

การวิเคราะห์ทางเทคนิคของปัญหาในสายเคเบิลใต้ดิน
Technical Analysis of Under Ground Cables Problems



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาปีการศึกษา 2563 ถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Technical Analysis of Under Ground Cables Problems



THIS PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT
FOR THE BACHELOR DEGREE IN ELECTRICAL ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระยาเลิศลักษณ์
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ปีการศึกษา 2563

การวิเคราะห์ทางเทคนิคของปัญหาในสายเคเบิลใต้ดิน
Technical Analysis of Under Ground Cables Problems



อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รศ.ดร.นรเศรษฐ์ พัฒนเดช
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2563

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การวิเคราะห์ทางเทคนิคของปัญหาในสายเคเบิลใต้ดิน

ผู้จัดทำ

1. นาย ศักรินทร์ ตูระธรรม
2. นาย ศุภณัฐ เชี่ยวชาญกิจการ
3. นาย สหรัฐ วงศ์นาป่า
4. นาย สิริคุปต์ บัวเขียว



ดร.เนตร วัฒนเดช อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.เนตรเศรษฐ์ พัฒนเดช)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่หรือใช้เพื่อวัตถุประสงค์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภพ จันทร์เจริญสุข)

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การวิเคราะห์ทางเทคนิคของปัญหาในสายเคเบิลใต้ดิน

นายศักรินทร์ ตระธรรม
นายศุภณัฐ เชี่ยวชาญกิจการ
นายสหัสรัฐ วงศ์นาป่า
นายสิริคุปต์ บัวเขียว
รศ.ดร.นรเศรษฐ์ พัฒนเดช อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2563

บทคัดย่อ

ปัญหาที่เกิดขึ้นในสายเคเบิลใต้ดิน ถือเป็นปัญหาที่อาจเกิดขึ้นกับสายเคเบิลใต้ดินทุกเส้น เช่น ปัญหาแรงดันเกินที่เกิดที่เปลือกเคเบิล (Over sheath voltage) การเกิดดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge: PD) และฉนวนเสื่อมสภาพ ดังนั้นเทคนิคการวิเคราะห์และการแก้ปัญหาดังกล่าวที่เกิดขึ้นกับสายเคเบิลใต้ดินจึงเป็นสิ่งที่จำเป็น โครงการนี้ผู้จัดทำจึงได้นำเสนอ การวิเคราะห์ทางเทคนิคของปัญหาในสายเคเบิลใต้ดิน ประกอบไปด้วยเทคนิค 3 ประการดังนี้ 1) แรงดันที่เปลือกของเคเบิล สามารถคำนวณตามหลักการของมาตรฐาน IEEE 507 ถ้าหากทราบพารามิเตอร์ที่จำเป็นของสายเคเบิลใต้ดิน โดยโครงการได้นำเสนอการคำนวณที่ทำได้ง่ายขึ้นโดยใช้ซอฟต์แวร์มาช่วยคำนวณ และนำเสนอหลักการแก้ปัญหาแรงดันที่เปลือกคือ ต่อกราวด์แบบไขว้ (Cross bounding) ซึ่งโครงการได้พิสูจน์โดยใช้ทฤษฎีตามมาตรฐาน IEEE 507 ในการตรวจสอบแรงดันซึ่งพบว่าการต่อกราวด์สามารถช่วยลดได้ทั้งแรงดันและกระแสไหลวนที่เปลือกของเคเบิลได้จริง 2) เมื่อระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีความยาวสายมาก การทดสอบด้วยแหล่งจ่ายแรงดัน 50 Hz จะเป็นการใช้กำลังไฟฟ้าอย่างมหาศาลในการทดสอบ จึงจำเป็นต้องลดกำลังไฟฟ้าทดสอบลงโดยทำการลดความถี่ในการทดสอบให้เหลือต่ำกว่า 1 Hz โดยจะอ้างอิงตามมาตรฐาน IEEE 400.2 ซึ่งเป็นการทดสอบสายเคเบิลโดยใช้แรงดัน VLF (Very Low Frequency) โดยมีทั้งการทดสอบความคงทน (Withstand test) และการทดสอบแบบวินิจฉัย (Diagnostic test) และ 3) การทดสอบตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วน (partial discharge) เป็นการทดสอบที่นิยมอย่างแพร่หลายสำหรับการทดสอบสายเคเบิลในปัจจุบัน เนื่องด้วยการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนสามารถวินิจฉัยปัญหาที่เกิดขึ้นได้ โดยสามารถบ่งบอกถึงความรุนแรง บ่งบอกถึงตำแหน่งที่เกิดขึ้นได้ของปัญหาในสายเคเบิลใต้ดิน สามารถทดสอบได้ทั้ง Online & Offline Test ทั้ง Conventional & Non- Conventional และยังสามารถทดสอบแบบ Synchronous Multi-channel PD Measurement เพื่อความเหมาะสมกับการนำไปเลือกใช้งานทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อสาธารณะ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Technical Analysis of Under Ground Cables Problems

Mr.Sakkarin Turatham

Mr.Suppanat Cheawchankitjakarn

Mr.Saharat Wongnapa

Mr.Sirakup Buakhaew

Associate.Prof.Dr. Norasage Pattanadech Advisor

ABSTRACT

Problems in underground cable is a problem that can occur with all underground cables such as over-voltage problems at the cable sheath (sheath voltage), partial discharge and insulation degradation. Therefore, analytical techniques and solutions to such problems arising with underground cables are necessary. This project presented the technical analysis of problems in underground cables which consists of 3 techniques as follows: 1) Sheath voltage which can be calculated according to the IEEE 507 standard if necessary, parameters of underground cable are known. The project presents simpler calculations using software to help calculate and present the principle of solving the problem of sheath voltage (Cross bounding), the project proved using IEEE 507 standard theory for sheath voltage detection and found that grounding can reduce both voltage and eddy current at the cable sheath. 2) When an underground cable system has a large length of cable. Testing with a 50 Hz voltage source is a tremendous amount of power applied to the test. Therefore, it is necessary to reduce the test power by reducing the test frequency to less than 1 Hz, referring to the IEEE 400.2 standard, which is a cable test using VLF (Very Low Frequency) voltage. Withstand test, diagnostic test and partial discharge test. And 3) The partial discharge test is the most popular type of cable testing today. As with some partial discharge tests, it can diagnose any problems that arise. Which can indicate violence Indicates the possible location of problems in underground cables. Able to test both online and offline test, both conventional and non-conventional, and can also test synchronous multi-channel partial discharge measurement to suit the test application selection.

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยการให้ความช่วยเหลือและสนับสนุนจากหลายท่านโดยเฉพาะอย่างยิ่งต้องขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดอกเตอร์ นรเศรษฐ์ พัฒนเดช และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดอกเตอร์ ภพ จันเจริญสุข อาจารย์ที่ปรึกษา รวมถึงคุณปณยวีร์ ฉายศิริ ที่กรุณาให้ข้อเสนอแนะและความคิดเห็นต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการมาด้วยดีตลอด และได้กรุณาตรวจแก้ไขปริญญาานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อยเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณคุณเพทาย นิมสนอง คุณศักดิ์ดีตา มณีโรจน์ และ เจ้าหน้าที่ประจำ บริษัท เทสลาอาร์พาวเวอร์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการออกแบบวงจรทดสอบการดิสชาร์จบางส่วนด้วยเทคนิค Synchronous Multi-channel และช่วยจัดหาอุปกรณ์สำหรับการต่อวงจรทดสอบให้

ขอขอบคุณคุณอ่องและคุณเปิ้ล เจ้าหน้าที่กองออกแบบระบบสายเคเบิลใต้ดิน การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (งามวงศ์วาน) ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการจัดหาข้อมูลและความรู้เกี่ยวกับโครงสร้างสายเคเบิลใต้ดิน และเทคนิคการคำนวณแรงดัน sheath voltage สำหรับการทำโครงการนี้

นอกจากนั้นขอขอบคุณพี่บอส เจ้าหน้าที่กองรีเลย์ โรงไฟฟ้า GPSC จังหวัดระยอง ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการจัดหาข้อมูลการทดสอบสายเคเบิลใต้ดินด้วยแรงดันความถี่ต่ำสำหรับการทำโครงการนี้

ท้ายนี้คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา และครอบครัวซึ่งให้การสนับสนุนในด้านการเงินและกำลังใจอีกทั้งเพื่อน ๆ พี่ ๆ และน้อง ๆ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในด้านการจัดหาอุปกรณ์ต่าง ๆ ในการทำโครงการครั้งนี้จนสำเร็จได้ด้วยดี จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and ^{III} cite the document when use.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูปภาพ	VII
สารบัญตาราง	XI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน	3
1.5 แผนการดำเนินงาน	4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 แรงดันที่เปลือกของเคเบิล (Cable sheath voltage)	6
2.2 ปัญหาการเสื่อมสภาพของเคเบิลจาก Treeing	9
2.3 เทคนิคการแก้ปัญหาแรงดันที่เปลือกของสายเคเบิล	14
2.4 เทคนิคการทดสอบสายเคเบิลด้วย VLF	19
2.4.1 การทดสอบความคงทนด้วย VLF (VLF AC withstand voltage testing)	21
2.4.2 การทดสอบแฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กทริกด้วย VLF (Tangent delta: $\tan \delta$)	28
2.4.3 การทดสอบดิสชาร์จบางส่วน (Partial discharge)	37
2.5 เทคนิคการวิเคราะห์และตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วน	39
2.5.1 วัตถุประสงค์ของการตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วน	41
2.5.2 เซนเซอร์ที่ใช้ในการตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนแบบออนไลน์	41
2.5.3 การวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนแบบ conventional	42
2.5.4 การวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนแบบ non-conventional	46
2.5.5 เทคนิคการแยกชนิดของการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (synchronous multi-channel partial discharge measurement)	47
2.5.6 การแสดงผลของการวัดดิสชาร์จบางส่วน	53
2.6 แนวทางปฏิบัติกับแรงดันที่เปลือกเคเบิลตามมาตรฐาน IEEE 575-2014	54

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การออกแบบการทดลองและวิธีการทดลอง	55
3.1 แรงดันที่เปลือกของเคเบิลและเทคนิคการแก้ปัญหา	55
3.1.1 แรงดันที่เปลือกของสายเคเบิล (sheath voltage)	55
3.1.2 เทคนิคการแก้ปัญหาแรงดันที่เปลือกของสายเคเบิล	56
3.2 การทดสอบสายเคเบิลใต้ดิน โดยใช้เทคนิค Very Low Frequency	56
3.2.1 การทดสอบชุดที่ 1	56
3.2.2 การทดสอบชุดที่ 2	57
3.2.3 การทดสอบชุดที่ 3	58
3.3 การทดสอบดิสชาร์จบางส่วน	60
3.3.1 การทดสอบดิสชาร์จบางส่วน แบบ conventional และ non- conventional	63
3.3.1 การทดสอบดิสชาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคแยกการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (synchronous multi-channel PD measurement)	67
บทที่ 4 ผลการทดลองและประเมินผล	70
4.1 แรงดันที่เปลือกของเคเบิลและเทคนิคการแก้ปัญหา	70
4.1.1 แรงดันที่เปลือกของเคเบิล (cable sheath voltage)	70
4.1.2 เทคนิคการแก้ปัญหาแรงดันที่เปลือกของสายเคเบิล	75
4.2 การทดสอบด้วยเทคนิค Very Low Frequency (VLF)	76
4.2.1 การทดสอบชุดที่ 1	76
4.2.2 การทดสอบชุดที่ 2	79
4.2.3 การทดสอบชุดที่ 3	81
4.3 เทคนิคการวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วน	87
4.3.1 ผลการทดลองการวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วน	87
4.3.2 ผลการทดลองการวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนด้วยเทคนิค Synchronous Multi-Channel PD Measurement	90
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	101
5.1 แรงดันที่เปลือกของเคเบิลและเทคนิคการแก้ปัญหา	101
5.1.1 แรงดันที่เปลือกของสายเคเบิล	101
5.1.2 การแก้ปัญหาแรงดันที่เปลือกของสายเคเบิล	101
5.2 การทดสอบสายเคเบิลใต้ดินโดยใช้เทคนิค Very Low frequency	101
5.3 การวัดดิสชาร์จบางส่วน	103

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีลาดกระบัง อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ยกเว้นที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เป็นพิเศษ ซึ่งหากมีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
เอกสารอ้างอิง	105
ภาคผนวก	107
ภาคผนวก ก. บทความทางวิชาการ	108
ภาคผนวก ข. ข้อมูลอุปกรณ์ทดสอบ	113
ภาคผนวก ค. ภาพระหว่างการปฏิบัติโครงการ	116
ประวัติผู้เขียน	121



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and ^{VI} cite the document when use.

สารบัญญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 การเหนี่ยวนำของฟลักซ์แม่เหล็กที่ตัวนำอะลูมิเนียมส่วน metallic sheath ทำให้มีลักษณะคล้ายกระบวนการเหนี่ยวนำระหว่างขดลวดภายในหม้อแปลงไฟฟ้า	2
2.2 ลักษณะของต้นไม้ไฟฟ้แบบโบว์	10
2.3 ลักษณะของต้นไม้ไฟฟ้แบบครีบ ก) เริ่มเกิดจากชั้นกั้นตัวนำ ข) เริ่มเกิดจากชั้นกั้นฉนวน	11
2.4 แบบจำลองโครงสร้างของต้นไม้ไฟฟ้แบบสร้อยไข่มุกโดย Sverre Hvidsten	11
2.5 ลักษณะของต้นไม้ไฟฟ้ ก) ต้นไม้ไฟฟ้แบบพุ่ม ข) ต้นไม้ไฟฟ้แบบกิ่ง	12
2.6 การเปลี่ยนจากต้นไม้ไฟฟ้ไปสู่อต้นไม้ไฟฟ้ 1.จุดปลายต้นไม้ไฟฟ้ 2.จุดเริ่มต้นต้นไม้ไฟฟ้ 3.เนื้อฉนวน ก) การเปลี่ยนจากต้นไม้ไฟฟ้ไปสู่อต้นไม้ไฟฟ้ 1 กิ่ง ข) การเปลี่ยนจากต้นไม้ไฟฟ้ไปสู่อต้นไม้ไฟฟ้หลายกิ่ง ค) การเกิดต้นไม้ไฟฟ้ที่จุดเริ่มต้นของต้นไม้ไฟฟ้ที่ขอบฉนวน	13
2.7 ตำแหน่งของ water blocking ของสายเคเบิล 115 kV ก) Longitudinal water-blocking ข) Radial water-blocking	14
2.8 ลักษณะการจัดวางตัวนำแต่ละเฟสแบบสลับ	14
2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับ ก) ระยะห่างระหว่างตัวนำ (S) ข) รัศมีเปลือกหุ้มชั้นนอก (d)	15
2.10 การกระจายแรงดันบนเปลือกของเคเบิลเมื่อต่อลงดินจุดเดียว	16
2.11 การต่อลงดินของสายเคเบิลสามเฟส ก) การต่อลงดินแบบจุดเดียว ข) การต่อลงดินแบบสองจุด	16
2.12 หลักการและวิธีการต่อแบบ cross bounding	17
2.13 การต่อ cross bounded cable with transposition	18
2.14 ส่วนประกอบของเคเบิลและประเภทการทดสอบ	20
2.15 จุดบกพร่องของระบบสายเคเบิลใต้ดิน	21
2.16 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ทดสอบกับสายเคเบิล	27
2.17 การวัดผล $\tan \delta$	30
2.18 ผลการเกิดดิสชาร์จบางส่วน และเซนเซอร์ที่ใช้ในการตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน (IEC 62478)	41
2.19 วงจรพื้นฐานการตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วน	42
2.20 วงจรทดสอบตรวจจับ PD แบบสมดุล ก) การนำ C_k เชื่อมกับเครื่องมือวัด ข) การนำ C_t เชื่อมกับเครื่องมือวัด	44
2.21 วงจรตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนแบบวงจรทดสอบแบบแยกขั้วสัญญาณ (polarity discrimination circuit arrangement)	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use. VII

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.22 วงจรตรวจจับดิสซาร์จบางส่วนแบบวงจรทดสอบแบบสมดุล (balanced circuit arrangement)	45
2.23 วงจรสำหรับการเปรียบเทียบวงจรตรวจวัดดิสซาร์จบางส่วน	46
2.24 เซนเซอร์ตรวจจับกระแส (Omicron MCT 120 High-Frequency Current Transformer)	47
2.25 การตรวจวัด PD โดยใช้ C_k และ HFCT	47
2.26 การซ้อนทับสัญญาณอิมพัลส์ของ PD โดยทำการวนเก็บค่าในแต่ละ Channel k_1 , k_2 , และ k_3	48
2.27 การแยกผลของแหล่งจ่ายสัญญาณ PD จากจุดบกพร่องต่าง ๆ	49
2.28 การระบุตำแหน่งเสมือนของจุดบกพร่องใน Star diagram	50
2.29 การวัด PD แบบ 3 Channel ที่สเตเตอร์ของอะซิงโครนัสมอเตอร์พิกัด 10 kV 7 MW ป้อนแรงดันเฟสเดียว โดยข้างบนแสดงถึงสัญญาณรบกวน (Cluster 1) และ PD (Cluster 2) ใน star diagram โดยแสดงอยู่ในรูปของ phase-resolve ในรูปด้านล่าง	51
2.30 การวัดในหลายย่านความถี่ โดยแสดงผลใน star diagram และแยกผลของสัญญาณที่ได้	51
2.31 ผลลัพธ์ของการวัดสัญญาณ PD ในระบบไฟฟ้ากระแสตรงด้วยการวัดแบบ 3CFRD	52
2.32 การดิสซาร์จบางส่วนบนฐานเวลารูปวงรี ก) จากแบบจำลอง ข) จากการแสดงผล	53
2.33 การดิสซาร์จบางส่วนบนฐานเวลารูปคลื่นไซน์ ก) จากแบบจำลอง ข) จากการแสดงผล	53
3.1 การแบ่งระยะของการ cross bounding ในกรณีศึกษาที่ 2	56
3.2 การทดสอบสายเคเบิลใต้ดิน โดยใช้เทคนิค Very Low Frequency	60
3.3 หม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ ก) หม้อแปลงทดสอบขนาด 100 kV, 10 kVA ข) หม้อแปลง regulating transformer	60
3.4 ตัวเก็บประจุคัปปลิงขนาด 100 kV, 50 Hz	61
3.5 Omicron MCT 120 High-Frequency Current Transformer	61
3.6 ระบบวัด ก) ชุดอุปกรณ์คัปปลิง MPD 600 ข) ชุดเปรียบเทียบประจุ CAL 542	62
3.7 ก) อิเล็กโทรดระนาบเพิ่มสำหรับการจำลองโคโรนาดิสซาร์จ ข) อิเล็กโทรดระนาบ ทรงกลมสำหรับการจำลองการดิสซาร์จบนพื้นผิวโดยใช้ฉนวนระหว่างช่องว่าง	62
3.8 สายเคเบิลที่ได้ออกแบบสำหรับการทดสอบการดิสซาร์จบางส่วน	63
3.9 วงจรทดสอบการดิสซาร์จบางส่วน	63
3.10 วงจรทดสอบการตรวจวัด PD โดยใช้ C_k และ HFCT นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า	64
3.11 การต่อวงจรทดสอบการตรวจวัด PD โดยใช้ C_k และ HFCT	64
3.12 วงจรทดสอบการดิสซาร์จบางส่วนกรณีจำลองโคโรนาดิสซาร์จด้านแรงดันสูง	65

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

สารบัญญรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.13 วงจรทดสอบการติสซาร์จบางส่วนกรณีจำลองโคโรนาติสซาร์จด้านแรงดันต่ำ	65
3.14 วงจรทดสอบการติสซาร์จบางส่วนกรณีจำลองการติสซาร์จบนผิวด้านแรงดันสูง	66
3.15 วงจรทดสอบการติสซาร์จบางส่วนกรณีจำลองการติสซาร์จบนผิวด้านแรงดันต่ำ	66
3.16 วงจรทดสอบการติสซาร์จบางส่วนของสายเคเบิล	67
3.17 วงจรทดสอบการติสซาร์จบางส่วนด้วยเทคนิค Synchronous Multi-channel กรณีสายเคเบิลและการจำลองโคโรนาติสซาร์จด้านแรงดันสูง	67
3.18 วงจรทดสอบการติสซาร์จบางส่วนด้วยเทคนิค Synchronous Multi-channel กรณีสายเคเบิลและการจำลองโคโรนาติสซาร์จด้านแรงดันต่ำ	68
3.19 วงจรทดสอบการติสซาร์จบางส่วนด้วยเทคนิค Synchronous Multi-channel กรณีสายเคเบิลและการจำลองการติสซาร์จบนผิวด้านแรงดันสูง	68
3.20 วงจรทดสอบการติสซาร์จบางส่วนด้วยเทคนิค Synchronous Multi-channel กรณีสายเคเบิลและการจำลองการติสซาร์จบนผิวด้านแรงดันต่ำ	69
4.1 ตัวอย่าง Duck bank ที่ใช้ทำการติดตั้งจริง	70
4.2 การจัดวางกลุ่มวงจรเพื่อใช้ในการคำนวณ	71
4.3 ข้อมูลของเคเบิลทั้งสามชุดในรูปของคำสั่งในโปรแกรม Scilab	71
4.4 คำสั่งในการคำนวณหาความต้านทานเชิงเหนี่ยวนำระหว่างเคเบิล (X_m) ในโปรแกรม Scilab	73
4.5 คำสั่งการคำนวณหาแรงดันที่เปลือกเคเบิลจากสมการในโปรแกรม Scilab	73
4.6 การเพิ่มคำสั่งข้อมูล ก)ความต้านทานที่เปลือก (R_{sh}) ข)cross bounding coefficient	74
4.7 คำสั่งที่ใช้คำนวณ ก)แรงดันที่เปลือกสายเคเบิล ข)กระแสไหลวน	75
4.8 กราฟความสัมพันธ์ของแรงดันทดสอบกับค่า Tan δ ของสายเคเบิลทั้งสามเฟส ของการทดสอบชุดที่ 1	78
4.9 กราฟความสัมพันธ์ของแรงดันทดสอบกับค่า Tan δ ของสายเคเบิลทั้งสามเฟส ของการทดสอบชุดที่ 2	80
4.10 กราฟความสัมพันธ์ของแรงดันทดสอบกับค่า Tan δ ของสายเคเบิลทั้งสามเฟส ของการทดสอบชุดที่ 3.1	82
4.11 กราฟความสัมพันธ์ของแรงดันทดสอบกับค่า Tan δ ของสายเคเบิลทั้งสามเฟส ของการทดสอบชุดที่ 3.2	84
4.12 กราฟความสัมพันธ์ของแรงดันทดสอบกับค่า Tan δ ของสายเคเบิลทั้งสามเฟส ของการทดสอบชุดที่ 3.3	86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีสารสนเทศ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งนี้ ผู้ใช้ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use. IX

สารบัญญรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
ค.1 การศึกษาโครงสร้างสายเคเบิลใต้ดิน และ เทคนิคการคำนวณ sheath voltage บรรยายโดยเจ้าหน้าที่กองออกแบบระบบสายเคเบิลใต้ดิน การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (งามวงศ์วาน)	117
ค.2 การทดสอบสายเคเบิลที่ทำการออกแบบโดยการจำลองปัญหาเพื่อนำไปทำการทดสอบโดยการวัดดิซซาร์จบางส่วนด้วยเทคนิค Synchronous Multi-channel	117
ค.3 ฟังการบรรยายให้ความรู้เกี่ยวกับการวัดดิซซาร์จบางส่วน โดยคุณเพทาย นิมสนอง และเจ้าหน้าที่ประจำบริษัทเทสลาาร์พาวเวอร์จำกัด	118
ค.4 ฟังเจ้าหน้าที่ประจำบริษัทเทสลาาร์พาวเวอร์จำกัดแนะนำการตรวจสภาพหม้อแปลงทดสอบโดยการวัดเปอร์เซ็นต์ Impedance	118
ค.5 วางแผนการทดสอบสายเคเบิลใต้ดินโดยการวัดดิซซาร์จบางส่วน ด้วยเทคนิค Synchronous Multi-channel	119
ค.6 ต่่องจรทดสอบทำการทดสอบสายเคเบิลใต้ดินโดยการวัดดิซซาร์จบางส่วน ด้วยเทคนิค Synchronous Multi-channel	119
ค.7 ทำการนำเสนอโครงการเพื่อรับฟังคำแนะนำจากอาจารย์ที่ปรึกษา	120

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and ^X cite the document when use.

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการดำเนินงาน	4
2.1 ระดับแรงดันสำหรับการทดสอบความคงทนด้วย VLF	24
2.2 ผลตัวอย่างการทดสอบตามมาตรฐาน IEEE 400.2	31
2.3 เกณฑ์การประเมินสำหรับฉนวน PE (PE, XLPE, TRXLPE)	33
2.4 เกณฑ์การประเมินสำหรับฉนวนกระดาษ (PILC)	33
2.5 เกณฑ์การประเมินสำหรับฉนวน EPR	34
2.6 การตีความจากความชันของเส้นกราฟของ $\tan \delta$ กับความยาวสายเคเบิล	35
2.7 เกณฑ์การประเมินสำหรับเคเบิลที่ติดตั้งใหม่ ที่มีฉนวนเป็น PE (XLPE and TRXLPE)	36
2.8 เกณฑ์การประเมินสำหรับเคเบิลที่ติดตั้งใหม่ ที่มีฉนวนเป็น EPR	36
2.9 ความเหมาะสมในการใช้งานเซนเซอร์กับอุปกรณ์แต่ละชนิด (จากบริษัท แอดวานซ์ เพาเวอร์ อีควิปเมนต์ (ประเทศไทย) จำกัด)	42
2.10 มาตรฐานสำหรับกำหนดค่าสูงสุดของแรงดันที่เปลือกของเคเบิลในแต่ละประเทศ	54
3.1 ข้อมูลการทดสอบชุดที่ 1	57
3.2 ข้อมูลการทดสอบชุดที่ 2: สายเคเบิลที่ติดตั้งจาก Substation ไปยัง Substation	57
3.3 ข้อมูลการทดสอบชุดที่ 3.1: สายเคเบิลที่ติดตั้งจาก Switchgear ไปยัง Transformer ตัวที่ 1	58
3.4 ข้อมูลการทดสอบชุดที่ 3.2: สายเคเบิลที่ติดตั้งจาก Switchgear ไปยัง Transformer ตัวที่ 2	58
3.5 ข้อมูลการทดสอบชุดที่ 3.3 : สายเคเบิลที่ติดตั้งจาก Switchgear ไปยัง Switchgear	59
4.1 ผลลัพธ์การคำนวณในโปรแกรม Scilab เมตริกซ์ของรัศมีของตัวนำเคเบิล (แกนกลาง)	72
4.2 ผลลัพธ์การคำนวณในโปรแกรม Scilab เมตริกซ์ของกระแสในเคเบิลแต่ละเส้น	72
4.3 ผลลัพธ์การคำนวณในโปรแกรม Scilab เมตริกซ์ของรัศมีของเปลือกโลหะของเคเบิล	72
4.4 ผลลัพธ์การคำนวณในโปรแกรม Scilab เมตริกซ์ ของระยะห่างระหว่างเคเบิล	72
4.5 ผลการคำนวณหาความต้านทานเชิงเหนี่ยวนำระหว่างเคเบิล (X_m)	73
4.6 ผลลัพธ์การคำนวณหาแรงดันที่เปลือกเคเบิลในโปรแกรม Scilab (V/m)	74
4.7 ผลการคำนวณแรงดันที่เปลือกของเคเบิลหลังต่อ cross bounding	75
4.8 ผลการคำนวณกระแสไหลวนที่เปลือกของเคเบิลหลังต่อ cross bounding	75
4.9 แรงดันที่เปลือกของเคเบิลบริเวณปลาย Duck bank ก่อน cross bounding	75
4.10 แรงดันที่เปลือกของเคเบิลบริเวณปลาย Duck bank หลัง cross bounding	75
4.11 ผลการทดสอบความต้านทานฉนวน (Before VLF Hipot) ของการทดสอบชุดที่ 1	76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งหากมีให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.12 ผลการทดสอบความต้านทานฉนวน (After VLF Hipot) ของการทดสอบชุดที่ 1	77
4.13 ผลการทดสอบแฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กทริก (Tan δ) ของการทดสอบชุดที่ 1	77
4.14 ผลการประเมินของแฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กทริกของการทดสอบชุดที่ 1	78
4.15 ผลการทดสอบความต้านทานฉนวน (Before VLF Hipot) ของการทดสอบชุดที่ 2	79
4.16 ผลการทดสอบความต้านทานฉนวน (After VLF Hipot) ของการทดสอบชุดที่ 2	79
4.17 ผลการทดสอบแฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กทริก (Tan δ) ของการทดสอบชุดที่ 2	80
4.18 ผลการประเมินของแฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กทริกของการทดสอบชุดที่ 2	81
4.19 ผลการทดสอบความต้านทานฉนวน (Before VLF Hipot) ของการทดสอบชุดที่ 3.1	81
4.20 ผลการทดสอบความต้านทานฉนวน (After VLF Hipot) ของการทดสอบชุดที่ 3.1	81
4.21 การทดสอบแฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กทริก (Tan δ) ของการทดสอบชุดที่ 3.1	82
4.22 ผลการประเมินของแฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กทริกของการทดสอบชุดที่ 3.1	83
4.23 ผลการทดสอบความต้านทานฉนวน (Before VLF Hipot) ของการทดสอบชุดที่ 3.2	83
4.24 ผลการทดสอบความต้านทานฉนวน (After VLF Hipot) ของการทดสอบชุดที่ 3.2	83
4.25 ผลการทดสอบแฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กทริก (Tan δ) ของการทดสอบชุดที่ 3.2	84
4.26 ผลการประเมินของแฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กทริกของการทดสอบชุดที่ 3.2	85
4.27 แสดงผลการทดสอบ Resistance Test (Before VLF Hipot)	85
4.28 แสดงผลการทดสอบ Resistance Test (After VLF Hipot)	85
4.29 แสดงผลการทดสอบแฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กทริก (Tan δ)	86
4.30 ผลการประเมินของแฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กทริกของการทดสอบชุดที่ 3.3	87
4.31 ผลการทดสอบอิเล็กทรอนิกส์จำลองการเกิดดิสชาร์จบางส่วน แบบ conventional	88
4.32 ผลการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนของสายเคเบิล แบบ conventional	88
4.33 ผลการทดสอบอิเล็กทรอนิกส์จำลองการเกิดดิสชาร์จบางส่วนโดยการวัดแบบ non-conventional วัดโดยการแทนที่อุปกรณ์คัปปลิงด้วย HFCT	89
4.34 ผลการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนของสายเคเบิล แบบ non-conventional วัดโดยการแทนที่อุปกรณ์คัปปลิงด้วย HFCT	89
4.35 ผลการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนด้วยเทคนิค Synchronous Multi-channel กรณีที่ 1 เคเบิลตัวอย่างเปรียบเทียบกับชุดอิเล็กทรอนิกส์จำลองโคโรนาดิสชาร์จด้านแรงดันสูง โดยกำหนด f_{center} ของอุปกรณ์คัปปลิงทั้งสามตัวคือ $f_{c1} = 250 \text{ kHz}$, $f_{c2} = 1.66 \text{ MHz}$	90

เอกสารนี้เป็นเอกสารและ fc3 = 4.38 MHz ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and ^{XII} cite the document when use.

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
<p>4.36 แผนภาพการแยกชนิดของดิสซาร์จบางส่วน (CFRD) จากการทดสอบดิสซาร์จบางส่วน ด้วยเทคนิค Synchronous Multi-channel กรณีที่ 1 เคเบิลตัวอย่างเปรียบเทียบกับชุด อิเล็กโทรดจำลองโคโรนาดิสซาร์จด้านแรงดันสูง</p>	91
<p>4.37 ผลการทดสอบดิสซาร์จบางส่วนด้วยเทคนิค Synchronous Multi-channel กรณีที่ 2 เคเบิลตัวอย่างเปรียบเทียบกับชุดอิเล็กโทรดจำลองโคโรนาดิสซาร์จด้านแรงดันต่ำ โดย กำหนด f_{center} ของอุปกรณ์คัปปลิงทั้งสามตัวคือ $fc1 = 250 \text{ kHz}$, $fc2 = 1.66 \text{ MHz}$ และ $fc3 = 4.38 \text{ MHz}$</p>	93
<p>4.38 แผนภาพการแยกชนิดของดิสซาร์จบางส่วน (CFRD) จากการทดสอบดิสซาร์จบางส่วน ด้วยเทคนิค Synchronous Multi-channel กรณีที่ 2 เคเบิลตัวอย่างเปรียบเทียบกับชุด อิเล็กโทรดจำลองโคโรนาดิสซาร์จด้านแรงดันต่ำ</p>	94
<p>4.39 ผลการทดสอบดิสซาร์จบางส่วนด้วยเทคนิค Synchronous Multi-channel กรณีที่ 3 เคเบิลตัวอย่างเปรียบเทียบกับชุดอิเล็กโทรดจำลองดิสซาร์จบนผิวด้านแรงดันสูง โดย กำหนด f_{center} ของอุปกรณ์คัปปลิงทั้งสามตัวคือ $fc1 = 400 \text{ kHz}$, $fc2 = 10 \text{ MHz}$ และ $fc3 = 15 \text{ MHz}$</p>	96
<p>4.40 แผนภาพการแยกชนิดของดิสซาร์จบางส่วน (CFRD) จากการทดสอบดิสซาร์จบางส่วน ด้วยเทคนิค Synchronous Multi-channel กรณีที่ 3 เคเบิลตัวอย่างเปรียบเทียบกับชุด อิเล็กโทรดจำลองดิสซาร์จบนผิวด้านแรงดันสูง</p>	97
<p>4.41 ผลการทดสอบดิสซาร์จบางส่วนด้วยเทคนิค Synchronous Multi-channel กรณีที่ 4 เคเบิลตัวอย่างเปรียบเทียบกับชุดอิเล็กโทรดจำลองดิสซาร์จบนผิวด้านแรงดันต่ำ โดย กำหนด f_{center} ของอุปกรณ์คัปปลิงทั้งสามตัวคือ $fc1 = 25 \text{ kHz}$, $fc2 = 1 \text{ MHz}$ และ $fc3 = 12 \text{ MHz}$</p>	99
<p>4.42 แผนภาพ CFRD จากการทดสอบดิสซาร์จบางส่วนด้วยเทคนิค synchronous multichannel กรณีที่ 4 เคเบิลตัวอย่างเปรียบเทียบกับชุดอิเล็กโทรดจำลองดิสซาร์จ บนผิวด้านแรงดันสูง</p>	100
<p>ข.1 ข้อมูลเครื่อง MPD 600 (High-end partial discharge measurement and analysis system)</p>	114
<p>ข.2 ข้อมูลตัวเก็บประจุคัปปลิง MCC210</p>	114
<p>ข.3 ข้อมูลเครื่องปรับเทียบประจุไฟฟ้า (Pulse calibrator : CAL 542)</p>	115
<p>ข.4 ข้อมูลหม้อแปลงกระแส Omicron MCT120 High-Frequency Current Transformer</p>	115

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำเนื้อหาไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ยกเว้นที่มิละเมิดลิขสิทธิ์ของเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and ^{XIII} cite the document when use.

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันพลังงานไฟฟ้าเป็นสิ่งสำคัญ การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง ซึ่งการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าผ่านระบบสายส่งใต้ดินเป็นทางเลือกที่ต้ออย่างหนึ่ง เนื่องจากเป็นระบบที่มีความปลอดภัย มีความน่าเชื่อถือสูง มีการสูญเสียกำลังไฟฟ้าน้อย และ ช่วยเพิ่มพื้นที่สาธารณูปโภคของประชาชนได้เนื่องจากการใช้ระบบสายส่งใต้ดินนั้นไม่ใช้เสาไฟฟ้าเหมือนกับระบบเหนือดิน ทำให้บริเวณบ้านเมืองสะอาดเรียบร้อยมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม ระบบสายส่งใต้ดินนั้นมีข้อเสียที่ร้ายแรงอยู่หลายประการ เช่น แรงดันที่เกิดขึ้นบนเปลือกของสายเคเบิล (Cable Sheath Voltage) เนื่องจากพลาสมาแม่เหล็กเกี่ยวคล้อง ซึ่งทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าและเป็นอันตรายต่อผู้ที่สัมผัส นอกจากนี้ยังมีปัญหาการเสื่อมสภาพ การเกิดดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge) และการสูญเสียพลังงานที่เกิดขึ้นกับฉนวนของสายเคเบิล จากการประชุมของผู้ร่วมทำโครงการ ได้ระบุถึงปัญหาที่สนใจและจะนำเสนอถึงการวิเคราะห์ทางเทคนิคในการตรวจสอบและแก้ปัญหาดังกล่าวภายในสายเคเบิลใต้ดินทั้งหมด 3 หัวข้อดังนี้

1)โครงการนี้ได้ทำการศึกษาถึงวิธีการคำนวณแรงดันที่เปลือกของสายเคเบิลใต้ดิน และการลดแรงดันด้วยวิธีการต่อลงดินแบบต่าง ๆ ทำการคำนวณแรงดันที่เปลือกของเคเบิลตามทฤษฎีแล้วเปรียบเทียบ กรณีระบบเคเบิลที่ต่อลงดินกับไม่ต่อลงดิน 2)การทดสอบสายเคเบิลด้วยเทคนิคแรงดันทดสอบความถี่ต่ำมาก (VLF: Very Low Frequency) ของเคเบิลระบบ 12 kV จนถึง 22kV เพื่อประเมินคุณภาพของเคเบิลตามมาตรฐาน IEEE 400.2 และ 3)เทคนิคการวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนโดย แบ่งเป็น 3 วิธีคือ Conventional, Non-Conventional และ Synchronous Multi-Channel PD Measurement

วิธีการลดแรงดันที่เปลือกของสายเคเบิลมีอยู่ 3 วิธี คือ การต่อลงดินแบบจุดเดียว การต่อลงดินแบบ 2 จุด และการต่อลงดินแบบไขว้ ซึ่งโครงการนี้จะทำการคำนวณแรงดันที่เกิดขึ้นบนเปลือกของสายเคเบิลด้วยสมการอ้างอิงจากมาตรฐาน IEEE std 575-2014 โดยคิดจากวิธีการต่อลงดินแบบไขว้เป็นหลัก เพื่อสังเกตแนวโน้มของแรงดันที่เกิดขึ้นบนเปลือกของสายเคเบิลว่าแรงดันนั้นผ่านมาตรฐาน IEEE std 575-2014 หรือไม่ โดยในการคำนวณแรงดันนั้นจะใช้ ซอฟต์แวร์ เข้ามาช่วยในการคำนวณ หลังจากนั้นทำการประเมินผลการทดสอบ VLF ที่ได้จากหน่วยงานภายนอกโดยดูจากค่าแฟคเตอร์สูญเสียทางไดอิเล็กทริกเพื่อระบุความสัมพันธ์ของฉนวนภายในสายเคเบิลเป็นการ

ประเมินคุณภาพของสายเคเบิลให้มีความปลอดภัย และความน่าเชื่อถือ โดยการประเมินจะอิงตามมาตรฐาน IEEE 400.2 และสุดท้ายคือการทดลอง เพื่อทดสอบการเกิดดิสชาร์จบางส่วนโดยทำการทดลองเพื่อศึกษา แพทเทิร์นของการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (PRPD) กับอิเล็กทรอนิกส์ PD แบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำเอกสารนี้ไปใช้

ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น ยกเว้นแต่กรณีที่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกประการ

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ต่าง ๆ รวมถึงสายเคเบิลใต้ดิน 24 kV โดยวิธีการวัดแบบ Conventional โดยใช้ Coupling capacitor 1 ตัว, Non-Conventional โดยใช้ หม้อแปลงกระแสความถี่สูง (High Frequency Current Transformer: HFCT) หลังจากนั้นนำชุดอิเล็กทรอนิกส์จำลอง PD กับสายเคเบิลใต้ดินมาต่อขนานกันเพื่อจำลอง PD แบบผสมและทำการวัดเพื่อแยกชนิดของ PD ด้วยวิธีการวัดแบบ synchronous multi-channel PD measurement ซึ่งจะทำให้สามารถแยกชนิดของสัญญาณ PD และสามารถระบุถึงปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในสายเคเบิลใต้ดิน สามารถแยกสัญญาณรบกวน และช่วยให้การคาดการณ์ การปรับปรุงหรือบำรุงรักษาเป็นไปได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาถึงปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นภายในสายเคเบิล
2. เพื่อวิเคราะห์แรงดันที่เกิดขึ้นบนเปลือกของสายเคเบิลแบบจำลองระบบ 69, 115, และ 230 kV
3. คำนวณแรงดันที่เกิดขึ้นบนเปลือกของสายเคเบิลแบบจำลองระบบ 69, 115, และ 230 kV เมื่อทำการต่อลงดิน
4. เพื่อศึกษาวิธีการลดแรงดันที่เกิดขึ้นบนเปลือกของสายเคเบิล
5. เพื่อประเมินผลการทดสอบสายเคเบิลด้วยเทคนิค VLF ประเมินความสูญเสียในฉนวน และการเกิดการดิสชาร์จบางส่วน และการผ่านการทดสอบตามมาตรฐาน IEEE400.2
6. เพื่อศึกษา และทดลอง เทคนิคการวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลใต้ดิน
7. เพื่อศึกษา และทดลอง เทคนิคการแยกชนิดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลใต้ดิน

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. ศึกษาวิธีการคำนวณแรงดันที่เปลือกของเคเบิล
2. ศึกษาวิธีการต่อกราวด์เคเบิลแบบต่าง ๆ เพื่อแก้ปัญหาแรงดันที่เปลือกของเคเบิล
3. ศึกษาและจำลองการต่อ Cross-bounding
4. ศึกษาการทดสอบสายเคเบิลด้วยวิธี VLF และประเมินผลการทดสอบ VLF
5. ทดสอบการวัดดิสชาร์จบางส่วน โดยใช้ ตัวเก็บประจุคัปปลิ่ง (C_k) และ HFCT
6. ทดสอบการวัดดิสชาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิค แยกการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (synchronous multi-PD measurement)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

1. คณะผู้จัดทำร่วมประชุมเพื่อวางแผนการทำโครงการงาน
2. คณะผู้จัดทำร่วมกันศึกษาปัญหาที่เกิดขึ้นในสายเคเบิลใต้ดิน รวมถึงเทคนิคการวิเคราะห์แก้ไขปัญหาดังกล่าว
3. ระบุปัญหาที่น่าสนใจและจะนำมาศึกษาในโครงการงาน
4. คณะผู้จัดทำร่วมกันศึกษาทฤษฎี และมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับปัญหาดังกล่าว
5. ออกแบบระบบสายเคเบิลที่จะนำมาเป็นกรณีศึกษา
6. ทำการคำนวณแรงดันที่เปลือกของเคเบิลจากกรณีศึกษาดังกล่าว
7. ศึกษาวิธีการต่อกราวด์เคเบิลแบบ ต้น-ปลายสาย และ แบบไขว้เพื่อแก้ปัญหาแรงดันที่เปลือกเคเบิล
8. ศึกษาและวางแผนการทดสอบสายเคเบิลด้วย เทคนิค VLF
9. สรุปผลการศึกษาและนำเสนอข้อมูลรวมถึงการออกแบบการทดลอง ในภาคเรียนที่ 1
10. ดำเนินการจัดหาผลการทดสอบ VLF จากหน่วยงานเพื่อนำมาศึกษา
11. ประเมินผลการทดสอบ VLF วิเคราะห์ผลการทดสอบตามมาตรฐาน IEEE 400.2
12. ศึกษา และทำการทดสอบ การเกิดดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลใต้ดินแบบวิธี Conventional โดยใช้ตัวเก็บประจุกลับปลี (C_x) 1 ตัว และวิธี Non-Conventional โดยใช้ HFCT
13. ศึกษาและทดสอบการใช้เทคนิคการแยกการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (synchronous multi-PD measurement) โดยใช้ ตัวเก็บประจุกลับปลี 3 ตัว (3C_x)
14. สรุปและเขียนรายงานโครงการงาน
15. นำเสนอโครงการงานในภาคเรียนที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

1.5 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน

การดำเนินงาน	ภาคเรียนที่ 1					ภาคเรียนที่ 2				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1.ประชุมวางแผน ศึกษา และระบุปัญหาในสายเคเบิลที่จะนำมาทำโครงการ	←→									
2.ศึกษาทฤษฎี และมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง	←→									
3.ออกแบบระบบสายเคเบิลที่จะนำมาเป็นกรณีศึกษา		←→								
4.ทำการคำนวณแรงดันที่เปลือกเคเบิล และศึกษาการจำลองแรงดันด้วยโปรแกรม			←→							
5.ศึกษาเทคนิคการต่อกราวด์ของเคเบิล			←→							
6.ศึกษา และวางแผนการทดสอบสายเคเบิลด้วยเทคนิค VLF			←→							
7.สรุปข้อมูล และนำเสนอในภาคเรียนที่ 1				←→						
8.จัดหาผลการทดสอบVLF จากหน่วยงานภายนอก						←→				
9.วิเคราะห์ ประเมินผลการทดสอบ VLF							←→			
10.ทดสอบการเกิดดิสชาร์จบางส่วนแบบ Conventional, Non-Conventional								←→		
11. ทดสอบการเกิดดิสชาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคการแยก PD (synchronous multi-channel PD measurement)								←→		
12.สรุปผลการศึกษา และจัดทำรายงานโครงการ									←→	
13. นำเสนอโครงการในภาคเรียนที่ 2										←→

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เข้าใจถึงการเกิดแรงดันที่เปลือกของฉนวน สามารถคำนวณ และจำลองแรงดันได้
2. สามารถแก้ไขปัญหาแรงดันที่เกิดขึ้นบนเปลือกของฉนวนได้จากวิธีการต่อกราวด์แบบต่าง ๆ
3. สามารถเข้าใจวิธีการออกแบบการวางสายเคเบิลเพื่อลดผลจากแรงดันที่เปลือกที่เกิดขึ้นให้ได้น้อยที่สุด
4. เข้าใจถึงวิธีการทดสอบสายเคเบิลด้วยวิธี VLF ว่ามีอุปกรณ์ และมีขั้นตอนอย่างไร
5. สามารถประเมินผลการทดสอบด้วย VLF ตามมาตรฐานการทดสอบ IEEE 400.2
6. เข้าใจถึงวิธีการวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนโดยใช้ HFCT
7. สามารถแยกชนิดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนได้
8. โครงการนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่ศึกษาและสนใจในหัวข้อสายเคเบิล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

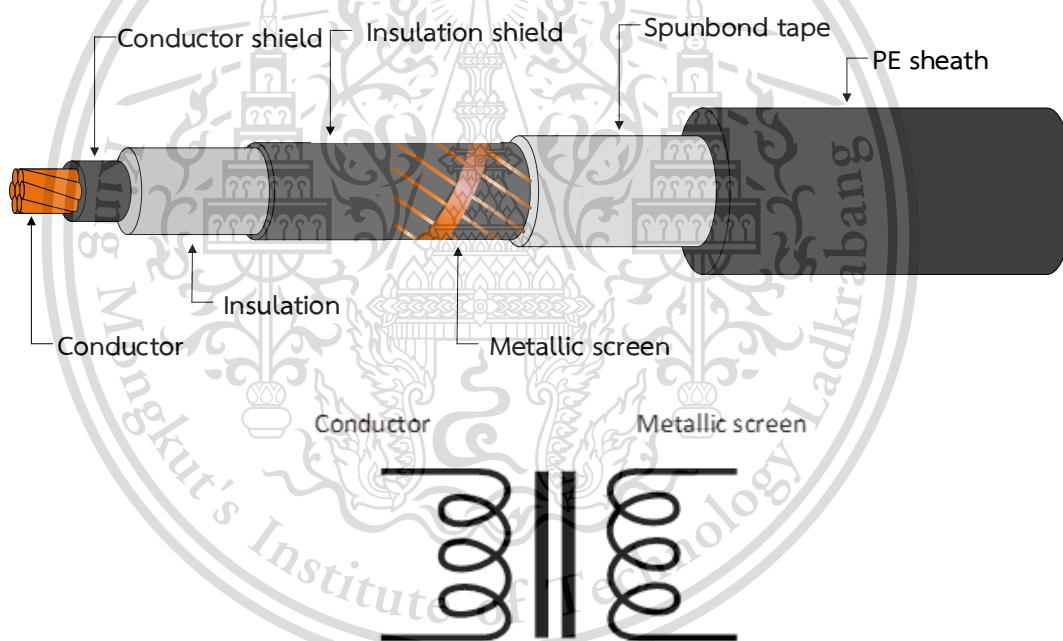
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 แรงดันที่เปลือกของเคเบิล (Cable sheath voltage)

เมื่อจ่ายแรงดันสูงให้กับตัวนำทองแดงของเคเบิลจะทำให้มีกระแสไหลอยู่ค่าหนึ่ง กระแสนั้นจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กอยู่ในบริเวณรอบข้างตัวนำทองแดง ฟลักซ์แม่เหล็กของสนามแม่เหล็กนั้นจะเกี่ยวคล้องกับตัวนำอะลูมิเนียมเนี่ยมส่วน metallic sheath ของเคเบิล โดยกระบวนการนี้มีลักษณะคล้ายกับหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส เมื่อตัวนำทองแดงของเคเบิลเปรียบเสมือนเป็นขดลวดแรงสูงของหม้อแปลง และ ตัวนำอะลูมิเนียมเนี่ยมส่วน metallic-sheath ของเคเบิลเปรียบเสมือนเป็นขดลวดแรงต่ำ



รูปที่ 2.1 การเหนี่ยวนำของฟลักซ์แม่เหล็กที่ตัวนำอะลูมิเนียมเนี่ยมส่วน metallic sheath ทำให้มีลักษณะคล้ายกระบวนการเหนี่ยวนำระหว่างขดลวดภายในหม้อแปลงไฟฟ้า

กระบวนการเหนี่ยวนำระหว่างขดลวดภายในหม้อแปลงไฟฟ้าจากโครงสร้างของสายเคเบิลฉนวน XLPE (Cross Linked Polyethylene) ที่ใช้กับระบบส่งกำลังไฟฟ้าใต้ดินของประเทศไทยนั้น ที่ส่วน metallic-sheath จะสัมผัสกับเปลือกหุ้มสายชั้นนอกของเคเบิลทำให้เกิดวงจรปิดขึ้นมา เมื่อตัวนำอะลูมิเนียมเนี่ยมส่วน metallic-sheath ที่ทำหน้าที่เป็นกราวด์ของเคเบิลถูกเหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันจะมีกระแสไหลค่าหนึ่งอยู่ในวงจรปิดที่เกิดขึ้น แล้วทำให้มีแรงดันเกิดขึ้นที่เปลือกหุ้มชั้นนอกของสายเคเบิล XLPE โดยเรียกแรงดันที่เกิดขึ้นนี้ว่า sheath voltage[1, 2]

This material is reserved for educational use only; not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากมาตรฐาน IEEE 575-1988 การคำนวณแรงดันที่เกิดขึ้นบนเปลือกของฉนวนมีพื้นฐานมาจากกฎที่กล่าวว่า “ตัวนำใด ๆ ก็ตามที่อยู่โดยรอบกับตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน และกระแสไฟฟ้านั้นเป็นกระแสไฟฟ้าสามเฟสสมดุล จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าบนตัวนำโดยรอบเหล่านั้น” ดังสมการ

$$E_a = j\omega I_a (2 \times 10^{-7}) \left[-\frac{1}{2} \ln \left(\frac{2S_{ab}}{dS_{ac}} \right) + j \frac{\sqrt{3}}{2} \ln \left(\frac{2S_{ac}}{d} \right) \right] \quad V/m \quad (2.1)$$

$$E_b = j\omega I_b (2 \times 10^{-7}) \left[\frac{1}{2} \ln \left(\frac{4S_{ab}S_{ac}}{d^2} \right) + j \frac{\sqrt{3}}{2} \ln \left(\frac{S_{bc}}{S_{ab}} \right) \right] \quad V/m \quad (2.2)$$

$$E_c = j\omega I_c (2 \times 10^{-7}) \left[-\frac{1}{2} \ln \left(\frac{2S_{bc}^2}{dS_{ac}} \right) - j \frac{\sqrt{3}}{2} \ln \left(\frac{2S_{bc}}{d} \right) \right] \quad V/m \quad (2.3)$$

เนื่องจากการจัดวางวงจรสายเคเบิล 3 เฟสในระบบส่งกำลังไฟฟ้าใต้ดินมีรูปแบบการจัดวางอยู่ 3 แบบคือ การจัดวางแบบ Trefoil การจัดวางแบบ Flat และ การจัดวางแบบทั่วไป โดยจากสมการ (2.1), (2.2) และ (2.3) หากกำหนดระยะห่างระหว่างตัวนำต่อรัศมีเปลือกหุ้มชั้นนอกทั้งสามเฟสเป็น S/d จะได้สมการแรงดันบนเปลือกเคเบิลของการจัดวางทั้งสามแบบ ดังนี้[2]

1. แรงดันบนเปลือกเคเบิลที่จัดวางแบบ Trefoil คือ

$$E_a = j\omega I_a (2 \times 10^{-7}) \left[-\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right] \ln \left(\frac{2S}{d} \right) \quad V/m \quad (2.4)$$

$$E_b = j\omega I_b (2 \times 10^{-7}) \ln \left(\frac{2S}{d} \right) \quad V/m \quad (2.5)$$

$$E_c = j\omega I_c (2 \times 10^{-7}) \left[-\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right] \ln \left(\frac{2S}{d} \right) \quad V/m \quad (2.6)$$

2. แรงดันบนเปลือกเคเบิลที่จัดวางแบบ Flat คือ

$$E_a = j\omega I_a (1 \times 10^{-7}) \left[\left(\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \ln \left(\frac{2S}{d} \right) - \left(\frac{3}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \ln \left(\frac{4S}{d} \right) \right] \quad V/m \quad (2.7)$$

$$E_b = j\omega I_b (2 \times 10^{-7}) \left(-\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \ln \left(\frac{2S}{d} \right) \quad V/m \quad (2.8)$$

$$E_c = j\omega I_c (1 \times 10^{-7}) \left[\left(\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \ln \left(\frac{2S}{d} \right) + \left(-\frac{3}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \ln \left(\frac{4S}{d} \right) \right] \quad V/m \quad (2.9)$$

3. แรงดันที่เกิดจากการจัดวางเคเบิลแบบทั่วไป สามารถใช้ได้ไม่จำกัดจำนวนกลุ่มวงจร และรูปแบบการวาง

แรงดันที่เกิดขึ้นที่เปลือกของเคเบิลที่มีรูปแบบการจัดวางแบบทั่วไปจะเกิดจากสาเหตุ และมีวิธีการคำนวณ ดังนี้

ก.) ฟลักซ์เชื่อมโยงเนื่องจากกระแสของเคเบิลที่อยู่บริเวณใกล้เคียง สามารถหาได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\lambda_{ik} = \frac{\mu_i}{2\pi} \ln \left[\frac{S_{ik}}{r_i} \right] \quad Wb/m \quad (2.10)$$

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

- เมื่อ l_i คือ กระแสในเคเบิล i (Metric l_i)
- s_{ik} คือ ระยะห่างระหว่างเคเบิล i กับเคเบิล k (Metric s_{sh})
- r_i คือ รัศมีของตัวนำ ในเคเบิล i (Metric r_i)

ข.) ฟลักซ์เชื่อมโยงเนื่องจากกระแสในแกนตัวนำของตัวเอง สามารถหาได้จาก

$$\begin{aligned} \lambda_{kk} &= \int_{r_k}^{r_{sh}} \frac{\mu I_k dx}{2\pi x} \\ &= \frac{\mu I_k}{2\pi} \ln \left[\frac{r_{sh}}{r_k} \right] \end{aligned} \tag{2.11}$$

- เมื่อ r_k คือ รัศมีของแกนตัวนำเคเบิลของตัวเอง
- r_{sh} คือ รัศมีของเปลือกโลหะของเคเบิล C_k (Metric r_{sh})

ดังนั้น ฟลักซ์เชื่อมโยงที่เกิดขึ้นทั้งหมดบนเปลือกของเคเบิลจึงเป็นผลรวมของ (ก.) และ (ข.)

$$\lambda_{Tk} = \lambda_{1k} + \lambda_{2k} + \dots + \lambda_{ik} + \lambda_{kk} \tag{2.12}$$

แรงดันที่เกิดขึ้นหาได้จากการหาอนุพันธ์ของ (2.12) ฟลักซ์เชื่อมโยงต่อเวลานั่นเอง

$$E_k = \frac{d\lambda_{Tk}}{dt} = \frac{d(\lambda_{1k} + \lambda_{2k} + \dots + \lambda_{ik} + \lambda_{kk})}{dt} \tag{2.13}$$

เมื่อทำการแทนค่า λ_{Tk} หรือ (2.10) และ (2.11) ลงใน (2.13) และหาอนุพันธ์จะสามารถสรุปได้ว่า

$$[E_s] = j[X_m][I_{core}] \quad V/m \tag{2.14}$$

โดยสามารถเขียนอยู่ได้ในรูปของเมตริกซ์ ดังนี้

$$[E_s] = j\mu \overset{X_m}{\begin{bmatrix} \ln \frac{r_{sh1}}{r_1} & \ln \frac{S_{12}}{r_2} & \ln \frac{S_{13}}{r_3} & \dots & \ln \frac{S_{1n}}{r_n} \\ \ln \frac{S_{21}}{r_1} & \ln \frac{r_{sh2}}{r_2} & \ln \frac{S_{23}}{r_3} & \dots & \ln \frac{S_{2n}}{r_n} \\ \ln \frac{S_{31}}{r_1} & \ln \frac{S_{32}}{r_2} & \ln \frac{r_{sh3}}{r_3} & \dots & \ln \frac{S_{3n}}{r_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \ln \frac{S_{n1}}{r_1} & \ln \frac{S_{n2}}{r_2} & \ln \frac{S_{n3}}{r_3} & \dots & \ln \frac{r_{shn}}{r_n} \end{bmatrix}} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการนี้ เป็นโมเดล Metric ทางคณิตศาสตร์แบบทั่วไปสำหรับหาค่าแรงดันบนเปลือกโลหะต่อหน่วยความยาวของสายเคเบิลจำนวน n เส้น

เมื่อ	r	คือ รัศมีของแกนตัวนำของเคเบิล
	R_{sh}	คือ รัศมีของเปลือกโลหะของเคเบิล
	s_{ij}	คือ ระยะห่าง ระหว่างเคเบิล i และ j [3]

2.2 ปัญหาการเสื่อมสภาพของเคเบิลจาก Treeing

ในปัจจุบันสายเคเบิลใต้ดินจะมีการใช้โพลีเอสเตอร์แบบเชื่อมขวาง (Cross linked polyethylene: XLPE) เป็นวัสดุฉนวนในเคเบิลที่ใช้ในระบบไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งในการใช้วัสดุฉนวนชนิดนี้มาจากการก้าวหน้าทางเทคโนโลยีที่ต้องการวัสดุฉนวนที่มีความทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าที่สูงมีค่าเพอร์มิสทิวิตี (permittivity) ที่ต่ำ มีค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริกที่น้อย และสามารถรับแรงทางกลได้ดี เป็นต้น สายเคเบิลเมื่อทำการติดตั้งแล้ว สิ่งที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้คือการเจอกับสภาพแวดล้อมบริเวณที่สายเคเบิลติดตั้ง โดยความชื้นเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ต้นไม้ขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งในการเสื่อมสภาพของเนื้อฉนวน ทำให้อายุการใช้งานของสายเคเบิลใต้ดินมีเวลาที่สั้นลง โดยปรากฏการณ์นี้จะเริ่มเกิดจากความชื้น หรือไอน้ำมาเกาะโดยรอบของฉนวน หรือความชื้นภายในเนื้อฉนวนซึ่งเกิดจากการผลิตวัสดุฉนวน เมื่อมีการใช้งานสายเคเบิลดังกล่าวก็จะเกิดความเครียดของสนามไฟฟ้าขึ้นทำให้ไอน้ำที่อยู่โดยรอบฉนวน หรือภายในฉนวน แทรกตัวจนทำให้เนื้อฉนวนแยกตัวออกจากกันโดยลักษณะจะมีความคล้ายกับพุ่มไม้ ซึ่งนำไปสู่การเสื่อมสภาพของฉนวน ปรากฏการณ์ต้นไม้จะค่อย ๆ ทำการขยายตัวอย่างช้า ๆ โดยมีลักษณะคล้ายมะเร็งฉนวนของสายเคเบิลไฟฟ้าแรงสูงหมดคุณสมบัติความเป็นฉนวนไปอย่างถาวร [4]

2.2.1 ปรากฏการณ์ต้นไม้ (Water Treeing) เริ่มจากเมื่อช่วง ค.ศ. 1960 จากการใช้สายเคเบิลไฟฟ้าแรงสูงโดยมีฉนวนเป็น โพลีเอสเตอร์ มีโอกาสการเกิดเบรกดาวน์สูงมาก โดยการใช้สายเคเบิลติดตั้งในแม่น้ำโดยมีชั้นป้องกันด้านนอกสุด ผลปรากฏว่าชั้นที่เป็นเนื้อฉนวนมีการซึมซับน้ำเข้าไปทำให้เกิดการเบรกดาวน์ ในปี ค.ศ. 1969 ปรากฏการณ์การเกิดการเสื่อมสภาพนี้ได้รู้จักกันในชื่อ ต้นไม้โดยมี Miyashita เป็นผู้นำเสนอในงานประชุม Electrical Insulation ที่ Boston ซึ่งจะมีลักษณะโครงสร้างคล้ายพุ่มไม้หรือพืด โดยทั่วไปแล้วการเกิดปรากฏการณ์ต้นไม้จะทำให้ค่าความทนทานแรงดันของฉนวนมีค่าลดลงไป ต้นไม้สามารถพัฒนาไปเป็น ต้นไม้ไฟฟ้าได้โดยความเครียดของสนามไฟฟ้าภายในรอยแยกที่เกิดจากต้นไม้มีค่าที่มากพอ จนทำให้เกิดการหาเส้นทางการเสื่อมสภาพของเนื้อฉนวนจนกระทั่งเปลี่ยนแปลงไปสู่การเสื่อมสภาพของฉนวนซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดเบรกดาวน์ [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น การนำเอกสารนี้ไปใช้ในการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ก็ตามโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์หรือผู้จัดทำเอกสารนี้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ให้เกิดปรากฏการณ์ต้นไม้ น้ำ คือ ความชื้น อุณหภูมิ ช่องว่าง สิ่งปนเปื้อน สารละลายไอออนิก आयुขัย ความเครียดสนามไฟฟ้า และความเป็นกรด-ด่าง (ค่า pH) ของวัสดุฉนวน [6]

การเกิดปรากฏการณ์ต้นไม้ น้ำ เป็นกลไกการเสื่อมสภาพของฉนวนที่สำคัญอย่างหนึ่ง ในสายเคเบิลไฟฟ้าใต้ดินแรงสูง หรือสายเคเบิลไฟฟ้าใต้น้ำแรงสูง โดยสายเคเบิลเหล่านี้ต้องออกแบบ การป้องกันเป็นพิเศษ ทั้งด้านวัสดุที่ใช้ในการป้องกัน และโครงสร้างของสายเคเบิล ต้นไม้ น้ำ สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1. ต้นไม้ น้ำแบบโบว์ (Bow-Tie Treeing) เกิดจากสิ่งปนเปื้อนหรือ ช่องว่างในเนื้อ ของฉนวน โดยการขยายตัวของต้นไม้ น้ำชนิดนี้จะมีลักษณะการขยายตัวแบบสมมาตร จาก จุดบกพร่องดังกล่าว ค่อย ๆ แพร่ขยายออกไปเป็นพุ่ม ซึ่งจะมีลักษณะคล้ายเหมือนโบว์ จึงเป็นชื่อ เรียกของต้นไม้ น้ำชนิดนี้ โดยต้นไม้ น้ำแบบโบว์ จะมีการแพร่ออกไปถึงระยะเวลาหนึ่ง ก็จะมีอัตราการ ขยายตัวที่ช้าลงไปขึ้นอยู่กับขนาดของจุดบกพร่องเริ่มต้นของการเกิดต้นไม้ น้ำชนิดนี้ โดยปกติแล้ว ต้นไม้ น้ำแบบโบว์จะไม่ได้เป็นสาเหตุหลักของการเกิดการเบรกดาวนของฉนวน



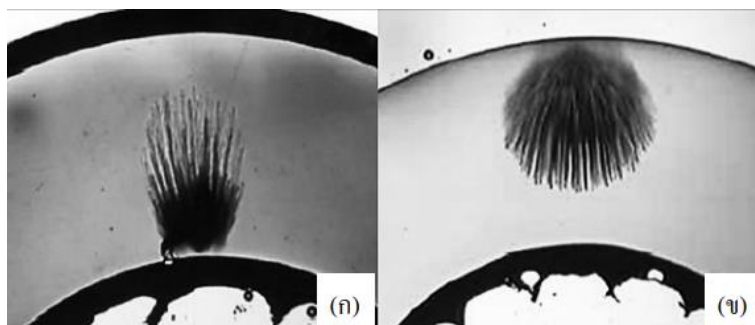
รูปที่ 2.2 ลักษณะของต้นไม้ น้ำแบบโบว์ [7]

2. ต้นไม้ น้ำแบบครีป (Vented Treeing) เริ่มเกิดจากชั้นกั้นตัวนำ (conductor screen) ดังรูปที่ 2.3ก) หรือ ชั้นกั้นฉนวน (Insulation screen) ดังรูปที่ 2.3ข) ที่ติดกับผิวของฉนวน ด้านใดด้านหนึ่ง โดยลักษณะของต้นไม้ น้ำแบบครีปจะเริ่มขยายจากผิวของฉนวน โดยทิศทางของการ แพร่กระจายของพุ่มจะขึ้นอยู่กับทิศทางของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในเนื้อฉนวน สาเหตุการเกิดมาจากการ เกิดออกซิเดชันในโครงสร้างของโพลีเมอร์ ความชื้นโดยรอบที่ทำการติดตั้ง หรือจุดบกพร่องใน ส่วนต่าง ๆ ของสายเคเบิล ซึ่งการต้นไม้ น้ำแบบครีป จะทำให้ช่องว่างในโพรงมีอากาศแทรกซึมเข้าไป ซึ่งจะทำให้เกิดการขยายตัวได้อย่างต่อเนื่องจนกระทั่งแผ่นอิเล็กโทรดทั้งสองฝั่งเชื่อมต่อกันจนนำไปสู่ สภาวะการเบรกดาวน ต้นไม้ น้ำชนิดนี้จะมี ความรุนแรงมากกว่าต้นไม้ น้ำแบบโบว์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

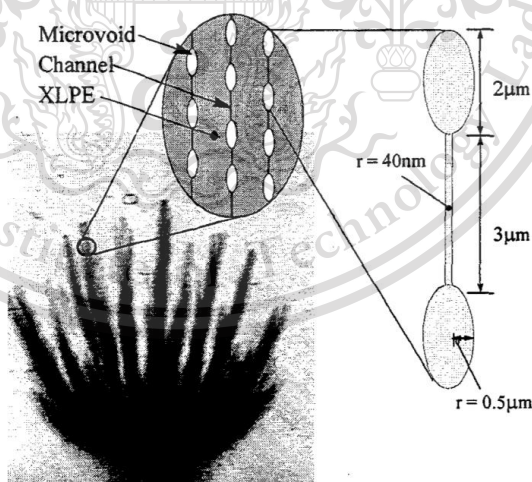
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.3 ลักษณะของต้นไม้้แบบครีป ก)เริ่มเกิดจากชั้นกั้นตัวนำ ข)เริ่มเกิดจากชั้นกั้นฉนวน [8]

แบบจำลองของต้นไม้้เริ่มต้นของการเกิดต้นไม้้ คือ การที่ในเนื้อฉนวน หรือสภาพแวดล้อมภายนอกมีน้ำเป็นองค์ประกอบ และมีการได้รับความเครียดทั้งทางกล และทางไฟฟ้า ทำให้น้ำเกิดการออสโมซิส หรือการควบแน่นขึ้น แล้วมีแรงทางไฟฟ้าเข้ามากระทำ ทำให้เป็นจุดเริ่มต้นของต้นไม้้ โดยการเริ่มต้นของปรากฏการณ์นี้จะเกิดโพรงขนาดเล็กเกิดขึ้นในเนื้อของฉนวนโพลีเมอร์ และโครงสร้างของโพลีเมอร์มีการเรียงตัวเชื่อมกันแบบเส้น เมื่อโมเลกุลของน้ำได้รับความเครียดสนามไฟฟ้าที่เพียงพอก็จะเกิดการแทรกตัวเกิดขึ้นเป็นช่องทางแคบขึ้น โดยจะมีโพรง และช่องทางเดินของน้ำเกิดขึ้น ซึ่งเป็นที่มาของแบบจำลองสร้อยไข่มุก (Strings of pearls) ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.4 โดยแบบจำลองนี้จะแสดงถึงการแพร่กระจายตัวของต้นไม้้ในฉนวนโพลีเมอร์ที่โครงสร้างเป็นสาย ซึ่งการแพร่กระจายออกไปตามแนวที่วัสดุโพลีเมอร์มีความอ่อนแอตามแนวของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในเนื้อฉนวน



รูปที่ 2.4 แบบจำลองโครงสร้างของต้นไม้้แบบสร้อยไข่มุกโดย Sverre Hvidsten [9]

2.2.2 ต้นไม้ไฟฟ้า (Electrical Treeing) เป็นปรากฏการณ์ที่เป็นความบกพร่องในเนื้อฉนวนก่อนการเกิดเบรกดาวน์ มีลักษณะคล้ายกับรากไม้ ต้นไม้ไฟฟ้าจะเกิดขึ้นมาได้เมื่อเนื้อฉนวนอยู่ภายใต้ความเครียดสนามสูงเป็นระยะเวลานาน อาจเกิดต่อจากปรากฏการณ์ต้นไม้้ หรือการกัด

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

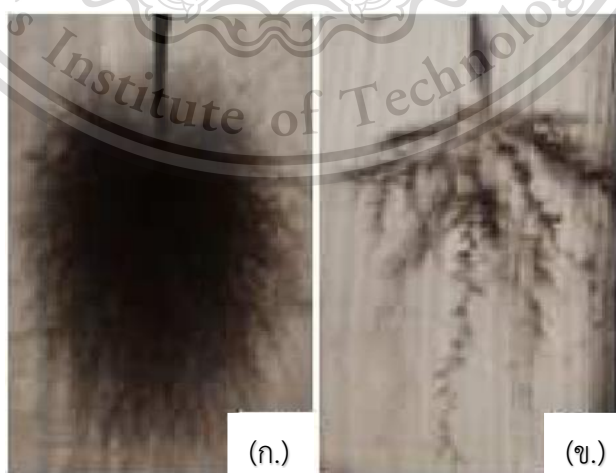
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เซาะจนเป็นช่องว่างในเนื้อฉนวน หรือเกิดจากประจุค้าง (Space Charge) บนฉนวนของสายเคเบิล หรือเกิดจากการสลายตัวของฉนวนจากรังสีอัลตราไวโอเล็ตและโอโซน ที่เกิดขึ้นจากการดิสชาร์จบางส่วน (Partial discharge: PD) โดยต้นไม้ไฟฟ้าจะแสดงการดิสชาร์จบางส่วนก่อนการเกิดเบรกดาวนของเนื้อฉนวน เนื่องจากภายในต้นไม้ไฟฟ้ามีความขรุขระของพื้นผิว การเกิดดิสชาร์จขึ้นเป็นการย่อยสลายสารอินทรีย์ในเนื้อฉนวน เป็นผลให้ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ามีค่าน้อยลงและความเครียดของสนามไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้น ทำให้ปรากฏการณ์ต้นไม้ไฟฟ้าสามารถแพร่กระจายตัวได้อย่างรวดเร็ว และรุนแรงกว่าปรากฏการณ์ต้นไม้ฟ้า

การเกิดปรากฏการณ์ต้นไม้ไฟฟ้าเป็นกลไกการเสื่อมสภาพของฉนวนอย่างหนึ่งที่มีความรุนแรงอย่างมากในการที่ทำให้ฉนวนเกิดการเบรกดาวนขึ้น การเกิดปรากฏการณ์ต้นไม้ไฟฟ้ามีความรุนแรงและมีอัตราการแพร่กระจายตัวมากกว่าปรากฏการณ์ต้นไม้ฟ้า และสามารถตรวจหาได้ง่ายกว่าปรากฏการณ์ต้นไม้ฟ้า ปรากฏการณ์ต้นไม้ฟ้าสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ

1. ต้นไม้ไฟฟ้าแบบพุ่ม (Bush Treeing) ลักษณะของต้นไม้ไฟฟ้านี้จะมีลักษณะคล้ายพุ่มไม้ ดังในรูป 2.5ก.) ซึ่งเกิดจากความเครียดไฟฟ้าที่ไม่สูงมาก มีอัตราการขยายตัวที่ช้าทำให้มีลักษณะเป็นพุ่ม ต้นไม้ไฟฟ้าแบบพุ่มสามารถพัฒนาไปเป็นต้นไม้ไฟฟ้าแบบกิ่งได้

2. ต้นไม้ไฟฟ้าแบบกิ่ง (Branch Treeing) ลักษณะของต้นไม้ไฟฟ้านี้จะคล้ายกับรากไม้ หรือกิ่งไม้ที่แตกแขนงออกไปดังในรูป 2.5ข.) ส่วนมากจะเกิดเมื่อฉนวนอยู่ภายใต้สภาวะความเครียดทางไฟฟ้าที่ต่ำ ซึ่งต้นไม้ไฟฟ้านี้จะมีความรุนแรงมากกว่าต้นไม้ไฟฟ้าแบบพุ่ม เนื่องจากอัตราการขยายตัวที่รวดเร็ว จนสามารถเจาะทะลุเนื้อฉนวนได้ในเวลาอันสั้นทำให้เป็นอันตรายอย่างมากในระบบของการฉนวน ต้นไม้ไฟฟ้าแบบกิ่งมักจะเป็นสาเหตุหลักในการเบรกดาวนของสายเคเบิล [6]



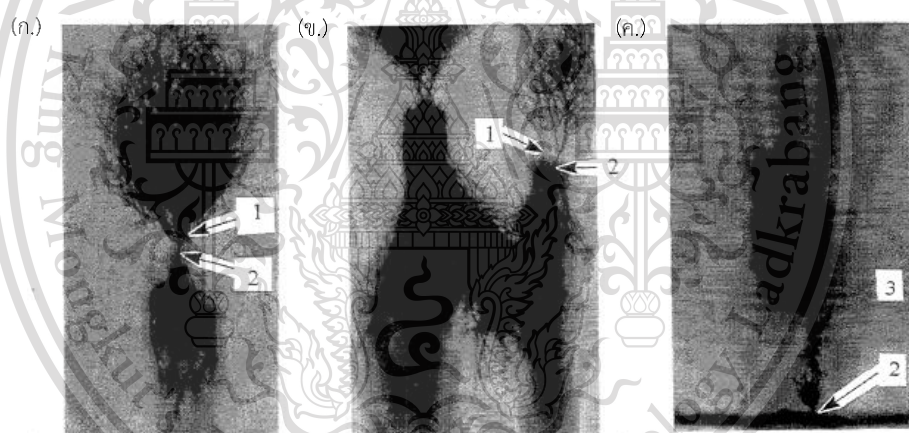
รูปที่ 2.5 ลักษณะของต้นไม้ไฟฟ้า ก) ต้นไม้ไฟฟ้าแบบพุ่ม ข) ต้นไม้ไฟฟ้าแบบกิ่ง [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น มิใช่เพื่อเผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากปรากฏการณ์ที่กล่าวมาเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นที่จะทำให้ฉนวนในระบบการฉนวนมีการเสื่อมสภาพอย่างถาวร แล้วเกิดการเบรกดาวน์ขึ้นทำให้สายเคเบิล และระบบเกิดความเสียหายขึ้น ซึ่งปรากฏการณ์ต้นไม้น้ำสามารถพัฒนาไปเป็นต้นไม้ไฟฟ้าได้ เมื่อได้รับความเครียดทางไฟฟ้าสูงที่บริเวณต้นไม้น้ำซึ่งเป็นบริเวณประาะบางในเนื้อฉนวน โดยการเปลี่ยนแปลงนี้ส่งผลให้อัตราการแพร่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้อายุของฉนวนมีอายุสั้นลง รูปที่ 2.6 เป็นการแสดงตัวอย่างการพัฒนาของต้นไม้น้ำไปสู่ต้นไม้ไฟฟ้า โดยรูปที่ 2.6ก.) เป็นตัวอย่างของการพัฒนาของต้นไม้น้ำไปสู่ต้นไม้ไฟฟ้าโดยด้านที่เป็นต้นไม้ไฟฟ้าจะมีการเกิดเพียงแค่งิ่งเดียว โดยปกติจะพบในการตรวจสอบสาเหตุการเบรกดาวน์ในสายเคเบิล รูปที่ 2.6ข.) เป็นตัวอย่างของการพัฒนาของต้นไม้น้ำไปสู่ต้นไม้ไฟฟ้าโดยต้นไม้ไฟฟ้าจะเกิดหลาย ๆ กิ่ง ทิศทางการขยายของต้นไม้ไฟฟ้าส่วนใหญ่พบการเติบโตไปด้านชั้นกั้นฉนวน จะสามารถพบได้ในแต่ละกิ่งของต้นไม้น้ำ 2.6ค.) เป็นตัวอย่างของต้นไม้ไฟฟ้าที่เกิดที่บริเวณจุดกำเนิดของต้นไม้น้ำ ในตัวอย่างจุดที่เกิดการทับซ้อนนี้เกิดขึ้นที่ตำแหน่งด้านชั้นกั้นฉนวนส่วนใหญ่จะพบในชั้นกั้นฉนวนแบบเก่า เช่น graphite painting หรือ เทปที่ทำจากสารกึ่งตัวนำ ซึ่งบริเวณที่เกิดจะมีปริมาณน้ำที่น้อยทำให้ต้นไม้น้ำไม่สามารถแพร่ไปได้ไกล



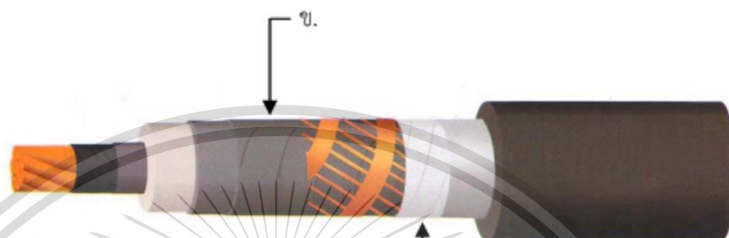
รูปที่ 2.6 การเปลี่ยนจากต้นไม้น้ำไปสู่ต้นไม้ไฟฟ้า 1.จุดปลายต้นไม้น้ำ 2.จุดเริ่มต้นต้นไม้น้ำ 3.เนื้อฉนวน ก) การเปลี่ยนจากต้นไม้น้ำไปสู่ต้นไม้ไฟฟ้า 1 กิ่ง ข) การเปลี่ยนจากต้นไม้น้ำไปสู่ต้นไม้ไฟฟ้าหลายกิ่ง ค) การเกิดต้นไม้น้ำที่จุดเริ่มต้นของต้นไม้น้ำที่ขอบฉนวน [9]

เนื่องจากการนำสายไฟฟ้าแรงสูงที่ติดตั้งใต้ดินนั้น ต้องใช้สายที่คุณสมบัติทนน้ำและทนความชื้นได้ ดังนั้นจะมีการเพิ่มขึ้นของเปลือกสายเคเบิลที่มีคุณสมบัติในการป้องกันฉนวนไม่ได้รับความชื้น หรือ Water blocking โดยชั้นที่สามารถกันความชื้นมี 2 ชั้น คือ

Longitudinal water-blocking เป็นชั้นที่เสริมขึ้นเพื่อป้องกันความเสียหายของฉนวนสัมผัสน้ำตามแนวยาวจากการลากสายเคเบิล โดยชั้นนี้จะมีลักษณะเป็นเทป หรือผงสังเคราะห์ที่เมื่อสัมผัสกับน้ำจะมีการดูดซึมน้ำเข้าไปแล้วขยายตัว โดยมีชื่อเรียกว่า Swelling tapes หรือ

Swelling powders โดยทั่วไปจะอยู่ระหว่างชั้น Insulation Screen กับ Jacket โดยชั้นนี้สามารถเคลือบพลาสติก เพื่อเพิ่มความแข็งแรงและ ความยืดหยุ่นให้กับสายเคเบิลได้

Radial water-blocking เป็นชั้นที่เป็นแผ่นเทปโลหะ หรือฟอยล์โลหะห่อหุ้มด้วยพลาสติกทั้ง 2 ด้าน ใช้ในการป้องกันน้ำตามแนวรัศมี หรือแนวขวางในสายเคเบิล โดยพลาสติกที่ห่อหุ้มจะถูกละลายเพื่อให้ติดกับชั้นถัดไป เพื่อป้องกันน้ำและความชื้นไม่ให้แพร่ไปยังชั้นของเนื้อฉนวนได้ หรือรู้จักกันในชื่อว่า Laminate sheath

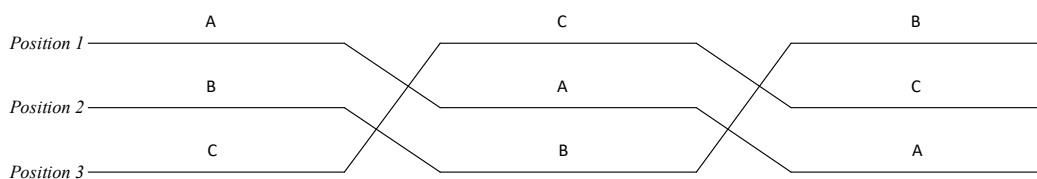


รูปที่ 2.7 ตำแหน่งของ water blocking ของสายเคเบิล 115 kV
 ก)Longitudinal water-blocking ข)Radial water-blocking [10]

2.3 เทคนิคการแก้ปัญหาแรงดันที่เปลือกของสายเคเบิล

ด้วยภาระของสายเคเบิลจากการเกิดแรงดัน (sheath voltage) และกระแสไหลวนที่เปลือก (sheath current) จึงต้องมีวิธีในการแก้ปัญหาเพื่อลดภาระ ยืดอายุการใช้งาน รวมถึงเพื่อประสิทธิภาพของสายเคเบิล และเพื่อความปลอดภัยสำหรับผู้ปฏิบัติงานที่ใกล้ชิดสายเคเบิล

2.3.1 การจัดวางเฟส การวางตัวนำแบบสลับไปมาช่วยลดความไม่สมดุลของระบบที่เกิดจากการวางตำแหน่งตัวนำ ระบบจะมีความสมดุลมากขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อจำนวนรอบการ transport เพิ่มขึ้น ในระบบสายเคเบิลใต้ดินกรณีที่มีสายเคเบิลวางไว้ใกล้กันจะช่วยลดในเรื่องของแรงดันที่เปลือกของเคเบิล เนื่องจากแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจากเฟสข้าง ๆ เกิดการหักล้างกันเมื่อมีการสลับตำแหน่งเฟส โดยลักษณะการวางเป็นไปดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ลักษณะการจัดวางตัวนำแต่ละเฟสแบบสลับ

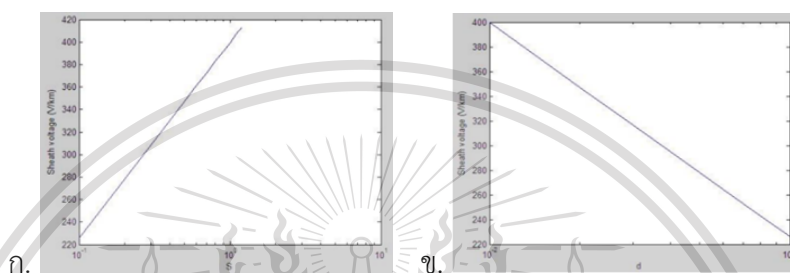
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.3.2 การปรับระยะห่างระหว่างสายเคเบิล จากสมการแรงดันบนเปลือกเคเบิล แทนค่าระยะห่างระหว่างตัวนำต่อรัศมีเปลือกเคเบิลด้วยอัตราส่วน S/d เมื่อกำหนดให้ค่า r มีค่าคงที่ แล้วทำการเพิ่มค่า S ตั้งแต่ 0.1 ถึง 1 เมตร จะพบว่าทั้งสายเคเบิลที่จัดวางแบบ Trefoil และแบบ Flat นั้นมีแรงดันบนเปลือกเคเบิลที่เพิ่มขึ้นแต่เพียงแค่วัสดุระยะหนึ่งตามรูปที่ 2.9ก.) เท่านั้น

2.3.3 ผลจากการปรับรัศมีเปลือกหุ้มชั้นนอก ในทางกลับกันหากกำหนดค่า S มีค่าคงที่แล้วทำการเพิ่มค่า d ตั้งแต่ 0.01 ถึง 0.1 เมตร จะพบว่าทั้งสายเคเบิลที่จัดวางแบบ Trefoil และแบบ Flat นั้นมีแรงดันบนเปลือกเคเบิลที่ลดลงตามรูปที่ 2.9ข.)



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับ ก)ระยะห่างระหว่างตัวนำ (S) ข)รัศมีเปลือกหุ้มชั้นนอก (d)[11]

2.3.4 Cable Grounding จากการสูญเสียที่เปลือกของสายเคเบิล (Cable sheath) ที่เพิ่มขึ้นตามระยะห่างของสายเคเบิลที่วางไว้ด้วยกัน (S) เช่น การติดตั้งสายเคเบิลแบบตัวนำแกนเดี่ยวที่มีการต่อลงดินแบบหลายจุดและวางไว้ในท่อแยกกันคนละท่อ เป็นต้น โดยจากทฤษฎีในหัวข้อก่อนหน้า จะพบว่าสิ่งที่เราไปเพิ่มระยะห่างของเคเบิลอาจช่วยลดในเรื่องของความร้อนที่เกิดขึ้นร่วมกันได้ แต่จะไปมีผลเพิ่มในส่วนของสนามแม่เหล็ก ทำให้เกิดแรงดันขึ้นที่เปลือกของเคเบิล และเกิดกระแสไหลวนมากขึ้น ดังนั้นการแก้ปัญหาความสูญเสียด้วยวิธีการปรับระยะห่างและรัศมีของตัวนำสายเคเบิลอาจไม่เหมาะสม จึงต้องมีวิธีการดังต่อไปนี้เพื่อที่จะเป็นการกำจัดหรือลดการสูญเสียจากกระแสไหลวนขึ้นที่เปลือกของสายเคเบิล

การต่อกราวด์เคเบิลเพื่อลดแรงดันที่เปลือกเคเบิลมีวิธี ดังนี้

1) การต่อลงดินแบบจุดเดี่ยว เป็นวิธีที่ง่ายที่สุดโดยการนำตัวนำไฟฟ้าต่อเข้ากับเปลือกของสายเคเบิลบริเวณส่วน metallic sheath นำมาเชื่อมติดกันของสายเคเบิลทั้งสามเฟส และต่อลงกราวด์ และทำเพียงด้านเดียวของสายเคเบิลดังแสดงในรูปที่ 2.11ก.) โดยการต่อลงดินแบบจุดเดี่ยวนิยมใช้กับสายเคเบิลใต้ดินระบบไม่เกิน 115 kV ความยาวไม่เกิน 500 เมตร[12]

ข้อดีของการต่อลงดินแบบจุดเดี่ยว

1. เนื่องจากมีการต่อลงดินเพียงด้านเดียวของสายเคเบิลดังนั้นจึงไม่เป็นการครบวงจร และไม่มีกระแสไหลวนเกิดขึ้นในเปลือกของสายเคเบิล

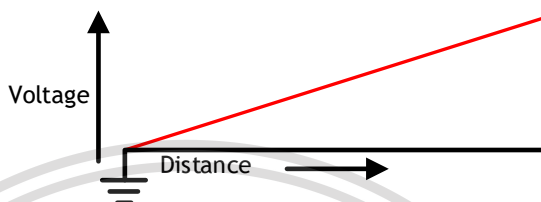
2. สามารถกำจัดความร้อนจากเปลือกของสายเคเบิลได้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ข้อเสียของการต่อลงดินแบบจุดเดียว

1. ที่จุดต่อลงดินแรงดันประมาณศูนย์และเพิ่มขึ้นแบบเส้นตรงเมื่อความยาวของสายเคเบิลเพิ่มขึ้น ดังนั้นในกรณีที่สายเคเบิลมีความยาวมากที่ปลายอีกด้านหนึ่งจะเกิดแรงดันสูงเกินกว่าค่าที่ยอมรับได้ดังรูปที่ 2.10

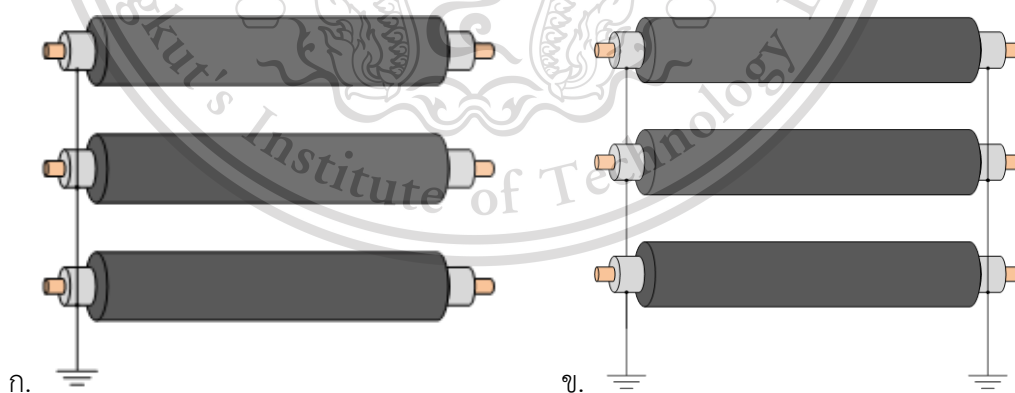


รูปที่ 2.10 การกระจายแรงดันบนเปลือกของเคเบิลเมื่อต่อลงดินจุดเดียว

2. เกิดการสปาร์คได้ง่ายเนื่องจากอีกด้านหนึ่งที่ไม่ได้ต่อลงดินของสายเคเบิลมีแรงดันที่เปลือกสูง

3. ใช้ได้กับสายเคเบิลที่มีความยาวน้อย [1]

2) การต่อลงดินแบบสองจุด (Two Point Bonding) เป็นการต่อลงดินแบบสองจุดของสายเคเบิลเป็นการต่อลงดินที่บริเวณต้นและปลายของสายเคเบิล ซึ่งMetallic sheath ของเคเบิลทั้งสามเฟสจะถูกเชื่อมเข้าด้วยกันและต่อลงกราวด์ ส่วนต้นสายหนึ่งจุด และปลายสายอีกหนึ่งจุด ดังแสดงในรูปที่ 2.11ข.)



รูปที่ 2.11 การต่อลงดินของสายเคเบิลสามเฟส

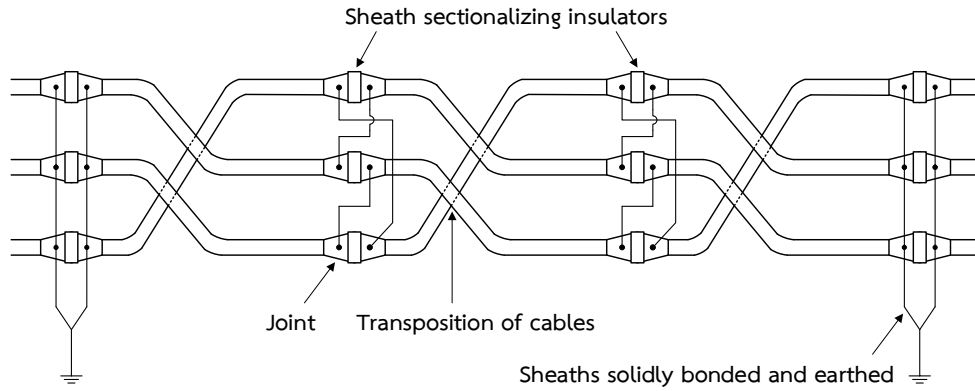
- ก) การต่อลงดินแบบจุดเดียว ข) การต่อลงดินแบบสองจุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อดีของการต่อลงดินแบบสองจุด

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.13 การต่อ cross bounded cable with transposition[13]

2.3.5 การคำนวณเพื่อแก้ปัญหาแรงดัน และกระแสไหลวนที่เปลือกของเคเบิลกรณีต่อลงดินการคำนวณแรงดันและกระแสที่เปลือก กรณีมีการต่อกราวด์ที่ต้นหรือปลายทางให้กับเคเบิล สิ่งที่ต้องพิจารณาเพิ่มคือ ความต้านทานของเปลือกเคเบิลที่เข้ามามีผล โดยกระแสที่เปลือก เป็นดังนี้

$$[E_s] = \{[R_{sh}] + j[X_m]\}[I_{sh}] \tag{2.15}$$

เมื่อ
ดังนั้น

$$\begin{aligned} [E_s] &= j[X_m][I_{core}] \\ [I_{sh}] &= \{[R_{sh}] + j[X_m]\}^{-1} j[X_m][I_{core}] \end{aligned} \tag{2.16}$$

การคำนวณแรงดันและกระแสที่เปลือก กรณีมีการต่อ cross bounding ให้กับเคเบิล สิ่งที่ต้องพิจารณาเพิ่มเติมคือ ตัวประกอบเนื่องจากการครอสบอนด์แทนด้วย [W] ซึ่งจะแตกต่างกันตามจำนวนวงจร ดังนี้

Metric [W] หรือ cross bounding coefficient ประกอบด้วย 3 metric เขียนในรูปทั่วไป คือ

$$W_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, W_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, W_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

เมื่อบางกรณีมีจำนวนเพิ่มมากขึ้นในระบบเคเบิล cross bounding coefficient ซึ่งจะเขียนอยู่ในรูป [U]

$$[U_1] = \begin{bmatrix} W_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & W_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & W_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & W_1 \end{bmatrix} \quad [U_2] = \begin{bmatrix} W_2 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & W_2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & W_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & W_2 \end{bmatrix} \quad [U_3] = \begin{bmatrix} W_3 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & W_3 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & W_3 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & W_3 \end{bmatrix}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดกรณีศึกษาเป็น 3 กลุ่มวงจรดังนั้น cross bounding coefficient [U] สามารถเขียนได้ดังนี้ การนำไปใช้

$$[u_1] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad [u_2] = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad [u_3] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

จากสมการทั่วไปของแรงดันที่เปลือก (2.14) เมื่อเคเบิลมีการต่อ cross bounding ควบคู่กับการต่อกราวด์ที่ต้นและปลายสายสมการจะเปลี่ยนรูปตามความสัมพันธ์ของระยะการครอสบอนด์กับ cross bounding coefficient เป็นดังนี้ [3]

$$[E_s] = \{D_x[U_1] + D_y[U_2] + D_z[U_3]\} * j[X_m][I_{core}] \quad (2.17)$$

และสามารถคำนวณกระแสไหลวนในเปลือกของเคเบิลได้จาก

$$[I_{sh}] = \{[R_{sh}] + j[X_m]\}^{-1} * j\{D_x[U_1] + D_y[U_2] + D_z[U_3]\}[X_m][I_{core}] \quad (2.18)$$

2.4 เทคนิคการทดสอบสายเคเบิลด้วย VLF

การทดสอบด้วยไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ต่ำ (VLF) เป็นการประยุกต์ใช้สัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับในย่านความถี่ตั้งแต่ 0.01 Hz ถึง 1 Hz สำหรับในการทดสอบความคงทน (Withstand test) วัสดุทดสอบ (Test object) จะถูกทดสอบโดยการป้อนระดับแรงดันที่กำหนด (โดยปกติจะมากกว่าแรงดันใช้งาน) ภายในช่วงระยะเวลาที่กำหนด โดยจะต้องไม่เกิดการเบรกดาวนเกิดขึ้นกับเนื้อฉนวน แต่สำหรับถ้าฉนวนเคเบิลหรืออุปกรณ์เสริมของเคเบิล (Accessory) มีการเสื่อมสภาพมากพอที่จะทำให้เกิดการเบรกดาวนระหว่างการทดสอบ จำเป็นจะต้องทำการซ่อมแซมระบบใหม่และทำการทดสอบความคงทนอีกครั้งจนกว่าจะทดสอบผ่าน

สำหรับการทดสอบเพื่อวินิจฉัย (Diagnostic test) จะได้ผลการทดสอบออกมาเป็นข้อมูลเชิงตัวเลข ซึ่งจะสามารถหาความสัมพันธ์ของการเสื่อมสภาพของระบบเคเบิลได้ โดยทำการเปรียบเทียบกับข้อมูลเชิงตัวเลขที่มีการเก็บสะสมมาก่อนหน้านั้น ว่าส่วนของระบบเคเบิลมีแนวโน้มที่จะทำงานต่อไปอย่างเหมาะสมหรือไม่ และจากค่าตัวเลขที่ได้จากการทดสอบ ควรจำไว้เสมอว่าเป็นค่าที่วัดได้จากการใช้แรงดัน VLF ในการทดสอบ ซึ่งอาจไม่ได้มีความสัมพันธ์กับค่าที่วัดได้จากการใช้แรงดันความถี่อื่น ๆ ในการทดสอบ ตัวอย่างเช่น การวัด $\tan \delta$ ที่ความถี่ 0.1 Hz จะมีขนาดที่โตกว่าในการวัดที่ความถี่ 50 Hz และการทดสอบการดิสชาร์จบางส่วน (PD) อาจมีความแตกต่างกันในแง่ของขนาด PD ที่วัดได้และขนาดของแรงดันไฟฟ้าเริ่มเกิดดิสชาร์จบางส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น ยกเว้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

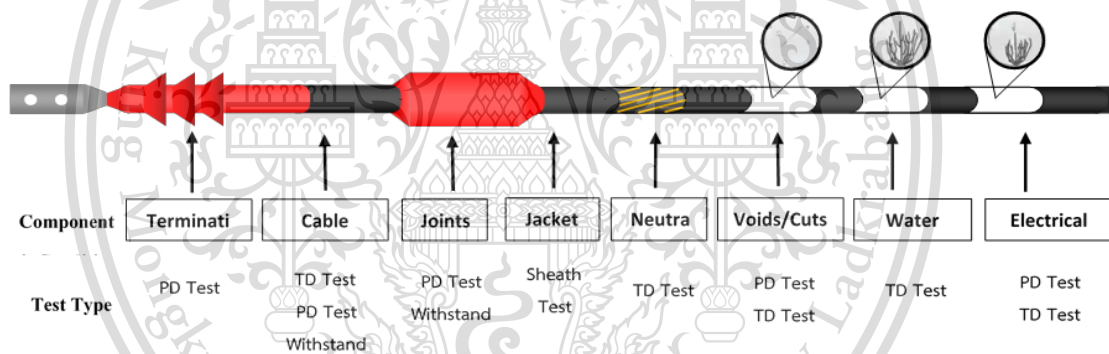
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การทดสอบด้วยไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ต่ำ (VLF) เป็นการประยุกต์ใช้สัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับในย่านความถี่ต่ำตั้งแต่ 0.01 Hz ถึง 1 Hz โดยปกติจะทดสอบที่ความถี่ 0.1 Hz เพื่อเป็นการลดกำลังของอุปกรณ์ทดสอบ เนื่องจากสายเคเบิลที่มีความยาวมาก ๆ จะมีค่าคาปาซิแตนซ์สูงมาก จึงจำเป็นต้องใช้กำลังในการทดสอบสูง เพื่อเป็นการลดกำลังในการทดสอบลง จึงจำเป็นต้องทำการลดความถี่ลง ตามสมการพิกัดกำลังที่ใช้ในการทดสอบ

$$S = 2\pi f \cdot C \cdot V^2 \quad (2.18)$$

ตัวอย่างเช่น ระบบเคเบิล 22 kV ยาว 1 ไมล์ มีค่าความจุ 0.5 μF /ไมล์ จะต้องใช้อุปกรณ์ทดสอบที่พิกัดกำลังประมาณ 32,000 VA (คิดพิกัดกำลังทดสอบที่ 80% ของพิกัดอุปกรณ์ทดสอบ) ถ้าใช้ความถี่ในการทดสอบลดลงเป็น 0.1 Hz จะใช้อุปกรณ์ทดสอบที่พิกัดกำลังเพียง 65 VA ซึ่งจะเห็นได้ว่ายิ่งใช้ความถี่ต่ำในการทดสอบ พิกัดกำลังของอุปกรณ์ทดสอบก็จะลดลง จากในตัวอย่างกำลังที่ใช้ในการทดสอบจะลดลงถึง 500 เท่า



รูปที่ 2.14 ส่วนประกอบของเคเบิลและประเภทการทดสอบ[14, 15]

จากรูปที่ 2.14 จะเป็นการแสดงส่วนประกอบของระบบเคเบิล ปัญหาที่เกิดขึ้นบนระบบเคเบิล และประเภทของการทดสอบ จากมาตรฐาน IEEE 400.2 แนะนำการทดสอบระบบเคเบิลด้วยกระแสสลับความถี่ต่ำ (VLF) ในมาตรฐานมีการทดสอบการอยู่ด้วยกัน 3 ประเภท ดังนี้ 1) การทดสอบความคงทนด้วย VLF 2) การทดสอบแฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กทริก ($\tan \delta$) และ 3) การทดสอบดิสชาร์จบางส่วน (PD testing)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.4.1 การทดสอบความคงทนด้วย VLF (VLF AC withstand voltage testing) การทดสอบความคงทนเป็นการทดสอบแบบทำลายหรือแบบ Pass & Fail ถ้าทดสอบไม่ผ่านระบบเคเบิลก็จะเกิดความเสียหาย แสดงว่าระบบมีจุดอ่อนหรือจุดบกพร่อง (weak point) แต่ถ้าทดสอบผ่านระบบเคเบิลก็สามารถใช้งานได้ตามปกติ แสดงว่าระบบยังไม่มีจุดอ่อนหรือจุดบกพร่องที่อาจทำให้เกิดการเสียหายในตอนทดสอบ การทดสอบความคงทนด้วย VLF สามารถตรวจจับ water trees ที่มีความรุนแรง และ electrical trees ได้ โดยทำให้ treeing เหล่านั้นขยายตัวและเกิดความเสียหายในจุดนั้นไป และสามารถตรวจจับปัญหาที่เกิดจากความผิดพลาดของการทำงานของช่างติดตั้ง เช่นการประกอบ splices และ termination โดยการทดสอบจะทำให้เกิดความเสียหายในบริเวณที่มีความผิดปกติหรือจุดบกพร่องในระหว่างการทดสอบ เป็นการทดสอบที่สามารถระบุตำแหน่งจุดบกพร่องได้ แต่ไม่สามารถบอกอายุที่เหลือของฉนวนได้ ไม่สามารถบอกได้ว่าคุณภาพของฉนวนที่เหลืออยู่นั้นเป็นอย่างไร เช่น สายเคเบิลที่ผ่านการทดสอบความคงทนแล้ว สายเคเบิลนั้นสามารถผ่านการทดสอบได้ง่ายแทบจะไม่มี ความผิดปกติ ฉนวนมีความสมบูรณ์สูง หรือสายเคเบิลนั้นเกือบจะไม่ผ่านการทดสอบ ความสมบูรณ์ของฉนวนนั้นเสื่อมไปพอสมควรแล้ว ฉะนั้นจึงเห็นได้ว่าการทดสอบความคงทนนั้นไม่สามารถบอกระดับความเสื่อมของสายเคเบิลได้ บอกได้เพียงแต่ว่าสายเคเบิลนั้นผ่านหรือไม่ผ่านการทดสอบแค่นั้น สำหรับเคเบิลที่ผ่านการทดสอบความคงทนตามสถิติแล้วจะมีอายุการใช้งานที่มากกว่า 2 ปีขึ้นไปที่มีความน่าเชื่อถือ 97%[15]



รูปที่ 2.15 จุดบกพร่องของระบบสายเคเบิลใต้ดิน[15]

จุดประสงค์ของการทดสอบความคงทนด้วย VLF เพื่อเป็นการตรวจสอบความสมบูรณ์ของสายเคเบิลทั้งระบบ เป็นการตรวจจับหาจุดบกพร่องของระบบเคเบิลแบบภาพรวม การคำนวณอายุการใช้งานของสายเคเบิลใต้ดินแสดงในรูปที่ 2.15 สามารถแยกแยะปัญหาได้เป็น ปัญหาที่เกิดจากการติดตั้งซึ่งเป็นปัญหาแบบ workmanship ที่เกิดจากการประกอบ joint และ termination และ

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ปัญหาที่เกิดจากการผลิต การขนส่ง และสิ่งแวดล้อม ซึ่งเมื่อใช้งานนานไปก็จะ เกิดความเสื่อมของ ฉนวนขึ้น อันเนื่องมาจากความชื้นมีผลทำให้เกิด water tree ในเนื้อฉนวน มีการแก้ตัวของเนื้อฉนวน มีการกัดกร่อนของแผ่นตะกั่วหรือทองแดงที่เปลือกเคเบิล จากปัญหาการดังกล่าวจะต้องมีการ ตรวจสอบเช็คสภาพระบบเคเบิลอยู่เป็นประจำ โดยมีการทดสอบความคงทนแบบ Installation test, Acceptance test และ Maintenance test

1) หลักการทดสอบความคงทน[16]

ระดับแรงดันสำหรับการทดสอบความคงทนของระบบเคเบิล โดยทั่วไปจะใช้แรงดัน ทดสอบที่มีขนาด 2 ถึง 3 เท่าของแรงดันที่ใช้งานปกติ ยกเว้นการทดสอบแบบบำรุงรักษาที่ใช้แรงดัน ในการทดสอบที่น้อยกว่า 2 เท่าของแรงดันที่ใช้งานปกติ การทดสอบความคงทนที่ใช้ขนาดแรงดัน ทดสอบสูงกว่าแรงดันที่ใช้งานปกติเนื่องจากการเร่งให้จุดอ่อนหรือจุดบกพร่องของระบบเคเบิล เกิดเบรกดาวนนี้ในระหว่างการทดสอบ ซึ่งจะสามารถตรวจจับหาจุดบกพร่องของระบบเคเบิลได้เจอ และทำการซ่อมแซมและแก้ไขได้อย่างทันถ่วงที ถ้าหากระบบเคเบิลมีจุดบกพร่องแต่ไม่ได้ทำการ ตรวจสอบจุดอ่อนหรือจุดบกพร่องเหล่านั้น จุดบกพร่องหรือจุดอ่อนเหล่านั้นก็พร้อมที่จะทำให้เกิดความเสียหายต่อระบบเคเบิลระหว่างการใช้งานได้ตลอดเวลา จึงเป็นทางเลือกที่ดีกว่าที่ต้องกำจัดให้ จุดบกพร่องหรือจุดอ่อนเหล่านั้นให้หายไป โดยทำให้จุดบกพร่องหรือจุดอ่อนเหล่านั้นเกิดความเสียหายในระหว่างการทดสอบที่ได้มีการกำหนดตารางเวลาทดสอบที่ชัดเจน มีการเตรียมเครื่องมือ พร้อมสำหรับการซ่อมแซมและแก้ไข มีการเตรียมสายเคเบิล splices และ termination มาสำรองไว้ เพื่อที่จะนำมาแทนที่สำหรับปัญหาที่แก้ไขไม่ได้ การทดสอบความคงทนด้วยVLFไม่ได้ก่อให้เกิดปัญหา ขึ้นมาใหม่ในระบบเคเบิล เป็นเพียงการหาจุดอ่อนหรือจุดบกพร่องที่มีอยู่แล้ว และไม่ได้ทำให้เกิดผล กระทบที่เป็นอันตรายต่ออายุการใช้งานของเคเบิลที่ได้มีการกำหนดมา[17] การทดสอบความคงทน ด้วยVLFเป็นการตรวจสอบความสมบูรณ์ของระบบเคเบิลเพื่อตรวจหาจุดอ่อนหรือจุดบกพร่องโดยทำ ให้เกิดการเบรกดาวนระหว่างการทดสอบแล้วต้องมีการซ่อมแซมและแก้ไข เป็นการกำจัดจุดอ่อนหรือ จุดบกพร่องของระบบเคเบิลเพื่อลดโอกาสที่จะทำให้เกิดความผิดพลาดในระหว่างการใช้งาน ลด ปัญหาในการเกิดไฟฟ้าดับซึ่งมีความสำคัญต่อระบบเศรษฐกิจในยุคปัจจุบันมาก และเป็นการเพิ่มความน่าเชื่อถือให้กับระบบเคเบิลให้มีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น

ถ้าหากระบบเคเบิลมีความสมบูรณ์ เช่น สายเคเบิลที่มีการผลิต การขนส่ง และการ ติดตั้งที่มีคุณภาพ รวมถึงการเชื่อมต่อสายเคเบิลทั้ง joint และ termination ที่ดีก็จะทำให้ระบบ เคเบิลมีความสมบูรณ์ ซึ่งก็จะผ่านการทดสอบความคงทนและสามารถใช้งานได้อย่างปลอดภัย แต่ อย่างไรก็ตามเมื่อใช้งานระบบเคเบิลไปนาน ๆ ก็ต้องเกิดการเสื่อมสภาพของระบบเป็นธรรมดา ซึ่งจะต้อง มีการทดสอบและตรวจเช็คสภาพระบบเคเบิลอยู่เป็นประจำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ 2) ประเภทของการทดสอบความคงทน[18] ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้เผยแพร่สิ่งนี้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกสิ่งที่มีกรรมสิทธิ์ใน ใช้ เป็น 3 ประเภท ดังนี้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Installation test เป็นการทดสอบสายเคเบิลโดยจะทำการทดสอบก่อนติดตั้งส่วนประกอบต่าง ๆ เช่น splices และ terminations ซึ่งการทดสอบนี้จะเป็นการเช็คสภาพของเคเบิลที่อาจเกิดความเสียหายจากการผลิต ความเสียหายจากการขนส่ง หรือความเสียหายที่เกิดจากการดึงลากสายเคเบิลเมื่อเวลาติดตั้ง

Acceptance test เป็นการทดสอบหลังจากการติดตั้งส่วนประกอบต่าง ๆ เสร็จเรียบร้อยแล้ว แต่ยังไม่ได้ทำการจ่ายไฟเพื่อเปิดการใช้งานของระบบเคเบิล ซึ่งในบ่อยครั้งก็ได้มีการข้ามการทดสอบแบบ Installation test เนื่องจากการทดสอบแบบ Acceptance test จะเป็นการทดสอบที่ระดับแรงดันสูงกว่าการทดสอบแบบ Installation test การทดสอบแบบ Acceptance test จะเป็นการทดสอบหลังจากการติดตั้งส่วนประกอบเสร็จแล้ว เช่น splices และ terminations แต่เคเบิลยังไม่ได้ถูกเชื่อมต่อเข้ากับสวิตช์เกียร์ ซึ่งการทดสอบแบบ Acceptance test เป็นการตรวจสอบปัญหาที่เกิดจากการทำงานของช่างผู้ติดตั้งในการประกอบสายเคเบิลหรือเข้าหัวต่อสายเคเบิล และยังเป็น การตรวจสอบปัญหาที่เกิดจากการผลิตและการขนส่งได้อีกด้วย จากตารางที่ 2.1 ในการทดสอบแบบ Acceptance test จะมีระดับแรงดันทดสอบสูงสุดประมาณ 2 ถึง 3 เท่าของระดับแรงดันที่ใช้งานปกติ ซึ่งการทดสอบแบบ Maintenance test จะใช้ระดับแรงดันในการทดสอบอยู่ที่ 70 ถึง 80 เปอร์เซ็นต์ของการทดสอบแบบ Acceptance test

Maintenance test เป็นการทดสอบหลังจากได้มีการใช้งานของระบบเคเบิลเรียบร้อยแล้ว เพื่อเป็นการบำรุงรักษาระบบเคเบิลใต้ดิน เมื่อระบบมีอายุการใช้งานมากขึ้นอาจมีปัญหาคืออื่น ๆ ตามมา เช่น การเสื่อมตัวของจุดเชื่อมต่อต่าง ๆ, การเสื่อมตัวของฉนวนที่เกิดจาก water tree การทดสอบแบบ Maintenance test ก็จะเป็นการตรวจหาจุดอ่อนของระบบเคเบิลที่ผ่านการใช้งานมาในแต่ละช่วง ซึ่งจะใช้ระดับแรงดันทดสอบที่ต่ำกว่าการทดสอบแบบ Acceptance test และการทดสอบแบบ Installation test แต่ยังคงมากกว่าระดับแรงดันที่ใช้งานปกติ

3) ระดับแรงดันสำหรับการทดสอบความคงทน

ระดับแรงดันในการทดสอบตามมาตรฐาน IEEE 400.2 สำหรับระบบเคเบิลขนาด 5 kV ถึง 69 kV ซึ่งเป็นการรวบรวมระดับแรงดันพื้นฐานที่ใช้ในการทดสอบทั่วโลก โดยระดับแรงดันที่ใช้ในการทดสอบจะมีขนาด 2 ถึง 3 เท่าของขนาดแรงดันที่ใช้งานปกติ ยกเว้นการทดสอบแบบ Maintenance test ที่ใช้ระดับแรงดันทดสอบที่น้อยกว่า 2 เท่าของขนาดแรงดันที่ใช้งานปกติ

แรงดันทดสอบกระแสสลับ VLF จะนิยมใช้รูปคลื่นไซน์และรูปคลื่นสี่เหลี่ยมในการทดสอบ สำหรับรูปคลื่นแรงดันอื่น ๆ ก็สามารถใช้ในการทดสอบระบบเคเบิลได้ แต่ในตอนนี้ยังไม่ได้มีการกำหนดระดับแรงดันทดสอบของรูปคลื่นอื่น ๆ ขึ้นมา จากมาตรฐาน IEEE 400.2 กำหนดให้แรงดันรูปคลื่นไซน์มีค่า RMS มีขนาดเป็น 0.707 เท่าของค่า Peak ซึ่งมาตรฐานได้กำหนดให้ค่าการบิดเบือน

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 2.1 ระดับแรงดันสำหรับการทดสอบความคงทนด้วย VLF[18]

รูปคลื่น	ระบบแรงดัน เคเบิล (phase to phase) [kV]	Installation (phase to ground)		Acceptance (phase to ground)		Maintenance (phase to ground)	
		[kV rms]	[kV peak]	[kV rms]	[kV peak]	[kV rms]	[kV peak]
รูปคลื่นไซน์	5	9	13	10	14	7	10
	8	11	26	13	18	10	14
	15	19	27	21	30	16	22
	20	24	34	26	37	20	28
	25	29	41	32	45	24	34
	28	32	45	36	51	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
รูปคลื่น สี่เหลี่ยม	5	13	13	14	14	10	10
	8	16	16	18	18	14	14
	15	27	27	30	30	22	22
	20	34	34	37	37	28	28
	25	41	41	45	45	34	34
	28	45	45	51	51	38	38
	30	48	48	54	54	41	41
	35	55	55	62	62	47	47
	46	72	72	81	81	61	61
	69	106	106	119	119	89	89

จากตารางที่ 2.1 การเลือกค่าระดับแรงดัน VLF ที่ใช้ทดสอบความคงทนของระบบ
เคเบิล ซึ่งจะมีรูปคลื่นแรงดันที่ใช้ทดสอบมีด้วยกัน 2 รูปคลื่น คือ รูปคลื่นไซน์ และรูปคลื่นสี่เหลี่ยม
โดยวิธีการเลือกค่าแรงดันทดสอบจะต้องเลือกตามตารางที่ 2.1 ดังนี้ 1. เลือกรูปคลื่นในการทดสอบ 2.
ไม่ว่ากรณีใดๆ ห้ามมั่วเด็ดขาดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ต้องทราบวาระบบเคเบิลที่ทดสอบเป็นระบบขนาดเท่าไร และ 3. ต้องทราบประเภทการทดสอบว่า
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เป็นการทดสอบประเภทอะไร ซึ่งจะมีอยู่ด้วยกัน 3 ประเภทคือ Installation test , Acceptance test และ Maintenance test

ตัวอย่างเช่น ต้องการทดสอบระบบเคเบิล ระบบ 22 kV_{L-L} แบบ Acceptance test และใช้แรงดันรูปคลื่นไซน์ในการทดสอบ ซึ่งจะได้ค่าแรงดันทดสอบอยู่ที่ 32 kV_{rms} หรือ 45 kV_{peak}

4) ระยะเวลาสำหรับการทดสอบความคงทน[18]

สำหรับมาตรฐาน IEEE 400.2 ในปัจจุบันได้มีการแนะนำสำหรับระยะเวลาการทดสอบด้วย VLF จาก 30 นาที ถึง 60 นาที สำหรับในอุตสาหกรรมมีการปรับให้เวลาต่ำที่สุดอยู่ที่ 30 นาที และโดยปกติในแบบยุโรปจะใช้เวลาในการทดสอบอยู่ที่ 1 ชั่วโมง

สำหรับการทดสอบความคงทนของเคเบิลที่มีอายุการใช้งาน (Maintenance test) วงจรปกติ แนะนำให้ใช้เวลาสำหรับการทดสอบอย่างน้อยที่สุด 30 นาที ที่ความถี่ 0.1 Hz แต่ถ้าระบบเคเบิลนั้นมีความสำคัญเป็นวงจรพิเศษ เช่น เป็นวงจรสายป้อน ให้พิจารณาเพิ่มเพื่อให้มีการขยายระยะเวลาในการทดสอบจนถึง 60 นาที ที่ความถี่ 0.1 Hz

สำหรับการทดสอบความคงทนของเคเบิลใหม่ที่เพิ่งมีการติดตั้งเสร็จ(Installation test) หรือเพิ่งมีการประกอบเสร็จ (Acceptance test) แนะนำให้ใช้เวลาสำหรับการทดสอบ 60 นาที ที่ความถี่ 0.1 Hz

ระยะเวลาในการทดสอบภายในช่วง 15 ถึง 30 นาทีควรมีการพิจารณา ถ้าหากการตรวจสอบคุณสมบัติของเคเบิล(the monitored characteristic)ยังคงดำเนินเป็นไปตามปกติที่ 15 นาที และไม่มีข้อผิดพลาดใด ๆ เกิดขึ้น ควรมีการทดสอบความคงทนที่ 30 นาที

ถ้าหากมีการลดความถี่ในการทดสอบความคงทน จำเป็นจะต้องเพิ่มระยะเวลาในการทดสอบด้วย อ่านเพิ่มเติมที่หัวข้อ 3.1.5

ถ้าระบบเคเบิลเกิดข้อผิดพลาดหรือเกิดเบรกดาวน์ขึ้นระหว่างการทดสอบ จะต้องมีการซ่อมแซมและแก้ไขระบบ หรือมีการแทนที่สายเคเบิลใหม่เข้าไป และหลังจากได้มีการซ่อมแซมเป็นที่เรียบร้อยแล้วจะต้องมีการทดสอบใหม่อีกครั้ง ที่เวลา 30 นาที โดยเฉพาะอย่างยิ่งการทดสอบความคงทน และจะต้องมีการทดสอบอื่น ๆ เช่น การทดสอบหาค่าแฟกเตอร์ความสูญเสีย(tan δ) และทดสอบหาการดิสชาร์จบางส่วน(PD : Partial discharge) ทั้งก่อนการซ่อมแซมเคเบิลเพื่อมีการประเมินเคเบิล และหลังการซ่อมแซมเคเบิลเพื่อมีการประเมินการทำงานของช่างติดตั้งหลังการซ่อมแซม

5) ความถี่สำหรับการทดสอบความคงทน[18]

การทดสอบด้วยแรงดัน VLF ได้มีการประยุกต์ใช้สัญญาณแรงดันกระแสสลับความถี่ต่ำในช่วง 0.01 Hz ถึง 1 Hz โดยส่วนใหญ่แล้วในเชิงพาณิชย์จะใช้แรงดันกระแสสลับ VLF ที่ความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่โดยสถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทนจันทบุรี และศูนย์วิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทนจันทบุรี

ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากสถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทนจันทบุรี และศูนย์วิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทนจันทบุรี

มาก ๆ ทำให้พิกัดกำลังของอุปกรณ์ทดสอบจะต้องมีค่าสูงตามไปด้วย แต่ถ้าหากพิกัดกำลังที่ต้องการ

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ใช้ในการทดสอบมีค่าเกินขีดจำกัดของอุปกรณ์ทดสอบที่ 0.1 Hz จึงจำเป็นต้องลดความถี่ที่ใช้ในการทดสอบลงให้ต่ำกว่า 0.1 Hz เพื่อที่จะสามารถทำการทดสอบต่อไปได้

ตัวอย่าง ระบบเคเบิล 22 kV ยาว 1 ไมล์ มีค่าความจุ 0.5 $\mu\text{F}/\text{ไมล์}$ มีชุดอุปกรณ์ทดสอบพิกัดกำลังที่ 100 VA

จากสมการที่ (2.18)	$S = 2\pi f \cdot C \cdot V^2$
แทนค่า	$S = 2\pi \cdot 0.1 \cdot 0.5 \times 1 \times 10^{-6} \cdot (22 / \sqrt{3} \times 10^3)^2$
จะได้พิกัดกำลังทดสอบ	$S = 51 \text{ VA}$

จากการคำนวณพบว่าพิกัดกำลังทดสอบมีค่าน้อยกว่าพิกัดอุปกรณ์ทดสอบ ซึ่งสามารถทำการทดสอบได้ แต่ถ้ระบบเคเบิลมีความยาวมาก ๆ เช่น ยาว 3 ไมล์ พิกัดกำลังทดสอบที่ต้องการจะเพิ่มขึ้นเป็น 3 เท่า ซึ่งจำเป็นต้องลดความถี่ลงสำหรับการทดสอบ

จากสมการที่ (2.18)	$S = 2\pi f \cdot C \cdot V^2$
แทนค่า	$100 \times 0.8 = 2\pi f \cdot 0.5 \times 3 \times 10^{-6} \cdot (22 / \sqrt{3} \times 10^3)^2$
จะได้ความถี่สำหรับการทดสอบ	$f = 0.053 \text{ Hz}$

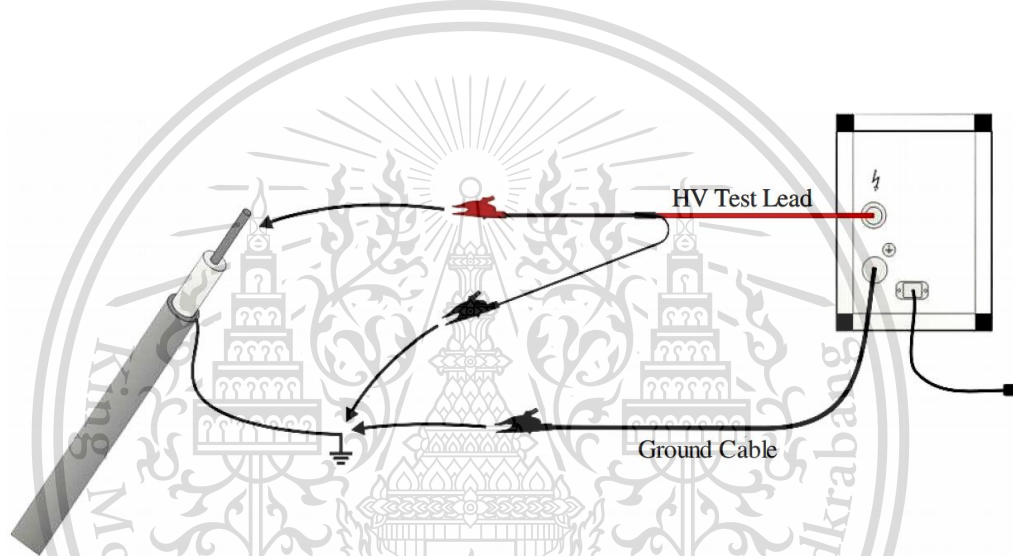
ดังนั้นจากการคำนวณจะเห็นว่าเราจะต้องทำการลดความถี่ลงสำหรับการทดสอบระบบเคเบิลที่มีความยาวมาก ๆ ซึ่งในกรณีนี้เราจะใช้ความถี่ในการทดสอบที่ 0.05 Hz หรือต่ำกว่า

ข้อควรระวังสำหรับการที่ลดความถี่ลงอย่างไม่จำเป็น จะทำให้ประสิทธิภาพของการทดสอบต่ำลงโดยอัตราส่วน dV/dt ของรูปคลื่นแรงดันทดสอบมีขนาดลดลง ทำให้ความเครียดของแรงดันทดสอบลดลงและทำให้เกิดผลกระทบจากสเปซชาร์จมากขึ้น และการทดสอบที่ความถี่ต่าง ๆ ที่ไม่ใช่ความถี่ 0.1 Hz นั้นมีข้อมูลของการทดสอบอยู่น้อยจึงยากต่อการเปรียบเทียบข้อมูลเพื่อนำมาวิเคราะห์ผล ซึ่งควรหลีกเลี่ยงการลดความถี่ลงโดยไม่จำเป็น สำหรับการทดสอบความคงทนตามมาตรฐาน IEEE 400.2 แนะนำให้มีการเพิ่มระยะเวลาในการทดสอบขึ้นเมื่อมีการทดสอบที่ลดความถี่ลงต่ำกว่า 0.1 Hz ให้พิจารณาการเพิ่มระยะเวลาการทดสอบโดยให้จำนวนรอบของรูปคลื่นมีอย่างเพียงพอที่จะทำให้ electrical tree เริ่มเกิดและขยายตัวจนสามารถเกิดการเบรกดาวนได้ กล่าวคือ หากใช้ความถี่ในการทดสอบความคงทนที่ 0.1 Hz ทุก ๆ 10 วินาที จะได้หนึ่งรอบรูปคลื่นแรงดัน หากใช้เวลาในการทดสอบที่ 60 นาที จะได้ 360 รอบรูปคลื่นแรงดัน แต่ถ้าใช้ความถี่ในการทดสอบความคงทนที่ 0.05 Hz ทุก ๆ 20 วินาที จะได้หนึ่งรอบรูปคลื่นแรงดัน หากใช้เวลาในการทดสอบที่ 60 นาที จะได้ 180 รอบรูปคลื่นแรงดัน จะเห็นได้ว่าถ้าใช้ความถี่ต่ำกว่า 0.1 Hz ในการทดสอบความคงทน จำนวนรอบรูปคลื่นแรงดันจะลดลงถ้าใช้เวลาในการทดสอบเท่ากัน ในมาตรฐาน IEEE 400.2 จึง

แนะนำให้มีการเพิ่มระยะเวลาในการทดสอบขึ้นเมื่อมีการทดสอบที่ลดความถี่ลงต่ำกว่า 0.1 Hz เช่น ดังในตัวอย่างมีการทดสอบที่ความถี่ 0.05 Hz ซึ่งมีการลดความถี่ลงจาก 0.1 Hz ลงมา 2 เท่า ในการทดสอบจึงจำเป็นต้องเพิ่มระยะเวลาในการทดสอบเพิ่มขึ้นอีก 2 เท่า จากนาน 60 นาที เป็น 120 นาที

6) การเชื่อมต่ออุปกรณ์ทดสอบVLF กับ เคเบิล[20]

อ้างอิงจากมาตรฐาน IEEE 400.2 สำหรับความปลอดภัยที่แนะนำ เครื่องมือทดสอบ VLF ควรต่อกับดินโดยตรง(solidly grounded) ก่อนเชื่อมต่อเข้ากับเคเบิล สำหรับสาย High volt test lead ดังรูปที่ 2.16 จะมีอยู่ด้วยกันสองสายสำหรับสายด้านนอกให้เชื่อมเข้ากับground ของเคเบิล ส่วนสายด้านในให้เชื่อมเข้ากับตัวนำของเคเบิล



รูปที่ 2.16 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ทดสอบกับสายเคเบิล

จากผลการทดสอบของการทดสอบความคงทนด้วยVLF ไม่สามารถให้ข้อมูลที่เฉพาะเจาะจงได้ ไม่สามารถบ่งบอกถึงระดับความเสื่อมสภาพของฉนวนได้ เป็นเพียงการทดสอบที่บอกว่ามีจุดอ่อนหรือจุดบกพร่องในสายเคเบิลนี้หรือไม่ ซึ่งได้มาจากการเกิดเบรกดาวน์ของจุดบกพร่องในระหว่างการทดสอบ หากไม่เกิดการเบรกดาวน์ขึ้นก็ไม่สามารถบ่งบอกอะไรได้ เป็นเพียงแต่ว่าผ่านการทดสอบความคงทนเท่านั้น เป็นการทดสอบแบบทำลาย

สำหรับในหัวข้อต่อไปจะกล่าวถึงการทดสอบแบบไม่ทำลายซึ่งสามารถวินิจฉัยปัญหาที่มีอยู่ในระบบเคเบิลได้ โดยจะมีการทดสอบอยู่ 2 ประเภทด้วยกันคือ 1.การทดสอบหาแฟกเตอร์ความสูญเสียในเนื้อฉนวนของเคเบิล($\tan \delta$) และ 2.การทดสอบดิสชาร์จบางส่วน(PD)

2.4.2 การทดสอบแฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กทริกด้วย VLF (Tangent delta :

Tan δ) การทดสอบวัดค่าแฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กทริกของสายเคเบิล($\tan \delta$) เป็นการเฝ้าติดตามความเสื่อมสภาพของสายเคเบิล โดยหลัก ๆ จะเป็นการตรวจความเสื่อมสภาพของฉนวน ไม่ว่าจะเป็นจุดใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งหมอมืดดแปลงเนลหา และต้องอ้างอิงเงาของเอกสารทบทวนการนำไปใช้ เคเบิล(เกิดต้นไม้ น้ำ water tree), เกิดการกัดกร่อนของชั้นตัวนำโลหะ(Metallic shields), เกิด

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ความชื้นในเนื้อฉนวน และเกิดการเสื่อมของอุปกรณ์เสริมของสายเคเบิล(Accessories)ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย สำหรับการทดสอบ $\tan \delta$ ที่ 0.1 Hz เมื่อมีค่าผลการทดสอบที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ระดับแรงดันเบรกดาวน์ในความถี่ใช้งานของฉนวนลดลง เพื่อเป็นการป้องกันการเกิดเบรกดาวน์ระหว่างใช้งาน จึงจำเป็นต้องมีการทดสอบในส่วนของการซ่อมบำรุง ซึ่งเป็นการทดสอบที่บอกได้ว่าการเสื่อมสภาพของสายเคเบิลมากน้อยแค่ไหน สายเคเบิลยังอยู่ในเกณฑ์ที่พอรับได้หรือต้องมีการทำการซ่อมแซมแก้ไขหรือต้องทำการเปลี่ยนใหม่ได้แล้ว สำหรับมาตรฐาน IEEE 400.2 ได้มีเกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินสำหรับการทดสอบวัดค่าแฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กทริก($\tan \delta$) มี 3 เกณฑ์ ดังนี้ 1)ไม่ต้องมีการดำเนินการ(No Action Required), 2)แนะนำให้มีการศึกษาเพิ่มเติม(Further Study advised) และ 3)ต้องมีดำเนินการ(Action Required)

1) ข้อเสนอแนะสำหรับการทดสอบ $\tan \delta$ [14]

การทดสอบวัดค่าแฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กทริกของสายเคเบิล($\tan \delta$) จะเป็นการทดสอบที่ไม่ได้ทำให้ฉนวนเกิดความเครียดที่มากเกินไป ใช้ระยะเวลาในการทดสอบที่สั้นและใช้ระดับแรงดันในการทดสอบที่ต่ำ ซึ่งแตกต่างกับการทดสอบแบบความคงทนที่ใช้เวลาในการทดสอบนานมากและใช้ระดับแรงดันในการทดสอบที่สูง การทดสอบหาแฟกเตอร์ความสูญเสีย($\tan \delta$) จะใช้แหล่งจ่ายกำลังเป็นแบบVLF และทำการเพิ่มเครื่องมือวัดแฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กทริก($\tan \delta$) ซึ่งผลลัพธ์ที่วัดได้จะเป็นค่าเชิงตัวเลข และสามารถนำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับมาตรฐาน IEEE 400.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการทดสอบวัดค่าแฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กทริกของสายเคเบิล($\tan \delta$)

การทดสอบวัดค่าแฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กทริก($\tan \delta$) โดยส่วนใหญ่จะทำการทดสอบสายเคเบิลที่ผ่านการใช้งานมานานมากกว่า 5 ปีขึ้นไป ซึ่งจะเป็นการตรวจจับหาเงื่อนไขของสายเคเบิล(ageing conditions)

การทดสอบวัดค่าแฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กทริก($\tan \delta$) เป็นส่วนหนึ่งของแผนการบำรุงรักษาสายเคเบิล เพื่อเป็นการบ่งบอกถึงอายุของสายเคเบิล หากสายเคเบิลมีการเสื่อมสภาพมากแล้วจนถึงค่าวิกฤติ จึงจำเป็นต้องทำการซ่อมแซมหรือเปลี่ยนสายเคเบิลใหม่ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการเบรกดาวน์ในระหว่างการใช้งาน และถ้าหากมีการทดสอบอยู่บ่อยครั้งก็จะได้ฐานข้อมูลสะสมที่มากพอที่จะสามารถทำนายอายุการใช้งานของเคเบิลได้และเพื่อเป็นการวางแผนสำหรับช่วงการทดสอบถัดไป

การทดสอบวัดค่าแฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กทริก($\tan \delta$) เป็นส่วนหนึ่งของโครงการเปลี่ยนเคเบิลใหม่ ซึ่งแน่นอนว่าในการเปลี่ยนสายเคเบิลใหม่ทั้งหมดอาจจะต้องมีค่าใช้จ่ายที่สูงมาก ๆ วิธีนี้จึงเป็นการตรวจจับหาสายเคเบิลที่เฉพาะเส้นที่มีการเสื่อมสภาพจริง ๆ และทำการเปลี่ยนสายเคเบิลเส้นนั้นใหม่ โดยไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนสายเคเบิลทั้งหมด และเป็นการลดค่าใช้จ่ายลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้นำเนื้อหาในเอกสารนี้ไปเผยแพร่หรือใช้ซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต

การทดสอบวัดค่าแฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กทริก($\tan \delta$) สามารถตรวจจับปัญหาที่เกิดขึ้นในเคเบิล เช่น สามารถประมาณอายุการใช้งานที่เหลือของเคเบิล , ตรวจหา water

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

tree , ตรวจหาความปนเปื้อนในเนื้อฉนวน (Contaminates in insulation) , ตรวจหาโพรงอากาศในเนื้อฉนวน และตรวจหาจุดที่เกิดจากน้ำมันรั่วไหลสำหรับเคเบิลฉนวนกระดาษ

การทดสอบวัดค่าแฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กทริก ($\tan \delta$) เนื่องจากผลของการวัดออกมาเป็นค่าเฉลี่ย จึงไม่สามารถระบุปัญหาที่เกิดขึ้นได้ เป็นเพียงการตรวจจับว่ามีปัญหาเกิดขึ้นหรือไม่ แต่ไม่สามารถระบุชนิดและตำแหน่งของปัญหาที่เกิดขึ้นได้ เช่น อาจเกิดช่องว่างในเนื้อฉนวนหรืออาจเกิด water tree

การทดสอบวัดค่าแฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กทริก ($\tan \delta$) ไม่สามารถให้ความแตกต่างระหว่าง ปัญหาใหญ่ที่เกิดในส่วนพื้นที่เล็ก ๆ (เกิด water tree ขนาดใหญ่หนึ่งจุด) กับปัญหาเล็ก ๆ ที่กระจายตัวไปทั่วทั้งหมด (เกิด water tree ขนาดเล็กที่กระจายตัวไปทั่วทั้งฉนวน) ถ้าทั้งสองปัญหามีผลการทดสอบเป็นเลขค่าเฉลี่ยเท่ากัน ซึ่งเป็นการตรวจปัญหาพบแต่ไม่มีข้อมูลมากพอที่จะบอกว่าปัญหาคืออะไรและอยู่ส่วนไหน

การทดสอบวัดค่าแฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กทริก ($\tan \delta$) เป็นการทดสอบที่ค่อนข้างยากที่จะผ่านการทดสอบ แต่ถ้าเคเบิลผ่านการทดสอบแสดงว่าเคเบิลนั้นยังมีความสมบูรณ์มาก ๆ ถ้าเคเบิลไม่ผ่านการทดสอบแสดงว่าจำเป็นต้องมีปัญหาเกิดขึ้นและจะต้องทำการทดสอบเพิ่มเติมเพื่อทำการวินิจฉัยปัญหาต่อไป

การทดสอบวัดค่าแฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กทริก ($\tan \delta$) จะต้องทดสอบสายเคเบิลที่ต่อกันเป็นชนิดเดียวกัน จะต้องไม่ผสมสายเคเบิลที่มีฉนวนเป็น XLPE หรือ EPR ต่อเข้าด้วยกัน เนื่องเคเบิลแต่ละชนิดจากมีคุณสมบัติเฉพาะที่แตกต่างกัน

ผลที่วัดได้จากการทดสอบ ($\tan \delta$) ของสายเคเบิลที่ต่อกันเป็นชนิดเดียวกันจะสามารถนำไปเปรียบเทียบกับตารางในมาตรฐาน IEEE 400.2 ได้ ส่วนการทดสอบ ($\tan \delta$) กับสายเคเบิลที่ต่อคนละชนิดกัน สามารถทดสอบได้ แต่ไม่สามารถนำไปเปรียบเทียบกับตารางในมาตรฐาน IEEE 400.2

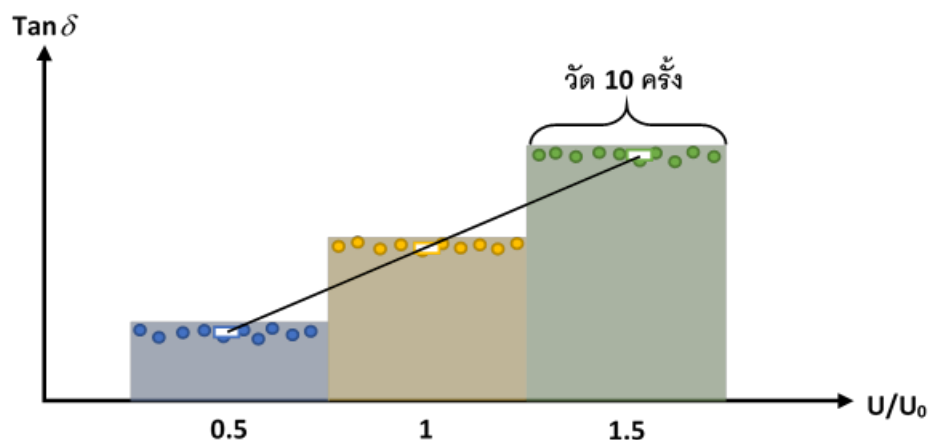
2) วิธีการทดสอบ $\tan \delta$ [18]

แรงดันที่ใช้ในการทดสอบจะใช้แรงดันได้เฉพาะรูปคลื่นไซน์เท่านั้น ที่ความถี่ 0.1 Hz ซึ่งระดับแรงดันที่ใช้ทดสอบจะขึ้นอยู่กับแรงดันที่ใช้งานของเคเบิล โดยเราจะใช้แรงดันทดสอบอยู่ด้วยกัน 3 ระดับ คือ $0.5U_0$, $1U_0$ และค่าสุดท้ายคือ $1.5U_0$ หรือจะใช้ค่ามากที่สุดที่ค่าแรงดันสูงสุดในการทดสอบความคงทน ซึ่ง U_0 เป็นพิกัดแรงดันสายเมื่อเทียบกับดินหรือแรงดันเฟสของระบบ (Rated line to ground voltage) ซึ่งแต่ละระดับแรงดันที่ใช้ทดสอบจะทำการวัดค่าประมาณ 6 ถึง 10 ครั้ง และทำการหาค่าเฉลี่ย โดยระยะเวลาในการทดสอบขึ้นอยู่กับจำนวนครั้งที่วัด ใช้เวลาอยู่ที่ประมาณ 5 ถึง 6 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.17 การวัดผล $\tan \delta$

สำหรับค่าที่ใช้ในการประเมินตามตารางจากมาตรฐาน IEEE 400.2 จะใช้ 3 ค่าดังนี้

1. Mean VLF-TD ค่าเฉลี่ย $\tan \delta$ จากการวัด 6 ถึง 10 ครั้ง ที่วัด ที่แรงดัน $1U_0$
2. VLF-DTD (Differential $\tan \delta$) ค่าความต่าง $\tan \delta$ สามารถคำนวณหาได้จากค่าเฉลี่ยที่ $1.5U_0$ ลบกับค่าเฉลี่ยที่ $0.5U_0$ เป็นผลต่างระหว่างค่าแฟคเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกเฉลี่ยที่แรงดัน $0.5 U_0$ และ $1.5 U_0$
3. VLF-TDTS (Tan Delta Time Stability) เป็นเสถียรภาพที่ได้จากการหาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากค่าที่วัด 6 ถึง 10 ครั้ง ซึ่งเป็นค่าที่บอกความห่างของข้อมูลที่เหลือจากค่าเฉลี่ย โดยสามารถคำนวณได้จากสูตรดังนี้

$$STDEV = \sqrt{\frac{\sum(TD - \overline{TD})^2}{(n-1)}} \quad (2.19)$$

โดย TD คือ ค่าแฟคเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก

\overline{TD} คือ ค่าเฉลี่ยของแฟคเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก

ตัวอย่าง การทดสอบ $\tan \delta$ ด้วย VLF ของระบบเคเบิล 22 kV จากตัวอย่างจะทำการทดสอบที่แรงดัน $0.5U_0$, $1U_0$ และ $1.5U_0$ คือ 6.35 kV, 12.7 kV และ 19.0 kV ตามลำดับ ซึ่งผลการทดสอบเป็นดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 2.2 ผลตัวอย่างการทดสอบตามมาตรฐาน IEEE 400.2

ระดับแรงดันทดสอบ	Tan δ (Mean VLF-TD) x 10^{-3}	Stability(VLF-TDTS) x 10^{-3}
0.5 U ₀	0.45	0.09
1.0 U ₀	0.65	0.11
1.5 U ₀	1.00	0.13

จากตารางจะได้ค่า VLF-DTD ค่าความต่าง (Differential tan δ) จากค่าเฉลี่ยที่ 1.5U₀ ลบกับค่าเฉลี่ยที่ 0.5U₀ จะได้ 1.00 - 0.45 = 0.55 จากนั้นนำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับตารางในมาตรฐาน IEEE 400.2

จากผลการทดสอบ tan δ ที่ 1U₀ ค่า VLF-TDTS (Tan Delta Time Stability) เท่ากับ 0.11x10⁻³ เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับตารางที่ 2.2 จากคอลัมที่ 2 เป็นค่าที่อยู่ในช่วง 0.1 x10⁻³ ถึง 0.5 x10⁻³ จะได้ผลการประเมินคือแนะนำให้มีการศึกษาเพิ่มเติม ต่อมาจะนำค่าความต่างที่ได้คือ 0.55 x10⁻³ มาเปรียบเทียบกับคอลัมถัดมา ผลที่ได้คือมีค่าน้อยกว่า 5 x10⁻³ จะได้ผลการประเมินคือไม่ต้องมีการดำเนินการใด ๆ และสุดท้ายค่าเฉลี่ย tan δ ที่ 1U₀ ค่าที่ได้เท่ากับ 0.65x10⁻³ มาเปรียบเทียบกับคอลัมสุดท้าย ผลที่ได้คือมีค่าน้อยกว่า 4 x10⁻³ จะได้ผลการประเมินคือไม่ต้องมีการดำเนินการใด ๆ

จะเห็นได้ว่าการนำค่าการทดสอบ tan δ ไปเปรียบเทียบกับเกณฑ์การประเมินของมาตรฐาน IEEE 400.2 จะได้ว่าให้มีการศึกษาเพิ่มเติมไม่ต้องมีการดำเนินการใด ๆ และไม่ต้องมีการดำเนินการใด ๆ ผลที่ได้คือให้มีการศึกษาเพิ่มเติม(Further study advised) จึงจำเป็นต้องมีการทดสอบอีกครั้งภายในระยะเวลาหนึ่งปี เพื่อมาทำการวิเคราะห์เพิ่มเติม

3) เกณฑ์การประเมินเคเบิลที่มีอายุการใช้งาน[18]

สำหรับการทดสอบ tan δ ถ้าผลที่วัดได้(VLF-TD, VLF-DTD, VLF-TDTS)มีค่ามากกว่าผู้ใช้งานยอมรับ อาจพิจารณาตามคำแนะนำดังนี้

ผู้ใช้งานสามารถเปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างเฟสต่าง ๆ ในกลุ่มเดียวกัน เพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ให้ดีขึ้น

ผู้ใช้งานสามารถแบ่งวงจรถูกเป็นส่วนย่อยและทดสอบซ้ำ ทำการวิเคราะห์ส่วนประกอบต่าง ๆ ของวงจร ตรวจสอบในส่วนประกอบที่น่าสงสัยและเปลี่ยนส่วนประกอบนั้นใหม่หรือเปลี่ยนอุปกรณ์เสริมที่ดูเหมือนว่าจะเก่า เมื่อทำการแก้ไขเปลี่ยนแปลงเสร็จจำเป็นต้องทดสอบใหม่อีกครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ ผู้ใช้สามารถทำการทดสอบแบบอื่น ๆ เช่นการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนซึ่งสามารถการค่า
ไม่ว่ากรณีใดระบุตำแหน่งของปัญหาที่เกิดขึ้นได้ เนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ค่าสัมบูรณ์ของ VLF-TD, VLF-DTD, VLF-TDTS เป็นค่าที่ใช้ในการเทียบกับฐานข้อมูลที่ถูกเก็บสะสมมาอย่างยาวนาน ซึ่งสามารถแบ่งเป็นเกณฑ์การประเมินสำหรับฉนวนเคเบิลได้ 3 เกณฑ์ดังนี้

1. ไม่ต้องการดำเนินการ (No Action Required) หมายถึง ระบบเคเบิลมีความปลอดภัยและสามารถใช้งานต่อไปได้ตามปกติ และไม่ต้องการดำเนินการแก้ไขใด ๆ แต่เมื่อนำระบบเคเบิลกลับไปใช้งาน จำเป็นจะต้องมีการกำหนดตารางเพื่อกลับมาทดสอบอีกครั้งภายหลัง เพื่อสังเกตดูแนวโน้มของ $\tan \delta$

2. แนะนำให้มีการศึกษาเพิ่มเติม (Further Study advised) คือ จำเป็นต้องมีข้อมูลเพิ่มเติมเพื่อประเมิน และข้อมูลเพิ่มเติมอาจมาจากประวัติของการ fail ของวงจรต่าง ๆ ก่อนหน้านี้ จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาข้อมูลอื่น ๆ ประกอบไปด้วย ซึ่งยังไม่สามารถสรุปได้ว่าสายเคเบิลมีความปลอดภัยหรือต้องมีการปรับปรุงแก้ไขเพิ่มเติมและจึงจำเป็นต้องมีการทดสอบอีกครั้งภายในระยะเวลาหนึ่งปี เพื่อมาทำการวิเคราะห์เพิ่มเติมหรือเพิ่มการประเมินจากการทดสอบวินิจฉัยเพิ่มเติม

3. ต้องมีดำเนินการ (Action Required) คือ ระบบเคเบิลมีค่า $\tan \delta$ สูงผิดปกติ ที่อาจบ่งบอกถึงสภาพฉนวนที่ไม่ดี ทำให้ระบบเคเบิลมีความเสี่ยงสูงที่จะเกิดการเบรกดาวน์ขึ้นในระหว่างการใช้งานปกติ ซึ่งจะทำให้เกิดความเสียหายต่อระบบ และเมื่อหลังการประเมินควรได้รับการพิจารณาให้เปลี่ยนหรือซ่อมแซมทันที หลังจากการทดสอบหรือภายในอนาคตอันใกล้ จึงจำเป็นต้องทำการซ่อมบำรุงหรือทำการเปลี่ยนสายเคเบิลใหม่ ซึ่งเกณฑ์การประเมินสำหรับการทดสอบ $\tan \delta$ สามารถดูได้จากตารางที่ 2.3 – 2.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 2.3 เกณฑ์การประเมินสำหรับฉนวน PE (PE, XLPE, TRXLPE)

Condition assessment	VLF-TD Time Stability (VLF-TDTS) measured by standard deviation at U_0 [10^{-3}]		Differential VLF-TD (VLF-TDT) (difference in mean VLF-TD) between $0.5U_0$ and $1.5U_0$ [10^{-3}]		Mean VLF-TD at U_0 [10^{-3}]
No Action Required	<0.1	and	<5	and	< 4
Further Study Advised	0.1 to 0.5	or	5 to 8	or	4 to 5
Action Required	>0.5	or	> 80	or	> 50

ตารางที่ 2.4 เกณฑ์การประเมินสำหรับฉนวนกระดาษ (PILC)

Condition assessment	VLF-TD Time Stability (VLF-TDTS) measured by standard deviation at U_0 [10^{-3}]		Differential VLF-TD (VLF-TDT) (difference in mean VLF-TD) between $0.5U_0$ and $1.5U_0$ [10^{-3}]		Mean VLF-TD at U_0 [10^{-3}]
No Action Required	<0.1	and	-35 to 10	and	< 85
Further Study Advised	0.1 to 0.4	or	-35 to -50 Or 10 to 100	or	85 to 200
Action Required	>0.4	or	<-50 Or >100	or	> 200

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 2.5 เกณฑ์การประเมินสำหรับฉนวน EPR

Condition assessment	Filled insulation system	VLF-TD Time Stability (VLF-TDTS) measured by standard deviation at U_0 [10^{-3}]		Differential VLF-TD (VLF-TDT) (difference in mean VLF-TD) between $0.5U_0$ and $1.5U_0$ [10^{-3}]		Mean VLF-TD at U_0 [10^{-3}]
No Action Required	If it is not possible to definitively identify a Filled Insulation	<0.1		<5		<35
	Carbon-filled (Black) EPR	<0.1	and	<2	and	<20
	Mineral-filled (Pink) EPR	<0.1		<4		<20
	Discharge resistant EPR	<0.1		<6		<100
	Mineral-filled XLPE	-		-		<100
Further Study	If it is not possible to definitively identify a Filled Insulation	0.1 to 1.3		5 to 100		35 to 120
	Carbon-filled (Black) EPR	0.1 to 2.7	or	2 to 120	or	20 to 100
	Mineral-filled (Pink) EPR	0.1 to 1		4 to 120		20 to 100
	Discharge resistant EPR	0.1 to 1		6 to 10		100 to 350
	Mineral-filled XLPE	-		-		100 to 350
Action Required	If it is not possible to definitively identify a Filled Insulation	>1.3		>100		>120
	Carbon-filled (Black) EPR	>2.7	or	>120	or	>100
	Mineral-filled (Pink) EPR	>1		>120		>100
	Discharge resistant EPR	>1		>10		>350
	Mineral-filled XLPE	-		-		>350

4) เกณฑ์การประเมินผลจากความยาวของสายเคเบิล[18]

การทดสอบ $\tan \delta$ สามารถทดสอบสายเคเบิลที่มีความยาวตั้งแต่ 30 เมตร ถึงมากกว่า 3 กิโลเมตร โดยมีความยาวเฉลี่ยที่ 180 เมตร การวัด $\tan \delta$ จะไม่ได้ให้ข้อมูลเกี่ยวกับความแปรผันของค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริกที่แปรตามความยาวของสายเคเบิล แต่จะแสดงเป็นค่าเฉลี่ยตลอดความยาวของสายเคเบิล วิธีแก้ปัญหาก็คือให้ทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์ของ $\tan \delta$ กับลักษณะ

ทางกายภาพของแต่ละวงจร เช่น ความยาวของสายเคเบิลและจำนวนอุปกรณ์เสริมในวงจร (Joint และ Termination) จากนั้นทำการพล็อตข้อมูลในรูปแบบกราฟ ($\tan \delta$ เทียบกับความยาวของสาย) ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เคเบิล) อาจจะพล็อตในรูปแบบลอการิทึมสเกล ดังตารางที่ 2.5 แสดงการวินิจฉัยความเป็นไปได้โดยพิจารณาจากความชันของกราฟที่ได้จากการพล็อต

ตารางที่ 2.6 การตีความจากความชันของเส้นกราฟของ $\tan \delta$ กับความยาวสายเคเบิล

ความชันของเส้นกราฟของ $\tan \delta$ กับความยาวสายเคเบิล	การวินิจฉัยที่เป็นไปได้
แบบเรียบ (การสูญเสียไม่ขึ้นกับความยาว)	มีความสูญเสียสม่ำเสมอตลอดทั้งสาย
แบบส้อม (ยังไม่ชัดเจนว่าความยาวของสายมีผลหรือเปล่า)	ไม่มีรูปแบบความสูญเสียที่ชัดเจน
ความชันเป็นบวก (การสูญเสียเพิ่มขึ้นเมื่อความยาวเพิ่มขึ้น)	เกิดการกัดกร่อนของชั้นโลหะหรือการสัมผัสที่ไม่ดีระหว่างชั้นโลหะ กับชั้นฉนวน หรือเกิดความสูญเสียที่อุปกรณ์เสริม
ความชันเป็นลบ (การสูญเสียลดลงเมื่อความยาวลดลง)	เกิดความสูญเสียบางส่วน เช่นอุปกรณ์เสริมที่หรือในส่วนของต้นไม้

5) เกณฑ์การประเมินสายเคเบิลที่ติดตั้งใหม่[18] สำหรับการทดสอบ $\tan \delta$ ในสายเคเบิลที่เพิ่งติดตั้งใหม่ จะไม่สามารถใช้เกณฑ์การประเมินของสายเคเบิลเก่าได้ ดังตารางที่ 2.4 ถึงตารางที่ 2.7 จึงไม่สามารถใช้ได้ และเป็นสิ่งที่สังเกตว่าในการวัด $\tan \delta$ ในระบบสายเคเบิลเก่าจะมีความไวต่อต้นไม้ที่เป็นสาเหตุทำให้ฉนวนเกิดการเสื่อม ส่วนการวัด $\tan \delta$ ในระบบสายเคเบิลที่เพิ่งติดตั้งใหม่นั้นจะเป็นการมองหาสิ่งปนเปื้อนภายในระบบมากกว่า

ตามข้อมูลที่มีในปี 2010 จากการทดสอบวินิจฉัยด้วยแรงดันVLFเกี่ยวกับสายเคเบิลประเภทต่างๆที่เพิ่งติดตั้งใหม่จะมีข้อมูลเพียงจำกัด ดังนั้นค่าที่ระบุในตารางอาจมีการเปลี่ยนแปลงได้เมื่อมีการเก็บสะสมข้อมูลเพิ่มเติม จะแสดงเกณฑ์การประเมินของระบบเคเบิลที่ติดตั้งใหม่แสดงอยู่ในตารางที่ 2.7 และตารางที่ 2.8 ข้อเสนอแนะสำหรับสายเคเบิลที่มีการติดตั้งใหม่ ค่า $\tan \delta$ ที่วัดได้ควรจะมีค่าน้อย ๆ ดังตาราง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 2.7 เกณฑ์การประเมินสำหรับเคเบิลที่ติดตั้งใหม่ ที่มีฉนวนเป็น PE(XLPE and TRXLPE)

เงื่อนไขการประเมิน	Tangent delta stability at U_0 [10^{-3}]		Tip up ($2.0U_0-1.0 U_0$) [10^{-3}]		Tangent delta at U_0 [10^{-3}]
ยอมรับได้ (Acceptable)	< 0.1	และ	< 0.8	และ	< 1.0
ศึกษาเพิ่มเติม (Further study advised)	> 0.1	หรือ	> 0.8	หรือ	> 1.0

ตารางที่ 2.8 เกณฑ์การประเมินสำหรับเคเบิลที่ติดตั้งใหม่ ที่มีฉนวนเป็น EPR

เงื่อนไขการประเมิน	Tangent delta stability at U_0 [10^{-3}]		Tip up ($2.0U_0-1.0 U_0$) [10^{-3}]		Tangent delta at U_0 [10^{-3}]
ยอมรับได้ (Acceptable)	< 0.1	และ	< 5	และ	< 10
ศึกษาเพิ่มเติม (Further study advised)	> 0.1	หรือ	> 5	หรือ	> 10

6) ข้อดีข้อเสียของการทดสอบ $\tan \delta$

ข้อดี: สามารถทำการทดสอบได้โดยผลลัพธ์ที่ได้ไม่ใช้เวลานาน เป็นการทดสอบเพื่อตรวจจับ water tree ช่องว่างอากาศ จุดรั่วไหลของน้ำมันสำหรับเคเบิลที่มีฉนวนเป็น PILC และสามารถนำผลลัพธ์ที่ได้จากการวัดสามารถนำไปเปรียบเทียบกับมาตรฐาน IEEE 400.2 เพื่อทำการประเมินเคเบิล

ข้อเสีย: ไม่สามารถบอกได้ว่าข้อบกพร่องของเคเบิลอยู่จุดไหน เพียงแต่บอกได้ว่ามีปัญหาเกิดขึ้นหรือไม่

การทดสอบวัดค่าแฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กทริก($\tan \delta$) เป็นเพียงการประเมินความสมบูรณ์ของเนื้อฉนวนเคเบิลซึ่งวัดได้ออกมาเป็นข้อมูลเชิงตัวเลขและสามารถนำมาวิเคราะห์ระดับความสมบูรณ์ของเนื้อฉนวนเคเบิลได้ว่ามีจุดบกพร่องในเนื้อฉนวนเคเบิลมากน้อยแค่ไหน มีระดับความรุนแรงมากน้อยเพียงไร แต่ยังไม่สามารถระบุตำแหน่งที่เกิดจุดบกพร่องในเนื้อฉนวนเคเบิลนั้นได้ ส่วนการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนจะเป็นการทดสอบเฉพาะที่ เช่น ที่ splices และ termination

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.4.3 การทดสอบดิสชาร์จบางส่วน (Partial discharge: PD) หัวข้อนี้อธิบายการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนด้วยแรงดันVLFรูปคลื่นไซน์ การทดสอบดิสชาร์จบางส่วนนี้มีรายละเอียดครอบคลุมตามมาตรฐาน IEEE 400.3 และการทดสอบนี้ควรปฏิบัติตามมาตรฐาน IEEE 400.3 และแนะนำให้ปฏิบัติตามขั้นตอนการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60885-3 เพื่อช่วยให้มีความสอดคล้องของผลลัพธ์ตามมาตรฐาน [14]

VLF-PD เป็นการทดสอบเพื่อวินิจฉัยและเป็นการทดสอบแบบไม่ทำลาย เพื่อตรวจจับตำแหน่งและความอันตรายของจุดบกพร่องในเนื้อฉนวน (Insulation defect) และสำหรับการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนด้วยแรงดันVLF จะมีคุณลักษณะที่แตกต่างกันออกไปจากการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนด้วยแรงดันที่ความถี่ 50 Hz

ดิสชาร์จบางส่วนคือ การดิสชาร์จที่ไม่เชื่อมถึงกันระหว่างแผ่นอิเล็กโทรด ปรากฏเมื่อเกิดผลต่างของแรงดันเกินกว่าระดับค่าเริ่มเกิดดิสชาร์จ เมื่อสายเคเบิลที่มาจากกระบวนการผลิตที่ไม่ดี เช่นมีสิ่งสกปรก มีโพรงอากาศภายใน ฉนวนไม่เป็นเนื้อเดียวกัน หรือในระหว่างการเข้าหัวสายเคเบิล มีการประกอบที่ไม่ดีทำให้เกิดข้อบกพร่องในระบบเคเบิลได้ การที่เคเบิลมีโพรงอากาศในเนื้อฉนวนทำให้เกิดดิสชาร์จบางส่วนขึ้น ซึ่งอากาศในโพรงจะมีระดับแรงดันการเกิดดิสชาร์จต่ำกว่าเนื้อฉนวนจึงทำให้เกิดดิสชาร์จบางส่วนขึ้นในโพรงอากาศที่อยู่ในเนื้อฉนวน การเกิดดิสชาร์จบางส่วนในเคเบิลจะเป็นการเร่งอายุการใช้งานของสายเคเบิลให้มีอายุการใช้งานที่สั้นลง เป็นการทำลายเนื้อฉนวนอย่างต่อเนื่องโดยฉนวนไม่สามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมหรือไม่สามารถรักษาตัวเองได้ หากเกิดดิสชาร์จบางส่วนขึ้นจะเป็นการทำลายและทำให้ฉนวนเสื่อมลง และการเกิดดิสชาร์จบางส่วนเป็นการสร้างเส้นทางตัวนำระหว่างตัวนำของเคเบิล (conductor) กับเปลือกเคเบิล (shield) ถ้าหากเส้นทางตัวนำนั้นเชื่อมถึงกันระหว่างอิเล็กโทรดก็จะทำให้เกิดการเบรกดาวนได้มากที่สุด

1) หลักการทดสอบ PD

การทดสอบดิสชาร์จบางส่วนเป็นการทดสอบหาจุดบกพร่องเพื่อตรวจคุณภาพของสายเคเบิล splices และ terminations ก่อนการนำเคเบิลไปใช้งานหรือหลังจากทำการประกอบเคเบิลเรียบร้อยแล้วเพื่อตรวจสอบความสมบูรณ์หลังการติดตั้ง การทดสอบดิสชาร์จบางส่วนเป็นการตรวจจับจุดบกพร่องแบบ local เช่น โพรงอากาศในเนื้อฉนวน , สิ่งสกปรก , electrical tree และปัญหาที่เกิดจากการประกอบ เช่น splices และ terminations แต่สิ่งที่การทดสอบดิสชาร์จบางส่วนไม่สามารถวัดได้คือปัญหาแบบ global เช่น water trees ที่เกิดในเนื้อฉนวน

2) วิธีการทดสอบ PD

การทดสอบ VLF-PD สามารถทดสอบระหว่างการทดสอบความคงทนได้(Withstand test)โดยเวลาการทดสอบและแรงดันทดสอบสูงสุดสามารถดูได้จากตารางที่ 2.1 โดยทำการขึ้นแรงดันอย่างช้า ๆ เพื่อไปถึงการระดับแรงดันที่ใช้ทดสอบความคงทน(Withstand test voltage level)ในการตรวจจับPD ถ้าขึ้นแรงดันไปถึงจุดหนึ่งแล้วมีPDปรากฏขึ้น จะเรียกว่า “แรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่ไม่ใช่การเชิงพาณิชย์ในวงจำกัดเท่านั้น การใช้ประโยชน์ด้วยการค้าไม่ว่ากรณีใดก็ตาม ถือว่าผิดกฎหมาย การนำข้อมูลไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เริ่มเกิด PD (Inception voltage: PDIV)” และสามารถทดสอบที่แรงดันนี้หรือสามารถขึ้นแรงดันขึ้นไปอีกจนถึงแรงดันทดสอบความคงทน และใช้เวลาทดสอบที่ระดับแรงดันนี้ประมาณ 20 ถึง 50 วินาที (2 cycles ถึง 5 cycles) จากนั้นทำการลดระดับแรงดันลงอย่างช้า ๆ จนกระทั่ง PD เริ่มหายไป ที่ระดับแรงดันนี้เรียกว่า “แรงดันเริ่มดับ(Extinction voltage: PDEV)”

แต่ถ้าขึ้นแรงดันไปจนถึงแรงดันที่ใช้ทดสอบความคงทนแต่ไม่พบ PD ให้ทำการคงแรงดันนี้แล้วรอเวลาไปอีก 30 นาที เว้นเสียแต่ว่า PD จะปรากฏ เมื่อ PD ปรากฏขึ้นให้รอเวลาไปอีก 30 ถึง 60 วินาที หลังจากนั้นให้ทำการค่อย ๆ ลดแรงดันลงจนกว่า PD เริ่มหายไป

ข้อควรระวัง

หลังจากขึ้นแรงดันไปจนถึง PD เริ่มเกิด (PDIV) Electrical tree สามารถขยายตัวจนกลายเป็นเส้นทางตัวนำแล้วเกิดการเบรกตาวนได้เร็วที่สุดในเวลาไม่กี่นาที

วิธีการทดสอบเพื่อวินิจฉัย PD ควรตระหนักไว้เสมอว่าข้อมูลที่ได้จากการทดสอบเป็นข้อมูลที่ไมเพียงพอต่อการตีความผลลัพธ์ของ PD ได้อย่างถูกต้องแม่นยำไม่ว่าจะเป็นสายเคเบิลฉนวน XLPE, EPR หรือ PILC ดังตัวอย่างเช่น ในบางพื้นที่ที่ตรวจพบค่า PD ที่สูงแต่ไม่ได้ทำให้เกิดความผิดพลาดของระบบ (Fail) ในทางกลับกันสำหรับในบางพื้นที่ที่ตรวจพบค่า PD ที่ต่ำหรือไม่เจอ PD เลย กลับเกิดความผิดพลาดของระบบขึ้นมา จงระวังในการตีความข้อมูล PD ที่วัดได้ในแต่ละครั้ง

3) ระดับแรงดันสำหรับการทดสอบ PD

ระดับแรงดันที่ใช้ในการทดสอบจะใช้วิธีการขึ้นแรงดันแบบทีละขั้นและค่าสุดท้ายมีค่าไม่เกิน $2U_0$ เช่น $0.5U_0$, $0.8U_0$, $1U_0$, $1.3U_0$, $1.5U_0$, $1.7U_0$, $2U_0$ (สำหรับเคเบิลที่มีอายุมากจะทำการทดสอบระดับแรงดันสุดท้ายที่ $1.7U_0$) การขึ้นแรงดันแบบทีละขั้นเป็นการหาแรงดันเริ่มเกิดดิสชาร์จบางส่วน PDIV (PD Inception Voltage) และเมื่อเจอการดิสชาร์จบางส่วนเกิดขึ้นก็ยังคงทำการขึ้นแรงดันทีละขั้นต่อไปจนถึงระดับแรงดัน $2U_0$ แล้วคงแรงดันไว้สักพักและค่อย ๆ ทำการลดแรงดันลงจนการดิสชาร์จบางส่วนหายไป เรียกว่า แรงดันเริ่มดับของดิสชาร์จบางส่วน PDEV (PD Extinction Voltage) การหาค่า PDIV และ PDEV เพื่อต้องการวิเคราะห์การนำเคเบิลไปใช้งาน

4) การประเมินผล PD

ถ้า PDIV มีค่าต่ำกว่าระดับแรงดันที่ใช้ใช้งาน: แสดงว่าหากนำเคเบิลนั้นไปใช้งานตามปกติก็จะเกิดการดิสชาร์จบางส่วนตลอดเวลาซึ่งจะเป็นอันตรายต่อระบบเคเบิลมาก ทำให้ฉนวนเสื่อมสภาพตลอดเวลา เป็นการค่อย ๆ สร้างเส้นทางตัวนำให้เชื่อมถึงกันระหว่างอิเล็กโทรดและทำให้เกิดการเบรกตาวนได้เร็วที่สุด

ถ้า PDIV มีค่าเกินกว่าระดับแรงดันที่ใช้ใช้งาน: แสดงว่าหากนำเคเบิลนั้นไปใช้งานตามปกติก็จะไม่เกิดดิสชาร์จบางส่วนขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ในเชิงพาณิชย์ การค้า
ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม ผู้ใช้ต้องรับผิดชอบต่อความเสียหายที่เกิดขึ้นจากการใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

มาในระบบ เช่น ฟิวส์หรือการสับสวิตช์ ก็ทำให้เกิดแรงดันสูงเกินกว่าค่า PDIV และทำให้เกิดการ
 ดิสชาร์จบางส่วนขึ้น และเมื่อค่า PDEV มีค่าต่ำกว่าค่าระดับแรงดันที่ใช้งาน ทำให้ไม่สามารถดับการ
 เกิดดิสชาร์จบางส่วนเองได้ จึงเกิดการดิสชาร์จตลอดเวลาซึ่งจะเป็นอันตรายต่อระบบเคเบิลมาก ทำ
 ให้ฉนวนเสื่อมสภาพตลอดเวลา เป็นการค่อย ๆ สร้างเส้นทางตัวนำให้เชื่อมถึงกันระหว่างอิเล็กโทรด
 และทำให้เกิดการเบรกดาวนได้ในที่สุด

ถ้า PDIV มีค่าเกินกว่าระดับแรงดันที่ใช้งาน และ PDEV มีค่าสูงกว่าระดับแรงดันที่
 ใช้งาน: แสดงว่าเคเบิลเมื่อนำไปใช้งานตามปกติก็จะไม่เกิดดิสชาร์จบางส่วนขึ้น และถ้าเกิดแรงดันเกิน
 เข้ามาในระบบ เช่น ฟิวส์หรือการสับสวิตช์ ก็ทำให้เกิดแรงดันสูงเกินกว่าค่า PDIV และทำให้เกิดการ
 ดิสชาร์จบางส่วนขึ้น แต่เมื่อค่า PDEV มีค่าสูงกว่าค่าระดับแรงดันที่ใช้งาน จึงทำให้สามารถดับการเกิด
 ดิสชาร์จบางส่วนเองได้ ซึ่งเป็นผลดีต่อระบบเคเบิลมาก

สำหรับการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนสามารถทดสอบพร้อมกับการทดสอบความ
 คงทน(withstand test)ได้ ซึ่งรู้อยู่แล้วว่าการทดสอบความคงทนจะใช้เวลาในการทดสอบ 30 ถึง 60
 นาที ใช้แรงดันประมาณ $2U_0$ ถึง $3U_0$ ที่ 0.1 Hz จะสามารถประยุกต์การขึ้นแรงดันสำหรับการ
 ทดสอบดิสชาร์จบางส่วนได้ สำหรับในการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนพร้อมกับการทดสอบความคงทนไป
 ด้วย ผลลัพธ์ของการทดสอบความคงทนไม่จำเป็นต้องเป็นแบบ Pass & fail ซึ่งสามารถวินิจฉัยการ
 ดิสชาร์จบางส่วนว่ามีความรุนแรงมากแค่ไหนเพื่อทำการหยุดการทดสอบก่อนที่จะเกิดการเบรกดาวน
 เมื่อเกิดดิสชาร์จบางส่วนมากเกินไป และถ้าทำการทดสอบความคงทนไปควบคู่กับการทดสอบ
 ดิสชาร์จบางส่วนเมื่อเกิดดิสชาร์จบางส่วนขึ้นในค่าที่ยอมรับได้ก็สามารถทำการทดสอบความคงทนจน
 ครบเวลาที่กำหนดและดิสชาร์จบางส่วนก็ยังคงเกิดจนจบชั่วโมง หากมีการทดสอบความคงทนผ่าน
 สามารถวิเคราะห์ได้ว่าผ่านการ “ทดสอบความคงทนแต่ไม่ผ่านการทดสอบดิสชาร์จบางส่วน” ถึงแม้
 จะผ่านการทดสอบความคงทนแต่ก็ไม่ผ่านการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนซึ่งไม่ควรนำเคเบิลไปใช้งาน
 เพื่อความปลอดภัยควรมีการตรวจสอบเพิ่มเติมที่จุดนั้น หรือไม่ก็ขยายระยะเวลาในการทดสอบความ
 คงทนเพิ่มขึ้นเพื่อให้จุดบกพร่องเหล่านั้นเกิดการเบรกดาวน

2.5 เทคนิคการวิเคราะห์และตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วน

การตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วนเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการประเมินอายุการใช้งานของ
 อุปกรณ์ไฟฟ้า เมื่อเกิดดิสชาร์จบางส่วนนอกจากจะเกิดเหตุการณ์ทางไฟฟ้าแล้วยังเกิดความ ร้อน แสง
 เสียงและปฏิกิริยาทางเคมี การตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน สามารถทำได้หลายวิธี โดยการสังเกตหรือ
 วัดผลที่เป็นปรากฏการณ์ต่าง ๆ ของดิสชาร์จบางส่วน การวัดผลของดิสชาร์จบางส่วนในเชิงปริมาณที่
 ได้ผลดีที่สุดคือ การวัดผลทางไฟฟ้า การตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วนสามารถแบ่งตามสิ่งที่เกิดจากการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้เผยแพร่ข้อมูลนี้แก่บุคคลอื่นโดยไม่ได้รับอนุญาตจากสถาบันฯ

1) การตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วนที่ไม่เป็นทางไฟฟ้า (non-electrical discharge
 detection) สามารถใช้สำหรับการตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนได้ แต่วิธีการตรวจวัดนี้ไม่

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สามารถใช้สำหรับการวัดขนาดหรือตำแหน่งของดิสชาร์จบางส่วนได้ เป็นเพียงการวัดเพื่อบอกว่าเกิดการดิสชาร์จบางส่วนหรือไม่ ซึ่งสิ่งที่สามารถตรวจวัดด้วยวิธีการตรวจวัดที่ไม่เป็นทางไฟฟ้า เช่น วัดทางเคมี วัดความดันแก๊ส วัดความร้อน วัดเสียง และ แสง

2) การตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วนที่เป็นทางไฟฟ้า (electrical discharge detection) จะเป็นการวัดเชิงไฟฟ้า ซึ่งจะสามารถวัดผลที่ได้ออกมาเป็นปริมาณเชิงตัวเลข สามารถนำตัวเลขผลการทดสอบมาวิเคราะห์ ประเมินค่าได้ และยังได้ผลในรูปแบบที่เป็นกราฟ ทราบถึงคุณลักษณะประเภทของการเกิดดิสชาร์จบางส่วน และยังสามารถทำนายว่าเกิดดิสชาร์จบางส่วนอยู่ที่ตำแหน่งไหน

1. การตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วนในขณะที่อุปกรณ์ต้องหยุดทำงาน (off line partial discharge monitoring) คือ ในเวลาที่ทำกรทดสอบอุปกรณ์ อุปกรณ์นั้นจะต้องต่อวงจรเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้าภายนอกเพื่อจำลองการใช้งานของอุปกรณ์ มีการติดตั้งวงจรและอุปกรณ์การตรวจวัดเข้ากับอุปกรณ์ที่ต้องการทดสอบ ในระหว่างการตรวจสอบนั้นจะต้องขึ้นแรงดันเพื่อทำการทดสอบ ทำให้เราสามารถหาแรงดันที่ดิสชาร์จบางส่วนเริ่มเกิด (Inception Voltage) และแรงดันที่ดิสชาร์จบางส่วนสิ้นสุด (Extinction Voltage) ซึ่งการตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วนแบบออฟไลน์นั้นจะให้ความแม่นยำสูงกว่าแบบออนไลน์ และมีสัญญาณรบกวนที่ต่ำ แต่จะยุ่งยากในการตรวจวัดเนื่องจากต้องใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าภายนอก และการตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วนแบบออฟไลน์มีความเป็นไปได้ที่จะเกิดความเสียหายหลังถูกนำมาใช้จริงได้

2. การตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วนในขณะที่อุปกรณ์กำลังทำงานตามปกติ (On line partial discharge monitoring) คือการทำการตรวจสอบ ติดตามได้อย่างต่อเนื่อง (Continuous Monitoring) ซึ่งไม่จำเป็นต้องมีแหล่งจ่ายไฟฟ้าภายนอก เพื่อที่จะจ่ายเข้าอุปกรณ์ที่ต้องการตรวจวัดเพื่อจำลองการใช้งาน และสามารถตรวจวัดการดิสชาร์จบางส่วนในสภาพการทำงานปกติ เช่น ที่อุณหภูมิ, ความดัน, ความชื้น และการสั่นของอุปกรณ์ ในสภาพการทำงานปกติ การตรวจวัดดิสชาร์จแบบออนไลน์สามารถตรวจสอบการบกพร่องของอุปกรณ์และแนวโน้มของการดิสชาร์จบางส่วนในสถานะการใช้งานจริงของอุปกรณ์ เช่น เซอร์สำหรับการทดสอบแบบออนไลน์ เช่น AE, HFCT, UHF ฯลฯ

2.5.1 วัตถุประสงค์ของการตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วน เป้าหมายของการตรวจวัดดิสชาร์จก็คือเพื่อการสืบหาความจริงที่ชัดเจนในการทดสอบแบบ ไม่ทำลาย หรือเพื่อ การประเมินอายุการใช้งานของฉนวน เป้าหมายในการตรวจวัดดิสชาร์จอย่างน้อยที่สุดมี 4 ประการที่ต้องการ คือ

1. การตรวจวัด (detection) เป็นการสังเกตการณ์ที่จะระบุให้ได้แน่นอนว่าดิสชาร์จนั้น เกิดขึ้นหรือไม่

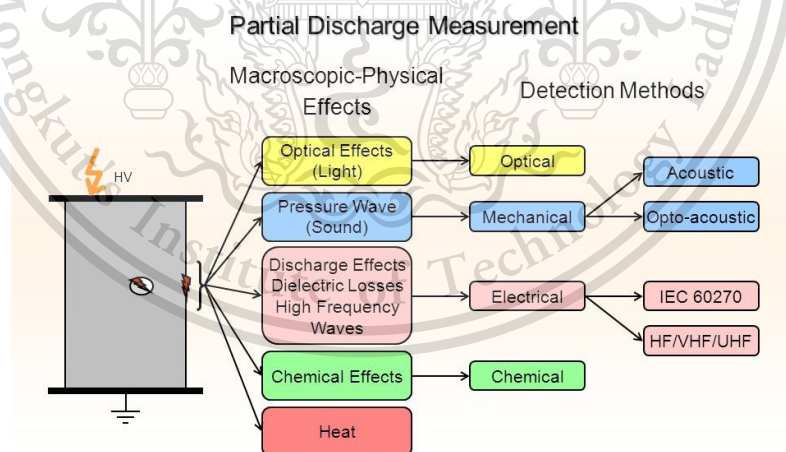
2. การวัด (measurement) ถ้าดิสชาร์จมีการเกิดขึ้น ขนาดของดิสชาร์จจะต้องสืบหาให้ชัดเจน ปริมาณทางกายภาพจะต้องเลือกมาซึ่งเป็นทั้งปริมาณที่เกี่ยวกับความอันตรายของ

ดิสชาร์จและสามารถวัดได้ด้วยวิธีการตรวจวัดดิสชาร์จ หลังจากที่มีปริมาณที่ถูกเลือกมาวิธีการเทียบมาตรฐานที่เชื่อถือได้มีการใช้ต่อเนื่องไปถึงได้ผลที่สม่ำเสมอ

3. ตำแหน่ง (location) หลังจากดิสชาร์จถูกตรวจวัด ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญมากต่อตำแหน่งของ บริเวณเกิดดิสชาร์จ ตำแหน่งที่เกิดดิสชาร์จก็จะมี ความแตกต่างกันไปไม่ว่าจะเป็น ดิสชาร์จในสายเคเบิลหรือในปลายขั้วของเคเบิล หรือดิสชาร์จในหม้อแปลงหรือในปลอกฉนวนนำสายของหม้อแปลง การเลือกใช้วิธีการตรวจวัดดิสชาร์จก็ต้องเป็นวิธีตรวจวัดที่สามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับตำแหน่งของดิสชาร์จได้

4. การประเมินค่า (evaluation) ในการประเมินจะต้องทำการประเมินชนิดและความอันตรายโดยการตรวจวัดดิสชาร์จ เมื่อมีการใช้ข้อมูลทั้งหมดที่ได้มาจากการทดสอบดิสชาร์จที่มีสมรรถนะดี ข้อมูลที่สำคัญสามารถได้จากคุณภาพของฉนวนภายใต้การทดสอบ

2.5.2 เซนเซอร์ที่ใช้ในการตรวจวัดการดิสชาร์จบางส่วนแบบออนไลน์ การเกิดดิสชาร์จบางส่วนในฉนวนไฟฟ้าในแต่ละครั้งจะสร้างปฏิกิริยาบางอย่างขึ้นมา โดยแปรผันไปตามระบบและสภาวะการใช้งานของอุปกรณ์ไฟฟ้านั้น ๆ ซึ่งจะอยู่ในรูปพลังงานต่าง ๆ เช่น คลื่นเสียง สัญญาณทางไฟฟ้า ปฏิกิริยาเคมี แสง และ สัญญาณคลื่นความถี่วิทยุ สัญญาณต่าง ๆ เหล่านี้เป็นหนทางสำหรับการตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วน ในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ดังนั้นในการตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วน จะใช้วิธีการที่แตกต่างกันออกไป โดยขึ้นอยู่กับการประยุกต์ใช้งานกับการวัดด้วยสัญญาณต่าง ๆ ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 ผลการเกิดดิสชาร์จบางส่วน และเซนเซอร์ที่ใช้ในการตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วน

(IEC 62478) [21]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

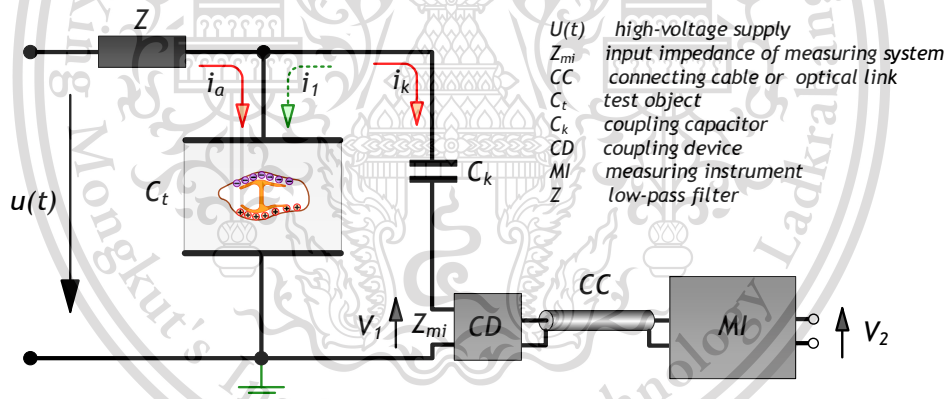
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 2.9 ความเหมาะสมในการใช้งานเซนเซอร์กับอุปกรณ์แต่ละชนิด (จากบริษัท แอดวานซ์ เพาเวอร์ อิควิปเมนท์ (ประเทศไทย) จำกัด)

Sensor/ Equipment	Cable	Transformer	Gas Insulated Switchgear	Rotating machine
AE	OK	Good	OK	Good
HFCT	Good	Good	Good	Good
UHF	OK	No	Good	No

2.5.3 การวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนแบบ conventional วงจรพื้นฐานสำหรับการตรวจจับ PD ตามข้อกำหนดในมาตรฐานสากล IEC 602270:1998 จะประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงหรือแรงดันทดสอบ U ตัวกรองสัญญาณ (Filter) จากแหล่งจ่ายหรืออิมพีแดนซ์ Z_f วัสดุทดสอบ (Test object) C_t ตัวเก็บประจุคัปปลิง (Coupling capacitor) C_k อุปกรณ์รับสัญญาณ (Coupling device) CD สายเคเบิลนำสัญญาณ (Connecting cable) CC และเครื่องมือวัด (Measuring instrument) MI ตามลำดับแสดงดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 วงจรพื้นฐานการตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วน

หน้าที่การทำงานและคุณสมบัติสำคัญของอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรทดสอบเป็นดังนี้

1) แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง U ใช้ในการจ่ายแรงดันให้วงจรทดสอบและมีฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าเพียงพอที่จะจ่ายโหลดได้เช่น หม้อแปลงทดสอบซึ่งควรเป็นหม้อแปลงทดสอบที่ปลอด PD ที่แรงดันทดสอบ เป็นต้น

2) ตัวกรองสัญญาณหรืออิมพีแดนซ์ Z_f ใช้ในการกรองสัญญาณรบกวนจากแหล่งจ่าย เช่น ฮาร์มอนิกส์ และ PD ที่เกิดภายในหม้อแปลงทดสอบเองที่ใช้เป็นแหล่งจ่ายเป็นต้นและหน้าที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือ ป้องกัน PD จากวงจรทดสอบไหลย้อนลงกราวด์ผ่านทางแหล่งจ่าย ตัวกรองดังกล่าวต้องทนแรงดันทดสอบได้และปราศจาก PD ที่แรงดันทดสอบ ตัวอย่างตัวกรอง เช่น ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่เพื่อเผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เหนี่ยวนำ (High voltage inductor) หรือตัวกรองชนิดผ่านแถบความถี่ต่ำ (High voltage low-pass filter) เป็นต้น ดังนั้นในกรณีที่ใช้หม้อแปลงทดสอบปราศจาก PD ที่แรงดันทดสอบเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงอาจจะไม่จำเป็นต้องใช้ตัวกรองอีก เนื่องจากอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงทดสอบมีคุณสมบัติเป็นตัวเหนี่ยวนำอยู่แล้ว โดยเฉพาะหม้อแปลงปลอดภัย PD

3) ตัวเก็บประจุคัปปลิง C_k มีค่าความจุไฟฟ้าประมาณเท่า ๆ กับความจุไฟฟ้า ของวัสดุทดสอบหรือใหญ่กว่า ในทางปฏิบัติตัวเก็บประจุคัปปลิงจะมีค่าประมาณ 1000 pF เพื่อให้ มีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำพอที่จะทำให้กระแสดิสชาร์จบางส่วนซึ่งมีค่าน้อยกว่า 100 μA และเป็นพัลส์แคบ ใช้เป็นส่วนเชื่อมต่อหรือคัปปลิงสัญญาณความถี่สูงให้ครบ วงจรระหว่าง C_a C_k และ CD ซึ่งมีอิมพีแดนซ์ต่ำสำหรับ PD ดังนั้นตัวเก็บประจุคัปปลิงต้องเป็นชนิดที่มีค่าความเหนี่ยวนำภายในต่ำ ปราศจาก PD ที่แรงดันทดสอบ

4) อุปกรณ์รับสัญญาณ CD และเครื่องมือวัด MI อุปกรณ์ทั้งสองส่วนนี้จะทำงานร่วมกันคือทำหน้าที่อินทิเกรต (Integrate) กระแสพัลส์ i_i ที่ไหลในวงจรทดสอบ เนื่องจากการเกิด PD โดยมีสายนำสัญญาณ CC เป็นสายที่เชื่อมต่อระหว่าง CD กับ MI อุปกรณ์รับสัญญาณจะทำหน้าที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือ เป็นตัวกรองกระแสความถี่ต่ำ (50 ถึง 400 เฮิรตซ์) และฮาร์มอนิกส์ต่าง ๆ จากแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบมิให้เข้าไปที่เครื่องมือวัดได้ ส่วนเครื่องมือวัด MI จะทำหน้าที่สำคัญอีก 3 ประการ คือเป็นวงจรขยายสัญญาณ (Amplified) เป็นวงจรกรองสัญญาณชนิดผ่านแถบ เพื่อลดสัญญาณรบกวนความถี่ต่ำที่มาจากแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบกับสัญญาณรบกวนความถี่สูงที่มาจากคลื่นวิทยุ และเป็นอุปกรณ์แสดงผล PD

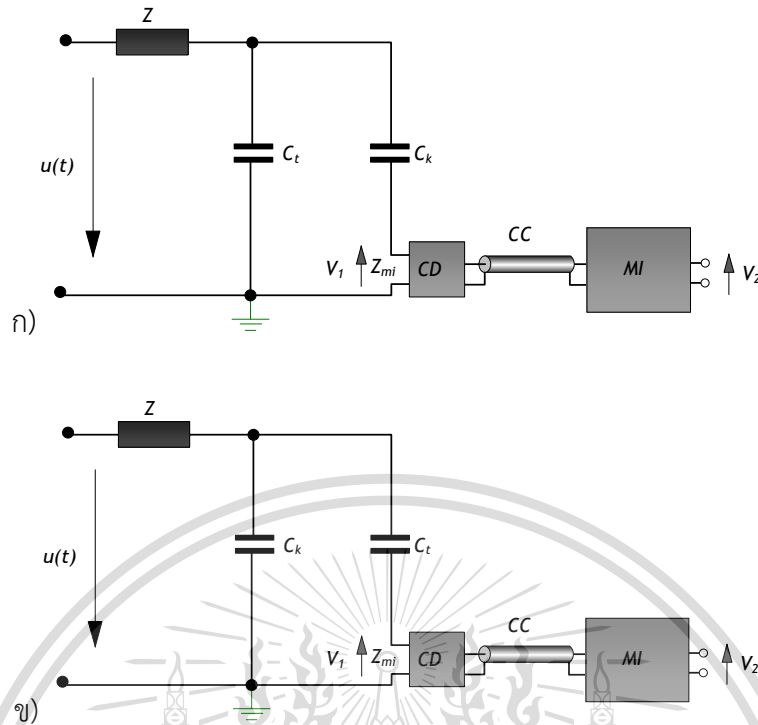
หลักการการทำงานของวงจรพื้นฐานสำหรับการตรวจจับ PD เริ่มจากค่อย ๆ ป้อนแรงดันทดสอบจากแหล่งจ่าย U ผ่านตัวกรอง Z_f ให้กับวงจรทดสอบจนกระทั่งเกิด PD ที่วัสดุทดสอบ C_a (ถ้าฉนวนของวัสดุทดสอบนั้นมีความบกพร่อง) ทำให้เกิดแรงดันตกที่ขั้วของ C_a ทำให้ C_k จะดิสชาร์จประจุไปที่ C_a เพื่อชดเชยแรงดันตกนั้น ผลดังกล่าวทำให้เกิดกระแสพัลส์ i_i ไหลวนครบวงจรซึ่งประกอบด้วย C_k , C_a และ CD ดังนั้น CD และ MI วัดประจุไฟฟ้าที่ถ่ายเทระหว่าง C_a กับ C_k โดยการอินทิเกรตกระแสพัลส์ i_i เพื่อนำไปแสดงผลต่อไป

การต่อระบบวงจรระบบวัดดิสชาร์จบางส่วนในวงจรทดสอบ จะมีความแตกต่างตรงที่การต่ออิมพีแดนซ์วัด Z_{mi} ซึ่งมาตรฐานการวัดดิสชาร์จบางส่วน IEC 60270 เรียกว่า อุปกรณ์คัปปลิง (coupling device) CD ประกอบเป็นอิมพีแดนซ์ Z_{mi} ต่อที่ต้นระบบวัดแบ่งเป็น 2 แบบ ดังในรูปที่ 2.20 ซึ่งเป็นวงจรตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนวิธีตรง (straight detection circuit)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.20 วงจรทดสอบตรวจจับ PD แบบสมดุล ก)การนำ C_k เชื่อมกับเครื่องมือวัด ข)การนำ C_t เชื่อมกับเครื่องมือวัด

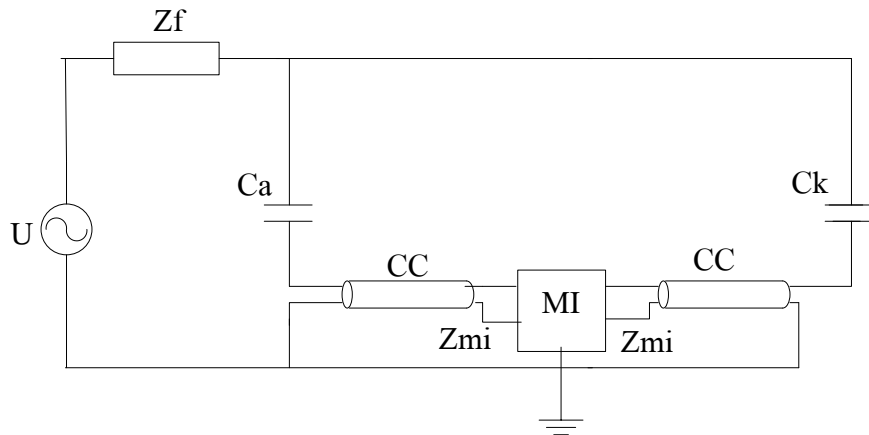
- เมื่อ $U(t)$: แหล่งจ่ายแรงดันทดสอบ
 Z : ตัวกรอง
 Z_{mi} : อิมพีแดนซ์ป้อนเข้าของระบบ
 CC : เคเบิลวัด
 C_t : ค่าเก็บประจุวัสดุทดสอบ
 C_k : ค่าเก็บประจุคัปปลิง
 CD : อุปกรณ์คาบเกี่ยว

ความแตกต่างของวงจรแบบรูป 2.20ก) และแบบ 2.20ข) คือ แบบ 2.20ก) ตัวคาบเกี่ยว CD ต่ออนุกรมกับ C_k ที่มีศักย์เป็นดิน เป็นแบบที่ใช้กันมากในทางปฏิบัติ ไม่เสี่ยงต่อการเกิดเบรกดาวน เพราะทราบค่าแรงดันที่กำหนดของ C_k แต่ความไวในการวัดจะน้อยกว่าแบบ 2.20ข) เพราะ PD ที่เกิดขึ้นนั้นเกิดขึ้นในวัสดุทดสอบ C_t แบบ 2.20ข) จะมีความไวสูงกว่าเพราะตัวคาบเกี่ยว CD ต่ออนุกรมโดยตรงกับวัสดุทดสอบ C_t ค่าเก็บประจุทดสอบสเตรย์ทั้งหลายด้านแรงสูงกับดินจะเพิ่มค่า C_k ทำให้ความไวของวงจรวัด PD สูงขึ้น แต่มีข้อเสียที่เสี่ยงต่อการเกิดเบรกดาวนที่วัสดุทดสอบ จะทำให้เครื่องมือวัด PD เสียหายได้ นอกจากนี้ 2 วิธีดังกล่าวแล้วการวัด PD อาจจะต้องวงจรวัดได้อีก 2 แบบ ดังรูปที่ 2.21 และรูปที่ 2.22 วงจรทดสอบตรวจจับ PD แบบสมดุล [22]

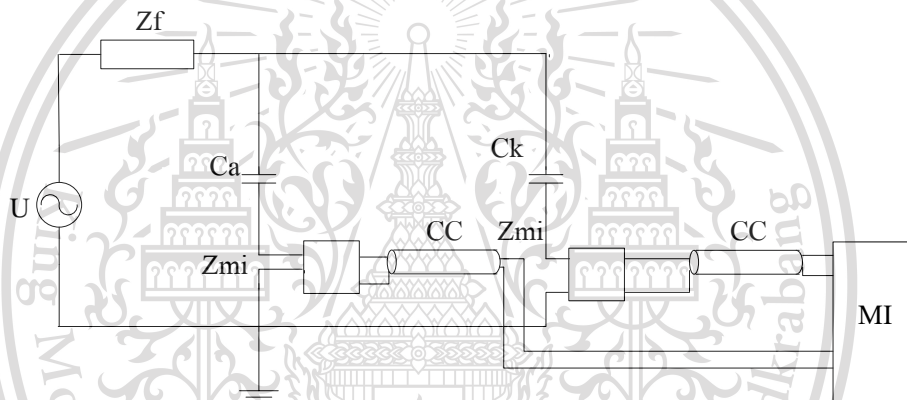
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.21 วงจรตรวจจับดิสซาร์จบางส่วนแบบวงจรทดสอบแบบแยกขั้วสัญญาณ
(polarity discrimination circuit arrangement)



รูปที่ 2.22 วงจรตรวจจับดิสซาร์จบางส่วนแบบวงจรทดสอบแบบสมดุล
(balanced circuit arrangement)

วงจรรูปที่ 2.22 เป็นวงจรทดสอบแบบสมดุล วงจรแบบนี้จะมีข้อได้เปรียบในเรื่องการลดสัญญาณรบกวนที่เข้ามาจากแหล่งจ่ายหรือสัญญาณแบบคอมมอนโหมด (common mode) สำหรับวงจรรูปที่ 2.21 เป็นวงจรทดสอบแบบแยกขั้วสัญญาณได้ มีข้อดีเช่นเดียวกับวงจรแบบสมดุล แต่มีความสามารถเพิ่มเติมในการแยกขั้วสัญญาณรบกวนจากภายนอกออกจากสัญญาณดิสซาร์จบางส่วนภายในวงจรทดสอบได้ ข้อเสียของวงจรทั้งสองคืออาจทำให้เครื่องมือวัดเกิดความเสียหายในกรณีที่วัสดุทดสอบเกิดเบรกดาวน และไม่เหมาะในการทดสอบวัสดุทดสอบที่มีซิลด์ขนาดใหญ่ เนื่องจากซิลด์ไม่ได้ถูกต่อลงกราวด์โดยตรง ดังนั้นถ้ามี สัญญาณรบกวนที่ซิลด์จะทำให้ความไวในการตรวจวัดดิสซาร์จบางส่วนลดลง [22]

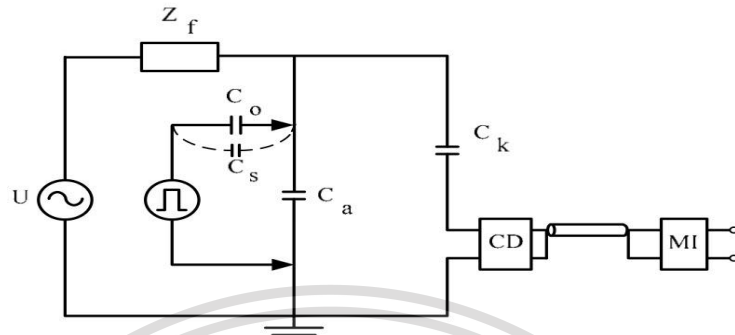
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

เนื่องจากสัญญาณเอาต์พุตของเครื่องตรวจวัดดิสซาร์จบางส่วนนั้นมีความแปรผัน ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ลงบนสื่อ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ตามขนาดของตัวเก็บประจุคัปปลิงและวัสดุทดสอบ จึงต้องมีการปรับเทียบด้วยค่าดิสซาร์จบางส่วน

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

มาตรฐานก่อนทำการป้อนแรงดันให้กับวงจรทดสอบ ทำได้โดยการใช้เครื่องปรับเทียบดิซาร์จ มาตรฐานป้อนกระแสพัลส์สั้น ๆ ที่มีประจุ q_{cal} ซึ่งทราบค่าที่แน่นอนที่ขั้วทั้งสองของวัสดุทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 วงจรสำหรับการปรับเทียบวงจรตรวจวัดดิซาร์จบางส่วน [23]

การปรับเทียบวงจรทดสอบโดยปกติจะทำก่อนการป้อนแรงดันเข้าวงจรทดสอบ โดยใช้เครื่องปรับเทียบดิซาร์จมาตรฐานในการป้อนกระแสพัลส์สั้น ๆ ที่มีประจุ (pulse area) q_{cal} ซึ่งทราบค่าที่แน่นอนที่ขั้วทั้งสองของวัสดุทดสอบ ถ้าเครื่องตรวจวัดดิซาร์จบางส่วนอ่านค่า ดิซาร์จบางส่วนได้เท่ากับ a_1 ดังนั้น สเกลแฟกเตอร์(scale factor) $k = q_{cal}/a_1$ หลังจากทำการปรับเทียบวงจรทดสอบเสร็จแล้วต้องเอาเครื่องปรับเทียบดิซาร์จมาตรฐานออกก่อนการป้อน แรงดันเข้าวงจรทดสอบ (ในกรณีที่ C_o เป็นตัวเก็บประจุแรงดันต่ำ) ในขณะที่ทำการทดสอบที่แรงดันตามมาตรฐาน กำหนด ถ้าในขณะนั้นเครื่องตรวจวัดดิซาร์จบางส่วนอ่านค่าได้ a_2 ดังนั้นประจุที่ปรากฏของดิซาร์จบางส่วนคือ $q = K_1 a_2$ และความไวของวงจรทดสอบ $q_{min} = 2K_1 h_n$ เมื่อ h_n คือค่าสูงสุดของระดับสัญญาณรบกวนพื้นหลัง (background noise) ที่อ่านจากเครื่องตรวจวัด ดิซาร์จบางส่วน หลังการปรับเทียบก่อนการจ่ายแรงดันให้วงจรทดสอบ [23]

2.5.4 การวัดการเกิดดิซาร์จบางส่วนแบบ non-conventional การตรวจวัดดิซาร์จบางส่วนด้วยวิธี Non-conventional โดยใช้ HFCT โดยแสดงในรูปที่ 2.23 ในการเกิดดิซาร์จบางส่วนขึ้นจะทำให้เกิดกระแสอิมพัลส์เล็ก ๆ ที่มีความถี่สูง (100 kHz – 30 MHz) ไหลลงสู่ระบบกราวด์ตลอดเวลา ซึ่งเป็นหนึ่งวิธีในการตรวจดิซาร์จบางส่วนแบบออนไลน์ คือ ตรวจจับกระแสที่มีขนาดเล็กหลายร้อยพัลส์ต่อวินาทีที่เกิดจากการดิซาร์จบางส่วน ซึ่งข้อจำกัดของวิธีวัดด้วย HFCT คือ ไม่เหมาะสมที่จะใช้ในการหาตำแหน่งของการเกิดดิซาร์จบางส่วน วิธีการตรวจวัดด้วย HFCT เป็นวิธี Non-conventional เป็นที่นิยมในการตรวจดิซาร์จบางส่วนในระบบไฟฟ้า เพราะง่ายต่อการใช้งานซึ่งมีประสิทธิภาพและมีความไวต่อการตรวจจับสัญญาณดิซาร์จ

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

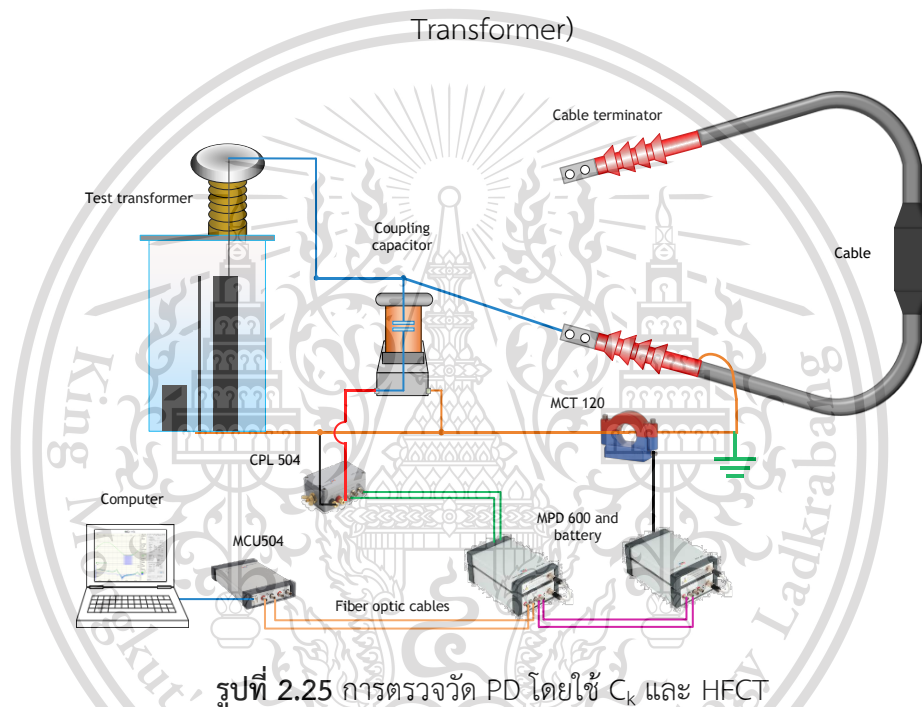
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.24 เซนเซอร์ตรวจจับกระแส (Omicron MCT 120 High-Frequency Current Transformer)



รูปที่ 2.25 การตรวจวัด PD โดยใช้ C_k และ HFCT

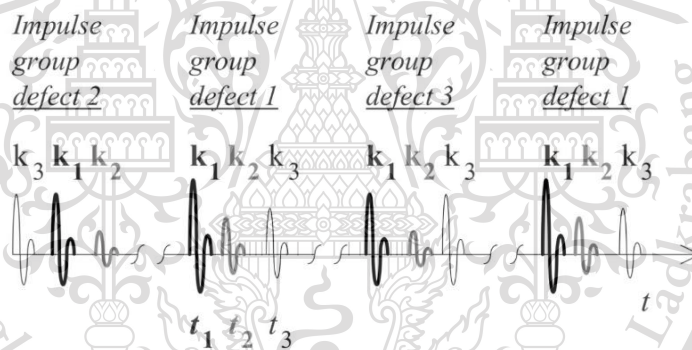
2.5.5 เทคนิคการแยกชนิดของการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (synchronous multi-channel partial discharge measurement) ปัญหาในการวัดระบบที่มีแหล่งกำเนิด PD ที่อยู่หลายตำแหน่ง ซึ่งทำให้ระบบวัดไม่สามารถระบุได้ว่าเป็นสัญญาณ PD ประเภทใด เนื่องจากการซ้อนทับกันของสัญญาณที่เกิดขึ้นมาดังกล่าว โดยในปัจจุบันได้มีการวิจัยที่พยายามแก้ไขปัญหาดังกล่าวที่เกิดขึ้น ซึ่งปัญหานี้เกิดจากการที่แหล่งกำเนิดสัญญาณที่มีตำแหน่งและประเภทที่แตกต่างกันออกไป ทำให้การวิจัยส่วนใหญ่ต้องการแยกประเภทและตำแหน่งของสัญญาณเหล่านั้นที่เกิดขึ้น โดยการคิดค้นเทคนิคการวัดนี้จะมีพื้นฐานทางด้าน Multi-channel เพื่อที่ต้องการแยกความถี่ของสัญญาณที่ซ้อนทับกันในระบบที่ทำการวัดสัญญาณ PD [24]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า โดยทั่วไปในระบบฉนวน เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้า หม้อแปลงไฟฟ้า และระบบสายเคเบิล ซึ่งการวัดแบบ Synchronous multi-channel จะสามารถแก้ไขปัญหานี้ในเรื่องของการแยก

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สัญญาณ และสามารถระบุได้ถึงข้อบกพร่องที่แตกต่างกันได้โดยทำการระบุตำแหน่งด้วยความสัมพันธ์ของแต่ละเฟส และสัญญาณรบกวนของระบบได้ การบันทึกค่าของ PD ที่ลักษณะเป็นสัญญาณอิมพัลส์ จะทำการบันทึกเป็นหลายช่องทางสัญญาณ โดยจะใช้การวัดที่แตกต่างกันออกไปแต่ละตำแหน่งของเฟสต่าง ๆ หรือ ใช้ย่านความถี่ที่แตกต่างกัน ซึ่งทั้งหมดนี้ทำให้เทคนิคการวัดแบบนี้มีชื่อว่า Synchronous multi-channel โดยการวัดจะอาศัยของหลักการประมวลผลแบบดิจิทัล ซึ่งจะทำการเก็บผลของการวัดสัญญาณ PD ทั้งหมดแล้วนำไปประมวลผล โดยปกติแล้วการวัด PD ด้วยเทคนิค Synchronous multi-channel จะทำการวัดอิมพัลส์ของ PD ที่เกิดขึ้นโดยจะทำการเก็บค่าวนไปในแต่ละช่องทางการวัด แล้วจะนำผลที่ได้มาจัดกลุ่มความสัมพันธ์ของสัญญาณอิมพัลส์ที่เกิดขึ้นในช่วงหนึ่งของเวลาที่ทำการเก็บผล โดยรูปที่ 2.26 จะเป็นการบ่งบอกว่าในสัญญาณอิมพัลส์แต่ละกลุ่มจะมีลักษณะของความสัมพันธ์แอมพลิจูดที่เหมือนกัน และเวลาที่แตกต่างกันออกไปในแต่ละกลุ่มของสัญญาณ ซึ่งความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นมาจะบ่งบอกถึงประเภทถึงข้อบกพร่องที่มีอยู่จากความแตกต่างของการหน่วง และเวลาของสัญญาณอิมพัลส์ ซึ่งทำให้สามารถทำการแยกกลุ่มแต่ละกลุ่มของสัญญาณ PD ที่เกิดขึ้น และสามารถระบุถึงประเภทข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นได้



รูปที่ 2.26 การซิงค์สัญญาณอิมพัลส์ของ PD โดยทำการวนเก็บค่าในแต่ละ Channel k_1 , k_2 , และ k_3

ในรูปที่ 2.26 จุดบกพร่องที่ 1 สามารถดูความสัมพันธ์ของขนาดแอมพลิจูดของ q_1/q_2 และ q_1/q_3 โดยช่วงเวลาที่เกิดของอิมพัลส์ที่แตกต่างกันของช่วง $t_3 - t_1$ และ $t_3 - t_2$ โดยสัญญาณจากจุดบกพร่องที่ 2 และ 3 สามารถแยกออกจากจุดบกพร่อง 1 เนื่องจากรูปแบบของสัญญาณของแหล่งกำเนิดนั้น ทั้งนี้ความสัมพันธ์แอมพลิจูดของรูปคลื่นสัญญาณที่เกิดขึ้นแต่อันจะไม่แตกต่างกัน แต่จะแตกต่างกันเรื่องของช่วงเวลา

จากข้อมูลของรูปแบบของสัญญาณอิมพัลส์ PD ในแต่ละจุดบกพร่อง สามารถดูได้จากข้อมูลที่เกิดขึ้นในแต่ละกลุ่มของ Channel จะมีความสัมพันธ์กับจุดบกพร่องนั้น ๆ จากการบันทึกเก็บค่าข้อมูลของ PD ที่เกิดขึ้นในช่วงแรกมันจะพบปัญหาจากเทคนิคการวัด ซึ่งเป็นปัญหาที่มักจะไม่ว่ากรณีใดเกิดขึ้นซ้ำแล้วซ้ำเล่าแม้แต่ในการวัดระบบที่มีแหล่งกำเนิดทำให้สัญญาณเกิดการซิงค์กัน การเรียงและการแยกของสัญญาณที่เกิดขึ้นอยู่กับประเภทของจุดบกพร่องที่เกิดขึ้นได้ในรูปแบบของการเก็บ

This material is reserved for educational use only; not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สะสม แล้วนำมาแยกผลการแสดงออกเป็นรูปต่าง ๆ ตามจุดบกพร่องที่เกิดขึ้นตามที่แสดงในรูปที่ 2.27 ถึงรูปที่ 2.31 โดยการวัด PD ด้วยเทคนิค Synchronous multi-channel สามารถทำได้ 2 แบบ ดังต่อไปนี้

1) ทำการวัดจากหลาย ๆ ตำแหน่งด้วยอุปกรณ์การวัดหลาย ๆ ตัว (การวัดแบบ Synchronous multi-point)

2) ทำการวัดที่ตำแหน่งเดียว โดยมีการวัดหลาย Channel โดยทำการต่อหน่วยวัดขนานกัน แล้วทำการวัดวนไปแต่ละตัวโดยการใช้ย่านความถี่ที่แตกต่างกันออกไป (การวัดแบบ Synchronous multi-frequency)

ในบางกรณีการวัดความถี่แนะนำให้ใช้ Narrowband เพื่อหลีกเลี่ยงของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น ยกตัวอย่างเช่น การวัดในหม้อแปลงไฟฟ้า จะทำการเลือกย่านความถี่ไม่อยู่ในช่วง resonance เพื่อป้องกันการความผิดพลาดที่เกิดจากแอมพลิจูดของสัญญาณซ้อนทับกัน ซึ่งในปกติแล้วการวัดแต่ละรูปแบบสามารถนำผลมาทำการประเมินร่วมกันได้ทั้ง 2 วิธีการ โดยการวัดระบบที่เป็นไฟฟ้า 3 เฟส โดยการวัด PD ด้วยเทคนิค Synchronous multi-channel ไม่จำเป็นต้องวัด ทั้ง 3 เฟส แต่โดยธรรมชาติจะทำการวัดแต่จะวัดทั้ง 3 เฟส



รูปที่ 2.27 การแยกผลของแหล่งจ่ายสัญญาณ PD จากจุดบกพร่องต่าง ๆ

จากการแยกเป็นจุดบกพร่องที่เป็นแหล่งกำเนิดของ PD แล้ว จะสามารถทำการสังเกตความสัมพันธ์ของแอมพลิจูดที่เกิดขึ้นมา หรือช่วงเวลาจากการกำเนิด PD จะสามารถนำมาวิเคราะห์ผลได้เป็นอย่างดีในการวัดที่มี 3 channel โดยนำผลลัพธ์ที่ได้มาเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของแอมพลิจูดได้จากการบันทึกผล ภายใต้ความสัมพันธ์เหล่านี้ค่าที่ได้จากการวัด และมีค่าประจุนสูงสุดให้เป็น q_{L1} โดยอัตราส่วนของ $q_{L1}/q_{L2}-1$ และ $q_{L1}/q_{L3}-1$ เป็นค่าประจุนที่มีค่าน้อยกว่า โดย

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

อัตราส่วนเหล่านี้จะนำมาใช้ในการหาพิกัดตำแหน่งของความบกพร่องที่เกิดขึ้นเป็นกราฟสามแกนโดยเรียกว่า Star diagram ในรูปที่ 2.28 ตำแหน่งเสมือนของจุดบกพร่องที่เกิดขึ้นจะถูกเปลี่ยนเป็นตำแหน่งต่าง ๆ ใน Star diagram โดยยังมีความสัมพันธ์กับจุดบกพร่องจริงในระบบ โดยผลที่แสดงออกมาเราไม่สามารถระบุ หรือรู้ถึงตำแหน่งได้จริง

จากความสัมพันธ์ของสัญญาณทั้งสามเฟส สามารถเขียนลงโดยใช้เวกเตอร์ขนานไปกับแกนกราฟได้ โดยขนาดของเวกเตอร์จะแสดงถึงขนาดของประจุจะเขียนแบบกราฟเส้นตรง หรือแบบกราฟลือคาลิทิมก็ได้ และการเขียนเวลาในการเกิดสัญญาณอิมพัลส์ขึ้นอาจแทนได้ด้วยจุดใน star diagram ได้ ทั้งนี้ star diagram อาจมีชื่อเรียกเป็น 3PARD (Three-Phase Amplitude Relation Diagram), 3PTRD (Three-Phase Time Relation Diagram) หรือ 3CFRD (Three Center Frequency Relation Diagram)



รูปที่ 2.28 การระบุตำแหน่งเสมือนของจุดบกพร่องใน Star diagram

ข้อดีจากการใช้ star diagram คือ จุดบกพร่องที่แตกต่างกันออกไปจะมีกลุ่มก้อนของการแสดงผลที่อยู่แตกต่างกันออกไป ทำให้สามารถแยกผลที่เกิดจากสัญญาณอิมพัลส์แต่ประเภทได้ และสามารถระบุได้ว่าเป็นแหล่งกำเนิด PD หรือ เป็นเพียงแค่อสัญญาณรบกวน

ในตัวอย่างของการบ่อนแรงที่เฟส L2 ในสเตเตอร์ของอะซิงโครนัสมอเตอร์ ด้วยวิธีการวัดหลายตำแหน่งในทั้งสามเฟส โดยจะแสดงในรูปของ star diagram รูปที่ 2.29 โดยจะทำการแยกกลุ่มของประจุที่แสดงผลออกจากกัน กลุ่มที่ 1 (Cluster 1) จะแสดงผลเป็นสัญญาณรบกวนจากแหล่งจ่าย กลุ่มที่ 2 (Cluster 2) จะแสดงผลเป็นการเกิดดิสชาร์จภายใน โดยจะมีความสมมาตรในเฟส L3 และ L1 ซึ่งสัมพันธ์กับ L2 ที่เป็นจุดที่บ่อนแรงดันเข้ามา

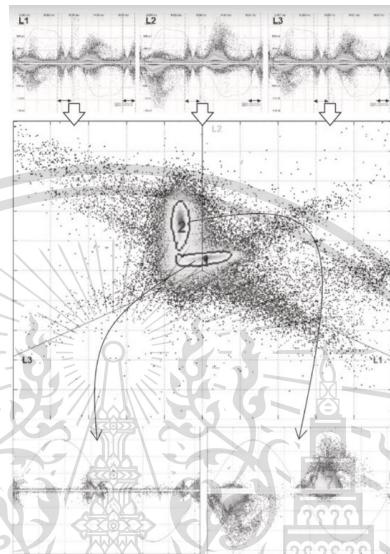
ตัวอย่างการจำลองการวัด PD ในระบบฉนวนแรงดันปานกลางที่อยู่ในน้ำมันแล้วมีจุดบกพร่อง 1 ตำแหน่ง โดยใช้การวัดแบบซิงโครนัสสามเฟส และมีการใช้ย่านความถี่ที่แตกต่างกัน

ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

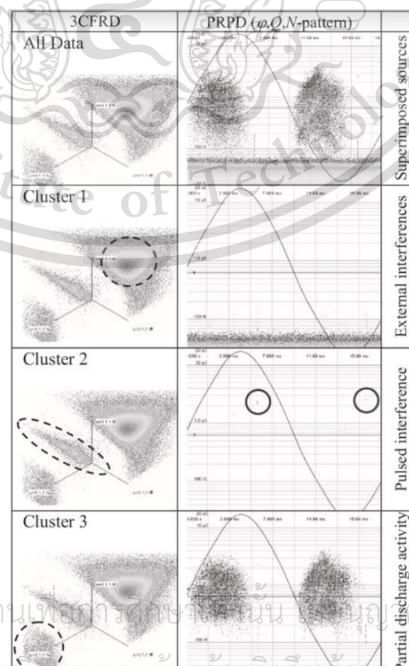
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

โดยแสดงผลในรูปแบบที่ 2.30 ทางด้านซ้ายบน และการแสดงผลแบบ PRPD (Phase Resolve PD Pattern) จะแสดงผลของแหล่งจ่าย สัญญาณ PD รวมไปถึงสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นตามที่แสดงในรูปแบบที่ 2.30 ทางด้านขวาบน แต่อย่างไรก็ตามใน star diagram สามารถแสดงกลุ่มของสัญญาณได้เป็นสามกลุ่มตามรูปที่ 2.30 ทางด้านซ้าย หลังจากนั้นจะทำการแยกกลุ่มออกมาแสดงผลในรูปแบบของ PRPD ได้ตามรูปที่ 2.30 ด้านขวา



รูปที่ 2.29 การวัด PD แบบ 3 Channel ที่สเตรเตอร์ของอะซิงโครนัสมอเตอร์พิกัด 10 kV 7 MW ป้อนแรงดันเฟสเดียว โดยข้างบนแสดงถึงสัญญาณรบกวน (Cluster 1) และ PD (Cluster 2) ใน star diagram โดยแสดงอยู่ในรูปของ phase-resolve ในรูปด้านล่าง



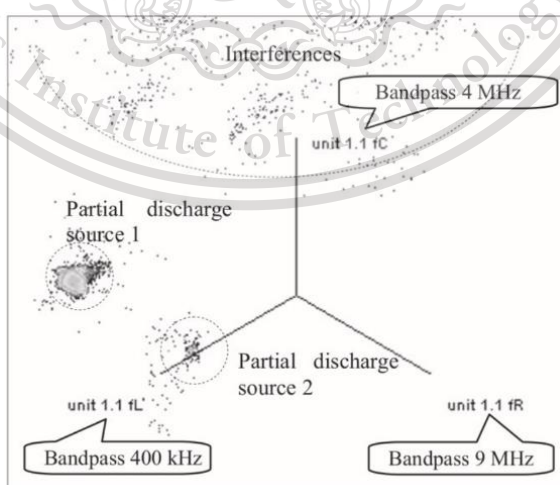
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานขององค์กรภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.30 การวัดในหลายย่านความถี่ โดยแสดงผลใน star diagram และแยกผลของสัญญาณที่ได้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากวิธีการวัดดังกล่าวที่ผ่านมา ผลของการทดลองสามารถแยกส่วนของรูปแบบ PD ที่เกิดขึ้น ซึ่งสามารถตัดสัญญาณส่วนของสัญญาณรบกวนออกไปได้ และสามารถทำการวิเคราะห์ผล PD ที่ได้ว่าเป็นรูปแบบไหนโดยนำสัญญาณที่เกิดการซ้อนทับแยกออกจากกันได้

จุดเด่นของการวัด PD ด้วยเทคนิค Synchronous multi-channel แยกสัญญาณ PD กับสัญญาณรบกวนออกจากกันเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ รวมไปถึงเทคนิคนี้สามารถใช้ทำการวัดสัญญาณ PD ในระบบไฟฟ้ากระแสตรงได้ด้วย แต่ด้วยระบบไฟฟ้ากระแสตรงไม่ได้มีสามเฟสเหมือนระบบไฟฟ้ากระแสสลับ ดังนั้นการติดตั้งเครื่องมือวัดแต่ละจุด จะทำการติดตั้งตำแหน่งที่แตกต่างกัน และแยกออกจากด้วยค่าของอิมพีแดนซ์ หรือจากการเลือกย่านความถี่ที่แตกต่างกัน ดังนั้นการวัดแรงดันกระแสตรงจะสามารถให้เห็นสัญญาณจากการวัดที่แตกต่างกันจากค่าแอมพลิจูดที่เกิดขึ้นจากความแตกต่างของการติดตั้งเครื่องมือวัดแต่ละตำแหน่งทำให้สัญญาณที่ได้สามารถแยกออกจากกันได้ โดยในรูปที่ 2.31 จะแสดงผลจากการวัด PD ที่มีย่านความถี่ที่แตกต่างกันด้วยการจ่ายแรงดันกระแสตรง ซึ่งผลการทดลองสามารถหาแหล่งกำเนิด PD ที่แตกต่างกันออกไปได้ 2 ตำแหน่ง และสามารถแยกสัญญาณรบกวนออกจากสัญญาณ PD ได้ด้วย โดยการแยกสัญญาณรบกวนออกจากสัญญาณที่เป็นแหล่งกำเนิด PD มีความสำคัญอย่างมาก และง่ายต่อการแยก เนื่องจากจะมีการเกิดอิมพัลส์ที่ค่อนข้างน้อย และสัญญาณรบกวนนี้ควรจะมีการนับออกมา ซึ่งสัญญาณ PD ในแรงดันกระแสตรงมีโอกาสที่มีความรุนแรงน้อยกว่าสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นได้ และการแสดงผลเป็นรูปแบบของมูมเฟสไม่สามารถทำได้เหมือนระบบไฟฟ้ากระแสสลับ และการแสดงผลบางอย่างในระบบไฟฟ้ากระแสสลับบางอย่างไม่สามารถแสดงออกมาในระบบกระแสตรงได้ แต่การแยกสัญญาณต่าง ๆ ด้วยเทคนิค Synchronous multi-channel เป็นจุดเริ่มต้นที่สำคัญในการวัดระบบไฟฟ้ากระแสตรงด้วย [24]



รูปที่ 2.31 ผลลัพธ์ของการวัดสัญญาณ PD ในระบบไฟฟ้ากระแสตรงด้วยการวัดแบบ 3CFRD

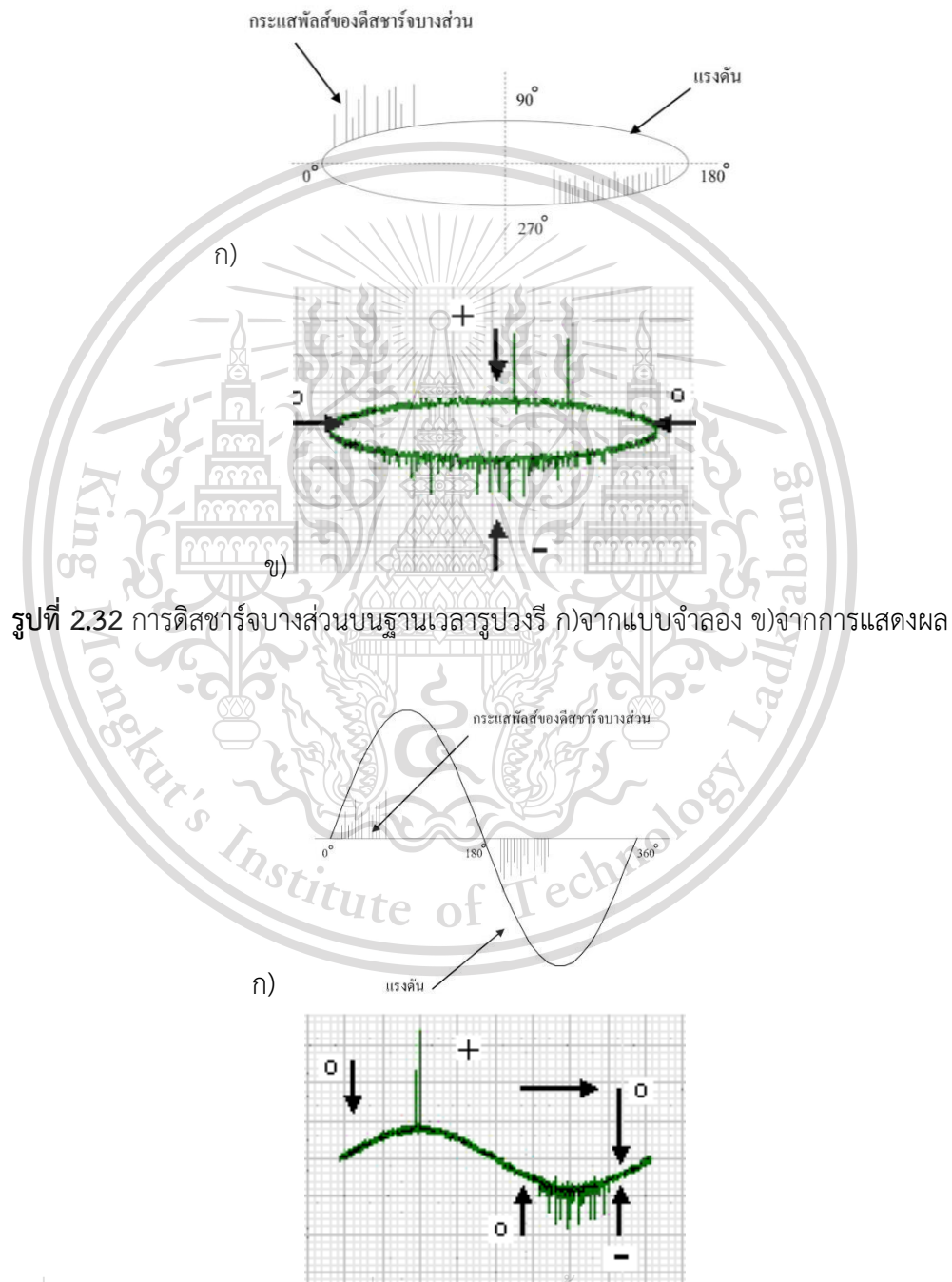
เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นต้นการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.5.6 การแสดงผลของการวัดดิซาร์จบางส่วน การแสดงผลของดิซาร์จบางส่วนที่ได้จากการตรวจวัดทางไฟฟ้านั้นสามารถทำได้ โดยทางมิเตอร์ ทางออสซิลโลสโคปและทางเครื่องบันทึก การแสดงนั้นอาจแสดงได้ 2 แบบ คือแสดงรูปพัลส์ของดิซาร์จบางส่วนบนฐานเวลารูปวงรีตามที่แสดงในรูปที่ 2.32 หรือแสดงรูปพัลส์ของดิซาร์จบางส่วนบนฐานเวลารูปคลื่นไซน์ ตามที่แสดงในรูปที่ 2.33 [23]



รูปที่ 2.32 การดิซาร์จบางส่วนบนฐานเวลารูปวงรี ก)จากแบบจำลอง ข)จากการแสดงผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ รูปที่ 2.33 การดิซาร์จบางส่วนบนฐานเวลารูปคลื่นไซน์ ก)จากแบบจำลอง ข)จากการแสดงผล

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.6 แนวทางปฏิบัติกับแรงดันที่เปลือกเคเบิลตามมาตรฐาน IEEE 575-2014

สำหรับการทดสอบกับแรงดันที่เปลือกของเคเบิล นั้นแตกต่างกันในแต่ละประเทศ และภูมิภาค โดยเนื่องมาจากประสิทธิภาพของฉนวนรอบนอกของสายเคเบิลที่สามารถทนรับแรงดันได้แตกต่างกันโดยที่ไม่ทำให้เกิดอันตราย โดยในสมัยก่อน ประมาณปี ค.ศ.1960 แรงดันที่เปลือกสามารถยอมรับได้เพียง 17 V เนื่องจากการฉนวนรอบนอกของสายเคเบิลนั้นยังไม่ดีพอ แต่ปัจจุบันการฉนวนของเคเบิลนั้นมีประสิทธิภาพเพียงพอที่จะมาสามารถทนรับแรงดันที่เปลือกโดยไม่เกิดอันตรายต่อผู้ที่มาสัมผัสเคเบิล ดังนั้นค่าของแรงดันที่ยอมรับได้จึงเพิ่มขึ้น ยกตัวอย่างเช่น ในประเทศ

สหรัฐ อเมริกา (USA) สามารถยอมรับได้ที่ประมาณ 65-90 V ขึ้นอยู่กับระดับแรงดันของเคเบิล

นอร์เวย์ (Norway) สามารถยอมรับได้ที่ 60 V

ญี่ปุ่น (Japan) สามารถยอมรับได้สูงถึง 200 V และมีการออกแบบฉนวนภายนอก (jacket) เป็นอย่างดี

ประเทศอื่น ๆ ซึ่งมีค่าที่ยอมรับได้โดยทั่วไปดังนี้ [2]

ตารางที่ 2.10 มาตรฐานสำหรับกำหนดค่าสูงสุดของแรงดันที่เปลือกของเคเบิลในแต่ละประเทศ

Country	Rated system voltage (kV)	Shield/sheath voltage limit (V)
UAE/Dubai	132	65
UAE/Other locations	132	12
Oman	132	65
Saudi Arabia	132	100
Saudi Arabia	230 to 280	200
Turkey	154	150
Turkey	380	200
Kuwait	275	65
Kuwait	400	200
Singapore	66	60
Singapore	230	120
Australia	132	150
Australia	330	250
South Korea	154 to 345	100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานวิชาการเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 3

การออกแบบการทดลองและวิธีการทดลอง

ในโครงงานนี้จะประกอบด้วยกรณีศึกษาที่เกิดมาจากปัญหาภายในสายเคเบิลใต้ดินทั้งหมด 3 หัวข้อด้วยกัน คือ การศึกษาเกี่ยวกับแรงดันที่เปลือกของสายเคเบิล (sheath voltage) ที่วางตัวในรูปแบบต่าง ๆ อยู่ภายใน Duck Bank ของระบบ Transmission Line หลังจากนั้นต่อมาคือการนำ ระบบ Duck Bank ในหัวข้อที่หนึ่ง มาทำการต่อ cross bounding และต่อลงดินที่ต้นและปลายของ Duck bank เพื่อเป็นการแก้ปัญหา sheath voltage หลังจากนั้นนำมาคำนวณ sheath voltage เปรียบเทียบกัน ระหว่างกรณีต่อลงดินและ cross bounding กับไม่ต่อลงดิน

หัวข้อที่ 2 มาคือการทดสอบสายเคเบิล ด้วยเทคนิค VLF เพื่อประเมินความเสื่อมสภาพของฉนวนภายในสายเคเบิลระบบ 6.6kV 12kV 20kV และ 22kV และประเมินว่าสายเคเบิลแต่ละเส้นผ่านมาตรฐานการทดสอบตาม มาตรฐาน IEEE หรือไม่

หัวข้อสุดท้าย คือ การวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วน โดยใช้เทคนิคหรือหลักการ 3 อย่างด้วยกันคือ การวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนแบบ conventional การวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนแบบ non-conventional และเทคนิคการแยกชนิดของการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (synchronous multi-partial discharge measurement)

3.1 แรงดันที่เปลือกของเคเบิลและเทคนิคการแก้ปัญหา

3.1.1 แรงดันที่เปลือกของสายเคเบิล (sheath voltage)

วิธีการทดลอง

1. ทำการออกแบบระบบสายเคเบิลใต้ดินหรือที่เรียกว่า duck bank ซึ่งภายในจะประกอบด้วยสายเคเบิลใต้ดินสามเฟสหลายวงจรวางกระจายอยู่ สายเคเบิลแต่ละวงจรมีพิกัดแรงดันที่แตกต่างกัน และจัดวางด้วยรูปแบบที่แตกต่างกัน

2. หาข้อมูลเกี่ยวกับสายเคเบิลที่จะนำมาออกแบบการทดลอง เช่นพิกัดแรงดัน รัศมีตัวนำ รัศมีสาย

3. ทำการออกแบบระบบสายเคเบิลโดยเลือก พิกัดแรงดัน ขนาดสาย ของแต่ละวงจรมีให้แตกต่างกัน โดยพิกัดไม่เกิน 230 kV (ตามระบบสายเคเบิลที่มีอยู่จริงในประเทศไทย)

4. วาดรูประบบสายเคเบิลหรือ duck bank ที่ออกแบบได้

5. ทำการคำนวณแรงดันของระบบสายเคเบิลที่ออกแบบ ตามทฤษฎี โดยออกแบบคำสั่งในโปรแกรม Scilab

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุแห่งลิขสิทธิ์ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

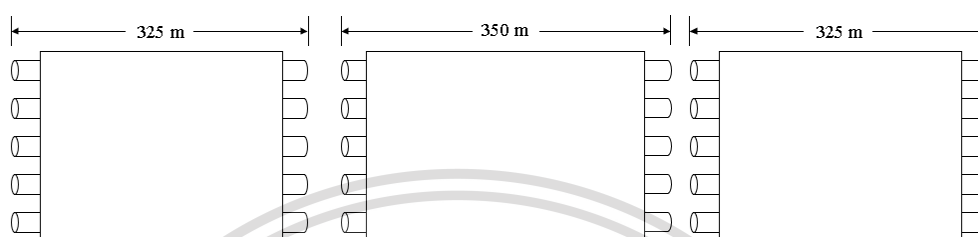
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.1.2 เทคนิคการแก้ปัญหาแรงดันที่เปลือกขอสายเคเบิล

วิธีการทดลอง

1. จากระบบสายเคเบิลในกรณีศึกษาที่ 1 นำมาทำการแบ่งส่วนความยาวเป็น 3 ส่วน เพื่อที่จะทำการต่อคลอส บอร์นดิง(Cross bounding) และต่อลงดินที่หัวและท้ายของระบบสายเคเบิล



รูปที่ 3.1 การแบ่งระยะของการ cross bounding ในกรณีศึกษาที่ 2

2. ทำการคำนวณแรงดันที่เปลือก (sheath voltage) โดยการสร้างคำสั่งใน Scilab ใหม่ อีกครั้ง
3. เปรียบเทียบแรงดันที่เปลือกเคเบิลที่คำนวณได้หลังการต่อ cross bounding กับ กรณีศึกษาที่ 1

3.2 การทดสอบสายเคเบิลใต้ดิน โดยใช้เทคนิค Very Low Frequency (VLF)

สำหรับการทดสอบสายเคเบิลใต้ดินด้วยแรงดัน VLF จะมีการทดสอบอยู่ด้วยกัน 3 ชุดการทดสอบ ซึ่งแต่ละชุดการทดสอบจะมีสายเคเบิล(test object)ที่มีเงื่อนไข(Condition)แตกต่างกันออกไป เนื่องจากสายเคเบิลในแต่ละชุดการทดสอบนั้นมีการติดตั้งต่างสถานที่ มีระดับแรงดันที่ใช้งาน, ความยาวสาย, และอายุการใช้งานแตกต่างกันออกไป การทดสอบในหัวนี้จะแบ่งออกเป็น 3 หัวข้อตามชุดการทดสอบดังนี้

3.2.1 การทดสอบชุดที่ 1

การทดสอบความเป็นฉนวน (Insulation Resistance Test) โดยใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 5000 V_{DC} และการทดสอบแฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กทริก (tan δ) โดยใช้แรงดัน VLF ที่ความถี่ 0.1 Hz โดยมีข้อมูลการทดสอบดังตารางที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลการทดสอบชุดที่ 1

Underground Incoming Cable Specification	
ฉนวนเคเบิล	Cross-Linked Polyethylene (XLPE)
แรงดันที่ใช้งาน	20 kV(rms) line to line
	11.5 kV (rms) line to ground
แรงดันทดสอบ	5.7 kV (rms) line to ground (Step 1)
	11.5 kV (rms) line to ground (Step 2)
	17.3 kV (rms) line to ground (Step 3)
มาตรฐานทดสอบ	IEEE std.400.2-2013
อุปกรณ์ทดสอบ	Very low frequency Model : HVA 60
	Tan Delta Test Model : TD 30
	Insulation Tester Model : MI 3200
	Computer : LENOVO

3.2.2 การทดสอบชุดที่ 2

การทดสอบความเป็นฉนวน (Insulation Resistance Test) โดยใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 5000 V_{DC} และการทดสอบแฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กทริก (tan δ) โดยใช้แรงดัน VLF ที่ความถี่ 0.1 Hz โดยมีข้อมูลการทดสอบดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ข้อมูลการทดสอบชุดที่ 2: สายเคเบิลที่ติดตั้งจาก Substation ไปยัง Substation

Underground Incoming Cable Specification	
ฉนวนเคเบิล	Cross-Linked Polyethylene (XLPE)
แรงดันที่ใช้งาน	12 kV(rms) line to line
	6.9 kV (rms) line to ground
แรงดันทดสอบ	3.4 (rms) line to ground (Step 1)
	6.9 (rms) line to ground (Step 2)
	10.4 (rms) line to ground (Step 3)
มาตรฐานทดสอบ	IEEE std.400.2-2013
อุปกรณ์ทดสอบ	Very low frequency Model : HVA 60
	Tan Delta Test Model : TD 30
	Insulation Tester Model : MI 3200
	Computer : LENOVO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.2.3 การทดสอบชุดที่ 3

การทดสอบความเป็นฉนวน (Insulation Resistance Test) โดยใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 5000 V_{DC} และการทดสอบแฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กทริก (tan δ) โดยใช้แรงดัน VLF ที่ความถี่ 0.1 Hz โดยการทดสอบในชุดที่ 3 จะมีการทดสอบสายเคเบิลอยู่ 3 ชุดด้วยกันที่มีการติดตั้งแตกต่างกัน โดยมีข้อมูลการทดสอบดังตารางที่ 3.3, 3.4 และ 3.5

ตารางที่ 3.3 ข้อมูลการทดสอบชุดที่ 3.1: สายเคเบิลที่ติดตั้งจาก Switchgear ไปยัง Transformer ตัวที่ 1

Underground Incoming Cable Specification	
ฉนวนเคเบิล	Cross-Linked Polyethylene (XLPE)
แรงดันที่ใช้งาน	22 kV(rms) line to line
	12.7 kV (rms) line to ground
แรงดันทดสอบ	6.4 (rms) line to ground (Step 1)
	12.7 (rms) line to ground (Step 2)
	19.0 (rms) line to ground (Step 3)
มาตรฐานทดสอบ	IEEE std.400.2-2013
อุปกรณ์ทดสอบ	Very low frequency Model : HVA 60
	Tan Delta Test Model : TD 30
	Insulation Tester Model : MI 3200
	Computer : LENOVO

ตารางที่ 3.4 ข้อมูลการทดสอบชุดที่ 3.2: สายเคเบิลที่ติดตั้งจาก Switchgear ไปยัง Transformer ตัวที่ 2

Underground Incoming Cable Specification	
ฉนวนเคเบิล	Cross-Linked Polyethylene (XLPE)
แรงดันที่ใช้งาน	12 kV(rms) line to line
	6.9 kV (rms) line to ground
แรงดันทดสอบ	3.4 (rms) line to ground (Step 1)
	6.9 (rms) line to ground (Step 2)
	10.4 (rms) line to ground (Step 3)
มาตรฐานทดสอบ	IEEE std.400.2-2013
อุปกรณ์ทดสอบ	Very low frequency Model : HVA 60
	Tan Delta Test Model : TD 30
	Insulation Tester Model : MI 3200
	Computer : LENOVO

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาระดับปริญญาโทและปริญญาเอกเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากหน่วยงานต้นสังกัด
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารที่นำมาไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 3.5 ข้อมูลการทดสอบชุดที่ 3.3: สายเคเบิลที่ติดตั้งจาก Switchgear ไปยัง Switchgear

Underground Incoming Cable Specification	
ฉนวนเคเบิล	Cross-Linked Polyethylene (XLPE)
แรงดันที่ใช้งาน	12 kV (rms) line to line
	6.9 kV (rms) line to ground
แรงดันทดสอบ	3.4 (rms) line to ground (Step 1)
	6.9 (rms) line to ground (Step 2)
	10.4 (rms) line to ground (Step 3)
มาตรฐานทดสอบ	IEEE std.400.2-2013
อุปกรณ์ทดสอบ	Very low frequency Model : HVA 60
	Tan Delta Test Model : TD 30
	Insulation Tester Model : MI 3200
	Computer : LENOVO

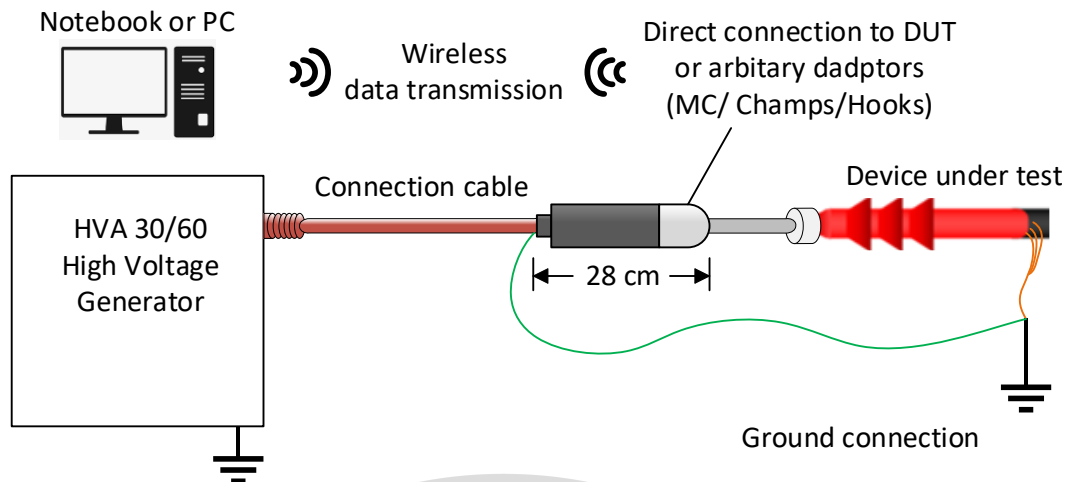
วิธีการทดสอบ

1. ทำการทดสอบ Insulation Resistance Test (Before VLF Hipot) ที่ $5kV_{DC}$ (Conductor to shield) เพื่อดูความต้านทาน (R) กระแสรั่วไหล (I) และความจุไฟฟ้า (C) ของสายเคเบิล
2. ทำการทดสอบ $\tan \delta$ ที่ 0.1 Hz ทีละเฟสโดยใช้เครื่องทดสอบ High voltage Generator Model HVA 60 และต่อวงจรการทดสอบดังรูปที่ 3.2
3. วิธีการจ่ายแรงดันการทดสอบ จะป้อนแรงดัน VLF ที่ 3 ระดับ คือที่ $0.5U_0$, $1U_0$ และ $1.5U_0$ จะได้ 3.4, 6.9 และ 10.4 kV_{rms} line to ground
4. ทำการวัดค่า $\tan \delta$ ของแต่ละเฟส โดยในการวัดแต่ละระดับแรงดันจะทำการวัด 6-10 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ย (mean) และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (stability) ของค่าที่วัดได้ในแต่ละช่วง ทดสอบจนครบทั้ง 3 เฟส
5. วิเคราะห์ผลและประเมินผล โดยนำค่าที่วัดได้จากข้อที่ 4 นำมาเทียบกับตารางในมาตรฐาน IEEE 400.2 หรือจากตารางที่ 2.3 - 2.5
6. ทำการทดสอบ Insulation Resistance Test (After VLF Hipot) ที่ $5kV_{DC}$ (Conductor to shield) เพื่อดูความต้านทาน(R) กระแสรั่วไหล(I) และความจุไฟฟ้า(C)ของสายเคเบิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.2 การทดสอบสายเคเบิลใต้ดิน โดยใช้เทคนิค Very Low Frequency

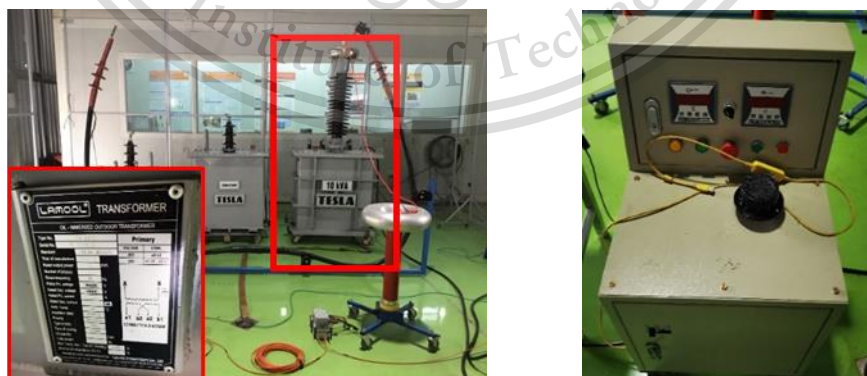
3.3 การทดสอบดิสชาร์จบางส่วน

สำหรับการทดสอบดิสชาร์จบางส่วน จะแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 แบบ คือ 1. การทดสอบดิสชาร์จบางส่วน แบบ conventional และ non-conventional (ตามหัวข้อ 3.3.1) และ 2. การทดสอบดิสชาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคการแยกการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (synchronous multi-channel PD measurement) (ตามหัวข้อ 3.3.2)

อุปกรณ์ในการทดลอง

1. หม้อแปลงทดสอบ

ในการทดสอบจะใช้หม้อแปลงทดสอบขนาด 100 kV, 10 kVA เป็นแหล่งกำเนิดแรงดันสูงและทำการควบคุมแรงดันที่ป้อนให้กับวัสดุทดสอบโดยใช้หม้อแปลง regulating transformer



รูปที่ 3.3 หม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ ก) หม้อแปลงทดสอบขนาด 100 kV, 10 kVA

ข) หม้อแปลง regulating transformer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2. ตัวเก็บประจุคัปปลิง

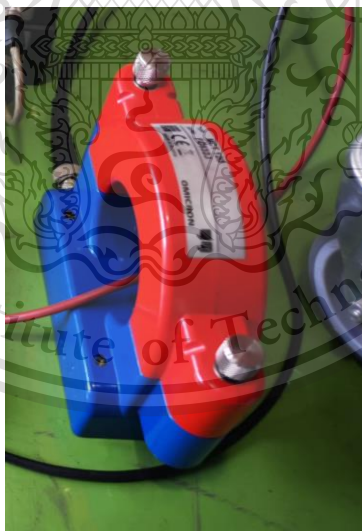
ในการทดสอบจะใช้ตัวเก็บประจุคัปปลิงขนาด 100 kV, 50 Hz ค่าความเก็บประจุ 1,000 pF ค่าความคลาดเคลื่อน 10% ย่านความถี่ 20 – 800 Hz เป็นตัวประจุที่ใช้จ่ายประจุให้กับวัสดุทดสอบ



รูปที่ 3.4 ตัวเก็บประจุคัปปลิงขนาด 100 kV, 50 Hz

3. High Frequency Current Transformer (HFCT)

HFCT สำหรับวัดสัญญาณการเกิดดิสชาร์จบางส่วนแบบ non-conventional



รูปที่ 3.5 Omicron MCT 120 High-Frequency Current Transformer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.ระบบวัด

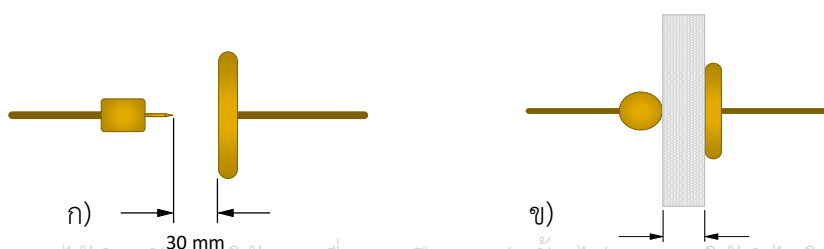
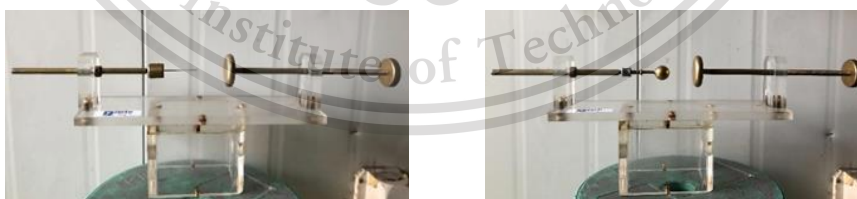
การทดสอบจากห้องปฏิบัติการจะใช้ Omicron MPD 600 เป็นเครื่องมือวัดที่ประกอบด้วยอุปกรณ์คัปปลิง (CPL 542), เครื่องวิเคราะห์สัญญาณ (MPD 600) และตัวควบคุมบัสไฟเบอร์ออปติก (MCU 502) เพื่อบันทึก Phase-resolved Partial Discharge (PRPD) โดยก่อนการทดลองจะต้องใช้อุปกรณ์ CAL 542 เป็นตัวปรับเทียบประจุ



รูปที่ 3.6 ระบบวัด ก)ชุดอุปกรณ์คัปปลิงMPD 600 ข)ชุดปรับเทียบประจุ CAL 542

5.ชุดอิเล็กโทรด

ก่อนทดสอบชิ้นงานสายเคเบิลชนิดของรูปแบบ PD และ PRPD ที่วัดได้จะต้องสัมพันธ์กับชิ้นงานสายเคเบิลที่ออกแบบไว้ จากอุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการมีชุดอิเล็กโทรดที่ออกแบบมาเพื่อจำลองโคโรนาดีสชาร์จ (ปลายแหลมและระนาบ) และการดีสชาร์จบนพื้นผิว (ทรงกลมและระนาบ) ในการทดสอบการจำลองโคโรนาดีสชาร์จนั้นจะปรับช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดเป็น 30 มิลลิเมตร และ ในการทดสอบการดีสชาร์จบนพื้นผิวจะติดตั้งแผ่นฉนวนขนาดพื้นที่ 400 ตารางมิลลิเมตรหนา 3 มิลลิเมตร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใด รูปที่ 3.7 ก)อิเล็กโทรดระนาบเข็มสำหรับการจำลองโคโรนาดีสชาร์จ ข)อิเล็กโทรดระนาบทรงกลม

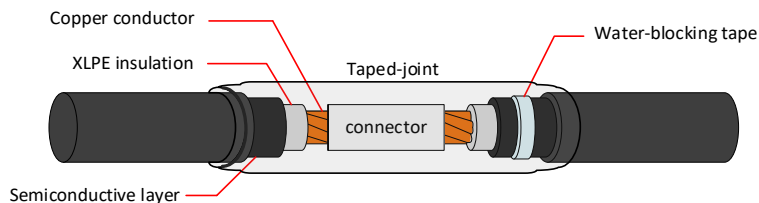
สำหรับการจำลองการดีสชาร์จบนพื้นผิวโดยใช้ฉนวนระหว่างช่องว่าง

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

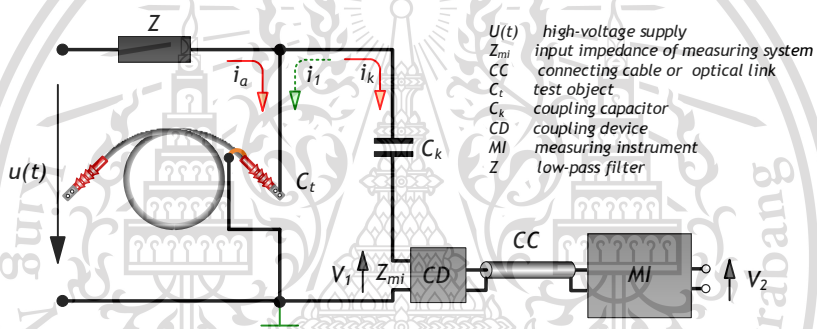
6.สายเคเบิล

ออกแบบไว้โดยการนำเทปปิดกั้นน้ำพันรอบชั้นสารกึ่งตัวนำของสาย XLPE ภายในข้อต่อแบบเทป ระยะห่าง 30 มิลลิเมตร (โดยประมาณ) จากแฉีกเกิดของสายเคเบิล



รูปที่ 3.8 สายเคเบิลที่ได้ออกแบบสำหรับการทดสอบการดิสชาร์จบางส่วน

วงจรทดสอบ



รูปที่ 3.9 วงจรทดสอบการดิสชาร์จบางส่วน

วงจรทดสอบการดิสชาร์จบางส่วนจะมีอุปกรณ์ คือ หม้อแปลงทดสอบ ตัวเก็บประจุ คัปปลิง และอุปกรณ์คัปปลิง โดยที่ระบบวัดมีความถี่ในการวัดเป็น 100 – 400 kHz และหม้อแปลงทดสอบจะต้องมีการต่อวงจรความถี่ต่ำผ่าน เพื่อป้องกันสัญญาณ PD เข้าสู่หม้อแปลงทดสอบ

วิธีการทดลอง

3.3.1 การทดสอบดิสชาร์จบางส่วน แบบ conventional และ non-conventional สำหรับในการทดลองนี้ได้ทำการออกแบบการทดลองเป็น 5 กรณีศึกษา คือ

1. วัดดิสชาร์จบางส่วนกรณีจำลองโคโรนาดิสชาร์จด้านแรงดันสูงดังรูปที่ 3.12
2. วัดดิสชาร์จบางส่วนกรณีจำลองโคโรนาดิสชาร์จด้านแรงดันต่ำดังรูปที่ 3.13
3. วัดดิสชาร์จบางส่วนกรณีจำลองการดิสชาร์จที่ผิวด้านแรงดันสูงดังรูปที่ 3.14
4. วัดดิสชาร์จบางส่วนกรณีจำลองการดิสชาร์จที่ผิวด้านแรงดันต่ำดังรูปที่ 3.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ใช้ภายใน 5. การวัดการดิสชาร์จบางส่วนของสายเคเบิลดังรูปที่ 3.16 ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

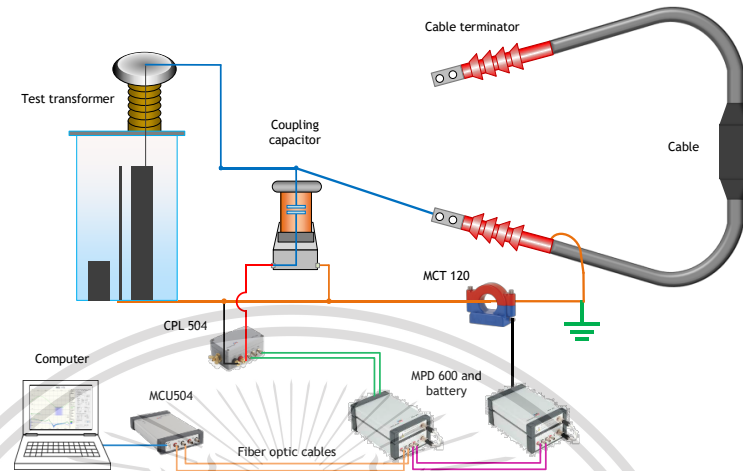
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ขั้นตอนการทดสอบอิเล็กทรอนิกส์โทรดจำลองการเกิดดิซชาร์จบางส่วน และ สายเคเบิล

1) ทำการติดตั้งวัสดุทดสอบและวงจรทดสอบดังรูป 3.10



รูปที่ 3.10 วงจรทดสอบการตรวจวัด PD โดยใช้ C_k และ HFCT



รูปที่ 3.11 การต่อวงจรทดสอบการตรวจวัด PD โดยใช้ C_k และ HFCT

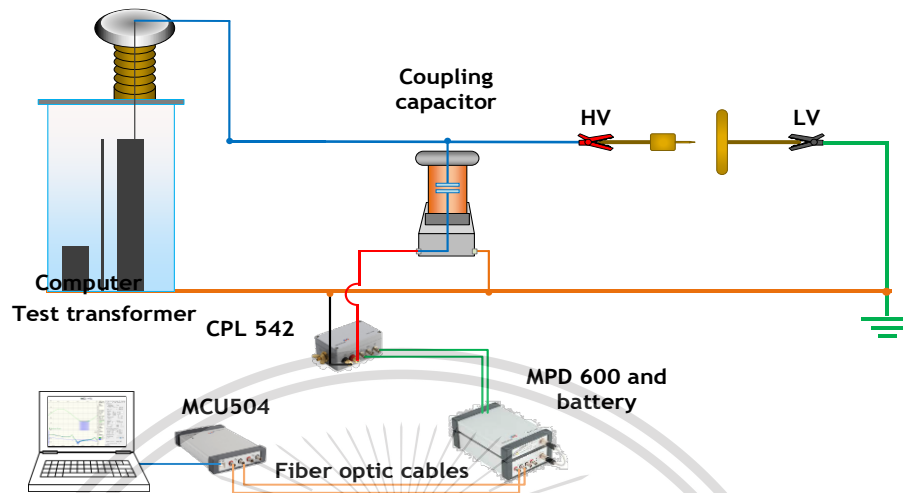
- 2) ทำการสอบเทียบประจุของวงจรทดสอบโดยใช้ CAL 542
- 3) ขึ้นแรงดันพร้อมกับทำการบันทึกค่าประจุจนกระทั่งพบแรงดันที่การดิซชาร์จบางส่วนเริ่มเกิด (PDIV) จากนั้นลดแรงดันลงจนมีค่าเป็นศูนย์
- 4) ทำการทดลองดังข้อ 3 ซ้ำ โดยขึ้นแรงดันแบบแรมพ์พร้อมบันทึกค่าด้วยโปรแกรม MPD จนเห็น PRPD ที่ชัดเจนแล้วคงแรงดันไว้ 1 นาที แล้วลดแรงดันลงจนมีค่าเป็นศูนย์
- 5) ทำการทดลองเช่นเดิมดังข้อ 1-4 กับอิเล็กทรอนิกส์ชนิดอื่น ๆ และสายเคเบิล
- 6) บันทึกผล PRPD เปรียบเทียบกับนระหว่าง conventional และ non-conventional

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษานันทนาการ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

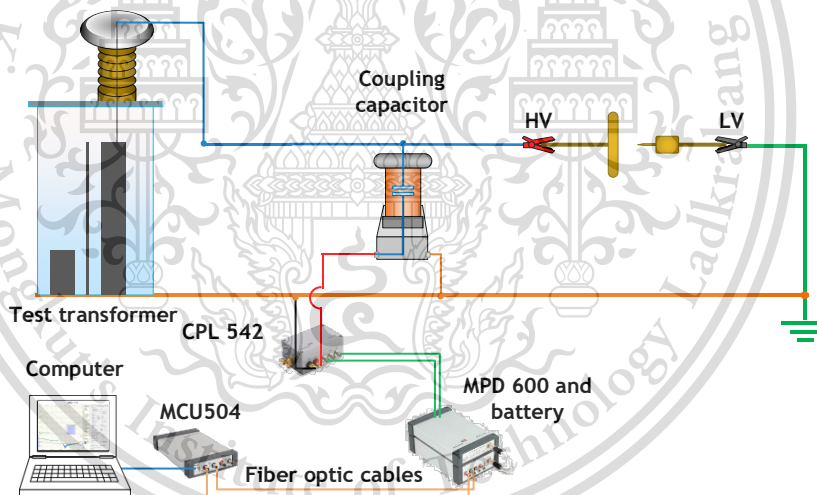
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

วงจรทดสอบกรณีอื่น ๆ



รูปที่ 3.12 วงจรทดสอบการดีสชาร์จบางส่วนกรณีจำลองโคโรนาดีสชาร์จด้านแรงดันสูง

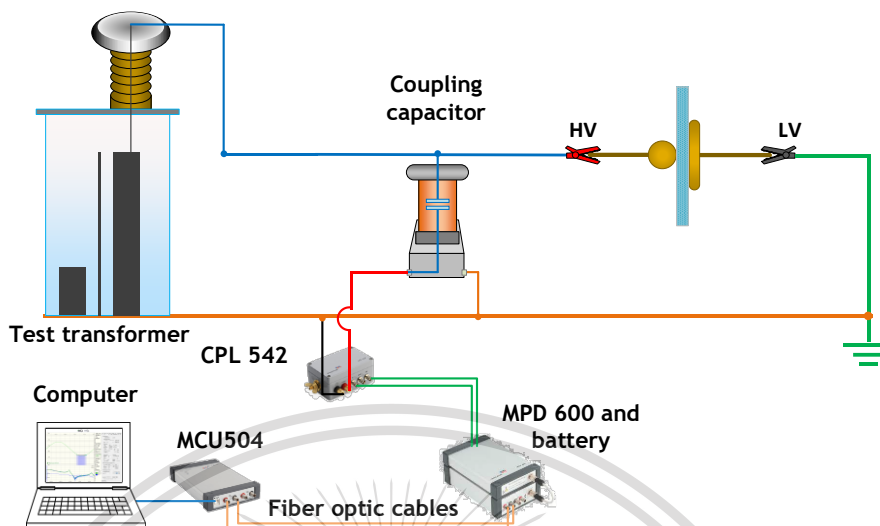


รูปที่ 3.13 วงจรทดสอบการดีสชาร์จบางส่วนกรณีจำลองโคโรนาดีสชาร์จด้านแรงดันต่ำ

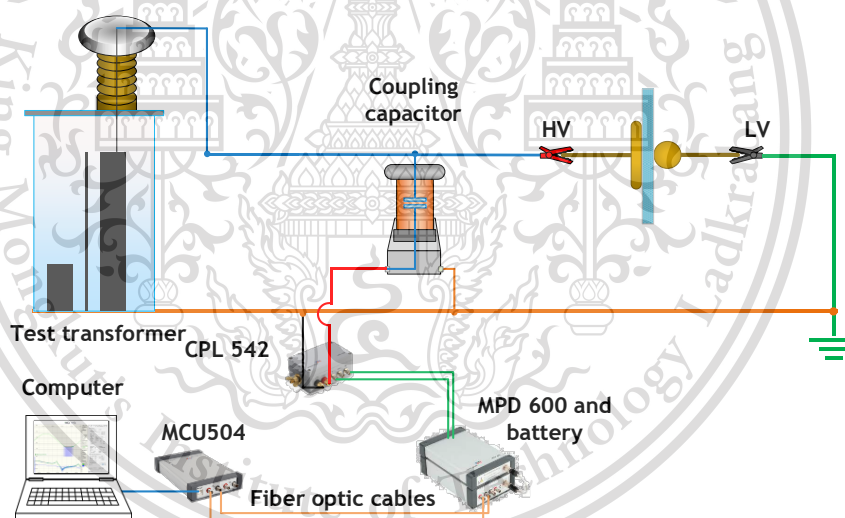
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.14 วงจรทดสอบการดีสชาร์จบางส่วนกรณีจำลองการดีสชาร์จบนม้วนด้านแรงดันสูง

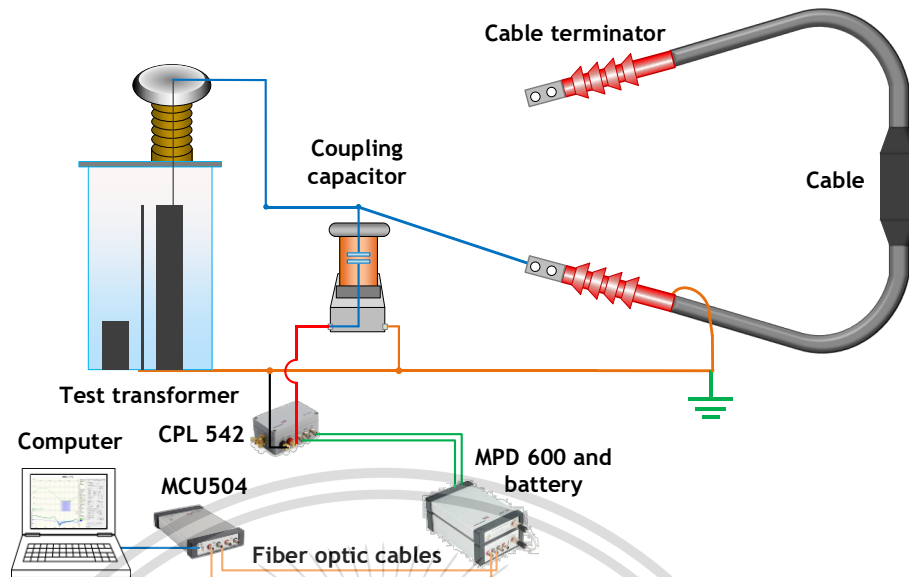


รูปที่ 3.15 วงจรทดสอบการดีสชาร์จบางส่วนกรณีจำลองการดีสชาร์จบนม้วนด้านแรงดันต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

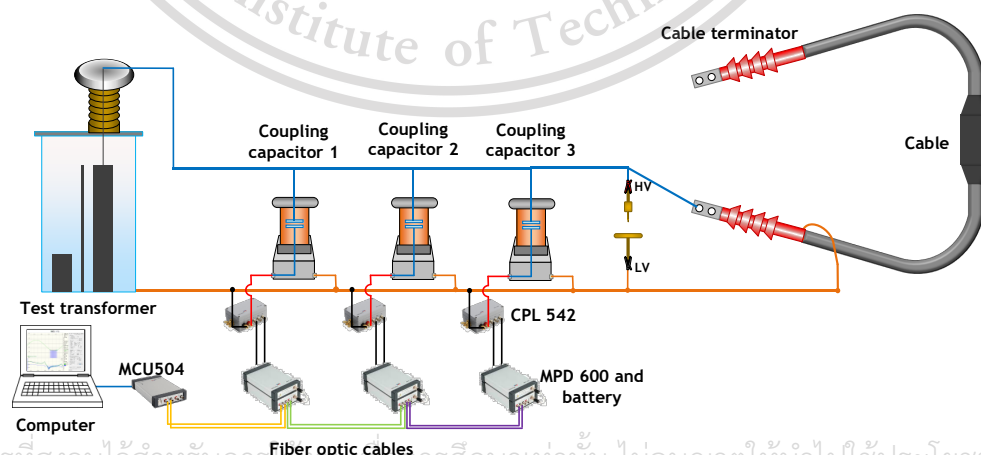
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.16 วงจรทดสอบการดิซชาร์จบางส่วนของสายเคเบิล

หมายเหตุ ในการทดสอบแบบ non-conventional จะทำการเปลี่ยนอุปกรณ์คัปปลิงในแต่ละรูปแบบที่ด้วยหม้อแปลง HFCT โดยทำการตั้งค่าแบนด์วิดท์ของ HFCT เพื่อให้ระบบวัดมีย่านความถี่ในการวัดเป็น 100 – 400 kHz

3.3.2 การทดสอบดิซชาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคการวัดดิซชาร์จบางส่วนแบบหลายช่องทาง (synchronous multi-channel PD measurement) สำหรับการทดสอบนี้เป็นการทดสอบโดยการขนานวัสดุทดสอบเคเบิลกับอิล็กโทรดทั้ง 4 แบบ เพื่อการตรวจสอบว่าการวัด PD สามารถตรวจจับและแยกชนิดของ PD จากแหล่งกำเนิดที่แตกต่างกันได้โดยการกำหนดย่านความถี่ในการวัดด้วยค่าความถี่กลาง (f_{center}) ของแต่ละย่านซึ่งแบ่งชุดการทดสอบออกเป็น 4 ชุด ดังรูปที่ 3.17-3.20

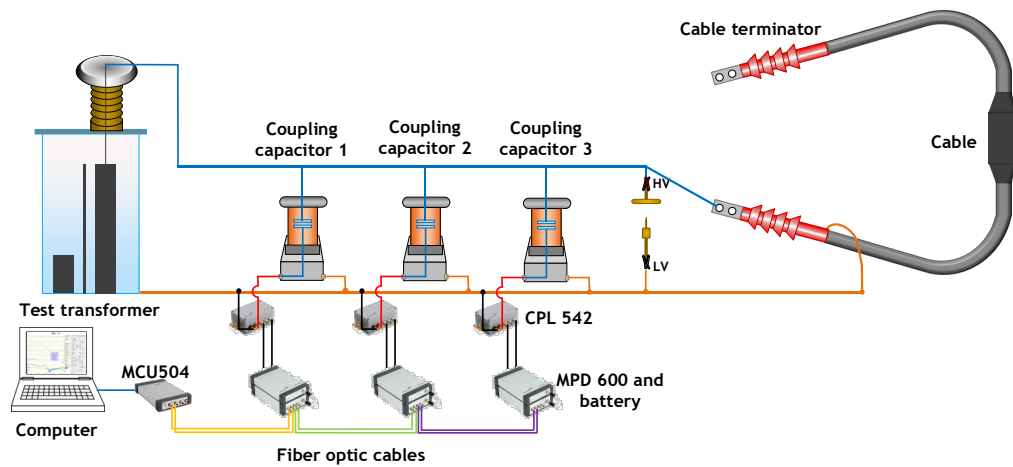


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

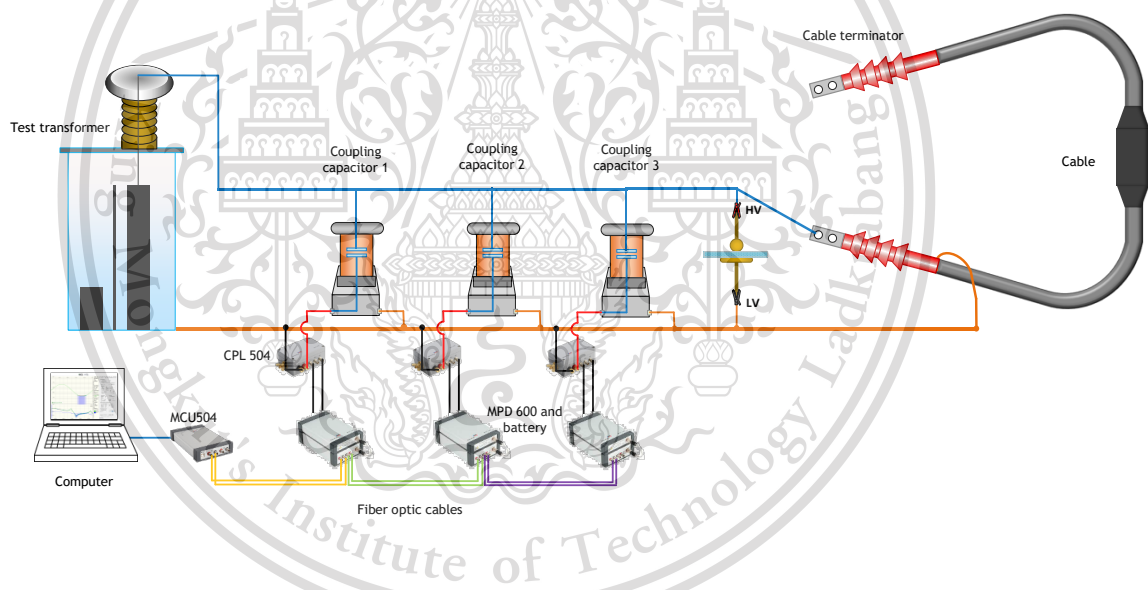
ไม่ว่ากรณีใด รูปที่ 3.17 วงจรทดสอบการดิซชาร์จบางส่วนด้วยเทคนิค Synchronous Multi-channel ที่กรณีสายไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.18 วงจรทดสอบการดีสชาร์จบางส่วนด้วยเทคนิค Synchronous Multi-channel กรณีสายเคเบิลและการจำลองโคโรนาดีสชาร์จด้านแรงดันต่ำ

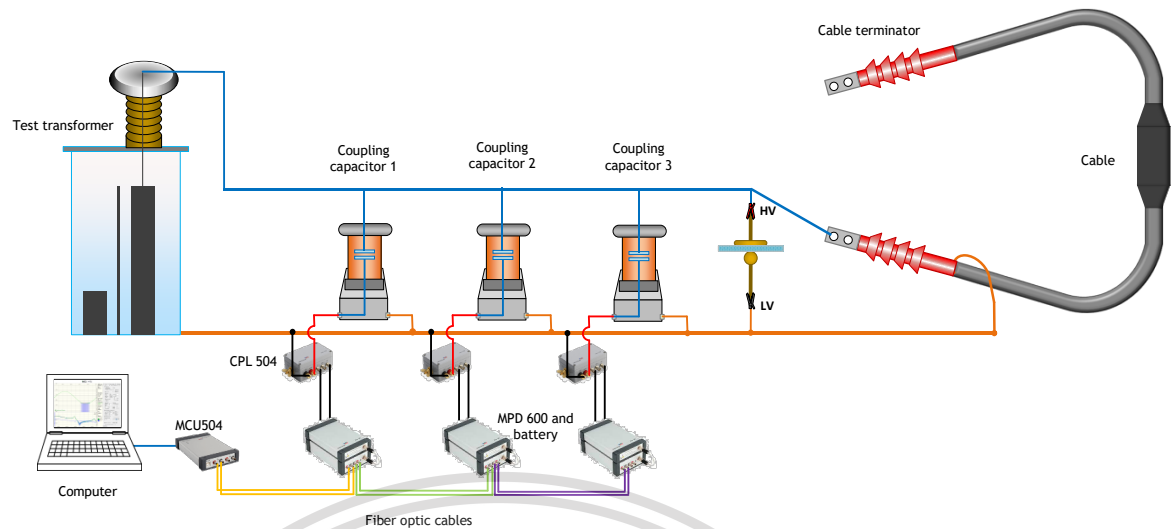


รูปที่ 3.19 วงจรทดสอบการดีสชาร์จบางส่วนด้วยเทคนิค Synchronous Multi-channel กรณีสายเคเบิลและการจำลองการดีสชาร์จบนผิวด้านแรงดันสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.20 วงจรทดสอบการดิสชาร์จบางส่วนด้วยเทคนิค Synchronous Multi-channel กรณีสายเคเบิลและการจำลองการดิสชาร์จบนผิวด้านแรงดันต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 4

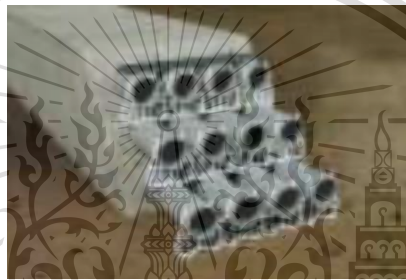
ผลการทดลองและประเมินผล

4.1 แรงดันที่เปลือกของเคเบิลและเทคนิคการแก้ปัญหา

4.1.1 แรงดันที่เปลือกของเคเบิล (cable sheath voltage)

1) การออกแบบระบบสายเคเบิล

จำลองระบบสายเคเบิล 3 ชุดใน duck bank ที่มีขนาดการจัดวางที่แตกต่างกัน ระบบ Transmission Line ใต้ดินระบบหนึ่งประกอบด้วยเคเบิล 3 ชุดวางจรด ดังรูป



รูปที่ 4.1 ตัวอย่าง Duck bank ที่ใช้ทำการติดตั้งจริง [10]

ข้อมูลสายเคเบิลที่นำมาออกแบบ

เคเบิลชุดที่ 1 สายเคเบิลบริษัท CN Cable Group 230 kV underground cable พิกัดกระแส 830 A, 1000 sq.mm ฉนวนXLPE, รัศมีตัวนำ(r_f) รวมทั้งหมด 20.7 mm, รัศมีจนถึงชั้นเปลือกเคเบิล(r_{sh}) 54.7 mm, ความต้านทานของเปลือกเคเบิล (R_{sh}) ตลอดเส้น 0.18 โอห์ม : กำหนดกระแสในเคเบิลดังนี้ 600 620 650 A

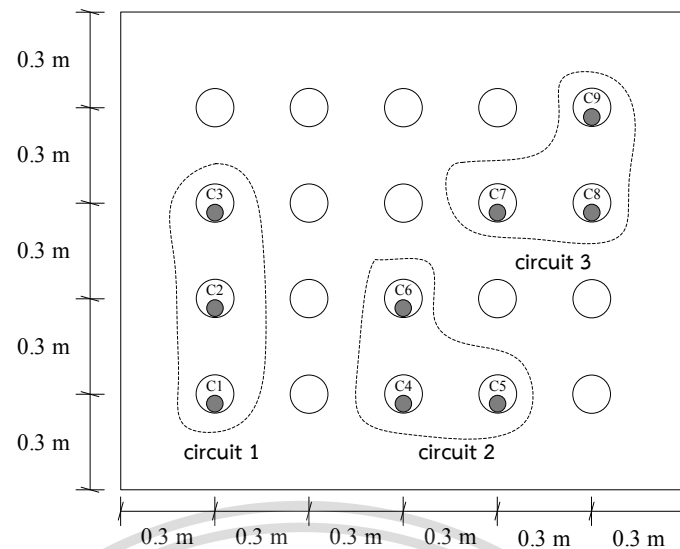
เคเบิลชุดที่ 2 สายเคเบิลบริษัท Thai Yazaki 115 kV underground cable พิกัดกระแส 550 A, 630 sq.mm ฉนวนXLPE, รัศมีตัวนำ(r_f) รวมทั้งหมด 15.2 mm, รัศมีจนถึงชั้นเปลือกเคเบิล (r_{sh}) 40.2 mm, ความต้านทานของเปลือกเคเบิลตลอดเส้น (R_{sh}) 0.3 โอห์มกำหนดกระแสในเคเบิล ดังนี้ 460 420 450 A

เคเบิลชุดที่ 3 สายเคเบิลบริษัท Thai Yazaki 69 kV underground cable พิกัดกระแส 350 A, 400 sq.mm ฉนวนXLPE, รัศมีตัวนำ(r_f) รวมทั้งหมด 11.75 mm, รัศมีจนถึงชั้นเปลือกเคเบิล(r_{sh}) 33 mm ความต้านทานของเปลือกเคเบิล (R_{sh}) ตลอดเส้น 0.3 โอห์ม: กำหนดกระแสในเคเบิลดังนี้ 250 230 260 A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ทางวิชาการเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.2 การจัดวางกลุ่มวงจรถ่ายเพื่อใช้ในการคำนวณ

2) วิธีการคำนวณแรงดัน

1 การนำข้อมูลของเคเบิลทั้งสามชุดเขียนคำสั่งในโปรแกรม Scilab เพื่อให้ข้อมูลอยู่ในรูปของในรูปของ Metric โดยคำสั่งจะแสดงในรูปที่ 4.3

```
//code cable data
r_sh = [54.7;54.7;
54.7;40.2;40.2;40.2;33;33;33]
ri = [20.7;20.7;20.7;15.2;15.2;15.2;11.75;11.75;11.75]
lc = [650;-310-536*%i;-325+563*%i;460;-210-363*%i;-225+390*%i;250;-115-199*%i;-130+225*%i]
f_system = 50
u = 4*%pi*10^-7
s_sh = [0,0.30,0.60,0.60,0.90,0.67,1.08,1.35,1.5;...
0.3,0,0.3,0.67,0.94,0.60,0.95,1.24,1.34;...
0.60,0.30,0,0.85,1.08,0.67,0.90,1.2,1.24;...
0.60,0.67,0.85,0,0.30,0.30,0.67,0.85,1.08;...
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ ซึ่งใช้สำหรับการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำเนื้อหาไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์ได้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 4.1 ผลลัพธ์การคำนวณในโปรแกรม Scilab เมตริกซ์ของรัศมีของตัวนำเคเบิล (แกนกลาง)

Cable no.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R_r	20.7	20.7	20.7	15.2	15.2	15.2	11.75	11.75	11.75

ตารางที่ 4.2 ผลลัพธ์การคำนวณในโปรแกรม Scilab เมตริกซ์ของกระแสในเคเบิลแต่ละเส้น

Cable no.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
I_c	650.0	-310.0 -537.0*%i	-320.0 +554.0*%i	470.0	-240.0 - 416.0*%i	-210.0 +364.0*%i	270.0	-115.0 - 199.0*%i	-125.0 +217.0*%i

ตารางที่ 4.3 ผลลัพธ์การคำนวณในโปรแกรม Scilab เมตริกซ์ของเปลือกโลหะของเคเบิล

Cable no.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
r_{sh}	54.7	54.7	54.7	40.2	40.2	40.2	33.0	33.0	33.0

ตารางที่ 4.4 ผลลัพธ์การคำนวณในโปรแกรม Scilab เมตริกซ์ ของระยะห่างระหว่างเคเบิล

Cable no.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.0	0.3	0.6	0.6	0.9	0.67	1.08	1.35	1.5
2	0.3	0.0	0.3	0.67	0.94	0.6	0.95	1.24	1.34
3	0.6	0.3	0.0	0.85	1.08	0.67	0.9	1.2	1.24
4	0.6	0.67	0.85	0.0	0.3	0.3	0.67	0.85	1.08
5	0.9	0.9	1.08	0.3	0.0	0.42	0.6	0.67	0.95
6	0.67	0.6	0.67	0.3	0.42	0.0	0.42	0.67	0.85
7	1.08	0.95	0.9	0.67	0.6	0.42	0.0	0.3	0.42
8	1.34	1.24	1.2	0.85	0.67	0.67	0.3	0.0	0.3
9	1.5	1.34	1.24	1.08	0.95	0.85	0.42	0.3	0.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

1.2 เขียนคำสั่งในการคำนวณหาความต้านทานเชิงเหนี่ยวนำระหว่างเคเบิล (X_m) ที่แสดงในรูปที่ 4.4

```
X_m = f_system*([log(r_sh(1)/ri(1)),log(s_sh(1,2)/ri(2)),log(s_sh(1,3)/ri(3)),...
log(s_sh(1,4)/ri(4)),log(s_sh(1,5)/ri(5)),log(s_sh(1,6)/ri(6)),...
log(s_sh(1,7)/ri(7)),log(s_sh(1,8)/ri(8)),log(s_sh(1,9)/ri(9));...
log(s_sh(2,1)/ri(1)),log(r_sh(2)/ri(2)),log(s_sh(2,3)/ri(3)),...
log(s_sh(2,4)/ri(4)),log(s_sh(2,5)/ri(5)),log(s_sh(2,6)/ri(6)),...
log(s_sh(2,7)/ri(7)),log(s_sh(2,8)/ri(8)),log(s_sh(2,9)/ri(9));...
log(s_sh(3,1)/ri(1)),log(s_sh(3,2)/ri(2)),log(r_sh(3)/ri(3)),...
log(s_sh(3,4)/ri(4)),log(s_sh(3,5)/ri(5)),log(s_sh(3,6)/ri(6)),...
log(s_sh(3,7)/ri(7)),log(s_sh(3,8)/ri(8)),log(s_sh(3,9)/ri(9));...
log(s_sh(4,1)/ri(1)),log(s_sh(4,2)/ri(2)),log(s_sh(4,3)/ri(3)),...
log(r_sh(4)/ri(4)),log(s_sh(4,5)/ri(5)),log(s_sh(4,6)/ri(6)),...
log(s_sh(4,7)/ri(7)),log(s_sh(4,8)/ri(8)),log(s_sh(4,9)/ri(9));...
log(s_sh(5,1)/ri(1)),log(s_sh(5,2)/ri(2)),log(s_sh(5,3)/ri(3)),...
log(s_sh(5,4)/ri(4)),log(r_sh(5)/ri(5)),log(s_sh(5,6)/ri(6)),...
log(s_sh(5,7)/ri(7)),log(s_sh(5,8)/ri(8)),log(s_sh(5,9)/ri(9));...
log(s_sh(6,1)/ri(1)),log(s_sh(6,2)/ri(2)),log(s_sh(6,3)/ri(3)),...
log(s_sh(6,4)/ri(4)),log(s_sh(6,5)/ri(5)),log(r_sh(6)/ri(6)),...
log(s_sh(6,7)/ri(7)),log(s_sh(6,8)/ri(8)),log(s_sh(6,9)/ri(9));...
log(s_sh(7,1)/ri(1)),log(s_sh(7,2)/ri(2)),log(s_sh(7,3)/ri(3)),...
log(s_sh(7,4)/ri(4)),log(s_sh(7,5)/ri(5)),log(s_sh(7,6)/ri(6)),...
log(r_sh(7)/ri(7)),log(s_sh(7,8)/ri(8)),log(s_sh(7,9)/ri(9));...
log(s_sh(8,1)/ri(1)),log(s_sh(8,2)/ri(2)),log(s_sh(8,3)/ri(3)),...
log(s_sh(8,4)/ri(4)),log(s_sh(8,5)/ri(5)),log(s_sh(8,6)/ri(6)),...
log(s_sh(8,7)/ri(7)),log(r_sh(8)/ri(8)),log(s_sh(8,9)/ri(9));...
log(s_sh(9,1)/ri(1)),log(s_sh(9,2)/ri(2)),log(s_sh(9,3)/ri(3)),...
log(s_sh(9,4)/ri(4)),log(s_sh(9,5)/ri(5)),log(s_sh(9,6)/ri(6)),...
log(s_sh(9,7)/ri(7)),log(s_sh(9,8)/ri(8)),log(r_sh(9)/ri(9))]
```

รูปที่ 4.4 คำสั่งในการคำนวณหาความต้านทานเชิงเหนี่ยวนำระหว่างเคเบิล (X_m) ในโปรแกรม Scilab

ตารางที่ 4.5 ผลการคำนวณหาความต้านทานเชิงเหนี่ยวนำระหว่างเคเบิล (X_m)

Cable no.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	6.105E-5	-2.660E-4	-2.224E-4	-2.030E-4	-1.776E-4	-1.961E-4	-1.499E-4	-1.359E-4	-1.293E-4
2	-2.660E-4	6.105E-5	-2.660E-4	-1.961E-4	-1.748E-4	-2.030E-4	-1.580E-4	-1.412E-4	-1.364E-4
3	-2.224E-4	-2.660E-4	6.105E-5	-1.811E-4	-1.661E-4	-1.961E-4	-1.614E-4	-1.433E-4	-1.412E-4
4	-2.224E-4	-2.155E-4	-2.006E-4	6.110E-5	-2.466E-4	-2.466E-4	-1.799E-4	-1.650E-4	-1.499E-4
5	-1.970E-4	-1.970E-4	-1.855E-4	-2.466E-4	6.110E-5	-2.254E-4	-1.869E-4	-1.799E-4	-1.580E-4
6	-2.155E-4	-2.224E-4	-2.155E-4	-2.466E-4	-2.254E-4	6.110E-5	-2.093E-4	-1.799E-4	-1.650E-4
7	-1.855E-4	-1.936E-4	-1.970E-4	-1.961E-4	-2.030E-4	-2.254E-4	6.488E-5	-2.304E-4	-2.093E-4
8	-1.719E-4	-1.768E-4	-1.789E-4	-1.811E-4	-1.961E-4	-1.961E-4	-2.304E-4	6.488E-5	-2.304E-4
9	-1.649E-4	-1.719E-4	-1.768E-4	-1.661E-4	-1.742E-4	-1.811E-4	-2.093E-4	-2.304E-4	6.488E-5

1.3 คำนวณหาแรงดันที่เปลือกเคเบิลจากสมการ (2.14) โดยใช้คำสั่งตามรูปที่ 4.5

$$E_s = (X_m * \%i) * I_c$$

$$ab_E_s = \text{abs}(E_s)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.5 คำสั่งการคำนวณหาแรงดันที่เปลือกเคเบิลจากสมการในโปรแกรม Scilab

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3) ผลการคำนวณและวิเคราะห์ผล

ตารางที่ 4.6 ผลลัพธ์การคำนวณหาแรงดันที่เปลือกเคเบิลในโปรแกรม Scilab (V)

Cable no.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Sheath Voltage (V)	174.30	220.72	196.83	116.59	144.13	148.13	76.57	68.11	69.50

จากผลการคำนวณจะพบว่าแรงดันที่เปลือกของเคเบิลมีค่า ประมาณ 0.1-0.2 V/m โดย เคเบิลวงจรที่ 1 ที่พิกัด 230 kV มีแรงดัน 0.174- 0.220 V/m เคเบิลวงจรที่ 2 ที่พิกัด 115 kV มีแรงดัน 0.116-0.148 V/m เคเบิลวงจรที่ 3 ที่พิกัด 69 kV มีแรงดัน 0.0681-0.0766 V/m ซึ่งอาจจะมีค่าน้อยแต่ถ้าหากสายเคเบิลมีความยาวมาก ๆ ดังเช่นในกรณีศึกษาที่สายเคเบิลความยาว 1 กิโลเมตรดังนั้นเราจะพบว่าที่ปลายสายจะมีแรงดันสูงถึง 100-200 V ซึ่งมีความอันตรายเป็นอย่างมากต่อผู้ที่สัมผัสหรือสิ่งรอบข้าง และแรงดันที่เปลือกในระดับนี้ยังไม่สามารถยอมรับได้ตามมาตรฐาน IEEE 575

4.1.2 เทคนิคการแก้ปัญหาแรงดันที่เปลือกของสายเคเบิล

จากการทดลองนำระบบสายเคเบิลจากกรณีศึกษาที่ 1 มาคำนวณแรงดัน และ กระแสไฟฟ้าไหลวนที่เปลือกของสายเคเบิลหลังจากทำการต่อ Cross Bounding และทำการต่อกราวด์ที่ต้นทาง และปลายทางด้วย โดยระยะการแบ่ง 3 ส่วน คือ 325 m, 350 m และ 325 m ตามลำดับ ซึ่งปรากฏในรูปที่ 3.1

1) การคำนวณแรงดันและกระแสหลังจาก Cross Bounding

1.1 ทำการเพิ่มคำสั่งข้อมูลในส่วนของความต้านทานที่เปลือก (R_{sh}) เพื่อใช้คำนวณกระแสไหลวน และเพิ่มคำสั่งข้อมูลในส่วน cross bounding coefficient (U1-U3) .ในรูปที่ 4.6

// cable sheath resistance	// cross bounding coefficient for three group cable		
R_sh = [0.18,0,0,0,0,0,0,0;...	U1 = [1,0,0,0,0,0,0,0;...	U2 = [0,1,0,0,0,0,0,0;...	U3 = [0,0,1,0,0,0,0,0;...
0,0,0,0,0,0,0,0;...	0,1,0,0,0,0,0,0;...	0,0,1,0,0,0,0,0;...	1,0,0,0,0,0,0,0;...
0,0,0,0,18,0,0,0,0;...	0,0,1,0,0,0,0,0;...	1,0,0,0,0,0,0,0;...	0,1,0,0,0,0,0,0;...
0,0,0,0,286,0,0,0,0;...	0,0,0,1,0,0,0,0;...	0,0,0,0,1,0,0,0;...	0,0,0,0,1,0,0,0;...
0,0,0,0,0,286,0,0,0;...	0,0,0,0,1,0,0,0;...	0,0,0,0,0,1,0,0;...	0,0,0,1,0,0,0,0;...
0,0,0,0,0,0,286,0,0;...	0,0,0,0,0,1,0,0;...	0,0,0,1,0,0,0,0;...	0,0,0,0,1,0,0,0;...

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ 4.6 การเพิ่มคำสั่งข้อมูล ก) ความต้านทานที่เปลือก (R_{sh}) ข) cross bounding coefficient มาไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

1.2 การต่อ cross boundingและต่อกราวด์ที่ต้นและปลายทางให้กับเคเบิลในกรณีศึกษาที่ 1 สมการที่จะนำมาใช้ คือสมการที่ (2.17) และ (2.18) นำมาสร้างคำสั่งที่ใช้คำนวณแรงดัน 4.6ก) และกระแสไหลวนในรูปที่ 4.6ข) หลังจากเคเบิลถูกตรวจสอบได้แล้ว

ก.

$$E_{s_cross} = \%i * (((325 * U1) + (350 * U2) + (325 * U3)) * (X_m * I_c))$$

$$abs_E_{s_cross} = abs(E_{s_cross})$$

ข.

$$I_{sh_cross} = (((R_{sh}) + (X_m * \%i))^{-1}) * (((325 * U1) + (350 * U2) + (325 * U3)) * (\%i * X_m * I_c))$$

$$abs_I_{sh_cross} = abs(I_{sh_cross})$$

รูปที่ 4.7 คำสั่งที่ใช้คำนวณ ก)แรงดันที่เปลือยกสายเคเบิล ข)กระแสไหลวน

2) ผลการคำนวณหลังจาก Cross Bounding

ตารางที่ 4.7 ผลการคำนวณแรงดันที่เปลือยกของเคเบิลหลังต่อ cross bounding

Cable no.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
แรงดัน (V)	18.0282	18.9290	11.2867	28.7260	30.4078	24.6732	1.2168	2.2496	3.7088

ตารางที่ 4.8 ผลการคำนวณกระแสไหลวนที่เปลือยกของเคเบิลหลังต่อ cross bounding

Cable no.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
กระแสไหลวน (A)	100.3942	105.0810	62.6780	100.4653	106.2738	86.2196	4.4433	7.5259	12.8293

3) เปรียบเทียบผลการทดลอง

ตารางที่ 4.9 แรงดันที่เปลือยกของเคเบิลบริเวณปลาย Duck bank ก่อน cross bounding

Cable no.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
กระแสไหลวน(A)	174.3	220.72	196.83	116.59	144.13	148.13	76.57	68.11	69.50

ตารางที่ 4.10 แรงดันที่เปลือยกของเคเบิลบริเวณปลาย Duck bank หลัง cross bounding

Cable no.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
กระแสไหลวน(A)	18.02	18.92	11.28	28.72	30.40	24.67	1.21	2.24	3.70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากการเปรียบเทียบผลการทดลองในกรณีศึกษาที่ 1 กับ 2 จะพบว่าการต่อแบบ cross bounding ทำให้แรงดันที่เปลือกของเคเบิลลดลงเป็นอย่างมากโดยที่ปลายทางเคเบิลมีแรงดันเพียง 15-20 V ซึ่งมีความอันตรายน้อยลงและส่งผลให้เคเบิลใน Duck bank ชุดนี้ มีแรงดันที่เปลือกที่สามารถยอมรับได้

4.2 การทดสอบด้วยเทคนิค Very Low Frequency (VLF)

จากบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.2 การทดสอบสายเคเบิลใต้ดิน โดยใช้เทคนิค Very Low Frequency (VLF) โดยจะแบ่งการทดสอบออกเป็น 3 ชุด ตามที่ได้ไปทดสอบตามสถานที่จริง ซึ่งผลการทดสอบจะมีทั้งในส่วนของการทดสอบดังนี้

- 1) การทดสอบความต้านทานฉนวน โดยใช้แรงดัน 5000 V_{DC} เพื่อที่จะทดสอบหาค่าความต้านทาน(R) กระแสรั่วไหล(I_{leak}) และค่าคาปาซิแตนซ์(C) เพื่อตรวจสอบเงื่อนไขของสายเคเบิลทั้งก่อนและหลังการทดสอบ VLF Hipot
- 2) การทดสอบการทดสอบแพกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กทริก (tan δ) โดยใช้แรงดันVLF ที่ความถี่ 0.1 Hz เพื่อทำการประเมินสายเคเบิล ดังนี้

4.2.1 ผลการทดสอบชุดที่ 1

1. ผลการทดสอบความต้านทานฉนวนของ (Before & After VLF Hipot)

ตารางที่ 4.11 ผลการทดสอบความต้านทานฉนวน (Before VLF Hipot) ของการทดสอบชุดที่ 1

Insulation Resistance Test at 5,000 Vdc. (Conductor to Shield) Before VLF Hipot											
อุณหภูมิ : 28 °C				ความชื้นสัมพัทธ์: 69 %							
A1,2,3- Shield				B1,2,3 - Shield				C1,2,3 - Shield			
Test Voltage	R (Ω)	I (A)	C (F)	Test Voltage	R (Ω)	I (A)	C (F)	Test Voltage	R (Ω)	I (A)	C (F)
5198	42.5 G	122 n	517 n	5195	155 G	33.6 n	518 n	5196	104 G	50.1 n	518 n

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 4.12 ผลการทดสอบความต้านทานฉนวน (After VLF Hipot) ของการทดสอบชุดที่ 1

Insulation Resistance Test at 5,000 Vdc. (Conductor to Shield) After VLF Hipot											
อุณหภูมิ : 28.8 °C				ความชื้นสัมพัทธ์: 60 %							
A1,2,3 - Shield				B1,2,3 - Shield				C1,2,3 - Shield			
Test Voltage	R (Ω)	I (A)	C (F)	Test Voltage	R (Ω)	I (A)	C (F)	Test Voltage	R (Ω)	I (A)	C (F)
5197	52.0 G	99.9 n	517 n	5195	138 G	37.7 n	514 n	5195	106 G	48.8 n	519 n

2.ผลการทดสอบแฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กทริก(Tan δ)

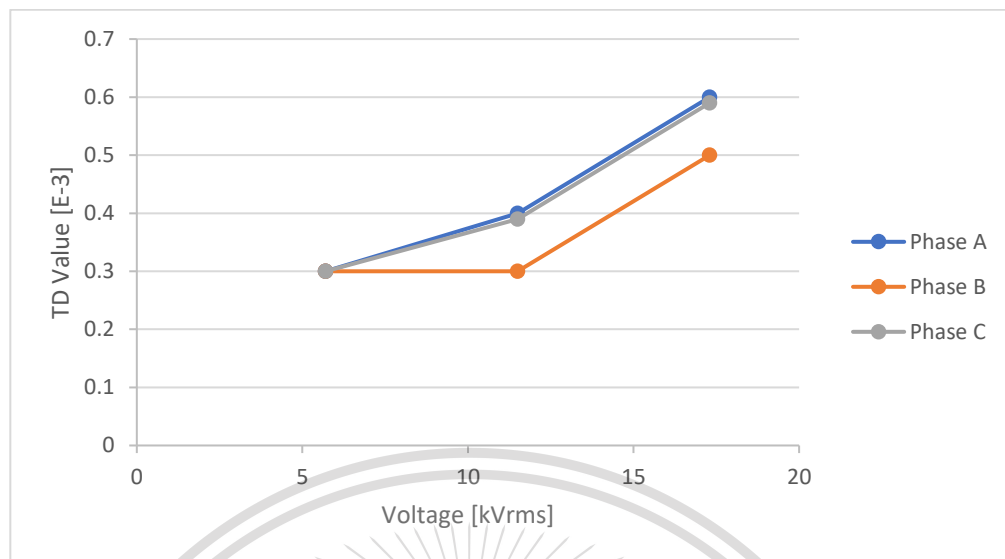
ตารางที่ 4.13 ผลการทดสอบแฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กทริก (Tan δ) ของการทดสอบชุดที่ 1

0.1 Hz. Dissipation factor (Loss Angle)				
Phase A		Ambient Temp: 28 C°		Relative Humidity: 69 %
Summary: 0.1 Hz, 525.8 nF				
Voltage [kVrms]	5.7	11.5	17.3	
TD Value [E-3]	0.3	0.4	0.6	
Std. Dev. [E-3]	0.0	0.0	0.0	
Phase B		Ambient Temp: 28 C°		Relative Humidity: 69 %
Summary: 0.1 Hz, 525.2 nF				
Voltage [kVrms]	5.7	11.5	17.3	
TD Value [E-3]	0.3	0.3	0.5	
Std. Dev. [E-3]	0.0	0.0	0.0	
Phase C		Ambient Temp: 28 C°		Relative Humidity: 69 %
Summary: 0.1 Hz, 527.4 nF				
Voltage [kVrms]	5.7	11.5	17.3	
TD Value [E-3]	0.3	0.4	0.6	
Std. Dev. [E-3]	0.0	0.0	0.0	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ของแรงดันทดสอบกับค่า Tan δ ของสายเคเบิลทั้งสามเฟสของการทดสอบชุดที่ 1

2.1 วิเคราะห์ผลทดสอบแฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กทริก (Tan δ) เปรียบเทียบกับตารางที่ 2.3

2.2 ประเมินผลทดสอบแฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กทริก (Tan δ)

ตารางที่ 4.14 ผลการประเมินของแฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กทริกของการทดสอบชุดที่ 1

Cable Name	Underground Cable Condition		
	ไม่ต้องมีการดำเนินการ	แนะนำให้มีการศึกษาเพิ่มเติม	ต้องมีการดำเนินการ
A	✓		
B	✓		
C	✓		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.2.2 ผลการทดสอบชุดที่ 2

1.ผลการทดสอบการทดสอบความต้านทานฉนวน (Before & After VLF Hipot)

ตารางที่ 4.15 ผลการทดสอบความต้านทานฉนวน (Before VLF Hipot) ของการทดสอบชุดที่ 2

Insulation Resistance Test at 5,000 Vdc. (Conductor to Shield) Before VLF Hipot											
อุณหภูมิ : 25.1 °C				ความชื้นสัมพัทธ์: 49 %							
R - Shield				Y - Shield				B - Shield			
Test Voltage	R (Ω)	I (A)	C (F)	Test Voltage	R (Ω)	I (A)	C (F)	Test Voltage	R (Ω)	I (A)	C (F)
5196	24.6	212	467	5193	864	6.01	445	5195	26.3	198	468
	G	n	n		M	μ	n		G	n	n

ตารางที่ 4.16 ผลการทดสอบความต้านทานฉนวน (After VLF Hipot) ของการทดสอบชุดที่ 2

Insulation Resistance Test at 5,000 Vdc. (Conductor to Shield) After VLF Hipot											
อุณหภูมิ : 25.1 °C				ความชื้นสัมพัทธ์: 49 %							
R - Shield				Y - Shield				B - Shield			
Test Voltage	R (Ω)	I (A)	C (F)	Test Voltage	R (Ω)	I (A)	C (F)	Test Voltage	R (Ω)	I (A)	C (F)
5191	12.7	410	471	5189	495	10.5	444	5194	37.6	138	468 n
	G	n	n		M	μ	n		G	n	n

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

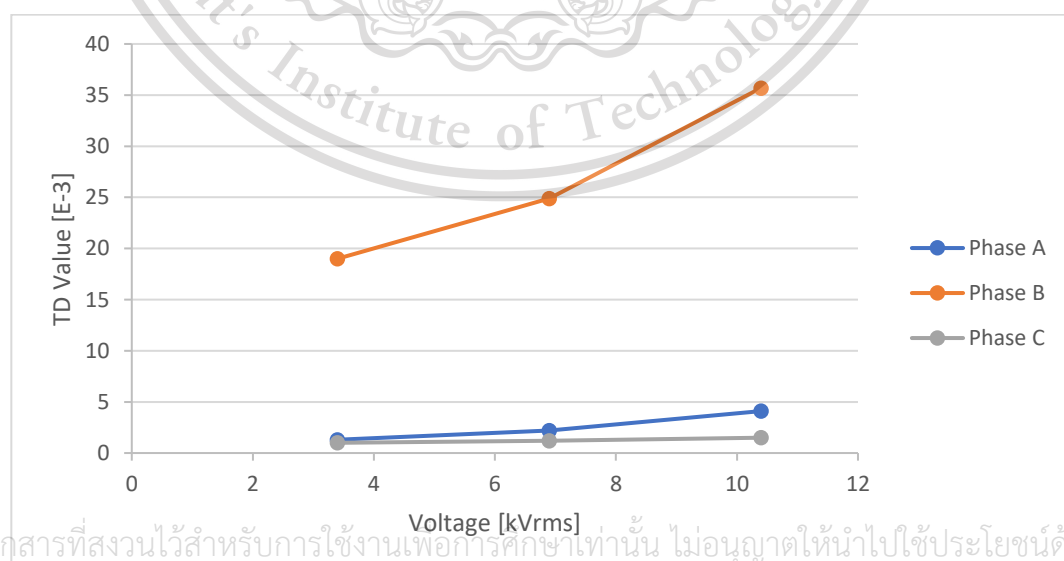
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.ผลการทดสอบแฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กทริก(Tan δ)

ตารางที่ 4.17 ผลการทดสอบแฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กทริก (Tan δ) ของการทดสอบชุดที่ 2

0.1 Hz. Dissipation factor (Loss Angle)			
Phase A	Ambient Temp: 25.1 C [°]	Relative Humidity: 49 %	
Summary: 0.1 Hz, 477 nF			
Voltage [kVrms]	3.4	6.9	10.4
TD Value [E-3]	1.3	2.2	4.1
Std. Dev. [E-3]	0.0	0.1	0.4
Phase B	Ambient Temp: 25.1 C [°]	Relative Humidity: 49 %	
Summary: 0.1 Hz, 449.8 nF			
Voltage [kVrms]	3.4	6.9	10.4
TD Value [E-3]	19.0	24.9	35.7
Std. Dev. [E-3]	0.1	0.3	1.5
Phase C	Ambient Temp: 25.1 C [°]	Relative Humidity: 49 %	
Summary: 0.1 Hz, 475.2 nF			
Voltage [kVrms]	3.4	6.9	10.4
TD Value [E-3]	1.0	1.2	1.5
Std. Dev. [E-3]	0.0	0.0	0.0



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ของแรงดันทดสอบกับค่า Tan δ ของสายเคเบิลทั้งสามเฟสของการ

ทดสอบชุดที่ 2

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

- 2.1 วิเคราะห์ผลทดสอบแฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กทริก (Tan δ) เปรียบเทียบกับตารางที่ 2.3
- 2.2 ประเมินผลทดสอบแฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กทริก (Tan δ)

ตารางที่ 4.18 ผลการประเมินของแฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กทริกของการทดสอบชุดที่ 2

Cable Name	Underground Cable Condition		
	ไม่ต้องมีการดำเนินการ	แนะนำให้มีการศึกษาเพิ่มเติม	ต้องมีการดำเนินการ
R		✓	
Y		✓	
B	✓		

4.2.3 ผลการทดสอบชุดที่ 3

4.4.3A กรณี 1 สายเคเบิลที่ติดตั้งจาก Switchgear ไปยัง Transformer ตัวที่ 1

1.ผลการทดสอบการทดสอบความต้านทานฉนวน (Before & After VLF Hipot)

ตารางที่ 4.19 ผลการทดสอบความต้านทานฉนวน (Before VLF Hipot) ของการทดสอบชุดที่ 3.1

Insulation Resistance Test at 5,000 Vdc. (Conductor to Shield) Before VLF Hipot											
อุณหภูมิ : 24.6 °C				ความชื้นสัมพัทธ์: 47 %							
A - Shield				B - Shield				C - Shield			
Test Voltage	R (Ω)	I (A)	C (F)	Test Voltage	R (Ω)	I (A)	C (F)	Test Voltage	R (Ω)	I (A)	C (F)
5,194	2.29 T	2.27 n	5.7 n	5,194	2.04 T	2.54 n	5.8 n	5,194	2.01 T	2.59 n	5.8 n

ตารางที่ 4.20 ผลการทดสอบความต้านทานฉนวน (After VLF Hipot) ของการทดสอบชุดที่ 3.1

Insulation Resistance Test at 5,000 Vdc. (Conductor to Shield) After VLF Hipot											
อุณหภูมิ : 26.2 °C				ความชื้นสัมพัทธ์: 42 %							
R - Shield				Y - Shield				B - Shield			
Test Voltage	R (Ω)	I (A)	C (F)	Test Voltage	R (Ω)	I (A)	C (F)	Test Voltage	R (Ω)	I (A)	C (F)
5,192	2.94 T	1.77 n	5.8 n	5,191	4.51 T	1.15 n	5.8 n	5,192	3.82 T	1.36 n	5.8 n

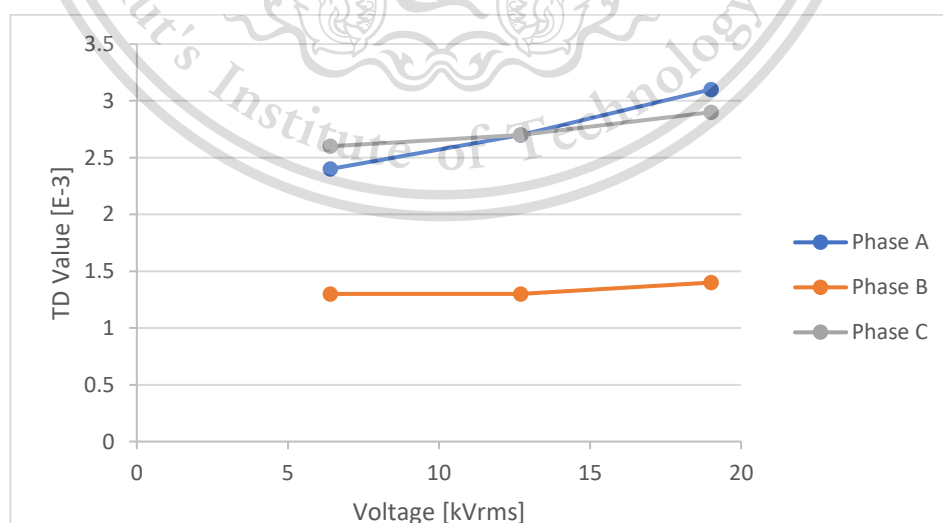
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.ผลการทดสอบแฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กทริก(Tan δ)

ตารางที่ 4.21 การทดสอบแฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กทริก (Tan δ) ของการทดสอบชุดที่ 3.1

0.1 Hz. Dissipation factor (Loss Angle)			
Phase A	Ambient Temp: 24.6 C°	Relative Humidity: 47 %	
Summary: 0.1 Hz, 6.5 nF			
Voltage [kVrms]	6.4	12.7	19.0
TD Value [E-3]	2.4	2.7	3.1
Std. Dev. [E-3]	0.0	0.0	0.0
Phase B	Ambient Temp: 24.6 C°	Relative Humidity: 47 %	
Summary: 0.1 Hz, 6.5 nF			
Voltage [kVrms]	6.4	12.7	19.0
TD Value [E-3]	1.3	1.3	1.4
Std. Dev. [E-3]	0.0	0.0	0.0
Phase C	Ambient Temp: 24.6 C°	Relative Humidity: 47 %	
Summary: 0.1 Hz, 6.5 nF			
Voltage [kVrms]	6.4	12.7	19.0
TD Value [E-3]	2.6	2.7	2.9
Std. Dev. [E-3]	0.0	0.0	0.1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ของแรงดันทดสอบกับค่า Tan δ ของสายเคเบิลทั้งสามเฟสของการ
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
 ทดสอบชุดที่ 3.1

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

- 2.1 วิเคราะห์ผลทดสอบแฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กทริก (Tan δ) เปรียบเทียบกับตารางที่ 2.3
- 2.2 ประเมินผลทดสอบแฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กทริก (Tan δ) ของการทดสอบชุดที่ 3.2

ตารางที่ 4.22 ผลการประเมินของแฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กทริกของการทดสอบชุดที่ 3.1

Cable Name	Underground Cable Condition		
	ไม่ต้องมีการดำเนินการ	แนะนำให้มีการศึกษาเพิ่มเติม	ต้องมีการดำเนินการ
SW-1.3 to TR(1) A	√		
SW-1.3 to TR(1) B	√		
SW-1.3 to TR(1) C	√		

- 4.4.3B กรณี 2 สายเคเบิลที่ติดตั้งจาก Switchgear ไปยัง Transformer ตัวที่ 2
1. ผลการทดสอบความต้านทานฉนวน (Before & After VLF Hipot) ของการทดสอบชุดที่ 3.2

ตารางที่ 4.23 ผลการทดสอบความต้านทานฉนวน (Before VLF Hipot) ของการทดสอบชุดที่ 3.2

Insulation Resistance Test at 5,000 Vdc. (Conductor to Shield) Before VLF Hipot											
อุณหภูมิ : 24.6 °C				ความชื้นสัมพัทธ์: 47 %							
A - Shield				B - Shield				C - Shield			
Test Voltage	R (Ω)	I (A)	C (F)	Test Voltage	R (Ω)	I (A)	C (F)	Test Voltage	R (Ω)	I (A)	C (F)
5,195	2.16 T	2.4 n	5.6 n	5,195	2.1 T	2.47 n	5.6 n	5,194	2.05 T	2.54 n	5.6 n

ตารางที่ 4.24 ผลการทดสอบความต้านทานฉนวน (After VLF Hipot) ของการทดสอบชุดที่ 3.2

Insulation Resistance Test at 5,000 Vdc. (Conductor to Shield) After VLF Hipot											
อุณหภูมิ : 26.3 °C				ความชื้นสัมพัทธ์: 42 %							
R - Shield				Y - Shield				B - Shield			
Test Voltage	R (Ω)	I (A)	C (F)	Test Voltage	R (Ω)	I (A)	C (F)	Test Voltage	R (Ω)	I (A)	C (F)
5,192	2 T	2.59 n	5.6 n	5,192	1.94 T	2.67 n	5.5 n	5,193	1.79 T	2.9 n	5.7 n

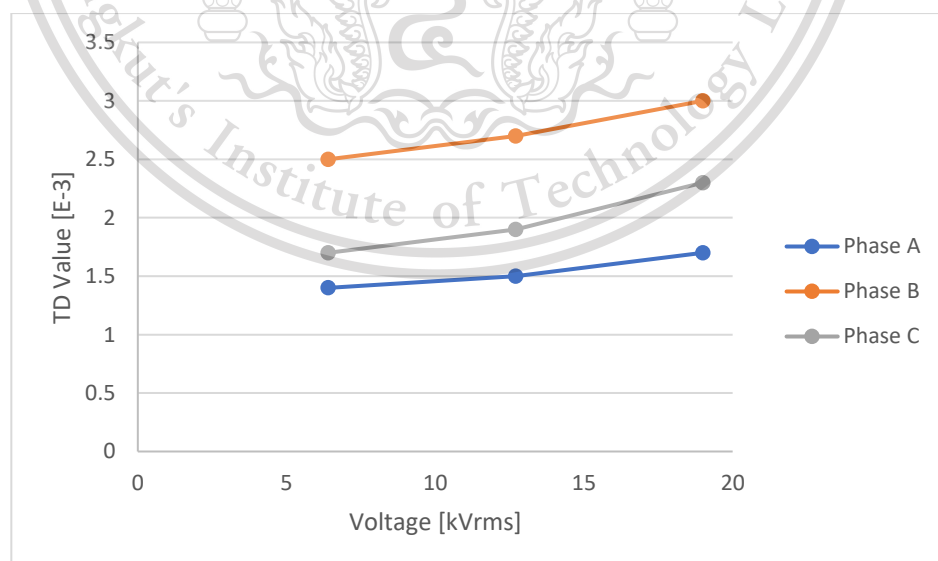
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.ผลการทดสอบแฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กทริก(Tan δ)

ตารางที่ 4.25 ผลการทดสอบแฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กทริก (Tan δ) ของการทดสอบชุดที่ 3.2

0.1 Hz. Dissipation factor (Loss Angle)			
Phase A	Ambient Temp: 24.6 C [°]	Relative Humidity: 47 %	
Summary: 0.1 Hz, 6.2 nF			
Voltage [kVrms]	6.4	12.7	19.0
TD Value [E-3]	1.4	1.5	1.7
Std. Dev. [E-3]	0.0	0.0	0.0
Phase B	Ambient Temp: 24.6 C [°]	Relative Humidity: 47 %	
Summary: 0.1 Hz, 6.3 nF			
Voltage [kVrms]	6.4	12.7	19.0
TD Value [E-3]	2.5	2.7	3.0
Std. Dev. [E-3]	0.0	0.0	0.1
Phase C	Ambient Temp: 24.6 C [°]	Relative Humidity: 47 %	
Summary: 0.1 Hz, 6.3 nF			
Voltage [kVrms]	6.4	12.7	19.0
TD Value [E-3]	1.7	1.9	2.3
Std. Dev. [E-3]	0.0	0.0	0.0



รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ของแรงดันทดสอบกับค่า Tan δ ของสายเคเบิลทั้งสามเฟสของการทดสอบชุดที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

- 2.1 วิเคราะห์ผลทดสอบแฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กทริก (Tan δ) เปรียบเทียบกับตารางที่ 2.3
- 2.2 ประเมินผลทดสอบแฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กทริก (Tan δ) ของการทดสอบชุดที่ 3.2

ตารางที่ 4.26 ผลการประเมินของแฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กทริกของการทดสอบชุดที่ 3.2

Cable Name	Underground Cable Condition		
	ไม่ต้องมีการดำเนินการ	แนะนำให้มีการศึกษาเพิ่มเติม	ต้องมีการดำเนินการ
SW-1.3 to TR(2) A	✓		
SW-1.3 to TR(2) B	✓		
SW-1.3 to TR(2) C	✓		

4.4.3C กรณี 3 สายเคเบิลที่ติดตั้งจาก Switchgear ไปยัง Switchgear

1.ผลการทดสอบการทำ Resistance Test (Before & After VLF Hipot)

ตารางที่ 4.27 แสดงผลการทดสอบ Resistance Test (Before VLF Hipot)

Insulation Resistance Test at 5,000 Vdc. (Conductor to Shield) Before VLF Hipot											
อุณหภูมิ : 26.1 °C ความชื้นสัมพัทธ์: 41 %											
A - Shield				B - Shield				C - Shield			
Test Voltage	R (Ω)	I (A)	C (F)	Test Voltage	R (Ω)	I (A)	C (F)	Test Voltage	R (Ω)	I (A)	C (F)
5,194	1.78 T	2.92 n	5.1 n	5,194	2.1 T	2.47 n	5.1 n	5,194	2.27 T	2.29 n	5 n

ตารางที่ 4.28 แสดงผลการทดสอบ Resistance Test (After VLF Hipot)

Insulation Resistance Test at 5,000 Vdc. (Conductor to Shield) After VLF Hipot											
อุณหภูมิ : 26.3 °C ความชื้นสัมพัทธ์: 42 %											
A - Shield				B - Shield				C - Shield			
Test Voltage	R (Ω)	I (A)	C (F)	Test Voltage	R (Ω)	I (A)	C (F)	Test Voltage	R (Ω)	I (A)	C (F)
5,193	2.25 T	2.31 n	5 n	5,192	2.98 T	1.74 n	5.1 n	5,191	3.37 T	1.54 n	5 n

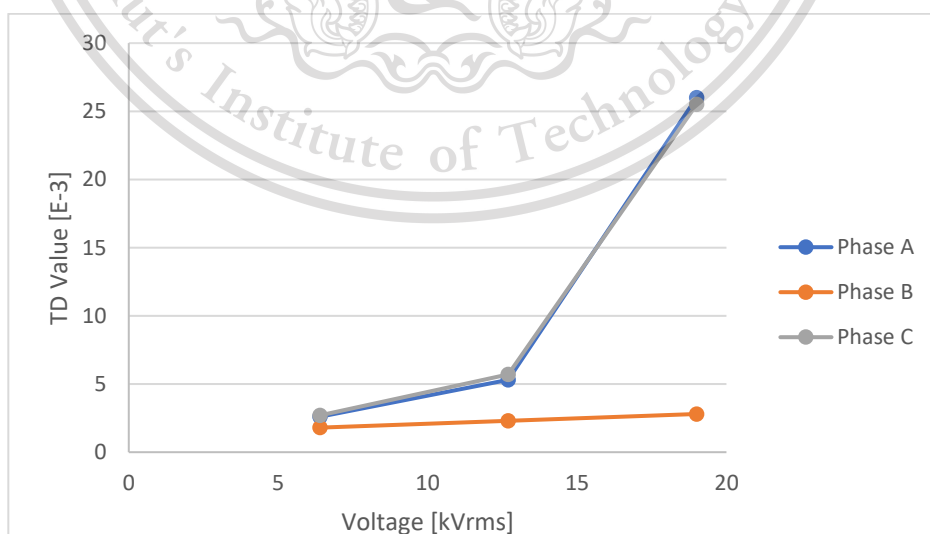
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.ผลการทดสอบแฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กทริก (Tan δ)

ตารางที่ 4.29 แสดงผลการทดสอบแฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กทริก (Tan δ)

0.1 Hz. Dissipation factor (Loss Angle)			
Phase A	Ambient Temp: 26.1 C °	Relative Humidity: 41 %	
Summary: 0.1 Hz, 2.4 nF			
Voltage [kVrms]	6.4	12.7	19.0
TD Value [E-3]	2.6	5.3	26
Std. Dev. [E-3]	0.1	0.1	0.2
Phase B	Ambient Temp: 26.1 C °	Relative Humidity: 41 %	
Summary: 0.1 Hz, 2.3 nF			
Voltage [kVrms]	6.4	12.7	19.0
TD Value [E-3]	1.8	2.3	2.8
Std. Dev. [E-3]	0.0	0.1	0.1
Phase C	Ambient Temp: 26.1 C °	Relative Humidity: 41 %	
Summary: 0.1 Hz, 2.4 nF			
Voltage [kVrms]	6.4	12.7	19.0
TD Value [E-3]	2.7	5.7	25.5
Std. Dev. [E-3]	0.1	0.3	0.7



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ของแรงดันทดสอบกับค่า Tan δ ของสายเคเบิลทั้งสามเฟสของการ
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากมีการนำไปใช้
 ทดสอบชุดที่ 3.3

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

- 2.1 วิเคราะห์ผลทดสอบแฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กทริก (Tan δ) เปรียบเทียบกับตารางที่ 2.3
- 2.2 ประเมินผลทดสอบแฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กทริก (Tan δ) ของการทดสอบชุดที่ 3.3

ตารางที่ 4.30 ผลการประเมินของแฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กทริกของการทดสอบชุดที่ 3.3

Cable Name	Underground Cable Condition		
	ไม่ต้องมีการดำเนินการ	แนะนำให้มีการศึกษาเพิ่มเติม	ต้องมีการดำเนินการ
SW-1.3 to SW-1.2A		✓	
SW-1.3 to SW-1.2B		✓	
SW-1.3 to SW-1.2C		✓	

4.3 เทคนิคการวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วน

สำหรับผลการทดสอบดิสชาร์จบางส่วน จะแบ่งผลการทดสอบออกเป็น 2 แบบ คือ

1. ผลการทดสอบดิสชาร์จบางส่วน แบบ conventional และ non- conventional (ตามหัวข้อ 4.3.1) และ 2. ผลการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคการแยกการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (synchronous multi-channel PD measurement) (ตามหัวข้อ 4.3.2)

4.3.1 ผลการทดลองการวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วน

1) แบบ conventional

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 4.31 ผลการทดสอบอิเล็กทรอนิกส์กำลังการเกิดดิสชาร์จบางส่วน แบบ conventional

อิเล็กทรอนิกส์	Phase-resolved Partial Discharge (PRPD)	ค่าที่บันทึก		
จำลองโคโรนา ดิสชาร์จด้าน แรงดันสูง		PDIV	V_{rms} (kV)	4.32
			Q_{IEC} (pC)	3.38
		PDEV	V_{rms} (kV)	3.54
			Q_{IEC} (pC)	0.98
		Maximum	V_{rms} (kV)	10.30
			Q_{IEC} (pC)	934.9
จำลองโคโรนา ดิสชาร์จด้าน แรงดันต่ำ		PDIV	V_{rms} (kV)	10.73
			Q_{IEC} (pC)	2.67
		PDEV	V_{rms} (kV)	10.14
			Q_{IEC} (pC)	0.89
		Maximum	V_{rms} (kV)	12.33
			Q_{IEC} (pC)	2273
จำลองดิสชาร์จ บนผิวด้าน แรงดันสูง		PDIV	V_{rms} (kV)	2.24
			Q_{IEC} (pC)	6.55
		PDEV	V_{rms} (kV)	1.312
			Q_{IEC} (pC)	0.96
		Maximum	V_{rms} (kV)	9.943
			Q_{IEC} (pC)	37,860
จำลองดิสชาร์จ บนผิวด้าน แรงดันต่ำ		PDIV	V_{rms} (kV)	2.24
			Q_{IEC} (pC)	9.24
		PDEV	V_{rms} (kV)	0.460
			Q_{IEC} (pC)	1.50
		Maximum	V_{rms} (kV)	10.87
			Q_{IEC} (pC)	52,190

ตารางที่ 4.32 ผลการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนของสายเคเบิล แบบ conventional

Phase-resolved Partial Discharge (PRPD)	ค่าที่บันทึก		
	PDIV	V_{rms} (kV)	10.90
		Q_{IEC} (pC)	4.62
	PDEV	V_{rms} (kV)	9.88
		Q_{IEC} (pC)	0.80
	Maximum	V_{rms} (kV)	13.38
		Q_{IEC} (pC)	759.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2) แบบ non-conventional

ตารางที่ 4.33 ผลการทดสอบอิเล็กทรอนิกส์โทรดจำลองการเกิดดิสชาร์จบางส่วนโดยการวัดแบบ non-conventional วัดโดยการแทนที่อุปกรณ์คัปปลิงด้วย HFCT

อิเล็กทรอนิกส์โทรด	Phase-resolved Partial Discharge (PRPD)	ค่าที่บันทึก		
จำลองโคโรนา ดิสชาร์จด้าน แรงดันสูง		PDIV	V _{rms} (kV)	9.66
			Q _{IEC} (pC)	644.3
		PDEV	V _{rms} (kV)	4.04
			Q _{IEC} (pC)	140.8
		Maximum	V _{rms} (kV)	10.27
			Q _{IEC} (pC)	1100
จำลองโคโรนา ดิสชาร์จด้าน แรงดันต่ำ		PDIV	V _{rms} (kV)	10.67
			Q _{IEC} (pC)	694.7
		PDEV	V _{rms} (kV)	4.74
			Q _{IEC} (pC)	7.73
		Maximum	V _{rms} (kV)	12.36
			Q _{IEC} (pC)	983
จำลองดิสชาร์จ บนผิวด้าน แรงดันสูง		PDIV	V _{rms} (kV)	2.82
			Q _{IEC} (pC)	2050
		PDEV	V _{rms} (kV)	0.55
			Q _{IEC} (pC)	7.26
		Maximum	V _{rms} (kV)	9.95
			Q _{IEC} (pC)	33500
จำลองดิสชาร์จ บนผิวด้าน แรงดันต่ำ		PDIV	V _{rms} (kV)	2.94
			Q _{IEC} (pC)	235.6
		PDEV	V _{rms} (kV)	0.56
			Q _{IEC} (pC)	59.76
		Maximum	V _{rms} (kV)	10.06
			Q _{IEC} (pC)	26300

ตารางที่ 4.34 ผลการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนของสายเคเบิล แบบ non-conventional วัดโดยการแทนที่อุปกรณ์คัปปลิงด้วย HFCT

Phase-resolved Partial Discharge (PRPD)	ค่าที่บันทึก		
	PDIV	V _{rms} (kV)	11.98
		Q _{IEC} (pC)	317.6
	PDEV	V _{rms} (kV)	8.30
		Q _{IEC} (pC)	5.79
	Maximum	V _{rms} (kV)	14.21
		Q _{IEC} (pC)	642.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่สำหรับการศึกษาและการวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ใช้เพื่อวัตถุประสงค์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น หากมีข้อผิดพลาดประการใด ผู้จัดทำขออภัยไว้ ณ ที่นี้ และขอสงวนสิทธิ์ในสิ่งที่ปรากฏ

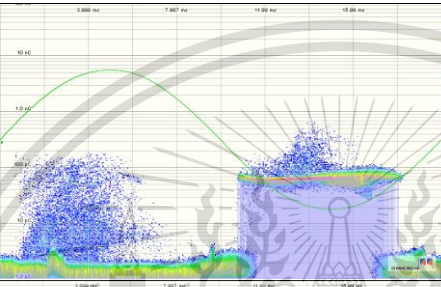
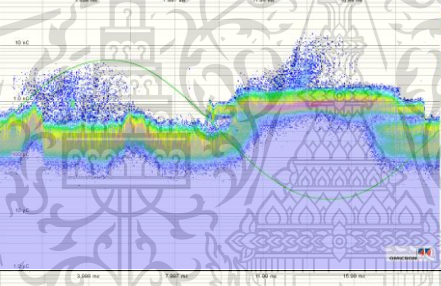
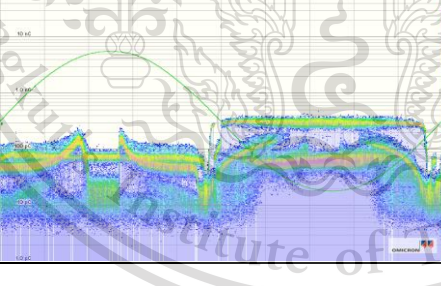
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.3.2 ผลการทดลองการวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนด้วยเทคนิค Synchronous Multi-Channel PD Measurement

1) กรณีที่ 1 เคเบิลตัวอย่างเปรียบเทียบกับชุดอิเล็กทรอนิกส์จำลองโคโรนาดิสชาร์จด้านแรงดันสูง

ตารางที่ 4.35 ผลการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนด้วยเทคนิค Synchronous Multi-channel กรณีที่ 1 เคเบิลตัวอย่างเปรียบเทียบกับชุดอิเล็กทรอนิกส์จำลองโคโรนาดิสชาร์จด้านแรงดันสูง โดยกำหนด f_{center} ของอุปกรณ์คัปปลิงทั้งสามตัวคือ $f_{c1} = 250$ kHz, $f_{c2} = 1.66$ MHz และ $f_{c3} = 4.38$ MHz

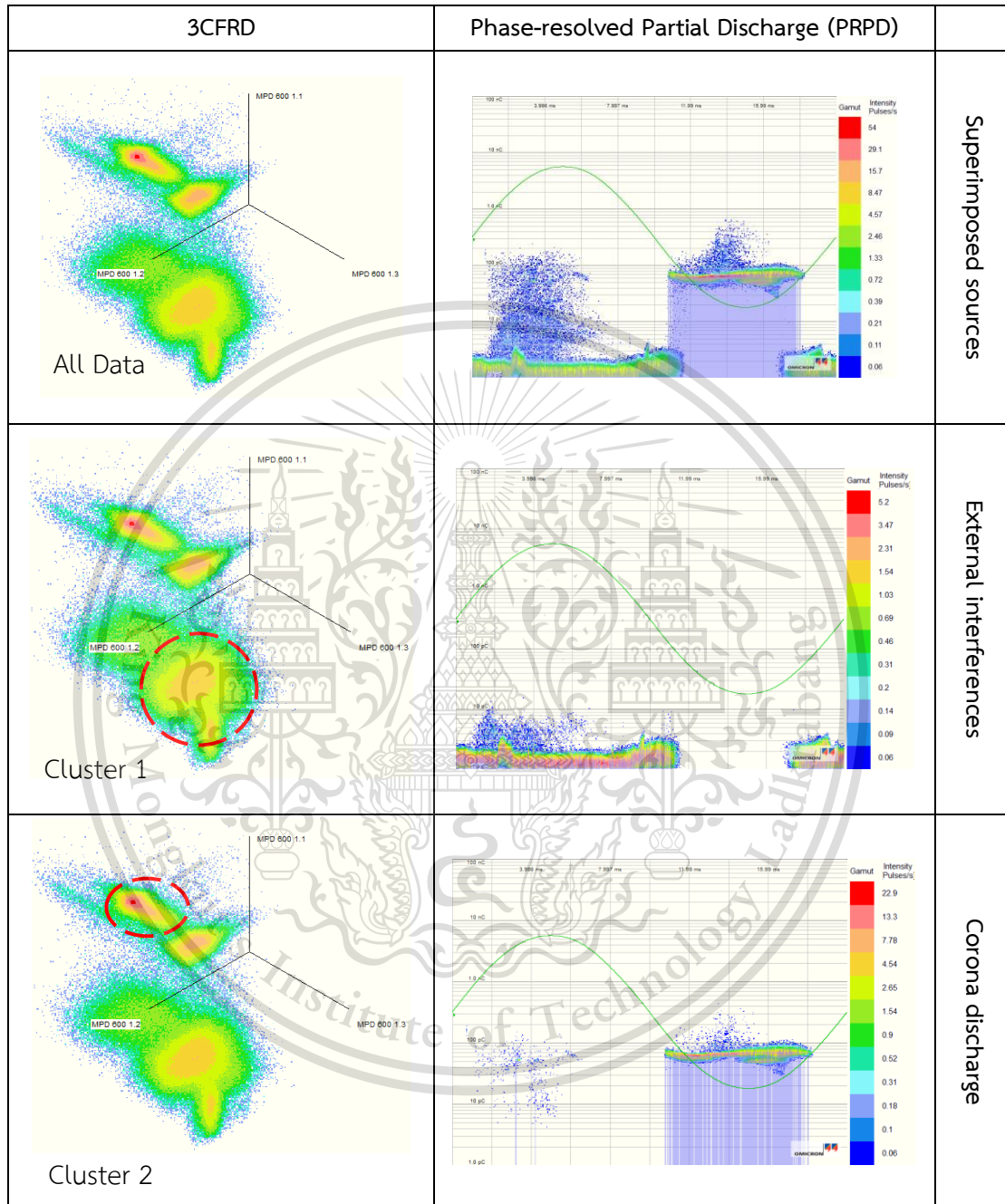
f_{center}	Phase-resolved Partial Discharge (PRPD)	ค่าที่บันทึก		
250 kHz		PDIV	V_{rms} (kV)	8.45
			Q_{IEC} (pC)	100.4
		PDEV	V_{rms} (kV)	-
			Q_{IEC} (pC)	-
		Maximum	V_{rms} (kV)	14.03
			Q_{IEC} (pC)	346.2
1.66 MHz		PDIV	V_{rms} (kV)	8.97
			Q_{IEC} (pC)	94.78
		PDEV	V_{rms} (kV)	-
			Q_{IEC} (pC)	-
		Maximum	V_{rms} (kV)	14.03
			Q_{IEC} (pC)	114
4.38 MHz		PDIV	V_{rms} (kV)	1.053
			Q_{IEC} (pC)	20.18
		PDEV	V_{rms} (kV)	-
			Q_{IEC} (pC)	-
		Maximum	V_{rms} (kV)	14.03
			Q_{IEC} (pC)	30.19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 4.36 แผนภาพการแยกชนิดของดิสชาร์จบางส่วน (CFRD) จากการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนด้วยเทคนิค Synchronous Multi-channel กรณีที่ 1 เคเบิลตัวอย่างเปรียบเทียบกับชุดอิเล็กทรอนิกส์จำลองโคโรนาดิสชาร์จด้านแรงดันสูง

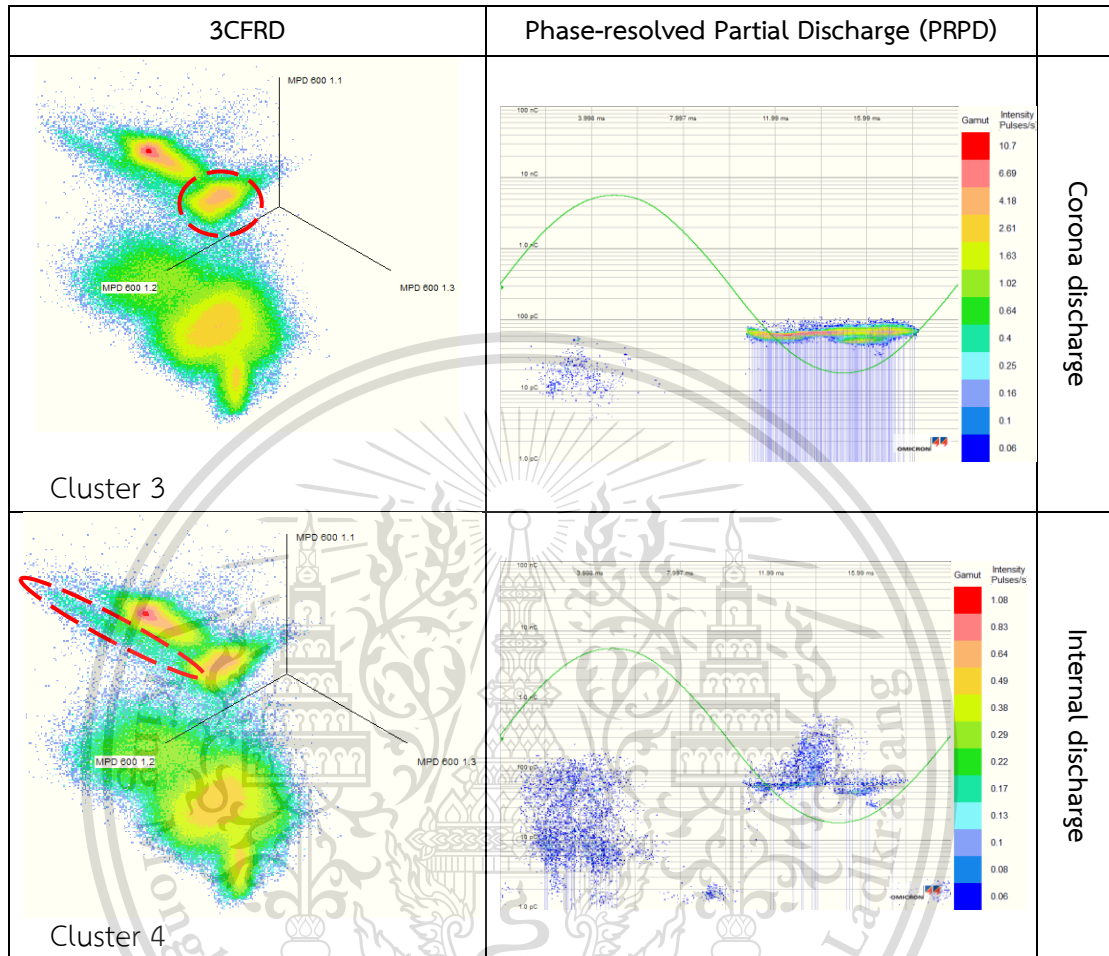


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 4.36 (ต่อ) แผนภาพการแยกชนิดของดิสชาร์จบางส่วน (CFRD) จากการทดสอบ ดิสชาร์จบางส่วนด้วยเทคนิค Synchronous Multi-channel กรณีที่ 1 เคเบิลตัวอย่าง เปรียบเทียบกับชุดอิเล็กทรอนิกส์จำลองโคโรนาดิสชาร์จด้านแรงดันสูง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2) กรณีที่ 2 เคเบิลตัวอย่างเปรียบเทียบกับชุดอิเล็กทรอนิกส์จำลองโคโรนาดีสชาร์จด้านแรงดันต่ำ

ตารางที่ 4.37 ผลการทดสอบดีสชาร์จบางส่วนด้วยเทคนิค Synchronous Multi-channel กรณีที่ 2 เคเบิลตัวอย่างเปรียบเทียบกับชุดอิเล็กทรอนิกส์จำลองโคโรนาดีสชาร์จด้านแรงดันต่ำ โดยกำหนด f_{center} ของอุปกรณ์คัปปลิงทั้งสามตัวคือ $f_{c1} = 250$ kHz, $f_{c2} = 1.66$ MHz และ $f_{c3} = 4.38$ MHz

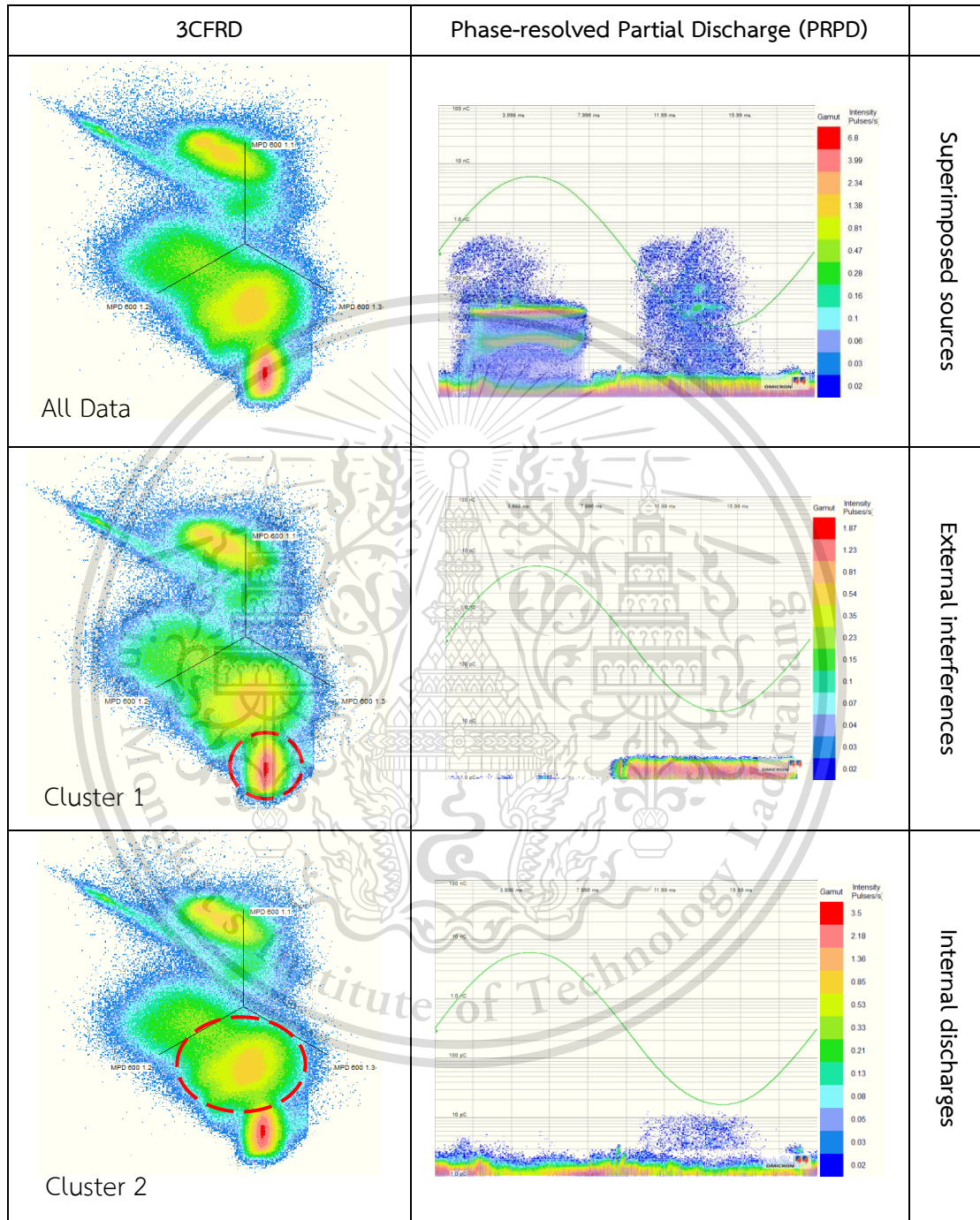
f_{center}	Phase-resolved Partial Discharge (PRPD)	ค่าที่บันทึก		
250 kHz		PDIV	V_{rms} (kV)	13.46
			Q_{IEC} (pC)	152.4
		PDEV	V_{rms} (kV)	-
			Q_{IEC} (pC)	-
		Maximum	V_{rms} (kV)	14.67
			Q_{IEC} (pC)	609.2
1.66 MHz		PDIV	V_{rms} (kV)	0.523
			Q_{IEC} (pC)	1010
		PDEV	V_{rms} (kV)	-
			Q_{IEC} (pC)	-
		Maximum	V_{rms} (kV)	14.67
			Q_{IEC} (pC)	22300
4.38 MHz		PDIV	V_{rms} (kV)	0.523
			Q_{IEC} (pC)	374.5
		PDEV	V_{rms} (kV)	-
			Q_{IEC} (pC)	-
		Maximum	V_{rms} (kV)	14.67
			Q_{IEC} (pC)	419.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 4.38 แผนภาพการแยกชนิดของดิสชาร์จบางส่วน (CFRD) จากการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนด้วยเทคนิค Synchronous Multi-channel กรณีที่ 2 เคเบิลตัวอย่างเปรียบเทียบกับชุดอิเล็กทรอนิกส์จำลองโคโรนาดิสชาร์จด้านแรงดันต่ำ

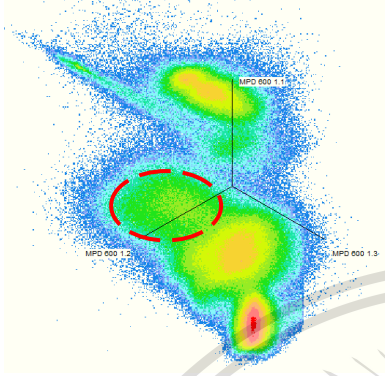
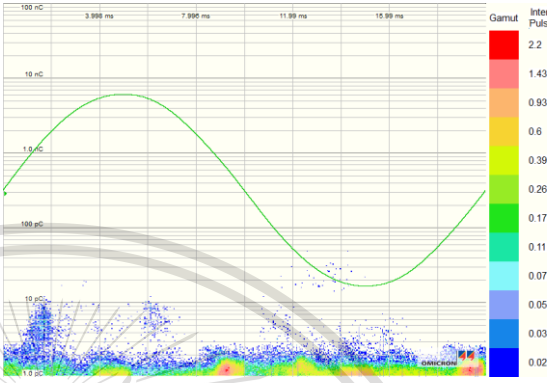
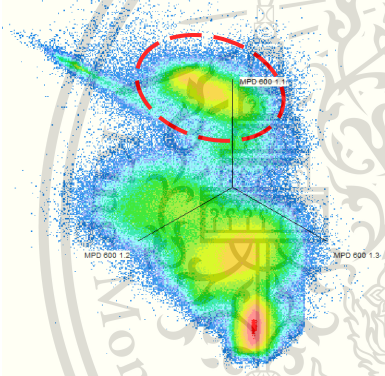
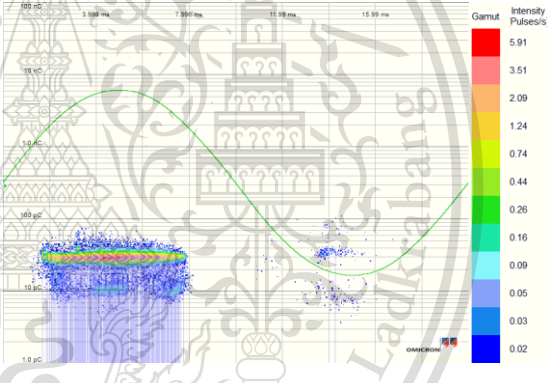
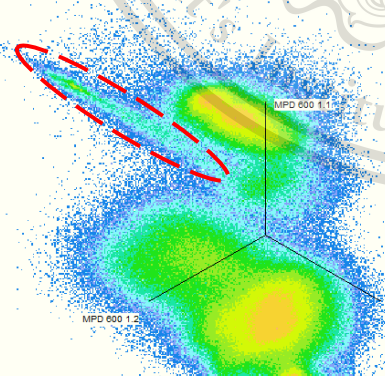
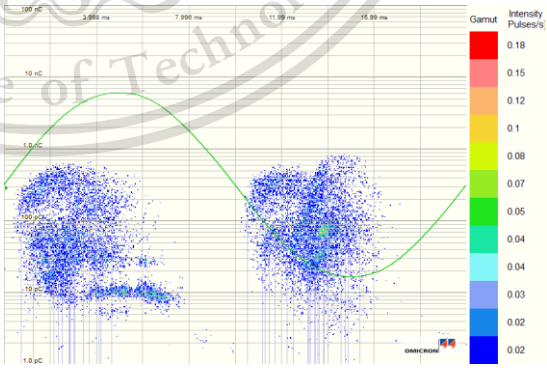


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 4.38 (ต่อ) แผนภาพการแยกชนิดของดิสชาร์จบางส่วน (CFRD) จากการทดสอบ ดิสชาร์จบางส่วนด้วยเทคนิค Synchronous Multi-channel กรณีที่ 2 เคเบิลตัวอย่าง เปรียบเทียบกับชุดอิเล็กทรอนิกส์จำลองโคโรนาดิสชาร์จด้านแรงดันต่ำ

3CFRD	Phase-resolved Partial Discharge (PRPD)	
 <p>Cluster 3</p>		<p>External interferences</p>
 <p>Cluster 4</p>		<p>Corona discharge</p>
 <p>Cluster 5</p>		<p>Internal discharge</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3) กรณีที่ 3 เคเบิลตัวอย่างเปรียบเทียบกับชุดอิเล็กทรอนิกส์จำลองดิซชาร์จบนผิว
ด้านแรงดันสูง

ตารางที่ 4.39 ผลการทดสอบดิซชาร์จบางส่วนด้วยเทคนิค Synchronous Multi-channel กรณี
ที่ 3 เคเบิลตัวอย่างเปรียบเทียบกับชุดอิเล็กทรอนิกส์จำลองดิซชาร์จบนผิวด้านแรงดันสูง โดยกำหนด
 f_{center} ของอุปกรณ์คัปปลิงทั้งสามตัวคือ $f_{c1} = 400$ kHz, $f_{c2} = 10$ MHz และ $f_{c3} = 15$ MHz

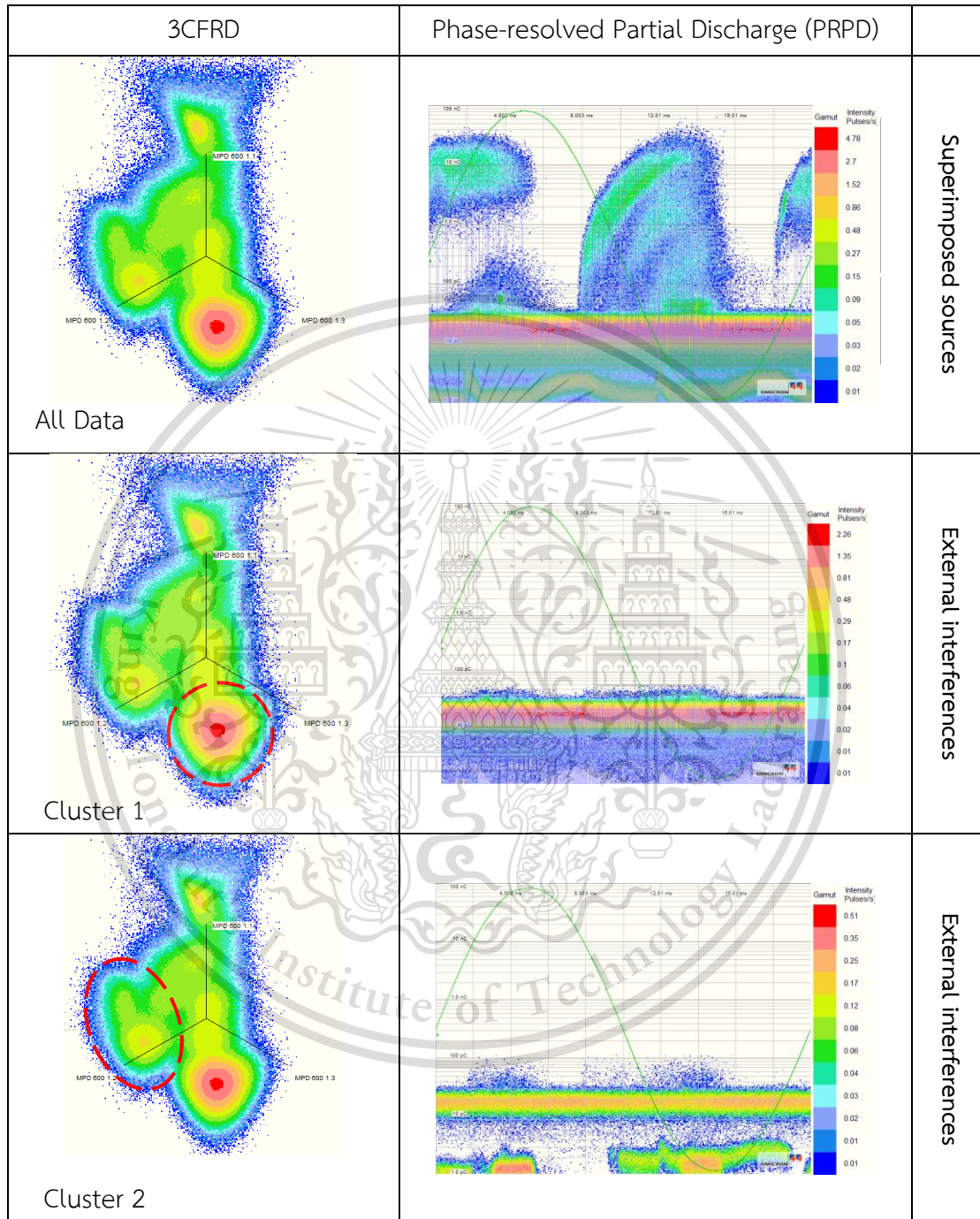
f_{center}	Phase-resolved Partial Discharge (PRPD)	ค่าที่บันทึก		
400 kHz		PDIV	V_{rms} (kV)	4.49
			Q_{IEC} (pC)	1395
		PDEV	V_{rms} (kV)	-
			Q_{IEC} (pC)	-
		Maximum	V_{rms} (kV)	13.87
			Q_{IEC} (pC)	28020
10 MHz		PDIV	V_{rms} (kV)	4.68
			Q_{IEC} (pC)	2065
		PDEV	V_{rms} (kV)	-
			Q_{IEC} (pC)	-
		Maximum	V_{rms} (kV)	13.87
			Q_{IEC} (pC)	11930
15 MHz		PDIV	V_{rms} (kV)	4.49
			Q_{IEC} (pC)	1849
		PDEV	V_{rms} (kV)	-
			Q_{IEC} (pC)	-
		Maximum	V_{rms} (kV)	13.87
			Q_{IEC} (pC)	11330

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 4.40 แผนภาพการแยกชนิดของดิสชาร์จบางส่วน (CFRD) จากการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนด้วยเทคนิค Synchronous Multi-channel กรณีที่ 3 เคเบิลตัวอย่างเปรียบเทียบกับชุดอิเล็กทรอนิกส์จำลองดิสชาร์จบนผิวด้านแรงดันสูง

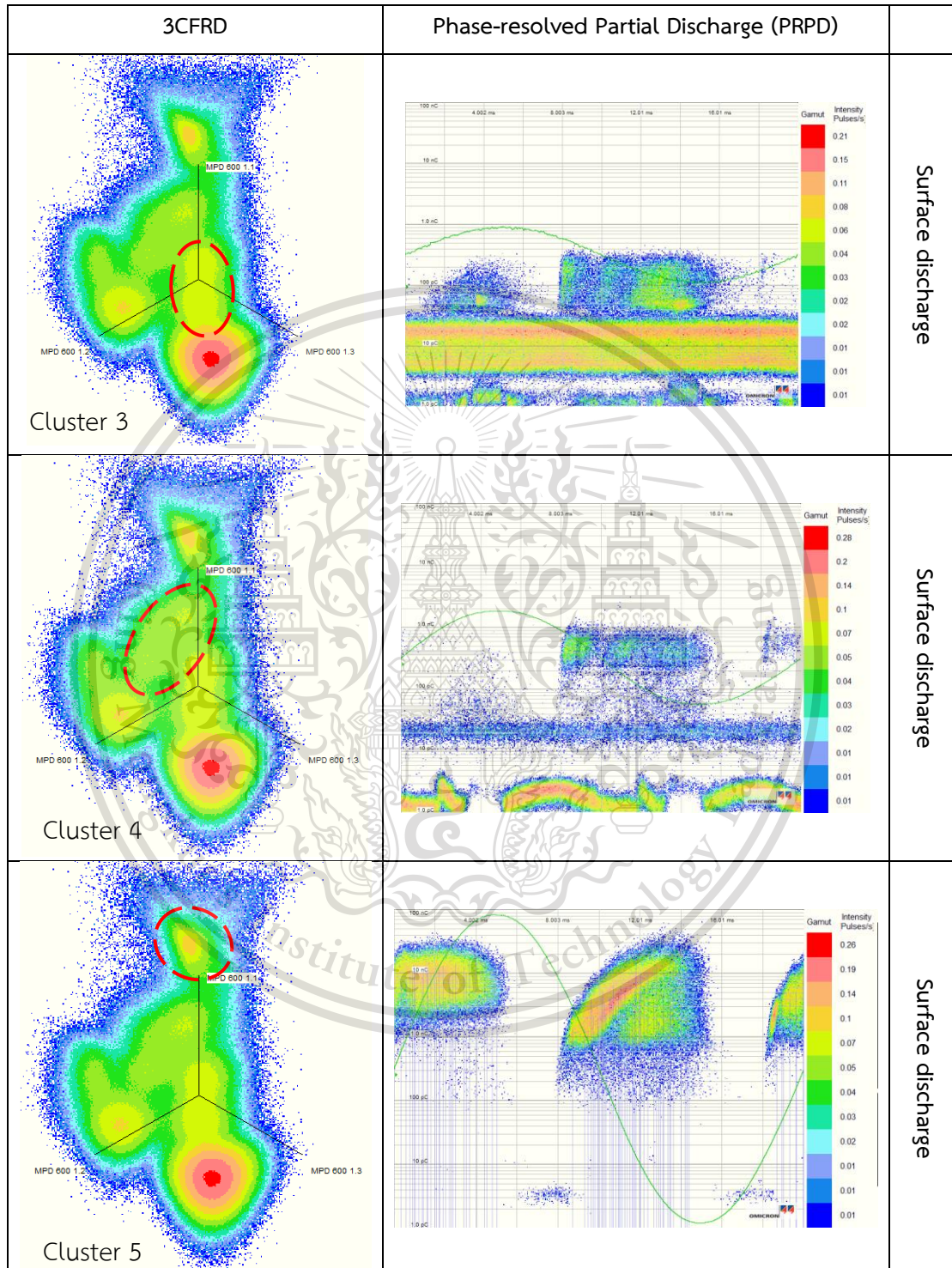


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 4.40 (ต่อ) แผนภาพการแยกชนิดของดิสชาร์จบางส่วน (CFRD) จากการทดสอบ ดิสชาร์จบางส่วนด้วยเทคนิค Synchronous Multi-channel กรณีที่ 3 เคเบิลตัวอย่าง เปรียบเทียบกับชุดอิเล็กทรอนิกส์จำลองดิสชาร์จบนผิวต้านแรงดันสูง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4) กรณีที่ 4 เคเบิลตัวอย่างเปรียบเทียบกับชุดอิเล็กทรอนิกส์โทรดจำลองดิสชาร์จบนผิว ด้านแรงดันต่ำ

ตารางที่ 4.41 ผลการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนด้วยเทคนิค Synchronous Multi-channel กรณีที่ 4 เคเบิลตัวอย่างเปรียบเทียบกับชุดอิเล็กทรอนิกส์โทรดจำลองดิสชาร์จบนผิวด้านแรงดันต่ำ โดยกำหนด f_{center} ของอุปกรณ์คัปปลิงทั้งสามตัวคือ $f_{c1} = 25 \text{ kHz}$, $f_{c2} = 1 \text{ MHz}$ และ $f_{c3} = 12 \text{ MHz}$

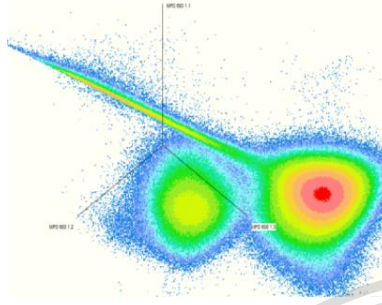
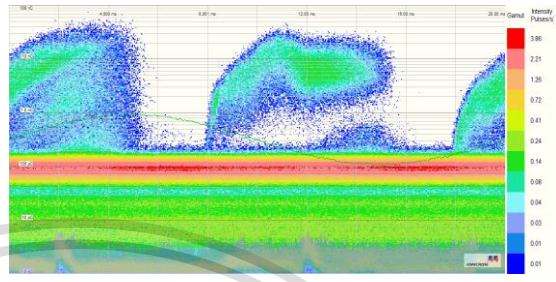

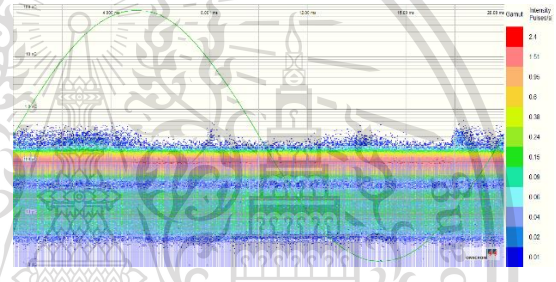
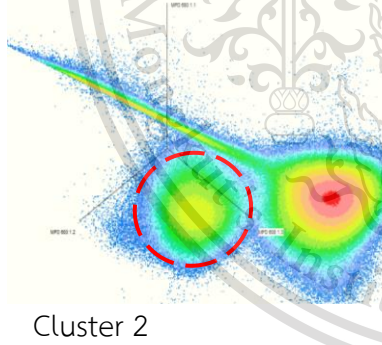
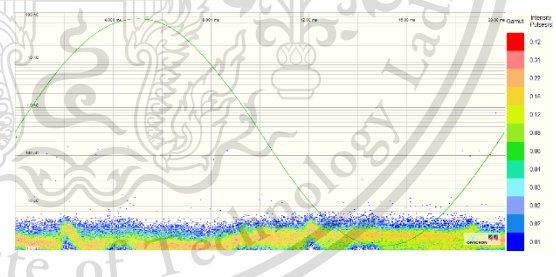
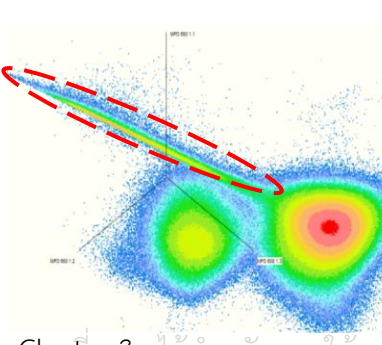
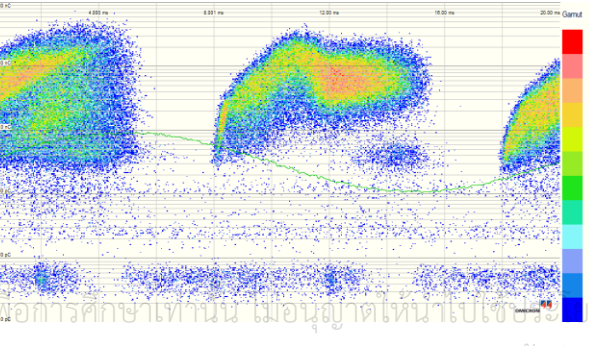
f_{center}	Phase-resolved Partial Discharge (PRPD)	ค่าที่บันทึก		
250 kHz		PDIV	V_{rms} (kV)	4.56
			Q_{IEC} (pC)	2863
		PDEV	V_{rms} (kV)	-
			Q_{IEC} (pC)	-
		Maximum	V_{rms} (kV)	13.62
			Q_{IEC} (pC)	42890
1 MHz		PDIV	V_{rms} (kV)	4.56
			Q_{IEC} (pC)	1728
		PDEV	V_{rms} (kV)	-
			Q_{IEC} (pC)	-
		Maximum	V_{rms} (kV)	13.62
			Q_{IEC} (pC)	24150
12 MHz		PDIV	V_{rms} (kV)	6.48
			Q_{IEC} (pC)	1127
		PDEV	V_{rms} (kV)	-
			Q_{IEC} (pC)	-
		Maximum	V_{rms} (kV)	13.62
			Q_{IEC} (pC)	3779

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 4.42 แผนภาพ CFRD จากการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนด้วยเทคนิค Synchronous Multi-channel กรณีที่ 4 เคเบิลตัวอย่างเปรียบเทียบกับชุดอิเล็กทรอนิกส์จำลองจลนศาสตร์บนผิวด้านแรงดันสูง

3CFRD	Phase-resolved Partial Discharge (PRPD)	
 <p data-bbox="341 739 446 772">All Data</p>		<p>Superimposed sources</p>
 <p data-bbox="341 1120 446 1153">Cluster 1</p>		<p>External Interferences</p>
 <p data-bbox="341 1478 446 1512">Cluster 2</p>		<p>External Interferences</p>
 <p data-bbox="341 1870 446 1904">Cluster 3</p>		<p>Surface discharge</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารงานวิจัยสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
 ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 แรงดันที่เปลือกของเคเบิลและเทคนิคการแก้ปัญหา

5.1.1 แรงดันที่เปลือกของสายเคเบิล (Cable Sheath voltage) เกิดขึ้นจากฟลักแม่เหล็กเกี่ยวคัลลิ่งที่เกิดขึ้นบน metallic sheath ของเคเบิล อันเนื่องมาจากสนามแม่เหล็กจากตัวของเคเบิลเส้นนั้นเองและผลมาจากสนามแม่เหล็กโดยเคเบิลรอบข้าง จากการศึกษาในหัวข้อที่ 1 ทำให้ทราบถึงวิธีการคำนวณแรงดันดังกล่าวที่เกิดขึ้นบนเปลือกของเคเบิล โดยแรงดันที่ได้นั้นมีค่าอยู่ในหน่วย V/m ส่งผลให้เคเบิลที่มีความยาวมากจะมีแรงดันที่บริเวณปลายสายสูงเกินกว่าค่าที่สามารถยอมรับได้ ตามมาตรฐาน IEEE 575 โดยในการทดลองของกรณีศึกษาที่ 1 พบว่า sheath voltage มีค่าประมาณ 0.1-0.2 V/m ซึ่งเคเบิลมีความยาวทั้งสิ้น 1 km ดังนั้นสายเคเบิลใต้ดินชุดนี้จะมี sheath voltage ที่ปลายสายสูงถึง 100-200 volt ซึ่งไม่สามารถยอมรับได้ตามแนวทางปฏิบัติของมาตรฐาน IEEE 575

5.1.2 การแก้ปัญหาแรงดันที่เปลือกของสายเคเบิล การแก้ปัญหาหรือลดแรงดันที่เปลือกของสายเคเบิลสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การปรับระยะห่างระหว่างสายเคเบิล การเลือกสายเคเบิลที่มีรัศมีตัวนำที่เหมาะสม และการต่อลงดินด้วยวิธีต่าง ๆ ดังในหัวข้อการศึกษาที่ 2 ซึ่งเป็นการต่อลงดินด้วยวิธีครอสบอร์นดิ้ง (Cross bounding) จากการศึกษาทดลองด้วยระบบสายเคเบิล (Duck Bank) พบว่าการต่อลงดินดังกล่าวสามารถทำให้แรงดันที่เปลือกของเคเบิลลดลงได้จริง โดยจากหัวข้อการศึกษาที่ 1 (ไม่ได้ต่อลงดิน) มีแรงดัน ที่เปลือกเคเบิล 100-200 volt เมื่อต่อลงดินในหัวข้อการศึกษาที่ 2 แล้ว เหลือแรงดันที่เปลือกเพียง 15-20 volt ซึ่งด้วยแรงระดับนี้กับการฉนวนในยุคปัจจุบันถือว่ามีความปลอดภัยต่อผู้ที่มีสัมผัส และสิ่งรอบข้าง และเป็นที่ยอมรับตามมาตรฐาน IEEE 575-2014

5.2 การทดสอบสายเคเบิลใต้ดินโดยใช้เทคนิค Very Low frequency

จากผลการทดสอบสายเคเบิลใต้ดิน โดยใช้เทคนิค Very Low Frequency (VLF) ทั้ง 3 ชุดการทดสอบ จะเห็นได้ว่า

การทดสอบชุดที่ 1 มีค่าของผลการทดสอบ $\tan \delta$ ที่ค่อนข้างต่ำ จะเห็นได้ว่าเคเบิลทั้ง 3 เฟส มีค่า $\tan \delta$ ที่ใกล้เคียงกัน เมื่อมีการเพิ่มระดับแรงดันทดสอบจาก $0.5U_0$, $1U_0$ และ $1.5U_0$ ก็ จะเห็นได้ว่าค่า $\tan \delta$ นั้นมีการขยับขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น และเมื่อดูค่า VLF-TD (ค่าเฉลี่ย $\tan \delta$ ที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง การนำ

ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น ยินดีให้ผู้อื่นนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

$1U_0$) ก็ จะเห็นว่า มีค่า 0.3×10^{-3} - 0.4×10^{-3} ซึ่งต่ำกว่าค่าที่มาตรฐานกำหนดไว้อยู่ที่ 4×10^{-3} และค่า

VLF-TDTS (ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน) จากข้อมูลที่ทำให้การทดสอบเป็น 0.0 แสดงว่าค่าที่วัดได้ไม่มีค่าที่

แกว่งจากค่าเฉลี่ยเลย และค่า VLF-DTD (ค่าผลต่างของค่าเฉลี่ย $\tan \delta$ ที่ $0.5U_0$ กับ $1.5U_0$) ซึ่งมีค่าที่

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ต่ำมากจะเป็นค่าที่แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของ $\tan \delta$ เมื่อระดับแรงดันทดสอบที่เพิ่มขึ้นก็จะเห็นได้ว่าก็มีค่าที่ต่ำกว่าที่มาตรฐานกำหนด จึงมีการประเมินสายเคเบิลทั้งสามเฟสเป็น No Action Required หรือไม่ต้องมีการดำเนินการใด ๆ แต่ก็ต้องมีแผนกำหนดการณ์ในการทดสอบต่อไป

การทดสอบชุดที่ 2 เมื่อสังเกตจากกราฟก็จะเห็นได้ว่ามีเฟส Y ที่มีค่า $\tan \delta$ ที่มีค่าสูงกว่าเฟส R และ B ซึ่งเมื่อพิจารณาที่เฟส Y มาดูที่ค่า VLF-TD ที่ $1U_0$ คือ 24.9×10^{-3} ก็จะเห็นว่าค่าที่เกินกว่ามาตรฐานกำหนด จะอยู่ในเกณฑ์ Further Study Advised และเมื่อพิจารณาที่เฟส B จากค่า $\tan \delta$ ที่วัดได้ทั้งสามระดับแรงดัน ก็จะเห็นว่าค่า $\tan \delta$ ที่ต่ำและมีการเพิ่มขึ้นของค่า $\tan \delta$ แบบน้อยมาก และมี VLF-TDTS เป็น 0.0 จะเห็นได้ว่าสายเคเบิลเฟส B อยู่ในเกณฑ์ประเมิน No Action Required และเมื่อพิจารณาที่เฟส R ค่า $\tan \delta$ ที่วัดได้ก็มีค่าที่ไม่สูง แต่เมื่อเพิ่มแรงดันทดสอบขึ้นจะเห็นได้ว่าค่า $\tan \delta$ มีค่าแทบจะทวีคูณและค่า VLF-TDTS (ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน) ก็มีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกันเมื่อใช้แรงดันทดสอบที่เพิ่มขึ้น ซึ่งจะอยู่ในเกณฑ์ Further Study Advised

การทดสอบชุดที่ 3 จะแบ่งออกเป็นการทดสอบอีก 3 ชุดด้วยกัน ในชุดแรกจะมีการประเมิน No Action Required ทั้งสามเฟสเพราะไม่มีค่าใดที่เกินมาตรฐาน และเมื่อพิจารณาจากกราฟก็จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มระดับแรงดันทดสอบค่า $\tan \delta$ ก็มีค่าที่ขยับเพิ่มขึ้นไม่มาก สำหรับในชุดที่สองก็มีผลการวัดที่ค่อนข้างดี มีการประเมินเป็น No Action Required ทั้งสามเฟสเพราะไม่มีค่าใดที่เกินมาตรฐาน และสำหรับชุดสุดท้ายจะมีการประเมินเป็น Further Study Advised ทั้งสามเฟส ซึ่งเมื่อพิจารณาจากกราฟก็จะเห็นได้ว่ากราฟมีการหักมุมที่ $1U_0$ ทั้งเฟส A และ C ซึ่งมีการประเมินเป็น Further Study Advised เพราะมีค่าที่เกินมาตรฐาน และเฟส B ถึงแม้กราฟจะเรียบ ๆ ไม่มีการหักมุมแบบ เฟส A และ C และมีค่า $\tan \delta$ ที่ไม่สูง แต่ถูกประเมินให้เป็น Further Study Advised เพราะมีค่า VLF-TDTS (ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ $1U_0$) มีค่าเกินมาตรฐาน ถึงแม้กราฟจะไม่ชันแต่อาจจะมีค่าแกว่งจากวัด จึงทำการประเมินให้เป็นศึกษาเพิ่มเติมไปก่อน

สรุปจากการทดสอบ $\tan \delta$ ด้วยแรงดัน VLF เพื่อประเมินสภาพของสายเคเบิล โดยมีการทดสอบเพื่อเก็บค่าที่วัดได้เป็นตัวเลข แล้วนำมาเทียบกับมาตรฐาน โดยมีเกณฑ์การประเมินเพียง 3 เกณฑ์คือ 1. No Action Required 2. Further Study Advised และ 3. Action Required ซึ่งจะเป็นการประเมินแบบกว้าง ๆ เท่านั้น จากตัวเลขในเกณฑ์การประเมินก็เป็นช่วงที่กว้าง และการทดสอบก็ไม่ได้บ่งบอกถึงบกพร่องของเคเบิลว่าอยู่จุดไหนและก็ได้บอกว่าคุณพร่องจากปัญหาอะไร เป็นเพียงการบอกว่าภายในสายเคเบิลมีจุดบกพร่องแบบภาพรวมน้อยหรือมากจากตัวเลขที่วัดได้ และมีพฤติกรรมอย่างไรเมื่อเพิ่มระดับแรงดันทดสอบขึ้น ซึ่งจากการทดสอบก็จะเห็นเป็นเพียงการประเมินแบบคร่าว ๆ ควรใช้ความรอบคอบในการประเมิน และควรใช้วิธีทดสอบที่หลากหลายเพื่อเพิ่มความเชื่อมั่นให้เพิ่มขึ้น.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

5.3 การวัดดิสชาร์จบางส่วน

จากการทดลองการวัดดิสชาร์จบางส่วน จะแบ่งได้ออกเป็น 2 หัวข้อใหญ่คือ 1. การทดลองการเกิดดิสชาร์จบางส่วน แบบ conventional และ non- conventional และ 2. การทดลองการวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนด้วยเทคนิค Synchronous Multi-Channel PD

สำหรับการทดลองการเกิดดิสชาร์จบางส่วน แบบ conventional และ non-conventional จะเป็นการวัดดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดจากการจำลองเคสต่าง ๆ โดยแต่ละเคสจะมีเพียงชุดดิสชาร์จบางส่วน(test object)เพียงชุดเดียวเท่านั้น จากผลการทดลองจะพบว่า รูปแบบผล PRPD ของ conventional และ non- conventional จะมีรูปแบบที่ไม่แตกต่างกันมาก แต่ค่าที่วัดได้บางค่าจะไม่ค่อยตรงกัน เช่น ค่า Q_{max} ที่วัดได้สำหรับบางการทดลองจะมีค่าที่วัดได้ไม่เท่ากัน แต่อย่างไรก็ตามการวัดแบบ non- conventional โดยใช้ HFCT จะมีข้อดีในการวัดหน้างาน(Onsite test)ที่สะดวกกว่า สามารถวัดขณะใช้งานได้(Online test) และมีผล PRPD ที่แทบจะไม่มีแตกต่างจากการวัดแบบ conventional แต่ข้อควรระวังคือค่าที่วัดได้จาก non- conventional จะมีบางค่าที่ไม่ตรงกับ conventional และสำหรับการทดสอบแบบ conventional จะนำผลที่วัดได้ไปเป็นพื้นฐานข้อมูลเพื่อเทียบในการทดลองหัวข้อถัดไปคือ การทดลองการวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนด้วยเทคนิค Synchronous Multi-Channel PD

สำหรับการทดลองการวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนด้วยเทคนิค Synchronous Multi-Channel PD จะเป็นการต่อยอดจากการทดลองการเกิดดิสชาร์จบางส่วน แบบ conventional แต่จะเพิ่มชุดดิสชาร์จบางส่วน(test object)ขนานกับสายเคเบิล และใช้ตัวเก็บประจุคัปปลิง(C_k) 3 ตัว ที่มีย่านความถี่ในการวัด 3 ย่านความถี่ เพื่อแยกสัญญาณ PD - เมื่อพิจารณาในกรณีที่ 1 เคเบิลกับชุดอิเล็กทรอนิกส์จำลองโคโรนาดิสชาร์จด้านแรงดันสูง จะใช้ความถี่ในการวัดที่ 250kHz, 1.66MHz และ 4.38MHz จากตารางที่ 4.35 จะใช้วิธีแยกสัญญาณ PD เป็น 4 กลุ่ม (Cluster1-4) จาก 3CFRD ซึ่งจากกลุ่มที่ 1 จะเป็นสัญญาณรบกวน(Noises) ในกลุ่มที่ 2 และ 3 จะเป็นสัญญาณของ Corona discharge ที่เห็นได้อย่างชัดและ และกลุ่มที่ 4 จะเป็นสัญญาณ PD ที่เกิดจากสายเคเบิลแต่ก็จะมีรูปแบบที่ไม่ค่อยชัดเมื่อเทียบกับผลจาก conventional

เมื่อพิจารณาในกรณีที่ 2 เคเบิลกับชุดอิเล็กทรอนิกส์จำลองโคโรนาดิสชาร์จด้านแรงดันต่ำ จะใช้ความถี่ในการวัดที่ 250kHz, 1.66MHz และ 4.38MHz เช่นเดียวกับในกรณีที่ 1 จากตารางที่ 4.37 จะใช้วิธีแยกสัญญาณ PD เป็น 5 กลุ่ม (Cluster1-5) จาก 3CFRD ซึ่งกลุ่มที่ 1 และ 3 จะเป็นสัญญาณรบกวน(Noises) ส่วนกลุ่มที่ 2 และ 5 จะเป็นสัญญาณ PD ที่เกิดจากสายเคเบิลแต่ก็จะมีรูปแบบอาจไม่ค่อยชัดเมื่อเทียบกับผลจาก conventional และ และกลุ่มที่ 4 จะเป็นสัญญาณของ Corona discharge ที่เห็นได้อย่างชัด

เมื่อพิจารณาในกรณีที่ 3 เคเบิลกับชุดอิเล็กทรอนิกส์จำลองด้านแรงดันสูง จะใช้ความถี่ในการวัดที่ 400 kHz, 10 MHz และ 15 MHz จากตารางที่ 4.39 จะใช้วิธีแยกสัญญาณ PD เป็น 5 กลุ่ม (Cluster1-5) จาก 3CFRD ซึ่งกลุ่มที่ 1 และ 2 จะเป็นสัญญาณรบกวน (Noises)

ส่วนกลุ่มที่ 3 และ 4 คิดว่าน่าจะเป็นสัญญาณ PD แบบ Internal discharge คาดว่าอาจจะมาจากสายเคเบิล และกลุ่มที่ 5 เป็นสัญญาณของ Surface discharge

เมื่อพิจารณาในกรณีที่ 4 เคเบิลกับชุดอิเล็กทรอนิกส์จำลองดีสชาร์จที่ผิวด้านแรงดันต่ำ จะใช้ความถี่ในการวัดที่ 250kHz, 1MHz และ 12MHz จากตารางที่ 4.41 จะใช้วิธีแยกสัญญาณ PD เป็น 3 กลุ่ม (Cluster1-3) จาก 3CFRD ซึ่งกลุ่มที่ 1 และ 2 จะเป็นสัญญาณรบกวน (Noises) ส่วนกลุ่มที่ 3 เป็นสัญญาณของ Surface discharge ซึ่งจะเห็นได้ว่าจากในกรณีนี้จะไม่เห็นส่วนของ PD ที่เกิดจากสายเคเบิลออกมา

สรุปจากการทดลองจะเห็นได้ว่าวิธีวัด PD แบบ Synchronous Multi-Channel PD ก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถแยกสัญญาณ PD ออกเป็นกลุ่ม ๆ ได้ว่ามีสัญญาณในส่วนไหนของ PD ประเภทไหนบ้างที่รวมตัวกันอยู่ สามารถแยกแยะปัญหาที่เกิดขึ้นได้ว่าสาเหตุที่เกิด PD นั้นมาจากสาเหตุอะไรบ้าง สามารถแยกสัญญาณรบกวน ออกจากสัญญาณ PD ในกรณีทำการวัด PD ที่หน้างาน (Onsite test) ซึ่งไม่สามารถหลีกเลี่ยงสัญญาณรบกวนที่เกิดจากสภาพแวดล้อมรอบ ๆ ได้ แต่ถึงอย่างไรก็ตามวิธีวัด PD แบบ Synchronous Multi-Channel PD ก็ยังมีข้อจำกัดอยู่มาก เช่นในการทดลองกรณีที่ 3 และ 4 เคเบิลกับชุดอิเล็กทรอนิกส์จำลองดีสชาร์จที่ผิว ซึ่งเมื่อแยกสัญญาณ PD ออกมาแล้ว สัญญาณ PD ที่เกิดจากเคเบิลจะถูกบังโดยสัญญาณ PD ที่เกิดจากชุดอิเล็กทรอนิกส์จำลองดีสชาร์จที่ผิว กล่าวคือเมื่อพิจารณาการวัดแบบ conventional (ตัวต้นแบบ) จากตารางที่ 4.31 จะเห็นได้ว่าที่แรงดันทดสอบประมาณ 10kV ค่า Q_{max} ของสัญญาณ PD ที่เกิดจากชุดอิเล็กทรอนิกส์จำลองดีสชาร์จที่ผิว จะมีค่าสูงถึง 30-50 nF แต่ค่า Q_{max} ของสัญญาณ PD ที่เกิดจากเคเบิลจะมีค่าเพียง 0.7 nF ซึ่งจะเห็นได้ว่าสัญญาณมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับสัญญาณ PD ที่เกิดจากชุดอิเล็กทรอนิกส์จำลองดีสชาร์จที่ผิว ดังนั้นวิธีวัด PD แบบ Synchronous Multi-Channel PD จึงไม่สามารถแยกสัญญาณ PD ที่มีขนาดเล็กกับที่มีขนาดใหญ่มา ๆ ได้ และอีกประการหนึ่งคือ ถึงแม้สัญญาณ PD ทั้งสองจะมีขนาดใกล้เคียงกัน และสามารถแยกสัญญาณออกจากกันได้ แต่สัญญาณที่แยกได้นั้นก็มีความผิดเพี้ยนอยู่บ้างจากรูปสัญญาณเดิมทั้งขนาด (Q_{IEC}) และรูปแบบการเกิด (PRPD) และอีกประการหนึ่งคือการเลือกย่านความถี่ของตัวเก็บประจุคัปปลิง (C_k) ทั้ง 3 ให้มีความเหมาะสม ซึ่งถ้าหากมีการเลือกย่านความถี่ที่ไม่ดีก็จะส่งผลกระทบต่อมุมมองเห็นสัญญาณ PD และอาจจะไม่สามารถแยกแยะสัญญาณได้ และสุดท้ายนี้วิธีวัด PD แบบ Synchronous Multi-Channel PD ก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่มีความน่าสนใจและควรค่าต่อการนำไปพัฒนาต่อยอดในอนาคตให้มีความละเอียดในการวัดและสามารถแยกแยะสัญญาณให้มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เอกสารอ้างอิง

- [1] Osama E. Gouda and Adel Farag, “Bonding methods of underground cables,” **Research Gate**, 2015, pp.17-34.
- [2] IEEE Standard Association, “IEEE Guide for Bonding Shields and Sheaths of Single-Conductor Power Cables Rated 5 kV through 500 kV,” **IEEE Power and Energy Society**, 2014
- [3] พันธุ์เทพ เลหาชัย, “การวิเคราะห์แรงดันและกระแสในเปลือกโลหะของเคเบิลใต้ดินระบบไฟฟ้าแรงสูง โดยไม่จำกัดจำนวนสายบ่อน และไม่จำกัดรูปแบบของการวางสาย,” **วารสารวิจัยและพัฒนา มจร.**, 2555.
- [4] Ramanujam Sarathi, Arya Nandini and Michael G. Danikas, “UNDERSTANDING ELECTRICAL TREEING PHENOMENA IN XLPE CABLE INSULATION ADOPTING UHF TECHNIQUE”, **Journal of ELECTRICAL ENGINEERING**, VOL. 62, NO. 2, 2011, pp 73–79.
- [5] E. F. Steennis and F. H. Kreuger, “Water Treeing in Polyethylene Cables”, **IEEE Transactions on Electrical Insulation**, Vol. 25, No. 5, October 1990.
- [6] นฤพนธ์ พรหมวิชัย, “ผลของสารละลายไอออนิกและอุณหภูมิต่อการขยายตัวของวอเตอร์ทรีอิ่งในสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินฉนวนพอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวางสำหรับระบบจำหน่ายแรงดันปานกลาง”, **วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต**, สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2561.
- [7] Yanuar Z. Arief, Zuraimy Adzis, N.A. Muhamad and Mohd Hafizi Ahmad, “Water Tree in Polymeric Cables: A Review”, **Malaysian Journal of Fundamental and Applied Sciences**, Vol.11, No.4 (2015), pp 191-200
- [8] ชีระพงศ์ บุญรักษา, “ลักษณะจำเพาะของวอเตอร์ทรีอิ่งในสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินฉนวนพอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวางสำหรับระบบจำหน่าย 22 kV”, **วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต**, สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2557.
- [9] Sverre Hvidsten, Erling Ildstad and Hallvard Faremo “MECHANISMS CAUSING NONLINEAR DIELECTRIC RESPONSE OF WATER TREED XLPE CABLES”, **IEEE International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectric**, Sweden, June 22-25, 1998.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 [10] กองมาตรฐานระบบไฟฟ้า ผ่านมาตรฐานและความปลอดภัย การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, ระบบ
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเด็ดขาดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
 เคเบิลใต้ดิน

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

- [11] M. Shaban, M. A. Salam, S. P. Ang and W. Voon “Calculation of sheath voltage of underground cables using various configurations,” **BICET 2014** , 2014.
- [12] กองมาตรฐานระบบไฟฟ้า ผ่านมาตรฐานและความปลอดภัย การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, “การต่อลงดินสำหรับสายเคเบิลใต้ดินระบบ 22kV, 33kV และ 115kV,” SA1-015, 2548.
- [13] American National Standard, “IEEE Guide for the Application of Sheath-Bonding Methods for Single-Conductor Cables and the Calculation of Induced Voltages and Currents in Cable Sheaths,” **IEEE Standards Board**, 1998, pp.10-18.
- [14] Jason Souchak, “Practical Applications of Cable Testing and Diagnostics Techniques,” **Webinar**, Megger, August 18 2017.
- [15] Steven H Spikes, Sergio Razo, “Cable Testing Anomalies for Windpark Testing Applications: Cable Fault Location, Test and Diagnostics,” **52ndAnnual**, Megger.
- [16] Jason Souchak. “Practical Applications of VLF Testing,” **Webinar**, Megger, May 20 2016.
- [17] NEETRAC Project Numbers: 04-211/04-212/09-166, “Diagnostic Testing of Underground Cable Systems (Cable Diagnostic Focused Initiative),” **NEETRAC Project**, December 2010.
- [18] IEEE Standard Association, “IEEE Guide for Field Testing of Shielded Power Cable Systems Using Very Low Frequency (VLF)(less than 1Hz),” **IEEE Std**, 2013.
- [19] Christof Sumereder. “A Comparison of Partial Discharge Detection with 50 Hz and 0,1 Hz at XLPE Cables,” **IEEE International Symposium on Electrical Insulation**, 2012, pp. 619-622.
- [20] Paul Brooker, “VLF Testing of Shielded Power Cables,” TR Corporation.
- [21] Michael Muhr, “IEC 62478 A Prospective Standard for Acoustic and Electromagnetic Partial Discharge Measurements,” Presentation, Graz University.
- [22] “การตรวจจับดิซชาร์จบางส่วนและรูปแบบการเกิดดิซชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง,” **เอกสารประกอบการทดลอง**, วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, 2554.
- [23] ศุภชัย บุญปก, “การพัฒนาระบบรู้จำแบบรูปของการดิซชาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคปัญญาประดิษฐ์,” **วิทยานิพนธ์**, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2553, 39-41.
- [24] Andreas Küchler, **High Voltage Engineering Fundamentals –Technology – Applications**, Springer Vieweg, Schweinfurt, Germany, 2017.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การวัดดิซชาร์จบางส่วนแบบหลายช่องทาง

Synchronous Multi-channel Partial Discharge Measurement

ศักรินทร์ ตรีธรรม ศูนย์วิจัยวิชาการ สหรั้ว วงศ์นาป่า และ สิริรูปต์ บัวเขียว
 ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 1 ซอย ฉลองกรุง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-329-8000 ต่อ 3925 E-Mail: 60010969@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นกรนำเสนองการแยกสัญญาณของ Partial Discharge (PD) ที่เกิดจากการรวมสัญญาณ PD โดยนำเอาอิเล็กโทรดจำลอง โครนาดิซชาร์จ และดิซชาร์จตามผิว ต่อขนานเข้ากับสายเคเบิลใต้ดินระบบ 24kV เพื่อจำลองการเกิดดิซชาร์จแบบหลายประเภท และหลายตำแหน่ง จากนั้นทำการวัดแบบ Multi-channel โดยใช้ ตัวเก็บประจุคัปปลิง (C_c) จำนวน 3 ตัว ผลการทดลองสามารถแสดงให้เห็นว่า Multi-Channel สามารถทำการแยกชนิดของ PD ที่เกิดขึ้นออกมาเป็น PRPD ที่สามารถระบุชนิดของ PD ได้ อีกทั้งยังสามารถแยกสัญญาณรบกวนออกจากระบบการวัด ทำให้ค่าการดิซชาร์จบางส่วนสามารถถูกระบุได้อย่างถูกต้องมากขึ้น

คำสำคัญ: แพทเทิร์นของการเกิดดิซชาร์จบางส่วน, แผนภาพสามความถี่กลาง, ดิซชาร์จบางส่วน, ซิงโครนัสหลายช่องสัญญาณ

Abstract

This research presents the separation of PD signals resulting from PD signal integration by using the corona discharge and surface discharge simulation with electrode. And parallel to 24 kV underground cable to simulate multiple types and positions of partial discharge. Then, make measurements with multi-channel instrument using three coupling capacitors (C_c). The resulting PD from multi-channel able to extract into PRPD that can identify the PD types and separate the noise signal from the measurement system.

Keywords: Phase-resolved Partial Discharge (PRPD), Three Center Frequency Relation Diagram (3FRD), Partial Discharge (PD), Synchronous Multi-channel

1. บทนำ

ปัญหาในการวัดระบบที่มีแหล่งกำเนิด PD ที่อยู่หลายตำแหน่ง ซึ่งทำให้ระบบวัดไม่สามารถระบุได้ว่าเป็นสัญญาณ PD ประเภทใด เนื่องจากการซ้อนทับกันของสัญญาณที่เกิดขึ้นมา ซึ่งปัญหานี้เกิดจากการ

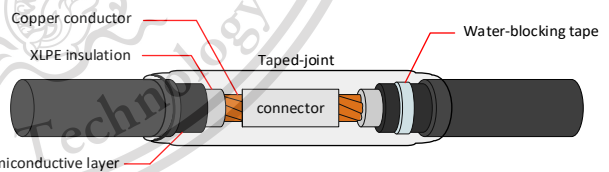
ที่แหล่งกำเนิดสัญญาณที่มีตำแหน่งและประเภทที่ แตกต่างกันไป ทำให้ต้องการแยกประเภทและตำแหน่งของสัญญาณเหล่านั้นที่เกิดขึ้น โดยเทคนิคการวัดนี้จะมีพื้นฐานทางด้าน Multi-channel เพื่อที่ต้องการแยกความถี่ของสัญญาณที่ซ้อนทับกันในระบบที่ทำการวัดสัญญาณ PD

2. การทดลอง

2.1 เตรียมตัวอย่างทดสอบ

จากการทดลองจะทำการเตรียมสายเคเบิลที่มีจุดผิดปกติภายในรอยต่อ และชุดอิเล็กโทรดที่จำลองการเกิดดิซชาร์จบางส่วนแบบโครนา และแบบตามผิว เพื่อนำมาขนานกัน

- 1) ทำการสร้างจุดผิดปกติภายในรอยต่อของสายเคเบิล โดยนำ เทปกันน้ำ (water-blocking tap) พันรอบชั้น สารกึ่งตัวนำ (insulation screen) ภายในข้อต่อ (joint) ซึ่งแสดงในรูปที่ 1
- 2) ทำการเตรียมชุดอิเล็กโทรดเพื่อจำลองการเกิดดิซชาร์จบางส่วนแบบโครนา และการเกิดดิซชาร์จบางส่วนแบบตามผิว ซึ่งแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 1 สายเคเบิลที่มีจุดผิดปกติภายในรอยต่อ



รูปที่ 2 ชุดอิเล็กโทรดจำลองการเกิดดิซชาร์จบางส่วน

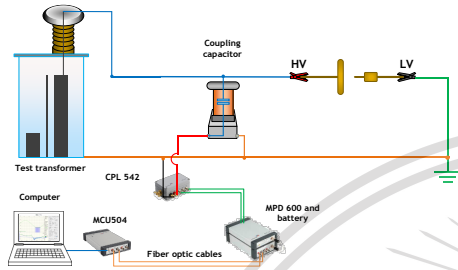
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการเรียนการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า และต้องอ้างอิงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

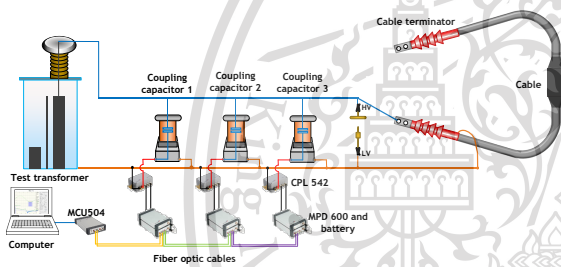
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.2 วงจรการทดสอบ

จากการทดลองจะทำการทดสอบวัดสัญญาณ PD จากตัวอย่างทดสอบทั้งชุดอิเล็กโทรดและสายเคเบิล เพื่อนำไปเป็นชุดข้อมูลอ้างอิง (reference) ดังตัวอย่างรูปที่ 3 จากนั้นทำการขนานสายเคเบิลกับชุดอิเล็กโทรด (สายเคเบิล-ชุดอิเล็กโทรดจำลอง โครโน่า, สายเคเบิล-ชุดอิเล็กโทรดจำลองคิซาร์จตามผิว) และทำการวัดสัญญาณ PD แบบ Multi-channel ดังรูปที่ 4



รูปที่ 3 วงจรทดสอบ PD ของชุดตัวอย่างทดสอบ



รูปที่ 4 วงจรทดสอบ PD แบบ Multi-channel

3. ผลการทดลอง

จากผลการทดลองจะตามตารางที่ 1-3 สำหรับการทดสอบ PD จากชุดตัวอย่างทดสอบรูปที่ 3 เมื่อทำการวัด 1.การจำลองโครโน่าคิซาร์จด้านแรงดันต่ำ 2.การจำลองคิซาร์จตามผิวด้านแรงดันสูง และ 3.การทดสอบคิซาร์จบางส่วนของสายเคเบิล จะได้ผลตามตารางที่ 1 เพื่อดูรูปแบบการเกิด PRPD ของชุดตัวอย่างทดสอบ เพื่อใช้เป็นชุดข้อมูลอ้างอิง (reference) ในการเปรียบเทียบกับการทดลองวัดคิซาร์จบางส่วน(PD) แบบ Multi-Channel หรือ Synchronous Multi-Channel PD Measurement

จากรูปที่ 4 เมื่อทำการขนานสายเคเบิลขนานกับชุดอิเล็กโทรดจำลองโครโน่าคิซาร์จด้านแรงดันต่ำ โดยทำการวัดแบบ Synchronous Multi-Channel PD Measurement และเลือกใช้ย่านความถี่ของตัวเก็บประจุคัปปลิง (C_p) ของแต่ละตัวในการวัดคือ 250 kHz, 1.66 MHz และ 4.38 MHz ตามลำดับ จะได้ผลดังตารางที่ 2 เมื่อดูผล PRPD จะเห็นว่าสัญญาณ PD มีการซ้อนทับกันทั้ง โครโน่าคิซาร์จ, คิซาร์จภายในสายเคเบิลและสัญญาณรบกวน จากนั้นจะทำการแยกสัญญาณ PD ที่รวมกัน

อยู่ออกจากกัน เมื่อพิจารณาผล 3CFRD ที่ได้จากตัวเก็บประจุคัปปลิงที่มีย่านวัด ความถี่ต่างกัน จะเห็นได้ว่ามีกลุ่มของสัญญาณอยู่ 5 กลุ่ม เพื่อจะเป็นการแยกสัญญาณ PD จึงได้ทำการเลือกแสดงผล PRPD ของแต่ละกลุ่มโดยเลือกตั้งแต่กลุ่มที่ 1-5 (Cluster1-5) จาก 3CFRD เมื่อพิจารณา รูปแบบ PRPD ของกลุ่มที่ 1 และ 3 จะพบว่าเป็นสัญญาณรบกวน (Noises) ส่วนกลุ่มที่ 4 จะพบเป็นสัญญาณของ Corona discharge พังแรงดันต่ำ ที่เห็นได้อย่างชัด และสุดท้ายกลุ่มที่ 2 และ 5 จะพบว่าเป็นสัญญาณ PD ที่เกิดจากสายเคเบิล แต่อาจจะมีรูปแบบที่ไม่ค่อยชัดเมื่อเทียบกับผลจากตารางที่ 1

จากการทดลองการวัด Synchronous Multi-Channel PD Measurement ของสายเคเบิลขนานกับชุดอิเล็กโทรดจำลองโครโน่าคิซาร์จด้านแรงดันต่ำ สามารถแยกสัญญาณ PD ของแต่ละประเภทออกจากกันได้ แต่สัญญาณของ PD ที่แยกได้ก็อาจจะไม่ได้เหมือนสัญญาณของจริงแบบสมบูรณ์ ซึ่งก็อาจจะมีในส่วนของสัญญาณที่ซ้อนทับกันอยู่ของกลุ่มสัญญาณที่ไม่สามารถแยกออกให้เป็น 100% ได้ แต่วิธีนี้ก็สามารถแยกแยะและระบุชนิดของ PD ที่เกิดรวมกันได้

ตารางที่ 1 ผลการวัด PD จากชุดตัวอย่างทดสอบเพื่อเป็นชุดข้อมูลอ้างอิง

อิเล็กโทรด	Phase-resolved Partial Discharge (PRPD)	ค่าที่บันทึก
ผลการจำลองโครโน่าคิซาร์จด้านแรงดันต่ำ		Maximum V _{rms} (kV) 12.33 Q _{IEC} (pC) 983
ผลการจำลองคิซาร์จตามผิวด้านแรงดันสูง		Maximum V _{rms} (kV) 9.95 Q _{IEC} (nC) 33.50
ผลการทดสอบคิซาร์จบางส่วนของสายเคเบิล		Maximum V _{rms} (kV) 14.21 Q _{IEC} (pC) 642.2

จากรูปที่ 4 เมื่อทำการขนานสายเคเบิลขนานกับชุดอิเล็กโทรดจำลองคิซาร์จตามผิวด้านแรงดันสูง และทำการวัดแบบ Synchronous Multi-Channel PD Measurement โดยเลือกใช้ย่านความถี่ของตัวเก็บประจุคัปปลิง (C_p) ของแต่ละตัวในการวัดคือ 400 kHz, 10 MHz และ 15 MHz

มีความถี่สูง ไม่สามารถแยกสัญญาณ PD ของแต่ละประเภทออกอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งนั่นเป็นผลมาจากขนาดของสัญญาณ PD ที่มีขนาดต่างกันมาก ๆ กว่า 50 เท่า จึงเห็นผลที่แยกออกไม่ชัดเจน จากการที่แยกเป็นกลุ่ม(Cluster1-5) เป็นเพียงแยกสัญญาณ PD ของดิซชาร์จตามผิว ให้เป็นส่วนสาม คือส่วนต้น ส่วนกลาง ส่วนปลาย และแยกสัญญาณรบกวนออก และจากการทดลองอาจสันนิษฐานเพิ่มเติมได้ว่าในส่วนของ Cluster 2 ตารางที่ 3 อาจจะไม่ได้ออกเป็นสัญญาณรบกวน แต่อาจจะเป็นสัญญาณ PD ของสายเคเบิล เพราะขนาด PD ของสายเคเบิลและชุดอิเล็กทรอนิกส์มีขนาดที่ต่างกันถึงหลายเท่า

4.สรุปผล

จากการทดลองจะเห็นได้ว่าวิธีวัด PD แบบ Synchronous Multi-Channel PD ก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถแยกสัญญาณ PD ออกเป็นกลุ่ม ๆ ได้ว่ามีสัญญาณในส่วนไหนบ้างที่รวมตัวกันอยู่ สามารถแยกแยะปัญหาที่เกิดขึ้นได้ว่าสาเหตุที่เกิด PD นั้นมาจากสาเหตุอะไรบ้าง สามารถแยกสัญญาณรบกวน ออกจากสัญญาณ PD ในกรณีทำการวัด PD ที่หน้างาน(On-site test)ที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงสัญญาณรบกวนที่เกิดจากสภาพแวดล้อมรอบ ๆ ได้ แต่อย่างไรก็ตามวิธีวัด PD แบบ Synchronous Multi-Channel PD ก็ยังมีข้อจำกัด เช่น ไม่สามารถแยกสัญญาณ PD ที่มีขนาดใหญ่ ๆ กับขนาดเล็กเพื่อระบุประเภทได้อย่างชัดเจนได้ และอีกประการหนึ่งคือ ถึงแม้สัญญาณ PD ทั้งสองจะมีขนาดใกล้เคียงกัน และสามารถแยกสัญญาณออกจากกันได้ แต่สัญญาณที่แยกได้นั้นก็มีความผิดเพี้ยนอยู่บ้างจากรูปสัญญาณเดิม และอีกประการหนึ่งคือการเลือกย่านความถี่ของตัวเก็บประจุคัปปลิง (C_c) ทั้ง 3 ย่าน ให้มีความเหมาะสม ซึ่งถ้าหากมีการเลือกย่านความถี่ที่ไม่ดีก็จะส่งผลกระทบต่อมุมมองเห็นสัญญาณ PD และไม่สามารถแยกแยะสัญญาณให้ชัดเจนได้ และสุดท้ายนี้วิธีวัด PD แบบ Synchronous Multi-Channel PD ก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่มีความน่าสนใจและควรค่าต่อการนำไปพัฒนาต่อในอนาคตให้มีความละเอียดในการวัดและสามารถแยกแยะสัญญาณให้มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยการให้ความช่วยเหลือและสนับสนุนจากหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งต้องขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดอกเตอร์ นรเศรษฐ พัฒนเดช และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดอกเตอร์ ภพ จันเจริญสุข อาจารย์ที่ปรึกษา รวมถึงคุณปณชวีร์ ฉายศิริ ที่กรุณาให้ข้อเสนอแนะและความคิดเห็นต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการมาด้วยดีตลอด

ขอขอบคุณคุณเพทาย นิมสนอง คุณศักดิ์คำ มณีโรจน์ และเจ้าหน้าที่ประจำ บริษัท เทสลาฟาวเวอร์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

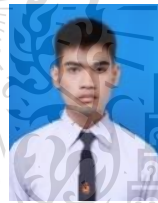
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

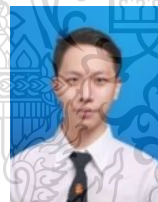
การออกแบบวงจรทดสอบการดิซชาร์จบางส่วนด้วยเทคนิค Synchronous Multi-channel และช่วยจัดหาอุปกรณ์สำหรับการต้องจรรถสอบให้

- เอกสารอ้างอิง**
- [1] Andreas Küchler, **High Voltage Engineering Fundamentals – Technology – Applications**, Springer Vieweg, Schweinfurt, Germany, 2017.
 - [2] Wojciech Koltunowicz, Ronald Plath “Synchronous Multi-channel PD Measurements,” **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, Vol. 15, No.6, December 2008, pp. 1715-1723.
 - [3] Alexander Kraetge, Kay Rethmeier, Michael Krüger and Paul Winter “Synchronous Multi-Channel PD Measurements and the Benefits for PD Analyses,” **IEEE PES T&D**, 2010.

ประวัติผู้จัดทำ



นายศักรินทร์ ชูระธรรม
รหัสนักศึกษา 60010969
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
E-mail: 60010969@kmitl.ac.th



นายสุกัญญ์ เชื้อวานุชิจการ
รหัสนักศึกษา 60010998
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
E-mail: 60010998@kmitl.ac.th



นายสัทรัฐ วงศ์สินปา
รหัสนักศึกษา 60011045
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
E-mail: 60011045@kmitl.ac.th



นายสิรคุปต์ บัวเหยา
รหัสนักศึกษา 60011061
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
E-mail: 60011061@kmitl.ac.th



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ ข.1 ข้อมูลเครื่อง MPD 600 (High-end partial discharge measurement and analysis system)

Center frequency	0 Hz - 32 MHz
Bandwidth	300 kHz, 650 kHz, 1 MHz, 1.5 MHz With broadband filter: 9 kHz, 30 kHz, 100 kHz, 300 kHz, 1 MHz, 3 MHz
Time domain	100 ns - 8 us
Input frequency range	V input: DC, 0.1 Hz - 2.16 kHz PD input: 0 Hz - 20 MHz
Input impedance	V input: 1 M Ω (parallel 1 μ F) PD input: 50 Ω
Input voltage	V input: 60 V rms (max.) PD input: 10 V rms (max.)
Dynamic range	V input: 102 dB PD input: 132 dB (overall), 70 dB (per input)
Computer connection	USB 2.0
Power supply	8 V DC - 12.4 V DC
Dimensions (W x H x D)	110 x 44 x 190 mm
Weight	600 g

ตารางที่ ข.2 ข้อมูลตัวเก็บประจุคัปปลิง MCC210

U_{pr8} (phase-to-ground)	100 kV
$C_{Nominal}$	1.0 nF (\pm 10%)
Withstand Voltage (1 min)	120 kV
Q_{PD}	< 1 pC @ 100 kV
Weight	10 kg / 22.1 lb
Dimensions (W x H x D)	450 x 766 x 450 mm / 17.5 x 30.15 x 17.5 inch
Operating temperature	-20 $^{\circ}$ C... 55 $^{\circ}$ C / -4 $^{\circ}$ F... 130 $^{\circ}$ F

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ขอสงวนสิทธิ์ในสิ่งที่ปรากฏ และขอสงวนสิทธิ์ของเนื้อหาเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ ข.3 ข้อมูลเครื่องปรับเทียบประจุไฟฟ้า (Pulse calibrator : CAL 542)

Pulse repetition frequency	300 Hz
Pulse rise time	< 4 ns*
Time domain	110 x 30 x 185 mm
Dimensions (W x H x D)	V input: DC, 0.1 Hz - 2.16 kHz PD input: 0 Hz - 20 MHz
Output connector	1 x BNC (BNC adapter, cables and connection clamps)
Computer connection	USB 2.0
Power supply	Lithium Battery 9 V, Lifetime > 10 years
Weight	520 g

ตารางที่ ข.4 ข้อมูลหม้อแปลงกระแส Omicron MCT 120 High-Frequency Current Transformer)

Frequency Range (-6 dB)	80 kHz ... 40 MHz (0 mm gap)
Inner hole dimensions	∅ ~53.5 mm / 2.11 in
Outer dimensions	114 x 154 x 62 mm / 4.49 x 6.07 x 2.45 inch
Ferrite core	Split
Connector	BNC, 50 Ohm, female
Weight	1.2 kg / 2.65 lb
Operating temperature	-20 °C ... 55 °C / -4 °F ... 130 °F

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

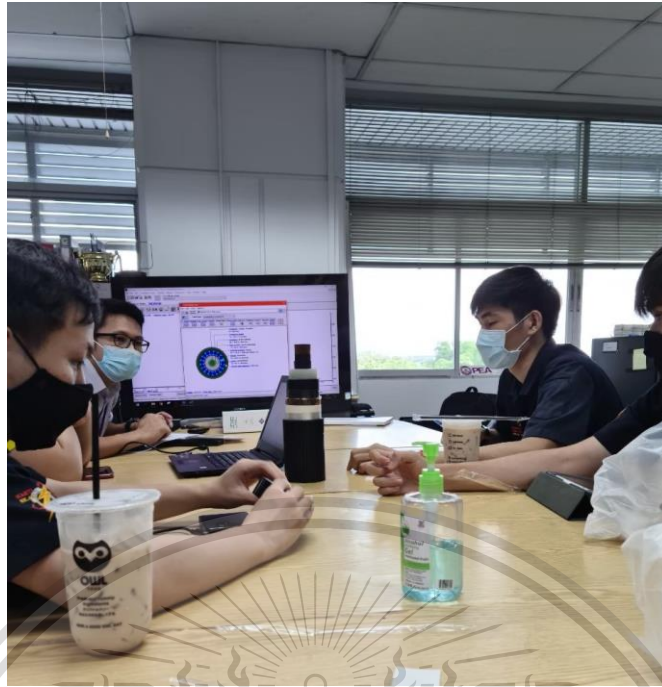
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ ค.1 การศึกษาโครงสร้างสายเคเบิลใต้ดิน และ เทคนิคการคำนวณ sheath voltage
บรรยายโดยเจ้าหน้าที่กองออกแบบระบบสายเคเบิลใต้ดิน การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (จามวงศ์วาน)



รูปที่ ค.2 การทดสอบสายเคเบิลที่ทำการออกแบบโดยการจำลองปัญหา ก่อนนำไปทำการทดสอบ
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นด้านการค้า
โดยการวัดดิซซาร์จบางส่วนด้วยเทคนิค Synchronous Multi-channel
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ ค.3 ฟังการบรรยายให้ความรู้เกี่ยวกับการวัดดิซาร์จบางส่วน โดยคุณเพทาย นิมสนองและ
เจ้าหน้าที่ประจำบริษัทเทสลา์พาวเวอร์จำกัด



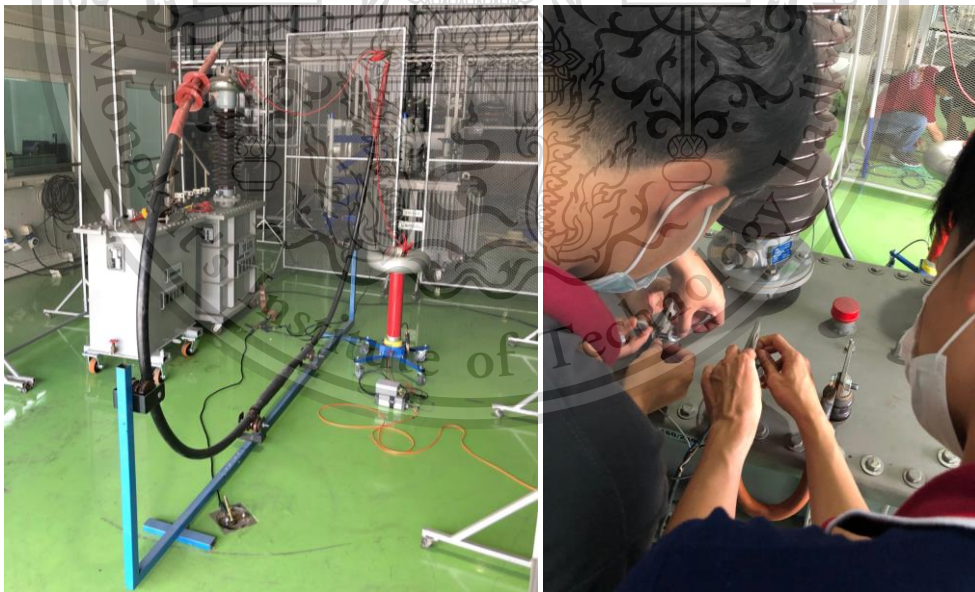
รูปที่ ค.4 ฟังเจ้าหน้าที่ประจำบริษัทเทสลา์พาวเวอร์จำกัดแนะนำการตรวจสอบสภาพหม้อแปลง
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ทดสอบโดยการวัดเปอร์เซ็นต์ Impedance
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ ค.5 วางแผนการทดสอบสายเคเบิลใต้ดินโดยการวัดดิซซาร์จบางส่วนด้วยเทคนิค Synchronous Multi-channel



รูปที่ ค.6 ต่อยंत्रทดสอบทำการทดสอบสายเคเบิลใต้ดินโดยการวัดดิซซาร์จบางส่วนด้วยเทคนิค Synchronous Multi-channel

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ ค.7 ทำการนำเสนอโครงการเพื่อรับฟังคำแนะนำจากอาจารย์ที่ปรึกษา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ประวัติผู้เขียน



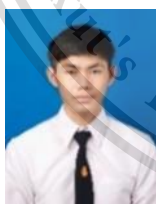
นายศักรินทร์ ทุระธรรม
เกิดวันที่
สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจาก
โรงเรียนธรรมศาสตร์คลองหลวงวิทยาคม
ที่อยู่ 36/332 ม.3 ถ.เลียบคลองสาม ต.คลองสาม อ.คลอง
หลวง จ.ปทุมธานี 12120



นายศุภณัฐ เชี่ยวชาญกิจการ
เกิดวันที่ 5 ธันวาคม พ.ศ. 2540
สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจาก
โรงเรียนเบญจมราชรังสฤษฎิ์ จังหวัดฉะเชิงเทรา
ที่อยู่ 170-172 ถ.ฉะเชิงเทรา-บางปะกง ต.หน้าเมือง
อ.เมือง จ.ฉะเชิงเทรา 24000



นายสหรัฐ วงศ์นาป่า
เกิดวันที่ 4 ธันวาคม 2541
สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจาก
โรงเรียนชำนาญสามัคคีวิทยา จังหวัดระยอง
ที่อยู่ 10/3 ม.1 ต.กองดิน อ.แกลง จ.ระยอง 22160



นายสิรคุปต์ บัวเขียว
เกิดวันที่ 30 สิงหาคม 2541
สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจาก
โรงเรียนพานพิทยาคม จังหวัดเชียงราย
ที่อยู่ 107 ม.7 ต.ป่าแฝก อ.แม่ใจ จ.พะเยา 56130

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.