

การวินิจฉัยฉนวนในสายเคเบิลกราวด์เคเบิล  
DIAGNOSTIC OF INSULATION IN UNDERGROUND CABLES



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2561

การวินิจฉัยฉนวนในสายเคเบิลแรงดันสูง  
DIAGNOSTIC OF INSULATION IN UNDERGROUND CABLES



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ปีการศึกษา 2561

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.

# DIAGNOSTIC OF INSULATION IN UNDERGROUND CABLES



THIS PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT  
FOR THE BACHELOR DEGREE IN ELECTRICAL ENGINEERING  
DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
2018

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 2561

การวินิจฉัยฉนวนในสายเคเบิลกราวด์เคเบิล  
DIAGNOSTIC OF INSULATION IN UNDERGROUND CABLES



อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานภายในเท่านั้น มิใช่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ขยายชาญ โพธิสาร  
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.

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2561

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การวินิจฉัยฉนวนในสายแอนเดอร์กราวด์เคเบิล

ผู้จัดทำ

1. นายณัฐพงศ์ นวพิทยารัตน์
2. นายธนพล พงษ์ศิริชัยโรจน์
3. นายธนวิทย์ จิรทัพย์ชัยสกุล



.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร.นรเศรษฐ์ พัฒนเดช)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชัยชาญ โภธิสาร)

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.

## การวินิจฉัยฉนวนในสายแอนเตอร์กราวด์เคเบิล

นายณัฐพงศ์ นวพิทยารัตน์  
นายธนพล พงษ์ศิริชัยโรจน์  
นายธนวิทย์ จิรทิพย์ชัยสกุล  
รศ.ดร.นรเศรษฐ พัฒนเดช อาจารย์ที่ปรึกษา  
ผศ. ชายชาญ โพธิสาร อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
ปีการศึกษา 2561

### บทคัดย่อ

ปัญญานิพนธ์นี้นำเสนอการทดลองเพื่อวินิจฉัยฉนวนของระบบสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูง ประกอบด้วย สายเคเบิล พิกัด 12/20(24) kV พื้นที่หน้าตัด 240 mm<sup>2</sup> ชูดต่อสายเคเบิลและชูดต่อด้านปลายสายเคเบิล โดยทำการจำลองกรณีศึกษา 4 กรณี ได้แก่ชูดต่อสายเคเบิลที่ไม่มีปัญหา ชูดต่อสายเคเบิลที่มีรอยบาก ชูดต่อสายเคเบิลปนเปื้อนผงทองแดง และชูดต่อสายเคเบิลปนเปื้อนผงเหล็ก กรณีศึกษาทั้งหมดจะทำการทดสอบ 3 วิธี คือ การวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน การวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนด้วยการวัดแบบดั้งเดิม และการวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนด้วยเทคนิคสมัยใหม่โดยใช้หม้อแปลงความถี่สูง และใช้เซ็นเซอร์ชนิดสายอากาศสำหรับตรวจจับสัญญาณความถี่สูงมาก กระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันที่วัดได้จะนำไปวิเคราะห์รูปร่างของตัวกระแส อัตราส่วนค่าเก็บประจุ รวมทั้งค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเล็กทรอนิกส์จากผลการทดสอบพบว่าค่ากระแสการนำซึ่งเป็นส่วนประกอบของกระแสโพลาริเซชันสามารถใช้ระบุปัญหาบนผิวฉนวนของชูดต่อสายเคเบิลได้ ค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเล็กทรอนิกส์มีความแตกต่างกันเล็กน้อยและค่าอัตราส่วนของตัวเก็บประจุมีความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญสำหรับทุกกรณีศึกษา ผลการตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนพบว่า การวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนด้วยวิธีดั้งเดิมจะให้ผลรูปแบบ Phase Resolved Partial Discharge สอดคล้องกับ การวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนด้วยเทคนิคสมัยใหม่โดยใช้หม้อแปลงความถี่สูง สำหรับการวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนด้วยเทคนิคสมัยใหม่โดยใช้เซ็นเซอร์ชนิดสายอากาศสำหรับตรวจจับสัญญาณความถี่สูงมากไม่สามารถระบุปัญหาที่จำลองขึ้นมาที่พิกัดแรงดันทดสอบที่ใช้ในการทดลองได้ นอกจากนี้แล้ว ได้ทำการทดสอบหาต้นไม้น้ำจากสายเคเบิลใต้ดินพิกัด 12/20(24) kV ที่เกิดความเสียหายจากการเกิดความผิดปกติขึ้น การย้อมสีตัวอย่างสายเคเบิลเพื่อให้สามารถมองเห็นต้นไม้น้ำได้ชัดเจน ได้ทำการย้อมสีด้วยสารละลายที่แตกต่างกัน 3 ชนิด ได้แก่ การย้อมด้วยสารละลายเมทิลีนบลูผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์ การย้อมด้วยสารละลายเมทิลีนบลูผสมแอมโมเนีย และการย้อมด้วยสารละลายเมทิลีนบลูผสมโซเดียมคาร์บอเนต จากผลการทดสอบไม่พบต้นไม้น้ำในสายเคเบิลตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ก่อนจะนำข้อมูลไปใช้ในงานวิจัยหรือการศึกษานานาชาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
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.

# DIAGNOSTIC OF INSULATION IN UNDERGROUND CABLES

Nuthapong

Navapittayaratana

Tanapol

Phongsirichairojna

Thanawin

Jirathipchaisakul

Assoc.Prof.Dr.techn.Norasage Pattanadech Advisor

Asst. Prof. Chaichan

Pothisarn Co-Advisor

2018

## ABSTRACT

This project represents the diagnostic tests for the problems of the underground cable system comprised of a 12/20(24) kV underground cable with the cross section area of 240 mm<sup>2</sup>, cable joints, and cable terminators. Four different case studies were simulated on the cable joint, i.e., a healthy heat shrinkable cable joint (case 1), a cable joint with an incision on XLPE surface (case 2), a cable joint contaminated with 20 micron iron powder on XLPE surface (case 3) and a cable joint contaminated with 20 micron copper powder on XLPE surface (case 4). Three different diagnostic test methods, i.e., polarization and depolarization current (PDC) measurement, the conventional partial discharge (PD) measurement and nonconventional PD measurements by using a high-frequency transformer (HFCT) and an ultra-high frequency (UHF) sensor were performed. The shapes of PDC tested including capacitive ratio (C-ratio), and dielectric dissipation factor (DDF) were analyzed. It was found that the conduction current extracted from the polarization currents can be used to indicate the surface problem of the contaminated cable joint. DDF and C-ratio obtained from all case studies were insignificantly different. For PD measurement, phase-resolved PD patterns obtained from the conventional PD measurement and the nonconventional PD measurement by using the HFCT were similar. However, the nonconventional PD measurement by using the UHF sensor could not detect PD signals at the tested voltages. Besides, water tree in a 12/20(24) kV failure underground cable was investigated. Water tree dying with three different solutions, i.e., methylene blue with sodium hydroxide, methylene blue with ammonia, and methylene blue with sodium carbonate was applied. From water tree testing, the water tree inside the cable specimen was not found.

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

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือจากหลายบุคคล โดยเฉพาะอย่างยิ่งต้องขอขอบคุณ รศ.ดร.นรเศรษฐ์ พัฒนเดช และ ผศ. ชายชาญ โปธิสาร อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการที่ได้ให้ทั้งความรู้ความอนุเคราะห์คอยให้คำปรึกษาให้ความสะดวกในการทำโครงการ การทดลอง และสถานที่ปฏิบัติการทดลองพร้อมข้อเสนอแนะที่มีประโยชน์เกี่ยวกับแนวทางในการทำโครงการ อีกทั้งตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ในการดำเนินโครงการจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการทางไฟฟ้าแรงสูง (High Voltage Laboratory, HVL) สำหรับการช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ อาทิ สถานที่และอุปกรณ์การทดสอบ

ขอขอบคุณรุ่นพี่นักศึกษาปริญญาโทและปริญญาเอกที่ช่วยสนับสนุนข้อมูลและแนะนำประสบการณ์ ทำให้การดำเนินโครงการเป็นไปด้วยดีเสมอมา

ขอขอบคุณบริษัท Meidensha Corporation ที่ให้การสนับสนุน โดยการมอบทุนสำหรับวิจัยให้กับโครงการปริญญาานิพนธ์นี้ ที่ทำให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จขึ้นมา

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณ บิดามารดา ที่คอยให้กำลังใจทำให้ก้าวผ่านการทำโครงการนี้ ลุล่วงไปได้ด้วยดี และเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่อยู่ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ท้ายสุดนี้คณะผู้จัดทำหวังเป็นอย่างยิ่งว่า โครงการนี้จะเป็นประโยชน์ต่อการศึกษา หากมีข้อบกพร่องประการใดคณะผู้จัดทำขอน้อมรับไว้ ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูปภาพ	VII
สารบัญตาราง	XII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตงานโครงการ	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน	2
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและสมมติฐานที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 บทนำ	5
2.2 สายเคเบิลใต้ดิน	6
2.2.1 ตัวนำไฟฟ้า(Conductor)	6
2.2.2 ชั้นกั้นตัวนำและชั้นกั้นฉนวน(Conductor screen and Insulation screen)	7
2.2.3 ฉนวนไฟฟ้า (Insulation)	7
2.2.4 เทปป้องกันน้ำชนิดสารกึ่งตัวนำ (Water Blocking Tape)	9
2.2.5 ชั้นกั้นโลหะ (Metallic Screen)	9
2.2.6 ชั้นลามิเนต (Laminated Sheath)	10
2.2.7 เปลือกนอก (Jacket หรือ Oversheath)	10
2.3 ข้อต่อเคเบิล	10
2.4.1 การออกแบบและติดตั้งข้อต่อเคเบิล	11
2.4 หัวต่อเคเบิล	14
2.4.1 หัวต่อเคเบิลแบบ Heat Shrink Type	14
2.5 การควบคุมสนามไฟฟ้าในอุปกรณ์ระบบเคเบิลใต้ดิน	16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
2.6 กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน	20
2.6.1 ความเป็นมาของปัญหาที่เกิดที่ฉนวนในสายเคเบิล	21
2.6.2 ความเป็นมาของพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวินิจฉัย	23
2.6.3 การตีความกรณีเคเบิลที่ไม่มีปัญหา	23
2.6.4 น้ำในฉนวนของสายเคเบิล XLPE	23
2.6.5 เคเบิลฉนวนกระดาษน้ำมันที่ต่อกับโหนดสูง ๆ	23
2.6.6 สารปนเปื้อนที่ทำให้เกิดปัญหาในสายเคเบิล XLPE	23
2.6.7 การจำลองแบบจำลองด้วยการวิเคราะห์กระแสโพรราไรเซชันและกระแสดีโพรราไรเซชันสำหรับฉนวนเคเบิลใต้ดิน	23
2.6.8 การตอบสนองของวัสดุไดอิเล็กตริกในโดเมนเวลา	25
2.6.9 การตอบสนองของวัสดุไดอิเล็กตริกในโดเมนความถี่	26
2.7 การดิสชาร์จบางส่วน	29
2.7.1 ชนิดของดิสชาร์จบางส่วน	29
2.7.2 วงจรสมมูลการเกิดการดิสชาร์จบางส่วน	33
2.7.3 การเกิดดิสชาร์จภายในไดอิเล็กตริก	35
2.7.4 การวัดการดิสชาร์จบางส่วนพื้นฐาน	36
2.7.5 การตรวจสอบ PD โดยไม่ใช้วิธีทางไฟฟ้า	38
2.7.6 การเกิดดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิล	39
2.8 ต้นไม้และ (Water tree)	39
<b>บทที่ 3 การออกแบบและประกอบสร้าง</b>	<b>44</b>
3.1 บทนำ	44
3.2 การเตรียมสายเคเบิลเพื่อนำมาติดตั้งข้อต่อเคเบิล	44
3.3 การจำลองปัญหาในสายเคเบิลใต้ดินจำลอง	45
3.4 การออกแบบและเครื่องมือการทดสอบสายเคเบิลใต้ดินจำลอง	46
3.4.1 การทดสอบกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน	47
3.4.2 การวัดดิสชาร์จบางส่วน	49
3.5 การเตรียมชิ้นส่วนเคเบิลสำหรับการตรวจสอบหาต้นไม้	53
<b>บทที่ 4 การทดสอบและประเมินผล</b>	<b>55</b>
4.1 วิธีดำเนินการทดสอบ	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สามารถใช้ส่วนหรือการใช้อื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานของท่านนั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 4.1.1 การทดสอบระบบเคเบิลใต้ดินจำลอง 57  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
4.1.2 การทดสอบสายเคเบิลเพื่อหาต้นไม้	57
<b>บทที่ 5 การทดสอบและประเมินผล</b>	<b>64</b>
5.1 ผลการทดสอบ	64
5.1.1 ผลการทดสอบกระแสโพลาริเซชันและกระแสตีโพลาริเซชันของกรณี จำลองต่าง ๆ	64
5.1.2 ผลการทดสอบการวัดดิซซาร์จบางด้วยตัวเก็บประจุ, HFCT และ UHF sensor	75
5.1.3 ผลการทดสอบสายเคเบิลหาต้นไม้	81
<b>บทที่ 6 สรุปและข้อเสนอแนะ</b>	<b>89</b>
6.1 สรุป	89
6.2 ข้อเสนอแนะ	90
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	<b>91</b>
<b>ภาคผนวก</b>	<b>92</b>
ภาคผนวก ก บทความทางวิชาการ	93
ภาคผนวก ข ข้อมูลอุปกรณ์	103
<b>ประวัติผู้เขียน</b>	<b>106</b>



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

## สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างสาย 69, 115 kV CV หรือ CE	5
2.2 โครงสร้างของ Cross-link Polyethylene	8
2.3 โครงสร้างของ Ethylene Propene Rubber	9
2.4 ข้อต่อเคเบิลชนิด Heat- shrinkable	10
2.5 การติดตั้งข้อต่อเคเบิล	13
2.6 โครงสร้างหัวต่อเคเบิลแบบ Heat Shrink Type	15
2.7 หัวต่อเคเบิลแบบ Heat Shrink Type	15
2.8 เส้นสนามไฟฟ้าและเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าในสายเคเบิลที่ถูกเตรียม	16
2.9 วงจรสมมูลชนิดเก็บประจุที่จะกำหนดแรงดันเริ่มต้นดิสชาร์จตามพิกัดที่ปลายสายเคเบิลที่ไม่มีการควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้า	17
2.10 การควบคุมความเครียดของสนามไฟฟ้าด้วยความจุไฟฟ้าหรือลักษณะทางเรขาคณิต	18
2.11 การควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้าด้วยการหักเหของเส้นฟลักซ์ไฟฟ้า	19
2.12 การควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้าด้วยความต้านทาน	19
2.13 การควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้าด้วยการควบคุมศักย์ไฟฟ้า	20
2.14 กราฟการวัดกระแสโพลาร์ไรเซชันและกระแสดีโพลาร์ไรเซชัน	26
2.15 ระบบเครือข่ายแบบบันได R-C	27
2.16 ชนิดของการเกิดดิสชาร์จบางส่วน	30
2.17 ตัวอย่างรูปสัญญาณการเกิดโคโรนาดิสชาร์จ	30
2.18 ตัวอย่างรูปสัญญาณการเกิดดิสชาร์จตามผิว	31
2.19 ตัวอย่างรูปสัญญาณการเกิดดิสชาร์จภายใน	32
2.20 รูปสนามไฟฟ้าเมื่อเกิด Corona Discharge	32
2.21 สนามไฟฟ้าเมื่อเกิด Surface Discharge	33
2.22 รูปสนามไฟฟ้าเมื่อเกิด Internal Discharge	33
2.23 วงจรสมมูลการดิสชาร์จบางส่วน	33
2.24 การจำลองการเกิดดิสชาร์จบางส่วน	34
2.25 วงจรการวัดการดิสชาร์จบางส่วนพื้นฐาน	36
2.26 ต้นไม้ลักษณะคล้ายหุกระต่าย	40
2.27 ต้นไม้ลักษณะเป็นโพรง	41
2.28 โครงสร้างทางเคมีเมทิลีนบลู	41
2.29 แนวการเกิดต้นไม้น้ำแบบพุ่ม	42
2.30 แนวการเกิดต้นไม้น้ำแบบกิ่ง	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ หากมีการนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสาร กรุณาแจ้งเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มี  
เอกสารนี้สงวนลิขสิทธิ์ไว้ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่	หน้า
3.1 สายเคเบิลที่ใช้ในการทดสอบ	44
3.2 ระยะเวลาปกขึ้นกั้นฉนวนของสายเคเบิล	44
3.3 ระยะเวลาปกขึ้น XLPE ของสายเคเบิล	45
3.4 ระยะเวลาปกขึ้นตัวนำของสายเคเบิล	45
3.5 ข้อต่อเคเบิลที่ไม่มีปัญหา	45
3.6 ข้อต่อที่มีรอยบาก	46
3.7 ข้อต่อเคเบิลใส่ผงทองแดง (ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 ไมครอน)	46
3.8 ข้อต่อเคเบิลใส่ผงเหล็ก (ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 ไมครอน)	46
3.9 แบบจำลองวงจรการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสตีโพลาริเซชัน	47
3.10 วงจรการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสตีโพลาริเซชัน	47
3.11 PDC Analyser 1MOD	48
3.12 อุปกรณ์จ่ายแรงดันเสริม (Phantom) (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง	49
3.13 แบบจำลองวงจรการวัดดิสชาร์จบางส่วนด้วยตัวเก็บประจุ	49
3.14 วงจรการวัดดิสชาร์จบางส่วนด้วยตัวเก็บประจุ	50
3.15 แบบจำลองวงจรการวัดดิสชาร์จบางส่วนด้วย HFCT-UHF sensors	51
3.16 วงจรการวัดดิสชาร์จบางส่วนด้วย HFCT-UHF sensors	51
3.17 PD-Analyzer HF/UHF	52
3.18 HFCT รุ่น 100 HVPD	52
3.19 UHF Sensor	53
3.20 ตัดฉนวนเคเบิลลักษณะเป็นแฉก	53
3.21 ทำความสะอาดและแบ่งชิ้นส่วนที่จะทดสอบ	54
4.1 การขึ้นแรงดันทดสอบแบบ Conventional	55
4.2 สารละลายเมทิลีนบลูผสมแอมโมเนียเข้มข้น	58
4.3 ต้มสารละลายโดยใช้เตาไฟฟ้าชนิดกวนสาร	59
4.4 ชิ้นส่วนเคเบิลที่ผ่านการย้อมสี	59
4.5 ชิ้นส่วนเคเบิลส่องด้วยกล้องไลต์ไมโครสโคป	60
4.6 สารละลายเมทิลีนบลูผสมโซเดียมคาร์บอเนต	60
4.7 สารละลายเมทิลีนบลูผสมโซเดียมคาร์บอเนต	61
4.8 ชิ้นส่วนเคเบิลที่ผ่านการย้อมสี	62
4.9 ชิ้นส่วนเคเบิลส่องด้วยกล้องไลต์ไมโครสโคป	62
5.1 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อต่อไม่มีปัญหา กราฟกระแสโพลาริเซชันและตีโพลาริเซชัน	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่	หน้า
5.2 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อต่อไม่มีปัญหา กราฟแสดงค่าความสูญเสีย	65
5.3 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อต่อไม่มีปัญหา กราฟ c ratio	65
5.4 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อต่อมีรอยบาก กราฟกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน	66
5.5 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อต่อมีรอยบาก กราฟแสดงค่าความสูญเสีย	67
5.6 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อต่อมีรอยบาก กราฟ c ratio	67
5.7 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อต่อรอยผงทองแดง กราฟกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน	69
5.8 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อต่อรอยผงทองแดง กราฟแสดงค่าความสูญเสีย	69
5.9 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อต่อรอยผงทองแดง กราฟ c ratio	70
5.10 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อต่อรอยผงเหล็ก กราฟกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน	71
5.11 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อต่อมีรอยบาก กราฟแสดงค่าความสูญเสีย	71
5.12 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อต่อรอยผงเหล็ก กราฟ c ratio	72
5.13 เปรียบเทียบกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันทั้ง 4 กรณี	73
5.14 เปรียบเทียบกระแสคอนดักชันทั้ง 4 กรณี	73
5.15 เปรียบเทียบค่าความสูญเสียทั้ง 4 กรณี	74
5.16 เปรียบเทียบ c ratio เสียทั้ง 4 กรณี	75
5.17 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อต่อไม่มีปัญหา กราฟการวัดดิสซาร์จบางส่วนแบบ Conventional	76
5.18 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อต่อไม่มีปัญหา กราฟการวัดดิสซาร์จบางส่วนด้วย HFCT sensor	76
5.19 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อต่อไม่มีปัญหา กราฟการวัดดิสซาร์จบางส่วนด้วย UHF sensor	77
5.20 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อต่อมีรอยบาก กราฟการวัดดิสซาร์จบางส่วนแบบ Conventional	77
5.21 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อต่อมีรอยบาก กราฟการวัดดิสซาร์จบางส่วนด้วย HFCT sensor	78
5.22 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อต่อมีรอยบาก กราฟการวัดดิสซาร์จบางส่วนด้วย UHF sensor	78
5.23 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อต่อรอยผงทองแดง กราฟการวัดดิสซาร์จบางส่วนแบบ Conventional	79
5.24 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อต่อรอยผงทองแดง กราฟการวัดดิสซาร์จบางส่วนด้วย HFCT sensor	79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่	หน้า
5.25 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อต่อรอยฝังทองแดง กราฟการวัดดิซซาร์จบางส่วนด้วย UHF sensor	80
5.26 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อต่อรอยฝังเหล็ก กราฟการวัดดิซซาร์จบางส่วนแบบ Conventional	80
5.27 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อต่อรอยฝังเหล็ก กราฟการวัดดิซซาร์จบางส่วนด้วย HFCT sensor	81
5.28 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อต่อรอยฝังเหล็ก กราฟการวัดดิซซาร์จบางส่วนด้วย UHF sensor	81
5.29 ส่องชิ้นส่วนเคเบิล 1-1 ที่ย้อมเมทิลีนบลูผสมแอมโมเนีย	82
5.30 ผลการตรวจสอบหาต้นไม้เคเบิล 1-1 ด้วยสารละลายเมทิลีนบลูผสมแอมโมเนีย (ก) ด้านที่ 1 (ข) ด้านที่ 2 (ค) ด้านที่ 3	82
5.31 ส่องชิ้นส่วนเคเบิล 1-1 ที่ย้อมเมทิลีนบลูผสมโซเดียมคาร์บอเนต	82
5.32 ผลการตรวจสอบหาต้นไม้เคเบิล 1-1 ด้วยสารละลายเมทิลีนบลูผสมโซเดียมคาร์บอเนต (ก) ด้านที่ 1 (ข) ด้านที่ 2 (ค) ด้านที่ 3	83
5.33 ส่องชิ้นส่วนเคเบิล 1-2 ที่ย้อมเมทิลีนบลูผสมแอมโมเนีย	83
5.34 ผลการตรวจสอบหาต้นไม้เคเบิล 1-2 ด้วยสารละลายเมทิลีนบลูผสมแอมโมเนีย (ก) ด้านที่ 1 (ข) ด้านที่ 2 (ค) ด้านที่ 3	84
5.35 ส่องชิ้นส่วนเคเบิล 1-2 ที่ย้อมเมทิลีนบลูผสมโซเดียมคาร์บอเนต	84
5.36 ผลการตรวจสอบหาต้นไม้เคเบิล 1-2 ด้วยสารละลายเมทิลีนบลูผสมโซเดียมคาร์บอเนต (ก) ด้านที่ 1 (ข) ด้านที่ 2 (ค) ด้านที่ 3	84
5.37 ส่องชิ้นส่วนเคเบิล 2-1 ที่ย้อมเมทิลีนบลูผสมแอมโมเนีย	85
5.38 ผลการตรวจสอบหาต้นไม้เคเบิล 2-1 ด้วยสารละลายเมทิลีนบลูผสมแอมโมเนีย (ก) ด้านที่ 1 (ข) ด้านที่ 2 (ค) ด้านที่ 3	85
5.39 ส่องชิ้นส่วนเคเบิล 2-1 ที่ย้อมเมทิลีนบลูผสมโซเดียมคาร์บอเนต	86
5.40 ผลการตรวจสอบหาต้นไม้เคเบิล 2-1 ด้วยสารละลายเมทิลีนบลูผสมโซเดียมคาร์บอเนต (ก) ด้านที่ 1 (ข) ด้านที่ 2 (ค) ด้านที่ 3	86
5.41 ส่องชิ้นส่วนเคเบิล 2-2 ที่ย้อมเมทิลีนบลูผสมแอมโมเนีย	86
5.42 ผลการตรวจสอบหาต้นไม้เคเบิล 2-2 ด้วยสารละลายเมทิลีนบลูผสมแอมโมเนีย (ก) ด้านที่ 1 (ข) ด้านที่ 2 (ค) ด้านที่ 3	87
5.43 ส่องชิ้นส่วนเคเบิล 2-2 ที่ย้อมเมทิลีนบลูผสมโซเดียมคาร์บอเนต	87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 5.44 ผลการตรวจสอบหาต้นไม้เคเบิล 2-2 ด้วยสารละลายเมทิลีนบลูผสมโซเดียมคาร์บอเนต 87  
(ก) ด้านที่ 1 (ข) ด้านที่ 2 (ค) ด้านที่ 3



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 วิธีการดำเนินงาน	3
2.1 คุณสมบัติของทองแดง (Cu) และอลูมิเนียม (Al)	6
2.2 เปรียบเทียบคุณลักษณะของทองแดง (Cu) และอลูมิเนียม (Al)	6
2.3 คุณสมบัติของ Polyvinyl Chloride (PVC) กับ Cross-link Polyethylene (XLPE)	9
4.1 เงื่อนไขการทดสอบ PDC	55
4.2 เงื่อนไขการทดสอบ PD แบบ Conventional	56
4.3 เงื่อนไขการทดสอบ PD แบบ ด้วย HFCT และ UHF sensor	57
4.4 การศึกษาการตรวจสอบต้นไม้ในสายเคเบิล	58
5.1 ผลการวิเคราะห์กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน กรณีข้อต่อไม่มีปัญหา	66
5.2 ผลการวิเคราะห์กระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน กรณีข้อต่อมีรอยบาก	68
5.3 ผลการวิเคราะห์กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน กรณีข้อต่อรอยผงทองแดง	70
5.4 ผลการวิเคราะห์กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน กรณีข้อต่อรอยผงเหล็ก	72
ข.1 การวัดกระแสของเครื่อง PDC-ANALYSER-1MOD	104
ข.2 การวัดแรงดันของเครื่อง PDC-ANALYSER-1MOD	104
ข.3 ข้อมูลเครื่อง PDC-Phantom-1000XE	104
ข.4 ข้อมูลเครื่อง PD-Analyzer HF-UHF	105
ข.5 ข้อมูล HFCT 140 ของ HVPD	105

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันการไฟฟ้านครหลวงและการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคได้มีการลงทุนก่อสร้างระบบเคเบิลใต้ดินเพื่อเปลี่ยนแปลงระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าภายในประเทศอย่างกว้างขวางไม่เฉพาะพื้นที่สำคัญในเขตกรุงเทพและปริมณฑลอีกต่อไป เนื่องจากบางพื้นที่มีความจำเป็นต้องใช้ระบบเคเบิลใต้ดินเพราะเป็นพื้นที่แออัดหรือเป็นพื้นที่ที่ต้องให้ความสำคัญกับภาพลักษณ์และภูมิทัศน์ แต่หลังจากได้ทำการก่อสร้างและใช้งานระบบเคเบิลใต้ดินได้มีการพบเจอปัญหาในระบบเคเบิลใต้ดินไม่ว่าจะในส่วนของการไฟฟ้าหรือภาคเอกชนก็ตาม โดยปัญหาเกิดจากหลายสาเหตุ เช่น การเกิดต้นไม้ในเนื้อฉนวน, การเชื่อมต่อสายเคเบิลที่ผิดพลาดหรือไม่เหมาะสมโดยขาดความชำนาญ, การที่มีแรงดันเกินเนื่องจากแรงดันเหนี่ยวนำอันเป็นผลมาจากฟ้าผ่าที่ต้นขั้ว, รอยขีดข่วนที่เกิดจากการลากสายทำให้เกิดสนามไฟฟ้าสูงบริเวณนั้น และดิสชาร์จบางส่วนในเนื้อฉนวน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาวิธีวินิจฉัยปัญหาที่เกิดในเนื้อฉนวนที่เป็นปัญหาหลักในระบบเคเบิลใต้ดิน เช่น การวิเคราะห์ฉนวนด้วยวิธีการวัดการดิสชาร์จบางส่วน, การวิเคราะห์กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน และการตรวจหาต้นไม้ที่เป็นต้น ที่ผ่านมาจะศึกษาการวิเคราะห์ฉนวนในสายเคเบิลเพียงอย่างเดียว แต่ตอนนี้เป็นที่ทราบแล้วว่าปัญหาของฉนวนสามารถเกิดได้ในทุกอุปกรณ์ในระบบเคเบิลไม่ว่าจะเป็นข้อต่อของเคเบิลหรือหัวต่อเคเบิลที่เชื่อมไปยังอุปกรณ์อื่นซึ่งเกิดจากการติดตั้งหรือออกแบบส่วนควบคุมสนามไฟฟ้าที่ไม่เหมาะสมทำให้เกิดความเครียดทางไฟฟ้าบริเวณปลายชั้นกันตัวนำ เนื่องจากการหักเหของสนามไฟฟ้าที่จะนำไปสู่ความล้มเหลวในที่สุด จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาปัญหาที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์ระบบเคเบิลใต้ดินเพิ่มเติมด้วย

### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของระบบเคเบิลใต้ดิน
2. เพื่อศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับช่องการดิสชาร์จบางส่วนและกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันในฉนวนของเคเบิลใต้ดิน
3. เพื่อศึกษาการวิเคราะห์ผลการดิสชาร์จบางส่วนกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันในฉนวนของเคเบิลใต้ดิน
4. เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่ออาการเกิดการดิสชาร์จบางส่วนและผลกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันในฉนวนของเคเบิลใต้ดิน
5. เพื่อศึกษาการตรวจสอบหาต้นไม้ในสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE โดยการยอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และใช้เพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3 ขอบเขตของโครงการงาน

1. ศึกษาลักษณะโครงสร้างระบบเคเบิลใต้ดิน
2. ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับการดิสชาร์จบางส่วนและการวิเคราะห์ผลของกระแส โฟลาไรเซชันและดีโฟลาไรเซชันของอุปกรณ์ในฉนวนของเคเบิลใต้ดิน
3. ศึกษาและวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการศึกษาการเกิดดิสชาร์จบางส่วนและกระแส โฟลาไรเซชันและดีโฟลาไรเซชันในฉนวนของเคเบิลใต้ดิน
4. ศึกษาการทดสอบอุปกรณ์ในระบบเคเบิลใต้ดินด้วยวิธีต่าง ๆ และเปรียบเทียบ ผลการทดสอบ
5. ศึกษาและทดลองตรวจสอบหาต้นไม้น้ำในสายเคเบิลใต้ดินชนิดฉนวน XLPE โดยการย้อมสีด้วยสารละลายเมทาสินบลู

### 1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

1. ศึกษาโครงสร้างและหน้าที่ของอุปกรณ์ในระบบเคเบิลใต้ดิน
2. ศึกษางานวิจัยและมาตรฐานของการทดสอบระบบเคเบิลใต้ดิน
3. ศึกษาทฤษฎีของการดิสชาร์จบางส่วนและการวิเคราะห์ผลของกระแส โฟลาไรเซชันและดีโฟลาไรเซชันในแต่ละวิธี
4. ออกแบบการทดสอบและจัดเตรียมวัสดุทดสอบ
5. ทำการทดสอบระบบเคเบิลใต้ดินด้วยอุปกรณ์ทดสอบแต่ละวิธี
6. ทำการตรวจสอบหาต้นไม้น้ำในสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE โดยการย้อมสีด้วย สารละลายเมทาสินบลู
7. วิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบจากตัวอย่างของชิ้นงานที่ได้
8. สรุปผลการทำโครงการงานและข้อเสนอแนะ
9. จัดทำรูปเล่มปริญญาานิพนธ์

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 1.1 วิธีการดำเนินงาน

วิธีการดำเนินการ	ระยะเวลา																				
	ปี 2561					ปี 2562															
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.											
1. ศึกษาโครงสร้างและหน้าที่ของอุปกรณ์ในระบบเคเบิลใต้ดิน											←-----→ ←-----→										
2. ศึกษางานวิจัยและมาตรฐานของการทดสอบระบบเคเบิลใต้ดิน											←-----→ ←-----→										
3. ศึกษาทฤษฎีของการดิสชาร์จบางส่วนและการวิเคราะห์ผลของกระแสโพลาร์ไรเซชันและดีโพลาร์ไรเซชันในแต่ละวิธี											←-----→ ←-----→										
4. ออกแบบการทดสอบและจัดเตรียมวัสดุทดสอบ											←-----→ ←-----→										
5. ทำการทดสอบระบบเคเบิลใต้ดินด้วยอุปกรณ์ทดสอบแต่ละวิธี											←-----→ ←-----→										
6. ทำการตรวจสอบหาต้นไม้น้ำในสายเคเบิลใต้ดินชนิดฉนวน XLPE โดยการย้อมสีด้วยสารละลายเมทาสินบลู																			←-----→ ←-----→		
7. สรุปและวิเคราะห์ผลการทดสอบจากตัวอย่างของชิ้นงานที่ได้											←-----→ ←-----→										
8. สรุปผลการทำโครงการและข้อเสนอแนะ																				←-----→ ←-----→	

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 2

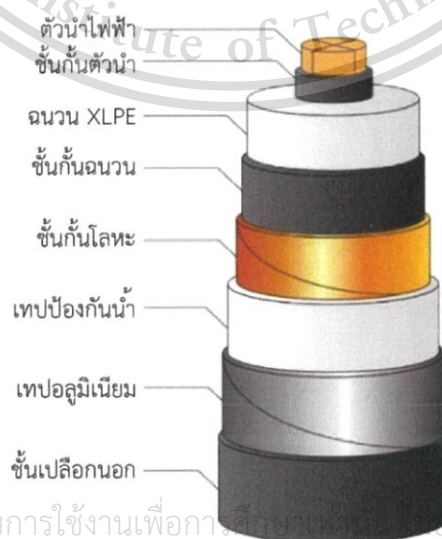
### ทฤษฎีและสมมติฐานที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 บทนำ

ในปัจจุบันความต้องการทางด้านพลังงานไฟฟ้าสูงขึ้นเนื่องจากจำนวนประชากรและอัตราการเจริญเติบโตของเศรษฐกิจที่เพิ่มขึ้น การไฟฟ้าฝ่ายผลิตจึงจำเป็นต้องคำนึงถึงเรื่องการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ามากขึ้น ระบบการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบ่งได้เป็น 2 แบบคือ ระบบสายส่งอากาศและระบบสายส่งใต้ดิน ระบบสายส่งอากาศมีข้อดีคือ ต้นทุนการก่อสร้างที่ถูกและหาจุดที่เกิดปัญหาได้ง่าย แต่อาจจะบดบังภูมิทัศน์ความสวยงามของสถานที่สำคัญ และอาจไม่อำนวยความสะดวกติดตั้งในบางสถานที่ที่แออัด จึงเป็นเหตุให้มีการสร้างระบบส่งจ่ายสายส่งใต้ดินมากขึ้นในสถานที่สำคัญ แต่ระบบเคเบิลใต้ดินมีข้อเสียคือ ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างสูง, ตรวจสอบจุดที่เกิดปัญหาได้ยาก และการระบายความร้อนไม่ดี การวินิจฉัยฉนวนในอุปกรณ์ระบบเคเบิลใต้ดินจึงจำเป็นเพื่อลดการเกิดปัญหาในระบบ เนื่องจากข้อบกพร่องในอุปกรณ์มักจะมีจุดเริ่มต้นที่ฉนวน จึงต้องมีการตรวจสอบอย่างมีประสิทธิภาพ เช่น การวัดการดิสชาร์จบางส่วน, การวัดกระแสโพลาไรเซชันและกระแสดีโพลาไรเซชัน และการตรวจสอบหาต้นไม้น้ำ เป็นต้น โดยในบทนี้จะอธิบายโครงสร้างอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบเคเบิลใต้ดิน การควบคุมสนามไฟฟ้าในอุปกรณ์ระบบเคเบิลใต้ดิน กระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชัน การดิสชาร์จบางส่วน และการตรวจสอบหาต้นไม้น้ำ

#### 2.2 สายเคเบิลใต้ดิน [3]

โครงสร้างของสายเคเบิลใต้ดินตัวอย่างใช้ในระบบสายส่งใต้ดิน 115 kV ที่ลดได้ตลอดแกนสแกน โดยแสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างสาย 115 kV CV หรือ CE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงหรือทำซ้ำของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

ส่วนประกอบของสายเคเบิลใต้ดินมีดังนี้

2.2.1 ตัวนำไฟฟ้า(Conductor) ทำหน้าที่ส่งผ่านกำลังไฟฟ้า ส่วนใหญ่จะเป็นทองแดงหรืออลูมิเนียม ตัวนำมีหลายลักษณะมีทั้งที่เป็นตัวนำเส้นเดียว ตัวนำตีเกลียว ตัวนำฝอย และตัวนำเดี่ยวกลวง สายเคเบิลที่ใช้ในหน้างานของการไฟฟ้านครหลวงจะใช้เป็นสายทองแดงแบบตีเกลียว ซึ่งพื้นที่หน้าตัดของตัวนำของตัวนำแต่ละเส้นและจำนวนของเส้นลวดที่ใช้ในการตีเกลียวจะผลิตเป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60228 คุณสมบัติของตัวนำทองแดงและตัวอลูมิเนียมสามารถแสดงได้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของทองแดง (Cu) และอลูมิเนียม (Al)

คุณสมบัติ	Cu	Al
ความนำไฟฟ้า (%IACS)	100	61
ความต้านทานไฟฟ้าที่ 20 °C ( $\Omega \cdot m$ )	$1.724 \times 10^{-8}$	$2.803 \times 10^{-8}$
สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (1/°C)	$1.70 \times 10^{-5}$	$2.3 \times 10^{-5}$
จุดหลอมเหลว (°C)	1083	659
ความนำความร้อน (W/cm.°C)	3.8	2.4
ความหนาแน่นที่ 20 °C (g/cm <sup>3</sup> )	8.89	2.7

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบคุณลักษณะของทองแดง (Cu) และอลูมิเนียม (Al)

คุณสมบัติ	Cu	Al
ความนำไฟฟ้า (พื้นที่หน้าตัดเท่ากัน)	1	0.6
พื้นที่หน้าตัด (ความต้านทานเท่ากัน)	1	1.66
เส้นผ่าศูนย์กลาง (ความต้านทานเท่ากัน)	1	1.29
น้ำหนัก (พื้นที่หน้าตัดเท่ากัน)	1	0.3
น้ำหนัก (ความต้านทานเท่ากัน)	1	0.5

ทองแดงมีคุณสมบัติความต้านทานทางไฟฟ้าน้อยกว่าอลูมิเนียม จึงทำให้ทองแดงมีประสิทธิภาพในการนำไฟฟ้าดีกว่าอะลูมิเนียมและที่กระแสไหลผ่านเท่ากันจะใช้ตัวนำทองแดงที่มีพื้นที่หน้าตัดที่น้อยกว่าตัวนำอะลูมิเนียม อย่างไรก็ตามตัวนำอะลูมิเนียมจะมีน้ำหนักเบาและราคาถูกกว่าตัวนำทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาร่วมกัน มิใช่เพื่อเผยแพร่หรือใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น 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.

## 2.2.2 ชั้นกั้นตัวนำและชั้นกั้นฉนวน(Conductor screen and Insulation screen)

เป็นชั้นสารกึ่งตัวนำ (Semiconducting screen) ซึ่งมีส่วนผสมของคาร์บอนแบล็คหรือผงเขม่าเป็นหลักเพื่อกระจายความเครียดสนามไฟฟ้า ตัวกั้นตัวนำจะอยู่ระหว่างชั้นตัวนำและฉนวน มีหน้าที่ทำให้ผิวสัมผัสระหว่างชั้นไม่มีช่องว่างที่อาจทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมซึ่งจะนำไปสู่การเกิดดิสชาร์จบางส่วนและทำให้อายุการใช้งานของสายเคเบิลลดลง นอกจากนี้ยังช่วยควบคุมสนามไฟฟ้าภายในเนื้อฉนวนให้มีความสม่ำเสมอมากขึ้น

2.2.3 ฉนวนไฟฟ้า(Insulation) เป็นส่วนที่ป้องกันไม่ให้เกิดกระแสไฟฟ้ารั่วไหลหรือลัดวงจรจนเกิดความเสียหายต่อระบบคุณภาพของฉนวนขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ทำ เริ่มแรกจะใช้เคเบิลแบบฉนวนกระดาษขี้ผึ้งน้ำมัน (PILC) ทนอุณหภูมิได้ประมาณ 80-90 °C มีความน่าเชื่อถือสูง แต่เนื่องจากชั้นตัวนำโลหะเป็นปลอกตะกั่วเมื่อเกิดการกัดกร่อนหรือรอยแตกอาจทำให้ความชื้นหรืออากาศเข้ามาในเนื้อฉนวนซึ่งอาจส่งผลให้เกิดความลึ้มเหลวในอนาคต ทำให้ปัจจุบันในระบบเคเบิลใต้ดินหันมาใช้เคเบิลฉนวนอัดรีดชนิดพอลิเมอร์มากขึ้นโดยชนิดที่นิยมใช้จะมีอยู่ 2 ชนิด คือ

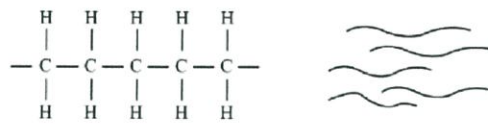
1. Cross-link Polyethylene(XLPE) ฉนวน XLPE ได้จากการนำ Polyethylene (PE) ซึ่งเป็น Thermoplastic มาเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโมเลกุลภายในทำให้เกิดการเกาะตัวกันระหว่างสายของโมเลกุลของ Polyethylene เป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนสภาพจาก Thermoplastic ไปเป็น Thermosetting ซึ่งเป็นผลให้มีคุณสมบัติที่ดีขึ้นหลายอย่าง วิธีการที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงนี้เรียกว่า Crosslinking ปกติโมเลกุลของ PE จะประกอบด้วยคาร์บอน (C) และไฮโดรเจน (H) ยึดเกาะกันเป็นสายยาวโดยไม่มีการยึดเกาะกันระหว่างสาย ดังนั้นเมื่อได้รับความร้อนสายโมเลกุลของ C-H นี้จะเคลื่อนที่ไปมาได้(เพราะไม่มีแรงยึดเกาะระหว่างสายโมเลกุล) เป็นผลให้เกิดละลายขึ้นนั่นเอง เมื่อทำให้เกิด Crosslink (ทำได้หลายวิธี เช่น การใช้สารเคมีเป็นตัวทำให้เกิดปฏิกิริยาหรือใช้ Radiation เป็นต้น) คือ ทำให้เกิดการยึดเกาะระหว่างสายของโมเลกุลของ Polyethylene แรงยึดเกาะระหว่างสายโมเลกุลนี้เองที่เป็นตัวทำให้ XLPE ไม่ละลายเมื่อได้รับความร้อน โดยฉนวน XLPE มีข้อดีดังนี้

1. ทนอุณหภูมิได้สูงคือ 90 °C
2. มี Dielectric Loss ต่ำ และมี Dielectric Strength สูง
3. มีคุณสมบัติทางกลที่ดีทนต่อแรงกระทำภายนอก
4. ทนต่อสารเคมีดีกว่า PE และ PVC
5. ไม่เป็นอันตรายต่อสภาวะแวดล้อม

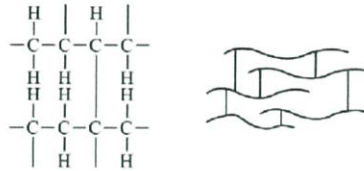
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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



โพลีเอทิลีน



ครอสลิงค์โพลีเอทิลีน

## รูปที่ 2.2 โครงสร้างของ Cross-link Polyethylene

2. Ethylene Propene Rubber (EPR) คือโคโพลิเมอร์ ที่ประกอบด้วยเอทิลีนและโพรพิลีน โดยอัตราส่วนของเอทิลีนและโพรพิลีน สามารถปรับเปลี่ยนกันไปในช่วงกว้าง แต่ในทางปฏิบัติขนาดของสายเคเบิลในเชิงพาณิชย์จะประกอบด้วยโคโพลิเมอร์ EPR ซึ่งมีเอทิลีนประมาณ 50 - 80% ในสภาวะปกติ EPR ทนอุณหภูมิได้ 90 °C และที่สภาวะลัดวงจรทนอุณหภูมิสูงสุดถึง 250 C° มีความไวต่อความชื้นและการเกิดต้นไม้ น้ำต่ำ EPR มีความยืดหยุ่นสูงกว่า XLPE แต่ค่า Dielectric Loss และราคาสูงกว่า

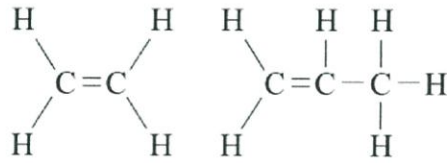
รูปที่ 2.3 แสดงโมเลกุลของเอทิลีนและโพรพิลีน โคโพลิเมอร์ขององค์ประกอบนี้จะประกอบด้วยโมโนเมอร์เอทิลีนและโพรพิลีน 50 % โครงสร้างของโพลิเมอร์ที่แตกแขนงคล้ายกับโพรพิลีน กิ่งของโซ่เหล่านี้มีเพียงพอที่จะป้องกันไม่ให้เกิดการตกผลึกและโคโพลิเมอร์ EPR นี้จะนุ่มยืดหยุ่นและขาดความแข็ง EPR อาจมีน้ำหนักของโมเลกุลที่สูงหรือต่ำและการกระจายน้ำหนักโมเลกุลอาจอยู่ในวงกว้างหรือแคบ ดังนั้นจึงมีหลายเกรดที่สามารถใช้ได้ซึ่งแต่แบบก็มีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน อัตราส่วนเอทิลีนที่เพิ่มขึ้นเป็น 70 - 80 % กลุ่มโพลิเมอร์สามารถจัดตำแหน่งและตกผลึกได้ง่ายขึ้น EPR เหล่านี้สามารถเรียกได้ว่าเป็น "semi-crystalline" ยิ่งอัตราส่วน เอทิลีนยิ่งสูงเท่าไรความเป็นผลึกของ EPR ยิ่งเพิ่มมากขึ้น

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.

โคพอลิเมอร์ ของเอทิลีน และ โพรพิลีน (~50:50)



เอทิลีน

โพรพิลีน

โครงสร้างโมเลกุลเดี่ยว



แตกกิ่งสั้น

โครงสร้าง อสัณฐานไม่เป็นผลึก

ต้องการทำกระบวนการครอสลิงค์

### รูปที่ 2.3 โครงสร้างของ Ethylene Propene Rubber

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของ Polyvinyl Chloride (PVC) กับ Cross-link Polyethylene (XLPE)

คุณสมบัติ	PVC	XLPE
พิกัดอุณหภูมิสูงสุดขณะใช้งาน (°C)	70	90
พิกัดอุณหภูมิสูงสุดขณะลัดวงจร (°C)	120	250
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก	6	2.4
ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	1.4	0.92
ความนำความร้อน (cal/cm.sec °C)	3.5	8

2.2.4 เทปป้องกันน้ำชนิดสารกึ่งตัวนำ (Water Blocking Tape) เป็นเทปที่ทำจากสารสังเคราะห์และมี Swellable Powder (สารที่ดูดซึมน้ำเข้าไปแล้วขยายตัวมีลักษณะเป็นผงคล้ายแป้ง) ที่เป็นสารกึ่งตัวนำ ที่สามารถดูดน้ำไว้ในตัวเทปตามแนวสายเคเบิลเวลาลากสายเพื่อต่อระบบเคเบิลใต้ดิน บริเวณปลายสายอาจโดนน้ำได้ ตัวเทปจะมีหน้าที่บล็อกน้ำไม่ให้ไหลซึมต่อเข้าไปในเคเบิล ช่วยป้องกันความเสียหายโดยเมื่อเทปโดยน้ำจะกลายเป็นเจล

2.2.5 ชั้นกันโลหะ (Metallic Screen) อยู่ถัดจากชั้นกันฉนวน ทำหน้าที่เป็นกราวด์สำหรับไฟฟ้าแรงสูง เป็นทางให้กระแสไฟฟ้าไหลกลับในกรณีที่เกิดการลัดวงจรและป้องกันอันตราย

จากการสัมผัสเคเบิล ทั้งยังป้องกันการก่อกวนจากสภาพแวดล้อมและช่วยป้องกันปัญหาทางกลที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น มิใช่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น 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. ตัวเชื่อม (Connector)
2. เทปฉนวน (Void filling tape)
3. ชั้นควบคุมความเครียด (Stress control tubing)
4. ชั้นฉนวน (Insulating sleeve)
5. ชั้นกันโลหะ (Screened insulating sleeve)
6. เทปโลหะป้องกัน (metal tape shield)
7. เปลือกนอก (sheath)

### 2.3.1 การออกแบบและติดตั้งข้อต่อเคเบิล

1. การเตรียมสายเคเบิล (Cable Preparation) เป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดจากวิธีการดำเนินการทั้งหมด และเป็นพื้นฐานที่แสดงให้เห็นถึงความน่าเชื่อถือในการสร้างข้อต่อและหัวต่อ การเตรียมเคเบิลที่ไม่เหมาะสมอาจนำไปสู่ความเสียหายได้ ในการเตรียมสายเคเบิลจะขึ้นอยู่กับวิธีและลักษณะของวัสดุ รวมไปถึงที่ผิวของฉนวนเคเบิลต้องไม่มีสิ่งปนเปื้อน ข้อบกพร่องและความเสียหาย เพราะสิ่งเหล่านี้อาจเกิดขึ้นได้ตอนทำการปลอกสายซิลด์ ที่ฉนวนของเคเบิลแบบอัดขึ้นรูปต้องมีผิวที่เรียบ ไม่มีสิ่งเจือปนหรือมีน้อยที่สุด และต้องไม่มีความชื้นที่เกาะตามผิวของฉนวน โดยต้องคำนึงถึงขอบเมื่อมีการตัดซิลด์ของฉนวน

2. การเชื่อมต่อตัวนำ (Connecting the Conductors) ตัวนำที่ใช้ในเคเบิลปกติมักใช้ทองแดงไม่กึ่งอะลูมิเนียม โดยมักใช้ทองแดงในข้อต่อโดยมีวิธีการเชื่อมต่อของตัวนำทองแดงสองตัวนำเข้าด้วยกันหลายวิธีเช่น การบีบอัด การเชื่อม การใช้ความร้อนหลอมละลาย การบัดกรี เป็นต้น ไม่ค่อยนิยมใช้อะลูมิเนียมเมื่อเทียบกับทองแดง เพราะต้องใช้ความร้อนระมัดระวังอย่างมากในการใช้เครื่องมือในการบีบอัดเชื่อมต่อตัวนำอะลูมิเนียม เมื่อใช้ตัวนำขนาดประมาณ 1000 kcmil ซึ่งเป็นตัวนำขนาดใหญ่ต้องสนใจในปัญหาการใช้เคเบิลเป็นสายป้อนเพราะจะมีแนวโน้มที่จะขยายตัวตามสภาพที่มีอุณหภูมิสูงเช่นการจ่ายโหลดฉุกเฉิน การทำงานของข้อต่อสายจะต้องมีเสถียรภาพต่อการจ่ายโหลดและสามารถรับกระแสสูงโดยไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อข้อต่อ การเชื่อมต่อโลหะควรเป็นโลหะชนิดเดียวกัน แต่ในบางกรณีใช้ตัวนำทองแดงเชื่อมต่อกับตัวนำอะลูมิเนียม โดยจะยอมรับให้ใช้อะลูมิเนียมเชื่อมต่อผ่านตัวนำทองแดง แต่ห้ามไม่ให้ตัวนำทองแดงต่อผ่านตัวนำอะลูมิเนียมเพราะว่ามีผลโหลดไซเคิล อัตราการขยายตัวของโลหะทั้งสองเป็นสาเหตุให้อะลูมิเนียมขยายออกมาและทำให้เกิดการเชื่อมต่อที่ไม่ดี

3. ฉนวนสำหรับข้อต่อ (Insulation for joints) วัสดุที่ใช้ในข้อต่อต้องมีความเข้ากันกับวัสดุในเคเบิลอย่างสมบูรณ์ ความหนาของผนังที่สัมผัสกับฉนวนของเคเบิลต้องทนต่อผลของความเครียดทางไฟฟ้า ข้อบังคับในอดีตของการใช้ฉนวนหุ้มกระดาดคือความหนาของฉนวนของเคเบิลเป็นสองเท่า หรือในความหมายคือออกแบบโดยการวางชั้นเท่ากับสองเท่าของความหนาที่มากกว่า ฉนวนของเคเบิล ฉนวนของข้อต่อที่ทำจากการพันเทป เรียกว่า self-amalgamating tapes ส่วน

ใหญ่ทำมาจากยางเอทิลีนโพรพิลีน โดยถูกสร้างมาจากบิวทีนหรือโพลีเอทิลีนที่ถูกผ่านคุณสมบัติทางความร้อนจนมีความคล้ายกันกับฉนวนของเคเบิล ข้อต่อ premolded ล้วนทำมาจากส่วนประกอบของยางเอทิลีน ข้อต่อที่หดตัวโดยความร้อน (heat shrink joints) มักทำมาจากสารประกอบของโพลีโอเลฟิน ที่มีคุณสมบัติในการขยายตัวเมื่อเกิดการเชื่อมขวางที่ได้จากการฉายรังสี โดยเส้นผ่าศูนย์กลางยังคงไม่ลดจนกว่าจะใช้ความร้อนกับตัวข้อต่อที่อยู่เหนือจุดเชื่อมต่อ ซึ่งวิธีนี้ไม่ควรให้เพิ่มความร้อนให้กับฉนวนมากเกินไป เมื่อเปรียบเทียบกับฉนวนทางไฟฟ้า วัสดุที่ใช้บางชนิดมีความคงทนต่อความร้อนที่ดี เมื่อให้ความร้อนที่มากเกินไปส่งผลให้ลดความสามารถของข้อต่อ ดังนั้นไม่ควรให้ความร้อนที่มากเกินไปที่จุดศูนย์กลางของข้อต่อ

4. วัสดุในการชิลด์ (Shield Materials) วัสดุที่จะนำมาใช้ต้องมีความเหมาะสมกับส่วนที่เหลือของเคเบิลและมีการนำกระแสไฟฟ้าที่เพียงพอในการลดค่าของผลทางไฟฟ้าสถิตในการสร้างแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ การแผ่รังสีประจุ และกระแสรั่วไหล และข้อต่อต้องสามารถควบคุมการเหนี่ยวนำของกระแสและกระแสความผิดพลาด ชิลด์ของข้อต่อมีความคล้ายกับชิลด์ของเคเบิล ที่มีความสามารถในการป้องกันการทางไฟฟ้าโดยการมีอนุภาคของคาร์บอนแบล็คเป็นสารประกอบอยู่ในวัสดุ โดยอนุภาคเหล่านี้ไม่ได้สัมผัสถึงกันเพื่อที่จะทำให้เกิดมีลักษณะนำไฟฟ้า

5. เปลือกนอกของข้อต่อ (Jackets for Joints) เปลือกนอกต้องเสริมสร้างความแข็งแรงทางกายภาพ ป้องกันไม่ให้ความชื้นซึมเข้าไปในข้อต่อและมีความคงทนทางเคมีและผลต่าง ๆ จากภายนอก

การติดตั้งข้อต่อเคเบิลชนิด Heat-shrinkable 22 kV มีวิธีการดังนี้

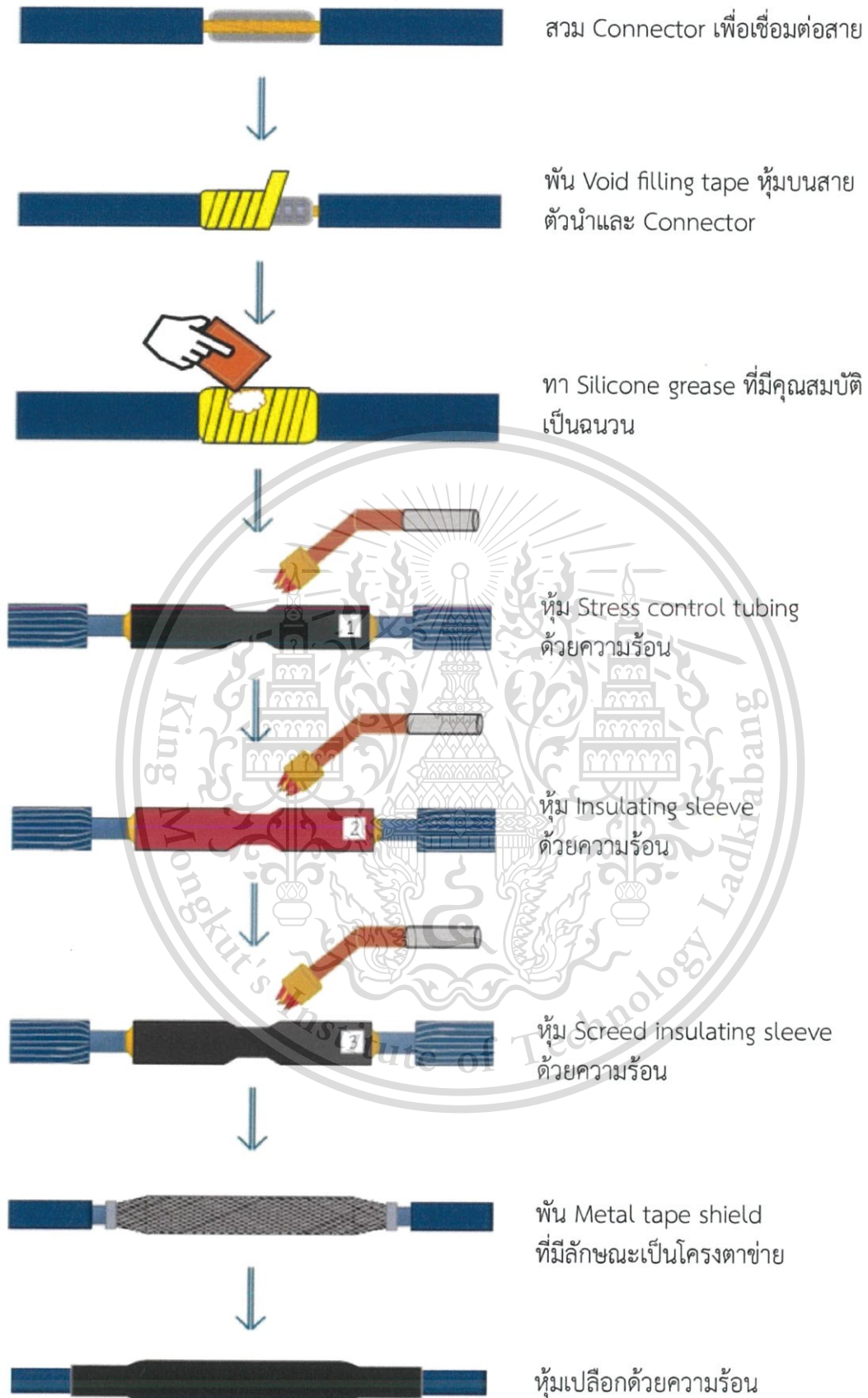
1. สวม Connector เชื่อมตัวนำของสายเคเบิลทั้ง 2 เส้นที่จะนำมาเชื่อมกัน
2. พันด้วย Void filling tape สีเหลืองที่เป็นตัว PE
3. ใส่จารบีบาง ๆ เพื่อทำให้ผิวของตัวฉนวนมีความเรียบเนียนมากขึ้น
4. หุ้มด้วย Stress control tubing (สีดำ) มีหน้าที่เพื่อควบคุมสนามไฟฟ้าจากนั้นให้ความร้อนโดยเราจะไล่จากตรงกลางเพื่อไล่อากาศออก
5. หุ้มด้วย Insulating sleeve (สีแดง) มีหน้าที่เป็นฉนวนจากนั้นให้ความร้อนโดยเราจะไล่จากตรงกลางเพื่อไล่อากาศออก
6. หุ้มด้วย Screened insulating sleeve (สีดำ) มีหน้าที่เพื่อควบคุมสนามไฟฟ้าจากนั้นให้ความร้อนโดยเราจะไล่จากตรงกลางเพื่อไล่อากาศออก
7. ทำการพัน ด้วย metal tape shield ซึ่งในส่วนนี้จะเป็นตัวเชื่อม ground ของสายทั้ง 2 เส้น และยังช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับโครงสร้าง Joint อีกด้วย

8. หุ้มส่วนที่เป็นข้อต่อทั้งหมดด้วย PE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น 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  
รูปที่ 2.5 การติดตั้งข้อต่อเคเบิล

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 หัวต่อเคเบิล [2]

ที่จุดสิ้นสุดของวงจรเคเบิลจะมีหัวต่อเคเบิล (terminator) เป็นส่วนที่เชื่อมต่อกับวงจรเคเบิลกับส่วนอื่นของระบบกำลัง อุปกรณ์ในระบบส่งจ่ายจะไม่เหมือนเคเบิลที่ต้องรวมอยู่ในไซต์ที่มีสภาพอากาศย่ำแย่และพื้นที่จำกัดเช่นในอิมมูโนและบ่อพัก ดังนั้นการพัฒนาอุปกรณ์ในระบบส่งจ่าย เพื่อให้การติดตั้งใช้เวลาให้น้อยที่สุด, ลดค่าใช้จ่ายและต้องหลีกเลี่ยงมลภาวะที่จะเกิดกับฉนวนเคเบิลระหว่างการประกอบ อุปกรณ์ในระบบส่งเป็นส่วนสำคัญในระบบเคเบิลจึงต้องแสดงประสิทธิภาพได้อย่างน้อยที่สุดเท่ากับสายเคเบิล การทดสอบอุปกรณ์ในระบบจึงถูกรวมเข้าใน Prequalification test กับ type test บนระบบเคเบิล

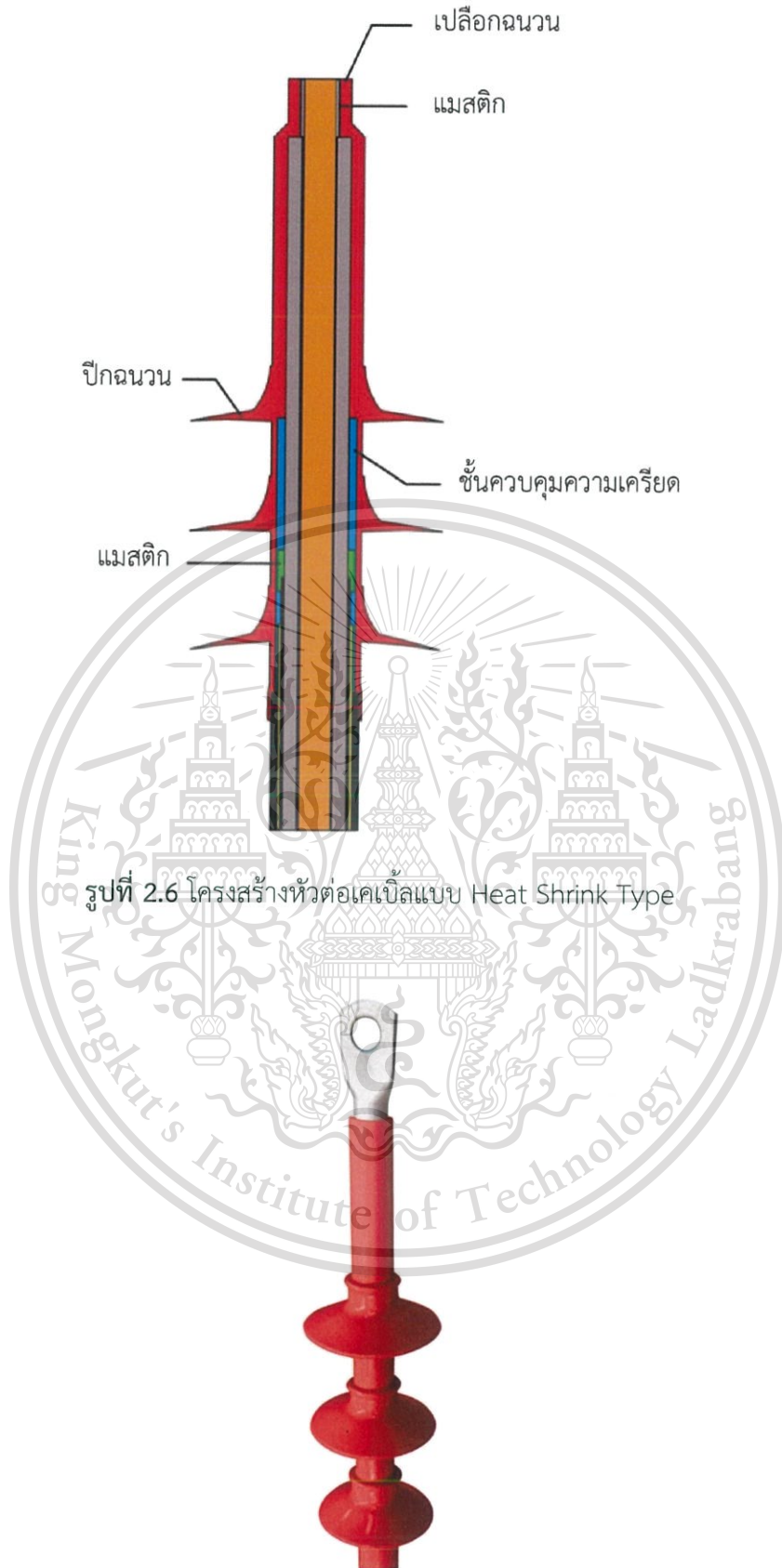
2.4.1 หัวต่อเคเบิลแบบ Heat Shrink Type เป็นหัวต่อเคเบิลที่เป็นชิ้นส่วนจากโรงงานผู้ผลิตในหนึ่งรุ่นสามารถใช้กับเคเบิลได้หลายขนาด มีข้อเสียคือต้องใช้เครื่องเป่าไฟและความร้อนซึ่งอาจเป็นอันตรายกับผู้ปฏิบัติงานได้ ต้องใช้ความเชี่ยวชาญมากในการเป่าไฟเพื่อให้หดอย่างสม่ำเสมอ อีกทั้งมีชิ้นส่วนมีชิ้นส่วนที่ต้องประกอบหลายชิ้นส่วน หลายขั้นตอน เช่น อุปกรณ์ควบคุม ความเครียด ผิวนวน และปีกฉนวน เพื่อติดตั้งหัวต่อเคเบิล โดยโครงสร้างหัวต่อเคเบิลแบบ Heat Shrink Type มีส่วนประกอบดังต่อไปนี้

1. ชั้นควบคุมความเครียดสนาม ควบคุมสนามไฟฟ้าบริเวณชั้นกันฉนวนที่ปลายสายของเคเบิล
2. เปลือกฉนวน เป็นชั้นป้องกันภายนอกของหัวต่อสายเคเบิลที่ทำหน้าที่เป็นฉนวน
3. แมสติก เป็นเทปที่เป็นฉนวนไฟฟ้า
4. ปีกฉนวน เป็นอุปกรณ์ที่สวมเพื่อเพิ่มระยะกระแสรั่วไหล

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.



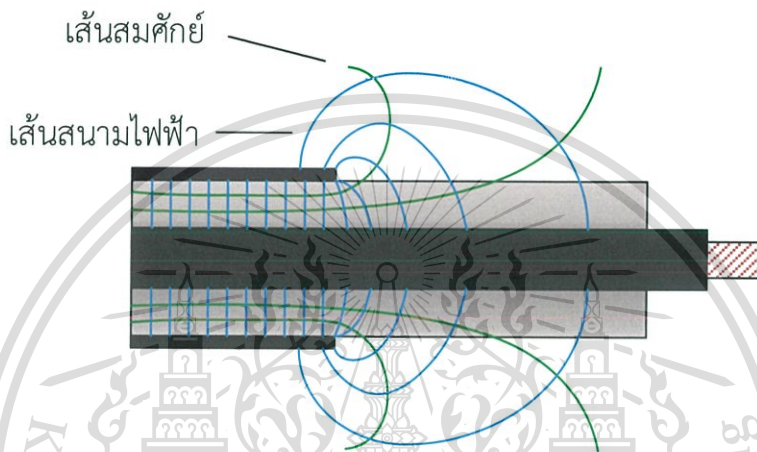
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

## 2.5 การควบคุมสนามไฟฟ้าในอุปกรณ์ระบบเคเบิลใต้ดิน

ปลายสายฉนวนของเคเบิลแรงดันขนาดกลางหรือสูงที่ถูกเตรียมสาย คุณสมบัติความคงทนต่อความชื้นของสนามไฟฟ้าจะสิ้นสุดลง ซึ่งความคงทนต่อสนามจะแปรเปลี่ยนตามการเปลี่ยนรูปทรงเรขาคณิตของสายเคเบิล ความเครียดไฟฟ้าเป็นเส้นที่มีความยาวเท่ากันและมีระยะห่างระหว่างตัวนำกับฉนวนที่เท่ากัน トラบเท่าที่สายเคเบิลรักษาขนาดทางกายภาพนี้ความเครียดไฟฟ้าจะยังคงสมมาตร เมื่อสายเคเบิลถูกตัดลงคุณสมบัติของฉนวนจะสิ้นสุดลงทันทีพร้อมกับฉนวนที่จะเปลี่ยนเป็นอากาศเกิดความไม่สม่ำเสมอสูงซึ่งนำไปสู่การเกิดเบรคดาวในฉนวนได้



รูปที่ 2.8 เส้นสนามไฟฟ้าและเส้นคักย์ไฟฟ้าเท่าในสายเคเบิลที่ถูกเตรียม

การควบคุมสนามไฟฟ้าที่หัวต่อเคเบิลในการป้องกันกันตัวนำออกมาเนื่องจากสายตัวนำที่ถูกปกฉนวนออกจำเป็นต้องรักษาระยะระหว่างสายตัวนำไฟฟ้ากับกราวด์ให้มีความพอเพื่อไม่ให้เกิดกระแสไหลข้าม (Flashover) จากสายตัวนำไปยังกราวด์ ระยะห่างจะขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้ารวมถึงสภาพแวดล้อมบริเวณไซต์งานด้วย การป้องกันกันตัวนำจะทำลายโครงสร้างของสายเคเบิล ความเครียดที่เกิดขึ้นมากพอจะทำให้ฉนวนเสียหาย ในการลดความเครียดไฟฟ้าที่ขอบชั้นกันฉนวนจะลดลงโดยการแผ่กระจายความเค้นที่ฉนวนของสายเคเบิล เนื่องจากเส้นความเครียดทางไฟฟ้ามาบรรจบกันที่ปลายชั้นกันฉนวน เส้นสนามไฟฟ้าจะทแยงมุมอยู่ใกล้ที่ขอบของชั้นกันฉนวน หากความเครียดเหล่านี้ไม่ลดลงอาจเกิดการดีสชาร์จบางส่วนจนนำไปสู่การเบรคดาว

หัวต่อสายเคเบิลจึงจำเป็นต้องสร้างให้ได้คุณภาพสำหรับการทำงานให้ระยะยาว ซึ่งจะต้องกำจัด Voltage stress ที่ชั้นกันฉนวนที่ปลายสายของเคเบิล ในวิธีการดั้งเดิมจะใช้ Stress cone ในการลดความเครียดที่ขอบชั้นกันฉนวน โดยแต่ละเทคนิคจะใช้ หลักการควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้าที่ต่างกันออกไป การเลือกใช้หัวต่อหรือข้อต่อสายเคเบิลจึงต้องพิจารณาถึงข้อดีข้อเสียแต่

ละเทคนิคในสภาวะการใช้งานที่เหมาะสมแล้วแต่กรณี ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาหลายเทคนิคให้เลือกเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปใช้เพื่อประโยชน์ด้านการค้าตามความเหมาะสมดังนี้ :

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

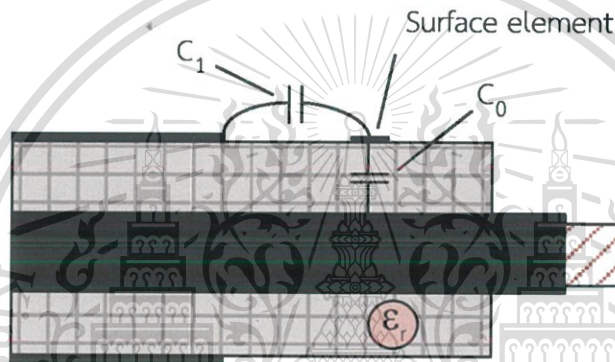
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

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

1. Compound Filling Technique
2. Cast - Resin Technique
3. Shrink – On Technique
4. Lapping Technique
5. Push – On Technique
6. Plug Technique

ในการควบคุมสนามไฟฟ้าจะพิจารณาจากค่าคาปาซิแตนซ์ 2 ค่า คือ

1. ค่าคาปาซิแตนซ์ระหว่างชั้นของตัวนำที่ถูกตัดออก กับ ฉนวน ( $C_1$ )
2. ค่าคาปาซิแตนซ์ระหว่างฉนวนกับตัวนำ ( $C_0$ )



รูปที่ 2.9 วงจรสมมูลชนิดเก็บประจุที่จะกำหนดแรงดันเริ่มต้นดีสชาร์จตามผิวฉนวนที่ปลายสายเคเบิลที่ไม่มีการควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้า

ความสัมพันธ์ระหว่างคาปาซิแตนซ์กับแรงดันระหว่างฉนวนกับชั้นตัวนำที่ถูกตัดออกเป็นดังนี้

$$U_a \approx E_d \sqrt{\frac{C_1}{C_0}} \quad (2.1)$$

เมื่อ  $U_a$  คือ แรงดันเริ่มต้นของการเบรคดาวน์ระหว่างฉนวนกับชั้นตัวนำที่ถูกตัดออก

$C_1$  คือ ค่าคาปาซิแตนซ์ระหว่างชั้นตัวนำที่ถูกตัดออกไปฉนวน

$C_0$  คือ ค่าคาปาซิแตนซ์ระหว่างฉนวนกับตัวนำ

$E_d$  คือ ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าเบรคดาวน์ที่ปลายชั้นของตัวนำที่ถูกตัด

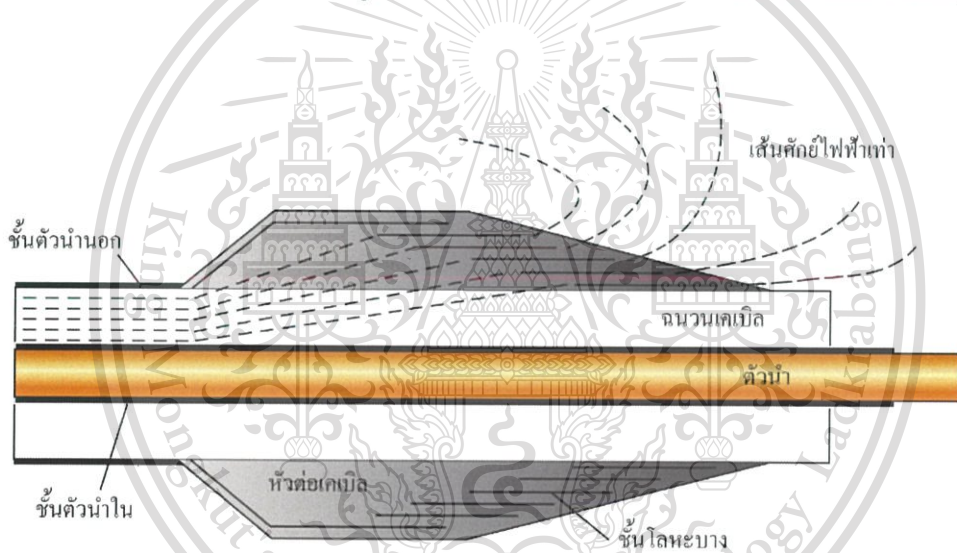
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

ถ้ารอบ ๆ สายเคเบิลเป็นอากาศ ค่า  $C_1$  จะน้อยมากเมื่อเทียบกับค่า  $C_0$  ( $C_1/C_0 \ll 1$ ) จะทำให้แรงดันเริ่มต้นของการเบรคดาวน์มีค่าต่ำ ทำให้เบรคดาวน์ได้ง่าย ในการควบคุมจึงต้องให้อัตราส่วนระหว่าง  $C_1$  กับ  $C_0$  มีค่ามากนั่นคือทำให้  $C_1$  เพิ่มขึ้นหรือ  $C_0$  ลดลงนั่นเองโดยการควบคุมสนามไฟฟ้าจะมีอยู่ 4 ประเภทดังนี้

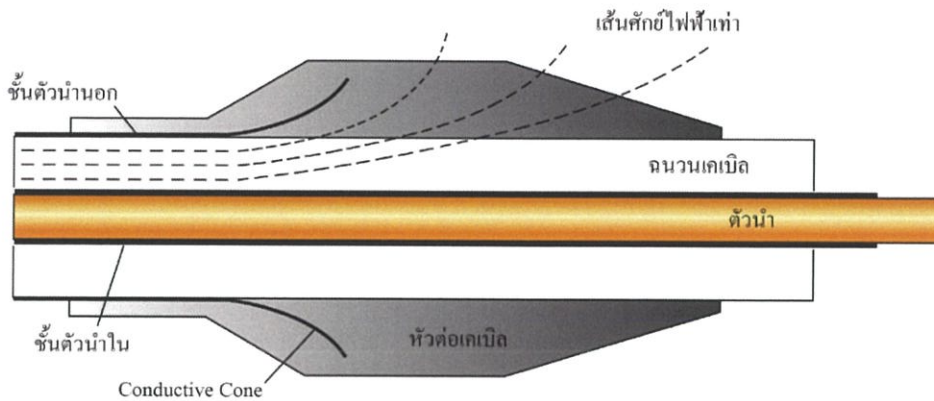
1. การควบคุมความเครียดของสนามไฟฟ้าด้วยความจุไฟฟ้าหรือลักษณะทางเรขาคณิต เป็นวิธีการควบคุมด้วยหลักการลด  $C_0$  (Volume Capacitance) ด้วยการเพิ่มขนาดของปลายสายเคเบิล (ทางอ้อม) โดยใช้กรวยความนำไฟฟ้า (Conductive Cone) ซึ่งจะทำให้ความหนาแน่นของเส้นฟลักซ์ไฟฟ้าบริเวณปลายสายน้อยลง (ต่อจากชั้นตัวนำนอก) เพื่อให้ความเข้มสนามไฟฟ้าลดลงอย่างต่อเนื่องดังแสดงในรูปที่ 2.10 วิธีนี้จะทำให้หัวต่อมีขนาดใหญ่ขึ้น เหมาะสำหรับใช้กับเคเบิลฉนวนโพลีเมอร์แรงดันระดับสูง วัสดุที่ใช้เป็นฉนวนหัวต่อเคเบิลจึงเป็นวัสดุฉนวนแข็งที่ให้ตัวได้ เช่น Silicone-Rubber, EPR, EDPM ข้อดีของหัวต่อประเภทนี้คือ มีการสูญเสียในไดอิเล็กตริกต่ำ การประกอบเข้าหัวง่าย ผลิตสำเร็จรูป ผ่านการตรวจสอบจากโรงงาน ข้อเสียคือมีขนาดใหญ่



รูปที่ 2.10 การควบคุมความเครียดของสนามไฟฟ้าด้วยความจุไฟฟ้าหรือลักษณะทางเรขาคณิต

2. การควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้าด้วยการหักเหของเส้นฟลักซ์ไฟฟ้า เป็นวิธีการควบคุมด้วยหลักการเพิ่ม  $C_1$  การเพิ่มความจุไฟฟ้าที่ผิวปลายสายเคเบิลทำได้ด้วยการเพิ่ม  $C_s$  การเพิ่มความจุไฟฟ้าที่ผิวปลายสายเคเบิลทำได้ด้วยการใช้วัสดุที่มีค่า  $\epsilon_r$  สูงหุ้มปลายสายต่อจากชั้นตัวนำนอกรูปที่ 2.11 ผลของความแตกต่างของ  $\epsilon_r$  ทำให้เกิดการหักเหของเส้นฟลักซ์ไฟฟ้า ช่วยกระจายศักย์ไฟฟ้าบนผิววัสดุหุ้มปลายสาย วิธีนี้ใช้สำหรับเคเบิลฉนวนโพลีเมอร์แรงดันสูงปานกลาง (Medium Voltage) มีข้อดีคือมักใช้เป็นแบบท่อหดหรือเป็นแบบเทปพันรอบปลายสายจึงทำให้ขนาดของหัวสายเคเบิลมีขนาดไม่เปลี่ยนแปลงไปไม่มากนัก และทำให้การติดตั้งสะดวก ไม่ยุ่งยาก แต่มีข้อเสียคือมีการสูญเสียไดอิเล็กตริกสูง





รูปที่ 2.13 การควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้าด้วยการควบคุมศักย์ไฟฟ้า

## 2.6 กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน [6], [7], [8], [9]

กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน (PDC) ซึ่งเป็นการทดสอบแบบไม่ทำลาย นอกจากนี้ยังสามารถประมวลผลค่าสัมประสิทธิ์การปลดปล่อย (Dielectric Dissipation Factor - DDF) หรือ ค่ากำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก และคาปาซิแตนซ์ (C) และยังสามารถในการวัดกระแส ในช่วง 10-12 pA ซึ่งมันสามารถใช้งานได้กับสายเคเบิลทุกประเภทและทุกความถี่ ซึ่งมันสามารถนำไปใช้ในงานได้โดยไม่ต้องมีการทำลายที่แรงดันไฟฟ้าต่ำ ๆ เช่น 50 โวลต์ เพื่อให้แน่ใจได้ว่าฉนวน จะไม่ถูกทำลายจากการทดสอบความเครียด

โดยกระแสที่ถูกปลดปล่อย (Depolarization current) หรือกระแสดูดซับ (Absorption current) ที่จะต้องวัดร่วมกับกระแสโพลาริเซชัน (Polarization current) ที่ใช้ระยะเวลา เท่า ๆ กัน เพื่อระบุอายุและคุณลักษณะ พารามิเตอร์ทั้งสามที่ใช้ในการวิเคราะห์คือ รูปร่างกระแส โพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน, การสแกนความถี่ของอัตราส่วนคาปาซิแตนซ์ และการสแกนความถี่ ของอัตราส่วน (ค่ากำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก)

เพื่อให้ได้มาซึ่งผลลัพธ์ที่มีความน่าเชื่อถือ เทียบตรง และดีที่สุดสำหรับการ ประเมินผลและการตีความ ในข้อมูลอ้างอิงได้มีการพูดถึงหลักการพื้นฐานในการเตรียมการสำหรับ การทดสอบกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของสายเคเบิลที่มีชั้นห่อหุ้มที่ต่อลงดินและชั้น ห่อหุ้มแยก เพื่อความปลอดภัยระหว่างทำการวัดขั้นตอนในการวัดเพื่อประเมินความเสียหายของ เปลือกและปัจจัยที่มีผลต่อการวัด

ประเภทของปัญหาที่พบมากที่สุดที่ส่งผลต่ออายุ คือ น้ำและความร้อน ที่สูงมากเกินไป ซึ่งวิธีการตีความผลจะเน้นไปที่ปัญหา 2 รูปแบบนี้ กรณีศึกษาที่น่าเสนอในบทความนี้ จะมีทั้งสายเคเบิล XLPE และสายเคเบิลกระดาษน้ำมัน

2.6.1 ความเป็นมาของปัญหาที่เกิดขึ้นที่ฉนวนในสายเคเบิล ฉนวนของสายเคเบิลทุก ประเภทไม่ว่าจะที่ระดับแรงดันใด ก็มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าขั้นพื้นฐานอยู่ 2 ประการคือความสามารถ ในการขจัดที่ที่มีสนามไฟฟ้าสถิตอยู่ ปรากฏการณ์ โพลาริเซชันและคอนดักชันจะปรากฏในทุกวัสดุ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฉนวนทางไฟฟ้าโดยปัญหาในฉนวนเกิดมาจากกลไกของหนึ่งในสองปรากฏการณ์นี้ โพลาริเซชันเกิดขึ้นในโมเลกุลทั้งหมดของตัวไดอิเล็กตริกและเป็นตัวทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีหรือการเสื่อมสภาพของวัสดุในเวลาเดียวกันคอนดักชันของไดอิเล็กตริกมักจะถูกกำหนดจากการปรากฏตัวของสิ่งสกปรกหรือสารปนเปื้อนที่ไม่ได้มาจากสารพื้นฐาน โพลาริเซชันของฉนวนในสายเคเบิลส่วนใหญ่เกิดจากการสะสมของตัวประจุที่ หน้าสัมผัสของวัสดุที่ต่างกัน (Interfacial polarization) ซึ่งอาจเกิดจากความเข้ากันไม่ได้ของวัสดุ การเสื่อมสภาพของวัสดุฉนวน หรือปฏิกิริยาทางเคมี ฯลฯ ตัวอย่างของผลิตภัณฑ์เสื่อมคุณภาพเป็นผลพวงมาจาก อุณหภูมิ ดิสชาร์จบางส่วน หรือแม้แต่ออกซิเดชัน เป็นต้น

คอนดักชันของฉนวนในสายเคเบิลโดยมากจะเกิดจากน้ำแต่ก็สามารถเกิดจากอนุภาคที่สามารถนำไฟฟ้าได้เช่นเดียวกัน เช่น ผงคาร์บอน ตะกอน และอื่น ๆ เป็นต้น ที่เข้าไปอยู่ในเนื้อฉนวนในระหว่างการติดตั้งระหว่างการดำเนินงานหรือมาจากความผิดพลาดตั้งแต่แรก

ในขณะที่น้ำหรือความชื้นที่หน้าสัมผัสทำให้เกิดการนำไฟฟ้า น้ำในเนื้อฉนวนไม่ว่าจะอยู่ในสถานะโมเลกุลหรืออยู่ในสถานะดูดซับทำให้เกิดโพลาริเซชัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับที่หน้าสัมผัสของวัสดุที่ต่างกัน (Interfacial polarization) ยิ่งไปกว่านั้นออกซิเจนในน้ำ ที่มีขั้วเป็นลบสามารถเชื่อมโยงหรือโต้ตอบกับโมเลกุลอื่น ๆ ได้แม้กระทั่งตัวนำทองแดงหรืออลูมิเนียม ดังนั้นน้ำที่อยู่ในสายเคเบิลฉนวน XLPE ถูกจัดหมวดหมู่ให้อยู่ในประเภทที่เป็นผลิตภัณฑ์เสื่อมคุณภาพ

2.6.2 ความเป็นมาของพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวินิจฉัย พารามิเตอร์สามตัวถูกนำมาใช้ในตีความคือ - รูปแบบกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน, อัตราส่วนคาปาซิแตนซ์ และค่ากำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก โดยในส่วนนี้จะกล่าวถึงเบื้องหลังของแต่ละตัวพารามิเตอร์กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันคือ การวัดในโดเมนเวลาให้ผลลัพธ์ของทั้ง 2 ตัว

คือ กระแสโพลาริเซชัน และกระแสดีโพลาริเซชัน เพื่อความถูกต้องควรทำการตรวจสอบผลกระทบบของกระแสตกค้าง ในกรณีที่ต้องตรวจแก้ก่อนที่จะใช้ผลกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันสำหรับการตีความ

เมื่อฉนวนสายเคเบิลถูกกระตุ้นจากการป้อนแรงดันไฟฟ้าโดยตรง(หรือระหว่างโพลาริเซชัน) จะมีกระแส 3 ตัวไหลผ่านภายในตัวฉนวนคือ กระแสคาปาซิทีฟ, กระแสซิมซับ และกระแสคอนดักทีฟ โดยกระแสคาปาซิทีฟจะปรากฏขึ้นในช่วงเวลาสั้น ๆ ในระหว่างการสวิตชิ่งซึ่งโดยปกติเราจะไม่กล่าวถึง จากการที่สายเคเบิลยาว ๆ มีความจุไฟฟ้าขนาดใหญ่ทำให้มันมีกระแสคาปาซิทีฟหลงเหลืออยู่หลังจากเริ่มทำการวัดด้วยวิธีการ PDC ไปแล้ว 1 วินาที ซึ่งตัวกระแสคาปาซิทีฟจะไม่ถูกใช้ในการตีความและจะต้องลบออก

ก่อนเริ่มการประมวลผลเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ในโดเมนความถี่ หลังจากกระแสคาปาซิทีฟหายไป กระแสชาร์จิจึง หรือกระแสโพลาริเซชัน ที่ประกอบด้วย กระแสซิมซับ อันเนื่องมาจากปรากฏการณ์โพลาริเซชัน(ผลิตภัณฑ์ที่เสื่อมสภาพ) และกระแสคอนดักทีฟ ที่เกิดจากปรากฏการณ์การนำ ในขณะที่กระแสการปลดปล่อยกระแสดีโพลาริเซชันระหว่างการถ่ายประจุจะบ่งบอกถึงตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือมีเงื่อนไขการใช้งานอื่น ๆ การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

กระแสซึมซับเท่านั้น เมื่อผลของการนำลดลงกระแสโพรราโรเซชันและกระแสตีโพรราโรเซชันจะมีค่าเกือบจะเท่า ๆ กัน ประมาณหนึ่งในสิบของช่วงเวลาซาร์จจึง นี่คือวิธีที่ PDC ใช้ในการระบุคอนดักชันและโพลาริเซชันซึ่งเป็นคุณสมบัติหลักสองประการของไดอิเล็กตริก สิ่งสำคัญคือเวลาในการวัดจะต้องเหมือนกันสำหรับกระแสทั้ง 2 ตัว

ในขณะที่กระแสตีโพรราโรเซชันหรือกระแสซึมซับเพิ่มขึ้นที่เป็นผลพวงมาจากการเสื่อมสภาพของผลิตภัณฑ์ในฉนวนของสายเคเบิล และการลดลงของกระแสซึมซับของสายเคเบิลบางประเภท เช่น เคเบิลฉนวน XLPE จะเกิดมาจากช่องว่างในตัวฉนวน

เป็นที่ทราบกันดีว่าความต้านทานของฉนวน คือ แรงดันไฟฟ้าที่เป็นค่าคงที่หารด้วยกระแสโพรราโรเซชัน เนื่องจากรูปร่างกระแสโพรราโรเซชันหาได้จากวิธีกระแสโพรราโรเซชันและกระแสตีโพรราโรเซชัน ความหมายที่แท้จริงของความต้านทานของฉนวนจะเข้าใจอย่างสมบูรณ์จากในกรณีศึกษา (โดยการพิจารณา กระแสโพรราโรเซชัน เนื่องจาก ความต้านทานของฉนวน จะไม่แสดง) นอกจากนี้ค่าความเป็นฉนวนทางไฟฟ้า(Polarization Index) ซึ่งเป็นความต้านทานของฉนวนที่เวลา 10 นาทีหารด้วย ความต้านทานของฉนวน ที่ 1 นาทีสามารถกำหนดได้จาก กระแสโพรราโรเซชัน ที่ 60 วินาทีหารด้วย กระแสโพรราโรเซชัน ที่ 600 วินาที ซึ่ง ค่าความเป็นฉนวนทางไฟฟ้า เป็นกุญแจสำคัญในการวินิจฉัยในกรณีของน้ำหรือสิ่งปนเปื้อนเท่านั้น ไม่ใช่ในกรณีของความชื้นที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์โพลาริเซชัน เช่น ต้นไม้ น้ำ เป็นต้น

อัตราส่วนคาปาซิแตนซ์ และค่ากำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก โดยการประมวลผลหรือการประเมินผลการวัดโดยใช้ซอฟต์แวร์ กระแสโพรราโรเซชันและกระแสตีโพรราโรเซชัน จะได้รับผลของอัตราส่วนคาปาซิแตนซ์และค่ากำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก ในโดเมนความถี่เฉพาะผลที่ความถี่ที่สอดคล้องกับช่วงระยะเวลาที่ใช้ในการวัดจะถูกใช้ในการตีความ ไม่ใช่มาจากการอนุมาน นอกจากนี้ยังใช้อัตราส่วนคาปาซิแตนซ์แทนคาปาซิแตนซ์ซึ่งแตกต่างกันไปในแต่ละสายเคเบิล อัตราส่วนคาปาซิแตนซ์ คือ อัตราส่วนของความจุที่ความถี่ 50 Hz เมื่อระบบฉนวนมีปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่เสื่อมคุณภาพเพียงเล็กน้อย ค่าความจุเป็นค่าคงที่ที่ 50 Hz, 1 Hz ต่อความถี่ต่ำและต่ำมาก อีกนัยหนึ่งคาปาซิแตนซ์เท่ากับ 1.00 ผลิตภัณฑ์ที่เสื่อมคุณภาพโดยเฉพาะกรณีของน้ำไม่ว่าจะอยู่ในสถานะ adsorbed state หรือ molecular state เพิ่มความจุที่ความถี่ต่ำและต่ำมากซึ่งหมายถึงอัตราส่วนคาปาซิแตนซ์สูงขึ้น นี่คือการทำให้เกิดการโพลาริเซชัน

แม้ว่าค่ากำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกจะสามารถเป็นตัวบ่งชี้ถึงสภาพฉนวน แต่ก็ไม่สามารถระบุถึงสาเหตุของปัญหาได้ ปรากฏการณ์การนำไฟฟ้าและโพลาริเซชันทั้งสองตัวจะเพิ่มค่ากำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก เมื่อเปรียบเทียบกับผลลัพธ์กับข้อมูลที่ผ่านมามีค่ากำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกขึ้นอยู่กับอุณหภูมิฉะนั้นเราจะต้องระมัดระวังในจุดนี้ นอกจากนี้ค่ากำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกที่แปรผันตามความถี่ในแต่ละตัวฉนวนจะไม่เหมือนกัน ค่ากำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของสายเคเบิลน้ำมันไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่โดยสถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทนเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยและพัฒนาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

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.

2.6.3 การตีความกรณีเคเบิลที่ไม่มีปัญหา ความแตกต่างระหว่างการตีความระหว่าง XLPE กับสายกระดาษน้ำมัน คือ ตัวค่ากำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก เนื่องจากผลของวัสดุที่แตกต่างกัน สายเคเบิล XLPE ที่แห้งจะมีค่ากำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก  $<10^{-4}$

เคเบิลน้ำมันมีค่ากำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก ใกล้กับ  $10^{-3}$  การพิจารณากระแสโพราไรเซชันและกระแสดีโพราไรเซชัน อัตราส่วนคาปาซิแตนซ์จะเหมือนกันสำหรับสาย XLPE และเคเบิล น้ำมัน เมื่ออัตราส่วนคาปาซิแตนซ์เท่ากับ 1 สายเคเบิลไม่มีการเสื่อมสภาพที่เกิดจากปรากฏการณ์โพลาไรเซชัน เมื่อรูปร่างของ กระแสโพราไรเซชันและกระแสดีโพราไรเซชัน มีเส้นกระแสทั้ง 2 ตัวอยู่ใกล้กันมาก สายเคเบิลจะไม่มีปัญหาอันเนื่องมาจากสารปนเปื้อน แต่ถ้าแต่ละเส้นกระแสมีลักษณะเป็นเส้นตรงและผกผันกัน สายเคเบิลจะมีสภาพดีหรือมีความชื้นในสถานะ adsorbed or molecular state ซึ่งจะถูกระบุด้วยอัตราส่วนคาปาซิแตนซ์ ถ้ากราฟกระแสไฟฟ้ามีการโค้งที่ชัดเจน สายไฟจะมีความร้อนสูง

2.6.4 น้ำในฉนวนของสายเคเบิล XLPE น้ำในสาย XLPE ก่อนหน้านี้การแยกหรือการเบี่ยงเบนของค่ากำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก กระแสโพราไรเซชันและกระแสดีโพราไรเซชัน แต่ฉนวนจะล้มเหลวเนื่องจากผลของน้ำ เนื่องจากอัตราส่วนคาปาซิแตนซ์ ไม่สูงกว่า 1 จากความถี่ทั้งหมดที่สังเกตจะไม่มีต้นไม้น้ำในสายเคเบิล ค่ากำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก แสดงให้เห็นว่าน้ำมีอิทธิพลต่อรูปร่างค่ากำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกที่ความถี่ต่ำกว่า 0.1 Hz หลังจากการทดสอบค่ากำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกนี้จะเห็นว่า VLF withstand ที่เฟส A ล้มเหลวก่อนที่จะถึงแรงดันไฟฟ้าทดสอบเป้าหมาย ดังนั้นผลการตอบสนองต่อไดอิเล็กตริกเหล่านี้พิสูจน์ได้ว่าความถี่ 0.1 Hz ไม่ต่ำพอที่จะประเมินปัญหาของน้ำ (ค่ากำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกที่ 0.1 Hz ของเฟส A และ B มีความคล้ายคลึงกันมาก) รูปร่างของค่ากำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกเป็นตัวแปรที่สำคัญที่สุด

2.6.5 เคเบิลฉนวนกระดาษน้ำมันที่ต่อกับโหมดสูง ๆ กรณีของเคเบิลฉนวนน้ำมันต่อกับโหมดสูงๆ สิ่งที่ได้จากความร้อนในกระดาษคือคาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ ความชื้นในกระดาษประมาณ 1.0-1.5% ที่ได้รับการประเมินโดยซอฟต์แวร์ กระแสโพราไรเซชันและกระแสดีโพราไรเซชันเหมือนว่าจะสร้างขึ้นจากความร้อนของกระดาษ เนื่องจากความดันน้ำมันได้รับการควบคุมอย่างดี อัตราส่วนของคาปาซิแตนซ์ ที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเกิดจากน้ำในชั้นเซลลูโลส รูปร่างของกระแสโพราไรเซชันและกระแสดีโพราไรเซชัน ไม่โค้งมาก

2.6.6 สารปนเปื้อนที่ทำให้เกิดปัญหาในสายเคเบิล XLPE รูปร่างของกระแสโพราไรเซชันและกระแสดีโพราไรเซชัน นี้เป็นกรณีของความร้อนสูงเกินไปหรือความร้อน ค่ากำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกสูงมากสำหรับสาย XLPE การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนคาปาซิแตนซ์ ที่ความถี่ต่ำมากอาจหมายถึงต้นไม้น้ำแต่การเชื่อมต่อระหว่างโพลาไรเซชันของน้ำมีแนวโน้มมากขึ้นเนื่องจากความสามารถในการซึมผ่านของน้ำสูง

2.6.7 การจำลองแบบจำลองด้วยการวิเคราะห์กระแสโพราไรเซชันและกระแสดีโพราไรเซชันสำหรับฉนวนเคเบิลใต้ดิน เมื่อใช้งานเคเบิลใต้ดินอย่างต่อเนื่องนำไปสู่การเสื่อมสภาพไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงชื่อเอกสารที่พิมพ์มีการนำไปใช้

ของฉนวน เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของฉนวนที่ละเอียดอย่างถาวร เนื่องจากประจุไฟฟ้าถูกสร้างขึ้นภายในฉนวน ส่งผลให้เกิดความเครียดสูงทางไฟฟ้า ในช่วงเวลาที่ยาวนาน การเสื่อมของฉนวนอย่างต่อเนื่องส่งผลให้เกิดการเบรคดาวนในเคเบิลในที่สุด ดังนั้นการตรวจสอบสภาพฉนวนเป็นสิ่งที่สำคัญเพื่อหลีกเลี่ยงการสูญเสียค่าใช้จ่ายที่ตามมาจากการไม่สามารถใช้งานได้ หนึ่งในเทคนิคที่พัฒนาขึ้นเพื่อประเมินสภาพฉนวนของสายใต้ดินคือการวิเคราะห์กระแสไพราโรเซชันและกระแสตีไพราโรเซชัน เทคนิคนี้ดำเนินการโดยการวัดกระแสไพราโรเซชันและกระแสตีไพราโรเซชัน โดยทั่วไปจะใช้เพื่อประเมินความเสื่อมโทรมของฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้า อย่างไรก็ตามยังสามารถใช้ตรวจสอบความเสื่อมโทรมภายในฉนวนสายเคเบิลได้ในระดับหนึ่ง

ส่วนประกอบสำคัญในเครือข่ายไฟฟ้าคือสายเคเบิลใต้ดิน หากฉนวนเกิดความเสียหายไม่สามารถใช้งานได้ระบบจำหน่ายจะได้รับผลกระทบอย่างรุนแรง ค่าใช้จ่ายในการหยุดทำงานสูงเนื่องจากระบบจำหน่ายล้มเหลวและค่าซ่อมแซมสายเคเบิล ทำให้การตรวจสอบสภาพของฉนวนสายเคเบิลโดยใช้การทดสอบแบบไม่ทำลายเป็นที่ต้องการ เนื่องจากไม่สร้างความเสียหายต่อตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ

ในกลุ่มการทดสอบแบบไม่ทำลายที่ใช้ได้คือ การวัดแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับ (RVM), ไดอิเล็กทริก สเปกโทรสโกปี (FDDS), การวิเคราะห์กระแสไพราโรเซชันและกระแสตีไพราโรเซชัน ปฏิกิริยาการแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับจะเกิดขึ้นเมื่อประจุไฟฟ้าในฉนวน ไม่สามารถเป็นกลางได้เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าที่สร้างขึ้นระหว่างขั้วตัวนำกับฉนวนทางไฟฟ้า ในการวัดด้วยวิธี FDDS ต้องใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับในความถี่ช่วง 0.1 mHz ถึง 1 kHz และการตอบสนองการวัดกระแส มุมเฟสที่วัดระหว่างแรงดันไฟฟ้าและรูปคลื่นกระแสต้องสอดคล้องกับสัมประสิทธิ์การสูญเสีย นั่นคือ ค่ากำลังสูญเสียไดอิเล็กทริก จากส่วนจริงและจินตภาพของความจุไฟฟ้าที่สามารถคำนวณได้

เมื่อฉนวนได้รับแรงดันกระแสตรงเป็นระยะเวลาหนึ่ง กระแสจำนวนเล็กน้อยจะไหลผ่านฉนวน การไหลของกระแสนี้ประกอบไปด้วย การดูดซับ, การเก็บประจุและการนำของกระแสไฟฟ้า กระแสที่ผ่านวัสดุนี้เรียกว่ากระแสไพลาโรเซชัน

เมื่อหยุดจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงฉนวนจะทำหน้าที่เป็นตัวเก็บประจุซึ่งมีพลังงานอยู่ภายใน การลัดวงจรของฉนวนในครั้งต่อไปจะทำให้ตัวเก็บประจุปล่อยพลังงานที่สะสมเอาไว้ นำไปสู่การไหลของกระแส ซึ่งกระแสนี้เรียกว่ากระแสตีไพลาโรเซชัน

การไพลาโรเซชันในฉนวนเป็นผลของการเคลื่อนที่ของประจุบวกและประจุลบ ภายใต้สนามไฟฟ้าทำให้เกิดไดโพลไฟฟ้าซึ่งจะเรียงตัวตามทิศทางสนามไฟฟ้า พบว่าการเรียงตัวนี้ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าในเนื้อฉนวนที่มีทิศทางตรงข้ามกับสนามไฟฟ้าที่เกิดจากความต่างศักย์ระหว่างแผ่นอิเล็กโทรดทำให้แรงดันระหว่างแผ่นอิเล็กโทรดลดลง การไพลาโรเซชัน  $P$  และสนามไฟฟ้า  $E$  มีทิศทางเดียวกันและมีความสัมพันธ์ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อ  $P = \chi \epsilon_0 E$  อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้ง(2.2) นำไปใช้

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

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

โดยที่  $\chi$  คือ ค่าความสามารถยอมรับได้ของไดอิเล็กตริก (Dielectric susceptibility)

$\epsilon_0$  คือ ค่าเปอร์มิตติวิตีที่สุญญากาศมีค่าเท่ากับ  $8.85419 \times 10^{-12}$  [F/m]

2.6.8 การตอบสนองของวัสดุไดอิเล็กตริกในโดเมนเวลา ในกรณีที่ฉนวนระหว่างอิเล็กโตรดเป็นสุญญากาศ จะแสดงความสัมพันธ์ของความหนาแน่นทางไฟฟ้า (Electric displacement  $D$ ) และสนามไฟฟ้า  $E$  ในรูปของเวกเตอร์ ได้ดังนี้

$$D = \epsilon_0 E \quad (2.3)$$

โดยที่ความหนาแน่นทางไฟฟ้า  $D$  แสดงในประจุไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ที่เกิดขึ้นบริเวณผิวอิเล็กโตรด เมื่อแทนที่สุญญากาศด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก ความหนาแน่นทางไฟฟ้า  $D$  ในสมการ (2.57) จะมีการโพลาริเซชัน  $P$  ของวัสดุไดอิเล็กตริกจากสมการ (2.56) เพิ่มเข้ามาทำให้ได้ความหนาแน่นทางไฟฟ้า  $D$  เป็นดังนี้

$$D(t) = \epsilon_0 E(t) + P(t) \quad (2.4)$$

$$D(t) = \epsilon_0 (1 + \chi) E(t) \quad (2.5)$$

ดังนั้นค่ากระแสโพลาริเซชัน ( $i_{pol}$ ) หรือกระแสจลนประจุ โดยมีแรงดัน  $U_c$  ที่ป้อนให้วัสดุไดอิเล็กตริกที่เป็นค่าคงที่ ซึ่งวัสดุไดอิเล็กตริกนั้นทำการดิสชาร์จประจุแล้ว ทำให้สามารถได้ค่ากระแสโพลาริเซชันในรูปความสัมพันธ์กับเวลาได้ดังนี้

$$i_{pol} = \sigma_0 E_c + \epsilon_0 (1 + \chi) E_c \delta(t) + \epsilon_0 E_c f(t) \quad (2.6)$$

โดยที่  $C_0$  คือ ค่าความจุของวัสดุทดสอบ

$\delta(t)$  คือ delta function ที่จุดเริ่มต้นโดยการป้อนแรงดันที่  $t = t_0$

เทอมที่หนึ่งขึ้นอยู่กับความสามารถในการนำไฟฟ้ากระแสตรงของวัสดุทดสอบ เทอมที่สองของสมการเกี่ยวข้องกับความหนาแน่นของกระแสที่เนื่องจากผลรวมของค่าความจุสุญญากาศของวัสดุทดสอบและค่าความจุสัมพันธ์กับค่าความสามารถยอมรับได้ของไดอิเล็กตริกที่ความถี่สูง

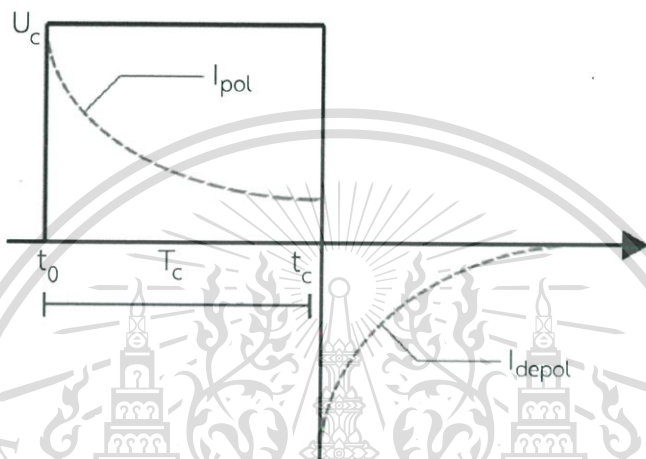
เมื่อค่ากระแสโพลาริเซชันลดลงจนถึงระดับคงที่ ในทันทีหลังจากนั้นลัดวงจรวัสดุทดสอบเพื่อวัดกระแสโพลาริเซชัน ได้เป็นสมการดังนี้

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$i_{\text{depol}} = -\epsilon_0 U_c [f(t) - f(t + T_c)] \tag{2.7}$$

โดยที่  $T_c$  คือ ระยะเวลาที่จ่ายแรงดันไปที่วัสดุทดสอบ

เทอมที่สองของสมการนี้สามารถละเว้นได้ ถ้าการวัดมีค่า  $T_c$  มากพอที่ทำให้กระแสโพลาริเซชันเริ่มคงที่ ดังนั้นกระแสดีโพลาริเซชันจะแปรผันตรงกับฟังก์ชันการตอบสนองของวัสดุไดอิเล็กตริก



รูปที่ 2.14 กราฟการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน

เมื่อมีการจ่ายแรงดันจะเกิดกระแสโพลาริเซชันหรือกระแสชาร์จประจุซึ่งประกอบด้วย กระแสซึมซับและกระแสคอนดักทีฟ เมื่อปลดแหล่งจ่ายออกจะเกิดกระแสดีโพลาริเซชันหรือกระแสดีสชาร์จประจุซึ่งจะมีแค่ กระแสซึมซับซึ่งมีขนาดเท่ากับ กระแสซึมซับในโพลาริเซชันแต่มีการกลับขั้ว ดังแสดงในรูปที่ 2.14 และแสดงกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันได้ดังนี้

$$i_{\text{pol}}(t) = i_{\text{absorp}}(t) + i_c(t) + i_{\text{con}}(t) \tag{2.8}$$

$$i_{\text{depol}}(t) = i_{\text{absorp}}(t) \tag{2.9}$$

2.6.9 การตอบสนองของวัสดุไดอิเล็กตริกในโดเมนความถี่ คุณสมบัติของวัสดุไดอิเล็กตริกสามารถวัดในความสัมพันธ์เชิงความถี่ การแปลงความสัมพันธ์ในเชิงเวลาเป็นความสัมพันธ์เชิงความถี่สามารถทำได้โดยใช้การแปลงสมการลาปลาซหรือฟูเรียร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ในบางประการ โดยสามารถแสดงเป็นความสัมพันธ์เปอร์มิตติวิตีไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน (complex dielectric permittivity) ของวัสดุได้ดังนี้

$$D(\omega) = \epsilon_0 \epsilon_r(\omega) E(\omega) \quad (2.10)$$

$$D(\omega) = \epsilon_0 [1 + \chi'(\omega) - j\chi''(\omega)] E(\omega) \quad (2.11)$$

โดยที่

$$\epsilon_r(\omega) = \epsilon_r'(\omega) - j\epsilon_r''(\omega) = (1 + \chi'(\omega)) - j\chi''(\omega) \quad (2.12)$$

และสามารถหาค่าเปอร์มิตติวิตี้ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (relative dielectric permittivity)

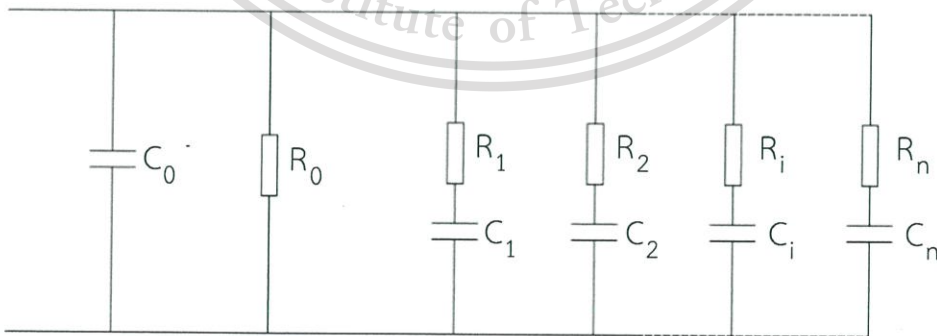
$$\tilde{\epsilon}_r(\omega) = \epsilon_r'(\omega) - j[\epsilon_r''(\omega) + \sigma_0 / \epsilon_0 \omega] \quad (2.13)$$

$$\tilde{\epsilon}_r(\omega) = 1 + \chi'(\omega) - j[\chi''(\omega) + \sigma_0 / \epsilon_0 \omega] \quad (2.14)$$

ฉะนั้น Dielectric dissipation factor (DDF) หรือ  $\tan \delta$  จะได้ดังนี้

$$\tan \delta(\omega) = \frac{\epsilon_r''(\omega) + \sigma_0 / \epsilon_0 \omega}{\epsilon_r'(\omega)} \quad (2.15)$$

ระบบของฉนวนสามารถจำลองในรูปแบบของระบบเครือข่ายแบบขั้นบันได R-C โดยที่เวลาต่างกันจะทำให้รูปแบบการเรียงตัวของขั้วในเนื้อฉนวนต่างกัน อาจแสดงโดยการจัดเรียงแบบ R-C อนุกรมกัน และจึงมาชานานตามรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ระบบเครือข่ายแบบขั้นบันได R-C

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.

ในที่ที่มีสนามไฟฟ้ากระแสไฟฟ้ากระแสตรงจะไหลผ่านเนื้อฉนวนพร้อมกับกระแสโพลาริเซชัน กระแสนี้เกิดขึ้นจากความต้านทานของฉนวน  $R_0$ ,  $C_0$  หมายถึง ค่าความจุไฟฟ้าของฉนวน โดยกระแส โพลาริเซชัน สามารถกำหนดได้จากสมการที่เกี่ยวข้องดังนี้  
กระแสคอนดักชัน ( $I_c$ )

$$I_c = \frac{U_0}{R_0} \quad (2.16)$$

กระแสดีโพลาริเซชัน ( $I_d$ )

$$I_d = \sum_{i=1}^n A_i \exp(-t / \tau_i) \quad (2.17)$$

$$A_i = \frac{U_0}{R_i} [1 - \exp(-\tau_c / \tau_i)] \quad (2.18)$$

ค่าคงที่เวลา

$$\tau_i = R_i C_i \quad (2.19)$$

กระแสโพลาริเซชัน ( $I_p$ )

$$I_p = I_c + I_d \quad (2.20)$$

ค่ากำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก

$$\tan \delta = \frac{I_R}{I_c} = \frac{\frac{1}{j\omega R_0} + \sum_{i=1}^n \frac{\omega R_i C_i^2}{j(1 + \omega^2 R_i^2 C_i^2)}}{C_0 + \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{1 + \omega^2 R_i^2 C_i^2}} \quad (2.21)$$

พารามิเตอร์สายเคเบิลของความต้านทานฉนวน ( $R_0$ ) และค่าความจุไฟฟ้าของฉนวน ( $C_0$ ) ถูกกำหนดโดยใช้สมการต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น 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.

$$R_0 = \frac{\ln(b/a)}{2\pi L\sigma} \quad (2.22)$$

$$C_0 = \frac{2\pi L\epsilon}{\ln(b/a)} \quad (2.23)$$

โดยค่า  $L$  คือค่าความยาวของสายเคเบิล  $a$  คือรัศมีด้านในของฉนวน  $b$  คือ รัศมีภายนอกของฉนวน  $\epsilon$  คือ แรงต้านสนามแม่เหล็ก และ  $\sigma$  คือค่าความนำไฟฟ้าของวัสดุที่เป็นฉนวนสายเคเบิลที่ใช้ในการจำลองจะเป็นฉนวนเคเบิล XLPE (Cross-linked Polyethylene)

## 2.7 การดิสชาร์จบางส่วน [1], [5]

การเกิดดิสชาร์จบางส่วน คือ การเกิดการเสียหายการเป็นฉนวนเพียงบางส่วนของระบบการฉนวน เป็นการเกิดเบรคดาวน์หรือดิสชาร์จที่ไม่ได้โยงถึงกันระหว่างอิเล็กโตรด ไม่ได้เป็นการเสียหายการเป็นฉนวนสมบูรณ์ทั้งระบบ การเกิดดิสชาร์จบางส่วนจะเกิดขึ้นในระบบฉนวนที่มีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงหรือฉนวนที่มีความไม่สม่ำเสมอหรือไม่เป็นเนื้อเดียวกันหรือมีสิ่งเจือปน ซึ่งทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าบางจุดสูงกว่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤต แต่ไม่อาจทำให้เกิดเบรคดาวน์โดยสมบูรณ์ได้หากแต่เกิดเพียงบางส่วนเท่านั้น

การเกิดโพรงหรือช่องว่างขนาดเล็กภายในเนื้อฉนวนของสายเคเบิลเป็นสิ่งที่ไม่พึงประสงค์ในการเตรียมวัสดุ ภายในโพรงบรรจุก๊าซที่มีค่าความนำสนามไฟฟ้า (Permittivity) ต่ำกว่าเนื้อฉนวนโดยรอบ ทำให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูงบริเวณรอบโพรง เมื่อแรงดันตกคร่อมโพรงมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงค่าความคงทนของก๊าซ ก็จะเกิดการเบรคดาวน์หรือดิสชาร์จภายในโพรง เรียกปรากฏการณ์นี้ว่าดิสชาร์จบางส่วน (Partial discharge) เนื่องจากไม่ได้เกิดในเนื้อฉนวนทั้งหมดในทันที แต่อาจนำไปสู่การเกิดเบรคดาวน์ได้ในเวลาต่อมา

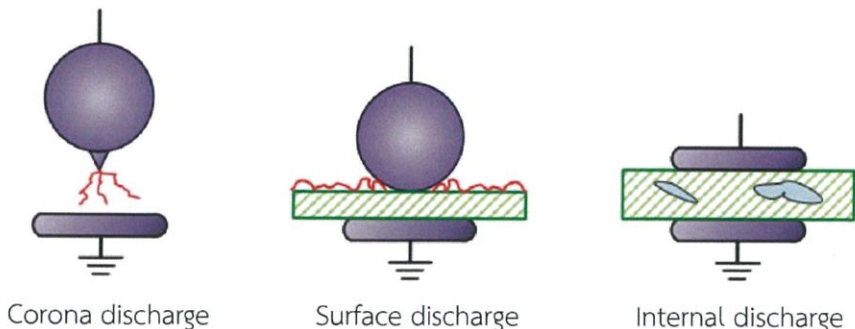
การเกิดดิสชาร์จบางส่วนเกิดขึ้นได้ทั้งในสนามไฟฟ้ากระแสตรงและสนามไฟฟ้ากระแสสลับ ภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสสลับจะเกิดการดิสชาร์จบางส่วนซ้ำเรื่อย ๆ เมื่อมีแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าค่า PDIV (PD Inception Voltage)

### 2.7.1 ชนิดของดิสชาร์จบางส่วน แบ่งออกเป็น 3 ประเภท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

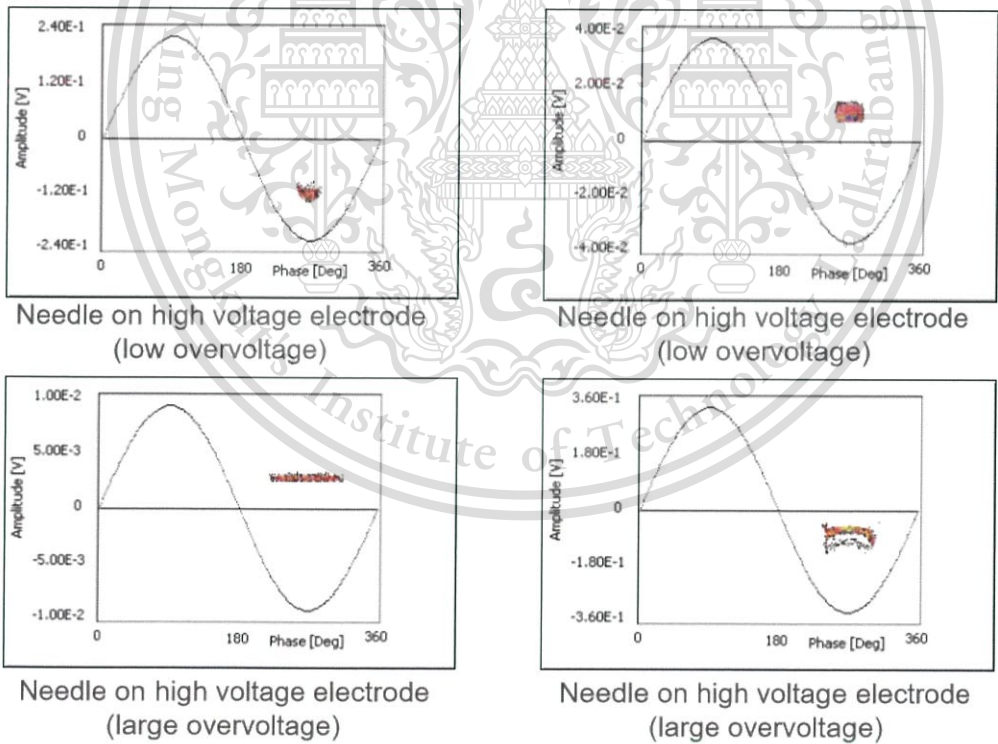
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

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



รูปที่ 2.16 ชนิดของการเกิดดิสชาร์จบางส่วน

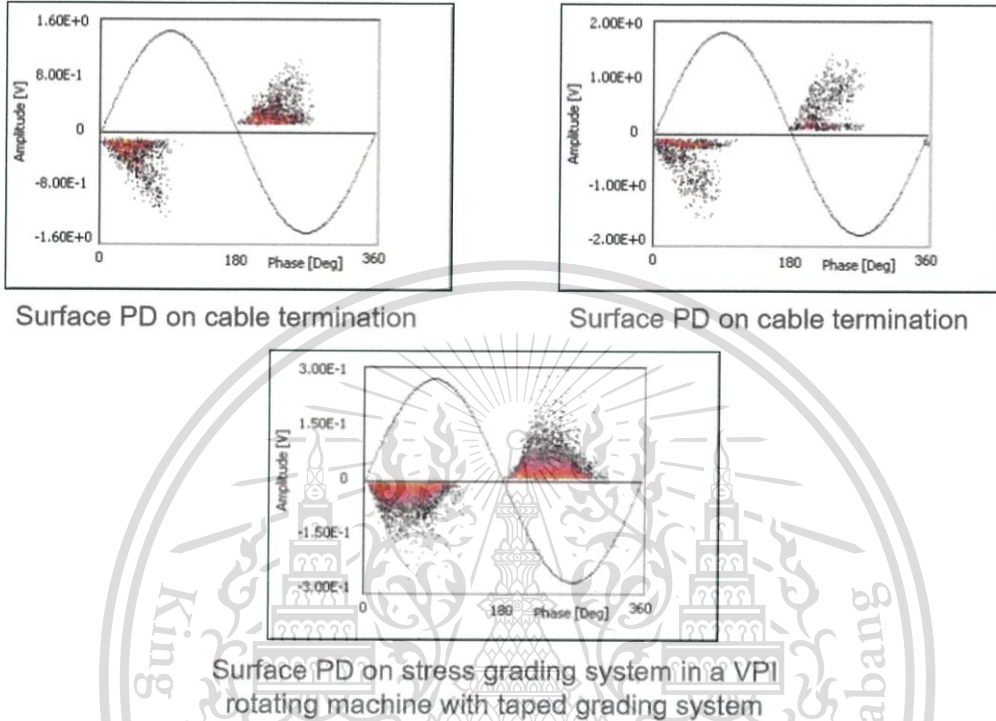
1. โครนาดีสชาร์จ (Corona Discharge) เกิดขึ้นจากการเชื่อมต่อของปลายคมหรือส่วนที่ยื่นออกมาหรือในการเชื่อมต่อแบบแรงดันสูง โดยปกติจะไม่เป็นอันตราย การออกแบบอุปกรณ์ไฟฟ้าบางชนิดยอมให้เกิดโครนาได้เนื่องจากถ้าออกแบบให้ไม่เกิดโครนาเลยอาจจะต้องใช้งบประมาณในการผลิตที่สูงเกินไป รูปร่างของสัญญาณโครนาดีสชาร์จ จะมีรูปร่างที่ไม่สมมาตรและมักเป็นแบบ Unipolar มีอัตราการเกิดซ้ำสูง มีอัตราการกระจายตัวต่ำ (ระดับดิสชาร์จสูงสุดกับต่ำสุดมีขนาดใกล้เคียงกัน) ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 ตัวอย่างรูปสัญญาณการเกิดโครนาดีสชาร์จ

2. ดิสชาร์จตามผิว (Surface Discharge) สามารถเกิดขึ้นได้ในพื้นผิวของวัสดุฉนวน อาจเกิดได้จากการที่เข้าหัวไม่เหมาะสม เป็นผลให้จุดนั้นมีความเครียดสนามไฟฟ้ามากกว่าจุดอื่น และไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ออกทางห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สิ่งที่เกิดขึ้นตามมาคือการเกิดดิสชาร์จตามผิว ที่รอยต่อของฉนวนและชั้นเซมิคอนดักเตอร์ทำให้อนวนเสียหายการเกิดดิสชาร์จพื้นผิว จะได้รับผลกระทบอย่างมากจากความชื้น รูปร่างของสัญญาณดิสชาร์จตามผิว จะมีรูปร่างที่สมมาตรเป็นส่วนมากแต่ก็มีบางกรณีที่ไม่สมมาตร มีอัตราการกระจายตัวสูง โดยส่วนมากดิสชาร์จจะเริ่มเกิดหลัง voltage zero-crossing ดังรูปที่ 2.18



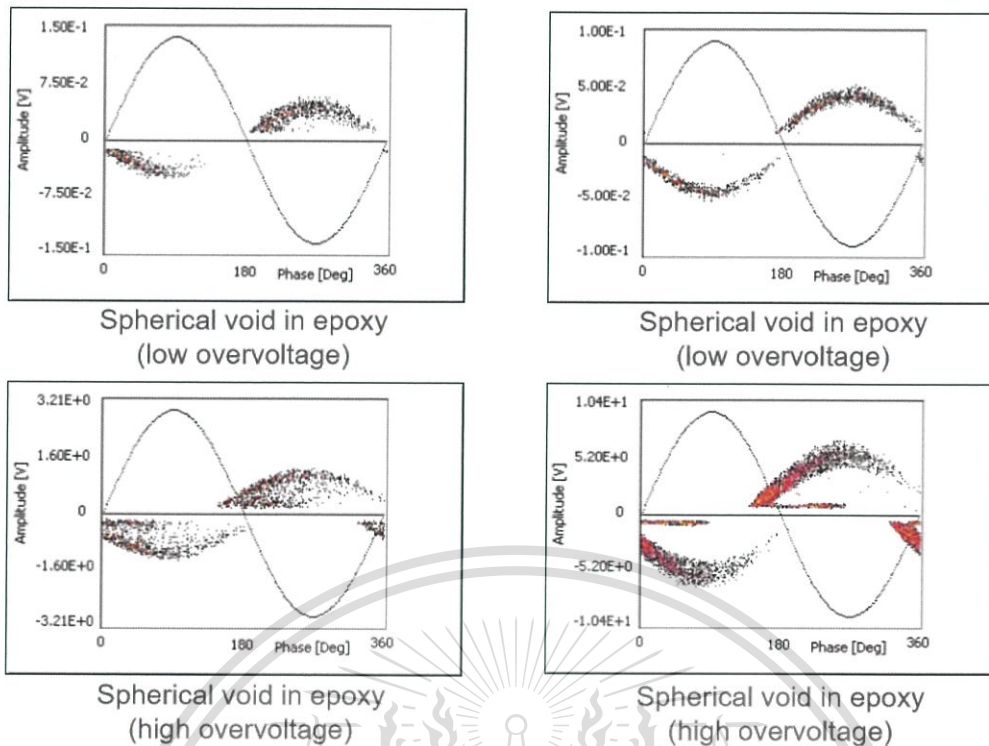
รูปที่ 2.18 ตัวอย่างรูปสัญญาณการเกิดดิสชาร์จตามผิว

3. ดิสชาร์จภายใน (Internal Discharge) สามารถเกิดขึ้นได้ในเนื้อของวัสดุฉนวน อาจเกิดขึ้นภายในข้อบกพร่องของเนื้อฉนวนในบริเวณที่เกิด ช่องว่าง, เปราะเปื้อน และข้อบกพร่องอื่นๆ หรือ อาจจะเป็นต้นไม้ไฟฟ้าโดยถ้าเกิดดิสชาร์จภายในขึ้นแล้วก็จะรุนแรงขึ้นเรื่อยๆ โดยจะขึ้นอยู่กับการใช้งานว่าเหมาะสมหรือไม่ เป็นผลมาจากช่องว่างภายในเนื้อฉนวนเกิดการขยายตัวเพิ่มขึ้น ผลที่ตามมาคือการเกิดดิสชาร์จภายในที่รุนแรงขึ้น อาจนำไปสู่การเบรคดาวน์ที่สมบูรณ์ได้ รูปร่างของสัญญาณ ดิสชาร์จภายในจะมีรูปร่างที่สมมาตรเป็นส่วนมาก มีอัตราการกระจายตัวระดับปานกลาง โดยส่วนมากดิสชาร์จจะเริ่มเกิดก่อน voltage zero-crossing ดังรูปที่ 2.19

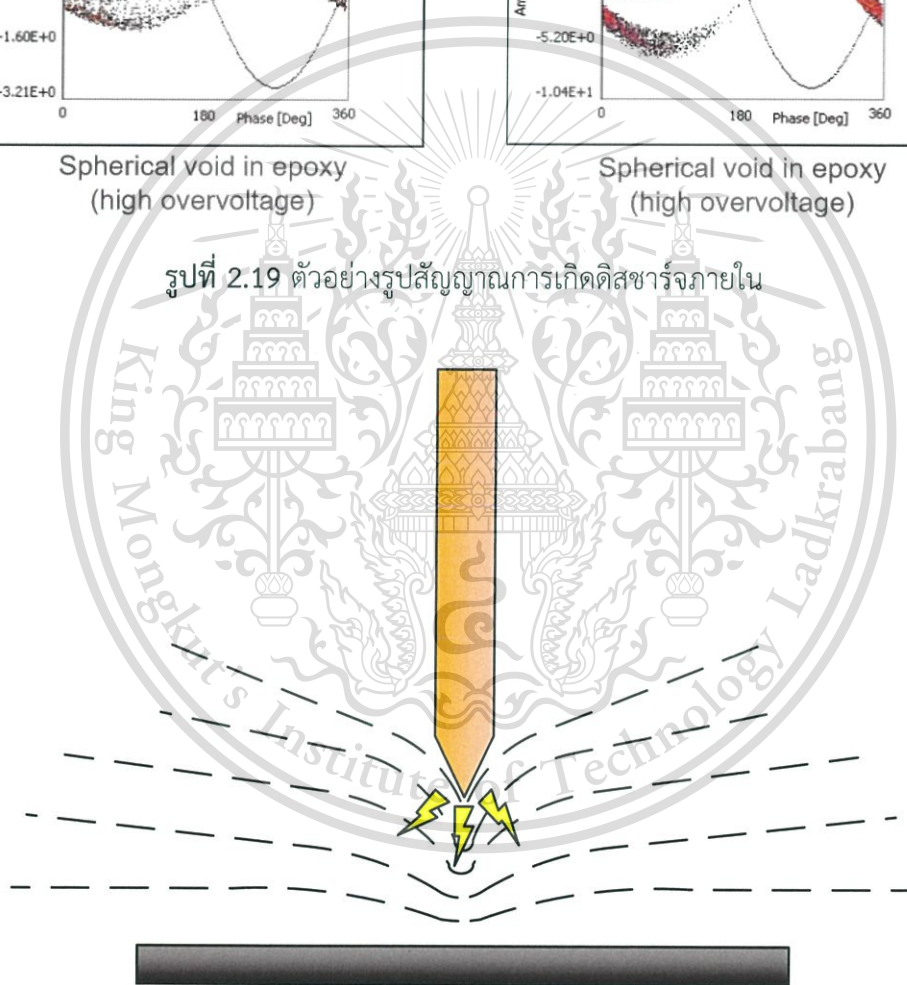
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 2.19 ตัวอย่างรูปสัญญาณการเกิดดีสชาร์จภายใน

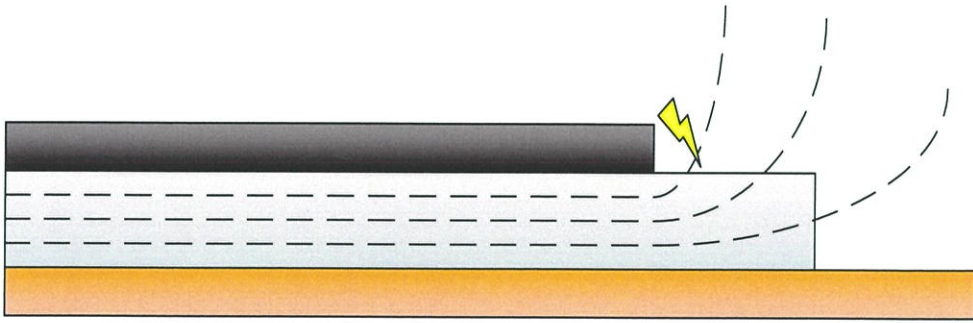


รูปที่ 2.20 รูปสนามไฟฟ้าเมื่อเกิด Corona Discharge

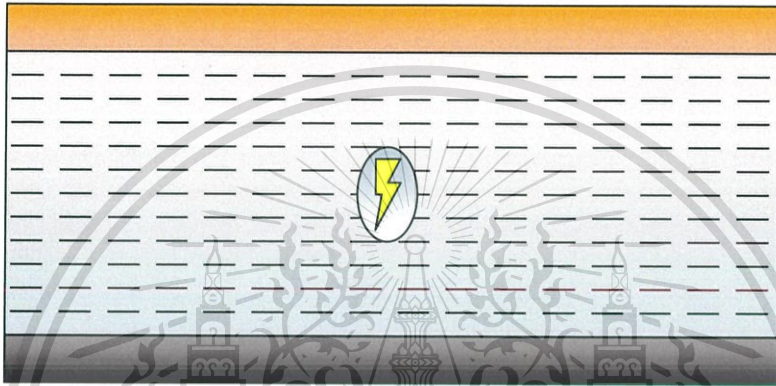
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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



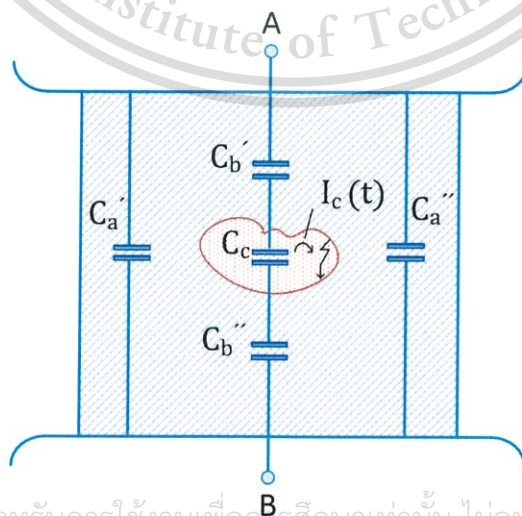
รูปที่ 2.21 สนามไฟฟ้าเมื่อเกิด Surface Discharge



รูปที่ 2.22 รูปสนามไฟฟ้าเมื่อเกิด Internal Discharge

### 2.7.2 วงจรสมมูลการเกิดการดิสชาร์จบางส่วน

1. แบบ capacitive model หรือ abc model เริ่มพัฒนาตั้งแต่ปี 1932 วงจรสมมูลที่ใช้ในปัจจุบันได้รับการปรับปรุงโดย Whitehead หรือ Kreuger ในช่วงปี 1950 และได้ใช้อย่างแพร่หลายจนถึงปัจจุบัน



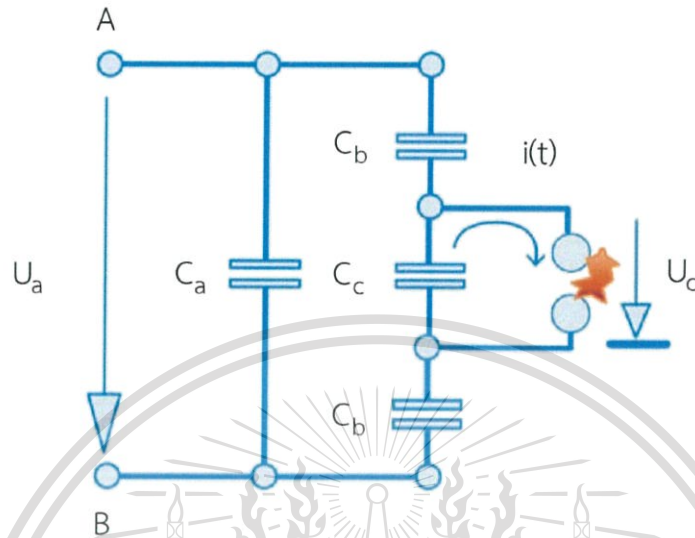
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุที่แสดงเนื้อหา และต้องขออนุญาตเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.23 วงจรสมมูลการดิสชาร์จบางส่วน

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

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

- $C_a$  คือ เนื้อฉนวนส่วนที่สมบูรณ์ที่อยู่โดยรอบของโพรงแก๊ส  
 $C_b$  คือ เนื้อฉนวนส่วนที่ต่ออนุกรมกับโพรงแก๊ส  
 $C_c$  คือ โพรงแก๊ส



รูปที่ 2.24 การจำลองการเกิดดิสชาร์จบางส่วน

ถ้าป้อนแรงดันที่ขั้วอิเล็กโทรดทำให้แรงดันตกคร่อมโพรงแก๊สสูงกว่าค่าแรงดันเบรคดาวน์สูงกว่าค่าแรงดันเบรคดาวน์ของโพรงอากาศซึ่งเขียนแทนด้วยสวิตช์  $S$  (การเบรคดาวน์ของช่องว่างถูกจำลองด้วยโดยการปิดสวิตช์ในระยะเวลาที่สั้น) มีความต้านทาน  $R$  เป็นตัวจำกัดกระแสดิสชาร์จ  $i(t)$  ที่ทำให้เกิดแรงดันตก  $\delta U_c$  ประจุที่ปล่อยออกมาจากโพรงแก๊สมีค่าเท่ากับ

$$\delta q_c = C_c \delta U_c \quad (2.24)$$

$\delta U_c$  คือ แรงดันที่ตกคร่อม  $C_c$

แต่การเกิดดิสชาร์จ  $C_c$  ทำให้เกิดการถ่ายเทประจุของ  $C_a$  และ  $C_b$  ในวงจรสมมูลเป็นผลให้เกิดแรงดันตกที่ขั้ว  $A - B$  เท่ากับ  $\delta U_a$  ซึ่งหาได้จาก

$$\delta U_a = \delta U_c \quad (2.25)$$

ค่าแรงดันตกไม่ให้อข้อมูลเกี่ยวกับ  $\delta q_c$  เลย แต่เป็นสัดส่วนกับ  $C_b \delta U_c$  ค่า  $\delta U_a$  ที่วัดได้เป็นพัลส์รูปขั้นและขึ้นอยู่กับ  $i(t)$  เมื่อแทนค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  

$$\delta U_c = \frac{\delta q_c}{C_c} \quad (2.26)$$
 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.

จะได้ว่า

$$\delta U_a = \frac{\delta q_c C_b}{C_c (C_a + C_b)} \quad (2.27)$$

ค่าของ  $\delta U_c$  มีค่าเป็น mV ถึง V ในขณะที่  $\delta U_a$  มีค่าเป็น kV แต่โดยที่ไม่ทราบค่า  $C_c$  และ  $C_b$  จึงไม่สามารถหาความสัมพันธ์ของ  $\delta U_a$  กับ  $\delta U_c$  และ  $\delta q_c$  ได้

2. แบบ dipole model ถูกพัฒนาขึ้นมาหลังจากปี 1980 เนื่องจากวงจรสมมูลแบบ capacitive ไม่สามารถอธิบายพฤติกรรมทางฟิสิกส์ที่ถูกต้องของการเกิดดิสชาร์จได้ แต่ไม่ได้ใช้อย่างแพร่หลาย เพราะทำความเข้าใจได้ค่อนข้างยาก เมื่อปี 2014 Lemke ได้พยายามนำมาอธิบายอีกครั้งหนึ่ง คาดว่าจะมีการใช้อย่างกว้างขวางมากขึ้นในอนาคตอันใกล้

2.7.3 การเกิดดิสชาร์จภายในไดอิเล็กตริก เรียกว่า ดิสชาร์จบางส่วนภายใน หมายถึง สนามไฟฟ้าหรือความคงทนไดอิเล็กตริก (Dielectric strength) หรือทั้งสองกระจายตัวในไดอิเล็กตริกที่ลักษณะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน โดยสามารถแยกการดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลออกเป็นชนิดต่าง ๆ ได้ดังต่อไปนี้

1. การดิสชาร์จที่เกิดจากโพรงอากาศ (Cavity) ภายในไดอิเล็กตริก
2. การดิสชาร์จที่เกิดจากรอยแตก (Fissure) ภายในไดอิเล็กตริก
3. การดิสชาร์จที่เกิดจากเศษวัสดุและสิ่งเจือปน (Resin and Contaminants)
4. การดิสชาร์จที่เกิดจากการขยายตัวของคาร์บอนแทรค (Carbon Track)

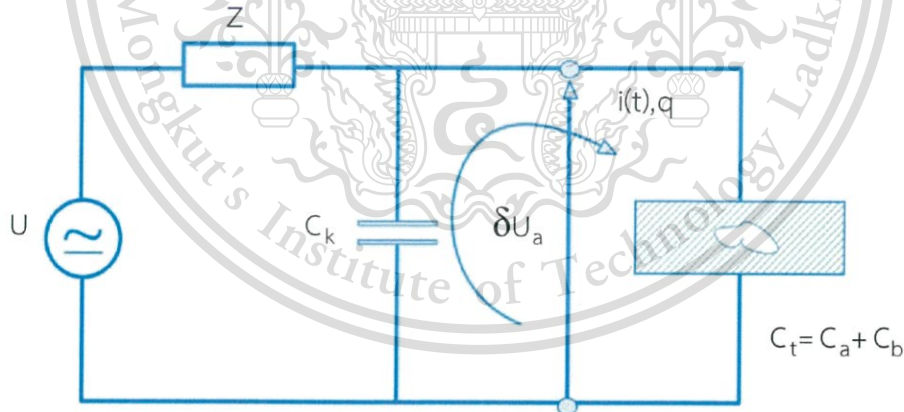
จุดที่ยื่นออกมาของชั้นเซมิคอนดักเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อการกระจายสนามในชั้นเซมิคอนดักเตอร์ซึ่งรบกวนทั้งรูปแบบสนามและการกระจายตัวความคงทนไดอิเล็กตริก (Dielectric strength) ในบริเวณที่มีความเข้มข้นของเส้นสนามสูงที่สุด ณ จุดที่ยื่นออกมา ซึ่งส่งผลให้วัสดุเกิดรอยแตกและเริ่มต้นเกิดช่องว่างกลวงที่มีขนาดไม่กี่  $\mu\text{m}$  หลังจากนั้นเกิดการปล่อยก๊าซที่มีเสถียรภาพภายในช่องนี้ ทำให้เกิดการสีกร่อนของวัสดุในรูปแบบของการขยายของช่องว่างอย่างต่อเนื่อง

ข้อบกพร่องอีกรูปแบบหนึ่งคือ โพรงแก๊สในสายเคเบิลที่สามารถเริ่มเกิดการดิสชาร์จบางส่วนโดยไม่ต้องมีความเสียหายของวัสดุเกิดขึ้น เนื่องจากความคงทนต่อสนาม (Field strength) ภายในช่องว่าง ( $\epsilon_r = 1$ ) เกินกว่าความเครียด (Stress) ที่ล้อมรอบไดอิเล็กตริกโดยค่าแฟคเตอร์ที่ใกล้เคียง  $\epsilon_{ri}$  (ค่าเปอร์มิตติวิตีของวัสดุฉนวน) ในขณะเดียวกัน แก๊สมีความคงทนต่อไดอิเล็กตริก (dielectric strength) น้อยกว่าของแข็ง, ของเหลว และฉนวนขุ่นเป็นเหตุให้การดิสชาร์จเหนือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ห้ามมิให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
 ไม่ว่ากรรมใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.4 การวัดการดิสชาร์จบางส่วนพื้นฐาน กระแสที่เกิดจากดิสชาร์จในโพรงแก๊สนั้นไม่สามารถวัดได้ แต่การดิสชาร์จในโพรงแก๊ส  $C_c$  ส่งผลให้เกิดการถ่ายเทประจุ เป็นผลให้เกิดแรงดันตก  $\delta U_c$  ที่ขั้วป้อนแรงดันภายนอก A – B การเคลื่อนที่ของประจุหรือเกิดกระแสไหลวนอันเนื่องมาจากแรงดันตก เป็นค่ากระแสชดเชยที่วัดได้ (measurable current)  $i(t)$  (แต่ไม่ใช่กระแสหรือประจุที่เกิดขึ้นจริงภายในโพรงแก๊ส) โดยประจุที่เกิดขึ้นจากการวัด PD มีดังนี้

1.  $q_c$  ประจุในโพรงอากาศ (แหล่งกำเนิด PD) ไม่สามารถวัดได้จริง
2.  $q_a$  (Apparent Charge) ประจุปรากฏ ใช้เป็นตัวแทนขนาดประจุที่เกิดขึ้นในการวัด PD ไม่ได้มีขนาดเท่ากับประจุในโพรงอากาศ ทางทฤษฎี  $q_a$  เกิดจากการถ่ายเทประจุจาก  $C_k$  ไปยังวัสดุทดสอบ โดยที่  $C_k$  มีขนาดเป็นอนันต์ (ซึ่งเป็นจริงไม่ได้ทางปฏิบัติ) ตาม IEC 60270:2000 กำหนดให้  $q_a$  เป็นประจุที่เกิดจากการ calibrate ที่รู้ค่าที่แน่นอน และเครื่องวัด PD ได้ถูกตั้งค่าให้อ่านค่าดังกล่าว
3.  $q_m$  (Measurable Charge) ประจุที่วัดได้จากวงจรวัด PD มีขนาดน้อยกว่าหรือเท่ากับ  $q_a$  เกิดจากการถ่ายเทประจุจาก  $C_k$  ไปยัง วัสดุทดสอบ โดยที่  $C_k$  มีขนาดไม่เป็นอนันต์ ปกติแล้ว  $C_k$  ควรจะมีขนาดมากกว่า ค่าความจุ (Capacitance) ของวัสดุทดสอบประมาณ 10 เท่า
4.  $Q_{IEC}$  ตามนิยาม IEC 60270:2000/AMD 1:2015 กำหนดให้  $q_a$  ซึ่งเป็นประจุที่เกิดจากการสอบเทียบที่รู้ค่าที่แน่นอน และเครื่องวัด PD ได้ถูกตั้งค่าให้อ่านค่าดังกล่าว ซึ่งจะคำนึงถึงอัตราการเกิดซ้ำเข้ามาพิจารณาพร้อมด้วย ปัจจุบันเริ่มนำ  $Q_{IEC}$  มาใช้แทนที่  $q_a$



รูปที่ 2.25 วงจรการวัดการดิสชาร์จบางส่วนพื้นฐาน

$U$  คือ ตัวจ่ายแรงดันป้อนให้กับตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว  $C_k$  และวัสดุทดสอบ  $C_t$

$C_k$  คือ ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว

$C_t$  คือ ค่าเก็บประจุของวัสดุทดสอบประกอบด้วย  $C_a$ ,  $C_b$  และ  $C_c$  ใช้ประโยชน์ด้านการค้า

$i(t), q$  คือ กระแสฟลัสดีสชาร์จบางส่วนที่ถ่ายเทระหว่าง  $C_k$  กับ  $C_t$  ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อผู้อื่นโดยไม่ได้รับอนุญาต และต้องอ้างอิงถึงเอกสารนี้ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขณะเกิดการดิสชาร์จบางส่วนที่จุดบกพร่อง ส่งผลให้แรงดันคร่อมฉนวนลดลง ขนาดของแรงดันที่ลดลงมีค่าเท่ากับ  $\delta U_a$  สอดคล้องกับ  $q_c, q_a, q_m$  และ  $Q_{IEC}$

ในกรณีอุดมคติ  $C_k \gg C_t$  และ  $C_t \approx C_a + C_b$  ประจุ  $q$  จะมีมากที่สุดค่าระหว่างการดิสชาร์จบางส่วน  $C_k$  จะปล่อยกระแสชาร์จจิ้งหรือ  $i(t)$  กรณีที่  $C_k \gg C_t$  ค่า  $\delta U_t$  จะได้รับชดเชยสมบูรณ์และประจุที่ถ่ายเทก็คือ  $i(t)$  ประจุถ่ายเทหาได้จากสมการ

$$q = \int i(t) dt = \left\{ C_a + \frac{C_a \cdot C_b}{C_c + C_b} \right\} \delta U_t \quad (2.28)$$

เพราะว่า  $C_b < C_c$  จึงได้  $q = (C_a + C_b) \delta U_t$

เมื่อแทนค่าจากสมการ  $\delta U_t = \frac{\delta q_c C_b}{C_c (C_a + C_b)}$

$$q = \frac{C_b \delta q_c}{C_c} \quad (2.29)$$

เงื่อนไขที่  $C_k \gg C_t$  ในทางปฏิบัติเป็นไปได้ยากเนื่องจาก  $C_k$  ขนาดใหญ่ มีราคาแพงจัดหายากและจะเป็นโหลตที่ดึงกระแสทำให้ไม่สามารถจ่ายแรงดันชดเชยได้อย่างสมบูรณ์ กำหนดแรงดันไฟฟ้าที่ได้ชดเชย  $\delta U_a^*$  จะได้

$$\delta U_a^* \cdot (C_a + C_b + C_k) = \delta U_a \cdot (C_a + C_b)$$

$$\delta U_a^* = \frac{(C_a + C_b)}{(C_a + C_b + C_k)} \cdot \delta U_a$$

$$\therefore \delta U_a = \frac{C_b}{(C_a + C_b)} \cdot \delta U_c, q = C_b \delta U_c$$

$$\delta U_a^* = \frac{q}{(C_a + C_b)} \cdot \frac{(C_a + C_b)}{(C_a + C_b + C_k)} = \frac{q}{(C_a + C_b + C_k)} \quad (2.30)$$

ประจุที่ส่งถ่ายจาก  $C_k$  ไป  $C_t$  ( $q_m$ ) สามารถวัดได้โดย

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.

$$\begin{aligned}
 &= C_k \delta U_a^* \\
 &= \frac{q}{(C_a + C_b + C_k)} C_k \\
 &= \frac{C_k}{(C_a + C_k)} q, C_b \text{ สามารถไม่นำมาคิดได้} \quad (2.31)
 \end{aligned}$$

สมการ (2.55) เป็นสมการที่ใช้สำหรับการวัดในห้องปฏิบัติการและสถานที่ติดตั้งใช้งาน

$$= \frac{q_m}{q} = \frac{C_k}{(C_a + C_k)} \quad (2.32)$$

### 2.7.5 การตรวจสอบ PD โดยไม่ใช้วิธีทางไฟฟ้า

1. ตรวจสอบทางเคมี (DGA) เป็นการนำตัวอย่างน้ำมันจากอุปกรณ์ฉนวนน้ำมันออกมาแยกเพื่อหาปริมาณของแก๊สไฮโดรคาร์บอนแต่ละชนิดเพื่อวิเคราะห์ความรุนแรงในการเริ่มเกิดดิสชาร์จ สามารถหาได้จากหลายวิธี ตาม IEC Standard และ IEEE Standard การตรวจสอบทางเคมีนี้นิยมใช้กับการทดสอบหม้อแปลง

2. ตรวจสอบสัญญาณแสง (Optical) เป็นการตรวจสอบหาการดิสชาร์จบางส่วนชนิดโคโรน่าเพื่อหาตำแหน่งหรือความรุนแรงในการเกิดโคโรน่าโดยการใส่กล้องส่องโคโรน่าจะต้องทำการตรวจสอบในห้องมืดเนื่องจากความยาวคลื่นของโคโรน่าอยู่ในช่วงแสงขาว (300-400nm) ในบางกรณีพิเศษอาจจะใช้การเปลี่ยนแสงเป็นไฟฟ้า (Photo-multipliers) หรือการปรับความเข้มแสงร่วมด้วย การตรวจสอบสัญญาณแสงเหมาะสมกับการทดสอบอุปกรณ์ภายนอก

3. ตรวจสอบสัญญาณเสียง (Acoustical) เป็นการตรวจสอบหาตำแหน่งการดิสชาร์จบางส่วนเป็นหลัก จะต้องทำการตรวจสอบในสถานที่ที่มีเสียงรบกวนต่ำ ค่าที่วัดได้จะมีขนาดเล็กต้องใช้งานร่วมกับตัวขยายสัญญาณเพื่อหาตำแหน่งได้แม่นยำ การใช้ไมโครโฟนที่มีความไวในการหาทิศทางสูงอยู่ในช่วงเหนือความถี่เสียงจะทำให้เพิ่มประสิทธิภาพในการหาตำแหน่งดีขึ้น การตรวจสอบสัญญาณเสียงเหมาะสมกับอุปกรณ์ภายนอกหรือสวิตช์เกียร์ หม้อแปลงน้ำมัน

4. ตรวจสอบสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (VHF/UHF) เป็นการตรวจสอบโดยอาศัยหลักการของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อเกิดการดิสชาร์จบางส่วนจะเกิดการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่ 200 MHz หรือมากกว่านั้น เหมาะสำหรับการตรวจสอบการดิสชาร์จบางส่วนในระบบ GIS โดยใช้ UHF Coupler โดยตำแหน่งในการวัดกับจุดเกิดดิสชาร์จบางส่วนอยู่ใกล้กันจะมีผลของการ

ลดทอนสัญญาณ การสะท้อนของสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น 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.

2.7.6 การเกิดดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิล การเกิดดิสชาร์จภายในไดอิเล็กตริก เรียกว่า ดิสชาร์จบางส่วนภายใน หมายถึงสนาม ไฟฟ้าหรือความคงทนไดอิเล็กตริก (Dielectric strength) หรือทั้งสองกระจายตัวในไดอิเล็กตริกที่ลักษณะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน โดยสามารถแยกการ ดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลและ อุปกรณ์ในระบบเคเบิลใต้ดินออกเป็นชนิดต่าง ๆ ได้ดังต่อไปนี้

1. การดิสชาร์จที่เกิดจากโพรงอากาศ (Cavity) ภายในไดอิเล็กตริก มักจะพบใน ฉนวนแข็ง มีสาเหตุมาจากการหุ้มฉนวนในกระบวนการผลิต ที่บริเวณโพรงแก๊สจะมีค่าสนามไฟฟ้าสูง กว่าบริเวณรอบโพรงแก๊สเนื่องจากเมื่อมีการเปลี่ยนตัวกลางของสนามไฟฟ้าจากเนื้อฉนวนไปโพรง อากาศยอมทำให้ค่าสนามไฟฟ้าในโพรงอากาศมีค่ามากกว่าบริเวณรอบโพรงอากาศ โพรงแก๊สในสาย เคเบิลสามารถเริ่มเกิดการดิสชาร์จบางส่วนโดยไม่ต้องมีความเสียหายของวัสดุเกิดขึ้น เนื่องจากความ คงทนต่อสนาม (Field strength) ภายในช่องว่าง ( $\epsilon_r = 1$ ) เกินกว่าความเครียด (Stress) ที่ล้อมรอบ ไดอิเล็กตริกที่ค่าแฟคเตอร์ใกล้เคียง  $\epsilon_{ri}$  (ค่าเปอร์มิตติวิตีของวัสดุฉนวน) ในขณะเดียวกัน แก๊สมีความ คงทนต่อไดอิเล็กตริก (dielectric strength) น้อยกว่าของแข็ง,ของเหลว และฉนวนชุบเป็นเหตุให้การ ดิสชาร์จเหนือแรงดันไฟฟ้าที่แน่นอนที่สามารถวัดได้จากภายนอกและสามารถนำไปสู่การพังทลายที่ ละน้อยของวัสดุโดยรอบ

2. การดิสชาร์จที่เกิดจากรอยแตก (Fissure) ภายในไดอิเล็กตริก การดิสชาร์จชนิดนี้ โดยส่วนมากจะพบในไดอิเล็กตริกที่มีความยืดหยุ่นเช่น เทอร์โมพลาสติก รอยแตกที่เกิดขึ้นจะมี ทิศทางเดียวกันกับสนามไฟฟ้า สาเหตุโดยทั่วไปจะเกิดจากสิ่งสกปรกที่เกิดขึ้นในไดอิเล็กตริก, ฟอง และโพรงอากาศที่เกิดใกล้ ๆ กันและขยายตัวรวมกัน ปรากฏการณ์นี้จะพบบ่อยในสายเคเบิลที่ใช้งาน ได้ไประยะหนึ่งแล้ว

3. การดิสชาร์จที่เกิดจากเศษวัสดุและสิ่งเจือปน (Resin and Contaminants) เศษ วัสดุ และสิ่งเจือปนนี้โดยมากจะมีสาเหตุมาจากกระบวนการผลิต เศษวัสดุ (Resin) หมายถึง เศษวัสดุ ที่ใช้ทำฉนวนที่เกิดที่ใหม่ หรือเศษใยไฟเบอร์ เป็นต้น ส่วนสิ่งเจือปน (Contaminants) หมายถึง สิ่งเจือปนภายนอกได้แก่ ฝุ่นล่อง เศษผงต่าง ๆ เศษวัสดุและสิ่งเจือปนจะเข้าไปแทรกอยู่ในไดอิเล็ก ตริก การดิสชาร์จชนิดนี้จะรวมไปถึงส่วนที่ขรุขระและตำหนิของไดอิเล็กตริก

4. การดิสชาร์จที่เกิดจากการขยายตัวของคาร์บอนแทรก (Carbon Track) การ ดิสชาร์จชนิดนี้จะเกิดในสารอินทรีย์(Organic) ที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบของวัสดุที่ใช้ทำฉนวนเช่น ครออสลิงค์โพลีเอทิลีน (XLPE), โพลีเอทิลีน (PE) และโพลีเมอร์ต่าง ๆ สาเหตุโดยทั่วไปเกิดจากที่ไดอิ เล็กตริกมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงมากทำให้เกิดรอยแตกเป็นเส้นเล็ก ๆ (Treeing) ภายในไดอิเล็กตริก

## 2.8 ต้นไม้ น้ำ (Water tree)

ต้นไม้ น้ำ (Water tree) จะเกิดขึ้นเมื่อเนื้อฉนวนพอลิเมอร์ของสายเคเบิลได้รับ

เอกสารนี้มีความขึ้นซึ่งอาจจะมาจกความขึ้นจากน้ำที่อยู่ภายนอกของเนื้อฉนวนสายเคเบิลใต้ดิน โดยความขึ้น นี้ด้านการค้า จะค่อยๆซึมเข้าสู่รอยต่อของเนื้อฉนวนหรืออาจเกิดจากผลของความร้อนที่เกิดจากการใช้งานหรือ การนำไปใช้

อาจจะเกิดจากกระบวนการผลิตสายเคเบิลใต้ดินในขั้นตอนการใช้ steam curing XLPE ซึ่งในขั้นตอนนี้อาจเกิดความชื้นในเนื้อฉนวน XLPE ทำให้เป็นต้นเหตุการเกิดต้นไม้ไฟ จึงได้มีการป้องกันการเกิดต้นไม้ไฟจากกระบวนการผลิตสายเคเบิลใต้ดินโดยเปลี่ยนไปใช้ gas curing แทน steam curing เมื่อฉนวนได้รับความชื้นดังกล่าวแล้วได้รับความเครียดสนามไฟฟ้า ต้นไม้ไฟก็จะก่อตัวเกิดขึ้นในเนื้อฉนวน โดยเริ่มจากบริเวณที่มีความบกพร่องของเนื้อฉนวนก่อน โดยแนวการเกิดต้นไม้ไฟ (treeing) จะเกิดในแนวเดียวกับสนามไฟฟ้า

การเกิดของต้นไม้ไฟ จะไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าได้ มีปัจจัยในการเร่งการเกิดต้นไม้ไฟคือความเครียดทางสนามไฟฟ้าที่สูงขึ้น ต้นไม้ไฟมีคุณสมบัติไม่นำไฟฟ้าแม้ว่าจะเติบโตจนเชื่อมระหว่างชั้นสารกึ่งตัวนำก็ตาม แต่เมื่อมีความเครียดสนามไฟฟ้าที่สูงหรือได้รับแรงดันไฟฟ้าเกิน เช่น โลท์นิงเสิร์จ หรือ สวิตซ์ซิงเสิร์จ จะเป็นต้นเหตุให้ต้นไม้ไฟพัฒนาเป็น ต้นไม้ไฟไฟฟ้า (Electrical tree) เมื่อเกิดแล้วจะมีคุณสมบัตินำไฟฟ้า ทำให้ความเป็นฉนวนของ XLPE ลดลงและนำไปสู่การเกิดเบรคดาวน์เมื่อต้นไม้ไฟไฟฟ้าโตจนฉนวนไม่สามารถทนแรงดันไฟฟ้าได้

ต้นไม้ไฟที่เกิดขึ้นในสายเคเบิลมีตำแหน่ง, รูปร่างและขนาดที่แตกต่างกันโดยต้นไม้ไฟสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่

1. ต้นไม้ไฟลักษณะคล้ายหูกระต่าย (Bow-tie Water Tree) ดังรูป 2.26 จะสามารถพบเจอได้ภายในเนื้อฉนวนเคเบิลสาเหตุเกิดจากเนื้อฉนวนมีจุดบกพร่องเป็นสิ่งปนเปื้อนหรือโพรงอากาศเมื่อได้รับแรงดันเกินหรือความเครียดสนามไฟฟ้าที่สูงขึ้นจะขยายตัวออกอย่างรวดเร็วรูปร่างคล้ายหูกระต่ายตามแนวของสนามไฟฟ้าแต่จะหยุดการขยายตัวในที่สุด ทำให้ต้นไม้ไฟลักษณะคล้ายหูกระต่าย ไม่ใช่สาเหตุหลักที่ทำให้ฉนวนเคเบิลเกิดการเบรคดาวน์



รูปที่ 2.26 ต้นไม้ไฟลักษณะคล้ายหูกระต่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

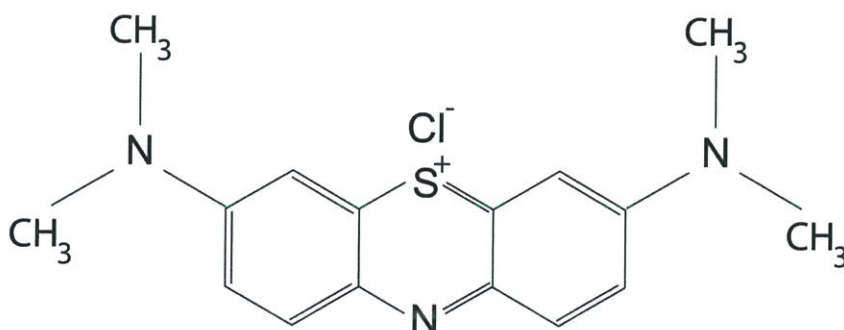
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2. ต้นไม้ น้ำลักษณะเป็นโพรง (Vent Water Tree) ดังรูป 2.27 จะสามารถพบเจอได้ในบริเวณใกล้ชั้นสารกึ่งตัวนำบริเวณที่มีจุดบกพร่องเช่นเกิดขอบคมขึ้นเมื่อได้รับแรงดันเกินหรือความเครียดสนามไฟฟ้าที่สูงขึ้นก็จะเกิดต้นไม้ น้ำลักษณะเป็นโพรงขึ้นและสามารถขยายตัวต่อไปได้เรื่อย ๆ เมื่อได้รับแรงดันเกินหรือความเครียดสนามไฟฟ้าที่สูงขึ้นทำให้ความเป็นฉนวนของ XLPE ลดลงและนำไปสู่การเกิดเบรคดาวน์เมื่อต้นไม้ไฟฟ้าโตจนฉนวนไม่สามารถทนแรงดันไฟฟ้าได้ ต้นไม้ น้ำลักษณะเป็นโพรง คือสาเหตุหลักที่ทำให้ฉนวนเคเบิลเกิดการเบรคดาวน์



รูปที่ 2.27 ต้นไม้ น้ำลักษณะเป็นโพรง

เนื่องจากต้นไม้ น้ำไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าได้ จึงต้องมีกระบวนการทดสอบฉนวนเคเบิลโดยการย้อมสีฉนวนด้วยเมทิลีนบลูและส่องด้วยกล้องไมโครสโคปเพื่อวิเคราะห์ลักษณะและขนาด โดยสารเมทิลีนบลูเป็นสารสีย้อมที่เป็นต่าง มีไอออนบวกเป็นตัวให้สี โดยมีโครงสร้างทางเคมีตามรูป 2.28 โดยการติดสีจะเกิดขึ้นจากการดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีประจุตรงกันข้าม โดยจับกันด้วยพันธะหลายชนิด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 2.28 โครงสร้างทางเคมีเมทิลีนบลู  
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.

แนวการเกิดต้นไม้ (treeing) จะเกิดตามแนวของสนามไฟฟ้าโดยจะโตขึ้นเมื่อได้รับแรงดันเกินหรือความเครียดสนามไฟฟ้าที่สูงขึ้นสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิดได้แก่

1.แนวการเกิดต้นไม้แบบพุ่ม (Bush Treeing) ดังรูป 2.29 สามารถเกิดขึ้นในเนื้อฉนวนเคเบิลในบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าไม่สูงมากนัก จะไม่อันตรายเท่าแนวการเกิดต้นไม้แบบกิ่ง (Branch Treeing) แต่เมื่อเกิดขึ้นแล้วเมื่อได้รับความเครียดสนามไฟฟ้าที่สูงขึ้นก็สามารถพัฒนาไปเป็นแนวการเกิดต้นไม้แบบกิ่งได้เช่นกันซึ่งทำให้ความเป็นฉนวนของ XLPE ลดลงและนำไปสู่การเกิดเบรคดาวน์



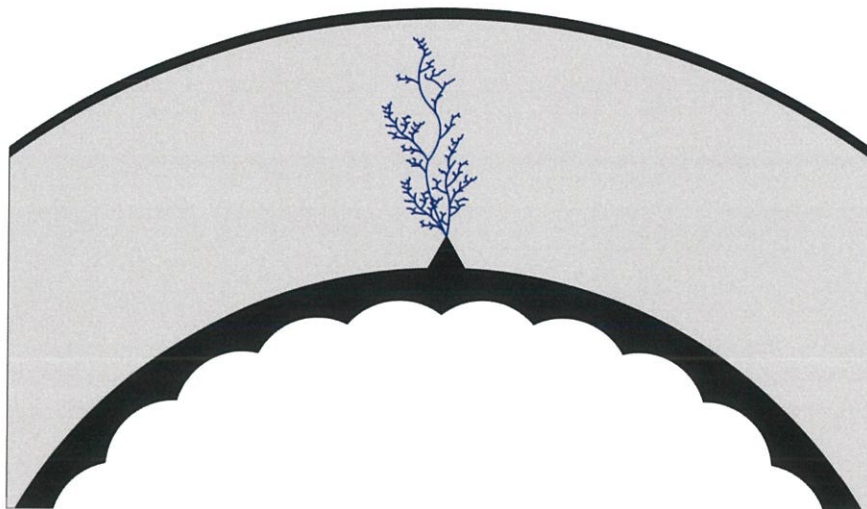
รูปที่ 2.29 แนวการเกิดต้นไม้แบบพุ่ม

2.แนวการเกิดต้นไม้แบบกิ่ง (Branch Treeing) ดังรูป 2.30 สามารถเกิดขึ้นในเนื้อฉนวนเคเบิลในบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าที่สูงหรืออาจเกิดจากความเครียดทางความร้อน ใช้เวลาในการเกิดและขยายตัวอย่างรวดเร็วและเป็นอันตรายต่อระบบฉนวนของเคเบิลใต้ดินเป็นอย่างยิ่ง เมื่อได้รับความเครียดสนามไฟฟ้าที่สูงขึ้นจะทำให้แนวการเกิดต้นไม้แบบกิ่งโตขึ้นขยายตัวตามแนวสนามไฟฟ้าและนำไปสู่การเกิดเบรคดาวน์

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 2.30 แนวการเกิดต้นไม้น้ำแบบกิ่ง



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 3

### การออกแบบและประกอบสร้าง

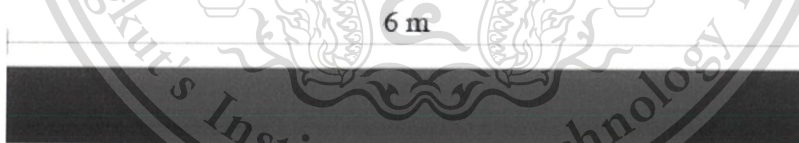
#### 3.1 บทนำ

ในการออกแบบและประกอบสร้างได้มีการจำลองปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบเคเบิลใต้ดินเพื่อศึกษาการวิเคราะห์ฉนวนในเคเบิลใต้ดิน วิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์ ได้แก่ การวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันในสายเคเบิลฉนวน XLPE ด้วยเครื่องทดสอบ PDC เพื่อดูผลของกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน, C ratio และ Dielectric Dissipation Factor (DDF) เพื่อบันทึกข้อมูลนำมาวิเคราะห์ผล การวัดการดิสชาร์จบางส่วนด้วยตัวเก็บประจุ, HFCT sensor และ UHF sensor เพื่อนำการวัดแต่ละวิธีมาเปรียบเทียบกัน และการตรวจสอบหาต้นไม้น้ำในสายเคเบิลใต้ดินชนิดฉนวน XLPE โดยการย้อมสีด้วยเมทาซีนบลู ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงการเตรียมสายเคเบิล, การจำลองกรณีปัญหา และการออกแบบและเครื่องมือการทดลองในแต่ละวิธี

#### 3.2 การเตรียมสายเคเบิลเพื่อนำมาติดตั้งข้อต่อเคเบิล

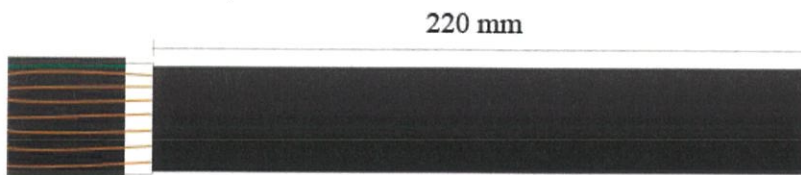
สายเคเบิลที่นำมาศึกษา และใช้ในการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันนี้จะใช้สายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE พิกัด 12/20(24) kV และมีพื้นที่หน้าตัด 240 mm<sup>2</sup> ซึ่งการเตรียมสายมีดังนี้

1. ใช้สายเคเบิลใต้ดินแบบมีเทปป้องกันน้ำฉนวน XLPE พิกัด 12/20(24) kV และมีพื้นที่หน้าตัด 240 mm<sup>2</sup> ที่มีความยาว 6 เมตร ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 สายเคเบิลที่ใช้ในการทดสอบ

2. ทำการปกสายเคเบิลใต้ดินโดยให้ชั้นกันฉนวนมีความยาว 220 มิลลิเมตรดังรูปที่ 3.2



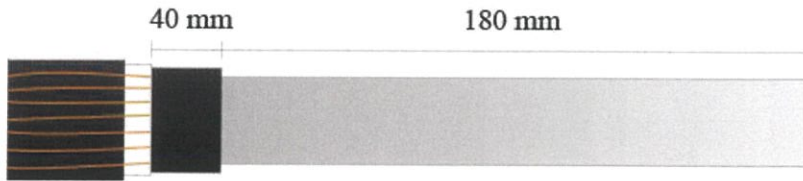
รูปที่ 3.2 ระยะเวลาการปกชั้นกันฉนวนของสายเคเบิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาดูแลเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น 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. ทำการปกสายเคเบิลใต้ดินโดยให้ชั้นกันฉนวนมีความยาว 40 มิลลิเมตร ชั้นฉนวน XLPE มีความยาว 180 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ระยะการปกชั้น XLPE ของสายเคเบิล

4. ทำการปกสายเคเบิลใต้ดินโดยให้ชั้นฉนวน XLPE มีความยาว 100 มิลลิเมตร ตัวนำมีความยาว 80 มิลลิเมตร โดยชั้นกันตัวนำมีความยาวเท่าความยาวฉนวนฉนวน XLPE ดังรูปที่ 3.4

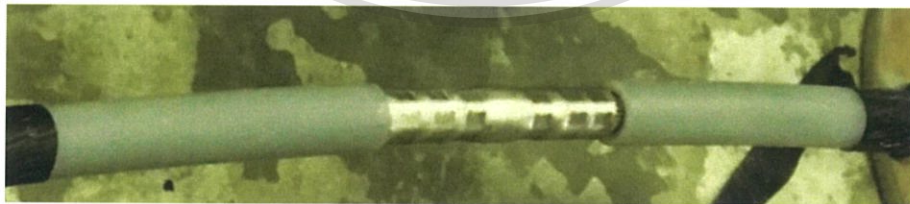


รูปที่ 3.4 ระยะการปกชั้นตัวนำของสายเคเบิล

### 3.3 การจำลองปัญหาในสายเคเบิลใต้ดินจำลอง

การออกแบบการวินิจฉัยฉนวนกรณีต่าง ๆ ในสายเคเบิลใต้ดิน กรณีปัญหาที่นำมาวิเคราะห์จะเกิดจากการทำข้อต่อเคเบิลและสิ่งประอะเปื้อนในระบบ โดยจะทำการจำลองกรณีต่อไปนี้

1. ข้อต่อเคเบิลไม่มีปัญหา การทำข้อต่อเป็นสิ่งที่ทำเพื่อเพิ่มความยาวของสายเคเบิล การจำลองนี้จะทำการศึกษาผลของการสวมข้อต่อที่ไม่มีปัญหา



รูปที่ 3.5 ข้อต่อเคเบิลที่ไม่มีปัญหา

2. ข้อต่อเคเบิลที่มีรอยบาก ปัญหาในข้อต่อเคเบิลส่วนใหญ่จะเกิดจากคนติดทำข้อ

ต่อเคเบิล เนื่องจากการเชื่อมสายจำเป็นต้องใช้ความชำนาญและประสบการณ์สูง ดังนั้นอาจทำให้เกิดรอยบากที่จะทำให้เกิดความเครียดไฟฟ้าบริเวณรอยบาก

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเปลี่ยนแปลงเนื้อหา 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 3.6 ขั้วต่อที่มีรอยบาก

3. ขั้วต่อเคเบิลใยแก้วทองแดงที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 ไมครอน เนื่องจากเวลาทำการเข้าสายจำเป็นต้องทำที่หน้างานซึ่งสภาพแวดล้อมไม่เหมาะสม (มีฝุ่นและผงโลหะ) ทำให้สิ่งเปราะเปื้อนไปเกาะบริเวณเนื้อฉนวนอาจทำให้เกิดความนำไฟฟ้า



รูปที่ 3.7 ขั้วต่อเคเบิลใยแก้วทองแดง (ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 ไมครอน)

4. ขั้วต่อเคเบิลใยแก้วเหล็กที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 ไมครอน การจำลองกรณีนี้มีลักษณะคล้ายกับกรณีใยแก้วทองแดง แต่จะมุ่งเน้นไปศึกษาผลของการเปลี่ยนชนิดสิ่งเปราะเปื้อนส่งผลกระทบต่อชุดเชื่อมต่อและระบบอย่างไร



รูปที่ 3.8 ขั้วต่อเคเบิลใยแก้วเหล็ก (ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 ไมครอน)

### 3.4 การออกแบบและเครื่องมือการทดสอบสายเคเบิลใต้ดินจำลอง [4], [7]

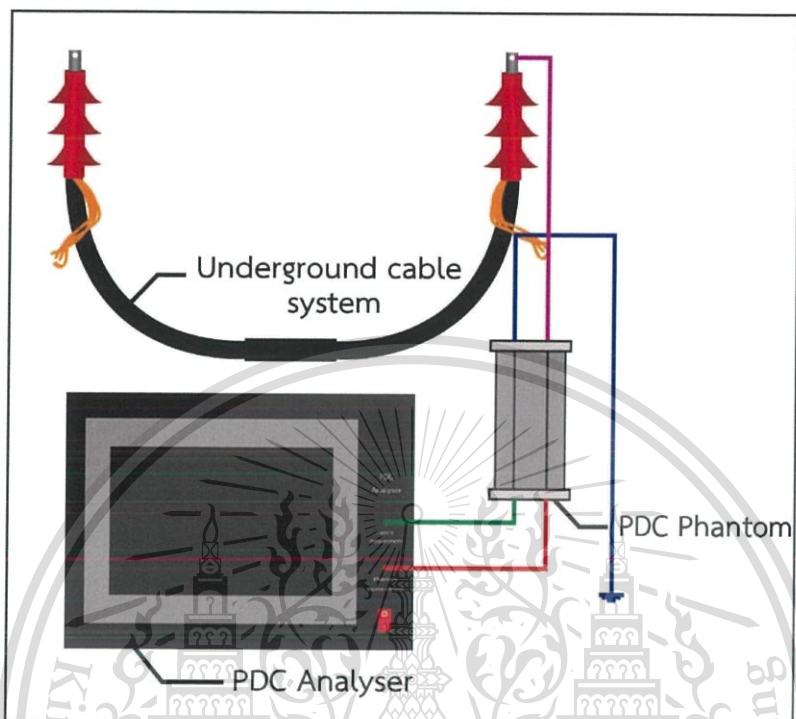
ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงวงจรการวัดโดยแสดงรูปแบบจำลองและรูปวงจรวัดจริงรวมถึงการออกแบบการทดสอบเพื่อศึกษากรณีต่าง ๆ และอุปกรณ์ที่นำมาใช้ในกระบวนการทดสอบ โดยแสดงดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

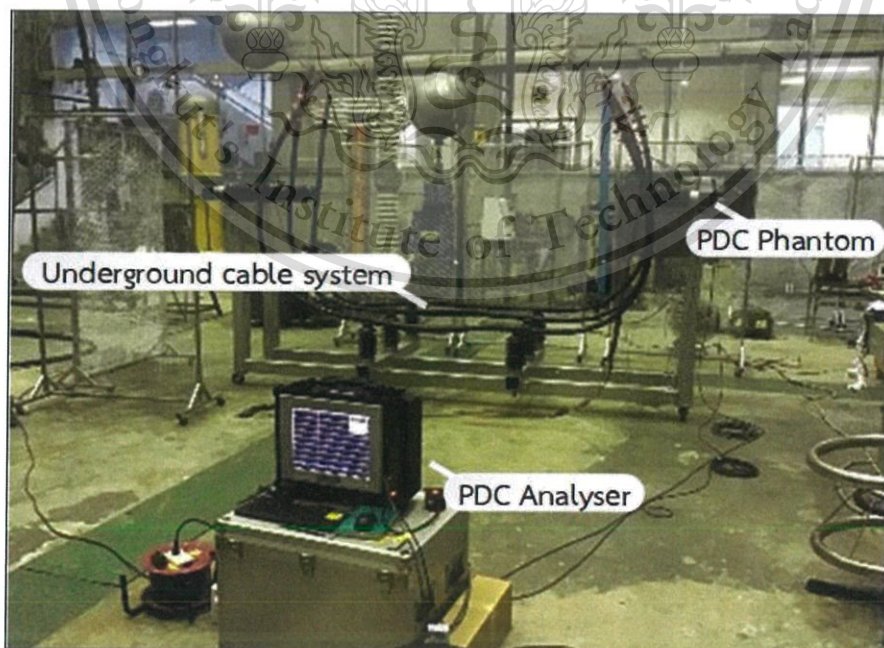
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

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

3.4.1 การทดสอบกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน จะใช้อุปกรณ์จ่ายแรงดันเสริม (Phantom) โดยจ่ายแรงดันไฟฟ้า 50 V และ 500 V ในปัญหาต่าง ๆ โดยวงจรการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันในสายเคเบิลฉนวน XLPE จะเป็นไปตามรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 แบบจำลองวงจรการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน



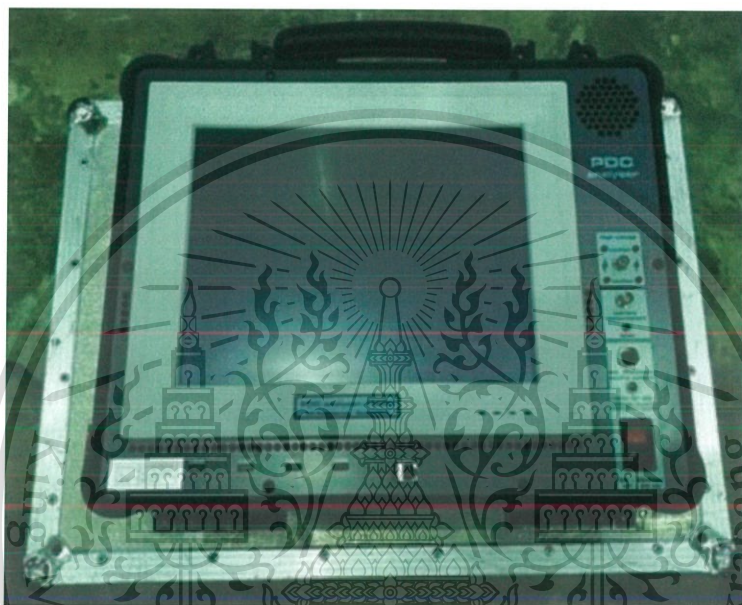
รูปที่ 3.10 วงจรการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่สำหรับใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น มิได้อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
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.

เครื่องมือที่ใช้ในการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน คือ PDC Analyser 1MOD เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดหน้างานและวินิจฉัยฉนวนแบบไม่ทำลาย โดยในตัวเครื่องประกอบด้วยอุปกรณ์สวิตชิง แหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรงที่สามารถปรับค่าได้ตั้งแต่ 30 -2000 V และมีเตอร์วัดกระแสสำหรับวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันของฉนวนในหน่วย pA โดยจะแสดงกราฟกระแสเทียบกับเวลาที่หน้าจอ และสามารถวัดค่าความจุรวมทั้งแสดงกราฟ Dielectric Dissipation Factor (DDF) หรือ  $\tan \delta$  เทียบกับค่าความถี่เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาของฉนวนต่อไป ได้ดังแสดงในรูป 3.11



รูปที่ 3.11 PDC Analyser 1MOD

อุปกรณ์จ่ายแรงดันเสริม (PDC Phantom 1000XE) เป็นอุปกรณ์เสริมเชื่อมต่อกับเครื่อง PDC Analyser 1MOD ผ่านสายคอนโทรลเพื่อใช้ประกอบการวัดในกรณีที่วัสดุทดสอบที่ไม่สามารถปลดกราวด์ออกจากระบบได้ โดยจ่ายแรงดันกระแสตรงที่สามารถปรับค่าได้ 30 -1000 V ไปที่วัสดุทดสอบ และส่งกระแสไปที่เครื่อง PDC Analyser 1MOD เพื่อทำการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน ดังแสดงในรูป 3.12

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.



(ก)



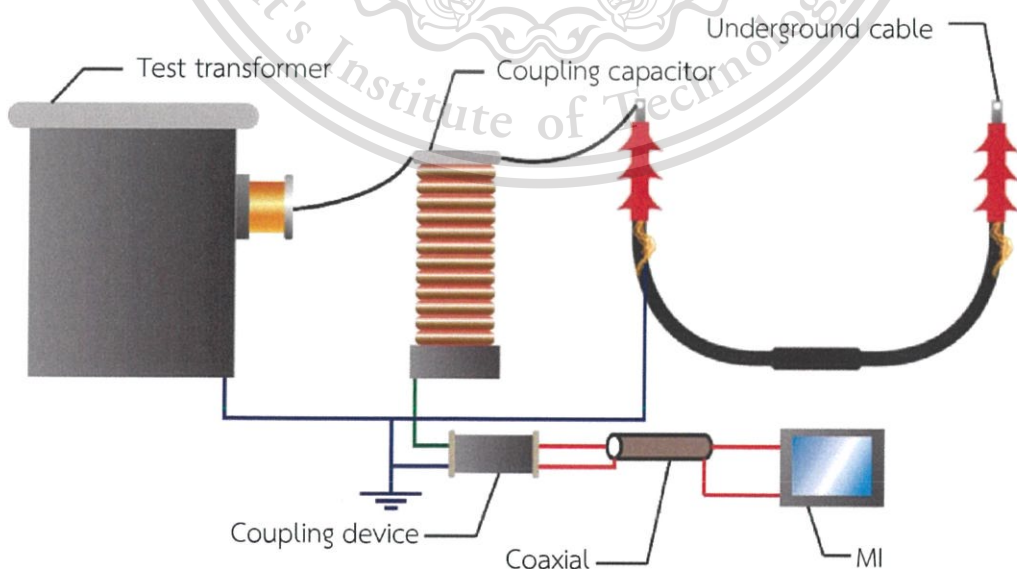
(ข)

รูปที่ 3.12 อุปกรณ์จ่ายแรงดันเสริม (Phantom) (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง

### 3.4.2 การวัดดิสชาร์จบางส่วน จะประกอบด้วย 2 วิธีดังนี้

1. การทดสอบฉนวนสายเคเบิล XLPE วิธีการวัดดิสชาร์จบางส่วนด้วยตัวเก็บประจุ (Conventional method) วงจรการวัดดิสชาร์จบางส่วนด้วยตัวเก็บประจุซึ่งเป็นการทดสอบแบบ Off-line test จะประกอบไปด้วย หม้อแปลงทดสอบที่ไม่มี Partial discharge ขนาด 230 V /100 kV 20 kVA ต่อเข้ากับตัวเก็บประจุขนาดใหญ่ (Coupling capacitor) ขนาด 1 nC 100kV เพื่อจ่ายแรงดันทดสอบสู่สายเคเบิลใต้ดิน โดยวงจรวัดจะต่อกับตัวเก็บประจุก่อนจะต่อลงดิน ซึ่งวงจรวัดจะประกอบไปด้วย Coupling device สายโคแอกเซียล และ MI มีหน้าที่ในการวัดประจุที่ Coupling capacitor จ่ายให้กับสายเคเบิลใต้ดิน ดังรูปที่ 3.13

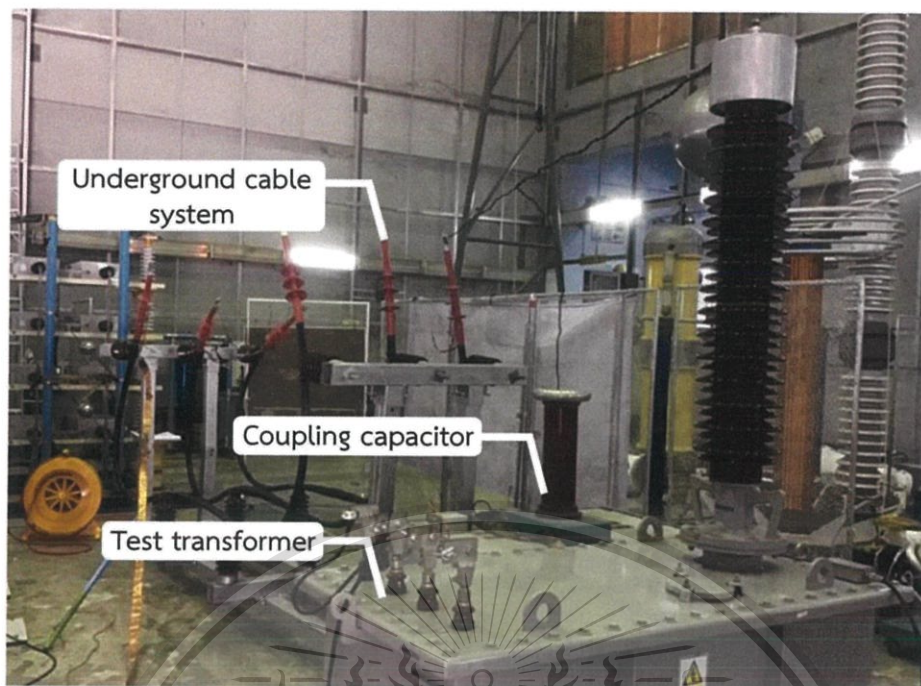
ขอเสนอแนะ ควรทำการวัดเทียบค่าตัวเก็บประจุให้ใกล้เคียงค่าดิสชาร์จบางส่วนที่วัดได้ก่อนการทดสอบ และควรใช้ตัววงจรทดสอบให้ห่างจากอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงอื่น ๆ เพื่อให้ผลการทดสอบมีค่าใกล้เคียงค่าที่ถูกต้องมากขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 3.13 แบบจำลองวงจรการวัดดิสชาร์จบางส่วนด้วยตัวเก็บประจุ  
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 3.14 วงจรการวัดดิซชาร์จบางส่วนด้วยตัวเก็บประจุ

ผลในการทดสอบจะสามารถบ่งบอกถึงชนิดในการเกิดดิซชาร์จบางส่วนในระบบเคเบิลใต้ดิน และบอกความรุนแรงในการเกิดดิซชาร์จบางส่วนจาก  $Q_{IEC}$  ซึ่งคือค่าประจุ (คูลอมบ์) ที่คิดผลของอัตราการเกิดซ้ำของการเกิดดิซชาร์จบางส่วนโดยผลการทดสอบจะไม่พิจารณาการเกิดดิซชาร์จบางส่วนที่มาจากชนิดโคโรนา

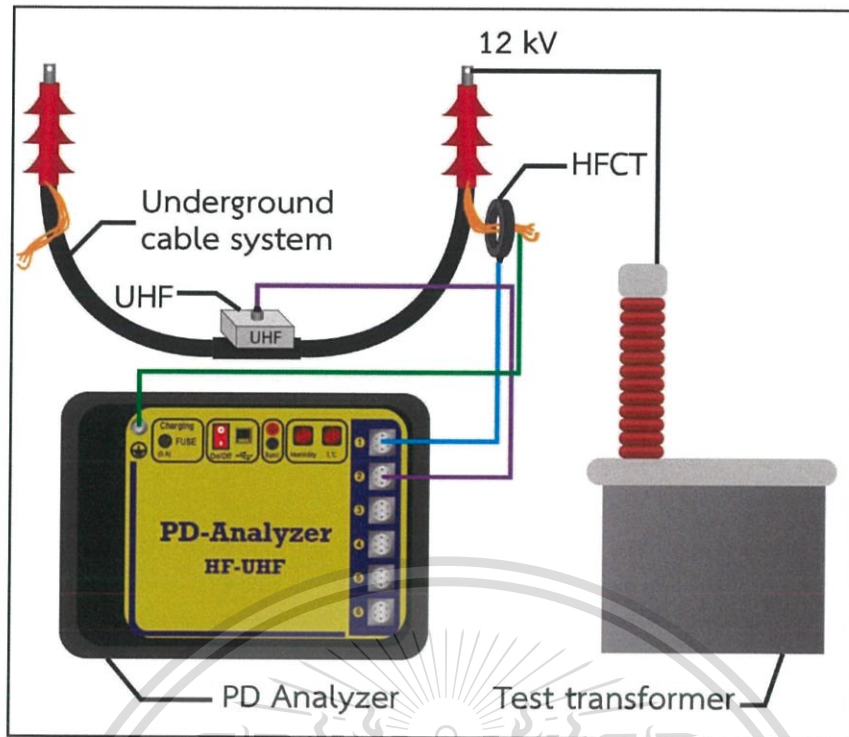
2. การทดสอบฉนวนสายเคเบิล XLPE ด้วยวิธีการวัดการดิซชาร์จบางส่วนด้วย HFCT-UHF sensors (Non-conventional method) ซึ่งเป็นการทดสอบแบบ On-line test วงจรการวัดดิซชาร์จบางส่วนด้วย HFCT-UHF จะประกอบไปด้วย HFCT ที่มี Bandwidth 0.1-20 MHz ต่อเข้ากับตัวนำ และ UHF วางบนข้อต่อสายเคเบิล-ใต้ดิน โดย HFCT และ UHF จะต่อกับเครื่อง PD Analyzer HF-UHF ที่มี ดังรูปที่ 3.15

ข้อเสนอแนะ ควรทำการวัดเทียบค่า HFCT ให้อ่านค่าประจุได้เท่ากันก่อนการทดสอบและควรเช็คตัวจรทดสอบให้ห่างจากอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงอื่น ๆ เพื่อให้ผลการทดสอบมีค่าใกล้เคียงค่าที่ถูกต้องมากขึ้น

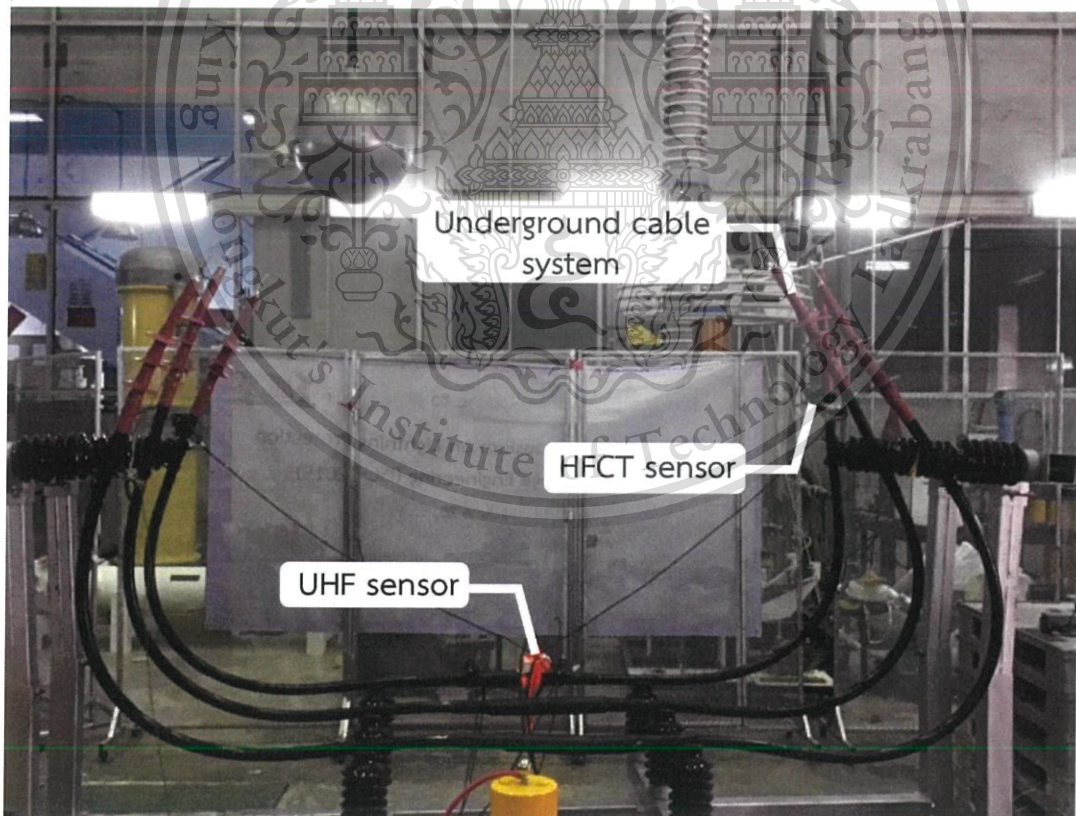
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 3.15 แบบจำลองวงจรการวัดดิซชาร์จบางส่วนด้วย HFCT-UHF sensors



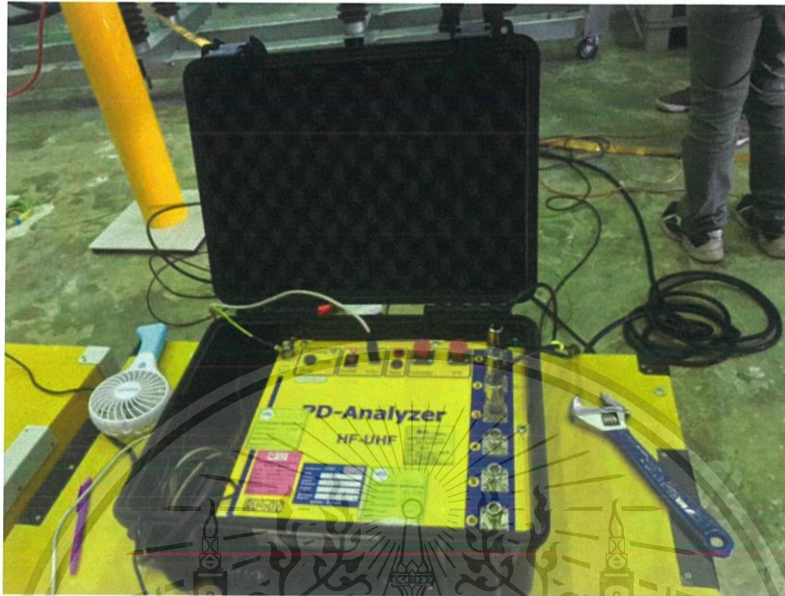
รูปที่ 3.16 วงจรการวัดดิซชาร์จบางส่วนด้วย HFCT-UHF sensors

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

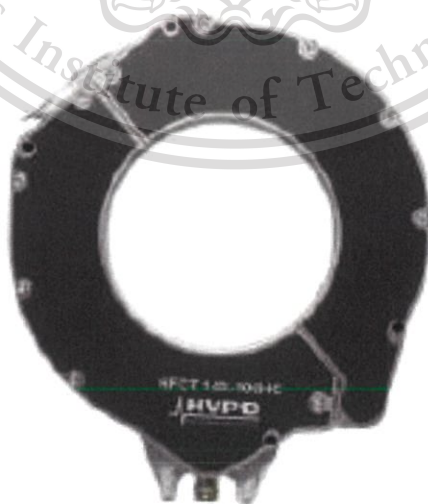
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เครื่อง PD-Analyzer HF/UHF ใช้ Phase resolved partial discharge (PRPD) และ time frequency analysis (PD-Cloud) ในการแปลผล ซึ่งรูปร่างและลักษณะของผลการวัดจะเหมือนกับการวัดด้วยตัวเก็บประจุ



รูปที่ 3.17 PD-Analyzer HF/UHF

HFCT sensor ประกอบไปด้วย ขดลวดเหนี่ยวนำ ferromagnetic ซึ่งมีอยู่ทั่วไป, คุณภาพสูง และราคาไม่แพง รับอินพุตการวัด คือ คลื่นกระแสของการดีสชาร์จบางส่วนที่ไหลผ่าน HFCT และนำเอาต์พุต คือ แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำบนความต้านทานของอินพุตมาประมวล โดยจะนำ HFCT sensor มาคล้องที่ตัวนำสายดิน ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.18 HFCT รุ่น 100 HVPD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น 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.

UHF sensor มักใช้ใน GIS สำหรับการวัดการดิสชาร์จบางส่วน โดยจะติดตั้งบนพื้นผิวภายนอกของ GIS เพื่อตรวจจับการดิสชาร์จบางส่วนโดยใช้หลักการคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า แต่ในปริญญานิพนธ์นี้ได้นำมาทดลองวัดการดิสชาร์จบางส่วนในเคเบิล



รูปที่ 3.19 UHF Sensor

### 3.5 การเตรียมชิ้นส่วนเคเบิลสำหรับการตรวจสอบหาต้นไม้น้ำ

สายเคเบิลที่ใช้ในการทดสอบจะเป็นชิ้นส่วนสายเคเบิลที่ขนาดพิกัด 22 kV โดยในการเตรียมสายเคเบิลในการทดลองจะทำการนำตัวนำทองแดงออกและทำการตัดฉนวนเคเบิลลักษณะเป็นแฉกด้วยเครื่องตัด โดยมีความหนาของฉนวนเคเบิลอยู่ที่ 0.5 mm ดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 ตัดฉนวนเคเบิลลักษณะเป็นแฉก

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.

เมื่อได้ชิ้นส่วนที่ต้องการแล้วนำมาทำความสะอาดด้วยเอทานอล โดยชิ้นส่วนที่นำมาทดสอบจะแบ่งเป็นส่วนหัว กลาง และท้าย จากตำแหน่งของชิ้นส่วนเคเบิล ดังรูป 3.21



รูปที่ 3.21 ทำความสะอาดและแบ่งชิ้นส่วนที่จะทดสอบ

โดยจะแบ่งกรณีของการทดสอบออกเป็น 4 กรณี ซึ่งได้แก่ 1-1, 1-2, 2-1 และ 2-2 ซึ่ง 1-1 และ 1-2 คือสายเคเบิลใต้ดินที่ระเบิดพร้อมกันและเป็นสายคนละเฟส ส่วน 2-1 และ 2-2 คือสายเคเบิลใต้ดินที่ระเบิดพร้อมกันและเป็นสายคนละเฟส แต่เกิดระเบิดทีหลัง 1-1 และ 1-2

การทดสอบเพื่อตรวจสอบหาต้นไม้น้ำจะแบ่งชิ้นส่วนของสายเคเบิลแต่ละกรณี ออกเป็น 2 ชุด เพื่อทดสอบด้วยวิธีย่อยสลายด้วยเมทิลีนบลู 3 วิธี ดังนี้

1. ทดสอบด้วยสารละลายเมทิลีนบลูกับแอมโมเนีย
2. ทดสอบด้วยสารละลายเมทิลีนบลูกับโซเดียมคาร์บอเนต
3. ทดสอบด้วยสารละลายเมทิลีนบลูกับโซเดียมไฮดรอกไซด์

ซึ่งการทดสอบหาต้นไม้น้ำทั้ง 3 วิธี เป็นการตรวจสอบหาต้นไม้น้ำที่ไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าได้ โดยต้นไม้น้ำมีคุณสมบัติไม่นำไฟฟ้าแม้ว่าจะเติบโตรวมเชื่อมระหว่างชั้นสารกึ่งตัวนำก็ตาม แต่เมื่อมีความเครียดสนามไฟฟ้าที่สูงหรือได้รับแรงดันไฟฟ้าเกินเช่น ไลต์นิงเสิร์จหรือสวิตช์ชิ่งเสิร์จ จะเป็นต้นเหตุให้ต้นไม้น้ำพัฒนาเป็นต้นไม้นำไฟฟ้าเมื่อเกิดแล้วจะมีคุณสมบัตินำไฟฟ้า ทำให้ความเป็นฉนวนของ XLPE ลดลงและนำไปสู่การเกิดเบรคดาวน์

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.

## บทที่ 4

### การทดสอบและประเมินผล

#### 4.1 วิธีดำเนินการทดสอบ [10]

4.1.1 การทดสอบระบบเคเบิลใต้ดินจำลอง การทดสอบสายเคเบิลที่มีข้อต่อนั้นจะประกอบไปด้วย 2 การทดสอบ คือ

1. การทดสอบหากระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน (PDC) โดยจะทำการป้อนแรงดันกระแสตรงให้สายเคเบิลด้วยแรงดันทดสอบและเวลาที่กำหนด จากนั้นทำการวัดกระแสโพลาริเซชัน กระแสดีโพลาริเซชัน และค่า  $\tan \delta$  โดยเครื่องทดสอบ PDC Analyser และนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบและวิเคราะห์

2. การทดสอบการดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge) โดยการทดสอบแบ่งเป็นแบบ Conventional method ที่วัดด้วยตัวเก็บประจุ และแบบ On-line test ที่วัดด้วย HFCT และ UHF sensor ในการทดสอบแบบ Non-conventional method โดยการทดสอบจะจำลองกรณีปัญหาที่ทำให้ฉนวนมีโอกาสเกิดกระแสรั่วไหลนั้น แบ่งเป็นกรณีดังนี้ 1. ข้อต่อไม่มีปัญหา 2. รอยบาก 3. ผงทองแดง 4. ผงเหล็ก โดยในตารางที่ 4.1 – ตารางที่ 4.3 แสดงเงื่อนไขในการการทดสอบในแต่ละวิธี

ตารางที่ 4.1 เงื่อนไขการทดสอบ PDC

เงื่อนไขการทดสอบ			
อุปกรณ์ที่ถูกทดสอบ	สายเคเบิลใต้ดิน XLPE แกนเดี่ยว 24 kV พื้นที่หน้าตัด 240 mm <sup>2</sup> ยาว 5 m ข้อต่อ (Heat-shrinkable joint)		
แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง	500 V DC		
อุณหภูมิขณะทดสอบ	30 °C		
อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัด	PDC Analyzer 1MOD		
วงจรที่ใช้ทดสอบ	PDC Phantom 1000XE		
กรณีทดสอบ	ข้อต่อดี	รอยบาก	
	ผงทองแดง	ผงเหล็ก	
ค่าที่ใช้ในการวิเคราะห์	รูปร่าง PDC	Tan Delta	C ratio
เวลาในการวัดกระแสโพลาริเซชัน	1000 วินาที		
เวลาในการวัดกระแสดีโพลาริเซชัน	1000 วินาที		

เอกสารนี้เป็นเอกสารสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ หากมีข้อผิดพลาดหรือต้องการแจ้งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันมีดังนี้

1. Initial Measurement ในขั้นตอนนี้ทำเพื่อกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นให้วัสดุทดสอบก่อนทำการทดสอบ โดยตั้งค่าเวลาโพลาริเซชันเป็น 0 วินาที หรือไม่มีการป้อนแรงดันไปที่วัสดุทดสอบ จากนั้นเครื่อง PDC Analyser จะทำการวัดกระแสดีโพลาริเซชันหรือการคลายประจุของวัสดุทดสอบโดยจะแสดงทั้งขนาดและชั่วของประจุในช่วง pA รอจนกว่ากระแสดีโพลาริเซชันลดลงเป็นศูนย์หรือค่าคงที่ก่อน เพื่อนำกระแสคงเหลือนี้ (Remaining Current) ไปหักลบจากค่าที่วัดได้เพื่อให้ได้ค่าจริง

2. Control Measurement วัดคุณสมบัติของขั้นตอนนี้เพื่อตรวจสอบขนาดกระแสและค่าความจุว่าฉนวนวัสดุทดสอบสามารถทดสอบได้หรือไม่ ซึ่งทำได้โดยวัดกระแสโพลาริเซชันโดยป้อนแรงดัน 50 V เป็นเวลา 5 วินาที จากนั้นวัดกระแสดีโพลาริเซชันจนขนาดกระแสลดลงถึงกระแสคงเหลือ (Remaining Current) ใน Initial Measurement

3. Main Measurement ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนการวัดค่าจริงตามค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่กำหนดของแต่ละกรณีศึกษา โดยจะทำการป้อนแรงดัน 500 V และเวลาวัด 1000 วินาทีเพื่อวัดกระแสโพลาริเซชันเมื่อครบเวลาการวัดกระแสโพลาริเซชันที่ตั้งไว้แล้วเครื่อง PDC Analyser จะหยุดจ่ายแรงดัน และวัดกระแสดีโพลาริเซชันตามเวลาที่กำหนด โดยเวลาที่ติดตั้งต้องทำให้กระแสดีโพลาริเซชันลดลงจนถึงระดับเดียวกับกระแสคงเหลือ (Remaining Current) ในขั้น Initial Measurement

ตารางที่ 4.2 เงื่อนไขการทดสอบ PD แบบ Conventional

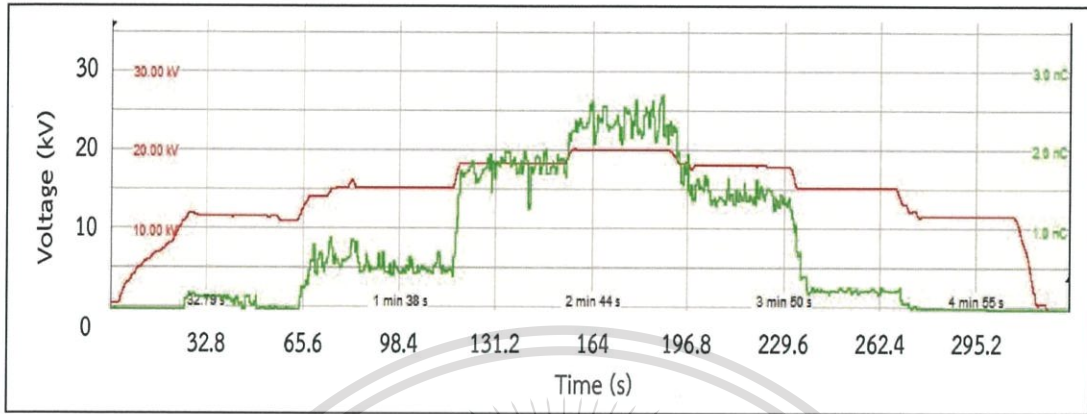
เงื่อนไขการทดสอบ		
อุปกรณ์ที่ถูกทดสอบ	สายเคเบิลใต้ดิน XLPE แกนเดี่ยว 24 kV พื้นที่หน้าตัด 240 mm <sup>2</sup> ยาว 5 m ข้อต่อ (Heat-shrinkable joint)	
แรงดันไฟฟ้า	20 kV	
ความถี่	250 kHz (Bandwidth: 100 - 400 kHz)	
อุณหภูมิขณะทดสอบ	30 °C	
กรณีทดสอบ	ข้อต่อดี	รอยบาก
	ผงทองแดง	ผงเหล็ก

ในการทดสอบ PD แบบ Conventional จะการขึ้นแรงดันจาก 12.5 kV ถึง 20 kV โดยขึ้นแรงดันเป็นแบบขั้นทีละ 2.5 kV และค้างไว้ขั้นละ 30 วินาที จากนั้นลดแรงดันเป็นขั้นจาก 20 kV ถึง 12.5 kV โดยลดแรงดันเป็นแบบขั้นทีละ 2.5 kV และค้างไว้ขั้นละ 30 วินาที นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น 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.

ข้อควรระวัง คือ ควรทำการวัดเทียบค่าตัวเก็บประจุให้ใกล้เคียงค่าดีสชาร์จบางส่วนที่วัดได้ก่อนการทดสอบ และควรเช็คดวงจรทดสอบให้ห่างจากอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงอื่น ๆ เพื่อให้ผลการทดสอบมีค่าใกล้เคียงค่าที่ถูกต้องมากขึ้น



รูปที่ 4.1 การขึ้นแรงดันทดสอบแบบ Conventional

ตารางที่ 4.3 เงื่อนไขการทดสอบ PD แบบ ด้วย HFCT และ UHF sensor

เงื่อนไขการทดสอบ		
อุปกรณ์ที่ถูกทดสอบ	สายเคเบิลใต้ดิน XLPE แกนเดี่ยว 24 kV พื้นที่หน้าตัด 240 mm <sup>2</sup> ยาว 5 m ข้อต่อ (Heat-shrinkable joint)	
อุปกรณ์ตรวจจับ	HFCT และ UHF sensor	
ความถี่	HF (100 kHz - 35 MHz) UHF (400 MHz - 1.5 GHz)	
อุณหภูมิขณะทดสอบ	30 °C	
กรณีทดสอบ	ข้อต่อดี	รอยบาก
	ผงทองแดง	ผงเหล็ก

4.1.2 การทดสอบสายเคเบิลเพื่อหาต้นไม้ (Water treeing) เป็นการทดสอบฉนวน XLPE ของสายเคเบิลที่มีประวัติที่แตกต่างกัน โดยในส่วนของ การเตรียมสายเคเบิลจะต้องนำตัวนำแกนกลางที่เป็นทองแดงออกและทำการตัดฉนวนเคเบิลลักษณะเป็นแวนด้วยเครื่องตัดโดยเลือกให้มีความหนาของฉนวนเคเบิลอยู่ที่ 0.5 mm จากนั้นนำมาทำความสะอาดด้วยเอทานอล สิ่งสำคัญอยู่ที่วิธีการทดสอบเนื่องจากทั้งสองวิธีที่ได้นำมาเลือกใช้นั้นแตกต่างกันทั้งการเตรียมสารละลายและเวลาในการทดสอบโดยจุดประสงค์หลักของการทดสอบนี้คือการหาวิธีที่เหมาะสมสำหรับการตรวจสอบต้นไม้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

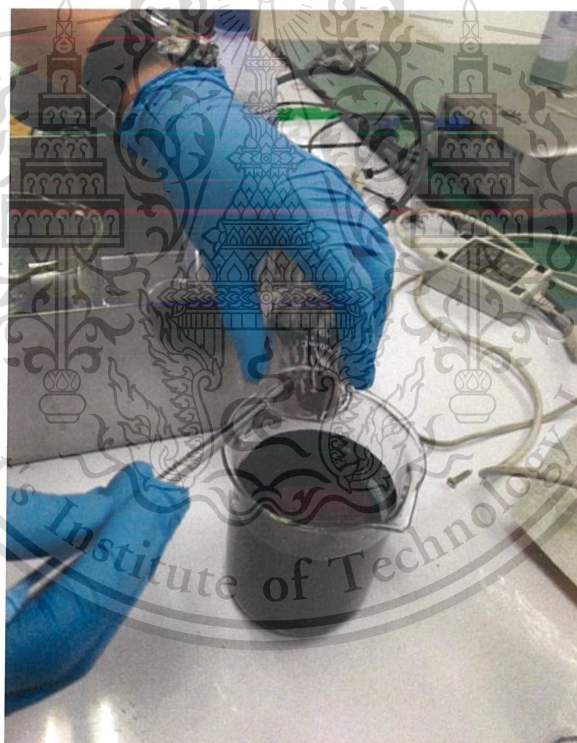
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

#### ตารางที่ 4.4 การศึกษาการตรวจสอบต้นไม้น้ำในสายเคเบิล

อุปกรณ์ที่ทดสอบ	สายเคเบิลใต้ดิน XLPE แกนเดี่ยว ความหนา 0.5 mm		
สายเคเบิล	ชนิด 1-1	ชนิด 1-2	
	ชนิด 2-1	ชนิด 2-2	
อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัด	กล้องไลต์ไมโครสโคป (Olympus BX43)		
สารตั้งต้น	เมทิลีนบลู		
วิธีการทดสอบ	แอมโมเนีย	โซเดียมคาร์บอเนต	โซเดียมไฮดรอกไซด์

##### 4.1.2.1 การทดสอบด้วยสารละลายเมทิลีนบลูกับแอมโมเนีย

1. เตรียมสารละลาย โดยชั่งสารเมทิลีนบลูปริมาณ 0.5 กรัม ด้วยเครื่องชั่งแล้วผสมกับน้ำกลั่น 250 ml ผสมกับสารละลายแอมโมเนียเข้มข้น 8 ml ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 สารละลายเมทิลีนบลูผสมแอมโมเนียเข้มข้น

2. ต้มสารละลายโดยใช้เตาไฟฟ้าชนิดกวนสาร ด้วยอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 นาที โดยปิดบีกเกอร์ด้วยแผ่นพรอยด์ แล้วนำชิ้นส่วนเคเบิลลงไปต้มกับสารละลายต่อที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที ดังรูปที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

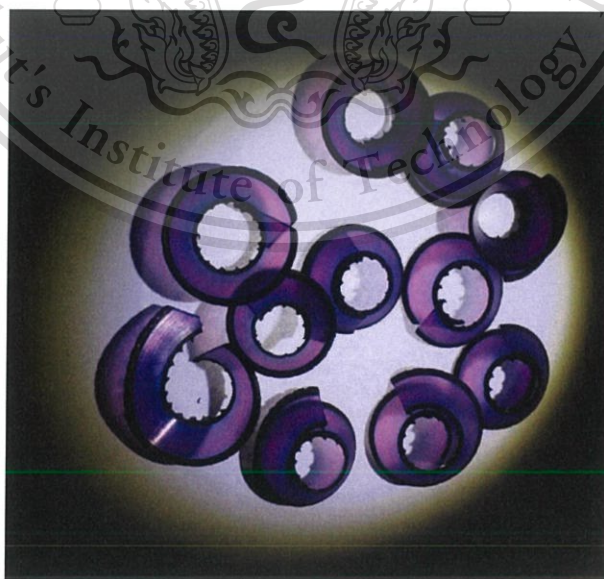
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

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



รูปที่ 4.3 ต้มสารละลายโดยใช้เตาไฟฟ้าชนิดกวนสาร

3. นำชิ้นส่วนสายเคเบิลที่ต้มครบกำหนดไปล้างด้วยน้ำร้อนและล้างหรือเช็ดด้วยเอทิลแอลกอฮอล์หรือไอโซโพรพานอลหรืออะซิโตนเช็ดและทำความสะอาดให้แห้ง เก็บชิ้นฉนวนที่ทำการย้อมสีเสร็จเรียบร้อยแล้วไว้ในถุงซิปล็อคความชื้น ดังรูปที่ 4.4



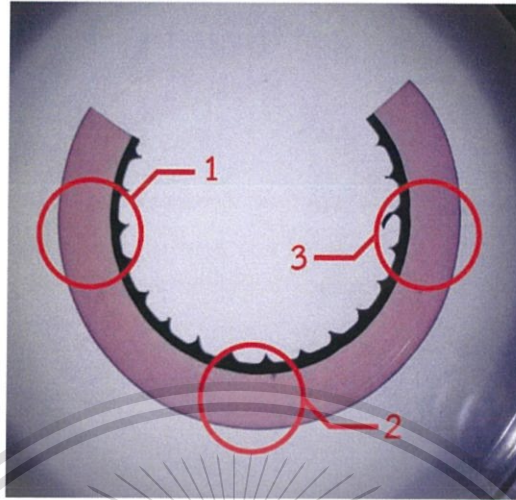
รูปที่ 4.4 ชิ้นส่วนเคเบิลที่ผ่านการย้อมสี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า 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.

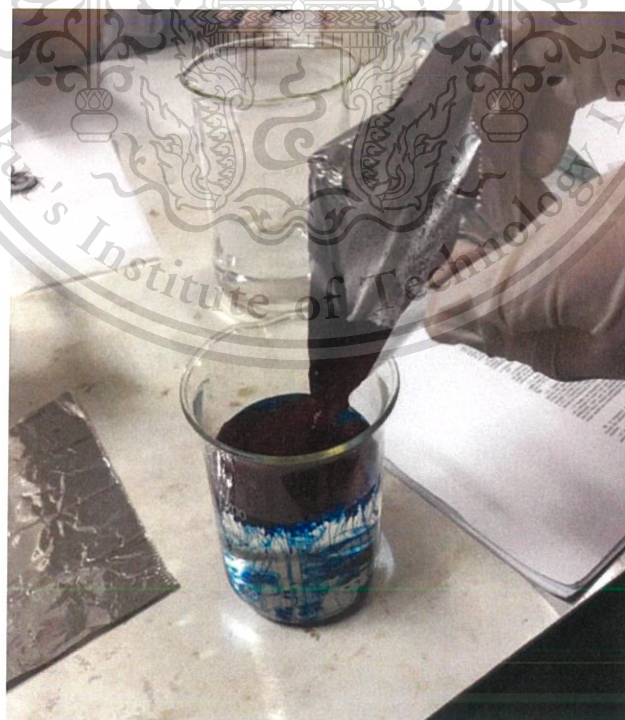
4. นำชิ้นส่วนเคเบิลมาส่องหาตำหนิหน้าด้วยกล้องไลต์ไมโครสโคป (Olympus BX43) สังกเกตแล้วบันทึกผลเป็นรูปภาพ 3 ด้านของชิ้นส่วนเคเบิลดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ชิ้นส่วนเคเบิลส่องด้วยกล้องไลต์ไมโครสโคป

#### 4.1.2.2 การทดสอบด้วยสารละลายเมทิลีนบลูกับโซเดียมคาร์บอเนต

1. เตรียมสารละลาย โดยชั่งสารเมทิลีนบลูปริมาณ 6 กรัม ด้วยเครื่องชั่งและชั่งสารโซเดียมคาร์บอเนตปริมาณ 0.5 กรัมด้วยเครื่องชั่ง แล้วผสมกับน้ำกลั่น 200 ml ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 สารละลายเมทิลีนบลูผสมโซเดียมคาร์บอเนต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น มิใช่ให้คุณค่าให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
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. ต้มสารละลายโดยใช้เตาไฟฟ้าชนิดกวนสาร ด้วยอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชม โดยปิดปีกเกอร์ด้วยแผ่นฟรอยด์ เมื่อครบ 4 ชมแล้วต้มสารละลายต่อที่อุณหภูมิ 70 เป็นเวลาอย่างน้อย 10 ชม. แต่เวลาที่เหมาะสมคือ 20 ชม. โดยไม่กวนสาร ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 สารละลายเมทิลีนบลูผสมโซเดียมคาร์บอเนต

3. ต้มสารละลายโดยใช้เตาไฟฟ้าชนิดกวนสาร ด้วยอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 15 นาที โดยปิดปีกเกอร์ด้วยแผ่นฟรอยด์ เมื่อครบ 15 นาที แล้วต้มสารละลายกับชิ้นส่วนเคเบิลต่อที่อุณหภูมิ 70 เป็นเวลาประมาณ 5 ชม. โดยไม่กวนสาร

4. นำชิ้นส่วนสายเคเบิลที่ต้มครบกำหนดไปแช่ด้วยเอทิลแอลกอฮอล์สักครู่หนึ่ง เช็ดและทำความสะอาดด้วยกระดาษซับเอทิลแอลกอฮอล์ เก็บชิ้นฉนวนที่ทำการย้อมสีเสร็จเรียบร้อยแล้วไว้ในถุงซิปล็อคความชื้น ดังรูปที่ 4.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

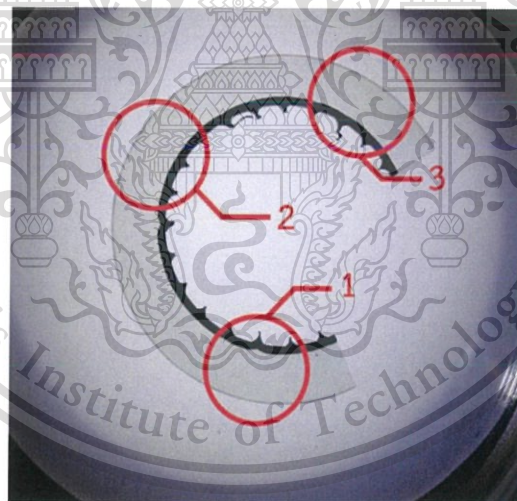
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

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



รูปที่ 4.8 ชิ้นส่วนเคเบิลที่ผ่านการย้อมสี

5. นำชิ้นส่วนเคเบิลมาส่องหาต้นไม้น้ำด้วยกล้องไลท์ไมโครสโคป (Olympus BX43) สังเกตแล้วบันทึกผลเป็นรูปภาพ 3 ด้านของชิ้นส่วนเคเบิลดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ชิ้นส่วนเคเบิลส่องด้วยกล้องไลท์ไมโครสโคป

#### 4.1.2.3 การทดสอบด้วยสารละลายเมทิลีนบลูกับโซเดียมไฮดรอกไซด์

1. เตรียมสารละลาย โดยชั่งสารเมทิลีนบลูปริมาณ 2.5 กรัม ด้วยเครื่องชั่งแล้วผสมกับน้ำกลั่น 1000 ml และชั่งสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ปริมาณ 2.5 กรัม ด้วยเครื่องชั่งแล้วผสมกับน้ำกลั่น 100 ml โดยการย้อมสีชิ้นส่วนของฉนวน XLPE จะใช้อัตราส่วนของเมทิลีนบลูต่อโซเดียม

ไฮดรอกไซด์ในอัตราส่วน 10 : 1 หลังจากนั้นนำเมทิลีนบลูและโซเดียมไฮดรอกไซด์ผสมกันตามอัตราส่วนที่กำหนด นำสารละลายทั้งสองชนิดผสมกันและนำไปต้มที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 4 ชม. ไม่ว่าจะกรณีใดๆ หงสน อักทงห้ามมเหตดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงใจของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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. นำชิ้นส่วนสายเคเบิลที่ตัดครบกำหนดไปแช่ด้วยเอทิลแอลกอฮอล์สักครู่หนึ่ง เช็ด และทำความสะอาดด้วยกระดาษซับเอทิลแอลกอฮอล์ เก็บชิ้นฉนวนที่ทำการซ่อมสีเสร็จเรียบร้อยแล้ว ไว้ในถุงซิปล็อคความชื้น
3. นำชิ้นส่วนเคเบิลมาสองหาต้นไม้น้ำด้วยกล้องไลท์ไมโครสโคป (Olympus BX43) สังเกตแล้วบันทึกผลเป็นรูปภาพ 3 ด้านของชิ้นส่วนเคเบิล



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.

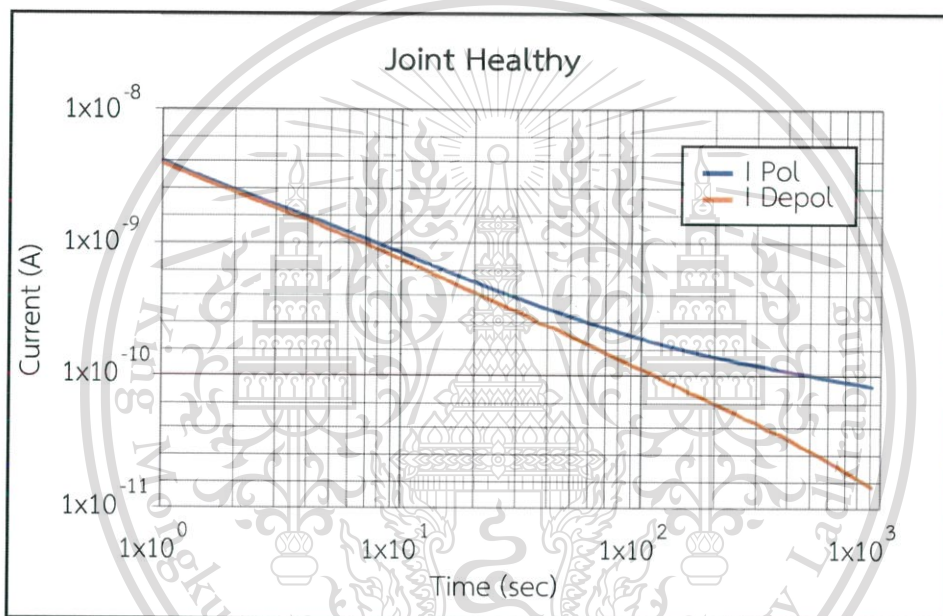
## บทที่ 5

### ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

#### 5.1 ผลการทดสอบ

5.1.1 ผลการทดสอบกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันของกรณีจำลองต่าง ๆ การทดสอบจะได้ผลของกราฟกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันที่จะนำไปวิเคราะห์และตีความถึงความสัมพันธ์ของค่ากระแสโพลาริเซชัน กระแสดีโพลาริเซชัน ค่าความสูญเสีย (Loss factor) และ C ratio

5.1.1.1 กรณีจำลองที่ 1 สายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE ที่มีข้อต่อที่ไม่มีปัญหา

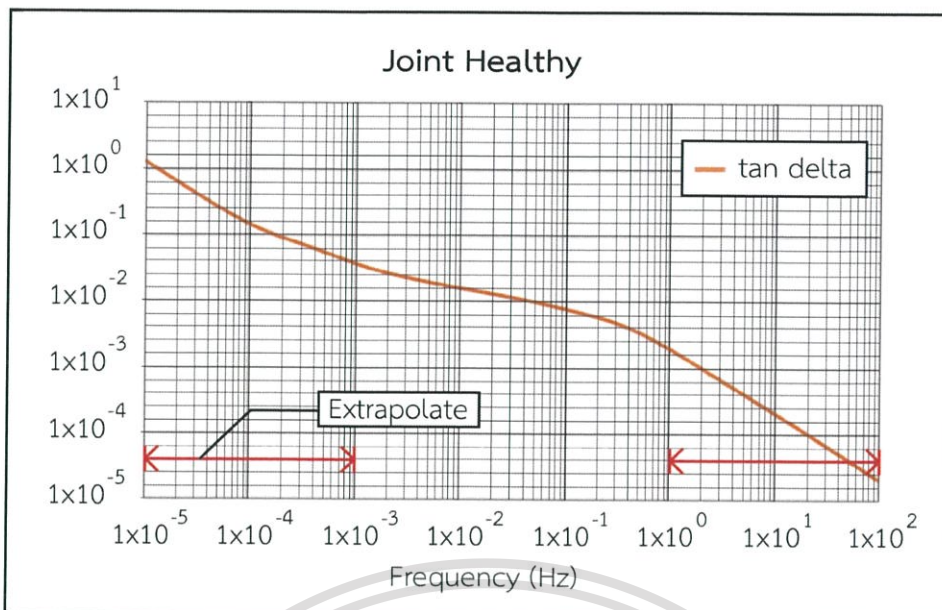


รูปที่ 5.1 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อต่อไม่มีปัญหา กราฟกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน

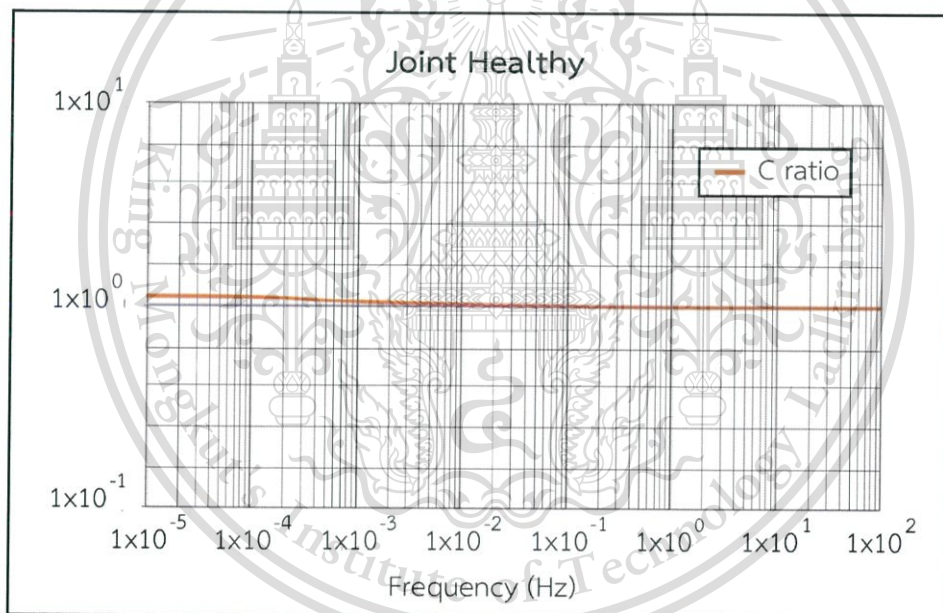
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 5.2 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อต่อไม่มีปัญหา กราฟแสดงค่าความสูญเสีย



รูปที่ 5.3 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อต่อไม่มีปัญหา กราฟ c ratio

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

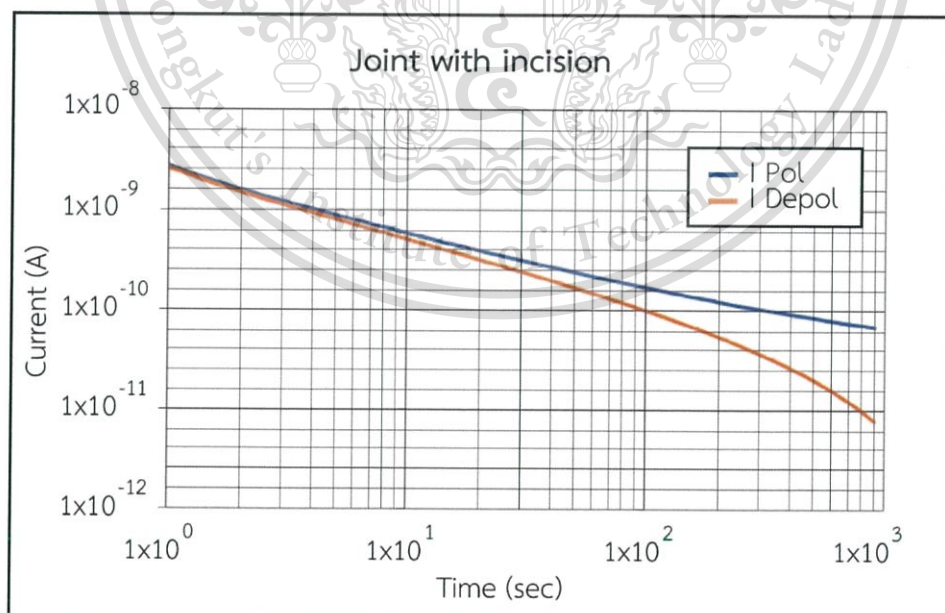
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

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

ตารางที่ 5.1 ผลการวิเคราะห์กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน กรณีข้อต่อไม่มีปัญหา

กรณีที่ 1: ผลการวิเคราะห์ ; ที่แรงดัน 500 V , อุณหภูมิ 31 °C , ความชื้นสัมพัทธ์ 58%			
กราฟ	รูปร่างลักษณะของกราฟ	ตีความผล	เหตุการณ์ที่เกิดขึ้น
PDC	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>I_{\text{depol}}</math> เป็นเส้นตรงในกราฟสเกล log-log</li> <li>- <math>I_{\text{pol}}</math> ค่อนข้างเป็นเส้นตรงในกราฟสเกล log-log</li> <li>- <math>I_{\text{pol}}</math> เคลื่อนออกจาก <math>I_{\text{depol}}</math> ที่เวลาน้อยกว่า 10 วินาที</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เป็นรูปแบบปกติของกระแส <math>I_{\text{depol}}</math></li> <li>- เป็นรูปแบบที่ยอมรับได้</li> <li>- มีโอกาสพบการรั่วไหลตามพินฉนวน</li> </ul>	-
Tan $\delta$	- มีค่าสูงขึ้น เมื่อความถี่ต่ำลง	- รูปแบบปกติ	- ยังไม่ผ่านการใช้งาน
C ratio	- ค่าคลาดเคลื่อนจาก 1 เล็กน้อยมาก	- มีผลิตภัณฑ์ที่ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพเล็กน้อย	- ในอุดมคติควรมีค่าเท่ากับ 1 หรือมีค่าเข้าใกล้มาก ๆ

5.1.1.2 กรณีจำลองที่ 2 สายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE ที่มีข้อต่อที่มีรอยบาก

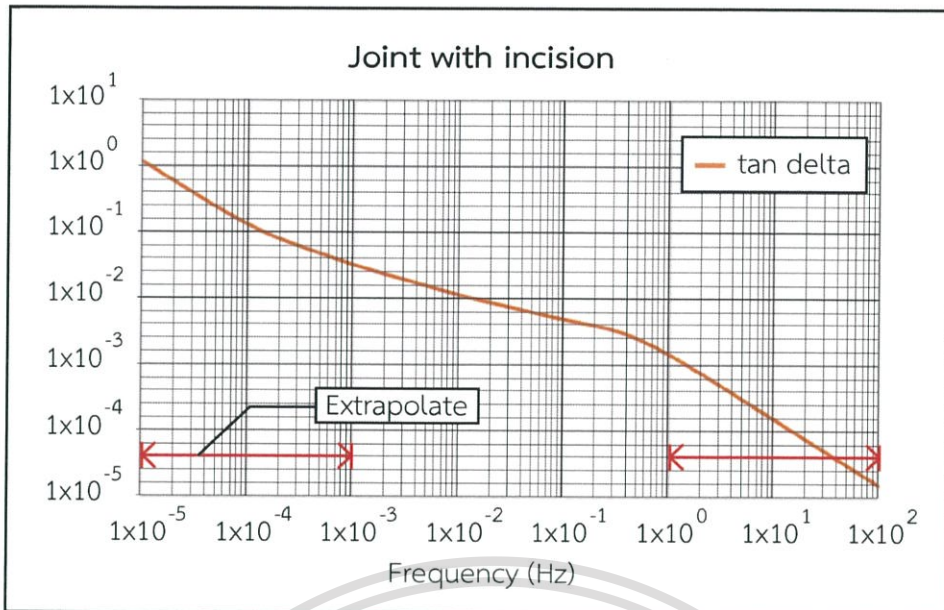


รูปที่ 5.4 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อต่อที่มีรอยบาก กราฟกระแสโพลาริเซชัน

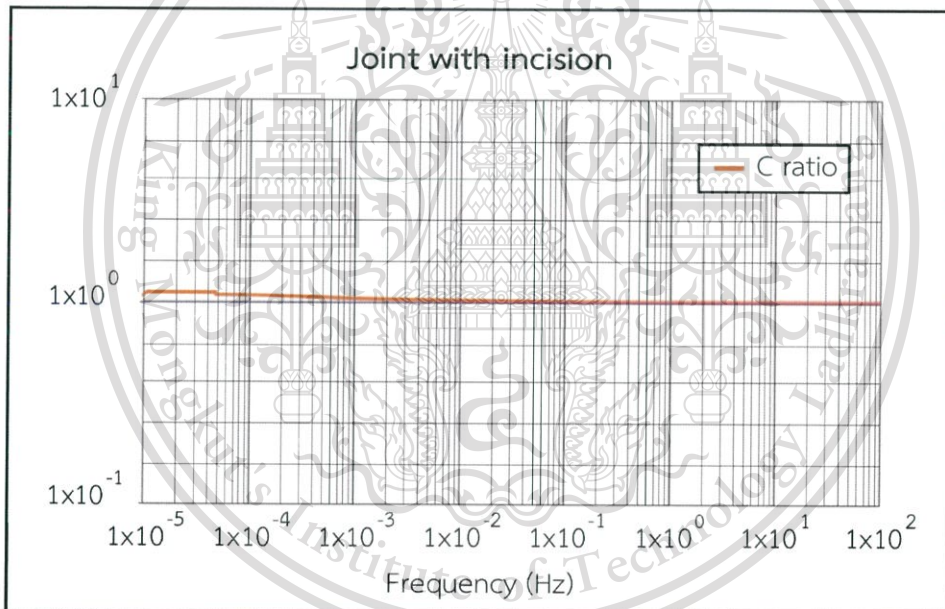
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน และดีโพลาริเซชัน เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 5.5 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อต่อมีรอยบาก กราฟแสดงค่าความสูญเสีย



รูปที่ 5.6 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อต่อมีรอยบาก กราฟ c ratio

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 5.2 ผลการวิเคราะห์กระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน กรณีข้อต่อมีรอยบาก

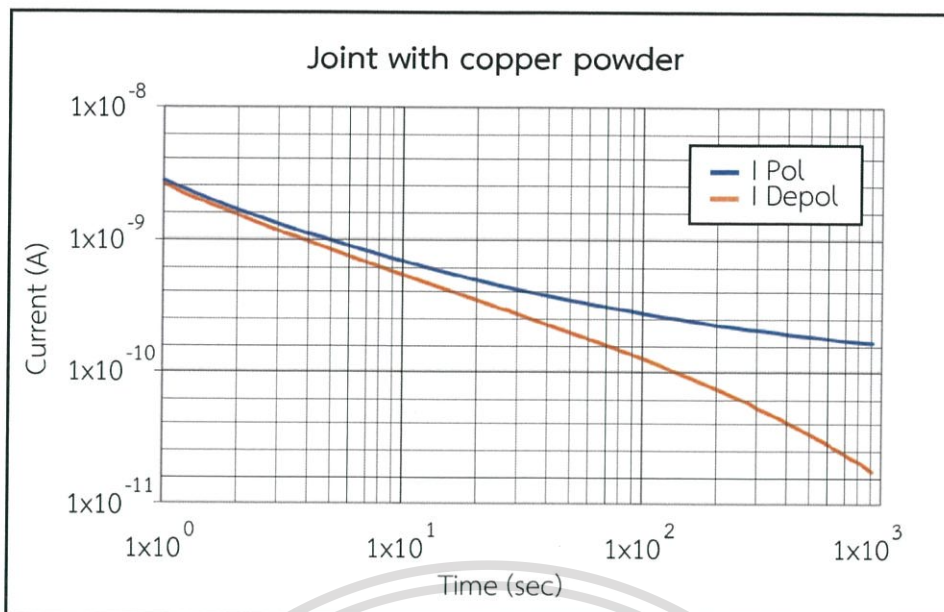
กรณีที่ 2: ผลการวิเคราะห์ ; ที่แรงดัน 500 V , อุณหภูมิ 32 °C , ความชื้นสัมพัทธ์ 65 %			
กราฟ	รูปร่างลักษณะของกราฟ	ตีความผล	เหตุการณ์ที่เกิดขึ้น
PDC	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>I_{depol}</math> เป็นเส้นตรงในกราฟสเกล log-log</li> <li>- <math>I_{pol}</math> ค่อนข้างเป็นเส้นตรงในกราฟสเกล log-log</li> <li>- <math>I_{pol}</math> เคลื่อนออกจาก <math>I_{depol}</math> ที่เวลาน้อยกว่า 10 วินาที</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เป็นรูปแบบปกติของกระแส <math>I_{depol}</math></li> <li>- เป็นรูปแบบที่ยอมรับได้</li> <li>- มีโอกาสพบการรั่วตามผิวฉนวน</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- มีภาพรวมคล้ายกับในกรณีแรกเป็นอย่างมาก (กรณีข้อต่อไม่มีปัญหา) หากมีแต่ผลิตภัณฑ์ที่ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพเล็กน้อยอยู่ก่อน สาเหตุอาจเป็นเพราะได้ทำการบากที่ตัวเนื้อฉนวน XLPE ไม่ลึกถึงขนาดที่ทำให้กระแส Conduction แสดงผล</li> </ul>
Tan $\delta$	<ul style="list-style-type: none"> <li>- มีค่าสูงขึ้น เมื่อความถี่ต่ำลง</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- รูปแบบปกติ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ยังไม่ผ่านการใช้งาน</li> </ul>
C ratio	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ค่าคลาดเคลื่อนจาก 1 เล็กน้อยมาก</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- มีผลิตภัณฑ์ที่ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพเล็กน้อย</li> </ul>	-

5.1.1.3 กรณีจำลองที่ 3 สายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE ที่มีข้อต่อรอยฟองแดง

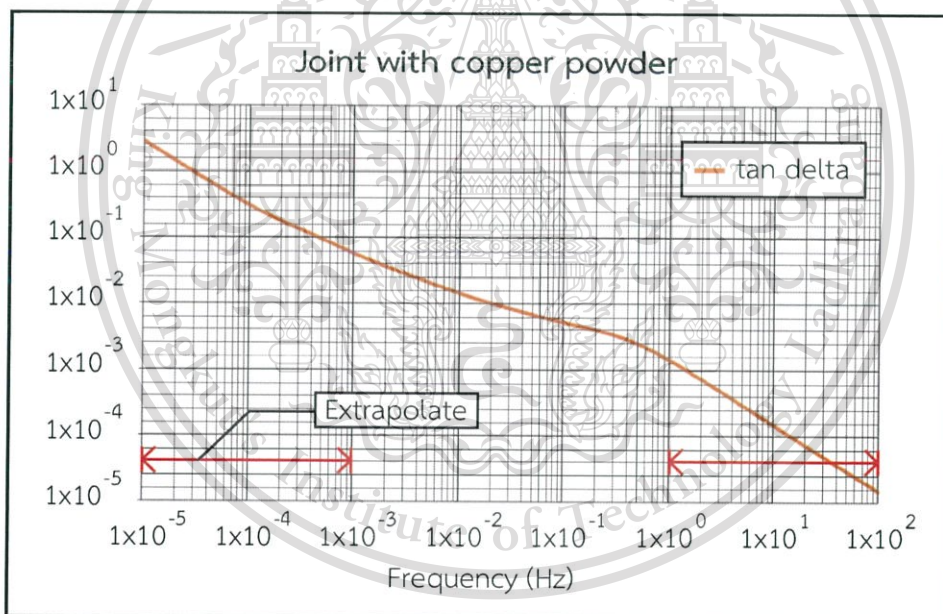
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 5.7 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อต่อรอยผงทองแดง กราฟกระแสโพลาริเซชัน และดีโพลาริเซชัน

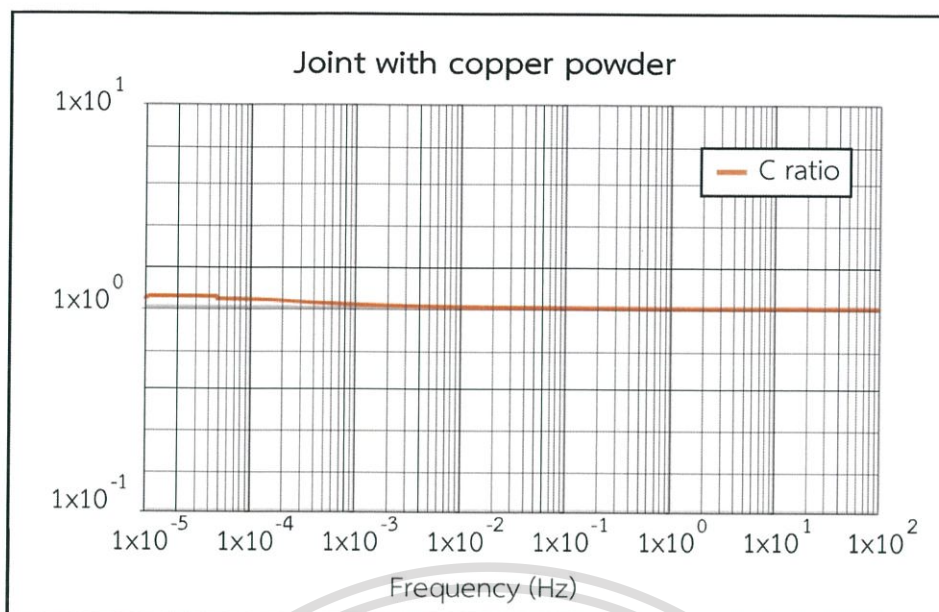


รูปที่ 5.8 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อต่อรอยผงทองแดง กราฟแสดงค่าความสูญเสีย

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 5.9 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อต่อรอยผงทองแดง กราฟ c ratio

ตารางที่ 5.3 ผลการวิเคราะห์กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน กรณีข้อต่อรอยผงทองแดง

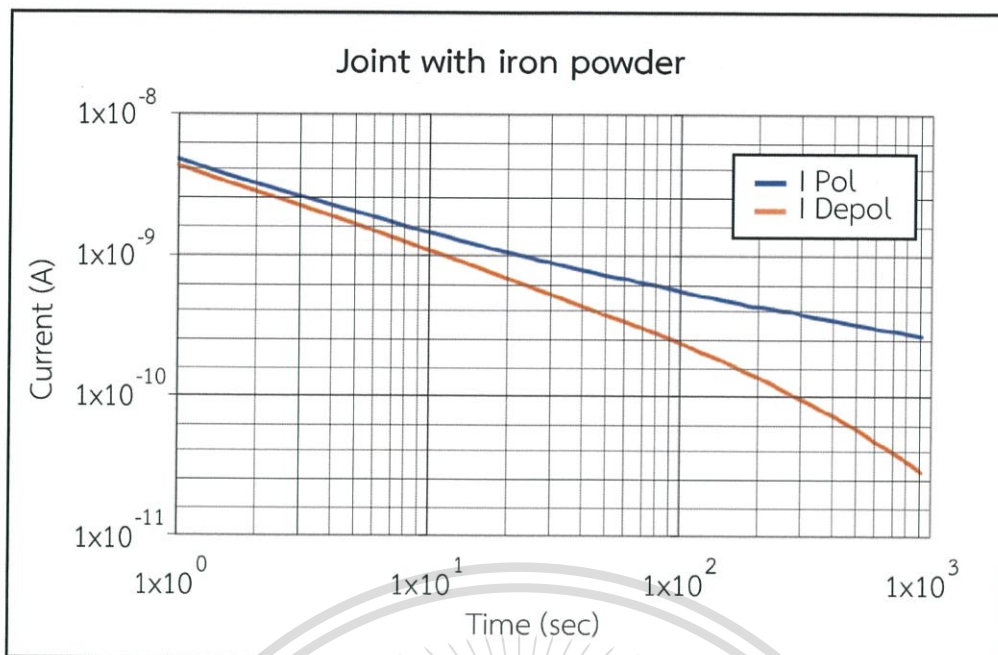
กรณีที่ 3: ผลการวิเคราะห์ ; ที่แรงดัน 500 V, อุณหภูมิ 32 °C, ความชื้นสัมพัทธ์ 65%			
กราฟ	รูปร่างลักษณะของกราฟ	ตีความผล	เหตุการณ์ที่เกิดขึ้น
PDC	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>I_{\text{depol}}</math> เป็นเส้นตรงในกราฟสเกล log-log</li> <li>- <math>I_{\text{pol}}</math> ค่อนข้างเป็นเส้นตรงในกราฟสเกล log-log</li> <li>- <math>I_{\text{pol}}</math> เคลื่อนออกจาก <math>I_{\text{depol}}</math> ตั้งแต่ช่วงเริ่มต้น</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เป็นรูปแบบปกติของกระแส <math>I_{\text{depol}}</math></li> <li>- ยิ่ง <math>I_{\text{pol}}</math> เคลื่อนออกจาก <math>I_{\text{depol}}</math> เร็วมากเพียงใด ยิ่งบอกได้ว่าฉนวนแยลงมากเท่าใด และมีโอกาสพบการรั่วไหลตามผิวฉนวน</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เป็นรูปแบบปกติของฉนวนที่มีปัญหาในส่วนของ Conduction</li> </ul>
Tan $\delta$	<ul style="list-style-type: none"> <li>- มีค่าสูงขึ้น เมื่อความถี่ต่ำลง</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- รูปแบบปกติ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ยังไม่ผ่านการใช้งาน</li> </ul>
C ratio	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ค่าคลาดเคลื่อนจาก 1 เล็กน้อยมาก</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- มีผลิตภัณฑ์ที่ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพเล็กน้อย</li> </ul>	-

#### 5.1.1.4 กรณีจำลองที่ 3 สายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE ที่มีข้อต่อรอยผงเหล็ก

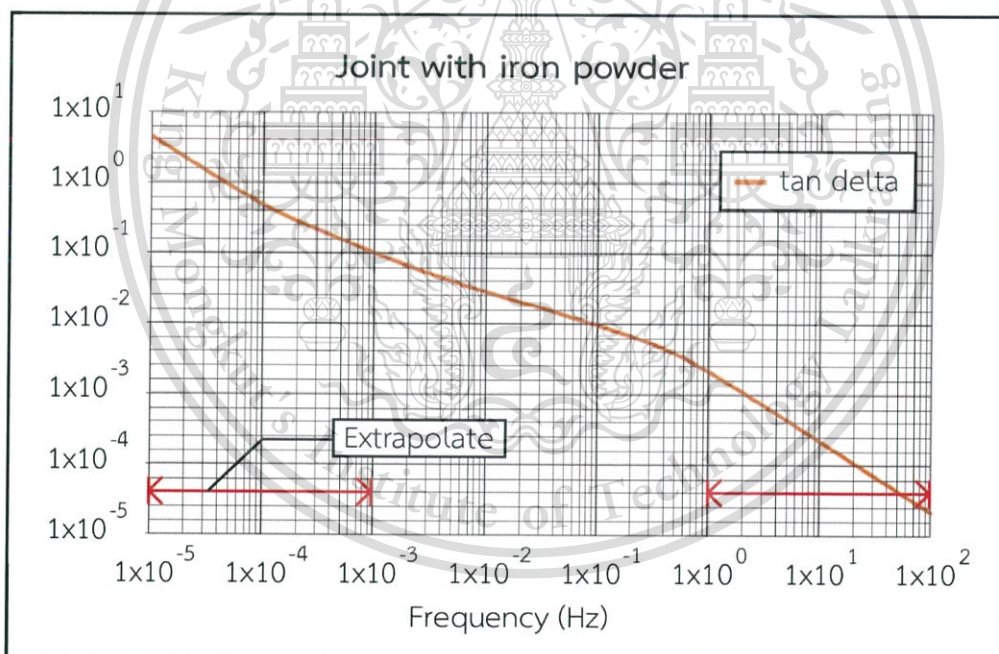
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 5.10 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อต่อรอยผงเหล็ก กราฟกระแสโพลาริเซชัน และดีโพลาริเซชัน

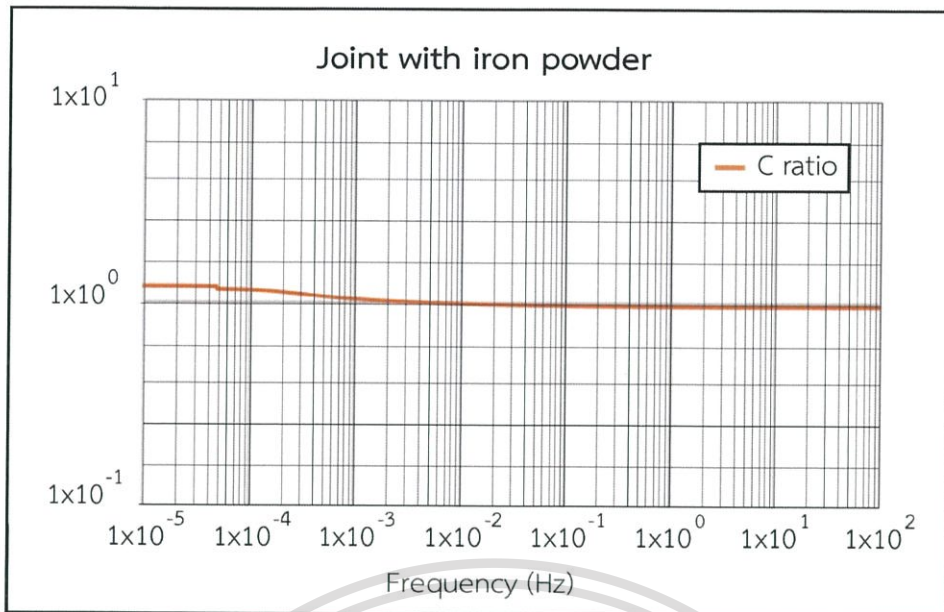


รูปที่ 5.11 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อต่อมีรอยบาก กราฟแสดงค่าความสูญเสีย

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 5.12 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อต่อรอยผงเหล็ก กราฟ c ratio

ตารางที่ 5.4 ผลการวิเคราะห์กระแสโพลารไรเซชันและดีโพลารไรเซชัน กรณีข้อต่อรอยผงเหล็ก

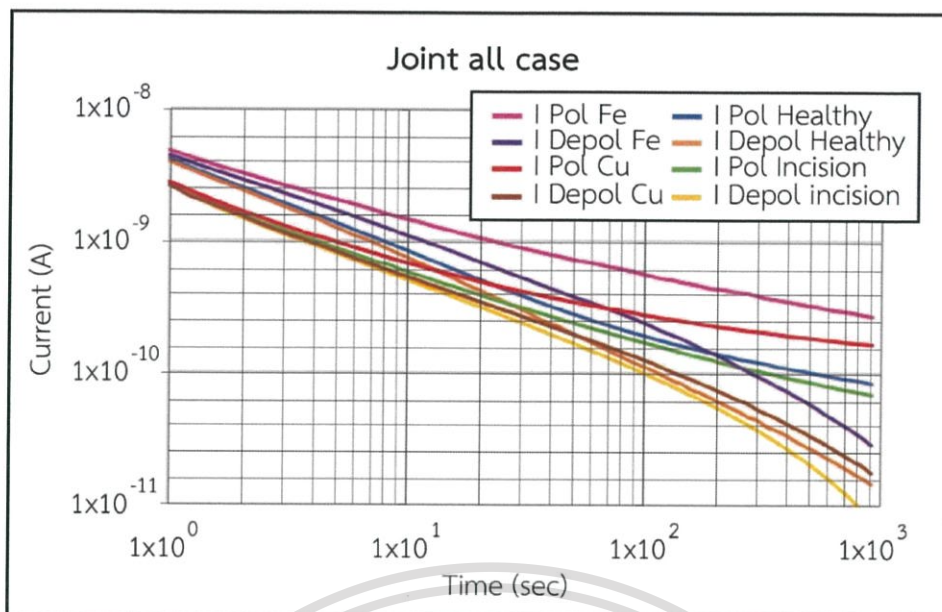
กรณี 4: ผลลัพท์ ; ที่แรงดัน 500 V , อุณหภูมิ 31 °C , ความชื้นสัมพัทธ์ 58 %			
กราฟ	รูปร่างลักษณะของกราฟ	ตีความผล	เหตุการณ์ที่เกิดขึ้น
PDC	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>I_{depol}</math> เป็นเส้นตรงในกราฟสเกล log-log</li> <li>- <math>I_{pol}</math> ค่อนข้างเป็นเส้นตรงในกราฟสเกล log-log</li> <li>- <math>I_{pol}</math> เคลื่อนออกจาก <math>I_{depol}</math> ตั้งแต่ช่วงเริ่มต้น</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เป็นรูปแบบปกติของกระแส <math>I_{depol}</math></li> <li>- ยิ่ง <math>I_{pol}</math> เคลื่อนออกจาก <math>I_{depol}</math> เร็วมากเพียงใด ยิ่งบอกได้ว่าฉนวนแยลงมากเท่าใด และมีโอกาสพบการรั่วไหลตามผิวฉนวน</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เป็นรูปแบบปกติของฉนวนที่มีปัญหาในส่วนของ Conduction</li> </ul>
Tan Delta	<ul style="list-style-type: none"> <li>- มีค่าสูงขึ้น เมื่อความถี่ต่ำลง</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- รูปแบบปกติ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ยังไม่ผ่านการใช้งาน</li> </ul>
C ratio	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ค่าคลาดเคลื่อนจาก 1 เล็กน้อยมาก</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- มีผลิตภัณฑ์ที่ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพเล็กน้อย</li> </ul>	-

5.1.1.5 การเปรียบเทียบกรณีปัญหาในระบบเคเบิลใต้ดินจำลองทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

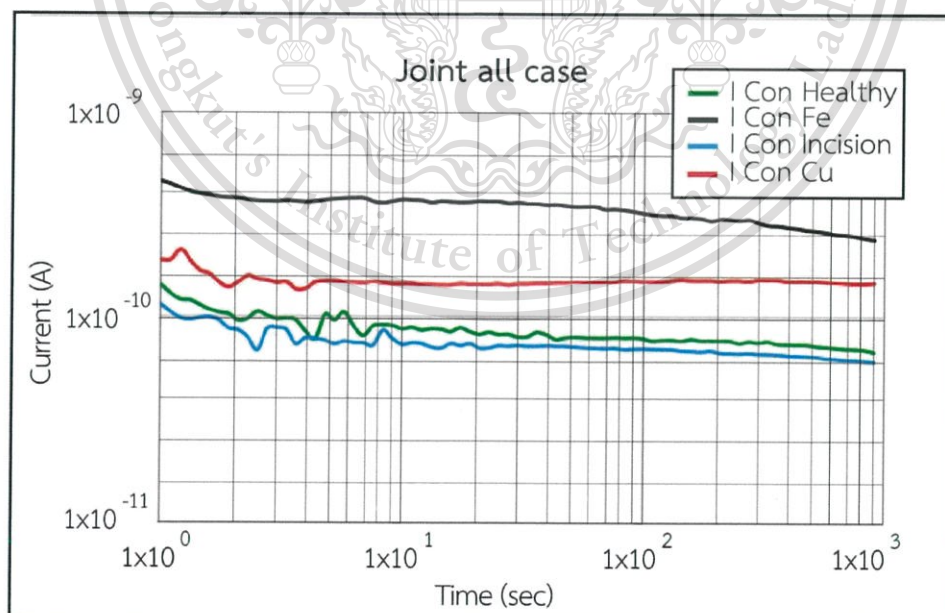
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

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



รูปที่ 5.13 เปรียบเทียบกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันทั้ง 4 กรณี

การเปรียบเทียบ depolarization current นั้นเปรียบเสมือนการเปรียบเทียบใน ส่วนของ Absorbtion current เป็นการดูผลการตอบสนองของตัวฉนวนนอกเหนือจากส่วนของ Conduction ที่เวลาน้อยกว่า 10 s จะเห็นได้ว่าเคสผงเหล็กมีขนาดกระแสสูงกว่าเคสปกติและอีก 2 เคสที่เหลือนำลำดับและกราฟของเคสรอยบากจะทับกับเคสผงทองแดงและที่ประมาณ 60 วินาที ลำดับจะเกิดการเปลี่ยนแปลง



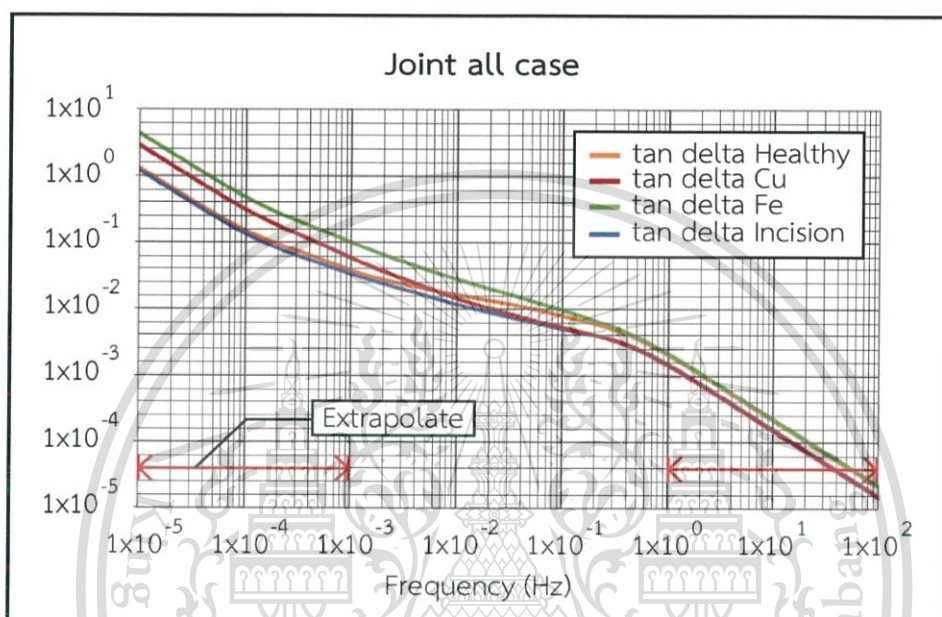
รูปที่ 5.14 เปรียบเทียบกระแสคอนดักชันทั้ง 4 กรณี

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.

การเปรียบเทียบในส่วนของ Conduction current จะเห็นว่าในเคสของผงเหล็ก และผงทองแดงนั้นกระแสมีการเพิ่มขึ้นจากเคสปกติอย่างเห็นได้ชัด แต่ไม่สามารถบ่งบอกได้ชัดเจนว่า ผงชนิดใดทำให้เกิดกระแสมากกว่าเนื่องจากค่ากระแสอาจขึ้นกับปริมาณผงหรือแม้แต่การกระจายตัวของผงในขณะโรวในขณะทีเคสรอยบากแทบจะไม่เห็นความแตกต่างของกระแส เราจึงสามารถตีความได้ว่าไม่มีกระแสไหลตามผิวของการบากในครั้งนี้สาเหตุอาจเนื่องจากรอยบากที่ส่วนฉนวนนั้น ลึกไม่เพียงพอและฉนวนXLPE มีคุณสมบัติของฉนวนที่ดี



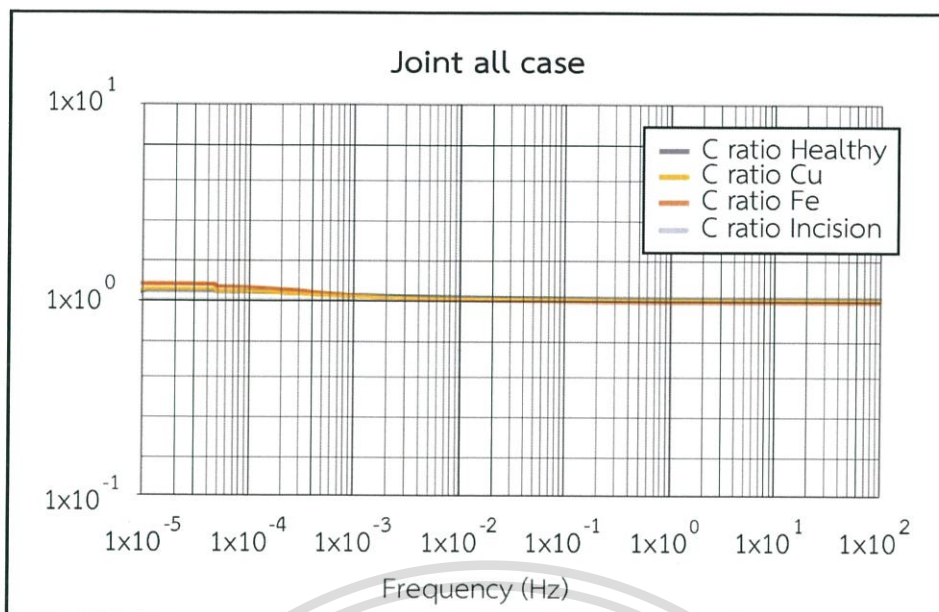
รูปที่ 5.15 เปรียบเทียบค่าความสูญเสียทั้ง 4 กรณี

การเปรียบเทียบกราฟ tan delta ของทุกเคส พบว่าที่ความถี่ลดลงค่า Tan delta จะมีค่าเพิ่มขึ้นในทุกกรณี มันสามารถบ่งบอกถึงคุณภาพของฉนวนแต่ไม่สามารถบอกสาเหตุของปัญหาได้ ดังนั้นเราต้องพิจารณาร่วมกับรูปร่างของ PDC ซึ่งค่าที่ยอมรับได้สูงสุดของฉนวนแต่ละชนิดนั้นมีค่าแตกต่างกัน

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 5.16 เปรียบเทียบ c ratio เสียทั้ง 4 กรณี

ไม่มีมีนัยสำคัญในกรณีของสารปนเปื้อน (หากระบบฉนวนมีผลิตภัณฑ์ที่ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพเล็กน้อย) ค่า C-ratio จะคงที่ตลอดช่วงความถี่ (หากไม่มีต้นไม้ น้ำ จะคงที่ที่ 1.00)

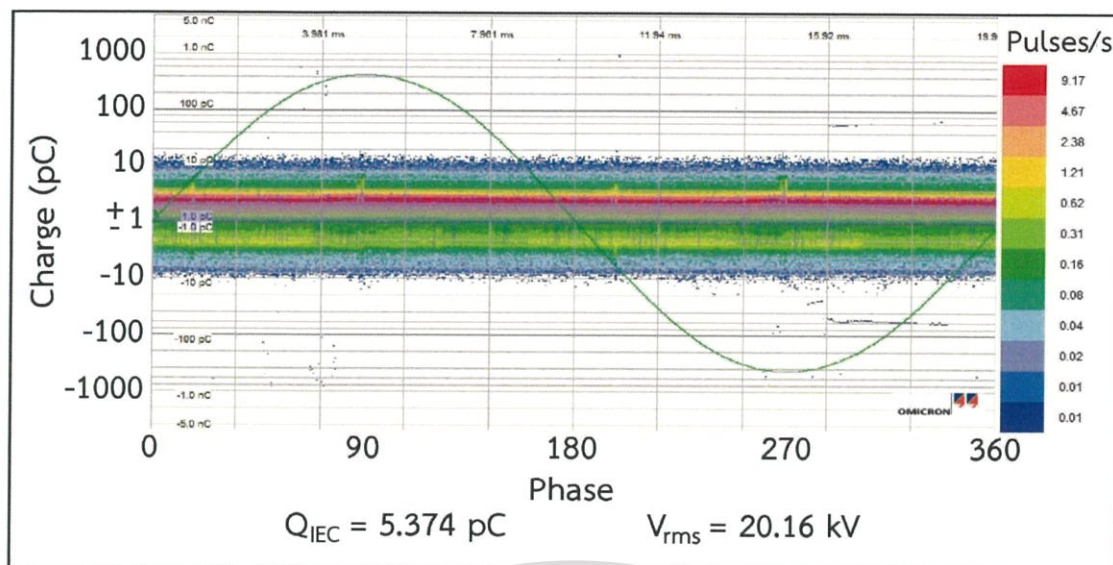
5.2.2 ผลการทดสอบการวัดดิสชาร์จบางส่วนด้วยตัวเก็บประจุ, HFCT และ UHF sensor การทดสอบจะได้ผลกราฟที่ได้จากโปรแกรม MPD and MI และ Inva Portable ที่จะนำไปวิเคราะห์รูปแบบการเกิด, การกระจายตัวและอัตราการเกิดซ้ำของการดิสชาร์จบางส่วนซึ่งสามารถใช้ระบุสาเหตุและแสดงระดับความเสียหายของการดิสชาร์จบางส่วนเพื่อการวิเคราะห์การเสื่อมสภาพของฉนวนในสายเคเบิลใต้ดิน

5.2.2.1 กรณีจำลองที่ 1 สายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE ที่มีข้อต่อที่ไม่มีปัญหา

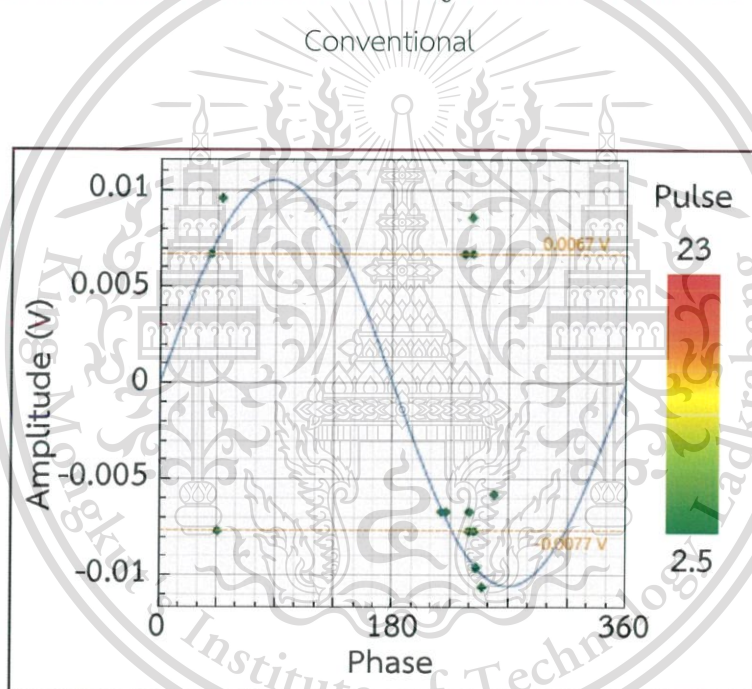
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 5.17 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อต่อไม่มีปัญหา กราฟการวัดดิซชาร์จบางส่วนแบบ

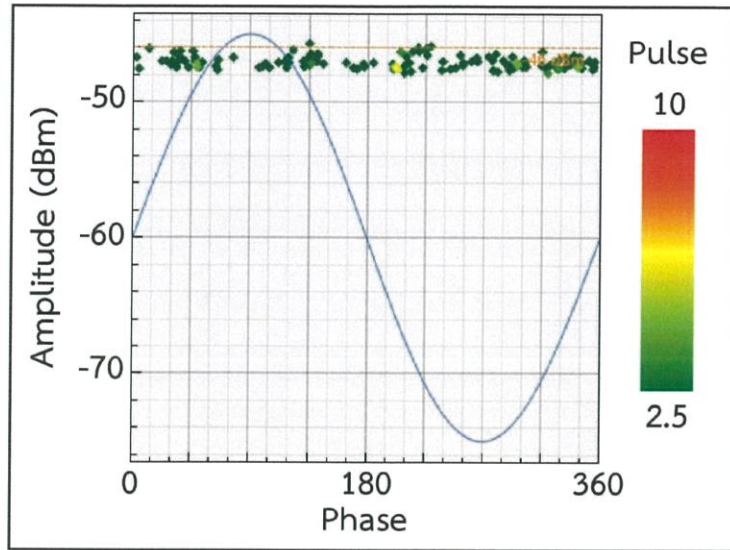


รูปที่ 5.18 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อต่อไม่มีปัญหา กราฟการวัดดิซชาร์จบางส่วนด้วย HFCT sensor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

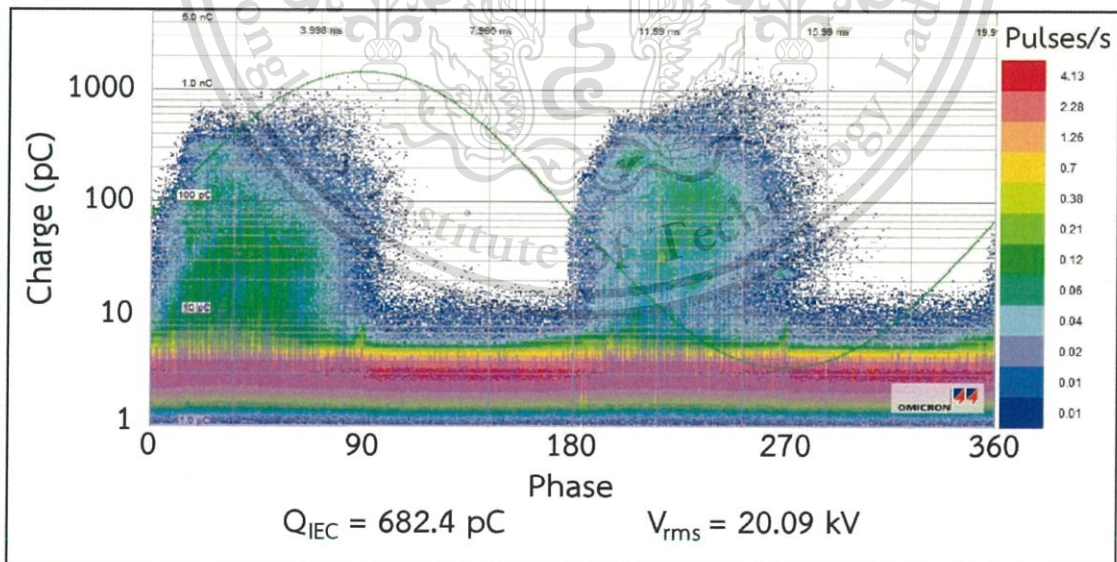
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.19 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อต่อไม่มีปัญหา กราฟการวัดดิซาร์จบางส่วนด้วย UHF sensor

ผลการวัดทั้ง 3 แบบไม่พบรูปแบบการเกิดการดิซาร์จบางส่วน มีสัญญาณรบกวน (noise) ระหว่างการวัด ในการวัดทั้ง 3 แบบ พบว่าความไว (Sensitivity) ในการวัดแบบ Conventional มากที่สุด รองลงมาคือการวัดแบบ Non-conventional ที่ได้จาก UHF sensor และต่ำที่สุด คือ แบบ Non-conventional ที่ได้จาก HFCT sensor

5.2.2.2 กรณีจำลองที่ 2 สายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE ที่มีข้อต่อที่มีรอยบากบริเวณ ฉนวนเคเบิล XLPE

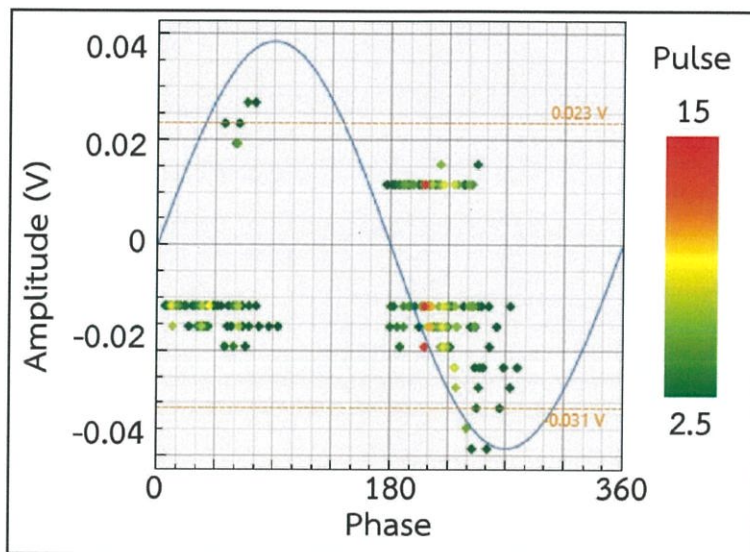


รูปที่ 5.20 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อต่อมีรอยบาก กราฟการวัดดิซาร์จบางส่วนแบบ Conventional

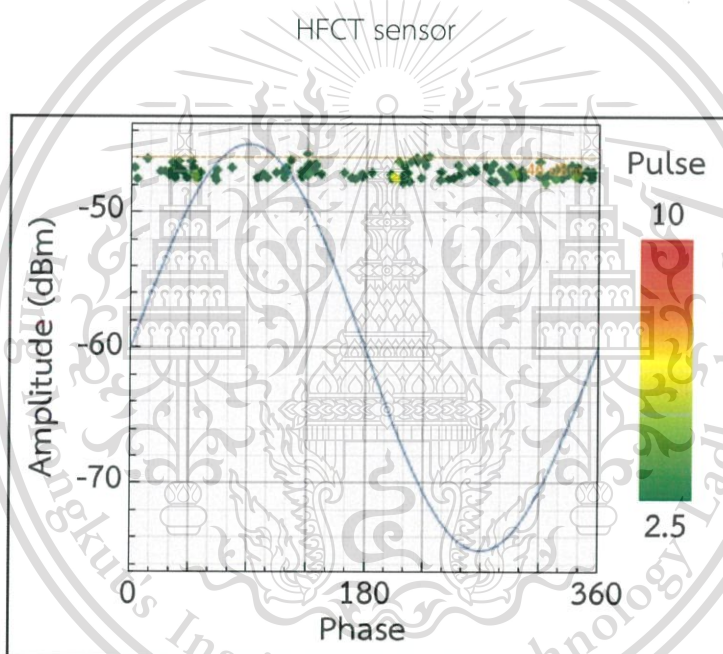
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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



รูปที่ 5.21 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อต่อมีรอยบาก กราฟการวัดดิซชาร์จบางส่วนด้วย



รูปที่ 5.22 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อต่อมีรอยบาก กราฟการวัดดิซชาร์จบางส่วนด้วย

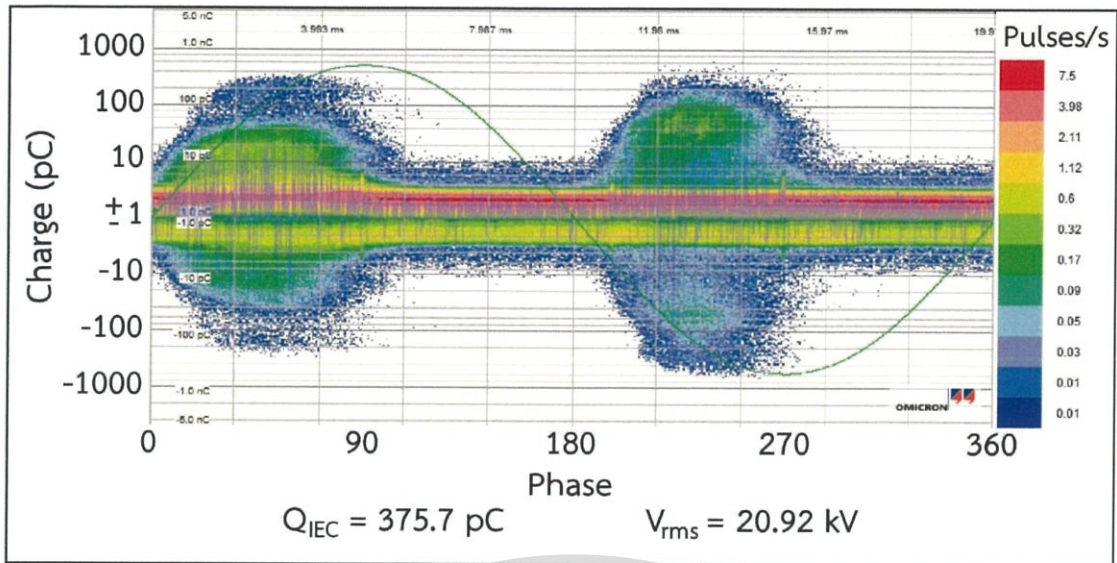
UHF sensor

ผลการวัดแบบ Conventional และการวัดแบบ Non-conventional ที่ได้จาก HFCT sensor มีรูปร่างการเกิดดิซชาร์จบางส่วนที่สมมาตร เกิดที่บริเวณใกล้จุด voltage zero-crossing เป็นรูปร่างของสัญญาณการเกิดดิซชาร์จภายใน (Internal discharge) การวัดแบบ Non-conventional ที่ได้จาก UHF sensor ไม่พบการดิซชาร์จบางส่วน โดยสามารถตรวจจับได้แค่สัญญาณรบกวน

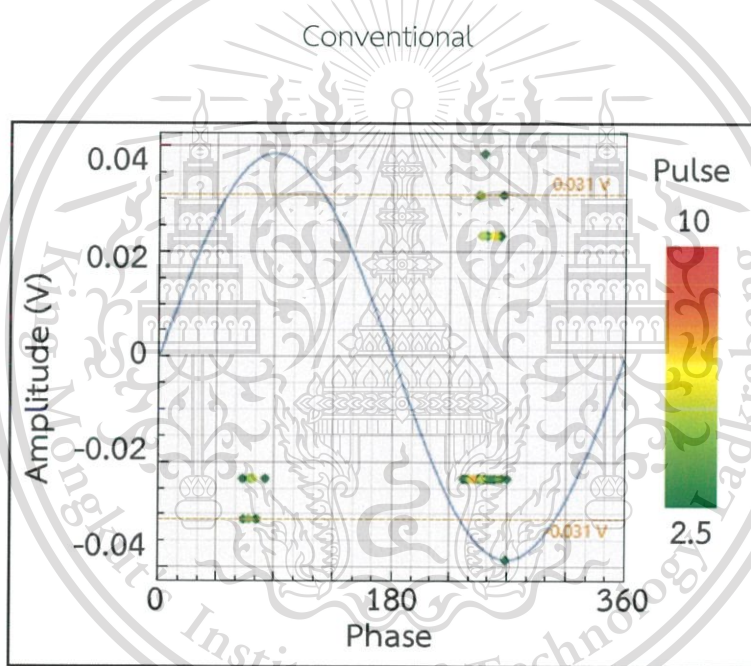
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับงานวิจัยทางวิชาการเท่านั้น มิใช่เพื่อเผยแพร่ไปยังประชาชน  
 5.2.2.3 กรณีจำลองที่ 3 สายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE ที่มีข้อต่อรอยพองทองแดง บริเวณผิวฉนวนเคเบิล XLPE  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 5.23 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อต่อรอยผงทองแดง กราฟการวัดดิซาร์จบางส่วนแบบ

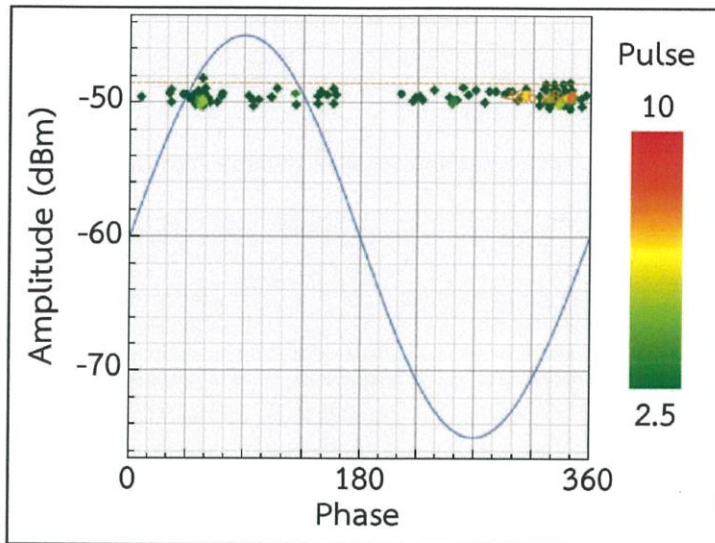


รูปที่ 5.24 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อต่อรอยผงทองแดง กราฟการวัดดิซาร์จบางส่วนด้วย HFCT Sensor

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.

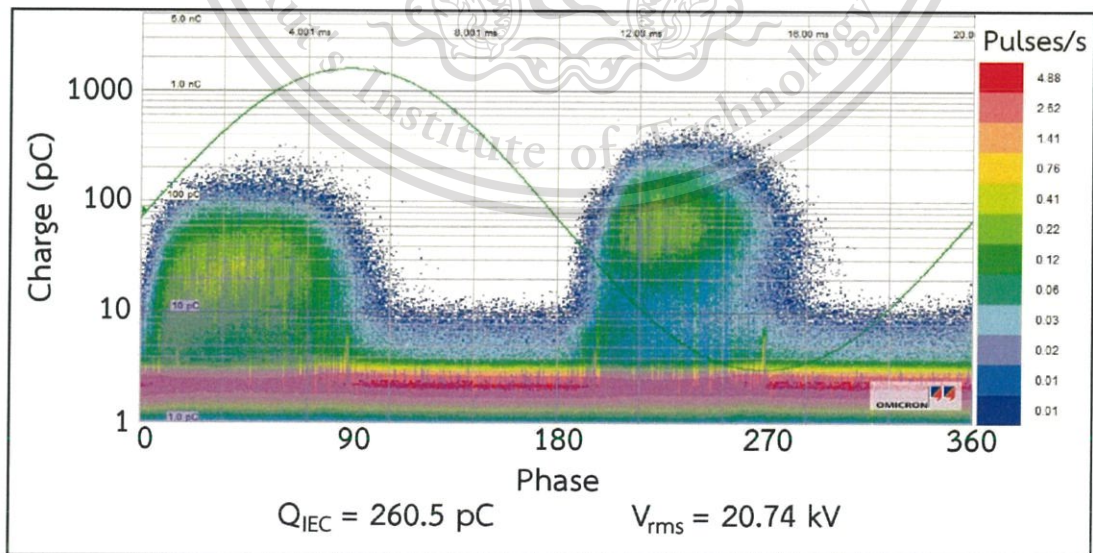


รูปที่ 5.25 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อต่อรอยพองแดงกราฟการวัดดิซชาร์จบางส่วนด้วย

UHF sensor

ผลการวัดแบบ Conventional และการวัดแบบ Non-conventional ที่ได้จาก HFCT sensor มีรูปร่างการเกิดดิซชาร์จบางส่วนที่ไม่สมมาตร โดยการดิซชาร์จเริ่มเกิดหลัง voltage zero-crossing ซึ่งตรงกับลักษณะรูปร่างของสัญญาณการเกิดดิซชาร์จตามผิว (Surface discharge) การวัดแบบ Non-conventional ที่ได้จาก UHF sensor ไม่พบการดิซชาร์จบางส่วน โดยสามารถตรวจจับได้แค่สัญญาณรบกวน

5.2.2.4 กรณีจำลองที่ 4 สายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE ที่มีข้อต่อรอยพองเหล็กบริเวณ ผิวฉนวนเคเบิล XLPE



รูปที่ 5.26 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อต่อรอยพองเหล็ก กราฟการวัดดิซชาร์จบางส่วนแบบ

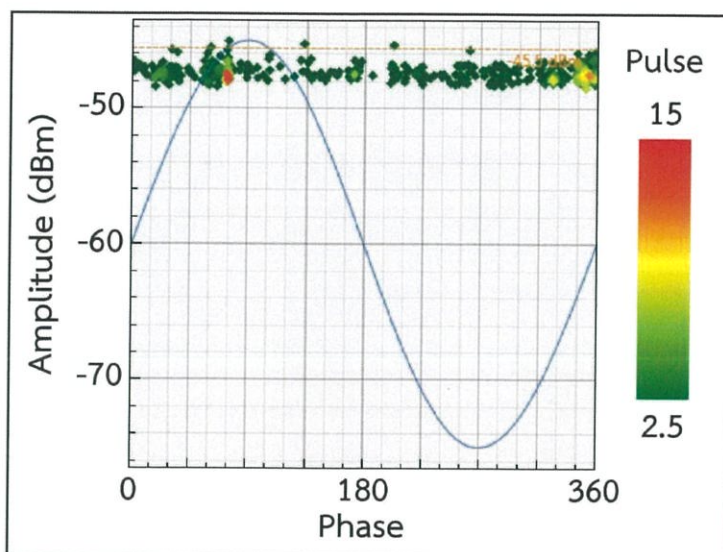
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปใช้เพื่อการค้า

Conventional

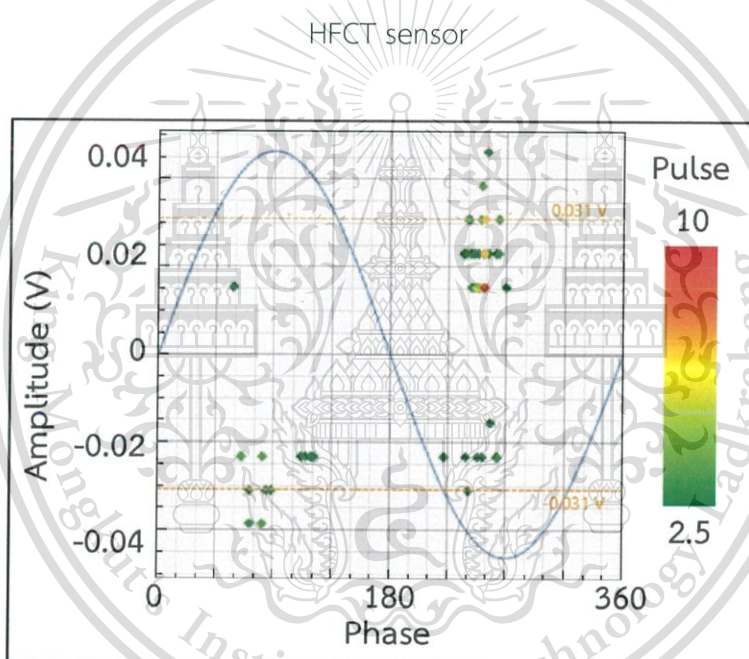
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 5.27 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อต่อรอยผงเหล็ก กราฟการวัดดิซชาร์จบางส่วนด้วย



รูปที่ 5.28 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อต่อรอยผงเหล็ก กราฟการวัดดิซชาร์จบางส่วนด้วย UHF sensor

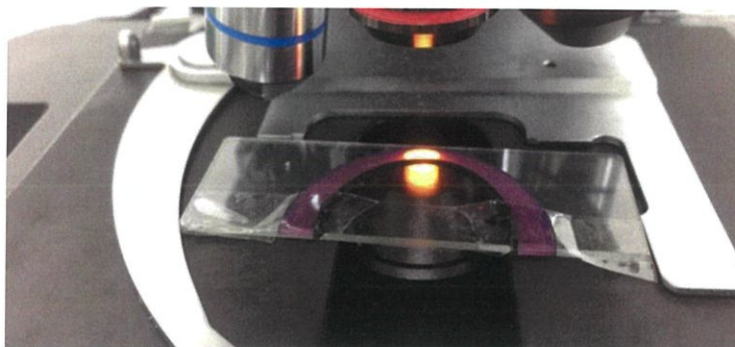
ผลการวัดแบบ Conventional และการวัดแบบ Non-conventional ที่ได้จาก HFCT sensor มีรูปร่างการเกิดดิซชาร์จบางส่วนที่ไม่สมมาตร โดยการดิซชาร์จเริ่มเกิดหลัง voltage zero-crossing ซึ่งตรงกับลักษณะรูปร่างของสัญญาณการเกิดดิซชาร์จตามผิว (Surface discharge) การวัดแบบ Non-conventional ที่ได้จาก UHF sensor ไม่พบรูปแบบการดิซชาร์จบางส่วน โดยสามารถตรวจจับได้แค่สัญญาณรบกวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์โดยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 5.1.3 ผลการทดสอบสายเคเบิลหาต้นไม้น้ำทั้ง 4 กรณีที่ได้กล่าวไว้บทที่ 3 ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น 5.1.3.1 ผลการตรวจสอบการเกิดต้นไม้น้ำในสายเคเบิล 1-1 เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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. ผลการทดสอบด้วยเมทิลีนบลูผสมแอมโมเนีย



รูปที่ 5.29 ส่องชิ้นส่วนเคเบิล 1-1 ที่ย้อมเมทิลีนบลูผสมแอมโมเนีย



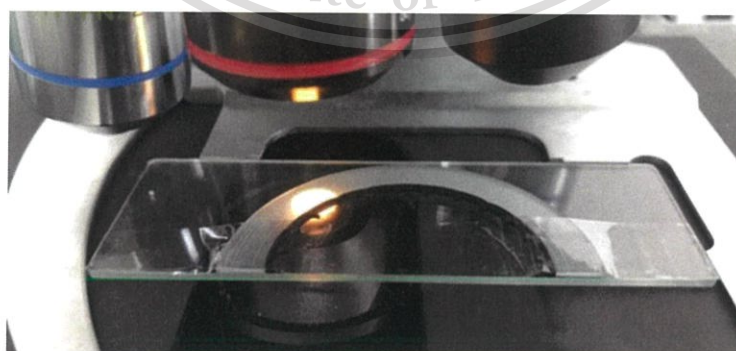
(ก)

(ข)

(ค)

รูปที่ 5.30 ผลการตรวจสอบหาต้นไม้เคเบิล 1-1 ด้วยสารละลายเมทิลีนบลูผสมแอมโมเนีย (ก) ด้านที่ 1 (ข) ด้านที่ 2 (ค) ด้านที่ 3

## 2. ผลการทดสอบด้วยสารละลายเมทิลีนบลูผสมโซเดียมคาร์บอเนต

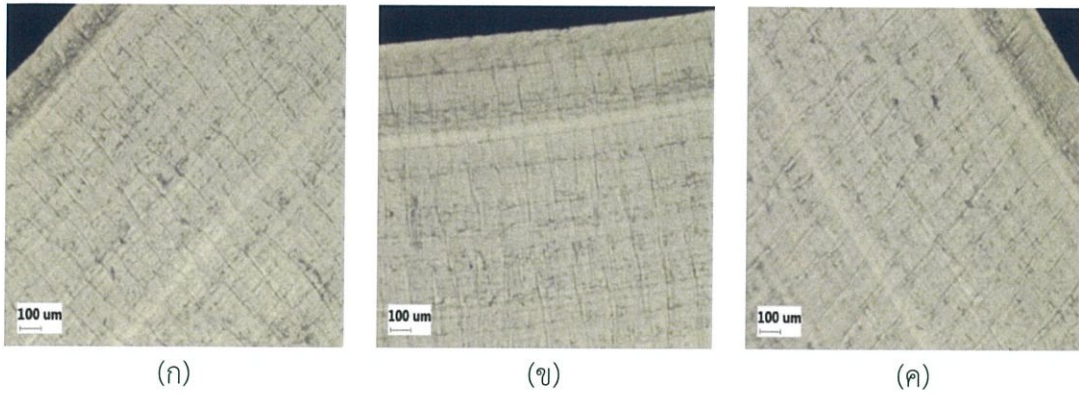


รูปที่ 5.31 ส่องชิ้นส่วนเคเบิล 1-1 ที่ย้อมเมทิลีนบลูผสมโซเดียมคาร์บอเนต

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.



(ก)

(ข)

(ค)

### รูปที่ 5.32 ผลการตรวจสอบหาต้นไม้เคเบิล 1-1 ด้วย

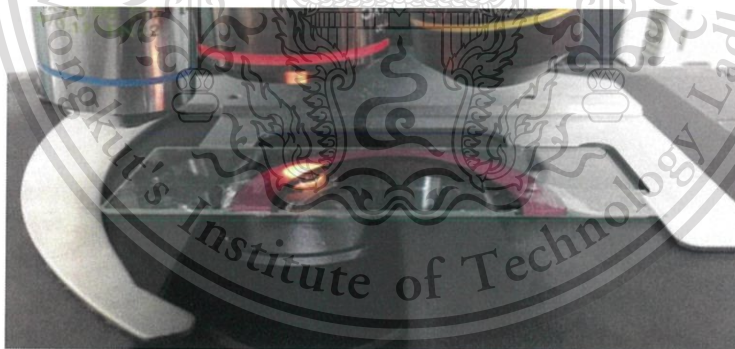
สารละลายเมทิลีนบลูผสมโซเดียมคาร์บอเนต (ก) ด้านที่ 1 (ข) ด้านที่ 2 (ค) ด้านที่ 3

### 3. ผลการทดสอบด้วยสารละลายเมทิลีนบลูผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์

ไม่สามารถตรวจสอบหาต้นไม้น้ำได้เนื่องจากเคเบิลหลังจากการย้อมสีแล้วมีสีที่เข้มมากเกินไปทำให้ไม่สามารถใช้วิธีส่องกล้องไลท์ไมโครสโคปเพื่อตรวจหาได้

### 5.1.3.2 ผลการตรวจสอบการเกิดต้นไม้น้ำในสายเคเบิล 1-2

#### 1. ผลการทดสอบด้วยเมทิลีนบลูผสมแอมโมเนีย

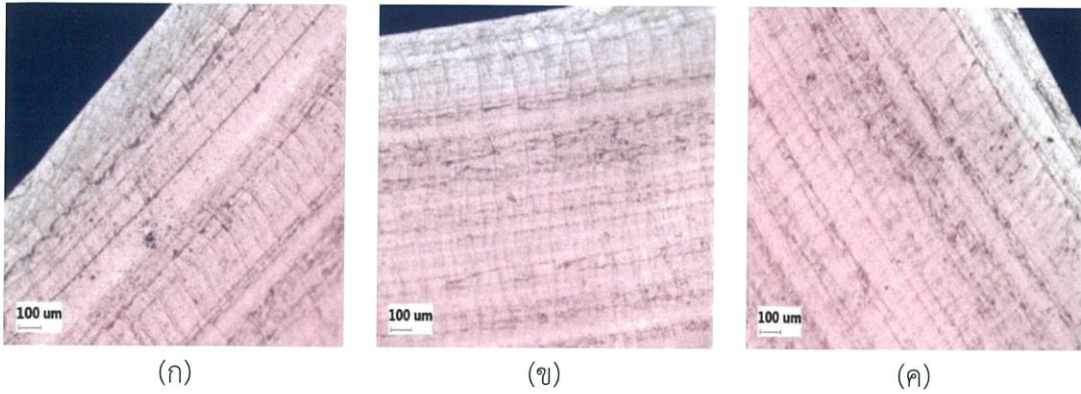


รูปที่ 5.33 ส่องชิ้นส่วนเคเบิล 1-2 ที่ย้อมเมทิลีนบลูผสมแอมโมเนีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

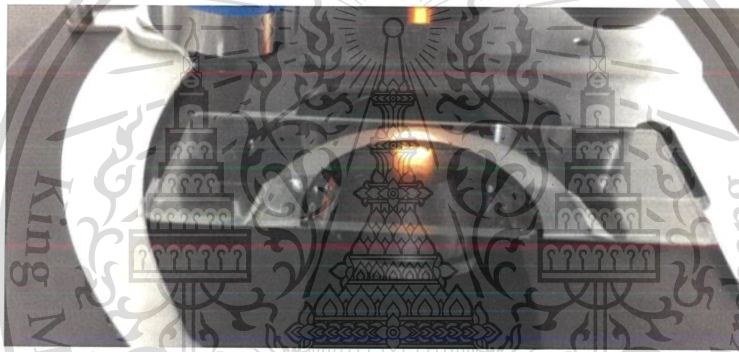
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



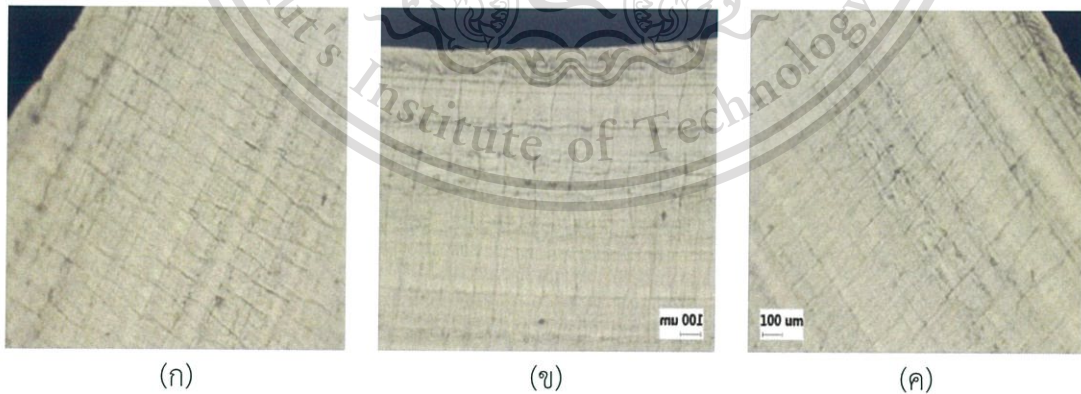
รูปที่ 5.34 ผลการตรวจสอบหาต้นไม้เคเบิล 1-2 ด้วย

สารละลายเมทิลีนบลูผสมแอมโมเนีย (ก) ด้านที่ 1 (ข) ด้านที่ 2 (ค) ด้านที่ 3

## 2. ผลการทดสอบด้วยสารละลายเมทิลีนบลูผสมโซเดียมคาร์บอเนต



รูปที่ 5.35 ส่องชิ้นส่วนเคเบิล 1-2 ที่ย้อมเมทิลีนบลูผสมโซเดียมคาร์บอเนต



รูปที่ 5.36 ผลการตรวจสอบหาต้นไม้เคเบิล 1-2 ด้วย

สารละลายเมทิลีนบลูผสมโซเดียมคาร์บอเนต (ก) ด้านที่ 1 (ข) ด้านที่ 2 (ค) ด้านที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส.3. ผลการทดสอบด้วยสารละลายเมทิลีนบลูผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

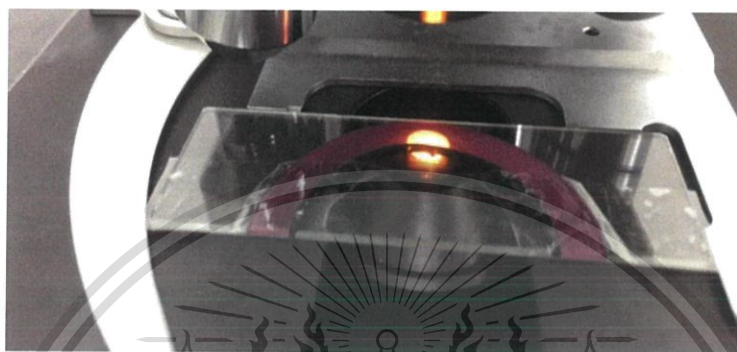
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

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

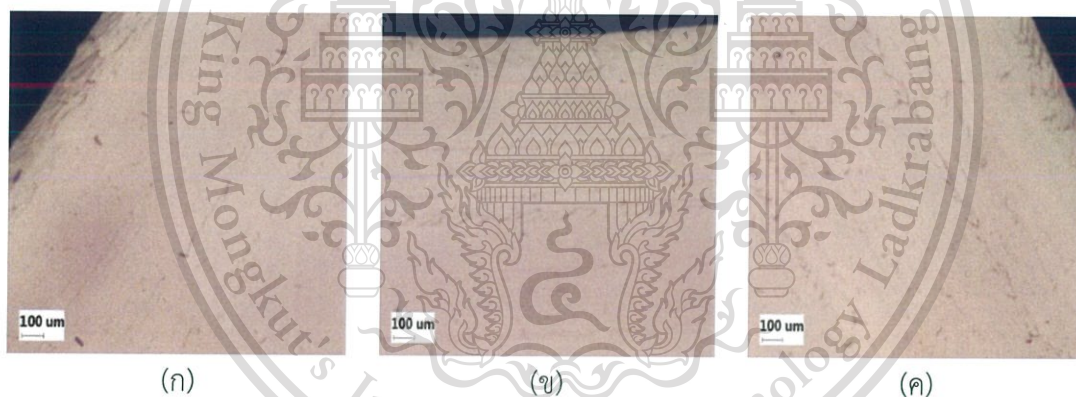
ไม่สามารถตรวจสอบหาต้นไม้น้ำได้เนื่องจากเคเบิลหลังจากการย้อมสีแล้วมีสีที่เข้มมากเกินไปทำให้ไม่สามารถใช้วิธีส่องกล้องไลท์ไมโครสโคปเพื่อตรวจหาได้

### 5.1.3.3 ผลการตรวจสอบการเกิดต้นไม้น้ำในสายเคเบิล 2-1

#### 1. ผลการทดสอบด้วยเมทิลีนบลูผสมแอมโมเนีย



รูปที่ 5.37 ส่องชิ้นส่วนเคเบิล 2-1 ที่ย้อมเมทิลีนบลูผสมแอมโมเนีย



(ก)

(ข)

(ค)

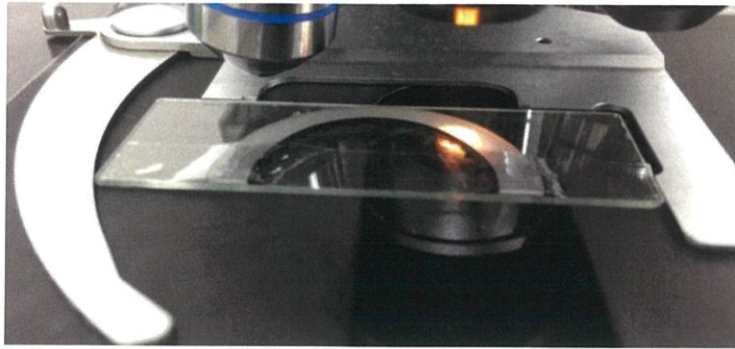
รูปที่ 5.38 ผลการตรวจสอบหาต้นไม้น้ำเคเบิล 2-1 ด้วยสารละลายเมทิลีนบลูผสมแอมโมเนีย (ก) ด้านที่ 1 (ข) ด้านที่ 2 (ค) ด้านที่ 3

#### 2. ผลการทดสอบด้วยสารละลายเมทิลีนบลูผสมโซเดียมคาร์บอเนต

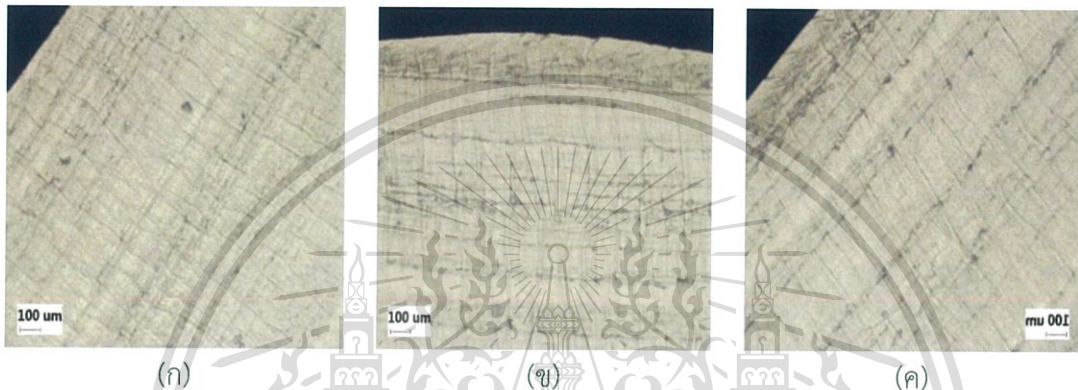
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 5.39 ส่องชิ้นส่วนเคเบิ้ล 2-1 ที่ย้อมเมทิลีนบลูผสมโซเดียมคาร์บอเนต



(ก)

(ข)

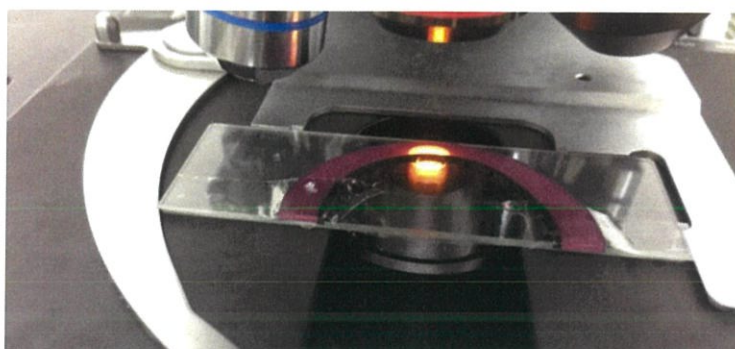
(ค)

รูปที่ 5.40 ผลการตรวจสอบหาต้นไม้เคเบิ้ล 2-1 ด้วยสารละลายเมทิลีนบลูผสมโซเดียมคาร์บอเนต (ก) ด้านที่ 1 (ข) ด้านที่ 2 (ค) ด้านที่ 3

3. ผลการทดสอบด้วยสารละลายเมทิลีนบลูผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์

ไม่สามารถตรวจสอบหาต้นไม้น้ำได้เนื่องจากเคเบิ้ลหลังจากการย้อมสีแล้วมีสีที่เข้มมากเกินไปทำให้ไม่สามารถใช้วิธีส่องกล้องไมโครสโคปเพื่อตรวจหาได้

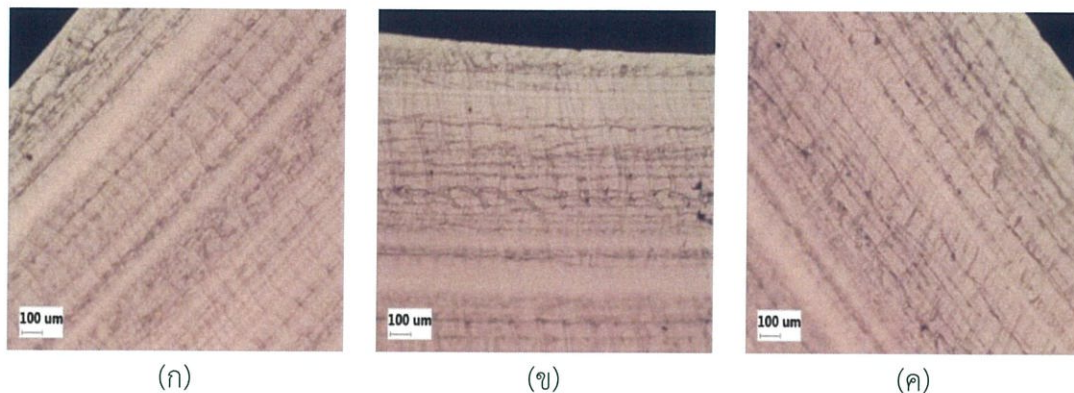
#### 5.1.3.3 ผลการตรวจสอบการเกิดต้นไม้น้ำในสายเคเบิ้ล 2-2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่รูปที่ 5.41 ส่องชิ้นส่วนเคเบิ้ล 2-2 ที่ย้อมเมทิลีนบลูผสมแอมโมเนียนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

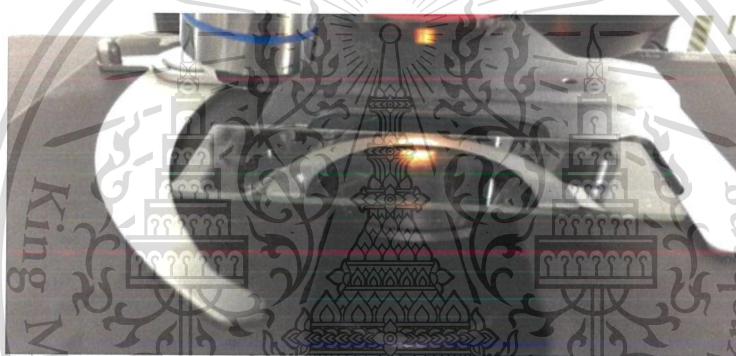
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

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



รูปที่ 5.42 ผลการตรวจสอบหาต้นไม้เคเบิล 2-2 ด้วย  
สารละลายเมทิลีนบลูผสมแอมโมเนีย (ก) ด้านที่ 1 (ข) ด้านที่ 2 (ค) ด้านที่ 3

2. ผลการทดสอบด้วยสารละลายเมทิลีนบลูผสมโซเดียมคาร์บอเนต



รูปที่ 5.43 ส่องชิ้นส่วนเคเบิล 2-2 ที่ย้อมเมทิลีนบลูผสมโซเดียมคาร์บอเนต



รูปที่ 5.44 ผลการตรวจสอบหาต้นไม้เคเบิล 2-2 ด้วย  
สารละลายเมทิลีนบลูผสมโซเดียมคาร์บอเนต (ก) ด้านที่ 1 (ข) ด้านที่ 2 (ค) ด้านที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การทดสอบด้วยสารละลายเมทิลีนบลูผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
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.

ไม่สามารถตรวจสอบหาต้นไม้น้ำได้เนื่องจากเคเบิลหลังจากการย้อมสีแล้วมีสีที่เข้มมากเกินไปทำให้ไม่สามารถใช้วิธีส่องกล้องไลท์ไมโครสโคปเพื่อตรวจหาได้

สรุปการทดสอบการตรวจสอบหาต้นไม้น้ำด้วยกระบวนการย้อมสีด้วย 3 วิธีพบว่า การทดสอบด้วยวิธีย้อมสีด้วยสารละลายเมทิลีนบลูกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ไม่สามารถตรวจสอบหาต้นไม้น้ำได้เนื่องจากเคเบิลหลังจากการย้อมสีแล้วมีสีที่เข้มมากเกินไปทำให้ไม่สามารถใช้วิธีส่องกล้องไลท์ไมโครสโคปเพื่อตรวจหาได้ ในส่วนการทดสอบด้วยวิธีย้อมสีด้วยสารละลายเมทิลีนบลูกับแอมโมเนียพบว่าเคเบิลหลังจากการย้อมสีแล้วมีสีที่เข้มแต่เข้มไม่เท่ากับการทดสอบด้วยวิธีย้อมสีด้วยสารละลายเมทิลีนบลูกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ทำให้สามารถใช้วิธีส่องกล้องไลท์ไมโครสโคปเพื่อตรวจหาต้นไม้น้ำได้ แต่ไม่พบต้นไม้น้ำในชิ้นส่วนเคเบิลที่นำมาทดลองในแต่ละกรณี และการทดสอบท้ายสุดด้วยวิธีย้อมสีด้วยสารละลายเมทิลีนบลูกับโซเดียมคาร์บอเนตพบว่าเคเบิลหลังจากการย้อมสีแล้วมีสีที่อ่อนทำให้สามารถใช้วิธีส่องกล้องไลท์ไมโครสโคปเพื่อตรวจหาต้นไม้น้ำได้ แต่ไม่พบต้นไม้น้ำในชิ้นส่วนเคเบิลที่นำมาทดลองเช่นกัน จึงสรุปได้ว่าเคเบิลที่นำมาทดลองในแต่ละกรณีไม่มีต้นไม้น้ำในเบื้องต้น



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 6

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 6.1 สรุป

เนื่องจากปัจจุบันประเทศไทยมีการสร้างเคเบิลใต้ดินมากขึ้น โดยปัญหาส่วนใหญ่เกิดที่ฉนวน ปัญหาการระเบิดที่จุดเชื่อมต่อส่วนใหญ่เกิดจากการฉนวนที่ไม่เหมาะสม ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการวิเคราะห์ฉนวนเพื่อตรวจสอบคุณภาพของฉนวนด้วยการทดสอบ เพื่อเป็นการป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหายต่อระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเพิ่มความน่าเชื่อถือ ซึ่งปริญญาณพนธ์นี้ทำการจำลองปัญหาในระบบเคเบิลใต้ดินเพื่อที่จะศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้น โดยเน้นไปที่สาเหตุของการรั่วไหลของกระแสตามผิวของฉนวน โดยได้สร้างกรณีศึกษา 4 กรณีดังนี้ แบ่งออกเป็น 1. กรณีเคเบิลปกติ 2. กรณีผงทองแดง 3. กรณีผงเหล็ก 4. กรณีรอยบาก โดยทุกกรณีจะเกิดขึ้นที่ข้อต่อเคเบิลแบบ Heat-shrinkable ของสายเคเบิลใต้ดิน XLPE แกนเดี่ยว 24 kV พื้นที่หน้าตัด 240 mm<sup>2</sup> ยาว 5 m วิธี การวิเคราะห์ฉนวนจะใช้ 2 วิธี คือ การวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันเพื่อหาผลตอบสนองของฉนวน โดยได้มีการใช้ผลของค่าพารามิเตอร์ทั้ง 3 ชนิดที่ได้จากชุดทดสอบ PDC ในการวิเคราะห์ผลและตีความผล ประกอบด้วย รูปร่างกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน (PDC shape), ค่าแฟคเตอร์ความสูญเสีย ( $\tan \delta$ ) และอัตราส่วนของตัวเก็บประจุ (C-ratio) 2. การวัดดิสชาร์จบางส่วนแบบ Conventional และ Non-conventional

จากผลของการทดสอบพบว่า ผลตอบสนองปัญหาการรั่วไหลของกระแสในกรณีต่างๆ ที่ถูกสร้างขึ้นมีคุณลักษณะของผลตอบสนองที่คล้ายกันและมีลักษณะไปในทิศทางเดียวกันไม่ว่าจะเป็น รูปร่างของกระแสโพลาริเซชันที่เบนตัวออกจากกระแสดีโพลาริเซชัน ในเวลาน้อยกว่า 10 วินาที (ช่วงเริ่มต้น) ยังมีการเบนตัวออกในเวลาที่ยังน้อยเพียงใดจึงบอกได้ว่าฉนวนแยลงมากเท่านั้นและมีโอกาสพบการรั่วไหลตามผิวฉนวนมากยิ่งขึ้น ซึ่งหากมองอีกนัยหนึ่งการเบนตัวออกของกระแสแปรผันตามถึงขนาดของกระแสคอนดักชัน ในส่วนของค่าแฟคเตอร์ความสูญเสีย ( $\tan \delta$ ) ของทุกกรณีให้ผลที่คล้ายกันนั่นคือที่ความถี่ลดลง ค่า  $\tan \delta$  จะมีค่าเพิ่มขึ้นในทุกกรณีซึ่งสามารถบ่งบอกถึงคุณภาพของฉนวนแต่ไม่สามารถบอกถึงสาเหตุของปัญหาได้ ในส่วนของ C ratio พบว่าไม่มีนัยสำคัญในกรณีของสารปนเปื้อน(หากระบบฉนวนมีผลิตภัณฑ์ที่ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพเล็กน้อย) ค่า C ratio จะคงที่ตลอดช่วงความถี่ (หากไม่มีต้นไม้น้ำจะคงที่ที่ 1.00) ซึ่งผลการทดสอบเราพบว่าค่าที่ได้มาการคงที่ที่ 1.00 และการวัดการดิสชาร์จบางส่วน พบว่าในกรณีที่เป็ผงโลหะจะทำให้เกิดการดิสชาร์จตามผิว ส่วนกรณีรอยบากจะทำให้เกิดดิสชาร์จภายใน การวัดแบบ Conventional และวัดด้วย HFCT จะให้ผลที่เป็นแนวโน้มเดียวกันแต่จะไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบโดยตรงได้เนื่องจากเป็นการ

วัดผลมาจากคลื่นสัญญาณความถี่ต่างกัน (BW ต่างกัน) ส่วน UHF sensor ไม่พบรูปแบบการดิสชาร์จ  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
บางส่วน โดยสามารถตรวจจับได้แค่สัญญาณรบกวน

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.

ในการศึกษาการตรวจสอบหาต้นไม้น้ำ ได้นำสายเคเบิล XLPE ที่เคยเกิดการระเบิด มาตรวจสอบโดยการหั่นเคเบิลเป็นชิ้นส่วนบาง ๆ เพื่อย้อมสารละลาย พบว่าการทดสอบด้วยวิธีย้อมสี ด้วยสารละลายเมทิลีนบลูกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ไม่สามารถตรวจสอบหาต้นไม้น้ำได้ เนื่องจากเคเบิล หลังจากการย้อมสีแล้วมีสีที่เข้มมากเกินไปทำให้ไม่สามารถส่องกล้องไมโครสโคปเพื่อตรวจหาได้ ส่วน การทดสอบด้วยวิธีย้อมสีด้วยสารละลายเมทิลีนบลูกับแอมโมเนียและวิธีย้อมสีด้วยสารละลายเมทิลีน บลูกับโซเดียมคาร์บอเนตพบว่าเคเบิลหลังจากการย้อมสีแล้วมีสีที่เข้มแต่เข้มไม่เท่ากับการทดสอบ ด้วยวิธีแรกทำให้สามารถใช้วิธีส่องกล้องไมโครสโคปเพื่อตรวจหาได้ ซึ่งผลลัพธ์ของการทดสอบคือไม่ พบต้นไม้น้ำในชิ้นส่วนเคเบิลที่นำมาทดสอบในทุกกรณี

## 6.2 ข้อเสนอแนะ

ในการต่อเชื่อมสายเคเบิลโดยใช้ข้อต่อจำเป็นต้องมีประสบการณ์และใช้ฝีมือสูง การ เชื่อมสายโดยขาดประสบการณ์จะทำให้เกิดโพรงอากาศระหว่างผิวของฉนวนในแต่ละชั้นซึ่งสามารถ ทำให้เกิดการดิสชาร์จในโพรงอากาศได้ อีกสิ่งหนึ่งที่จะต้องตระหนักคือความสะอาดของผิวฉนวน และสถานะแวดล้อมก่อนทำการทดสอบ การทดสอบดิสชาร์จบางส่วนแบบ Conventional ตาม IEC 60270 ควรทำการวัดเทียบค่าตัวเก็บประจุให้ใกล้เคียงค่าดิสชาร์จบางส่วนที่วัดได้ก่อนการทดสอบ และขณะในการทดสอบ ต้องป้องกันการรบกวนภายนอกที่อาจจะก่อให้เกิดความผิดพลาดในการวัด เช่น การเดินผ่านระหว่างทำการทดสอบ สัญญาณรบกวนจากอุปกรณ์ต่าง ๆ เป็นต้น

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.

## เอกสารอ้างอิง

- [1] ชลิตา วรกิจเจริญผล, ณัฐพงศ์ พันธุ์สวัสดิ์, ณัฐวุฒิ รักพรหม, บัญญัติ สีสลาจรรย์กุล, “การศึกษาความบกพร่องของสายเคเบิลใต้ดิน”, **ปริญญาานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต**, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2551.
- [2] E. Peschke, R. von Olshausen, **Cable Systems for High and Extra-High Voltage**, Erlangen and Munich, Publicis MCD Verlag, 1999.
- [3] กองมาตรฐานระบบไฟฟ้า, **ระบบเคเบิลใต้ดิน Underground cable system**, 2548.
- [4] นายชยานันต์ แสงนิติเดช, นายณรัช ประทุมแก้ว, นายณัฐวร สุขวิสูตร, นายธนชัย เมืองโคตร, “การศึกษากระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันในสายเคเบิลใต้ดิน”, **ปริญญาานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต**, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2560.
- [5] Norasage Pattanadech, “**Introduction to PD Measurements**”, **Underground Cable Testing and Diagnosis**, Electrical Engineering Dept., Faculty of Engineering, King Mongkut’s Institute of Technology Bangkok, 2018.
- [6] S. A. Bhumiwat “**On-site non-destructive diagnosis of in-service power cables by polarisation / depolarisation current analysis**” 2010 IEEE International Symposium on Electrical.
- [7] S. Bhumiwat, “**Interpretation of dielectric spectroscopy results in time and frequency domains for power cables,**” CIGRE Session 43, Paris, France, August 22-27, 2010, pp. D1-216.
- [8] Walter S. Zaengl, Prof. em. Dr.-Ing. “**DIELECTRIC SPECTROSCOPY IN TIME AND FREQUENCY DOMAIN FOR HV POWER EQUIPMENT (TRANSFORMERS, CABLES ETC.)**” 2001 IEEE International Symposium on Electrical.
- [9] S. Sulaiman\*, A. Mohd Ariffin and D. T. Kien, “**Simulation Modeling of Polarization and Depolarization Current Analysis for Underground Cable Insulation**” IEEE 7th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO2013), 2013.
- [10] A. C. Ashcraft, R. M. Eichhorn, “**METHOD FOR VISUALIZATION OF WATER TREES BY STAINING**” IEEE Trans. Electr. Insul, Vol EI-13 No 3, June 1978.

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.



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.

# การวินิจฉัยฉนวนในสายเคเบิลกราวด์เคเบิล

## Diagnostic of Insulation in Underground Cables

นายณัฐพงศ์ นวพิทยารัตน์, นายธนพล พงษ์ศิริชัยโรจน์, นายธนวิทย์ จิรทิพย์ชัยสกุล

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ซอย 1 คลองกรุง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-329-8000 ต่อ 3925 E-Mail: tanapol.bright@gmail.com

### บทคัดย่อ

ในอันเดอร์กราวด์เคเบิลมีปัญหาจำนวนมากที่เกิดใน XLPE โครงการนี้นำเสนอการวินิจฉัยฉนวนด้วยการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน (PDC) กับการวัดดิสชาร์จบางส่วน (PD) ของอันเดอร์กราวด์เคเบิลพิกัด 22 kV โดยมีการจำลองปัญหา 3 กรณีที่เป็นสาเหตุของการรั่วไหลของกระแสตามผิวของฉนวน ได้แก่ เคเบิลที่มีรอยบาก, เคเบิลปนเปื้อนผงทองแดง และเคเบิลปนเปื้อนผงเหล็ก การทดสอบกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันจะนำรูปร่างกราฟและค่า Dielectric Dissipation Factor (DDF) หรือ  $\tan \delta$  ที่วัดได้มาวิเคราะห์ที่ส่วนการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนนำเสนอการวัดเป็นแบบ Conventional และ Non-conventional โดยจะวิเคราะห์ผลจากรูปแบบ, การกระจายตัว, อัตราการเกิดซ้ำ และ  $Q_{IEC}$  ของการดิสชาร์จบางส่วน

**คำสำคัญ:** อันเดอร์กราวด์เคเบิล, กระแสโพลาริเซชัน, กระแสดีโพลาริเซชัน และดิสชาร์จบางส่วน

### ABSTRACT

In underground cable system, There are a lot of problems in XLPE insulation and cable accessories. This project represents diagnostic of insulation by using polarization and depolarization current (PDC) and partial discharge (PD) measurement of XLPE underground cable system rated of 22 kV. To investigate effects of contaminants, four case study, case 2: incision at cable joint, case 3: copper powder at cable joint, and case 4: iron powder at cable joint, were investigated. PDC tests use PDC shape and  $\tan \delta$  for interpreting the dielectric response. In PD tests, it was performed in the Conventional and Non-conventional measurements that can analyse results from PD pattern, PD dispersion, repetition rates and  $Q_{IEC}$ .

**Keyword:** Underground cables, Polarization current, Depolarization current and Partial Discharge

### 1. บทนำ

ในปัจจุบันการไฟฟ้านครหลวงและการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคได้มีการลงทุนก่อสร้างระบบเคเบิลใต้ดินเพื่อเปลี่ยนแปลงระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าภายในประเทศอย่างกว้างขวาง เนื่องจากบางพื้นที่จำเป็นต้องใช้ระบบเคเบิลใต้ดินเนื่องจากเป็นพื้นที่แออัดหรือเป็นต้องให้ความสำคัญกับภาพลักษณ์และภูมิทัศน์ แต่หลังจากการก่อสร้างและใช้งานระบบเคเบิลใต้ดินได้เกิดปัญหาที่มาจากฉนวน เนื่องจากขาดความรู้และความเข้าใจฉนวนในระบบ ด้วยสาเหตุนี้การทดสอบวินิจฉัยฉนวนวิธีการต่าง ๆ จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในการลดปัญหาดังกล่าว

### 2. ทฤษฎีและสมมติฐานที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 การทดสอบกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน (PDC) [1]

การทดสอบกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน (PDC) เป็นการวิเคราะห์คุณภาพของเนื้อฉนวน เป็นวิธีที่ระบุปรากฏการณ์ของคอนดักชันกับโพลาริเซชันในฉนวน โดยสามารถวัดขนาดกระแสค่าที่ 10-12 pA แอมป์ การคงเหลือของประจุในเนื้อฉนวนสามารถวัดได้โดยไม่ต้องใช้วิธีทางแรงดัน เทคนิคการวัดนี้อยู่บนพื้นฐานในโดเมนของเวลาที่สามารถวัดได้ทั้งกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันในโดเมนความถี่การวัดนั้นจะให้ผลของเทอมเพคเตอร์ความสูญเสีย (Dielectric Dissipation Factor: DDF) และค่าความจุ (C)

#### 2.2 การทดสอบการดิสชาร์จบางส่วน (PD) [2]

การทดสอบการดิสชาร์จบางส่วนสามารถแบ่งออกได้เป็น Conventional (ตามมาตรฐาน IEC 60270) กับ Non-conventional ข้อเสียหลักในการวัดการดิสชาร์จบางส่วน Conventional คือ ไม่สามารถใช้ในหน้างานได้ เนื่องจากต้องใช้แหล่งจ่ายไฟที่มีขนาดใหญ่ โดยจะต้องสามารถเหนี่ยวนำแรงดันทดสอบให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่ต้องการจะทดสอบและยังต้องหยุดการทำงานของอุปกรณ์ จึงต้องใช้การวัดแบบ Non-conventional ที่เซนเซอร์แบบต่าง ๆ ในการวัด (AE, HF, UHF ฯลฯ) เพื่อที่จะทดสอบการดิสชาร์จหน้างานได้

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. การออกแบบและประกอบสร้าง

#### 3.1 การจำลองปัญหาสายเคเบิลใต้ดิน

กรณีปัญหาที่นำมาจะเกิดจากการทำข้อต่อเคเบิลและสิ่งประกอบอื่นในระบบ โดยจะทำการจำลองกรณีต่อไปนี้

##### 1. ข้อต่อเคเบิลที่มีรอยบาก



รูปที่ 1 ข้อต่อที่มีรอยบาก

##### 2. ข้อต่อเคเบิลใส่ผงทองแดง



รูปที่ 2 ข้อต่อเคเบิลใส่ผงทองแดง

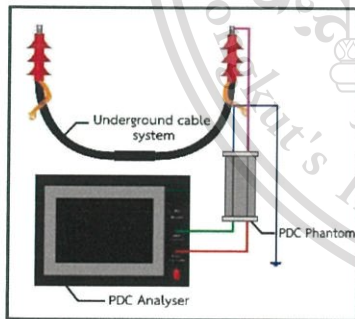
##### 3. ข้อต่อเคเบิลใส่ผงเหล็ก



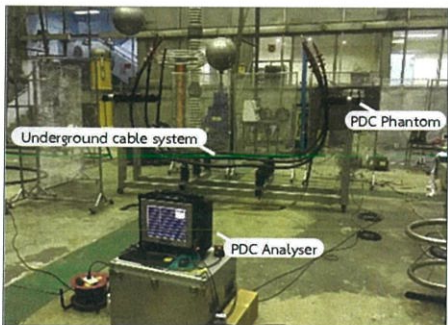
รูปที่ 3 ข้อต่อเคเบิลใส่ผงเหล็ก

#### 3.2 วงจรทดสอบ PDC

วงจรทดสอบ PDC ที่ใช้ในการวินิจฉัยปัญหาในข้อต่อเคเบิล แสดงดังต่อไปนี้



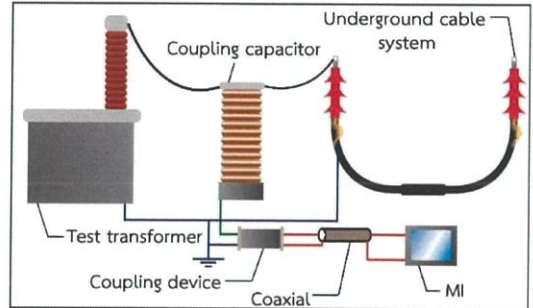
รูปที่ 4 แบบจำลองวงจรทดสอบ PDC



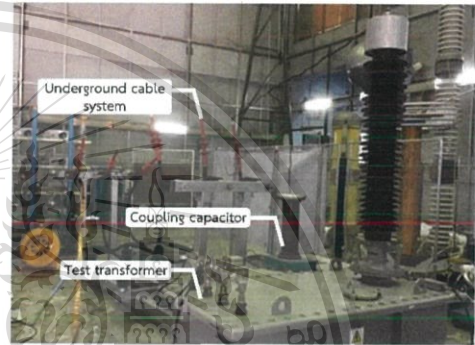
รูปที่ 5 แบบจำลองวงจรทดสอบ PDC

#### 3.3 วงจรทดสอบ PD แบบ Off-line และ On-line

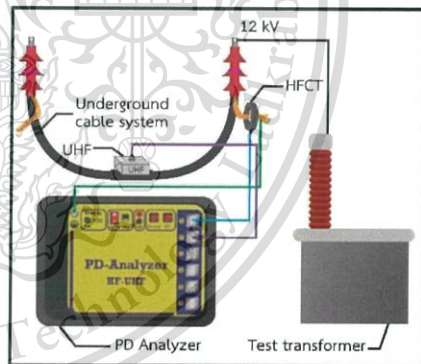
วงจรทดสอบ PD ที่ใช้ในการวินิจฉัยปัญหาในข้อต่อเคเบิล แสดงดังต่อไปนี้



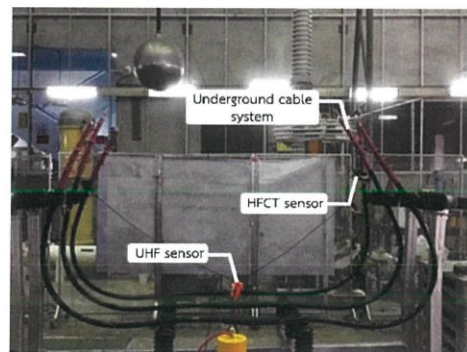
รูปที่ 6 แบบจำลองวงจรทดสอบ PD แบบ Conventional



รูปที่ 7 วงจรทดสอบ PD แบบ Conventional



รูปที่ 8 แบบจำลองวงจรทดสอบ PD แบบ Non-conventional



รูปที่ 9 วงจรทดสอบ PD แบบ Non-conventional

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำออกเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากผู้นิเทศฯ ได้

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. การทดสอบและประเมินผล

##### 4.1 วิธีการทดสอบ PDC

ขั้นตอนการทดสอบกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันมี 3 ขั้นตอน ได้แก่ 1. Initial Measurement 2. Control Measurement 3. Main Measurement และมีเงื่อนไขการทดสอบดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เงื่อนไขการทดสอบ PDC

แรงดัน	500 V DC
อุณหภูมิขณะทดสอบ	30 °C
อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัด	PDC Analyzer 1MOD
วงจรที่ใช้ทดสอบ	PDC Phantom 1000XE
เวลาในการวัดกระแสโพลาริเซชัน	1000 วินาที
เวลาในการวัดกระแสดีโพลาริเซชัน	1000 วินาที

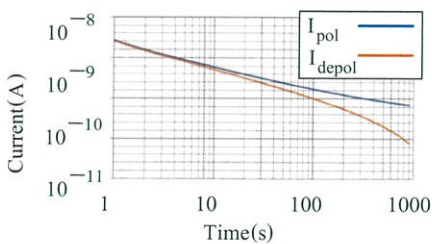
##### 4.2 วิธีการทดสอบ PD

การทดสอบ PD แบบ Conventional ต้องทำการวัดเทียบค่าตัวเก็บประจุให้ใกล้เคียงค่าคิซาร์จบางส่วนที่วัดได้ก่อนการทดสอบ และเซตวงจรทดสอบให้ห่างจากอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงอื่น ๆ เพื่อให้ผลการทดสอบมีค่าใกล้เคียงค่าที่ถูกต้องมากขึ้น และขึ้นแรงดันทดสอบจาก 12.5 kV ถึง 20 kV โดยขึ้นแรงดันเป็นแบบขั้นทีละ 2.5 kV และค้างไว้ขั้นละ 30 วินาที จากนั้นลดแรงดันเป็นขั้นจาก 20 kV ถึง 12.5 kV โดยลดแรงดันเป็นแบบขั้นทีละ 2.5 kV และค้างไว้ขั้นละ 30 วินาที

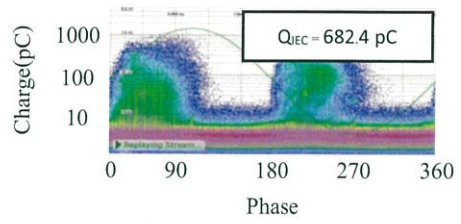
การทดสอบ PD แบบ Non-conventional จะใช้ HFCT และ UHF sensor การวัด และแปรผลการวัดด้วยเครื่อง PD-Analyzer HF/UHF ที่ใช้ Phase resolved partial discharge (PRPD) และ time frequency analysis (PD-Cloud) ซึ่งรูปร่างและลักษณะของผลการวัดจะเหมือนกับ การวัดแบบ Conventional

#### 5. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

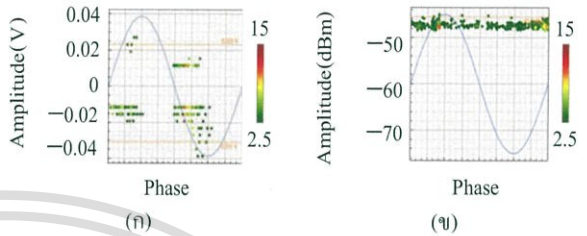
##### 5.1 กรณีข้อต่อเคเบิลที่มีรอยบาก



รูปที่ 10 กรณีข้อต่อเคเบิลที่มีรอยบาก กราฟกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน



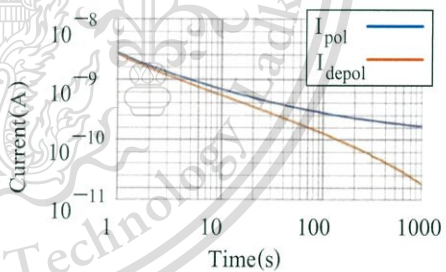
รูปที่ 11 กรณีข้อต่อเคเบิลที่มีรอยบาก กราฟการวัดคิซาร์จบางส่วนแบบ Conventional



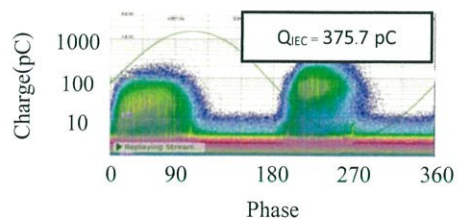
รูปที่ 12 กรณีข้อต่อเคเบิลที่มีรอยบาก กราฟการวัดคิซาร์จบางส่วนที่วัด (ก) HFCT (ข) UHF sensor

จากกราฟ PDC กระแสโพลาริเซชันเคลื่อนออกจากกระแสดีโพลาริเซชันในช่วงเวลาน้อยกว่า 10 นาที มีโอกาสพบการรั่วตามฉนวนบางส่วน ผลการวัด PD แบบ Conventional และวัดด้วย HFCT รูปร่างผลมีลักษณะการเกิดคิซาร์จภายใน (Internal discharge) การวัดด้วย UHF sensor ไม่พบรูปแบบการคิซาร์จบางส่วน

##### 5.2 กรณีข้อต่อเคเบิลใส่ผงทองแดง



รูปที่ 13 กรณีข้อต่อเคเบิลใส่ผงทองแดง กราฟกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน

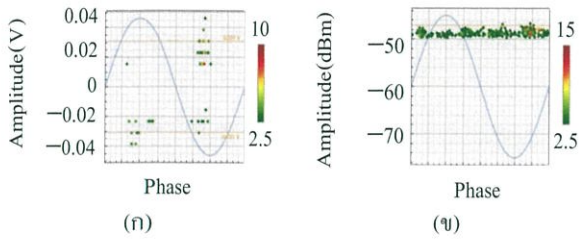


รูปที่ 14 กรณีข้อต่อเคเบิลใส่ผงทองแดง กราฟการวัดคิซาร์จบางส่วนแบบ Conventional

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

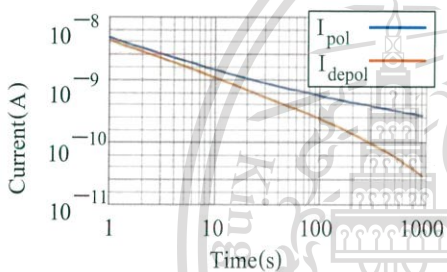
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



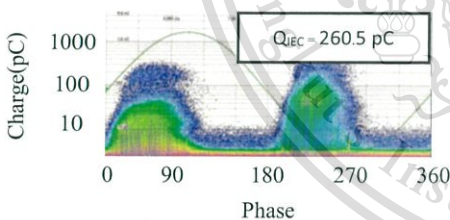
รูปที่ 15 กรณีสื่อต่อเคเบิลที่ได้ฟังของแคง กราฟการวัดคิซาร์จบางส่วน  
วัดด้วย (ก) HFCT (ข) UHF sensor

จากกราฟ PDC กระแสโพลาริเซชันเคลื่อนออกจากกระแส  
ดิโพลาริเซชันช่วงเริ่มต้น เป็นรูปแบบของฉนวนที่มีปัญหาในส่วนของ  
Conduction ส่วนผลการวัด PD แบบ Conventional และวัดด้วย HFCT  
รูปร่างผลมีลักษณะการเกิดคิซาร์จตามผิว(Surface discharge) การวัด  
ด้วย UHF sensor ไม่พบรูปแบบการคิซาร์จบางส่วน

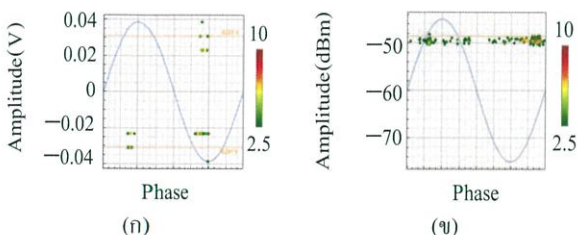
### 5.3 กรณีสื่อต่อเคเบิลใต้ผงเหล็ก



รูปที่ 16 กรณีสื่อต่อเคเบิลใต้ผงเหล็ก กราฟกระแสโพลาริเซชัน  
และดิโพลาริเซชัน



รูปที่ 17 กรณีสื่อต่อเคเบิลใต้ผงเหล็ก กราฟการวัดคิซาร์จบางส่วน  
แบบ Conventional



รูปที่ 18 กรณีสื่อต่อเคเบิลใต้ผงเหล็ก กราฟการวัดคิซาร์จบางส่วน  
วัดด้วย (ก) HFCT (ข) UHF sensor

จากกราฟ PDC กระแสโพลาริเซชันเคลื่อนออกจากกระแส  
ดิโพลาริเซชันช่วงเริ่มต้น เป็นรูปแบบของฉนวนที่มีปัญหาในส่วนของ  
Conduction ส่วนผลการวัด PD แบบ Conventional และวัดด้วย HFCT  
รูปร่างผลมีลักษณะการเกิดคิซาร์จตามผิว(Surface discharge) การวัด  
ด้วย UHF sensor ไม่พบรูปแบบการคิซาร์จบางส่วน

## 6. สรุป

จากผลการทดสอบพบว่า ผลตอบสนองปัญหาการรั่วไหลของ  
กระแสในกรณีต่าง ๆ ที่ถูกสร้างขึ้นมีคุณลักษณะของผลตอบสนองที่  
คล้ายกันและมีลักษณะไปในทิศทางเดียวกันไม่ว่าจะเป็น รูปร่างของ  
กระแสโพลาริเซชันที่เบนตัวออกจากกระแสดิโพลาริเซชัน ในช่วง  
เวลาที่น้อยกว่า 10 วินาที (ช่วงเริ่มต้น) การเบนตัวออกที่เวลาน้อย ๆ  
สามารถบอกได้ว่าฉนวนสภาพแย่มาก และมีโอกาสพบการรั่วไหลตาม  
ผิวฉนวนมากยิ่งขึ้น และการวัดการคิซาร์จบางส่วน พบว่าในกรณีที่เห็น  
ผงโลหะจะทำให้เกิดการคิซาร์จตามผิว ส่วนกรณีรอยบากจะทำให้เกิด  
คิซาร์จภายใน การวัดแบบ Conventional และวัดด้วย HFCT จะให้ผลที่  
เป็นลักษณะเดียวกันแต่จะไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบโดยตรงได้  
เนื่องจากการวัดผลมาจากคลื่นสัญญาณความถี่ต่างกัน (Bandwidth  
ต่างกัน) ส่วน UHF sensor ไม่พบรูปแบบการคิซาร์จบางส่วน โดย  
สามารถตรวจจับได้แค่สัญญาณรบกวน

## 7. กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีด้วยความเมตตา  
กรุณาอย่างสูงจาก รศ.ดร.นรเศรษฐ พัฒนเดช ที่ให้คำปรึกษา ความรู้  
รวมทั้งให้ความช่วยเหลือพร้อมทั้งแก้อุปกรณ์ในด้านต่าง ๆ และ  
ขอขอบคุณ บริษัท พีดี โซลูชันส์ จำกัด. ที่ให้ความอนุเคราะห์มาช่วย  
ทดสอบการคิซาร์จบางส่วน

## 8. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. A. Bhumiwat "On-site non-destructive diagnosis of in-service power cables by polarisation /depolarisation current analysis" 2010 IEEE International Symposium on Electrical.
- [2] Norasage Pattanadech, "Introduction to PD Measurements", Underground Cable Testing and Diagnosis, Electrical Engineering Dept., Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Bangkok, 2018

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.

# Polarization and Depolarization Current Measurement Applied for Investigation of Underground Cable System Problems

N. Pattanadech  
Electrical Engineering Dept.,  
Faculty of Engineering,  
King Mongkut's Institute of  
Technology Ladkrabang  
Bangkok, Thailand  
norasage.pa@kmitl.ac.th

T. Phongsirichairojna  
Electrical Engineering Dept.,  
Faculty of Engineering,  
King Mongkut's Institute of  
Technology Ladkrabang  
Bangkok, Thailand  
tanapol.bright@gmail.com

N. Navapittayaratana  
Electrical Engineering Dept.,  
Faculty of Engineering,  
King Mongkut's Institute of  
Technology Ladkrabang  
Bangkok, Thailand  
earth\_nuthapong@hotmail.com

P.Nimsanong  
Electrical Engineering Dept.,  
Faculty of Engineering,  
King Mongkut's Institute of  
Technology Ladkrabang  
Bangkok, Thailand  
phethai.ni@gmail.com

T. Jirathipchaisakul  
Electrical Engineering Dept.,  
Faculty of Engineering,  
King Mongkut's Institute of  
Technology Ladkrabang  
Bangkok, Thailand  
thanawin\_winnie@hotmail.com

C.Chuayin  
Electrical Engineering Dept.,  
Faculty of Engineering,  
King Mongkut's Institute of  
Technology Ladkrabang  
Bangkok, Thailand  
Chaiwat09@gmail.com

**Abstract**—This research investigates the problems in XLPE cables system. The 12/20(24) kV underground cable with the cross section area of 240 mm<sup>2</sup> was used in the experiment. Two 3 meter long cables were connected by a cable joint where the defect was simulated on. The dielectric investigation of XLPE cable system by polarization and depolarization current (PDC) measurement was performed comparatively among four different cases: a healthy cable with healthy heat shrinkable joint (case1), a cable joint with an incision on XLPE surface (case2), a cable joint contaminated with 20 micron iron powder on XLPE surface (case3) and a cable joint contaminated with 20 micron copper powder on XLPE surface (case4). Diagnostic parameters, PDC shapes, dielectric dissipation factor (DDF) and conduction current, derived from PDC test results for analyzing the dielectric response are proposed in this paper.

**Keywords**— polarization and depolarization current, contaminants, XLPE underground cable, cable joint

## I. INTRODUCTION

Today, the underground cable system plays an important role in the transmission and distribution line systems. Currently underground cable systems are widely used to supply electrical energy in the distribution system. The advantages of underground cable system are high reliability, low dielectric loss and good mechanical properties [1]. Focusing on underground cable system, it is composed of underground cables, cable joints, and cable terminators. Generally, problems occurring in the underground system are found in the cable joints and at the cable terminator. The problem might be occurred due to moisture and conductive contaminant remaining in cable joints and cable terminators. For insulation testing, the polarization and depolarization current (PDC) method is one of the non-destructive insulation testing methods which might be applied for diagnosis the underground cable system [2]. The PDC measurement is performed, in order to measure PDC shapes, C ratio and dielectric dissipation factor (DDF). These factors can be used to analyze and diagnose the condition of insulation of the underground cable system.

## II. RELATED THEORY

The PDC measurement is used for diagnose the integrity of the insulation of the insulation system. In time domain, the polarization and depolarization currents as shown in Fig. 1 are analyzed.

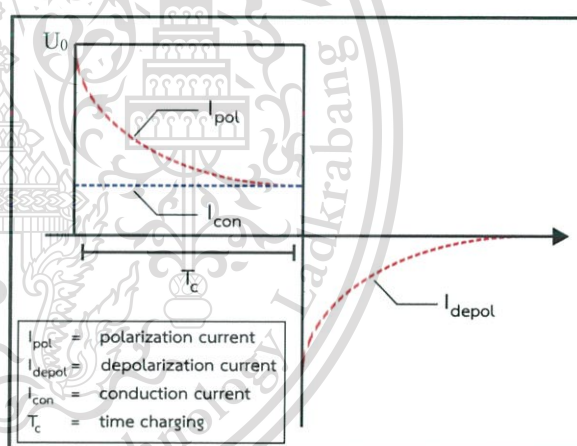


Fig. 1. Polarization current and depolarization current

The polarization current ( $I_{pol}$ ) exists when the DC voltage source is applied to the test object. Whereas the depolarization current ( $I_{depol}$ ) is detected when the DC voltage source is stopped after energizing for polarization current measurement. In addition, the polarization current consists of absorption current and conduction current. The magnitude of absorption current and depolarization current is equal but, opposite polarity.

The conduction current ( $I_{con}$ ) occurs normally in the imperfection insulation and it is enlarged by contaminant and/or dirt on the insulation surface. However, contaminant and/or dirt does not affect the insulating texture. The conduction current only exists when applied DC voltage source and has a constant magnitude [3].

$$I_{con} = C_0 U_0 \left[ \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} \right] \quad (1)$$

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.

Where:  $C_0$  is the geometric capacitance of test object.  
 $U_0$  is the DC voltage supplied to the tested insulation.  
 $\sigma_0$  is the volume conductivity of the tested insulation.  
 $\epsilon_0$  is permittivity of free space.

For the clean insulation, the conduction current is low. In the other hand, if the insulation has a defect, the conduction current will increase obviously [4].

In this paper, not only PDC curves but the dielectric parameters are also analysed. The analysed dielectric parameters are as follow;

1) Insulation resistance (IR)

Normally, insulation starts to age as soon as it's made. The result of aging makes the insulation deteriorates. To determine the Insulation resistance (IR), The IR equation (2) below are used.

$$IR = \frac{I_{pot}(t)}{U(t)} \quad (2)$$

Where:  $U(t)$  is DC step voltage applied for IR testing

However, IR is temperature sensitive. When the temperature goes up, IR goes down, and vice versa. For comparing the two readings data, it necessary to correct the readings to a specified temperature.

2) Depolarization index (dPI)

The depolarization Index (dPI) can be calculated by using equation (3) in order to evaluate the conditions of solid insulation system.

$$dPI = \frac{I_{depol-60s}}{I_{depol-600s}} \quad (3)$$

Where:  $I_{depol-60s}$  and  $I_{depol-600s}$  are the depolarization current at 60 and 600 second respectively.

3) Capacitance ratio (C ratio)

If there is no significant consideration in the contamination (the insulation system contains a negligible amount of deterioration products) Capacitive of the insulation system is constant from 50Hz towards low and very low frequency (In case of no water tree C ratio should becomes constant at 1.00) [5].

4) Dielectric dissipation factor (DDF)

DDF can indicate the quality of the insulation but cannot inform the cause of the problem that comes from the absorption current or conduction current. Therefore, the DDF and the shape of PDC have to be considered together by which the maximum acceptable DDF value of each insulation is different. In the case of XLPE cables, the acceptable values should not exceed  $10^{-4}$  at 1Hz. DDF will increase if the insulation has a problem. The shape of the magnitude of DDF is different between XLPE cable and others [5].

III. EXPERIMENTATION

A. Preparation

In this experiment, a 12/20(24) kV XLPE medium-voltage underground cables with 6 m length and the cross-section of 240 mm<sup>2</sup> were prepared. The process for connecting two healthy underground cables with a healthy heat shrinkable cable joint is shown in Fig.2.

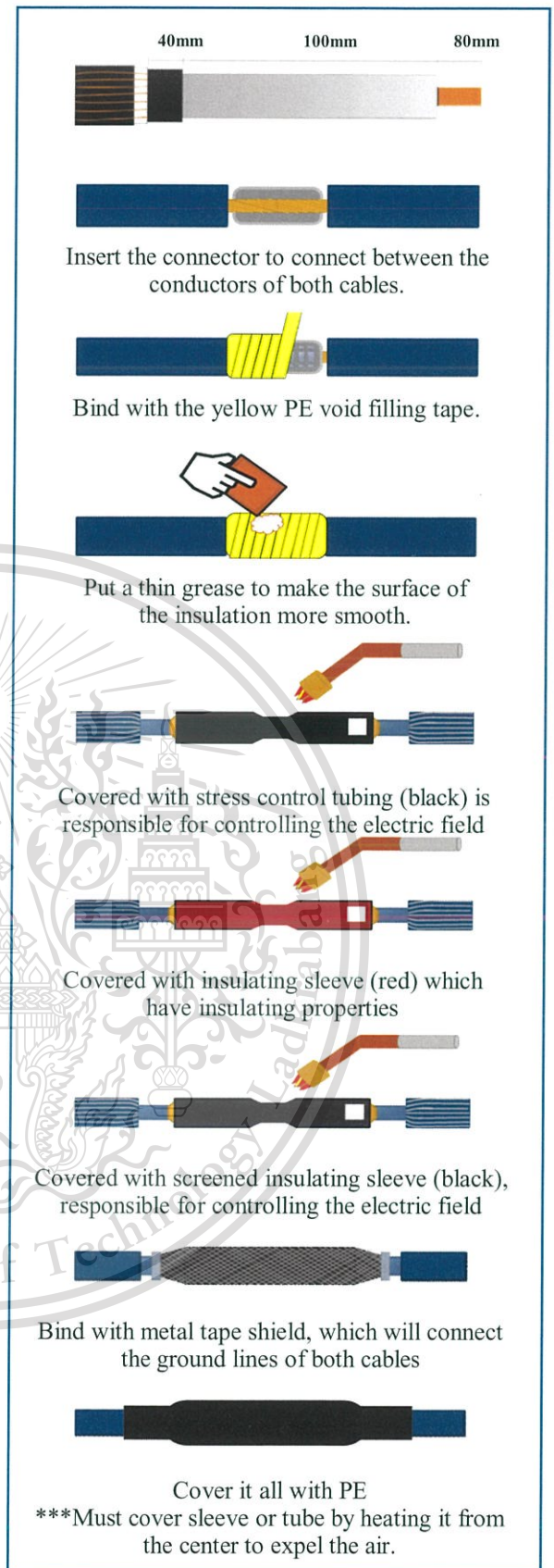


Fig. 2. Process for connecting two underground cables with heat-shrinkable joint [6]

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.

## B. Models for experimentation

PDC testing of XLPE cable was performed comparatively among three different cases as shown in Fig.3- Fig. 6 respectively:

- Case 1: healthy cable joint

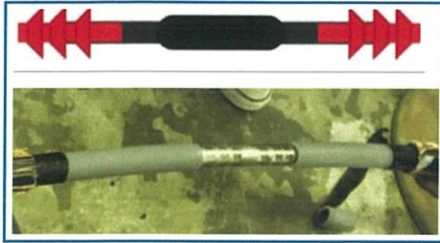


Fig. 3. Healthy cables connected with the healthy cable joint.

- Case 2: cable joint with an incision

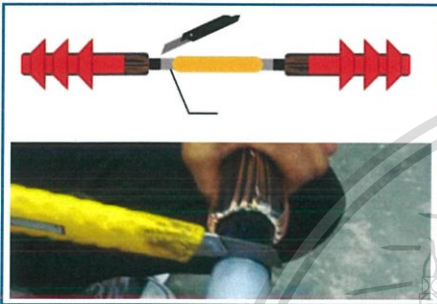


Fig. 4. Healthy cables connected with the cable joint with an incision on XLPE surface

- Case 3: cable joint contaminated with iron powder

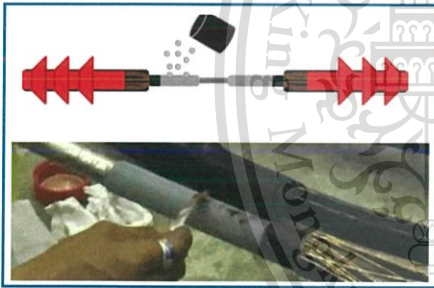


Fig. 5. Healthy cables connected with the cable joint contaminated with 20-micron iron powder on XLPE surface,

- Case 4: cable joint contaminated with copper powder

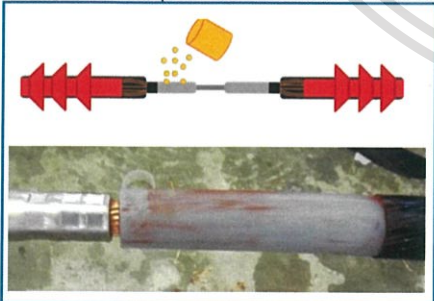


Fig. 6. Healthy cable connected with the cable joint contaminated with 20-micron copper powder on XLPE surface.

## C. PDC test set-up

The test apparatus for investigation of the dielectric response of the underground cable systems is shown in Fig. 7

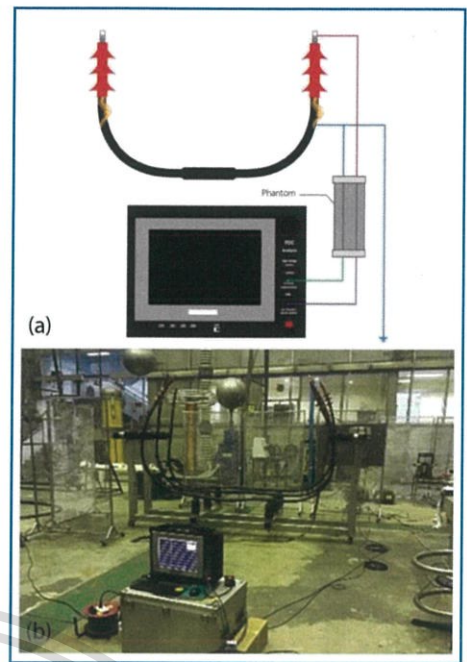


Fig. 7. (a) Test circuit diagram for phase to ground PDC measurements (b) Test circuit arrangement for PDC measurements phase to ground

Two main devices applied for the experiment consist of PDC analyzer and PDC phantom. PDC phantom is used for supplying DC voltage when the test object cannot remove ground from the system. The DC voltage generated by PDC phantom can be adjusted between 30 – 1000.

## D. PDC test procedure

The PDC measurement was performed in three steps:(i) initial measurement, (ii) control measurement, and (iii) main measurement [4].

- (i) Initial measurement : This step is aim to measure the remaining current. No voltage was applied to the test object. Thus, the test object was short-circuited. The remaining current was measured.
- (ii) Control measurement : The DC voltage source was applied about 50 V to the test object for 5 seconds to check the current amplitude and the ability whether the test object can be tested or not. After that, the test object was discharged until the discharging current was as equal as the remaining current.
- (iii) Main measurement : The 500 DC voltage was applied to the test object for 1000 seconds while the polarization current was recorded. Then, the test object was short-circuited and the depolarization current was measured for 1000 seconds.

## IV. PDC TEST RESULTS

From the PDC experiments, the measured polarization current  $I_{poi}(t)$  and depolarization current  $I_{depoi}(t)$  are shown in Fig. 8. and the dielectric parameters for all measurement cases are evaluated and summarized in Table 1 below.

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.

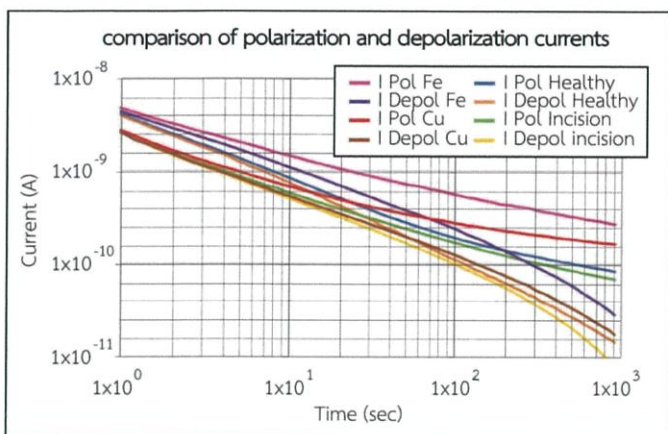


Fig. 8. Comparison of polarization and depolarization currents from the case studies.

TABLE I. DIELECTRIC PARAMETERS FROM THE CASE STUDIES

Table Head	$C_0$ (pF)	IR(T $\Omega$ )	PI	dPI
Case 1	1521	7.49	2.66	7.46
Case 2	1537	9.55	2.77	8.95
Case 3	1478	2.24	2.23	6.98
Case 4	1516	3.43	1.84	6.07

## V. INTERPRETATION

From the comparison of conduction current, it showed that, the conduction current obviously increased in case of caused iron powder and copper powder defect compared with that of the healthy joint. However, it was not clearly indicated the difference of PDC shapes for all experiment because the conduction current magnitude might depend on the amount of powder or even the distribution of powder. In incision case, it was hardly indicated the difference from the healthy joint case.

During 0 - 10 seconds of testing, it can be seen that the iron powder defect caused the highest depolarization current magnitude. From the comparison of the tan delta, it is show that the lower the frequency, the higher DDF value is.

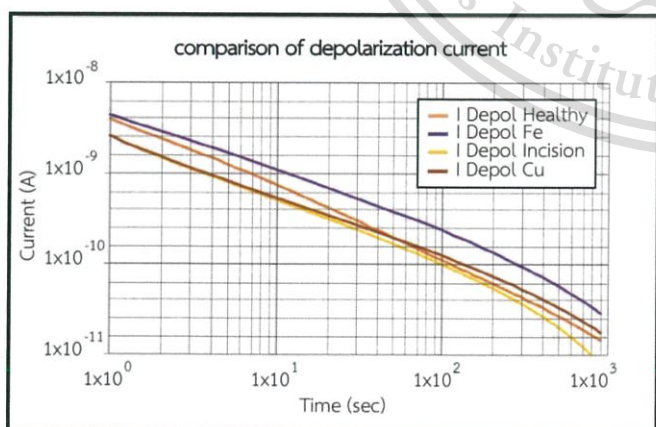


Fig. 9. Comparison of depolarization current from the case studies.

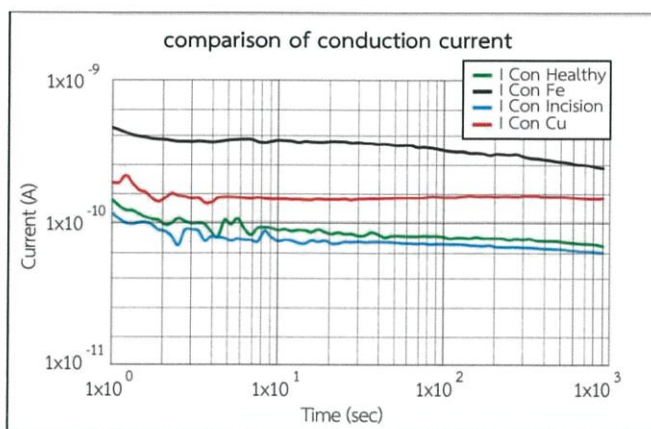


Fig. 10. Comparison of conduction current from the case studies.

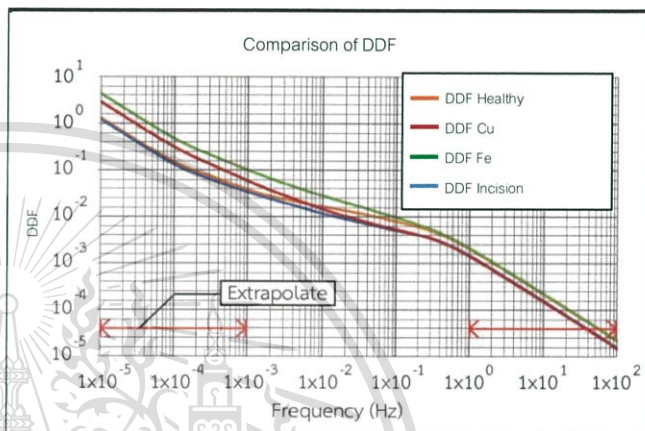


Fig. 11. Comparison of DDF from the case studies.

## CONCLUSION

The paper aim to study the PDC shapes that indicate the surface problem of underground cable system. The shape of the PDC shape has a rather similar pattern. The losses vary according to the magnitude of the depolarization current and DDF that indicates the quality of the insulation.

## ACKNOWLEDGMENT

The authors wish to acknowledge all staff of high voltage laboratory, King Mongkut's Institute of technology Ladkrabang.

## REFERENCES

- [1] XU Zhiliang, "Research on Verification and Optimization of Ampacity for JOKY XLPE Cables in Pipes". Xian, China: Xian Jiaotong University, 2013.
- [2] S. A. Bhumiwat "On-site non-destructive diagnosis of in-service power cables by polarisation /depolarisation current analysis" 2010 IEEE International Symposium on Electrical.
- [3] Walter S. Zaengl, et al, "Dielectric Spectroscopy in Time and Frequency Domain for HV Power Equipment, Part I: Theoretical Considerations," IEEE Electrical Insulation Mag., vol 19, no. 5, 2003."
- [4] J. Singhasivanon "The Classification of Regular and Defected Low Voltage XLPE Cable by Using Polarization and Depolarization Current Method" presented at the 5th International Electrical Engineering Congress, Pattaya, Thailand, 8-10 March 2017
- [5] S. Bhumiwat, "Interpretation of dielectric spectroscopy results in time and frequency domains for power cables", CIGRE 2010, D1-216.
- [6] Tyco Electronics, "Joints for Screened Single Core Plastic and Rubber Insulated Cables 24 kV without Armour" installation instruction EPP-0215-9/05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา ไม่นำไปใช้ในเชิงพาณิชย์

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.

## Polarization and Depolarization Current Measurement

### Applied for Investigation of Underground Cable System Problems

Nuthapong Navapittayaratana, Tanapol Phongsirichairojna, Thanawin Jirathipchaisakul,  
Sittthisak Klienhom and Norasage Pattanadech

#### Abstract

This project investigates the problems in XLPE cables system. The 12/20(24) kV underground cable with the cross section area of 240 mm<sup>2</sup> was used in the experiment. Two 3 meter long cables were connected by a cable joint where the defect was simulated on. The dielectric investigation of XLPE cable system by polarization and depolarization current (PDC) measurement was performed comparatively among four different cases: a healthy cable with healthy heat shrinkable joint (case1), a cable joint with an incision on XLPE surface (case2), a cable joint contaminated with 20 micron iron powder on XLPE surface (case3) and a cable joint contaminated with 20 micron copper powder on XLPE surface (case4). Diagnostic parameters, PDC shapes, tan  $\delta$  and conduction current, derived from PDC test results for analyzing the dielectric response are proposed in this project.

**Keywords:** PDC, Contaminants, XLPE Underground Cable, Cable Joint

#### Introduction

This project studies factors that can indicate unhealthy cable joints. PDC measurement is a low-voltage test applied for any type and any voltage level of long cables. Therefore, it is non-destructive test that ensure the insulation is not degraded by the test stress.

#### Methodology

Pictures below show the experimental case and test diagram



Fig. 1 Experimental Case 1



Fig. 2 Experimental Case 3



Fig. 3 Experimental Case 3



Fig. 4 Cable joint preparation



Fig. 5 Test circuit arrangement

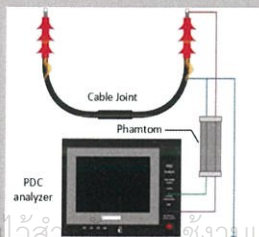


Fig. 6 PDC test set-up

#### Results

Pictures below show the test results

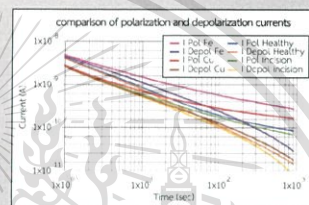


Fig. 7 Test results

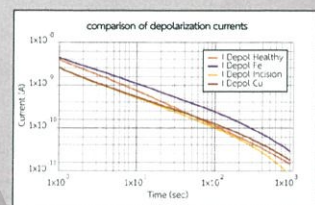


Fig. 8 Depolarization currents

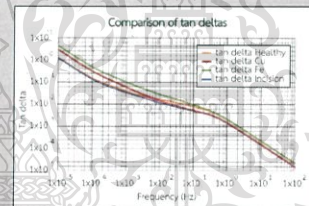


Fig. 9 Tan deltas

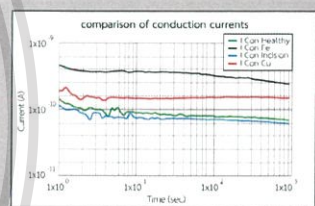


Fig. 10 Conduction currents

#### Conclusion

From the comparison of the conduction current. It can be seen that in the case of iron powder and copper powder, the current has obviously increased from the normal case but cannot clearly indicate which type of powder causes more current. In case of incision is hardly see the difference from the normal current. The comparison of the depolarization current is similar to the comparison of the absorption current. It is focus on the response from the conduction part. At less than 10 seconds, It can be seen that the iron powder case has a higher current magnitude than normal cases and another two cases respectively and the graph of the incision cased will overlap with the copper powder case. At about 60 seconds, the sequence will change. Depolarization current shape of all case slightly curved in log-log scale. From a comparison of the tan  $\delta$  graph of all case it was found that at a reduced frequency, the tan  $\delta$  value will increase in all cases.

#### References

- [1] S. A. Bhumiwat "On-site non-destructive diagnosis of in-service power cables by polarisation /depolarisation current analysis" 2010 IEEE International Symposium on Electrical
- [2] S. Bhumiwat, "Interpretation of dielectric spectroscopy results in time and frequency domains for power cables", CIGRE 2010, D1-216

#### Acknowledgement

THAI MEIDENSHA CO., LTD.





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 การวัดกระแสของเครื่อง PDC-ANALYSER-1MOD**

range	$\pm 1$ mA
Resolution	1 pA
accuracy	0.5 % of the measured value $\pm 1$ pA after 1 hour warming up
impedance	10 k $\Omega$
protection	up to 100 mA respectively 1 kV for 50 ms
noise suppression	up to 10 A eff at 50 / 60 Hz mains frequency
filtering	mean value in 1 s intervals
Filtering (recorded data)	mean value in intervals increasing proportionally with the time from the voltage source switching moment

**ตารางที่ ข.2 การวัดแรงดันของเครื่อง PDC-ANALYSER-1MOD**

voltage range when switched on	+30 ... +2000 V
maximum current sourcing when switched on	<+5 mA
impedance when switched on	< 20 k $\Omega$
impedance when switched to zero	< 0.2
current limiting when switching cap. Loads	< $\pm 100$ mA for 20 ms

**ตารางที่ ข.3 ข้อมูลเครื่อง PDC-Phantom-1000XE**

voltage range	30 to 1000 V
current 5 mA	short circuit indefinitely
output to ground insulation	> 1000 T $\Omega$
temperature (use)	0 ... 40 °C
temperature (store)	-10 ... 65 °C
size	290 x 255 x 115 (width x depth x height in mm)
weight	2.6 kg
power supply	remote supply by the PDC Analyser-1MOD

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.4 ข้อมูลเครื่อง PD-Analyzer HF-UHF

Parameter	Value
Value Number of measuring channels	6
Operating voltage, kV	> 3
>3 Discharge pulse frequency, MHz 0.5 ÷ 1500.0	0.5 - 1500.0
Discharge amplitude, pC	20 -100000
Computer connection	USB
Supply voltage, V, AC/DC	90 - 260
Operating temperature range, °C	0 - 40
Case size, mm	520 x 435 x 230

ตารางที่ ข.5 ข้อมูล HFCT 140 ของ HVPD

Internal Aperture	94 mm
External Diameter	180 mm
Weight	1.7 kg
Transfer Impedance	1.8 - 3.2 mV/mA ±5%
Lower -3dB response	350 kHz
Upper -3dB response	19 kHz
Recommend load impedance	50 Ω
Output connector	BNC Female
Max 50 Hz Current (with PVC spacers)	300-1000 A

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



ชื่อ-นามสกุล นายณัฐพงศ์ นวพิทยารัตน์

วัน เดือน ปีเกิด 9 มิถุนายน 2540

ที่อยู่ 113 ซอย 9 หมู่บ้านผกามาศ แขวงสวนหลวง เขตสวนหลวง จังหวัด  
กรุงเทพฯ 10250

### ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2558

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจาก  
โรงเรียนเซนต์ดอมินิก

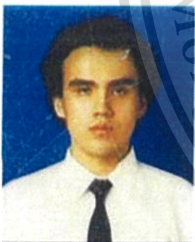
พ.ศ. 2562

สำเร็จการศึกษาวិชาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยี  
พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฝึกงานภาคฤดูร้อน

บริษัท อีเทลไทยวิศวกรรม จำกัด  
แผนก Design engineer

วันที่ 1 มิถุนายน ถึง 31 กรกฎาคม 2561



ชื่อ-นามสกุล นายธนพล พงษ์ศิริชัยโรจน์

วัน เดือน ปีเกิด 19 กุมภาพันธ์ 2539

ที่อยู่ 97/43 หมู่บ้านเพอเพคเพลส หมู่ 8 ซอยอ่อนนุช-ลาดกระบัง 20/3  
ตำบลราชาเทวะ อำเภอบางพลี จังหวัดสมุทรปราการ 10540

### ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2557

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจาก  
โรงเรียนเตรียมอุดมศึกษาพัฒนาการ

พ.ศ. 2562

สำเร็จการศึกษาวิชาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยี  
พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฝึกงานภาคฤดูร้อน

บริษัท สายไฟฟ้าบางกอกเคเบิล จำกัด

แผนก Maintenance  
วันที่ 1 มิถุนายน ถึง 31 กรกฎาคม 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงชื่อเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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



ชื่อ-นามสกุล นายธนวิทย์ จิรทิพย์ชัยสกุล

วัน เดือน ปีเกิด 26 ตุลาคม 2539

ที่อยู่ 25/14 ถนนเพชรพระราม แขวงบางกะปิ เขตห้วยขวาง จังหวัดกรุงเทพฯ  
10310

### ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2558

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจาก  
โรงเรียน สาธิต มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ  
ประสานมิตรฝ่ายมัธยม

พ.ศ. 2562

สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยี  
พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฝึกงานภาคฤดูร้อน

บริษัท Repco จำกัด  
แผนก Maintenance  
วันที่ 1 มิถุนายน ถึง 1 สิงหาคม 2561



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.