

การประเมินสภาพฉนวนของระบบสายเคเบิลใต้ดิน
ด้วยการวิเคราะห์คุณลักษณะทางไดอิเล็กตริก

INSULATION CONDITION ASSESSMENT OF UNDERGROUND CABLE SYSTEM
USING DIELECTRIC CHARACTERISTICS ANALYSIS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ (หลักสูตรสหวิทยาการ)
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2567

KMITL-2024-EN-M-027-237

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INSULATION CONDITION ASSESSMENT OF UNDERGROUND CABLE SYSTEM
USING DIELECTRIC CHARACTERISTICS ANALYSIS



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING
(MULTI-DISCIPLINARY PROGRAM)
SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2024
KMITL-2024-EN-M-027-237

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2024

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประเมินสภาพฉนวนของระบบสายเคเบิลใต้ดิน ด้วยการวิเคราะห์คุณลักษณะทางไดอิเล็กตริก
นักศึกษา	นายปัลลย์ อุดมลักษณะานนท์
รหัสประจำตัว	65016062
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ (หลักสูตรสหวิทยาการ)
พ.ศ.	2567
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. นรเศรษฐ์ พัฒนเดช รศ.ดร. พิทยา ปานนิล

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาเพื่อประเมินสภาพของฉนวนในระบบสายเคเบิลใต้ดิน โดยการวิเคราะห์คุณลักษณะของฉนวน ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว ระบบสายเคเบิลใต้ดินในการใช้งานจะเจอความเครียดต่างๆ ทำให้สภาพฉนวนเสื่อมลง โดยจะทำให้คุณลักษณะทางไดอิเล็กตริกของฉนวนนี้เปลี่ยนแปลงไปตามการเสื่อมสภาพด้วย วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเสนอเทคนิคการวัดการตอบสนองทางไดอิเล็กตริกในโดเมนเวลาและความถี่เพื่อประเมินสภาพของระบบสายเคเบิลใต้ดินที่ผ่านการใช้งานจริงและระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีการจำลองข้อบกพร่องในข้อต่อสายเคเบิล โดยเทคนิคการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันในโดเมนเวลา และการวัดสเปกโตรสโคปีในโดเมนความถี่ นอกจากนี้ ได้นำเสนอการทดสอบด้วยแรงดันสูง ประกอบด้วย การทดสอบแรงดันสูงที่ความถี่ต่ำมากพร้อมการวัดตัวประกอบกำลังสูญเสีย และการทดสอบดิสชาร์จบางส่วน โดยสองเทคนิคนี้จะนำมาประเมินสภาพของระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีการจำลองข้อบกพร่องในข้อต่อสายเคเบิล ซึ่งการทดสอบต่างๆ จะถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อให้ได้พารามิเตอร์ที่ใช้ในการประเมินสภาพฉนวน และจะนำไปเปรียบเทียบกับระบบสายเคเบิลที่ไม่ผ่านการใช้งานใดๆและมีความสมบูรณ์ จากผลการวิเคราะห์พบว่า การวัดการตอบสนองทางไดอิเล็กตริกในโดเมนเวลาและความถี่ รวมถึงการทดสอบด้วยแรงดันสูงนั้น สามารถประเมินสภาพของฉนวนในระบบสายเคเบิลใต้ดินได้ ซึ่งต้องใช้หลายๆหัวข้อควบคู่กันไปเพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้องที่สุด

Thesis	INSULATION CONDITION ASSESSMENT OF UNDERGROUND CABLE SYSTEM USING DIELECTRIC CHARACTERISTICS ANALYSIS
Student	Mr. Patt Udomluksananon
Student ID.	65016062
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical and Computer Engineering (Multi-Disciplinary Program)
Year	2024
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Norasage Pattanadech Assoc. Prof. Dr. Pittaya Pannil

ABSTRACT

This thesis is a study aimed at insulation condition assessment of the underground cable systems. Underground cable systems are typically exposed to various stresses, leading to insulation degradation over time. Consequently, the dielectric characteristics of the insulation undergo alterations as it deteriorates. This thesis presents the dielectric response measurement techniques, both in the time and frequency domain, to assess the insulation condition of the service-aged underground cable and the underground cable system, which simulated the defects inside the cable joint. The polarization and depolarization current measurement and frequency domain spectroscopy technique are used to measure dielectric response. Besides, high voltage testing is also proposed, including very low frequency testing and partial discharge testing. These two techniques are used for assessing the underground cable system with simulated cable joint. All testing techniques are analyzed to determine the parameters for condition assessment and compared with the underground cable systems, which have good condition. The analysis found that the dielectric response measurements and high voltage testing can assess the condition of underground cable insulation. However, the contribution of diverse testing techniques will provide the most accurate results.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ ข้าพเจ้าขอแสดงความขอบคุณอย่างสุดซึ้งตั้งแต่ รองศาสตราจารย์ ดอกเตอร์ นรเศรษฐ พัฒนเดช สำหรับความช่วยเหลือต่างๆ, การให้คำปรึกษาและคำแนะนำในการแก้ไขปัญหา ตลอดจนความรู้ในเรื่องวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงทั้งพื้นฐานและขั้นสูง นอกจากนี้ ขอขอบคุณสำหรับการมอบโอกาสและประสบการณ์อันมีค่าต่างๆ ที่ให้แก่ข้าพเจ้าตลอดช่วงการศึกษา และขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดอกเตอร์ พิทยา ปานนิล ผู้ซึ่งเป็น อาจารย์ที่ปรึกษาาร่วม สำหรับความช่วยเหลือต่างๆ เช่นเดียวกัน

ขอขอบคุณ คุณสุวิทย์ ลิขิตสุภิน สำหรับการมอบประสบการณ์การทำงานของท่านแก่ข้าพเจ้า และคำแนะนำที่มอบให้ในการทดสอบต่างๆ

ขอขอบคุณ คุณสุทัศน์ สุขสกุลปัญญา สำหรับการสนับสนุนอุปกรณ์ทดสอบ PDC Analyser-1MOD ในส่วนการวัดกระแสโพลาร์ไรเซชันและกระแสตีโพลาร์ไรเซชัน รวมไปถึงประสบการณ์การทดสอบในห้องปฏิบัติการและภาคสนาม

ขอขอบคุณ คุณวรชัย สวัสดิมงคล บริษัท ทีไอเอส เอ็นจิเนียริง แอนด์ เซอร์วิส จำกัด และคุณโชคชัย บุรารักษ์ บริษัท เพาเวอร์ อินทิเกรชั่น จำกัด สำหรับการสนับสนุนอุปกรณ์ทดสอบ Omicron DIRANA ในส่วนการวัดตอบสนองทางไดอิเล็กตริกในโดเมนความถี่

ขอขอบคุณ คุณอุทัย ทาสี บริษัท ดาต้า เอ็นทรี กรุป จำกัด สำหรับการสนับสนุนอุปกรณ์ทดสอบ b2 HVA45TD VLF test set ในส่วนการทดสอบแรงดันสูงที่ความถี่ต่ำมาก และการมอบประสบการณ์การทดสอบสายเคเบิลใต้ดินในภาคสนาม

ขอขอบคุณ คุณสุริยะ มงคลสาธิตพงษ์ บริษัท พีดี โซลูชันส์ จำกัด และ บริษัท แพลน มาร์เก็ต โกลด์ จำกัด สำหรับการสนับสนุนอุปกรณ์ทดสอบดิสชาร์จบางส่วน และประสบการณ์การทดสอบดิสชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงดันสูงอันมีค่า

ทั้งนี้ทั้งนั้น ขอแสดงความขอบคุณเป็นอย่างสูงแต่ รุ่งที่จาก ห้องปฏิบัติการวิเคราะห์ฉนวนและวิศวกรรมไฟฟ้าแรงดันสูง (Dielectric Analytika and High Voltage Engineering Laboratory: DikaLab) ทั้ง นายกิตติพิศ จรรย์านูรัตน์, นายญาณพล กิตติคุณธราดล, นายศิวกร จินเมือง, นายศักรินทร์ ตระธรรม, นายชิษณุพงศ์ ศรีนางแย้ม, นายวิชชากร สวัสดิมงคล และอีกหลายๆท่าน สำหรับคำแนะนำและให้การสนับสนุนตลอดมา และขอขอบคุณ นายกฤษดา ดอกไม้, นายโกมินทร์ ชุมพิบูลย์, และนายวิศนันทน์ โรจนสุนันท์ เพื่อนร่วมชั้นปี สำหรับการช่วยเหลือและสนับสนุนตลอดมา นอกจากนี้ ขอขอบคุณน้องๆ DikaLab สำหรับความช่วยเหลือตลอดทุกการทดสอบ

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณอย่างสุดซึ้งตั้งแต่ ทั้งคุณพ่อ, คุณแม่และพี่สาวที่ให้การสนับสนุนและช่วยเหลือในทุกๆเรื่องตลอดชีวิตของข้าพเจ้า ซึ่งเป็นแรงบันดาลใจให้ข้าพเจ้าตลอดการศึกษา

ปัทย์ อุดมลักษณะานนท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	I
ABSTRACT.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.4 สมมุติฐานของการศึกษา.....	2
1.5 ขั้นตอนการศึกษา.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 โครงสร้างระบบสายเคเบิลใต้ดินแรงดันปานกลาง.....	6
2.1.1 ตัวนำ (Conductor).....	7
2.1.2 ตัวกั้นตัวนำ (Conductor screen).....	8
2.1.3 ฉนวน (Insulation).....	9
2.1.4 ตัวกั้นฉนวน (Insulation screen).....	10
2.1.5 ตัวกั้นโลหะ (Metallic shield).....	11
2.1.6 เปลือกหุ้มนอก (Outer sheath).....	11
2.1.7 ส่วนประกอบอื่นๆ (Others).....	12
2.2 การเสื่อมสภาพและกลไกความล้มเหลวในระบบฉนวนสายเคเบิลใต้ดิน.....	12
2.3 การตอบสนองทางไดอิเล็กตริก.....	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1	ทฤษฎีการตอบสนองทางไดอิเล็กตริกในโดเมนเวลา	15
2.3.2	ทฤษฎีการตอบสนองทางไดอิเล็กตริกในโดเมนความถี่.....	19
2.3.3	การวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน (Polarization and Depolarization Current (PDC) Measurement).....	20
2.3.4	การวัดสเปกโตรสโกปีในโดเมนความถี่ (Frequency Domain Spectroscopy, FDS technique).....	21
2.4	การทดสอบแรงดันสูงที่ความถี่ต่ำมาก (Very Low Frequency Testing, VLF Testing)	22
2.5	การทดสอบดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge Test, PD Test).....	24
2.5.1	ลักษณะการเกิดดิสชาร์จบางส่วน	25
2.5.2	วงจรสมมูลของดิสชาร์จบางส่วน	27
2.5.3	ลักษณะการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในระบบสายเคเบิลใต้ดิน	28
บทที่ 3	การออกแบบการทดลองและการทดสอบ.....	29
3.1	การเตรียมระบบสายเคเบิลใต้ดินพิกัด 22 กิโลโวลต์ เพื่อใช้ในการทดสอบ	29
3.1.1	ระบบสายเคเบิลใต้ดินพิกัด 22 กิโลโวลต์ที่มีเฉพาะส่วนของสายเคเบิลใต้ดิน	29
3.1.2	ระบบสายเคเบิลใต้ดินพิกัด 22 กิโลโวลต์ที่มีทั้งส่วนของสายเคเบิลใต้ดินและอุปกรณ์เสริม.....	31
3.2	การทดสอบเพื่อวัดผลตอบสนองทางไดอิเล็กตริกในโดเมนเวลาสำหรับระบบสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูง.....	32
3.2.1	การทดสอบ PDC measurement กับระบบสายเคเบิลใต้ดินที่ปกกแล้วยังคงส่วนประกอบทั้งหมดไว้.....	33
3.2.2	การทดสอบ PDC measurement กับระบบสายเคเบิลใต้ดินที่ปกกโดยนำส่วนประกอบอย่างอื่นออกทั้งหมดเหลือเพียงชั้นตัวกั้นฉนวนเป็นชั้นนอกสุด	34
3.2.3	การทดสอบ PDC measurement กับระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีการจำลองข้อบกพร่องในข้อต่อสายเคเบิลใต้ดิน.....	35

3.3 การทดสอบเพื่อวัดผลตอบสนองทางไดอิเล็กตริกในโดเมนความถี่สำหรับระบบสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูง	36
3.4 การทดสอบแรงดันสูงที่ความถี่ต่ำมากสำหรับระบบสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูง.....	37
3.5 การทดสอบการวัดดิสชาร์จบางส่วนสำหรับระบบสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูง	39
3.6 สรุปการทดสอบที่ศึกษาในวิทยานิพนธ์	40
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง	42
4.1 กรณีศึกษาที่ 1 ระบบสายเคเบิลใต้ดินพิกัด 22 กิโลโวลต์ที่มีเฉพาะส่วนของสายเคเบิลใต้ดิน.....	42
4.1.1 ระบบสายเคเบิลใต้ดินที่ถูกปกปิดโดยคองส่วนประกอบทั้งหมดไว้	42
4.1.2 ระบบสายเคเบิลใต้ดินที่ถูกปกปิดโดยนำส่วนประกอบอย่างอื่นออกทั้งหมดเหลือเพียงชั้นตัวกั้นฉนวนเป็นชั้นนอกสุด	44
4.2 กรณีศึกษาที่ 2 ระบบสายเคเบิลใต้ดินพิกัด 22 กิโลโวลต์ที่มีทั้งสายเคเบิลใต้ดินและอุปกรณ์เสริม	45
4.2.1 เทคนิคการวัดสเปกโตรสโคปีในโดเมนความถี่ (Frequency Domain Spectroscopy, FDS technique).....	46
4.2.2 เทคนิคการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสตีโพลาริเซชัน (PDC measurement).....	48
4.2.3 การทดสอบแรงดันสูงที่ความถี่ต่ำมาก (Very Low Frequency Testing, VLF Testing)	51
4.2.4 การทดสอบดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge (PD) Test).....	54
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	57
5.1 สรุปผล.....	57
5.1.1 กรณีศึกษาที่ 1 ระบบสายเคเบิลใต้ดินพิกัด 22 กิโลโวลต์ที่มีเฉพาะส่วนของสายเคเบิลใต้ดิน	57
5.1.2 กรณีศึกษาที่ 2 ระบบสายเคเบิลใต้ดินพิกัด 22 กิโลโวลต์ที่มีทั้งสายเคเบิลใต้ดินและอุปกรณ์เสริม	58
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	60

เอกสารอ้างอิง	61
ภาคผนวก.....	66
บทความวิชาการ	67
ประวัติผู้เขียน.....	89



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนการศึกษาในปีการศึกษา 2565.....	3
ตารางที่ 1.1 (ต่อ) ขั้นตอนการศึกษาในปีการศึกษา 2565.....	4
ตารางที่ 1.2 ขั้นตอนการศึกษาในปีการศึกษา 2566.....	5
ตารางที่ 2.1 ความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุเหล็กชนิดต่างๆ ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส [5].....	8
ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพระหว่างตัวนำทองแดงและตัวนำอะลูมิเนียม [7]8	8
ตารางที่ 2.3 การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุพอลิเอทิลีนก่อนและหลังการเชื่อม ขวาง [13].....	10
ตารางที่ 2.4 ตัวอย่างลักษณะการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในระบบสายเคเบิลใต้ดิน [36].....	29
ตารางที่ 3.1 ระยะเวลาการปกสายเคเบิลใต้ดิน.....	31
ตารางที่ 3.2 สรุปการทดสอบที่ใช้ศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของระบบสายเคเบิลใต้ดิน 22 กิโลโวลต์	41
ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบ PDC measurement.....	51
ตารางที่ 4.2 เกณฑ์สำหรับการวิเคราะห์ผลการทดสอบ VLF-TD ตามมาตรฐาน IEEE Std. 400.2- 2013 [30].....	52
ตารางที่ 4.3 พารามิเตอร์ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบ VLF ที่ความถี่ 0.1 เฮิรตซ์.....	53

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 ตัวอย่างภาพตัดขวางของสายเคเบิลระดับแรงดันปานกลางประเภท (ก) แกนเดี่ยว (Single core) และ (ข) สามแกน (Three Cores).....	6
รูปที่ 2.2 ตัวอย่างส่วนประกอบของสายเคเบิลใต้ดินระดับแรงดันปานกลาง	6
รูปที่ 2.3 ลักษณะของตัวนำที่ใช้ในสายเคเบิลใต้ดิน	7
รูปที่ 2.4 กระบวนการเชื่อมขวางด้วยสารประกอบ DCP ของพอลิเอทิลีนและผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้ [12].....	9
รูปที่ 2.5 ผลการทดสอบความคงทนต่อเบรกดาว์นระหว่างสายเคเบิลใต้ดินที่ผลิตด้วยกระบวนการ Triple extrusion และ Double extrusion ที่พันเทปกึ่งตัวนำที่ผสมวัสดุแกรไฟต์ [15]	11
รูปที่ 2.6 สิ่งแปลกปลอมในฉนวนของสายเคเบิลใต้ดิน [21]	13
รูปที่ 2.7 ตัวอย่างข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นได้ในอุปกรณ์เสริม [21].....	14
รูปที่ 2.8 ตัวอย่างสถิติการเกิดความล้มเหลวในระบบสายเคเบิลใต้ดินระดับแรงดันปานกลาง (ก) แบ่งตามประเภทส่วนประกอบของระบบสายเคเบิล และ (ข) แบ่งตามสาเหตุที่ทำให้เกิดความล้มเหลว.....	14
รูปที่ 2.9 การเกิดโพลาริเซชันในวัสดุไดอิเล็กตริกที่เกิดขึ้นภายใต้สนามไฟฟ้า $E(t) = E_0$	15
รูปที่ 2.10 หลักการการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน PDC measurement ...	17
รูปที่ 2.11 วงจรสมมูลของการวัด PDC	20
รูปที่ 2.12 วงจรสมมูลของการวัด FDS.....	22
รูปที่ 2.13 การประเมินสภาพของระบบสายเคเบิลใต้ดินในแต่ละช่วงความถี่ของการวัด FDS [29] .	22
รูปที่ 2.14 รูปคลื่นสำหรับการทดสอบ VLF	23
รูปที่ 2.15 ลักษณะการเกิดดิสชาร์จ (ก) โครนาดิสชาร์จ, (ข) ดิสชาร์จบนผิว และ (ค) ดิสชาร์จภายใน [34].....	25
รูปที่ 2.16 ลักษณะการเกิดโครนาดิสชาร์จ (ก) ปลายแหลมอยู่ที่ขั้วบวก และ (ข) ปลายแหลมอยู่ที่ขั้วลบ [35].....	26
รูปที่ 2.17 ลักษณะการเกิดดิสชาร์จที่ผิว [35]	26
รูปที่ 2.18 ลักษณะการเกิดดิสชาร์จภายใน (ก) โพรงอากาศอยู่ใกล้ขั้วบวก และ (ข) โพรงอากาศอยู่ใกล้ขั้วลบ [35].....	27

รูปที่ 2.19 วงจรสมมูลการดิสซาร์จบางส่วน (ก) แบบจำลองดิสซาร์จภายในโพรงอากาศในเนื้อฉนวน และ (ข) วงจรสมมูลการเกิดดิสซาร์จบางส่วนในโพรงอากาศ [34].....	28
รูปที่ 3.1 ตัวอย่างของต้นไม้ฟ้าที่พบในสายเคเบิลใต้ดินที่ใช้ทดสอบ [37].....	29
รูปที่ 3.2 การเปลี่ยนแปลงของส่วนประกอบในสายเคเบิลใต้ดินที่ใช้ในการทดสอบอย่างชัดเจน เช่น (ก) สีของเส้นลวดทองแดงสำหรับต่อลงดินมีการเปลี่ยนสี, (ข) รอยแตกของเทปทองแดง, (ค) พบสารประกอบประเภทคอปเปอร์ไค้ชั้นเทปทองแดงและ (ง) พบรอยแตกบนชั้นซีลด์ฉนวน	30
รูปที่ 3.3 การปกอสายเคเบิลใต้ดินเพื่อใช้ในการทดสอบ [37] (ก) การปกอสายเคเบิลที่ยังคง ส่วนประกอบทั้งหมดไว้ (รูปแบบที่ 1.1) และ (ข) การปกอสายเคเบิลที่เหลือน้ำซีลด์ฉนวนเป็น ชั้นนอกสุด (รูปแบบที่ 1.2).....	30
รูปที่ 3.4 การเตรียมระบบสายเคเบิลใต้ดินสำหรับการทดสอบรูปแบบที่ 2 โดยมีการจำลอง ข้อบกพร่องดังนี้ [38, 39] (ก) จำลองรอยบากความลึก 3 มิลลิเมตรที่เนื้อฉนวน XLPE, (ข) การทำผกเหล็กบนผิวของฉนวน XLPE, (ค) การทำผกทองแดงบนผิวของฉนวน XLPE และ (ง) ระบบสายเคเบิลใต้ดินที่ข้อต่อสายเคเบิลมีความสมบูรณ์	31
รูปที่ 3.5 เครื่องมือทดสอบ PDC-ANALYSER-1MOD	32
รูปที่ 3.6 การจัดวงจรทดสอบ PDC measurement กับระบบสายเคเบิลใต้ดินที่ปกแล้วยังคง ส่วนประกอบทั้งหมดไว้ (ก) แผนภาพวงจรการทดสอบในหัวข้อที่ 3.2.1 [37] และ (ข) การจัด วงจรการทดสอบจริง	34
รูปที่ 3.7 การจัดวงจรทดสอบ PDC measurement กับระบบสายเคเบิลใต้ดินที่ปกโดยนำ ส่วนประกอบอย่างอื่นออกทั้งหมดเหลือเพียงชั้นซีลด์ฉนวนเป็นชั้นนอกสุด (ก) แผนภาพวงจร การทดสอบในหัวข้อที่ 3.2.2 [37] และ (ข) การจัดวงจรการทดสอบจริง.....	35
รูปที่ 3.8 การจัดวงจรทดสอบ PDC measurement กับระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีการจำลอง ข้อบกพร่องในข้อต่อสายเคเบิลใต้ดิน [39] (ก) แผนภาพวงจรการทดสอบในหัวข้อที่ 3.2.3, (ข) การจัดวงจรการทดสอบจริง และ (ค) การเชื่อมต่อสายจ่ายแรงดันไฟฟ้าและสายวัด กระแสไฟฟ้าที่บริเวณหัวต่อสายเคเบิล	36
รูปที่ 3.9 เครื่องมือทดสอบ Omicron DIRANA	37
รูปที่ 3.10 การจัดวงจรทดสอบ FDS measurement กับระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีการจำลอง ข้อบกพร่องในข้อต่อสายเคเบิลใต้ดิน (ก) แผนภาพวงจรการทดสอบในหัวข้อที่ 3.3 [39], (ข)	

การจัดวงจรการทดสอบจริง และ (ค) การเชื่อมต่อสายจ่ายแรงดันไฟฟ้าและสายวัด กระแสไฟฟ้าที่บริเวณหัวต่อสายเคเบิล	37
รูปที่ 3.11 เครื่องมือทดสอบ b2 HVA45TD สำหรับการทดสอบแรงดันสูงที่ความถี่ต่ำมาก.....	38
รูปที่ 3.12 การจัดวงจรทดสอบ VLF testing กับระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีการจำลองข้อบกพร่องใน ข้อต่อสายเคเบิลใต้ดิน (ก) แผนภาพวงจรการทดสอบในหัวข้อที่ 3.4 [38], (ข) การจัดวงจร การทดสอบจริง และ (ค) การเชื่อมต่อสายจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่บริเวณหัวต่อสายเคเบิลและการ ต่อลงดินของสายเคเบิลใต้ดิน	38
รูปที่ 3.13 วงจรการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนสำหรับระบบสายเคเบิลใต้ดิน (ก) แผนผังวงจรการ ทดสอบดิสชาร์จบางส่วน และ (ข) รูปวงจรทดสอบดิสชาร์จบางส่วนจริง.....	39
รูปที่ 3.14 สัญญาณรบกวนพื้นหลัง (Background noise) ขณะทำการทดสอบ	40
รูปที่ 4.1 สายเคเบิลใต้ดินสำหรับการทดสอบที่ผ่านการปกแล้วและส่วนประกอบทั้งหมดยังคงอยู่	42
รูปที่ 4.2 ผลการทดสอบ PDC measurement ของสายเคเบิลใต้ดินที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว (เส้นกราฟสีแดง) เปรียบเทียบกับสายเคเบิลใต้ดินที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน (เส้นกราฟสีน้ำเงิน) ในกรณีศึกษาที่ 4.1.1 [37]	43
รูปที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ตัวประกอบกำลังการสูญเสียของสายเคเบิลใต้ดินที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว (เส้นกราฟสีแดง) เปรียบเทียบกับสายเคเบิลใต้ดินที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน (เส้นกราฟสีน้ำเงิน) ในกรณีศึกษาที่ 4.1.1 [37]	43
รูปที่ 4.4 สายเคเบิลใต้ดินสำหรับการทดสอบที่ผ่านการปกแล้วโดยนำส่วนประกอบอื่นๆออกโดยมี ชั้นฉนวนเป็นชั้นนอกสุด	44
รูปที่ 4.5 ผลการทดสอบ PDC measurement ของสายเคเบิลใต้ดินที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว (เส้นกราฟสีแดง) เปรียบเทียบกับสายเคเบิลใต้ดินที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน (เส้นกราฟสีน้ำเงิน) ในกรณีศึกษาที่ 4.1.2 [37]	45
รูปที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์ตัวประกอบกำลังการสูญเสียของสายเคเบิลใต้ดินที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว (เส้นกราฟสีแดง) เปรียบเทียบกับสายเคเบิลใต้ดินที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน (เส้นกราฟสีน้ำเงิน) ในกรณีศึกษาที่ 4.1.2 [37]	45
รูปที่ 4.7 ตัวอย่างระบบสายเคเบิลใต้ดินพิกัด 22 กิโลโวลต์สำหรับกรณีศึกษาที่ 2	46

รูปที่ 4.8	ตัวประกอบกำลังการสูญเสียที่ได้จากเทคนิคการวัด FDS ของระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีการจำลองข้อบกพร่องในข้อต่อเคเบิลและระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีความสมบูรณ์ [39].....	47
รูปที่ 4.9	ความจุไฟฟ้าเชิงซ้อนที่ได้จากเทคนิคการวัด FDS [39] โดยแบ่งเป็น (ก) กราฟเปรียบเทียบความจุไฟฟ้าส่วนจริงของระบบสายเคเบิลใต้ดิน และ (ข) กราฟเปรียบเทียบความจุไฟฟ้าส่วนจินตภาพของระบบสายเคเบิลใต้ดิน.....	48
รูปที่ 4.10	กราฟเปรียบเทียบกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันของระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อบกพร่องในข้อต่อสายเคเบิลและระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีความสมบูรณ์ [38]	49
รูปที่ 4.11	กราฟเปรียบเทียบเฉพาะ (ก) กระแสโพลาริเซชัน และ (ข) กระแสดีโพลาริเซชัน	50
รูปที่ 4.12	กราฟเปรียบเทียบพารามิเตอร์ความนำไฟฟ้าของฉนวนในระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อบกพร่องในข้อต่อสายเคเบิลและระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีความสมบูรณ์ [38]	50
รูปที่ 4.13	กราฟเปรียบเทียบตัวประกอบกำลังการสูญเสียของระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อบกพร่องในข้อต่อสายเคเบิลและระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีความสมบูรณ์ [38].....	50
รูปที่ 4.14	ตัวอย่างแนวโน้มของผลการวัด VLF-TD ที่ระดับแรงดันเดียวกันซึ่งแสดงความไม่เป็นเส้นตรงของข้อมูล (Non-linear trend).....	53
รูปที่ 4.15	กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย TD ที่ความถี่ 0.1 เฮิร์ตซ์ ในแต่ละระดับแรงดันทดสอบของระบบสายเคเบิลใต้ดินทั้งสามกรณี.....	54
รูปที่ 4.16	ระดับสัญญาณรบกวนพื้นหลังในการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนกับระบบสายเคเบิลใต้ดิน	55
รูปที่ 4.17	รูปแบบ PRPD ของระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีความสมบูรณ์ ณ ระดับแรงดันใช้งานปกติ	55
รูปที่ 4.18	รูปแบบ PRPD ของระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อบกพร่องจากการสร้างรอยบากในเนื้อฉนวน XLPE ณ ระดับแรงดันใช้งานปกติ.....	55
รูปที่ 4.19	รูปแบบ PRPD ของระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อบกพร่องจากการทาผงทองแดงบนผิวฉนวน XLPE ณ ระดับแรงดันใช้งานปกติ.....	56

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานที่ได้รับความนิยมและมีความสำคัญทั้งการใช้งานในชีวิตประจำวัน และการผลิตเนื่องจากมีต้นทุนที่สมเหตุสมผลและมีการส่งจ่ายได้ง่ายและมีประสิทธิภาพ [1] ระบบไฟฟ้าประกอบด้วยระบบการผลิตไฟฟ้า, ระบบส่งและจำหน่ายไฟฟ้า, และระบบสำหรับผู้บริโภคเป็นหลัก [2] สำหรับระบบไฟฟ้าแรงสูงจะถูกใช้เป็นอย่างมากในระบบส่งจ่ายและจำหน่ายแทนระบบแรงดันต่ำหรือแรงดันปานกลาง เนื่องจาก ระบบแรงดันสูงสามารถส่งได้ในระยะทางที่ไกลกว่าและส่งพลังงานไฟฟ้าได้มากกว่า และยังมีแรงดันตกและกำลังสูญเสียที่น้อยกว่าในสายส่งไฟฟ้า [2] อุปกรณ์ไฟฟ้าที่สำคัญชนิดหนึ่งสำหรับการส่งจ่ายหรือจำหน่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับผู้ใช้งานและผู้บริโภคต่างๆ คือ สายเคเบิลแรงดันสูง ซึ่งก่อนหน้านี้ พลังงานไฟฟ้าจะถูกส่งจ่ายด้วยระบบสายเคเบิลเหนือหัว (Overhead line system) เป็นหลัก แต่ในปัจจุบัน เทคโนโลยีการฉนวนมีการพัฒนามากขึ้น ทำให้ระบบสายเคเบิลใต้ดิน (Underground cable system) ได้รับความนิยมมาใช้งานทดแทนระบบสายเคเบิลเหนือหัวมากขึ้น ซึ่งข้อดีของระบบสายเคเบิลใต้ดินเมื่อเปรียบเทียบกับระบบสายเคเบิลเหนือหัว คือ ระบบสายเคเบิลใต้ดินจะมีความน่าเชื่อถือและเสถียรภาพสูงกว่า เนื่องมาจากการไม่ถูกรบกวนจากต้นไม้หรือสิ่งก่อสร้างต่างๆ ที่มีโอกาสกระทบต่อสายเคเบิลเหนือหัวและนำไปสู่ความล้มเหลว, การติดตั้งในพื้นที่ที่จำกัดหรือพื้นที่พิเศษ เช่น สนามบิน เนื่องจากมาตรการด้านความปลอดภัย หรือ การส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าข้ามทะเล ทางเลือกในการเลือกใช้สายเคเบิลใต้น้ำ (Submarine cable) จะมีความเหมาะสมมากกว่า และข้อจำกัดด้านสิ่งแวดล้อมในเรื่องของทัศนียภาพของประชากรในเมืองที่ระบบสายเคเบิลเหนือหัวจะบดบังทัศนียภาพมากกว่าระบบสายเคเบิลใต้ดิน รวมไปถึงการคำนึงถึงผลของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าเนื่องจากสายเคเบิลเหนือหัว เป็นต้น [3]

สำหรับระบบสายเคเบิลใต้ดินแรงสูงในปัจจุบันวัสดุชนิด ครอสลิงกด์พอลิเอทิลีน (Crosslinked polyethylene : XLPE) ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในปัจจุบัน เนื่องจากคุณสมบัติต่างๆ ที่ถูกปรับปรุงจากกระบวนการเชื่อมขวาง (Crosslinking) ซึ่งสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE นี้ จะต้องพบเจอกับความเครียดขณะใช้งานประกอบด้วย ความเครียดทางความร้อน (Thermal stress), ความเครียดทางไฟฟ้า (Electrical stress), ความเครียดทางกล (Mechanical stress) และปัจจัยเนื่องจากสภาพแวดล้อม โดยความเครียดนี้จะเรียกโดยรวมว่า “TEAM stress” โดยจะส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของฉนวนสายเคเบิลใต้ดิน และท้ายที่สุดทำให้เกิดความล้มเหลว (Failure) ในระบบไฟฟ้า ดังนั้น เพื่อความน่าเชื่อถือและการทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ การประเมินสภาพฉนวนของสายเคเบิลใต้ดินจึงเป็นสิ่งสำคัญเพื่อป้องกันการเกิดความล้มเหลวที่ไม่ได้คาดหวังขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงเล็งเห็นถึงความสำคัญของการประเมินสภาพฉนวนของสายเคเบิลใต้ดิน เพื่อทราบถึงคุณสมบัติของฉนวนในสายเคเบิลใต้ดิน โดยได้นำเสนอเทคนิคการตรวจสอบคุณลักษณะ ด้วยการวัดผลตอบสนองทางไดอิเล็กตริกของฉนวนสายเคเบิลใต้ดิน ประกอบด้วย เทคนิคการวัดกระแสโพลาไรเซชันและกระแสดีโพลาไรเซชัน (Polarization and Depolarization Current (PDC) measurement) ซึ่งเป็นการวัดผลตอบสนองทางไดอิเล็กตริกในโดเมนเวลาและเทคนิคการวัดสเปกโตรสโคปีในโดเมนความถี่ (Frequency Domain Spectroscopy : FDS technique) ซึ่งเป็นการวัดผลตอบสนองทางไดอิเล็กตริกในโดเมนความถี่ และเทคนิคการทดสอบด้วยแรงดันสูง ประกอบด้วย การทดสอบแรงดันสูงที่ความถี่ต่ำมาก (Very Low Frequency (VLF) testing) และการทดสอบดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge (PD) test) เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาและนำไปประยุกต์ใช้ในภาคสนามเพื่อประเมินสภาพของระบบฉนวนสายเคเบิลใต้ดินต่อไป

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาระบบฉนวนของระบบสายเคเบิลใต้ดิน
2. เพื่อศึกษากระบวนการเสื่อมสภาพและกลไกความล้มเหลวในระบบสายเคเบิลใต้ดิน
3. เพื่อศึกษาการประยุกต์ใช้การทดสอบเพื่อวัดผลตอบสนองทางไดอิเล็กตริกทั้งในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ของฉนวนในระบบสายเคเบิลใต้ดิน
4. เพื่อศึกษาการทดสอบด้วยแรงดันสูงที่ใช้ในการทดสอบระบบสายเคเบิลใต้ดิน
5. เพื่อศึกษาคุณลักษณะทางไฟฟ้าและเพื่อประเมินสภาพของฉนวนในระบบสายเคเบิลใต้ดิน โดยใช้การวัดผลตอบสนองทางไดอิเล็กตริกและการทดสอบด้วยแรงดันสูง

1.3 ขอบเขตการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาคุณลักษณะทางไฟฟ้าและประเมินสภาพของฉนวนในระบบสายเคเบิลใต้ดินแรงดันปานกลาง XLPE พิกัดแรงดัน 22 กิโลโวลต์ ด้วยวิธีการวัดผลตอบสนองทางไดอิเล็กตริกทั้งในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ รวมถึงการทดสอบระบบสายเคเบิลใต้ดินด้วยแรงดันสูง

1.4 สมมุติฐานของการศึกษา

การทดสอบโดยการวัดผลตอบสนองทางไดอิเล็กตริกทั้งในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่จะสามารถเป็นทางเลือกเพื่อประเมินคุณสมบัติของฉนวนไฟฟ้าในระบบสายเคเบิลใต้ดิน อีกทั้งยังช่วยประเมินสภาพของฉนวนในระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อบกพร่องภายในได้ นอกจากนี้ การทดสอบด้วยแรงดันสูงจะยังช่วยส่งเสริมความแม่นยำในการประเมินสภาพของฉนวนในระบบสายเคเบิลใต้ดินนี้อีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ขั้นตอนการศึกษา

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนการศึกษาในปีการศึกษา 2565

การดำเนินงาน	ภาคการศึกษาที่ 1, ปีการศึกษา 2565					ภาคการศึกษาที่ 2, ปีการศึกษา 2565				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1. ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับระบบฉนวนในระบบสายเคเบิลใต้ดิน										
2. ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับการวัดผลตอบสนองทางไดอิเล็กตริกในโดเมนเวลา										
3. ทดสอบสายเคเบิลใต้ดินด้วยเทคนิคการวัดผลตอบสนองทางไดอิเล็กตริกในโดเมนเวลา (PDC measurement)										
4. วิเคราะห์ผลการทดสอบ										
6. เข้าร่วมและนำเสนอผลงานในงานประชุมวิชาการ CMD 2022 ณ Kitakyushu, ประเทศญี่ปุ่น										
7. ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับการวัดผลตอบสนองทางไดอิเล็กตริกในโดเมนความถี่ (FDS technique)										
8. ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับการทดสอบด้วยแรงดันสูงที่ความถี่ต่ำมาก (VLF testing)										

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1.1 (ต่อ) ขั้นตอนการศึกษาในปีการศึกษา 2565

การดำเนินงาน	ภาคการศึกษาที่ 1, ปีการศึกษา 2565					ภาคการศึกษาที่ 2, ปีการศึกษา 2565				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
9. ทดสอบระบบสายเคเบิลใต้ดินด้วยเทคนิคการวัดผลตอบสนองทางไดอิเล็กตริกในโดเมนเวลา										
10. ทดสอบระบบสายเคเบิลใต้ดินด้วยการทดสอบด้วยแรงดันสูงความถี่ต่ำมาก (VLF testing)										
11. วิเคราะห์ผลการทดสอบระบบสายเคเบิลใต้ดินจากเทคนิคการวัดผลตอบสนองทางไดอิเล็กตริกในโดเมนเวลา										
12. วิเคราะห์ผลการทดสอบระบบสายเคเบิลใต้ดินจากการทดสอบด้วยแรงดันสูงความถี่ต่ำมาก (VLF testing)										
14. ทดลองระบบสายเคเบิลใต้ดินด้วยเทคนิคการวัดผลตอบสนองทางไดอิเล็กตริกในโดเมนความถี่										
15. วิเคราะห์ผลการทดสอบระบบสายเคเบิลใต้ดินจากเทคนิคการวัดผลตอบสนองทางไดอิเล็กตริกในโดเมนความถี่										

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1.2 ขั้นตอนการศึกษาในปีการศึกษา 2566

การดำเนินงาน	ภาคการศึกษาที่ 1, ปีการศึกษา 2566				ภาคการศึกษาที่ 2, ปีการศึกษา 2566						
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.
1. เข้าร่วมและ นำเสนอผลงาน ในงานประชุม วิชาการ ISH 2023 ณ เมือง Glasgow, สหราชอาณาจักร											
2. เข้าร่วมและ นำเสนอผลงาน ในงานประชุม วิชาการ ISEIM 2023 ณ เมือง Matsue, ประเทศญี่ปุ่น											
3. ศึกษาทฤษฎี เกี่ยวกับการ ทดสอบดิสซาร์จ บางส่วน											
4. ทดสอบระบบ สายเคเบิลใต้ดิน ด้วยเทคนิคการ ทดสอบดิสซาร์จ บางส่วน											
5. วิเคราะห์ผล การทดสอบ											
6. เตรียมข้อมูล และจัดทำรูปเล่ม วิทยานิพนธ์											

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

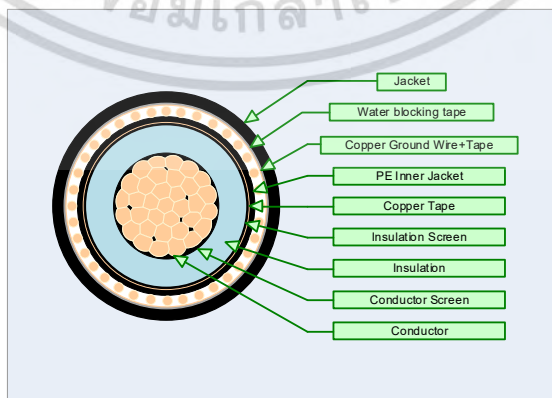
ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับโครงสร้างระบบสายเคเบิลใต้ดินในระดับแรงดันปานกลาง นอกจากนี้ จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับการวัดการตอบสนองทางไดอิเล็กตริกทั้งในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ รวมไปถึงทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับการทดสอบแรงดันสูงที่ความถี่ต่ำมาก และการทดสอบดิสชาร์จบางส่วน

2.1 โครงสร้างระบบสายเคเบิลใต้ดินแรงดันปานกลาง

ระบบสายเคเบิลใต้ดินระดับแรงดันปานกลางตามที่มาตราฐาน IEC 60502-2:2014 [4] กำหนดซึ่งใช้งานในระบบไฟฟ้าปัจจุบันมีทั้งสายเคเบิลที่เป็นแกนเดี่ยว (Single core) และสายเคเบิลที่มีสามแกน (Three cores) ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.1 (ก) และ (ข) ตามลำดับ โดยส่วนประกอบหลักของสายเคเบิลใต้ดินระดับแรงดันปานกลาง ซึ่งได้แสดงดังตัวอย่างในรูปที่ 2.2 ประกอบด้วยดังนี้



รูปที่ 2.1 ตัวอย่างภาพตัดขวางของสายเคเบิลระดับแรงดันปานกลางประเภท (ก) แกนเดี่ยว (Single core) และ (ข) สามแกน (Three cores)

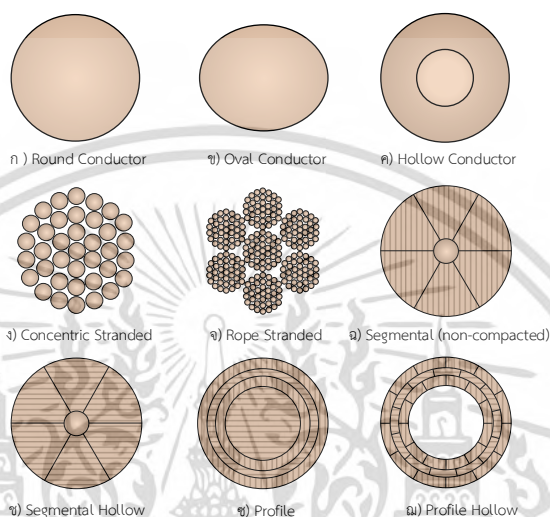


รูปที่ 2.2 ตัวอย่างส่วนประกอบของสายเคเบิลใต้ดินระดับแรงดันปานกลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1 ตัวนำ (Conductor)

ลักษณะของตัวนำที่ใช้ในสายเคเบิลใต้ดินมีหลากหลายลักษณะตามรูปที่ 2.3 ซึ่งส่วนใหญ่แล้วตัวนำที่ใช้งานโดยทั่วไปในสายเคเบิลใต้ดินจะเป็นในรูปแบบ ตัวนำตีเกลียวแบบมีศูนย์กลาง (Concentric stranded) [5] ที่มีการตีเกลียวในลักษณะไขว้ในแต่ละชั้นซึ่งมีข้อดีประการหนึ่งคือ ทำให้ตัวนำสายเคเบิลสามารถทนต่อการดัดงอซ้ำๆ ได้ [6]



รูปที่ 2.3 ลักษณะของตัวนำที่ใช้ในสายเคเบิลใต้ดิน

วัสดุสำหรับผลิตตัวนำสายเคเบิลใต้ดินที่ใช้งานในปัจจุบันเมื่อได้คำนึงถึงเรื่องความต้านทานไฟฟ้าและราคาวัสดุแล้ว นั่นคือ ทองแดงและอะลูมิเนียม โดยตารางที่ 2.1 แสดงความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุเหล็กชนิดต่างๆ ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างตัวนำที่เป็นทองแดงจะมีความนำไฟฟ้ามากกว่าตัวนำที่เป็นอะลูมิเนียมอยู่ที่ประมาณ 1.6 เท่า ดังนั้น หากต้องการให้ตัวนำสามารถนำกระแสไฟฟ้าได้เท่ากัน จะต้องออกแบบตัวนำอะลูมิเนียมให้มีขนาดใหญ่กว่าการออกแบบตัวนำทองแดง, น้ำหนักของตัวนำอะลูมิเนียมที่เบากว่าตัวนำทองแดง 48 เปอร์เซ็นต์ที่ความยาวตัวนำเท่ากัน ซึ่งถือเป็นข้อดีของตัวนำอะลูมิเนียม, สำหรับในกรณีที่สายเคเบิลเกิดการลัดวงจรตัวนำที่เป็นทองแดงจะสามารถรองรับกระแสลัดวงจรได้มากกว่า [5] และในตารางที่ 2.2 จะแสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพระหว่างตัวนำทองแดงและตัวนำอะลูมิเนียม

ตารางที่ 2.1 ความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุเหล็กชนิดต่างๆ ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส [5]

วัสดุเหล็ก	ความต้านทานไฟฟ้า (ohm-mm ² /m x 10 ⁻⁸)
เงิน (Silver)	1.629
ทองแดงชนิดอบอ่อน (Copper, annealed)	1.724
ทองแดงชนิดแข็ง (Copper, hard drawn)	1.777
ทองแดงชุบตีบุก (Copper, tinned)	1.741 – 1.814
อะลูมิเนียมชนิดนุ่ม (Aluminum, soft, 61.2% cond.)	2.803
อะลูมิเนียมชนิดแข็ง (Aluminum, ½ hard to full hard)	2.828
โซเดียม (Sodium)	4.3
นิกเกิล (Nickel)	7.8

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพระหว่างตัวนำทองแดงและตัวนำอะลูมิเนียม [7]

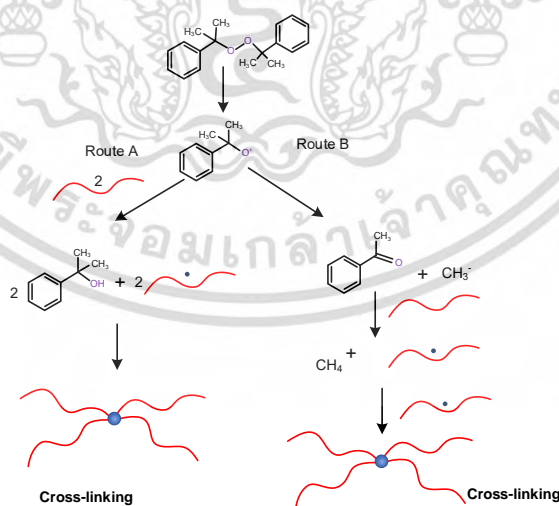
คุณสมบัติ	หน่วย	ทองแดง	อะลูมิเนียม
ความนำไฟฟ้า	%IACS	100	61
ความต้านทานไฟฟ้าที่ 20 องศาเซลเซียส	ohm-mm ² /m	1.724 x 10 ⁻⁸	2.803 x 10 ⁻⁸
สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน	1/°C	1.70 x 10 ⁻⁵	2.30 x 10 ⁻⁵
จุดหลอมเหลว	°C	1083	659
ความนำความร้อน	W/cm-°C	3.8	2.4
ความหนาแน่นที่ 20 องศาเซลเซียส	g/cm ³	8.89	2.7

2.1.2 ตัวกั้นตัวนำ (Conductor screen)

ตัวกั้นตัวนำเป็นชั้นที่อยู่ถัดจากตัวนำของสายเคเบิลใต้ดิน โดยทำจากวัสดุที่มีคุณสมบัติกึ่งนำไฟฟ้า (Semi-conductive material) โดยส่วนใหญ่จะทำจากวัสดุเดียวกับชั้นฉนวนและมีการเติมอนุภาคคาร์บอนแบล็ค (Carbon black) [8, 9] และมาตรฐาน IEC 60502-2:2014 ได้กำหนดเกณฑ์ความต้านทานของชั้นตัวกั้นตัวนำไว้ไม่เกิน 1,000 Ω.m [4] ตัวกั้นตัวนำมีหน้าที่ทำให้เกิดความเรียบบริเวณขอบนอกของชั้นตัวนำเนื่องจากตัวนำที่ตีเกลียวจะมีความขรุขระอยู่ เพื่อไม่ให้ชั้นฉนวนเกิดความเสียหายและยังทำหน้าที่ลดความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณช่องว่างรอยต่อกับชั้นฉนวน ซึ่งในปัจจุบันในกระบวนการผลิตสายเคเบิล ชั้นตัวกั้นตัวนำจะถูกอัดรีด (Extrude) ลงบนตัวนำเลยก่อนจะอัดรีดชั้นฉนวนเป็นขั้นตอนถัดไป

2.1.3 ฉนวน (Insulation)

องค์ประกอบสำคัญของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงดันสูงทุกชนิด คือ ระบบฉนวน ซึ่งจะบ่งบอกถึงความน่าเชื่อถือของอุปกรณ์นั้นๆ เพราะหน้าที่ของฉนวนคือ การรองรับแรงดันไฟฟ้าใช้งานของอุปกรณ์ไฟฟ้าและคั่นระหว่างตัวนำและส่วนที่ต่อลงดินไม่ให้เกิดการลัดวงจร สำหรับระบบสายเคเบิลใต้ดินจะมีระบบฉนวนหลากหลายรูปแบบ เช่น ระบบเคเบิลกระดาษฉนวนน้ำมัน (Self Containing Fluid-filled (SCFF) cable หรือ High Pressure Fluid-filled (HPFF) cable), ระบบเคเบิลฉนวนกระดาษครอบคลุมด้วยตะกั่ว (Paper Insulated Lead Cover (PILC) cable), ระบบเคเบิลฉนวนพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene : LDPE), และ ระบบเคเบิลฉนวนวัสดุประเภทยาง (Ethylene propylene rubber (EPR) cable) โดยในปี 1963 Alfred R. Gilbert และ Frank Precopio จาก General Electric Company ได้คิดค้นวัสดุครอสลิงก์พอลิเอทิลีน (Cross-linked polyethylene : XLPE) เป็นครั้งแรกและในปี 1968 ได้มีการนำวัสดุ XLPE มาใช้เป็นฉนวนของสายเคเบิลใต้ดิน [10, 11] ซึ่งในปัจจุบันจะใช้ฉนวน XLPE เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งเป็นการปรับปรุงจากวัสดุพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำนำมาผ่านกระบวนการเชื่อมขวาง (Crosslinking) ด้วยวิธีการบ่มความร้อน (Curing หรือ Vulcanization) ด้วยตัวแทนการเชื่อมขวาง (Crosslinking agent) โดยส่วนใหญ่จะใช้สารประกอบประเภทเปอร์ออกไซด์ (Dicumyl Peroxide : DCP) ซึ่งจะก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการซึ่งมีมวลโมเลกุลต่ำและระเหยง่าย เช่น Methan (CH_4), น้ำ, Acetophenol, Cumyl alcohol, และ α -methyl styrene ดังรูปที่ 2.4 หลังจากสิ้นสุดกระบวนการเชื่อมขวาง จึงต้องผ่านกระบวนการนำแก๊สดังกล่าวออก (Degassing) ต่อไป [12]



รูปที่ 2.4 กระบวนการเชื่อมขวางด้วยสารประกอบ DCP ของพอลิเอทิลีนและผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้ [12]

เมื่อพอลิเมอร์ผ่านกระบวนการเชื่อมขวางแล้วจะเปลี่ยนจากพลาสติกประเภทเทอร์โมพลาสติกเป็นประเภทเทอร์โมเซต และจะทำให้มีคุณสมบัติทางกล, ทางเคมี และทางความร้อนที่ดีขึ้น โดยอ้างอิงจากฉนวน LDPE จะมีอุณหภูมิใช้งานสูงสุดที่ 75 องศาเซลเซียส แต่สำหรับฉนวน XLPE จะใช้งานได้สูงกว่าคือ 90 องศาเซลเซียส และสามารถทนอุณหภูมิขณะเกิดการลัดวงจรได้ถึง 250 องศาเซลเซียส รวมถึงคุณสมบัติทางไฟฟ้า เช่น มีความคงทนสูง, กำลังการสูญเสียทางไดอิเล็กตริกต่ำ ในทุกย่านความถี่, ความต้านทานฉนวนสูง เป็นต้น [11, 13] ในตารางที่ 2.3 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุพอลิเอทิลีนก่อนและหลังการเชื่อมขวาง

สำหรับสายเคเบิลใต้ดินระดับแรงดันปานกลางฉนวนครอสลิงกด์พอลิเอทิลีน (XLPE) จะถูกกำหนดระดับความหนาของฉนวนตามมาตรฐาน IEC 60502-2:2014 ซึ่งความหนาของฉนวนนั้นจะขึ้นกับระดับแรงดันใช้งานของสายเคเบิลใต้ดินและขนาดของตัวนำ [4]

ตารางที่ 2.3 การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุพอลิเอทิลีนก่อนและหลังการเชื่อมขวาง [13]

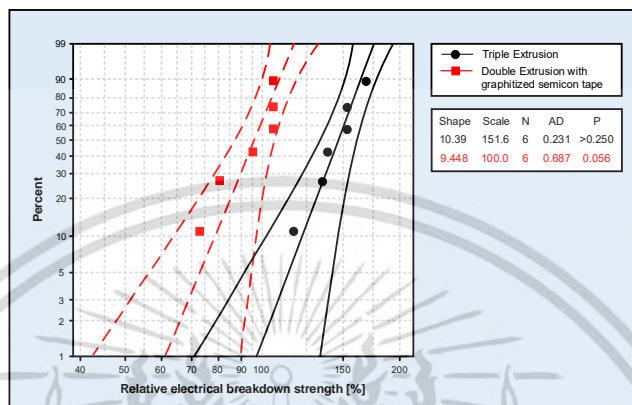
คุณสมบัติ	หน่วย	LDPE	XLPE
ความคงทนต่อการเบรกดาวน, E_b	kV/mm	75	50
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก, ϵ_r	-	2.2	2.4
ความต้านทานเชิงปริมาตร, ρ	$\Omega \cdot \text{cm}$	5×10^{17}	10^{16}
กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกที่ 1 MHz	-	2×10^{-4}	10^{-3}
ปริมาณความเป็นผลึกคริสตัล (Crystallinity)	%	55-65	40-70
ความหนาแน่น	g/cm^3	0.92	0.92
จุดหลอมเหลว	$^{\circ}\text{C}$	110	90-110
ความคงทนต่อแรงดึง	MPa	13	31

ทั้งนี้ทั้งนั้น การใช้ฉนวน XLPE ในสายเคเบิลใต้ดินจะต้องคำนึงถึงสิ่งแปลกปลอม, ความชื้น, ช่องว่างหรือโพรงอากาศในเนื้อฉนวน ซึ่งจะทำให้เกิดความเครียดจากสนามไฟฟ้าเมื่อนำไปใช้งานสูง บริเวณนั้นๆ และนำไปสู่การเกิดดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge : PD) ได้ โดยจะขยายตัวออกในลักษณะแตกแขนง (Dendritic growth) คล้ายต้นไม้ในเนื้อฉนวน หรือเรียกว่า “treeing” [14]

2.1.4 ตัวกั้นฉนวน (Insulation screen)

ตัวกั้นฉนวนเป็นชั้นที่ห่อหุ้มชั้นฉนวนของสายเคเบิลใต้ดิน โดยทำจากวัสดุที่มีคุณสมบัติกึ่งนำไฟฟ้า (Semi-conductive material) เช่นเดียวกับชั้นตัวกั้นตัวนำ และมาตรฐาน IEC 60502-2:2014 ได้กำหนดเกณฑ์ความต้านทานของชั้นตัวกั้นฉนวนไว้ไม่เกิน $500 \Omega \cdot \text{m}$ [4] ตัวกั้นฉนวนมีหน้าที่ทำให้เกิดความเรียบบริเวณขอบนอกของชั้นฉนวนเช่นเดียวกับตัวกั้นตัวนำ ซึ่งในปัจจุบันในกระบวนการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลิตสายเคเบิล ชั้นตัวกั้นฉนวนจะถูกอัดรีด (Extrude) หลังจากชั้นฉนวน เรียกว่า “Triple extrusion” โดยก่อนหน้านี้ ชั้นตัวกั้นฉนวนจะใช้วิธีพันเทปกึ่งตัวนำที่ผสมวัสดุแกรไฟต์ หรือเป็น Double extrusion และเมื่อเปรียบเทียบกับวิธี Triple extrusion จะทำให้สายเคเบิลใต้ดินมีความคงทนต่อการเกิดเบรกดาวน์สูงกว่าวิธี Double extrusion แสดงในรูปที่ 2.5 [15]



รูปที่ 2.5 ผลการทดสอบความคงทนต่อเบรกดาวน์ระหว่างสายเคเบิลใต้ดินที่ผลิตด้วยกระบวนการ Triple extrusion และ Double extrusion ที่พันเทปกึ่งตัวนำที่ผสมวัสดุแกรไฟต์ [15]

2.1.5 ตัวกั้นโลหะ (Metallic shield)

ตัวกั้นโลหะในสายเคเบิลใต้ดินระดับแรงดันปานกลางจะอยู่ติดกับชั้นตัวกั้นฉนวน ทำหน้าที่เป็นเส้นทางการไหลของกระแสอัดประจุของสายเคเบิลใต้ดินลงดินแทนชั้นตัวกั้นฉนวนซึ่งเป็นวัสดุกึ่งตัวนำ แต่ทั้งนี้ทั้งนั้น พื้นที่หน้าตัดของตัวกั้นโลหะนี้ยังคงไม่เพียงพอต่อการรับกระแสลัดวงจร ลักษณะของตัวกั้นโลหะที่ใช้ในสายเคเบิลใต้ดินมี 2 ลักษณะ คือ ลักษณะลวดทองแดงทีเกลียวห่างๆ และใช้เทปทองแดงพันรอบเพื่อให้มั่นใจว่าเส้นลวดแนบกับชั้นตัวกั้นฉนวน และอีกลักษณะหนึ่ง คือ ใช้เทปทองแดงพันทับเป็นเกลียวรอบชั้นตัวกั้นฉนวน และเมื่อใช้งานสายเคเบิลใต้ดิน ส่วนของตัวกั้นโลหะจะต้องถูกต่อลงดินเสมอ ไม่ว่าจะต่อเพียง 1 ด้านหรืออาจจะต่อลงดินทั้ง 2 ด้านก็ได้ ทำหน้าที่อีกหนึ่งของตัวกั้นโลหะ คือ ทำหน้าที่ป้องกันสนามไฟฟ้าให้ออกสู่ภายนอกได้ [7, 16]

2.1.6 เปลือกหุ้มนอก (Outer sheath)

เปลือกหุ้มนอกเป็นส่วนที่อยู่ด้านนอกสุดของสายเคเบิลใต้ดิน ทำหน้าที่ในการปกป้องส่วนประกอบภายในสายเคเบิลทั้งทางกลและทางไฟฟ้า โดยเปลือกหุ้มนอกผลิตจากทั้งวัสดุที่เป็นเทอร์โมพลาสติกและเทอร์โมเซต แต่โดยส่วนใหญ่แล้ว เปลือกหุ้มนอกจะผลิตจากวัสดุเทอร์โมพลาสติกประเภทพีวีซี (Polyvinyl Chloride : PVC) เนื่องจากคุณสมบัติที่ดีในหลายๆด้าน เช่น มีความทนทาน, ทนทานต่อน้ำมัน, มีคุณสมบัติทนไฟ (อาจใช้สารเติมแต่งร่วมด้วย), ทนทานต่อสภาพแวดล้อมของดินที่สายเคเบิลใต้ดินวางอยู่ และป้องกันความชื้นได้ แต่ไม่เทียบเท่ากับเปลือกหุ้ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกชนิดพอลิเอทิลีน (Polyethylene : PE) นั่นคือ หากพื้นที่ใดที่มีความชื้นมีโอกาสแทรกซึมเข้าไปในสายเคเบิลใต้ดินได้ ควรเลือกใช้เปลือกหุ้มนอกชนิด PE และคุณสมบัติอีกประการคือ การทนต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากรังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet : UV) เนื่องจากมีการผสมคาร์บอนแบล็กเข้าไปด้วย

สำหรับข้อเสียของเปลือกหุ้มนอกชนิด PVC คือ มีแนวโน้มที่จะเกิดรอยคืบ (Creep) ภายใต้แรงกดดันอย่างต่อเนื่อง และเมื่อ PVC ถูกการเผาไฟ จะเกิดสารประกอบประเภทคลอไรด์จำนวนมาก และเมื่อรวมกับน้ำจะเกิดเป็นกรดไฮโดรคลอริกซึ่งเป็นพิษต่อคนและสิ่งแวดล้อม [16]

2.1.7 ส่วนประกอบอื่นๆ (Others)

ในหัวข้อก่อนหน้านี้ กล่าวถึงส่วนประกอบหลักที่สายเคเบิลใต้ดินควรมี และในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงส่วนประกอบเสริมเพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือในการใช้งานสายเคเบิลใต้ดิน

1. เทคโนโลยีป้องกันน้ำ (Water blocking technology): สำหรับสายเคเบิลใต้ดินที่มีโอกาสถูกน้ำท่วมหรือความชื้นจากสภาพแวดล้อมที่สายเคเบิลใต้ดินวางอยู่แทรกซึมเข้าไปถึงฉนวนสายเคเบิลใต้ดินและทำให้เกิดการเสื่อมสภาพขึ้น จึงต้องมีการเพิ่มชั้นอุปกรณ์กันน้ำในสายเคเบิลใต้ดิน เช่น การใส่วัสดุคล้ายผงแป้งบริเวณช่องว่างของตัวนำจะสามารถป้องกันน้ำในแนวตามยาวของสายเคเบิลใต้ดิน (Longitudinal water blocking) ได้ ซึ่งเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำแล้วจะเกิดการขยายตัวและเปลี่ยนสถานะไปเป็นเจลซึมน้ำ หรือการเพิ่มเทปกั้นน้ำได้ชั้นเปลือกหุ้มนอกเพื่อป้องกันน้ำเข้าตามแนวรัศมี (Radial water blocking) ได้เช่นเดียวกัน [8, 16] ซึ่งเทปกั้นน้ำนี้มีทั้งวัสดุชนิดกึ่งตัวนำ (Semi-conductive water blocking tape) หรือเป็นวัสดุฉนวนไฟฟ้า (Non-conductive water blocking tape) ก็ได้

2. ปลอกโลหะ (Metallic sheath): ใช้สำหรับป้องกันน้ำและความชื้นสัมผัสกับฉนวนของสายเคเบิลใต้ดิน อีกทั้งยังใช้ในพื้นที่ที่มีการกัดกร่อนสูงและมีแนวโน้มที่จะเกิดระเบิดหรือไฟไหม้ โดยในปัจจุบัน วัสดุที่นิยมนำมาทำปลอกโลหะ คือ ตะกั่วและอะลูมิเนียม [7, 9]

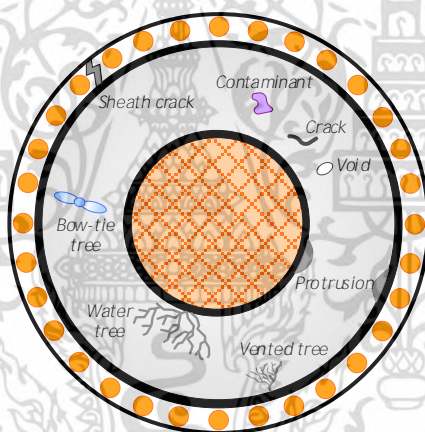
3. เกราะป้องกัน (Armour): ใช้สำหรับป้องกันแรงทางกลจากภายนอกมากระทำต่อสายเคเบิลใต้ดิน ในกรณีที่น่าสายเคเบิลใต้ดินฝังดินโดยตรง เช่น การขุดดิน โดยเกราะป้องกันมักทำมาจากลวดเหล็กชุบสังกะสี หรือ ลวดเหล็กแบนตีเกลียวด้วยวัสดุทองแดงหรืออะลูมิเนียม [7]

2.2 การเสื่อมสภาพและกลไกความล้มเหลวในระบบฉนวนสายเคเบิลใต้ดิน

โดยทั่วไปแล้ว สายเคเบิลใต้ดินจะถูกออกแบบให้มีอายุการใช้งานมากกว่า 30 ปี [17-19] ซึ่งในการใช้งาน สายเคเบิลใต้ดินจะอยู่ภายใต้สภาวะความเครียดต่างๆ เรียกว่า TEAM stress ประกอบด้วย ความเครียดเนื่องจากความร้อน (Thermal stress) เช่น ความร้อนที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าที่ส่งจ่ายโดยสายเคเบิลใต้ดิน หรือความร้อนที่ถ่ายเทมาจากสภาพแวดล้อมที่สายเคเบิลวางไว้, ความเครียดเนื่องจากสนามไฟฟ้า (Electrical stress) เช่น แรงดันไฟฟ้าใช้งานปกติของสาย

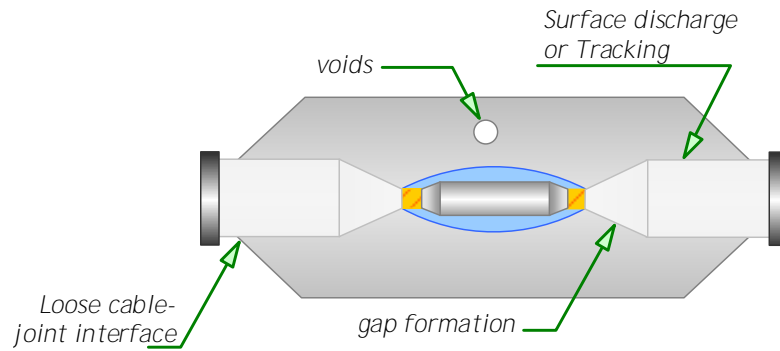
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เคเบิลหรือแรงดันไฟฟ้าในสถานะชั่วคราว (Transient state), กระแสไฟฟ้า, ความถี่ใช้งาน หรือการเกิดดิซชาร์จบางส่วนภายใน เป็นต้น, ความเครียดทางกล (Mechanical stress) เช่น การดัดงอสายเคเบิลใต้ดิน, การกดทับ, การฉีก หรือ การดึงสายเคเบิลใต้ดิน เป็นต้น และผลจากสภาพแวดล้อม (Ambient) เช่น แก๊สต่างๆ, น้ำหรือความชื้น, สารเคมี หรือ การแผ่รังสีต่างๆ เป็นต้น โดยความเครียดเหล่านี้จะทำให้ฉนวนของสายเคเบิลใต้ดินเกิดการเสื่อมสภาพลงเรื่อยๆ นอกจากนี้ การเสื่อมสภาพของสายเคเบิลใต้ดินอาจเกิดขึ้นจากการมีสิ่งแปลกปลอมภายในเนื้อฉนวนของสายเคเบิล ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.6 ซึ่งในสายเคเบิลใต้ดินระดับแรงดันปานกลางนี้ ปัญหาข้อบกพร่องที่พบเจอได้บ่อยคือ ต้นไม้ไฟ (Water tree) เกิดจากการมีโพรงอากาศหรือสิ่งแปลกปลอมภายในเนื้อฉนวนของสายเคเบิลใต้ดิน โดยมีปัจจัยสำคัญคือ ความชื้นที่เข้ามาในเนื้อฉนวน [20] ส่งผลให้ความเป็นฉนวนของสายเคเบิลใต้ดินลดลง ซึ่งต้นไม้ไฟนี้จะใช้เวลานานในการเจริญเติบโตตามแนวสนามไฟฟ้า ซึ่งการเจริญเติบโตนี้อาจไม่มีความอันตรายใดๆ แต่เมื่อต้นไม้ไฟแปลงสภาพเป็นต้นไม้ไฟฟ้า (Electrical tree) แล้ว จะนำไปสู่ความล้มเหลวอย่างรวดเร็ว



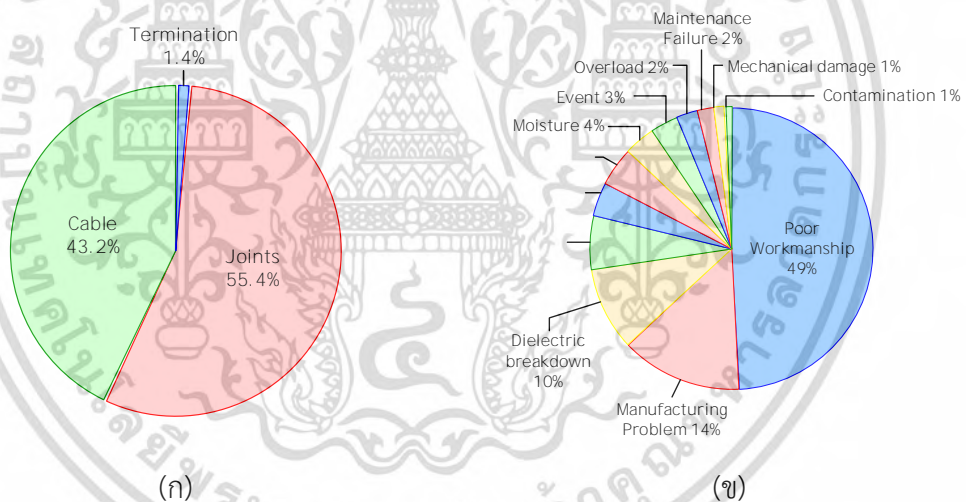
รูปที่ 2.6 สิ่งแปลกปลอมในฉนวนของสายเคเบิลใต้ดิน [21]

นอกจากนี้ ในระบบสายเคเบิลใต้ดิน ซึ่งประกอบด้วย สายเคเบิลใต้ดิน, ข้อต่อสายเคเบิล และหัวต่อสายเคเบิล โดยอุปกรณ์เพิ่มเติมนี้ก็สามารถทำให้ระบบสายเคเบิลใต้ดินเกิดการเสื่อมสภาพได้เช่นเดียวกัน ในรูปที่ 2.7 แสดงตัวอย่างข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นได้ในอุปกรณ์เสริมของระบบสายเคเบิลใต้ดิน ซึ่งข้อบกพร่องเหล่านี้จะทำให้เกิดดิซชาร์จบางส่วนขึ้นในระบบสายเคเบิลใต้ดินและนำไปสู่ความล้มเหลวในที่สุด



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นได้ในอุปกรณ์เสริม [21]

โดยจากข้อมูลสถิติ [22] ในรูปที่ 2.8 (ก) และ (ข) พบว่า สำหรับระบบสายเคเบิลใต้ดินระดับแรงดันปานกลาง ส่วนที่เกิดความล้มเหลวมากที่สุด คือ ข้อต่อสายเคเบิล และสาเหตุที่ทำให้เกิดความล้มเหลวส่วนใหญ่มาจาก การทำงานที่ผิดพลาดของคนทำงาน (Poor workmanship) ขณะติดตั้งอุปกรณ์เสริม



รูปที่ 2.8 ตัวอย่างสถิติการเกิดความล้มเหลวในระบบสายเคเบิลใต้ดินระดับแรงดันปานกลาง [22]
 (ก) แบ่งตามประเภทส่วนประกอบของระบบสายเคเบิล และ (ข) แบ่งตามสาเหตุที่ทำให้เกิดความล้มเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 การตอบสนองทางไดอิเล็กตริก

2.3.1 ทฤษฎีการตอบสนองทางไดอิเล็กตริกในโดเมนเวลา [23-26]

สำหรับชุดอิเล็กโตรดในสุญญากาศ ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของฟลักซ์ในวัสดุไดอิเล็กตริก ณ เวลาใดๆ, $D(t)$ เป็นสัดส่วนโดยตรงกับสนามไฟฟ้าที่วัสดุไดอิเล็กตริกได้รับ โดยเป็นสนามไฟฟ้าที่ขึ้นอยู่กับเวลา, $E(t)$ ดังสมการที่ (2.1)

$$D(t) = \varepsilon_0 E(t) \quad (2.1)$$

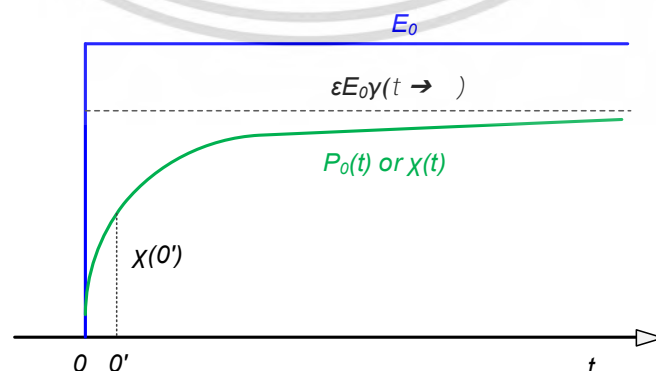
เมื่อ $\varepsilon_0 = 8.85419 \times 10^{-12} \text{ As/V}\cdot\text{m}$ คือ สภาพยอมของสุญญากาศ (Vacuum permittivity)

เมื่อสุญญากาศถูกแทนที่ด้วยวัสดุไดอิเล็กตริกใดๆแล้ว ความหนาแน่นของฟลักซ์จะเพิ่มขึ้นเนื่องจากมีกระบวนการโพลาไรเซชัน (Polarization process) เกิดขึ้นในวัสดุไดอิเล็กตริก ซึ่งเขียนได้ตามสมการที่ (2.2)

$$D(t) = \varepsilon_0 E(t) + P(t) \quad (2.2)$$

พจน์ $P(t)$ กับ $E(t)$ จะมีลักษณะการขึ้นอยู่กับเวลาแตกต่างกัน โดยที่กระบวนการโพลาไรเซชันที่ต่างกันจะทำให้เกิดความล่าช้าที่ต่างกันตามลักษณะสนามไฟฟ้า ความล่าช้าที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากพฤติกรรมที่ขึ้นกับเวลาของพารามิเตอร์สภาพรับได้ทางไฟฟ้า, $\chi(t)$ ที่เกิดขึ้นหลังจากจ่ายแรงดันไฟฟ้าแบบขั้น (Step voltage) ให้กับวัสดุไดอิเล็กตริก และวัสดุไดอิเล็กตริกนั้นจะเกิดกระบวนการโพลาไรเซชันในลักษณะต่างๆ โดยจะมีการตอบสนองในโดเมนเวลาคือ สภาพรับได้ทางไฟฟ้า, $\chi(t)$ ซึ่งก่อนหน้าที่จะจ่ายแรงดันไฟฟ้า ($t \leq 0$) จะมีค่าเป็นศูนย์ ในรูปที่ 2.9 แสดงการเกิดโพลาไรเซชันในวัสดุไดอิเล็กตริกที่เกิดขึ้นภายใต้สนามไฟฟ้า E_0 โดยสามารถแสดงสมการได้ตามสมการที่ (2.3)

$$P(t) / E(t) = \varepsilon_0 \chi(t) 1(t) \quad (2.3)$$



รูปที่ 2.9 การเกิดโพลาไรเซชันในวัสดุไดอิเล็กตริกที่เกิดขึ้นภายใต้สนามไฟฟ้า $E(t) = E_0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (2.3) เมื่อใช้เทคนิคคอนโวลูชันในโดเมนเวลา หรือ “Duhamel’s Integral” เพื่อคำนวณหาการโพลาริเซชัน ณ เวลาต่างๆ, $P(t)$ ดังนั้น การโพลาริเซชัน ณ เวลาใดๆ แสดงดังสมการที่ (2.4)

$$P(t) = \varepsilon_0 \chi E(t) + \Delta P(t) = \varepsilon_0 \chi_\infty E(t) + \varepsilon_0 \int_0^t E(\tau) \frac{d\chi(t-\tau)}{dt} d\tau \quad (2.4)$$

และอนุพันธ์ของสภาพรีบได้ทางไฟฟ้าต่อเวลา คือ

$$f(t) = \frac{d\chi(t)}{dt} \quad (2.5)$$

นั่นคือ $f(t)$ คือฟังก์ชันการตอบสนองทางไดอิเล็กตริกของวัสดุไดอิเล็กตริก เขียนสมการใหม่ได้คือ

$$P(t) = \varepsilon_0 \chi_\infty E(t) + \varepsilon_0 \int_0^t E(\tau) f(t-\tau) d\tau \quad (2.6)$$

จากสมการของแมกเวลล์ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ารวม, $j(t)$ ที่เกิดจากสนามไฟฟ้า, $E(t)$ โดยอธิบายจากผลรวมของกระแสไฟฟ้าส่วนนำไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากกระบวนการโพลาริเซชันได้คือ

$$j(t) = \sigma_0 E(t) + \frac{dD(t)}{dt} \quad (2.7)$$

เมื่อ σ_0 คือ ความนำไฟฟ้ากระแสตรง (DC conductivity)

แทนที่ $D(t)$ ในสมการที่ (2.7) ด้วยสมการที่ (2.6)

$$j(t) = \sigma_0 E(t) + \varepsilon_0 \frac{dE(t)}{dt} + \frac{dP(t)}{dt} \quad (2.8)$$

และแทนที่ $P(t)$ ในสมการที่ (2.8) ด้วยสมการที่ (2.6) โดยกำหนดให้ $E(t)$ เป็นค่าคงที่ และ $\varepsilon_\infty = 1 + \chi_\infty$ ซึ่ง ∞ หมายถึง กระบวนการโพลาริเซชันที่เร็วมากและไม่สามารถวัดได้ในเมนเวลา

$$j(t) = \sigma_0 E(t) + \varepsilon_0 \frac{dE(t)}{dt} + \varepsilon_0 \frac{d}{dt} \int_0^t E(\tau) f(t-\tau) d\tau \quad (2.9)$$

$$j(t) = \sigma_0 E(t) + \varepsilon_0 \{ \varepsilon_\infty \delta(t) + f(t) \} E(t) \quad (2.10)$$

จากสมการ (2.10) ทำการแปลงสมการจากความหนาแน่นกระแส, $j(t)$ เป็นกระแสไฟฟ้า, $i(t)$

$$i_{pol}(t) = C_0 U_c \left[\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} + \varepsilon_\infty \delta(t) + f(t) \right] \quad (2.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ C_0 คือความจุไฟฟ้าเชิงเรขาคณิตของวัสดุไดอิเล็กตริก, U_c คือแรงดันที่ใช้อัดประจุวัสดุไดอิเล็กตริก และ $\delta(t)$ คือ ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นขณะเพิ่มระดับแรงดันอย่างทันทีทันใด ที่เวลา $t = t_0$

จากสมการที่ (2.11) สามารถละเว้นพจน์กลางได้เนื่องจากเป็นกระบวนการโพลาริเซชันที่เร็วมากและไม่สามารถวัดได้ในความเป็นจริง จึงเขียนสมการใหม่ของกระแสโพลาริเซชันได้เป็น

$$i_{pol}(t) = C_0 U_c \left[\frac{\sigma_0}{\epsilon_0} + f(t) \right] \quad (2.12)$$

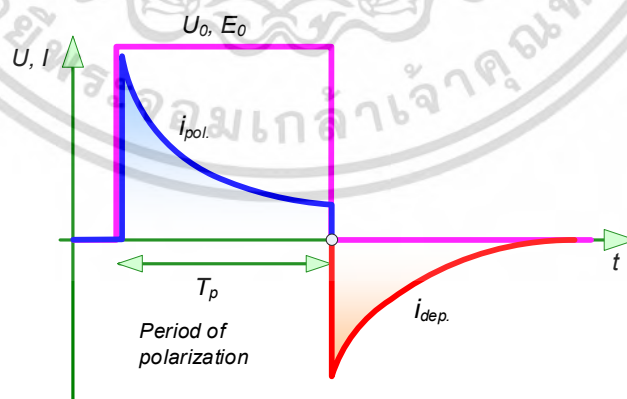
หลังจากสิ้นสุดการวัดช่วงโพลาริเซชันแล้วที่เวลา $t = T_c$ วัสดุไดอิเล็กตริกที่ถูกทดสอบจะถูกลัดวงจร (Short circuit) กระแสไฟฟ้าที่วัดได้จะเป็นกระแสที่วัสดุไดอิเล็กตริกคายประจุออกในทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางอัดประจุ จะเรียกระแสไฟฟ้านี้ว่า กระแสดีโพลาริเซชัน (Depolarization current, $i_{dep}(t)$) โดยจากสมการที่ (2.11) ที่เวลา $t \geq (t_0 + T_c)$

$$i_{dep}(t) = -C_0 U_c [\epsilon_\infty \delta(t) + f(t) - f(t + T_c)] \quad (2.13)$$

และเช่นเดียวกันกับกรณีของกระแสโพลาริเซชัน พจน์กลางสามารถละเว้นได้เนื่องจากเป็นช่วงเวลาที่สั้นมากและไม่สามารถวัดได้ในความเป็นจริง ดังนั้น สมการใหม่ของกระแสดีโพลาริเซชันจะได้เป็น

$$i_{dep}(t) = -C_0 U_c [f(t) - f(t + t_c)] \quad (2.14)$$

โดยหลักการของการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน (Polarization and Depolarization Current measurement) หรือการวัด PDC, การจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบขั้น (DC Step voltage) และช่วงเวลาการวัดกระแสไฟฟ้าในแต่ละช่วงแสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 หลักการการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน PDC measurement

จากสมการที่ (2.14) หากช่วงเวลาอัดประจุมากเพียงพอที่กระบวนการโพลาริเซชันเสรีจ
สมบูรณ์ทั้งหมด จะสามารถละเว้นพจน์ $f(t+T_c)$ ประมาณเท่ากับศูนย์ได้ จะทำให้กระแสดีโพลาริเซ
ชันจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับฟังก์ชันการตอบสนองทางไดอิเล็กตริกของวัสดุไดอิเล็กตริก ดังนั้น

$$i_{dep}(t) \approx -C_0 U_c f(t) \quad (2.15)$$

$$f(t) \approx -\frac{i_{dep}(t)}{C_0 U_c} \quad (2.16)$$

และจากสมการที่ (2.12) ความนำไฟฟ้าจากกระแสโพลาริเซชันได้ ดังนี้

$$\sigma_0 \approx \frac{\epsilon_0}{C_0 U_c} (i_{pol}(t) - i_{dep}(t)) \quad (2.17)$$

และการพิจารณาเพื่อศึกษาพารามิเตอร์ในโดเมนความถี่ จำเป็นต้องใช้การแปลงโดเมนเวลา
เป็นโดเมนความถี่ เช่น การแปลงฟูเรียร์ (Fourier Transformation) หรือการแปลงลาปราช
(Laplace Transformation) โดยจากสมการที่ (2.9) เมื่อทำการแปลงลาปราชแล้ว จะได้

$$\bar{J}(\omega) = \sigma_0 \bar{E}(\omega) + j\omega \epsilon_0 \bar{E}(\omega) + j\omega \epsilon_0 \bar{F}(\omega) \bar{E}(\omega) \quad (2.18)$$

โดย $\bar{F}(\omega)$ คือ การแปลงฟูเรียร์ของฟังก์ชันการตอบสนองทางไดอิเล็กตริก หรือ สภาวะรับได้
ทางไฟฟ้าเชิงซ้อน (Complex susceptibility, $\chi(\omega)$) และ

$$\bar{F}(\omega) = \chi(\omega) = \chi'(\omega) - j\chi''(\omega) \quad (2.19)$$

จากนั้น นำสมการที่ (2.19) แทนในสมการที่ (2.18) จะได้

$$\bar{J}(\omega) = [\{\sigma_0 + \epsilon_0 \omega \chi''(\omega)\} + j\omega \epsilon_0 \{1 + \chi'(\omega)\}] \bar{E}(\omega) \quad (2.20)$$

โดยจากความสัมพันธ์ของสภาพยอมของไดอิเล็กตริกสัมพันธ์ คือ

$$\bar{J}(\omega) = j\omega \epsilon_0 \bar{\epsilon}_r(\omega) \bar{E}(\omega) \quad (2.21)$$

ดังนั้น เมื่อเปรียบเทียบสมการที่ (2.21) กลับไปยังสมการที่ (2.20) จะได้

$$\bar{\epsilon}_r(\omega) = \epsilon_r'(\omega) - j\epsilon_r''(\omega) = [1 + \chi'(\omega)] - j \left[\chi''(\omega) + \frac{\sigma_0}{\omega \epsilon_0} \right] \quad (2.22)$$

ตัวประกอบกำลังสูญเสีย หรือ $\tan\delta$ ในโดเมนความถี่จึงหาได้จาก

$$\tan \delta(\omega) = \frac{\varepsilon_r''(\omega)}{\varepsilon_r'(\omega)} = \frac{\chi''(\omega) + \frac{\sigma_0}{\omega\varepsilon_0}}{1 + \chi'(\omega)} \quad (2.23)$$

2.3.2 ทฤษฎีการตอบสนองทางไดอิเล็กตริกในโดเมนความถี่ [26]

อิมพีแดนซ์ (Impedance) ของวัสดุไดอิเล็กตริกสามารถอธิบายได้จากการจ่ายแรงดันไฟฟ้า รูปไซน์ตกร่อมวัสดุไดอิเล็กตริก และมีการวัดอย่างแม่นยำทั้งแรงดันที่คร่อมวัสดุไดอิเล็กตริกและกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านวัสดุไดอิเล็กตริก โดยพิจารณาจากความต่างเฟสระหว่างแรงดันไฟฟ้า $U(\omega)$ และกระแสไฟฟ้า $I(\omega)$ ณ ความถี่ที่กำหนด อิมพีแดนซ์ของวัสดุไดอิเล็กตริกสามารถหาได้จาก

$$\bar{Z}(\omega) = Z'(\omega) + jZ''(\omega) = \bar{U}(\omega) / \bar{I}(\omega) \quad (2.24)$$

โดยกำหนดว่าวัสดุไดอิเล็กตริกเป็นค่าความจุไฟฟ้าเชิงซ้อน ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า $U(\omega)$ และกระแสไฟฟ้า $I(\omega)$ สามารถเขียนได้เป็น

$$\bar{I}(\omega) = j\omega\bar{C}(\omega)\bar{U}(\omega) \quad (2.25)$$

จาก
$$\bar{Z}(\omega) = \frac{1}{j\omega\bar{C}(\omega)}$$

และเนื่องจากความจุไฟฟ้าเชิงซ้อนเขียนได้ในรูปส่วนจริงและส่วนจินตภาพ ดังนี้

$$\bar{C}(\omega) = C'(\omega) + jC''(\omega) \quad (2.26)$$

และความจุไฟฟ้าเชิงซ้อนนั้นมีความสัมพันธ์กับสภาพยอมทางไฟฟ้าเชิงซ้อน, ε จึงอธิบายได้เป็น

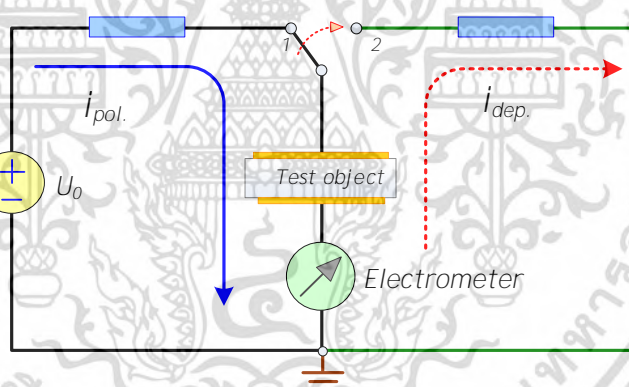
$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon'(\omega) + j\varepsilon''(\omega) = \frac{\bar{C}(\omega)}{C_0} \quad (2.27)$$

เมื่อ C_0 คือ ค่าความจุไฟฟ้าเชิงเรขาคณิตของวัตถุทดสอบ และ ตัวประกอบกำลังสูญเสีย ($\tan\delta$) ของวัตถุทดสอบสามารถหาได้จาก

$$\tan \delta(\omega) = \frac{\varepsilon_r''(\omega)}{\varepsilon_r'(\omega)} = \frac{C''(\omega)}{C'(\omega)} \quad (2.28)$$

2.3.3 การวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน (Polarization and Depolarization Current (PDC) Measurement)

การวัด PDC เป็นการวัดการตอบสนองในโดเมนเวลาประเภทหนึ่ง โดยมีหลักการคือ จ่ายแรงดันกระแสตรงแบบขั้น (หรือเรียกว่า แรงดันอัดประจุ (Charging voltage)) ให้กับวัตถุทดสอบเป็นระยะเวลาหนึ่ง โดยระยะเวลาที่ วัตถุทดสอบจะเกิดกระบวนการโพลาริเซชันภายในวัสดุไดอิเล็กทริกเป็นระยะเวลาที่กำหนด เรียกว่า ระยะเวลาโพลาริเซชัน (Polarization time หรือ Charging time) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านวัสดุไดอิเล็กทริกจะถูกอ่านโดยเครื่องวัด Electrometer เรียกว่า “กระแสโพลาริเซชัน (Polarization current)” หลังจากครบระยะเวลาโพลาริเซชันแล้ว สวิตช์แรงดันสูงจะทำการสับวงจรอย่างรวดเร็วเพื่อเปิดวงจรฝั่งแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าและลัดวงจรวัตถุทดสอบ หลังจากนั้น วัสดุไดอิเล็กทริกที่ประจุตัวเป็นตัวเก็บประจุจะคายประจุที่เก็บไว้ ออกในทิศทางตรงข้ามกับทิศทางที่อัดประจุ และจะผ่านเครื่องวัด Electrometer เช่นเดียวกันแต่ต่างขั้วกัน ซึ่งกระแสไฟฟ้าในช่วงหลังนี้จะเรียกว่า “กระแสดีโพลาริเซชัน (Depolarization current)” โดยกระแสดีโพลาริเซชันจะมีเครื่องหมายตรงข้ามกับกระแสโพลาริเซชัน สำหรับวงจรสมมูลของการวัด PDC แสดงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 วงจรสมมูลของการวัด PDC

พารามิเตอร์หลักที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการวัด PDC ในช่วงโพลาริเซชัน ประกอบด้วย

1. ความต้านทานฉนวน (Insulation resistance, IR)

ความต้านทานฉนวน หรือ IR คือ ความสามารถของฉนวนไฟฟ้าที่สามารถต้านทานกระแสตรงไหลผ่านวัสดุไดอิเล็กทริก โดยสามารถหาได้จากผลหารระหว่างแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่จ่ายให้กับวัตถุทดสอบและกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านวัตถุทดสอบที่เวลา 60 วินาที โดยแสดงสมการด้านล่าง และค่าความต้านทานฉนวนนี้ต้องปรับแก้คูณหมุ่โดยอ้างอิงที่ 40 องศาเซลเซียสด้วย [27]

$$IR_{\text{min}} = \frac{U_c}{i(60s)} \quad (2.29)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ดัชนีโพลาไรเซชัน (Polarization index, PI)

ดัชนีโพลาไรเซชัน หรือ PI คือ การเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานฉนวนเมื่อเวลาผ่านไป โดยค่าดัชนีโพลาไรเซชันสามารถหาได้จากผลหารระหว่างความต้านทานฉนวนที่เวลา 1 นาที (60 วินาที) และความต้านทานฉนวนที่เวลา 0.5 นาที (30 วินาที) [27] โดยแสดงสมการด้านล่าง

$$PI = \frac{IR_{10\min}}{IR_{1\min}} \quad (2.30)$$

3. อัตราส่วนการซึมซับไดอิเล็กตริก (Dielectric Absorption Ratio, DAR)

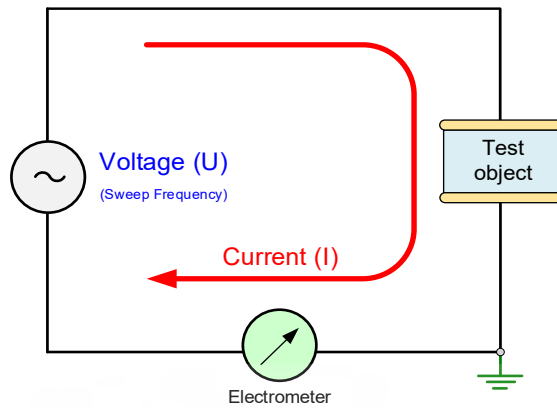
อัตราส่วนการซึมซับไดอิเล็กตริก หรือ DAR คือ การเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานฉนวนเมื่อเวลาผ่านไปเช่นเดียวกับ PI แต่ใช้ระยะเวลาสั้นๆ นั่นคือ หาได้จากผลหารระหว่างความต้านทานฉนวนที่เวลา 1 นาที (60 วินาที) และความต้านทานฉนวนที่เวลา 30 วินาที [28]

$$DAR = \frac{IR_{60\sec}}{IR_{30\sec}} \quad (2.31)$$

2.3.4 การวัดสเปกโตรสโคปีในโดเมนความถี่ (Frequency Domain Spectroscopy, FDS technique)

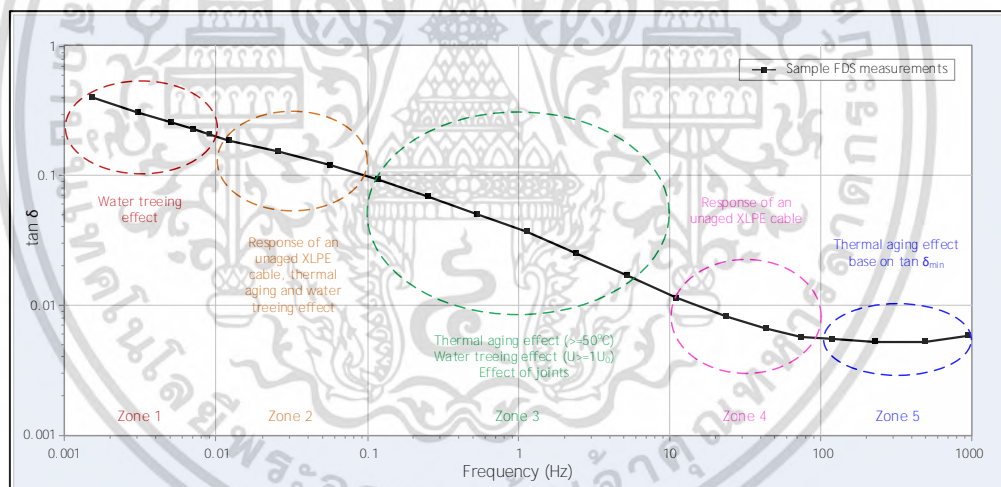
โดยปกติแล้ว อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงจะมีการทดสอบเพื่อตรวจสอบคุณภาพของฉนวนไฟฟ้า โดยหัวข้อการวัดตัวเก็บประจุและตัวประกอบกำลังสูญเสีย หรือ $C \ \& \ \tan\delta$ เป็นหนึ่งในหัวข้อการทดสอบเพื่อตรวจสอบโดยรวมของฉนวนว่ายังมีความสมบูรณ์ดีหรือไม่ แต่การทดสอบดั้งเดิมนั้นจะทดสอบที่ความถี่ใช้งาน หรือความถี่ 50 เฮิรตซ์ ซึ่งในบางครั้ง ผลการทดสอบ $\tan\delta$ ที่ความถี่ใช้งานอาจไม่บ่งบอกถึงปัญหาภายในระบบฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ดังนั้น จึงได้มีการนำเสนอเทคนิคสมัยใหม่คือการวัดผลตอบสนองทางไดอิเล็กตริกในโดเมนความถี่ ที่จะวัดผลตอบสนองทางไดอิเล็กตริกในช่วงย่านความถี่กว้างๆ ขึ้นมา

โดยการวัด FDS จะทดสอบโดยจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับรูปไซน์ที่ปรับความถี่ของแรงดันไฟฟ้า ตามช่วงความถี่ที่กำหนด $\hat{U}(\omega)$ ให้กับวัตถุทดสอบ และวัดกระแสไฟฟ้า $\hat{I}(\omega)$ ที่ไหลผ่านวัสดุไดอิเล็กตริกออกมา วงจรสมมูลของการวัด FDS แสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 วงจรสมมูลของการวัด FDS

โดยทั่วไปแล้ว ในการทดสอบ FDS จะทดสอบในย่านความถี่กว้างๆ เช่น 1 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 1 มิลลิเฮิรตซ์ โดยสำหรับการทดสอบ FDS ในระบบสายเคเบิลใต้ดินระดับแรงดันปานกลางนั้น ได้มีการนำเสนอ Master curve โดยกำหนดในช่วงย่านความถี่ตั้งแต่ 1 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 1 มิลลิเฮิรตซ์ ซึ่งแต่ละช่วงความถี่จะบ่งบอกถึงปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบสายเคเบิลใต้ดิน [29] ดังแสดงในรูปที่ 2.13



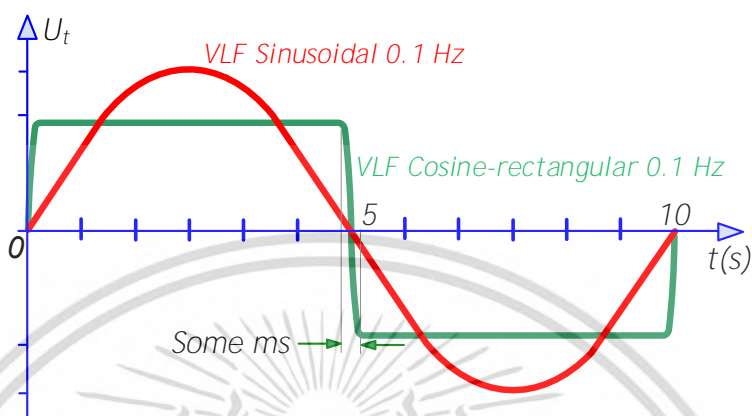
รูปที่ 2.13 การประเมินสภาพของระบบสายเคเบิลใต้ดินในแต่ละช่วงความถี่ของการวัด FDS [29]

2.4 การทดสอบแรงดันสูงที่ความถี่ต่ำมาก (Very Low Frequency Testing, VLF Testing)

การทดสอบ VLF เป็นการทดสอบทางเลือกสำหรับทดสอบระบบสายเคเบิลใต้ดินในภาคสนาม เนื่องจากการทดสอบระบบสายเคเบิลใต้ดินที่ความถี่กำลังจะใช้กำลังไฟฟ้าที่สูงมากในการทดสอบ ซึ่งแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าจะมีขนาดใหญ่ และไม่เอื้ออำนวยต่อการทดสอบภาคสนาม การทดสอบ VLF เป็นการทดสอบโดยใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ต่ำมาก คือ ตามมาตรฐาน IEEE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Std. 400.2-2013 และ IEC 60060-3:2006 ได้กำหนดย่านความถี่การทดสอบ VLF ไว้ในช่วง 0.01 ถึง 1 เฮิรตซ์ [30, 31] และกำหนดลักษณะรูปคลื่นการทดสอบไว้ด้วยกัน 2 ลักษณะ คือ รูปคลื่นแบบไซน์ (Sinusoidal) และรูปคลื่นแบบสี่เหลี่ยม (Cosine rectangular) แสดงดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 รูปคลื่นสำหรับการทดสอบ VLF

สำหรับการทดสอบ VLF ได้นำมาใช้ในการทดสอบความคงทนที่แรงดันสูง หรือการทดสอบ Hi-pot และได้มีการเพิ่มพารามิเตอร์เพื่อนำมาป็นทางเลือกสำหรับการประเมินสภาพสายเคเบิลใต้ดิน นั่นคือ การวัด $\tan\delta$ (VLF-TD) และการวัดดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge (PD) test, (VLF-PD)) ซึ่งเป็นการวัดที่ความถี่ต่ำมากทั้งสองพารามิเตอร์ โดยการทดสอบต่างๆ มาตรฐานได้มีการกำหนดแนวทางการทดสอบและการประเมินผลไว้ สำหรับการทดสอบ $\tan\delta$ จะทดสอบด้วยแรงดันกระแสสลับรูปคลื่นไซน์ ความถี่ 0.1 เฮิรตซ์ โดยมาตรฐาน IEEE Std. 400.2-2013 [30] ได้กำหนดระดับแรงดันทดสอบ $\tan\delta$ สำหรับระบบสายเคเบิลใต้ดิน คือ $0.5U_0$, $1.0U_0$ และ $1.5U_0$ โดยที่ U_0 คือ แรงดันใช้งานปกติของระบบสายเคเบิลใต้ดินที่ทำการทดสอบ จากนั้นเมื่อได้ผลการทดสอบแล้ว จะมีพารามิเตอร์ 3 ตัวที่มาตรฐานกำหนดเพื่อใช้เป็นเกณฑ์ประเมินสภาพ [30] ประกอบด้วย

1. ค่าเฉลี่ยของ $\tan\delta$ (Mean VLF-TD): โดยทั่วไปแล้ว การทดสอบ VLF ที่ระดับแรงดันทดสอบใดๆ จะมีการเก็บค่า $\tan\delta$ ประมาณ 8-10 ครั้ง แล้วจึงนำค่าทั้งหมดมาหาค่าเฉลี่ยต่อไป โดยค่าเฉลี่ย $\tan\delta$ ที่ใช้สำหรับประเมินตามเกณฑ์จะใช้ที่รับแรงดันทดสอบ $1.0U_0$

$$\overline{TD} = \frac{\sum TD}{n} \quad (2.32)$$

โดย TD คือ $\tan\delta$ ที่ระดับแรงดันทดสอบ $1.0U_0$ และ n คือ จำนวนข้อมูล $\tan\delta$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ผลต่างของ $\tan\delta$ (Differential VLF-TD: VLF-DTD หรือ Tip-up): พารามิเตอร์นี้จะเป็นการวิเคราะห์ผลต่างของค่าเฉลี่ย $\tan\delta$ ที่ระดับแรงดันทดสอบ $1.5U_0$ และ $0.5U_0$

$$DTD = TD(1.5U_0) - TD(0.5U_0) \quad (2.33)$$

3. เสถียรภาพทางเวลาของ $\tan\delta$ (VLF-TD Time Stability: VLF-TDTS): พารามิเตอร์นี้เป็นการดูเสถียรภาพของค่า $\tan\delta$ ที่วัดได้โดยใช้วิธีคำนวณส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation, STDEV) ของค่า $\tan\delta$ ที่วัดได้ที่ระดับแรงดันทดสอบ $1.0U_0$ โดยสมการสำหรับคำนวณส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานนี้แสดงดังสมการที่ (2.34) [30]

$$STDEV = \sqrt{\frac{\sum (TD - \overline{TD})^2}{(n-1)}} \quad (2.34)$$

โดย TD คือ ค่า $\tan\delta$ และ \overline{TD} คือ ค่าเฉลี่ยของ $\tan\delta$ และ n คือจำนวนข้อมูลของ $\tan\delta$

4. Skirt: สำหรับพารามิเตอร์นี้ไม่ได้มีการกำหนดในมาตรฐาน IEEE Std. 400.2-2013 แต่ถูกนำเสนอจาก Korea Electric Power Corporation (KEPCO) ประเทศเกาหลี เพื่อเป็นพารามิเตอร์เพิ่มเติมที่ช่วยในการประเมินสภาพสายเคเบิลใต้ดินให้ถูกต้องมากขึ้น โดยพารามิเตอร์ Skirt นี้ เป็นการคำนวณเสถียรภาพทางเวลาของข้อมูล $\tan\delta$ เช่นเดียวกับ VLF-TDTS และการคำนวณ Skirt อย่างง่ายนั้น จะคำนวณจากค่า $\tan\delta$ มากที่สุด ลบกับค่า $\tan\delta$ น้อยที่สุดในชุดข้อมูลในระดับแรงดันทดสอบเดียวกัน แต่ทั้งนี้ทั้งนั้น หากชุดข้อมูลไม่ได้มีความเป็นเส้นตรง หรือมีการแกว่งของข้อมูล วิธีอย่างง่ายอาจไม่ถูกต้อง จึงได้มีการเสนอวิธีวิเคราะห์ใหม่โดยการสร้าง เส้นตรงเสมือน (Virtual line) โดยวิธีการคำนวณแสดงในอ้างอิง [32]

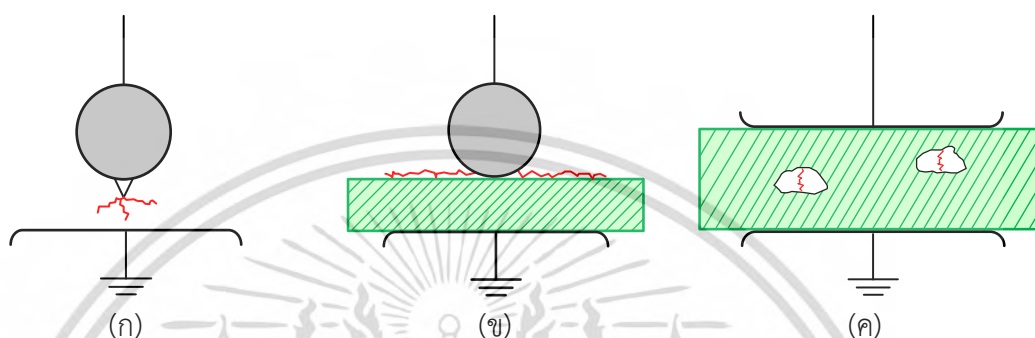
2.5 การทดสอบดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge Test, PD Test)

ดิสชาร์จบางส่วน หรือ Partial Discharge (PD) ตามนิยามที่ให้ไว้ในมาตรฐาน IEC 60270:2000+AMD1:2015 [33] คือ “localized electrical discharge that only partially bridges the insulation between conductors and which can or can not occur adjacent to a conductor” หรือ การเกิดดิสชาร์จทางไฟฟ้าเฉพาะที่เชื่อมถึงกันเพียงบางส่วนของระบบฉนวนระหว่างตัวนำทั้งสองด้าน ซึ่งอาจเกิดติดหรือไม่ติดกับตัวนำก็ได้

ดิสชาร์จบางส่วนจะเกิดขึ้นในระบบฉนวนที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง หรือระบบฉนวนที่มีความไม่สม่ำเสมอ ซึ่งทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าในระบบฉนวนมีค่าสูงกว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤต หรือบางครั้งอาจเกิดที่บริเวณจุดที่ความคงทนของฉนวนลดลง แต่ไม่อาจทำให้เกิดเบรกดาวนโดยสมบูรณ์ได้ ดิสชาร์จบางส่วนเกิดขึ้นได้ทั้งในสนามไฟฟ้ากระแสตรง, สนามไฟฟ้า

กระแสสลับและสนามไฟฟ้าจากแรงดันอิมพัลส์ที่เกิดซ้ำๆ สำหรับดิสชาร์จบางส่วนภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสสลับ ดิสชาร์จจะเกิดขึ้นซ้ำๆและทำให้เกิดการสีกกร่อนของวัสดุที่เป็นประเภทอินทรีย์วัตถุ

ดิสชาร์จบางส่วนอาจแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด คือ โคโรนาดิสชาร์จ (Corona discharge), ดิสชาร์จบนผิวภายใน (Surface discharge) และดิสชาร์จภายใน (Internal discharge) ซึ่งลักษณะการดิสชาร์จต่างๆแสดงดังรูปที่ 2.15 (ก) ถึง (ค) ตามลำดับ

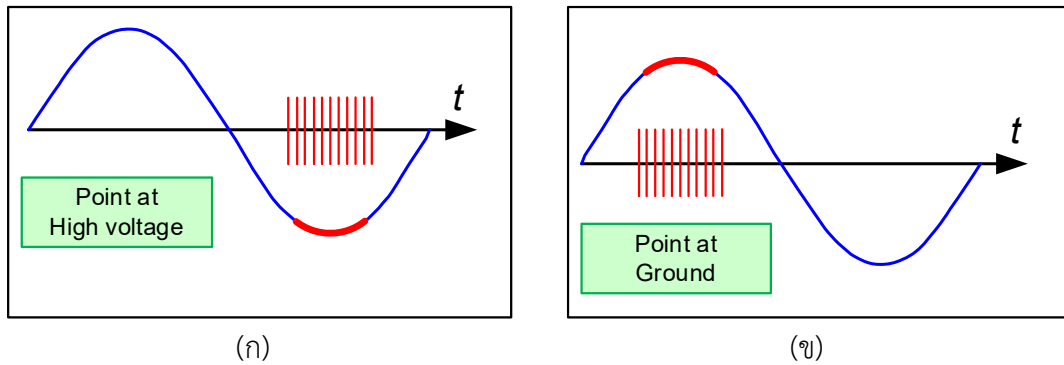


รูปที่ 2.15 ลักษณะการเกิดดิสชาร์จ (ก) โคโรนาดิสชาร์จ, (ข) ดิสชาร์จบนผิว และ (ค) ดิสชาร์จภายใน [34]

2.5.1 ลักษณะการเกิดดิสชาร์จบางส่วน

1. โคโรนาดิสชาร์จ (Corona discharge)

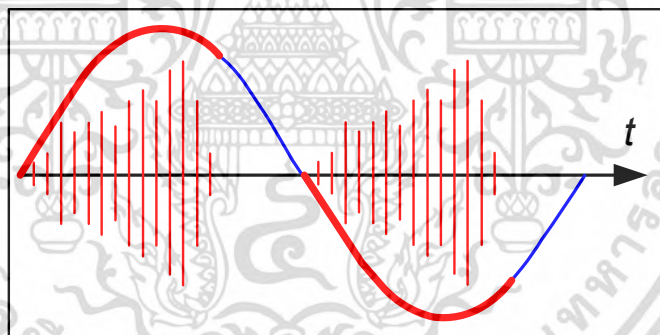
โคโรนาดิสชาร์จ คือ การดิสชาร์จในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (Highly non-uniform electric field) รอบบริเวณปลายแหลมหรือขอบคมที่อยู่ในอากาศหรือแก๊สความดันปกติ จะเริ่มเกิดการดิสชาร์จขึ้นเมื่อความเครียดสนามไฟฟ้าเกินค่าสนามไฟฟ้าวิกฤตของอากาศ โคโรนาดิสชาร์จจะเกิดขึ้นในสนามไฟฟ้ากระแสสลับในบริเวณที่มีแรงดันสูงที่สุด เมื่อแรงดันนี้มากกว่าแรงดันเริ่มเกิดโคโรนา ซึ่งแรงดันเริ่มเกิดโคโรนาในขั้วลบจะน้อยกว่าขั้วบวก หรือเรียกว่า ผลของขั้ว (Polarity effect) ซึ่งในฉนวนที่เป็นอากาศ หากอิเล็กโตรดปลายแหลมอยู่ที่ขั้วบวก โคโรนาดิสชาร์จจะเกิดที่ช่วงแรงดันสูงสุดฝั่งลบ และหากอิเล็กโตรดปลายแหลมอยู่ที่ขั้วลบ โคโรนาดิสชาร์จจะเกิดที่ช่วงแรงดันสูงสุดฝั่งบวก โดยแสดงดังรูปที่ 2.16 (ก) และ (ข) แต่ในฉนวนที่เป็นน้ำมัน การเกิดโคโรนาดิสชาร์จจะเกิดในลักษณะตรงกันข้ามกับการเกิดในฉนวนที่เป็นอากาศ อย่างไรก็ตาม หากเพิ่มแรงดันให้สูงขึ้นอีก โคโรนาดิสชาร์จจะปรากฏที่อีกครึ่งรอบของแรงดันด้วย



รูปที่ 2.16 ลักษณะการเกิดโคโรนาดิสชาร์จในฉนวนอากาศ (ก) ปลายแหลมอยู่ที่ขั้วบวก และ (ข) ปลายแหลมอยู่ที่ขั้วลบ [35]

2. ดิสชาร์จตามผิว (Surface discharge)

ดิสชาร์จตามผิวจะเกิดขึ้นจากขอบของอิเล็กโตรดคล้ายกับโคโรนาดิสชาร์จ ซึ่งการดิสชาร์จตามผิวนี้นี้จะขึ้นอยู่กับระดับแรงดันกระแสสลับ โดยเมื่อแรงดันเพิ่มขึ้นจะทำให้สตรีมเมอร์ (Streamer) ที่เกิดขึ้นและขนาดของดิสชาร์จบางส่วนจะมากขึ้นตามไปด้วย ดังนั้น ดิสชาร์จตามผิวจะมีขนาดเพิ่มขึ้นจากจุดตัดศูนย์ไปยังจุดยอดของแรงดันไฟฟ้าตามรูปที่ 2.17

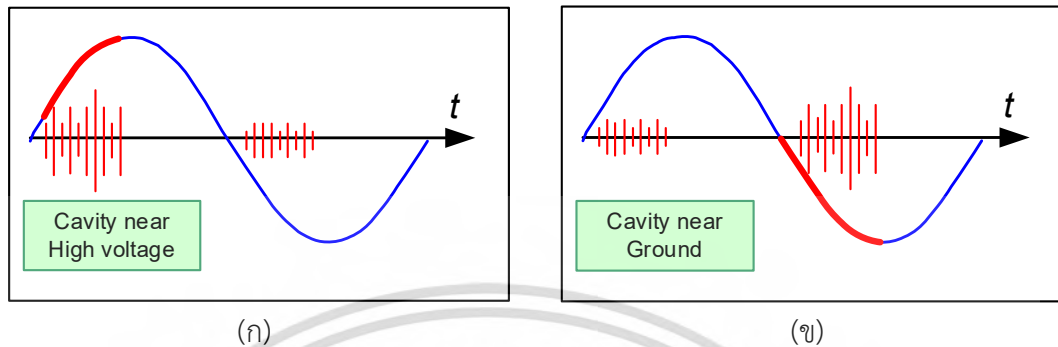


รูปที่ 2.17 ลักษณะการเกิดดิสชาร์จที่ผิว [35]

3. ดิสชาร์จภายใน (Internal discharge)

ดิสชาร์จภายในจะเกิดขึ้นภายในฉนวนแข็งหรือฉนวนเหลว ซึ่งมีฟองแก๊สอยู่ภายในระบบ ฉนวนนั้นๆ โดยความเครียดสนามไฟฟ้าของฉนวนที่ดิสชาร์จภายในเริ่มเกิดขึ้นขึ้นอยู่กับความเครียดสนามไฟฟ้าของแก๊สในโพรงอากาศ ฉนวนที่มีสิ่งเจือปนอื่นอยู่จะทำให้เกิดแก๊สขึ้นหลังจากเกิดเบรกดาวน์ครั้งแรก การมีฟองแก๊สอยู่ภายในฉนวนจะเป็นต้นเหตุนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์ในที่สุด จึงอาจกล่าวได้ว่าฉนวนใดที่มีดิสชาร์จภายใน จะทำให้อายุการใช้งานของฉนวนสั้นลง โดยลักษณะการเกิดดิสชาร์จบางส่วนตามแรงดันไฟฟ้าจะเป็นไปตามรูปที่ 2.18 (ก) และ (ข) ซึ่งหากโพรงอากาศอยู่ใกล้กับ

ขั้วบวก ขนาดของดิสชาร์จบางส่วนฝั่งบวกจะสูงกว่าฝั่งลบ และหากโพรงอากาศอยู่ใกล้กับขั้วลบ ขนาดของดิสชาร์จบางส่วนฝั่งลบจะสูงกว่าฝั่งบวก



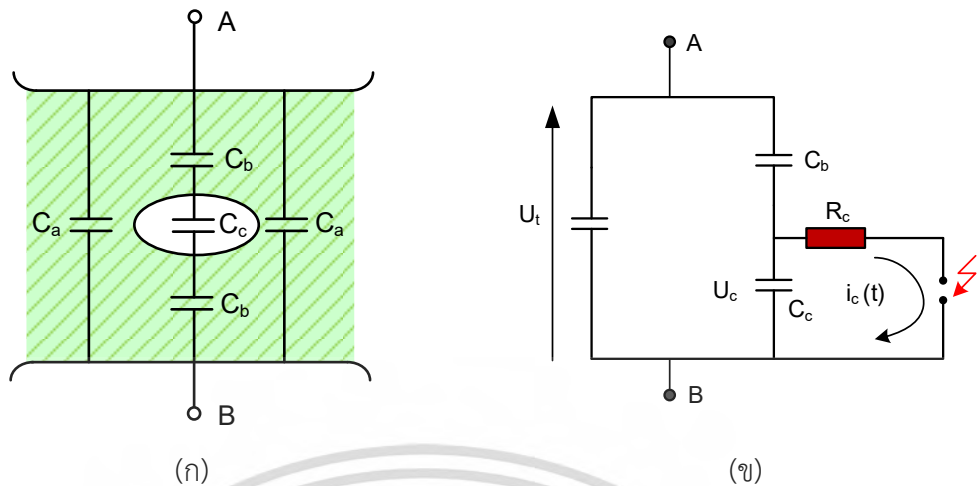
รูปที่ 2.18 ลักษณะการเกิดดิสชาร์จภายใน (ก) โพรงอากาศอยู่ใกล้ขั้วบวก และ (ข) โพรงอากาศอยู่ใกล้ขั้วลบ [35]

2.5.2 วงจรสมมูลของดิสชาร์จบางส่วน

โดยเหตุที่ดิสชาร์จบางส่วนภายในที่เกิดขึ้นในระบบฉนวน หรือในอุปกรณ์ไฟฟ้าซึ่งไม่สามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตา ฉะนั้น เพื่อให้สามารถตรวจจับหรือวัดค่าดิสชาร์จบางส่วนในฉนวนได้ จึงมีการเขียนวงจรสมมูลของฉนวนที่มีดิสชาร์จบางส่วนขึ้น และเพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจ จึงใช้วงจรสมมูลสำหรับฉนวนที่มีโพรงอากาศ หรือแบบจำลองดิสชาร์จบางส่วนแบบ ABC model เพื่อใช้ในการวิเคราะห์การเกิดและหาปริมาณดิสชาร์จบางส่วนภายใน ดังวงจรสมมูลของฉนวนในรูปที่ 2.19

ในรูปที่ 2.19 แสดงวัสดุฉนวนที่มีโพรงอากาศภายในระบบฉนวน และฉนวนวางอยู่ระหว่างอิเล็กโทรด A-B โพรงอากาศในระบบฉนวนแทนด้วยความจุไฟฟ้า C_c , ฉนวนที่ต่ออนุกรมกับโพรงอากาศแทนด้วยความจุไฟฟ้า C_b' ส่วนที่ต่ออนุกรมกับ C_c นี้ จะรวมกันได้เป็น C_b ส่วนฉนวนที่สมบูรณ์ที่อยู่โดยรอบของ C_c จะให้ ค่าเป็น C_a' และรวมกันในส่วนนี้จะได้เป็น C_a ซึ่งค่าความจุไฟฟ้าของวัสดุทดสอบ C_t จะมีค่าโดยประมาณเท่ากับ C_a ซึ่งมีค่ามากกว่า C_b มากๆ นั่นคือ

$$C_t \approx C_a \gg C_c > C_b$$



รูปที่ 2.19 วงจรสมมูลการดีสชาร์จบางส่วน (ก) แบบจำลองดีสชาร์จภายในโพรงอากาศในเนื้อฉนวน และ (ข) วงจรสมมูลการเกิดดีสชาร์จบางส่วนในโพรงอากาศ [34]

2.5.3 ลักษณะการเกิดดีสชาร์จบางส่วนในระบบสายเคเบิลใต้ดิน

การเกิดดีสชาร์จบางส่วนในระบบสายเคเบิลใต้ดินจะทำให้สภาพฉนวนเสื่อมสภาพไปเรื่อยๆ จนเกิดความล้มเหลวขึ้นได้ ซึ่งตัวอย่างของลักษณะการเกิดดีสชาร์จบางส่วนในระบบสายเคเบิลใต้ดินได้สรุปไว้ในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ตัวอย่างลักษณะการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในระบบสายเคเบิลใต้ดิน [36]

ประเภทของ PD	สาเหตุ	ขนาด PD	ระดับความเสียหาย
ดิสชาร์จภายใน (Internal discharge)	<ul style="list-style-type: none"> - กระบวนการผลิตที่ไม่ดี - การเสื่อมอายุของวัสดุฉนวน - โพรงอากาศภายในฉนวน 	<p>ขึ้นกับความถี่ของแรงดันไฟฟ้า, อัตราการขึ้นแรงดันไฟฟ้าและขนาดของโพรงอากาศ</p>	ฉนวนเกิดความเสียหาย
ดิสชาร์จตามผิว (Surface discharge)	<ul style="list-style-type: none"> - น้ำหรือความชื้นแทรกซึมเข้ามา - การพัฒนาของโพรงอากาศในฉนวน 	หลักร้อยละโคคูโลมบ์	เกิดความเสียหายเล็กน้อยถึงปานกลาง แต่ไม่ถึงการเกิดความล้มเหลวขึ้น
สิ่งแปลกปลอมชนิดปลายแหลม (Protrusion defect)	<ul style="list-style-type: none"> - โคโรนาดิสชาร์จที่หัวต่อสายเคเบิล 	ขึ้นกับลักษณะและขนาดของปลายแหลมยื่น	ปลายแหลมยื่นจะทำให้เกิดความเข้มสนามไฟฟ้าสูงมากและเกิดการเร่งความเร็วเสื่อมสภาพเนื่องจากสนามไฟฟ้า
ต้นไม้ไฟฟ้า (Electrical treeing)	<ul style="list-style-type: none"> - สิ่งแปลกปลอม, โพรงแก๊สที่อยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าสูงเป็นเวลานาน 	ขนาดสูงกว่าดิสชาร์จภายใน	ฉนวนเสียหายมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบการทดลองและการทดสอบ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบการทดลองวิทยานิพนธ์นี้ ประกอบด้วย การเตรียมระบบสายเคเบิลใต้ดินเพื่อใช้ในการทดสอบ, รายละเอียดการทดสอบและวงจรถ่ายทอด ทั้งการทดสอบการวัดผลตอบสนองทางไดอิเล็กตริกและการทดสอบด้วยแรงดันสูง ตลอดจนการวิเคราะห์ผลการทดสอบ

3.1 การเตรียมระบบสายเคเบิลใต้ดินพิกัด 22 กิโลโวลต์ เพื่อใช้ในการทดสอบ

ระบบสายเคเบิลใต้ดินที่ใช้ในการทดสอบสำหรับวิทยานิพนธ์นี้ ประกอบด้วย 2 รูปแบบ คือ ระบบสายเคเบิลใต้ดินพิกัด 22 กิโลโวลต์ที่มีเฉพาะส่วนของสายเคเบิลใต้ดิน และระบบสายเคเบิลใต้ดินพิกัด 22 กิโลโวลต์ที่มีทั้งส่วนของสายเคเบิลใต้ดินและอุปกรณ์เสริม คือ หัวต่อสายเคเบิลใต้ดิน (Cable termination) และข้อต่อสายเคเบิลใต้ดิน (Cable joint) โดยแต่ละระบบสายเคเบิลใต้ดินมีรายละเอียดดังนี้

3.1.1 ระบบสายเคเบิลใต้ดินพิกัด 22 กิโลโวลต์ที่มีเฉพาะส่วนของสายเคเบิลใต้ดิน

สายเคเบิลใต้ดินนี้มีพิกัดแรงดัน 22 กิโลโวลต์ ฉนวนครอสลิงกด์พอลิเอทิลีน (XLPE) โดยเป็นสายเคเบิลใต้ดินที่ผ่านการใช้งานจริงเป็นระยะเวลามากกว่า 10 ปี ซึ่งสายเคเบิลใต้ดินที่ใช้ในการทดสอบนี้มีการตรวจพบการมีอยู่ของต้นไม้ (Water tree) ดังตัวอย่างรูปที่ 3.1 และส่วนประกอบของสายเคเบิลใต้ดินมีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนเนื่องจากสภาพแวดล้อมที่สายเคเบิลใต้ดินถูกวางไว้ดังรูปที่ 3.2 โดยในการทดสอบนี้ มีการเตรียมสายเคเบิลใต้ดิน 2 ลักษณะ คือ ลักษณะที่ 1.1 การปกสายเคเบิลใต้ดินเพื่อการทดสอบโดยคงส่วนประกอบทั้งหมดไว้ และ ลักษณะที่ 1.2 การปกสายเคเบิลใต้ดินโดยนำส่วนประกอบอย่างอื่นออกทั้งหมดเหลือเพียงชั้นตัวกั้นฉนวน (Insulation screen) เป็นชั้นนอกสุดดังรูปที่ 3.3 (ก) และรูปที่ 3.3 (ข) ตามลำดับ และระยะความยาวการปกสายเคเบิลใต้ดินแต่ละรูปแบบแสดงดังตารางที่ 3.1 สุดท้ายแล้ว ระบบสายเคเบิลใต้ดินลักษณะที่ 1.1 จะมีความยาวของเทปทองแดงที่วัดจากปลายด้านหนึ่งถึงปลายอีกด้านหนึ่งไว้เท่ากับ 100 เซนติเมตร และระบบสายเคเบิลใต้ดินลักษณะที่ 1.2 จะมีความยาวของชั้นตัวกั้นฉนวนไว้เท่ากับ 100 เซนติเมตรเช่นเดียวกัน



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างของต้นไม้ที่พบในสายเคเบิลใต้ดินที่ใช้ทดสอบ [37]

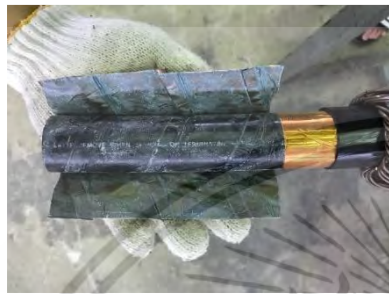
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



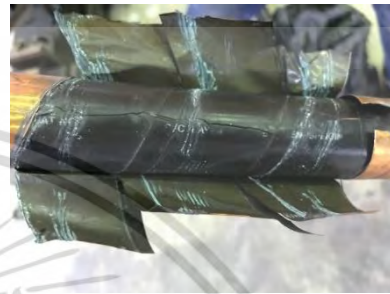
(ก)



(ข)

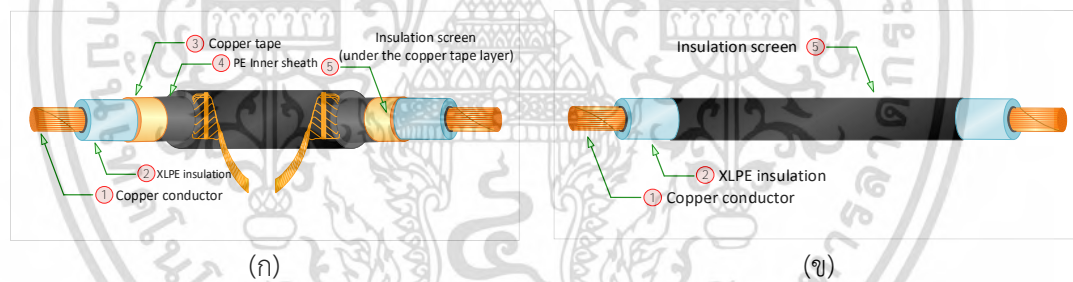


(ค)



(ง)

รูปที่ 3.2 การเปลี่ยนแปลงของส่วนประกอบในสายเคเบิลใต้ดินที่ใช้ทดสอบอย่างชัดเจน เช่น (ก) สีของเส้นลวดทองแดงสำหรับต่อลงดินมีการเปลี่ยนสี, (ข) รอยแตกของเทปทองแดง, (ค) พบสารประกอบประเภทคอปเปอร์ไดซัลไฟด์ขึ้นที่เทปทองแดงและ (ง) พบรอยแตกบนชั้นตัวกั้นฉนวน



(ก)

(ข)

รูปที่ 3.3 การปกสายเคเบิลใต้ดินเพื่อใช้ในการทดสอบ [37] (ก) การปกสายเคเบิลใต้ดินที่ยังคงส่วนประกอบทั้งหมดไว้ (รูปแบบที่ 1.1) และ (ข) การปกสายเคเบิลใต้ดินที่เหลือชั้นตัวกั้นฉนวนเป็นชั้นนอกสุด (รูปแบบที่ 1.2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 ระยะความยาวการปกสายเคเบิลใต้ดิน

ส่วนประกอบสายเคเบิลใต้ดิน	ระยะความยาวที่ทำการปก (เซนติเมตร)	
	รูปแบบที่ 1.1	รูปแบบที่ 1.2
1. ตัวนำทองแดง	7.00	7.00
2. ชั้นฉนวน XLPE	5.00	5.00
3. ชั้นตัวกันฉนวน	-	100.00
4. เทปทองแดง	3.00	-
5. ชั้นเปลือกโพลีเอทิลีนด้านใน	3.00	-

3.1.2 ระบบสายเคเบิลใต้ดินพิกัด 22 กิโลโวลต์ที่มีทั้งส่วนของสายเคเบิลใต้ดินและอุปกรณ์เสริม

ระบบสายเคเบิลใต้ดินในรูปแบบนี้เป็นวัตถุประสงค์สำหรับที่มีส่วนประกอบครบถ้วนทั้งระบบ คือ ส่วนสายเคเบิลใต้ดิน (Cable section), ส่วนหัวต่อสายเคเบิล (Cable termination section), และ ส่วนข้อต่อสายเคเบิล (Cable joint section) โดยส่วนสายเคเบิลใต้ดินจะใช้สายเคเบิลใต้ดินพิกัดแรงดัน 22 กิโลโวลต์ ฉนวน XLPE ความยาว 3 เมตร จำนวน 2 เส้น โดยเชื่อมต่อกันด้วยข้อต่อสายเคเบิล และใส่หัวต่อสายเคเบิลทั้งสองด้านที่ปลายสายเคเบิลใต้ดิน โดยได้มีการจำลองข้อบกพร่องภายในข้อต่อสายเคเบิลที่จำลองเหตุที่อาจเกิดขึ้นได้ในการทำงานจริง (Poor workmanship) คือ การสร้างรอยบากความลึก 3 มิลลิเมตรที่เนื้อฉนวน XLPE, การทาบงเหล็กบนผิวของฉนวน XLPE และการทาบงทองแดงบนผิวของฉนวน XLPE ดังรูปที่ 3.4 (ก) ถึงรูปที่ 3.4 (ค) นอกจากนี้ได้มีการเตรียมระบบสายเคเบิลใต้ดินที่ข้อต่อสายเคเบิลมีความสมบูรณ์ดังรูปที่ 3.4 (ง) เพื่อเป็นค่าอ้างอิงในการเปรียบเทียบ



รูปที่ 3.4 การเตรียมระบบสายเคเบิลใต้ดินสำหรับการทดสอบรูปแบบที่ 2 โดยมีการจำลองข้อบกพร่อง ดังนี้ [38, 39] (ก) จำลองรอยบากความลึก 3 มิลลิเมตรที่เนื้อฉนวน XLPE, (ข) การทาบงเหล็กบนผิวของฉนวน XLPE, (ค) การทาบงทองแดงบนผิวของฉนวน XLPE และ (ง) ระบบสายเคเบิลใต้ดินที่ข้อต่อสายเคเบิลมีความสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การทดสอบเพื่อวัดผลตอบสนองทางไดอิเล็กตริกในโดเมนเวลาสำหรับระบบสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูง

สำหรับการทดสอบเพื่อวัดผลตอบสนองทางไดอิเล็กตริกในโดเมนเวลานั้น จะใช้เทคนิคการวัดกระแสโพลาไรเซชันและกระแสดีโพลาไรเซชัน (Polarization and Depolarization Current (PDC) measurement) หรือการทดสอบ PDC measurement โดยใช้เครื่องมือทดสอบ PDC-ANALYSER-1MOD ดังรูปที่ 3.5 ในการทดสอบ



รูปที่ 3.5 เครื่องมือทดสอบ PDC-ANALYSER-1MOD

โดยการทดสอบ PDC measurement ได้ดำเนินการกับระบบสายเคเบิลใต้ดินพิกัด 22 กิโลโวลต์ทั้ง 2 รูปแบบ โดยระบบสายเคเบิลใต้ดินรูปแบบที่ 1 ที่มีเฉพาะส่วนของสายเคเบิลใต้ดินจะทดสอบในทั้ง 2 ลักษณะ ประกอบด้วย การทดสอบ PDC measurement กับระบบสายเคเบิลใต้ดินที่ปกแล้วยังคงส่วนประกอบทั้งหมดไว้ และการทดสอบ PDC measurement กับระบบสายเคเบิลใต้ดินที่ปกโดยนำส่วนประกอบอย่างอื่นออกทั้งหมดเหลือเพียงชั้นตัวกั้นฉนวนเป็นชั้นนอกสุด และระบบสายเคเบิลใต้ดินรูปแบบที่ 2 จะทำการทดสอบกับระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีการจำลองข้อบกพร่องในข้อต่อสายเคเบิลใต้ดิน และเปรียบเทียบกับระบบสายเคเบิลใต้ดินที่ข้อต่อสายเคเบิลมีความสมบูรณ์ โดยก่อนการทดสอบ ระบบสายเคเบิลใต้ดินที่จะถูกทำการทดสอบจะต้องทำความสะอาดผิวในท่ทุกส่วนประกอบและจะต้องทำการคายประจุคงค้างในระบบฉนวนลงดินเป็นระยะเวลาหนึ่ง เพื่อไม่ให้ส่งผลกระทบต่อผลการทดสอบ นอกจากนี้ จะทำการบันทึกอุณหภูมิแวดล้อมและความชื้นสัมพัทธ์ ณ ห้องทดสอบก่อนการทดสอบทุกครั้ง ซึ่งสำหรับการทดสอบ PDC measurement นั้นได้มีการแนะนำขั้นตอนการทดสอบทั้งหมด 3 ขั้นตอน [40, 41] ดังนี้

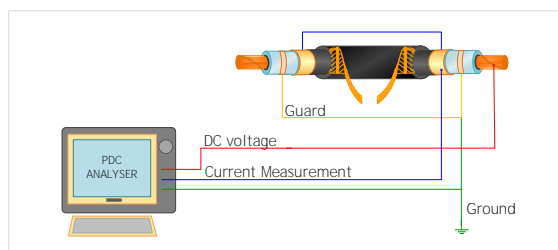
1. การวัดขั้นแรก (Initial measurement): เป็นการวัดเพื่อดูสภาพเริ่มต้นของระบบฉนวนที่ต้องการวัด โดยจะอธิบายได้จากการสังเกตกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านระบบฉนวน ในการดูกระแสไฟฟ้าในขั้นตอนนี้ จะทำการวัดกระแสไฟฟ้าโดยไม่กำหนดช่วงการไหลกระแสของระบบฉนวน ซึ่งมีความจำเป็นว่า กระแสไฟฟ้าที่วัดได้ในขั้นตอนนี้ควรจะน้อยและอยู่ในสภาวะคงตัว หากกระแสไฟฟ้าในขั้นตอนนี้สูง แต่กระแสไฟฟ้าอยู่ในสภาวะคงตัวนั้น กระแสไฟฟ้านี้จะถูกพิจารณาเป็น “offset” ในการประเมิน ซึ่งจะนำไปลบในขั้นตอนการวัดจริง

2. การวัดขั้นตรวจสอบ (Control measurement): การวัดในขั้นตอนนี้จะดำเนินการเพื่อยืนยันวงจรการทดสอบว่าไม่มีความผิดปกติใดๆ ซึ่งก่อนจะทำการวัดขั้นจริง มีคำแนะนำให้ดำเนินการวัดขั้นตรวจสอบด้วยช่วงเวลาอัดประจุสั้นๆ เช่น 5 ถึง 10 วินาที เพื่อตรวจสอบวงจรทั้งหมด จากการยืนยันขนาดของกระแสไฟฟ้าที่วัดได้และค่าความจุไฟฟ้า การวัดขั้นตรวจสอบแต่ละครั้งจะไม่ส่งผลต่อการวัดขั้นจริง เนื่องจากกระแสไฟฟ้าผ่อนคลาย (Relaxation current) นั้นเกิดจากการอัดประจุในระยะเวลาสั้นๆ ซึ่งสามารถละเว้นได้หลังจากช่วงเวลารอเพียงไม่กี่นาที

3. การวัดขั้นจริง (Main measurement): การวัดขั้นจริงจะดำเนินการทดสอบหลังการวัดขั้นตรวจสอบโดยจะเลือกขนาดแรงดันที่ใช้อัดประจุที่เพียงพอและเหมาะสม รวมถึงระยะเวลาการไหลกระแสและดีโพล่าไรเซชันด้วยเช่นเดียวกัน

3.2.1 การทดสอบ PDC measurement กับระบบสายเคเบิลใต้ดินที่ปกคลุมแล้วยังคงส่วนประกอบทั้งหมดไว้

การทดสอบ PDC measurement ในหัวข้อนี้จะทำการเชื่อมต่อสายจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ตัวนำทองแดงของสายเคเบิลใต้ดินโดยตรงและวัดกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นผ่านเทปทองแดงที่เป็นส่วนประกอบของสายเคเบิลใต้ดินที่ทำการทดสอบ โดยทำการเชื่อมต่อสายวัดกระแสไฟฟ้า ณ ตำแหน่งนี้ นอกจากนี้บริเวณฉนวน XLPE ที่ยื่นออกมาจากการปกคลุมจะนำเทปทองแดงที่นำไฟฟ้าได้ทั้งสองด้าน (ด้านเทปทองแดงและด้านกาวที่มีสมบัติความนำไฟฟ้า) พันรอบฉนวน XLPE ที่ระยะ 4 เซนติเมตรวัดจากขอบของฉนวน XLPE ที่ติดกับตัวนำทองแดง เพื่อทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรดสำหรับนำกระแสไฟฟ้ารั่วไหล (Leakage current) ที่ไหลผ่านผิวของฉนวน XLPE ซึ่งเป็นองค์ประกอบกระแสไฟฟ้าที่ไม่ต้องการวัดลงสู่ดิน [42] การจัดวงจรสำหรับการทดสอบในหัวข้อนี้แสดงดังรูปที่ 3.6 ซึ่งในการทดสอบนี้ จะใช้แรงดันทดสอบกระแสตรง 1,000 โวลต์, ระยะเวลาการวัดกระแสโพล่าไรเซชันเท่ากับ 1,500 วินาที และระยะเวลาการวัดกระแสดีโพล่าไรเซชันเท่ากับ 1,500 วินาที



(ก)

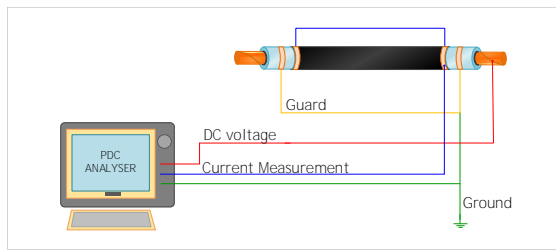


(ข)

รูปที่ 3.6 การจัดวงจรทดสอบ PDC measurement กับระบบสายเคเบิลใต้ดินที่ปกแล้วยังคงส่วนประกอบทั้งหมดไว้ (ก) แผนภาพวงจรการทดสอบในหัวข้อที่ 3.2.1 [37] และ (ข) การจัดวงจรการทดสอบจริง

3.2.2 การทดสอบ PDC measurement กับระบบสายเคเบิลใต้ดินที่ปกโดยนำส่วนประกอบอย่างอื่นออกทั้งหมดเหลือเพียงชั้นตัวกั้นฉนวนเป็นชั้นนอกสุด

การทดสอบ PDC measurement ในหัวข้อนี้จะทำการเชื่อมต่อสายจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ตัวนำทองแดงของสายเคเบิลใต้ดินโดยตรงเช่นเดียวกับหัวข้อที่ 3.2.1 แต่ในหัวข้อนี้จะนำเทปกาวทองแดงพันที่ปลายแต่ละด้านบนชั้นตัวกั้นฉนวน ความกว้างด้านละ 4 เซนติเมตร โดยทำการเชื่อมต่อสายวัดกระแสไฟฟ้า ณ ตำแหน่งนี้เพื่อเป็นอิเล็กโทรดสำหรับวัดกระแสไฟฟ้า นอกจากนี้บริเวณฉนวน XLPE ที่ยื่นออกมาจากการปกจะนำเทปกาวทองแดงที่นำไฟฟ้าได้ทั้งสองด้าน (ด้านเทปกาวทองแดงและด้านกาวที่มีความนำไฟฟ้า) พันรอบฉนวน XLPE ที่ระยะ 4 เซนติเมตรวัดจากขอบของฉนวน XLPE ที่ติดกับตัวนำทองแดงเช่นเดียวกับหัวข้อที่ 3.2.1 เพื่อทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรดสำหรับนำกระแสไฟรั่วไหล (Leakage current) ที่ไหลผ่านผิวของฉนวน XLPE ซึ่งเป็นองค์ประกอบกระแสไฟฟ้าที่ไม่ต้องการวัดลงสู่กราวด์ [42] การจัดวงจรสำหรับการทดสอบในหัวข้อนี้แสดงดังรูปที่ 3.7 ซึ่งในการทดสอบนี้ จะใช้แรงดันทดสอบกระแสตรง 1,000 โวลต์, ระยะเวลาการวัดกระแสโพลาริเซชันเท่ากับ 1,500 วินาที และระยะเวลาการวัดกระแสดีโพลาริเซชันเท่ากับ 1,500 วินาทีเช่นเดียวกับหัวข้อที่ 3.2.1



(ก)

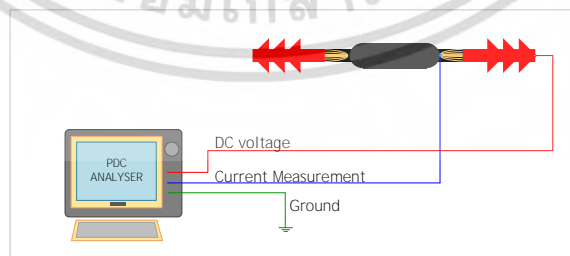


(ข)

รูปที่ 3.7 การจัดวงจรทดสอบ PDC measurement กับระบบสายเคเบิลใต้ดินที่ปกโดยนำ ส่วนประกอบอย่างอื่นออกทั้งหมดเหลือเพียงชั้นตัวกันฉนวนเป็นชั้นนอกสุด (ก) แผนภาพวงจรการ ทดสอบในหัวข้อที่ 3.2.2 [37] และ (ข) การจัดวงจรการทดสอบจริง

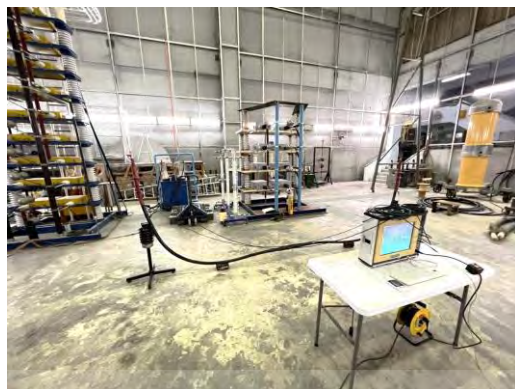
3.2.3 การทดสอบ PDC measurement กับระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีการจำลองข้อบกพร่องใน ข้อต่อสายเคเบิลใต้ดิน

การทดสอบ PDC measurement ในหัวข้อนี้จะทดสอบกับระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีการ จำลองข้อบกพร่องในข้อต่อสายเคเบิล คือ ข้อบกพร่องที่มีการบากที่เนื้อฉนวน XLPE ความลึก 3 มิลลิเมตร, ข้อบกพร่องที่มีการทาบทองแดงบนผิวของฉนวน XLPE และทำการทดสอบกับระบบสาย เคเบิลใต้ดินที่ข้อต่อสายเคเบิลมีความสมบูรณ์ โดยในการทดสอบ จะเชื่อมต่อสายจ่ายแรงดันไฟฟ้า ณ ตำแหน่งหางปลา (Cable lug) ของระบบสายเคเบิลใต้ดินที่ทำการทดสอบด้านใดด้านหนึ่ง และทำ การวัดกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นผ่านเส้นลวดตัวนำสำหรับการต่อลงดิน (Ground wires) การจัดวงจร สำหรับการทดสอบในหัวข้อนี้แสดงดังรูปที่ 3.8 ในการทดสอบนี้ จะใช้แรงดันทดสอบกระแสตรง 1,500 โวลต์, ระยะเวลาการวัดกระแสโพลาริเซชันเท่ากับ 1,500 วินาที และระยะเวลาการวัดกระแส ดีโพลาริเซชันเท่ากับ 1,500 วินาที



(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)



(ค)

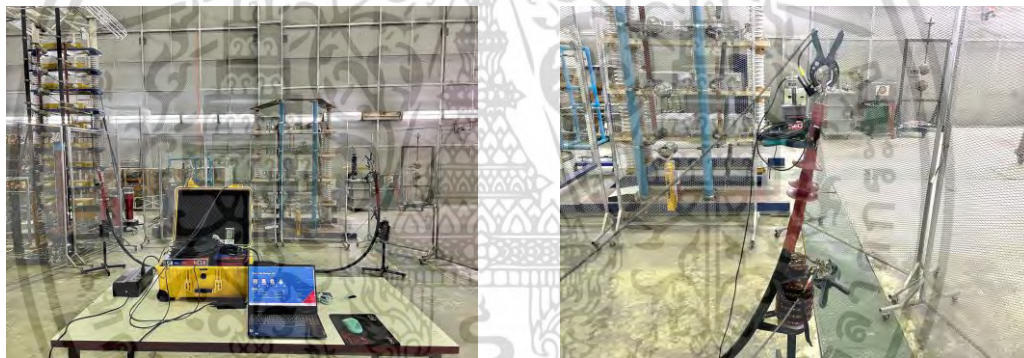
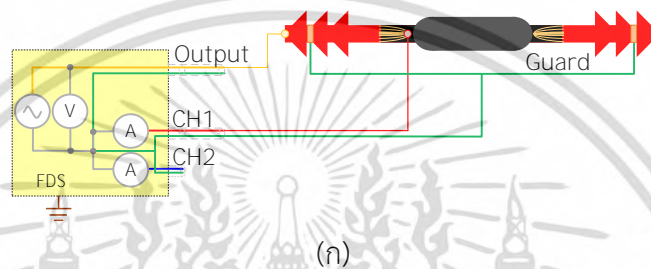
รูปที่ 3.8 การจัดวางจรทดสอบ PDC measurement กับระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีการจำลองข้อบกพร่องในข้อต่อสายเคเบิลใต้ดิน [39] (ก) แผนภาพวงจรการทดสอบในหัวข้อที่ 3.2.3, (ข) การจัดวางจรการทดสอบจริง และ (ค) การเชื่อมต่อสายจ่ายแรงดันไฟฟ้าและสายวัดกระแสไฟฟ้าที่บริเวณหัวต่อสายเคเบิล

3.3 การทดสอบเพื่อวัดผลตอบสนองทางไดอิเล็กตริกในโดเมนความถี่สำหรับระบบสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูง

สำหรับการทดสอบเพื่อวัดผลตอบสนองทางไดอิเล็กตริกในโดเมนความถี่จะใช้เทคนิคการวัดสเปกโตรสโคปีในโดเมนความถี่ (Frequency Domain Spectroscopy) หรือเทคนิค FDS จะใช้เครื่องมือทดสอบ Omicron DIRANA ดังรูปที่ 3.9 โดยได้ทำการทดสอบกับระบบสายเคเบิลใต้ดินพิกัด 22 กิโลโวลต์ที่มีการจำลองข้อบกพร่องในข้อต่อสายเคเบิลใต้ดิน โดยหัวข้อเทคนิค FDS จะทำการทดสอบกับระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีการจำลองข้อบกพร่อง ประกอบด้วย ข้อบกพร่องที่มีการบากที่เนื้อฉนวน XLPE ความลึก 3 มิลลิเมตร, ข้อบกพร่องที่มีการทาผงเหล็กบนผิวของฉนวน XLPE และระบบสายเคเบิลใต้ดินที่ข้อต่อสายเคเบิลมีความสมบูรณ์ สำหรับเทคนิค FDS จะทำการเชื่อมต่อสายจ่ายแรงดันไฟฟ้า ณ ตำแหน่งหางปลาของระบบสายเคเบิลใต้ดินด้านใดด้านหนึ่ง และทำการวัดกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นผ่านเส้นลวดตัวนำสำหรับการต่อลงดิน (Ground wires) นอกจากนี้ ได้นำเทปกาทองแดงพันที่บริเวณผิวของหัวต่อสายเคเบิลใต้ดินทั้งสองด้านเพื่อทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรดสำหรับนำกระแสไฟฟ้ารั่วไหลบนผิวของหัวต่อสายเคเบิลลงสู่ดิน การจัดวางจรสำหรับเทคนิค FDS แสดงดังรูปที่ 3.10 และการทดสอบนี้จะใช้แรงดันไฟฟ้าค่ายอด (Peak voltage) กระแสสลับเท่ากับ 200 โวลต์ และย่านความถี่ที่ใช้ในการวัดคือ 1 มิลลิเฮิรตซ์ ถึง 1 กิโลเฮิรตซ์



รูปที่ 3.9 เครื่องมือทดสอบ Omicron DIRANA



(ข)

(ค)

รูปที่ 3.10 การจัดวงจรทดสอบ FDS measurement กับระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีการจำลองข้อบกพร่องในข้อต่อสายเคเบิลใต้ดิน (ก) แผนภาพวงจรการทดสอบในหัวข้อที่ 3.3 [39], (ข) การจัดวงจรการทดสอบจริง และ (ค) การเชื่อมต่อสายจ่ายแรงดันไฟฟ้าและสายวัดกระแสไฟฟ้าที่บริเวณหัวต่อสายเคเบิล

3.4 การทดสอบแรงดันสูงที่ความถี่ต่ำมากสำหรับระบบสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูง

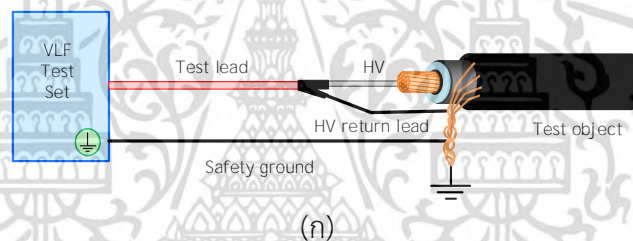
การทดสอบแรงดันสูงที่ความถี่ต่ำมากหรือ Very Low Frequency (VLF) testing จะดำเนินการทดสอบกับระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีการข้อบกพร่องภายในข้อต่อสายเคเบิลในกรณีข้อบกพร่องที่มีการบวมที่เนื้อฉนวน XLPE ความลึก 3 มิลลิเมตร, ข้อบกพร่องที่มีการทางทองแดงบนผิวของฉนวน XLPE และระบบสายเคเบิลใต้ดินที่ข้อต่อสายเคเบิลมีความสมบูรณ์ ด้วยเครื่องมือทดสอบ b2 HVA45TD ดังรูปที่ 3.11 โดยจะทำการทดสอบเฉพาะหัวข้อค่าตัวประกอบกำลังการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูญเสียของระบบฉนวน หรือ dissipation factor ($\tan\delta$) การจัดวงจรการทดสอบ คือ เชื่อมต่อสายจ่ายแรงดัน ณ ตำแหน่งหางปลาของสายเคเบิลใต้ดินด้านใดด้านหนึ่ง โดยได้มีการใส่อิเล็กทรอนิกส์เพื่อป้องกันการเกิดโคโรนาดีสชาร์จบริเวณจุดเชื่อมต่อที่มีแรงดันสูงด้วย และเชื่อมต่อเส้นลวดตัวนำสำหรับการต่อลงดิน (Ground wires) ลงสู่ดิน โดยวงจรการทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.11 เครื่องมือทดสอบ b2 HVA45TD สำหรับการทดสอบแรงดันสูงที่ความถี่ต่ำมาก



(ข)

(ค)

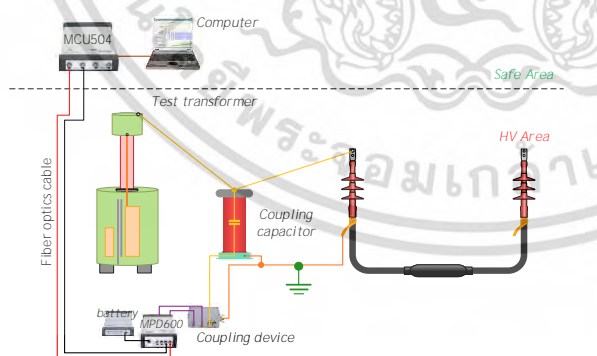
รูปที่ 3.12 การจัดวงจรทดสอบ VLF testing กับระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีการจำลองข้อบกพร่องในข้อต่อสายเคเบิลใต้ดิน (ก) แผนภาพวงจรการทดสอบในหัวข้อที่ 3.4 [38], (ข) การจัดวงจรการทดสอบจริง และ (ค) การเชื่อมต่อสายจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่บริเวณหัวต่อสายเคเบิลและการต่อลงดินของสายเคเบิลใต้ดิน

ในการทดสอบนี้ จะทดสอบตามมาตรฐาน IEEE Std. 400.2-2013 [30] ในหัวข้อการทดสอบค่าตัวประกอบกำลังการสูญเสียของระบบฉนวน โดยจะทดสอบด้วยแรงดันสูง 3 ระดับแรงดัน คือ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$0.5U_0$, $1.0U_0$ และ $1.5U_0$ โดย U_0 คือ แรงดันใช้งานของระบบสายเคเบิลใต้ดินเมื่อวัดเทียบดิน และสำหรับระบบสายเคเบิลใต้ดินพิกัด 22 กิโลโวลต์ แรงดันใช้งานเมื่อวัดเทียบดินจะเท่ากับ 12.7 กิโลโวลต์ เพราะฉะนั้น แรงดันที่ใช้ในการทดสอบจะเท่ากับ 6.4 กิโลโวลต์, 12.7 กิโลโวลต์ และ 19.1 กิโลโวลต์ ตามลำดับ นอกจากนี้ รูปคลื่นของแรงดันทดสอบเป็น รูปคลื่นไซน์ (Sinusoidal waveform) และความถี่ของทุกๆแรงดันทดสอบตามมาตรฐานข้างต้น กำหนดให้ทำการทดสอบที่ความถี่ 0.1 เฮิรตซ์ โดยก่อนการทดสอบ VLF จะต้องทำความสะอาดหัวต่อสายเคเบิลให้สะอาดทุกครั้งตามคำแนะนำในมาตรฐาน

3.5 การทดสอบการวัดดิสชาร์จบางส่วนสำหรับระบบสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูง

การทดสอบการวัดดิสชาร์จบางส่วน หรือ Partial Discharge (PD) test จะดำเนินการทดสอบกับระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีการขั้วบกร่องภายในข้อต่อสายเคเบิลในกรณีขั้วบกร่องที่มีการบากที่เนื้อฉนวน XLPE ความลึก 3 มิลลิเมตร, ขั้วบกร่องที่มีการทาผงทองแดงบนผิวของฉนวน XLPE และระบบสายเคเบิลใต้ดินที่ข้อต่อสายเคเบิลมีความสมบูรณ์ ซึ่งการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนนี้ จะเป็นการทดสอบแบบดั้งเดิม (Conventional partial discharge test) ตามข้อกำหนดในมาตรฐาน IEC 60270 [33] และมาตรฐาน IEC 60885-3 [43] โดยใช้ชุดระบบวัดดิสชาร์จบางส่วน OMICRON MPD 600 โดยการเตรียมวงจรทดสอบในหัวข้อนี้ จะนำหม้อแปลงทดสอบต่อขนานกับตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว (Coupling capacitor) เพื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับระบบสายเคเบิลใต้ดินที่ทำการทดสอบ โดยมีอุปกรณ์คัปปลิง (Coupling device) เชื่อมต่อแบบอนุกรมกับตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว และจะเชื่อมต่อกับชุดระบบวัดดิสชาร์จบางส่วนผ่านสายโคแอกเซียล ดังรูปที่ 3.13



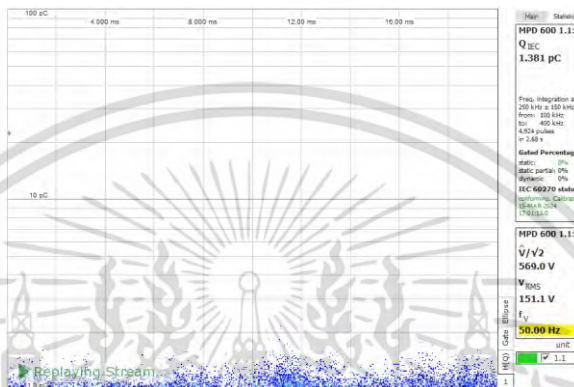
(ก)



(ข)

รูปที่ 3.13 วงจรการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนสำหรับระบบสายเคเบิลใต้ดิน (ก) แผนผังวงจรการทดสอบดิสชาร์จบางส่วน และ (ข) รูปวงจรทดสอบดิสชาร์จบางส่วนจริง

ก่อนการทดสอบดิสชาร์จบางส่วน จะต้องมีการปรับเทียบระบบวัดก่อน โดยใช้เครื่องปรับเทียบพัลส์ (Pulse calibrator) เชื่อมต่อคร่อมกับระบบสายเคเบิลใต้ดินที่ทำการทดสอบและทำการจ่ายพัลส์เพื่อปรับเทียบระบบวัด โดยพัลส์สำหรับการปรับเทียบจะมีขนาดระหว่าง 50% ถึง 200% ของขนาด PD ที่ต้องการวัด และต้องสูงกว่าสองเท่าของสัญญาณรบกวนพื้นหลัง (Background noise) [33] ซึ่งในหัวข้อนี้ได้เลือกพัลส์สำหรับปรับเทียบ คือ 10 พิโคคูลอมบ์จึงมีความเหมาะสมเนื่องจากสัญญาณรบกวนพื้นหลังในรูปที่ 3.14 มีขนาดประมาณ 1 พิโคคูลอมบ์



รูปที่ 3.14 สัญญาณรบกวนพื้นหลัง (Background noise) ขณะทำการทดสอบ

ในการทดสอบหัวข้อนี้ จะทดสอบดิสชาร์จบางส่วนในระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อบกพร่องในข้อต่อสายเคเบิล เปรียบเทียบกับระบบสายเคเบิลที่มีข้อต่อสายเคเบิลสภาพสมบูรณ์ โดยจะจำลองการเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่ระดับแรงดันใช้งานปกติ ซึ่งสำหรับระบบสายเคเบิลใต้ดินพิกัด 22 กิโลโวลต์ ระดับแรงดันใช้งานเท่ากับ 12.7 กิโลโวลต์ และความถี่ของแรงดันทดสอบ 50 เฮิร์ตซ์

3.6 สรุปการทดสอบที่ศึกษาในวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ศึกษาคูณสมบัติทางไฟฟ้าของระบบสายเคเบิลใต้ดินพิกัด 22 กิโลโวลต์ซึ่งมีรูปแบบการจัดเตรียมและการทดสอบที่แตกต่างกันดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สรุปการทดสอบที่ใช้ศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของระบบสายเคเบิลใต้ดิน 22 กิโลโวลต์

รูปแบบระบบสายเคเบิลใต้ดิน	Dielectric response Measurement		การทดสอบแรงดันสูงที่ความถี่ต่ำมาก (VLF testing)	การทดสอบดิสชาร์จบางส่วน (PD test)
	PDC	FDS		
ระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีเฉพาะส่วนของสายเคเบิลใต้ดิน				
สายเคเบิลใต้ดินที่ถูกปกปิดโดยคองส่วนประกอบทั้งหมดไว้	✓	-	-	-
สายเคเบิลใต้ดินที่ถูกปกปิดโดยนำส่วนประกอบอย่างอื่นออกทั้งหมดเหลือเพียงชั้นตัวกันฉนวนเป็นชั้นนอกสุด	✓	-	-	-
ระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีการจำลองข้อบกพร่องในข้อต่อสายเคเบิลใต้ดิน				
ระบบสายเคเบิลใต้ดินที่ข้อต่อสายเคเบิลมีความสมบูรณ์	✓	✓	✓	✓
จำลองความบกพร่องโดยสร้างรอยบากความลึก 3 มิลลิเมตรที่เนื้อฉนวน XLPE	✓	✓	✓	✓
จำลองความบกพร่องโดยทาผงเหล็กบนผิวของฉนวน XLPE	-	✓	-	-
จำลองความบกพร่องโดยทาผงทองแดงบนผิวของฉนวน XLPE	✓	-	✓	✓

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

ในบทนี้ จะกล่าวถึงผลการทดลองที่ทดสอบระบบสายเคเบิลใต้ดินในรูปแบบต่างๆ รวมถึงการอภิปรายผลการทดสอบ โดยจะแบ่งเป็นกรณีศึกษาตามรูปแบบของระบบสายเคเบิลใต้ดิน ซึ่งประกอบด้วย ระบบสายเคเบิลใต้ดินพิกัด 22 กิโลโวลต์ที่มีเฉพาะส่วนของสายเคเบิลใต้ดิน และระบบสายเคเบิลใต้ดินพิกัด 22 กิโลโวลต์ที่มีทั้งส่วนของสายเคเบิลใต้ดินและอุปกรณ์เสริม

4.1 กรณีศึกษาที่ 1 ระบบสายเคเบิลใต้ดินพิกัด 22 กิโลโวลต์ที่มีเฉพาะส่วนของสายเคเบิลใต้ดิน

ในกรณีศึกษาที่ 1 ระบบสายเคเบิลใต้ดินพิกัด 22 กิโลโวลต์ที่มีเฉพาะส่วนของสายเคเบิลใต้ดิน จะถูกทดสอบด้วย เทคนิคการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน (Polarization and Depolarization Current (PDC) measurement, PDC measurement) โดยระบบสายเคเบิลใต้ดินในกรณีศึกษาจะถูกแบ่งออกเป็น 2 กรณีศึกษาย่อย คือ ระบบสายเคเบิลใต้ดินที่ถูกปกปิดโดยคังส่วนประกอบทั้งหมดไว้ และระบบสายเคเบิลใต้ดินที่ถูกปกปิดโดยนำส่วนประกอบอย่างอื่นออกทั้งหมดเหลือเพียงชั้นตัวกั้นฉนวนเป็นชั้นนอกสุด ซึ่งกรณีศึกษาที่ได้ถูกนำเสนอในบทความวิชาการของผู้เขียนวิทยานิพนธ์นี้ซึ่งถูกเผยแพร่ในเอกสารอ้างอิง [37] แล้ว

4.1.1 ระบบสายเคเบิลใต้ดินที่ถูกปกปิดโดยคังส่วนประกอบทั้งหมดไว้

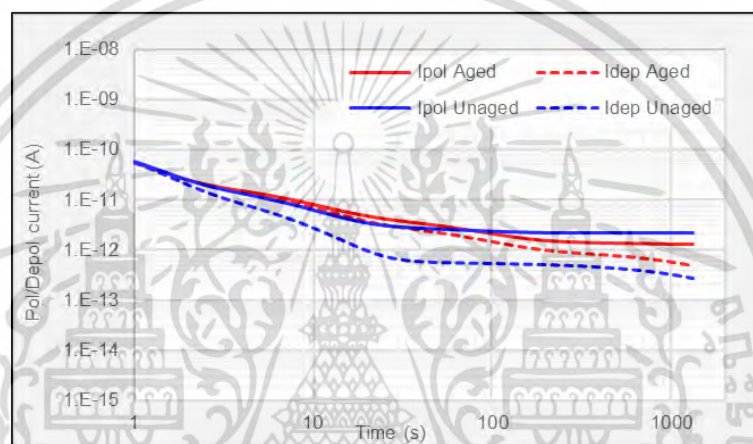
ในการทดสอบ PDC measurement นี้จะทดสอบกับระบบสายเคเบิลใต้ดินพิกัด 22 กิโลโวลต์ที่ถูกปกปิด โดยส่วนประกอบอื่นยังคงอยู่เหมือนเดิมแสดงดังรูปที่ 4.1 ซึ่งได้ทดสอบทั้งสายเคเบิลใต้ดินที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว (Service-aged cable) และสายเคเบิลใต้ดินที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน (Unaged cable) เพื่อการเปรียบเทียบ



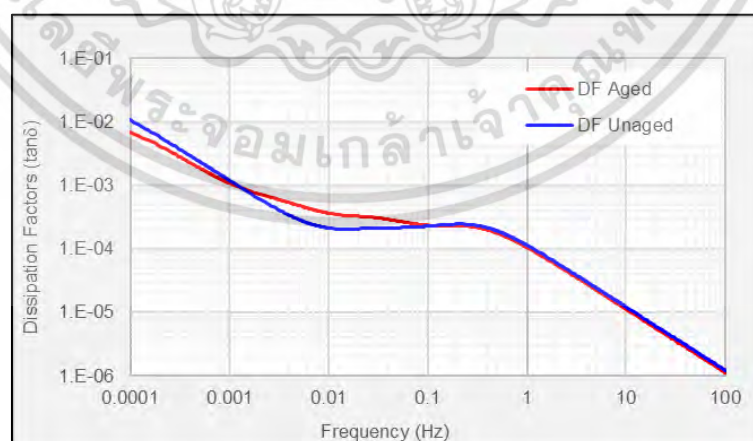
รูปที่ 4.1 สายเคเบิลใต้ดินสำหรับการทดสอบที่ผ่านการปกปิดแล้วและส่วนประกอบทั้งหมดยังคงอยู่

ผลการทดสอบ PDC measurement แสดงดังรูปที่ 4.2 โดยจากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าลักษณะของกราฟ PDC จากสายเคเบิลใต้ดินทั้งสองไม่มีความแตกต่างกันมาก และจากการวิเคราะห์พารามิเตอร์เพิ่มเติม โดยค่าความจุไฟฟ้า (Capacitance) ของสายเคเบิลใต้ดินที่ผ่านการใช้งานเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานมาแล้วอยู่ที่ 317 พิโคฟาร์ต และสายเคเบิลใต้ดินที่ยังไม่ผ่านการใช้งานอยู่ที่ 315 พิโคฟาร์ต และความต้านทานฉนวน (Insulation resistance) จะมีค่า 369.18 เทระโอห์มและ 442.18 เทระโอห์ม สำหรับสายเคเบิลใต้ดินที่ผ่านการใช้งานมาแล้วและสายเคเบิลใต้ดินที่ยังไม่ผ่านการใช้งานตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า สายเคเบิลใต้ดินที่ผ่านการใช้งานมาแล้วจะมีคุณสมบัติความต้านทานไฟฟ้าของฉนวนลดลง รวมไปถึงพารามิเตอร์ตัวประกอบกำลังการสูญเสีย (Dissipation factor, $\tan\delta$) ของสายเคเบิลใต้ดินทั้งสองในรูปที่ 4.3 พบว่า ในช่วงย่านความถี่ 1 มิลลิเฮิรตซ์ ถึง 100 มิลลิเฮิรตซ์ สายเคเบิลที่ผ่านการใช้งานมาแล้วมีค่า $\tan\delta$ ที่สูงกว่าสายเคเบิลที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน ซึ่งอาจเป็นผลเนื่องมาจากการมีอยู่ของสารประกอบประเภทคอปเปอร์ภายใต้ชั้นเทปทองแดงของสายเคเบิลใต้ดิน



รูปที่ 4.2 ผลการทดสอบ PDC measurement ของสายเคเบิลใต้ดินที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว (เส้นกราฟสีแดง) เปรียบเทียบกับสายเคเบิลใต้ดินที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน (เส้นกราฟสีน้ำเงิน) ในกรณีศึกษาที่ 4.1.1 [37]



รูปที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ตัวประกอบกำลังการสูญเสียของสายเคเบิลใต้ดินที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว (เส้นกราฟสีแดง) เปรียบเทียบกับสายเคเบิลใต้ดินที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน (เส้นกราฟสีน้ำเงิน) ในกรณีศึกษาที่ 4.1.1 [37]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

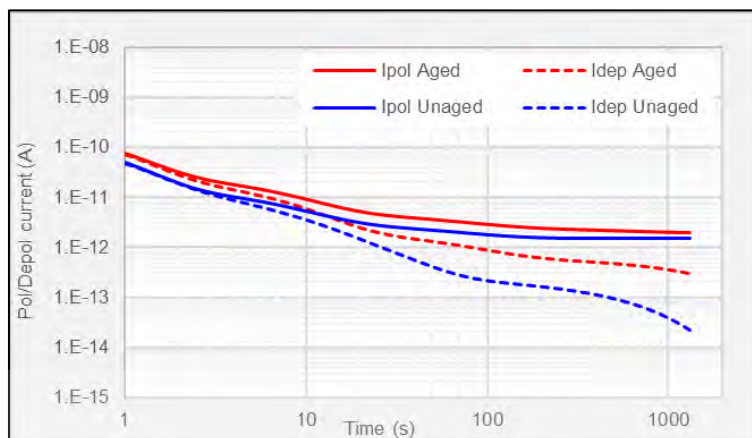
4.1.2 ระบบสายเคเบิลใต้ดินที่ถูกปกโดยนำส่วนประกอบอย่างอื่นออกทั้งหมดเหลือเพียงชั้นตัวกั้นฉนวนเป็นชั้นนอกสุด

ในการทดสอบ PDC measurement นี้ จะดำเนินการทดสอบกับสายเคเบิลใต้ดินที่ถูกปกโดยนำส่วนประกอบอื่นๆออกทั้งหมด ทำให้สายเคเบิลใต้ดินที่จะทดสอบในหัวข้อนี้มีชั้นตัวกั้นฉนวนเป็นชั้นสุดท้ายดังรูปที่ 4.4 โดยการทดสอบนี้เป็นการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวนครอสลิงก์พอลิเอทิลีน (XLPE) ของสายเคเบิลใต้ดินอย่างแท้จริง

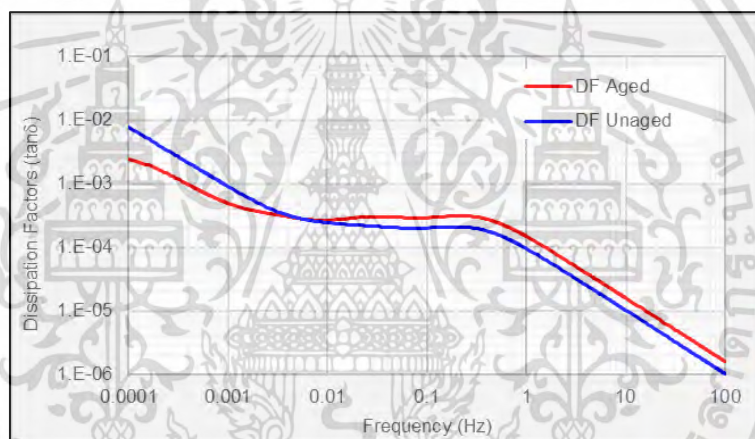


รูปที่ 4.4 สายเคเบิลใต้ดินสำหรับการทดสอบที่ผ่านการปกแล้วโดยนำส่วนประกอบอื่นๆออกโดยมีชั้นชีลด์ฉนวนเป็นชั้นนอกสุด

ผลการทดสอบ PDC measurement ของกรณีศึกษานี้แสดงดังรูปที่ 4.5 ซึ่งจากกราฟ PDC แสดงให้เห็นถึงลักษณะของเส้นกราฟที่ได้จากทั้งกรณีของสายเคเบิลใต้ดินที่ผ่านการใช้งานมาแล้วและยังไม่ผ่านการใช้งานมีความคล้ายคลึงกัน และจากการวิเคราะห์พารามิเตอร์อื่นๆเพิ่มเติม ค่าความจุไฟฟ้าของสายเคเบิลทั้งสองมีค่า 321 พิโคฟารัดสำหรับสายเคเบิลใต้ดินที่ผ่านการใช้งานมาแล้วและ 315 พิโคฟารัดสำหรับสายเคเบิลใต้ดินที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน ซึ่งความแตกต่างนี้สันนิษฐานว่าเกิดจากความยาวของสายเคเบิลใต้ดินหลังจากปกแล้วนั้น มีความแตกต่างกันเล็กน้อย และความต้านทานฉนวนนั้นมีค่า 329.61 เทระโอห์มสำหรับสายเคเบิลใต้ดินที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว และ 463.06 เทระโอห์มสำหรับสายเคเบิลใต้ดินที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความเสื่อมสภาพของฉนวนสายเคเบิลใต้ดินอย่างชัดเจน นอกจากนี้ พารามิเตอร์ตัวประกอบกำลังการสูญเสียของสายเคเบิลใต้ดินทั้งที่ผ่านการใช้งานมาแล้วและยังไม่มีการใช้งานนั้นแสดงผลในรูปที่ 4.6 มีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย โดยจากหลักฐานการพบต้นไม้ (Water tree) จากฉนวน XLPE ของสายเคเบิลใต้ดินที่ผ่านการใช้งานมาแล้วนั้น พบว่าการทดสอบนี้ยังไม่แสดงความแตกต่างของคุณสมบัติทางไฟฟ้าถึงการมีอยู่ของต้นไม้ โดยสาเหตุอาจเนื่องมาจากประชากรของต้นไม้ในฉนวนสายเคเบิลใต้ดินนี้ไม่มากพอ หรือความยาวต้นไม้ในฉนวนสั้นจนเกินไปที่จะทำให้เห็นถึงความแตกต่างจากผลการทดสอบ PDC measurement [37]



รูปที่ 4.5 ผลการทดสอบ PDC measurement ของสายเคเบิลใต้ดินที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว (เส้นกราฟสีแดง) เปรียบเทียบกับสายเคเบิลใต้ดินที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน (เส้นกราฟสีน้ำเงิน) ในกรณีศึกษาที่ 4.1.2 [37]



รูปที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์ตัวประกอบกำลังการสูญเสียของสายเคเบิลใต้ดินที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว (เส้นกราฟสีแดง) เปรียบเทียบกับสายเคเบิลใต้ดินที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน (เส้นกราฟสีน้ำเงิน) ในกรณีศึกษาที่ 4.1.2 [37]

4.2 กรณีศึกษาที่ 2 ระบบสายเคเบิลใต้ดินพิกัด 22 กิโลโวลต์ที่มีทั้งสายเคเบิลใต้ดินและอุปกรณ์เสริม

ในกรณีศึกษานี้ได้ดำเนินการทดสอบในหัวข้อทดสอบต่างๆ กับระบบสายเคเบิลใต้ดินพิกัด 22 กิโลโวลต์ที่มีทั้งสายเคเบิลใต้ดินอุปกรณ์เสริมนั่นคือ หัวต่อสายเคเบิล (Cable termination) และข้อต่อสายเคเบิล (Cable joint) โดยระบบสายเคเบิลที่ใช้ทดสอบนี้ได้มีการทำข้อบกพร่องต่างๆ ภายในข้อต่อสายเคเบิล เช่น การสร้างรอยบากความลึก 3 มิลลิเมตรที่เนื้อฉนวน XLPE, การทาบงเหล็กบนผิวของฉนวน XLPE และการทาบงทองแดงบนผิวของฉนวน XLPE และมีการทำระบบสาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เคเบิลใต้ดินที่มีความสมบูรณ์ในทุกส่วนไว้สำหรับการเปรียบเทียบ ซึ่งได้แสดงตัวอย่างระบบสายเคเบิลใต้ดินในกรณีศึกษาในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ตัวอย่างระบบสายเคเบิลใต้ดินพิกัด 22 กิโลโวลต์สำหรับกรณีศึกษาที่ 2

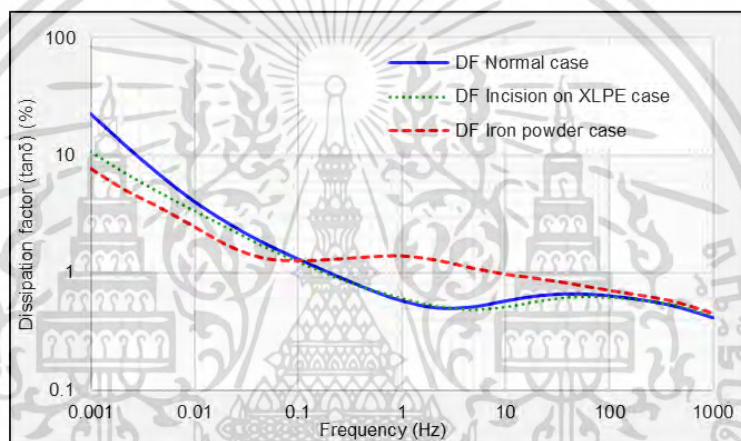
สำหรับกรณีศึกษาจะถูกรวบรวมตามหัวข้อการทดสอบ คือ หัวข้อเทคนิคการวัดสเปกโตรสโคปีในโดเมนความถี่ (Frequency Domain Spectroscopy, เทคนิค FDS) โดยได้ถูกนำเสนอในบทความวิชาการของผู้เขียนวิทยานิพนธ์นี้ซึ่งถูกเผยแพร่ในเอกสารอ้างอิง [39], หัวข้อการทดสอบการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสโพลาริเซชัน (PDC measurement), การทดสอบแรงดันสูงที่ความถี่ต่ำมาก (Very low frequency testing, VLF testing) ซึ่งทั้งสองหัวข้อนี้ได้ถูกนำเสนอในบทความวิชาการของผู้เขียนวิทยานิพนธ์ตามเอกสารอ้างอิง [38], และการทดสอบดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge (PD) test)

4.2.1 เทคนิคการวัดสเปกโตรสโคปีในโดเมนความถี่ (Frequency Domain Spectroscopy, FDS technique)

เทคนิคการวัดสเปกโตรสโคปีในโดเมนความถี่ หรือเทคนิค FDS จะทดสอบกับระบบสายเคเบิลใต้ดินพิกัด 22 กิโลโวลต์ที่มีการจำลองข้อบกพร่องภายในข้อต่อสายเคเบิล คือ ข้อบกพร่องจากการสร้างรอยบากความลึก 3 มิลลิเมตรในเนื้อฉนวน XLPE (Incision on XLPE case) และข้อบกพร่องจากการทาผงเหล็กบนผิวฉนวน XLPE (Iron powder case) และทดสอบกับระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีความสมบูรณ์ (Normal case) เพื่อใช้สำหรับการเปรียบเทียบ โดยจากการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวน XLPE ในระบบสายเคเบิลใต้ดินด้วยเทคนิค FDS จะได้พารามิเตอร์ในโดเมนความถี่คือ ตัวประกอบกำลังการสูญเสีย ($\tan\delta$) ซึ่งได้ทำการเปรียบเทียบในทุกกรณีดังรูปที่ 4.8 และความจุไฟฟ้าเชิงซ้อน (Complex capacitance) ของระบบสายเคเบิลใต้ดินแสดงในรูปที่ 4.9 โดยแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ รูปที่ 4.9 (ก) แสดงถึงความจุไฟฟ้าส่วนจริง (Real part capacitance) และรูปที่ 4.9 (ข) แสดงถึงความจุไฟฟ้าส่วนจินตภาพ (Imaginary part capacitance)

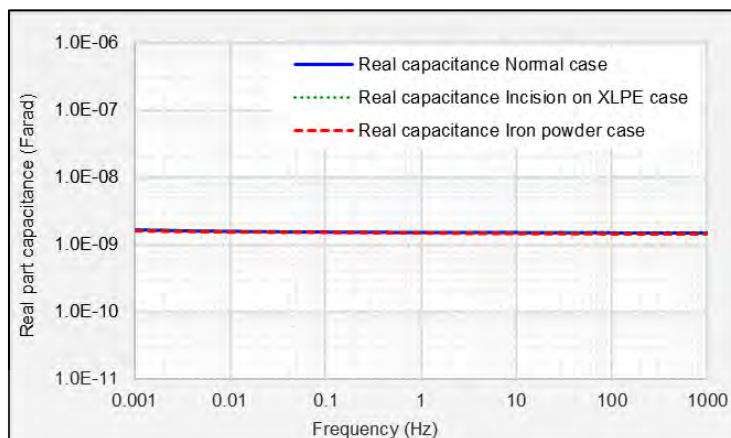
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟเปรียบเทียบพารามิเตอร์ $\tan\delta$ พบว่าระบบสายเคเบิลใต้ดินในกรณีที่มีข้อต่อเคเบิล มีการจำลองรอยบากความลึก 3 มิลลิเมตรในเนื้อฉนวน XLPE มีการตอบสนองที่ความคล้ายคลึงกับระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีความสมบูรณ์ แต่สำหรับกรณี ระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อต่อสายเคเบิลมีการทาผงเหล็กบนผิวฉนวน XLPE มีการตอบสนองที่แตกต่างในช่วงความถี่ 100 มิลลิเฮิร์ตซ์ ถึง 100 เฮิร์ตซ์ และที่ความถี่ 1 เฮิร์ตซ์ การตอบสนองนี้ได้แสดงจุดสูงสุดของการสูญเสียในวัสดุไดอิเล็กตริก (Dielectric loss peak) อีกด้วย ซึ่งสามารถสันนิษฐานได้ว่า การตอบสนองทางไดอิเล็กตริกของฉนวนในระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อบกพร่องโดยการทาผงเหล็กบนผิวฉนวน XLPE หรือการมีอยู่ของสิ่งปนเปื้อนที่มีความนำไฟฟ้าในระบบฉนวน จะส่งผลให้เกิดลักษณะกราฟของพารามิเตอร์ $\tan\delta$ ดังในรูปที่ 4.8 [39]

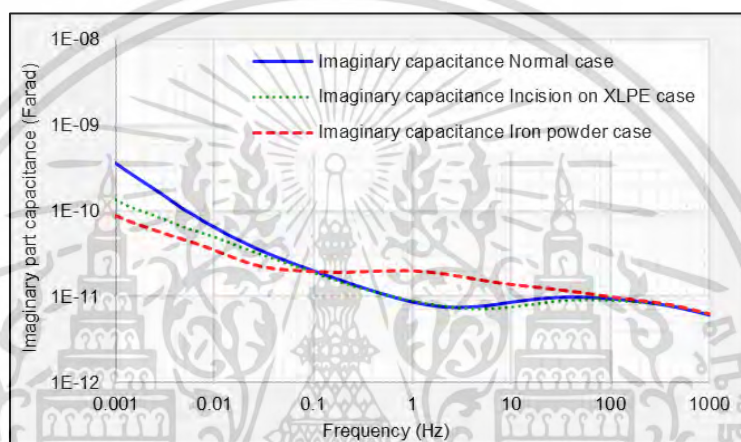


รูปที่ 4.8 ตัวประกอบกำลังการสูญเสียที่ได้จากเทคนิค FDS ของระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีการจำลองข้อบกพร่องในข้อต่อเคเบิลและระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีความสมบูรณ์ [39]

และสำหรับความจุไฟฟ้าส่วนจริงในรูปที่ 4.9 (ก) พบว่า ค่าความจุไฟฟ้าส่วนจริงมีค่าเท่ากัน (ในลอการิทึมสเกล (log-log scale)) และคงที่ตลอดช่วงย่านความถี่ที่ใช้วัด (1 มิลลิเฮิร์ตซ์ ถึง 1 กิโลเฮิร์ตซ์) ในทุกระบบสายเคเบิลใต้ดินที่ใช้ในการวัดการตอบสนองทางไดอิเล็กตริกในโดเมนความถี่ ด้วยเทคนิค FDS และสำหรับความจุไฟฟ้าส่วนจินตภาพในรูปที่ 4.9 (ข) ลักษณะของเส้นกราฟมีแนวโน้มของเส้นกราฟที่คล้ายคลึงกับกราฟเปรียบเทียบพารามิเตอร์ $\tan\delta$



(ก)



(ข)

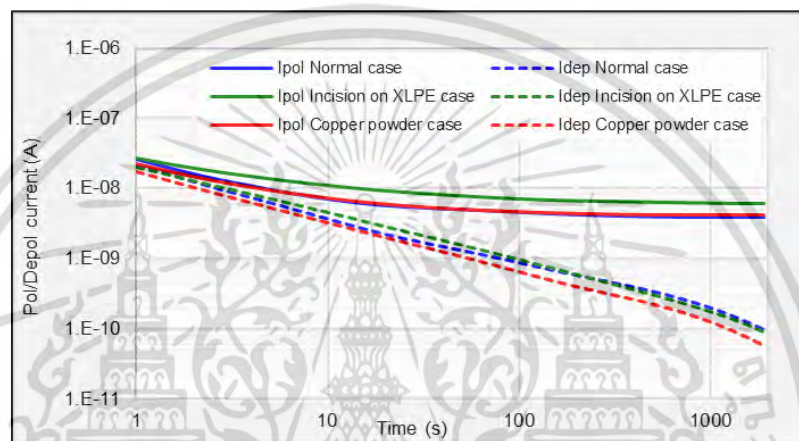
รูปที่ 4.9 ความจุไฟฟ้าเชิงซ้อนที่ได้จากเทคนิค FDS [39] โดยแบ่งเป็น (ก) กราฟเปรียบเทียบความจุไฟฟ้าส่วนจริงของระบบสายเคเบิลใต้ดิน และ (ข) กราฟเปรียบเทียบความจุไฟฟ้าส่วนจินตภาพของระบบสายเคเบิลใต้ดิน

4.2.2 เทคนิคการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน (PDC measurement)

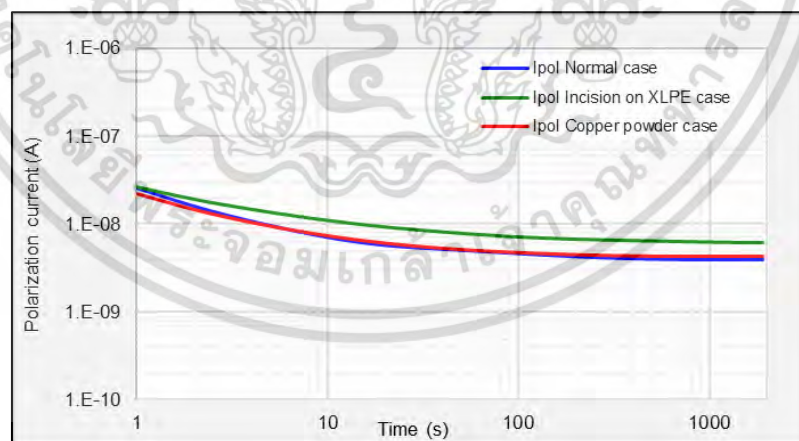
การทดสอบ PDC measurement จะดำเนินการทดสอบกับระบบสายเคเบิลใต้ดินพิกัด 22 กิโลโวลต์ที่มีการจำลองข้อบกพร่องภายในข้อต่อสายเคเบิล คือ ข้อบกพร่องจากการสร้างรอยบาก ความลึก 3 มิลลิเมตรในเนื้อฉนวน XLPE (Incision on XLPE case) และข้อบกพร่องจากการทำผงทองแดงบนผิวฉนวน XLPE (Copper powder case) และทดสอบกับระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีความสมบูรณ์ (Normal case) เพื่อใช้สำหรับการเปรียบเทียบ โดยรูปที่ 4.10 แสดงกราฟเปรียบเทียบกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันของระบบสายเคเบิลใต้ดินทั้งสามกรณี จะเห็นได้ว่าทั้งสามกรณีมีลักษณะเส้นกราฟที่คล้ายคลึงกัน โดยในกรณีของระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีความสมบูรณ์ และกรณีที่ในข้อต่อสายเคเบิลมีการทำผงทองแดงบนผิวฉนวน XLPE จะมีเกือบซ้อนทับกัน และในกรณีที่ข้อต่อสายเคเบิลมีการสร้างรอยบากในเนื้อฉนวน XLPE นั้นจะมีกระแสโพลาริเซชันที่สูงกว่าดัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 4.11 (ก) และสำหรับกระแสดีโพลาไรเซชันนั้นมีความใกล้เคียงกันมากทั้งสามกรณีแสดงในรูปที่ 4.11 (ข) และพารามิเตอร์ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบ PDC measurement นั้นคือ ความนำไฟฟ้าของฉนวน ซึ่งแสดงตามกราฟในรูปที่ 4.12 จะเห็นว่าข้อบกพร่องในข้อต่อสายเคเบิลในระบบสายเคเบิลใต้ดินส่งผลให้ความนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีของระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีสภาพสมบูรณ์ และในรูปที่ 4.13 แสดงกราฟเปรียบเทียบของตัวประกอบกำลังการสูญเสีย ($\tan\delta$) ซึ่งทั้งสามกรณีมีค่าใกล้เคียงกันแต่ในช่วงความถี่ต่ำที่สื่อถึงการสูญเสียเนื่องจากความนำไฟฟ้า [44, 45] จะมีความแตกต่างกันเล็กน้อยโดยมีความสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ความนำไฟฟ้า

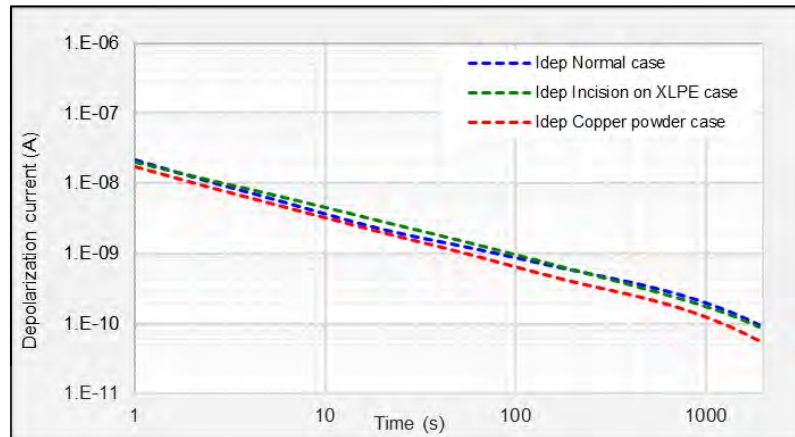


รูปที่ 4.10 กราฟเปรียบเทียบกระแสดีโพลาไรเซชันและกระแสดีโพลาไรเซชันของระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อบกพร่องในข้อต่อสายเคเบิลและระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีความสมบูรณ์ [38]



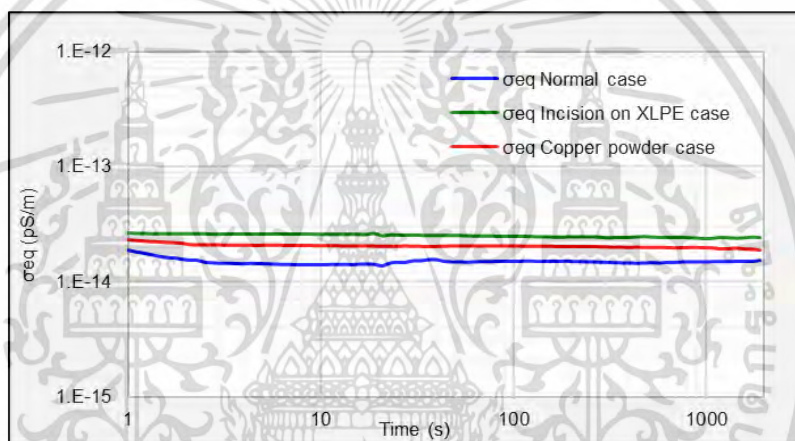
(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

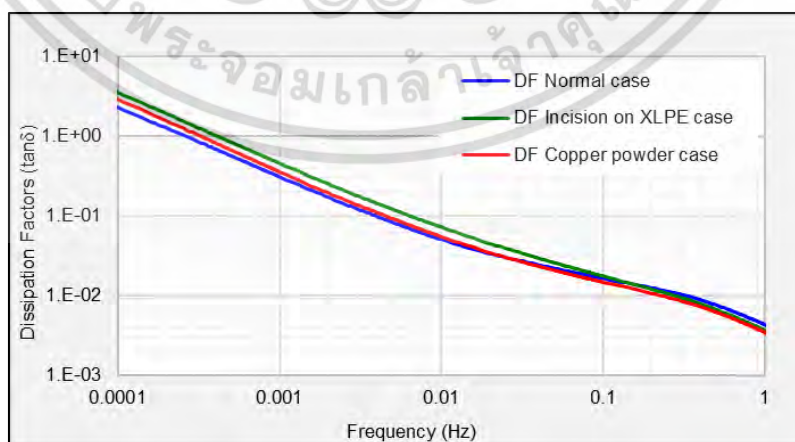


(ข)

รูปที่ 4.11 กราฟเปรียบเทียบเฉพาะ (ก) กระแสโพลาริเซชัน และ (ข) กระแสดีโพลาริเซชัน



รูปที่ 4.12 กราฟเปรียบเทียบพารามิเตอร์ความนำไฟฟ้าของฉนวนในระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อบกพร่องในข้อต่อสายเคเบิลและระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีความสมบูรณ์ [38]



รูปที่ 4.13 กราฟเปรียบเทียบตัวประกอบกำลังการสูญเสียของระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อบกพร่องในข้อต่อสายเคเบิลและระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีความสมบูรณ์ [38]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และตารางที่ 4.1 แสดงถึงพารามิเตอร์ทางไดอิเล็กตริกจากการวิเคราะห์ผลการทดสอบ PDC measurement ประกอบด้วยความจุไฟฟ้า (Capacitance), ความต้านทานฉนวน (Insulation resistance, IR), ดัชนีโพลาไรเซชัน (Polarization index, PI), และอัตราส่วนการซึมซับไดอิเล็กตริก (Dielectric absorption ratio, DAR) โดยความจุไฟฟ้าของระบบสายเคเบิลใต้ดินทั้งสามกรณีจะมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนความต้านทานฉนวนจะเห็นได้ว่า ในกรณีที่ระบบสายเคเบิลใต้ดินมีข้อบกพร่องในข้อต่อสายเคเบิลจะให้ค่าความต้านทานฉนวนต่ำกว่าระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีสภาพสมบูรณ์ ซึ่งสามารถประเมินถึงการเสื่อมสภาพของฉนวนไฟฟ้าได้ อย่างไรก็ตาม พารามิเตอร์ดัชนีโพลาไรเซชันและอัตราส่วนการซึมซับไดอิเล็กตริกจากทั้งสามกรณีมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งไม่สามารถแบ่งแยกความเสื่อมสภาพของระบบสายเคเบิลใต้ดินของทั้งสามกรณีนี้ได้

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบ PDC measurement

พารามิเตอร์	ระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีความสมบูรณ์	ระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีการสร้างรอยบากในฉนวน XLPE	ระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีการทาผงทองแดงบนผิวฉนวน XLPE
ความจุไฟฟ้า (พีโคฟารัด)	1505	1510	1505
ความต้านทานฉนวน (กิกะโอห์ม)	310.674	194.800	245.192
ดัชนีโพลาไรเซชัน	1.22	1.2	1.7
อัตราส่วนการซึมซับไดอิเล็กตริก	1.13	1.12	1.09

4.2.3 การทดสอบแรงดันสูงที่ความถี่ต่ำมาก (Very Low Frequency Testing, VLF Testing)

การทดสอบแรงดันสูงที่ความถี่ต่ำมาก หรือ การทดสอบ VLF จะทดสอบกับระบบสายเคเบิลใต้ดินพิกัด 22 กิโลโวลต์ที่มีการจำลองข้อบกพร่องภายในข้อต่อสายเคเบิล คือ ข้อบกพร่องจากการสร้างรอยบากความลึก 3 มิลลิเมตรในเนื้อฉนวน XLPE (Incision on XLPE case) และข้อบกพร่องจากการทาผงทองแดงบนผิวฉนวน XLPE (Copper powder case) และดำเนินการทดสอบกับระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีความสมบูรณ์ (Normal case) เพื่อใช้สำหรับการเปรียบเทียบ โดยจากการวิเคราะห์พารามิเตอร์ตัวประกอบกำลังสูญเสียที่ความถี่ต่ำมาก (VLF Tangent Delta, VLF-TD) ตามเกณฑ์ที่มาตรฐาน IEEE Std. 400.2-2013 [30] กำหนดตามตารางที่ 4.2 และผลการทดสอบที่ได้รับจากการทดสอบ VLF ในตารางที่ 4.3 พบว่า ระบบสายเคเบิลใต้ดินทั้งสามกรณีที่ทำเนิการทดสอบถูกจัดอยู่ในเกณฑ์ “แนะนำให้ศึกษาเพิ่มเติม (Further Study Advised)” ทั้งหมด

นอกจากนี้ พารามิเตอร์นอกเหนือจากที่มาตรฐานกำหนดนั้นคือ Skirt ที่คิดค้นโดย Korea Electric Power Corporation (KEPCO) ประเทศเกาหลี [32] โดยพิจารณาผลการทดสอบ VLF-TD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ระดับแรงดัน $1.5U_0$ (19.1 กิโลโวลต์) พบว่า ระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อบกพร่องในข้อต่อสายเคเบิลล้วนมีค่า Skirt ที่มากกว่าระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีความสมบูรณ์ทั้งสิ้น โดยในกรณีของระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีการทางทองแดงบนผิวฉนวน XLPE ในข้อต่อสายเคเบิลจะแสดงค่า Skirt มากที่สุด รองลงมาคือกรณีของระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีการสร้างรอยบากความลึก 3 มิลลิเมตรในเนื้อฉนวน XLPE ในข้อต่อสายเคเบิล และน้อยที่สุด คือ ระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีความสมบูรณ์ และแนวโน้มของชุดข้อมูล TD ในการทดสอบที่ระดับแรงดันเดียวกันแสดงถึงความไม่เป็นเส้นตรง (Non-linear trend) ดังตัวอย่างในรูปที่ 4.14 ซึ่งจะประเมินสภาพถึงการเกิดดิสชาร์จทางไฟฟ้าภายในอุปกรณ์เสริมของระบบสายเคเบิลใต้ดิน [32]

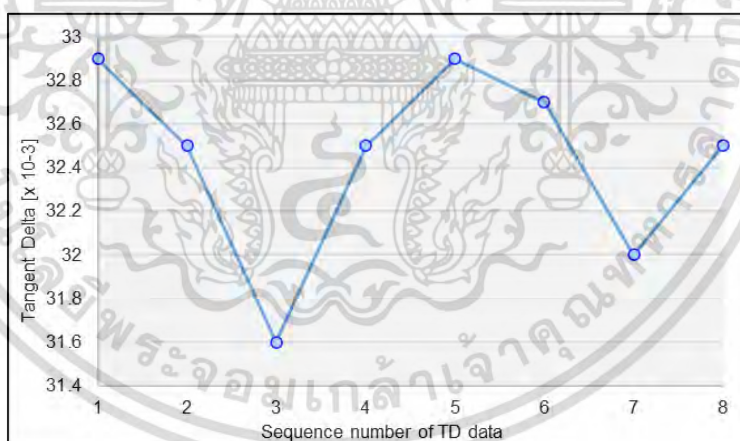
ตารางที่ 4.2 เกณฑ์สำหรับการวิเคราะห์ผลการทดสอบ VLF-TD ตามมาตรฐาน IEEE Std. 400.2-2013 [30]

การประเมินสภาพ	เสถียรภาพทางเวลาของค่า TD (VLF-TDTS) ที่ U_0 [$\times 10^{-3}$]		ความแตกต่างของค่า TD (VLF-DTD) ระหว่าง $0.5U_0$ และ $1.5U_0$ [$\times 10^{-3}$]		ค่าเฉลี่ย TD (VLF-TD) ที่ U_0 [$\times 10^{-3}$]
ไม่ต้องดำเนินการใดๆ (No Action Required)	< 0.1	และ	< 5	และ	< 4
แนะนำให้ศึกษาเพิ่มเติม (Further Study Advised)	0.1 ถึง 0.5	หรือ	5 ถึง 80	หรือ	4 ถึง 50
จำเป็นต้องดำเนินการ (Action Required)	> 0.5	หรือ	> 80	หรือ	> 50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 พารามิเตอร์ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบ VLF ที่ความถี่ 0.1 เฮิรตซ์

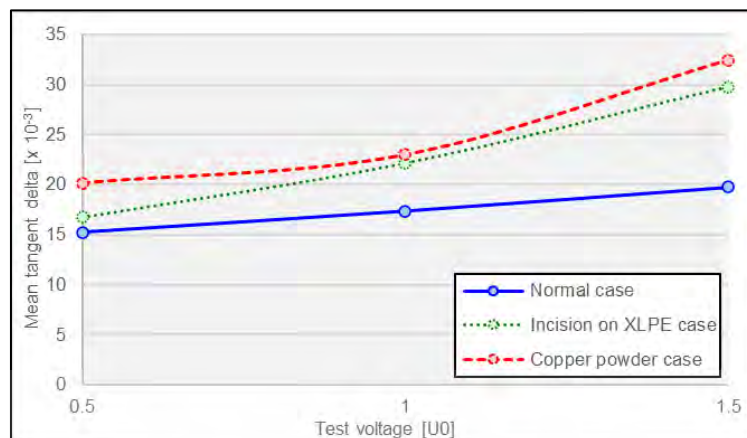
พารามิเตอร์	ระบบสายเคเบิล ใต้ดินที่มีความ สมบูรณ์	ระบบสายเคเบิล ใต้ดินที่มีการสร้าง รอยบากในฉนวน XLPE	ระบบสายเคเบิล ใต้ดินที่มีการทำ ผงทองแดงบนผิว ฉนวน XLPE
ค่าเฉลี่ย TD (VLF-TD) ที่ U_0 [$\times 10^{-3}$]	17.37	22.17	22.99
ความแตกต่างของค่า TD (VLF-DTD) ระหว่าง $0.5U_0$ และ $1.5U_0$ [$\times 10^{-3}$]	4.55	12.99	12.32
เสถียรภาพทางเวลาของค่า TD (VLF- TDTS) ที่ U_0 [$\times 10^{-3}$]	0.082	0.142	0.146
Skirt ที่ $1.5U_0$	0.24	0.45	2.78
การประเมินสภาพตามมาตรฐาน IEEE Std. 400.2-2013	แนะนำให้ศึกษา เพิ่มเติม (Further Study Advised)	แนะนำให้ศึกษา เพิ่มเติม (Further Study Advised)	แนะนำให้ศึกษา เพิ่มเติม (Further Study Advised)



รูปที่ 4.14 ตัวอย่างแนวโน้มของผลการวัด VLF-TD ที่ระดับแรงดันเดียวกันซึ่งแสดงความไม่เป็นเส้นตรงของข้อมูล (Non-linear trend)

และเมื่อนำค่าเฉลี่ย TD ที่ระดับแรงดัน $0.5U_0$ (6.4 กิโลโวลต์), $1.0U_0$ (12.7 กิโลโวลต์), และ $1.5U_0$ (19.1 กิโลโวลต์) มาสร้างกราฟดังรูปที่ 4.15 พบว่า แนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่าเฉลี่ย TD ต่อแรงดันทดสอบของระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อบกพร่องในข้อต่อสายเคเบิลจะมากกว่าระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีความสมบูรณ์ ซึ่งจากการวิเคราะห์แนวโน้มนี้จะสามารถช่วยในการประเมินระดับการเสื่อมสภาพของระบบสายเคเบิลใต้ดินได้อีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

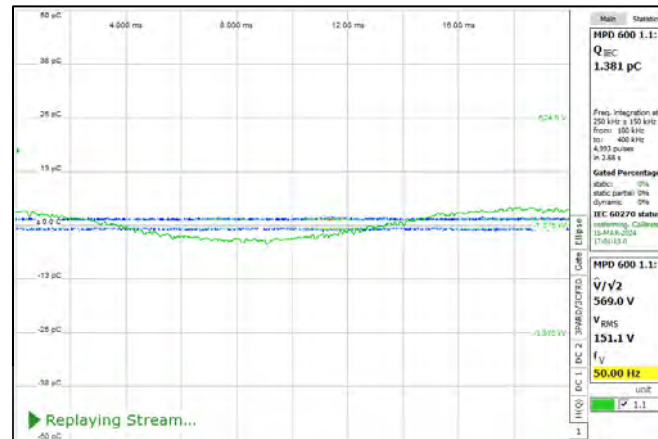


รูปที่ 4.15 กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย TD ที่ความถี่ 0.1 เฮิรตซ์ ในแต่ละระดับแรงดันทดสอบของระบบสายเคเบิลใต้ดินทั้งสามกรณี

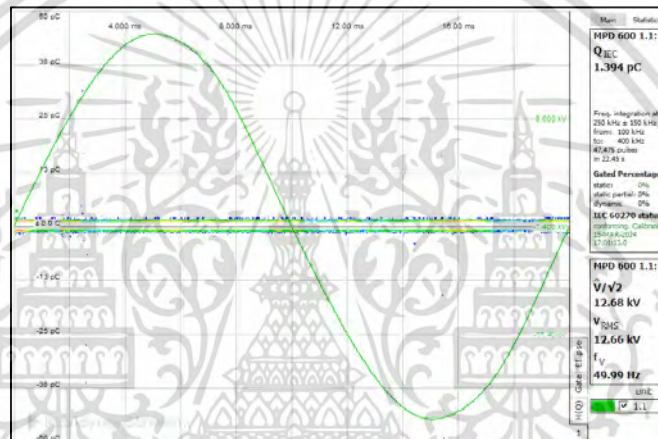
4.2.4 การทดสอบดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge (PD) Test)

การทดสอบดิสชาร์จบางส่วน หรือ การทดสอบ Partial Discharge (PD) จะทดสอบกับระบบสายเคเบิลใต้ดินพิกัด 22 กิโลโวลต์ที่มีการจำลองข้อบกพร่องภายในข้อต่อสายเคเบิล คือ ข้อบกพร่องจากการสร้างรอยบากความลึก 3 มิลลิเมตรในเนื้อฉนวน XLPE (Incision on XLPE case) และข้อบกพร่องจากการทาผงทองแดงบนผิวฉนวน XLPE (Copper powder case) และทดสอบกับระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีความสมบูรณ์ (Normal case) เพื่อใช้สำหรับการเปรียบเทียบ ซึ่งก่อนทำการวัดดิสชาร์จบางส่วนได้วัดสัญญาณรบกวนพื้นหลัง (Background noise) ของระบบมีค่าประมาณ 1.38 พีโคคูลอมบ์แสดงในรูปที่ 4.16 และเมื่อทำการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนกับระบบสายเคเบิลใต้ดินทั้งสามกรณีที่แรงดันทดสอบเทียบเท่ากับระดับแรงใช้งานปกติ หรือประมาณ 12.7 กิโลโวลต์ พบว่ารูปแบบ Phase Resolved Partial Discharge (PRPD pattern) ของระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีความสมบูรณ์ดังรูปที่ 4.17 ไม่ปรากฏการเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่ระดับแรงดันใช้งานปกติ แต่ในกรณีของระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อบกพร่องในข้อต่อสายเคเบิลทั้งสองกรณี โดยกรณีของระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีการสร้างรอยบากในเนื้อฉนวน XLPE ในรูปที่ 4.18 แสดงให้เห็นว่าที่ระดับแรงดันใช้งานปกติเป็นระดับแรงดันเริ่มเกิดดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge Inception Voltage, PDIV) และกรณีของระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีการทาผงทองแดงบนผิวฉนวน XLPE ในรูปที่ 4.19 แสดงการเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่ระดับแรงดันใช้งานปกติ

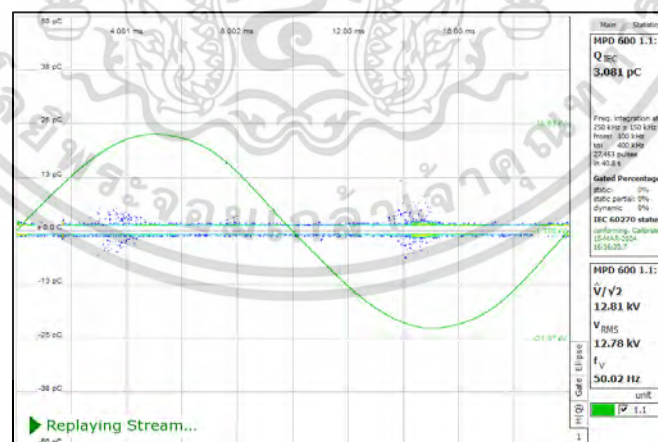
จากการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนนี้ สามารถประเมินสภาพของระบบสายเคเบิลใต้ดินได้ว่า ในกรณีของระบบสายเคเบิลใต้ดินที่ใช้งานจริง การมีอยู่ของข้อบกพร่องในข้อต่อสายเคเบิลจะทำให้เกิดการดิสชาร์จบางส่วนตลอดเวลาและทำให้ฉนวนของระบบสายเคเบิลใต้ดินเสื่อมสภาพและนำไปสู่ความล้มเหลวของสายเคเบิลในที่สุด



รูปที่ 4.16 ระดับสัญญาณรบกวนพื้นหลังในการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนกับระบบสายเคเบิลใต้ดิน

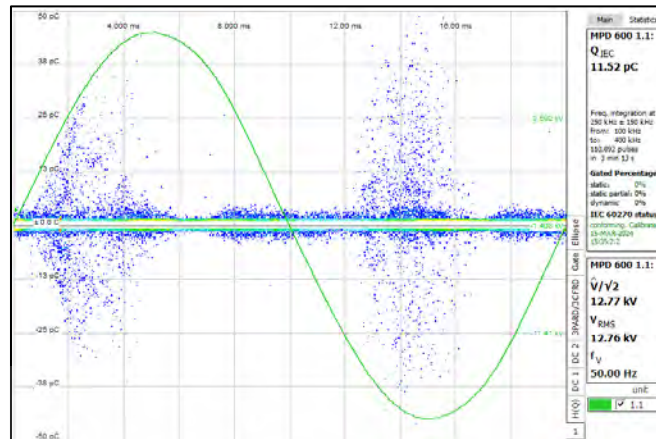


รูปที่ 4.17 รูปแบบ PRPD ของระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีความสมบูรณ์ ณ ระดับแรงดันใช้งานปกติ



รูปที่ 4.18 รูปแบบ PRPD ของระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อบกพร่องจากการสร้างรอยบากในเนื้อฉนวน XLPE ณ ระดับแรงดันใช้งานปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 รูปแบบ PRPD ของระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อบกพร่องจากการทากงทองแดงบนผิวฉนวน XLPE ณ ระดับแรงดันใช้งานปกติ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

จากการศึกษาเพื่อประเมินสภาพฉนวนในระบบสายเคเบิลใต้ดินด้วยวิธีการทดสอบต่างๆ ซึ่งได้แสดงผลการทดสอบตามบทที่ 4 โดยสามารถสรุปผลโดยแบ่งเป็นกรณีศึกษาได้ดังนี้

5.1.1 กรณีศึกษาที่ 1 ระบบสายเคเบิลใต้ดินพิกัด 22 กิโลโวลต์ที่มีเฉพาะส่วนของสายเคเบิลใต้ดิน

ในกรณีศึกษานี้ ได้ทำการทดสอบ PDC measurement กับสายเคเบิลใต้ดินพิกัด 22 กิโลโวลต์ โดยได้แบ่งเป็นสายเคเบิลใต้ดินที่ยังคงส่วนประกอบอื่นๆไว้ทั้งหมด และสายเคเบิลใต้ดินที่นำส่วนประกอบอื่นออกทั้งหมดเหลือเพียงชั้นตัวกั้นฉนวนเป็นชั้นนอกสุด โดยทั้งสองกรณีย่อยได้ใช้สายเคเบิลใต้ดินที่ผ่านการใช้งานมาแล้วมากกว่า 10 ปีและสายเคเบิลใต้ดินที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเพื่อเปรียบเทียบคุณลักษณะทางไฟฟ้าจากการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบ PDC measurement

จากกรณีแรก ที่ดำเนินการทดสอบกับสายเคเบิลใต้ดินที่ยังคงส่วนประกอบอื่นๆไว้ทั้งหมด ซึ่งสายเคเบิลใต้ดินที่ใช้งานมาแล้วพบข้อบกพร่องจากการใช้งานหลายประการ แต่ผลการทดสอบ PDC measurement ไม่ได้มีความแตกต่างกันมากในเรื่องของกราฟกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน ทั้งนี้ทั้งนั้น ความต้านทานฉนวนระหว่างสายเคเบิลใต้ดินที่ผ่านการใช้งานมาแล้วและสายเคเบิลใต้ดินที่ยังไม่ผ่านการใช้งานแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างว่า สายเคเบิลใต้ดินที่ผ่านการใช้งานมาแล้วนั้นจะมีคุณสมบัติความเป็นฉนวนที่ลดน้อยลง และจากพารามิเตอร์ตัวประกอบกำลังการสูญเสีย ($\tan\delta$) พบว่าสายเคเบิลใต้ดินที่ผ่านการใช้งานมาแล้วนั้นมีค่า $\tan\delta$ ที่สูงขึ้นในช่วงความถี่ 1 มิลลิเฮิรตซ์ ถึง 100 มิลลิเฮิรตซ์ ซึ่งอาจเป็นผลเนื่องมาจากการมีอยู่ของสารประกอบประเภทคอปเปอร์ภายใต้ชั้นเทปทองแดงของสายเคเบิลใต้ดิน

และกรณีที่สอง เมื่อดำเนินการทดสอบกับสายเคเบิลใต้ดินที่นำส่วนประกอบอื่นออกทั้งหมดเหลือเพียงชั้นตัวกั้นฉนวนเป็นชั้นนอกสุดนั้นจะเป็นการทดสอบเพื่อดูคุณลักษณะของชั้นฉนวน XLPE เพียงอย่างเดียว ซึ่งสายเคเบิลใต้ดินที่ผ่านการใช้งานมาแล้วนั้นมีการพบต้นไม้ซึ่งเป็นสัญญาณถึงความเสื่อมสภาพของสายเคเบิลใต้ดิน ซึ่งผลการทดสอบ PDC measurement ไม่ได้มีความแตกต่างกันมากในเรื่องของกราฟกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน, ความต้านทานฉนวนมีความแตกต่างเช่นเดียวกับกรณีก่อนหน้า และตัวประกอบกำลังการสูญเสียของสายเคเบิลใต้ดินมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย โดยสรุปได้ว่า การทดสอบนี้ยังไม่สามารถแบ่งแยกความแตกต่างของคุณสมบัติทางไฟฟ้าเนื่องจากการมีอยู่ของต้นไม้ได้ เนื่องจากประชากรของต้นไม้ในฉนวนสายเคเบิลใต้ดินนี้ไม่มากพอ หรือความยาวต้นไม้ในฉนวนสั้นจนเกินไปที่จะทำให้เกิดเห็นถึงความแตกต่างจากผลการทดสอบ PDC measurement

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.2 กรณีศึกษาที่ 2 ระบบสายเคเบิลใต้ดินพิกัด 22 กิโลโวลต์ที่มีทั้งสายเคเบิลใต้ดินและอุปกรณ์เสริม

กรณีศึกษานี้เป็นการศึกษาคุณลักษณะทางไฟฟ้าของระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อบกพร่องภายในข้อต่อสายเคเบิล ซึ่งเป็นการจำลองความผิดพลาดในการทำงานของคนที่เชื่อมต่อสายเคเบิล โดยตัวอย่างปัญหาที่นำมาจำลองเพื่อการศึกษา ประกอบด้วย ปัญหาการสร้างรอยบากที่มีความลึก 3 มิลลิเมตรในเนื้อฉนวน XLPE, ปัญหาการทาบงเหล็กบนฉนวน XLPE และปัญหาการทาบงทองแดงบนฉนวน XLPE และเตรียมระบบสายเคเบิลที่มีความสมบูรณ์เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบ โดยในกรณีศึกษานี้ได้ใช้การทดสอบต่างๆ เพื่อประเมินสภาพระบบสายเคเบิลใต้ดิน เช่น เทคนิคการวัดสเปกโตรสโคปีในโดเมนความถี่ (Frequency Domain Spectroscopy, FDS), การทดสอบ PDC measurement, การทดสอบแรงดันสูงที่ความถี่ต่ำมาก (Very Low Frequency Testing, VLF testing) และการทดสอบดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge (PD) test)

สำหรับเทคนิค FDS กับระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีการจำลองข้อบกพร่อง คือ การสร้างรอยบากในเนื้อฉนวน XLPE และการทาบงเหล็กบนฉนวน XLPE และเปรียบเทียบกับระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีความสมบูรณ์พบว่า ตัวประกอบกำลังการสูญเสียในช่วงความถี่ 100 มิลลิเฮิร์ตซ์ ถึง 100 เฮิร์ตซ์ ระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีการทาบงเหล็กบนฉนวน XLPE มีการตอบสนองทางไดอิเล็กตริกที่แตกต่างกับอีกสองกรณี และแสดงจุดสูงสุดของการสูญเสียในวัสดุไดอิเล็กตริกที่ความถี่ 1 เฮิร์ตซ์อีกด้วย อาจสรุปได้ว่า การตอบสนองทางไดอิเล็กตริกที่เกิดขึ้นนี้เนื่องมาจากระบบสายเคเบิลใต้ดินมีการปนเปื้อนของวัสดุนำไฟฟ้าในระบบฉนวน และสำหรับระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีการสร้างรอยบากในเนื้อฉนวน XLPE การตอบสนองทางไดอิเล็กตริกมีความคล้ายคลึงกับระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีความสมบูรณ์ นอกจากนี้ ความจุไฟฟ้าส่วนจริงของทั้งสามกรณีมีค่าเท่ากันและคงที่ตลอดย่านการวัด ส่วนความจุไฟฟ้าส่วนจินตภาพมีลักษณะกราฟมีความคล้ายคลึงกับกราฟตัวประกอบกำลังการสูญเสีย

และระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีการจำลองข้อบกพร่องคือ การสร้างรอยบากในเนื้อฉนวน XLPE และการทาบงทองแดงบนฉนวน XLPE และเปรียบเทียบกับระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีความสมบูรณ์ โดยได้ทำการทดสอบทั้งหมดสามหัวข้อ คือ การทดสอบ PDC measurement, การทดสอบ VLF Testing และการทดสอบ PD โดยการทดสอบ PDC measurement ทั้งสามกรณีแสดงลักษณะกราฟ PDC มีความคล้ายคลึงกัน และในกรณีของสายเคเบิลใต้ดินที่มีการสร้างรอยบากในเนื้อฉนวน XLPE ได้แสดงคุณลักษณะการนำไฟฟ้าที่มากกว่าอีกสองกรณี โดยมีความสัมพันธ์กับกราฟตัวประกอบกำลังการสูญเสียที่มีความสูญเสียในช่วงความถี่ซึ่งสื่อถึงความสูญเสียเนื่องจากความนำไฟฟ้าที่ให้ผลการวิเคราะห์เช่นเดียวกัน และความต้านทานฉนวนแสดงให้เห็นว่า กรณีของระบบสายเคเบิลใต้ดินที่ในข้อต่อสายเคเบิลมีข้อบกพร่องอยู่นั้น จะมีความต้านทานฉนวนที่น้อยกว่าระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีความสมบูรณ์ นั่นสื่อถึงความเสื่อมสภาพในระบบฉนวนของระบบสายเคเบิลใต้ดิน

สำหรับการทดสอบ VLF พบว่าเมื่อประเมินสภาพของระบบสายเคเบิลใต้ดินทั้งสามกรณีตามมาตรฐาน IEEE Std. 400.2-2013 นั้นระบบสายเคเบิลใต้ดินทุกกรณีจัดอยู่ในเกณฑ์ “แนะนำให้ศึกษาเพิ่มเติม (Further Study Advised)” แต่เมื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์เพิ่มขึ้นด้วยพารามิเตอร์ Skirt ที่ระดับแรงดันทดสอบ $1.5U_0$ นั้นพบว่า ระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อบกพร่องในข้อต่อสายเคเบิลจะมีค่ามากกว่าระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีความสมบูรณ์ นอกจากนี้หากพิจารณาแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่า $\tan\delta$ ต่อระดับแรงดันทดสอบ จะพบว่าระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อบกพร่องในข้อต่อสายเคเบิลจะแสดงความแตกต่างอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีความสมบูรณ์

และการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนซึ่งดำเนินการทดสอบกับระบบสายเคเบิลใต้ดินทั้งสามกรณี โดยกำหนดแรงดันทดสอบที่แรงดันใช้งานปกติของระบบสายเคเบิล ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่าระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีความสมบูรณ์จะไม่เกิดดิสชาร์จบางส่วน ณ แรงดันใช้งานปกติ แต่สำหรับกรณีของระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อบกพร่องในข้อต่อสายเคเบิลต่างแสดงการเกิดดิสชาร์จบางส่วนขึ้น คือ ระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีการสร้างรอยบากในเนื้อฉนวน XLPE จะเริ่มเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่ระดับแรงดันใช้งานปกติ (Partial Discharge Inception Voltage: PDIV) และระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีการทางทองแดงบนผิวฉนวน XLPE พบว่า เกิดดิสชาร์จบางส่วนเกิดขึ้นในระดับ 11.52 กิโลโวลต์ ซึ่งหมายความว่า หากเป็นระบบสายเคเบิลที่ใช้งานจริง หากระบบสายเคเบิลมีข้อบกพร่องอยู่ในระบบฉนวนนั้น จะทำให้เกิดการดิสชาร์จตลอดเวลาและฉนวนจะเสื่อมสภาพลงเรื่อยๆ สุดท้ายแล้วระบบสายเคเบิลนั้นจะเกิดความล้มเหลวในที่สุด

ดังนั้น การประเมินสภาพของระบบสายเคเบิลใต้ดินเพื่อใช้งานอย่างมีความน่าเชื่อมั่นนั้นสามารถนำวิธีการทดสอบเหล่านี้เพื่อใช้สำหรับการประเมินสภาพของฉนวนในระบบสายเคเบิลใต้ดินได้ ทั้งนี้ทั้งนั้น การประเมินสภาพนี้จะต้องใช้เทคนิคการทดสอบและข้อมูลที่น่าไปใช้วิเคราะห์ที่หลากหลายเพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้องและน่าเชื่อถือมากที่สุด

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการปรับปรุงการทดสอบ หรือหาข้อมูลเพิ่มเติมเกี่ยวกับการทดสอบที่ยังแสดงผลไม่ชัดเจน
2. ควรมีการเก็บข้อมูลผลการทดสอบในระบบสายเคเบิลที่มีข้อบกพร่องอื่นๆ เพิ่มเติม
3. ควรมีการเก็บข้อมูลผลการทดสอบจากระบบสายเคเบิลใต้ดินที่ใช้งานจริงและเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจากห้องปฏิบัติการ
4. ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการทดสอบอื่นๆ ที่จะช่วยในการประเมินระบบสายเคเบิลใต้ดินได้
5. ควรศึกษาการทดสอบในสาขาวิชาอื่นที่สามารถจะช่วยในการประเมินสภาพของวัสดุฉนวนในระบบสายเคเบิลใต้ดินได้
6. ศึกษาการจัดทำดัชนีสุขภาพของระบบสายเคเบิลใต้ดินโดยใช้พารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบต่างๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] H. Saadat, "THE POWER SYSTEM AND ELECTRIC POWER GENERATION," *Power System Analysis: PSA Publishings*, 2010.
- [2] J. D. Glover, T. Overbye, and M. S. Sarma, "Introduction," *Power System Analysis and Design*, Cengage Learning, 2017.
- [3] F. Kiessling, P. Nefzger, J. F. Nolasco, and U. Kaintzyk, "Overall planning," *Overhead Power Lines: Planning, Design, Construction*, Power Systems, pp. 1-23, Germany: Springer Berlin, Heidelberg, 2003.
- [4] "Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 1 kV ($U_m = 1,2$ kV) up to 30 kV ($U_m = 36$ kV) - Part 2: Cables for rated voltages from 6 kV ($U_m = 7,2$ kV) up to 30 kV ($U_m = 36$ kV)," *IEC 60502-2:2014*, International Electrotechnical Commission, 2014.
- [5] L. J. Hiivala, and C. C. Landinger, "Conductors," *Electrical Power Cable Engineering*, W. A. Thue, ed., CRC Press, 2012.
- [6] S. K. Ganguli, and V. Kohli, "Conductor Formation–Stranding: Theory and Practice," *Power Cable Technology*, Boca Raton: CRC Press, 2016.
- [7] คมสัน เพ็ชรรัักษ์, "สายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน," *High Voltage Cable การออกแบบและติดตั้งระบบสายไฟฟ้าแรงดันสูง*, กรุงเทพมหานคร: บริษัท สายไฟฟ้าบางกอกเคเบิล จำกัด, 2565.
- [8] G. Mazzanti, and M. Marzinotto, "Main Principles of HVDC Extruded Cable Design," *Extruded Cables for High-Voltage Direct-Current Transmission: Advances in Research and Development*, IEEE Press Series on Power and Energy Systems, Wiley-IEEE Press, 2013.
- [9] Carl C. Landinger, "Shielding of Power Cables," *Electrical Power Cable Engineering*, W. A. Thue, ed., USA: CRC Press, 2012.
- [10] F. Precopio, "The invention of chemically crosslinked polyethylene," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 15, no. 1, pp. 23-25, 1999.
- [11] H. Orton, "History of underground power cables," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 29, no. 4, pp. 52-57, 2013.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] N. Chandran, A. Sivadas, E. V. Anuja, D. K. Baby, and R. Ramdas, "XLPE: Crosslinking Techniques and Recycling Process," *Crosslinkable Polyethylene: Manufacture, Properties, Recycling, and Applications*, Materials Horizons: From Nature to Nanomaterials, pp. 167-188, Singapore: Springer Singapore, 2021.
- [13] Khaled Aljoumaa, and Abdul Wahab Allaf, "Morphology, Structure, Properties and Applications of XLPE," *Crosslinkable Polyethylene: Manufacture, Properties, Recycling, and Applications*, Materials Horizons: From Nature to Nanomaterials, pp. 125-166, Singapore: Springer Singapore, 2021.
- [14] M. Balachandran, "Aging and Degradation Studies in Crosslinked Polyethylene (XLPE)," *Crosslinkable Polyethylene: Manufacture, Properties, Recycling, and Applications*, Materials Horizons: From Nature to Nanomaterials, pp. 189-210, Singapore: Springer Singapore, 2021.
- [15] D. Wald, and A. Smedberg, "Evolution of Medium Voltage Cable Technology in Europe," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 24, no. 5, pp. 31-35, 2008.
- [16] Bruce S. Bernstein, "Fundamentals of Electrical Insulation Materials," *Electrical Power Cable Engineering*, W. A. Thue, ed., USA: CRC Press, 2012.
- [17] P. Cichecki, R. A. Jongen, E. Gulski, J. J. Smit, B. Quak, F. Petzold, and F. d. Vries, "Statistical approach in power cables diagnostic data analysis," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 15, no. 6, pp. 1559-1569, 2008.
- [18] M. Choudhary, M. Shafiq, I. Kiitam, A. Hussain, I. Palu, and P. Taklaja, "A Review of Aging Models for Electrical Insulation in Power Cables," *Energies*, vol. 15, no. 9, 2022.
- [19] T. Takahashi, "Localization Methodology of Partial Discharge Source for XLPE Cable System at Its Early Stage Deterioration," 2023 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), East Rutherford, NJ, USA, 2023, pp. 1-4.
- [20] E. F. Steennis, and F. H. Kreuger, "Water treeing in polyethylene cables," *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, vol. 25, no. 5, pp. 989-1028, 1990.
- [21] N. Hampton, *CHAPTER 2 Medium Voltage Cable System Issues: Cable Diagnostic Focused Initiative (CDFI)*, 2016.

- [22] Dr. Jim (Jun) Guo, and Zhong Zheng, "Partial Discharge Tests for Medium-Voltage Power Cable Systems," Fall 2020 Cover Story, 2020
- [23] E. Kuffel, W. S. Zaengl, and J. Kuffel, "Non-destructive insulation test techniques," *High Voltage Engineering: Fundamentals* Oxford, UK: Newnes, 2000.
- [24] W. S. Zaengl, "Dielectric spectroscopy in time and frequency domain for HV power equipment. I. Theoretical considerations," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 19, no. 5, pp. 5-19, 2003.
- [25] S. Chakravorti, D. Dey, and B. Chatterjee, "Time Domain Dielectric Response Measurements," *Recent Trends in the Condition Monitoring of Transformers*, Power Systems, London, UK: Springer-Verlag, 2013.
- [26] S. Chakravorti, D. Dey, and B. Chatterjee, "Frequency Domain Spectroscopy," *Recent Trends in the Condition Monitoring of Transformers*, Power Systems, London, UK: Springer-Verlag, 2013.
- [27] "IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Electric Machinery," *IEEE Std 43-2013 (Revision of IEEE Std 43-2000)*, pp. 1-37, 2014.
- [28] C. Suo et al., "Analysis of XLPE Cable Health Assessment Parameters under Various Test Voltages by PDC Method," 2022 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Applications (ICHVE), Chongqing, China, 2022, pp. 1-4.
- [29] A. N. Jahromi, P. Pattabi, J. Densley, and L. Lamarre, "Medium voltage XLPE cable condition assessment using frequency domain spectroscopy," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 36, no. 5, pp. 9-18, 2020.
- [30] "IEEE Guide for Field Testing of Shielded Power Cable Systems Using Very Low Frequency (VLF)(less than 1 Hz)," *IEEE Std 400.2-2013*, 2013, pp. 1-60.
- [31] CIGRE WG D1.48, "Electrical properties of insulating materials under VLF voltage," *TB 751*, CIGRE, 2018.
- [32] D. Kim, Y. Cho, and S. m. Kim, "A study on three dimensional assessment of the aging condition of polymeric medium voltage cables applying very low frequency (VLF) $\tan \delta$ diagnostic," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 21, no. 3, pp. 940-947, 2014.

- [33] "High-voltage test techniques - Partial discharge measurements," *IEC 60270:2000+AMD1:2015 CSV* International Electrotechnical Commission, 2015.
- [34] สำรวัย สังข์สะอาด, "การทดสอบแบบไม่ทำลาย," *วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง*, กรุงเทพมหานคร, 2549.
- [35] A. Kuchler, "Electric Strength," *High Voltage Engineering*, VDI-Buch, Heidelberg: Springer Vieweg Berlin, 2018.
- [36] S. Govindarajan, A. Morales, J. A. Ardila-Rey, and N. Purushothaman, "A review on partial discharge diagnosis in cables: Theory, techniques, and trends," *Measurement*, vol. 216, pp. 112882, 2023/07/01/, 2023.
- [37] P. Udomluksananon, A. Kunakorn, S. Maneerot, C. Bunlaksananusorn, P. Pannil and N. Pattanadech, "The Study of Polarization and Depolarization Current Measurements on Service-Aged 22 kV XLPE Underground Cables with Presence of Water Trees," 2022 9th International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), Kitakyushu, Japan, 2022, pp. 01-06.
- [38] P. Udomluksananon, N. Boonsaner, T. Wiangtong, S. Jeenmuang, K. Chumpiboon, K. Dorkmai, W. Rojanasunan, and N. Pattanadech, "The Dielectric Characteristics of 22 kV XLPE Underground Cables with Degraded Artificial Joint," 2023 International Symposium on High Voltage Engineering (ISH), Glasgow, UK, 2023, IET Conference Proceedings, pp. 38-42.
- [39] P. Udomluksananon, S. Jeenmuang, K. Chumpiboon, K. Dorkmai, W. Rojanasunan and N. Pattanadech, "The Dielectric Properties in Frequency Domain of the 22 kV Underground Cables with Defective Joint," 2023 International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM), Shimane, Japan, 2023, pp. 01-04.
- [40] "PDC-ANALYSER-1MOD User's Guide," ALFF Engineering.
- [41] S. A. Bhumiwat, "On-site non-destructive diagnosis of in-service power cables by Polarization / Depolarization Current analysis," 2010 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, San Diego, CA, USA, 2010, pp. 1-5.
- [42] P. Werelius, P. Tharning, R. Eriksson, B. Holmgren, and U. Gafvert, "Dielectric spectroscopy for diagnosis of water tree deterioration in XLPE cables," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 8, no. 1, pp. 27-42, 2001.

- [43] "Electrical test methods for electric cables - Part 3: Test methods for partial discharge measurements on lengths of extruded power cables," *IEC 60885-3:2015* International Electrotechnical Commission, 2015.
- [44] S. Kumara, X. Xu, T. Hammarström, A. M. Pourrahimi, C. Müller and Y. V. Serdyuk, "Comparison of Different Methods for Characterization of DC Conductivity of Insulating Polymers," 2020 IEEE 3rd International Conference on Dielectrics (ICD), Valencia, Spain, 2020, pp. 435-438.
- [45] X. Cheng, G. Ye, H. Sun, T. Li, and C. Sun, "Analysis of low-frequency dielectric loss of XLPE cable insulation based on extended Debye model," *AIP Advances*, vol. 11, no. 8, pp. 085103, 2021.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก
บทความวิชาการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



บทความวิชาการ

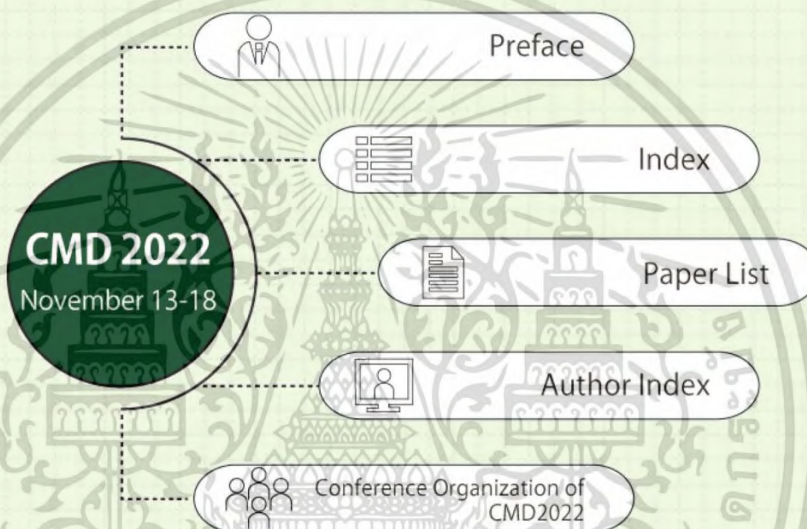
P. Udomluksananon, A. Kunakorn, S. Maneerot, C. Bunlaksananusorn, P. Pannil and N. Pattanadech, "The Study of Polarization and Depolarization Current Measurements on Service-Aged 22 kV XLPE Underground Cables with Presence of Water Trees," 2022 9th International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), Kitakyushu, Japan, 2022, pp. 01-06, doi: 10.23919/CMD54214.2022.9991350.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2022 9th International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD)

Hybrid style

On-site participation at the Kitakyushu International
Conference Center, Kitakyushu, Japan, and online participation



[Download All Data](#)

Sponsored by :

IEEJ Technical Committee on Dielectrics and Electrical Insulation

Technically co-sponsored by :

IEEE Dielectrics and Electrical Insulation Society

Supported by :

City of Kitakyushu

Kitakyushu Convention & Visitors Association

SECOM Science and Technology Foundation

The Institute of Electrical Installation Engineers of Japan, Kyushu Chapter

IEEJ, Kyushu Chapter

©The Institute of Electrical Engineers of Japan, 2022

Published by Noboru Fujiwara

The Institute of Electrical Engineers of Japan

6-2 Gobancho, Chiyodaku, Tokyo 102-0076, Japan

ISBN 978-4-88686-431-4

IEEE Catalog Number: CFP2230D-ART

IEEE Meetings, Conferences & Events (MCE)

445 Hoes Lane Piscataway, NJ 08854 USA

Email: iecc-mce@iecc.org

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The Study of Polarization and Depolarization Current Measurements on Service-Aged 22 kV XLPE Underground Cables with Presence of Water Trees

P. Udomluksananon^{1*}, A. Kunakorn¹, S. Maneerot³, C. Bunlaksananusom², P. Pannil², N. Pattanadech¹

¹Department of Electrical Engineering, School of Engineering,

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand

²Department of Instrumentation and Control Engineering, School of Engineering,

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand

³TESLA Power CO.,LTD., Om Noi, Samut Sakhon 74130, Thailand

*E-mail: udomluksananon.p@gmail.com

Abstract – This paper represents the condition assessment of service-aged 22 kV XLPE insulated underground cables. From the investigation, the water trees were detected in the insulation layer. The visual inspection of underground cables reveals the presence of copper carbonate contaminated on the copper tape layer. Some underground cables have the discontinuity of the copper tape layer. To evaluate the insulation condition of the underground cables, the polarization and depolarization current (PDC) measurements were performed on both the service-aged and the new (or unused) cables. The underground cables to experiment with the length of insulation screen equal to 1 m were prepared. In this research, the PDC measurements were performed on different aspects, i.e., the testing voltages (600 V, 800 V, and 1000 V), the testing positions, the effect of the discontinuity of the copper tape layer which occurred during service, the influence of the presence of copper carbonate, and the influence of water trees in XLPE cables. The dielectric response of the underground cables by using polarization and depolarization current measurements can diagnose the problems in service-aged underground cables, but this paper needs more test data for accurate interpretation.

Keywords: PDC measurements, Polarization and depolarization current, XLPE underground cable, Water trees

I. INTRODUCTION

At present, transmission and distribution power systems have been increasing in both cities and some suburbs because of the increase of people and the utilization of electrical energy. Thus, the reliability of power systems is more important than in the past. Likewise, electrical equipment used in the power system should be reliable. One of the important electrical equipment in the power system is power cables. Power cables are used to distribute electrical energy to the user and are utilized in the electrical generating process. Nowadays, underground cables are widely used, and overhead lines are replaced by underground cables. Most currently, power cable insulation is cross-linked polyethylene (XLPE). When XLPE underground cable was used for several years, one of the problems that have been occurring in many underground cables is water tree deterioration. The water trees grow in XLPE insulation when the XLPE insulation has contaminants or protrusions combined with the effect of electric field stress and water or moisture [1]. The water trees will degrade the insulation properties of XLPE insulation and lead to the failure of the underground cable. Moreover, the underground cables have other problems since they operate under thermal, electrical, and mechanical stress and environmental, e.g., on

the copper tape layer, when moisture from the environment reacts with copper tape, it will produce copper carbonate on the copper tape layer.

This paper studies the insulation condition of service-aged XLPE underground cables with the presence of water trees by using dielectric response analysis. To determine the dielectric response of underground cables by using the polarization and depolarization current (PDC) measurements technique. This technique is non-destructive testing by applying DC step voltage to underground cables [2]. Then, the data from PDC measurements are analyzed to investigate characteristic parameters, i.e., polarization and depolarization current, dielectric dissipation factor (DDF), and capacitance ratio.

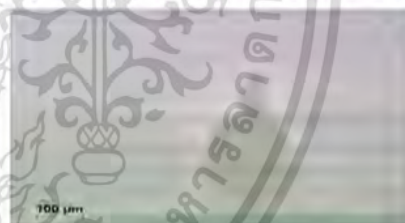


Figure 1. Example of a water tree in service-aged underground cable.

II. RELATED THEORY

A. Water Trees Phenomena

The water trees are the diffuse structure in the insulation that grows under the combination of water (or moisture) and the electric field. Water trees will cause the insulation to degrade the electrical properties, e.g., breakdown voltage level [3], especially large water trees since these water trees can initiate insulation failure. The water trees have two different types, i.e., vented trees and bow-tie trees, based on the location where these trees start growing. Under service aging, the vented trees are more dangerous than bow-tie trees because when the vented trees are grown, in the direction of the electric stress, from one side of the insulation to another side of the insulation and initiate an electrical tree which can occur the breakdown inside the underground cable insulation. Water trees have possible mechanisms of growth, e.g., the coulomb forces, thermal degradation, dielectrophoresis, chemical degradation, etc [1]. The influence of water trees can appear the non-linear effects with respect to the applied voltage of service-aged underground cable [4]. Fig. 1 shows

the example of a water tree that is observed in the tested service-aged underground cable.

B. Polarization and Depolarization Current Measurements

The polarization and depolarization current (PDC) measurements are the method to diagnose the insulation condition in the time domain. The measured current has two parts, i.e. when the DC step voltage source is applied to the test object, the polarization current or charging current $i_{pol}(t)$ is measured. The polarization current $i_{pol}(t)$ can be expressed in (1).

$$i_{pol}(t) = C_0 U_c \left[\frac{\sigma_0}{\epsilon_0} + \epsilon_{\infty} \delta(t) + f(t) \right] \quad (1)$$

Where

- C_0 is the geometric capacitance of the test object.
- U_c is the magnitude of DC step voltage (DC charging voltage) that energizing to the test object.
- σ_0 is the pure DC conductivity of the dielectric.
- ϵ_0 is the permittivity of free space or vacuum (the constant value is 8.85419×10^{-12} [As/Vm]).
- ϵ_{∞} is the relative permittivity of the dielectric.
- $\delta(t)$ is the delta function arising from the suddenly applied step voltage at any time.
- $f(t)$ Is the dielectric response function of the dielectric.

After the DC step voltage source is stopped to energize the test object, the test object is short-circuited. The current which is discharged from the test object and flows in the circuit is measured. This current is called depolarization current or discharge current $i_{depol}(t)$. The depolarization current $i_{depol}(t)$ can be expressed in (2).

$$i_{depol}(t) = -C_0 U_c \left[f(t) - f(t+T_c) \right] \quad (2)$$

Where T_c is the charging time in the polarization process. From (2), the second term can be neglected if the charging time T_c was long enough to complete all polarization processes. Then, the depolarization current becomes directly proportional to the dielectric response function of the test object [5].

Ideally, the polarization and depolarization current are equal but opposite polarity (see Fig. 2). In practice, the conduction current in the polarization process consists of the conduction current inside the insulation and the leakage current on the insulation surface when the DC step voltage source is applied to the insulation [6].

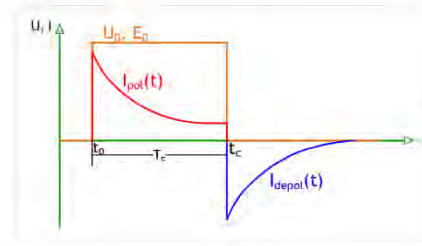


Figure 2. Characteristics of the polarization and depolarization currents.

C. Dielectric Parameters Following This Research

1. Dielectric dissipation factor (DDF)

The dielectric dissipation factor (DDF) or loss factor represents the total loss in the insulation system. The DDF consists of polarization loss and conduction loss (the ionization loss will be neglected). This parameter can indicate the insulation condition, but it is unable to specify the cause of the problems. The DDF of each insulation system cannot be compared since the different types of material [2].

2. Capacitance ratio (C ratio)

The capacitance ratio is the parameter to consider the contaminant in the insulation system. This parameter can be obtained from the ratio of capacitance at the corresponding frequency to capacitance at 50 Hz. If the insulation system contains a negligible amount of contaminant or deterioration products, the capacitance at power frequency or 50 Hz to very low frequencies is constant (or the capacitive ratio equals 1.00). On the other hand, if the insulation system contains free water (or molecules of water), including the water trees or other deterioration products, the capacitance ratio is higher at low and very low frequencies since the slowly interfacial polarization in the insulation system [2].

III. EXPERIMENTATION

A. The Underground Cable Preparation

The underground cables used in the experiments have three samples, i.e., the unaged underground cable, the service-aged underground cable with regular copper tape, and the service-aged underground cable with resistive copper tape. In Fig. 3, the underground cables were prepared for experiment 1 to experiment 4 with the length of each layer in Table I. below.

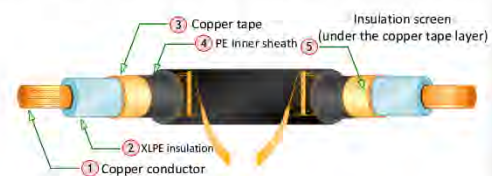


Figure 3. The structures of the underground cables.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

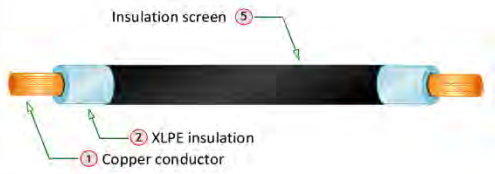


Figure 4. The structure of underground cables for experiment 5.

And in experiment 5, the unaged underground cable and the service-aged underground cable with the regular copper tape still have only a copper conductor, XLPE insulation, and insulation screen. And others were removed (See Fig. 4).

TABLE I. THE LENGTH OF THE PREPARED UNDERGROUND CABLES STRUCTURES

No.	Layer	Length (m)
1	Copper conductor	0.07
2	XLPE insulation	0.05
3	Copper tape	0.03
4	PE Inner sheath	0.03
5	Insulation screen (under the copper tape layer)	1.00

TABLE II. THE UNDERGROUND CABLES CONFIGURATIONS

CIRCUIT	DESCRIPTION	
CUtape	Energizing position	Copper conductor
	Measuring position	Copper tape that both sides are connected
GW	Energizing position	Copper conductor
	Measuring position	Ground wire
CUR	Energizing position	Copper conductor
	Measuring position	Copper tape on energizing side
CUL	Energizing position	Copper conductor
	Measuring position	Copper tape on the opposite side that energizes

B. PDC Test Circuit

The test circuit for measuring polarization and depolarization current by using PDC Analyser (PDC-Analyser-1MOD). In all the experiments, the internal voltage source was used, but the applied voltage values were described below based on the experimental setup. The polarization (charging) time and depolarization time was 1500 s. Both times were used in all experiments, and the XLPE insulation was guarded. To provide accuracy and safety measurements, The PDC measurements procedure was conducted according to [7]. To study the insulation condition of the underground cables, the experiments were designed into five experiments, as described below.

Table II shows the underground cable configurations used in the PDC test circuit for experiment 1 to experiment 4. In each configuration, the different measuring positions of the PDC test circuit are illustrated in Fig. 5(a) – Fig. 5(d). And in experiment 5, the PDC test circuit energized charging voltage at the copper conductor and measured on the insulation screen layer, as shown in Fig. 6.

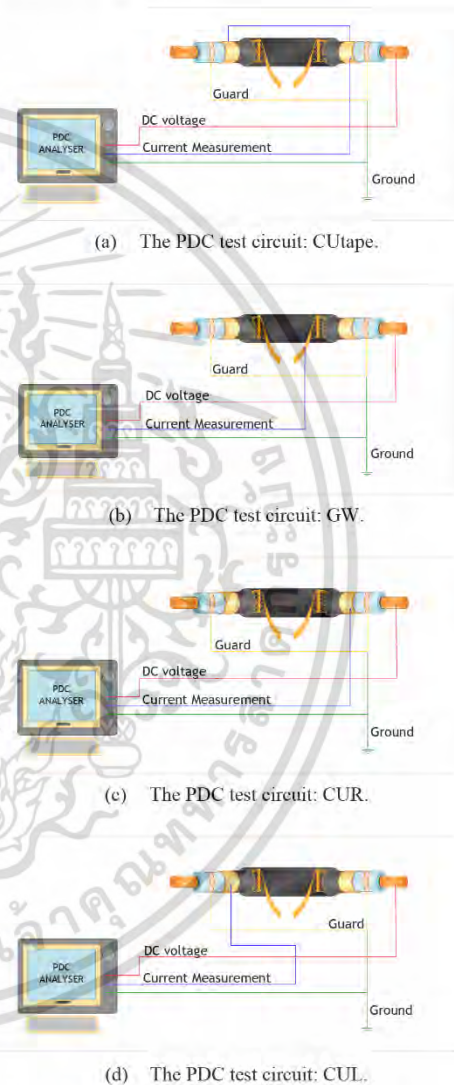


Figure 5. The PDC test circuits for experiment 1 to experiment 4.

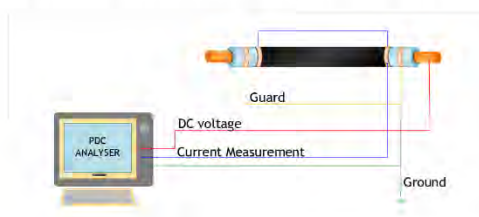


Figure 6. The PDC test circuit for experiment 5.

C. The Experimental Setup

Experiment 1: To compare the polarization and depolarization current at the different applied voltages, i.e., 600, 800, and 1000 V of the service-aged underground cable.

The polarization and depolarization duration was 1500 s. The CUTape circuit was used in this experiment.

Experiment 2: To compare the polarization and depolarization current by measuring at different positions, i.e., measuring at the copper tape and ground wire. The applied voltage was 1000 V, and The polarization and depolarization duration was 1500 s. The CUTape and GW circuits were used in this experiment.

Experiment 3: To study the polarization and depolarization current of the underground cables, which have resistive copper tape and regular copper tape. The applied voltage was 1000 V, and The polarization and depolarization duration was 1500 s. The CUTape, CUR, and CUL circuits were used in this experiment.

Experiment 4: To study the polarization and depolarization current of the service-aged underground cable, which has copper carbonate on the copper tape layer and unaged underground cable. The applied voltage was 1000 V, and The polarization and depolarization duration was 1500 s. The CUTape circuit was used in this experiment.

Experiment 5: To study the polarization and depolarization current of XLPE insulation in service-aged underground cable with the presence of water trees and unaged underground cable. The applied voltage was 1000 V, and The polarization and depolarization duration was 1500 s. The circuit was used in this experiment, as shown in Fig. 6.

IV. TEST RESULTS AND DISCUSSION

From experiment 1, Fig. 7 shows that polarization and depolarization currents depend on an applied voltage, but the dielectric dissipation factors of each applied voltage are not different in all frequency ranges, as shown in Fig. 8.

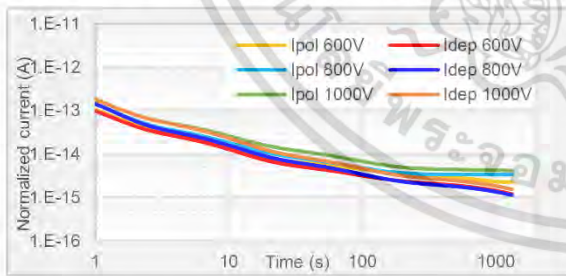


Figure 7. The polarization and depolarization current at the different applied voltages.

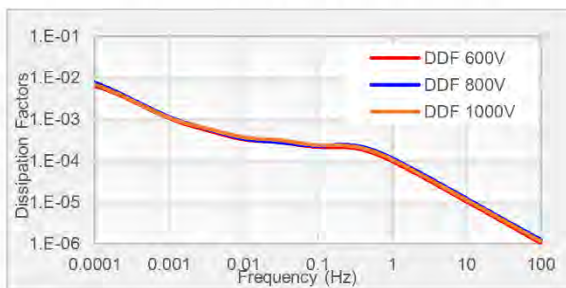


Figure 8. The dielectric dissipation factor at the different applied voltages.

In experiment 2, test results show the polarization and depolarization currents from two measuring positions are shown in Fig. 9. And Fig. 10 and Fig. 11 show the other dielectric response when measured at different positions, i.e., dielectric dissipation factor and capacitance ratio, respectively.

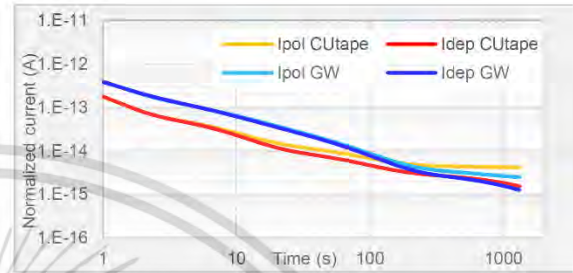


Figure 9. The polarization and depolarization current by measuring different positions.

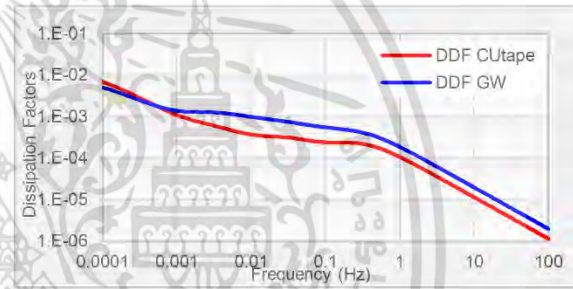


Figure 10. The dielectric dissipation factor by measuring different positions.

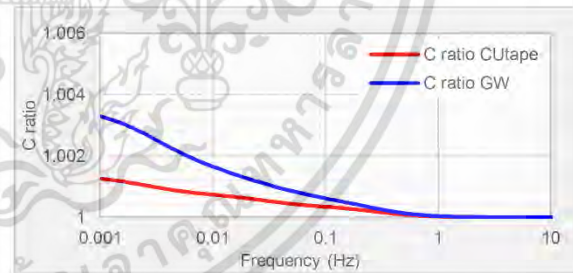


Figure 11. The capacitance ratio at any frequency compared with 50 Hz by measuring different positions.

From experiment 3, Fig. 12 and Fig. 13 show the trends of polarization and depolarization currents in each measuring position from the service-aged underground cables with resistive copper tape and regular copper tape, respectively, have a similar trend. While the dielectric dissipation factor of underground cable with resistive copper tape (see in Fig. 14) at a frequency range higher than 0.1 Hz has significantly different values, opposite to underground cable with regular copper tape that has a close value of the dissipation factor value as shown in Fig. 15.

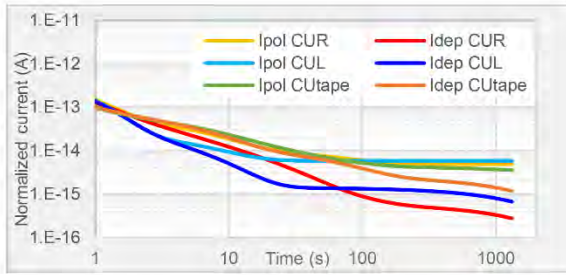


Figure 12. The polarization and depolarization current of underground cable that has resistive copper tape in each circuit.

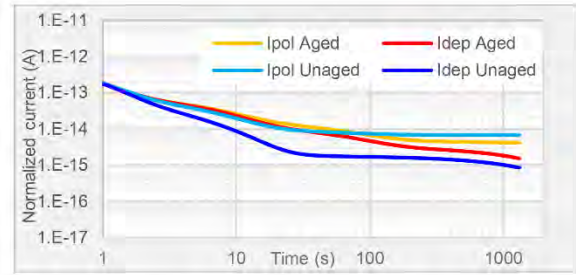


Figure 16. The polarization and depolarization current of service-aged and unaged underground cables.

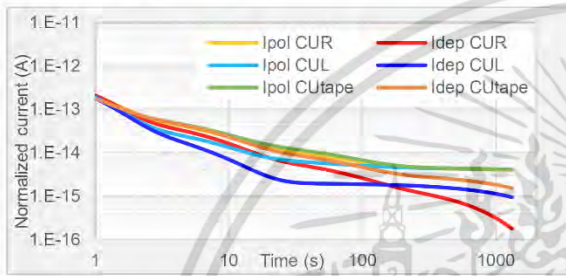


Figure 13. The polarization and depolarization current of underground cable that has regular copper tape in each circuit.

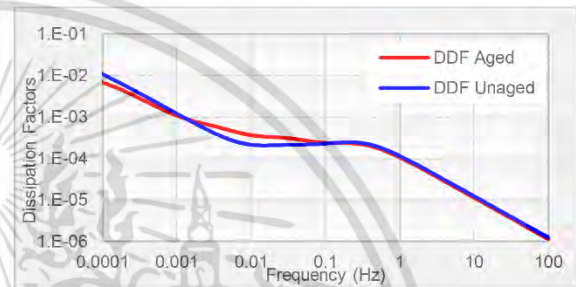


Figure 17. The dielectric dissipation factor of service-aged and unaged underground cables.

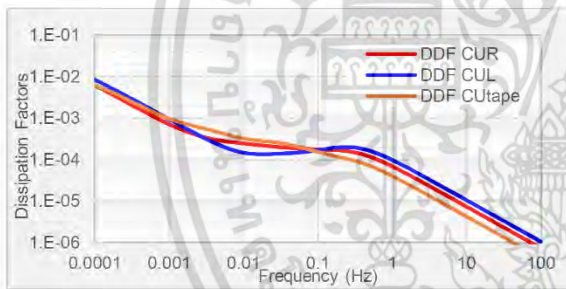


Figure 14. The dielectric dissipation factor of underground cable that has resistive copper tape in each circuit.

And the results of experiment 5, the measurements were conducted only on XLPE insulation. The polarization and depolarization currents of XLPE insulation which presence of water trees and insulation from the unaged underground cable are compared in Fig. 18. The other dielectric responses of two XLPE insulation, i.e., dielectric dissipation factor and capacitance ratio, are shown in Fig. 19 and Fig. 20, respectively. The results are not significantly different between service-aged and unaged insulation.

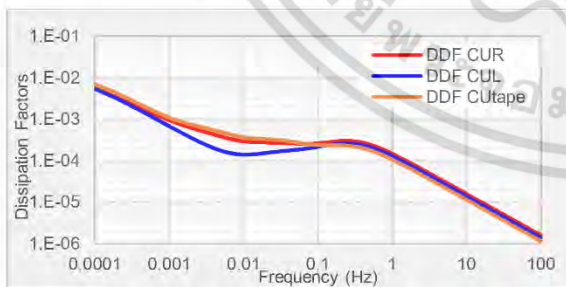


Figure 15. The dielectric dissipation factor of underground cable that has regular copper tape in each circuit.

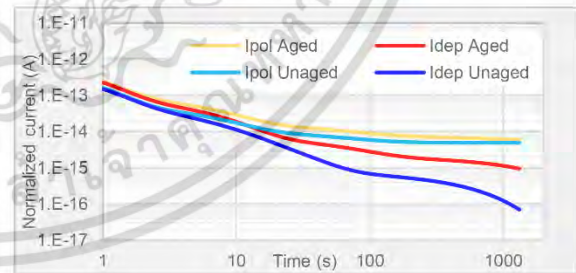


Figure 18. The polarization and depolarization current of the XLPE insulation in service-aged and unaged underground cable.

In experiment 4 test results, the polarization and depolarization currents are shown in Fig. 16, and the dielectric dissipation factors at a frequency range higher than 0.1 Hz are close between service-aged and unaged underground cables and slightly different at a frequency range below 0.1 Hz, as shown in Fig. 17.

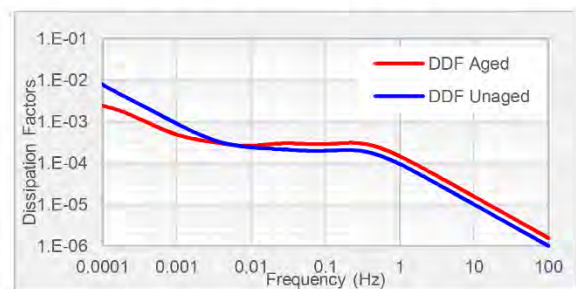


Figure 19. The dielectric dissipation factor of the XLPE insulation in service-aged and unaged underground cables.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

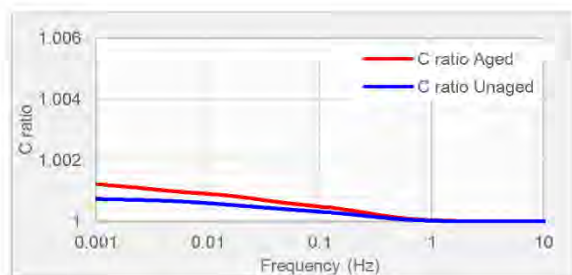


Figure 20. The capacitance ratio at any frequency compared with 50 Hz of the XLPE insulation in service-aged and unaged underground cable.

V. CONCLUSION

Initially, the polarization and depolarization currents are based on the voltage that applying to the test object, but the dielectric dissipation factor is not change corresponding to the applied voltage, and the test results by testing at different measuring positions on the same service-aged underground cable are not similar that may occur by the contaminants, e.g., water or any conduction particles that accumulated in underground cable sections during service. The problems in underground cables that occur during service are interpreted by the dielectric response parameters. For the resistive copper tape, the dielectric dissipation factor shows a different trend from the regular copper tape. In the case of copper carbonate under the copper tape layer, the measurements cannot distinguish only the result of copper carbonate due to the effect of water trees in the insulation is included. And in the case of investigating the influence of water trees in XLPE insulation, the test results do not show a significant difference between service-aged and unaged underground cable insulation, maybe because the length of water trees is short,

and the population is not enough to obtain results obviously. Consequently, the test data from the last two experiments may not be enough to interpret the problems.


ACKNOWLEDGMENT

The authors gratefully acknowledge the staff of High Voltage Engineering Laboratory and Dielectric Analytika Laboratory (DIKALab) at King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang for preparing the XLPE specimens to observe water trees and supporting the experiment process.

REFERENCES

- [1] E. F. Steennis and F. H. Kreuger, "Water treeing in polyethylene cables," in *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, vol. 25, no. 5, pp. 989-1028, Oct. 1990.
- [2] S. Bhumiwat, "Interpretation of dielectric spectroscopy results in time and frequency domains for power cables," CIGRE, Session Materials, Cigre D1-216, 2010.
- [3] S. Hydsten, E. Ildstad, B. Holmgren and P. Werelius, "Correlation between AC breakdown strength and low frequency dielectric loss of water tree aged XLPE cables," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 13, no. 1, pp. 40-45, Jan. 1998.
- [4] T. Heizmann and W. S. Zaengl, "Influence of ageing on depolarization currents in polymer-insulated medium-voltage cables," *1991 Annual Report. Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, 1991, pp. 324-329.
- [5] W. S. Zaengl, "Dielectric spectroscopy in time and frequency domain for HV power equipment. I. Theoretical considerations," in *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 19, no. 5, pp. 5-19, Sept.-Oct. 2003.
- [6] J. Singhasivanon, C. Manop, N. Pattanadech, and N. Jirasuwankul, "The classification of regular and defected low voltage XLPE cable by using polarization and depolarization current method," *2017 International Electrical Engineering Congress (iEECON)*, 2017, pp. 1-4.
- [7] S. A. Bhumiwat, "On-site non-destructive diagnosis of in-service power cables by Polarization / Depolarization Current analysis," *2010 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, 2010, pp. 1-5.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



บทความวิชาการ

P. Udomluksananon, S. Jeenmuang, K. Chumpiboon, K. Dorkmai, W. Rojanasunan and N. Pattanadech, "The Dielectric Properties in Frequency Domain of the 22 kV Underground Cables with Defective Joint," 2023 International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM), Shimane, Japan, 2023, pp. 01-04, doi: 10.23919/ISEIM60444.2023.10329183.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**Proceedings of
2023 International Symposium on
Electrical Insulating Materials
(ISEIM 2023)**

September 24-28, 2023
Matsue City, Japan

Sponsored by

IEEJ Technical Committee on Dielectrics and Electrical Insulation

Technically Co-sponsored by

IEEE Dielectrics and Electrical Insulation Society
IEEE DEIS Japan Chapter

II. RELATED THEORY

A. Frequency Domain Spectroscopy (FDS) Technique

Frequency domain spectroscopy (FDS) is an advanced technique to assess the insulation condition by characterizing the dielectric properties of the insulation, i.e., dielectric dissipation factor ($\tan\delta$) and complex capacitance, at different frequencies. The principle of the FDS technique is the measurement of voltage across the test object $U(\omega)$ and the current that flows through the test object $I(\omega)$. The phase difference between the measured voltage and measured current is taken into account. Moreover, the test object's impedance $Z(\omega)$ can be calculated from (1).

$$\bar{Z}(\omega) = Z'(\omega) + jZ''(\omega) = \bar{U}(\omega) / \bar{I}(\omega) \quad (1)$$

The relationship between the voltage and current can determine the complex capacitance $C(\omega)$ that can be rewritten in (2). Furthermore, the complex capacitance correlates with the complex permittivity $\varepsilon_r(\omega)$ as expressed in (3).

$$\bar{I}(\omega) = j\omega\bar{C}(\omega)\bar{U}(\omega) \quad (2)$$

$$\bar{\varepsilon}_r(\omega) = \varepsilon_r'(\omega) - j\varepsilon_r''(\omega) = \frac{\bar{C}(\omega)}{C_0} \quad (3)$$

Where C_0 is the test object's geometric capacitance.

Equation (3) determines the complex permittivity consisting of the real and imaginary parts. The real part of the complex permittivity ε_r' represents the standard (or relative) permittivity that relates to the capacitance of the test object, and the imaginary part permittivity ε_r'' is correlated to the dielectric (polarization) losses in the test object [7, 8]. The dielectric dissipation factor ($\tan\delta_p$), which represents the losses in the insulation system, can be written in the function of frequency as (4).

$$\tan\delta_p = \frac{\varepsilon_r''(\omega)}{\varepsilon_r'(\omega)} = \frac{C''(\omega)}{C'(\omega)} \quad (4)$$

From Fig. 1, The total current density that flows through the insulation consists of displacement current density, which is a combination of purely capacitive part, polarization part, and conduction current density. So, the dielectric dissipation factor, which comprises polarization loss and conduction loss $\tan\delta_c$, is expressed in (5) [8].

$$\tan\delta = \tan\delta_c + \tan\delta_p = \frac{\kappa}{\omega\varepsilon_0\varepsilon_r'} + \frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_r'} \quad (5)$$

Where κ is a conductivity value.

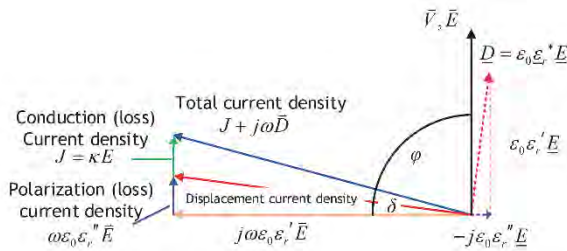


Fig. 1. Dielectric losses with polarization loss and conduction loss by means of the phase difference between electric field (or voltage) and current density in a complex plane phasor diagram [8].

III. EXPERIMENTAL SETUP

A. Test Specimens Preparation

The test specimens are the underground cable systems that simulate the poor workmanship condition of the joint installation process. Three test specimens were prepared. For each test specimen, two three meters 22 kV underground cables were used and connected with the simulated joint. Also, the heat-shrinkable cable terminations are on both ends of all test specimens. Two test specimens were prepared by making the defects inside the cable joint. In the first case, the incision made by a cutter blade was cut into the insulation for three millimeters in depth, that shown in Fig. 2. Second case, The XLPE surface was daubed with the twenty-micron iron powder, that seen in Fig. 3. And, another case is the test specimen with a healthy condition joint, as shown in Fig. 4, to be the comparative reference values.



Fig. 2. Case of cable joint with an incision on the XLPE surface.

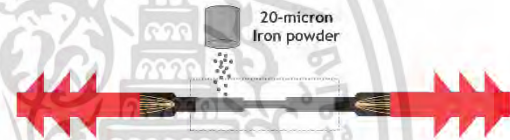


Fig. 3. Case of cable joint with iron powder on the XLPE surface.



Fig. 4. Case of a healthy condition cable joint.

B. FDS Measurement Techniques

Frequency domain spectroscopy (FDS) is an off-line non-destructive test for analyzing dielectric response in the frequency domain. This technique was carried out by OMICRON DIRANA. The test circuit was set up by applying AC test voltage at the cable terminal and measured at the ground wire. Moreover, to reduce the influence of leakage current on the cable termination surface [9], copper tape was used as a guard electrode on both sides of the cable termination. It was bypassed to the guard connection on the test device. The schematic diagram of the test circuit is shown in Fig. 5.

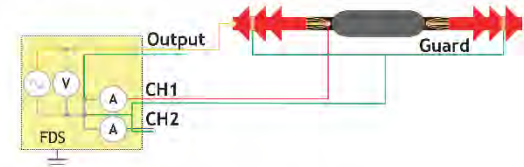


Fig. 5. A schematical diagram of the FDS test circuit.

After the test circuit had been set up, the test voltage used in all cases was the AC peak test voltage of 200 V_p. The tests performed the FDS measurement in the frequency ranges of 1 mHz to 1 kHz. Before the test began, the ambient conditions, i.e., ambient temperature and relative humidity, had been collected.

ไม่วารกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IV. TEST RESULTS AND INTERPRETATION

From FDS measurement, the test results analyzed the insulation condition of the underground cable systems, which are the test specimens in this research. The dielectric response parameters obtained from FDS measurement consist of the dielectric dissipation factor (or $\tan\delta$), and the complex capacitance, both of the real part capacitance and the imaginary part capacitance. Fig. 6 shows the comparative curves of the dielectric dissipation factor from three cases. This graph reveals the significantly different values of the case of iron powder on the XLPE surface at the frequency range of 0.1 Hz to 100 Hz. It is possible that an iron powder that was daubed between the XLPE insulation and cable joint increased the conductivity of the insulation system. Consequently, the $\tan\delta$ is increased. Moreover, the $\tan\delta$ curve of the test specimen, in which the joint has an iron powder on the XLPE surface, shows the loss peak at the frequency of 1 Hz. This phenomenon may be the effect of the conductive contaminant between the interface in the insulation system of this test specimen. Another case is the incision on the XLPE surface in the cable joint. The curve does not show the difference in the $\tan\delta$ curve compared to the normal joint case. That means the incision on the XLPE surface does not influence the dielectric response measurement in the frequency domain.

The complex capacitance obtained from the FDS measurement consists of the real part capacitance and the imaginary part capacitance. The complex capacitance parameter is divided into two graphs. Fig. 7 and 8 show the real part capacitance curves, respectively. Fig. 7 shows the real part capacitance, which represents the capacitance of the test object, of all three cases have a similar trend, and the capacitance value at the power frequency of all three cases is approximately 1.5 nF. So, the real part capacitance does not show the difference between the underground cable systems that cable joints have the defects, which are both of an iron powder on the XLPE insulation and the incision on the XLPE insulation, and another without defect. Another part of the complex capacitance is the imaginary part capacitance, which represents the losses in the insulation system. Fig. 8 reveals the result of this parameter that the imaginary part capacitance values from three cases are distinct. Furthermore, this parameter has a similar trend to the dielectric dissipation factor.

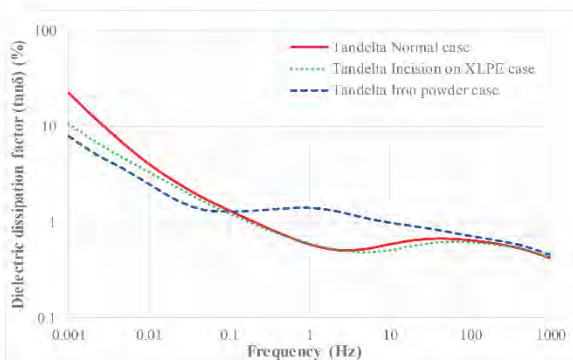


Fig. 6. The comparative curves of $\tan\delta$ from three cases.

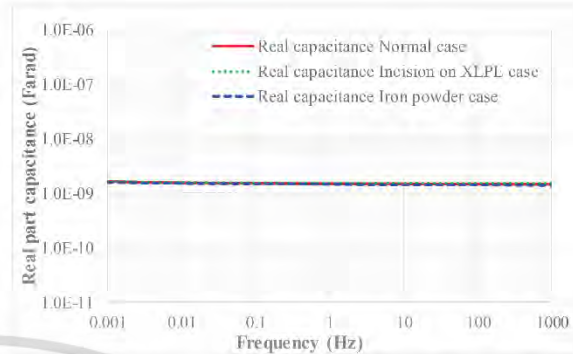


Fig. 7. The comparative curves of real part capacitance from three cases.

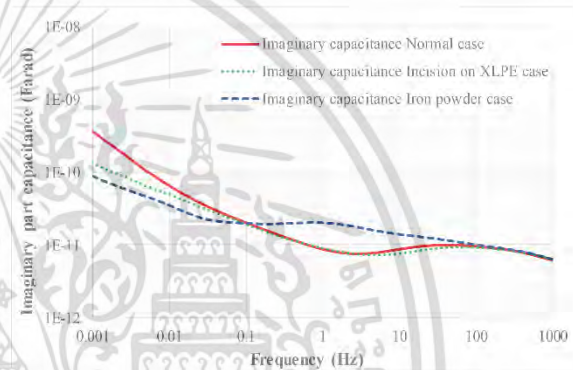


Fig. 8. The comparative curves of imaginary part capacitance from three cases.

V. CONCLUSION

This research represents the FDS technique to assess the insulation's integrity of the underground cable systems, which simulated the defects in the cable joint. The FDS technique was carried out by OMICRON DIRANA. The AC test voltage used in this research is 200 V_p, and the measuring frequency range is 1 mHz to 1 kHz. The parameters obtained from this technique are the dielectric dissipation factor and the complex capacitance. From the test results, the dielectric dissipation factor parameter graph reveals the significantly different values of the case of iron powder on the XLPE surface at the frequency range of 0.1 Hz to 100 Hz. In addition, it shows the loss peak at 1 Hz. It may interpret that the presence of conductive contaminant increases the conductivity of the insulation system, and the dielectric response reveals this effect in this frequency range. Nevertheless, the case of the incision on the XLPE surface does not show a noticeable difference from the case of the healthy condition joint. Another parameter is complex capacitance, divided into the real part capacitance and the imaginary part capacitance. From the real part capacitance of three cases almost has a constant value in the log-log scale. This parameter does not reveal the different results between the underground cable systems with normal and abnormal joints. On the contrary, the imaginary part capacitance shows the distinct value of three cases, and the curve of this parameter tends to be similar to the dielectric dissipation factor parameter curve.

การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญูญาติให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


ACKNOWLEDGMENT

The authors gratefully thank the staff of King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang's High Voltage Engineering Laboratory and Dielectric Analytika and High Voltage Engineering Laboratory (DIKA Lab) for their recommendations and continuous assistance during our testing processes.

REFERENCES

- [1] N. Amyot, E. David, D. Fournier, D. Jean and D. Lalancette, "Dielectric response of cable accessories and its influence on cable diagnostics," Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Cancun, Mexico, 2002, pp. 434-437.
- [2] A. N. Jahromi, P. K. Pattabi, S. Lo and J. Densley, "Approaches to the forensic failure investigation of medium voltage polymeric cables," 2020 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), Knoxville, TN, USA, 2020, pp. 85-89.
- [3] E. Ildstad, "Challenging Defects of High Voltage Insulation Systems," 2019 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), Richland, WA, USA, 2019, pp. 1-13.
- [4] Maanen B., Van, Plet, C., Van Der Wielen, P., et al.: 'Failures in underground power cables – return of experience'. JICABLE'15, 9th Int. Conf. Insulated Power Cables, Versailles, France, 21–25 June 2015, vol.2, pp. 265–269.
- [5] Zhou, C., Yi, H. and Dong, X., Review of recent research towards power cable life cycle management. High voltage, 2: pp. 179-187, 2017.
- [6] B. Oyegoke, P. Hyvonen, M. Aro and Ning Gao, "Application of dielectric response measurement on power cable systems," in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 10, no. 5, pp. 862-873, Oct. 2003.
- [7] S. Chakravorti, D. Dey and B. Chatterjee, "Frequency Domain Spectroscopy" in Recent Trends in the Condition Monitoring of Transformers - Theory Implementation and Analysis, London, U.K.:Springer, pp. 193–225, 2013.
- [8] A. Küchler. High Voltage Engineering Fundamentals-Technology-Applications. Germany : Springer-Verlag GmbH. 2018.
- [9] P. Werelius, P. Tharning, R. Eriksson, B. Holmgren and U. Gafvert, "Dielectric spectroscopy for diagnosis of water tree deterioration in XLPE cables," in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 8, no. 1, pp. 27-42, Feb 2001.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



บทความวิชาการ

P. Udomluksananon, N. Boonsaner, T. Wiangtong, S. Jeenmuang, K. Chumpiboon, K. Dorkmai, W. Rojanasunan, and N. Pattanadech, "The dielectric characteristics of 22 KV XLPE underground cables with degraded artificial joint," 23rd International Symposium on High Voltage Engineering (ISH 2023), Glasgow, UK, 2023, pp. 38-42, doi: 10.1049/icp.2024.0424.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ISH 2023

International Symposium on High Voltage Engineering | Glasgow, UK

International Symposium on High Voltage Engineering

27 August – 1 September 2023 | Glasgow

FULL PAPERS BOOK

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE DIELECTRIC CHARACTERISTICS OF 22 KV XLPE UNDERGROUND CABLES WITH DEGRADED ARTIFICIAL JOINT

Patt Udomluksananon^{1}, Nutthaphan Boonsaner¹, Theerayod Wiangtong¹, Siwakorn Jeenuang¹,
Komin Chumpiboon¹, Kritsada Dorkmai¹, Warisanan Rojanasunan¹, Norasage Pattanadech¹*

*¹Department of Electrical Engineering, School of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand
udomluksananon.p@gmail.com

Keywords: DIELECTRIC CHARACTERISTICS, XLPE UNDERGROUND CABLE, DEGRADED JOINT, POLARIZATION AND DEPOLARIZATION CURRENTS, VERY LOW FREQUENCY TESTING

Abstract

This paper represents the dielectric characteristics of the 22 kV underground cable test specimen. Two 3 m XLPE underground cables were connected with the heat-shrinkable joint that has been simulated with some artificial defects. The healthy heat-shrinkable terminations are at both ends of the cable test specimen. For this research, the underground cables with the healthy joint, the joint with a copper powder contaminant on the XLPE surface, and the joint with an incision on the XLPE surface were prepared to perform the experiment. To compare the dielectric characteristics of the underground cables with the healthy joint and degraded artificial joints, the polarization and depolarization currents (PDC) measurements and the very low frequency-tangent delta (VLF-TD) testing, according to IEEE standard 400.2-2013, were conducted. From the PDC measurements, the test results are not clearly different for the underground cables with the defective joint when compared to the healthy joint case, except for the electrical conductivity and insulation resistance that show the difference between them. The VLF tangent delta parameters and mean tangent delta comparison curve show differences in each case, which can contribute to assessing the condition of the underground cable systems.

1 Introduction

The underground cable is one of the crucial equipment in the power grid's transmission and distribution systems. Nowadays, underground cable systems are widely used in the worldwide power system; thus, underground cable systems should be expected to reliably distribute electrical energy to users or various utilities [1]. However, underground cable systems, which consist of cable, joints, and terminations, during operation must experience stresses like electrical stress, thermal stress, mechanical stress, environment, and other factors, which are sometimes accelerated by poor practices in installation and maintenance [2,3]. From these stresses, the underground cable insulation will undergo degradation and, failure will occur. The time-to-failure for underground cable systems or other power system assets like generators, transformers, etc., can be described by the "bathtub curve", which can be divided into three phases, i.e., the burn-in phase, the useful life phase, and the wear-out phase [2]. The failure, which is an unexpected aspect, leads to a lack of export capability or extreme failure depending on the system response and the associated circuit [4]. Therefore, the customers or users lost time [2] and, in terms of business, a loss of income resulted. Most of the failure locations that occur in underground cable systems are the accessories section, particularly the joint section, in which poor workmanship is the most cause that leads to the failure event of the underground cable system [1,3,5-9].

In this research, the joint problems, which are examples of poor workmanship, were fabricated. To study the dielectric characteristics of underground cables with a degraded artificial joint, i.e., the copper powder on the surface of XLPE insulation in the joint and the incision on the XLPE surface in another joint, and compare to the healthy condition joint. The polarization and depolarization currents (PDC) measurements and the dielectric dissipation factor, or tan delta measurement, at very low frequency (VLF) voltage were carried out. The PDC measurements were used to investigate the dielectric characteristic parameters in the time domain, i.e., polarization and depolarization currents, insulation resistance (IR), polarization index (PI), dielectric absorption ratio (DAR), electrical conductivity, and the dielectric dissipation factor (DDF) or the tan delta ($\tan\delta$), that be converted from the time domain to the frequency domain using, e.g., the Hamon approximation, the extended Debye model, the Cole-Cole model, and so on. For VLF testing, the parameters that are analyzed according to IEEE std. 400.2-2013, i.e., mean tangent delta (TD) at normal phase to ground operating voltage U_0 , differential tangent delta (DTD) between $0.5U_0$ and $1.5U_0$, and tangent delta time stability (TDTS) at U_0 where the test frequency for providing the parameter values is 0.1 Hz [10]. Another parameter is skirt, which was proposed by KEPCO, Korea, and is used to more precisely describe the condition of underground cable systems [11].

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2 Theoretical background

2.1 Principle of PDC measurements

The PDC measurements are the non-destructive testing for the high-voltage apparatus to characterize the dielectric response of insulation in the time domain. This measurement has two parts, i.e., polarization current and depolarization current, that can be expressed by equations (1) and (2), respectively [12].

$$i_{pol}(t) = C_0 U_c \left[\frac{\sigma_0}{\epsilon_0} + \epsilon_\infty \delta(t) + f(t) \right] \quad (1)$$

$$i_{depol}(t) = -C_0 U_c [f(t) - f(t+T_c)] \quad (2)$$

Where

- C_0 is the geometric capacitance of the test object,
- U_c is the magnitude of DC step voltage (DC charging voltage) that energizing to the test object,
- σ_0 is the pure DC conductivity of the dielectric,
- ϵ_0 is the permittivity of free space or vacuum (the constant value is 8.85419×10^{-12} [As/Vm]),
- ϵ_∞ is the relative permittivity of the dielectric when applying step voltage suddenly at any time t_0 ,
- $\delta(t)$ is the delta function arising from the suddenly applied step voltage at any time $t = t_0$,
- $f(t)$ is the dielectric response function of the dielectric,
- T_c is the duration for applying the test voltage to the test object

In the first step, the DC voltage is applied to the test object, consequently, the polarization processes occur in the insulation system, and the PDC device measures the current, the so-called polarization current, which is a combination of capacitive current, polarization current, and conductive current. After the charging process is complete, the test object is short-circuited. The discharge current will flow through the measurement device and be recorded. This current, the so-called depolarization current, this current combines only the capacitive current and the polarization current. The depolarization current becomes directly proportional to the dielectric response function of the test object [12]. The characteristic graph of the two measured currents is shown in Fig 1.

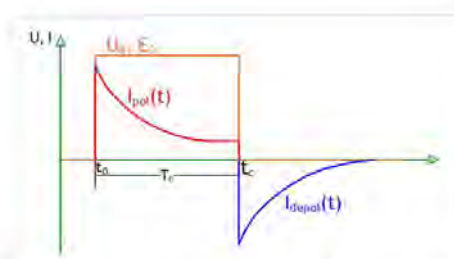


Fig. 1 The characteristic graph of the polarization and depolarization current [12]

2.2 Very low frequency (VLF) testing

The VLF AC testing is an alternative AC voltage test, with a test frequency range of 0.01 to 1 Hz [10,13], for underground cables or other high-voltage apparatus. The main advantage of VLF testing is the lower needed reactive power when compared to power frequency AC voltage testing, but the internal electric field distribution is similar to that at power frequency [13]. The VLF testing is conducted following IEEE Std. 400.2-2013 and IEC 60060-3:2006. Initially, this technique is used for the underground cable system withstand test. And the additional options, the tangent delta measurement, and partial discharge test, can be tested by VLF AC voltage that contributes to the condition assessment of the underground cable system, following IEEE Std. 400.2-2013, to characterize the medium voltage underground cable system condition [13]. For the tangent delta measurement, for providing the global condition assessment, the standard IEEE 400.2-2013 designates the test voltage frequency for VLF AC voltage at 0.1 Hz, and the test voltage start at $0.5U_0$ and increased by $0.5U_0$ voltage step until the test voltage is $1.5U_0$. The criteria for action decisions are specified in this standard by using the analyzed parameters, i.e., mean tangent delta (VLF-TD), differential tangent delta (VLF-DTD), and tangent delta time stability (VLF-TDTS) [10].

3 Experimental

3.1 The joint preparation

In this research, the two problem joints were used to simulate the poor workmanship, i.e., the copper powder on the XLPE surface in a cable joint and the incision on the XLPE surface in another cable joint. In the case of the copper powder on the XLPE surface in Fig 2, the 20-micron copper powder was used and painted on the XLPE insulation. And in the case of the incision on the XLPE surface in Fig 3, the incision was caused by a cutter blade that cut into the XLPE insulation for 3 millimeters in depth [3]. All cases of the joint problem were compared to the case of the underground cable with the healthy joint in Fig 4 [3].



Fig. 2 Case of copper powder on XLPE surface



Fig. 3 Case of the incision on XLPE surface [3]



Fig. 4 Case of underground cable with healthy joint [3]

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 The PDC measurements circuit

The circuit for measuring the polarization and depolarization currents was carried out using the PDC-Analyser-1MOD, and the internal voltage source was used for all experiment cases. In all cases, the circuit setup and test parameters are the same. The measurement was set up by energized high voltage at the cable terminal and measured at the ground wire, as shown in Fig 5. For the test parameters, the DC voltage value that was applied to the underground cable systems was 1500 V, the polarization time or charging time was 1500 s, and the depolarization time was 1500 s.

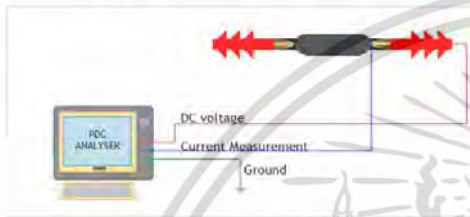


Fig. 5 The measurement setup diagram for PDC measurement

3.3 The $\tan\delta$ measurement circuit using VLF testing set

For measuring the $\tan\delta$ at very low frequency (VLF-TD), the B2 HVA45TD, the VLF test set with $\tan\delta$ measurement function, was used in this research (as shown in Fig 6). The test circuit was followed by IEEE standard 400.2-2013 [10], and the circuit diagram is shown in Fig 7. A high voltage was energized at the cable terminal, and the corona shield was used to protect against corona discharge nearby the cable terminal. The return lead was connected to the ground wire. This test setup was used in all experiment cases. Also, the test parameters, e.g., test voltage and test frequency, were set following IEEE standard 400.2-2013 [10], i.e., the test voltages, using a sinusoidal waveform, were $0.5U_0$ (6.4 kV), $1.0U_0$ (12.7 kV), and $1.5U_0$ (19.1 kV), the test frequency was 0.1 Hz, and the data sample for each voltage was 10 samples.



Fig. 6 The B2 HVA45TD for VLF-TD testing

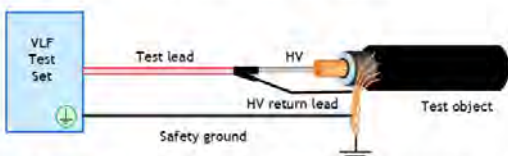


Fig. 7 The circuit diagram for VLF-TD measurement [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการวิจัย

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4 Results

4.1 The PDC measurements results

From PDC measurements, the comparison curves of polarization and depolarization currents from three cases are shown in Fig 8. The analyzed dielectric response curves, i.e., electrical conductivity, and dielectric dissipation factor, are illustrated in Fig 9 and Fig 10, respectively. Moreover, the other dielectric parameters, like geometric capacitance, insulation resistance, polarization index, and dielectric absorption ratio, are shown in Table 1.

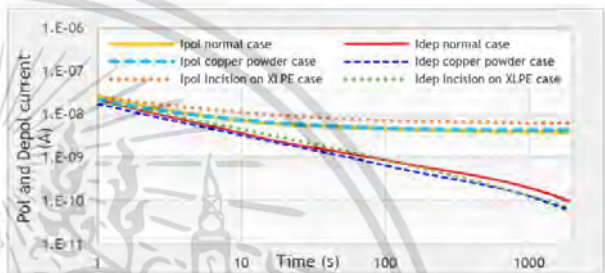


Fig. 8 The comparison of polarization and depolarization currents curves from three cases

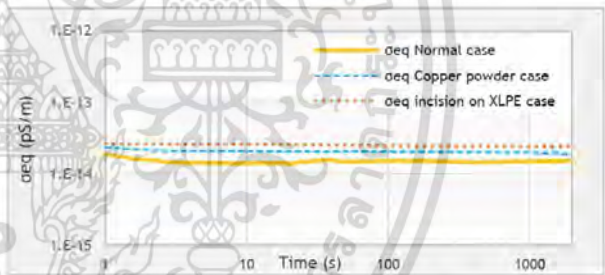


Fig. 9 The comparison of electrical conductivity curves from three cases

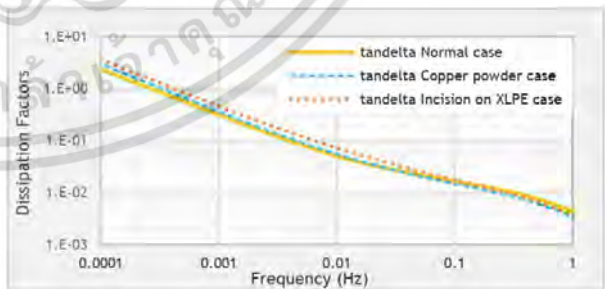


Fig. 10 The comparison of dielectric dissipation factor curves from three cases

Table 1 The dielectric parameters from PDC measurements

Dielectric parameters	C_{geo} [pF]	IR [GΩ]	PI	DAR
Normal case	1505	310.674	1.22	1.13
Copper powder case	1505	245.192	1.7	1.09
Incision on XLPE case	1510	194.800	1.2	1.12

Fig 8 shows that the polarization and depolarization currents of the underground cable with a healthy joint are almost as similar to the underground cable with the joint that has the copper powder on the XLPE surface. However, the current curves of the underground cable with the joint that has the incision on the XLPE surface are slightly different when compared to the underground cable with a healthy joint. The electrical conductivity of the three cases in Fig 9 is clearly different. The underground cables with defective joints have a higher value of electrical conductivity than the underground cables with the healthy joint. In part of the dielectric dissipation factor shown in Fig 10, the curves show slightly different values throughout the frequency range but this parameter values of the underground cable with the healthy joint are the lowest at a low frequency range of all three cases. Thus, this parameter from PDC measurements does not clearly distinguish between the underground cable with the healthy joint and the defective joint. Moreover, the dielectric parameter, the insulation resistance (IR), in Table 1 shows a different value that is inversely proportional to the electrical conductivity, but the values of the polarization index (PI) and the dielectric absorption ratio (DAR) have a similar value of the three cases.

4.2 The VLF tangent delta (VLF-TD) measurement results

According to IEEE std. 400.2-2013, the $\tan\delta$ measurements at very low frequency (0.1 Hz) are measured at $0.5U_0$, $1.0U_0$, and $1.5U_0$, i.e., 6.4 kV, 12.7 kV, and 19.1 kV, respectively, for the 22 kV underground cable system, using sinusoidal voltage waveshape. The test results of the mean tangent delta at $1.0U_0$, the differential tangent delta between $0.5U_0$ and $1.5U_0$, and tangent delta time stability at $1.0U_0$ from three cases are shown in Table 2. Furthermore, the parameter "skirt" is also shown in this table. Additionally, the comparison curves of the mean tangent delta of each test voltage are shown in Fig 11.

Table 2 The analysed parameters from VLF-TD measurement

Dielectric parameters	Mean TD [$\times 10^{-3}$]	VLF-DTD [$\times 10^{-3}$]	VLF-TDTS [$\times 10^{-3}$]	Skirt at $1.5U_0$
Normal case	17.37	4.55	0.082	0.24
Copper powder case	22.99	12.32	0.146	2.78
Incision on XLPE case	22.17	12.99	0.142	0.45

From the VLF-TD test results, the VLF-TD parameters show a significantly different value between the underground cable with a healthy joint and the underground cables with the defective joint that has higher values than in another case. However, according to IEEE std. 400.2-2013, all cases are assessed under the "Further Study Advised" criteria [10]. The comparison curves represent the trend of increasing $\tan\delta$ at each test voltage level. These can describe that the underground cables with a defective joint will show a greater increase in trend than the underground cable with the healthy joint. Thus, the increasing $\tan\delta$ value trend at each test voltage level may correspond to the level of degradation of the underground cable system.

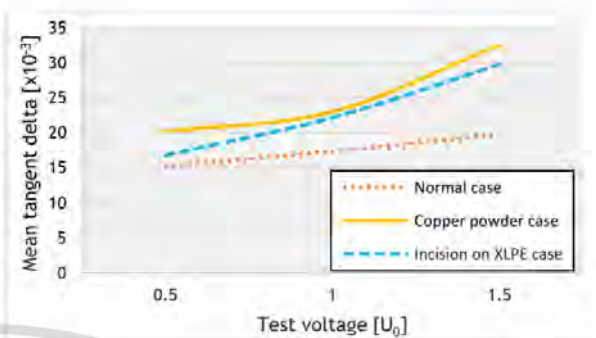


Fig. 11 The comparison curves of mean tangent delta at 0.1 Hz of each test voltage for three cases

4 Conclusion

From the PDC measurement, the test results of the polarization and depolarization currents curves are not clearly different for the underground cables with the defective joints when compared to the underground cable with the healthy joint. Moreover, the analyzed parameters, i.e., the dielectric dissipation factor, polarization index, and dielectric absorption ratio, have similar values in each case. These parameters make it hard to judge the condition of an underground cable system. However, the electrical conductivity and insulation resistance show different values between underground cables with the defective joint and healthy joint. These parameters show that the underground cables with defective joints have a higher value in electrical conductivity and a lower value in insulation resistance than the underground cable with the healthy joint. That means the insulation properties of the underground cable with a defective joint lost their integrity. Likewise, when comparing the VLF-TD results of the three cases to the criteria in IEEE std. 400.2-2013, all cases are assessed under the "Further Study Advised" criteria. Nevertheless, the parameter values and tendency of the comparison curves of the mean tangent delta show distinctly increased values in the case of the underground cables with defective joints. This test contributes to confirming the degradation of insulation. Moreover, the VLF-TD can assess the underground cable system condition, following IEEE std. 400.2-2013 for the further action decision.

5 Acknowledgements

The authors gratefully thank the Data Entry Group Co., Ltd. for supporting the VLF testing set and sharing their experience with VLF field testing. Furthermore, we would like to acknowledge Mr. Whichakorn Sawatdimongkol and the staff of King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang's High Voltage Engineering Laboratory and Dielectric Analytika Laboratory (DIKA Lab) for their continuous assistance during our testing processes.

ขอขอบคุณผู้สนับสนุนโครงการวิจัยงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญญาตให้หน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6 References

- [1] J. J. Smit, E. Gulski and F. J. Wester, "Economical and technical aspects of advanced PD diagnostics to support condition based maintenance of HV assets," IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition, Yokohama, Japan, 2002, pp. 1110-1115 vol.2
- [2] Zhou, C., Yi, H. and Dong, X. (2017), Review of recent research towards power cable life cycle management. *High Voltage*, 2: 179-187.
- [3] P. Udomluksananon, S. Jeenuang, K. Chumpiboon, K. Dorkmai, W. Rojanasunan and N. Pattanadech, "The Dielectric Properties in Frequency Domain of the 22 kV Underground Cables with Defective Joint," 2023 International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM), Shimane, Japan, 2023, pp. 01-04.
- [4] J. I. Aizpurua et al., "A Diagnostics Framework for Underground Power Cables Lifetime Estimation Under Uncertainty," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 36, no. 4, pp. 2014-2024, Aug. 2021.
- [5] E. M. Shaalan, S. A. Ward and A. Youssef, "Analysis of a Practical Study for Under-Ground Cable Faults Causes," 2021 22nd International Middle East Power Systems Conference (MEPCON), Assiut, Egypt, 2021, pp. 208-215.
- [6] Maanen B., Van, Plet, C., Van Der Wielen, P., et al.: 'Failures in underground power cables – return of experience'. JICABLE'15, 9th Int. Conf. Insulated Power Cables, Versailles, France, 21–25 June 2015, pp. 1–5.
- [7] 'Review of Medium Voltage Asset Failure Investigations', <https://eatechnology.com/media/n3amoyyq/review-of-mv-asset-failure.pdf>, accessed 15 February 2023.
- [8] S. Afotey and S. M. Aliadeh, "Investigation into the Impact of Cable Failure Localisation Methods on the Underground Cable Life Time in a Medium Voltage Distribution Network," 2020 IEEE 29th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Delft, Netherlands, 2020, pp. 898-903.
- [9] A. Ghaderi, A. Mingotti, F. Lama, L. Peretto and R. Tinarelli, "Effects of Temperature on MV Cable Joints Tan Delta Measurements," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 68, no. 10, pp. 3892-3898, Oct. 2019.
- [10] "IEEE Guide for Field Testing of Shielded Power Cable Systems Using Very Low Frequency (VLF)(less than 1 Hz)," in *IEEE Std 400.2-2013*, vol., no., pp.1-60, 9 June 2013.
- [11] D. Kim, Y. Cho and S. -m. Kim, "A study on three dimensional assessment of the aging condition of polymeric medium voltage cables applying very low frequency (VLF) tan δ diagnostic," in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 21, no. 3, pp. 940-947, June 2014.
- [12] P. Udomluksananon, A. Kunakorn, S. Maneerot, C. Bunlaksanusorn, P. Pannil and N. Pattanadech, "The Study of Polarization and Depolarization Current Measurements on Service-Aged 22 kV XLPE Underground Cables with Presence of Water Trees," 2022 9th International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), Kitakyushu, Japan, 2022, pp. 01-06.
- [13] CIGRE Technical Brochure 751, "Electrical properties of insulating materials under VLF voltage", CIGRE WG D1.48, December 2018.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ข้อมูลส่วนตัว:

ชื่อ-นามสกุล: นายปัทม์ อุดมลักษณะานนท์
 วัน เดือน ปีเกิด: 15 มกราคม พ.ศ. 2543
 สถานที่เกิด: เพชรบุรี
 สัญชาติ: ไทย
 อีเมล: pat.udm@outlook.com
 เบอร์โทรศัพท์: +66-92-264-1260



ประวัติการศึกษา:

สิงหาคม 2561 ถึง วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า (เกียรตินิยมอันดับหนึ่ง)
 มิถุนายน 2565 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 กรุงเทพฯ, ประเทศไทย

หัวข้องานวิจัยที่

สนใจ:

- เทคนิคการทดสอบและการวัดแรงดันสูง
- ระบบฉนวนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง (ระบบสายเคเบิลใต้ดิน, เครื่องจักรกลหมุนแรงดันสูง, หม้อแปลงไฟฟ้าและอื่นๆ)
- การประเมินสภาพและวินิจฉัยระบบฉนวนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง

โครงการที่เข้าร่วมใน

ภาคอุตสาหกรรม:

- การประเมินสภาพฉนวนในสายเคเบิลใต้ดินพิกัด 22 กิโลโวลต์ (2565)
- การประเมินสภาพฉนวนในสายเคเบิลใต้ดินพิกัด 115 กิโลโวลต์ (2565)
- การประเมินสภาพฉนวนของขดลวดสเตเตอร์ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูง (2565 - 2566)
- การประเมินสภาพฉนวนของขดลวดสเตเตอร์ในเครื่องกำเนิดมอเตอร์แรงดันสูง (2565 - 2566)
- การทดสอบดิสชาร์จบางส่วนกับคอยล์สเตเตอร์สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพิกัด 11 กิโลโวลต์ (2565)
- การตรวจสอบต้นไม้น้ำในฉนวน XLPE ของหัวต่อสายเคเบิลใต้ดิน (Cable termination) พิกัด 6.6 และ 22 กิโลโวลต์ (2566)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- โครงการที่เข้าร่วมในภาคอุตสาหกรรม:**
- การวิเคราะห์หาสาเหตุเนื่องจากความล้มเหลวของหัวต่อสายเคเบิลใต้ดินชนิดแห้งเพื่อเชื่อมต่อเข้าสวิตช์เกียร์หุ้มฉนวนก๊าซพิกัด 115 กิโลโวลต์ (2566)
 - การประเมินสภาพฉนวนในหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับเพิ่มแรงดันไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator Step-Up Transformer, GSUT) (2566)
 - การวิเคราะห์หาสาเหตุเนื่องจากความล้มเหลวของสายเคเบิลใต้ดินพิกัด 6.6 กิโลโวลต์ (2567)
 - การประเมินสภาพฉนวนในสายเคเบิลใต้ดินพิกัด 115 กิโลโวลต์ (2567)

รายการบทความวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่ (2565 - 2567):

บทความวิชาการจากงานประชุมวิชาการที่ผู้เขียนวิทยานิพนธ์เป็นชื่อแรก

1. **P. Udomluksananon**, A. Kunakorn, S. Maneerot, C. Bunlaksananusorn, P. Pannil and N. Pattanadech, "The Study of Polarization and Depolarization Current Measurements on Service-Aged 22 kV XLPE Underground Cables with Presence of Water Trees," 2022 9th International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), Kitakyushu, Japan, 2022, pp. 01-06, doi: 10.23919/CMD54214.2022.9991350.
2. **P. Udomluksananon**, S. Jeenuang, K. Chumpiboon, K. Dorkmai, W. Rojanasunan and N. Pattanadech, "The Dielectric Properties in Frequency Domain of the 22 kV Underground Cables with Defective Joint," 2023 International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM), Shimane, Japan, 2023, pp. 01-04, doi: 10.23919/ISEIM60444.2023.10329183.
3. **P. Udomluksananon**, N. Boonsaner, T. Wiangtong, S. Jeenuang, K. Chumpiboon, K. Dorkmai, W. Rojanasunan, and N. Pattanadech, "The dielectric characteristics of 22 KV XLPE underground cables with degraded artificial joint," 23rd International Symposium on High Voltage Engineering (ISH 2023), Glasgow, UK, 2023, pp. 38-42, doi: 10.1049/icp.2024.0424.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทความวิชาการจากงานประชุมวิชาการที่ผู้เขียนวิทยานิพนธ์มีส่วนร่วม

1. S. Jeenmuang, W. Rojanasunan, K. Dorkmai, K. Chumpiboon, **P. Udomluksananon** and N. Pattanadech, "Partial Discharge Testing on MV Motor – Case Study," 2023 International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM), Shimane, Japan, 2023, pp. 100-102, doi: 10.23919/ISEIM60444.2023.10329082.
2. N. Pattanadech, S. Jeenmuang, K. Dorkmai, K. Chumpiboon, **P. Udomluksananon**, W. Rojanasunan and T. Worthong, "Investigation of stator winding insulation condition of MV motors based on dielectric response measurement," 23rd International Symposium on High Voltage Engineering (ISH 2023), Glasgow, UK, 2023, pp. 138-142, doi: 10.1049/icp.2024.0441.
3. N. Pattanadech, S. Lacharochana, S. Jeenmuang, T. Worthong, **P. Udomluksananon**, K. Chumpiboon, S. Kerdmanee, W. Rojanasunan, K. Dorkmai, S. Mongkolsatitpong, "Dielectric Measurement for Condition Monitoring & Testing of MV Cable: Experience in Thailand," unpublished paper, INMR World Congress 2023, Bangkok, Thailand.

วารสารทางวิชาการที่ผู้เขียนวิทยานิพนธ์มีส่วนร่วม

1. Yannaphol Kittikhuntharadol, Norasage Pattanadech, Sakda Maneerot, Korraya Jongvilaikasem, Kittipod Jariyanurat, Siwakorn Jeenmuang, **Patt Udomluksananon**, Komin Chumpiboon, Chanin Bunlaksananusorn, "Physical and chemical properties' comparison of natural ester and palm oil used in a distribution transformer," Energy Reports, Vol. 9, March 2023, Pages 549-556, <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.11.100>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้