

การศึกษาความเสื่อมสภาพของฉนวนในเคเบิลใต้ดินด้วยแรงดันทดสอบ DAC
STUDY ON INSULATION DETERIORATION IN UNDERGROUND CABLE WITH
DAC TEST VOLTAGES



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ปีการศึกษา 2563

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

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

STUDY ON INSULATION DETERIORATION IN UNDERGROUND CABLE WITH DAC
TEST VOLTAGES



THIS PROJECT SUBMITTED IN PARATIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT

FOR THE BACHELOR'S DEGREE IN ELECTRICAL ENGINEERING

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF THE TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามใช้ข้อมูลไปเผยแพร่ต่อสาธารณะด้วยวิธีใดๆทั้งทางตรงและอ้อมซึ่งถือเป็นการนำไปใช้

This material is reserved for educational use²⁰²⁰, not allowed for commercial use.

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

ปีการศึกษา 2563

การศึกษาความเสื่อมสภาพของฉนวนในเคเบิลใต้ดินด้วยแรงดันทดสอบ DAC
STUDY ON INSULATION DETERIORATION IN UNDERGROUND CABLE WITH DAC
TEST VOLTAGES



อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รศ.ดร.นรเศรษฐ์ พัฒนเดช
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ผศ.ดร.ภพ จันทร์เจริญสุข

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

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

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2563

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาความสัมพันธ์สภาพของฉนวนในเคเบิลใต้ดินด้วยแรงดันทดสอบ DAC

ผู้จัดทำ

1. นาย กรณ์ย์พล แรงฤทธิ์
2. นาย สรวุฒิ คูศิริวานิชกร
3. นาย สัญญา ตั้งกาญจนยีนยง
4. นาย สัญญา โปธิ์หอมศิริ



นรเศรษฐ พัฒนเดชอาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร. นรเศรษฐ พัฒนเดช)

รพ จันทรเจริญสุขอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รพ จันทรเจริญสุข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

การศึกษาความเสื่อมสภาพของฉนวนในเคเบิลใต้ดินด้วยแรงดันทดสอบ DAC

นายกรัณย์พล

แรงฤทธิ์

นายสรุทธิ

คูศิริวานิชกร

นายสัญญา

ตั้งกาญจนยืนยง

นายสัญญา

โพธิ์หอมศิริ

รองศาสตราจารย์ ดร. นรเศรษฐ์ พัฒนเดช อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2563

บทคัดย่อ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเสื่อมสภาพและการวินิจฉัยระบบเคเบิลฉนวน Cross-linked polyethylene (XLPE) ภายใต้การทดสอบแรงดันสูงด้วยแรงดันทดสอบ Damped AC ในระบบทดสอบ Oscillating wave test system ตามมาตรฐาน IEEE Std 400.4-2015 และ IEEE Std 400.3-2006 ซึ่งเป็นการทดสอบในบริเวณที่ติดตั้งระบบเคเบิล (On-site) ประกอบด้วยระบบเคเบิลทั้งหมด 3 ระบบ ได้แก่ ระบบเคเบิลใต้ดิน 22 กิโลโวลต์, ระบบเคเบิลใต้ดิน 6.9 กิโลโวลต์และสายเคเบิลป้อนเข้าบับดับเพลิง 6.9 กิโลโวลต์ ซึ่งมีพารามิเตอร์ประกอบการวินิจฉัยเสื่อมสภาพของเคเบิล ได้แก่ พฤติกรรมการเกิดเบรกดาวน ไซด์และลักษณะของการเกิดดิสชาร์จบางส่วน และพฤติกรรมความสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dissipation factor) จากการทดสอบพบว่า มีระบบเคเบิลใต้ดิน 2 ระบบที่ฉนวนภายในเริ่มมีการเสื่อมสภาพเนื่องจากมีดิสชาร์จบางส่วนเกิดขึ้นเล็กน้อยและอีกหนึ่งระบบเคเบิลใต้ดินยังไม่มีมีการเสื่อมสภาพของฉนวนภายในเนื่องจากไม่มีดิสชาร์จบางส่วนเกิดขึ้น และนอกจากนี้ยังศึกษาการเสื่อมสภาพของบุชชิ่งที่ผ่านการใช้งานพิกัด 123 กิโลโวลต์ภายใต้การทดสอบด้วยแรงดันสูงกระแสสลับ (Alternating Current: AC) โดยบุชชิ่งที่ทำการศึกษามีโครงสร้างภายในเป็น Oil impregnated paper (OIP) และโครงสร้างภายนอกเป็นพอร์ซเลน (Porcelain) เป็นบุชชิ่งประเภท Air to oil รวมทั้งศึกษาพฤติกรรมดิสชาร์จบางส่วนจากการจำลองความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในบุชชิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

STUDY ON INSULATION DETERIORATION IN UNDERGROUND CABLE WITH DAC TEST VOLTAGES

Mr.KARANPON RANGRIT
Mr.SORAWUT KUSIRIWANICHAKORN
Mr.SANYA TANGKANCHANAYEUNYONG
Mr.SANYA PHOHOMSIRI
Associate.Prof.Dr.Norasage Pattanadech Advisor

ABSTRACT

This thesis aims to study on the degradation and diagnosis of Cross-linked polyethylene (XLPE) insulated cable systems under high voltage testing with Damped AC test voltage which is in the Oscillating wave test system in accordance with IEEE Std 400.4-2015 and IEEE Std 400.3-2006. The testing is done at the on-site area and divided into three cases which consist of 22 kV underground cable, 6.9 kV underground cable, and 6.9 kV feeding cable of the fuel pump, which contains parameters for diagnosing cable deterioration consist of breakdown behavior, types and characteristics of occurrence partial discharge, and the behavior of the dielectric loss (dissipation factor). The test results show that there are two underground cable systems where the internal insulation began to deteriorate due to a slight partial discharge, and another one that has not deteriorated the internal insulation yet due to the absence of partial discharge. And also study on the deterioration of the service-aged bushing 123 kV under alternating current (AC) high voltage testing, with the bushing that studied an internal structure as oil-impregnated paper (OIP) and external structures as Porcelain which is air to oil type and also studied some of the discharge behavior from the simulation of the defect that occurred in the bushing.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีนั้น ต้องขอขอบคุณการช่วยเหลือที่ได้รับ ความกรุณาจากหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งต้องขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.นรเศรษฐ พัฒนเดช และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภพ จันทรเจริญสุข อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ รวมไปถึงคุณ ปุณยวีร์ ฉายศิริ ที่ได้กรุณาตรวจสอบแก้ไขปริญญานิพนธ์เล่มนี้จนสำเร็จเรียบร้อยเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ บริษัท พีดี โซลูชั่นส์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านความรู้ ข้อมูล เครื่องมือ และวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดสอบจนการทดสอบเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ ภาควิชาไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่คอยชี้แนะ แนะนำ ให้คำปรึกษา แนวทางในการศึกษาค้นคว้าและการทดสอบจนการทดสอบเสร็จสมบูรณ์

ท้ายนี้คณะผู้จัดทำ ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาและครอบครัว ซึ่งคอยให้การ สนับสนุนในด้านการเงิน การเดินทาง และให้กำลังใจมาตลอด รวมทั้งทุกๆคนที่ได้ให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำในการใช้อุปกรณ์ และการทดสอบต่างๆในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ ด้วยดี จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ ด้วย

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	X
สารบัญตาราง	XIV
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของโครงการและข้อกำหนดของโครงการ	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน	2
1.5 แผนการดำเนินการ	3
1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 โครงสร้างของสายเคเบิลใต้ดิน	5
2.1.1 ชั้นตัวนำ (Conductor layer)	5
2.1.1.1 ตัวนำกลม (Round conductor)	6
2.1.1.2 ตัวนำแบบแยกส่วนวงกลม (Segmental conductor)	7
2.1.1.3 ตัวนำแบบฮอลโล (Hollow conductor)	8
2.1.2 ชั้นฉนวน (Insulation layer)	8
2.1.3 ชั้นสารกึ่งตัวนำ (Semi-conductive layer)	9
2.1.4 ชั้นตัวกั้นโลหะ (Metallic screen layer)	10
2.1.5 ชั้นเทปกั้นน้ำ (Water blocking tape layer)	11
2.1.6 Separative tape	11
2.1.7 ชั้นเปลือกนอก (Jacket หรือ Oversheath)	11
2.2 กระบวนการผลิตสายไฟฟ้าใต้ดินฉนวน XLPE	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น หากมีข้อสงสัยประการใด กรุณาติดต่อเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.1 กระบวนการรีด (Drawing)	12
2.2.2 กระบวนการขึ้นรูปตัวนำตีเกลียว (Conductor stranding)	12
2.2.3 การหุ้ม (Extruding)	12
2.2.4 การเรียงตัวของกลุ่มอะตอม	13
2.2.5 การคำนึงถึงคุณสมบัติของฉนวน	13
2.2.5.1 พอลิเอทิลีน (Polyethylene : PE)	13
2.2.5.2 High-density polyethylene (HDPE)	14
2.2.5.3 Low-density polyethylene (LDPE)	14
2.2.5.4 Cross-linked polyethylene (XLPE)	14
2.2.5.5 การพันชั้นเทปกั้นน้ำ (Semi-conductive water blocking tape)	15
2.2.5.6 การตีเกลียวแกนชั้นตัวกั้นโลหะ (Core stranding)	15
2.2.5.7 การพันชั้นเทปกั้นน้ำรอบนอก (Non-conductive water blocking tape)	15
2.3 ข้อมูลและคุณสมบัติเกี่ยวกับหัวต่อสายเคเบิลและข้อต่อเคเบิล	15
2.3.1 หัวต่อสายเคเบิล (Cable terminator)	15
2.3.1.1 หัวต่อสายชนิดพอร์ซเลน (Porcelain type)	16
2.3.1.2 หัวต่อเคเบิลชนิด Slip on type	17
2.3.1.3 หัวต่อสายชนิด Cold shrink type	18
2.3.1.4 หัวต่อสายเคเบิลชนิด Heat shrink type	19
2.3.2 ข้อต่อเคเบิล (Cable joint)	19
2.3.2.1 ข้อต่อเคเบิลชนิด Straight through joint	19
2.3.2.2 ข้อต่อเคเบิลชนิด Branch joint	20
2.3.2.3 ข้อต่อเคเบิลชนิด Pot end joint	21
2.3.3 ขอบกพร่องในข้อต่อและหัวต่อสายเคเบิล	24
2.3.3.1 ช่องว่างและการปนเปื้อนบนผิวฉนวน	25
2.3.3.2 ผิวฉนวนได้รับความเสียหายทางกล	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับความรู้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และส่งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.3.3 การปกกั้นสารกึ่งตัวนำยาวเกินไป	26
2.3.3.4 การปกกั้นสารกึ่งตัวนำสั้นเกินไป	27
2.3.3.5 ความเสียหายที่โคนควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้า	27
2.3.3.6 การต่อข้อต่อที่ไม่ถูกต้อง	28
2.3.3.7 การปิดผนึกข้อต่อและหัวต่อสายที่ไม่สมบูรณ์	29
2.4 การทดสอบแรงดันกระแสสลับด้วยวงจรเรโซแนนซ์	31
2.4.1 หลักการทดสอบด้วยวงจรเรโซแนนซ์	31
2.4.2 วงจรทดสอบเรโซแนนซ์ปรับค่าเหนี่ยวนำ	33
2.4.3 วงจรทดสอบเรโซแนนซ์ปรับค่าความถี่ไฟฟ้า	37
2.4.4 การเปรียบเทียบระบบทดสอบระหว่างระบบ ACRL และ ACRF	42
2.5 การทดสอบเคเบิลแรงสูงด้วยแรงดันทดสอบ Damped AC	44
2.5.1 หลักการทดสอบเคเบิลด้วยแรงดันทดสอบ Damped AC	47
2.5.2 การทดสอบแรงดันคงทนระบบเคเบิลด้วยแรงดัน Damped AC	49
2.5.2.1 ลักษณะแรงดันทดสอบสำหรับการทดสอบแรงดันคงทน	49
2.5.2.2 วิธีการทดสอบแรงดันคงทนให้กับอุปกรณ์ทดสอบ	51
2.5.2.3 ประเภทของการทดสอบแรงดันคงทนด้วยแรงดันทดสอบ Damped AC	54
2.5.2.3.1 Installation testing	54
2.5.2.3.2 Acceptance testing	54
2.5.2.3.3 Maintenance testing	55
2.5.3 การวัดดิสชาร์จบางส่วนและการประมาณค่า Tan delta	56
2.5.3.1 การวัดดิสชาร์จบางส่วน	56
2.5.3.2 การวัดดิสชาร์จบางส่วนตามมาตรฐาน IEC 60270	56
2.5.3.3 การประมาณค่า Tan delta	58
2.5.4 การประเมินการทดสอบ	59
2.6 บุชชิงแรงดันสูง	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับเอาไว้ใช้เฉพาะเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ลีวทั้งนี้ว่าเว็บไซต์นี้ให้ข้อมูลและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6.1 การจัดประเภทบุชชิงตามฉนวนภายนอกของบุชชิง	61
2.6.1.1 บุชชิงประเภท Air to Oil	61
2.6.1.2 บุชชิงประเภท Oil to Oil	62
2.6.1.3 บุชชิงฉนวนภายนอกอื่นๆ	62
2.6.2 การจัดประเภทบุชชิงตามโครงสร้างภายในของบุชชิง	63
2.6.2.1 บุชชิงชนิด Solid type	63
2.6.2.2 บุชชิงชนิด Capacitance graded	64
2.6.2.2.1 Resin Bonded Paper (RBP)	64
2.6.2.2.2 Oil impregnated paper (OIP)	65
2.6.2.2.3 Resin impregnated paper (RIP)	65
2.6.3 การจัดประเภทบุชชิงตามฉนวนภายในของบุชชิง	66
2.6.3.1 Air insulated bushing	66
2.6.3.2 Oil filled bushing	66
2.6.3.3 Oil impregnated paper	67
2.6.3.4 Resin bonded หรือ impregnated paper insulated	67
2.6.3.5 Cast insulation	67
2.6.3.6 Gas-Insulated Bushing	68
บทที่ 3 การออกแบบการทดลอง	69
3.1 เตรียมการทดลอง	69
3.1.1 อุปกรณ์การทดลอง	69
3.1.1.1 อุปกรณ์จ่ายแรงดันทดสอบ Damped AC	69
3.1.1.2 ระบบเคเบิล 22 kV	71
3.1.1.3 ระบบเคเบิล 6.9 kV	72
3.1.1.4 เคเบิลบีมดับเพลิง 6.9 kV	73
3.2 การทดสอบเพื่อวินิจฉัยระบบเคเบิลใต้ดินด้วยแรงดัน Damped AC	74
3.3 การทดสอบการจำลองดิซชาร์จบางส่วนของบุชชิงแรงสูง	75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.1 อุปกรณ์การทดลอง	75
3.3.1.1 AC Control Unit 20 kVA	75
3.3.1.2 หม้อแปลงทดสอบ	76
3.3.1.3 ตัวเก็บประจุเกี่ยวคัลลิ่ง	77
3.3.1.4 บุชชิงแรงสูงชนิด OIP Condenser Bushing	78
3.3.1.5 อุปกรณ์รับสัญญาณ (Coupling Device)	79
3.3.2 ขั้นตอนการทดสอบวัดดิสชาร์จบางส่วนในบุชชิง	80
บทที่ 4 ผลการทดสอบและประเมินผล	82
4.1 ผลการทดสอบและวินิจฉัยระบบเคเบิลใต้ดินพีกัด 22 kV	82
4.1.1 ผลการทดสอบและวินิจฉัยระบบเคเบิลใต้ดินพีกัด 22 kV (ก่อนแก้ไขการเข้าหัวต่อสาย)	82
4.1.1.1 เคเบิลเฟส A (L1-1)	82
4.1.1.2 เคเบิลเฟส A (L1-2)	84
4.1.2 ผลการทดสอบและวินิจฉัยระบบเคเบิลใต้ดินพีกัด 22 kV (หลังแก้ไขการเข้าหัวต่อสาย)	86
4.1.2.1 เคเบิลเฟส A (L1-1)	86
4.1.2.2 เคเบิลเฟส A (L1-2)	88
4.1.3 สรุปผลการทดสอบและวินิจฉัยระบบเคเบิลใต้ดินพีกัด 22 kV	90
4.2 ผลการทดสอบและวินิจฉัยระบบเคเบิลใต้ดินพีกัด 6.9 kV	91
4.2.1 เคเบิลเฟส A (Unit 3A-2)	91
4.2.2 เคเบิลเฟส B (Unit 3A-2)	92
4.2.3 เคเบิลเฟส C (Unit 3A-2)	92
4.2.4 เคเบิลเฟส A (Unit 3B-1)	93
4.2.5 เคเบิลเฟส B (Unit 3B-1)	93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตให้ถือว่าผิดกฎหมาย

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

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

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.8 เคเบิลเฟส B (Unit 3A-1)	95
4.2.9 เคเบิลเฟส C (Unit 3A-1)	95
4.2.10 เคเบิลเฟส A (Unit 4A-2)	96
4.2.11 เคเบิลเฟส B (Unit 4A-2)	96
4.2.12 เคเบิลเฟส C (Unit 4A-2)	97
4.2.13 เคเบิลเฟส A (Unit 3B-2)	97
4.2.14 เคเบิลเฟส B (Unit 3B-2)	98
4.2.15 เคเบิลเฟส C (Unit 3B-2)	98
4.2.16 สรุปผลการทดสอบและวินิจฉัยระบบเคเบิลใต้ดินพิกัด 6.9 kV	99
4.3 ผลการทดสอบและวินิจฉัยเคเบิลพิกัด 6.9 kV สำหรับใช้ป้อนเข้าบับดับเพลิง	101
4.3.1 เคเบิลเฟส A	101
4.3.2 เคเบิลเฟส B	101
4.3.3 เคเบิลเฟส C	102
4.3.4 สรุปผลการทดสอบและวินิจฉัยเคเบิลพิกัด 6.9 kV สำหรับใช้ป้อนเข้าบับดับเพลิง	102
4.4 ผลการทดสอบการทดสอบการจำลองดิสชาร์จบางส่วนบัพชิ่งแรงสูง	103
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	107
5.1 สรุปผลการทดลอง	107
5.2 ข้อเสนอแนะการทดลอง	107
เอกสารอ้างอิง	108
ภาคผนวก	111
ภาคผนวก ก	112
ภาคผนวก ข	117
ประวัติผู้เขียน	120

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างชั้นตัวนำของเคเบิล XLPE	5
2.2 ตัวนำกลมมีจุดศูนย์กลางร่วมกัน	6
2.3 ตัวนำกลมตีเกลียวอัดแน่น	7
2.4 ตัวนำแบบแยกส่วนวงกลม	7
2.5 ตัวนำแบบฮอลโล	8
2.6 โครงสร้างชั้นฉนวนของเคเบิล XLPE	8
2.7 โครงสร้างชั้นสารกึ่งตัวนำของเคเบิล XLPE	9
2.8 โครงสร้างชั้นตัวกั้นโลหะของเคเบิล XLPE	10
2.9 โครงสร้างชั้นเทปกั้นน้ำของเคเบิล XLPE	11
2.10 โครงสร้างชั้นเปลือกนอกของเคเบิล XLPE	11
2.11 หัวต่อสายเคเบิลชนิดพอร์ชเลน	16
2.12 หัวต่อสายเคเบิลชนิด Slip on type	17
2.13 หัวต่อสายเคเบิลชนิด Cold shrink	18
2.14 หัวต่อสายเคเบิลชนิด Heat shrink	19
2.15 ข้อต่อเคเบิลชนิด Straight joint	20
2.16 ข้อต่อเคเบิลชนิด Branch joint แบบ T	20
2.17 ข้อต่อเคเบิล Branch joint แบบ Y	21
2.18 ข้อต่อเคเบิลชนิด Pot ends joint	21
2.19 เวลาที่ใช้ในการติดตั้งข้อต่อเคเบิลในกระบวนการต่างๆ	22
2.20 ขั้นตอนการตัดที่ได้รับการปรับปรุงแล้ว	23
2.21 การเปรียบเทียบเวลาในการทำงานก่อนและหลังปรับปรุง	23
2.22 การเบี่ยงเบนของเส้นสนามไฟฟ้า	24
2.23 ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับฉนวนระหว่างการปลดและต่อฉนวน	25
2.24 การปนเปื้อนบนพื้นผิวของฉนวน	26
2.25 การต่อเคเบิลโดยยังมีชั้นสารกึ่งตัวนำเหลืออยู่	26
2.26 การต่อเคเบิลโดยมีบริเวณที่ไม่มีชั้นสารกึ่งตัวนำ	27
2.27 ความผิดพร่องที่โคนควมคุมสนามไฟฟ้า	27
2.28 การต่อสายตัวนำที่ข้อต่อสาย	28
2.29 วงจรทดสอบเรโซแนนซ์พื้นฐาน(บน) แผนภาพเฟสเซอร์(ล่าง) และ Resonance curve(ขวา)	31
2.30 วงจรทดสอบเรโซแนนซ์แบบอนุกรม(ซ้าย)และแบบขนาน(ขวา)	32
2.31 แกนหลักชนิดเซล(ซ้าย)และแกนหลักชนิดสองแกน(ขวา)เจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการปรับปรุง	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับเอาไว้ใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ

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

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

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.32 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขาออกและขนาดของโพลดสำหรับรีแอกเตอร์แรงสูงชนิด กระแสไฟฟ้าคางที่(บน)และชนิดกำลังไฟฟ้าคางที่(ล่าง)	34
2.33 รีแอกเตอร์ถังโลหะ	35
2.34 รีแอกเตอร์ถังฉนวนทรงกระบอก(ซ้าย)และส่วน Active part(ขวา)	36
2.35 ลักษณะการพันขดลวดสำหรับรีแอกเตอร์ถังฉนวนทรงกระบอก	36
2.36 การต่อแคสเคดรีแอกเตอร์ถังฉนวนทรงกระบอก 3 ชั้น	37
2.37 ช่วงความถี่ที่สามารถปรับได้(บน)และช่วงแรงดันที่สามารถทดสอบได้(ล่าง)	38
2.38 ระบบการทำงานและการติดตั้งเครื่องแปลงความถี่ไฟฟ้า	39
2.39 แรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยมจากเครื่องแปลงความถี่ไฟฟ้า	39
2.40 การออกแบบแกนเหล็กสำหรับรีแอกเตอร์แบบคางค่า	40
2.41 รีแอกเตอร์ถังฉนวนทรงกระบอกแบบคางค่า	40
2.42 การออกแบบรีแอกเตอร์สำหรับการทดสอบประจำให้กับ GIS	41
2.43 ระบบทดสอบเรโซแนนซ์โดยรวมของระบบทดสอบ ACRL(บน) และ ACRF(ล่าง)	42
2.44 ระดับพิกัดแรงดันต่างๆของเคเบิล	44
2.45 กราฟความสัมพันธ์ Bath tube	45
2.46 ประเภทการทดสอบเคเบิลเพื่อจะประเมินสภาพหรืออายุของเคเบิล	46
2.47 แนวโน้มของความล้มเหลวระบบเคเบิลฉนวน XLPE ตามอายุที่ระดับแรงดันใช้งานต่างๆ	47
2.48 วงจรทดสอบ Damped AC แบบสมบูร์ณ(บน) วงจรสมมูลย์ก่อนปิดสวิตซ์(ซ้าย) และหลังปิด สวิตซ์(ขวา)	48
2.49 ลักษณะแรงดันทดสอบ Damped AC สำหรับการกระตุ้น 1 ครั้ง	49
2.50 วิธีการจ่ายแรงดันทดสอบ Damped AC	52
2.51 ระยะเวลาในการชาร์จประจุที่ระดับแรงดันต่างกัน	53
2.52 วงจรการวัดดิสชาร์จบางส่วน	56
2.53 วงจรสอบเทียบระบบวัด	57
2.54 การลดทอนของแรงดันทดสอบที่มีความสูญเสียในฉนวนต่างกัน	58
2.55 บุชชิงประเภท Air to Oil	61
2.56 บุชชิงประเภท Air to Air	62
2.57 บุชชิงชนิด Solid type	63
2.58 บุชชิงชนิด Capacitance graded	64
2.59 บุชชิงชนิด Resin Bonded Paper	64
2.60 บุชชิงชนิด Oil Impregnated Paper	65
2.61 บุชชิงชนิด Resin Impregnated Paper	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม กรุณาแจ้งให้ติดต่อหน่วยงาน และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

Forbidden to modify the content, or XI cite the document when use.

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.62 บุษชิงฉนวนอากาศ	66
2.63 บุษชิงฉนวนน้ำมัน	66
2.64 บุษชิงฉนวนน้ำมัน	67
2.65 บุษชิงฉนวน SF ₆ สำหรับใช้ใน GIS	68
3.1 แหล่งจ่ายแรงดันทดสอบ Damped AC 35 kV	69
3.2 วงจรการทดสอบด้วยแหล่งจ่ายแรงดัน Damped AC	71
3.3 เคเบิลทดสอบพิกัด 22 kV	71
3.4 เคเบิลทดสอบพิกัด 6.9 kV	72
3.5 เคเบิลป้อนเข้าป้อนดับเพลิงทดสอบ 6.9 kV	73
3.6 บุษชิงสำหรับการทดสอบที่มีความดันเป็นอนสูง	75
3.7 AC Control Unit	75
3.8 หม้อแปลงทดสอบ	76
3.9 ตัวเก็บประจุเกี่ยวคัล้อง	77
3.10 บุษชิงแรงสูงชนิด OIP Condenser Bushing	78
3.11 อุปกรณ์รับสัญญาณ	79
3.12 การติดตั้งการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนในบุษชิง	80
3.13 วงจรการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนในบุษชิง	80
3.14 การจำลองความผิดพร่องที่ความสูง 58 cm จากจุดต่อลงดิน	81
4.1 รูปคลื่นแรงดันทดสอบและดิสชาร์จบางส่วนก่อนแก้ไข (L1-1)	82
4.2 การวิเคราะห์ Phase-resolved partial discharge pattern ก่อนแก้ไข (L1-1)	82
4.3 การวิเคราะห์ PD mapping เพื่อหาตำแหน่งของดิสชาร์จบางส่วนก่อนแก้ไข (L1-1)	83
4.4 รูปคลื่นแรงดันทดสอบและดิสชาร์จบางส่วนก่อนแก้ไข (L1-2)	84
4.5 การวิเคราะห์ Phase-resolved partial discharge pattern ก่อนแก้ไข (L1-2)	84
4.6 การวิเคราะห์ PD mapping เพื่อหาตำแหน่งของดิสชาร์จบางส่วนก่อนแก้ไข (L1-2)	85
4.7 รูปคลื่นแรงดันทดสอบและดิสชาร์จบางส่วนหลังแก้ไข (L1-1)	86
4.8 การวิเคราะห์ Phase-resolved partial discharge pattern หลังแก้ไข (L1-1)	86
4.9 การวิเคราะห์ PD mapping เพื่อหาตำแหน่งของดิสชาร์จบางส่วนหลังแก้ไข (L1-1)	87
4.10 รูปคลื่นแรงดันทดสอบและดิสชาร์จบางส่วนหลังแก้ไข (L1-2)	88
4.11 การวิเคราะห์ Phase-resolved partial discharge pattern หลังแก้ไข (L1-2)	88
4.12 การวิเคราะห์ PD mapping เพื่อหาตำแหน่งของดิสชาร์จบางส่วนหลังแก้ไข (L1-2)	89
4.13 รูปคลื่นแรงดันทดสอบและดิสชาร์จบางส่วนเคเบิลเฟส A (Unit 3A-2)	91
4.14 การวิเคราะห์ Phase-resolved partial discharge pattern เคเบิลเฟส A (Unit 3A-2)	91

เอกสารนี้เป็นเอกสารทสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดต้งห้าม ล้างหรือแก้ไขโดยไม่ขออนุญาต และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15 รูปคลื่นแรงดันทดสอบและดิซาร์จบางส่วนเคเบิลเฟส B (Unit 3A-2)	92
4.16 รูปคลื่นแรงดันทดสอบและดิซาร์จบางส่วนเคเบิลเฟส C (Unit 3A-2)	92
4.17 รูปคลื่นแรงดันทดสอบและดิซาร์จบางส่วนเคเบิลเฟส A (Unit 3B-1)	93
4.18 รูปคลื่นแรงดันทดสอบและดิซาร์จบางส่วนเคเบิลเฟส B (Unit 3B-1)	93
4.19 รูปคลื่นแรงดันทดสอบและดิซาร์จบางส่วนเคเบิลเฟส C (Unit 3B-1)	94
4.20 รูปคลื่นแรงดันทดสอบและดิซาร์จบางส่วนเคเบิลเฟส A (Unit 3A-1)	94
4.21 รูปคลื่นแรงดันทดสอบและดิซาร์จบางส่วนเคเบิลเฟส B (Unit 3A-1)	95
4.22 รูปคลื่นแรงดันทดสอบและดิซาร์จบางส่วนเคเบิลเฟส C (Unit 3A-1)	95
4.23 รูปคลื่นแรงดันทดสอบและดิซาร์จบางส่วนเคเบิลเฟส A (Unit 4A-2)	96
4.24 รูปคลื่นแรงดันทดสอบและดิซาร์จบางส่วนเคเบิลเฟส B (Unit 4A-2)	96
4.25 รูปคลื่นแรงดันทดสอบและดิซาร์จบางส่วนเคเบิลเฟส C (Unit 4A-2)	97
4.26 รูปคลื่นแรงดันทดสอบและดิซาร์จบางส่วนเคเบิลเฟส A (Unit 3B-2)	97
4.27 รูปคลื่นแรงดันทดสอบและดิซาร์จบางส่วนเคเบิลเฟส B (Unit 3B-2)	98
4.28 รูปคลื่นแรงดันทดสอบและดิซาร์จบางส่วนเคเบิลเฟส C (Unit 3B-2)	98
4.29 รูปคลื่นแรงดันทดสอบและดิซาร์จบางส่วนเคเบิลเฟส A	101
4.30 รูปคลื่นแรงดันทดสอบและดิซาร์จบางส่วนเคเบิลเฟส B	101
4.31 รูปคลื่นแรงดันทดสอบและดิซาร์จบางส่วนเคเบิลเฟส C	102
4.32 ดิซาร์จบางส่วนในตัวเก็บประจุเกี่ยวคล่อง	103
4.33 ดิซาร์จบางส่วนในบุชชิ่งจากการจำลองที่ความสูง 58 cm จากจุดต่อลงดิน	104
4.34 ดิซาร์จบางส่วนในบุชชิ่งจากการจำลองที่ความสูง 51 cm จากจุดต่อลงดิน	104
4.35 ดิซาร์จบางส่วนในบุชชิ่งจากการจำลองที่ความสูง 44 cm จากจุดต่อลงดิน	105
4.36 ดิซาร์จบางส่วนในบุชชิ่งจากการจำลองที่ความสูง 37 cm จากจุดต่อลงดิน	105
4.37 ดิซาร์จบางส่วนในบุชชิ่งจากการจำลองที่ความสูง 65 cm จากจุดต่อลงดิน	106
4.38 ดิซาร์จบางส่วนในบุชชิ่งจากการจำลองที่ความสูง 72 cm จากจุดต่อลงดิน	106
ข.1 การติดตั้งชุดทดสอบ Damped AC สำหรับการทดสอบเคเบิล 22 kV	118
ข.2 การติดตั้งชุดทดสอบ Damped AC สำหรับการทดสอบเคเบิล 6.9 kV	118
ข.3 การติดตั้งชุดทดสอบ Damped AC สำหรับการทดสอบสายป้อนเคเบิล 6.9 kV	119
ข.4 การติดตั้งชุดทดสอบดิซาร์จบางส่วนในบุชชิ่งแรงสูง	119

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการดำเนินการ	3
2.1 เปรียบเทียบคุณลักษณะของทองแดงและอะลูมิเนียม	6
2.2 โครงสร้างหัวต่อสายชนิด Slip on type	17
2.3 โครงสร้างหัวต่อสายชนิด Cold shrink	18
2.4 ข้อบกพร่องและสาเหตุที่ทำให้เกิดจุดผิวดพร่อง	29
2.5 เปรียบเทียบระบบทดสอบ ACRF และ ACRL สำหรับทดสอบ On-site เคเบิลแรงสูง	43
2.6 ความถี่ของแรงดันทดสอบ Damped AC สำหรับเคเบิลที่ความยาวต่างๆ	51
2.7 ระดับแรงดันทดสอบแรงดันคงทน Damped AC สำหรับเคเบิลใหม่	54
2.8 ระดับแรงดันทดสอบแรงดันคงทน Damped AC สำหรับเคเบิลเก่าหรือซ่อมบำรุง	55
2.9 ตัวอย่างการประเมินผลการทดสอบระบบเคเบิลผลิตใหม่	60
3.1 ข้อกำหนดทางเทคนิคของอุปกรณ์สำหรับจ่ายแรงดันทดสอบ	69
3.2 ข้อกำหนดทางเทคนิคของหม้อแปลงทดสอบ	76
3.3 ข้อกำหนดทางเทคนิคของตัวเก็บประจุเกี่ยวค้ำ	77
3.4 ข้อกำหนดทางเทคนิคของบushingแรงสูง OIP	78
3.5 ข้อกำหนดทางเทคนิคของอุปกรณ์รับสัญญาณ	79
4.1 ผลการทดสอบวินิจฉัยระบบเคเบิลใต้ดินพิกัด 22 kV ด้วยแรงดันทดสอบ Damped AC	90
4.2 ผลการทดสอบวินิจฉัยระบบเคเบิลใต้ดินพิกัด 6.9 kV ด้วยแรงดันทดสอบ Damped AC	99
4.3 ผลการทดสอบวินิจฉัยเคเบิลบีมดับเพลิงพิกัด 6.9 kV ด้วยแรงดันทดสอบ Damped AC	102
4.4 อัตราส่วนแรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลงทดสอบ	103

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

Forbidden to modify the content, arXIVcite the document when use.

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ระบบส่งจ่ายหรือระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าเป็นระบบที่สำคัญอย่างยิ่งต่อโลกในยุคปัจจุบัน โดยการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหรือพลังงานไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าต้นทางสู่ผู้ใช้ไฟฟ้า สามารถแบ่งได้เป็น 2 ระบบ ได้แก่ ระบบส่งกำลังไฟฟ้าเหนือหัวที่ใช้สายส่งไฟฟ้าแรงสูงพาดเสาเหนือดิน(Overhead transmission lines) และระบบส่งกำลังไฟฟ้าใต้ดินที่ใช้สายส่งไฟฟ้าแรงสูงใต้ดิน(Underground cable)

และเนื่องด้วยความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีในปัจจุบันที่มีการพัฒนาไปอย่างรวดเร็ว อีกทั้งยังมีความหนาแน่นของประชากรในบริเวณที่มีความเจริญซึ่งเป็นบริเวณหรือชุมชนที่มีพื้นที่จำกัดเพิ่มสูงขึ้นหรือปัจจัยอื่นๆอีกมากมาย ส่งผลให้มีความต้องการการใช้ไฟฟ้าสูงขึ้นอย่างมากในบางบริเวณและอาจทำให้ระบบส่งกำลังไฟฟ้าเหนือหัวได้รับผลกระทบต่างๆ ได้แก่ จำนวนเสาไฟฟ้าหรือจำนวนวงจรไฟฟ้าต่อเสาไฟหนึ่งต้นเพิ่มสูงขึ้น ระยะเวลาปลอดภัยไม่เพียงพอเนื่องจากอาคารสูง มีโอกาสเกิดอันตรายต่อระบบไฟฟ้าจากปัจจัยภายนอก ได้แก่ คน สัตว์ หรือสภาพแวดล้อมได้ง่าย ด้วยปัญหาเหล่านี้ทำให้ในปัจจุบันนั้นมีการศึกษาวิจัยและวิเคราะห์ปัญหาต่างๆต่อระบบส่งกำลังไฟฟ้าใต้ดิน เช่น ปัญหาทางโครงสร้างและปัญหาจากการติดตั้งเคเบิลใต้ดินแรงสูงและปัญหาการเกิดเบรกดาวน์ที่สายส่งไฟฟ้าแรงสูงใต้ดินหรือบริเวณจุดต่อสาย เป็นต้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบส่งกำลังไฟฟ้าใต้ดินให้ดียิ่งขึ้นและสามารถใช้ระบบส่งกำลังไฟฟ้าใต้ดินแทนระบบส่งกำลังไฟฟ้าเหนือหัวได้อย่างมีประสิทธิภาพและยั่งยืนในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาโครงสร้างพื้นฐานและกระบวนการผลิตสายเคเบิลใต้ดินแรงสูง
2. เพื่อศึกษาโครงสร้างและองค์ประกอบต่างๆ รวมถึงคุณสมบัติขององค์ประกอบในแต่ละชั้นของสายเคเบิลใต้ดินแรงสูง
3. เพื่อศึกษาคุณสมบัติของอุปกรณ์เสริม (Accessories) ที่ใช้ในระบบส่งกำลังไฟฟ้าใต้ดิน ได้แก่ หัวต่อสายเคเบิลและข้อต่อเคเบิล
4. ศึกษาการทดสอบสายเคเบิลใต้ดินแรงสูงด้วยระบบทดสอบเรโซแนนซ์กระแสสลับแบบอนุกรม (AC Series Resonance Test System)
5. ศึกษากระบวนการทดสอบหาดีสชาร์จบางส่วน (Partial discharge) และความสูญเสียในฉนวน (Dissipation factor) สำหรับสายเคเบิลใต้ดินแรงสูงด้วยระบบทดสอบ Oscillating Wave Test System (OWTS) โดยใช้แรงดันทดสอบแรงสูงด้วยแรงดันออสซิลเลทพร้อมกับการหน่วง

เอกสารนี้เป็นเอกสารทบทวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือนำไปใช้ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

6. ศึกษาโครงสร้างและประเภทของบุขซึ่งแรงสูง โดยมุ่งเน้นเป็นบุขซึ่งการฉนวน กระดาษบุขน้ำมันหรือการฉนวนชนิด OIP รวมทั้งศึกษาการทดสอบดิสชาร์จบางส่วน

1.3 ขอบเขตของโครงการและข้อกำหนดของโครงการ

1. ศึกษาโครงสร้างภายในและวัสดุสำหรับเคเบิลแรงสูงใต้ดิน
2. ใช้การทดสอบแรงดันกระแสสลับด้วยวงจรเรโซแนนซ์และการทดสอบด้วยแรงดัน Damped AC ให้กับเคเบิลใต้ดินแรงสูง
3. การทดสอบดิสชาร์จบางส่วนสำหรับบุขซึ่งแรงสูงการฉนวนชนิด OIP
4. นำผลการทดสอบที่ได้มาใช้ในการวิเคราะห์และประเมินผลการทดสอบให้กับเคเบิลใต้ดินและบุขซึ่งแรงสูง

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

1. ศึกษาโครงสร้างพื้นฐานของสายเคเบิลใต้ดินแรงสูงและองค์ประกอบต่างๆในระบบส่งกำลังไฟฟ้าใต้ดิน
2. ศึกษาขั้นตอนและวิธีการผลิตสายเคเบิลใต้ดินแรงสูงในโรงงาน
3. ศึกษาองค์ประกอบและคุณสมบัติของโครงสร้างต่างๆของสายเคเบิลใต้ดินแรงสูง
4. ศึกษาคุณสมบัติและชนิดของหัวต่อสายและข้อต่อสายเคเบิลที่จำเป็นในระบบส่งกำลังไฟฟ้าใต้ดิน
5. ศึกษาและวิเคราะห์องค์ประกอบของระบบการทดสอบ วิธีการทดสอบ การเลือกใช้อุปกรณ์ และข้อกำหนดต่างๆ ในการทดสอบสายเคเบิลใต้ดินแรงสูงด้วยระบบทดสอบเรโซแนนซ์กระแสสลับแบบอนุกรม
6. ศึกษาการทดสอบแรงดันคงทน การทดสอบหาดิสชาร์จบางส่วนและความสูญเสียในฉนวน สำหรับเคเบิลแรงสูงใต้ดินด้วยระบบทดสอบ OWTS ซึ่งใช้แหล่งจ่ายเป็นแรงดัน Damped AC ในการทดสอบ พร้อมทั้งศึกษาวิธีการประเมินจากผลการทดสอบ
7. ศึกษาโครงสร้างและการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนสำหรับบุขซึ่งแรงสูงฉนวน OIP
8. ออกแบบ วางแผน และเตรียมการทดสอบ
9. เรียบเรียงและสรุปผลการทดสอบ
10. จัดทำรูปเล่มปริญญาานิพนธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

1.5 แผนการดำเนินการ

จากขั้นตอนการดำเนินการ สามารถแจกแจงเป็นตารางแผนการดำเนินงานได้ดังนี้

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินการ

ขั้นตอนการดำเนินงาน	ปีการศึกษา 2563								
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.
1. ศึกษาโครงสร้างพื้นฐานของสายเคเบิลใต้ดินแรงสูง	←→								
2. ศึกษาขั้นตอนการสร้างสายเคเบิลใต้ดินแรงสูง	←→	←→							
3. ศึกษาองค์ประกอบและคุณสมบัติของโครงสร้างของสายเคเบิลใต้ดินแรงสูง		←→	←→						
4. ศึกษาคุณสมบัติการใช้งานองค์ประกอบเสริมในระบบส่งกำลังไฟฟ้าใต้ดิน			←→	←→					
5. ศึกษาการทดสอบเคเบิลใต้ดินแรงสูงด้วยระบบเรโซแนนซ์				←→	←→				
6. ศึกษาการทดสอบแรงดันคงทน ดิสชาร์จบางส่วน และความสูญเสียในฉนวนสำหรับเคเบิลใต้ดินแรงสูงด้วยระบบทดสอบ OWTS						←→	←→		
7. ศึกษาโครงสร้างและการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนสำหรับบุขึงแรงสูง						←→	←→		
8. ออกแบบและเตรียมการทดสอบ							←→	←→	←→
9. เรียบเรียงและสรุปผลการทดสอบ								←→	←→
10. จัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์								←→	←→

เอกสารนี้เป็นเมื่อเวลาที่ส่งไปยังผู้ใช้งาน: ระยะเวลาที่วางแผนไว้ อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และค่าส่งกลับถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ระยะเวลาที่ปฏิบัติงานจริง

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

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

1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. เข้าใจเหตุและผลในการออกแบบโครงสร้างสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE
2. เข้าใจขั้นตอนและนวัตกรรมสำหรับการผลิตสายเคเบิล
3. เข้าใจวิธีการทดสอบเคเบิลใต้ดินด้วยระบบทดสอบกระแสสลับโดยใช้วงจรเรโซแนนซ์ในการทดสอบ รวมทั้งทราบข้อจำกัดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ
4. เข้าใจขั้นตอนการทดสอบเคเบิลด้วยระบบทดสอบ OWTS ด้วยแรงดันทดสอบ Damped AC ทั้งการทดสอบแรงดันคงทนและการทดสอบเพื่อวินิจฉัยอายุของเคเบิล
5. เข้าใจโครงสร้างและการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนสำหรับบุชชิ่งแรงสูง
6. เข้าใจหลักการประเมินดิสชาร์จบางส่วนและความสูญเสียในฉนวนโดยคำนึงจากผลการทดสอบ
7. ได้รับทักษะในการศึกษาค้นคว้าข้อมูลและการประสานงานกับผู้เชี่ยวชาญรวมถึงการทำงานเป็นทีมเพื่อการทำโครงการให้สำเร็จตามเป้าหมายที่ตั้งไว้ และการทำงานในอนาคตให้สำเร็จได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 โครงสร้างของสายเคเบิลใต้ดิน [1,2]

โครงสร้างของสายเคเบิลใต้ดินประกอบด้วยจำนวนชั้นหลายชั้นอยู่ภายในซึ่งมีหน้าที่แตกต่างกันออกไป โดยหากเราพิจารณาส่วนประกอบของแต่ละชั้นโดยเริ่มจากโครงสร้างด้านในสุดของสายเคเบิลใต้ดินได้ดังนี้

2.1.1 ชั้นตัวนำ (Conductor layer)



รูปที่ 2.1 โครงสร้างชั้นตัวนำของเคเบิล XLPE

มีหน้าที่ในการนำกระแสไฟฟ้าโดยส่วนใหญ่จะทำขึ้นมาจากอะลูมิเนียมหรือทองแดง โดยจะมีลักษณะเป็นทรงกระบอกสม่ำเสมอ แต่รูปแบบในการจัดวางลวดตัวนำเพื่อประกอบเป็นตัวนำเคเบิลอาจจะแตกต่างกันออกไป โดยจะมีทั้งรูปแบบสายตัวนำแกนเดียวหรือสายตัวนำสามแกน ในทางปฏิบัติของการไฟฟ้านครหลวงจะใช้สายเคเบิลที่มีตัวนำแกนเดียวซึ่งใช้วัสดุเป็นทองแดงเพราะสามารถนำกระแสไฟฟ้าได้สูงกว่าตัวนำแบบอะลูมิเนียม ซึ่งพื้นที่หน้าตัดของตัวนำแต่ละเส้นและจำนวนของเส้นลวดที่ใช้ในการตีเกลียวจะเป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60228 โดยจะกำหนดพื้นที่หน้าตัดของตัวนำและจำนวนเส้นลวด จากนั้นนำค่าที่กำหนดทั้งสองนี้ไปหาพื้นที่หน้าตัดของลวดที่จะนำมาตีเกลียว

การตีเกลียวมีทั้งชนิดตีเกลียวกลมไม่อัดแน่น (Non-compact stranded conductor) และชนิดตีเกลียวกลมอัดแน่น (Compact round) เพื่อลดผลการเกิดดิสชาร์จแบบโคโรนา การตีเกลียวสลับทิศทางการในแต่ละชั้นจะให้ทิศทางของสนามไฟฟ้าในตัวนำหักล้างกันโดยส่งผลให้ความเครียดสนามไฟฟ้าลดลงด้วย คุณสมบัติของตัวนำทองแดงและตัวนำอะลูมิเนียมสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบคุณลักษณะของทองแดงและอะลูมิเนียม

คุณสมบัติ	ทองแดง	อะลูมิเนียม
ความนำไฟฟ้า (ที่พื้นที่หน้าตัดเท่ากัน)	1	0.6
พื้นที่หน้าตัด (ที่ความต้านทานเท่ากัน)	1	1.66
เส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากัน (ที่ความต้านทานเท่ากัน)	1	1.29
น้ำหนัก (ที่พื้นที่หน้าตัดเท่ากัน)	1	0.3
น้ำหนัก (ที่ความต้านทานเท่ากัน)	1	0.5
ความนำไฟฟ้า (%IACS)	100	61
ความต้านทานไฟฟ้าที่ 20°C ($\Omega \cdot m$)	1.724×10^{-8}	2.803×10^{-8}
สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน ($1/^{\circ}C$)	1.70×10^{-5}	2.30×10^{-5}
จุดหลอมเหลว ($^{\circ}C$)	1083	659
ความนำความร้อน ($W/cm^{\circ}C$)	3.8	2.4
ความหนาแน่นที่ 20°C	8.89	2.7

ซึ่งลักษณะการจัดเรียงตัวนำที่ใช้ในสายเคเบิลใต้ดินนั้นมีหลายลักษณะด้วยกัน ได้แก่

2.1.1.1 ตัวนำกลม (Round conductor)

รูปที่ 2.2 ตัวนำกลมมีจุดศูนย์กลางร่วมกัน

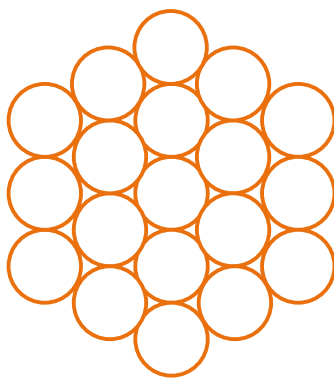
แบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ

รูปแบบที่ 1 แบบซ้อนกันที่มีจุดศูนย์กลางร่วมกัน (Concentric) มีตัวนำที่เป็นแกนกลาง 1 เส้นและมีสายเปลือกตีเกลียวล้อมรอบ โดยจะมีปรากฏการณ์ทางผิว (Skin effect) และ ความต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับ (AC resistance) และกระแสตรง (DC resistance) ที่สูงกว่าแบบตัวนำตีเกลียวอัดแน่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

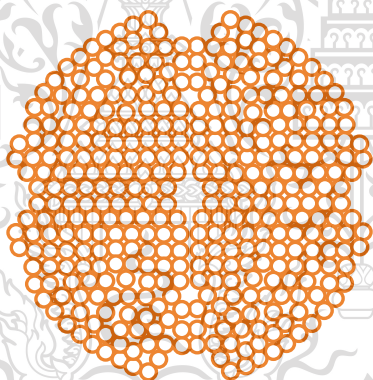
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.3 ตัวนำกลมตีเกลียวอัดแน่น

รูปแบบที่ 2 แบบตัวนำตีเกลียวอัดแน่น (Compressed) มีลักษณะที่คล้ายคลึงกับแบบตัวนำที่มีจุดศูนย์กลางซ้อนกันแต่จะทำการตีเกลียวอัดแน่นทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางมีขนาดเล็กลงและยังช่วยลดค่าวัสดุของการทำฉนวนที่นำมาหุ้ม

2.1.1.2 ตัวนำแบบแยกส่วนวงกลม (Segmental conductor)



รูปที่ 2.4 ตัวนำแบบแยกส่วนวงกลม

เป็นตัวนำที่มีการแบ่งกันออกเป็น ส่วน เช่น ตัวนำแบบแยกส่วน 90° จะแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ดังรูปที่ 2.4 และตัวนำแบบแยกส่วน 120° จะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ตัวนำชนิดนี้ใช้กับสายเคเบิลที่มีขนาดใหญ่เนื่องจากต้องการคุณสมบัติในการนำกระแสไฟฟ้าสูง [3]

ซึ่งการจัดเรียงตัวนำในลักษณะนี้นั้นมีข้อดีหรือประโยชน์ต่าง ๆ มากมาย ดังนี้

- มีความต้านทานกระแสสลับ (AC resistance) ที่ต่ำ
- เนื่องจากตัวนำแต่ละตัวมีการวางแบบสลับกันส่งผลให้ Skin effect factor ต่ำทำ

ให้ช่วยเรื่องผลของ Skin effect และ Proximity effect ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

2.1.1.3 ตัวนำแบบฮอลโล (Hollow conductor)



รูปที่ 2.5 ตัวนำแบบฮอลโล

ลักษณะของตัวนำชนิดนี้จะเป็นท่อกลวงบริเวณท่อกกลางตัวนำใช้สำหรับเติมฉนวนเหลวเพื่อใช้ในการระบายความร้อน โดยส่วนใหญ่สายประเภทนี้จะมีการเติมน้ำมันเข้าไปในท่อกกลางตัวนำ

ซึ่งการจัดเรียงตัวนำในลักษณะนี้นั้นมีข้อดีหรือประโยชน์ต่างมากมาย ดังนี้

- อัตราความต้านทานของกระแสตรงและกระแสสลับมีค่าที่ต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับตัวนำแบบซ้อนกันที่มีจุดศูนย์กลางเดียวกัน

2.1.2 ชั้นฉนวน (Insulation layer)



รูปที่ 2.6 โครงสร้างชั้นฉนวนของเคเบิล XLPE

มีหน้าที่ในการป้องกันไม่ให้เกิดกระแสไฟฟ้าเกิดการรั่วไหลหรือลัดวงจร ซึ่งทำให้เกิดการสูญเสียในระบบไฟฟ้าและอาจส่งผลให้เกิดอันตรายต่อผู้ที่สัมผัสได้ โดยวัสดุที่นำมาเพื่อสร้างฉนวนของสายเคเบิลมีอยู่ด้วยกันหลายชนิด เช่น Polyethylene (PE), Polyvinyl Chloride (PVC) และ Cross-linked Polyethylene (XLPE) เป็นต้น โดยการเลือกใช้งานในระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำจะนิยมใช้ PVC และ PE ส่วนในระบบไฟฟ้าแรงดันสูงจะนิยมใช้ XLPE, Oil Impregnated Paper (OIP) และ Ethylene Propylene Rubber (EPR) โดยตัวคุณสมบัติของฉนวนในเคเบิลจะต้องมีแรงดันที่ตกคร่อมที่ผิวนอกของฉนวนให้มีค่าที่เข้าใกล้ศูนย์ นอกจากนี้วัสดุที่ใช้ในการทำฉนวนต้องเป็นสารเนื้อเดียวกัน และต้องปราศจากสารเจือปนเพื่อป้องกันการเกิดดิสชาร์จบางส่วนและการเจาะทะลุ ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้สายเคเบิลได้รับความเสียหาย โดยขณะที่มีกระแสไฟฟ้าไหลจะเกิดความสูญเสียพลังงาน

This material is for educational purposes only. It is forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ความร้อนของฉนวนจะเป็นตัวกำหนดความสามารถในการทนความร้อนของสายเคเบิล ซึ่งการเลือกใช้ฉนวนชนิดต่างๆควรคำนึงถึงอุณหภูมิ ระดับแรงดันของระบบและสภาพแวดล้อมที่ติดตั้ง คุณสมบัติของวัสดุฉนวนที่ดีจะพิจารณาจากคุณสมบัติดังต่อไปนี้

1) มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี โดยต้องมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูง มีค่าสูญเสียไดอิเล็กตริกต่ำเพื่อป้องกันไม่ให้อุณหภูมิของฉนวนเพิ่มขึ้นเกินกว่าขีดจำกัด และมีความคงทนต่อการเกิดร่องรอยการนำไฟฟ้าที่ผิว (Tracking) เพื่อป้องกันการกัดกร่อนหรือการเสื่อมสภาพของฉนวน

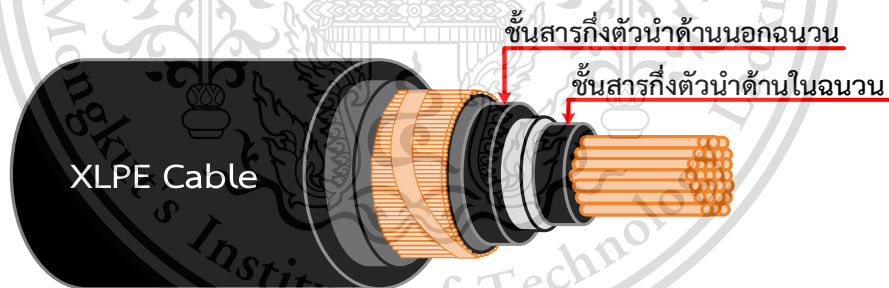
2) มีคุณสมบัติทางความร้อนที่ดี โดยต้องทนความร้อนได้ดีเนื่องจากเมื่อเกิดการผิพร่องจะทำให้ความร้อนเพิ่มสูงขึ้นซึ่งฉนวนที่ดีจะต้องทนกับความร้อนเหล่านี้ได้ สามารถระบายความร้อนได้ดี ไม่ติดไฟ และสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ

3) มีคุณสมบัติทางกลที่ดี โดยต้องมีความทนต่อแรงทางกลสูงเนื่องจากวัสดุที่นำมาทำฉนวนต้องทนต่อแรงดันทางไฟฟ้าแล้วยังต้องทนต่อการรองรับน้ำหนัก แรงกด แรงบิด หรือแรงดึงตลอดจนแรงระเบิดจากความดันก๊าซภายใน

4) มีคุณสมบัติต่อปฏิกิริยาเคมีได้ดี ไม่ทำปฏิกิริยากับสารอื่นที่ทำให้เกิดพิษแม้จะเกิดการติดไฟหรือเพลิงไหม้

5) มีคุณสมบัติการทนต่อสภาพแวดล้อมที่ดี ณ ตำแหน่งที่ติดตั้งใช้งาน ทนต่อน้ำมัน ทนต่อโอโซน ไม่ดูดความชื้น และ ทนต่อการแผ่รังสีในบางกรณี

2.1.3 ชั้นสารกึ่งตัวนำ (Semi-conductive layer)



รูปที่ 2.7 โครงสร้างชั้นสารกึ่งตัวนำของเคเบิล XLPE

แบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือชั้นสารกึ่งตัวนำด้านในฉนวน (Inner semi-conductive layer หรือ Conductor screen) และชั้นสารกึ่งตัวนำรอบนอกฉนวน (Outer semi-conductive layer หรือ Insulation screen) ซึ่งทำจากวัสดุสารกึ่งตัวนำจำพวกผ้าอาบคาร์บอน หรือเป็นชั้นที่ผ่านกระบวนการอัดของสารสังเคราะห์ พลาสติกผสมตัวนำสำหรับสายเคเบิลใต้ดินที่ใช้งานกับระดับแรงดันที่มากกว่า 2 kV จะต้องมีชั้น Conductor screen และสำหรับสายเคเบิลใต้ดินที่ใช้งานกับระดับแรงดันที่สูงกว่า 5 kV จะต้องมีโครงสร้างชั้น Insulation screen

หน้าที่ของโครงสร้างชั้น Semi-Conductive Layer มีดังนี้ [4]

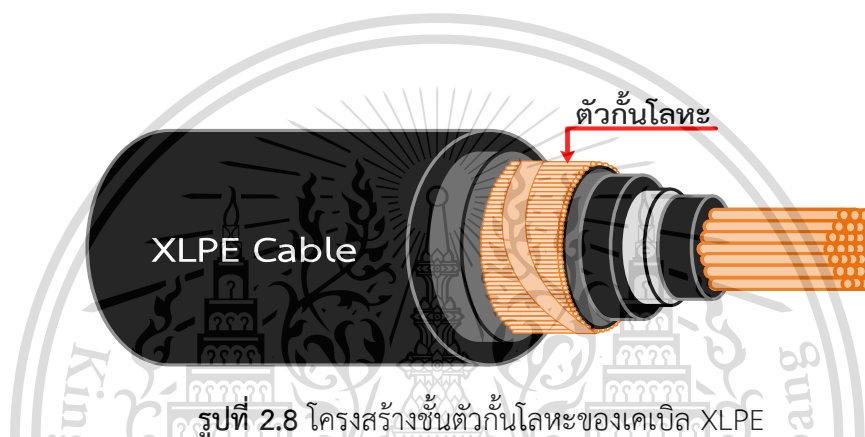
1) ทำให้ผิวสัมผัสมีความราบเรียบเพื่อลดความเครียดของสนามไฟฟ้า

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

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

- 2) ลดความเครียดของสนามไฟฟ้าบริเวณรอยต่อของฉนวนไฟฟ้าที่แตกต่างกัน
- 3) ในส่วนของ Conductor screen จะทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าตรงบริเวณรอยต่อระหว่างตัวนำกับฉนวนไม่ให้มีค่าแตกต่างกันมาก หรือทำให้สนามไฟฟ้ากระจายอย่างสม่ำเสมอตลอดความหนาของฉนวน และป้องกันไม่ให้เกิดช่องว่างอากาศที่บริเวณรอยต่อ
- 4) ในส่วนของ Insulation Screen จะทำให้การกระจายของสนามไฟฟ้าตรงบริเวณรอยต่อระหว่างฉนวนกับเปลือกโลหะดีขึ้น และยังช่วยป้องกันแสงสว่างจากภายนอกหรือสิ่งอื่น ๆ ที่จะทำให้ฉนวนเสียหาย
- 5) ช่วยป้องกันการเกิดดิสชาร์จบางส่วน

2.1.4 ชั้นตัวกั้นโลหะ (Metallic screen layer)



รูปที่ 2.8 โครงสร้างชั้นตัวกั้นโลหะของเคเบิล XLPE

มีทั้งแบบเทปหรือแบบเส้นลวดซึ่งทำจากทองแดง อะลูมิเนียม ปลูกตะกั่ว หรืออะลูมิเนียมลูกฟูก (Corrugate aluminium sheath) ซึ่งในการเลือกใช้วัสดุสำหรับโครงสร้างชั้นตัวกั้นโลหะจะต้องพิจารณาถึงความเป็นไปได้ที่จะเกิดการกัดกร่อน ความปลอดภัยทางกล และความปลอดภัยทางไฟฟ้าด้วย โดยข้อกำหนดของตัวกั้นโลหะทั้งทางไฟฟ้า รูปร่าง และช่องว่างต้องเป็นไปตามมาตรฐานของแต่ละประเทศ

หน้าที่ของตัวกั้นโลหะ (Metallic screen) มีดังนี้

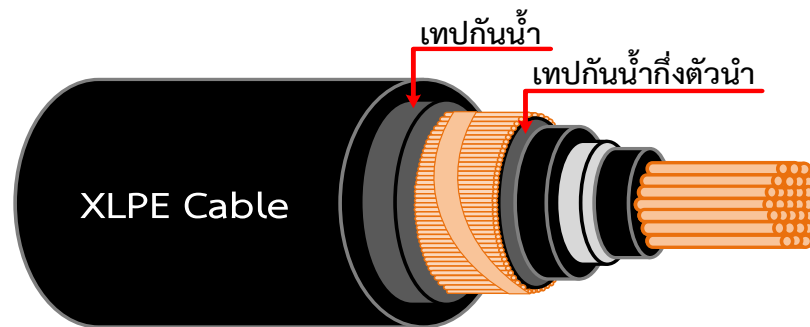
- 1) ทำหน้าที่เป็นกราวด์ สำหรับสายไฟฟ้าแรงสูง
- 2) ในกรณีเกิดการลัดวงจรจะเป็นเส้นทางให้กระแสไฟฟ้าไหลกลับ
- 3) ทำหน้าที่เป็น Mechanical Protection เพื่อป้องกันความเสียหายให้แก่ฉนวน
- 4) ทำหน้าที่เป็นชั้นกันน้ำในกรณีของสายเคเบิลใต้น้ำ (Submarine cable)
- 5) ทำหน้าที่ในการรักษาความดันภายในสำหรับสายเคเบิลประเภท Oil Fill Cable
- 6) ป้องกันสัญญาณรบกวนภายในที่เกิดขึ้นไม่ให้ออกไปรบกวนภายนอกได้
- 7) ป้องกันอันตรายเนื่องจากการสัมผัสสายเคเบิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

2.1.5 ชั้นเทปกั้นน้ำ (Water blocking tape layer)



รูปที่ 2.9 โครงสร้างชั้นเทปกั้นน้ำของเคเบิล XLPE

เป็นชั้นที่เสริมขึ้นมาในกรณีของสายเคเบิลใต้ดินแรงสูงที่ใช้ในบริเวณที่ชื้นแฉะ เพื่อป้องกันน้ำไหลเข้าไปตามแนวสายเคเบิลในกรณีที่เปลือกนอกของสายเคเบิล มีการชำรุดจากการลากสายทำให้ส่วนที่เป็นฉนวนสัมผัสกับน้ำเป็นระยะทางยาว สายเคเบิลจึงมีโอกาสชำรุดสูง ดังนั้นโครงสร้างของเทปกั้นน้ำนี้จึงต้องทำจากการสารสังเคราะห์และมี Swellable Powder (สารที่ดูดซึมน้ำเข้าไปแล้วขยายตัวมีลักษณะเป็นผงคล้ายแป้ง) โดยทั่วไปจะจัดวางอยู่ระหว่างชั้นสารกึ่งตัวนำรอบนอกฉนวนและชั้นเปลือกนอก

2.1.6 Separative tape

อาจทำมาจากวัสดุจำพวกผ้า หรือ Polyester tape ยกตัวอย่างเช่นไมลา(Mylar) มีหน้าที่ป้องกันส่วนต่างๆ ที่จะมีผลต่อสภาพฉนวน และ ตัวกันโลหะ นอกจากนี้ยังช่วยรัดตัวกันโลหะให้แน่นและช่วยให้ตัวกันโลหะไม่ติดกับเปลือกนอก (Jacket) ทำให้ไม่เกิดร่องที่ด้านในของเปลือกนอก

2.1.7 ชั้นเปลือกนอก (Jacket หรือ Oversheath) [5]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 2.10 โครงสร้างชั้นเปลือกนอกของเคเบิล XLPE นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

ทำหน้าที่ป้องกันสายเคเบิลจากการเสียดสีจากแรงกระทำภายนอก หรือจากการลากสาย การติดตั้ง หรือการขนส่ง ซึ่งมีทั้งผิวเรียบและผิวขรุขระชนิดสันมีร่องสำหรับสายเคเบิลขนาดใหญ่เพื่อลดแรงเสียดทานต่อสายเคเบิล โดยวัสดุที่ใช้ทำเปลือกนอกอาจจะทำเป็นพวก Thermoplastic compound อย่างเช่น PE และ PVC หรือसानจำพวก Elastomeric compound อย่างเช่น Polychloroprene, Chlorosulfonated, Polyethylene และ Similar polymers และควรมีคุณสมบัติที่เหมาะสม

2.2 กระบวนการผลิตสายไฟฟ้าใต้ดินฉนวน XLPE [6]

2.2.1 กระบวนการรีด (Drawing)

คือการนำเอาตัวนำเข้าเครื่องรีด โดยผ่านลูกรีดเกลียว (Roller die) เพื่อลดขนาดของสายจากขนาดใหญ่และค่อยลดขนาดลงเรื่อยๆจนได้ขนาดที่ต้องการ เพื่อนำไปขึ้นรูปโดยการตีเกลียว (Stranding) หรือจะนำมาใช้เป็นตัวนำเส้นเดี่ยว (Solid conductor) โดยวัสดุที่นำมาใช้เป็นตัวนำสำหรับนำกระแสของเคเบิลมีอยู่ 2 ชนิดได้แก่ ทองแดงและอะลูมิเนียม โดยกระบวนการรีดตัวนำจะมีหลายลักษณะ เช่น การรีดตัวนำแบบแข็ง (Hard drawn conductor) และการรีดแบบผ่านไอน้ำ (Annealed conductor) โดยการรีดลักษณะนี้จะเหมาะกับตัวนำทองแดง

2.2.2 กระบวนการขึ้นรูปตัวนำตีเกลียว (Conductor stranding)

โดยการนำตัวนำไฟฟ้าที่มีคุณสมบัติของค่าความต้านทานที่ 20°C ตามมาตรฐานกำหนด มาทำการตีเกลียวเพื่อลดค่าความต้านทานไฟฟ้าให้มีค่าต่ำลง โดยการตีเกลียวจะทำให้ตัวนำมีความยาวจริงของตัวนำเพิ่มขึ้นโดยความยาวที่วัดได้มีความยาวเท่าเดิม ซึ่งจะมีหลายรูปแบบด้วยกัน เช่น การตีเกลียวแบบ Concentric การตีเกลียวแบบ Buncher และการตีเกลียวแบบ Rope-lay

2.2.3 การหุ้ม (Extruding)

เป็นขั้นตอนการนำตัวนำไฟฟ้ามาทำการหุ้มฉนวน หรือปลอกด้วยวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนทางไฟฟ้า และมีคุณสมบัติทนต่อสภาพแวดล้อมและสารเคมีได้ดี โดยวัสดุที่นำมาใช้ส่วนใหญ่จะเลือกเป็นวัสดุที่มีความเป็นพอลิเมอร์สูง โดยจะเกิดจากการเรียงตัวของอะตอมหลายกลุ่ม เรียกว่าโมเลกุลลูกโซ่หรือโมเลกุลแบบมาโคร โดยจะมีรูปแบบการเรียงตัวอยู่ด้วยกัน 3 รูปแบบ

รูปแบบที่ 1 โพลีเมอร์แบบเส้นยาวตลอด (Linear shape) โดยการเรียงตัวจะเรียงตัวตามแนวยาวเท่านั้น โดยความยาวที่มากขึ้นจะมีน้ำหนักโมเลกุลที่มากขึ้น มีความแข็งแรงที่สูงขึ้น และทนความร้อนได้ดียิ่งขึ้น มีชื่อเรียกว่าวัสดุเทอร์โมพลาสติก (Thermoplast) หรือเทอร์โมอีลาสต์ (Thermoelast)

รูปแบบที่ 2 โพลีเมอร์แบบแยกแขนโดยรอบ (Branched shape) เป็นการเรียงตัวในลักษณะที่ทำให้เกิดพื้นที่มาโคร โดยโครงสร้างแบบนี้ทำให้โมเลกุลอยู่ห่างกัน จึงทำให้ความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้ซึ่งงานที่อาจารย์นำมาทำขึ้นเพื่อแจกจ่ายในวงจำกัดเท่านั้น ไม่สามารถนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่หรือใช้เพื่อการค้า
ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม หน้าแน่นน้อย โดยโครงสร้างแบบนี้จะจัดเป็นโครงสร้างของเทอร์โมพลาสติกอีกประเภทหนึ่งที่มีการนำไปใช้

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

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

รูปแบบที่ 3 โพลีเมอร์แบบเชื่อมโยงหรือร่างแห (Cross-linked shape) คือการเรียงตัวของกลุ่มอะตอมโดยจะเกิดการเรียงตัวของโมเลกุลออกไปทุกทิศทาง โดยโมเลกุลลูกโซ่ที่อยู่ใกล้เคียงเชื่อมต่อกันด้วยกรรมวิธีทางเคมีซึ่งเรียกว่า การต่อโมเลกุล (Intermoleculator) หรือการเชื่อมต่อแบบไขว้ (Cross Linking) โดยเมื่อมีการเชื่อมต่อแบบไขว้ที่มีความหนาแน่นน้อย วัสดุนั้นจะถูกเรียกว่าอีลาสโตเมอร์ (Elastomer) และหากการเชื่อมต่อแบบไขว้มีความหนาแน่นมากจะเรียกว่าดูโรพลาสต์ (Duroplast) โดยวัสดุชนิดนี้เมื่อได้รับความร้อนที่สูงมากจะเสียคุณสมบัติทางกลไปโดยสิ้นเชิงและไม่สามารถกลับไปเป็นรูปเดิมได้ดังนั้นการขึ้นรูปของวัสดุชนิดนี้จะทำได้โดยวิธีการอัดหรือวิธีการหล่อเท่านั้น

2.2.4 การเรียงตัวของกลุ่มอะตอม

กระบวนการของการเรียงตัวของกลุ่มอะตอมนี้ เรียกว่าพอลิรีแอกชัน (Polyreaction) สามารถแยกออกได้เป็น 3 ขบวนการ คือ

1) พอลิเมอไรเซชัน (Polymerisation) คือกระบวนการที่เกิดจากกลุ่มอะตอมเรียงตัวกันซึ่งกลุ่มอะตอมดังกล่าวนี้เรียกว่า โมโนเมอร์ (Monomer) เป็นกลุ่มเดียวกันหรือชนิดเดียวกันซึ่งจะเรียงตัวกันในแนวยาว โดยการเรียงตัวของโมโนเมอร์ชนิดเดียวกันจะถูกเรียกว่า โมโนพอลิเมอไรเซชัน (Monopolymerisation) แต่ถ้าโมโนเมอร์เกิดการเรียงตัวโดยชนิดที่แตกต่างกันมากกว่า 2 ชนิดขึ้นไปเรียกว่าโคพอลิเมอไรเซชัน (Copolymerisation)

2) พอลีคอนเดนชัน (Polycondensation) คือกระบวนการเรียงตัวกันของโมโนเมอร์ที่มีชนิดที่แตกต่างกันออกไป โดยส่วนใหญ่จะทำให้เกิดช่องว่างระหว่างกลุ่มอะตอมที่เรียงตัวกัน จึงไม่เหมาะสมกับการนำมาใช้สร้างฉนวนไฟฟ้าแรงดันสูง

3) พอลีแอดดิชัน (Polyaddition) คือกระบวนการเรียงตัวของกลุ่มอะตอมของสารประกอบกับกลุ่มอะตอมของไฮโดรเจน

2.2.5 การคำนึงถึงคุณสมบัติของฉนวน

2.2.5.1 พอลีเอทิลีน (Polyethylene : PE)

เกิดขึ้นจากกระบวนการเรียงตัวแบบพอลิเมอไรเซชันของกลุ่มอะตอมโมโนเมอร์เอทิลีน (Ethylene, C_2H_4) ในแนวยาว ซึ่งพอลีเอทิลีนจัดเป็นสารประเภทเทอร์โมพลาสต์ โดยจากลักษณะโครงสร้างของพอลีเอทิลีนจะสังเกตได้ว่าจะมีการจับตัวของอะตอมไฮโดรเจนอย่างเดียวจึงมีความสมมาตรของโมเลกุลลูกโซ่ จึงจัดอยู่ในสารไม่มีขั้ว (Non-Polar Material) ผลดังกล่าวทำให้พอลีเอทิลีนมีค่า ϵ_r ต่ำ ($\epsilon_r \approx 2.3$) และค่าสูญเสียไดอิเล็กตริกต่ำเช่นกัน ($\tan \delta = 1 \times 10^{-4}$) และมีความทนต่อความเครียดของสนามไฟฟ้าสูงมาก ดังนั้น PE จึงเป็นตัวเลือกในการนำมาทำวัสดุฉนวนของสายเคเบิลใต้ดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

2.2.5.2 High-density polyethylene (HDPE)

มีลักษณะเฉพาะคือโครงสร้างโมเลกุลลูกโซ่เรียงตัวกันตามแนวยาวโดยมีแขนง (Branch) หรือการเชื่อมต่อระหว่างลูกโซ่ที่อยู่ใกล้กันน้อยมาก (ประมาณ 5 จุด ต่อ 1,000 อะตอมของคาร์บอน) ความหนาแน่นของโมเลกุลจึงมีค่าสูง และ ค่าความถ่วงจำเพาะสูง (ประมาณ 0.95 กรัม/ลูกบาศก์เมตร) และเป็นสารเทอร์โมพลาสติกที่มีจุดหลอมเหลวค่อนข้างสูง คือ 130 - 135 °C จึงทำให้สามารถนำไปใช้งานที่มีอุณหภูมิสูงถึง 90 °C ซึ่งการนำ HDPE มาใช้งานนั้นมีข้อจำกัดที่วัสดุมีความแข็งแรงทำให้เกิดความเสียหายได้ง่ายเมื่อรับแรงทางกลเนื่องจากความหนาแน่นของโมเลกุลสูง

2.2.5.3 Low-density polyethylene (LDPE)

มีลักษณะที่คล้ายคลึงกับ HDPE แต่จะมีการเชื่อมต่อของโมเลกุลลูกโซ่ที่อยู่ในบริเวณใกล้กันกับแขนงหลักมากกว่าของ HDPE (ประมาณ 30 จุด ต่อ 1,000 อะตอมคาร์บอน) โดยจะมีคุณสมบัติคล้ายกับ HDPE แต่มีความหนาแน่นของโมเลกุลและความถ่วงจำเพาะของโมเลกุลที่ต่ำกว่า (ประมาณ 110 - 115 °C) จึงมีความอ่อนตัวมากกว่าและสามารถนำไปใช้งานที่อุณหภูมิ 70 °C ซึ่งต่ำกว่าของตัว HDPE ซึ่งการนำ LDPE มาใช้งานนั้นมีข้อเสียบางประการ เนื่องจากมีจุดหลอมเหลวที่ต่ำ เมื่อนำวัสดุชนิดนี้ไปทำฉนวนของสายเคเบิลหากเกิดการลัดวงจรเกิดขึ้นทำให้เกิดความร้อนในสายเคเบิลจนถึงจุดหลอมเหลวของ LDPE จะทำให้ LDPE หลอมละลายจนทำให้ไม่สามารถรองรับน้ำหนักของสายตัวนำที่อยู่ตรงกลางได้จนทำให้ตัวนำเลื่อนลงมาชิดขอบด้านล่างของสายเคเบิล ทำให้เกิดความผิดพลาดทางเรขาคณิตของโครงสร้างสายเคเบิล ทำให้เกิดความเครียดทางไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอ

2.2.5.4 Cross-linked polyethylene (XLPE)

มีลักษณะที่คล้ายกับ LDPE (ประมาณ 30 จุดต่อ 1,000 อะตอมคาร์บอน) ซึ่งจะมีคุณสมบัติที่คล้ายคลึงกัน เช่น ความหนาแน่นของโมเลกุล ความถ่วงจำเพาะ และจุดหลอมเหลว แต่ด้วยวิธีการทางเคมีที่ทำให้โมเลกุลเกิดการเชื่อมโยงแบบไขว้ทำให้เกิดโครงสร้างที่คล้ายกับตาข่าย ซึ่งจะเป็นการเรียงตัวแบบร่างแห ดังนั้น LDPE ที่ผ่านขบวนการทางเคมีนี้จะทำให้เกิด XLPE โดยจะทำให้มีคุณสมบัติที่ XLPE ไม่เกิดการหลอมละลายแม้อุณหภูมิสูงถึง 115 °C แต่จะกลายเป็นยางอิลาสติก เนื่องจาก XLPE ที่การเรียงตัวแบบร่างแหจึงจัดเป็นสารประเภทอิลาสโตเมอร์ ดังนั้น XLPE จึงมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางกลที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ LDPE และยังสามารถนำไปใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงกว่า 90 °C ซึ่งในปัจจุบัน XLPE เป็นวัสดุที่เหมาะสมสำหรับนำมาทำฉนวนของสายเคเบิลชนิดฉนวนพอลิเมอร์

โดยการหุ้มจะต้องประกอบไปด้วยท่ออบสายโดยใช้ไอน้ำ (Stream) หรือ Heater กับก๊าซ N₂ ที่อุณหภูมิ 400-500°C และท่อหล่อเย็นจะมีการหุ้มหรืออัด (Extruder) พร้อมกันทั้ง 3 ชั้น คือชั้นสารกึ่งตัวนำภายในฉนวน, ชั้นเนื้อฉนวน และชั้นสารกึ่งตัวนำภายนอกฉนวน ซึ่งจะช่วยลดขั้นตอนการผลิตลงและไม่ทำให้เกิดสารเจือปนหรืออนุภาคจำพวกฝุ่นเข้ามาแทรกระหว่างชั้นฉนวน และชั้นสารกึ่งตัวนำ เพราะการหุ้มฉนวน XLPE ของสายเคเบิลชนิดนี้จะต้องอยู่ในห้องที่มีการควบคุม

ฝุ่นละออง ไม่ให้ฝุ่นละอองเข้าไปผสมกับเนื้อฉนวนซึ่งอาจจะเป็นสาเหตุของการเกิดเบรกดาวน์ การหุ้มพร้อมกันจึงเป็นการออกแบบที่ดีและปลอดภัยมากที่สุดต่ออายุเคเบิลในการผลิตสายเคเบิลชนิดนี้ โดยหลังจากการหุ้มฉนวนควรนำสายตัวนำที่หุ้มด้วยฉนวนไปทำการอบสายเพื่อทำการไล่แก๊สที่ตกค้างในเนื้อฉนวน และป้องกันไม่ให้เกิดปัญหาในขั้นตอนการติดตั้ง

2.2.5.5 การพันชั้นเทปกั้นน้ำ (Semi-conductive water blocking tape)

ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำและดูดความชื้นจะช่วยกระจายความเครียดของสนามไฟฟ้าบนพื้นผิวฉนวน เพื่อยับยั้งการซึมผ่านของน้ำและความชื้นที่เข้าทางหัวสายและปลายสาย

2.2.5.6 การตีเกลียวแกนชั้นตัวกันโลหะ (Core stranding)

ด้วยลวดทองแดงล้อมรอบสายเพื่อรองรับการลัดวงจร และ ป้องกันสนามไฟฟ้าขณะใช้งานไม่ให้เป็นอันตราย และ ช่วยป้องกันสัญญาณความถี่ที่เกิดขึ้นไปรบกวนอุปกรณ์ที่อยู่ใกล้เคียง

2.2.5.7 การพันชั้นเทปกั้นน้ำรอบนอก (Non-conductive water blocking tape)

ซึ่งเทปที่มีคุณสมบัติดูดความชื้นจะช่วยยับยั้งการซึมผ่านของน้ำทางด้านหัวสายและปลายสาย และจากนั้นนำมาทำการหุ้มชั้นเปลือกนอกเพื่อป้องกันหรือช่วยรับความเสียหายทางกลของสายเคเบิลในขณะจัดเก็บ ติดตั้ง และใช้งาน

2.3 ข้อมูลและคุณสมบัติเกี่ยวกับหัวต่อสายเคเบิลและข้อต่อเคเบิล

2.3.1 หัวต่อสายเคเบิล (Cable terminator)

หัวต่อสายเคเบิลเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ต่อเข้ากับปลายสายเคเบิลขนาดที่มีการตัดปลายเพื่อสิ้นสุดระบบเคเบิลหรือเพื่อเชื่อมต่อบริเวณเคเบิลเข้ากับระบบไฟฟ้าหรืออุปกรณ์อื่นๆ เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า โดยมีจุดประสงค์เพื่อลดความชื้นของสนามไฟฟ้า เนื่องจากผลของการเบี่ยงเบนของเส้นสนามไฟฟ้าที่บริเวณปลายสายที่จะทำการต่อเข้ากับระบบหรืออุปกรณ์อื่นๆ ซึ่งจะนำไปสู่การเกิดความเครียดไฟฟ้าสะสมภายในสายเคเบิล ดังนั้นจึงจำเป็นต้องต่อหัวต่อสายเคเบิลเพื่อทำการควบคุมให้ไม่เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าที่จุดใดจุดหนึ่งมากเกินไปจนเกิดความเสียหาย โดยใช้ส่วนที่เรียกว่า Stress relief cone สำหรับกระจายเส้นสนามไฟฟ้าหรือเลือกใช้วัสดุที่ค่าความต้านทานสนามไฟฟ้าสูง สิ่งที่สำคัญที่สุดในการติดตั้งหัวต่อสายเคเบิลคือการปกสายและการทำความสะอาด โดยหากปกสายไม่ดีอาจทำให้การต่อหัวต่อสายไม่เรียบร้อย และหากอุปกรณ์ไม่สะอาด เช่น มีเศษตัวนำหรือเศษผงอื่นๆ เหลืออยู่อาจทำให้เกิดดิสชาร์จบางส่วนได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

2.3.1.1 หัวต่อสายชนิดพอร์ซเลน (Porcelain type) [7]



รูปที่ 2.11 หัวต่อสายเคเบิลชนิดพอร์ซเลน [8]

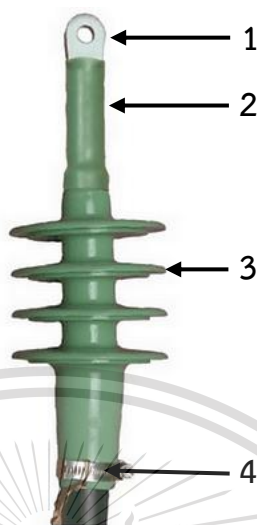
หัวต่อสายเคเบิลชนิดนี้มีคุณสมบัติป้องกันความชื้นและน้ำ มีความทนทานต่อสภาพแวดล้อมสูง แต่ต้องใช้งานและขนย้ายด้วยความระมัดระวังเนื่องจากมีขนาดใหญ่และน้ำหนักมากจึงจำเป็นที่จะต้องระวังไม่ให้กระแทกรุนแรงจนเกินไป เนื่องจากอาจทำให้พอร์ซเลนแตกหรือมีรอยร้าวที่ผิวพอร์ซเลนได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

2.3.1.2 หัวต่อเคเบิลชนิด Slip on type



รูปที่ 2.12 หัวต่อสายเคเบิลชนิด Slip on type [9]

สามารถติดตั้งได้เร็วแต่มีข้อเสียคือใช้แรงในการดันหัวต่อสายเคเบิลใต้ดิน แต่ละรุ่นจะใช้ได้เฉพาะของขนาดสายเคเบิลนั้น ซึ่งต้องมีขนาดฉนวนเหมาะสมพอดี มิฉะนั้นจะเกิดช่องอากาศภายใน ทำให้เกิดความเสียหายและมีชิ้นส่วนประกอบกันหลายชิ้นส่วน คือ อุปกรณ์ควบคุมความเครียด ผิวฉนวน และปีกฉนวน จากรูปที่ 2.12 สามารถแจกแจงองค์ประกอบของหัวต่อสายเคเบิลชนิด Slip on type ได้ดังนี้

ตารางที่ 2.2 โครงสร้างหัวต่อสายชนิด Slip on type

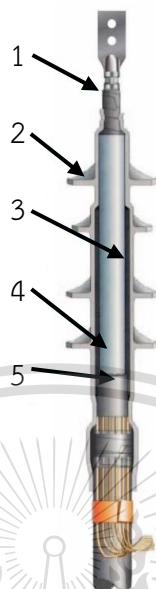
ตำแหน่ง	อุปกรณ์
1	หางปลาต่อสายเคเบิล
2	ปลอกซิลิโคนสำหรับกันน้ำ
3	Housing วัสดุซิลิโคนโดยมีส่วนสำหรับควบคุมสนามไฟฟ้าอยู่ภายใน
4	จุดที่มีการต่อลงดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

2.3.1.3 หัวต่อสายชนิด Cold shrink type



รูปที่ 2.13 หัวต่อสายเคเบิลชนิด Cold shrink [10]

สามารถใช้กับสายเคเบิลได้หลายขนาดและสามารถป้องกันความชื้น น้ำ แรงทางกล และสารเคมีได้ดี ซึ่งมีขั้นตอนการติดตั้งน้อยและไม่ต้องใช้เครื่องเป่าไฟในการประกอบทำให้ปลอดภัยกับผู้ปฏิบัติงาน จากรูปที่ 2.13 สามารถแจกแจงองค์ประกอบของหัวต่อสายเคเบิลชนิด Cold shrink type ได้ดังนี้

ตารางที่ 2.3 โครงสร้างหัวต่อสายชนิด Cold shrink

ตำแหน่ง	อุปกรณ์
1	ส่วนสำหรับกันความชื้น
2	การฉนวนภายนอก
3	ท่อสำหรับควบคุมสนามไฟฟ้าสู่ภายนอก
4	ส่วนซิลิโคนสำหรับควบคุมการกระจายสนามไฟฟ้า
5	เทปสำหรับเติมพื้นที่ว่างในหัวต่อสาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

2.3.1.4 หัวต่อสายเคเบิลชนิด Heat shrink type



รูปที่ 2.14 หัวต่อสายเคเบิลชนิด Heat shrink [11]

สามารถใช้กับเคเบิลได้หลายขนาดแต่ในการประกอบต้องใช้เครื่องเป่าไฟซึ่งต้องใช้ความระมัดระวังเนื่องจากอาจเป็นอันตรายกับผู้ปฏิบัติงานได้ และต้องใช้ความชำนาญในการต่อสาย เพื่อให้การหดของหัวต่อสายสม่ำเสมอและแนบชิดกับเคเบิลได้ดี

2.3.2 ข้อต่อเคเบิล (Cable joint)

เป็นส่วนประกอบสำคัญในการเชื่อมเคเบิลสองเส้นเข้าด้วยกันสำหรับระบบเคเบิลใต้ดินที่มีความยาวมากกว่าความยาวสายเคเบิลเส้นเดียว สามารถแบ่งประเภทข้อต่อเคเบิลได้ดังนี้

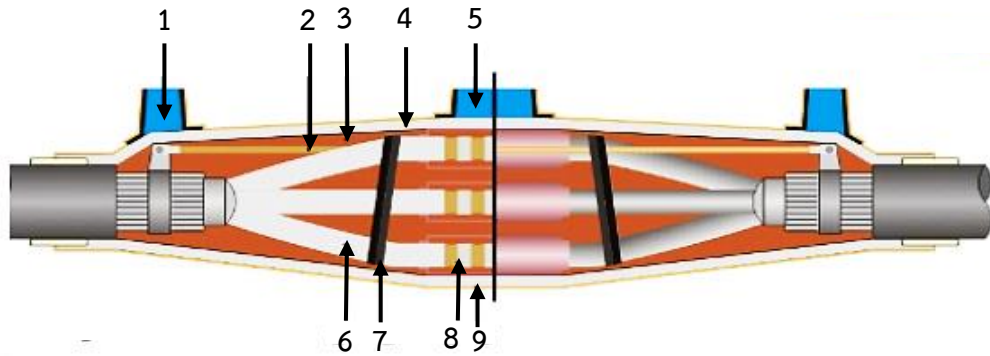
2.3.2.1 ข้อต่อเคเบิลชนิด Straight through joint

เป็นข้อต่อแบบที่ใช้กันมากที่สุดโดยมีการต่อสายเคเบิลเข้าด้วยกันในลักษณะต่อสายโดยตรง โดยอาจจะต้องมีเงื่อนไขในการติดตั้งที่ต้องคำนึงถึงหลายอย่าง เช่น เนื้อฉนวน ลักษณะแกน เป็นต้น เพื่อให้การเชื่อมต่อนั้นไม่สมบูรณ์และไม่สร้างความเสียหาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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



รูปที่ 2.15 ข้อต่อเคเบิลชนิด Straight joint [12]

ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนประกอบต่างๆ ดังนี้

- 1) Riser
- 2) Earth continuity connection
- 3) C.J compound
- 4) Plastinet
- 5) Pouring gate
- 6) Core Insulation
- 7) PVC (NA) Tape
- 8) Ferrule
- 9) BOPP Tape two layers each half overlapped over plastinet

ข้อต่อแบบ Straight through joint นั้นติดตั้งได้ทั้งภายในและภายนอกอาคารหรือทั้งใต้น้ำและใต้ดิน โดยข้อต่อสายเคเบิลนั้นป้องกันสายเคเบิลจากความเสียหายเชิงกลและความชื้นอีกด้วย

2.3.2.2 ข้อต่อเคเบิลชนิด Branch joint



รูปที่ 2.16 ข้อต่อเคเบิลชนิด Branch joint แบบ T

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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



รูปที่ 2.17 ข้อต่อเคเบิล Branch joint แบบ Y

ข้อต่อเคเบิลชนิดนี้สามารถแบ่งได้เป็นสองประเภทตามโครงสร้างและการใช้งานคือ หัวต่อเคเบิลที่มีโครงสร้างและการต่อสายแบบตัว Y และ T ซึ่งโดยทั่วไปแล้วนิยมใช้แบบ Y เพื่อเชื่อมต่อเคเบิลแรงดันต่ำ โดยมีลักษณะไม่มีโครงป้องกันอาจมีจำนวน 1-5 แกน

2.3.2.3 ข้อต่อเคเบิลชนิด Pot end joint



รูปที่ 2.18 ข้อต่อเคเบิลชนิด Pot ends joint [13]

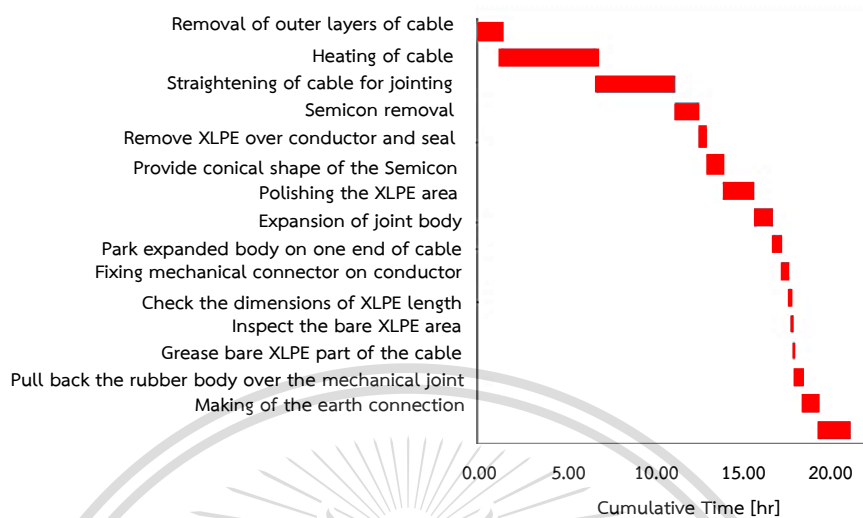
เป็นข้อต่อเคเบิลสำหรับการเชื่อมต่อปลายสายที่ยังไม่ได้ใช้งานของสายเคเบิลหรืออยู่ในช่วงรอการใช้งาน โดยใช้ในการหุ้มปลายสายเคเบิลเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหายทางกล ความชื้น หรือสภาพแวดล้อมต่างในบริเวณที่ติดตั้งปลายเคเบิล

ส่วนสำคัญอีกส่วนที่สำคัญมากไม่ว่าจะเป็นหัวต่อสายเคเบิลหรือข้อต่อเคเบิลคือ การปกสายและการติดตั้งเนื่องจากการปกสายที่ดีจะทำให้มีโอกาสเกิดดีสชาร์จบางส่วนในบริเวณที่ประกอบปลดลง โดยสายส่วนใหญ่ในปัจจุบันมักจะมี XLPE เป็นส่วนประกอบหลักในการทำตัวสาย ใน การปกสายนั้นจะต้องมีการปกเนื้อสายหรือส่วนที่เป็น XLPE และมีการพันหรือตัดชั้นตัวกัน

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

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

โลหะให้ถูกต้องเพื่อลดการเกิดสนามไฟฟ้าภายในและขั้นตอนที่กินเวลามากที่สุดในการติดตั้งข้อต่อคือ การขัน ดังรูปที่ 2.19 [14]



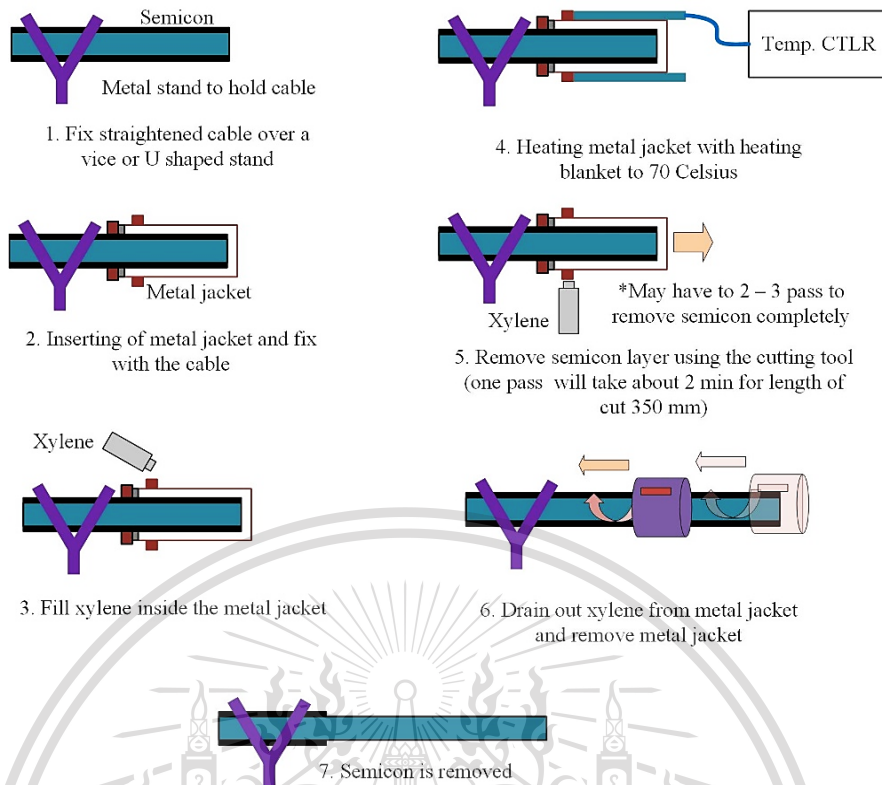
รูปที่ 2.19 เวลาที่ใช้ในการติดตั้งข้อต่อเคเบิลในกระบวนการต่างๆ

จากรูปที่ 2.19 แสดงให้เห็นว่าการติดตั้งเคเบิลนั้นใช้ระยะเวลาในการติดตั้งค่อนข้างมาก จึงมีการคิดค้นการปรับปรุงการติดตั้งเพื่อให้ลดระยะเวลาในการติดตั้ง แต่ได้ผลลัพธ์เท่าเดิมหรือดีกว่าหากมีการศึกษาเพิ่มเติมในอนาคต โดยกระบวนการปรับปรุงนั้นมีสองส่วนคือการยึดและการขันสายเคเบิล โดยการยึดสายเคเบิลนั้นจากที่ได้ทำการศึกษามามี 3 วิธีการ คือ Differential scanning calorimetry (dsc), Stress relaxation time optimization (maxwell model) และ Dynamic mechanical analysis (dma) โดยแต่ละวิธีการนั้นคิดค้นขึ้นเพื่อแก้ปัญหาในแต่ละส่วนที่ต่างกัน แต่ทั้ง 3 นั้นเน้นไปที่การลดความเครียดอันเนื่องมาจากความร้อน ความดันจากการผลิต หรือการขนส่ง ส่วนการขันนั้นเป็นขั้นตอนที่ต้องใช้ความชำนาญมาก เพราะหากการขันทำแบบไม่มีประสิทธิภาพอาจทำให้เกิดดิซซาร์จขึ้นระหว่างชั้นของสายเคเบิลหรือเกิดดิซซาร์จขึ้นภายในตัวข้อต่อได้ โดยหลังจากที่ได้ทำการปรับปรุงขั้นตอนการขันแล้วนั้นก็มีขั้นตอนและการเปรียบเทียบการใช้เวลาดังนี้

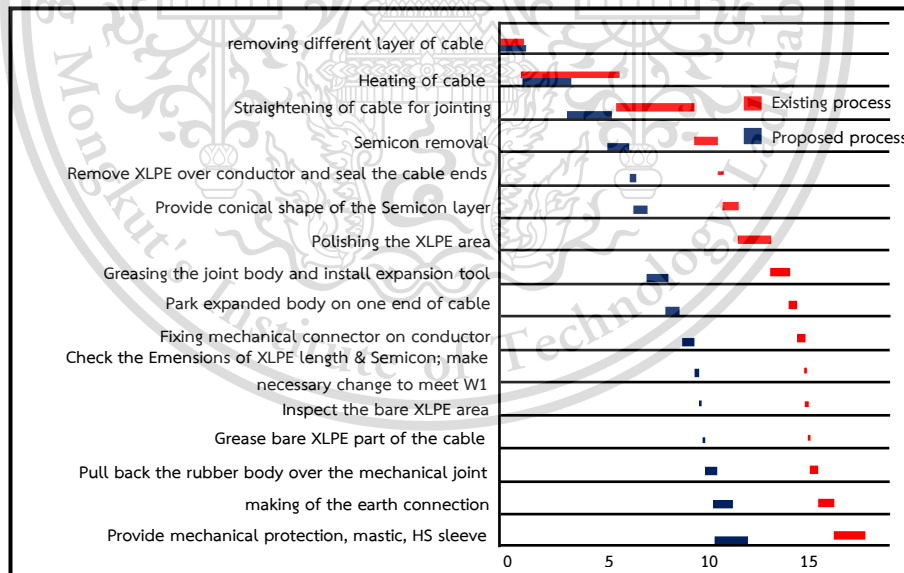
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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



รูปที่ 2.20 ขั้นตอนการตัดที่ได้รับการปรับปรุงแล้ว



รูปที่ 2.21 การเปรียบเทียบเวลาในการทำงานก่อนและหลังปรับปรุง

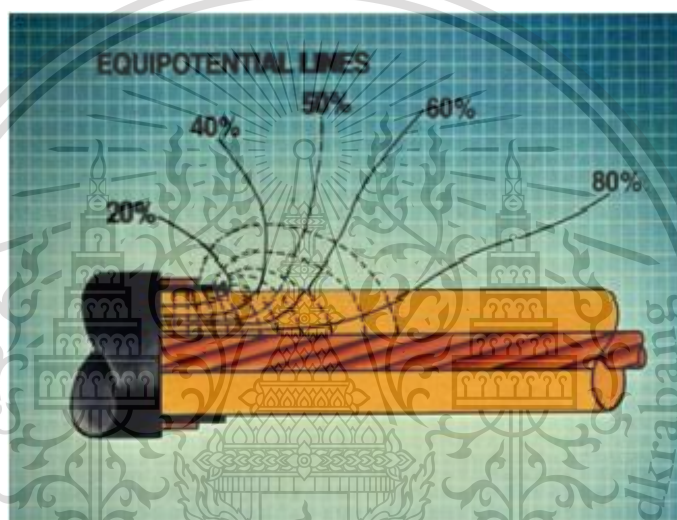
การปรับปรุงขั้นตอนนั้นไม่เพียงแต่ทำให้การทำงานนั้นสะดวกยิ่งขึ้นและยังลดเวลาการทำงานลดลงราวๆ 10 ชั่วโมง เมื่อเทียบกับวิธีการดั้งเดิม ไม่นับญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

2.3.3 ข้อบกพร่องในข้อต่อและหัวต่อสายเคเบิล [15]

ข้อบกพร่องในข้อต่อและหัวต่อสายเคเบิลส่วนใหญ่เกิดจากการติดตั้งที่ไม่ได้มาตรฐาน หรือขาดความชำนาญในการติดตั้งของผู้ติดตั้งทำให้เกิดความเสียหายต่อฉนวน ในการติดตั้งข้อต่อหรือหัวต่อสายเคเบิลนั้นมีขั้นตอนสำคัญที่เรียกว่าการปกสายหรือการต่อสาย เป็นขั้นตอนที่สำคัญมากในการติดตั้งข้อต่อหรือหัวต่อสายเคเบิล โดยในสายเคเบิลใต้ดินทั่วไปที่ไม่ได้มีการตัดต่อนั้นเมื่อมีการบ่อนแรงดันเข้าไปจะมีเส้นแรงไฟฟ้าที่กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอตลอดความยาวเคเบิล แต่เมื่อสายเคเบิลมีการถูกตัดต่อสายตัวนำที่ถูกปกจะต้องรักษาระยะห่างระหว่างสายตัวนำกับ Shield ควบคุมสนามไฟฟ้าให้เพียงพอเพื่อไม่ให้เกิดกระแสไหลข้ามจากตัวนำไปยัง Shield ซึ่งถ้าฉนวนนั้นบางเกินไปจะทำให้เกิดการเบี่ยงเบนอย่างกะทันหันของสนามไฟฟ้าซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 การเบี่ยงเบนของเส้นสนามไฟฟ้า

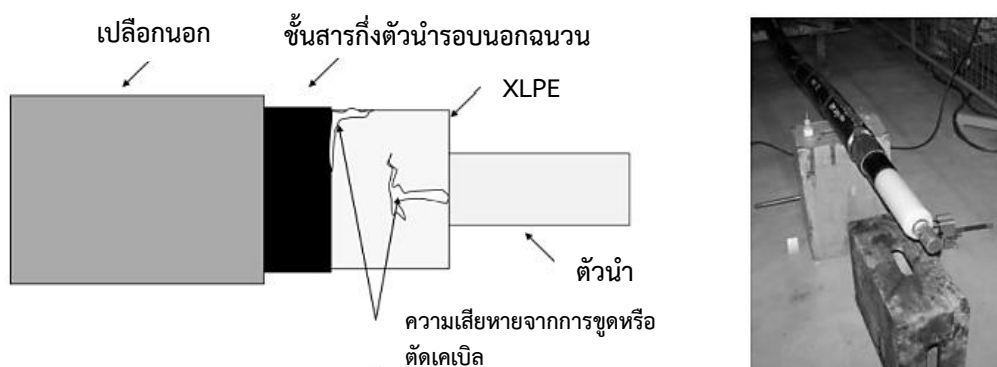
นอกจากนี้ข้อบกพร่องอาจเกิดจากปัญหาอื่น ๆ ได้ไม่ว่าจะเป็นปัญหาช่องว่างหรือการปนเปื้อนบนพื้นผิว การที่ผิวเนื้อฉนวนได้รับแรงทางกล การปกชั้นสารกึ่งตัวนำรอบนอกฉนวนน้อยเกินไป การปกชั้นสารกึ่งตัวนำรอบนอกฉนวนมากเกินไป ความเสียหายต่อส่วนควบคุมสนามไฟฟ้าหรือการปิดผนึกข้อต่อและหัวต่อสายเคเบิลที่ไม่สมบูรณ์ก็สามารถส่งผลให้เกิดข้อบกพร่องขึ้นได้ทั้งหมดซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

2.3.3.1 ช่องว่างและการปนเปื้อนบนผิวฉนวน



รูปที่ 2.23 ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับฉนวนระหว่างการปลอกและต่อฉนวน

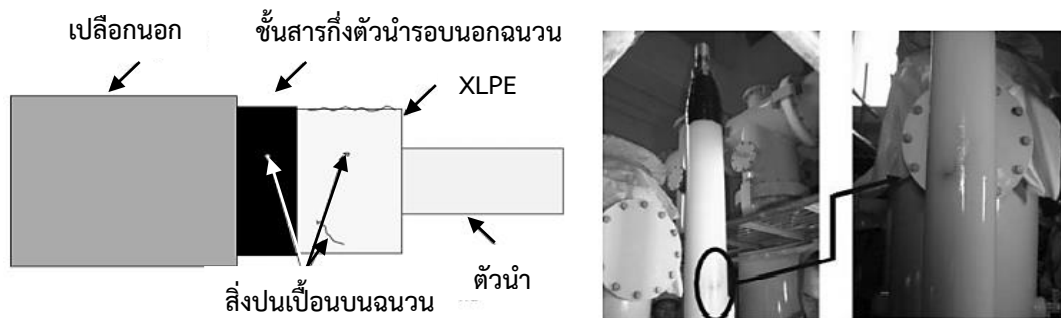
ความผิดปกติที่อาจเกิดขึ้นจากการประกอบคือช่องว่างหรือการปนเปื้อน ระหว่างส่วนประกอบสำหรับควบคุมสนามและฉนวนของเคเบิล ซึ่งอาจเกิดจากการติดตั้งที่ไม่ถูกต้องหรือไม่สะอาดพอหรืออาจเกิดจากความเสียหายทางกล ช่องว่างสามารถเกิดได้จากการกระจายตัวที่ไม่สมบูรณ์ของการติดตั้งเจลที่มีพื้นฐานเป็นน้ำหรือซิลิโคนซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.23(ซ้าย) ปัจจัยอื่นประกอบด้วย ความหยาบพื้นผิวของการปกสายเคเบิล แรงที่ใช้ในการดันข้อต่อหรือโคนควบคุมสนามไฟฟ้าเข้าสู่ปลายสายด้วยกระบวนการปกเคเบิลต้องดูแลเรื่องการนำชั้นสารกึ่งตัวนำออกก่อนที่จะต่อข้อต่อหรือหัวต่อสายเคเบิล ความเสียหายต่างๆหรือรอยแหว่งที่ฉนวนอาจส่งผลให้เกิดช่องว่างอากาศที่ใต้โคนควบคุมสนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

2.3.3.2 ผิวฉนวนได้รับความเสียหายทางกล



รูปที่ 2.24 การปนเปื้อนบนพื้นผิวของฉนวน

ฉนวนเคเบิลจำเป็นต้องสะอาดและแห้งก่อนทำกระบวนการเชื่อมต่อ หากฉนวนสกปรกมีฝุ่นหรือทรายจะทำให้เกิดการบิดเบือนของเส้นสนามไฟฟ้าภายในและส่งผลให้เกิดโดยสารปนเปื้อนโดยทั่วไปแล้วจะเป็นทรายหรือเศษจากการปกอกเคเบิล

2.3.3.3 การปกอกชั้นสารกึ่งตัวนำยาวเกินไป



รูปที่ 2.25 การต่อเคเบิลโดยยังมีชั้นสารกึ่งตัวนำเหลืออยู่

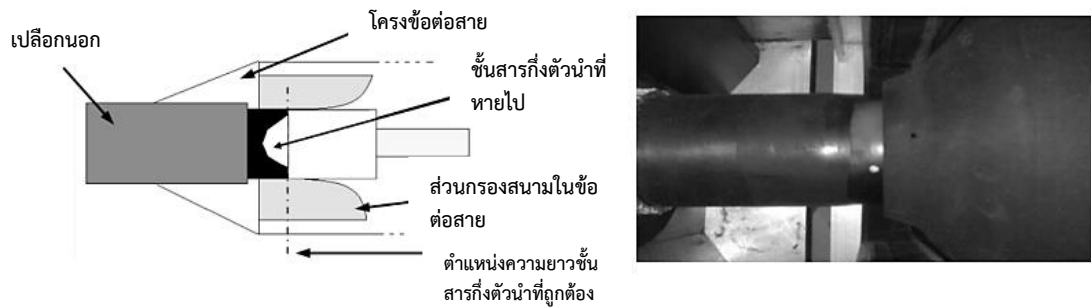
ในข้อต่อต้องปกอกชั้นสารกึ่งตัวนำรอบนอกฉนวนออกเพื่อต่อเคเบิลกับตัวควบคุมสนามไฟฟ้าที่ข้อต่อสาย การปกอกน้อยเกินไปอาจทำให้เหลือชั้นสารกึ่งตัวนำที่ปกอกไม่หมดที่หน้าสัมผัสระหว่างฉนวนเคเบิลและตัวข้อต่อที่สามารถส่งผลต่อดิซชาร์จบางส่วนที่ขอบระหว่างฉนวนเคเบิลกับฉนวนของข้อต่อเคเบิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

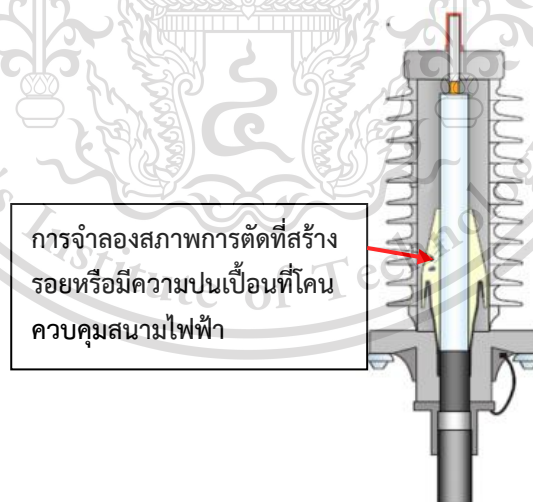
2.3.3.4 การปกชั้นสารกึ่งตัวนำสิ้นเกินไป



รูปที่ 2.26 การต่อเคเบิลโดยมีบริเวณที่ไม่มีชั้นสารกึ่งตัวนำ

ข้อบกพร่องนี้จำลองสถานการณ์เคเบิลบางส่วนที่ไม่ได้มีซิลด์เข้าไปในตัวข้อต่อ เมื่อการเชื่อมต่อระหว่างส่วนควบคุมสนามไฟฟ้าในข้อต่อและชั้นสารกึ่งตัวนำของเคเบิลที่หายไป เนื่องจากการปกชั้นสารกึ่งตัวนำนี้มากเกินไปอาจทำให้เกิดดิสชาร์จตามผิวได้ โดยขนาดของดิสชาร์จบางส่วนขึ้นอยู่กับขนาดของชั้นสารกึ่งตัวนำที่หายไป ข้อบกพร่องนี้อาจเกิดจากผลลัพธ์ของความไม่สมบูรณ์ของเคเบิลหรือการใช้สารทำความสะอาดที่ไม่เหมาะสมกับชนิดของอุปกรณ์ การสัมผัสกันระหว่างชั้นสารกึ่งตัวนำรอบนอกฉนวนและข้อต่อเคเบิลแสดงดังในรูปที่ 2.26

2.3.3.5 ความเสียหายที่โคนควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้า



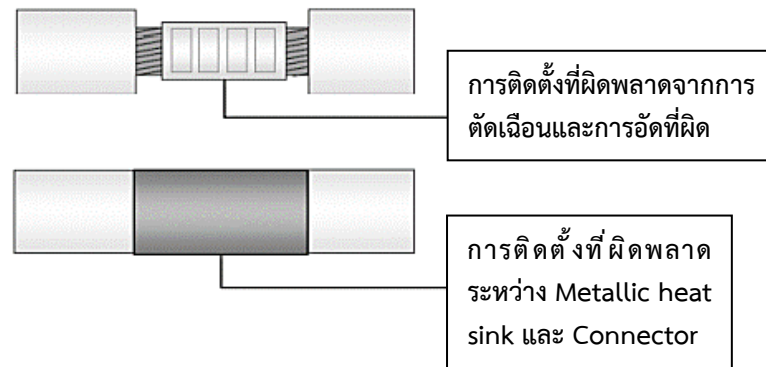
รูปที่ 2.27 ความผิดปกติที่โคนควบคุมสนามไฟฟ้า

สำหรับอุปกรณ์ควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้า เช่น Deflectors สำหรับอุปกรณ์
เอกสารนี้เป็นประเภทนี้ชั้นสารกึ่งตัวนำรอบนอกฉนวนได้ถูกนำออกจากฉนวนเคเบิลด้วยอุปกรณ์พิเศษ พื้นผิวฉนวน
ที่เปลือยเปล่านั้นต้องสะอาดและเรียบโดยการขัด ร่องรอยของการแหงหรือรอยข่วนทั้งหมดตลอด
ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม
พื้นผิวควรถูกกำจัดเพราะร่องรอยเหล่านี้ทำให้ความเข้มสนามไฟฟ้าสูงขึ้น

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

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

2.3.3.6 การต่อข้อต่อที่ไม่ถูกต้อง



รูปที่ 2.28 การต่อสายตัวนำที่ข้อต่อสาย

ปัญหาส่วนใหญ่ของตัวเชื่อมต่อเกิดจากสองสาเหตุคือ หน้าสัมผัสที่ไม่แนบสนิทและความเสียหายที่ตัวนำก่อนนำมาประกอบในข้อต่อ ผลลัพธ์คือมีความต้านทานเพิ่มขึ้นและการผลิตความร้อน ในกรณีของตัวนำอะลูมิเนียมสามารถนำไปสู่การเกิดจุด Hot spot บริเวณตัวนำซึ่งสาเหตุของความผิดพลาดทางความร้อน การประกอบข้อต่อที่ไม่ถูกต้องจะสร้างความร้อนขึ้นที่บริเวณนั้นและเกิดการเสื่อมสภาพของฉนวนเมื่อถึงอุณหภูมิที่กำหนด ส่วนที่สำคัญของการประกอบตัวเชื่อมต่อสำหรับประเภทเฉพาะของข้อต่อคือ heat-sink/shield โดยเฉพาะการเชื่อมต่อระหว่าง Metallic heat sink และตัวเชื่อมต่อเป็นส่วนสำคัญของความเสถียรทางความร้อนภายในโครงสร้างข้อต่อ

สถานการณ์นี้อ้างถึงปรากฏการณ์ที่การเพิ่มของอุณหภูมินำไปสู่การเพิ่มอุณหภูมิที่สูงกว่า ภายใต้อุณหภูมิสูงการนำไฟฟ้าของวัสดุฉนวนอาจเปลี่ยนแปลงด้วยผลการเพิ่มของการไหลของกระแสไฟฟ้าการเปลี่ยนแปลงทางเคมี เช่น การหลอมเหลวหรือการสลายตัวผ่านพันธะทางเคมี ซึ่งผลที่ตามมาคืออุณหภูมิสูงถูกปล่อยออกมาบริเวณที่เรียกว่าจุด Hot spot

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

2.3.3.7 การปิดผนึกข้อต่อและหัวต่อสายที่ไม่สมบูรณ์

การปิดผนึกของหัวต่อสายเคเบิลนั้นสำคัญมากเนื่องจากความเป็นไปได้ของการที่ความชื้นผ่านเข้ามา การใช้ขนาดและมิติที่ไม่ถูกต้อง การเลือกวัสดุที่สึกกร่อนเร็ว และการปนเปื้อนของตัวกลางฉนวนน้ำมันหรือแก๊ส การปิดผนึกที่ไม่สมบูรณ์นั้นเป็นสาเหตุของการซึมของน้ำและกระแสไฟฟ้ารั่ว ความชื้นที่ซึมเข้ามาภายในข้อต่อสามารถเปลี่ยนการกระจายตัวของสนามและพฤติกรรมของดิสชาร์จบางส่วน

ในหัวต่อสาย น้ำที่ขังอยู่สามารถทำให้เกิดการเสื่อมสภาพภายในชั้นส่วนโลหะและส่วนท้ายของหัวต่อสาย ข้อบกพร่องของการประกอบเหล่านี้ไม่ได้ทำให้เกิดการเบรกดาว์นหลังการป้อนแรงดันทดสอบ อย่างไรก็ตามสิ่งเหล่านี้กระตุ้นและก่อให้เกิดกระบวนการสลายตัวภายในหัวต่อสาย ผลกระทบของการผนึกที่ไม่สมบูรณ์สามารถเป็นได้หลายประการ เช่น กระแสไฟฟ้ารั่วไหล พฤติกรรมดิสชาร์จบางส่วน และความต้านทานแรงดันเบรกดาว์นของฉนวนภายในตัว โดยข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นจากสาเหตุต่างๆสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ข้อบกพร่องและสาเหตุที่ทำให้เกิดจุดผิดพลาด

สาเหตุ	ปัจจัยที่ทำให้เกิด	ข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นได้	อาการ
การขนส่ง / การติดตั้ง	<ul style="list-style-type: none"> - ความผิดพลาดของคน - แรงดึงที่สูงเกินไป - รัศมีการดัดเล็กเกินไป - ใช้เครื่องมือผิด - ข้อบกพร่องของการดึงตัวหมุนหรือตัวดึงไฮดรอลิก อุปกรณ์ทำให้เกิดแรงดึงหรือแรงกดที่มากไปบนเคเบิลหรือข้อต่อ - ผุหรือผลกระทบจากสิ่งแวดล้อม 	<ul style="list-style-type: none"> - เกิดช่องว่างหรือรอยแตกบนฉนวน - มีการหนาทนเบรกดาว์นต่ำลง - ความเครียดบนฉนวนและเกิดความเครียดเชิงกลบนฉนวน - เกิดการเปลี่ยนเป็นตัวนำบนฉนวนและการเสีรูปของตัวอุปกรณ์ - ความเสียหายบนเปลือกเคเบิล 	<ul style="list-style-type: none"> - ความเครียดสนามไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น - เกิดความร้อนเกิดเฉพาะจุด - ความทนทานการเบรกดาว์นต่ำ - การปนเปื้อน - PD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

ตารางที่ 2.4 (ต่อ) ข้อบกพร่องและสาเหตุที่ทำให้เกิดจุดผิดพลาด

สาเหตุ	ปัจจัยที่ทำให้เกิด	ข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นได้	อาการ
การติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ	<ul style="list-style-type: none"> - ความผิดพลาดของคน - การขาดความชำนาญ - ขาดความรู้และประสบการณ์ - ใช้เครื่องมือผิด - การประกอบผิดมิติและวิธีการ - การใช้วัสดุที่ผิดเช่น ใช้วัสดุปิด - ผนึกที่มีปฏิกิริยาต่อการเสื่อมสลายได้ง่าย 	<ul style="list-style-type: none"> - การกระจายทางสนามไฟฟ้าที่ผิดภายในข้อต่อและหัวต่อสาย - ช่องว่างและความปนเปื้อน - ความไม่บริสุทธิ์ - การเบี่ยงเบนของชั้นกึ่งฉนวน - ข้อบกพร่องของโคนควบคุมสนามไฟฟ้าและพื้นผิวฉนวน - มีน้ำและความชื้นซึมเข้าด้านใน 	<ul style="list-style-type: none"> - เกิดความร้อนเกิดเฉพาะจุด - ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงขึ้น - ความทนทานต่อการเบรกดาวน์ต่ำ - การเพิ่มของ กระแสไฟฟ้ารั่วไหล - การเพิ่มของความสูญเสียในฉนวน



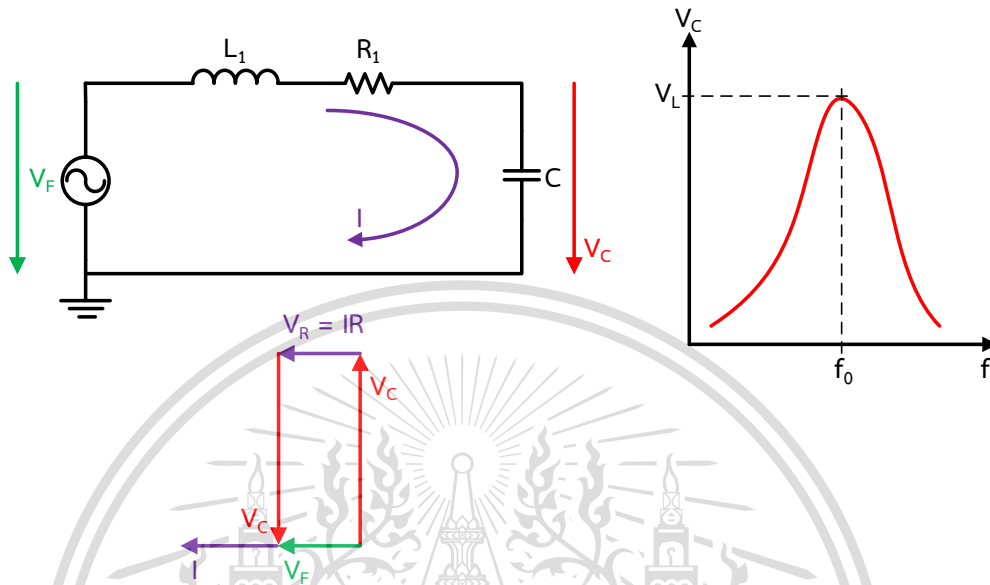
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

2.4 การทดสอบแรงดันกระแสสลับด้วยวงจรเรโซแนนซ์ [16]

2.4.1 หลักการทดสอบด้วยวงจรเรโซแนนซ์



รูปที่ 2.29 วงจรทดสอบเรโซแนนซ์พื้นฐาน(บน) แผนภาพเฟสเซอร์(ล่าง) และ Resonance curve(ขวา)

การให้วงจรทดสอบอยู่ในสภาวะเรโซแนนซ์ซึ่งเป็นการให้ความถี่ของสัญญาณแรงดันทดสอบเท่ากับความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency, f_0) ซึ่งเกิดจากการทำให้แรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุหรืออุปกรณ์ทดสอบมีค่าเท่ากัน ($V_L = V_C$) โดยสามารถเขียนแผนภาพเฟสเซอร์ได้ดังรูปที่ 2.29 และแสดงสมการของความถี่ธรรมชาติได้ดังสมการที่ 2.1

$$V_L = V_C$$

$$\omega L = \frac{1}{\omega C}$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.1)$$

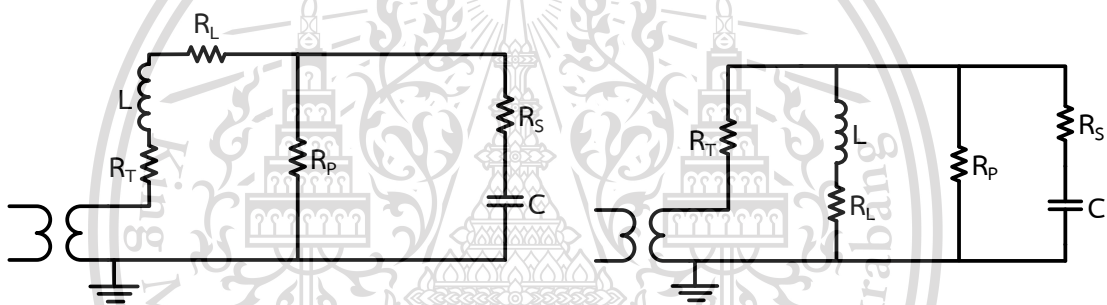
โดยในการทดสอบเรโซแนนซ์จะใช้ค่าตัวประกอบคุณภาพ (Quality factor, Q) ในการบอกถึงประสิทธิภาพของวงจรการทดสอบ ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างกำลังไฟฟ้าที่โหลดต้องการต่อกำลังไฟฟ้าสูญเสียซึ่งจะมีเพียงกำลังไฟฟ้าสูญเสียจริงเท่านั้น หรือจะได้ว่าค่าตัวประกอบคุณภาพนั้นเป็นอัตราส่วนระหว่างแรงดันทดสอบต่อแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้า (Feeding voltage, V_F) ได้เช่นกัน ดังสมการที่ 2.2

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

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

$$Q = \frac{S_C}{P_R} = \frac{V_C}{V_F} = \frac{I}{IR} = \frac{1}{\omega_0 C \cdot R} = \sqrt{\frac{L}{C \cdot R^2}} \approx \frac{V_T}{V_F} \quad (2.2)$$

ซึ่งการทดให้วงจรทดสอบอยู่ในสภาวะเรโซแนนซ์นั้นสามารถทำได้ 2 วิธี วิธีที่หนึ่ง จะใช้การปรับค่าเหนี่ยวนำของรีแอคเตอร์แรงสูงจนได้ความถี่ของสัญญาณป้อนเข้า (f_F) เท่ากับความถี่ธรรมชาติ เรียกระบบการทดสอบนี้ว่าวงจรเรโซแนนซ์ปรับค่าเหนี่ยวนำ (Inductance-tuned resonant circuit, ACRL) หรือใช้วิธีโดยการป้อนสัญญาณไฟฟ้าเข้าวงจรทดสอบผ่านเครื่องปรับความถี่ไฟฟ้า (Frequency converter) ด้วยเพื่อให้ได้สัญญาณแรงดันทดสอบที่มีความถี่ธรรมชาติออกมา ซึ่งเรียกว่าวงจรเรโซแนนซ์ปรับความถี่ (Frequency-tuned resonant circuit, ACRF) โดยทั้งสองระบบนี้อาจมีข้อจำกัดในการปรับวงจรทดสอบให้ได้เงื่อนไขเรโซแนนซ์ เนื่องจากเงื่อนไขเรโซแนนซ์ $f_F = f_0$ นั้นไม่สามารถใช้ได้กับกรณีที่โหลดมีค่าเก็บประจุสูงหรือต่ำมากๆ



รูปที่ 2.30 วงจรทดสอบเรโซแนนซ์แบบอนุกรม(ซ้าย)และแบบขนาน(ขวา)

โดยจะต้องออกแบบหม้อแปลงที่ใช้ในการทดสอบให้กำลังไฟฟ้าที่เพียงพอกับกำลังไฟฟ้าป้อนเข้าสูงสุดและแรงดันทดสอบที่ต้องการ ซึ่งจะเป็นกรณีที่ตัวประกอบคุณภาพมีค่าต่ำสุด ในวงจรเรโซแนนซ์อนุกรมจะต่อรีแอคเตอร์แรงสูงอนุกรมกับขดลวดแรงสูงของหม้อแปลงกระตุ้น ดังรูปที่ 2.30(ซ้าย)

สำหรับวงจรเรโซแนนซ์แบบขนานจะใช้สำหรับจ่ายให้กับวงจรการทดสอบแบบพิเศษ (Special test) ที่อุปกรณ์ทดสอบมีค่าเก็บประจุสูงมากๆและมีแรงดันไฟฟ้าที่ค่อนข้างต่ำ เช่น ตัวเก็บประจุ (Capacitor banks) ซึ่งในวงจรเรโซแนนซ์ขนานนี้จะต่อรีแอคเตอร์แรงสูงขนานกับขดลวดแรงสูงของหม้อแปลงไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.30(ขวา) ดังนั้นหม้อแปลงไฟฟ้าจึงมีอิทธิพลมากในการปรับตั้งค่าแรงดันไฟฟ้าทดสอบ โดยจะได้ค่าตัวประกอบคุณภาพมีค่าเป็นดังสมการที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพียง $Q = \frac{S_C}{P_R} = \frac{I_C}{I_F} \approx \frac{I_T}{I_F}$ นี้ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ (2.3)

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

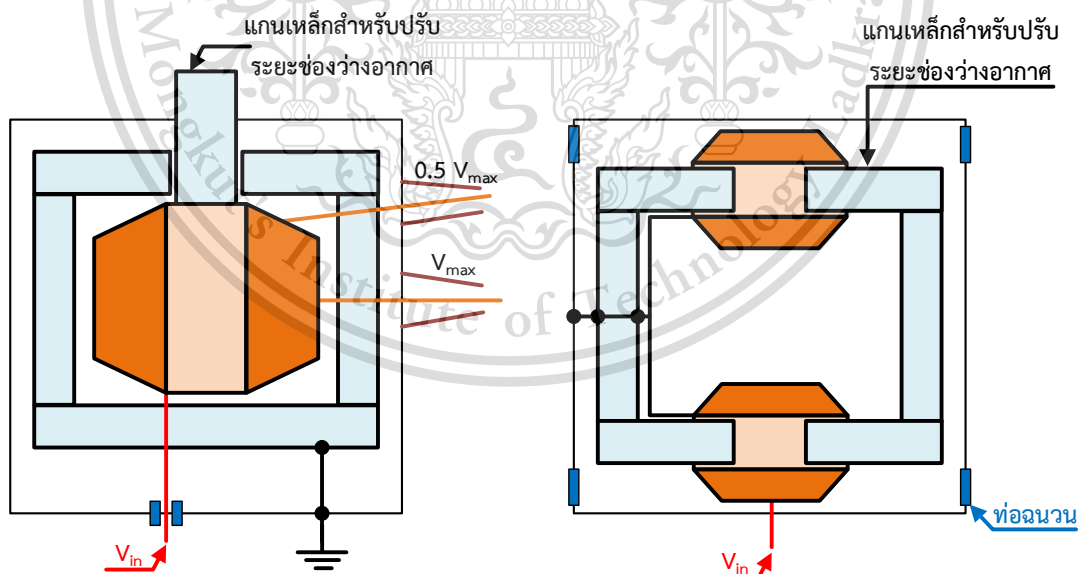
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากการต่อวงจรทดสอบเรโซแนนซ์แบบขนานที่ต่อวงจรสัญญาณป้อนเข้าที่มีตัวประกอบคุณภาพ (Q_F) ขนานกับวงจรของอุปกรณ์ทดสอบที่มีตัวประกอบคุณภาพ (Q_T) ทำให้ตัวประกอบคุณภาพรวมของการทดสอบมีค่าเป็นดังสมการที่ 2.4

$$Q = \frac{1}{\frac{1}{Q_F} + \frac{1}{Q_T}} = \frac{Q_F \cdot Q_T}{Q_F + Q_T} \quad (2.4)$$

ตัวประกอบคุณภาพเป็นพารามิเตอร์ที่ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการทดสอบ โดยในกรณีที่เป็นวงจรปรับค่าเหนี่ยวนำจะมองว่าตัวประกอบคุณภาพของวงจรป้อนเข้ามีค่าคงที่ ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 50-200 ขึ้นอยู่กับการออกแบบ และหากการทดสอบเคเบิลยาวที่หน้างานซึ่งมีกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ต้องการและ Q_T นั้นมีค่าสูง ดังนั้นตัวประกอบคุณภาพรวมจะกำหนดด้วยค่าตัวประกอบคุณภาพของวงจรป้อนเข้า ในทางกลับกันในกรณีของการทดสอบเฉพาะแบบ (Type test) ให้กับเคเบิลสั้นๆ ร่วมกับหัวต่อปลายสายชนิดน้ำ (Water termination) ด้วยค่าเก็บประจุของโหลดที่มีค่าต่ำและค่าความต้านทานน้ำที่ปลายสายที่ต่อขนานอยู่ทำให้เกิดโหลดความต้านทานเพิ่มขึ้นมา ดังนั้นตัวประกอบคุณภาพรวมในกรณีนี้จะกำหนดด้วยค่าตัวประกอบคุณภาพของวงจรรูปรณ์ทดสอบ

2.4.2 วงจรทดสอบเรโซแนนซ์ปรับค่าเหนี่ยวนำ



รูปที่ 2.31 แกนเหล็กชนิดเซล(ซ้าย)และแกนเหล็กชนิดสองแกน(ขวา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการปรับค่าเหนี่ยวนำของรีแอกเตอร์สามารถปรับโดยใช้แกนเหล็กที่สามารถปรับระยะได้ ซึ่งการปรับตำแหน่งของแกนเหล็กจะทำให้ค่าเหนี่ยวนำของรีแอกเตอร์เปลี่ยนไป ดังรูปที่ 2.31 ซึ่งแกนเหล็กชนิดเซลจะมีแกนเหล็กตรงกลางที่ปรับระยะได้เพียงแกนเดียวและแกนเหล็กชนิด

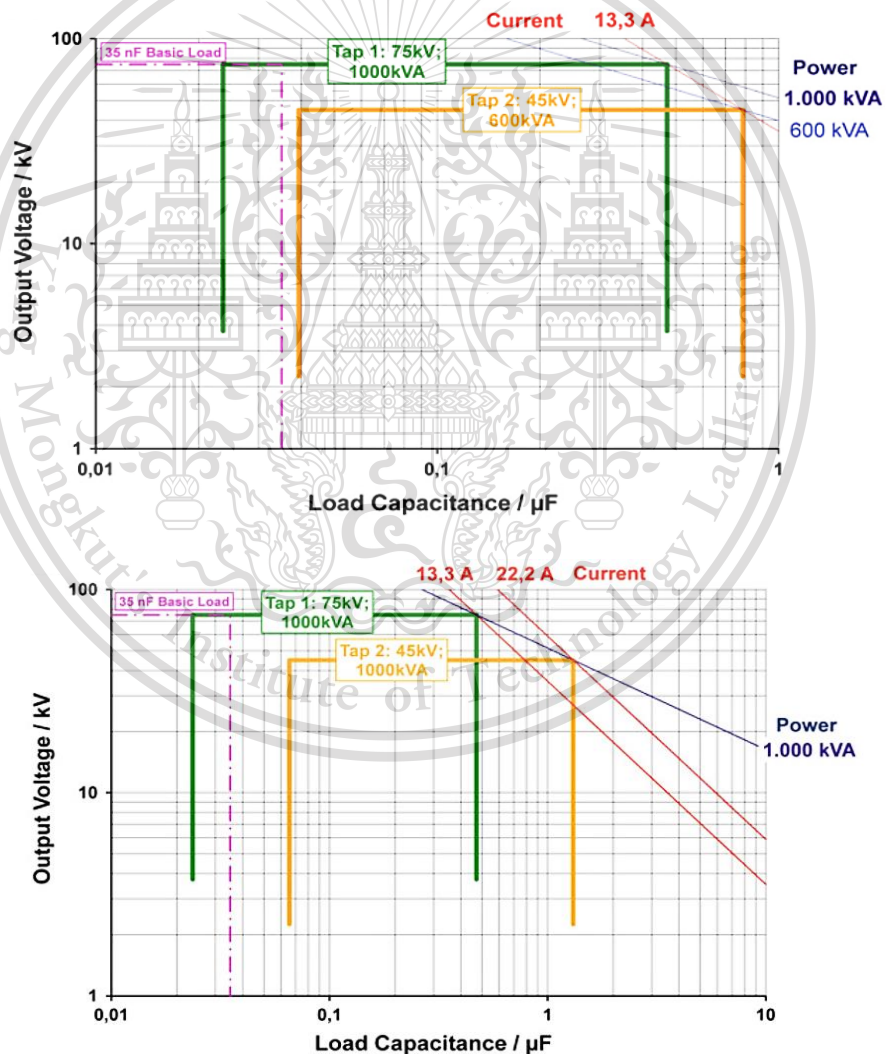
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

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

สองแกนจะปรับระยะความกว้างของช่องว่างอากาศได้ตำแหน่งละ $a/2$ โดยค่าเหนี่ยวนำนั้นขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ต่างๆดังสมการที่ 2.5

$$L = \frac{k \cdot \mu_0 \cdot w^2 \cdot A}{a} \tag{2.5}$$

- เมื่อ
- L = ค่าความเหนี่ยวนำของรีแอคเตอร์แรงสูง
 - k = แฟคเตอร์ค่าคงที่
 - μ_0 = ค่าซึมซาบของช่องว่างอากาศ
 - w = จำนวนรอบของขดลวด
 - A = พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก
 - a = ระยะความกว้างของช่องว่างอากาศ



รูปที่ 2.32 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขาออกและขนาดของโหลดสำหรับรีแอคเตอร์แรงสูงชนิดเอกสสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า กระแสไฟฟ้าคงที่(บน)และชนิดกำลังไฟฟ้าคงที่(ล่าง) ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

จากสมการที่ 2.5 ค่าความเหนี่ยวนำของรีแอคเตอร์สูงสุด (L_{max}) จะมีความกว้างของช่องว่างอากาศมีค่าต่ำสุด (a_{min}) และได้เงื่อนไขเรโซแนนซ์ตามสมการที่ 2.1 ด้วยค่าเก็บประจุของโหลดต่ำสุด C_{min} ในทางกลับกัน C_{max} จะสัมพันธ์กับค่าเหนี่ยวนำต่ำสุดที่มีระยะความกว้างช่องว่างอากาศสูงสุด การเพิ่มความกว้างของช่องว่างอากาศนั้น ฟลักซ์แม่เหล็กสเตรย์และค่าความสูญเสียจะเพิ่มตามไปด้วยและทำให้เกิดพฤติกรรมของตัวเหนี่ยวนำไม่เป็นเชิงเส้นและมีค่าตัวประกอบคุณภาพต่ำลง จึงทำให้อัตราส่วนการปรับความกว้างของช่องอากาศถูกจำกัดอยู่ที่ประมาณ $a_{max} / a_{min} \approx 20$ และทำให้อัตราส่วนขนาดของโหลดที่สามารถทดสอบได้ $C_{max} / C_{min} \approx 20$ ดังแผนผังแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขาออกและโหลดตัวเก็บประจุที่สามารถทดสอบได้ดังรูปที่ 2.32 และสมการที่ 2.6

$$\frac{C_{max}}{C_{min}} = \frac{L_{min}}{L_{max}} \approx \frac{a_{max}}{a_{min}} \quad (2.6)$$

โดยทั่วไปวงจรเรโซแนนซ์จะใช้ค่าเก็บประจุของโหลดพื้นฐาน (Basic load capacitor, $C_b \geq C_{min}$) ซึ่งทำให้เกิดเป็นสภาวะเรโซแนนซ์และสามารถทำงานโดยไม่มีค่าเหนี่ยวนำจากอุปกรณ์ทดสอบ ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญในการตรวจสอบระบบทดสอบเรโซแนนซ์ โดยตัวเก็บประจุพื้นฐานนี้ใช้เป็นตัวแบ่งแรงดันหรือตัวเก็บประจุเกี่ยวค้ำสำหรับการวัดดิซชาร์จบางส่วนหรือตัวกรองสัญญาณแรงสูง



รูปที่ 2.33 รีแอคเตอร์ถังโลหะ

รีแอคเตอร์ถังโลหะ (Tank-type reactors) การออกแบบรีแอคเตอร์ถังโลหะขึ้นอยู่กับการฉนวนและปัจจัยทางความร้อน โดยมักจะออกแบบโดยมีแท่งสำหรับแรงดัน V_i ที่มีขนาดต่ำกว่าแรงดันพิกัด (V_{max}) ของรีแอคเตอร์ ขดลวดสามารถออกแบบสำหรับกระแสที่ I ซึ่งใช้ขดลวดเพียงชนิดเดียวและกำลังไฟฟ้าที่แรงดัน V_i นี้จะมีค่าแปรผันตามอัตราส่วนแรงดัน V_i / V_m ดังรูปที่ 2.37(บน) โดยที่ขดลวดทำจากขดลวดย่อย (Sub-windings) ที่มีคุณสมบัติเหมือนกัน ในทางกลับกัน หากออกแบบสำหรับกำลังไฟฟ้าให้คงที่ อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้า i_i / I_m จะเพิ่มตามส่วนกลับของอัตราส่วนแรงดัน V_i / V_m โดยกระแสที่สูงขึ้นนี้ต้องใช้ขดลวดที่หนาขึ้น โดยที่ขดลวดทำจากขดลวดย่อยที่ต่างกัน ส่วนการออกแบบรีแอคเตอร์ถังเหล็กที่ดีจะใช้แกนเหล็กแบบเชล ดังรูปที่ 2.31(ซ้าย)

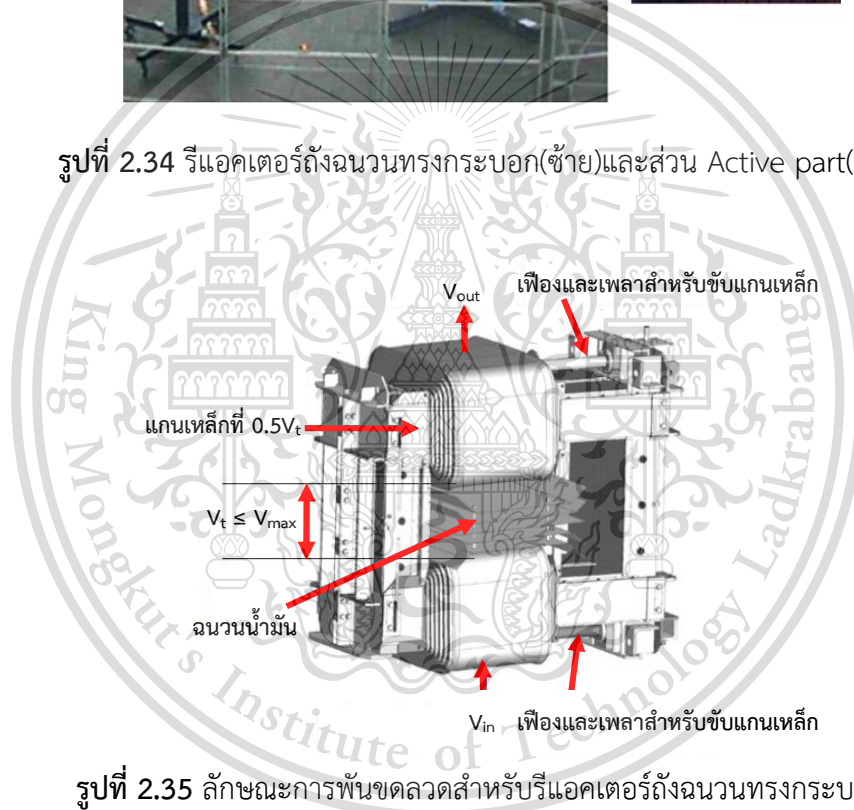
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

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

เนื่องจากมีความเสถียรสูงในการปรับระยะแกนอากาศและขดลวดของรีแอกเตอร์ถึงเหล็กออกแบบ โดยให้มีการปรับแก้ปแรงดันไฟฟ้าโดยหากเพิ่มเพียงแท็บเดียวจะใช้บุชซึ่งแต่หากมีสามแท็บขึ้นไป จะต้องติดตั้ง No-load tap-changer เข้าไปด้วย โดยรีแอกเตอร์ถึงเหล็กนี้ไม่สามารถนำมาต่อใช้งานแบบแคสเคด (Cascade) เพื่อใช้งานในระดับแรงดันที่สูงขึ้นได้



รูปที่ 2.34 รีแอกเตอร์ถึงฉนวนทรงกระบอก(ซ้าย)และส่วน Active part(ขวา)



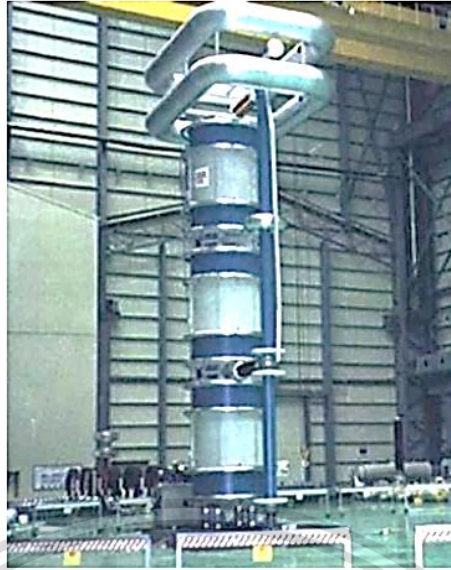
รูปที่ 2.35 ลักษณะการพันขดลวดสำหรับรีแอกเตอร์ถึงฉนวนทรงกระบอก

รีแอกเตอร์ชนิดทรงกระบอก (Cylinder-type reactors) ใช้แกนเหล็กแบบสองแกน โดยปรับระยะแกนด้วยการปรับที่แกนเหล็กทั้งสองฝั่งหรือเพียงฝั่งเดียวขึ้นอยู่กับกรออกแบบ โดยขดลวดจะแบ่งเป็น 2 ส่วน โดยต้นขดลวดส่วนล่างจะเชื่อมต่อกับฝาปิดด้านล่างที่มีการต่อลงดิน และปลายของขดลวดส่วนบนจะต่อกับฝาด้านบนที่มีพิกัดแรงดันสูง ส่วนที่เรียกว่า Active part เป็นจุดที่มีแรงดันครึ่งเดียวของแกนเหล็กเอง ส่วนโลหะทรงกระบอกทำหน้าที่ควบคุมสนามภายในสำหรับส่วนที่เป็น Active part ที่อยู่ในน้ำมันและภายนอกสำหรับพื้นผิวของรีแอกเตอร์ที่เป็นอากาศ โดยส่วนการ

ฉนวนทรงกระบอกอีกชิ้นหนึ่งมีกักรนำมาใช้แทนบุชซึ่งของรีแอกเตอร์ การกระจายความเข้มสนามการค้ำ
ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม ห้าพันห้าหมื่นห้าพันห้าร้อยห้าสิบห้าถึงห้าพันห้าหมื่นห้าพันห้าร้อยห้าสิบห้า

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

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



รูปที่ 2.36 การต่อแคสเคดรีแอกเตอร์ถึงฉนวนทรงกระบอก 3 ชั้น

การต่อรีแอกเตอร์ทรงกระบอกแบบแคสเคด สามารถต่อใช้แบบอนุกรมสำหรับแรงดันที่สูงขึ้นได้ด้วยการซ้อนกันเป็นชั้น (Stack) ดังรูปที่ 2.36 โดยจะใช้เมื่อต้องการใช้แรงดันทดสอบที่สูงขึ้นที่มีกระแสทดสอบไม่สูงมากนัก สำหรับกรณีที่ต้องใช้กระแสทดสอบสูงขึ้นสามารถนำรีแอกเตอร์มาต่อขนานกันได้

2.4.3 วงจรทดสอบเรโซแนนซ์ปรับค่าความถี่ไฟฟ้า

เมื่อมีการใช้กับอุปกรณ์ทดสอบที่ต่างกัน ทำให้ความถี่ธรรมชาติเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ช่วงในการปรับค่าของวงจรเรโซแนนซ์ช่วงค่าความถี่ที่ยอมรับได้ โดยค่าเก็บประจุของโหลดสูงสุดจะระบุค่าความถี่ในการทดสอบต่ำสุด โดยต้องทราบค่าเหนี่ยวนำของรีแอกเตอร์ก่อนแล้ว ซึ่งช่วงความถี่ที่สามารถปรับได้ตามที่มาตรฐานการทดสอบแรงดันสูงกระแสล้นอนุญาติ ดังนี้

$$C_{\max} = \frac{1}{(2\pi f_{\min})^2 \cdot L} \quad \text{และ} \quad C_{\min} = \frac{1}{(2\pi f_{\max})^2 \cdot L} \quad (2.7)$$

หรือ

$$\frac{C_{\max}}{C_{\min}} = \left(\frac{f_{\max}}{f_{\min}} \right)^2 \quad (2.8)$$

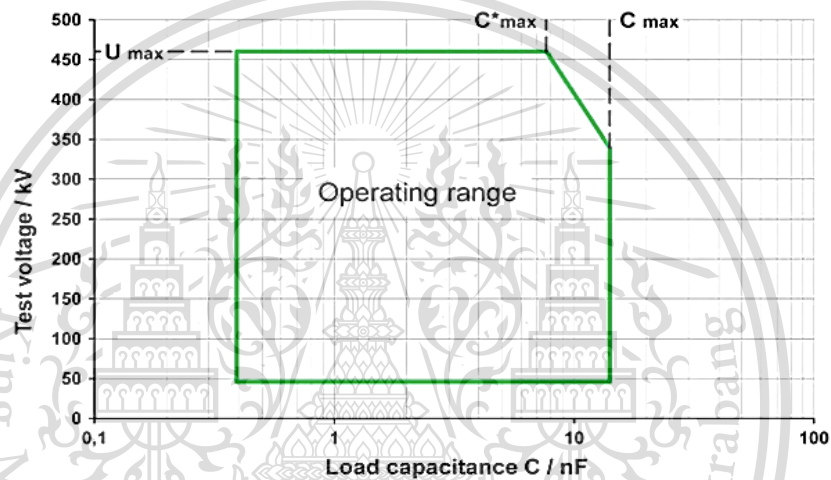
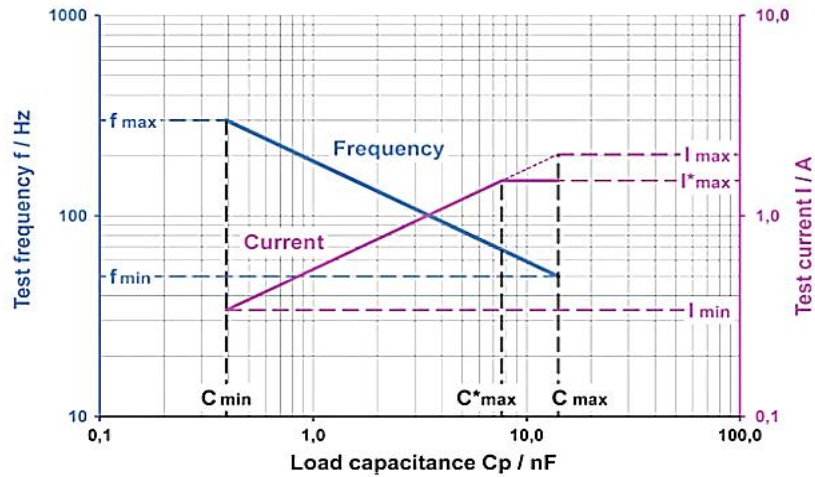
และกระแสไฟฟ้าทดสอบสูงสุดมีค่าเท่ากับ

$$I_{\max} = 2\pi f_{\min} \cdot C_{\max} \cdot V_T = V_T \cdot \sqrt{\frac{C_{\max}}{L}} \quad (2.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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



รูปที่ 2.37 ช่วงความถี่ที่สามารถปรับได้(บน)และช่วงแรงดันที่สามารถทดสอบได้(ล่าง)

จากสมการที่ 2.8 สามารถคำนวณลักษณะการทำงานของวงจรทดสอบเรโซแนนซ์ปรับความถี่ได้ การเพิ่มโหลดจากโหลดขนาดต่ำสุดไปยังโหลดขนาดสูงสุด ความถี่จะลดลงจาก f_{max} ไปยัง f_{min} ในขณะเดียวกันค่ากระแสไฟฟ้าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับโหลดที่เพิ่มขึ้น จึงอาจทำให้กระแส I_{max} ที่ได้มีค่าสูงกว่ากระแสที่ออกแบบสำหรับความร้อนที่เกิดขึ้น I^*_{max} ดังรูปที่ 2.37(บน) จึงต้องมีการจำกัดค่ากระแสให้ไม่เกินค่า I^*_{max} ด้วยการลดแรงดันทดสอบลงโดยที่ยังอยู่ในช่วงค่าเก็บประจุของโหลดในแผนภาพ ดังรูปที่ 2.37(ล่าง)

จึงสามารถกล่าวได้ว่ากำลังไฟฟ้าทดสอบสูงสุดเกิดขึ้นที่กรณีใช้ความถี่ในการทดสอบต่ำสุดคือ $S_T = V_T \times I_{max}$ แต่สมการนี้อาจยังไม่ใช่ค่าพารามิเตอร์ที่มีการใช้ทั่วไป เนื่องจากการขึ้นอยู่ กับค่าความถี่ของการทดสอบด้วย ซึ่งทั่วไปมักจะนำมาเทียบกับกำลังไฟฟ้าที่ความถี่ 50 หรือ 60 Hz ดังสมการที่ 2.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน $S_{50} = \frac{50}{f_{min}} \cdot S_T$ เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์(2.10) การค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

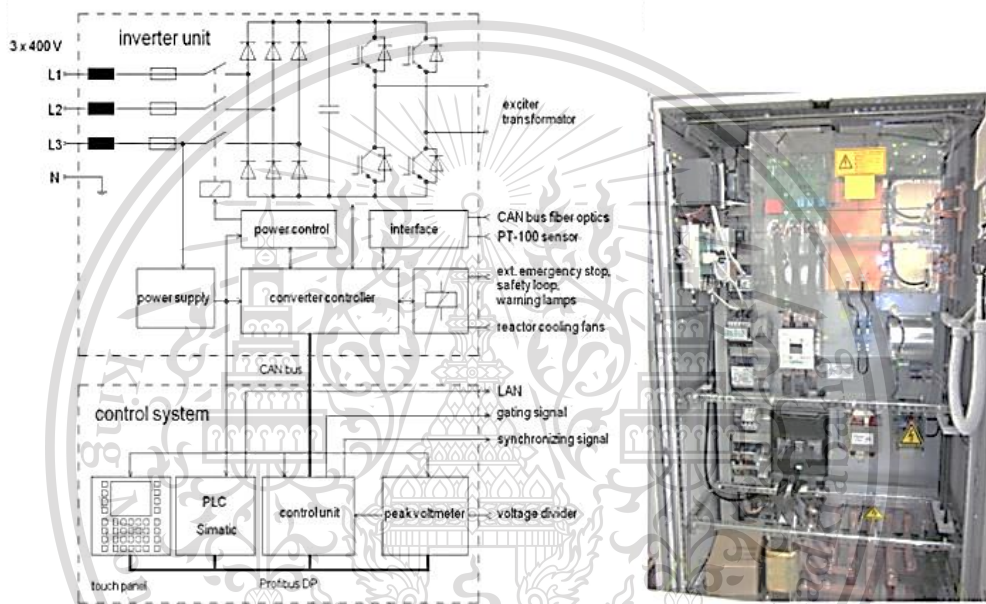
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

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

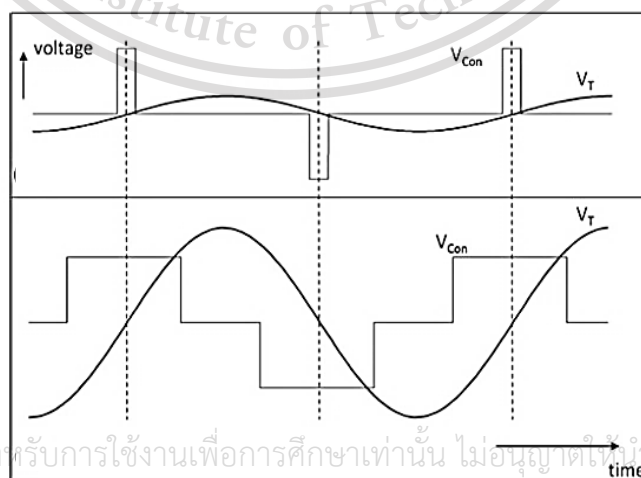
กำลังไฟฟ้าป้อนเข้าจะใช้เท่ากับกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในวงจร โดยสามารถนำค่าตัวประกอบคุณภาพมาช่วยคำนวณร่วมกับกำลังไฟฟ้าทดสอบได้ ดังนี้

$$P_F = \frac{S_T}{Q} \tag{2.11}$$

ตัวประกอบคุณภาพของระบบทดสอบเรโซแนนซ์ปรับความถี่ที่สูงกว่าระบบทดสอบเรโซแนนซ์ปรับค่าเหนี่ยวนำ เนื่องจากการออกแบบที่ให้ค่าเหนี่ยวนำมีค่าคงที่จะไปลดฟลักซ์แม่เหล็กสเตรย์ซึ่งทำให้กำลังสูญเสียน้อยลง โดยสามารถประมาณได้ว่า $Q = 50-150$ สำหรับระบบ ACRF (สำหรับ ACRL, $Q = 20-60$)



รูปที่ 2.38 ระบบการทำงานและการติดตั้งเครื่องแปลงความถี่ไฟฟ้า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

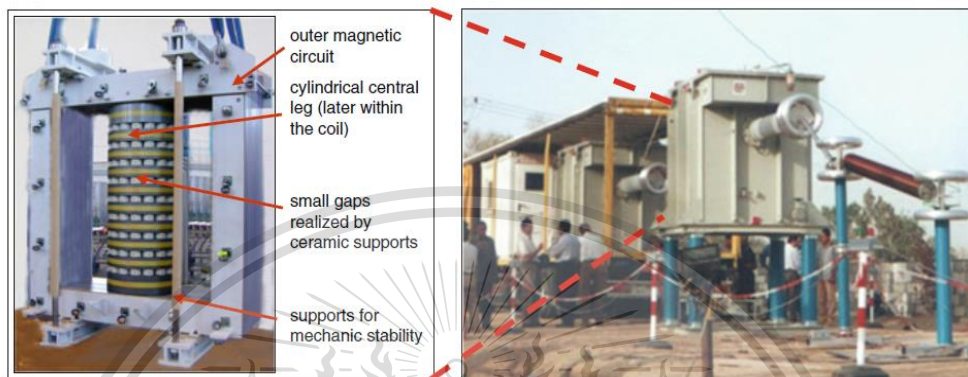
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.39 แรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยมจากเครื่องแปลงความถี่ไฟฟ้า

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

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

การป้อนกำลังไฟฟ้าเข้าของระบบทดสอบเรโซแนนซ์ปรับความถี่จะป้อนผ่าน Static frequency converters ดังรูปที่ 2.38 โดยจะป้อนไฟ 3 เฟสผ่านอุปกรณ์เรียงกระแสเพื่อให้เป็น ไฟฟ้ากระแสตรงและผ่านวงจร Power transistors (IGBT's) หรือ SKIIP modules เพื่อแปลงแรงดัน กระแสตรงให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับรูปสี่เหลี่ยม โดยรูปที่ 2.39(บน) และ 2.39(ล่าง) เป็น รูปคลื่นสำหรับแรงดันทดสอบแรงดันต่ำและแรงดันสูงตามลำดับ



รูปที่ 2.40 การออกแบบแกนเหล็กสำหรับรีแอกเตอร์แบบคงค่า

รีแอกเตอร์ถังเหล็กแบบคงค่า (Tank-type fixed reactors) ใช้ในการทดสอบกำลัง สูง ออกแบบด้วยการฉนวนกระดาษชุบน้ำมันซึ่งเป็นข้อมูลของหม้อแปลงทดสอบที่แกนเหล็กตรง กลางจะประกอบไปด้วยหลายๆช่องว่างอากาศเล็กที่มีฟลักซ์แม่เหล็กสเตรย์ต่ำมาก ดังนั้นรีแอกเตอร์นี้ จึงมีค่าตัวประกอบคุณภาพสูงกว่ารีแอกเตอร์ชนิดปรับค่าได้ ตัวถังของรีแอกเตอร์ต่อลงดินและ สามารถนำมาใช้งานโดยการต่อกันแบบแคสเคดได้โดยชั้นที่สูงกว่าต้องวางอยู่บนฐานรองรับที่เป็น ฉนวน (Insulating support) ดังรูปที่ 2.40 โดยจะมีการนำรีแอกเตอร์นี้มาใช้ในการทดสอบบริเวณ ติดตั้งให้กับระบบเคเบิลหลังการติดตั้งหรือหลังซ่อมใหม่หรือสามารถใช้กับการทดสอบประจำสำหรับ เคเบิลยาวที่ติดตั้งใต้น้ำ



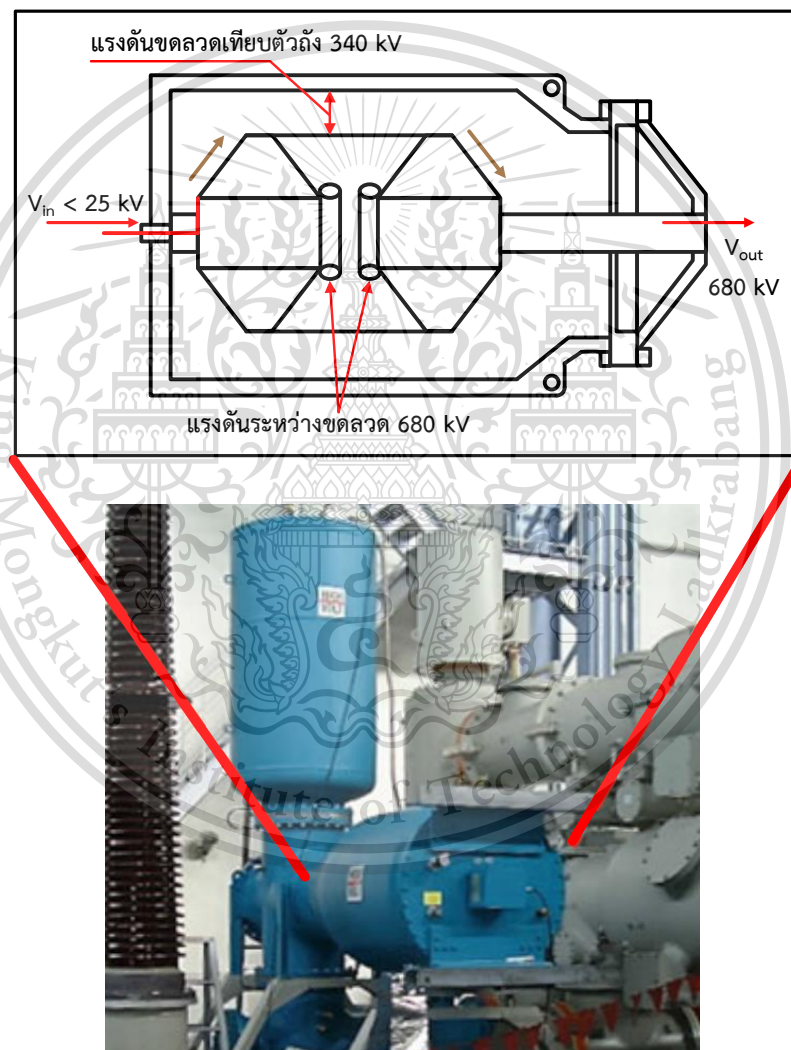
รูปที่ 2.41 รีแอกเตอร์ถังฉนวนทรงกระบอกแบบคงค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และเผยแพร่ข้อมูลใดๆของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

รีแอคเตอร์ทรงกระบอกแบบคงค่า (Cylinder-type fixed reactors) การออกแบบจะเป็นดังรูปที่ 2.41 จะใช้สำหรับการทดสอบที่ใช้กำลังไฟฟ้าทดสอบที่ต่ำลง แต่สามารถนำมาต่อแคสเคดกันง่ายด้วยการวางซ้อนขึ้น โดยรีแอคเตอร์ชนิดนี้จะใช้กับอุปกรณ์ทดสอบแรงดันสูงที่ต้องการกำลังไฟฟ้าต่ำ ดังนั้นรีแอคเตอร์ชนิดนี้จึงใช้สำหรับการทดสอบบริเวณติดตั้งสำหรับ GIS และ GIL หรือสำหรับจ่ายแรงดันทดสอบของหม้อแปลงกำลังซึ่งสามารถทดสอบได้ทั้งในโรงงานและบริเวณติดตั้ง นอกจากนี้รีแอคเตอร์ที่มีน้ำหนักเบาและจะมีปริมาตรน้ำมันที่ค่อนข้างน้อย การนำรีแอคเตอร์หลายอันมาใช้ร่วมกันนั้นสามารถใช้ได้ทั้งการต่ออนุกรมหรือขนานเพื่อรองรับอุปกรณ์ทดสอบต่างๆที่ต่างกัน และด้วยความสามารถในการระบายความร้อนที่ต่ำทำให้กระแสไฟฟ้าและรอบการทำงาน (Duty cycle) ที่สามารถใช้งานได้ถูกจำกัด



รูปที่ 2.42 การออกแบบรีแอคเตอร์สำหรับการทดสอบประจำให้กับ GIS

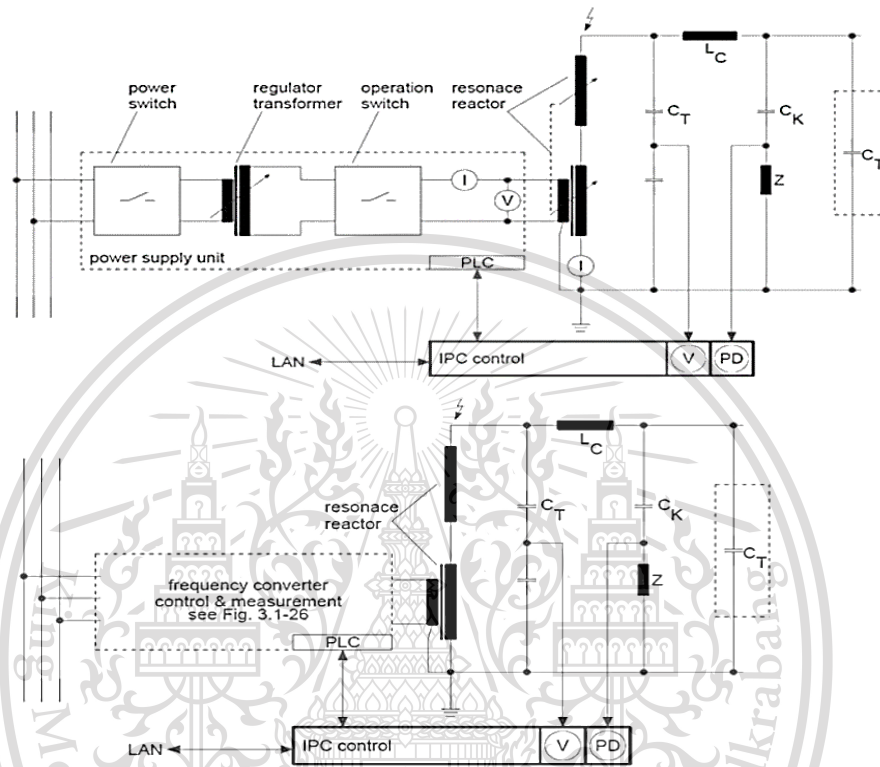
รีแอคเตอร์แบบคงค่าที่มีการฉนวนด้วยฟอยล์ชุบก๊าซ SF₆ (Fixed reactors with SF₆-impregnated foil insulation) รีแอคเตอร์ชนิดนี้จะอยู่ในอุปกรณ์ปิดที่เป็นโลหะที่สามารถนำมาเชื่อมกับอุปกรณ์ทดสอบฉนวนอัดก๊าซได้โดยตรง ดังรูปที่ 2.42 ซึ่งออกแบบให้ไม่มีการใช้แกนเหล็กแต่มีการแบ่งขดลวดมีจำนวนรอบสูงมาก ชั้นเดียวที่ครึ่งหนึ่งของแต่ละขดลวดจะอยู่บนตัวนำ

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

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

ทรงกระบอกของแต่ละอัน การฉนวนด้วย SF₆ ของช่องว่างแก๊สระหว่างสองทรงกระบอกจะต้อง ออกแบบสำหรับแรงดันพิกัดของรีแอคเตอร์ ในขณะที่แรงดันระหว่างบริเวณรอบนอกขดลวดกับโครง อุปกรณ์มีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของแรงดันพิกัด

2.4.4 การเปรียบเทียบระบบทดสอบระหว่างระบบ ACRL และ ACRF



รูปที่ 2.43 ระบบทดสอบแรงดันแรงสูงโดยรวมของระบบทดสอบ ACRL(บน) และ ACRF(ล่าง)

การเปรียบเทียบรีแอคเตอร์กระแสสลับแรงสูงในวงจรแรงดันแรงสูง จากรูป 2.48 รีแอคเตอร์ของระบบแรงดันปรับความถี่นั้นเรียบง่ายและกระทัดรัดกว่า นอกจากนี้ยังแข็งแรงกว่า และมีราคาถูกกว่ารีแอคเตอร์ของระบบแรงดันปรับความถี่อื่น ๆ อีกด้วย และจากไดอะแกรมจะเห็นว่าระบบแรงดันปรับความถี่ยังมีองค์ประกอบที่ใช้น้อยกว่าเพราะภายในตู้ไม่มีทั้งสวิตช์ เครื่องแปลงความถี่ไฟฟ้า และระบบควบคุมติดตั้งอยู่ด้วยกันภายในนั้น

แต่การใช้วิธีปรับความถี่จะไม่เหมาะสำหรับการทดสอบส่วนใหญ่ในโรงงาน โดยจากมาตรฐาน IEC 60060-1: 2010 ได้ให้ความคลาดเคลื่อนของความถี่ที่สามารถยอมรับได้ของการทดสอบแรงดันกระแสสลับแรงสูงว่าต้องอยู่ในช่วง 45–65 Hz จึงมีอัตราส่วนของช่วงการปรับความถี่เพียง 2 เท่านั้น ซึ่งอาจน้อยเกินไปสำหรับช่วงการปรับความถี่ให้เพียงพอกับขนาดของโหลดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

ตารางที่ 2.5 เปรียบเทียบระบบทดสอบ ACRF และ ACRL สำหรับทดสอบ On-site เคเบิลแรงสูง

วงจรเรโซแนนซ์	ACRL	ACRF
ความถี่ในการทดสอบ	$f_L = 50 \text{ Hz (60 Hz)}$	$f_F = 20\text{-}300 \text{ เฮิร์ต}$
กำลังไฟฟ้าทดสอบสูงสุด	$S_{L,max} = 2\pi f \times CU^2$	$S_{F,max} = 2.5 S_{L,max}$
ตัวประกอบคุณภาพ	$Q_L = 40\text{-}60$	$80 \leq Q_F < 120$
ช่วงค่าของโหลด	$C_{max} / C_{min} = L_{min} / L_{max} \approx 20$	$C_{max} / C_{min} = (f_{max} / f_{min})^2 \approx 225$
กำลังไฟฟ้าป้อนเข้า	$P_{eL} = (2\pi f \times CU^2) \times q_L$	$P_{eF} = P_{eL} \times (f_F / f_L) \times (Q_L / Q_F)$
แหล่งจ่ายไฟ	หนึ่งหรือสองเฟส	สามเฟส
อัตราส่วนน้ำหนักต่อกำลังไฟฟ้า	3 - 8	0.8 - 1.5
องค์ประกอบที่มีส่วนที่เคลื่อนที่ได้	รีแอคเตอร์ปรับค่าได้ หม้อแปลงควบคุม	-
อุปกรณ์หลักที่ต้องใช้	รีแอคเตอร์ปรับค่าได้ อุปกรณ์แบ่งแรงดัน/PD coupler หม้อแปลงกระตุ้น อุปกรณ์สวิตช์ ควบคุม และวัด	รีแอคเตอร์ อุปกรณ์แบ่งแรงดัน/PD coupler หม้อแปลงกระตุ้น อุปกรณ์สวิตช์ ควบคุม และวัด

จากตารางที่ 2.5 เป็นการสรุปความต่างระหว่างระบบทดสอบเรโซแนนซ์ระบบ ACRF และ ACRL ได้ดังนี้

- ในระบบทดสอบ ACRF จะใช้ความถี่ของสัญญาณในการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 62067; IEC 60840 ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 20-300 Hz แต่สำหรับการทดสอบที่ความถี่ต่ำกว่า 20 Hz ต้องใช้กำลังไฟฟ้าที่สูงกว่ากำลังทดสอบ 2.5 เท่า (หรืออาจใช้เป็นค่าเก็บประจุที่สูงกว่าอุปกรณ์ทดสอบ 2.5 เท่า) ของระบบทดสอบ ACRL โดยเทียบในแรงดันทดสอบที่เท่ากัน

- เนื่องจากความสูญเสียต่ำของรีแอคเตอร์ทำให้ตัวประกอบคุณภาพของระบบทดสอบ ACRF มีค่ามากกว่าประมาณ 2 เท่าของระบบทดสอบ ACRL

- ย่านความถี่ที่ใช้ได้ของระบบทดสอบ ACRF กว้างกว่าของระบบทดสอบ ACRL ประมาณ 10 เท่า

- ทั้งย่านความถี่ที่กว้างและตัวประกอบคุณภาพที่สูงกว่าทำให้กำลังไฟฟ้าป้อนเข้าของระบบทดสอบ ACRF มีค่าต่ำกว่าของระบบทดสอบ ACRL ประมาณ 5 เท่า

- แหล่งจ่ายไฟให้กับระบบทดสอบ ACRL จะต้องใช้สัญญาณ 1 หรือ 2 เฟส แต่วงจรของเครื่องปรับความถี่ไฟฟ้าที่ต้องใช้ในระบบทดสอบ ACRF จำเป็นต้องใช้แหล่งจ่ายไฟ 3 เฟสที่สมมาตรที่สะดวกสำหรับใช้ทดสอบที่บริเวณติดตั้ง

จากการเปรียบเทียบกันในตารางที่ 2.5 นั้นจะเห็นได้ว่าระบบทดสอบ ACRF จะดีกว่าเมื่อคิดถึงปัจจัยทางค่าใช้จ่าย ซึ่งเป็นการทดสอบบริเวณที่ติดตั้งแต่ก็สามารถจ่ายให้กับการทดสอบในโรงงานได้แค่บางอย่างเช่นกัน เช่น จ่ายเป็นแรงดันทดสอบกระแสลับสำหรับหม้อแปลงกำลัง ซึ่งทำงานที่ความถี่มากกว่า 40 Hz เมื่อความถี่สูงสุดหรือ 200 Hz นั้นสามารถรองรับช่วงอัตราส่วนของโหลดได้ในระหว่าง 1-20

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

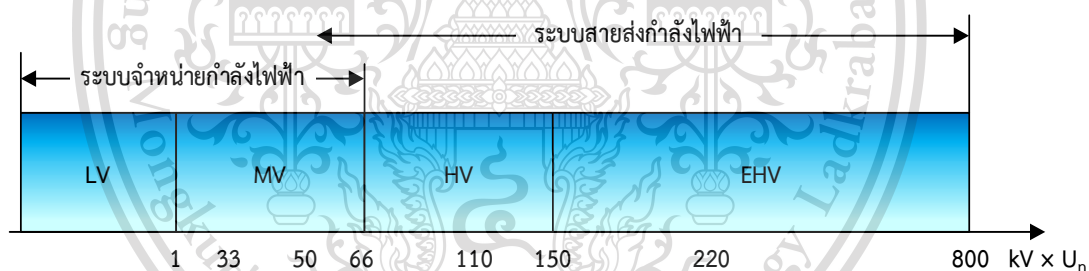
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สำหรับเคเบิลยาวที่ติดตั้งใต้น้ำ(ช่วงประมาณ 10 กิโลเมตร) นั้นยังไม่มีวิธีในการทดสอบอื่นนอกจากใช้ระบบทดสอบเรโซแนนซ์ปรับความถี่ (ACRF) ซึ่งสามารถใช้งานเต็มย่านความถี่ 10-500 Hz ที่มีระบุไว้ใน IEC 60060-3 สำหรับการทดสอบบริเวณติดตั้งและการทดสอบในโรงงาน

2.5 การทดสอบเคเบิลแรงสูงด้วยแรงดันทดสอบ Damped AC [17-19]

เนื่องจากปัจจัยต่างๆ ทั้งสภาพแวดล้อมและสภาพเศรษฐกิจในที่ต่างๆทั่วโลก ทำให้ระบบส่งกำลังไฟฟ้าแรงสูงใต้ดินนั้นมีความสำคัญต่อชีวิตความเป็นอยู่ของมนุษย์เราเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ในปัจจุบัน โดยระบบเคเบิลใต้ดินนั้นเป็นหนึ่งในปัจจัยที่สำคัญที่สุดของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแรงสูงใต้ดินและจำเป็นต้องนำมาใช้ในปริมาณมาก จึงต้องมีการทดสอบระบบเคเบิลเพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือและเพิ่มประสิทธิภาพในการนำระบบเคเบิลใต้ดินมาใช้งาน โดยองค์ประกอบสำคัญของระบบเคเบิลใต้ดินนั้น ได้แก่ สายเคเบิลใต้ดิน ข้อต่อเคเบิลและหัวต่อสายเคเบิล

สำหรับเคเบิลใต้ดินนั้นออกแบบมาเพื่อการส่งจ่ายพลังงานจำนวนมากในช่วง MVA ที่ระดับแรงดันต่างๆ ซึ่งมีค่าความสูญเสียที่ต่ำและระดับความน่าเชื่อถือที่สูง โดยเมื่อเปรียบเทียบกับสายส่งเหนือดินพบว่ามีความสูญเสียน้อยกว่าถึง 30% ระบบส่งจ่ายใต้ดินทั่วไปทำงานด้วยระบบกระแสสลับสามเฟสที่ระดับแรงดันต่างๆและความถี่กำลังมาตรฐานจะมีอยู่ด้วยกัน 2 ระบบคือระบบ 50 Hz และระบบ 60 Hz



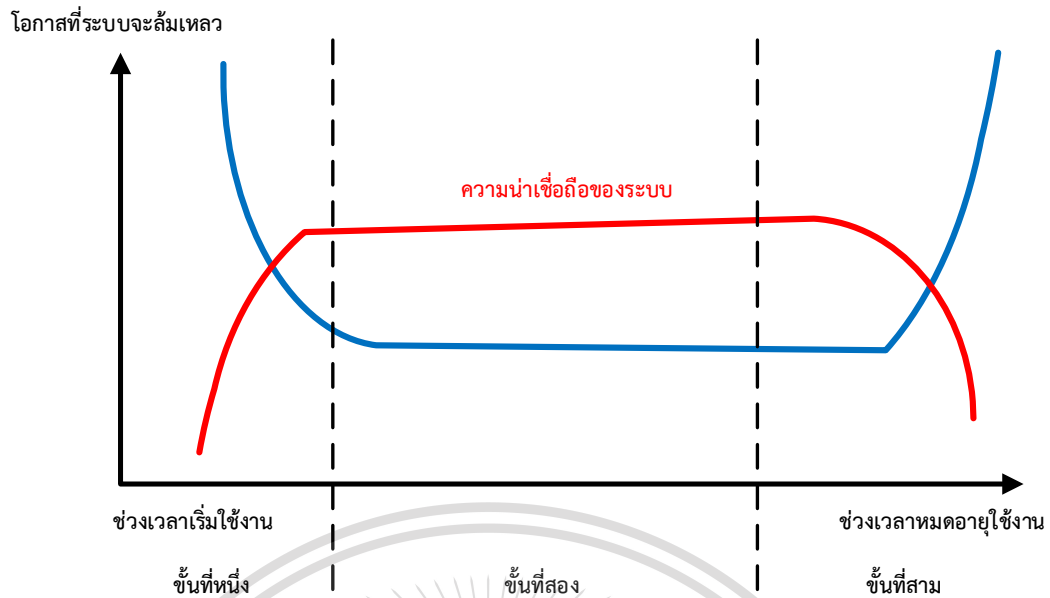
รูปที่ 2.44 ระดับพิกัดแรงดันต่างๆของเคเบิล

เคเบิลแรงดันสูงและแรงดันสูงพิเศษฉนวน XLPE มีค่าคาดหวังของอัตราการเกิดความล้มเหลวของระบบเท่ากับ 1 ครั้งในเวลา 20 ปี ซึ่งก็คือเคเบิลส่งจ่ายที่มีอายุเกินกว่า 40 ปี ประกอบด้วย หัวต่อสายเคเบิล 6 จุดควรมีค่าอัตราการเกิดความล้มเหลวที่ต่ำ สำหรับข้อต่อสายของเคเบิลฉนวน XLPE ควรมีค่าอัตราการเกิดความล้มเหลวเท่ากับ 2 ครั้งตลอดช่วงอายุการใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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



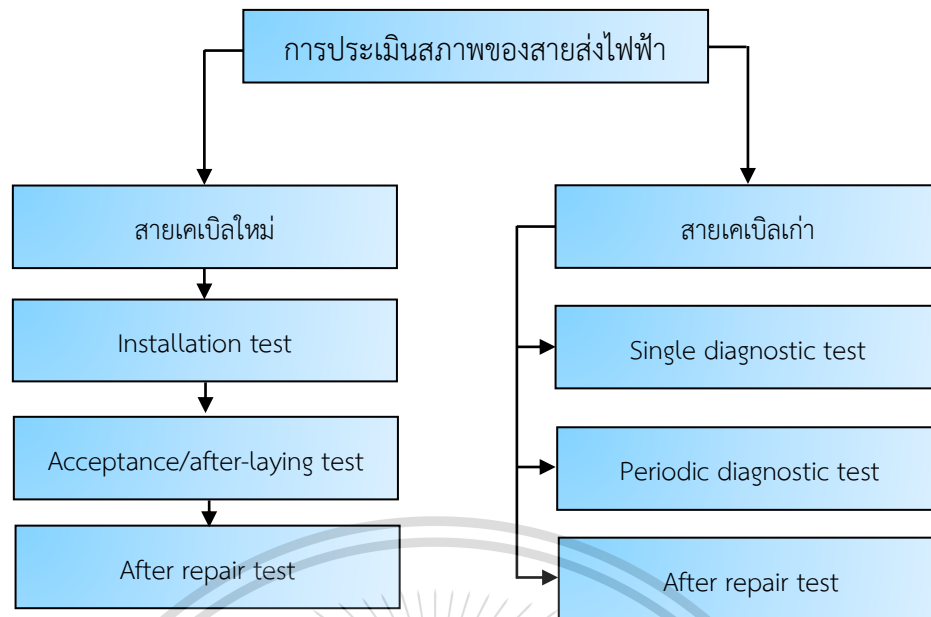
รูปที่ 2.45 กราฟความสัมพันธ์ Bath tube

ความน่าเชื่อถือของเคเบิลนั้นจะมีค่าต่ำในช่วงต้นของอายุการใช้งานที่ได้รับอิทธิพลมาจากที่เกิดจากความผิดพลาดจากการติดตั้งซึ่งเรียกว่า ช่วง Infant mortality ในช่วงท้ายของอายุการใช้งานการเกิดระบบล้มเหลวจะเกี่ยวข้องกับกระบวนการ Ageing ซึ่งเรียกว่าช่วง Wear out โดยกราฟความสัมพันธ์ Bath tube แสดงให้เห็นว่าอัตราการเกิดความล้มเหลวของเคเบิลระบบส่งจ่ายมีค่าไม่คงที่ตลอดอายุการใช้งาน การเปลี่ยนแปลงของกราฟจากช่วงที่ 1 ไปยังช่วงที่ 2 จะขึ้นอยู่กับคุณภาพของการผลิตและคุณภาพของการติดตั้งรวมถึงสภาวะในการใช้งาน หากไม่มีการเกิดความล้มเหลวในช่วงแรกเริ่มของอายุการใช้งานการเปลี่ยนแปลงจากช่วงที่ 2 ไปยังช่วงที่ 3 นั้นจะเป็นเรื่องที่ยากที่จะคาดเดา โดยทั่วไปเคเบิลได้ออกแบบให้มีช่วงอายุการใช้งานที่ประมาณ 40-50 ปีแต่ค่าที่แน่นอนนั้นเป็นเรื่องยากที่คาดเดาอย่างถูกต้องได้เนื่องจากจะขึ้นอยู่กับโหลดและการใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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



รูปที่ 2.46 ประเภทการทดสอบเคเบิลเพื่อจะประเมินสภาพหรืออายุของเคเบิล

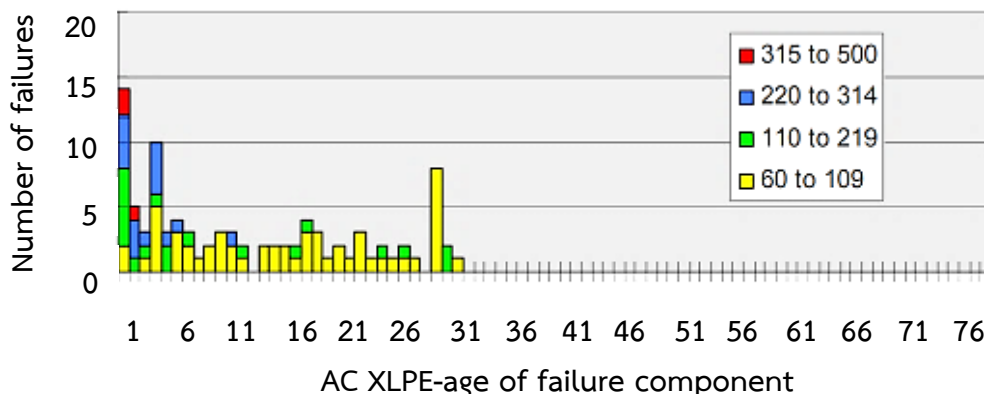
ระบบเคเบิลใหม่ (New cable system)

การเกิดความล้มเหลวในช่วงต้นของเคเบิลนั้นป้องกันด้วยความเชี่ยวชาญระดับสูง เพื่อที่จะตรวจสอบการติดตั้งหน้างานด้วยการทดสอบแรงดันคงทน Acceptance voltage ถ้าไม่มีการเกิดเบรกดาวนในระบบเคเบิลในระหว่างเวลาทำการทดสอบจะผ่านการทดสอบ สถิติการเกิดความล้มเหลวของเคเบิลฉนวน XLPE ที่ระดับแรงดันต่างๆแสดงให้เห็นว่าความล้มเหลวที่เกิดในช่วง 3 ปีแรกนับตั้งแต่ช่วงเริ่มต้นใช้งานเกี่ยวข้องกับข้อบกพร่องจากการติดตั้งในส่วนข้อต่อและปลายสายเคเบิล โดยปัญหาส่วนใหญ่เกิดจากความชำนาญที่น้อยเกินไประหว่างการประกอบ เช่น หลักการประกอบที่ผิด ความสะอาดในการประกอบอุปกรณ์หรือวัสดุที่ใช้ผิด และการใช้องค์ประกอบการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าผิดพลาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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



รูปที่ 2.47 แนวโน้มของความล้มเหลวระบบเคเบิลฉนวน XLPE ตามอายุที่ระดับแรงดันใช้งานต่างๆ

ระบบเคเบิลที่ผ่านการใช้งาน (Service-aged cable system)

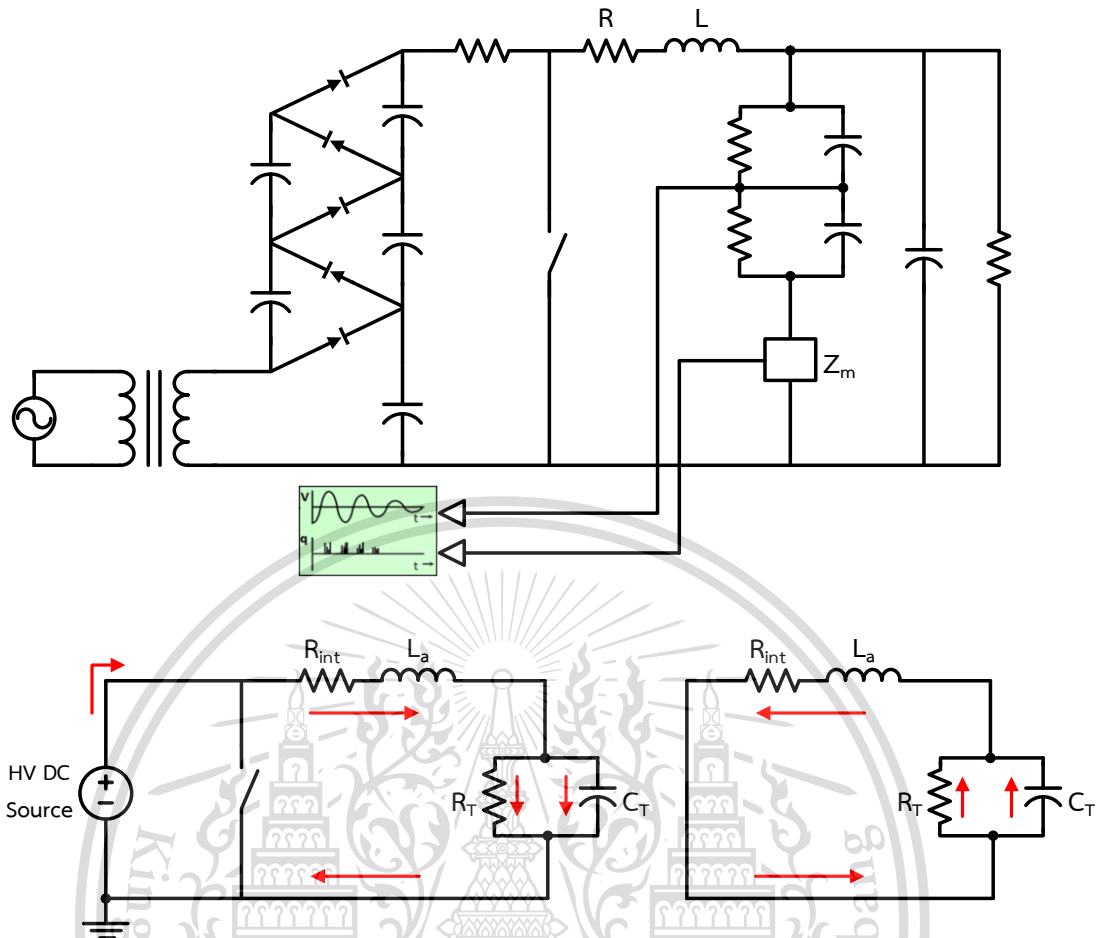
การประเมินสภาพของเคเบิลเก่าที่ผ่านการใช้งานนั้นต้องใช้เวลา การสังเกต พารามิเตอร์และการวินิจฉัยองค์ประกอบหลักของเคเบิล เช่น ฉนวนเคเบิล การเปรียบเทียบผลลัพธ์ การวัดเหล่านี้กับมาตรฐานที่มีอยู่ประกอบกับความรู้จะช่วยให้ได้รับข้อมูลเกี่ยวกับสถานะจริงของเคเบิล การประเมินสถานะนั้นอาจเป็นแบบต่อเนื่องหรือเป็นแบบช่วงเวลา

การทดสอบระบบเคเบิลประกอบไปด้วยการทดสอบแรงดันคงทนเพื่อทดสอบการทนได้ของแรงดันใช้งานและแรงดันเกินที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการใช้งาน รวมถึงการวัดดิสชาร์จบางส่วนและการวัดพลังงานสูญเสีย เพื่อทราบอายุและระยะเวลาในการใช้งาน ซึ่งการทดสอบระบบเคเบิลที่ดีนั้นควรเป็นการทดสอบที่เมื่อทำการทดสอบแล้วได้ผลการทดสอบที่ประกอบไปด้วยข้อมูลทั้งสามส่วนครบถ้วนเพื่อทราบประสิทธิภาพจากการนำระบบเคเบิลมาใช้งาน

2.5.1 หลักการทดสอบเคเบิลด้วยแรงดันทดสอบ Damped AC

การทดสอบระบบเคเบิลได้ค้นพิกัดแรงดัน 5 kV ขึ้นไปด้วยแรงดันทดสอบ Damped AC หรือเรียกว่าระบบทดสอบ Oscillating Wave Test System (OWTS) เป็นอีกหนึ่งทางเลือกในการทดสอบระบบเคเบิลตามมาตรฐาน IEEE Std 400.4TM-2015 ซึ่งเป็นการทดสอบบริเวณพื้นที่ติดตั้งแบบตัดแหล่งจ่ายออกจากระบบเคเบิล โดยจะทำการทดสอบแรงดันคงทนให้กับระบบเคเบิลใต้ดินที่มีการหุ้มด้วยชั้นสารกึ่งตัวนำรอบนอกฉนวน (Shielded power cable) เพื่อรองความเครียดสนามไฟฟ้ารอบนอกฉนวน ซึ่งมีพิกัดแรงดัน 5 kV ขึ้นไปเป็นอุปกรณ์ทดสอบ พร้อมกับการวัดดิสชาร์จบางส่วนและการประมาณค่าความสูญเสียในฉนวน เนื่องจากจากผลการสำรวจการทดสอบแรงดันคงทนด้วยแรงดันทดสอบ Damped AC ให้กับระบบเคเบิลนั้น มีประมาณ 40% ที่ทดสอบแล้วทำให้อุปกรณ์ทดสอบเกิดเบรกดาวขึ้น และประมาณ 70% ของการเบรกดาวที่เกิดขึ้นนี้ สามารถตรวจพบดิสชาร์จบางส่วนที่อุปกรณ์ทดสอบก่อนที่อุปกรณ์ทดสอบจะเกิดการเบรกดาวขึ้น หรือการที่อุปกรณ์ทดสอบเกิดเบรกดาวขึ้นนั้นอาจเป็นเพราะเกิดการขยายใหญ่ขึ้นที่บริเวณจุดที่ผิดพร่องในเนื้อฉนวน ทำให้

ให้อุปกรณ์ทดสอบเกิดการเบรกดาวขึ้นในที่สุด



รูปที่ 2.48 วงจรทดสอบ Damped AC แบบสมบูรณ(บน) วงจรสมมูลยก่อนปิดสวิตซ์(ซ้าย) และหลังปิดสวิตซ์(ขวา)

การทดสอบด้วยแรงดันทดสอบ Damped AC นั้นจะทำการทดสอบแรงดันคงทนให้กับอุปกรณ์ทดสอบ โดยสำหรับในโครงการนี้ก็คืระบบเคเบิลใต้ดิน พร้อมกับการตรวจจับและวิเคราะห์การดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นที่อุปกรณ์ทดสอบ โดยวงจรรวมในการทดสอบแสดงดังรูปที่ 2.48 ซึ่งเป็นส่วนประกอบต่างๆที่ต้องนำมาใช้ในการทดสอบ ดังนี้

1) แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง จากการนำไฟฟ้ากระแสสลับมาผ่านวงจรเรียงกระแส Greinacher cascade หรืออาจใช้แหล่งจ่ายกระแสตรงในการเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้กับวงจรการทดสอบได้

2) High voltage solid-state switch เป็นสวิตซ์สำหรับปิดวงจรเพื่อตัดแหล่งจ่ายออกจากวงจรทดสอบ และปล่อยให้อุปกรณ์ทดสอบทำการคายประจุที่สะสมไว้ออกไป และสร้างสัญญาณ Sinusoidal ที่มีค่าคอยล์ขนาดแรงดันลงสำหรับใช้เป็นแรงดันทดสอบ

3) ตัวเหนี่ยวนำแรงสูง ใช้ตัวเหนี่ยวนำชนิดแกนอากาศเพื่อลดความสูญเสียที่เกิดขึ้น โดยใช้ในการทำให้วงจรทดสอบทำการตัดแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าออกไปแล้วอยู่ในสภาวะเร

ไม่ว่ากรณีใด โชนันซ์ ซึ่งช่วยให้การทดสอบนี้เป็นอีกหนึ่งทางเลือกสำหรับการนำไปใช้ทดสอบหน้างาน เนื่องจาก

ไม่มีความต้องการของกำลังไฟฟ้าเชิงซ้อนในวงจรทดสอบ

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

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

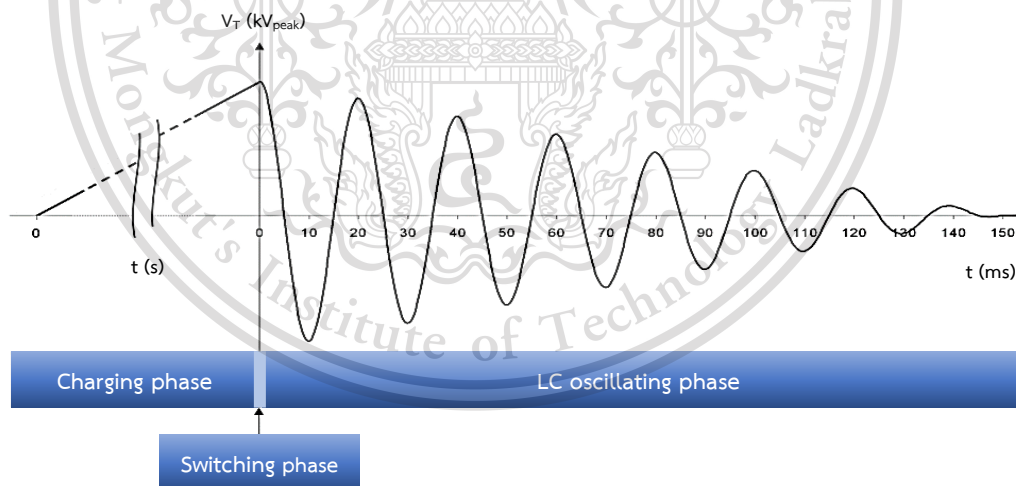
4) อุปกรณ์ทดสอบ (Test object) อาจเป็นระบบเคเบิลใต้ดินหรืออุปกรณ์อื่นๆที่ต้องการทดสอบ สำหรับระบบเคเบิลนั้นค่าความเก็บประจุเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความยาวของเคเบิล ดังนั้นยิ่งเคเบิลมีความยาวมากทำให้ความต้องการกำลังไฟฟ้าเชิงซ้อนยิ่งมากตามไปด้วยเช่นกัน

5) ระบบวัดและตรวจจัดการดิซชาร์จบางส่วน ประกอบไปด้วยอุปกรณ์แบ่งแรงดัน ตัวเก็บประจุเกี่ยวคัลลิ่ง ออสซิลโลสโคป และระบบประมวลผลสัญญาณหรือคอมพิวเตอร์

2.5.2 การทดสอบแรงดันคงทนระบบเคเบิลด้วยแรงดัน Damped AC

2.5.2.1 ลักษณะแรงดันทดสอบสำหรับการทดสอบแรงดันคงทน

การทดสอบแรงดันคงทนด้วยแรงดัน Damped AC สามารถทำได้โดยการใช้แหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรงหรือแรงดันชั่วเดียวเข้าสู่วงจรทดสอบ จากนั้นทำการเก็บประจุไฟฟ้าไว้ในเคเบิลใต้ดินหรืออุปกรณ์ทดสอบด้วยค่าเก็บประจุที่สูงของอุปกรณ์ทดสอบเองโดยใช้การเพิ่มแรงดันแบบเชิงเส้น (Ramp voltage) จนเก็บประจุที่อุปกรณ์ทดสอบจนถึงค่าแรงดันทดสอบ Damped AC สูงสุด (V_T) จากนั้นจะทำการปิดสวิตช์แรงสูงลงทันทีด้วยความเร็วสูงเพื่อทำการตัดแหล่งจ่ายแรงดัน Damped AC ออกจากวงจรทดสอบ และให้อุปกรณ์ทดสอบคายประจุที่เก็บไว้ผ่านตัวเหนี่ยวนำแกนอากาศเพื่อสร้างแรงดันที่มีการออสซิลเลทตามสภาวะเรโซแนนซ์อนุกรม โดยที่มีการลดทอนของขนาดแรงดันลงตามความสูญเสียที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์และอุปกรณ์ทดสอบ ดังรูปที่ 2.49 โดยสามารถแบ่งสภาวะของแรงดันทดสอบเป็นช่วงต่างๆได้ดังนี้



รูปที่ 2.49 ลักษณะแรงดันทดสอบ Damped AC สำหรับการกระตุ้น 1 ครั้ง

1) Charging phase หรือ Energizing phase เป็นขั้นตอนแรกของการทดสอบแรงดันคงทนด้วยแรงดัน Damped AC โดยเป็นการป้อนแรงดันจากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่มีลักษณะเชิงเส้นเข้ามาเก็บไว้ที่อุปกรณ์ทดสอบ จนกระทั่งแรงดันตกคร่อมอุปกรณ์ทดสอบถึงค่าแรงดันทดสอบ Damped AC สูงสุด โดยในช่วงนี้ต้องใช้ระยะเวลาในการดำเนินการรวมทั้งหมดต่ำกว่า 100 วินาที เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการสะสมของประจุค้างขึ้นที่อุปกรณ์ทดสอบ ซึ่งหากไม่สามารถ

ป้อนแรงดันถึงค่าแรงดันทดสอบได้ต่ำกว่า 100 วินาที อาจนำแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าภายนอกมาช่วย เพื่อช่วยลดระยะเวลาที่ใช้ในขั้นตอนนี้ได้

2) Switching phase เมื่อแรงดันตกคร่อมอุปกรณ์ทดสอบถึงค่าแรงดันทดสอบแล้ว สวิตช์แรงสูงในวงจรทดสอบต้องทำงานทันที เพื่อตัดแหล่งจ่ายออกจากวงจรทดสอบและให้อุปกรณ์ทดสอบทำการคายประจุที่สะสมไว้ออกมาจนหมดและสร้างเป็นสัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่มีการหน่วงขนาดแรงดันไฟฟ้าออกมา โดยในช่วงนี้ต้องใช้เวลาในการทำงานน้อยกว่า $1 \mu\text{s}$ เนื่องจากเป็นการทำงานของสวิตช์ในขณะที่สัญญาณแรงดันอยู่ที่คายอด หากสวิตช์ใช้เวลาในการทำงานสูงเกินไปอาจทำให้เกิดแรงดันเกินเกิดขึ้นได้ ซึ่งเป็นหลักการเดียวกับการเกิดแรงดันเกินสวิตช์ซึ่งในระบบจำหน่าย/ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ซึ่งแรงดันเกินที่จะเกิดขึ้นนี้อาจให้อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบหรืออุปกรณ์ทดสอบเกิดเบรกดาวน์และเกิดความเสียหายได้ หรืออาจเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดโพรงหรือดิสชาร์จบางส่วนขึ้นที่อุปกรณ์ได้ หรืออาจส่งผลกระทบต่อการวัดดิสชาร์จบางส่วนได้

3) LC oscillating phase หลังจากสวิตช์แรงสูงตัดแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าออกจากวงจรทดสอบเรียบร้อยแล้ว วงจรทดสอบจะกลายเป็นวงจรเรโซแนนซ์อนุกรม เนื่องจากในวงจรเหลือเพียงค่าความต้านทานจากความสูญเสียที่เกิดขึ้นภายในระบบ ค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำแกนอากาศแรงสูงที่มีค่าคงที่ค่าหนึ่ง และค่าเก็บประจุของอุปกรณ์ทดสอบ และเมื่ออุปกรณ์ทดสอบทำการคายประจุที่เก็บสะสมไว้แล้วนั้น สัญญาณแรงดันตกคร่อมอุปกรณ์ทดสอบที่วัดได้จะเป็นสัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่มีการออสซิลเลทและหน่วงขนาดของแรงดันลงเนื่องจากผลของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุในวงจรโดยมีสมการแรงดันทดสอบดังสมการที่ 2.12

$$U(t) = U_0 e^{-\beta t} \sin(\omega t + \phi) \quad (2.12)$$

เมื่อ $U(t)$ เป็นแรงดันทดสอบจากการคายประจุของอุปกรณ์ทดสอบ (kV)

U_0 เป็นแรงดันตกคร่อมอุปกรณ์ทดสอบก่อนสวิตช์แรงสูงทำงาน (kV)

β เป็นค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน (Attenuation factor)

เนื่องจากค่าความสูญเสียภายในระบบทดสอบและค่าความสูญเสียที่อุปกรณ์ทดสอบและเนื่องด้วยวงจรทดสอบเปรียบเสมือนเป็นวงจรเรโซแนนซ์อนุกรม ทำให้สัญญาณที่ได้ออกมาจากการคายประจุสะสมจากอุปกรณ์ทดสอบมีความถี่เท่ากับความถี่เรโซแนนซ์ต้องมีค่าระหว่าง 20–500 Hz สามารถหาได้ดังสมการที่ 2.13

$$f_r = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_a C_T}} \quad (2.13)$$

เมื่อ f_r เป็นความถี่ของสัญญาณทดสอบหรือ Natural frequency (Hz)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ L_a เป็นค่าเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำแกนอากาศแรงสูง (H) นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือเผยแพร่ข้อมูลข้างต้นไปยังเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ C_T เป็นค่าเก็บประจุของอุปกรณ์ทดสอบ (μF)

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

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

การทดสอบแรงดันคงทน Damped AC ทั่วไปจะเลือกใช้ความถี่ต่างกันไปตามชนิดการฉนวนและความยาวของสายเคเบิล เนื่องจากผลของค่าเก็บประจุที่เพิ่มขึ้นของอุปกรณ์ทดสอบ และค่าความเหนี่ยวนำรวมในวงจรทดสอบ ตัวอย่างการเลือกใช้ความถี่ในการทดสอบแสดงดังตารางที่ 2.6 โดยกำหนดให้เคเบิลมีพิกัด 220 kV มีกระแสชาร์จเท่ากับ 10 mA และตัวเหนี่ยวนำแกนอากาศมีค่า 8.9 H

ตารางที่ 2.6 ความถี่ของแรงดันทดสอบ Damped AC สำหรับเคเบิลที่ความยาวต่างๆ

ความยาวสายเคเบิล (km)	ความถี่สำหรับการทดสอบ เคเบิลฉนวน XLPE (C=200 pF/m) (Hz)	ความถี่การสำหรับทดสอบ เคเบิลฉนวน Oil impregnated paper (C=350 pF/m) (Hz)
0.25	238	180
0.5	168	127
1	119	90
2	84	63
4	59	45
8	42	31
16	29	22
20	26	20

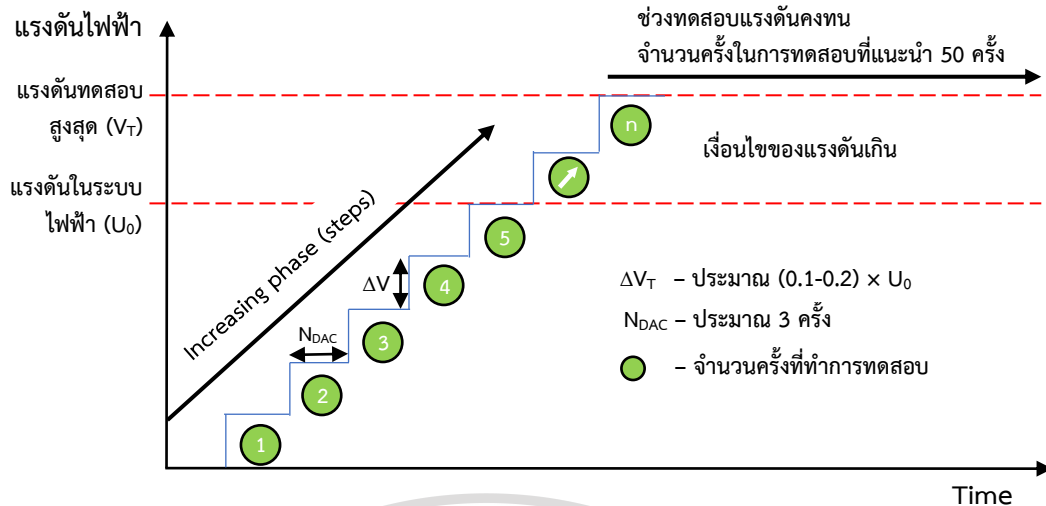
2.5.2.2 วิธีการทดสอบแรงดันคงทนให้กับอุปกรณ์ทดสอบ

จากขั้นตอนดังกล่าวข้างต้น เป็นขั้นตอนการทดสอบอุปกรณ์ทดสอบด้วยการป้อนแรงดันทดสอบ Damped AC ซึ่งเป็นการกระตุ้น 1 ครั้ง โดยในการทดสอบแรงดันคงทน Damped AC ให้กับอุปกรณ์ทดสอบหรือระบบเคเบิลนั้นจะต้องทำการกระตุ้นแรงดัน 3 ขั้นตอนดังที่กล่าวข้างต้นหลายๆรอบ โดยที่จะค่อยๆเพิ่มระดับแรงดันขึ้นไปเรื่อยๆ จนถึงค่าแรงดันทดสอบ Damped AC สูงสุด ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ในการทดสอบแรงดันคงทน โดยมีวิธีและขั้นตอนการทดสอบดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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



รูปที่ 2.50 วิธีการจ่ายแรงดันทดสอบ Damped AC

การทดสอบแรงดันคงทน Damped AC ให้กับอุปกรณ์ทดสอบนั้นต้องทำการกระตุ้นด้วยแรงดันทดสอบหลายครั้ง โดยจะค่อยๆเพิ่มระดับแรงดันทดสอบจากศูนย์โวลต์จนกระทั่งถึงค่าแรงดันพิกัดทดสอบหรือแรงดันทดสอบ โดยมีตัวอย่างการกำหนดวิธีการจ่ายแรงดันทดสอบดังนี้ (กำหนดให้เพิ่มแรงดันทดสอบครั้งละ $0.2 U_0$)

1. เลือกค่าระดับแรงดันทดสอบที่จะเพิ่มขึ้นในแต่ละขั้น โดยในกรณีนี้กำหนดให้แรงดันทดสอบเพิ่มขึ้นขั้นละ $0.2 U_0$ (เมื่อ U_0 เป็นแรงดันระบบไฟฟ้าของอุปกรณ์ทดสอบ) และจำนวนครั้งในการป้อนแรงดันทดสอบแต่ละค่าให้กับอุปกรณ์ทดสอบดังนี้ ที่แรงดัน U_0 10 ครั้ง, ที่แรงดันทดสอบสูงสุด 50 ครั้ง และที่ระดับแรงดันอื่นๆ ($0.2 U_0, 0.4 U_0, \dots$) ระดับแรงดันละ 3 ครั้ง
2. เริ่มทำการทดสอบตามวิธีการทดสอบข้างต้น โดยทำการป้อนแรงดันทดสอบที่มีค่ายอดของแรงดันทดสอบเท่ากับระดับแรงดันแรก que เลือกคือเท่ากับ $0.2 U_0$ จากนั้นสวิตช์แรงสูงทำงานทันที และให้อุปกรณ์ทดสอบคายประจุที่เก็บไว้ออกมาจนหมดสร้างแรงดันทดสอบที่มีการออสมิเลทออกมา ทำการทดสอบเช่นนี้ซ้ำจนครบ 3 รอบ
3. ทำการเพิ่มระดับแรงดันทดสอบเป็น $0.4 U_0$ จากนั้นทำการทดสอบเช่นเดียวกับข้อ 2 จนกระทั่งถึงระดับแรงดันทดสอบ U_0 (ขึ้นระดับแรงดันครั้งที่ 5)
4. การทดสอบที่ระดับแรงดันทดสอบ U_0 นี้ใช้วิธีทดสอบเช่นเดียวกับค่าแรงดันอื่นๆ แต่จำนวนครั้งที่ทำการทดสอบนั้นอาจมากกว่าที่ทดสอบที่ระดับแรงดันอื่นๆที่ผ่านมาได้ เช่น ทำการทดสอบ 10 ครั้งที่ระดับแรงดันทดสอบ U_0 จากนั้นจึงเพิ่มระดับแรงดันทดสอบ เป็นต้น
5. ทำการทดสอบและเพิ่มระดับแรงดันขึ้นจนระดับแรงดันถึงค่าแรงดันทดสอบคงทนที่ได้ออกแบบการทดสอบไว้ เช่น $1.7 U_0$ ที่ระดับแรงดันนี้จะทำการทดสอบเยอะกว่าที่ทุกๆระดับแรงดัน โดยมักจะทำการทดสอบถึง 50 ครั้ง

6. จากการทดสอบทั้งหมดนี้ ให้ทำการตรวจจับหรือวัดดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นที่อุปกรณ์ทดสอบ และสังเกตว่ามีอาการเบรกทาวนเกิดขึ้นที่อุปกรณ์ทดสอบในระหว่างที่ทำการทดสอบ ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

หรือไม่ เพื่อนำข้อมูลเหล่านี้ไปใช้ในการประเมินและวินิจฉัยอุปกรณ์ทดสอบเพื่อที่จะตัดสินใจการนำอุปกรณ์ทดสอบนี้ไปใช้งานจริงต่อไป

เนื่องจากการใช้เคเบิลเป็นอุปกรณ์ทดสอบ ทำให้ระยะเวลาที่ใช้ในการชาร์จหรือเก็บประจุให้กับเคเบิลที่เป็นอุปกรณ์ทดสอบ (Charging time) มีระยะเวลายาวนานแตกต่างกันตามระยะเวลาความยาวของเคเบิลอันเนื่องมาจากค่าเก็บประจุไฟฟ้าของเคเบิลที่เป็นอัตราส่วนสัมพันธ์โดยตรงกับความยาวสายซึ่งจะส่งผลโดยตรงกับกระแสไฟฟ้าที่โหลดต้องการ ทำให้จำนวนการกระตุ้นหรือการป้อนแรงดันทดสอบในช่วงการทดสอบ 1 ชั่วโมงนั้นอาจแตกต่างกันตามความยาวสาย โดยระยะเวลาที่ใช้ในการชาร์จประจุให้กับอุปกรณ์ทดสอบนั้นสามารถหาได้ ซึ่งสามารถแสดงตัวอย่างดังในรูปที่ 2.51 (กำหนดให้ตัวเหนี่ยวนำแกนอากาศมีค่าเหนี่ยวนำ 5.5 H และ Charging current มีค่า 8 mA)

$$t_{ch} = \frac{V_T \cdot C_{load}}{I_{load}} \quad (2.14)$$

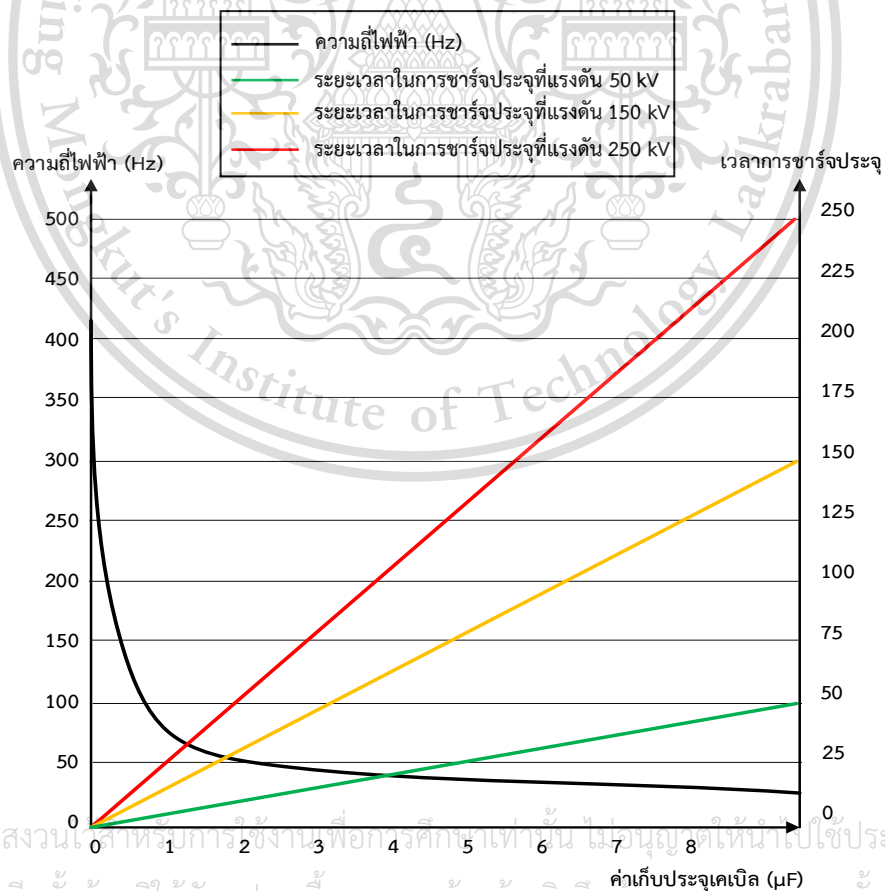
เมื่อ

t_{ch} เป็นระยะเวลาที่ต้องใช้ในการชาร์จประจุของอุปกรณ์ทดสอบ (s)

V_T เป็นระดับแรงดันทดสอบ (kV)

C_{load} เป็นค่าเก็บประจุของอุปกรณ์ทดสอบ (μF)

I_{load} เป็น Charging current ของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันกระแสตรง (mA)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.51 ระยะเวลาในการชาร์จประจุที่ระดับแรงดันต่างกัน

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

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

2.5.2.3 ประเภทของการทดสอบแรงดันคงทนด้วยแรงดันทดสอบ Damped AC

2.5.2.3.1 Installation testing

เป็นการทดสอบให้กับเคเบิลที่เพิ่งติดตั้งเสร็จใหม่ๆ โดยเป็นการทดสอบก่อนที่จะทำการเชื่อมต่อเคเบิลเข้ากับข้อต่อและหัวต่อสายเคเบิล โดยใช้ค่าแรงดันทดสอบต่ำกว่าการทดสอบแบบ Acceptance test และ Maintenance test ซึ่งเป็นการทดสอบเพื่อยืนยันความน่าเชื่อถือในการติดตั้งระบบเคเบิล แต่ทั้งนี้สามารถใช้เพียงการทดสอบ Acceptance test หรือ Maintenance test แทนได้

2.5.2.3.2 Acceptance testing

เป็นการทดสอบสำหรับเคเบิลใหม่ที่ยังไม่ได้ผ่านการใช้งาน โดยทำการทดสอบหลังจากติดตั้งเคเบิลและนำไปเชื่อมต่อกับข้อต่อสายและหัวต่อสายเคเบิลเรียบร้อยแล้ว โดยจำนวนครั้งที่ทำการทดสอบที่ค่าแรงดันสุดท้ายนั้นสามารถทำการทดสอบได้ถึง 50 ครั้ง โดยจะเลือกค่าแรงดันทดสอบจากพิกัดแรงดันใช้งานของเคเบิล ซึ่งพิกัดสูงสุดของเคเบิลสูงสุดที่ทดสอบได้นั้นคือ 230 kV ดังตารางที่ 2.7 ที่มีความถี่การทดสอบอยู่ในช่วง 20-500 Hz และทำการทดสอบจำนวน 50 ครั้ง

ตารางที่ 2.7 ระดับแรงดันทดสอบแรงดันคงทน Damped AC สำหรับเคเบิลใหม่

พิกัดแรงดันของเคเบิล (เฟส-เฟส) U (kV _{rms})	แรงดันระบบไฟฟ้า (เฟส-ดิน) U_0 (kV _{rms})	ระดับแรงดันทดสอบ Damped AC (เฟส-ดิน) V_T (kV _{peak})
3	2	6
5	3	8
6	4	12
8	5	14
10	6	17
15	9	26
20	12	34
25	15	43
30	18	51
35	21	60
45-47	26	74
60-69	35	99
110-115	64	181
132-138	77	187
150-161	87	212
220-230	127	254

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ถือว่ากรมมีเหตุเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

2.5.2.3.3 Maintenance testing

เป็นการทดสอบแรงดันคงทนสำหรับเคเบิลที่อยู่ในระหว่างการใช้งานหรือเคเบิลที่ผ่านกระบวนการซ่อมบำรุง โดยทำการทดสอบหลังติดตั้งเข้ากับข้อต่อสายและหัวต่อสายเคเบิลแล้วเช่นกัน โดยจะเลือกค่าแรงดันทดสอบจากพิกัดแรงดันของเคเบิลและทำการทดสอบ 50 ครั้ง ซึ่งพิกัดสูงสุดของเคเบิลสูงสุดที่ทดสอบได้นั้นสามารถทดสอบเคเบิลที่พิกัดมากกว่า 230 kV ได้หากจำเป็น ดังตารางที่ 2.8 ที่ความถี่การทดสอบในช่วง 20-500 Hz

ตารางที่ 2.8 ระดับแรงดันทดสอบแรงดันคงทน Damped AC สำหรับเคเบิลเก่าหรือซ่อมบำรุง

พิกัดแรงดันของเคเบิล (เฟส-เฟส) U (kV _{rms})	แรงดันระบบไฟฟ้า (เฟส-ดิน) U_0 (kV _{rms})	ระดับแรงดันทดสอบ Damped AC (เฟส-ดิน) V_T (kV _{peak})
3	2	5
5	3	6
6	4	10
8	5	11
10	6	14
15	9	21
20	12	28
25	15	35
30	18	41
35	21	48
45-47	26	60
60-69	35	80
110-115	64	145
132-138	77	150
150-161	87	170
220-230	127	204
275-287 ¹	159	237
330-345 ¹	191	282
380-400 ¹	220	293
หมายเหตุ ¹ แรงดันทดสอบที่สูงกว่า 230 kV ใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

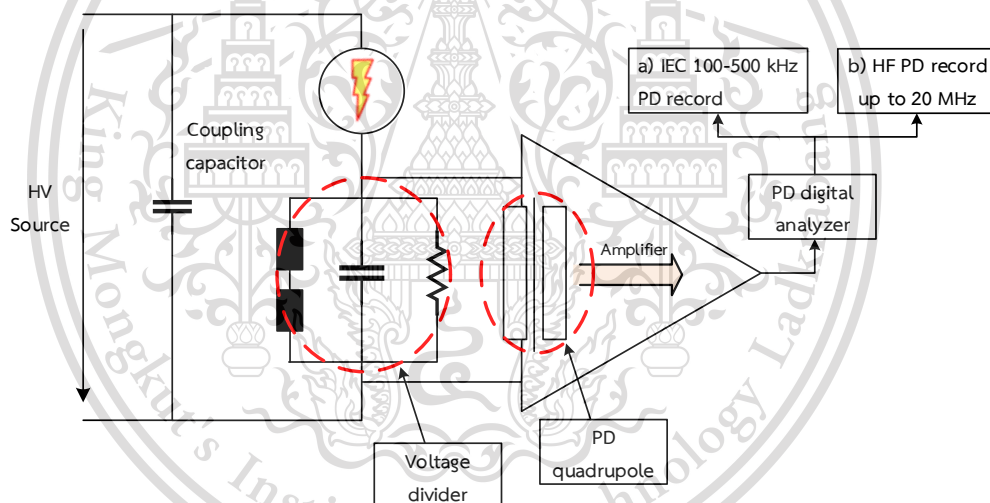
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.5.3 การวัดดิสชาร์จบางส่วนและการประมาณค่า Tan delta

2.5.3.1 การวัดดิสชาร์จบางส่วน [20]

การวัดดิสชาร์จบางส่วนนั้นจะทำการวัดด้วยวงจรวัดที่ต่อเข้ากับเคเบิลหรืออุปกรณ์ทดสอบจากภายนอก โดยทำการวัดดิสชาร์จบางส่วนพร้อมกับการทดสอบแรงดันคงทน โดยทั่วไปสามารถแบ่งวิธีการวัดตามย่านความถี่ในการวัดดิสชาร์จบางส่วนได้ 2 ประเภท ประเภทแรกเป็นทั่วไปซึ่งมีการนำมาใช้งานและพัฒนาเป็นเวลานาน โดยอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 60270 และประเภทที่สองนั้นใช้ความถี่ในย่านที่สูงขึ้น โดยอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 62478 โดยการวัดทั้งสองมีวัตถุประสงค์เพื่อการวินิจฉัยดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นที่อุปกรณ์ทดสอบขณะทำการทดสอบว่ามีค่าเกินกว่าค่าที่ยอมรับได้หรือไม่ และนำไปประเมินอุปกรณ์ทดสอบเพื่อตัดสินใจในการนำไปติดตั้งใช้งานจริง และสามารถประเมินอายุการใช้งานที่เหลือของอุปกรณ์ทดสอบได้

2.5.3.2 การวัดดิสชาร์จบางส่วนตามมาตรฐาน IEC 60270



รูปที่ 2.52 วงจรวัดดิสชาร์จบางส่วน

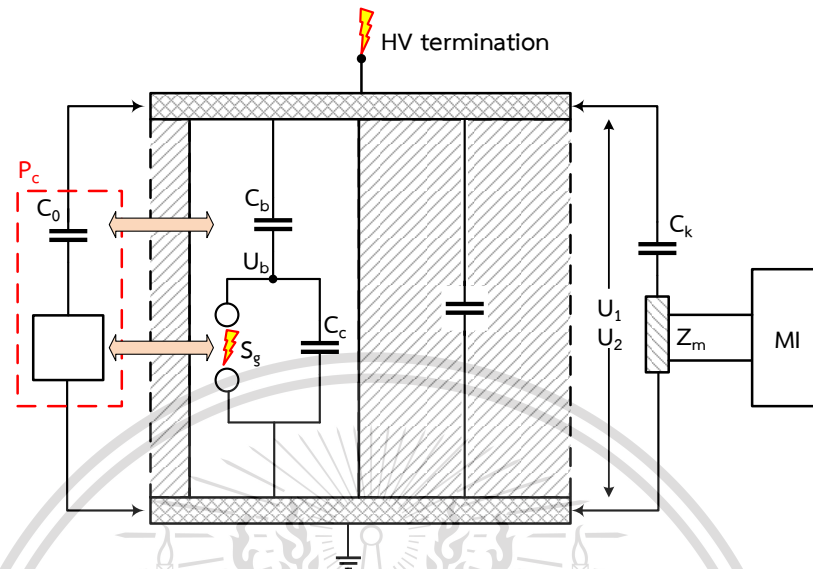
หลักการวัดดิสชาร์จบางส่วนนั้นมีการอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 60270 และ IEC 60885-3 และสำหรับเทคนิคในการตรวจจับสัญญาณนั้นอ้างอิงตาม IEEE Std 400.3 โดยจาก IEC 60270 ได้แสดงวงจรวัดดิสชาร์จบางส่วนดังรูปที่ 2.52 ซึ่งใช้ตัวเก็บประจุเกี่ยวคัลล์งสำหรับคายประจุเพื่อตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน โดยนำมาต่อขนานกับอุปกรณ์ทดสอบ วิธีการวัดตามมาตรฐานนี้จะใช้ย่านความถี่ในช่วง 100–500 kHz สำหรับตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนและ Phase-resolved partial discharge pattern (PRPD pattern) และอีกย่านความถี่ที่ใช้จะเป็นความถี่สูงขึ้นอาจสูงถึง 20 MHz ที่มี Sampling rate 100 MHz เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ Time domain reflectometry

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้เพื่อการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

(TDR) เพื่อหาตำแหน่งในระบบเคเบิลที่มีดิสชาร์จบางส่วนเกิดขึ้นโดยวัดระยะจากจุดที่มีการต่อวงจรการวัดจากภายนอก



รูปที่ 2.53 วงจรสอบเทียบระบบบวัด

จากรูปที่ 2.53 มีพารามิเตอร์ต่างๆในวงจรดังนี้

C_a = ค่าเก็บประจุของโหลด	Z_m = อิมพีแดนซ์เข้าวงจรวัด
C_b = ค่าเก็บประจุสเตรย์ของ PD Source	U_0 = แรงดันจากอุปกรณ์สอบเทียบ
C_c = ค่าเก็บประจุภายในของ PD Source	U_b = แรงดันจากจุดที่มีดิสชาร์จบางส่วน
C_0 = ค่าเก็บประจุนุกรมกับตัวสอบเทียบ	U_1 = แรงดันจากอุปกรณ์สอบเทียบตกรวม C_a
S_g = แยกทรนกลม (Spark gap)	U_2 = แรงดันแบบ Step จาก PD Source ที่ตกรวม C_a
P_c = อุปกรณ์สอบเทียบ (Calibrator)	MI = อุปกรณ์แสดงดิสชาร์จบางส่วน
C_k = ตัวเก็บประจุเกี่ยวคัลล์อง	

วงจรสอบเทียบตามมาตรฐาน IEC 60270 แสดงดังรูปที่ 2.53 เป็นการจำลองการเคลื่อนที่ระหว่างจุดที่มี PD เกิดขึ้นจนถึงปลายสายเนื่องจากดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นภายในระบบเคเบิล โดยใช้อุปกรณ์สอบเทียบจ่ายดิสชาร์จบางส่วน (PD calibrator) ที่ประกอบด้วยแหล่งจ่ายสัญญาณพัลส์ (Pulse generator) กับตัวเก็บประจุค่าหนึ่งต่ออนุกรมกันอยู่ (C_0) โดยในการตรวจจับและวิเคราะห์สัญญาณ PD จะใช้ความถี่ 2 ย่านด้วยกัน ดังนี้

1) ย่านความถี่ในช่วง 100-500 kHz ซึ่งเป็นย่านความถี่ที่อ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 60270 เพื่อใช้ร่วมกับตัวเก็บประจุเกี่ยวคัลล์อง (C_k) สำหรับจับสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนและแสดงผลออกมาเป็นพฤติกรรมความสัมพันธ์ดิสชาร์จบางส่วนที่เทียบกับแรงดันไฟฟ้าหรือ PRPD สำหรับวิเคราะห์หิชนิดของดิสชาร์จบางส่วนโดยสังเกตจากมุมเฟสของแรงดันที่มีสัญญาณ PD เกิดขึ้น

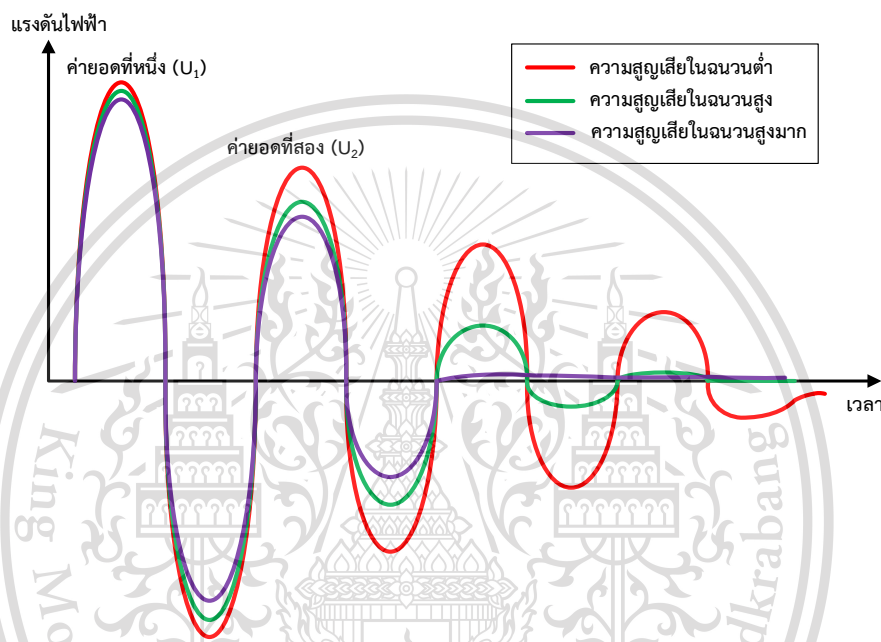
นอกจากนี้ยังใช้ในการสังเกตแรงดันดิสชาร์จบางส่วนเริ่มเกิดและแรงดันดิสชาร์จบางส่วนต่ำกว่า

Background noise (PDEV) ซึ่งเป็นอีกหนึ่งปัจจัยสำคัญในการวินิจฉัยการนำเคเบิลไปใช้งาน

2) ย่านความถี่สูงตั้งแต่ 100 kHz – 20 MHz ใช้สำหรับวิเคราะห์สัญญาณดิสซาร์จบางส่วนที่จับได้เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของดิสซาร์จบางส่วนเทียบกับระยะทางหรือ TDR เพื่อหาตำแหน่งที่มีดิสซาร์จบางส่วนเกิดขึ้น

2.5.3.3 การประมาณค่า Tan delta

Tan delta หรือ Dissipation factor (DF) ซึ่งเป็นความสูญเสียในฉนวนของเคเบิลที่ได้จากการป้อนแรงดันทดสอบ Damped AC นั้นสามารถหาค่าได้ 2 วิธี ดังนี้



รูปที่ 2.54 การลดทอนของแรงดันทดสอบที่มีความสูญเสียในฉนวนต่างกัน

1) ใช้วิธีการประมาณ โดยทำการกระตุ้นแรงดันทดสอบ 1 ครั้ง จากนั้นสังเกตพฤติกรรมการลดลงของแรงดัน หากแรงดันลดลงอย่างรวดเร็วและมีระยะเวลาในการออสซิลเลชันนั้นหมายถึงฉนวนมีความสูญเสียในฉนวนสูง แสดงดังรูปที่ 2.54 ซึ่งสัญญาณสีแดง สีเขียวและสีม่วงคือสัญญาณที่มีค่า DF เรียงจากน้อยไปมากซึ่งจะแปรไปตามค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน ยิ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนมาก การลดทอนของขนาดแรงดันยิ่งมีค่ามาก ดังสมการที่ 2.15

$$\frac{U_5}{U_1} = e^{-\beta(t_5 - t_1)}$$

$$\beta_{DAC} = \frac{\ln\left(\frac{U_5}{U_1}\right)}{t_5 - t_1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ (2.15) การค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

2) ใช้วิธีหาค่าโดยตรง อาจใช้การสอบเทียบระบบวัดจากผู้ผลิต โดยเทียบผลจากการใช้ความถี่และขนาดของแรงดันทดสอบต่างกัน จะได้ความต้านทานภายในทั้งหมดของอุปกรณ์ในวงจรทดสอบ (R_L) ที่ไม่รวมความต้านทานหรือความสูญเสียของเคเบิลออกมา และสามารถหาค่าความต้านทานของอุปกรณ์ทดสอบ (R_C) ที่แสดงถึงความสูญเสียที่เกิดขึ้นที่เคเบิลได้ โดยสามารถนำค่าความต้านทานนี้ไปหาค่า DF ต่อไป ดังสมการที่ 2.16

$$R_C = \frac{L}{2\beta LC - R_L C} \quad (2.16)$$

และสามารถคำนวณหาค่าความสูญเสียในฉนวนได้ ดังสมการที่ 2.17

$$DF = \frac{1}{\omega R_C C} \quad (2.17)$$

2.5.4 การประเมินการทดสอบ

ก่อนเริ่มทดสอบจำเป็นต้องตรวจสอบก่อนว่าแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบ Damped AC ที่ใช้ทำการทดสอบนั้นสามารถทดสอบเคเบิลที่ต้องการทดสอบได้หรือไม่ ซึ่งโดยทั่วไปจะดูข้อมูลจากผู้ผลิต แล้วตรวจสอบขนาดของโหลดที่สามารถทำการทดสอบได้ว่าอยู่ในช่วงใด ซึ่งอาจออกแบบช่วงของโหลดมาจากค่ากระแสสูงสุดในกระบวนการ Charging process และอยู่ในช่วงความถี่ที่ยอมรับได้ เช่น หากอ้างอิงตามมาตรฐาน IEEE 400.4-2015 จะออกแบบให้สามารถจ่ายโหลดที่ขนาดต่างๆ ให้มีความถี่ตั้งแต่ 20-500 Hz หรือหากออกแบบตามมาตรฐาน IEC 60060-3 : 2006 จะออกแบบให้สามารถทดสอบโหลดที่ค่าต่างๆ โดยที่ค่าความถี่ไฟฟ้าอยู่ในช่วง 20-1,000 Hz

นอกจากการวินิจฉัยในเรื่องของดิสชาร์จบางส่วนและความสูญเสียในฉนวนแล้ว ยังต้องสังเกตเรื่องการลดทอนของแรงดันทดสอบ Damped AC ด้วย ซึ่งเรียกว่า Damping factor (D_f) ซึ่งสามารถหาค่าได้โดยตรง ดังสมการที่ 2.18

$$D_f = \frac{V_1 - V_2}{V_1} \quad (2.18)$$

เมื่อ V_1 เป็นแรงดันค่ายอดของลูกคลื่นแรกของแรงดันทดสอบ
 V_2 เป็นแรงดันค่ายอดของลูกคลื่นลูกที่สองของแรงดันทดสอบที่มีขั้วเดียวกับ V_1
 จากมาตรฐาน IEEE 400.4-2015 ระบุว่าค่า Damping factor นี้ต้องมีค่าไม่เกิน 15% ($D_f \leq 15\%$) ซึ่งมีค่าแปรผันตรงตามความสูญเสียที่เกิดขึ้นในการทดสอบ ทั้งความสูญเสียภายในวงจรทดสอบ และความสูญเสียที่อุปกรณ์ทดสอบหรือเคเบิล

นอกจากนั้นยังมีเรื่องการประเมินการทดสอบเนื่องจากดิสชาร์จบางส่วน จากการประเมินผลการทดสอบนั้นแบ่งเป็นแบบ Monitored withstand test ที่มีการวินิจฉัยผ่านการดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นในระหว่างทำการทดสอบแรงดันคงทน และ Non-monitoring test ที่ไม่ได้มีการวินิจฉัยผลของดิสชาร์จบางส่วนและสังเกตเพียงผลของการเบรกดาวนเท่านั้น ดังนั้นการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
 ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม ลิขสิทธิ์ของเนื้อหาทั้งหมด และสิ่งอื่นใดที่ปรากฏในเอกสารฉบับนี้สงวนไว้สำหรับใช้

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

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

แบบ Non-monitored test จะทำการประเมินไม่ผ่านการทดสอบเมื่อมีการเบรกดาว์นเกิดขึ้นเท่านั้น ซึ่งการทดสอบที่ดีควรจะเป็นการทดสอบแบบ Monitored test ที่มีผลของดิสชาร์จบางส่วนเป็นหนึ่ง ในข้อมูลประกอบการวิเคราะห์และตัดสินใจ โดยจากในมาตรฐาน IEEE 400.4-2015 ได้มีการแสดง ตัวอย่างการแนะนำการประเมินผลการทดสอบของระบบเคเบิลใหม่ ที่เลือกขนาดแรงดันทดสอบตาม ตารางที่ 2.7 จากนั้นสังเกตแรงดันดิสชาร์จบางส่วนเริ่มเกิดว่าเกิดขึ้นที่แรงดันทดสอบต่ำๆหรือไม่ ถ้า ใช้ให้วิเคราะห์ว่าการดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นนั้นเป็นการดิสชาร์จบางส่วนประเภทไหน ซึ่งสามารถ แสดงตัวอย่างการประเมินการทดสอบได้ดังตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 ตัวอย่างการประเมินผลการทดสอบระบบเคเบิลผลิตใหม่

อุปกรณ์ทดสอบ	มีการเบรก ดาว์นเกิดขึ้น	PDIV < 1.2 U ₀	< 1.2 U ₀ PDIV < 1.7 U ₀	PDIV > 1.7 U ₀	ผลการ ทดสอบ
เคเบิล	✓	-	-	-	×
	✓	-	-	-	×
	×	-	-	✓	✓
	×	-	✓	-	×
Joints	✓	-	-	-	×
	✓	-	-	-	×
	×	-	✓	✓	✓
	×	✓	-	-	×
Terminations	✓	-	-	-	×
	✓	-	-	-	×
	×	-	-	✓	✓
	×	-	✓	-	✓ ²
	✓	✓	-	-	×
หมายเหตุ ¹ หากความเข้มข้น PD มากกว่า 3 ต่อหนึ่งรอบ และมีขนาดมากกว่า 100 pC ให้ประเมิน ไม่ผ่านการทดสอบ ² หาก PD ที่เกิดขึ้นแต่ละเฟสไม่เท่ากันและความเข้มข้น PD มากกว่า 3 ต่อหนึ่งรอบ และมี ขนาดมากกว่า 100 pC ให้ประเมินไม่ผ่านการทดสอบ (หากไม่สามารถทดสอบซ้ำได้) ³ หาก PD ที่เกิดขึ้นเป็น External PD ให้ประเมินผ่านการทดสอบ					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

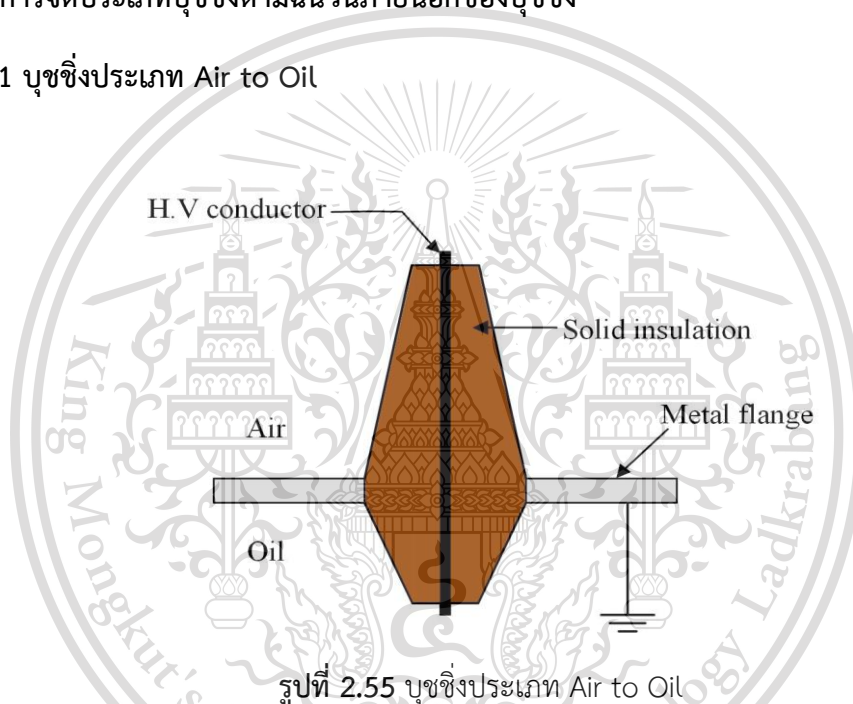
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.6 บุชชิงแรงดันสูง [21]

ภายในบุชชิงแรงดันสูงจะมีตัวนำ 1 เส้นหรือมากกว่าในบริเวณแกนกลางของบุชชิงแรงดันสูงซึ่งมีมีการต่อลงดินผ่านอุปกรณ์ เช่น ตัวถังเหล็กโดยบุชชิงจะมีหน้าที่ในการรองรับแรงทางกลและแรงทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ที่นำไปบุชชิงไปใช้งาน ในการรองรับแรงทางบุชชิงจะเป็นตัวเชื่อมต่ออุปกรณ์ที่นำไปบุชชิงไปติดตั้งเข้ากับอุปกรณ์ภายนอกอื่นๆ จึงทำให้บุชชิงต้องมีความเป็นฉนวนไฟฟ้าที่สูงและบุชชิงต้องมีคุณสมบัติในการทนความร้อนที่เกิดขึ้นจากแรงดันใช้งานและแรงดันเกิน ในการแบ่งประเภทของบุชชิงจะสามารถแบ่งโดยใช้หลักเกณฑ์ด้วยกัน 3 ปัจจัย ได้แก่ ฉนวนภายนอกที่ปลายทั้งสองด้านของบุชชิง โครงสร้างภายในของบุชชิง และการฉนวนภายในบุชชิง

2.6.1 การจัดประเภทบุชชิงตามฉนวนภายนอกของบุชชิง

2.6.1.1 บุชชิงประเภท Air to Oil



รูปที่ 2.55 บุชชิงประเภท Air to Oil

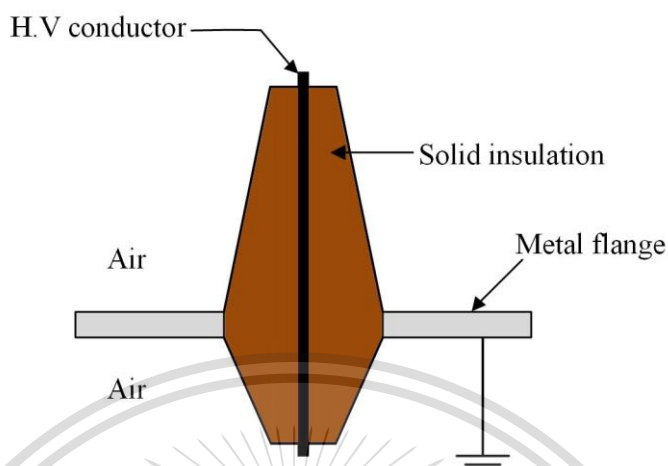
โดยบุชชิงประเภทนี้จะมีฉนวนภายนอกปลายทั้งสองด้านของบุชชิงอยู่ในอากาศโดยปลายด้านหนึ่งของบุชชิงจะสัมผัสกับอากาศภายนอกอุปกรณ์และปลายอีกด้านหนึ่งจะสัมผัสกับน้ำมันภายในอุปกรณ์ที่นำไปบุชชิงไปติดตั้ง โดยความเป็นฉนวนของน้ำมันนั้นมีค่ามากกว่าอากาศจึงมีการออกแบบปลายบริเวณด้านที่มีฉนวนอากาศให้มีความยาวที่มากกว่าปลายด้านที่มีฉนวนเป็นน้ำมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

2.6.1.2 บุชชิงประเภท Oil to Oil



รูปที่ 2.56 บุชชิงประเภท Air to Air

บุชชิงประเภทนี้จะมีปลายทั้งสองด้านสัมผัสอากาศ โดยด้านที่สัมผัสกับภายในอุปกรณ์จะมีการออกแบบให้บริเวณปลายมีความยาวน้อยกว่าด้านที่สัมผัสอากาศภายนอกอุปกรณ์ เนื่องจากด้านที่สัมผัสอากาศภายนอกจะต้องเผชิญกับมลภาวะที่ผิวและผลจากสภาพอากาศต่างๆ เช่น ฟ้าผ่า ฝนตก หรือไอเกลือ เป็นต้น

2.6.1.3 บุชชิงฉนวนภายนอกอื่นๆ

บุชชิงประเภทนี้ถูกผลิตตามสภาพการใช้งานและมีการนำ SF₆ เข้ามาใช้งานในบุชชิง เช่น บุชชิงประเภท Air to SF₆ ถูกนำมาใช้งานในเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่มีฉนวน SF₆, บุชชิงประเภท SF₆ to Oil ถูกใช้งานเป็นทางผ่านระหว่าง SF₆ busduct กับอุปกรณ์ที่มีการเติมน้ำมัน และบุชชิงประเภท Oil to Oil ถูกใช้งานระหว่าง Oil busduct กับอุปกรณ์ที่มีการเติมน้ำมัน

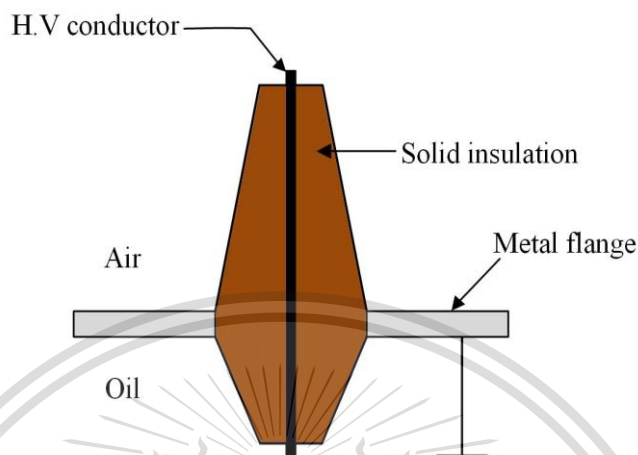
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

2.6.2 การจัดประเภทบุชชิ่งตามโครงสร้างภายในของบุชชิ่ง

2.6.2.1 บุชชิ่งชนิด Solid type



รูปที่ 2.57 บุชชิ่งชนิด Solid type

บุชชิ่งประเภทนี้จะประกอบด้วยหนึ่งตัวนำที่แกนกลางและมีฉนวนที่ปลายทั้งสองด้านเป็นพอร์ซเลนหรืออีพอกซีเรซิน โดยบุชชิ่งประเภทนี้จะใช้กับอุปกรณ์จำพวกหม้อแปลงจำหน่าย วงจรสวิตช์สำหรับหม้อแปลงกำลัง เป็นต้น โดยเส้นผ่านศูนย์กลางของบุชชิ่งจะแปรผันตรงกับขนาด พิกัดกระแสของบุชชิ่ง และช่องว่างระหว่างตัวนำกับฉนวนจะถูกเติมด้วยอากาศหรือน้ำมันหม้อแปลง (Mineral oil) ซึ่งจะเลือกโดยใช้พิกัดแรงดันที่กำหนด น้ำมันหม้อแปลงจะมีความสามารถในการ ถ่ายเทความร้อนและค่าความเป็นฉนวนที่สูงกว่าจึงทำให้มีค่าคงทนแรงดันสูงกว่าเมื่อเทียบกับอากาศ

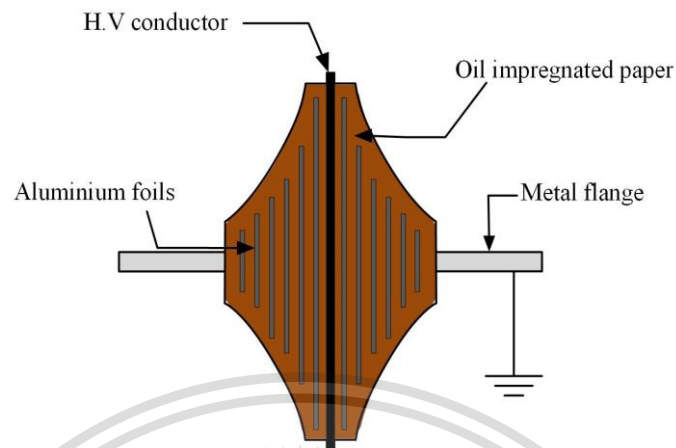
ข้อเสียของบุชชิ่งชนิดนี้คือมีการกระจายแรงดันภายในบุชชิ่งที่ไม่สม่ำเสมอ โดยจะกระจายตัวส่วนมากที่บริเวณตัวนำและพื้นที่ผิวด้านนอกใกล้กับตัวถัง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องออกแบบให้ มีความยาวของบริเวณปลายเพียงพอเพื่อให้ความเครียดสนามไฟฟ้ามีค่าน้อยกว่าแรงดันที่ทำให้เกิดการ วาบไฟตามผิวที่ฉนวนของบุชชิ่งและต้องมีค่าเส้นผ่านศูนย์กลางที่มากพอเพื่อให้ความเครียดจาก ตัวนำมีค่าน้อยกว่าค่าความคงทนฉนวนไฟฟ้าของวัสดุที่นำมาทำฉนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

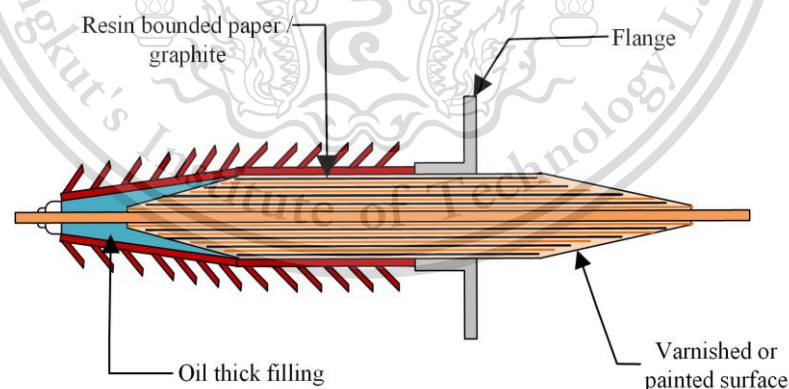
2.6.2.2 บุษชิงชนิด Capacitance graded



รูปที่ 2.58 บุษชิงชนิด Capacitance graded

บุษชิงชนิดนี้มีการเพิ่มกระบอกโลหะเพื่อใส่ตัวนำที่บริเวณแกนกลางของบุษชิงและนำกระดาษแช่น้ำมันมาพันรอบกระบอกโลหะ ระหว่างชั้นของกระดาษจะนำฟอยล์อะลูมิเนียมมาวางเรียงกันโดยมีระยะห่างที่เท่ากัน ที่ชั้นนอกสุดของฟอยล์โลหะจะทำการเชื่อมต่อกับถังเหล็กโดยจะแบ่งบุษชิงแบบ Capacitance graded ได้ 3 รูปแบบดังนี้

2.6.2.2.1 Resin Bonded Paper (RBP)



รูปที่ 2.59 บุษชิงชนิด Resin Bonded Paper

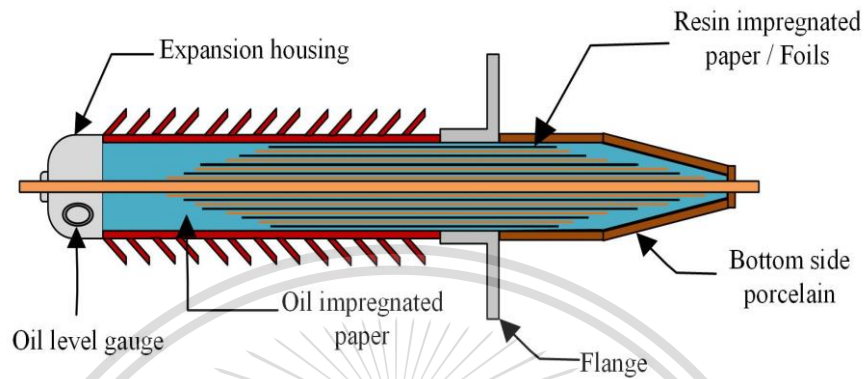
โครงสร้างของบุษชิงชนิด RBP ทำมาจากกระดาษพันรอบกระบอกโลหะโดยมีฟอยล์โลหะอยู่ระหว่างชั้นของกระดาษแล้วทำการเคลือบด้วยเรซินภายใต้ความร้อนและแรงดันโดยในการออกแบบบุษชิงประเภทนี้จะออกแบบให้ในแต่ละชั้นสามารถทนแรงดันได้ประมาณ 20 kV/cm ซึ่งข้อเสียของบุษชิงประเภทนี้คือระหว่างชั้นของฟอยล์และกระดาษอาจเกิดฟองอากาศโดยฟองอากาศที่

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

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

เกิดขึ้นในขั้นตอนการผลิตที่ไม่ได้มาตรฐานและฟองอากาศดังกล่าวเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดการ
 ดิสชาร์จบางส่วน

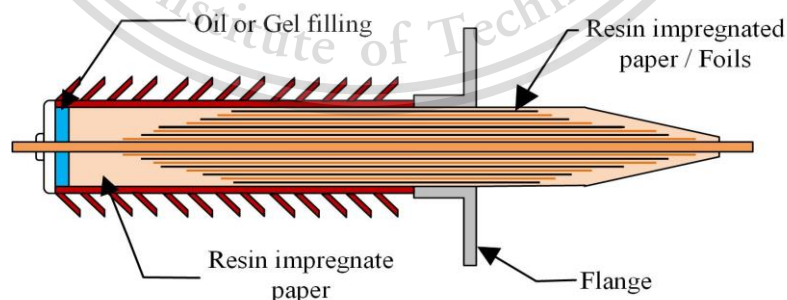
2.6.2.2.2 Oil impregnated paper (OIP)



รูปที่ 2.60 บุชชิงชนิด Oil Impregnated Paper

โครงสร้างของบุชชิงชนิด OIP ทำจากกระดาษที่นำไปอบเพื่อนำความชื้นออกและ
 นำไปแช่ในน้ำมันหม้อแปลง ในการออกแบบจำนวนและตำแหน่งของพอยล์จะเลือกจากระดับแรงดัน
 ที่ทำให้เกิดการเบรกดาวน์ของฉนวนในขั้นตอนการผลิตที่ได้มาตรฐานจะทำให้ไม่เกิดฟองอากาศใน
 โครงสร้างของ OIP ซึ่งทำให้เกิดแรงดันเริ่มต้นในการเกิดดิสชาร์จบางส่วนสูงกว่าบุชชิง RBP โดยใน
 การออกแบบให้แต่ละชั้นสามารถทนแรงดันได้ 45 kV/cm และความยาวกับความกว้างของพอยล์
 โลหะจะถูกออกแบบมาเพื่อให้เกิดการกระจายตัวของแรงดันได้อย่างสม่ำเสมอ

2.6.2.2.3 Resin impregnated paper (RIP)



รูปที่ 2.61 บุชชิงชนิด Resin Impregnated Paper

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ โครงสร้างของบุชชิง RIP ทำมาจากกระดาษมาพันรอบกระบอแก้วนำและนำพอยล์การค้ำ
 มาวางระหว่างชั้นของกระดาษเพื่อควบคุมความเครียดของสนามไฟฟ้า จากนั้นนำเข้ากระบวนการ

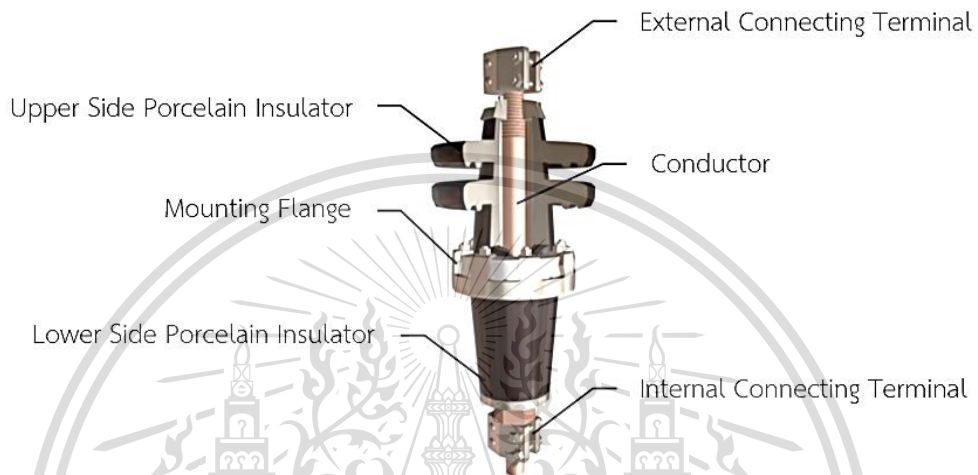
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

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

หล่ออีพอกซีเรซินภายใต้ความดันสุญญากาศเพื่อไม่ให้เกิดฟองในขั้นตอนการผลิตในการออกแบบจะ ออกแบบให้แต่ละชั้นทนแรงดันได้ 36 kV/cm

2.6.3 การจัดประเภทบุชชิ่งตามฉนวนภายในของบุชชิ่ง

2.6.3.1 Air insulated bushing [22]



รูปที่ 2.62 บุชชิ่งฉนวนอากาศ

บุชชิ่งประเภทนี้ถูกใช้งานกับอุปกรณ์ที่ใช้อากาศเป็นฉนวนภายในและบุชชิ่งชนิด solid type ดังรูปที่ 2.57 โดยฉนวนภายในบุชชิ่งเป็นอากาศ

2.6.3.2 Oil filled bushing



รูปที่ 2.63 บุชชิ่งฉนวนน้ำมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

บุชชิงประเภทนี้จะมีน้ำมันหม้อแปลงอยู่ระหว่างแกนตัวนำบริเวณกลางบุชชิงและฉนวนภายในของบุชชิง ซึ่งน้ำมันหม้อแปลงจะถูกเติมลงในตัวบุชชิงหรือใช้ร่วมกับอุปกรณ์ที่นำบุชชิงไปทำการติดตั้ง โดยสามารถเติมน้ำมันและสุ่มตัวอย่างด้วยวิธีการ Dissolved gas analysis (DGA) ได้ง่ายโดยผ่านตัวบุชชิงได้เลย โดยมักจะใช้เป็นน้ำมันหม้อแปลงเพื่อถ่ายเทความร้อนจากตัวนำที่อยู่แกนกลางของบุชชิง

2.6.3.3 Oil impregnated paper

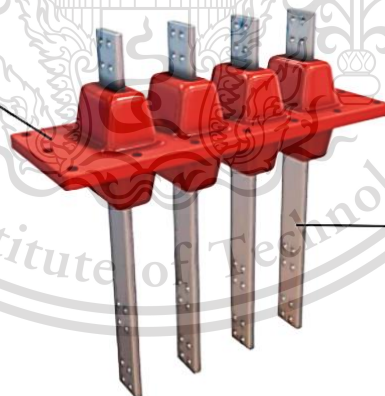
บุชชิงประเภทนี้จะมีความคงทนความเครียดสนามไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงกับกระดาษที่นำไปสร้างจะทำให้ค่า Dielectric characteristics มีค่าที่ดีขึ้น โดยส่วนประกอบภายในและภายนอกเป็นดังรูปที่ 2.60

2.6.3.4 Resin bonded หรือ impregnated paper insulated

โดยบุชชิงชนิดนี้จะถูกสร้างขึ้นจากตัวนำเป็นแกนกลางพันเข้าด้วยกระดาษที่ทำการแช่ด้วยเรซินโดยการจัดประเภทแบบนี้เหมือนกับบุชชิงประเภท OIP ส่วนประกอบภายในและภายนอกเป็นดังรูปที่ 2.59

2.6.3.5 Cast insulation [23]

Cast Resin



Conductor

รูปที่ 2.64 บุชชิงฉนวนน้ำมัน

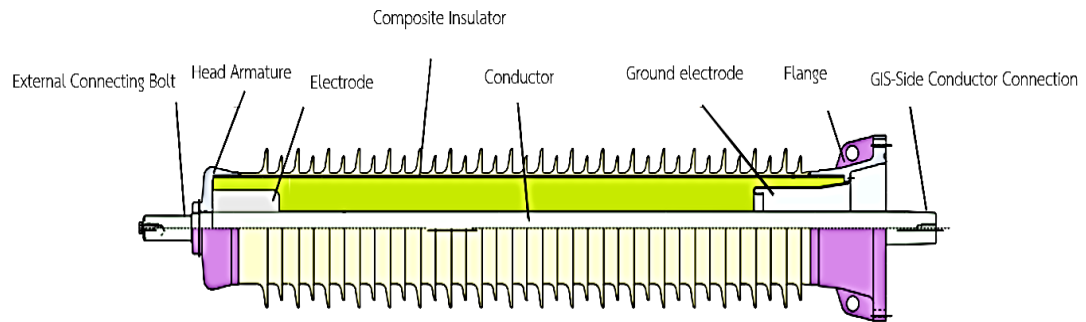
บุชชิงชนิดนี้ถูกสร้างจากการหล่อทำให้แข็งตัวยกตัวอย่างเช่น บุชชิงชนิด Solid type หรือบุชชิงชนิด Capacitance graded เนื่องจากเรซินมีคุณสมบัติทางความร้อน, ทางไฟฟ้า และคุณสมบัติทางกลที่ดีซึ่งไม่ส่งผลต่อการหดตัวจึงมีการประยุกต์ใช้อย่างมากในการผลิตบุชชิง โดยการหล่อจะอยู่ภายใต้สภาพแรงดันเพื่อทำการขึ้นรูป จากนั้นจะทำการพิมพ์ลงบน Clamp โดยมีการบวนการ Automatic pressure gelation (APG) เพื่อให้บุชชิงเป็นเนื้อเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม กรุณาแจ้งให้ผู้นับถือและเจ้าของลิขสิทธิ์ที่เกี่ยวข้องทราบทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

2.6.3.6 Gas-Insulated Bushing [24]



รูปที่ 2.65 บุษซึ่งฉนวน SF₆ สำหรับใช้ใน GIS

บุษซึ่งประเภทนี้จะนำแก๊สสร้างเป็นฉนวนระหว่างตัวนำที่แกนกลางกับหน้าแปลนโลหะ โดยยกตัวอย่างแก๊สที่นำมาใช้ เช่น SF₆ โดยบุษซึ่งชนิดนี้อาจมีการนำกรวดซิลด์เพื่อควบคุมสนามไฟฟ้าแทนการใช้ Capacitance graded



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

บทที่ 3

การออกแบบการทดลอง

3.1 เตรียมการทดลอง

3.1.1 อุปกรณ์การทดลอง

3.1.1.1 อุปกรณ์จ่ายแรงดันทดสอบ Damped AC



รูปที่ 3.1 แหล่งจ่ายแรงดันทดสอบ Damped AC 35 kV

เครื่องจ่ายแรงดันทดสอบ Damped AC จากบริษัท Dimrus รุ่น CPDA-60 สามารถจ่ายแรงดันทดสอบได้สูงสุด $35 \text{ kV}_{\text{peak}}$ โดยมีข้อมูลทางเทคนิคของแหล่งจ่ายไฟ ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ข้อกำหนดทางเทคนิคของอุปกรณ์สำหรับจ่ายแรงดันทดสอบ

พารามิเตอร์ทางไฟฟ้า	
แรงดันขาออกสูงสุด (kV)	$56 \text{ kV}_{\text{peak}}$ หรือ $40 \text{ kV}_{\text{rms}}$
กระแสชาร์จสูงสุด (mA)	10
ขนาดของเคเบิลที่สามารถทดสอบได้ (μF)	$0.05 \div 10$
ขนาดดิสชาร์จบางส่วนที่สามารถจับได้ (pC)	$10 \div 100000$
ความถี่ของสัญญาณดิสชาร์จบางส่วน (MHz)	$0.15 \div 50.0$
ความถี่แรงดันทดสอบ Damped AC (Hz)	$20 \div 1000$
วัดค่า $T_g \delta$ ในเนื้อฉนวน	สามารถวัดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

ตารางที่ 3.1 (ต่อ) ข้อกำหนดทางเทคนิคของอุปกรณ์สำหรับจ่ายแรงดันทดสอบ

พารามิเตอร์สำคัญ	
แรงดันป้อนเข้า กระแสสลับ/กระแสตรง (V)	110 ÷ 240
ระยะเวลาการทำงานโดยใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ (hours.)	4 ÷ 8
น้ำหนักของอุปกรณ์รวม (กิโลกรัม)	120

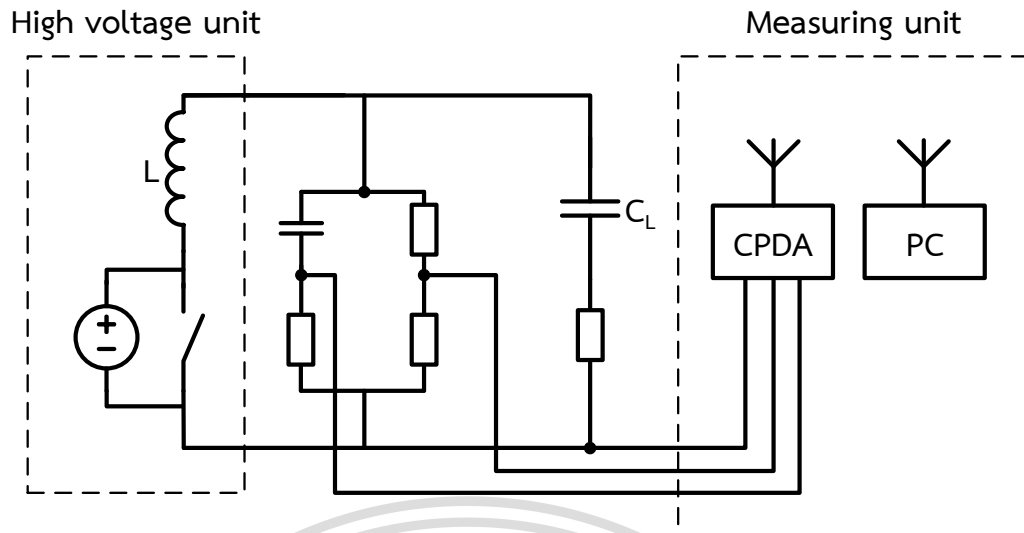
โดยระบบทดสอบแรงดัน Damped AC รุ่น CPDA-60 มีอุปกรณ์เสริมอื่นๆมากมาย
ที่จำเป็นต้องใช้ในการทดสอบ ประกอบด้วย

- 1) อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ประกอบด้วย
 - แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า
 - สวิตช์แรงสูง
 - 2) ตัวเหนี่ยวนำแกนอากาศ 2 ชั้น ต่ออนุกรมโดยวางซ้อนอยู่บนชุดแหล่งจ่าย
แรงดันไฟฟ้า
 - 3) อุปกรณ์แบ่งแรงดัน (Voltage divider)
 - 4) ระบบวัดและตรวจจับสัญญาณไฟฟ้า (Measuring unit) ประกอบด้วย
 - แหล่งจ่ายไฟ (Power supply)
 - อุปกรณ์ควบคุม (Controller)
 - แบตเตอรี่
 - 5) คอมพิวเตอร์/โน้ตบุ๊ก (PC laptop)
 - 6) ตัวสอบเทียบอุปกรณ์ (Calibrator)
 - 7) ซอฟต์แวร์และคู่มือการใช้งาน (Software and manual)
- ซึ่งสามารถเขียนเป็นวงจรการทดสอบได้ดังรูปที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

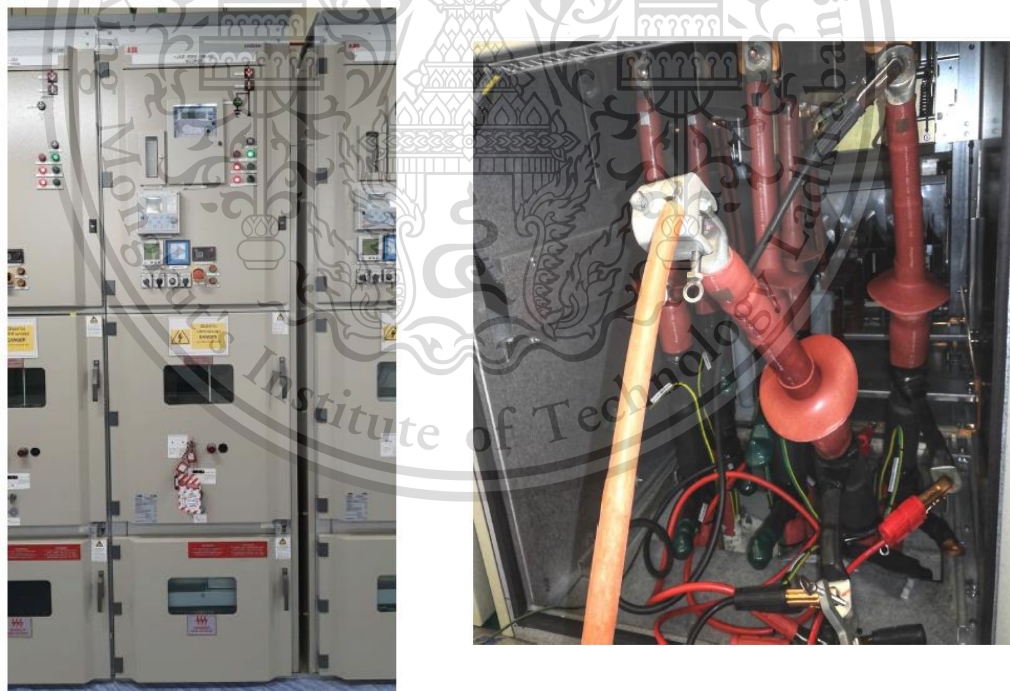
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

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



รูปที่ 3.2 วงจรการทดสอบด้วยแหล่งจ่ายแรงดัน Damped AC

3.1.1.2 ระบบเคเบิล 22 kV



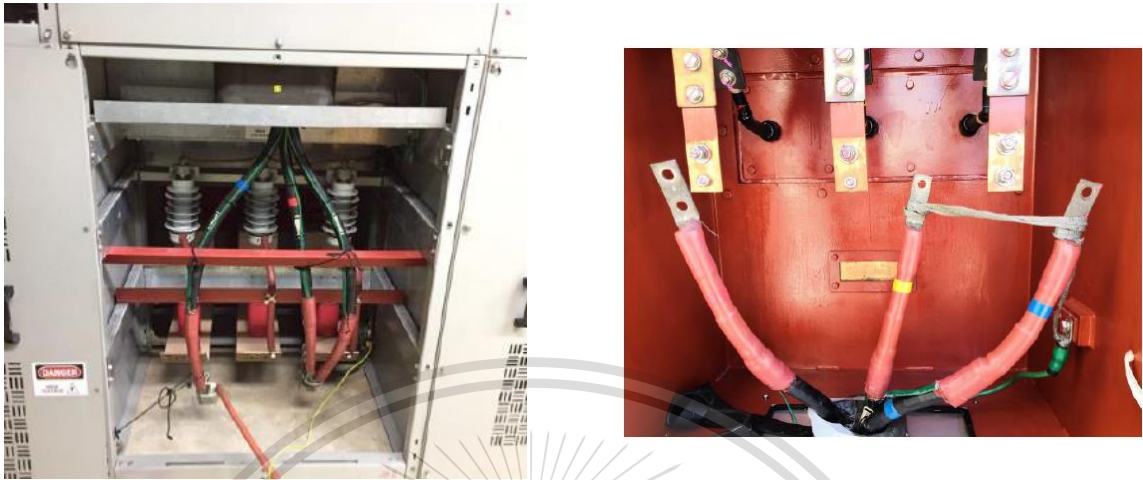
รูปที่ 3.3 เคเบิลทดสอบพิกัด 22 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

3.1.1.3 ระบบเคเบิล 6.9 kV



รูปที่ 3.4 เคเบิลทดสอบพิกัด 6.9 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

3.1.1.4 เคเบิลป้อนดับเพลิง 6.9 kV



รูปที่ 3.5 เคเบิลป้อนเข้าป้อมดับเพลิงทดสอบ 6.9 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

3.2 การทดสอบเพื่อวินิจฉัยระบบเคเบิลใต้ดินด้วยแรงดัน Damped AC

การทดสอบแรงดัน Damped AC ให้กับอุปกรณ์ทดสอบข้างต้น ได้แก่ เคเบิลใต้ดิน พิกัดแรงดัน 22 kV, เคเบิลใต้ดินพิกัดแรงดัน 6.9 kV และสายเคเบิลป้อนเข้าบัสดับเพลิง โดยมีพิกัด 6.9 kV นั้นจะทดสอบเพียงเพื่อการวินิจฉัยเท่านั้น โดยจะทำการทดสอบและสังเกตการณ์เกิดการดิสชาร์จบางส่วนเกิดขึ้น โดยมีขั้นตอนการป้อนแรงดันทดสอบ ดังนี้

1) หาอัตราส่วนสำหรับการวัดดิสชาร์จบางส่วนในแต่ละการทดสอบ ด้วยการสอบเทียบระบบของการทดสอบ โดยการจ่ายประจุสอบเทียบเข้าสู่วงจรทดสอบเท่ากับ 1 nC

2) ค่อยๆขึ้นแรงดันทดสอบโดยมีรูปแบบขนาดแรงดัน $0.2U_0$, $0.5U_0$, $1.0U_0$ และสุดท้ายที่แรงดันทดสอบ พร้อมกับสังเกตดิสชาร์จบางส่วนที่อาจเกิดขึ้นได้ในทุกแรงดันทดสอบเพื่อบันทึกค่าแรงดันดิสชาร์จบางส่วนเริ่มเกิด โดยใช้สมการที่ 2.13 เพื่อหาค่าเก็บประจุของโพลโดยคิดจากความถี่ของแรงดันทดสอบที่บันทึกได้

3) หากจ่ายแรงดันทดสอบถึงขนาดที่ได้ออกแบบการทดสอบไว้และยังไม่มีดิสชาร์จบางส่วนเกิดขึ้นจะถือว่าเคเบิลนั้นไม่มีจุดผิดพลาดผ่านการทดสอบทันที หรือจ่ายแรงดันทดสอบที่แรงดันค่าเดิมจำนวน 50 ครั้งเพื่อทดสอบความคงทนของเคเบิล ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการทดสอบ

4) กรณีที่มีดิสชาร์จบางส่วนเกิดขึ้น จะทำการทดสอบและขึ้นแรงดันทดสอบต่อไปเรื่อยๆเช่นเดิม จนถึงแรงดันทดสอบและสังเกตขนาดของดิสชาร์จบางส่วนและค่าความสูญเสียในเนื้อฉนวนที่เกิดขึ้นว่ามีขนาดที่สามารถยอมรับได้หรือไม่

5) จากข้อ 4 กรณีที่แรงดันดิสชาร์จบางส่วนเริ่มเกิดมีค่าต่ำ เช่น มีแรงดันเริ่มเกิดดิสชาร์จบางส่วนเท่ากับ $1.0U_0$ หรือน้อยกว่า อาจทำการค่อยๆขึ้นแรงดันโดยอาจไม่มุ่งเน้นการขึ้นแรงดันไปจนถึงแรงดันทดสอบเพื่อยืนยันว่าเคเบิลที่กำลังทำการทดสอบนี้มีดิสชาร์จบางส่วนเกิดขึ้นจริงแล้วทำการแก้ไข ทั้งนี้ดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นนี้ต้องไม่ใช่ดิสชาร์จบางส่วนภายใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

3.3 การทดสอบการจำลองดิสชาร์จบางส่วนบุชชิงแรงสูง

การทดสอบเพิ่มเติมที่ได้จัดทำขึ้นและนำมาประกอบรวมไว้ในโครงการนี้ เป็นการทดสอบเพื่อวัดดิสชาร์จบางส่วนในบุชชิงแรงสูงการฉนวนแบบกระดาษชุบน้ำมัน ที่ผ่านการติดตั้งโดยรับสภาพแวดล้อมภายนอกมาเป็นระยะเวลาอนาน ทำให้มีคราบน้ำและความปนเปื้อนต่างๆที่บริเวณผิวด้านนอกของพอร์ชเลน ดังรูปที่ 3.6 จึงนำบุชชิงนี้มาทำการทดสอบหาดิสชาร์จบางส่วน เพื่อศึกษาความรู้เพิ่มเติมเกี่ยวกับพฤติกรรมของดิสชาร์จบางส่วนในบุชชิง



รูปที่ 3.6 บุชชิงสำหรับการทดสอบที่มีความปนเปื้อนสูง

3.3.1 อุปกรณ์การทดลอง

3.3.1.1 AC Control Unit 20 kVA



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นสำหรับการใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.7 AC Control Unit

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

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

3.3.1.2 หม้อแปลงทดสอบ



รูปที่ 3.8 หม้อแปลงทดสอบ

หม้อแปลงทดสอบแรงสูงชนิดน้ำมัน (Oil-immersed outdoor transformer) พิกัดกำลัง 20 kVA โดยมีข้อกำหนดทางเทคนิค ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ข้อกำหนดทางเทคนิคของหม้อแปลงทดสอบ

กำลังไฟฟ้าขาออก (kVA)	20	การต่อตัวนำด้านแรงดันต่ำ	
แรงดันไฟฟ้าขาเข้า (V)	440/220, 50 Hz, 1 เฟส		
แรงดันไฟฟ้าขาออก (kV)	200, 50 Hz, 1 เฟส	Voltage	CONN.
กระแสไฟฟ้าขาเข้า (A)	45/90	440	a2-b2
กระแสไฟฟ้าขาออก (A)	0.1	220	a1-b2, a2-b1
ระดับฉนวน	A		
มาตรฐานอ้างอิง	TIS 384, IEC 60076		
ช่วงเวลาการใช้งาน	Cont.		
การระบายความร้อน	ONAN		
อิมพีแดนซ์ลัดวงจร (ที่ 75 °C)	9.56 %		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ใช้ในเชิงพาณิชย์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

3.3.1.3 ตัวเก็บประจุเกี่ยวคัล้อง



รูปที่ 3.9 ตัวเก็บประจุเกี่ยวคัล้อง

ตัวเก็บประจุแรงสูงมีข้อกำหนดทางเทคนิค ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ข้อกำหนดทางเทคนิคของตัวเก็บประจุเกี่ยวคัล้อง

พารามิเตอร์ทางไฟฟ้า	ขนาด
ค่าความจุไฟฟ้า (nF)	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

3.3.1.4 บุษชิงแรงสูงชนิด OIP Condenser Bushing



รูปที่ 3.10 บุษชิงแรงสูงชนิด OIP Condenser Bushing

บุษชิงแรงสูงชนิด OIP Condenser Bushing ซึ่งใช้เป็นอุปกรณ์ทดสอบ มีข้อกำหนดทางเทคนิค ดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ข้อกำหนดทางเทคนิคของบุษชิงแรงสูง OIP

พารามิเตอร์	ขนาด
แรงดันไฟฟ้าของระบบ (kV)	71
แรงดันไฟฟ้าพิกัด (kV)	123
แรงดันคงทนอิมพัลส์ฟ้าผ่า (kV)	550
ความคงทนแรงดันไฟฟ้าความถี่ต่ำ 1 นาที (kV)	230
กระแสไฟฟ้าพิกัด (A)	400
ค่าความจุไฟฟ้า C_1 (pF)	263.99 ¹
ความสูญเสียในฉนวน (Dissipation factor, %)	0.412
หมายเหตุ	
¹ ค่าเก็บประจุรวมทั้งหมดที่ได้จากการทดสอบ PDC เท่ากับ 253 pF	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนต้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้เพื่อวัตถุประสงค์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

3.3.1.5 อุปกรณ์รับสัญญาณ (Coupling Device)



รูปที่ 3.11 อุปกรณ์รับสัญญาณ

อุปกรณ์รับสัญญาณที่มีอิมพีแดนซ์ขาเข้าสำหรับวงจรวัด (Measuring impedance)

รุ่น The CPL 542 Quadrupole มีข้อกำหนดทางเทคนิค ดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ข้อกำหนดทางเทคนิคของอุปกรณ์รับสัญญาณ

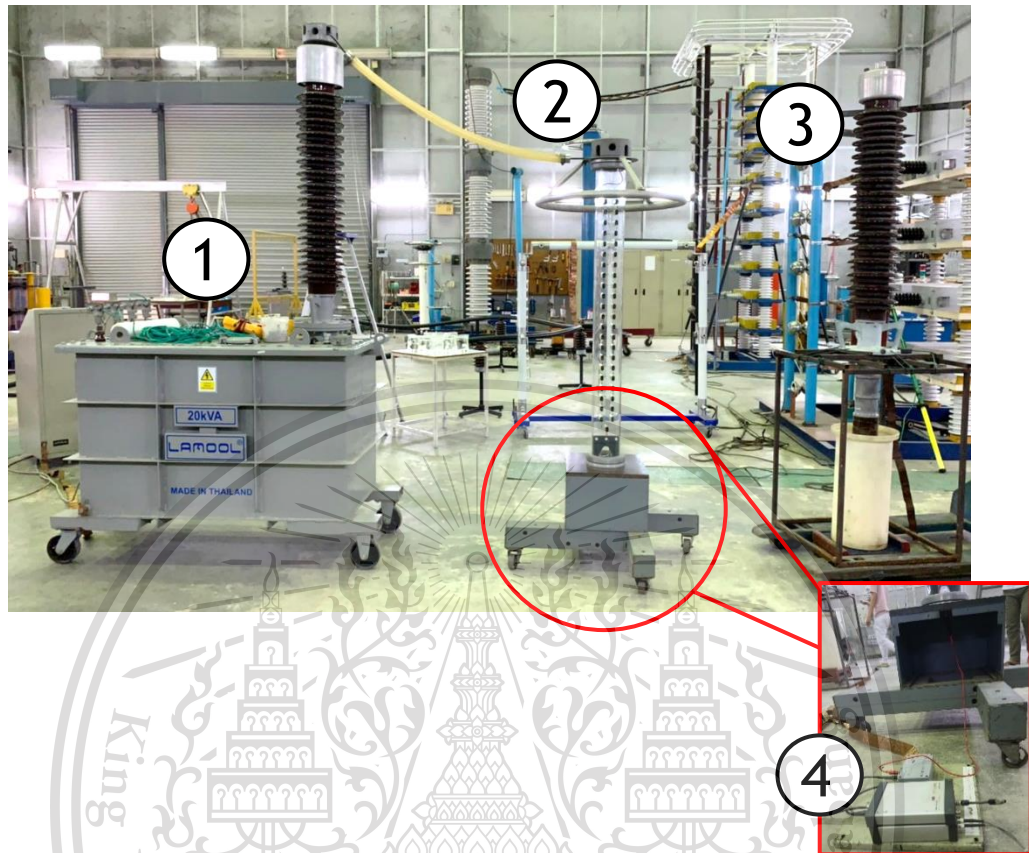
พารามิเตอร์	ขนาด
Max. currents (A)	1.2/2
Low-arm capacitance (μF)	120 (for 2 A or 1.2 A)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

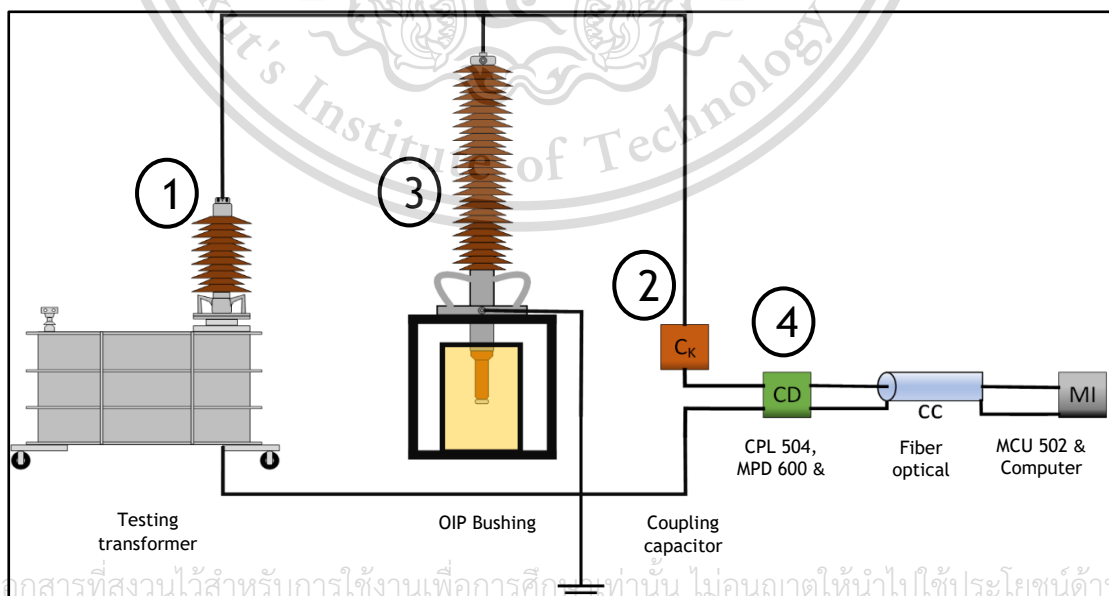
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

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

3.3.2 ขั้นตอนการทดสอบวัดดิสชาร์จบางส่วนในบุชชิ่ง



รูปที่ 3.12 การติดตั้งการทดสอบวัดดิสชาร์จบางส่วนในบุชชิ่ง

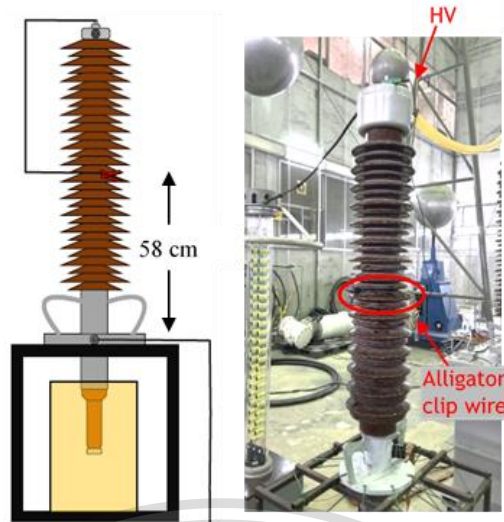


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิรูปที่ 3.13 วงจรการทดสอบวัดดิสชาร์จบางส่วนในบุชชิ่ง การทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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



รูปที่ 3.14 การจำลองความผิดพลาดที่ความสูง 58 cm จากจุดต่อลงดิน

1. ตรวจสอบอัตราส่วนการแปลงแรงดันไฟฟ้าที่ถูกต้องของหม้อแปลงทดสอบ โดยจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับหม้อแปลงไฟฟ้า จากนั้นบันทึกขนาดแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากฝั่งแรงดันต่ำและฝั่งแรงดันสูงของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยค่อยๆเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าขึ้นและทำการบันทึกจนครบ 5 ค่า จากนั้นนำอัตราส่วนแรงดันไฟฟ้าจากการจ่ายแรงดันทดสอบแต่ละค่ามาหาค่าเฉลี่ยเพื่อหาอัตราส่วนแรงดันไฟฟ้าที่ถูกต้อง

2. ตรวจสอบระบบวัดดิสชาร์จบางส่วนโดยการสอบเทียบเครื่องมือวัด เพื่อหาอัตราส่วนในการวัดดิสชาร์จบางส่วนสำหรับการทดสอบ โดยจ่ายประจุสำหรับการสอบเทียบ 100 pC

3. หาแรงดันดิสชาร์จบางส่วนเริ่มเกิดภายในตัวเก็บประจุเกี่ยววอลล้อง

4. ทดสอบหาขนาดดิสชาร์จบางส่วนของบุชชิ่ง โดยติดตั้งอุปกรณ์การทดสอบดังรูปที่ 3.12 และ 3.13 จากนั้นจ่ายแรงดันทดสอบผ่านหม้อแปลงทดสอบ ตัวเก็บประจุเกี่ยววอลล้อง และระบบวัดดิสชาร์จบางส่วนที่ผ่านการตรวจสอบแล้ว

5. ทำการจำลองความผิดพลาดภายในบุชชิ่ง โดยนำสายตัวนำหุ้มฉนวนปากจระเข้เชื่อมต่อทางไฟฟ้าจากจุดปลายบุชชิ่งด้านบนที่มีไฟฟ้าแรงสูงนำมาพันบริเวณใต้ครีบบของพอร์ชเลนที่ชั้นกึ่งกลาง ซึ่งสูงจากจุดต่อลงดินประมาณ 58 cm ดังรูปที่ 3.14 จากนั้นจ่ายแรงดันทดสอบโดยค่อยๆเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าขึ้นเพื่อหาแรงดันดิสชาร์จบางส่วนเริ่มเกิด

6. ทำการทดสอบตามข้อ 5 ข้างต้นโดยเปลี่ยนตำแหน่งการพันสายตัวนำหุ้มฉนวนปากจระเข้ลงการทดสอบละ 1 ชั้น เริ่มจากตำแหน่งใต้ครีบบพอร์ชเลนที่มีความสูงจากจุดต่อลงดินประมาณ 51 cm และสิ้นสุดที่ตำแหน่งใต้ครีบบพอร์ชเลนที่มีความสูงจากจุดต่อลงดินประมาณ 37 cm

7. ทำการทดสอบเช่นเดียวกับข้อ 6 แต่เปลี่ยนตำแหน่งการพันสายตัวนำขึ้นการทดสอบละ 1 ชั้นจากจุดที่สูงจากจุดต่อลงดินประมาณ 58 cm ในข้อ 5 โดยเริ่มการทดสอบแรกที่จุดที่สูงจากจุดต่อลงดินประมาณ 65 cm จนกระทั่งไม่มีดิสชาร์จบางส่วนเกิดขึ้นจากการจำลองความผิดพลาดดังกล่าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

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

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

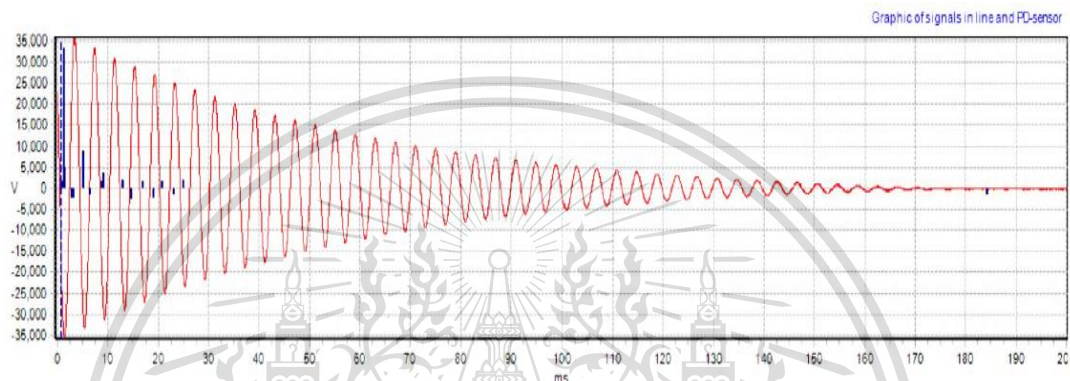
บทที่ 4

ผลการทดสอบและประเมินผล

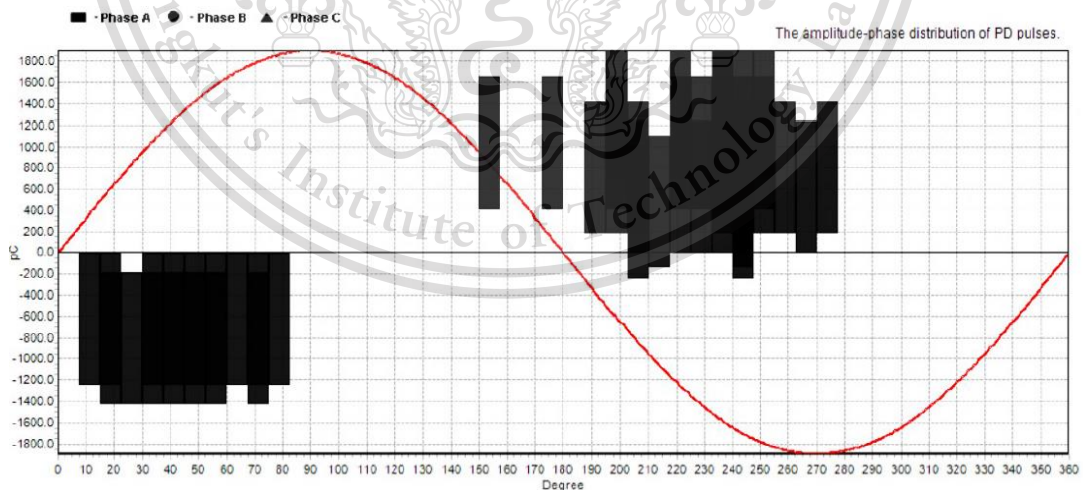
4.1 ผลการทดสอบและวินิจฉัยระบบเคเบิลใต้ดินพิกัด 22 kV

4.1.1 ผลการทดสอบและวินิจฉัยระบบเคเบิลใต้ดินพิกัด 22 kV (ก่อนแก้ไขการเข้าหัวต่อสาย)

4.1.1.1 เคเบิลเฟส A (L1-1)



รูปที่ 4.1 รูปคลื่นแรงดันทดสอบและดิสชาร์จบางส่วนก่อนแก้ไข (L1-1)

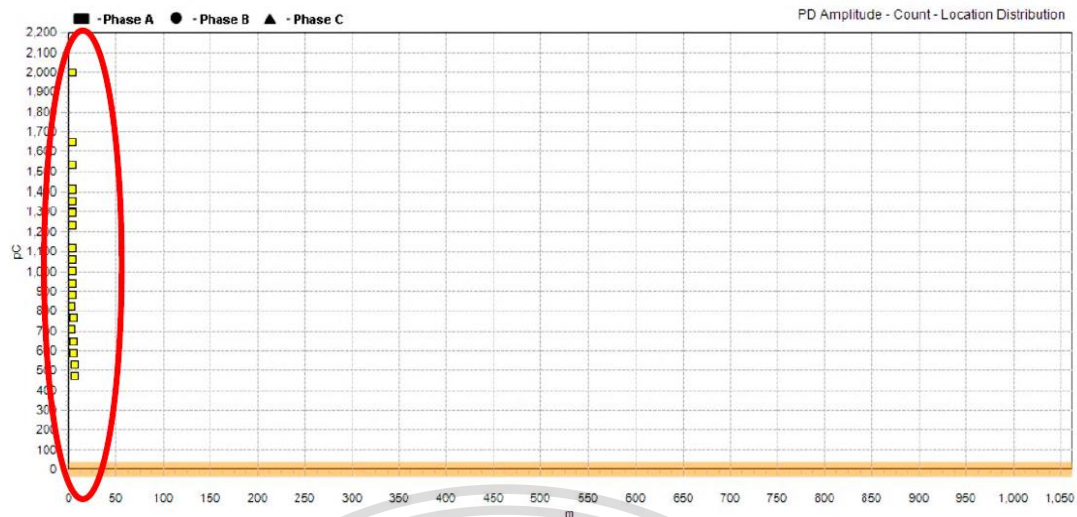


รูปที่ 4.2 การวิเคราะห์ Phase-resolved partial discharge pattern ก่อนแก้ไข (L1-1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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



รูปที่ 4.3 การวิเคราะห์ PD mapping เพื่อหาตำแหน่งของดิสชาร์จบางส่วนก่อนแก้ไข (L1-1)

จากผลการทดสอบ พบว่า

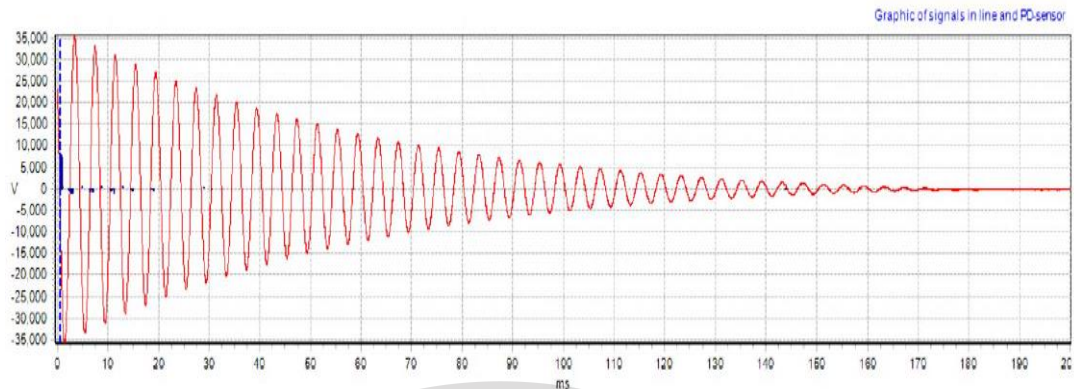
- 1) มีแรงดันดิสชาร์จบางส่วนเริ่มเกิดเท่ากับ $1.4U_0$ หรือ $25.145 \text{ kV}_{\text{peak}}$ โดยมีขนาดดิสชาร์จบางส่วนเกิดขึ้นประมาณ 2 nC
- 2) จากการวิเคราะห์ Phase-resolved partial discharge pattern ในรูปที่ 4.2 พบว่าดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นเป็นชนิดการดิสชาร์จตามผิว
- 3) จากการวิเคราะห์ PD mapping ในรูปที่ 4.3 พบว่าตำแหน่งที่เกิดดิสชาร์จบางส่วนชนิดดิสชาร์จตามผิวเกิดขึ้นที่บริเวณหัวต่อสายฝั่งที่ทำการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

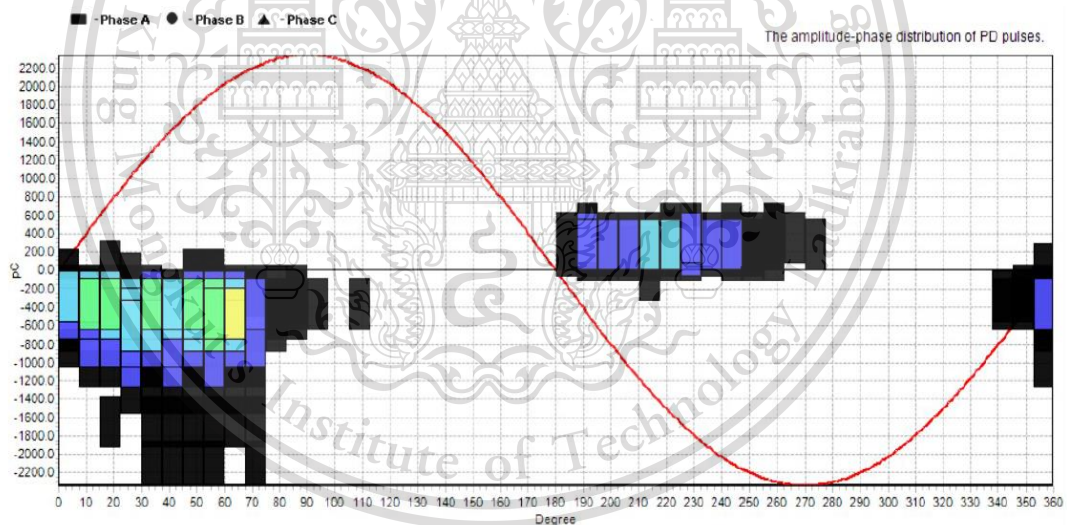
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

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

4.1.1.2 เคเบิลเฟส A (L1-2)



รูปที่ 4.4 รูปคลื่นแรงดันทดสอบและดิซชาร์จบางส่วนก่อนแก้ไข (L1-2)

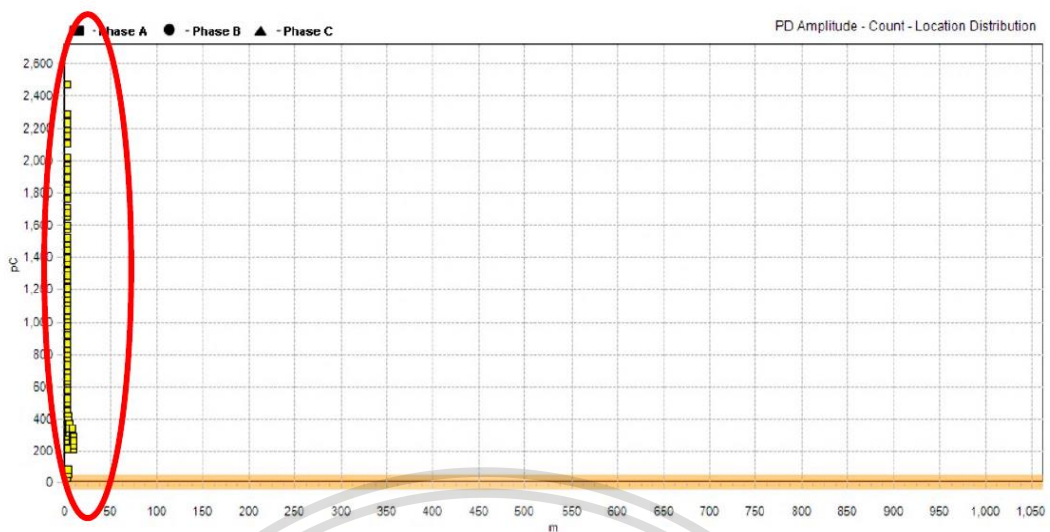


รูปที่ 4.5 การวิเคราะห์ Phase-resolved partial discharge pattern ก่อนแก้ไข (L1-2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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



รูปที่ 4.6 การวิเคราะห์ PD mapping เพื่อหาตำแหน่งของดิสชาร์จบางส่วนก่อนแก้ไข (L1-2)

จากผลการทดสอบ พบว่า

- 1) มีแรงดันดิสชาร์จบางส่วนเริ่มเกิดเท่ากับ $1.5U_0$ หรือ $26.941 \text{ kV}_{\text{peak}}$ โดยมีขนาดดิสชาร์จบางส่วนเกิดขึ้นประมาณ 2.473 nC
- 2) จากการวิเคราะห์ Phase-resolved partial discharge pattern ในรูปที่ 4.5 พบว่าดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นเป็นชนิดการดิสชาร์จตามผิว
- 3) จากการวิเคราะห์ PD mapping ในรูปที่ 4.6 พบว่าตำแหน่งที่เกิดดิสชาร์จบางส่วนชนิดดิสชาร์จตามผิวเกิดขึ้นที่บริเวณหัวต่อสายฝั่งที่ทำการทดสอบ

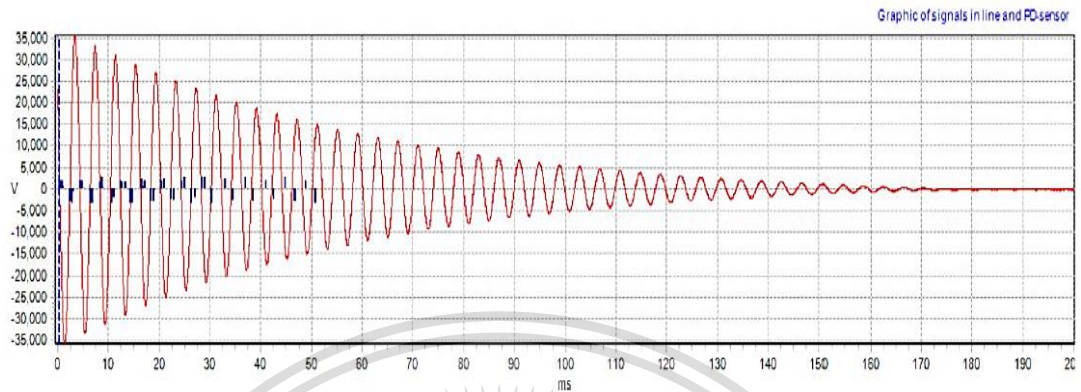
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

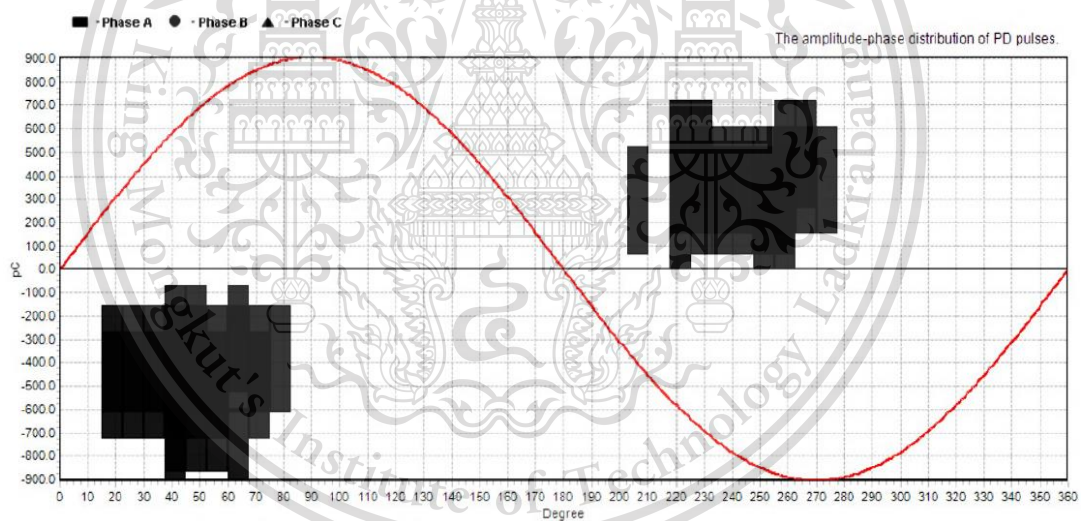
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.1.2 ผลการทดสอบและวินิจฉัยระบบเคเบิลใต้ดินพิกัด 22 kV (หลังแก้ไขการเข้าหัวต่อสาย)

4.1.2.1 เคเบิลเฟส A (L1-1)



รูปที่ 4.7 รูปคลื่นแรงดันทดสอบและดิซชาร์จบางส่วนหลังแก้ไข (L1-1)

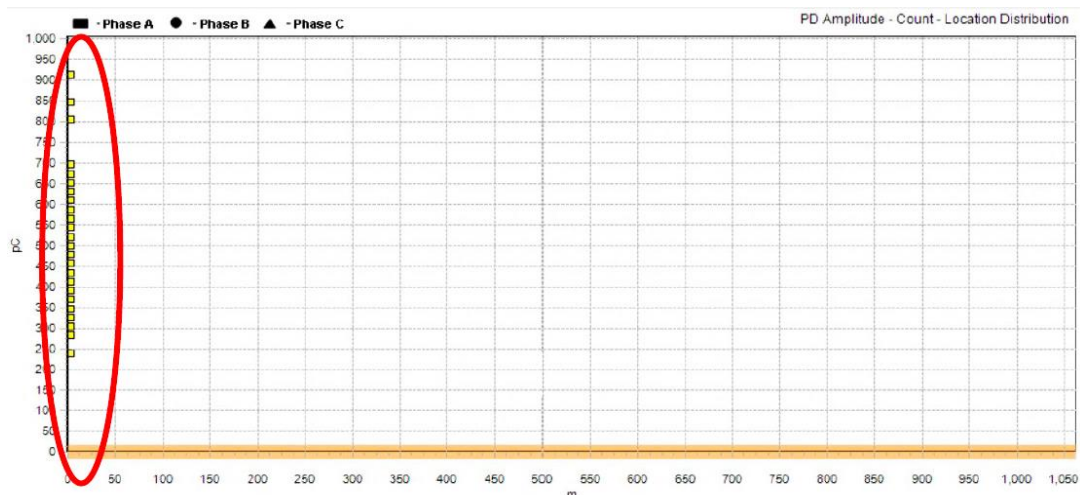


รูปที่ 4.8 การวิเคราะห์ Phase-resolved partial discharge pattern หลังแก้ไข (L1-1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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



รูปที่ 4.9 การวิเคราะห์ PD mapping เพื่อหาตำแหน่งของดิสชาร์จบางส่วนหลังแก้ไข (L1-1)

จากผลการทดสอบ พบว่า

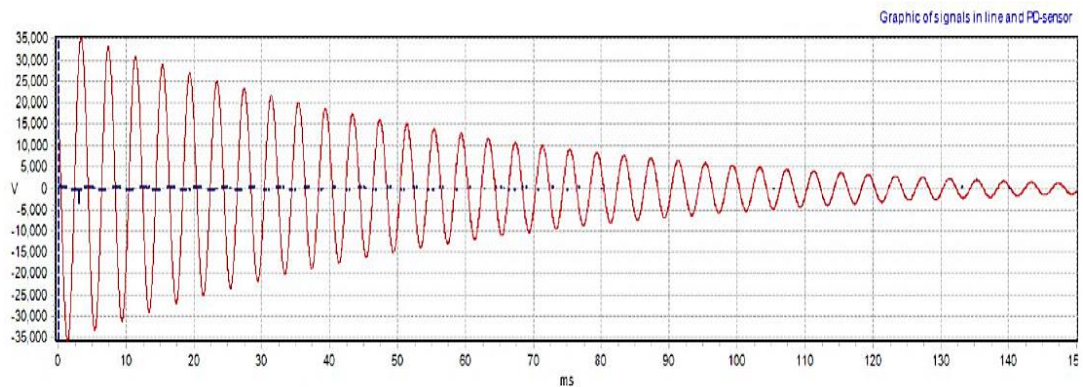
- 1) มีแรงดันดิสชาร์จบางส่วนเริ่มเกิดเท่ากับ $2.0U_0$ หรือ $35.921 \text{ kV}_{\text{peak}}$ โดยมีขนาดดิสชาร์จบางส่วนเกิดขึ้นประมาณ 0.913 nC
- 2) จากการวิเคราะห์ Phase-resolved partial discharge pattern ในรูปที่ 4.8 พบว่าดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นเป็นชนิดการดิสชาร์จตามผิว
- 3) จากการวิเคราะห์ PD mapping ในรูปที่ 4.9 พบว่าตำแหน่งที่เกิดดิสชาร์จบางส่วนชนิดดิสชาร์จตามผิวเกิดขึ้นที่บริเวณหัวต่อสายฝั่งที่ทำการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

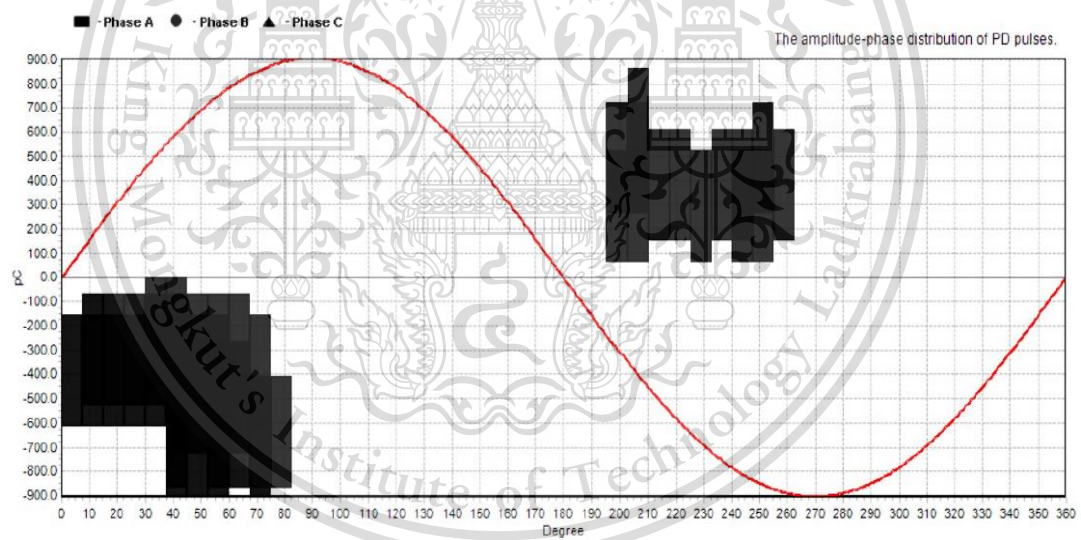
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

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

4.1.2.2 เคเบิลเฟส A (L1-2)



รูปที่ 4.10 รูปคลื่นแรงดันทดสอบและดิสชาร์จบางส่วนหลังแก้ไข (L1-2)

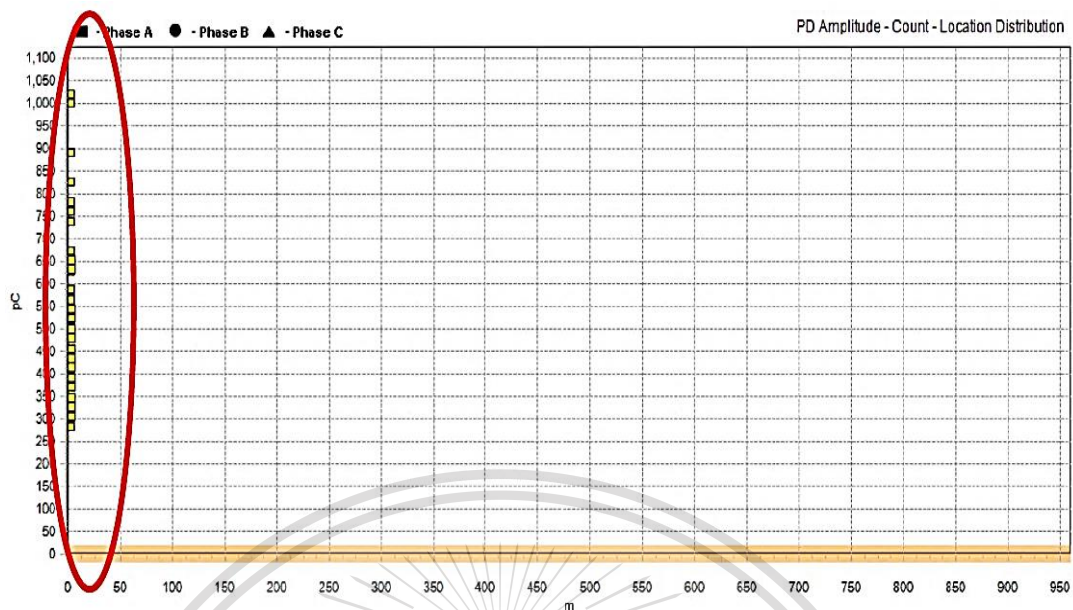


รูปที่ 4.11 การวิเคราะห์ Phase-resolved partial discharge pattern หลังแก้ไข (L1-2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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



รูปที่ 4.12 การวิเคราะห์ PD mapping เพื่อหาตำแหน่งของดิสชาร์จบางส่วนหลังแก้ไข (L1-2)

จากผลการทดสอบ พบว่า

- 1) มีแรงดันดิสชาร์จบางส่วนเริ่มเกิดเท่ากับ $1.7U_0$ หรือ $30.533 \text{ kV}_{\text{peak}}$ โดยมีขนาดดิสชาร์จบางส่วนเกิดขึ้นประมาณ 1.022 nC
- 2) จากการวิเคราะห์ Phase-resolved partial discharge pattern ในรูปที่ 4.11 พบว่าดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นเป็นชนิดการดิสชาร์จตามผิว
- 3) จากการวิเคราะห์ PD mapping ในรูปที่ 4.12 พบว่าตำแหน่งที่เกิดดิสชาร์จบางส่วนชนิดดิสชาร์จตามผิวเกิดขึ้นที่บริเวณหัวต่อสายฝั่งที่ทำการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

4.1.3 สรุปผลการทดสอบและวินิจฉัยระบบเคเบิลใต้ดินพิกัด 22 kV

จากผลการทดสอบระบบเคเบิลใต้ดินพิกัด 22 kV ดังรูปที่ 4.1 ถึง 4.12 สามารถสรุปผลการทดสอบได้ ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบวินิจฉัยระบบเคเบิลใต้ดินพิกัด 22 kV ด้วยแรงดันทดสอบ Damped AC

เคเบิล	พิกัดแรงดัน (kV)	จำนวน (เส้น)	แรงดันทดสอบ	แรงดันดิสชาร์จบางส่วนเริ่มเกิด	ดิสชาร์จบางส่วนที่ $2U_0$	Tan δ (%)	ผลการประเมิน
ก่อนเข้าแก้ไขการเข้าหัวสายเคเบิล							
เฟส A (L1-1)	22	1	$2.0U_0$ (35.92 kV)	$1.4U_0$ (25.15 kV)	2 nC ชนิด: ดิสชาร์จตามผิวบริเวณหัวต่อสายฝั่งที่จ่ายแรงดันทดสอบ	0.30	มีค่าต่ำ
เฟส A (L1-2)	22	1	$2.0U_0$ (35.92 kV)	$1.5U_0$ (26.94 kV)	2.473 nC ชนิด: ดิสชาร์จตามผิวบริเวณหัวต่อสายฝั่งที่จ่ายแรงดันทดสอบ	0.30	มีค่าต่ำ
หลังเข้าแก้ไขการเข้าหัวสายเคเบิล							
เฟส A (L1-1)	22	1	$2.0U_0$ (35.92 kV)	$2.0U_0$	0.931 nC ชนิด: ดิสชาร์จตามผิวบริเวณหัวต่อสายฝั่งที่จ่ายแรงดันทดสอบ	0.30	มีค่าต่ำ
เฟส A (L1-2)	22	1	$2.0U_0$ (35.92 kV)	$1.7U_0$ (30.53 kV)	1.022 nC ชนิด: ดิสชาร์จตามผิวบริเวณหัวต่อสายฝั่งที่จ่ายแรงดันทดสอบ	0.31	มีค่าต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ด้านการค้า

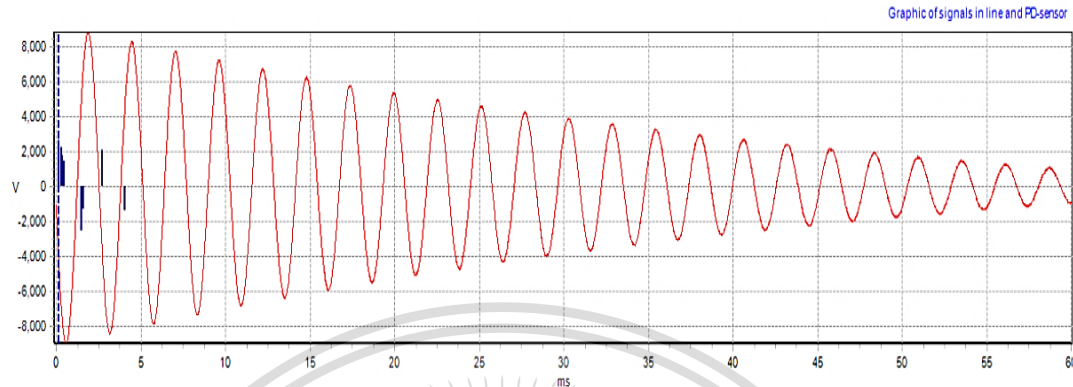
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

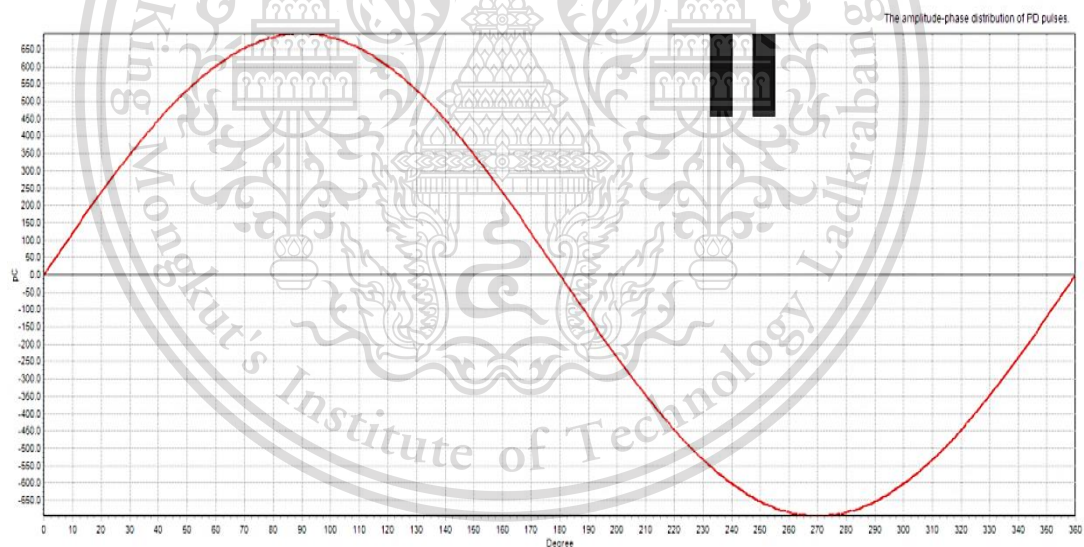
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.2 ผลการทดสอบและวินิจฉัยระบบเคเบิลใต้ดินพิกัด 6.9 kV

4.2.1 เคเบิลเฟส A (Unit 3A-2)



รูปที่ 4.13 รูปคลื่นแรงดันทดสอบและดิสชาร์จบางส่วนเคเบิลเฟส A (Unit 3A-2)



รูปที่ 4.14 การวิเคราะห์ Phase-resolved partial discharge pattern เคเบิลเฟส A (Unit 3A-2)

จากผลการทดสอบพบว่า

1) มีแรงดันดิสชาร์จบางส่วนเริ่มเกิดเท่ากับ $1.7U_0$ หรือ $9.576 \text{ kV}_{\text{peak}}$ โดยมีขนาดดิสชาร์จบางส่วนเกิดขึ้นประมาณ 650 pC

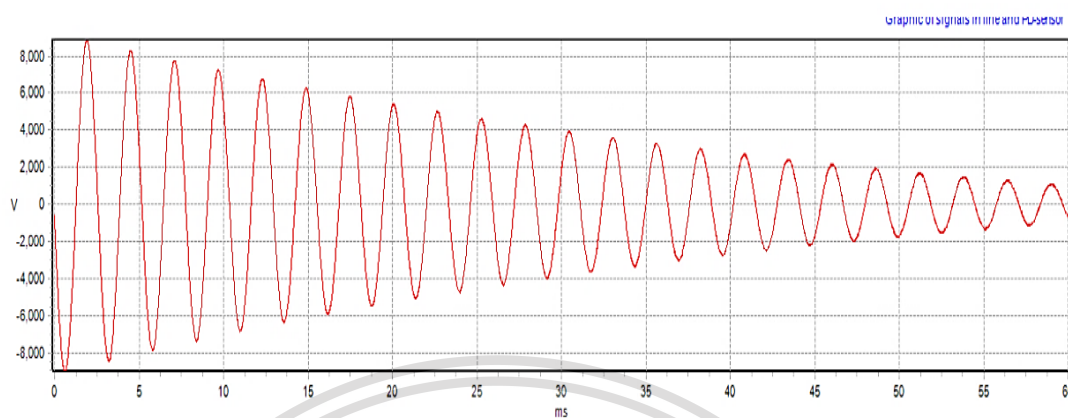
2) จากการวิเคราะห์ Phase-resolved partial discharge pattern ในรูป 4.14 พบว่าการดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นเป็นชนิดโคโรนาดิสชาร์จ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูผู้สอนเพื่อจุดประสงค์เฉพาะเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

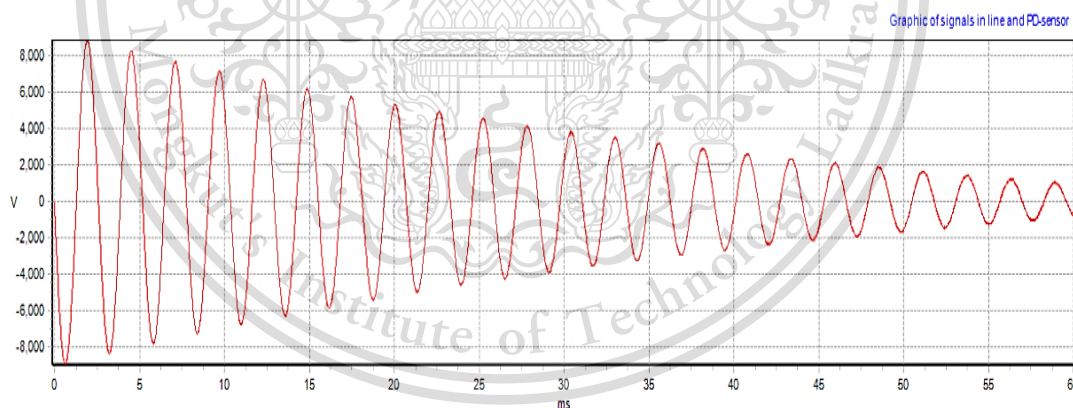
4.2.2 เคเบิลเฟส B (Unit 3A-2)



รูปที่ 4.15 รูปคลื่นแรงดันทดสอบและดิสชาร์จบางส่วนเคเบิลเฟส B (Unit 3A-2)

จากการทดสอบพบว่าไม่มีดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นในระบบเคเบิลนี้

4.2.3 เคเบิลเฟส C (Unit 3A-2)



รูปที่ 4.16 รูปคลื่นแรงดันทดสอบและดิสชาร์จบางส่วนเคเบิลเฟส C (Unit 3A-2)

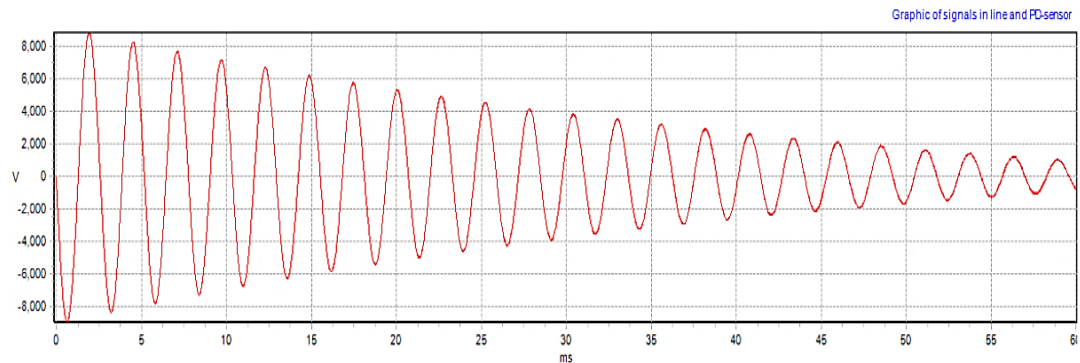
จากการทดสอบพบว่าไม่มีดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นในระบบเคเบิลนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

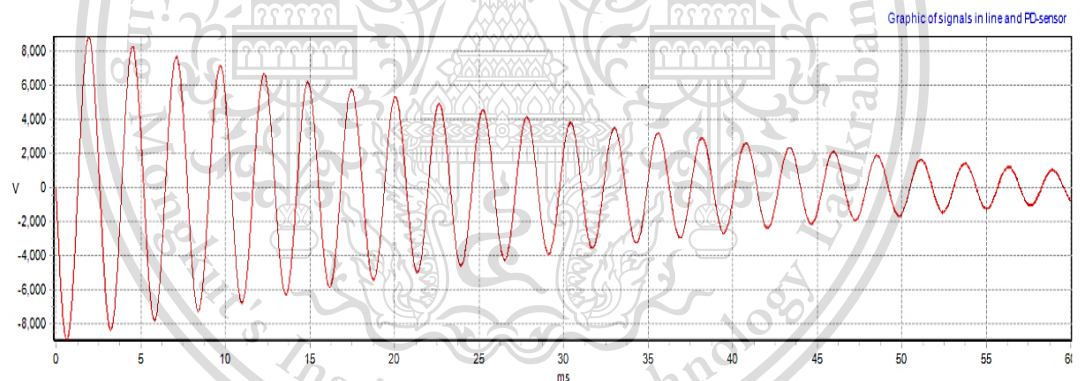
4.2.4 เคเบิลเฟส A (Unit 3B-1)



รูปที่ 4.17 รูปคลื่นแรงดันทดสอบและดิสชาร์จบางส่วนเคเบิลเฟส A (Unit 3B-1)

จากการทดสอบพบว่าไม่มีดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นในระบบเคเบิลนี้

4.2.5 เคเบิลเฟส B (Unit 3B-1)



รูปที่ 4.18 รูปคลื่นแรงดันทดสอบและดิสชาร์จบางส่วนเคเบิลเฟส B (Unit 3B-1)

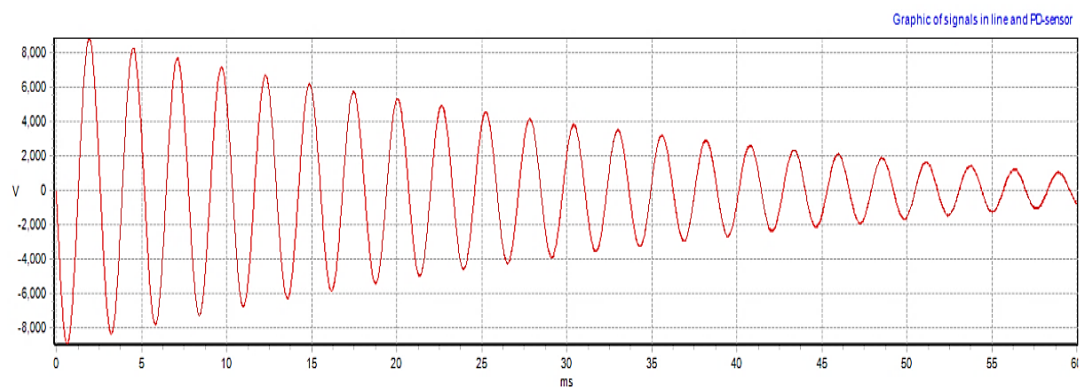
จากการทดสอบพบว่าไม่มีดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นในระบบเคเบิลนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

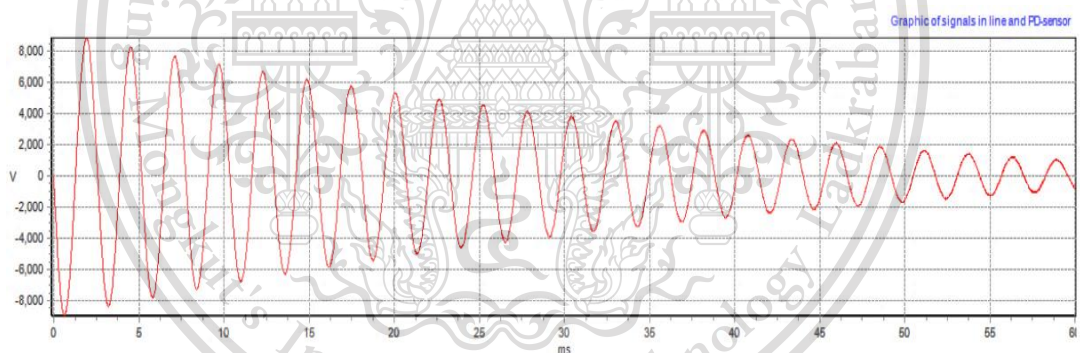
4.2.6 เคเบิลเฟส C (Unit 3B-1)



รูปที่ 4.19 รูปคลื่นแรงดันทดสอบและดิสชาร์จบางส่วนเคเบิลเฟส C (Unit 3B-1)

จากการทดสอบพบว่าไม่มีดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นในระบบเคเบิลนี้

4.2.7 เคเบิลเฟส A (Unit 3A-1)



รูปที่ 4.20 รูปคลื่นแรงดันทดสอบและดิสชาร์จบางส่วนเคเบิลเฟส A (Unit 3A-1)

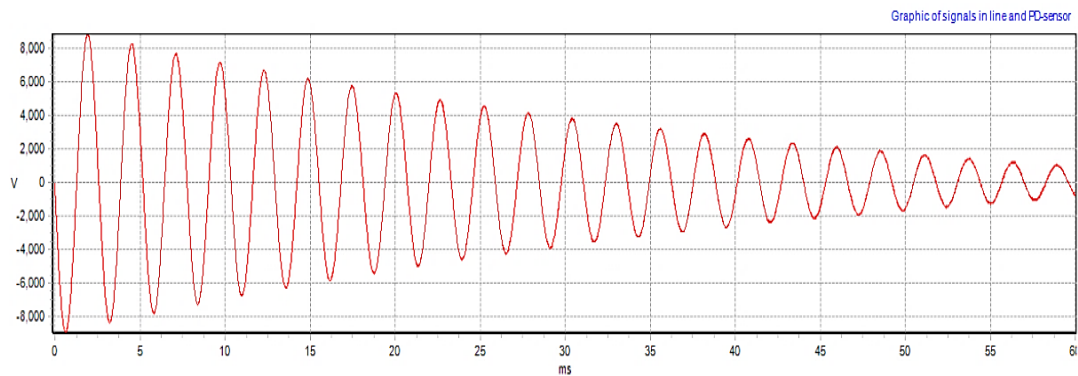
จากการทดสอบพบว่าไม่มีดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นในระบบเคเบิลนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

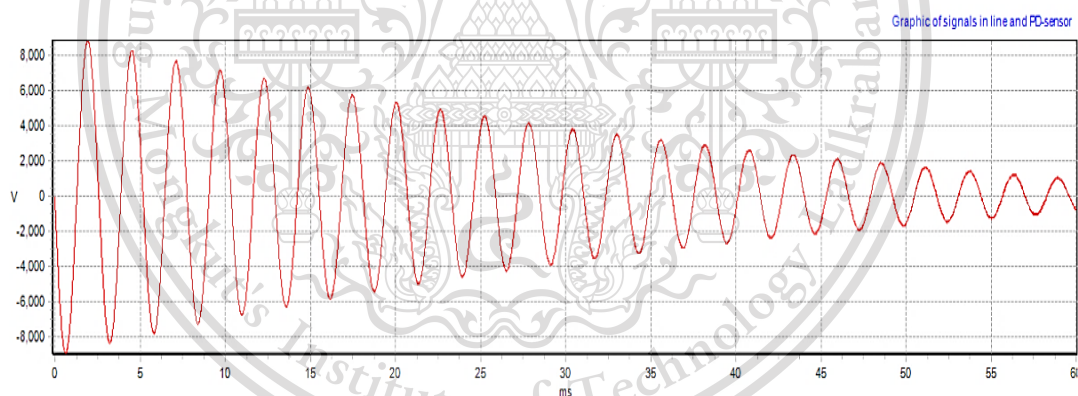
4.2.8 เคเบิลเฟส B (Unit 3A-1)



รูปที่ 4.21 รูปคลื่นแรงดันทดสอบและดิสชาร์จบางส่วนเคเบิลเฟส B (Unit 3A-1)

จากการทดสอบพบว่าไม่มีดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นในระบบเคเบิลนี้

4.2.9 เคเบิลเฟส C (Unit 3A-1)



รูปที่ 4.22 รูปคลื่นแรงดันทดสอบและดิสชาร์จบางส่วนเคเบิลเฟส C (Unit 3A-1)

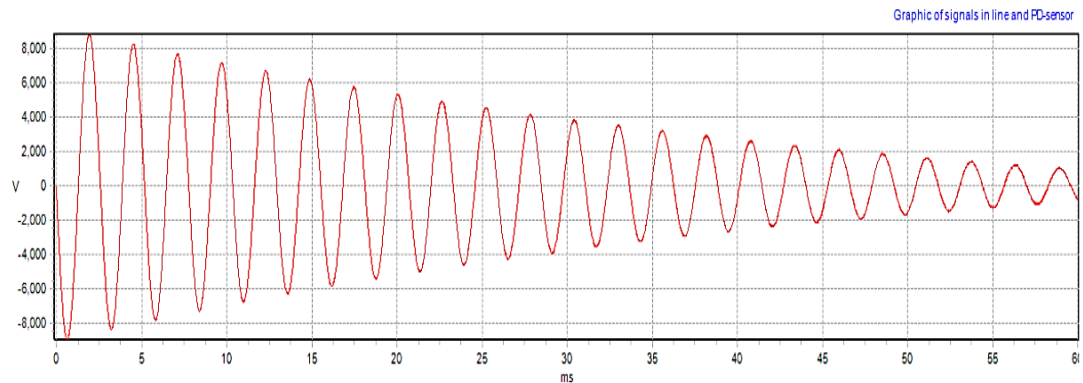
จากการทดสอบพบว่าไม่มีดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นในระบบเคเบิลนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

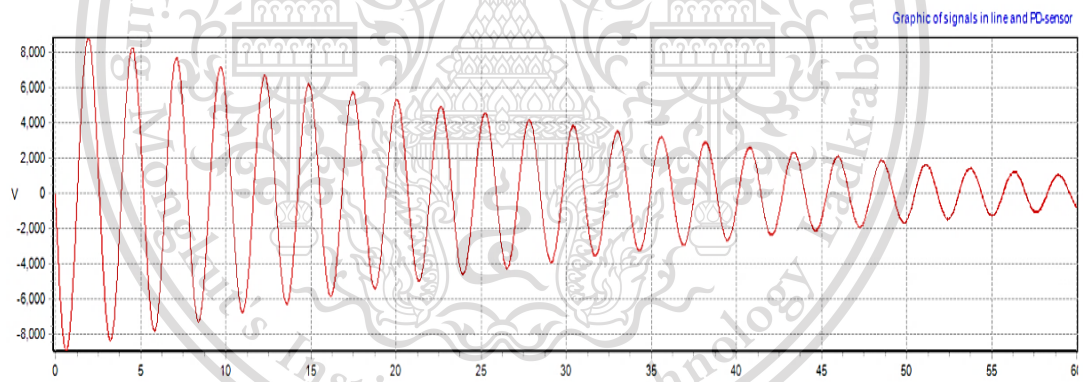
4.2.10 เคเบิลเฟส A (Unit 4A-2)



รูปที่ 4.23 รูปคลื่นแรงดันทดสอบและดิสชาร์จบางส่วนเคเบิลเฟส A (Unit 4A-2)

จากการทดสอบพบว่าไม่มีดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นในระบบเคเบิลนี้

4.2.11 เคเบิลเฟส B (Unit 4A-2)



รูปที่ 4.24 รูปคลื่นแรงดันทดสอบและดิสชาร์จบางส่วนเคเบิลเฟส B (Unit 4A-2)

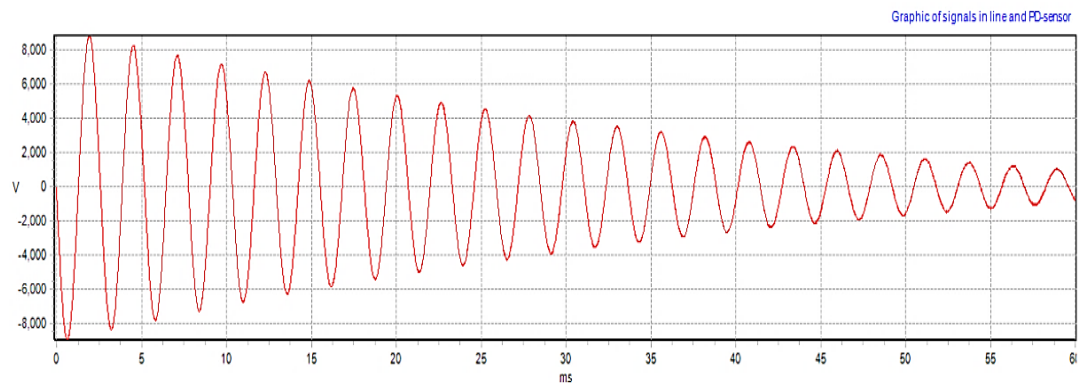
จากการทดสอบพบว่าไม่มีดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นในระบบเคเบิลนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

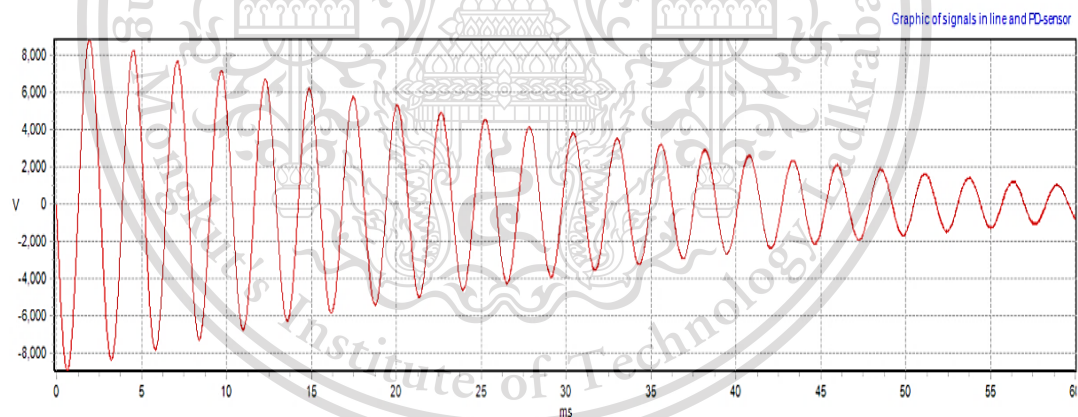
4.2.12 เคเบิลเฟส C (Unit 4A-2)



รูปที่ 4.25 รูปคลื่นแรงดันทดสอบและดิสชาร์จบางส่วนเคเบิลเฟส C (Unit 4A-2)

จากการทดสอบพบว่าไม่มีดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นในระบบเคเบิลนี้

4.2.13 เคเบิลเฟส A (Unit 3B-2)



รูปที่ 4.26 รูปคลื่นแรงดันทดสอบและดิสชาร์จบางส่วนเคเบิลเฟส A (Unit 3B-2)

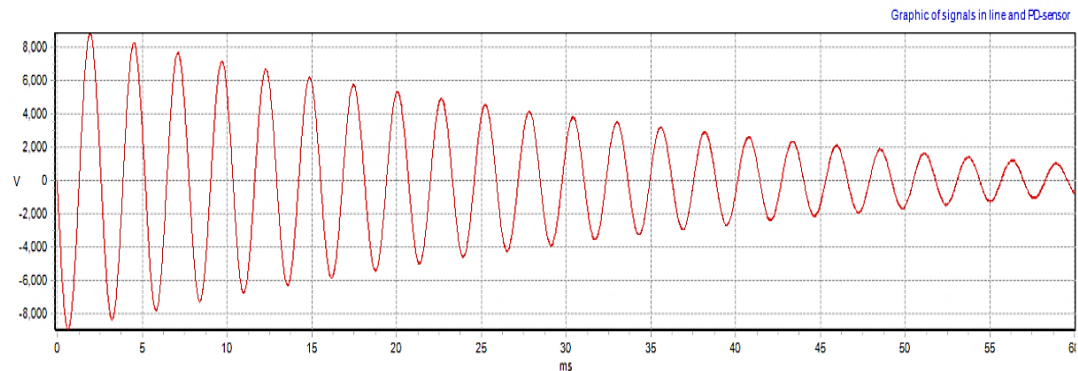
จากการทดสอบพบว่าไม่มีดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นในระบบเคเบิลนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

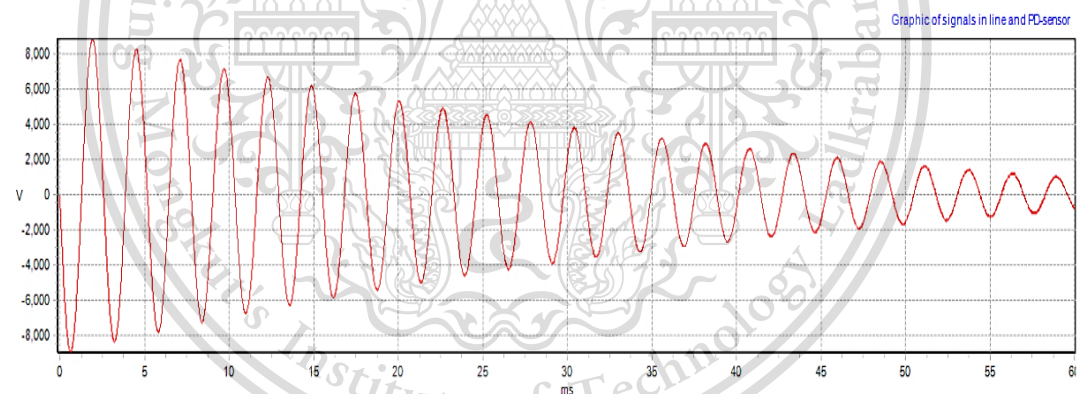
4.2.14 เคเบิลเฟส B (Unit 3B-2)



รูปที่ 4.27 รูปคลื่นแรงดันทดสอบและดิสชาร์จบางส่วนเคเบิลเฟส B (Unit 3B-2)

จากการทดสอบพบว่าไม่มีดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นในระบบเคเบิลนี้

4.2.15 เคเบิลเฟส C (Unit 3B-2)



รูปที่ 4.28 รูปคลื่นแรงดันทดสอบและดิสชาร์จบางส่วนเคเบิลเฟส C (Unit 3B-2)

จากการทดสอบพบว่าไม่มีดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นในระบบเคเบิลนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

4.2.16 สรุปผลการทดสอบและวินิจฉัยระบบเคเบิลใต้ดินพิกัด 6.9 kV

จากผลการทดสอบระบบเคเบิลใต้ดินพิกัด 6.9 kV ดังรูปที่ 4.13 ถึง 4.28 สามารถสรุปผลการทดสอบได้ ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบวินิจฉัยระบบเคเบิลใต้ดินพิกัด 6.9 kV ด้วยแรงดันทดสอบ Damped AC

เคเบิล	พิกัดแรงดัน (kV)	จำนวน (เส้น)	แรงดันทดสอบ	แรงดันดิสชาร์จบางส่วนเริ่มเกิด	ดิสชาร์จบางส่วน	Tan δ (%)	ผลการประเมิน
Unit 3A-2							
เฟส A	6.9	1	1.7U ₀ (9.58 kV)	1.7U ₀	650 pC ชนิด: โครโร นำดิสชาร์จ	0.43	มีค่าต่ำ
เฟส B	6.9	1	1.7U ₀ (9.58 kV)	-	-	0.44	0 ^a
เฟส C	6.9	1	1.7U ₀ (9.58 kV)	-	-	0.42	0 ^a
Unit 3B-1							
เฟส A	6.9	1	1.7U ₀ (9.58 kV)	-	-	0.44	0 ^a
เฟส B	6.9	1	1.7U ₀ (9.58 kV)	-	-	0.41	0 ^a
เฟส C	6.9	1	1.7 U ₀ (9.58 kV)	-	-	0.39	0 ^a
Unit 3A-1							
เฟส A	6.9	1	1.7U ₀ (9.58 kV)	-	-	0.44	0 ^a
เฟส B	6.9	1	1.7U ₀ (9.58 kV)	-	-	0.53	0 ^a
เฟส C	6.9	1	1.7U ₀ (9.58 kV)	-	-	0.44	0 ^a

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

ตารางที่ 4.2 (ต่อ) ผลการทดสอบวินิจัยระบบเคเบิลใต้ดินพิกัด 6.9 kV ด้วยแรงดันทดสอบ Damped AC

เคเบิล	พิกัดแรงดัน (kV)	จำนวน (เส้น)	แรงดันทดสอบ	แรงดันดิสชาร์จ บางส่วนเริ่มเกิด	ดิสชาร์จ บางส่วน	Tanδ (%)	ผลการประเมิน
Unit 4A-2							
เฟส A	6.9	1	1.7 U ₀ (9.576 kV)	-	-	0.51	0 ^a
เฟส B	6.9	1	1.7 U ₀ (9.576 kV)	-	-	0.54	0 ^a
เฟส C	6.9	1	1.7 U ₀ (9.576 kV)	-	-	0.53	0 ^a
Unit 3B-2							
เฟส A	6.9	1	1.7 U ₀ (9.576 kV)	-	-	0.45	0 ^a
เฟส B	6.9	1	1.7 U ₀ (9.576 kV)	-	-	0.38	0 ^a
เฟส C	6.9	1	1.7 U ₀ (9.576 kV)	-	-	0.38	0 ^a
หมายเหตุ							
a 0 หมายถึงระบบเคเบิลยังมีสภาพปกติ							

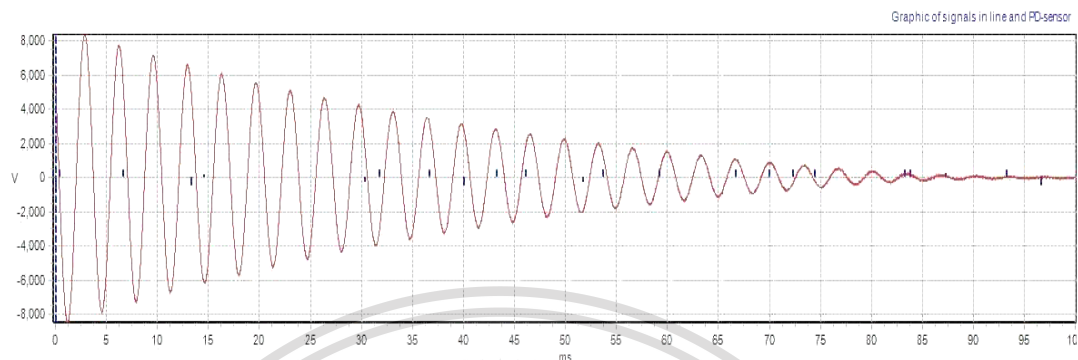
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

4.3 ผลการทดสอบและวินิจฉัยเคเบิลพิกัด 6.9 kV สำหรับใช้ป้อนเข้าป้อมดับเพลิง

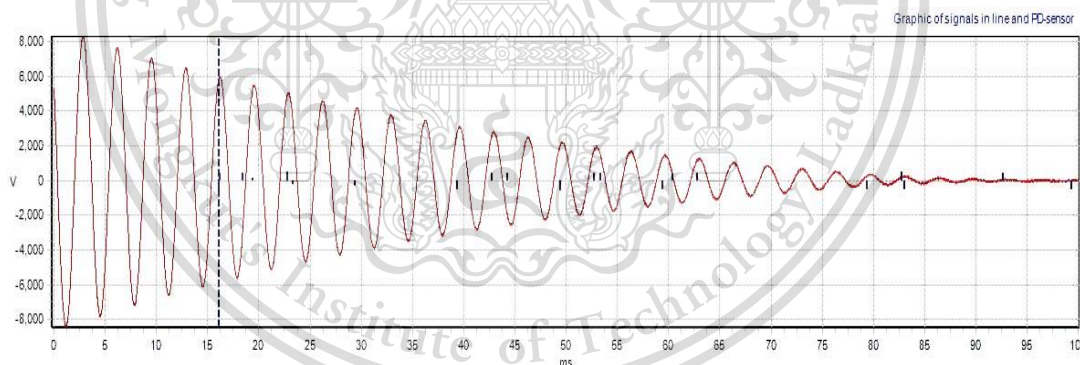
4.3.1 เคเบิลเฟส A



รูปที่ 4.29 รูปคลื่นแรงดันทดสอบและดิสชาร์จบางส่วนเคเบิลเฟส A

จากการทดสอบพบว่าไม่มีดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นในระบบเคเบิลนี้

4.3.2 เคเบิลเฟส B



รูปที่ 4.30 รูปคลื่นแรงดันทดสอบและดิสชาร์จบางส่วนเคเบิลเฟส B

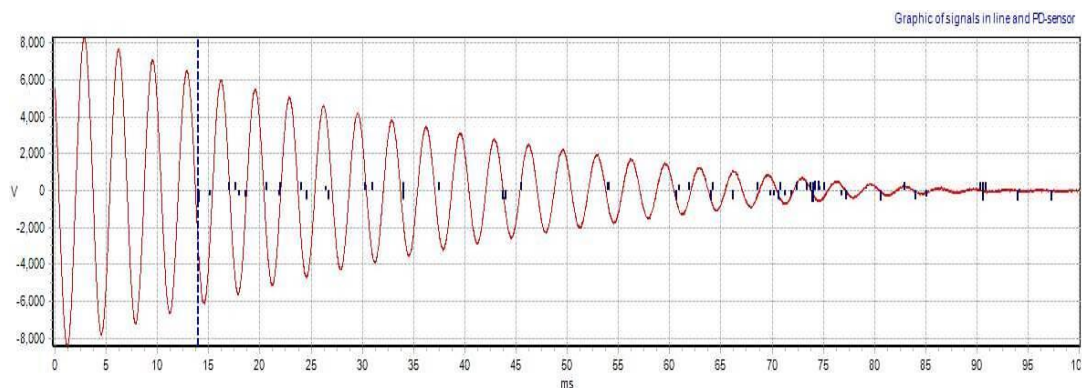
จากการทดสอบพบว่าไม่มีดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นในระบบเคเบิลนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

4.3.3 เคเบิลเฟส C



รูปที่ 4.31 รูปคลื่นแรงดันทดสอบและดิสชาร์จบางส่วนเคเบิลเฟส C

จากการทดสอบพบว่าไม่มีดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นในระบบเคเบิลนี้

4.3.4 สรุปผลการทดสอบและวินิจฉัยเคเบิลพิกัด 6.9 kV สำหรับใช้ป้อนเข้าบัสดับเพลิง

จากผลการทดสอบเคเบิลพิกัด 6.9 kV ดังรูปที่ 4.29 ถึง 4.31 สามารถสรุปผลการทดสอบได้ ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบวินิจฉัยเคเบิลบัสดับเพลิงพิกัด 6.9 kV ด้วยแรงดันทดสอบ Damped AC

เคเบิล	พิกัดแรงดัน (kV)	จำนวน (เส้น)	แรงดันทดสอบ	แรงดันดิสชาร์จบางส่วนเริ่มเกิด	ดิสชาร์จบางส่วน	Tan δ (%)	ผลการประเมิน
เฟส A	6.9	1	1.5 U ₀ (8.45 kV)	-	-	0.40	0 ^a
เฟส B	6.9	1	1.5 U ₀ (8.45 kV)	-	-	0.43	0 ^a
เฟส C	6.9	1	1.5 U ₀ (8.45 kV)	-	-	0.44	0 ^a
หมายเหตุ ^a 0 หมายถึงระบบเคเบิลยังมีสภาพปกติ							

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

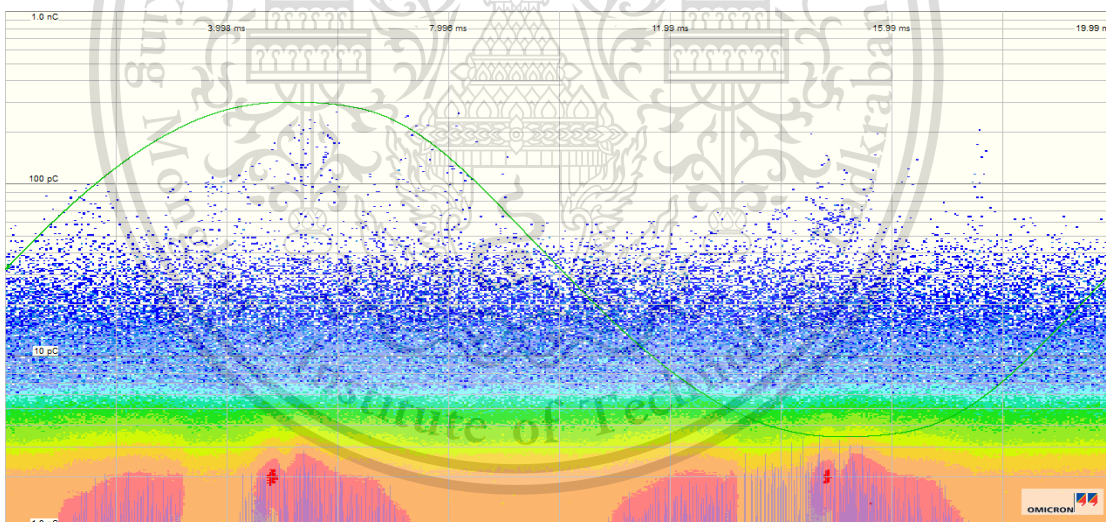
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.4 ผลการทดสอบการทดสอบการจำลองดิซาร์จบางส่วนบุชชิงแรงสูง

ตารางที่ 4.4 อัตราส่วนแรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลงทดสอบ

แรงดันไฟฟ้าด้านแรงต่ำ (V)	แรงดันไฟฟ้าด้านแรงสูง (kV)	อัตราส่วนแรงดันไฟฟ้า (เท่า)
1.2	1.2	1,000
5.113	5.270	1,030.70
10.32	10.74	1,040.69
15.13	15.78	1,042.96
19.94	20.84	1,045.13

จากตารางที่ 4.4 อัตราส่วนแรงดันไฟฟ้าที่ถูกต้องของหม้อแปลงทดสอบสำหรับการทดสอบดิซาร์จบางส่วนของบุชชิงเท่ากับ 1,032 เท่า

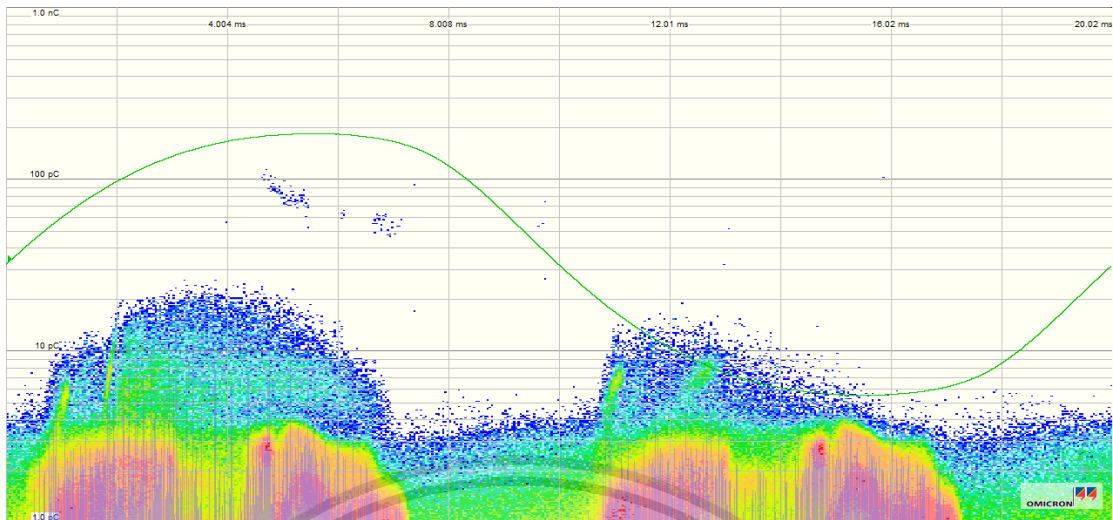


รูปที่ 4.32 ดิซาร์จบางส่วนในตัวเก็บประจุเกี่ยวคัล่อง

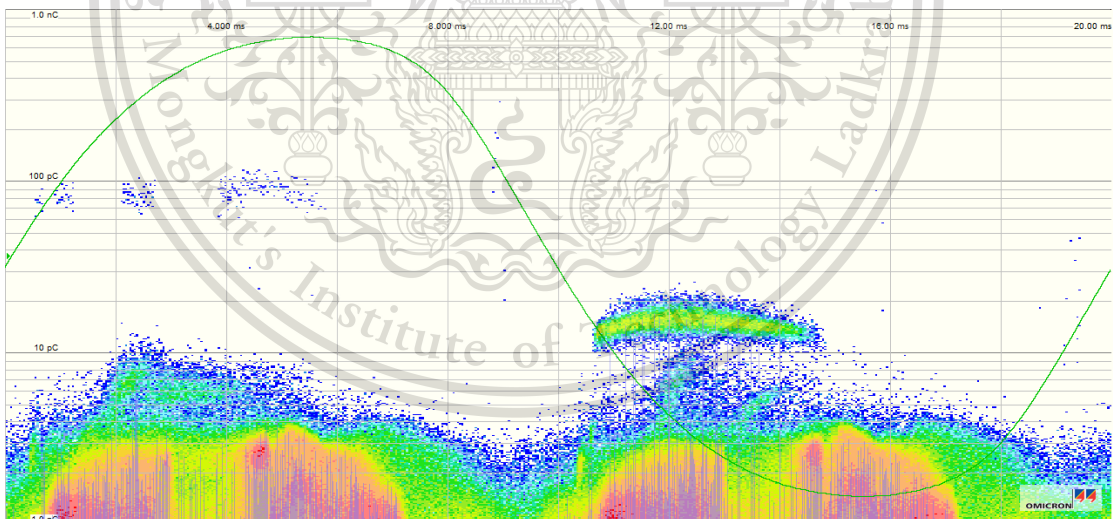
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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



รูปที่ 4.33 ดิสชาร์จบางส่วนในบุชซึ่งจากการจำลองที่ความสูง 58 cm จากจุดต่อลงดิน

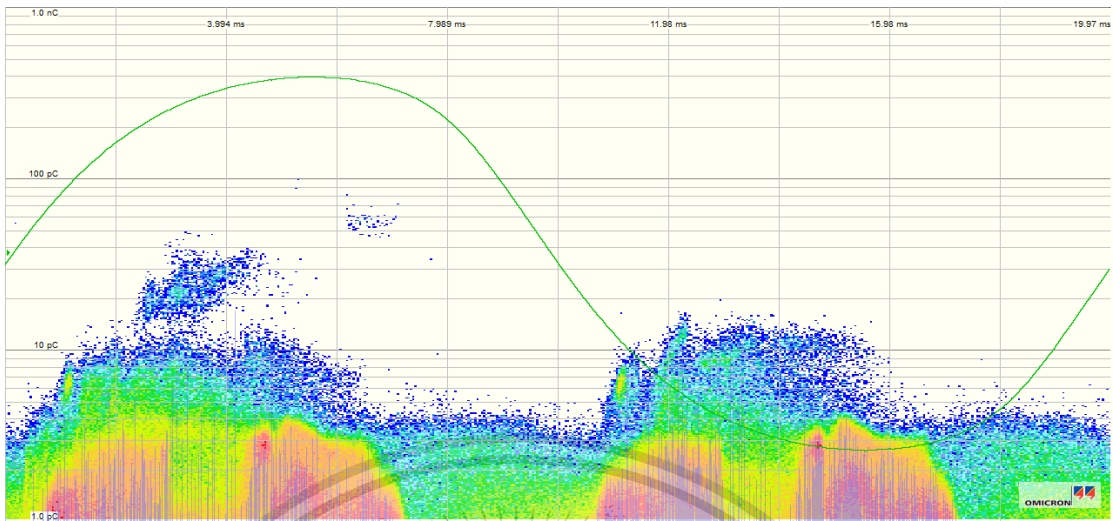


รูปที่ 4.34 ดิสชาร์จบางส่วนในบุชซึ่งจากการจำลองที่ความสูง 51 cm จากจุดต่อลงดิน

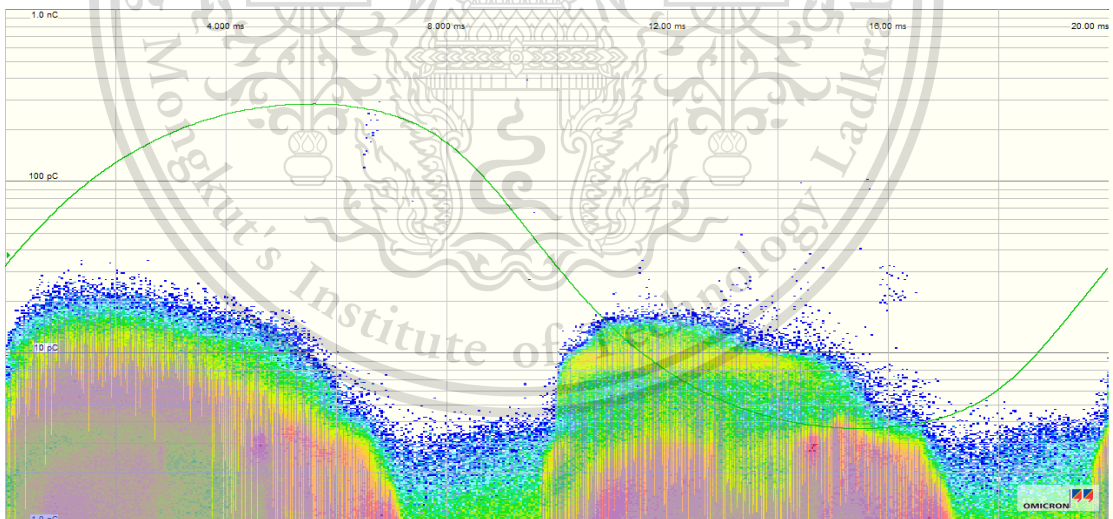
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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



รูปที่ 4.35 ดิสชาร์จบางส่วนในบุชชิงจากการจำลองที่ความสูง 44 cm จากจุดต่อลงดิน

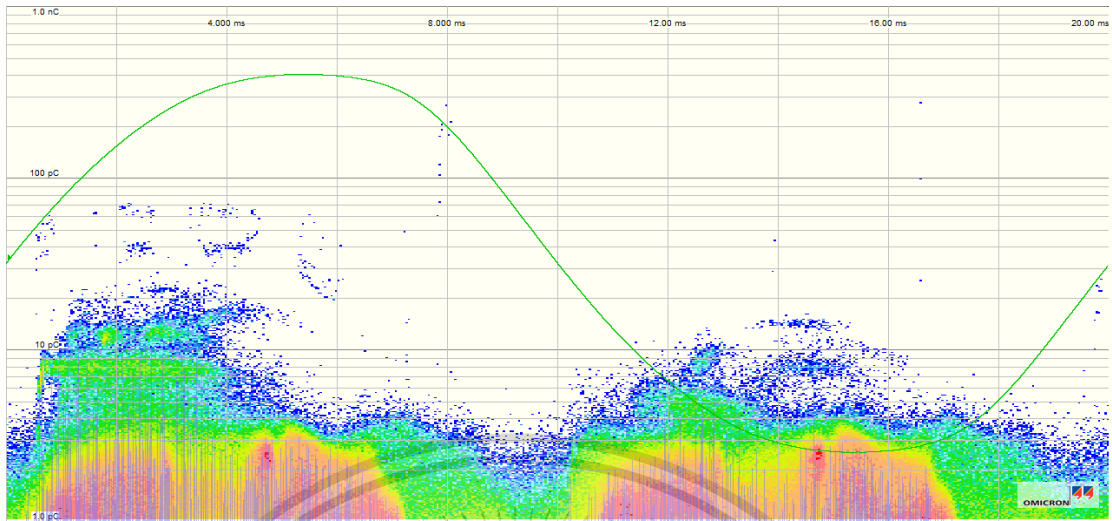


รูปที่ 4.36 ดิสชาร์จบางส่วนในบุชชิงจากการจำลองที่ความสูง 37 cm จากจุดต่อลงดิน

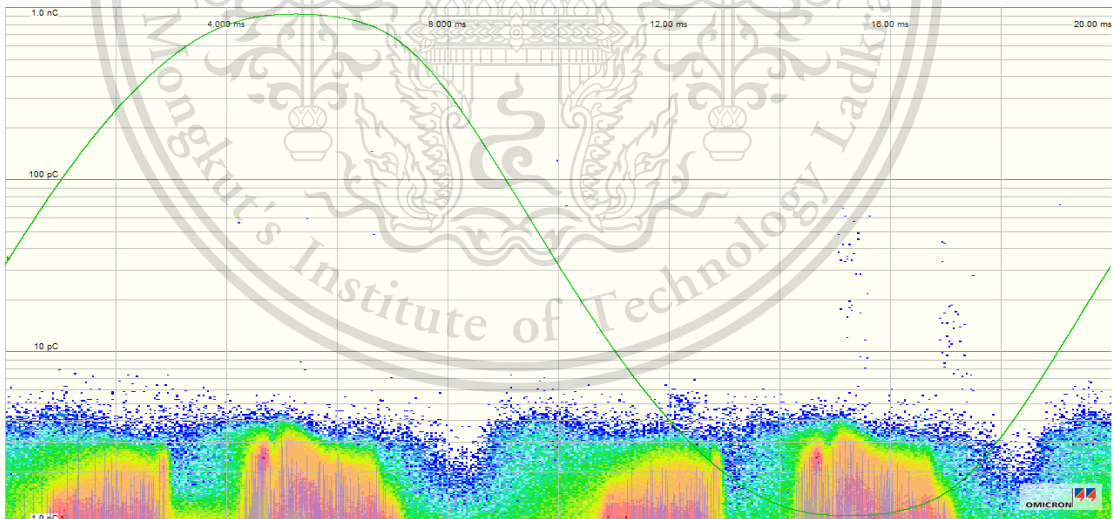
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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



รูปที่ 4.37 ดิสซาร์จบางส่วนในบุชชิงจากการจำลองที่ความสูง 65 cm จากจุดต่อลงดิน



รูปที่ 4.38 ดิสซาร์จบางส่วนในบุชชิงจากการจำลองที่ความสูง 72 cm จากจุดต่อลงดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

ในการทดสอบระบบเคเบิล 22 kV แสดงให้เห็นถึงความผิดพลาดจากการทำงานในการต่อปลายสายที่ไม่ดีพอ อาจต่อหลวมหรือมีส่วนที่เป็นตัวนำโผล่ออกมาทำให้มีดิสชาร์จบางส่วนเกิดขึ้น โดยหลังจากแก้ไขการต่อหัวสายเคเบิลแล้วทำให้แรงดันดิสชาร์จบางส่วนเริ่มเกิดเพิ่มขึ้นจาก $1.4U_0$ เป็น $2.0U_0$ และ $1.5U_0$ เป็น $1.7U_0$ สำหรับเคเบิลเฟส A สาย L1-1 และ L1-2 ตามลำดับ รวมทั้งขนาดดิสชาร์จบางส่วนที่ลดลงประมาณ 2 เท่า

สำหรับระบบเคเบิล 22 kV และ 6.9 kV ที่มีดิสชาร์จบางส่วนเกิดขึ้นอยู่ในระดับต่ำคือประมาณ 1 nC และ 650 pC ตามลำดับ จำเป็นต้องทดสอบใหม่อีกครั้งทุกๆ 6 เดือนเพื่อสังเกตพฤติกรรมการโตของดิสชาร์จบางส่วน ทั้งนี้ต้องนำผลการทดสอบด้วยแรงดัน Damped AC นี้เทียบกับดิสชาร์จบางส่วนจากการวัดแบบ On-line ทุกครั้ง และเคเบิล 6.9 kV สำหรับป้อนเข้าวงจรป้อนดับเพลิงนั้นคุณภาพของฉนวนยังไม่มีควมผิดปกติเกิดขึ้นภายในเนื่องจากไม่มีดิสชาร์จบางส่วนเกิดขึ้น ทั้งนี้ต้องคอยสังเกตอย่างสม่ำเสมอโดยวัดดิสชาร์จบางส่วนแบบ On-line ทุกปี ปีละ 1 ครั้ง เพื่อสังเกตผลดิสชาร์จบางส่วนที่อาจเกิดขึ้นได้ในอนาคต

ในส่วนของ การประเมินความสูญเสียในฉนวนหรือ Tan delta สำหรับเคเบิลเก่าจะใช้ตามที่คุณผู้ผลิตกำหนด โดยในการทดสอบนี้ใช้เกณฑ์การประเมินคือความสูญเสียในฉนวนจะต้องมีค่าไม่เกิน 2% ซึ่งจากผลการทดสอบจะได้ว่าระบบเคเบิลมีความสูญเสียในฉนวนนั้นอยู่ในระดับต่ำมาก

สำหรับการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนในบุงซึ่ง พบว่าไม่มีดิสชาร์จบางส่วนเกิดขึ้นแม้มีความปนเปื้อนค่อนข้างมากที่พอร์ชเลน จึงได้ทำการจำลองการต่อถึงกันทางไฟฟ้าจากจุดไฟฟ้าแรงสูงสู่บริเวณผิวของพอร์ชเลน โดยมาจากการสมมติฐานให้สายที่ต่อแรงดันสูงไปรบกวนเส้นสนามไฟฟ้าที่กระจายออกจากแผ่นกรองสนามไฟฟ้าภายในฉนวน โดยยังนำไฟฟ้าแรงสูงมาเชื่อมต่อใกล้กับจุดต่อลงดินมากเท่าไรแรงดันดิสชาร์จบางส่วนเริ่มเกิดยังมีค่าต่ำลงเท่านั้น ซึ่งเป็นแนวโน้มที่ถูกต้องตามสมมติฐานที่ได้ตั้งไว้

5.2 ข้อเสนอแนะการทดลอง

1. เนื่องจากการทดสอบไฟฟ้าแรงสูง จึงเป็นการทดสอบที่อาจเกิดอันตรายต่อผู้ทำการทดสอบ และอุปกรณ์ทั้งหมดที่ใช้ในการทดสอบได้ ดังนั้นการทดสอบจึงต้องมีสติและใช้ความระมัดระวังสูงมากในการทดสอบเพื่อความปลอดภัยต่อชีวิตและทรัพย์สิน

2. การติดต่อประสานงานกับหน่วยงานต่างๆทำได้ยากลำบากยิ่งขึ้น เนื่องจากสถานการณ์ของโรค Covid-19 ในปัจจุบัน จึงต้องมีการวางแผนงานที่ละเอียดมากยิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

เอกสารอ้างอิง

- [1] ชินวัฒน์ ปรีดาภิตติพัฒน์ สุรเมตต์ ช่วยท้าว สุวพี ก้อนจันทร์เทศ และ เสกสรรค์ แสนนิทา, “การศึกษาการออกแบบสายเคเบิลใต้ดินที่ระดับแรงดันสูงสุดไม่เกิน 24 kV เพื่อแก้ปัญหาการรองรับแรงทางกลภายหลังการติดตั้ง,” **ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต**, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2551.
- [2] ศราริษฐ์ พานิช สิทธิชัย พจน์จาวานิช สุภัคทวี เจตีย์กัน และ ททัยชนก ศิริพัฒนานันทกูร, “การวินิจฉัยสายเคเบิลใต้ดิน,” **ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต**, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2551.
- [3] **Cable Construction & Cable Selection- Part:1**. สืบค้นเมื่อวันที่ 10 สิงหาคม 2563, จาก <https://electrical notes.wordpress.com/2016/04/07/cable-construction-cable-selection-part1/>
- [4] **Cable Construction & Cable Selection- Part:2**. สืบค้นเมื่อวันที่ 10 สิงหาคม 2563, จาก <https://electricalnotes.wordpress.com/2016/04/12/cable-construction-cable-selection-part2-2/>
- [5] **Cable Construction & Cable Selection- Part:3**. สืบค้นเมื่อวันที่ 10 สิงหาคม 2563, จาก <https://electricalnotes.wordpress.com/2016/05/02/cable-construction-cable-selection-part3/>
- [6] มารุต บุญทรัพย์, “การพัฒนาโปรแกรมออกแบบมาตรฐานการผลิตสายไฟฟ้าเพื่อลดข้อผิดพลาด,” **วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต**, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยสยาม, 2560.
- [7] กองมาตรฐานระบบไฟฟ้า ฝ่ายมาตรฐานและความปลอดภัย, **ระบบเคเบิลใต้ดิน Underground Cable System**, Berlin Heidelberg :Springer-Verlag, 2548.
- [8] **Outdoor Termination**. สืบค้นเมื่อวันที่ 20 ตุลาคม 2563, จาก <https://www.swcc.co.jp/eng/products/siconex/termination.html>
- [9] **SLIP ON OUTDOOR CABLE TERMINATIONS 11KV 33KV 42KV EUROMOLD AFN**. สืบค้นเมื่อวันที่ 21 ตุลาคม 2563, จาก <https://www.powerandcables.com/product/product-category/euromold-afn-slip-outdoor-cable-terminations/>
- [10] **3M COLD SHRINK CABLE TERMINATIONS (MV-HV 11KV 33KV 66KV)**. สืบค้นเมื่อวันที่ 1 พฤศจิกายน 2563, จาก <https://www.powerandcables.com/product/hv-cable-joints-terminations-connectors/3m-cold-shrink-cable-terminations/>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้เพื่อการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [11] **HEAT SHRINK CABLE TERMINATIONS LV 3/4 CORE PILC CABLES 50-150SQMM 0.6/1KV – SPS 50-150-1000-3.** สืบค้นเมื่อวันที่ 1 พฤศจิกายน 2563, จาก <https://www.powerandcables.com/product/product-category/0-61kv-heat-shrink-cable-terminations-pilc-sps-50-150-1000-3/>
- [12] **Types of electrical joints and terminations (back to basics).** สืบค้นเมื่อวันที่ 2 พฤศจิกายน 2563, จาก <http://engineering.electrical-equipment.org/others/types-of-electrical-joints-and-terminations-back-to-basics.html>
- [13] **Three Core Pot End Shrinkset Joint.** สืบค้นเมื่อวันที่ 5 พฤศจิกายน 2563, จาก <https://www.jointingtech.co.uk/Raychem-11kV-Three-Core-Pot-End-Shrinkset-Joint>
- [14] Subhankar Das, Rajdeep Majumder, and Sangita Singh, “Cable Joint Installation Time Optimization,” **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, Vol.24, No.6, 2017, pp. 3959 – 3965
- [15] P. Cicek, **Testing and Diagnosis of High Voltage and Extra High Voltage Power Cables with Damped AC Voltages**, Delft 2018
- [16] Wolfgang Hauschild and Eberhard Lemke, **High-Voltage Test and Measuring Techniques**, Berlin Heidelberg :Springer-Verlag, 2014.
- [17] IEEE 400.4 2015 **Guide for Field-Testing of Shielded Power Cable Systems Rated 5 kV and Above with Damped Alternating Current Voltage (DAC)**
- [18] **Damped AC Testing.** สืบค้นเมื่อวันที่ 16 ธันวาคม 2563, จาก <https://www.pdserve.com/services/cable-testing/>
- [19] **Damped AC for Commissioning & Diagnostic Testing of HV Cable Circuits.** สืบค้นเมื่อวันที่ 16 ธันวาคม 2563, จาก <https://www.inmr.com/damped-commissioning-diagnostic-testing-cable-circuits/>
- [20] Wester, F.J., **Condition Assessment of Power Cables Using PD Diagnosis at Damped AC Voltages**, Rotterdam, The Netherlands: Optima, 2004.
- [21] Z. Ahmed., “Analysis of Partial Discharge in OIP Bushing Models,” **Degree project**, Electrical Engineering Electromagnetic Engineering, KTH Electrical Engineering, 2011.
- [22] **Oil-Filled Porcelain Bushing.** สืบค้นเมื่อวันที่ 29 ธันวาคม 2563, จาก <https://savree.com/en/encyclopedia/oilfilled-porcelain-bushing>
- [23] **Cast Resin Bushing.** สืบค้นเมื่อวันที่ 29 ธันวาคม 2563, จาก <https://savree.com/en/encyclopedia/cast-resin-bushing>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในทางวิชาการเท่านั้น ไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดก็ตามสงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในทางวิชาการเท่านั้น ไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ด้านการค้า

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

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

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

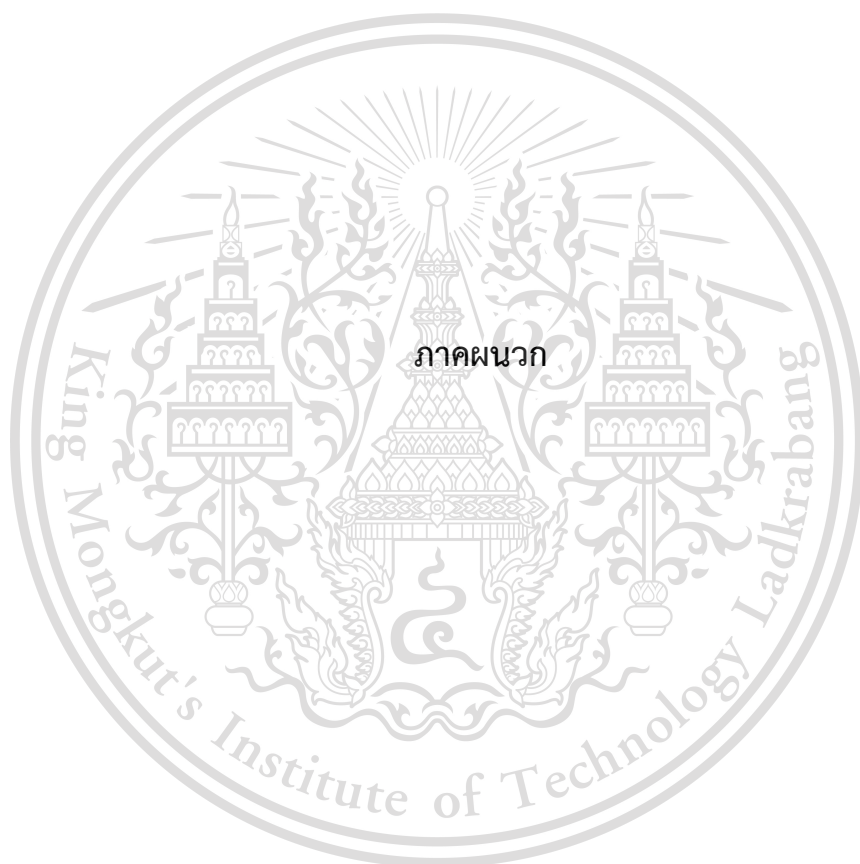
- [24] Gas insulated outdoor bushing for GIS substation and switches with silicone composite housing. สืบค้นเมื่อวันที่ 29 ธันวาคม 2563, จาก <https://www.hspkoeln.de/>



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

การศึกษาความเสื่อมสภาพของฉนวนในเคเบิลใต้ดินด้วยแรงดันทดสอบ DAC

STUDY ON INSULATION DETERIORATION IN UNDERGROUND CABLE WITH DAC

TEST VOLTAGES

นายกรัณย์พล แรงฤทธิ์¹ นายสรวิทย์ คุศิริวานิชกร¹ นายสัญญา ตั้งกาญจนยืนยง¹ นายสัญญา โพธิ์หอมศิริ¹
E-Mail: 60010016@kmitl.ac.th E-Mail: 60011030@kmitl.ac.th E-Mail: 60011048@kmitl.ac.th E-Mail: 60011049@kmitl.ac.th
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 ซอย ฉลองกรุง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเสื่อมสภาพและการวินิจฉัยระบบเคเบิลฉนวน Cross-linked polyethylene (XLPE) ภายใต้การทดสอบแรงดันสูงด้วยแรงดันทดสอบ Damped AC ในระบบทดสอบ Oscillating wave test system ตามมาตรฐาน IEEE Std 400.4-2015 และ IEEE Std 400.3-2006 ซึ่งเป็นการทดสอบในบริเวณที่ติดตั้งระบบเคเบิล (On-site) ประกอบด้วยระบบเคเบิลทั้งหมด 3 ระบบ ได้แก่ ระบบเคเบิลใต้ดิน 22 กิโลโวลต์, ระบบเคเบิลใต้ดิน 6.9 กิโลโวลต์และสายเคเบิลป้อนเข้าบีมดับเพลิง 6.9 กิโลโวลต์ ซึ่งมีทาร์มิเตอร์ประกอบการวินิจฉัยเสื่อมสภาพของเคเบิล ได้แก่ พฤติกรรมการเกิดเบรกดาวน์ ชนิดและลักษณะของการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (Partial discharge, PD) และพฤติกรรมความสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dissipation factor) จากการทดสอบพบว่า มีระบบเคเบิลใต้ดิน 2 ระบบที่ฉนวนภายในเริ่มมีการเสื่อมสภาพเนื่องจากมีดิสชาร์จบางส่วนเกิดขึ้นเล็กน้อย และอีกหนึ่งระบบเคเบิลใต้ดินยังไม่มีการเสื่อมสภาพของฉนวนภายใน เนื่องจากไม่มีดิสชาร์จบางส่วนเกิดขึ้น และนอกจากนี้ยังศึกษาการเสื่อมสภาพของบุชซึ่งที่ผ่านการใช้งานพิกัด 123 กิโลโวลต์ภายใต้การทดสอบด้วยแรงดันสูงกระแสสลับ (Alternating Current: AC) โดยบุชซึ่งที่ทำการศึกษามีโครงสร้างภายในเป็น Oil impregnated paper (OIP) และโครงสร้างภายนอกเป็นพอร์ซเลน (Porcelain) เป็นบุชซึ่งประเภท Air to oil รวมทั้งศึกษาพฤติกรรมดิสชาร์จบางส่วนจากการจำลองความผิดปกติที่เกิดขึ้นในบุชซึ่ง

คำสำคัญ: เคเบิลใต้ดิน, การทดสอบ DAC, ดิสชาร์จบางส่วน, การวินิจฉัยเคเบิล, บุชซึ่ง OIP

Abstract

This thesis aims to study on the degradation and diagnosis of Cross-linked polyethylene (XLPE) insulated cable systems under high voltage testing with Damped AC test voltage which is in the Oscillating wave test system in accordance with IEEE Std 400.4-2015 and IEEE Std 400.3-2006. The testing is done at the on-site area and divided into three cases which consist of 22 kV underground cable, 6.9 kV underground

cable, and 6.9 kV feeding cable of the fuel pump, which contains parameters for diagnosing cable deterioration consist of breakdown behavior, types and characteristics of occurrence partial discharge, and the behavior of the dielectric loss (dissipation factor). The test results show that there are two underground cable systems where the internal insulation began to deteriorate due to a slight partial discharge, and another one that has not deteriorated the internal insulation yet due to the absence of partial discharge. And also study on the deterioration of the service-aged bushing 123 kV under alternating current (AC) high voltage testing, with the bushing that studied having an internal structure as oil-impregnated paper (OIP) and external structures as Porcelain which is air to oil type and also studied some of the discharge behavior from the simulation of the defect that occurred in the bushing.

Keywords: Underground cable, DAC testing, Partial discharge, Cable diagnostic, OIP Bushing

1. บทนำ

เนื่องด้วยการส่งพลังงานไฟฟ้าด้วยเคเบิลใต้ดินแรงสูงเป็นสิ่งที่จำเป็นในอนาคต จึงมีการคิดค้นวิธีการต่างๆ ในการทดสอบและประเมินผลเพื่อวินิจฉัยอายุความเสื่อมสภาพของเคเบิล ที่ซึ่งอาจมีจุดผิดปกติเกิดขึ้นในระบบอันเนื่องมาจากกระบวนการผลิต การขนส่ง หรือการติดตั้งที่ผิดพลาด และการใช้งานในระยะเวลานาน โครงการนี้ได้ศึกษาเกี่ยวกับการทดสอบด้วยแรงดันทดสอบ Damped AC (DAC) ซึ่งเป็นหนึ่งทางเลือกในแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสำหรับการทดสอบเคเบิลใต้ดินตามมาตรฐาน IEEE400.4-2015 รวมทั้งบุชซึ่งแรงสูงก็เป็นอีกหนึ่งอุปกรณ์สำคัญในระบบส่งจ่ายพลังงานเช่นกัน ซึ่งในการทดสอบสำหรับอุปกรณ์ทั้งสองจะใช้จอร์วัด PD ตามมาตรฐาน IEC 60270: 2012

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและการทดสอบ

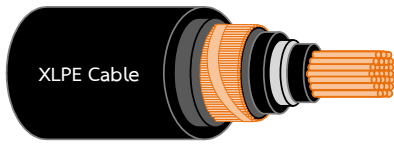
สิ่งที่ต้องคำนึงในการเลือกแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ามาใช้ในการทดสอบประกอบด้วย พิกัดแรงดันเคเบิล กระแสชาร์จสูงสุดและค่าเก็บประจุของเคเบิลที่สามารถทดสอบได้ ซึ่งสามารถตรวจสอบได้จากข้อมูลทางเทคนิคจากผู้ผลิต โดยลักษณะโครงสร้างของเคเบิลใต้ดินฉนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำเนื้อหาไปเผยแพร่หรือใช้เพื่อวัตถุประสงค์อื่นใดโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์

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

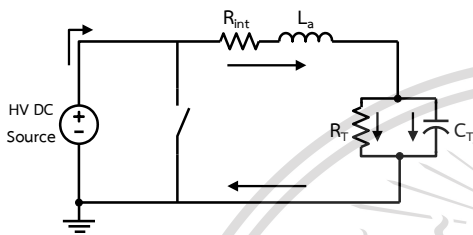
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

XLPE แสดงดังรูปที่ 1 ทั้งนี้ โครงสร้างของเคเบิลใต้ดินจะขึ้นอยู่กับข้อตกลงในการผลิตรวมทั้งเงื่อนไขและสภาพแวดล้อมในการใช้งาน



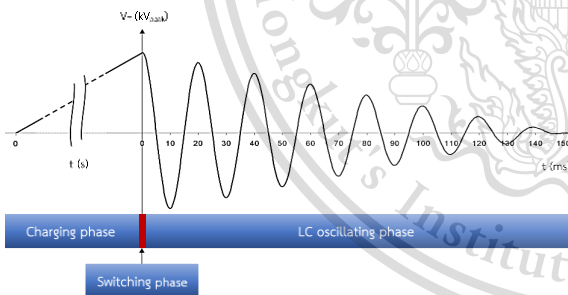
รูปที่ 1 โครงสร้างของเคเบิลฉนวน XLPE

2.1 หลักการทดสอบเคเบิลด้วยแรงดัน Damped AC



รูปที่ 2 วงจรทดสอบ Damped AC ตามมาตรฐาน IEEE 400.4

วงจรการทดสอบแรงดันคงที่ด้วยแรงดัน DAC แสดงดังรูปที่ 2 ซึ่งประกอบไปด้วย 1) แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 2) Solid state switch 3) ความต้านทานภายในวงจรทดสอบ 4) ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าแกนอากาศ 5) เคเบิลหรืออุปกรณ์ทดสอบ 6) ระบบวัด PD โดยลักษณะของสัญญาณแรงดันทดสอบแสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ลักษณะแรงดันทดสอบ DAC

จากรูปที่ 3 สามารถแบ่งแรงดันทดสอบได้ 3 ช่วง ดังนี้

- 1) Charging phase คือการจ่ายแรงดันกระแสตรงเพื่อเก็บประจุไฟฟ้าไว้ในเคเบิล โดยต้องใช้ระยะเวลาในช่วงนี้ต่ำกว่า 100 วินาที เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดประจุค้างในเคเบิล
- 2) Switching phase เมื่อเก็บประจุในเคเบิลจนถึงพิกัดแรงดันทดสอบ ให้สวิตช์แรงสูงทำงานด้วยระยะเวลาต่ำกว่า 100 μ s

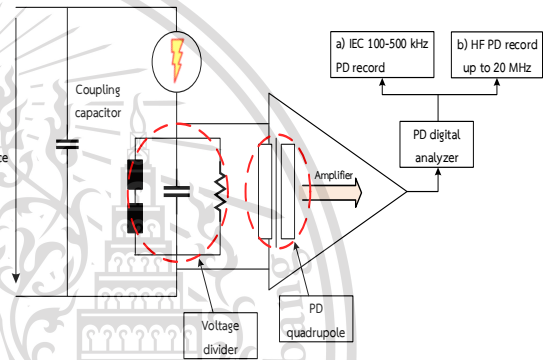
3) LC oscillating phase หลังจากสวิตช์ทำงานเคเบิลจะคายประจุที่เก็บสะสมไว้และสร้างแรงดันทดสอบออกมา

$$U(t) = U_0 e^{-\beta t} \sin(\omega t + \theta) \quad (1)$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_a C_T}} \quad (2)$$

แรงดันทดสอบและความถี่แสดงดังสมการที่ 1 และ 2 ซึ่งต้องมีค่า 20-500 Hz สามารถแบ่งประเภทของการทดสอบได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ 1) Acceptance testing สำหรับการทดสอบเคเบิลใหม่ที่ติดตั้งเข้ากับหัวต่อสายและข้อต่อสายแล้ว 2) Maintenance testing สำหรับการทดสอบเคเบิลที่มีอายุการใช้งานหรือผ่านการซ่อมบำรุง มีแรงดันทดสอบต่ำกว่า Acceptance testing โดยทั้งสองจะทดสอบหลังจากติดตั้งระบบเคเบิลเรียบร้อยแล้วและเป็นการทดสอบสำหรับเคเบิลพิกัดแรงดันไม่เกิน 230 kV

2.2 การวัดดิซชาร์จบางส่วนในเคเบิล



รูปที่ 4 วงจรการวัด PD ตามมาตรฐาน IEC 60270

การวัด PD จะใช้ตัวเก็บประจุที่ไวต่อสัญญาณกับเคเบิล โดยใช้การตรวจจับแบบ Conventional สำหรับการวิเคราะห์แรงดันดิซชาร์จบางส่วนเริ่มเกิด (PDIV), Phase-resolved partial discharge pattern (PRPD pattern), Time domain reflectometry (TDR) และ Tan delta หรือ Dissipation factor (DF) ในการทดสอบ DAC นั้นมีวิธีการหาค่า DF ได้ 2 วิธี ดังนี้

$$\beta_{DAC} = -\frac{\ln\left(\frac{U_5}{U_1}\right)}{t_5 - t_1} \quad (3)$$

1) ใช้วิธีการประมาณโดยสังเกตการลดลงของแรงดันทดสอบ หากแรงดันลดลงอย่างรวดเร็วหมายถึงฉนวนมีค่า DF สูง ดังสมการที่ 3

$$DF = \frac{1}{\omega R_C C} \quad (4)$$

2) ใช้วิธีหาค่าโดยตรง โดยเทียบผลจากการใช้ความถี่และขนาดของแรงดันทดสอบต่างกัน จะให้ความต้านทานภายในทั้งหมดของอุปกรณ์และสามารถคำนวณหาค่า DF ได้ดังสมการที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารทรัพย์สินทางปัญญาของสถาบันวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการศึกษามหาชน โดยสงวนลิขสิทธิ์ไว้ภายใต้เงื่อนไขการคุ้มครองทางกฎหมายและไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และนำข้อมูลไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากสถาบันฯ

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

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

$$D_f = \frac{V_1 - V_2}{V_1} \quad (5)$$

นอกจากการวินิจฉัย PD และ DF แล้วยังต้องประเมินการลดทอนของแรงดันอีกด้วย ซึ่งเรียกว่า Damping factor (D) ซึ่งสามารถหาค่าได้โดยตรงดังสมการที่ 5 ทั้งนี้ D_f ต้องมีค่าไม่เกิน 15% จากตัวอย่างการประเมิน PD จากมาตรฐาน IEEE 400.4 ได้ระบุพารามิเตอร์สำหรับการประเมินผลของ PD ที่เกิดขึ้น ดังนี้

การเกิดเบรกดาวน์: หากมีการเบรกดาวน์เกิดขึ้นให้ประเมินไม่ผ่านการทดสอบทันที

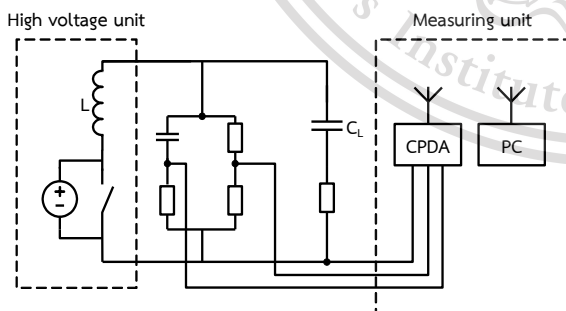
PDIV: สำหรับสายเคเบิลหาก PDIV มีขนาดสูงกว่า $1.7 U_0$ ให้ผ่านการทดสอบ แต่สำหรับข้อต่อและหัวต่อสายเคเบิลอาจผ่านการทดสอบได้ตั้งแต่ $1.2 U_0$ แต่ต้องสังเกตชนิดของ PD ที่เกิดขึ้นประกอบด้วย โดยขึ้นอยู่กับข้อตกลงระหว่างผู้ทำการทดสอบและหน่วยงานที่ซึ่งเป็นเจ้าของเคเบิล

2.3 การทดสอบ DAC สำหรับเคเบิล

การทดสอบเคเบิลจะใช้ชุดแหล่งจ่าย DAC Dimrus รุ่น CPDA-60 ที่สามารถทดสอบกับเคเบิลที่มีพิกัดสูงสุด 35 kV



รูปที่ 5 ชุดแหล่งจ่ายแรงดัน DAC



รูปที่ 6 วงจรทดสอบของชุดแหล่งจ่ายแรงดัน DAC

การทดสอบเคเบิลพิกัดด้วยแรงดันทดสอบ DAC มีการทดสอบและประเมินผลการทดสอบ ดังนี้

- 1) สอบเทียบระบบของการทดสอบโดยการจ่ายประจุสอบเทียบเข้าสู่วงจรทดสอบเท่ากับ 1 nC
- 2) ขึ้นแรงดันทดสอบ $0.2U_0$, $0.5U_0$, $1.0U_0$ พร้อมกับสังเกต PD

ที่อาจเกิดขึ้นได้ในทุกแรงดันทดสอบเพื่อบันทึกค่า PDIV

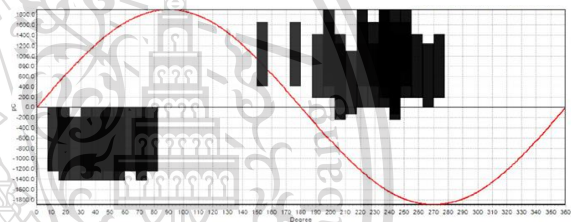
3) กรณีที่มี PD เกิดขึ้น ให้สังเกตขนาดของ PD และ DF ที่เกิดขึ้นว่ามีขนาดที่สามารถยอมรับได้หรือไม่

4) จากข้อ 3 กรณีที่ PDIV มีค่าต่ำ เช่น $1.0 U_0$ อาจค่อยๆ ขึ้นแรงดันเพื่อยืนยันว่าเคเบิลที่กำลังทำการทดสอบนี้มี PD เกิดขึ้นจริงแล้วทำการแก้ไข ทั้งนี้ PD ที่เกิดขึ้นต้องไม่ใช่ดิสชาร์จบางส่วนภายใน

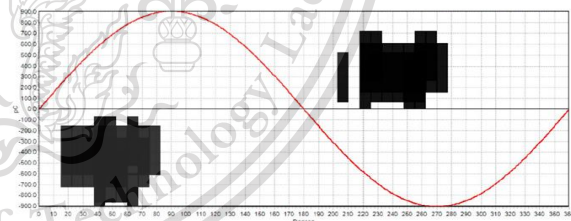
2.3.1 การทดสอบ DAC สำหรับเคเบิลพิกัด 22 kV



รูปที่ 7 เคเบิลทดสอบพิกัด 22 kV



รูปที่ 8 ผลการทดสอบ PRPD pattern ก่อนแก้ไข (L1-1)



รูปที่ 9 ผลการทดสอบ PRPD pattern หลังแก้ไข (L1-2)

2.3.2 การทดสอบ DAC สำหรับเคเบิลพิกัด 6.9 kV



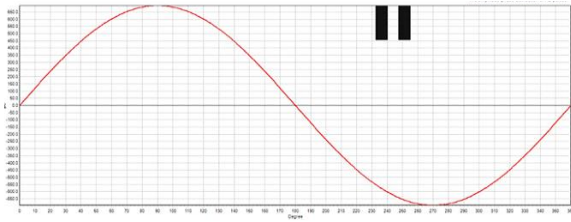
รูปที่ 10 เคเบิลทดสอบพิกัด 6.9 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับอาจารย์และบุคลากรศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่อนุญาตให้นำไปทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต หากมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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



รูปที่ 11 ผลการทดสอบ PRPD pattern ของเคเบิล 6.9 kV

2.3.3 การทดสอบ DAC สำหรับเคเบิลป้อนเข้าบีมดับเพลิง พิกัด 6.9 kV



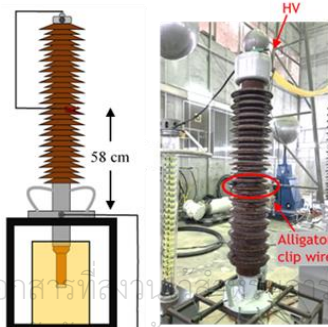
รูปที่ 12 เคเบิลป้อนเข้าบีมดับเพลิงทดสอบพิกัด 6.9 kV

จากการทดสอบพบว่า ไม่มี PD เกิดขึ้นในระบบเคเบิลนี้

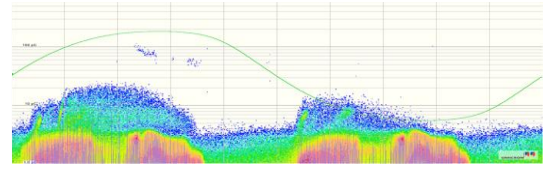
2.4 การทดสอบดิสชาร์จบางส่วนในบushing OIP 123 kV

1. สอบเทียบเครื่องมือวัดขนาดด้วยประจุไฟฟ้าขนาด 100 pC
2. หาค่า PDIV ภายในตัวเก็บประจุที่เกี่ยวข้อง
3. ทดสอบหา PD ภายในบushing
4. จำลองความผิดพลาดภายในบushing โดยนำสายตัวนำหุ้มฉนวนปากจะเข้เชื่อมต่อทางไฟฟ้าจากจุดที่มีไฟฟ้าแรงสูงนำมาพันบริเวณใต้กรับของพอร์ชเลนที่สูงจากจุดต่อลงดินประมาณ 58 cm จากนั้นจ่ายแรงดันทดสอบเพื่อหาค่า PDIV จากนั้นเปลี่ยนตำแหน่งการพันสายลงครึ่งละ 1 ชั้น เริ่มจากตำแหน่งที่มีความสูงจากจุดต่อลงดินประมาณ 51 cm และสิ้นสุดที่ประมาณ 37 cm

5. ทำการทดสอบเช่นเดียวกับข้อ 4 แต่เปลี่ยนตำแหน่งการพันสายขึ้นจากจุดต่อลงดินประมาณ 65 cm จนกระทั่งไม่มี PD เกิดขึ้น



รูปที่ 13 การจำลองความผิดพลาดที่ความสูง 58 cm จากจุดต่อลงดิน



รูปที่ 14 PRPD pattern จากการจำลองที่ความสูง 58 cm จากจุดต่อลงดิน

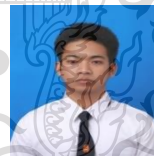
3. สรุป

การทดสอบระบบเคเบิล 22 kV พบว่ามีค่า PDIV เท่ากับ $1.4U_0$ และ $1.5U_0$ จึงแก้ไขการต่อเข้าหัวสายเคเบิลทำให้ค่า PDIV เพิ่มขึ้นเป็น $2.0U_0$ และ $1.7U_0$ ตามลำดับ และ PD ที่ลดลงประมาณ 2 เท่า โดยเคเบิลที่พบ PD และเคเบิลสายป้อนจะต้องคอยวัดแบบ On-line ทุก 6 เดือน และปีละ 1 ครั้ง ตามลำดับ สำหรับการประเมินความสูญเสียในฉนวนสำหรับเคเบิลจะใช้ตามผู้ผลิตกำหนด โดยต้องมีค่าไม่เกิน 2% ซึ่งจากการทดสอบทั้งหมดนั้นมีค่าประมาณ 0.4-0.5% สำหรับการทดสอบบushingซึ่งยังจำลองใกล้กับจุดต่อลงดินค่า PDIV ยังมีค่าต่ำ

เอกสารอ้างอิง

- [1] IEEE 400.4 2015 Guide for Field-Testing of Shielded Power Cable Systems Rated 5 kV and Above with Damped Alternating Current Voltage (DAC).
- [2] P. Cicek, Testing and Diagnosis of High Voltage and Extra High Voltage Power Cables with Damped AC Voltages, Delft 2018

ประวัติผู้เขียนบทความ



นายกรัณย์พล แรงฤทธิ์

เกิดวันที่ 29 ตุลาคม พ.ศ.2541

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

60010016@kmitl.ac.th

นายสรวิทย์ คูศิริวานิชกร



เกิดวันที่ 20 สิงหาคม พ.ศ. 2541

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

60011030@kmitl.ac.th

นายสัญญา ตั้งกาญจนอินชัย



เกิดวันที่ 17 กันยายน พ.ศ. 2541

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

60011048@kmitl.ac.th

นายสัญญา โพธิ์หอมศิริ



เกิดวันที่ 19 พฤศจิกายน พ.ศ. 2541

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

60011049@kmitl.ac.th

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงแหล่งเอกสารที่นำมาใช้

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

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



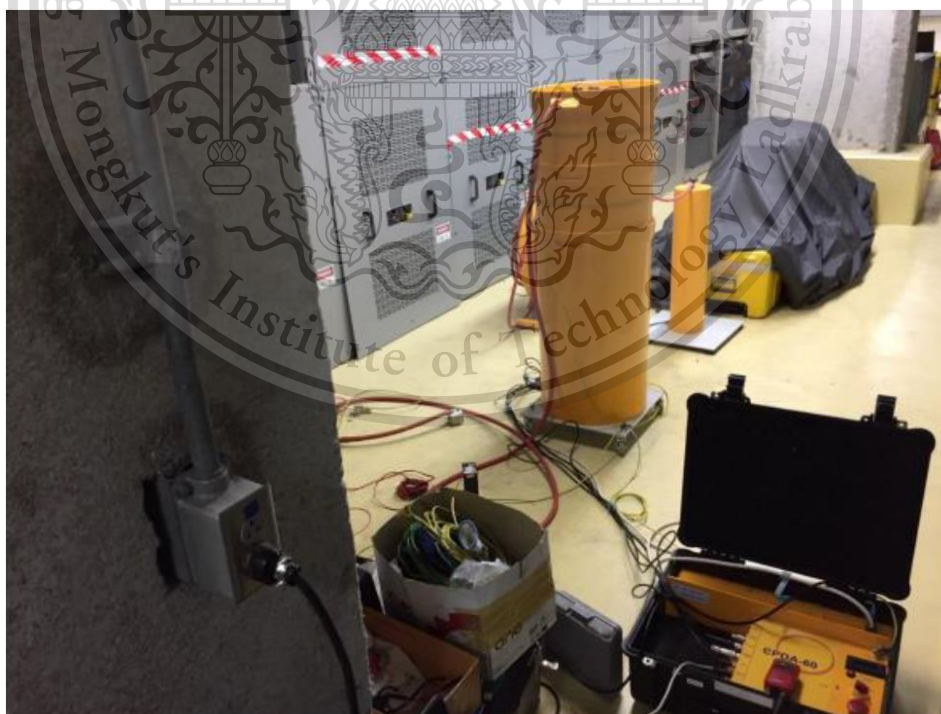
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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



รูปที่ ข.1 การติดตั้งชุดทดสอบ Damped AC สำหรับการทดสอบเคเบิล 22 kV



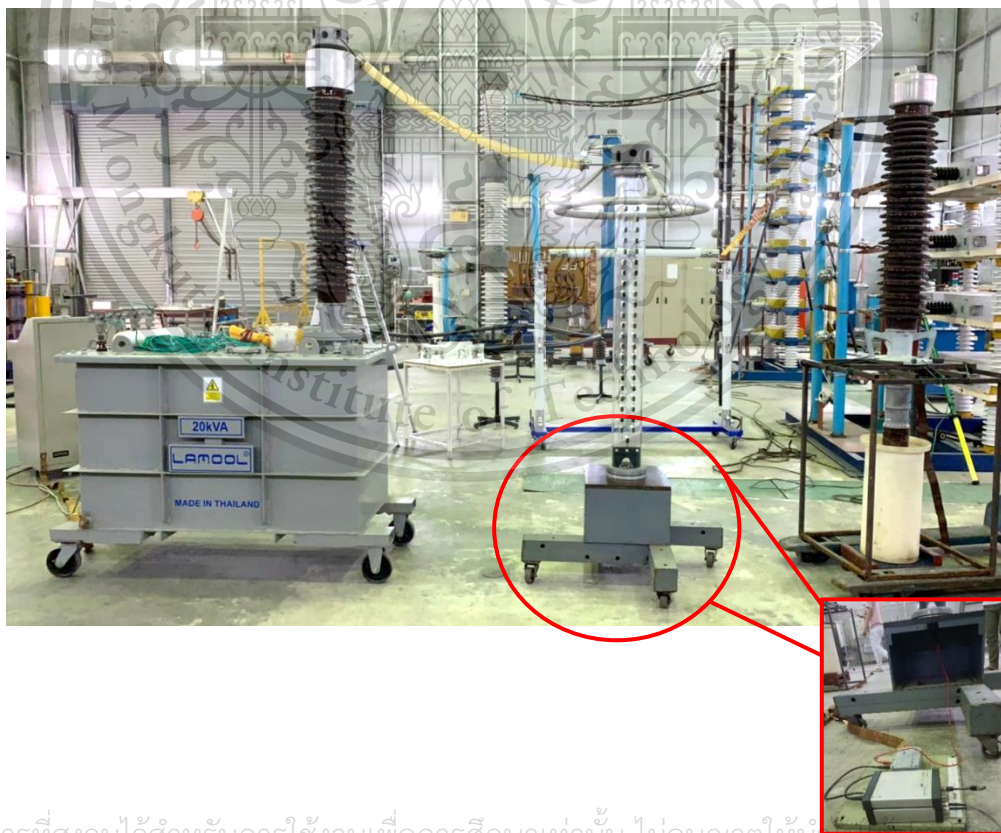
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่รูปที่ ข.2 การติดตั้งชุดทดสอบ Damped AC สำหรับการทดสอบเคเบิล 6.9 kV โยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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



รูปที่ ข.3 การติดตั้งชุดทดสอบ Damped AC สำหรับการทดสอบสายเคเบิล 6.9 KV



รูปที่ ข.4 การติดตั้งชุดทดสอบดิสชาร์จบางส่วนในบุงชิงแรงสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้เพื่อการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามแก้ไขข้อมูลและต้นฉบับเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-นามสกุล นายกรัณย์พล แร่งฤทธิ์

เกิดวันที่ 29 ตุลาคม พ.ศ.2541

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจาก โรงเรียนเบญจมเทพอุทิศ
เข้าศึกษาที่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ
ทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2560

ฝึกงานที่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ
ทหารลาดกระบัง ระหว่างเดือน มิถุนายน ถึง กรกฎาคม พ.ศ. 2563



ชื่อ-นามสกุล นายสรวุฒิ คูศิริวานิชกร

เกิดวันที่ 20 สิงหาคม พ.ศ. 2541

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจาก โรงเรียนชลราษฎรอำรุง
เข้าศึกษาที่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ
ทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2560

ฝึกงานที่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ
ทหารลาดกระบัง ระหว่างเดือน มิถุนายน ถึง กรกฎาคม พ.ศ. 2563

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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



ชื่อ-นามสกุล นายสัญญา ตั้งกาญจนยืนยง

เกิดวันที่ 17 กันยายน พ.ศ. 2541

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมตอนปลายจาก โรงเรียนวิสุทธิรังษี

เข้าศึกษาที่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ
ทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2560

ฝึกงานที่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ
ทหารลาดกระบัง ระหว่างเดือน มิถุนายน ถึง กรกฎาคม พ.ศ. 2563



ชื่อ-นามสกุล นายสัญญา โพร้athomศิริ

เกิดวันที่ 19 พฤศจิกายน พ.ศ. 2541

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจาก โรงเรียนพิบูลวิทยาลัย

เข้าศึกษาที่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ
ทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2560

ฝึกงานที่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ
ทหารลาดกระบัง ระหว่างเดือน มิถุนายน ถึง กรกฎาคม พ.ศ. 2563

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

