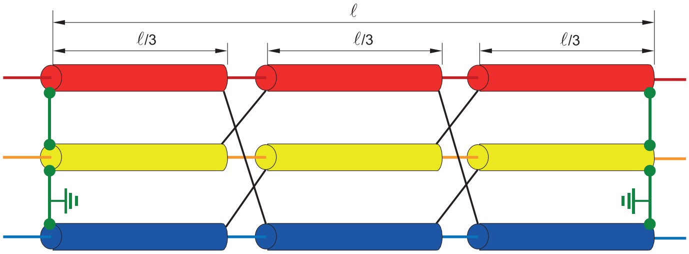


ข) ประสานศักย์เปลือกโลหะที่กลางสายเคเบิลและต่อลงดินที่ปลายทั้งสองด้านของเคเบิลผ่าน SVL [TB979,2020]

รูปที่ 3.27 การประสานศักย์เปลือกโลหะและต่อลงดินร่วมกับการใช้สาย GCC และ SVL

3.6.4 การประสานศักย์เปลือกโลหะแบบไขว้

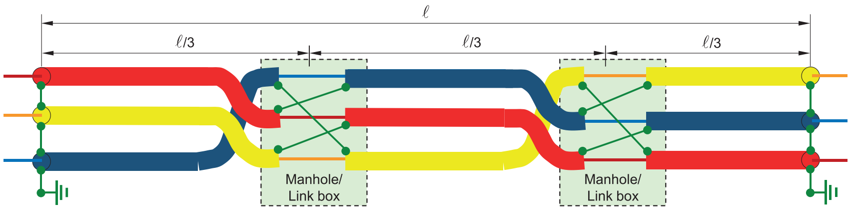
การแบ่งเปลือกโลหะของสายเคเบิลเป็นช่วงๆ และต่อไขว้กันดังแสดงในรูปที่ 3.28 จะทำให้มีกระแสไหลในเปลือกโลหะน้อยมากเพราะแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำในเปลือกโลหะหักล้างกันเกือบหมด -ถ้าเราวางเคเบิลแบบสามเหลี่ยม- ทำให้เราประสานเปลือกโลหะและต่อลงกราวน์ที่ปลายสายเคเบิลทั้งสองด้านได้



รูปที่ 3.28 การประสานศักย์แบบไขว้ –แต่ไม่สลับสายเคเบิล

สำหรับสายเคเบิลที่วางในแนวราบ เนื่องจากระยะห่างระหว่างสายแต่ละเส้นไม่เท่ากัน จึงทำให้ความเหนี่ยวนำของสายแต่ละเส้นไม่เท่ากัน ผลที่ตามมาคืออิมพีแดนซ์ของสายเคเบิลจึงไม่เท่ากัน แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำในเปลือกโลหะของสายเคเบิลแต่ละช่วงในรูปที่ 3.28 จึงไม่เท่ากัน ทำให้แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่เปลือกโลหะของสายเคเบิลแต่ละช่วงรวมกันยังมีค่าอยู่บ้าง

วิธีการทำให้แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำในเปลือกโลหะของสายเคิลที่วางแนวราบมีค่าน้อยที่สุด จึงทำโดยประสานศักย์เปลือกโลหะแบบไขว้พร้อมทั้งทำ การสลับสายเคเบิล (transposition) ด้วย ดังแสดงในรูปที่ 3.29



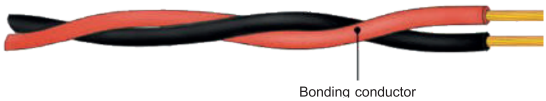
รูปที่ 3.29 การประสานศักย์เปลือกโลหะแบบไขว้ ร่วมกับการสลับสายเคเบิล

ในรูปที่ 3.29 จะเห็นว่าการสลับสายเคเบิลใน บ่อพักสายเคเบิล (manhole) ทำได้ยากมากถ้าสายเคเบิลมีขนาดใหญ่ และถ้าเราทำ จุดต่อสายเคเบิล (joint) ก็จะเป็นจุดอ่อนของสายเคเบิลซึ่งมาจากหลายสาเหตุ เช่น น้ำเข้า, คุณภาพของการทำจุดต่อสายเคเบิล ฯลฯ อย่างไรก็ตามที่จุดนี้ต้องทำประสานศักย์ชีลด์แบบไขว้และอาจติดตั้ง SVL ไว้ด้วย

3.6.5 ตัวนำประสานศักย์

ตัวนำประสานศักย์ในรูปที่ 3.20 มี 2 แบบคือ ตัวนำเดี่ยวหุ้มฉนวนและสายเคเบิลหุ้มฉนวน การเลือกใช้ประเภทใดขึ้นกับความยาวของตัวนำประสายศักย์ ℓ_{bond} ดังนี้

1. $\ell_{bond} \leq 3$ m: ใช้ตัวนำเดี่ยวหุ้มฉนวน
2. $3 \text{ m} < \ell_{bond} \leq 10$ m: ใช้ตัวนำเดี่ยวหุ้มฉนวนที่ ไขว้กันตลอดสาย (twisted pair) ในรูปที่ 3.30 หรือใช้ตัวนำเดี่ยวหุ้มฉนวนหลายเส้นขนานกันและมัดให้ติดกันเป็นช่วงๆ เพื่อไม่ให้มีช่องว่างระหว่างสาย



รูปที่ 3.30 ตัวนำประสานศักย์ที่ใช้ตัวนำเดี่ยวหุ้มฉนวนที่ไขว้กันตลอดสาย

3. $10 \text{ m} < \ell_{bond} \leq 15$ m: ใช้สายเคเบิลหุ้มฉนวน
4. $\ell_{bond} > 15$ m: ไม่แนะนำให้ทำการประสานศักย์

พื้นที่หน้าตัดของตัวนำประสานศักย์ที่แนะนำ แสดงไว้ในตารางที่ 3.15

ตารางที่ 3.15 พื้นที่หน้าตัดของตัวนำประสานศักย์ที่แนะนำ

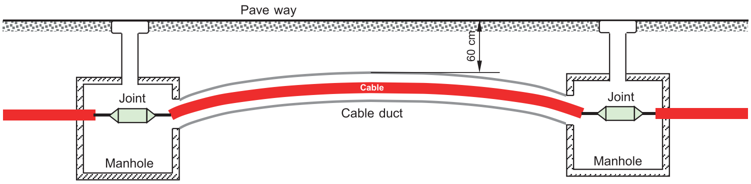
<table>
<tr><th rowspan="2">System voltage [kV]</th><th rowspan="2">Cu conductor cross section [mm^2]</th><th rowspan="2">Single conductor insulation thickness [mm]</th><th colspan="2">Cable insulation thickness [mm]</th></tr>
<tr><th>Inner</th><th>Outer</th></tr>
<tr><td>69</td><td>120</td><td rowspan="4">3.3</td><td rowspan="3">4.4</td><td rowspan="4">3.3</td></tr>
<tr><td>115-138</td><td>250</td></tr>
<tr><td>161-230</td><td>400</td></tr>
<tr><td>345-500</td><td>1000</td><td>6.6</td></tr>
</table>

3.7 การก่อสร้างระบบสายเคเบิลใต้ดิน

ในการก่อสร้างระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าด้วยสายเคเบิลใต้ดินเพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับผู้ใช้ไฟ เราจะต้องก่อสร้างให้ระบบส่งไฟฟ้าใต้ดินให้ปลอดภัยต่อสิ่งมีชีวิตและต่อสายเคเบิลเอง ดังนั้นจึงต้องฝังสายเคเบิลไว้ใต้ดิน, ร้อยสายเคเบิลไว้ในท่อ (Duct bank) หรือวางสายเคเบิลไว้ที่ปลอดภัย แต่ก็ควรเลือกการวางสายเคเบิลให้สั้นที่สุดและเป็นเส้นตรงไปยังระหว่างบ่อพักเพื่อความสะดวกในการร้อยสายเคเบิล

ในกรณีที่ไม่สามารถทำการร้อยสายเคเบิลได้ซึ่งอาจเกิดขึ้นเนื่องจากมีสิ่งกีดขวาง ท่อร้อยสายเคเบิลควรมีรัศมีความโค้งใหญ่ที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เพื่อให้ง่ายต่อการร้อยสายเคเบิลและลดความเครียดสนามไฟฟ้าที่กระทำต่อเนื้อฉนวนของสายเคเบิล -ดังนั้นจึงควรหลีกเลี่ยงการโค้งหักมุม-

นอกจากนั้น การเดินท่อระหว่างบ่อพักก็ควรจะมีความลาดเอียงเพียงเล็กน้อย ถึงแม้ว่าอาจจะทำให้น้ำไหลซึมจากบ่อหนึ่งไปยังอีกบ่อหนึ่งก็ตาม รูปที่ 3.31 แสดงการเดินท่อที่วางอยู่ระดับพื้นโดยมีความชัน 2 ด้าน คือ จากตรงกลางแล้วค่อยลาดลงสู่บ่อพักแต่ละด้าน โดยในทางปฏิบัติความลาดเอียงควรมีค่ามากกว่า 1/400 และควรฝังท่อให้ลึกไม่น้อยกว่า 60 cm จากผิวถนน



รูปที่ 3.31 การเดินสายเคเบิลในท่อร้อยสายใต้ดิน

3.7.1 ท่อร้อยสายเคเบิลใต้ดิน

ท่อร้อยสายเคเบิลใต้ดินมักทำจาก ไฟเบอร์กลาส, คอนกรีต, ซีเมนต์ใยหิน (Asbestos cement), โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE), พีวีซี และเหล็ก แต่ที่นิยมในปัจจุบันมี 2 ประเภท คือท่อซีเมนต์และท่อ HDPE เพราะกันน้ำได้ดีและทนต่อปฏิกิริยาเคมี

คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำท่อร้อยสายเคเบิลได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.16

ตารางที่ 3.16 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำท่อร้อยสายเคเบิล

Properties	Fiber glass	Asbetos cement	Cocrete	Steel
Coefficient of Friction [N/N]	0.25-0.30	0.4-0.6	0.35-0.55	0.55
Resistance to Corrosion	Good	Excellent	Excellent	Good
Resistance to Electric Arc.	Fair	Excellent	Excellent	Good
Heat Dissipation	Fair	Good	Good	Excellent
Pro	Light Weight	Durable	Durable	Flexible & Strong
Con	Expensive	Expensive	Heavy	Magnetic

ก) ท่อซีเมนต์ใยหิน (asbestos cement)

ท่อซีเมนต์ใยหินเป็นท่อไร้ตะเข็บที่ผลิตขึ้นจากส่วนผสมของปูนซีเมนต์และใยหิน มีความยาวมาตรฐานท่อละ 4 m โดยทั่วไปจะวางแล้วหุ้มด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน คือ 6”, 8”, 10” และ 12”

ข้อดี ราคาถูกกว่าท่อชนิดอื่น, ทนทานต่อการผุกร่อน และระบายความร้อนได้ดี

ข้อเสีย มีโอกาสแตกหักง่ายกว่าท่อชนิดอื่นและมีน้ำหนักมาก

ข) ท่อ HDPE

ท่อ HDPE ทนต่อสภาพแวดล้อมต่างๆ ได้ดี แบ่งออกเป็น Class I และ Class II มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางให้เลือกตั้งแต่ 20-200 mm

ข้อดี ยืดหยุ่นและโค้งงอได้ง่ายกว่าท่อซีเมนต์ใยหิน ดังนั้นจึงวางได้โดยตรงไม่ต้องหุ้มคอนกรีต แต่มีราคาสูงกว่าท่อซีเมนต์ใยหิน

ค) ท่ออ่อนลูกฟูก (Flexible Corrugated Pipe)

มักทำจากโพลีเอทิลีนแข็ง (hard Polyethelene) มีลักษณะเป็นลูกฟูกจึงสามารถโค้งงอได้ง่าย ดังนั้นในการขนส่งจึงม้วนเป็นขด แต่ละขดจะยาวประมาณ 50-100 m มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางให้เลือกตั้งแต่ 30 - 150 mm

ข้อดี มีน้ำหนักเบากว่าท่อชนิดอื่น สามารถวางท่อให้มีความยาวมากกว่าท่อชนิดอื่นทำให้มีจำนวนจุดต่อน้อยกว่า แรงเสียดทานในการร้อยสายเคเบิลน้อยกว่าและหลบหลีกสิ่งกีดขวางได้ง่าย

ข้อเสีย มีราคาแพงและทำความสะอาดท่อได้ยาก

3.7.2 บ่อพักสายเคเบิลใต้ดิน

บ่อพักสายเคเบิลใต้ดินมักทำจากคอนกรีตเสริมเหล็ก ส่วนใหญ่จะก่อสร้างอยู่ใต้ผิวถนนซึ่งมีการจราจรของยานพาหนะต่างๆ ดังนั้นจึงต้องรับน้ำหนักสูงสุดได้ถึง 18 ton ผนังด้านนอกของบ่อพักจะต้องอยู่ใต้ระดับผิวถนนไม่น้อยกว่า 40 cm บ่อพักต้องมีฝาปิด (manhole cover) ทำด้วยเหล็ก ที่ก้นบ่อพักจะต้องติดตั้งปั๊มไว้สำหรับสูบน้ำออกจากบ่อพัก

ลักษณะของการจัดหน้าช่องเปิดของบ่อพักขึ้นอยู่กับท่อร้อยสายเคเบิลใต้ดินที่จะต่อกับท่อพักนั้นๆ บ่อพักขนาดเล็กสามารถหล่อสำเร็จรูปแล้วยกมาวางในที่ต้องการติดตั้ง แต่ถ้าเป็นบ่อพักขนาดใหญ่ก็ต้องก่อสร้างที่หน้างานเพราะมีน้ำหนักมาก หน้าที่หลักของบ่อพักสายเคเบิลใต้ดินมีดังนี้

1. ใช้วางและจัดทำจุดต่อสายเคเบิล เนื่องจากไม่สามารถลากสายเคเบิลออกจากทางเดินสาย (cable trench) ขึ้นไปที่เสาไฟฟ้าได้
2. ใช้ในการทำระบบกราวน์สำหรับสายเคเบิลในระบบจำหน่าย 12 และ 24 kV และใช้ในการสลับสายเคเบิลในระบบส่ง 69, 115 และ 230 kV
3. ใช้ในการเปลี่ยนหรือแยกทิศทางของท่อร้อยสาย เช่น แยกสายขึ้นไปที่เสาไฟฟ้า หรือแยกเข้าซอย/ถนน
4. ช่วยในการลากสายเคเบิลให้สะดวกมากยิ่งขึ้น

3.7.3 การวางสายเคเบิลใต้ดิน

เรานำสายเคเบิลใต้ดินมาติดตั้งใช้งานได้หลายรูปแบบ แต่ละรูปแบบมีวิธีก่อสร้างและค่าใช้จ่ายแตกต่างกันออกไป ดังนั้นการเลือกวิธีวางสายเคเบิลจึงต้องพิจารณาถึงความเหมาะสมต่างๆ เช่น สภาพพื้นดิน, จำนวนวงจรของสายเคเบิล, เทคโนโลยีที่จะนำมาใช้ในการก่อสร้าง และงบประมาณในการลงทุน

การวางสายเคเบิลใต้ดินมีอยู่ 3 แบบ คือ วางสายเคเบิลในท่อร้อยสายหุ้มคอนกรีต, วางสายเคเบิลฝังใต้ดินโดยตรง และวางสายเคเบิลในอุโมงค์สาธารณูปโภค

ในการติดตั้งสายเคเบิลนั้น ไม่ว่าเราจะเดินสายในท่อหรือวางในรางสายเคเบิล (cable tray) เราต้องพิจารณาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในการติดตั้ง เช่น ค่าแรงดึงสูงสุด, ค่าแรงกดบนสายเคเบิลเนื่องจากผนังท่อ (sidewall pressure), พื้นที่ของสายเมื่อเทียบกับพื้นที่ของท่อ (percent conduit fill) [%], การเบียดเสียดของสายเคเบิลในท่อ (Jamming) และระยะปลอดภัย (clearance) เป็นหลัก

ขนาดของท่อเป็นพารามิเตอร์หลักในการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์พื้นที่ของสายเมื่อเทียบกับพื้นที่ของท่อ, การเบียดเสียดของสายเคเบิลในท่อ และระยะปลอดภัย

ส่วนค่าแรงดึงที่ยอมรับได้นั้น กำหนดจากค่าแรงดึงสูงสุดที่ยอมรับได้ของแรงดึงจากอุปกรณ์ที่ใช้ โดยแรงดึงที่ดึงสายเคเบิลในท่อจะถูกคำนวณแล้วนำมาเปรียบเทียบกับค่าแรงดึงสูงสุดที่ยอมรับได้ ถ้าค่าแรงดึงสายเคเบิลมีค่ามากกว่าค่าแรงดึงสูงสุดที่ยอมรับได้ก็จะต้องทำการคำนวณเพื่อหาค่าแรงดึง

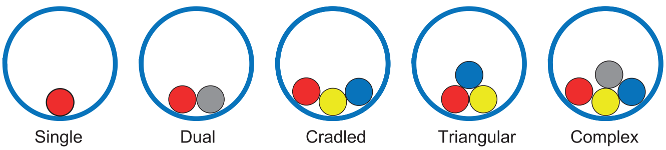
ใหม่ให้น้อยกว่าค่าแรงดึงสูงสุดที่ยอมรับได้ มิฉะนั้นสายเคเบิลอาจจะได้รับความเสียหายเพราะ ตัวนำก็เป็นส่วนหนึ่งของสายเคเบิลที่จะต้องสามารถรับแรงดึงสายได้โดยไม่เกิดความเสียหายโดยไม่ต้องใช้เปลือกหุ้มฉนวนโลหะ, เทป หรือเครื่องห่อหุ้มมาช่วย หลังจากที่ทำคำนวณหาค่าแรงดึงที่ต้องการได้แล้วจะต้องคำนวณหาค่าแรงกดบนเคเบิลเนื่องจากผนังท่อ ต่อไป

ขั้นตอนและการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในการติดตั้งสายเคเบิลใต้ดินภายในท่อ มีลำดับดังนี้

1. หลังจากทราบขนาดของสายเคเบิลใต้ดิน [IEC60287-1-1, 2006], ขนาดของท่อร้อยสายเคเบิล และชนิดของท่อร้อยสายเคเบิล จากการออกแบบตามมาตรฐาน ให้นำค่าต่างๆ มาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์พื้นที่ของสายเมื่อเทียบกับพื้นที่ของท่อ, ค่าการเบียดเสียดของสายในท่อ และค่าระยะปลอดภัย
2. เลือกรัศมีความโค้งของท่อ, ขนาดของท่อ และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจากข้อกำหนดของท่อแต่ละชนิด
3. หาน้ำหนักของสายเคเบิล (w) จากข้อกำหนดของของสายเคเบิล
4. คำนวณ *แฟกเตอร์แก้ค่าน้ำหนัก* w (weight correction factor)
5. คำนวณค่าแรงดึงสูงสุดที่ยอมรับได้
6. คำนวณค่าแรงดึงที่ใช้ในการลากสายสายเคเบิล (T) และค่าแรงกดจากผนังท่อ
7. เปรียบเทียบค่าแรงดึงที่ใช้ในการลากสายเคเบิลกับค่าแรงดึงสูงสุดที่ยอมรับได้
8. เปรียบเทียบค่าของแรงกดจากผนังท่อที่คำนวณได้กับค่ามาตรฐาน

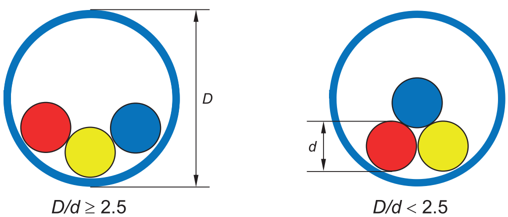
3.7.3.1 ลักษณะวางสายเคเบิลในท่อ

การวางสายเคเบิลมีผลต่อค่าแรงดึงของสายเนื่องจากแฟกเตอร์แก้ค่าน้ำหนัก w ที่ใช้ในการคำนวณแรงดึงขึ้นอยู่กับลักษณะของการวางสายเคเบิลในท่อ ดังแสดงในรูปที่ 3.32



รูปที่ 3.32 การวางสายเคเบิลในท่อ

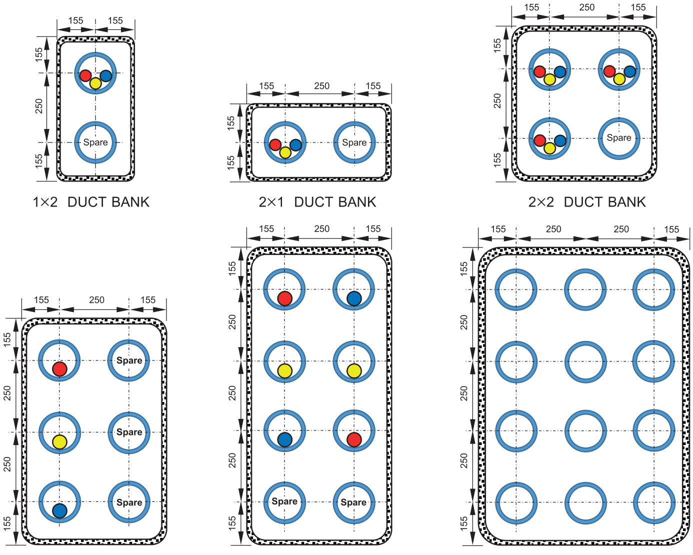
ลักษณะการวางสายเคเบิลแกนเดี่ยว 3 เส้น ในท่อเดียวกันสามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ D กับเส้นผ่านศูนย์กลางของสายเคเบิล d ซึ่งมักเรียกว่า อัตราส่วน D/d ดังแสดงในรูปที่ 3.34



รูปที่ 3.33 การวางสายเคเบิลแกนเดี่ยว 3 เส้น ในท่อเดียวกัน

3.7.3.2 การวางสายเคเบิลในท่อร้อยสายหุ้มคอนกรีต (duct bank with concrete casing)

การวางสายเคเบิลแบบนี้จะต้องขุดดินตามแนวของสายเคเบิลเพื่อก่อสร้างท่อร้อยสายเคเบิลที่หุ้มด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก ลักษณะการวางสายเคเบิลใน duct bank ที่นิยมใช้โดยทั่วไปได้แสดงไว้ในรูปที่ จะเป็นดังรูปที่ 3.34 โดยจะเห็นได้ว่าคอนกรีตเสริมเหล็กทำหน้าที่ป้องกันแรงทางกลและผลกระทบอื่นๆ ที่อาจมากระทบกับสายเคเบิลได้เป็นอย่างดี

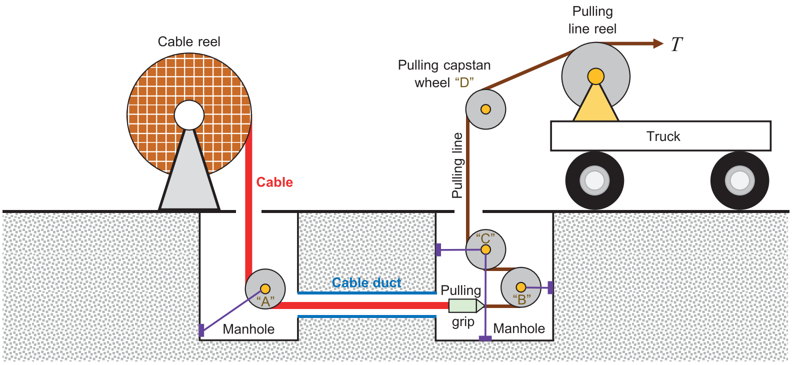


รูปที่ 3.34 การวางสายเคเบิลในท่อร้อยสายหุ้มคอนกรีต

3.7.3.3 การลากสายเคเบิลในท่อ

ในการลากสายเคเบิลเข้าไปในท่อนั้น ส่วนมากจะใช้รถที่มี *เครื่องกว้าน* (winch) ช่วยในการดึงสายเคเบิล รถที่มีเครื่องกว้านจะจอดอยู่ใกล้กับปากของบ่อพักสาย สลิงที่ใช้ในการดึงสายเคเบิลจะถูกต่อเข้ากับเครื่องกว้านบนรถ ส่วนที่บ่อพักสายอีกด้านหนึ่งจะจอดรถบรรทุกล้อสายเคเบิลที่ยกตั้งอยู่บนขาหยั่ง โดยยกให้สูงพ้นพื้นเพื่อให้หมุนได้สะดวกขณะที่ลากสายเคเบิลออกจากล้อสายเคเบิล

ก่อนทำการลากสายเคเบิลจะต้องประกอบที่ยึดสลิงเข้ากับปลายของสายเคเบิล จุดที่ยึดกับสลิงนี้มักเรียกว่า *ห่วงดึง* (pulling eye) หรือใช้ pulling grip ยึดปลายสายเคเบิลกับสลิงก็ได้ และขณะลากสายเคเบิลเข้าไปในท่อก็ต้องทาสารหล่อลื่นที่เปลือกหุ้มสายเคเบิลซึ่งอาจเป็นจารบีหรือหินสบู่ -หินสบู่มีราคาแพงและไม่มีที่จำหน่ายในประเทศไทย- ที่ปากท่อจะต้องใส่เครื่องป้องกันเพื่อไม่ให้ขอบท่อขูดกับเปลือกหุ้มสายเคเบิลจนเกิดความเสียหาย ลักษณะการลากสายเคเบิลแสดงไว้ในรูปที่ 3.35 [IEEE1185, 2019]



รูปที่ 3.35 การลากสายเคเบิลในท่อ

การลากสายเคเบิลจะใช้ความเร็วประมาณ 3-5 เมตรต่อนาที ระหว่างการลากสายเคเบิลต้องมีการให้สัญญาณมือหรือวิทยุติดต่อกันได้ ขณะลากเคเบิลต้องจดบันทึกแรงดึงทุกๆ หนึ่งนาที โดยให้สังเกตว่าแรงดึงสายเคเบิลต้องค่อยๆ เพิ่มขึ้น ถ้าแรงดึงเปลี่ยนแปลงมากบ้างน้อยบ้างขณะลากสายเคเบิลก็แสดงว่าอาจมีปัญหาที่ท่อหรือการป้อนสายเคเบิลไม่ดีซึ่งจะมีผลทำให้สายเคเบิลเสียหายได้ และเมื่อสายเคเบิลโผล่ที่บ่อพักสายเคเบิลอีกด้านหนึ่งแล้ว ต้องทำการดึงสายเคเบิลเผื่อไว้สำหรับทำการต่อสายอีกเล็กน้อย

หลังจากตัดสายเคเบิลออกจากม้วนสาย ควรตรวจสอบเปลือกหุ้มของสายเคเบิลว่าชำรุดหรือไม่ โดยใช้เครื่องวัดความต้านทานฉนวนตรวจดูระหว่างปลอก/ชีลด์โลหะ-เกราะของสายเคเบิลกับกราวน์ด้วยแรงดันกระแสตรงขนาด 2.5 kV สำหรับสายเคเบิลในระบบจำหน่าย และ 15 kV สำหรับสายเคเบิลในระบบส่ง โดยจะต้องวัดค่าความต้านทานฉนวนได้ไม่ต่ำกว่า 20 GΩ และ 100 GΩ ตามลำดับ [ANSI/NETA ATS, 2009]

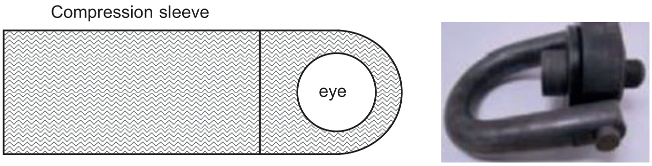
จากนั้น ให้ปิดปลายสายเคเบิลด้วยฝาครอบ -ถ้าสายมีเปลือกตะกั่วหุ้มให้ใช้ฝาครอบตะกั่วครอบปลายสาย แล้วใช้ตะกั่วชนิด 40/60 เชื่อมปิดอย่างดีอย่าให้รั่ว- จากนั้นพันด้วยเทปอีกชั้นหนึ่ง ถ้าสายเป็นแบบที่ไม่มีเปลือกตะกั่วให้ใช้ฝาครอบที่ทำด้วยยางหรือพีวีซีครอบแล้วพันทับด้านนอกด้วยเทปพีวีซีอีกครั้ง การปิดปลายสายเป็นสิ่งที่มีความสำคัญมาก เพราะถ้าทำไม่เรียบร้อยน้ำอาจรั่วซึมเข้าไปในสายเคเบิลทำให้สายเคเบิลเสียหายใช้งานไม่ได้

การลากสายเคเบิลไม่ใช่มีแต่การลากเข้าเท่านั้น บางครั้งยังมีการดึงสายเคเบิลในท่อออกอีกด้วย เหตุที่ต้องดึงออกก็เพราะสายเคเบิลเสียหายหลังจากใช้งานไประยะหนึ่งหรือต้องการเลิกใช้สายเคเบิลชุดนั้นแล้วหรือต้องการเปลี่ยนขนาดของสาย การดึงสายเคเบิลออกจากท่อจะยุ่งยากมากกว่าการลากสายเคเบิลเข้าท่อ บางครั้งไม่สามารถดึงสายออกมาได้จนขนาดถึงกับตะขอเหล็กที่แขวนรอกขาดหรือบางครั้งก็ทำให้สายเคเบิลขาด ถ้าสายเคเบิลที่ดึงออกมาขาด วิธีแก้ไขเพื่อเอาสายออกมาให้ได้ก็คือ ต้องขุดข้างท่อเพื่อตัดเอาเคเบิลขึ้นมา แต่ถ้าท่อที่ใส่สายเคเบิลเป็นท่อที่อยู่ตรงกลางโดยมีท่ออื่นอยู่ข้างๆ ก็ไม่สามารถใช้วิธีขุดข้างท่อได้ ในกรณีนี้อาจต้องปล่อยสายเคเบิลทิ้งไว้

3.7.3.4 แรงดึงสายเคเบิลสูงสุด [IEEE576, 2000]

ก) ดึงที่ตัวนำ

ในกรณีนี้เราจะติดห่วงดึง (pulling eye) ที่มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.36 ที่ตัวนำของสายเคเบิล



รูปที่ 3.36 ห่วงดึงตัวนำของสายเคเบิล

แรงดึงสายเคเบิลสูงสุด T_{max} หาได้จากสมการ

$$\begin{aligned} T_{max} &= 0.0180 \cdot nA_{cond} \quad \text{[N] for Cu conductor} \\ &= 0.0135 \cdot nA_{cond} \quad \text{[N] for Al conductor} \end{aligned} \tag{3.43}$$

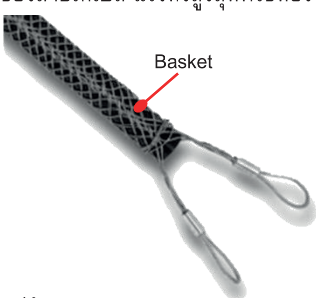
เมื่อ n = จำนวนตัวนำที่ดึง

A_{cond} = พื้นที่หน้าตัดของตัวนำแต่ละเส้น [mm^2]

แต่แรงดึงสูงสุดที่ใช้ต้องไม่เกิน 22.24 kN สำหรับสายเคเบิลแกนเดี่ยว และไม่เกิน 44.48 kN สำหรับสายเคเบิล 3 แกน (แรงที่ดึงสายเคเบิลหลายเส้นพร้อมกันจะกระจายไม่เท่ากันในสายเคเบิลแต่ละเส้น)

ข) ดึงที่ปลอกตะกั่ว

เมื่อใช้ *อุปกรณ์ดึงแบบตาข่าย* (woven mesh pulling grip หรือ basket grip) ที่มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.37 ดึงปลอกตะกั่วของสายเคเบิล แรงดึงสูงสุดที่ใช้ต้องไม่เกิน 10.33 N/m^2



รูปที่ 3.37 อุปกรณ์ดึงแบบตาข่าย (woven mesh pulling grip หรือ basket grip)

ค) ดึงที่เปลือกสายเคเบิล -ไม่มีปลอกตะกั่ว

เมื่อใช้อุปกรณ์ดึงแบบตาข่ายดึงที่เปลือกสายเคเบิลที่ไม่มีปลอกตะกั่ว แรงดึงสูงสุดที่ใช้ต้องไม่เกิน 4.4 kN และแรงดึงต้องไม่เกินค่า T_{max} ที่คำนวณได้จากสมการที่ 3.43

3.7.3.5 ความยาวสายเคเบิลสูงสุดขณะที่ร้อยท่อตรง

ความยาวของสายเคเบิลแต่ละช่วงสูงสุด ℓ_{max} ในการดึงสายเคเบิลหาได้จากสมการ

$$\ell_{max} = \frac{T_{max}/g}{W_c w f} \quad \text{[m]} \tag{3.44}$$

เมื่อ T_{max} = แรงดึงสายเคเบิลสูงสุด

g = ค่าคงที่แรงโน้มถ่วง = 9.807 [m/s^2]

W_c = ตัวแก้ค่าน้ำหนักสายเคเบิล [1]

w = น้ำหนักสายเคเบิล [kg/m]

f = สัมประสิทธิ์ความเสียดทานทางจลน์ [N/N]

ก) ตัวแก้ค่าน้ำหนักสายเคเบิล W_c

ตัวแก้ค่าน้ำหนักสายเคเบิลสำหรับสายเคเบิลเส้นเดียว (สายเคเบิลแกนเดี่ยวหรือ 3 แกน) คือ W_c = 1 สำหรับสายเคเบิลแกนเดี่ยว 3 เส้น ที่วางในท่อ ค่า W_c จะขึ้นกับลักษณะการวางสายเคเบิลในท่อ (ดูรูปที่ 3.33) ดังนี้

- วางแบบเปล

$$W_c = 1 + \frac{3}{4}\left[\frac{D}{D-d}\right]^2 \tag{3.45a}$$

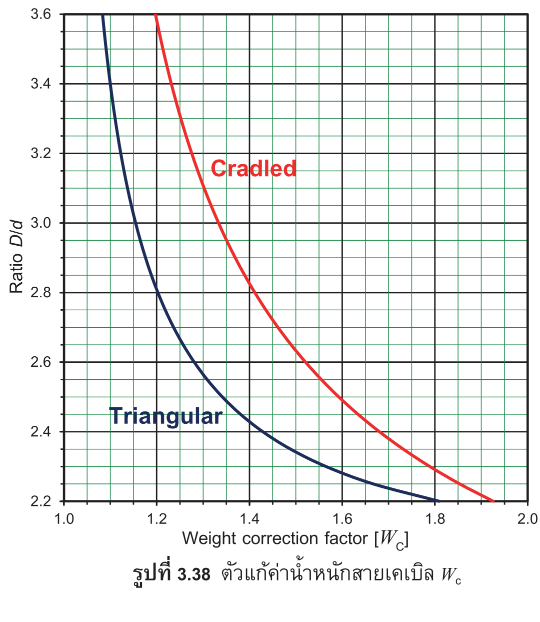
- วางแบบสามเหลี่ยม

$$W_c = \frac{1}{\sqrt{1-\left[\frac{D}{D-d}\right]^2}} \tag{3.45b}$$

เมื่อ D = เส้นผ่านศูนย์กลางในของท่อ [m]

d = เส้นผ่านศูนย์กลางนอกของสายเคเบิลหนึ่งเส้น [m]

หรือดังที่แสดงในรูปที่ 3.38



รูปที่ 3.38 ตัวแก้ค่าน้ำหนักสายเคเบิล W_c

ข) สัมประสิทธิ์ความเสียดทานทางจลน์ f

สัมประสิทธิ์ความเสียดทานทางจลน์เมื่อทาสายเคเบิลด้วยสารหล่อลื่น (lubricant) แสดงไว้ในตารางที่ 3.17

ตารางที่ 3.17 สัมประสิทธิ์ความเสียดทานทางจลน์ f เมื่อทาสายเคเบิลด้วยสารหล่อลื่น

วัสดุที่ทำเปลือกพลาสติกของสายเคเบิล	วัสดุที่ทำท่อร้อยสายเคเบิล		
	M	**PVC**	**FIB**
PVC	0.40	0.35	0.50
PE -low density HMW polyetylene	0.35	0.35	0.50
CSPE (chlorosulphonated polyethylene)	0.50	0.50	0.70
XLPE	0.35	0.35	0.50
Nylon	0.40	0.35	0.50
CPE (chlorinated polyethylene)	0.50	0.50	0.70
PCP (polychloroprene)	0.50	0.50	0.70

M = ท่อโลหะ, เหล็กกล้า หรืออะลูมิเนียม **PVC** = ท่อพีวีซีผนังบาง
FBI = ท่อไฟเบอร์ (ท่อ Orangeburg หรือ Nocrete)

ก่อนการลากสายเคเบิล เราควรสำรวจท่อร้อยสายเคเบิลว่าภายในท่อไม่มีสิ่งกีดขวางใดๆ เช่น เศษวัสดุต่างๆ และของมีคมโดยเฉพาะที่ปลายท่อร้อยสายเคเบิล และใช้สารหล่อลื่นเตรียมไว้ก่อนเพื่อลดแรงดึงสายเคเบิล –ลดสัมประสิทธิ์ความเสียดทานทางจลน์- นอกจากนั้นยังควรทาสารหล่อลื่นที่เปลือกหุ้มสายเคเบิลและสลิงที่ใช้ลากสายเคเบิลตลอดเวลาขณะที่ร้อยสายเคเบิล สารหล่อลื่นที่ใช้ต้องมีคุณสมบัติที่ไม่ช่วยให้ไฟติด, ไม่มีสารระเหยที่เป็นอันตราย และไม่แข็งตัวเมื่อเสร็จการลากสายเคเบิล (เพื่อที่จะได้ลากสายเคเบิลออกจากท่อได้ง่ายในภายหลัง)

ปริมาณสารหล่อลื่น Q ที่ต้องใช้ขึ้นอยู่กับขนาดและความยาวของท่อร้อยสายเคเบิล สามารถคำนวณได้จากสมการ [IEEE1185, 2019]

$$Q = \ell_{\text{duct}} \cdot \varnothing_{\text{duct}} \quad [\text{L}] \tag{3.46}$$

เมื่อ ℓ_{duct} = ความยาวท่อร้อยสายเคเบิล [m]

$\varnothing_{\text{duct}}$ = เส้นผ่านศูนย์กลางท่อร้อยสายเคเบิล [m]

ปริมาณสารหล่อลื่นที่ต้องใช้จะมากขึ้นในกรณีที่ สายเคเบิลมีน้ำหนักมาก, สภาพของท่อร้อยสายเคเบิล เช่น เก่า, สกปรก หรือขรุขระมาก, จำนวนสายเคเบิลในท่อ, จำนวนโค้งตลอดความยาวที่ลากสายเคเบิล และสิ่งแวดล้อมขณะที่ลากสายเคเบิล เช่น อุณหภูมิ หรือมีน้ำขังในท่อ

สารหล่อลื่นที่ใช้ในการลากสายเคเบิลได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.18

ตารางที่ 3.18 สารหล่อลื่นที่ใช้ในการลากสายเคเบิล

สารหล่อลื่น	ประเภทของเปลือกหุ้มสายเคเบิล					
	PCP	PVC	XLP&PE	CSPE	CPE	Pb
Soap flakes and water	✔	✔	✔	✔	✔	✔
Bentonite –dry or with water	✔	✔	✔	✔	✔	✔
Grease	X	X	X	X	X	✔
Saop-based paste	✔	✔	✔	✔	✔	✔
Water/wax emaulsion	✔	✔	?	✔	✔	✔
Polymer-based aqueous solutions	✔	✔	✔	✔	✔	✔
✔ = ใช้ได้; **X** = ไม่แนะนำ; **?** = ให้สอบถามผู้ผลิต						

3.7.3.6 แรงดึงสายเคเบิลช่วงทางโค้ง

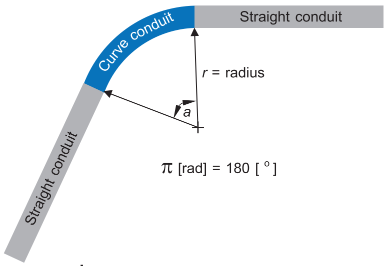
แรงดึงสายเคเบิลช่วงทางโค้งสามารถหาได้จากสมการ

$$T_o = T_i \cdot e^{fa} \tag{3.47}$$

เมื่อ T_o = แรงดึงสายเคเบิลขณะที่ออกจากปลายท่อส่วนที่โค้ง [N]

T_i = แรงดึงสายเคเบิลที่ปลายท่อส่วนที่ตรงก่อนเข้าปลายท่อส่วนที่โค้ง [N]

a = มุมที่ทางโค้ง [rad] ในรูปที่ 3.39



รูปที่ 3.39 มุม *a* และรัศมี *r* ของท่อโค้ง

เพื่อลดแรงดึงสายเคเบิลช่วงที่ผ่านทางโค้ง เราควรดึงสายเคเบิลเข้าท่อทางด้านที่ใกล้ที่สุดกับส่วนที่ท่อโค้ง

รัศมี *r* ที่น้อยที่สุดของทางโค้งสำหรับสายเคเบิลที่มีปลอกโลหะ/เกราะได้แสดงในตารางที่ 3.19

ตารางที่ 3.19 มุม *a* และรัศมี *r* ของท่อโค้ง

ประเภทปลอกโลหะ/เกราะ	*D/d*
Interlovked armor	7
Flat-tape armor	12
Wire armor	12
Corrugated sheath	7
Lead sheath	12

สำหรับสายเคเบิลที่มีชีลด์โลหะอย่างเดียว ให้ใช้ค่ารัศมีที่น้อยที่สุดเท่ากับ 12 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของสายเคเบิลแต่ละเส้น หรือ 7 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางรวมทั้งหมดของสายเคเบิล โดยใช้ค่าที่มากกว่าที่คำนวณได้

3.7.3.7 แรงกดที่ผนังท่อ

แรงกดที่ผนังท่อส่วนที่โค้ง P สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\begin{aligned} P &= \left[\frac{T_o}{r}\right] \quad \text{[N] for single core cable} \\ &= \left[\frac{3W_C - 2}{3}\right]\frac{T_o}{r} \quad \text{[N] for cradled lay} \\ &= \left[\frac{W_C}{2}\right]\frac{T_o}{r} \quad \text{[N] for triangular lay} \end{aligned} \tag{3.48}$$

โดยที่แรงกดผนังท่อสูงสุด P_{max} ได้แสดงไว้นตารางที่ 3.20

ตารางที่ 3.20 แรงกดผนังท่อสูงสุด P_{max} ช่วงที่ลากสายเคเบิลตรงทางโค้ง

ประเภทสายเคเบิล	แรงกดผนังท่อสูงสุด P_{max} [kN/m]
5-15 kV	7.3
25-35 kV	7.3
Interlocked armored cable -all voltage classes	4.4

3.7.3.8 การเบียดเสียดของสายในท่อ

ถ้าเราดึงสายเคเบิลสามเส้นที่วางแนวราบ สายเคเบิลอาจเบียดเสียหรือพันกัน (jamming) ที่ช่วงทางโค้งของท่อ ดังนั้นจึงควรตรวจสอบอัตราส่วน D/d ก่อนลากสายเคเบิล ดังนี้

- ไม่น่าจะเกิดการพันกันของสายเคเบิล เมื่อ $1.05D/d > 3.2$
- สายเคเบิลอาจพันกัน เมื่อ $2.8 \leq 1.05D/d \leq 3.2$
- ไม่น่าจะเกิดการพันกันของสายเคเบิล เมื่อ $1.05D/d < 2.6$ แต่ควรตรวจสอบระยะห่าง

3.7.3.9 แรงดึงสายเคเบิลในท่อลง/ขึ้นบ่อพักสายไฟ

ดูข้อ 4.11 ใน [IEEE1185, 2019]

3.8 หัวสายเคเบิลแรงสูง

สายเคเบิลอาจต่ออยู่ระหว่างสายไฟฟ้าแรงสูงเหนือดินหรือสายไฟฟ้าแรงสูงเหนือดินกับอุปกรณ์ไฟฟ้า -เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า- หรือบัสบาร์ในสวิตช์เกียร์แรงสูง ที่จุดต่อสายเคเบิลจึงสัมผัสกับอากาศรอบข้างตลอดเวลา ดังนั้นที่ปลายสายเคเบิลจึงต้องมี หัวสายเคเบิล (cable terminator) เพื่อป้องกันไม่ให้มีความชื้นหรือน้ำฝนเข้าไปในสายเคเบิล

หัวสายเคเบิลมีอยู่ 2 ประเภท คือ *หัวสายเคเบิลสำเร็จรูป* (cable termination kit) ที่ใช้กับเคเบิลในระบบจำหน่าย และ *หัวสายเคเบิลแบบปลอกฉนวนนำสายไฟ* (bushing type cable terminator) ที่ใช้กับเคเบิลในระบบส่ง ดังแสดงในรูปที่ 3.40

แบบใช้ภายในอาคาร

แบบใช้ภายนอกอาคาร

ก) หัวสายเคเบิลสำเร็จรูป

พอลิเมอร์

พอร์ซเลน

ข) หัวสายเคเบิลแบบปลอกฉนวนนำสายไฟ

รูปที่ 3.40 หัวสายเคเบิลที่ใช้ในทางปฏิบัติ

หัวสายเคเบิลสำเร็จรูปมักทำจากพอลิเมอร์ทำให้ประกอบกับสายเคเบิลได้ง่าย มีทั้งแบบใช้ภายในอาคารที่ไม่มีปีก และแบบใช้ภายนอกอาคารที่มีปีกเพื่อเพิ่มระยะรั่วป้องกัน สำหรับประเทศไทยแนะนำให้ใช้หัวสายเคเบิลสำเร็จรูปแบบใช้ภายนอกอาคารทุกกรณี เพราะสายเคเบิลที่ติดตั้งภายในอาคารแม้จะไม่ถูกแดดถูกฝน แต่ก็มีความชื้นมาเกาะที่ผิวของหัวสายเคเบิล -เนื่องจากในขณะที่สายเคเบิลจ่ายกำลังไฟฟ้า สายเคเบิลจะร้อนทำให้ไม่มีความชื้นเกาะที่ผิวของหัวสายเคเบิล แต่เมื่อสายเคเบิลไม่จ่ายกำลังไฟฟ้า หัวสายเคเบิลจะเย็นตัวลงในขณะที่อากาศรอบๆ เย็นลงเร็วกว่า อากาศจึงกลั่นตัวเป็นหยดน้ำเกาะที่ผิวหัวสายเคเบิลจนอาจทำให้เกิดวาบไฟตามผิว เหตุการณ์ดังกล่าวมักเกิดในช่วงเช้ามืดกับสายเคเบิลที่ติดตั้งในห้องที่ไม่มีการปรับอากาศหรือไม่มีการติดตั้ง *ลวดความร้อน* (heater) ไล่ความชื้นใกล้ๆ หัวสายเคเบิล-

หัวสายเคเบิลแบบปลอกฉนวนนำสายไฟที่ใช้ในระบบส่งที่มีระดับแรงดันต่ำกว่า 69 kV มักเป็นแบบไม่มีการเกลี่ยแรงดันซึ่งใช้ฉนวนตัน ส่วนที่ใช้ในระบบส่งที่มีระดับแรงดันสูงกว่านั้นจะเป็นแบบที่มีการเกลี่ยแรงดันที่มักเรียกว่าปลอกฉนวนนำสายไฟแบบตัวเก็บประจุ วัสดุที่ใช้ทำเปลือกมีเพียง 2 ประเภท คือพอร์ซเลนและพอลิเมอร์ ในปัจจุบันการไฟฟ้าต่างๆ ใช้หัวสายเคเบิลแบบปลอกฉนวนนำสายไฟที่ทำจากพอลิเมอร์เป็นหลักเพื่อหลีกเลี่ยงผลทางกลที่ตามมาหลังจากที่หัวสายเคเบิลระเบิด (ภาพซ้ายมือในรูปที่ 3.40 ข)) เนื่องจากหัวสายเคเบิลเกิดดีสชาร์จภายใน

3.9 เอกสารอ้างอิงบทที่ 3

[ANSI/NETA ATS, 2009], "*Acceptance testing specifications for electrical power equipment and systems*", International electrical testing association, 2009.

[IEEE575, 2014], "*Guide for bonding shields and sheaths of single-conductor power cables rated 5 kV through 500 kV*", IEEE, 2014.

[IEEE576, 2000], "*Practice for installation, termination, and testing of insulated power cable as used in industrial and commercial applications*", IEEE, 2000.

[IEEE1185, 2109], "*Practice for cable installation in generating stations and industrial facilities*", IEEE, 2019.

[IEC60287-1-1, 2006], "*Electric cables - Calculation of the current rating - Part 1-1: Current rating equations (100 % load factor) and calculation of losses - General*", IEC, 2006.

[IEC60287-2-1, 2015], "*Electric cables - Calculation of the current rating - Part 2-1: Thermal resistance - Calculation of thermal resistance*", IEC, 2015.

[IEC60502-2, 2014], "*Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 1 kV (Um = 1,2 kV) up to 30 kV (Um = 36 kV) – Part 2: Cables for rated voltages from 6 kV (Um = 7,2 kV) up to 30 kV (Um = 36 kV)*", IEC, 2014.

[Moore, 2006], Moore, G.F., "*Electric cables handbook*", 3rd edition, Blackwell science Ltd., UK, 2006.

[NESC, 2017], "*National electrical safety code*", IEEE, 2017.

[Siemens, 1990], Heinhold, L., "*Power cables and their application – Part 1: Material, construction, criteria for selection, project planning, laying and installation, accessories, measuring and testing*", 3rd revised edition, Siemens Aktien-gesellshaft, Berlin and Munich, 1990.

[TB797, 2020], "*Sheath bonding systems of AC transmission cables -design, testing, and maintenance*", Technical brochure 797, CIGRE, 2020.

บทที่ 4. สนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากสายส่งไฟฟ้า

ในปัจจุบันทั่วโลกให้ความสนใจกับสิ่งแวดล้อมมากขึ้น ทั้งการหันมาใช้ยานพาหนะที่ขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้าเพื่อลดควันพิษที่ปล่อยออกมาจากท่อไอเสียของยานพาหนะ เช่น รถจักรยานยนต์, รถยนต์, เรือ, เครื่องบิน และเครื่องยนต์สันดาปภายในอื่นๆ การลดการใช้พลาสติกโดยหันมาใช้วัสดุที่นำกลับมาใช้ใหม่ได้ หรือการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงที่มีส่วนผสมของแอลกอฮอล์ รวมถึงสนใจกับปัญหาที่เกิดขึ้นจากการแพร่กระจายสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงอีกด้วย ทั้งๆ ที่ในชีวิตประจำเราได้รับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าความเข้มสูงจากอุปกรณ์ไฟฟ้าที่เราใช้อยู่เป็นประจำ เช่น เครื่องทำน้ำร้อน, เครื่องเป่าผม, เตาอบไฟฟ้า, เตาไฟฟ้า หรืออุปกรณ์ไฟฟ้าใดๆ ที่กินกระแสสูงๆ ที่เราต้องเข้าอยู่ใกล้ๆ

อย่างไรก็ตาม สนามไฟฟ้า E และสนามแม่เหล็ก B เมื่อสายส่งไฟฟ้าทำงานเต็มพิกัดส่งออกมาก็ควรมีค่าไม่เกินข้อกำหนดของหน่วยงานกลางระหว่างประเทศ คือ International commission on non-ionizing radiation protection, ICNIRP, (เป็นหน่วยงานของสหประชาชาติ) ที่แสดงในตารางที่ 4.1 ยกเว้นข้อกำหนดของการไฟฟ้า [EGAT, 2020] หรือหน่วยงานรัฐที่มีค่าต่ำกว่า

ตารางที่ 4.1 ข้อกำหนดของสนามไฟฟ้า E และสนามแม่เหล็ก B

	E [kV_{rms}/m]		B [μT/mG]	
	[ICNIRP, 2010]	EGAT	[ICNIRP, 2010]	EGAT
พนักงาน	10	2	1000/10000	20/200
สาธารณะ	5		200/2000	
EGAT specified E and B limit at 1 m above ground at RoW				

ค่า E และ B ในตารางเป็นค่าสูงสุดของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ "ไม่น่าจะมีผลกระทบ" ต่อสุขภาพของสิ่งมีชีวิตในระยะยาว -ในที่นี้ผู้เขียนเข้าใจว่า "ไม่น่าจะมีผลกระทบ" ไม่ได้หมายความว่าจะมีความปลอดภัย เพราะอาจยังไม่มีรายงานใดๆ ที่น่าเชื่อถือได้ รายงานว่ามีอันตรายเกิดขึ้น-

ในบทนี้จะแสดงการหาค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่แพร่กระจายจากสายส่งกำลังไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆ บนผิวดิน ไม่ว่าสายส่งกำลังไฟฟ้านั้นจะเป็นสายส่งไฟฟ้าแรงสูงเหนือพื้นดินหรือสายเคเบิลใต้ดินก็ตาม แต่โปรดสังเกตว่าสายเคเบิลใต้ดินนั้นไม่มีสนามไฟฟ้าแพร่ไปด้านนอกเพราะปลอก/ชีลด์โลหะ-เกราะต่อลงดินเสมอ -ชีลด์โลหะบางๆ ของสายเคเบิลไม่สามารถกั้นการแพร่กระจายของสนามแม่เหล็กได้ วัสดุที่กั้นสนามแม่เหล็กได้ดีคือ วัสดุแม่เหล็ก (magnetic material) เช่น เหล็กที่มีความหนามากๆ-

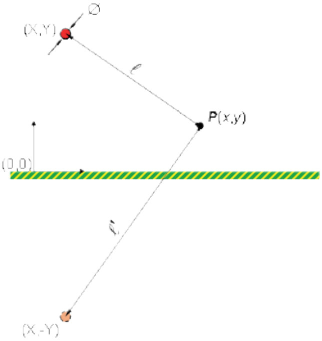
ในที่นี่เราจะพิจารณาว่าระบบส่งกำลังไฟฟ้าทั้งสองประเภทประกอบจากตัวนำเท่านั้น โดยไม่คำนึงถึงส่วนประกอบอื่นๆ เช่น พวงลูกถ้วยไฟฟ้า, เสาส่งไฟฟ้า, บ่อพักสายไฟฟ้า ฯลฯ ดังนั้นจึงสามารถใช้สมการทางคณิตศาสตร์ในการคำนวณได้ ถ้าเป็นโครงสร้างระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าที่ใช้งานจริง เราก็อาจคำนวณค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กด้วยซอฟต์แวร์สำเร็จรูป เช่น [Ansys Maxwell®, 2019] หรือ [Comsol, 2020]

4.1 การคำนวณสนามไฟฟ้า *E*

การหาค่า สนามไฟฟ้า (electric field, *E*) ณ จุดใดๆ ที่เกิดจากตัวนำที่มีศักย์ไฟฟ้า มีขั้นตอนดังนี้

1. สมมุติให้ประจุไฟฟ้าบนตัวนำไฟฟ้ามีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอตลอดความยาว และกำหนดให้ประจุต่อความยาวมีค่าเท่ากับ λ [C/m] จากนั้นหาค่าสนามไฟฟ้า *E* ที่เกิดจากประจุไฟฟ้านั้น
2. ค่าสนามไฟฟ้า *E* ที่ได้คำนวณได้จะนำมาคำนวณหาศักย์ไฟฟ้า *U* ที่ตัวนำ ทำให้เราได้ความสัมพันธ์ระหว่าง *U* กับ λ
3. จากนั้นแปลงความสัมพันธ์ระหว่าง *E* กับ λ ให้อยู่ในรูปของ *E* กับ *U*

ขั้นแรกกำหนดให้ตัวนำไฟฟ้ายาว *L* มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ $\varnothing$ อยู่ที่ตำแหน่ง (X,Y) เหนือพื้นดิน โดยจุดที่ต้องการทราบค่าสนามไฟฟ้าอยู่ที่จุด ***P*** ณ ตำแหน่ง (*x*,*y*) ซึ่งห่างจากสายตัวนำเท่ากับ ℓ ดังแสดงในรูปที่ 4.1



(X,Y) = ตำแหน่งของจุดศูนย์กลางของตัวนำไฟฟ้ายาว *L* [m]
(*x*,*y*) = ตำแหน่งของจุด ***P*** ที่สนใจค่าสนามไฟฟ้า
$\varnothing$ = เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำไฟฟ้า [m]
λ = ประจุบนตัวนำ [C/m]
ℓ = ระยะห่างระหว่างตัวนำกับจุด ***P***
ℓ' = ระยะห่างระหว่างเงาฉายของตัวนำไฟฟ้า (image) กับจุด ***P***

รูปที่ 4.1 การคำนวณสนามไฟฟ้าที่จุด ***P*** ที่เกิดจากตัวนำไฟฟ้าที่มีแรงดัน *U* วางเหนือพื้นดิน

การคำนวณใช้หลักการของ image โดยพิจารณาให้มีเงาฉายของตัวนำที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ $\varnothing$ [m] เช่นกัน แต่มีประจุ -λ [C/m] อยู่ที่ตำแหน่ง (X,-Y) ใต้พื้นดิน ห่างจากจุด ***P*** เท่ากับ ℓ' [m] จากกฎของเกาส์ (Gauss's law) สนามไฟฟ้า *E* ที่ตำแหน่ง ***P*** จึงหาได้จากสมการ

$$\int E \cdot dA = \frac{q}{\varepsilon_0}$$
$$E \cdot 2\pi\ell L = \frac{\lambda L}{\varepsilon_0} \Rightarrow E = \frac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0 \ell} \tag{4.1}$$

ดังนั้นสนามไฟฟ้าจากตัวนำในแนวแกน *x* และ *y* ที่จุด ***P*** จึงหาได้จากสมการ

$$E_x = \frac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0\ell}\frac{x - X}{\ell}; \quad E_y = \frac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0\ell}\frac{y - Y}{\ell}$$

และในทำนองเดียวกัน สนามไฟฟ้าจากเงาฉายของตัวนำในแนวแกน *x* และ *y* ที่จุด ***P*** หาได้จากสมการ

$$E_{x,img} = \frac{-\lambda}{2\pi\varepsilon_0\ell'}\frac{x - X}{\ell'}; \quad E_{y,img} = \frac{-\lambda}{2\pi\varepsilon_0\ell'}\frac{y + Y}{\ell'}$$

สนามไฟฟ้ารวมทั้งหมดที่จุด ***P*** จึงหาได้จากสมการที่ 4.2

$$E_{x,total} = \frac{\lambda(x-X)}{2\pi\varepsilon_0}\left[\frac{1}{\ell^2}-\frac{1}{\ell'^2}\right] \tag{4.2a}$$

$$E_{y,total} = \frac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0}\left[\frac{y-Y}{\ell^2}-\frac{y+Y}{\ell'^2}\right] \tag{4.2b}$$

ศักย์ไฟฟ้าของตัวนำที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง $\varnothing$ จึงหาได้จากการอินตีเกรตสนามไฟฟ้า E ดังนี้

$$U_b - U_a = -\int_{r_a}^{r_b} E \cdot dx = -\int_{r_a}^{r_b} \frac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0 x}\cdot dx = -\frac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0}\ln\frac{r_b}{r_a}$$

$$U_{r=\varnothing/2} = -\frac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0}\ln\frac{\varnothing}{2}$$

ศักย์ไฟฟ้าที่ผิวตัวนำซึ่งเกิดจากประจุบนตัวนำและประจุบนเงาฉายของตัวนำจึงมีค่าเท่ากับ

$$U = -\frac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0}\ln\frac{\varnothing}{2}+\frac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0}\ln\left[2Y+\frac{\varnothing}{2}\right] = -\frac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0}\ln\left[\frac{\varnothing}{4Y+\varnothing}\right]$$

ความสัมพันธ์ระหว่างประจุไฟฟ้าต่อหน่วยความยาว λ [C/m] และแรงดันไฟฟ้า U [V] จึงหาได้จากสมการที่ 4.3

$$\lambda = -\frac{2\pi\varepsilon_0 U}{\ln\left[\frac{\varnothing}{4Y+\varnothing}\right]} \tag{4.3}$$

เมื่อแทนสมการที่ 4.3 ในสมการที่ 4.2a และ 4.2b เราจะสามารถหาสนามไฟฟ้าที่จุด ***P*** เมื่อตัวนำมีแรงดันเท่ากับ U ได้จากสมการที่ 4.4 โดยเราจะเห็นว่าสนามไฟฟ้าจะแปรผกผันกับระยะห่างจากตัวนำยกกำลังสอง ซึ่งหมายความว่าสนามไฟฟ้าจะมีค่าลดลงเร็วมากเมื่อห่างจากตัวนำออกไป

$$E_{x,total} = \frac{U(x-X)}{\ln\left[\frac{\varnothing}{4Y+\varnothing}\right]}\left[-\frac{1}{\ell^2}+\frac{1}{\ell'^2}\right]; \qquad E_{y,total} = \frac{U}{\ln\left[\frac{\varnothing}{4Y+\varnothing}\right]}\left[-\frac{y-Y}{\ell^2}+\frac{y+Y}{\ell'^2}\right] \tag{4.4}$$

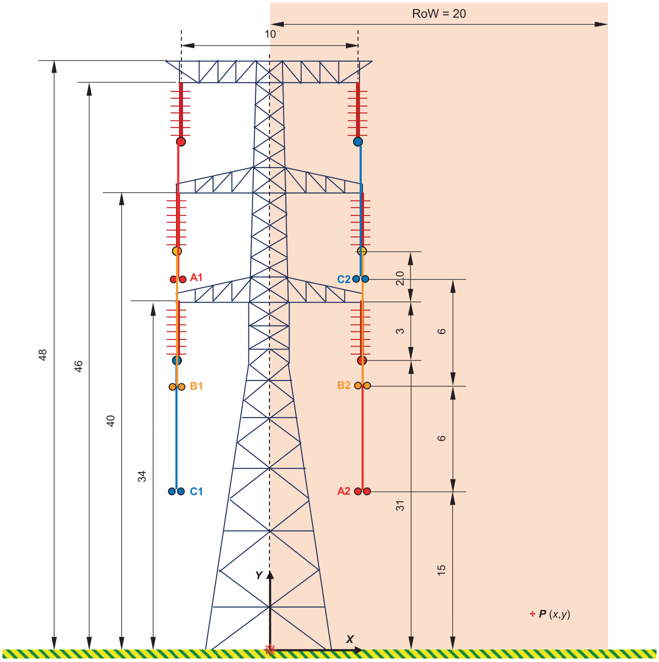
สนามไฟฟ้ารวมจึงมีค่าเท่ากับ

$$E = \sqrt{E_{x,total}^{\;2}+E_{y,total}^{\;2}}$$

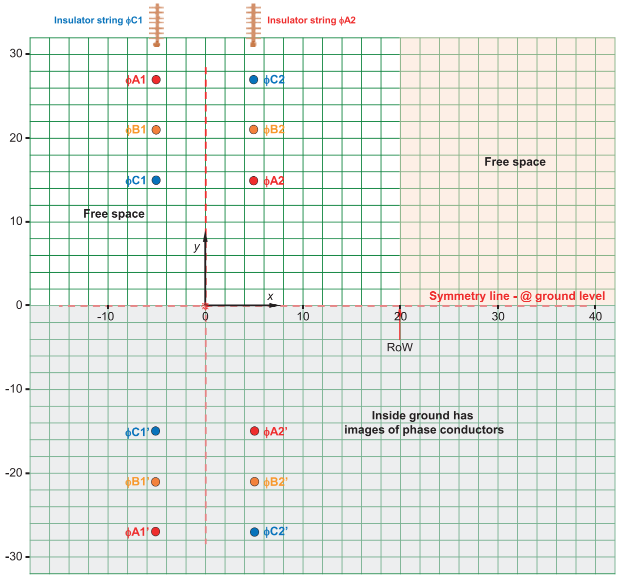
รูปที่ 4.2 แสดงตัวอย่างโครงสร้างของเสาส่งไฟฟ้าต้นที่รับน้ำหนักสายไฟฟ้าที่ใช้แขนเสาไฟฟ้าแบบเหล็กถักที่สมมุติขึ้น เพื่อใช้ในการคำนวณสนามไฟฟ้าที่บริเวณ RoW = 20 m โดยกำหนดให้สายเฟสทุกเส้นมีระยะเหนือพื้นดินเท่ากับระยะต่ำสุดที่กึ่งกลางระหว่างเสาส่งไฟฟ้า พารามิเตอร์ต่างๆ ของสายเฟสได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.2 -ตำแหน่งพื้นดินที่กึ่งกลางเสาไฟฟ้ามีพิกัด (X,Y) = (0,0)- และโมเดลที่ใช้ในคำนวณได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.3

ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์ของตัวนำที่ใช้ในการคำนวณค่าสนามไฟฟ้า -บริเวณทั้งหมดที่อยู่เหนือระดับดินว่างเปล่า

ตัวนำ	A1	B1	C1	A2	B2	C2
U_m [kV_{rms}]	245					
ϕ [°]	0	-120	+120	0	-120	+120
X [m]	-5	-5	-5	5	5	5
Y [m]	237	21	15	15	21	27



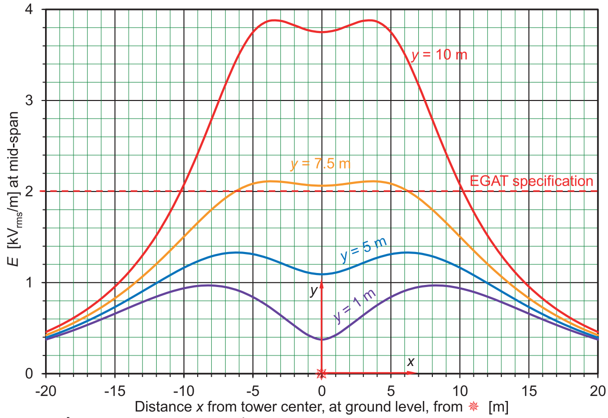
รูปที่ 4.2 ตัวอย่างเสาส่งไฟฟ้าที่ใช้แขนเสาไฟฟ้าแบบเหล็กถักในการคำนวณสนามไฟฟ้าที่ขอบ RoW



รูปที่ 4.3 โมเดลในการคำนวณสนามไฟฟ้า -บริเวณเหนือพื้นดินเป็นที่ว่าง-

4.1.1 ค่าสนามไฟฟ้าที่จุดต่าง ๆ ณ ตำแหน่งท้องช้าง

รูปที่ 4.4 แสดงค่าสนามไฟฟ้า E [kV_{rms}/m] ที่คำนวณได้ที่ความสูง y = 1, 5, 7.5, และ 10 m เหนือพื้นดิน ที่ระยะ x ต่างๆ จากจุดกึ่งกลางเสาไฟฟ้าที่ระดับผิวดิน ❋ ไปจนถึง RoW ที่ ±20 m



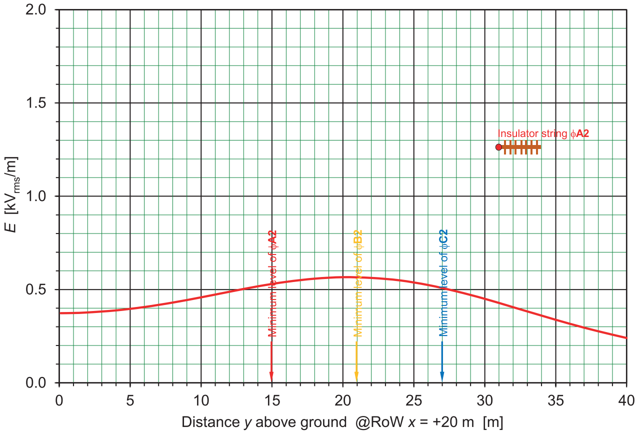
รูปที่ 4.4 สนามไฟฟ้า E ที่จุดต่างๆ ในบริเวณ RoW ณ ตำแหน่งท้องช้าง

จากรูปที่ 4.4 เราจะเห็นว่าที่ขอบ RoW ค่าสนามไฟฟ้าที่ระดับความสูง y = 1 m จากพื้นดินมีค่าสูงสุดประมาณ 0.4 kV_{rms}/m ซึ่งต่ำกว่าข้อกำหนดของ กฟผ. ที่ 2 kV_{rms}/m มาก และแม้ว่า E จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อระยะห่างจากพื้นดินมากขึ้น -จนถึง y = 10 m- ที่ขอบ RoW ก็ยังมีสนามไฟฟ้าต่ำกว่าข้อกำหนดของ กฟผ. ที่ 2 kV_{rms}/m มากอยู่ดี ซึ่งหมายถึงถ้ามีสิ่งมีชีวิตอยู่นอก RoW และอยู่ที่ความสูงไม่เกิน 10 m จากพื้นดิน สิ่งมีชีวิตก็น่าจะไม่ได้รับอันตรายจากสนามไฟฟ้า

แต่ถ้าเราพิจารณาสนามไฟฟ้าในบริเวณ RoW ก็จะพบว่าค่า E จะสูงเกินข้อกำหนดของ กฟผ. ที่ 2 kV_{rms}/m เมื่อระดับความสูง y ~ 7 m แต่ค่าดังกล่าวก็จะเกินข้อกำหนดในช่วง x ~ ±6 m จากจุดกึ่งกลางเสาไฟฟ้าที่ระดับผิวดิน ❋ เท่านั้น ซึ่งหมายถึงถ้ามีสิ่งมีชีวิตในบริเวณ RoW บริเวณนี้ สิ่งมีชีวิตอาจจะไม่ปลอดภัยจากสนามไฟฟ้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งช่างของการไฟฟ้าที่ปีนเสาส่งไฟฟ้าทางด้านนอกเสา ส่วนช่างที่ปีนเสาไฟฟ้าทางด้านในของเสาไม่น่าจะเป็นอันตรายเพราะโครงเหล็กถักของเสาส่งไฟฟ้าจะกั้นสนามไฟฟ้าไว้

การคำนวณข้างต้นพิจารณาในกรณีที่ในบริเวณขอบ RoW ไม่มีวัตถุใดอยู่เลย แต่หากมีสิ่งปลูกสร้าง เช่น อาคารสูงที่ปลูกสร้างที่ขอบ RoW เมื่อความสูงของสิ่งปลูกสร้างสูงขึ้นก็จะเข้าใกล้สายตัวนำมากขึ้นก็จะทำให้สนามไฟฟ้าในบริเวณนั้นสูงขึ้นด้วย ดังนั้นจึงได้คำนวณค่าสนามไฟฟ้าที่ขอบ RoW (x = +20 m ในรูปที่ 4.3 โดยแปรความสูง y จากพื้นดิน ดังแสดงในรูปที่ 4.5

จากรูปที่ 4.5 จะเห็นว่าสนามไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นเมื่อระยะความสูงจากพื้นดินเพิ่มขึ้น โดยจะมีค่าสูงสุดประมาณ 0.6 kV_{rms}/m ณ ความสูง y ~ 21 m จากพื้นดินซึ่งเป็นแนวระดับท้องช้างของสายส่งไฟฟ้า **ϕB2** พอดี จากนั้นสนามไฟฟ้าจะมีค่าลดลงที่ความสูงมากขึ้นไปเนื่องจากที่ความสูงที่มากกว่านั้นจะห่างจากสายส่งไฟฟ้ามากขึ้นเรื่อยๆ จากการคำนวณที่ได้จึงอาจจะกล่าวได้ว่าเสาส่งไฟฟ้าที่ออกแบบนี้ ยังแพร่สนามไฟฟ้าที่ยอมรับได้ที่ความสูงระดับแนวสายส่งไฟฟ้าทุกเฟสที่ขอบ RoW

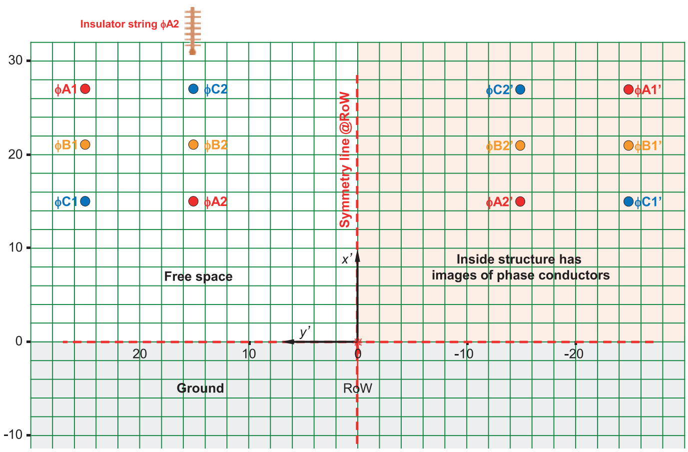


รูปที่ 4.5 สนามไฟฟ้า E ที่ความสูงเหนือพื้นดินต่างๆ ณ ตำแหน่งท้องช้าง -ไม่มีสิ่งปลูกสร้างนอกขอบ RoW

4.1.2 ค่าสนามไฟฟ้าที่ขอบ RoW

ค่าสนามไฟฟ้าต่างๆ ที่กล่าวข้างต้นเป็นค่าที่คำนวณได้จากการสมมุติว่าบริเวณทั้งหมดที่อยู่เหนือระดับดินนั้นว่างเปล่า -โดยที่ระดับดินเป็นแกนสมมาตร- โดยใช้โมเดลในรูปที่ 4.3

ดังนั้นหากมีสิ่งปลูกสร้างขนาดใหญ่ เช่น อาคารสูงที่ขอบ RoW ค่าสนามไฟฟ้าก็จะเปลี่ยนไปจากที่คำนวณได้ในรูปที่ 4.5 เนื่องจากสิ่งปลูกสร้างขนาดใหญ่เหล่านั้นจะมีศักย์ไฟฟ้าเป็นศูนย์เท่ากับพื้นดิน -ไม่รวมสิ่งปลูกสร้างโดดๆ ที่มีศักย์เป็นศูนย์หรือไม่เท่ากับศูนย์ เช่น เสาไฟฟ้า, เสาส่งสัญญาณสื่อสาร, ต้นไม้, เสาธง, ฯลฯ- ทำให้ลักษณะการกระจายของสนามไฟฟ้าที่ไม่เหมือนในกรณีปกติทั่วไป ในกรณีจึงต้องใช้โมเดลในรูปที่ 4.6 เพื่อคำนวณสนามไฟฟ้าที่ขอบ RoW โดยใช้พารามิเตอร์ที่แสดงในตารางที่ 4.3

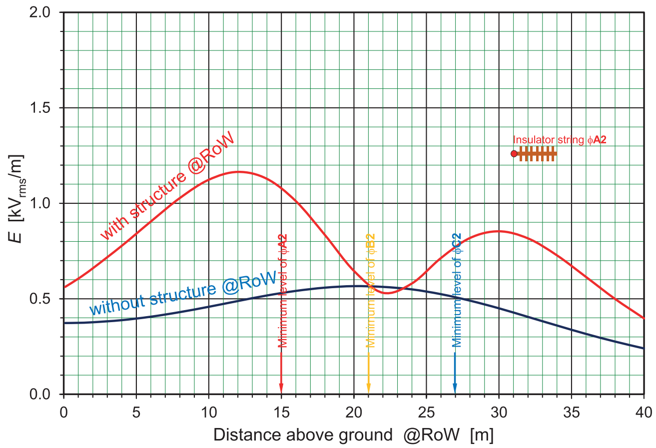


รูปที่ 4.6 โมเดลในการคำนวณสนามไฟฟ้า -ที่ขอบ RoW มีสิ่งปลูกสร้างขนาดใหญ่-

ตารางที่ 4.3 พารามิเตอร์ของตัวนำที่ใช้ในการคำนวณค่าสนามไฟฟ้า -มีสิ่งปลูกสร้างขนาดใหญ่ที่ RoW

ตัวนำ	A1	B1	C1	A2	B2	C2
U_m [kV_{rms}]	245					
ϕ [°]	0	-120	+120	0	-120	+120
X [m]	27	21	15	15	21	27
Y [m]	25	25	25	15	15	15

ผลการคำนวณค่าสนามไฟฟ้าที่แนวสมมาตร (x = +20 m) ที่ความสูงต่างๆ ที่ได้จากการใช้โมเดลที่ไม่มีสิ่งปลูกสร้าง (ตามระยะ y จากระดับพื้นดินในรูปที่ 4.3) และโมเดลที่มีสิ่งปลูกสร้างต่อลงดิน (ตามระยะ x' จากระดับพื้นดินในรูปที่ 4.6) ได้แสดงในรูปที่ 4.7

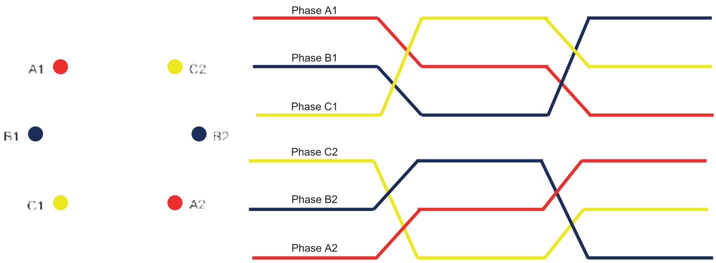


รูปที่ 4.7 สนามไฟฟ้า E ที่ความสูงเหนือพื้นดินต่างๆ ณ ตำแหน่งท้องช้าง -มีสิ่งปลูกสร้างนอกขอบ RoW

จากรูปที่ 4.7 เราจะเห็นว่าค่าสนามไฟฟ้าที่คำนวณได้จากโมเดลทั้งสองแบบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะจากพื้นดินเพิ่มขึ้นเข้าใกล้สายเฟสเส้นล่างสุดมากขึ้น และที่ความสูงมากกว่าสายเฟสเส้นบนสุดค่าสนามไฟฟ้าก็จะมีค่าลดลง อย่างไรก็ตาม ค่าสนามไฟฟ้าที่คำนวณได้จากโมเดลที่มีสิ่งปลูกสร้างที่ต่อลงดินที่ขอบ RoW จะมีค่าสูงมากกว่าโมเดลที่ไม่สิ่งปลูกสร้างโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ความสูง 12-13 m ซึ่งเป็นระดับที่ใกล้เคียงกับระดับต่ำสุดของสายเฟสเส้นล่างสุด

แม้ว่าค่าสนามไฟฟ้าที่คำนวณได้จากทั้ง 2 กรณี จะมีค่าต่ำกว่าข้อกำหนดของ กฟผ. ที่ 2 kV_{rms}/m แต่ก็ควรระมัดระวังไม่ให้มีการก่อสร้างสิ่งปลูกสร้างที่ขอบ RoW

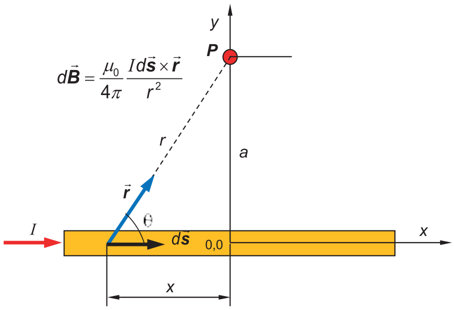
โปรดสังเกตว่าสายส่งไฟฟ้าเหนือดินชุดทางซ้ายและชุดทางด้านขวามีการจัดเรียงสายเฟสไม่เหมือนกันเพราะต้องการหักล้างผลของสนามไฟฟ้าที่ห่างออกไปจากตัวนำ การจัดเรียงสายเฟสนี้จะมีลักษณะเหมือนเดิมแม้ว่าจะทำการการสลับสายเฟสเป็นช่วงเพื่อทำให้อิมพีแดนซ์ของสายส่งแต่ละเฟสมีค่าประมาณเท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 การสลับตำแหน่งสายเฟสของวงจรคู่ (double-circuit three-phase line transposition)

4.2 การคำนวณความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก *B*

การหาค่า ความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก (magnetic flux density, *B*) ณ จุด ***P*** ใดๆ ที่เกิดจากกระแส I ที่ไหลในตัวนำไฟฟ้าที่แสดงในรูปที่ 4.9 สามารถใช้หลักการของ Biot savart ดังนี้



รูปที่ 4.9 สนามแม่เหล็ก *B* ที่จุด ***P*** เมื่อมีกระแส I ไหลในตัวนำไฟฟ้า

ความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก *B* ที่จุด ***P*** จึงหาได้จากผลรวมของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสในส่วนสั้นๆ *ds* ของตัวนำที่ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขนาด *dB* ในกรณีที่ตัวนำยาวกว่าระยะ *a* มากๆ ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กจะมีค่าเท่ากับ

$$B = I\frac{\mu_0}{2\pi a} \tag{4.5}$$

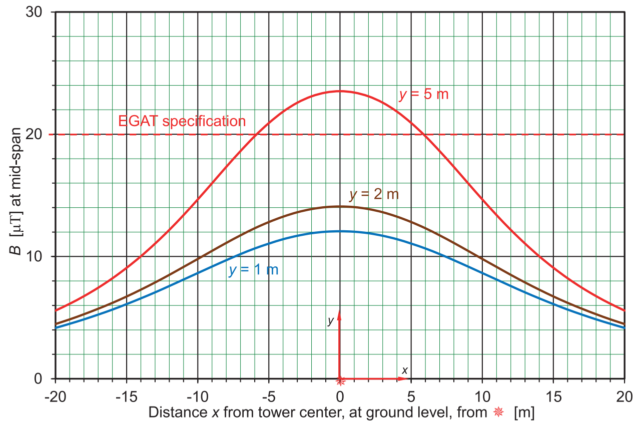
ซึ่งจะเห็นว่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กแปรผกผันกับระยะห่างจากตัวนำ

4.2.1 ค่า *B* ที่จุดต่าง ๆ ณ ตำแหน่งท้องช้าง

เมื่อใช้โครงสร้างของเสาส่งไฟฟ้าในรูปที่ 4.2 โดยใช้พารามิเตอร์ต่างๆ ของกระแสที่แสดงไว้ในตารางที่ 4.4 ในการคำนวณก็จะพบว่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก *B* ในบริเวณ RoW ที่ความสูงต่างๆ เหนือพื้นดินมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 4.10

ตารางที่ 4.4 กระแส I และเฟส ϕ ของกระแสที่ไหลในตัวนำต่างๆ

ตัวนำ	A1	B1	C1	A2	B2	C2
I [A_{rms}]	2000					
ϕ [°]	0	-120	+120	0	-120	+120



รูปที่ 4.10 ความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก *B* ที่จุดต่างๆ ในบริเวณ RoW ณ ตำแหน่งท้องช้าง

จากรูปที่ 4.10 จะเห็นว่าสนามแม่เหล็กที่ความสูง y = 1, 2 และ 5 m จากพื้นดินตลอด RoW ณ ตำแหน่งท้องช้างของสายเฟสเส้นล่างสุดแทบทั้งหมด -ยกเว้นในช่วง ±6 m ที่ความสูง y = 5 m- มีค่าต่ำกว่าข้อกำหนดของ กฟผ. คือ B = 20 μT ดังนั้นสิ่งมีชีวิตโดยทั่วไปก็น่าจะไม่ได้รับอันตรายจากสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น แต่เราจะเห็นว่าค่าของสนามแม่เหล็กสูงขึ้นเมื่อระยะห่างจากพื้นดินมากขึ้น ดังนั้นช่างของการไฟฟ้าที่ปีนเสาส่งไฟฟ้าไม่ว่าจะทางด้านในหรือนอกเสาอาจจะเป็นอันตรายได้ เพราะโครงเหล็กถักของเสาส่งไฟฟ้าแทบจะไม่สามารถกั้นสนามแม่เหล็กได้เลย

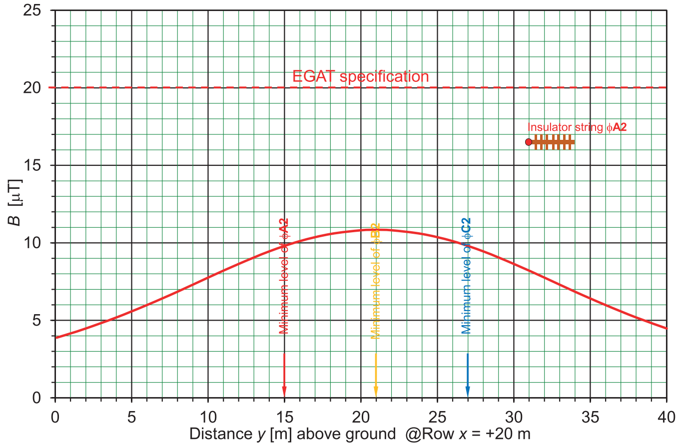
4.2.2 ค่า *B* ที่ขอบ RoW

รูปที่ 4.11 แสดงค่าสนามแม่เหล็กที่ขอบ RoW ที่ x = +20 m ที่ความสูงต่างๆ จนถึง y = 40 m ซึ่งจะเห็นว่าสนามแม่เหล็กจะมีค่าสูงขึ้นตามความสูงเมื่อเข้าใกล้สายตัวนำมากขึ้น จนมีค่าสูงสุดที่ความสูงประมาณ 21 m ซึ่งเป็นความสูงในระดับเดียวกับสายเฟสเส้นกลางโดยมีค่าสนามแม่เหล็ก B = 11 μT ซึ่งต่ำกว่าข้อกำหนดของ กฟผ. จากนั้นสนามแม่เหล็กจะลดลงเมื่อสูงขึ้นไปมากกว่านั้น ทั้งนี้เพราะระยะห่างจากสายตัวนำเพิ่มขึ้น

4.3 สรุป

จากการคำนวณสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้า 230 ในขณะที่ทำงานที่แรงดัน U_m = 245 kV_{rms} และตัวนำทุกเส้นจ่ายกระแสไฟฟ้าเต็มพิกัดที่ I_{rate} = 1000 A_{rms} พบว่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ขอบ RoW ที่ความสูงเหนือพื้นดิน 1 m มีค่าประมาณ 0.4 kV_{rms}/m และ 4 μT ตามลำดับ โดยทั้งสองค่าอยู่ต่ำกว่าข้อกำหนดของ กฟผ.

จากการประเมินค่าสนามไฟฟ้าในกรณีที่ไม่มีสิ่งก่อสร้างเทียบกับกรณีที่มีสิ่งก่อสร้างที่ตั้งสมมติฐานว่าสิ่งก่อสร้างนั้นต่อลงดิน พบว่าสนามไฟฟ้าที่คำนวณได้เมื่อมีสิ่งปลูกสร้างมีค่าที่สูงกว่าในกรณีที่ไม่มีสิ่งปลูกสร้าง โดยพบว่าค่าสนามไฟฟ้าจะมีค่าต่ำกว่า 2 kV_{rms}/m ตลอดทั้งช่วงที่คำนวณ



รูปที่ 4.11 ความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก *B* ที่ความสูงเหนือพื้นดินต่างๆ ณ ตำแหน่งท้องช้าง -ไม่มีสิ่งปลูกสร้างนอกขอบ RoW

ส่วนในกรณีของความหนาแน่นสนามแม่เหล็กที่ความสูงต่างๆ ที่ขอบ RoW ค่า *B* จะสูงขึ้นเมื่อเข้าใกล้สายเฟสมากขึ้นและในช่วงความสูงประมาณ 21 m ซึ่งอยู่ในระดับเดียวกับสายเฟสเส้นกลาง แต่ *B* ก็มีค่าเพียง 11 μT ซึ่งต่ำกว่าข้อกำหนดของ กฟผ. ที่ 20 μT

ข้อควรระวังคือ ในบริเวณ RoW ช่วงรอบๆ กึ่งกลางเสาส่งไฟฟ้า ค่า *B* จะเพิ่มขึ้นตามความสูง *y* จากพื้นดิน ดังนั้นช่างของการไฟฟ้าที่ปีนเสาส่งไฟฟ้าไม่ว่าจะทางด้านในหรือนอกเสาอาจจะเป็นอันตรายได้หากสายส่งไฟฟ้าจ่ายโหลดให้ผู้ใช้ เพราะโครงเหล็กถักของเสาส่งไฟฟ้าแทบจะไม่สามารถกั้นความหนาแน่นสนามแม่เหล็กได้เลย (แม้ว่าการคำนวณในบทนี้ทั้งหมดจะทำที่จุดท้องช้างมีค่าต่ำสุดที่จุดกึ่งกลางระหว่างเสาส่งไฟฟ้า แต่ข้อสรุปนี้ก็ใช้ได้ที่ตำแหน่งของเสาส่งไฟฟ้า เพียงแต่ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กค่าสูงจะเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง *y* ที่สูงขึ้นไปกว่าเดิม)

ส่วนสนามไฟฟ้านั้น ถ้าช่างของการไฟฟ้าปีนเสาส่งไฟฟ้าทางด้านในของส่งไฟฟ้า ผู้เขียนคาดว่าน่าจะไม่เกิดอันตรายเพราะเสาส่งไฟฟ้าที่ต่อลงกราวน์จะกั้นสนามไฟฟ้าไว้ แต่ถ้าปีนทางด้านนอกของเสาส่งไฟฟ้าก็ต้องคำนวณกันใหม่เพราะเสาส่งไฟฟ้าต่อลงกราวน์ ซึ่งคล้ายกับในกรณีที่มีสิ่งปลูกสร้างขนาดใหญ่ที่ขอบ RoW และการคำนวณอาจต้องใช้การจำลองแบบด้วยซอฟต์แวร์เพราะเสาส่งไฟฟ้ามีขนาดไม่ใหญ่มากนัก

4.4 เอกสารอ้างอิงบทที่ 4

[Ansys Maxwell®, 2019], "*ANSYS Electronics Desktop 2019 (Maxwell)* ", Ansys, Inc., USA, 2019.

[Comsol, 2020], "*COMSOL Multiphysics® software*", COMSOL, Inc., USA, 2020.

[EGAT, 2020], "*Design of a 230 kV compact transmission line for using in limited area*", Final report, CEPT, 2020. (in Thai)

[ICNIRP, 2010], "*ICNIRP guide line for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (1 Hz-100 kHz)*", International commission on non-ionizing radiation protection, Health Physics, Vol 99(6), pp.818-836, 2010.

บทที่ 5. การทดสอบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง

การทดสอบมีหลายประเภท เริ่มตั้งแต่หลังจากการออกแบบอุปกรณ์ก็มี การทดสอบเฉพาะแบบ (type test, TT) เพื่อยืนยันว่าอุปกรณ์ที่ออกแบบไว้มีคุณสมบัติขั้นต่ำตามที่ต้องการ -ในที่นี้มักทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ทุกหัวข้อที่มาตรฐาน เช่น IEC, ANSI, มอก. รวมถึงข้อกำหนดของผู้ซื้อ- ในขณะทำการผลิตก็มี การทดสอบเพื่อควบคุมคุณภาพ (quality control test, QT) เพื่อคอยตรวจสอบคุณสมบัติที่สำคัญบางอย่างของอุปกรณ์ว่ายังเป็นไปตามเกณฑ์การผลิตที่โรงงานตั้งขึ้น รวมทั้งเป็นการตรวจสอบคุณภาพของวัสดุที่จัดซื้อมาผลิตอุปกรณ์อีกด้วย -เพราะอุปกรณ์ที่ผ่านการทดสอบเฉพาะแบบอาจจะใช้วัสดุที่จัดหามาจากแหล่งผลิตแห่งหนึ่งที่แตกต่างไปจากแหล่งผลิตวัสดุขณะที่โรงงานผลิตอุปกรณ์เพื่อจัดจำหน่ายจริง- ก่อนที่ส่งมอบอุปกรณ์ให้ผู้ซื้อ ผู้ผลิตก็ต้องทำ การทดสอบประจำ (routine test, RT) กับอุปกรณ์ทุกตัวว่าอุปกรณ์นั้นใช้งานได้ และท้ายที่สุดเมื่ออุปกรณ์ไปถึงผู้ซื้อ ผู้ซื้อก็จะทำ การทดสอบเพื่อตรวจรับ (acceptance test, AT) ก่อนใช้งานจริง

สายส่งไฟฟ้าแรงสูงเหนือพื้นดินก็เช่นกัน ส่วนประกอบต่างๆ เช่น สาย ACSR หรือลูกถ้วยไฟฟ้าก็จะมีการทดสอบทั้งหมดที่กล่าวข้างต้น โดยที่การทดสอบเพื่อตรวจรับนั้นมักทดสอบกับสายส่งไฟฟ้าแรงสูงทั้งเส้นด้วยแรงดันกระแสสลับ และบางครั้งอาจทำการวัดค่า แรงดันรบกวนคลื่นวิทยุ (radio influence voltage, RIV) ที่เกิดขึ้นจากสายส่งไฟฟ้าด้วย

สำหรับสายเคเบิลใต้ดินนั้น ทดสอบเพื่อตรวจรับจะเข้มงวดมากขึ้นเพราะฉนวนของสายเคเบิลเป็นฉนวนแข็งที่เมื่อเกิดเบรกดาวน์แล้วจะเสียสภาพอย่างถาวรทันที -ฉนวนแข็งมักเรียกว่า ฉนวนที่ไม่สามารถคืนสภาพการเป็นฉนวนได้เอง (non-self restoring insulation) ส่วนก๊าซ เช่น อากาศ หรือ SF_6 มักเรียกว่า ฉนวนที่สามารถคืนสภาพการเป็นฉนวนได้เอง (self restoring insulation)-

การทดสอบความทนแรงดันของสายส่งไฟฟ้าเป็นการทดสอบความพร้อมในการจ่ายไฟ จึงเป็นการทดสอบประเภท *ผ่าน/ไม่ผ่าน* (go/no-go) ประกอบด้วยการทดสอบด้วยแรงดันสูงประเภทต่างๆ คือ

1. ความทนแรงดันกระแสสลับ ที่ความถี่ไฟฟ้ากำลังกระแสสลับ 50 Hz หรือ 60 Hz ตาม [IEC60060-1, 2010]
2. ความทนแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า ที่ระดับแรงดันฉนวนมูลฐาน BIL ด้วยรูปคลื่นมาตรฐาน T_1/T_2 = 1.2/50 μs ตาม [IEC60060-1, 2010] และ
3. ความทนแรงดันอิมพัลส์สวิตชิง ที่ระดับแรงดันฉนวนมูลฐาน SIL ด้วยรูปคลื่นมาตรฐาน T_p/T_2 = 250/2500 μs ตาม [IEC60060-1, 2010]

มักทำกับตัวอย่างสายส่งไฟฟ้าสั้นๆ ยาว 10-20 m เท่านั้น จึงเหมาะกับการทดสอบเฉพาะแบบ ในขณะที่การทดสอบความทนแรงดันเพื่อการตรวจรับจะทดสอบสายส่งไฟฟ้าทั้งเส้นที่หน้างาน (on-site) -ค่าความจุไฟฟ้าของวัสดุทดสอบ C_{EUT} สูงมาก- จึงใช้แรงดันทดสอบที่มีรูปคลื่นแตกต่างไปจากการทดสอบเฉพาะแบบและที่ระดับแรงดันที่น้อยกว่าการทดสอบเฉพาะแบบ

รูปคลื่นแรงดันทดสอบที่หน้างาน อาจเป็น

1. แรงดันกระแสสลับ (AC voltage, AC) ความถี่ 10-400 Hz ตาม [IEC60060-3, 2006]
2. แรงดันกระแสสลับแบบหน่วง (damp AC voltage, DAC) ความถี่ 20-500 Hz ตาม [IEEE400.4, 2015]
3. แรงดันกระแสสลับความถี่ต่ำมาก (very low frequency voltage, VLF) ที่ความถี่ 0.01-1 Hz รูปคลื่นไซน์หรือสี่เหลี่ยม ตาม [IEC60060-3, 2006] [IEEE400.2, 2013]
4. แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็ม (full lightning impulse volatge, LI) โดยที่เวลาหน้าคลื่น $0.8\ \mu s \le T_1 \le 20\ \mu s$ และเวลาหลังคลื่น $40\ \mu s \le T_2 \le 100\ \mu s$ ตาม [IEC60060-3, 2006] [IEEE400.2, 2013]
5. แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นแกว่ง (oscillatory lightning impulse voltage, OLI) มีการแกว่งที่ความถี่ $15\ \text{kHz} \le f \le 400\ \text{kHz}$ ตาม [IEC60060-3, 2006]
6. แรงดันอิมพัลส์สวิตชิงไม่กลับขั้ว (aperiodic switching impulse voltage, ASI) โดยที่เวลาหน้าคลื่น $20\ \mu s \le T_1 \le 400\ \mu s$ และเวลาหลังคลื่น $1000 \le T_2 \le 4000\ \mu s$ ตาม [IEC60060-3, 2006]
7. แรงดันอิมพัลส์สวิตชิงรูปคลื่นแกว่ง (oscillatory switching impulse voltage, OSI) มีการแกว่งที่ความถี่ $1\ \text{kHz} \le f \le 15\ \text{kHz}$ ตาม [IEC60060-3, 2006]

การทดสอบอีกประเภทหนึ่งคือ การทดสอบเพื่อการบำรุงรักษา (maintenance test, MT) ซึ่งมีวัตถุประสงค์ 2 อย่าง คือ

1. การทดสอบความพร้อมใช้งานหลังการซ่อมแซมหรือหลัง *การทำให้เหมือนใหม่* (refurbished) เช่น ซ่อมจุดต่อสายเคเบิลใต้ดินซึ่งจะใช้การทดสอบความทนแรงดันเหมือนกับการทดสอบเฉพาะแบบแต่ที่ระดับแรงดันต่ำกว่า และ
2. การทดสอบเพื่อประเมินสภาพ (condition assessment test, CA) ของสายส่งไฟฟ้า โดยเฉพาะสายเคเบิลใต้ดินว่าสภาพของสายเคเบิลใต้ดินมีแนวโน้มที่จะเสียหายหรือไม่ เช่น วัดดีสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลว่ามีค่า PD มากกว่าการวัดครั้งที่ผ่านมาหรือไม่

ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดสอบทางด้านไฟฟ้าแรงสูงที่ทำกับสายส่งไฟฟ้าแรงสูงทั้งแบบเหนือพื้นดินและใต้ดิน เฉพาะการทดสอบเฉพาะแบบและการทดสอบเพื่อตรวจรับที่หน้างานเท่านั้น โดยการทดสอบบางหัวข้อที่กล่าวถึง สามารถนำไปใช้ในการทดสอบสถานีไฟฟ้าทั้งสถานีและ GIS หรือใช้ในการทดสอบเพื่อบำรุงรักษาได้ด้วย

5.1 รหัสการป้องกันฝุ่น/น้ำของเครื่องวัด

เครื่องวัด (measuring instrument) ที่ใช้ในการทดสอบที่กล่าวถึงในบทนี้หมายถึง *มิเตอร์หรือมาตร* (meter) เท่านั้น เครื่องวัดที่ใช้ควรมีความไม่แน่นอนในการวัดเหมาะสมตามการทดสอบแต่ละประเภท เช่น การวัดค่าความทนแรงดัน มาตรฐานมักกำหนดความไม่แน่นอนในการวัดของ ระบบวัดแรงดัน (voltage measuring system) ไว้ที่ ±3% ไม่ว่าจะใช้เครื่องวัดในห้องทดสอบหรือใช้ที่ *หน้างาน* (on-site) โดยก่อนการใช้เครื่องวัดก็ควรดู *คู่มือการใช้งาน* (operation/user manual) ว่ามีข้อกำหนดอะไรบ้างที่สำคัญ เช่น *พิสัย* (range) ของเครื่องวัด, ควรใช้เครื่องวัดที่อุณหภูมิระหว่าง 10-40 °C, ความชื้นรอบๆ เครื่องวัดไม่เกิน 90%, ควรเปิดเครื่องไว้ 1 hr ก่อนทำการวัดค่าที่ต้องการ ฯลฯ และหากใช้เครื่องวัดที่หน้างานก็ต้องตรวจสอบ รหัสการป้องกันฝุ่น/น้ำของเครื่องวัด (ingress protection, IP, code) ว่าเหมาะสมกับสภาพแวดล้อมที่กำลังทำการวัดค่าหรือไม่ เช่น บริเวณที่มีฝุ่นละออง, มีละอองน้ำทะเล ฯลฯ

รหัส IP [IEC60529, 2001] มีไว้เพื่อ

- ป้องกันมนุษย์เข้าถึงส่วนที่เป็นอันตรายภายในเครื่องวัด
- ป้องกันวัสดุแปลกปลอมเข้าไปในเครื่องวัด และ
- ป้องกันน้ำเข้าไปในเครื่องวัด

โดยแสดงเป็นตัวเลขและตัวอักษรดังที่แสดงในรูปที่ 5.1

IP 1 2 A B

ตัวเลข 0 ถึง 6 หรือตัวอักษร X (1)
ตัวเลข 0 ถึง 8 หรือตัวอักษร X (2)
ตัวอักษร H, M, H, W (ถ้ามี) (A)
ตัวอักษร A, B, C, D (ถ้ามี) (B)

รูปที่ 5.1 รหัสการป้องกันฝุ่น/น้ำของเครื่องวัด

รหัสตัวแรกเป็นตัวเลข 0-6 แสดงความสามารถในการป้องกันฝุ่นหรือวัตถุอื่นๆ รหัสตัวที่ 2 เป็นตัวเลข 0-8 แสดงความสามารถในการป้องกันน้ำของเครื่องวัด รหัสตัวที่ 3 และ 4 เป็นตัวอักษรภาษาอังกฤษ จะมีหรือไม่มีก็ได้ เครื่องวัดต้องระบุรหัสตัวแรกและตัวที่ 2 เสมอ แต่ถ้าผู้ผลิตเครื่องวัดไม่ต้องการ ให้ระบุด้วยตัวอักษร X ความหมายของรหัสแต่ละตัวได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.1 และ 5.2

ตารางที่ 5.1 ความหมายของรหัส IP ตัวแรกและตัวที่ 2

		Meaning for the protection of instrument	Meaning for the protection of persons
	IP	**Against ingress of solid objects**	**Against access to hazardous parts**
1st numeric code	0	non-protected	non-protected
	1	$\varnothing \geq 50$ mm	back of hand
	2	$\varnothing \geq 12.5$ mm	finger: $\varnothing \geq 12$ mm, length ≥ 80 mm
	3	$\varnothing \geq 2.5$ mm	tool: $\varnothing \geq 2.5$ mm
	4	$\varnothing \geq 1.0$ mm	wire: $\varnothing \geq 1.0$ mm
	5	dust-protected	
	6	dust-tight	
	IP	**Against ingress of water**	**-**
2nd numeric code	0	non-protected	-
	1	vertical dripping	
	2	dripping (15° tilted)	
	3	spraying	
	4	splashing	
	5	jetting	
	6	powerful jetting	
	7	temporary immersion	
	8	continuous immersion	
This table also applied to IP of equipment with $U_m \leq 72.5$ kV			

ตารางที่ 5.2 ความหมายของรหัส IP ตัวที่ 3 และ 4

		Meaning for the protection of equipment	Meaning for the protection of persons
	IP	**-**	**Against access to hazardous parts**
3rd letter code	A	-	back of hand
	B		finger
	C		tool
	D		wire
	IP	**Supplement information specific to**	
4th letter code	H	High voltage apparatus	-
	M	Motion during water test, e.g. rotor of motor	
	S	Stationary during water test	
	W	Weather conditions to be used	
This table also applied to IP of equipment with $U_m \leq 72.5$ kV			

5.2 การวัดความต้านทานฉนวน

การวัดค่า ความต้านทานฉนวน (insulation resistance, IR) เป็นธรรมเนียมปฏิบัติที่ควรทำก่อนการป้อนแรงดันสูงให้กับ วัสดุทดสอบ (test object/equipment under test, EUT) เสมอ ไม่ว่าจะเป็นป้อนแรงดันทดสอบเพื่อการตรวจรับ, บำรุงรักษาประจำ, หลังการซ่อมแซม หรือหลังเกิดเหตุการณ์ผิดปกติทั้งที่ทราบและไม่ทราบสาเหตุ

นอกจากนั้น ค่าความต้านทานฉนวนที่วัดได้อาจแสดงให้เห็นถึงสภาพของฉนวนว่ามีการเสื่อมสภาพไปมากน้อยเพียงใดจาก [Chauvin, 2010]

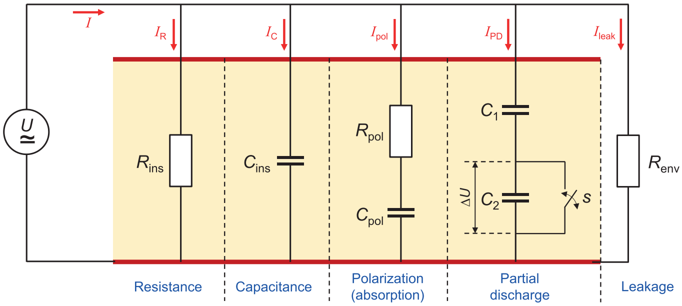
- *ความเค้นทางไฟฟ้า* เพราะฉนวนต้องรับแรงดันขณะที่ทำงานอยู่ตลอดเวลาและรับแรงดันเกินเนื่องจากเกิดการลัดวงจรในระบบ, ฟ้าผ่าทำให้เกิดแรงดันเกินอิมพัลส์ฟ้าผ่า หรือการปิด/เปิดเซอร์กิตเบรกเกอร์ทำให้เกิดแรงดันอิมพัลส์สวิตชิง เป็นครั้งคราว
- *ความเค้นทางกล* เพราะอุปกรณ์ไฟฟ้าไม่ได้จ่ายกระแสให้โหลดตลอดเวลา แต่จ่ายกระแสมากบ้างน้อยบ้างสลับกันไป กระแสที่ไหลในตัวนำที่อยู่ใกล้กันจะทำให้เกิดแรงทางกลกระทำต่อฉนวนที่คั่นระหว่างตัวนำสองตัวนั้นโดยเฉพาะอย่างยิ่งขณะที่เกิดลัดวงจรในระบบ เพราะแรงทางกล F ที่กระทำต่อเนื้อฉนวนจะแปรตามกระแส I ยกกำลังสอง, $F \propto I^2$
- *ความเค้นทางอุณหภูมิ* ซึ่งสัมพันธ์กับความเค้นทางกลเพราะวัสดุต่างๆ ที่ใช้ทำอุปกรณ์มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวตามอุณหภูมิไม่เท่ากัน และสัมพันธ์กับความเค้นทางทางไฟฟ้าเนื่องจากฉนวนจะมีขีดจำกัดอุณหภูมิในการใช้งานอยู่ เช่น อุณหภูมิสูงสุดของ XLPE มีค่าเท่ากับ 95 °C ถ้าอุณหภูมิสูงกว่านี้จะทำให้ความทนแรงดันของฉนวนลดลงและอาจทำให้ฉนวนเสียหายได้ สำหรับเคเบิลใต้ดิน อุณหภูมิที่สูงเกินไปอาจเกิดขึ้นจากการจ่ายกระแสเกินพิกัดหรือเกิดการลัดวงจร
- *ความเค้นทางเคมี* จากการที่ฉนวนสัมผัสกับสารเคมี เช่น สารหล่อลื่นขณะที่ทำการลากสายในท่อหรือสัมผัสกับสารระเหยที่กัดกร่อน เช่น หัวเคเบิลที่อยู่ในบริเวณพื้นที่อุตสาหกรรมสัมผัสกับไอระเหยที่เป็นกรด

- *สิ่งเปรอะเปื้อน* ฉนวนที่อยู่ภายนอกหรือภายในอุปกรณ์อาจนำไฟฟ้าจนมีกระแสรั่วจำนวนมากไหลผ่านผิวฉนวนหรือที่เรียกว่า tracking ทำให้ผิวฉนวนเสียหาย เช่นที่หัวสายเคเบิลประเภทที่เป็นพอลิเมอร์ หรือในกรณีที่เลวร้ายที่สุดก็อาจจมน้ำอยู่เป็นเวลานานเพราะน้ำท่วม จึงจำเป็นต้องประเมินสภาพก่อนการจ่ายไฟฟ้า

การวัดค่าความต้านทานฉนวนเป็น การทดสอบแบบไม่ทำลาย (non-destructive test) คล้ายกับการวัดค่า ตัวประกอบกำลังของฉนวน (insulation power factor/loss tangent, Tg δ), การวิเคราะห์การตอบสนองเชิงความถี่ (frequency response analysis, FRA) และ การวัดดีสชาร์จบางส่วน PD คือ ผลการวัดค่าครั้งแรกจะถือว่าเป็น *ลายนิ้วมือ* (finger print) ของอุปกรณ์นั้น แต่ IR ใช้แรงดันทดสอบน้อยกว่า คือโดยปกติจะใช้แรงดันกระแสตรง 0.5-5 kV_{DC} ในการวัดค่า IR เท่านั้น และแสดงผลการวัดเป็น [MΩ] หรือ [GΩ]

5.2.1 วงจรสมมูลของฉนวน

วงจรสมมูลของฉนวนสามารถแทนได้ด้วยตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ ดังที่แสดงในรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 วงจรสมมูลของฉนวน

เมื่อ U = แรงดันกระแสตรงหรือแรงดันกระแสสลับ [V]

R_{INS} = ความต้านทานของฉนวน [Ω] = $f(1/\sigma_{INS})$

C_{INS} = ความจุไฟฟ้าของฉนวน [F]

R_{pol}-C_{pol} = *องค์ประกอบโพลาไรซ์* (polarization component) ของฉนวน

เราจะเห็นว่าฉนวนในรูปที่ 5.2 ประกอบไปด้วย

ก) ความต้านทาน R_{INS}: เป็นองค์ประกอบกระแสตรงของฉนวน โดยปกติจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ T เพราะความนำไฟฟ้า σ_{INS} ขึ้นอยู่กับ T

ข) ความจุไฟฟ้า C_{INS}: เป็นองค์ประกอบกระแสสลับของฉนวน โดยปกติจะไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ T แต่จะเปลี่ยนไปตามความถี่เพราะค่าเปอร์มิตติวิตี้ของฉนวน ε_{INS} แปรตามความถี่ ฉนวนทางไฟฟ้าในอุดมคติจะแทนด้วยตัวเก็บประจุเสมอเพราะเรามักสมมุติให้ $R_{INS} = \infty$ ถ้าเราวัดค่าความต้านทานฉนวนด้วยแรงดันกระแสตรง ค่า C_{INS} จะมีผลต่ออัตราการเพิ่มขึ้นของกระแสตรงในช่วงต้นๆ แต่ผลดังกล่าวจะหายไปอย่างรวดเร็ว

ค) การโพลาไรซ์: หรือที่บางครั้งเรียกว่า absorption เกิดจากโมเลกุลของสารฉนวนประเภท *สารอินทรีย์* (organic materail) บางประเภทมีขั้วจึงพยายามเรียงตัวในแนวเดียวกับสนามไฟฟ้า ซึ่งการเรียงตัวของโมเลกุลนี้ต้องใช้พลังงานจากภายนอกซึ่งก็มาจากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้านั่นเอง

ในกรณีที่เราป้อนแรงดันกระแสตรงให้ฉนวน การเรียงตัวของโมเลกุลจะเกิดขึ้นเพียงครั้งเดียว พลังงานที่ได้รับจากสนามไฟฟ้าจะสะสมอยู่ตัวเก็บประจุ C_{pol} และ C_{INS} โดยมีค่าเท่ากับ $W = ½(C_{pol}+C_{INS})U_{DC}^2$ [J] ซึ่งอาจเป็นอันตรายได้เพราะเมื่อเราหยุดจ่ายแรงดัน U_{DC} ให้ฉนวน พลังงานนี้จะยังสะสมอยู่ในฉนวนแม้ว่าเราจะปลดแรงจ่ายแรงดัน U_{DC} ออกจากฉนวนแล้วก็ตาม พลังงานที่สะสมนี้จะค่อยๆ ลดลงตามเวลาเพราะประจุที่สะสมในเนื้อฉนวนจะถ่ายทอดให้กับ R_{ins} และความต้านทานภายนอก R_{env} เช่นความต้านทานตามผิวของหัวสายเคเบิล เวลาที่พลังงานที่สะสมในฉนวนลดลง (relaxation time) จนถึงระดับที่ไม่เป็นอันตรายจะขึ้นกับค่า $(R_{ins}||R_{env})(C_{pol}+C_{INS})$

อย่างไรก็ตามหากมีมนุษย์ไปสัมผัสตัวนำ เช่น ตัวนำของสายเคเบิล XLPE หรือขั้วของ *ตัวเก็บประจุแก้ค่าตัวประกอบกำลัง* (capacitor bank) ก่อนที่พลังงานที่สะสมในฉนวนลดลงจนถึงระดับที่ไม่เป็นอันตราย พลังงานที่สะสมในฉนวนก็จะถ่ายทอดไปยังร่างกายของมนุษย์ ทำให้มนุษย์รู้สึกเหมือนถูกไฟดูด [TB745, 2018] จะรู้สึกเจ็บมากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับ *กระแสคายประจุ* (discharge current, I_{dis}) ที่ผ่านร่างกายมนุษย์ซึ่งขึ้นอยู่กับความต้านทานของร่างกายมนุษย์ R_{body} และ $(C_{pol}+C_{INS})$

ดังนั้นเมื่อปลดแรงจ่ายแรงดัน U_{DC} ออกจากฉนวนแล้ว เราจึงควรคายพลังงานที่สะสมในตัวเก็บประจุ $(C_{pol}+C_{INS})$ ด้วยการต่อตัวนำลงกราวน์ โดยที่ประจุที่สะสมใน C_{INS} จะหายไปอย่างรวดเร็ว แต่ประจุใน C_{pol} จะหายไปอย่างช้าๆ เพราะต้องรอเวลาให้โมเลกุลของฉนวนหมุนกับไปอยู่ในสภาพเดิม -เราจึงเรียกว่า relaxation time- ซึ่งต้องอาจใช้เวลาหลายนาทีหรือเป็นชั่วโมงขึ้นอยู่กับประเภทของฉนวน โดยเฉพาะอย่างยิ่งฉนวน XLPE ของสายเคเบิลจะใช้เวลานานมาก อาจใช้เวลาเป็นวันถ้าสายเคเบิลยาวมาก -ฉนวนประเภทกระดาษจุ่มน้ำมันที่ใช้ในสายเคเบิลหรือหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังแบบน้ำมันจะใช้เวลาน้อยกว่านี้- และโปรดสังเกตว่าการกราวน์ตัวนำซ้ำหลายๆ ครั้งก็ไม่ช่วยให้เวลาในการคายพลังงานนี้น้อยลง

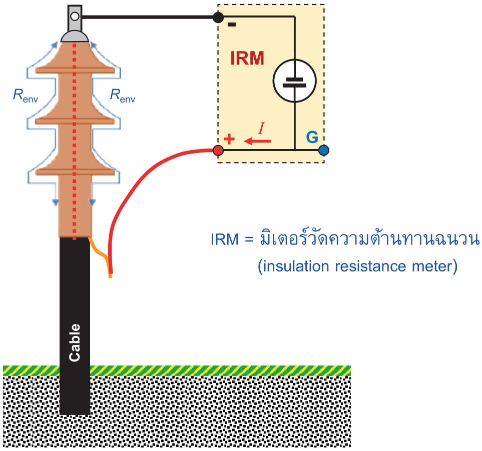
แต่ในกรณีที่เราป้อนแรงดันกระแสสลับให้ฉนวน โมเลกุลจะเรียงตัวกลับไปกลับมาตามทิศทางของสนามไฟฟ้าด้วยความถี่เป็น 2 เท่าของความถี่ของแรงดันกระแสสลับ จึงถือว่าเป็นกำลังสูญเสียอย่างหนึ่งในระบบไฟฟ้า (ดูการวัดค่าตัวประกอบกำลังของฉนวนในหัวข้อ 5.2)

ง) ดีสชาร์จบางส่วน: เป็นปรากฏการณ์ที่บริเวณเล็กๆ ของฉนวนเบรกดาวน์เมื่อได้รับแรงดัน ΔU โดยจะเรียกว่า โคโรนา (corona) ถ้าส่วนที่เบรกดาวน์เป็นอากาศ เช่นส่วนที่แหลมคมของจุดที่ต่อหัวสายเคเบิลกับสายส่งไฟฟ้าเหนือพื้นดิน, ดีสชาร์จตามผิว (surface discharge) ถ้าส่วนที่เบรกดาวน์นั้นเป็น *ก๊าซหรือฉนวนเหลวที่สัมผัสกับฉนวนแข็งและโลหะ* (triple junction) เช่น ที่ผิวของหัวสายเคเบิลบริเวณขั้วต่อแรงสูงหรือที่ ปลอกฉนวนนำสายไฟฟ้า (bushing) ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง และดีสชาร์จภายใน (internal discharge) เช่น ช่องว่างอากาศ, ช่องว่างสุญญากาศ, หยดน้ำมัน, หรือเศษโลหะในเนื้อฉนวน XLPE, ส่วนขรุขระของตัวนำหรือชีลด์โลหะที่สัมผัสกับสกรีนตัวนำ/สกรีนฉนวน, ช่องว่างระหว่างสกรีนตัวนำกับฉนวน XLPE หรือสิ่งสกปรกในน้ำมันหม้อแปลง ฯลฯ โปรดสังเกตว่า C_1 และ C_2 ในรูปที่ 5.2 เป็นส่วนเล็กๆ ส่วนหนึ่งของ C_{INS} เท่านั้น แต่แยกออกมาเพื่อความสะดวกในการอธิบายปรากฏการณ์

จ) กระแสรั่ว: เกิดขึ้นตามผิวฉนวนภายนอก โดยที่ R_{env} แทนผลทั้งหมดของสภาพแวดล้อมรอบๆ ผิวฉนวนที่สัมผัสกับอากาศ เช่น ความชื้น, ฝุ่นละออง, ไอสารเคมี, ไอเกลือ ฯลฯ มีผลทำให้เกิดกำลังสูญเสีย $I_{leak}^2 \cdot R_{env}$ และถ้ามีกระแส I_{leak} ไหลตามผิวฉนวนเป็นเวลานาน ผิวฉนวนที่ทำจากสารอินทรีย์อาจเสียหายเนื่องจากความร้อนทำให้เกิด รอยไหม้ที่ผิว (carbonized) ฉนวนที่มีคุณสมบัตินำไฟฟ้าได้ ทำให้ ระยะรั่ว (leakage distance) ลดลงจนท้ายที่สุดก็เกิด *วาบไฟตามผิวฉนวน* (flashover) โปรดสังเกตว่า I_{leak} ขึ้นอยู่กับสภาพของผิวฉนวน ดังนั้นเราจึงลด I_{leak} ได้ด้วยการทำความสะอาดผิวฉนวนอยู่เป็นประจำ

5.2.2 วงจรวัดความต้านทานฉนวน

วงจรวัดค่าความต้านทานฉนวนแสดงไว้ในรูปที่ 5.3

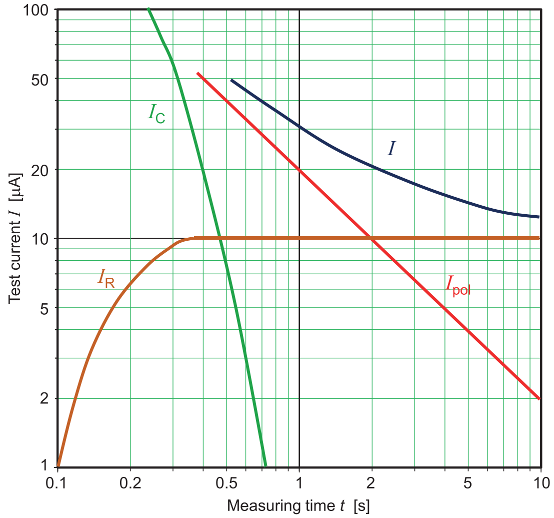


รูปที่ 5.3 วงจรวัดค่าความต้านทานฉนวน

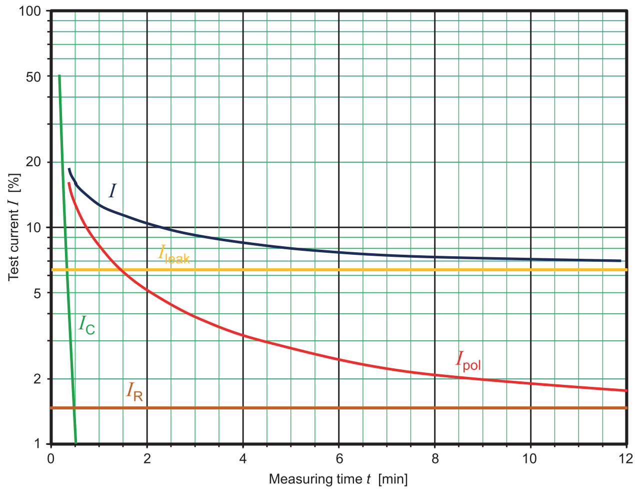
ตัวอย่างของผลการวัดค่ากระแส I ที่เปลี่ยนไปตามตามเวลาได้แสดงรูปที่ 5.4 [Chouvin, 2010] และ 5.5 [IEEE43, 2000] ซึ่งจะเห็นว่ากระแสอัดประจุ I_C ลดลงอย่างรวดเร็วในขณะที่กระแสโพลาไรซ์ I_{pol} ไหลอยู่เป็นเวลานานมาก ในกรณีของ XLPE อาจไหลอยู่นานเป็นชั่วโมง และค่า I_{pol} อาจสูงหรือต่ำกว่า I_R ก็ได้

ถ้าฉนวนอยู่ในสภาพที่ดี กระแส I ก็จะไหลอยู่เป็นเวลานานเพราะ I_{pol} ไหลอยู่นานมาก แต่ในทางกลับกัน ถ้าฉนวนเสื่อมสภาพหรือมีความชื้นเข้าไป กระแส I ก็มีแนวโน้มที่จะคงที่เมื่อเวลาผ่านไปไม่นานเพราะ I_R และ/หรือ I_{leak} จะมีค่าสูงกว่า I_{pol} มาก

นอกจากนั้นในรูปที่ 5.5 จะเห็นว่าสภาพแวดล้อม -เช่น ความสกปรกของหัวเคเบิลหรือความชื้น-ที่มาเกาะที่หัวสายเคเบิลมีผลต่อการวัดค่า IR มาก ดังนั้นผลการวัดค่า IR จึงไม่มีประโยชน์เพราะค่า IR เปลี่ยนไปตามสภาพแวดล้อมขณะที่ทำการวัดค่า เราจึงควรลดผลกระทบของสภาพแวดล้อมที่มีต่อค่า IR ด้วยการทำความสะอาดผิวฉนวนก่อนการวัดและวัดค่า IR ในวันที่มีอากาศแจ่มใส

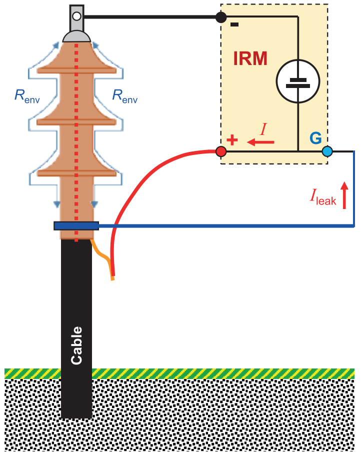


รูปที่ 5.4 กระแส I_{leak} ที่วัดได้เมื่อไม่มี R_{env}

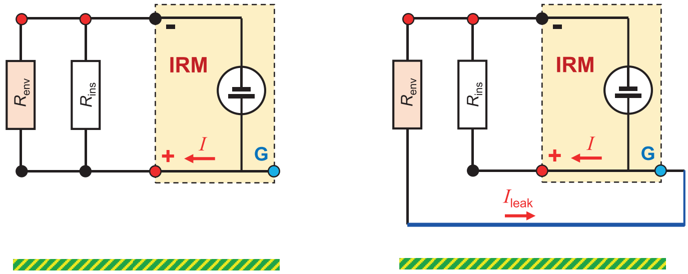


รูปที่ 5.5 กระแส I_{leak} ที่วัดได้เมื่อมี R_{env}

แต่วิธีที่ดีที่สุด คือใช้การ์ด -อิเล็กโทรดที่ทำหน้าที่เบี่ยงกระแส I_{leak} ลงกราวน์โดยไม่ผ่านมิเตอร์วัด IR- เช่น ใช้ลวดหรือเทปโลหะพันรอบหัวสายเคเบิลดังแสดงในรูปที่ 5.6 ส่วนวงจรสมมูลของรูปที่ 5.3 เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 5.6 แสดงไว้ในรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.6 วงจรวัดค่าความต้านทานฉนวน เมื่อใช้การ์ดอิเล็กโทรด



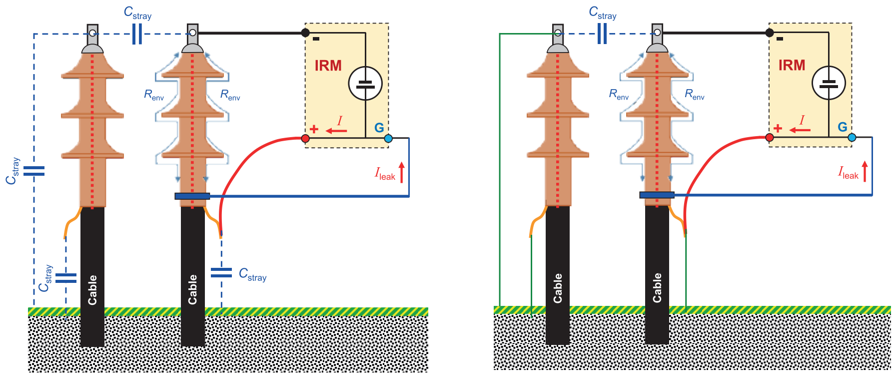
ก) ไม่ใช้อิเล็กโทรดป้องกัน ข) ใช้อิเล็กโทรดป้องกัน

รูปที่ 5.7 วงจรสมมูลของการวัดค่า IR ในรูปที่ 5.3 และ 5.6

โปรดสังเกตว่าการวัดค่า IR ในรูปที่ 5.3 และ5.6

1. เราต่อขั้วลบของมิเตอร์ IR เข้ากับหัวสายเคเบิล ทั้งนี้เพราะ [IEEE43, 2000] แนะนำให้ใช้การต่อแบบนี้เพื่อหลีกเลี่ยงปรากฏการณ์ electroendosmosis ในฉนวนประเภทกระดาษจุ่มน้ำมัน (oil-paper insulation) ดังนั้นจึงควรฝึกการต่อมิเตอร์ IR ในลักษณะนี้ให้คุ้นเคยในการวัดค่าความต้านทานของฉนวนไม่ว่าวัสดุทดสอบนั้นจะเป็นอุปกรณ์ประเภทใด
2. เราไม่ได้ต่อชีลด์โลหะของสายเคเบิลลงกราวน์ซึ่งเป็นการปฏิบัติงานที่ไม่เหมาะสม เพราะที่ชีลด์โลหะจะมีศักย์ไฟฟ้าอยู่ค่าหนึ่งเนื่องจากผลของตัวเก็บประจุแฝง C_{stray} ดังแสดงในรูปที่ 5.8 ก) ดังนั้นหลังจากที่เราวัดค่า IR เสร็จแล้ว แม้ว่าเราจะต่อหัวสายเคเบิลลงกราวน์เพื่อคายประจุ แต่ที่เปลือกโลหะของสายเคเบิลจะมีศักย์ไฟฟ้าค้างอยู่ สิ่งมีชีวิตที่ไปสัมผัสเปลือกโลหะของสายเคเบิลจึงอาจถูกไฟดูดได้

ดังนั้นในการวัดค่าความต้านทานฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าใดๆ ด้วยมิเตอร์ IR ให้ต่อส่วนที่เป็นโลหะใดๆ เช่น ตัวนำและชีลด์โลหะของสายเคเบิลเส้นอื่น ที่อยู่ใกล้กันลงกราวน์ให้หมด ดังแสดงในรูปที่ 5.8 ข)



ก) C_{stray} ทำให้โลหะที่ไม่ต่อลงกราวน์มีศักย์ไฟฟ้า ข) วิธีวัดค่า IR ที่ถูกต้อง

รูปที่ 5.8 ผลของตัวเก็บประจุแฝง C_{stray}

5.2.3 ค่าความต้านทานฉนวน

ฉนวนควรมีความต้านทานดังแสดงในตารางที่ 5.3 [ANSI/NETA ATS, 2009] [ANSI/NETA MTS, 2011]

ตารางที่ 5.3 ค่าความต้านทานฉนวนต่ำสุดสำหรับการทดสอบเพื่อตรวจรับและการทดสอบการเพื่อบำรุงรักษา

System voltage [kV]	Minimum DC test voltage [kV]	Minimum IR [GΩ]	
		Acceptance	maintenance
25	5	20	
> 33.5	15	100	

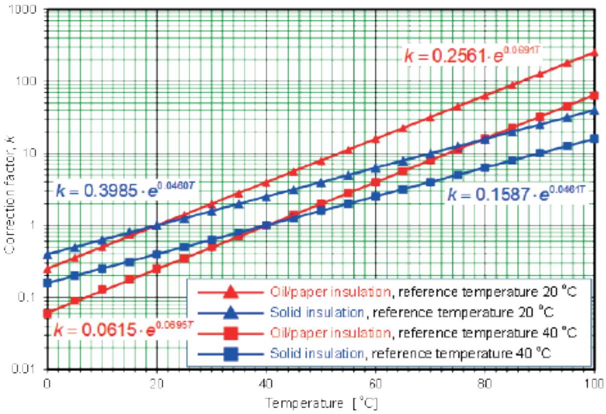
การวัดค่า IR โดยปกติจะทำที่อุณหภูมิของสภาพอากาศโดยรอบ ซึ่ง [IEC60076-1, 2011] กำหนดไว้ที่ 10-40 °C แต่ทั้งอุณหภูมิและแรงดันกระแสตรงที่ใช้วัดค่า IR มีผลต่อค่า IR ที่วัดได้ ดังนั้นการเปรียบเทียบผลการวัดค่า IR หลายๆ ครั้งของอุปกรณ์ตัวใดตัวหนึ่งจึงต้องแก้ค่าผลของอุณหภูมิให้ค่า IR ต่างๆ อ้างอิงไปที่อุณหภูมิเดียวกัน เช่น 20 °C หรือ 40 °C และต้องใช้ค่า IR ที่วัดด้วยแรงดันกระแสตรงที่เท่ากันเท่านั้น

มิเตอร์วัดค่า IR โดยทั่วไปจะมีค่าแรงดันทดสอบกระแสตรงเท่ากับ 0.5, 1, 2.5 และ 5 kV แต่เราต้องเลือกใช้ค่าแรงดันทดสอบกระแสตรงดังกล่าวไม่เกินค่า rms ของแรงดันทดสอบความทนแรงดันกระแสสลับของสายเคเบิล และวัดค่า IR เป็นเวลาไม่น้อยกว่า 1 hr หรือจนกว่าค่า IR ที่อ่านได้มีการเปลี่ยนไปไม่เกินค่าที่กำหนดในเวลาที่กำหนด เช่น เปลี่ยนไปไม่เกิน 5% ในเวลา 10 min ติดต่อกัน 3 ครั้ง

ค่า IR ที่อุณหภูมิอ้างอิง IR สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\mathrm{IR}_{T_{ref}} = k \cdot \mathrm{IR}_{@T} \quad [\Omega] \qquad (5.1)$$

โดยที่ k เป็น *ตัวปรับแก้* (correction factor) ในรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.9 ตัวปรับแก้ k ในสมการที่ 5.1

5.2.4 ความหมายของค่า IR ที่วัดได้

ค่า IR ที่วัดได้วันนี้จะขึ้นกับการออกแบบสายเคเบิล, ความสะอาด และความชื้นของฉนวนขณะทำการวัด การเปรียบเทียบค่า IR ที่วัดได้วันนี้กับค่า IR ครั้งที่วัดได้ก่อนหน้านี้จึงให้ผลการประเมินสภาพของฉนวนที่ดีกว่าการตัดสินสภาพของฉนวนด้วยค่า IR ที่วัดได้วันนี้เพียงอย่างเดียว

ดังนั้นเราจึงควรวัดค่า IR ของสายเคเบิลเป็นประจำ เช่น ระหว่างการบำรุงรักษาที่สายเคเบิลต้องหยุดจ่ายไฟ แล้วนำค่า IR ที่วัดได้ มาเทียบกับค่า IR ของสายเคเบิลที่วัดได้ครั้งก่อนหน้าในลักษณะของกราฟ ถ้าค่า IR ลดต่ำลงอย่างมีนัยสำคัญ เช่น ต่ำกว่าค่า IR ในตารางที่ 5.3 เราอาจทำให้ค่า IR ของสายเคเบิลให้สูงขึ้นได้อีกครั้ง -ถ้าสายเคเบิลไม่เก่าจนเกินไปและยังอยู่ในสภาพที่ดี- ด้วยการทำความสะอาดผิวนอกของหัวต่อสายเคเบิลอย่างรอบคอบอีกครั้งแล้ววัดค่า IR ซ้ำ ค่า IR ที่ต่ำมากๆ อาจเกิดจากรอยไหม้ที่ผิวของหัวสายเคเบิล ซึ่งอาจต้องขูดรอยไหม้ที่ผิวออกและหาทางป้องกันการเกิดดีสชาร์จตามผิวไม่ให้เกิดขึ้นอีก หรือเปลี่ยนหัวสายเคเบิล -แน่นอนว่ามีค่าใช้จ่ายต่ำกว่าการเปลี่ยนสายเคเบิลทั้งเส้น-

ทั้งนี้ เราควรตรวจสอบค่า IR ที่วัดได้ต่ำอีกครั้งด้วยการทดสอบอย่างอื่น เช่น วัดค่า Tg δ หรือวัดค่า ดรรชนีการโพลาไรซ์ (polarization index, PI)

5.2.5 ดรรชนีการโพลาไรซ์, PI

ดังที่กล่าวมาแล้วว่ากระแสทั้งหมด I ที่ผ่านฉนวนขณะที่วัดค่า IR ประกอบด้วย I_C ที่ลดลงอย่างรวดเร็ว, I_{pol} ที่ลดลงอย่างช้าๆ ขึ้นกับชนิดฉนวน และ I_{INS} ที่เป็นกระแสผ่านเนื้อฉนวนจริงๆ (ถ้าเราใช้การ์ดอิเล็กโทรดขณะที่วัดค่า IR ทำให้ไม่มี I_{env} ผ่านมิเตอร์ IR) ซึ่งจะมีค่าขึ้นกับสภาพของฉนวนจริงๆ ว่ามีสิ่งผิดปกติ เช่น มีความชื้นเข้าไปในหัวสายเคเบิลหรือไม่ -สำหรับหัวสายเคเบิลแบบสำเร็จรูปอาจเป็นความชื้นที่ผิวด้านในของหัวสายเคเบิลและสำหรับหัวสายเคเบิลแบบปลอกฉนวนนำสายไฟฟ้าก็อาจเป็นความชื้นที่อยู่ในกระดาษจุ่มน้ำมัน-

ถ้ามีความชื้นในฉนวน กระแส I_{leak} จะเพิ่มขึ้นเร็วเมื่อเทียบกับการลดลงของ I_{pol} ทำให้ค่า IR เพิ่มขึ้นตามเวลาค่อนข้างเร็วเมื่อเทียบกับฉนวนที่ไม่มีความชื้น เราจึงสามารถใช้ดรรชนีการโพลาไรซ์ PI ในการระบุสภาพของฉนวนได้ โดย PI ถูกนิยามให้มีค่าเท่ากับ

$$\text{PI} = \frac{\text{IR}_{10\text{min}}}{\text{IR}_{1\text{min}}} \tag{5.2}$$

เมื่อ $\text{IR}_{10\text{min}}$ = ค่า IR ที่วัดได้ ณ เวลา 10 min [Ω]

$\text{IR}_{1\text{min}}$ = ค่า IR ที่วัดได้ ณ เวลา 1 min [Ω]

ดังนั้นฉนวนที่มีค่า PI สูงๆ จึงเป็นฉนวนที่ดี ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

- เนื่องจากเราวัดค่า IR ด้วยแรงดันต่ำๆ จึงไม่เกิดดีสชาร์จบางส่วน ทำให้ไม่มีกระแส I_{PD} และกระแส I_{C} จะลดลงเร็วมาก ดังนั้น $I = I_{\text{INS}} + I_{\text{pol}} + I_{\text{leak}}$
- ถ้าสมมุติว่า I_{pol} มีค่าน้อยมากที่เวลา 10 min เราจะพบว่า

$$\text{IR}_{1\text{min}} = \frac{U_{\text{DC}}}{I} = \frac{U_{\text{DC}}}{I_{\text{ins}} + I_{\text{leak}} + I_{\text{pol}}} \ [\Omega]; \quad \text{IR}_{10\text{min}} = \frac{U_{\text{DC}}}{I} = \frac{U_{\text{DC}}}{I_{\text{ins}} + I_{\text{leak}}} \ [\Omega]$$

- ดรรชนีการโพลาไรซ์ PI จึงเท่ากับ

$$\text{PI} = \frac{I_{\text{ins}} + I_{\text{leak}} + I_{\text{pol}}}{I_{\text{ins}} + I_{\text{leak}}} = 1 + \frac{I_{\text{pol}}}{I_{\text{ins}} + I_{\text{leak}}}$$

- ดังนั้น ถ้า $(I_{\text{INS}}+I_{\text{leak}}) >> I_{\text{pol}}$ ค่า PI ~ 1 จึงหมายความว่าฉนวนอยู่ในสภาพที่ไม่ค่อยดี ในขณะที่ถ้า $(I_{\text{INS}}+I_{\text{leak}}) < I_{\text{pol}}$ ก็หมายความว่าฉนวนอยู่ในสภาพที่ดี

นอกจากนั้นค่า PI ยังไม่มีผลกระทบจากอุณหภูมิและความชื้นขณะที่ทำการวัดว่า IR เพราะถือว่าที่เวลา 1 min และ 10 min ผลกระทบดังกล่าวที่มีต่อค่า IR จะเหมือนกัน

ค่า PI ที่แสดงถึงสภาพของฉนวน แสดงไว้ในตารางที่ 5.4 [Megger, 2020a]

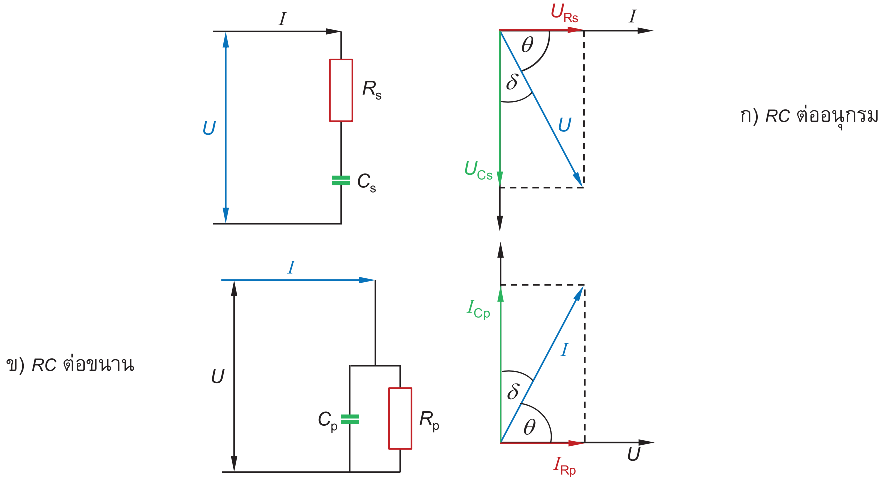
ตารางที่ 5.4 ค่า PI ที่แสดงถึงสภาพของฉนวน

PI	Insulation condition
< 1	poor
1-2	questionable
2-4	OK
> 4	good

อนึ่งค่า IR ที่สูงๆ ต้องใช้เครื่องวัดที่สามารถวัดกระแสได้ต่ำๆ ในช่วง nA -เช่น ใช้แรงดัน U_{DC} = 1 kV วัดค่าความต้านทาน R = 500 MΩ กระแส I จะไหลเพียง 2 nA เท่านั้น- ทำให้ผลการวัดอาจคลาดเคลื่อนได้ถ้าแรงดัน U_{DC} มีเปลี่ยนแปลงแม้แต่เพียงเล็กน้อย -เช่น แบตเตอรี่อ่อน- ดังนั้นจึงต้องระวังการเปรียบเทียบค่า PI ถ้าค่า IR ที่วัดได้สูงกว่า 500 MΩ

5.3 การวัดกำลังสูญเสียของฉนวน

ดังที่กล่าวแล้วในข้อ 5.2 ว่า เมื่อเราป้อนแรงดันกระแสสลับให้ฉนวนก็จะเกิดกำลังสูญเสียขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของฉนวนหมุนกลับไปกลับมาตามทิศทางของสนามไฟฟ้า นอกจากนั้นก็ยังเกิดกำลังสูญเสียในความต้านทานของฉนวนเอง ดังนั้นเมื่อเราพิจารณาเฉพาะกำลังสูญเสียของฉนวน ฉนวนจึงมีวงจรสมมูลดังแสดงในรูปที่ 5.10 -ไม่คำนึงถึง R_{env} และ PD เพราะ PD อาจเกิดหรือไม่เกิดก็ได้ ขึ้นกับสภาพของสิ่งแวดล้อมรอบๆ ฉนวน เช่น ฝนตก, มลภาวะ, การเสื่อมสภาพเนื่องจากใช้งานเกินพิกัดความร้อน, รับแรงดันเกินบ่อยๆ, ฉนวนถึงอายุการใช้งาน, ฯลฯ-



รูปที่ 5.10 วงจรสมมูลของฉนวนเมื่อพิจารณาเฉพาะกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้น

เราทราบดีว่าตัวประกอบกำลังมีค่า cos θ เมื่อ θ คือมุมระหว่าง I และ U มีหน่วยเป็น เรเดียน และในรูปที่ 5.10 ค่า $\delta = \pi/2 - \theta$ ดังนั้น

วงจร *RC* อนุกรม:

$$\cos\theta = \frac{U_{Rs}}{U}; \quad \tan\delta = \frac{U_{Rs}}{U_{Cs}} = \frac{IR_s}{I/\omega C_s} = \omega R_s C_s \tag{5.3}$$

วงจร *RC* ขนาน:

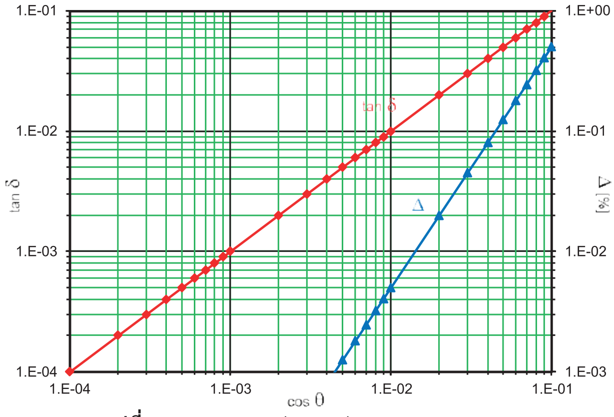
$$\cos\theta = \frac{I_{Rp}}{I}; \quad \tan\delta = \frac{I_{Rp}}{I_{Cp}} = \frac{U/R_p}{U\omega C_p} = \frac{1}{\omega R_p C_p} \tag{5.4}$$

แต่ความต้านทานของฉนวนมีค่าสูงมาก เช่น XLPE มีความต้านทานจำเพาะ 10^{18} Ω-cm ทำให้ δ มีค่าประมาณ π/2 ($R_s \sim 0$ หรือ $R_p \sim \infty$) ทำให้ cos θ ~ tan δ โดยแตกกันไม่เกิน 0.5% หาก tan δ มีค่าน้อยกว่า 0.1 ดังแสดงในรูปที่ 5.11

ดังนั้นกำลังสูญเสียของฉนวนจึงมีค่าเท่ากับ

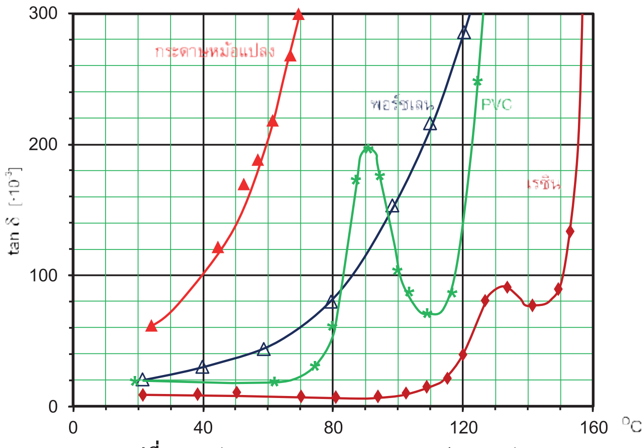
$$P = UI\cos\theta \sim UI \cdot \tan\delta \;\; [W]$$
$$\sim \omega CU^2 \cdot \tan\delta = S \;\; [VA] \tag{5.5}$$

บางครั้งจึงเรียกค่า tan δ หรือ Tg δ ว่าตัวประกอบกำลังของฉนวนหรือแฟกเตอร์กำลังสูญเสียของฉนวน



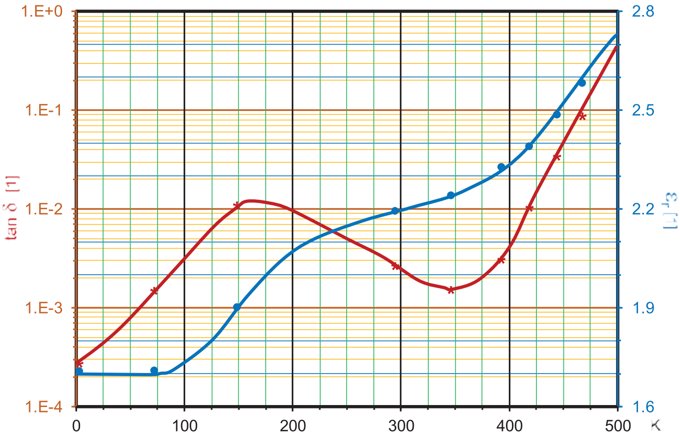
รูปที่ 5.11 ความแตกต่างระหว่าง cos θ และ tan δ

ค่า tan δ ของฉนวนประเภทต่างๆ ได้แสดงในรูปที่ 5.12 [Arora, 1995]

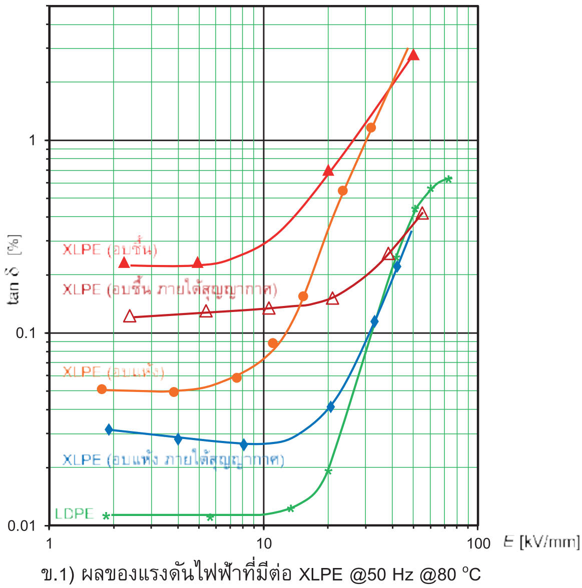


รูปที่ 5.12 ค่า tan δ @50 Hz ของฉนวนประเภทต่างๆ

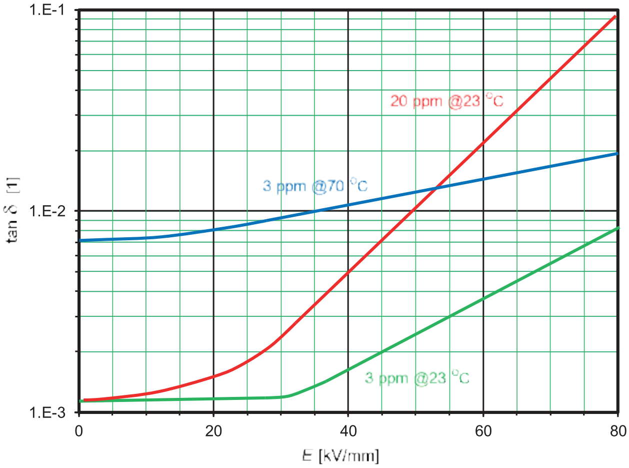
เป็นที่ทราบกันดีว่าความนำจำเพาะซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญของความต้านทานเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิและแรงดันไฟฟ้าที่ฉนวนได้รับ ส่วนการโพลาไรซ์และเปอร์มิตติวิตี้ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญของความจุไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงตามความถี่ ดังนั้น tan δ จึงขึ้นอยู่กับทั้งอุณหภูมิ, แรงดันไฟฟ้า และความถี่ ดังแสดงในรูปที่ 5.13 [Arora, 1995]



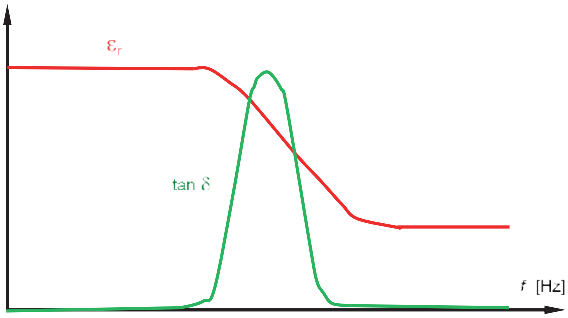
ก) ผลของอุณหภูมิ



ข.1) ผลของแรงดันไฟฟ้าที่มีต่อ XLPE @50 Hz @80 °C



ข.2) ผลของแรงดันไฟฟ้าที่มีต่อน้ำมันหม้อแปลง @50 Hz



ค) ผลของความถี่

รูปที่ 5.13 ผลของอุณหภูมิ, แรงดันไฟฟ้า และความถี่ที่มีต่อ tan δ

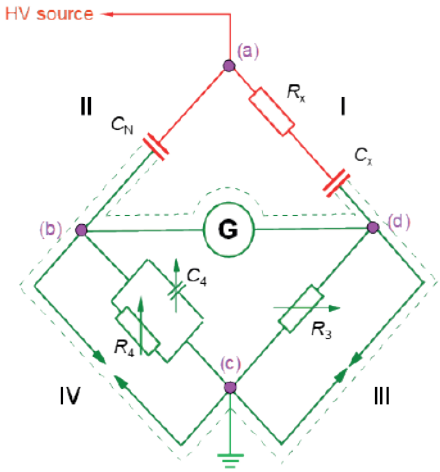
สำหรับสายเคเบิลที่ใช้ XLPE เป็นฉนวน ค่าเปอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์ ε_r ของ XLPE จะมีค่าประมาณ 2.3 และคงที่จนถึง 100 MHz ส่วนสายเคเบิลที่ใช้กระดาษจุ่มน้ำมันเป็นฉนวน ค่าเปอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์ ε_r ของกระดาษจุ่มน้ำมันสามารถคำนวณได้จากสมการ [TB531, 2013]

$$\varepsilon_r = 2.5 + \frac{0.94}{1 + \left[j\omega \cdot 6 \cdot 10^{-9} \right]^{0.315}}$$

ดังนั้นผลการวัด tan δ จึงต้องระบุอุณหภูมิ, แรงดันไฟฟ้า และความถี่ ขณะทำการวัดเสมอ

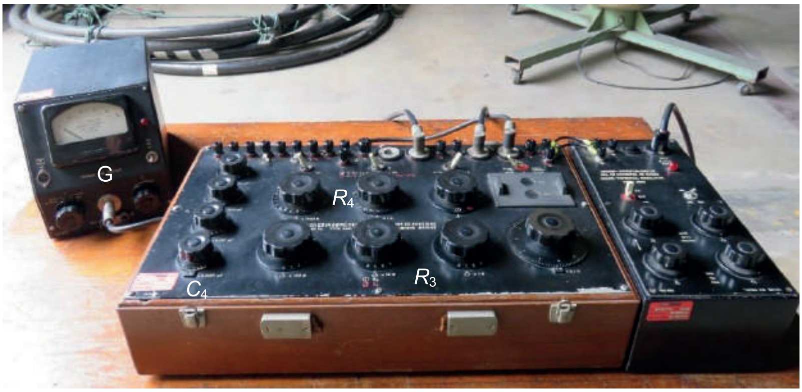
5.3.1 การวัด tan δ ด้วย Schering bridge

วงจร Schering bridge แสดงในรูปที่ 5.14 โดย R_x และ C_x คือวงจรสมมูลแบบอนุกรมของวัสดุทดสอบ



รูปที่ 5.14 วงจรสมมูลของการวัด tan δ ด้วยวงจร Schering bridge

ตัวเก็บประจุ C_N ในรูปเป็น *ตัวเก็บประจุมาตรฐาน* (standard/gas capacitor) ที่มีกำลังสูญเสียน้อยมาก (tan δ ~ 10^{-6}) เพราะฉนวนใช้ก๊าซอัดความดัน สัญญาณจากภาคแรงต่ำของ C_N และ EUT ส่วนที่อยู่ในเส้นประ -ใช้สายที่มีชีลด์เพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนจากภายนอก- จะต่อกับเครื่องวัดในรูปที่ 5.15 ที่อยู่ในห้องควบคุมเพื่อความปลอดภัยของผู้ทำการวัด



รูปที่ 5.15 Schering bridge ที่ห้องทดลองไฟฟ้าแรงสูง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมื่อปรับ R_3 และ C_4 จนกระแสที่ไหลผ่าน *กัลวานอมิเตอร์* (Galvanometer, G) มีค่าประมาณศูนย์ เราจะถือว่าบริจด์สมดุล ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อ

$$\frac{Z_{II}}{Z_{IV}} = \frac{Z_{I}}{Z_{III}}$$

$$Z_I = R_x - \frac{j}{\omega C_x};\quad Z_{II} = -\frac{j}{\omega C_N};\quad Z_{III} = R_3;\quad Z_{IV} = \frac{R_4 \cdot \left(-\frac{j}{\omega C_4}\right)}{R_4 - \frac{j}{\omega C_4}}$$

ดังนั้น

$$C_x = C_N \frac{R_4}{R_3};\qquad R_x = R_3 \frac{C_4}{C_N} \tag{5.6}$$

และ

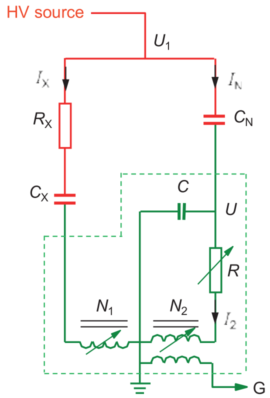
$$\text{Tg}\,\delta = \omega C_x R_x = \omega C_4 R_4 \tag{5.7}$$

ซึ่งนอกจากจะทราบค่า tan δ แล้ว เรายังทราบความจุไฟฟ้า C_x ของ EUT อีกด้วย

แต่ Schering bridge มีข้อด้อยที่สำคัญคือมี ตัวเก็บประจุแฝง C_{stray} ของสายชีลด์ เนื่องจากชีลด์โลหะต่อลงกราวน์แต่อยู่ใกล้กับจุด (b) และ (d) ซึ่งมีแรงดันไม่เท่ากับศูนย์ทำให้ Z_{III} และ Z_{IV} มีค่าเปลี่ยนไป วิธีลดผลกระทบ คือใช้ R_3 ที่มีความต้านทานต่ำไม่เกิน 10 kΩ ส่วน Z_{IV} จะได้รับผลกระทบน้อยเพราะโดยปกติ $C_4 >> C_{stray}$

5.3.2 การวัด tan δ ด้วยหลักการของหม้อแปลง

การวัด tan δ ด้วยวิธีนี้จะใช้หม้อแปลงพิเศษที่มีขดลวด 3 ขด พันบนแกนเหล็กแกนเดียวกัน และหม้อแปลงได้รับการออกแบบให้มีกำลังสูญเสียทั้งของขดลวดและแกนเหล็กต่ำมากเป็นพิเศษ ดังแสดงในรูปที่ 5.16



รูปที่ 5.16 การวัด tan δ ด้วยหลักการของหม้อแปลง

ตัวเก็บประจุ C_N ในรูปเป็นตัวเก็บประจุมาตรฐาน ส่วนสัญญาณจากภาคแรงต่ำของ C_N และ EUT จะต่อกับเครื่องวัด -ที่อยู่ในเส้นประ- ในรูปที่ 5.17 ที่อยู่ในห้องควบคุมเพื่อความปลอดภัยของผู้ทำการวัด

จากวงจรในรูปที่ 5.16 หากสมมุติว่าหม้อแปลงเป็นอุดมคติ ถ้าเราปรับ R และ C จนทำให้ $N_x I_1 = N_2 I_2$ ฟลักซ์ในแกนเหล็กจะมีค่าเป็นศูนย์ ทำให้ไม่มีแรงดันเหนี่ยวนำในขดลวดที่ 3 จึงไม่มีกระแสไหลผ่านกัลวานอมิเตอร์ G

รูปที่ 5.17 Transformer ratio arm bridge ที่ห้องทดลองไฟฟ้าแรงสูง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ที่จุดสมดุล

$$U = I_N Z = I_N \frac{R \cdot \left(\frac{1}{j\omega C}\right)}{R + \left(\frac{1}{j\omega C}\right)} = I_N \frac{R}{1 + j\omega RC} \quad \text{and} \quad I_2 = I_N \frac{\left(\frac{1}{j\omega C}\right)}{R + \left(\frac{1}{j\omega C}\right)} = I_N \frac{1}{1 + j\omega RC}$$

$$U_1 = I_N \left(\frac{1}{j\omega C_N} + \frac{R}{1 + j\omega RC}\right), \text{ if } U_1 = 1, \text{ then } I_N = \frac{(1 + j\omega RC)}{1/j\omega C_N \cdot (1 + j\omega RC) + R}$$

$$I_x = \frac{1}{R_x + 1/j\omega C_x} = \frac{j\omega C_x}{1 + j\omega R_x C_x}$$

ดังนั้น

$$C_x = \frac{N_2}{N_1} C_N \tag{5.8}$$

และ

$$\text{Tg}\,\delta = \omega R (C_N + C) \tag{5.9}$$

ตัวอย่างที่ 5.1 การไฟฟ้านครหลวงต้องการเดินสายเคเบิล 115 kV 400 mm^2 จากสถานีไฟฟ้าสามย่านไปยังสถานีไฟฟ้าวัดเลียบระยะทาง 5 km จงหากำลังสูญเสียในเนื้อฉนวนของสายเคเบิลนี้ หากการไฟฟ้าใช้สายเคเบิลที่มีผลการวัด tan δ ที่ความยาว 10 m เท่ากับ $30 \cdot 10^{-4}$ และวัด C_x ได้เท่ากับ 2 nF

จากผลการวัดค่า C_x ความจุไฟฟ้าของสายเคเบิลมีค่าเท่ากับ 2/10 = 0.2 nF/m ส่วนค่า tan δ จะเท่าเดิมไม่ว่าสายเคเบิลจะยาวเท่าใดก็ตาม

ดังนั้น

$$P = \omega C U^2 \text{Tg}\,\delta = 100\pi \cdot (5000 \cdot 0.2 \cdot 10^{-9}) \cdot \left(\frac{115 \cdot 10^3}{\sqrt{3}}\right)^2 \cdot 30 \cdot 10^{-4}$$

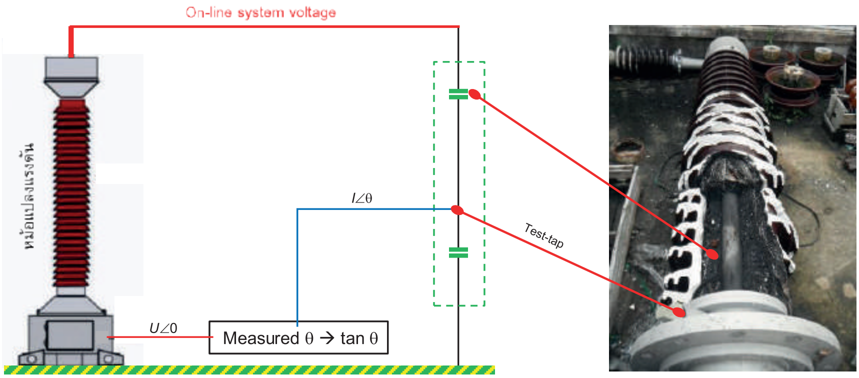
$$= 4.15 \ \text{[kW]}$$

การเดินสายเคเบิลแรงสูงต้องใช้สาย 3 เส้น กำลังสูญเสียในเนื้อฉนวนจึงเท่ากับ 4.15·3 = 12.45 kW ซึ่งน้อยมากเมื่อเทียบกับกำลังสูญเสียในตัวนำของสายเคเบิล

อนึ่งในการคำนวณเราใช้ค่าแรงดัน U_{L-N} = 115/√3 kV ซึ่งเป็นแรงดันที่ตกคร่อมฉนวนของสายเคเบิล ทำให้ต้องคูณผลการคำนวณด้วย 3 แต่ถ้าใช้ U_{L-L} = 115 kV ซึ่งเป็นแรงดันเฟสของระบบไฟฟ้า ผลการคำนวณจะเท่ากันโดยไม่ต้องคูณ 3

5.3.3 การวัด tan δ ตลอดเวลาขณะที่สายเคเบิลจ่ายไฟ

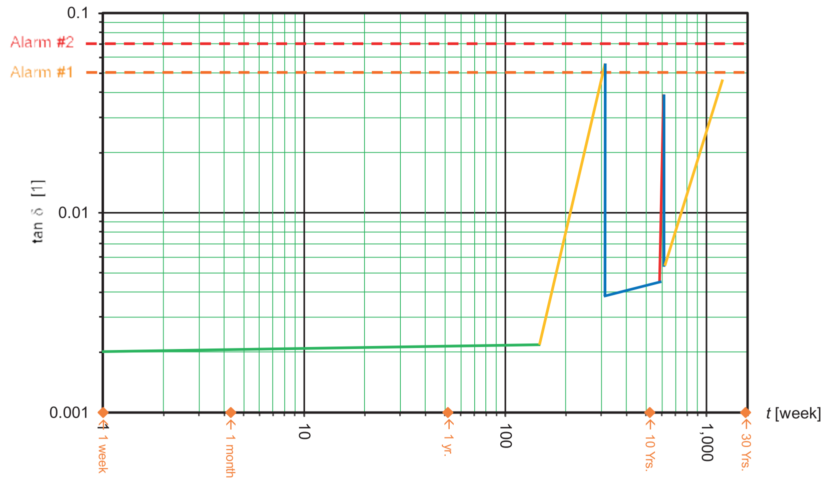
โปรดสังเกตว่าการวัด tan δ ทั้งสองวิธีข้างต้นต้องทำในขณะที่ดับไฟ ซึ่งมักทำระหว่างการบำรุงรักษาอุปกรณ์ไฟฟ้า แต่ในปัจจุบันการไฟฟ้าต่างๆ มักต้องการวัด tan δ เพื่อประเมินสภาพของอุปกรณ์ไฟฟ้าตลอดเวลา เช่น ผ่านปลอกฉนวนนำสายไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง หรือผ่านหัวสายเคเบิลแบบที่ใช้ปลอกฉนวนนำสายไฟฟ้า จึงใช้วงจรที่แสดงในรูปที่ 5.18 ในการวัด



รูปที่ 5.18 วงจรวัด tan δ เพื่อประเมินสภาพของอุปกรณ์ไฟฟ้าตลอดเวลา

จากนั้นนำค่าที่วัดได้ไปแก้ค่าอุณหภูมิ เช่นแปลงไปที่ 40 °C แล้วนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่ตั้งเป็นเกณฑ์ไว้ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 5.19 ซึ่งจะเห็นว่า tan δ มีค่าค่อนข้างคงที่ในช่วง 3 ปีแรก จากนั้นก็เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จนถึงปีที่ 6 ก็เกินค่าเตือนภัยระดับ 1 (alarm #1) ที่ตั้งไว้ แต่การไฟฟ้าก็ไม่ได้จัดการอะไรเพราะค่า tan δ เพิ่มขึ้นอย่างปกติ -แต่หากระหว่างที่การไฟฟ้าไม่ได้ทำอะไร ถ้าค่า tan δ เพิ่มขึ้นเกินค่าเตือนภัยระดับ 2 (alarm #2) การไฟฟ้าจะนำหม้อแปลงออกจากระบบทันทีเพื่อป้องกันไฟฟ้าดับ- เมื่อถึงเวลาที่เหมาะสมการไฟฟ้าจึงนำหม้อแปลงออกมาจากระบบเพื่อทำการบำรุงรักษา เช่น เปลี่ยนถ่ายน้ำมันหม้อแปลงทั้งหมด นำชิ้นส่วนกระดาษจุ่มน้ำมันมาตรวจสอบอายุ ฯลฯ หลังจากการบำรุงรักษา ค่า tan δ จะลดลงมา แต่ไม่ต่ำเท่ากับหม้อแปลงใหม่ๆ ซึ่งเป็นเรื่องปกติ

เมื่อใช้ไปถึงปีที่ 12 ค่า tan δ เพิ่มขึ้นด้วยอัตราผิดปกติ ดังนั้นแม้ว่าค่า tan δ จะต่ำกว่าค่าเตือนภัยระดับ 1 การไฟฟ้าก็นำหม้อแปลงออกจากระบบทันทีเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดไฟฟ้าดับ การไฟฟ้าอาจนำหม้อแปลงไปบำรุงรักษาซึ่งอาจเป็นการเปลี่ยนฉนวนของขดลวดแรงสูง ตรวจสอบความแน่นหนาของจุดยึดต่างๆ ฯลฯ แล้วนำหม้อแปลงกลับไปใช้งานจนกระทั่งถึงเวลาที่หม้อแปลงหมดอายุการใช้งาน



รูปที่ 5.19 ตัวอย่างประวัติผลการวัด tan δ @40 °C ของหม้อแปลงไฟฟ้า

เกร็ดความรู้ 5.1 อุปกรณ์ไฟฟ้ามีอายุการใช้งานนานเท่าใด?

อายุการใช้งานของอุปกรณ์ไฟฟ้าแบ่งออกเป็น 3 ประเภทดังนี้

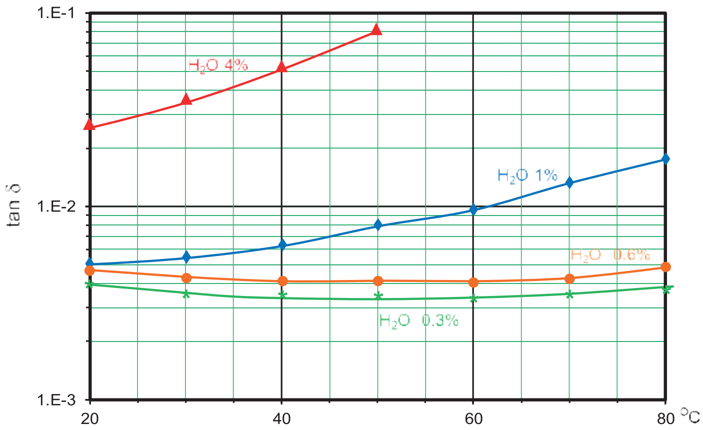
1. <u>อายุจริง</u> เป็นเวลาที่อุปกรณ์หมดสภาพในการใช้งานเช่น คอมพิวเตอร์ติด ๆ ดับ ๆ เพราะชิ้นส่วนภายในหมดสภาพ ซึ่งโดยปกติน้อยครั้งมากที่เราจะใช้งานจนอุปกรณ์เสียหาย ยกเว้นอุปกรณ์ที่มีราคาแพง เช่น รถยนต์เก่า ๆ ที่วิ่งกันอยู่ในปัจจุบันนี้
2. <u>อายุทางเศรษฐศาสตร์</u> เป็นเวลาที่เราใช้อุปกรณ์อย่างคุ้มค่าตามที่ลงทุนแล้ว เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า เราใช้จนค่าไฟฟ้าที่ได้มากกว่า ราคาของหม้อแปลงรวม + ดอกเบี้ย + ค่าบำรุงรักษา + ค่าดำเนินการ + ฯลฯ โดยปกติจะใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีราคาแพง
3. <u>อายุทางเทคโนโลยี</u> เป็นเวลาเราเห็นว่าเราต้องการอุปกรณ์แบบเดิมที่ทำงานได้ดีขึ้นเช่น หม้อแปลงแกน amorphous ที่มีกำลังสูญเสียต่ำมาก สายเคเบิลที่ฝังใยแก้วนำแสงเพื่อวัดความร้อนของตัวนำตลอดเวลา คอมพิวเตอร์รุ่นใหม่ที่ใช้ CPU เร็วขึ้น ฯลฯ (ในที่นี้ไม่นับการเปลี่ยนอุปกรณ์ไฟฟ้าตามความทันสมัย เช่น เปลี่ยนโทรศัพท์มือถือทุกครั้งที่มีรุ่นใหม่ ๆ ออกมา) โดยปกติจะเปลี่ยนอุปกรณ์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานหรือเพิ่มความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า

ระดับการเตือนภัยสามารถเลือกได้หลายวิธี แต่วิธีที่นิยมคือใช้ค่าที่มาตรฐานระบุในการทดสอบประจำหรือการทดสอบเฉพาะแบบ เช่น [IEC60317, 2017] ได้ระบุค่า tan δ สูงสุดของปลอกฉนวนนำสายไฟฟ้าไว้ในตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 ค่า tan δ และค่า tan δ ที่เพิ่มสูงสุด ของปลอกฉนวนนำสายไฟฟ้า

ประเภทฉนวน	ค่า tan δ	ค่า tan δ ที่เพิ่ม
	1.05 $U_m/\sqrt{3}$	1.05 $U_m/\sqrt{3}$ - U_m
กระดาษจุ่มน้ำมัน (paper-impregnate, PIP)	$7{\cdot}10^{-3}$	$1{\cdot}10^{-3}$
กระดาษจุ่มเรซิน (resin-impregnate, RIP)	$7{\cdot}10^{-3}$	$4{\cdot}10^{-3}$
กระดาษหุ้มเรซิน (resin-bonded paper, RBP)	$15{\cdot}10^{-3}$	$1{\cdot}10^{-3}$
ฟิล์มจุ่มก๊าซ (gas-impregnated film, GIF)	$5{\cdot}10^{-3}$	$1{\cdot}10^{-3}$
ก๊าซ	$5{\cdot}10^{-3}$	$1{\cdot}10^{-3}$

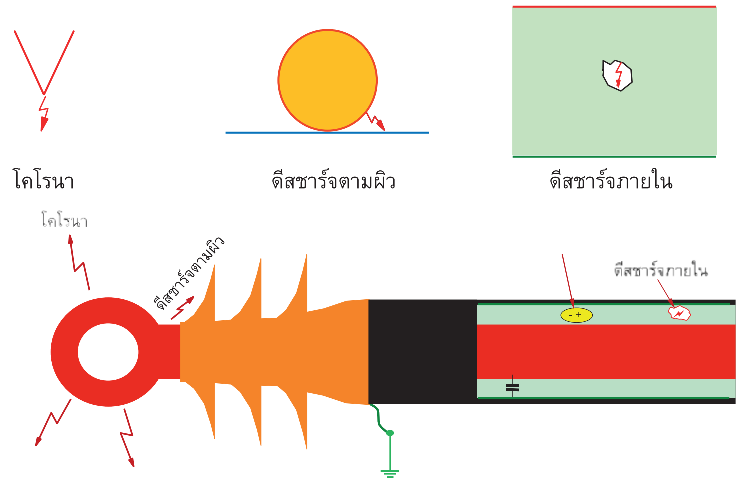
หรืออาจใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง tan δ กับน้ำที่อยู่ในฉนวน ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 5.20 [ABB, 2018] เพราะมีผลการทดลองเป็นจำนวนมากที่วัดค่าแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนเหลวหรือ PIP ที่มีน้ำ



รูปที่ 5.20 ความสัมพันธ์ระหว่าง tan δ กับปริมาณน้ำที่อยู่ในน้ำมันหม้อแปลง

5.4 การวัดดีสชาร์จบางส่วน

ดีสชาร์จบางส่วนเป็นปรากฏการณ์เบรกดาวน์ที่เกิดซ้ำไปซ้ำมาหลายพันครั้งต่อวินาที แต่เกิดขึ้นในบางส่วนของฉนวนเท่านั้น ฉนวนทั้งหมดจึงยังทนแรงดันของระบบได้และทำงานได้โดยปกติ อย่างไรก็ตามดีสชาร์จบางส่วนอาจทำให้เกิดรบกวนสัญญาณวิทยุหรือทำลายฉนวนทีละน้อยๆ เสมอ ดีสชาร์จบางส่วนจึงแบ่งตามลักษณะของปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเป็น 3 ประเภท ดังแสดงในรูปที่ 5.21



รูปที่ 5.21 ประเภทของดีสชาร์จบางส่วนที่แบ่งตามลักษณะของปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น

ก) โคโรนา

โคโรนาเป็นดีสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นในบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าสูงเกินค่าแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนที่คืนสภาพเองได้ เช่น อากาศ หรือ SF_6 ดังนั้นแม้ว่าโมเลกุลของก๊าซจะเปลี่ยนไป แต่ในที่สุดก็จะคืนสภาพเดิมจึงไม่มีผลต่อความคงทนแรงดันไฟฟ้าของก๊าซ อย่างไรก็ตามการเกิดไอออไนซ์ในก๊าซจะทำให้มีประจุเคลื่อนที่ตามสนามไฟฟ้า จึงเกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้ากระจายออกไปรบกวนสัญญาณวิทยุ ดังนั้นจึงวัดผลกระทบด้วยความแรงของสัญญาณรบกวนในหน่วย μV หรือ dBμV (dBμV = 10 log[μV/(1 μV)]) นอกจากนั้นยังทำให้เกิด *กำลังสูญเสียโคโรนา* (corona loss) ซึ่งเป็นปัญหาหลักของสายส่งไฟฟ้า

ข) ดีสชาร์จตามผิว

ดีสชาร์จตามผิวเกิดที่จุดสามประสานทำให้เกิดโคโรนาในก๊าซหรือฉนวนเหลวที่ล้อมรอบฉนวนแข็ง ผิวของฉนวนแข็งที่ทำจากสารออแกนิกจึงเสียสภาพเนื่องจากความร้อนและเกิดรอยไหม้ที่ผิวที่ยาวมากขึ้นๆ จนเกิดวาบไฟตามผิวในที่สุด ดังนั้นจึงวัดผลกระทบด้วยความแรงของสัญญาณรบกวนในหน่วย μV เช่นเดียวกับโคโรนา

ค) ดีสชาร์จภายใน

ดีสชาร์จภายในเกิดขึ้นเพราะมีสารแปลกปลอมภายในฉนวนหลัก (สารแปลกปลอมมีค่าเปอร์มิตติวิตี้ไม่เท่ากับฉนวนหลัก) ซึ่งอาจเป็น ฟองอากาศ/สุญญากาศ, เศษโลหะหรือเศษฉนวน ในฉนวนแข็งและเหลว

การดีสชาร์จทุกกรณีจะทำลายฉนวนหลักเพราะเมื่อเกิดไอออไนซ์ อิเล็กตรอนและไอออนต่างๆ จะเปลี่ยนพลังงานที่ได้รับจากสนามไฟฟ้าไปเป็นพลังงานจลน์ เมื่อไปชนฉนวนหลักพลังงานจลน์ดังกล่าวจะแปรไปเป็นความร้อนที่ทำลายฉนวนทีละน้อยๆ ความหนาของฉนวนหลักจึงลดลงจนท้ายที่สุดก็เกิดเบรกดาวน์

ดังนั้นจึงวัดผลกระทบด้วยพลังงานในหน่วยของประจุ q [pC] เพราะเราทราบว่าพลังงาน $W = qU$ เมื่อ U คือแรงดันที่เริ่มเกิดดีสชาร์จภายใน

5.4.1 วิธีตรวจจับดีสชาร์จบางส่วน

วิธีตรวจจับดีสชาร์จบางส่วนทำได้หลายวิธี ดังนี้

ก) ฟังเสียง เป็นวิธีง่ายๆ ในสังเกตว่ามีโคโรนาหรือดีสชาร์จตามผิวในอากาศหรือไม่ แม้ว่าจะไม่สามารถแสดงค่าเป็นตัวเลข แต่ก็ให้ความรู้สึกถึงความรุนแรงของดีสชาร์จบางส่วนได้จากเสียงที่ดังขึ้นๆ -ที่ระดับแรงดันคงที่ เสียงจะดังขึ้นเมื่อสภาพอากาศรอบๆ ลูกถ้วยเปลี่ยนไป เช่น อากาศแห้งในหน้าหนาวเสียงจะเกิดขึ้นดังกว่าอากาศชื้นในหน้าร้อน หรือในช่วงเช้าที่มีน้ำค้างเกาะที่ผิวฉนวน-

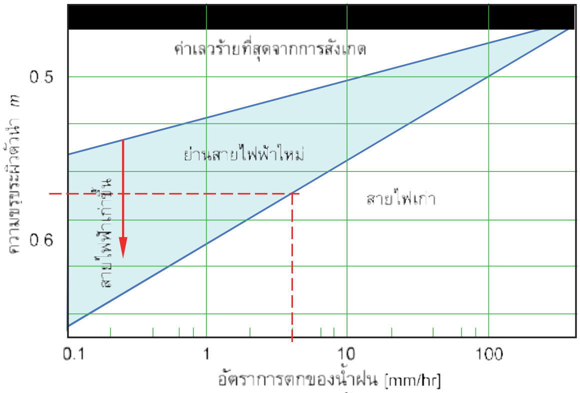
ข) ใช้สายตา การสังเกตแสงจากโคโรนาด้วยสายตา (visual corona test) ยังใช้เป็นวิธีทดสอบในปัจจุบัน เช่น การทดสอบสายส่งไฟฟ้าเหนือพื้นดิน วิธีนี้มีความไวกว่าการฟังเสียงจึงตรวจจับโคโรนาที่แรงดันต่ำกว่าได้

การทดสอบจะทำในห้องที่มืดสนิท จากนั้นค่อยๆ เพิ่มแรงดันทดสอบจนถึงค่าที่ระบุในมาตรฐาน อย่างไรก็ตามมาตรฐานมักระบุให้เพิ่มแรงดันทดสอบขึ้นไปจนเห็นแสงจุดเล็กๆ สีม่วงอมฟ้าเกิดที่ผิววัสดุทดสอบ พร้อมกันนั้นเราอาจได้ยินเสียงด้วย

ค่าแรงดันที่ทำให้เริ่มสังเกตเห็นแสงนี้เรียกว่า แรงดันเริ่มเกิดโคโรนา (corona inception voltage) จากนั้นเพิ่มแรงดันทดสอบสูงขึ้นอีกเล็กน้อย เพื่อให้วัสดุทดสอบเกิดโคโรนาขึ้นหลายๆ จุด แล้วคงแรงดันนี้ไว้ 3-5 นาที เพื่อให้โคโรนาเกิดคงที่ (มักเรียกว่าให้โคโรนาติด) จากนั้นลดแรงดันทดสอบลงจนไม่เห็นแสงเกิดขึ้น ค่าแรงดันที่ไม่เห็นแสงนี้เรียกว่า แรงดันที่ไม่มีโคโรนา (corona extinction voltage) ซึ่งเป็นแรงดันไฟฟ้าที่เรานำไปเปรียบเทียบกับค่าพิกัดที่ระบุในมาตรฐาน ถ้าสูงกว่าค่าที่ระบุก็ถือว่าผ่านการทดสอบ

เหตุผลที่มาตรฐานกำหนดให้เพิ่มแรงดันทดสอบจนเห็นแสงก็เนื่องจาก แม้ว่าวัสดุทดสอบจะไม่เกิดโคโรนาในการใช้งานที่แรงดันปกติ แต่เมื่อบรรยากาศรอบข้างเปลี่ยนไป ความคงทนแรงดันของอากาศอาจมีค่าต่ำลงจนเกิดโคโรนา เช่น เมื่อมีน้ำค้างหรือมีน้ำฝนมาเกาะที่ผิวของสายส่งไฟฟ้าซึ่งเหมือนกับมีปลายแหลมที่ผิวสายไฟฟ้า จะทำให้สนามไฟฟ้าสูงขึ้น ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 5.22 [EPRI, 2006] เมื่อ m เป็นแฟกเตอร์ความขรุขระของตัวนำ (ตัวนำที่เรียบมี m = 1)

เมื่อเกิดโคโรนาขึ้นแล้วที่แรงดันใช้งานปกติ อากาศรอบๆ สายไฟฟ้าจะแตกตัวเป็นไอออนผสมกับโมเลกุลปกติของอากาศทำให้ความคงทนแรงดันของอากาศลดลง ดังนั้นแม้ว่าฝนหยุดตกและสายไฟฟ้าแห้งเนื่องจากความร้อน อากาศรอบๆ สายไฟฟ้าก็ทนแรงดันใช้งานปกติไม่ได้อยู่ดี จึงเกิดโคโรนาต่อไป โคโรนาอาจหายไปเมื่อมีลมพัดแรงๆ ทำให้ไอออนกระจายห่างออกไปจากสายไฟฟ้าจนทำให้ความคงทนแรงดันของอากาศกลับไปสู่ภาวะปกติ

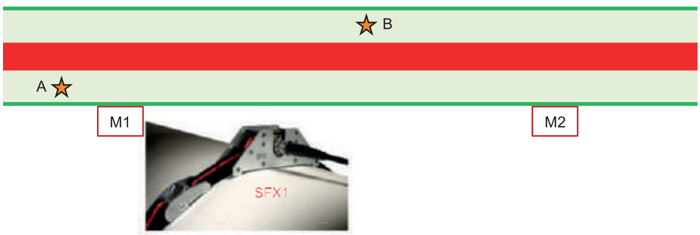


รูปที่ 5.22 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการตกของน้ำฝนกับค่าความขรุขระของตัวนำ *m*

ค) วัดความดัน (pressure detection) ใช้กับการเกิดดีสชาร์จในก๊าซหรือฉนวนเหลวของอุปกรณ์ เช่น GIS, หม้อแปลงไฟฟ้า, ฯลฯ

เป็นที่ทราบกันดีว่าเมื่อเกิดดีสชาร์จก็จะมีประจุอิสระและไอออนเกิดขึ้น ประจุอิสระและไอออนจะได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าและวิ่งไปตามแนวสนามไฟฟ้า ดังนั้นจึงการเคลื่อนที่ของโมเลกุลต่างๆ ในฉนวน จึงทำให้ความดันในบริเวณที่เกิดดีสชาร์จเปลี่ยนแปลง ถ้าเกิดดีสชาร์จขึ้นรุนแรงการเปลี่ยนแปลงความดันอากาศก็มากและในทางกลับกัน -คล้ายกับเวลาที่เราพูด อากาศในบริเวณด้านหน้าปากของเราจะขยับตัวเป็นคลื่นเสียงที่คนอื่นได้ยิน จะดังหรือค่อยก็ขึ้นกับว่าเรากระซิบหรือตะโกนซึ่งก็คล้ายกับการเกิดดีสชาร์จ-

ดีสชาร์จบางส่วนจะเกิดซ้ำไปซ้ำมาหลายพันครั้งต่อวินาที ดังนั้นการตรวจจับความดันที่เปลี่ยนแปลงจึงใช้ *ไมโครโฟนอัลตราโซนิก* (ultrasonic microphone) เพื่อหลีกเลี่ยงความถี่เสียงที่มนุษย์ได้ยิน (20 Hz - 20 kHz) ค่าที่วัดได้อาจบอกขนาดของดีสชาร์จไม่แม่นยำนัก แต่มีข้อดีคือสามารถระบุตำแหน่งที่เกิดดีสชาร์จได้ถ้าใช้ไมโครโฟนมากกว่า 1 ตัวขึ้นไป ดังแสดงในรูปที่ 5.23



รูปที่ 5.23 การวัดดีสชาร์จบางส่วนใน GIS ด้วยไมโครโฟนอัลตราโซนิก

สมมุติว่าเกิดดีสชาร์จบางส่วนที่จุด A ไมโครโฟน M1 และ M2 จะได้รับเสียงที่มาจากทางซ้ายมือทั้งคู่ แต่เวลาที่เสียงมาถึงไมโครโฟนจะไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงใช้เวลาดังกล่าวในการคำนวณตำแหน่งของ A ได้ การเกิดดีสชาร์จบางส่วนที่จุด B ก็เช่นกัน เพียงแต่ไมโครโฟน M1 จะได้รับเสียงที่มาจากทางขวา ส่วน M2 จะได้รับเสียงที่มาจากทางซ้าย ดังนั้นอย่างน้อยเราก็ทราบว่าจุด B อยู่ระหว่างไมโครโฟนทั้งสองตัว

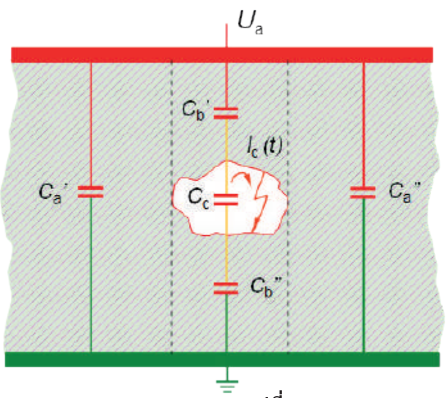
ง) วัดองค์ประกอบทางเคมี (chemical analysis) ที่แปลกปลอม ใช้กับการเกิดดีสชาร์จในก๊าซหรือฉนวนเหลวของอุปกรณ์ เช่น GIS, หม้อแปลงไฟฟ้า ฯลฯ เช่นกัน โดยใน GIS เรามักจะสุ่มก๊าซ SF_6 ออกมาวิเคราะห์หาสารแปลกปลอม ส่วนในหม้อแปลงจะใช้ DGA เพื่อหาก๊าซ H_2, Methane, Ethane ฯลฯ

จ) วัด tan δ ในหัวข้อที่ 5.3 ขณะที่วัดค่า tan δ โดยปกติเข็มชี้ของกัลวานอมิเตอร์จะค่อนข้างนิ่ง แสดงว่าไม่มีดีสชาร์จบางส่วนเกิดขึ้น ถ้ามีดีสชาร์จบางส่วนเกิดขึ้นเข็มจะกระดิกไปมา แม้ว่าเราจะไม่ทราบขนาด แต่เราก็ทราบว่าที่แรงดันเท่าใดจึงทำให้ดีสชาร์จบางส่วนเกิดขึ้น

ฉ) วัดกระแสพัลส์ (pulse current dection) เป็นวิธีที่ไวและแม่นยำที่สุดในปัจจุบัน ทำได้ทั้งในการทดสอบประจำ, การทดสอบเฉพาะแบบ และการวัดตลอดเวลาเพื่อประเมินสภาพของอุปกรณ์ไฟฟ้า ดังที่จะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

5.4.2 กระแสพัลส์เมื่อเกิดดีสชาร์จบางส่วน

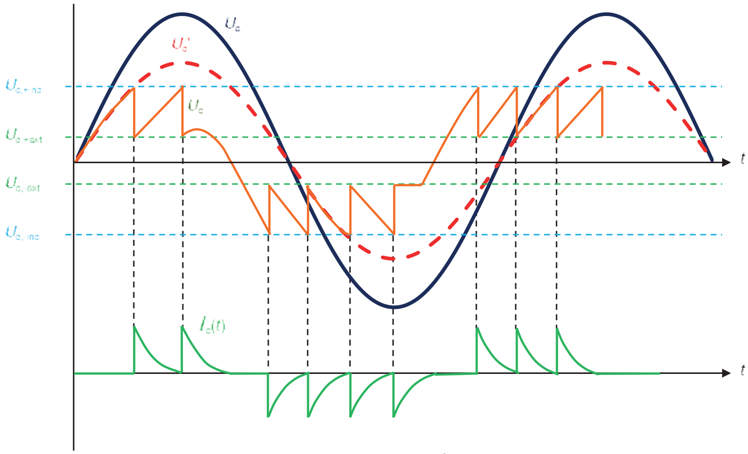
วงจรสมมูลของดีสชาร์จบางส่วนทั้ง 3 ประเภท แสดงในรูปที่ 5.24



C_a', C_a'' = เนื้อฉนวนปกติทางซ้ายและขวา
C_c = สิ่งแปลกปลอมที่เกิดดีสชาร์จ ในกรณีของโคโรนาและดีสชาร์จตามผิวจะอยู่ชิดกับอิเล็กโทรดที่มีสนามไฟฟ้าสูง
C_b', C_b'' = เนื้อฉนวนที่อนุกรมกับสิ่งแปลกปลอมในกรณีของโคโรนาและดีสชาร์จตามผิวจะรวมกัน

รูปที่ 5.24 วงจรสมมูลของดีสชาร์จบางส่วน

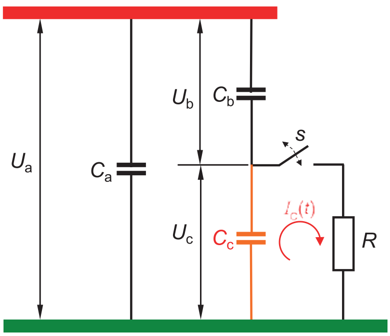
เมื่อเราป้อนแรงดัน U_a ให้ฉนวน แรงดันที่ตกคร่อมสิ่งแปลกปลอม U_c จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อมีค่าสูงกว่าแรงดันเริ่มเกิดดีสชาร์จขั้วบวก $U_{c,+inc}$ ของสิ่งแปลกปลอม สิ่งแปลกปลอมจะเบรกดาวน์ (C_c คายประจุ) ทำให้มีกระแสพัลส์ $I_C(t)$ ไหล ดังแสดงในรูปที่ 5.25



รูปที่ 5.25 รูปคลื่นแรงดันและกระแสที่เกิดขึ้นขณะที่เกิดดีสชาร์จบางส่วน

จากนั้นแรงดันที่ตกคร่อมสิ่งแปลกปลอมจะลดลงจนถึงแรงดันดีสชาร์จหยุดขั้วบวก $U_{c,+ext}$ กระแสจะหยุดไหลจึงทำให้แรงดันที่ตกคร่อมสิ่งแปลกปลอมเพิ่มสูงขึ้น C_c จึงได้รับการอัดประจุอีกครั้งหนึ่ง -U_c' คือแรงดันที่ตกคร่อมสิ่งแปลกปลอมเมื่อไม่มีการดีสชาร์จ- ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นทั้งขั้วบวกและลบโดยที่ขนาดของกระแสพัลส์ $I_C(t)$ และจำนวนกระแสพัลส์ n ที่เกิดในแต่ละวินาทีจะแปรตามแรงดัน $U_{c,+inc}$ (หรือ $U_{c,-inc}$) และความต้านทานระหว่างที่เกิดดีสชาร์จ ซึ่งขึ้นกับประเภทของสิ่งแปลกปลอม -มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาเพราะสิ่งแปลกปลอมจะเสียสภาพทุกครั้งที่เกิดดีสชาร์จบางส่วน แต่การเสียสภาพจะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ-

เพื่อศึกษาการเกิดดีสชาร์จในรายละเอียด เราจะรวมตัวเก็บประจุต่างๆ ในรูปที่ 5.24 ให้เป็นตัวเก็บประจุในอุดมคติเพียง 3 ตัว ดังแสดงรูปที่ 5.26 โดย C_a แทนเนื้อฉนวนส่วนใหญ่จึงมีค่ามาก, C_b แทนเนื้อฉนวนส่วนอนุกรมกับสิ่งแปลกปลอม มีค่าน้อยกว่าความจุไฟฟ้าของสิ่งแปลกปลอม C_c ที่เป็นช่องว่างเล็กๆ (∅ ~ μm) แต่ C_c จะมีค่าลดลงถ้ามีขนาดใหญ่ขึ้น



$C_a = C_a' + C_a''$; $C_b = C_b' // C_b''$

$C_a >> C_c >> C_b$

รูปที่ 5.26 วงจรอย่างง่ายของดีสชาร์จบางส่วน

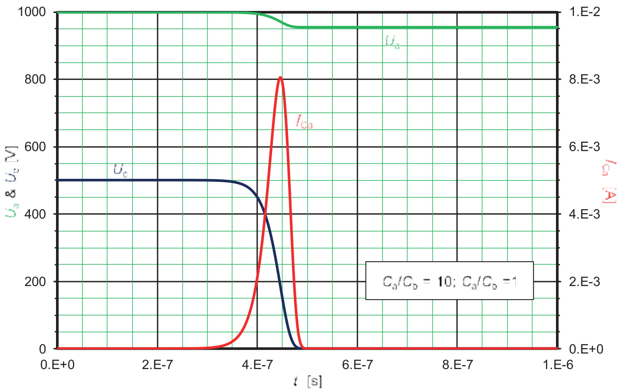
ในการศึกษาด้วยการจำลองแบบ [Pspice, 2016] เราจะป้อนแรงดันกระแสตรง U_a = 1 kV ให้กับฉนวน ดังนั้นก่อนเกิดดีสชาร์จบางส่วน U_b และ U_c จะมีค่าขึ้นกับอัตราส่วน C_c/C_b ดังแสดงในตารางที่ 5.6

ตารางที่ 5.6 แรงดัน U_b และ U_c เมื่อ C_a และ C_c มีค่าต่างๆ (C_b = 1 pF; U_a = 1kV)

	C_b = 1 pF; U_a = 1kV											
C_a [pF]	10				100				1000			
C_c [pF]	1	10	20	100	1	10	20	100	1	10	20	100
U_b [V]	500	909	952	990	500	909	952	990	500	909	952	990
U_c [V]	500	91	48	10	500	91	48	10	500	91	48	10

จากนั้นจะปลดแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรงออกจากฉนวน แรงดันต่างๆ ในรูปที่ 5.26 จึงมีค่าคงที่เพราะยังไม่เกิดดีสชาร์จ (สวิตช์ *s* เปิด)

เมื่อเกิดดีสชาร์จบางส่วน (สวิตช์ *s* ปิด) แรงดันและกระแสที่จุดต่างๆ ในฉนวนจะมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 5.27



รูปที่ 5.27 แรงดัน U_a และ U_c และกระแส I_{Ca} ที่ไหลผ่าน C_a เมื่อเกิดดีสชาร์จบางส่วน

ในรูปที่ 5.27 ได้กำหนดให้ C_c สูงผิดปกติ เพื่อศึกษาการลดลงของแรงดันที่ตกคร่อมฉนวน ΔU_a ซึ่งจะเห็นว่าลดลงประมาณ 5% (45.5 V) แรงดัน U_c จะลดลงเป็นศูนย์แบบเลขชี้กำลังด้วยค่าคงตัวเวลาประมาณ RC_c เท่ากับกระแส I_{Ca} แต่ขนาดของกระแสจะขึ้นกับค่าของ C_a

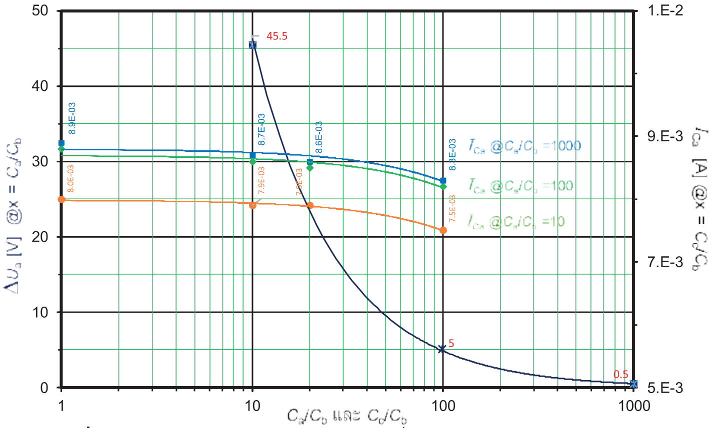
ประจุดีสชาร์จ (discharge charge) q_c ที่ตัวเก็บประจุ C_c สูญเสียไปจึงหาได้จากสมการ

$$\delta q_c = \int I_c(t)dt = C_c \cdot \Delta U_c \tag{5.10}$$

ทำให้เกิดแรงดันตก ΔU_a ซึ่งหาได้จากสมการ (เนื่องจาก C_c >> C_b เมื่อ C_c ต่ออนุกรมกับ C_b จึงมีค่าประมาณ C_b)

$$\Delta U_a = \frac{C_b}{C_a + C_b} \cdot \Delta U_c = \frac{1 \cdot 10^{-12}}{10 \cdot 10^{-12} + 1 \cdot 10^{-12}} \cdot 500 = 45.5 \ \ [\mathrm{V}]$$

แรงดันตก ΔU_a และกระแส I_{Ca} เมื่อ C_a/C_b และ C_c/C_b มีค่าต่างๆ ได้แสดงในรูปที่ 5.28



รูปที่ 5.28 แรงดันตก ΔU_a และกระแส I_{Ca} เมื่อ C_a/C_b และ C_c/C_b มีค่าต่างๆ

จากรูปเราจะเห็นว่ายิ่ง C_a/C_b มีค่ามากเท่าใด แรงดันตก ΔU_a จะน้อยลง ดังนั้นการวัดแรงดันตก ΔU_a จึงทำได้ยากมากเพราะเราต้องแยกความแตกต่างของแรงดัน U_a ก่อนและหลังการเกิดดีสชาร์จบางส่วนซึ่งมีค่าน้อยมาก เช่น ในกรณีที่ C_a/C_b = 1000 เราต้องแยกแรงดัน 0.5 V ออกจาก 1000 V ให้ได้

นอกจากนั้นในทางปฏิบัติเราไม่ทราบว่าจริงๆ แล้ว C_b และ C_c มีค่าเท่าใดจึงไม่ทราบว่าจริงๆ แล้ว q_c ซึ่งเป็นตัวชี้ที่แสดงถึงความรุนแรงของดีสชาร์จบางส่วนมีค่าเท่าใด ยิ่งไปกว่านั้นค่า C_c ยังเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา เช่นในกรณีที่สิ่งแปลกปลอมเป็นช่องว่าง ผนังของช่องว่างจะค่อยๆ ถูกทำลายทำให้ช่องว่างโตขึ้น

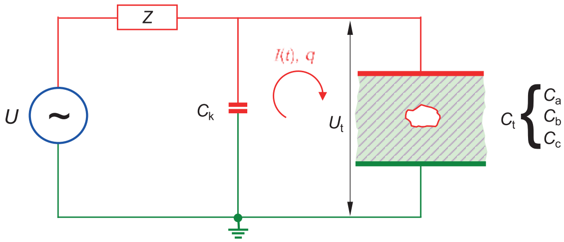
แต่เราจะเห็นว่าถ้า C_a/C_b มีค่ามากขึ้นกระแส I_{Ca} จะมากขึ้น ดังนั้นการวัดดีสชาร์จบางส่วนในห้องทดลองจึงใช้วิธีที่ระบุใน [IEC60270, 2015]

5.4.3 วงจรวัดดีสชาร์จบางส่วน

ในหัวข้อที่ผ่านมาเราจะเห็นว่าในความเป็นจริงเราไม่สามารถวัดกระแส I_{Ca} ได้ เพราะจากภายนอกเราจะทราบเพียงว่าฉนวนมีความจุไฟฟ้า C_t และเมื่อมีดีสชาร์จบางส่วนจะมีกระแสพัลส์ $I(t)$ ไหลผ่านวัสดุทดสอบ ดังนั้นในการวัดกระแสพัลส์เราจึงเพิ่มตัวเก็บประจุคัปปลิง C_k ในวงจรวัดดังแสดงในรูปที่ 5.29

หากเราสมมุติให้ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุคัปปลิง C_k มีค่าเป็นอนันต์ แรงดัน $U_a = U_t$ จะคงที่เมื่อเกิดดีสชาร์จบางส่วน $\Delta U_a \sim 0$) แม้ว่า C_k จะจ่ายประจุ q ให้ฉนวนตอนที่ดีสชาร์จบางส่วนหยุด ประจุ q นี้มักเรียกว่า ประจุที่ปรากฏ (apparent charge) เพราะเป็นประจุที่เราวัดได้ แต่อย่างไร q ก็มีค่าไม่เท่ากับ q_c ที่สูญเสียไปในสิ่งแปลกปลอม

แต่ในทางปฏิบัติ C_k มีค่าไม่เป็นอนันต์จึงเกิดแรงดันตกระหว่างที่เกิดดีสชาร์จบางส่วน ดังนั้น ประจุที่วัดได้ (measured charge) q_m จึงไม่เท่ากับ q แต่มีความสัมพันธ์กันตามสมการที่ 5.11



รูปที่ 5.29 วงจรวัดดีสชาร์จบางส่วนในทางปฏิบัติ

$$\frac{q_m}{q} = \frac{C_k}{C_k + C_t} \tag{5.11}$$

นอกจากประจุที่วัดได้ q แล้ว ข้อมูลอื่นๆ ที่สำคัญของดีสชาร์จบางส่วนประกอบไปด้วย

- *อัตราการเกิดพัลส์* (pulse repetition rate, n) คือ จำนวนกระแสพัลส์ของดีสชาร์จบางส่วนที่วัดได้ในหนึ่งหน่วยเวลา [1/s]
- มุม ϕ_i และเวลา t_i ที่เกิดกระแสพัลส์ โดยที่ $\phi_i = 360\cdot(t_i/T)$ [°] เมื่อ t_i วัดจากจุดที่แรงดันเป็นศูนย์และกำลังเพิ่มขึ้นเป็นบวก ส่วน T คือคาบของแรงดันทดสอบ (20 ms สำหรับความถี่ 50 Hz)
- กระแสดีสชาร์จเฉลี่ย I คือ อัตราส่วนของผลรวมของประจุที่ปรากฏต่อช่วงเวลา T_{ref} ที่เลือก

$$I = \frac{\sum_{i=1}^{n}|q_i|}{T_{ref}} = \frac{(|q_1|+|q_2|+\ldots+|q_n|)}{T_{ref}} \quad \text{[C/s] or [A]}$$

- *กำลังสูญเสียดีสชาร์จ* (discharge power, P) หาได้จาก

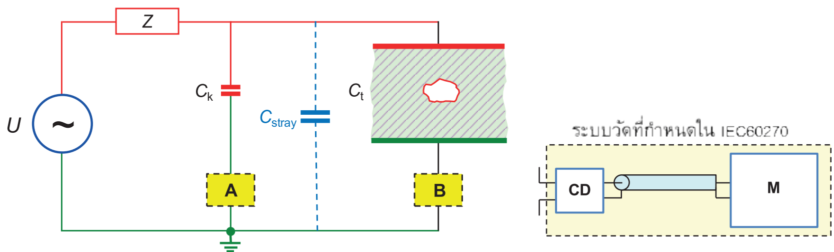
$$P = \frac{\sum_{i=1}^{n} q_i U_i}{T_{ref}} = \frac{(q_1U_1 + q_2U_2 + \ldots + q_nU_n)}{T_{ref}} \quad \text{[W]}$$

เมื่อ U_i คือแรงดันขณะที่เกิดประจุที่ปรากฏ q_i ที่เวลา t_{ref}

- *อัตราการเกิดประจุยกกำลังสอง* (quadratic rate, D)

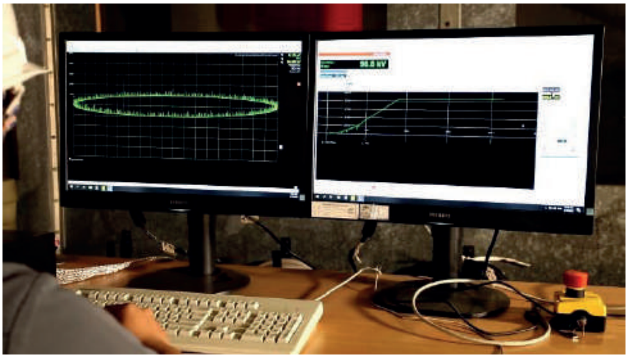
$$D = \frac{1}{T_{ref}}\left(q_1^2 + q_2^2 + \ldots + q_m^2\right) \quad [\mathrm{C}^2/\mathrm{s}]$$

โดยในปัจจุบันใช้เครื่องวัดอิเล็กทรอนิกส์ที่เป็นไปตามข้อกำหนดของ [IEC60270, 2015] วัดกระแส I ด้วยวงจรในรูปที่ 5.30 แล้วใช้ซอฟต์แวร์ในการคำนวณ



ก) วงจรวัดดีสชาร์จบางส่วน

ข) ภาพถ่ายวงจรวัดดีสชาร์จบางส่วนที่ บริษัท สายไฟฟ้าบางกอกเคเบิ้ล จำกัด



ค) เครื่องวัดดีสชาร์จบางส่วนที่ บริษัท สายไฟฟ้าบางกอกเคเบิ้ล จำกัด

รูปที่ 5.30 วงจรวัดดีสชาร์จบางส่วนที่ใช้ระบบวัดตาม [IEC60270, 2015]

โปรดสังเกตว่าระบบวัดดีสชาร์จบางส่วนอาจต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุคัปปลิง C_k ที่ตำแหน่ง A หรือต่ออนุกรมกับวัสดุทดสอบที่ตำแหน่ง B ก็ได้ ซึ่งมีข้อดีข้อเสียต่างกันไป

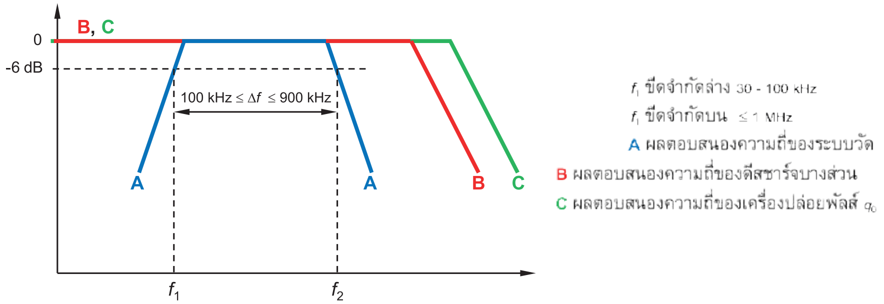
การต่อระบบวัดที่จุด A มีความปลอดภัยมากกว่าจุด B เพราะเราไม่ทราบว่าวัสดุทดสอบจะเกิดเบรกดาวน์หรือไม่ในขณะวัดดีสชาร์จ์บางส่วน แต่มีความไวในการวัดน้อยกว่าการต่อที่จุด B เพราะมีประจุแฝง C_{stray} ในวงจร ประจุที่ไหลผ่าน C_k จึงไม่เท่ากับประจุที่ไหลผ่านวัสดุทดสอบ

5.4.3.1 ระบบวัดดีสชาร์จบางส่วนตาม IEC60270

ระบบวัดดีสชาร์จบางส่วนตาม IEC60270 ประกอบด้วยอุปกรณ์คัปปลิง CD ในรูปที่ 5.30 ก) ทำหน้าที่แปลงประจุที่ต้องการวัดในวงจรทดสอบให้เป็นแรงดัน โดยวงจรภายในจะมีผลตอบสนองความถี่ในลักษณะที่ตัดความถี่ของแรงดันทดสอบและฮาร์มอนิกทิ้งไปก่อนส่งสัญญาณผ่านระบบส่งสัญญาณไปที่ระบบวัดดีสชาร์จบางส่วน

ส่วนระบบส่งสัญญาณอาจเป็นสายเคเบิลทรงกระบอกซ้อนแกนร่วมหรือใยแก้วนำแสง มีหน้าที่หลักในการป้องกันสัญญาณรบกวนที่มาทางอากาศจากภายนอก ดังนั้นอุปกรณ์คัปปลิงจึงอาจเป็นแบบไม่ใช้พลังงาน (passive) หรือใช้พลังงาน (active)

เครื่องวัด M อาจมี *ผลตอบสนองความถี่แบบแถบความถี่กว้าง* (wideband frequency response) หรือมี *ผลตอบสนองความถี่แบบแถบความถี่แคบ* (narrowband frequency response) แต่ต้องมีผลการตอบสนองความถี่คงที่ในช่วงแบนด์วิดท์ Δf ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 5.31



รูปที่ 5.31 ผลตอบสนองความถี่แบบแถบความถี่กว้างตาม [IEC60270, 2015]

ระบบวัดควรสามารถบันทึกดีสชาร์จบางส่วนสูงสุดที่เกิดซ้ำๆ กันได้อย่างถูกต้อง ดังนั้นจึงต้องวัดประจุ q_0 ที่เกิดซ้ำ N ครั้ง/s ที่จ่ายจาก *เครื่องปล่อยพัลส์ดีสชาร์จมาตรฐาน* (PD pulse calibrator) ได้อย่างแม่นยำตามที่แสดงในตารางที่ 5.7

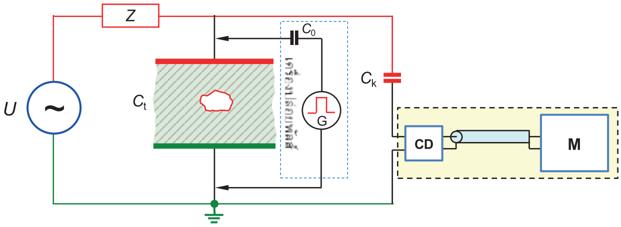
ตารางที่ 5.7 ความแม่นยำของระบบวัดดีสชาร์จบางส่วนในการวัดประจุ q_0 ที่เกิดซ้ำ N ครั้ง/s

N [Hz]	1	2	5	10	50	≥ 100
R_{min} [%]	35	55	76	85	94	95
R_{max} [%]	45	65	86	95	104	105

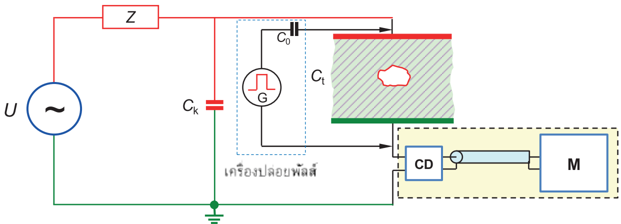
ในกรณีที่ต้องการวัดอัตราการเกิดพัลส์ n ระบบวัดต้องมี *เวลาแยกพัลส์* (pulse resolaution time, T_r) ต่ำ ซึ่งทำได้โดยใช้ระบบวัดที่มีแบนด์วิดท์ Δf สูงและมีความแม่นยำในการนับพัลส์ดังที่แสดงในตารางที่ 5.7

5.4.3.2 การสอบเทียบวงจรวัดดีสชาร์จบางส่วน

เนื่องจากวัสดุทดสอบแต่ละตัวมีความจุไฟฟ้า C_t ไม่เท่ากันและตัวเก็บประจุคัปปลิง C_k มีค่าไม่เป็นอนันต์ เราจึงต้องหาตัวคูณ k ของวงจรทดสอบทุกครั้งก่อนการป้อนแรงดันทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 5.32



ก) ระบบวัดต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุคัปปลิง



ข) ระบบวัดต่ออนุกรมกับวัสดุทดสอบ

รูปที่ 5.32 การหาตัวคูณ *k* ของวงจรทดสอบ

การสอบเทียบวงจรทดสอบควรทำด้วยการจ่ายประจุ q_0 ที่มีขนาดประมาณเท่ากับดีสชาร์จบางส่วนที่คาดว่าจะเกิดหรือเกณฑ์ผ่านการทดสอบดีสชาร์จบางส่วน q_{limit} ตามที่มาตรฐานอุปกรณ์กำหนดเพื่อปรับความไวของระบบวัด ซึ่งโดยปกติ $0.5q_{limit} \leq q_0 \leq 2q_{limit}$ และ $C_0 \leq 0.1C_t$

ตัวคูณ k จะมีค่าเท่ากับ q_m/q_0 เมื่อ q_m คือค่าประจุที่ระบบวัดรายงาน ดังนั้นผลการวัดดีสชาร์จจากการทดสอบที่รายงาน (ประจุที่ปรากฏ, q) จึงมีค่าเท่ากับ kq_m ยกตัวอย่างเช่น k = 1.25 และ q_m = 40 pC ประจุ q ที่ห้องทดสอบรายงานจึงเท่ากับ 50 pC

5.4.3.3 สัญญาณรบกวนจากภายนอก

สัญญาณรบกวนบางประเภทอาจเกิดขึ้นแม้ว่าจะไม่ได้ป้อนแรงดันทดสอบ เช่นการปิด-เปิดสวิตซ์ไฟ, สัญญาณจากสถานีวิทยุโทรทัศน์, การทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงใกล้ๆ ฯลฯ ส่วนสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นเมื่อป้อนแรงดันทดสอบและมีขนาดเพิ่มขึ้นตามแรงดันทดสอบอาจมาจากดีสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลเอง, หัวสายเคเบิล, ตัวนำที่ต่อระหว่างส่วนต่างๆ ในวงจรวัดที่มีแรงดันสูง ฯลฯ และที่เกิดขึ้นบ่อยๆ คือ สปาร์กที่เกิดจากจุดต่อต่างๆ ไม่แน่น เราจึงแบ่งสัญญาณรบกวนวงจรทดสอบเป็น 2 ประเภทคือ สัญญาณที่มาทางอากาศและที่มาทางสายไฟฟ้าทางด้านแรงต่ำของหม้อแปลงทดสอบ

สำหรับสัญญาณรบกวนที่มาทางตัวนำไฟฟ้า เรามักใช้ Z -มักใช้ตัวเหนี่ยวนำ- ในรูปที่ 5.32 ซึ่งเป็น *ตัวกรองความถี่ต่ำ* (low-pass filter) ทำหน้าที่แยกวงจรวัดออกจากวงจรป้อนแรงดันทดสอบที่ความถี่สูง ดังนั้นดีสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นจะไหลในวงของวัสดุทดสอบและตัวเก็บประจุคัปปลิง ในขณะเดียวกันก็ป้องกันไม่ให้สัญญาณรบกวนจากวงจรป้อนแรงดันทดสอบไหลเข้ามาที่ระบบวัด บางครั้งเราอาจต้องติดตั้งตัวกรองความถี่สูงที่ด้านแรงต่ำของหม้อแปลงทดสอบกั้นสัญญาณรบกวนอีกด้วย

ส่วนสัญญาณรบกวนที่มาทางอากาศ เรามักหลีกเลี่ยงโดยทำการทดสอบในห้องชีลด์ และสำหรับการทดสอบที่หน้างานเราอาจใช้ *อุปกรณ์กำจัดสัญญาณรบกวนแบบไวงาน* (active noise cancellation device) ที่ใช้เสาอากาศเพื่อรับสัญญาณรวบกวน ทำการกลับเฟสสัญญาณที่วัดได้ 180° แล้วนำไปรวมกับสัญญาณดีสชาร์จบางส่วนที่ต้องการวัดก่อนส่งสัญญาณไปที่เครื่องวัดดีสชาร์จบางส่วน

ผู้อ่านสามารถศึกษาเทคนิคอื่นๆ ที่ใช้ในการกำจัดสัญญาณรบกวนได้จาก [ELT 011, 1969a] และ [IEC 60270, 2015]

5.4.3.4 เครื่องวัด RIV ตาม [NEMA107, 2016]

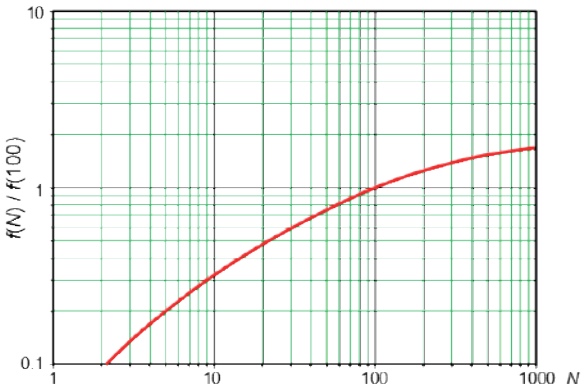
ทั้ง IEC60270 และ NEMA107 ใช้เครื่องวัด RIV ที่มีข้อกำหนดตาม [CISPR16-1-1, 2015] ช่วงความถี่ 0.15-30 MHz (band B) ที่วัดสัญญาณพัลส์แบบค่ายอดถ่วงน้ำหนัก QP (ดูข้อ 1.6 ในบทที่ 1) เหมือนกัน

เครื่องวัดดังกล่าวสามารถเลือก *ความถี่กลาง* (midband frequency, f_m) ได้ แต่ต้องมีแบนด์วิดท์ Δf = 9 kHz @6dB คงที่และมี *เวลาคงตัวในการอัดประจุ* (charging time constant, τ_1) เท่ากับ 1 ms, *เวลาคงตัวในการคายประจุ* (discharging time constant, τ_2) เท่ากับ 160 ms, *เวลาคงตัวทางกล* (mechanical time constant, τ_3) เท่ากับ 160 ms (ดูคำอธิบาย CISPR16-1-1 โดยสรุปใน [Schwarzbeck, 2018]) และโปรดสังเกตว่าผลการวัดพัลส์แบบ QP จะมีค่าต่างกันไปตามจำนวนพัลส์ที่วัดต่อวินาที N แม้ว่าแต่ละพัลส์จะมีประจุ q_m เท่ากันก็ตาม

สำหรับพัลส์กระแสแคบๆ ที่เกิดขึ้นสม่ำเสมอ [IEC60270, 2015] ค่า RIV จะสัมพันธ์กับค่า q_m ตามสมการ

$$\mathrm{RIV} = \frac{q_m \cdot \Delta f \cdot Z_m \cdot f(N)}{k} \tag{5.12}$$

เมื่อ Z_m คือ ค่าความต้านทานขาเข้าของเครื่องวัด [Ω], $f(N)$ คือ ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นของ N ในรูปที่ 5.33 และ k คือตัวคูณมีค่าเท่ากับ q/RIV



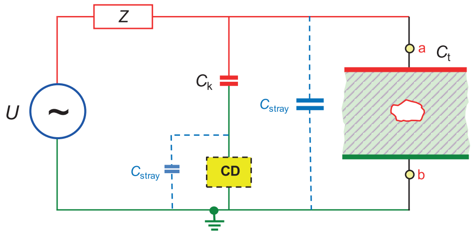
รูปที่ 5.33 ฟังก์ชัน $f(N)$ ในสมการที่ (5.12)

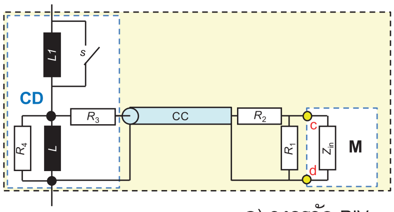
การศึกษาในอดีตพบว่าคลื่นรบกวนจากระบบไฟฟ้าประกอบด้วยหลายความถี่ รวมทั้งความถี่ 1 MHz ซึ่งเป็นจุดกึ่งกลางของการส่งกระจายเสียงวิทยุ AM พอดี ดังนั้นการวัด RIV จึงควรวัดที่ 1 MHz ถ้าทำได้ -ไม่มีคลื่นรบกวนวงจรวัดที่ความถี่นี้- ถ้าทำไม่ได้ NEMA107 แนะนำให้วัด RIV ที่ความถี่อื่น ดังแสดงในตารางที่ 5.8

ตารางที่ 5.8 ความถี่ในการวัด RIV ที่ NEMA107 แนะนำ

MHz										
0.015	0.020	0.028	0.035	0.05	0.06	0.08	0.10	0.12	0.15	0.20
0.28	0.35	0.5	0.6	0.8	1	2	1.5	2	2.8	3.5
5	6	8	10	12	15	20	25	30		

วงจรวัด RIV ที่ใช้ระบบวัดตาม [NEMA107, 2016] ได้แสดงในรูปที่ 5.34





Z_{in} [Ω]	50		≥ 1 M
CC [Ω]	50	75	185
R_1 [Ω]	-		185
R_2 [Ω]	-	25	-
R_3 [Ω]	100		-
R_4 [Ω]	-		100
L [Ω]	≥ 1.5 k @f_m		

ก) วงจรวัด RIV

ข) เครื่องวัด RIV ที่ห้องทดลองไฟฟ้าแรงสูง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ค) ภาพถ่ายวงจรวัด RIV ณ ห้องทดลองไฟฟ้าแรงสูง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 5.34 วงจรวัด RIV ตาม [NEMA107, 2016]

ในรูปที่ 5.34 ก) จะเห็นว่าตัวคัปปลิง CD ที่ต่ออนุกรมกับตัวเป็บประจุคัปปลิง C_k มีรายละเอียดมากกว่า IEC60270 ดังนี้

ก) *L1 และสวิตช์ s* ในกรณีที่วัด RIV ด้วยความถี่กลาง $f_m \leq 1$ MHz รีแอกแตนซ์ของ C_k มีค่าสูง กระแสพัลส์จึงผ่านได้ยาก ดังนั้นเราจึงต่อ *L1* ที่ปรับค่าได้อนุกรมเพื่อให้เกิดเรโซแนนซ์กับ C_k ที่ความถี่กลาง สวิตช์ *s* จึงอยู่ในตำแหน่งเปิด เมื่อ $f_m > 1$ MHz จึงปิดสวิตช์ s เพื่อลัดวงจร

ข) *L* ทำหน้าที่เป็นอิมพีแดนซ์วัดกระแสพัลส์ ต้องมีค่ามากกว่า 1.5 kΩ ที่ความถี่ f_m

ค) *ตัวต้านทาน R ต่างๆ* ทำหน้าที่ลดการสะท้อนในสายเคเบิล CC และที่เครื่องวัด M (ดูข้อ 1.6 ในบทที่ 1)

ง) *สายเคเบิล CC* มักมีอิมพีแดนซ์ Z_c เท่ากับ 50 Ω หรือ 75 Ω และควรมีการลดทอนสัญญาณต่ำ (ดูเกร็ดความรู้ 1.4 ในบทที่ 1)

จ) *เครื่องวัด M* ต้องเป็นไปตามที่ระบุใน CISPR16-1-1 แถบความถี่ B ที่แสดงผลแบบค่ายอดถ่วงน้ำหนัก QP

5.4.3.5 การวัด RIV

สภาพบรรยากาศของห้องทดลองควรอยู่ในช่วง 30-40 °C และความชื้นไม่เกิน 80% ขณะทำการวัด RIV สัญญาณรบกวนต้องมีค่าไม่เกิน -6 dB (ไม่เกินครึ่งหนึ่งของค่า RIV ที่วัดได้หรือเกณฑ์การผ่านการทดสอบวัดค่า RIV)

ก่อนการทดลองต้องสอบเทียบวงจรทดสอบเพื่อหาตัวคูณ P โดยใช้เครื่องปล่อยพัลส์ดีสชาร์จมาตรฐานจ่ายประจุ *x* pC ให้กับจุด a-b ในรูปที่ 5.34 ก) แล้วบันทึกค่าที่วัดได้เป็น $E_{a\text{-}b}$ จากนั้นใช้เครื่องปล่อยพัลส์จ่ายประจุ *x* pC เท่าเดิมให้กับจุด c-d ในรูปที่ 5.34 ก) แล้วบันทึกค่าที่วัดได้ $E_{c\text{-}d}$ ตัวคูณ P จะมีค่าเท่ากับ $E_{a\text{-}b}/E_{c\text{-}d}$ ซึ่งมีค่าน้อยกว่ากว่าหนึ่งเสมอ แต่ต้องมากกว่า 0.25 เมื่อวัดค่า RIV ที่ความถี่ 1 MHz และที่ความถี่อื่นก็ต้องมากกว่า 0.2

ขณะที่วัดค่า RIV เข็มของเครื่องวัดมักแกว่งไปมา ให้บันทึกค่าที่เข็มชี้ค่าสูงที่สุดในช่วงเวลา 15 s เป็นค่า RIV ที่วัดได้ ค่า RIV ที่รายงานไม่ต้องแก้ค่าสภาพอากาศของห้องทดสอบ แต่อาจต้องแก้ค่าด้วยตัวคูณ โดยที่ค่า RIV ที่รายงานจะเท่ากับค่า RIV ที่วัดได้หารด้วยตัวคูณ P

5.4.4 เครื่องปล่อยพัลส์ดีสชาร์จมาตรฐาน

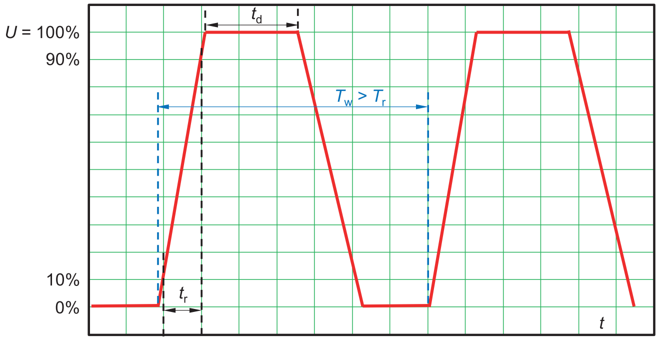
ประจุที่เครื่องปล่อยพัลส์ดีสชาร์จมาตรฐานในรูปที่ 5.35 จ่ายให้วงจรทดสอบได้มาจากการป้อนแรงดันรูปขั้นที่มีขนาด U_0 ผ่านตัวเก็บประจุ C_0 ประจุจึงมีค่าเท่ากับ $q_0 = C_0U_0$ เครื่องปล่อยพัลส์มักใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์ในการแปลงแรงดันกระแสตรงของแบตเตอรี่ 6-12 V ไปเป็นแรงดันรูปขั้นที่มีขนาด U_0 ที่มีความไม่แน่นอนต่ำมากและมักมีความถี่เท่ากับ $2f_{LF}$ [Hz] เมื่อ f_{LF} เป็นความถี่ของระบบไฟฟ้าที่ใช้ในประเทศนั้นๆ (ทำโดยซิงโครไนซ์กับแสงที่เปล่งจาก *หลอดไส้* (incandescent lamp) ที่กระพริบด้วยความถี่ f_{LF}) แล้วจ่ายผ่านตัวเก็บประจุที่มีค่าความจุไฟฟ้า C_0 ที่เที่ยงตรงมาก แรงดัน U_0 อาจปรับได้หลายค่าเพื่อเปลี่ยนขนาดของ q_0 ตามความไวที่ต้องการ ดังตัวอย่างที่แสดงในตารางที่ 5.9

รูปที่ 5.35 เครื่องปล่อยพัลส์ดีสชาร์จมาตรฐาน ที่ใช้ห้องทดลองไฟฟ้าแรงสูง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.9 ขนาดของแรงดันรูปขั้น U_0 ที่ต้องการเพื่อจ่ายประจุ q_0

	U_0 [V]							
q_0 [pC]	2	5	10	20	50	100	200	500
C_0 = 100 pF (C_t > 1 nF)	0.02	0.05	0.1	0.2	0.5	1	2	5
C_0 = 1 nF (C_t > 10 nF)	-	-	-	0.02	0.05	0.1	0.2	0.5

แรงดันรูปขั้นที่สร้างจะมีลักษณะรูปคลื่นดังแสดงในรูปที่ 5.36 โดยเวลาขาขึ้น t_r ต้องไม่เกิน 60 ns -สำหรับเครื่องวัดที่มีผลการตอบสนองความถี่แบบแถบความถี่กว้างที่มี f_2 > 500 kHz เวลาขาขึ้นต้องไม่เกิน 0.03/f_2- และเข้าสู่ภาวะคงตัว ($U = U_0 \pm 3\%$) ในเวลา t_s < 200 ns แต่ละพัลส์ต้องมีความกว้าง t_d > 5 μs ช่วงเวลาระหว่างพัลส์ T_W ต้องนานกว่าเวลาแยกพัลส์ T_r



รูปที่ 5.36 ลักษณะของแรงดันรูปขั้น

สำหรับ EUT ทั่วไปที่มีความจุไฟฟ้าเท่ากับ C_t ความจุไฟฟ้าของเครื่องปล่อยพัลส์ต้องมี $C_0 \leq 200$ pF และ $\leq 0.01C_t$ แต่สำหรับวัสดุทดสอบที่ต้องพิจารณาถึงการสะท้อนของคลื่น เช่น สายเคเบิลที่ยาวกว่า 200 m ที่มีอิมพีแดนซ์ลักษณะเฉพาะ Z_c ความจุไฟฟ้าของเครื่องปล่อยพัลส์ต้องมี $C_0 \leq 1$ nF และ $C_0Z_c \leq$ 30 ns

เครื่องปล่อยพัลส์ที่ใช้ในการตรวจสอบสมรรถนะของระบบวัดดีสชาร์จบางส่วน ต้องมีคุณสมบัติเพิ่มเติม ดังนี้

- ต้องปรับประจุ q_0 ได้อย่างต่อเนื่องหรือเป็นขั้นดังที่อธิบายข้างต้น เพื่อใช้ตรวจสอบความเป็นเชิงเส้นของตัวคูณ k ความเป็นเชิงเส้นของประจุพัลส์เองต้องไม่เกิน ±5% หรือ ±1 pC แล้วแต่ค่าใดจะสูงกว่า
- สามารถเปลี่ยนช่วงเวลาระหว่างพัลส์เพื่อใช้ตรวจสอบ T_r ของระบบวัดดีสชาร์จบางส่วนได้
- ขั้วทั้งสองของเครื่องปล่อยพัลส์ ไม่ต่อลงดิน (floated) คือแต่ละขั้วไม่ต่อกับกราวน์
- สำหรับเครื่องปล่อยประจุแบบที่ใช้แบตเตอรี่ ต้องมีไฟบอกสถานะของแบตเตอรี่
- สามารถจ่ายประจุได้ทั้งขั้วบวกและลบ เพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงขนาดของประจุที่ปรากฏเมื่อกระแสดีสชาร์จบางส่วนกลับขั้ว
- สามารถจ่ายพัลส์สอบเทียบเป็นชุด (แต่ละชุดจ่ายพัลส์ประจุ q_0 ที่มีขนาดเท่ากันจำนวน N ครั้งต่อวินาที) เพื่อใช้ตรวจสอบเครื่องวัดดีสชาร์จบางส่วน

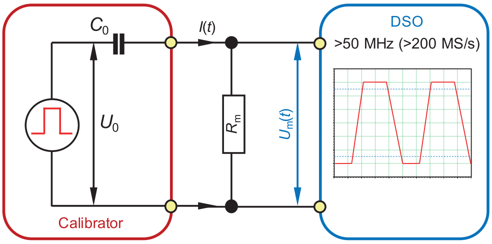
5.4.4.1 การทดสอบสมรรถนะของเครื่องปล่อยพัลส์ดีสชาร์จมาตรฐาน

เครื่องปล่อยพัลส์ดีสชาร์จมาตรฐานเองก็ต้องได้รับการทดสอบสมรรถนะ ที่สามารถตรวจสอบย้อนกลับได้ถึงมาตรฐานระดับชาติ โดยมีหัวข้อการทดสอบดังนี้

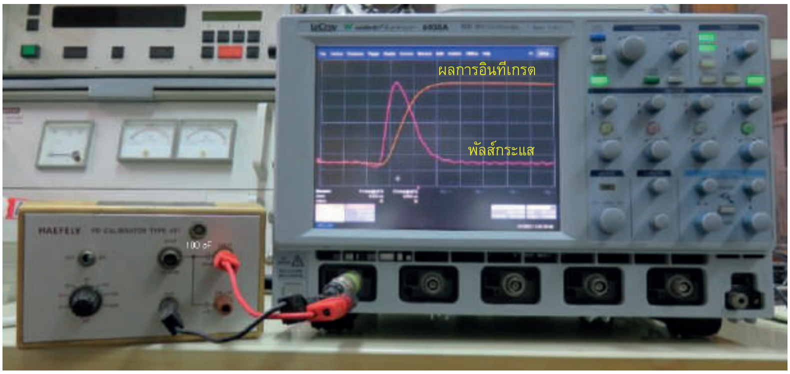
- ค่าจริงของประจุพัลส์ q_0 ที่เครื่องปล่อยพัลส์จ่ายมีความไม่แน่นอน ±5% หรือ ±1 pC แล้วแต่ค่าใดจะสูงกว่า
- เวลาขาขึ้น t_r ของแรงดันรูปขั้น U_0 มีความไม่แน่นอน ±10%
- ความถี่ของพัลส์ประจุ N มีความไม่แน่นอน ±1% ถ้าต้องใช้เครื่องปล่อยพัลส์ในการสอบเทียบระบบวัดดีสชาร์จบางส่วนที่มีความสามารถในการวัดอัตราการเกิดพัลส์ n

5.4.4.2 วิธีตรวจสอบประจุพัลส์ q_0 และเวลาขาขึ้น t_r ของเครื่องปล่อยพัลส์

การตรวจสอบประจุพัลส์ q_0 และเวลาขาขึ้น t_r ของเครื่องปล่อยพัลส์ดีสชาร์จมาตรฐานทำโดยใช้ออสซิลโลสโคปแบบดิจิทัล DSO ดังแสดงในรูปที่ 5.37



ก) วงจรตรวจสอบ



ข) ภาพถ่ายการตรวจสอบเครื่องปล่อยพัลส์ดีสชาร์จมาตรฐาน

รูปที่ 5.37 การตรวจสอบ q_0 และ t_r ของเครื่องปล่อยพัลส์ด้วย DSO

การตรวจสอบทำโดยการต่อตัวต้านทาน R_m ที่มีค่าระหว่าง 50-200 Ω ที่ขั้วของเครื่องปล่อยพัลส์แล้ววัดแรงดัน $U_m(t)$ ด้วย DSO ที่มีแบนด์วิดท์ไม่น้อยกว่า 50 MHz (~200 MS/s) การต่ออุปกรณ์ต่างๆ ให้ใช้สายไฟที่สั้นที่สุดเท่าที่จะทำได้

ค่า R_m ที่เลือกใช้ต้องทำให้การแกว่งช่วงขาลงลดลงเหลือ 2% ของค่ายอด ภายในเวลาทำการอินทีเกรตหาค่าประจุ q_0 ตามสมการ

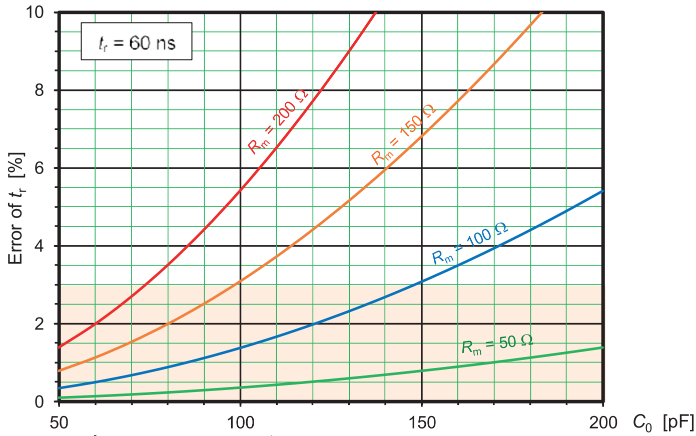
$$q_0 = \int i(t)dt = \frac{1}{R_m}\int U_m(t)dt \tag{5.13}$$

ดังนั้นความไม่แน่นอนในการวัดจึงขึ้นกับความแม่นยำของค่า R_m และ DSO และความถูกต้องของการอินทีเกรตซึ่งมักเป็นซอฟต์แวร์ภายในของ DSO (เราอาจดึงข้อมูล x-y จาก DSO มาทำการอินทีเกรตด้วยซอฟต์แวร์อื่นตามที่ต้องการ)

บางครั้งเราไม่ต้องใช้ตัวต้านทาน R_m หากเราใช้ DSO ที่มีอิมพีแดนซ์ขาเข้า Z_{DSO} เท่ากับ 50 Ω (มีตัวเก็บประจุแฝง C_{DSO} ต่อขนานอยู่เสมอ) ต่อโดยตรงเข้ากับเครื่องปล่อยพัลส์ ซึ่งมีข้อดีคือเราสามารถสอบเทียบ DSO เพียงครั้งเดียว แต่ก็มีข้อเสียคือถ้า R_m มีค่าน้อยจนเกิดการแกว่งมากเกินไปจะทำให้การอินทีเกรตผิดพลาด

นอกจากนั้นค่า R_mC_0 ควรน้อยกว่า t_r เพื่อให้วัดเวลาขาขึ้นได้อย่างถูกต้อง ซึ่งโดยทั่วไปความผิดพลาดในการวัด t_r โดยประมาณหาได้จากสมการที่ 5.14 หรือรูปที่ 5.38

$$\text{Error of } t_r = \left(\sqrt{1^2 + (t_r/R_mC_0)^2} - 1\right)\cdot 100 \ \ [\%] \tag{5.14}$$

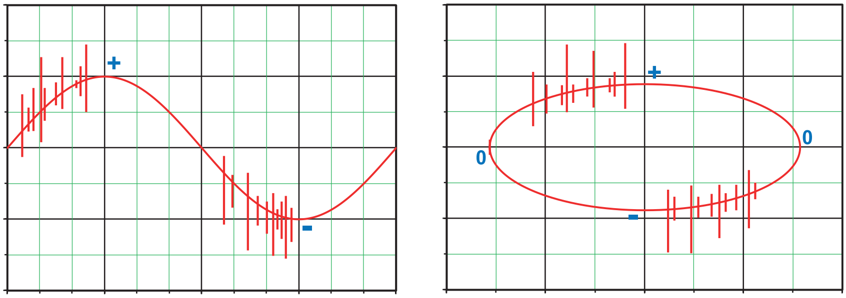


รูปที่ 5.38 ผลของ R_mC_0 ที่มีต่อความผิดพลาดในการวัด t_r = 60 ns

5.4.5 รูปแบบเฉพาะของดีสชาร์จบางส่วน

การหา รูปแบบเฉพาะของดีสชาร์จบางส่วน (PD pattern) หรือ ลายนิ้วมือ (finger print) ของ PD ที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์ไฟฟ้า เช่น หม้อแปลง, สายเคเบิล, หม้อแปลงวัด, ปลอกฉนวนนำสายไฟ ฯลฯ ได้ศึกษามานานกว่าครึ่งศตวรรษจนถึงปัจจุบัน [ELT011, 1969a] [ELT011, 1969b] [TB676, 2017] [TB728, 2018] วัตถุประสงค์ก็เพื่อประเมินสภาพของอุปกรณ์ไฟฟ้าว่าพร้อมที่จะทำงานหรือต้องทำการบำรุงรักษา โดยมีเป้าหมายสูงสุดคือทำนายอายุการใช้งานที่เหลือของอุปกรณ์ไฟฟ้านั้น

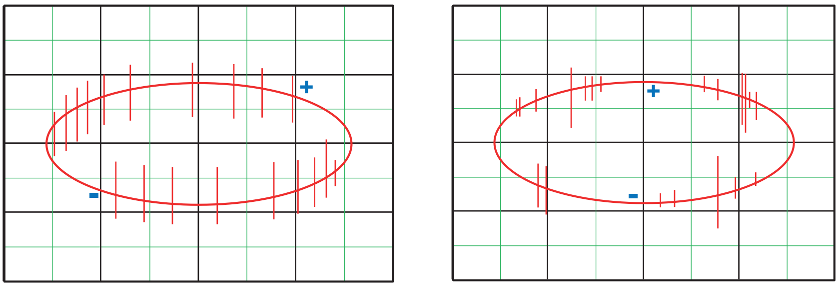
ในอดีต การแสดงรูปแบบเฉพาะของ PD ทำโดยการนำสัญญาณของ PD มาขยายและซ้อนบนรูปคลื่นแรงดันทดสอบแล้วแสดงผลบนจอออสซิลโลสโคป ดังแสดงในรูปที่ 5.39 [ELT011, 1969a]



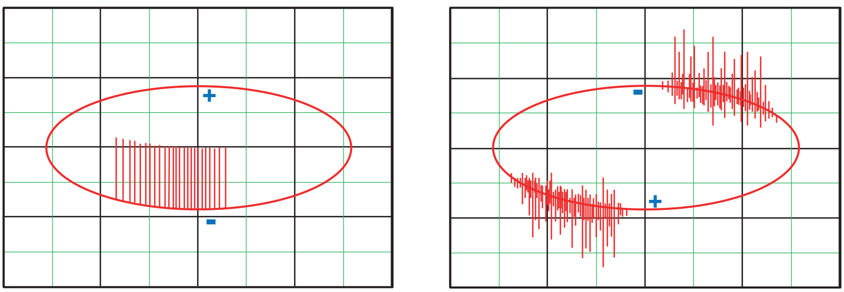
ก) แสดง PD บนรูปไซน์ (sinwave time-base) ข) แสดง PD บนรูปวงรีไซน์ (elliptical time-base)

รูปที่ 5.39 รูปแบบเฉพาะของ PD เมื่อแสดงผลบนจอออสซิลโลสโคป

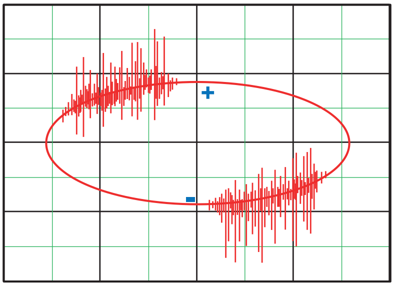
จากนั้นก็ศึกษารูปแบบเฉพาะของ PD เช่นที่แสดงรูปที่ 5.40 แล้วบันทึกไว้เป็นฐานข้อมูล หากในการทดสอบครั้งใดมี PD ขึ้นก็นำรูปแบบ PD ที่เกิดขึ้นมาเปรียบเทียบกับรูปแบบเฉพาะที่เก็บไว้ เพื่อพยายามที่จะระบุว่า PD นั้นเกิดขึ้นจากสัญญาณรบกวน เช่น โคโรนา จุดต่อไม่แน่น ฯลฯ หรือเกิดจากอุปกรณ์ทดสอบเอง ถ้าเกิดจากอุปกรณ์ทดสอบเกิดเพราะอะไรและเกิดที่ตำแหน่งไหน?



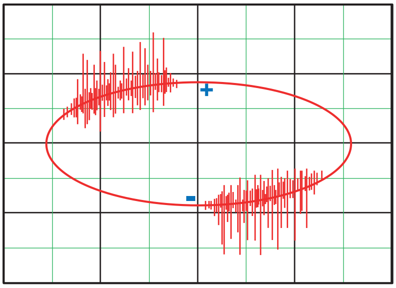
ก) ดีสชาร์จที่วัตถุไม่ต่อลงกราวน์ ข) การทำงานของไทริสเตอร์



ค) โคโรนาในอากาศ ง) ดีสชาร์จตามผิว



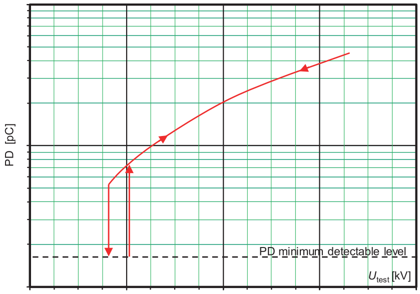
จ) ดีสชาร์จภายในฉนวนแข็ง



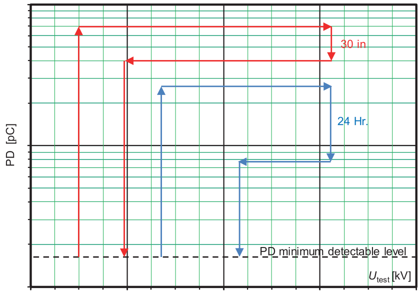
ฉ) ดีสชาร์จภายในกระดาษจุ่มน้ำมัน

รูปที่ 5.40 รูปแบบเฉพาะของ PD จากสาเหตุต่างๆ

นอกจาก PD จะมีรูปแบบเฉพาะต่างกันแล้ว การศึกษายังพบว่าขนาดของ PD ขึ้นกับขนาดและเวลาที่ป้อนแรงดันอีกด้วย ดังตัวอย่างที่แสดงรูป 5.41



ก) ดีสชาร์จตามผิว



ข) ดีสชาร์จภายใน

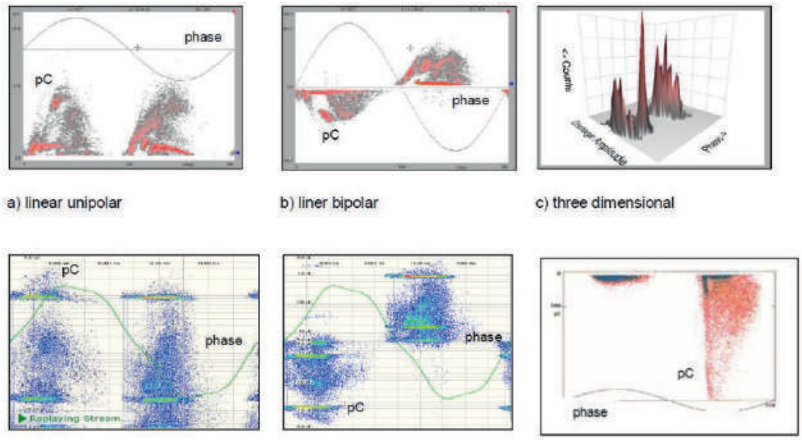
รูปที่ 5.41 ผลของขนาดและเวลาที่ป้อนแรงดัน U_{test} ที่มีต่อขนาดของ PD

ในรูปที่ 5.41 ก) เมื่อเราป้อนแรงดันทดสอบจนถึงค่าแรงดันเริ่มเกิด PD ขนาดของ PD จะเพิ่มขึ้นทันทีทันใดและเมื่อเพิ่มแรงดันสูงขึ้นขนาดของ PD ก็เพิ่มขึ้นตาม แต่เมื่อลดแรงดันลงจะพบว่าแรงดันที่ PD หยุดเกิดจะต่ำกว่าแรงดันเริ่มเกิด PD

ส่วนในรูปที่ 5.41 ข) เมื่อเราป้อนแรงดันทดสอบจนถึงค่าแรงดันเริ่มเกิด PD ขนาดของ PD จะเพิ่มขึ้นทันทีทันใดและเมื่อเพิ่มแรงดันสูงขึ้นขนาดของ PD จะคงที่ แต่เมื่อคงแรงดันไว้ 30 min แล้วลดแรงดันลงจะพบว่าแรงดันที่ PD หยุดเกิดจะสูงกว่าแรงดันเริ่มเกิด PD เมื่อป้อนแรงดันทดสอบซ้ำอีกครั้งก็พบว่าแรงดันเริ่มเกิด PD มีค่าสูงกว่าครั้งแรกและเมื่อเพิ่มแรงดันสูงขึ้นขนาดของ PD จะคงที่คล้ายกับครั้งแรกที่ป้อนแรงดัน และเมื่อคงแรงดันไว้ 24 Hr แล้วลดแรงดันลงจะพบว่าแรงดันที่ PD หยุดจะสูงกว่าครั้งแรกขึ้นไปอีก

โปรดสังเกตว่าการแสดงผล PD บนคลื่นรูปวงรีหรือรูปไซน์ในสมัยก่อนบนจอออสซิลโลสโคป สัญญาณ PD จะขยับไปขยับมาตลอดเวลาไม่เกิดซ้ำที่ตำแหน่งเดิม การบันทึกรูปคลื่นที่แสดงในรูปที่ 5.39 และ 5.40 จึงต้องใช้กล้องถ่ายรูป แล้วนำมาสเก็ตอีกครั้งในภายหลัง

เมื่อเทคโนโลยีทางด้านสารกึ่งตัวนำก้าวหน้าขึ้นจนสามารถสร้าง DSO หรือ ตัวแปลงเป็นดิจิทัลได้ เราจึงบันทึกข้อมูลของ PD ได้ถูกต้องขึ้นและที่สำคัญคือเราสามารถบันทึกขนาดของ PD ที่เกิดขึ้นโดยทราบว่าเกิดขึ้นที่เวลาใดของรูปแรงดันทดสอบ (เกิดที่มุมกี่องศาของรูปคลื่นไซน์) จากนั้นนำข้อมูลการเกิด PD ในช่วงเวลาหนึ่ง เช่น 1 s มาแสดงผลในลักษณะที่เรียกว่า ดีสชาร์จบางส่วนตามเฟส (phase resolve partial discharge, PRPD) ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 5.42



a) linear unipolar

b) liner bipolar

c) three dimensional

d) logarithmic unipolar (increasing amplitude from bottom to top)

e) logarithmic bipolar [OMICRON]

f) linear unipolar (increasing amplitude from top down)

[Fuhr PD-test, OMICRON]

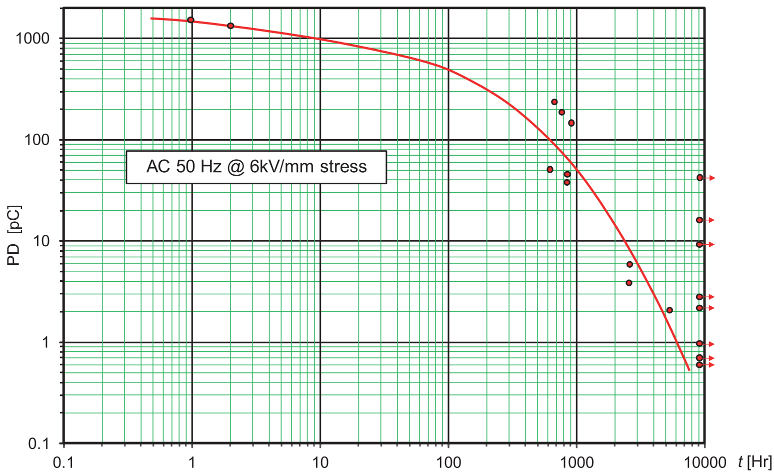
รูปที่ 5.42 การแสดงขนาด PD ในลักษณะของ PRPD ในช่วงเวลาหนึ่ง

จากนั้นจึงใช้ซอฟต์แวร์คำนวณค่าต่างๆ เช่น จำนวน PD ที่เกิดที่มุมต่างๆ, ขนาดประจุทั้งหมดที่เกิดขึ้นที่มุมนั้น, ขนาดประจุสูงสุดที่เกิดขึ้น, พลังงานของประจุแต่ละครั้ง ($\frac{1}{2}q_iU_i^2$), พลังงานของประจุทั้งหมดในช่วงเวลา 1 s, ฯลฯ แล้วนำผลการคำนวณทั้งหมดมาใช้ในการหาตำแหน่งที่เกิด PD, วิเคราะห์หาสาเหตุที่เกิด PD, และพยายามที่จะทำนายอายุการใช้งานที่เหลือของฉนวน ซึ่งในปัจจุบันนี้ยังทำไม่ได้

การวิเคราะห์ PD ที่เกิดในสายเคเบิลเมื่อ 50 ปีก่อน [ELT011, 1969b] ได้ตั้งคำถามสำคัญในการทำนายอายุการใช้งานที่เหลือของฉนวนไว้ 5 ข้อ คือ

1) ขนาดของ PD มีความสัมพันธ์กับอายุของฉนวนหรือไม่? คำตอบคืออาจใช่หรือไม่ใช่ แน่นอนว่าเวลาที่ฉนวนทนแรงดันได้จากผลการทดลองขึ้นกับขนาดของ PD ที่เกิดขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5.43 แต่ในทางปฏิบัติเราไม่ทราบว่าสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิด PD ที่สิ่งแปลงปลอมในฉนวนมีค่าเท่าใด?

2) ขนาดของ PD มีความสัมพันธ์กับขนาดของสิ่งแปลกปลอมหรือไม่ จากผลการทดลอง คำตอบคืออาจใช่ แต่ในทางปฏิบัติเราไม่ทราบสิ่งแปลกปลอมมีขนาดเท่าไร?



รูปที่ 5.43 ความสัมพันธ์ของเวลาที่ฉนวนเสียหายกับขนาดของ PD ในสายเคเบิล PVC

3) อายุของฉนวนขึ้นอยู่กับประเภทของสิ่งแปลกปลอมหรือไม่ คำตอบคือใช่ แต่ในทางปฏิบัติเราไม่ทราบว่าสิ่งแปลกปลอมคืออะไร?

4) PD แสดงถึงการเสื่อมสภาพของฉนวนหรือไม่ คำตอบคือใช่ แต่เราไม่ทราบว่าอัตราการเสื่อมสภาพเป็นอย่างไร? เราอาจใช้ฉนวนเป็นเวลานานก่อนที่จะเกิด PD จากนั้น PD อาจมีค่าคงที่เป็นเวลานาน แต่อยู่ๆ ฉนวนก็เบรกดาวน์ หรือ PD มีขนาดเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามเวลาซึ่งไม่ทราบว่าจะเบรกดาวน์เมื่อใด ดังนั้นการที่เราทราบขนาดของ PD จึงไม่มีความหมายในการหาอัตราการเสื่อมสภาพของฉนวนและทำนายว่าจะเกิดเบรกดาวน์เมื่อใด

5) ขนาดของ PD สามารถใช้ในการพิจารณาคุณภาพของฉนวนหรือไม่ คำตอบคือใช่แน่นอน เพราะเป็นการตรวจสอบคุณภาพในการผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้า ดังนั้นการวัด PD จึงเป็นการทดสอบประจำของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงแทบทุกประเภทที่ใช้ฉนวนที่ไม่สามารถคืนสภาพการเป็นฉนวนได้เอง

โดยสรุปคือเราไม่ทราบความน่าจะเป็นที่จะเกิด PD ในฉนวนขณะที่ใช้งานหรือไม่? และถ้ามีโอกาสเกิดขึ้นจะเกิดเมื่อใด? เพราะแม้ว่าเราจะทราบว่าขณะนั้นสนามไฟฟ้าในเนื้อฉนวนมีค่าเท่าใด แต่เราก็ไม่ทราบ: ขนาดและตำแหน่งสิ่งแปลกปลอมในฉนวน, จำนวนสิ่งแปลกปลอม, สิ่งแปลกปลอมคืออะไร, ฯลฯ จึงไม่ทราบว่ามีความทนแรงดันได้เท่าใด -ซึ่งเป็นสิ่งที่วิศวกรทั่วไปไม่ต้องการเพราะยากต่อการตัดสินใจ จะเปลี่ยนอุปกรณ์ใหม่ก็เสียดายเงินที่ลงทุนไปแล้วและค่าใช้จ่ายจำนวนมากที่อาจเกิดขึ้น จะไม่เปลี่ยนอุปกรณ์ก็ไม่ทราบว่าจะเกิดเบรกดาวน์เมื่อใดและผลที่ตามมาจะรุนแรงขนาดไหน? -

ดังนั้นเราจึงยังพยายามหาความสัมพันธ์ของ PD กับอายุการใช้งานที่เหลือของฉนวนในปัจจุบัน

5.5 วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม

การทดสอบความทนแรงดันกระแสลับที่หน้างาน เพื่อตรวจรับสถานีไฟฟ้า, สายส่งไฟฟ้าเหนือพื้นดิน, GIS หรือสายเคเบิลใต้ดิน ซึ่งมีค่าความจุไฟฟ้าสูงมากๆ มักใช้หม้อแปลงทดสอบที่ปกติใช้ในห้องทดสอบไม่ได้เพราะมีกำลังพิกัดไม่สูงพอ เช่น ถ้า GIS ของสถานีไฟฟ้า 230 kV แห่งหนึ่งมีความจุไฟฟ้า 6 nF หากเราต้องการทดสอบความทนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้วยแรงดัน 460 kV ที่ 50 Hz เราจำเป็นต้องใช้หม้อแปลงทดสอบที่มีพิกัดกำลังเท่ากับ (k = 1)

$$S = k \cdot \omega C U^2 = 1 \cdot 100\pi \cdot 6 \cdot 10^{-9} \cdot \left(460 \cdot 10^3\right)^2 = 400 \text{ [kVA]} \tag{5.15}$$

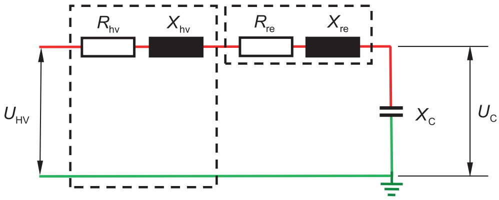
ซึ่งหม้อแปลงทดสอบนี้จะมีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักมากทำให้เคลื่อนย้ายลำบาก

ดังนั้น [IEC60060-3, 2006] จึงอนุญาตให้ใช้ความถี่ของแรงดันกระแสสลับในช่วง 10-500 Hz ได้ตามความเหมาะสมและเป็นไปตามข้อกำหนดของ *มาตรฐานผลิตภัณฑ์* (product standard) ทำให้เราสามารถใช้หม้อแปลงทดสอบที่มีขนาดเล็กกว่าที่คำนวณได้ในสมการที่ 5.15 ในการทดสอบที่หน้างานได้ด้วยการใช้ วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม (series resonant circuit)

5.5.1 การสร้างแรงดันกระแสสลับด้วยวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม

5.5.1.1 หลักการทำงาน

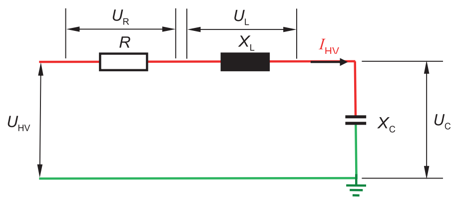
วงจรสมมูลของหม้อแปลงทดสอบขณะจ่ายแรงดันผ่านรีแอกเตอร์ให้กับโหลดที่มีลักษณะเป็นตัวเก็บประจุ ได้แสดงในรูปที่ 5.44



R_{hv} = ความต้านทานของขดลวดหม้อแปลง อ้างอิงไปทางขดลวดแรงสูง [Ω]
X_{hv} = รีแอกแตนซ์ของขดลวดหม้อแปลง อ้างอิงไปทางขดลวดแรงสูง [Ω]
R_{re} = ความต้านทานของรีแอกเตอร์ [Ω]
X_{re} = รีแอกแตนซ์ของรีแอกเตอร์ [Ω]
X_C = รีแอกแตนซ์ของโหลด (มีลักษณะเป็นตัวเก็บประจุ) [Ω]

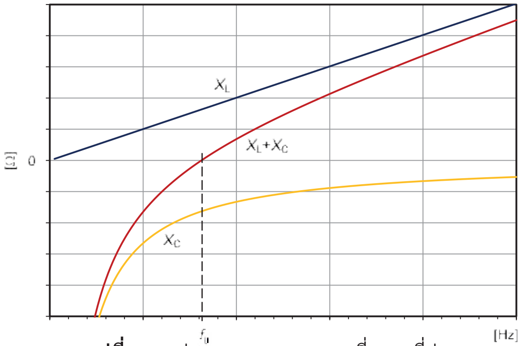
รูปที่ 5.44 วงจรสมมูลของหม้อแปลงทดสอบ ขณะที่จ่ายแรงดันผ่านรีแอกเตอร์ให้กับวัสดุทดสอบ

เมื่อกำหนดให้ $R = R_{hv} + R_{re}$ และ $X_L = X_{hv} + X_{re}$ วงจรสมมูลจะมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 5.45



รูปที่ 5.45 วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม

แต่เราทราบว่า $X_L = j\omega L$ และ $X_C = -j/(\omega C)$ ดังนั้นค่า X_L และ X_C ที่ความถี่ต่างๆ จะมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 5.46



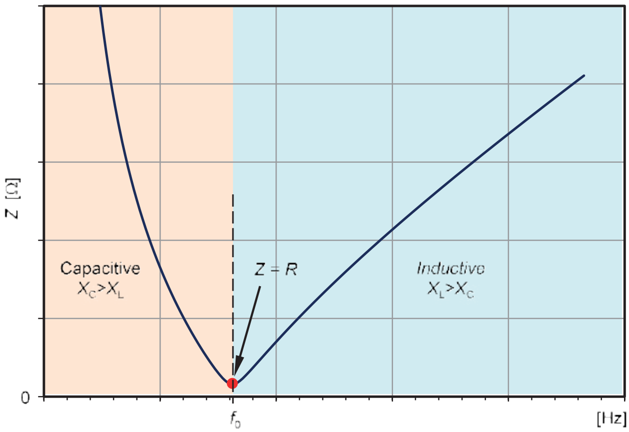
รูปที่ 5.46 ค่า X_L, X_C และ X_L+X_C ที่ความถี่ต่างๆ

ความถี่ที่ทำให้ X_L+X_C เท่ากับศูนย์เรียกว่าความถี่เรโซแนนซ์ f_0 ซึ่งเราทราบกันดีว่าสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 5.16 คือ

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad \text{[Hz]} \tag{5.16}$$

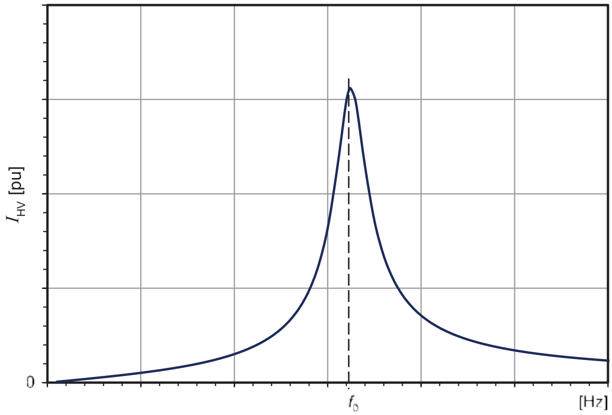
แต่เนื่องจากรีแอกเตอร์มีความต้านทานเท่ากับ R ดังนั้นอิมพีแดนซ์ของวงจรจึงเปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ตามสมการข้างล่าง และมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 5.47

$$Z = R + j(X_L - X_C) \quad [\Omega]$$



รูปที่ 5.47 อิมพีแดนซ์ของวงจรในรูปที่ 5.45 ที่ความถี่ต่างๆ

ซึ่งจะเห็นว่าที่ความถี่ f_0 อิมพีแดนซ์ของวงจรจะมีค่าต่ำที่สุดเท่ากับ R ทำให้กระแส I_{HV} มีค่าสูงที่สุดและมีเฟสตรงกันกับแรงดัน U_{HV} ที่ความถี่ต่ำกว่า f_0 กระแส I_{HV} จะมีเฟสนำหน้าแรงดัน U_{HV} ส่วนที่ความถี่สูงกว่า f_0 กระแส I_{HV} จะมีเฟสตามหลังแรงดัน U_{HV} กระแส I_{HV} ที่ความถี่ต่างๆ เมื่อหม้อแปลงมีพิกัดแรงดัน U_{HV} ได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.48



รูปที่ 5.48 กระแส I_{HV} ที่ไหลในวงจรในรูปที่ 5.45 ที่ความถี่ต่างๆ

ซึ่งจะเห็นว่ากระแส I_{HV} มีค่าเท่ากับ U_{HV}/R ทำให้มีแรงดัน U_C คร่อมโหลด X_C เท่ากับ $U_{HV}/(X_L/R)$ (ที่ความถี่เรโซแนนซ์ $X_C = X_L$)

ดังนั้นเราจึงสามารถใช้หม้อแปลงที่มีพิกัดแรงดันเพียง U_{HV} เพื่อสร้างแรงดันสูง U_C คร่อมอุปกรณ์ทดสอบได้

ตัวอย่าง 5.2 จงคำนวณหาแรงดัน U_C ที่ความถี่เรโซแนนซ์ เมื่อกำหนดให้ U_{HV} = 50 kV, R = 16 kΩ, L = 160 H และ C = 6 nF

$$U_C = I_{HV} \cdot X_C = U_{HV}\frac{X_C}{R} = U_{HV}\frac{X_L}{R} \quad \text{[V]}$$

ดังนั้น

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{160 \cdot 6 \cdot 10^{-9}}} = 162.4 \quad \text{[Hz]}$$

$$X_L = 2\pi f_0 L = 2\pi \cdot 162.4 \cdot 160 = 163.3 \quad [\text{k}\Omega]$$

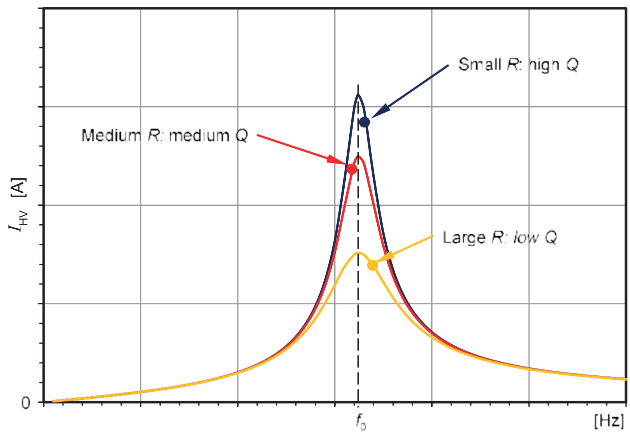
$$U_C = U_{HV}\frac{X_L}{R} = 50 \cdot 10^3 \frac{163.3 \cdot 10^3}{16 \cdot 10^3} = 510 \quad \text{[kV]}$$

5.5.1.2 ตัวประกอบคุณภาพ

เนื่องจากขดลวดของหม้อแปลงและรีแอกเตอร์มีความต้านทานเสมอ เราจึงกำหนดคุณสมบัติของตัวเหนี่ยวนำด้วย ตัวประกอบคุณภาพ (quality factor, Q) ซึ่งมีนิยาม คือ Q มีค่าเท่ากับพลังงานสูงสุดที่สะสมในตัวเหนี่ยวนำหารด้วยพลังงานที่สูญเสียไปในความต้านทานในหนึ่งรอบความถี่ หรือ

$$Q = 2\pi\frac{\frac{1}{2}L\cdot\left(\sqrt{2}\cdot I_{rms}\right)^2}{\left(I_{rms}\right)^2\cdot R\cdot T} = 2\pi f\frac{\frac{1}{2}L\cdot\left(\sqrt{2}\cdot I_{rms}\right)^2}{\left(I_{rms}\right)^2\cdot R} = \frac{2\pi f\cdot L}{R} = \frac{X_L}{R} \tag{5.17}$$

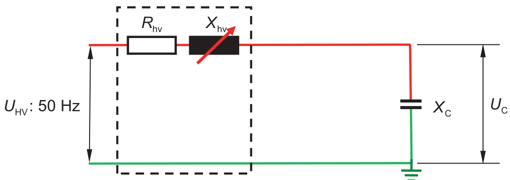
ผลของ Q ที่มีต่อกระแส I_{HV} ที่ความถี่ต่างๆ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.49 ซึ่งจะเห็นว่าวงจรเรโซแนนซ์ควรมีค่า Q สูง (R มีค่าน้อย) เพราะจะทำให้กระแส I_{HV} มีค่าสูง แรงดันที่คร่อมโหลด U_C จึงมีค่าสูงตามไปด้วยเช่นกัน



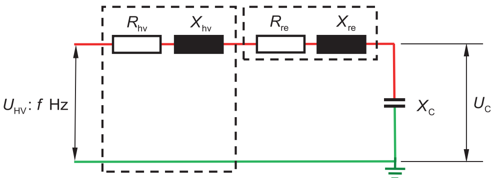
รูปที่ 5.49 ผลของ Q ที่มีต่อกระแส I_{HV} ที่ไหลในวงจรในรูปที่ 5.45 ที่ความถี่ต่างๆ

5.5.1.3 หม้อแปลงเรโซแนนซ์

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้น เราจะเห็นว่าถ้าโหลดมีรีแอกแตนซ์เท่ากับ X_C เราสามารถทำให้เกิดเรโซแนนซ์ได้ ด้วยการปรับความถี่ของแรงดันทดสอบ หรือปรับความเหนี่ยวนำของหม้อแปลงทดสอบดังแสดงในรูปที่ 5.50



ก) ปรับความเหนี่ยวนำของขดลวดหม้อแปลงทดสอบ



ข) ปรับความถี่ของแรงดันที่ป้อนให้กับหม้อแปลง

รูปที่ 5.50 หม้อแปลงเรโซแนนซ์

วงจรในรูปที่ 5.50 ก) มักใช้กับการทดสอบที่ต้องการให้เกิดเรโซแนนซ์ที่ความถี่ 50 Hz -ใช้ในห้องทดสอบของโรงงานผลิตสายเคเบิล โดยที่ X_{HV} ของหม้อแปลงสามารถเปลี่ยนได้ด้วยการเพิ่มหรือลดแกปอากาศในแกนเหล็กของหม้อแปลง- ส่วนวงจรในรูปที่ 5.50 ข) เราต้องใช้รีแอกเตอร์ต่ออนุกรมกับอุปกรณ์ทดสอบและปรับความถี่ของแรงดันที่ป้อนให้กับหม้อแปลงจนได้แรงดัน U_C ตามที่ต้องการ

หม้อแปลงที่ต้องใช้ในการทดสอบอุปกรณ์จึงมีพิกัดแรงดันได้ต่ำที่สุดเท่ากับ $U_{HV} = U_C/Q$ และมีพิกัดกระแสเท่ากับกระแสสูงสุดที่ไหลผ่านรีแอกเตอร์

ถ้าเราต้องการจ่ายแรงดันให้กับโหลดที่มีความจุไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ C_n ที่แรงดันทดสอบ U_C และที่ความถี่ f_n -ความถี่ต่ำสุดที่สามารถจ่ายแรงดัน U_C ให้กับโหลดที่มีความจุไฟฟ้า C_t ใดๆ ได้- เราต้องใช้รีแอกเตอร์ที่มีความเหนี่ยวนำ L_n เท่ากับ

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{L_n C_n}} \Rightarrow L_n = \frac{1}{(2\pi f_n)^2 \cdot C_n} \qquad (5.18)$$

ส่วนแรงดันที่ตกคร่อมรีแอกเตอร์ L_n จะมีค่าประมาณเท่ากับแรงดันที่ตกคร่อมโหลด U_C ที่ความถี่ $f_n \sim f_0$ และหากสมมุติว่า R มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับ X_L (Q มีค่าสูง) เราจะพบว่า

$$I_n = \frac{U_C}{X_n} = \frac{U_C}{2\pi f_n \cdot L_n} = U_C\sqrt{\frac{C_n}{L_n}} \qquad (5.19)$$

กรณี $C_t \le C_n$: เราต้องการทดสอบโหลดที่มีความจุไฟฟ้า C_t ที่แรงดัน U_C ที่ความถี่ $f_t \sim f_0$ ดังนั้นความถี่ f_t ที่ต้องใช้ในการทดสอบอุปกรณ์ที่มีความจุไฟฟ้า C_t ใดๆ จึงมีค่าเท่ากับ

$$\frac{f_t}{f_n} = \sqrt{\frac{C_n}{C_t}} = \frac{1}{\sqrt{C_t/C_n}} \qquad (5.20)$$

ซึ่งจะเห็นว่า f_t มีค่าสูงกว่า f_n เสมอ นอกจากนั้น

$$I_t = \frac{U_C}{2\pi f_t \cdot L_n} = U_C\sqrt{\frac{C_t}{L_n}} \qquad (5.21)$$

ดังนั้น

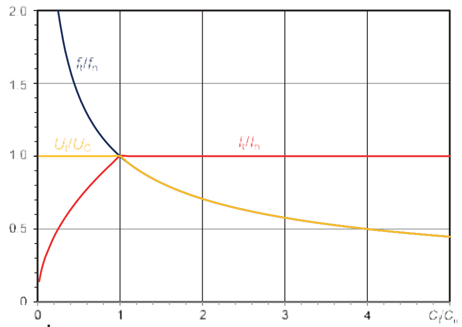
$$\frac{I_t}{I_n} = \frac{f_n}{f_t} = \sqrt{\frac{C_t}{C_n}} \qquad (5.22)$$

ซึ่งหมายถึงกระแสที่ใช้ในการทดสอบ I_t จะน้อยกว่ากระแสพิกัด I_n เสมอ

กรณี $C_t > C_n$: ในกรณีนี้กระแส I_t จะสูงกว่า I_n ดังนั้นจึงจำเป็นที่ต้องจำกัดกระแสไม่ให้เกิน I_n ด้วยการลดแรงดันทดสอบจาก U_C เหลือเพียง U_t แต่กระแสมีความสัมพันธ์โดยตรงกับแรงดัน ดังนั้น

$$\frac{U_t}{U_C} = \sqrt{\frac{C_n}{C_t}} = \frac{1}{\sqrt{C_t/C_n}} \qquad (5.23)$$

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ f_t/f_n, I_t/I_n และ U_t/U_C กับ C_t/C_n ได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.51



รูปที่ 5.51 ความสัมพันธ์ของ f_t/f_n, I_t/I_n และ U_t/U_C กับ C_t/C_n

ภาพถ่ายหม้อแปลงแบบเรโซแนนซ์ขณะทำการสอบเทียบแรงดัน โดยที่โหลดเป็นสายเคเบิล XLPE พิกัดแรงดัน 115 kV ยาว 1 km ได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.52

ก) ชุดทดสอบที่เคลื่อนย้ายได้ สำหรับการทดสอบที่หน้างาน ของ บริษัท บางกอกเคเบิ้ล จำกัด

ข) วัสดุทดสอบ 115 kV XLPE เคเบิล

รูปที่ 5.52 ชุดทดสอบแรงดันกระแสสลับแบบที่ใช้วงจรเรโซแนนซ์ 135 kV 13 MVA 30-300 kV

5.5.1.3 ข้อดีของวงจรเรโซแนนซ์

วงจรเรโซแนนซ์มีข้อดีดังต่อไปนี้ [Kuffel, et. al., 2000]

ก) เราสามารถใช้หม้อแปลงที่มีพิกัดแรงดันเพียง U_{HV} เพื่อจ่ายแรงดันสูงให้กับโหลด $U_C = U_{HV} \cdot Q$ โดยในทางปฏิบัติ Q มักมีค่าระหว่าง 20-50

ข) พิกัดกำลังของหม้อแปลงทดสอบมีค่าต่ำเพราะกระแส I_{HV} ที่จ่ายให้โหลด X_C ที่ความถี่เรโซแนนซ์มีค่าเพียง U_C/X_L เท่านั้น

ค) หากเกิดเบรกดาวน์ที่อุปกรณ์ทดสอบ กระแส I_{HV} ที่หม้อแปลงทดสอบต้องจ่ายจะมีค่าต่ำกว่า U_{HV}/R ที่ความถี่แรโซแนนซ์มากเพราะเมื่ออุปกรณ์ทดสอบเกิดเบรกดาวน์ I_{HV} จะมีค่าเท่ากับ $U_{HV}/(R+jX_L)$ ทำให้ EUT ที่เกิดการเบรกดาวน์ไม่ทำให้เกิดความเสียหายที่รุนแรงต่ออุปกรณ์อื่นๆ ที่อยู่ใกล้เคียง

ง) รีแอกเตอร์ที่ใช้ในวงจรเรโซแนนซ์สามารถสร้างได้ง่าย โดยที่แกนของรีแอกเตอร์อาจเป็นเหล็กหม้อแปลงหรืออากาศก็ได้

จ) เราสามารถเลือกความถี่เรโซแนนซ์ได้ด้วยการเปลี่ยนความถี่ (ในกรณีที่เราใช้รีแอกเตอร์ที่มีค่าคงที่) หรือเปลี่ยนค่าความเหนี่ยวนำของรีแอกเตอร์ (ในกรณีที่เรากำหนดให้ความถี่มีค่าคงที่)

5.5.2 ข้อกำหนดของแรงดันทดสอบ

รูปคลื่นควรใกล้เคียงรูปไซน์ที่ครึ่งบวกและลบมีลักษณะคล้ายกัน โดยที่

$$0.85\sqrt{2} \le \frac{U_{peak}}{U_{rms}} \le 1.15\sqrt{2} \qquad (5.24)$$

แต่ถ้า U_{peak}/U_{rms} ไม่อยู่ในช่วง √2 ±5% ต้องตรวจสอบว่าค่า U_{peak} ด้านบวกและลบแตกต่างกันไม่เกิน 2%

ขณะที่ทำการทดสอบ ถ้าเวลาที่คงแรงดันทดสอบ U_{test} มีค่าไม่เกิน 60 s แรงดันที่ป้อนให้ EUT ต้องมีค่าประมาณคงที่โดยแกว่งไปมาได้ไม่เกิน 3% ของแรงดันทดสอบ U_{test} หรือ

$$\delta U_{test} \le 0.03 U_{test}; \quad U_{test} = \frac{U_{peak}}{\sqrt{2}}$$

ถ้าเวลาที่คงแรงดันทดสอบ U_{test} เกิน 60 s ก็อนุญาตให้แรงดันที่ป้อนให้ EUT แกว่งไปมาได้ไม่เกิน $0.05U_{test}$

ดังนั้นกระแสลัดวงจรของหม้อแปลงสำหรับการทดสอบในสภาวะแห้งจึงต้องไม่น้อยกว่า 0.1 A_{rms} และถ้าความจุไฟฟ้าของ EUT มีค่าน้อยก็ควรต่อตัวเก็บประจุภายนอกเพิ่มเข้าไปจนค่าความจุไฟฟ้ารวมของโหลดมีค่าอยู่ในช่วง 0.5-1 nF เพื่อให้แรงดันที่ป้อนให้ EUT แกว่งไม่มากขณะที่เกิดดีสชาร์จบางส่วนที่ EUT

หากมาตรฐานผลิตภัณฑ์ไม่ได้ระบุวิธีการป้อนแรงดันทดสอบให้ EUT ให้เพิ่มแรงดันทดสอบด้วยอัตราที่เราสามารถค่าแรงดันทดสอบได้ทัน จนถึงค่าประมาณ $0.75U_{test}$ จากนั้นให้ป้อนแรงดันทดสอบเพิ่มขึ้นดวยอัตรา $0.02U_{test}$ จนถึงค่า U_{test} ที่กำหนดแล้วคงค่าไว้ตามเวลาที่มาตรฐานผลิตภัณฑ์กำหนด ถ้ามาตรฐานไม่กำหนดเวลาไว้ ให้คงแรงดันไว้นาน 60 s จากนั้นก็ลดแรงดันทดสอบลงเป็นศูนย์อย่างรวดเร็ว -แต่ไม่ใช่หยุดป้อนแรงดันทดสอบเพื่อให้แรงดันทดสอบเป็นศูนย์ทันทีทันใด เพราะอาจทำให้เกิดแรงดันเกินสวิตชิงในวงจรที่ทำให้วัสดุทดสอบเสียหายได้-

5.6 แรงดันกระแสสลับแบบหน่วง

แรงดันกระแสสลับแบบหน่วง (damp AC voltage, DAC) เป็นแรงดันอีกประเภทหนึ่งที่ [IEC60060-3, 2006] อนุญาตให้ใช้ในการทดสอบความทนแรงดันของฉนวนที่มีค่าความจุไฟฟ้าสูงๆ เช่น สายเคเบิลใต้พื้นดิน สามารถสร้างสร้างได้ไม่ยากนักเพราะต้องการเพียงแหล่งจ่ายแรงดันสูงกระแสตรงเพื่ออัดประจุให้สายเคเบิลมีแรงดันเท่ากับค่าแรงดันทดสอบ $U_{t,1st\ peak}$ จากนั้นก็ทำให้สายเคเบิลคายประจุผ่านตัวเหนี่ยวนำภายนอก L_{ckt} ลงกราวน์

แรงดันที่สายเคเบิลจะแกว่งไปมาเนื่องจากมีการถ่ายเทพลังงานระหว่างความจุไฟฟ้าของสายเคเบิล C_{ins} กับตัวเหนี่ยวนำภายนอก L_{ckt} แต่ค่ายอดของการแกว่งจะลดลง เพราะทั้งสายเคเบิลและตัวเหนี่ยวนำภายนอกมีความต้านทาน R_{ins} และ R_{ext} อยู่ค่าหนึ่ง

5.6.1 ข้อกำหนดของแรงดันทดสอบ

[IEC60060-3, 2006] และ [IEEE400.4, 2015] กำหนดให้

- ค่ายอดของคลื่นลูกแรก $U_{t,1st\ peak}$ ต้องมี *ความคลาดเคลื่อน* (tolerence) ไม่เกิน ±5% [IEC60060-3, 2006] หรือ ±3% [IEEE400.4, 2015] โดยที่ค่า $U_{t,1st\ peak}$ จะขึ้นอยู่กับประเภทของการทดสอบว่าเป็นการทดสอบเพื่อตรวจรับ AT, การทดสอบเพื่อการบำรุงรักษา MT หรือการทดสอบเพื่อประเมินสภาพ CA ดังแสดงในตารางที่ 5.10 [IEEE400.4, 2015] และรูปที่ 5.53

ตารางที่ 5.10 ค่ายอดแรก $U_{t,1st\ peak}$ ของแรงดันกระแสสลับแบบหน่วง

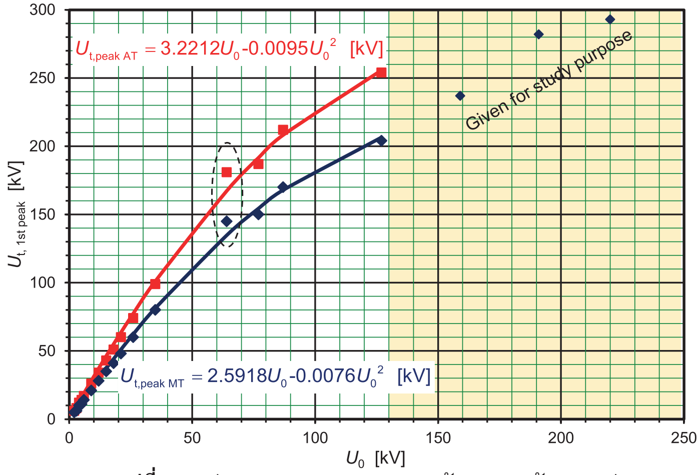
$U_0/U/U_m$ [kV] [IEC60183, 2015]	$U_{t,1st\ peak}$ [IEEE400.4, 2015]		$U_0/U/U_m$ [kV] [IEC60183, 2015]	$U_{t,1st\ peak}$ [IEEE400.4, 2015]	
	AT	MT		AT	MT
2/3/3.6	6	5	26/45/52	74	60
3/3/3.6	8	6	36/69/72.5	99	80
3.6/6/7.2	12	10	64/115/123	181	145
5/-/-	14	11	76/138/145	187	150
6/10/12	17	14	87/161/170	212	170
9/15/17.5	26	21	127/230/245	254	204
12/20/24	34	28	160/287/300	-	237
15/-/-	43	35	190/345/362	-	282
18/30/36	51	41	220/400/420	-	293
21/-/-	60	48			
AT = Acceptance test, *n* =50, MT = Maintenance test, *n* =50 (ดูคำอธิบาย *n* ในหัวข้อ 5.6.3)					

จากรูปที่ 5.53 จะเห็นว่า $U_{t,1st\ peak}$ แปรตาม U_0 ตามสมการพหุนามลำดับที่ 2 (2nd order polynomial equation) และที่ U_0 เท่ากับ 64 kV เราจะเห็นว่าแรงดัน $U_{t,peak}$ สูงไปเล็กน้อย -ในวงรี- ซึ่งอาจเกิดจากการพิมพ์ผิด ส่วน $U_{t,1st\ peak}$ ในพื้นที่แรเงาสีเหลืองเป็นค่าที่ [IEEE400.4, 2015] แนะนำให้ทดลองใช้สำหรับสายเคเบิลที่ใช้ในระบบแรงดันสูงกว่า 245 kV

- ความถี่ของการแกว่ง f_r ต้องอยู่ในช่วง 20 Hz ถึง 1000 Hz ตาม [IEC60060-3, 2006] หรือ 500 Hz ตาม [IEEE 400.4, 2015] และ

- ความหน่วงของการแกว่งกำหนดด้วย *ตัวประกอบความหน่วง* (damping factor, D_f) ควรมีค่าไม่เกิน 40% ตาม [IEC60060-3, 2006] หรือควรไม่เกิน 15% ตาม [IEEE 400.4, 2015] โดยค่า D_f คำนวณจากสมการ

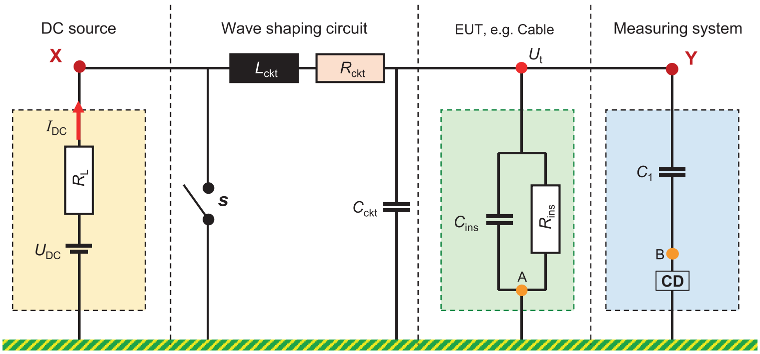
$$D_f = \frac{\left(U_{t,\ 1st\ peak} - U_{t,\ 2nd\ peak}\right)}{U_{t,\ 1st\ peak}} 100\ \ [\%] \qquad (5.25)$$



รูปที่ 5.53 ค่ายอดแรก $U_{t,1st\ peak}$ ของแรงดันกระแสสลับแบบหน่วง

5.6.2 วิธีสร้างแรงดันกระสลับแบบหน่วง

วิธีที่นิยมใช้ในการสร้างแรงดัน DAC แสดงไว้ในรูปที่ 5.54



รูปที่ 5.54 วงจรสร้างแรงดันกระแสสลับแบบหน่วง

ซึ่งประกอบด้วย 4 ส่วน ดังนี้

5.6.2.1 วัสดุทดสอบ

วัสดุทดสอบหรือ EUT ในที่นี้สมมุติว่าเป็นสายเคเบิลที่ใช้ฉนวน XLPE ดังนั้นวงจรสมมูลจึงประกอบด้วย C_{ins} และ R_{ins} โดยที่ R_{ins} แทนความต้านทานทุกประเภทที่กล่าวถึงในหัวข้อที่ 5.2.1 และ 5.3 ยกเว้น R_{env}

ค่า C_{ins} หาได้จากข้อกำหนดของผู้ผลิต, วัดค่าความจุไฟฟ้าของสายเคเบิล หรือคำนวณจากสมการ

$$C_{ins} = \frac{2\pi\varepsilon_r\varepsilon_0 \cdot \ell}{\ln(r_2/r_1)} \ [\text{F}] \ \Rightarrow \ C_{ins}/\ell = \frac{2\pi\varepsilon_r\varepsilon_0}{\ln(r_2/r_1)} = \frac{2\pi\varepsilon_r\varepsilon_0}{\ln(\varnothing_2/\varnothing_1)} \ [\text{F/m}] \tag{5.26}$$

เมื่อ ℓ = ความยาวของสายเคเบิล [m]

ε_r = เปอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์ของ XLPE ถ้าไม่ทราบให้ประมาณว่ามีค่าเท่ากับ 2.3

ε_0 = เปอร์มิตติวิตี้ของสุญญากาศ = $8.854 \cdot 10^{-12}$ [F/m]

r_1, $\varnothing_1$ = รัศมีหรือเส้นผ่านศูนย์กลางนอกของสกรีนตัวนำ [m]

r_2, $\varnothing_2$ = รัศมีหรือเส้นผ่านศูนย์กลางของฉนวน XLPE (ไม่รวมสกรีนฉนวน) [m]

ตัวอย่างที่ 5.2 จงหาค่าความจุไฟฟ้าของสายเคเบิล 12/20(24) kV CV-AWA ของบริษัทบาง กอกเคเบิ้ล จำกัด ที่มีความยาว 50 km จากข้อมูลต่อไปนี้ $\varnothing_1$ = 23.4 mm, $\varnothing_2$ = 36 mm และ $R_{DC,\,@20C}$ = 47 mΩ/km

$$C_{ins} = \frac{2\pi\varepsilon_r\varepsilon_0\ell}{\ln(\varnothing_2/\varnothing_1)} = \frac{2\pi \cdot 2.3 \cdot 8.854 \cdot 10^{-12} \cdot 50 \cdot 10^3}{\ln(36/23.4)} \sim 15 \ [\mu\text{F}]$$

5.6.2.2 แหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรง

แหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรงทำหน้าที่อัดประจุให้สายเคเบิลจนมีแรงดันเท่ากับ $U_{t,1st\ peak}$ ภายในเวลาประมาณ 100 s [IEEE 400.4, 2015] ก่อนการต่อสายเคเบิลลงกราวน์ด้วยการปิดสวิตช์ s แต่แหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรงสามารถจ่ายกระแส I_{DC} ได้สูงสุดเพียงค่าๆ หนึ่งซึ่งขึ้นกับพิกัดของหม้อแปลงกระแสสลับและไดโอด ดังนั้นจึงต้องใช้ตัวต้านทาน R_L ในการจำกัดกระแสอัดประจุ

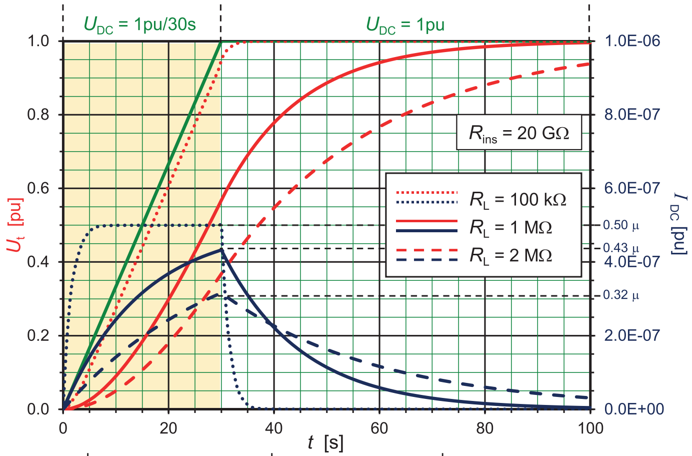
ถ้าสมมุติว่าเราต้องการเพิ่มแรงดันอัดประจุด้วยอัตรา dU/dt กระแสที่ต้องใช้ในการอัดประจุจะมีค่าเท่ากับ

$$I_{DC} = C_{ins}\frac{dU_{t,peak}}{dt} \ [\text{A}] \tag{5.27}$$

ตัวอย่างที่ 5.3 จงคำนวณพิกัดกระแสของแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรงที่ต้องใช้ในการทดสอบสายเคเบิลในตัวอย่างที่ 5.2 ด้วยแรงดันทดสอบ $U_{t,\,1st\ peak}$ = 34 kV โดยที่เราต้องการปรับแรงดัน U_{DC} ให้มีค่าเท่ากับ $U_{t,\,1st\ peak}$ ภายใน 30 s

$$I_{DC} = C_{ins}\frac{dU_{t,peak}}{dt} = 15 \cdot 10^{-6}\,\frac{34 \cdot 10^3}{30} = 17 \ [\text{mA}]$$

รูปที่ 5.55 แสดงแรงดัน U_t ที่สายเคเบิลในตัวอย่างที่ 5.2 (C_{ins} = 15 μF) -กำหนดให้ R_{ins} = 20 GΩ- เมื่อเราเพิ่มแรงดันกระแสตรงด้วยอัตรา 1 pu/s จนถึง 1 pu ในเวลา 30 s แล้วคงค่าที่ 1 pu ไว้จนถึงเวลา 100 s โดยใช้ R_L ค่าต่างๆ



รูปที่ 5.55 แรงดัน U_t ที่สายเคเบิลในตัวอย่างที่ 5.2 (C_{ins} = 15 μF) เมื่อป้อนแรงดัน DC ด้วยอัตรา 1 pu/30 s

จากรูปที่ 5.55 จะเห็นว่า

- เมื่อความต้านทานจำกัดกระแสมีค่าต่ำ เช่น R_L = 100 kΩ กระแสสูงสุดที่ไหลจะมีค่า $I_{DC} = 0.5{\cdot}10^{-6}$ pu เมื่อป้อนแรงดัน U_{DC} = 1 pu ดังนั้นถ้าเราป้อนแรงดัน U_{DC} = 34 kV กระแส I_{DC} จะไหลเท่ากับ 17 mA ตรงกับที่คำนวณได้ตามตัวอย่างที่ 5.3

  นอกจากนั้น กระแสจะเข้าสู่จุดสูงสุดเร็วมากเพราะค่าคงตัวเวลาของวงจร R_LC_{ins} มีค่าเท่ากับ 1.5 s ซึ่งน้อยกว่าเวลา 30 s มาก ส่วนแรงดัน U_t ที่สายเคเบิลก็ถึงค่า 34 kV เร็วมากคือถึงในเวลาประมาณ 30 s เท่ากับเวลาที่เราป้อนแรงดัน U_{DC} คงที่เท่ากับ 34 kV
- เมื่อความต้านทาน R_L = 1 MΩ กระแสสูงสุดที่ไหลจะมีค่า $I_{DC} = 0.43{\cdot}10^{-6}$ pu เมื่อป้อนแรงดัน U_{DC} = 1 pu ดังนั้นถ้าเราป้อนแรงดัน U_{DC} = 34 kV กระแส I_{DC} จะไหลเท่ากับ 14.7 mA ขณะนี้ค่าคงตัวเวลาของวงจร R_LC_{ins} มีค่าเท่ากับ 15 s ทำให้แรงดัน U_t ที่สายเคเบิลก็ถึงค่า 34 kV ในเวลา 100 s ตามที่ต้องการ
- เมื่อความต้านทาน R_L = 2 MΩ กระแสสูงสุดที่ไหลจะมีค่า $I_{DC} = 0.32{\cdot}10^{-6}$ pu เมื่อป้อนแรงดัน U_{DC} = 1 pu ดังนั้นถ้าเราป้อนแรงดัน U_{DC} = 34 kV กระแส I_{DC} จะไหลเท่ากับ 10.7 mA ขณะนี้ค่าคงตัวเวลาของวงจร R_LC_{ins} มีค่าเท่ากับ 30 s ทำให้แรงดัน U_t ที่สายเคเบิลมีค่าไม่ถึง 34 kV ในเวลา 100 s ตามที่ต้องการ

ดังนั้น พิกัดของเครื่องกำเนิดแรงดันกระแสตรงจึงกำหนดจาก

- พิกัดแรงดัน U_{DC} : $\geq U_{t,\ 1st\ peak}$ ในตารางที่ 5.10
- พิกัดกระแส I_{DC} : ไม่น้อยกว่าคำนวณจากสมการที่ 5.27 ถ้าเครื่องกำเนิดแรงดันกระแสตรงมีพิกัดกระแสน้อยกว่าค่าที่คำนวณได้ก็ใช้ตัวต้าน R_L จำกัดกระแสที่คำนวณได้จากสมการ

$$\begin{aligned} 100 &= dt + 5R_LC_{ins} \\ &= C_{ins}\frac{U_{DC}}{I_{DC}} + 5R_LC_{ins} \;\Rightarrow\; R_L \approx \frac{100 - C_{ins}U_{DC}/I_{DC}}{5C_{ins}} \quad [\Omega] \end{aligned} \tag{5.28}$$

ตัวอย่างที่ 5.4 จงคำนวณค่า R_L ที่จำกัดกระแสอัดประจุ เมื่อแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรงมีพิกัดแรงดัน U_{DC} = 50 kV และพิกัดกระแส I_{DC} = 40 mA เมื่อโหลดเป็นสายเคเบิลที่มีค่าความจุไฟฟ้าเท่ากับ 20 μF และต้องการเวลาอัดประจุ dt = 20 s

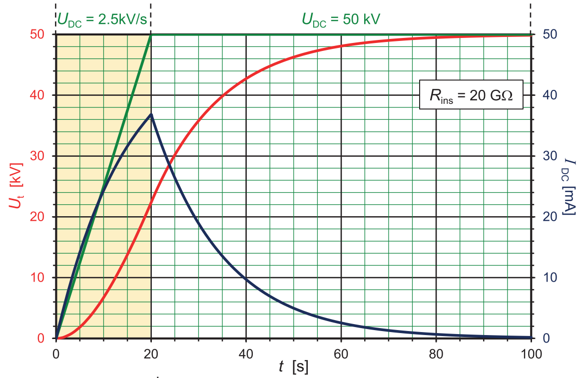
จากสมการที่ 5.27

$$I_{DC} = C_{ins}\frac{dU_{t,peak}}{dt} = 20\cdot 10^{-6}\frac{50\cdot 10^{3}}{20} = 50 \;\; [\text{mA}]$$

ดังนั้น

$$R_L = \frac{100 - C_{ins}U_{DC}/I_{DC}}{5C_{ins}} = \frac{100 - 20\cdot 10^{-6}\times 50\cdot 10^{3}/40\cdot 10^{-3}}{5\times 20\cdot 10^{-6}} = 750 \;\; [\text{k}\Omega]$$

กราฟแรงดันและกระแสจากการจำลองแบบด้วย Pspice ได้แสดงไว้ในรูปข้างล่าง



จากรูปจะเห็นว่าถ้าเราใช้ R_L ต่ำกว่า 750 kΩ กระแสอัดประจุอาจเกินพิกัดกระแส 40 mA และแรงดันที่โหลดจะถึงค่า 50 kV เร็วกว่านี้ แต่ในทางกลับกัน ถ้า R_L สูงกว่า 750 kΩ กระแสอัดประจุจะลดลง แต่แรงดันที่โหลดอาจจะไม่ถึงค่า 50 kV ในเวลา 100 s

5.6.2.3 วงจรปรับรูปคลื่น

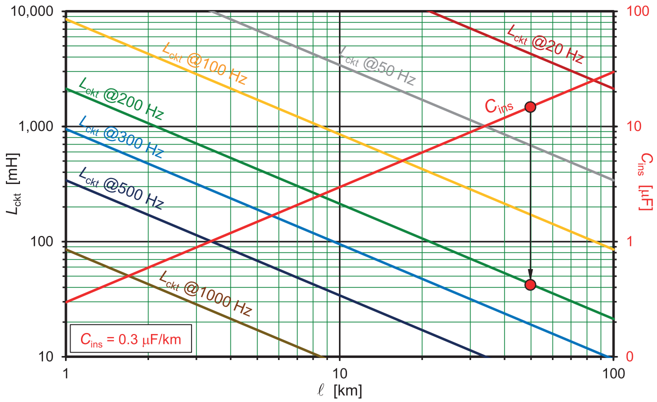
วงจรปรับรูปคลื่นประกอบด้วย R_{ckt} , L_{ckt} และ C_{ckt} โดยที่ R_{ckt} เป็นความต้านทานแฝงต่างๆ ของวงจร เช่น ความต้านทานภายในของตัวเหนี่ยวนำ L_{ckt} , ความต้านทานของสายไฟ, ความต้านทานของจุดต่อต่างๆ ในวงจร (รวมถึงความต้านทานตัวนำของสายเคเบิล R_{EUT} ซึ่งในขั้นแรกจะกำหนดให้ R_{EUT} = 0 Ω) เป็นองค์ประกอบที่เราไม่ต้องการให้มีในวงจรเพราะเป็นตัวหน่วงการแกว่งของแรงดัน U_t ตัวเหนี่ยวนำ L_{ckt} ทำหน้าที่กำหนดความถี่การแกว่ง f_r ของแรงดัน U_t ซึ่งคำนวณได้จากสมการ

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{ckt}C_{ins}}} \quad [\text{Hz}] \qquad (5.29a)$$

หรือ

$$L_{ckt} = \frac{1}{(2\pi f_0)^2 C_{ins}} \quad [\text{H}] \qquad (5.29b)$$

ดังนั้นถ้ากำหนดให้ C_{ins} = 0.3 μF/km ค่า L_{ckt} ที่เราต้องใช้เพื่อให้แรงดันแกว่งที่ความถี่ต่างๆ จึงมีค่าดังที่แสดงในรูปที่ 5.56



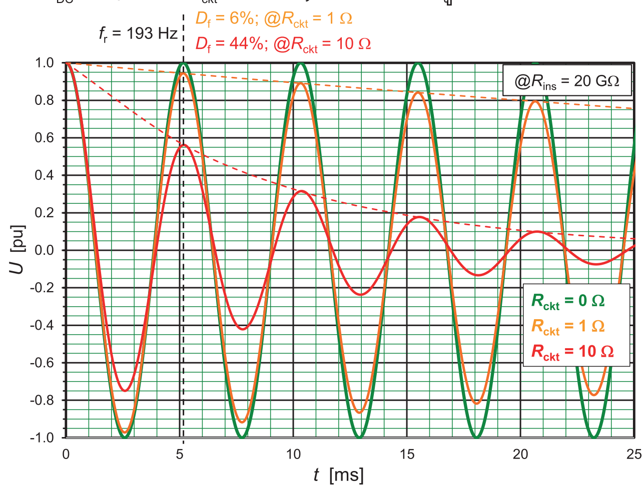
รูปที่ 5.56 ค่า L_{ckt} ที่ต้องใช้เพื่อให้แรงดันแกว่งที่ความถี่ต่างๆ

ในการคำนวณค่าต่างๆ ในรูปที่ 5.56 ได้กำหนดให้ C_{ckt} = 0 เพราะ C_{ckt} เป็นตัวเก็บประจุที่เราต้องเพิ่มเข้าไปในกรณีที่เรามี L_{ckt} อยู่แล้วและต้องการทดสอบสายเคเบิลด้วยความถี่ f_r แต่การแกว่งของแรงดันมีค่าไม่เท่ากับ f_r เพราะ C_{ins} ของสายเคเบิลน้อยเกินไป

ตัวอย่างที่ 5.5 จงหาค่า L_{ckt} ที่ต้องการ เมื่อสายเคเบิลยาว 50 km -มีความจุไฟฟ้าเท่ากับ 0.3 μF/km- และเราต้องการให้แรงดันทดสอบ U_t แกว่งที่ความถี่ f_r = 200 Hz

$$L_{ckt} = \frac{1}{(2\pi f_0)^2 C_{ins}} = \frac{1}{(2\pi \cdot 200)^2 \cdot 50 \times 0.3 \cdot 10^{-6}} = 42.6 \text{ [mH]}$$

รูปคลื่นแรงดันทดสอบ U_t จากการจำลองแบบด้วย Pspice เมื่อกำหนดให้ L_{ckt} = 45 mH, C_{ins} = 15 μF, R_{ins} = 20 GΩ, U_{DC} = 1 pu และ R_{ckt} มีค่าต่างๆ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.57



รูปที่ 5.57 รูปคลื่นแรงดันทดสอบ U_t เมื่อกำหนดให้ L_{ckt} = 45 mH, C_{ins} = 15 μF, R_{ins} = 20 GΩ และ U_{DC} = 1 pu

ดังนั้นถ้า R_{ckt} ~ 0 ค่า φ = 0 ทำให้แรงดันไม่มีการลดทอน (กราฟเส้นทึบสีเขียว) กระแสสูงสุดที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_{ckt} และสวิตซ์ s จะมีค่าเท่ากับ

$$I_{t,max} = \frac{U_{t,1st\ peak}}{Z_{ckt}} = U_{t,1st\ peak}\sqrt{\frac{C_{ins}}{L_{ckt}}} \tag{5.30}$$

ตัวอย่างที่ 5.6 จงหาค่ากระแสสูงสุด $I_{t,max}$ ที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_{ckt} ในตัวอย่างที่ 5.5 เมื่อ $U_{t,1st\ peak}$ = 1 V

$$Z_{ckt} = \sqrt{\frac{L_{ckt}}{C_{ins}}} = \sqrt{\frac{45\cdot 10^{-3}}{15\cdot 10^{-6}}} = 54.77\ \ [\Omega]$$

ดังนั้น

$$I_{t,max} = \frac{U_{t,1st\ peak}}{Z_{ckt}} = \frac{1}{54.77} = 18.3\ [\text{mA}_{peak}] = 12.9\ \ [\text{mA}_{rms}]$$

นอกจากนั้นเราจะเห็นผลของความต้านทานแฝง R_{ckt} ได้อย่างชัดเจน คือถ้า R_{ckt} มีค่ามาก การหน่วงก็จะมากทำให้ตัวประกอบความหน่วง D_f มีค่ามาก ซึ่งจากรูปจะเห็นว่าเมื่อ R_{ckt} = 10 Ω, D_f มีค่า 44% ซึ่งเกินเกณฑ์ 15% และ 40% ตามที่ทั้ง [IEEE 400.4, 2015] และ [IEC60060-3, 2006] แนะนำไว้

รูปคลื่นแรงดันทดสอบที่สายเคเบิล $U_t(t)$ ในรูปที่ 5.57 สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$U_t(t) = U_{DC}e^{-\alpha t}\sin(2\pi f_0 t + \varphi)\ \ [\text{V}] \tag{5.31}$$

เมื่อ α = *สัมประสิทธิ์การลดทอน* (attenuation coefficient) = $R_{ckt}/(2L_{ckt})$ [1/s]

φ = มุมของรูปคลื่นไซน์ขณะที่ปิดสวิตซ์ *s* ในที่นี้เท่ากับ π/2 เพราะเราป้อนแรงดันกระแสตรงขั้วบวก

U_{DC} = แรงดันทดสอบ $U_{t,1st\ peak}$ [V]

โดยที่เส้นประในรูปที่ 5.57 แสดงพจน์ $e^{-\alpha t}$

ดังนั้นค่าแรงดัน $U_{t,\ 2nd\ peak}$ จึงมีค่าโดยประมาณเท่ากับ

$$U_{t,2nd\ peak}(t) = U_{DC}e^{-\alpha t} = U_{DC}e^{-\frac{\alpha}{f_0}} = e^{-\frac{R_{ckt}2\pi\sqrt{L_{ckt}C_{ins}}}{2L_{ckt}}} = e^{-\frac{\pi R_{ckt}}{Z_{ckt}}}\ \ [\text{V}] \tag{5.32}$$

ค่าที่คำนวณได้จากสมการที่ 5.32 เป็นค่าโดยประมาณที่เวลา $t = 1/f_0$ เพราะค่ายอดต่างๆ $U_{t,\ xth\ peak}$ ของการแกว่งจะเลื่อนไปจากเวลา $t = 1/f_0$ เนื่องจากมีพจน์การลดทอน $e^{-\alpha t}$ อยู่ในสมการ

ค่า D_f จึงหาได้จากสมการ

$$D_f = \frac{1-e^{-\frac{\pi R_{ckt}}{Z_{ckt}}}}{1}100\ \ [\%] \tag{5.33}$$

ทำให้เราสามารถคำนวณค่า R_{ckt} สูงสุดที่ทำให้ D_f มีค่าไม่เกินเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนดได้ดังนี้ [IEEE400.4, 2015]:

$$1-0.15 = e^{-\frac{\pi R_{ckt}}{Z_{ckt}}} \Rightarrow \ln(0.85) = -\frac{\pi R_{ckt}}{Z_{ckt}}$$

$$R_{ckt} = -\frac{\sqrt{L_{ckt}/C_{ins}}}{\pi}\cdot\ln(0.85)\ \ \ [\Omega] \tag{5.34a}$$

[IEC60060-3, 2006]:

$$1-0.4=e^{-\frac{\pi R_{ckt}}{Z_{ckt}}} \Rightarrow \ln(0.4)=-\frac{\pi R_{ckt}}{Z_{ckt}}$$

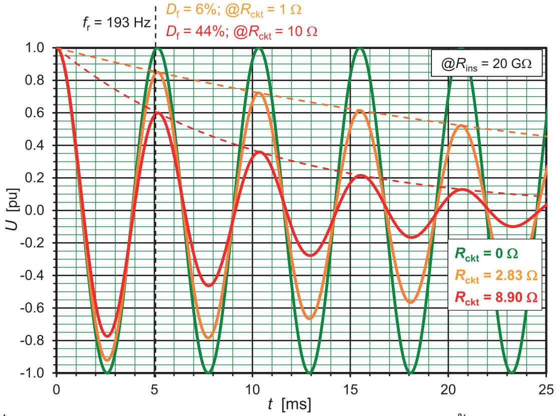
$$R_{ckt}=-\frac{\sqrt{L_{ckt}/C_{ins}}}{\pi}\cdot\ln(0.4) \quad [\Omega] \tag{5.34b}$$

ตัวอย่างที่ 5.7 จงหาค่า R_{ckt} สูงสุดของวงจรในตัวอย่างที่ 5.5 ที่เป็นไปตามเกณฑ์ของ [IEEE400.4, 2015] และ [IEC60060-3, 2006]

[IEEE400.4, 2015]: $$R_{ckt}=-\frac{\sqrt{L_{ckt}/C_{ins}}}{\pi}\cdot\ln(0.85)=-\frac{\sqrt{45\cdot10^{-3}\times15\cdot10^{-6}}}{\pi}\cdot\ln(0.85)=2.83 \ [\Omega]$$

[IEC60060-3, 2006]: $$R_{ckt}=-\frac{\sqrt{L_{ckt}/C_{ins}}}{\pi}\cdot\ln(0.4)=-\frac{\sqrt{45\cdot10^{-3}\times15\cdot10^{-6}}}{\pi}\cdot\ln(0.4)=8.90 \ [\Omega]$$

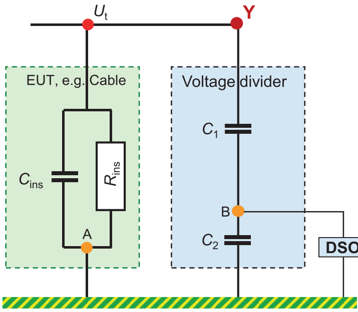
ผลการจำลองแบบโดย Pspice เมื่อกำหนดให้ L_{ckt} = 45 mH, C_{ins} = 15 mF, R_{ins} = 20 GΩ และ U_{DC} = 1 pu ได้แสดงไว้ในรูปข้างล่าง



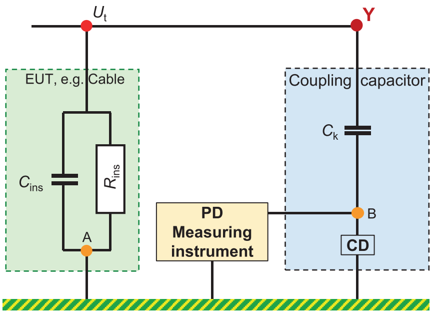
แต่จากตัวอย่างที่ 5.2 ตัวนำของสายเคเบิลมี $R_{DC,\ @20C}$ = 47 mΩ/km ดังนั้นสายเคเบิลที่ยาว 50 km จึงมีค่า R_{EUT} = 2.35 Ω ซึ่งหมายความว่าความต้านทานในวงจรปรับรูปคลื่นต้องมีค่าไม่เกิน 0.48 Ω และ 6.55 Ω ตามลำดับ

5.6.2.3 ระบบวัดแรงดัน

ระบบวัดแรงดันในรูปที่ 5.54 ต้องมีความคลาดเคลื่อนในการวัดแรงดันไม่เกิน ±5% และมี เวลาตอบสนอง (response time) ไม่เกิน 0.5 s ระบบวัดแรงดันที่จะใช้ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการทดสอบว่าจะทดสอบความทนแรงดันกระแสสลับเพียงอย่างเดียวหรือทดสอบเพื่อประเมินสภาพของฉนวนไปพร้อมกัน ดังแสดงในรูปที่ 5.58



ก) ระบบวัดแรงดันสำหรับการทดสอบความทนแรงดันกระแสสลับและการวัดค่า Tg δ



ข) ระบบวัดแรงดันสำหรับการวัดค่า PD

รูปที่ 5.58 ระบบวัดแรงดันในรูปที่ 5.54

ก) ระบบวัดแรงดันสำหรับการทดสอบความทนแรงดันกระแสสลับ ในรูปที่ 5.58 ก) มีเพียง โวลเตจดิไวเดอร์และ DSO เท่านั้น เราต้องใช้ DSO เพราะในการทดสอบต้องมีการตรวจสอบรูปคลื่นของแรงดันหลังจากสวิตช์ s ปิดวงจร แต่ข้อควรที่ควรระวังคือ DSO มักมีอิมพีแดนซ์ขาเข้าเพียง 1 MΩ เท่านั้นและโดยทั่วไปจะมีความไม่แน่นอนในการวัด 2% ดังนั้นจึงควรทำการสอบเทียบพร้อมกับโวลเตจดิไวเดอร์เพื่อให้ได้ ตัวคูณ (scale factor, F) ของระบบวัดแรงดันทั้งระบบเพียงตัวเดียว

ข) ระบบวัดแรงดันสำหรับการวัดค่า PD ในรูปที่ 5.58 ข) ใช้เพียงเครื่องวัด PD เท่านั้น เนื่องจากในปัจจุบันมักเครื่องวัด PD ต้องวัดแรงดันทดสอบได้ด้วยเพราะต้องแสดงค่า PD ที่วัดได้ที่มุมเฟสต่างๆ ของแรงดันทดสอบอยู่แล้ว (ดูหัวข้อ 5.4.5)

ความไวในการวัด PD ของเครื่องวัดและสัญญาณรบกวนจากภายนอกสูงสุดขณะทำการวัด PD ของสายเคเบิลขึ้นกับ

- ประเภทสายเคเบิลและอุปกรณ์ประกอบ: สายเคเบิลที่ใช้ XLPE เป็นฉนวนจะทน PD ได้ต่ำกว่าฉนวนแบบกระดาษจุ่มน้ำมัน ทั้งนี้รวมถึงอุปกรณ์ต่างๆ ด้วย
- สนามไฟฟ้าขณะที่ทำงาน: ความเสียหายของ XLPE เนื่องจาก PD ขึ้นกับสนามไฟฟ้า ดังนั้นสายเคเบิลที่ใช้ในระบบ HV หรือ EHV (ที่มักถูกออกแบบให้ทำงานที่สนามไฟฟ้าสูงกว่า คือให้รับสนามไฟฟ้า kV/mm สูงกว่า) จึงไวต่อ PD มากกว่าสายเคเบิลที่ใช้ในระบบ MV

- แรงดันทดสอบ: สนามไฟฟ้าที่ XLPE ได้รับขณะทำการทดสอบจะสูงกว่าสนามไฟฟ้าขณะที่ทำงาน ดังนั้นความเสียหายจาก PD จึงตรวจสอบได้ง่ายขึ้น
- การแยกแยะ PD ในสายเคเบิลจากสัญญาณรบกวน: การวัด PD ที่แรงดันทดสอบสูงๆ อาจทำให้เกิดโคโรนาที่หัวสายเคเบิลหรือสายนำแรงสูงในวงจรทดสอบทำให้แยกแยะ PD ในสายเคเบิลจากสัญญาณรบกวนได้ยาก

  ยกตัวอย่าง เช่น การที่เราวัด PD ของสายเคเบิลที่ใช้กระดาษจุ่มน้ำมันในระบบ MV หรือของอุปกรณ์ประกอบของสายเคเบิลแบบ XLPE ในระบบ MV ได้เป็นร้อยๆ pC ไม่ได้หมายความว่าสายเคเบิลดังกล่าวจะเสียหายทันทีทันใด ดังนั้นจึงยอมให้มีสัญญาณรบกวนเป็น 100 pC ได้ขณะที่ทำการวัดค่า PD ของสายเคเบิล ในทางกลับกัน PD ที่เกิดขึ้นในสายเคเบิล XLPE ในระบบ HV หรือ EHV เพียงไม่กี่สิบ pC อาจทำให้สายเคเบิลในอีกไม่กี่วันข้างหน้า ดังนั้นสัญญาณรบกวนในขณะที่ทำการวัดค่า PD ของสายเคเบิลจึงควรมีค่าต่ำ

ค) ระบบวัดแรงดันสำหรับการวัดค่า Tg δ ใช้วงจรในรูปที่ 5.58 ก) เพื่อหา Tg δ จากรูปคลื่นแรงดันทดสอบ ความแม่นยำในการหาค่า Tg δ ควรดีกว่า 0.01% ($1 \cdot 10^{-4}$) ถ้าสมมุติว่าสายเคเบิลที่ปกติควรมี Tg $\delta \leq 0.1\%$ -การทดสอบเฉพาะแบบตาม [IEC60840, 2011] กำหนดให้สายเคเบิล XLPE มี Tg $\delta \leq 10 \cdot 10^{-4}\%$-

อย่างไรก็ตาม ค่า Tg δ ที่วัดได้จะรวมกำลังสูญเสียในตัวต้านทานปรับรูปคลื่น R_{ckt} และความสูญเสียในตัวนำของสายเคเบิล R_{DC} ไว้ด้วย ดังนั้นเราจึงต้องแยกกำลังสูญเสียดังกล่าวออกมาก่อนจึงจะทราบค่า Tg δ จริงของสายเคเบิล ดังนั้นในการอธิบายต่อไปนี้จะกำหนดให้ตัวต้านทานปรับรูปคลื่น R_{ckt} รวมค่าความต้านทานของตัวนำของสายเคเบิล R_{DC} ไว้แล้ว และฉนวน XLPE แทนด้วย C_{ins} ต่อขนานกับ R_{ins} ทำให้คำนวณ Tg δ ได้จากสมการ

$$\text{Tg}\ \delta = \frac{1}{\omega R_{ins} C_{ins}} 100 \ \ [\%] \tag{5.35}$$

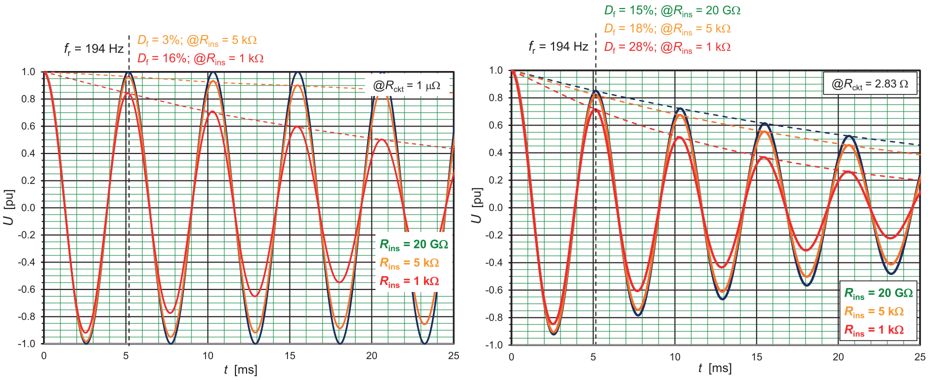
ตัวอย่างที่ 5.8 จงคำนวณค่า R_{ins} ของสายเคเบิลที่มี C_{ins} = 15 μF เมื่อวัด Tg δ ได้ 0.1% ที่ความถี่ 194 Hz

$$\text{Tg}\ \delta = \frac{1}{\omega R_{ins} C_{ins}} 100 \Rightarrow R_{ins} = \frac{100}{\text{Tg}\ \delta \cdot \omega C_{ins}} = \frac{100}{0.1 \cdot 2\pi \cdot 200 \cdot 15 \cdot 10^{-6}} = 54.8 \ \ [\text{k}\Omega]$$

รูปที่ 5.59 แสดงรูปคลื่นแรงดันทดสอบเมื่อ R_{ins} มีค่าต่างๆ โดยที่ค่า Tg δ สามรถหาได้จากขั้นตอนต่อไปนี้ [IEEE400.4, 2015]

1. ต้องรู้ค่า R_{ckt} ของวงจรซึ่งอาจทำได้ด้วยการวัดค่าความต้านทานด้วยการใช้เครื่องวัดความต้านทานแบบบริดจ์ เช่น Wheatstone bridge หรือ Kelvin bridge (ดูหัวข้อ 5.10.2 E1)
2. ประมาณค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน α จากสมการ

$$\alpha = -\frac{\ln\left(U_{t,5th\ peak} / U_{t,1st\ peak}\right)}{t_{5th\ peak} - t_{1st\ peak}} \tag{5.36}$$



ก) R_{ckt} = 1 μΩ ข) R_{ckt} = 2.83 Ω

รูปที่ 5.59 รูปคลื่นแรงดันทดสอบขณะวัด Tg δ เมื่อ R_{ins} มีค่าต่างๆ

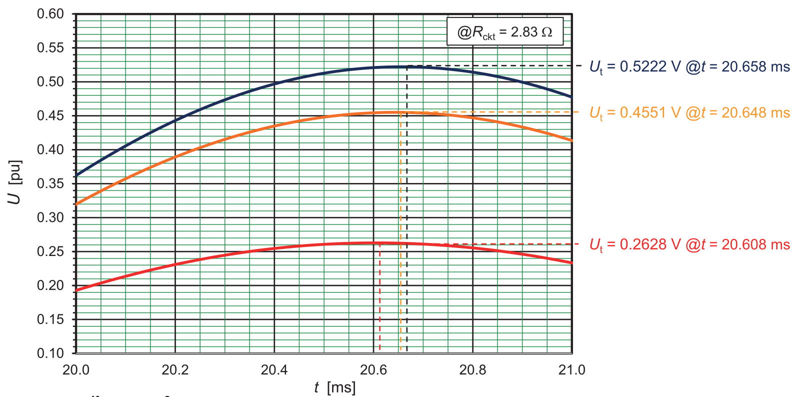
3. หาค่า R_{ins} จากสมการ

$$R_{ins} = \frac{L_{ckt}}{2\alpha L_{ckt}C_{ins} - R_{ckt}C_{ins}} \tag{5.37}$$

4. คำนวณค่า Tg δ จากสมการสมการที่ 5.35

ตัวอย่างที่ 5.9 จงคำนวณค่า Tg δ ของสายเคเบิลเส้นสีแดง **R**, เส้นสีเหลือง **Y** และเส้นสีน้ำเงิน **B** ในรูปที่ 5.59 ข) เมื่อสายเคเบิลทุกเส้นมี C_{ins} = 15 μF และวงจรปรับรูปคลื่นมี L_{ckt} = 45 mH และ R_{ckt} = 2.83 Ω

เพื่อความแม่นยำในการหาค่ายอดของ $U_{t,5th\ peak}$ จึงขยายรูปที่ 5.59 ข) บริเวณเวลา 20-21 ms ดังแสดงในรูป



ผลการคำนวณได้แสดงในตาราง

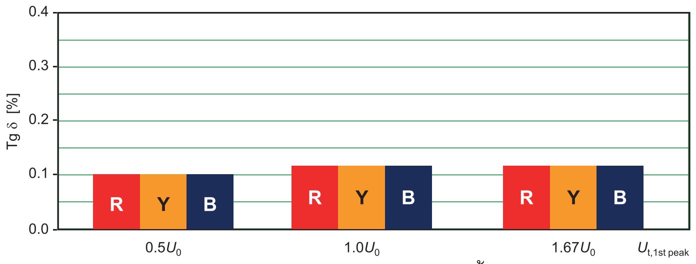
	B	Y	R
α =	31.5	38.2	64.8
R_{ins} [kΩ] =	796.2	5.0	1.0
Tg δ [%] =	0.007	1.102	5.477

จากตัวอย่างที่ 5.9 จะเห็นว่าผลการคำนวณ R_{ins} ตรงกับค่าที่ใช้ในการจำลองแบบสำหรับเคเบิลเส้น **Y** และ **R** ส่วนเคเบิลเส้น **B** คำนวณ R_{ins} ได้เพียง 800 kΩ แทนที่จะเป็น 20 GΩ ตามที่ใช้ในการจำลองแบบ ดังนั้นจึงควรระวังในการหาค่า Tg δ ที่น้อยมากๆ ด้วยการใช้ DAC

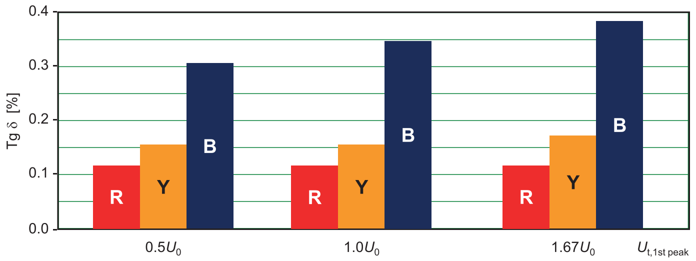
การประเมินผลการวัดค่า Tg δ ของสายเคเบิลนอกจากจะใช้เกณฑ์ที่มาตรฐาน เช่น [IEC60141-1, 1998] หรือเกณฑ์ที่การไฟฟ้ากำหนด ปกติจะพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงของ Tg δ โดยอาจ

- เปรียบเทียบค่า Tg δ กันเองระหว่างสายเคเบิลแต่ละเฟส
- เปรียบเทียบค่า Tg δ กับสายเคเบิลเส้นอื่นแบบเดียวกัน, อายุเท่ากัน และใช้งานในบริเวณเดียวกัน
- เปรียบเทียบค่า Tg δ ที่วัดได้กับค่าที่วัดได้ครั้งก่อนๆ ที่แรงดันเดียวกัน
- เปรียบเทียบค่า Tg δ ที่วัดที่แรงดันต่างกัน

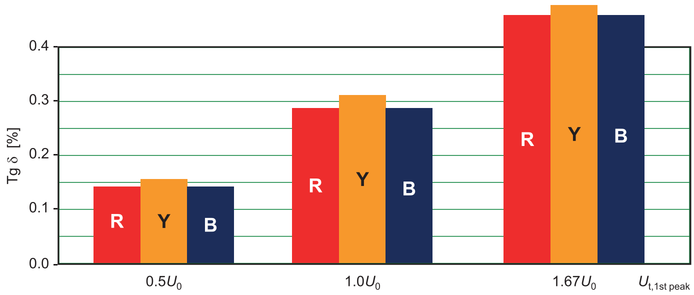
ตัวอย่างผลการเปรียบเทียบค่า Tg δ ที่วัดได้ แสดงในรูปที่ 5.60 [IEEE400.4, 2015]



ก) สายเคเบิลแต่ละเฟสมีค่า Tg δ และไม่ขึ้นกับ $U_{t,1st\ peak}$



ข) สายเคเบิลแต่ละเฟสมีค่า Tg δ ต่างกันมากและเพิ่มขึ้นตาม $U_{t,1st\ peak}$ เล็กน้อย



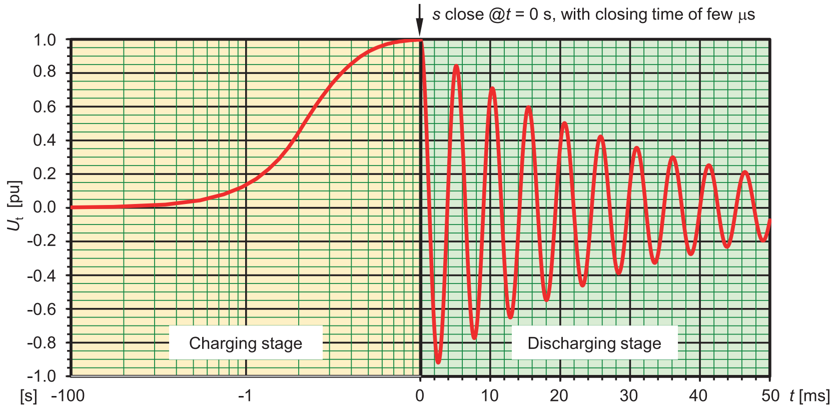
ค) สายเคเบิลแต่ละเฟสมีค่า Tg δ ใกล้เคียงกัน แต่เพิ่มขึ้นตาม $U_{t,1st\ peak}$ อย่างเห็นได้ชัด

รูปที่ 5.60 ค่า Tg δ ที่ได้จากสายเคเบิลแต่ละเฟส ที่แรงดันทดสอบ $U_{t,1st\ peak}$ ค่าต่างๆ

ซึ่งจะเห็นว่าสายเคเบิลทั้งสามเฟสในรูปที่ 5.60 ก) มีสภาพปกติเพราะสายเคเบิลทุกเฟสมีค่า Tg δ ต่ำและแทบไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามแรงดัน ส่วนสายเคเบิลในรูปที่ 5.60 ข) นั้น สายเคเบิลเฟส **B** ผิดปกติแน่นอนเพราะมีค่า Tg δ สูงกว่าเฟสอื่นอย่างชัดเจน และในรูปที่ 5.60 ค) ค่า Tg δ ของสายเคเบิลทั้งสามเฟสเพิ่มขึ้นตามแรงดันทดสอบ โดยอาจมีสาเหตุจากเกิด PD ในเนื้อฉนวนของสายเคเบิลแบบกระดาษจุ่มน้ำมันหรือ water tree ในเนื้อฉนวนของสายเคเบิลแบบ XLPE หรือสาเหตุอื่นๆ

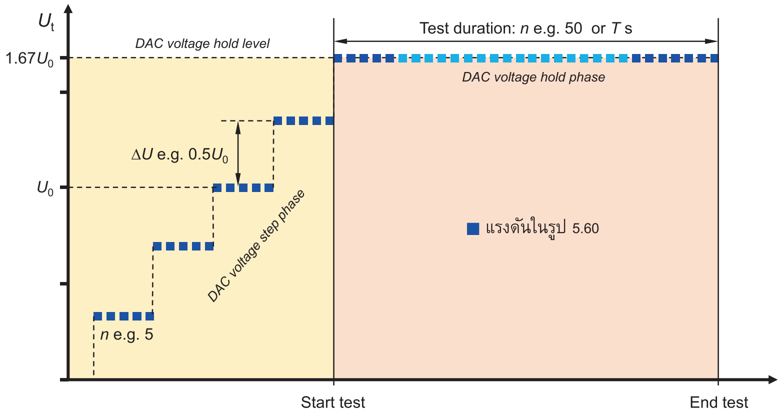
5.6.3 วิธีทดสอบ

จากหัวข้อที่ 5.6.2 แรงดันทดสอบที่สายเคเบิลได้รับแต่ละครั้งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 5.61



รูปที่ 5.61 รูปคลื่นแรงดันทดสอบที่สายเคเบิลในช่วงการอัดประจุและการคายประจุแต่ละครั้ง

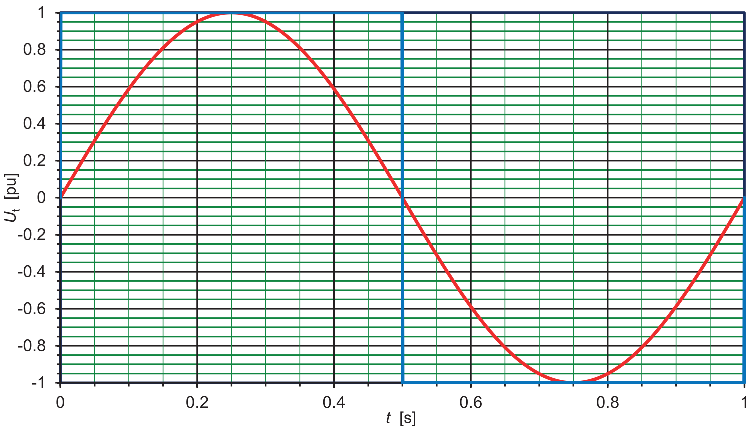
จำนวนครั้งและวิธีการทดสอบที่หน้างานแต่ละแบบจะแตกต่างกันไปตามวัตถุประสงค์แต่จะมีลักษณะเหมือนกันคือป้อนแรงดันทดสอบ U_t ในรูปที่ 5.6 เป็นชุดๆ เช่น ชุดละ n = 5 ครั้ง แต่ละชุดจะมีแรงดัน U_t ไม่เท่ากันโดยเพิ่มแรงดันทดสอบขึ้นครั้งละ $\Delta U = 0.2U_0 - 0.5U_0$ จนถึงค่าแรงดันทดสอบที่ต้องการ เช่น $U_t = U_{t,1st\ peak} = 1.67U_0$ แล้วป้อนแรงดันทดสอบนี้อีกจำนวน n เช่น 50 ครั้ง ตามที่ต้องการหรือป้อนแรงดันทดสอบเป็นเวลา T s ตามที่ต้องการ ดังแสดงในรูปที่ 5.62



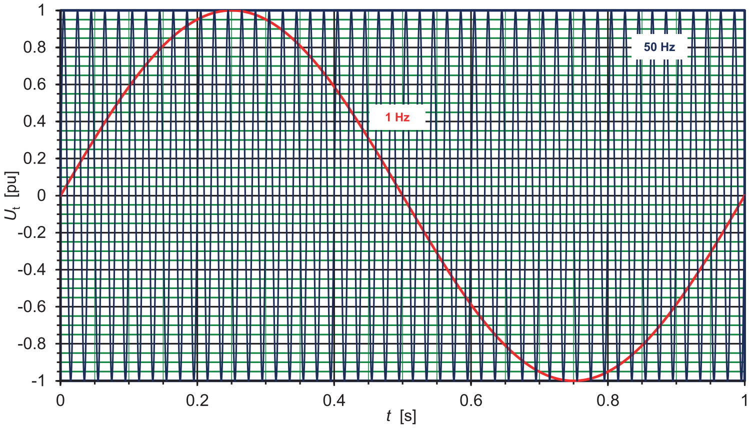
รูปที่ 5.62 วิธีป้อนแรงดันกระแสสลับแบบหน่วงให้วัสดุทดสอบ

5.7 แรงดันกระแสสลับความถี่ต่ำมาก

แรงดันกระแสสลับความถี่ต่ำมากตาม [IEC60060-3, 2006] และ [IEEE400.2, 2013] หมายถึงแรงดันกระแสสลับที่มีความถี่อยู่ในช่วง 0.01-1 Hz ที่มีรูปคลื่นแรงดันแบบไซน์หรือ รูปคลื่นแรงดันสี่เหลี่ยม (rectangular voltage waveform) ดังแสดงในรูปที่ 5.63



ก) แรงดันรูปไซน์และแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยมความถี่ 1 Hz



ข) แรงดันรูปคลื่นไซน์ความถี่ 1 Hz เมื่อเทียบกับความถี่กำลัง 50 Hz ปกติ

รูปที่ 5.63 รูปคลื่นแรงดันกระแสสลับความถี่ต่ำมาก

เกร็ดความรู้ 5.2 ความถี่ต่ำมากทางด้านการกระจายเสียง มีความถี่อยู่ในช่วงใด?

องค์การสื่อสารสากล (international telecommunication union, ITU) ได้แบ่งช่วงสัญญาณวิทยุออกเป็นช่วงดังที่แสดงในตาราง

Frequency	Wavelength	Name	Abbreviation	Note
< 3 Hz	> 10^5 km	Tremendeously low frequency	TLF	
3 - 30 Hz	10^5 - 10^4 km	Extremely low frequency	ELF	
30 - 300 Hz	10^4 - 10^3 km	Super low frequency	SLF	
300 - 3000 Hz	10^3 – 100 km	Ultra low frequency	ULF	
3 - 30 kHz	100 - 10 km	Very low frequency	VLF	sound
30 - 300 kHz	10 - 1 km	Low frequency	LF	
0.3 - 3 MHz	1 km - 100 m	Medium frequency	MF	AM
3 - 30 MHz	100 - 10 m	High frequency	HF	
30 - 300 MHz	10 - 1 m	Very high frequency	VHF	FM
0.3 - 3 GHz	1 m - 10 cm	Ultra high frequency	UHF	Wi-fi, DTT
3 - 30 GHz	10 - 1 cm	Super high frequency	SHF	Wi-fi
30 - 300 GHz	1 cm - 1 mm	Extremely high frequency	EHF	
0.3 - 3 THz	1 mm – 0.1 mm	Tremendeously high frequency	THF	
DTT = digital terrstial television				

ความถี่ต่ำมากทางด้านการกระจายเสียงมีความถี่อยู่ในช่วง 3-30 kHz ดังนั้นจึงมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 10-100 km เป็นความถี่ช่วงเดียวกันกับเสียงที่มนุษย์ได้ยิน แต่มักใช้ในการส่งสัญญาณเข้ารหัสทางด้านการทหาร โดยเฉพาะอย่างยิ่งการสื่อสารระหว่างเรือดำน้ำเพราะส่งสัญญาณในน้ำทะเลได้ไกลถึง 40 m

ส่วนการสื่อสารระหว่างอากาศยานและระหว่างเรือจะใช้ความถี่ในช่วง VHF

VLF ทางด้านไฟฟ้าแรงสูงเริ่มมีการศึกษามาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1980 โดยมีการใช้งานทั้งการทดสอบเพื่อตรวจรับ, การทดสอบหลังการบำรุงรักษา และการตรวจสภาพของสายเคเบิลทั้งการวัด Tg δ และ PD

5.7.1 ข้อกำหนดของแรงดันทดสอบ

เนื่องจากรูปคลื่น VLF ที่ใช้มีสองรูปคลื่น ดังนั้นความต้องการจึงต่างกัน

ก) รูปคลื่นแรงดันไซน์ ต้องมีรูปร่างใกล้เคียงคลื่นไซน์โดยที่ทั้งครึ่งบวกและลบมีรูปร่างคล้ายกัน โดยที่

$$0.85\cdot\sqrt{2}\le\frac{U_{t,peak}}{U_{t,rms}}\le 1.15\cdot\sqrt{2}$$

แต่ถ้า $U_{t,peak}/U_{t,srms}$ ไม่อยู่ในช่วง √2±5% ให้ตรวจสอบว่าค่ายอดบวกและลบแตกต่างกันไม่เกิน 2%

ข) รูปคลื่นแรงดันสี่เหลี่ยม

$$0.95\le\frac{U_{t,peak}}{U_{t,rms}}\le 1.05$$

ดังนั้นจึงต้องระวังในการป้อนแรงดันทดสอบในกรณีที่ระบุ U_t เป็น rms เพราะค่ายอดของรูปคลื่นมีค่าไม่เท่ากัน

ความคลาดเคลื่อนของแรงดันทดสอบต้องไม่เกิน ±5% นอกจากนั้นแหล่งจ่ายแรงดัน VLF ควรจ่ายกระแสกระแสต่างๆ เช่น กระแสรั่ว, กระแสโพลาไรซ์, กระแสดีสชาร์จบางส่วนที่ผิว ฯลฯ ได้ โดยทำให้แรงดันทดสอบที่ EUT ลดลงไม่เกิน 15%

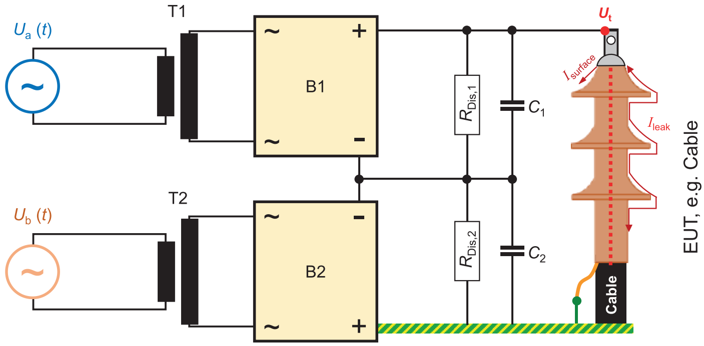
ระบบวัดแรงดันต้องมีความไม่แน่นอนในการวัดไม่เกิน 5% และมีเวลาตอบสนอง T_N ไม่เกิน 0.5 ms (หรือตัวคูณของระบบวัดแรงดันในช่วง 0.5-2 เท่าของความถี่ที่ใช้ในการทดสอบ เปลี่ยนแปลงไม่เกิน 2%)

5.7.2 วิธีสร้างแรงดันกระสลับความถี่ต่ำมาก

การสร้างแรงดัน VLF รูปคลื่นไซน์อาจทำโดยการควบคุมการเพิ่มแรงดันกระแสตรงขั้วบวกให้สายเคเบิลแล้วควบคุมให้สายเคเบิลค่อยๆ คายประจุผ่านตัวต้านทาน เมื่อแรงดันทดสอบเป็นศูนย์ก็กลับขั้วแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรงให้เป็นขั้วลบแล้วทำซ้ำเดิมอย่างที่กล่าวมาแล้ว

ส่วนการสร้างแรงดัน VLF รูปคลื่นแรงดันสี่เหลี่ยมก็ทำในทำนองเดียวกัน ด้วยการใช้วงจรเรียงกระแส (rectifier circuit) ที่ควบคุมได้ ร่วมกับวงจรแกว่งที่ประกอบจากตัวเหนี่ยวนำและความจุไฟฟ้าของ EUT

วงจรสร้างแรงดัน VLF รูปคลื่นไซน์ในปัจจุบันใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังเป็นหลักดังแสดงในรูปที่ 5.64 [Xinlao, 1997] และ 5.67 [Mohaupt, 2010] [Mohaupt, 2013]

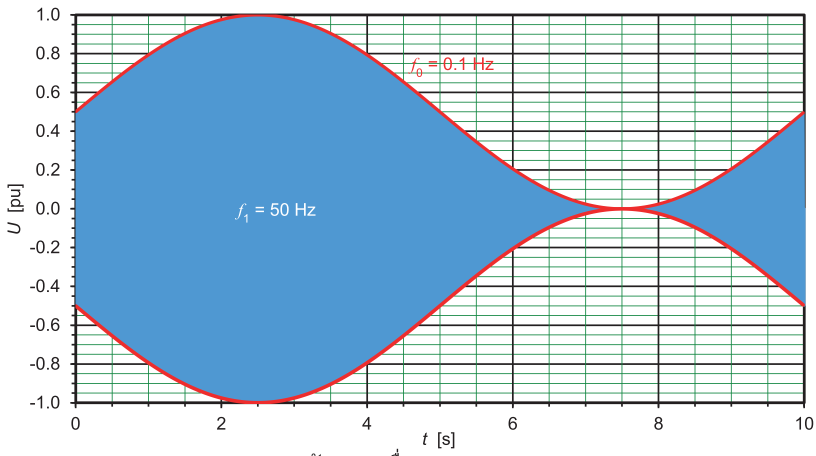


รูปที่ 5.64 วงจรสร้างแรงดัน VLF ที่ใช้วงจรเรียงกระแสแบบบริจด์เป็นดีมอดูเลเตอร์

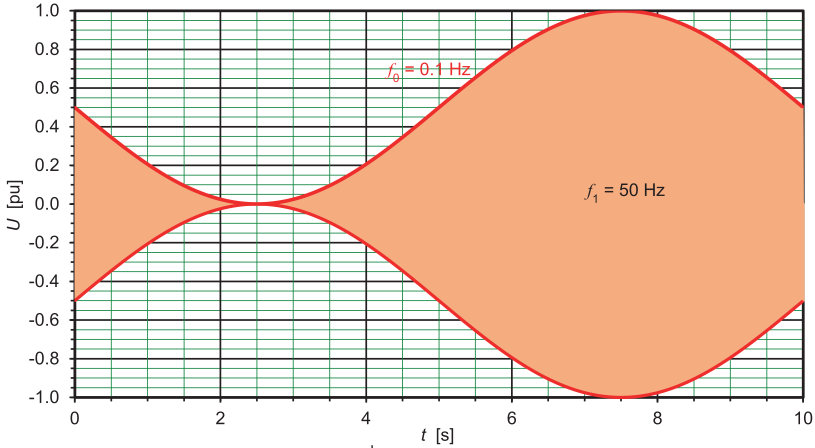
แรงดัน $U_a(t)$ และ $U_b(t)$ เป็นแรงดันกระแสสลับที่ถูกมอดูเลต โดยมีค่าเท่ากับ

$$U_a(t) = \frac{U}{2}(1+\sin 2\pi f_0 t)\sin 2\pi f_1 t$$
$$U_b(t) = \frac{U}{2}(1-\sin 2\pi f_0 t)\sin 2\pi f_1 t \qquad (5.38)$$

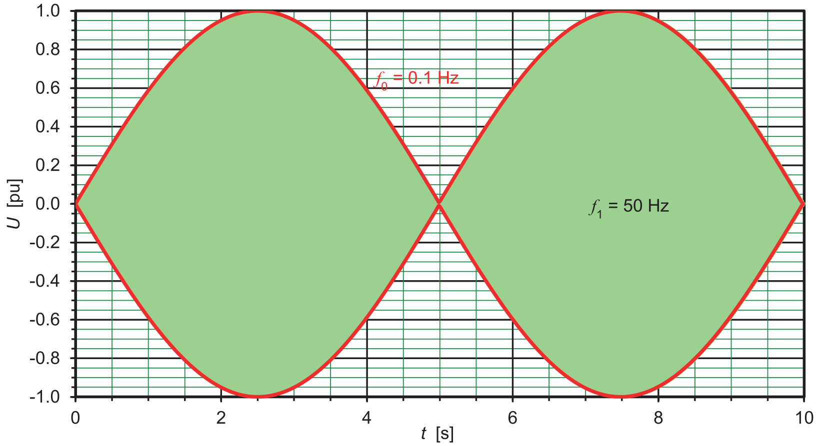
เมื่อ U เป็นค่ายอดของแรงดัน ส่วน f_0 เป็นความถี่ของแรงดันทดสอบ VLF ที่ต้องการและ f_1 เป็นความถี่ที่ถูกมอดูเลต โดยที่ความถี่ทั้งสองความถี่จะ *บีต* (beat) กันดังแสดงในรูปที่ 5.65



ก) แรงดัน $U_a(t)$ เมื่อ f_0 = 0.1 Hz และ f_1 = 50 Hz



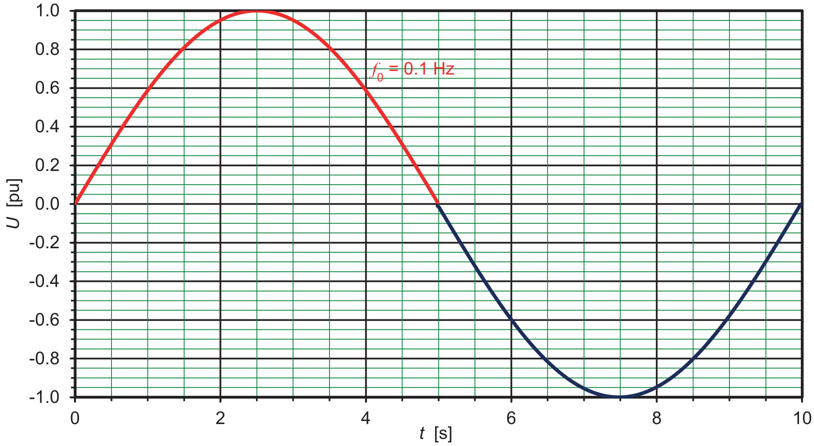
ข) แรงดัน $U_b(t)$ เมื่อ f_0 = 0.1 Hz และ f_1 = 50 Hz



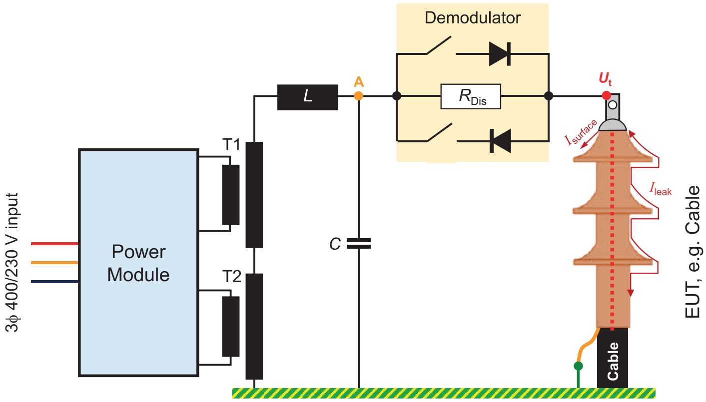
ค) แรงดัน $U_a(t)$-$U_b(t)$

รูปที่ 5.65 แรงดัน $U_a(t)$ และ $U_b(t)$

จากนั้นเราจะใช้หม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูง T1 และ T2 ขยายแรงดัน $U_a(t)$ และ $U_b(t)$ ให้มีขนาดสูงขึ้นตามที่ต้องการ ก่อนผ่านวงจรเรียงกระแสแบบบริจด์ที่ทำหน้าที่เป็น *ดีมอดูเลเตอร์* (demodulator) เพื่อดีมอดูเลตสัญญาณร่วมกับ $R_{Dis,1}$, C_1 , $R_{Dis,2}$ และ C_2 ทำให้แรงดันทดสอบ U_t มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 5.66



รูปที่ 5.66 แรงดันทดสอบ VLF U_t ที่สายเคเบิล

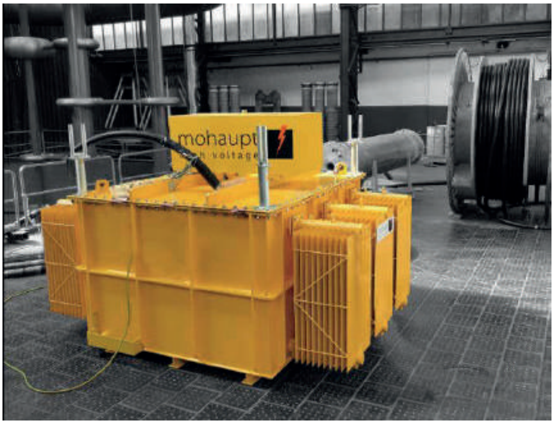


รูปที่ 5.67 วงจรสร้างแรงดัน VLF ที่ใช้วงจรเรียงกระแสแบบควบคุมได้เป็นมอดูเลเตอร์

หลักการทำงานของวงจรในรูปที่ 5.67 ก็คล้ายกับวงจรในรูปที่ 5.54 คือ Power module จะแปลงแรงดันกระแสสลับ 3ϕ 400/230 V ให้เป็นแรงดันกระแสตรงจากนั้นก็ใช้ตัวแปลง DC-AC แปลงแรงดันกระแสตรงกลับไปเป็นกระแสสลับความถี่สูง f_1 ในย่าน kHz และกระแสสลับ VLF ความถี่ f_0 ที่ต้องการให้บีตกัน

จากนั้นก็ป้อนแรงดันทั้งสองชุดผ่าน T1, T2 และวงจรเรโซแนนซ์ LC เพื่อให้แรงดันมีขนาดสูงขึ้นแล้วผ่านดีมอดูเลเตอร์ที่ควบคุมการทำงานได้เพื่ออัดประจุให้สายเคเบิลร่วมกับตัวต้านทาน R_{Dis} ซึ่งทำหน้าที่คายประจุให้กับสายเคเบิล แรงดันทดสอบ U_t ที่สายเคเบิลจึงมีลักษณะเหมือนดังที่แสดงในรูปที่ 5.66

เครื่องกำเนิดแรงดัน VLF ที่มีจำหน่ายในปัจจุบันมีหลายขนาด ดังแสดงในรูปที่ 5.68



ก) DRT200-1, 200 kV 1 μF [Mohaupt,

ข) VLF Sinus 62, 62 kV$_{peak}$, 40 mA [Megger, 2020b]

ค) BAUR-PHG 80, 80 kV$_{peak}$, 3kVA [HV Inc, 2020]

รูปที่ 5.68 ตัวอย่างเครื่องกำเนิดแรงดัน VLF ที่มีจำหน่าย

5.7.3 วิธีทดสอบ

การทดสอบสายเคเบิลด้วย VLF ทำได้ทั้งกับสายเคเบิลใหม่และที่ใช้งานแล้ว [IEEE400.2, 2013] แนะนำให้ป้อนแรงดันทดสอบ U_t ความถี่ 0.1 Hz เป็นเวลาอย่างน้อย 30 min สำหรับเคเบิลที่ใช้งานแล้วในกรณีของการทดสอบความทนแรงดัน แต่ถ้าสายเคเบิลดังกล่าวจ่ายโหลดที่มีความสำคัญมาก ก็ให้เพิ่มเวลาเวลาในการป้อน U_t เป็น 60 min ส่วนในกรณีของการตรวจรับสายเคเบิลใหม่ให้ป้อน U_t ความถี่ 0.1 Hz เป็นเวลาอย่างน้อย 60 min ให้สายเคเบิล

สำหรับการทดสอบเพื่อตรวจสภาพโดยทั่วไป จะป้อน U_t เป็นเวลา 15-30 min ถ้าค่าที่วัดได้ -เช่น Tg δ หรือ PD- ค่อนข้างคงที่เป็นเวลาอย่างน้อย 15 min แต่ถ้าเป็นการทดสอบความทนแรงดันเพื่อตรวจสอบหลังการซ่อมแซมก็ให้ป้อน U_t อย่างน้อย 30 min

ค่าแรงดันทดสอบ U_t ในกรณีต่างๆ ได้แสดงในตารางที่ 5.11 [IEEE400.2, 2013] และรูปที่ 5.69

ตารางที่ 5.11 แรงดันทดสอบ U_t ที่ใช้ในการทดสอบความทนแรงดันของสายเคเบิล

VLF waveform	Cable rating U_R [kV_{L-L}]	Installtion $U_{t,L-E}$		Acceptance $U_{t,L-E}$		Maintenance[b] $U_{t,L-E}$	
		[kV_{rms}]	[kV_{peak}]	[kV_{rms}]	[kV_{peak}]	[kV_{rms}]	[kV_{peak}]
Sinusoidal	5	9	13	10	14	7	10
	8	11	16	13	18	10	14
	15	19	27	21	30	16	22
	20	24[c]	34[c]	26	37	20	28
	25	29[c]	41[c]	32	45	24[c]	34[c]
	28	32	45	36[c]	51[c]	27	38
	30	34	48	38	54	29	41
	35	39	55	44	62	33	47
	46	51	72	57	81	43	61
	69	75	106	84	119	63	89
Regtangular	5	13		14		10	
	8	16		18		14	
	15	27		30		22	
	20	34		37		28	
	25	41		45		34	
	28	45		51		38	
	30	48		54		41	
	35	55		62		47	
	46	72		81		61	
	69	106		119		89	

[a] If the cable operating voltage is lower than the cable rating voltage U_R, the maintenance withstand test voltage $U_{t,L-G}$ should be equal to the cable operating voltage.

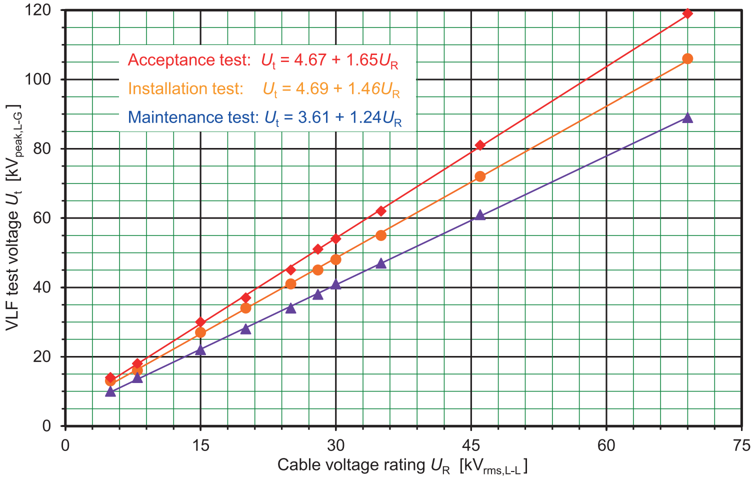
[b] The maintenance withstand test voltage is about 75% of to the acceptance withstand test voltage.

[c] Some practical test voltages may be up to 5% below the value listed, they are acceptable. But the cable may be "undertested".

[d] It should be noted that if the cable failed at the above withstand test voltage levels, the cable is already in a highly compromised condition.

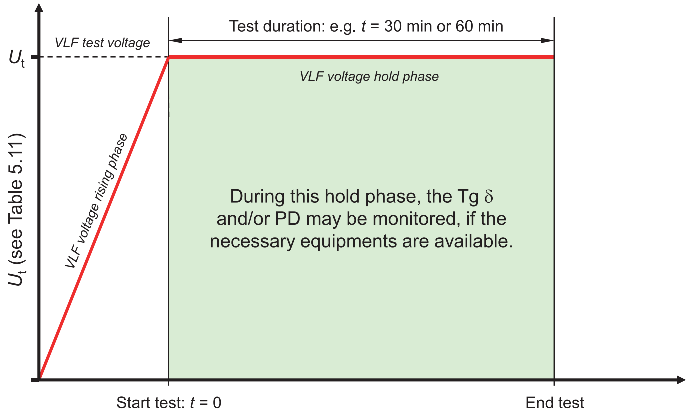
ในการทดสอบโดยทั่วไป เราจะค่อยๆ เพิ่มแรงดันทดสอบ U_t ให้สายเคเบิล โดยที่ช่วงที่คงแรงดันทดสอบเราอาจทำการวัดและบันทึกค่ากระแสรั่วหรือวัดค่า Tg δ หรือ PD ไปด้วย และหลังจากครบเวลาคงแรงดันทดสอบแล้ว ก็ค่อยๆ ลดแรงดันลงจนเป็นศูนย์และต่อตัวนำของสายเคเบิลลงกราวน์เพื่อคายประจุค้างที่อยู่ในสายเคเบิลเพื่อความปลอดภัย

หากระหว่างการทดสอบเกิดเบรกดาวน์ที่สายเคเบิล ให้รีบปิดเครื่องกำเนิดแรงดัน VLF แล้วต่อตัวนำของสายเคเบิลลงกราวน์ทันทีเพื่อคายประจุค้างที่อยู่ในสายเคเบิล จากนั้นหาจุดที่เกิดเบรกดาวน์ (ดูบทที่ 6), ทำการซ่อมแซม และทำการทดสอบซ้ำอีกครั้งหนึ่ง



รูปที่ 5.69 แรงดันทดสอบ U_t ที่ใช้ในการทดสอบความทนแรงดันของสายเคเบิล

การป้อนแรงดันทดสอบ U_t จะมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 5.69



รูปที่ 5.70 การป้อนแรงดัน U_t ในการทดสอบความทนแรงดันของสายเคเบิล

สำหรับการประเมินสภาพของสายเคเบิลด้วยการวัด Tg δ ผู้อ่านที่สนใจสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จาก Annex E, G และ H ใน [IEEE400.2, 2013]

5.8 แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็ม

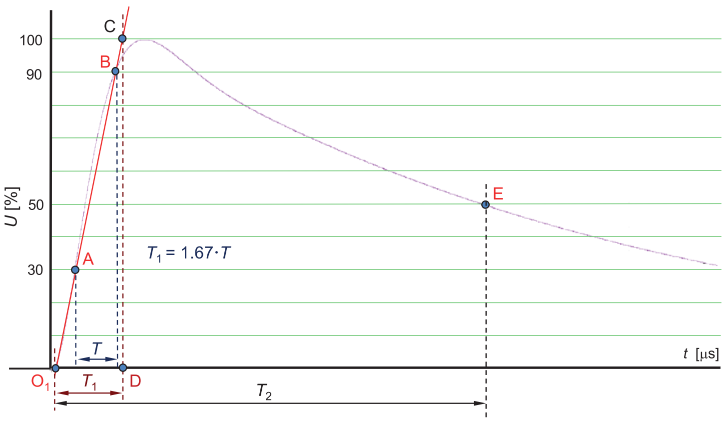
เราทราบว่า [IEC60071-1, 2019] แบ่งแรงดันเกินชั่วครู่ออกเป็น 2 ประเภทคือแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นเนื่องจากมีฟ้าผ่าลงที่ระบบสายส่งไฟฟ้าและแรงดันอิมพัลส์สวิตชิงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการทำงานของสวิตช์ที่สถานีไฟฟ้า เช่นการปิด-เปิดเซอร์กิตเบรกเกอร์หรือสวิตช์ตัดตอน

ในหัวข้อนี้เราจะศึกษาวิธีสร้างแรงดันอิมพัลส์ทั้ง 2 ประเภท ด้วย เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ (impulse voltage generator)

5.8.1 แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นมาตรฐาน

มาตรฐาน [IEC60060-1, 2010] กำหนดไว้ว่า แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าคือแรงดันอิมพัลส์ที่มีเวลาหน้าคลื่นไม่เกิน 20 μs โดยแบ่งออกเป็นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็มและ แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นตัด (lightning impulse, chopped wave voltage)

พารามิเตอร์ทางเวลาที่ใช้กำหนดรูปคลื่นของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็ม คือ เวลาหน้าคลื่น (front time, T_1) และ เวลาหลังคลื่น (tail time, T_2) ดังแสดงในรูปที่ 5.71



รูปที่ 5.71 แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็ม

เวลาหน้าคลื่น T_1 หาได้ดังนี้

1. กำหนดค่ายอดของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า U_p ให้เท่ากับ 100%
2. กำหนดให้จุด A และ B คือ ตำแหน่งที่แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามีค่าเท่ากับ 30% และ 90% ของ U_p ตามลำดับ
3. ลากเส้นตรงผ่านจุด A-B ตำแหน่งที่เส้นตรงตัดแกนแรงดัน U = 100% จะเรียกว่าจุด C ส่วนตำแหน่งที่เส้นตรงตัดแกนเวลา t จะเรียกว่าจุด O_1 ซึ่งมีชื่อเรียกเฉพาะว่า *จุดเริ่มต้นเสมือน* (virtual origin) -ในที่นี้สมมุติให้จุด O และ O_1 ที่ระบุใน [IEC60060-1, 2010] เป็นจุดเดียวกัน- โดยการวัดเวลาทั้งหมดของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าต่อไปนี้ จะถือว่าจุด O_1 เป็นจุดที่เวลา t = 0
4. ลากเส้นตรงจากจุด C ขนานกับแกนแรงดัน U มาตัดกับแกนเวลาที่จุด D เวลาหน้าคลื่น T_1 จะมีค่าเท่ากับช่วงเวลาจากจุด O_1 ถึงเวลาที่จุด D

อนึ่ง เนื่องจากเส้นตรงที่ผ่านจุด A-B มีความชันเท่ากับเส้นตรงที่ผ่านจุด O_1-C ดังนั้นเวลาหน้าคลื่น T_1 จึงสามารถหาได้จากเวลา T ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามีค่า 30-90% ของ U_p ตามสมการ

$$T_1 = 1.67 \cdot T \tag{5.39}$$

ส่วนเวลาหลังคลื่น T_2 หาได้ดังนี้

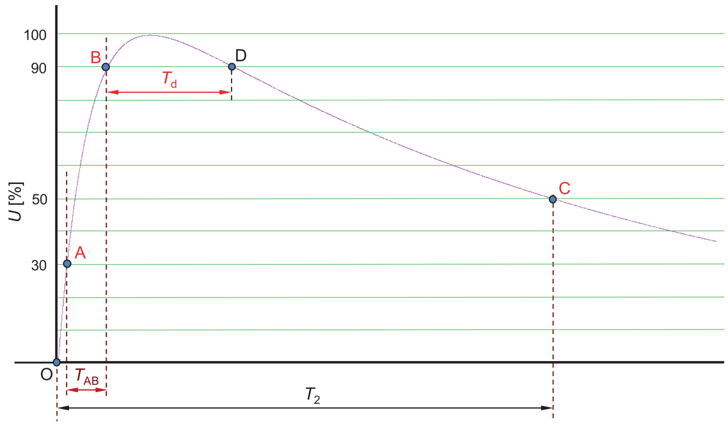
1. กำหนดให้จุด E คือ ตำแหน่งที่แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าผ่านค่ายอด U_p แล้วมีขนาดลดต่ำลดมาเหลือ 50% ของ U_p
2. เวลาหลังคลื่น T_2 จะมีค่าเท่ากับเวลาจากจุด O_1 จนถึงเวลาที่จุด E ตัดผ่านแกนเวลา

แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นมาตรฐานมีเวลา T_1 = 1.2 μs และ T_2 = 50 μs และมักเขียนว่า 1.2/50 μs โดยมาตรฐานยอมให้เวลา T_1 และ T_2 มีความคลาดเคลื่อนได้ ±30% และ ± 20% ตามลำดับ ดังนั้นหากแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามี T_1 อยู่ในช่วง 0.84-1.56 μs และ T_2 อยู่ในช่วง 40-60 μs ก็ถือว่าแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่านี้มีรูปคลื่นเป็นไปตามมาตรฐาน

ส่วนค่ายอด U_p มาตรฐานยอมให้มีความคลาดเคลื่อนได้ ±3%

5.8.2 แรงดันอิมพัลส์สวิตชิงรูปคลื่นมาตรฐาน

มาตรฐาน [IEC60060-1, 2010] กำหนดไว้ว่าแรงดันอิมพัลส์สวิตชิง คือแรงดันอิมพัลส์ที่มีเวลาหน้าคลื่นเกิน 20 μs โดยพารามิเตอร์ทางเวลาที่ใช้กำหนดรูปคลื่นของแรงดันอิมพัลส์สวิตชิง คือ เวลาค่ายอด (time to peak, T_p) และเวลาหลังคลื่น T_2 ดังแสดงในรูปที่ 5.72



รูปที่ 5.72 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์สวิตชิง

เวลาหลังคลื่น T_2 หาได้ดังนี้

1. กำหนดให้ค่ายอดของแรงดันอิมพัลส์สวิตชิงเรียกว่า U_p มีค่าเท่ากับ 100%
2. กำหนดให้จุด O คือ ตำแหน่งที่แรงดันอิมพัลส์สวิตชิงเริ่มเพิ่มขึ้นจากศูนย์
3. กำหนดให้จุด C คือ ตำแหน่งที่แรงดันอิมพัลส์สวิตชิงผ่านค่ายอด U_p แล้วมีขนาดลดต่ำลดเหลือ 50% ของ U_p

4. เวลาหลังคลื่น T_2 จะมีค่าเท่ากับเวลาจากจุด O จนถึงเวลาที่จุด C ตัดผ่านแกนเวลา

ส่วนเวลาค่ายอด T_p หาได้ดังนี้

1. กำหนดให้จุด A และ B คือตำแหน่งที่แรงดันอิมพัลส์สวิตชิงมีค่าเท่ากับ 30% และ 90% ของ U_p ตามลำดับ ช่วงเวลาระหว่างจุด A และ B จะเรียกว่า T_{AB}
2. เวลา T_p หาได้จากสมการ

$$\begin{aligned} T_P &= K \cdot T_{AB} \\ K &= 2.42 - 3.08 \cdot 10^{-3} \cdot T_{AB} + 1.51 \cdot 10^{-4} \cdot T_2 \end{aligned} \tag{5.40}$$

เมื่อ T_{AB} และ T_2 มีหน่วยเป็น μs

แรงดันอิมพัลส์สวิตชิงรูปคลื่นมาตรฐานมีเวลา T_p = 250 μs และ T_2 = 2500 μs ซึ่งมักเขียนว่า 250/2500 μs มาตรฐานยอมให้เวลา T_p และ T_2 มีความคลาดเคลื่อนได้ ±20% และ ±60% ตามลำดับ ดังนั้นหากแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามี T_p อยู่ในช่วง 200-300 μs และ T_2 อยู่ในช่วง 1000-4000 μs ก็ถือว่าแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่านี้มีรูปคลื่นเป็นไปตามมาตรฐาน ส่วนค่ายอด U_p มาตรฐานยอมให้มีความคลาดเคลื่อนได้ ±3%

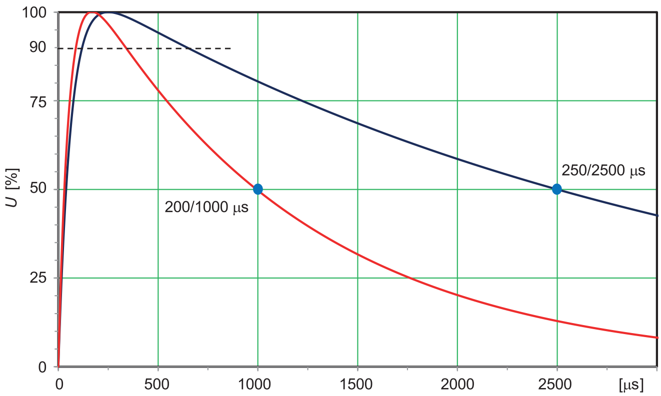
ตัวอย่างที่ 5.10 เมื่อวัด T_{AB} และ T_2 ได้ 100 μs และ 2500 μs ตามลำดับ เวลาที่ถึงค่ายอด T_p มีค่าเท่าใด?

$$\begin{aligned} K &= 2.42 - 3.08 \cdot 10^{-3} \cdot T_{AB} + 1.51 \cdot 10^{-4} \cdot T_2 \\ &= 2.42 - 3.08 \cdot 10^{-3} \cdot 100 + 1.51 \cdot 10^{-4} \cdot 2500 \\ &= 2.49 \end{aligned}$$

ดังนั้น

$$T_P = K \cdot T_{AB} = 2.49 \cdot 100 = 249 \ \ [\mu s]$$

อย่างไรก็ตาม เนื่องจากมาตรฐานยอมให้เวลา T_p/T_2 มีความคลาดเคลื่อนค่อนข้างมาก ดังแสดงในรูปที่ 5.73 ซึ่งเราจะเห็นว่าช่วงเวลาที่แรงดัน U มีค่าสูงกว่า 90% ของรูปคลื่น 250/2500 μs มากกว่ารูปคลื่น 200/1000 μs เกือบสองเท่า มาตรฐานการทดสอบอุปกรณ์บางฉบับจึงกำหนด ช่วงเวลาคงแรงดัน 90% (time above 90%, T_d) ซึ่งเป็นเวลาที่แรงดันอิมพัลส์สวิตชิงมีค่าเกิน 90% ของ U_p ไว้ด้วย เพื่อให้อุปกรณ์ทดสอบได้รับแรงดันอิมพัลส์สวิตชิงเป็นเวลานานตามที่ต้องการ



รูปที่ 5.73 แรงดันอิมพัลส์สวิตชิง 250/2500 μs และ 200/1000 μs

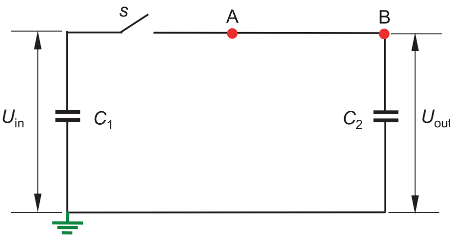
5.8.3 ข้อกำหนดของแรงดันอิมพัลส์ที่หน้างาน

สำหรับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า [IEC60060-3, 2006] ยอมให้ T_1 อยู่ในช่วง 0.8-20 μs และ T_2 อยู่ในช่วง 40-100 μs การแกว่งบริเวณหน้าคลื่นต้องมีขนาดไม่เกิน 5% ของค่ายอด U_p ความคลาดเคลื่อนของแรงดันทดสอบยอมให้มากขึ้นเป็น ±5%

ในกรณีของแรงดันอิมพัลส์สวิตชิง [IEC60060-3, 2006] ไม่มีข้อกำหนดเพิ่มเติม ดังนั้นจึงต้องใช้เกณฑ์ต่างๆ ที่กล่าวไว้ในข้อ 5.8.2

5.8.4 วิธีสร้างแรงดันแรงดันอิมพัลส์

การถ่ายเทประจุระหว่างตัวเก็บประจุ 2 ตัว ที่แสดงในรูปที่ 5.74 สามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้



รูปที่ 5.74 การถ่ายเทประจุระหว่างตัวเก็บประจุ 2 ตัว

ในตอนเริ่มต้นเราจะอัดประจุให้ C_1 ด้วยแรงดันกระแสตรงจน C_1 มีแรงดันเท่ากับ U_{in} ดังนั้นประจุ q ที่สะสมอยู่ใน C_1 มีค่าเท่ากับ C_1U_{in}

เมื่อเราปิดสวิตช์ s (ซึ่งมักใช้แกปทรงกลมสำหรับเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ขนาดใหญ่ ส่วนเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบเคลื่อนย้ายได้มักใช้ IGBT หรือ Thyristor) เพื่อให้ C_1 จ่ายประจุให้กับ C_2 ประจุ q จะมีค่าเท่าเดิมเพราะในวงจรไม่มีความต้านทาน ประจุ q จึงกระจายไปอยู่ในทั้ง C_1 และ C_2 แต่อย่างไรก็ตามแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุทั้งสองตัวต้องมีค่าเท่ากับ U_{out} เท่ากัน ดังนั้น

$$C_1 \cdot U_{in} = C_1 \cdot U_{out} + C_2 \cdot U_{out}$$

$$U_{out} = \frac{C_1}{C_1 + C_2} U_{in} = \frac{1}{1 + C_2/C_1} U_{in}$$

ยกตัวอย่างเช่น $C_2 = C_1$ แรงดัน U_{out} จะเท่ากับ $0.5 \cdot U_{in}$ หรือกล่าวได้ว่าแรงดัน U_{out} ที่ตกคร่อม C_2 หลังจากเราปิดสวิตช์ s จะลดลงเหลือเพียงครึ่งหนึ่งของแรงดัน U_{in} ที่เราอัดประจุให้ C_1

ตัวอย่างที่ 5.11 จงหา U_{out} ในกรณีที่ $C_2/C_1 = 0.1$ และ $C_2/C_1 = 10$

เมื่อ $C_2/C_1 = 0.1$

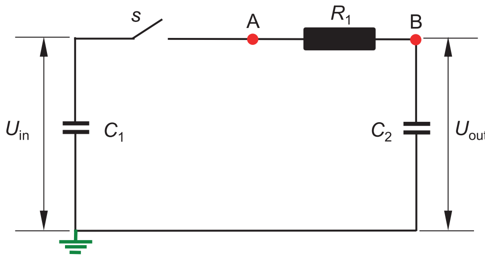
$$U_{out} = \frac{1}{1 + C_2/C_1} U_{in} = \frac{1}{1 + 0.1} U_{in} = 0.9 \cdot U_{in}$$

เมื่อ $C_2/C_1 = 10$

$$U_{out} = \frac{1}{1 + C_2/C_1} U_{in} = \frac{1}{1 + 10} U_{in} = 0.1 \cdot U_{in}$$

ซึ่งหมายความว่า ถ้าเราต้องการให้ U_{out} มีค่าใกล้เคียงกับ U_{in} เราต้องใช้ตัวเก็บประจุ C_1 ที่มีค่าความจุไฟฟ้ามากกว่าตัวเก็บประจุ C_2 มากๆ เช่น ถ้า C_2/C_1 = 0.1 อัตราส่วนแรงดัน U_{out}/U_{in} จะเท่ากับ 90%

การที่แรงดัน U_{out} ที่ตกคร่อม C_2 เพิ่มขึ้นทันทีทันใดเมื่อเราปิดสวิตช์ s ก็เพราะไม่มีตัวต้านทานในวงจร เราจึงสามารถทำให้แรงดัน U_{out} ที่ตกคร่อม C_2 เพิ่มขึ้นด้วยอัตราเร็วเท่าใดก็ได้โดยต่อ ตัวต้านทานปรับหน้าคลื่น (front resister, R_1) ต่ออนุกรมกับ C_2 ดังแสดงในรูปที่ 5.75



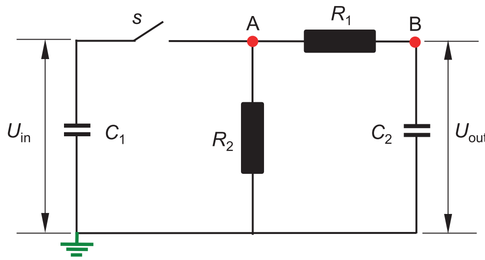
รูปที่ 5.75 การปรับเวลาหน้าคลื่นแรงดันอิมพัลส์ T_1 ด้วยการใช้ตัวต้านทาน R_1

ถ้าสมมุติให้ C_1 >> C_2 แรงดัน U_{out} ที่ตกคร่อม C_2 จะเพิ่มขึ้นแบบเลขชี้กำลังตามสมการ

$$U_{out} = \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_2}}\right) \cdot U_{in} \tag{5.41}$$

เมื่อค่าคงตัวเวลา $\tau_2 = R_1C_2$ และโปรดสังเกตว่าที่เวลา $t = 5\tau_2$ ค่า U_{out} จะประมาณ $0.99U_{in}$

แรงดัน U_{out} จะคงที่ตลอดไปเพราะที่จุด A และ B มีแรงดันเท่ากัน ทำให้ C_1 และ C_2 ไม่สามารถคายประจุได้ วิธีหนึ่งที่ทำให้ C_1 และ C_2 สามารถคายประจุได้คือต่อ ตัวต้านทานปรับหลังคลื่น (tail resister, R_2) ระหว่างจุด A กับกราวน์ ดังแสดงในรูปที่ 5.76 โดยในที่นี้จะสมมุติว่า R_2 >> R_1 ทำให้ R_2 ไม่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของแรงดัน U_{out} ที่ตกคร่อม C_2 ที่กล่าวมาแล้วข้างต้น



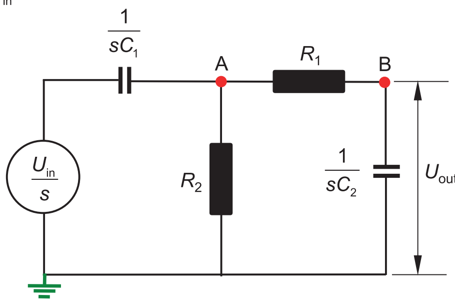
รูปที่ 5.76 การปรับเวลาหลังคลื่นแรงดันอิมพัลส์ T_2 ด้วยการใช้ตัวต้านทาน R_2

เนื่องจาก C_1 >> C_2 ดังนั้น C_2 จึงคายประจุผ่าน R_1+R_2 ทำให้แรงดันที่จุด A ลดลง ตัวเก็บประจุ C_1 จึงต้องคายประจุผ่าน R_2 เพื่อให้แรงดันที่จุด A มีค่าเท่ากัน แรงดัน U_{out} ที่จุด B จึงลดลงแบบเลขชี้กำลังตามสมการ

$$U_{out} = e^{-\frac{t}{\tau_1}} \cdot U_{in} \tag{5.42}$$

เมื่อ $\tau_1 = R_2C_1$ และโปรดสังเกตว่าที่เวลา $t = 0.7\tau_1$ ค่า U_{out} จะประมาณ $0.5U_{in}$

วิธีหาแรงดัน U_{out} เมื่อ R_1, R_2, C_1 และ C_2 ในรูปที่ 5.76 มีค่าใดๆ ทำโดยใช้ *การแปลงลาปลาส* (Laplace transform) ดังแสดงในรูปที่ 5.77 โดยการคายประจุของ C_1 ผ่านสวิตช์ s แทนด้วย แรงดันรูปขั้น (step voltage waveform) U_{in}/s



รูปที่ 5.77 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

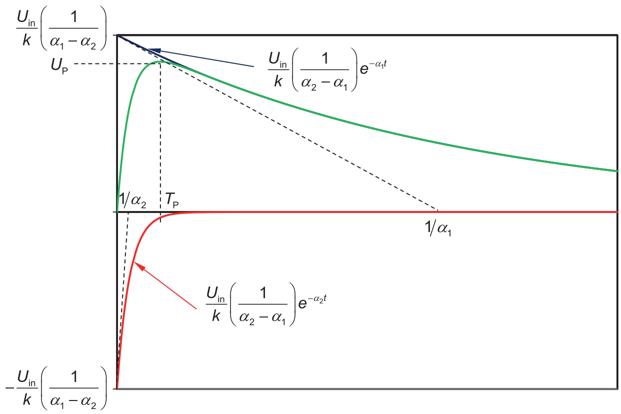
ผลการวิเคราะห์พบว่า

$$U_{out} = \frac{U_{in}}{k}\left(\frac{1}{\alpha_2-\alpha_1}\right)\left(e^{-\alpha_1 t}-e^{-\alpha_2 t}\right)$$

$$\alpha_1 = \frac{a}{2}-\sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2-b}\ ;\quad \alpha_2 = \frac{a}{2}+\sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2-b} \tag{5.43}$$

ซึ่งจะเห็นว่าแรงดันอิมพัลส์ประกอบไปด้วยคลื่นแบบเลขชี้กำลัง 2 รูป โดยที่ α_2 เป็นพารามิเตอร์ที่ปรับเวลาหน้าคลื่น ส่วน α_1 เป็นพารามิเตอร์ที่ปรับเวลาหลังคลื่น

แรงดันอิมพัลส์ที่สร้างขึ้นจากสมการที่ 5.43 ได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.78



รูปที่ 5.78 องค์ประกอบของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ตามสมการที่ 5.43

พารามิเตอร์ α_1 และ α_2 สำหรับแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นต่างๆ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.12 [Kuffel, 2000]

ตารางที่ 5.12 พารามิเตอร์ α_1 และ α_2 สำหรับแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นต่างๆ

T_1/T_2 [μs]	T_P/T_2 [μs]	α_1 [μs^{-1}]	α_2 [μs^{-1}]
1.2/5	-	1/3.48	1/0.8
1.2/50	-	1/68.2	1/0.405
1.2/200	-	1/284	1/0.381
-	250/2500	1/3155	1/62.5

และค่า R_1 และ R_2 สามารถหาได้จากการสมการ

$$R_1 = \frac{1}{2C_2}\left[\left(\frac{1}{\alpha_1}+\frac{1}{\alpha_2}\right)-\sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_1}+\frac{1}{\alpha_2}\right)^2-\frac{4(C_1+C_2)}{\alpha_1\alpha_2 C_1}}\right]$$
$$R_2 = \frac{1}{2(C_1+C_2)}\left[\left(\frac{1}{\alpha_1}+\frac{1}{\alpha_2}\right)+\sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_1}+\frac{1}{\alpha_2}\right)^2-\frac{4(C_1+C_2)}{\alpha_1\alpha_2 C_1}}\right] \tag{5.44}$$

5.8.4.1 ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์มีนิยามเป็น

$$\eta = \frac{U_p}{U_{in}}\cdot 100 \ \ [\%]$$

เมื่อ U_p คือค่าสูงสุดของแรงดันอิมพัลส์ U_{out} โดยเวลา T_p ที่เกิดแรงดัน U_p สามารถหาได้ดังนี้

$$\frac{dU_{out}}{dt} = \frac{d}{dt}\left[\frac{U_{in}}{k}\frac{1}{(\alpha_2-\alpha_1)}\left(e^{-\alpha_1 t}-e^{-\alpha_2 t}\right)\right]=0$$
$$= -\alpha_1 e^{-\alpha_1 t}+\alpha_2 e^{-\alpha_2 t}$$
$$\frac{\alpha_2}{\alpha_1} = e^{(\alpha_2-\alpha_1)t} \Rightarrow t = T_P = \frac{\ln(\alpha_2/\alpha_1)}{(\alpha_2-\alpha_1)}$$

ตัวอย่าง 5.12 จงหา T_p ของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า 1.2/50 μs

$$T_P = \frac{\ln(\alpha_2/\alpha_1)}{(\alpha_2-\alpha_1)} = \frac{\ln\left(\frac{1}{0.405\cdot 10^{-6}}\Big/\frac{1}{68.2\cdot 10^{-6}}\right)}{\left(\frac{1}{0.405\cdot 10^{-6}}-\frac{1}{68.2\cdot 10^{-6}}\right)} = 2.09 \sim 2 \ \ [\mu s]$$

เมื่อแทนค่า T_p ในสมการที่ 5.43 เราจะพบว่า

$$\eta = \frac{U_P}{U_{in}} = \frac{1}{k}\left(\frac{1}{\alpha_2-\alpha_1}\right)\left(e^{-\alpha_1 T_P}-e^{-\alpha_2 T_P}\right)$$
$$= \frac{1}{k}\left(\frac{1}{\alpha_2-\alpha_1}\right)\left(e^{-\alpha_1\frac{\ln(\alpha_2/\alpha_1)}{(\alpha_2-\alpha_1)}}-e^{-\alpha_2\frac{\ln(\alpha_2/\alpha_1)}{(\alpha_2-\alpha_1)}}\right)$$
$$= \frac{1}{k(\alpha_2-\alpha_1)}\left((\alpha_2/\alpha_1)^{-\frac{\alpha_1}{(\alpha_2-\alpha_1)}}-(\alpha_2/\alpha_1)^{-\frac{\alpha_2}{(\alpha_2-\alpha_1)}}\right)$$

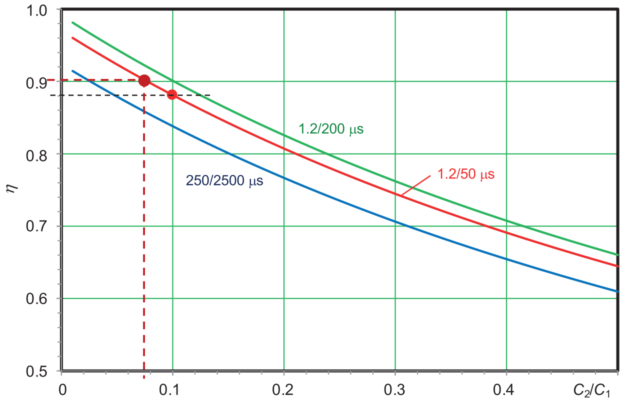
โดยที่ k มีค่าเท่ากับ

$$k = \frac{1}{2}\left(\frac{\alpha_2+\alpha_1}{\alpha_2\alpha_1}\right)\left[1-\sqrt{1-4\frac{\alpha_2\alpha_1}{(\alpha_2+\alpha_1)^2}\left(1+\frac{C_2}{C_1}\right)}\right]$$

ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์จึงหาได้จาก

$$\eta = \frac{1}{\frac{1}{2}\left(\frac{\alpha_2+\alpha_1}{\alpha_2\alpha_1}\right)\left[1-\sqrt{1-4\frac{\alpha_2\alpha_1}{(\alpha_2+\alpha_1)^2}\left(1+\frac{C_2}{C_1}\right)}\right](\alpha_2-\alpha_1)}\left((\alpha_2/\alpha_1)^{-\frac{\alpha_1}{(\alpha_2-\alpha_1)}}-(\alpha_2/\alpha_1)^{-\frac{\alpha_2}{(\alpha_2-\alpha_1)}}\right) \tag{5.45}$$

ซึ่งเราจะเห็นว่าประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่มีพารามิเตอร์ α_1 และ α_2 ดังแสดงในตารางที่ 5.12 จะขึ้นกับอัตราส่วน C_2/C_1 ดังแสดงในรูปที่ 5.79



รูปที่ 5.79 ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ (1 = 100%)

ในกรณีที่ $\alpha_2 >> \alpha_1$ และ $C_2/C_1 << 1$ ประสิทธิภาพโดยประมาณของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์สามารถหาได้จากสมการ

$$\eta = \frac{U_P}{U_{in}} = \frac{1}{1+C_2/C_1} \tag{5.46}$$

ซึ่งเป็นสมการเดียวกันกับการถ่ายเทประจุระหว่าง C_2 กับ C_1 ในกรณีที่ไม่มีตัวต้านทาน R_1 และ R_2 ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

5.8.4.2 การออกแบบเบื้องต้น

เราทราบว่าถ้า $C_1 >> C_2$ แรงดัน U_{out} จะมีค่าประมาณ 99% ของ U_p ที่เวลาประมาณ $t = 5 \cdot R_1C_2$ ซึ่งในกรณีของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า 1.2/50 μs เกิดที่ 2 μs และแรงดัน U_{out} จะมีค่าประมาณ 50% ของ U_p ที่เวลาประมาณ $t = 0.7 \cdot R_2C_1$ ซึ่งในกรณีของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า 1.2/50 μs เกิดที่ 50 μs ดังนั้นการคำนวณแบบหยาบๆ ในขั้นต้นจึงสามารถทำได้ดังนี้

ตัวอย่างที่ 5.13 จงออกแบบเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า 1.2/50 μs ที่มีประสิทธิภาพ 90% เพื่อใช้ทดสอบสายเคเบิลที่มีความจุไฟฟ้า C_2 = 1 nF

จากรูปที่ 5.79 ถ้าต้องการประสิทธิภาพ 90% $C_2/C_1 \sim 0.08$ หรือ $C_1 = 12.5\ C_2$ = 12.5 nF ดังนั้น

$$2 \cdot 10^{-6} = 5R_1C_2 \Rightarrow R_1 = \frac{2 \cdot 10^{-6}}{5 \cdot 1 \cdot 10^{-9}} = 400 \quad [\Omega]$$

$$50 \cdot 10^{-6} = 0.7 \cdot R_2C_1 \Rightarrow R_2 = \frac{50 \cdot 10^{-6}}{0.7 \cdot 12.5 \cdot 10^{-9}} = 5.7 \quad [k\Omega]$$

ส่วนการออกแบบเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ขั้นต้นโดยทั่วไป ทำได้ดังนี้

1. ระบุโหลดของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ C_2 ซึ่งประกอบไปด้วยความจุไฟฟ้าของ EUT C_{EUT}, ตัวเก็บประจุแฝง C_{stray} และ โวลเตจดิไวเดอร์ $C_{divider}$

$$C_2 = C_{load} + C_{stray} + C_{divider}$$

2. กำหนดประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ต้องการ เช่น ถ้าต้องการสร้างรูปคลื่น 1.2/50 μs โดยเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์มีประสิทธิภาพ 88% จากรูปที่ 5.79 เราจะพบว่า C_2/C_1 = 0.1 หรือ C_1 = 10C_2
3. จากค่า α_1 และ α_2 ในตารางที่ 5.12 เราสามารถคำนวณค่า R_1 และ R_2 จากสมการที่ 5.44

ตัวอย่าง 5.14 จงออกแบบเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า 1.2/50 μs ที่มีประสิทธิภาพ 90% เพื่อทดสอบสายเคเบิลที่มีความจุไฟฟ้า C_2 = 1 nF

จากรูปที่ 5.79 ถ้าต้องการประสิทธิภาพ 90% C_2/C_1 ~ 0.08 หรือ C_1 = 12.5C_2 = 12.5 nF และจากตารางที่ 5.12 α_1 และ α_2 มีค่า 1/68.2 μs^{-1} และ 1/0.405 μs^{-1} ตามลำดับ ดังนั้นจากสมการที่ 5.44

$$R_1 = \frac{1}{2C_2}\left[\left(\frac{1}{\alpha_1}+\frac{1}{\alpha_2}\right) - \sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_1}+\frac{1}{\alpha_2}\right)^2 - \frac{4(C_1+C_2)}{\alpha_1\alpha_2C_1}}\right]$$

$$R_1C_2 = \frac{1}{2}\left[\left(68.2\cdot10^{-6}+0.405\cdot10^{-6}\right) - \sqrt{\left(68.2\cdot10^{-6}+0.405\cdot10^{-6}\right)^2 - 68.2\cdot10^{-6}\cdot0.405\cdot10^{-6}\cdot4(1+0.08)}\right]$$

$$= 4.38\cdot10^{-7}$$

$$R_1 = \frac{4.38\cdot10^{-7}}{C_2} = \frac{4.38\cdot10^{-7}}{1\cdot10^{-9}} = 438 \;\; [\Omega]$$

$$R_2 = \frac{1}{2(C_1+C_2)}\left[\left(\frac{1}{\alpha_1}+\frac{1}{\alpha_2}\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_1}+\frac{1}{\alpha_2}\right)^2 - \frac{4(C_1+C_2)}{\alpha_1\alpha_2C_1}}\right]$$

$$R_2C_1 = \frac{1}{2\cdot1.08}\left[\begin{array}{l}\left(68.2\cdot10^{-6}+0.405\cdot10^{-6}\right)\\ +\sqrt{\left(68.2\cdot10^{-6}+0.405\cdot10^{-6}\right)^2 - 68.2\cdot10^{-6}\cdot0.405\cdot10^{-6}\cdot4(1+0.08)}\end{array}\right]$$

$$= 5.81\cdot10^{-5}$$

$$R_2 = \frac{5.81\cdot10^{-5}}{C_1} = \frac{5.81\cdot10^{-5}}{12.5\cdot10^{-9}} = 4.65 \;\; [k\Omega]$$

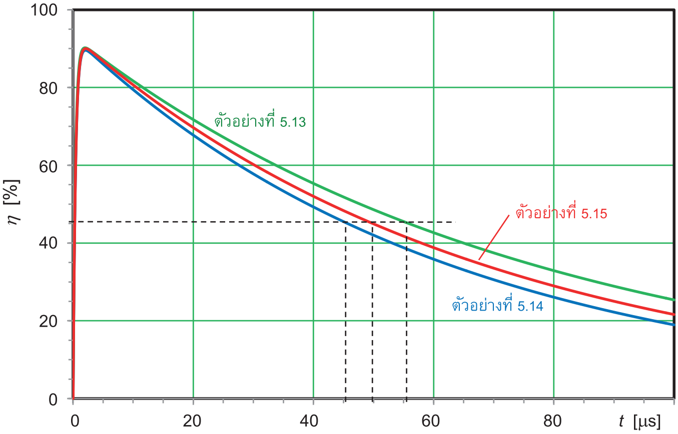
ตัวอย่าง 5.15 จงออกแบบเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า 1.2/50 μs ที่มีประสิทธิภาพ 90% เพื่อทดสอบสายเคเบิลที่มีความจุไฟฟ้า C_2 = 1 nF

จากตารางที่ 5.12 α_1 และ α_2 มีค่า 1/68.2 μs^{-1} และ 1/0.405 μs^{-1} ตามลำดับ และจากสมการที่ 5.45 ถ้าต้องการประสิทธิภาพ 90% C_2/C_1 = 0.077 หรือ C_1 = 13C_2 = 13 nF ดังนั้นจากสมการที่ 5.44

$$R_1C_2 = 4.39\cdot10^{-7} \Rightarrow R_1 = \frac{4.39\cdot10^{-7}}{C_2} = \frac{4.39\cdot10^{-7}}{1\cdot10^{-9}} = 439 \;\; [\Omega]$$

$$R_2C_1 = 6.33\cdot10^{-5} \Rightarrow R_2 = \frac{6.33\cdot10^{-5}}{C_2} = \frac{6.33\cdot10^{-5}}{13\cdot10^{-9}} = 4.88 \;\; [k\Omega]$$

รูปคลื่นที่ได้จากการจำลองแบบ [Pspice, 2016] เมื่อใช้ค่า C_1, C_2, R_1 และ R_2 ที่คำนวณได้จากตัวอย่างที่ 5.13-5.15 แสดงไว้ในรูปที่ 5.80 ส่วนเวลาหน้าคลื่นและหลังคลื่น T_1/T_2 ที่วัดได้จากรูปที่ 5.80 มีค่าดังแสดงในตารางที่ 5.13



รูปที่ 5.80 รูปคลื่นที่ได้จากการจำลองแบบที่คำนวณได้จากตัวอย่างที่ 5.13-5.15

ตารางที่ 5.13 พารามิเตอร์ T_1/T_2 ที่วัดได้จากรูปที่ 5.80

ตัวอย่างที่	T_1 [μs]	T_2 [μs]
5.13	1.11	56
5.14	1.20	46
5.15	1.21	50

จากรูปที่ 5.80 และตารางที่ 5.13 เราจะเห็นว่าการคำนวณที่แสดงในตัวอย่างที่ 5.13-5.15

1. ให้ค่าประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ประมาณ 90% เท่ากัน
2. เวลาหน้าคลื่น T_1 อยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนดคือ 0.84 μs $\leq T_1 \leq$ 1.56 μs และมีค่าแตกต่างจาก 1.2 μs ไม่มากนัก ดังนั้นการคำนวณเวลาหน้าคลื่น T_1 จึงใช้การคำนวณแบบหยาบๆ ได้ถ้า $C_1 >> C_2$
3. เวลาหลังคลื่น T_2 อยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนดคือ 40 μs $\leq T_2 \leq$ 60 μs แต่มีข้อสังเกตที่สำคัญคือค่า C_1 มีผลต่อ T_2 ค่อนข้างมาก ค่า C_1 ในตัวอย่างที่ 5.13 และ 5.14 มีค่าเท่ากัน แต่ในตัวอย่างที่ 5.13 ที่ใช้สมการอย่างง่าย ค่า T_2 มีค่ามากเกินไป ส่วนในตัวอย่างที่ 5.14 ก็ทำให้ T_2 มีค่าน้อยเกินไป ดังนั้นการหาค่า C_1 จึงควรใช้วิธีที่แสดงในตัวอย่างที่ 5.15 อย่างไรก็ตามค่า C_1 ที่มีขายตามท้องตลาดมีค่าให้เลือกไม่มากนัก

5.8.5 วิธีทดสอบ

การทดสอบเฉพาะแบบหัวข้อความทนแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าหรือสวิตชิงของสายเคเบิลจะกล่าวถึงในหัวข้อที่ 5.10.2 ส่วนการทดสอบความทนแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าหรือสวิตชิงของ EUT อื่นๆ มักใช้ วิธีการทดสอบ B (test procedure B) และ วิธีการทดสอบ C (test procedure C) ที่กำหนดไว้ใน [IEC60060-1, 2010]

5.8.5.1 วิธีทดสอบ B

วิธีทดสอบ B (15/2) มักใช้ในการทดสอบ EUT ที่ใช้ฉนวนซึ่งอาจเสื่อมสภาพได้เมื่อรับแรงดันสูงหรือฉนวนที่คืนสภาพเองได้ โดยป้อนแรงดันอิมพัลส์ U_t ที่มีรูปคลื่น, ขั้ว และค่ายอด ตามที่มาตรฐานผลิตภัณฑ์ระบุให้กับ EUT จำนวน 15 ครั้ง

EUT จะผ่านการทดสอบเมื่อ

1. เกิดเบรกดาวน์ในฉนวนที่คืนสภาพเองได้ ไม่เกิน 2 ครั้ง และ
2. ไม่มีข้อบ่งชี้ว่า EUT เสียสภาพหลังการทดสอบ โดยใช้วิธีตรวจสอบที่มาตรฐานผลิตภัณฑ์กำหนด (หากไม่ระบุไว้อาจถือว่า EUT ไม่เสียสภาพหากการป้อน U_t 3 ครั้งสุดท้ายไม่ทำให้เกิดการเบรกดาวน์ที่ EUT

หากการป้อน U_t 3 ครั้งสุดท้ายทำให้เกิดเบรกดาวน์ในฉนวนที่คืนสภาพเองได้ของ EUT ให้ป้อน U_t เพิ่มอีก 3 ครั้ง และจะถือว่า EUT ผ่านการทดสอบหากไม่เกิดเบรกดาวน์ขึ้นในการป้อน U_t ที่เพิ่มอีก 3 ครั้งนี้

5.8.5.2 วิธีทดสอบ C

วิธีทดสอบ C (3+9) มักใช้ในการทดสอบ EUT ที่ใช้ฉนวนแบบผสม โดยป้อนแรงดันอิมพัลส์ U_t ที่มีรูปคลื่น, ขั้ว และค่ายอด ตามที่มาตรฐานผลิตภัณฑ์ระบุ ให้กับ EUT จำนวน 3 ครั้ง

EUT จะผ่านการทดสอบเมื่อ

1. ไม่เกิดเบรกดาวน์เมื่อป้อนแรงดัน U_t ทั้ง 3 ครั้ง หรือ
2. ถ้าเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนที่คืนสภาพเองได้ของ EUT 1 ครั้ง ให้ป้อน U_t เพิ่มอีก 9 ครั้ง และถือว่า EUT ผ่านการทดสอบ หากไม่เกิดเบรกดาวน์ขึ้นในการป้อน U_t ที่เพิ่มอีก 9 ครั้งนี้ นอกจากนั้นต้องไม่มีข้อบ่งชี้ว่า EUT เสียสภาพหลังการทดสอบ โดยใช้วิธีตรวจสอบที่มาตรฐานผลิตภัณฑ์กำหนด

5.9 แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นแกว่ง

5.9.1 ข้อกำหนดของแรงดันทดสอบ

แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นแกว่ง (oscillating impulse voltage) หมายถึงแรงดันอิมพัลส์ที่มีการแกว่งแบบหน่วงที่หลังคลื่น ในกรณีของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า ความถี่ของการแกว่งต้องอยู่ในช่วง 15-400 kHz และแรงดันต้องไม่มีการเปลี่ยนขั้ว ส่วนในกรณีแรงดันอิมพัลส์สวิตชิงนั้น ความถี่ของการแกว่งต้องอยู่ในช่วง 1-15 kHz แต่แรงดันอาจมีการเปลี่ยนขั้วได้

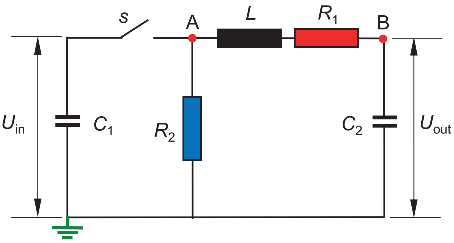
ค่ายอดแรงดันและเวลาหน้าคลื่น T_1 หรือ T_p จะหาเหมือนกับแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มทุกประการแต่เวลาหลังคลื่น T_2 จะหาจากเส้นที่ลากผ่านค่ายอดของการแกว่ง

ข้อดีของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นแกว่งเมื่อเทียบกับแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มคือ ในกรณีที่เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์มีขนาดเดียวกัน (พิกัดของ C_1 เท่ากัน) ค่ายอดของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นแกว่งจะสูงกว่าค่ายอดของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มประมาณ 2 เท่า

ในทางกลับกันหากต้องการค่ายอดเท่ากัน เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นแกว่งจะมีขนาดเล็กกว่าเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็ม

5.9.2 วิธีสร้างแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นแกว่ง

วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นแกว่งจะเหมือนกับวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็ม ยกเว้นเราจะต่อตัวเหนี่ยวนำ L อนุกรมกับ R_1 ดังแสดงในรูปที่ 5.81



รูปที่ 5.81 วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นแกว่ง

ค่า L ที่ต้องการเพื่อให้รูปคลื่นเกิดการแกว่งที่ความถี่ f_0 สามารถประมาณได้จากสมการ

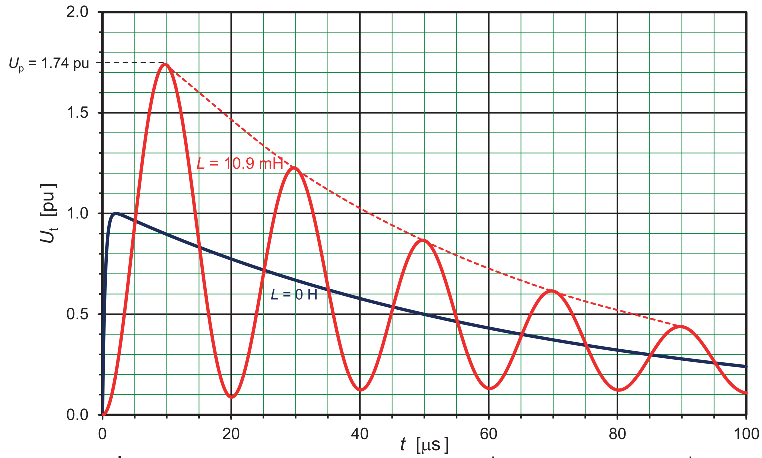
$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{1}{\sqrt{L\dfrac{C_1C_2}{C_1+C_2}}} \quad \Rightarrow \quad L = \frac{1}{(2\pi f_0)^2}\frac{C_1+C_2}{C_1C_2} \tag{5.47}$$

ตัวอย่าง 5.16 จงออกจากตัวอย่างที่ 5.15 จงคำนวณค่า L เพื่อทำให้แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า 1.2/50 μs แกว่งที่ความถี่ f_0 = 50 kHz

จากตัวอย่างที่ 5.15 พบว่า C_1 = 13 nF, C_2 = 1 nF, R_1 = 439 Ω และ R_2 = 4.88 kΩ ดังนั้นจากสมการที่ 5.47

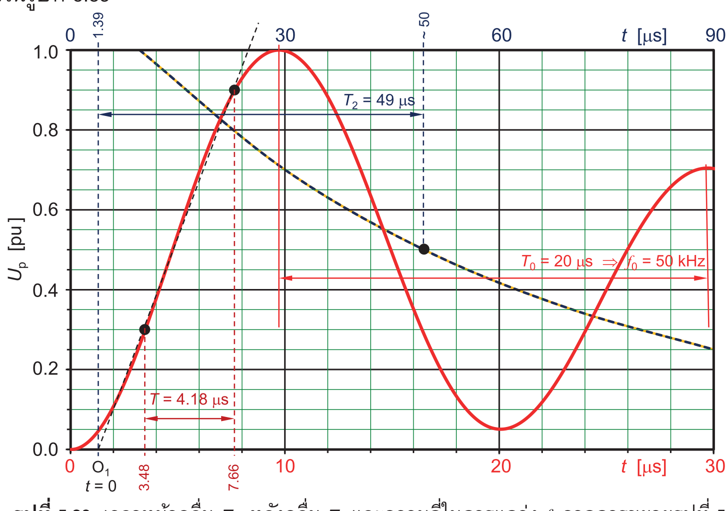
$$L = \frac{1}{(2\pi f_0)^2}\frac{C_1+C_2}{C_1C_2} = \frac{1}{(2\pi \times 50\cdot 10^3)^2}\frac{13\cdot 10^{-9}+1\cdot 10^{-9}}{13\cdot 10^{-9}\times 1\cdot 10^{-9}} = 10.9 \ \ [\text{mH}]$$

ผลการจำลองแบบด้วย [Pspice, 2016] แสดงไว้ในรูปที่ 5.82



รูปที่ 5.82 ผลการจำลองแบบด้วยการใช้ค่าต่าง ๆ ที่คำนวณได้จากตัวอย่างที่ 5.16

เวลาหน้าคลื่น T_1 และหลังคลื่น T_2 รวมทั้งความถี่ในการแกว่ง f_0 ต้องวัดจากรูป 5.82 ที่ขยายดังที่แสดงในรูปที่ 5.83



รูปที่ 5.83 เวลาหน้าคลื่น T_1, หลังคลื่น T_2 และความถี่ในการแกว่ง f_0 จากการขยายรูปที่ 5.82

การวัดเวลาหน้าคลื่น T_1 จะเหมือนกับที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 5.8.1 คือ ให้ลากเส้นตรงผ่านจุด $0.3U_p$ และ $0.9U_p$ จุดที่เส้นตรงนี้ตัดแกนเวลา O_1 จะเป็นจุดเริ่มต้นเสมือน ดังนั้นการวัดค่าเวลาต่าง ๆ จะอ้างอิงจากจุด O_1 นี้ -t = 0-

จากรูปที่ 5.83 จะพบว่า

1. ความถี่ในการแกว่งของแรงดันอิมพัลส์ f_0 = 50 kHz ตามที่ออกแบบไว้
2. เวลาหน้าคลื่น $T_1 = 0.67T = 6.97$ μs อยู่ในเกณฑ์ 0.8-20 μs ตามที่มาตรฐานกำหนด
3. เวลาหลังคลื่น T_2 ซึ่งวัดจากเส้นที่ลากผ่านค่ายอดของการแกว่ง (ในรูปที่ 5.83 ใช้สเกลเวลาเป็น 3 เท่าของการวัดเวลา T_1) มีค่าประมาณ 50 μs ก็อยู่ในเกณฑ์ 40-100 μs ตามที่มาตรฐานกำหนด

5.9.3 วิธีทดสอบ

ดูข้อ 5.8.5

5.10 การทดสอบเฉพาะแบบของสายเคเบิล

การทดสอบสายเคเบิลแบ่งออกเป็นการทดสอบประจำ, การทดสอบเพื่อควบคุมคุณภาพ, การทดสอบเฉพาะแบบ และการทดสอบเพื่อตรวจรับงาน ซึ่งมีทั้งการทดสอบทางไฟฟ้า, ทางกล และความร้อน โดยในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงหัวข้อการทดสอบเฉพาะแบบทางไฟฟ้า ของสายเคเบิลตามมาตรฐาน [IEC60502-2, 2014], [IEC60840, 2020] และ [IEC62067, 2011] และการทดสอบบางหัวข้อที่สำคัญเท่านั้น (ในหัวข้อนี้จะไม่กล่าวถึงการทดสอบเพื่อควบคุมคุณภาพ) ดังแสดงในตารางที่ 5.14

ตารางที่ 5.14 หัวข้อการทดสอบทางไฟฟ้าของสายเคเบิลตาม IEC

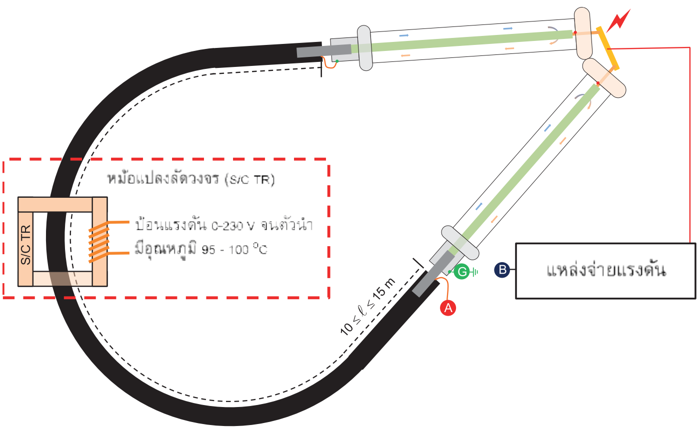
หัวข้อทดสอบ	มาตรฐาน IEC		
	60502-2	60840	62067
E1 ความต้านทานของตัวนำ	R	-	-
E2 การวัดดีสชาร์จบางส่วน	R,T	R,T	R,T
E3 การทดสอบความทนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ	R,T	R	R
E4 การวัดค่า Tg δ	T	-	T
E5 การทดสอบความทนแรงดันอิมพัลส์สวิตซิง	-	-	T
E6 การทดสอบความทนแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า	T	T	T
E7 การทดสอบความทนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 4 Hr	T	-	-
E8 การทดสอบความทนแรงดันไฟฟ้าของฉนวนระหว่างส่วนโลหะ	R,A	R,A	R,A
E9 การทดสอบความทนแรงดันไฟฟ้าของฉนวน (AC หรือ DC)	A	A	A
M1 การทดสอบการดัด	T	T	T
T1 การทดสอบวัฏจักรความร้อน	T	T	T
G1 การทดสอบการป้องกันน้ำซึม	T	T	T
T = การทดสอบเฉพาะแบบ ตัวอย่างสายเคเบิลที่ใช้ในการทดสอบต้องมีความยาว 10-15 m ไม่รวมหัวสายเคเบิล, A = การทดสอบเพื่อตรวจรับ, R = การทดสอบประจำ			

สายเคเบิลที่ผลิตจากโรงงานจะส่งไปยังหน้างานเพื่อทำการติดตั้งเป็นล้อ ดังนั้นสายเคเบิลจึงโค้งไปบนล้อสายไฟในทิศทางเดียว แต่เส้นทางการฝังสายเคเบิลในดินอาจโค้งไปโค้งมาซึ่งอาจมีทิศตรงข้ามกับที่สายเคเบิลพันมาบนล้อสายไฟ สายเคเบิลจึงถูกดัดไปดัดมา (มาตรฐานให้ทดสอบข้อ M1) จนอาจทำให้เกิดช่องว่างระหว่างสกรีนตัวนำกับฉนวนหรือฉนวนกับสกรีนฉนวน (มาตรฐานให้ทดสอบข้อ E2) เมื่อ

เราใช้สายเคเบิลจ่ายกำลังไฟฟ้าก็จะเกิดกำลังสูญเสียขึ้นทั้งในตัวนำและในเนื้อฉนวน มาตรฐานจึงให้วัดค่า Tg δ (การทดสอบข้อ E4 โดยมาตรฐานอนุญาตให้ทดสอบกับเคเบิลเส้นอื่นได้)

การใช้กำลังไฟฟ้าโดยทั่วไปจะมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ทำให้มีกระแสไหลผ่านตัวนำของสายเคเบิลมากบ้างน้อยบ้างสลับกันไป จึงทำให้อุณหภูมิของสายเคเบิลเปลี่ยนแปลงไปมา (มาตรฐานให้ทำการทดสอบข้อ T1) วัสดุต่างๆ ของสายเคเบิลก็ยืด/หดไปมาเช่นกัน แต่สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิของวัสดุต่างๆ ไม่เท่ากันจึงอาจเกิดช่องว่างระหว่างสกรีนตัวนำกับฉนวนหรือฉนวนกับสกรีนฉนวน (มาตรฐานให้ทดสอบข้อ E2) นอกจากนั้นแม้ว่าเคเบิลจะไม่ถูกฟ้าผ่าโดยตรงเพราะฝังอยู่ใต้ดิน แต่เคเบิลก็ได้รับแรงดันเกินอิมพัลส์ฟ้าผ่าเป็นบางครั้ง (มาตรฐานให้ทดสอบข้อ E5) เพราะสายเคเบิลต่ออยู่กับสายส่งไฟฟ้าเหนือพื้นดิน เมื่อมีฟ้าผ่าลงบนสายส่งไฟฟ้าเหนือพื้นดินจะมีแรงดันเกินวิ่งเข้ามาในสายเคเบิล หลังจากแรงดันเกินผ่านไปสายเคเบิลต้องยังใช้งานได้ตามปกติไม่เกิดความเสียหาย (มาตรฐานให้ทดสอบข้อ E6)

การทดสอบเฉพาะแบบของสายเคเบิลทุกหัวข้อ จึงทำกับตัวอย่างสายเคเบิลที่มีความยาว 10-15 m เพียงเส้นเดียว (ไม่รวมความยาวหัวสายเคเบิล ทั้งนี้เพราะถ้าสายเคเบิลยาวน้อยไปอาจตรวจสอบไม่พบสิ่งบกพร่องขณะทำการทดสอบและถ้าสายเคเบิลมีเส้นผ่านศูนย์กลางโตก็จะทำการทดสอบ M1 ได้ยากมาก ส่วนถ้าสายเคเบิลยาวกว่านี้จะมีความจุไฟฟ้าสูงมาก ห้องทดลองไฟฟ้าแรงสูงทั่วไปอาจไม่มีหม้อแปลงทดสอบที่มีขนาดใหญ่พอที่จะทดสอบได้ และในการทดสอบความทนแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าก็อาจปรับเวลาหน้าคลื่น T_1 ของแรงดันอิมพัลส์ไม่ได้ ทั้งที่มาตรฐานยอมให้เวลา T_1 ยาวได้ถึง 5 μs) และทำเป็นลำดับเพื่อจำลองการใช้งานปกติของสายเคเบิล ดังนี้ M1, E2, E4, T1, E5 และ E6 โดยมักใช้หัวสายเคเบิลสำเร็จรูปสำหรับสายเคเบิลในระบบจำหน่าย และหัวสายเคเบิลแบบน้ำความต้านทานสูงสำหรับสายเคเบิลในระบบส่ง แล้วต่อถึงกันดังแสดงในรูปที่ 5.84



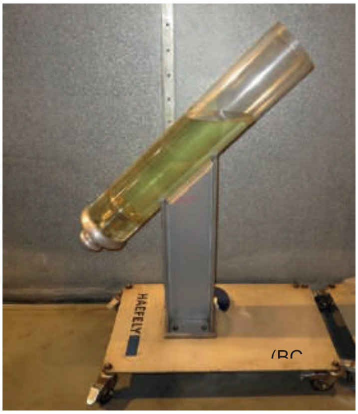
รูปที่ 5.84 ตัวอย่างสายเคเบิลที่ใช้ในการทดสอบเฉพาะแบบ

สำหรับการทดสอบประจำจะใช้วิธีการทดสอบคล้ายกับการทดสอบเฉพาะแบบ เพียงแต่ทดสอบกับสายเคเบิลทั้งล้อ และเพื่อความรวดเร็วและประหยัดจะใช้หัวสายแบบทาด้วยสารกึ่งตัวนำและแบบน้ำมันเสมอ ถ้าทำได้

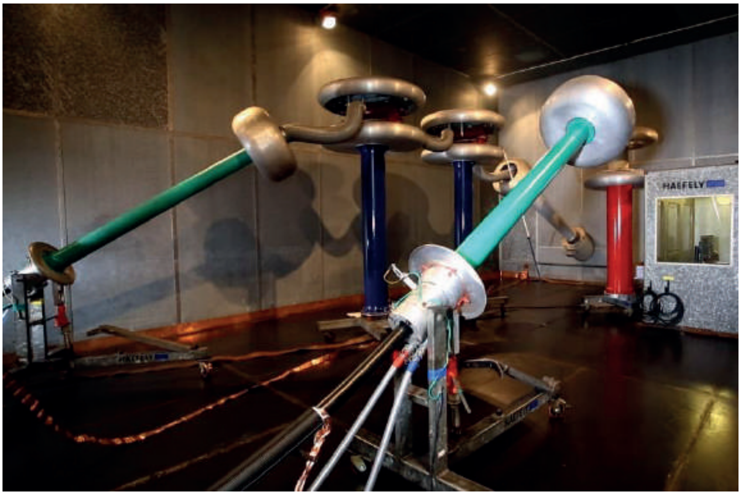
5.10.1 การเตรียมหัวสายเคเบิล

ในการทดสอบประจำและการทดสอบเฉพาะแบบ ผู้ผลิตหรือห้องทดลองไฟฟ้าแรงสูงจะใช้หัวสายเคเบิลแบบพิเศษดังแสดงในรูปที่ 5.85 เพราะแรงดันทดสอบมีค่าสูงกว่าแรงดันใช้งานปกติของเคเบิลมาก นอกจากนั้นต้องการความรวดเร็วการทดสอบด้วย

ก) หัวสายเคเบิลแบบทาด้วยสารกึ่งตัวนำ



ข) หัวสายเคเบิลแบบน้ำมัน

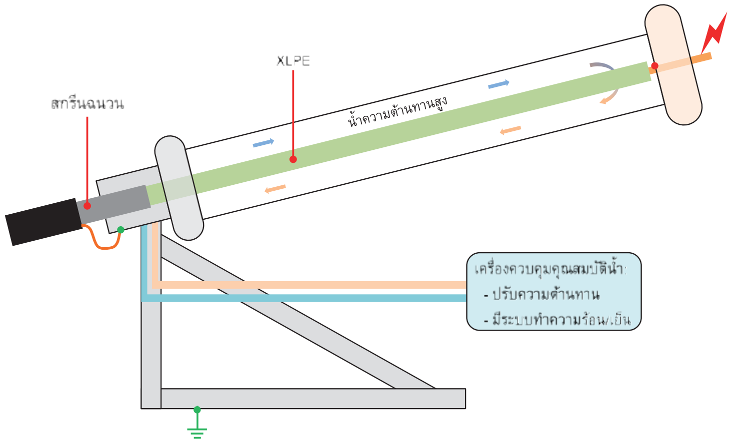


ค) หัวสายเคเบิลแบบน้ำความต้านทานสูง

รูปที่ 5.85 หัวสายเคเบิลที่ใช้ในการทดสอบเฉพาะแบบหรือการทดสอบประจำ

หัวข้อทดสอบสายเคเบิลที่ต้องระมัดระวังที่สุดคือการวัดดีสชาร์จบางส่วน ในการทดสอบต้องไม่เกิดดีสชาร์จบางส่วนในวงจรทดสอบและที่หัวสายเคเบิลเพราะเราต้องการวัดดีสชาร์จบางส่วนที่เกิดจากสายเคเบิลที่ระดับแรงดัน 1.5-2U_0 หัวสายเคเบิลแบบทาสารกึ่งตัวนำและแบบน้ำมันจึงใช้กับการทดสอบสายเคเบิลในระบบจำหน่ายเท่านั้นเพราะหัวสายแบบนี้ทนแรงดันได้ไม่เกิน 100 kV

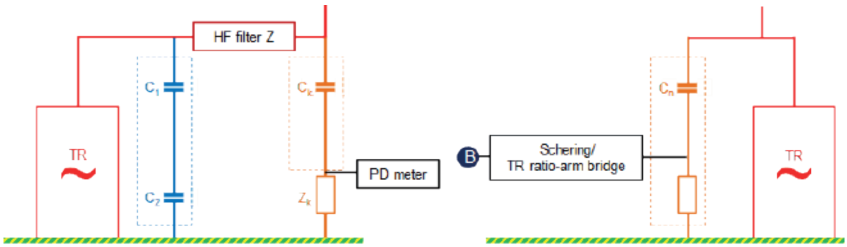
หัวสายที่ใช้กับเคเบิลในระบบส่งจะเป็นแบบน้ำความต้านทานสูงเสมอ โดยมีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 5.86 นอกจากนั้นยังต้องมีเครื่องควบคุมคุณสมบัติของน้ำอีกด้วยเพื่อทำหน้าที่ทำน้ำในท่อให้มีความต้านทานสูงตามที่ต้องการและอาจมีการหมุนเวียนน้ำอุ่นในท่อเพื่อไม่ให้สายเคเบิลระบายความร้อนออกไปมากนักในระหว่างทำการทดสอบ



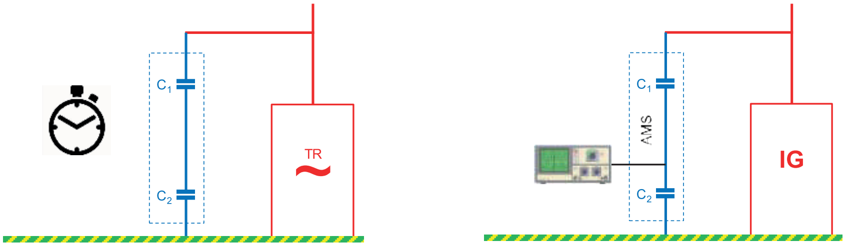
รูปที่ 5.86 โครงสร้างหัวสายเคเบิลแบบน้ำความต้านทานสูงและเครื่องควบคุมคุณสมบัติของน้ำ

5.10.2 แหล่งจ่ายแรงดันในการทดสอบ

ลักษณะของการต่อแหล่งจ่ายแรงดันเข้ากับสายเคเบิลในทดสอบ แสดงไว้ในรูปที่ 5.87



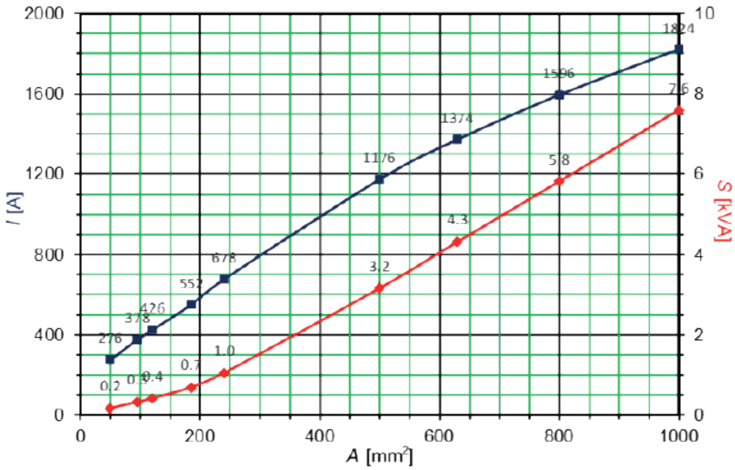
ก) แหล่งจ่ายแรงดันข้อ E2 ข) แหล่งจ่ายแรงดันข้อ E4



ค) แหล่งจ่ายแรงดันข้อ E3, E1 และ T1 ง) แหล่งจ่ายแรงดันข้อ E5

รูปที่ 5.87 แหล่งจ่ายแรงดันที่ใช้ในการทดสอบเฉพาะแบบ

หม้อแปลงลัดวงจร (short circuit transformer, S/C TR) ในรูปที่ 5.84 เป็นหม้อแปลงพิเศษที่มีขดลวดทุติยภูมิรอบเดียว -คือสายเคเบิลที่เราทำการทดสอบนั่นเอง- พิกัดกำลัง S หาได้จากสมการ $S = I^2Z$ เมื่อ I คือขนาดกระแสโดยประมาณที่ไหลผ่านตัวนำของสายเคเบิลที่มีพื้นที่หน้าตัด A แล้วทำให้ตัวนำมีอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 95-100 °C ซึ่งจากประสบการณ์ในการทดสอบสายเคเบิลที่ห้องทดลองไฟฟ้าแรงสูง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย มีค่าดังแสดงในรูปที่ 5.88



รูปที่ 5.88 ขนาดของกระแสที่ทำให้ตัวนำมีอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 95-100 °C

อิมพีแดนซ์ของสายเคเบิล Z มีวงจรสมมูลเป็นความต้านทาน R อนุกรมกับตัวเหนี่ยว นำ L โดยหากสมมุติว่าเราจัดสายเคเบิลที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง a = 10 cm เป็นวงกลมที่มีรัศมี R ซึ่งมีเส้นรอบวง ℓ ยาวประมาณ 12 m ก็จะหาค่าประมาณของ L ได้ดังนี้

$$L_{n=1} \sim R\mu_0\left(\ln\left(\frac{8R}{a}\right)-2\right) = \frac{\ell}{2\pi}\mu_0\left(\ln\left(\frac{4\ell}{a\pi}\right)-2\right)$$

$$= \frac{12}{2\pi}4\pi\cdot 10^{-7}\left(\ln\left(\frac{4\cdot 12}{0.1\cdot\pi}\right)-2\right) = 7.27 \quad [\mu\text{H}]$$

จึงทำให้ที่ความถี่ 50 Hz ค่า X_L = 3.3 mΩ ซึ่งโดยปกติจะมากกว่าความต้านทาน R หลายสิบเท่า ดังนั้นเราจึงหา S ได้จาก $S = I^2X_L$ ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 5.88

5.10.2 วิธีทดสอบ

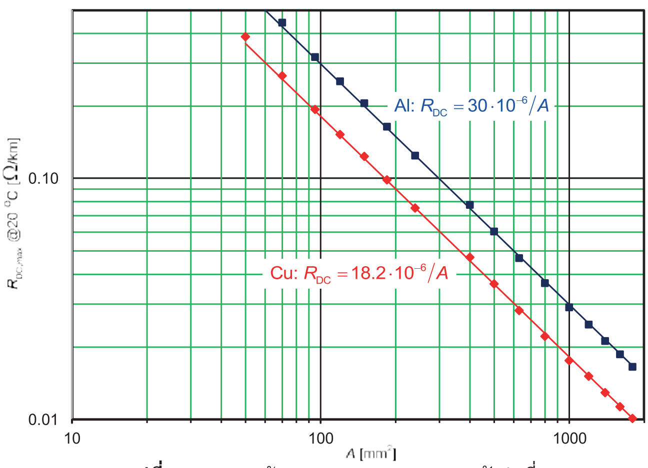
E1. ความต้านทานของตัวนำ

ลวดที่ใช้ตีเกลียวเป็นตัวนำของสายเคเบิลอาจเป็น ลวดทองแดงเปลือย, ลวดทองแดงเคลือบฉนวน, ลวดอะลูมิเนียม หรือลวดอะลูมิเนียมอัลลอยด์ แม้ว่ามาตรฐานจะไม่ได้กำหนดความต้านทานจำเพาะไว้ แต่มาตรฐานกำหนดให้วัดความต้านทานของตัวนำเป็นการทดสอบประจำ เพราะตัวนำของสายเคเบิลต้องมีความต้านทานต่ำเพื่อไม่ให้เกิดกำลังสูญเสียมากเกินไปในขณะใช้งาน

ความต้านทานกระแสตรงสูงสุด $R_{DC,max}$ ของตัวนำที่ 20 °C แสดงในตารางที่ 5.15 และรูปที่ 5.89

ตารางที่ 5.15 ความต้านทานสูงสุด $R_{DC,max}$ ของตัวนำที่ 20 °C

	$R_{DC,max}$ @20 °C [Ω/km]				$R_{DC,max}$ @20 °C [Ω/km]		
A [mm²]	ทองแดง	ทองแดงเคลือบ	อะลูมิเนียม	A [mm²]	ทองแดง	ทองแดงเคลือบ	อะลูมิเนียม
50	0.3870	0.3910	0.6410	**500**	0.0366	0.0369	0.0605
70	0.2680	0.2700	0.4430	**630**	0.0283	0.0286	0.0469
95	0.1930	0.1950	0.3200	**800**	0.0221	0.0224	0.0367
120	0.1530	0.1540	0.2530	**1000**	0.0176	0.0177	0.0291
150	0.1240	0.1260	0.2060	**1200**	0.0151	0.0151	0.0247
185	0.0991	0.1000	0.1640	**1400**	0.0129	0.0129	0.0212
240	0.0754	0.0762	0.1250	**1600**	0.0113	0.0113	0.0186
400	0.0470	0.0475	0.0778	**1800**	0.0101	0.0101	0.0165

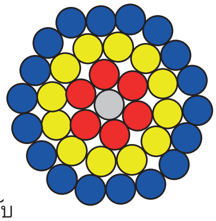


รูปที่ 5.89 ความต้านทานสูงสุด $R_{DC,max}$ ของตัวนำที่ 20 °C

สัญลักษณ์รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสและรูปข้าวหลามตัดแสดงค่าในตารางที่ 5.15 ส่วนเส้นทึบคำนวณจากสมการที่ให้ไว้ ค่าคงที่ในสมการ ($18.2 \cdot 10^{-6}$ สำหรับทองแดง และ $30 \cdot 10^{-6}$ สำหรับอะลูมิเนียม) เป็นค่าโดยประมาณของความต้านทานจำเพาะของตัวนำตีเกลียว

เกร็ดความรู้ 5.3 เราจะใช้สมการ $R_{DC} = \rho\ell/A$ เมื่อ ρ คือความต้านทานจำเพาะของวัสดุ [Ωm], ℓ คือความยาวของตัวนำตีเกลียว [m] และ A คือพื้นที่หน้าตัดของตัวนำตีเกลียว [m^2] ในการคำนวณความต้าน ทานกระแสตรงของตัวนำตีเกลียวได้หรือไม่?

เราลองพิจารณารูปของตัวนำตีเกลียวต่อไปนี้ ซึ่งจะเห็นว่าเราใช้สมการข้างต้นไม่ได้ เพราะ?



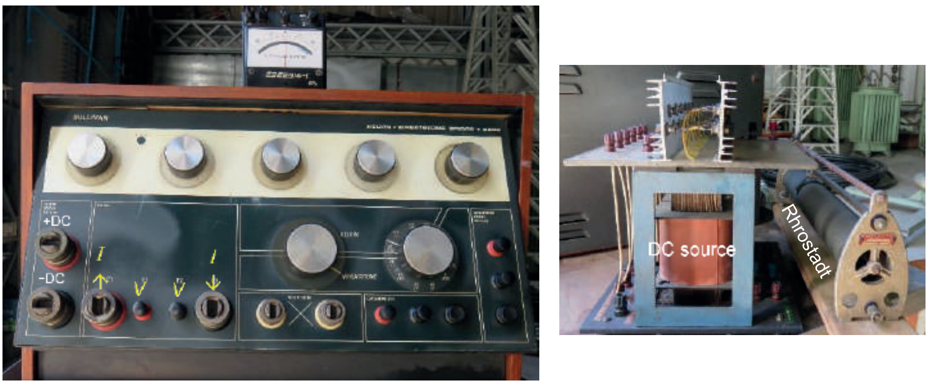
1. พื้นที่หน้าตัด A ของตัวนำตีเกลียวไม่เท่ากับผลรวมของพื้นที่หน้าตัด A' ของตัวนำย่อยคูณกับจำนวนตัวนำย่อย n เพราะตัวนำย่อยซ้อนกันเป็นชั้นๆ โดย

$$n = 1 + \sum_{i=1}^{m}\left[6 \cdot (i-1)\right]$$

เมื่อ m เป็นจำนวนชั้น จึงมีช่องว่างระหว่างตัวนำย่อย

2. ความยาวของตัวนำย่อยแต่ละชั้นไม่เท่ากัน (ตัวนำย่อยในชั้นเดียวกันยาวเท่ากัน) และไม่เท่ากับ ℓ และโปรดระวังในการใช้ เราไม่สามารถใช้ R_{DC} ในการคำนวณกำลังสูญเสียของตัวนำตีเกลียวได้ เพราะในการใช้งานจริงสายเคเบิลจะมีกระแสสลับไหลในตัวนำตีเกลียว ผู้อ่านที่สนใจสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จาก [TB345, 2008]

ก่อนการวัดความต้านทานของตัวนำ ให้นำสายเคเบิลที่ผลิตเสร็จแล้วทั้งล้อ วางทิ้งไว้ในห้องทดลองเป็นเวลา 12-24 Hr เพื่อให้ตัวนำของสายเคเบิลมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง จากนั้นวัดความต้านทานกระแสตรงของตัวนำด้วยเครื่องวัดความต้านทาน เช่น Kelvin bridge ดังที่แสดงในรูปที่ 5.90



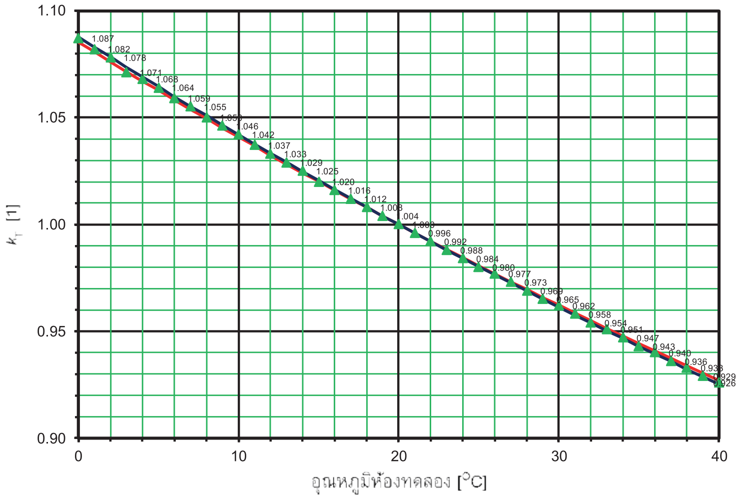
รูปที่ 5.90 Kelvin-Wheatstone bridge ที่ห้องทดลองไฟฟ้าแรงสูง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

แล้วแก้ค่าความต้านทานกระแสตรงที่วัดได้ ณ อุณหภูมิห้องไปที่อุณหภูมิ 20 $^{\circ}$C ตามสมการ [IEC60228, 2004]

$$R_{DC,20} = k_T R_{DC,T} \frac{1000}{\ell} \tag{5.48}$$

เมื่อ $R_{DC,T}$ คือ ความต้านทานตัวนำที่วัดได้จากสายเคเบิลยาว ℓ m [Ω]

K_T คือ ตัวแก้ค่าอุณหภูมิดังที่แสดงในรูปที่ 5.91 โดยให้ใช้ค่าตัวเลขในรูปสำหรับทั้งตัวนำทองแดงและอะลูมิเนียม



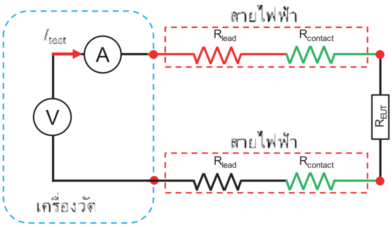
รูปที่ 5.91 ตัวแก้ค่าอุณหภูมิ K_T

หรือใช้สมการ (เส้นตรงสีแดงสำหรับทองแดงและสีน้ำเงินสำหรับอะลูมิเนียมในรูปที่ 5.91)

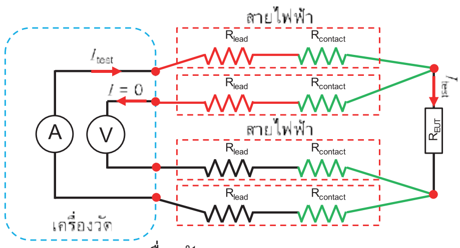
$$\text{Cu:}\quad k_{T,Cu} = \frac{254.5}{234.5 + T} \qquad \text{Al:}\quad k_{T,Al} = \frac{248}{228 + T} \qquad (5.49)$$

เกร็ดความรู้ 5.4 ทำไมเราต้องใช้ Kelvin หรือ Wheatstone bridge ในการวัดความต้านต้านทานค่าต่ำๆ?

ก่อนอื่นสมมุติว่าโวลต์มิเตอร์ V มีความต้านทานเป็นอนันต์และแอมมิเตอร์ A ไม่มีความต้านทานเลย วงจรข้างล่างแสดงวิธีวัดค่าความต้านทาน 2 แบบ



ก) เครื่องวัดแบบ 2-terminals



ข) เครื่องวัดแบบ 4-terminals

วงจรในรูป ก) เป็นวงจรวัดทั่วไปของมิเตอร์วัดความต้านทานทั่วไป ซึ่งมักใช้หลักการป้อนกระแสตรง I_{test} คงที่ ในการใช้งานก็ต่อสายไฟที่มีความต้านทาน R_{lead} เข้ากับความต้านทาน R_{EUT} ที่ต้องการวัดค่าโดยใช้ตัวหนีบหรือ ปากคีบ (crocodile clip) ที่มีความต้านทาน $R_{contact}$ ความต้านทานที่วัดได้ R_{mea} จึงมีค่าเท่ากับ

$$\frac{V}{I_{test}} = R_{meas} = 2\left(R_{lead} + R_{contact}\right) + R_{EUT}$$

ซึ่งจะเห็นว่าความผิดพลาดในการวัดคือ R_{lead} และ $R_{contact}$ ที่อยู่ในวงจร

โดยปกติ R_{lead} จะขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ทำสายไฟฟ้าและความยาวของสายไฟฟ้าซึ่งเปลี่ยนไปมาเสมอเพราะผู้ทำการวัดความต้านทานมักไม่คำนึงถึงผลดังกล่าว ส่วน $R_{contact}$ ก็เช่นกันแต่มีปัญหาเพิ่มขึ้นมาคือออกไซด์ที่เกิดขึ้นและความแน่นในการยึดเข้ากับ R_{EUT} -โปรดสังเกตว่าขาของตัวต่อเครื่องเสียงหรือหูฟังดีๆ หรืออุปกรณ์สื่อสารความเร็วสูงที่ใช้ในปัจจุบัน เช่น หัว USB หรือ HDMI มักเคลือบด้วยทอง ทั้งนี้เพราะทองเป็นสารที่ไม่ค่อยทำปฏิกิริยากับสารอื่น (noble metal) เราจึงเห็นการขุดหรือร่อนทองเป็นก้อนๆ โดยไม่ต้องถลุงเพื่อแยกทองออกมาเหมือนการถลุงเหล็ก นอกจากนั้นคนจีนทราบคุณสมบัตินี้ของทองมาเป็นพันๆ ปี สมัยก่อนเราจึงเห็นคนใส่ฟันปลอมที่ทำด้วยทองไม่เคยเห็นการใช้โลหะประเภทอื่น และตอนนี้ผู้อ่านคงไม่สงสัยแล้วว่าทำไมประเทศของเราจึงนำเข้าขยะอิเล็กทรอนิกส์ ทั้งที่ขยะดังกล่าวมีสารพิษ เช่น สารหนู ตะกั่ว ฯลฯ-

ความต้านทานของ R_{lead} และ $R_{contact}$ มักมีค่าเป็น mΩ ดังนั้นถ้า R_{EUT} มีค่ามากเป็น Ω ค่าความต้านทาน R_{mea} ที่วัดได้จะมีความแตกต่างไปจาก R_{EUT} ไม่มากนัก

หาก R_{EUT} มีความต้านทานน้อย วิธีที่ลดความผิดพลาดได้วิธีหนึ่งคือ ก่อนการวัดความต้านทานให้วัดความต้านทาน R_{lead} และ $R_{contact}$ โดยจับปากคีบเข้าด้วยกัน สมมุติว่าวัดค่าความต้านทานได้เท่ากับ $R_{corrected}$ จากนั้นจึงวัดความต้านทาน R_{mea} ตามปกติ ความต้านทาน R_{EUT} จึงมีค่าเท่ากับ R_{mea} - $R_{corrected}$

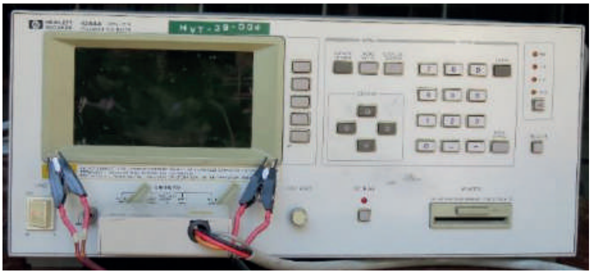
วงจรในรูป ข) เป็นวงจรวัดของ Kelvin bridge ซึ่งมี 4 ขั้ว เสมอหรือ Wheatstone bridge ซึ่งมี 4 ขั้วเช่นกัน -แต่ในบางครั้งผู้ใช้จะใช้เพียง 2 ขั้ว เท่านั้น (จึงเหมือนวงจร ก))- และโดยปกติจะใช้แหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรงภายนอกที่เรียบมาก (มีแฟกเตอร์ระลอกต่ำ) เพื่อจ่ายกระแส I_{test} ให้กับ R_{EUT} (ระวัง: กระแส I_{test} ที่ใช้ในการวัดต้องไม่สูงเกินไปจนทำให้อุณหภูมิของ R_{EUT} เปลี่ยนแปลงไปจากอุณหภูมิห้อง)

ความต้านทานที่วัดได้ R_{mea} จึงมีค่าเท่ากับ

$$\frac{V}{I_{test}} = R_{meas} = R_{EUT}$$

เพราะโวลต์มิเตอร์ V มีความต้านทานเป็นอนันต์ จึงไม่มีกระแสไหลในวงจรวัดแรงดัน จึงไม่มีผลของ R_{lead} และ $R_{contact}$

อนึ่ง เครื่องวัดอิมพีแดนซ์ความแม่นยำสูงในปัจจุบัน ที่แสดงในรูปที่ 5.92 ใช้หลักการของ Kelvin หรือ Wheatstone bridge ใช้ปากคีบพิเศษที่ขาข้างหนึ่งของปากคีบใช้ป้อนกระแส I_{test} ส่วนขาอีกข้างหนึ่งใช้วัดแรงดัน V แต่ก็จ่ายกระแส I_{test} ได้ไม่มากนักเพราะไม่มีแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรงภายนอก



รูปที่ 5.92 เครื่องวัดอิมพีแดนซ์ ที่ห้องทดลองไฟฟ้าแรงสูง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

E2. การวัดดีสชาร์จบางส่วน

XLPE เป็นฉนวนแข็งจึงเป็นฉนวนที่ไม่สามารถคืนสภาพการเป็นฉนวนได้เองเมื่อเกิดเบรกดาวน์ กระบวนการหุ้มตัวนำตีเกลียวด้วย XLPE จึงเป็นขั้นตอนที่สำคัญเพราะ ช่องว่างอากาศเล็กๆ (void) ที่ตกค้างในเนื้อ XLPE จะทำให้เกิดดีสชาร์จภายใน เมื่อใช้งานสายเคเบิลไปนานๆ ก็จำนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์ในที่สุด เวลานานๆ ดังกล่าวอาจเป็นวัน เดือน ปี หรือหลายปี ไม่มีใครทราบในปัจจุบัน ดังนั้นจะเห็นว่าการทดสอบสายเคเบิลจะมีการวัดดีสชาร์จบางส่วนอยู่เสมอ

ต่อวงจรวัดดีสชาร์จบางส่วนโดยใช้รูปที่ 5.84 ต่อกับแหล่งจ่ายแรงดัน E2 ในรูปที่ 5.87 ก) แล้วต่อจุด A และ G ถึงกัน (ดูการวัดดีสชาร์จบางส่วนในข้อ 5.4 และ [IEC60885-3, 2015])

ในการวัดให้เพิ่มแรงดันไปที่ $2U_0$ สำหรับสายเคเบิลในระบบจำหน่าย (หรือ $1.75U_0$ สำหรับสายเคเบิลในระบบส่ง) แล้วคงค่าไว้ 10 s จากนั้นลดแรงดันลงมาที่ $\surd 3U_0$ (หรือ $1.5U_0$ สำหรับสายเคเบิลในระบบส่ง) แล้ววัดค่าดีสชาร์จบางส่วนด้วยเครื่องวัดที่มีความไวไม่น้อยกว่า 5 pC ค่าที่วัดได้ต้องไม่เกิน 5 pC จึงถือว่าสายเคเบิลไม่มีดีสชาร์จบางส่วนและผ่านการทดสอบ (สำหรับการทดสอบประจำของสายเคเบิลในระบบส่งที่มีพิกัดแรงดัน $\geq$ 230 kV ใช้ค่า 10 pC แทนที่จะเป็น 5 pC)

อนึ่งในการทดสอบเฉพาะแบบของสายเคเบิลในระบบส่ง เราต้องปรับแรงดันที่ป้อนให้ S/C TR จนกระทั่งตัวนำมีอุณหภูมิระหว่าง 90-100 °C และคงอุณหภูมิของตัวนำให้อยู่ในช่วงดังกล่าวเป็นเวลาไม่น้อยกว่า 2 Hr ก่อนการวัดดีสชาร์จบางส่วน

E3. การทดสอบความทนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

ต่อวงจรทดสอบความทนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับโดยใช้รูปที่ 5.84 ต่อกับแหล่ง จ่ายแรงดัน E3 ในรูปที่ 5.87 ค) แล้วต่อจุด A และ G ถึงกัน

มาตรฐานให้ทดสอบสายเคเบิล ณ อุณหภูมิห้อง โดยทดสอบด้วยขนาดและเวลาในการป้อนแรงดันทดสอบ ได้แสดงในตารางที่ 5.16

ตารางที่ 5.16 ขนาดและเวลาป้อนแรงดันในการทดสอบความทนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้สายเคเบิล

	การทดสอบประจำ		การทดสอบเฉพาะแบบ			
			ข้อ E5		การทดสอบ 4 Hr [b)]	
	ขนาด	เวลา	ขนาด	เวลา	ขนาด	เวลา
ระบบจำหน่าย	$3.5U_0$	5 min	$3.5U_0$	15 min	$4U_0$	4 Hr
ระบบส่ง	$2.5U_0$	30 min	$2.5U_0$ [a)]	15 min	-	-

[a)] ณ อุณหภูมิห้องทดลองหรือขณะที่สายเคเบิลเย็นลงหลังการป้อนแรงดันอิมพัลส์
[b)] อนุญาตให้ใช้สายเคเบิลเส้นอื่นได้ ถ้าผ่านการทดสอบข้อ M1 และ T1 มาก่อนแล้ว

มาตรฐานถือว่าสายเคเบิลผ่านการทดสอบ หากสายเคเบิลไม่เกิดเบรกดาวน์ในช่วงเวลาที่ป้อนแรงดันทดสอบ

E4. การวัด Tg δ

ต่อวงจรวัด Tg δ โดยใช้รูปที่ 5.84 ต่อกับแหล่งจ่ายแรงดัน E4 ในรูปที่ 5.87 ข) แล้วต่อจุด A และ B ถึงกัน (ดูการวัด Tg δ ในข้อ 5.3)

ให้วัด Tg δ ขณะที่ตัวนำของสายเคเบิลมีอุณหภูมิระหว่าง 90-100 °C โดยป้อนแรงดันไม่น้อยกว่า 2 kV สำหรับสายเคเบิลในระบบจำหน่าย (หรือ U_0 สำหรับสายเคเบิลในระบบส่ง) ค่า Tg δ ที่วัดได้ต้องไม่เกิน $40{\cdot}10^{-4}$ สำหรับสายเคเบิลในระบบจำหน่าย (หรือ $10{\cdot}10^{-4}$ สำหรับสายเคเบิลในระบบส่ง) มาตรฐานจึงถือว่าสายเคเบิลผ่านการทดสอบ

E5. การทดสอบความทนแรงดันอิมพัลส์สวิตชิง

การทดสอบความทนแรงดันอิมพัลส์สวิตชิง ทำกับสายเคเบิลในระบบส่งที่มีพิกัดแรงดัน ≥ 300 kV โดยให้ต่อวงจรในรูปที่ 5.84 ต่อกับแหล่งจ่ายแรงดัน E5 ในรูปที่ 5.87 ง) แล้วต่อจุด A และ G ถึงกัน ก่อนการป้อนแรงดันอิมพัลส์สวิตชิงต้องทำให้ตัวนำของสายเคเบิลมีอุณหภูมิระหว่าง 90-100 °C และคงอุณหภูมิของตัวนำให้อยู่ในช่วงดังกล่าวเป็นเวลาไม่น้อยกว่า 2 Hr

การทดสอบความทนแรงดันอิมพัลส์สวิตชิงให้ทำตาม [IEC60230, 2018] โดยป้อนแรงดัน 1175 kV ให้สายเคเบิลในระบบส่งที่มีแรงดัน 550 kV ส่วนขั้นตอนการป้อนแรงดันและเกณฑ์ตัดสินให้ดูข้อ E6 การทดสอบความทนแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า

E6. การทดสอบความทนแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า

ต่อวงจรทดสอบความทนแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า โดยใช้รูปที่ ต่อกับแหล่งจ่ายแรงดัน E5 ในรูปที่ 5.87 ง) แล้วต่อจุด A และ G ถึงกัน ก่อนการป้อนแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าต้องทำให้ตัวนำของสายเคเบิลมีอุณหภูมิระหว่าง 90-100 °C และคงอุณหภูมิของตัวนำให้อยู่ในช่วงดังกล่าวเป็นเวลาไม่น้อยกว่า 2 Hr สำหรับสายเคเบิลในระบบส่ง ส่วนสายเคเบิลในระบบจำหน่ายมาตรฐานไม่กำหนดระยะเวลาในการคงอุณหภูมิของตัวนำไว้

การทดสอบความทนแรงดันอิมพัลส์ผ่าให้ทำตาม [IEC60230, 2018] ซึ่งแตกต่างไปจากที่กล่าวในข้อ 5.8.5 ซึ่งอ้างอิง [IEC60060-1, 2010] ดังนี้

- เวลาหน้าคลื่นของแรงดันอิมพัลส์ อนุญาตให้มีค่าอยู่ระหว่าง $1 \leq T_1 \leq 5$ μs
- ป้อนแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า U_t (ดูตารางที่ 5.17) ขั้วบวกและลบอย่างละ 10 ครั้ง โดยไม่กำหนดว่าต้องป้อนขั้วไหนก่อน

ดังนั้นการใช้มาตรฐานจึงต้องเลือกมาตรฐานผลิตภัณฑ์ก่อนว่ามีวิธีทดสอบที่ต้องการหรือไม่ ถ้าไม่มีก็พิจารณามาตรฐานกลุ่มผลิตภัณฑ์ต่อไปว่ามีหรือไม่ ถ้ายังไม่มีอีกก็ใช้มาตรฐานพื้นฐาน IEC60060-1 สุดท้ายถ้ายังไม่มีก็ต้องร้องขอไปที่ IEC ให้ออกมาตรฐานประเภทข้อกำหนดทางเทคนิค TS หรือรายงานทางเทคนิค TR

ตารางที่ 5.17 ขนาดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า U_t ที่ใช้ในการทดสอบ

	ระบบจำหน่าย		ระบบส่ง			
U_m [kV]	24	36	72.5	123	245	550
U_t [kV]	125	170	325	550	1050	1550

ก่อนการทดสอบให้ปรับสภาพสายเคเบิล -ทำเพื่อกลับขั้วประจุค้างใน XLPE ให้ตรงกับขั้วของ U_t- โดยป้อนแรงดันที่ค่า $0.5U_t$, $0.65U_t$ และ $0.8U_t$

จากนั้นป้อนแรงดัน U_t (เช่นขั้วบวก) จำนวน 10 ครั้ง, กลับขั้วแรงดันอิมพัลส์ (เช่นไปเป็นขั้วลบ), ปรับสภาพสายเคเบิลตามที่กล่าวข้างต้น, และป้อน U_t จำนวน 10 ครั้ง

ถ้าสายเคเบิลทนแรงดันอิมพัลส์ได้ ให้นำสายเคเบิลไปทดสอบความทนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับตามข้อ E3.

E7. การทดสอบความทนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 4 Hr

ดูการทดสอบ E3

E8. การทดสอบความทนแรงดันไฟฟ้าของฉนวนระหว่างส่วนโลหะ

ฉนวนระหว่างปลอก/ชีลด์โลหะ -ไม่รวมถึง XLPE และฉนวนระหว่างส่วนโลหะที่มีสารกึ่งตัวนำ- ในการทดสอบประจำให้ทดสอบตามข้อ 3 ของ [IEC 60229, 2007] ซึ่งแบ่งเป็น

ก) *ทดสอบด้วยแรงดันกระแสตรง* (DC voltage test) โดยป้อนแรงดัน U_{DC} = 8 kV/mm ≤ 25 kV ขั้วลบที่โลหะชั้นในกับโลหะชั้นนอกเป็นเวลา 1 min จะถือว่าผ่านการทดสอบถ้าฉนวนไม่เบรกดาวน์

ข) *ทดสอบการสปาร์ก* (spark test) โดย

กรณีที่ทดสอบด้วยแรงดันกระแสสลับ: ต่อโลหะชั้นในลงกราวน์ แล้วป้อนแรงดัน U_{AC} = 6 kV/mm ≤ 15 kV กับโลหะชั้นนอก นานพอที่จะสังเกตความผิดปกติที่จะเกิดขึ้น โดยจะถือว่าผ่านการทดสอบถ้าไม่เกิดความผิดปกติ

กรณีที่ทดสอบด้วยแรงดันกระแสตรง: ป้อนแรงดัน U_{DC} = 9 kV/mm ≤ 25 kV ขั้วลบที่โลหะชั้นในกับโลหะชั้นนอกนานพอที่จะสังเกตความผิดปกติที่จะเกิดขึ้น โดยจะถือว่าผ่านการทดสอบถ้าไม่เกิดความผิดปกติ

E9. การทดสอบความทนแรงดันไฟฟ้าของฉนวน

ให้ป้อนแรงดันระหว่างตัวนำกับชีลด์ด้วยวิธีใดวิธีหนึ่งที่กำหนดในตารางที่ 5.18

ตารางที่ 5.18 ขนาดแรงดันที่ใช้ในการทดสอบความทนแรงดันไฟฟ้าของฉนวน

สายเคเบิล	แรงดันทดสอบ			
	แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง [a]	แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ		
		0.1 Hz	20 - 300 Hz	50 Hz
ระบบจำหน่าย	15 min @$4U_0$	15 min @$3U_0$	15 min @$\sqrt{3}U_0$	24 Hr @U_0
ระบบส่ง < 230 kV	-		1 Hr @$2U_0$	
ระบบส่ง ≥ 230 kV			1 Hr @$1.7U_0$	

[a] ฉนวนอาจเป็นอันตรายหากทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

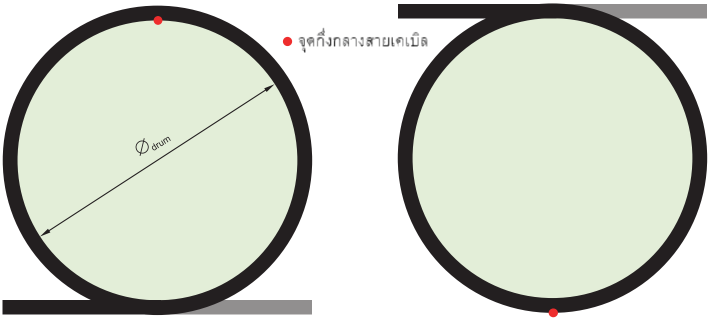
M1. การทดสอบการดัด

ให้ ดัด (bending) สายเคเบิลรอบวัตถุรูปทรงกระบอก เช่น ล้อสายเคเบิลซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง $\varnothing_{drum}$ ไม่เกินค่าที่แสดงในตารางที่ 5.19 กลับไป-กลับมา จำนวน 3 ครั้ง ดังแสดงในรูปที่ 5.93

ตารางที่ 5.19 เส้นผ่านศูนย์กลาง ∅ ต่ำสุดของวัตถุรูปทรงกระบอกที่ใช้ดัดสายเคเบิล

สายเคเบิล	สายเคเบิลแกนเดี่ยว	สายเคเบิล 3 แกน
ชีลด์ทำจาก Al	36(*d*+*D*) + 5%	25(*d*+*D*) + 5%
ชีลด์แบบเทปพัน/มีเกราะตะกั่ว	25(*d*+*D*) + 5%	20(*d*+*D*) + 5%
ประเภทอื่น ๆ	20(*d*+*D*) + 5%	15(*d*+*D*) + 5%
d = ∅ ตัวนำ และ *D* = ∅ สายเคเบิล		

จากนั้นนำสายเคเบิลไปวัดดีสชาร์จบางส่วนตามข้อ E2



รูปที่ 5.93 วิธีดัดสายเคเบิลรอบวัตถุรูปทรงกระบอก กลับไป-กลับมา 1 ครั้ง

T1. การทดสอบวัฏจักรความร้อน

ให้เตรียมสายเคเบิลสำหรับ การทดสอบวัฏจักรความร้อน (heat cycle test) เป็นรูปตัว U ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางตามที่ระบุไว้ในตารางที่ 5.19 หากเป็นสายเคเบิลในระบบส่งให้ต่อกับแหล่งจ่ายแรงดัน E3 ในรูปที่ 5.87 ค) แล้วต่อจุด A และ G ถึงกัน

ให้ทดสอบเป็นจำนวน 20 วัฏจักร แต่ละวัฏจักรต้องทำให้ตัวนำของสายเคเบิลร้อน-เย็นตามที่แสดงในตารางที่ 5.20 โดยในช่วงเวลาร้อนต้องทำให้ตัวนำของสายเคเบิลมีอุณหภูมิระหว่าง 90-100 °C และคงอุณหภูมิของตัวนำให้อยู่ในช่วงดังกล่าวเป็นเวลาไม่น้อยกว่าค่าที่แสดงในตารางที่ 5.20 ส่วนช่วงเวลาเย็นให้หยุดนำกระแสเพื่อให้ตัวนำเย็นลงตามธรรมชาติ โดยหากพื้นที่หน้าตัดของตัวนำของสายเคเบิลโตอาจต้องช่วยระบายความร้อน เช่นใช้ลมเย็นเป่าเพื่อให้สายเคเบิลเย็นลงจนถึงอุณหภูมิห้อง

ตารางที่ 5.20 ช่วงเวลาร้อน-เย็นในการทดสอบวัฏจักรความร้อนและการป้อนแรงดันให้สายเคเบิล

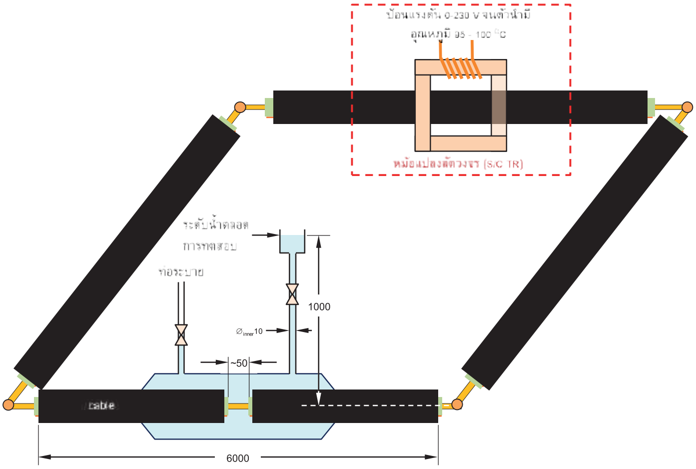
สายเคเบิล	1 วัฏจักร	เวลาช่วงร้อน	เวลาช่วงเย็น	ป้อนแรงดันตลอดการทดสอบ
ระบบจำหน่าย	8 Hr	5 Hr (คงความร้อน > 3 Hr)	3 Hr	-
ระบบส่ง	24 Hr	8 Hr (คงความร้อน > 2 Hr)	16 Hr	$2U_0$
อนุญาตให้หยุดการทดสอบได้ในกรณีเกิดเหตุสุดวิสัย เช่น ไฟฟ้าดับ แต่การทดสอบต้องทำให้ครบ 20 วัฏจักร				

หลังการทดสอบให้นำสายเคเบิลในระบบจำหน่ายไปวัดดีสชาร์จบางส่วนตามข้อ E2 สำหรับสายเคเบิลในระบบส่งก็สามารถนำไปวัดดีสชาร์จบางส่วนตามข้อ E2 ทันทีหรือทำภายหลังการทดสอบความทนแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าตามข้อ E6 ก็ได้

G1. การทดสอบป้องกันน้ำซึม

ในบางครั้งอาจมีน้ำซึมเข้าไปในสายเคเบิล โดยอาจซึมเข้ามาทางหัวสายเคเบิล, จุดต่อสายเคเบิลหรือเปลือกพลาสติก ทำให้เกิดดีสชาร์จบางส่วนที่นำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์ในที่สุด ดังนั้นสายเคเบิลบางเส้นจะมีเทปกันน้ำ เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำซึมเข้าไปในตัวนำหรือชีลด์เป็นระยะทางไกลๆ โดยวัสดุที่ใช้ทำเทปกันน้ำมีคุณสมบัติที่เมื่อโดนน้ำแล้วจะพองตัวขึ้นทำให้น้ำไม่สามารถซึมต่อไปได้ การซ่อมสายเคเบิลจึงมีราคาไม่แพงเพราะไม่ต้องเปลี่ยนสายเคเบิลทั้งเส้น

ใน การทดสอบป้องกันน้ำซึม (water penetration test) ให้จัดวงจรดังแสดงในรูปที่ 5.94 โดยให้นำตัวอย่างสายเคเบิลใหม่ยาว 6 m ที่ผ่านการทดสอบ M1 มาขวั้นเนื้อสายเคเบิลบริเวณกึ่งกลางความยาวออกตั้งแต่เปลือกพลาสติกจนถึงชั้นที่ต้องการทดสอบป้องกันน้ำซึมยาว ~ 50 mm แล้วประกอบภาชนะบรรจุน้ำ (เช่น ท่อ PVC) ดังแสดงรูปที่ 5.94 โดยน้ำที่อยู่ในภาชนะบรรจุต้องสัมผัสกับชั้นป้องกันน้ำซึม จากนั้นวางบนพื้นห้องทดลองแล้วประกอบวงจรเพื่อป้อนกระแสให้ตัวอย่าง ด้วยการใช้สายเคเบิลที่มีขนาดเดียวกันมาต่อกับตัวอย่างให้เป็นวงรอบปิด



รูปที่ 5.94 การทดสอบป้องกันน้ำซึม

เติมน้ำประปาในภาชนะบรรจุน้ำจนระดับน้ำสูงกว่าแกนสายเคเบิล 1 m โดยเปิดวาล์วที่ท่อระบายในขณะเติมน้ำเพื่อไม่ให้มีอากาศเหลืออยู่ในภาชนะบรรจุน้ำ แล้วทิ้งไว้ 24 Hr เพื่อตรวจสอบการรั่วซึมของน้ำที่จุดต่างๆ ในวงจรทดสอบ

ให้ทดสอบความร้อนจำนวน 10 วัฏจักร แต่ละวัฏจักรต้องทำให้ตัวนำร้อนและเย็นตามที่แสดงในตารางที่ 5.20 โดยในช่วงเวลาร้อนต้องทำให้ตัวนำของสายเคเบิลมีอุณหภูมิระหว่าง 90-100 °C และต้องระวังไม่ให้น้ำเดือด ตลอดการทดสอบต้องรักษาระดับน้ำให้สูงกว่าแกนของสายเคเบิล 1 m ตลอดเวลาด้วยการเติมน้ำเพิ่มและปิด/เปิดวาล์วที่ท่อระบาย

จะถือว่าสายเคเบิลผ่านการทดสอบ หากไม่มีน้ำซึมออกมาทางปลายของตัวอย่างระหว่างการทดสอบ

5.11 การทดสอบเพื่อตรวจรับ

การทดสอบเพื่อตรวจรับที่หน้างานทำเพื่อตรวจจับความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับระบบ/อุปกรณ์ระหว่างการขนส่ง, การเก็บรักษาก่อนการติดตั้ง, สภาวะแวดล้อม ณ ตำแหน่งที่ติดตั้ง หรือการประกอบส่วนต่างๆ เข้าเป็นระบบ/อุปกรณ์ ยกตัวอย่างเช่น สถานีไฟฟ้าที่ฉนวนด้วยก๊าซ (gas insulated substation, GIS) ที่โดยปกติบางส่วนของ GIS จะประกอบมาแล้วจากโรงงาน จากนั้นก็ประกอบส่วนต่างๆ เข้าด้วยกัน รวมทั้งหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง, สายเคเบิล ให้เป็นสถานีไฟฟ้า

การทดสอบที่หน้างานนี้ไม่ใช่การทดสอบเฉพาะแบบหรือกราทดสอบประจำที่ทำซ้ำ แต่มีวัตถุเพื่อยืนยันความพร้อมทำงานของระบบ/อุปกรณ์ก่อนการจ่ายไฟ ซึ่งถือว่าเป็นกระบวนการสุดท้ายในการควบคุมคุณภาพและการประกันคุณภาพ

การทดสอบหลักจะเป็นการทดสอบความทนแรงดันเพราะต้องใช้อุปกรณ์ทดสอบที่มีราคาแพง ดังนั้นการทดสอบเพื่อตรวจรับที่หน้างานจึงควรพิจาณาถึง: 1. ความเหมาะสมของวิธีทดสอบที่เลือกใช้, 2. ความเป็นไปได้ในการทดสอบด้วยวิธีดังกล่าวที่หน้างาน และ 3. ค่าใช้จ่ายในการทดสอบ

5.11.1 สายส่งไฟฟ้าเหนือพื้นดิน

เท่าที่ผู้เขียนทราบ ในปัจจุบันไม่มีกำหนดไว้ในมาตรฐาน แต่การไฟฟ้าบางแห่งอาจให้ทำการทดสอบความทนแรงดันกระแสสลับความถี่ 10-500 Hz ซึ่งต้องใช้วงจรเรโซแนนซ์ในการทดสอบ หรือใช้แรงดันกระแสสลับแบบหน่วง ขนาดแรงดันทดสอบก็เป็นไปตามการตกลงกันระหว่างบริษัทผู้รับเหมากับการไฟฟ้า ส่วนการทดสอบความทนแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าและสวิตชิงนั้น ไม่นิยมทำกันเพราะค่าใช้จ่ายสูงมากและการทดสอบความทนแรงดันกระแสสลับก็เพียงพอที่จะยืนยันความพร้อมในการจ่ายไฟของสายส่งอยู่แล้ว

อีกวิธีหนึ่งที่นิยมใช้กัน คือจ่ายไฟที่ระดับแรงดันใช้งานให้สายส่งไฟฟ้าในขณะที่ไม่จ่ายโหลดเป็นเวลา 24 Hr หรือตามช่วงเวลาที่ตกลงกันระหว่างบริษัทผู้รับเหมากับการไฟฟ้า

อนึ่ง เนื่องความกังวลในเรื่องสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจากสายส่งไฟฟ้าเหนือดินที่มีต่อสุขภาพของมนุษย์ในปัจจุบัน การไฟฟ้าจึงมักทำการวัดค่า E และ B จากสายส่งไฟฟ้าที่หน้างานหลังจากที่สายส่งไฟฟ้าจ่ายโหลดไประยะหนึ่งเพื่อยืนยันว่าค่า E และ B ยังอยู่ในเกณฑ์ที่การไฟฟ้ากำหนด เช่น ที่แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 (การวัดค่า B ต้องให้สายส่งไฟฟ้าเหนือดินจ่ายโหลดให้มีกระแส I ไหลในสายใน

สายเฟส แต่กระแสที่ไหลอาจมีค่าน้อยกว่ากระแสพิกัด I_{rate} ของสายเฟส เพราะค่า B_{rate} ที่กระแสพิกัดหาได้จากสมการ $B_{rate} = (I_{rate}/I)B)$

5.11.2 สายเคเบิลใต้ดิน

ปัจจุบัน [IEC60502-2, 2014] และ [IEC60840, 2020] กำหนดให้การทดสอบเพื่อตรวจรับสายเคเบิลที่หน้างานเฉพาะหัวข้อการทดสอบความทนแรงดันเท่านั้นโดยแบบออกเป็นสองหัวข้อย่อย ดังนี้

5.11.2.1. การทดสอบความทนแรงดันไฟฟ้าของฉนวนระหว่างส่วนโลหะ

การทดสอบเพื่อตรวจรับงานให้ทดสอบตามข้อ 5 ของ [IEC 60229, 2007] โดยให้ต่อเปลือกโลหะทั้งหมดของสายเคเบิลเข้าด้วยกัน แล้วป้อนแรงดันกระแสตรง U_{DC} = 4 kV/mm ≤ 10 kV ขั้วลบที่เปลือกโลหะที่ต่อถึงกันกับดินที่ฝังสายเคเบิลเป็นเวลา 1 min โดยจะถือว่าผ่านการทดสอบถ้าฉนวนไม่เบรกดาวน์

5.11.2.2. การทดสอบความทนแรงดันไฟฟ้าของฉนวน

สำหรับสายเคเบิลในระบบจำหน่าย [IEC60502-2, 2014] ให้เลือกทดสอบความทนแรงดันกระแสสลับความถี่ 50 Hz ระหว่างการป้อนแรงดัน U_m ระหว่างตัวนำกับปลอก/ชีลด์เป็นเวลา 5 นาที หรือป้อนแรงดันใช้งานเป็นเวลา 24 Hr ตามการตกลงกันระหว่างบริษัทผู้รับเหมากับการไฟฟ้า

ส่วนสายเคเบิลในระบบส่ง [IEC60840, 2020] ให้เลือกทดสอบความทนแรงดันกระแสสลับความถี่ 20-300 Hz ระหว่างการป้อนแรงดันทดสอบ U_t ที่แสดงในตารางที่ 5.21 เป็นเวลา 1 Hr หรือป้อนแรงดัน U_0 เป็นเวลา 24 Hr ตามการตกลงกันระหว่างบริษัทผู้รับเหมากับการไฟฟ้า

ตารางที่ 5.21 แรงดันทดสอบ สำหรับสายเคเบิลที่ใช้ในระบบส่ง

$U_0/U/U_m$ [kV]	U_t [kV]
26/45-47/52	52
36/60-69/72.5	72
64/110-115/123	128
76/132-138/145	132
87/150-161/170	150

5.12 เอกสารอ้างอิงบทที่ 5

[ABB, 2018], "*Bushing diagnostics and conditioning*", 2750 515-142 EN, REV. 4, Product information, ABB AB components, Ludvika, Sweden, 2018.

[ANSI/NETA ATS, 2009], "*Acceptance testing specifications for electrical power equipment and systems*", American national standard institute and International electrical testing association, 2009.

[ANSI/NETA MTS, 2011], "*Maintenance testing specifications for electrical power equipment and systems*", American national standard institute and International electrical testing association, 2009.

[Ansys Maxwell®, 2019], "*ANSYS Electronics Desktop 2019 (Maxwell)*", Ansys, Inc., USA, 2019.

[Arora, 1995], Arora, R. and Mosch, W., "*High Voltage Insulation Engineering*", New age international publishers limited, New Delhi, 1995.

[Chauvin, 2010], "*Insulation resistance testing guide: 50 to 5000 Vdc Megohmmeter*", Chauvin Arnoux group, 2010.

[CISPR16-1-1, 2015], "*Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods - Part 1: Radio disturbance and immunity measuring apparatus - Measuring apparatus*", International Special Committee on Radio Disturbance, CISPR, 2015.

[Comsol, 2020], "*COMSOL Multiphysics® software*", COMSOL, Inc., USA, 2020.

[ELT011, 1969a], "*Recognition of discharge*", Electra, CIGRE, 1969.

[ELT011, 1969b], "*Significant of PD detection*", Electra, CIGRE, 1969.

[EGAT, 2020], "*Design of a 230 kV compact transmission line for using in limited area*", Final report, CEPT, 2020. (in Thai)

[EPRI, 2006], "*EPRI AC transmission line reference book - 200 kV and above*", 3rd Edition, Electric Power Research Instiute, 2006.

[HV Inc, 2020], "*BAUR-PHG 80 Portable VLF Tester*", Technical brochur, HV Technologies, Inc., USA, 2020.

[ICNIRP, 2010], "*ICNIRP guide line for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (1 Hz-100 kHz)*", International commission on non-ionizing radiation protection, Health Physics, Vol 99(6), pp.818-836, 2010.

[IEC60060-1, 2010], "*High-voltage test techniques - Part 1: General definitions and test requirements*", IEC, 2010.

[IEC60060-3, 2006], "*High-voltage test techniques –Part 3: Definitions and requirements for on-site testing*", IEC, 2006.

[IEC60071-1, 2019], "*Insulation co-ordination - Part 1: Definitions, principles and rules*", IEC, 2019.

[IEC60141-1, 1998], "*Tests on oil-filled and gas-pressure cables and their accessories - Part 1: Oil-filled, paper-insulated, metal-sheathed cables and accessories fo AC up to and including 400 kV*", with amendement 2, IEC, 1998.

[IEC60183, 2015], "*Guidance for the selection of HV AC cabel system*", IEC, 2015.

[IEC60229, 2007], "*Electric cables - Tests on extruded oversheaths with a special protective function*", IEC, 2007.

[IEC60230, 2018], "*Impulse tests on cables and their accessories*", IEC, 2018.

[IEC60270, 2015], "*High-voltage test techniques - Partial discharge measurements*", with amendment 1, IEC, 2015.

[IEC60288, 2004], "*Conductor for insulated cable*", IEC, 2004.

[IEC60317, 2017], "*Insulated bushings for alternating voltages above 1000 V*", IEC, 2017.

[IEC60502-2, 2014], "*Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 1 kV (U_m = 1,2 kV) up to 30 kV (U_m = 36 kV) – Part 2: Cables for rated voltages from 6 kV (U_m = 7,2 kV) up to 30 kV (U_m = 36 kV)*", IEC, 2014.

[IEC60529, 2001], "*Degrees of protection provided by enclosures (IP Code)*", IEC, 2001.

[IEC60840, 2020], "*Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 30 kV (U_m= 36 kV) up to 150 kV (U_m = 170 kV) - Test methods and requirements*", IEC, 2020.

[IEC60885-3, 2015], "*Electrical test methods for electric cables – Part 3: Test methods for partial discharge measurements on lengths of extruded power cables*", IEC, 2015.

[IEC62067, 2011], "*Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 150 kV (U_m = 170 kV) up to 500 kV (U_m = 550 kV) - Test methods and requirements*", IEC, 2011.

[IEC62271-203, 2011], "*High-voltage switchgear and controlgear – Part 203: Gas-insulated metal-enclosed switchgear for rated voltages above 52 kV*", IEC, 2003.

[IEEE43, 2000], "*Practice for testing insulation resistance of rotating machinery*", IEEE, 2000.

[IEEE400, 2012], "*Field testing and evaluation of the insulation of shielded power cable systems rated 5 kV and above*", IEEE, 2012.

[IEEE400.2, 2013], "*Field testing of shielded power cable systems using VLF (less than 1Hz)*", IEEE, 2013.

[IEEE400.3, 2006], "*PD testing of shielded power cable systems in a field environment*", IEEE, 2006.

[IEEE400.4, 2015], "*Field testing of shielded power cable systems rated 5kV and Above with DAC voltage*", IEEE, 2015.

[Kuffel, et. al., 2000], "*High Voltage Engineering, Fundamentals*", Kuffel, E., Zaengl, W. and Kuffel, J., Newnes, Oxford, 2000.

[Megger, 2020a], "A guide to diagnostic insulation testing above 1 kV", www.megger.com, 2020.

[Megger, 2020b], "*VLF Sinus 62 - VLF test system user guide*", Issue C (12/2020)-EN, Aricle No. 86278, Megger Germany GmbH (Baunach), 2020.

[Mohaupt, 2010], Mohaupt, P. and Bergman, A., "*A new concept for test equipment for testing large HV and UHV cables on-site*", Paper B1_302, CIGRE Session, Paris, 2010.

[Mohaupt, 2013], Mohaupt, P., Misteli, k. and Geyer, H., "*VLF testing of high voltage cables, state of the art*", Nord-IS 13, Norway, 2013.

[NEMA107, 2016], "*Methods of measurement of Radio Influence Voltage (RIV) of high-voltage apparatus*", National Electrical Manufacturers Association, 2016.

[Pspice, 2016], "*PSPICE 9.1 Student version*", Cadence PCB solution, 2016.

[TB531, 2013], "*Cable systems electrical characteristics*", CIGRE, 2013.

[TB745 ,2018], "*Issues related to spark discharge (human body)*", CIGRE, 2018.

[TB676, 2017], "Partial Discharges in Transformers", Techincal brochure No.728, CIGRE, 2017.

[TB728, 2018], "On-site Partial Discharge assessment of HV and EHV cable systems", Techincal brochure No.728, CIGRE, 2018.

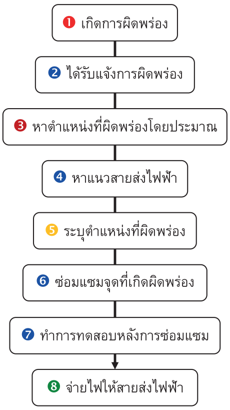
[Xinlao, 1997], Xinlao, W. et.al., "*A new type of VLF high voltage generator used for on-site tests of power cables*", Proc. 5th Int. Conf. on Properties and Applications of Dilectric Materials, South Korea, 1997.

บทที่ 6. การหาจุดผิดพร่องในสายเคเบิล

ในบทที่ 2 เราได้ทราบถึงผลเสียของการสะท้อนไป-มาของคลื่นกระแสฟ้าผ่าในเสาส่งไฟฟ้าที่อาจทำให้แรงดันที่แขนโลหะของเสาส่งไฟฟ้ามีค่าสูงจนเกิดเบรกดาวน์ข้ามพวงลูกถ้วยมาที่สายเฟสได้ ในบทนี้เราจะกล่าวถึงข้อดีของการสะท้อนของคลื่นที่เราสามารถนำไปใช้ในการหาตำแหน่งที่เกิด การผิดพร่อง (fault) ในสายส่งไฟฟ้า ซึ่งมีประโยชน์มากในกรณีที่สายส่งไฟฟ้าเป็นสายเคเบิลที่ฝังอยู่ใต้ดินหรือเคเบิลที่วางในน้ำ/ทะเลเกิดผิดพร่อง เพราะเราไม่สามารถเห็นตำแหน่งที่ผิดพร่อง เช่น สายเฟสขาด หรือสายเฟสลัดวงจรลงดิน ได้ด้วยสายตา เหมือนกับในกรณีของสายส่งไฟฟ้าในอากาศ

ดังนั้นในบทนี้จึงกล่าวถึงการหาตำแหน่งการผิดพร่องในสายเคเบิลเป็นหลัก แต่หลักการดังกล่าวก็สามารถนำไปใช้หาตำแหน่งการผิดพร่องในสายส่งไฟฟ้าในอากาศได้ด้วย

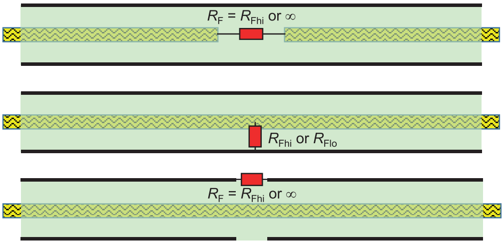
การดำเนินงานเมื่อเกิดการผิดพร่องขึ้นกับสายเคเบิลได้แสดงไว้ในรูปที่ 6.1 [TB773, 2019]



รูปที่ 6.1 การดำเนินงานเมื่อเกิดการผิดพร่องขึ้นในสายเคเบิล

การผิดพร่องในสายเคเบิลแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ 1. การผิดพร่องแบบเปิดวงจร (open circuit fault) ที่เกิดขึ้นจากการที่ตัวนำของสายเคเบิลต่อไม่ถึงกัน เช่น ตัวนำขาดจากการได้รับแรงทางกล; 2. การผิดพร่องแบบลัดวงจร (shunt fault) ที่เกิดจากการเบรกดาวน์ระหว่างตัวนำกับปลอก/ชีลด์โลหะของสายเคเบิลผ่านฉนวน การลัดวงจรในที่นี้ไม่ได้หมายถึงการที่ตัวนำและปลอก/ชีลด์โลหะของสายเคเบิลต่อถึงกันทางไฟฟ้า เพราะเส้นทางการเกิดเบรกดาวน์ผ่านเนื้อฉนวนอาจมีค่าความต้านทาน (R_F) อยู่ค่าหนึ่ง ซึ่งอาจมีค่าสูง ($R_{F,hi}$) หรือต่ำ ($R_{F,lo}$) ก็ได้ขึ้นอยู่กับประเภทของฉนวนสายเคเบิลว่าเป็น XLPE หรือกระดาษจุ่มน้ำมัน และความรุนแรงของการเกิดเบรกดาวน์; และ 3. เปลือกโลหะของสายเคเบิลชำรุด (sheath fault) ซึ่งมักเกิดจากการสึกกร่อนของเปลือกโลหะ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสายเคเบิลที่ใช้ชีลด์โลหะแบบเทปทองแดง

ลักษณะของการผิดพร่องแบบต่าง ๆ ของสายเคเบิล ได้แสดงไว้ในรูปที่ 6.2



รูปที่ 6.2 ลักษณะของการผิดพร่องแบบต่างๆ ที่เกิดกับสายเคเบิล

เมื่อเกิดผิดพร่องขึ้น บางครั้งระบบป้องกันจะตรวจจับได้เองว่าเกิดการผิดพร่องขึ้นโดยอัตโนมัติ เช่น กระแสไหลสูงมากผิดปกติเนื่องจากเกิดลัดวงจรลงกราวน์ หรือกระแสไหลน้อยผิดปกติเนื่องจากสายขาด แต่ที่เกิดขึ้นแน่ๆ คือผู้ใช้ไม่มีไฟฟ้าใช้ ดังนั้นการไฟฟ้าจะได้รับข้อร้องเรียนจากผู้ใช้ไฟฟ้าว่าไฟฟ้าดับเสมอ ซึ่งก็มีข้อดีคือการไฟฟ้าจะทราบถึงบริเวณที่เกิดผิดพร่องอย่างคร่าวๆ ในเบื้องต้น

จากนั้นก็เป็น การหาจุดที่เกิดผิดพร่องโดยประมาณ (fault prelocation) และถ้าทราบแนวสายเคเบิลจากแบบก่อสร้าง ก็เดินไปสำรวจเพื่อหา ตำแหน่งที่ผิดพร่อง (fault pinpointing) เมื่อพบแล้วก็ทำการซ่อมแซมส่วนที่เสียหาย, ทำการทดสอบว่าจุดที่ซ่อมแซมนั้นมีความทนแรงดันไฟฟ้าได้ตามที่ต้องการ และจ่ายไฟกลับให้สายเคเบิล

6.1 การหาจุดที่เกิดผิดพร่องโดยประมาณ

การหาจุดที่เกิดผิดพร่องโดยประมาณจะทำในขณะที่หยุดจ่ายไฟฟ้าให้สายเคเบิลที่เกิดความผิดพร่องเท่านั้น โดยต่อเครื่องมือทดสอบเข้ากับหัวสายเคเบิลด้านหนึ่ง ส่วนหัวสายเคเบิลอีกด้านหนึ่งจะต่อด้วยวิธีต่างๆ ตามเทคนิคที่ใช้การหาตำแหน่งที่เกิดผิดพร่อง โดยที่เทคนิคที่นิยมใช้กันประกอบไปด้วย

A. วิธีวัดเวลาการสะท้อนของคลื่น (time domain reflectometry, TDR)
B. การเผาจุดผิดพร่อง (burn down technique)
C. วิธีวัดคลื่นสะท้อนจากอาร์ก (arc reflection method, ARM)
D. วิธีวัดคลื่นจากการเบรกดาวน์ที่จุดผิดพร่อง (decay method)
E. วิธีวัดกระแสพัลส์ (impulse current method)
F. วิธีบริจด์ (bridge method)

6.1.1 วิธีวัดเวลาการสะท้อนของคลื่น

ดังที่กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 1.4 ว่าคลื่น U^+ ที่วิ่งด้วยความเร็ว v m/μs ในสายส่งที่มีอิมพีแดนซ์ลักษณะเฉพาะ Z_C จะเกิดการสะท้อนเมื่อไปปะทะกับอิมพีแดนซ์ Z_L ใดๆ ที่มีค่าไม่เท่ากับ Z_C โดยที่คลื่นสะท้อน U^- มีค่าเท่ากับ

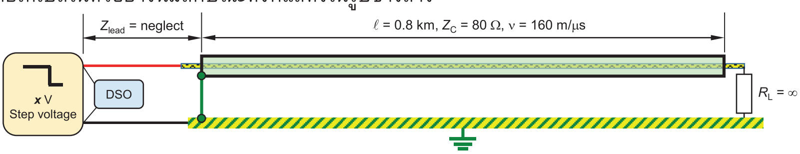
$$U^- = \Gamma U^+; \quad \Gamma = \frac{Z_L - Z_C}{Z_L + Z_C} \tag{6.1}$$

และหากอิมพีแดนซ์ Z_L ไม่ได้อยู่ที่ปลายสายส่ง ก็จะมีคลื่นขนาด U_T วิ่งต่อไปในสายส่งด้วยขนาด

$$U_T = U^+ + U^- = \frac{2Z_L}{Z_L + Z_C} U^+ \tag{6.2}$$

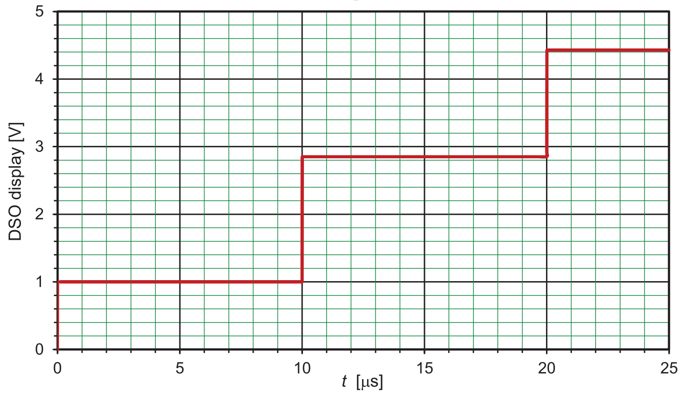
ตัวอย่างที่ 6.1 สายเคเบิลเส้นหนึ่งมี Z_C = 80 Ω และความเร็วของคลื่นที่วิ่งในสายเคเบิลมีค่า ν = 160 m/μs ถ้าเราป้อนแรงดันรูปคลื่นแบบขั้นที่มีขนาด 1 V ที่หัวสายด้านหนึ่งของสายเคเบิลที่ยาว 0.8 km ในขณะที่หัวสายเคเบิลอีกด้านหนึ่งเปิดวงจร จงวาดรูปคลื่นของแรงดันที่สะท้อนไปมาในสายเคเบิลที่บันทึกได้ที่หัวสายเคเบิลด้านที่เราป้อนแรงดันรูปคลื่นแบบขั้นที่มีขนาด 1 V

สายเคเบิลในตัวอย่างนี้มีลักษณะดังที่แสดงในรูปข้างล่าง



โปรดสังเกตว่าในตัวอย่างนี้เราสมมุติว่าเครื่องกำเนิดแรงดันรูปคลื่นแบบขั้นในรูปมีค่าความต้านทานภายใน R_{in} = 1 kΩ ส่วน DSO มีอิมพีแดนซ์ขาเข้าสูงมาก เช่น Z_{DSO} = 1 MΩ (ในทางปฏิบัติ DSO ก็คือจอแสดงผลของเครื่องกำเนิดแรงดันรูปคลื่นแบบขั้น) นอกจากนั้นยังไม่คำนึงถึงผลของอิมพีแดนซ์ของสายที่ใช้ต่อระหว่างกับสายเคเบิล Z_{lead} ที่มีต่อการวัดรูปคลื่น

ผลการจำลองแบบด้วย [Spice, 2016] ได้แสดงไว้ในรูป



แต่ก่อนอื่น เราจะคำนวณค่าแรงดัน ***x*** V ที่เครื่องกำเนิดแรงดันรูปขั้นสร้างขึ้น เพื่อให้แรงดันที่วิ่งเข้าไปในปลายสายเคเบิล U^+_{RL} มีค่าเท่ากับ 1 V ดังนี้

เนื่องจากเราสมมุติให้เครื่องกำเนิดแรงดันรูปคลื่นแบบขั้นมีความต้านทานภายใน Z_{in} = 1 kΩ และอิมพีแดนซ์ของสายเคเบิล Z_C = 80 Ω โดยเมื่อเราต่อ DSO ที่มีความต้านทานขาเข้า Z_{DSO} = 1 MΩ ขนานเข้าไปกับสายเคเบิล ความต้านทานรวมที่ขนานกันก็จะมีค่าประมาณเท่ากับ 80 Ω ดังนั้น

$$\frac{x}{1} = \frac{R_{in} + Z_C \parallel Z_{DSO}}{R_C \parallel Z_{DSO}} = \frac{1 \cdot 10^3 + 80 \parallel 1 \cdot 10^6}{80 \parallel 1 \cdot 10^6} \quad \Rightarrow x = 13.5 \ \ [\text{V}]$$

ที่เวลา t = 0 s แรงดัน 1 V จะเคลื่อนที่ไปในสายเคเบิลด้วยความเร็ว ν = 160 m/μs ดังนั้นจึงเคลื่อนที่ไปถึงสายเคเบิลอีกด้านที่เวลา

$$\tau = \frac{\ell}{\nu} = \frac{0.8 \cdot 10^3}{160} = 5 \ \ [\mu\text{s}]$$

แต่เนื่องจากที่ปลายสายเคเบิลเปิดวงจร $R_L = \infty$ ทำให้สัมประสิทธิ์การสะท้อนมีค่าเท่ากับ

$$\Gamma_{RL} = \frac{R_L - Z_C}{R_L + Z_C} = \frac{\infty - 80}{\infty + 80} = 1$$

จึงทำให้เกิดคลื่นสะท้อน U^{-}_{RL} ที่มีค่าเท่ากับ

$$U^{-}_{RL}=\Gamma U^{+}_{RL}=1\cdot 1=1\ \text{[V]}$$

วิ่งย้อนกลับไปที่เครื่องกำเนิดแรงดันรูปคลื่นแบบขั้นและคลื่น U^{-}_{RL} นี้จะวิ่งมาถึงจุดที่ DSO ต่ออยู่ที่เวลา t = 10 μs

คลื่น U^{-}_{RL} ที่วิ่งมาถึง DSO นี้ก็คือคลื่น U^{+}_{Rin} ที่ DSO มองเห็นนั่นเอง แต่เนื่องจากเครื่องกำเนิดแรงดันรูปคลื่นแบบขั้นมี R_{in} = 1 kΩ และมี DSO ต่อขนานอยู่ จึงทำให้สัมประสิทธิ์การสะท้อนมีค่าเท่ากับ

$$\Gamma_{Rin}=\frac{R_{in}\parallel Z_{DSO}-Z_C}{R_{in}\parallel Z_{DSO}+Z_C}=\frac{1\cdot 10^3\parallel 1\cdot 10^6-80}{1\cdot 10^3\parallel 1\cdot 10^6+80}=0.852$$

จึงทำให้เกิดคลื่นสะท้อน U^{-}_{Rin} ค่าเท่ากับ

$$U^{-}_{Zin}=\Gamma U^{+}_{Zin}=0.852\cdot 1=0.852\ \text{[V]}$$

คลื่นส่งผ่าน U_T จึงเท่ากับ

$$U_{T,Rin}=U^{+}_{Rin}+U^{-}_{Rin}=1+0.852=1.852\ \text{[V]}$$

แรงดันรวมที่ DSO บันทึกได้ ณ เวลา t = 10 μs จึงมีค่าเท่ากับแรงดันเดิม 1 V บวกกับ $U_{T,Rin}$ ซึ่งเท่ากับ 2.852 V ดังแสดงในรูป

โปรดสังเกตว่าเวลาที่คลื่นเคลื่อนที่ไปกลับระหว่างต้นทางถึงปลายทางของสายเคเบิลที่ยาว 0.8 km ในตัวอย่างนี้ใช้เวลา t = 10 μs ซึ่งเป็นเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ในระยะทาง 1.6 km ดังนั้นเพื่อให้ระบุตำแหน่งที่เกิดผิดพร่องได้ถูกต้องไม่สับสน เครื่องวัดที่มีขายในท้องตลาดในปัจจุบันจึงมักให้เราป้อนเร็วของคลื่นในการเคลื่อนที่ในสายเคเบิลเป็น ν/2 (บางครั้งก็เรียกว่า propagation factor) ซึ่งจากตัวอย่างค่า ν/2 = 80 m/μs ดังนั้น

$$\ell=\tau\cdot v/2=10\cdot 80=0.8\ \text{[km]}$$

ซึ่งเท่ากับความยาวของสายเคเบิลพอดี

ค่า ν/2 ของสายเคเบิลที่ใช้ฉนวนประเภทต่างๆ ได้แสดงในตารางที่ 6.1 [TB773, 2019]

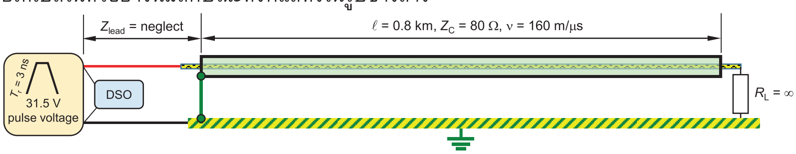
ตารางที่ 6.1 ค่า ν/2 ของสายเคเบิลที่ใช้ฉนวนประเภทต่างๆ

Dielectric	ν/2 [m/μs]
MI	64-80
PE/XLPE	80-90
EPR	75-85
Oil filled	75-84

ต่อจากนี้ไป ในการอธิบายพฤติกรรมการสะท้อนของคลื่นในสายเคเบิล เราจะสมมุติให้ความเร็วของคลื่นในสายเคเบิลมีค่า ν = 160 m/μs และสมมุติว่าเครื่อง TRD ส่งสัญญาณพัลส์ขั้วบวกออกไปจากเครื่อง

ตัวอย่างที่ 6.2 จากตัวอย่างที่ 6.1 ถ้าในการทดสอบเราใช้เครื่องกำเนิด แรงดันพัลส์ (pulse voltage waveform) แทนเครื่องกำเนิดแรงดันรูปคลื่นแบบขั้น จงวาดรูปคลื่นของแรงดันที่สะท้อนไปมาในสายเคเบิลที่บันทึกได้ที่หัวสายเคเบิลด้านที่เราป้อนแรงดันพัลส์ขนาด 1 V

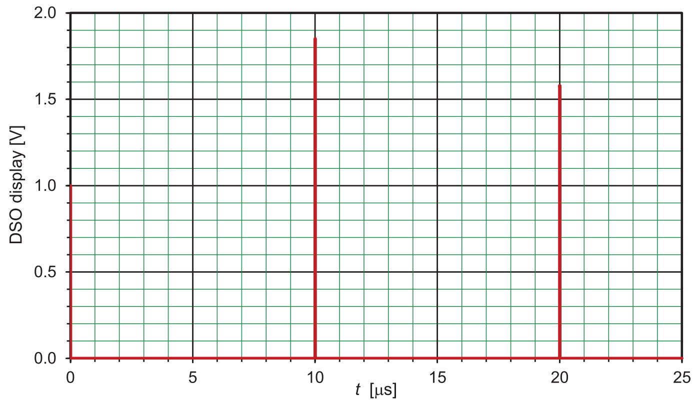
สายเคเบิลในตัวอย่างนี้มีลักษณะดังที่แสดงในรูปข้างล่าง



โปรดสังเกตว่าในตัวอย่างนี้เราสมมุติว่าเครื่องกำเนิดแรงดันพัลส์ในรูปมีค่าความต้านทานภายใน R_{in} = 1 kΩ เหมือนเดิม ส่วน DSO มีอิมพีแดนซ์ขาเข้าสูงมาก เช่น Z_{DSO} = 1 MΩ นอกจากนั้นยังไม่คำนึงถึงผลของอิมพีแดนซ์ของสายที่ใช้ต่อระหว่างกับสายเคเบิล Z_{lead} ที่มีต่อการวัดรูปคลื่น เหมือนในตัวอย่างที่ 6.1

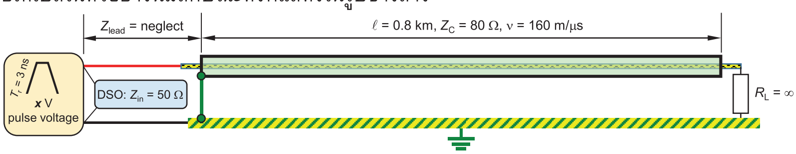
ผลการจำลองแบบด้วย [Spice, 2016] เมื่อป้อนพัลส์ที่มีเวลาขึ้น T_r = 3 ns และมีความกว้าง 10 ns ได้แสดงไว้ในรูปข้างล่าง

จากรูปจะเห็นว่า U^{+}_{RL} มีค่ายอดเท่ากับ 1 V เท่าเดิมแต่ลดลงเป็นศูนย์เร็วมากเพราะเป็นพัลส์ทำให้คลื่นที่สะท้อนกลับมาจากปลายสาย U^{-}_{RL} ค่ายอด 1 V เป็นพัลส์ด้วย แรงดัน $U_{T,Rin}$ จึงเป็นพัลส์ที่มีค่ายอด 1.852 V



ตัวอย่างที่ 6.3 จากตัวอย่างที่ 6.2 ถ้าในการทดสอบเราใช้ DSO ที่มีอิมพีแดนซ์ขาเข้า Z_{DSO} = 50 Ω จงวาดรูปคลื่นของแรงดันที่สะท้อนไปมาในสายเคเบิลที่บันทึกได้ที่หัวสายเคเบิลด้านที่เราป้อนแรงดันพัลส์ 1 V

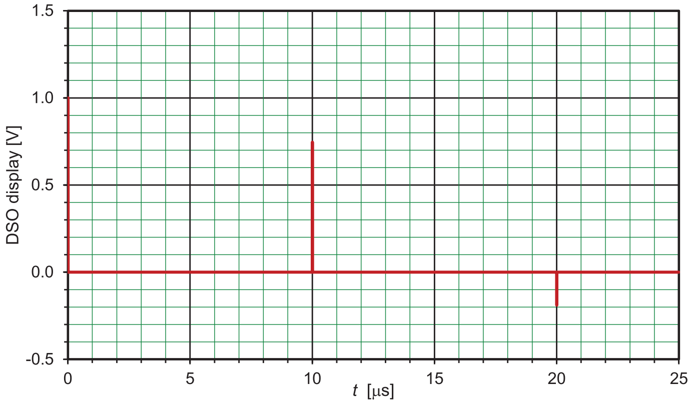
สายเคเบิลในตัวอย่างนี้มีลักษณะดังที่แสดงในรูปข้างล่าง



โปรดสังเกตว่าในตัวอย่างนี้เราสมมุติว่าเครื่องกำเนิดแรงดันพัลส์ในรูปมีค่าความต้านทานภายใน R_{in} = 1 kΩ ส่วน DSO มีอิมพีแดนซ์ขาเข้า Z_{DSO} = 50 Ω ดังนั้นเครื่องกำเนิดแรงดันพัลส์จึงต้องจ่ายแรงดันที่ขั้วสูงขึ้นเป็น

$$\frac{x}{1}=\frac{R_{in}+Z_C \parallel Z_{DSO}}{Z_C \parallel Z_{DSO}}=\frac{1\cdot 10^3+80\parallel 50}{80\parallel 50}\quad\Rightarrow x=33.5\ \ [\text{V}]$$

เพื่อทำให้แรงดันที่หัวสายเคเบิลมีค่าเท่ากับ 1 V (ยังไม่คำนึงถึงผลของอิมพีแดนซ์ของสาย Z_{lead} ที่ใช้ต่อระหว่างเครื่องกำเนิดแรงดันพัลส์กับสายเคเบิล) ผลการจำลองแบบด้วย [Spice, 2016] เมื่อป้อนพัลส์ที่มีเวลาขึ้น T_r = 3 ns และมีความกว้าง 10 ns ได้แสดงไว้ในรูปข้างล่าง



จากรูปจะเห็นว่า U^+_{RL} มีค่ายอดเท่ากับ 1 V เท่าเดิมเหมือนตัวอย่างที่ 6.2 ทำให้คลื่นที่สะท้อนกลับมาจากปลายสาย U^-_{RL} มีค่ายอด 1 V ด้วย แต่สัมประสิทธิ์การสะท้อนที่เครื่องกำเนิดแรงดันพัลส์จะเปลี่ยนไปเป็น

$$\Gamma_{Rin}=\frac{R_{in}\parallel Z_{DSO}-Z_C}{R_{in}\parallel Z_{DSO}+Z_C}=\frac{1\cdot 10^3\parallel 50-80}{1\cdot 10^3\parallel 50+80}=-0.254$$

จึงทำให้เกิดคลื่นสะท้อน U^-_{Rin} ค่าเท่ากับ

$$U^-_{Rin}=\Gamma U^+_{Rin}=-0.254\cdot 1=-0.254\ \ [\text{V}]$$

คลื่นส่งผ่าน U_T จึงเท่ากับ

$$U_{T,Rin}=U^+_{Rin}+U^-_{Rin}=1-0.254=0.746\ \ [\text{V}]$$

แรงดันรวมที่ DSO บันทึกได้ ณ เวลา t = 10 µs จึงมีค่าเท่ากับแรงดันเดิม 0 V บวกกับ $U_{T,Rin}$ ซึ่งเท่ากับ 0.746 V ดังแสดงในรูป

จากนั้นคลื่นสะท้อน U^-_{Rin} = -0.254 V จะวิ่งจากเครื่องกำเนิดแรงดันพัลส์ย้อนกลับไปที่ปลายสายเคเบิลและเกิดคลื่นสะท้อน U^-_{RL} = -0.254 V ย้อนกลับมาถึงเครื่องกำเนิดแรงดันพัลส์ที่เวลา t = 20 µs อีกครั้งหนึ่งดังนั้น

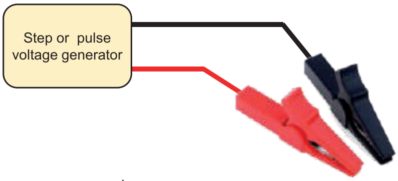
$$U^-_{Rin}=\Gamma U^+_{Rin}=\Gamma U^-_{RL}=-0.254\cdot(-0.254)=0.064\ \ [\text{V}]$$

U_T จึงเท่ากับ

$$U_{T,Rin}=U^+_{Rin}+U^-_{Rin}=-0.254+0.064=-0.189\ \ [\text{V}]$$

6.1.1.1 ผลของอิมพีแดนซ์ของสายไฟที่ใช้ต่อระหว่างเครื่อง TDR กับหัวสายเคเบิล

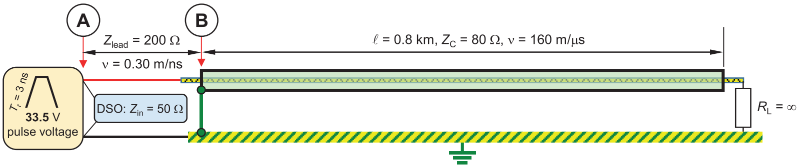
ในที่นี้เราจะสมมุติให้สายไฟที่ใช้ต่อระหว่างเครื่องกำเนิดแรงดันกับหัวสายเคเบิลมีอิมพีแดนซ์ Z_{lead} = 200 Ω โดยสายไฟนี้มักจะเป็นสายทองแดงไฟตีเกลียวหุ้มฉนวนสั้นๆ ยาวประมาณ 2-3 m ที่ปลายด้านหนึ่งมักเป็น *ปากคีบ* (crocodile clip) เพื่อความสะดวกในการต่อกับหัวสายเคเบิล ดังแสดงในรูปที่ 6.3



รูปที่ 6.3 ลักษณะของสายไฟที่ใช้ต่อระหว่างเครื่องกำเนิดแรงดันกับหัวสายเคเบิล

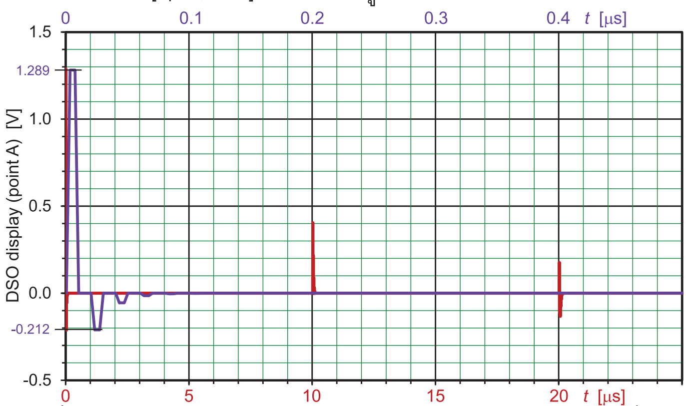
ตัวอย่างที่ 6.4 จากตัวอย่างที่ 6.3 ถ้าในการทดสอบเราใช้สายไฟที่มี Z_{lead} = 200 Ω ความยาว 3 m (สมมุติว่าคลื่นใช้เวลาในการเคลื่อนที่ τ ในสายไฟนี้เท่ากับ 10 ns -ν = 0.3 m/ns-) ต่อระหว่างเครื่องกำเนิดแรงดันพัลส์กับหัวสายเคเบิล จงวาดรูปคลื่นของแรงดันที่สะท้อนไปมาในสายเคเบิลที่บันทึกได้ที่ปลายสายเคเบิลด้านที่เราป้อนแรงดันพัลส์

สายเคเบิลในตัวอย่างนี้มีลักษณะดังที่แสดงในรูปข้างล่าง



ก. แรงดันที่จุด A

ผลการจำลองแบบด้วย [Spice, 2016] ได้แสดงไว้ในรูปข้างล่าง



ในรูปมีรูปคลื่น 2 รูป รูปแรก (เส้นสีแดง) ใช้สเกลเวลา 0-25 μs ทางด้านล่าง ส่วนรูปที่สอง (เส้นสีม่วง) ใช้สเกลเวลา 0-0.5 μs ทางด้านบน

เนื่องในตัวอย่างนี้ เราพิจารณาให้สายไฟที่ต่อระหว่างเครื่องกำเนิดแรงดันพัลส์กับหัวสายเคเบิลมีอิมพีแดนซ์ Z_{lead} = 200 Ω แรงดันที่วิ่งเข้าไปในสายไฟจึงมีค่าเท่ากับ

$$U^{+}_{A,t=0\,\mu s} = 33.5 \cdot \frac{Z_{lead} \parallel Z_{DSO}}{R_{in} + Z_{lead} \parallel Z_{DSO}} = 33.5 \cdot \frac{200 \parallel 50}{1 \cdot 10^{3} + 200 \parallel 50} = 1.289 \;\; [V]$$

และวิ่งไปถึงหัวสายเคเบิลที่จุด B ที่เวลา 10 ns หรือ 0.01 μs แต่เนื่องจากสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นที่วิ่งมาจากด้านซ้าย (L) ของจุด B มีค่ากับ

$$\Gamma_{L,B} = \frac{Z_C - Z_{lead}}{Z_C + Z_{lead}} = \frac{80 - 200}{80 + 200} = -0.429$$

ทำให้คลื่นสะท้อนมีค่าเท่ากับ

$$U^{-}_{B,t=10\,ns} = \Gamma_{L,B} U^{+}_{B,t=10\,ns} = -0.429 \cdot 1.289 = -0.552 \;\; [V]$$

ซึ่งจะวิ่งย้อนกลับไปที่จุด A และถึงจุด A ที่เวลา 20 ns (0.02 μs) แต่เนื่องจากสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นที่วิ่งมาจากด้านขวา (R) ของจุด A มีค่ากับ

$$\Gamma_{R,A} = \frac{R_{in} \parallel Z_{DSO} - Z_{lead}}{R_{in} \parallel Z_{DSO} + Z_{lead}} = \frac{1 \cdot 10^{3} \parallel 50 - 200}{1 \cdot 10^{3} \parallel 50 + 200} = -0.615$$

ทำให้คลื่นสะท้อนมีค่าเท่ากับ

$$U^{-}_{A,t=20\,ns} = \Gamma_{R,A} U^{+}_{A,t=20\,ns} = -0.615 \cdot (-0.552) = 0.340 \;\; [V]$$

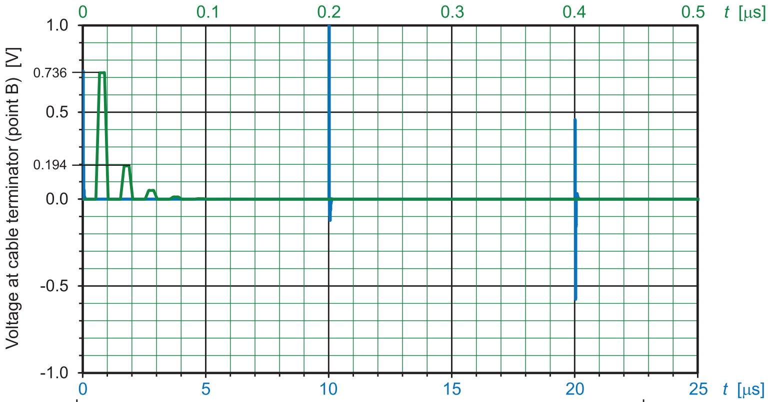
ดังนั้นคลื่นส่งผ่าน U_T จึงเท่ากับ

$$U_{T,A,t=20\,n} = U^{+}_{A,t=20\,ns} + U^{-}_{A,t=20\,ns} = -0.552 + 0.340 = -0.212 \;\; [V]$$

ดังที่แสดงในรูป

ข. แรงดันที่จุด B

ผลการจำลองแบบด้วย [Spice, 2016] ได้แสดงไว้ในรูปข้างล่าง



ในรูปมีรูปคลื่น 2 รูป รูปแรก (เส้นสีฟ้า) ใช้สเกลเวลา 0-25 μs ทางด้านล่าง ส่วนรูปที่สอง (เส้นสีเขียว) ใช้สเกลเวลา 0-0.5 μs ทางด้านบน

เนื่องจากเวลาในการเคลื่อนที่ τ ในสายไฟที่ต่อระหว่างเครื่องกำเนิดแรงดันพัลส์กับหัวสายเคเบิลมีค่า 10 ns ดังนั้นแรงดันที่วิ่งผ่านเข้าไปในสายเคเบิลที่จุด B จึงมีค่า

$$U_{T,B,t=10\,n} = U^{+}_{B,t=10\,ns} + U^{-}_{B,t=10\,ns} = 1.289 - 0.552 = 0.736 \;\; [V]$$

หลังจากนั้น คลื่นสะท้อน $U^{-}_{RA,t=20\,ns}$ = 0.340 V ก็จะวิ่งมาถึงที่เวลา 30 ns แต่เนื่องจาก $\Gamma_{L,B}$ = -0.492 ดังนั้น

$$U^{-}_{B,t=30\,ns} = \Gamma_{L,B} U^{+}_{B,t=30\,ns} = -0.429 \cdot (0.340) = -0.146 \;\; [V]$$

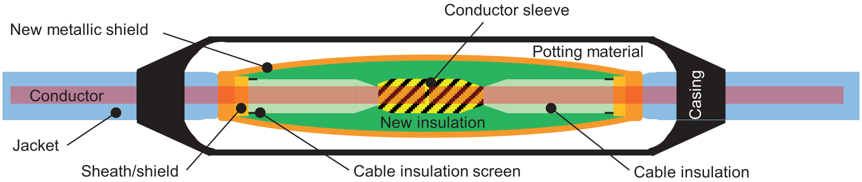
แรงดันที่วิ่งผ่านเข้าไปในสายเคเบิลที่จุด B จึงมีค่า

$$U_{T,B,t=30\text{ n}} = U^{+}_{B,t=30\text{ ns}} + U^{-}_{B,t=30\text{ ns}} = 0.340 - 0.146 = 0.194 \quad [V]$$

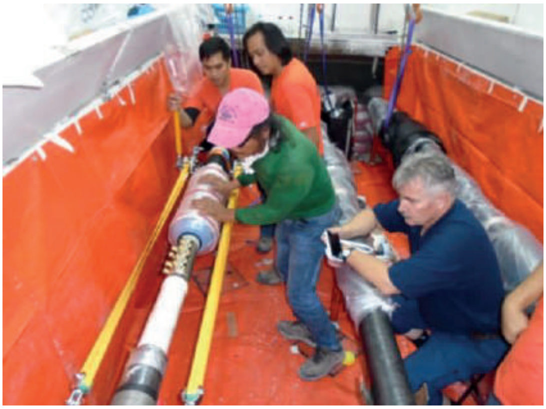
6.1.1.2 การสะท้อนที่จุดต่อสายเคเบิล

สายเคเบิลที่ยาวหลายสิบ km จะมี จุดต่อสายเคเบิล (cable joint หรือที่เรียกสั้นๆ ว่า joint) เสมอ เพราะล้อพันสายเคเบิลมีขนาดที่จำกัด -เนื่องจากข้อขัดข้องในการขนส่งทางบก- ทำให้ม้วนสายเคเบิลได้ยาวไม่มากนัก ขึ้นอยู่กับเส้นผ่านศูนย์กลางของสายเคเบิล แต่ก็มักไม่เกิน 1 km

จุดต่อสายเคเบิลในรูปที่ 6.4 เป็นจุดอ่อนของสายเคเบิลทุกประเภท -การเกิดผิดพร่องของสายเคเบิลแทบทั้งหมดมักเกิดที่ตำแหน่งนี้- เหตุผลก็เนื่องมาจากการทำจุดต่อสายเคเบิล



ก. โครงสร้างของจุดต่อสายเคเบิลสำเร็จรูป (splicing kit หรือ compact joint) ที่มักใช้ในระบบจำหน่าย



ข. การต่อสายเคเบิลที่ใช้ในระบบส่ง

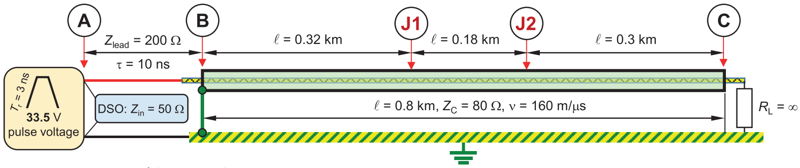
รูปที่ 6.4 ตัวอย่างจุดต่อสายเคเบิล

โดยปกติ จุดต่อสายเคเบิลในระบบจำหน่ายมักเป็นแบบสำเร็จรูป (รูปที่ 6.4 ก.) เพื่อให้สะดวกและรวดเร็วในการต่อสายเคเบิลดังนั้นผู้รับเหมาจึงมักไม่ค่อยระมัดระวังในเรื่องน้ำและฝุ่นที่อาจเข้าไประหว่างที่ทำจุดต่อสายเคเบิล และเราทราบดีว่าถ้ามีฝุ่นหรือน้ำเข้าไปในจุดต่อขณะที่ทำการประกอบจุดต่อสายเคเบิล สิ่งแปลกปลอมเหล่านั้นจะทำให้เกิดดีสชาร์จบางส่วนที่จุดต่อสายเคเบิลและในที่สุดก็จะทำให้เกิดเบรกดาวน์ที่จุดนี้

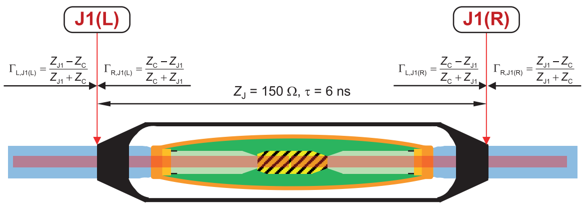
สำหรับจุดต่อสายเคเบิลในระบบส่ง การต่อสายจะประณีตและระมัดระวังเพิ่มขึ้นตามระดับแรงดันของสายเคเบิล -ความสำคัญของสายส่งไฟฟ้ามักขึ้นอยู่กับระดับแรงดันของสายส่งไฟฟ้า เพราะหากสายส่งไฟฟ้าในระบบส่งเกิดความผิดพร่องก็จะเกิดไฟฟ้าดับเป็นวงกว้างเนื่องจากสายส่งไฟฟ้าในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้สายส่งไฟฟ้าในระบบจำหน่ายด้วย แต่หากสายส่งไฟฟ้าในระบบจำหน่ายเกิดความผิดพร่อง ไฟฟ้าจะดับเป็นบริเวณที่ไม่กว้างมากนัก แต่ทั้งนี้ก็ไม่ได้หมายความว่าสายส่งไฟฟ้าในระบบจำหน่ายจะไม่สำคัญเพราะสายส่งไฟฟ้าในระบบจำหน่ายบางเส้นจ่ายไฟฟ้าให้โหลดที่มีความสำคัญ เช่น เขตพระราชฐาน, โรงพยาบาล, หน่วยงานความมั่นคง ฯลฯ- จนบางครั้งอาจต้องสร้างกระโจมหรือห้องครอบบริเวณที่ทำจุดต่อสายเคเบิล (รูปที่ 6.4 ข.) ห้องดังกล่าวจะควบคุมให้มีความชื้นต่ำและมีความดันอากาศสูงกว่าบรรยากาศภายนอกเล็กน้อยเพื่อป้องกันฝุ่น/ความชื้นเข้ามาในห้อง

อย่างไรก็ตามอิมพีแดนซ์ของจุดต่อสายเคเบิล Z_J ทุกประเภทจะมีค่าไม่เท่ากับอิมพีแดนซ์ของสายเคเบิล Z_C และโดยปกติ $Z_J > Z_C$ -เพราะโครงสร้างของจุดต่อสายเคเบิลใช้ฉนวนที่หนาขึ้นจึงทำให้ค่าความจุไฟฟ้าลดลง- จึงทำให้เกิดการสะท้อนของคลื่นที่จุดนี้

ตัวอย่างที่ 6.5 สายเคเบิลในตัวอย่างที่ 6.4 มีจุดต่อสายอยู่ 2 ตำแหน่งดังแสดงในรูปข้างล่าง



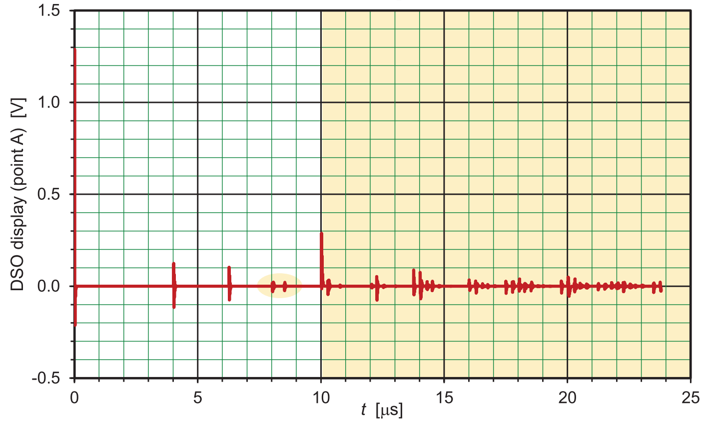
โดยจุดต่อ J1 และ J2 มีลักษณะดังรูป



J1(L) คือทางด้านซ้ายของ J1 และ J1(R) คือทางด้านขวาของ J1 ส่วน Γ คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่น

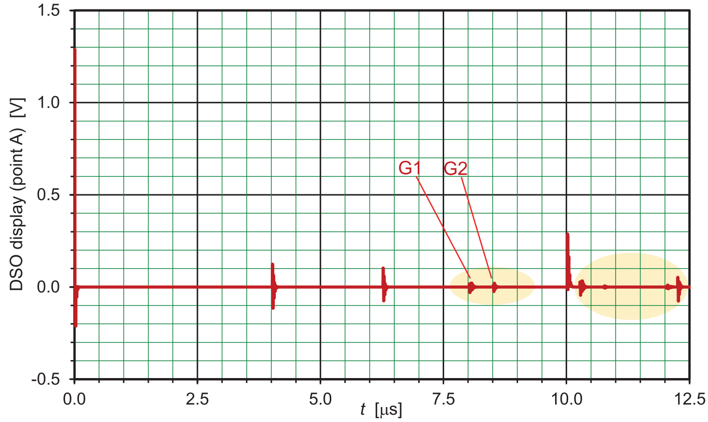
จงวาดรูปคลื่นของแรงดันที่สะท้อนไปมาในสายเคเบิลที่บันทึกได้ที่หัวสายเคเบิลด้านที่เราป้อนแรงดันพัลส์

ผลการจำลองแบบด้วย [Spice, 2016] ได้แสดงไว้ในรูป a) ข้างล่าง



a)

แต่เราทราบว่าเวลาเคลื่อนที่ของคลื่นในสายเคเบิล τ มีค่าเท่า 5 μs ดังนั้นแรงดันพัลส์ที่เครื่อง TDR ป้อนให้หัวสายเคเบิลด้านซ้ายที่จุด A ที่เวลา t = 0 s จะย้อนกลับมาถึง DSO ที่เวลา t ประมาณ 10 μs เราจึงจะพิจารณารูปคลื่นที่ได้จากการจำลองแบบเฉพาะในช่วง 0-12.5 μs ที่แสดงในรูป b) ข้างล่างเท่านั้น



b)

ก่อนอื่นเราจะคำนวณเวลาในการเคลื่อนที่ระหว่าง DSO กับ J1, DSO กับ J2 และ J1 กับ J2 ดังนี้

- เวลาในการเคลื่อนที่ระหว่าง DSO กับ J1

$$\tau_{\text{DSO-J1}} = \frac{\ell_{\text{DSO-J1}}}{v_{\text{C}}} = \frac{320}{1.6 \cdot 10^8} = 2 \ \text{[ns]}$$

- เวลาในการเคลื่อนที่ระหว่าง DSO กับ J2

$$\tau_{\text{DSO-J2}} = \frac{\ell_{\text{DSO-J2}}}{v_{\text{C}}} = \frac{500}{1.6 \cdot 10^8} = 3.125 \ \text{[ns]}$$

- เวลาในการเคลื่อนที่ระหว่าง J1 กับ J2

$$\tau_{\text{J1-J2}} = \tau_{\text{DSO-J2}} - \tau_{\text{DSO-J1}} = 3.125 - 2 = 1.125 \ \text{[ns]}$$

ดังนั้นในการวิเคราะห์รูปคลื่นจากการจำลองแบบให้ถูกต้อง เราต้องพิจารณาถึงเวลา τ_{lead} = 10 ns ที่คลื่นวิ่งในสายไฟที่ต่อระหว่างเครื่องกำเนิดพัลส์กับหัวสายเคเบิลด้วย ดังนี้ -คลื่นสะท้อนลูกแรกจาก J1 จะวิ่งกลับมาถึง DSO ที่เวลา t = 4.02 ns-

- ที่เวลา t = 0 s:

คลื่นพัลส์ขนาด 1.289 V จะวิ่งเข้าไปใน Z_{lead} = 200 Ω

- ที่เวลา t = 10 ns:

คลื่นพัลส์ขนาด 1.289 V จะวิ่งเข้าไปถึงจุด B แต่เนื่องจากสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นที่วิ่งมาจากด้านซ้าย (L) ของจุด B มีค่ากับ

$$\Gamma_{L,B} = \frac{Z_C - Z_{lead}}{Z_C + Z_{lead}} = \frac{80-200}{80+200} = -0.429$$

ดั้งนั้นจึงเกิดคลื่นสะท้อน

$$U^-_{B,t\,=\,10\text{ ns}} = \Gamma_{L,B} U^+_{B,t\,=\,10\text{ ns}} = -0.429 \cdot 1.289 = -0.552 \text{ [V]}$$

และมีคลื่นส่งผ่านขนาด

$$U_{T,B,t\,=\,10\text{ ns}} = U^+_{B,t\,=\,10\text{ ns}} + U^-_{B,t\,=\,10\text{ ns}} = 1.289 - 0.552 = 0.737 \text{ [V]}$$

วิ่งเข้าไปในสายเคเบิลช่วงที่อยู่ระหว่างจุด B กับ J1

- ที่เวลา t = 20 ns:

คลื่นสะท้อน $U^-_{B,t\,=\,10\text{ ns}}$ จะวิ่งมาถึงที่ DSO และจะสะท้อนไปมาระหว่างจุด A กับ B ซึ่งจะทำให้ค่าที่ DSO บันทึกได้เปลี่ยนแปลงทุก 20 ns แต่ในที่นี้เราจะละเลยผลของการสะท้อนนี้เพราะการสะท้อนเหล่านี้จะมีขนาดเล็กลงเรื่อยๆ แล้วหายไปในที่สุด

- ที่เวลา t = 2.01 μs:

คลื่นพัลส์ขนาด 0.737 V จะวิ่งไปถึง J1 แต่เนื่องจากสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นที่วิ่งมาจากด้านซ้าย (L) ของ J1(L) มีค่ากับ

$$\Gamma_{L,J1(L)} = \frac{Z_{J1} - Z_C}{Z_{J1} + Z_C} = \frac{150-80}{150+80} = 0.304$$

ดังนั้นจึงเกิดคลื่นสะท้อน

$$U^-_{J1(L),t\,=\,2.01\mu s} = \Gamma_{L,J1(L)} U^+_{J1(L),t\,=\,2.01\mu s} = 0.304 \cdot 0.737 = 0.224 \text{ [V]}$$

วิ่งย้อนกลับไปที่จุด B และมีคลื่นส่งผ่าน J1 ไปที่ปลาย J1(R) ขนาด

$$U_{T,J1(L),t\,=\,2.01\mu s} = U^+_{J1(L),t\,=\,2.01\mu s} + U^-_{J1(L),t\,=\,2.01\mu s} = 0.737 + 0.224 = 0.961 \text{ [V]}$$

- ที่เวลา t = 2.016 μs:

คลื่นพัลส์ขนาด 0.961 V จะวิ่งไปถึง J1(R) แต่เนื่องจากสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นที่วิ่งมาจากด้านซ้าย (L) ของ J1(R) มีค่ากับ

$$\Gamma_{L,J1(R)} = \frac{Z_C - Z_{J1}}{Z_C + Z_{J1}} = \frac{80-150}{80-150} = -0.304$$

ดังนั้นจึงเกิดคลื่นสะท้อน

$$U^-_{J1(R),t\,=\,2.016\mu s} = \Gamma_{L,J1(R)} U^+_{J1(R),t\,=\,2.016\mu s} = -0.304 \cdot 0.961 = -0.293 \text{ [V]}$$

วิ่งย้อนกลับไปที่ J1(L) และมีคลื่นส่งผ่านจุดต่อ J1 ขนาด

$$U_{T,J1,t\,=\,2.016\mu s} = U^+_{J1(R),t\,=\,2.016\mu s} + U^-_{J1(R),t\,=\,2.016\mu s} = 0.737 + 0.224 = 0.961 \text{ [V]}$$

วิ่งเข้าไปในสายเคเบิลช่วงที่อยู่ระหว่าง J1 กับ J2

- ที่เวลา t = 4.010 μs:

คลื่นสะท้อน $U^{-}_{J1(L),t\,=\,2.01\mu s}$ จะวิ่งมาถึงที่จุด B แต่เนื่องจากสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นที่วิ่งมาจากด้านขวา (R) ของ B มีค่ากับ

$$\Gamma_{R,B} = \frac{Z_{lead} - Z_C}{Z_{lead} + Z_C} = \frac{200-80}{200+80} = -0.429$$

ดังนั้นจึงเกิดคลื่นสะท้อน

$$U^{-}_{B,t\,=\,4.01\mu s} = \Gamma_{R,J1} U^{+}_{B,t\,=\,4.01\mu s} = 0.429 \cdot 0.224 = 0.096 \;\; [V]$$

วิ่งย้อนกลับไปในสายเคเบิลและมีคลื่นส่งผ่านไปที่ DSO ขนาด

$$U_{T,B,t\,=\,4.01\mu s} = U^{+}_{B,t\,=\,4.01\mu s} + U^{-}_{B,t\,=\,4.01\mu s} = 0.224 + 0.096 = 0.320 \;\; [V]$$

- ที่เวลา t = 4.020 μs:

คลื่นส่งผ่าน $U_{T,B,t\,=\,4.01\mu s}$ จะวิ่งมาถึงที่จุด A แต่เนื่องจากสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นที่วิ่งมาจากด้านด้านขวา (R) ของ DSO มีค่ากับ

$$\Gamma_{R,DSO} = \frac{R_{in} \,||\, Z_{DSO} - Z_{lead}}{R_{in} \,||\, Z_{DSO} + Z_{lead}} = \frac{1 \cdot 10^3 \,||\, 50 - 200}{1 \cdot 10^3 \,||\, 50 + 200} = -0.615$$

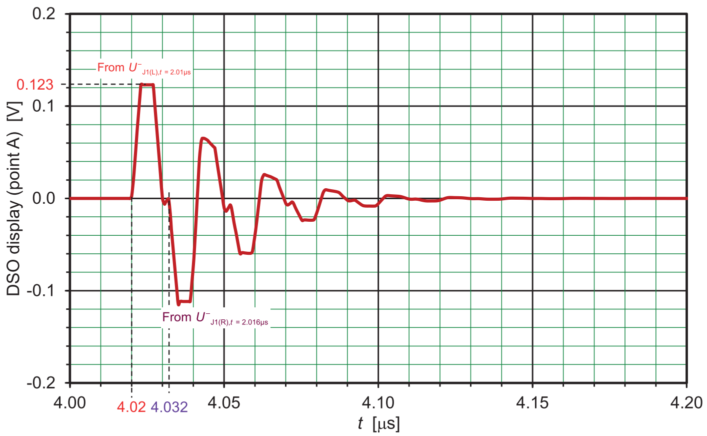
ดังนั้นจึงเกิดคลื่นสะท้อน

$$U^{-}_{DSO,t\,=\,4.02\mu s} = \Gamma_{R,DSO} U^{+}_{DSO,t\,=\,4.02\mu s} = -0.615 \cdot 0.320 = -0.197 \;\; [V]$$

วิ่งย้อนกลับไปที่จุด B ส่วน DSO จะแสดงขนาดของพัลส์เท่ากับ

$$U_{DSO,t\,=\,4.02\mu s} = U^{+}_{DSO,t\,=\,4.02\mu s} + U^{-}_{DSO,t\,=\,4.02\mu s} = 0.320 - 0.197 = 0.123 \;\; [V]$$

ดังที่แสดงรูป b) โดยภาพขยายในบริเวณนี้ได้แสดงในรูป c) ข้างล่าง



c)

- ที่เวลา t = ... s:

คลื่นพัลส์ต่าง ๆ จะสะท้อนไปมาระหว่างจุดต่าง ๆ ในลักษณะที่อธิบายมาแล้วข้างต้น ซึ่งจะเห็นว่าต้องใช้เวลามากในการคำนวณ ดังนั้นการวิเคราะห์การสะท้อนของคลื่นจึงมักใช้การจำลองแบบหรือใช้ Lattice diagram ซึ่งจะไม่กล่าวถึงในที่นี้ ผู้อ่านที่สนใจสามารถศึกษาได้จาก [Bewley, 1955]

จุดที่สำคัญในรูป a) และ b) ของตัวอย่างที่ 6.5 คือพื้นที่แรเงาสีเหลืองที่มีคลื่นสะท้อนเล็กๆ เกิดขึ้น คลื่นดังกล่าวเป็นคลื่นที่สะท้อนซ้ำกลับมาที่ DSO จาก J1 และ J2 ซึ่งมักจะทำให้เราเข้าใจผิดว่าสายเคเบิลทำไมถึงมีจุดผิดพร่องมากนัก? ทั้งที่เพิ่งได้ทำการติดตั้ง

คลื่นดังกล่าวเป็น *เงา* หรือที่มักเรียกว่า ghost เป็นคลื่นสะท้อนที่เราไม่ต้องการ แต่ก็โชคดีที่เราสามารถสังเกตได้ง่ายเพราะเงามักจะเกิดที่เวลาเป็นจำนวน n เท่าของเวลาที่เกิดการสะท้อนกลับมาถึง DSO เสมอ เช่น เงา G1 ที่เวลา $t \sim 8$ μs ในรูป b) ของตัวอย่างที่ 6.5 เป็นการสะท้อนซ้ำที่เกิดจาก J1 แล้วเงา G2 ที่เวลา $t \sim 8.5$ μs ในรูป b) ของตัวอย่างที่ 6.5 เป็นการสะท้อนซ้ำของคลื่นที่เกิดจากที่จุดใด?

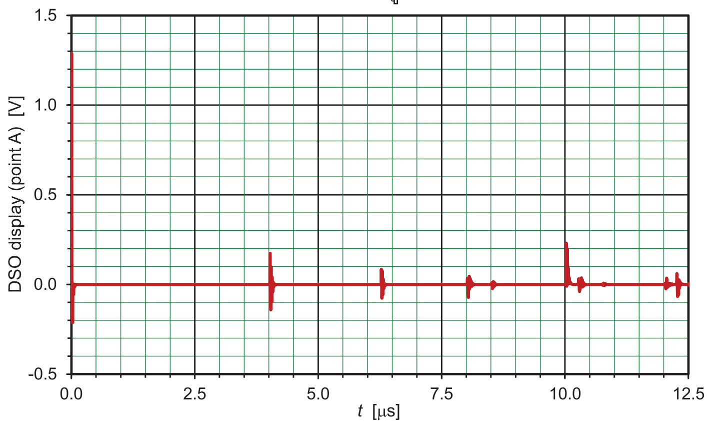
6.1.1.3 ลายนิ้วมือของสายเคเบิล

ลายนิ้วมือของสายเคเบิลในที่นี้คือ รูปคลื่นบันทึกได้จาก TDR หลังจากที่เราติดตั้งสายเคเบิลเสร็จแล้ว -ก่อนการจ่ายไฟแต่หลังการทดสอบความทนแรงดัน- รูปคลื่นนี้จะทำให้เราทราบถึงตำแหน่งของจุดต่อสายเคเบิลและเงาต่างๆ ในสายเคเบิลเส้นที่ผ่านการทดสอบความทนแรงดันและพร้อมที่จะจ่ายไฟฟ้าให้โหลด ซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการวัดรูปคลื่นสะท้อนด้วยเครื่อง TDR ครั้งถัดไป ในกรณีที่เราต้องการตรวจสภาพของสายเคเบิลหรือเมื่อเกิดความผิดพร่องขึ้น

อย่างไรก็ตาม เราต้องพึงระลึกไว้ด้วยว่าเวลาความเร็วในการเคลื่อนที่ของคลื่น v จะเปลี่ยนไปตามอายุและอุณหภูมิของสายเคเบิลค่าเปอร์มิตติวิตี้เปลี่ยนไป ทำให้ความจุไฟฟ้าของสายเคเบิลเปลี่ยนไป ดังแสดงในตัวอย่างที่ 6.6

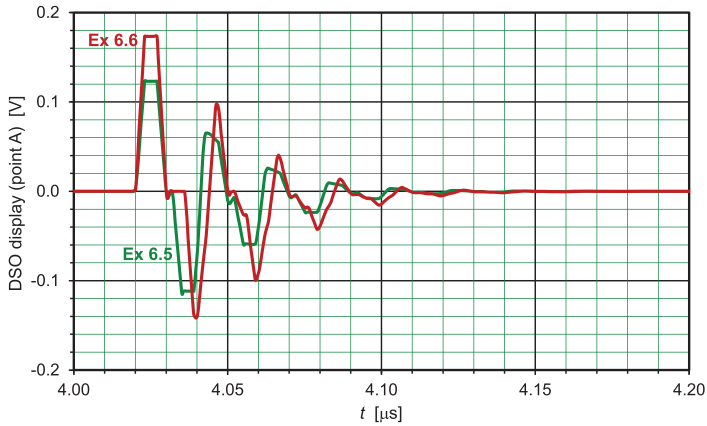
ตัวอย่างที่ 6.6 จากตัวอย่างที่ 6.5 ถ้าจุดต่อสาย J1 มีอิมพีแดนซ์สูงขึ้นเป็น 200 Ω และเวลาในการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้นเป็น 8 ns จงวาดรูปคลื่นของแรงดันที่สะท้อนไปมาในสายเคเบิลที่บันทึกได้ที่หัวสายเคเบิลด้านที่เราป้อนแรงดันพัลส์

ผลการจำลองแบบด้วย [Spice, 2016] ได้แสดงไว้ในรูปข้างล่าง



ซึ่งจะเห็นว่าแทบไม่มีความแตกต่างจากรูป b) ในตัวอย่างที่ 6.5 เลย

แต่ถ้าเราพิจารณาที่บริเวณ J1 ดังที่แสดงในรูปข้างล่าง เราจะเห็นถึงลายนิ้วมือที่ไม่เหมือนกัน ทำให้เราทราบว่า J1 มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น

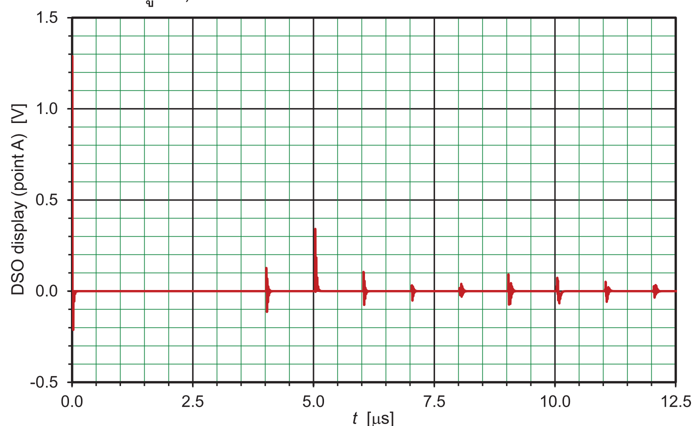


อย่างไรก็ตาม การเปรียบเทียบลายนิ้วมือทั้งสองชุดควรใช้ข้อมูลที่บันทึกด้วยเครื่อง TDR เครื่องเดียวกันเพราะคุณสมบัติของ TDR แต่ละเครื่องจะไม่เหมือนกัน แม้ว่าจะเป็นผลิตภัณฑ์จากผู้ผลิตรายเดียวกันและเป็นรุ่นเดียวกัน นอกจากนั้นในการเปรียบเทียบก็ยังต้องคำนึงด้วยว่า TDR เครื่องเดียวกันอาจให้ลายนิ้วมือที่ต่างกัน เนื่องจากผลของอายุการใช้งานและสภาพแวดล้อมขณะที่ใช้เครื่อง TDR ไม่เหมือนกัน

6.1.1.4 การผิดพร่องแบบเปิดวงจร

การผิดพร่องแบบเปิดวงจรจะมีอยู่ 2 ลักษณะ คือ สายเคเบิลขาดทั้งเส้นทำให้ตัวนำและปลอก/ชีลด์โลหะขาดออกจากกัน ดังแสดงในตัวอย่าง 6.7

ตัวอย่างที่ 6.7 ผู้ใช้ไฟฟ้าจากสายเคเบิลในตัวอย่างที่ 6.5 แจ้งให้การไฟฟ้าทราบว่าไฟฟ้าดับ การไฟฟ้าจึงส่งทีมช่างไปหาจุดที่เกิดผิดพร่อง เมื่อทีมช่างไปถึงก็หาจุดผิดพร่องด้วยเครื่อง TDR และได้ผลการวัดการสะท้อนของคลื่นดังแสดงในรูป a)

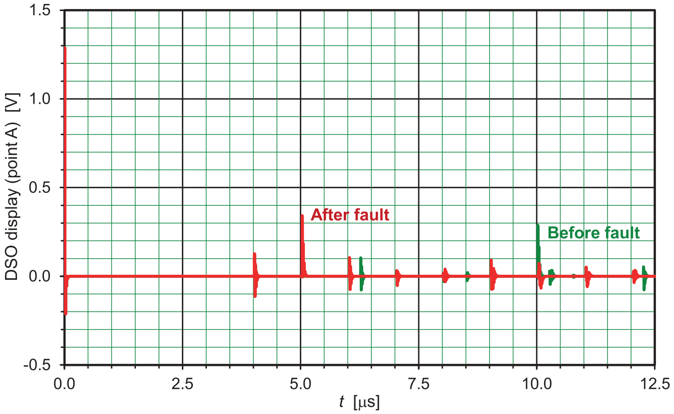


a)

ในฐานะที่ท่านเป็นหัวหน้าทีมช่าง จงหาตำแหน่งโดยประมาณของจุดที่เกิดผิดพร่องจากรูป a)

จากรูป a) ท่านคงประเมินได้แน่ว่าสายเคเบิลมีจุดผิดปกติเกิดขึ้นที่เวลา t = 4, 5, 6 ,7, 8 … μs แต่จุดที่ผิดพร่องจะเป็นที่ใดก็ยังไม่ทราบ การจะสำรวจหาตำแหน่งผิดพร่องในรายละเอียดตามผิวดินก็ต้องใช้เวลามาก เพราะการวัดเวลาที่คลาดเคลื่อนไป 1 μs หมายถึงจุดที่ผิดพร่องจะคลาดเคลื่อนไป 160 m -เพราะจากข้อมูลของสายเคเบิล ความเร็วของคลื่นที่เคลื่อนที่ v ของสายเคเบิลเส้นนี้มีค่าเท่ากับ 160 m/μs-

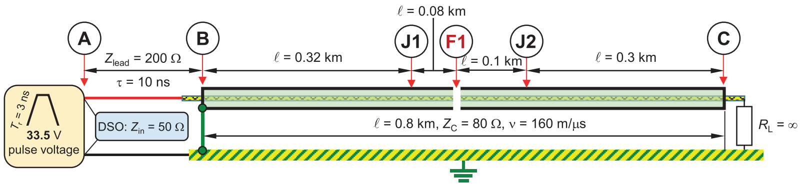
โชคดีที่ทีมช่างชุดก่อนหน้าได้วัดลายนิ้วมือของเคเบิลเส้นนี้ก่อนการจ่ายไฟให้ผู้ใช้ไฟฟ้าไว้และมีสำเนาพร้อมที่จะแสดงผลในเครื่อง TDR ท่านจึงดึงข้อมูลลายนิ้วมือของสายเคเบิลเส้นนี้ทั้ง 2 ชุดมาเปรียบเทียบกัน ซึ่งพบว่าภาพที่แสดงบน TDR มีลักษณะดังที่แสดงในรูป b)



b)

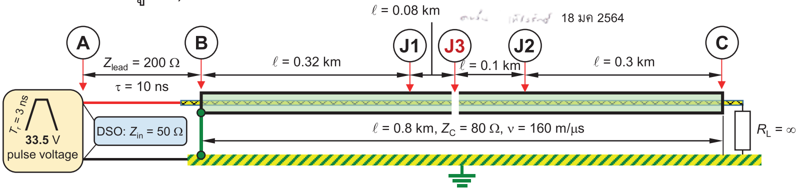
ท่านจึงทราบว่าจุดที่ผิดพร่องอยู่ที่เวลา t = 5 μs หรือที่ระยะทาง $\ell = (v/2)\times t \sim 400$ m จากหัวสายเคเบิลด้านที่ท่านวัดรูปคลื่นการสะท้อนของคลื่นด้วยเครื่อง TDR

ท่านจึงร่างภาพของสายเคเบิลเส้นนี้ให้ทีมบำรุงรักษาไปสำรวจหาจุดที่เกิดผิดพร่องที่ท่านประเมินว่าจะเกิดที่ระยะทางประมาณ 400 m จากหัวสายเคเบิลด้านที่ท่านวัดรูปคลื่น ดังแสดงในรูป



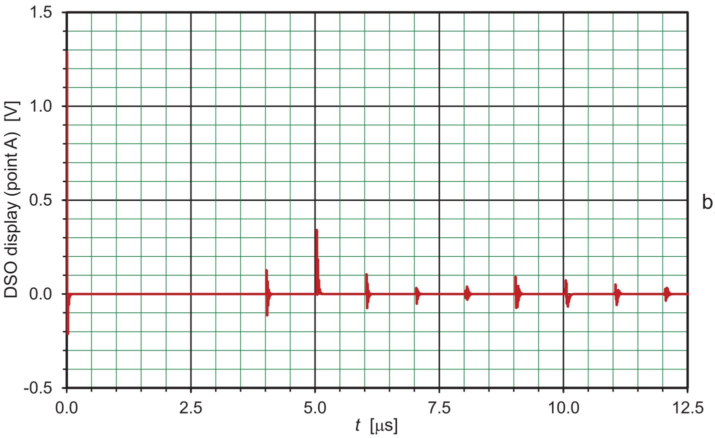
การผิดพร่องแบบเปิดวงจรอีกลักษณะหนึ่ง มักเกิดจากการที่ตัวนำชำรุดแต่ปลอก/ชีลด์โลหะไม่เสียหาย เหตุการณ์ที่เป็นไปได้คือ *ท่อต่อสายไฟ* (sleeve) ที่จุดต่อตัวนำของสายเคเบิลหลวมหรือหลุดออกจากกัน ดังแสดงในตัวอย่างที่ 6.8

ตัวอย่างที่ 6.8 หลังจากทีมบำรุงรักษาซ่อมแซมสายเคเบิลในตัวอย่างที่ 6.5 ด้วยการตัดสายจุดที่ชำรุดและทำจุดต่อสายเคเบิลใหม่เรียบร้อย หัวหน้าทีมบำรุงรักษาก็ส่งแบบก่อสร้างสายเคเบิลล่าสุดมาให้ทีมช่างเก็บไว้อ้างอิงต่อไป ดังแสดงในรูป a)



a)

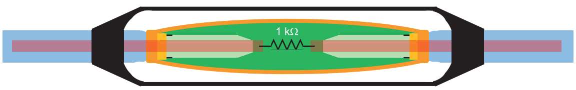
ทีมช่างก็ทำการบันทึกลายนิ้วมือใหม่ของสายเคเบิลเส้นนี้ด้วย TDR ก่อนการจ่ายไฟ และได้ผลการวัดการสะท้อนของคลื่นดังแสดงในรูป a)



b)

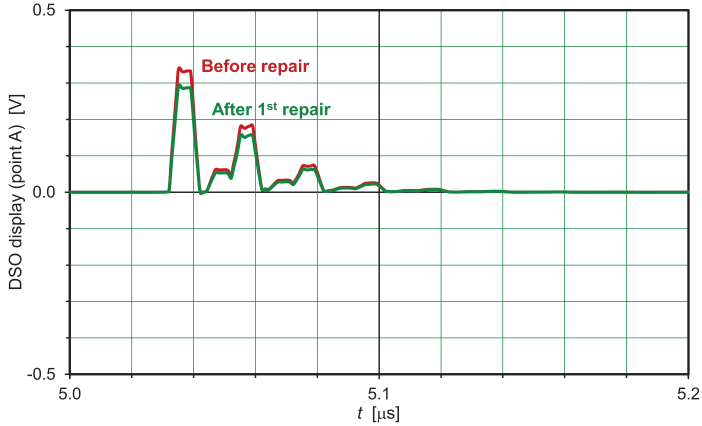
ในฐานะที่ท่านเป็นหัวหน้าทีมช่าง จงวิเคราะห์รูปคลื่นที่บันทึกได้ในรูป b)

ท่านคงเห็นได้ทันทีว่ารูป a) ในตัวอย่างที่ 6.7 และรูป b) ในตัวอย่างที่ 6.8 เหมือนกันทุกประการ -ผลการจำลองแบบในรูป b) ในตัวอย่างนี้ ใช้จุดต่อที่แสดงในรูปที่ 6.4 ก. แต่แทนจุดต่อสายด้วยตัวต้านทานขนาด 1 kΩ ที่แสดงในรูป c)-



c)

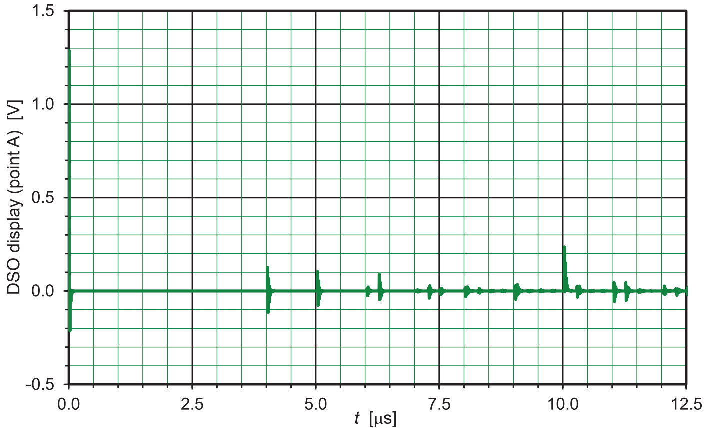
ซึ่งแสดงว่าการผิดพร่องยังอยู่ที่ระยะทาง ℓ ~ 400 m จากหัวสายเคเบิลด้านที่ท่านวัดรูปคลื่นการสะท้อนของคลื่นด้วยเครื่อง TDR เหมือนเดิม จะบอกว่าสายยังขาดอยู่ก็เป็นไปไม่ได้เพราะทีมบำรุงรักษาแจ้งว่าได้ทำจุดต่อสายเคเบิลใหม่แล้ว ท่านจึงเปรียบเทียบรูปคลื่นก่อนและหลังการซ่อมแซมสายเคเบิลในบริเวณ t ~ 5 µs ดังแสดงในรูป d)



d)

ท่านจึงทราบได้ทันทีว่าสายเคเบิลไม่ขาด แต่สาเหตุหนึ่งที่เป็นไปได้คือท่อต่อสายไฟไม่แน่น -อาจเนื่องจากลืมใช้คีมบีบท่อต่อสายไฟหรือใช้คีมที่ไม่เหมาะสมบีบท่อต่อสายไฟ- ท่านจึงขอให้ทีมบำรุงรักษาไปรื้อจุดต่อสายเคเบิลที่เพิ่งทำเสร็จขึ้นมาใหม่แล้วตรวจสอบดู ผลปรากฏว่าตัวนำของสายเคเบิลที่จุดต่อสายเคเบิลต่อถึงกันไม่ดีจริงๆ เพราะ.....

จากนั้นทีมช่างก็ทำการบันทึกลายนิ้วมือใหม่ของสายเคเบิลเส้นนี้ด้วย TDR ก่อนการจ่ายไฟและได้ผลการวัดการสะท้อนของคลื่นดังแสดงในรูป e)

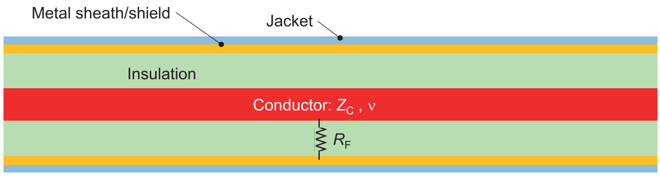


e)

6.1.1.5 การผิดพร่องแบบลัดวงจร

การลัดวงจรที่สายเคเบิลเกิดขึ้นได้เสมอ โดยสาเหตุอาจเกิดจาก อายุของสายเคเบิลทำให้ฉนวนหลักเสื่อมสภาพไปตามเวลา, การผลิตสายเคเบิลมีข้อบกพร่อง, การติดตั้งสายเคเบิลทำให้สายเคเบิลบอบช้ำ, การทำจุดต่อสายเคเบิลบกพร่อง, เหตุการณ์ธรรมชาติ, แรงกระทบทางกลจากภายนอก ฯลฯ

การผิดพร่องแบบลัดวงจรในรูปที่ 6.5 มีอยู่ 2 แบบ คือ การลัดวงจรแบบที่มีอิมพีแดนซ์สูง (high impedance fault, R_{Fhi}) และ การลัดวงจรแบบที่มีอิมพีแดนซ์ต่ำ (low impedance fault, R_{Flo}) ซึ่งโดยปกติจะถือว่าเป็น R_{Flo} เมื่ออิมพีแดนซ์มีค่าน้อยกว่า 100 Ω

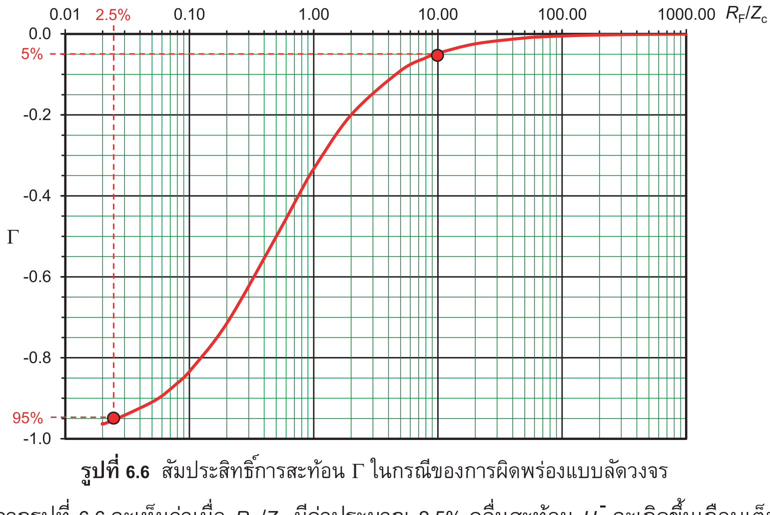


รูปที่ 6.5 การผิดพร่องแบบลัดวงจร

แต่เราทราบดีว่าคลื่นสะท้อน U^- ขึ้นอยู่สัมประสิทธิ์การสะท้อน Γ และ Γ ในกรณีของการผิดพร่องแบบลัดวงจรสามารถหาได้จากสมการ

$$\Gamma = \frac{R_F \parallel Z_C - Z_C}{R_F \parallel Z_C + Z_C} = -\frac{1}{1 + 2 \cdot R_F / Z_C} \qquad (6.3)$$

หรือจากรูปที่ 6.6

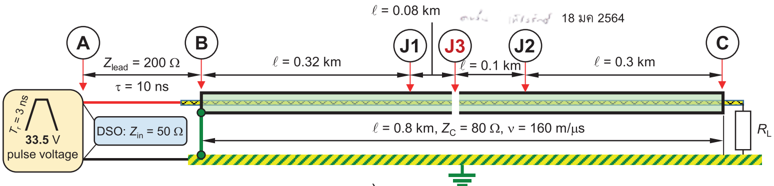


รูปที่ 6.6 สัมประสิทธิ์การสะท้อน Γ ในกรณีของการผิดพร่องแบบลัดวงจร

จากรูปที่ 6.6 จะเห็นว่าเมื่อ R_F/Z_C มีค่าประมาณ 2.5% คลื่นสะท้อน U^- จะเกิดขึ้นเกือบเต็มที่ คือ สะท้อนเกือบเท่ากับคลื่นที่มากระทบ U^+ เพียงแต่มีขั้วตรงข้ามเท่านั้น แต่ถ้า R_F มีค่าประมาณ 10 เท่าของ Z_C คลื่นสะท้อน U^- จะเกิดขึ้นน้อยมาก จึงเหมือนกับสายเคเบิลเป็นปกติ -ไม่มีการลัดวงจรเกิดขึ้น-

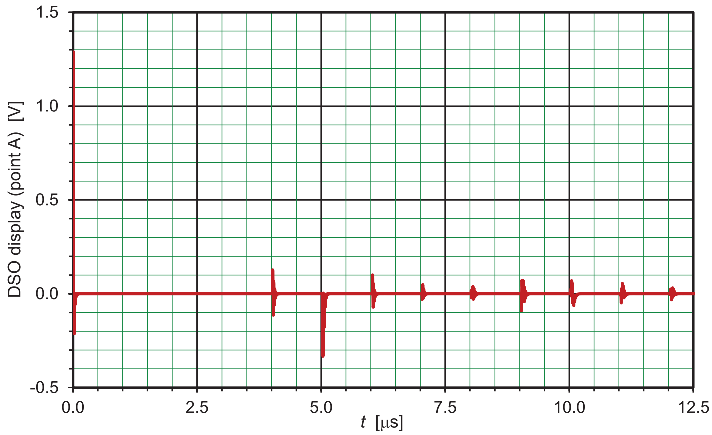
การสะท้อนของคลื่นที่วัดได้ด้วยเครื่อง TDR จึงมีลักษณะดังที่แสดงในตัวอย่างต่อไปนี้

ตัวอย่างที่ 6.9 หลังจากซ่อมแซมสายเคเบิลในตัวอย่างที่ 6.8 ได้ 3 สัปดาห์ สายเคเบิลเส้นนี้ก็ชำรุดอีกครั้งหนึ่ง ทีมช่างจึงไปวัดลายนิ้วมือ โดยนำแบบก่อสร้างในรูป a) ไปด้วย



a)

ทีมช่างได้วัดลายนิ้วมือใหม่ของสายเคเบิลด้วย TDR เครื่องเดิมและได้ผลการวัดการสะท้อนของคลื่นดังแสดงในรูป b)

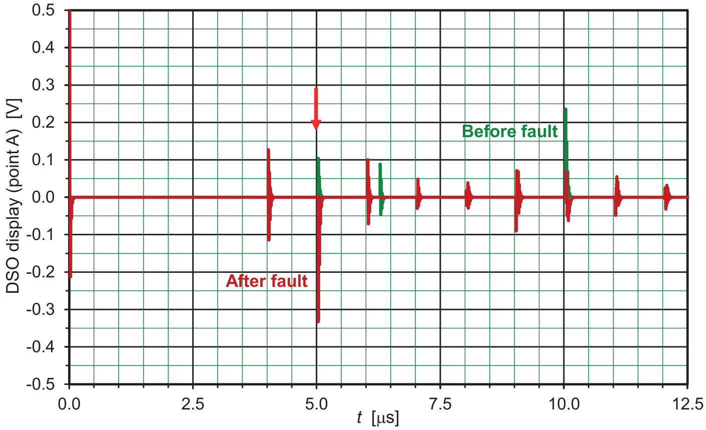


b)

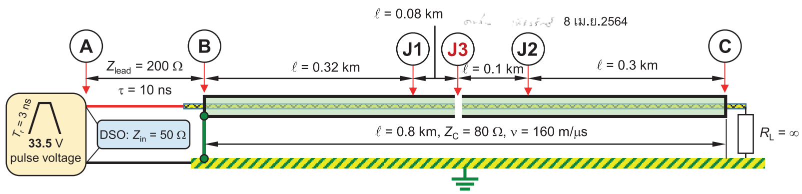
ในฐานะที่ท่านเป็นหัวหน้าทีมช่าง จงวิเคราะห์รูปคลื่นที่บันทึกได้ในรูป b

ท่านเห็นทันทีว่ารูป b) มีจุดที่ผิดปกติที่เวลา $t \sim 5$ μs เพราะมีคลื่นสะท้อนขั้วลบเกิดขึ้น และจุดนี้อยู่ที่ J3 ซึ่งช่างคมสันเป็นผู้ซ่อมจุดที่สายเคเบิลขาดเมื่อ 3 สัปดาห์ที่แล้ว แต่เพื่อความแน่ใจท่านจึงนำลายนิ้วมือของสายเคเบิลเส้นนี้ที่วัดเมื่อ 3 สัปดาห์ที่แล้วก่อนการจ่ายไฟ มาเปรียบเทียบ ดังแสดงในรูป c) ซึ่งจะเห็นว่าเกิดความผิดปกติที่ J3 จริงๆ และเป็นการผิดพร่องเป็นแบบลัดวงจรแน่เพราะคลื่นสะท้อนมีขั้วตรงข้ามกับคลื่นที่เครื่อง TDR ส่งออกไป

อนึ่ง ก่อนที่หัวหน้าทีมช่างจะนำลายนิ้วมือของสายเคเบิลเส้นนี้ที่วัดเมื่อ 3 สัปดาห์ที่แล้วก่อนการจ่ายไฟมาเปรียบเทียบ หัวหน้าทีมช่างได้ลบเงาของการสะท้อนจากจุดต่อต่างๆ ทั้งหมดออกไป (เส้นสีเขียวในรูป c)) เพื่อความชัดเจนในการเปรียบเทียบและทำให้พิจารณาตำแหน่งที่เกิดเงาของการสะท้อนชุดใหม่ต่างๆ ได้ง่ายขึ้น

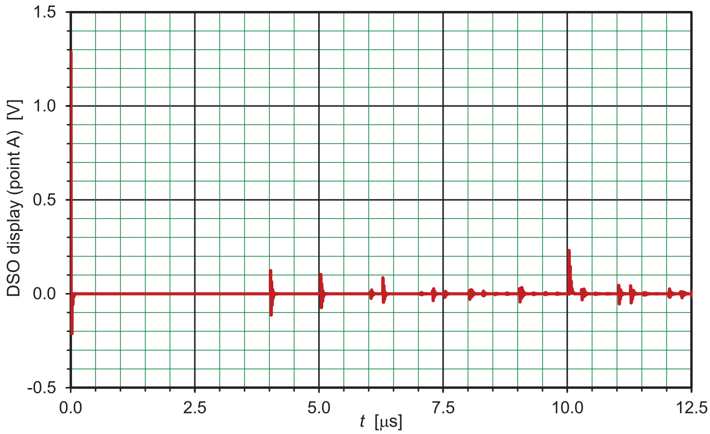


ตัวอย่างที่ 6.10 หลังจากซ่อมแซมสายเคเบิลในตัวอย่างที่ 6.9 ได้อีก 3 เดือน สายเคเบิลเส้นนี้ก็ชำรุดอีกครั้งหนึ่ง ทีมช่างจึงไปวัดลายนิ้วมือ โดยนำแบบก่อสร้างในรูป a) ไปด้วย



a)

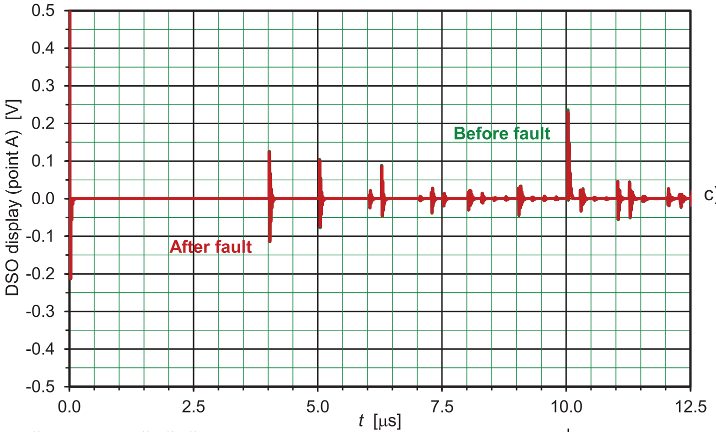
ทีมช่างได้วัดลายนิ้วมือใหม่ของสายเคเบิลด้วยเครื่อง TDR เครื่องเดิมและได้ผลการวัดการสะท้อนของคลื่น ดังแสดงในรูป b)



b)

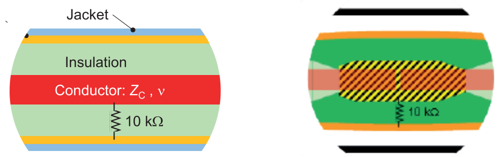
ในฐานะที่ท่านเป็นหัวหน้าทีมช่าง จงวิเคราะห์รูปคลื่นที่บันทึกได้ในรูป b)

ท่านเห็นทันทีว่ารูป b) ดูคุ้นตามาก ท่านจึงนำลายนิ้วมือของสายเคเบิลเส้นนี้ที่วัดเมื่อ 3 เดือนที่แล้วก่อนการจ่ายไฟมาเปรียบเทียบ ดังแสดงในรูป c) ซึ่งจะเห็นว่าตำแหน่งต่างๆ ของคลื่นสะท้อนเท่ากันหมดและขนาดยังใกล้เคียงกันอีกด้วย ซึ่งแปลว่าสายเคเบิลอยู่สภาพปกติ



c)

แต่ทำไมเคเบิลจ่ายไฟไม่ได้? หรือว่าจะเป็นการผิดพร่องแบบลัดวงจรที่มีอิมพีแดนซ์สูง ทางหนึ่งที่หัวหน้าช่างทำคือวัดความต้านทานฉนวนด้วยวิธีที่อธิบายในหัวข้อ 5.2 –ใช้การ์ดอิเล็กโทรดป้องกันที่หัวสายเคเบิลทั้งสองด้านด้วย- ค่าความต้านทานฉนวน R_{ins} ที่เครื่อง IR วัดได้มีค่าเพียง 10 kΩ ดังนั้นจุดที่เกิดผิดพร่องจึงน่าจะมีลักษณะดังแสดงในรูป d)



d)

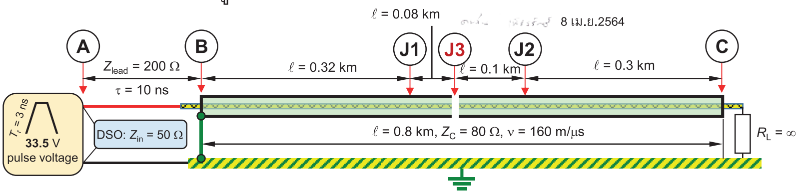
เคเบิล? หรือ จุดต่อสายเคเบิล?

ผลการวัดค่า R_{ins} บอกได้เพียงว่าสายเคเบิลผิดปกติ แต่จุดที่ผิดพร่องอยู่ที่ตำแหน่งใดของสายเคเบิล? -ที่จุดต่อสายเคเบิล J3?- หัวหน้าช่างจึงต้องหาตำแหน่งที่เกิดผิดพร่องด้วยการเผาจุดผิดพร่อง (ดูหัวข้อ 6.1.2) เพื่อทำให้การลัดวงจรเปลี่ยนจากแบบอิมพีแดนซ์สูงไปเป็นแบบอิมพีแดนซ์ต่ำเหมือนกับในตัวอย่างที่ 6.9

6.1.1.6 การผิดพร่องที่ปลอก/ชีลด์โลหะ

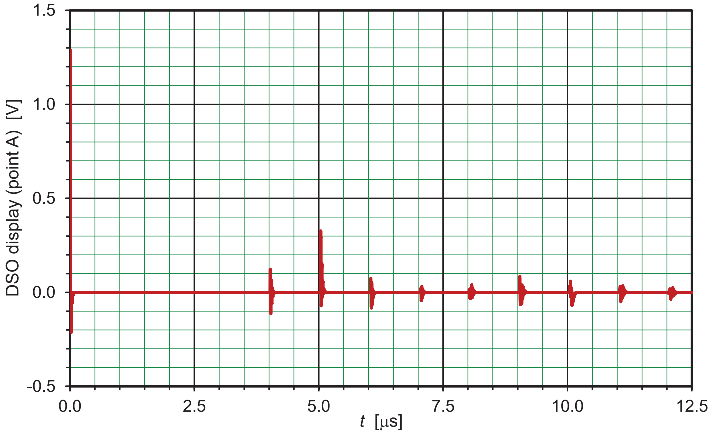
การผิดพร่องที่ปลอก/ชีลด์โลหะของสายเคเบิลที่พบส่วนใหญ่มักเกิดกับสายเคเบิลที่มีชีลด์โลหะแบบแถบทองแดงบางๆ พันซ้อนกันรอบสกรีนฉนวน สาเหตุที่ชีลด์โลหะขาดเกิดมักเกิดจากการสึกกร่อนเพราะมีน้ำในดินผ่านเปลือกนอกของสายเคเบิลเข้ามา การหาตำแหน่งที่ผิดพร่องได้แสดงในตัวอย่างต่อไปนี้

ตัวอย่างที่ 6.11 หลังจากใช้สายเคเบิลในตัวอย่างที่ 6.10 ได้ 5 ปี หัวหน้าทีมช่างก็ไปตรวจสภาพสายเคเบิลเส้นนี้อีกครั้งหนึ่ง โดยนำแบบก่อสร้างในรูป a) ไปด้วย



a)

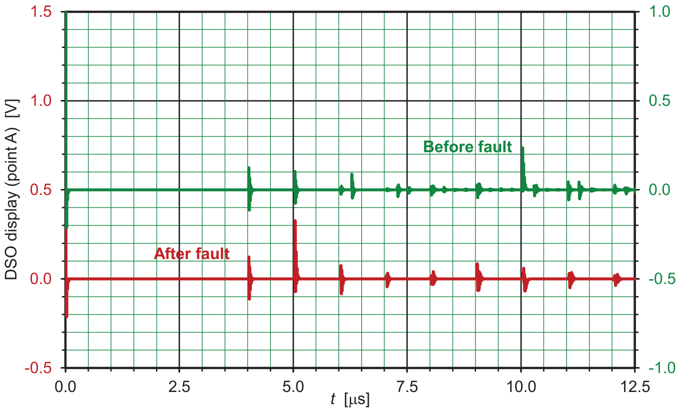
ทีมช่างได้วัดลายนิ้วมือใหม่ของสายเคเบิลด้วย TDR เครื่องเดิมและได้ผลการวัดการสะท้อนของคลื่น ดังแสดงในรูป b)



b)

ในฐานะที่ท่านเป็นหัวหน้าทีมช่าง จงวิเคราะห์รูปคลื่นที่บันทึกได้ในรูป b)

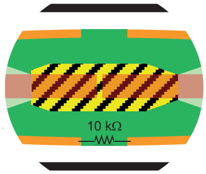
ท่านเห็นทันทีว่ารูป b) ดูคุ้นตามาก ท่านจึงนำลายนิ้วมือของสายเคเบิลเส้นนี้ที่วัดเมื่อ 3 ปีก่อนมาเปรียบเทียบ ดังแสดงในรูป c)



c)

ซึ่งจะเห็นว่าตำแหน่งต่างๆ ของคลื่นสะท้อนยังอยู่ที่เดิมโดยประมาณ แต่ตำแหน่งที่ผิดปกติคือ การสะท้อนที่ปลายสายเคเบิลที่เวลา $t \sim 10$ μs เหมือนจะมีขนาดลดลง ในขณะที่ขนาดการสะท้อนที่จุดต่อสายเคเบิล J3 ที่เวลา $t \sim 5$ μs โตขึ้นมาก แต่ทำไมสายเคเบิลยังจ่ายไฟได้ตามปกติหรือว่าจะเป็นเพราะชีลด์ขาด? เพราะแม้ว่าชีลด์จะขาดแต่สายเคเบิลก็สามารถจ่ายไฟได้เพราะชีลด์ที่หัวสายเบิลทั้งสองข้างต่อลงกราวน์

ทางหนึ่งที่ท่านทำได้คือวัดความต้านทานของชีลด์ว่าต่อถึงกันหรือไม่ ผลปรากฏว่าวัดความต้านทานของชีลด์ได้ถึง 10 kΩ ท่านจึงสรุปว่าเป็นไปได้มากที่ชีลด์ที่จุดต่อสายเคเบิล J3 ขาด -ความต้านทาน 10 kΩ ที่วัดได้คงเป็นความต้านทานของน้ำที่ซึมเข้าไปในบริเวณจุดที่ชีลด์ขาด- และจุดที่เกิดผิดพร่องน่าจะมีลักษณะดังแสดงในรูป d)



d)

6.1.1.7 สรุป

สิ่งที่สำคัญในการใช้วิธีวัดเวลาการสะท้อนของคลื่นด้วยเครื่อง TDR เพื่อหาจุดผิดพร่องในสายเคเบิลคือ การบันทึกลายนิ้วมือของสายเคเบิลภายหลังการติดตั้งสายเคเบิลก่อนการจ่ายไฟเพื่อหาเวลาในการเคลื่อนที่ τ ของสัญญาณในสายเคเบิลจริงๆ ที่หน้างาน -ความเร็วของคลื่นในสายเคเบิลจะเปลี่ยนไปเล็กน้อยตามอุณหภูมิและอายุของสายเคเบิล- และตำแหน่งของจุดต่อทั้งหมดของสายเคเบิล ในการเปรียบเทียบลายนิ้วมือของสายเคเบิลก็ควรใช้ลายนิ้วมือที่บันทึกได้จากเครื่อง TDR เครื่องเดียวกันเพราะ TDR แต่ละเครื่องอาจมีคุณสมบัติแตกต่างกัน

การผิดพร่องแบบเปิดวงจรจะมีอยู่ 2 ลักษณะ คือสายเคเบิลขาดและตัวนำของสายเคเบิลไม่ต่อถึงกันหรือต่อกันไม่แน่น การสะท้อนของคลื่นจะเป็นคลื่นบวกเหมือนกัน แต่ขนาดของพัลส์ที่สะท้อนไม่เท่ากัน โดยขนาดของพัลส์ที่สะท้อนจากสายเคเบิลที่ขาดจะมีขนาดสูงที่สุด และขนาดของพัลส์ที่สะท้อนจะลดลงเรื่อยๆ ตามค่าความต้านทานของจุดระหว่างของตัวนำของสายเคเบิลที่ลดลง จนมีค่าเป็นศูนย์ -ไม่มีการสะท้อน- เมื่อตัวนำของสายเคเบิลต่อถึงกันทางไฟฟ้าอย่างดี

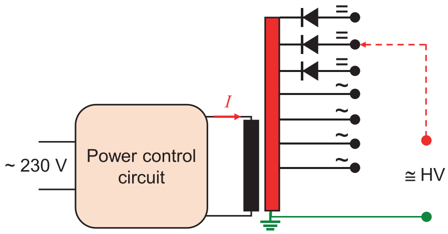
การผิดพร่องแบบลัดวงจรก็มีอยู่ 2 ลักษณะ เช่นกัน คือการลัดวงจรที่มีอิมพีแดนซ์สูง R_{Fhi} และอิมพีแดนซ์ต่ำ R_{Flo} ซึ่งจากรูปที่ 6.6 เราจะเห็นว่าถ้า R_F/Z_C มีค่าประมาณ 2.5% คลื่นสะท้อน U^- จะเกิดขึ้นเกือบเต็มที่ คือสะท้อนเกือบเท่ากับคลื่นที่มากระทบ U^+ เพียงแต่มีขั้วตรงข้ามเท่านั้น แต่หาก $R_F/Z_C > 10$ คลื่นสะท้อน U^- จะเกิดขึ้นน้อยมากจึงเหมือนกับสายเคเบิลเป็นปกติ แต่เราก็ยังสามารถที่จะใช้วิธีการสะท้อนของคลื่นเพื่อหาตำแหน่งที่เกิดผิดพร่องได้ด้วยการเผาจุดผิดพร่องให้อิมพีแดนซ์ของจุดที่ผิดพร่องลดลงจาก $R_{Fhi} \rightarrow R_{Flo}$ หรือใช้เครื่องมือพิเศษ ดังที่จะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

ส่วนในกรณีที่ปลอก/ชีลด์โลหะของสายเคเบิลขาดนั้น สายเคเบิลยังสามารถจ่ายไฟได้ตามปกติถ้าปลอก/ชีลด์โลหะที่หัวสายเคเบิลทั้งสองด้านต่อลงกราวน์ การที่ปลอก/ชีลด์โลหะของสายเคเบิลขาดจะทำให้ขนาดของคลื่นสะท้อนจากปลายสายเคเบิลลดลงในขณะที่คลื่นสะท้อน ณ ตำแหน่งที่ปลอก/ชีลด์โลหะของสายเคเบิลขาดจะโตขึ้น

6.1.2 การเผาจุดผิดพร่อง

ดังที่กล่าวแล้วว่าวิธีใช้หลักการสะท้อนของคลื่นในการหาจุดผิดพร่องจะใช้ได้ดีในกรณีที่ตัวนำหรือปลอก/ชีลด์โลหะขาดจนทำให้ความต้านทานอนุกรมที่เกิดขึ้นมีค่าสูง หรือในกรณีที่ฉนวนเบรกดาวน์และมีอิมพีแดนซ์ที่จุดผิดพร่อง R_F มีค่าต่ำเท่านั้น เพราะถ้า R_F มีค่าสูง คลื่นสะท้อนจะมีขนาดเล็กมากจนอาจไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงของรูปคลื่น เราจึงต้องทำให้ R_F มีค่าต่ำลงโดยการ “เผา” จุดผิดพร่อง

ในที่นี้การ "เผา" ไม่ได้หมายถึงการทำให้เกิดไฟลุกไหม้ที่จุดผิดพร่องแต่หมายถึงการทำให้เนื้อฉนวนในบริเวณที่เกิดเบรกดาวน์กลายเป็น คราบเขม่าที่นำไฟฟ้า (carbonized) ได้จนมีอิมพีแดนซ์ต่ำพอ วิธีเผาก็คือใช้เครื่องมือในรูปที่ 6.7 [TB773, 2019] ทำให้เกิดเบรกดาวน์ที่จุดผิดพร่องซ้ำหลายๆ ครั้งจนจุดผิดพร่องมีอิมพีแดนซ์ต่ำ



รูปที่ 6.7 เครื่องมือเผาจุดผิดพร่อง

เครื่องมือในรูปที่ 6.7 ประกอบด้วยหม้อแปลงแรงสูงที่มี แทป (tap) ให้เลือกแรงดันสูงได้หลายระดับตามความเหมาะสมเพื่อทำให้เกิดเบรกดาวน์ซ้ำที่จุดผิดพร่อง -บางแทปอาจมีไดโอดเพื่อแปลงแรงดันขาออกให้เป็นแรงดันสูงกระแสตรง- และมีวงจรควบคุมกระแสที่จ่ายให้จุดผิดพร่องขณะทำการเผาด้วย

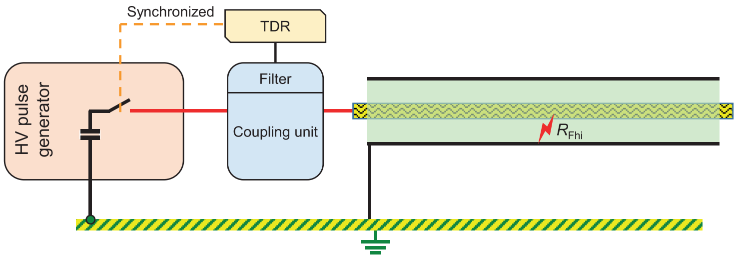
การเผาจุดผิดพร่องของสายเคเบิลที่ฉนวนด้วยการดาษจุ่มน้ำมันทำได้ง่ายมากเพราะน้ำมันเป็นสารอินทรีย์ แต่ถ้าเผาแล้วทิ้งเวลานานเกินไปก็อาจทำให้มีน้ำมันซึมกลับเข้ามาที่จุดผิดพร่องจนทำให้จุดผิดพร่องมีอิมพีแดนซ์สูงเหมือนเดิมอีกครั้งหนึ่ง สำหรับสายเคเบิลที่ฉนวนด้วยพลาสติก เช่น XLPE การเผาจุดผิดพร่องอาจทำให้เกิดคราบเขม่าได้ยาก นอกจากนั้นหากทิ้งเวลานานเกินไปก็อาจมีน้ำจากภายนอกสายเคเบิลซึมเข้ามาที่จุดผิดพร่องจนทำให้จุดผิดพร่องมีอิมพีแดนซ์สูงเหมือนเดิมได้

โปรดสังเกตว่าถ้าเราเผาจุดผิดพร่องจนมีอิมพีแดนซ์ R_F ต่ำมากพอ เราก็จะใช้เครื่อง TRD หาจุดผิดพร่องได้ง่ายมาก แต่การที่ R_F ต่ำจะทำให้การเผาจุดผิดพร่องครั้งต่อไปไม่เกิดการสปาร์ก -กระแสลัดวงจรจะไหลเพิ่มขึ้นๆ ตามระดับแรงดันที่ใช้ในการเผาจุดผิดพร่อง- จึงไม่มีเสียงเกิดขึ้นทำให้การหาตำแหน่งผิดพร่องที่แน่นอนด้วยวิธีการฟังเสียงทำได้ยากหรือใช้ไม่ได้เลย

นอกจากนั้น การเผาจุดผิดพร่องมักทำลายจุดผิดพร่องจนทำให้เราไม่สามารถตรวจสอบได้ว่าจุดที่ผิดพร่องนั้นเกิดจากสาเหตุใด

6.1.3 วิธีวัดคลื่นสะท้อนจากอาร์ก

วิธีวัดคลื่นสะท้อนจากอาร์ก (arc reflection method, ARM) -บางครั้งก็เรียกว่า วิธีวัดคลื่นอิมพัลส์ครั้งที่สอง (secondary impulse method, SIM) หรือ วิธีวัดคลื่นอิมพัลส์ซ้ำ (multiple impulse method, MIM)- ใช้เครื่องมือที่แสดงในรูปที่ 6.8 [TB773, 2019]



รูปที่ 6.8 เครื่องวัดคลื่นสะท้อนจากอาร์ก

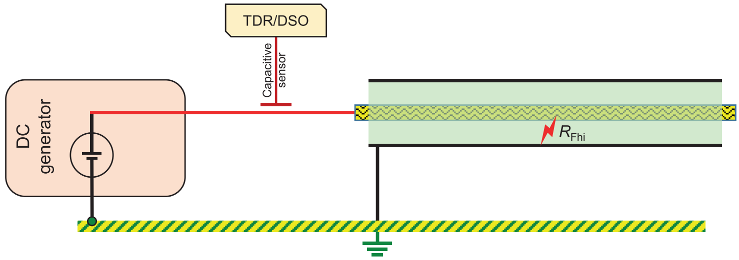
หลักการของการวัดคลื่นสะท้อนจากอาร์กก็คือ การใช้พัลส์แรงดันสูงทำให้จุดผิดพร่องเปลี่ยนจากอิมพีแดนซ์สูง R_{Fhi} ไปเป็นอิมพีแดนซ์ต่ำ R_{Flo} เพียงช่วงเวลาสั้นๆ โดยเครื่องมือในรูปที่ 6.8 จะป้อนพัลส์แรงดันสูง HV_{pulse} จากตัวเก็บประจุขนาดใหญ่ให้สายเคเบิลที่เกิดผิดพร่อง ทำให้จุดผิดพร่องที่มีอิมพีแดนซ์สูงเกิดเบรกดาวน์จนกลายเป็นอาร์กนาน 2-3 ms ซึ่งเป็นเวลานานพอที่เราจะส่งคลื่น TDR_{pulse} จากเครื่อง TDR ซ้อนเข้าไปในสายเคเบิลจนสามารถบันทึกลายนิ้วมือของสายเคเบิลนี้ได้

วิธี ARM/SIM จะใช้การส่ง TDR_{pulse} เข้าไปในสายเคเบิลเพียงครั้งเดียว ขั้นตอนการใช้เครื่อง TDR ที่นิยมคือ 1. ส่ง TDR_{pulse} เข้าไปในสายเคเบิลที่เกิดผิดพร่องแบบ R_{Fhi} เพื่อบันทึกลายนิ้วมือ -บันทึกคลื่นสะท้อนต่างๆ จากจุดต่อของสายเคเบิลและจากปลายสายเคเบิล-; 2. ป้อนพัลส์แรงดันสูง HV_{pulse} เพื่อทำให้จุดผิดพร่องเกิดอาร์ก; 3. ส่ง TDR_{pulse} ตามเข้าไปเพื่อบันทึกลายนิ้วมืออีกครั้งหนึ่ง; และ 4. เปรียบเทียบลายนิ้วมือทั้งก่อนและหลังการเกิดอาร์ก

อย่างไรก็ตาม ถ้าจุดที่ผิดพร่องเปียกหรือมีน้ำมันซึมกลับเข้ามาก็อาจทำให้เวลาที่เกิดอาร์กจาก HV_{pulse} ล่าช้าออกไป คลื่น TDR_{pulse} ลูกแรกจึงมองไม่เห็นจุดผิดพร่อง ดังนั้นวิธี MIM จึงส่ง TDR_{pulse} ออกไปซ้ำๆ กันหลายครั้งเพื่อบันทึกลายนิ้วมือของสายเคเบิล

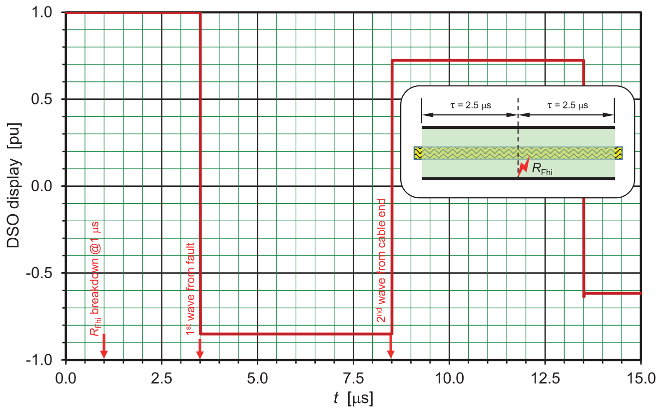
6.1.4 วิธีวัดคลื่นจากการเบรกดาวน์ที่จุดผิดพร่อง

วิธีวัดคลื่นจากการเบรกดาวน์ที่จุดผิดพร่อง (decay method) ใช้การป้อนแรงดันกระแสตรง HV_{DC} ตั้งแต่ 1-100 kV ในรูปที่ 6.9 [TB773, 2019] ให้สายเคเบิลที่เกิดผิดพร่องแบบลัดวงจรที่มีอิมพีแดนซ์สูง การเกิดเบรกดาวน์ที่จุดผิดพร่อง R_{Fhi} จะทำให้แรงดันที่ R_{Fhi} ตกลงเป็นศูนย์ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแรงดันที่สามารถตรวจจับได้ด้วย TDR หรือ DSO



รูปที่ 6.9 การวัดคลื่นจากการเบรกดาวน์ที่จุดผิดพร่อง

ตัวอย่างรูปคลื่นที่วัดได้จาก DSO แสดงในรูปที่ 6.10



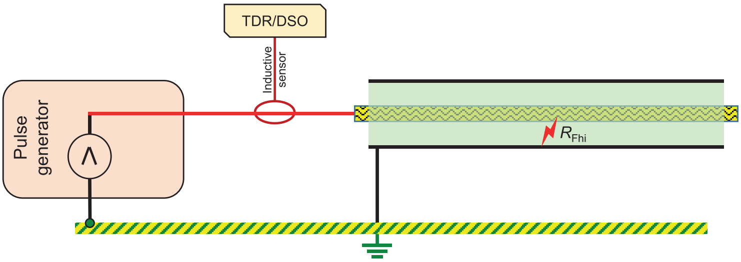
รูปที่ 6.10 รูปคลื่นจากการเบรกดาวน์ที่จุดผิดพร่อง เมื่อป้อนแรงดัน HV_{DC}

ในรูปที่ 6.10 เราได้ป้อนแรงดัน HV_{DC} เพื่ออัดประจุสายเคเบิลจนมีแรงดันเต็มที่ 1 pu ที่เวลา t = 0 s จากนั้นจุดผิดพร่อง R_{Fhi} ก็เบรกดาวน์ที่เวลา t = 1 µs ต่อมา ทำให้เกิดคลื่นวิ่งไปที่ปลายทั้งสองข้างของสายเคเบิล แต่เนื่องจากคลื่นใช้เวลาในการวิ่งไปที่ปลายทั้งสองด้านเท่ากับ 2.5 µs เท่ากัน ดังนั้น DSO จึงเห็นการเปลี่ยนแปลงครั้งแรกที่เวลา t = 1+2.5 = 3.5 µs ส่วนการเปลี่ยนแปลงครั้งที่ 2 จะเกิดจากการสะท้อนกลับมาจากปลายสายอีกด้านหนึ่งที่เวลา t = 3.5+(2×2.5) = 8.5 µs

อย่างไรก็ตาม เราไม่สามารถใช้วิธีนี้ถ้าจุดผิดพร่องมีอิมพีแดนซ์ต่ำ -หรือที่เรียกกันว่า จุดผิดพร่องแบบเปียก (wet fault)- เพราะไม่สามารถใช้แรงดันกระแสตรงอัดประจุให้สายเคเบิลได้

6.1.5 วิธีวัดกระแสพัลส์

วิธีวัดกระแสพัลส์ (impulse current method) ใช้การส่งพัลส์กระแสที่มีพลังงานสูงไปทำให้จุดผิดพร่องที่มีอิมพีแดนซ์สูงเบรกดาวน์คล้ายกับวิธีวัดคลื่นสะท้อนจากอาร์กดังแสดงรูปที่ 6.11 ซึ่งเมื่อ R_{Fhi} เบรกดาวน์ก็จะมีพัลส์กระแสวิ่งไปที่ปลายสายเคเบิลทั้งสองข้าง การวัดคลื่นสะท้อนจะใช้วิธีวัดการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น



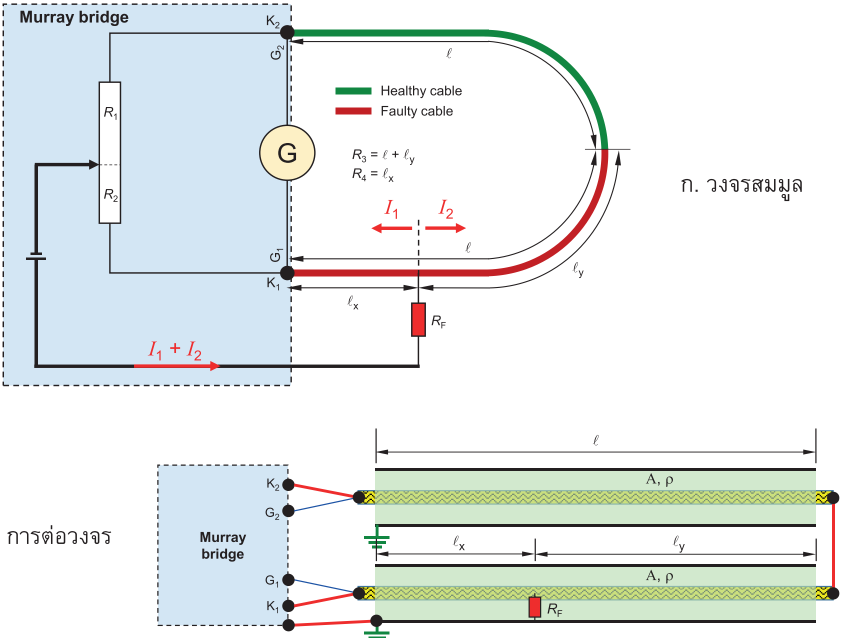
รูปที่ 6.11 เครื่องวัดกระแสพัลส์

6.1.6 วิธีบริจด์

วิธีบริจด์ (bridge method) แบ่งออกเป็น 3 วิธีคือ ก.เมอเรย์บริจด์ (Murray bridge); ข.เกรเซอร์บริจด์ (Glaser bridge); และ ค.วิธีวัดแรงดันตกคร่อม (voltage drop method)

6.1.6.1 เมอเรย์บริจด์

เมอเรย์บริจด์ใช้ในการหาจุดผิดพร่องระหว่างตัวนำ-ตัวนำ, ตัวนำ-กราวน์, และปลอก/ชีลด์โลหะขาด มีวงจรวัดคล้ายกับวีทสโตนบริจด์ ดังที่แสดงในรูปที่ 6.12



รูปที่ 6.12 เมอเรย์บริจด์

โปรดสังเกตว่าเมอเรย์บริจด์ต้องใช้สายเคเบิลที่มีสภาพปกติ (healthy cable) ต่ออนุกรมกับสายเคเบิลที่เกิดผิดพร่อง (faulty cable) โดยที่สายเคเบิลทั้งสองเส้นควรมี ความยาวเท่ากัน, วัสดุที่ทำตัวนำประเภทเดียวกัน และมีพื้นที่หน้าตัดของตัวนำ A เท่ากัน ดังนั้นเมอเรย์บริจด์จึงเหมาะกับการหาจุดผิดพร่องของสายเคเบิลหลายแกน

เมื่อปรับค่า R_1 และ/หรือ R_2 จนบริจด์สมดุล กระแสที่ไหลผ่านกัลวานอมิเตอร์จะเท่ากับศูนย์ ดังนั้น

$$\frac{R_2 I_1}{R_4 I_1} = \frac{R_1 I_2}{R_3 I_2} \Rightarrow \frac{R_2}{\ell_x} = \frac{R_1}{(\ell + \ell_y)} = \frac{R_1}{(2\ell - \ell_x)}$$
$$\ell_x = 2\ell \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad \text{[m]} \tag{6.4}$$

ในกรณีที่สายเคเบิลทั้งสองเส้นมี A ไม่เท่ากัน และ/หรือตัวนำจากวัสดุที่ต่างกัน เราต้องคำนึงถึงพารามิเตอร์ที่ต่างกันนี้ด้วยในการคำนวณ โดยใช้สมการ

$$\ell_x = \ell \frac{R_2}{R_1 + R_2} \left(1 + \frac{\rho_H}{A_H} \frac{A_F}{\rho_F} \right) \quad \text{[m]} \tag{6.5}$$

เมื่อ ρ_H และ A_H คือ ความต้านทานจำเพาะ [Ωm] และพื้นที่หน้าตัดตัวนำ [m^2] ของสายเคเบิลเส้นที่ปกติ
ρ_F และ A_F คือ ความต้านทานจำเพาะ [Ωm] และพื้นที่หน้าตัดตัวนำ [m^2] ของสายเคเบิลเส้นที่เกิดผิดพร่อง

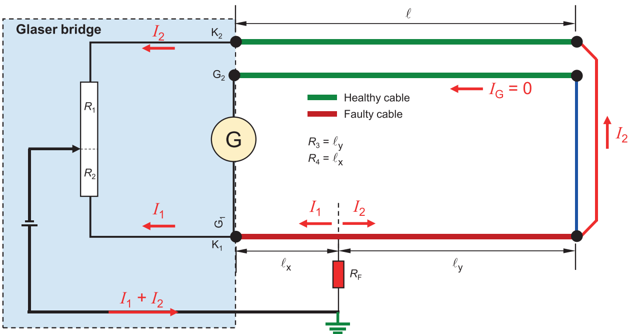
หรือใช้เกรเซอร์บริจด์ในการหาจุดผิดพร่อง

การหาจุดผิดพร่องด้วยเมอเรย์บริจด์มีความแม่นยำสูงถึง 0.5-1% ของความยาวสายเคเบิล ℓ แต่ก็ต้องคำนึงถึงความต้านทานแฝง -ความต้านทานของจุดต่อสายเคเบิล, ความต้านทานของสายไฟที่ใช้ต่อระหว่างสายเคเบิลเส้นที่ปกติกับสายเคเบิลเส้นที่เกิดผิดพร่องเพราะอาจมีความยาวหลายสิบเมตรเนื่องจากความยาวของหัวสายเคเบิลหรือสายเคเบิลทั้งสองเส้นวางห่างกัน- ขณะที่ทำการวัดด้วย

อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ A ของสายเคเบิลทั้งสองเส้นมีค่าต่างกันมาก เมอเรย์บริจด์จะมีความแม่นยำในการวัดลดลง

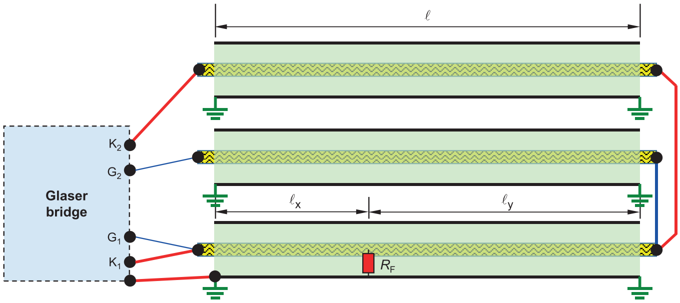
6.1.6.2 เกรเซอร์บริจด์

เกรเซอร์บริจด์มักใช้กับการผิดพร่องที่เกิดจากตัวนำลัดวงจรลงกราวน์ในกรณีที่สายเคเบิลเส้นที่ปกติกับสายเคเบิลเส้นที่เกิดผิดพร่องมีพื้นที่หน้าตัดของตัวนำ A ไม่เท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 6.13



ก. วงจรสมมูล

ข. การต่อวงจร



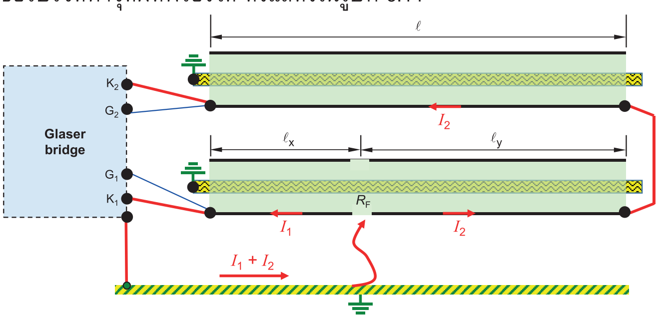
รูปที่ 6.13 การใช้เกรเซอร์บริจด์หาจุดผิดพร่องที่เกิดจากตัวนำลัดวงจรลงกราวน์

โปรดสังเกตว่าเกรเซอร์บริจด์ต้องใช้สายเคเบิลที่มีสภาพปกติ 2 เส้น สายสายเคเบิลที่มีสภาพปกติเส้นหนึ่งจะต่ออนุกรมกับสายเคเบิลที่เกิดผิดพร่อง -ขณะที่ใช้บริจด์มีกระแส I_2 ไหลผ่าน- ส่วนสายสายเคเบิลที่มีสภาพปกติอีกเส้นหนึ่งจะต่อกับกัลวานอมิเตอร์ -เมื่อเกรเซอร์บริจด์สมดุลจะมีกระแส $I_G = 0$ ไหลผ่าน- จึงเหมาะกับการหาจุดผิดพร่องของสายเคเบิลหลายแกน และเมื่อปรับค่า R_1 และ/หรือ R_2 จนเกรเซอร์บริจด์สมดุล กระแสที่ไหลผ่านกัลวานอมิเตอร์จะเท่ากับศูนย์ ดังนั้น

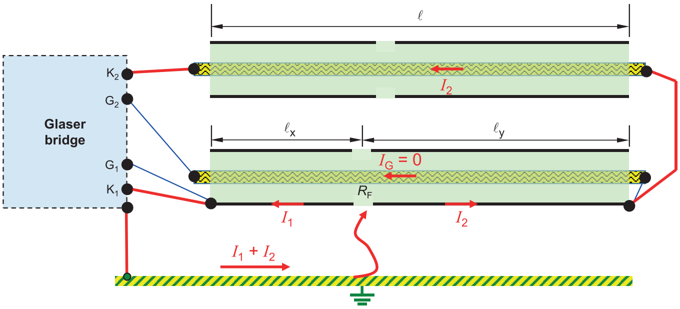
$$\frac{R_2 I_1}{\ell_x I_1} = \frac{R_1 I_2}{\ell I_G + \ell_y I_2} \Rightarrow \frac{R_2}{\ell_x} = \frac{R_1}{\ell_y} = \frac{R_1}{\ell - \ell_x}$$

$$\ell_x = \ell \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad [\mathrm{m}] \tag{6.6}$$

ในกรณีที่ปลอก/ชีลด์โลหะขาด -เราใช้ปลอก/ชีลด์โลหะเป็นทางกลับของกระแสที่จ่ายให้โหลด- อาจเนื่องมาจากสายเคเบิลที่ฝังดินโดยตรงได้รับแรงกลจากภายนอกหรือลากสายเคเบิลไม่ดีขณะติดตั้ง เราอาจใช้เกรเซอร์บริจด์หาจุดผิดพร่องได้ ดังแสดงในรูปที่ 6.14



ก. ใช้ปลอก/ชีลด์โลหะของสายเคเบิลเส้นที่ปกติเป็นทางผ่านของกระแส I_2 การคำนวณหา ℓ_x ใช้สมการที่ 6.4 เช่นเดียวกับเมอเรย์บริจด์



ข. ใช้ตัวนำของสายเคเบิลเส้นที่ปกติเป็นทางผ่านของกระแส I_2 การคำนวณหา ℓ_x ใช้สมการที่ 6.6

รูปที่ 6.14 การใช้เกรเซอร์บริจด์หาจุดผิดพร่องที่เกิดจากปลอก/ชีลด์โลหะของสายเคเบิลขาด

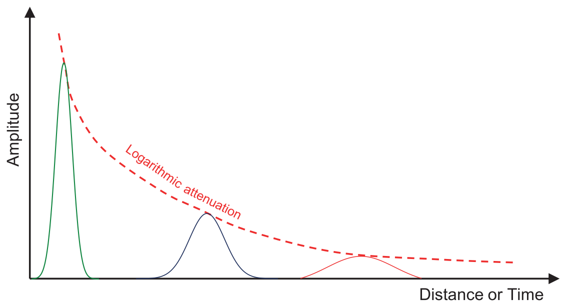
6.1.6.3 วิธีวัดแรงดันตกคร่อม

วิธีวัดแรงดันตกคร่อม (voltage drop method) ดูหัวข้อ 2.3.8.4 ใน [TB773, 2019]

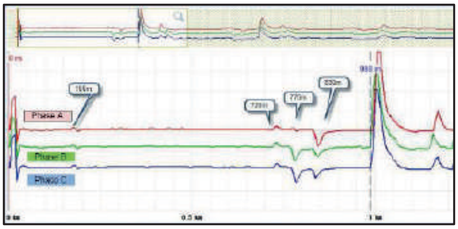
6.1.7 ข้อสังเกต

การหาจุดผิดพร่องด้วยการวัดเวลาที่คลื่นสะท้อนมีการเปลี่ยนแปลงในข้อ 6.1.1-6.1.5 ไม่ง่ายอย่างที่อธิบาย เพราะในที่นี้เราไม่ได้คำนึงถึงการลดทอนของคลื่นเนื่องจากความต้านทานของตัวนำของสายเคเบิล R_{con} และความต้านทานของฉนวนสายเคเบิล R_{ins} ทั้งยังไม่ได้คำนึงถึงผลปรากฏการณ์ที่ผิวที่ทำให้องค์ประกอบความถี่สูงของพัลส์ถูกลดทอนมากกว่าความถี่ต่ำ ซึ่งจะทำให้ความชันของพัลส์น้อยลง ดังที่อธิบายไว้ในหัวข้อ 1.4 และ 1.5 ของบทที่ 1

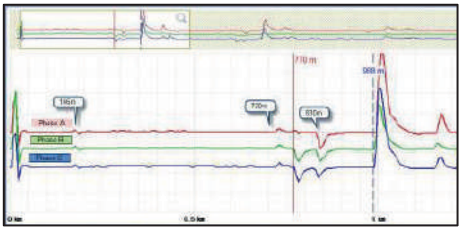
ลักษณะของรูปคลื่นของพัลส์ที่วิ่งในสายเคเบิลในทางปฏิบัติ ได้แสดงในรูปที่ 6.15-6.17



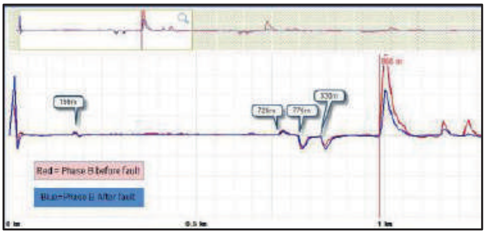
รูปที่ 6.15 การลดทอนของคลื่นและผลของปรากฏการณ์ที่ผิวเมื่อคลื่นเคลื่อนที่ในสายเคเบิลจริง



ก. ลายนิ้วมือก่อนจ่ายไฟให้สายเคเบิล

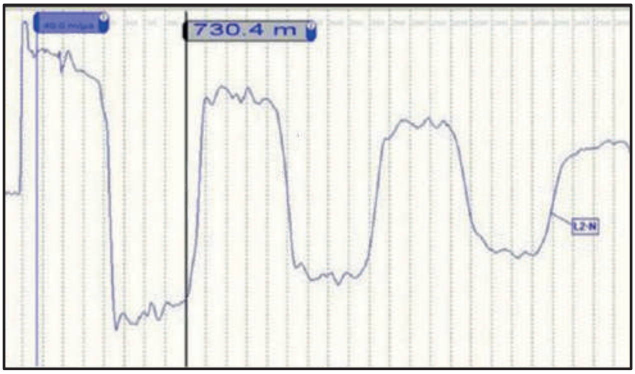


ข. ลายนิ้วมือหลังจากเกิดผิดพร่องที่สายเคเบิลเฟส B



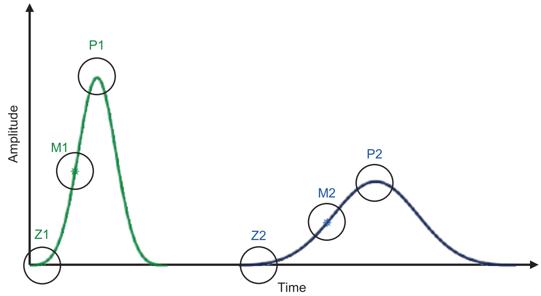
ค. ลายนิ้วมือของสายเคเบิลเฟส B ก่อนและหลังเกิดผิดพร่อง

รูปที่ 6.16 ลายนิ้วมือของสายเคเบิลที่บันทึกได้จากเครื่อง TDR



รูปที่ 6.17 รูปคลื่นที่บันทึกได้ด้วยวิธีวัดคลื่นจากการเบรกดาวน์ที่จุดผิดพร่อง [TB773, 2019]

ดังนั้นการตัดสินว่าเวลาใดที่คลื่นเกิดการเปลี่ยนแปลงจึงค่อนข้างยาก ดังแสดงในรูปที่ 6.18

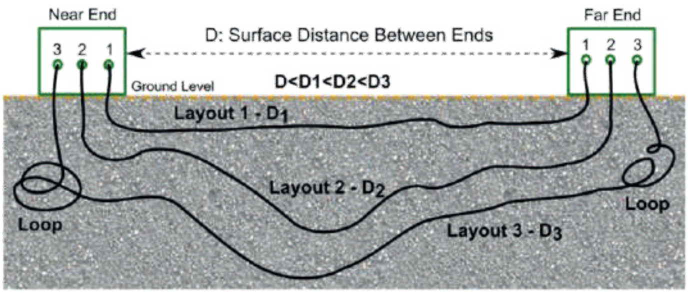


รูปที่ 6.18 การระบุวัดเวลาที่คลื่นเกิดการเปลี่ยนแปลง

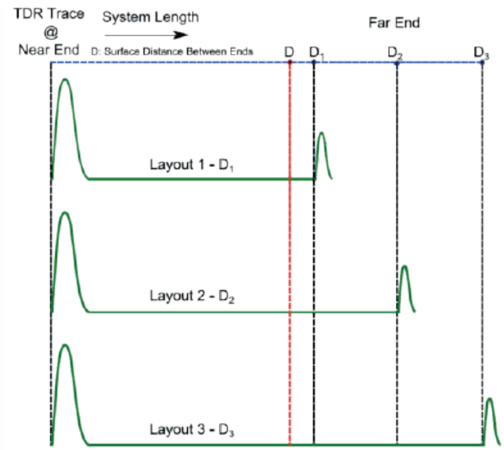
จากรูปที่ 6.18 เราจะเห็นว่ามีเวลาอยู่ 3 ตำแหน่งที่เราสามารถใช้ในการระบุเวลาที่คลื่นเกิดการเปลี่ยนแปลงคือ เวลาที่คลื่นมีขนาดเท่ากับศูนย์ Z, เวลาที่คลื่นมีขนาดสูงสุด P และเวลาที่คลื่นมีขนาดเป็นครึ่งหนึ่งของขนาดสูงสุด M -เลข 1 และ 2 ในรูปหมายถึงคลื่นลูกที่ 1 และ 2 ตามลำดับ- ซึ่งเราจะเห็นว่าการระบุว่า Z และ P เกิดขึ้นที่เวลาใดจะทำได้ยากขึ้นเมื่อความชันของคลื่นลดลง -คลื่นสะท้อนลูกถัดๆ มา- ในที่นี้การระบุเวลาที่คลื่นเกิดการเปลี่ยนแปลงที่ดีที่สุดเหมือนจะเป็นที่จุด M เพราะขนาดศูนย์และขนาดสูงสุดหาได้ไม่ยากนัก อย่างไรก็ตามการระบุเวลาที่คลื่นเกิดการเปลี่ยนแปลงผิดพลาดไป 2-3 μs ก็หมายถึงการระบุตำแหน่งที่ผิดพร่องในสายเคเบิลคลาดเคลื่อนไป 300-500 m -สมมุติว่า v = 160 m/μs- ซึ่งไม่ใช่ระยะทางที่สั้นนัก

หรือถ้าเราใช้วิธีบริจด์ในข้อที่ 6.1.6 ที่แม่นยำมากในการหาจุดผิดพร่องของสายเคเบิล การวัดที่มีความแม่นยำ 1% จะหมายถึงการระบุตำแหน่งที่ผิดพร่องในสายเคเบิลคลาดเคลื่อนไป 500 m ถ้าสายเคเบิลยาว 50 km

นอกจากนั้นการเดินสายเคเบิลใต้พื้นดินไม่ได้เป็นเส้นตรงเสมอไปเพราะต้องมีทางโค้งเสมอ และต้องยังต้องเผื่อสายไว้ในบ่อพักสายในกรณีที่ต้องทำจุดต่อสายเคเบิล ดังแสดงในรูปที่ 6.19 [NEETRAC, 2016] -สายเคเบิลที่วางในทะเลจะโค้งไปมาเป็นรูปตัว S เสมอ เพื่อเผื่อความยาวไว้สำหรับการยกขึ้นมาซ่อมแซมเหนือพื้นน้ำ-



ก. สายเคเบิลฝังใต้ดิน 3 แบบ -Layout D1-D3-



ข. ตำแหน่งที่เกิดผิดพร่องที่เครื่อง TDR วัดได้จากเคเบิลฝังใต้ดินทั้ง 3 แบบ

รูปที่ 6.19 ผลของรูปแบบการลากสายเคเบิลใต้ดินที่มีต่อการระบุตำแหน่งที่เกิดผิดพร่อง

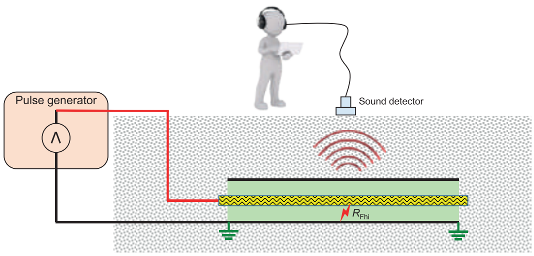
ดังนั้นเราจึงต้องระบุตำแหน่งที่เกิดผิดพร่องให้แม่นยำขึ้นด้วยวิธีอื่นเพิ่มเติม เพื่อลดเวลาและค่าใช้จ่ายในการหาจุดผิดพร่องเพื่อทำการซ่อมแซม

6.2 การระบุตำแหน่งที่ผิดพร่อง

ตำแหน่งของจุดผิดพร่องที่แน่นอนอาจมาได้จากการเห็นจุดผิดพร่องโดยตรงหรือรายงานจากผู้เห็นเหตุการณ์ วิธีหาจุดที่เกิดผิดพร่องในหัวข้อนี้เป็นการตรวจจับสัญญาณต่างๆ เช่นเสียง, คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และแรงดัน บนผิวดินหรือผิวน้ำตามแนวการวางสายเคเบิล

6.2.1 วิธีฟังเสียง

วิธีฟังเสียง (acoustic method) ใช้ได้ดีกับสายเคเบิลที่ใต้ฝังดินโดยตรง (back filled) เกิดการผิดพร่องที่มีอิมพีแดนซ์สูง ดังแสดงในรูปที่ 6.20 [TB773, 2019]

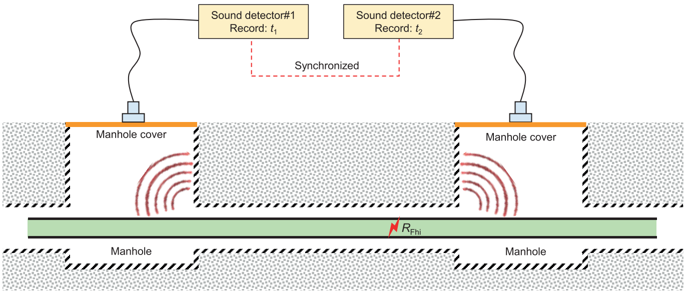


รูปที่ 6.20 วิธีฟังเสียงที่เกิดจากการเบรกดาวน์ที่จุดผิดพร่อง -บนผิวดิน-

เครื่องกำเนิดพัลส์ในรูปจะสร้างพัลส์แรงดันสูงส่งไปที่จุดที่เกิดผิดพร่องเพื่อทำให้เกิดเบรกดาวน์ การเบรกดาวน์จะทำให้เกิดเสียงซึ่งจะดังมากน้อยเท่าใดก็ขึ้นอยู่กับพลังงานของพัลส์ ดังนั้นเสียงที่เกิดขึ้นจึงสามารถตรวจจับได้ที่ผิวดินด้วยเครื่องวัดเสียงความไวสูง

เครื่องกำเนิดพัลส์จะส่งพัลส์ซ้ำเป็นช่วงๆ ขณะที่ทีมช่างตรวจจับเสียงตามแนวสายเคเบิล ยิ่งเดินเข้าใกล้กับจุดผิดพร่องเท่าใด เสียงก็จะดังมากขึ้นๆ

สำหรับเคเบิลที่วางในท่อ เสียงที่เกิดขึ้นจากจุดผิดพร่องอาจไม่สามารถตรวจจับได้โดยตรงที่ผิวดิน แต่ก็อาจตรวจจับได้จากเสียงที่วิ่งในท่อร้อยสายเคเบิลไปที่บ่อพักสายทั้งสองข้าง ดังแสดงในรูปที่ 6.21 [TB773, 2019]



รูปที่ 6.21 วิธีฟังเสียงที่เกิดจากการเบรกดาวน์ที่จุดผิดพร่อง -ที่บ่อพักสายเคเบิล-

ในรูปที่ 6.21 เสียงจากการเบรกดาวน์ที่จุดผิดพร่องจะเคลื่อนที่มาถึง *เครื่องตรวจจับเสียง* (sound detector, SD) ทั้งสองเครื่องที่เวลาไม่เท่ากัน ถ้า SD ทั้งสองเครื่องตั้งเวลาไว้ตรงกัน -เช่น ใช้เวลาจาก GPS เหมือนกัน- เราก็สามารถคำนวณหาตำแหน่งที่เกิดผิดพร่องได้ถ้าทราบความยาวสายเคเบิลในท่อ ℓ และความแตกต่างของเวลา $\Delta t = t_1 - t_2$ จากสมการ

$$t_1 = \frac{\ell_1}{v}; \quad t_2 = \frac{\ell_2}{v}; \quad t_1 + t_2 = \frac{\ell}{v}; \quad t_1 - t_2 = \Delta t = \frac{2\ell_1 - \ell}{v}$$

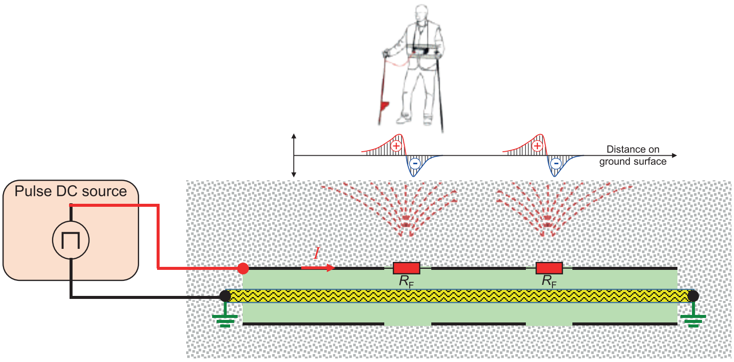
$$\ell_1 = \frac{v \cdot \Delta t + \ell}{2} \quad [\mathrm{m}] \tag{6.7}$$

เมื่อ v อาจสมมุติให้เท่ากับความเร็วของเสียงในอากาศปกติเท่ากับ 335 m/s (1100 ft/s) หรืออาจหาได้จากการวัด v ของเสียงจริงในท่อ เพราะการสะท้อนของเสียงในท่อซึ่งทำจากวัสดุต่างๆ มีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเสียงไม่เท่ากันและ/หรือมีน้ำขังในท่อ โดยส่งเสียง -แต่ไม่ใช่ตะโกนหรือจุดประทัด- จากจากบ่อพักหนึ่งที่เวลา $t = t_1 = 0$ แล้ววัดว่าเสียงที่มาถึงอีกบ่อพักหนึ่งเกิดขึ้นที่เวลา $t = t_2$ เท่าใด

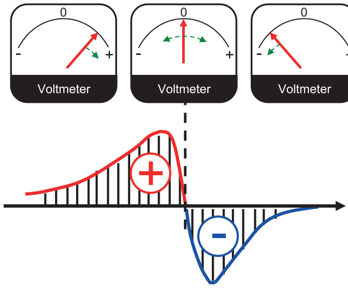
6.2.2 วิธีวัดแรงดันช่วงก้าวบนผิวดิน

วิธีวัดแรงดันช่วงก้าวบนผิวดิน (step voltage method) ใช้ได้ดีกับการหาจุดผิดพร่องที่ปลอก/ชีลด์โลหะของสายเคเบิลที่ฝังได้ดินโดยการส่งพัลส์แรงดันกระแสตรงไปตามปลอก/ชีลด์โลหะดังที่แสดงในรูปที่ 6.22 [TB773, 2019] -ตัวนำของสายเคเบิลในรูปต่อลงกราวน์เพื่อความปลอดภัย แต่ไม่มีกระแสไหลเพราะไม่มีการผิดพร่องแบบลัดวงจรระหว่างตัวนำกับปลอก/ชีลด์โลหะของสายเคเบิล-

พัลส์แรงดันกระแสตรงจะไหลไปตามปลอก/ชีลด์โลหะของสายเคเบิลจนถึงที่จุดชำรุดโดยไม่ทำให้เกิดการเบรกดาวน์ แต่จะทำให้เกิดกระแสบางส่วนไหลผ่านความต้านทานของจุดที่ชำรุด R_F ไปยังชีลด์อีกด้านหนึ่งและมีกระแสบางส่วนไหลไปในดินทั้งทางด้านซ้ายและด้านขวา



ก. การต่อวงจรทดสอบ



ข. แรงดันที่อ่านได้จากมิเตอร์วัดแรงดันกระแสตรง

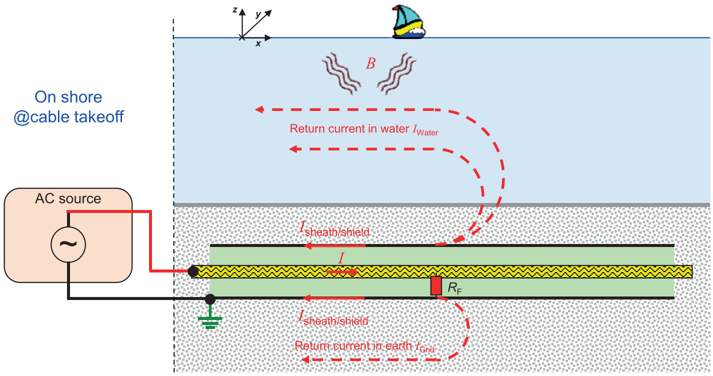
รูปที่ 6.22 วิธีวัดแรงดันช่วงก้าวบนผิวดินเนื่องจากกระแสที่ไหลจากปลอก/ชีลด์โลหะที่ชำรุดของสายเคเบิล

เนื่องจากดินมีความต้านทานจำเพาะ ρ ค่าๆ หนึ่ง จึงทำให้เกิดแรงดันบนผิวดินขึ้นเนื่องจากมีกระแสไหลในดิน ขนาดของแรงดันที่ผิวดินจึงขึ้นกับพลังงานของพัลส์แรงดันกระแสตรง, ρ และ R_F

เมื่อเราเดินวัดความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นบนผิวดินตามแนวสายเคเบิล เข็มของมิเตอร์วัดแรงดันกระแสตรงจะกระดิกเมื่อเราเข้าใกล้จุดที่เกิดผิดพร่อง โดยในรูปที่ 6.22 เข็มจะกระดิกไปทางแรงดันบวกเมื่อเราเข้าใกล้จุดผิดพร่องจากทางด้านซ้าย แต่จะขยับน้อยมากถ้าอยู่ตรงกับตำแหน่งที่ผิดพร่อง และเข็มจะกระดิกไปทางแรงดันลบเมื่อเราออกจากจุดผิดพร่องไปทางด้านขวา

6.2.3 วิธีวัดสนามแม่เหล็ก

วิธีฟังเสียงและวิธีวัดแรงดันช่วงก้าวบนผิวดินไม่สามารถใช้หาจุดผิดพร่องของสายเคเบิลที่วางใต้น้ำได้ เราจึงใช้ วิธีวัดสนามแม่เหล็ก (magnetic field detection) ที่แสดงในรูปที่ 6.23 โดยวิธีนี้จะวัดสนามแม่เหล็กที่กระจายออกมาจากจุดผิดพร่อง R_F ของสายเคเบิลเนื่องจากมีกระแสไหล I ในน้ำ



รูปที่ 6.23 วิธีวัดสนามแม่เหล็กบนผิวน้ำจากการที่กระแสมีไหลจากจุดผิดพร่องของสายเคเบิลไปในน้ำ

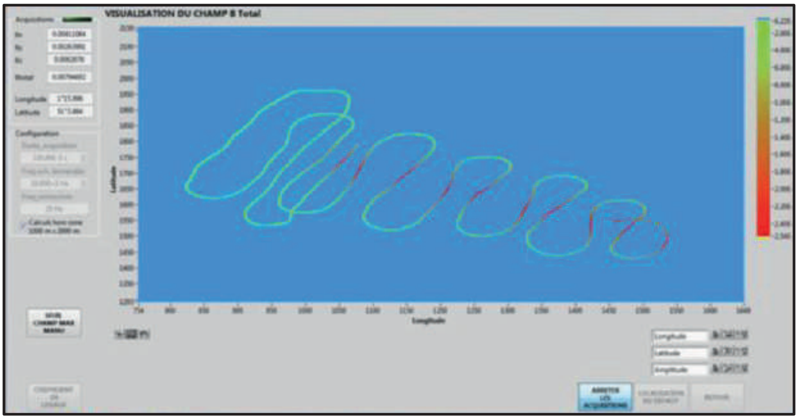
แหล่งจ่ายแรงดันกระแสสลับในรูปที่ 6.23 จะป้อนกระแสให้จุดผิดพร่อง โดยที่กระแสนี้สามารถไหลกลับได้หลายทางคือ ผ่านทางปลอก/ชีลด์โลหะของสายเคเบิล, ผ่านลงไปในดินใต้พื้นน้ำ หรือผ่านน้ำกลับไปที่แหล่งจ่ายแรงดันกระแสสลับ -ดังนั้นจึงเหมาะมากกับสายเคเบิลใต้น้ำที่เกิดการผิดพร่องแบบเปิดวงจร คือสายขาดทั้งเส้น เพราะกระแสจะไหลกลับผ่านดินใต้พื้นน้ำหรือน้ำเป็นส่วนใหญ่- กระแสที่ไหลกลับนี้จะสร้างสนามแม่เหล็ก *B* ขึ้น โดยความแรงของ *B* จะขึ้นอยู่กับขนาดของกระแส ซึ่งสามารถตรวจจับได้ด้วยเครื่องวัดสนามแม่เหล็กดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 6.24

ก. 10 Hz - 3 kHz, 0.01-12000 μT ข. 50/60 Hz - 3 kHz, 20-2000 μT

รูปที่ 6.24 ตัวอย่างโพรบวัดสนามแม่เหล็ก

ส่วนการแสดงผลนั้นอาจแสดงเป็นตัวเลขที่จอแสดงผลหรือใช้ซอฟต์แวร์ประมวลผลทั้งขนาดของสนามแม่เหล็กและตำแหน่งที่เกิดสนามแม่เหล็กขึ้น -ข้อมูลจาก GPS- ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 6.25 โดยที่สีเขียวในรูปหมายถึงสนามแม่เหล็กมีค่าสูง ส่วนสีแดงหมายถึงสนามแม่เหล็กมีค่าต่ำ

โปรดสังเกตว่าถ้ามีกระแสไหลผ่านปลอก/ชีลด์โลหะของสายเคเบิล สนามแม่เหล็ก ณ ตำแหน่งบนผิวน้ำเหนือจุดผิดพร่องจะมีค่าน้อย สนามแม่เหล็กจะค่าสูงขึ้นเมื่อเคลื่อนแนวการวัดสนามแม่เหล็กเข้าใกล้แหล่งจ่ายแรงดันกระแสสลับ และในทางกลับกันสนามแม่เหล็กจะค่าต่ำลงเรื่อยๆ เมื่อเคลื่อนแนวการวัดสนามแม่เหล็กไกลออกไปจากแหล่งจ่ายแรงดันกระแสสลับ [TB773, 2019] แนะนำว่าตำแหน่งที่เกิดผิดพร่องคือตำแหน่งที่วัดค่าสนามแม่เหล็กได้เท่ากับครึ่งหนึ่งของค่าสนามแม่เหล็กสูงสุดที่วัดได้



รูปที่ 6.25 การแสดงผลสนามแม่เหล็กบนผิวน้ำที่วัดได้จากจุดผิดพร่องของสายเคเบิลในน้ำ

6.3 สรุป

การหาตำแหน่งผิดพร่องของสายเคเบิลใต้ดินหรือใต้น้ำที่แม่นยำทำได้ไม่ยากหากเรา มีข้อมูลของสายเคเบิลที่ผิดพร่องครบถ้วน, มีเครื่องมือที่จำเป็น และมีผู้ควบคุมงานที่มีประสบการณ์ การหาตำแหน่งผิดพร่องของสายเคเบิลใต้ดินหรือใต้น้ำประกอบไปด้วย

ก. ข้อมูลของสายเคเบิลที่ผิดพร่อง: ประกอบไปด้วยข้อมูลจำเพาะของสายเคเบิลคือความต้านทานของตัวนำ [Ω/m], ประเภทของฉนวน -XLPEหรือกระดาษจุ่มน้ำมัน-, ความต้านทานของตัวนำ [Ω/m], ความยาวของสายเคเบิล, แนวการเดินสายเคเบิล, ตำแหน่งของจุดต่อสายเคเบิลทั้งหมด, ลายนิ้วมือทุกประเภทของสายเคเบิล -ประวัติการวัดรูปคลื่นการสะท้อนด้วยเครื่อง TDR โดยเฉพาะอย่างยิ่งรูปคลื่นที่แสดงจุดต่อสายของสายเคเบิลทั้งหมด, ประวัติการวัด Tg δ, ประวัติการวัด PD ทั้งหมด- สรุปง่ายๆ ก็คือ สายเคเบิลทุกเส้นควรมีประวัติส่วนตัวเพราะอย่างน้อยที่สุดเราก็สามารถนำข้อมูลต่างๆ มาประเมินได้ว่า สายเคเบิลเส้นนี้ควรรื้อออกแล้วเดินสายเคเบิลเส้นใหม่ทดแทนได้หรือยัง

ข. เครื่องมือ/อุปกรณ์ที่ต้องเตรียม: จากข้อมูลเบื้องต้นที่ได้รับจากหน้างาน เราอาจจะประเมินได้คร่าวๆ ว่าการผิดพร่องที่เกิดขึ้นเป็นแบบใด อุปกรณ์ที่แนะนำสำหรับการประมาณหาตำแหน่งที่เกิดผิดพร่อง คือ เครื่องวัดความต้านทานฉนวน, เครื่อง TDR, บริจด์วัดความต้านทาน, อุปกรณ์เผาจุดผิดพร่อง ฯลฯ สำหรับการระบุตำแหน่งที่เกิดผิดพร่องก็ควรเตรียมไมโครโฟนและ/หรือเครื่องวัดสนามแม่เหล็กตามความเหมาะสม

หลังจากซ่อมสายเคเบิลที่ชำรุดเสร็จแล้วก็ทำการทดสอบความทนแรงดัน (ถ้าต้องการ) แล้ววัดลายนิ้วมือชุดใหม่ เช่น IR, TDR, Tg δ, PD, ฯลฯ ของสายเคเบิล

6.4 เอกสารอ้างอิงบทที่ 6

[Bewley, 1951], Bewley, L.V., "*Traveling Waves on Transmission systems*", 2nd edition, John Wiley & Sons, inc., NY, 1951.

[NEETRAC, 2016], Hernandez-Mejia, J.C., "*Ch5 Time domain reflectometry (TDR)*", National electric energy, testing, research and application center, Georgia Tech Research Corporation, 2016.

[Pspice, 2016], "*PSPICE 9.1 Student version*", Cadence PCB solution, 2016.

[TB773, 2019], "*Fault location on land and submarine links (AC & DC)*", CIGRE, 2019.