

การประเมินสภาพฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนด้วยการวิเคราะห์
ผลตอบสนองไดอิเล็กทริก

ASSESSMENT OF INSULATION CONDITION OF ROTATING MACHINES
USING DIELECTRIC RESPONSE ANALYSIS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2564

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ASSESSMENT OF INSULATION CONDITION OF ROTATING MACHINES
USING DIELECTRIC RESPONSE ANALYSIS



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2021
KMUTL-2021-EN-D-018-085

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2021

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประเมินสภาพนวนของเครื่องจักรกลหมุนด้วยการวิเคราะห์ผลตอบสนองไดอิเล็กทริก
นักศึกษา	นายเพทาย นิมสนอง
รหัสประจำตัว	57601417
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2564
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.นรเศรษฐ์ พัฒนเดช

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการประเมินสภาพนวนของเครื่องจักรกลหมุนด้วยการวิเคราะห์ผลตอบสนองไดอิเล็กทริก โดยศึกษาผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของตัวอย่างสเตเตอร์บาร์ที่ใช้ในงานในเครื่องจักรกลหมุนพิกัดแรงดัน 13.8 kV ทั้งฉนวนกราวด์และฉนวนระหว่างเฟสในห้องปฏิบัติการ โดยศึกษาผลของ แรงดันที่ป้อน เวลาที่ใช้ในการโพลาริเซชัน อุณหภูมิ ฉนวนเสื่อมสภาพแยกชั้นจากความร้อนและความชื้น จากผลการศึกษาพบว่าทุกกรณีศึกษามีผลกระทบต่อผลตอบสนองของไดอิเล็กทริก ทำให้การแปลผลการวัดผลตอบสนองของไดอิเล็กทริกอาจนำไปสู่ความเข้าใจและข้อสรุปที่ผิดพลาดหากทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบที่สภาวะแตกต่างกัน วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอพารามิเตอร์ไดอิเล็กทริกตัวใหม่ได้แก่ ค่าความนำไฟฟ้าสมมูลและฟังก์ชันผลตอบสนองไดอิเล็กทริกสมมูล ซึ่งพารามิเตอร์ที่นำเสนอจะทำการนอร์มอลไลซ์ผลการวัดไปที่ระดับแรงดันทดสอบอ้างอิง เวลาที่ใช้ในการโพลาริเซชันอ้างอิง และอุณหภูมิอ้างอิง ทำให้สามารถเปรียบเทียบผลการทดสอบฉนวนสเตเตอร์ที่สภาวะแตกต่างกันได้ พารามิเตอร์ไดอิเล็กทริกที่นำเสนอถูกนำไปประยุกต์ใช้ประเมินสภาพฉนวนสเตเตอร์ของเครื่องจักรกลหมุนแรงดันสูงขนาดกลางถึงขนาดใหญ่จำนวน 80 เครื่อง ภายใต้เงื่อนไขการใช้งานที่แตกต่างกัน ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าพารามิเตอร์ไดอิเล็กทริกที่นำเสนอร่วมกับเกณฑ์ที่แนะนำมีประโยชน์อย่างชัดเจนในการประเมินฉนวนสเตเตอร์ของเครื่องจักรกลหมุน อย่างไรก็ตามการศึกษาวิจัยเก็บข้อมูลเพิ่มเติมมีประโยชน์อย่างยิ่งในการนำไปปรับปรุงเกณฑ์ที่นำเสนอให้มีความถูกต้องมากขึ้น

Thesis	Assessment of Insulation Condition of Rotating Machines Using Dielectric Response Analysis
Student	Mr. Pethai Nimsanong
Student ID.	57601417
Degree	Doctor of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2021
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr. Norasage Pattanadech

ABSTRACT

This dissertation proposes the assessment of the insulation condition of rotating machines by applying the dielectric response analysis (DRA). The DRA of the ground insulation and phase insulation of the stator bar samples rated 13.8 kV was investigated in the laboratory. From the experiments, the effect of the test parameters, i.e., given applied voltages, polarization times, and the effect of the insulation parameters, i.e., temperatures, the presence of delaminated insulation caused by thermal stress and moisture content, on the DRA, were investigated. From the test results, it was found that all investigated parameters affected the dielectric response. Therefore, the comparison of the dielectric response test results obtained from different conditions may cause misunderstandings and lead to a wrong conclusion. This dissertation introduces new dielectric parameters, i.e., equivalent conductivity and equivalent dielectric response function. These parameters were normalized to the reference values of the given applied voltage, the polarization time, and the temperature then the DRA test results obtained from the different conditions can be prepared and correctly interpreted. The proposed parameters, including the recommended criteria, were applied to assess the insulation condition of 80 medium-large high voltage rotating machines operated with different service conditions. From the result analysis, it was found that the proposed dielectric parameters combined with the suggested criteria were clearly useful for assessing the condition of the stator insulation in the high voltage rotating machines. Besides, further investigation will be beneficial to improve precisely the suggestion criteria.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.นรเศรษฐ พัฒนเดช ที่ให้ความช่วยเหลือและคำชี้แนะตลอดจนให้ความรู้และประการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า และขอขอบคุณ ผศ. ดร. สถาพร พรหมวงศ์ ที่คอยช่วยเหลือและสนับสนุนข้าพเจ้าเสมอมา

ข้าพเจ้าขอขอบคุณ คุณธเนศ วอทอง ซึ่งเป็นอาจารย์อีกท่านหนึ่งของข้าพเจ้าที่ได้กรุณาถ่ายทอดประสบการณ์ความรู้การบำรุงรักษาเครื่องจักรกลหมุน และให้โอกาสอันดีแก่ข้าพเจ้าในการเข้าไปศึกษาวิจัยฉนวนเครื่องจักรกลหมุนในโรงไฟฟ้าตลอดจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จ

ข้าพเจ้าขอขอบคุณ คุณวรชัย สวัสดิ์มงคล กรรมการผู้จัดการ บริษัท ทีไอเอส เอ็นจิเนียริง แอนด์ เซอร์วิส จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องวัดผลตอบสนองไดอิเล็กทริกและมอบโอกาสในการเข้าไปทดสอบเครื่องจักรกลหมุนในโรงไฟฟ้า และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่บริษัท ทีไอเอส เอ็นจิเนียริง แอนด์ เซอร์วิส ทุกคน ที่ได้ให้ความร่วมมือสนับสนุนข้าพเจ้าเป็นอย่างดี

ข้าพเจ้าขอขอบคุณ นายชิษณุพงศ์ ศรีนางแย้ม และ นายศิวกร จินเมือง และน้องๆ ห้องปฏิบัติการวิจัยฉนวนไฟฟ้าแรงสูง DikaLab ที่ให้การสนับสนุนข้าพเจ้าด้วยดีจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จจุลวง

สุดท้ายต้องขอขอบคุณภรรยาของข้าพเจ้า นางสาวณัฐพร กิติโกเศศ และลูกสาวของข้าพเจ้า เด็กหญิงนิตา นิมสนอง ที่ให้กำลังใจและเป็นกำลังใจที่ดีของข้าพเจ้าตลอดมา

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดวิชาความรู้และประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

เพทาย นิมสนอง

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	3
1.5 ขอบเขตการวิจัย	6
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	6
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 กล่าวนำ	7
2.2 ประเภทของขดลวดโรเตอร์.....	8
2.3 ประเภทของขดลวดสเตเตอร์.....	11
2.3.1 ขดลวดสเตเตอร์แบบการพันแบบสุ่ม	11
2.3.2 ขดลวดสเตเตอร์แบบพันสำเร็จชนิดคอยล์	12
2.3.3 ขดลวดสเตเตอร์แบบพันสำเร็จชนิดโรเบลบาร์	13
2.3.4 วัสดุฉนวนของขดลวดสเตเตอร์.....	14
2.4 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเสื่อมสภาพของฉนวน	16
2.4.1 ความร้อน	16

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.2 ความเครียดทางไฟฟ้า.....	17
2.4.3 ความเครียดทางกล.....	18
2.4.4 ผลกระทบจากสิ่งแวดล้อม.....	19
2.5 วัสดุไดอิเล็กทริก.....	20
2.5.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของไดอิเล็กทริก.....	21
2.5.2 ปฏิกิริยาการโพลาไรเซชัน.....	27
2.5.3 ผลตอบสนองไดอิเล็กทริกในโดเมนเวลา.....	29
2.5.4 ผลตอบสนองไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่.....	32
2.6 หลักการวัดกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชัน.....	35
บทที่ 3 การศึกษาผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของ ฉนวนสเตเตอร์บาร์ตัวอย่าง.....	36
3.1 กล่าวนำ.....	36
3.2 การเตรียมสเตเตอร์บาร์ตัวอย่าง.....	36
3.3 การศึกษาสนามไฟฟ้าของสเตเตอร์บาร์ตัวอย่าง.....	38
3.4 การเตรียมวงจรการทดลองศึกษาผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของสเตเตอร์บาร์ตัวอย่าง.....	40
3.5 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันต่อการโพลาไรเซชัน.....	41
3.6 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการโพลาไรเซชันต่อตัวเก็บประจุย่อย.....	43
3.7 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิต่อการโพลาไรเซชัน.....	45
3.8 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างฉนวนเสื่อมสภาพแยกชั้นจากความร้อนและ ความชื้นต่อการโพลาไรเซชัน.....	47
3.9 การศึกษาผลของขนาดสเตเตอร์ต่อฟังก์ชันไดอิเล็กทริกสมมูล.....	49
บทที่ 4 การประเมินสภาพฉนวนของฉนวนสเตเตอร์ ในเครื่องจักรกลหมุน ณ จุดใช้งาน.....	50
4.1 การวัดผลตอบสนองไดอิเล็กทริกฉนวนขดลวดสเตเตอร์ ณ จุดใช้งาน.....	50
4.2 เกณฑ์แนะนำสำหรับการประเมินสภาพฉนวนขดลวดสเตเตอร์.....	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 การศึกษาการโพลาริเซชันของฉนวนขดลวดสเตเตอร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ณ จุดใช้งาน ...	53
4.3 การศึกษาการโพลาริเซชันของฉนวนขดลวดสเตเตอร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ณ จุดใช้งาน ...	60
บทที่ 5 สรุปผลการทดสอบ	67
5.1 สรุปผลการทดสอบ.....	67
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	68
5.3 งานวิจัยในอนาคต	69
เอกสารอ้างอิง	70
ภาคผนวก.....	76
ประวัติผู้เขียน.....	123



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ขั้นตอนการศึกษา.....	6
3.1 ข้อมูลพื้นฐานของสเตเตอร์บาร์ตัวอย่าง	36
3.2 คุณสมบัติวัสดุที่ใช้คำนวณสนามไฟฟ้าของสเตเตอร์บาร์ตัวอย่าง	38
3.3 กรณีศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันต่อการโพลาริเซชัน	41
3.4 กรณีศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการโพลาริเซชันต่อตัวเก็บประจุย่อ	43
3.5 กรณีศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิต่อการโพลาริเซชัน	45
3.6 กรณีศึกษาขนาดของเสื่อมสภาพจากความชื้นและความร้อนต่อการโพลาริเซชัน	47
4.1 เกณฑ์แนะนำสำหรับการประเมินสภาพฉนวนขดลวดสเตเตอร์.....	51
4.2 กรณีศึกษาผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของฉนวนขดลวดสเตเตอร์มอเตอร์ ณ จุดใช้งาน	52
4.3 กรณีศึกษาผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของฉนวนขดลวดสเตเตอร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ณ จุดใช้งาน.....	53
4.4 กรณีศึกษาผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของฉนวนขดลวดสเตเตอร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ณ จุดใช้งาน....	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โรเตอร์แบบขั้วแม่เหล็กยื่น	8
2.2 โรเตอร์ทรงกระบอก	9
2.3 โรเตอร์แบบกรงกระรอก	9
2.4 โรเตอร์แบบขดลวดพัน	10
2.5 ภาพถ่ายและภาพหน้าตัดของขดลวดสเตเตอร์แบบปุ่ม	12
2.6 ขดลวดสเตเตอร์แบบพันสำเร็จชนิดคอยล์.....	12
2.7 ขดลวดสเตเตอร์แบบพันสำเร็จชนิดโรเบลบาร์	13
2.8 โครงสร้างการฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนและภาพตัดของฉนวนสเตเตอร์	14
2.9 การแยกตัวของฉนวนในเครื่องจักร	16
2.10 ความเสียหายของฉนวนเนื่องจากการเกิดพอลต์	18
2.11 รอยแตกที่บริเวณ endwinding	19
2.12 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อโรเตอร์และสเตเตอร์	20
2.13 ความต้านทานและทิศทางการไหลของกระแส.....	21
2.14 ค่าเปอร์มิตติวิตีของวัสดุที่ความถี่ 1 MHz ที่ 20 °C , 1 bar	22
2.15 วงจรสมมูลของฉนวน.....	22
2.16 เฟสเซอร์ไดอะแกรมแรงดันและกระแส.....	23
2.17 วงจรสมมูลของฉนวนที่แทนกำลังสูญเสียไดอิเล็กทริก 3 รูปแบบ	24
2.18 คุณลักษณะของตัวประกอบกำลังสูญเสีย.....	24
2.19 การเรียงตัวของโมเลกุลในเนื้อฉนวนในสภาวะปกติและได้รับสนามไฟฟ้า.....	25
2.20 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในโพรงอากาศ	26
2.21 ตัวประกอบกำลังของวัสดุฉนวน.....	26
2.22 กลไกพื้นฐานของการเกิดปรากฏการณ์โพลาริเซชัน	28
2.23 ความสัมพันธ์ของค่าเปอร์มิตติวิตีเชิงซ้อนและกลไกการเกิดปรากฏการณ์โพลาริเซชัน.....	28
2.24 โมเดลไดอิเล็กทริก กระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน	31
2.25 วงจรวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันของฉนวนบริเวณขดลวดสเตเตอร์	35
3.1 การเตรียมสเตเตอร์บาร์ตัวอย่าง.....	37
3.2 ระบบฉนวนสเตเตอร์บาร์ตัวอย่าง	37
3.3 ภาพขยายชั้นฉนวนสเตเตอร์บาร์ตัวอย่าง.....	37
3.4 ระบบฉนวนสเตเตอร์บาร์ตัวอย่าง.....	38
3.5 การกระจายแรงดันไฟฟ้าจากผลการคำนวณ.....	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.6 สนามไฟฟ้าในระบบฉนวนจากผลการคำนวณ.....	39
3.7 แรงดันไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าจากจุด A ไปจุด B.....	39
3.8 วงจรสมมูลระบบฉนวนในร่องสลีต	39
3.9 วงจรการวัดผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของ	40
3.10 วงจรสมมูลวัดผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของ	40
3.11 ผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของฉนวนกรณีป้อนแรงดันแตกต่างกัน	41
3.12 ผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของฉนวนหลังการทานอร์มัลไลเซชันที่แรงดัน 100 โวลต์.....	42
3.13 ผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของฉนวนกรณีเวลาโพลาไรเซชันแตกต่างกัน	43
3.14 ผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของฉนวนหลังปรับเวลา T_p เข้าสู่ขั้นต้น	44
3.15 ผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของฉนวนและความนำไฟฟ้าสมมูลกรณีอุณหภูมิแตกต่างกัน	46
3.16 ผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของฉนวนกรณีอุณหภูมิแตกต่างกัน.....	47
3.17 ผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของฉนวนกรณีฉนวนเสื่อมสภาพจากความชื้นและความร้อน.....	48
3.18 ผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของฉนวนกรณีอุณหภูมิแตกต่างกัน.....	49
3.19 ผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของฉนวนกรณีอุณหภูมิแตกต่างกัน.....	49
4.1 วงจรการวัดผลตอบสนองไดอิเล็กทริกฉนวนขดลวดสเตเตอร์ ณ จุดใช้งาน.....	51
4.2 ขั้นตอนการวัดผลตอบสนองไดอิเล็กทริก	51
4.3 ความนำไฟฟ้าสมมูลและเกณฑ์แนะนำสำหรับ EDRF	52
4.4 ผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของมอเตอร์กรณีศึกษาที่ 1.....	54
4.5 ผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของมอเตอร์กรณีศึกษาที่ 2.....	55
4.6 ผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของมอเตอร์กรณีศึกษาที่ 3.....	56
4.7 ผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของมอเตอร์กรณีศึกษาที่ 4.....	57
4.8 ผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของมอเตอร์กรณีศึกษาที่ 5.....	58
4.9 ผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของมอเตอร์กรณีศึกษาที่ 6.....	59
4.10 ผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากรณีศึกษาที่ 1	61
4.11 ผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากรณีศึกษาที่ 2.....	62
4.12 ผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากรณีศึกษาที่ 3.....	63
4.13 ผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากรณีศึกษาที่ 4.....	64
4.14 ผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากรณีศึกษาที่ 5.....	65
4.15 ผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากรณีศึกษาที่ 6.....	66
5.1 ขั้นตอนการประเมินสภาพฉนวน.....	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในโรงไฟฟ้าและในโรงงานอุตสาหกรรม เครื่องจักรกลหมุน (Rotating machine) เป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญอย่างมาก ทำหน้าที่แปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าหรือแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล ขึ้นอยู่กับการประยุกต์ใช้งาน ในกรณีที่เครื่องจักรกลหมุนติดตั้งใช้งานในตำแหน่งที่สำคัญของกระบวนการผลิต หากเครื่องจักรกลหมุนดังกล่าวชำรุดเสียหายกะทันหัน จะส่งผลให้เกิดความเสียหายทั้งทางตรงและทางอ้อมในมูลค่าสูง เพื่อลดความเสียหายดังกล่าวที่จะเกิดขึ้น จำเป็นต้องตรวจสอบดูแลเฝ้าระวังเครื่องจักรกลหมุนให้อยู่ในสภาพดีพร้อมใช้งาน จึงต้องมีการวางแผนการซ่อมบำรุงรักษา จากการเก็บข้อมูลทางสถิติเรื่องการล้มเหลวของเครื่องจักรกลหมุนพบว่าสาเหตุความเสียหายหลักมาจากแบร์ริงและความเสื่อมสภาพของฉนวน โดยเฉพาะฉนวนของขดลวดสเตเตอร์ที่ได้รับแรงดันไฟฟ้า ความร้อน และแรงทางกล ขณะใช้งาน และการปนเปื้อนจากสภาพแวดล้อม ดังนั้น เพื่อให้ทราบถึงสภาพของฉนวนจึงจำเป็นต้องมีการกำหนดวิธีการทดสอบฉนวนของเครื่องจักรกลหมุน เพื่อช่วยให้สามารถประเมินสภาพฉนวนและวิเคราะห์สาเหตุความผิดปกติของฉนวนได้ก่อนที่ฉนวนจะเกิดความเสียหาย อีกทั้งช่วยให้ผู้ประกอบการสามารถวางแผนการซ่อมบำรุงได้อย่างเหมาะสม ทำให้ยืดอายุการใช้งานเครื่องจักรกลหมุน และลดมูลค่าความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นได้

ปัจจุบันในการประเมินสภาพฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนขนาดกลางและขนาดใหญ่ ได้มีการพัฒนาวิธีการวัดกระแสโพลาไรเซชันและกระแสดีโพลาไรเซชัน (Polarization and depolarization current, PDC) และวิเคราะห์ผลตอบสนองไดอิเล็กทริก (Dielectric Response Analysis, DRA) ซึ่งมีแนวโน้มการใช้เทคนิคดังกล่าวเพิ่มขึ้น เทคนิคนี้จะใช้แรงดันต่ำในการทดสอบทำให้ฉนวนไม่ได้รับความเสียหายเพิ่มเติมจากการทดสอบ ซึ่งเป็นจุดเด่นเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการทดสอบเครื่องจักรกลหมุนด้วยวิธีปกติที่ใช้แรงดันสูงในการทดสอบ อาจจะทำให้เกิดความเสียหายต่อระบบฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนได้ นอกจากนี้ยังส่งผลให้อายุการใช้งานของเครื่องจักรกลหมุนลดลงอย่างมีนัยยะสำคัญ ในประเทศไทยการวิเคราะห์ฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนด้วยวิธีวิเคราะห์ผลตอบสนองไดอิเล็กทริกยังไม่ได้รับการศึกษาวิจัยอย่างจริงจัง จึงทำให้เกิดงานวิจัยนี้ขึ้นมา เพื่อทำการศึกษาอิทธิพลต่างๆ ต่อผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของฉนวนของเครื่องจักรกลหมุน เช่น แรงดันทดสอบ โครงสร้างของฉนวน อุณหภูมิ ความชื้น ความร้อน และฉนวนเสื่อมสภาพ ผลการศึกษาที่ได้จะช่วยให้เกิดความรู้ความเข้าใจในการวิเคราะห์สภาพฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนแรงดันสูงและสามารถนำไปใช้ในการวางแผนบำรุงรักษาเครื่องจักรกลหมุนได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ยังได้

นำเสนอพารามิเตอร์ใหม่ ได้แก่ ฟังก์ชันไดอิเล็กทริกสมมูล (Equivalent dielectric response) ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

function, EDRF) และ ค่าความนำไฟฟ้าสมมูล (Equivalent conductivity, σ_e) และนำเสนอเกณฑ์การประเมินสภาพฉนวน เพื่อเป็นตัวช่วยในการวางแผนบำรุงรักษาและปรับปรุงสภาพฉนวน ลดโอกาสการทำงานที่ล้มเหลวของเครื่องจักรกลหมุนในขณะใช้งานและช่วยยืดอายุการทำงานให้ยาวนานขึ้น อีกทั้งยังเพิ่มประสิทธิภาพของระบบโดยรวมให้เกิดความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์อีกด้วย

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อผลตอบแทนไดอิเล็กทริกของขดลวดสเตเตอร์ของเครื่องจักรกลหมุนด้วยวิธีการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสตีโพลาริเซชัน
2. เพื่อศึกษาผลตอบแทนไดอิเล็กทริกของขดลวดสเตเตอร์ของเครื่องจักรกลหมุนที่ผ่านการใช้งานในสภาวะแตกต่างกัน
3. เพื่อสร้างรูปแบบการประเมินฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนด้วยวิธีการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสตีโพลาริเซชัน
4. นำเสนอพารามิเตอร์ใหม่สำหรับประเมินสภาพฉนวนขดลวดสเตเตอร์ของเครื่องจักรกลหมุน
5. นำเสนอเกณฑ์แนะนำสำหรับการประเมินสภาพฉนวนขดลวดสเตเตอร์ของเครื่องจักรกลหมุน
6. เพื่อพัฒนาองค์ความรู้ทางด้านการตรวจสอบวินิจฉัยการฉนวนของเครื่องจักรกลหมุน

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

1. การวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสตีโพลาริเซชันและการวิเคราะห์ผลตอบแทนไดอิเล็กทริกสามารถแปลผลเพื่อประเมินสภาพฉนวนขดลวดสเตเตอร์ได้
2. ขนาดของแรงดันที่ใช้ในการทดสอบวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสตีโพลาริเซชันมีผลต่อผลตอบแทนไดอิเล็กทริกของขดลวดสเตเตอร์
3. ระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสตีโพลาริเซชันมีผลต่อผลตอบแทนไดอิเล็กทริกของขดลวดสเตเตอร์
4. อุณหภูมิของขดลวดสเตเตอร์มีผลต่อการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสตีโพลาริเซชัน
5. ความชื้นและความร้อนภายในฉนวนของขดลวดสเตเตอร์มีผลต่อผลตอบแทนไดอิเล็กทริก
6. ค่าความจุไฟฟ้าของขดลวดสเตเตอร์มีผลต่อผลตอบแทนไดอิเล็กทริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

ในปี พ.ศ. 2543 Jean-Jacques Alff, Vahe Der Houhanessian , Walter S. Zaengl และ Adolf J. Kachler นำเสนองานวิจัยเรื่อง A Novel, Compact Instrument for the Measurement and Evaluation of Relaxation Currents Conceived for On-Site Diagnosis of Electric Power Apparatus [1] ทางคณะผู้จัดทำได้ออกแบบเครื่องมือสำหรับวินิจฉัยฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่ภาคสนาม (On-site) ซึ่งเป็นเครื่องมือสำหรับวินิจฉัยฉนวนโดยมีพื้นฐานจากการกระแสรีแลกเซชัน (Relaxation current) ภายใต้แนวคิดที่ว่ากระแสรีแลกเซชันของฉนวนอาจจะวัดเป็นค่าเชิงปริมาณของผลตอบสนองไดอิเล็กทริกในโดเมนเวลาหรือโดเมนความถี่ได้ หลักการพื้นฐานของเครื่องมือนี้คือวัดปฏิกิริยาของประจุที่อยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าในรูปแบบของกระแสโพลาริเซชันในโดเมนเวลา หลังจากนั้นเมื่อปลดแหล่งจ่ายไฟฟ้าแล้วทำการลัดวงจรฉนวนไดอิเล็กทริกจะเกิดกระแสชั่วตรงข้ามไหลขึ้นมา ซึ่งกระแสที่วัดได้นั้นเรียกว่ากระแสดีโพลาริเซชัน ซึ่งนอกจากจะวัดกระแสรีแลกเซชันแล้ว เครื่องมือที่นำเสนอยังสามารถแปลงค่ากระแสในโดเมนเวลาไปเป็นค่าความจุไฟฟ้าและประเมินแพคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ได้อีกด้วย

ในปี พ.ศ. 2549 Michael Muhr, Christof Sumereder ได้นำเสนองานวิจัยเรื่อง Condition Assessment of Electric Machines [2] โดยมีใจความสำคัญเกี่ยวกับการจัดการสินทรัพย์และความเสี่ยงของอุปกรณ์ไฟฟ้า และการประเมินอายุและสภาพของอุปกรณ์ไฟฟ้า เนื่องจากในขณะนั้นในตลาดการผลิตพลังงานไฟฟ้านั้นเริ่มมีการแข่งขันกันมากขึ้น ดังนั้นเพื่อประโยชน์สูงสุดในทางเศรษฐศาสตร์ บริษัทผลิตพลังงานไฟฟ้าต้องดำเนินการเพิ่มประสิทธิภาพการบำรุงรักษา การดำเนินการและกลยุทธ์การลงทุน ขณะเดียวกันเองก็มีการพัฒนาเครื่องมือต่างๆ ในการประเมินสภาพอายุของอุปกรณ์ซึ่งผลลัพธ์จากการใช้งานพบว่าประสบความสำเร็จเป็นอย่างดีสำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบกำลังพบว่าปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความล้มเหลวของตัวอุปกรณ์ไฟฟ้ากำลังคือ ฉนวน ในการวินิจฉัยเพื่อวางแผนการบำรุงรักษาและการดำเนินงานอย่างมีประสิทธิภาพจึงจำเป็นต้องติดตามผลทั้งทางไฟฟ้า ทางกล ทางความร้อน และทางเคมี ตัวอย่างการทดสอบที่ใช้สำหรับการประเมินทางไฟฟ้า ได้แก่ การวัดการดีสชาร์จบางส่วน (Partial discharges), แพคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric Dissipation Factor, DDF), การทดสอบทีปอัพ (Tip-up test), ความคงทนฉนวน (Dielectric strength), ความต้านทานฉนวน (Insulation resistance), การวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน เมื่อมีความเข้าใจสภาพและอายุของอุปกรณ์จะช่วยให้วางกลยุทธ์การบำรุงรักษาที่เหมาะสม ลดค่าใช้จ่ายและยืดอายุการทำงานของอุปกรณ์ให้ยาวนานขึ้น

ในปี พ.ศ. 2553 S. BHUMIWAT นำเสนองานวิจัยเรื่อง Interpretation of dielectric spectroscopy results in time and frequency domains for power cables [3] บทความนี้แสดงวิธีการแปลผลการวัดผลตอบสนองไดอิเล็กทริกสำหรับสายเคเบิลด้วยการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน ซึ่งเทคนิคนี้ได้รับการแนะนำเมื่อปี 2543 ซึ่งเป็นการทดสอบแบบไม่เอกสารถือเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำลายในโดเมนเวลา ความสามารถของเทคนิคนี้สามารถวัดกระแสในช่วงพิโคแอมแปร์ (pA) และประยุกต์ใช้ในการประเมินสายเคเบิลยาวได้ที่ภาคสนาม ทำการทดสอบที่ระดับแรงดันไฟฟ้าต่ำ เช่น 50 หรือ 500 VDC ขึ้นอยู่กับสัญญาณรบกวนขณะทดสอบ ซึ่งทำให้มั่นใจได้ว่าฉนวนไม่ถูกทำให้เสื่อมสภาพด้วยความเครียดสนามไฟฟ้าในการทดสอบ นอกจากนี้ยังมีการประมวลผลในโดเมนความถี่ ในรูปของพารามิเตอร์ของแพคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กทริก ($\tan \delta$) และ ค่าความจุไฟฟ้า (Capacitance, C) ซึ่งในบทความดังกล่าวจะใช้ผลในรูปแบบของกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน แพคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กทริก และ อัตราส่วนค่าความจุไฟฟ้า (C ratio) ในการวิเคราะห์การเสื่อมอายุของสายเคเบิล จากการแปลผลกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน แพคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กทริกและอัตราส่วนค่าความจุไฟฟ้าในช่วงความถี่ 1 mHz ถึง 1 Hz สามารถระบุลักษณะของการเสื่อมอายุของสายเคเบิลเนื่องจากปัญหาจากความชื้นและความร้อนที่สูงเกินไปในกระดาศิมเพิร์กเนตในน้ำมันและสายเคเบิลครอสลิงค์โพลีเอทิลีน (Cross-linked polyethylene, XLPE) ได้

ในปี พ.ศ. 2553 Supatra A. Bhumiwat นำเสนอบทความเรื่อง On-site Non-destructive Dielectric Response Diagnosis of Rotating Machines [4] โดยเสนอการประเมินฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนโดยใช้การวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน แล้วนำไปแปลผลร่วมกับค่าแพคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กทริก และอัตราส่วนค่าความจุไฟฟ้า งานวิจัยนี้ยังกล่าวถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน กล่าวคือ ในการวัดจำเป็นต้องดิสชาร์จ (Discharge) ประจุไฟฟ้าในฉนวนของอุปกรณ์ที่จะทำการวัดให้เหลือน้อยที่สุดก่อน เนื่องจากผลของการประจุที่สะสมในฉนวนมีผลต่อผลการทดสอบ นอกจากนี้ยังมีผลของอุณหภูมิและความชื้นด้วย สำหรับการทดสอบได้มีการแปลผลการตอบสนองไดอิเล็กทริกของมอเตอร์ที่ผลิตขึ้นใหม่ มอเตอร์ที่มีความชื้น มอเตอร์ที่เสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน และมอเตอร์ที่เสื่อมสภาพจากหลายสาเหตุ ซึ่งจากการแปลผลพบว่าค่าที่แพคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กทริกมีค่าเพิ่มขึ้นบ่งชี้ว่าฉนวนของอุปกรณ์ดังกล่าวมีปัญหา แต่ไม่สามารถบอกได้ว่าเป็นปัญหาอะไร ในส่วนของอัตราส่วนค่าความจุไฟฟ้าพบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นที่ความถี่ต่ำแสดงถึงการเสื่อมสภาพของฉนวนที่เกิดจากปรากฏการณ์โพลาริเซชัน (Polarization phenomena) กล่าวคือ มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเนื้อฉนวน ส่วนปัญหาที่เกิดจากปรากฏการณ์นำไฟฟ้า (Conduction phenomena) จะไม่มีผลต่ออัตราส่วนค่าความจุไฟฟ้า รูปร่างของกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันสามารถระบุปรากฏการณ์โพลาริเซชัน ปรากฏการณ์นำไฟฟ้าได้เฉพาะเจาะจงมากขึ้น เช่น การเสื่อมอายุทางความร้อน สารปนเปื้อนที่เป็นสื่อนำกระแสไฟฟ้า ฯลฯ แต่ในบางกรณีจำเป็นต้องใช้ผลของกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันร่วมกับอัตราส่วนค่าความจุไฟฟ้าในการวินิจฉัยสภาพฉนวน

ในปี พ.ศ. 2555 Elysée Obame Pascal Rain Olivier Gallot-Lavallée และ Gérard Tripot นำเสนองานวิจัยเรื่อง Detection of Artificial Insulation Defects in a Medium-Voltage Motor by Dielectric Spectroscopy Analysis [5] โดยศึกษาการตรวจจับข้อบกพร่องในเนื้อฉนวนของมอเตอร์แรงดันปานกลาง (medium-voltage motors) ที่เกิดขึ้นจากการผลิต โดยศึกษาความผิดปกติในเนื้อฉนวนสเตเตอร์โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ไดอิเล็กทริกสเปกโทรสโกปี (Dielectric Spectroscopy Analysis) โดยมีการจำลองฉนวนสเตเตอร์ของมอเตอร์แรงดันปานกลางให้มีข้อบกพร่องในเนื้อฉนวนที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการผลิต การวิเคราะห์ฉนวนนี้ทำการวัดค่าความจุไฟฟ้าและค่าแฟคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กทริก ($\tan \delta$) โดยทดลองที่อุณหภูมิ 30 °C และใช้ความถี่แรงดันไฟฟ้าในการทดสอบ 1 mHz – 1 kHz โดยมีตัวอย่างความบกพร่องในเนื้อฉนวนที่แตกต่างกันทั้งหมด 7 กรณี จากการทดลองพบว่าผลของความชื้นส่งผลต่อคุณสมบัติของไดอิเล็กทริกที่ความถี่ต่ำ ดังนั้น จึงควรทำการทดสอบขณะที่อากาศแห้งและสะอาด นอกจากนี้พบว่าค่าความจุไฟฟ้าและแฟคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กทริกที่ความถี่ 1 kHz ของข้อบกพร่องกรณีต่างๆ จะมีค่าแตกต่างกันซึ่งสามารถนำมาเปรียบเทียบกันได้

จากงานวิจัยใน ปี พ.ศ. 2555 เรื่อง The Use of Dielectric Spectroscopy for Detection of Insulation Defects in End Turns of Medium Voltage Motors นำเสนอโดย T.Tran Pascal Rain Olivier Gallot-Lavallée และ Gérard Tripot [6] ได้มีการศึกษาความผิดปกติของฉนวนสเตเตอร์ในส่วนที่พันร่องสลิตโดยใช้วิธีการวิเคราะห์ไดอิเล็กทริกสเปกโทรสโกปีโดยมีการจำลองความบกพร่องที่ฉนวนสเตเตอร์ของมอเตอร์แรงดันปานกลางให้มีข้อบกพร่องในเนื้อฉนวนส่วนที่พันร่องสลิต ในการวิเคราะห์ฉนวนดังกล่าวจะทำการวัดค่าความจุไฟฟ้าและแฟคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กทริกที่อุณหภูมิ 30 °C ในช่วงความถี่ 1 mHz – 1 kHz ในการวัดฉนวนส่วนที่พันร่องสลิตจะใช้น้ำเป็นอิเล็กโทรดโดยการแช่ปลายขดในน้ำตลอด 10 นาที ที่ทำการทดลอง ซึ่งในการศึกษาวิจัยนี้มีการจำลองการบกพร่องที่ส่วนที่พันร่องสลิตทั้งหมด 7 กรณี ที่มีความบกพร่องแตกต่างกัน และจากการใช้วิธีการวิเคราะห์ไดอิเล็กทริกสเปกโทรสโกปีพบว่า มี 6 กรณีที่ค่าความจุไฟฟ้าที่ 1 kHz สามารถบ่งบอกข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นได้

จะเห็นได้ว่าการวิเคราะห์สภาพฉนวนสเตเตอร์ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ผลตอบสนองไดอิเล็กทริกมีแนวโน้มมากขึ้น และสามารถพัฒนางานวิจัยให้เทคนิคนี้วิเคราะห์สภาพฉนวนขั้นสูงได้

1.5 ขอบเขตการวิจัย

1. ศึกษาโครงสร้างของเครื่องจักรกลหมุนขนาดกลางและขนาดใหญ่
2. ศึกษารูปแบบและวิธีการพันฉนวนของขดลวดสเตเตอร์ที่ใช้ในเครื่องจักรกลหมุนขนาดกลางและขนาดใหญ่
3. ศึกษาวิธีการวัดผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของฉนวนขดลวดสเตเตอร์ของเครื่องจักรกลหมุน
4. ศึกษาสนามไฟฟ้าและโมเดลฉนวนของขดลวดสเตเตอร์
5. ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันต่อการโพลาริเซชันในฉนวนของขดลวดสเตเตอร์
6. ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการโพลาริเซชันต่อตัวเก็บประจุย่อยในโมเดลฉนวน
7. ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิต่อการโพลาริเซชัน
8. ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างฉนวนเสื่อมสภาพแยกชั้นจากความชื้นและความร้อนต่อการโพลาริเซชัน
9. วิเคราะห์ผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของขดลวดสเตเตอร์ที่ใช้ในเครื่องจักรกลหมุน ณ จุดใช้งาน

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนการศึกษา

ขั้นตอนการทำงาน	ปีการศึกษาและภาคการศึกษา								
	2557		2558		2559		2560		
	1	2	1	2	1	2	1	2	
1.ศึกษาส่วนประกอบและหลักการทำงานของเครื่องจักรกลหมุน รวมทั้งขั้นตอนการผลิตขดลวดสเตเตอร์	●	●	●						
2.ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง			●	●	●	●	●	●	●
3.ออกแบบขั้นตอนทดสอบและจำลองกรณีศึกษา					●				
4.ทำการเก็บข้อมูลผลการทดสอบ PDC ของแต่ละกรณีศึกษา							●	●	●
5.ทำการวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง					●	●			
6. เขียนบทความสำหรับตีพิมพ์ในวารสารวิชาการ				●	●	●			●
7. จัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์							●	●	●

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

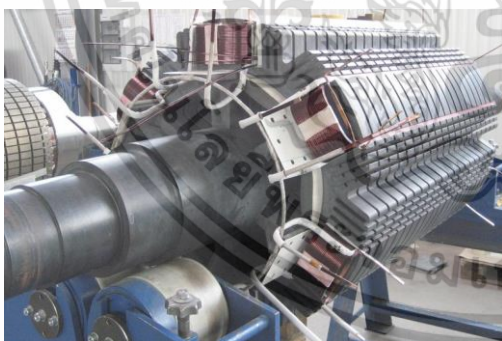
2.1 กล่าวนำ

เครื่องจักรกลหมุน (Rotating machines) แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง และเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ โดยทั่วไปแล้วเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับสามารถแบ่งออกตามลักษณะการทำงานได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ เครื่องจักรกลซิงโครนัส (Synchronous machines) และเครื่องจักรกลเหนี่ยวนำ (Induction machines) [7] โดยเครื่องจักรกลหมุนใช้หลักการแปลงผันพลังงานผ่านสนามแม่เหล็ก โดยทำหน้าที่เปลี่ยนรูปพลังงานระหว่างพลังงานทางไฟฟ้ากับพลังงานทางกล เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) เป็นเครื่องจักรกลที่เปลี่ยนพลังงานกลให้เป็นพลังงานไฟฟ้า ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้าเพื่อจ่ายให้กับระบบไฟฟ้า และมอเตอร์ (Motor) เป็นเครื่องจักรกลที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานกล ทำหน้าที่เป็นต้นกำลังทางกลเพื่อจ่ายให้กับภาระทางกล โครงสร้างเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนโดยทั่วไปจะประกอบด้วย แกนเหล็ก (สารเฟอร์โรแมกเนติก) รูปทรงกระบอก มีส่วนประกอบหลักอยู่ 2 ส่วนคือ สเตเตอร์ (Stator) เป็นส่วนอยู่กับที่ซึ่งจะประกอบด้วย แกนเหล็ก และขดลวดสเตเตอร์ ส่วนโรเตอร์ (Rotor) เป็นส่วนที่หมุนได้ซึ่งจะประกอบด้วยเพลลา แกนเหล็ก ขดลวดโรเตอร์ คอมมิวเตเตอร์ (Commutator) หรือ สลิปริง (Slip ring) สำหรับต่อกับแปรงถ่าน ซึ่งจะมีช่องว่างระหว่างส่วนสเตเตอร์กับโรเตอร์เรียกว่า ช่องอากาศ (Air gap) ในบทนี้จะลงรายละเอียดไปที่ขดลวดโรเตอร์และขดลวดสเตเตอร์ของเครื่องจักรกลหมุน ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเสื่อมสภาพของฉนวน ความสูญเสียในเนื้อฉนวน ผลตอบสนองไดอิเล็กทริก (Dielectric response) และหลักการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน (Polarization and depolarization current, PDC) และปรากฏการณ์โพลาริเซชัน (Polarization phenomena) การวิเคราะห์ฉนวนด้วยการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน [8-9] โดยอธิบายรายละเอียดดังต่อไปนี้

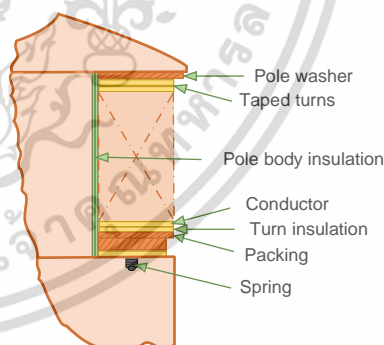
2.2 ประเภทของขดลวดโรเตอร์

โรเตอร์ของเครื่องจักรกลหมุนจะประกอบด้วย เพลลา แกนเหล็ก ขดลวดโรเตอร์ คอมมิวเตเตอร์หรือสลิปริงสำหรับต่อกับแปรงถ่านเพื่อเชื่อมต่อไปยังวงจรรภายนอก อย่างไรก็ตามกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดโรเตอร์มักจะเป็นกระแสตรงในเครื่องจักรกลซิงโครนัส หรือกระแสสลับความถี่ต่ำมาก (ไม่กี่เฮิรตซ์) ในเครื่องจักรกลเหนี่ยวนำ เนื่องจากการใช้งานความถี่ต่ำดังกล่าวทำให้ความต้องการแกนโรเตอร์แบบลามิเนต (Laminate) มีความสำคัญน้อยลง ขดลวดโรเตอร์ของเครื่องจักรกลแบบซิงโครนัสเหมือนกับขดลวดโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ มีฉนวนไฟฟ้าเพื่อป้องกันการลัดวงจรระหว่างตัวนำที่อยู่ติดกันหรือระหว่างตัวนำกับตัวโรเตอร์ [7] ประเภทของขดลวดของโรเตอร์แบ่งได้ 4 ประเภทดังนี้

1. โรเตอร์แบบขั้วแม่เหล็กยื่น (Salient pole rotor) ใช้กับมอเตอร์ซิงโครนัสที่ความเร็วรอบต่ำ เช่น โรงไฟฟ้าพลังงานน้ำ ลักษณะโรเตอร์จะมีขั้วแม่เหล็กยื่นออกมารอบแกนโรเตอร์ ดังรูปที่ 2.1 ฉนวนเทิร์น (Turn insulation) ทำหน้าที่แยกตัวนำทองแดงแต่ละตัวนำออกจากกัน สำหรับตัวนำทองแดงบางส่วนโดยเฉพาะที่อยู่ใกล้กับหน้าขั้วอาจจะใช้เทปฉนวนพันรอบทองแดงเพื่อเพิ่มระยะห่างมากขึ้น เทปตัวคั่นจากฉนวนเทิร์น และตัวนำทองแดงถูกเชื่อมต่อกันเป็นชุดเพื่อสร้างขดลวด การสร้างขดลวดอีกทางเลือกหนึ่งคือ การหมุนแถบทองแดงยาวแบบขดลวด เพื่อสร้างขดลวดแบบหลายรอบเช่นเดียวกับการออกแบบหลายชั้น ขดลวดจะแยกออกจากตัวขั้วที่มีสายดินโดยใช้แหวนรองและแถบฉนวน บ่อยครั้งที่ขั้วทั้งหมดอาจจุ่มลงในของเหลวที่เป็นฉนวนเพื่อยึดส่วนประกอบต่างๆ เข้าด้วยกัน



(ก) ขดลวด Pol-wheel windings



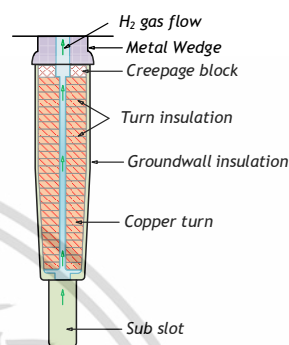
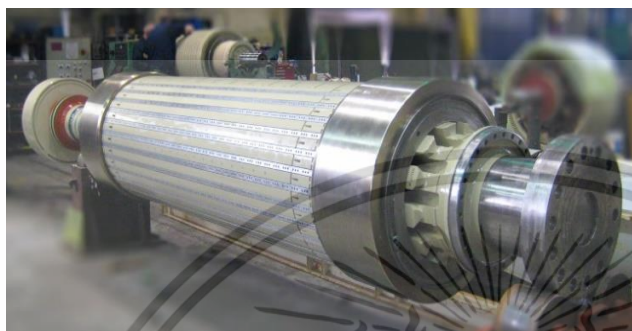
(ข) ภาพตัดขวางของโรเตอร์แบบขั้วแม่เหล็กยื่น

รูปที่ 2.1 โรเตอร์แบบขั้วแม่เหล็กยื่น [10]

2. โรเตอร์ทรงกระบอก (Cylindrical rotor/Round rotor) ใช้กับเครื่องกำเนิดซิงโครนัสที่ความเร็วรอบสูง เช่น โรงไฟฟ้าพลังงานไอน้ำ และแก๊สเทอร์ไบน์ (Gas turbine) เป็นโรเตอร์แกนเหล็กซึ่งใช้เหล็กอัดขึ้นรูปติดกับเพลลา ดังรูปที่ 2.2 มีร่องสลอตสำหรับวางตัวนำทองแดงที่หุ้มฉนวนแล้วปิดร่องสลอตด้วยลิ้ม (Wedge) ปิดหัวและท้ายด้วยวงแหวนเหล็ก โรเตอร์ทรงกระบอกส่วนใหญ่มักพบในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์ไบน์ที่มี 2 และ 4 ขั้ว รวมทั้งในมอเตอร์ซิงโครนัส 2 ขั้ว ตัวโรเตอร์มักจะทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากโลหะผสมเหล็กโดยการตีขึ้นรูป (Forging) แกนสล็อตถูกตัดลงใน การตีขึ้นรูปทองแดงที่ทำจาก แถบทองแดงที่มีความกว้างไม่เกิน 2-3 เซนติเมตร วางอยู่ในช่องเหล่านี้ โดยปกติจะมี 5-20 แถบ (รอบ) ในร่องสล็อต แทนที่จะหุ้มฉนวนทองแดงโดยตรงด้วยเทปหรือฉนวนฟิล์ม ฉนวนเทิร์นในโรเตอร์ ขนาดใหญ่จะถูกแยกออกจากกันโดยแถบฉนวนหรือช่องรูปตัวแอล (L-shaped) ซึ่งจัดเป็นแนวช่อง เพื่อทำหน้าที่ฉนวนกราวด์ (Ground insulation)

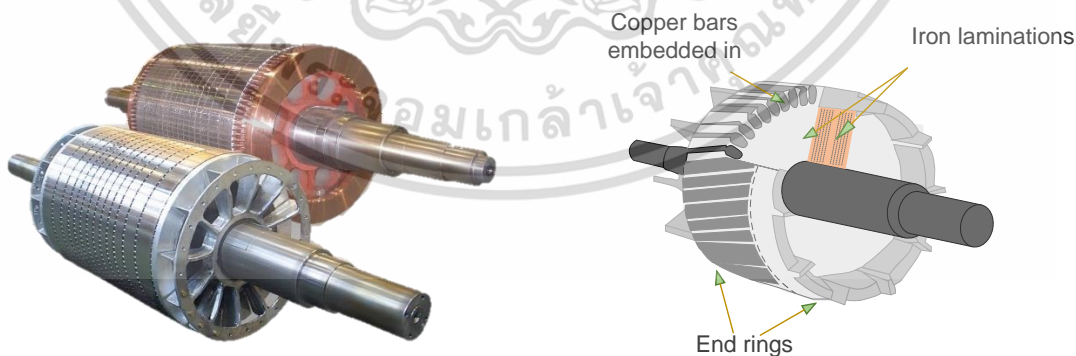


(ก) โรเตอร์ทรงกระบอก

(ข) ภาพตัดขวางของช่องโรเตอร์ทรงกระบอก

รูปที่ 2.2 โรเตอร์ทรงกระบอก [11]

3. โรเตอร์แบบกรงกระรอก (Squirrel cage rotor) ใช้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยโรเตอร์ถูก สร้างขึ้นจากแท่งโลหะตัน เชื่อมด้วยแหวนที่ปลายของโรเตอร์ทั้งสอง ซึ่งมีลักษณะเหมือนกรงกระรอก โรเตอร์กรงกระรอกประกอบไปด้วยแกนเหล็กทรงกระบอกและมีร่องสล็อต (Slot) สำหรับใส่ตัวนำ ทองแดงหรืออะลูมิเนียมอยู่รอบๆ และตัวนำเหล่านี้จะถูกลัดวงจรด้วยวงแหวนลัดวงจร (Short circuiting rings) ขดลวดที่อยู่ในโรเตอร์ชนิดนี้ถูกลัดวงจรอย่างถาวรและไม่มีการเชื่อมต่อความ- ต้านทานจากภายนอก จากรูปที่ 2.3 จะพบว่าร่องสล็อตจะไม่ขนานกับแกนหมุน



(ก) โรเตอร์แบบกรงกระรอก

(ข) ภาพตัดขวางของโรเตอร์แบบกรงกระรอก

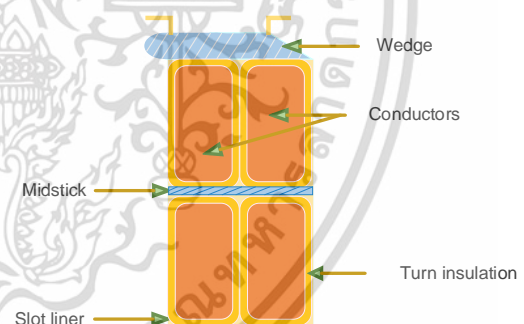
รูปที่ 2.3 โรเตอร์แบบกรงกระรอก [12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. โรเตอร์แบบวาวด์ (Wound rotor) ใช้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำซึ่งใช้กันอย่างแพร่หลายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าประเภทกังหันลม ตัวโรเตอร์จะมีการพันขดลวดที่ตัวโรเตอร์เป็นแบบสามเฟส เช่นเดียวกันกับที่สเตเตอร์มีการต่อแบบสตาร์ (Star) ผ่านทางสลิปริง และแปรงถ่าน โดยที่สลิปริงนี้จะเชื่อมต่อระหว่างขดลวดของโรเตอร์กับตัวต้านทานภายนอก หรืออุปกรณ์ควบคุมอื่นๆ โดยตัวต้านทานจะช่วยควบคุมความเร็วของมอเตอร์ ซึ่งฉนวนเทิร์นจะเป็นฉนวนของขดลวดแม่เหล็ก เมื่อทำการใส่ตัวนำลงในร่องสล็อตหลังจากนั้นจะทำการปิดร่องสล็อตด้วยลิ้ม ซับสล็อต (Sub-slot) ทำหน้าที่เป็นฉนวนกราวด์ ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญมากที่จะต้องเติมช่องให้เต็ม เพื่อให้แน่ใจว่าขดลวดจะไม่เคลื่อนที่ภายใต้แรงหมุน พื้นที่ทั้งหมดเต็มไปด้วยแถบฉนวนและโรเตอร์ทั้งหมดชุบด้วยฉนวนเหลวที่ผ่านการบ่ม โดยการใช้การจุ่ม การทำให้ชุ่มหยด หรือกระบวนการ Global vacuum pressure impregnated (GVPI) เนื่องจากขดลวดโรเตอร์ได้รับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับต่ำ ดังนั้น จึงสามารถออกแบบให้ฉนวนมีความบางได้ สำหรับโรเตอร์ขนาดใหญ่จะใช้แท่งทองแดงเป็นตัวนำขดลวด แท่งเหล่านี้มีรูปร่างเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีขนาดยาวในแนวรัศมี แสดงดังรูปที่ 2.4 โดยปกติจะทำการสอดแท่งทองแดง 2 หรือ 4 แท่ง ในแต่ละช่อง ซึ่งวางผ่านด้านบนหรือด้านผ่านช่องจากปลายช่อง ก่อนที่จะทำการสอดแท่งทองแดง แท่งทองแดงจะต้องถูกหุ้มด้วยเทปฉนวน 2-3 ชั้น นอกจากนี้ ฉนวนกราวด์จะเป็นซับสล็อต เช่นเดียวกับโรเตอร์แบบการพันแบบสุ่ม (Random-wound) แถบฉนวนจะยึดขดลวดตัวนำและโรเตอร์จะถูกนำไปอิมเพิร์กเนตเพื่อป้องกันไม่ให้ขดลวดเคลื่อนที่เนื่องจากการหมุน



(ก) โรเตอร์แบบวาวด์



(ข) ภาพตัดขวางของช่องโรเตอร์แบบวาวด์

รูปที่ 2.4 โรเตอร์แบบวาวด์ [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ประเภทของขดลวดสเตเตอร์

ส่วนประกอบหลักของสเตเตอร์คือ ขดลวดสเตเตอร์ และแกนเหล็กสเตเตอร์ ระบบฉนวนขดลวดสเตเตอร์มักจะใช้จำพวกไมก้า (Mica) โพลีเอสเตอร์ (Polyester) และ อีพ็อกซีเรซิน (Epoxy resin) เป็นโครงสร้างหลัก ซึ่งมีคุณสมบัติความแข็งแรงเชิงกลต่ำกว่าทองแดงหรือเหล็กกล้ามาก ดังนั้นอายุการใช้งานของขดลวดสเตเตอร์ส่วนใหญ่จะถูกจำกัดด้วยอายุของฉนวนไฟฟ้า [13-14]

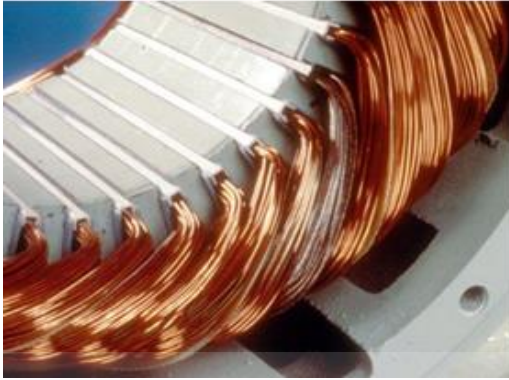
ขดลวดสเตเตอร์มี 3 ประเภท ได้แก่ ขดลวดสเตเตอร์แบบการพันแบบสุ่ม (Random-wound stator) ขดลวดสเตเตอร์แบบพันสำเร็จชนิดคอยล์ (Form-wound stator) และขดลวดสเตเตอร์แบบพันสำเร็จชนิดโรเบลบาร์ (Roebel bar)

2.3.1 ขดลวดสเตเตอร์แบบการพันแบบสุ่ม

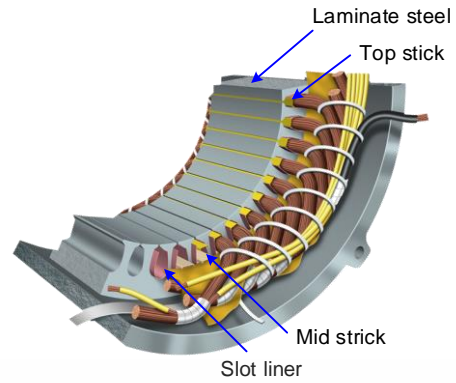
ขดลวดสเตเตอร์แบบการพันแบบสุ่ม (Random-wound stator) ประกอบด้วยตัวนำทองแดงหุ้มฉนวนที่พันอย่างต่อเนื่อง (พันด้วยมือหรือด้วยเครื่องจักร) ผ่านช่องในแกนเหล็กสเตเตอร์เพื่อสร้างขดลวด [7] แสดงดังรูปที่ 2.5

โดยการฉนวนของขดลวดสเตเตอร์แบบการพันแบบสุ่ม มีดังนี้

- 1) ฉนวนสเตรนด์ (Strand Insulation) เป็นฉนวนจำพวกวานิชและเรซินที่ใช้เคลือบลวดทองแดงตลอดเส้น สามารถทำหน้าที่เป็นฉนวนเทิร์นได้ ซึ่งปกติจะออกแบบให้ทนแรงดันเฟสสูงสุดที่จ่ายให้มอเตอร์ประมาณ 690 V_{ac} ในปัจจุบันมีการพัฒนาใช้ฉนวน Acrylic, Polyamides (ชื่อทางการค้าคือ Nylon, Nomex และ Herox) ใช้แทนวานิชและใช้อีพ็อกซีหรือโพลีเอสเตอร์แทนการใช้เรซิน
- 2) ฉนวนกราวด์ (Ground insulation) คือ ฉนวนส่วนที่วางรองไว้ในร่องสลีตก่อนที่จะวางขดลวดลงไป นิยมใช้แผ่นฉนวนสังเคราะห์จากอะรามิด (Aramid) ทำให้ฉนวนสามารถทนอุณหภูมิได้สูงถึง 220 °C (ชื่อทางการค้าคือ Nomex™, Dacron™, และ Mylar™) และมักจะใส่ขดลวดแบบการพันแบบสุ่มลงในช่องที่มีฉนวนกราวด์อยู่แล้ว โดยฉนวนกราวด์อาจทำจากลามิเนตของเส้นใยโพลีเอสเตอร์ที่ไม่ทอและฟิล์มโพลีเอสเตอร์ทำเป็นแผ่นวางรองในร่องสลีตก่อนวางขดลวด
- 3) Mid stick คือ ฉนวนที่กั้นระหว่างขดลวดระหว่างเฟส ใช้ฉนวนชนิดเดียวกับฉนวนกราวด์
- 4) Top stick คือ ฉนวนที่กั้นด้านบนของขดลวดในร่องสลีต ใช้ฉนวนชนิดเดียวกับฉนวนกราวด์



(ก) ขดลวดสเตเตอร์แบบสุ่ม



(ข) โครงสร้างขดลวดสเตเตอร์แบบสุ่ม

รูปที่ 2.5 ภาพถ่ายและภาพหน้าตัดของขดลวดสเตเตอร์แบบสุ่ม [15]

2.3.2 ขดลวดสเตเตอร์แบบพันสำเร็จชนิดคอยล์

ขดลวดสเตเตอร์แบบพันสำเร็จชนิดคอยล์ (Form-wound stators: Coil type) โดยทั่วไป ขดลวดสเตเตอร์แบบพันสำเร็จจะใช้งานในเครื่องจักรกลหมุนที่ทำงานที่ระดับแรงดันสูงกว่า 1000 V ขดลวดดังกล่าวทำจากขดลวดหุ้มฉนวนที่ได้รับการขึ้นรูปก่อนที่จะวางเข้าไปในร่องสลิตในแกนสเตเตอร์ แสดงดังรูปที่ 2.6 ในการผลิตขดลวดสเตเตอร์แบบพันสำเร็จชนิดคอยล์ ตัวนำทองแดงหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมจะถูกนำมาขดเป็นรูปต่อเนื่อง จากนั้นจะถูกนำมาตัดเป็นรูปทรงหกเหลี่ยม (บางครั้งเรียกว่า Diamond shape) จากนั้นจึงทำการพันฉนวน หลังจากการพันฉนวนสเตเตอร์คอยล์ (Stator coil) จะถูกนำไปทำให้ฉนวนเป็นเนื้อเดียวกันโดยวิธีที่นิยมใช้มี 2 วิธีคือ 1.กระบวนการอัดร้อน (Hot press) และ 2.กระบวนการ Vacuum Pressure Impregnation (VPI) ทั้งนี้ในการเลือกฉนวนที่มาพันต้องคำนึงถึงวิธีการที่ใช้ในการทำให้ฉนวนเป็นเนื้อเดียวกันด้วย [16]



(ก) ขดลวดสเตเตอร์แบบพันสำเร็จชนิดคอยล์



(ข) ขดลวดสเตเตอร์ถูกวางในร่องสลิตของแกนเหล็ก

รูปที่ 2.6 ขดลวดสเตเตอร์แบบพันสำเร็จชนิดคอยล์

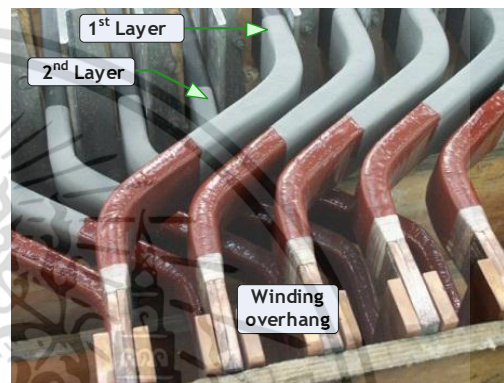
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 ขดลวดสเตเตอร์แบบพันสำเร็จชนิดโรเบลบาร์

ขดลวดสเตเตอร์แบบพันสำเร็จชนิดโรเบลบาร์ (Roebel bar) มักใช้ในเครื่องจักรกลหมุนขนาดใหญ่ที่ต้องการขดลวดที่ใหญ่และแข็งแรงเพื่อความสะดวกในการติดตั้งและซ่อมบำรุง เนื่องจากขดลวดสเตเตอร์แบบพันสำเร็จชนิดโรเบลบาร์ จะถูกผลิตขึ้นโดยมีลักษณะ “ครึ่งรอบ” ดังรูปที่ 2.7 เนื่องจากลักษณะดังกล่าว การวางโรเบลบาร์ลงในร่องสล็อตจึงถูกวางเพียงครึ่งเดียวลงในช่องในแต่ละครึ่ง ซึ่งง่ายกว่าการใส่แท่งโรเบลบาร์สองแท่งในช่อง 2 ช่องพร้อมกัน ดังนั้น ขดลวดประเภทนี้จึงจำเป็นต้องมีการเชื่อมต่อทางไฟฟ้าเพื่อสร้างขดลวดที่ปลายทั้งสองด้านของแท่งโรเบลบาร์ [7,8]



(ก) ขดลวดสเตเตอร์แบบพันสำเร็จชนิดโรเบลบาร์



(ข) การเชื่อมต่อทางไฟฟ้าที่ปลายทั้งสองด้าน

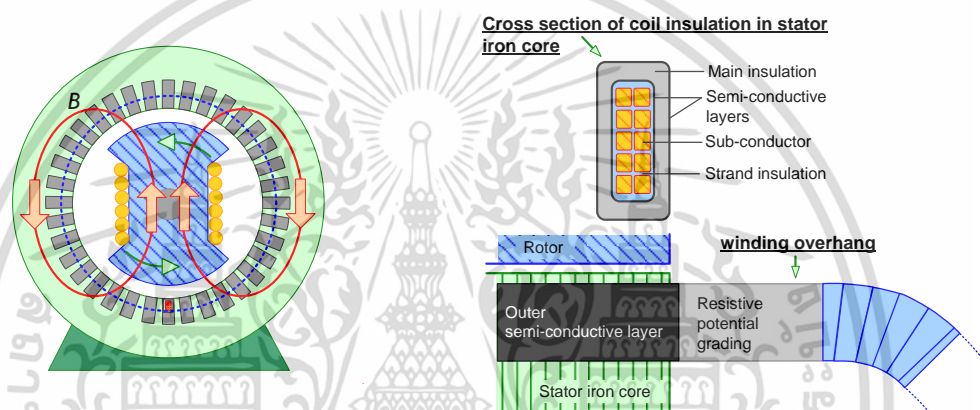
รูปที่ 2.7 ขดลวดสเตเตอร์แบบพันสำเร็จชนิดโรเบลบาร์

จากรูปที่ 2.8 แสดงโครงสร้างฉนวนของขดลวดสเตเตอร์แบบพันสำเร็จชนิดคอยล์และขดลวดสเตเตอร์แบบพันสำเร็จชนิดโรเบลบาร์ ซึ่งมีโครงสร้างฉนวนดังนี้

1) ฉนวนสเตรนด์ เป็นฉนวนที่อยู่ติดกับตัวนำทำหน้าที่ป้องกันการลัดวงจรระหว่างตัวนำที่อยู่ใกล้กันภายในขดลวดสเตเตอร์ ในการผลิตขดลวดสเตเตอร์ ตัวนำทองแดงจะถูกหุ้มด้วยฉนวนสเตรนด์ก่อนนำมาขดและตัดขึ้นรูป ดังนั้น ฉนวนสเตรนด์จึงต้องมีทั้งคุณสมบัติทางกลและทางไฟฟ้าที่ดีเพราะฉนวนบริเวณใกล้ตัวนำจะมีอุณหภูมิสูงที่สุดและต้องรับความเครียดทางไฟฟ้าสูงอีกด้วย ฉนวนที่ใช้เป็นพวกอีพ็อกซีเรซินหรือโพลีเอสเตอร์เคลือบแท่งตัวนำ หรือเป็นแท่งตัวนำที่หุ้มด้วย Nomex™ paper ขดลวดสเตเตอร์แบบพันสำเร็จ แบ่งออกเป็นหลายรอบซึ่งจะต้องมีการหุ้มฉนวนอย่างดี ในขดลวดแบบหลายรอบ ฉนวนสเตรนด์อาจจะสามารถเป็นฉนวนเทิร์นได้ ซึ่งในอดีตมักจะมีพบโดยการพันเทปไมก้าแยกกันในแต่ละรอบ บางครั้งสามารถหลีกเลี่ยงขั้นตอนการปิดเทปแบบรอบนี้ได้โดยการอัดเกร็ดฉนวนสเตรนด์ผ่านเครื่องพันเทปแต่ละเส้นด้วยเทปกระดาษไมก้าแบบบางซึ่งรองรับด้วยฉนวน PET หรือฟิล์มโพลีเมอร์ imide ในปัจจุบันฟิล์มโพลีเมอร์อาจมีสารเติมแต่งอนินทรีย์ เช่น อลูมินาที่ป้องกันการหลุดลอกออกบางส่วนหรือทำจากวัสดุพิเศษที่มีความต้านทานตามธรรมชาติต่อการหลุดออกดังกล่าว

2) ฉนวนเทิร์น เป็นฉนวนส่วนที่อยู่ถัดจากฉนวนแอสตรนด์ ซึ่งจะทำหน้าที่ป้องกันการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด โดยส่วนมากฉนวนชนิดนี้จะใช้วัสดุชนิดเดียวกับฉนวนกราวด์วอลล์

3) ฉนวนกราวด์วอลล์ เป็นฉนวนส่วนที่อยู่ถัดจากฉนวนเทิร์นโดยฉนวนชั้นนี้จะเป็นฉนวนหลัก ซึ่งทำหน้าที่เป็นฉนวนระหว่างแท่งโลหะตัวนำกับแกนเหล็กสเตเตอร์ที่ต่อลงดิน โดยวัสดุที่นำมาใช้ทำฉนวนประเภทนี้มีหลายชนิดขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน วัสดุที่ใช้ในฉนวนจะเป็นพวกกระดาษเทปไมก้าเสริมด้วยไฟเบอร์กลาส เป็นต้น นอกจากนี้ ฉนวนกราวด์วอลล์ของสเตเตอร์มีความสำคัญต่อการทำงานที่เหมาะสมของมอเตอร์หรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอย่างมาก สำหรับอายุการใช้งานที่ยาวนาน ฉนวนกราวด์วอลล์จะต้องทนต่อความเครียดทางไฟฟ้าความร้อนและทางกลที่อาจเกิดขึ้นได้



(ก) ภาพตัดขวางเครื่องจักรกลไฟฟ้า (ข) ภาพตัดขวางแท่งตัวนำของสเตเตอร์

รูปที่ 2.8 โครงสร้างการฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนและภาพตัดของฉนวนสเตเตอร์

2.3.4 วัสดุฉนวนของขดลวดสเตเตอร์

1) เรซินสังเคราะห์เหลว (Liquid synthetic resins)

สำหรับฉนวนกราวด์วอลล์ในขดลวดสเตเตอร์แบบพันสำเร็จ มีเรซิน 2 ประเภทที่มีความสำคัญมากคือ โพลีเอสเตอร์ และอีพ็อกซี่ ซึ่งทั้งสองชนิดนี้มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในฉนวนกราวด์วอลล์ขดลวดสเตเตอร์แบบพันสำเร็จเรซินที่ไม่มีตัวทำละลายอื่นๆ ที่บางครั้งใช้สำหรับการใช้งานพิเศษ ได้แก่ ซิลิโคน อะครีเลต อีไมด์ และการผสมพินอลิกกับเรซินอื่นๆ [13, 17]

1.1) โพลีเอสเตอร์ เป็นเส้นใยสังเคราะห์ที่ได้จากถ่านหิน อากาศ น้ำ และปิโตรเลียม เส้นใยโพลีเอสเตอร์พัฒนาขึ้นในห้องปฏิบัติการตั้งแต่ศตวรรษที่ 20 เกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างกรดและแอลกอฮอล์ ในปฏิกิริยานี้โมเลกุลตั้งแต่สองโมเลกุลขึ้นไปรวมกันเพื่อสร้างโมเลกุลขนาดใหญ่ที่มีโครงสร้างซ้ำตลอดความยาว เส้นใยโพลีเอสเตอร์สามารถสร้างโมเลกุลไอออนที่มีความเสถียรและแข็งแรงมาก โพลีเอสเตอร์ถูกนำมาใช้ในการสร้างผลิตภัณฑ์หลายประเภท รวมถึงของตกแต่งบ้าน อุตสาหกรรมผ้า คอมพิวเตอร์ เทปบันทึกเสียง และฉนวนไฟฟ้า

1.2) Epoxides (Epoxy Resins) ในยุคแรกส่วนใหญ่เป็นของแข็งเทอร์โมพลาสติกที่ไม่เป็นตัวทำละลายที่อุณหภูมิห้อง และไม่เหมาะสำหรับใช้เป็นเรซินที่มีความหนืดต่ำ เรซินอีพ็อกซีที่เป็นของแข็งสามารถผสมกับอีพอกไซด์แบบ monofunctional ที่มีความหนืดต่ำ เช่น glycidyl ethers เพื่อทำให้ของเหลวมีความหนืดที่อุณหภูมิห้อง อย่างไรก็ตามสารผสมที่ผ่านการบ่มเหล่านี้จะไม่มีวามแข็งแรง เรซินอีพ็อกซีมีข้อดีหลายประการเหนือเรซินโพลีเอสเตอร์คือ มีแนวโน้มที่จะมีเสถียรภาพทางความร้อนดีขึ้น กลุ่มอีพ็อกซีไม่เสถียรและทำปฏิกิริยาหรือเชื่อมโยงได้ง่ายกับสารประกอบกลุ่มที่มีอะตอมไฮโดรเจนเคลื่อนที่ เช่น คาร์บอกซิลไฮดรอกซิล และกลุ่มเอมีน เมื่อผสมเรซินและสารประกอบเหล่านี้จะเกิดปฏิกิริยากับการเกิดพอลิเมอร์ (การยึดตัว) ของโมเลกุลและการสร้างพันธะตามขวาง ปฏิกิริยาการครอสลิงค์เหล่านี้ส่งผลให้เกิดโพลีเมอร์เป็นของแข็งและเสถียร ซึ่งหดตัวน้อยมากเพียง 0.05–2 % ในขณะที่สารประกอบโพลีเอสเตอร์อาจหดตัวได้มากถึง 10 %

2) ไมก้า (Mica)

ไมก้าเป็นหนึ่งในวัสดุหลักที่ใช้ในขดลวดสเตเตอร์ที่มีพิคัดสูงกว่า 1000 V เนื่องจากมีความสามารถในการทนอุณหภูมิสูง และทนต่อการคายประจุบางส่วนได้ดีเยี่ยม ไมก้ายังคงถูกใช้เป็นฟิลเลอร์พิเศษในสีพลาสติกและเครื่องสำอาง เนื่องจากความโปร่งใสและความต้านทานต่อการแตกหักและความร้อนจึงมีการใช้ไมก้าหรือที่เรียกว่า isinglass สำหรับลูกโลกโคมไฟและสำหรับหน้าต่างในเตาถ่านหินไม้และน้ำมันก๊าด ในทางเคมีไมก้าเป็นซิลิเกตที่ซับซ้อนของอะลูมิเนียมที่มีโพแทสเซียม แมกนีเซียม เหล็ก โซเดียม ลิเทียม ฟลูออรีน และร่องรอยขององค์ประกอบอื่น ๆ ไมก้าหลักคือ muscovite $H_2KAl_3(SiO_4)_3$; phlogopite, $[H,K(Mg,F)_3]Mg_3Al(SiO_4)_3$; และ biotite, $(H,K)_2(Mg,Fe)_2(Al,Fe)_2(SiO_4)_3$ และอื่นๆ ที่ยังไม่รู้จักกันดี ได้แก่ lepidolite, paragonite และ zinnwaldite

2.1) Mica Splittings ไมก้ามีการใช้งานหรือยังคงใช้ในงานฉนวนไฟฟ้าหลายประเภท ซึ่งรวมถึงหน้าต่างไมโครเวฟ ตัวเก็บประจุ แหวนรองสำหรับติดตั้งทรานซิสเตอร์ และการใช้ในงานเครื่องจักรกลหมุนต่างๆ ส่วนใหญ่ใช้สำหรับสร้างชั้นไมก้าแต่ละชั้น ซึ่งเป็นที่ต้องการเป็นวัตถุดิบในการเปลี่ยนเป็นกระดาษไมก้า การใช้งาน Mica Splittings ในเครื่องจักรกลหมุนโดยทั่วไปจะอยู่ในรูปแบบของแผ่นหรือเทปโดยมีแผ่นรองรับและสารเคลือบเรซินหรือเป็นแผ่นขึ้นรูปที่ทำด้วยเรซินสำหรับยึดติด โดยทั่วไปจะใช้งานเป็นเทปซึ่งพันด้วยมือเป็นฉนวนกราวด์สำหรับมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูง เทปที่ใช้ใน Mica Splittings แทบจะไม่มีการใช้งานในปัจจุบันแล้ว

2.2) Mica Paper กระดาษไมก้าที่ผ่านการเผาที่มีแนวโน้มที่จะมีเกล็ดที่เล็กกว่ากระดาษไมก้าที่ผ่านการเคลือบด้วยกลไก กระดาษไมก้าทั้งสองรูปแบบเป็นกระดาษซัฟต์สำหรับการชุบเรซิน เนื่องจากกระดาษไมก้าที่ไม่ผ่านการปรับปรุงปริมาณมากถึง 50% ประกอบด้วยช่องว่างเล็ก ๆ กระดาษที่มีการแยกส่วนด้วยกลไกนั้นค่อนข้างง่ายกว่าในการชุบระหว่าง VPI แม้ว่าทั้งสองรูปแบบจะใช้แทนกันได้ ในกระบวนการนี้ เป็นไปได้ที่จะผสมทั้งสองแบบเพื่อทำเป็นกระดาษสำหรับการใช้งาน

พิเศษแม้ว่าจะไม่ได้ทำบ่อยนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3) Mica Backing Materials ไม่ก้าถูกใช้เป็นเทป (โดยทั่วไปกว้าง 2-3 ซม.) โดยดึงเทปให้แน่นขณะพันด้วยมือหรือด้วยเครื่องจักรรอบๆ ตัวนำทองแดง ซึ่ง Mica splittings และ Mica paper มีความต้านทานแรงดึงไม่เพียงพอในกระบวนการพันเทปดังกล่าว ดังนั้น ไมก้าที่มีไว้สำหรับฉนวนกราวด์จึงต้องเชื่อมติดกับวัสดุรองรับเพื่อให้ทนต่อแรงดึงได้ สำหรับ Mica splittings การต่อวัสดุรองรับมักเป็นผ้าฝ้ายทอหรือแม้แต่กระดาษทิชชู Mica splittings ถูกยึดเข้ากับเทปผ้าฝ้ายด้วยวานิช เมื่อ Mica paper ได้รับการพัฒนา วัสดุรองรับส่วนใหญ่มักเป็น Dacron™ และไฟเบอร์กลาสแบบทอหรือแก้ว Mica paper ซึ่งถูกยึดติดกับวัสดุรองรับด้วยอีพ็อกซีหรือโพลีเอสเตอร์เล็กน้อย วัสดุเหล่านี้จะช่วยเพิ่มความต้านทานแรงดึงและสามารถยึดติดกับโพลีเอสเตอร์หรือเรซินอีพ็อกซีที่นำมาชุบได้ดี Dacron และแก้ว หรือ Mica paper ที่ทำจากแก้วยังคงใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในขดลวดสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่ที่พิกัดสูงกว่า 14 kV

2.4 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเสื่อมสภาพของฉนวน

2.4.1 ความร้อน

อุณหภูมิขณะที่เครื่องจักรทำงานนั้นทำให้เกิดความเครียดเนื่องจากอุณหภูมิ (Thermal stress) ซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นนี้เป็นผลมาจาก I^2R กระแสไหลวน (eddy current) และความสูญเสียแฝงของตัวนำทองแดงและความร้อนเนื่องจากความสูญเสียในแกนเหล็ก แรงเสียดทานจากแรงลม (Windage) อุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมี (ปฏิกิริยาออกซิเดชันในเครื่องจักรกลที่ระบายความร้อนด้วยอากาศ) [7,8,18] เมื่อเครื่องจักรกลทำงานที่อุณหภูมิสูงกว่าเกณฑ์ ปฏิกิริยาออกซิเดชันทำให้ฉนวนทุกชนิดเปราะ และ/หรือมีแนวโน้มที่จะเกิดการแยกกันของชั้นเทปกราวด์ ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การแยกตัวของฉนวนในเครื่องจักร [7]

นอกจากนี้ การเปลี่ยนแปลงโหลดของมอเตอร์ทำให้อุณหภูมิของขดลวดเปลี่ยนไป ถ้าอุณหภูมิของขดลวดเปลี่ยนจากอุณหภูมิห้องไปที่อุณหภูมิขณะเดินเครื่องอย่างรวดเร็ว ตัวนำทองแดงเอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อคุณได้เห็นเว็บไซต์นี้ กรุณาอย่าคิดว่านี่คือเอกสารที่ถูกต้องและไม่ว่ากรณิดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะมีการขยายตัว ในทางกลับกัน ฉนวนที่ใช้งานในปัจจุบันจะมีสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวเนื่องจากความร้อนต่ำกว่าทองแดง และมีการเย็นตัวลงทันทีภายหลังจากที่ทำการลดโหลด ผลที่เกิดขึ้นจะเกิดความเค้นเฉือน (Shear stress) ระหว่างตัวนำทองแดงและฉนวน เนื่องจากทองแดงจะมีการขยายตัวได้ไวกว่าฉนวนกราวด์วอลล์ ในขดลวดสเตเตอร์หลังจากที่ได้รับความร้อน จะทำให้พันธะระหว่างทองแดงและฉนวนขาดจากกัน อย่างไรก็ตาม เมื่อความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างตัวนำและฉนวนมีมากขึ้นจำนวนรอบที่จะนำไปสู่การล้มเหลว (Cycles to failure) จะลดลง

ในทางกลับกัน การที่ขดลวดมีอุณหภูมิสูงขึ้นก็อาจจะเป็นประโยชน์ได้ เนื่องจากการมีอุณหภูมิที่สูงจะมีแนวโน้มที่จะป้องกันความชื้นในขดลวดและลดความเสี่ยงในการเกิดความล้มเหลวจากแตร็คกิ้ง (Tracking failure) ได้ นอกจากนี้ ถ้าฉนวนที่กั้นระหว่างตัวนำและกราวด์ของขดลวดหรือบาร์ที่สเตเตอร์มีรอยแยกจากการผลิตที่ไม่ดี การที่มีอุณหภูมิสูงจะทำให้ฉนวนขยายตัว ทำให้สามารถลดช่องว่างภายในเนื้อฉนวนและลดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนได้

2.4.2 ความเครียดทางไฟฟ้า

ความเครียดทางไฟฟ้าที่ความถี่กำลัง ในมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 50/60 Hz โดยทั่วไปจะส่งผลกระทบต่ออายุการใช้งานเพียงเล็กน้อยสำหรับฉนวนไฟฟ้าในขดลวดสเตเตอร์ที่กัดต่ำกว่า 1000 V ความหนาของฉนวนในขดลวดสเตเตอร์ด้านแรงต่ำรวมถึงขดลวดของโรเตอร์ทั้งหมดถูกพิจารณาผลกระทบทางกลเป็นหลัก นั่นคือ ฉนวนต้องหนาพอที่จะทนต่อแรงจากการพันขดลวด และแรงทางกลที่เกิดขึ้นจากขดลวดในขณะที่ใช้งาน [19]

ในขดลวดสเตเตอร์ 50/60 Hz ทั่วไปที่มีพิกัดสูงกว่า 1000 V ความหนาของฉนวนส่วนใหญ่กำหนดจากความเครียดไฟฟ้า นั่นคือ พิกัดแรงดันไฟฟ้าหารด้วยความหนาของฉนวน ดังสมการที่ 2.1

$$E = \frac{V}{d} \quad (2.1)$$

เมื่อ E คือ ความเครียดทางไฟฟ้า V คือ พิกัดแรงดัน และ d คือ ความหนาของฉนวนแรงดันที่ความถี่กำลังสามารถทำให้เกิดความเสียหายกับฉนวนได้หากเกิดการดิสชาร์จบางส่วนขึ้น (Partial discharge) การเกิดดิสชาร์จบางส่วนนั้นทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของประจุและไอออนในฉนวนแข็ง ซึ่งทำให้พันธะของฉนวน เช่น พันธะของคาร์บอนและไฮโดรเจนขาดได้ นอกจากนี้ การดิสชาร์จบางส่วนจะทำให้เกิดโพรงที่มีขนาดใหญ่ขึ้นและนำไปสู่ความล้มเหลวได้ [7]

อีกวิธีหนึ่งที่ทำให้ความเครียดทางไฟฟ้าสามารถทำให้ฉนวนมีอายุสั้นลงได้คือ เมื่อแรงดันไฟฟ้ากระชากซ้ำๆ (Repetitive voltage surge) หลายครั้งที่ฉนวนสเตเตอร์แบบการพันแบบสุมหรือโรเตอร์ของเครื่องจักรกลเชิงโรตารี การใช้งาน Inverter-fed drives (IFDs) ซึ่งเป็นแหล่งจ่ายแรงดันพัลส์วidthมอดูเลชัน (Pulse Width Modulation: PWM) สามารถทำให้เกิดแรงดันกระชากหลายพันครั้ง แรงดักกระชากเหล่านี้สามารถทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าที่ค่อนข้างสูงที่บริเวณต้นขดลวดสเต

เตอร์หรือขดลวดโรเตอร์ของกังหันลม เครื่องจักรกลที่มีการจัดขดลวดแบบสุมซึ่งมีฉนวนที่บางและมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โพรงอากาศมากและเครื่องจักรกลที่มีพิคัดแรงดันต่ำกว่า 440 V สามารถตรวจจับการดิสชาร์จบางส่วนได้ขณะที่มีการใช้งาน IFD ถึงแม้จะไม่มีดิสชาร์จบางส่วนเกิดขึ้นแต่ถ้ามีความเครียดสูงเพียงพอจะทำให้เกิดประจุค้างขึ้นได้ กระบวนการนี้รวมไปถึงการปลดปล่อยอิเล็กตรอนบริเวณผิวที่ไม่สมบูรณ์บนทองแดงไปสู่แผ่นฉนวน การเกิดไฟกระชากซ้ำๆ ทำให้พันธะเคมีของแผ่นฉนวนขาด เมื่อถึงสภาวะหนึ่งอาจเกิดการทะลุได้ ในทางเดียวกัน ขดลวดโรเตอร์ในเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสซึ่งได้รับแรงดันกระแสตรงที่มาจากระบบการกระตุ้นคงที่ (Static excitation system) โดยการใช้ไทรสเตอร์หรือสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ นั้นจะมีอายุการใช้งานที่สั้นลงเนื่องจากการเกิดไฟกระชากเช่นเดียวกัน ซึ่งรูปที่ 2.10 แสดงตัวอย่างความเสียหายที่เกิดจากความเครียดทางไฟฟ้า



รูปที่ 2.10 ความเสียหายของฉนวนของขดลวดสเตเตอร์เนื่องจากการเกิดฟลลด์

2.4.3 ความเครียดทางกล

ความเครียดทางกลนั้นมีสามแหล่งกำเนิดหลักๆ ระบบฉนวนบนโรเตอร์ที่สัมผัสกับแรงเหวี่ยงสูง แรงที่สั้นซึ่งมีแนวโน้มที่จะทำให้ฉนวนแตกหรือบิดเบี้ยว ส่วนใหญ่ฉนวนจะมีหรือไม่มีความสามารถในการทนต่อแรงดังกล่าว นอกจากนี้ยังมีการทำให้อายุการใช้งานลดลงร่วมด้วย ถึงแม้ว่าวัสดุบางชนิดจะมีการ “ไหลเย็น” (Cold-flow) หรือ “การคืบตัว” (Creep) กล่าวคือ ค่อยๆ ขยายออกไปจากบริเวณที่มีความเครียดสูงและจะนำไปสู่การเกิดฟลลด์ในที่สุด

ความเครียดทางกลแบบที่สองเกิดจากกระแสความถี่กำลังที่เพิ่มการแกว่งของแรงแม่เหล็กให้มีความถี่เป็นสองเท่าของความถี่กำลัง เมื่อขดลวดในร่องสลอตที่สเตเตอร์เกิดการหลวม (loose) จะทำให้ขดลวดมีการสั่นและฉนวนที่กั้นระหว่างตัวนำและกราวด์จะถลอก แรงแม่เหล็กที่คล้ายๆ กันนี้ได้เกิดขึ้นที่ปลายขดลวดเช่นกัน ถ้าขดลวดหรือบาร์เกิดการสั่นจนไปกระทบส่วนประกอบอื่นๆ ก็จะทำให้ส่วนประกอบนั้นถลอกหรือแตกหักได้เช่นกัน แสดงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 รอยแตกเนื่องจากความเครียดทางกลที่บริเวณ endwinding

ความแตกต่างของความเครียดทางกลกับความเครียดทางไฟฟ้าและความร้อนคือ ความเครียดทางกลจะไม่มีสมการที่อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างแรงสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นและอายุการใช้งานของเครื่องจักร แม้ว่าจะมีสมการที่อธิบายจำนวนรอยขีดข่วนที่อาจจะเกิดขึ้น แต่ก็ไม่สามารถทำได้ในทางปฏิบัติ และไม่มีสมการใดที่จะเป็นพื้นฐานสำหรับมาตรฐานในการทดสอบอัตราการเสื่อมสภาพ (Aging) ภายใต้การสั่นสะเทือนได้ [19]

ความเครียดทางกลที่สำคัญอย่างที่สามารถมาจากสภาวะทรานเซียนต์ (Transient) การสวิตช์เปิดมอเตอร์หรือการชิ่งโครโนซ์ที่เฟสตรงข้ามกันของเครื่องจักรกลชิ่งโครโนซ์ ทั้งสองเหตุการณ์นี้ทำให้เกิดกระแสทรานเซียนต์ที่ความถี่กำลังมีค่ามากขึ้นถึง 5 เท่าหรือมากกว่ากระแสปกติในสเตเตอร์ ส่งผลให้เกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดแรงทางกลที่มากกว่าปกติถึง 25 เท่าหรือมากกว่า องค์ประกอบที่เป็นไฟฟ้ากระแสตรงของแรงดังกล่าวมีแนวโน้มทำให้ขดลวดหรือบาร์ที่สเตเตอร์เกิดการหักงอ หากฉนวนไม่สามารถทนต่อแรงดังกล่าวได้ก็จะเกิดการแตกหัก และหากมีสภาวะทรานเซียนต์เกิดขึ้นหลายครั้ง ส่วนประกอบที่ปลายขดลวด (End winding) ก็จะมีการคลายตัวออกและทำให้เกิดการถลอกจากการทำงานภายใต้แรงสั่นสะเทือน

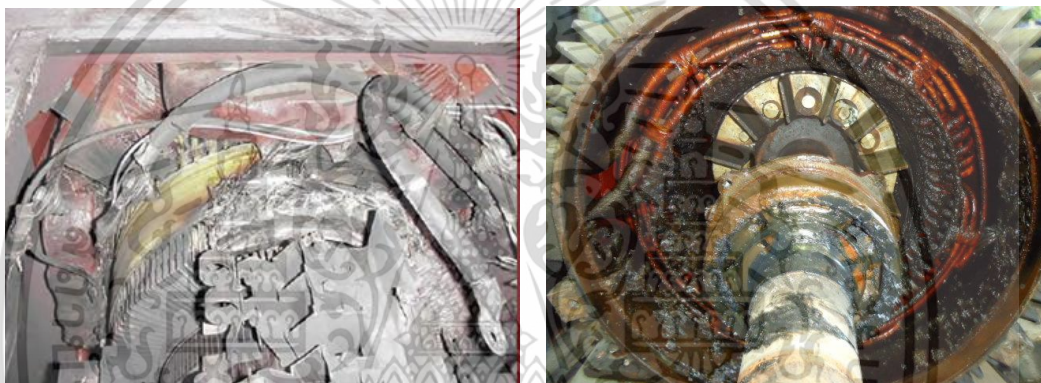
2.4.4 ผลกระทบจากสิ่งแวดล้อม

ปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลทำให้เกิดความเสียหายแก่มอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า [7] เช่น

- ความชื้นที่ควบแน่นอยู่บนขดลวด
- น้ำมันจากเบรคหรือระบบกันน้ำในเครื่องจักรที่มีการระบายความร้อนด้วยไฮโดรเจน
- ความชื้นสูง
- สารเคมีที่เป็นอันตราย
- การปนเปื้อนของวัสดุขุดดินในอากาศหรือไฮโดรเจน
- ฝุ่นผงจากคั่นขาเบรคหรือแปรงถ่านในเครื่องจักร
- สิ่งสกปรกและเศษซากต่างๆ จากสิ่งแวดล้อมภายนอก เช่น แมลง ฝ้า ลอย ฝุ่นจากถ่านหิน และแป้งที่มาจากอุตสาหกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัจจัยแต่ละอย่างนั้นจะส่งผลกระทบต่อโรเตอร์และสเตเตอร์แตกต่างกัน ในบางครั้งปัจจัยเหล่านี้เมื่อเกิดขึ้นร่วมกับความเครียดอื่นๆ จะทำให้เกิดการเสื่อมสภาพ (Aging) ได้เช่น ความชื้นและ/หรือน้ำมันรวมกับสิ่งสกปรกอื่นๆ ดังรูปที่ 2.12 ทำให้เกิดแผ่นฟิล์มบางๆ ที่ฉนวนและสามารถนำไฟฟ้าได้ และเมื่ออยู่ภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้าจะทำให้เกิดกระแสไหลผ่านและทำให้เกิดรอยไหม้ขึ้นได้ การรวมกันของน้ำมัน ความชื้น และสิ่งสกปรกในช่องทางการระบายอากาศของโรเตอร์กับสเตเตอร์ และที่ระหว่างขดลวดและปลายขดทำให้เกิดความเสี่ยงที่จะเกิดความเสียหายจากความร้อน น้ำมันหล่อลื่นทำให้ระหว่างขดลวดและสล็อตในโรเตอร์และสเตเตอร์เกิดการขยับนำไปสู่การเกิดการถลอก เมื่อความชื้นของอากาศและไฮโดรเจนในระบบระบายอากาศต่ำทำให้ค่าแรงดันเบรกดาวน (Breakdown voltage) ของแก๊สต่ำนำไปสู่การเกิดดิสชาร์จบางส่วน นอกจากนี้ สารเคมี เช่น กรด และไอโซนสามารถทำลายฉนวนและลดความแข็งแรงทางกลได้ [20]



(ก) คอมมิวเตเตอร์ที่เกิดวาบไฟตามฉนวน (ข) สิ่งสกปรกบนฉนวนสเตเตอร์ของมอเตอร์

รูปที่ 2.12 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อโรเตอร์และสเตเตอร์เนื่องจากสิ่งสกปรก

2.5 วัสดุไดอิเล็กทริก

วัสดุไดอิเล็กทริกเป็นฉนวนไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่สามารถถูกเหนี่ยวนำให้มีขั้วไฟฟ้าได้เมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า ค่าที่บ่งบอกความสามารถในการมีขั้วของวัสดุคือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) เมื่อไดอิเล็กทริกถูกวางอยู่ในสนามไฟฟ้า (E) ประจุ (q) ของมันจะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดการขยับเพียงเล็กน้อยจากตำแหน่งสมดุลเฉลี่ยเดิมด้วยระยะห่างเล็กๆ (d) ก่อให้เกิดความเป็นขั้วไดอิเล็กทริกด้วยขนาดของไดโพลโมเมนต์ (p) แสดงดังสมการที่ 2.2 ปฏิกิริยานี้จะสร้างสนามไฟฟ้าภายในที่ช่วยลดสนามโดยรวมภายในตัวไดอิเล็กทริกมันเอง ถ้าไดอิเล็กทริกหนึ่งประกอบด้วยโมเลกุลที่มีแรงยึดเหนี่ยวอยู่ด้วยกันที่อ่อน โมเลกุลเหล่านั้นไม่เพียงแต่จะกลายเป็นขั้วเท่านั้น แต่จะยังเรียงตัวเพื่อให้แกนสมมาตรของมันอยู่ในแนวเดียวกันกับสนามไฟฟ้า [8,21]

$$\bar{p} = q\bar{d} \quad (2.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งสามารถเขียนไดโพลโมเมนต์ให้อยู่ในรูปของความสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าได้ในสมการที่ 2.3 โดยขึ้นอยู่กับความสามารถในการโพลาริซของวัสดุ (α)

$$\bar{p} = \alpha \bar{E} \quad (2.3)$$

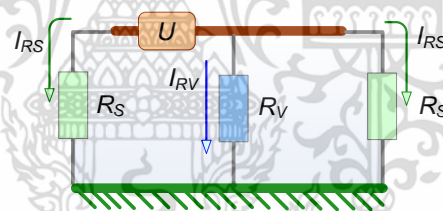
2.5.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของไดอิเล็กทริก

คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่สำคัญที่เป็นตัวบ่งบอกคุณสมบัติและคุณภาพของฉนวน มีดังนี้

1) ความต้านทาน (Resistivity)

ความต้านทาน (R_m) คือ คุณสมบัติของวัสดุที่ต้านการไหลของกระแสไฟฟ้า ฉนวนไฟฟ้าที่สมบูรณ์จะต้องไม่นำกระแสเลยเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง นั่นคือ ไม่มีค่าสภาพนำไฟฟ้า (conductivity) อยู่เลย หรือมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเป็นอนันต์ แต่ในทางปฏิบัติเมื่อนำฉนวนไปคั่นระหว่างอิเล็กโทรดที่ป้อนแรงดันไฟฟ้าจะมีกระแสไหลผ่านฉนวนอยู่ค่าๆ หนึ่งเสมอ กระแสรั่วไหลผ่านฉนวนในกรณีของฉนวนแข็งนั้นสามารถแบ่งกระแสรั่วไหลเป็นกระแสที่ไหลผ่านเนื้อฉนวน (I_{RV}) และกระแสที่ไหลผ่านผิวฉนวน (I_{RS}) เมื่อ R_v เป็นความต้านทานในเนื้อฉนวนและ R_s เป็นความต้านทานที่ผิวฉนวน [22,23] ดังรูปที่ 2.13

$$R_m = R_v + R_s \quad (2.4)$$



รูปที่ 2.13 ความต้านทานและทิศทางการไหลของกระแส

2) เพอร์มิตติวิตี (Permittivity)

เพอร์มิตติวิตี (Permittivity, ϵ) เป็นปริมาณที่บอกถึงพลังงานที่สามารถสะสมในวัสดุไดอิเล็กทริกได้และความสูญเสียภายในของไดอิเล็กทริก ค่าเพอร์มิตติวิตีของวัสดุประกอบด้วยค่าเพอร์มิตติวิตีของสุญญากาศ ($\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ F/m) และค่าเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ของวัสดุ (ϵ_r) แสดงดังรูปที่ 2.14 ค่าเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์เป็นค่าที่บอกให้ทราบว่าฉนวนดังกล่าวจะมีค่าความจุไฟฟ้าอยู่เป็นกี่เท่าค่าความจุไฟฟ้าของฉนวนสุญญากาศภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน [8,9] ค่าเพอร์มิตติวิตีของวัสดุแต่ละชนิดคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

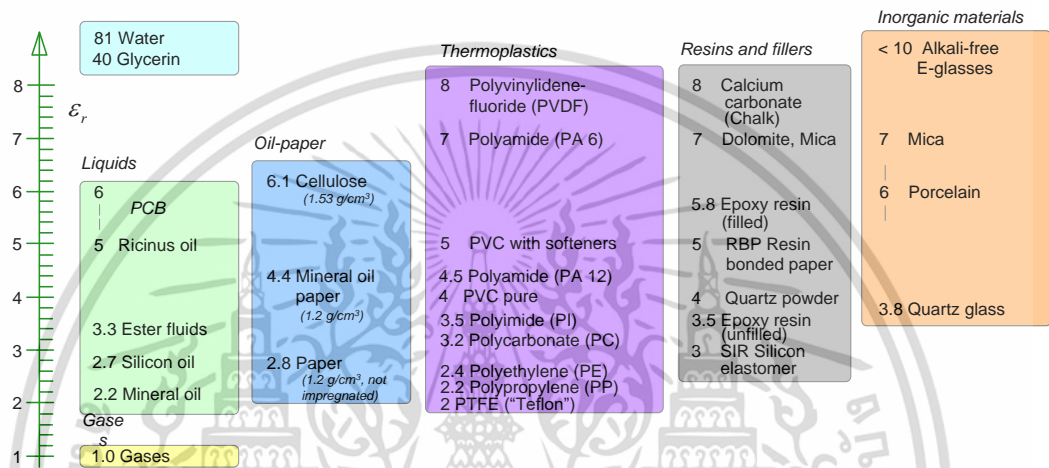
$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r \quad (2.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าเปอร์มิตติวิตีเชิงซ้อนของวัสดุ ประกอบด้วยค่าเปอร์มิตติวิตีส่วนจริง (ϵ') จะบ่งบอกถึงค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ค่าเปอร์มิตติวิตีส่วนจินตภาพ (ϵ'') จะบ่งบอกถึงค่าความสูญเสียของไดอิเล็กทริก และสภาพความนำไฟฟ้า (Conductivity, σ)

$$\epsilon(\omega, T) = \epsilon'(\omega, T) + j\epsilon''(\omega, T) \tag{2.6}$$

เมื่อ T คือ อุณหภูมิ ($^{\circ}C$)
 ω คือ ความถี่เชิงมุม = $2\pi f$ (rad / s)



รูปที่ 2.14 ค่าเปอร์มิตติวิตีของวัสดุที่ความถี่ 1 MHz ที่อุณหภูมิ 20 °C , ความดันบรรยากาศ 1 bar

3) ตัวประกอบกำลังสูญเสียไดอิเล็กทริก ($\tan \delta$)

วงจรสมมูลของฉนวนสามารถเขียนได้ 2 แบบคือ วงจรขนาน RC หรือวงจรอนุกรม RC โดยที่ R แทนความสูญเสียที่เกิดขึ้นในเนื้อฉนวน และ C แทนคุณสมบัติฉนวนที่เก็บพลังงานไว้ในรูปสนามไฟฟ้า แสดงไว้ในวงจรสมมูลดังรูปที่ 2.15 [24]



รูปที่ 2.15 วงจรสมมูลของฉนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

$$R_p = \frac{I + (\omega C_s R_s)^2}{R_s (\omega C_s)^2} \quad (2.7)$$

$$C_p = \frac{C_s}{1 + (\omega C_s R_s)^2} \quad (2.8)$$

$$\tau = R_p C_p = \frac{I}{\omega^2 C_s R_s} \quad (2.9)$$

เช่นเดียวกับ

$$R_s = \frac{R_p}{1 + (\omega C_p R_p)^2} \quad (2.10)$$

$$C_s = \frac{1 + (\omega C_p R_p)^2}{\omega^2 C_p R_p^2} \quad (2.11)$$

$$\tau = R_s C_s = \frac{I}{\omega^2 C_p R_p} \quad (2.12)$$

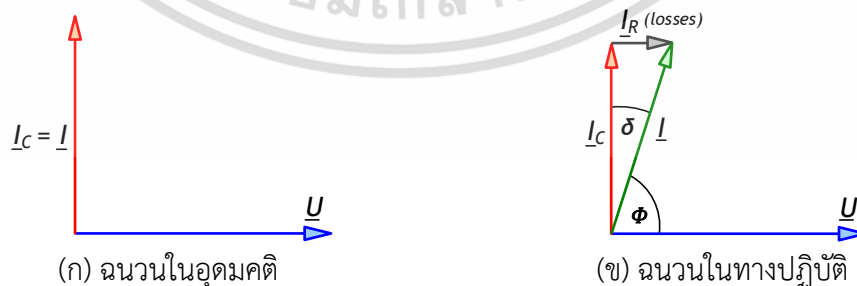
เมื่อป้อนแรงดันรูปไซน์ให้กับฉนวน

$$U = U_m \sin(\omega t) \quad (2.13)$$

จะได้กระแส

$$I = I_m \sin(\omega t + \Phi) \quad (2.14)$$

ฉนวนในทางวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงจะมีลักษณะเป็นตัวเก็บประจุที่เก็บพลังงานไว้ได้ในรูปสนามไฟฟ้า แต่ในทางปฏิบัติฉนวนจะไม่ได้เป็นตัวเก็บประจุที่บริสุทธิ์ ดังนั้น กระแสที่ไหลผ่านฉนวน (I) ไม่ได้มีกระแสตัวเก็บประจุ (I_C) เพียงอย่างเดียว ดังรูปที่ 2.16(ก) กำลังสูญเสียภายในเนื้อฉนวนที่เกิดขึ้นสามารถเขียนแทนด้วยความต้านทานในวงจรสมมูล จึงมีกระแสความต้านทาน (I_R) เกิดขึ้นด้วย ส่งผลให้กระแสที่ไหลผ่านฉนวนนำหน้าน้อยกว่า 90 องศาเท่ากับ δ หรือเรียกว่ามุมตัวประกอบกำลังสูญเสีย ดังรูปที่ 2.16(ข)



รูปที่ 2.16 เฟสเซอร์ไดอะแกรมแรงดันและกระแส

กำหนดให้ δ เป็นมุมระหว่าง I กับ I_C ซึ่งโดยปกติแล้วมุม δ เป็นมุมที่มีค่าน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำลังสูญเสียคือ $P_d = UI \cos(\Phi)$ (2.15)

$= UI \sin(\Phi)$ (2.16)

เพราะว่า $\sin \delta = \tan \delta$ เมื่อ δ มีค่าน้อย ๆ

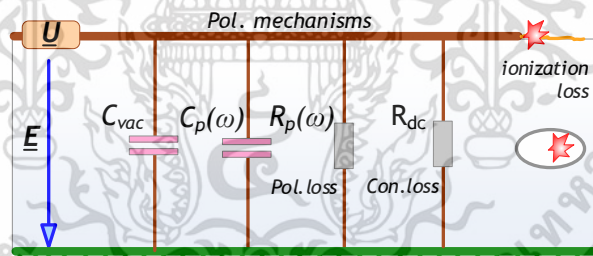
ดังนั้น $P_d = UI \tan(\Phi)$ (2.17)

เมื่อพิจารณาตามวงจรสมมูล

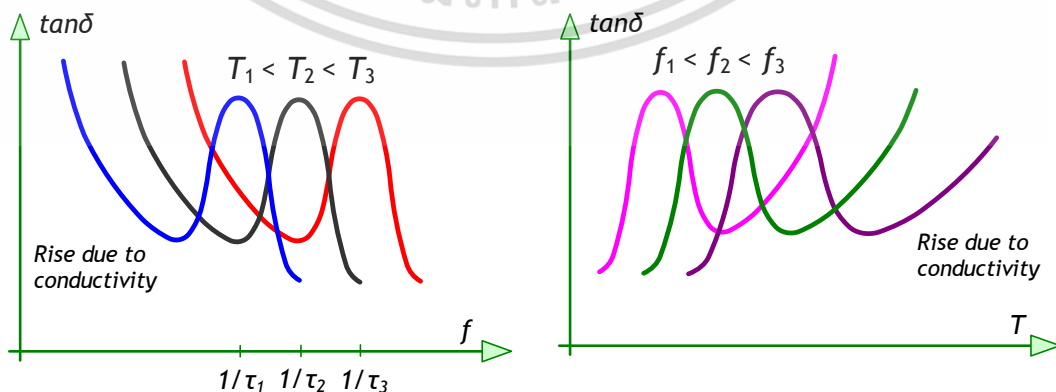
วงจรขนาน $\tan \delta = \frac{I}{\omega C_p R_p}$ (2.18)

วงจรรอนุกรม $\tan \delta = \omega C_s R_s$ (2.20)

การใช้งานอุปกรณ์ฉนวนในระบบไฟฟ้ากำลังควรมีการบำรุงรักษาอย่างสม่ำเสมอ เพื่อให้มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน ค่าตัวประกอบกำลังสูญเสียไดอิเล็กทริกเป็นพารามิเตอร์ตัวหนึ่งที่ใช้ชี้วัดอายุการใช้งานฉนวน ซึ่งค่ากำลังสูญเสียไดอิเล็กทริกของฉนวนจะแปรตามแรงดันที่ใช้งานและสภาพแวดล้อม เช่น ความชื้น อุณหภูมิ ความดันบรรยากาศ คุณสมบัติของเนื้อฉนวน และอื่นๆ ในทางปฏิบัติสามารถจำแนกประเภทของตัวประกอบกำลังสูญเสียไดอิเล็กทริกได้ 3 รูปแบบคือ ความสูญเสียเนื่องจากสภาพความนำไฟฟ้า ความสูญเสียเนื่องจากปรากฏการณ์โพลาไรเซชัน และความสูญเสียเนื่องจากไอออนในเซชันหรือดิซชาร์จบางส่วนภายในเนื้อฉนวน [8,9] แสดงดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 วงจรสมมูลของฉนวนที่แทนกำลังสูญเสียไดอิเล็กทริก 3 รูปแบบ



(ก) ตัวประกอบกำลังสูญเสียที่ขึ้นกับอุณหภูมิ

(ข) ตัวประกอบกำลังสูญเสียที่ขึ้นกับความถี่

รูปที่ 2.18 คุณลักษณะของตัวประกอบกำลังสูญเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้ท่านไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ความสูญเสียเนื่องจากสภาพความนำไฟฟ้า ($\tan \delta_{Con}$)

เมื่อฉนวนอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้ามีผลทำให้เกิดความนำขึ้นมา เพราะประจุบางส่วนเกิดการเคลื่อนที่ เกิดเป็นกระแสรั่วไหลผ่านฉนวน [25,26] ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\tan \delta_{Con}(\omega) = \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0 \epsilon'_r} \tag{2.22}$$

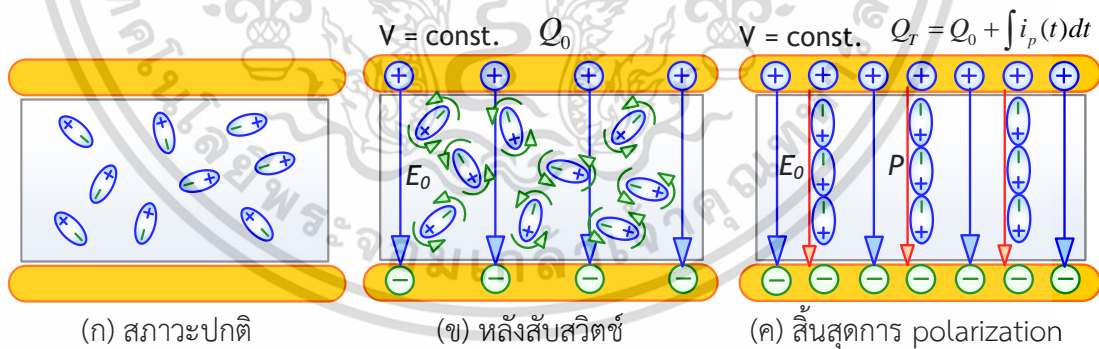
เมื่อ σ คือ สภาพการนำไฟฟ้าของวัสดุ (S/m)

ω คือ ความถี่เชิงมุม = $2\pi f$ (rad/s)

2. ความสูญเสียเนื่องจากปรากฏการณ์โพลาไรเซชัน ($\tan \delta_{Pol}$)

ฉนวนในสภาวะปกติโมเลกุลจะเรียงตัวกันอย่างอิสระ เมื่อฉนวนนั้นอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า ประจุบวกและลบของโมเลกุลจะแยกออกจากกันเนื่องจากแรงที่เกิดขึ้นจากสนามไฟฟ้า ทำให้โมเลกุลทำตัวเหมือนไดโพลที่มีขนาดประจุเท่ากันแต่อยู่ในลักษณะที่มีขั้วตรงข้ามกันพร้อมกับเรียงตัวในแนวสนามไฟฟ้า เมื่อฉนวนได้รับสนามไฟฟ้ากระแสสลับ ไดโพลจะเรียงตัวในแนวสนามไฟฟ้าสลับไปตามแนวสนามไฟฟ้าที่สลับไปมาตลอดเวลา แสดงดังรูปที่ 2.19 การสลับไดโพลไปมาตลอดเวลาเป็นสาเหตุให้เกิดความสูญเสียในรูปของความร้อน [25,26] ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

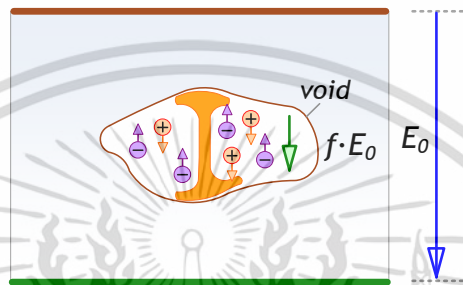
$$\tan \delta_{Pol}(\omega) = \frac{\epsilon''_r}{\epsilon'_r} \tag{2.23}$$



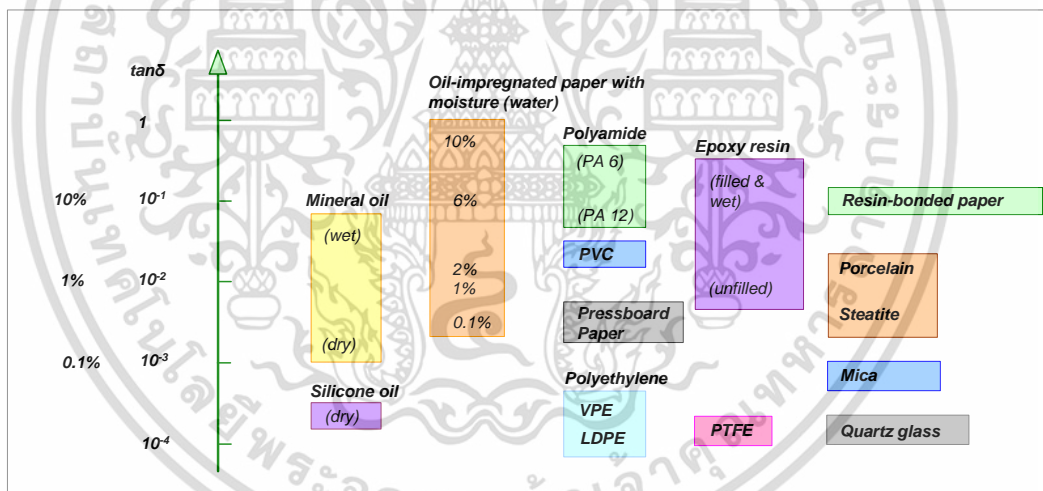
รูปที่ 2.19 การเรียงตัวของโมเลกุลในเนื้อฉนวนในสภาวะปกติและได้รับสนามไฟฟ้า

3. ความสูญเสียเนื่องจากไอออนในเซชันหรือดิสชาร์จบางส่วนภายในเนื้อฉนวน

การเกิดดิสชาร์จบางส่วนเกิดในบริเวณที่ฉนวนมีการปนเปื้อนวัสดุอื่นหรือมีโพรงอากาศ วัสดุหรือโพรงอากาศเหล่านั้นมีค่าความจุไฟฟ้าและค่าความคงทนต่อสนามไฟฟ้าต่ำกว่าเนื้อฉนวน [27,28] เมื่อฉนวนได้รับแรงดันไฟฟ้าที่เกิดค่าความคงทนต่อสนามไฟฟ้าจะเกิดการเบรกดาวน์ในบริเวณที่มีวัสดุปนเปื้อนและกลายเป็นโพรงอากาศเพิ่มขึ้น เกิดกระแสดิสชาร์จในโพรงอากาศนั้น เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนชนกับเนื้อฉนวน ดังรูปที่ 2.20 ทำให้เกิดความร้อนและปฏิกิริยาเคมี ส่งผลให้อายุการใช้งานของฉนวนสั้นลง



รูปที่ 2.20 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในโพรงอากาศ



รูปที่ 2.21 ตัวประกอบกำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของวัสดุฉนวนต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 ปรากฏการณ์โพลาริเซชัน

การเคลื่อนที่ของประจุในอะตอมหรือโมเลกุลในวัสดุไดอิเล็กทริกทำให้เกิดปรากฏการณ์โพลาริเซชันขึ้นในเนื้อฉนวน ดังรูปที่ 2.22 - 2.23 ซึ่งกลไกการเกิดปรากฏการณ์โพลาริเซชันนั้นขึ้นอยู่กับขนาดสนามไฟฟ้า สภาพความนำไฟฟ้าของวัสดุ และอุณหภูมิ โดยมีกลไกพื้นฐานอยู่ 5 กลไก [21,25,29] ดังนี้

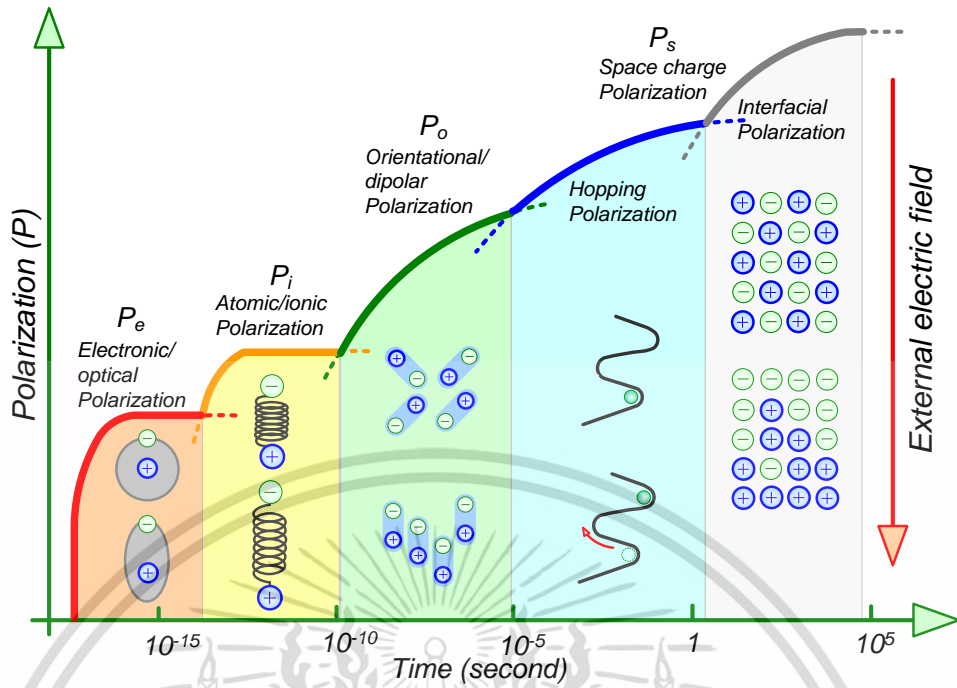
1. Electronic polarization หรือ Optical polarization เป็นกลไกการโพลาริเซชันที่เกิดจากการเปลี่ยนรูปร่างของกลุ่มอิเล็กตรอนของอะตอมหรือโมเลกุลจากสมมาตรเนื่องจากสนามไฟฟ้า ทำให้เปลือกอิเล็กตรอนหรือวงโคจรของอิเล็กตรอนที่หมุนวนอยู่รอบนิวเคลียสของอะตอมเคลื่อนที่ด้วยระยะการกระจัดที่สัมพันธ์กับนิวเคลียสของอะตอมโดยเปลือกอิเล็กตรอนจะยึดออกตามแนวของสนามไฟฟ้า

2. Atomic polarization หรือ Ionic polarization เป็นกลไกการโพลาริเซชันที่เกิดกับวัสดุของแข็งที่เป็นสารประกอบไอออนิกภายใต้สนามไฟฟ้า เดิมทีโมเลกุลที่มีพันธะไอออนิก การไดโพลของอะตอมที่มีไอออนบวกและไอออนลบจะมีทิศทางที่แน่นอนไม่สามารถหมุนได้ ไดโพลโมเมนต์ลัพธ์จะหักล้างกันเท่ากับศูนย์ แต่เมื่อโมเลกุลที่มีพันธะไอออนิกดังกล่าวอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าอะตอมที่มีไอออนบวกจะเคลื่อนที่ตามทิศทางของสนามไฟฟ้าและอะตอมที่มีไอออนลบจะเคลื่อนที่ตรงข้ามทิศทางของสนามไฟฟ้าเกิดระยะการกระจัดระหว่างไอออนขึ้น เกิดไดโพลโมเมนต์ขึ้น

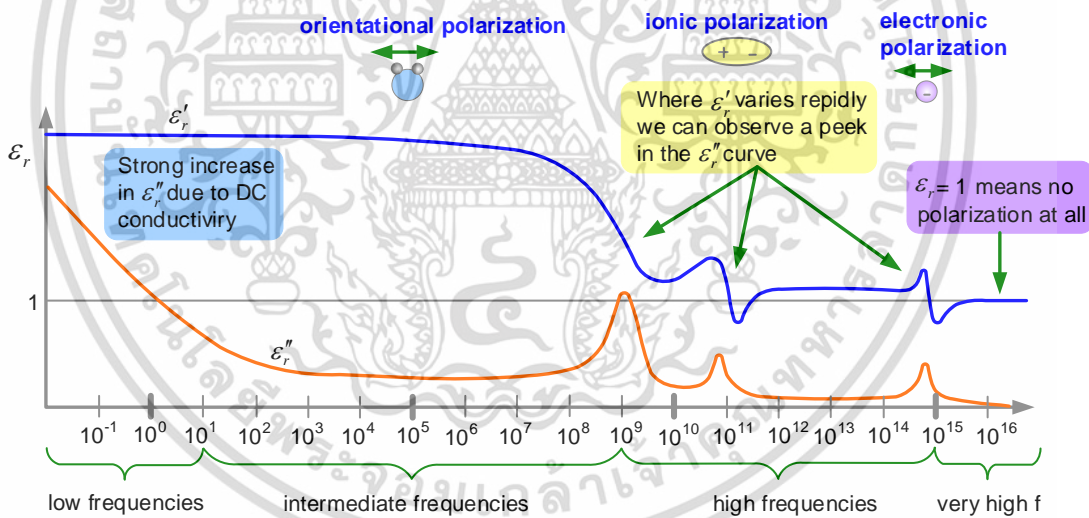
3. Orientation polarization เป็นกลไกการโพลาริเซชันที่เกิดจากขึ้นในโมเลกุลที่มีขั้ว (โดยปกติจะเป็นของเหลวหรือก๊าซ) เช่น โมเลกุลของน้ำ ไดโพลของมันจะมีการเคลื่อนที่และหมุนอย่างอิสระซึ่งจะแตกต่างกับ Ionic polarization แต่เมื่อโมเลกุลที่มีขั้วอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า ทิศทางของแต่ละไดโพลจะเคลื่อนที่หมุนเล็กน้อยโดยที่ทิศทางผลลัพธ์อยู่ในแนวทิศทางของสนามไฟฟ้า

4. Hopping polarization เกิดขึ้นที่ตำแหน่งที่อยู่ของประจุ (ไอออนและตำแหน่งว่างสำหรับวัสดุที่มีโครงสร้างเป็นไอออนิกคริสตัล หรืออิเล็กตรอนและโฮลสำหรับในแก้วและ amorphous semiconductor) โดยเกิดจากการที่ประจุมีการกระโดดจากตำแหน่งที่อยู่ไปตำแหน่งข้างเคียง ในบางครั้งอาจถูกมองว่าเป็น Orientation polarization แต่มีข้อแตกต่างกันตรงที่ Orientation polarization moment เป็นกลไกของไดโพลโมเมนต์เชิงขั้วถาวรซึ่งเป็นโมเมนต์ที่เกิดจากการกระโดดของประจุภายในอนุภาค ขณะที่ไดโพลของ Hopping polarization เกิดจากอนุภาคของประจุที่แยกออกจากกันมีการกระโดดจากศักร์หนึ่งไปอีกศักร์หนึ่ง

5. Interfacial polarization เกิดขึ้นที่ผิวของวัสดุ ขอบเขตเกรน รอยต่อระหว่างเฟสของวัสดุที่ค่าความนำที่ไม่เท่ากันและค่าเปอร์มิตติวิตีแตกต่างกัน (รวมถึงพื้นผิวของตะกอน) เมื่อฉนวนอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า ประจุในฉนวนจะกระจายตามทิศทางของสนามไฟฟ้า อนุภาคประจุบวกและอนุภาคประจุลบที่สามารถเคลื่อนที่ได้จะเคลื่อนที่แยกออกจากกันและมาสะสมกันตรงรอยต่อของฉนวนที่มีค่าเปอร์มิตติวิตีต่างกัน



รูปที่ 2.22 กลไกพื้นฐานของการเกิดปรากฏการณ์โพลาไรเซชัน [21]



รูปที่ 2.23 ความสัมพันธ์ของค่าเปอร์มิตติวิตีเชิงซ้อนและกลไกการเกิดปรากฏการณ์โพลาไรเซชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.3 ผลตอบสนองไดอิเล็กทริกในโดเมนเวลา

เมื่อเขียนค่าความอ่อนไหวทางไฟฟ้าของตัวกลางวัสดุไดอิเล็กทริกหนึ่ง (Dielectric susceptibility) ให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์กับค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ ϵ_r ของวัสดุไดอิเล็กทริกเดียวกันได้ [30-32] ดังรูป 2.24

$$\chi = \epsilon_r - 1 \quad (2.24)$$

เมื่อพิจารณาไดอิเล็กทริกที่เป็นฉนวนไอโซทรอปิกที่อยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าค่า electric displacement density \bar{D} จะเกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ของการเป็นขั้วของไดอิเล็กทริก \bar{P} โดย

$$\bar{D} = \epsilon_0 \bar{E} + \bar{P} = \epsilon_0 (1 + \chi) \bar{E} = \epsilon_0 \epsilon_r \bar{E} \quad (2.25)$$

สำหรับวัสดุไอโซทรอปิกสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของการเป็นขั้วของไดอิเล็กทริกที่ถุกเหนี่ยวนำหรือโพลาริเซชัน (\bar{P}) และสนามไฟฟ้า (\bar{E}) ได้ดังต่อไปนี้

$$\bar{P} = \epsilon_0 \chi \bar{E} + \text{higher order terms in } \bar{E} \quad (2.26)$$

โดยที่ ϵ_0 คือค่าเปอร์มิตติวิตีของ free space (มีค่า $= 8.85419 \times 10^{-12}$ As/Vm) และ χ คือค่าความอ่อนไหวทางไฟฟ้า (susceptibility) ของวัสดุไดอิเล็กทริกเป็นตัวชี้วัดความง่ายแก่ไหนที่มันจะเป็นขั้วในการตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าหนึ่ง

จากสมการที่ 2.26 โพลาริเซชันที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา $P(t)$ สามารถคำนวณจากสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา $E(t)$ โดยใช้โมเดลการคำนวณของ Duhamel integral หรือทำการคอนโวลูชันในโดเมนเวลา [33-35] จะได้สมการโพลาริเซชันใหม่ดังสมการนี้

$$P(t) = \epsilon_0 \chi(0) E(t) + \epsilon_0 \int_0^t E(\tau) \frac{d\chi(t-\tau)}{dt} d\tau \quad (2.27)$$

ในสมการ 2.27 จะมีค่าอนุพันธ์ของค่าความสามารถยอมรับได้ของไดอิเล็กทริก $\chi(t)$ ปรากฏขึ้นในสมการ ดังนั้นจะกำหนดฟังก์ชันนี้ด้วย $f(t)$ ซึ่งเป็นฟังก์ชันตอบสนองไดอิเล็กทริกของฉนวน [1,34]

$$f(t) = \frac{d\chi(t)}{dt} \quad (2.28)$$

ดังนั้นสมการโพลาริเซชันสามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการที่ 2.29 ในทางอุดมคติพจน์แรกของสมการต้องเป็นศูนย์ $\chi(0) = 0$ แต่ในการวัดจริงปรากฏการณ์โพลาริเซชันประเภทที่เกิดขึ้นเร็วมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะไม่สามารถกำหนดได้ ด้วยเหตุผลข้อนี้จึงกำหนด delayed time constant เป็น $t = 0'$ เพื่อแทนค่าพจน์ในช่วงความถี่สูง

$$\bar{P}(t) = \varepsilon_0 \chi(0) E(t) + \varepsilon_0 \int_0^t E(\tau) f(t-\tau) d\tau \quad (2.29)$$

ในการวัดโพลาริเซชันไม่สามารถวัดขนาดโดยตรงได้ แต่สามารถหาได้จากกระแสการกระจัด เนื่องจากการโพลาริเซชันจะสร้างกระแสไหลผ่านเนื้อฉนวน ซึ่งเป็นส่วนหลักส่วนหนึ่งในกระแสการกระจัด ดังนั้นจากสมการคณิตศาสตร์ของแมกซ์เวลในปี ค.ศ. 1891 สนามไฟฟ้า $E(t)$ ที่ป้อนให้ฉนวนจะสร้างความหนาแน่นกระแส $J(t)$ ซึ่งเป็นผลรวมของกระแสการนำไฟฟ้าและกระแสการกระจัด (Displacement current) [33]

$$\nabla \times H(t) = J(t) = \sigma_0 E(t) + \frac{dD(t)}{dt} \quad (2.30)$$

เมื่อ σ_0 คือ ความนำของวัสดุ DC conductivity ของวัสดุฉนวน

เมื่อใช้ความสัมพันธ์ระหว่างสมการที่ 2.24 - 2.25. และสมการที่ 2.29 - 2.30 ดังนั้นความหนาแน่นกระแสสามารถเขียนได้ใหม่ดังนี้

$$J(t) = \sigma_0 E(t) + \varepsilon_0 (1 - \chi(0')) \frac{dE(t)}{dt} + \varepsilon_0 f(0') E(t) + \varepsilon_0 \int_{0'}^t \frac{df(t-\tau)}{dt} E(\tau) d\tau \quad (2.31)$$

ถ้าป้อน step voltage ตั้งแต่ $t = 0$ จนเป็นเวลานาน โดยขนาดของสนามไฟฟ้าที่ป้อนให้ฉนวนมีขนาดเท่ากับ E_0 จะสามารถหาความหนาแน่นของกระแสโพลาริเซชัน $J_{pol}(t)$ ได้ดังสมการ

$$J_{pol}(t) = \sigma_0 E_0 + \varepsilon_0 (1 - \chi(0')) E_0 \delta(t) + \varepsilon_0 E_0 f(t) \quad (2.32)$$

โดยที่ $\delta(t)$ คือ ฟังก์ชันเดลต้า (delta function) ที่เกิดขึ้นจากการจ่ายแรงดัน step voltage แบบทันทีทันใดให้กับวัตถุทดสอบที่เวลาเริ่มต้น

เมื่อถึงเวลาที่หยุดจ่ายแรงดันให้กับฉนวนและทำการลัดวงจร ฉนวนจะคายประจุลงสู่กราวด์ โมเลกุลและประจุไฟฟ้าภายในเนื้อฉนวนจะเกิดการจัดเรียงตัวเข้าสู่สภาวะปกติก่อนที่จะมีสนามไฟฟ้ามากระทำ ความหนาแน่นของกระแสโพลาริเซชัน $J_{dep}(t)$ เขียนเป็นสมการได้ดังต่อไปนี้

$$J_{dep}(t) = -\varepsilon_0 E_C [f(t) - f(t+T_C)] \quad (2.33)$$

เมื่อ T_C เป็นระยะเวลาที่ป้อน step voltage

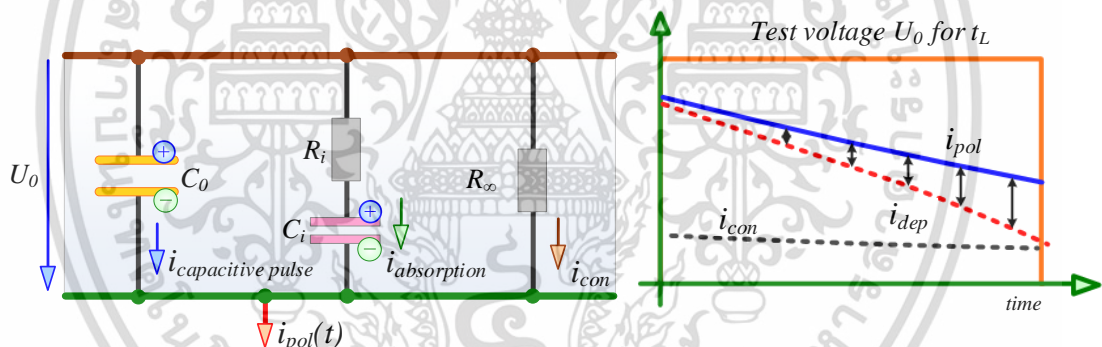
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสโพลาริเซชัน $i_{pol}(t)$ จะประกอบด้วยส่วนที่สำคัญ 3 ส่วน คือ ส่วนของการชาร์จประจุของตัวเก็บประจุสุญญากาศ ในโมเดลแทน C_0 ส่วนที่สองเป็นส่วนที่สื่อถึงกลไกการโพลาริเซชันที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาในโมเดลแทนด้วย $R_i C_i$ ต่ออนุกรมกัน และส่วนที่สามเป็นกระแสคอนดักชันที่มีค่าคงที่ ในโมเดลจะแสดงส่วนนี้ด้วยความต้านทานกระแสตรง R_∞ กระแสโพลาริเซชันสามารถแสดงอยู่ในรูปสมการดังต่อไปนี้ [8]

$$i_{pol}(t) = \sum_i \left(\frac{V}{R_i} e^{-\frac{t}{\tau_i}} \right) + \frac{V}{R_\infty} \quad (2.34)$$

ส่วนประกอบกระแส $\frac{V}{R_\infty}$ ซึ่งเป็นกระแสที่เกิดจากค่าความนำไฟฟ้าของวัสดุ (conduction current, i_{con}) ซึ่งสามารถหาได้จากค่าที่ steady-state หลังจากช่วงเวลาที่ย้ายแรงดันไฟฟ้า $t = t_L$ ตัวเก็บประจุ C_i จะถูกเก็บประจุไว้ด้วยกระแสโพลาริเซชัน แรงดันที่สะสมในตัวเก็บประจุ C_i เขียนสมการได้ดังสมการที่ 2.35

$$V_{C_i}(t_L) = V \left(1 - e^{-\frac{t_L}{\tau_i}} \right) \quad (2.35)$$



(ก) โมเดลไดอิเล็กทริก

(ข) กระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน

รูปที่ 2.24 ผลตอบสนองของไดอิเล็กทริกในโดเมนเวลา

เมื่อหยุดจ่ายแรงดันให้กับฉนวนและทำการลัดวงจรฉนวนเพื่อให้ฉนวนเกิดการคายประจุลงสู่กราวด์ โมเลกุลและประจุไฟฟ้าภายในเนื้อฉนวนจะเกิดการจัดเรียงตัวเข้าสู่สภาวะปกติก่อนที่จะมีสนามไฟฟ้ามากระทำกระแสคายประจุที่วัดได้ขณะทำการลัดวงจรให้กับฉนวนจะถูกเรียกว่ากระแสดีโพลาริเซชัน ($i_{dep}(t)$) [36,37] ซึ่งเขียนได้ดังสมการต่อไปนี้

$$i_{dep}(t) = -\sum_i \left(\frac{V_C(t_L)}{R_i} e^{-\frac{t-t_L}{\tau_i}} \right) \quad (2.36)$$

ค่ากระแสการนำไฟฟ้าสามารถหาได้จากผลต่างของกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน [38]

$$i_{con}(t) = i_{pol}(t) + i_{dep}(t + t_L) \quad (2.37)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.4 ผลตอบสนองไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่

คุณสมบัติของไดอิเล็กทริกที่วัดได้ในโดเมนเวลาจะสามารถทำการแปลงไปอยู่ในโดเมนความถี่ด้วยวิธีการแปลงของลาปลาซ (Laplace transform) และการแปลงฟูเรียร์ (Fourier transform) [39-41] ได้โดยใช้สมการความหนาแน่นของกระแสตั้งสมการที่ 2.31

$$j(t) = \sigma_0 E(t) + \varepsilon_0 \frac{dE(t)}{dt} + \varepsilon_0 \frac{d}{dt} \int_0^t f(t-\tau) E(\tau) d\tau \quad (2.38)$$

โดย $j(t) \Rightarrow j(p); E(t) \Rightarrow E(p); E'(t) \Rightarrow pE(p); f(t) \Rightarrow F(p)$; และพิจารณาเทอมสุดท้ายที่ติดอยู่ในรูปการคอนโวลูชัน ให้อยู่ในรูปลาปลาซซึ่งสามารถแทนด้วยตัว p (Laplace operator)

$$j(p) = \sigma_0 E(p) + \varepsilon_0 pE(p) + \varepsilon_0 pF(p)E(p) \quad (2.39)$$

ตัว p คือ ความถี่เชิงซ้อน (Complex frequency) $i\omega$, ดังนั้น สามารถลดรูปสมการได้ดังนี้

$$j(\omega) = E(\omega)[\sigma_0 + i\omega\varepsilon_0(I + F(\omega))] \quad (2.40)$$

โดยการแปลงฟูเรียร์ของฟังก์ชันผลตอบสนองไดอิเล็กทริก $f(t)$ หรือความสามารถยอมรับได้เชิงซ้อน (Complex susceptibility):

$$\begin{aligned} \chi(\omega) &= F(\omega) = \chi'(\omega) - i\chi''(\omega) \\ &= \int_0^\infty f(t) \exp(-i\omega t) dt \end{aligned} \quad (2.41)$$

หมายเหตุ สเกลความถี่อยู่ในช่วง $0 \leq \omega \leq \infty$ สามารถรวมสมการ (2.40) และ (2.41) และเขียนเป็นผลรวมความหนาแน่นของกระแส

$$j(t) = \{\sigma_0 + \varepsilon_0 \omega \chi''(\omega) + i\omega\varepsilon_0[1 + \chi'(\omega)]\} E(\omega) \quad (2.42)$$

จากทฤษฎีพื้นฐาน เมื่อพิจารณาจากค่าความหนาแน่นของสนามไฟฟ้าในรูปเชิงซ้อน (Complex dielectric permittivity) $\varepsilon(\omega)$ ซึ่งแสดงเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$D(\omega) = \varepsilon_0 \varepsilon(\omega) E(\omega) \quad (2.43)$$

$$\text{เมื่อ } \varepsilon(\omega) = \varepsilon'(\omega) - i\varepsilon''(\omega) = (1 + \chi'(\omega)) - i\chi''(\omega) \quad (2.44)$$

การวัดผลตอบสนองไดอิเล็กทริก (Dielectric response) ในรูปโดเมนความถี่นั้น เป็นไปได้ยากในทางปฏิบัติ เนื่องมาจากเป็นย่านความถี่ที่อยู่ในช่วงกว้าง ซึ่งมีการใช้กันน้อยในทางวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง โดยปกติจะวัดค่า C และ $\tan \delta$ เพียงความถี่เดียวเท่านั้น อย่างไรก็ตามการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัดผลตอบสนองไดอิเล็กทริกในรูปโดเมนความถี่ก็ยังคงมีการทดสอบบ้างสำหรับห้องปฏิบัติการต่างๆ [42,43] จากสมการที่ 2.42 แสดงให้เห็นค่ากระแสที่ก่อให้เกิดความนำไฟฟ้ากระแสตรง (DC conductivity) σ_0 และ ค่าการสูญเสียของไดอิเล็กทริก (Dielectric loss) $\varepsilon''(\omega)$ ไม่มีความแตกต่างจากการวัดจริง ส่งผลให้สอดคล้องกับผลการวัดค่าเปอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์ของไดอิเล็กทริก (relative dielectric permittivity) $\varepsilon_r(\omega)$ โดยสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้ [44,45]

$$j(\omega) = i\omega\varepsilon_0\varepsilon_r(\omega)E(\omega) \quad (2.45)$$

ดังนั้น

$$\varepsilon_r(\omega) = \varepsilon_r'(\omega) - i\varepsilon_r''(\omega)$$

$$\varepsilon_r(\omega) = \varepsilon_r'(\omega) - i[\varepsilon_r''(\omega) + \sigma_0 / \varepsilon_0\omega]$$

$$\varepsilon_r = 1 + \chi'(\omega) - i[\chi''(\omega) + \sigma_0 / \varepsilon_0] \quad (2.46)$$

และค่าตัวประกอบความสูญเสียของไดอิเล็กทริก (Dissipation factor) หรือ $\tan \delta(\omega)$,

$$\tan \delta(\omega) = \frac{\varepsilon_r''(\omega)}{\varepsilon_r'(\omega)} = \frac{\varepsilon_r''(\omega) + \sigma_0 / \varepsilon_0\omega}{\varepsilon_r'(\omega)} \quad (2.47)$$

จากค่าของสมการที่ 2.42 ส่วนจริงแสดงให้เห็นค่าความจริงของวัสดุทดสอบ ส่วนค่าจินตภาพให้เห็นถึงค่าความสูญเสีย ซึ่งอยู่ในรูปโดเมนความถี่ [46-48]

พิจารณาในรูปโดเมนความถี่ สามารถทำโดยอาศัยสมการที่ (2.45) ซึ่งเป็นความแตกต่างระหว่างกระแสลับ $I(\omega)$ และแรงดันกระแสลับ $U(\omega)$ ที่เกิดจากการวัด

$$I(\omega) = i\omega C(\omega)U(\omega) \quad (2.48)$$

เมื่อ $C(\omega)$ คือ ค่าตัวเก็บประจุเชิงซ้อน (Complex capacitance) มีความสัมพันธ์กับ เปอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์

จากสมการที่ 2.46 จะได้

$$\begin{aligned} C(\omega) &= C'(\omega) - iC''(\omega) \\ &= C_0\{\varepsilon_r'(\omega) - i[\varepsilon_r''(\omega) + \sigma_0 / \varepsilon_0]\} \end{aligned} \quad (2.49)$$

เมื่อ C_0 คือ ค่าตัวเก็บประจุ (Geometric capacitance)

σ_0 คือ ค่าความนำไฟฟ้ากระแสตรงของวัสดุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 2.47 สามารถคำนวณค่าสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric dissipation factor: DDF) หรือ $\tan \delta$ ได้ดังนี้

$$\tan \delta(\omega) = \frac{C''(\omega)}{C'(\omega)} \quad (2.50)$$

โดย $C'(\omega)$ แสดงความจุไฟฟ้าส่วนจริงของวัสดุ

$C''(\omega)$ แสดงผลการสูญเสียจากค่าความนำไฟฟ้ากระแตรง

สำหรับวงจรสมมูลในรูปที่ 2.24 สามารถคำนวณหาค่าความจุเชิงซ้อน (Complex capacitance) $C(\omega)$ จากสมการที่ 2.41 สามารถแสดงในรูปแอดมิตแตนซ์เชิงซ้อน (Complex admittance) $Y(\omega)$ ได้ดังสมการที่ 2.51

$$C(\omega) = \frac{Y(\omega)}{i\omega} = C_\infty + \frac{1}{i\omega R_0} + \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{1+i\omega R_i C_i} \quad (2.51)$$

ซึ่ง $C(\omega)$ สามารถแยกออกเป็น ส่วนจริงและจินตภาพได้ดังนี้

$$C'(\omega) = C_\infty + \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{1+(\omega R_i C_i)^2} \quad (2.52)$$

และ

$$C''(\omega) = \frac{1}{\omega R_0} + \sum_{i=1}^n \frac{\omega R_i C_i^2}{1+(\omega R_i C_i)^2} \quad (2.53)$$

นอกจากนี้ค่าอัตราส่วนค่าความจุไฟฟ้า (Capacitance ratio) สามารถหาได้จาก

$$C \text{ ratio} = \frac{C'(\omega)}{C_\infty} \quad (2.54)$$

ส่วนค่า $\tan \delta(\omega)$ สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\tan \delta(\omega) = \frac{\frac{1}{\omega R_0} + \sum_{i=1}^n \frac{\omega R_i C_i^2}{1+(\omega R_i C_i)^2}}{C_\infty + \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{1+(\omega R_i C_i)^2}} \quad (2.55)$$

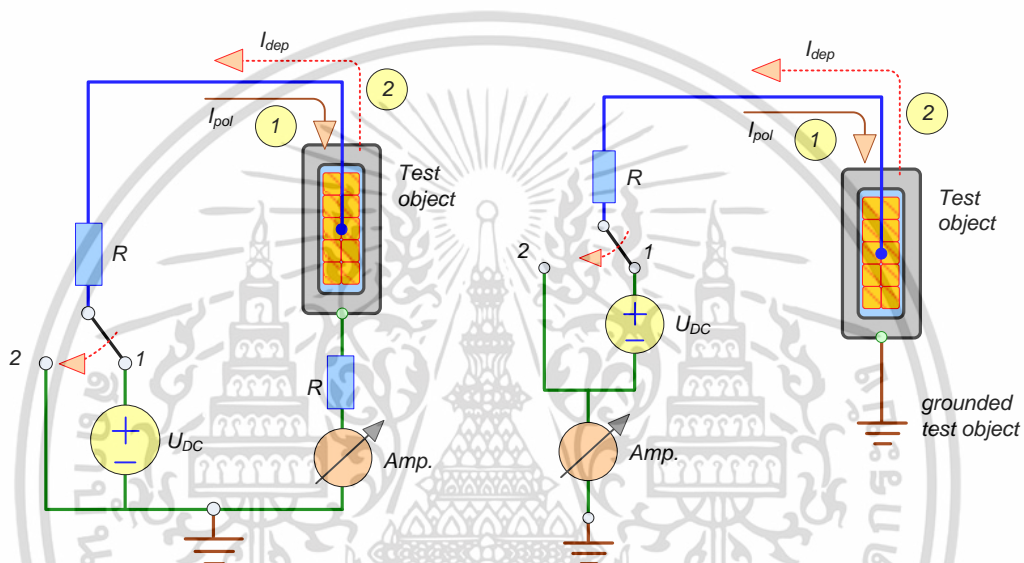
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 หลักการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน

ในการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันของฉนวนเครื่องจักรกลหมุนจะดำเนินการวัดฉนวนดังกล่าวใน 2 ตำแหน่ง แสดงดังรูปที่ 2.25 คือ

1. ฉนวนระหว่างเฟส (Phase to Phase Insulation)
2. ฉนวนระหว่างเฟสกับกราวด์ (Phase to Ground Insulation)

ซึ่งผลการวัดกระแสของทั้งสองบริเวณไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบกันได้เนื่องจากทั้งสองบริเวณมีค่าความจุไฟฟ้า (Capacitance) ที่แตกต่างกันมาก [49-51]



ก) ฉนวนระหว่างเฟส

ข) ฉนวนระหว่างเฟสกับกราวด์

รูปที่ 2.25 วงจรวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันของฉนวนบริเวณขดลวดสเตเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การศึกษาผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของ

ฉนวนสแตเตอร์บาร์ตัวอย่าง

3.1 กล่าวนำ

บทนี้เสนอการศึกษาผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของฉนวนสแตเตอร์บาร์ตัวอย่างจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานน้ำ พิกัดแรงดัน 13.8 kV 111 MVA ติดตั้งใช้งาน ณ เขื่อนศรีนครินทร์ โดยทั่วไป โครงสร้างฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนระดับแรงดันตั้งแต่ 6 kV ขึ้นไป โครงสร้างฉนวนภายในร่องสล็อตคล้ายกันแต่ต่างกันบริเวณพื้นร่องสล็อต เหตุผลเนื่องจากการควบคุมการกระจายแรงดันบริเวณพื้นร่องสล็อตให้สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ ดังนั้นสแตเตอร์บาร์ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จึงใช้เป็นตัวแทนของฉนวนในร่องสล็อตในเครื่องจักรกลหมุนขนาดใหญ่ทุกระดับแรงดัน เนื่องจากการประเมินสภาพฉนวนสแตเตอร์บาร์ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ผลตอบสนองไดอิเล็กทริกในปัจจุบัน ยังมีข้อมูลน้อยและคลุมเครือ ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงศึกษาอิทธิพลต่างๆ ที่มีผลต่อผลตอบสนองไดอิเล็กทริก เพื่อความเข้าใจในการแปลผลการวัดผลตอบสนองไดอิเล็กทริกอย่างลึกซึ้งและไม่คลุมเครือ เพื่อเป็นประโยชน์ในวงการอุตสาหกรรมในประเทศไทยในการประเมินสภาพฉนวนเครื่องจักรกลหมุนขนาดใหญ่

3.2 การเตรียมสแตเตอร์บาร์ตัวอย่าง

สแตเตอร์บาร์ตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาทดลองในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ มีข้อมูลพื้นฐานดังในตารางที่ 3.1 และรูปที่ 3.1 ฉนวนสแตเตอร์บาร์ที่ใช้ศึกษาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ผ่านการใช้งานจริงแล้วแต่อยู่ในสภาพดี ค่าความต้านทานฉนวนอยู่ในย่าน $G\Omega$ ความยาวสแตเตอร์บาร์ตัวอย่างประมาณ 30 เซนติเมตร โดยที่ฉนวน 20 เซนติเมตรเป็นตัวแทนฉนวนที่อยู่ในร่องสล็อตของเครื่องจักรกลหมุนเนื่องจากระบบฉนวนครบถ้วน ดังรูปที่ 3.2 ด้านหัวและท้ายด้านละ 5 เซนติเมตรแทนส่วนที่พื้นร่องสล็อตเนื่องจากไม่มีวัสดุกึ่งตัวนำ โดยสแตเตอร์บาร์ตัวอย่างมีจำนวน 15 ตัวอย่าง โดยที่ฉนวนสแตเตอร์บาร์ทั้งหมดจะถูกดึงความชื้นออกด้วยตู้อบสุญญากาศ ก่อนทำการทดลองเพื่อให้เงื่อนไขเริ่มต้นของตัวอย่างอยู่ในสภาพเดียวกัน

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลพื้นฐานของสแตเตอร์บาร์ตัวอย่าง

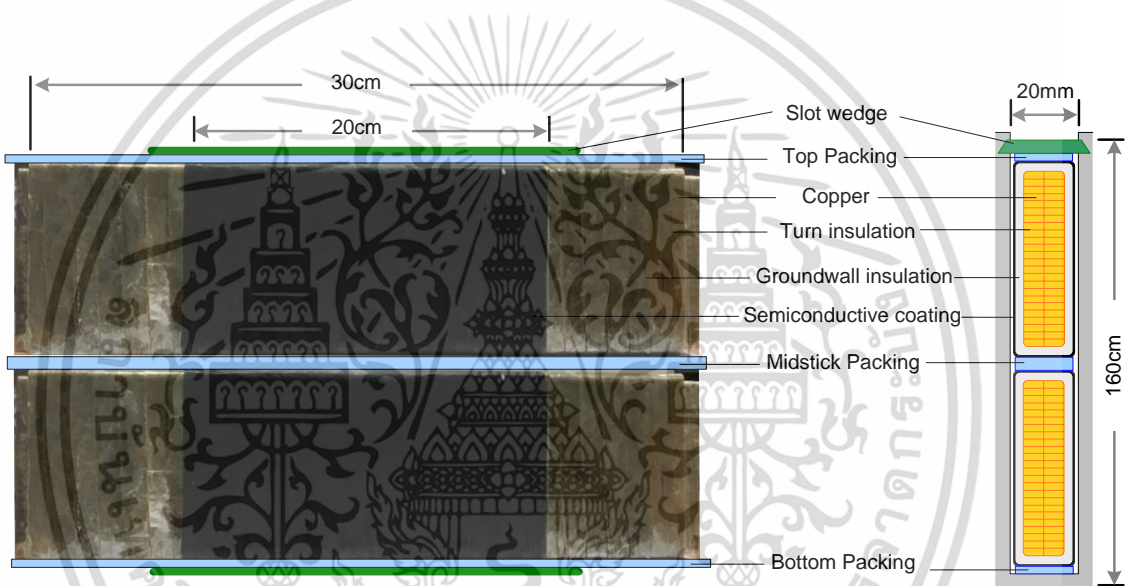
Capacity (MVA)	Rated Voltage (kV)	Rated Current (A)	Power Factor	Rated Speed (RPM)	Rated Frequency (Hz)	No. of Phases	No. of Pole
111.1	13.8	4,648	0.9	150	50	3	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

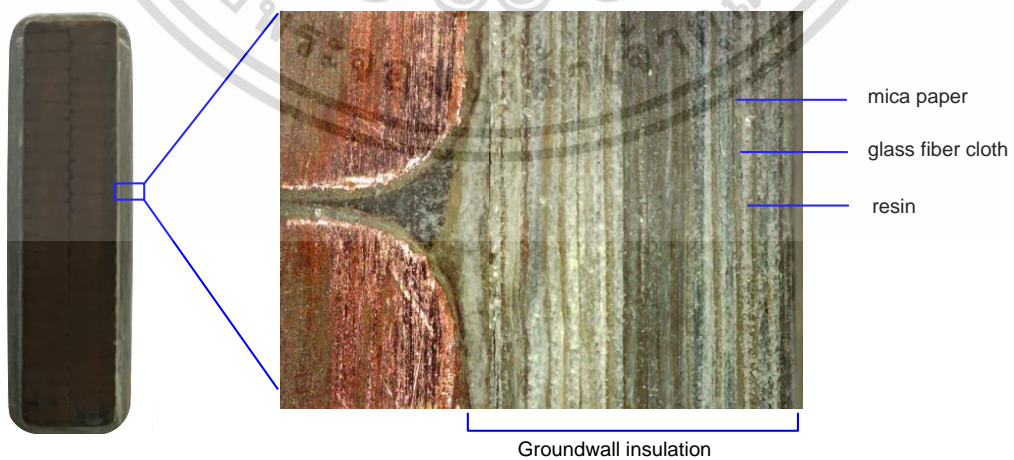


(ก) สเตเตอร์บาร์ในเครื่องจักรกลหมุน (ข) สเตเตอร์บาร์เดี่ยว (ค) สเตเตอร์บาร์ตัวอย่าง

รูปที่ 3.1 การเตรียมสเตเตอร์บาร์ตัวอย่าง



รูปที่ 3.2 ระบบฉนวนสเตเตอร์บาร์ตัวอย่าง



รูปที่ 3.3 ภาพขยายชั้นฉนวนสเตเตอร์บาร์ตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การศึกษาสนามไฟฟ้าของสเตเตอร์บาร์ตัวอย่าง

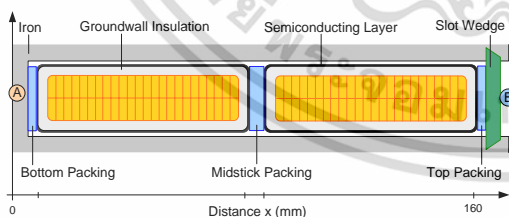
หัวข้อนี้นำเสนอการศึกษาสนามไฟฟ้าในระบบฉนวนสเตเตอร์ในร่องสลอตโดยใช้การคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method, FEM) และประยุกต์ใช้สมการแมกซ์เวลล์ (Maxwell's equations) ดังสมการที่ 3.1 คุณสมบัติวัสดุที่ใช้คำนวณสนามไฟฟ้าของตัวอย่างสเตเตอร์บาร์แสดงในตารางที่ 3.2 โครงสร้างแบบจำลองมีขนาดเท่ากับสเตเตอร์จริงที่ใช้ในการทดลองในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ดังรูปที่ 3.4 ผลการคำนวณการกระจายแรงดันไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงดังรูปที่ 3.5 ถึง รูปที่ 3.7 จากผลการคำนวณตามรูปที่ 3.7 ขนาดแรงดันไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าจากจุด A ไปจุด B คือ แรงที่กระทำต่อประจุในระบบฉนวน จากข้อมูลที่ได้จากการศึกษาสนามไฟฟ้า วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอวงจรมูลเพื่อเป็นตัวแทนของระบบฉนวนสเตเตอร์ในร่องสลอตดังรูปที่ 3.8 ซึ่งมีประโยชน์มากในการใช้วิเคราะห์ผลตอบสนองไดอิเล็กทริกในหัวข้อต่อไป

$$\nabla \cdot \sigma E + \frac{d}{dt} \nabla \cdot \epsilon E = 0 \quad (3.1)$$

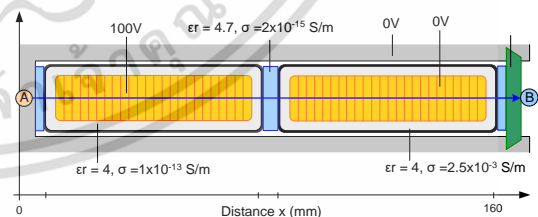
เมื่อ σ คือ ค่าความนำไฟฟ้า (pS/m)
 ϵ คือ ค่าเปอร์มิตติวิตี (F/m)
 E คือ สนามไฟฟ้าที่ป้อนภายนอก (V/m)

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้คำนวณสนามไฟฟ้าของสเตเตอร์บาร์ตัวอย่าง

Material	Relative permittivity	Conductivity (S/m)
Groundwall Insulation	4.0	1.0×10^{-13}
Semiconducting Layer	4.0	2.5×10^{-3}
Packing and Slot Wedge	4.7	2.0×10^{-15}

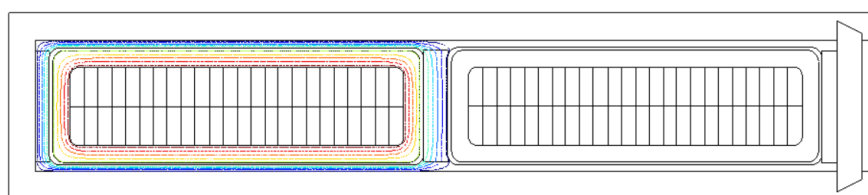


(ก) โครงสร้างสเตเตอร์บาร์ในร่องสลอต



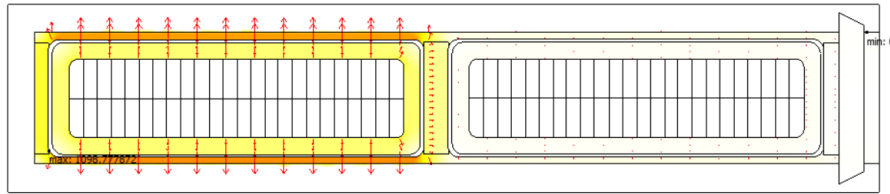
(ข) พารามิเตอร์สเตเตอร์บาร์ในร่องสลอต

รูปที่ 3.4 ระบบฉนวนสเตเตอร์บาร์ตัวอย่าง

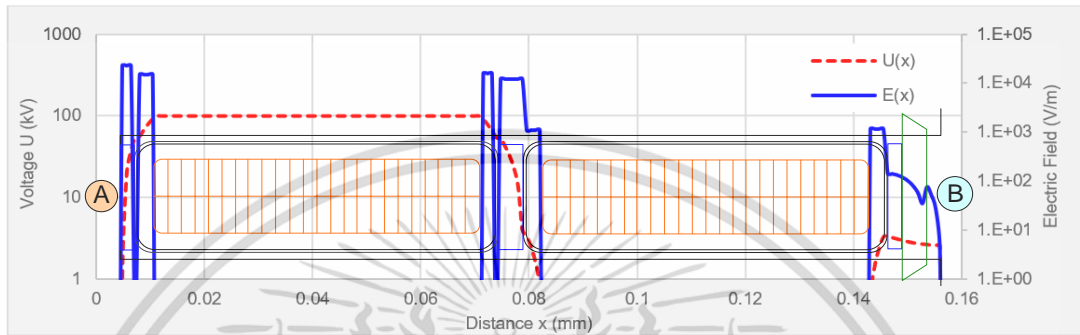


รูปที่ 3.5 การกระจายแรงดันไฟฟ้าจากผลการคำนวณ

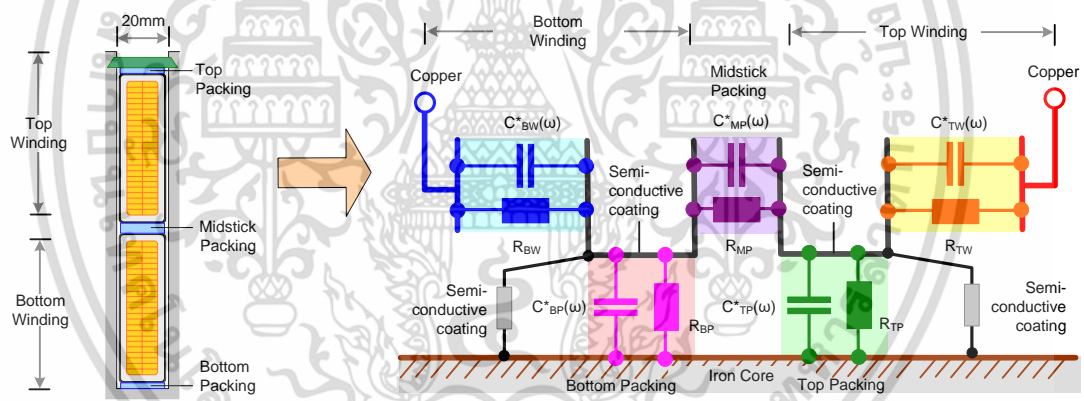
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 สนามไฟฟ้าในระบบฉนวนจากผลการคำนวณ



รูปที่ 3.7 แรงดันไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าจากจุด A ไปจุด B



(ก) สเตเตอร์บาร์ในร่องสลีต

(ข) วงจรสมมูลสเตเตอร์บาร์ในร่องสลีต

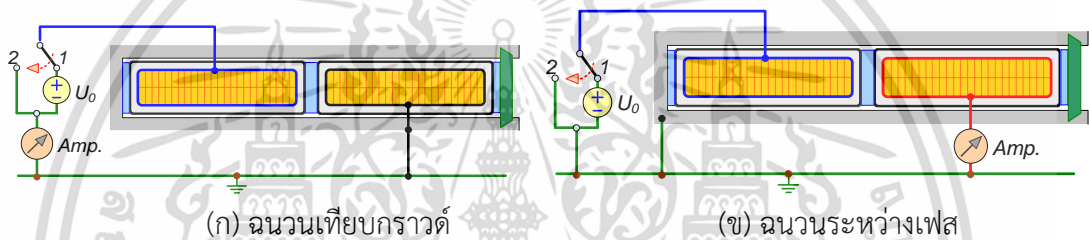
รูปที่ 3.8 วงจรสมมูลระบบฉนวนในร่องสลีต

จากรูปที่ 3.7 พบว่าประจุที่อยู่กับที่และเคลื่อนที่ได้ในระบบฉนวนสามารถถูกเหนี่ยวนำจากสนามไฟฟ้าภายนอกสอดคล้องตามกระบวนการโพลาไรเซชันซึ่งจะสัมพันธ์กับสภาพฉนวน ดังนั้นการวิเคราะห์ผลตอบสนองไดอิเล็กทริกเพื่อประเมินสภาพฉนวนจึงเป็นเทคนิคที่สำคัญและมีประโยชน์ แต่สิ่งสำคัญประการหนึ่งคือการแปลผลดังกล่าวต้องใช้ความรู้ความเข้าใจอย่างแท้จริงจากความรู้หลายด้านประกอบรวมกัน เพื่อแปลผลอย่างมีเหตุผลในหลักวิชาการ

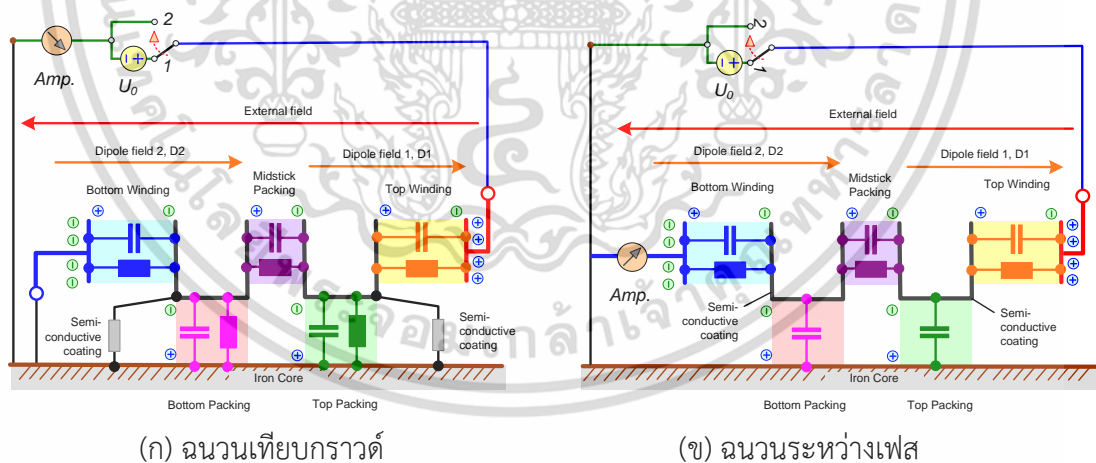
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การเตรียมวงจรการทดลองศึกษาผลสนองไดโพลีทริกของสเตเตอร์บาร์ตัวอย่าง

การศึกษาค้นคว้าผลตอบสนองไดโพลีทริกของระบบฉนวนสเตเตอร์ในร่องสลีต ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีวงจรการวัด ดังรูปที่ 3.9 และ 3.10 วงจรวัดในรูปที่ 3.9 (ก) และ 3.10 (ก) เป็นการวัดผลตอบสนองไดโพลีทริกของระบบฉนวนเทียบกราวด์ หลังป้อนแรงดันรูปไซน์และคงที่แรงดันไว้ กระแสทุกส่วนในระบบฉนวนจะถูกตรวจวัดด้วยแอมป์มิเตอร์ที่เชื่อมต่อโดยตรงกับตัวนำหรืออิล็กโตรดแรงดัน วงจรวัดในรูปที่ 3.9 (ข) และ 3.10 (ข) เป็นการวัดผลตอบสนองไดโพลีทริกของระบบฉนวนระหว่างเฟส กระแสในระบบฉนวนระหว่างตัวนำต่างเฟสจะถูกวัดเท่านั้น แอมป์มิเตอร์ของระบบวัดเชื่อมต่อโดยตรงกับตัวนำหรืออิล็กโตรดด้านกราวด์ ปัจจัยที่มีผลต่อการวัดผลตอบสนองไดโพลีทริกได้แก่ แรงดันที่ป้อน เวลาที่ใช้ป้อนแรงดัน อุณหภูมิของฉนวน สภาพฉนวน จะศึกษาและนำเสนอในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 3.9 วงจรการวัดผลตอบสนองไดโพลีทริกของ



รูปที่ 3.10 วงจรสมมูลวัดผลตอบสนองไดโพลีทริกของฉนวนสเตเตอร์ในร่องสลีต

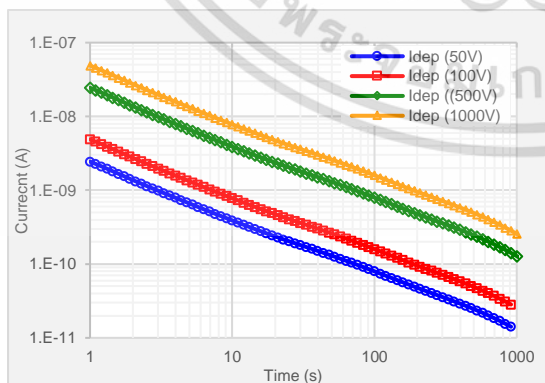
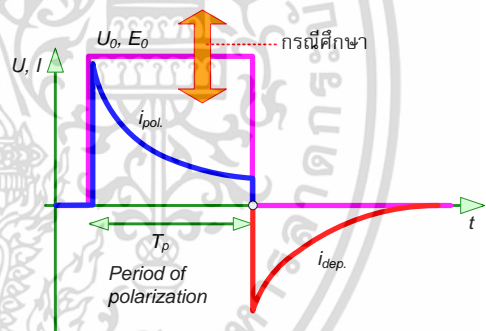
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันต่อการโพลาริเซชัน

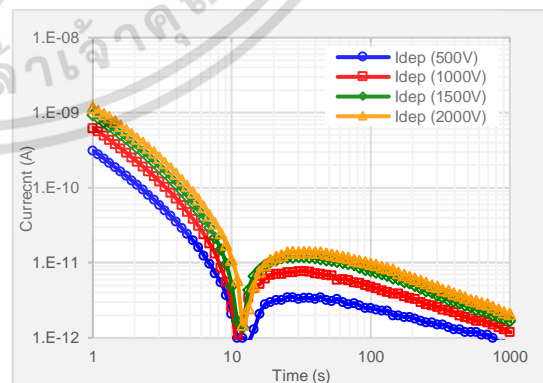
หัวข้อนี้นำเสนอการศึกษาแรงดันที่ป้อนต่อการโพลาริเซชันในระบบฉนวน โดยทั่วไปสนามไฟฟ้าภายในระบบฉนวนจะขึ้นอยู่กับขนาดแรงดันที่ป้อนหรือปริมาณประจุที่ผิวอิเล็กโทรด ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของระบบฉนวน และขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ความคุมสนามไฟฟ้าในระบบฉนวน ฉนวนสเตเตอร์ของเครื่องจักรกลหมุนขนาดใหญ่ประกอบด้วยเทปไมก้าพันรอบตัวนำหลายชั้น ซึ่งจำนวนชั้นขึ้นอยู่กับเงื่อนไขความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าและการระบายความร้อนจากกระแสไหลผ่านตัวนำ ช่องว่างอากาศในฉนวนจะใช้ฮีฟ็อกซีเรซินแทรกซึมแทนช่องว่างอากาศ เทปไมก้าประกอบด้วยผ้าใยแก้วเพื่อเพิ่มความแข็งแรงทางกล ทำให้ระบบฉนวนมีรอยต่อภายในจำนวนมาก ทำให้เกิดการโพลาริเซชันแบบไดโพลาร์และแบบอินเตอร์เฟเชียลที่รอยต่อระหว่างพื้นผิวของวัสดุต่างชนิด เหนียวนำประจุไฟฟ้าสะสมที่ผิวตัวนำหรืออิเล็กโทรด ประจุดังกล่าวจะเหนียวนำมากกว่าฉนวนเนื้อเดียว ในหัวข้อนี้จะศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าต่อการโพลาริเซชัน โดยเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันไฟฟ้าภายนอกที่ไม่สูงเกินจนเกิดดิสชาร์จภายในฉนวน และเปรียบเทียบผลตอบสนองไดอิเล็กทริก

ตารางที่ 3.3 กรณีศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันต่อการโพลาริเซชัน

กรณีศึกษา	ฉนวนเทียบกราวด์			ฉนวนระหว่างเฟส		
	แรงดัน (V)	เวลา (s)	อุณหภูมิ (°C)	แรงดัน (V)	เวลา (s)	อุณหภูมิ (°C)
1	50	1000	25	500	1000	25
2	100	1000	25	1000	1000	25
3	500	1000	25	1500	1000	25
4	1000	1000	25	2000	1000	25



(ก) ฉนวนเทียบกราวด์



(ข) ฉนวนระหว่างเฟส

รูปที่ 3.11 ผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของฉนวนกรณีป้อนแรงดันแตกต่างกัน

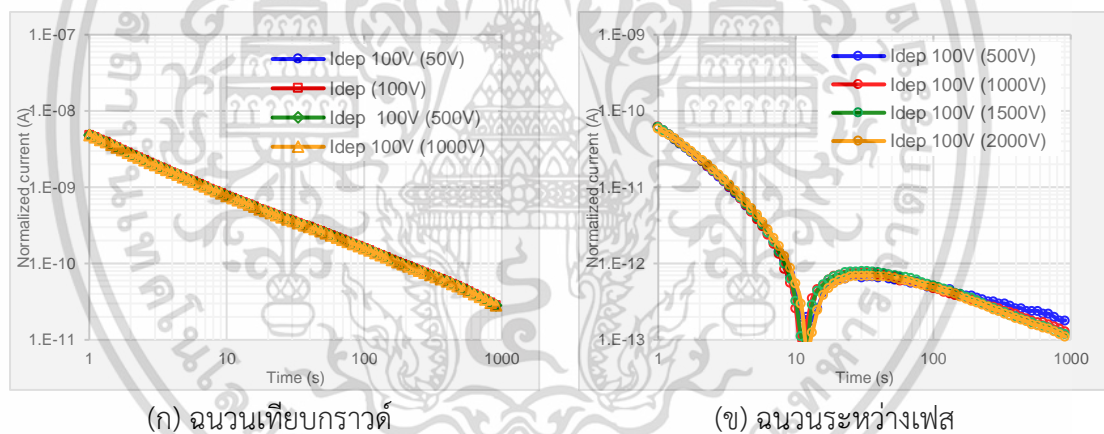
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองกระแสดีโพลาริเซชัน (มีขนาดเท่ากับกระแสโพลาริเซชันขณะป้อนแรงดันกระแสตรง) ทั้งกรณีฉนวนเทียบกราวด์และฉนวนระหว่างเฟสแสดงดังรูปที่ 3.11 พบว่ากระแสดีโพลาริเซชันเพิ่มและลดตามระดับแรงดันที่ป้อน

จากรูปที่ 3.11 ต่อไปทำการนอร์มัลไลเซชันกระแสดีโพลาริเซชันที่ระดับแรงดันต่าง ๆ ไปที่ระดับแรงดัน 100 V โดยประยุกต์ใช้สมการที่ 3.2

$$I_{dep,100V}(t) = \frac{i_{dep}(t)}{U_0} \times 100 \quad (3.2)$$

หลังนอร์มัลไลเซชันแสดงดังรูปที่ 3.12 พบว่ากระแสดีโพลาริเซชันทุกกรณีศึกษามีขนาดเท่ากันและรูปร่างกระแสเหมือนกัน ทำให้สรุปได้ว่ากระแสดีโพลาริเซชันหรือกระบวนการโพลาริเซชันในฉนวนมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับแรงดัน สิ่งสำคัญประการหนึ่งคือในทางปฏิบัติไม่ควรป้อนแรงดันสูงเกินไป เนื่องจากจะทำให้มีกระแสชาร์จประจุจากกระบวนการไดโพลาร์หรือกระแสชาร์จประจุ C_{50Hz} ยาวนานกว่า 1 วินาที ทำให้อาจแปลผลการวัดผลคลาดเคลื่อน ดังนั้นควรป้อนแรงดันให้กระแสดีโพลาริเซชันชัดเจนหรือมากกว่ากระแสเริ่มต้นก็เพียงพอในการแปลผล



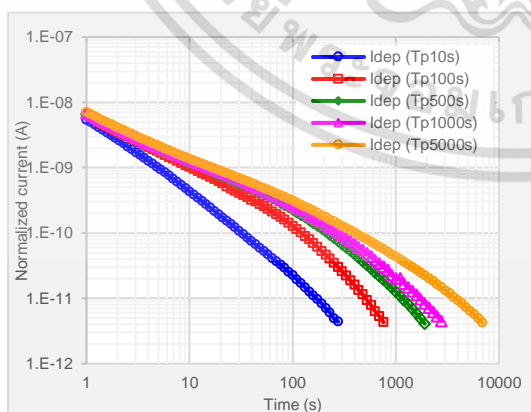
รูปที่ 3.12 ผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของฉนวนหลังการทำงานนอร์มัลไลเซชันไปที่แรงดัน 100 V

3.6 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการโพลาริเซชันต่อตัวเก็บประจุย่อย

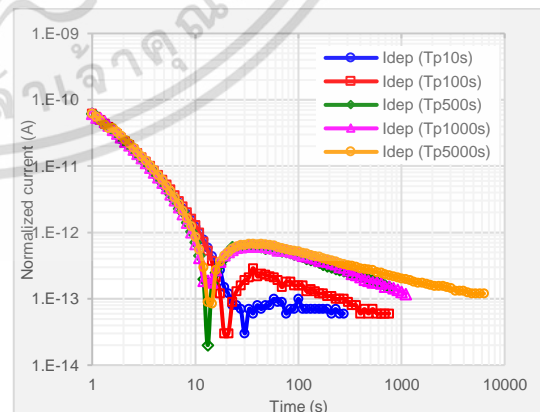
โดยทั่วไปโครงสร้างฉนวนสเตเตอร์บาร์มีหลายจำนวนชั้นขึ้นอยู่กับระดับแรงดันและการระบายความร้อน เมื่อฉนวนดังกล่าวอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าสูงขึ้นภายนอกจะเหนี่ยวนำประจุไฟฟ้าที่ผิวอิเล็กทรอนิกส์หรือผิวตัวนำด้วยปรากฏการณ์โพลาริเซชัน มีความจุเท่ากับ C_{50Hz} และเมื่อสนามไฟฟ้าภายนอกคงที่ประจุอิสระทั้งไอออนบวกและไอออนลบจะมีเวลาในการเคลื่อนที่ภายใต้แรงของสนามไฟฟ้า ประจุเหล่านี้จะเคลื่อนที่ไปติดสะสมในบริเวณรอยต่อของระบบฉนวนหรือชั้นของเทปไมก้า เนื่องจากคุณสมบัติค่าความนำไฟฟ้าและค่าเปอร์มิตติวิตีของวัสดุในระบบฉนวนแตกต่างกัน ทำให้เกิดตัวเก็บประจุย่อย C_i ในระบบฉนวนจำนวนมาก (รายละเอียดวงจรสมมูลของระบบฉนวนนำเสนอในหัวข้อ 2.5.3) ตัวแปรที่สำคัญคือเวลาในการเคลื่อนที่ของประจุอิสระ ซึ่งหมายถึงเวลาในการป้อนแรงดันกระแสตรงคงที่ กรณีที่ป้อนแรงดันกระแสตรงคงที่นาน หมายถึงประจุอิสระในระบบฉนวนมีแรงเหนี่ยวนำจากสนามไฟฟ้าภายนอกให้เคลื่อนที่ได้ช้าและสะสมในรอยต่อ หัวข้อนี้ออกแบบเพื่อศึกษาเวลาในการป้อนแรงดันด้วยระยะเวลาแตกต่างกันเพื่อศึกษาว่าต้องใช้เวลาน้อยที่สุดเท่าไรจึงจะเพียงพอสำหรับประเมินค่าความจุย่อยได้อย่างเหมาะสม

ตารางที่ 3.4 กรณีศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการโพลาริเซชันต่อตัวเก็บประจุย่อย

กรณีศึกษา	ฉนวนเทียบกราวด์			ฉนวนระหว่างเฟส		
	แรงดัน (V)	เวลา (s)	อุณหภูมิ (°C)	แรงดัน (V)	เวลา (s)	อุณหภูมิ (°C)
1	100	10	25	100	10	25
2	100	100	25	100	100	25
3	100	500	25	100	500	25
4	100	1000	25	100	1000	25
5	100	5000	25	100	5000	25



(ก) ฉนวนเทียบกราวด์



(ข) ฉนวนระหว่างเฟส

รูปที่ 3.13 ผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของฉนวนกรณีเวลาโพลาริเซชันแตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองดังรูปที่ 3.13 จะพบว่ากระแสดีโพลาริเซชันขึ้นอยู่กับเวลาที่ป้อนแรงดันทั้ง วงจรวัดผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของฉนวนเทียบกราวด์และฉนวนระหว่างเฟส การคำนวณค่าความจุ ไฟฟ้าย่อยจะใช้สมการที่ 3.3 โดยใช้เทคนิค Curve fitting ประมาณค่าพารามิเตอร์ $R_i C_i$ ในระบบ ฉนวน

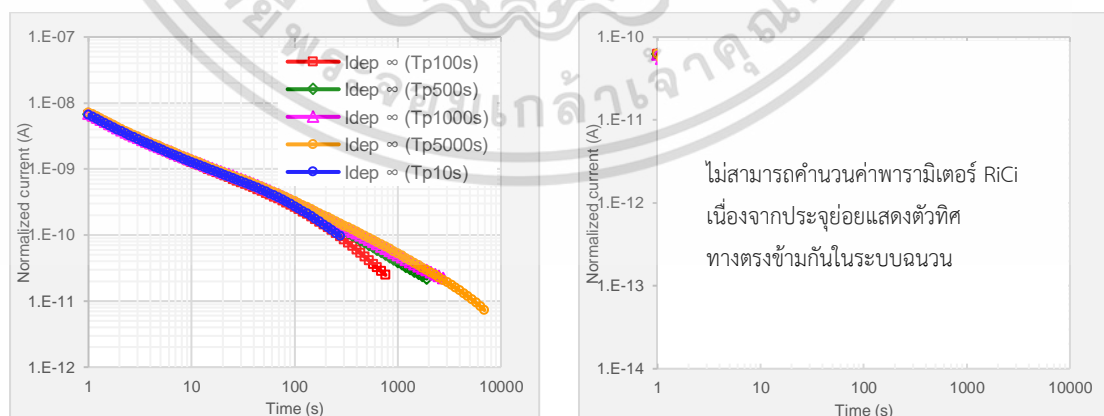
$$i_{dep}(t) = \sum_i \frac{U_{ci}(T_p)}{R_i} \exp(-t / R_i C_i) \quad (3.3a)$$

$$U_{ci}(t) = U \cdot (1 - \exp(-t / R_i C_i)) \quad (3.3b)$$

เมื่อคำนวณและประเมินพารามิเตอร์ $R_i C_i$ ทุกกรณีศึกษาแล้ว ต่อไปปรับสมการที่ 3.3 ใหม่เป็น สมการที่ 3.4 คำนวณกระแสดีโพลาริเซชันใหม่ (i_{dec}) โดยปรับพารามิเตอร์ T_p ให้เข้าสู่อินันต์ซึ่งเสมือน ตัวเก็บประจุย่อยทุกตัวในระบบฉนวนถูกชาร์จด้วยเวลานาน

$$i_{dec}(t) = \sum_i \frac{U}{R_i} \exp(-t / R_i C_i); \quad \text{for } T_p \rightarrow \infty \quad (3.4)$$

ผลการคำนวณแสดงดังรูปที่ 3.14 จะพบว่ารูปร่างกระแสดีโพลาริเซชันที่ใช้ป้อนแรงดันด้วย เวลา 500 วินาที หลังประยุกต์ใช้สมการที่ 3.4 รูปร่างกระแสดีโพลาริเซชันใกล้เคียงกับกระแสดีโพลาริเซชันที่ใช้ป้อนแรงดันด้วยเวลา 5000 วินาที นั้นหมายถึงค่าความจุไฟฟ้าย่อยที่ได้จากการป้อน แรงดันที่เวลา 500 วินาทีใกล้เคียงกับเวลาที่ป้อนแรงดัน 5000 วินาที ดังนั้นในทางปฏิบัติสามารถ ปรับเวลาได้ และประยุกต์ใช้สมการที่ 3.4 เพื่อลดเวลาในการวัดผลตอบสนองไดอิเล็กทริก ณ จุดใช้ งาน ส่วนในกรณีฉนวนระหว่างเฟสไม่สามารถคำนวณค่าพารามิเตอร์ $R_i C_i$ ได้ เนื่องจากมีการกลับทิศ ของกระแสดีโพลาริเซชันนั้นหมายถึงมีประจุย่อยแสดงตัวทิศทางตรงข้ามกันในระบบฉนวน



(ก) ฉนวนเทียบกราวด์

(ข) ฉนวนระหว่างเฟส

รูปที่ 3.14 ผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของฉนวนหลังปรับเวลา T_p เข้าสู่อินันต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิต่อการโพล่าไรเซชัน

โดยทั่วไปอุณหภูมิคือพลังงานความร้อนที่ช่วยให้การเคลื่อนที่ของประจุในสนามไฟฟ้าง่ายขึ้น ดังนั้นประจุหรือไอออนอิสระในระบบฉนวนจะเคลื่อนที่ได้ดีขึ้นส่งผลให้กระแสโพล่าไรเซชันและกระแสดีโพล่าไรเซชันเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิของฉนวนขณะที่วัด อาจส่งผลให้การแปลความหมายสภาพฉนวนคลาดเคลื่อน ในส่วนนี้จะศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการโพล่าไรเซชันและการนำไฟฟ้าในระบบฉนวนกรณีศึกษาดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 กรณีศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิต่อการโพล่าไรเซชัน

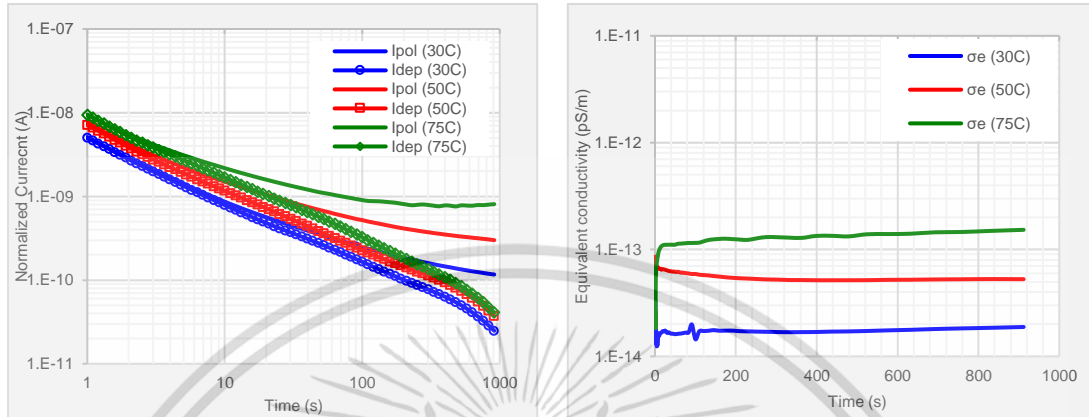
กรณีศึกษา	ฉนวนเทียบกราวนด์			
	แรงดัน (V)	เวลา (s)	อุณหภูมิ (°C)	
1	100	1000	30	
2	100	1000	50	
3	100	1000	75	

ผลการทดลองดังรูปที่ 3.15 (ก) พบว่ากระแสโพล่าไรเซชันและกระแสดีโพล่าไรเซชันเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิฉนวนเพิ่มขึ้นหรือค่าความต้านทานฉนวนและค่าความต้านทานย่อยลดลง นั่นหมายถึงประจุอิสระในระบบฉนวนสามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ในการทดลองศึกษาอุณหภูมิของฉนวน 30 ถึง 75 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมิไม่สูงเกินไปจนไปทำลายฉนวน พารามิเตอร์ที่ใช้ประเมินความสามารถในการเคลื่อนที่ของประจุในระบบฉนวนที่นิยมใช้คือ ค่าความนำไฟฟ้าซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ไม่ขึ้นกับโครงสร้างของระบบฉนวนแต่จำเป็นต้องทราบโครงสร้างของระบบฉนวนหรือค่าความจุไฟฟ้าของระบบฉนวน (C_{geo}) เพื่อใช้ในการคำนวณ ในทางปฏิบัติไม่สามารถคำนวณค่าความนำไฟฟ้าของระบบฉนวนได้เนื่องจากไม่ทราบโครงสร้างฉนวนทั้งระบบ ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงนำเสนอสมการคำนวณค่าความนำไฟฟ้าสมมูล (σ_e) ดังสมการที่ 3.5 ซึ่งสัมพันธ์โดยตรงค่าความนำไฟฟ้าในระบบฉนวน ในกรณีที่ทราบค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นที่สามารถประเมินค่าความนำไฟฟ้าของระบบฉนวนจริงได้ ค่าความนำไฟฟ้าสมมูลหลังการคำนวณแสดงได้ดังรูปที่ 3.15 (ข) เนื่องจากค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของวัสดุเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้าสมมูลต่ออุณหภูมิฉนวนแสดงได้โดยใช้ความสัมพันธ์ของสมการ Arrhenius ดังสมการที่ 3.6 และจัดสมการให้อยู่รูปสมการเส้นตรงดังสมการที่ 3.7

$$\sigma_e(t) = \frac{\sigma(t)}{\epsilon_r} = \frac{\epsilon_0 \cdot \{i_{pol}(t) - i_{dep}(t)\}}{C_{geo} \cdot U} \quad (3.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความนำไฟฟ้าสมมูลของฉนวนในรูปที่ 3.15 (ข) สามารถจัดใหม่และแสดงดังรูปที่ 3.16 (ก) และคำนวณค่าความชันของเส้นตรง เมื่อได้ค่าความชันแล้วประยุกต์ใช้สมการที่ 3.8 ประมาณค่าพลังงานงานการกระตุ้น E_a ในการทดลองนี้ค่า E_a เท่ากับ 0.46 eV หรือ 44.27 kJ/mol



(ก) ผลตอบสนองไดโอดเล็กทริก

(ข) ความนำไฟฟ้าสมมูล

รูปที่ 3.15 ผลตอบสนองไดโอดเล็กทริกของฉนวนและความนำไฟฟ้าสมมูลกรณีอุณหภูมิแตกต่างกัน

$$\sigma_e(T) = \sigma_e(T_1) \exp(-E_a / RT) \quad (3.6)$$

$$\ln \sigma_e(T) = -\frac{E_a}{R} \cdot \frac{1}{T} + \ln \sigma_e(T_1) \quad (3.7)$$

$$E_a = -m \times R \quad (3.8)$$

ต่อไปคำนวณกระแสดีโพลาร์ไรเซชันจากสมการที่ 3.4 ในหัวข้อที่ 3.5 จะได้ค่าพารามิเตอร์ $R_i C_i$ ของระบบฉนวนที่อุณหภูมิแตกต่างกัน และประยุกต์ใช้สมการที่ 3.9 คำนวณค่ากระแสดีโพลาร์ไรเซชันและกระแสดีโพลาร์ไรเซชันดังสมการที่ 3.10 และ 3.11 ผลการคำนวณแสดงดังรูปที่ 3.16 (ข) พบว่าค่าพลังงานการกระตุ้นที่ประมาณได้จากการทดลองสามารถแปลงค่าค่ากระแสดีโพลาร์ไรเซชันและกระแสดีโพลาร์ไรเซชันที่อุณหภูมิใด ๆ ได้

$$R_{i,T_1} = R_{i,T_2} \exp \left\{ -\frac{E_a}{k} \cdot \left[\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right] \right\} \quad (3.9)$$

$$i_{polc}(t) = \sum_i \frac{U}{R_{i,T_1}} \exp(-t / R_{i,T_1} C_i) + \frac{U_0}{R_{\infty,T_1}}; \quad \text{for } T_p \rightarrow \infty \quad (3.10)$$

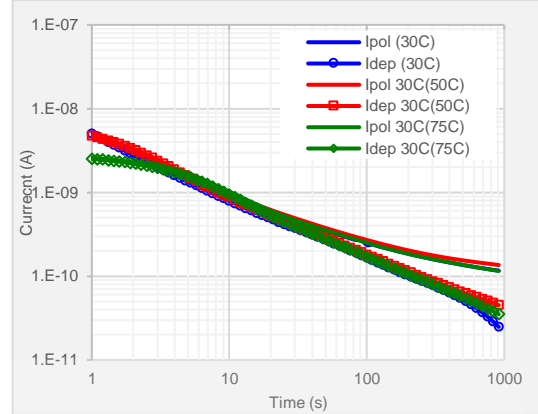
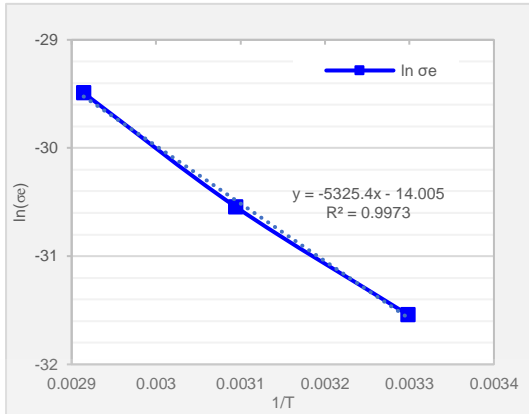
$$i_{dec}(t) = \sum_i \frac{U}{R_{i,T_1}} \exp(-t / R_{i,T_1} C_i); \quad \text{for } T_p \rightarrow \infty \quad (3.11)$$

เมื่อ T_1 และ T_2 คือ อุณหภูมิอ้างอิง (K)

T คือ อุณหภูมิใดๆ (K)

k คือ ค่าคงที่บ็อลทซ์มันน์ (Boltzmann constant; 8.62×10^{-5} [eV/K])

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



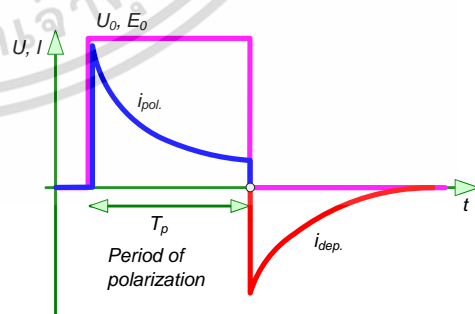
(ก) กราฟความสัมพันธ์จากสมการ Arrhenius (ข) PDC หลังปรับแก้อุณหภูมิไปที่ 30 °C
รูปที่ 3.16 ผลตอบสนองไดโพลีกริกของฉนวนกรณีอุณหภูมิแตกต่างกัน

3.8 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างฉนวนเสื่อมสภาพแยกชั้นจากความร้อนและความชื้นต่อการโพลาริเซชัน

จากการทดลองก่อนหน้าทำให้สามารถเข้าใจผลตอบสนองไดโพลีกริกต่อแรงดันป้อน เวลาที่ใช้ในการป้อนแรงดัน และอุณหภูมิของฉนวนสเตเตอร์บาร์แล้ว ในหัวข้อนี้จะจำลองสภาพฉนวนในเงื่อนไขแห้งและชื้น และเสื่อมสภาพจากความร้อนและความชื้น โดยทั่วไปความแห้งและความชื้นในฉนวนหมายถึง ปริมาณน้ำที่อยู่ในระบบฉนวนซึมผ่านขบวนการแพร่เข้าไปในระบบฉนวน ทำให้มีไอออนอิสระมากขึ้นส่งผลต่อกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน และในกรณีที่ได้รับความร้อนและความชื้นมากเกินไปจะทำให้เทปไมก้าแยกชั้นเนื่องจากอีพ็อกซีเรซินบริเวณรอยต่อในระบบฉนวนเปลี่ยนสภาพ ในการทดลองหัวข้อนี้ กรณีศึกษาดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 กรณีศึกษาฉนวนเสื่อมสภาพแยกชั้นจากความร้อนและความชื้นต่อการโพลาริเซชัน

กรณีศึกษา	ฉนวนเทียบกราวด์			
	แรงดัน (V)	เวลา (s)	อุณหภูมิ (°C)	เงื่อนไขฉนวน
1	100	1000	25	Ref ฉนวนปกติ
2	100	1000	25	160°C6hr ฉนวนแห้งปกติ
3	100	1000	25	160°C30hr เสื่อมจากความร้อน
4	100	1000	25	160°C36hr เสื่อมจากความร้อน
5	100	1000	25	wet1 ฉนวนชื้นปกติ
6	100	1000	25	wet2 เสื่อมจากความชื้น
7	100	1000	25	Wet3 เสื่อมจากความชื้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองดังรูปที่ 3.17 พบว่าความแห้งและความชื้นในเนื้อฉนวน มีผลต่อผลตอบสนองไดอิเล็กตริก กราฟกระแสดีโพลาร์ไรเซชันจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามปริมาณประจุอิสระในเนื้อฉนวน ประจุอิสระอาจเกิดจากความชื้นหรือจากฉนวนเสื่อมสภาพ ซึ่งในกรณีที่ฉนวนยังไม่แยกชั้นรูปร่างของกระแสดีโพลาร์ไรเซชันยังคงมีรูปร่างเป็นเส้นตรงในกราฟ log-log ในกรณีที่ฉนวนเสื่อมสภาพเกิดการแยกชั้นในเนื้อฉนวนรูปร่างของกระแสในช่วง 1 ถึง 100 วินาทีจะเปลี่ยนไปไม่เป็นเส้นตรง กระแสดีโพลาร์ไรเซชันสามารถอธิบายได้ดังสมการที่ 3.12 และฟังก์ชันผลตอบสนองไดอิเล็กตริก $f(t)$ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.13 ข้อดีของพารามิเตอร์ฟังก์ชันผลตอบสนองไดอิเล็กตริกคือไม่ขึ้นอยู่กับโครงสร้างฉนวนแต่ขึ้นอยู่กับสภาพฉนวน

$$i_{dep}(t) = -U_0 \cdot C_{vac} [f(t) - f(T_p + t)] \tag{3.12a}$$

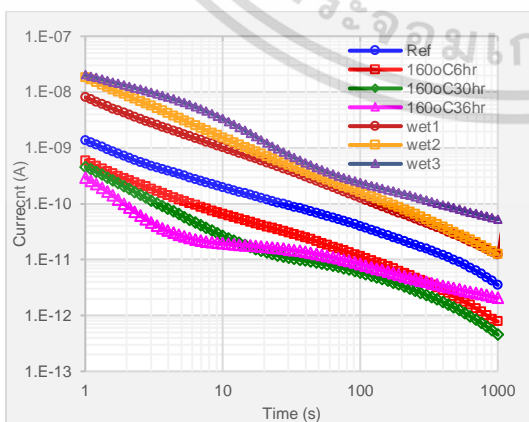
$$= -U_0 \cdot C_{vac} \cdot f(t); \quad \text{for } T_p \rightarrow \infty \tag{3.12b}$$

$$= -U_0 \cdot C_{50Hz} \cdot \frac{f(t)}{\epsilon_r} \tag{3.12c}$$

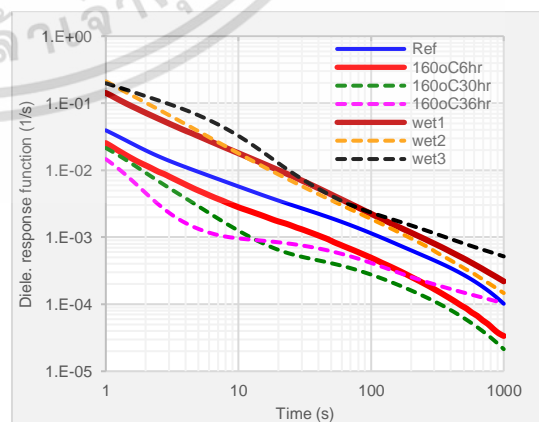
$$DRF = f(t) = \left| \frac{i_{dep}(t)}{C_{vac} U_0} \right| \tag{3.13}$$

$$EDRF = \frac{f(t)}{\epsilon_r} = \left| \frac{i_{dep}(t)}{C_{geo} U_0} \right| \tag{3.14}$$

จากสมการที่ 3.13 ในทางปฏิบัติไม่สามารถคำนวณค่าความจุสูญญากาศ (C_{vac}) ได้เนื่องจากไม่ทราบโครงสร้างที่แท้จริงของระบบฉนวนจึงไม่สามารถคำนวณฟังก์ชันผลตอบสนองไดอิเล็กตริกได้ตามสมการที่ 3.13 ดังนั้น วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอสมการคำนวณฟังก์ชันผลตอบสนองไดอิเล็กตริกสมมูลดังสมการที่ 3.14 ซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับฟังก์ชันผลตอบสนองไดอิเล็กตริกซึ่งผลลัพธ์ไม่ขึ้นกับโครงสร้างของฉนวน



(ก) ผลตอบสนองไดอิเล็กตริกในเงื่อนไขต่างๆ



(ข) EDRF

รูปที่ 3.17 ผลตอบสนองไดอิเล็กตริกของฉนวนกรณีฉนวนเสื่อมสภาพแยกชั้นจากความร้อนและความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.9 การศึกษาผลของขนาดสเตเตอร์ต่อฟังก์ชันไดอิเล็กตริกสมมูล

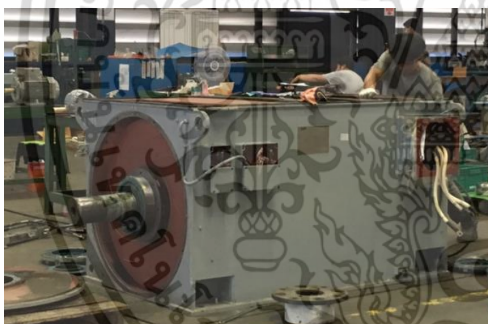
จากหัวข้อที่แล้วได้นำเสนอสมการคำนวณฟังก์ชันผลตอบสนองไดอิเล็กตริกสมมูลซึ่งสมการที่นำเสนอผลลัพธ์ไม่ขึ้นกับโครงสร้างของระบบฉนวน ดังนั้น ในหัวข้อนี้จึงออกแบบทดลองโดยประยุกต์ใช้สมการ 3.14 ที่นำเสนอเกี่ยวกับฉนวนสเตเตอร์บาร์ที่ขนาดความจุแตกต่างกันเช่น สเตเตอร์บาร์ตัวอย่าง ขดลวดสเตเตอร์พิกัดแรงดัน 6.6 kV มอเตอร์พิกัดแรงดัน 6.6 kV และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพิกัดแรงดัน 15.7 kV ดังรูปที่ 3.18 จากการศึกษาพบว่าขนาดของกระแสดีโพลาร์โรเซชันขึ้นอยู่กับโครงสร้างฉนวนดังรูปที่ 3.19 (ก) แต่เมื่อประยุกต์ใช้สมการคำนวณฟังก์ชันผลตอบสนองไดอิเล็กตริกสมมูลแล้ว ผลตอบสนองไดอิเล็กตริกของฉนวนไม่ขึ้นอยู่กับโครงสร้างดังรูปที่ 3.19 (ข) ดังนั้นสมการที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ใช้ได้กับฉนวนสเตเตอร์ทุกขนาด หรือกล่าวได้ว่าสมการที่นำเสนอคือสมการใช้สำหรับนอมอลไลซ์กระแสดีโพลาร์โรเซชัน



(ก) สเตเตอร์บาร์ตัวอย่าง 13.8 kV $C_{50\text{Hz}}$ 322 pF



(ข) ขดลวดสเตเตอร์ 6.6 kV $C_{50\text{Hz}}$ 1.19 nF

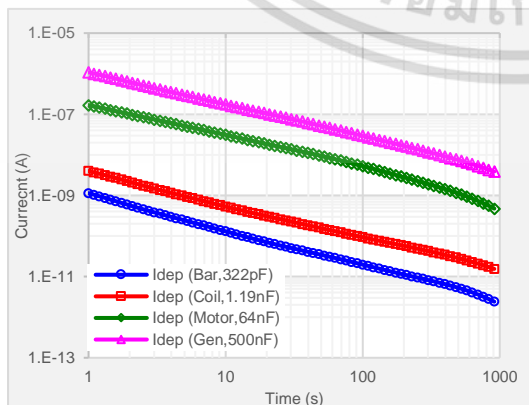


(ค) มอเตอร์ 6.6 kV $C_{50\text{Hz}}$ 322 pF

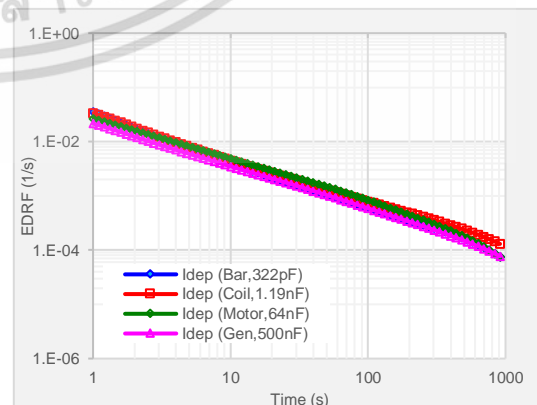


(ง) เครื่องกำเนิดไฟฟ้า 15.7 kV $C_{50\text{Hz}}$ 500 nF

รูปที่ 3.18 ผลตอบสนองไดอิเล็กตริกของฉนวนกรณีความจุไฟฟ้าแตกต่างกัน



(ก) ผลตอบสนองไดอิเล็กตริก



(ข) ผลตอบสนองไดอิเล็กตริกหลังนอมอลไลซ์

รูปที่ 3.19 ผลตอบสนองไดอิเล็กตริกของฉนวนกรณีค่าความจุไฟฟ้าแตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การประเมินสภาพฉนวนของฉนวนสแตเตอร์ ในเครื่องจักรกลหมุน ณ จุดใช้งาน

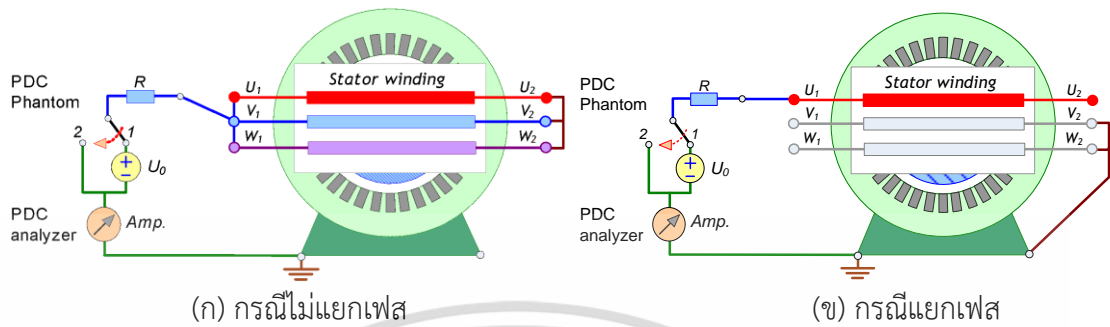
บทนี้แนะนำเกณฑ์แนะนำสำหรับการประเมินสภาพฉนวนขดลวดสแตเตอร์ในเครื่องจักรกลหมุน ณ จุดใช้งาน และตัวอย่างกรณีศึกษาการประยุกต์ใช้ทั้งในมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดกลางและขนาดใหญ่ในสภาพฉนวนที่แตกต่างกัน

4.1 การวัดผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของฉนวนขดลวดสแตเตอร์ ณ จุดใช้งาน

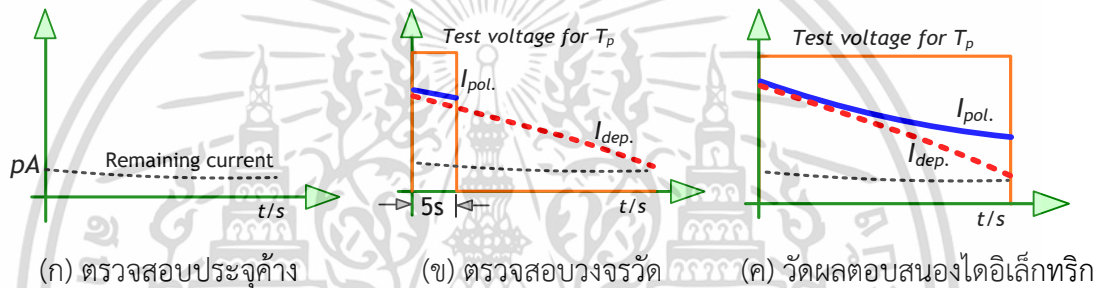
วงจรถ่ายทอดผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของฉนวนขดลวดสแตเตอร์ ณ จุดใช้งาน กรณีฉนวนเทียบกรวดแสดงดังรูปที่ 4.1 ในกรณีที่ขดลวดสแตเตอร์ในเครื่องจักรกลหมุนไม่มีกล่องสำหรับปลดแยกเฟสจะต่อวงจรตามรูปที่ 4.1(ก) ซึ่งทำให้ได้ผลตอบสนองไดอิเล็กทริกโดยรวมทั้ง 3 เฟสไม่สามารถวิเคราะห์แยกเฟสได้ อย่างไรก็ตามกรณีดังกล่าวส่วนใหญ่จะใช้กับขดลวดสแตเตอร์ในเครื่องจักรกลหมุนระดับแรงดันไม่เกิน 6.6 kV ในกรณีที่ขดลวดสแตเตอร์มีระดับแรงดันมากกว่า 6.6 kV หรือมีพิทกกำลังสูงส่วนใหญ่ขดลวดสแตเตอร์จะมีกล่องสำหรับปลดแยกเฟส สามารถวัดผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของฉนวนขดลวดสแตเตอร์แยกเฟสได้และระหว่างเฟสได้โดยต่อวงจรดังรูปที่ 4.1 (ข) ขั้นตอนการวัดผลตอบสนองไดอิเล็กทริกแสดงดังรูปที่ 4.2 ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้ ขั้นตอนที่ 1 ดังรูป 4.2(ก) ขั้นตอนนี้มีความสำคัญมากเนื่องจากการตรวจสอบประจุค้างในระบบฉนวนก่อนวัดผลตอบสนองไดอิเล็กทริก ถ้าหากประจุค้างในระบบฉนวนมีปริมาณมากจะมีผลต่อการวัดผลตอบสนองไดอิเล็กทริก เนื่องจากประจุค้างจะไปเพิ่มหรือลดขนาดของประจุย่อย (C) ในวงจรสมมูลซึ่งขึ้นอยู่กับค่าการแสดงขั้วของประจุค้างก่อนเริ่มวัด ประจุค้างที่พบส่วนใหญ่ในทางปฏิบัติคือประจุค้างจากแรงดันใช้งานกรณีที่เครื่องจักรกลหมุนเดินเครื่องใช้งานเป็นเวลานาน หรือประจุค้างจากการทดสอบค่าความต้านทานฉนวนด้วยแรงดันสูงกระแสตรง ดังนั้นเพื่อลดผลของประจุค้างต่อการวัดผลตอบสนองไดอิเล็กทริกจึงจำเป็นต้องอย่างยิ่งที่ต้องดิสชาร์จประจุค้างออกจากระบบฉนวนให้เหลือน้อยที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ ขั้นตอนที่ 2 ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่สำคัญอีกขั้นตอนหนึ่งคือเป็นการตรวจสอบการต่อวงจรวัดโดยจะป้อนแรงดันค่าต่ำๆ ด้วยเวลาสั้นๆ เพื่อตรวจสอบระดับกระแส ตรวจสอบค่าความจุไฟฟ้าที่ความถี่กำลัง ($C_{50\text{Hz}}$) และเป็นข้อมูลประกอบเพื่อพิจารณาการปรับค่าแรงดันทดสอบในขั้นตอนที่ 3 โดยก่อนเริ่มขั้นตอนที่ 3 ต้องดิสชาร์จประจุค้างในขั้นตอนที่ 2 ให้มีระดับต่ำใกล้เคียงกับขั้นตอนที่ 1 หลังจากนั้นจึงเริ่มขั้นตอนที่ 3 ซึ่งเป็นการวัดผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของระบบฉนวนจริง จากการศึกษาผลตอบสนองไดอิเล็กทริกทั้งในห้องปฏิบัติการและ ณ จุดใช้งานจริงพบว่าแรงดันทดสอบที่เหมาะสมไม่ควรเกิน 100 V และเวลาการโพลาริเซชันไม่ควรต่ำกว่า 500 วินาที และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิขณะทำการวัดวงจรที่ไม่เปลี่ยนแปลง และครบบันทึกอุณหภูมิฉนวน บันทึกข้อมูลแวดล้อม และประวัติการใช้งานเครื่องจักรกลหมุน เพื่อเป็นข้อมูลประกอบในการประเมินสภาพฉนวน



รูปที่ 4.1 วงจรการวัดผลตอบสนองไดอิเล็กทริกฉนวนขดลวดสเตเตอร์ ณ จุดใช้งาน



รูปที่ 4.2 ขั้นตอนการวัดผลตอบสนองไดอิเล็กทริก

เครื่องจักรกลหมุนที่ศึกษาวัดผลตอบสนองไดอิเล็กทริก ณ จุดใช้งานในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ แบ่งออกเป็น 5 กลุ่ม จำนวน 80 เครื่อง (123 ขดลวดสเตเตอร์) ข้อมูลดังตารางที่ 4.1 ในสภาพการใช้งานเครื่องจักรกลหมุนที่แตกต่างกัน

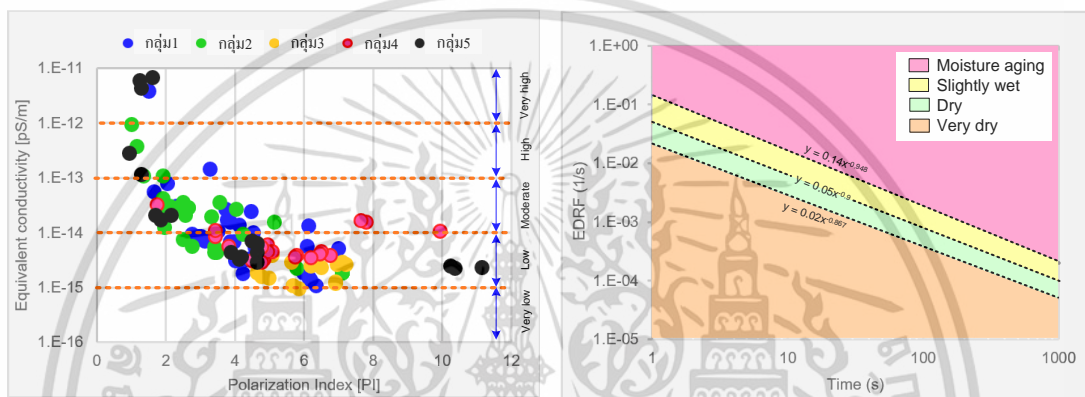
ตารางที่ 4.1 เครื่องจักรกลหมุนที่วัดผลตอบสนองไดอิเล็กทริก ณ จุดใช้งาน

กลุ่ม	พิกัดแรงดัน (kV)	ความจุไฟฟ้าของขดลวดสเตเตอร์ (nF)	จำนวนขดลวดสเตเตอร์
1	6.6	18 - 99	38
2	6.6	100 - 299	34
3	6.6	300 - 460	14
4	6.6 - 11	150 - 230	15
5	11 - 23	350 - 500	22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 เกณฑ์แนะนำสำหรับการประเมินสภาพนวนขดลวดสเตเตอร์

จากการศึกษาผลตอบสนองไดอิเล็กทริกในห้องปฏิบัติการในบทที่ 3 และจากผลการวัดผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของเครื่องจักรกลหมุนจริงทั้งขนาดกลางและขนาดใหญ่ในภาคอุตสาหกรรมตามตารางที่ 4.1 จากข้อมูลทั้งหมดสามารถแบ่งระดับความนำไฟฟ้าได้โดยประยุกต์ใช้ค่าความนำไฟฟ้าสมมูลดังรูปที่ 4.3 (ก) และแบ่งระดับความแห้งและชื้นในฉนวนได้โดยประยุกต์ใช้ฟังก์ชันผลตอบสนองไดอิเล็กทริกสมมูลดังรูปที่ 4.3 (ข) และเกณฑ์แนะนำที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำหรับการประเมินสภาพนวนขดลวดสเตเตอร์ในเครื่องจักรกลหมุน ณ จุดใช้งาน ตั้งแต่พิกัดแรงดัน 6.6 kV ถึง 24 kV ดังตารางที่ 4.2



(ก) ความสัมพันธ์ระหว่าง σ_e และ PI (ข) เกณฑ์แนะนำสำหรับ EDRF

รูปที่ 4.3 ความนำไฟฟ้าสมมูลและเกณฑ์แนะนำสำหรับ EDRF

ตารางที่ 4.2 เกณฑ์แนะนำสำหรับการประเมินสภาพนวนขดลวดสเตเตอร์

Contamination / moisture / dry		Degradation condition	
Equivalent conductivity σ_e (pS/m)	Condition	Equivalent dielectric response function, EDRF (1/s)	Condition
<1E-14	Low	$< 0.02t^{-0.867}$	Very dry
1E-14 – 0.9E-13	Moderate	$0.02t^{-0.867} - 0.05t^{-0.9}$	Dry
1E-13 – 0.9E-12	High	$0.05t^{-0.9} - 0.14t^{-0.948}$	Slightly wet
> 1E-12	Very high	$> 0.14t^{-0.948}$	Moisture aging

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การศึกษาการไหลเวียนของฉนวนขดลวดสเตเตอร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ณ จุดใช้งาน

หัวข้อนี้เป็นตัวอย่างกรณีศึกษาในการประเมินสภาพฉนวนสเตเตอร์มอเตอร์ขนาดกลางและขนาดใหญ่ในสภาพของฉนวนที่แตกต่างกัน 6 กรณีศึกษา ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 กรณีศึกษาผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของฉนวนขดลวดสเตเตอร์มอเตอร์ ณ จุดใช้งาน

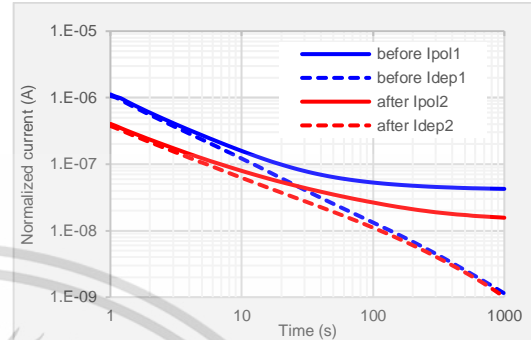
กรณีศึกษา	kW	kV	Type of cooling	Condition
1	625	6.6	Air-to-air heat exchanger	ก่อนและหลังทำความสะอาดสิ่งปนเปื้อนประเภทฝุ่น
2	257	6.6	Open-circuit ventilation	ก่อนและหลังปรับปรุงสภาพฉนวน
3	600	6.6	Air-to-air heat exchanger	ฉนวนรับความร้อนจากการเสียดสีของ wedge แม่เหล็ก
4	608	6.6	Open-circuit ventilation	ก่อนและหลังทำความสะอาดสิ่งปนเปื้อนจากน้ำมันเบร้ง
5	257	6.6	Open-circuit ventilation	สภาพฉนวนขึ้นเนื่องจากหยุดใช้งานเป็นเวลานาน
6	22,500	11.0	Air-to-water heat exchanger	ก่อนและหลังทำความสะอาดสิ่งปนเปื้อนจากผงฝุ่นในอุตสาหกรรมเคมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

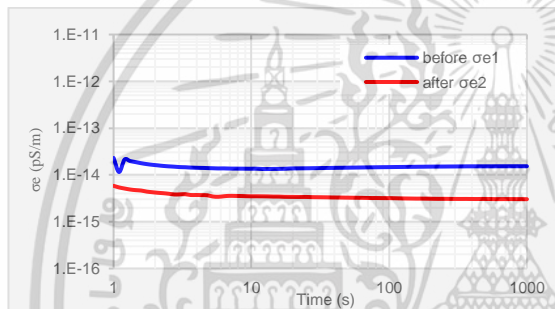
กรณีศึกษาที่ 1: ผลตอบสนองไดโอดีเล็กทริกของมอเตอร์ก่อนและหลังทำความสะอาดสิ่งปนเปื้อนประเภทฝุ่น



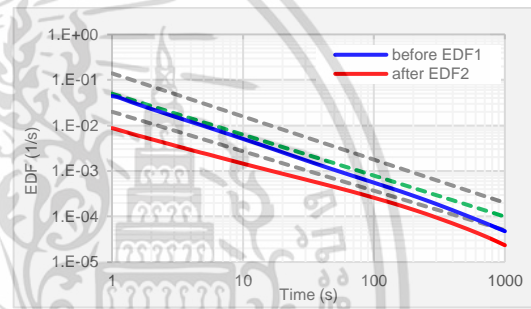
(ก) สิ่งปนเปื้อนประเภทฝุ่น



(ข) ผลตอบสนองไดโอดีเล็กทริก



(ค) σ_e ก่อน (1) และหลัง (2)



(ง) EDF ก่อน (1) และหลัง (2)

รูปที่ 4.4 ผลตอบสนองไดโอดีเล็กทริกของมอเตอร์กรณีศึกษาที่ 1

ประเมินสภาพนวนสเตรเตอร์ของมอเตอร์กรณีศึกษาที่ 1

(ก) ก่อนทำความสะอาดสิ่งปนเปื้อนประเภทฝุ่น

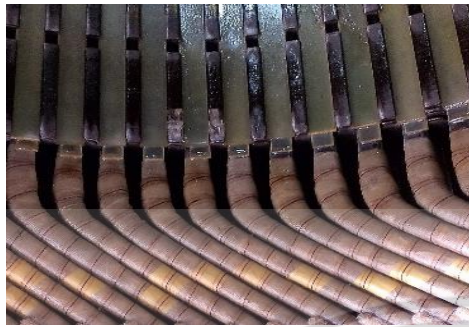
1. ค่าความนำไฟฟ้าสมมูล : พบว่ามีสิ่งปนเปื้อนบนฉนวนนวนสเตรเตอร์นำไฟฟ้าระดับปานกลาง
2. ฟังก์ชันผลตอบสนองไดโอดีเล็กทริกสมมูล : พบว่าไม่มีความชื้นภายในฉนวนสเตรเตอร์ในร่องสลิตและไม่พบการแยกชั้นระหว่างเทปไมก้าและอีพ็อกซีเรซิน

(ข) หลังทำความสะอาดสิ่งปนเปื้อนประเภทฝุ่น

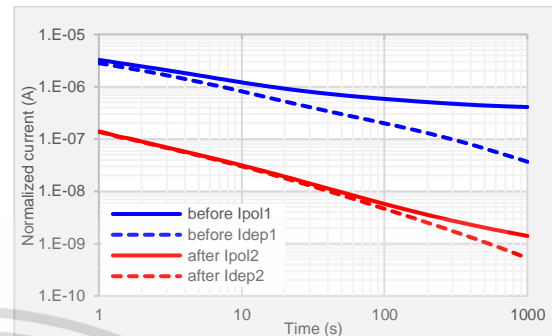
1. ค่าความนำไฟฟ้าสมมูล : พบว่าฉนวนนวนสเตรเตอร์สะอาดนำไฟฟ้าระดับต่ำ
2. ฟังก์ชันผลตอบสนองไดโอดีเล็กทริกสมมูล : พบว่าฉนวนสเตรเตอร์ในร่องสลิตแห้งมากแต่ไม่พบการแยกชั้นระหว่างเทปไมก้าและอีพ็อกซีเรซิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

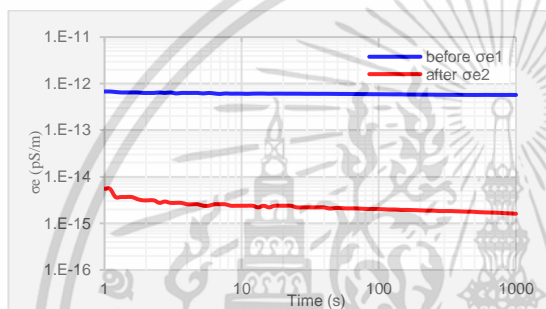
กรณีศึกษาที่ 2: ผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของมอเตอร์ก่อนและหลังปรับปรุงสภาพฉนวน



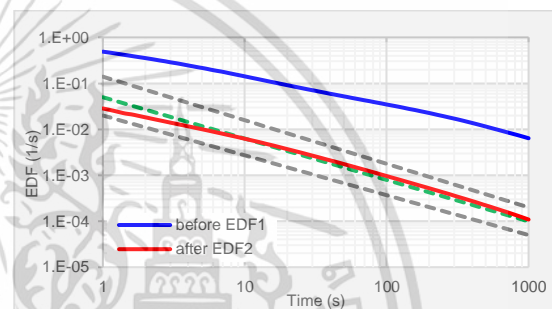
(ก) สภาพฉนวนหลังปรับปรุง



(ข) ผลตอบสนองไดอิเล็กทริก



(ค) σ_e ก่อน (1) และหลัง (2)



(ง) EDF ก่อน (1) และหลัง (2)

รูปที่ 4.5 ผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของมอเตอร์กรณีศึกษาที่ 2

ประเมินสภาพฉนวนสเตเตอร์ของมอเตอร์กรณีศึกษาที่ 2

(ก) ก่อนปรับปรุงสภาพฉนวน

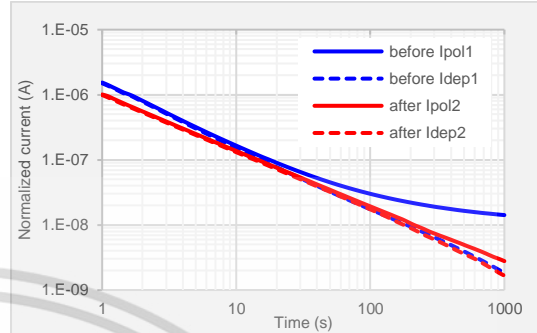
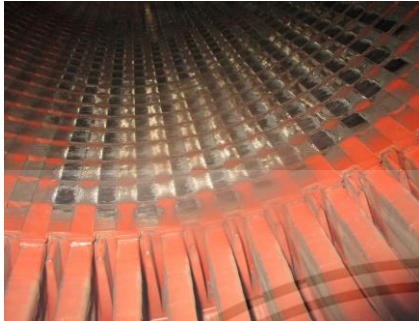
1. ค่าความนำไฟฟ้าสมมูล : พบว่าเนื้อฉนวนสเตเตอร์นำไฟฟ้าระดับสูง
2. ฟังก์ชันผลตอบสนองไดอิเล็กทริกสมมูล : พบว่ามีความชื้นปริมาณมากภายในฉนวนสเตเตอร์ในร่องสลิตแต่ไม่พบการแยกชั้นระหว่างเทปไมก้าและอีพ็อกซีเรซิน แต่หากความชื้นอยู่ภายในระบบฉนวนนานจะทำให้ฉนวนเสื่อมสภาพ ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าลดลงและความร้อนจะสะสมในรอยต่อระบบฉนวน ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการระบายความร้อนลดลง

(ข) หลังปรับปรุงสภาพฉนวน

1. ค่าความนำไฟฟ้าสมมูล : พบว่าผิวฉนวนสเตเตอร์สะอาดนำไฟฟ้าระดับต่ำ
2. ฟังก์ชันผลตอบสนองไดอิเล็กทริกสมมูล : พบว่าไม่มีความชื้นภายในฉนวนสเตเตอร์ในร่องสลิตและไม่พบการแยกชั้นระหว่างเทปไมก้าและอีพ็อกซีเรซิน

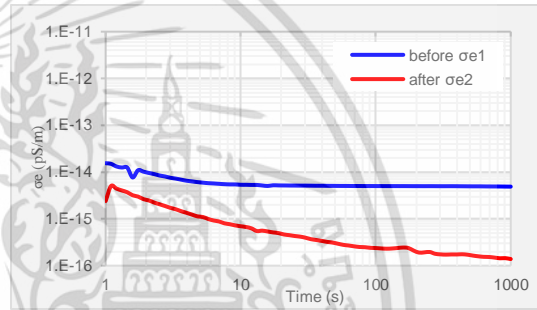
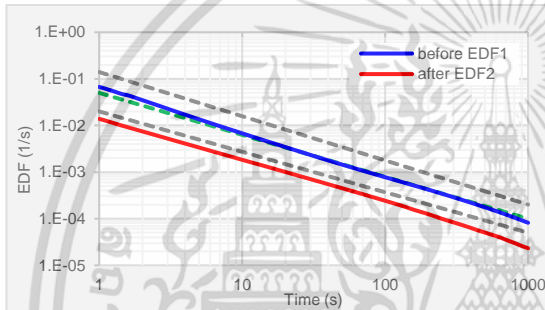
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีศึกษาที่ 3: ผลตอบสนองไดโอดีเล็กทริกของมอเตอร์ก่อนและหลังฉนวนรับความร้อนจากการเสียดสีของ wedge แม่เหล็ก



(ก) ฉนวนรับความร้อนจากการเสียดสีของ wedge

(ข) ผลตอบสนองไดโอดีเล็กทริก



(ค) σ_e ก่อน (1) และหลัง (2)

(ง) EDRF ก่อน (1) และหลัง (2)

รูปที่ 4.6 ผลตอบสนองไดโอดีเล็กทริกของมอเตอร์กรณีศึกษาที่ 3

ประเมินสภาพฉนวนสเตเตอร์ของมอเตอร์กรณีศึกษาที่ 3

(ก) ก่อนฉนวนรับความร้อนจากการเสียดสีของ wedge แม่เหล็ก

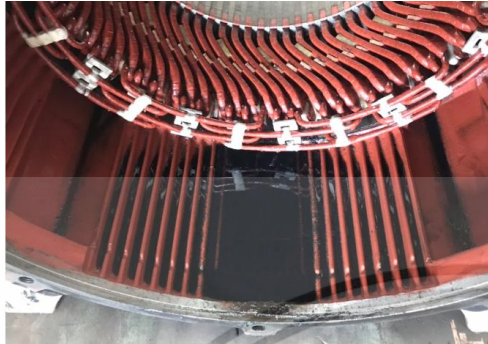
1. ค่าความนำไฟฟ้าสมมูล : พบว่าฉนวนสเตเตอร์สะอาดนำไฟฟ้าระดับต่ำ
2. ฟังก์ชันผลตอบสนองไดโอดีเล็กทริกสมมูล : พบว่าไม่มีความขึ้นภายในฉนวนสเตเตอร์ในร่องสล๊อตและไม่พบการแยกชั้นระหว่างเทปไมก้าและอีพ็อกซีเรซิน

(ข) หลังฉนวนรับความร้อนจากการเสียดสีของ wedge แม่เหล็ก

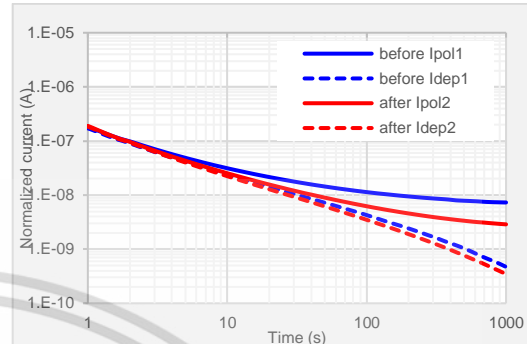
1. ค่าความนำไฟฟ้าสมมูล : พบว่าฉนวนสเตเตอร์สะอาดนำไฟฟ้าระดับต่ำและความนำจากฉนวนสเตเตอร์ในร่องสล๊อตต่ำมากสาเหตุจากอีพ็อกซีเรซินแห้งมาก และรูปร่างความนำไฟฟ้าสมมูลจะลดลงตามเวลาไม่คงที่ สาเหตุจากประจุที่เคลื่อนที่ผ่านระบบฉนวนมีน้อยมาก
2. ฟังก์ชันผลตอบสนองไดโอดีเล็กทริกสมมูล : พบว่าฉนวนสเตเตอร์ในร่องสล๊อตแห้งมากแต่ไม่พบการแยกชั้นระหว่างเทปไมก้าและอีพ็อกซีเรซิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

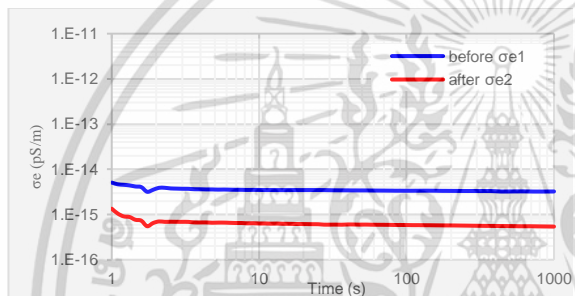
กรณีศึกษาที่ 4: ผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของมอเตอร์ก่อนและหลังทำความสะอาดสิ่งปนเปื้อนเป็นอนจกน้ำมันแบร็ง



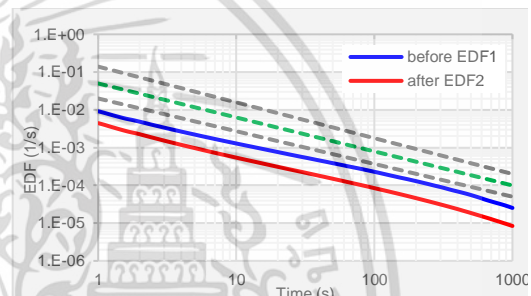
(ก) สิ่งปนเปื้อนจากน้ำมันแบร็ง



(ข) ผลตอบสนองไดอิเล็กทริก



(ค) σ_e ก่อน (1) และหลัง (2)



(ง) EDRF ก่อน (1) และหลัง (2)

รูปที่ 4.7 ผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของมอเตอร์กรณีศึกษาที่ 4

ประเมินสภาพฉนวนสเตเตอร์ของมอเตอร์กรณีศึกษาที่ 4

(ก) ก่อนทำความสะอาดสิ่งปนเปื้อนเป็นอนจกน้ำมันแบร็ง

1. ค่าความนำไฟฟ้าสมมูล : พบว่ามีสิ่งปนเปื้อนบนผิวฉนวนสเตเตอร์นำไฟฟ้าระดับต่ำ หมายถึง น้ำมันแบร็งยังไม่เปลี่ยนสภาพนำไฟฟ้า
2. ฟังก์ชันผลตอบสนองไดอิเล็กทริกสมมูล : พบว่าฉนวนสเตเตอร์ในร่องสลิตแห้งมากแต่ไม่พบการแยกชั้นระหว่างเทปไมก้าและอีพ็อกซีเรซิน

(ข) หลังทำความสะอาดสิ่งปนเปื้อนเป็นอนจกน้ำมันแบร็ง

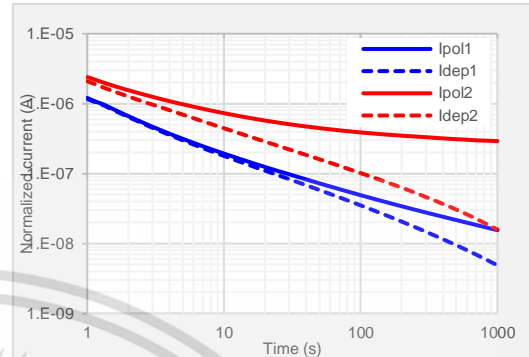
1. ค่าความนำไฟฟ้าสมมูล : พบว่าผิวฉนวนสเตเตอร์สะอาดนำไฟฟ้าระดับต่ำและความนำจากฉนวนสเตเตอร์ในร่องสลิตต่ำมากสาเหตุจากอีพ็อกซีเรซินแห้งมากหลังการอบ
2. ฟังก์ชันผลตอบสนองไดอิเล็กทริกสมมูล : พบว่าฉนวนสเตเตอร์ในร่องสลิตแห้งมากขึ้นจากการอบหลังจากทำความสะอาดน้ำมันแบร็งแต่ไม่พบการแยกชั้นระหว่างเทปไมก้าและอีพ็อกซีเรซิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

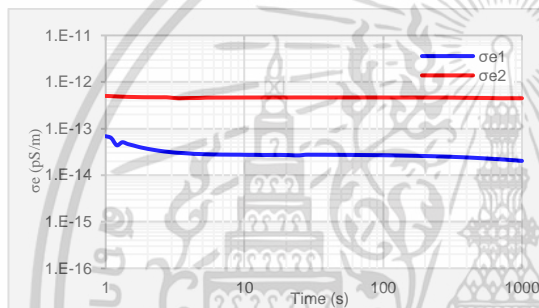
กรณีศึกษาที่ 5: ผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของมอเตอร์กรณีสภาพนวนขึ้นเนื่องจากหยุดใช้งานเป็นเวลานาน



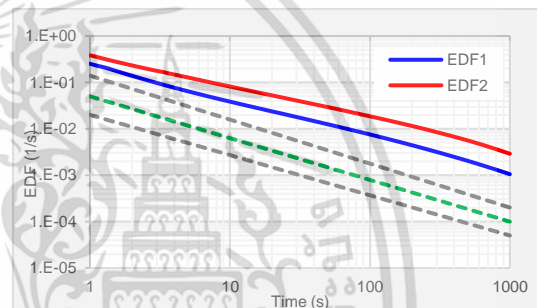
(ก) สภาพนวนขึ้นเนื่องจากหยุดใช้งานเป็นเวลานาน



(ข) ผลตอบสนองไดอิเล็กทริก



(ค) σ_e ผนวนขึ้นของมอเตอร์ (1) และ (2)



(ง) EDFR ผนวนขึ้นของมอเตอร์ (1) และ (2)

รูปที่ 4.8 ผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของมอเตอร์กรณีศึกษาที่ 5

ประเมินสภาพนวนสเตเตอร์ของมอเตอร์กรณีศึกษาที่ 5

(ก) สภาพนวนขึ้นเนื่องจากหยุดใช้งานเป็นเวลานานมอเตอร์ตัวที่ 1

1. ค่าความนำไฟฟ้าสมมูล : พบว่าเมื่อผนวนสเตเตอร์นำไฟฟ้าระดับปานกลาง
2. ฟังก์ชันผลตอบสนองไดอิเล็กทริกสมมูล : พบว่ามีความขึ้นปริมาณมากภายในผนวนสเตเตอร์ในร่องสลอตแต่ไม่พบการแยกชั้นระหว่างเทปไมก้าและอีพ็อกซีเรซิน

(ข) สภาพนวนขึ้นเนื่องจากหยุดใช้งานเป็นเวลานานมอเตอร์ตัวที่ 2

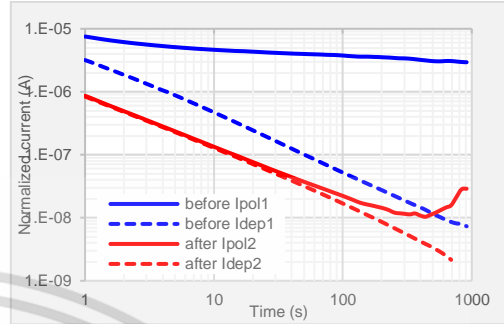
1. ค่าความนำไฟฟ้าสมมูล : พบว่าเมื่อผนวนสเตเตอร์นำไฟฟ้าระดับสูง ดังนั้นความวางแผนบำรุงรักษาลดปริมาณความขึ้นก่อนเดินเครื่องมอเตอร์
2. ฟังก์ชันผลตอบสนองไดอิเล็กทริกสมมูล : พบว่ามีความขึ้นปริมาณมากภายในผนวนสเตเตอร์ในร่องสลอตแต่ไม่พบการแยกชั้นระหว่างเทปไมก้าและอีพ็อกซีเรซิน แต่หากความขึ้นอยู่ภายในระบบผนวนนานจะทำให้ผนวนเสื่อมสภาพ ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าลดลงและความร้อนจะสะสมในรอยต่อระบบผนวน ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการระบายความร้อนลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

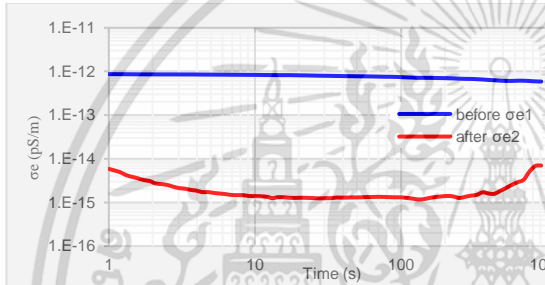
กรณีศึกษาที่ 6: ผลตอบสนองไดโพลีกริกของมอเตอร์ก่อนและหลังทำความสะอาดสิ่งปนเปื้อนจากผงฝุ่นในอุตสาหกรรมเคมี



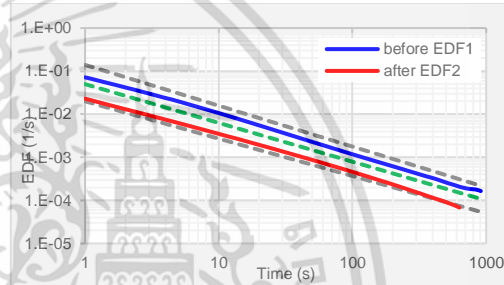
(ก) สิ่งปนเปื้อนจากผงฝุ่นในอุตสาหกรรมเคมี



(ข) ผลตอบสนองไดโพลีกริก



(ค) σ_e ก่อน (1) และหลัง (2)



(ง) EDF ก่อน (1) และหลัง (2)

รูปที่ 4.9 ผลตอบสนองไดโพลีกริกของมอเตอร์กรณีศึกษาที่ 6

ประเมินสภาพนวนสเตรเตอร์ของมอเตอร์กรณีศึกษาที่ 6

(ก) ก่อนทำความสะอาดสิ่งปนเปื้อนจากผงฝุ่นในอุตสาหกรรมเคมี

1. ค่าความนำไฟฟ้าสมมูล : พบว่ามีสิ่งปนเปื้อนบนผิวฉนวนสเตรเตอร์นำไฟฟ้าระดับสูง
2. ฟังก์ชันผลตอบสนองไดโพลีกริกสมมูล : พบว่าเริ่มมีความขึ้นภายในฉนวนสเตรเตอร์ในร่องสล็อตและไม่พบการแยกชั้นระหว่างเทปไมก้าและอีพ็อกซีเรซิน

(ข) หลังทำความสะอาดสิ่งปนเปื้อนจากผงฝุ่นในอุตสาหกรรมเคมี

1. ค่าความนำไฟฟ้าสมมูล : พบว่ามีสิ่งปนเปื้อนบนผิวฉนวนสเตรเตอร์นำไฟฟ้าระดับต่ำ และรูปร่างค่าความนำไฟฟ้าสมมูลที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาที่มีความผิดปกติคือค่าความนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นช่วงปลาย
2. ฟังก์ชันผลตอบสนองไดโพลีกริกสมมูล : พบว่าไม่มีความขึ้นภายในฉนวนสเตรเตอร์ในร่องสล็อตและไม่พบการแยกชั้นระหว่างเทปไมก้าและอีพ็อกซีเรซิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การศึกษาการไหลเวียนของฉนวนขดลวดสเตเตอร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ณ จุดใช้งาน

หัวข้อนี้เป็นตัวอย่างกรณีศึกษาในการประเมินสภาพฉนวนสเตเตอร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดกลางและขนาดใหญ่ในสภาพของฉนวนที่แตกต่างกัน 6 กรณีศึกษา ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 กรณีศึกษาผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของฉนวนขดลวดสเตเตอร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ณ จุดใช้งาน

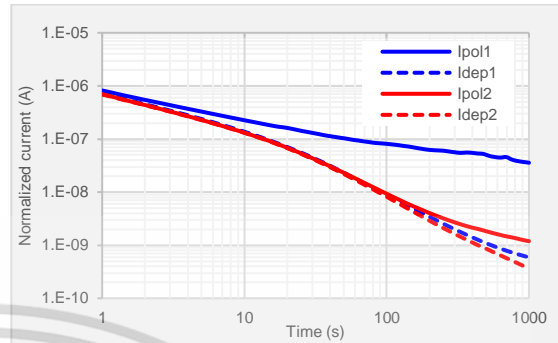
กรณีศึกษา	MVA	kV	Type of cooling	Condition
1	51	11.5	Indirect air cooling	มีสิ่งปนเปื้อนบนผิวฉนวน
2	51	11.5	Indirect air cooling	ผลของความชื้นหลังหยุดเดินเครื่อง
3	154	15.7	Indirect air cooling	ก่อนและหลังเปิด heater
4	154	15.7	Indirect air cooling	ผลตอบสนองไดอิเล็กทริกปี 2019, 2021
5	211	15.7	Indirect hydrogen cooling	มีสิ่งปนเปื้อนน้ำมันบนผิวฉนวน
6	823	23.0	Direct water & Indirect hydrogen cooling	ผลตอบสนองไดอิเล็กทริกปี 2015, 2017, 2019, 2021

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

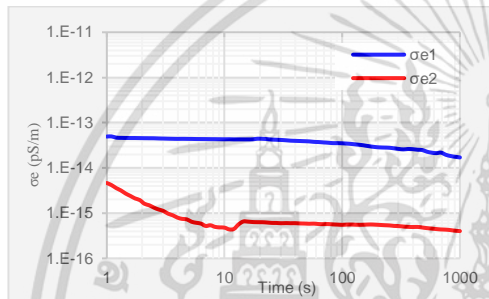
กรณีศึกษาที่ 1: ผลตอบสนองไดโพลีกริกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากรณีมีสิ่งปนเปื้อนบนผิวฉนวน



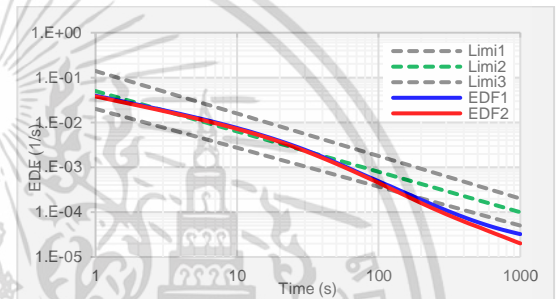
(ก) มีสิ่งปนเปื้อนบนผิวฉนวน



(ข) ผลตอบสนองไดโพลีกริก



(ค) σ_e ก่อน (1) และหลัง (2)



(ง) EDRF ก่อน (1) และหลัง (2)

รูปที่ 4.10 ผลตอบสนองไดโพลีกริกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากรณีศึกษาที่ 1

ประเมินสภาพฉนวนสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าศึกษาที่ 1

(ก) ก่อนทำความสะอาดสิ่งปนเปื้อนบนผิวฉนวน

1. ค่าความนำไฟฟ้าสมมูล : พบว่ามีสิ่งปนเปื้อนบนผิวฉนวนสเตเตอร์นำไฟฟ้าระดับปานกลาง
2. ฟังก์ชันผลตอบสนองไดโพลีกริกสมมูล : พบว่าไม่มีความขึ้นภายในฉนวนสเตเตอร์ในร่องสล๊อตและไม่พบการแยกชั้นระหว่างเทปไมก้าและอีพ็อกซีเรซิน

(ข) หลังทำความสะอาดสิ่งปนเปื้อนบนผิวฉนวน

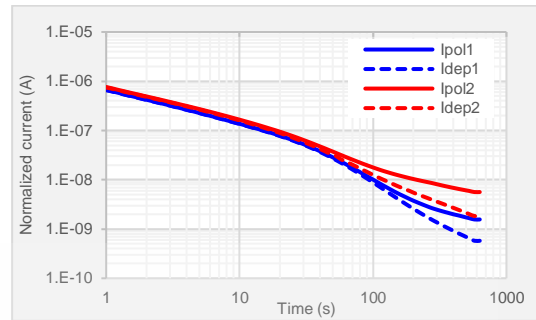
1. ค่าความนำไฟฟ้าสมมูล : พบว่ามีสิ่งปนเปื้อนบนผิวฉนวนสเตเตอร์นำไฟฟ้าระดับต่ำมาก
2. ฟังก์ชันผลตอบสนองไดโพลีกริกสมมูล : พบว่าไม่มีความขึ้นภายในฉนวนสเตเตอร์ในร่องสล๊อตและไม่พบการแยกชั้นระหว่างเทปไมก้าและอีพ็อกซีเรซิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

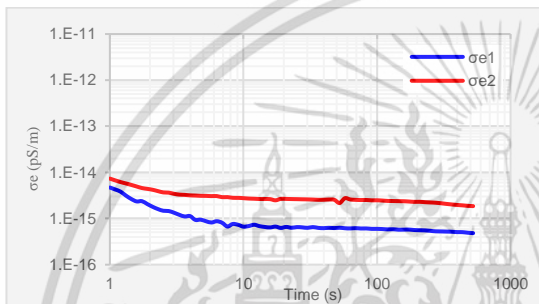
กรณีศึกษาที่ 2: ผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากรณีหลังหยุดเดินเครื่อง



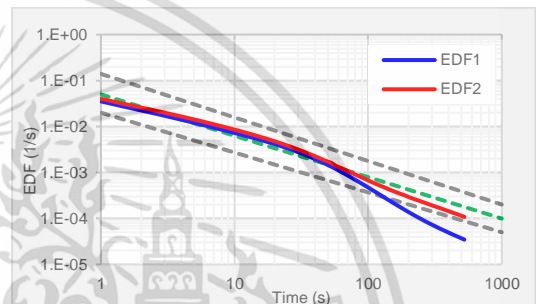
(ก) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลังหยุดเดิน



(ข) ผลตอบสนองไดอิเล็กทริก



(ค) σ_e หลังหยุดเดินเครื่อง 1 วัน (1) และ 10 วัน (2)



(ง) EDFR หลังหยุดเดินเครื่อง 1 วัน (1) และ 10 วัน (2)

รูปที่ 4.11 ผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากรณีศึกษาที่ 2

ประเมินสภาพนวนสแตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าศึกษาที่ 2

(ก) หลังหยุดเดินเครื่อง 1 วัน

1. ค่าความนำไฟฟ้าสมมูล : พบว่ามีสิ่งปนเปื้อนบนผิวฉนวนสแตเตอร์นำไฟฟ้าระดับต่ำมาก
2. ฟังก์ชันผลตอบสนองไดอิเล็กทริกสมมูล : พบว่าไม่มีความขึ้นภายในฉนวนสแตเตอร์ในร่องสลิตและไม่พบการแยกชั้นระหว่างเทปไมก้าและอีพ็อกซีเรซิน

(ข) หลังหยุดเดินเครื่อง 10 วัน

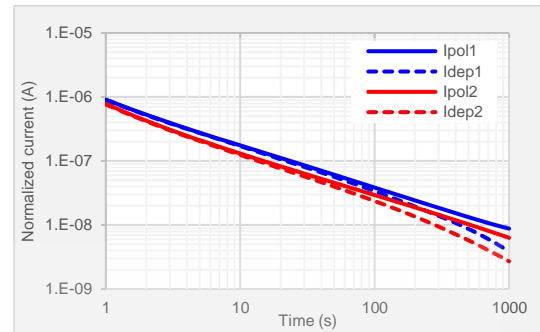
1. ค่าความนำไฟฟ้าสมมูล : พบว่ามีสิ่งปนเปื้อนบนผิวฉนวนสแตเตอร์หรือความชื้นบริเวณปลายขดลวดสแตเตอร์นำไฟฟ้าระดับต่ำ (ความนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นหลังหยุดเดินเครื่อง 10 วัน)
2. ฟังก์ชันผลตอบสนองไดอิเล็กทริกสมมูล : พบว่าไม่มีความขึ้นภายในฉนวนสแตเตอร์ในร่องสลิตและไม่พบการแยกชั้นระหว่างเทปไมก้าและอีพ็อกซีเรซิน แต่พบมีความชื้นบริเวณปลายขดลวดสแตเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

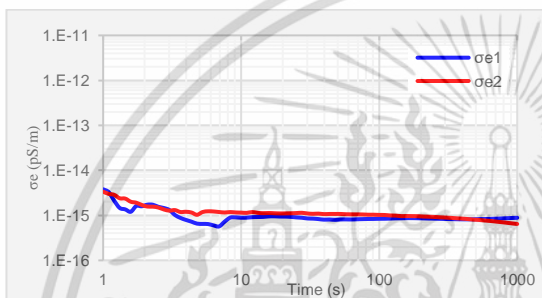
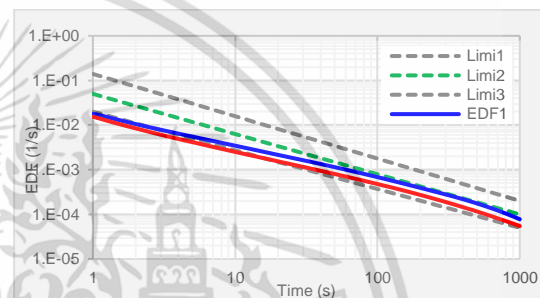
กรณีศึกษาที่ 3: ผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากรณีก่อนและหลังเปิด heater



(ก) การเตรียมวงจรวัด



(ข) ผลตอบสนองไดอิเล็กทริก

(ค) σ_e ก่อน (1) และหลัง (2)

(ง) EDRF ก่อน (1) และหลัง (2)

รูปที่ 4.12 ผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากรณีศึกษาที่ 3

ประเมินสภาพนวนสแตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าศึกษาที่ 3

(ก) ก่อนเปิด heater

1. ค่าความนำไฟฟ้าสมมูล : พบว่ามีสิ่งปนเปื้อนบนผิวฉนวนสแตเตอร์นำไฟฟ้าระดับต่ำ
2. ฟังก์ชันผลตอบสนองไดอิเล็กทริกสมมูล : พบว่าไม่มีความขึ้นภายในฉนวนสแตเตอร์ในร่องสล๊อตและไม่พบการแยกชั้นระหว่างเทปไมก้าและอีพ็อกซีเรซิน

(ข) หลังเปิด heater

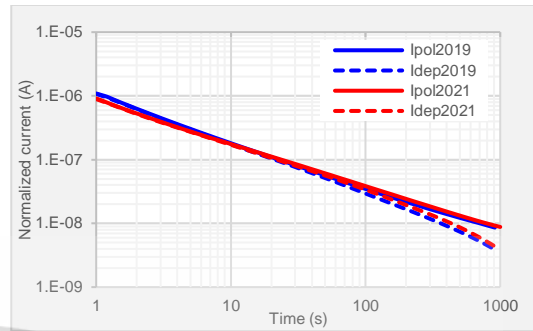
1. ค่าความนำไฟฟ้าสมมูล : พบว่ามีสิ่งปนเปื้อนบนผิวฉนวนสแตเตอร์นำไฟฟ้าระดับต่ำ
2. ฟังก์ชันผลตอบสนองไดอิเล็กทริกสมมูล : พบว่าความขึ้นภายในฉนวนสแตเตอร์ในร่องสล๊อตลดลงหลังเปิด heater และไม่พบการแยกชั้นระหว่างเทปไมก้าและอีพ็อกซีเรซิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

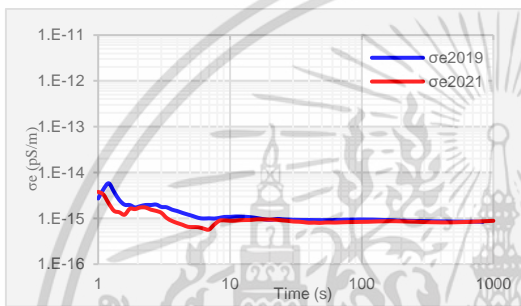
กรณีศึกษาที่ 4: ผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากรณีติดตามผลตามอายุการใช้งาน



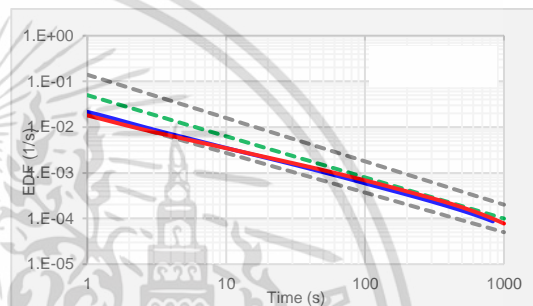
(ก) ก่อนทำความสะอาด



(ข) ผลตอบสนองไดอิเล็กทริก



(ค) σ_e ปี 2019 และ 2021



(ง) EDRF ปี 2019 และ 2021

รูปที่ 4.13 ผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากรณีศึกษาที่ 4

ประเมินสภาพนวนสแตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าศึกษาที่ 4

(ก) ผลตอบสนองไดอิเล็กทริกปี 2019

1. ค่าความนำไฟฟ้าสมมูล : พบว่ามีสิ่งปนเปื้อนบนผิวฉนวนสแตเตอร์นำไฟฟ้าระดับต่ำ
2. ฟังก์ชันผลตอบสนองไดอิเล็กทริกสมมูล : พบว่าไม่มีความขึ้นภายในฉนวนสแตเตอร์ในร่องสลิตและไม่พบการแยกชั้นระหว่างเทปไมก้าและอีพ็อกซีเรซิน

(ข) ผลตอบสนองไดอิเล็กทริกปี 2021

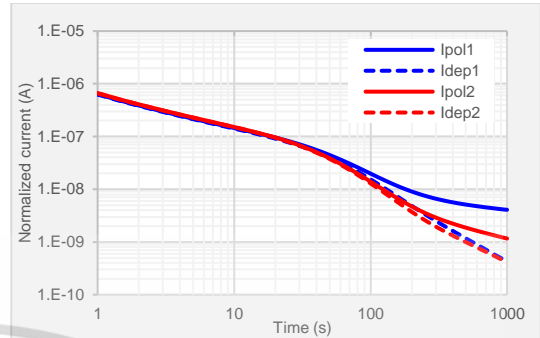
1. ค่าความนำไฟฟ้าสมมูล : พบว่ามีสิ่งปนเปื้อนบนผิวฉนวนสแตเตอร์นำไฟฟ้าระดับต่ำ มีค่าใกล้เคียงกับปี 2019
2. ฟังก์ชันผลตอบสนองไดอิเล็กทริกสมมูล : พบว่าไม่มีความขึ้นภายในฉนวนสแตเตอร์ในร่องสลิตและไม่พบการแยกชั้นระหว่างเทปไมก้าและอีพ็อกซีเรซิน มีค่าใกล้เคียงกับปี 2019

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

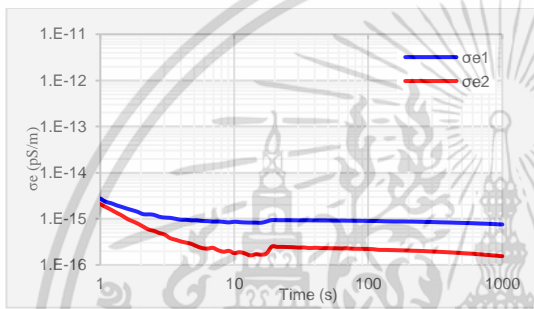
กรณีศึกษาที่ 5: ผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากรณีมีสิ่งปนเปื้อนจากน้ำมันแบร์ริง



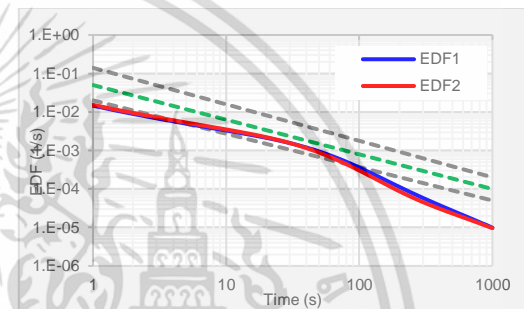
(ก) มีสิ่งปนเปื้อนน้ำมันบนผิวฉนวน



(ข) ผลตอบสนองไดอิเล็กทริก



(ค) σ_e ก่อน (1) และหลัง (2)



(ง) EDRF ก่อน (1) และหลัง (2)

รูปที่ 4.14 ผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากรณีศึกษาที่ 5

ประเมินสภาพฉนวนสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าศึกษาที่ 5

(ก) ก่อนทำความสะอาดสิ่งปนเปื้อนประเภทน้ำมันแบร์ริง

1. ค่าความนำไฟฟ้าสมมูล : พบว่ามีสิ่งปนเปื้อนบนผิวฉนวนสเตเตอร์นำไฟฟ้าระดับต่ำ แต่ขนาดความนำไฟฟ้าสมมูลสูงกว่าเฟสอื่น
2. ฟังก์ชันผลตอบสนองไดอิเล็กทริกสมมูล : พบว่าไม่มีความขึ้นภายในฉนวนสเตเตอร์ในร่องสลิตและไม่พบการแยกชั้นระหว่างเทปไมก้าและอีพ็อกซีเรซิน

(ข) หลังทำความสะอาดสิ่งปนเปื้อนประเภทน้ำมันแบร์ริง

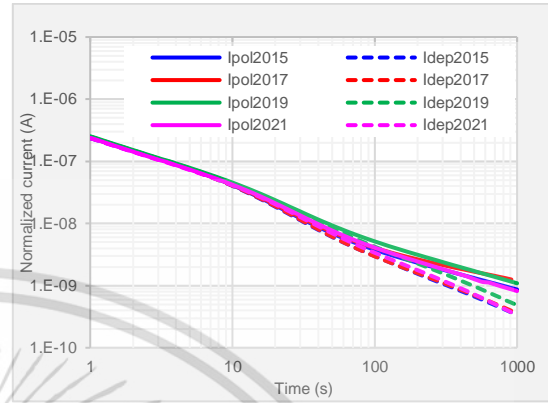
1. ค่าความนำไฟฟ้าสมมูล : พบว่ามีสิ่งปนเปื้อนบนผิวฉนวนสเตเตอร์นำไฟฟ้าระดับต่ำมาก และความนำไฟฟ้าสมมูลใกล้เคียงกับเฟสอื่น
2. ฟังก์ชันผลตอบสนองไดอิเล็กทริกสมมูล : พบว่าไม่มีความขึ้นภายในฉนวนสเตเตอร์ในร่องสลิตและไม่พบการแยกชั้นระหว่างเทปไมก้าและอีพ็อกซีเรซิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

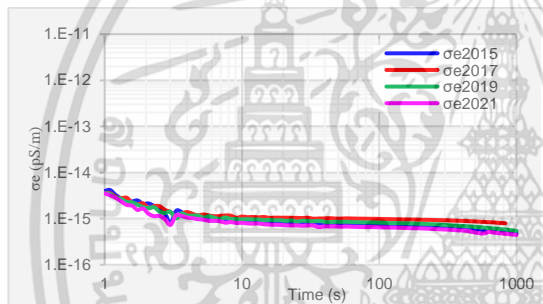
กรณีศึกษาที่ 6: ผลตอบสนองไดโพลีกริกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากรณีติดตามผลตามอายุการใช้งาน



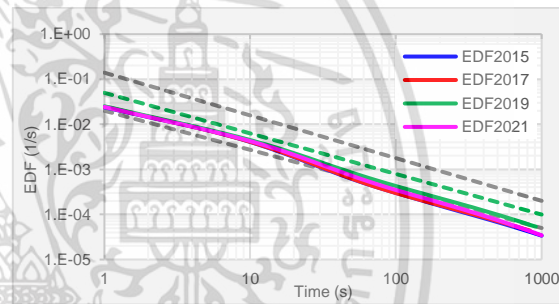
(ก) การเตรียมขมวด



(ข) ผลตอบสนองไดโพลีกริกปี 2015, 2017, 2019, 2021



(ค) σ_e ปี 2015, 2017, 2019, 2021



(ง) EDF ปี 2015, 2017, 2019, 2021

รูปที่ 4.15 ผลตอบสนองไดโพลีกริกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากรณีศึกษาที่ 6

ประเมินสภาพฉนวนสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าศึกษาที่ 6

ผลตอบสนองไดโพลีกริกปี 2015, 2017, 2019, 2021

1. ค่าความนำไฟฟ้าสมมูล : พบว่ามีสิ่งปนเปื้อนบนผิวฉนวนสเตเตอร์นำไฟฟ้าระดับต่ำ หมายถึงฉนวนสเตเตอร์ยังคงสภาพใกล้เคียงเดิม สภาพฉนวนไม่ถูกแรงให้เสื่อมจากสิ่งปนเปื้อนตลอดช่วงการใช้งาน
2. ฟังก์ชันผลตอบสนองไดโพลีกริกสมมูล : พบว่าไม่มีความขึ้นภายในฉนวนสเตเตอร์ในร่องสลิตและไม่พบการแยกชั้นระหว่างเทปไมก้าและอีพ็อกซีเรซิน หมายถึงสภาพฉนวนไม่ถูกแรงจากความชื้นหรือความร้อนให้เสื่อมตลอดช่วงการใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดสอบ

5.1 สรุปผลการทดสอบ

จากการศึกษาผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของฉนวนสแตเตอร์เครื่องจักรกลหมุนขนาดกลาง และขนาดใหญ่ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ พบว่ากระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันเพิ่มและลดตามระดับแรงดันทดสอบโดยมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นระหว่างแรงดันทดสอบกับกระบวนการโพลาริเซชันในระบบฉนวน กรณีผลของเวลาที่ใช้ป้อนแรงดันทดสอบสำหรับฉนวนสแตเตอร์เทียบกราวด์ พบว่าการป้อนแรงดันทดสอบด้วยเวลา 500 วินาที กระแสดีโพลาริเซชันสามารถประเมินค่าพารามิเตอร์ตัวเก็บประจุย่อย C_j ในวงจรสมมูลฉนวนมีค่าใกล้เคียงกับตัวเก็บประจุย่อยที่ประเมินจากกระแสดีโพลาริเซชันเมื่อป้อนแรงดันทดสอบนาน 5000 วินาที กรณีผลของอุณหภูมิของฉนวนเปลี่ยนแปลงพบว่ากระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิฉนวนเพิ่มขึ้น หรือค่าความต้านทานฉนวนและค่าความต้านทานย่อยลดลง และพบว่าค่าพลังงานงานการกระตุ้น E_a ประมาณ 0.46 eV หรือ 44.27 kJ/mol สามารถใช้ปรับแก้ค่าต้านทานฉนวนและค่าความต้านทานย่อยในวงจรสมมูลฉนวนที่อุณหภูมิใดๆ ไปที่อุณหภูมิอ้างอิงได้ กรณีผลของสภาพฉนวนสแตเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงพบว่าความแห้งและความชื้นในเนื้อฉนวนมีผลต่อผลตอบสนองไดอิเล็กทริกและในกรณีที่ฉนวนเสื่อมสภาพเกิดการแยกชั้นในเนื้อฉนวนรูปร่างของกระแสในช่วง 1 ถึง 100 วินาทีจะเปลี่ยนไปไม่เป็นเส้นตรง

เพื่อวิเคราะห์ผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของฉนวนสแตเตอร์ได้อย่างเข้าใจชัดเจนไม่คลุมเครือ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสนอเทคนิคที่ใช้ประเมินสภาพฉนวนด้วยพารามิเตอร์ใหม่ได้แก่ ความนำไฟฟ้าสมมูล (σ_e) และฟังก์ชันผลตอบสนองไดอิเล็กทริกสมมูล (EDRF) ซึ่งพารามิเตอร์ที่นำเสนอดังกล่าวจะไม่ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของฉนวน และนำเสนอวิธีการนอร์มัลไลเซชันกระแสดีโพลาริเซชันซึ่งจะทำให้เปรียบเทียบผลการวัดได้ง่ายขึ้น และพบว่าพารามิเตอร์ใหม่ที่นำเสนอมีประโยชน์อย่างมากในการประเมินสภาพฉนวน ผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นข้อมูลเพิ่มเติมจากการประเมินสภาพฉนวนแบบดั้งเดิมด้วยการประเมินสภาพฉนวนจากค่าความต้านทานฉนวน ดัชนีโพลาริเซชัน และแฟกเตอร์พลังงานสูญเสีย ดังตัวอย่างการประยุกต์ใช้ในบทที่ 4

ขั้นตอนการประเมินสภาพฉนวนที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มี 5 ขั้นตอนดังไดอะแกรมรูปที่ 5.1

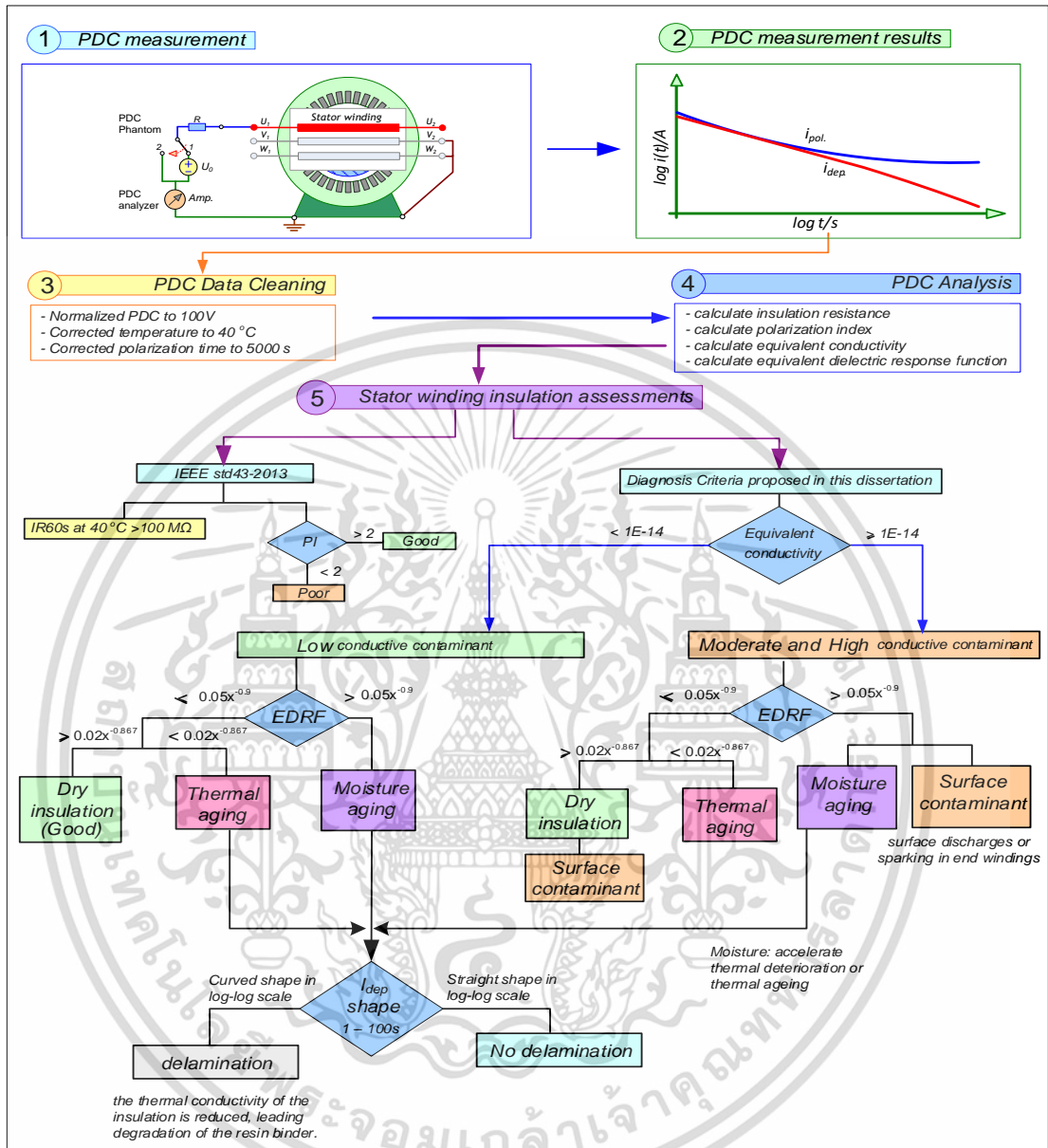
ขั้นตอนที่ 1 วัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน

ขั้นตอนที่ 2 นอร์มัลไลเซชันกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณพารามิเตอร์ $R_j C_j$ ด้วยเทคนิค Curve fitting และคำนวณพารามิเตอร์ R_j ไปที่อุณหภูมิอ้างอิง 40 องศาเซลเซียส คำนวณกระแสดีโพลาริเซชันไปที่อุณหภูมิอ้างอิง 40 องศาเซลเซียส คำนวณกระแสดีโพลาริเซชันไปที่เวลา T_p เข้าสู่ขั้นถัดไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 4 คำนวณฟังก์ชันผลตอบสนองไดโพลีเมตริกสมมูลและคำนวณค่าความนำไฟฟ้าสมมูล
 ขั้นตอนที่ 5 ประเมินสภาพฉนวนตามตารางที่ 4.2



รูปที่ 5.1 ขั้นตอนการประเมินสภาพฉนวน

5.2 ข้อเสนอแนะ

ควรเก็บข้อมูลการทดสอบฉนวนสเตเตอร์ที่เกิดการเสื่อมสภาพกรณีต่างๆ เพิ่มเติมเพื่อเป็นแนวทางในการสร้างรูปแบบเพื่อวิเคราะห์สภาพฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนขนาดใหญ่ทั้งมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์ฉนวนเพื่อประเมินสภาพโดยรวมควรร่วมกับเทคนิคอื่น เช่น การวัดดิสชาร์จบางส่วน การแพคเกจกำลังสูญเสียไดโพลีเมตริก เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 งานวิจัยในอนาคต

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอข้อมูลทางวิชาการที่มีคุณค่าเกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลต่อการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสตีโพลาริเซชัน นำเสนอเทคนิคการนอร์มอลไลซ์ผลการวัด ไปที่ระดับแรงดันทดสอบอ้างอิง เวลาที่ใช้ในการโพลาริเซชันอ้างอิง และอุณหภูมิอ้างอิง ทำให้สามารถเปรียบเทียบผลการทดสอบฉนวนสเตเตอร์ที่สภาวะแตกต่างกันได้ และนำเสนอพารามิเตอร์ไดอิเล็กทริกตัวใหม่ รวมทั้งนำเสนอเกณฑ์แนะนำสำหรับการประเมินสภาพฉนวนขดลวดสเตเตอร์ของเครื่องจักรกลหมุน อย่างไรก็ตามข้อมูลที่ได้จากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นข้อมูลพื้นฐานเพื่อต่อยอดงานวิจัยในอนาคต มีหัวข้อดังต่อไปนี้

- 1) ศึกษาผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของฉนวนขดลวดสเตเตอร์ระหว่างเฟสกรณีฉนวนเสื่อมสภาพแยกชั้นจากความร้อนและความชื้น
- 2) ศึกษาผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของฉนวนขดลวดสเตเตอร์ระหว่างเฟสกรณี Slot wedge, Top packing, Midstick packing และ Bottom packing ชำรุด
- 3) พัฒนาสมการและสร้างโมเดลฉนวนอธิบายกรณีกระแสตีโพลาริเซชันกลับซ้ำ
- 4) ศึกษาผลตอบสนองความถี่ของระบบฉนวน (frequency response analysis, FRA) กรณีฉนวนระหว่างชั้นขดลวด (Turn insulation) บกพร่อง
- 5) หาค่าพลังงานงานการกระตุ้น E_a ของฉนวนขดลวดสเตเตอร์กรณีฉนวนเสื่อมสภาพแยกชั้นจากความร้อนและความชื้น และสร้างสมการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง E_a กับ ฉนวนเสื่อมสภาพ
- 6) ศึกษาผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของฉนวนขดลวดสเตเตอร์ที่เสื่อมสภาพกรณีรับความเครียดจากแรงดันกระชากจากแหล่งจ่าย Inverter-fed drives (IFDs)
- 7) ประยุกต์และพัฒนาเทคนิคการประเมินสภาพฉนวนขดลวดสเตเตอร์ด้วยการวิเคราะห์ผลตอบสนองไดอิเล็กทริก ร่วมกับการวัดผลตอบสนองความถี่ของระบบฉนวนและการวัดดิสชาร์จบางส่วน

เอกสารอ้างอิง

- [1] J. -. Alff, V. Der Houhanessian, W. S. Zaengl and A. J. Kachler. "A Novel, Compact Instrument for The Measurement and Evaluation of Relaxation Currents Conceived for On-Site Diagnosis of Electric Power Apparatus" **The 2000 IEEE International Symposium on Electrical Insulation**, Anaheim, CA, USA, April 2000. pp. 161-167.
- [2] M. Muhr, C. Sumereder, "Condition Assessment of Electric Machines" **International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis**, Changwon, Republic of Korea. 2006.
- [3] S. Bhumiwat, "Interpretation of dielectric spectroscopy results in time and frequency domains for power cables", **CIGRE 2010**. D1-216.
- [4] S. A. Bhumiwat, "On-site non-destructive dielectric response diagnosis of rotating machines," in **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, vol. 17, no. 5, October 2010, pp. 1453-1460.
- [5] E. Obame, P. Rain, O. Gallot-Lavallée and G. Tripot, "Detection of Artificial Insulation Defects in a Medium-Voltage Motor by Dielectric Spectroscopy Analysis," in **IEEE Transactions on Energy Conversion**, vol. 27, no. 2, June 2012, pp. 270-276.
- [6] T. Tran, O. Gallot-Lavallée, P. Rain and G. Tripot, "The Use of Dielectric Spectroscopy for Detection of Insulation Defects in End Turns of Medium Voltage Motors," in **IEEE Transactions on Energy Conversion**, vol. 27, no. 4, Dec. 2012, pp. 905-911.
- [7] Greg C. Stone, Ian Culbert, Edward A. Boulter and Hussein Dhirani. **Electrical Insulation for Rotating Machines : Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair**. Second edition. Canada : Wiley-IEEE Press. 2014.
- [8] Andreas Küchler. **High Voltage Engineering Fundamentals-Technology-Applications**. Germany : Springer-Verlag GmbH. 2018.
- [9] E. Kuffel, W.S. Zaengl, and J. Kuffel, **High Voltage Engineering: Fundamentals**. Butterworth-Heinemann, Second edition 2000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [10] Partzsch. 2021. "Pol-wheel windings." [Online]. Available : <https://en.partzsch.de/pol-wheel-windings>
- [11] Electrical Images Search Engine. 2021 "Synchronous Motor Rotor With Amortisseur Winding.G.E, Fort Wayne." [Online]. Available : <http://emadrlc.blogspot.com/2012/07/synchronous-motor-rotor-with.html>.
- [12] Partzsch. 2021. "Slip-ring rotor windings." [Online]. Available : <https://en.partzsch.de/slip-ring-rotors>
- [13] E. A. Boulter and G. C. Stone, "Historical development of rotor and stator winding insulation materials and systems," in **IEEE Electrical Insulation Magazine**, vol. 20, no. 3, pp. 25-39
- [14] G. C. Stone and G. H. Miller, "Progress in rotating-machine insulation systems and processing," in **IEEE Electrical Insulation Magazine**, vol. 29, no. 4, pp. 45-51
- [15] One By Zero Electronics. 2021. "What Are Random Wound And Form Wound Coils In Electric Motor ?" [Online] Available : <https://onebyzeroelectronics.blogspot.com/2017/03/what-are-random-wound-and-form-wound.html>
- [16] Conseil International des Grands Réseaux Électriques, "Guide of methods for determining the condition of stator winding insulation and their effectiveness in large motors," **Technical Brochure**, Ref. 662, 2013.
- [17] W. McDermid, "Insulation systems and monitoring for stator windings of large rotating machines," **IEEE Electrical Insulation Magazine**, Vol. 9, No. 4, 1993, pp. 7-15.
- [18] M. Farahani, E. Gockenbach, H. Borsi, K. Schäfer and M. Kaufhold, "Behavior of machine insulation systems subjected to accelerated thermal aging test," in **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, vol. 17, no. 5, pp. 1364-1372
- [19] T.S. Ramu, **Reliability and Life Estimation of Power Equipment**. NewAge International Publisher, 2009

- [20] G. Griffith, S. Tucker, J. Milsom and G. Stone, "Problems with modern air-cooled generator stator winding insulation," in **IEEE Electrical Insulation Magazine**, vol. 16, no. 6, pp. 6-10
- [21] Kao, Kwan Chi. **Dielectric phenomena in solids: with emphasis on physical concepts of electronic processes**. UK : Elsevier Academic Press. 2004.
- [22] S. A. Bhumiwat, "Insulation resistance and polarization of rotating machines," 2011 **Electrical Insulation Conference (EIC)**., 2011, pp. 249-253
- [23] **IEEE std. 43. 2013**. IEEE Recommended Practice for testing Insulation Resistance of Electric Machinery.
- [24] **IEEE std. 286 2000** IEEE Recommended Practice for Measurement of Power Factor Tip-Up of Electric Machinery Stator Coil Insulation.
- [25] W. S. Zaengl, "Dielectric spectroscopy in time and frequency domain for HV power equipment. I. Theoretical considerations," in **IEEE Electrical Insulation Magazine**, vol. 19, no. 5, pp. 5-19, Sept.-Oct. 2003
- [26] W. S. Zaengl, "Applications of dielectric spectroscopy in time and frequency domain for HV power equipment," in **IEEE Electrical Insulation Magazine**, vol. 19, no. 6, pp. 9-22, Nov.-Dec. 2003
- [27] F.H. Kreuger, **Partial discharge detection in high-voltage equipment**. Butterworths, London, 1989.
- [28] **IEC 60270**. High-voltage test techniques – Partial discharge measurements, International Electrotechnical Commission, Switzerland. 2015
- [29] Norasage Pattanadech Partial Discharge Inception Voltage Characteristics of Mineral Oil, **Dissertation**, Graz University of Technology, December 2013.
- [30] A.K. Jonscher, "The 'universal' dielectric response. I" in **IEEE Electrical Insulation Magazine**, Year 1990, Volume: 6, Issue: 2.
- [31] A.K. Jonscher, "The 'universal' dielectric response. II" in **IEEE Electrical Insulation Magazine**, Year 1990, Volume: 6, Issue: 3.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [32] A.K. Jonscher, "The 'universal' dielectric response. III" in **IEEE Electrical Insulation Magazine**, Year 1990, Volume: 6, Issue: 4.
- [33] M. Farahani, H. Borsi and E. Gockenbach, "Dielectric response studies on insulating system of high voltage rotating machines," in **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, vol. 13, no. 2, pp. 383-393, April 2006
- [34] V. Der Houhanessian, "Measurement and analysis of dielectric response in oil-paper insulation systems," **Ph.D. thesis**, Swiss Federal Institute of Technology, No. 12832, Zurich, 1998.
- [35] A. Helgeson and U. Gafvert, "Dielectric response measurements in time and frequency domain on high voltage insulation with different response," **Proceedings of 1998 International Symposium on Electrical Insulating Materials**. 1998 Asian International Conference on Dielectrics and Electrical Insulation. 30th Symposium on Electrical Insulating Ma, 1998, pp. 393-398
- [36] S. A. Bhumiwat, "Field experience in insulation diagnosis of industrial high voltage motors using dielectric response technique," **2009 IEEE Electrical Insulation Conference**, 2009
- [37] S. A. Bhumiwat, "On-site non-destructive diagnosis of in-service power cables by Polarization / Depolarization Current analysis," **2010 IEEE International Symposium on Electrical Insulation**, 2010, pp. 1-5
- [38] S. A. Bhumiwat, "Depolarization index for dielectric aging indicator of rotating machines," in **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, vol. 22, no. 6, pp. 3126-3132, December 2015
- [39] M. Farahani, H. Borsi and E. Gockenbach, "Dielectric spectroscopy in time and frequency domain on insulation system of high voltage rotating machines," **Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Solid Dielectrics**, 2004. ICSD 2004., 2004, pp. 60-63 Vol.1
- [40] T. K. Saha, "Review of modern diagnostic techniques for assessing insulation condition in aged transformers," in **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, vol. 10, no. 5, pp. 903-917, Oct.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส. 2003 สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [41] A. Helgeson and U. Gafvert, "Dielectric response during curing of a resin-rich insulation system for rotating machines," **1999 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena** (Cat. No.99CH36319), 1999, pp. 289-292 vol.1
- [42] T. K. Saha, R. Middleton and A. Thomas, "Understanding frequency & time domain polarisation methods for the insulation condition assessment of power transformers," **2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting**, 2009, pp. 1-8
- [43] "Dielectric response methods for diagnostics of power transformers," in **IEEE Electrical Insulation Magazine**, vol. 19, no. 3, pp. 12-18, May-June 2003
- [44] A. K. Jonscher, **Dielectric Relaxation in Solids**, Chelsea Dielectrics Press, London, UK, 1983.
- [45] U. Gafvert, G. Frimpong, and J. Fuhr, "Modeling of dielectric measurements on power transformers," **presented at the Proc. CIGRÉ**, Paris, France, 1998.
- [46] U. Gafvert, L. Adeen, M. Tapper, P. Ghasemi and B. Jonsson, "Dielectric spectroscopy in time and frequency domain applied to diagnostics of power transformers," **Proceedings of the 6th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials** (Cat. No.00CH36347), 2000, pp. 825-830 vol.2
- [47] E. David and L. Lamarre, "Low-frequency dielectric response of epoxy-mica insulated generator bars during multi-stress aging," in **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, vol. 14, no. 1, pp. 212-226, Feb. 2007
- [48] E. David, R. Taghizad, L. Lamarre and D. N. Nguyen, "Investigation on the low frequency dielectric response of ground-wall insulation of rotating machine windings," **2003 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena**, 2003, pp. 157-160
- [49] E. David, et al., "PDC measurements to assess machine insulation," in **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, vol. 17, pp. 1461-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส 1469, 2010.การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [50] S. A. Bhumiwat, "Application of Polarisation Depolarisation Current (PDC) technique on fault and trouble analysis of stator insulation," **Cigre Sc A1 & D1 Joint Colloquim**, October 24, 2007, pp. 79-87.
- [51] S. A. Bhumiwat, "The latest Technology for On-Site Insulation Condition Assessment of Electrical Power Apparatus," **Electricity Engineers Association of New Zealand**, Christchurch, June 21-22, 2002.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



บทความที่ 1

VLF Dielectric Response and HF Localized Dielectric Discharge
Measurement for Rotating Machine Insulation Assessment

Editor-in-Chief: Pavlos Lazaridis

ISSN 1550-4646

Journal of Mobile Multimedia

JMM



River Publishers

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Home / Archives / 2020: Vol 16 Iss 1-2

Published: 2020-08-14

Smart Innovative Technology for Future Industry and Multimedia Applications

- | | |
|--|---------|
| <p>VLF Dielectric Response and HF Localized Dielectric Discharge Measurement for Rotating Machine Insulation Assessment</p> <p>P. Nimsanong, N. Pattanadech</p> <p>PDF HTML</p> | 1–22 |
| <p>A Novel Dual Magnetodiode for Wireless Sensor Networks</p> <p>Chalin Sutthinet, Amporn Poyai, Toempong Phetchakul</p> <p>PDF HTML</p> | 23–44 |
| <p>High Sensitivity Non-split Drain MAGFET for Wireless Sensor Networks</p> <p>Rattapong Nakachai, Amporn Poyai, Toempong Phetchakul</p> <p>PDF HTML</p> | 45–64 |
| <p>Evaluation of UHF Transfer Function in a Power Transformer for Real-Time Partial Discharge Detection</p> <p>Sathaporn Promwong, Thanadol Tiengthong</p> <p>PDF HTML</p> | 65–84 |
| <p>SATSEARCHTORY: Searching Online Platform for Niche Product in a Metropolitan Area</p> <p>Sutipong Sutipitakwong, Pornsuree Jamsri</p> <p>PDF HTML</p> | 85–102 |
| <p>A Conceptual Model of E-Commerce Taxation Using a Circular Model for E-Commerce Sustainability</p> <p>Somkeit Noamna, Supaporn Kiattisin</p> <p>PDF HTML</p> | 103–130 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

VLF Dielectric Response and HF Localized Dielectric Discharge Measurement for Rotating Machine Insulation Assessment

P. Nimsanong and N. Pattanadech*

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Chalongkrung Road, Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

E-Mail: phethai.ni@gmail.com; norasage.pa@kmitl.ac.th

**Corresponding Author*

Received 01 May 2020; Accepted 14 May 2020;
Publication 17 August 2020

Abstract

This paper represents the very low frequency (VLF) dielectric response and high frequency (HF) localized dielectric discharge measurement for rotating machine insulation assessment. The integral conditions of stator winding insulation, the so-called aging condition, were investigated by the dielectric response measuring technique. The polarization and depolarization currents in the VLF range from 0.0001 to 1 Hz were measured under an external step electric field. The local conditions of stator winding insulation, the so-called weak spot condition, were examined by the partial discharge (PD) measuring technique. The PD pulse currents were detected by a capacitive sensor in a wide-band range, where the bandwidth of the measuring system was set between 30 kHz and 30 MHz. The medium voltage rotating machine rated 6.6 kV and 240 to 2,270 kW under different service conditions, i.e., new stator winding, moisture contamination, dirt contamination as well as thermally and severely aged insulation, was studied. Besides, four case studies on measuring the PD in service rotating machines rated 11–15 kV, 7100 to 211,000 kW as well as the attenuation of the PD pulses were conducted and demonstrated. With several case studies, this paper introduces new dielectric parameters, the so-called charge ratio (QR) and charge difference gradient (QDG), to identify

Journal of Mobile Multimedia, Vol. 16_1-2, 1–22.

doi: 10.13052/jmm1550-4646.16121

© 2020 River Publishers

the dielectric mechanism occurring in the stator winding insulation caused by the polarization and conduction processes. It can be concluded that the proposed parameters are a valuable tool for assessing the aging condition. In the case of the PD measurement, it was found that the PD pulse is strongly attenuated in the slot section. This paper also introduces the combination of both the dielectric response and PD measurement results, which can be very useful for assessing a complete insulation condition in the rotating machine. Moreover, the criteria for insulation conditions are suggested in this paper to evaluate the integral and local conditions for the rotating machine insulation. The local discharge in the machine causes electromagnetic waves, which may get released from the non-perfect characteristics of the enclosure. This signal may interfere with the functioning of other nearby electronic devices, especially the communication equipment. Therefore, maintaining the excellent condition of the insulation system by the proposed technique detailed in this paper will support the highly effective operational efficiency of the communication system as well.

Keywords: Stator winding insulation, dielectric response measurement, partial discharge measurement, polarization and depolarization current, pulse attenuation.

1 Introduction

Medium voltage (MV) rotating machines are widely used in many applications in the industry sectors, such as in the power plants, in the chemical industries, in the oil and gas industries, in the metal industries, etc. The increasing conductivity in bulk and overhang insulation, insulation delamination, insulation abrasion and weak spots are responsible for insulation degradation that significantly reduces the life of the MV rotating machine [1, 2].

To extend the service life of the MV rotating machine, non-destructive testing techniques like the insulation resistance (IR) measurement, the polarization index (PI) measurement and the capacitance and power factor tip-up measurement are commonly performed to detect any insulation defects and to track the integral insulation condition [3–6]. Unfortunately, conventional parameters such as the PI and IR are estimated from a charging current measured, which is caused by the superposition of the polarization and the conduction currents in dielectric used, while the capacitance and power factor tip-up measurement provide vague information with reference to conductivity

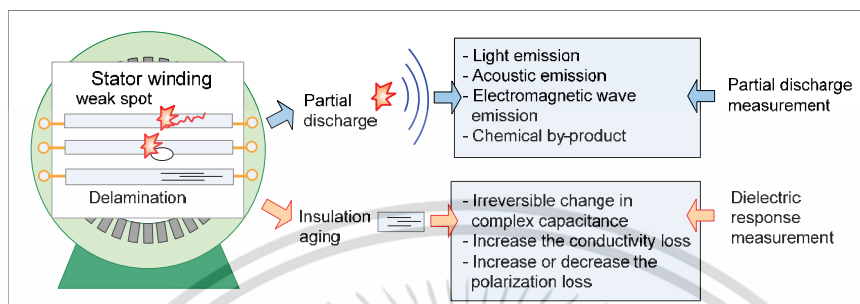


Figure 1 Overview of insulation diagnostics of rotating machine.

loss, polarization loss and ionization loss. Therefore, it is difficult to apply such non-destructive testing techniques for identifying the problems of the stator winding insulation. To overcome this deficiency, this paper introduces the very low frequency (VLF) dielectric response and high frequency (HF) partial discharge (PD) measurement technique. The dielectric response measurement results were analysed with the proposed dielectric parameters, i.e., charge ratio and charge difference gradient (QR and QDG, respectively) to separate conductivity loss from polarization loss. However, the PD measurement result provides precise estimation about ionization phenomena occurring at a weak spot.

2 Dielectric Response Under an External Step Field

As shown in Figure 2 the two main responses exhibited by insulation material subjected to a step voltage $U(t)$ are the conduction mechanism (*which causes the conduction current*) and the polarization mechanism (*which causes the polarization current*) [7–11].

2.1 Electrical conduction mechanism

As described by equation (1), the electrical conduction mechanism is caused by the step electric field $E(t)$ which excites the current density $J_{\sigma}(t)$ of the insulation material within the cross-sectional area A_{geo} with conductivity σ determined by the number of charge carriers and the mobility of these charges. The conductivity response of the dielectric material is much stronger in the lower frequency ranges, while at higher frequencies, the conductivity response tends to be much smaller and sometimes insignificant:

$$J_{\sigma}(t) = \sigma E(t). \quad (1)$$

2.2 Polarization mechanism

As described by equation (2), the polarization mechanism is caused by a stress E-field, which is not strong enough to cause significant damage to the insulation material. Under the step electric field $E(t)$, the polarization $P_0(t)$ is a linear function with the E-field. The polarization phenomena increase the charge density at the electrodes expressed in equation (2):

$$D(t) = \varepsilon_0 E(t) + P_0(t). \quad (2)$$

In this research work, the two polarization processes under consideration are quick polarization P_{quick} and slow polarization P_{slow} (interfacial polarization, P_i). The dielectric response test results using the PDC analysis in the experiment shows that the rise time T_r of the step field $E(t)$ is of much longer duration than the relaxation time τ_d due to the quick polarization which is caused by internal impedance of the voltage source of the PDC analyser. Therefore, electric susceptibility due to rapid polarization χ_{quick} is determined to be a constant value as in equations (3a)–(3c). During relatively slow polarization, the electric susceptibility due to the slow polarization χ_{slow} is exponentially tending towards $\chi_i(\infty)$ as shown in equations (4a)–(4d):

$$P_{\text{quick}}(t) = P_{el}(t) + P_{io}(t) + P_d(t) \quad (3a)$$

$$= [N_{el}a_e + N_{io}a_{io} + N_d a_d] \cdot E(t) \quad (3b)$$

$$= \varepsilon_0 \chi_{\text{quick}} E(t); \chi_{\text{quick}} \approx \text{constant for } T_r \gg \tau_d \quad (3c)$$

where $P_{el}(t)$, $P_{io}(t)$ and $P_d(t)$ are electronic, ionic and dipolar polarizations, respectively. N_{el} , N_{io} and N_d are the number of dipoles per unit volume of electronic, ionic and dipolar polarizations, respectively. Further, α_e , α_{io} and α_d are polarizability of electronic, ionic and dipolar polarizations, respectively:

$$P_{\text{slow}}(t) = \sum_i P_i(t) \quad (4a)$$

$$= \varepsilon_0 \cdot \chi_{\text{slow}} \cdot E(t) \quad (4b)$$

$$\chi_{\text{slow}} = \sum_i \chi_i(\infty) [1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}}] \text{ for } T_r \ll \tau_i \quad (4c)$$

$$= \sum_i \chi_i(\infty) [1 - f_i(t)] \quad (4d)$$

where $P_i(t)$ is the interfacial polarization, $\chi_i(\infty)$ is the steady state end value of the electric susceptibility due to slow polarization and $f_i(t)$ is the dielectric response function.

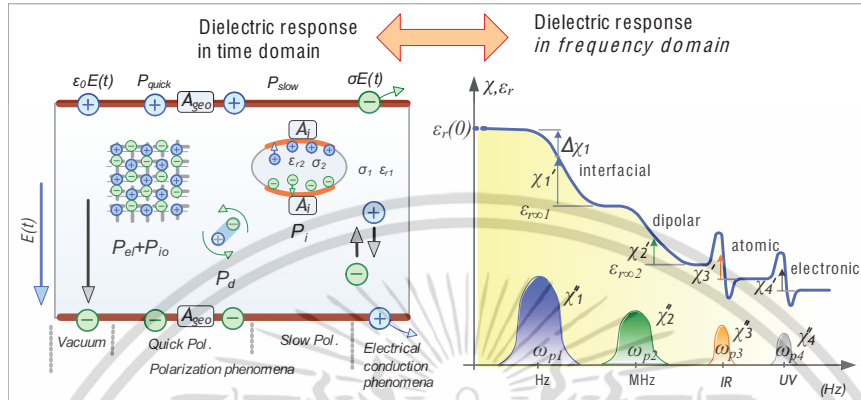


Figure 2 Dielectric behaviours for insulating material in time and frequency domains.

The equations describing the time dependency of electric susceptibility under the step field $E(t)$ are shown in Figure 2.

The step response $P_0(t)$ in time domain due to all polarization processes is shown in equations (5a) and (5b):

$$P_0(t) = P_{quick}(t) + P_{slow}(t) \quad (5a)$$

$$= \epsilon_0 \cdot E(t) \cdot \chi_{Quick} + \epsilon_0 \cdot E(t) \cdot \sum_i \chi_i(\infty) [1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}}] \quad (5b)$$

3 Dielectric Mechanisms in Stator Winding Insulation

Dielectric mechanisms occurring in the stator winding insulation under a step field depend on the insulation materials and the structure of the insulation system. The construction of stator coils used for the MV machine typically as a form-wound winding is comprised of copper strands, turn insulations (enamelled wires and fibres), ground wall insulations (mica tapes or glasses) and semiconducting layers. To form the insulation system of the MV machines, the insulations at the bottom of the stator slots, the insulations between two coils in the same stator slot and the insulations under a slot wedge are needed. The air gaps and spacers are used as well to insulate coils from each other in the overhang portion.

3.1 Conduction mechanisms in stator winding insulation

Figure 3(a) depicts an example of electrical conduction mechanisms occurring in/on the MV form-wound winding insulation. Considering the modern

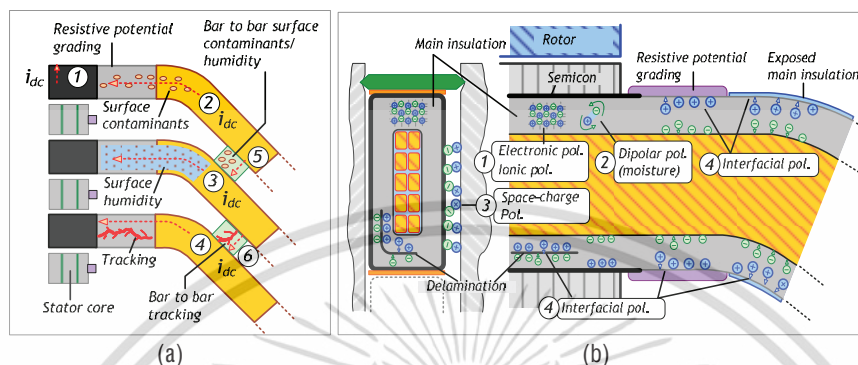


Figure 3 Example of dielectric mechanisms in the stator winding insulation (a) conduction mechanisms (b) polarization mechanisms.

MV machine insulation system, a well-bonded polyester and epoxy-mica insulation are utilized by which free charge carriers (1) that pass through the bulk insulation are essentially zero unless the insulation is partially or fully saturated with the moisture from the atmosphere. However, degradation of the epoxy-mica insulation that has undergone thermal aging may increase the free charge carriers resulting in the increase of electrical conductivity. For conduction mechanism occurring in/on the overhang insulation of the end-winding turns (2)–(4) and in the spacers separating the coils between the different phases (5) and (6), the surface leakage current depends on the electric field distribution on the resistive potential grading used, type and amount of the conductive contamination, moisture and temperature also.

3.2 Polarization mechanisms in stator winding insulation

Figure 3(b) illustrates an example of the polarization mechanisms in the MV form-wound winding insulation. When the winding insulation is under a step field, such insulation contributes to several polarization mechanisms. It induces charges on the electrode surface to compensate for the external applied electric field [11]. Electronic and atomic polarization (1) occurs due to neutral atoms that have displaced with quick relaxation times (optical frequencies). However, if the mica insulation is saturated with moisture from the atmosphere, dipolar polarization (2) might also be evident with short relaxation times (UHF to X-band frequencies). Interfacial polarization processes the accumulation of free charge carriers (3) in a region such as near the copper strand, stator core and the end-winding portion. Besides, the

charge carriers (4) can migrate and accumulate at the interface in mica tape layers, as well as accumulate (contamination) on the surface of end winding.

4 PD in Rotating Machine

In stator windings rated 6 kV and above, the partial discharge inception and extinction voltage (PDIV and PDEV) for new machines are commonly below the rated line-to-ground operating voltage. This means that the mica in the main insulation is designed to resist the PD usually at a low-level in the range of 1000 pC for an exceptionally long time, which is non-hazardous to insulation. However, the stator winding insulation of a rotating machine undergoes aging due to the operating conditions. Thermal, electrical, vibrational, and thermo-mechanical stresses act on the stator insulation during the service of the machine. These stresses cause a weak spot in the insulation system. At the weak spot, the electric strength or breakdown strength at a defect site is significantly lower than the electrical stress, resulting in occurrence of the PD. Figure 4 shows the potential PD sources that can occur in the stator winding of a rotating machine.

5 Dielectric Response Parameter Analysis

5.1 Charge difference analysis

From the dielectric response measurement, charge difference value (Q_{diff}) is calculated by equations (6)–(8). This parameter provides an amount of the non-stored charge passed through the insulation system under a step field. This paper introduces the dielectric parameter, the so-called charge difference gradient (QDG), to assess the conduction problem caused by free charge

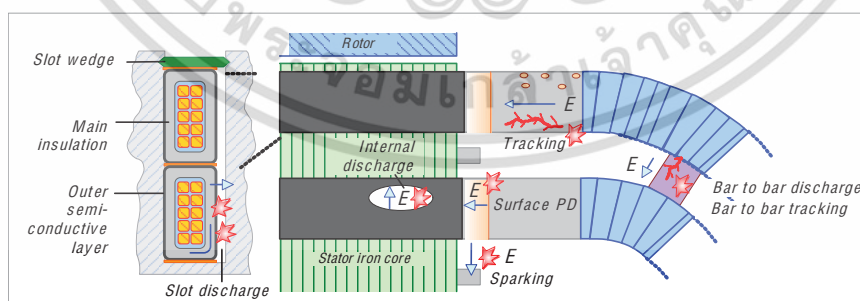


Figure 4 Partial discharge sources in the stator winding of a rotating machine.

carriers (contaminants) in bulk insulation and on overhang insulation. The QDG is proportional to the conductivity of the insulation system equation (9):

$$Q_{diff} = \int [i_{pol}(t) + i_{dep}(t)] \cdot dt \quad (6)$$

$$i_{pol}(t) + i_{dep}(t) = \sum_i \underbrace{\frac{U_0}{R_i} e^{-\frac{t+t_c}{t_i}}}_{\approx 0} + \frac{U_0}{R(t)} \quad (7)$$

$$Q_{diff} \approx [U_0/R(t)] \cdot t \quad (8)$$

$$QDG = dQ_{diff}/dt. \quad (9)$$

5.2 Charge ratio analysis

Another dielectric parameter introduced in this paper is the QR. The QR is the ratio of the accumulation of charge carriers (Q_d) to the charge carrier (Q_{geo}). Further, the Q_d originates from the interfacial polarization process recorded after 1 second by integration depolarization current, whereas the Q_{geo} is induced from dipolar polarization processes expressed as in equations (10)–(13):

$$Q_d = \int i_{dep}(t) \cdot dt \quad (10)$$

$$Q_d \approx -U_0 \sum_i C_i \cdot \left(1 - e^{-\frac{T_p}{R_i C_i}}\right) \left(1 - e^{-\frac{t}{R_i C_i}}\right) \quad (11)$$

$$Q_{geo} \approx C_{geo} \cdot U_0 \quad (12)$$

$$QR = \frac{Q_d}{Q_{geo}} = \left\{ \sum_i C_i \cdot \left(1 - e^{-\frac{T_p}{R_i C_i}}\right) \left(1 - e^{-\frac{t}{R_i C_i}}\right) \right\} / C_{geo} \quad (13)$$

Note: Partial resistance (R_i) and partial capacitance (C_i) are the dielectric parameters related to the relaxation time of the interfacial polarization process. Further, R_i and C_i can be estimated by using a curve-fitting technique applied to the depolarization current. C_{geo} is the geometrical capacitance or high-frequency capacitance, explained in Ref. [11].

6 PD Parameter Analysis

6.1 PD magnitude

To assess the severity of the PD sources, both the discharge magnitude and the discharge frequency are important. The discharge magnitude or apparent

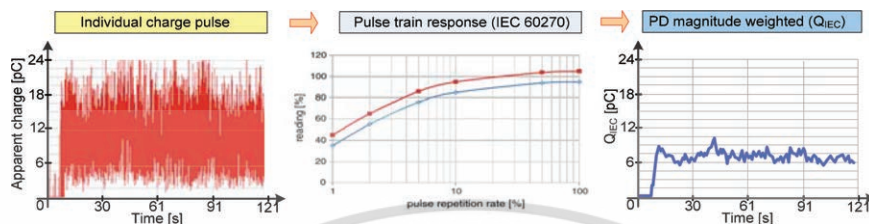


Figure 5 The process for determining the PD magnitude weighted.

charge is related to the size of a defect on stator insulation, and discharge frequency is associated with the erosion of insulating material. Therefore, the PD magnitude weighted, the so-called Q_{IEC} , is recommended and specified in IEC 60270. This means that the Q_{IEC} is involved in the discharge magnitude, discharge frequency and measuring bandwidth of a PD pulse. The process for determining the Q_{IEC} is shown in Figure 5.

6.2 Attenuation factor of the PD pulse

To study the attenuation of the PD pulse travelling through the winding, this research introduces the attenuation factor, as shown in equation (14). After normalization of the PD measuring circuit with the PD detection capacitor connected at the phase terminals, Q_{mT} is measured by injecting a known standard charge, Q_A , with the PD calibrator at the phase terminal, whereas Q_{mN} is measured by injecting the Q_A at the neutral end:

$$\%AF = [1 - (Q_{mN}/Q_{mT})] \times 100 \quad (14)$$

6.3 Hysteresis analysis

For evaluating the PDIV and PDEV as well as the types of PD sources, the test voltage profile applied to insulation is carried out, as shown in Figure 6, and the PD amplitude is monitored via the hysteresis test. The PDIV, PDEV and PD sources can be investigated by applying the hysteresis curve. Both the PDIV and PDEV provide information about the aging rate of insulation. If the PDIV and PDEV remain constant over time, it reveals that there is little aging. However, if the PDEV and PDIV significantly decrease over time, it implies that the winding insulation is deteriorating due to one or more of the many degradation mechanisms.

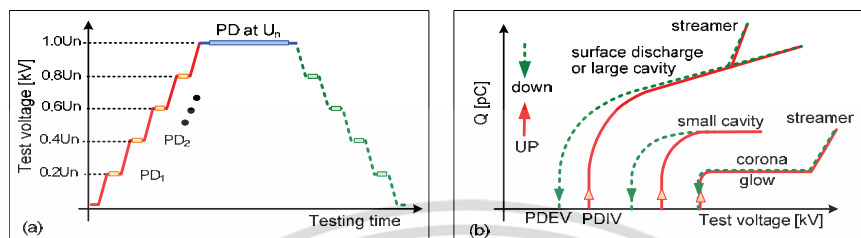


Figure 6 Profile of the test voltage and hysteresis PD characteristics.

7 Dielectric Response Experiments

In this section, applications of the proposed dielectric parameters (QDG and QR) for insulation diagnosis of service motors are implemented to assess the insulation condition of MV motors, as listed in Table 1. These motors rated at 6.6 kV and 240 to 2,270 kW have been serviced under different conditions. The class F insulation manufactured under the Global Vacuum Pressure Impregnation technology is used as the insulation of the stator windings of these motors. The experiments are conducted to verify the effectiveness of the proposed diagnostic parameters in practice. The diagnostic parameters, QDG and QR, analysed from relaxation current, are presented for each case study.

7.1 Dielectric response measurement circuit

The measuring circuit diagram and test voltage profile used to investigate the dielectric response of the MV motors in case 1–case 6 at ambient temperature (stabilized temperature) are shown in Figure 7.

7.2 Dielectric response test procedure

To perform the dielectric response measurement, a three-step process is as follows [13]. In the first step, in this process, only the depolarization current

Table 1 Rotating machine details for dielectric response measurement.

Case studies	kW	kV	Insulation condition
Case 1	400	6.6	New stator winding
Case 2	240	6.6	Moisture contamination
Case 3	240	6.6	After cleaning
Case 4	2270	6.6	Dirt contamination
Case 5	600	6.6	Thermally aged
Case 6	300	6.6	Severely aged

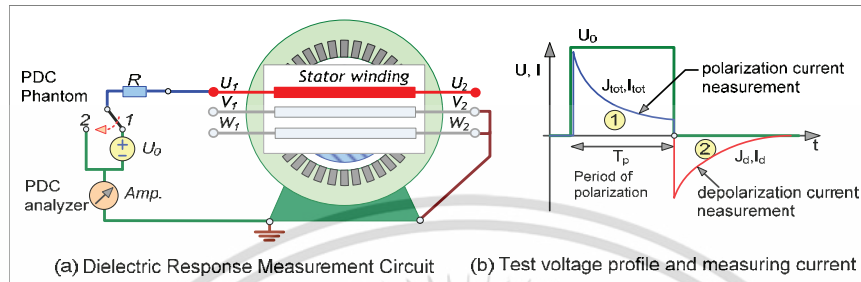


Figure 7 Test circuit diagram for dielectric response measurement

is measured to ascertain the amount of remaining charge inside the stator winding insulation. In the second step, this process is conducted to confirm that there are no abnormalities in the measuring circuit. A step test voltage of 10–50 V is applied to the insulation system for measuring the polarization current. Then, the test object is short-circuited. In the third step, a step test voltage is applied to the insulation system for 1,000 seconds. Then, the test object is short-circuited for 1,000 seconds. The polarization current and depolarization current obtained from this process are recorded and used to analyse further the dielectric characteristics of the stator winding insulation under test.

8 PD Experiments

The purpose of the PD measurement is to investigate the symptom of insulation degradation by detecting the pulse currents caused by charge transfer in the defect site, according to the IEC 60270. Case studies on measuring the PD activity and case studies on measuring the PD pulse attenuation in field rotating machines rated 11–15 kV and 7,100 to 211,000 kW are conducted and demonstrated, as listed in Tables 2 and 3, respectively.

8.1 PD measurement circuit

Figure 8 shows the PD measurement setups and the test voltage profile performed on the investigated rotating machine at on-site.

8.2 PD test procedure

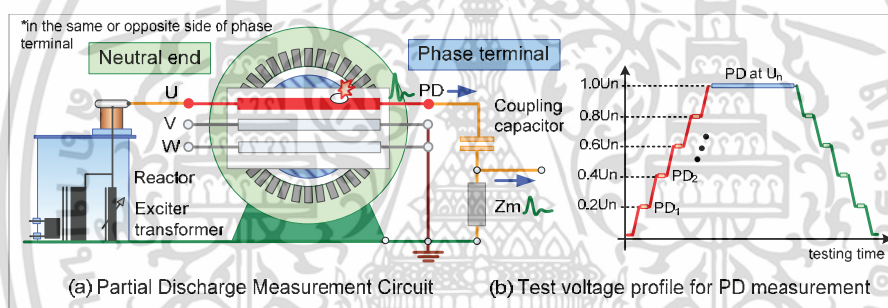
The test procedure for performing the PD measurement of this experiment can be divided into the following steps. At first, the measuring circuit was

Table 2 Rotating machine details for PD activity measurement

Case studies	kW	kV	Insulation condition
Case 7	7,100	11.5	Slot wedge partially damaged
Case 8	22,500	11.5	Dirt contamination
Case 9	51,260	11.5	Stress grading-coating failure
Case 10	211,500	15.7	Stress grading-coating having problem

Table 3 Rotating machine details for artificial PD pulse attenuation measurement

Case studies	kW	kV	Configuration of phase terminal (PHT) and neutral end (NED)
Case 11	154,000	11.5	PHT and NED positioned on the same side
Case 12	211,500	15.7	PHT and NED positioned on the same side
Case 13	9,900	6.6	PHT positioned on the opposite side of NED
Case 14	51,260	11.5	PHT positioned on the opposite side of NED

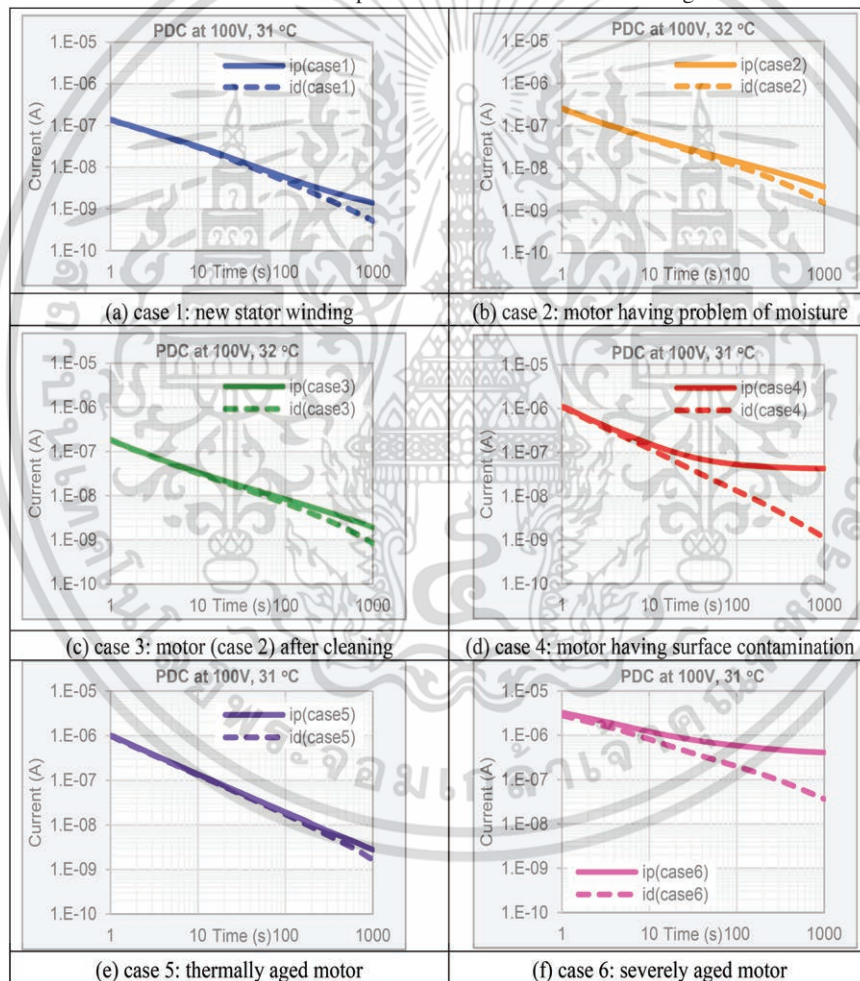
**Figure 8** Test circuit diagram for partial discharge measurement.

set up, as depicted in Figure 8. Then, the measuring frequency range was adjusted, and the measuring circuit was normalized with a known standard charge (apparent charge) via the terminals of the test object. Next, the background noise was recorded. After that, a stepped voltage was applied to the individual stator winding with a dwell time on each step of at least 10 seconds, one phase energized, whereas the other two connected to ground, and the stepped voltage was increased to the rated line-to-ground voltage while monitoring the PD pulses on a computer screen. The winding was energized at rated voltage, and then the PD magnitudes were recorded. Then, the stepped voltage was decreased to the voltage at which the PD was no longer discernibly measured. Finally, the PDIV, PD at the rated voltage, PDEV and the PD pattern were recorded.

9 Dielectric Response Measurement Results

The results of the dielectric response measurements for six case studies of various motors used with different service conditions are illustrated in Table 4, where the dielectric response measurement was performed with a 100 VDC step voltage. The polarization and depolarization currents were recorded for 1,000 seconds for each case study.

Table 4 Polarization and depolarization currents of the investigated motors



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10 PD Measurement Results

Table 5 shows the PD measurement results as a function of test voltage (U_t) and time (t), and Table 6 shows the attenuation measurement results of the artificial PD pulses.

Table 5 PD measurement results of the investigated rotating machine

		PD measurement results: $Q_{IEC} = f(U_t, t)$	Captured PD patterns at U_0
Case 7: Slot wedge partially damaged	Measured at phase terminal		
Case 8: Dirt contamination	Measured at phase terminal		
Case 9: Stress grading-coating failure	Measured at phase terminal		
	Measured at neutral end		
Case 10: Stress grading-coating having problem	Measured at phase terminal		
	Measured at neutral end		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 6 Attenuation measurement results of the artificial PD pulse

Case studies	Phase	QmT	QmS	%AF
Case 11: 154,000 kVA 11.5 kV PHT and NED positioned on the same side	U	10nC	5.3nC	47%
	V	10nC	7.4nC	26%
	W	10nC	4.3nC	57%
Case 12: 211,000 kVA 15.7 kV PHT and NED positioned on the same side	U	10nC	3.8nC	62%
	V	10nC	3.2nC	68%
	W	10nC	3.5nC	65%
Case 13: 9,900 kVA 6.6 kV PHT positioned on the opposite side of NED	U	10nC	0nC	100%
	V	10nC	0nC	100%
	W	10nC	0nC	100%
Case 14: 511,260 kVA 11.5 kV PHT positioned on the opposite side of NED	U	10nC	0nC	100%
	V	10nC	0nC	100%
	W	10nC	0nC	100%

11 Discussion

11.1 VLF dielectric response measurement

From the dielectric response measurement results in Table 4, the QDG and QR were evaluated and compared in Figure 9 using equations (9) and (13). Both the QDG and QR provide a reasonable estimate of the actual condition of the insulation for the rotating machines in this research.

The QDG is related to ionic activity inside stator insulation and or on the winding surface. The ionic activities inside stator insulation are caused by moisture owing to the ingress of water from the atmosphere and or by the oxidation process from the bonding of the oxygen with the broken end of the polymer chain due to thermal stress. Whereas, the ionic activities on the winding surface are caused by moisture or oil mixed with dirt, dust, salt, fly

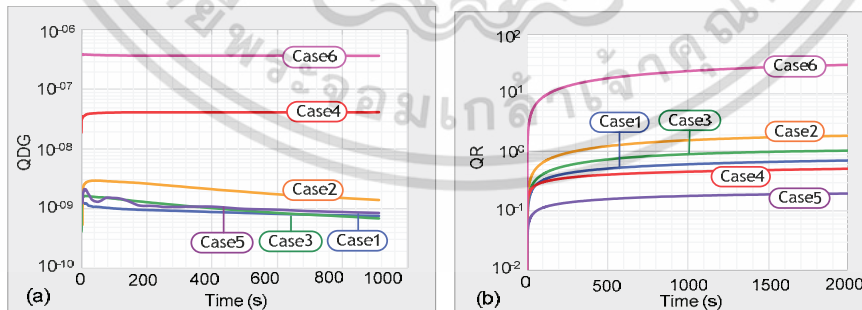


Figure 9 (a) QDG curve of investigated motors (b) QR curve of investigated.

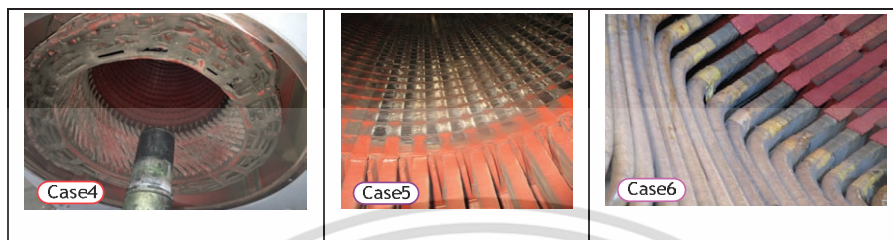


Figure 10 Thermographic image of investigated machines.

ash, chemicals, etc. The QR is associated with the free charge carriers trapped at mica tape that is debonded owing to the aging of insulation or trapped at any interface in the insulation system due to the mismatch between the dielectric properties of the material used.

11.2 HF localized dielectric discharge measurement

From the PD measurement results in Table 5, the hysteresis PD curves were evaluated, as shown in Table 7. The hysteresis PD curves give useful information about the PDIV, PDEV and physical phenomena of the PD sources, which are used to compare the fingerprint in Figure 6. Further, the hysteresis PD curves provide the PD types better than the PRPD pattern, which sometimes provides imprecise or vague information for interpretation of the local insulation condition.

In the case of the attenuation measurement results of the artificial PD pulse, the %AF was evaluated and compared in Table 6 using equation (14). It seems that the PD measurement has a big issue regarding the intrinsic PD amplitude at a defect site due to the PD pulse being strongly attenuated when the PD pulse travels through the winding in the slot section. From the experiment, it was found that the PD activity at the defect site away from the PD sensor is not possible to detect. For this reason, the PD measurement should be performed both at the phase terminal and neutral ends.

11.3 Suggested criteria for condition assessment of MV motor

For the VLF dielectric response measurement, the proposed technique is a relatively new offline dielectric test of the rotating machine; therefore, it has no interpretation guide for assessing the aging condition. Based on the

Table 7 Hysteresis PD analysis

	Hysteresis PD	Endoscopic inspection
Case 7: Slot wedge partially damaged		
Case 8: Dirt contamination		
Case 9: Stress grading-coating failure		
Case 10: Stress grading-coating failure		

experimental and field measurement results of the authors, the suggested criteria for the aging condition are included in Table 8.

For the HF localized dielectric discharge measurement, generally, the relevant IEEE and IEC standards do not propose a minimum value for the PD magnitude for the new or service machine. Therefore, the PD results are interpreted in comparison to one phase against another, one machine against other similar (in design and ratings) machines and interpreting the PD magnitude on the same phase over time. In case of no information about previous offline PD measurement, this paper introduces the suggested in-service criteria of the PD magnitude used to assess the insulation condition roughly, as illustrated in Table 9.

Table 8 Suggested criteria for condition assessment of medium voltage motor

QDG value	Contamination/moisture	QR value	Degradation condition
<1E-9	Low	<0.2	Very dry
1E-9–0.9E-8	Moderate	0.2–0.6	Dry
1E-8–0.9E-7	High	0.6–1.5	Slightly wet
>1E-7	Very high	>1.5	Moisture aging

Table 9 Suggested limit values of PD magnitude

Suggests limit values of Q_m (nC)		Severity of PD sources	Insulation condition
Slot section	End windings		
< 2	< 2	Very low	Excellent
2–5	2–5	Low	Good
5–10	5–15	Medium	Acceptable
10–15	15–20	High	Poor
15–20	20–50	Very high	Inspection necessary
>20	>50	Hazardous	Potential problem

The suggestion criteria will be useful for evaluation of the machine's insulation. These criteria will help the operator to maintain the machine in a healthy condition by which the release of signals from the insulation defects can be avoided. Such criteria are beneficial for the maintenance planning of the machines used in industrial sectors, including machines that are used to support the communication systems.

12 Conclusion

From the experiments, it can be concluded that the proposed parameters are a valuable tool for assessing the aging condition. The QDG and the QR introduced in this paper have proved as the useful parameters applied for characterizing the insulation condition of the stator winding insulation. It is found that the proposed parameters can identify conductive contamination and/or insulation saturated with moisture and insulation degradation. The QDG provides information about the ionic activities on stator winding insulation. On the other hand, the QR gives crucial information regarding stored charge in the stator winding insulation at the mica tape layer or moisture aging. In the case of the PD measurement, the hysteresis PD curves give useful information about the PDIV, PDEV and physical phenomena of the PD source, which is used to compare the fingerprint, and it is found that the PD pulse is strongly attenuated in the slot section. Therefore, the PD measurement should be performed both at the phase terminal and neutral

ends. This paper also introduces the combination of both the dielectric response and PD measurement results, which can be very useful for assessing a complete insulation condition in the rotating machine. Moreover, the criteria for insulation conditions are suggested in this paper to evaluate the integral and local conditions for insulation of the rotating machine. Applying the techniques presented in this paper will be very useful in maintaining the machine in a good condition, and thus can mitigate the PD problem with many radiated electromagnetic waves that may interfere with the operation of the nearby electronic devices, especially the electronics and communication equipment. Therefore, maintaining the excellent condition of the machine by the proposed technique will support the highly effective operational efficiency of the communication system as well.

Acknowledgements

This work was supported by the King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Research Fund [grant number KREF 206301]. The authors also gratefully acknowledge the support of the staff at the Dielectric Analytika Laboratory, KMITL.

References

- [1] Michael Muhr and Christof Sumereder, "Condition Assessment of Electric Machines," *CMD*, 2006, pp. 90-90.
- [2] T.S. Ramu, *Reliability and Life Estimation of Power Equipment*. New Age International Publisher, 2009, Chapter 3.
- [3] T. Tran, O. Gallot-Lavallée, P. Rain, and G. Tripot, "The Use of Dielectric Spectroscopy for Detection of Insulation Defects in End Turns of Medium Voltage Motors," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 27, no. 4, pp. 905-911, Dec. 2012.
- [4] E. Obame, P. Rain, O. Gallot-Lavallée, and G. Tripot, "Detection of Artificial Insulation Defects in a Medium-Voltage Motor by Dielectric Spectroscopy Analysis," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 27, no. 2, pp. 270-276, June 2012.
- [5] Supatra A. Bhumiwat, "On-site non-destructive dielectric response diagnosis of rotating machines," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 17, no. 5, pp. 1453-1460, Oct. 2010.

- [6] Greg C. Stone Ian Culbert Edward A. Boulter Hussein Dhirani, *Electrical Insulation for Rotating Machines: Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair*. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. 2014, hapter 4.
- [7] E. Kuffel, W.S. Zaengl, and J. Kuffel, *High Voltage Engineering: Fundamentals*. Butterworth-Heinemann, Second edition 2000, Chapter 7.
- [8] Andrzej Ka Jonscher, *Dielectric relaxation in solids*. Chelsea Dielectrics Press, 1983, Chapter 2 and 7.
- [9] Kwan Chi Kao, *Dielectric phenomena in solids: with emphasis on physical concepts of electronic processes*. Elsevier Academic Press, 2004, Chapter 2.
- [10] Andreas Küchler, *High Voltage Engineering: Fundamentals–Technology–Applications*. Springer Berlin Heidelberg, 2017, Chapter 4.
- [11] Walter S. Zaengl, “Application of Dielectric Spectroscopy in Time and Frequency Domain for HV power Equipment,” *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 19, no.6, pp. 9-22, Nov/Dec 2003.
- [12] 43-2000 - IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery
- [13] J. Alff, V. Der Hauhanessian, W. S. Zaengl and A. J. Kachler, “A novel, compact instrument for the measurement and evaluation of relaxation currents conceived for on-site diagnosis of electrical power apparatus,” in *IEEE international symposium on electrical insulation*, Anaheim, CA, USA, 2-5 April 2003.

Biographies



P. Nimsanong received his B. Eng. and M. Eng. degrees in electrical engineering from the Faculty of Engineering, KMITL, Thailand in 2006 and 2012, respectively. Now, he is currently a Ph.D. student in electrical engineering,

Faculty of Engineering, KMITL, Thailand. His major research interests are in high voltage equipment testing and diagnostics.



N. Pattanadech received his B.Eng and M.Eng degrees in electrical engineering from the King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang in 1998 and Chulalongkom University, Thailand in 2002, respectively. He is also awarded his Ph.D. degree by the Institute of High Voltage Engineering and System Management, Graz University of Technology, Austria in 2013. Currently, he works as an associate professor at the King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand. His research activities have been mainly involved with partial discharge in insulating liquid, solid insulator characteristics, high-voltage testing and high voltage measurement techniques, high voltage equipment monitoring and diagnostics, lightning and grounding problems and electromagnetic compatibility in high-voltage field.



บทรความที่ 2

Dielectric diagnosis of 24 kV XLPE cable using polarization and depolarization current, conventional partial discharge measurements and high frequency current measurement

12th IET International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2016)

IET Conference Publications 696

Beijing, China
28 - 29 May 2016

ISBN: 978-1-5108-3265-7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SIMULATION AND ANALYSIS OF POWER CABLE HARMONIC LOSS AND TEMPERATURE RISE	624
<i>Chenyang Li ; Jie Chen ; Libin Hu ; Jingying Cao</i>	
POWER EQUIPMENT STATE DIAGNOSIS BASED ON MULTI-SOURCE MONITORING DATA MINING	630
<i>Miming Zheng ; Xiang Sun</i>	
FAULT DIAGNOSIS MODEL OF POWER TRANSFORMER BASED ON IMPROVED GREY RELATION METHOD WITH COMBINED WEIGHT	635
<i>Tusongjiang Kari ; Wensheng Gao ; Guojun Lu ; Yong Wang ; Le Luan ; Liang Li ; Xiaotong Xu</i>	
RESEARCH ON DETECTION OF LIGHTNING PROTECTION FACILITIES IN GAS STATION	640
<i>Xiaxi Li ; Linlin Xing ; Shi Yan ; Xinwei Wang ; Hongwei Mei ; Liming Wang</i>	
A NOVEL CONTROL STRATEGY OF VSC-HVDC FOR OFFSHORE PLATFORMS	645
<i>Shaoqi Lu ; Xu Zheng</i>	
AUTOMATIC SUPPRESSION OF SINGLE-PHASE ARCING FAULT IN AC DISTRIBUTION SYSTEMS	651
<i>Bo Zhang ; Qing Yang ; Wenxia Sima ; Ming Yang ; Jiaquan Ran</i>	
FAULT LINE DETECTION BASED ON OPTIMIZED CASCADED BISTABLE SYSTEM FOR DISTRIBUTION NETWORK	656
<i>Jie Gao ; Xiaowei Wang ; Qiming Cheng ; Xiangxiang Wei ; Dechang Yang</i>	
NOVEL METHOD AND APPARATUS FOR WIRELESS POWER TRANSMISSION IN A SEAWATER ENVIRONMENT	661
<i>Huan Gao ; Nianhua Zhang ; Gongshu Lei ; Hongxi Xue</i>	
COMMUTATION FAILURE ANALYSIS CONSIDERING DIRECT CURRENT DYNAMICS IN LCC-HVDC SYSTEMS	666
<i>Yaping Hu ; Jun Lu ; Huafeng Zhou</i>	
STUDY ON BRILLOUIN SCATTERING BASED OPGW EQUIVALENT ICING THICKNESS CONVERSION	671
<i>Zhao-yu Qin ; Zhe-Zhe Pan ; Hui-Xuan Shi ; Yong Chen ; Long-hua Wang ; Xiao-bo Liu</i>	
A NOVEL ON-LOAD DE-ICING METHOD FOR DISTRIBUTION LINES	678
<i>S.F. Yu ; Y.B. Gao ; Y.Z. Hu ; Z.Y. Zheng ; D.F. Ke</i>	
NONLINEAR LOAD CHARACTERISTICS OF HVDC CONVERTERS	682
<i>Y. Zhang ; A.M. Gole</i>	
THE STUDY ON SYMPATHETIC INRUSH CURRENT OF CONVERTER TRANSFORMERS IN HVDC SYSTEM AND ITS IDENTIFICATION METHOD	687
<i>Kanjun Zhang ; Xuanwei Qi ; Shiyun Zhang ; Wenbin Cao ; Fan Yang ; Xianggen Yin</i>	
THE STUDY ON CT SATURATION CAUSED BY THE CIRCULATING CURRENT IN THE DELTA-WINDING OF CONVERTER TRANSFORMER AND ITS IMPACT ON THE PROTECTION IN HVDC SYSTEM	692
<i>Kanjun Zhang ; Xuanwei Qi ; Xianggen Yin ; Kun Chen ; Wei Hu ; Shiyun Zhang</i>	
STUDY ON TRANSIENT MODELLING AND SIMULATION OF FIBER OPTIC CURRENT TRANSFORMER	697
<i>Hongxing Wang ; Yuanpeng Guan</i>	
TEMPERATURE ERROR SUPPRESSION AND COMPENSATION TECHNOLOGY OF FIBER OPTIC CURRENT TRANSFORMER	701
<i>Hongxing Wang ; Yuanpeng Guan ; Zhifang Xu ; Dongwei Liu</i>	
DIELECTRIC DIAGNOSIS OF 24KV XLPE CABLE USING POLARIZATION AND DEPOLARIZATION CURRENT, CONVENTIONAL PARTIAL DISCHARGE MEASUREMENTS AND HIGH FREQUENCY CURRENT MEASUREMENT	704
<i>P. Nimsanong ; N. Pattanadech ; P. Yutthagowith</i>	
WIDE-BAND MODELING OF HVDC CONVERTER TRANSFORMER FOR EMTP AND ITS APPLICATION ON FAULT ANALYSIS	709
<i>Yunchao Wang ; Zhanqing Yu ; Jun Hu ; Jinliang He</i>	
LOW FREQUENCY RESONANCE ANALYSIS OF ± 1100 KV HVDC SYSTEM	715
<i>Yunchao Wang ; Zhanqing Yu ; Jun Hu ; Jinliang He</i>	
Author Index	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DIELECTRIC DIAGNOSIS OF 24KV XLPE CABLE USING POLARIZATION AND DEPOLARIZATION CURRENT, CONVENTIONAL PARTIAL DISCHARGE MEASUREMENTS AND HIGH FREQUENCY CURRENT MEASUREMENT

P.Nimsanong^{}, N.Pattanadech^{*} and P.Yutthagowith^{*}*

^{}Electrical Engineering department, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Chalongkrung Road, Ladkrabang, Bangkok, Thailand, 10520
E-mail: phethai.ni@hotmail.com*

Keywords: Medium voltage power cable, cable joints, polarization and depolarization current, conventional partial discharge measurement, high frequency current measurement

Abstract

Medium voltage power cables are an important element of electric power distribution. Most of cable failures occurring in XLPE insulation and cable accessories are due to insulation failure. This research work represents the dielectric investigation of 12/20(24) kV XLPE power cables including cable joints by using polarization and depolarization current (PDC) measurement, conventional partial discharge measurement according to IEC 60270, and high frequency current measurement measured by high frequency current transformer (HFCT). In this research work, six case studies, case 1: PE sheath damaged, case 2: semi-conducting layer damaged, case 3: void defect in extruded cable, case 4: void defect in extruded cable at cable joint, case 5: semi-conductive contaminant at cable joint, and case 6: conductive contaminant at cable joint, were investigated. The test results showed that two basic properties, polarization and depolarization current, of cable insulation can be utilized for classification of cables with joint problems. The defects in extruded cable and cable joint can be identified by the PDC shapes. However, to clarify the problems occurring at the cables by conventional PD measurement and HFCT measurement was performed. Moreover, it was found that the sensitivity of HFCT was clearly lower than conventional tool.

1 Introduction

Electric distribution utilities in Thailand distribute electric energy via both overhead and underground cable systems. Medium voltage power cables are an important element of electric power distribution which represents 15% to 20% of installed distribution system capacity. Most of cable failures occurring in XLPE insulation and cable accessories are due to insulation failure affecting on reliability of power distribution system. To improve reliability, the on-site off-line non-destructive diagnostic tool based on dielectric spectroscopy in

time and frequency domain has been applied to assess global dielectric health of underground cable including cable accessories [1]. However, the conventional PD measurement is an indispensable tool to trace in weak spots of dielectrics of insulation system [2].

2 Theory

The insulation system of medium power cables assemblies cross-linked polyethylene (XLPE) interfaced with ethylene-propylene diene rubber (EPDM) at cable joint. Although XLPE insulation has a good electrical performance; it has a disadvantage on degradation and can lead to failure in a short time. To diagnose the imperfection of insulation system, dielectric diagnostic tools are utilized to ensure a reliable operation of insulation system. PDC measurement is an important test technique used to measure the interfacial polarization effect that originates from the interfaces between insulation layer including secondary crosslinking by-products. Polarization is superimposed by the DC conductivity of XLPE and insulation of cable joint. Moisture, temperature and conductive aging products can change both polarization phenomena and DC conductivity [3].

2.1 Dielectric Response in Time Domain [1]

If a step voltage U_0 is applied to a dielectric material with a geometric capacitance C_0 for time T_p , two kinds of phenomena contribute to electrical conduction and polarization. The charging current or polarization current $I_{pol}(t)$ can be derived:

$$I_{pol}(t) = C_0 U_0 \left[\underbrace{\frac{\sigma_0}{\epsilon_0}}_{\text{conductive part}} + \underbrace{\epsilon(\infty)\delta(t)}_{\text{vacuum capacitive part}} + \underbrace{f(t)}_{\text{dielectric response part}} \right] \quad (1)$$

For experiment, dirac-function $\delta(t)$ cannot be measured because of its produced an externally large current pulse and very short duration time.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

After time T_p , complete polarization $f(t)$ becomes 0 or incomplete polarization $f(t)$ is not be 0. If a dielectric material is short-circuited, the discharging current or depolarization current $I_{depol}(t)$ can be defined:

$$I_{depol}(t) = -C_0 U_0 \left[f(t) - \underbrace{f(T_p + t)}_{\substack{\text{can be neglected} \\ \text{for long time } T_p}} \right] \quad (2)$$

where: σ_0 is the volume conductivity of dielectric material; ϵ_0 is permittivity of free space; $\epsilon(\infty)$ is the high frequency part of the permittivity; $\delta(t)$ is the dirac-function; $f(t)$ is the dielectric response function.

2.2 Dielectric Response in Frequency Domain [3]

When a dielectric material with capacitance $C(\omega)$ is subjected with sinusoidal voltage $U(\omega)$, the sinusoidal current $I(\omega)$ will flow as :

$$I(\omega) = j\omega C(\omega)U(\omega) \quad (3)$$

The capacitance is a complex number consisting of losses $C''(\omega)$ and “pure” capacitance $C'(\omega)$. The sinusoidal current $I(\omega)$ can be rewritten as:

$$I(\omega) = j\omega C_0 \left\{ \underbrace{\frac{\epsilon(\infty) + \chi'(\omega)}{\epsilon'(\omega) \text{ pure capacitive part}}}_{\epsilon'(\omega)} - j \underbrace{\left[\frac{\sigma_0 + \chi''(\omega)}{\epsilon_0} \right]}_{\epsilon''(\omega) \text{ loss capacitive part}} \right\} U(\omega) \quad (4)$$

$\chi'(\omega)$ and $\chi''(\omega)$ are susceptibility depending on frequency ω

2.3 Partial discharge measurement technique

Generally, PD is a consequence of local stress concentrations in the insulation or on the insulation surface. In the power cables system, PD phenomena can be examined with various techniques based on the measurements of electrical, electromagnetic and acoustic signals. For a XLPE power cable the configuration as coaxial cylinder electrodes, The detectable pulse q_a can be derived [2]:

$$q_a \approx P_m \cdot \frac{1.2}{r_c \left[\ln \left(\frac{r_a}{r_i} \right) \right]} \quad (5)$$

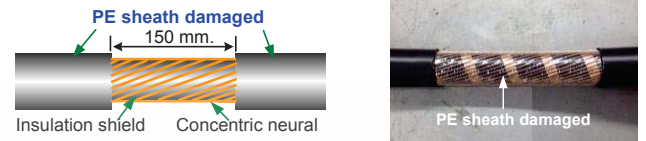
where: P_m is the term of dipole moment; r_c , r_a and r_i are geometrical parameters of cable configuration [2].

3 Experimentation

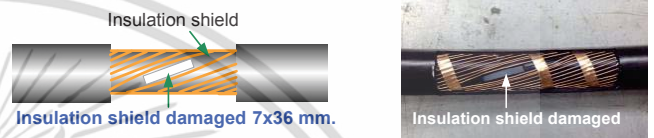
3.1 Models for experiment

The XLPE cables with the cross-section area of 240 mm^2 and 5 m long including premolded joint as rate voltage of

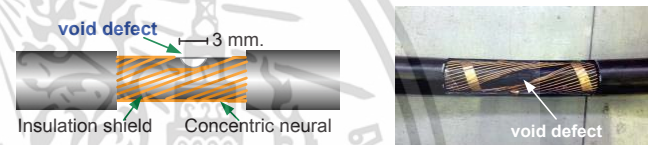
12/20(24) kV were used in the experiment. Six case studies, case1: PE sheath damaged, case2: semi-conducting layer damaged, case3: void defect in extruded cable, case4: void defect in extruded cable at cable joint, case5: semi-conductive contaminant at cable joint, and case6: conductive contaminant at cable joint, were prepared to investigate as depicted in Fig. 1(a) – 1(f).



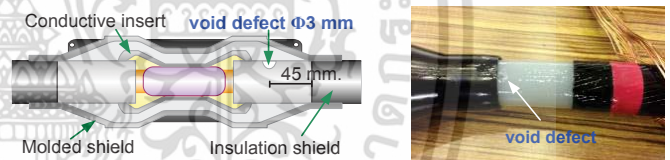
(a) case 1: PE sheath damaged



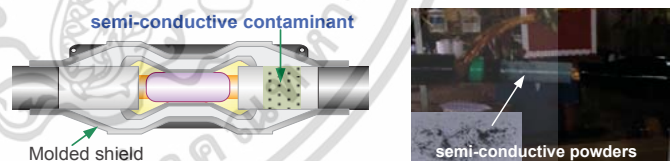
(b) case 2: semi-conducting layer damaged



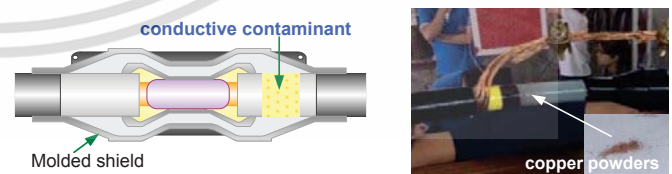
(c) case 3: void defect in extruded cable



(d) case 4: void defect in extruded cable at cable joint



(e) case 5: semi-conductive contaminant at cable joint



(f) case 6: conductive contaminant at cable joint

Fig. 1. XLPE power cables for six case studies

3.2 PDC test set up

To study the dielectric response of the artificially damaged insulation of medium voltage power cables including its joint, the PDC test circuit was set up and PDC experiment test set up were illustrated in Fig. 2 and Fig. 3 respectively. Then, the

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

initial condition of the cable so called the remaining charges inside the insulation system was measured by measuring discharging or remaining current [4]. The amplitude of remaining current was about 8 pA which was suitable to carry out the PDC experiment. Next, the direct voltage of 1,000 volt from the PDC-Phantom-1000XE voltage source was applied to the cable specimen. The polarization and depolarization current were measured and fitted with the equation (6) to determine the individual element R_i , C_i of linear dielectric model cables [1,5].

$$i_{pol/depol(t)} = \sum_{i=1}^n A_i e^{(-t/R_i C_i)} \quad (6)$$

where: $A_i = U_c (1 - e^{(-T_p/R_i C_i)}) / R_i \quad (7)$

The dielectric loss factor $\tan \delta$ can be calculated from individual element R_i , C_i of linear dielectric model by the following equation (8):

$$\tan \delta(\omega) = \frac{C''(\omega)}{C'(\omega)} = \frac{\frac{1}{\omega R_0} + \sum_{i=1}^n \frac{\omega R_i C_i^2}{1 + (\omega R_i C_i)^2}}{C_{50Hz} + \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{1 + (\omega R_i C_i)^2}} \quad (8)$$

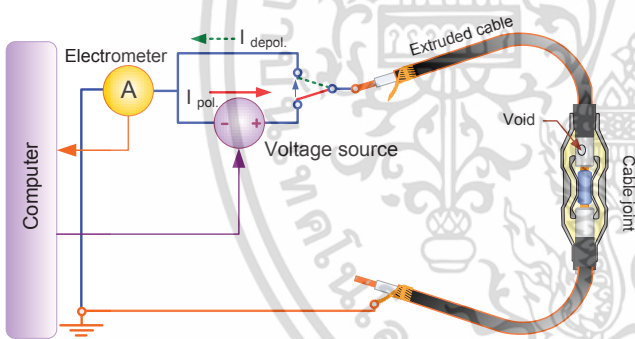


Fig.2. Test circuit diagram for PDC measurements

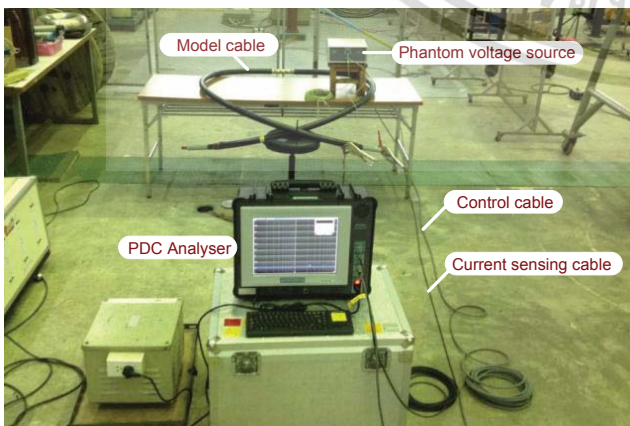


Fig.3. Test circuit arrangement for PDC measurements

3.3 PD test set up

The cable test specimen was prepared with the cable terminators for partial discharge measurement (PD). PD measurement was performed in the high voltage laboratory. The test circuit diagram and PD experiment test set up are depicted in Fig. 4 and Fig. 5 respectively. The measuring middle frequency f_m of conventional PD measurement was 250 kHz with bandwidth 100 kHz to 400 kHz according to IEC60270. Moreover, the high frequency current measurement was measured by high frequency current transformer (HFCT) with bandwidth 50 kHz to 20 MHz. The surrounding disturbance was measured at the measuring frequency which was approximately less than 1.2 pC. The measuring circuit was calibrated with the standard PD pulse from CAL 542-charge calibrator. Then, the cable test specimen was subjected to the alternating voltage by the free PD testing transformer from zero until partial discharge inception voltage (PDIV) occurred and the PDIV was recorded. Then, the test voltage was increased to 120 percent of PDIV to record the PD pattern for 1 minute.

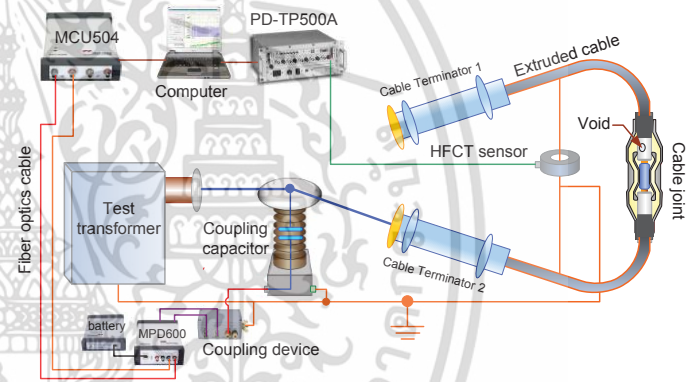


Fig.4. Test circuit diagram for PD measurements

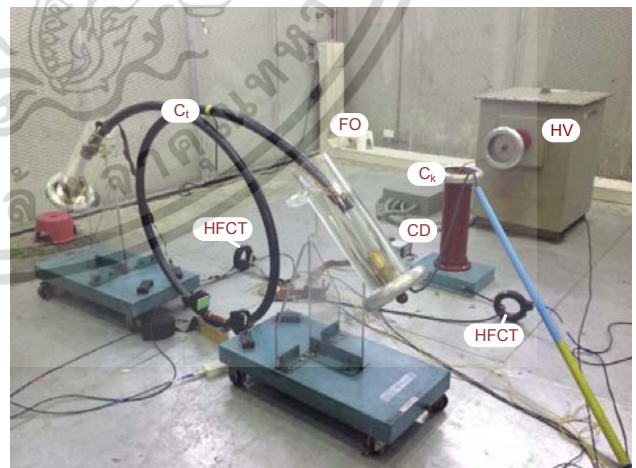


Fig.5. Test circuit arrangement for PD measurements

Where: HV is high-voltage supply 75kV; C_1 is cable test specimen; C_k is coupling capacitor 1nF; CD is coupling device; FO is fiber optics cable; HFCT is high frequency current transformer.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4 Test results

4.1 PDC measurement results

From the PDC experiment, two basic properties which are polarization and depolarization current of six case studies are shown in Table 1.

4.2 PD measurement results

For conventional PD measurement, four basic quantities

which are PD amplitude (pC), phase angle, polarity of PD pulses and repetition rate (PDs/s) were examined to distinguish the different types of PD phenomena occurring in insulation system of six case studies. For HFCT PD measurement, three basic parameters which are PD amplitude (mV), polarity of PD pulses and discharge timing were investigated. The test results obtained from the conventional PD measurement and HFCT PD measurement are represented in table 1.

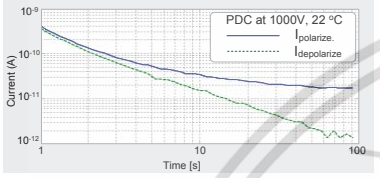
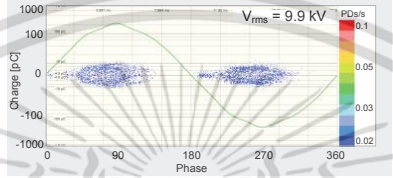
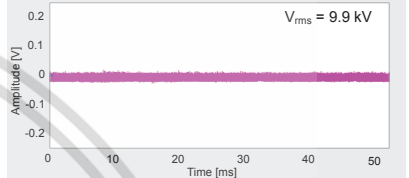
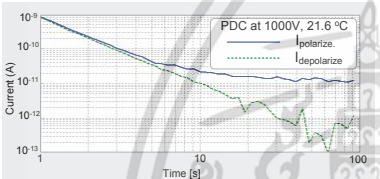
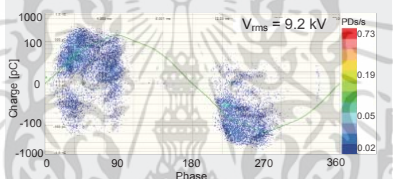
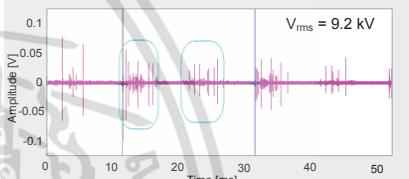
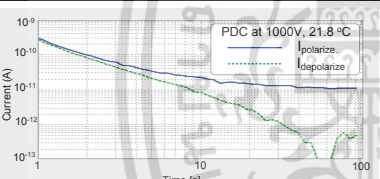
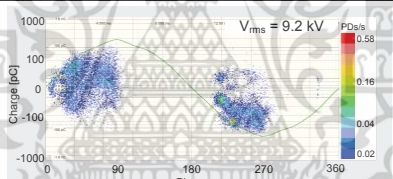
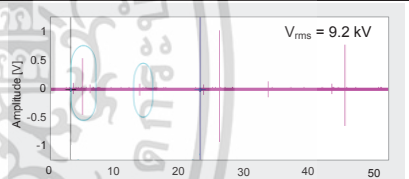
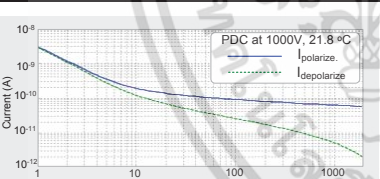
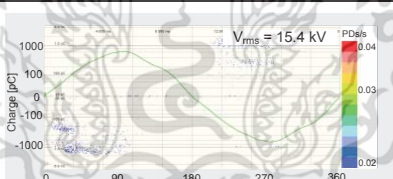
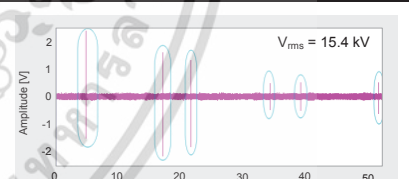
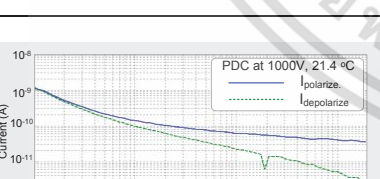
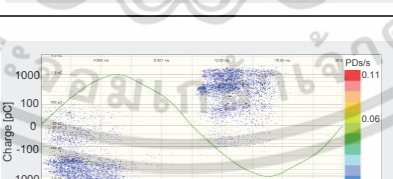

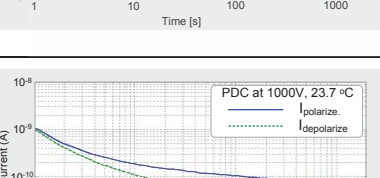
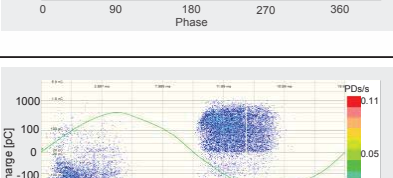
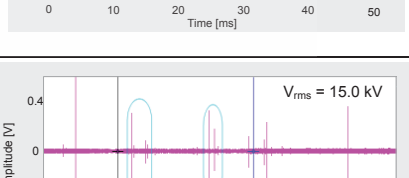
	PDC measurement results	PD measurement results	
		Conventional PD measurement	HFCT sensor
Case 1			
Case 2			
Case 3			
Case 4			
Case 5			
Case 6			

Table 1: Comparison of the PDC and PD measurement results

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5 Discussions

5.1 PDC test results

To evaluate the dielectric response of the test specimen, the polarization and depolarization current from test results were evaluated by applying the linear dielectric model from (6) and (7) to calculate the dielectric response in frequency domain which is dielectric dissipation factor (DDF) as depicted in Fig.6. Besides, C Ratio, polarization (P.I.) and depolarization index (dP.I.) were calculated as shown in table 2.

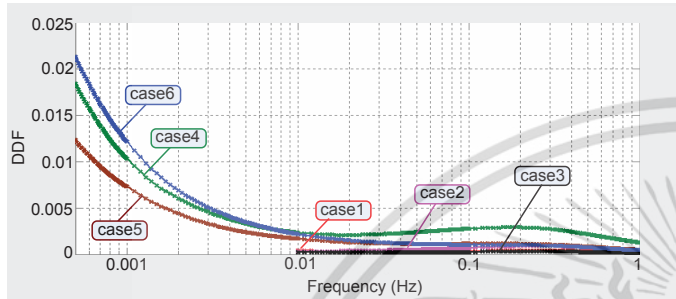


Fig.6. DDF of cable test specimens

	cases					
	1	2	3	4	5	6
charging time (s)	100	100	100	2000	2000	2000
C Ratio at 0.01 to 50 Hz	1.001	1.002	1.000	1.007	1.003	1.003
C Ratio at 0.0005 to 50 Hz	-	-	-	1.026	1.029	1.107
P.I. (R10/R1)	10.99	32.67	13.01	15.78	8.53	5.77
P.I. (R100/R10)	1.94	2.07	1.94	2.10	2.22	1.80
P.I. (R200/R20)	-	-	-	1.71	1.91	1.61
P.I. (R600/R60)	-	-	-	1.53	1.64	1.55
dP.I. (R10/R1)	20.82	57.16	28.55	23.63	11.56	9.03
dP.I. (R100/R10)	13.87	8.58	16.40	4.61	4.38	2.82
dP.I. (R200/R20)	-	-	-	3.94	4.24	2.51
dP.I. (R600/R60)	-	-	-	4.09	4.11	2.29

Table 2: C Ratio, P.I. and dP.I. of cable test specimens

5.2 PD test results

To evaluate the main characteristics of PD patterns, the PD test results in this research work were summarized in Table 3.

Main characteristics of PD patterns		cases					
		1	2	3	4	5	6
symmetric pattern		X	X	X	X	X	X
asymmetric pattern							
most of PD start after the voltage zero-crossing			X	X		X	X
repetition rates		high		X			
		moderate			X		X
		low	X			X	
most of PD polarity	positive half cycle voltage	positive PD pulse	X	X	X		
		negative PD pulse	X			X	X
	negative half cycle voltage	positive PD pulse	X			X	X
		negative PD pulse	X	X	X		
PD magnitude dispersion		high		X			X
		moderate	X		X		X
		low				X	

Table 3: Main characteristics of PD patterns

6 Conclusions

From the experiment, it can be concluded that PDC measuring technique has high potential to analyse the problems of the cable system compared with the conventional PD measurement while HFCT PD measurement needs special experience to analyse its results. Moreover, the sensitivity of HFCT was clearly lower than conventional tool.

Acknowledgements

The authors wish to acknowledge Mr.Worachai Sawatdimongkol from TIS company, Mr.Kittimasak Tikakosol from APE company and all staff of high voltage laboratory, King Mongkut's Institute of technology Ladkrabang.

References

- [1] E. Kuffel, W.S. Zaengl, J. Kuffel, "High Voltage Engineering Fundamentals", Second edition 2000, published by Butterworth-Heinemann.
- [2] Wolfgang Hauschild, Eberhard Lemke, "High-Voltage Test and Measuring Techniques", 2014th edition, Springer Heidelberg New York Dordrecht London.
- [3] Maik Kock, "Reliable Moisture Determination in Power Transformers", Sierke Verlag Göttingen, Band 1-2008.
- [4] S. Bhumiwat, "Interpretation of dielectric spectroscopy results in time and frequency domains for power cables", CIGRE 2010, D1-216.
- [5] W. S. Zaengl, "Dielectric Spectroscopy in Time and Frequency. Domain for HV Power Equipment (Transformers, Cables etc.)", 12th Internat. Symposium on High Voltage Engineering - ISH 2001, Bangalore, India, 20 - 24 August 2001.



Phethai Nimsanong: He received B.Eng. and M.Eng. degrees in electrical engineering from Faculty of Engineering, KMITL, Thailand in 2006 and 2012, respectively. Now, he is currently PhD student in electrical engineering, Faculty of Engineering, KMITL, Thailand. His major research interests are high voltage testing and equipment.



Norasage Pattanadech: He received Dr. techn. In Electrical Engineering from Graz University of Technology, Austria, 2013. Currently, He is Asst. Professor of Electrical Engineering Dept. Faculty of Engineering, KMITL, Thailand. His research activities have been mainly involved insulators, high voltage testing and equipment.



Peerawat Yutthagowith: He received Ph. D. degree from Doshisha University, Kyoto, Japan, in 2010. He joined King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang as a Lecturer in 2007. His research interests are in area of a high voltage engineering and electromagnetic transient in power systems. Dr. Yutthagowith is also a member of International Council on Large Electric Systems (CIGRE) WG C4.37.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2018 12th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM 2018)

**Xi'an, China
20-24 May 2018**

Pages 1-569



IEEE Catalog Number: CFP18ICP-POD
ISBN: 978-1-5386-5789-8

4-P-6	Investigation of Dimensional Effect in ZnO Ceramics through High-temperature Relaxation.....	805
	<i>Lei Xin, Yuwei Huang, Kangning Wu, Zhuang Tang, Jianying Li, Shengtao Li, Wenfeng Liu</i>	
4-P-7	Frequency Dependence Parameter Analysis of Underground Cables with and without Joint	809
	<i>Phethai Nimsanong, Anantawat Kunakorn, Norasage Pattanadech</i>	
4-P-8	Characteristics of Electric Field Distortion in Deteriorated Composite Insulators with High Temperature	813
	<i>Zhonghao Zhang, Xinyu Huang, Ming Lu, Zehui Liu, Liming Wang</i>	
4-P-9	Polarization and Depolarization Currents of the Degraded Stator Insulation of the Synchronous Machine for Hydro Power Plant	817
	<i>Natnaree Phumiphunephon, Natthawut Phloymuk, Norasage Pattanadech</i>	
4-P-10	Research on Shielding Effect of Background Electric Field for GIS Bus with a Conductive Protrusion Under Impulses	821
	<i>Tao Wen, Qiaogen Zhang, Ming Chen, Jiangtan Ma, Zhicheng Wu, Naoyuki Shimomura, Yu Yin, Weijiang Chen</i>	
4-P-11	Dissolved Gas Analysis of Transformer Oil Based on Deep Belief Networks	825
	<i>Yu Liang, Yaoyu Xu, Xinshu Wan, Yuan Li, Ning Liu, Guanjun Zhang</i>	
4-P-12	Experimental Analysis of Temperature Distribution in High-Voltage Strain Clamp	829
	<i>Xuanchang Dong, Fengrui Qu, Yanfei Li, Baili Fang, Yiqing Wang, Gang liu</i>	
4-P-13	AC Loss Characteristics of Layered Insulated Low AC Resistive Conductor	833
	<i>Liexiang Hu, Zhenxing Jiang, Liming Yang, Zhien Zhu, Shaohua Wang, Dong Li, Hai Zheng</i>	
4-P-14	Study of GIS Disconnecter Internal Fever by Simulation and Experiment	837
	<i>Siqi Song, Yongyong Jia, Jinggang Yang, Yuan Liu, Yujie Li, Tong Liu</i>	
4-P-15	Optimization and Analysis on the Key Insulation Structure of 500kV Radial Split Transformer.....	844

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Frequency Dependence Parameter Analysis of Underground Cables with and without Joint

P. Nimsanong, A. Kunakorn, N. Pattanadech

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand
E-mail: phethai.ni@hotmail.com

Abstract- This paper represents the dielectric investigation of XLPE power cables with and without cable joint (premolded joint) by using polarization and depolarization current (PDC) measurement. To investigate the polarization phenomena of the underground cable (case 1) and the underground cable with the premolded joint (case 2), the XLPE cables with the cross-section area of 240 mm² and 5 m long with rate voltage of 12/20(24) kV with and without premolded joint were used in the experiment. In this research work, the DC voltage of 1,000V was applied to insulation system for measuring polarization current, $i_{pol}(t)$. Then, suddenly disconnected the DC applied voltage source to short circuit the tested cable to measure depolarization current, $i_{dep}(t)$. In case 1, the PDC measurement was only for 100 seconds due to its homogeneous insulation of XLPE cable; only conduction current and interfacial polarization current with short relaxation time existed. In case 2, the PDC measurement was done for 2,000 seconds. In this case the polarization current was from XLPE cable mentioned and the interfacial polarization current from the barrier between XLPE cable and cable joint. From the experiment, the frequency dependence of the complex capacitance and dielectric dissipation factor of the underground cable and the underground cable with the premolded joint were analyzed. It is found that the trend of real part of the complex capacitance and the conduction loss of both case studies is not much different. However, the trend of imaginary part of the complex capacitance and polarization loss of both case studies is clearly different. Two peaks of imaginary parts of complex capacitance and polarization loss of the underground cable with joint is from XLPE and the junction of XLPE and joint.

I. INTRODUCTION

Polarization of the atoms and molecules that form the bulk of the insulating material occurs when this insulation is subjected to electric field stress[1, 2]. There are five main polarization mechanisms:

- (i) Electronic polarization, by which atoms and/or molecules are deformed by slightly shifting of the electron cloud away from nucleus.
- (ii) Atomic polarization or vibrational polarization, by which atoms and/or molecules vibrate at a higher frequency.
- (iii) Lattice polarization, by which polarization occurs due to shifts between differently charged crystal lattice modules.
- (iv) Orientation polarization, by which polar molecules or molecular groups (so-called electrical dipoles) rotate to align with an electric field.
- (v) Interfacial or space charge polarization, by which congestion of charge carriers at the macroscopic or

microscopic interface between media of different permittivity and conductivity leads to the polarization of the dielectric [3, 4].

II. DIELECTRIC CHARACTERISTICS

The four main dielectric characteristics, i.e., dielectric constant ϵ_r , conductivity σ , loss factor ($\tan\delta$) and complex dielectric constant ϵ^* are considered for insulation analysis [5].

Permittivity ϵ_r : The molecular structure of XLPE power cable is typically comprised of symmetrical polyethylene chain molecules exhibiting no dipole moment or orientation polarization. Therefore, the XLPE structure produces low dielectric constants caused by electronic, atomic and lattice polarization.

Conductivity σ : The conductivity of plastic insulation especially polypropylene is comparatively very low, with charge transport (caused by so called 'hopping' of electrons between locations) taking place at low field strengths predominantly by ion conduction.

Loss factor ($\tan\delta$): The polarization and conduction losses of insulating material are represented by the $\tan\delta$ or loss factor. The polarization loss, in the case of the XLPE power cable equipped with the cable joint is predominantly caused by interfacial polarization between the XLPE insulation and cable joint surface.

Complex Permittivity ϵ^* : the complex permittivity is used to describe the phase displacement between the electric field $E(t)$ or voltage $U(t)$ and the electrical displacement density $D(t)$.

The relationship between the four dielectric parameters above is expressed in Fig.1-2.

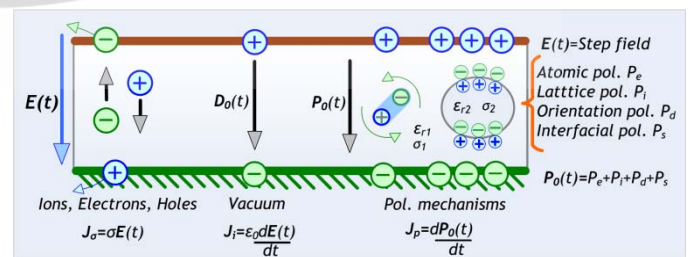


Fig.1. Dielectric material under step field

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

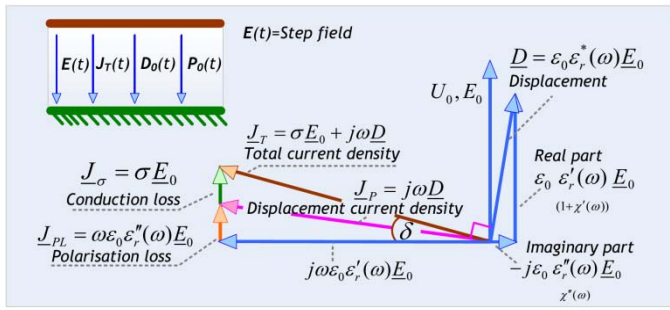


Fig.2. Description of a complex vector diagram of dielectric parameters

III. PDC MEASUREMENT

PDC (Polarization and Depolarization Current) measurement detects the polarization current $i_{pol}(t)$ or charging current when a DC voltage is applied to the test object. Once completely polarization current measurement, the test object is then short-circuited in order to measure the depolarization $i_{dep}(t)$ or discharge current and thereby obtain information pertaining to the characteristics of the insulation[3, 4].

PDC analysis can be performed by using either readily available diagnostic software incorporating an appropriate curve-fitting function, or by developing a specific algorithm by which the obtained PDC curves are verified by a comparison with the measured PDC. From the PDC test results, it is then possible to determine both the complex capacitance $C^*(\omega)$ and the Loss factor $\tan \delta(\omega)$ in the frequency domain.

IV. EXPERIMENTATION

A. Models for experimentation

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

Case 1. XLPE power cable with no cable joint

Case 2. XLPE power cable with pre-molded cable joint

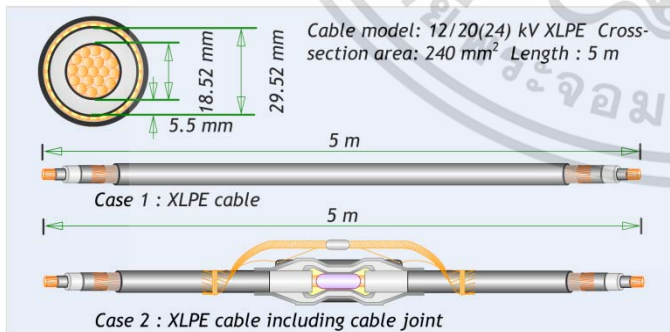


Fig.3. XLPE power cables for two case studies

B. PDC test set-up

The PDC test circuit diagram and the PDC test set up used to investigate the dielectric response of the underground cable with and without joint are illustrated below in Fig. 4 -5 respectively.

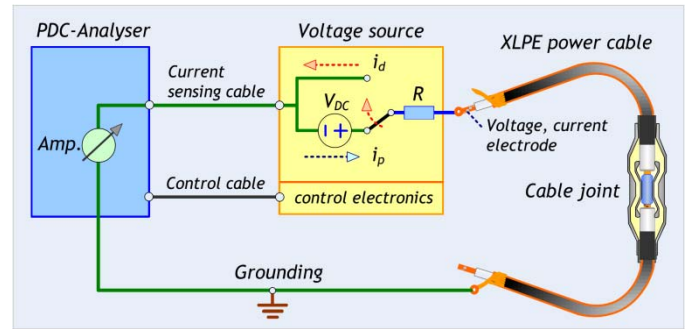


Fig. 4. Test circuit diagram for PDC measurement of an underground cable

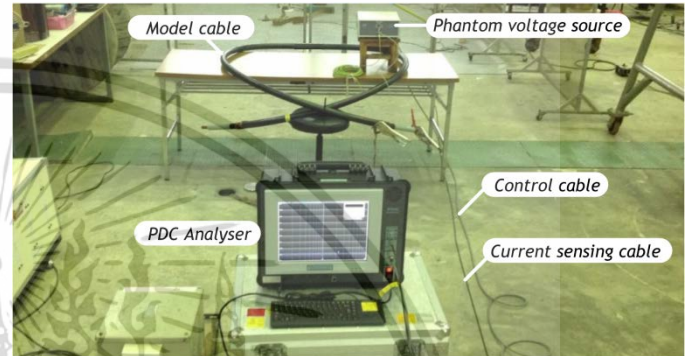


Fig. 5. Test circuit arrangement for PDC measurement of an underground cable

C. PDC test procedure

The test procedure for performing the PDC measurement consisted of a three-step process: (i) initial measurement, (ii) control measurement, and (iii) main measurement [6].

(i) *Initial measurement*: As shown in Fig.6(a) this was made to determine the initial condition of the insulation of the cable samples. In this process, only the depolarization current was measured, in order to ascertain the amount of any remaining charges inside the insulation.

(ii) *Control measurement*: The control measurement procedure was conducted in order to confirm that there were no abnormalities in the PDC test circuit. As shown in

Fig. 6(b) this process consisted of applying a DC test voltage of 50V for a period of 5 seconds to the insulation system in order to measure $i_{pol}(t)$, then short-circuiting the test object in order to measure $i_{dep}(t)$ for a period until $i_{dep}(t)$ decreased to the minimum level (at least to the same level as the remaining current from the initial measurement).

(iii) *Main measurement*: The polarization and depolarization currents obtained from the main measurements illustrated in Fig. 6(c) were used to determine the dielectric characteristics of the cable insulation under test. In order to perform the main measurements, a DC test voltage of 1,000V was applied to the two types of cable under test for $i_{dep}(t)$ measurement, in Case 1 for a period of 100 seconds, and in Case 2 for a period of 2,000 seconds. Then short-circuiting the test object in order to measure $i_{dep}(t)$.

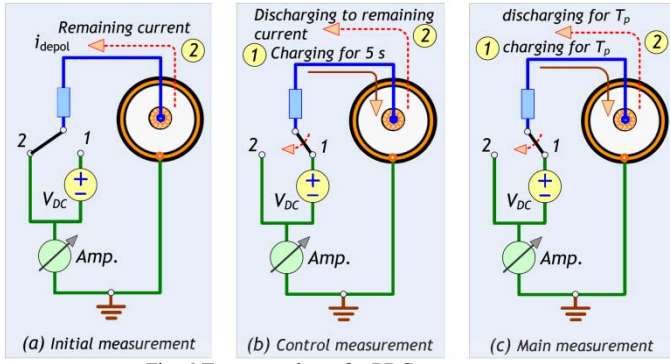


Fig. 6. Test procedures for PDC measurement

V. TEST RESULTS

From the PDC experiments, the measured polarization $i_{pol}(t)$ and depolarization $i_{dep}(t)$ currents of the underground cable and the underground cable with joint are shown in Fig.7-8 respectively.

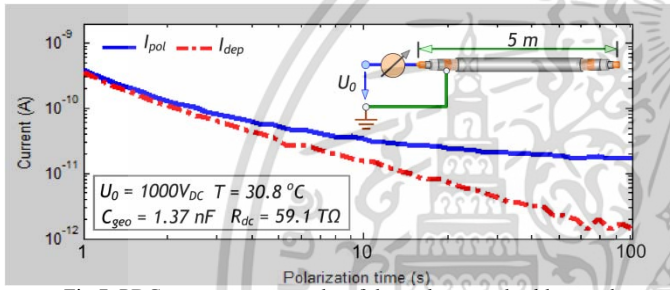


Fig.7. PDC measurement results of the underground cable tested

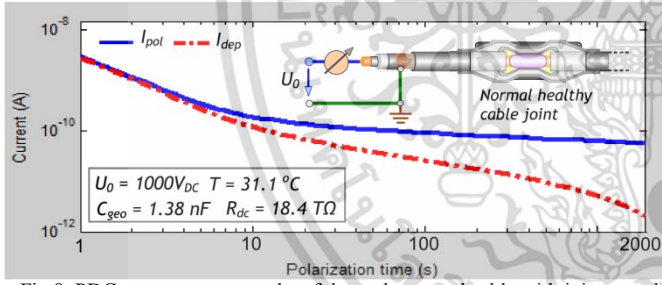


Fig.8. PDC measurement results of the underground cable with joint tested

According to Fig.7, the PDC measurements were only performed for 100 seconds due to its homogeneous insulation of XLPE cable generating only the interfacial polarization current. In Fig. 8 the PDC measurements were conducted for 2,000 seconds. In this case the polarization current and the depolarization current were generated from two interfacial polarization mechanisms. The first interfacial polarization mechanism occurred in the extruded XLPE cable. The second interfacial polarization mechanism occurred at the junction between XLPE and cable joint insulation.

VI. DISCUSSIONS

A. Linear Model

This research work proposes the analysis of the frequency dependence parameters of the tested underground cables with and without joint. The considered parameters are

composed of a complex capacitance and a dielectric dissipation factor (loss factor) of the test specimen.

Once the cable insulation is subjected to an electric field, a charging current $i_{charging}$ occurs. The charging current can be determined as the sum of high frequency capacitive current $i_{C_{geo}}$, interfacial polarization current i_{pol} , and conduction current $i_{R_{dc}}$ as expressed in (1) below

$$i_{charging}(t) = i_{C_{geo}} + i_{pol} + i_{R_{dc}} \quad (1)$$

$$= C_{geo} \frac{dU_0}{dt} + \sum_{i=1}^n \frac{U_0}{R_i} e^{-\frac{t}{R_i C_i}} + \frac{U_0}{R_{dc}}$$

where C_{geo} is high frequency capacitance, U_0 stands for step DC voltage, R_{dc} is DC resistance and R_i and C_i are resistance and capacitance parameters generated from interfacial polarization.

The equivalence circuit related to equation (1) is represented in Fig.9.

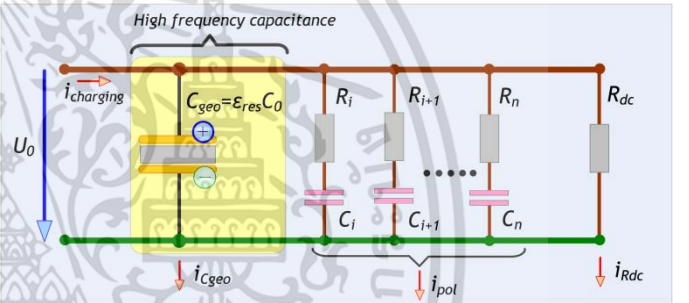


Fig.9. Linear model for XLPE power cables including cable joints

From equation (1) and Fig.9, C_{geo} is estimated by integration of the polarization current from $t = 0$ to $t = \Delta t$ as given in (2)

$$C_{geo} = \frac{1}{U_0} \cdot \int_0^{\Delta t} i_{pol}(t) \cdot dt. \quad (2)$$

R_i and C_i parameters can be calculated from depolarization $i_{dep}(t)$ current as expressed in (3) by employing a curve fitting technique

$$i_{dep}(t) = \sum_{i=1}^n \frac{U_{ci}(T_c)}{R_i} e^{-\frac{t}{R_i C_i}} \quad (3)$$

where $U_{ci}(T_c) = U_0(1 - e^{-\frac{t}{R_i C_i}})$; $i = 1 \dots n$ and T_c is a time for applying the DC test voltage.

To determine DC resistance R_{dc} , the following equation is utilized

$$R_{dc} = \frac{U_0}{i_{pol}(T_c) - |i_{dep}(2T_c)|}. \quad (4)$$

B. Frequency dependence parameter analysis

To establish the insulation model in frequency domain, the complex admittance can be calculated as in (5).

$$Y(\omega) = j\omega C_{geo} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i - j\frac{1}{\omega C_i}} + \frac{1}{R_{dc}} \quad (5)$$

$$= j\omega \left[C_{geo} + \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{1 + j\omega R_i C_i} \right] + \frac{1}{R_{dc}}$$

To determine complex capacitance, the real part $C'(\omega)$ and the imaginary part $C''(\omega)$ can be computed using the equations below.

$$C'(\omega) = C_{geo} + \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{1 + (\omega R_i C_i)^2} \quad (6)$$

$$C''(\omega) = -j \sum_{i=1}^n \frac{\omega R_i C_i^2}{1 + (\omega R_i C_i)^2} \quad (7)$$

The loss factor obtained from the conduction current is calculated by equation (8)

$$\tan \delta_{\sigma}(\omega) = \frac{1}{\omega R_{dc} C'(\omega)} \quad (8)$$

The loss factor generated by the interfacial polarization mechanism of the underground cables with and without joint can be calculated by equation (9)

$$\tan \delta_p(\omega) = \frac{C''(\omega)}{C'(\omega)} \quad (9)$$

From equation (6) – (7), the frequency dependence complex capacitance of the XLPE cable (case 1) tested and the XLPE cable equipped with the cable joint (case 2) tested can be determined as shown in Fig.10 - Fig.11 respectively.

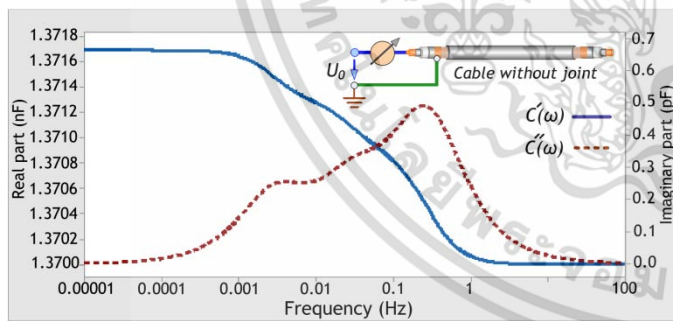


Fig.10. Complex capacitance of XLPE model cable (case 1)

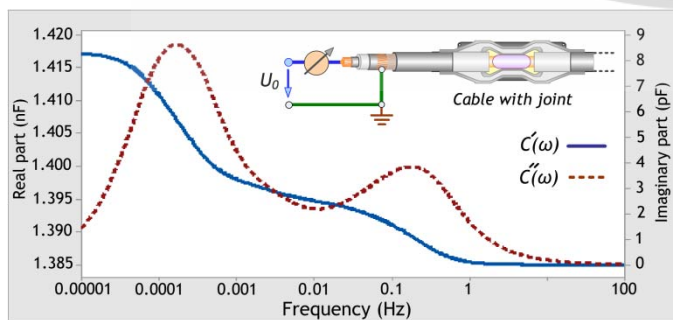


Fig.11. Complex capacitance of XLPE model cable including cable joint (case 2)

Besides, the loss factors of the cable insulations under test are illustrated in Fig.12.

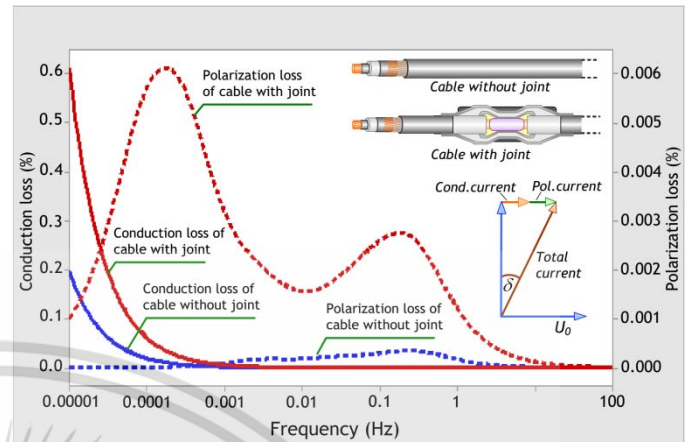


Fig.12. Loss factor of 12/20(24) kV XLPE power cables including cable joints

VII. CONCLUSION

From the experiment, the polarization and depolarization currents of the XLPE underground cable (case 1) and the XLPE underground cable with joint (case 2) were investigated. Then, the frequency dependence parameters, i.e., complex capacitance, polarization loss and conduction loss of the underground cable tested were analyzed. It is found that the trend of real part of the complex capacitance and the conduction loss of both case studies is not much different. However, the trend of imaginary part of the complex capacitance and polarization loss of both case studies is clearly different. Two peaks of imaginary parts of complex capacitance and polarization loss of the underground cable with joint is from XLPE and the junction of XLPE and joint.

ACKNOWLEDGMENT

The authors wish to acknowledge Mr. Worachai Sawat dimongkol from TIS Company Thailand and all staff of high voltage laboratory, King Mongkut's Institute of technology Ladkrabang.

REFERENCES

- [1] Donald R. Askeland, Pradeep P. Fulay, Wendelin J. Wright, "The Science and Engineering of Materials", Sixth Edition, 2010
- [2] W. S. Zaengl, "Dielectric Spectroscopy in Time and Frequency. Domain for HV Power Equipment (Transformers, Cables etc.)", 12th Internat. Symposium on High Voltage Engineering - ISH 2001, Bangalore, India, 20 - 24 August 2001.
- [3] Andreas Kuchler "Hochspannungstechnik" 2nd edition, 2005
- [4] E. Kuffel, W.S. Zaengl, J. Kuffel, "High Voltage Engineering Fundamentals", Second edition 2000, published by Butterworth-Heinemann.
- [5] Andrzej Karol Jonscher, "Dielectric Relaxation in Solids", Chelsea Dielectrics Press Ltd, July 1983.
- [6] S. A. Bhumivat "On-site non-destructive diagnosis of in-service power cables by polarisation /depolarisation current analysis" 2010 IEEE International Symposium on Electrical.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2019 5th International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology (ICEAST 2019)

Luang Prabang, Laos
2 – 5 July 2019



IEEE Catalog Number: CFP19099-POD
ISBN: 978-1-7281-0068-5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Track 4: Telecommunications, Computer Science, Instrumentation and Control, Electrical and Electronic Engineering

Paper ID	Title / Author(s)
296	Experimental Evaluation Scheme of DTTV Propagation Loss in Thailand.....253 <i>Sathaporn Promwong, Thanadol Tiengthong, Aditep Chaisang, and Yuttapong Rangsanseri</i>
297	The investigated on Harmonic Monitoring for the Inverter Applications by using Microprocessor.....257 <i>Savath Nouphengdy, Somsanouk Pathoumvanh, Phoumy Indahak, and Khamphoui Southisombath</i>
298	Performance Comparison between a two-switch and RCD clamp forward converters.....261 <i>Virot Wuti, Amata Luangpol, Kaweevat Tattiwong, Anan Sopin, Phaophak Sirisuk, and Chanin Bunlaksananusorn</i>
299	Condition Assessment of MV Motor Based on Charge Difference and Charge Ratio Analysis.....265 <i>P. Nimsanong, N. Boonsaner, and N. Pattanadech</i>
300	Application of Duval Pentagon Compared with Other DGA Interpretation Techniques: Case Studies for Actual Transformer Inspections Including Experience from Power Plants in Thailand.....269 <i>N. Pattanadech and W. Wattakapaiboon</i>
301	The Aging of the Insulation System of Large Rotating Machines in Frequency Domains.....273 <i>Natthawut Phloymik and Norasage Pattanadech</i>
304	1V High Speed E-TSPC 2/3 Prescalers.....277 <i>Itthiphath Lawang, Apirak Tudsorn, and Siraphop Tooprakai</i>
305	Implementation of OTA-based Memristor Emulator for Adjusting Frequency.....281 <i>Aphichata Thongrak, Suchada Sitjongsataporn, Sanya Khunkhao, and Pichet Muongnoul</i>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Condition Assessment of MV Motor Based on Charge Difference and Charge Ratio Analysis

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

N. Boonsaner
Electrical Engineering Dept., Faculty of
Engineering,
King Mongkut's Institute of
Technology Ladkrabang
Bangkok, Thailand
nut_work8@hotmail.com

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

Abstract— Insulation resistance and polarization index tests have been conducted in utility companies as one of the major tools for evaluating the integrity of stator winding insulation of medium voltage motor. Unfortunately, the information obtained from the measurement results are the combination of the electrical problem and polarization problem in the insulation system not separated from each other. This paper presents a new approach so-called charge difference analysis (QDA) and charge ratio analysis (QRA) to identify the problem in stator winding insulation occurred from conduction mechanism or/and polarization mechanism. Moreover, proposed parameters which are QD, QG and QR have been conducted on field motors in the following case studies: the first group (A) consists of two motors of which one is new motor and the other one is severely aged motor, the second group (B) consists of two motors of which one is lightly loaded motor and the other one is thermally aged motor, and the third group (C) consists of a single motor, on which PDC measurements have been carried out after maintenance in 2014 and 2016 respectively. From experiments, it was found that proposed parameters are able to provide useful information about the condition of stator insulation, i.e. contamination or/and degradation.

Keywords— medium voltage motor, condition assessment, insulation resistance, conduction and polarization mechanisms

I. INTRODUCTION

In industry, medium voltage motor (1 - 6.6 kV) is a one of the most important apparatus used for converting mechanical power into electrical energy or vice versa. Normally, expected life of electrical machine designed is about 20 - 40 years [1]. In general, insulation determines the lifetime of an electrical machine. However, during operation the stator winding insulation of a motor undergoes ageing due to stresses so called TEAM stresses: thermal(T), electrical(E), Ambient (A) and mechanical(M) resulting in the breakage of insulation bonds or delamination reducing the remaining life [2]. The traditional method for assessment the condition of motor is insulation resistance (IR) or polarization index (PI) where measurements need to be repeated periodically to observe trend. However, IR or PI may have satisfactory values even contamination or damage occurred in the stator winding insulation. Therefore, this paper proposes dielectric analysis that goes further than just numeric trending so-called charge difference analysis (QDA) and charge ratio analysis (QRA) to identify the problem in stator winding insulation between conduction and polarization. They can convert the values into physical attributes which can represent the condition of stator insulation. The derived QD parameter gives information about the conduction problem occurred in insulation which may cause by surface humidity, free water or droplet, surface contaminants, tracking, carbon dust, metal dust, debris from

fault, and leakage path; on the other hand, another derived parameter is the QR which represents the polarization problem occurred in insulation, it may be caused by by-products of partial discharges, aging molecules at interfaces, arcing by-products, oxidation by-products, products of spilled lubricating oil and dust, chemical dust salted dust, corrosive products, thermal aging products, and adsorbed moisture in molecular state. Thus, proposed parameters in this paper can provide valuable information about the symptom of insulation aging for assessment the condition of motor.

II. DIELECTRIC MECHANISMS AND DIELECTIC RESPONSE MEASUREMENT

To understand dielectric mechanisms in stator winding insulation, it is important to know what insulation technology and materials are used because the dielectric mechanisms depend on the materials and structure of insulation system. Solid materials like Mica, Polyimide, Polyester, Aramid, and Glass are used partly to insulate the high voltage parts from the earth or from each other, partly to smooth the voltage differences for instance in the coil end area or overhang. A semi-conductive layer may be used to avoid surface discharge in high electric field regions. For two coils in the same stator slot with different phases, the thick laminate spacers are used to insulate between them. Air gap is used to insulate coils from each other at the overhang area.

A. Conduction Mechanisms in Stator Winding Insulation

Fig.1 shows the example of electrical conduction phenomena on stator winding insulation. For conduction mechanisms in slot section (1), modern insulation is well-bonded polyester and epoxy-mica insulation systems, the conduction current that passes through the bulk insulation is essentially zero unless the insulation has become saturated with moisture. However, older insulation systems such as asphaltic-mica or shellac mica-folium may have a natural and higher conduction current due to the conductivity of the tapes that back the mica [4]. For conduction mechanism on the surface of the end-turns (2) – (4) and between the different phases of the stator winding (5) – (6), the magnitude of the surface leakage current depends on the type and amount of conductive contamination and also temperature.

B. Polarization Mechanisms in Stator Winding Insulation

Fig.2 shows the example of polarization phenomena on stator winding insulation. When stator insulation under an external step DC field, insulating material may have several dielectric mechanisms or polarization effects that contribute to charge storage within the insulation to compensate the external applied electric field [5]. Electronic and ionic

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

polarization (1) occurs due to neutral atoms displaced. However, if moisture enters the insulation system, dipolar polarization (2) may also be evident. Space charge polarization (3) occurs from the accumulation of charges in a region such as near the electrodes in the slots and in the end winding sections. Interfacial polarization (4) arises from the migration and accumulation of charge between two different dielectrics that have different dielectric constants and conductivities in slot region (i.e., between layers of mica-epoxy, between insulating materials and contaminants, between insulating materials and air space, etc). Besides, interfacial polarization can also occur from charge accumulation (contamination) on the surface of end-winding.

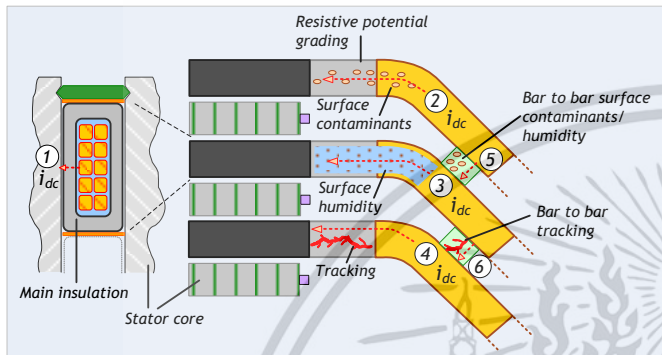


Fig. 1. Example of electrical conduction phenomena of MV motor.

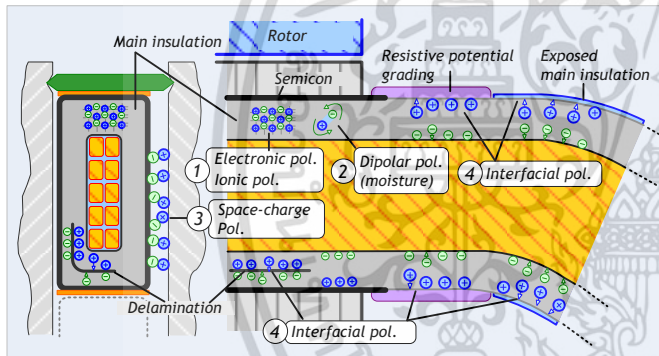


Fig. 2. Example of polarization phenomena of MV motor.

C. Dielectric Response Measurement for Stator Insulation

Polarization and depolarization current measurement is one of insulation diagnostic test techniques applied for various kind of high voltage equipment, i.e. transformers, bushings, rotating machines etc [6]. PDC measurement records the polarization current $i_{pol}(t)$ during charging by a step DC voltage and the depolarization current $i_{dep}(t)$ after short circuit of the insulation [6] as illustrated in Fig.3.

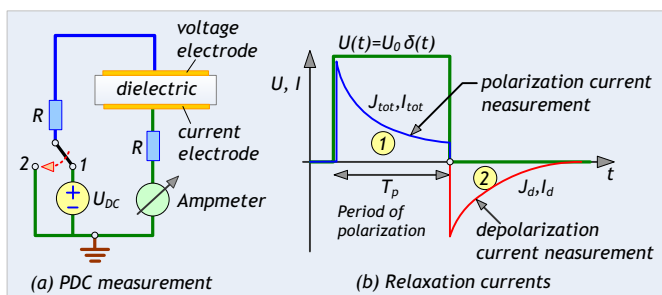


Fig. 3. Principle of polarization and depolarization current measurement charging by a step DC voltage $U(t)$ for a time T_p and then short-circuit.

III. CHARGE DIFFERENCE AND CHARGE RATIO ANALYSIS

A. Polarization index

The insulation resistance is calculated from the polarization current and applied DC voltage by Ohm's Law, and the polarization index is the ratio of the insulation resistance (IR) measured after 10 minutes to the 1 minute value which can be evaluated in equation below and the criteria described in Table I [4].

$$PI = \frac{IR(600s)}{IR(60s)} \quad (1)$$

TABLE I. CONDITION OF INSULATION INDICATED BY POLARIZATION INDEX

Polarization Index Value	Insulation condition
< 1.0	Dangerous
1 – 1.4	Poor
1.5 – 1.9	Questionable
2.0 – 2.9	Fair
3.0 – 4.0	Good
> 4.0	Excellent

B. Charge Difference Analysis (QDA)

From dielectric response measurement, charge difference value (QD) is evaluated as shown in equation (2), QD represents the non-stored charge in stator winding insulation when under the external electric field. The further parameter proposed in this paper is the charge difference gradient (QG) which is proportional to the dc conductivity of insulation system, equation (3) below are used:

$$QD = [i_{pol}(t) - i_{dep}(t)] \cdot t \quad (2)$$

$$QG = dq_d/dt. \quad (3)$$

C. Charge Ratio Analysis (QRA)

To evaluate the stored charge in insulation system when under the external electric field, another parameter presented in this paper is the charge ratio (QR). It is the ratio of the accumulated charge from interfacial polarization process after 1 second to the accumulated charge from polarization processes before 1 second expressed as in equation (4).

$$QR = \frac{\sum_i C_i \cdot (1 - e^{-\frac{T_p}{R_i C_i}}) (1 - e^{-\frac{t}{R_i C_i}})}{C_{geo}} \quad (4)$$

Note: R_i and C_i are interfacial polarization parameters which can be obtained from a curve-fitting technique applied to the depolarization current, C_{geo} is geometrical capacitance, explained in detail in Ref. [6].

IV. DIELECTRIC RESPONSE MEASUREMENT ON FIELD MOTORS

After describing CDA and CRA, in this section their applications in insulation diagnosis on field motors are performed with three case studies, as detailed in Table II. This is to verify the effectiveness of proposed method in practice. The first group (A) consists of two motors of which one is new motor and the other one is severely aged motor, the second group (B) consists of two motors of which one is healthy motor and the other one is thermally aged motor, and the third group (C) consists of a single motor, on which PDC measurements have been carried out after maintenance in

2014 and 2016 respectively. Investigated motors are illustrated in Fig. 4 to Fig.6.

TABLE II. INVESTIGATED MEDIUM VOLTAGE MOTORS

Motor	kV	Service record
A1	6.6	new motor
A2	6.6	Suspected to be very aged motor
B1	6	Lightly loaded motor
B2	6	thermally aged motor
C1	6.6	after maintenance in 2014
C2	6.6	after maintenance in 2016

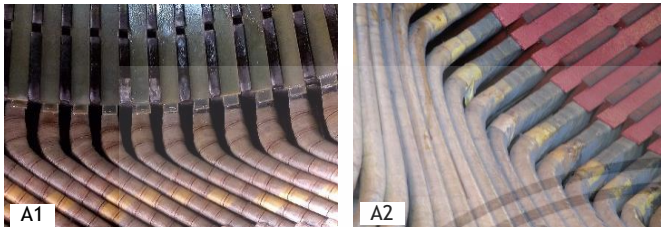


Fig. 4 Investigated motor A1 and A2.

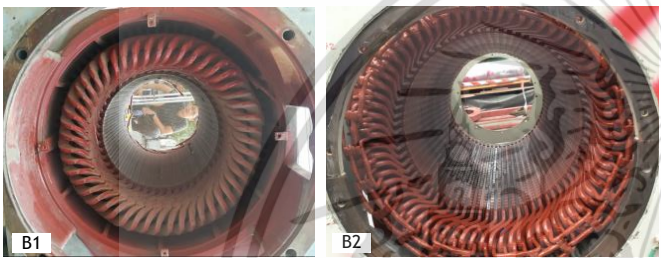


Fig. 5 Investigated motor B1 and B2.

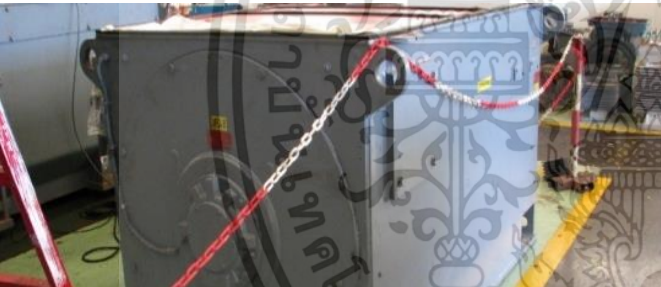


Fig. 6 Investigated motor C1 and C2.

The PDC test circuit diagram used to investigate the dielectric response of MV motor for case studies are shown in Fig.7.

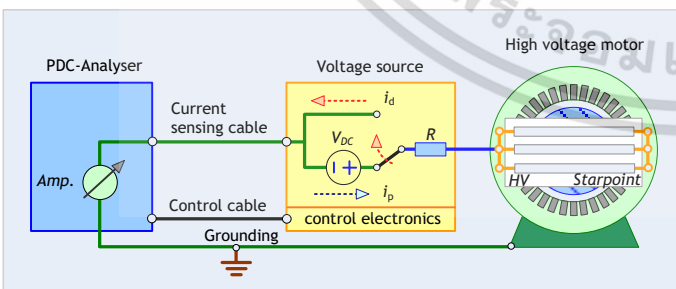


Fig. 7 Test circuit diagram for PDC measurement.

V. TEST RESULTS

The results of dielectric response measurements for case studies in table II are presented in Fig. 8 to Fig. 10, where PDC was performed at 100 VDC. The polarization and depolarization current measurement duration for stator insulation was 2,000 s.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

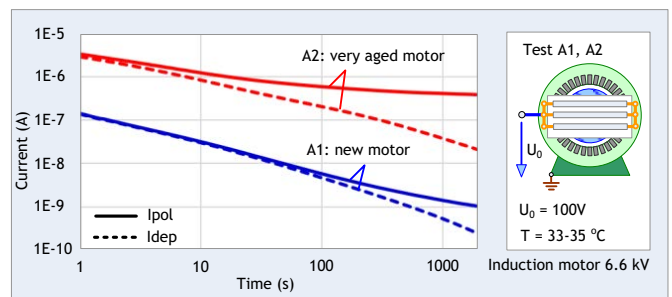


Fig. 8. Comparison between PDCs of A1 and A2.

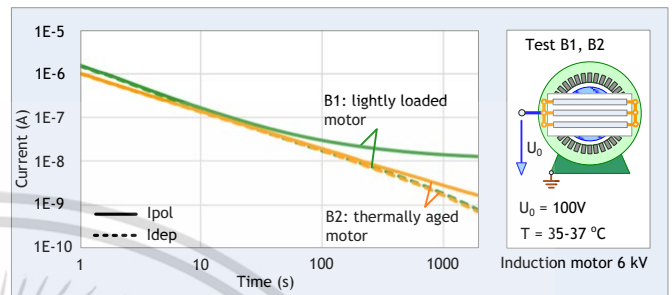


Fig. 9. Comparison between PDCs of B1 and B2.

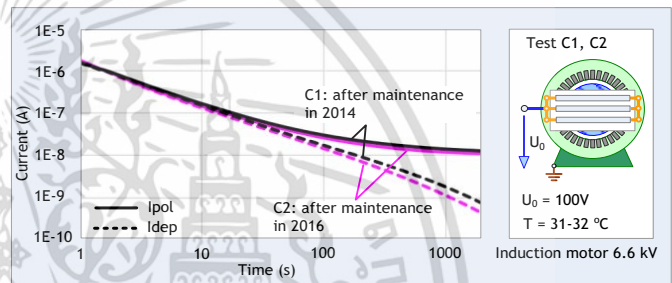


Fig. 10 Comparison between PDCs of C1 and C2.

VI. EVALUATION OF INSULATION RESISTANCE AND POLARIZATION INDEX

The insulation resistance (IR) and polarization index (PI) were evaluated from the PDC test results in the previous chapter summarized in Table III. It is observed that PI values of A1, B1, C1, and C2 are higher than 2, which means that the insulation condition is acceptable unless PI value of A2 shows the poor condition. However, the PI cannot identify what the problem is contamination or degradation.

TABLE III. IR AND PI OF MOTOR A1, A2, B1, B2, C1, AND C2

Motor	IR at 1 min. (GΩ)	IR at 10 min. (GΩ)	PI
A1	12.4	56.2	4.53
A2	0.13	0.2	1.52
B1	2.56	6.4	2.50
B2	3.51	24.3	6.92
C1	2.94	7.8	2.65
C2	2.56	6.4	2.50

VII. EVALUATION OF CHARGE DIFFERENCE GRADIENT AND CHARGE RATIO

The QD, QG and QR in time domain were obtained by QDA and QRA of the PDC test results from experiment as shown in Fig. 11 to Fig. 13. These are summarized in Table IV. This table shows the classification of problems in motor based on proposed parameters.

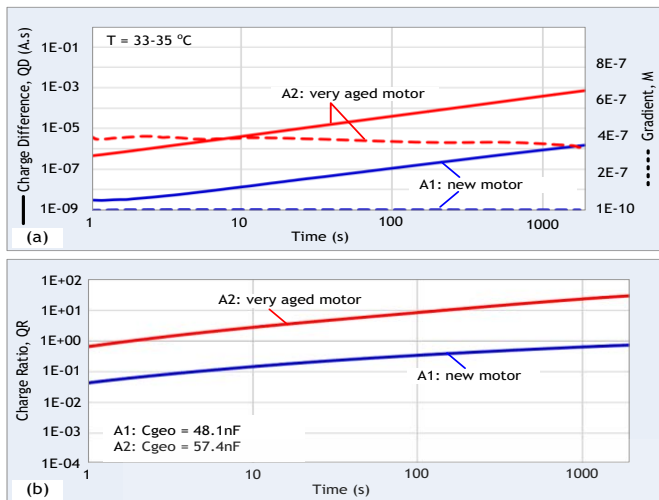


Fig. 11. Comparisons of QDA and QRA between A1 and A2

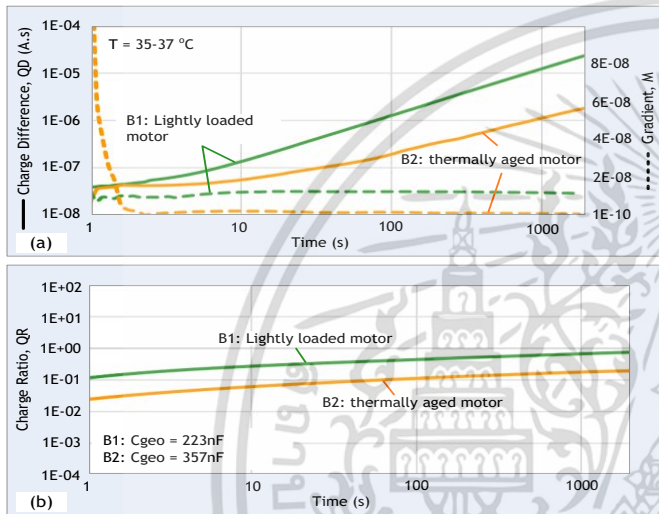


Fig. 12. Comparisons of QDA and QRA between B1 and B2

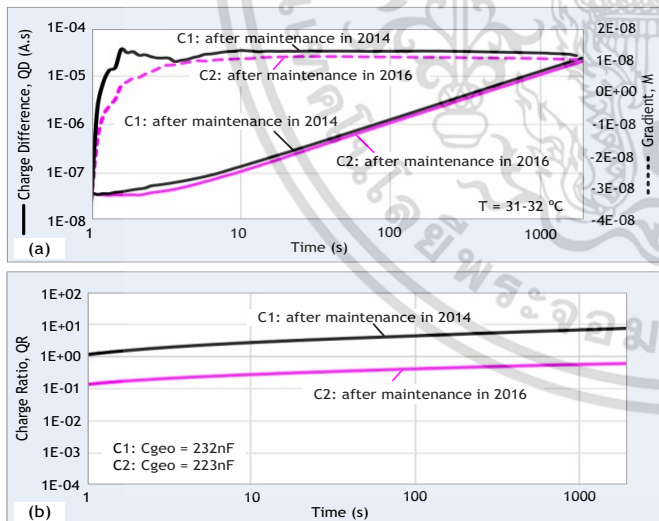


Fig. 13. Comparisons of QDA and QRA between C1 and C2

Note: (a) illustrates the QD and QG (b) illustrates QR, in time domain

TABLE IV. QG AND QR OF MOTOR A1, A2, B1, B2, C1, AND C2

Motor	QG at 2000 s	QR at 2000 s
A1	6.59E-10	0.72
A2	3.42E-7	29.6
B1	1.14E-8	0.75
B2	6.34E-10	0.19
C1	1.01E-8	0.61
C2	1.12E-8	7.39

VIII. DISCUSSION

From QG and QR in Table IV analyzed from different insulation condition, this paper introduces the suggested criteria for assessment the condition of MV motor as shown in Table V. Therefore, the condition assessment of motors under investigation is summarized in table VI. If the QG value is more than $1E-9$, contamination or moisture is likely. The QG value which is proportional to the dc conductivity can further be improved by cleaning and drying. Furthermore, If QR value is more than 1, it shows the symptom of insulation aging. By contrast, if QR value is less than 0.5, thermal aging effect is likely. To extend life of motor, the cooling system needs to be improved to prevent further thermal trouble. Thus, the QR proposed in this paper is important parameter so-called aging factor.

TABLE V. SUGGESTED CRITERIA FOR CONDITION ASSESSMENT

QG Value	Contamination/ moisture	QR Value	Degradation condition
$< 0.9E-9$	Low	< 0.5	Thermal aging
$1E-9 - 0.9E-8$	Moderate	0.5 - 1.0	healthy
$1E-8 - 0.9E-7$	High	1.1 - 20	Insulation aging
$> 1E-7$	Very high	> 20	Severely aged

TABLE VI. CONDITION ASSESSMENT OF A1, A2, B1, B2, C1 AND C2

Motor	Insulation condition (PI)	Contamination/ moisture (QG)	degradation condition (QR)
A1	Excellent	Low	healthy
A2	Questionable	Very high	severely aged
B1	Fair	Moderate	healthy
B2	Excellent	Low	Thermal aging
C1	Fair	Moderate	healthy
C2	Fair	Moderate	aging

IX. CONCLUSION

From the experiment, the QG and QR value analyzed from PDCs are valuable parameters for insulation diagnosis of the MV motor. It was found that the proposed parameters can identify contamination (moisture) and insulation degradation even when IR or PI value are acceptable. Clearly, the QG provide information about the conductivity of stator winding insulation, on the other hand, the QR represents the stored charge in stator winding insulation from insulation delamination or insulation aging. This will help for assessment the condition of MV motor to make correct maintenance plan or even replacing a new motor for higher reliability.

REFERENCES

- [1] Michael Muhr and Christof Sumereder, "Condition Assessment of Electric Machines," CMD, 2006, pp. 90-90.
- [2] T.S. Ramu, *Reliability and Life Estimation of Power Equipment*. New Age International Publisher, 2009, Chapter 3.
- [3] Greg C. Stone Ian Culbert Edward A. Boulter Hussein Dhirani, *Electrical Insulation for Rotating Machines: Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair*. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. 2014, hapter 4.
- [4] 43-2000 - IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery
- [5] Andreas Küchler, *High Voltage Engineering: Fundamentals–Technology–Applications*. Springer Berlin Heidelberg, 2017, Chapter 4.
- [6] Walter S. Zaengl, "Application of Dielectric Spectroscopy in Time and Frequency Domain for HV power Equipment," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 19, no.6, pp. 9-22, Nov/Dec 2003.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายเพทาย นิมสนอง
วัน เดือน ปีเกิด	22 เมษายน 2526
ที่อยู่	88/309 หมู่ 5 ตำบลท่าระหัด อำเภอเมืองสุพรรณบุรี จังหวัดสุพรรณบุรี 72000
ประวัติการศึกษา	2550 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า (เกียรตินิยมอันดับ 2) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2555 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1.) การวัดและทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง 2.) การบำรุงรักษาและวินิจฉัยฉนวน 3.) การตรวจจับตีสหาร์จบบางส่วนและการจำแนกประเภท
ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย	
พ.ศ.2550 - 2551	งานวิจัยการทดสอบและพัฒนาครอบเอาท์พิวส์ ได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย
พ.ศ.2550 - ปัจจุบัน	ผู้ช่วยนักวิจัย ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2551 - ปัจจุบัน	วิศวกรไฟฟ้าระดับ 7 การไฟฟ้านครหลวง
พ.ศ.2560	ผู้ฝึกสอนการดำเนินการและควบคุมระบบไฟฟ้ากำลัง ณ การไฟฟ้านครหลวง ผู้ฝึกสอนการดำเนินการและการบริหารการจัดส่งโหลด ณ การไฟฟ้านครหลวง
พ.ศ.2562	ฝึกอบรมการวัดการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันบนอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ณ Institute for Power Engineering and High Voltage Technology University of Applied Sciences FHWS Schweinfurt ประเทศเยอรมัน 1 เดือน
พ.ศ.2563	คณะกรรมการการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ Condition Monitoring and Diagnosis (CMD 2020) ครั้งที่ 8 ณ กรุงเทพมหานคร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

งานวิจัยปี พ.ศ. 2564

1. P. Nimsanong " **Evaluation of Loss Factor of Natural Ester with Temperature Normalization**" CIRED 2021. The 26th International Conference & Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2021), 20-23 September, 2021.
2. Natthawut Phloymuk, Pethai Nimsanong, Norasage Pattanadech " **Additional Parameters for Describing the Dielectric Behavior of Stator Winding in Large Motors**" 2021 8th International Conference on Power and Energy Systems Engineering (CPESE 2021), 10-12 September 2021, Fukuoka, Japan.
3. Sakda Maneerot, Norasage Pattanadech, Yannaphol Kittikhuntharadol, Pethai Nimsanong, and Chanin Bunlaksananusorn, **Polarization and Conduction Characteristics of Mineral Oil and Natural Ester Mixed with Nanoparticles**, Submitted to Advances in Materials Science and Engineering, June, 2021.

งานวิจัยปี พ.ศ. 2563

1. P. Nimsanong, N. Pattanadech, **VLF Dielectric Response and HF Localized Dielectric Discharge Measurement for Rotating Machine Insulation Assessment**, Journal of Mobile Multimedia, vol. 16, no. 1-2, pp. 1-20, August 2020.

งานวิจัยปี พ.ศ. 2562

1. Sitthisak Klienhom, Phethai Nimsanong, Norasage Pattanadech, **Application of Dielectric Response Measurement Technique for the Condition Assessment of On-site Transformers**, PEACON & INNOVATION 2019, Centra Government Complex Hotel & Convention Centre Chaeng Watthana, Chaeng Watthana, Bangkok, 3-24 September, 2019.
2. S. Maneerot, P. Nimsanong, J. Siritworachanyadee, M Leelajindakraierk, K. Jariyanurat and N. Pattanadech, "Dielectric Response Analysis of Mineral Oil Immersed Transformer Insulation during Manufacturing Process", IEEE International Conference on Dielectric Liquids (ICDL2019), Roma, Italy, June 23 – June 27, 2019.
3. J. Siritworachanyadee, S. Maneerot, P. Kitcahiya, P. Nimsanong, and N. Pattanadech, "The Polarization and Depolarization Current Characteristics of Mineral Oil, Natural Ester (FR3), Palm Oil, and Liquid Impregnated Pressboard" IEEE International Conference on Dielectric Liquids (ICDL2019), Roma, Italy, June 23 – June 27, 2019.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. S. Maneerot, P. Nimsanong, K. Jariyanurat and N. Pattanadech, "**Dielectric Response Analysis of Mineral Oil Immersed Transformer, Natural Ester (FR3) Immersed Transformer, and Palm Oil Immersed Transformer**", IEEE International Conference on Dielectric Liquids (ICDL2019), Roma, Italy, June 23 – June 27, 2019.
5. P. Nimsanong, N. Boonsaner, N. Pattanadech, "**Condition Assessment of MV Motor Based on Charge Difference and Charge Ratio Analysis**", The 5th International Conference on Engineering, Applied Science and Technology (ICEAST 2019), Luang Prabang, Laos on July 2-5, 2019.
6. S. Klienhom, N. Boonsaner, P. Nimsanong, Ph. Chanchareonsook, A. Kunakorn, and N. Pattanadech, "**Dielectric Response Analysis for Cable Joint Problems in Medium Voltage Underground Cable System**", 21st International Symposium on High Voltage Engineering, Budapest, Hungary, August 26-30, 2019.

งานวิจัยปี พ.ศ. 2561

1. S. Maneerot, K. Jariyanurat, P. Nimsanong, C. Bunlaksananusor, A. Kunakorn, N. Pattanadech, "**Studies of Electrical and Thermal Characteristics of Natural Ester Immersed Transformer Compared with Mineral Oil Immersed and Palm Oil Immersed Transformer**", 2018 Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), 23-26 Sept. 2018, Perth, WA, Australia, pp 1-4.
2. P. Nimsanong, A. Kunakorn, N. Pattanadech, "**Frequency Dependence Parameter Analysis of Underground Cables with and without Joint**", 2018 12th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM), 20-24 May 2018, Xi'an, China, pp 809-812.
3. K. Thungsook, P. Nimsanong, N. Marukatut, N. Pattanadech, "**Polarization and Depolarization Current Measurement of Underground Cable with Different Cable lengths, Temperatures and Test Voltages**", 2018 Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), 23-26 Sept. 2018, Perth, WA, Australia, pp 1-4.
4. N. Phloymuk, P. Nimsanong, N. Phumipunepon, S. Potivejkul, T. Wiangtong, N. Pattanadech, "**The Dissipation Factor ($\tan\delta$) Monitoring of A Stator Winding Insulation of A Synchronous Machine**", 2018 Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), 23-26 Sept. 2018, Perth, WA, Australia, pp 1-4.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. N. Phloymuk, P. Nimsanong, N. Phumipunepon, S. Kittiratsatcha, N. Pattanadech, "Dielectric Properties Analysis of Gas Turbine Synchronous Generator by Polarization and Depolarization Current Measuremen", 2018 Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), 23-26 Sept. 2018, Perth, WA, Australia, pp 1-4.

งานวิจัยปี พ.ศ. 2560

1. N. Pattanadech, S. Maneerot, K. Jariyanurat, P. Nimsanong, "Electrical Characteristics Comparison of Mineral Oil and Natural Ester for Transformer Application", IEECON 2017: The 2017 International Electrical Engineering Congress, 8-10 March, 2017, Pattaya, Thailand, PE 059, pp. 189-192.
2. K. Jariyanurat, S. Maneerot, P. Nimsanong, P. Kitcharoen, P. Chaisiri, N. Pattanadech, "Dielectric Properties of Mineral Oil Compared with Natural Ester", 2017 IEEE 19th International Conference on Dielectric Liquids, 25-29 June 2017, Manchester, UK, pp 1-4.
3. N. Pattanadech, S. Maneerot, K. Jariyanurat, P. Nimsanong, "Partial Discharge Characteristics of Mineral Oil Compared with Natural Ester", 2017 International Electrical Engineering Congress (iEECON), 8-10 March 2017, Pattaya, Thailand, pp 1-4.
4. P. Nimsanong and N. Pattanadech, "Polarization and Conduction Loss Analysis for Underground Cable Problems", ISLH 2017, 3rd International Symposium on Lightning Protection High Voltage Engineering, March 9-10, 2017, Bangkok, Thailand, pp. 83-86.
5. N. Pattanadech, M. Kando, M. Leelajindakrairerk, P. Chanchareonsook, P. Nimsanong, "Effect of Lightning Phenomena on People in Thailand", APL 2017: The 10th Asia-Pacific International Conference on Lightning, 16-19 May, 2017, Thailand, PID 168.

งานวิจัยปี พ.ศ. 2559

1. P. Nimsanong, N. Pattandech, P. Yutthagowith, "Dielectric Diagnosis of 24kV XLPE Cable Using Polarization and Depolorization Current, Conventional Partial Discharge Measurement and High Frequency Current Measurement", The 12th IET International Conference on AC and DC Power Transmission, 28-29 May, 2016, Beijing, China, ACDC 2016_0214, pp 1-5.
2. P. Nimsanong, E. Khemthong, V. Thep-om and N. Pattanadech, "Dielectric Analysis of 24kV XLPE Cable Using Conventional and Non-Conventional PD Measurement Methods", ISLH 2016, 2rd International Symposium on Lightning Protection High Voltage Engineering, March 9-10, 2016, Bangkok, Thailand, pp 129-132.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. P. Maungpratun, P. Nimsanong and N. Pattanadech, **Effect of Titanium Dioxide Nanoparticles on Breakdown Characteristics of Mineral Oil Based Nanofluids**, Proceedings of the 8th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology, EENET2016, Phuket, Thailand, 25-27 May 2016, pp. 13-16.

งานวิจัยปี พ.ศ. 2558

1. N. Pattanadech, P. Nimsanong, S. Potivejkul, P. Yutthagowith and S. Polmai “**Partial Discharge Classification Using Probabilistic Neural Network Model**”, ICEMS 2015, the 18th International Conference on Electrical Machines and Systems, October 25-28, 2015, Pattaya City, Thailand, paper 763.
2. N. Pattanadech, P. Nimsanong, S. Potivejkul, P. Yutthagowith and S. Polmai “**Generalized Regression Networks for Partial Discharge Classification**”, ICEMS 2015, the 18th International Conference on Electrical Machines and Systems, October 25-28, 2015, Pattaya City, Thailand, paper 760.
3. N. Pattanadech and P. Nimsanong, “**Self-Organizing Map Performance for Partial Discharge Classification**”, ISLH 2015, 1st International Symposium on Lightning Protection High Voltage Engineering, June 12-13, 2015, Bangkok, Thailand, pp 85-89.

งานวิจัยปี พ.ศ. 2557

1. N.Pattanadech and P. Nimsanong, **Partial Discharge Classification Using LVQ Model Compared with PNN Model**, 17th Asian Conference on Electrical Discharge (ACED2014), Bangkok, Thailand, 8-9 December, 2014, pp. 94-97.
2. N.Pattanadech and P. Nimsanong, **Partial Discharge Classification Using Principal Component Analysis Combine with Self-Organizing Map**, IEEE TENCON-2014, Bangkok, Thailand, 22-25 October, 2014.
3. N.Pattanadech and P. Nimsanong, **Partial Discharge Classification Using Learning Vector Quantization Network Model**, IEEE TENCON-2014, Bangkok, Thailand, 22-25 October, 2014.
4. N.Pattanadech and P. Nimsanong, **Effect of Training Methods on The Accuracy of PCA-KNN Partial Discharge Classification Model**, IEEE TENCON-2014, Bangkok, Thailand, 22-25 October, 2014.
5. N.Pattanadech and P. Nimsanong, **Effect of Noise Signals on Partial Discharge Classification Models**, IEEE TENCON-2014, Bangkok, Thailand, 22-25 October, 2014.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้