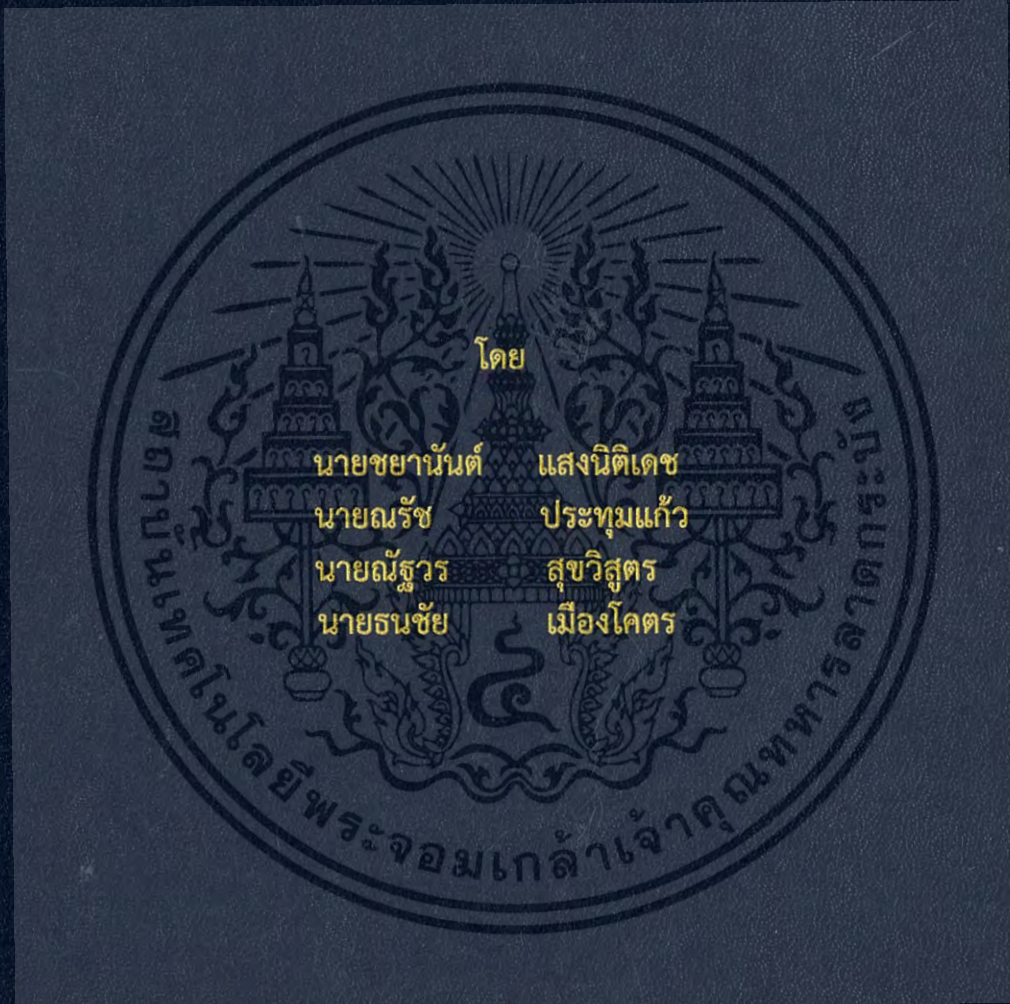


การศึกษากระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันในสายเคเบิลใต้ดิน
THE STUDY OF POLARIZATION AND DEPOLARIZATION CURRENT
IN UNDERGROUND CABLES



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

การศึกษากระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันในสายเคเบิลใต้ดิน
THE STUDY OF POLARIZATION AND DEPOLARIZATION CURRENT
IN UNDERGROUND CABLES



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE STUDY OF POLARIZATION AND DEPOLARIZATION CURRENT
IN UNDERGROUND CABLES



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

2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2560

การศึกษากระแสโพล่าไรเซชันและกระแสดีโพล่าไรเซชันในสายเคเบิลใต้ดิน

THE STUDY OF POLARIZATION AND DEPOLARIZATION CURRENT IN UNDERGROUND
CABLES



อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ ดร. นรเศรษฐ์ พัฒนเดช

รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2560

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษากระแสโพลาริเซชันและกระแสตีโพลาริเซชันในสายเคเบิลใต้ดิน

ผู้จัดทำ

1. นายชยานันต์ แสงนิติตเดช
2. นายณรัช ประทุมแก้ว
3. นายณัฐวร สุขวิสูตร
4. นายธนชัย เมืองโคตร



.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร.นรเศรษฐ วัฒนเดช)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษากระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันในสายเคเบิลใต้ดิน

นายชยานันต์	แสงนิติเดช
นายณรัช	ประทุมแก้ว
นายณัฐวร	สุขวิสูตร
นายธนชัย	เมืองโคตร
รศ.ดร.นรเศรษฐ์	พัฒนเดช อาจารย์ที่ปรึกษา
รศ.ดร.ศิริวัฒน์	โพธิเวชกุล อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
ปีการศึกษา 2560	

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้นำเสนอการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันของสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE พิกัด 12/20(24) kV พื้นที่หน้าตัด 240 mm² เพื่อศึกษาผลของวงจรวัดและแรงดันทดสอบ ผลของความยาวสายเคเบิล และผลของอุณหภูมิ โดยในการศึกษาผลของวงจรวัดและแรงดันทดสอบใช้สายเคเบิลที่ไม่มีจุดเชื่อมต่อ (กรณีที่ 1) และมีจุดเชื่อมต่อ pre-molded (กรณีที่ 2) ในกรณีที่ 1 เวลาที่ใช้ในการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน 100 วินาที และกรณีที่ 2 เวลาที่ใช้ในการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน 1,000 วินาทีเนื่องจากมีผลของโพลาริเซชันระหว่างชั้น (interfacial polarization) ที่บริเวณจุดเชื่อมต่อ และใช้วงจรทดสอบสายเคเบิลแบบแยกชิลด์ออกจากกราวด์ (isolated shield) และแบบไม่ปลดชิลด์ออกจากกราวด์ (ground shield) ทดสอบในแต่ละกรณีโดยป้อนแรงดันกระแสตรง 250 V 500 V 750 V และ 1,000 V ตามลำดับ ในการศึกษาผลของความยาวทำการป้อนแรงดันทดสอบ 400 V ให้กับสายเคเบิลยาว 15 cm, 2.5 m และ 3.5m และใช้เวลาในการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน 100 วินาที ในการศึกษาผลของอุณหภูมิใช้สายเคเบิลยาว 15 cm ป้อนแรงดันกระแสตรง 400 V ให้กับสายเคเบิลที่อุณหภูมิ 50°C 70°C และ 90°C ตามลำดับและเวลาที่ใช้ในการวัดกระแส โพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน 100 วินาที จากนั้นนำค่ากระแสโพลาริเซชัน กระแสดีโพลาริเซชัน และค่า Dielectric Dissipation Factor (DDF) หรือ tan delta ที่วัดได้ทั้งหมดมาวิเคราะห์ จากผลการทดสอบพบว่ากระแสโพลาริเซชัน กระแสดีโพลาริเซชัน และ tan delta ที่วัดได้จากวงจรการทดสอบและความยาวสายที่ต่างกันมีความแตกต่างกันเล็กน้อย แรงดันทดสอบที่เพิ่มขึ้นทำให้กระแสโพลาริเซชัน และกระแสดีโพลาริเซชันเพิ่มขึ้นแต่ไม่ส่งผลต่อค่า tan delta และอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นทำให้กระแสโพลาริเซชันและกระแสคอนดักชันเพิ่มขึ้นแต่กระแสดีโพลาริเซชันลดลง

The study of polarization and depolarization current in underground cables

Mr. Chayanan Sangnitidej
Mr. Narach Pratoomkaew
Mr. Nattaworn Sukwisut
Mr. Tanachai Mueangkhot
Assoc.Prof.Dr.techn.Norasage Pattanadech Advisor
Assoc.Prof.Dr.Siriwat Potivejkul Co-Advisor
2017

ABSTRACT

This project represents the polarization and depolarization current (PDC) measurement of XLPE cables with rate voltage of 12/20(24) kV and 240 mm² cross section to study effects of test circuits and test voltages, effects of cable lengths and effect of temperatures. To investigate the effects of test circuits and test voltages, XLPE cables without joint (Case 1) and with pre-molded joint (Case 2) were used in the experiment. In case 1, the XLPE cable was tested with the measuring time 100 seconds. In case 2, the XLPE cable with joint was investigated with the measuring time for 1,000 seconds. Moreover, the XLPE cable with isolated shield and with ground shield were investigated for each case study. DC voltage applied to the test specimen for measuring PDC value was 250 V, 500V, 750V and 1,000V respectively. To investigate the effects of cable lengths, the 400 V DC voltage was applied to 15 cm, 2.5 m and 3.5m XLPE cable lengths with the measuring time 100 seconds. To investigate the effect of temperatures, the 400 V DC voltage was applied to the XLPE cable with the temperature of 50, 70 and 90 degree Celsius respectively and measuring time 100 seconds. PDC and Dielectric Dissipation Factor (DDF) or tan delta obtained from the experiment were compared and analyzed. It was found a bit difference due to different ground connections and different length of XLPE cable tested. Increasing in DC test voltages increased the PDCs but did not effect on tan delta values. Moreover, increasing temperatures increased the PDCs and conduction currents.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีด้วยความเมตตากรุณาอย่างสูงจาก รศ.ดร.นรเศรษฐ พัฒนเดช และ รศ.ดร.ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล ที่ให้คำปรึกษา ความรู้ รวมทั้งให้ความช่วยเหลือพร้อมทั้งแก้ข้อบกพร่องในด้านต่าง ๆ ตั้งแต่การอธิบายทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง แนวทางการปฏิบัติงาน และคอยสอบถามความคืบหน้าและปัญหาต่าง ๆ ตลอดการทำงาน โดยท่านคอยจะให้คำปรึกษารวมถึงการลงมือปฏิบัติงานจริงด้วยตนเองในบางครั้งเพื่อช่วยแก้ปัญหาที่เกิดขึ้น และยังคงคอยตรวจสอบความถูกต้องของปริญญาานิพนธ์ ทำให้ปริญญาานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงและมีความสมบูรณ์ ซึ่งคณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการทางไฟฟ้าแรงสูง (High Voltage Laboratory, HVL) สำหรับการช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ อาทิ สถานที่และอุปกรณ์การทดสอบ ทั้งนี้ขอขอบคุณรุ่นพี่ ป.เอก ป.โท ทุกท่านที่ช่วยเหลือและให้คำแนะนำจนปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณบริษัท ทีไอเอส เอ็นจิเนียริง แอนด์เซอร์วิส จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ให้ยืมชุดทดสอบกระแสโพลาริเซชันและกระแสตีโพลาริเซชัน เพื่อใช้ในการทำโครงงานนี้

ขอขอบคุณบริษัท Meidensha Corporation ที่ให้การสนับสนุน โดยการมอบทุนสำหรับวิจัยให้กับโครงงานปริญญาานิพนธ์นี้ ที่ทำให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จขึ้นมา

นอกจากนี้ขอขอบพระคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และคณาจารย์ทุกท่านที่คอยถ่ายทอดวิชาความรู้เพื่อใช้ในการทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ อีกทั้งยังนำไปประกอบวิชาชีพได้ในอนาคต

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงสมาชิกท่านอื่นๆ ในครอบครัว ตลอดจนผู้ที่เกี่ยวข้องทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวนามไว้ ณ ที่นี้ ที่มีส่วนช่วยเหลือทั้งในด้านกำลังใจและทุนทรัพย์ ให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูปภาพ	VII
สารบัญตาราง	X
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ	1
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน	2
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและสมมติฐานที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 บทนำ	4
2.2 วัสดุพอลิเมอร์	4
2.2.1 ประเภทของพอลิเมอร์	4
2.2.2 โครงสร้างโมเลกุลของพอลิเมอร์	5
2.2.3 โครงสร้างผลึกของพอลิเมอร์	7
2.3 พอลิเอทิลีน (Polyethylene)	8
2.4 พอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวาง (Cross-linked polyethylene)	8
2.5 โครงสร้างและวัสดุของสายเคเบิล	9
2.6 ทฤษฎีของข้อต่อสาย (Joining Theory)	14
2.6.1 การออกแบบข้อต่อ และการติดตั้ง (Joining Design and Installation)	14
2.7 การทดสอบเพื่อวิเคราะห์กระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสตีโพลาไรซ์เซชัน	17
2.8 เทคนิคการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสตีโพลาริเซชัน (PDC)	21
2.8.1 เทคนิคการวัดของเครื่องทดสอบ PDC Analyser	22
2.8.2 วงจรสมมูลของวัสดุไดอิเล็กตริก	23

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การออกแบบและประกอบสร้าง	27
3.1 กล่าวนำ	27
3.2 วงจรการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสตีโพลาริเซชัน ในสายเคเบิลฉนวน XLPE	27
3.2.1 การศึกษาผลของวงจรวัดและแรงดันที่ใช้ในการทดสอบ	27
3.2.2 การศึกษาผลของความยาว	29
3.2.3 การศึกษาผลของอุณหภูมิ	29
3.3 สายเคเบิลที่ใช้ในการทดสอบ	33
3.3.1 สายเคเบิลฉนวน XLPE ยาว 5m แบบไม่มีข้อต่อ	34
3.3.2 สายเคเบิลฉนวน XLPE ยาว 5m แบบมีข้อต่อ	34
3.3.3 สายเคเบิลฉนวน XLPE ยาว 3.5 m	34
3.3.4 สายเคเบิลฉนวน XLPE ยาว 2.5 m	35
3.3.5 สายเคเบิลฉนวน XLPE ยาว 15 cm	35
3.3.6 สายเคเบิลฉนวน XLPE ยาว 0.5 m	35
3.3.7 สายเคเบิลฉนวน XLPE ยาว 15 cm	36
3.4 สรุป	36
บทที่ 4 การทดสอบและประเมินผล	37
4.1 วิธีดำเนินการทดสอบ	37
4.1.1 เงื่อนไขการทดสอบกระแสโพลาริเซชันและกระแสตีโพลาริเซชัน	37
4.1.2 ขั้นตอนการทดสอบ	39
4.2 สรุป	39
บทที่ 5 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล	40
5.1 กล่าวนำ	40
5.2 ผลการทดสอบ	40
5.2.1 ศึกษาผลของการเปลี่ยนแรงดันทดสอบในวงจรทดสอบ	40
5.2.1.1 กรณีศึกษาที่ 1 สายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE ที่ไม่มีข้อต่อ Pre-molded joint	40

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2.1.2 กรณีศึกษาที่ 2 สายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE ที่มีข้อต่อ Pre-molded joint	45
5.2.2 ศึกษาผลของความยาวของสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE	50
5.2.3 ศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE	52
5.3 สรุป	55
บทที่ 6 สรุปและข้อเสนอแนะ	56
6.1 สรุป	56
6.2 ข้อเสนอแนะ	57
เอกสารอ้างอิง	58
ภาคผนวก	59
ภาคผนวก ก บทความทางวิชาการ	60
ภาคผนวก ข ข้อมูลเครื่องทดสอบ	69
ประวัติผู้เขียน	74



สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 พอลิเมอร์แบบเชิงเส้น	5
2.2 พอลิเมอร์แบบกิ่ง	6
2.3 พอลิเมอร์แบบเชื่อมขวาง	6
2.4 พอลิเมอร์แบบโครงข่าย	6
2.5 โครงสร้างแบบอสัณฐาน (Amorphous)	7
2.6 โครงสร้างแบบกึ่งผลึก (Partially crystalline)	7
2.7 โครงสร้างทั่วไปของสายเคเบิลใต้ดิน	9
2.8 ข้อต่อแบบเทป	14
2.9 ข้อต่อแบบ Premolded	16
2.10 แสดงส่วนของ connector ของข้อต่อแบบ Premolded	17
2.11 แสดงกราฟการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสตีโพลาริเซชัน	20
2.12 วงจรทดสอบของการวัด PDC ของเคเบิลกำลังแบบ isolated shield	21
2.13 วงจรทดสอบของการวัด PDC ของเคเบิลกำลังแบบ ground shield	22
2.14 รูปจำลองวงจรของเครื่องทดสอบ PDC Analyser	22
2.15 แผนภาพอย่างง่ายของแอมป์มิเตอร์ในเครื่องทดสอบ PDC Analyser	23
2.16 วงจรสมมูลของวัสดุไดอิเล็กตริก	23
2.17 ลักษณะทางเรขาคณิตของเคเบิลฉนวน XLPE	25
3.1 แบบจำลองวงจรวัดที่ไม่ใช้อุปกรณ์จ่ายแรงดันเสริม(Phantom)	27
3.2 วงจรวัดจริงที่ไม่ใช้อุปกรณ์จ่ายแรงดันเสริม(Phantom)	28
3.3 แบบจำลองวงจรวัดที่ใช้อุปกรณ์จ่ายแรงดันเสริม(Phantom)	28
3.4 วงจรวัดจริงที่ใช้อุปกรณ์จ่ายแรงดันเสริม(Phantom)	28
3.5 แบบจำลองวงจรวัดที่ใช้ในการศึกษาผลของความยาวสายเคเบิล	29
3.6 วงจรวัดจริงที่ใช้ในการศึกษาผลของความยาวสายเคเบิล	29
3.7 แบบจำลองวงจรวัดที่ใช้ในการศึกษาผลของอุณหภูมิ	30
3.8 วงจรวัดจริงที่ใช้ในการศึกษาผลของอุณหภูมิ	30
3.9 PDC Analyser 1MOD	30
3.10 อุปกรณ์จ่ายแรงดันเสริม (Phantom) ด้านหน้าและหลัง	31
3.11 แบบจำลองอะคริลิกที่ออกแบบ	31
3.12 กล่องอะคริลิกจริงที่ใช้ในการทดสอบ	32
3.13 กล่องควบคุมอุณหภูมิ	32
3.14 ภาพแสดงคุณลักษณะของสายเคเบิลฉนวน XLPE	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
VII
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.15 สายเคเบิลฉนวน XLPE ยาว 5 m	34
3.16 สายเคเบิลฉนวน XLPE ยาว 5 m ที่มีข้อต่อ (Pre-molded joint)	34
3.17 สายเคเบิลฉนวน XLPE ยาว 3.5 m	34
3.18 สายเคเบิลฉนวน XLPE ยาว 2.5 m	35
3.19 สายเคเบิลฉนวน XLPE ยาว 1.5 m	35
3.20 สายเคเบิลฉนวน XLPE ยาว 0.5 m	35
3.21 สายเคเบิลฉนวน XLPE ยาว 15 cm	36
5.1 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่ไม่มีข้อต่อ Pre-molded joint กราฟกระแสโพลาริเซชัน และกระแสดีโพลาริเซชันที่ได้จากวงจรทดสอบที่ 1	41
5.2 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่ไม่มีข้อต่อ Pre-molded joint กราฟกระแสโพลาริเซชัน และกระแสดีโพลาริเซชันที่ได้จากวงจรทดสอบที่ 2	41
5.3 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่ไม่มีข้อต่อ Pre-molded joint กราฟกระแสโพลาริเซชัน ที่ได้จากวงจรทดสอบที่ 1 ที่ศึกษาผลของแรงดันทดสอบ	42
5.4 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่ไม่มีข้อต่อ Pre-molded joint กราฟกระแสดีโพลาริเซชัน ที่ได้จากวงจรทดสอบที่ 1 ที่ศึกษาผลของแรงดันทดสอบ	42
5.5 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่ไม่มีข้อต่อ Pre-molded joint กราฟกระแสคอนดักชัน ที่ได้จากวงจรทดสอบที่ 1 ที่ศึกษาผลของแรงดันทดสอบ	43
5.6 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่ไม่มีข้อต่อ Pre-molded joint กราฟกระแสโพลาริเซชัน ที่ได้จากวงจรทดสอบที่ 2 ที่ศึกษาผลของแรงดันทดสอบ	43
5.7 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่ไม่มีข้อต่อ Pre-molded joint กราฟกระแสดีโพลาริเซชัน ที่ได้จากวงจรทดสอบที่ 2 ที่ศึกษาผลของแรงดันทดสอบ	44
5.8 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่ไม่มีข้อต่อ Pre-molded joint กราฟกระแสคอนดักชัน ที่ได้จากวงจรทดสอบที่ 2 ที่ศึกษาผลของแรงดันทดสอบ	44
5.9 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่ไม่มีข้อต่อ Pre-molded joint กราฟแสดงค่าความสูญเสีย ที่ได้จากวงจรทดสอบที่ 1 ที่ศึกษาผลของแรงดันทดสอบ	45
5.10 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่ไม่มีข้อต่อ Pre-molded joint กราฟแสดงค่าความสูญเสีย ที่ได้จากวงจรทดสอบที่ 2 ที่ศึกษาผลของแรงดันทดสอบ	45
5.11 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อต่อ Pre-molded joint กราฟกระแสโพลาริเซชัน และกระแสดีโพลาริเซชันที่ได้จากวงจรทดสอบที่ 1	46
5.12 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อต่อ Pre-molded joint กราฟกระแสโพลาริเซชัน และกระแสดีโพลาริเซชันที่ได้จากวงจรทดสอบที่ 2	46

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.13 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อต่อ Pre-molded joint กราฟกระแสโพลาริเซชันที่ได้จากวงจรทดสอบที่ 1 ที่ศึกษาผลของแรงดันทดสอบ	47
5.14 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อต่อ Pre-molded joint กราฟกระแสดีโพลาริเซชันที่ได้จากวงจรทดสอบที่ 1 ที่ศึกษาผลของแรงดันทดสอบ	47
5.15 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อต่อ Pre-molded joint กราฟกระแสคอนดักชันที่ได้จากวงจรทดสอบที่ 1 ที่ศึกษาผลของแรงดันทดสอบ	48
5.16 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อต่อ Pre-molded joint กราฟกระแสโพลาริเซชันที่ได้จากวงจรทดสอบที่ 2 ที่ศึกษาผลของแรงดันทดสอบ	48
5.17 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อต่อ Pre-molded joint กราฟกระแสดีโพลาริเซชันที่ได้จากวงจรทดสอบที่ 2 ที่ศึกษาผลของแรงดันทดสอบ	49
5.18 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อต่อ Pre-molded joint กราฟกระแสคอนดักชันที่ได้จากวงจรทดสอบที่ 2 ที่ศึกษาผลของแรงดันทดสอบ	49
5.19 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อต่อ Pre-molded joint กราฟแสดงค่าความสูญเสียที่ได้จากวงจรทดสอบที่ 1 ที่ศึกษาผลของแรงดันทดสอบ	50
5.20 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อต่อ Pre-molded joint กราฟค่าความสูญเสียที่ได้จากวงจรทดสอบที่ 2 ที่ศึกษาผลของแรงดันทดสอบ	50
5.21 กราฟกระแสโพลาริเซชัน ที่ศึกษาผลของความยาวที่แตกต่างกัน	51
5.22 กราฟกระแสดีโพลาริเซชัน ที่ศึกษาผลของความยาวที่แตกต่างกัน	51
5.23 กราฟกระแสคอนดักชัน ที่ศึกษาผลของความยาวที่แตกต่างกัน	52
5.24 กราฟค่าความสูญเสีย ที่ศึกษาผลของแรงดันทดสอบ	52
5.25 กราฟกระแสโพลาริเซชัน ที่ศึกษาผลของอุณหภูมิที่แตกต่างกัน	53
5.26 กราฟกระแสดีโพลาริเซชัน ที่ศึกษาผลของอุณหภูมิที่แตกต่างกัน	53
5.27 กราฟกระแสคอนดักชัน ที่ศึกษาผลของอุณหภูมิที่แตกต่างกัน	54
5.28 กราฟค่าความสูญเสีย ที่ศึกษาผลของอุณหภูมิที่แตกต่างกัน	54

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 วิธีการดำเนินงาน	2
2.1 คุณสมบัติของพอลิเอทิลีน	8
2.2 คุณสมบัติของ XLPE	9
2.3 เปรียบเทียบคุณลักษณะของทองแดง (Cu) และอลูมิเนียม (Al)	10
2.4 คุณสมบัติของทองแดง (Cu) และอลูมิเนียม (Al)	10
2.5 คุณสมบัติของฉนวน PVC และ XLPE ตามมาตรฐาน IEC 605002-2	12
2.6 ความหนาฉนวน Cross-linked polyethylene (XLPE) ตามมาตรฐาน IEC 605002-2	12
2.7 อุณหภูมิตัวนำสูงสุดสำหรับฉนวนผสมชนิดต่างๆ ตามมาตรฐาน IEC 605002-2	13
2.8 การจำแนกปัญหาในเนื้อฉนวนของเคเบิล	18
3.1 คุณลักษณะของสายเคเบิลฉนวน XLPE	33
4.1 การศึกษาผลของวงจรวัดและแรงดันทดสอบ	37
4.2 การศึกษาผลของความยาวสายเคเบิล	38
4.3 การศึกษาผลของอุณหภูมิ	38

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันมีความก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยีและเศรษฐกิจเป็นอย่างมากโดยเห็นได้จากสิ่งประดิษฐ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้น เช่น รถยนต์ระบบพลังงานไฟฟ้า หุ่นยนต์ เครื่องจักรต่างๆ เป็นต้น รวมถึงมีการเพิ่มขึ้นของสิ่งปลูกสร้างและจำนวนประชากรส่งผลให้มีความต้องการทางด้านพลังงานไฟฟ้าสูงขึ้น การไฟฟ้าฝ่ายผลิตจึงจำเป็นต้องคำนึงถึงผลกระทบทางด้านการผลิตไฟฟ้าที่ไม่เพียงพอต่อความต้องการของผู้ใช้งาน และการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบส่งผ่านทางอากาศอาจบดบังภูมิทัศน์ความสวยงามของสถานที่ท่องเที่ยวที่สำคัญของประเทศ และอาจไม่อำนวยต่อการติดตั้งในบางสถานที่ที่มีความแออัด จึงเป็นเหตุให้มีการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าทางสายเคเบิลใต้ดินได้รับพิจารณานำมาใช้ในการติดตั้งมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบทางด้านขีดความสามารถในการส่งจ่ายกำลังนั้นดีกว่า โดยมีความเสถียรภาพ ความน่าเชื่อถือ และมีความปลอดภัยมากขึ้น ซึ่งในการติดตั้งสายเคเบิลใต้ดินนั้นผู้ทำการติดตั้งจำเป็นต้องมีความรู้และความเชี่ยวชาญทางวิศวกรรมที่อ้างอิงตามมาตรฐานสากล

แต่ในปัจจุบันยังขาดผู้ที่มีความรู้และความเข้าใจในการติดตั้งสายเคเบิลใต้ดิน จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้อาจจะเกิดความบกพร่องในสายเคเบิลใต้ดินและนำไปสู่การลดอายุการใช้งานในที่สุด ด้วยสาเหตุนี้การศึกษาสายเคเบิลใต้ดินจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง เพื่อลดปัญหาดังกล่าวจึงได้มีการศึกษาการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันโดยเครื่องทดสอบ PDC ซึ่งเป็นวิธีหนึ่งในการทดสอบฉนวนแบบไม่ทำลายที่ไม่ก่อให้เกิดความเสียหายแก่ฉนวน และศึกษาพฤติกรรมต่างๆ ของฉนวนจากการจำลองปัญหาในสายเคเบิล

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของสายเคเบิลใต้ดิน
2. เพื่อศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน
3. เพื่อศึกษาทฤษฎีและหลักการของชุดทดสอบกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน
4. เพื่อทดลองศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน

1.3 ขอบเขตของโครงการ

1. ศึกษาโครงสร้างสายเคเบิลใต้ดิน
2. ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันในฉนวน
3. ศึกษาสาเหตุการเสื่อมสภาพของสายเคเบิลใต้ดิน
4. ศึกษาทดสอบสายเคเบิลใต้ดินโดยการจำลองปัญหาและปัจจัยต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

1. ศึกษาของโครงสร้างของสายเคเบิลใต้ดิน
2. ศึกษามาตรฐานของการทดสอบสายเคเบิลใต้ดินแรงสูง
3. ศึกษาการใช้งานโปรแกรม Comsol multiphysic 3.5 รวมทั้งโปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบเพื่อทำการวิเคราะห์ เช่น Autocad, Solid work และทำการจำลองการวิเคราะห์สนามไฟฟ้า
4. ออกแบบจำลองปัญหาที่สามารถเกิดขึ้นในสายเคเบิลใต้ดินในกรณีต่างๆ
5. ทำการทดสอบสายเคเบิลใต้ดินที่ได้รับการจำลองปัญหาโดยชุดทดสอบ
6. สรุป และวิเคราะห์ผลการทดสอบจากตัวอย่างของชิ้นงานที่ได้
7. จัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์

ตารางที่ 1.1 วิธีการดำเนินงาน

วิธีการดำเนินการ	ระยะเวลา									
	ปี 2560					ปี 2561				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1. การศึกษาโครงสร้างของสายเคเบิลใต้ดินและศึกษาศึกษาดูงานตามโรงงาน	←-----→									
2. ศึกษามาตรฐานของการทดสอบสายเคเบิลใต้ดิน		←-----→								
3. ศึกษาการใช้งานโปรแกรม Comsol multiphysic 3.5 รวมทั้งโปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบเพื่อทำการวิเคราะห์ เช่น Autocad, Solid work และทำการจำลองการวิเคราะห์สนามไฟฟ้า	←-----→									
4. ศึกษาทฤษฎีของกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน				←-----→						
				←-----→						

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1.1 วิธีการดำเนินงาน (ต่อ)

5. ออกแบบการทดสอบและ จัดเตรียมวัสดุทดสอบ					←-----→				
6. ทำการทดสอบสายเคเบิล ใต้ดินด้วยเครื่อง PDC					←-----→				
7. สรุป และวิเคราะห์ผลการ ทดสอบจากตัวอย่างของ ชิ้นงานที่ได้					←-----→		←-----→		
8. จัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์					←-----→		←-----→		

←-----→ วางแผน ←-----→ ปฏิบัติจริง

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับโครงสร้างรายละเอียดของส่วนประกอบสายเคเบิลใต้ดิน และมาตรฐานวิธีการทดสอบสายเคเบิลใต้ดิน
2. สามารถใช้โปรแกรมในการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าของสายเคเบิล เพื่อศึกษาผลกระทบของความเครียดสนามไฟฟ้าต่อการเกิดความผิดปกติของสายเคเบิลใต้ดิน
3. ได้รับความรู้และทักษะในการใช้อุปกรณ์เครื่องมือทางวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงอย่างถูกต้องและปลอดภัย
4. มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับสาเหตุ และปัจจัยที่ทำให้สายเคเบิลใต้ดินเกิดความผิดปกติจากกรณีต่างๆ ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการป้องกัน และลดปัญหาที่อาจเกิดขึ้นได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและสมมติฐานที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ปัจจุบันสายเคเบิลไฟฟ้าใต้ดินมีการใช้งานอย่างแพร่หลายในระบบส่งจ่ายไฟฟ้าเนื่องจากสามารถทนความเครียดสนามไฟฟ้าและทนต่อแรงเชิงกลได้ดี แต่เมื่อผ่านการใช้งานเป็นเวลานานอาจทำให้เกิดการเสื่อมสภาพได้ ซึ่งส่วนมากข้อบกพร่องในเคเบิลจะมีจุดเริ่มต้นที่ฉนวน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการซ่อมบำรุงและการทดสอบอย่างมีประสิทธิภาพ อาทิเช่น การวิเคราะห์กระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันโดยชุดทดสอบ PDC ซึ่งเป็นการทดสอบแบบไม่ทำลายเพื่อวิเคราะห์ฉนวนในสายเคเบิล โดยในบทนี้จะอธิบายเกี่ยวกับวัสดุพอลิเมอร์ที่ใช้เป็นฉนวนทางไฟฟ้า รวมทั้ง พอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวาง (XLPE) โครงสร้างทั่วไปของสายเคเบิล ทฤษฎีเกี่ยวกับหัวข้อต่อ และการทดสอบเพื่อวิเคราะห์กระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน

2.2 วัสดุพอลิเมอร์ [1],[2]

พอลิเมอร์ (Polymer) คือ สารประกอบที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ (Macromolecule) และมีมวลโมเลกุลมาก ที่ประกอบไปด้วยหน่วยที่เล็กที่สุดของพอลิเมอร์ ที่เรียกว่า มอนอเมอร์ (Monomer) มาต่อกันเป็นโซ่ยาวและจะทำปฏิกิริยาต่อกันซึ่งเรียกว่าปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) จนทำให้เกิดเป็นพันธะโควาเลนต์ไปเชื่อมมอนอเมอร์เข้าด้วยกันและเกิดเป็นพอลิเมอร์ โดยตัวกำหนดความแข็งแรง ความคงทน และแรงระหว่างโมเลกุล คือ ความยาวของสายโซ่โมเลกุลและชนิดของมอนอเมอร์

2.2.1 ประเภทของพอลิเมอร์

พอลิเมอร์แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ตามลักษณะการเกิด ได้แก่

1. พอลิเมอร์ธรรมชาติ (Natural polymer) เป็นพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น โปรตีน แป้ง เซลลูโลส ยางธรรมชาติ เป็นต้น
2. พอลิเมอร์สังเคราะห์ (Synthetic polymer) เป็นพอลิเมอร์ที่เกิดจากการสังเคราะห์โดยปฏิกิริยาเคมี เช่น พลาสติก ไนลอน โฟม เป็นต้น

พอลิเมอร์แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ตามชนิดของมอนอเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบ ได้แก่

1. โฮโมพอลิเมอร์ (Homopolymer) คือ พอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยหน่วยเล็กๆ ของมอนอเมอร์ชนิดเดียวกัน เช่น แป้งเป็นพอลิเมอร์ที่มีกลูโคสเป็นมอนอเมอร์ พอลิสไตรีนเป็นพอลิเมอร์ที่มีสไตรีนเป็นมอนอเมอร์
2. โคพอลิเมอร์ (Copolymer) คือ พอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยหน่วยเล็กๆ ของมอนอเมอร์ต่างชนิดกันอย่างน้อย 2 ชนิด เช่น พอลิเอสเทอร์ และ พอลิเอไมด์

พอลิเมอร์แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ตามการตอบสนองต่อความร้อน ได้แก่

1. เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) มีโครงสร้างโมเลกุลเป็นโซ่ตรงยาวจึงมีการเชื่อมต่อระหว่างโซ่พอลิเมอร์น้อย ทำให้สามารถหลอมตัวได้ด้วยความร้อนและแข็งตัวหรือขึ้นรูปได้เมื่อทำให้เย็นลง โดยไม่มีผลต่อโครงสร้างหรือเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของพอลิเมอร์นั้นๆ เช่น พอลิเอทิลีน (PE), พอลิสไตรีน (PS) และ พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) เป็นต้น

2. เทอร์โมเซตติงพลาสติก (Thermosetting plastic) โครงสร้างโมเลกุลเชื่อมโยงกันแบบโครงข่ายหรือเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ (Cross-Linked) ทำให้มีความแข็งแรงมากเนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลสูง พลาสติกชนิดนี้จึงมีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่สูงและทนต่อปฏิกิริยาเคมีได้ดี คงรูปหลังผ่านความร้อนหรือแรงดันเพียงครั้งเดียวไม่สามารถทำให้หลอมเหลวและขึ้นรูปใหม่ได้ เช่น อีพ็อกซี (Epoxy), เบกาไลท (Bekelite) และ พอลิเอสเตอร์ (Polyester) เป็นต้น

2.2.2 โครงสร้างโมเลกุลของพอลิเมอร์

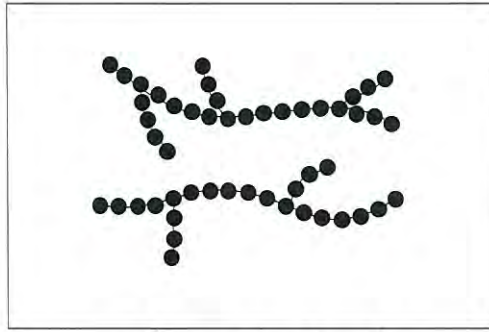
โครงสร้างโมเลกุลพอลิเมอร์จะเกิดจากมอนอเมอร์หน่วยย่อยเล็กๆ ต่อกันด้วยพันธะโควาเลนต์ในรูปแบบต่างๆ ส่งผลให้สมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์แตกต่างกันไปตามลักษณะโครงสร้างโมเลกุลนั้นๆ ดังนี้

1. พอลิเมอร์แบบเชิงเส้น (Linear Polymer) มอนอเมอร์ต่อกันเป็นสายโซ่ยาว โครงสร้างจะชิดกันมาก ส่งผลให้ความหนาแน่นและจุดหลอมเหลวสูง มีลักษณะที่ขุ่นและเหนียว PE, PS, PVC, Nylon และ High Density PE (HDPE) เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 พอลิเมอร์แบบเชิงเส้น

2. พอลิเมอร์แบบกิ่ง (Branched Polymer) เป็นพอลิเมอร์ที่มีการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่โมเลกุลเป็นลักษณะมีกิ่งก้านออกจากสายโซ่หลัก ส่งผลให้การจัดเรียงตัวไม่แน่น ความเป็นผลึกลดลง พอลิเมอร์มีความหนาแน่นต่ำและจุดเดือดจุดหลอมเหลวจะต่ำกว่าพอลิเมอร์แบบเชิงเส้น เช่น พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) เป็นต้น ลักษณะการเรียงตัวของโมเลกุล แสดงในรูปที่ 2.2



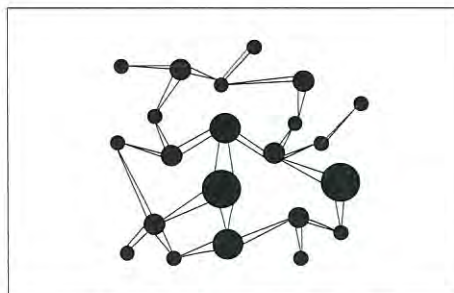
รูปที่ 2.2 พอลิเมอร์แบบกิ่ง

3. พอลิเมอร์แบบเชื่อมขวาง (Cross-Linked Polymer) คือ พอลิเมอร์ที่มีสายโซ่เชื่อมต่อกันที่ตำแหน่งต่างๆ ด้วยพันธะโควาเลนต์ โดยทั่วไปแล้วสามารถสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบเชื่อมขวางได้โดยการเติมอะตอมหรือโมเลกุลตัวเติมเพื่อทำให้เกิดพันธะโควาเลนต์กับสายโซ่ซึ่งมักจะทำที่อุณหภูมิสูง ตัวอย่างพอลิเมอร์แบบเชื่อมขวาง เช่น เมลามีน (Melamine), พอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวาง (XLPE) เป็นต้น ลักษณะการเรียงตัวของโมเลกุล แสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 พอลิเมอร์แบบเชื่อมขวาง

4. พอลิเมอร์แบบโครงข่าย (Network Polymer) โครงสร้างเป็นแบบสามมิติและพอลิเมอร์ที่มีการเชื่อมขวางสูงอาจจัดเป็นพอลิเมอร์แบบโครงข่ายได้เช่นเดียวกัน ตัวอย่างพอลิเมอร์ประเภทนี้เช่น อีพ็อกซี เรซิน (Epoxy Resin) ฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซิน (Phenolformaldehyde Resin) เป็นต้น ลักษณะการเรียงตัวโมเลกุล แสดงในรูป 2.4



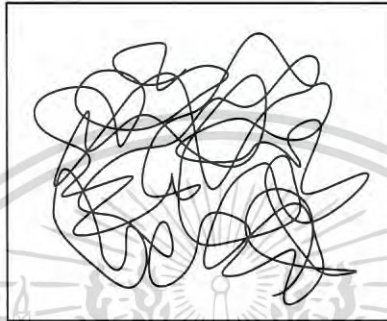
รูปที่ 2.4 พอลิเมอร์แบบโครงข่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 โครงสร้างผลึกของพอลิเมอร์

โครงสร้างผลึกมีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางกลของพอลิเมอร์ ลักษณะโครงสร้างผลึกของพอลิเมอร์ แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้

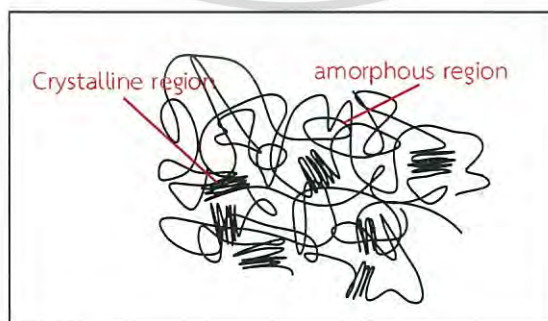
1. แบบอสัณฐาน (Amorphous) เป็นการรวมกันของโมเลกุลสายโซ่ยาวที่ไม่สมมาตรและการเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ ซึ่งเป็นการจัดเรียงตัวของอะตอมที่ไม่แน่นอนเหมือนกับของเหลว เมื่อให้ความร้อนจะไม่แสดงจุดหลอมเหลวที่ชัดเจน แต่จะค่อยๆ กลายเป็นของเหลว โครงสร้างอสัณฐานแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 โครงสร้างแบบอสัณฐาน (Amorphous)

2. แบบกึ่งผลึก (Partially Crystalline) โครงสร้างนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่สายโซ่โมเลกุลมีการเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ (Amorphous Region) และส่วนที่จัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ (Crystalline region) เมื่อให้ความร้อนส่วนที่เป็นผลึก (Crystalline region) จะเสียไป ส่งผลให้พอลิเมอร์นิ่ม จุดหลอมเหลวของพอลิเมอร์แบบกึ่งผลึกคือ อุณหภูมิที่ทำให้ส่วนที่เป็นผลึกหมดไป โครงสร้างแบบกึ่งผลึก แสดงดังในรูป 2.6

ปริมาณความเป็นผลึกมีผลต่อสมบัติทางกลของพอลิเมอร์ นั่นคือ พอลิเมอร์ที่มีปริมาณความเป็นผลึกมากจะมีความแข็งมากกว่าพอลิเมอร์ที่มีปริมาณความเป็นผลึกน้อย เนื่องจากอะตอมของพอลิเมอร์อยู่ชิดกันมากกว่า แต่ในพอลิเมอร์ที่มีปริมาณความเป็นผลึกน้อยจะสามารถแฉกและตัดได้ง่าย



รูปที่ 2.6 โครงสร้างแบบกึ่งผลึก (Partially crystalline)

2.3 พอลิเอทิลีน (Polyethylene) [3]

พอลิเอทิลีน (Polyethylene; PE) เป็นพอลิเมอร์ชนิดเทอร์โมพลาสติก (Thermo plastic) ที่มีความหนาแน่นต่ำสามารถสร้างได้โดยกระบวนการของเครื่องอัดรีดจากการทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของเอทิลีนในสภาวะที่มีออกซิเจนที่ความดันสูง พอลิเอทิลีนจะอ่อนตัวขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นและที่สภาวะการทำงานปกติสามารถทนอุณหภูมิได้สูงสุดถึง 70°C และอุณหภูมิต่ำสุด -30°C แต่ถ้าหากมีสารประกอบอื่นผสมอยู่จะสามารถทนอุณหภูมิต่ำสุดได้ถึง -50°C โดยถ้าวัสดุที่ถูกผลิตขึ้นมีช่วงค่าความหนาแน่น 0.92-0.93 จะเรียกว่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene; LDPE) ที่ช่วงค่าความหนาแน่น 0.94-0.95 จะเรียกว่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นปานกลาง (Medium density polyethylene; MDPE) และที่ช่วงค่าความหนาแน่น 0.96-0.98 จะเรียกว่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High density polyethylene; HDPE) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงจะทำการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติในสภาวะปกติได้ยาก แต่สามารถทำได้โดยการผสมสาร จำพวกเช่น สารต้านออกซิเดชัน (antioxidant) เอทิลีนไวนิลอะซิเตต (ethylene vinyl acetate; EVA) หรือยางเอทิลีนโพรพิลีน (ethylene propylene rubber; EPR) โดยปกติพอลิเอทิลีนมีความไวต่อแสงและรังสีอัลตราไวโอเล็ต แต่สามารถป้องกันได้โดยผสมสารคาร์บอนแบล็คมากกว่า 2 เปอร์เซ็นต์ และที่อุณหภูมิสูงจะมีผลจากสารโพแทสเซียมและกรดซัลฟิวริกเข้มข้น มีการปรับปรุงพอลิเอทิลีนได้หลากหลายวิธี โดยการผสมสารพอลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติยืดหยุ่นจำนวนเล็กน้อยเพื่อให้เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้กับตามความต้องการของผู้ใช้ ในปัจจุบันมักใช้พอลิเอทิลีนไปทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงเพื่อสร้างพอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวาง (Cross-linked polyethylene; XLPE)

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของพอลิเอทิลีน [3]

คุณสมบัติ	ค่ามาตรฐาน
Insulation resistance	10^{16} ($\Omega \cdot \text{cm}$)
Surface resistance	10^{14} (Ω)
Dielectric constant ϵ	2.3–2.5
Loss angle $\tan \delta$ at 50 Hz	>0.0001
Breakdown voltage (kV/mm)	25–30
Tensile strength	120–150 kg/cm ²
Elongation approx.	400%–600%

2.4 พอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวาง (Cross-linked polyethylene; XLPE) [3]

พอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวางเป็นพอลิเมอร์แบบเทอร์โมเซตติง บนพื้นฐานของฉนวนแข็งแบบพอลิเอทิลีนที่ถูกบ่มภายใต้อุณหภูมิและความดันด้วยการผสมสารอินทรีย์เปอร์ออกไซด์ (organic peroxide) และสารต้านออกซิเดชัน (antioxidant) ทำให้สามารถทนอุณหภูมิในสภาวะการใช้งานปกติเพิ่มขึ้นจาก 70°C เป็น 90-95°C และสภาวะลัดวงจรสามารถทนอุณหภูมิสูงจาก 150°C เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

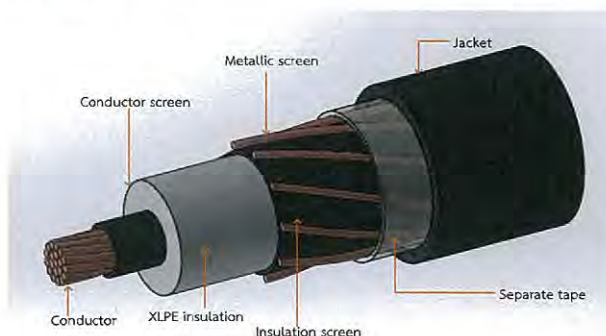
250°C แรงดันเบรกดาวนไฟฟ้ากระแสสลับเพิ่มขึ้นเป็น 30 kV/mm และระดับแรงดันอิมพัลส์สามารถเพิ่มได้ถึง 55/60 kV เมื่อไม่มีสิ่งเจือปนอยู่ และการเชื่อมขวางกับการผสมสารเปอร์ออกไซด์ เช่น ไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (dicumyl peroxide) หรือเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (enzoyl peroxide) ที่สภาวะอุณหภูมิและความดันสูงจะทำให้มีจุดหลอมเหลวที่สูงขึ้น ในปัจจุบันการผลิตสายเคเบิลแรงดันสูงและแรงดันสูงพิเศษนิยมใช้ฉนวนเป็นพอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวาง (XLPE) แทนที่ฉนวนกระดาษบรรจุด้วยน้ำมัน

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของ XLPE [3]

คุณสมบัติ	ค่ามาตรฐาน
Insulation resistance	10^{17} ($\Omega \cdot \text{cm}$)
Surface resistance	10^{14} (Ω)
Dielectric constant ϵ	2.3–2.5
Loss angle $\tan \delta$ at 50 Hz	<0.008
Super clean compound	<0.0001
Breakdown voltage (kV/mm)	45–50
Tensile strength	120–140 kg/cm ²
Elongation approx.	300%–500%

2.5 โครงสร้างและวัสดุของสายเคเบิล [4],[5]

การออกแบบสายเคเบิลต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพในการส่งจ่ายกำลัง อายุการใช้งาน และความปลอดภัยเป็นหลัก จากอดีตจนถึงปัจจุบันโครงสร้างของสายเคเบิลจะยังไม่มีเปลี่ยนแปลงมากเท่าไรแต่จะปรับปรุงวัสดุเพื่อยืดอายุการใช้งานของสายเคเบิลและเพื่อให้ตรงต่อจุดประสงค์ในการใช้งาน โดยปัจจุบันนิยมใช้งานสายเคเบิลฉนวน XLPE เป็นหลัก ในรูปที่ 2.7 จะแสดงโครงสร้างโดยทั่วไปของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินฉนวน XLPE ที่ประกอบด้วย ตัวนำ(Conductor) ตัวกันตัวนำ(Conductor screen) ตัวกันฉนวน(Insulation screen) ตัวกันโลหะ(Metallic Screen) Separator tape และเปลือกนอก(Jacket)



รูปที่ 2.7 โครงสร้างทั่วไปของสายเคเบิลใต้ดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ตัวนำไฟฟ้า (Conductor)

ตัวนำไฟฟ้าทำหน้าที่ส่งผ่านกำลังไฟฟ้า โดยทั่วไปจะทำมาจากทองแดงหรืออลูมิเนียม ซึ่งทองแดงมีคุณสมบัติความต้านทานทางไฟฟ้าน้อยกว่าอลูมิเนียม จึงทำให้ทองแดงมีประสิทธิภาพในการนำไฟฟ้าดีกว่าอลูมิเนียมและที่กระแสไหลผ่านเท่ากันจะใช้ตัวนำทองแดงที่มีพื้นที่หน้าตัดที่น้อยกว่าตัวนำอะลูมิเนียม อย่างไรก็ตามตัวนำอะลูมิเนียมจะมีน้ำหนักเบาและราคาถูกกว่าตัวนำทองแดง โดยลักษณะโครงสร้างตัวนำมีหลายลักษณะดังนี้ ตัวนำเดี่ยวตันรูปวงกลมหรือวงรี (Round or oval conductor single strand) ตัวนำตีเกลียว (Round Strand Conductor) ตัวนำแบบอัด (Profile wire Conductor) โดยรูปร่างตัวนำจะมีหน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมคางหมูช่วยลดช่องว่างระหว่างตัวนำ ตัวนำแบบเซ็กเมนต์ (Segmental Conductor) และตัวนำเดี่ยวกลวง (Hollow Core Conductor) โดยทั่วไปสายเคเบิลอาจแบ่งออกเป็นสายเคเบิลตัวนำเดี่ยว (Single-core cable) หรือตัวนำแบบ 3 แกน (Three-core cable) จากคุณสมบัติของตัวนำทองแดง และตัวนำอลูมิเนียมที่มีความแตกต่างกัน สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.3 และตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.3 เปรียบเทียบคุณลักษณะของทองแดง (Cu) และอลูมิเนียม (Al)

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

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติของทองแดง (Cu) และอลูมิเนียม (Al)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ตัวกั้นตัวนำ (Conductor screen)

เป็นชั้นสารกึ่งตัวนำ (Semiconducting screen) ซึ่งมีส่วนผสมของคาร์บอนแบล็กหรือผงเขม่า เป็นหลักเพื่อกระจายความเครียดสนามไฟฟ้า ตัวกั้นตัวนำจะอยู่ระหว่างชั้นตัวนำและฉนวนมีหน้าที่ทำให้ผิวสัมผัสระหว่างตัวนำและฉนวนเรียบไม่มีช่องว่างที่อาจทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมซึ่งจะนำไปสู่การเกิดดิสชาร์จบางส่วนและทำให้อายุการใช้งานของสายเคเบิลลดลง นอกจากนี้ยังช่วยควบคุมสนามไฟฟ้าภายในเนื้อฉนวนให้มีความสม่ำเสมอมากขึ้น

3. ฉนวน (Insulation)

ฉนวนเป็นส่วนที่สำคัญที่สุดของสายเคเบิลใต้ดินมีหน้าที่กั้นไม่ให้กระแสไฟฟ้าเกิดการรั่วไหลหรือลัดวงจรจนเกิดความสูญเสียต่อระบบไฟฟ้า และอาจเกิดอันตรายต่อบุคคลที่สัมผัสได้ ซึ่งฉนวนอาจเป็นแบบแผ่นหรือเป็นฉนวนแบบอัดรีด ฉนวนที่มีคุณภาพดีต้องปราศจากสิ่งเจือปน ช่องอากาศ และรอยแตกซึ่งจะทำให้เกิดความเครียดทางไฟฟ้าสูงที่บริเวณจุดบกพร่องเหล่านี้และจะนำไปสู่ความล้มเหลวในเคเบิล รวมทั้งชั้นที่ติดกับฉนวนต้องมีความเรียบเพื่อหลีกเลี่ยงความเครียดทางไฟฟ้าสูงบริเวณรอยต่อฉนวน ในยุคเริ่มต้นนิยมใช้ฉนวนกระดาษจุ่มน้ำมัน (Paper Impregnated Laminated Cable: PILC) ซึ่งทนอุณหภูมิได้ประมาณ 80-90 °C มีความน่าเชื่อถือสูงแต่เนื่องจากชั้นตัวกั้นโลหะเป็นปลอกตะกั่วเมื่อเกิดการกัดกร่อนหรือรอยแตกอาจทำให้ความชื้นหรืออากาศเข้ามาในเนื้อฉนวนซึ่งอาจส่งผลให้เกิดความล้มเหลวในสายเคเบิลในอนาคต ประกอบกับมีความสูญเสียสูงกว่าฉนวนชนิดพอลิเมอร์และขาดผู้เชี่ยวชาญเนื่องจากโครงสร้างฉนวนชนิดนี้ค่อนข้างซับซ้อน ทำให้ปัจจุบันนิยมนิยมนใช้น้อยลง และหันมาใช้ฉนวนอัดรีดชนิดพอลิเมอร์มากขึ้น ได้แก่ Polyethylene (PE) Ethylene Propene Rubber (EPR) Crosslink polyethylene (XLPE) และ Water tree retardant cross-linked polyethylene (WTR – XLPE) เนื่องจากฉนวน PE สามารถทนอุณหภูมิขณะใช้งานได้เพียง 75 °C จึงมีการพัฒนาฉนวน EPR และ XLPE ขึ้นมาโดยฉนวน Ethylene Propene Rubber (EPR) ในสภาวะปกติทนอุณหภูมิได้ 90°C และที่สภาวะลัดวงจรทนอุณหภูมิสูงสุดถึง 250 °C มีความไวต่อความชื้นและการเกิดต้นไม้ดำ EPR มีความยืดหยุ่นสูงกว่า XLPE แต่ค่า Dielectric Loss และราคาสูงกว่า XLPE ฉนวน Cross-Linked Polyethylene (XLPE) ในสภาวะปกติทนอุณหภูมิได้ 90°C และที่สภาวะลัดวงจรทนอุณหภูมิสูงสุดถึง 250 °C มีค่า Dielectric Loss ต่ำ รวมทั้งมีคุณสมบัติทางกลที่ดีทนต่อแรงกระทำภายนอก อย่างไรก็ตามการใช้งานฉนวน XLPE อาจเผชิญกับปัญหาต้นไม้ดำซึ่งในปัจจุบันจึงได้มีการพัฒนาฉนวน XLPE ที่สามารถลดปัญหาพฤติกรรมการณ์เกิดต้นไม้ดำได้ในระดับหนึ่งนั่นคือ ฉนวนแบบ Water tree retardant cross-linked polyethylene (WTR – XLPE)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในตารางที่ 2.5 จะแสดงคุณสมบัติของฉนวน PVC และ XLPE ตารางที่ 2.6 แสดงความหนาฉนวน Cross-linked polyethylene (XLPE) และตารางที่ 2.7 แสดงอุณหภูมิตัวนำสูงสุดสำหรับฉนวนผสมชนิดต่างๆ ตามมาตรฐาน IEC 605002-2

ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติของฉนวน PVC และ XLPE ตามมาตรฐาน IEC 605002-2

คุณสมบัติ	PVC	XLPE
พิกัดอุณหภูมิสูงสุดขณะใช้งาน (°C)	70	90
พิกัดอุณหภูมิสูงสุดขณะลัดวงจร (°C)	120	250
ค่าคงที่ได้โอห์มตริก	6	2.4
ความหนาแน่น (g/cm ³)	1.4	0.92
ความนำความร้อน (cal/cm.sec °C)	3.5	8
ความต้านทานต่อแรงดึง (kg/mm ²)	2.5	3

ตารางที่ 2.6 ความหนาฉนวน Cross-linked polyethylene (XLPE) ตามมาตรฐาน IEC 605002-2

Nominal cross sectional area of conductor (mm ²)	Nominal thickness of insulation at rated voltage U ₀ /U (U _m)				
	3.6/6(7.2) kV (mm)	6/10(12) kV (mm)	8.7/15(17.5) kV (mm)	12/20(24) kV (mm)	18/30 (36) kV (mm)
10	2.5	-	-	-	-
16	2.5	3.4	-	-	-
25	2.5	3.4	4.5	-	-
35	2.5	3.4	4.5	5.5	-
50-185	2.5	3.4	4.5	5.5	8.0
240	2.6	3.4	4.5	5.5	8.0
300	2.8	3.4	4.5	5.5	8.0
400	3.0	3.4	4.5	5.5	8.0
500-1600	3.2	3.4	4.5	5.5	8.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.7 อุณหภูมิตัวนำสูงสุดสำหรับฉนวนชนิดต่างๆ ตามมาตรฐาน IEC 605002-2

ฉนวนผสม	อุณหภูมิสูงสุดของตัวนำ °C	
	Normal Operation	Short-circuit (≤5 วินาที)
Polyvinyl chloride (PVC/B)		
พื้นที่หน้าตัดตัวนำ ≥300 mm ²	70	160
พื้นที่หน้าตัดตัวนำ ≤300 mm ²	70	140
Cross-linked polyethylene (XLPE)	90	250
Ethylene propylene rubber (EPR และ HEPR)	90	250

4. ตัวกันฉนวน (Insulation screen)

ตัวกันฉนวนทำมาจากวัสดุชนิดเดียวกับตัวนำอยู่ระหว่างชั้นฉนวนและตัวกันโลหะ (Metallic Screen) ตัวกันฉนวนมีหน้าที่คล้ายตัวนำคือลดช่องว่างระหว่างฉนวนและตัวกันโลหะ อีกทั้งช่วยให้สนามไฟฟ้ารอบๆ ฉนวนของสายเคเบิลมีความสม่ำเสมอ

ชั้นตัวนำ ตัวกันตัวนำ ฉนวน และตัวกันฉนวนรวมแล้วเรียกว่าเป็นแกนกลางของสายเคเบิล ออกแบบมาเพื่อป้องกันไม่ให้สนามไฟฟ้าออกนอกสายเคเบิล

5. ตัวกันโลหะ (Metallic Screen)

ตัวกันโลหะอาจเป็นโลหะที่ทำมาจากทองแดง อลูมิเนียม หรือตะกั่ว ในสายเคเบิลฉนวน XLPE ตัวกันโลหะอาจเป็นลวดทองแดง เทปทองแดง หรือลวดทองแดงพันด้วยเทปทองแดงอีกที ตัวกันโลหะอยู่ถัดจากชั้นตัวกันฉนวน ปกติแล้วจะกำหนดให้ตัวกันโลหะมีศักย์ไฟฟ้าเป็นกราวด์ ตัวกันโลหะทำหน้าที่เป็นทางให้กระแสไฟฟ้าไหลกลับในกรณีที่เกิดการลัดวงจรและป้องกันอันตรายจากการสัมผัสเคเบิล ทั้งยังป้องกันการกัดกร่อนจากสภาพแวดล้อมและช่วยป้องกันปัญหาทางกลที่เกิดจากการตึงตัวของสายอีกด้วย

6. Separator tape

มีหน้าที่ป้องกันความชื้นที่จะมีผลต่อตัวกันโลหะและฉนวน อีกทั้งยังมีหน้าที่ช่วยรัดตัวกันโลหะให้แน่นและทำให้ไม่ติดกับเปลือกนอก (Jacket)

7. เปลือกนอก (Jacket)

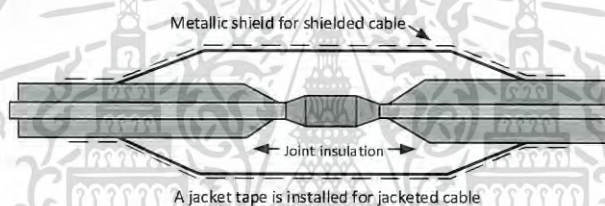
เป็นชั้นนอกสุดของสายเคเบิล ทำหน้าที่ป้องกันแสง ความชื้นรวมถึงการกัดกร่อนจากสภาพแวดล้อมอื่น ในสายเคเบิลใต้ดินเปลือกนอกนิยมทำมาจากพอลิเอทิลีน (PE) ซึ่งมีความทนทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อความชื้นสูงและมีการผสมคาร์บอนแบล็คเพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพเนื่องจากแสง แต่มีความต้านทานต่อเปลวไฟต่ำ โดยพอลิเอทิลีนจะสามารถแบ่งตามความหนาแน่นได้เป็น พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำแบบเส้น (LLDPE) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นปานกลาง (MDPE) และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) หรืออาจทำมาจากพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) ซึ่งมีความคงทนทางกายภาพได้ดี ความต้านทานเปลวไฟดี ความทนต่อความชื้นสูงแต่น้อยกว่าพอลิเอทิลีน และทนต่อสภาพดินฟ้าอากาศและดินได้ดีเยี่ยม

2.6 ทฤษฎีของข้อต่อสาย (Jointing Theory) [6]

ข้อต่อ (Jointing) คือส่วนที่ทำให้เคเบิล 2 ชั้น สามารถถูกมองเห็นเป็นจุดปลายสายของเคเบิลทั้งคู่ถูกต่อกัน ส่วนที่ทำให้ข้อต่อแตกต่างกับเทอร์มินเนชัน คือข้อต่อมีความใกล้เคียงเหมือนกับส่วนที่ยึดออกจากสายเคเบิล เคเบิลทั้งคู่ที่ถูกเตรียมมาต้องมีลักษณะที่เหมือนกันที่จะนำมาต่อกัน เช่น PILC และ เคเบิลแบบอัดขึ้นรูป ที่ปลายของข้อต่อคือส่วนประกอบของซิลด์เคเบิลที่ถูกตัด โดยรูปที่ 2.8 แสดงข้อต่อแบบเทปและส่วนประกอบต่างๆ



รูปที่ 2.8 ข้อต่อแบบเทป

2.6.1 การออกแบบข้อต่อ และการติดตั้ง (Jointing Design and Installation)

1. การเตรียมสายเคเบิล (Cable Preparation) เป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดจากวิธีการดำเนินการทั้งหมด และเป็นพื้นฐานที่แสดงให้เห็นถึงความน่าเชื่อถือในการสร้างข้อต่อและหัวต่อ การเตรียมเคเบิลที่ไม่เหมาะสมอาจนำไปสู่ความเสียหายได้ ในการเตรียมสายเคเบิลจะขึ้นอยู่กับวิธีและลักษณะของวัสดุ รวมไปถึงที่ผิวของฉนวนเคเบิลต้องไม่มีสิ่งปนเปื้อน ข้อบกพร่องและความเสียหาย เพราะสิ่งเหล่านี้อาจเกิดขึ้นได้ตอนทำการปลอกสายซิลด์ ที่ฉนวนของเคเบิลแบบอัดขึ้นรูปต้องมีผิวที่เรียบ ไม่มีสิ่งเจือปนหรือมีน้อยที่สุด และต้องไม่มีความชื้นที่เกาะตามผิวของฉนวน โดยต้องคำนึงถึงขอบเมื่อมีการตัดซิลด์ของฉนวน สำหรับอุปกรณ์ที่ใช้การต่อแบบ premolded ที่ขอบของซิลด์ต้องมีความเหลี่ยม คือมีการตั้งฉากกับแกนของเคเบิล ส่วนที่เป็นโลหะที่ใช้เชื่อมกันของซิลด์โลหะต้องไม่มีความเสียหายซึ่งส่วนนี้เป็นส่วนที่สำคัญส่วนหนึ่ง การตัดเกลียวของสายไม่ควรตัดเข้าไปในตัวนำ สิ่งที่ต้องกังวลในข้อต่อสายคือการมีทางเดินร่องภายใน จากการศึกษาในปี 1950 ศึกษาทางเดินร่องภายในฉนวนกระดาษที่ระดับพิทัก 15 kV จะพบร่องความยาว 1 นิ้วในทุกๆ 1 kV การใช้เทปพันเคเบิลโดยใช้กระดาษหรือผ้าลินิน อาจมีช่องอากาศระหว่างชั้นฉนวนทั้งสองชั้น การใช้ข้อต่อ premolded มัก

ใช้ได้ดีกับฉนวนเคเบิลแบบการใช้การรัดให้คงอยู่ ในการทดสอบแสดงค่าประมาณ 7 kV ต่อนิ้ว เป็นค่าที่น่าเชื่อถือสำหรับข้อต่อแบบนี้

2. การเชื่อมต่อตัวนำ (Connecting the Conductors) ตัวนำที่ใช้ในเคเบิลปกติมักใช้ทองแดงไม่ก็อะลูมิเนียม โดยมักใช้ทองแดงในข้อต่อโดยมีวิธีการเชื่อมต่อของตัวนำทองแดงสองตัวนำเข้าด้วยกัน มีหลายวิธีเช่น การบีบอัด การเชื่อม การใช้ความร้อนหลอมละลาย การบัดกรี เป็นต้น ไม่ค่อยนิยมใช้อะลูมิเนียมเมื่อเทียบกับทองแดง เพราะต้องใช้ความระมัดระวังอย่างมากในการใช้เครื่องมือในการบีบอัด เชื่อมต่อตัวนำอะลูมิเนียม เมื่อใช้ตัวนำขนาดประมาณ 1000 kcmil ซึ่งเป็นตัวนำขนาดใหญ่ต้องสนใจในปัญหาการใช้เคเบิลเป็นสายป้อนจะมีแนวโน้มที่จะขยายตัวตามสภาวะที่มีอุณหภูมิสูงเช่นการจ่ายโหลดฉุกเฉิน การทำงานของข้อต่อสายจะต้องมีเสถียรภาพต่อการจ่ายโหลด และสามารถรับกระแสสูงโดยไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อข้อต่อ การเชื่อมต่อโลหะควรเป็นโลหะชนิดเดียวกัน แต่ในบางกรณีใช้ตัวนำทองแดงเชื่อมต่อกับตัวนำอะลูมิเนียม โดยจะยอมรับให้ใช้อะลูมิเนียมเชื่อมต่อผ่านตัวนำทองแดง แต่ห้ามไม่ให้ตัวนำทองแดงต่อผ่านตัวนำอะลูมิเนียมเพราะว่ามีผลไหลตไซเคิล อัตราการขยายตัวของโลหะทั้งสองเป็นสาเหตุให้อะลูมิเนียมขยายออกมาและทำให้เกิดการเชื่อมต่อที่ไม่ดี

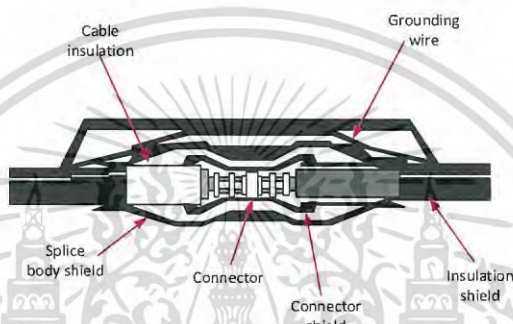
3. ฉนวนสำหรับข้อต่อ (Insulation for joints) วัสดุที่ใช้ในข้อต่อต้องมีความเข้ากันกับวัสดุในเคเบิลอย่างสมบูรณ์ ความหนาของฉนวนที่สัมผัสกับฉนวนของเคเบิลต้องทนต่อผลของความเครียดทางไฟฟ้า ข้อบังคับในอดีตของการใช้ฉนวนหุ้มกระดาษคือความหนาของฉนวนของเคเบิลเป็นสองเท่าหรือในความหมายคือออกแบบโดยการวางชั้นเท่ากับสองเท่าของความหนาที่มากกว่าฉนวนของเคเบิล ฉนวนของข้อต่อที่ทำจากการพันเทป เรียกว่า self-amalgamating tapes ส่วนใหญ่ทำมาจากยางเอทิลีนโพรพิลีน โดยถูกสร้างมาจากบิวทินหรือโพลีเอทิลีนที่ถูกผ่านคุณสมบัติทางความร้อนจนมีความคล้ายกันกับฉนวนของเคเบิล ข้อต่อ premolded ล้วนทำมาจากส่วนประกอบของยางเอทิลีน ข้อต่อที่หดตัวโดยความร้อน (heat shrink joints) มักทำมาจากสารประกอบของโพลีโอเลฟิน ที่มีคุณสมบัติในการขยายตัวเมื่อเกิดการเชื่อมขวางที่ได้จากการฉายรังสี โดยเส้นผ่าศูนย์กลางยังคงไม่ลดจนกว่าจะใช้ความร้อนกับตัวข้อต่อที่อยู่เหนือจุดเชื่อมต่อ ซึ่งวิธีนี้ไม่ควรให้เพิ่มความร้อนให้กับฉนวนมากเกินไปเมื่อเปรียบเทียบกับฉนวนทางไฟฟ้า วัสดุที่ใช้บางชนิดมีความคงทนต่อความร้อนที่ดี เมื่อให้ความร้อนที่มากเกินไปส่งผลให้ลดความสามารถของข้อต่อ ดังนั้นไม่ควรให้ความร้อนที่มากเกินไปที่จุดศูนย์กลางของข้อต่อ

4. วัสดุในการชิลด์ (Shield Materials) วัสดุที่จะนำมาใช้ต้องมีความเหมาะสมกับส่วนที่เหลือของเคเบิลและมีการนำกระแสไฟฟ้าที่เพียงพอในการลดค่าของผลทางไฟฟ้าสถิตในการสร้างแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ การแผ่รังสีประจุ และกระแสรั่วไหล และข้อต่อต้องสามารถควบคุมการเหนี่ยวนำของกระแสและกระแสความผิดพลาด ชิลด์ของข้อต่อมีความคล้ายกับชิลด์ของเคเบิล ที่มีความสามารถในการป้องกันการทางไฟฟ้าโดยการมีอนุภาคของคาร์บอนแบลคเป็นสารประกอบอยู่ในวัสดุ โดยอนุภาคเหล่านี้ไม่ได้สัมผัสถึงกันเพื่อที่จะทำให้มีลักษณะนำไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

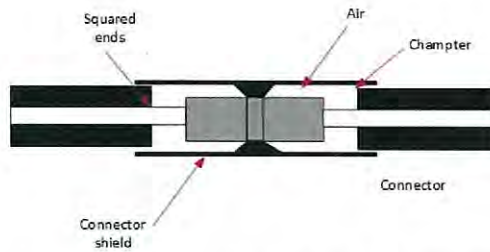
5.เปลือกนอกของข้อต่อ (Jackets for Joints) เปลือกนอกต้องเสริมสร้างความแข็งแรงทางกายภาพ ป้องกันไม่ให้ความชื้นซึมเข้าไปในข้อต่อและมีความคงทนทางเคมีและผลต่างๆ จากภายนอก เป็นส่วนที่สำคัญในการใช้เปลือกนอกบนข้อต่อสายเมื่อเกิดการกัดกร่อนขึ้นที่โลหะหรือซีลด์จะถูกควบคุมให้เกิดในบริเวณนั้นๆ

6.ข้อต่อ Premolded โดยส่วนประกอบของข้อต่อจะแสดงดังรูป 2.9 อุปกรณ์มักออกแบบให้ครอบคลุมกับขนาดของสายแรงดันไฟฟ้าปานกลาง และขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางเคเบิลที่ใช้ในข้อต่อต้องอยู่ในช่วงที่ระบุของสายแต่ละสาย ในการระบุตำแหน่งของข้อต่อต้องทำการเลื่อนข้อต่อไปตามใดด้านหนึ่งของปลายสายก่อนทำการติดตั้ง ละในท้ายที่สุดจะได้เป็นตำแหน่งที่เหนือศูนย์กลางของข้อต่อ โดยข้อต่อ premolded มีส่วนประกอบดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.9 ข้อต่อแบบ Premolded

- 1.1 Connector เป็นส่วนที่แสดงถึงการเชื่อมบิอัดทางกลของตัวนำทั้งสองตัวนำ นอกจากนี้ที่ปลายของconnector ไม่ต้องทำให้มีขนาดเล็ก เนื่องจากจะถูกปกคลุมด้วย connector shield
- 1.2 Cable End Preparation ฉนวนของเคเบิลที่ connector จะถูกตัดตามมุมขวาไปยังตัวนำ มีการลบขอบมุมที่ขอบแหลมของเคเบิลเพื่อป้องกันการครูดกับผิวภายในของส่วน housing เพื่อให้ง่ายต่อการเลื่อนโครงข้อต่อให้เข้ากับตำแหน่งที่ต้องการ
- 1.3 Connector Shield ส่วนประกอบนี้จะไม่เจอในข้อต่อแบบพัน แต่จะพบในข้อต่อแบบ premolded ซึ่งทำมาจากวัสดุประเภทยาง และการลบขอบคมของ connector กับอากาศ ซึ่งคือระหว่าง connector กับ ฉนวนของเคเบิล connector shield ต้องติดกับส่วนที่เป็นไฟฟ้ากับตัวนำของเคเบิลเพื่อลดความแตกต่างของแรงดันที่เกิดขึ้น โดยที่ connector กับ connector shield มีค่าศักย์ไฟฟ้าที่เท่ากัน ในการออกแบบจะไม่ยอมให้เกิดการคายประจุในอากาศหรือที่บริเวณขอบของconnector ในรูปที่ 2.10 แสดงภาพขยายของconnector shield และการต่อกับ connector



รูปที่ 2.10 แสดงส่วนของ connector ของข้อต่อแบบ Premolded

- 1.4 Insulation ใช้วัสดุฉนวนแบบ EPDM ที่ถูกฉีกอยู่ระหว่าง connector shield ไปจนถึงขอบของตัวข้อต่อ
- 1.5 Splice Body Shield ส่วนนี้คือส่วนหนาของยางที่คลุมตัวนำ ถูกออกแบบให้ทับซ้อนกับชีลด์ของฉนวนเคเบิล ที่ปลายของข้อต่อจะทำการลดความเครียดจากปลายสายของเคเบิลทั้งสองข้าง
- 1.6 Grounding Eye จะอยู่ตรงปลายของข้อต่อ โดยเป็นส่วนที่จำเป็นในข้อต่อ premolded แบบแรงดันปานกลาง และมีการต่อกับส่วนที่ต่อลงดินของเคเบิล แสดงให้เห็นที่ส่วนที่ต่อลงดินขนานกับ splice body shield
- 1.7 Neutral Across Splice โดยทั่วไปจะประกอบลวดเคเบิลที่พันเป็นเกลียวเข้าด้วยกันไปที่ศูนย์กลางและนำไปต่อที่จุดศูนย์กลางของข้อต่อ เป็นเกลียวที่อยู่รอบของข้อต่อและมีส่วนที่สัมผัสกับชั้นนอกสุดของข้อต่อจะช่วยให้การระบุตำแหน่งผิดพลาดเพื่อแสดงความน่าเชื่อถือที่โลหะที่ต่อลงดินสำหรับชีลด์ของข้อต่อ
- 1.8 Adapter บางทีในการออกแบบก็นำ premolded splice ต่อเข้ารวมกับ adapter เพื่อยื่นช่วงของสายเคเบิลให้มีความเหมาะสมกับขนาดของhousing และยอมให้สายที่ต่างชนิดกันในด้านขนาดนำมาต่อกันเพื่อให้สามารถนำไปใช้งานกับ housing ที่มีอยู่ในตลาด การวางตำแหน่งของ adapter เป็นส่วนสำคัญ โดยจะใช้adapter ก่อนจะติดตั้งตัวคอนเนคเตอร์ในกรณีของข้อต่อแบบ premolded โดยโครงสร้างต้องทำการติดตั้งทุกชั้นส่วนก่อนที่จะทำการเคลื่อนย้าย

2.7 การทดสอบเพื่อวิเคราะห์กระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน [7],[8]

การวิเคราะห์กระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน เป็นวิธีบนพื้นฐานของการประยุกต์แรงดันกระแสตรง โดยการโพลาริเซชันคือกระแสซาร์จประจุและดีโพลาริเซชันคือกระแสดีซาร์จประจุ ในทางเทคนิคจะใช้แรงดันทดสอบที่น้อยกว่า 2 kV โดยวิธีการวัดมีอยู่ 2 แบบ คือ กระแสจะถูกวัดจากการเปลี่ยนแปลงแรงดันกับกระแสจะถูกวัดที่ค่าแรงดันที่มีค่าน้อยค่าหนึ่งในเทอมของฟังก์ชันของเวลา มีการใช้วิธีของ isothermal relaxation current (IRC) เพื่อทำการแปลงข้อมูลให้อยู่ในเทอมของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่โดยใช้การแปลงลาปลาซหรือการแปลงฟูเรียร์ ในการวิเคราะห์ขนาดของความสูญเสีย โดยผลที่ได้นั้นสามารถเปรียบเทียบวิธีทางโดเมนของความถี่ที่ใช้ไดโอิเล็กทริกสเปคโตรสโคปี

การทดสอบกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน (PDC) เป็นวิเคราะห์คุณภาพของเนื้อฉนวน เป็นวิธีที่ระบุปรากฏการณ์ของคอนดักชันกับโพลาริเซชันในฉนวน โดยสามารถวัดขนาดกระแสต่ำที่ 10^{-12} A หรือในระดับพิโคแอมป์ การคงเหลือของประจุในเนื้อฉนวนสามารถวัดได้โดยไม่ใช้วิธีทางแรงดัน เทคนิคการวัดนี้อยู่บนพื้นฐานในโดเมนของเวลาที่สามารถวัดได้ทั้งกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันและในโดเมนความถี่การวัดนั้นจะให้ผลของเทอมเพคเตอร์ความสูญเสีย (Dielectric Dissipation Factor : DDF) และค่าความจุ (C)

ปรากฏการณ์ของคอนดักชัน เกิดขึ้นเมื่อมีแหล่งจ่ายไฟฟ้าเท่านั้นโดยจะมีความนำไฟฟ้าเกิดขึ้น และปรากฏการณ์โพลาริเซชัน เกิดขึ้นในโมเลกุลของฉนวนทั้งขณะที่มีแหล่งจ่ายไฟฟ้าและไม่มีแหล่งจ่ายไฟฟ้า ทำให้ส่งผลต่อการเปลี่ยนทางเคมีของฉนวน ซึ่งสาเหตุปรากฏการณ์ทั้งสองสามารถจำแนกได้ ดังแสดงในตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 การจำแนกปัญหาในเนื้อฉนวนของเคเบิล [8]

Polarization	Conduction
- ผลของการเสื่อมอายุโมเลกุลที่รอยต่อของฉนวน	- ความชื้นที่ผิวภายนอก
- ความชื้นที่เกิดขึ้นในเคเบิลฉนวนกระดาษ	- ผลจากหยดน้ำหรือละอองน้ำที่เกาะอยู่บนผิวของข้อต่อสายเคเบิล
- การเกิดต้นไม้ในเคเบิลฉนวน XLPE	- ผลจากหยดน้ำหรือละอองน้ำที่เกาะอยู่บนผิวของสายเคเบิลฉนวน XLPE
- ผลของการเกิดดิสชาร์จบางส่วน	- ผลของรั่วไหลตามผิว
- ผลของปฏิกิริยาเคมีจากกระบวนการผลิต XLPE	- ผลของผงคาร์บอนหรือผงโลหะที่เกิดจากพอลต์
- ผลของการเสื่อมสภาพทางความร้อน	- การมีสารปนเปื้อนที่มีคุณสมบัติเป็นตัวนำ
- ผลของการเกิดออกซิเดชัน	- ผลของการมีสิ่งเจือปน

2.7.1 พื้นฐานของการตอบสนองของวัสดุไดโอิเล็กทริก

เมื่อวัสดุอยู่ในภาวะที่มีสนามไฟฟ้าซึ่งเกิดจากการจ่ายแรงดันผ่านอิเล็กโตรดที่มีวัสดุไดโอิเล็กทริกชั้นระหว่างกลาง ทำให้ไดโพลถูกกระตุ้นในระดับอะตอม เกิดการเหนี่ยวนำขึ้นภายในอะตอมหรือโมเลกุล ทำให้ประจุขั้วบวกและลบ ($\pm q$) ที่มีจำนวนเท่ากันแยกกันเป็นระยะทางสั้นๆ d เกิดจากสร้างไดโพลด้วยไดโพลโมเมนต์ $p = qd$ ซึ่งเกี่ยวข้องกับสนามไฟฟ้า E คือ $p = \alpha E$ โดย α คือความสามารถในการมีขั้ว (polarisability) หนึ่งในกลไกหลักในการเกิด มาโคสโคปิกโพลาริเซชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(macroscopic polarisation P) ที่จะกล่าวในที่นี้ คือ Interfacial Polarisation เกิดขึ้นในวัสดุฉนวนที่ประกอบด้วยชั้นวัสดุไดอิเล็กตริกต่างชนิดกัน เช่น การต่อข้อต่อในสายเคเบิลใต้ดิน โดยมีความแตกต่างของฉนวน XLPE และ แอทีลีนโพรพิลีนไดอีนอีลาสโตเมอร์ (EPDM) ในข้อต่อ เป็นต้น ความต่างกันของค่าเปอร์มิตติวิตีและคอนดักติวิตี ทำให้เมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าประจุบวกและลบมาสะสมที่รอยต่อของวัสดุที่ต่างชนิดทำให้เกิดไดโพล ในปรากฏการณ์มักใช้เวลานานและโดยทั่วไปเกิดขึ้นที่ความถี่ต่ำไปจนถึงความถี่กำลัง ดังนั้นการโพลาริเซชันในฉนวนเป็นผลของการเคลื่อนที่ของประจุบวกและประจุลบภายใต้สนามไฟฟ้าทำให้เกิดไดโพลไฟฟ้า ซึ่งจะเรียงตัวตามทิศทางสนามไฟฟ้า พบว่าการเรียงตัวนี้ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าในเนื้อฉนวนที่มีทิศทางตรงข้ามกับสนามไฟฟ้าที่เกิดจากความต่างศักย์ระหว่างแผ่นอิเล็กโทรดทำให้แรงดันระหว่างแผ่นอิเล็กโทรดลดลง การโพลาริเซชัน P และสนามไฟฟ้า E มีทิศทางเดียวกันและมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$P = \chi \epsilon_0 E \quad (1)$$

โดยที่ χ คือ ค่าความสามารถยอมรับได้ของไดอิเล็กตริก (dielectric susceptibility)

ϵ_0 คือ ค่าเปอร์มิตติวิตีที่สูญญากาศมีค่าเท่ากับ 8.85419×10^{-12} [As/Vm] ซึ่งหน่วยมีความสัมพันธ์มาจาก ความหนาแน่นทางไฟฟ้า D (As/m²) กับสนามไฟฟ้า E (V/m)

2.7.2 การตอบสนองของวัสดุไดอิเล็กตริกในโดเมนเวลา

ในกรณีที่ฉนวนระหว่างอิเล็กโทรดเป็นสูญญากาศ จะแสดงความสัมพันธ์ของความหนาแน่นทางไฟฟ้า (electric displacement D) และสนามไฟฟ้า E ในรูปของเวกเตอร์ ได้ดังนี้

$$D = \epsilon_0 E \quad (2)$$

หรือสนามไฟฟ้าที่ถูกสร้างในความสัมพันธ์เชิงเวลา

$$D(t) = \epsilon_0 E(t) \quad (3)$$

โดยที่ความหนาแน่นทางไฟฟ้า D แสดงในประจุไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ที่เกิดขึ้นบริเวณผิวอิเล็กโทรด เมื่อแทนที่สูญญากาศด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก ความหนาแน่นทางไฟฟ้า D ในสมการ (2) จะมีการโพลาริเซชัน P ของวัสดุไดอิเล็กตริกจากสมการ (1) เพิ่มเข้ามา ทำให้ได้ความหนาแน่นทางไฟฟ้า D เป็นดังนี้

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

$$D(t) = \epsilon_0 (1 + \chi) E(t) \quad (4)$$

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

$$i_{pol} = \sigma_0 E_c + \epsilon_0 (1 + \chi(0')) E_c \delta(t) + \epsilon_0 E_c f(t) \quad (5)$$

โดยที่ C_0 คือ ค่าความจุของวัสดุทดสอบ

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

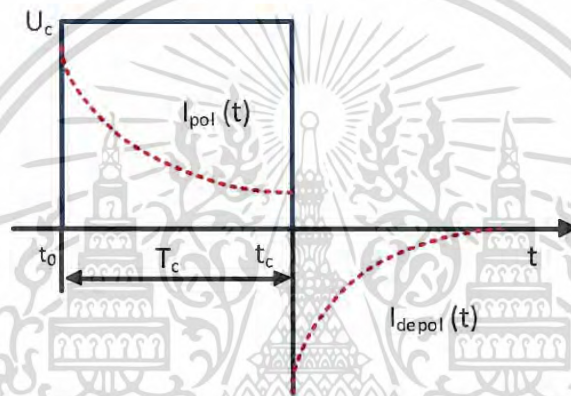
เทอมที่หนึ่งขึ้นอยู่กับความสามารถในการนำไฟฟ้ากระแสตรงของวัสดุทดสอบ เทอมที่สองของสมการเกี่ยวข้องกับความหนาแน่นของกระแสที่เนื่องจากผลรวมของค่าความจุสุญญากาศของวัสดุทดสอบและค่าความจุสัมพันธ์กับค่าความสามารถยอมรับได้ของไดอิเล็กตริกที่ความถี่สูง

เมื่อค่ากระแสโพลาริเซชันลดลงจนถึงระดับคงที่ ในทันทีหลังจากนั้นลัดวงจรวัสดุทดสอบเพื่อวัดกระแสดีโพลาริเซชัน ได้เป็นสมการดังนี้

$$i_{\text{depol}} = -\epsilon_0 U_c [f(t) - f(t+T_c)] \quad (6)$$

โดยที่ T_c คือ ระยะเวลาที่จ่ายแรงดันไปที่วัสดุทดสอบ

เทอมที่สองของสมการนี้สามารถละเว้นได้ ถ้าการวัดมีค่า T_c มากพอที่ทำให้กระแสโพลาริเซชันเริ่มคงที่ ดังนั้นกระแสดีโพลาริเซชันจะแปรผันตรงกับฟังก์ชันการตอบสนองของวัสดุไดอิเล็กตริก



รูปที่ 2.11 แสดงกราฟการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน

เมื่อมีการจ่ายแรงดันจะเกิดกระแสโพลาริเซชันหรือกระแสชาร์จประจุซึ่งประกอบด้วย Absorption Capacitive current และ Current Conduction Current เมื่อปลดแหล่งจ่ายออกจะเกิดกระแสดีโพลาริเซชันหรือกระแสดีชาร์จประจุซึ่งจะมีแค่ Absorption Current ซึ่งมีขนาดเท่ากับ Absorption Current ในโพลาริเซชันแต่มีการกลับขั้ว ดังแสดงในรูปที่ 2.11 และแสดงกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันได้ดังนี้

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

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

2.7.3 การตอบสนองของวัสดุไดอิเล็กตริกในโดเมนความถี่

คุณสมบัติของวัสดุไดอิเล็กตริกสามารถวัดในความสัมพันธ์เชิงความถี่ การแปลงความสัมพันธ์ในเชิงเวลาเป็นความสัมพันธ์เชิงความถี่สามารถทำได้โดยใช้การแปลงสมการลาปลาซหรือฟูเรียร์

ความหนาแน่นทางไฟฟ้า D สามารถแสดงเป็นความสัมพันธ์เปอร์มิตติวิตีไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน (complex dielectric permittivity) ของวัสดุได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}\underline{D}(\omega) &= \epsilon_0 \underline{\epsilon}(\omega) \underline{E}(\omega) \\ &= \epsilon_0 [1 + \chi'(\omega) - j\chi''(\omega)] \underline{E}(\omega)\end{aligned}\quad (7)$$

โดยที่

$$\underline{\epsilon}(\omega) = \epsilon_r'(\omega) - j\epsilon_r''(\omega) = (1 + \chi'(\omega)) - j\chi''(\omega) \quad (8)$$

และสามารถหาค่าเปอร์มิตติวิตีไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (relative dielectric permittivity)

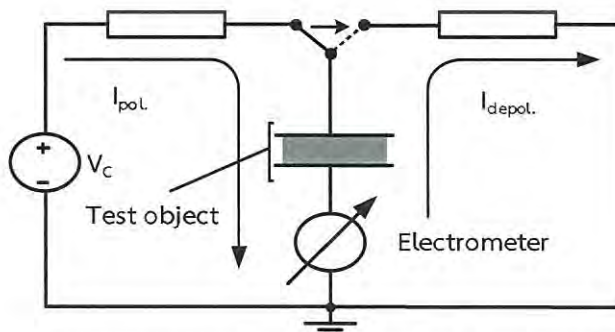
$$\begin{aligned}\underline{\epsilon}(\omega) &= \epsilon_r'(\omega) - i[\epsilon_r''(\omega) + \sigma_0 / \epsilon_0 \omega] \\ &= 1 + \chi'(\omega) - j[\chi''(\omega) + \sigma_0 / \epsilon_0 \omega]\end{aligned}\quad (9)$$

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

$$\tan\delta(\omega) = \frac{\epsilon_r''(\omega) + \sigma_0 / \epsilon_0 \omega}{\epsilon_r'(\omega)} \quad (10)$$

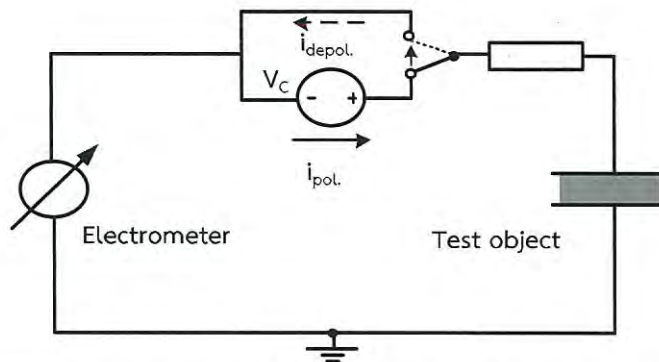
2.8 เทคนิคการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน (PDC) [8],[9],[10]

วงจรถดสอบสายเคเบิลสามารถแบ่งได้เป็น 2 วงจร คือ วงจรถดสอบของการวัด PDC ของเคเบิลกำลังแบบ isolated shield ดังแสดงรูปที่ 2.12 วงจรนี้ใช้ทดสอบในกรณีที่สามารถแยกหรือปลด shield ของสายเคเบิลออกจากกราวด์ระบบได้ และวงจรถดสอบของการวัด PDC ของเคเบิลกำลังแบบ ground shield ดังแสดงรูปที่ 2.13 ใช้ในการทดสอบในกรณีที่ไม่สามารถปลด shield ของสายเคเบิลออกจากกราวด์ของระบบได้โดยจะใช้อุปกรณ์จ่ายแรงดันเสริม (Phantom) ในการจ่ายแรงดันไฟฟ้า โดยหลักการทำงานของทั้งสองวงจรถดสอบคล้ายกันคือจ่ายแรงดันไฟฟ้าไปที่วัสดุทดสอบเพื่อวัดกระแสโพลาริเซชันหรือกระแสชาร์จประจุ หลังจากนั้นสวิตซ์ซึ่งวัสดุทดสอบเพื่อลัดวงจรและทำการวัดกระแสดีโพลาริเซชันหรือกระแสดีชาร์จประจุ โดย Capacitive current ที่เกิดขึ้นในโพลาริเซชันจะมีค่าสูงในสายเคเบิลยาว แต่จะไม่นำมาวิเคราะห์เนื่องจาก Capacitive current เกิดขึ้นในระหว่างการสวิตซ์ซึ่งเพียงไม่กี่วินาทีขึ้นอยู่กับค่าความจุของสายเคเบิล ดังนั้นเมื่อมีค่า conduction current ต่ำจะทำให้กระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันมีค่าเกือบเท่ากัน



รูปที่ 2.12 วงจรถดสอบของการวัด PDC ของเคเบิลกำลังแบบ isolated shield

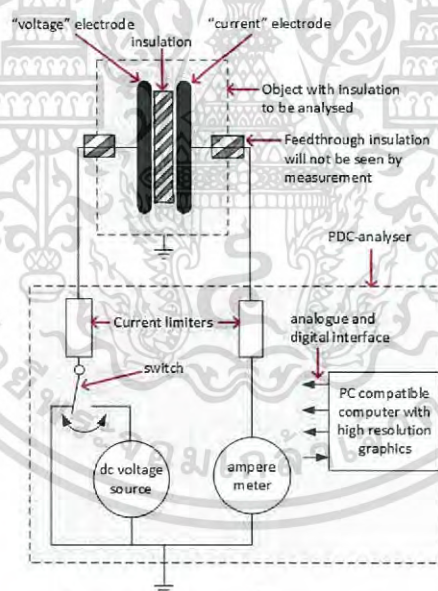
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 วงจรทดสอบของการวัด PDC ของเคเบิลกำลังแบบ ground shield

2.8.1 เทคนิคการวัดของเครื่องทดสอบ PDC Analyser

เทคนิคการวัดที่ใช้เครื่องทดสอบ PDC Analyser ถูกเรียกว่า two active electrodes ตามรูปที่ 2.14 สำหรับเทคนิคนี้ฉนวนที่วิเคราะห์ต้องอยู่ระหว่างสองอิเล็กโทรดซึ่งจะประพฤติเป็นตัวเก็บประจุที่มีฉนวนเป็นวัสดุไดอิเล็กตริก หนึ่งในอิเล็กโทรดกำหนดเป็น “อิเล็กโทรดกระตุ้น” และป้อนแรงดันทดสอบ อิเล็กโทรดที่สองเรียกว่า “อิเล็กโทรดตรวจจับ” โดยลัดวงจรไปกราวด์ผ่านแอมป์มิเตอร์ที่มีความไวสูง

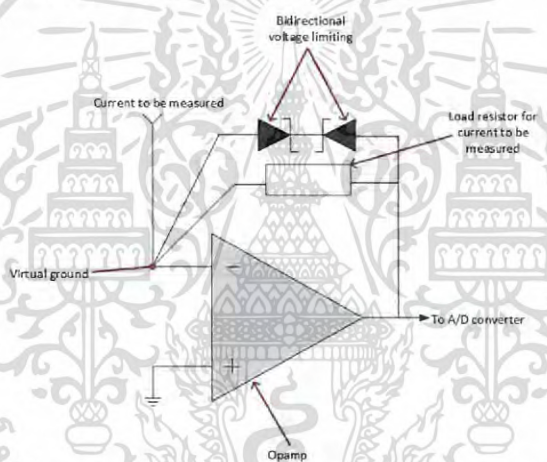


รูปที่ 2.14 รูปจำลองวงจรของเครื่องทดสอบ PDC Analyser

ส่วนสำคัญหนึ่งของเครื่องวิเคราะห์ PDC Analyser คือ แอมป์มิเตอร์ โดยปกติแล้วกระแสไหลโรเซชัน และกระแสดีโพลไรเซชันมีขนาดเล็ก และค่าที่ได้จากการวัดต่างวัสดุทดสอบมีช่วงกว้างหลายสิบเท่า การวัดกระแสขนาดเล็กนี้จะทำได้ยากขึ้นหากกระแสสลับมีการซ้อนทับที่เกิดจากการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าจากอุปกรณ์แรงสูงบริเวณใกล้เคียง และหากเกิดกระแสชั่วคราวขึ้นเมื่อสวิตซ์ซึ่งแหล่งจ่ายแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

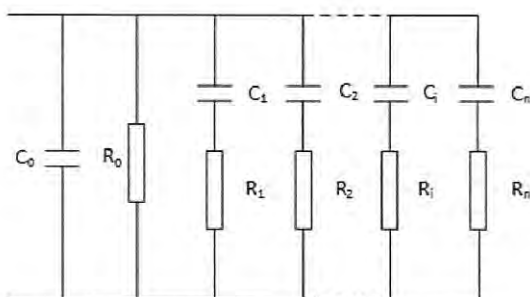
หลักการทำงานพื้นฐานของแอมป์มิเตอร์แสดงดังรูปที่ 2.15 ออปแอมป์ควบคุมแรงดันขาออก เพื่อรักษาแรงดันที่จุดกราวด์เสมือน (virtual ground) ไว้ที่ศูนย์โวลต์ ฉะนั้นอิมพีแดนซ์ของแอมป์มิเตอร์จึงเป็นศูนย์โอห์ม (รวมกับอิมพีแดนซ์ของตัวจำกัดกระแสที่ไม่ได้แสดงในที่นี้) การวัดกระแสในช่วง pA ถึง mA และเพื่อให้มีการป้องกันกระแสเกิน 100 mA หรือมากกว่า จำเป็นต้องใช้ออปแอมป์ที่กระแสขาเข้าเปลี่ยนแปลงตามเวลาและอุณหภูมิน้อยกว่า 1pA ความต่างของแรงดันออฟเซตขาเข้าต่ำ และความสามารถในการส่งกระแสออกไม่น้อยกว่า 100mA การจำกัดแรงดันแบบสองทิศทาง (The bi-directional voltage limiting) จำเป็นต้องใช้วงจรรีเลย์ทรอนิกส์พิเศษ ซีเนอร์ไดโอดธรรมดาจึงไม่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้กับกระแสต่ำนี้ สำหรับแต่ละตัวอย่างดิจิตอล ตัวต้านทานโหลด (load resistor) จะถูกเลือกในช่วง 10 kΩ ถึง 10GΩ เพื่อให้มีแรงดันขาออกสูงสุดเท่าที่เป็นไปได้สำหรับ A/D converter สำหรับการใช้อิมพีเตอร์ควรมีช่วงกระแสไฟฟ้า ± 1 mA ที่ความละเอียดประมาณ 0.5 % ของค่าที่วัดได้ค่า การเบี่ยงเบนสูงสุด และความละเอียดขั้นต่ำควรมีค่ามากกว่า 1pA ดังนั้นอัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่วัดได้ต่ำสุดคือ $1:10^9$



รูปที่ 2.15 แผนภาพอย่างง่ายของแอมป์มิเตอร์ในเครื่องทดสอบ PDC Analyser

2.8.2 วงจรสมมูลของวัสดุไดอิเล็กตริก

การจำลองวัสดุไดอิเล็กตริกสามารถจำลองได้ด้วยตัววงจรสมมูลซึ่งประกอบด้วย ตัวต้านทานอนุกรมกับตัวเก็บประจุต่อขนานกันเป็นกึ่ง RC ได้เพื่อวิเคราะห์กระแสไหลผ่านฉนวน โดยวงจรสมมูลแสดงดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 วงจรสมมูลของวัสดุไดอิเล็กตริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรสมมูลนี้สามารถจำลองกระแสโพลาริเซชัน และกระแสดีโพลาริเซชันในโดเมนเวลาได้ เนื่องจากกึ่ง RC ขนานทุกกิ่งก่อให้เกิดกระแสเอ็กซ์โพเนนเชียล ซึ่งกระแสดีโพลาริเซชันเป็นการทับซ้อนของเอ็กซ์โพเนนเชียลนี้ และความต้านทานกระแสตรง R_0 แสดงกระแสที่ไหลผ่านฉนวน ขณะที่ความจุ C_0 ใช้เพื่อกำหนดความจุเชิงซ้อน (complex capacitance) ไดโพลของฉนวนมีการหมุนเพื่อเรียงตัวตามทิศสนามไฟฟ้าทำให้เกิดกระแสโพลาริเซชัน และไดโพลจะกลับสู่สภาวะเดิมเมื่อสนามไฟฟ้าหายไป กระบวนการการคลายตัว (relaxation process) อาจแสดงได้จากกึ่ง RC ขนานในวงจรสมมูล ซึ่งกึ่ง RC ขนานนี้จะขึ้นอยู่กับลักษณะการคลายตัวไดโพลของฉนวนซึ่งสอดคล้องกับค่าคงที่เวลา (τ) กระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันขึ้นอยู่กับเวลาซึ่งจะลดลงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล ในทางกลับกันกระแสคอนดักชันจะคงที่ตลอดช่วงการจ่ายแรงดัน โดยแสดงกระแสคอนดักชันในกฎของโอห์มจะสรุป ได้ดังนี้

$$I_{con} = \frac{U_0}{R_0} \quad (11)$$

เมื่อ U_0 คือ แรงดันกระแสตรงที่ป้อนผ่านวัสดุฉนวน

ฉะนั้นจะคำนวณความต้านทาน R_0 และความจุ C_0 ระหว่างสองอิเล็กโทรดตามหลักทรงกระบอกแกนร่วม ดังรูปที่ 2.17 และคุณสมบัติฉนวน ได้ดังนี้

$$R_0 = \frac{\ln(b/a)}{2\pi L\sigma} \quad (12)$$

$$C_0 = \frac{2\pi L\epsilon_0\epsilon_r}{\ln(b/a)} \quad (13)$$

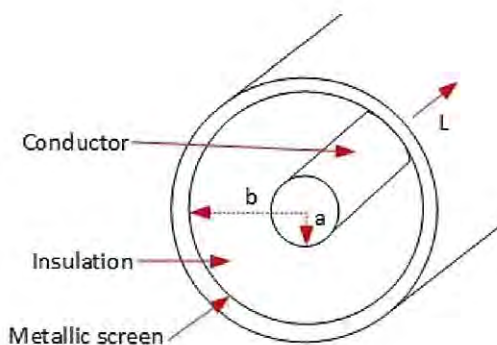
เมื่อ a คือ รัศมีภายในฉนวนของเคเบิลฉนวน XLPE

b คือ รัศมีด้านนอกฉนวนของเคเบิลฉนวน XLPE

L คือ ความยาวของสายเคเบิล

σ คือ ค่าความนำไฟฟ้า

$\epsilon_0\epsilon_r$ คือ ค่าเปอร์มิตติวิตีของฉนวน



รูปที่ 2.17 ลักษณะทางเรขาคณิตของเคเบิลฉนวน XLPE

กระแสดีโพลาร์ไอเซชันประกอบด้วยสมการการลดลงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลที่สร้างขึ้นจากกึ่ง RC ขนานและแสดงเป็นสมการ ได้ดังนี้

$$i_{\text{depol}} = \sum_{i=1}^n A_i \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \quad (14)$$

โดย

$$A_i = \frac{U_0}{R_0} \left[1 - \exp\left(-\frac{T_c}{\tau_i}\right) \right] \quad (15)$$

$$\tau_i = R_i C_i \quad (16)$$

เมื่อ n คือ จำนวนกึ่ง RC ขนาน
 A_i และ τ_i คือ ค่าคงที่
 T_c คือ เวลาการชาร์จประจุ

โดยค่าที่เกี่ยวข้องกับ R_i และ C_i จะมีผลต่อรูปแบบการลดลงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลของกระแสดีโพลาร์ไอเซชัน

จากวงจรสมมูลที่กล่าวไว้ข้างต้นชุดทดสอบ PDC สามารถหาค่า $\tan \delta$ ได้จากความสัมพันธ์ของค่าความจุจริง (C') และค่าความจุจินตภาพ (C'') ดังแสดงตามสมการต่อไปนี้

$$C' = C_0 + \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{1 + (\omega R_i C_i)^2} \quad (17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C'' = \frac{1}{\omega R_0} + \sum_{i=1}^n \frac{\omega R_i C_i^2}{1 + (\omega R_i C_i)^2} \quad (18)$$

$$\tan \delta = \frac{C''}{C'} \quad (19)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบและประกอบสร้าง

3.1 กล่าวนำ

การศึกษาระแสโพลาริเซชันและกระแสตีโพลาริเซชันในสายเคเบิลฉนวน XLPE โดยใช้เครื่องทดสอบPDC วิธีที่ออกแบบคือจำลองปัญหาของสายเคเบิลต่างๆ เพื่อดูผลของกระแสโพลาริเซชัน กระแสตีโพลาริเซชัน และ Dielectric Dissipation Factor (DDF) หรือ $\tan \delta$ เพื่อบันทึกข้อมูลนำมาประมวลผลต่อไป ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงวงจรการทดสอบ อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ และการเตรียมสายเคเบิลที่นำมาทดสอบกรณีต่างๆ

3.2 วงจรการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสตีโพลาริเซชันในสายเคเบิลฉนวน XLPE

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงวงจรการวัดโดยแสดงรูปแบบจำลองและรูปวงจรวัดจริงรวมถึงการออกแบบการทดสอบเพื่อศึกษารณีต่างๆ และอุปกรณ์ที่นำมาใช้ในกระบวนการทดสอบ โดยแสดงดังต่อไปนี้

3.2.1 การศึกษาผลของวงจรวัดและแรงดันที่ใช้ในการทดสอบ

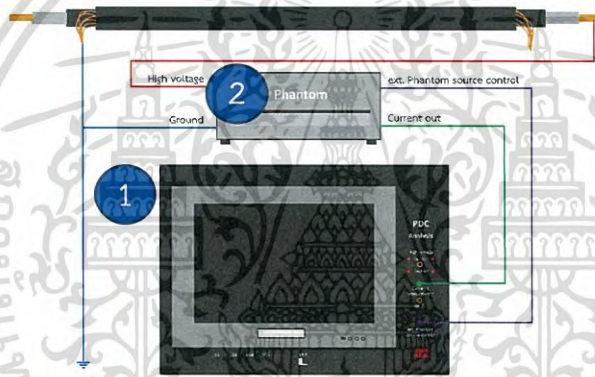
ในการทดสอบนี้เป็นการศึกษาผลของวงจรวัดระหว่างวงจรวัด PDC ของเคเบิลกำลังแบบ isolated shield หรือ วงจรที่ไม่ใช้อุปกรณ์จ่ายแรงดันเสริม(Phantom) แสดงดังรูปที่ 3.1 และ 3.2 เพื่อเทียบกับวงจรวัด PDC ของเคเบิลกำลังแบบ ground shield หรือ วงจรที่ใช้อุปกรณ์จ่ายแรงดันเสริม (Phantom) ดังรูปที่ 3.3 และ 3.4 โดยจ่ายแรงดันไฟฟ้า 250V 500V 750V และ1000V ในกรณีสายเคเบิลฉนวน XLPE ที่มีข้อต่อและไม่มีข้อต่อ



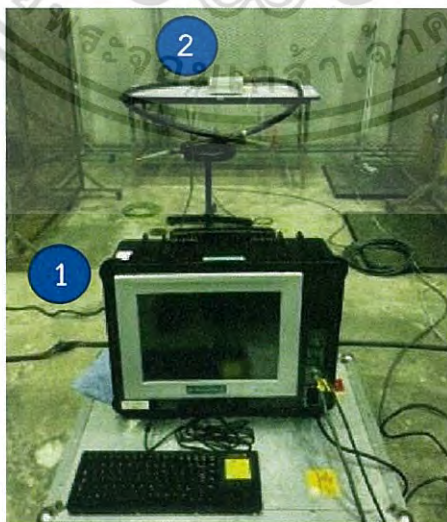
รูปที่ 3.1 แบบจำลองวงจรวัดที่ไม่ใช้อุปกรณ์จ่ายแรงดันเสริม(Phantom)



รูปที่ 3.2 วงจรวัดจริงที่ไม่ใช้อุปกรณ์จ่ายแรงดันเสริม(Phantom)



รูปที่ 3.3 แบบจำลองวงจรวัดที่ใช้อุปกรณ์จ่ายแรงดันเสริม(Phantom)

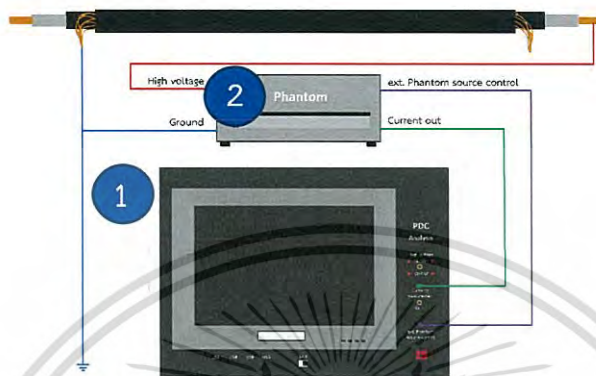


รูปที่ 3.4 วงจรวัดจริงที่ใช้อุปกรณ์จ่ายแรงดันเสริม(Phantom)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 การศึกษาผลของความยาว

ในการทดสอบนี้เป็นการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบผลของความยาวซึ่งใช้สายเคเบิลฉนวน XLPE ที่มีความยาว 15 cm 250 cm และ 350 cm โดยจ่ายแรงดันไฟฟ้า 400V ซึ่งแบบจำลองชุดทดสอบและวงจรชุดทดสอบจริง แสดงดังรูปที่ 3.5 และ 3.6



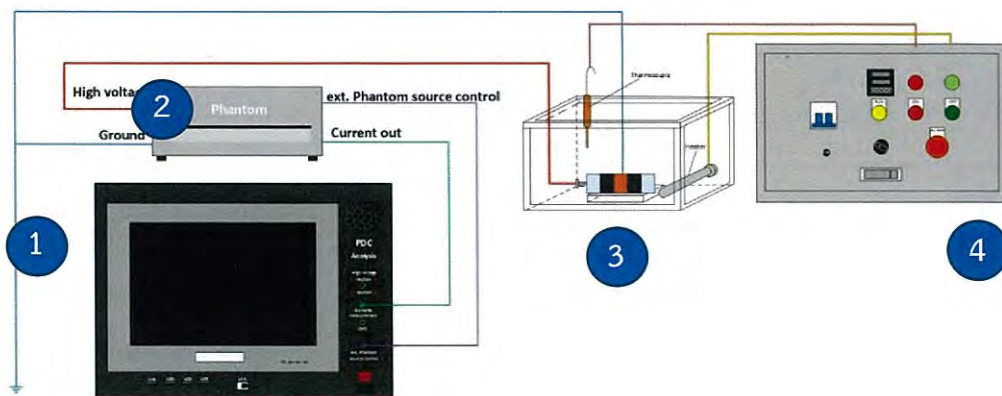
รูปที่ 3.5 แบบจำลองวงจรวัดที่ใช้ในการศึกษาผลของความยาวสายเคเบิล



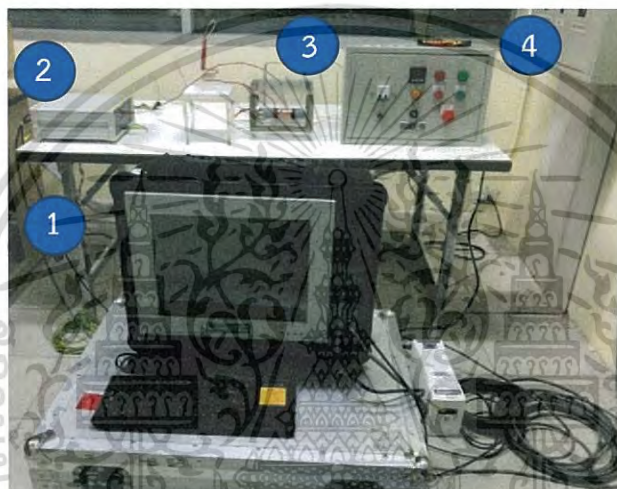
รูปที่ 3.6 วงจรวัดจริงที่ใช้ในการศึกษาผลของความยาวสายเคเบิล

3.2.3 การศึกษาผลของอุณหภูมิ

ในการทดสอบนี้เป็นการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิ ซึ่งจำลองผ่านกล่องอะคริลิก โดยจ่ายแรงดันไฟฟ้า 400V ที่อุณหภูมิ 50°C 70°C และ 90°C ซึ่งแบบจำลองชุดทดสอบและวงจรชุดทดสอบจริงแสดงดังรูปที่ 3.7 และ 3.8



รูปที่ 3.7 แบบจำลองวงจรวัดที่ใช้ในการศึกษาผลของอุณหภูมิ



รูปที่ 3.8 วงจรวัดจริงที่ใช้ในการศึกษาผลของอุณหภูมิ

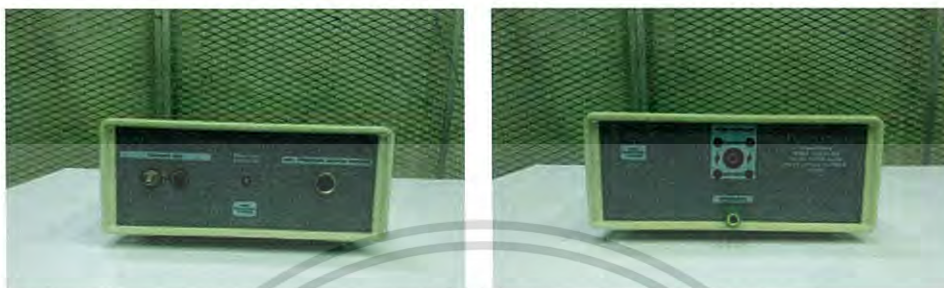
1. PDC Analyser 1MOD ดังแสดงในรูป 3.9 เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดหน้างานและวินิจฉัยฉนวนแบบไม่ทำลาย โดยในตัวเครื่องประกอบด้วยอุปกรณ์สวิตชิง แหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรงที่สามารถปรับค่าได้ตั้งแต่ 30-2000 V และมีเทอร์มิสเตอร์วัดกระแสสำหรับวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสโพลาริเซชันของฉนวนในหน่วย pA โดยจะแสดงกราฟกระแสเทียบกับเวลาที่หน้าจอ และสามารถวัดค่าความจุ่มรวมทั้งแสดงกราฟ Dielectric Dissipation Factor (DDF) หรือ $\tan \delta$ เทียบกับความถี่เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาของฉนวนต่อไปได้



รูปที่ 3.9 PDC Analyser 1MOD

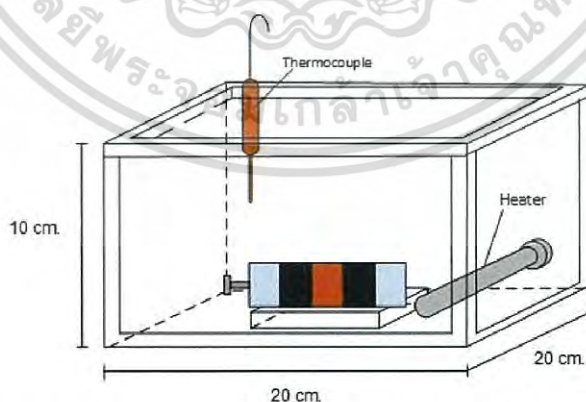
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. อุปกรณ์จ่ายแรงดันเสริม (PDC Phantom 1000XE) ดังแสดงในรูป 3.10 เป็นอุปกรณ์เสริมเชื่อมต่อกับเครื่อง PDC Analyser 1MOD ผ่านสายคอนโทรลเพื่อใช้ประกอบการวัดในกรณีที่วัสดุทดสอบที่ไม่สามารถปลดกรวดออกจากระบบได้ โดยจ่ายแรงดันกระแสตรงที่สามารถปรับค่าได้ 30-1000 V ไปที่วัสดุทดสอบ และส่งกระแสไปที่เครื่อง PDC Analyser 1MOD เพื่อทำการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสโพลาริเซชัน



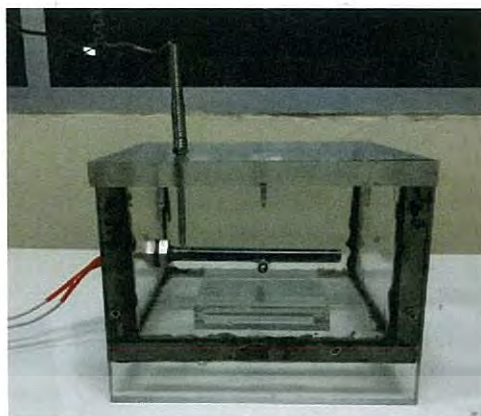
รูปที่ 3.10 อุปกรณ์จ่ายแรงดันเสริม (Phantom) ด้านหน้าและหลัง

3. กล่องอะคริลิก มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดกว้าง 20 cm ยาว 20 cm สูง 10 cm ใช้สำหรับวางสายเคเบิลทดสอบความยาว 15 cm เพื่อควบคุมอุณหภูมิและป้องกันผลกระทบจากภายนอก ซึ่งภายในกล่องจะประกอบด้วย เครื่องทำความร้อนแบบหั่วเกลียวขนาด 220 V 500 W ใช้สำหรับการจ่ายความร้อนแก่อุณหภูมิของอากาศภายในกล่อง และมีเทอร์โมคัปเปิลที่เป็นเซ็นเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิของอากาศภายในกล่อง จากนั้นตัวเทอร์โมคัปเปิลจะส่งค่าแสดงไปยังกล่องควบคุมอุณหภูมิ โดยเครื่องทำความร้อน และเทอร์โมคัปเปิลจะเชื่อมต่อกับกล่องตัดต่ออุณหภูมิ ภาพจำลองกล่องอะคริลิกที่ออกแบบไว้แสดงดังรูปที่ 3.11 และภาพจริงของกล่องอะคริลิกที่ใช้ในการทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.11 แบบจำลองอะคริลิกที่ออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 กล่องอะคริลิกจริงที่ใช้ในการทดสอบ

4. กล่องควบคุมอุณหภูมิ มีหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิของอากาศรอบๆ สายเคเบิลภายในกล่องอะคริลิกให้คงที่ตลอดระยะเวลาการทดสอบ ซึ่งจะสามารถตั้งค่าอุณหภูมิตามที่ต้องการได้หลายระดับอุณหภูมิ โดยในการทดสอบผลของอุณหภูมิจะตั้งค่าที่ 50°C 70°C และ 90°C ตามลำดับ ซึ่งจะเชื่อมต่อกับเทอร์โมคัปเปิลเพื่อวัดอุณหภูมิ และเครื่องทำความร้อนจากกล่องอะคริลิกที่ติดตั้งสายเคเบิลทดสอบ โดยกล่องควบคุมอุณหภูมิแสดงดังรูปที่ 3.13

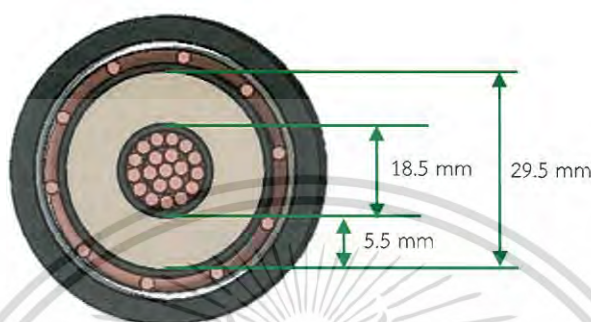


รูปที่ 3.13 กล่องควบคุมอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 สายเคเบิลที่ใช้ในการทดสอบ

สายเคเบิลที่นำมาศึกษา และใช้ในการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันนี้จะใช้สายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE พิกัด 12/20(24) kV และมีพื้นที่หน้าตัด 240 mm^2 ซึ่งคุณลักษณะของสายเคเบิลจะแสดงดังรูปที่ 3.14 และตารางที่ 3.1 ซึ่งในการออกแบบการทดสอบจะแบ่งสายเคเบิลเป็นกรณีต่างๆ



รูปที่ 3.14 ภาพแสดงคุณลักษณะของสายเคเบิลฉนวน XLPE

ตารางที่ 3.1 คุณลักษณะของสายเคเบิลฉนวน XLPE

คุณลักษณะของสายเคเบิล	รายละเอียด
ชนิดของสายเคเบิล	สายเคเบิลแรงสูงฉนวน XLPE พิกัด 12/20(24) kV
พื้นที่หน้าตัดของตัวนำทองแดง (mm^2)	240
ความหนาของฉนวน XLPE (mm)	5.5
เส้นผ่านศูนย์กลางในตัวนำ (mm)	18.5
เส้นผ่านศูนย์กลางถึงนอกฉนวน (mm)	29.5
เปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ของฉนวน, ϵ_r	2.3

วิธีการเตรียมสายเคเบิลในกรณีที่ 3.3.1-3.3.4 ทำได้โดยตัดสายเคเบิลตามความยาวที่ต้องการ จากนั้นลอกเปลือกนอกของสายเคเบิล เปิดพลาสติกที่หุ้ม Shield wires ต่อมานำ Shield wires ออกมาเพื่อใช้ในการวัด จากนั้นลอกสารกึ่งตัวนำที่หุ้มฉนวน XLPE และลอกฉนวน XLPE เพื่อให้สามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ตัวนำของสายเคเบิลระหว่างการวัดได้ โดยสายเคเบิลที่เตรียมเพื่อทำการทดสอบแสดงดังต่อไปนี้

3.3.1 สายเคเบิลฉนวน XLPE ยาว 5m แบบไม่มีข้อต่อ

สายเคเบิลแบบไม่มีข้อต่อ ดังในรูปที่ 3.18 ใช้ในการศึกษาผลของวงจรวัดที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 3.15 สายเคเบิลฉนวน XLPE ยาว 5 m

3.3.2 สายเคเบิลฉนวน XLPE ยาว 5m แบบมีข้อต่อ

สายเคเบิลในกรณีนี้ออกแบบโดยใช้ข้อต่อแบบ Pre-molded joint เพื่อเชื่อมต่อระหว่างสองสายเข้ากัน ดังรูปที่ 3.16 กรณีนี้ใช้ในการศึกษาผลของวงจรวัดที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 3.16 สายเคเบิลฉนวน XLPE ยาว 5 m ที่มีข้อต่อ (Pre-molded joint)

3.3.3 สายเคเบิลฉนวน XLPE ยาว 3.5 m

สายเคเบิลความยาว 3.5m ดังรูปที่ 3.17 ใช้ในการศึกษาผลของความยาว



รูปที่ 3.17 สายเคเบิลฉนวน XLPE ยาว 3.5 m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4 สายเคเบิลฉนวน XLPE ยาว 2.5 m

สายเคเบิลความยาว 2.5m ดังแสดงในรูปที่ 3.18 ใช้ในการศึกษาผลของความยาว



รูปที่ 3.18 สายเคเบิลฉนวน XLPE ยาว 2.5 m

3.3.5 สายเคเบิลฉนวน XLPE ยาว 1.5 m

สายเคเบิลความยาว 1.5m ดังแสดงในรูปที่ 3.19 ใช้ในการศึกษาผลของความยาว



รูปที่ 3.19 สายเคเบิลฉนวน XLPE ยาว 1.5 m

3.3.6 สายเคเบิลฉนวน XLPE ยาว 0.5 m

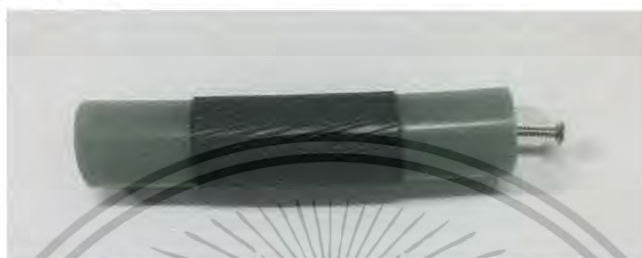
สายเคเบิลความยาว 0.5m ดังแสดงในรูปที่ 3.20 ใช้ในการศึกษาผลของความยาว



รูปที่ 3.20 สายเคเบิลฉนวน XLPE ยาว 0.5 m

3.3.7 สายเคเบิลฉนวน XLPE ยาว 15 cm

วิธีการเตรียมสายเคเบิลในกรณีนี้ ทำได้โดยตัดสายเคเบิลตามความยาว 15 cm จากนั้นปอกเปลือกนอกของสายเคเบิลออก เปิดพลาสติกที่หุ้ม Shield wires ต่อมานำ Shield wires ออกจากนั้นปอกสารกึ่งตัวนำที่หุ้มฉนวน XLPE ของทั้งสองข้าง ข้างละ 7 cm และเจาะนอตเข้าที่ตัวนำเพื่อให้สามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ตัวนำของสายเคเบิลระหว่างการวัดได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.21 และใช้เทปทองแดงพันรอบชั้นสารกึ่งตัวนำที่หุ้มฉนวน XLPE เพื่อเป็นกราวด์ของเคเบิล ใช้ในการศึกษาผลของความยาว และผลของอุณหภูมิ



รูปที่ 3.21 สายเคเบิลฉนวน XLPE ยาว 15 cm

3.4 สรุป

เนื้อหาในบทที่ 3 นี้ได้กล่าวถึงการออกแบบจำลองชุดทดสอบที่ใช้เพื่อศึกษาลักษณะกระแสโพลาริซ์และกระแสดีโพลาริซ์รวมถึง Dielectric Dissipation Factor (DDF) หรือ $\tan \delta$ ในสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE กรณีต่างๆ สำหรับรายละเอียดที่ได้อธิบายในบทนี้คือ การออกแบบการทดสอบ วงจรที่ใช้ในการทดสอบ อุปกรณ์ต่างๆ และการเตรียมสายเคเบิลฉนวน XLPE กรณีต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบ หลังจากออกแบบวงจรทดสอบและเตรียมสายเคเบิลแล้ว ในบทถัดไปจะนำเสนอขั้นตอนกระบวนการทดสอบและตัวแปรที่ใช้ในการทดสอบ

บทที่ 4

การทดสอบและประเมินผล

4.1 วิธีดำเนินการทดสอบ

การทดสอบกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันของสายเคเบิลฉนวน XLPE จะทำการป้อนแรงดันกระแสตรงให้สายเคเบิลตามแรงดันทดสอบและเวลาที่กำหนด จากนั้นทำการวัดกระแสโพลาริเซชัน กระแสดีโพลาริเซชัน และค่า $\tan\delta$ โดยเครื่องทดสอบ PDC Analyser และนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบและวิเคราะห์ต่อไป ซึ่งจะมีเงื่อนไขการทดสอบ และขั้นตอนในการทดสอบดังนี้

4.1.1 เงื่อนไขการทดสอบกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน

ในการทดสอบกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันจะทำการกำหนดเงื่อนไขการทดสอบเพื่อศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่อาจส่งผลต่อการวัด ซึ่งจะแบ่งการศึกษาออกเป็น การศึกษาผลของวงจรวัดและแรงดันทดสอบ การศึกษาผลของความยาวสายเคเบิล และการศึกษาผลของอุณหภูมิ โดยในตารางที่ 4.1 – ตารางที่ 4.3 แสดงปัจจัยที่ควบคุมในการดำเนินการทดสอบในแต่ละกรณีเพื่อให้ง่ายต่อความเข้าใจ

ตารางที่ 4.1 การศึกษาผลของวงจรวัดและแรงดันทดสอบ

การศึกษาผลของวงจรวัด	เงื่อนไขการทดสอบ			
สายเคเบิล	สายเคเบิลแรงสูงฉนวน XLPE พิกัด 12/20(24) kV พื้นที่หน้าตัด 240 mm ² ยาว 5 m			
แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง	250 V 500 V 750 V และ 1000 V			
กรณีของสายเคเบิล	ไม่มีข้อต่อ		มีข้อต่อ (Pre-molded joint)	
วงจรวัดที่ใช้ทดสอบ	ไม่ใช่ Phantom (วงจรวัดทดสอบ 1)	ใช้ Phantom (วงจรวัดทดสอบ 2)	ไม่ใช่ Phantom (วงจรวัดทดสอบ 1)	ใช้ Phantom (วงจรวัดทดสอบ 2)
เวลาในการวัด กระแสโพลาริเซชัน	100 วินาที		1000 วินาที	
เวลาในการวัด กระแสดีโพลาริเซชัน	100 วินาที		1000 วินาที	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 การศึกษาผลของความยาวสายเคเบิล

การศึกษาผลของความยาว	เงื่อนไขการทดสอบ				
สายเคเบิล	สายเคเบิลแรงสูงฉนวน XLPE พิกัด 12/20(24) kV พื้นที่หน้าตัด 240 mm ²				
แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง	400 V				
ความยาวสายเคเบิล	0.15 m	0.5 m	1.5 m	2.5 m	3.5 m
เวลาในการวัดกระแสโพลาริเซชัน	100 วินาที				
เวลาในการวัดกระแสดีโพลาริเซชัน	100 วินาที				

ตารางที่ 4.3 การศึกษาผลของอุณหภูมิ

การศึกษาผลของอุณหภูมิ	เงื่อนไขการทดสอบ				
สายเคเบิล	สายเคเบิลแรงสูงฉนวน XLPE พิกัด 12/20(24) kV พื้นที่หน้าตัด 240 mm ² ยาว 15 cm				
แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง	400 V				
อุณหภูมิในกล่องอะคริลิก	30°C	50°C	70°C	90°C	
เวลาในการวัดกระแสโพลาริเซชัน	100 วินาที				
เวลาในการวัดกระแสดีโพลาริเซชัน	100 วินาที				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 ขั้นตอนการทดสอบ

หลังจากที่เตรียมวงจรการทดสอบและสายเคเบิลที่ใช้ทดสอบเรียบร้อยแล้ว ต่อมาจะทำการวัด ซึ่งจะมี 3 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

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

2. Control Measurement วัดคุณสมบัติของขั้นตอนนี้เพื่อตรวจสอบขนาดกระแสและค่าความจุ ซึ่งทำได้โดยวัดกระแสดีโพลาริเซชันโดยป้อนแรงดัน 100 V เป็นเวลา 5 วินาที จากนั้นวัดกระแสดีโพลาริเซชันจนขนาดกระแสลดลงถึงกระแสคงเหลือ (Remaining Current) ใน Initial Measurement

3. Main Measurement ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนการวัดค่าจริงตามค่าตัวแปรต่างๆ ที่กำหนดของแต่ละกรณีศึกษา โดยจะทำการป้อนแรงดันและเวลาวัดเพื่อวัดกระแสดีโพลาริเซชันเมื่อครบเวลาการวัดกระแสดีโพลาริเซชันที่ตั้งไว้แล้ว เครื่อง PDC Analyser จะหยุดจ่ายแรงดัน และวัดกระแสดีโพลาริเซชันตามเวลาที่กำหนด โดยเวลาที่ตั้งต้องทำให้กระแสดีโพลาริเซชันลดลงจนถึงระดับเดียวกับกระแสคงเหลือ (Remaining Current) ในขั้น Initial Measurement

4.2 สรุป

เนื้อหาในบทที่ 4 นี้ได้กล่าวถึงเงื่อนไขการทดสอบ และขั้นตอนการทดสอบวัดกระแสดีโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันในสายเคเบิลฉนวน XLPE เมื่อดำเนินการทดสอบตามเงื่อนไขที่กำหนดเรียบร้อยแล้ว จะนำผลที่ได้จากเครื่องทดสอบ PDC Analyser มาพล็อตกราฟและเปรียบเทียบ โดยจะกล่าวในบทที่ 5 ต่อไป

บทที่ 5

ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

5.1 กล่าวนำ

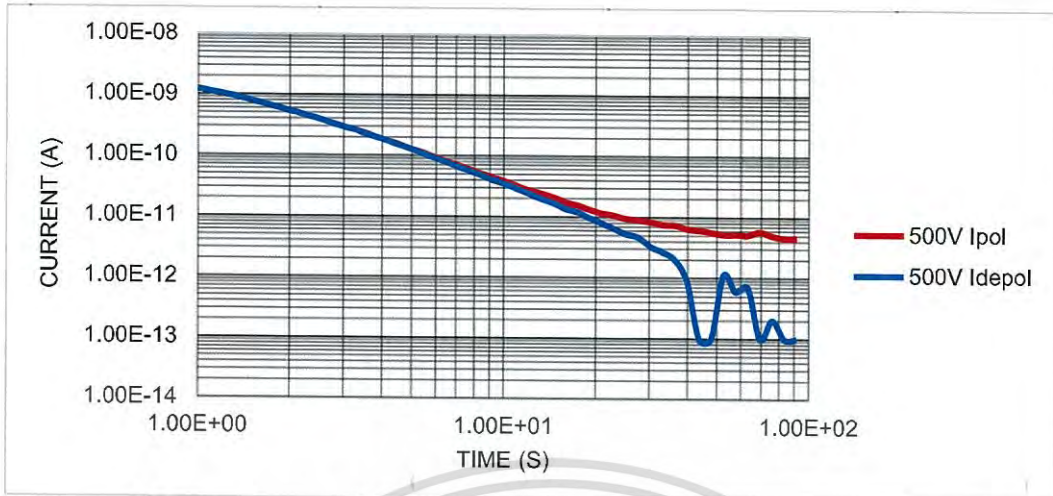
จากบทที่กล่าวมาข้างต้น ผู้วิจัยได้กล่าวถึงการศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบและการคำนวณในเรื่องของกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันของสายเคเบิลฉนวน XLPE ที่ได้จากการทดสอบ PDC แล้ว ในบทนี้จะกล่าวถึงผลของการทดสอบที่ได้จากการทดสอบ PDC วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของค่ากระแสโพลาริเซชัน กระแสดีโพลาริเซชัน ค่าความสูญเสีย(Loss factor) และผลของกรณีศึกษาต่างๆที่ได้ออกแบบไว้ซึ่งได้กล่าวไว้ในบทที่ 3

5.2 ผลการทดสอบ

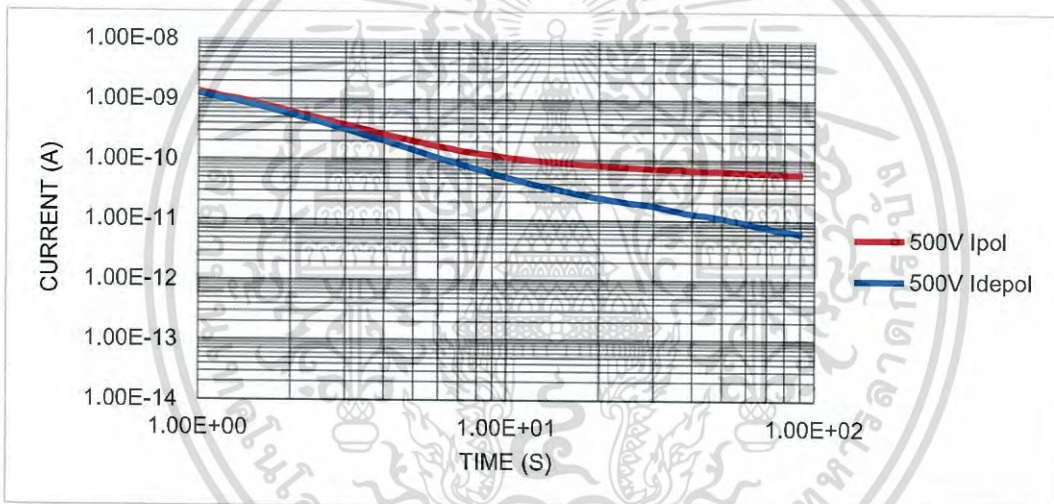
5.2.1 ศึกษาผลของการเปลี่ยนแรงดันทดสอบในวงจรทดสอบ

5.2.1.1 กรณีศึกษาที่ 1 สายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE ที่ไม่มีข้อต่อ Pre-molded joint

การทดสอบจะได้ผลของกราฟกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันจากวงจรทดสอบที่ 1 และ วงจรทดสอบที่ 2 ที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 เป็นกราฟที่พลอตค่ากระแสในความสัมพันธ์เชิงเวลา ผลที่ได้ในวงจรทดสอบที่ 1 ซึ่งแสดงผลในรูปที่ 5.1 พบว่าในช่วงเวลาเริ่มต้นค่ากระแสทั้งโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันมีค่าใกล้เคียง ที่เวลาประมาณ 10 วินาที กราฟกระแสดีโพลาริเซชันเริ่มห่างออกจากกระแสโพลาริเซชันเนื่องจากผลของกระแสคอนดักชัน และในช่วงท้ายที่กระแสดีโพลาริเซชันเริ่มมีความแปรปรวนอันเนื่องมาจากผลของกระแสที่ลงมาสัมผัสค่ากระแสที่คงเหลืออยู่ อันเนื่องมาจากผลของประจุค้างในสายเคเบิลใต้ดินอยู่ที่ประมาณ 13.5 pA ทำให้ไม่สามารถนำค่าดังกล่าวที่ได้ไปวิเคราะห์ต่อไปได้ และผลที่ได้ในวงจรทดสอบที่ 2 ซึ่งแสดงผลในรูปที่ 5.2 พบว่าในช่วงเริ่มต้นค่ากระแสทั้งกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันมีค่าใกล้เคียง กราฟกระแสดีโพลาริเซชันเริ่มห่างออกจากกระแสโพลาริเซชันเนื่องจากผลของกระแสคอนดักชันและกราฟที่ได้ยังคงเป็นเส้นตรง

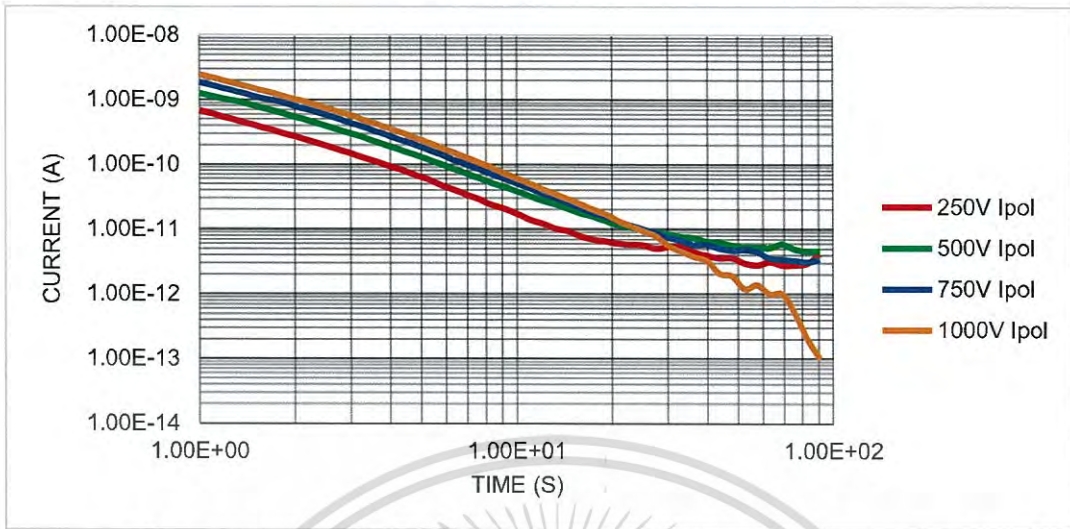


รูปที่ 5.1 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่ไม่มีข้อต่อ Pre-molded joint กราฟกระแสโพลาริเซชัน และกระแสดีโพลาริเซชันที่ได้จากวงจรทดสอบที่ 1

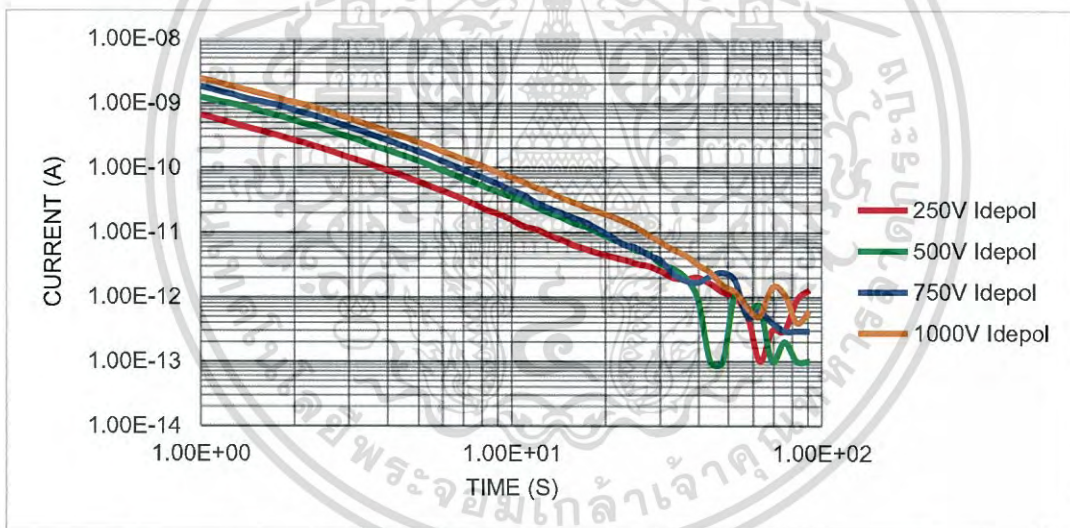


รูปที่ 5.2 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่ไม่มีข้อต่อ Pre-molded joint กราฟกระแสโพลาริเซชัน และกระแสดีโพลาริเซชันที่ได้จากวงจรทดสอบที่ 2

เปรียบเทียบผลของการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันใช้แรงดันทดสอบหลายระดับ คือ 250V 500V 750V และ 1000V ที่ได้จากการวัดในวงจรทดสอบที่ 1 ซึ่งได้ผลแสดงดังในรูปที่ 5.3-5.5 พบว่ากราฟกระแสทั้งโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันมีค่าแปรเปลี่ยนไปตามระดับแรงดันทดสอบที่เพิ่มขึ้นที่เห็นในช่วงต้นของกราฟและในช่วงท้ายผลที่ได้นั้นมีความผิดพลาดอันเนื่องมาจากเครื่องมือวัดจึงทำให้ได้ผลลัพธ์ที่ไม่เหมาะสมที่จะนำไปวิเคราะห์ต่อไป เป็นข้อจำกัดของเครื่องมือวัดที่จะวัดกระแสต่ำๆ ได้ไม่ถูกต้อง

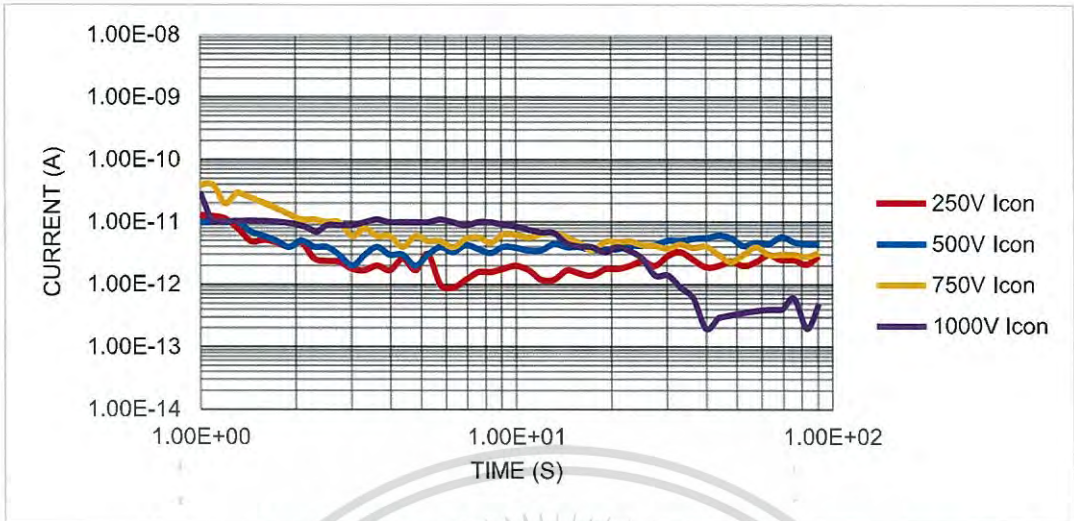


รูปที่ 5.3 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่ไม่มีข้อต่อ Pre-molded joint กราฟกระแสโพลาริเซชันที่ได้จากวงจรทดสอบที่ 1 ที่ศึกษาผลของแรงดันทดสอบ



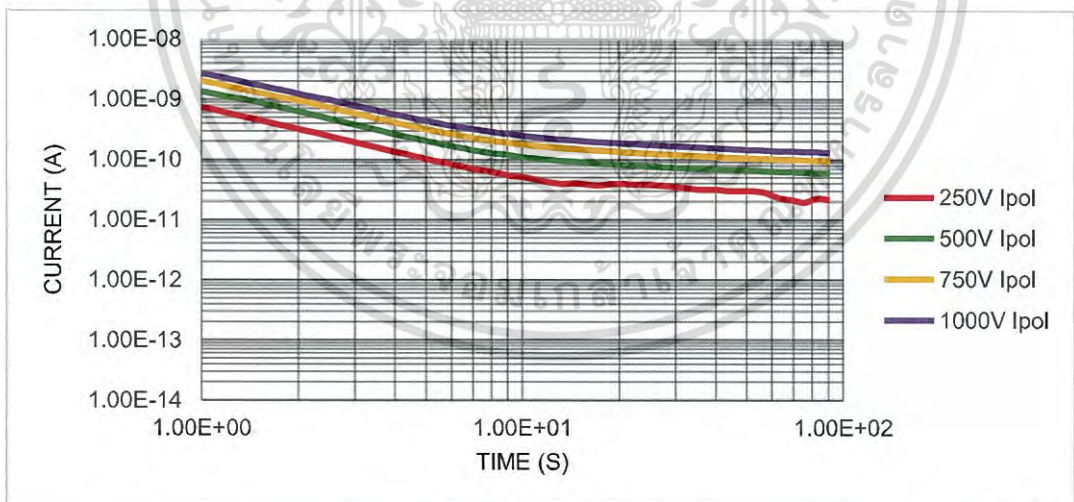
รูปที่ 5.4 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่ไม่มีข้อต่อ Pre-molded joint กราฟกระแสดีโพลาริเซชันที่ได้จากวงจรทดสอบที่ 1 ที่ศึกษาผลของแรงดันทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

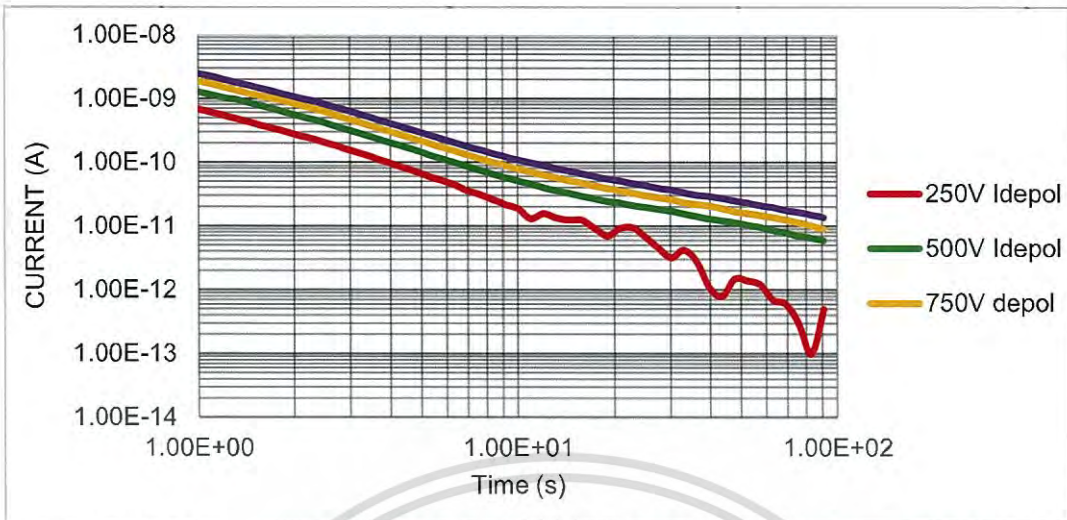


รูปที่ 5.5 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่ไม่มีข้อต่อ Pre-molded joint กราฟกระแสคอนดักชันที่ได้จากวงจรทดสอบที่ 1 ที่ศึกษาผลของแรงดันทดสอบ

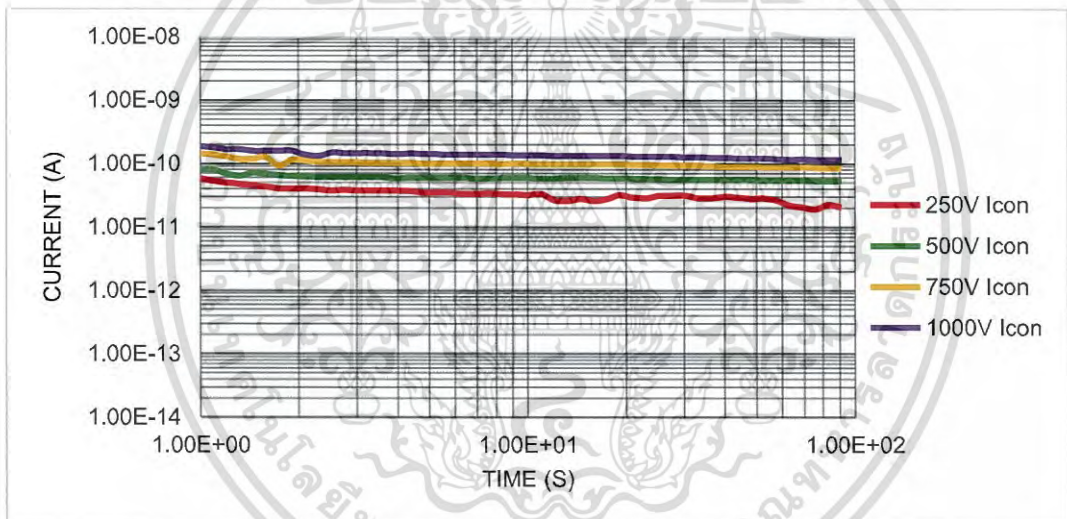
เปรียบเทียบผลของการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันที่ใช้แรงดันทดสอบหลายระดับ คือ 250V 500V 750V และ 1000V ที่ได้จากการวัดในวงจรทดสอบที่ 2 ซึ่งได้ผลดังแสดงในรูปที่ 5.6-5.8 พบว่ากราฟกระแสทั้งโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันมีค่าแปรเปลี่ยนไปตามระดับแรงดันทดสอบที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 5.6 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่ไม่มีข้อต่อ Pre-molded joint กราฟกระแสโพลาริเซชันที่ได้จากวงจรทดสอบที่ 2 ที่ศึกษาผลของแรงดันทดสอบ

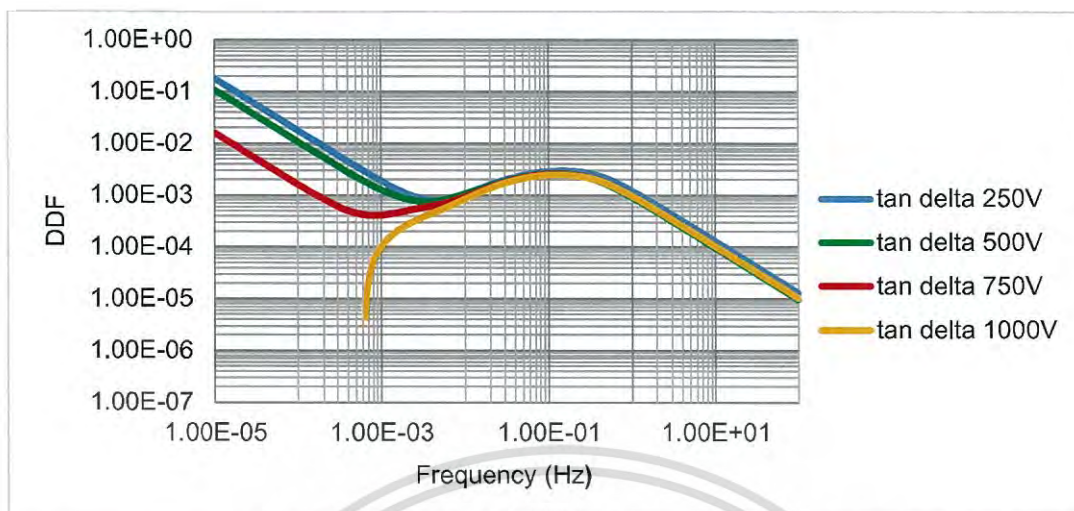


รูปที่ 5.7 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่ไม่มีข้อต่อ Pre-molded joint กราฟกระแสดีโพลไรเซชันที่ได้จากวงจรทดสอบที่ 2 ที่ศึกษาผลของแรงดันทดสอบ

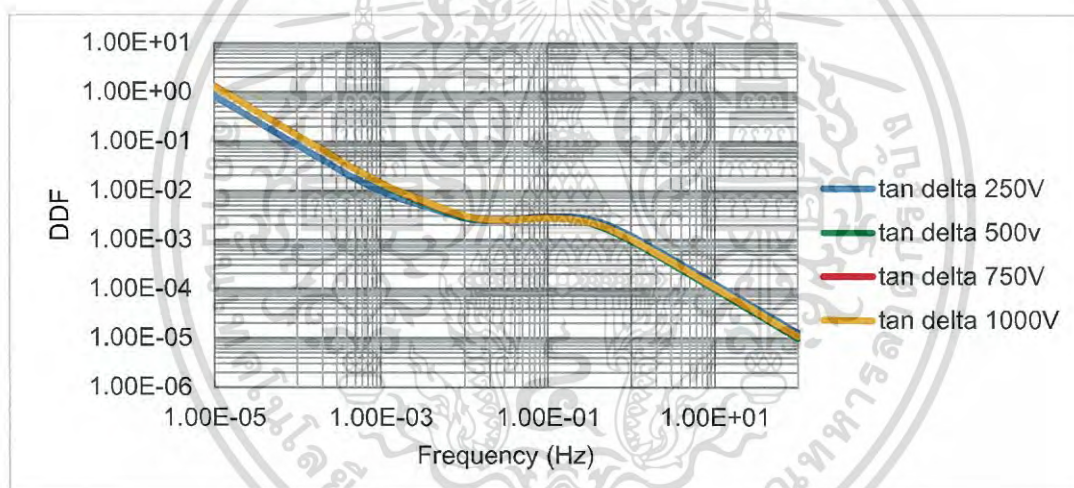


รูปที่ 5.8 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่ไม่มีข้อต่อ Pre-molded joint กราฟกระแสคอนดักชันที่ได้จากวงจรทดสอบที่ 2 ที่ศึกษาผลของแรงดันทดสอบ

วิเคราะห์ค่า Dielectric Dissipation Factor (DDF) หรือค่าความสูญเสีย loss factor ($\tan \delta$) จากผลของการเปลี่ยนแปลงแรงดันทดสอบที่ได้จากวงจรทดสอบที่ 1 เป็นกราฟในความสัมพันธ์เชิงความถี่แสดงดังรูปที่ 5.9 และได้จากวงจรที่ 2 แสดงดังรูปที่ 5.10 จากผลที่ได้พบว่าวงจรที่ 1 ค่า DDF มีความแปรเปลี่ยนไปตามระดับแรงดันทดสอบที่ใช้และผลที่ได้มีความผิดพลาดอันเนื่องมาจากเครื่องมือจึงวงจรที่ 1 ในกราฟกระแสโพลไรเซชันที่กล่าวไว้ข้างต้นจึงทำให้ได้ค่าที่ไม่ผิดพลาด และผลที่ได้จากวงจรทดสอบที่ 2 ค่า DDF มีค่าใกล้เคียงกันที่แรงดันทดสอบที่แตกต่างกัน

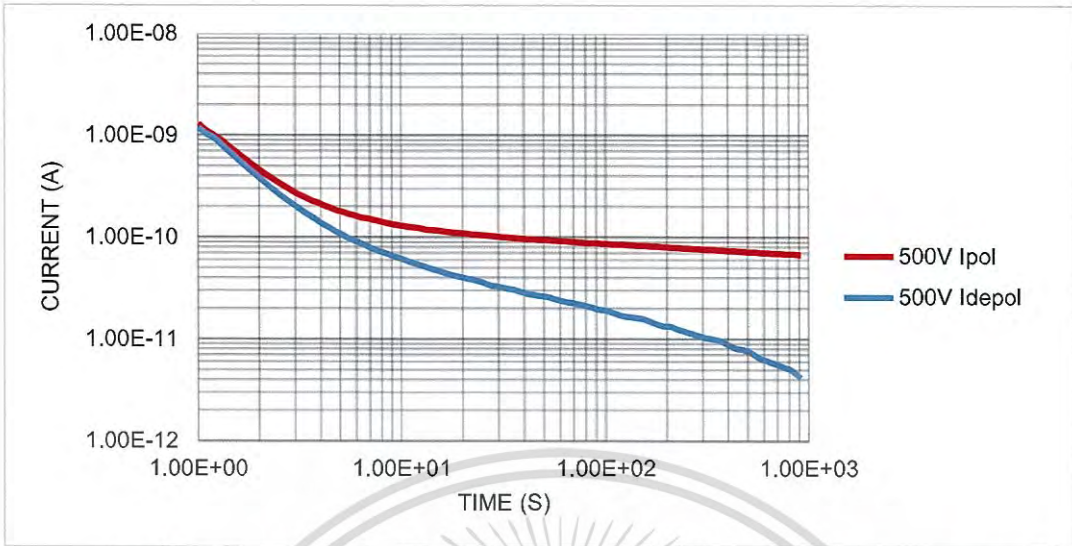


รูปที่ 5.9 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่ไม่มีข้อต่อ Pre-molded joint กราฟแสดงค่าความสูญเสียที่ได้จากวงจรถดสอบที่ 1 ที่ศึกษาผลของแรงดันทดสอบ

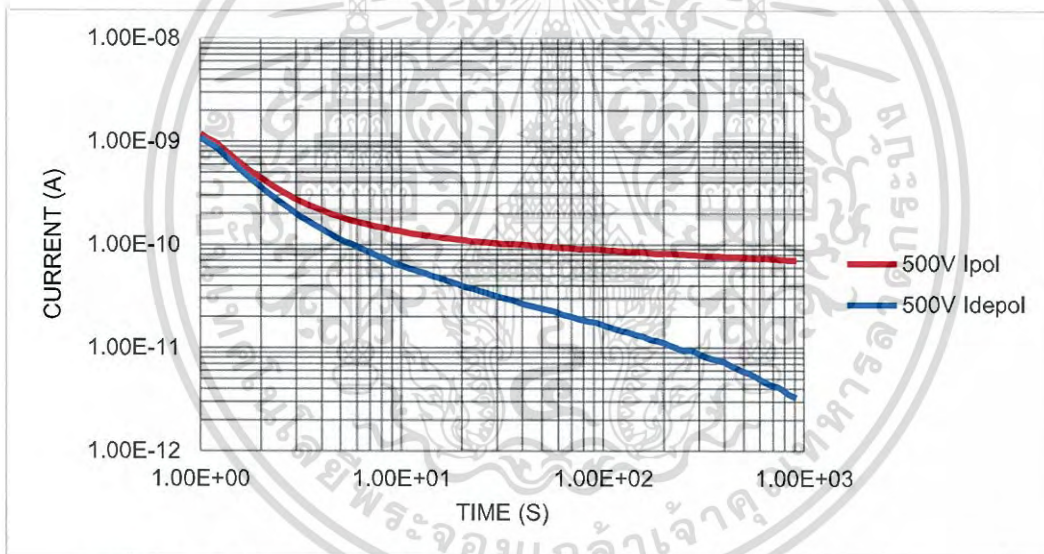


รูปที่ 5.10 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่ไม่มีข้อต่อ Pre-molded joint กราฟแสดงค่าความสูญเสียที่ได้จากวงจรถดสอบที่ 2 ที่ศึกษาผลของแรงดันทดสอบ

5.2.1.2 กรณีศึกษาที่ 2 สายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE ที่มีข้อต่อ Pre-molded joint การทดสอบจะได้ผลของกราฟกระแสโพลาร์ไรเซชันและกระแสดีโพลาร์ไรเซชันจากวงจรถดสอบที่ (วงจรถดสอบที่) 1 และวงจรถดสอบที่ (วงจรถดสอบที่) 2 ที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 ซึ่งได้ผลแสดงดังกราฟในรูปที่ 5.11-5.12 โดยพบว่าผลที่ได้ในวงจรถดสอบทั้งสองมีความคล้ายคลึงกัน



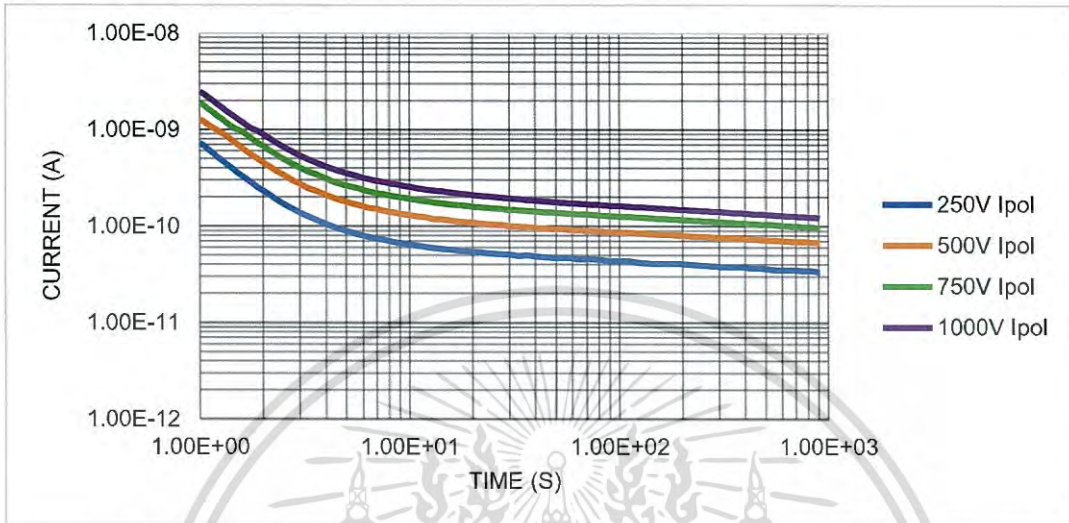
รูปที่ 5.11 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อต่อ Pre-molded joint กราฟกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันที่ได้จากวงจรทดสอบที่ 1



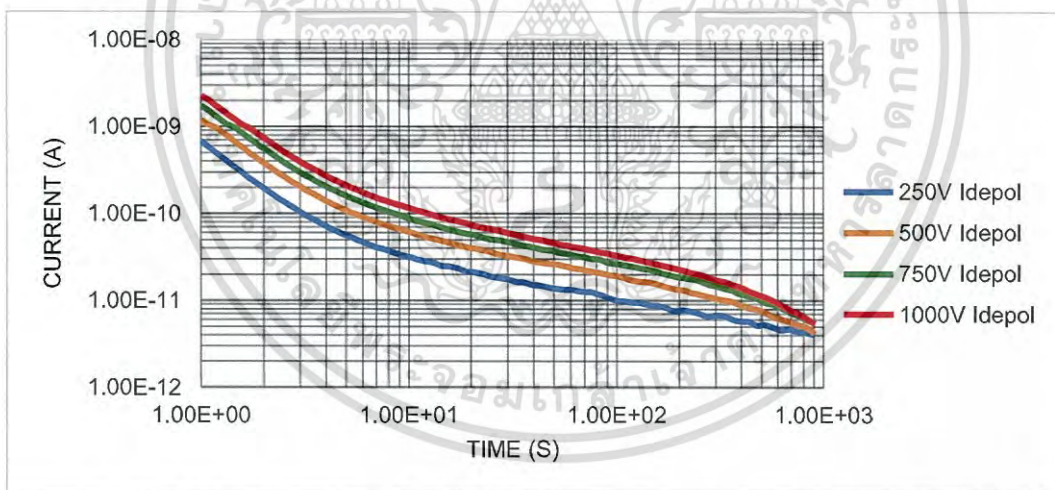
รูปที่ 5.12 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อต่อ Pre-molded joint กราฟกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันที่ได้จากวงจรทดสอบที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปรียบเทียบผลของการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันใช้แรงดันทดสอบหลายระดับ คือ 250V 500V 750V และ 1000V ที่ได้จากการวัดในวงจรทดสอบที่ 1 และวงจรทดสอบที่ 2 ซึ่งได้ผลดังแสดงในรูปที่ 5.13-5.18 พบว่ากราฟกระแสทั้งโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันมีค่าแปรเปลี่ยนไปตามระดับแรงดันทดสอบที่เพิ่มขึ้น

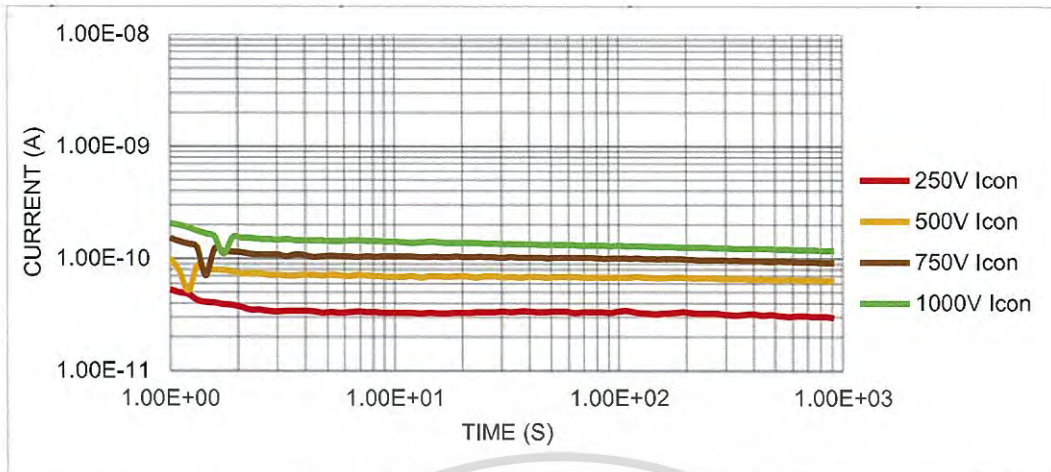


รูปที่ 5.13 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อต่อ Pre-molded joint กราฟกระแสโพลาริเซชันที่ได้จากวงจรทดสอบที่ 1 ที่ศึกษาผลของแรงดันทดสอบ

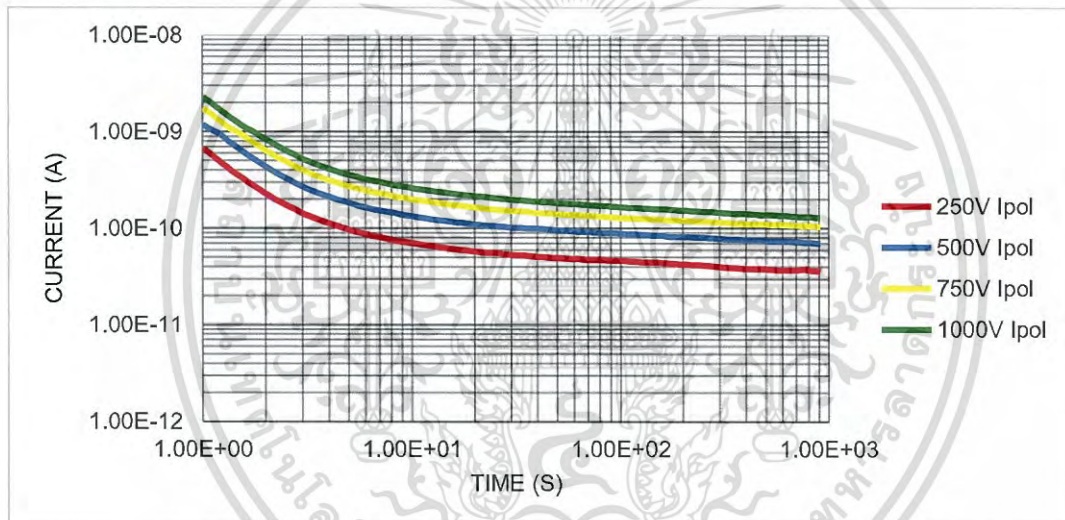


รูปที่ 5.14 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อต่อ Pre-molded joint กราฟกระแสดีโพลาริเซชันที่ได้จากวงจรทดสอบที่ 1 ที่ศึกษาผลของแรงดันทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

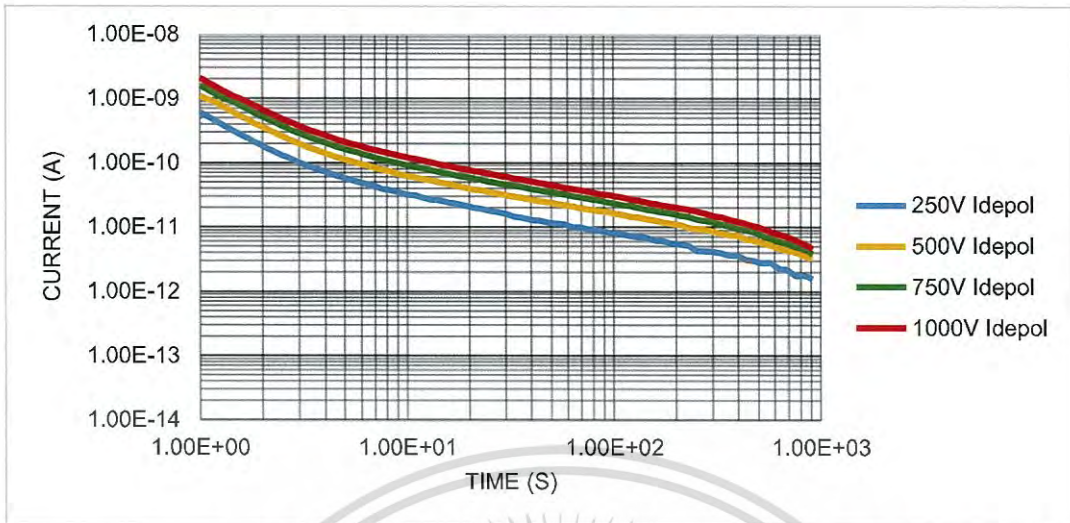


รูปที่ 5.15 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อต่อ Pre-molded joint กราฟกระแสคอนดักชั่น
ที่ได้จากวงจรทดสอบที่ 1 ที่ศึกษาผลของแรงดันทดสอบ

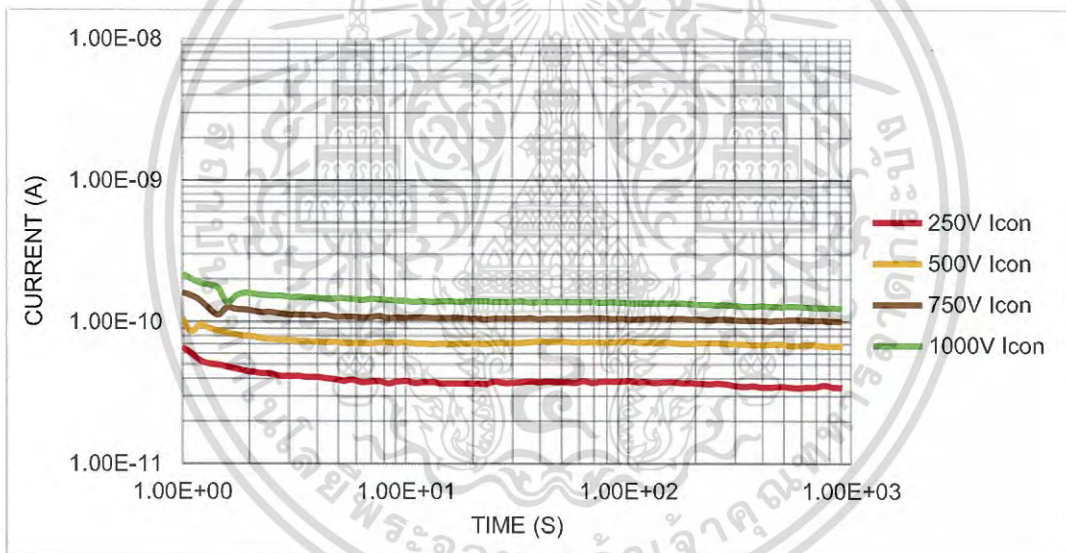


รูปที่ 5.16 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อต่อ Pre-molded joint กราฟกระแสโพลาริเซชัน
ที่ได้จากวงจรทดสอบที่ 2 ที่ศึกษาผลของแรงดันทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

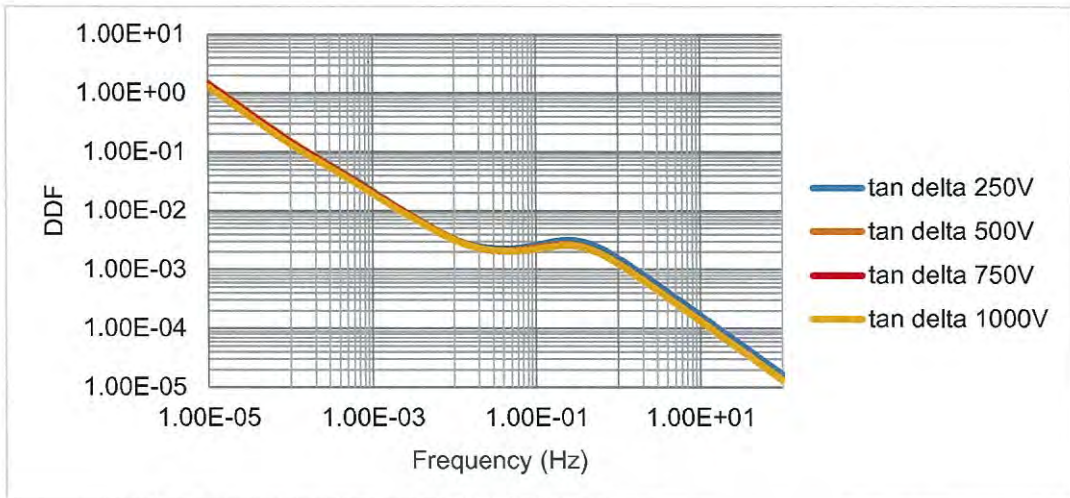


รูปที่ 5.17 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อต่อ Pre-molded joint กราฟกระแสดีโพลาร์เซชันที่ได้จากวงจรถดสอบที่ 2 ที่ศึกษาผลของแรงดันทดสอบ

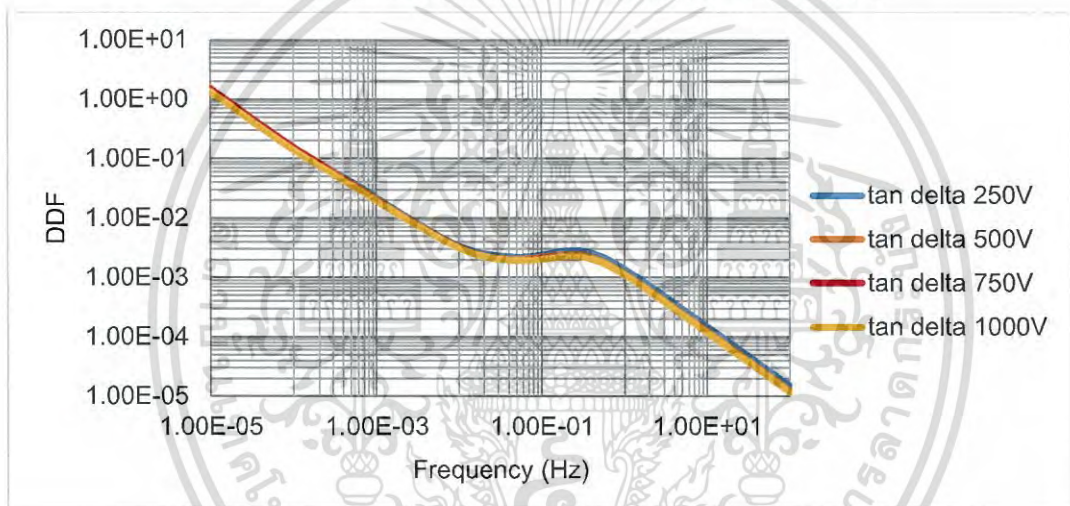


รูปที่ 5.18 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อต่อ Pre-molded joint กราฟกระแสคอนดักชันที่ได้จากวงจรถดสอบที่ 2 ที่ศึกษาผลของแรงดันทดสอบ

วิเคราะห์ค่า DDF จากวงจรถดสอบที่ 1 และวงจรถดสอบที่ 2 จากการเปลี่ยนแปลงแรงดันทดสอบ แสดงในรูปที่ 5.19-5.20 พบว่าค่า DDF ที่ได้ในวงจรถดสอบทั้งสองมีความคล้ายคลึงกันและมีค่าใกล้เคียงในระดับแรงดันที่แตกต่างกัน



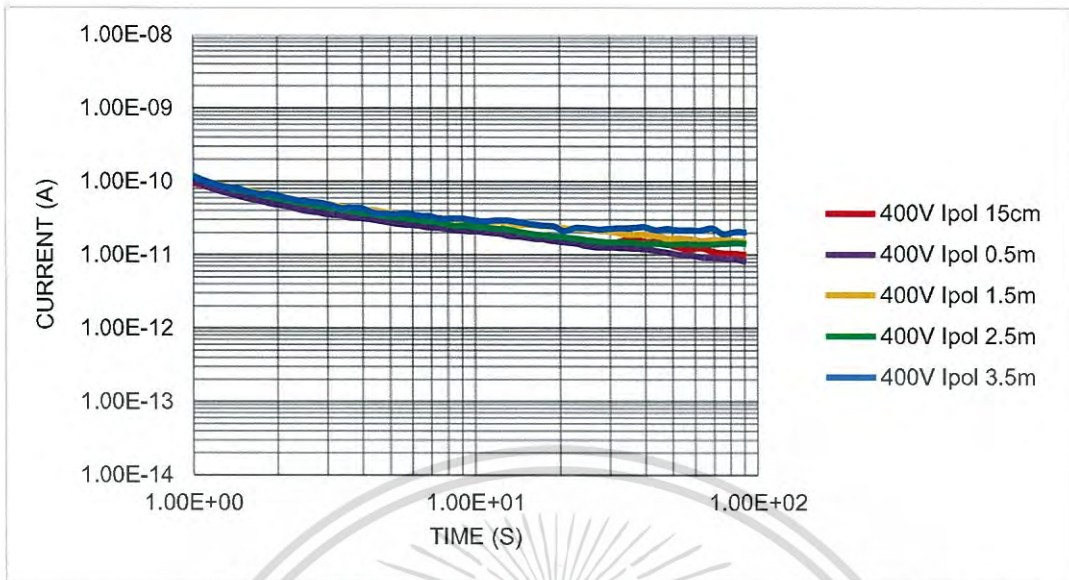
รูปที่ 5.19 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อต่อ Pre-molded joint กราฟแสดงค่าความสูญเสียที่ได้จากวงจรทดสอบที่ 1 ที่ศึกษามลของแรงดันทดสอบ



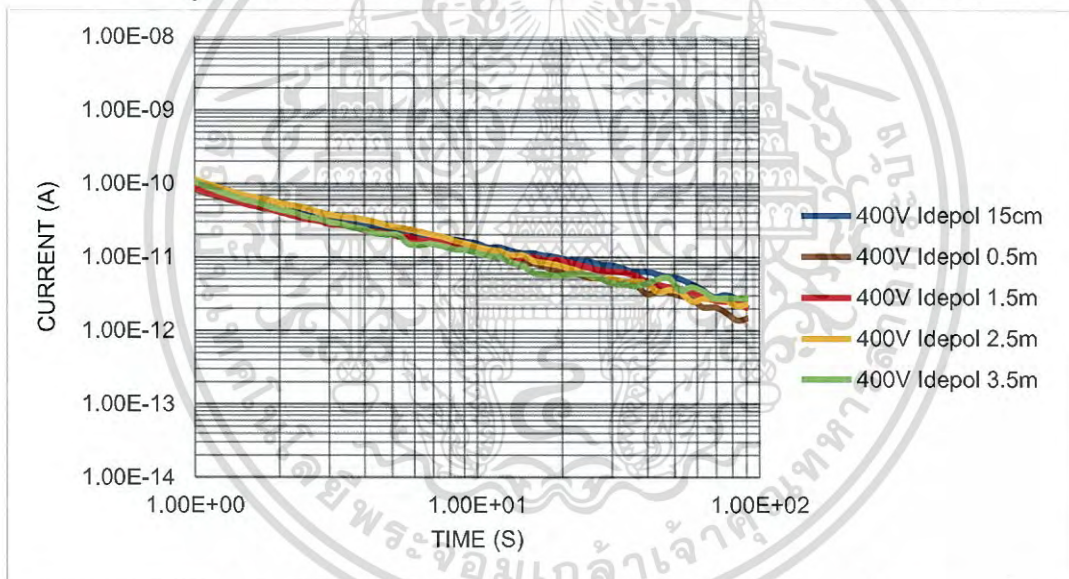
รูปที่ 5.20 กรณีสายเคเบิลใต้ดินที่มีข้อต่อ Pre-molded joint กราฟค่าความสูญเสียที่ได้จากวงจรทดสอบที่ 2 ที่ศึกษามลของแรงดันทดสอบ

5.2.2 ศึกษาผลของความยาวของสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE

เพื่อศึกษามลของกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันที่สายเคเบิลใต้ดินที่มีความยาวแตกต่างกัน คือ 15cm 0.5m 1.5m 2.5m และ 3.5m ดังแสดงผลในรูปที่ 5.21 ถึง 5.23 พบว่าค่ากระแสทั้งโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันในช่วงเริ่มต้นมีค่าไม่เท่ากันแต่ในช่วงท้ายกราฟกระแสลดลงมาถึงในระดับที่ใกล้เคียงกัน

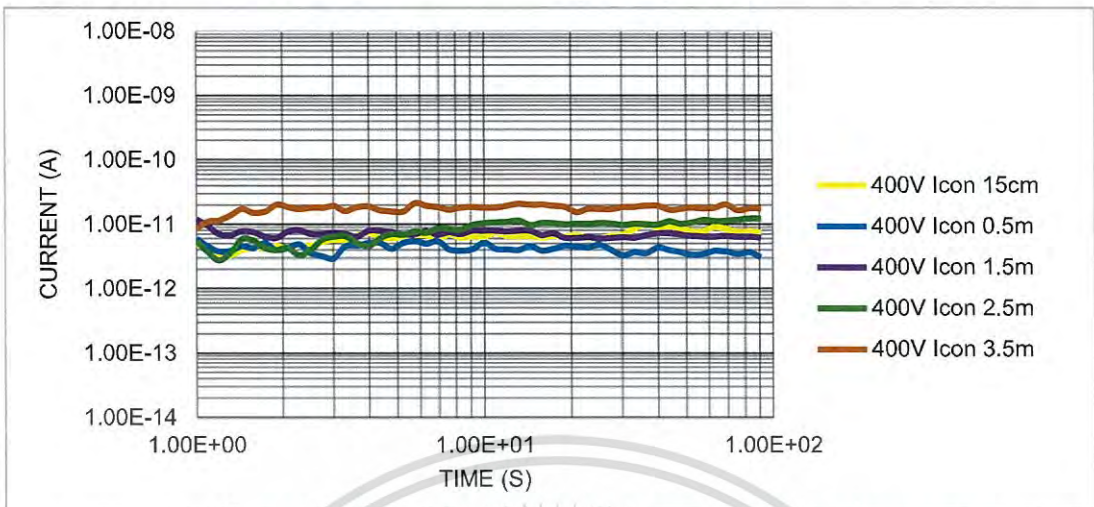


รูปที่ 5.21 กราฟกระแสโพลาริเซชัน ที่ศึกษาผลของความยาวที่แตกต่างกัน



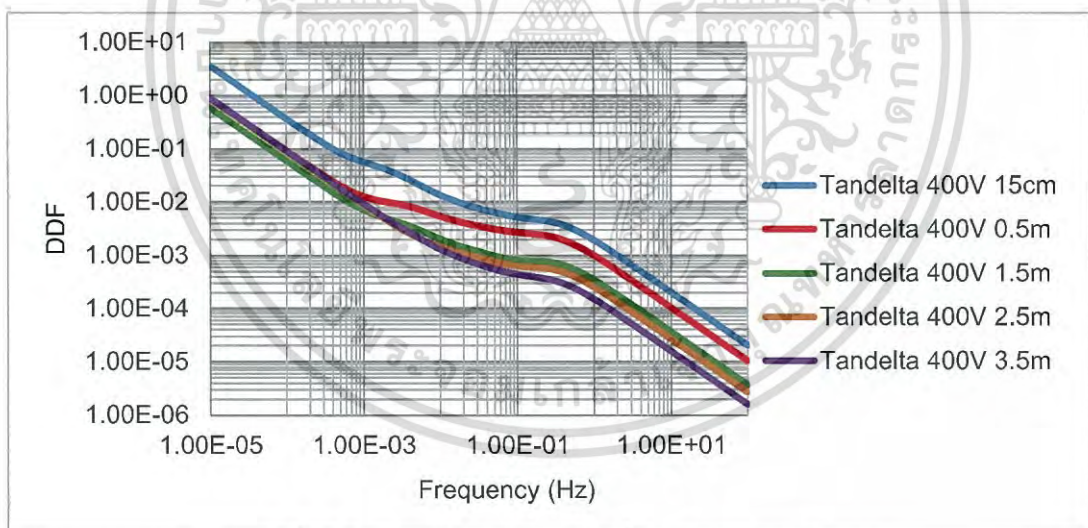
รูปที่ 5.22 กราฟกระแสดีโพลาริเซชัน ที่ศึกษาผลของความยาวที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.23 กราฟกระแสคอดักชั้น ที่ศึกษาผลของความยาวที่แตกต่างกัน

วิเคราะห์ค่า DDF ของสายเคเบิลใต้ดินที่มีความยาวต่างกัน ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 5.24 พบว่าในทุกย่านความถี่ค่าความสูญเสียมีค่าน้อยลงตามความยาวสายที่เพิ่มมากขึ้นตามลำดับ

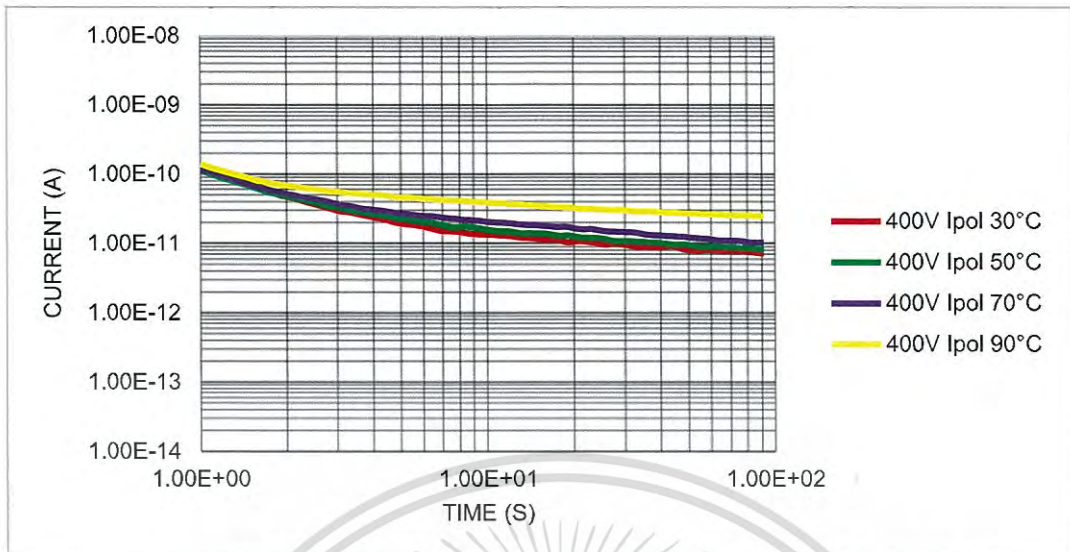


รูปที่ 5.24 กราฟค่าความสูญเสีย ที่ศึกษาผลของแรงดันทดสอบ

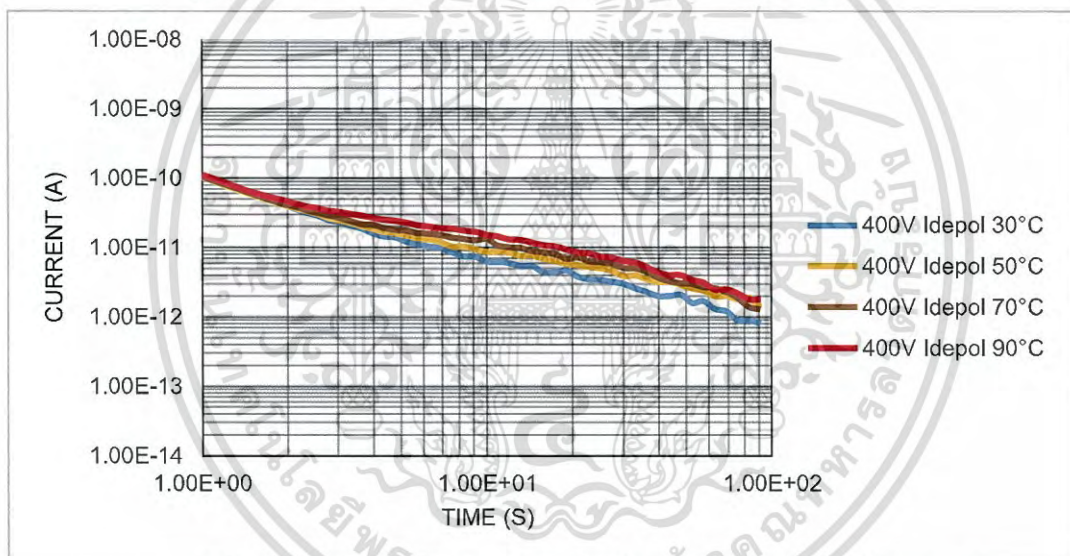
5.2.3 ศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE

เพื่อศึกษาผลของกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันที่สายเคเบิลที่มีความยาว 15cm ทดสอบที่ในกล่องควบคุมอุณหภูมิที่แตกต่างกันคือ 30°C 50°C 70°C และ 90°C ดังแสดงในรูปที่ 5.25 ถึง 5.27 พบว่ากราฟกระแสดีโพลาริเซชันและกระแสคอดักชั้นมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง ส่งผลทำให้กราฟกระแสโพลาริเซชันยกตัวสูงขึ้นตามความสัมพันธ์ที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

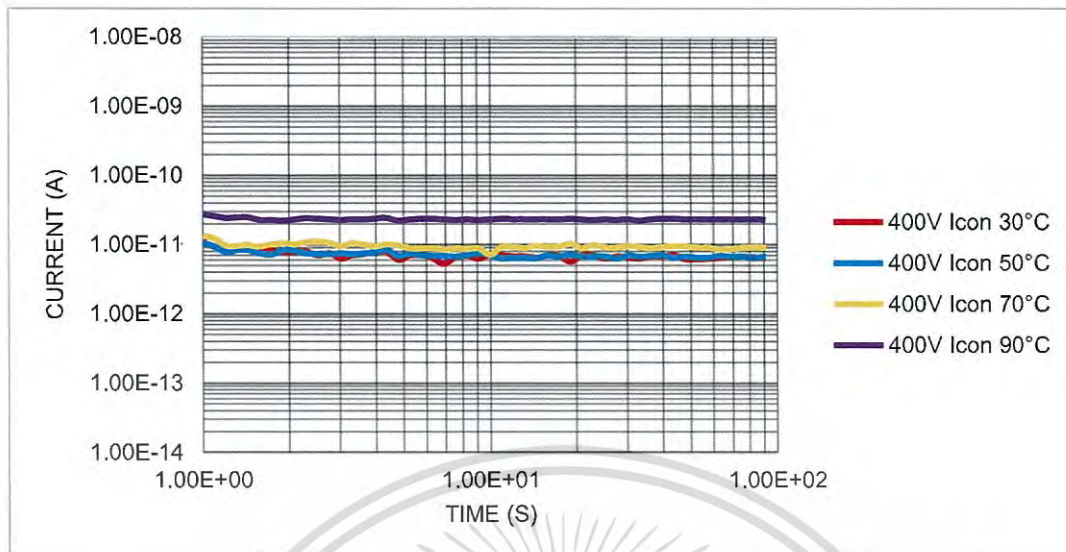


รูปที่ 5.25 กราฟกระแสโพลาริเซชัน ที่ศึกษาผลของอุณหภูมิที่แตกต่างกัน



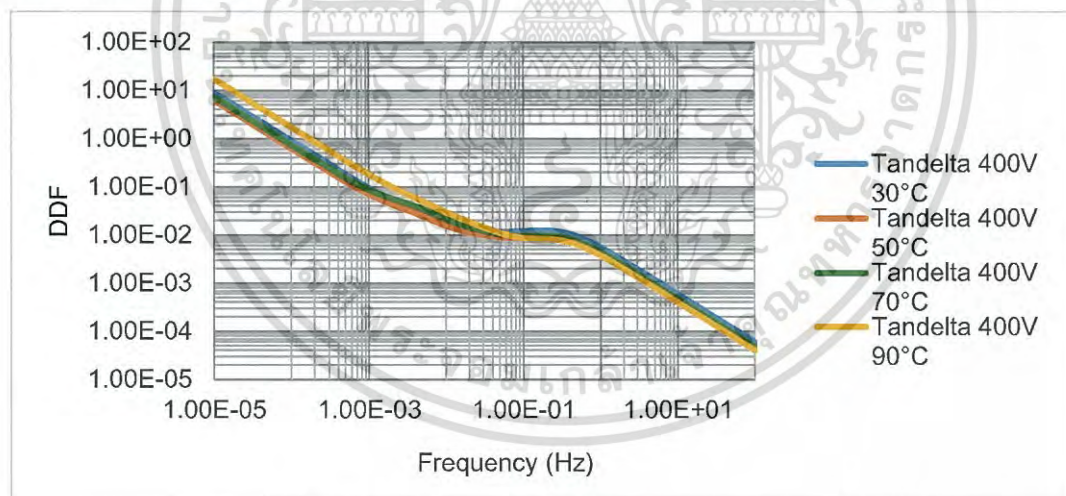
รูปที่ 5.26 กราฟกระแสดีโพลาริเซชัน ที่ศึกษาผลของอุณหภูมิที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.27 กราฟกระแสคอนดักชัน ที่ศึกษาผลของอุณหภูมิที่แตกต่างกัน

วิเคราะห์ค่า DDF ที่แสดงผลดังในรูปที่ 5.28 พบว่าที่ย่านความถี่ต่ำที่น้อยกว่า $0.1Hz$ ค่า DDF ที่อุณหภูมิ $30^{\circ}C$ $50^{\circ}C$ $70^{\circ}C$ มีค่าใกล้เคียงกัน แต่ที่อุณหภูมิ $90^{\circ}C$ ค่าความสูญเสียมีค่าสูงกว่าค่าอื่นๆ และในย่านความถี่ที่มากกว่า $0.1Hz$ ค่า DDF มีค่าใกล้เคียงกันในทุกค่าอุณหภูมิ



รูปที่ 5.28 กราฟค่าความสูญเสีย ที่ศึกษาผลของอุณหภูมิที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 สรุป

เนื้อหาในบทที่ 5 ได้กล่าวถึงผลกราฟที่ได้จากการทดสอบเพื่อดูกระแสโพลาริเซชันและกระแสตีโพลาริเซชันในสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE ที่ได้ออกแบบจำลองผลที่ส่งผลต่อการวัดกระแสในชุดทดสอบ และเปรียบเทียบจำลองปัญหาเพื่อนำไปวิเคราะห์ ซึ่งจะได้ว่า ในการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสตีโพลาริเซชันนั้นมีการสองแบบของวงจรการวัดทดสอบที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 พบว่า ถ้าต้องการวัดที่ขนาดกระแสต่ำๆ วงจรในการวัดที่ 2 ที่มีอุปกรณ์เสริมนั้นให้ผลการวัดที่ถูกต้องกว่าวงจรในการวัดแบบที่ 1 กราฟกระแสที่ได้แปรผันโดยตรงตามระดับแรงดันทดสอบที่เพิ่มขึ้น และค่าความสูญเสีย (DDF) ที่ได้ควรมีค่าเท่ากันหรือใกล้เคียงกันคือระดับแรงดันทดสอบไม่มีผลต่อค่าความสูญเสีย กรณีศึกษาผลของความยาวสายเคเบิลพบว่าไม่มีผลต่อค่ากระแสทั้งโพลาริเซชันและกระแสตีโพลาริเซชันซึ่งได้ผลของการกราฟมีการลดลงมาถึงในระดับที่ใกล้เคียงกัน กรณีศึกษาผลของอุณหภูมิกับการวัดพบว่ากระแสโพลาริเซชันมีค่าเพิ่มขึ้นไปตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากกระแสคอนดักชันและกระแสตีโพลาริเซชันแปรเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุป

ในปัจจุบันสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE ได้รับความนิยมมากขึ้นในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า เพราะสามารถทนความเครียดทางสนามไฟฟ้าได้สูง มีค่าความสูญเสียที่ต่ำ และทนทานต่อแรงทางกลได้ดี โดยสาเหตุความเสียหายในสายเคเบิลใต้ดินมักเกิดขึ้นที่ฉนวน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการทดสอบเพื่อตรวจสอบคุณภาพของฉนวนด้วยการทดสอบแบบวินิจัยแบบไม่ทำลายเพื่อเป็นการป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหายต่อระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเพิ่มความน่าเชื่อถือ ซึ่งในโครงการวิจัยนี้ได้ศึกษาเรื่องปัจจัยที่มีผลต่อการวัดการทดสอบกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน (PDC) ในสายเคเบิลใต้ดิน โดยศึกษาผลที่ได้จากชุดทดสอบ PDC ที่สามารถวัดกระแสโพลาริเซชัน กระแสดีโพลาริเซชัน และค่าเฟคเตอร์ความสูญเสีย ($\tan\delta$) ซึ่งคณะผู้จัดทำได้ศึกษาค้นคว้าทฤษฎีเกี่ยวกับเทคนิคการวัดของชุดทดสอบ การวิเคราะห์กระแสโพลาริเซชัน กระแสดีโพลาริเซชัน และวงจรสมมูลของวัสดุไดอิเล็กตริกที่จะนำไปหาค่าความสูญเสียดังกล่าว

โครงการวิจัยนี้ได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการวัดการทดสอบ PDC ในสายเคเบิลใต้ดินโดยได้จำลองกรณีศึกษาต่างๆที่ส่งผลต่อการวัดการทดสอบเป็น 3 กรณี ซึ่งกรณีที่ 1 เป็นการศึกษาค่าผลของขนาดแรงดันทดสอบโดยแบ่งเป็น 250V 500V 750V และ 1000V ทดสอบกับวัสดุทดสอบสายเคเบิลกับสายเคเบิลที่มีข้อต่อ Pre-molded กรณีที่ 2 เป็นการศึกษาผลของขนาดความยาวสายเคเบิลที่ต่างกันโดยแบ่งเป็นสายเคเบิลขนาด 15cm 0.5m 1.5m 2.5m และ 3.5m และกรณีที่ 3 เป็นการศึกษาผลของอุณหภูมิโดยทดสอบกับสายเคเบิลในกล่องอะคริลิกโดยทำการควบคุมอุณหภูมิแตกต่างกันคือ 30°C 50°C 70°C และ 90°C โดยกรณีทั้งหมดได้ทำการศึกษาคูแวนน์ของกระแสโพลาริเซชัน กระแสดีโพลาริเซชันและค่าเฟคเตอร์ความสูญเสีย โดยในกรณีที่ 1 พบว่าขนาดแรงดันที่เพิ่มขึ้นทำให้ขนาดของกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันเพิ่มขึ้นตามทั้งในวงจรทดสอบที่ 1 และ 2 ค่าเฟคเตอร์ความสูญเสียมีค่าใกล้เคียงเดิมตามขนาดแรงดันที่เปลี่ยนไป และวงจรทดสอบที่ 1 ให้ผลที่มีความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากข้อจำกัดในเครื่องมือวัดที่ไม่เหมาะสมสำหรับการวัดที่กระแสต่ำ กรณีที่ 2 พบว่าขนาดของกระแสทั้งโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันลดลงมาอยู่ในระดับเดียวกัน ค่าความสูญเสียมีค่าน้อยลงเมื่อความยาวมากขึ้น และกรณีที่ 3 พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น กระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป และค่าความสูญเสียในช่วงความถี่ต่ำแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

จากการทดสอบทั้ง 3 กรณี สามารถสรุปได้ว่าขนาดแรงดันทดสอบและอุณหภูมิมีผลต่อการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน แต่ขนาดความยาวสายไม่มีผลต่อการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน สามารถนำผลที่ได้ไปเป็นตัวแปรที่ถูกควบคุมและปรับใช้ในการทดสอบในกรณีต่างๆในอนาคต

6.2 ข้อเสนอแนะ

จากการดำเนินการวิจัยวิทยานิพนธ์ที่ผ่านมา และผลที่ได้จากการทดสอบ ทำให้เกิดแนวคิดและข้อเสนอแนะ หากมีการทดสอบความต่อไปในอนาคต ดังต่อไปนี้

1. ความสะอาดของชิ้นงาน มีผลต่อการทดสอบมาก ควรทำการเช็ดตัวฉนวนก่อนทำการทดสอบทุกครั้ง เพื่อให้ได้ผลถูกต้องแม่นยำ
2. ระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบ ควรจะใช้เวลาที่นานพอเพื่อให้กระแสดีโพลาริเซชันลงไปถึงกระแสคงเหลือก่อนทำการทดสอบต่อไป
3. ในการควบคุมอุณหภูมิของชิ้นงาน จะได้ผลที่ถูกต้องแม่นยำที่สุด เมื่อเทอร์โมคัปเปิ้ลอยู่ในตำแหน่งที่ใกล้กับชิ้นงานมากที่สุดและห่างจากฮีตเตอร์พอสมควร
4. ขณะทำการทดสอบควรมีผู้เฝ้าดูตลอดเวลาที่ทดสอบ เมื่อเกิดความผิดพลาดใดๆ จะได้ปิดเครื่องได้ทันเวลาก่อนที่จะเกิดความเสียหาย
5. เมื่อทำการเปลี่ยนชิ้นงานทดสอบ ต้องปิดเครื่อง PDC ก่อนทุกครั้งเพื่อป้องกันความเสียหายที่สามารถเกิดได้กับอุปกรณ์ต่างๆ
6. ขณะในการทดสอบ ต้องมีการควบคุมปัจจัยรบกวนภายนอกที่อาจจะก่อให้เกิดความผิดพลาดในการทดสอบ เช่น การเดินผ่านระหว่างทำการทดสอบ สัญญาณรบกวนจากอุปกรณ์ต่างๆ เป็นต้น
7. ก่อนทำการทดสอบ PDC ต้องทำการทดสอบขั้นเริ่มต้น และขั้นควบคุมก่อนเสมอ เพื่อให้วัสดุทดสอบเกิดการดิสชาร์จกระแสจนเท่ากับกระแสคงเหลือ
8. ควรทำการทดสอบซ้ำเพื่อตรวจสอบผลการทดสอบเพื่อให้ได้ผลถูกต้องแม่นยำ

เอกสารอ้างอิง

- [1] วิกิพีเดียพอลิเมอร์ สืบค้นเมื่อ 19 กันยายน 2560, จากวิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี
<https://th.wikipedia.org/wiki/พอลิเมอร์>.
- [2] อนุสิษฐ์ เกื้อกุล, พอลิเมอร์ สืบค้นเมื่อ 22 กันยายน 2560 , จากคลังความรู้ SciMath
<https://www.scimath.org/lesson-chemistry/item/7095-2017-06-04-02-45-14>
- [3] Suhil Kumar Ganguli, Vivek Kohli, **Power Cable Technology**, 2016
- [4] ชีระพงษ์ บุญรักษา “ ,ลักษณะจำเพาะของต้นไม้ในสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินฉนวนพอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวางสำหรับระบบจำหน่าย 22 k V, ”วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต,, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, ภาควิศวกรรมไฟฟ้า,2557.
- [5] กองมาตรฐานระบบไฟฟ้า, “ระบบเคเบิลใต้ดิน Underground cable system”,2548
- [6] William A. Thue, **Electrical Power Cable Engineering**, 1999
- [7]E.Kuffel, W.S.Zaengl, J.Kuffel, **High Voltage Engineering Fundamentals**, 2000
- [8] Supatra A. Bhumiwat, “On-site Non-destructive Diagnosis of In-service Power Cables by Polarization / Depolarization Current Analysis”, IEEE International Symposium on Electrical Insulation (ISEI), 2010
- [9] J. Alff, V. Der Houhanessian, W. S. Zaengl and A.J. Kachler “A novel, compact instrument for the measurement and evaluation of relaxation currents conceived for on-site diagnosis of electrical power apparatus” IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Anaheim, USA, 2000
- [10] S.Sullaiman, A.Mohd Ariffin, D.T.Kien, “Simulation Modeling of Polarization and Depolarization Current Analysis for Underground Cable Insulation”, IEEE 7th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO2013), 2013

ภาคผนวก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษากระแสโพล่าไรเซชันและกระแสดีโพล่าไรเซชันในเคเบิลใต้ดิน

The study of polarization and depolarization current in underground cables

นาย ชยานันต์ แสงนิติเดช, นาย ณรัช ปรทุมแก้ว, นาย ณัฐวร สุขวิสูตร, นาย ธนชัย เมืองโคตร
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ซอย 1 ฉลองกรุง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-329-8000 ต่อ 3925 E-Mail: nattawornn@hotmail.com

บทคัดย่อ

โครงการนี้นำเสนอการวัดกระแสโพล่าไรเซชันและกระแสดีโพล่าไรเซชันของสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE ที่ไม่มีข้อต่อ (กรณีที่ 1) และมีข้อต่อ (กรณีที่ 2) ซึ่งสายเคเบิลฉนวน XLPE ที่ใช้ในการทดสอบมีพิสัย 12/20(24) kV พื้นที่หน้าตัด 240 mm² ยาว 5 m โดยในกรณีที่ 1 ใช้เวลาในการวัดกระแสโพล่าไรเซชันและกระแสดีโพล่าไรเซชัน 100 วินาที และกรณีที่ 2 ใช้เวลาในการวัดกระแสโพล่าไรเซชันและกระแสดีโพล่าไรเซชัน 1,000 วินาที เนื่องจากมีผลของโพล่าไรเซชันระหว่างชั้น (interfacial polarization) ที่บริเวณข้อต่อ และในการทดสอบในช่วงจรทดสอบสายเคเบิลแบบแยกชิลด์ออกจากกราวด์ (isolated shield) และแบบไม่ปลดชิลด์ออกจากกราวด์ (ground shield) เพื่อทดสอบในสายเคเบิลแต่กรณี โดยป้อนแรงดันกระแสตรง 250 V, 500 V, 750 V และ 1,000 V ตามลำดับ และนำค่ากระแสโพล่าไรเซชัน กระแสดีโพล่าไรเซชัน และค่า Dielectric Dissipation Factor (DDF) หรือ tan delta ที่วัดได้มาวิเคราะห์ต่อไป จากผลการทดสอบพบว่าค่าที่วัดได้จากวงจรการทดสอบที่ต่างกัน มีความแตกต่างกันเล็กน้อย และเมื่อเพิ่มแรงดันทดสอบกระแสโพล่าไรเซชันและกระแสดีโพล่าไรเซชันจะเพิ่มขึ้นแต่ไม่ส่งผลต่อค่า tan delta

คำสำคัญ : กระแสโพล่าไรเซชัน และกระแสดีโพล่าไรเซชัน

ABSTRACT

This project represents the polarization and depolarization current (PDC) measurement of XLPE power cables without joint (Case 1) and with premolded joint (Case 2). XLPE cables with 240 mm² cross section and 5 m length with rate voltage of 12/20(24) kV were used in the experiment. In case 1, the XLPE cable was tested with the measuring time for polarization and depolarization 100 seconds. In case 2, the XLPE cable with joint was investigated with the measuring time for polarization and depolarization 1,000 seconds due to the effect of interfacial polarization at cable joint. Moreover, the XLPE cable with isolated shield and with ground shield were investigated for each case study. DC voltage applied to the test specimen for measuring PDC value

was 250 V, 500V, 750V and 1,000V respectively. PDC and Dielectric Dissipation Factor (DDF) or tan delta obtained from the experiment were compared and analyzed. It was found a bit difference due to different ground connections of XLPE cable tested. Moreover, increasing in DC test voltage increased the PDC but did not effect on tan delta value.

Keyword: Polarization current and Depolarization current

1. บทนำ

ในปัจจุบันมีความต้องการทางด้านพลังงานไฟฟ้าสูงขึ้น และการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบส่งผ่านทางอากาศอาจไม่อำนวยต่อการติดตั้งในบางสถานที่ที่มีความแออัด จึงเป็นเหตุให้มีการใช้สายเคเบิลใต้ดินในระบบส่งจ่ายแพร่หลายมากขึ้น เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการส่งจ่ายกำลัง ทนต่อความถี่รบกวนทางไฟฟ้าได้สูง และมีค่าสูญเสียไดอิเล็กตริกต่ำ แต่ยังคงขาดผู้ที่มีความรู้และความเข้าใจในการติดตั้งสายเคเบิลใต้ดิน จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้อาจจะเกิดความบกพร่องในสายเคเบิลใต้ดินและนำไปสู่การลดอายุการใช้งานในที่สุด ด้วยสาเหตุนี้การศึกษาสายเคเบิลใต้ดินและการทดสอบวินิจฉัยฉนวนจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง เพื่อลดปัญหาดังกล่าวจึงได้มีการศึกษาการวัดกระแสโพล่าไรเซชันและดีโพล่าไรเซชันโดยเครื่องทดสอบ PDC ซึ่งเป็นวิธีหนึ่งในการทดสอบฉนวนแบบไม่ทำลายที่ไม่ก่อให้เกิดความเสียหายแก่ฉนวน

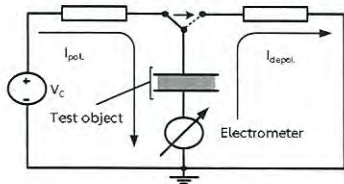
2. ทฤษฎีและสมมติฐานที่เกี่ยวข้อง

2.1 การวัดกระแสโพล่าไรเซชันและกระแสดีโพล่าไรเซชัน (PDC) [1]

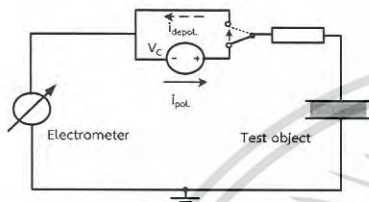
วงจรการทดสอบสายเคเบิลสามารถแบ่งได้เป็น 2 วงจร คือ วงจรทดสอบของการวัด PDC ของสายเคเบิลแบบ isolated shield ดังแสดงรูปที่ 1 วงจรนี้ใช้ทดสอบในกรณีที่สามารถแยกหรือปลดชิลด์ของสายเคเบิลออกจากกราวด์ระบบได้ และวงจรทดสอบของการวัด PDC ของสายเคเบิลแบบ ground shield ดังแสดงรูปที่ 2 ใช้ในการทดสอบในกรณีที่ไม่สามารถปลดชิลด์ของสายเคเบิลออกจากกราวด์ของระบบได้โดยจะใช้อุปกรณ์จ่ายแรงดันเสริม (Phantom) ในการจ่ายแรงดันไฟฟ้า โดยหลักการการทำงานของทั้งสองวงจรวัดคล้ายกันคือจ่ายแรงดันไฟฟ้าไปที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุทดสอบเพื่อวัดกระแสโพลาริเซชันหรือกระแสชาร์จประจุ หลังจาก นั้นสวิตซ์วัสดุทดสอบเพื่อลัดวงจรและทำการวัดกระแสดีโพลาริเซชัน หรือกระแสดีสชาร์จประจุ



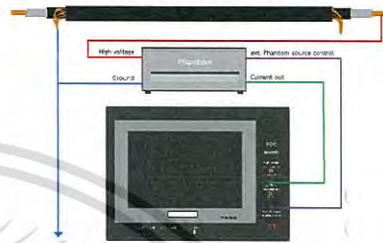
รูปที่ 1 วงจรทดสอบ PDC แบบ isolated shield



รูปที่ 2 วงจรทดสอบ PDC แบบ ground shield



รูปที่ 5 วงจรทดสอบ PDC แบบ isolated shield (วงจร 1)



รูปที่ 6 แบบจำลองวงจรทดสอบ PDC แบบ grounded shield (วงจร 2)

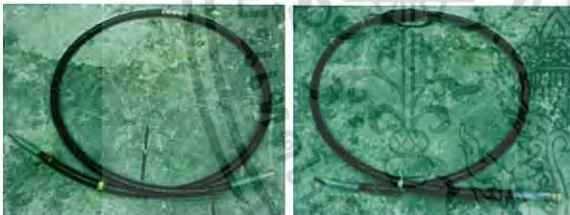


รูปที่ 7 วงจรทดสอบ PDC แบบ grounded shield (วงจร 2)

3. การออกแบบและประกอบสร้าง

3.1 วัสดุทดสอบ

สายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE พิกัด 12/20(24) kV พื้นที่หน้าตัด 240 mm² แบ่งเป็น 2 กรณี คือ แบบไม่มีข้อต่อ และมีข้อต่อ Pre-molded แต่ละกรณียาว 5 m แสดงดังรูปด้านล่าง



(ก) (ข)

รูปที่ 3 สายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE

(ก) กรณีที่ 1 ไม่มีข้อต่อ (ข) กรณีที่ 2 มีข้อต่อ Pre-molded

3.2 วงจรทดสอบ

วงจรทดสอบ PDC ที่ใช้ในการวัดพฤติกรรมฉนวนในเคเบิลใต้ดินแบบไม่มีข้อต่อและมีข้อต่อ แสดงดังต่อไปนี้



รูปที่ 4 แบบจำลองวงจรทดสอบ PDC แบบ isolated shield (วงจร 1)

4. การทดสอบและประเมินผล

ขั้นตอนของการทดสอบวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน (PDC) สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

1. Initial Measurement
 2. Control Measurement
 3. Main Measurement
- ในขั้น Main Measurement Measurement เป็นขั้นตอนการวัดค่าจริงตามค่าตัวแปรต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เงื่อนไขการศึกษาผลของวงจรวัดและแรงดันทดสอบ

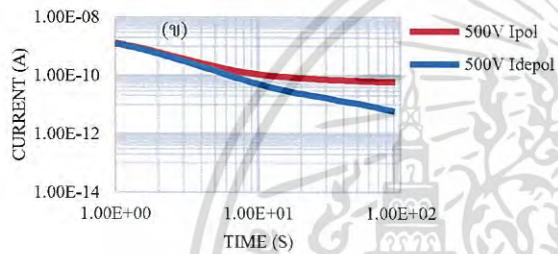
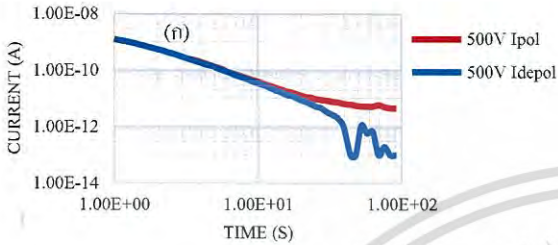
พารามิเตอร์	เงื่อนไขการทดสอบ			
แรงดันทดสอบ	250 V 500 V 750 V และ 1,000 V			
กรณีสายเคเบิล	ไม่มีข้อต่อ (กรณีที่ 1)		มีข้อต่อ (กรณีที่ 2)	
วงจรทดสอบ	วงจร 1	วงจร 2	วงจร 1	วงจร 2
เวลาวัดกระแสโพลาริเซชัน	100 วินาที		1,000 วินาที	
เวลาวัดกระแสดีโพลาริเซชัน	100 วินาที		1,000 วินาที	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

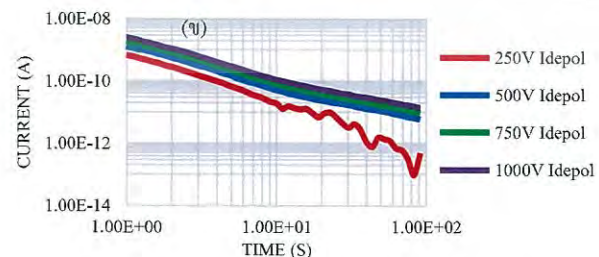
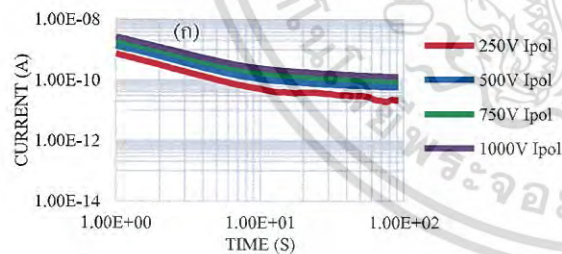
5.1 กรณีที่ 1 สายเคเบิลที่ไม่มีข้อต่อ

กระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันที่ทดสอบกับวงจรทดสอบทั้ง 2 แบบ พบว่ากระแสโพลาริเซชันในวงจรทดสอบที่ 1 มีความแปรปรวนเนื่องจากคลงมาในระดับของกระแสที่คงเหลืออยู่ในสายเคเบิลได้คืน



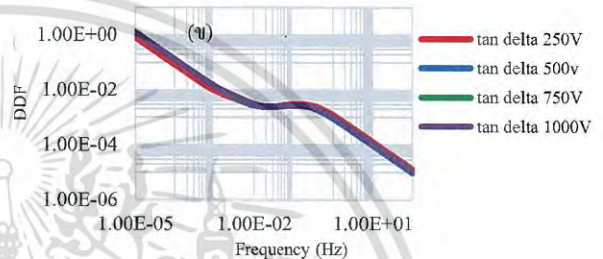
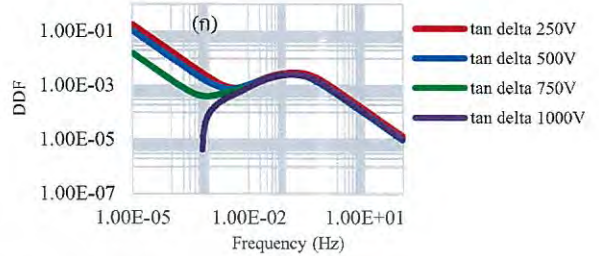
รูปที่ 8 กระแสโพลาริเซชัน (I_{pol}) และกระแสดีโพลาริเซชัน (I_{depol}) (ก) วงจรทดสอบ 1 (ข) วงจรทดสอบ 2

กระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันที่ได้จากวงจรทดสอบที่ 2 เพื่อแสดงผลของแรงดันทดสอบ แสดงดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 ผลของแรงดันทดสอบที่มีต่อกระแสที่วัดได้ (ก) กระแสโพลาริเซชัน (ข) กระแสดีโพลาริเซชัน

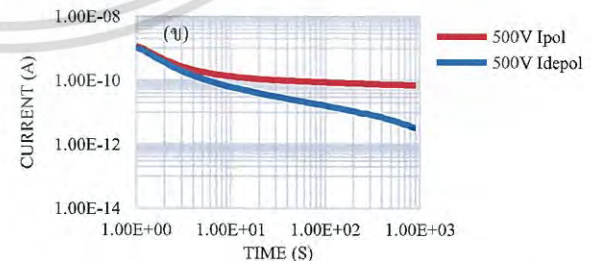
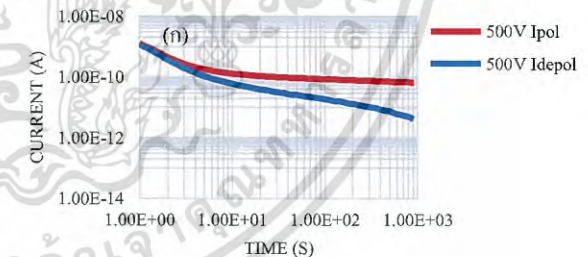
ค่าความสูญเสียจากการเปลี่ยนแปลงแรงดันทดสอบพบว่า DDF แปรเปลี่ยนไปตามแรงดันทดสอบในวงจรทดสอบที่ 1 และ DDF ในวงจรทดสอบที่ 2 มีค่าใกล้เคียงกัน



รูปที่ 10 ค่า DDF ที่วัดได้ (ก) วงจรทดสอบ 1 (ข) วงจรทดสอบ 2

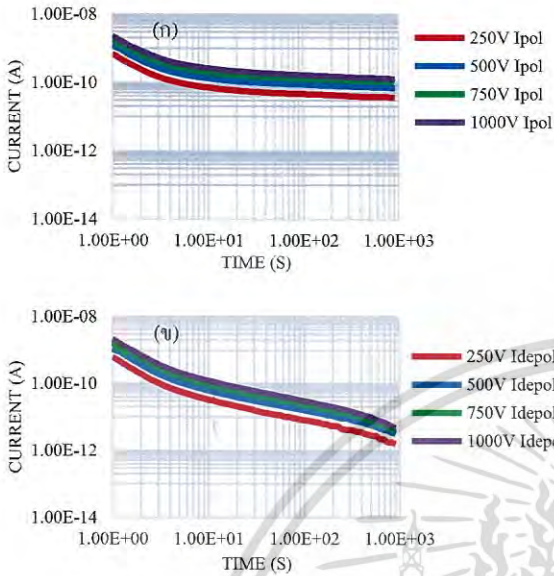
5.2 กรณีที่ 2 สายเคเบิลที่มีข้อต่อ Pre-molded

กระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันที่ได้จากวงจรทดสอบที่ 1 และวงจรทดสอบที่ 2 ดังแสดงดังรูปที่ 11



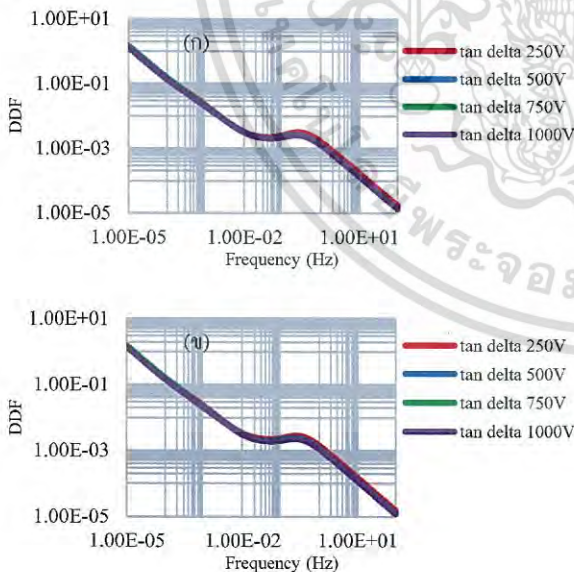
รูปที่ 11 กระแสโพลาริเซชัน (I_{pol}) และกระแสดีโพลาริเซชัน (I_{depol}) (ก) วงจรทดสอบ 1 (ข) วงจรทดสอบ 2

กระแสโพลาริเซชันและกระแสโพลาริเดชันที่ได้จากวงจรทดสอบที่ 2 เพื่อดูผลของแรงดันทดสอบ แสดงดังรูปที่ 12



รูปที่ 12 ผลของแรงดันทดสอบที่มีต่อกระแสที่วัดได้ (ก) กระแสโพลาริเซชัน (ข) กระแสดีโพลาริเซชัน

ค่าความสูญเสียจากการเปลี่ยนแปลงแรงดันทดสอบพบว่า DDF ในวงจรทดสอบที่ 1 และวงจรทดสอบที่ 2 มีค่าใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 13



รูปที่ 13 ค่า DDF ที่วัดได้ (ก) วงจรทดสอบ 1 (ข) วงจรทดสอบ 2

6. สรุป

โครงการวิจัยนี้ได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่างๆต่อการวัดการทดสอบ PDC ในสายเคเบิลใต้ดิน โดยได้จำลองกรณีศึกษาที่ส่งผลต่อการวัดการทดสอบที่ศึกษาผลของขนาดแรงดันทดสอบ โดยแบ่งเป็น 250V 500V 750V และ 1000V ทดสอบกับวัสดุทดสอบสายเคเบิล (กรณีที่ 1) กับสายเคเบิลที่มีข้อต่อ Pre-molded (กรณีที่ 2) โดยทำการศึกษาดูแนวโน้มของกระแสโพลาริเซชัน กระแสดีโพลาริเซชันและค่าเฟดเตอร์ความสูญเสีย โดยในกรณีที่ 1 และกรณีที่ 2 พบว่าขนาดแรงดันทดสอบที่เพิ่มขึ้นทำให้ขนาดของกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันเพิ่มขึ้นตามทั้งในวงจรทดสอบที่ 1 และ 2 ค่าเฟดเตอร์ความสูญเสียมีค่าใกล้เคียงเดิมตามขนาดแรงดันที่เปลี่ยนไป และวงจรทดสอบที่ 1 ให้ผลที่มีความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากข้อจำกัดในเครื่องมือวัดที่ไม่เหมาะสมสำหรับการวัดที่กระแสต่ำเพราะทั้งกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันลดลงไปถึงในระดับกระแสที่คงเหลืออยู่ในสายเคเบิล จากการทดสอบสามารถสรุปได้ว่าขนาดแรงดันทดสอบมีผลต่อการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันสามารถนำผลที่ได้ไปเป็นตัวแปรที่ถูกควบคุมและปรับใช้ในการทดสอบในกรณีต่างๆในอนาคต

7. กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีด้วยความเมตตา กรณาอย่างสูงจาก รศ.ดร.นรเศรษฐ พัฒนเดช ที่ให้คำปรึกษา ความรู้ รวมทั้งให้ความช่วยเหลือพร้อมทั้งแก้ไขข้อบกพร่องในด้านต่าง ๆ ของขอขอบคุณ บริษัทที่ไอเอส เอ็นจิเนียริง แอนด์เซอร์วิส จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ให้ยืมชุดทดสอบ PDC และขอขอบคุณห้องปฏิบัติการทางไฟฟ้าแรงสูง (High Voltage Laboratory, HVL) รวมถึงรุ่นพี่ ป.เอก ป.โท ทุกท่าน สำหรับการช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ สุดท้ายขอขอบคุณบริษัท Meidensha Corporation เป็นอย่างสูงที่มอบทุนสำหรับวิจัยให้กับโครงการปริญญานิพนธ์

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. A. Bhumawat "On-site non-destructive diagnosis of in-service power cables by polarisation /depolarisation current analysis" 2010 IEEE International Symposium on Electrical.
- [2] W. S. Zaengl; "Dielectric spectroscopy in time and frequency domains for HV power equipment (Transformers, cables, etc.)". 12th International Symposium on High Voltage Engineering – ISH2001, Bangalore, India 20-24 August 2001
- [3] W. S. Zaengl "Dielectric Spectroscopy in Time and Frequency Domain for HV Power Equipment, Part I: Theoretical Considerations". IEEE EI Magazine. Vol. 19 No. 5, September/ October 2003, pp. 5-19.

Polarization and Depolarization Current Measurement of Underground Cable with different DC test Voltages

C. Sangnitdej, N. Pratoomkeaw, N. Sukwisut, T. Mueangkhrot and N. Pattanadetch

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand

Abstract

This paper represents the polarization and depolarization current (PDC) measurement of XLPE power cables without joint (Case 1) and with pre-molded joint (Case 2). XLPE cables with 240 mm² and 5 m length with rate voltage of 12/20(24) kV was used in the experiment. In case 1, the XLPE cable was tested with the measuring time for polarization and depolarization 100 seconds. In case 2, the XLPE cable with joint was investigated with the measuring time for polarization and depolarization 1,000 seconds due to the effect of interfacial polarization at cable joint. Moreover, the XLPE cable with isolated shield and with ground shield was investigated for each case study. DC voltage applied to the test specimen for measuring PDC value was 250 V, 500V, 750V and 1,000V respectively. PDC and Dielectric Dissipation Factor (DDF) or tan delta obtained from the experiment were compared and analyzed. It was found a bit difference due to different ground connections of XLPE cable tested. Moreover, increasing in DC test voltage increases the PDC but does not effect on tan delta value.

1. Introduction

At present, XLPE insulated cables are widely used for distribution system because it can withstand high electrical field stress and have low dielectric loss and good mechanical properties withstanding external forces. Most cable failures usually occur in the insulation because they were operated under electrical, thermal, mechanical and environmental stress. This affects the reliability of the power transmission system and economic loss consequence because of the high cost of maintaining damaged such systems. Therefore, it is necessary to proper maintenance for underground cable system with high effectively diagnostic test methods.

For insulation testing, non-destructive test methods such as the return voltage measurement (RVM), dielectric spectroscopy and polarization and depolarization current (PDC) analysis have been introduced [1]. PDC test technique applies the lower test voltage to the insulation system for PDC measurement. This technique provides PDC values and Dielectric Dissipation Factor (DDF) for insulation property analysis.

2. Theory

2.1 PDC measurement

PDC (Polarization and Depolarization Current) measurement detects the polarization current $i_{pol}(t)$ or charging current when a DC voltage is applied to the test object. Once completely polarization current measurement, the test object is then short-circuited in order to measure the depolarization $i_{depol}(t)$ or discharge current and thereby obtain information pertaining to the characteristics of the insulation[2-5]. There are two types of PDC test circuit applied for this research. Only PDC analyzer was used for XLPE cable with isolated ground shield investigation which the insulation shield can be isolated from ground to measurement via PDC analyzer (test circuit 1) as shown in Fig 1(a). PDC with Phantom source was utilized in case of XLPE cable with ground shield investigation (test circuit 2) as shown in Fig 1(b).

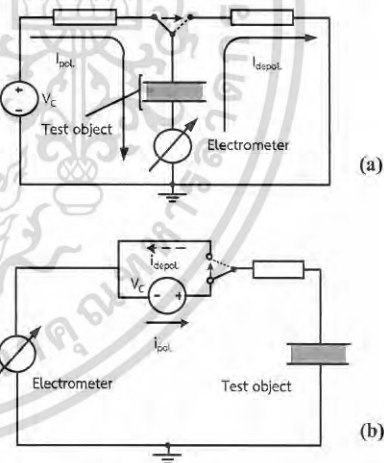


Fig. 1. PDC test arrangement (a) XLPE cable with isolated ground shield investigation: test circuit 1 (b) XLPE cable with ground shield investigation: test circuit 2

3. Experiment

3.1 Test object

Two identical 12/20(24) kV XLPE medium voltage cables of 240 mm² cross-section and 5 m length were prepared for use during the series of tests (see Fig. 2-3) in order to produced the two case studies as described below:

- Case 1. XLPE cable with no cable joint
- Case 2. XLPE cable with pre-molded cable joint



Fig.2. XLPE power cable with no cable joint



Fig.3. XLPE power cable with pre-molded joint

3.2 Test setup

The PDC test circuit diagram and the PDC test set up used to investigate the dielectric response of the underground cable with and without joint are illustrated below in Fig. 4 -7 respectively.



Fig. 4. Test circuit diagram for PDC measurement of XLPE cable with isolated shield



Fig. 5. Test circuit arrangement for PDC measurement of XLPE cable with isolated shield



Fig. 6. Test circuit diagram for PDC measurement of XLPE cable with grounded shield



Fig.7. Test circuit arrangement for PDC measurement of XLPE cable with grounded shield

3.3 Test procedure

The PDC measurement are divided to 3 procedures- initial measurement, control measurement and main measurement as described below [5] :

Initial measurement: This is made to determine initial condition of XLPE cable. In this process only the depolarization current was measured by which the depolarization current decrease to a steady state of remaining charge inside the insulation.

Control measurement: This is the process before starting the main measurement by measuring the polarization current for 5 seconds with being apply DC test voltage 100V. Then the depolarization current was recorded until its amplitude reduce to the same level as the remaining current from the initial measurement.

Main measurement: In this process, DC test voltages of 250 V, 500V, 750V and 1,000V are applied to the XLPE cable for investigating PDC values. In case 1, the XLPE cable was tested with the measuring time for polarization and depolarization 100 seconds. In case 2, the XLPE cable with joint was investigated with the measuring time for polarization and depolarization 1,000 seconds The test parameters are summarized in Table 1 below.

TABLE I. TEST PARAMETERS

Parameters	Case 1: XLPE cable with no cable joint	Case 2: XLPE cable with pre-molded joint
DC test voltages	250 V, 500 V, 750V, 1000 V	
Polarization time	100 seconds	1,000 seconds
Depolarization time	100 seconds	1,000 seconds

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. Test result

4.1 Case 1 XLPE cable with no cable joint

The polarization current and depolarization current of the case 1 investigation from test circuit 1 and circuit 2 are shown in Fig.8. The fluctuation was found for the depolarization obtained from the test circuit 1.

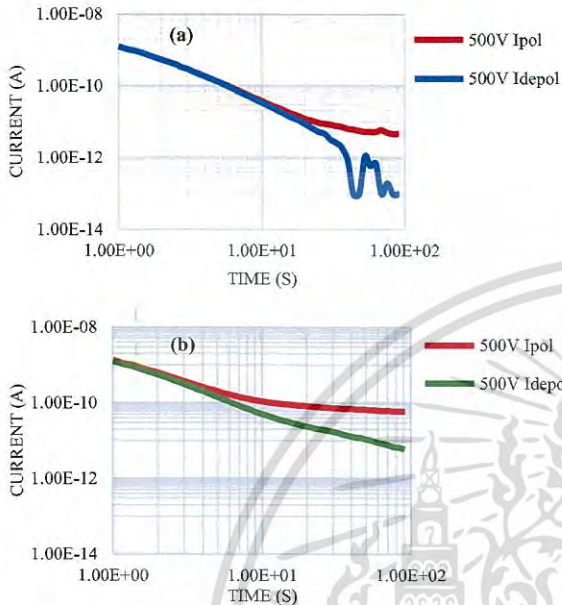


Fig. 8. Polarization and depolarization current (a) test circuit 1 (b) test circuit 2

PDC test results (test circuit2) shown in Fig. 9 are obtained from various DC applied voltages.

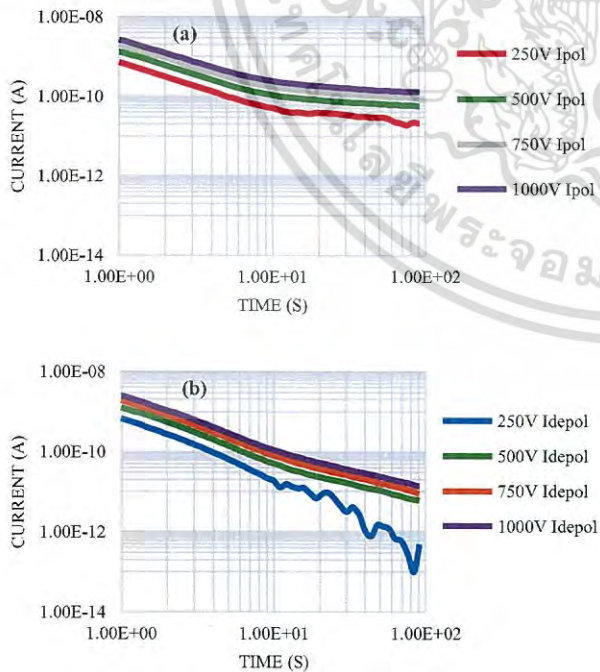


Fig. 9. Effect of DC applied voltage on PDC test results (a) polarization current (b) depolarization current

DDF analysis at different DC applied voltages obtained from the test circuit 1 and test circuit 2 is illustrated in Fig. 10. As can be seen, the DDFs acquired from test circuit 1 are vary depending on the DC applied voltage.

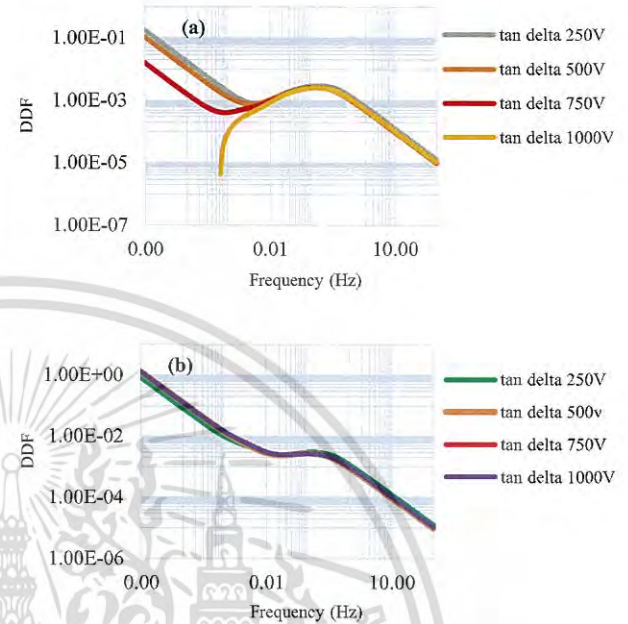


Fig. 10. DDF analysis (a) test circuit 1 (b) test circuit 2

4.2 Case 2 XLPE cable with pre-molded joint

The polarization current and depolarization current of the case 1 investigation from test circuit 1 and circuit 2 are shown in Fig.11.

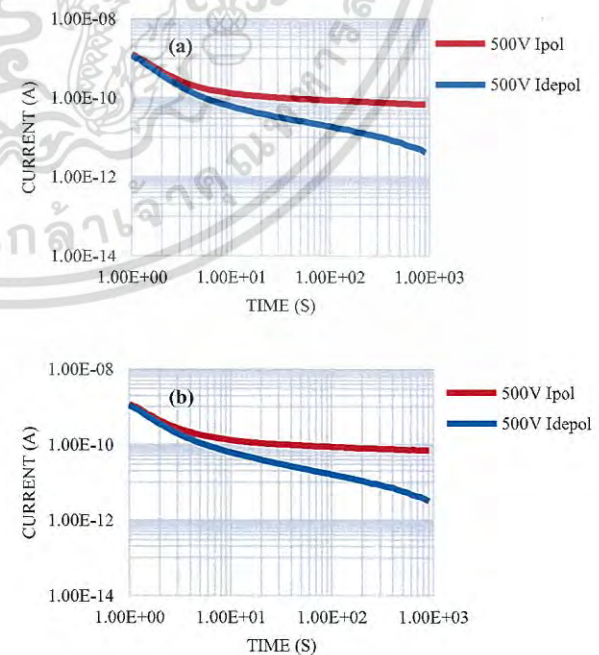


Fig. 11. Polarization and depolarization current (a) test circuit 1 (b) test circuit 2

PDC test results (test circuit2) shown in Fig. 12 are obtained from various DC applied voltages.

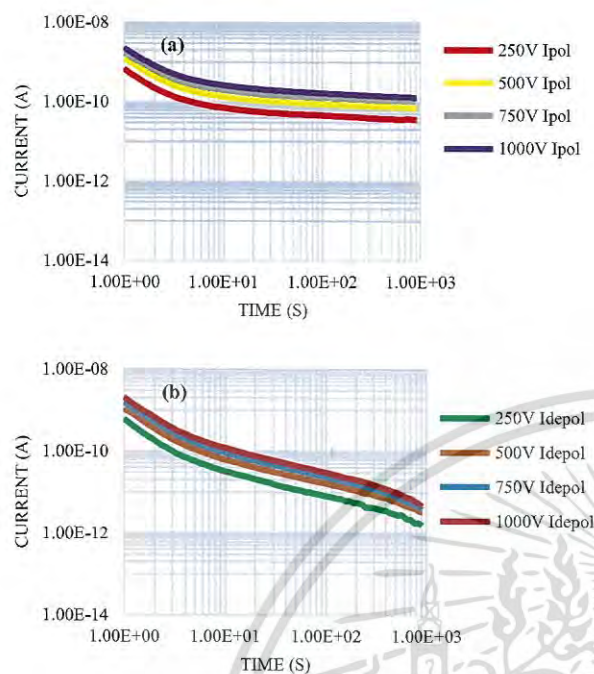


Fig. 12. Effect of DC applied voltage on PDC test results (a) polarization currents (b) depolarization currents

DDF analysis at different DC applied voltages obtained from the test circuit 1 and test circuit 2 is illustrated in Fig. 10. As can be seen, the DDFs acquired from test circuit 1 and the test circuits 2 are relatively similar being depending on the DC applied voltages.

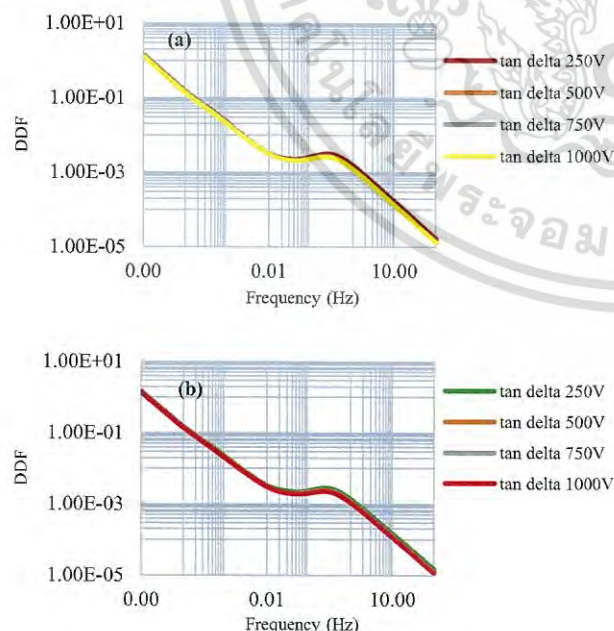


Fig. 13. DDF analysis (a) test circuit 1 (b) test circuit 2

5. Conclusion

From the test result, it is clearly that differently grounded connections of the test object may lead to different PDC test results. This will affect the DDF analysis. Different DC applied voltages should provide the same DDF.

ACKNOWLEDGMENT

The authors wish to acknowledge Mr. Worachai Sawatdimongkol from TIS company Thailand adviser and all staff of high voltage laboratory, King Mongkut's Institute of technology Ladkrabang. Besides, the authors would like to express their thanks for project financial support from Meidensha Corporation.

REFERENCES

- [1] S. Sulaiman, A. Mohd Ariffin and D. T. Kien "Simulation Modeling of Polarization and Depolarization Current Analysis for Underground Cable Insulation" 2013 IEEE 7th International Power Engineering and Optimization Conference.
- [2] W. S. Zaengl "Dielectric Spectroscopy in Time and Frequency Domain for HV Power Equipment, Part I: Theoretical Considerations", IEEE EI Magazine. Vol. 19 No. 5, September/October 2003, pp. 5-19.
- [3] W. S. Zaengl; "Dielectric spectroscopy in time and frequency domains for HV power equipment (Transformers, cables, etc.)". 12th International Symposium on High Voltage Engineering – ISH2001, Bangalore, India 20-24 August 2001.
- [4] J. Alf, V. Der Houhanessian, W. S. Zaengl and A. J. Kachler; "A novel, compact instrument for the measurement and evaluation of relaxation currents conceived for onsite diagnosis of electrical power apparatus". 2000 IEEE International Symposium on Electrical Insulation – ISEI, Anaheim, CA, USA, 2-5 April 2000.
- [5] S. A. Bhumiwat "On-site non-destructive diagnosis of in-service power cables by polarisation /depolarisation current analysis" 2010 IEEE International Symposium on Electrical.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Specifications: Electrical Insulation Diagnostic System PDC-ANALYSER-1MOD

Current measurement

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

Voltage source

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

Capacitance measurement

the load capacitance is indirectly measured by computing the ratio charge to voltage when the voltage source is switched off for measuring of the depolarisation current. However, the current measurement is not impaired by a load capacitance surpassing the range listed below.

load capacitance measuring range at 2 kV source voltage	25 nF
accuracy at 2 kV source voltage	± 2 % ± 5 pF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

load capacitance measuring range at 1 kV source voltage	50 nF
accuracy at 1 kV source voltage	±2 % ±10 pF
load capacitance measuring range at 500 V source voltage	100 nF
accuracy at 500 V source voltage	±2 % ±20 pF
load capacitance measuring range at 100 V source voltage	500 nF
accuracy at 100 V source voltage	±2 % ±100 pF

Computer

Display	15" TFT, resolution 1024 x 786 pixels
Processor	Intel Pentium 1 Ghz
Memory	SDRAM 512 MB
Drives	40 GB harddisk, DVD +/-RW, 3½" Floppy
standard interfaces	2x PCMCIA, 1x parallel, 2x serial, 1x USB, 1x Ethernet
options	additional serial ports, Audio in/out, external Monitor out
Software	
operating system	Windows XP SP2
measuring and control program	installed ready to use, outputs for each measurement one file with polarisation data, one file with depolarisation data and one file with general measurement descriptions
standard evaluation software	installed ready to use, easy to use, extensive possibilities to postprocess, display, print and export the measured data,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	<p>computation of the complex capacitance in function of frequency, computation of a lumped equivalent circuit of the measured insulation, computation of recovery voltages and the derived polarisation spectrum , computation of polarisation indexes and of insulation resistances according to all known standards and definitions</p> <p>quality assessment of oil-paper insulation systems, quantitative determination of moisture content in pressboard and of oil conductivity for power transformers</p>
advanced evaluation software	
Miscellaneous	
Weight	17.3 kg
power supply	90 ... 260 V, 47 ... 63 Hz, <160 VA
size	514x185x428 (width depth height in mm)
temperature (use)	0 ... 35 °C
temperature (stock)	-10 ... 50 °C
pressure	70 ... 106 kPa
humidity	5 ... 80 % non condensing
acceleration	< 2 g
length of standard measurement cables	15 m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Specifications: PDC-Phantom-1000XE

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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-นามสกุล นายชยานันต์ แสงนิติเดช

วัน เดือน ปีเกิด 11 กรกฎาคม 2538

ที่อยู่ 69/278 พระยาสุเรนทร์ แขวงบางชั้น เขตคลองสามวา จังหวัดกรุงเทพฯ
10510

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2557

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจาก
โรงเรียนบดินทรเดชา (สิงห์ สิงหเสนี) 2

พ.ศ. 2561

สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฝึกงานภาคฤดูร้อน

บริษัท RSPM Motor Service จำกัด
แผนก Electrical engineer

วันที่ 1 มิถุนายน ถึง 28 กรกฎาคม 2560



ชื่อ-นามสกุล นายณรัช ประทุมแก้ว

วัน เดือน ปีเกิด 22 เมษายน 2539

ที่อยู่ 40/14 หมู่ 2 ตำบลท่าตำหนัก อำเภอนครศรีชัย จังหวัดนครปฐม 73120

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2557

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจาก
โรงเรียนพระปฐมวิทยาลัย

พ.ศ. 2561

สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฝึกงานภาคฤดูร้อน

บริษัท ซีเมนส์ จำกัด

ฝ่ายบริหารพลังงานไฟฟ้า แผนกไฟฟ้าแรงสูง

วันที่ 1 มิถุนายน ถึง 28 กรกฎาคม 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ชื่อ-นามสกุล นายณัฐวร สุขวิสูตร

วัน เดือน ปีเกิด 22 มกราคม 2539

ที่อยู่ 17/4 หมู่ 3 ตำบลโพธิ์ไก่ตัน อำเภอเมืองลพบุรี จังหวัดลพบุรี 15000

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2557

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจาก
โรงเรียนวินิตศึกษา

พ.ศ. 2561

สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฝึกงานภาคฤดูร้อน

บริษัท เทอร์โมเทรเซอร์ จำกัด
แผนก Assistant Engineer

วันที่ 1 มิถุนายน ถึง 28 กรกฎาคม 2560



ชื่อ-นามสกุล นายธนชัย เมืองโคตร

วัน เดือน ปีเกิด 19 มิถุนายน 2538

ที่อยู่ 67 หมู่ 4 ตำบลห้วยใหญ่ อำเภอห้วยใหญ่ จังหวัดมุกดาหาร 49150

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2557

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจาก
โรงเรียนจุฬารัตนราชวิทยาลัย มุกดาหาร

พ.ศ. 2561

สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฝึกงานภาคฤดูร้อน

บริษัท บางปะอินโคเจนเนอเรชั่น จำกัด
แผนก ซ่อมบำรุง และควบคุมกระบวนการผลิต

วันที่ 1 มิถุนายน ถึง 28 กรกฎาคม 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้