

การวินิจฉัยฉนวนมอเตอร์แรงดันสูงด้วยวิธีการวัดกระแสโพลาริเซชันและ  
กระแสดีโพลาริเซชัน

A DIAGNOSIS OF HIGH VOLTAGE MOTOR INSULATION BY POLARIZATION AND  
DEPOLARIZATION CURRENT MEASUREMENT



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2562

KMITL-2019-EN-M-020-149

การวินิจฉัยฉนวนมอเตอร์แรงดันสูงด้วยวิธีการวัดกระแสโพลาริเซชันและ  
กระแสดีโพลาริเซชัน

A DIAGNOSIS OF HIGH VOLTAGE MOTOR INSULATION BY POLARIZATION AND  
DEPOLARIZATION CURRENT MEASUREMENT



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2562

KMITL-2019-EN-M-020-149

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A DIAGNOSIS OF HIGH VOLTAGE MOTOR INSULATION BY POLARIZATION AND  
DEPOLARIZATION CURRENT MEASUREMENT



SETHAWIT BOONSATHITTHAVORN

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2019  
KMITL-2019-EN-M-020-149

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2019

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวินิจฉัยฉนวนมอเตอร์ด้วยวิธีการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันและการซ่อมบำรุงมอเตอร์
นักศึกษา	นายเศรษฐวิทย์ บุญสถิตย์ถาวร
รหัสประจำตัว	60601056
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2562
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.นรเศรษฐ วัฒนเดช

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอการวินิจฉัยฉนวนของมอเตอร์ด้วยวิธีการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน (Polarization and Depolarization Current, PDC) เพื่อให้เกิดความเข้าใจคุณลักษณะการฉนวนของมอเตอร์ โดยแบ่งการศึกษาเป็นสามส่วน คือ 1.การทดสอบการฉนวนในแต่ละขั้นตอนการผลิตสเตเตอร์คอยล์สำหรับมอเตอร์ 2.การทดสอบการฉนวนของมอเตอร์ก่อนและหลังการซ่อมบำรุง และ 3.การทดสอบการฉนวนของมอเตอร์ที่ไม่ได้ใช้งานเป็นเวลานาน สำหรับการทดสอบในแต่ละขั้นตอนการผลิตสเตเตอร์คอยล์สำหรับมอเตอร์ จะสร้างสเตเตอร์คอยล์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีพิกัดแรงดัน 6.6 กิโลโวลต์ จำนวน 5 คอยล์ เป็นวัตถุประสงค์ โดยกระบวนการผลิตจะแบ่งขั้นตอนออกเป็น 5 ขั้นตอน หลังจากทำการผลิตในแต่ละขั้นตอนจะวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน จากผลการทดสอบพบว่าในการพันฉนวนยิ่งฉนวนแยกชั้นกันส่งผลทำให้กระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน และ กระแสการนำไฟฟ้าของฉนวนเพิ่มขึ้น และหลังจากกระบวนการ hotpress ฉนวนมีความเป็นเนื้อเดียวกัน ส่งผลทำให้กระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันและ กระแสการนำไฟฟ้าของฉนวนลดลง สำหรับการทดสอบวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันของมอเตอร์ก่อนและหลังการซ่อมบำรุง จะทดสอบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีพิกัดแรงดัน 6.6 กิโลโวลต์ จำนวน 4 ตัว และการทดสอบมอเตอร์ที่ไม่ได้ใช้งานเป็นเวลานานจะวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันของมอเตอร์สำรองที่มีพิกัดแรงดัน 6.6 กิโลโวลต์ 4 ตัว ที่ไม่ได้ใช้งานเป็นเวลา 10, 11, 17 และ 24 เดือน และจากผลการทดลองพบว่า วิธีการทดสอบวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันสามารถใช้ประเมินสภาพของฉนวนและสามารถใช้เป็นแนวทางในการวิเคราะห์และประเมินฉนวนได้

<b>Thesis</b>	A Diagnosis of High Voltage Motor Insulation by Polarization and Depolarization Current Measurement
<b>Student</b>	Mr.Sethawit Boonsathitthavorn
<b>Student ID.</b>	60601056
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Electrical Engineering
<b>Year</b>	2019
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc.Prof.Dr.Norasage Pattanadech

## ABSTRACT

This thesis presents the high voltage motor insulation diagnosis by polarization and depolarization current (PDC) measurement. The objective of this project is to understand the stator coil insulation characteristics of a high voltage motor. The studies are divided into three parts, i.e., 1) the PDC test a stator coil for each manufacturing process 2) the PDC test of the motor insulation before and after overhaul and 3) the PDC test of the spare motor insulation. For the first investigation, the dielectric properties of a stator coil used in 6.6 kV 260 kW motor was constructed step by step during manufacturing process and the PDC measurement was performed for each step. According to the experiments, it was found that the separated layers of the insulation caused higher the polarization current and depolarization current. After the hotpress process, the insulation was homogeneous due to the combination of the multi insulation layers, the polarization current and depolarization current were therefore decreased. For the second investigation four induction motors rated 6.6 kV before and after overhaul were tested by PDC measurement. For the last investigation, four spare motors rated 6.6 kV, which had not be operated for 10, 11, 17, and 24 months, were tested by PDC measurement. From the test results, the PDC tests showed the ability to assess the condition of the insulation of the high voltage motors.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลือและความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.นรเศรษฐ พัฒนเดช ที่ให้ความช่วยเหลือ คำชี้แนะตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ บริษัท เอเชียมอเตอร์ เซอร์วิส เซ็นเตอร์ จำกัด ที่สนับสนุนงานวิจัยนี้โดยให้การอนุเคราะห์ผลิตชิ้นทดสอบ ขดลวดสเตเตอร์ และอนุญาตให้เก็บข้อมูลการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันของมอเตอร์ที่ผ่านการใช้งานในอุตสาหกรรมจริงทั้งก่อนและหลังการบำรุงรักษา และขอขอบคุณผู้บริหารและพนักงานทุกคน ที่ให้การสนับสนุนการวิจัยนี้ และให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างดีตลอดมา

ขอขอบพระคุณ คุณวรชัย สวัสดิมงคล และ บริษัท ทีไอเอส เอ็นจิเนียริง แอนด์ เซอร์วิส จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่อง PDC Analyzer 1-Mod เพื่อใช้ในการทดลองวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน ตลอดการทำวิจัย

ขอขอบคุณ นายแพทย์ นิมสนอง และนางสาวณัฐนรี ภูมิพันธ์ ที่คอยให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางการออกแบบกรณีศึกษาและทำการทดลองตลอดการทำวิจัย

สุดท้ายต้องขอขอบคุณครอบครัวของข้าพเจ้า และเพื่อนๆ ที่เป็นกำลังใจที่ดีตลอดมา สำหรับความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้มอบวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

เศรษฐวิทย์ บุญสถิตย์ถาวร

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	I
ABSTRACT.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูปภาพ.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	4
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ.....	4
2.1.1 มอเตอร์ซิงโครนัส.....	6
2.1.2 มอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	7
2.2 ขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์.....	7
2.2.1 ประเภทขดลวดสเตเตอร์.....	7
2.2.2 โครงสร้างของขดลวดสเตเตอร์.....	9
2.2.3 ฉนวนที่ใช้สำหรับขดลวดสเตเตอร์.....	10
2.3 ปรากฏการณ์โพลาไรเซชัน (Polarization).....	11
2.3.1 คุณสมบัติฉนวนในปรากฏการณ์โพลาไรเซชัน.....	11
2.3.2 ชนิดของโพลาไรเซชัน.....	13
2.4 กระแสโพลาไรเซชันและกระแสตีโพลาไรเซชัน.....	15
2.4.1 กระแสโพลาไรเซชัน.....	15
2.4.2 กระแสตีโพลาไรเซชัน.....	17
2.5 การทดสอบความต้านทานฉนวน (Insulation Resistance Test , IR).....	18
2.6 การทดสอบค่าดัชนีโพลาไรเซชัน (Polarization Index Test : PI).....	19
2.7 การทดสอบเปรียบเทียบเสิร์จ (Surge Test).....	20

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การทดสอบเพื่อเป็นแนวทางในการบำรุงรักษาเครื่องจักรกลหมุนแรงดันสูงแบบดั้งเดิม.....	21
3.1 กล่าวนำ.....	21
3.2 ขั้นตอนการซ่อมบำรุงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูง.....	21
3.2.1 ขั้นตอนการรื้อถอนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูง.....	22
3.2.2 ขั้นตอนการซ่อมบำรุงและการทดสอบแต่ละส่วนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูง.....	24
3.2.2.1 การซ่อมบำรุงในส่วนของสเตเตอร์.....	24
3.2.2.2 การซ่อมบำรุงในส่วนของโรเตอร์.....	29
3.2.2.3 การซ่อมบำรุงในส่วนของระบบระบายความร้อน.....	30
3.3 ขั้นตอนการ Overhaul มอเตอร์.....	31
บทที่ 4 การทดสอบเพื่อเป็นแนวทางในการบำรุงรักษาเครื่องจักรกลหมุนแรงดันสูงด้วยแนวคิดสมัยใหม่.....	34
4.1 กล่าวนำ.....	34
4.2 การวัดกระแสโพลาร์โรเซชันและกระแสตีโพลาร์โรเซชันในแต่ละขั้นตอนการผลิตสเตเตอร์คอยล์สำหรับมอเตอร์.....	34
4.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตสเตเตอร์คอยล์สำหรับมอเตอร์.....	35
4.2.2 ขั้นตอนการผลิตสเตเตอร์คอยล์สำหรับมอเตอร์.....	35
4.2.3 การวัดกระแสโพลาร์โรเซชันและตีโพลาร์โรเซชันสำหรับสเตเตอร์คอยล์.....	36
4.3 การทดสอบฉนวนของมอเตอร์ก่อนการซ่อมบำรุงและหลังการซ่อมบำรุง.....	38
4.3.1 การวัดกระแสโพลาร์โรเซชันและตีโพลาร์โรเซชันสำหรับมอเตอร์.....	42
4.3.2 การวัดความต้านทานฉนวนและค่าดัชนีโพลาร์โรเซชันสำหรับมอเตอร์.....	43
4.3.3 การทดสอบเปรียบเทียบเสิร์จ (Surge Test) สำหรับมอเตอร์.....	44
4.4 การทดสอบฉนวนของมอเตอร์สำรองที่ไม่ได้ใช้งานเป็นเวลานาน.....	45
บทที่ 5 ผลการทดสอบเพื่อเป็นแนวทางในการบำรุงรักษาเครื่องจักรกลหมุนแรงดันสูงด้วยแนวคิดสมัยใหม่.....	48
5.1 การทดสอบวัดกระแสโพลาร์โรเซชันและกระแสตีโพลาร์โรเซชันในแต่ละขั้นตอนการผลิตสเตเตอร์คอยล์สำหรับมอเตอร์.....	48
5.2 การทดสอบฉนวนของมอเตอร์ก่อนการซ่อมบำรุงและหลังการซ่อมบำรุง.....	51
5.2.1 การทดสอบฉนวนของมอเตอร์ A.....	51

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2.1.1 การทดสอบวัดกระแสโพลารไรเซชันและกระแสตีโพลารไรเซชันสำหรับ มอเตอร์ A.....	51
5.2.1.2 ผลการทดสอบความต้านทานฉนวน การทดสอบค่าดัชนีโพลารไรเซชัน และการทดสอบเปรียบเทียบเสิร์จ ของมอเตอร์ A.....	54
5.2.2 การทดสอบฉนวนของมอเตอร์ B.....	54
5.2.2.1 การทดสอบวัดกระแสโพลารไรเซชันและกระแสตีโพลารไรเซชันสำหรับ มอเตอร์ B.....	54
5.2.2.2 ผลการทดสอบความต้านทานฉนวน การทดสอบค่าดัชนีโพลารไรเซชัน และการทดสอบเปรียบเทียบเสิร์จ ของมอเตอร์ B.....	57
5.2.3 การทดสอบฉนวนของมอเตอร์ C.....	57
5.2.3.1 การทดสอบวัดกระแสโพลารไรเซชันและกระแสตีโพลารไรเซชันสำหรับ มอเตอร์ C.....	57
5.2.3.2 ผลการทดสอบความต้านทานฉนวน การทดสอบค่าดัชนีโพลารไรเซชัน และการทดสอบเปรียบเทียบเสิร์จ ของมอเตอร์ C.....	60
5.2.4 การทดสอบฉนวนของมอเตอร์ D.....	60
5.2.4.1 การทดสอบวัดกระแสโพลารไรเซชันและกระแสตีโพลารไรเซชันสำหรับ มอเตอร์ D.....	60
5.2.4.2 ผลการทดสอบความต้านทานฉนวน การทดสอบค่าดัชนีโพลารไรเซชัน และการทดสอบเปรียบเทียบเสิร์จ ของมอเตอร์ D.....	63
5.3 การทดสอบฉนวนของมอเตอร์สำรองที่ไม่ได้ใช้งานเป็นเวลานาน.....	63
บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง.....	67
6.1 สรุปผลการทดสอบ.....	67
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	67
เอกสารอ้างอิง.....	68
ภาคผนวก.....	70
ภาคผนวก ก บทควมวิชาการ.....	71
ประวัติผู้เขียน.....	84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	4
2.1 แสดงระดับชั้นฉนวน อุณหภูมิ และวัสดุที่ใช้ในเนื้อฉนวน.....	10
2.2 ค่าแรงดันทดสอบความต้านทานฉนวนตามมาตรฐาน (ตามมาตรฐาน IEEE 43-2000).....	19
2.3 สภาพของฉนวนโดยประเมินจากค่า PI (ตามมาตรฐาน IEEE 43-2000).....	19
2.4 ค่า PI ต่ำสุดของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับและกระแสตรง.....	19
2.5 การอ่านค่ากราฟการทดสอบเปรียบเทียบเสิร์จ.....	20
3.1 แสดงผลการทดสอบ Stator slot wedge.....	26
3.2 แสดงผลการทดสอบ Insulation Resistance Test และ Polarization Index Test.....	27
3.3 แสดงผลการทดสอบ Insulation Power Factor Tip - Up.....	28
5.1 แสดงผลการวัดความต้านทานฉนวน การทดสอบค่าดัชนีโพลาไรโรเซชัน และการทดสอบ เปรียบเทียบเสิร์จ ของมอเตอร์ A ก่อนการซ่อมบำรุงและหลังการซ่อมบำรุง.....	54
5.2 แสดงผลการวัดความต้านทานฉนวน การทดสอบค่าดัชนีโพลาไรโรเซชัน และการทดสอบ เปรียบเทียบเสิร์จ ของมอเตอร์ B ก่อนการซ่อมบำรุงและหลังการซ่อมบำรุง.....	57
5.3 แสดงผลการวัดความต้านทานฉนวน การทดสอบค่าดัชนีโพลาไรโรเซชัน และการทดสอบ เปรียบเทียบเสิร์จ ของมอเตอร์ C ก่อนการซ่อมบำรุงและหลังการซ่อมบำรุง.....	60
5.4 แสดงผลการวัดความต้านทานฉนวน การทดสอบค่าดัชนีโพลาไรโรเซชัน และการทดสอบ เปรียบเทียบเสิร์จ ของมอเตอร์ D ก่อนการซ่อมบำรุงและหลังการซ่อมบำรุง.....	63
5.5 แสดงผลการวัดความต้านทานฉนวน ค่าดัชนีโพลาไรโรเซชัน และค่าความจุไฟฟ้าของ มอเตอร์ที่ไม่ได้ใช้งานเป็นเวลานาน.....	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตั้ง VII อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 แผนผังแสดงประเภทมอเตอร์.....	5
2.2 โรเตอร์แบบขั้วแม่เหล็กยื่นและโรเตอร์ทรงกระบอกของมอเตอร์ซิงโครนัส.....	6
2.3 โรเตอร์แบบพันขดลวดและโรเตอร์แบบกรงกระรอกของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	7
2.4 การวางขดลวดสเตเตอร์แบบRandom-wound.....	8
2.5 ขดลวดสเตเตอร์แบบคอยล์.....	8
2.6 (ก)แท่งสเตเตอร์แบบแท่งโรเบล (ข)การเชื่อมกันของปลายแท่งสเตเตอร์แบบแท่งโรเบล....	9
2.7 โครงสร้างของขดลวดสเตเตอร์แบบคอยล์.....	9
2.8 โครงสร้างของระบบฉนวนของขดลวดสเตเตอร์.....	9
2.9 กระบวนการโพลาริเซชัน.....	11
2.10 ระยะเวลาที่ใช้ในการเกิดโพลาริเซชันทั้ง 5 แบบภายใต้การป้อนแรงดันขึ้นบันได.....	14
2.11 องค์ประกอบของกระแสโพลาริเซชัน.....	16
2.12 กระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน.....	18
3.1 ก) Nameplate ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ข) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังไอน้ำ.....	21
3.2 แผนผังการซ่อมบำรุงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่.....	21
3.3 ก) การวัดค่า Alignment ก่อนการรื้อถอน และ ข) การปลด busbar.....	22
3.4 ก) ถอด valve slow drive และ ข) ถอด brush holder ring.....	22
3.5 ก) ถอด casing D-end และ ข) ND-end.....	22
3.6 ก) ถอด sleeve bearing ด้าน D-end และ ข) ด้าน ND-end.....	23
3.7 ก) วัดระยะแกปอากาศระหว่างโรเตอร์และสเตเตอร์ และ ข) ถอด cover guard.....	23
3.8 ก) ถอด coupling bolts และ ข) ติดตั้งอุปกรณ์สำหรับชักโรเตอร์ออกจากสเตเตอร์.....	23
3.9 ก) โรเตอร์ และ ข) สเตเตอร์ ค) ระบบระบายความร้อนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	24
3.10 ก) ทดสอบ ELCID ข) การทำความสะอาดสเตเตอร์ด้วย Dry ice ค) อบโดยเครื่องเป่าลมร้อน ง) ทาสีสเตเตอร์ด้วยวานิช จ) ฟันสีสเตเตอร์ ฉ) สเตเตอร์หลังทำความสะอาด....	25
3.11 ก) วงจรทดสอบ Insulation Resistance Test และ Polarization Index Test ข) วงจรทดสอบ Winding Resistance Test ค) วงจรทดสอบ Insulation Power Factor Tip – Up ง) เครื่องวัด Insulation Resistance Test และ Polarization Index Test จ) เครื่องวัด Winding Resistance Test ฉ) เครื่อง Doble insulation testing.....	27
3.12 โรเตอร์หลังการ overhaul.....	29
3.13 ส่วนประกอบของโรเตอร์ที่ถูกรื้อในการซ่อมบำรุง.....	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และดัด VIII อย่างไม่ถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.14 ก) ส่วนของระบบระบายความร้อน ข) แยกส่วนประกอบระบบระบายความร้อน ค) หลังทาสี.....	30
3.15 ก) ตัวกรอง (Filter) ของระบบระบายความร้อน ข) gasket ชุดใหม่ ค) rubber seal ชุดใหม่.....	31
3.16 Test pressure cooling system.....	31
3.17 มอเตอร์ขนาดพิกัดแรงดัน 6.6 kV ก) ก่อน Overhaul ข) หลัง Overhaul.....	31
3.18 การทดสอบมอเตอร์ก่อนการ Overhaul.....	32
3.19 ก) โรเตอร์ ข) สเตเตอร์ ค) bearing housing.....	32
3.20 ก) ล้างสเตเตอร์ ข) โรเตอร์ขณะทดสอบ dynamic balancing ค) เพล่าแบร็ง ง) ประกอบชิ้นส่วนของมอเตอร์.....	33
4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตสเตเตอร์คอปล์สำหรับมอเตอร์.....	35
4.2 รูปสเตเตอร์คอปล์แต่ละขั้นตอนการผลิต.....	36
4.3 วงจรสมมูลวัฏจักรแสโพล่าไรเซชันและดีโพล่าไรเซชันของฉนวนระหว่างเฟสและ การต่อวงจร.....	37
4.4 อุปกรณ์สำหรับวงจรวัฏจักรแสโพล่าไรเซชันและดีโพล่าไรเซชันของฉนวนระหว่างเฟส	37
4.5 (ก) มอเตอร์ A ก่อนซ่อมบำรุง (ข) สเตเตอร์ของมอเตอร์ A ก่อนซ่อมบำรุง (ค) มอเตอร์ หลังซ่อมบำรุง (ง) สเตเตอร์ของมอเตอร์ A หลังซ่อมบำรุง (จ) โรเตอร์ (ฉ) การทำความสะอาด สเตเตอร์.....	38
4.6 (ก) มอเตอร์ B ก่อนซ่อมบำรุง (ข) สเตเตอร์ของมอเตอร์ B ก่อนซ่อมบำรุง (ค) มอเตอร์ B หลังซ่อมบำรุง (ง) สเตเตอร์ของมอเตอร์ B หลังซ่อมบำรุง (จ) โรเตอร์ (ฉ) การทำความสะอาด สเตเตอร์.....	39
4.7 (ก) มอเตอร์ C ก่อนซ่อมบำรุง (ข) สเตเตอร์ของมอเตอร์ C ก่อนซ่อมบำรุง (ค) มอเตอร์ C หลังซ่อมบำรุง (ง) สเตเตอร์ของมอเตอร์ C หลังซ่อมบำรุง (จ) โรเตอร์ (ฉ) การทำความสะอาด สเตเตอร์.....	40
4.8 (ก) มอเตอร์ D ก่อนซ่อมบำรุง (ข) สเตเตอร์ของมอเตอร์ D ก่อนซ่อมบำรุง (ค) มอเตอร์ D หลังซ่อมบำรุง (ง) สเตเตอร์ของมอเตอร์ D หลังซ่อมบำรุง (จ) โรเตอร์ (ฉ) การทำความสะอาด สเตเตอร์.....	41
4.9 วงจรวัฏจักรแสโพล่าไรเซชันและดีโพล่าไรเซชันของฉนวนระหว่างเฟสกับกราวด์.....	42
4.10 อุปกรณ์ในวงจรวัฏจักรแสโพล่าไรเซชันและดีโพล่าไรเซชันของฉนวนระหว่างเฟส กับกราวด์.....	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และดัดแปลงอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 เครื่อง Megger MIT525 5 kV diagnostic.....	43
4.12 วงจรวัดความต้านทานฉนวน.....	44
4.13 การต่อวงจรวัดความต้านทานฉนวนของมอเตอร์.....	44
4.14 เครื่องทดสอบเปรียบเทียบเสิร์จ.....	45
4.15 วงจรการทดสอบเปรียบเทียบเสิร์จ.....	45
4.16 มอเตอร์ M1 ขณะต่อวงจรวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน.....	46
4.17 มอเตอร์ M2 ขณะต่อวงจรวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน.....	46
4.18 มอเตอร์ M3 ขณะต่อวงจรวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน.....	47
4.19 มอเตอร์ M4 ขณะต่อวงจรวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน.....	47
5.1 กระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันในแต่ละขั้นตอนการผลิตสเตเตอร์ คอยล์สำหรับมอเตอร์ที่มีพิกัดแรงดัน 6.6 กิโลโวลต์.....	49
5.2 กระแสการนำไฟฟ้าไฟฟ้าของแต่ละขั้นตอนการผลิตสเตเตอร์คอยล์สำหรับมอเตอร์ที่มี พิกัดแรงดัน 6.6 กิโลโวลต์.....	49
5.3 ค่าความจุไฟฟ้าเชิงซ้อนในแต่ละขั้นตอนการผลิตสเตเตอร์คอยล์สำหรับมอเตอร์ที่มีพิกัด แรงดัน 6.6 กิโลโวลต์ (ก) ความจุไฟฟ้าจริง (ข) ความจุไฟฟ้าจินตภาพ.....	50
5.4 แพคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกในแต่ละขั้นตอนการผลิตสเตเตอร์คอยล์สำหรับ มอเตอร์ที่มีพิกัดแรงดัน 6.6 กิโลโวลต์.....	51
5.5 กระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันของมอเตอร์ A ก่อนการซ่อมบำรุงและหลัง การซ่อมบำรุง.....	52
5.6 กระแสการนำไฟฟ้าไฟฟ้าของมอเตอร์ A ก่อนการซ่อมบำรุงและหลังการซ่อมบำรุง.....	52
5.7 ค่าความจุไฟฟ้าเชิงซ้อนของมอเตอร์ A ก่อนการซ่อมบำรุงและหลังการซ่อมบำรุง (ก) ความจุไฟฟ้าจริง (ข) ความจุไฟฟ้าจินตภาพ.....	53
5.8 แพคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกของมอเตอร์ A ก่อนการซ่อมบำรุงและหลังการซ่อม บำรุง.....	53
5.9 กระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันของมอเตอร์ A ก่อนการซ่อมบำรุง และหลังการซ่อมบำรุง.....	55
5.10 กระแสการนำไฟฟ้าไฟฟ้าของมอเตอร์ A ก่อนการซ่อมบำรุงและหลังการซ่อมบำรุง.....	55
5.11 ค่าความจุไฟฟ้าเชิงซ้อนของมอเตอร์ A ก่อนการซ่อมบำรุงและหลังการซ่อมบำรุง (ก) ความจุไฟฟ้าจริง (ข) ความจุไฟฟ้าจินตภาพ.....	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปร่าง (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.12 แพคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกของมอเตอร์ A ก่อนการซ่อมบำรุงและหลังการซ่อมบำรุง.....	56
5.13 กระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันของมอเตอร์ C ก่อนการซ่อมบำรุงและหลังการซ่อมบำรุง.....	58
5.14 กระแสการนำไฟฟ้าไฟฟ้าของมอเตอร์ C ก่อนการซ่อมบำรุงและหลังการซ่อมบำรุง.....	58
5.15 ค่าความจุไฟฟ้าเชิงซ้อนของมอเตอร์ A ก่อนการซ่อมบำรุงและหลังการซ่อมบำรุง (ก) ความจุไฟฟ้าจริง (ข) ความจุไฟฟ้าจินตภาพ.....	59
5.16 แพคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกของมอเตอร์ A ก่อนการซ่อมบำรุงและหลังการซ่อมบำรุง.....	59
5.17 กระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันของมอเตอร์ D ก่อนการซ่อมบำรุงและหลังการซ่อมบำรุง.....	61
5.18 กระแสการนำไฟฟ้าไฟฟ้าของมอเตอร์ D ก่อนการซ่อมบำรุงและหลังการซ่อมบำรุง.....	61
5.19 ค่าความจุไฟฟ้าเชิงซ้อนของมอเตอร์ D ก่อนการซ่อมบำรุงและหลังการซ่อมบำรุง (ก) ความจุไฟฟ้าจริง (ข) ความจุไฟฟ้าจินตภาพ.....	62
5.20 แพคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกของมอเตอร์ D ก่อนการซ่อมบำรุงและหลังการซ่อมบำรุง.....	62
5.21 กระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันของมอเตอร์ที่ไม่ได้ใช้งานเป็นเวลานาน	65
5.22 กระแสการนำไฟฟ้าไฟฟ้าของมอเตอร์ที่ไม่ได้ใช้งานเป็นเวลานาน.....	65
5.23 ค่าความจุไฟฟ้าเชิงซ้อนของมอเตอร์ที่ไม่ได้ใช้งานเป็นเวลานาน (ก) ความจุไฟฟ้าจริง (ข) ความจุไฟฟ้าจินตภาพ.....	66
5.24 แพคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกของมอเตอร์ที่ไม่ได้ใช้งานเป็นเวลานาน.....	66

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

มอเตอร์เป็นเครื่องจักรกลหมุนที่มีบทบาทสำคัญอย่างมากในระบบอุตสาหกรรมไม่ว่าจะเป็น อุตสาหกรรมการผลิต อุตสาหกรรมการแปรรูป และโรงไฟฟ้า ต่างก็จำเป็นต้องใช้มอเตอร์ในการทำงาน ทั้งสิ้น ซึ่งผลกระทบจากความเสียหายหรือความผิดปกติในขณะที่ทำงานของมอเตอร์เหล่านี้ ก่อให้เกิดมูลค่าความเสียหายมหาศาลต่อภาคอุตสาหกรรม ดังนั้นเพื่อลดความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้น มอเตอร์ที่ใช้ งานจำเป็นต้องมีการประเมินสภาพและวางแผนการซ่อมบำรุง ในขั้นตอนการประเมินนั้นผู้ประเมินต้องมีความเข้าใจถึงส่วนประกอบและโครงสร้างของมอเตอร์ ปัจจัยที่ทำให้มอเตอร์เสื่อมสภาพ รวมทั้งวิธีที่ใช้ทดสอบเพื่อประเมินสภาพมอเตอร์ ความเสียหายที่เกิดขึ้นในมอเตอร์นั้นเกิดขึ้นได้จากหลายปัจจัย เช่น ความเครียดเนื่องจากความร้อน ความเครียดเนื่องจากแรงทางกล ผลจากปฏิกิริยาทางเคมี สภาพแวดล้อมที่ตั้ง และความเครียดทางไฟฟ้า สำหรับมอเตอร์จุดอ่อนของมัน คือ ฉนวน โดยจะพบโครงสร้างส่วนฉนวนที่ขดลวดสเตเตอร์และขดลวดโรเตอร์ ดังนั้นหากผู้ใช้งานมีความเข้าใจระบบฉนวนและสภาพของฉนวน สาเหตุที่จะทำให้มอเตอร์เกิดความผิดปกติ และสามารถวางแผนวิธีการบำรุงรักษาและการซ่อมแซม มอเตอร์ได้อย่างถูกต้อง สิ่งเหล่านี้จะช่วยยืดอายุการทำงานของมอเตอร์ และช่วยลดอัตราการทำงาน ล้มเหลวของมอเตอร์ลงได้ อีกทั้งยังเพิ่มความน่าเชื่อถือให้กับระบบของโรงงาน

สำหรับวิธีการทดสอบมอเตอร์ ในปัจจุบันนี้วิธีการวิเคราะห์สภาพฉนวนของมอเตอร์มีหลายวิธี เช่น การทดสอบความต้านทานฉนวน Insulation Resistance (IR), การทดสอบค่าดัชนีโพลาไรเซชัน Polarization Index (PI), การทดสอบเปรียบเทียบเสิร์จ Surge test, DC hipot test, AC hipot test, PD test และ Polarization and Depolarization Current (PDC) ฯลฯ ซึ่งหนึ่งวิธีที่น่าสนใจและน่าจะมี ประโยชน์เป็นอย่างสูงที่สามารถวิเคราะห์คุณสมบัติของฉนวนได้โดยไม่ทำให้ฉนวนได้รับความเสียหายเพิ่ม เดิม คือวิธีการวิเคราะห์ผลการวัดกระแสโพลาไรเซชันและกระแสดีโพลาไรเซชัน โดยการทดสอบนี้จะใช้ แรงดันต่ำในการทดสอบ จึงไม่ทำให้ฉนวนได้รับความเสียหายเพิ่มเติมจากแรงดันทดสอบ ซึ่งเป็นจุดเด่น อย่างมาก แต่อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์ฉนวนของมอเตอร์แรงดันสูงด้วยวิธีวิเคราะห์ผลการวัดกระแสโพ ลาริเซชันและกระแสดีโพลาไรเซชันภายในประเทศไทย นี้ยังไม่ได้รับการศึกษาวิจัยอย่างจริงจัง จึงทำให้ ขาดองค์ความรู้ดังกล่าวเป็นอย่างมาก ด้วยเหตุนี้วิทยานิพนธ์เล่มนี้จึงได้ทำการศึกษาโครงสร้างฉนวนของ ขดลวดสเตเตอร์ คุณสมบัติของฉนวนที่ใช้ในกระบวนการผลิต และผลตอบสนองไดอิเล็กทริก โดย การศึกษาวิเคราะห์รูปแบบพฤติกรรมของกระแสโพลาไรเซชันและกระแสดีโพลาไรเซชันในแต่ละขั้นตอน

การผลิต พร้อมทั้งศึกษารูปแบบพฤติกรรมของกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันของมอเตอร์ที่ใช้งานจริงในอุตสาหกรรมในสภาวะก่อนและหลังการซ่อมบำรุง และเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบความต้านทานฉนวน, การทดสอบค่าดัชนีโพลาริเซชัน และการทดสอบเปรียบเทียบเสิร์จ

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของขดลวดสเตเตอร์ที่ใช้สำหรับมอเตอร์แรงดันสูงในแต่ละขั้นตอนของการพันขดลวดสเตเตอร์โดยวิธีการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันเพื่อเป็นแนวทางในการวิเคราะห์ฉนวนมอเตอร์
2. เพื่อศึกษาผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของมอเตอร์ก่อนการซ่อมบำรุงและหลังการซ่อมบำรุงโดยวิธีการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันและวิธีการทดสอบความต้านทานฉนวน การทดสอบค่าดัชนีโพลาริเซชัน และการทดสอบเปรียบเทียบเสิร์จ
3. เพื่อศึกษาผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของมอเตอร์ที่ไม่ได้ใช้งานเป็นเวลานานโดยวิธีการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน

## 1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

1. ผลจากการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันสามารถอธิบายผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของฉนวนที่ใช้ในการผลิตขดลวดสเตเตอร์ได้
2. ผลจากการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันสามารถอธิบายผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของมอเตอร์ก่อนการซ่อมบำรุงและหลังการซ่อมบำรุง

## 1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

จากงานวิจัยในปี พ.ศ. 2542 เรื่อง Dielectric Response During Curing of a Resin-Rich Insulation System for Rotating Machines ของ Anders Helgeson และ Uno Gäfvert [1] ในงานวิจัยนี้จะศึกษาผลตอบสนองไดอิเล็กทริกระหว่างการ curing ของ ฉนวนประเภท Resin-Rich ของเครื่องจักรกลหมุนโดยการวัดค่า Capacitance และค่าความสูญเสียในช่วงความถี่ 10 mHz- 1 mHz ด้วยการสร้างโมเดลฉนวนระหว่างกระบวนการ curing โดยใช้วิธี differential scanning calorimetry (DSC) วิธี DSC จะใช้หาความสัมพันธ์ของความร้อนกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาในฉนวน จากผลการวิจัยพบว่าที่อุณหภูมิต่างกันข้อมูลผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของฉนวนที่ได้จะต่างกัน และมีการนำเสนอโมเดลฉนวน 2 โมเดล เพื่ออธิบายผลตอบสนองไดอิเล็กทริกขณะที่ Degree of curing ( $\alpha$ )=0 และอธิบายขณะที่  $\alpha = 1$

ในปี พ.ศ. 2543 จากงานวิจัยของ Jean-Jacques Alff, Vahe Der Houhanessian, Walter S. Zaengl และ Adolf J. Kachler เรื่อง A Novel, Compact Instrument for the Measurement and Evaluation of Relaxation Currents conceived for On-Site Diagnosis of Electric Power Apparatus [2] ได้นำเสนอเครื่องมือใหม่ที่ใช้วัดผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของอุปกรณ์ไฟฟ้าโดยพัฒนาต่อยอด จากวิธีก่อนหน้านี้ที่วัดค่า capacitance และ the loss factor ( $\tan \delta$ ) ที่ความถี่ค่าเดียวซึ่งอาจจะไม่พอสำหรับการอธิบายผลตอบสนองไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ จึงพัฒนาเครื่องมือ PDC-analyser ที่สามารถวัดผลตอบสนองไดอิเล็กทริกในโดเมนเวลา โดยการจ่าย dc voltage step ผ่านอุปกรณ์ทดสอบ และวัดกระแสทรานเซียนท์ที่ไหลผ่านอุปกรณ์ทดสอบในขณะที่จ่ายไฟและขณะที่ลัดวงจร โดยกระแสที่วัดได้ขณะที่จ่ายไฟนั้นเรียกว่า กระแสโพลาริเซชัน ส่วนกระแสที่ไหลในขณะที่ลัดวงจรเรียกว่า กระแสดีโพลาริเซชัน ซึ่งผลที่วัดได้จากโดเมนเวลาสามารถแปลงเป็นโดเมนความถี่ได้

จากงานวิจัยของ Nancy Frost, Mark Winkler และ Steve Tuckwell ในปีพ.ศ. 2556 ได้นำเสนอผลงานวิจัยเรื่อง Mica Tape and VPI Resin Insulation System Options for Medium Voltage Applications [3] โดยได้ศึกษาฉนวน groundwall ของมอเตอร์ขนาดพิกัดแรงดัน 6 กิโลโวลต์ โดยใช้ฉนวนเทปไมก้าเปรียบเทียบกับ VPI

ในปีพ.ศ. 2558 จากงานวิจัยของ Mahdi Shadmand, Hassan Moazami Goudarzi และ Sedigheh Kazemi เรื่อง PDC Characteristics of Modern Stator Insulation Systems [4] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันของฉนวนมอเตอร์สมัยใหม่ของเทอร์โบเจนเนอเรเตอร์ขนาดใหญ่ที่ใช้วิธี Resin-Rich เปรียบเทียบกับฉนวนมอเตอร์สมัยใหม่ของเทอร์โบเจนเนอเรเตอร์ขนาดใหญ่ที่ใช้วิธี VPI

จากงานวิจัยในปี 2559 ของ N.F.M. Yusof, N. Bashir และ N.A. Muhamad เรื่อง Polarization and Depolarization Current Study in Polymeric Insulation Containing Voids [5] ได้นำเสนอการศึกษาคุณสมบัติของฉนวนโพลีเมอร์ที่มีโพรงอากาศ ด้วยวิธีการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันและคำนวณ DC conductivity โดยได้ทดลองกับ Silicone Rubber (SIR) ที่มีโพรงอากาศขนาดต่างๆ และกำหนดจำนวนโพรงอากาศ จากการทดลองพบว่ายิ่งเพิ่มขนาดโพรงอากาศ ขนาดของกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันและ DC conductivity ยิ่งเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกันกับจำนวนของโพรงอากาศยิ่งเพิ่มจำนวนขนาดของค่ากระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันและ DC conductivity ก็เพิ่มขึ้นด้วย จึงมีนัยยะว่าเมื่อเนื้อของฉนวนมีช่องว่างของโพรงอากาศมาก ค่ากระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน และ DC conductivity ก็จะมีมากขึ้นด้วย

## 1.5 ขอบเขตการวิจัย

1. งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลตอบสนองไดโอดีเล็กทริกของฉนวนที่ใช้ในการผลิตขดลวดสเตเตอร์สำหรับมอเตอร์พิกัดแรงดัน 6.6 กิโลโวลต์ โดยใช้การออกแบบฉนวนขดลวดสเตเตอร์เดิมตามต้นแบบการพันฉนวนขดลวด สเตเตอร์ของมอเตอร์ที่ใช้ทดลอง และทำการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันในแต่ละขั้นตอนการผลิต

2. งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษารูปแบบพฤติกรรมของกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันของมอเตอร์ที่ใช้งานจริงในอุตสาหกรรมในสภาวะก่อนและหลังการซ่อมบำรุง และเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบความต้านทานฉนวน การทดสอบค่าดัชนีโพลาริเซชัน และการทดสอบเปรียบเทียบเสิร์จของมอเตอร์ขนาด 6.6 กิโลโวลต์

## 1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

### ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนการศึกษา

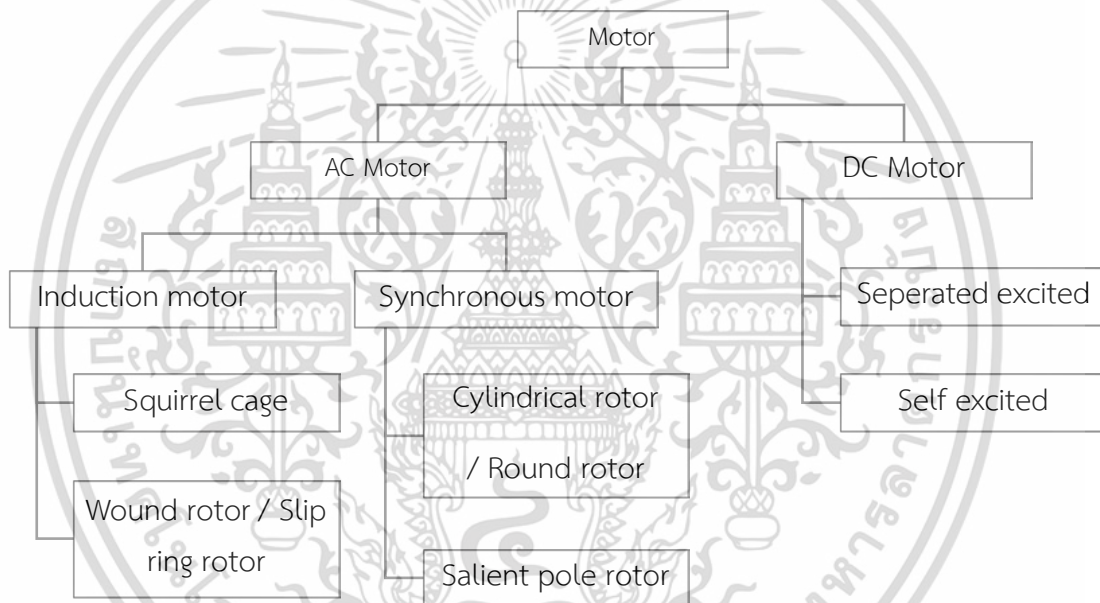
ขั้นตอนการทำงาน	ปีพ.ศ. 2561			ปีพ.ศ. 2562		
	ม.ค-เม.ย	พ.ค.-ส.ค.	ก.ย.-ธ.ค.	ม.ค-เม.ย	พ.ค.-ส.ค.	ก.ย.-ธ.ค.
1.ศึกษาส่วนประกอบและหลักการทำงานของมอเตอร์รวมทั้งขั้นตอนการผลิต stator coil	✓					
2.ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง		✓				
3.จัดหาอุปกรณ์และจัดเตรียมวัสดุทดสอบ			✓			
4.ทำการวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง				✓		
5.เขียนบทความสำหรับตีพิมพ์ในวารสารวิชาการ					✓	
6. เขียนเล่มวิทยานิพนธ์						✓

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

มอเตอร์ คือ เครื่องจักรกลหมุนที่ทำงานโดยการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานกล เพื่อใช้ในการขับเคลื่อนชนิดต่าง ๆ ซึ่งแบ่งเป็นประเภทใหญ่ตามระบบไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์ได้ 2 ประเภท คือ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ (Alternating current motor) และมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (Direct current motor) ดังแสดงแผนผังในรูปที่ 2.1 ซึ่งที่กล่าวในบทนี้จะขอลำถึงมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสเท่านั้น



รูปที่ 2.1 แผนผังแสดงประเภทมอเตอร์

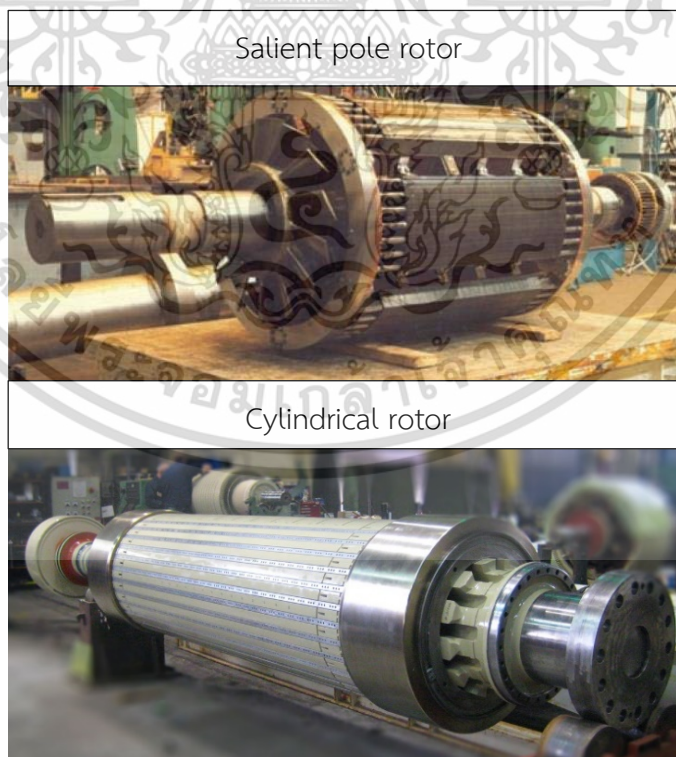
### 2.1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ [6]

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับเป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้ากระแสสลับ ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล ใช้เป็นตัวต้นกำลังหมุนขับเคลื่อนชนิดต่างๆ สามารถใช้งานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับได้ โดยการนำต้นกำลังมาขับเคลื่อน ส่วนประกอบของมอเตอร์มีอยู่หลักๆ 2 ส่วน คือ สเตเตอร์ (Stator) เป็นโครงสร้างส่วนที่อยู่นิ่งของมอเตอร์ และโรเตอร์ (Rotor) เป็นส่วนที่เคลื่อนที่หมุน สำหรับการแบ่งประเภทของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับนั้นสามารถแบ่งเป็นประเภทใหญ่ๆ ได้ 2 ประเภท คือ มอเตอร์ซิงโครนัส (Synchronous motor) และมอเตอร์เหนี่ยวนำ (Induction motor)

### 2.1.1 มอเตอร์ซิงโครนัส

มอเตอร์ซิงโครนัส ขดลวดที่สเตเตอร์ของมอเตอร์จะรับไฟสามเฟสเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กหมุน ส่วนที่โรเตอร์จะมีการพันขดลวดสนามแม่เหล็กไว้เพื่อรับไฟฟ้ากระแสตรงมากระตุ้น และทำงานด้วยความเร็วซิงโครนัส โรเตอร์ของมอเตอร์ซิงโครนัสจะมี 2 ประเภท คือ โรเตอร์แบบขั้วแม่เหล็กยื่น (salient pole rotor) และโรเตอร์ทรงกระบอก (Cylindrical rotor/ Round rotor) ดังรูปที่ 2.2 มอเตอร์ชนิดนี้ นิยมใช้ในอุตสาหกรรมหนัก เช่น ใช้ขับเคลื่อนโมโตในการโม่หิน และยังใช้ในการปรับปรุงตัวประกอบกำลัง (Power Factor) ของระบบไฟฟ้าได้ด้วย

- โรเตอร์แบบขั้วแม่เหล็กยื่น เป็นแบบขั้วแม่เหล็กยื่น รอบ ๆ ขั้วแม่เหล็กจะถูกพันเป็นขดลวดสนามโดยต่ออนุกรมกัน และจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้กับขดลวดเพื่อให้เกิดขั้วแม่เหล็กที่คงตัว โดยขดลวดสนามแม่เหล็กที่โรเตอร์นี้จะต่อเข้ากับวงแหวนหรือสลีปริงจำนวน 2 วงเพื่อรับไฟกระแสตรงจากแหล่งจ่ายภายนอก และที่โรเตอร์ยังฝังแท่งตัวนำไว้ที่ผิวของขั้วแม่เหล็กทุกๆ ขั้ว ทำเป็นกรงกระรอกเหมือนกับตัวหมุนของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส เรียกว่า ขดลวดแอมเพอร์เพื่อใช้ช่วยหมุนมอเตอร์
- โรเตอร์ทรงกระบอก แกนเหล็กใช้เหล็กอัดขึ้นรูปติดกับเพลลา มีร่องสลีตสำหรับวางบาร์ทองแดงที่หุ้มฉนวนแล้วปิดร่องสลีตด้วยylim ปิดหัวท้ายด้วยวงแหวนเหล็ก



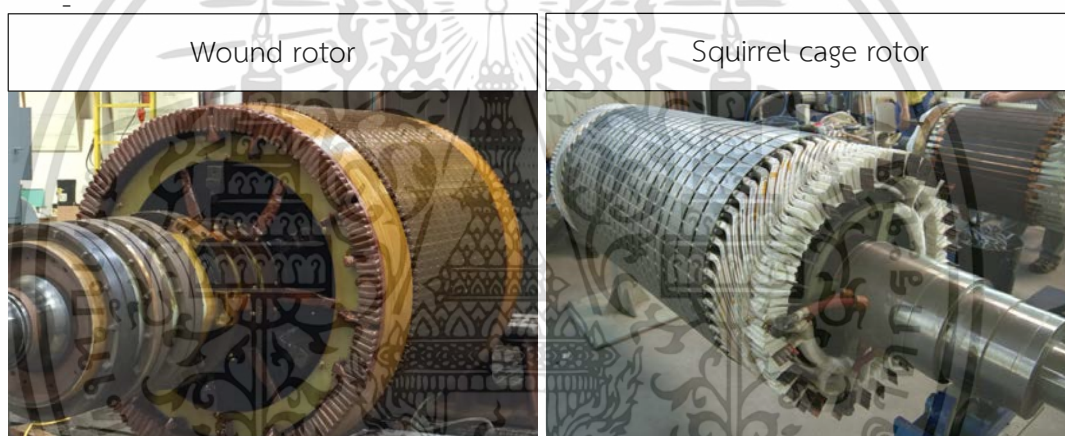
รูปที่ 2.2 โรเตอร์แบบขั้วแม่เหล็กยื่นและโรเตอร์ทรงกระบอกของมอเตอร์ซิงโครนัส [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.2 มอเตอร์เหนี่ยวนำ

มอเตอร์เหนี่ยวนำหรือมอเตอร์อะซิงโครนัส มอเตอร์ประเภทนี้พลังงานจะถูกโอนไปยังโรเตอร์โดยการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า มอเตอร์เหนี่ยวนำสามารถแบ่งตามชนิดโรเตอร์ได้ 2 ประเภทคือ โรเตอร์แบบกรงกระรอก (Squirrel cage) และโรเตอร์แบบพันขดลวด (Wound rotor) ดังรูปที่ 2.3

- โรเตอร์แบบกรงกระรอกมีขดลวดโรเตอร์ทำขึ้นจากแท่งโลหะตัน เชื่อมด้วยแหวนที่ปลายของโรเตอร์ทั้งสอง ลักษณะเหมือนกรงกระรอก
- โรเตอร์แบบพันขดลวดจะมีการพันขดลวดที่ตัวโรเตอร์เป็นแบบสามเฟสเช่นเดียวกันกับที่สเตเตอร์มีการต่อแบบสตาร์ผ่านทางสลีปริงและแปรงถ่าน โดยที่สลีปริงนี้จะต่อระหว่างขดลวดของโรเตอร์กับตัวต้านทานภายนอกหรืออุปกรณ์ควบคุมอื่นๆ โดยตัวต้านทานจะช่วยควบคุมความเร็วของมอเตอร์



รูปที่ 2.3 โรเตอร์แบบพันขดลวดและโรเตอร์แบบกรงกระรอกของมอเตอร์เหนี่ยวนำ [8, 9]

## 2.2 ขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์ [6, 10, 11, 12]

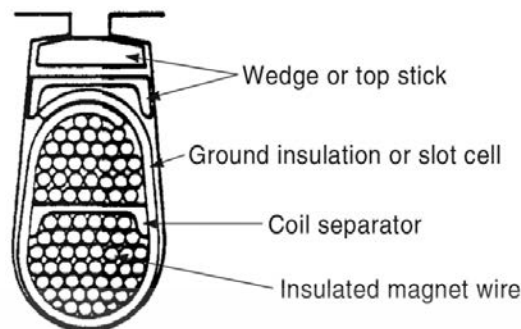
โครงสร้างฉนวนของมอเตอร์มีอยู่ทั้งที่ส่วนของสเตเตอร์และโรเตอร์ แต่ฉนวนของมอเตอร์ส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับขดลวดสเตเตอร์ ดังนั้นในบทนี้จะขออธิบายเฉพาะโครงสร้างฉนวนของขดลวดสเตเตอร์

### 2.2.1 ประเภทขดลวดสเตเตอร์

ขดลวดสเตเตอร์ที่ใช้ในมอเตอร์ที่มีกำลังมากกว่า 1 กิโลวัตต์ มี 3 ประเภท คือ

#### 1) ขดลวดสเตเตอร์แบบ Random-wound

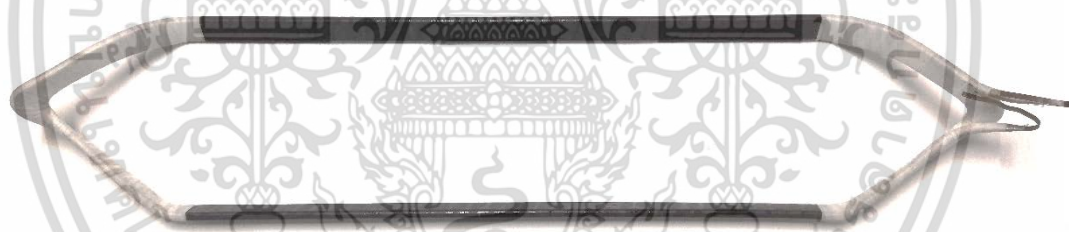
โดยทั่วไปจะใช้กับมอเตอร์ที่มีพิกัดกำลังต่ำและใช้งานที่ระดับแรงดันไม่เกิน 1000 โวลต์ โดยใช้ลวดตัวนำที่เคลือบฉนวนพันเป็นวงผ่านร่องสลิตในแกนสเตเตอร์โดยการวางมีลักษณะแบบสุ่ม คือวางกลุ่มลวดตัวนำไว้บนร่องสลิตใดก็ได้โดยไม่คิดถึงผลของแรงดันต่อของขดลวด



รูปที่ 2.4 การวางขดลวดสเตเตอร์แบบ Random-wound [6]

### 2) ขดลวดสเตเตอร์แบบคอยล์ (Coil type)

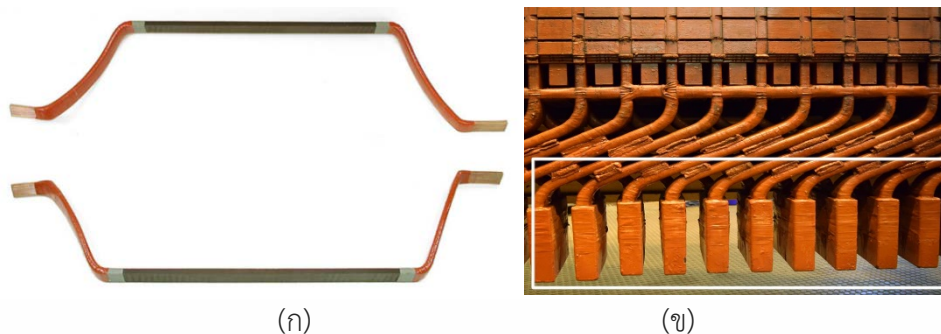
ขดลวดสเตเตอร์แบบคอยล์ถูกสร้างจากแท่งลวดทองแดงหน้าตัดสี่เหลี่ยมที่มีการฉนวนเรียบร้อยนำมาขดแล้วตัดขึ้นรูปเป็นคอยล์รูปร่างคล้ายเพชร (Diamond shape) ดังรูป 2.5 ก่อนแทรกกลงไปในร่องสลีตในแกนสเตเตอร์ แต่ละคอยล์ต่อกันเป็นอนุกรมกัน ลักษณะการวางขดลวดสเตเตอร์จะคำนึงถึงแรงดันต่อรอบของขดลวดสเตเตอร์ให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม โดยทั่วไปจะใช้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่พิกัด 50 ถึง 100 MVA และถูกใช้งานที่ระดับแรงดัน 1000 โวลต์ขึ้นไป



รูปที่ 2.5 ขดลวดสเตเตอร์แบบคอยล์

### 3) ขดลวดสเตเตอร์แบบโรเบลบาร์ (Roebel bar type)

ขดลวดสเตเตอร์แบบโรเบลนิยมใช้ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่ เนื่องจากขดลวดสเตเตอร์แบบคอยล์อาจมีขนาดใหญ่ ทำให้ยากต่อการแทรกลงในร่องสลีต ดังนั้นขดลวดสเตเตอร์แบบโรเบลบาร์ จึงถูกคิดค้นขึ้นมาเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว โดยลดขนาดของแท่งทองแดงลง และมีการพันแท่งทองแดงแบบ Transposition ดังรูปที่ 2.6 ทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีขนาดลดลง นอกจากนี้ยังช่วยลดปัญหาความสูญเสียในขดลวดสเตเตอร์จากกระแสไหลวน ขดลวดสเตเตอร์แบบแท่งโรเบล จึงมีลักษณะคล้ายกับการตัดครึ่งขดลวดแบบคอยล์ ดังนั้นจึงเรียกลักษณะดังกล่าวนี้ว่า half-coil ซึ่งในการประกอบลงร่องสลีต half-coil แต่ละชิ้นจะถูกนำมาเชื่อมต่อกันเป็นอนุกรมโดยปลายของ half-coil จะถูกเชื่อมติดกันดังแสดงในรูปที่ 2.6



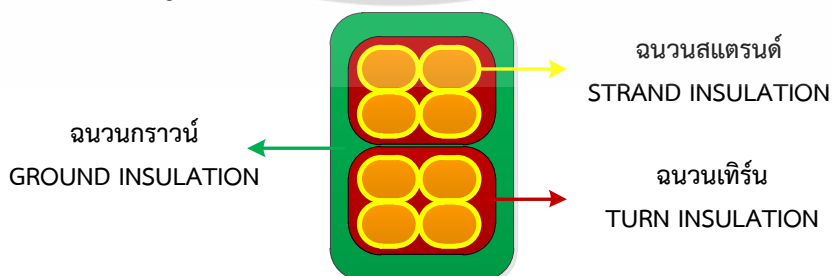
รูปที่ 2.6 (ก) แผงสเตเตอร์แบบแท่งโรเบล (ข) การเชื่อมกันของปลายแผงสเตเตอร์แบบแท่งโรเบล [12]

### 2.2.2 โครงสร้างของขดลวดสเตเตอร์

ขดลวดสเตเตอร์ถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของขดลวดสเตเตอร์ที่อยู่ภายในร่องสลีต (Slot Portion) และส่วนของขดลวดสเตเตอร์ที่โผล่พ้นร่องสลีต (End winding Portion) ฉนวนของทั้งสองส่วนจะใช้วัสดุที่แตกต่างกัน ฉนวนที่อยู่ภายในร่องสลีตจะมีโพรงอากาศระหว่างชั้นฉนวนน้อยกว่าฉนวนบริเวณส่วนพ้นร่องสลีต เนื่องจากกรรมวิธีการผลิตฉนวนในบริเวณร่องสลีตนั้นจะใช้เครื่องอัดความร้อน (Hot Press หรือ Heat Press) บีบอัดขดลวดสเตเตอร์ด้วยความร้อน ทำให้ฉนวนอีพ็อกซีเรซินที่แทรกอยู่ในเทปพันฉนวนละลายและซึมเข้าไปในช่องว่างระหว่างเนื้อฉนวน ความแข็งแรงและความเป็นเนื้อเดียวกันของฉนวนขดลวดสเตเตอร์ที่อยู่ภายในร่องสลีตจึงมีมากกว่าฉนวนบริเวณส่วนพ้นร่องสลีตซึ่งมีลักษณะโค้ง



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของขดลวดสเตเตอร์แบบคอยล์



รูปที่ 2.8 โครงสร้างของระบบฉนวนของขดลวดสเตเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างระบบฉนวนของขดลวดสเตเตอร์แบ่งออกได้ 3 ส่วน ได้แก่

1) ฉนวนแอสตรอนด์ (Strand Insulation) คือชั้นของฉนวนที่หุ้มขดลวดตัวนำทองแดงย่อยในขดลวดสเตเตอร์ ซึ่งจะทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้เกิดการลัดวงจรระหว่างตัวนำย่อยภายในขดลวดสเตเตอร์ แต่เดิมนั้นฉนวนชั้นนี้จะทำจากวัสดุแร่ใยหิน แต่เนื่องจากต้องการเพิ่มเนื้อที่สำหรับขดลวดโลหะทองแดง เพื่อให้สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากขึ้น จึงเปลี่ยนมาใช้วัสดุประเภท แก้วโพลีเอสเตอร์แทน

2) ฉนวนเทิร์น (Turn Insulation) เป็นฉนวนส่วนที่อยู่ถัดจากฉนวนแอสตรอนด์ ซึ่งจะทำหน้าที่ป้องกันการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด โดยส่วนมากฉนวนชนิดนี้จะใช้วัสดุชนิดเดียวกับฉนวนกราวด์

3) ฉนวนกราวด์ (Ground Wall Insulation) เป็นฉนวนส่วนที่อยู่ถัดจากฉนวนเทิร์นโดยฉนวนชั้นนี้จะเป็ฉนวนหลัก ซึ่งทำหน้าที่เป็นฉนวนระหว่างแท่งโลหะตัวนำกับแกนเหล็กสเตเตอร์ วัสดุที่นำมาใช้ทำฉนวนประเภทนี้มีหลายชนิดขึ้นอยู่กับลักษณะการนำไปใช้งาน

### 2.2.3 ฉนวนที่ใช้สำหรับขดลวดสเตเตอร์

วัสดุฉนวนที่ใช้ในการพันแท่งสเตเตอร์มีหลายระดับ แต่ละชนิดจะมีค่าอุณหภูมิที่ทนได้แตกต่างกันดังตารางที่ 2.1

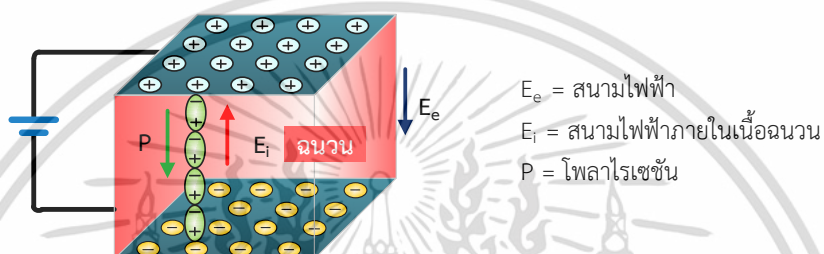
ตารางที่ 2.1 แสดงระดับชั้นฉนวน อุณหภูมิ และวัสดุที่ใช้ในเนื้อฉนวน [11]

ระดับคลาสฉนวน	อุณหภูมิสูงสุด °C	ตัวอย่างวัสดุฉนวน
Y	90	ผ้าฝ้าย, ผ้าไหม, กระดาษเซลลูโลส, เส้นใยไหม
A	105	ผ้าฝ้าย, ผ้าไหม, กระดาษเซลลูโลส, ลินิน โดยจะมีการนำวัสดุฉนวนไปชุบด้วยน้ำมันวานิชหรือเรซิน รวมทั้งอีนาเมล
E	120	ลิมาเนตพลาสติกหรือเทอร์โมพลาสติกร่วมกับไฟเบอร์เทอร์โมเซตติ้ง, อีพ็อกซีอีนาเมลหรือวานิช
B	130	ไมก้า, ไฟเบอร์กลาสและแก้วใยหิน (Asbestos) โดยจะใช้เซลแล็ค แอสฟัลต์และโพลีเอสเตอร์เรซินเป็นตัวยึดประสาน
F	155	ไมก้า, ไฟเบอร์กลาสและแก้วใยหินเช่นเดียวกันกับระดับชั้น B แต่วัสดุที่ใช้เป็นตัวยึดประสานจะใช้อีพ็อกซีเรซิน
H	180	ไมก้า, ไฟเบอร์กลาสและแก้วใยหินเช่นเดียวกันกับระดับชั้น B แต่วัสดุยึดประสานจะใช้ซิลิโคนเรซิน หรือยางซิลิโคน
C	>180	ฉนวนประเภทไมก้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 ปรากฏการณ์โพลาไรเซชัน (Polarization) [10,11,12,13]

ปรากฏการณ์โพลาไรเซชัน คือพฤติกรรมของฉนวนที่อยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า อะตอมหรือโมเลกุลที่อยู่ในเนื้อฉนวนจะถูกโพลาไรซ์ ทำให้เกิดพฤติกรรมเชิงขั้วขึ้นมา ทำให้อนุภาคดังกล่าวเกิดการหมุนเพื่อตอบสนองต่อแรงกระทำจากสนามไฟฟ้าภายนอก ดังรูปที่ 2.9 โดยอนุภาคจะหมุนด้านที่เป็นประจุลบไปยังแฉกอิเล็กโทรดด้านบวกและหมุนด้านที่เป็นประจุบวกไปยังอิเล็กโทรดด้านลบ และเมื่อปลดแหล่งจ่ายแรงดันออกจากระบบ อนุภาคก็จะเกิดการหมุนตัวกลับสู่สภาพเดิมเหมือนดังก่อนหน้าที่จะทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับฉนวน



รูปที่ 2.9 กระบวนการโพลาไรเซชัน [10]

โพลาไรเซชัน (Polarization,  $P$ ) ( $C/m^2$ ) ถูกนิยามว่าเป็นอัตราส่วนของไดโพลโมเมนต์ (Dipole moment) ที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้นมาภายในเนื้อฉนวนภายใต้สนามไฟฟ้าภายนอกที่ป้อนให้กับอิเล็กโทรดต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของฉนวน

$$\text{โพลาไรเซชัน} = \frac{\text{ไดโพลโมเมนต์}}{\text{ปริมาตรของฉนวน}} \quad (2.1)$$

โดยที่ไดโพลโมเมนต์ (Dipole moment,  $p$ ) เกิดขึ้นได้ดังต่อไปนี้หากมีจุดประจุอยู่ 2 จุด จุดหนึ่งมีประจุ  $+q$  และอีกจุดหนึ่งมีประจุ  $-q$  จะเกิดไดโพลโมเมนต์ระหว่างประจุทั้งสองขึ้น โดยที่ ไดโพลโมเมนต์ที่เกิดขึ้นเป็นดังสมการที่ 2.2

$$p = qd \quad (2.2)$$

$d$  คือ เวกเตอร์ระยะกระจัด (displacement vector) มีทิศทางจากประจุลบไปยังประจุบวก ดังนั้นไดโพลโมเมนต์ จึงเป็นปริมาณเวกเตอร์และมีทิศจากประจุลบไปประจุบวก

### 2.3.1 คุณสมบัติฉนวนในปรากฏการณ์โพลาไรเซชัน [11]

การเกิดปรากฏการณ์โพลาไรเซชันจะเกิดขึ้นถ้าฉนวนอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า โดยพิจารณาจากตัวเก็บประจุที่มีสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอโดยมีสูญญากาศเป็นฉนวน ค่าการแทนที่ไดอิเล็กตริก dielectric displacement  $\vec{D}(t)$  เป็นสัดส่วนกับเวกเตอร์สนามไฟฟ้า  $\vec{E}(t)$  กับค่าเปอร์มิตติวิตี ( $\epsilon_0$ ) ซึ่งเป็นค่าคงที่

$$\vec{D}(t) = \epsilon_0 \vec{E}(t) \quad (2.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าแทนที่ฉนวนสูญญากาศด้วยวัสดุฉนวนไอโซทรอปิก ความหนาแน่นสนามไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากปรากฏการณ์โพลาไรเซชัน  $\bar{P}(t)$  ดังสมการที่ 2.4

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

เมื่อฉนวนอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าจะเกิดโพลาไรเซชัน ซึ่งทิศทางจะตรงกันข้ามกับสนามไฟฟ้าภายในเนื้อฉนวน  $E_i$  ดังรูปที่ 2.9 กระบวนการเกิดโพลาไรเซชันแต่ละชนิดจะเกิดขึ้นไม่พร้อมกันขึ้นอยู่กับขนาดสนามไฟฟ้าที่ป้อน  $E_0$  และค่าความสามารถยอมรับได้ของไดอิเล็กตริก ( $\chi$ ) ซึ่งสัมพันธ์กันดังสมการต่อไปนี้

$$\bar{P}(t) = \chi \epsilon_0 E_0 \quad (2.5)$$

สมการโพลาไรเซชันที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาสามารถคำนวณเมื่อป้อนสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาโดยใช้การ convolution ในโดเมนเวลา จะได้สมการโพลาไรเซชันใหม่ดังสมการนี้

$$\bar{P}(t) = \epsilon_0 \chi(0) E(t) + \epsilon_0 \int_0^t E(\tau) \frac{d\chi(t-\tau)}{dt} d\tau \quad (2.6)$$

ในสมการ 2.6 จะมีค่าอนุพันธ์ของค่าความสามารถยอมรับได้ของไดอิเล็กตริก  $\chi(t)$  ปรากฏขึ้นในสมการ ดังนั้นจะกำหนดฟังก์ชันนี้ด้วย  $f(t)$  ซึ่งเป็นฟังก์ชันตอบสนองไดอิเล็กตริกของฉนวน

$$f(t) = \frac{d\chi(t)}{dt} \quad (2.7)$$

ดังนั้นสมการโพลาไรเซชันสามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการที่ 2.8 ในทางอุดมคติพจน์แรกของสมการต้องเป็นศูนย์  $\chi(0) = 0$  แต่ในการวัดจริงปรากฏการณ์โพลาไรเซชันประเภทที่เกิดขึ้นเร็วมากจะไม่สามารถกำหนดได้ ด้วยเหตุผลข้อนี้จึงกำหนด delayed time constant เป็น  $t = 0'$  เพื่อแทนค่าพจน์ในช่วงความถี่สูง

$$\bar{P}(t) = \epsilon_0 \chi(0) E(t) + \epsilon_0 \int_0^t E(\tau) f(t-\tau) d\tau \quad (2.8)$$

ในการวัดโพลาไรเซชันไม่สามารถวัดขนาดโดยตรงได้ แต่สามารถหาได้จากกระแสการกระจัด เนื่องจากการโพลาไรเซชันจะสร้างกระแสไหลผ่านเนื้อฉนวน ซึ่งเป็นส่วนหลักส่วนหนึ่งในกระแสการกระจัด ดังนั้นจากสมการคณิตศาสตร์ของแมกซ์เวลในปี.ศ. 1891 สนามไฟฟ้า  $E(t)$  ที่ป้อนให้ฉนวนจะสร้างความหนาแน่นกระแส  $J(t)$  ซึ่งเป็นผลรวมของกระแสการนำไฟฟ้าและกระแสการกระจัด (Displacement Current)

$$\nabla \times H(t) = J(t) = \sigma_0 E(t) + \frac{dD(t)}{dt} \quad (2.9)$$

เมื่อ  $\sigma_0$  คือ ความนำของวัสดุ DC conductivity ของวัสดุฉนวน

เมื่อใช้ความสัมพันธ์ระหว่างสมการที่ 2.4 สมการที่ 2.8 และสมการที่ 2.9 ดังนั้นความหนาแน่นกระแสสามารถเขียนได้ใหม่ดังนี้

$$J(t) = \sigma_0 E(t) + \varepsilon_0 (1 - \chi(0')) \frac{dE(t)}{dt} + \varepsilon_0 f(0') E(t) + \varepsilon_0 \int_0^t \frac{df(t-\tau)}{d\tau} E(\tau) d\tau \quad (2.10)$$

ส่วน  $(1 - \chi(0'))$  ในสมการนี้เป็นส่วนจริงของค่าเปอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์ (relative permittivity) สำหรับช่วงความถี่สูงที่ time constant เป็น  $t = 0'$

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

$$J_{pol}(t) = \sigma_0 E_0 + \varepsilon_0 (1 - \chi(0')) E_0 \delta(t) + \varepsilon_0 E_0 f(t) \quad (2.11)$$

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

### 2.3.2 ชนิดของโพลาริเซชัน [11,12,13]

โพลาริเซชัน มีด้วยกัน 5 ชนิด ดังนี้

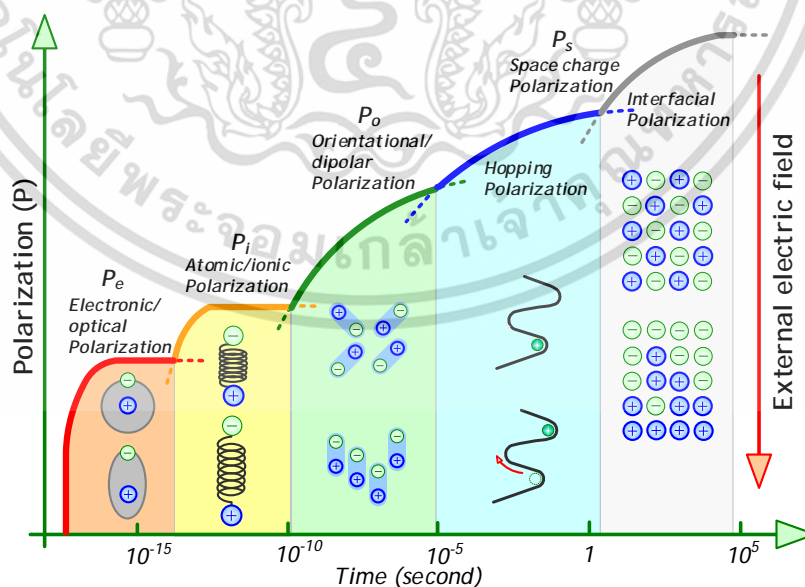
1. Electronic Polarization เป็นกระบวนการโพลาริเซชันระดับอะตอมของฉนวน เมื่อฉนวนอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า ทำให้กลุ่มหมอกอิเล็กตรอนที่อยู่รอบๆ นิวเคลียสเกิดการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งเล็กน้อย เพื่อจัดเรียงตัวใหม่เนื่องจากอิทธิพลของสนามไฟฟ้าภายนอกที่กระทำ แต่การเปลี่ยนแปลงในลักษณะดังกล่าวมีขนาดเล็กมาก เนื่องจากแรงจากสนามไฟฟ้าภายนอกที่กระทำต่ออะตอมนั้นมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับแรงยึดเหนี่ยวภายในอะตอมที่เกิดจากนิวเคลียสกระทำต่ออิเล็กตรอน โพลาริเซชันชนิดนี้เกิดขึ้นภายในเวลา  $10^{-14}$  วินาที ซึ่งมีความสอดคล้องกับความเร็วแสงและการมีขั้วแบบดังกล่าวนี้จะไม่ทำให้เกิดการสูญเสียทางไฟฟ้า

2. Atomic Polarization เป็นกระบวนการโพลาริเซชันกับวัสดุที่เป็นผลึกไอออนิก เมื่อมีสนามไฟฟ้าจากภายนอกกระทำ จะทำให้ไอออนบวกและไอออนลบของพันธะไอออนิกมีการเคลื่อนที่ ซึ่งการเคลื่อนที่นี้จะทำให้เกิดไดโพลที่ไม่สมดุล เนื่องจากสนามไฟฟ้าภายนอกสามารถทำให้การจัดเรียงตัวของนิวเคลียสภายในอะตอมและการสั่นของโครงสร้างโมเลกุลเปลี่ยนแปลงไป การมีขั้วแบบนี้ไม่สามารถเกิดขึ้นภายในเวลาที่รวดเร็วดังเช่น Electronic Polarization ได้เพราะนิวเคลียสของอะตอมเคลื่อนที่ได้ช้ามากเมื่อเทียบกับอิเล็กตรอน

3. Orientation Polarization เป็นการโพลาไรซ์ที่เกิดขึ้นกับไดอิเล็กตริกที่มีโมเลกุลเป็นแบบเชิงขั้วถาวร ซึ่งการเรียงตัวของอะตอมเดิมจะเรียงตัวอยู่อย่างกระจัดกระจาย ไม่มีรูปแบบที่แน่นอนและเมื่อเราวัดค่าสนามไฟฟ้ารวมจะมีค่าเท่ากับศูนย์ แต่เมื่อป้อนสนามไฟฟ้าให้กับฉนวนโมเลกุลที่เป็นแบบเชิงขั้วภายในโมเลกุลเองจะเกิดการเรียงตัวใหม่ตามทิศทางของสนามไฟฟ้า ซึ่งการโพลาไรเซชันประเภทนี้จะใช้เวลาในการเกิดนานกว่า Electronic Polarization และ Atomic Polarization

4. Hopping Polarization เป็นกระบวนการโพลาไรซ์ที่อธิบายปรากฏการณ์ที่ประจุภายในฉนวนเมื่อฉนวนอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า อิเล็กตรอนภายในฉนวนจะกระโดดจากตำแหน่งหนึ่งไปยังอีกตำแหน่งหนึ่งโดยที่พฤติกรรมการกระโดดนี้จะเกิดในระยะเวลาสั้น จากนั้นอิเล็กตรอนดังกล่าวจะค้างอยู่ในตำแหน่งใหม่ที่กระโดดไปทำให้ที่ตำแหน่งใหม่แสดงพฤติกรรมเป็นประจุลบ และเกิดโฮลขึ้นมา ซึ่งพฤติกรรมการย้ายตำแหน่งของประจุภายในฉนวนจะทำให้เกิดการโพลาไรซ์ขึ้น

5. Interfacial Polarization เกิดขึ้นเนื่องจากการแพร่กระจายของไอออนโดยก่อนป้อนสนามไฟฟ้าให้กับฉนวน อนุภาคประจุบวกและอนุภาคประจุลบจะมีการจัดเป็นระเบียบ แต่เมื่อฉนวนอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า ทำให้เกิดการกระจายของประจุในฉนวนตามทิศสนามไฟฟ้าอนุภาคประจุบวกและอนุภาคประจุลบที่สามารถเคลื่อนที่ได้ที่อยู่ภายในเนื้อฉนวนจะเคลื่อนที่แยกออกจากกัน และอนุภาคประจุดังกล่าวจะเคลื่อนที่มาสะสมกันตรงรอยต่อของฉนวน 2 ชนิด ที่มีค่าเปอรอมิตติวิตีแตกต่างกัน ซึ่งจะทำให้เกิดการสะสมของประจุบวกหรือประจุลบที่รอยต่อของฉนวนดังกล่าว ซึ่งปรากฏการณ์นี้จะทำให้การกระจายของสนามไฟฟ้าภายในเนื้อฉนวนผิดเพี้ยนไป



รูปที่ 2.10 ระยะเวลาที่ใช้ในการเกิดโพลาไรเซชันทั้ง 5 แบบภายใต้การป้อนแรงดันขึ้นบันได

## 2.4 กระแสโพลาริเซชันและกระแสตีโพลาริเซชัน [12,13,14]

ฉนวนของขดลวดสเตเตอร์ของเครื่องจักรกลหมุนประกอบด้วยไมก้าผสมเรซินเป็นส่วนใหญ่ดังนั้นจึงทำให้ฉนวนของขดลวดสเตเตอร์ประกอบด้วยรอยต่อของฉนวนเป็นจำนวนมากซึ่งรอยต่อดังกล่าวจะเกิดขึ้นระหว่างวัสดุฉนวนไมก้าและเรซินและด้วยเหตุนี้เมื่อทำการป้อนแรงดันกระแสตรงให้กับฉนวน กระบวนการโพลาริเซชันที่เกิดขึ้นภายในฉนวนที่วัดได้จึงเป็นการโพลาริเซชันประเภท Interfacial Polarization เป็นหลัก เนื่องจากไม่สามารถวัดขนาดการโพลาริเซชันทั้งหมดภายในฉนวนได้โดยตรง เมื่อป้อนแรงดันกระแสตรงให้กับฉนวนเป็นเวลานานเพียงพอที่จะทำให้เกิดการโพลาริเซชันและขนาดของแรงดันที่ป้อนไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการเบรกดาว์น การเกิดโพลาริเซชันเพื่อตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าจากภายนอกที่มากระทำจะทำให้เกิดกระแสขึ้นในขณะที่ทำการป้อนแรงดันให้กับฉนวนซึ่งก็คือกระแสโพลาริเซชัน ( $i_{pol}$ )

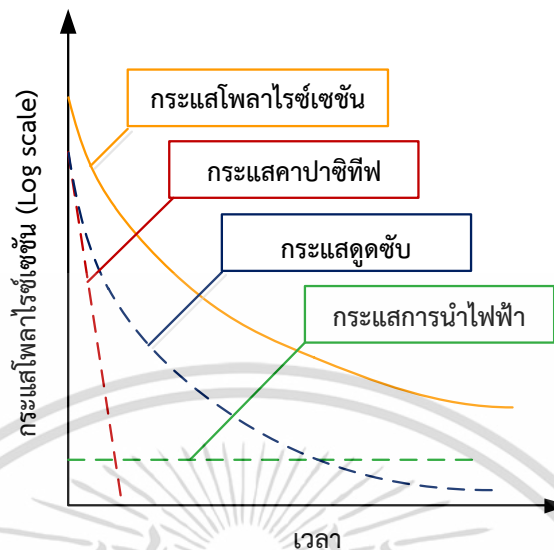
### 2.4.1 กระแสโพลาริเซชัน

กระแสโพลาริเซชันในทางทฤษฎีจะมีองค์ประกอบ 3 ส่วน คือ

- 1) กระแสคาปาซิทีฟ (capacitive current,  $i_c$ ) ซึ่งเป็นกระแสที่เกิดขึ้นเนื่องจากผลของตัวเก็บประจุสุญญากาศของระบบการฉนวน และจะลดลงในทันทีทันใด
- 2) กระแสดูดซับ (absorption current,  $i_{ob}$ ) ซึ่งเป็นกระแสที่เกิดขึ้นจากกระบวนการโพลาริเซชันภายในเนื้อฉนวน
- 3) กระแสการนำไฟฟ้า (conductance current,  $i_{con}$ ) ซึ่งเป็นกระแสที่เกิดจากค่าความนำไฟฟ้าของวัสดุและมีอยู่ในวัสดุทุกชนิด

การฉนวนหลายชั้นส่งผลถึงปรากฏการณ์โพลาริเซชันและการนำไฟฟ้า วิธีการวินิจฉัยฉนวนโดยการวัดผลของอินเทอร์เฟเชียลโพลาริเซชันที่เกิดจากปรากฏการณ์โพลาริเซชัน เกิดโดยการนำไฟฟ้ากระแสตรงระหว่างชั้นฉนวน โดยความชื้น, อุณหภูมิและอายุการใช้งานจะส่งผลต่อปรากฏการณ์เหล่านี้

กระแสโพลาริเซชันในทางทฤษฎีและองค์ประกอบของกระแสแสดงได้ดังรูปที่ 2.11 แต่ในทางปฏิบัติกระแสโพลาริเซชันที่วัดได้จะมีกระแสรั่วไหล (leakage current,  $i_l$ ) รวมอยู่ด้วยซึ่งกระแสรั่วไหลนี้เกิดขึ้นจากสิ่งปนเปื้อนที่ผิวฉนวนหรือเกิดจากความสกปรกของสภาพแวดล้อมขณะทำการทดสอบโดยจะพิจารณากระแสการนำไฟฟ้าและกระแสรั่วไหลเป็นกระแสนำไฟฟ้าที่วัดได้ในทางปฏิบัติ (practical conduction current,  $i_{con(practical)}$ )



รูปที่ 2.11 องค์ประกอบของกระแสโพลาริเซชัน [14]

$$i_{pol (practical)} = i_c + i_{ob} + i_{con} + i_l \quad (2.12)$$

$$i_{con (practical)} = i_{con} + i_l \quad (2.13)$$

กระแสโพลาริเซชันในทางทฤษฎีสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.14)

$$i_{pol}(t) = C_0 V_0 \left[ \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} + \epsilon_\infty \delta(t) + f(t) \right] \quad (2.14)$$

โดยที่  $C_0$  คือ ค่าความจุไฟฟ้าทางเรขาคณิต (geometric capacitance) ของวัตถุทดสอบ

$V_0$  คือ แรงดันกระแสตรงที่ใช้ในการทดสอบ

$\sigma_0$  คือ ค่าความนำไฟฟ้ากระแสตรงบริสุทธิ์ (pure dc conductivity)

$\epsilon_0$  คือ ค่าเปอร์มิตติวิตีของสุญญากาศ (permittivity of vacuum)

$\epsilon_\infty$  คือ ค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ (relative permittivity) ที่เวลาเริ่มต้น (ที่ 0 วินาที)

$\delta(t)$  คือ ฟังก์ชันเดลต้า (delta function) ที่เกิดขึ้นจากการจ่ายแรงดันรูปขั้นบันไดแบบ

ทันทีทันใดให้กับวัตถุทดสอบที่เวลาเริ่มต้น

$f(t)$  คือ ฟังก์ชันผลตอบสนองของไดอิเล็กตริก (dielectric response function)

จากสมการที่ (2.15) สามารถแบ่งกระแสโพลาริเซชันออกเป็น 3 เทอมเรียงลำดับจากซ้ายไปขวา

ดังนี้

เทอมที่ 1 คือเทอมของ  $\frac{\sigma}{\epsilon}$  ซึ่งเป็นเทอมที่มีความสัมพันธ์กับค่าความนำไฟฟ้าภายในเนื้อฉนวน และเป็นเทอมที่ไม่ขึ้นอยู่กับกระบวนการโพลาริซชันของฉนวน เทอมที่ 1 นี้จะปรากฏในขณะทำการจ่ายแรงดันให้กับฉนวนเท่านั้นซึ่งเทอมที่ 1 จะเป็นเทอมที่มีความสัมพันธ์กับกระแสการนำไฟฟ้าของฉนวน

เทอมที่ 2 คือเทอมของ  $\epsilon\delta(t)$  ซึ่งเป็นเทอมที่ไม่สามารถทำการวัดได้ในทางปฏิบัติเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของขนาดกระแสอย่างรวดเร็วซึ่งเทอมที่ 2 นี้จะเกิดจากกระบวนการโพลาริซชันที่ใช้ระยะเวลาในการเกิดรวดเร็วดังเช่น Electronic Polarization เป็นต้น

เทอมที่ 3 คือเทอมของ  $f(t)$  เป็นเทอมที่มีความสัมพันธ์กับกระบวนการโพลาริซชันทั้งหมดที่เกิดขึ้นภายในเนื้อฉนวนยกเว้นกระบวนการโพลาริซชันที่ใช้ระยะเวลาในการเกิดรวดเร็วดังที่กล่าวไปในเทอมที่ 2 ซึ่งเทอมที่ 3 นี้จะเป็นเทอมที่มีความสัมพันธ์กับกระแสคาปาซิทีฟและกระแสดูดซับ

## 2.4.2 กระแสดีโพลาริซชัน

จากข้อ 2.4.1 เมื่อหยุดจ่ายแรงดันให้กับฉนวนและทำการลัดวงจรฉนวนเพื่อให้ฉนวนเกิดการคายประจุลงสู่กราวด์ โมเลกุลและประจุไฟฟ้าภายในเนื้อฉนวนจะเกิดการจัดเรียงตัวเข้าสู่สภาวะปกติก่อนที่จะมีสนามไฟฟ้ามากระทำกระแสคายประจุ (Discharge current) ที่วัดได้ขณะทำการลัดวงจรให้กับฉนวนจะถูกเรียกว่ากระแสดีโพลาริซชัน ( $i_{depol}$ ) กระแสดีโพลาริซชัน จะมีองค์ประกอบ 2 ส่วน คือ

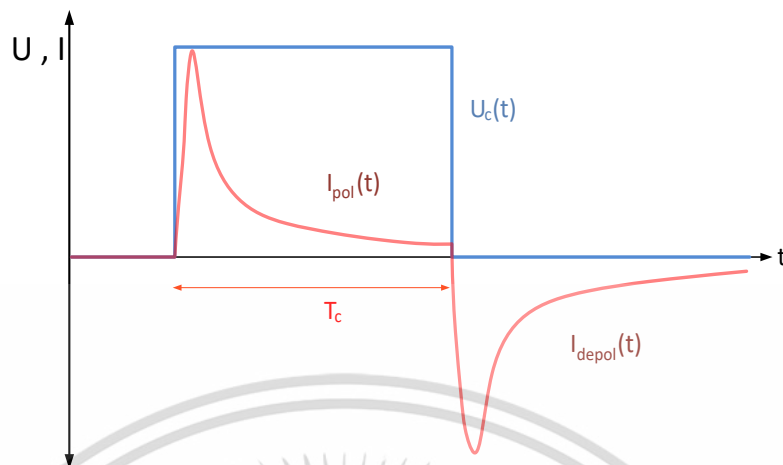
1) กระแสคาปาซิทีฟดิสชาร์จ (capacitive discharge current,  $i_{c(discharge)}$ ) ซึ่งเป็นกระแสที่เกิดขึ้นและลดลงอย่างทันทีทันใดและจะมีคุณลักษณะเหมือนกับกระแสคาปาซิทีฟของกระแสโพลาริซชันแต่มีขั้วตรงข้ามกัน

2) กระแสดูดซับดิสชาร์จ (absorption discharge current,  $i_{ab(discharge)}$ ) ซึ่งเป็นกระแสที่มีค่าสูงในช่วงแรกและเมื่อทำการคายประจุให้กับฉนวนต่อไปเรื่อยๆ กระแสดังกล่าวจะมีค่าลดลงกระแสดูดซับดิสชาร์จนี้จะมีคุณลักษณะเหมือนกับกระแสดูดซับของกระแสโพลาริซชันแต่จะมีขั้วตรงข้ามกันสำหรับกระแสดีโพลาริซชันจะไม่มีองค์ประกอบของกระแสการนำไฟฟ้าและกระแสรั่วไหลรวมอยู่ด้วยเนื่องจากทำการหยุดป้อนแรงดันให้กับฉนวนแล้วกระแสดีโพลาริซชันเขียนได้ดังสมการที่ (2.17) และกระแสโพลาริซชันและกระแสดีโพลาริซชันที่วัดได้แสดงดังรูปที่ 2.28

$$i_{depol} = i_{c(discharge)} + i_{ab(discharge)} \quad (2.15)$$

$$i_{depol}(t) = -C_0 V_0 [f(t) - f(t + T_c)] \quad (2.16)$$

$T_c$  คือ ระยะเวลาทำการจ่ายแรงดันให้กับวัตถุทดสอบ



รูปที่ 2.12 กระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน [11]

เมื่อพิจารณาสมการที่ (2.14) และ (2.16) พบว่า สามารถหากระแสไฟฟ้าในทางปฏิบัติได้โดยการนำกระแสดีโพลาริเซชันที่วัดได้มาลบออกจากกระแสโพลาริเซชันที่วัดได้ในทางปฏิบัติ

$$I_{con(practical)} = I_{pol(practical)} - I_{depol} \quad (2.17)$$

$$I_{con(practical)} = I_c + I_{ab} + I_{con} + I_l - I_{c(discharge)} - I_{ab(discharge)} \quad (2.18)$$

$$I_{con(practical)} = I_{con} + I_l \quad (2.19)$$

## 2.5 การทดสอบความต้านทานฉนวน (Insulation Resistance Test , IR) [14]

การทดสอบความต้านทานฉนวนเป็นการทดสอบแบบประจำ (Routine) ซึ่งจะทำทั้งก่อนและระหว่างการใช้งานเครื่องจักรกล วิธีนี้เป็นการทดสอบแบบไม่ทำลาย ดังนั้นจึงไม่ทำให้ฉนวนไฟฟ้าเสียหาย ซึ่งถูกนำมาใช้ประยุกต์ใช้ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1912 การทดสอบความต้านทานฉนวนเป็นการทดสอบที่สามารถทำได้ง่ายและรวดเร็ว โดยผลการทดสอบบ่งบอกถึงสภาพของฉนวน โดยที่ค่าความต้านทานฉนวน ณ เวลาใดๆ คือ

$$R_t = \frac{V}{I_t} \quad (2.20)$$

โดยที่	V	คือ	แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ในการทดสอบ
	$I_t$	คือ	ผลรวมของกระแสที่วัดได้หลังจากเวลา t
	$R_t$	คือ	ค่าความต้านทานฉนวนที่เวลาใดๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ค่าแรงดันทดสอบความต้านทานฉนวนตามมาตรฐาน (ตามมาตรฐาน IEEE 43-2013) [14]

พิกัดแรงดันของขดลวด (โวลต์)	แรงดันกระแสตรงที่ใช้ในการทดสอบความต้านทานฉนวน (โวลต์)
น้อยกว่า 100	500
1000-2500	500-1000
2501-5000	1000-2500
5001-12000	2500-5000
มากกว่า 12000	5000-10000

## 2.6 การทดสอบค่าดัชนีโพลาไรเซชัน (Polarization Index Test : PI)

การทดสอบค่าดัชนีโพลาไรเซชันหรือค่าดัชนีการเกิดขี้ว คืออัตราส่วนของความต้านทานฉนวน (IR) ที่วัดได้หลังจากจ่ายแรงดันไฟฟ้าเป็นระยะเวลา 10 นาที ( $R_{10}$ ) ต่อ 1 นาที ( $R_1$ ) ดังสมการที่ 2.21

$$PI = \frac{IR_{10}}{IR_1} \quad (2.21)$$

ตารางที่ 2.3 สภาพของฉนวนโดยประเมินจากค่า PI (ตามมาตรฐาน IEEE 43-2013) [14]

สภาพของฉนวน	PI (10/1 นาที)
อันตราย	ต่ำกว่า 1.0
ฉนวนอาจมีปัญหา	1.0-2.0
ฉนวนดี	2.0-4.0
ฉนวนดีเยี่ยม	มากกว่า 4.0

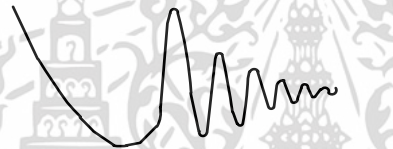
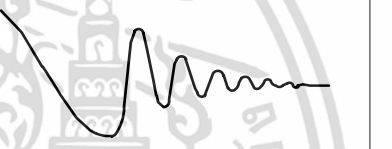



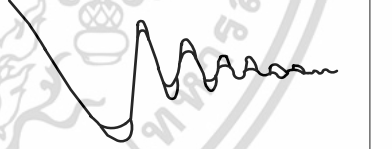
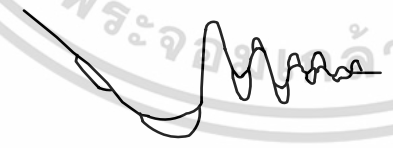
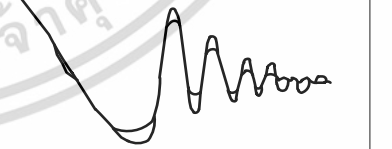
ตารางที่ 2.4 ค่า PI ต่ำสุดของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับและกระแสตรง

ระดับชั้นของฉนวน	อุณหภูมิแวดล้อมที่ฉนวนสามารถทนได้ (องศาเซลเซียส)	ค่า PI ต่ำสุด
A	105	1.5
B	130	2.0
F	155	2.0
H	180	2.0

## 2.7 การทดสอบเปรียบเทียบเสิร์จ (Surge Test) [12,15]

เป็นการทดสอบความสมดุลของค่าอิมพีแดนซ์ของฉนวนด้วยวิธีการเปรียบเทียบเสิร์จ ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบกราฟของแรงดัน 2 กราฟที่เกิดขึ้นจากการจ่ายและหยุดจ่ายกระแสที่เป็นพัลส์ไปยังขดลวด 2 ชุด ในกรณีที่ถ้าหากค่าอิมพีแดนซ์มีความสมมาตรหรือมีค่าไม่แตกต่างกันกราฟของแรงดันที่ได้ก็จะซ้อนกัน แต่ถ้าหากขดลวดบางชุดที่มีความบกพร่อง เช่นเกิดการลัดวงจรหรือฉนวนของแกนเหล็กบางส่วนมีการเสื่อมสภาพ กราฟของแรงดันที่ได้ก็จะแยกออกจากกันซึ่งผลการทดสอบจะถูกตรวจจับด้วยออสซิลโลสโคป ชนิด 2 เส้น (Dual trace)

ตาราง 2.5 การอ่านค่ากราฟการทดสอบเปรียบเทียบเสิร์จ

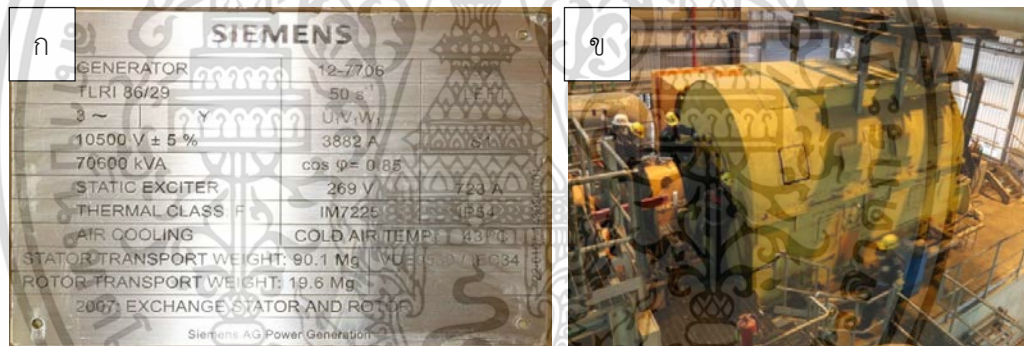
การต่อขดลวด ลักษณะของขดลวด	การต่อขดลวดแบบสตาร์	การต่อขดลวดแบบเดลต้า
ดี		
ลัดวงจร ระหว่างขด		
ลัดวงจร ระหว่างตัวนำ		
ต่อ ตัวนำกลับขั้ว		

### บทที่ 3

## การทดสอบเพื่อเป็นแนวทางในการบำรุงรักษาเครื่องจักรกลหมุน แรงดันสูงแบบดั้งเดิม

### 3.1 กล่าวนำ

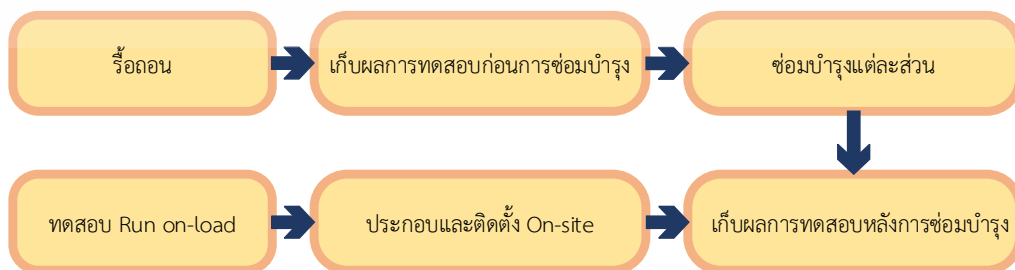
จากประสบการณ์การทำงานซ่อมบำรุงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและมอเตอร์ในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ โดยจะกล่าวถึงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงขนาดพิกัด 70.6 MVA 10.5kV ที่ใช้ในโรงไฟฟ้าพลังไอน้ำ โดยมีเครื่องกังหันไอน้ำเป็นเครื่องต้นกำลังหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ในการซ่อมบำรุงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงนี้จะแบ่งการซ่อมบำรุงออกเป็น 5 ส่วนหลัก ได้แก่ สเตเตอร์ โรเตอร์ ระบบระบายความร้อน valve slow drive และเครื่องเป่าลมร้อน (heater blower) และกล่าวถึงการ Overhaul มอเตอร์ขนาดพิกัด 6.6 kV



รูปที่ 3.1 ก) Nameplate ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ข) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังไอน้ำ

### 3.2 ขั้นตอนการซ่อมบำรุงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูง

ในงานซ่อมบำรุงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงนั้นไม่สามารถเคลื่อนย้ายเครื่องกำเนิดทั้งตัวไปซ่อมที่โรงงานได้ในครั้งเดียว จะต้องมีการรื้อถอนและขนย้ายบางส่วนไปซ่อมที่โรงงาน และบางส่วนซ่อมที่หน้างานดังแสดงในแผนผังรูปที่ 3.2

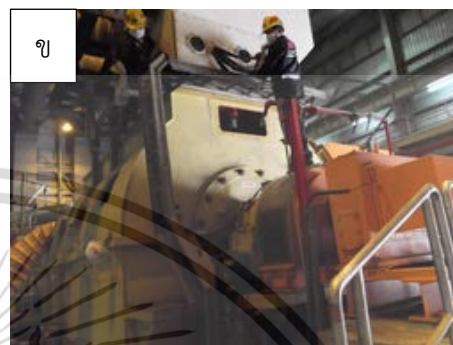


รูปที่ 3.2 แผนผังการซ่อมบำรุงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

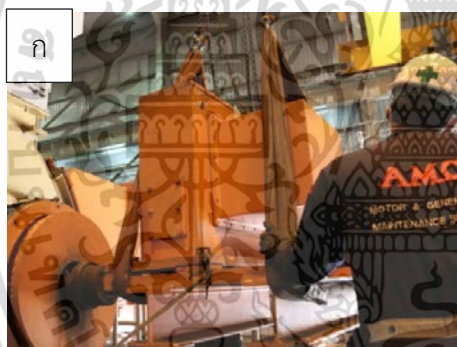
### 3.2.1 ขั้นตอนการรื้อถอนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูง

1. ตรวจสอบวัดค่า Alignment ก่อนการรื้อถอน หลังจากนั้นจึงปลด busbar ดังรูปที่ 3.3ก และ 3.3ข ตามลำดับ



รูปที่ 3.3 ก) การวัดค่า Alignment ก่อนการรื้อถอน และ ข) การปลด busbar

2. ถอด valve slow drive และ brush holder ring ดังรูปที่ 3.4ก และ 3.4ข ตามลำดับ



รูปที่ 3.4 ก) ถอด valve slow drive และ ข) ถอด brush holder ring

3. ถอดฝา casing D-end และ ND-end ดังรูปที่ 3.5ก และ 3.5ข ตามลำดับ



รูปที่ 3.5 ก) ถอด casing D-end และ ข) ND-end

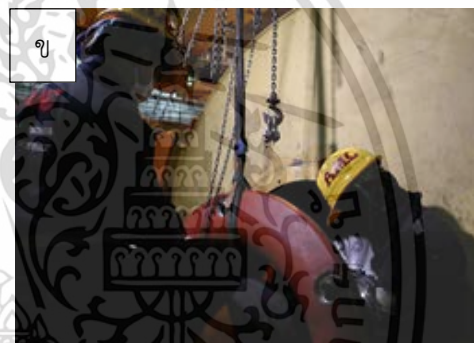
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ถอด sleeve bearing ด้าน D-end และ ด้าน ND-end ดังรูปที่ 3.6ก และ3.6ข ตามลำดับ



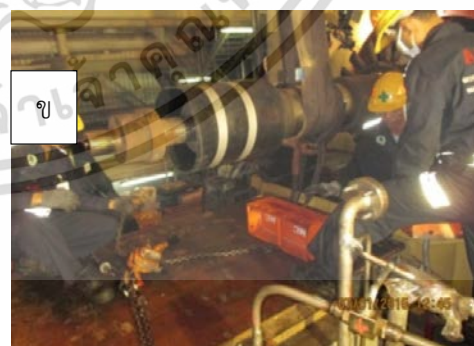
รูปที่ 3.6 ก) ถอด sleeve bearing ด้าน D-end และ ข) ด้าน ND-end

5. วัดระยะแกปอากาศหลังจากนั้นถอด cover guard ดังรูปที่ 3.7ก และ3.7ข



รูปที่ 3.7 ก) วัดระยะแกปอากาศระหว่างโรเตอร์และสเตเตอร์ และ ข) ถอด cover guard

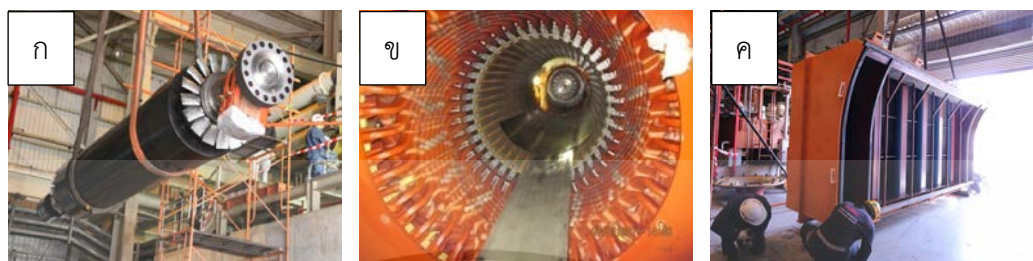
6. ถอด coupling bolts และติดตั้งอุปกรณ์สำหรับชักโรเตอร์ออกจากสเตเตอร์ ดังรูปที่ 3.8ก และ3.8ข ตามลำดับ



รูปที่ 3.8 ก) ถอด coupling bolts และ ข) ติดตั้งอุปกรณ์สำหรับชักโรเตอร์ออกจากสเตเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. ซักโรเตอร์ออกจากสเตเตอร์ ดังรูปที่ 3.9ก
8. รั้วระบบระบายความร้อนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังรูปที่ 3.9ค



รูปที่ 3.9 ก) โรเตอร์ และ ข) สเตเตอร์ ค) ระบบระบายความร้อนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

### 3.2.2 ขั้นตอนการซ่อมบำรุงและการทดสอบแต่ละส่วนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูง

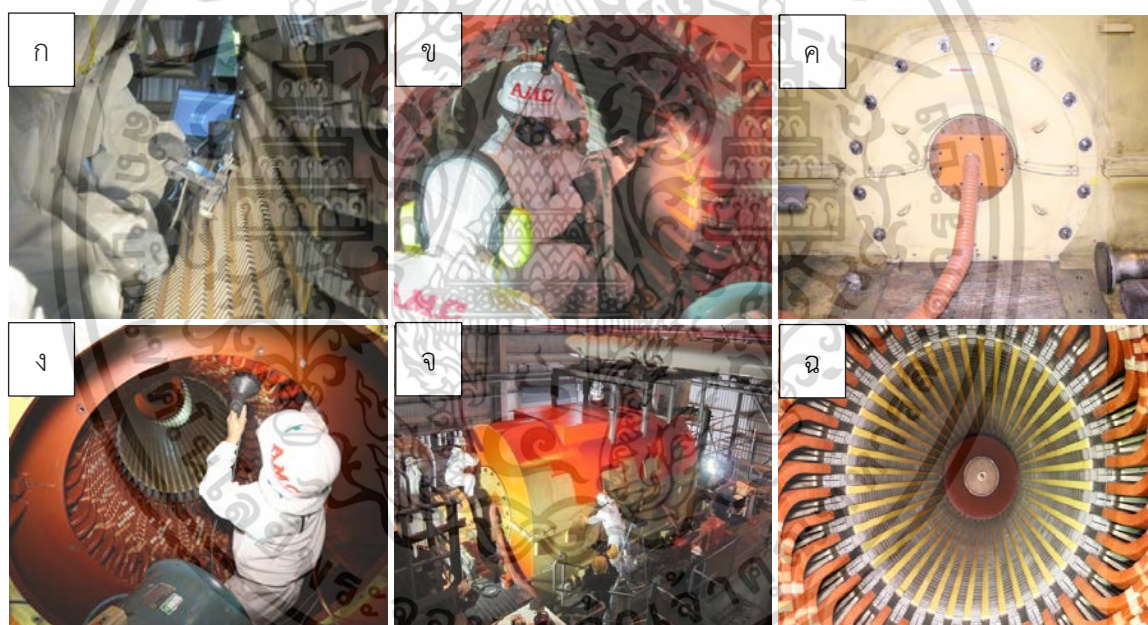
ในการซ่อมบำรุงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงนี้จะแบ่งการซ่อมบำรุงออกเป็น 5 ส่วนหลัก ได้แก่ สเตเตอร์ โรเตอร์ ระบบระบายความร้อน valve slow drive และเครื่องเป่าลมร้อน ในแต่ละส่วนจะมีการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบข้อมูลก่อนและหลังการซ่อมบำรุง ในบทนี้จะขออธิบายการซ่อมบำรุงเฉพาะส่วนสเตเตอร์ โรเตอร์ และระบบระบายความร้อน

#### 3.2.2.1 การซ่อมบำรุงในส่วนของสเตเตอร์

1. ตรวจสอบหาจุดผิดปกติ
  - เช็ค Stator lamination core
  - เช็ค Stator slot wedge
  - เช็ค End winding and support
  - เช็ค Busbar connection
  - ทดสอบ Electromagnetic Core Imperfection Detection (ELCID testing)
2. ทดสอบสเตเตอร์ด้วยการทดสอบทางไฟฟ้าก่อนการซ่อมบำรุง
  - Insulation Resistance Test
  - Winding Resistance Test
  - Polarization Index Test
  - Insulation Power Factor Tip - Up
3. ทดสอบ Current Transformer (CT)
  - Ratio Test
  - Resistance Test
  - Insulation Resistance Test

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Impedance Test
- 4. ทดสอบความแน่นของลิ้มไนร่องสลีต (Slot wedge tightness)
- 5. ทำความสะอาดสเตเตอร์ด้วย Dry ice
- 6. อบโดยเครื่องเป่าลมร้อน (Dry out)
- 7. ทาสีสเตเตอร์ด้วยวานิช
- 8. ทดสอบสเตเตอร์ด้วยการทดสอบทางไฟฟ้าอีกครั้งหลังการซ่อมบำรุง
  - Insulation Resistance Test
  - Winding Resistance Test
  - Polarization Index Test
  - Insulation Power Factor Tip - Up
- 9. พ่นสีสเตเตอร์ (Air brush painting stator)



รูปที่ 3.10 ก) ทดสอบ ELCID ข) การทำความสะอาดสเตเตอร์ด้วย Dry ice

ค) อบโดยเครื่องเป่าลมร้อน ง) ทาสีสเตเตอร์ด้วยวานิช จ) พ่นสีสเตเตอร์ ฉ) สเตเตอร์หลังทำความสะอาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ผลการทดสอบ Slot wedge tightness

ตรวจสอบ Slot wedge tightness ด้วยเครื่อง Wedge Tightness check เพื่อตรวจสอบความแน่นของลิ้มในร่องสล๊อต โดยผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงผลการทดสอบ Stator slot wedge

Number of slots	Wedges per slot ก่อน overhaul						
	1	2	3	4	5	6	7
1	94	91	54	95	92	86	93
	79	97	96	86	95	97	95
3	97	96	87	98	77	95	97
4	98	98	98	73	71	100	98
5	97	94	87	73	51	87	94
6	94	94	93	74	85	96	95
7	96	91	87	82	87	89	92
8	93	93	58	90	91	95	96
9	66	87	62	86	48	88	84
10	87	77	74	92	91	94	89
11	93	93	88	60	60	81	87
12	89	78	80	89	89	87	82
13	92	89	63	90	73	86	88
14	88	88	57	60	89	90	86
15	84	82	53	55	51	41	75
16	86	89	88	61	77	87	81
17	89	78	32	45	69	43	76
18	83	94	76	63	90	89	83
19	86	82	65	89	73	71	78
20	75	79	56	81	59	82	80
21	91	86	78	76	85	74	79
22	85	86	81	87	91	92	81
23	60	81	80	76	51	85	78
24	78	81	78	76	84	83	83
25	86	78	70	82	79	79	74
26	79	79	58	78	82	78	77
27	78	78	57	63	39	77	75
28	76	81	80	86	83	76	79
29	82	85	71	81	83	78	84
30	60	88	82	83	85	86	84
31	86	71	40	77	81	84	85
32	84	88	88	85	60	83	89
33	84	91	83	84	58	82	88
34	87	89	74	86	90	86	90
35	92	92	84	59	80	91	90
36	93	91	43	90	94	91	93
37	95	92	76	89	92	92	91
38	86	82	95	65	92	95	96
39	95	94	96	62	94	92	95
40	95	97	97	93	96	96	98
41	95	93	77	62	95	92	95
42	94	98	96	97	99	98	99



No. of Slot : 42

Wedges Per Slot : 7

Test Points : 3

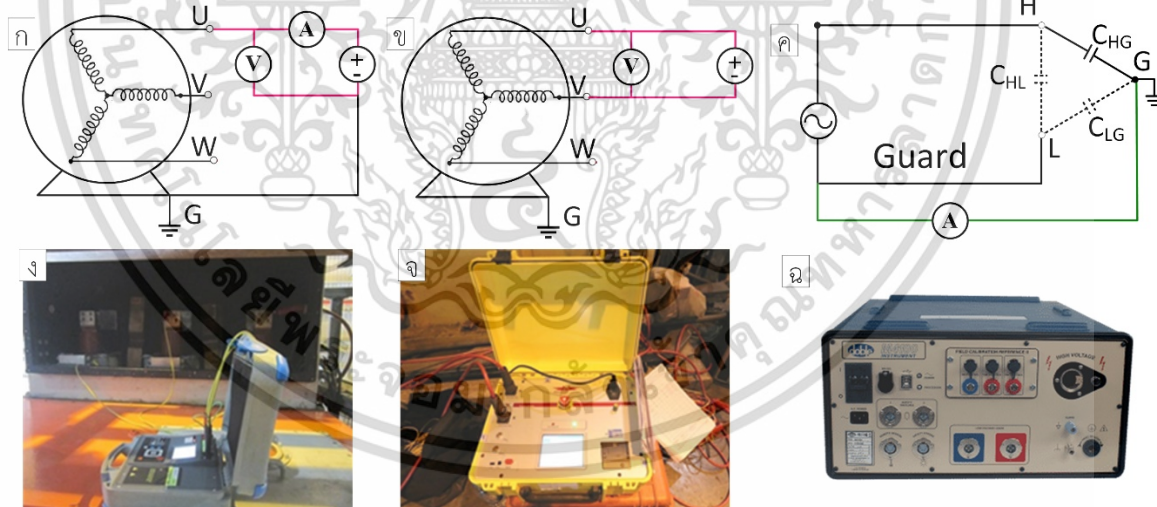


ผลการทดสอบ Insulation Resistance Test และ Polarization Index Test

ทดสอบ Insulation Resistance Test และ Polarization Index Test ด้วยเครื่อง Insulation Resistance Test และ Polarization Index Test ดังรูป 3.11 โดยผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 แสดงผลการทดสอบ Insulation Resistance Test และ Polarization Index Test

STATUS	การต่อ	IR @	IR @	PI	TEST VOLTAGE (Vdc)	WINDING TEMP (°C)
		1 min (GΩ)	10 min (GΩ)			
Before O/H	Y	5.25	19.30	3.67	5000	32
	OPEN - Y	8.00	33.20	4.16	5000	32
	OPEN - Y	8.30	32.90	3.97	5000	32
After O/H	OPEN - Y	8.20	31.90	3.89	5000	32
	Y	9.78	48.00	4.91	5000	33
	OPEN - Y	13.40	66.90	5.00	5000	33
After O/H	OPEN - Y	12.00	59.40	4.96	5000	33
	OPEN - Y	11.90	62.40	5.26	5000	33



รูปที่ 3.11 ก) วงจรทดสอบ Insulation Resistance Test และ Polarization Index Test

ข) วงจรทดสอบ Winding Resistance Test ค) วงจรทดสอบ Insulation Power Factor Tip - Up

ง) เครื่องวัด Insulation Resistance Test และ Polarization Index Test

จ) เครื่องวัด Winding Resistance Test ฉ) เครื่อง Doble insulation testing

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบ Insulation Power Factor Tip - Up

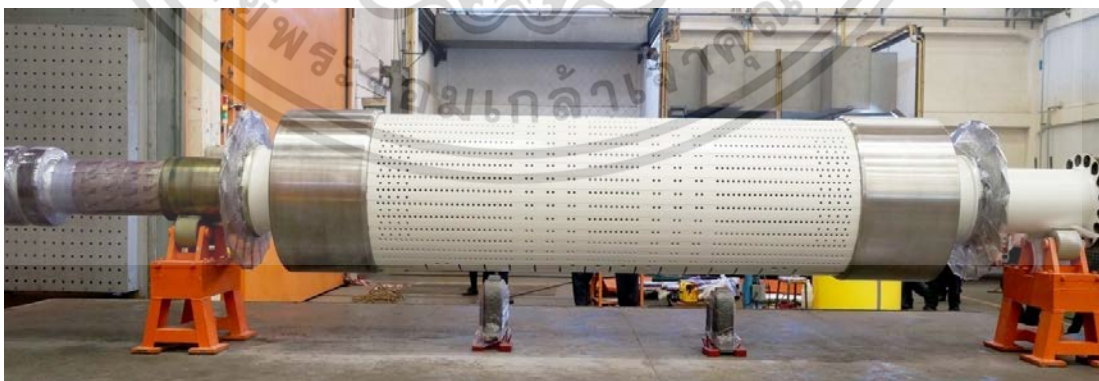
ทดสอบ Insulation Power Factor Tip - Up ด้วยเครื่อง Doble insulation testing ค่า PF Tip - Up หากจาก PF ที่ 1.0 Vp-0.25 Vp โดยผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 แสดงผลการทดสอบ Insulation Power Factor Tip - Up

การต่อ		TEST kV.	MILLIAMPERES		WATTS		PF.		TIP-UP		CAPACITANCE (µF)	
จ่าย แรงดัน	WIND GRD.		ก่อน Overhaul	หลัง Overhaul	ก่อน Overhaul	หลัง Overhaul	ก่อน Overhaul	หลัง Overhaul	ก่อน Overhaul	หลัง Overhaul	ก่อน Overhaul	หลัง Overhaul
U	V + W	2.0	1012.95	1010.22	54.41	54.39	0.537	0.538	0.230	0.213	0.32225	0.32158
		3.0	1013.41	1011.13	55.41	59.38	0.587	0.587			0.32263	0.32187
		4.0	1014.61	1011.22	56.41	64.25	0.642	0.635			0.32279	0.32208
		5.0	1014.87	1012.07	57.41	70.12	0.704	0.693			0.32309	0.32231
		6.0	1015.91	1012.16	58.41	76.00	0.768	0.751			0.32326	0.32248
V	W + U	2.0	1007.14	1003.93	59.41	52.69	0.526	0.525	0.224	0.202	0.32038	0.31970
		3.0	1007.71	1005.19	60.41	56.82	0.573	0.565			0.32069	0.32000
		4.0	1008.6	1005.50	61.41	61.58	0.625	0.612			0.32090	0.32020
		5.0	1009.43	1006.17	62.41	66.86	0.689	0.664			0.32112	0.32041
		6.0	1010.23	1006.93	63.41	73.13	0.750	0.726			0.32144	0.32067
W	U + V	2.0	1006.53	1004.02	64.41	50.88	0.521	0.507	0.187	0.195	0.32028	0.31962
		3.0	1007.32	1005.25	65.41	55.05	0.56	0.548			0.32060	0.31990
		4.0	1007.66	1005.85	66.41	59.78	0.603	0.594			0.32075	0.32008
		5.0	1008.7	1005.94	67.41	64.66	0.653	0.643			0.32100	0.32033
		6.0	1009.29	1006.44	68.41	70.60	0.708	0.701			0.32117	0.32045

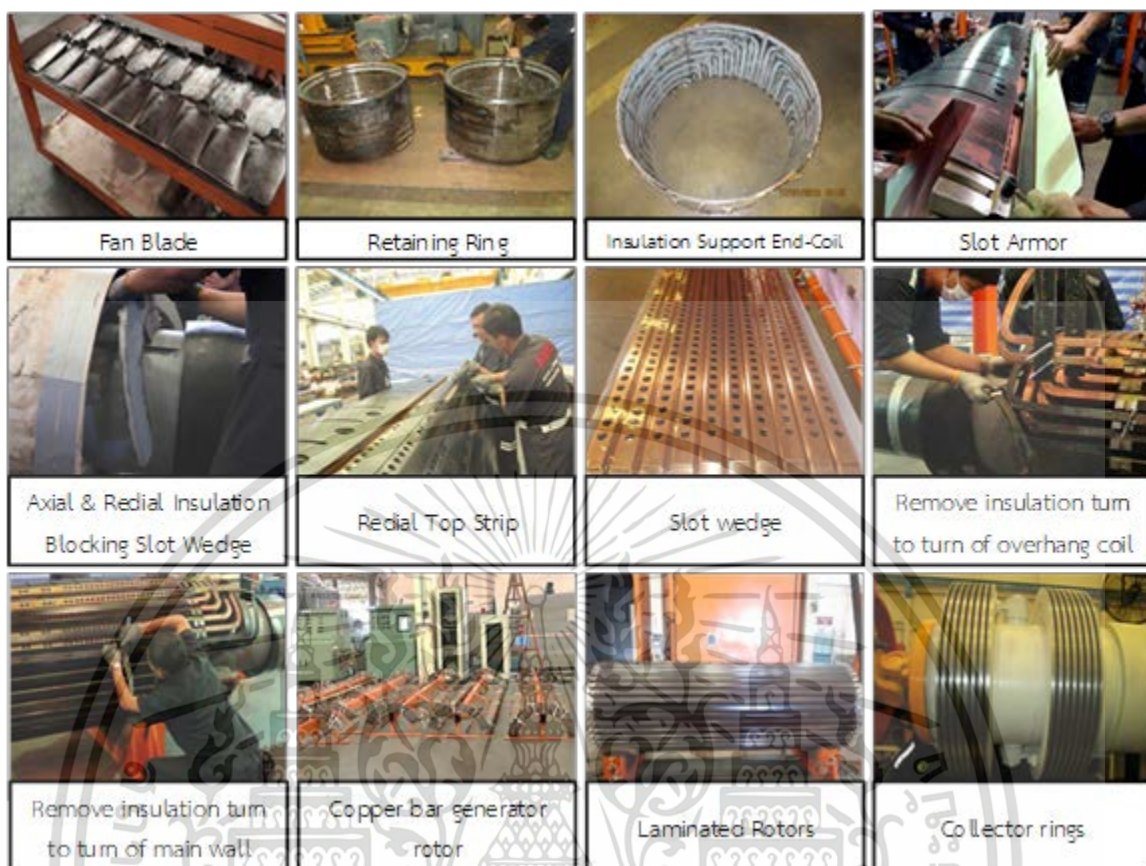
### 3.2.2.2 การซ่อมบำรุงในส่วนของโรเตอร์

1. ตรวจสอบหาจุดผิดปกติ
  - Check run out rotor
  - Check balance rotor
2. ทดสอบโรเตอร์ด้วยการทดสอบทางไฟฟ้าก่อนการซ่อมบำรุง
  - Insulation Resistance Test
  - Polarization Index Test
  - AC, Impedance Test
  - Voltage Balance Test
  - Recurrent Surge Oscillation Test (RSO)
3. ถอด Fan Blade และ Retaining Ring ทั้งด้าน D-end และด้าน ND-end มาทำความสะอาด
4. รื้อ Insulation Support End-Coil เพื่อเปลี่ยนชุดใหม่
5. ถอด Axial & Radial Insulation Blocking Slot Wedge และ Slot wedge มาทำความสะอาด
6. ถอดขดลวดโรเตอร์ออกจากแกนโรเตอร์ หลังจากนั้นรื้อฉนวนเก่าออกจากขดลวดโรเตอร์แล้วพันใหม่
7. ปรับแกนโรเตอร์ Adjustment lamination
8. ประกอบโรเตอร์โดยเริ่มจากใส่ Slot Armor อันใหม่ลงในร่อง ตามด้วยขดลวดโรเตอร์ และ Slot Wedge และปิดด้วย Axial & Radial Insulation Blocking Slot Wedge อันใหม่ แล้วเคลือบด้วย epoxy painting
9. ประกอบ Retaining Ring และ Fan Blade กลับเข้าไปที่โรเตอร์
10. ปรับผิวสลีปริงใหม่



รูปที่ 3.12 โรเตอร์หลังการ overhaul

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 ส่วนประกอบของโรเตอร์ที่ถูกเรือในการซ่อมบำรุง

### 3.2.2.3 การซ่อมบำรุงในส่วนของระบบระบายความร้อน

1. แยกส่วนประกอบระบบระบายความร้อนมาทำความสะอาดและทาสี ดังรูป 3.14
2. เปลี่ยนตัวกรอง (Filter) ของระบบระบายความร้อน ดังรูป 3.15ก
3. เปลี่ยน gasket ชุดใหม่ ดังรูป 3.15ข
4. เปลี่ยน rubber seal ชุดใหม่ ดังรูป 3.15ค

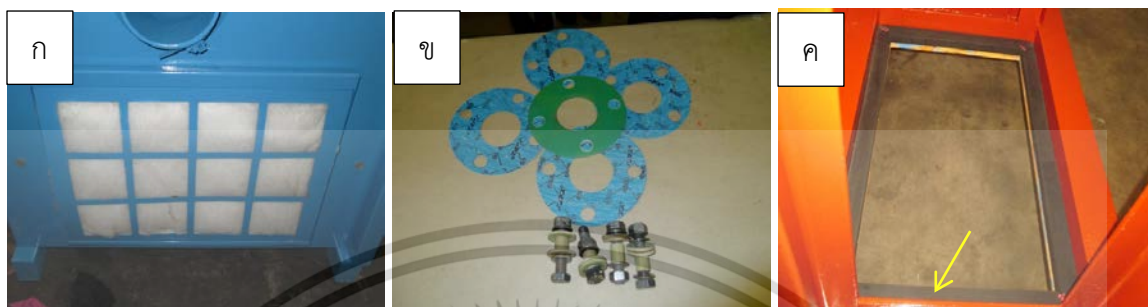


รูปที่ 3.14 ก) ส่วนของระบบระบายความร้อน ข) แยกส่วนประกอบระบบระบายความร้อน ค) หลังทาสี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. เปลี่ยน O-ring ชุดใหม่

6. Test pressure cooling system ดังรูป 3.16



รูปที่ 3.15 ก) ตัวกรอง (Filter) ของระบบระบายความร้อน ข) gasket ชุดใหม่ ค) rubber seal ชุดใหม่



รูปที่ 3.16 Test pressure cooling system

### 3.3 ขั้นตอนการ Overhaul มอเตอร์

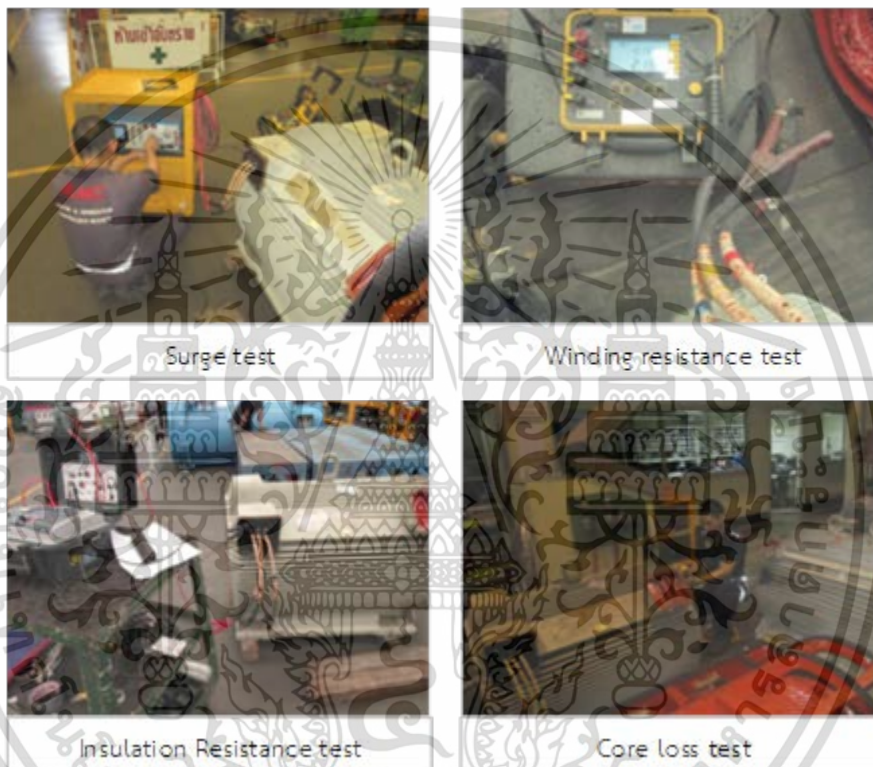
งาน Overhaul มอเตอร์ขนาดพิกัดแรงดัน 6.6 kV ฉนวนคลาส F โดยแสดงภาพก่อนและหลัง Overhaul ดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 มอเตอร์ขนาดพิกัดแรงดัน 6.6 kV ก) ก่อน Overhaul ข) หลัง Overhaul

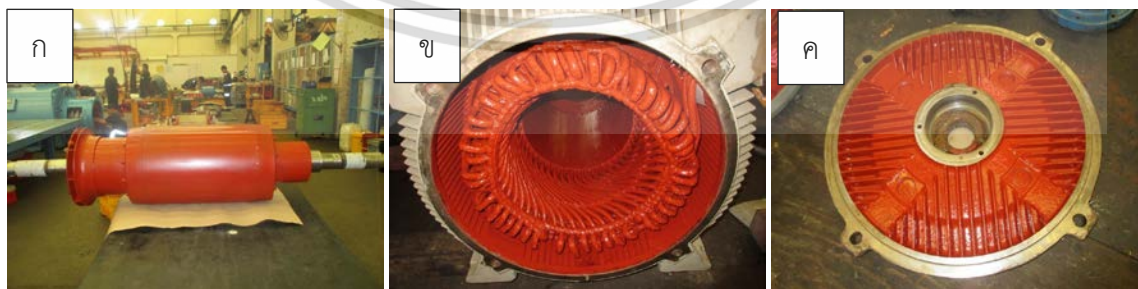
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ตรวจสอบหาจุดบกพร่อง
2. ทดสอบก่อนการซ่อมบำรุง
  - Surge test
  - Resistance test
  - Insulation Resistance test
  - Core loss test



รูปที่ 3.18 การทดสอบมอเตอร์ก่อนการ Overhaul

3. รื้อส่วนประกอบมอเตอร์



รูปที่ 3.19 ก) โรเตอร์ ข) สเตเตอร์ ค) bearing housing

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. สเตเตอร์จะถูกทำความสะอาดฉีดล้างด้วยน้ำอัดแรงดันแล้วอบที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง
5. โรเตอร์ทดสอบ dynamic balancing และตรวจสอบเพลลา
6. ทำความสะอาดและทาสี bearing housing
7. ประกอบชิ้นส่วนของมอเตอร์
8. ฟันสีมอเตอร์
9. ทดสอบหลังการซ่อมบำรุง
  - Surge test
  - Resistance test
  - Insulation Resistance test
  - Core loss test



รูปที่ 3.20 ก) ล้างสเตเตอร์ ข) โรเตอร์ขณะทดสอบ dynamic balancing ค) เพลลาเบรียง  
ง) ประกอบชิ้นส่วนของมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

# การทดสอบเพื่อเป็นแนวทางในการบำรุงรักษาเครื่องจักรกลหมุน แรงดันสูงด้วยแนวคิดสมัยใหม่

### 4.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการศึกษาคุณสมบัติฉนวนสแตเตอร์ของมอเตอร์แรงดันสูงโดยวิธีการทดสอบคุณสมบัติฉนวนด้วยการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันร่วมกับเทคนิคการทดสอบแบบดั้งเดิมเพื่อซ่อมบำรุงเครื่องจักรกลหมุนในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ การผลิตสแตเตอร์คอยล์สำหรับมอเตอร์อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ และวิธีดำเนินการทดสอบ สำหรับการศึกษาคูณสมบัติฉนวนสแตเตอร์ของมอเตอร์แรงดันสูงจะแบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ 1. การศึกษาคูณสมบัติฉนวนในแต่ละขั้นตอนการผลิตสแตเตอร์คอยล์สำหรับมอเตอร์ 2. การศึกษาคูณสมบัติฉนวนของมอเตอร์ก่อนและหลังการซ่อมบำรุงรักษา 3. การทดสอบมอเตอร์ที่ไม่ได้ใช้งานเป็นเวลานาน ในส่วนที่หนึ่งนี้มีเป้าหมายเพื่อศึกษาและทำความเข้าใจคุณสมบัติฉนวนแต่ละชนิดของสแตเตอร์คอลลีย์ใช้สำหรับมอเตอร์แรงดันสูงด้วยวิธีการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน ส่วนที่สองมีเป้าหมายเพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติฉนวนมอเตอร์แรงดันสูงด้วยวิธีการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน และการทดสอบมอเตอร์ด้วยวิธีอื่น อาทิ การวัดความต้านทานฉนวน (IR) และ Surge test วิธีเหล่านี้โดยปกติจะเป็นวิธีที่ใช้ทดสอบมอเตอร์เพื่อประเมินและเปรียบเทียบมอเตอร์ก่อนและหลังการซ่อมบำรุง ส่วนที่ 3 เพื่อศึกษาคูณสมบัติฉนวนมอเตอร์แรงดันสูงที่ไม่ได้ใช้งานเป็นเวลานาน

การซ่อมบำรุงเครื่องจักรกลหมุนในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ในบทนี้จะกล่าวถึงเครื่องจักรกลหมุนแรงดันสูง 4 ตัว โดยเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดสอบความต้านทานฉนวน และการทดสอบค่าดัชนีโพลาริเซชันของก่อนการซ่อมแซมและหลังการซ่อมแซม วัตถุประสงค์ของส่วนนี้เพื่อให้เห็นกระบวนการซ่อมบำรุงเครื่องจักรกลขนาดใหญ่ และนำเสนอผลการทดสอบทางไฟฟ้าก่อนและหลังการซ่อมบำรุง

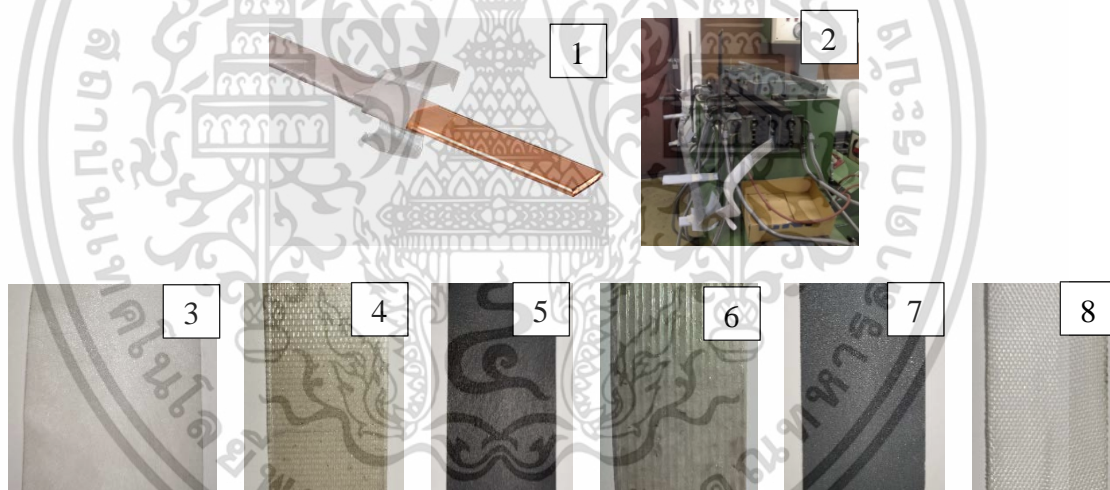
### 4.2 การวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันในแต่ละขั้นตอนการผลิตสแตเตอร์คอยล์สำหรับมอเตอร์

วัตถุประสงค์ของการทดลองนี้เพื่อศึกษาผลตอบสนองไดอิเล็กตริกของแต่ละขั้นตอนการผลิตสแตเตอร์โดยวิธีการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันเพื่อเป็นแนวทางในการวิเคราะห์ฉนวนมอเตอร์ โดยได้ทำการทดลองกับสแตเตอร์คอยล์สำหรับมอเตอร์ 6.6 กิโลโวลต์ ระดับฉนวนคลาส F จำนวน 5 คอยล์ ซึ่งกระบวนการในการผลิตสแตเตอร์คอยล์จะถูกแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอน

หลังจากผ่านกระบวนการผลิตในแต่ละขั้นตอนจะทำการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันสำหรับอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการผลิตถูกแสดงในรูปที่ 4.1 และรายละเอียดในการผลิตได้ถูกอธิบายในหัวข้อ 4.2.2

#### 4.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตสเตเตอร์คอยล์สำหรับมอเตอร์

1. แท่งตัวนำทองแดง
2. เครื่อง Hot press
3. NOMEX paper
4. เทป Kremica
5. เทป Conductive
6. เทป Filosam
7. เทป Semi-conductive
8. เทปโพลีเอสเตอร์



รูปที่ 4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตสเตเตอร์คอยล์สำหรับมอเตอร์

#### 4.2.2 ขั้นตอนการผลิตสเตเตอร์คอยล์สำหรับมอเตอร์

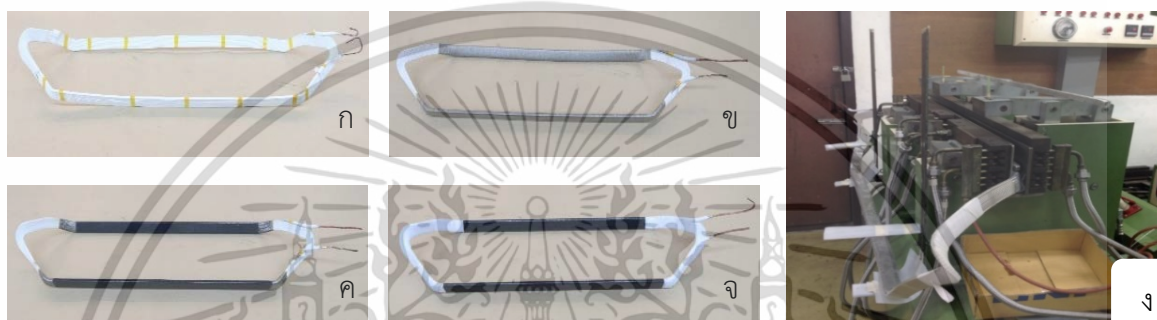
ขั้นตอนที่ 1. แท่งตัวนำทองแดงที่ถูกพันด้วย NOMEX paper ถูกนำมาขดและตัดขึ้นเป็นรูป Diamond shape ดังรูป 4.2ก

ขั้นตอนที่ 2. พันเทป Kremica จำนวน 6 รอบ ในส่วนทางตรงสำหรับวางในร่องสลิตและมุมทั้งสองของสเตเตอร์คอยล์ ดังรูป 4.2ข

ขั้นตอนที่ 3. พันเทป Conductive จำนวน 1 รอบ ในส่วนทางตรงสำหรับวางในร่องสลิตของสเตเตอร์คอยล์ ดังรูป 4.2ค

ขั้นตอนที่ 4. นำสเตเตอร์คอยล์จากขั้นตอนที่ 3 มาเข้าเครื่อง Hotpress ซึ่งเป็นการบีบอัดในส่วนทางตรงสำหรับวางในร่องสลิตของสเตเตอร์คอยล์ โดยมีการควบคุมความดันและอุณหภูมิให้คงที่ ที่ความดัน 1 บาร์ และอุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที ดังรูป 4.2ง

ขั้นตอนที่ 5. พันเทป Filosam จำนวน 7 รอบ ที่บริเวณทางโค้งและมุมทั้งสี่ หลังจากนั้นพันเทป Semi-conductive จำนวน 1 รอบ ที่มุมทั้งสี่ ชั้นสุดท้ายพันเทปโพลีเอสเตอร์จำนวน 1 รอบ ที่บริเวณทางโค้งและมุมทั้งสี่ ดังรูป 4.2จ



รูปที่ 4.2 รูปสเตเตอร์คอยล์แต่ละขั้นตอนการผลิต

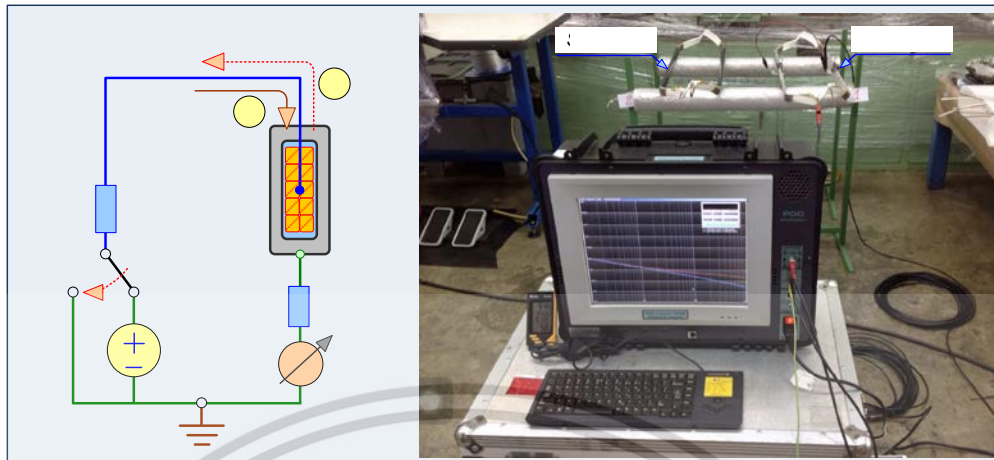
- ก. สเตเตอร์คอยล์หลังขึ้นรูปเป็น Diamond shape
- ข. สเตเตอร์คอยล์หลังพันเทป Kremica ในส่วนทางตรงร่องสลิต
- ค. สเตเตอร์คอยล์หลังพันเทป Conductive ในส่วนทางตรงร่องสลิต
- ง. สเตเตอร์คอยล์ในกระบวนการ Hotpress ในส่วนทางตรงร่องสลิต
- จ. สเตเตอร์คอยล์หลังพันเทป Filosam, เทป Semi-conductive และพันเทปโพลีเอสเตอร์ที่ส่วนร่องสลิต

#### 4.2.3 การวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันสำหรับสเตเตอร์คอยล์

สำหรับสเตเตอร์คอยล์ใช้วงจรวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของฉนวนระหว่างเฟส (Phase to Phase Insulation) วงจรนี้ใช้ทดสอบกับสเตเตอร์คอยล์ในห้องปฏิบัติการที่สามารถแยกกราวด์ออกได้ โดยจะใช้วงจรนี้ในการทดลองการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันในแต่ละขั้นตอนการผลิต สเตเตอร์คอยล์สำหรับมอเตอร์

สำหรับการต่อวงจรที่ใช้ทดสอบการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของฉนวนระหว่างเฟส จะต่อวงจรตามรูปที่ 4.3 โดยนำฟอยล์อลูมิเนียมมาจำลองแทนร่องสลิตของสเตเตอร์ พันรอบขึ้นทดสอบบริเวณส่วนทางตรงในร่องสลิต ในการทดสอบจะทำการจ่ายแรงดัน 300 โวลต์ เข้าไปยังแ่งตัวนำของสเตเตอร์คอยล์เป็นเวลา 1000 วินาที เพื่อวัดกระแสโพลาริเซชัน หลังจากครบตามเวลาจะวัดกระแสดีโพลาริเซชัน โดยการลัดวงจรลงกราวด์แล้วปล่อยให้ฉนวนดิสชาร์จเป็นเวลา 1000 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 วงจรสมมูลวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของฉนวนระหว่างเฟสและการต่อวงจร

สำหรับวงจรวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของฉนวนระหว่างเฟสจะใช้อุปกรณ์สำหรับทดสอบวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันดังนี้

1. เครื่องวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน (PDC-Analyser-1MOD)
- 2.. สายไฟที่ใช้
  - สายวัดกระแส (Current sensing cable)
  - สายจ่ายแรงดันสูงสำหรับ PDC-Analyser-1MOD (Voltage cable)
  - สายกราวด์ (Ground cable)



**PDC-Analyser-1MOD**  
voltage range 30-2000V  
Current range  $\pm 1$  mA  
resolution 1 pA

current sensing  
cable



voltage cable



ground cable



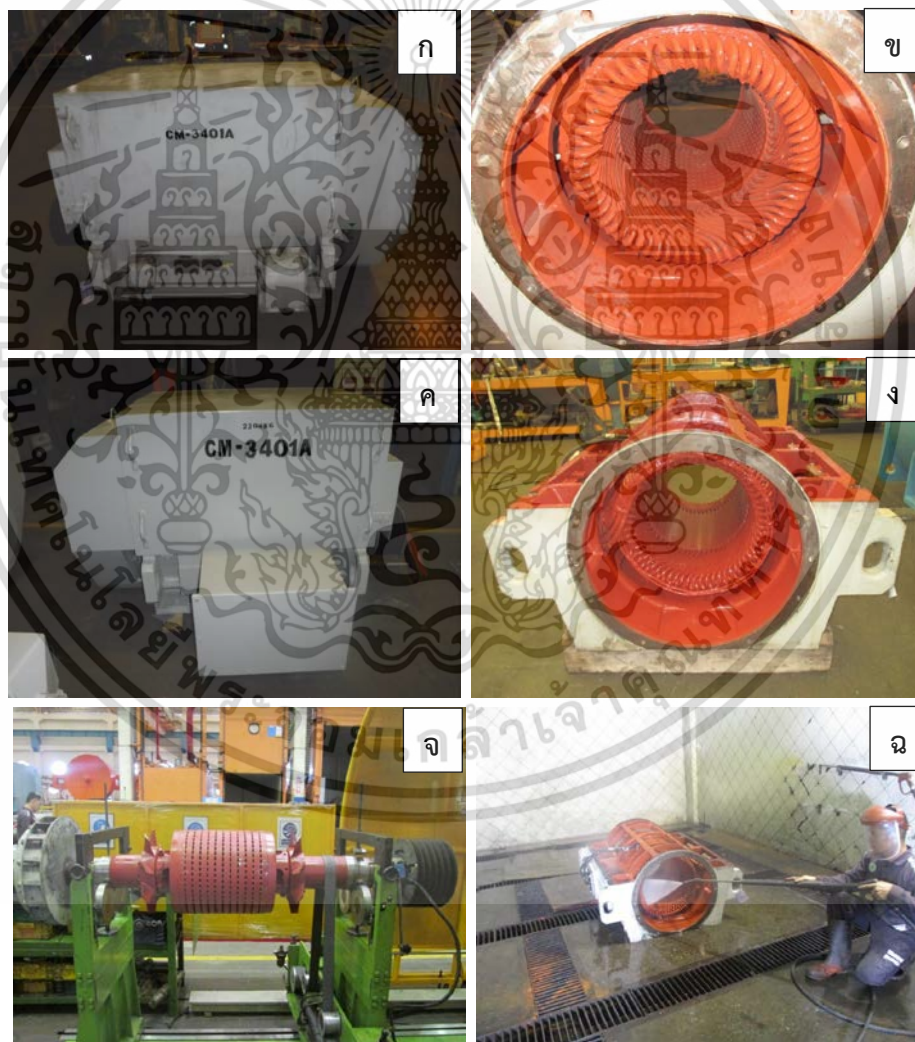
รูปที่ 4.4 อุปกรณ์สำหรับวงจรวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของฉนวนระหว่างเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 การทดสอบฉนวนของมอเตอร์ก่อนการซ่อมบำรุงและหลังการซ่อมบำรุง

ในหัวข้อนี้ได้ทำการทดลองกับมอเตอร์จำนวน 4 ตัว โดยวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน, ความต้านทานฉนวน (IR), Polarization Index (PI) และ Surge test ของมอเตอร์ก่อนการซ่อมบำรุงและหลังการซ่อมบำรุง

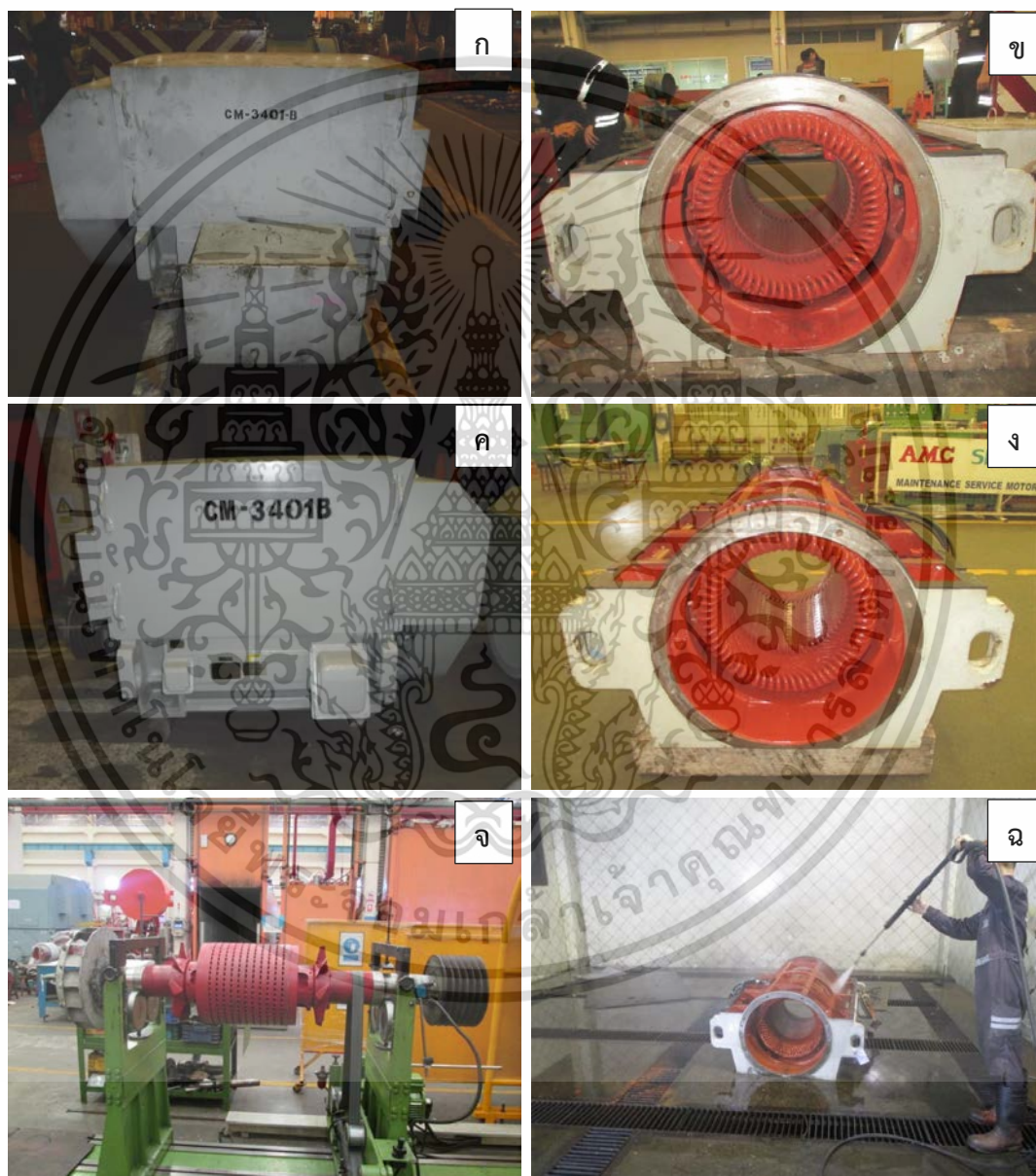
**มอเตอร์ A :** เป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส พิกัดแรงดัน 6.6 กิโลโวลต์ ขนาดกำลัง 240 กิโลวัตต์ ระดับฉนวนคลาส F ก่อนการซ่อมบำรุงพบว่าที่ผิวของฉนวนสเตเตอร์คอยล์มีฝุ่นเกาะอยู่เล็กน้อย ดังรูปที่ 4.5ก และ 4.5ข หลังจากนั้นนำมอเตอร์มาซ่อมบำรุงโดยการล้างสเตเตอร์ ทาสีเคลือบวานิช และอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง หลังการซ่อมบำรุงมอเตอร์ไม่พบสิ่งปนเปื้อนที่ผิวของสเตเตอร์คอยล์ดังรูปที่ 4.5ค และ 4.5ง



รูปที่ 4.5 (ก) มอเตอร์ A ก่อนซ่อมบำรุง (ข) สเตเตอร์ของมอเตอร์ A ก่อนซ่อมบำรุง (ค) มอเตอร์หลังซ่อมบำรุง (ง) สเตเตอร์ของมอเตอร์ A หลังซ่อมบำรุง (จ) โรเตอร์ (ฉ) การทำความสะอาดสเตเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

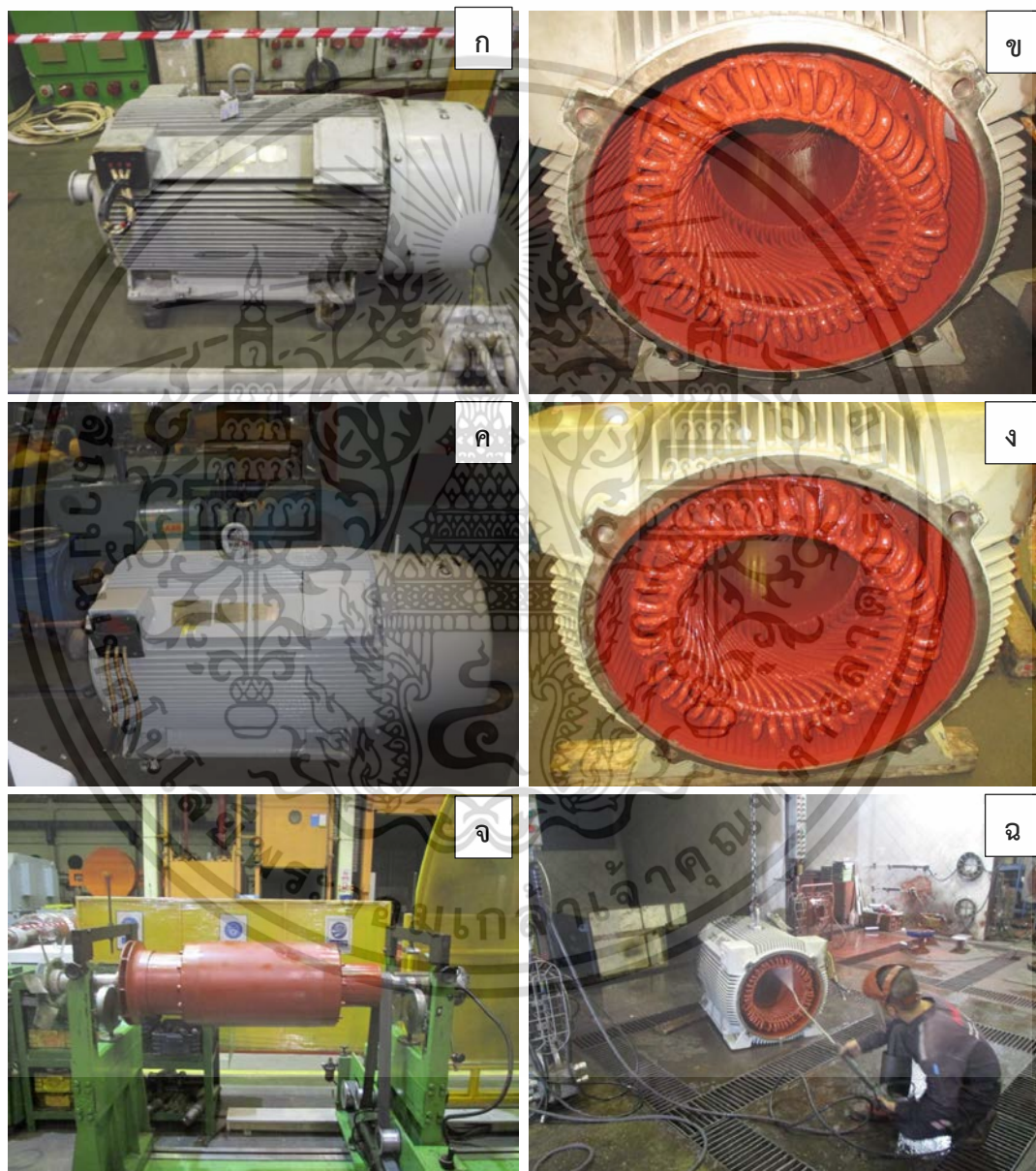
มอเตอร์ B : เป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส พิกัดแรงดัน 6.6 กิโลโวลต์ ขนาดกำลัง 240 กิโลวัตต์ ระดับฉนวนคลาส F ก่อนการซ่อมบำรุงพบว่าที่ผิวของฉนวนสเตเตอร์คอยล์มีฝุ่นอยู่เล็กน้อย ดังรูปที่ 4.6ก และ 4.6ข หลังจากนั้นนำมอเตอร์มาซ่อมบำรุงโดยการล้างสเตเตอร์ ทาสี และอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 ชั่วโมง หลังการซ่อมบำรุงมอเตอร์ไม่พบสิ่งปนเปื้อนที่ผิวของสเตเตอร์คอยล์ดังรูปที่ 4.6ค และ 4.6ง



รูปที่ 4.6 (ก) มอเตอร์ B ก่อนซ่อมบำรุง (ข) สเตเตอร์ของมอเตอร์ B ก่อนซ่อมบำรุง (ค) มอเตอร์ B หลังซ่อมบำรุง (ง) สเตเตอร์ของมอเตอร์ B หลังซ่อมบำรุง (จ) โรเตอร์ (ฉ) การทำความสะอาดสเตเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

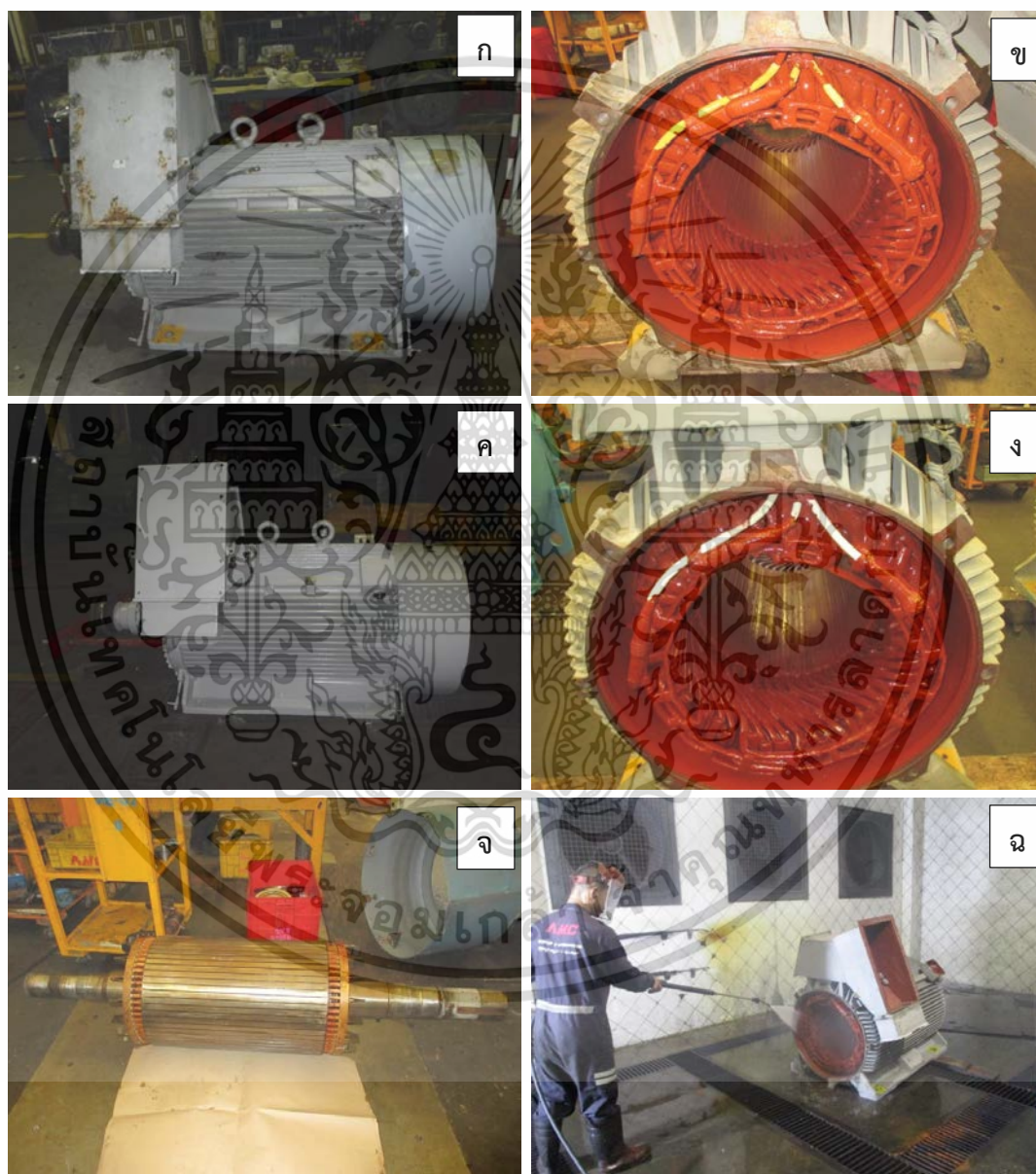
มอเตอร์ C : เป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส พิกัดแรงดัน 6.6 กิโลโวลต์ ขนาดกำลัง 400 กิโลวัตต์ ระดับฉนวนคลาส F ก่อนการซ่อมบำรุงพบว่าที่ผิวของฉนวนสเตเตอร์คอยล์มีฝุ่นอยู่เล็กน้อย ดังรูปที่ 4.7ก และ 4.7ข หลังจากนั้นนำมอเตอร์มาซ่อมบำรุงโดยการล้างสเตเตอร์ ทาสี และอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 ชั่วโมง หลังการซ่อมบำรุงมอเตอร์ไม่พบสิ่งปนเปื้อนที่ผิวของสเตเตอร์คอยล์ดังรูปที่ 4.7ค และ 4.7ง



รูปที่ 4.7 (ก) มอเตอร์ C ก่อนซ่อมบำรุง (ข) สเตเตอร์ของมอเตอร์ C ก่อนซ่อมบำรุง (ค) มอเตอร์ C หลังซ่อมบำรุง (ง) สเตเตอร์ของมอเตอร์ C หลังซ่อมบำรุง (จ) โรเตอร์ (ฉ) การทำความสะอาดสเตเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอเตอร์ D : เป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส พิกัดแรงดัน 6.6 กิโลโวลต์ ขนาดกำลัง 400 กิโลวัตต์ ระดับฉนวนคลาส F ก่อนการซ่อมบำรุงพบว่าที่ผิวของฉนวนสเตเตอร์คอยล์มีฝุ่นอยู่เล็กน้อย ดังรูปที่ 4.8ก และ 4.8ข หลังจากนั้นนำมอเตอร์มาซ่อมบำรุงโดยการล้างสเตเตอร์ ทาสี และอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 ชั่วโมง หลังการซ่อมบำรุงมอเตอร์ไม่พบสิ่งปนเปื้อนที่ผิวของสเตเตอร์คอยล์ดังรูปที่ 4.8ค และ 4.8ง



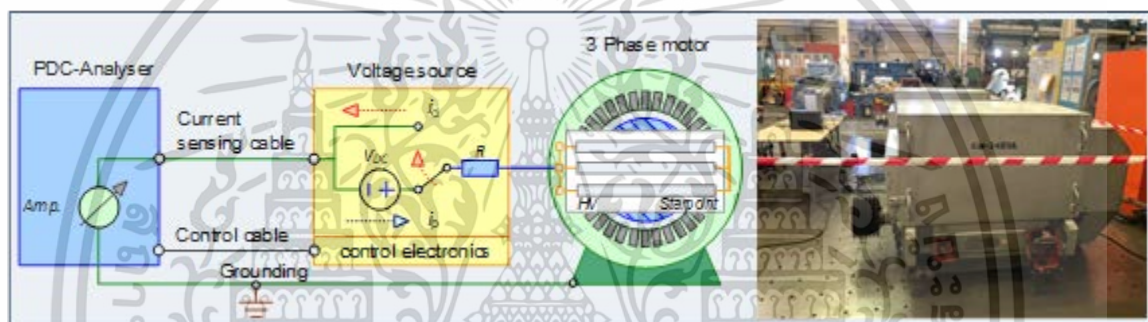
รูปที่ 4.8 (ก) มอเตอร์ D ก่อนซ่อมบำรุง (ข) สเตเตอร์ของมอเตอร์ D ก่อนซ่อมบำรุง (ค) มอเตอร์ D หลังซ่อมบำรุง (ง) สเตเตอร์ของมอเตอร์ D หลังซ่อมบำรุง (จ) โรเตอร์ (ฉ) การทำความสะอาดสเตเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3.1 การวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันสำหรับมอเตอร์

สำหรับมอเตอร์ใช้วงจรวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของฉนวนระหว่างเฟสกับกราวด์ (Phase to Ground Insulation) วงจรนี้ใช้ทดสอบกับสเตเตอร์คอยล์ของมอเตอร์ในกรณีที่ไม่สามารถแยกกราวด์ออกได้ โดยจะใช้วงจรนี้ในการทดลองการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันของมอเตอร์ก่อนการซ่อมบำรุงและหลังการซ่อมบำรุง

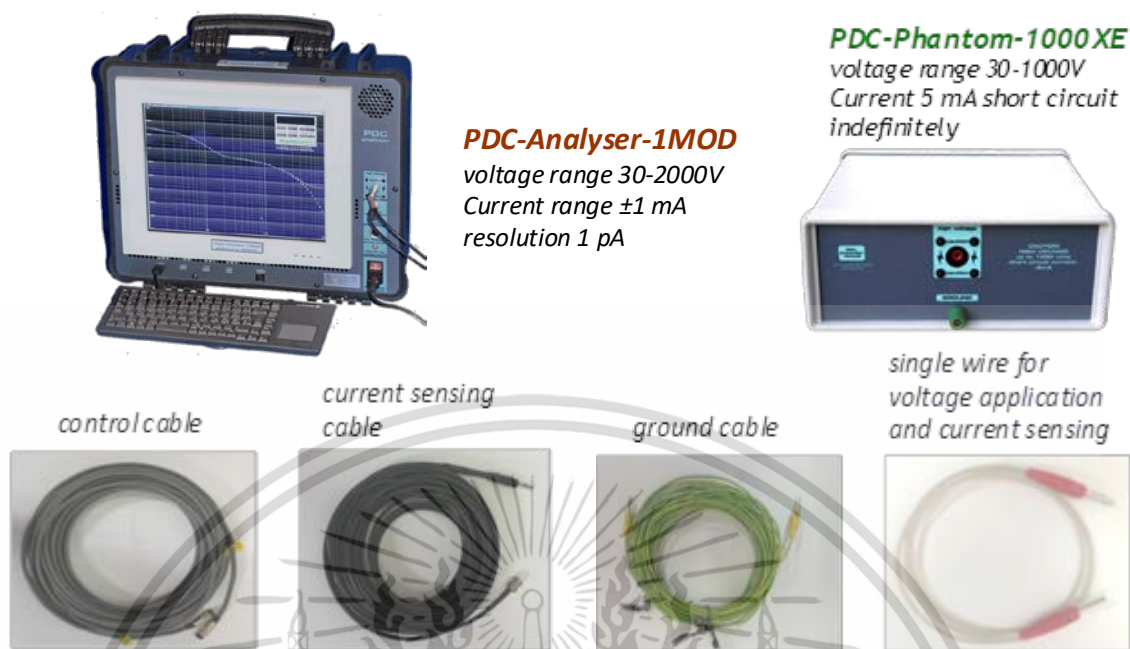
สำหรับการต่อวงจรที่ใช้ทดสอบการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของฉนวนระหว่างเฟสกับกราวด์ จะต่อวงจรตามรูปที่ 4.9 ในการทดสอบจะทำการจ่ายแรงดัน 100 โวลต์ เข้าไปยังเทอร์มินอลของแต่ละเฟสเป็นเวลา 1100 วินาที เพื่อวัดกระแสโพลาริเซชัน หลังจากครบตามเวลาจะวัดกระแสดีโพลาริเซชัน โดยการลัดวงจรลงกราวด์แล้วปล่อยให้ฉนวนดิสชาร์จเป็นเวลา 1100 วินาที



รูปที่ 4.9 วงจรวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของฉนวนระหว่างเฟสกับกราวด์

วงจรวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของฉนวนระหว่างเฟสกับกราวด์จะใช้อุปกรณ์สำหรับทดสอบวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันดังนี้

1. เครื่องวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน (PDC-Analyzer-1MOD)
2. เครื่องจ่ายแรงดัน (PDC-Phantom-1000XE)
3. สายไฟที่ใช้
  - สายควบคุม (Control cable)
  - สายวัดกระแส (Current sensing cable)
  - สายกราวด์ (Ground cable)
  - สายจ่ายแรงดันสูงสำหรับ PDC-Phantom-1000XE (Single wire for voltage application and current sensing)



รูปที่ 4.10 อุปกรณ์ในวงจรวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของฉนวนระหว่างเฟสกับกราวด์

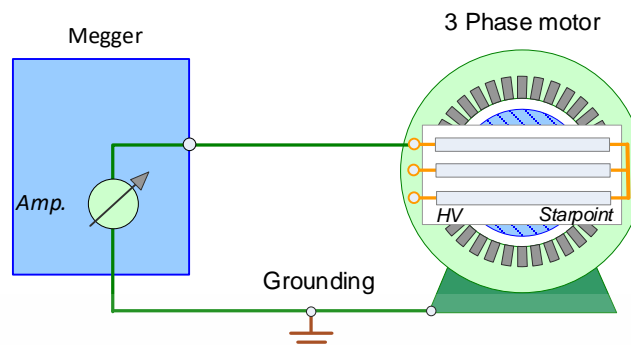
#### 4.3.2 การวัดความต้านทานฉนวนและค่าดัชนีโพลาริเซชันสำหรับมอเตอร์

การวัดความต้านทานฉนวน (Insulation Resistance Test, IR) และ ค่าดัชนีโพลาริเซชัน (Polarization Index, PI) ของมอเตอร์ ใช้เครื่อง Megger MIT525 5 kV diagnostic ดังรูปที่ 4.11 โดยต่อวงจรวัดความต้านทานฉนวนสำหรับมอเตอร์ดังรูปที่ 4.12 และ 4.13 ในการทดสอบมอเตอร์ 6.6 กิโลโวลต์ ก่อนทดสอบจะทำการดิสชาร์จขดลวดสเตเตอร์เป็นเวลาอย่างน้อย 50 นาที หลังจากนั้นเริ่มการทดสอบโดยจะจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 5,000 โวลต์ เป็นเวลา 10 นาที โดยค่า IR คือค่าความต้านทานที่วัดได้หลังจากจ่ายแรงดันไป 1 นาที ส่วนค่า PI จะหาได้จากอัตราส่วนความต้านทานฉนวนที่ 10 นาที ต่อความต้านทานฉนวนที่ 1 นาที ดังสมการที่ 2.21

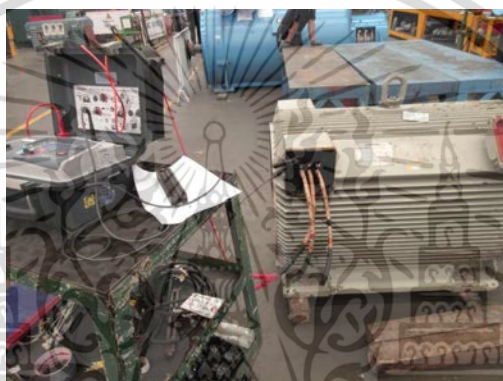


รูปที่ 4.11 เครื่อง Megger MIT525 5 kV diagnostic

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 วงจรวัดความต้านทานฉนวน



รูปที่ 4.13 การต่อวงจรวัดความต้านทานฉนวนของมอเตอร์

#### 4.3.3 การทดสอบเปรียบเทียบเสิร์จ (Surge Test) สำหรับมอเตอร์

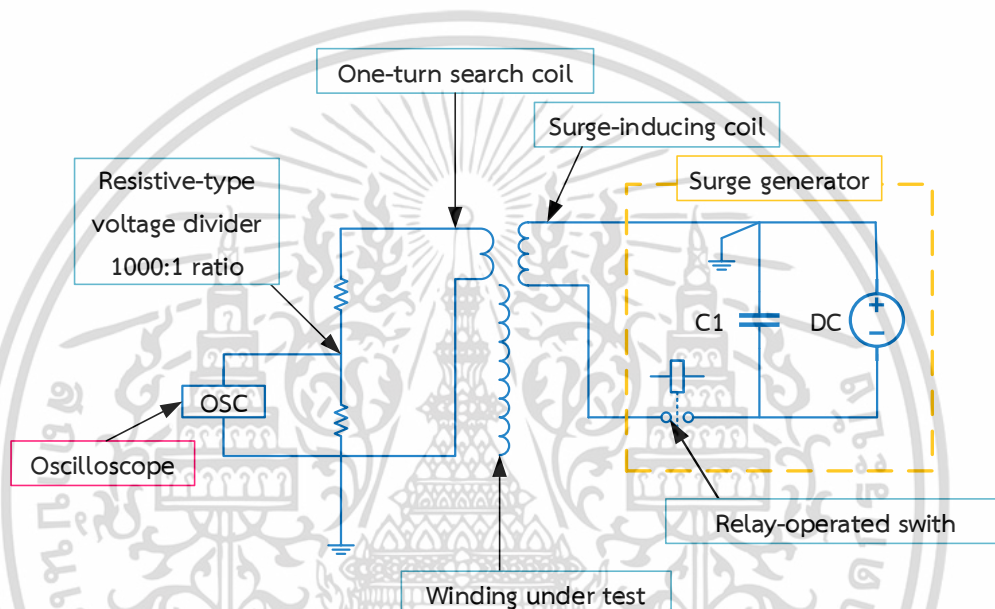
การทดสอบเปรียบเทียบเสิร์จ เป็นการทดสอบเพื่อตรวจหาความบกพร่องของฉนวนระหว่างรอบของสเตเตอร์คอยล์ โดยอาศัยหลักการของการดีสชาร์จของแรงดันที่อยู่ในคาปาซิเตอร์ไปยังขดลวดทำให้เกิดสัญญาณเสิร์จขึ้น รูปร่างของสัญญาณเสิร์จขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์ของสเตเตอร์คอยล์ การทดสอบจะทำการเปรียบเทียบเสิร์จของขดลวดครั้งละคู่ จำนวน 3 คู่ คือ

1. เฟส A กับ เฟส B
2. เฟส B กับ เฟส C
3. เฟส C กับ เฟส A

การทดสอบเป็นการเปรียบเทียบกราฟของแรงดัน 2 กราฟที่เกิดขึ้นจากการจ่ายกระแสที่เป็นพัลส์ไปยังขดลวดของทั้งสองเฟสและตรวจจับด้วยออสซิลอโคป ในกรณีที่ถ้าหากค่าอิมพีแดนซ์มีความสมมาตรหรือมีค่าไม่แตกต่างกันกราฟของแรงดันที่ได้ก็จะซ้อนกัน แต่ถ้าหากขดลวดบางชุดที่มีความบกพร่อง เช่นเกิดการลัดวงจรหรือฉนวนของแกนเหล็กบางส่วนมีการเสื่อมสภาพกราฟของแรงดันที่ได้ก็จะแยกออกจากกัน



รูปที่ 4.14 เครื่องทดสอบเปรียบเทียบเสิร์จ



รูปที่ 4.15 วงจรการทดสอบเปรียบเทียบเสิร์จ [15]

#### 4.4 การทดสอบฉนวนของมอเตอร์สำรองที่ไม่ได้ใช้งานเป็นเวลานาน

ในหัวข้อนี้ได้ทำการทดลองกับมอเตอร์สำรองที่ไม่ได้ใช้งานเป็นเวลานานจำนวน 4 ตัว โดยทำการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน, ความต้านทานฉนวน และ Polarization Index การวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันสำหรับการทดลองนี้ใช้วงจรเดียวกับหัวข้อ 4.3.2 สำหรับมอเตอร์ โดยใช้วงจรวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของฉนวนระหว่างเฟสกับกราวด์ วงจรนี้ใช้ทดสอบกับวัตถุทดสอบที่ไม่สามารถแยกกราวด์ออกได้ การต่อวงจรตามรูปที่ 4.9 ในการทดสอบจะทำการจ่ายแรงดัน 100 โวลต์ เข้าไปยังขั้วเทอร์มินอลทั้งสามเฟสเป็นเวลา 1100 วินาที เพื่อวัดกระแสโพลาริเซชัน หลังจากครบตามเวลาจะวัดกระแสดีโพลาริเซชัน โดยการลัดวงจรลงกราวด์แล้วปล่อยให้ดิสชาร์จเป็นเวลา 1100 วินาที สำหรับมอเตอร์สำรองที่ไม่ได้ใช้งานเป็นเวลานานจำนวน 4 ตัว ได้แก่

**มอเตอร์ M1 :** เป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส พิกัดแรงดัน 6.6 กิโลโวลต์ ขนาดกำลัง 300 แรงม้า ระดับฉนวนคลาส F ทำหน้าที่บดหินปูน ใช้งานครั้งสุดท้ายเมื่อวันที่ 11 ต.ค. 2560 ไม่ได้ใช้งานเป็นเวลา 24 เดือน ดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 มอเตอร์ M1 บรรจุในลังไม้ ขณะต่อวงจรวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน

**มอเตอร์ M2 :** เป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส พิกัดแรงดัน 6.6 กิโลโวลต์ ขนาดกำลัง 350 แรงม้า ระดับฉนวนคลาส F ทำหน้าที่เป็นมอเตอร์ปั๊ม ใช้งานครั้งสุดท้ายเมื่อวันที่ 25 พ.ค. 2561 ไม่ได้ใช้งานเป็นเวลา 17 เดือน ดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 มอเตอร์ M2 ขณะต่อวงจรวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**มอเตอร์ M3 :** เป็นมอเตอร์ 3 เฟส พิกัดแรงดัน 6.6 กิโลโวลต์ ขนาดกำลัง 400 แรงม้า ระดับฉนวนคลาส F ทำหน้าที่เป็นมอเตอร์โบลเวอร์หีบปูนแรงดันสูง ใช้งานครั้งสุดท้ายเมื่อวันที่ 30 พ.ย. 2561 ไม่ได้ใช้งานเป็นเวลา 11 เดือน ดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 มอเตอร์ M3 ขณะต่อวงจรวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน

**มอเตอร์ M4 :** เป็นมอเตอร์ 3 เฟส พิกัดแรงดัน 6.6 กิโลโวลต์ ขนาดกำลัง 400 แรงม้า ระดับฉนวนคลาส F ทำหน้าที่บดหินปูน ใช้งานครั้งสุดท้ายเมื่อวันที่ 7 ธ.ค. 2561 ไม่ได้ใช้งานเป็นเวลา 10 เดือน ดังรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 มอเตอร์ M4 ขณะต่อวงจรวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# ผลการทดสอบเพื่อเป็นแนวทางในการบำรุงรักษาเครื่องจักรกล หมุนแรงดันสูงด้วยแนวคิดสมัยใหม่

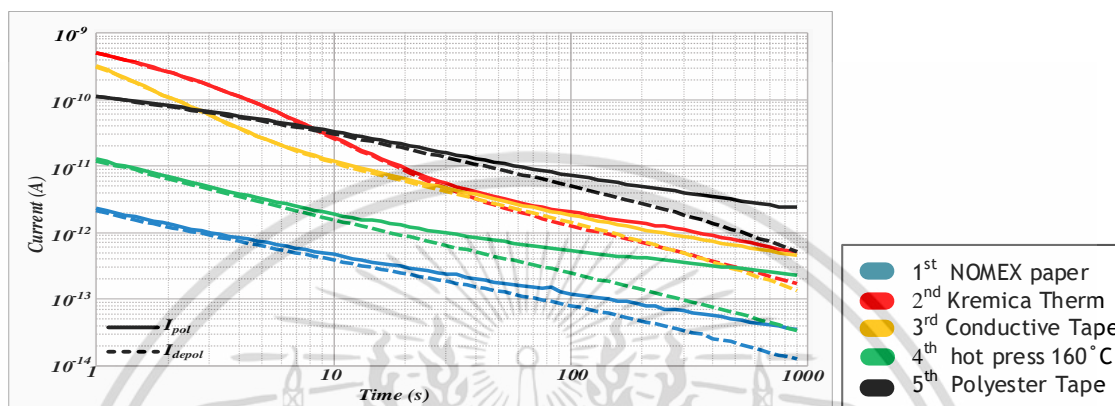
สำหรับผลการทดสอบในหัวข้อ 5.1 การทดสอบวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสตีโพลาริเซชันในแต่ละขั้นตอนการผลิตสเตเตอร์คอยล์สำหรับมอเตอร์แรงดันสูง จะแสดงผลการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสตีโพลาริเซชัน กระแสการนำไฟฟ้าไฟฟ้า ค่าความจุไฟฟ้าเชิงซ้อน และแฟคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริก ในสเกลลอการิทึม (logarithm) ส่วนผลการทดสอบในหัวข้อ 5.2 การทดสอบฉนวนของมอเตอร์ก่อนการซ่อมบำรุงและหลังการซ่อมบำรุง จะแสดงผลการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสตีโพลาริเซชัน กระแสการนำไฟฟ้าไฟฟ้า ค่าความจุไฟฟ้าเชิงซ้อน แฟคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริก ค่า IR ค่า PI และผลการเปรียบเทียบ Surge test สำหรับผลการทดสอบหัวข้อ 5.3 การทดสอบฉนวนของมอเตอร์สำรองที่ไม่ได้ใช้งานเป็นเวลานาน จะแสดงผลการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสตีโพลาริเซชัน กระแสการนำไฟฟ้าไฟฟ้า ค่าความจุไฟฟ้าเชิงซ้อน แฟคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริก ค่า IR และ ค่า PI ที่ได้จากกระแสโพลาริเซชัน

### 5.1 การทดสอบวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสตีโพลาริเซชันในแต่ละขั้นตอนการผลิตสเตเตอร์คอยล์สำหรับมอเตอร์

จากการทดลองวัดกระแสโพลาริเซชันและตีโพลาริเซชันในแต่ละขั้นตอนการผลิตสเตเตอร์คอยล์สำหรับมอเตอร์ที่มีพิกัดแรงดัน 6.6 กิโลโวลต์ ระดับฉนวนคลาส F จำนวน 5 คอยล์ โดยทำการทดลองในห้องปฏิบัติการที่ควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง 25 - 30 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์อยู่ในช่วง 50 - 70% ผลการทดลองจะแสดงผลของกระแสโพลาริเซชันและตีโพลาริเซชัน กระแสการนำไฟฟ้า ค่าความจุไฟฟ้าเชิงซ้อน และแฟคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริก ของแต่ละขั้นตอนการผลิตสเตเตอร์คอยล์ ดังรูปที่ 5.1-5.4 ตามลำดับ

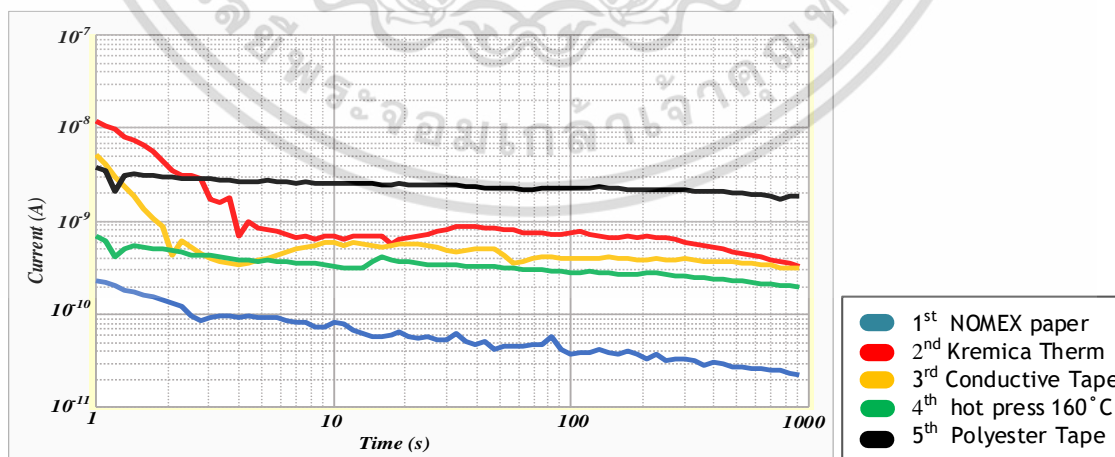
จากผลการทดลองในรูปที่ 5.1 พบว่าในขั้นตอนที่ 1 มีเพียงแค่นวน Nomex 1 ชั้น กระแสโพลาริเซชันและตีโพลาริเซชันมีรูปร่างเป็นเส้นตรงมีค่าลดลงเมื่อเวลาที่ใช้ในการวัดเพิ่มขึ้นและมีขนาดน้อยมากสุด เนื่องจากฉนวนเป็นเนื้อเดียวและความหนาของฉนวนบางที่สุด เมื่อพันฉนวนมากขึ้นในขั้นตอนที่ 2 และ 3 พบว่ากระแสโพลาริเซชันและตีโพลาริเซชันไม่เป็นเส้นตรงเนื่องจากในขั้นตอนการพันฉนวนมีการแยกชั้นไม่เป็นเนื้อเดียวกัน และมีขนาดของกระแสทั้งสองมากกว่าขั้นตอนที่ 1 เนื่องจากความหนาของฉนวนมากขึ้น หลังผ่านกระบวนการ Hot-press รูปร่างกระแสโพลาริเซชันและตีโพลาริเซชัน

กลับมาเป็นเส้นตรงอีกครั้ง เพราะน้ำยา epoxy resin ใน Kremica ละลายทำให้ฉนวนกลับมาเป็นเนื้อเดียวกัน และขนาดของกระแสที่วัดได้ลดลง หลังการพันฉนวนในบริเวณส่วนโค้งค่ากระแสโพลารไรเซชันและดีโพลารไรเซชันที่วัดได้มีการเปลี่ยนแปลงคือมีค่าสูงมากขึ้น



รูปที่ 5.1 กระแสโพลารไรเซชันและกระแสดีโพลารไรเซชันในแต่ละขั้นตอนการผลิตสเตเตอร์คอยล์สำหรับมอเตอร์ที่มีพิกัดแรงดัน 6.6 กิโลโวลต์

จากผลการทดลองในรูปที่ 5.2 พบว่าในขั้นตอนที่ 1 กระแสการนำไฟฟ้ามีขนาดน้อยมากที่สุด เนื่องจากความหนาของฉนวนน้อยที่สุด เมื่อพันฉนวนมากขึ้นในขั้นตอนที่ 2, 3 และ 4 พบว่าขนาดของกระแสการนำไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นมากกว่าขั้นตอนที่ 1 เนื่องจากความหนาของฉนวนมากขึ้น หลังการพันฉนวนในบริเวณส่วนโค้งค่ากระแสการนำไฟฟ้ามากกว่าขั้นตอนที่ 2, 3 และ 4 เนื่องจากมีปริมาตรของฉนวนมากขึ้นและความหนาของฉนวนในส่วนโค้งเพิ่มมากขึ้นด้วย

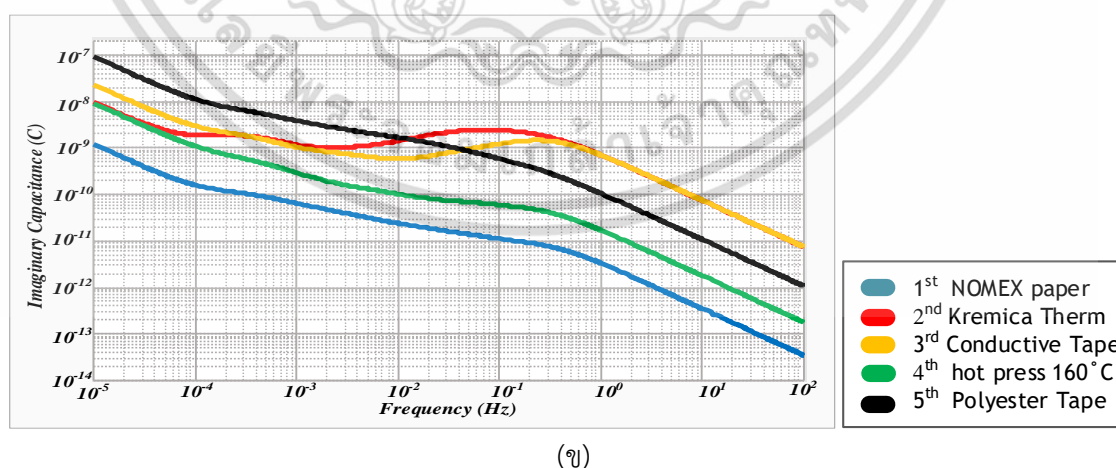
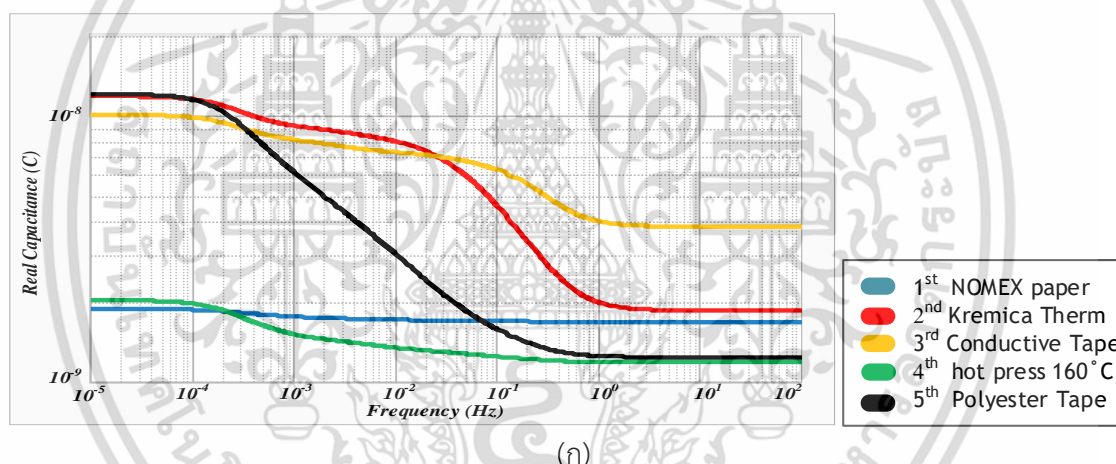


รูปที่ 5.2 กระแสการนำไฟฟ้าของในแต่ละขั้นตอนการผลิตสเตเตอร์คอยล์สำหรับมอเตอร์ที่มีพิกัดแรงดัน 6.6 กิโลโวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

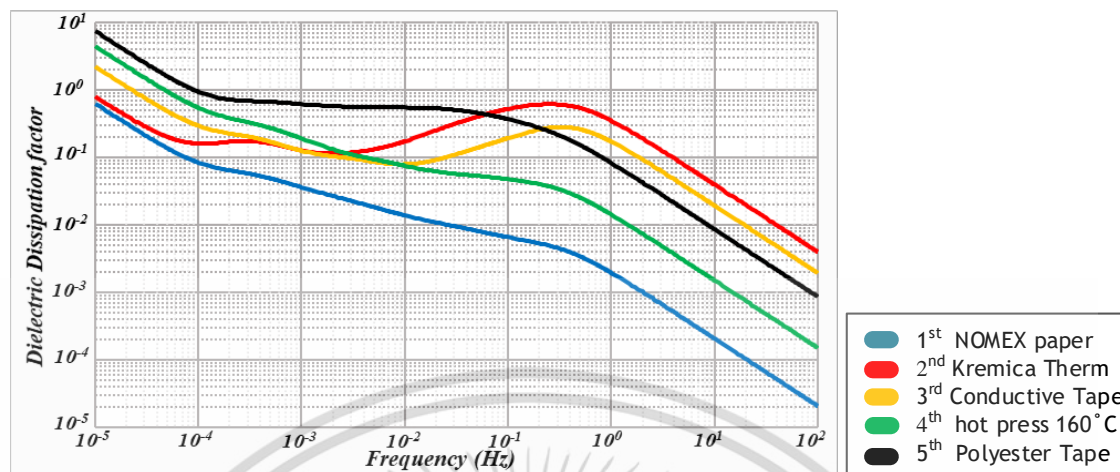
จากผลการทดลองในรูปที่ 5.3 แสดงค่าความจุไฟฟ้าเชิงซ้อน โดยค่าความจุไฟฟ้าจริง จะแบ่งการพิจารณาเป็น 2 ส่วนคือช่วงความถี่สูง (1 Hz - 100 Hz) และช่วงความถี่ต่ำ ( $10^{-5}$  Hz - 1 Hz) ค่าความจุไฟฟ้าจริงช่วงความถี่สูงจะบ่งบอกถึงค่าความจุไฟฟ้าอันเนื่องมาจากโครงสร้างฉนวน ค่าความจุไฟฟ้าจริงช่วงความถี่ต่ำจะบ่งบอกความเป็นเนื้อเดียวกันของฉนวน เมื่อฉนวนมีการแยกชั้นในชั้นตอนที่ 2, 3 และ 5 จะมีค่าสูง เมื่อฉนวนเป็นเนื้อเดียวกันในชั้นตอนที่ 1 และชั้นตอนที่ 4 สเตเตอร์คอยล์ผ่านกระบวนการ Hot-press ขนาดของค่าความจุไฟฟ้าจริงช่วงความถี่ต่ำจะมีค่าต่ำ

ค่าความจุไฟฟ้าจินตภาพและแฟคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกในรูปที่ 5.3ข และ 5.4 มีแนวโน้มและลักษณะกราฟคล้ายกันทั้งสองกราฟเป็นกราฟที่บ่งบอกถึงค่าความสูญเสียในเนื้อฉนวนโดยฉนวนที่มีการแยกชั้นในชั้นตอนที่ 2 และ 3 จะมีค่าสูงกว่าฉนวนที่เป็นเนื้อเดียวในชั้นตอนที่ 4 และผลของการพันฉนวนในส่วนโค้งที่พันร่องสลิตทำให้ค่าความจุไฟฟ้าจินตภาพและแฟคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกเพิ่มขึ้น



รูปที่ 5.3 ค่าความจุไฟฟ้าเชิงซ้อนในแต่ละชั้นตอนการผลิตสเตเตอร์คอยล์สำหรับมอเตอร์ที่มีพิกัดแรงดัน 6.6 กิโลโวลต์ (ก) ความจุไฟฟ้าจริง (ข) ความจุไฟฟ้าจินตภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.4 แพคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกในแต่ละขั้นตอนการผลิตสเตเตอร์คอยล์สำหรับมอเตอร์ที่มี พิกัดแรงดัน 6.6 กิโลโวลต์

## 5.2 การทดสอบฉนวนของมอเตอร์ก่อนการซ่อมบำรุงและหลังการซ่อมบำรุง

ในหัวข้อนี้ได้ทำการทดลองกับมอเตอร์จำนวน 4 ตัว โดยวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน, การทดสอบความต้านทานฉนวน การทดสอบค่าดัชนีโพลาริเซชัน และการทดสอบเปรียบเทียบเสิร์จ ของมอเตอร์ก่อนการซ่อมบำรุงและหลังการซ่อมบำรุง

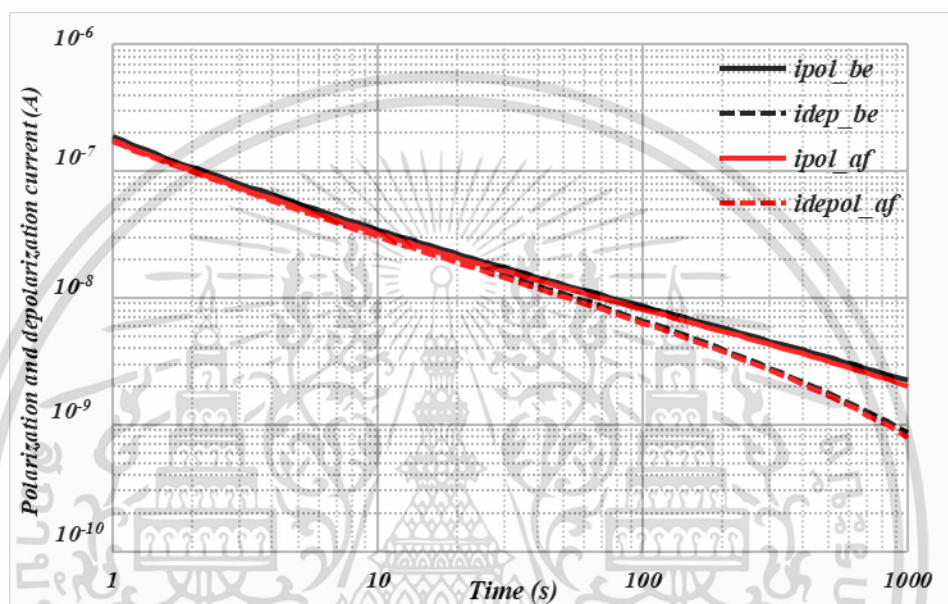
### 5.2.1 การทดสอบฉนวนของมอเตอร์ A

มอเตอร์ A เป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส พิกัดแรงดัน 6.6 กิโลโวลต์ ขนาดกำลัง 240 กิโลวัตต์ ระดับฉนวนคลาส F ก่อนการซ่อมบำรุงพบว่าที่ผิวของฉนวนสเตเตอร์คอยล์มีฝุ่นเกาะอยู่เล็กน้อย หลังจากนั้นนำมอเตอร์มาซ่อมบำรุงโดยการล้างสเตเตอร์ ทาสีเคลือบวานิช และอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 ชั่วโมง หลังการซ่อมบำรุงมอเตอร์ไม่พบสิ่งปนเปื้อนที่ผิวของสเตเตอร์คอยล์

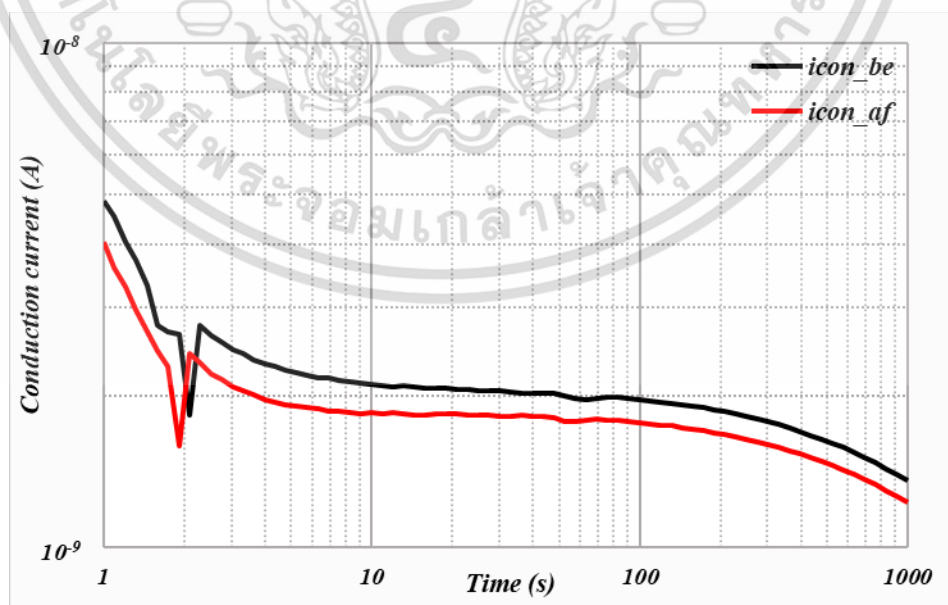
#### 5.2.1.1 การทดสอบวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันสำหรับมอเตอร์ A

จากการทดลองวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของมอเตอร์ A ที่มีพิกัดแรงดัน 6.6 กิโลโวลต์ ระดับฉนวนคลาส F ก่อนการซ่อมบำรุงและหลังการซ่อมบำรุง จะแสดงผลของกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน กระแสการนำไฟฟ้า ค่าความจุไฟฟ้าเชิงซ้อน และแพคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริก ดังรูปที่ 5.5-5.8 ตามลำดับ จากกราฟพบว่าค่ากระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน ค่าความจุไฟฟ้าจินตภาพ และแพคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกของมอเตอร์ A ก่อนการซ่อมบำรุง

และหลังการซ่อมบำรุงมีค่าเท่ากัน แต่ค่ากระแสการนำไฟฟ้าของมอเตอร์ A หลังผ่านการ Overhaul มีค่าลดลงเนื่องจากหลัง Overhaul สิ่งสกปรกที่ผิวของฉนวนลดลง ค่าความจุไฟฟ้าจริงที่ความถี่ต่ำของมอเตอร์ A หลังผ่านการ Overhaul มีค่าลดลงเช่นกันเนื่องจากการ Overhaul มีการอบทำให้ฉนวนเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น

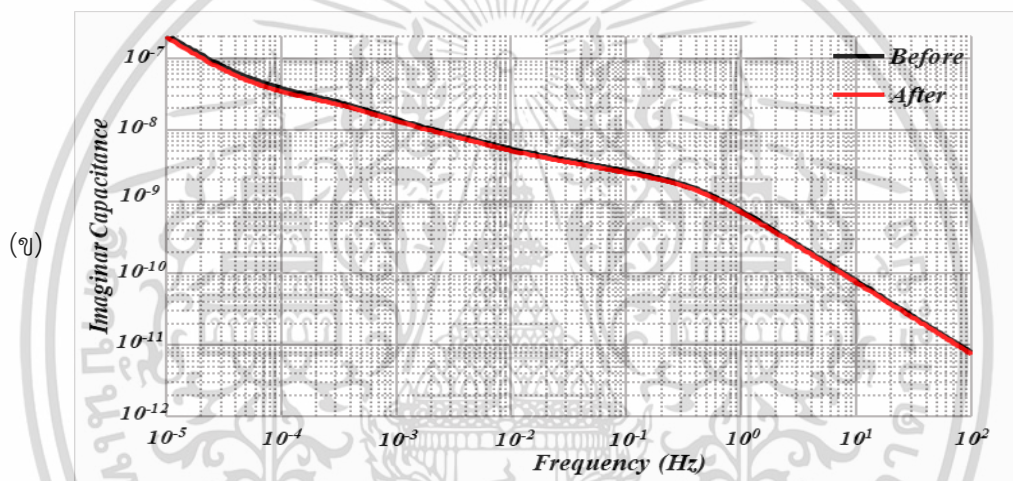
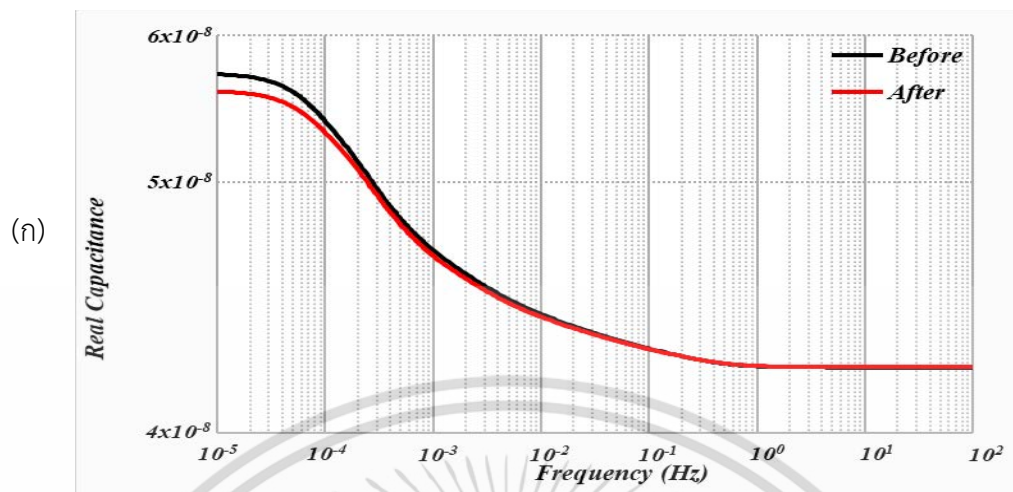


รูปที่ 5.5 กระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันของมอเตอร์ A ก่อนการซ่อมบำรุงและหลังการซ่อมบำรุง



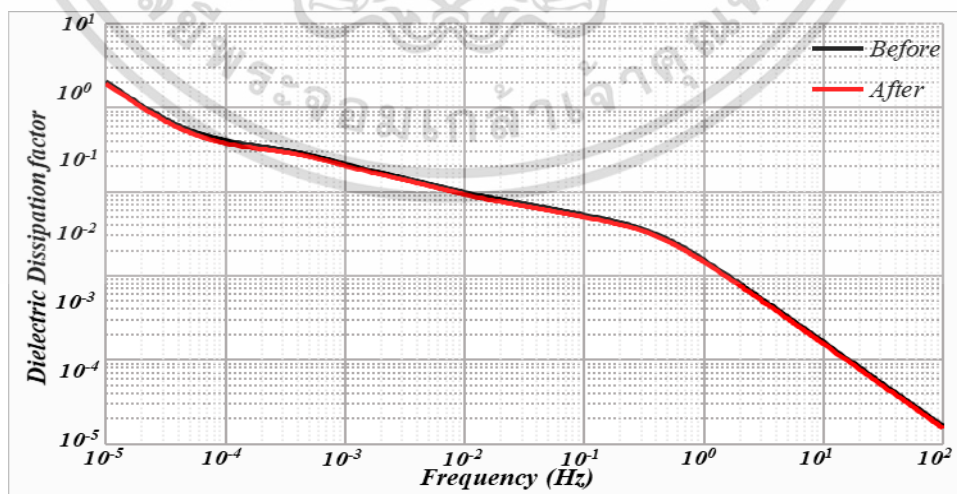
รูปที่ 5.6 กระแสการนำไฟฟ้าของมอเตอร์ A ก่อนการซ่อมบำรุงและหลังการซ่อมบำรุง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.7 ค่าความจุไฟฟ้าเชิงซ้อนของมอเตอร์ A ก่อนการซ่อมบำรุงและหลังการซ่อมบำรุง

(ก) ความจุไฟฟ้าจริง (ข) ความจุไฟฟ้าจินตภาพ



รูปที่ 5.8 แฟคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกของมอเตอร์ A ก่อนการซ่อมบำรุงและหลังการซ่อมบำรุง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.2.1.2 ผลการทดสอบความต้านทานฉนวน การทดสอบค่าดัชนีโพลาไรเซชัน และการทดสอบเปรียบเทียบเสิร์จ ของมอเตอร์ A

ในช่วง 1 นาทีแรกพบว่าค่าความต้านทานฉนวนหลังซ่อมบำรุงมีค่ามากขึ้น แต่เมื่อวัดความต้านทานฉนวนต่อไปที่ 10 นาที พบว่ามีค่าลดลง ค่าดัชนีโพลาไรเซชันหลังซ่อมมีค่าน้อยลงจาก 3.95 เหลือ 3.22 เมื่อเปรียบเทียบแรงดันเสิร์จพบว่าพัลส์ทับกันถือว่าฉนวนไม่มีการ short turn

ตารางที่ 5.1 แสดงผลการวัดความต้านทานฉนวน การทดสอบค่าดัชนีโพลาไรเซชัน และการทดสอบเปรียบเทียบเสิร์จ ของมอเตอร์ A ก่อนการซ่อมบำรุงและหลังการซ่อมบำรุง

ก่อนการซ่อมบำรุง	หลังการซ่อมบำรุง
IR 1 min : 7.07 GΩ	IR 1 min : 7.48 GΩ
IR 10 min : 28.0 GΩ	IR 10 min : 25.1 GΩ
PI : 3.95	PI : 3.22

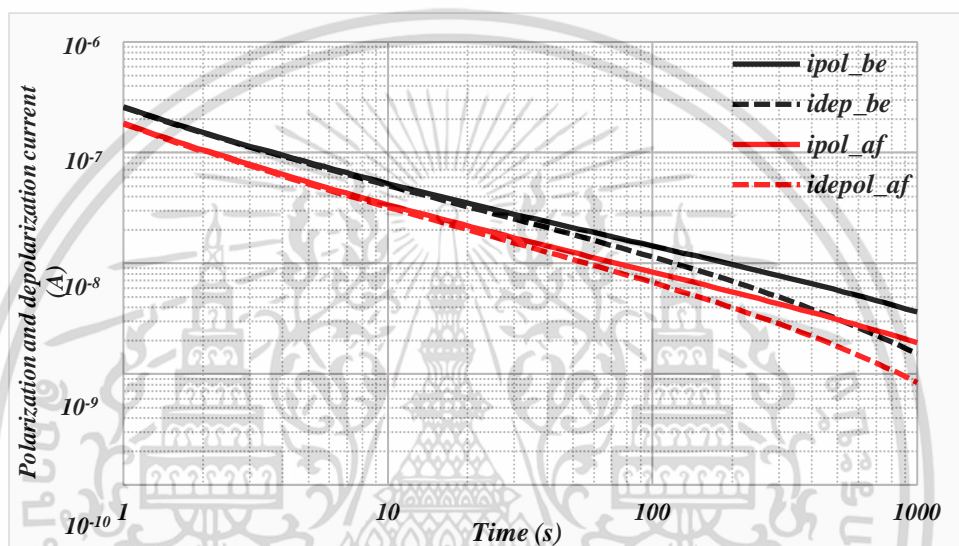
### 5.2.2 การทดสอบฉนวนของมอเตอร์ B

เป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส พิกัดแรงดัน 6.6 กิโลโวลต์ ขนาดกำลัง 240 กิโลวัตต์ ระดับฉนวนคลาส F ก่อนการซ่อมบำรุงพบว่าที่ผิวของฉนวนสเตเตอร์คอยล์มีฝุ่นเกาะอยู่เล็กน้อย หลังจากนั้นนำมอเตอร์มาซ่อมบำรุงโดยการล้างสเตเตอร์ ทาสีเคลือบวานิช และอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง หลังการซ่อมบำรุงมอเตอร์ไม่พบสิ่งปนเปื้อนที่ผิวของสเตเตอร์คอยล์

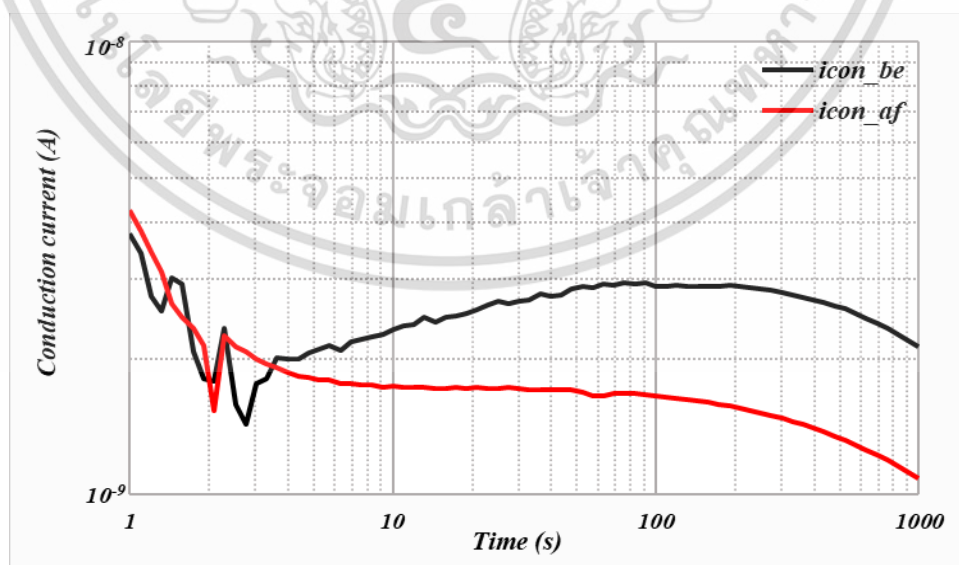
#### 5.2.2.1 การทดสอบวัดกระแสโพลาไรเซชันและกระแสตีโพลาไรเซชันสำหรับมอเตอร์ B

จากการทดลองวัดกระแสโพลาไรเซชันและตีโพลาไรเซชันของมอเตอร์ B ที่มีพิกัดแรงดัน 6.6 กิโลโวลต์ ระดับฉนวนคลาส F ก่อนการซ่อมบำรุงและหลังการซ่อมบำรุง จะแสดงผลของกระแสโพลา

โรเซชันและดีโพลาริเซชัน ดังรูปที่ 5.9 พบว่ากระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันก่อนการซ่อมบำรุงมีค่าสูงกว่าหลังซ่อมบำรุง ในทำนองเดียวกันกับกระแสการนำไฟฟ้าในรูปที่ 5.10 กระแสการนำไฟฟ้าก่อนการซ่อมบำรุงมีค่าสูงกว่าหลังซ่อมบำรุงเนื่องจากความชื้นในเนื้อฉนวนลดลงและสิ่งสกปรกที่ผิวได้ถูกนำออก ค่าความจุไฟฟ้าเชิงซ้อน และแพคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริก ดังรูปที่ 5.11-5.12 ตามลำดับ ก่อนการซ่อมบำรุงและหลังการซ่อมบำรุงมีค่าใกล้เคียงกันแสดงว่าโครงสร้างภายในของฉนวนแทบจะไม่เปลี่ยนแปลงหลังซ่อมบำรุง

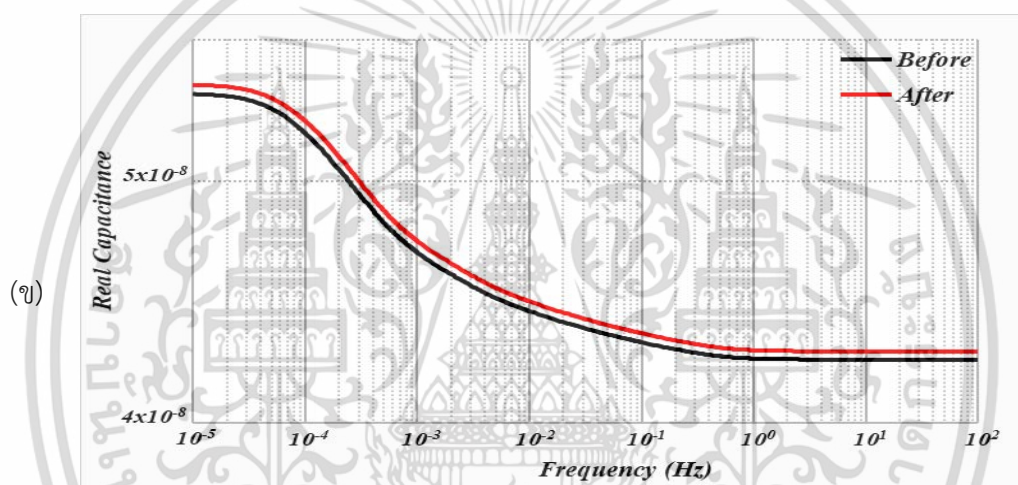
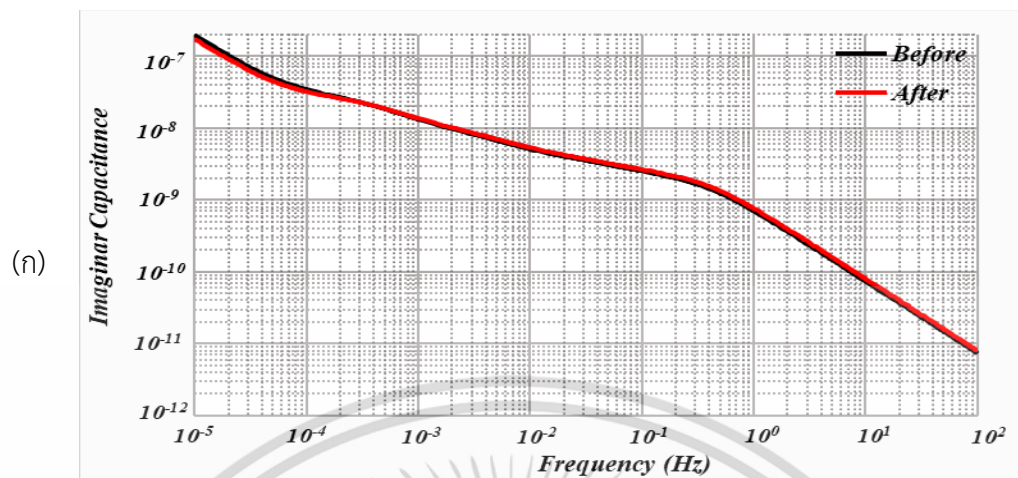


รูปที่ 5.9 กระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันของมอเตอร์ B ก่อนการซ่อมบำรุงและหลังการซ่อมบำรุง



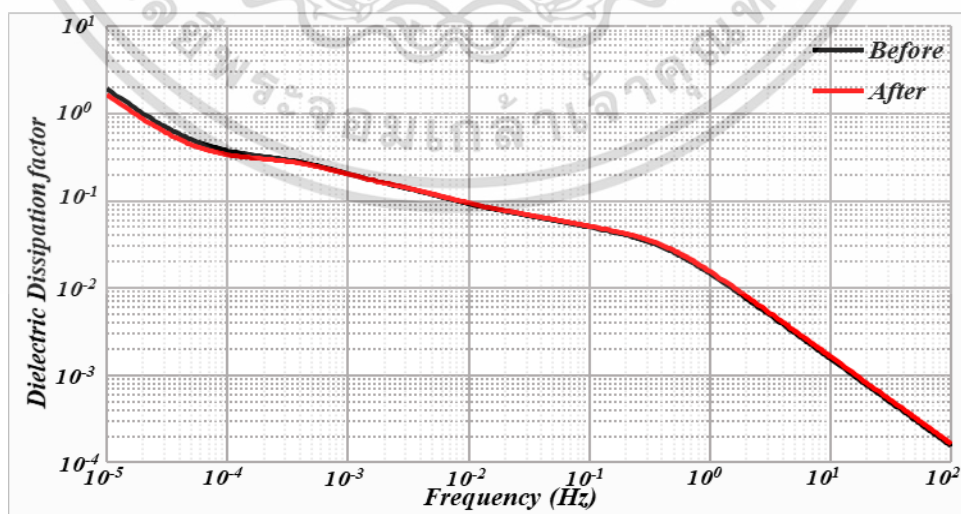
รูปที่ 5.10 กระแสการนำไฟฟ้าไฟฟ้ของมอเตอร์ B ก่อนการซ่อมบำรุงและหลังการซ่อมบำรุง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.11 ค่าความจุไฟฟ้าเชิงซ้อนของมอเตอร์ B ก่อนการซ่อมบำรุงและหลังการซ่อมบำรุง

(ก) ความจุไฟฟ้าจริง (ข) ความจุไฟฟ้าจินตภาพ



รูปที่ 5.12 แฟคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกของมอเตอร์ B ก่อนการซ่อมบำรุงและหลังการซ่อมบำรุง


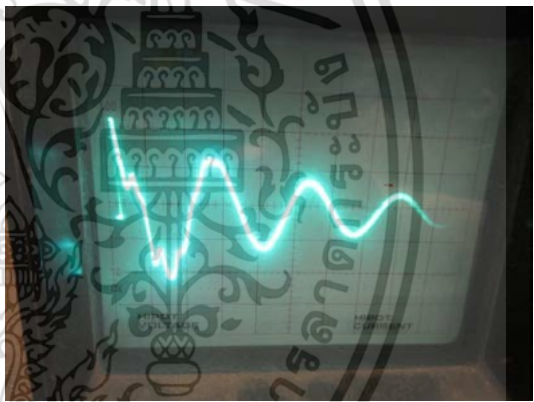
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.2.2.2 ผลการทดลอง การทดสอบความต้านทานฉนวน การทดสอบค่าดัชนีโพลาไรไรเซชัน และการทดสอบเปรียบเทียบเสิร์จ ของมอเตอร์ B

ค่าความต้านทานฉนวนในช่วง 1 นาทีแรกของมอเตอร์หลังซ่อมบำรุงมีค่ามากขึ้นแต่เมื่อวัดต่อไปที่ 10 นาที พบว่ามีค่าลดลง ค่าดัชนีโพลาไรไรเซชัน หลังซ่อมมีค่าน้อยลงจาก 3.88 เหลือ 3.13 เมื่อเปรียบเทียบแรงดันเสิร์จพบว่าพัลส์ทับกันถือว่าฉนวนไม่มีการ short turn

ตารางที่ 5.2 แสดงผลการวัดความต้านทานฉนวน การทดสอบค่าดัชนีโพลาไรไรเซชัน และการทดสอบเปรียบเทียบเสิร์จ ของมอเตอร์ B ก่อนการซ่อมบำรุงและหลังการซ่อมบำรุง

ก่อนการซ่อมบำรุง	หลังการซ่อมบำรุง
IR 1 min : 5.88 GΩ	IR 1 min : 7.60 GΩ
IR 10 min : 18.91 GΩ	IR 10 min : 23.8 GΩ
PI : 3.88	PI : 3.13

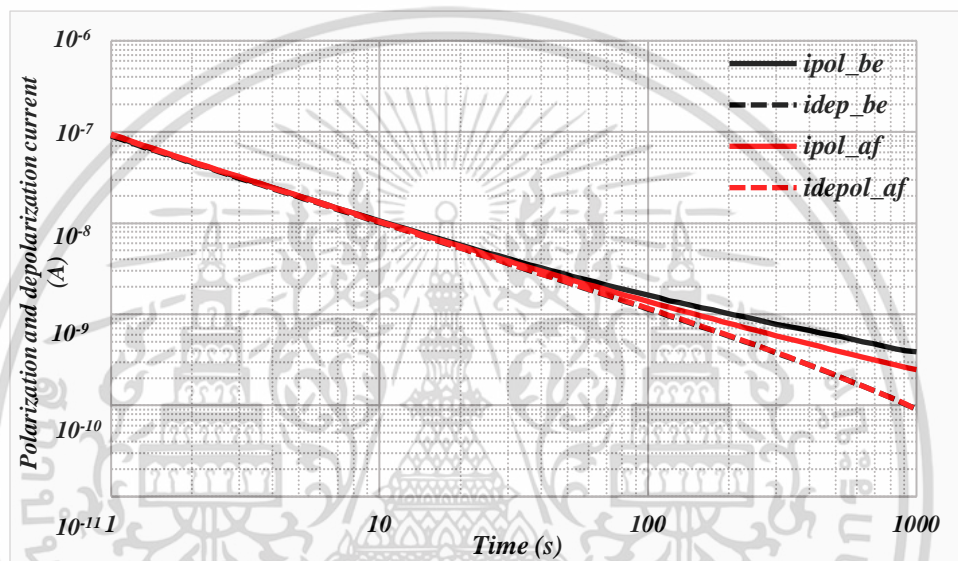
### 5.2.3 การทดสอบฉนวนของมอเตอร์ C

เป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส พิกัดแรงดัน 6.6 กิโลโวลต์ ขนาดกำลัง 240 กิโลวัตต์ ระดับฉนวนคลาส F ก่อนการซ่อมบำรุงพบว่าที่ผิวของฉนวนสเตเตอร์คอยล์มีฝุ่นเกาะอยู่เล็กน้อย หลังจากนั้นนำมอเตอร์มาซ่อมบำรุงโดยการล้างสเตเตอร์ ทาสีเคลือบวานิช และอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง หลังการซ่อมบำรุงมอเตอร์ไม่พบสิ่งปนเปื้อนที่ผิวของสเตเตอร์คอยล์

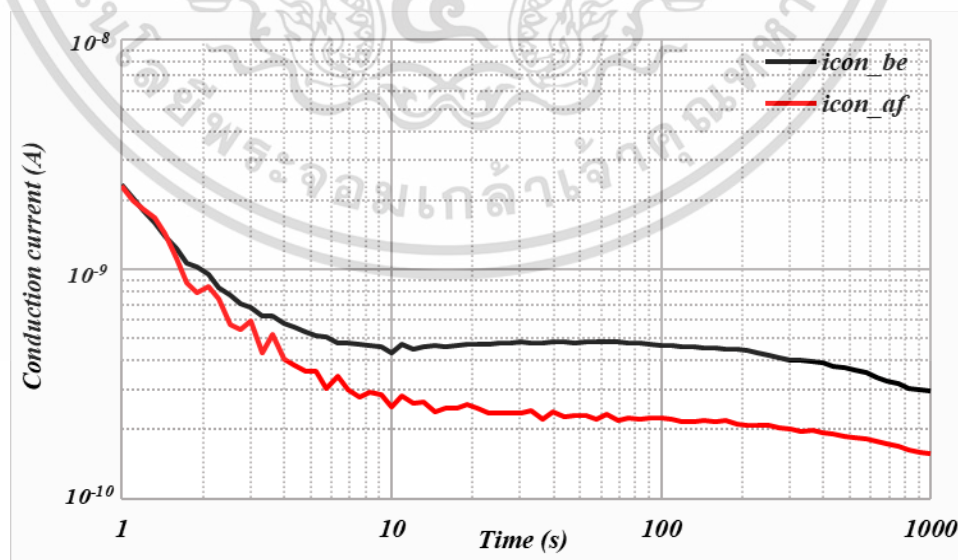
#### 5.2.3.1 การทดสอบวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันสำหรับมอเตอร์ C

จากการทดลองวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของมอเตอร์ C ที่มีพิกัดแรงดัน 6.6 กิโลโวลต์ ระดับฉนวนคลาส F ก่อนการซ่อมบำรุงและหลังการซ่อมบำรุง จะแสดงผลของ

กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน ดังรูปที่ 5.13 พบว่ากระแสโพลาริเซชันของมอเตอร์ C ก่อนการซ่อมบำรุงที่เวลามากกว่า 100 วินาที มีค่ามากกว่ากระแสโพลาริเซชันของมอเตอร์ C หลังการซ่อมบำรุง ผลของกระแสการนำไฟฟ้าก่อนการซ่อมบำรุงมีค่ามากกว่ากระแสการนำไฟฟ้าหลังการซ่อมบำรุง ส่วนค่าความจุไฟฟ้าจริงก่อนการซ่อมบำรุงมีค่าน้อยกว่าค่าความจุไฟฟ้าจริงหลังการซ่อมบำรุง ดังรูปที่ 5.15ก ค่าความจุไฟฟ้าจินตภาพและแพคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกในช่วงความถี่ต่ำก่อนการซ่อมบำรุงมีค่ามากกว่าหลังการซ่อมบำรุง ดังรูปที่ 5.15ข -5.16 ตามลำดับ

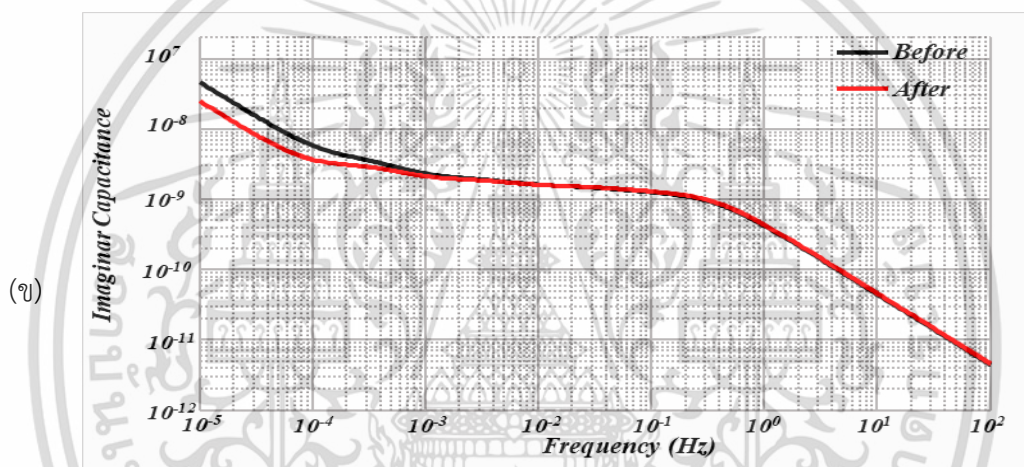
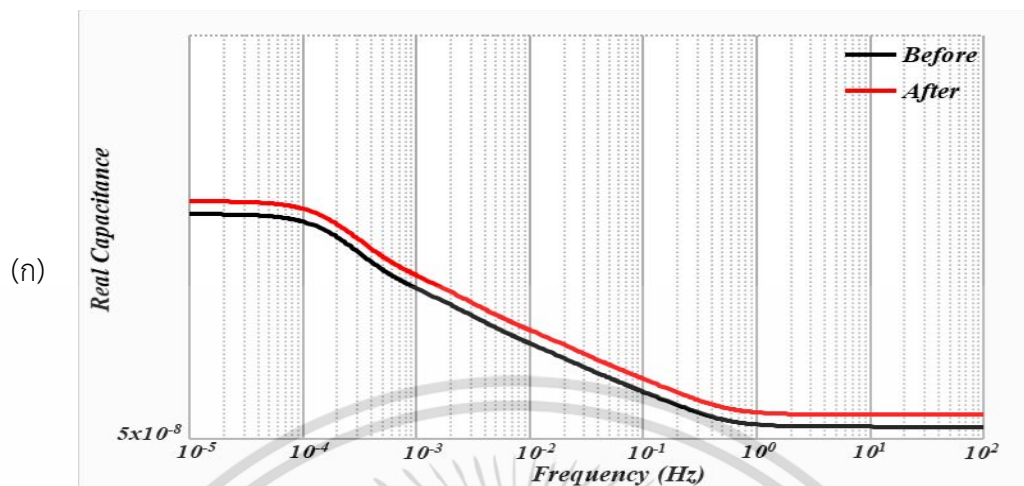


รูปที่ 5.13 กระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันของมอเตอร์ C ก่อนการซ่อมบำรุงและหลังการซ่อมบำรุง



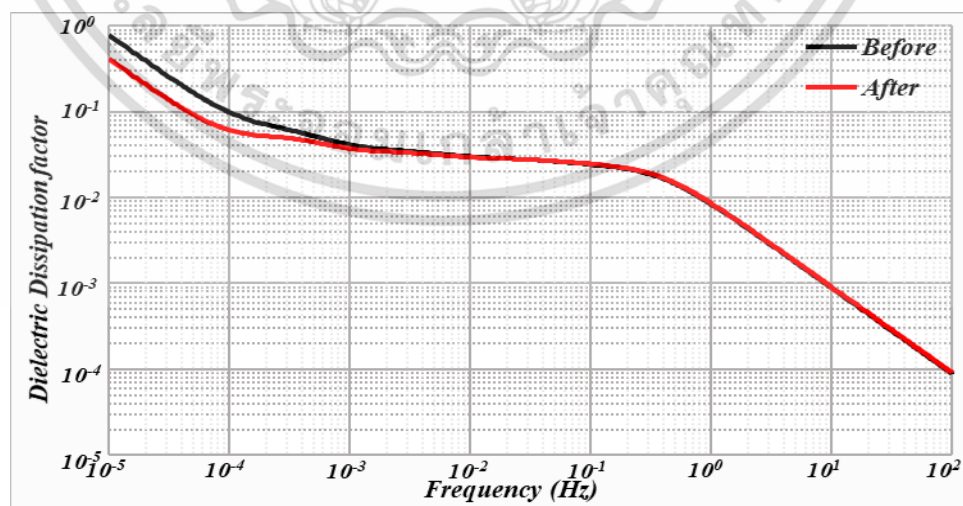
รูปที่ 5.14 กระแสการนำไฟฟ้าของมอเตอร์ C ก่อนการซ่อมบำรุงและหลังการซ่อมบำรุง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.15 ค่าความจุไฟฟ้าเชิงซ้อนของมอเตอร์ C ก่อนการซ่อมบำรุงและหลังการซ่อมบำรุง

(ก) ความจุไฟฟ้าจริง (ข) ความจุไฟฟ้าจินตภาพ



รูปที่ 5.16 แพลคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกของมอเตอร์ C ก่อนการซ่อมบำรุงและหลังการซ่อมบำรุง


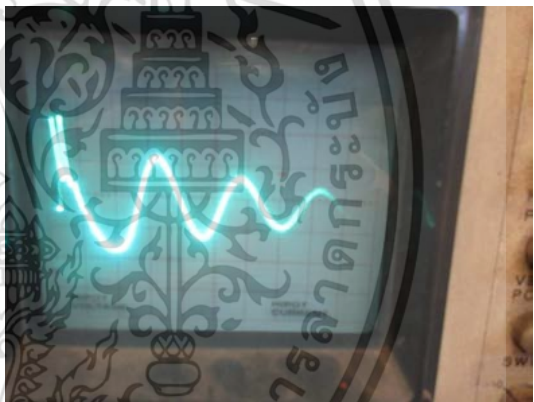
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.2.3.2 ผลการทดลอง การทดสอบความต้านทานฉนวน การทดสอบค่าดัชนีโพลาไรไรเซชัน และการทดสอบเปรียบเทียบเสิร์จ ของมอเตอร์ C

ค่า ความต้านทานฉนวน ในช่วง 1 นาทีแรก หลังซ่อมบำรุงมีค่ามากขึ้นแต่เมื่อวัดต่อไปที่ 10 นาที พบว่ามีค่าลดลง ค่า ค่าดัชนีโพลาไรไรเซชัน หลังซ่อมมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 1.62 เป็น 2.08 เมื่อเปรียบเทียบแรงดันเสิร์จพบว่าพัลส์ทับกันถือว่าฉนวนไม่มีการ short turn

ตารางที่ 5.3 แสดงผลการวัดความต้านทานฉนวน การทดสอบค่าดัชนีโพลาไรไรเซชัน และการทดสอบเปรียบเทียบเสิร์จ ของมอเตอร์ C ก่อนการซ่อมบำรุงและหลังการซ่อมบำรุง

ก่อนการซ่อมบำรุง	หลังการซ่อมบำรุง
IR 1 min : 16.6 GΩ	IR 1 min : 15.6GΩ
IR 10 min : 27.0 GΩ	IR 10 min : 32.5 GΩ
PI : 1.62	PI : 2.08

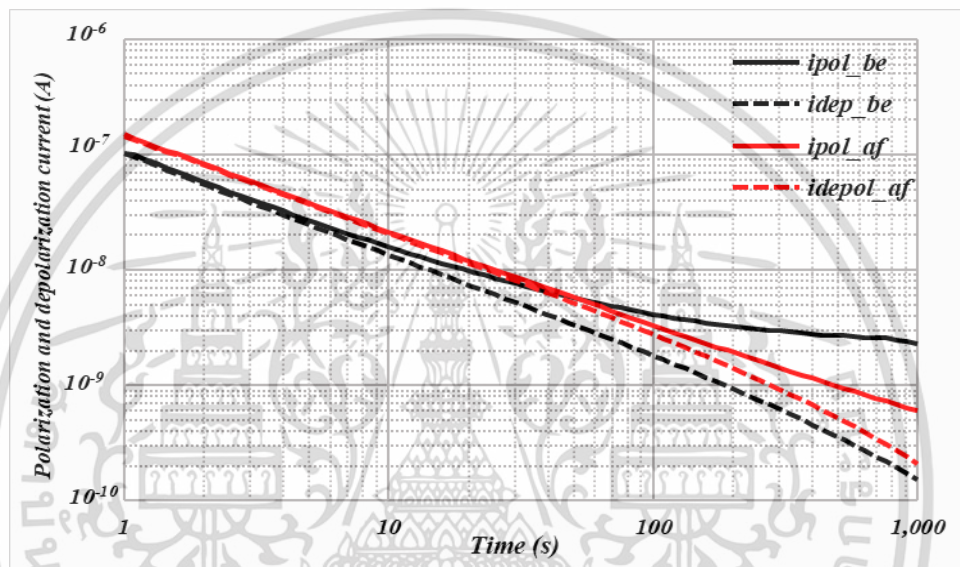
### 5.2.4 การทดสอบฉนวนของมอเตอร์ D

เป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส พิกัดแรงดัน 6.6 กิโลโวลต์ ขนาดกำลัง 400 กิโลวัตต์ ระดับฉนวนคลาส F ก่อนการซ่อมบำรุงพบว่าที่ผิวของฉนวนสเตเตอร์คอยล์มีฝุ่นเกาะอยู่เล็กน้อย หลังจากนั้นนำมอเตอร์มาซ่อมบำรุงโดยการล้างสเตเตอร์ ทาสีเคลือบวานิช และอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง หลังการซ่อมบำรุงมอเตอร์ไม่พบสิ่งปนเปื้อนที่ผิวของสเตเตอร์คอยล์

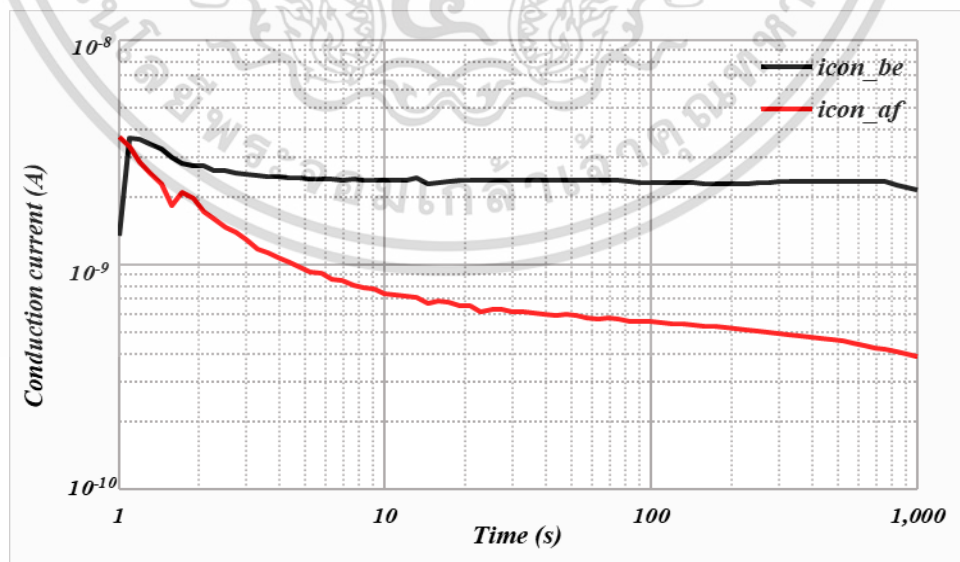
#### 5.2.4.1 การทดสอบวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันสำหรับมอเตอร์ D

จากการทดลองวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของมอเตอร์ D ที่มีพิกัดแรงดัน 6.6 กิโลโวลต์ ระดับฉนวนคลาส F ก่อนการซ่อมบำรุงและหลังการซ่อมบำรุง จะแสดงผลของ

กระแสโพลาริเซชันหลังการซ่อมบำรุงมีค่ามากกว่ากระแสโพลาริเซชันก่อนการซ่อมบำรุงในช่วง 20 วินาทีแรก ส่วนกระแสดีโพลาริเซชันหลังการซ่อมบำรุงมีค่ามากกว่ากระแสดีโพลาริเซชันก่อนการซ่อมบำรุงดังรูปที่ 5.17 ผลของกระแสการนำไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 5.18 หลังการ Overhaul กระแสการนำไฟฟ้าลดลง ส่วนค่าความจุไฟฟ้าจริงก่อนการซ่อมบำรุงมีค่าน้อยกว่าค่าความจุไฟฟ้าจริงหลังการซ่อมบำรุง ดังรูปที่ 5.19ก ค่าความจุไฟฟ้าจินตภาพและแพคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกที่ช่วงความถี่ต่ำก่อนการซ่อมบำรุงมีค่ามากกว่าหลังการซ่อมบำรุง ดังรูปที่ 5.19ข - 5.20 ตามลำดับ

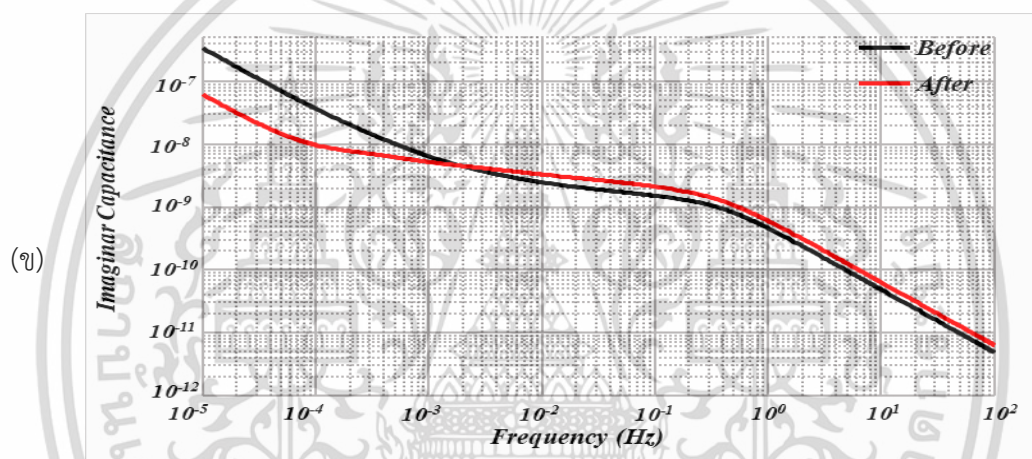
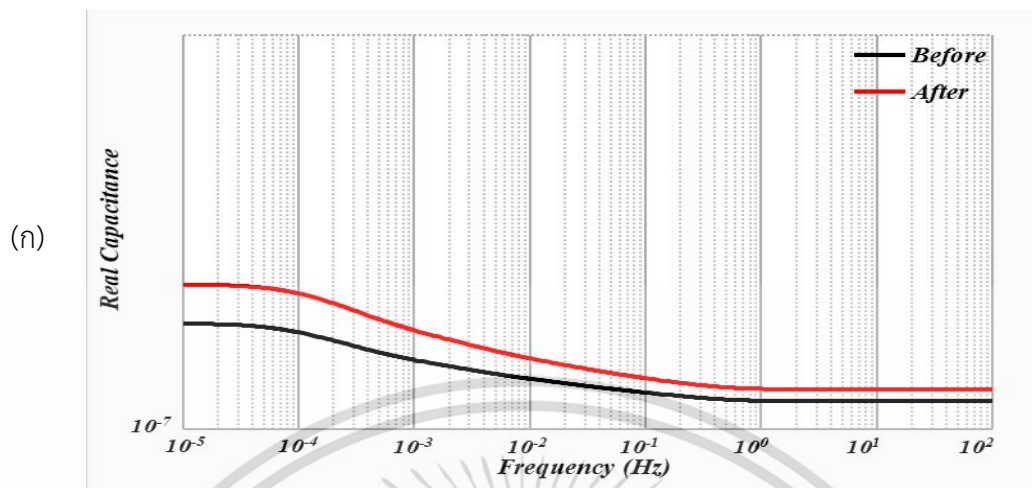


รูปที่ 5.17 กระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันของมอเตอร์ D ก่อนการซ่อมบำรุงและหลังการซ่อมบำรุง

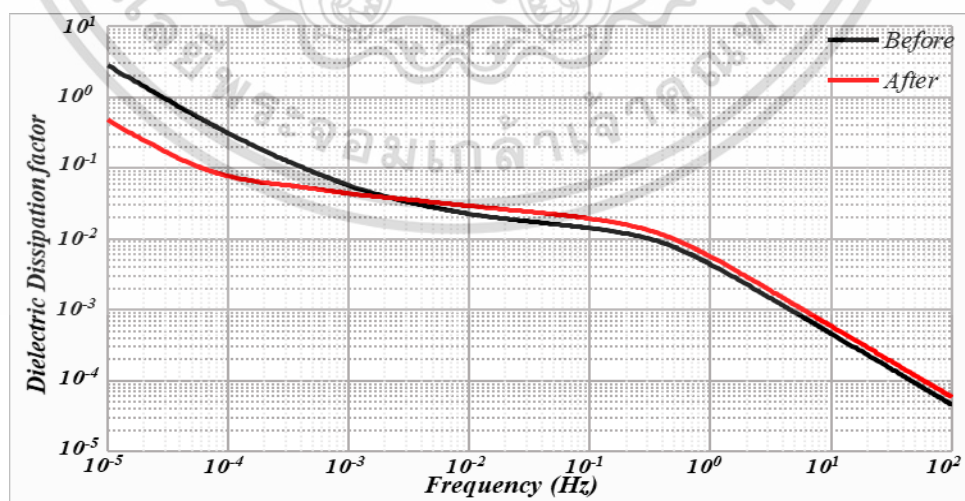


รูปที่ 5.18 กระแสการนำไฟฟ้าของมอเตอร์ D ก่อนการซ่อมบำรุงและหลังการซ่อมบำรุง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.19 ค่าความจุไฟฟ้าเชิงซ้อนของมอเตอร์ D ก่อนการซ่อมบำรุงและหลังการซ่อมบำรุง (ก) ความจุไฟฟ้าจริง (ข) ความจุไฟฟ้าจินตภาพ



รูปที่ 5.20 แฟคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกของมอเตอร์ D ก่อนการซ่อมบำรุงและหลังการซ่อมบำรุง


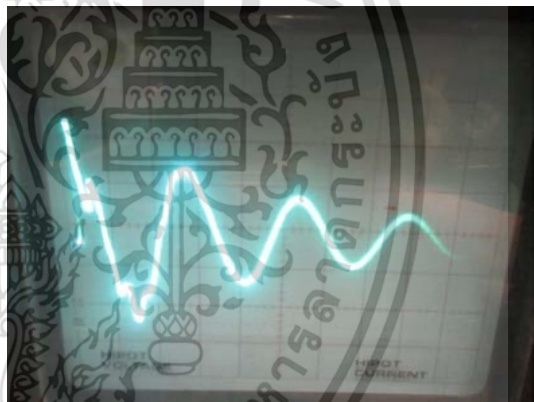
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.2.4.2 ผลการทดลอง การทดสอบความต้านทานฉนวน การทดสอบค่าดัชนีโพลาไรเซชัน และการทดสอบเปรียบเทียบเสิร์จ ของมอเตอร์ D

ค่าความต้านทานฉนวนในช่วง 1 นาทีแรกหลังซ่อมบำรุงมีค่ามากขึ้น แต่เมื่อวัดต่อไปที่ 10 นาที พบว่าค่าความต้านทานฉนวนมีค่าลดลง ค่าดัชนีโพลาไรเซชัน หลังซ่อมมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 2.96 เหลือ 3.83 เมื่อเปรียบเทียบแรงดันเสิร์จพบว่าพัลส์ทับกันถือว่าฉนวนไม่มีการ short turn

ตารางที่ 5.4 แสดงผลการวัดความต้านทานฉนวน การทดสอบค่าดัชนีโพลาไรเซชัน และการทดสอบเปรียบเทียบเสิร์จ ของมอเตอร์ D ก่อนการซ่อมบำรุงและหลังการซ่อมบำรุง

ก่อนการซ่อมบำรุง	หลังการซ่อมบำรุง
IR 1 min : <u>19.1</u> GΩ	IR 1 min : <u>18.01</u> GΩ
IR 10 min : <u>56.7</u> GΩ	IR 10 min : <u>69.0</u> GΩ
PI : 2.96	PI : 3.83

### 5.3 การทดสอบฉนวนของมอเตอร์สำรองที่ไม่ได้ใช้งานเป็นเวลานาน

ในหัวข้อนี้ได้ทำการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน, ความต้านทานฉนวน (IR) และ Polarization Index (PI) ของมอเตอร์สำรองที่ไม่ได้ใช้งานเป็นเวลานานจำนวน 4 ตัว ได้แก่

**มอเตอร์ M1 :** เป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส พิกัดแรงดัน 6.6 กิโลโวลต์ ขนาดกำลัง 300 แรงม้า ระดับฉนวนคลาส F ทำหน้าที่เป็นมอเตอร์ไครฟ์หินปูน ใช้งานครั้งสุดท้ายเมื่อวันที่ 11 ต.ค. 2560 ไม่ได้ใช้งานเป็นเวลา 24 เดือน

**มอเตอร์ M2 :** เป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส พิกัดแรงดัน 6.6 กิโลโวลต์ ขนาดกำลัง 350 แรงม้า ระดับฉนวนคลาส F ทำหน้าที่เป็นมอเตอร์บีม ใช้งานครั้งสุดท้ายเมื่อวันที่ 25 พ.ค. 2561 ไม่ได้ใช้งานเป็นเวลา 17 เดือน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**มอเตอร์ M3 :** เป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส พิกัดแรงดัน 6.6 กิโลโวลต์ ขนาดกำลัง 400 แรงม้า ระดับฉนวนคลาส F ทำหน้าที่เป็นมอเตอร์โบลเวอร์หินปูนแรงดันสูง ใช้งานครั้งสุดท้ายเมื่อวันที่ 30 พ.ย. 2561 ไม่ได้ใช้งานเป็นเวลา 11 เดือน

**มอเตอร์ M4 :** เป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส พิกัดแรงดัน 6.6 กิโลโวลต์ ขนาดกำลัง 400 แรงม้า ระดับฉนวนคลาส F ทำหน้าที่เป็นมอเตอร์โดรฟ์หินปูน ใช้งานครั้งสุดท้ายเมื่อวันที่ 7 ธ.ค. 2561 ไม่ได้ใช้งานเป็นเวลา 10 เดือน

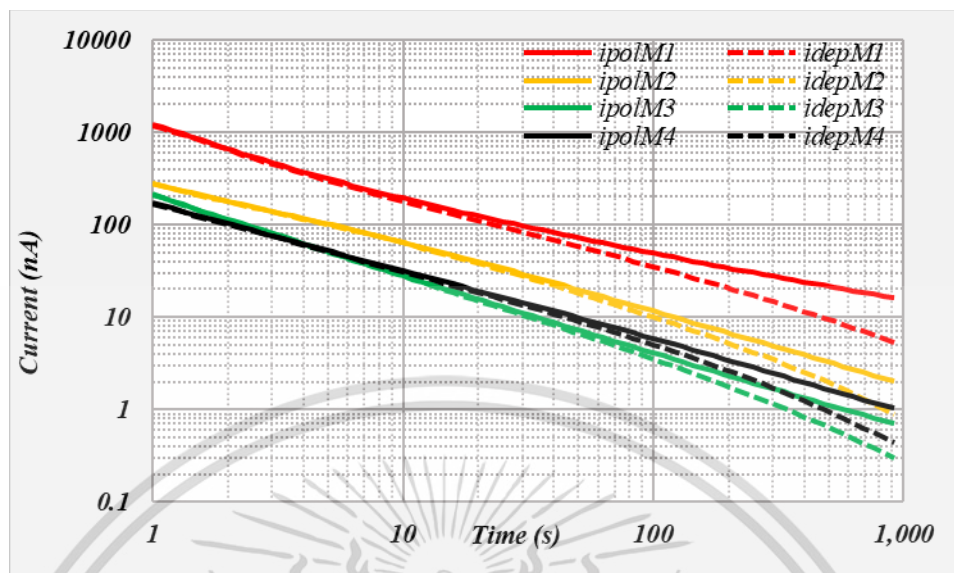
แล้วเปรียบเทียบผลของกระแสโพลารไรเซชันและดีโพลารไรเซชัน กระแสการนำไฟฟ้า ค่าความจุไฟฟ้าเชิงซ้อน และแฟคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกดังรูปที่ 5.21-24. ตามลำดับ

จากผลของกระแสโพลารไรเซชันสามารถหาค่าความต้านทานฉนวนในช่วง 1 นาที และ 10 นาที และค่าดัชนีโพลารไรเซชันได้ดังตารางที่ 5.5 ซึ่งพบวามอเตอร์สำรอง M1 ที่เก็บไว้นาน 24 เดือน มีค่าความต้านทานฉนวนในช่วง 1 นาที 10 นาที และค่าดัชนีโพลารไรเซชันต่ำที่สุด ส่วนมอเตอร์สำรอง M3 ที่เก็บไว้นาน 11 เดือน มีค่าความต้านทานฉนวนในช่วง 1 นาที 10 นาที และค่าดัชนีโพลารไรเซชันสูงที่สุด

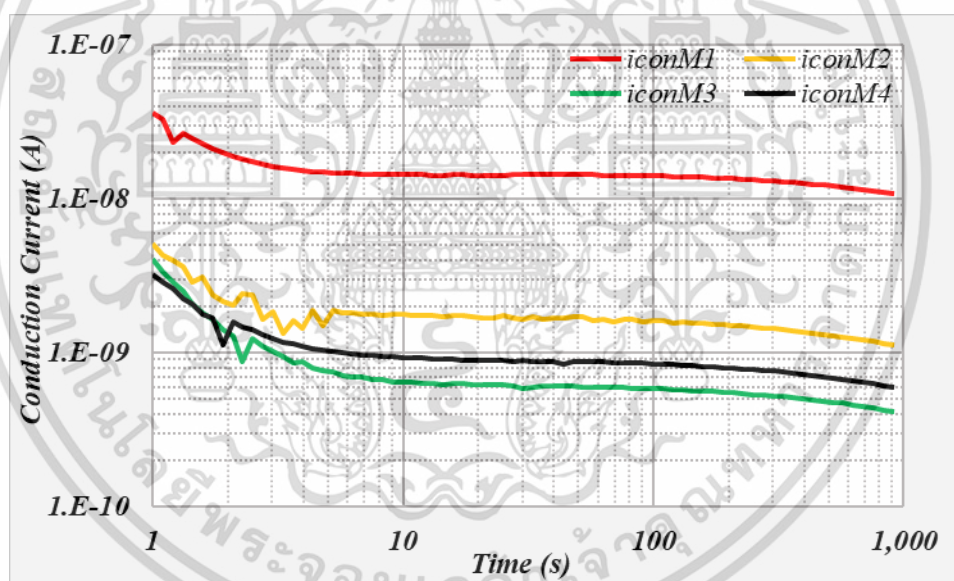
**ตารางที่ 5.5** แสดงผลการวัดความต้านทานฉนวน ค่าดัชนีโพลารไรเซชัน และค่าความจุไฟฟ้าของมอเตอร์ที่ไม่ได้ใช้งานเป็นเวลานาน

มอเตอร์	ระยะเวลาที่ไม่ได้ใช้งาน (เดือน)	IR1min (GΩ)	IR10min (GΩ)	PI	Capacitance (nF)
M1	24	1.578	5.175	3.28	46.342
M2	17	6.028	36.887	6.12	52.385
M3	11	16.674	106.781	6.4	96.114
M4	10	11.990	73.014	6.09	63.665

ผลการทดลองวัดกระแสโพลารไรเซชันและดีโพลารไรเซชันของมอเตอร์ M1 - M4 แสดงดังรูปที่ 5.21 พบว่ายิ่งเก็บไว้นานขนาดของกระแสโพลารไรเซชันและดีโพลารไรเซชันยิ่งสูงขึ้น ในทำนองเดียวกับ ผลของกระแสการนำไฟฟ้าที่ถูกแสดงดังรูปที่ 5.22 มอเตอร์ที่เก็บไว้เป็นเวลานานจะมีค่ากระแสการนำสูง เนื่องจากความชื้นที่เข้าไปในฉนวน ส่วนค่าความจุไฟฟ้าจริงที่ความถี่ต่ำยิ่งเก็บไว้นานค่ายิ่งมาก ส่วนที่ความถี่สูงค่าความจุไฟฟ้าจริงที่ได้จะแปรผกผันกับค่าที่ได้ที่ความถี่ต่ำดังรูปที่ 5.23ก ค่าความจุไฟฟ้าจินตภาพและแฟคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริก แสดงดังรูปที่ 5.23ข - 5.24ตามลำดับ พบว่ายิ่งเก็บไว้นานขนาดของความจุไฟฟ้าจินตภาพและแฟคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกยิ่งสูงขึ้น

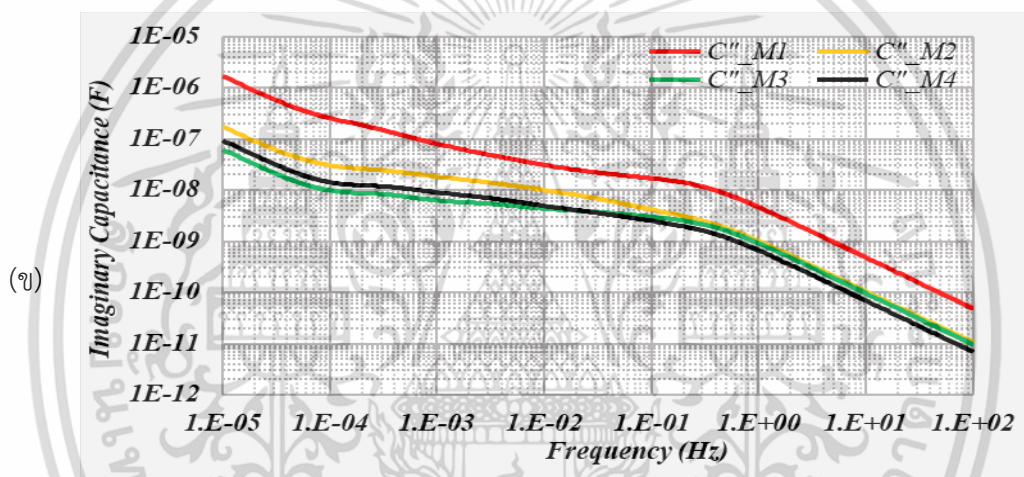
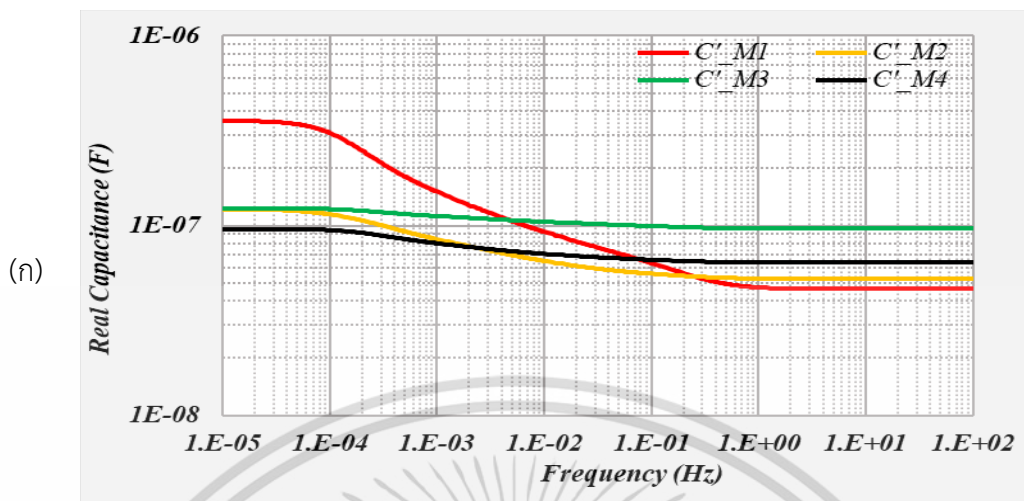


รูปที่ 5.21 กระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันของมอเตอร์ที่ไม่ได้ใช้งานเป็นเวลานาน

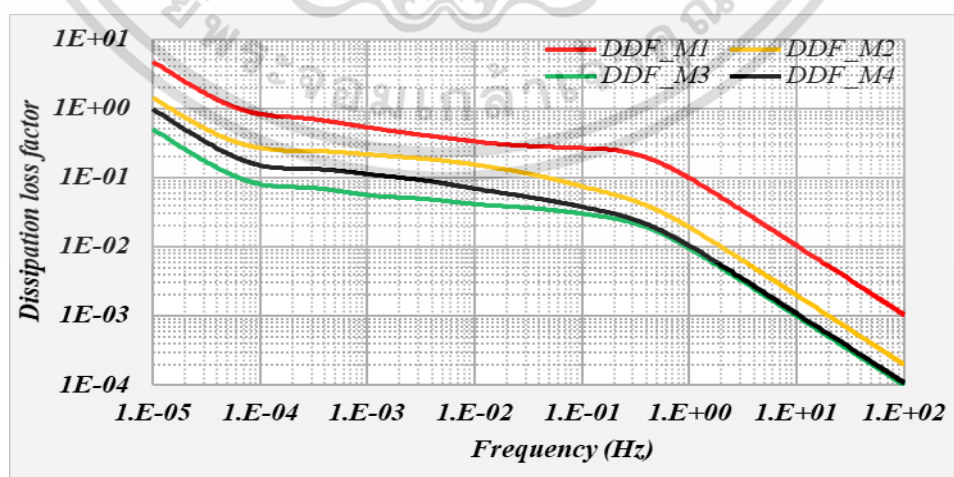


รูปที่ 5.22 กระแสการนำไฟฟ้าไฟฟ้าของมอเตอร์ที่ไม่ได้ใช้งานเป็นเวลานาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.23 ค่าความจุไฟฟ้าเชิงซ้อนของมอเตอร์ที่ไม่ได้ใช้งานเป็นเวลานาน (ก) ความจุไฟฟ้าจริง (ข) ความจุไฟฟ้าจินตภาพ



รูปที่ 5.24 แฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกของมอเตอร์ที่ไม่ได้ใช้งานเป็นเวลานาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

# สรุปผลการทดสอบ

### 6.1 สรุปผลการทดสอบ

จากการทดลองพบว่าวิธีการทดสอบวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสตีโพลาริเซชันนั้นสามารถวิเคราะห์สภาพของฉนวนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในหัวข้อการทดลองที่ 5.1 จะเห็นผลการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสตีโพลาริเซชันของฉนวนที่เป็นเนื้อเดียวกันและฉนวนที่แยกชั้นกันมีรูปแบบที่แตกต่างกันชัดเจน เมื่อฉนวนมีการแยกชั้นกันในขั้นตอนการผลิตที่ 2 และ 3 กราฟของกระแสโพลาริเซชันและกระแสตีโพลาริเซชันจะไม่เป็นเส้นตรง แต่เมื่อนำสเตเตอร์คอยล์ไปผ่านกระบวนการ hotpress เรซินในเตป Kremica จะถูกหลอมละลายทำให้ฉนวนเป็นเนื้อเดียวกัน เมื่อวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสตีโพลาริเซชัน ผลที่ได้คือขนาดกระแสโพลาริเซชันและกระแสตีโพลาริเซชันลดลง และกราฟเป็นเส้นตรง ค่าความจุไฟฟ้าเชิงซ้อนและแพคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกลดลง ในขั้นตอนที่ 5 หลังการพันฉนวนในส่วนโค้งที่ยื่นพ้นร่องสลอต พบว่าขนาดกระแสโพลาริเซชันและกระแสตีโพลาริเซชัน กระแสการนำไฟฟ้า ค่าความจุไฟฟ้าจินตภาพและแพคเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริก มีขนาดสูงขึ้นตลอดช่วง แต่ค่าความจุไฟฟ้าจำนวนจริงในช่วงความถี่สูงจะไม่เพิ่มจากขั้นตอนที่ 4 ค่าความจุไฟฟ้าจำนวนจริงสามารถบอกผลของฉนวนในส่วนโค้งที่ยื่นพ้นร่องสลอตได้

จากผลการทดลองที่ 5.2 สามารถประเมินมอเตอร์เหนี่ยวนำทั้ง 4 ตัว ได้ว่ามอเตอร์ทั้งสี่มีสิ่งสกปรกที่ผิวเท่านั้น เนื่องจากหลังการล้าง และอบมอเตอร์ ทำให้ผลของกระแสการนำไฟฟ้าลดลง ดังนั้นการซ่อมบำรุงโดยการ overhaul จะช่วยในเรื่องลดสิ่งสกปรกที่ผิวเท่านั้น

จากผลการทดลองที่ 5.3 การทดสอบฉนวนของมอเตอร์สำรองที่ไม่ได้ใช้งานเป็นเวลานาน พบว่ายิ่งเก็บไว้เป็นเวลานานกระแสความนำในเนื้อฉนวนยิ่งสูง เนื่องจากความชื้นในเนื้อฉนวน

### 6.2 ข้อเสนอแนะ

ควรเก็บข้อมูลของมอเตอร์และเจนเนอเรเตอร์ที่เกิดความบกพร่องกรณีต่างๆ เพื่อเป็นแนวทางในการสร้างรูปแบบเพื่อวิเคราะห์สภาพฉนวนของมอเตอร์และเจนเนอเรเตอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

## เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Helgeson and U. Gafvert. 1999. "Dielectric response during curing of a resin-rich insulation system for rotating machines." pp. 289-292 vol.1. in **1999 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena** (Cat. No.99CH36319), Austin, TX, USA.
- [2] J. -. Alff, V. Der Houhanessian, W. S. Zaengl and A. J. Kachler. 2000. "A novel, compact instrument for the measurement and evaluation of relaxation currents conceived for on-site diagnosis of electric power apparatus." pp. 161-167. In **Conference Record of the 2000 IEEE International Symposium on Electrical Insulation** (Cat. No.00CH37075), Anaheim, CA, USA.
- [3] N. Frost, M. Winkeler and S. Tuckwell. 2013. "Mica tape and VPI resin insulation system options for medium voltage applications." pp. 196-200. In **2013 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)**, Ottawa.
- [4] M. Shadmand, H. M. Goudarzi and S. Kazemi. 2015. "PDC characteristics of modern stator insulation systems." pp. 1015-1018. In **2015 IEEE 11th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM)**, Sydney, NSW.
- [5] N. F. M. Yusof, N. Bashir and N. A. Muhamad. 2016. "Polarization and depolarization current study in polymeric insulation containing voids." pp. 1-4. In **2016 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)**, Chengdu.
- [6] Greg C. Stone, Edward A. Boulter Ian Culbert and Hussein Dhirani. 2004. **Electrical Insulation for Rotating Machines**, 1st Ed. Canada: Wiley-IEEE Press.
- [7] Electrical Images Search Engine "**Synchronous Motor Rotor With Amortisseur Winding.G.E,Fort Wayne.**" [Online]. Available : <http://emadrlc.blogspot.com/2012/07/synchronous-motor-rotor-with.html>. 2012

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [8] Jay Industrial Repair. “Wound Rotor Motors.” [Online]. Available : <https://jayindustrial.com/electric-motor-repair/wound-rotor-motors/>. 2019.
- [9] PARTZSCH Elektromotoren. “Slip-Ring Rotor Windings.” [Online]. Available : <https://de.partzsch.de/schleifringlaeufer>. 2019.
- [10] พัชรี ทองอินต๊ะ. 2559. “การวิเคราะห์ฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนแรงดันสูง โดยวิธีการวัดกระแสโพลาริซ์เซชันและกระแสดีโพลาริซ์เซชัน”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [11] E. Kuffel, etc. 2000. **High Voltage Engineering Fundamentals**, Oxford Auckland Boston Johannesburg Melbourne New Delhi: Newnes
- [12] ชินปกรณ ชลศิริพงษ์ และคณะ. 2559. “การวิเคราะห์ฉนวนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยวิธีวัดกระแสโพลาริซ์เซชันและดีโพลาริซ์เซชัน”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [13] Andreas K. 2018. **High Voltage Engineering Fundamentals-Technology-Applications**, Germany: Springer Vieweg.
- [14] IEEE std. 43. 2013. IEEE Recommended Practice for testing Insulation Resistance of Electric Machinery.
- [15] IEEE std. 522. 2004. IEEE Guide for Testing Turn Insulation of Form-Wound Stator Coils for Alternating-Current Electric Machines.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. S. Boonsathitthavorn, N. Phumipunepon, P. Kitcharoen and N. Pattanadech, "Dielectric Properties of Resin Rich Stator Coil of High Voltage Motor during Processing," 2018 Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), Perth, WA, 2018, pp. 1-4.

**CMD2018**  
International Conference on  
Condition Monitoring and Diagnosis

**Curtin University**

**2018 CONDITION MONITORING AND  
DIAGNOSIS (CMD)**

**CURTIN UNIVERSITY**  
SEPTEMBER 23rd—26th Perth, Australia

**TECHNICAL SPONSORS:**

IEEE PES  
Power & Energy Society\*

AMPCONTROL®

OMICRON

**EESA**  
Electric Energy Society of Australia

**SUPPORTED BY:**

IEEE

DEIS

ENGINEERS AUSTRALIA

PERTH CONVENTION BUREAU

ISBN: 978-1-5386-4126-2      © IEEE 2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Dielectric Properties of Resin Rich Stator Coil of High Voltage Motor during Processing

S.Boonsathitthavorn\*, N. Phumipunepon\*\*, P. Kitcharoen, N. Pattanadech

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering,

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,

Bangkok, Thailand

worawit.sam@gmail.com\*, natnaree.nuta@gmail.com\*\*

**Abstract**— One of the non-destructive test methods commonly used to characterize the electrical properties of power equipment is polarization and depolarization current testing. The objective of this paper is to study of the change of dielectric properties during the manufacturing stages of a stator coil used in 6.6 kV 260 kW motor. There were five steps to manufacture the resin rich stator coil. The first step, the copper coil was wound around by NOMEX paper. Then the slot portion of the stator coil was wound by KREMICAL tape as the second process and by the conductive tape as the third process. Then, the insulation and conductive layer of the stator coil were pressed and cured at 160 °C for one and a half hour as the fourth process. The pressing and curing will combine the multi insulation to be homogeneous insulation of the stator coil. The final step, the end winding portion was wounded by Filosam tape and polyester tape. The polarization and depolarization currents were measured and recorded after finishing each manufacturing process. From the test results, the polarization currents and depolarization currents obtained from each step were clearly different. Then the polarization and depolarization currents, conduction current and capacitance of the test results were analyzed and reported in this paper.

**Keywords**— Polarization current, Depolarization current, capacitance, NOMEX, KREMICA, Conductive tape, Filosam tape and Polyester tape

## I. INTRODUCTION

The stator insulating system plays an important role in reliability and stability of using high voltage rotating machine. After manufacturing stator coils, the stator coils are tested to evaluate the condition of insulation by various well-established diagnostic techniques [1-3]. The techniques involve the measurement of the insulation resistance (according to the IEEE Std 43) [2], polarization index, a withstand test (Hipot) and the dielectric dissipation factor (according to the IEEE Std 286) [3].

This article uses non-destructive measuring technique that is polarization and depolarization current method to evaluate the change of dielectric properties during the manufacturing stages of a stator coil used in a 6.6 kV 260 kW motor. This technique is generally used for assessing the insulation system of transformer and now applied for other kinds of high voltage apparatus such as rotating machines [4-6], underground cables and bushings. In the PDC measurement process, a test voltage does not affect insulation integrity or service life. The aim of this article is to present the PDC characteristics of the stator coils under manufacturing processes. More particularly, conduction current and capacitance are mentioned.

## II. PDC MEASUREMENT

The polarization phenomena is described in [7-9]. When a step DC voltage is applied to the insulation system. The polarization mechanisms  $P(t)$  of insulating materials take place due to the force of the electric field  $E(t)$ . During this process, polarization current is generated. It can be expressed in (1) [7]

$$i_{pol}(t) = \frac{V}{R_{\infty}} + \sum_i \left( \frac{V}{R_i} e^{-\frac{t}{\tau_i}} \right) \quad (1)$$

where  $V$  is the unit step voltage response,  $R_{\infty}$  is direct current resistance,  $R_i$  is additional resistance in the network model, and  $\tau_i$  is time constant.

After disconnecting the DC voltage source, the test object is immediately short-circuited. The depolarization current  $i_{depol}(t)$  occur through the test object as expressed in (2)

$$i_{depol}(t) = -\sum_i \left( \frac{V(I - e^{-\frac{t_L}{\tau_i}})}{R_i} e^{-\frac{t-t_L}{\tau_i}} \right) \quad (2)$$

where  $t_L$  is the charging time.

DC conductivity or conduction current can be determined as a steady-state value. It can be approximated from the difference between the polarization current and depolarization current. Hence, the exponential terms can be neglected for long charging time  $t + t_L \gg \tau_i$ . DC conductivity is indicated in polarization current as the component  $V/R_{\infty}$ . DC conductivity is expressed by the following equation (3)

$$i_{con}(t) = i_{pol}(t) + i_{depol}(t+t_L) \approx \frac{V}{R_{\infty}} \quad (3)$$

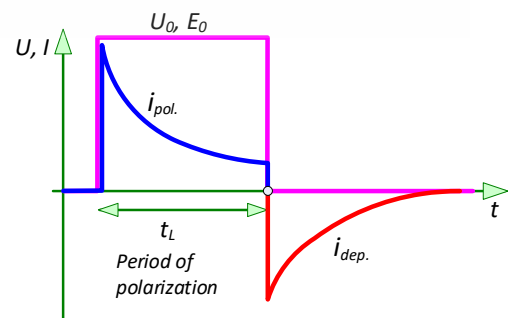


Fig. 1. Polarization and depolarization currents of a dielectric material exposed to a step-function electric field.

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

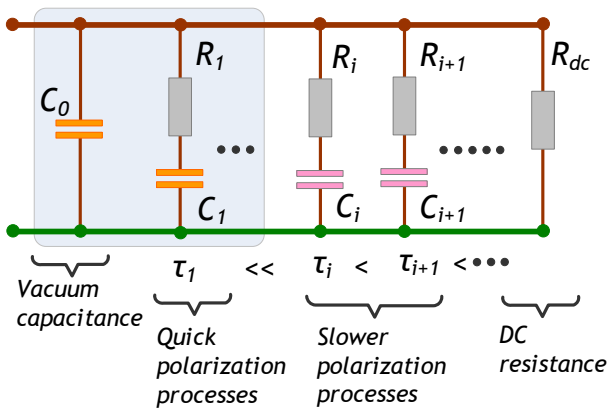


Fig. 2. PDC Measurement diagram and network model of linear solid materials.

### III. EXPERIMENTAL DETAILS

#### A. Manufacturing stator coil

The stator coils used in this research was designed for a 6.6 kV 260 kW motor. The temperature class of the stator coils was 155 °C (class F). In manufacturing of the stator coil, a form winding used rectangular copper wire which was wound around by NOMEX paper. The coil winding process began with looping of the copper wire. Then the looped coil was shaped by a forming machine for occupying in the stator slot. In the slot portion, the form coil was wound by KREMICAL tape and then by the conductive tape respectively. After that, the slot portion of the stator coil was pressed and cured at 160 °C for one and a half hour to cure the resin, making a rigid winding having specified mechanical and electrical characteristics. For the end winding portion or overhang, the stator coil had Filosam tape and polyester tape applied.

In this article, the experiment focused on five steps of manufacturing the resin rich stator coil which had been set for measuring the polarization and depolarization current for every step of manufacturing process as follows:

- 1) The first process, the copper coil was wound around by NOMEX paper for 1 turn and shaped in diamond shape.
- 2) The second process, the slot portion of the stator coil was wound by KREMICAL tape for 13 turns.
- 3) The third process, the slot portion of the stator coil was wound by the conductive tape for 1 turn.
- 4) The fourth process, the insulation and conductive layer of the slot portion of the stator coil were pressed and cured at 160 °C for one and a half hour.
- 5) The fifth process, the end winding portion was wound by Filosam tape for 7 turns and after that polyester tape for 1 turn.

Sections of the stator coil investigated were shown in Fig. 3.

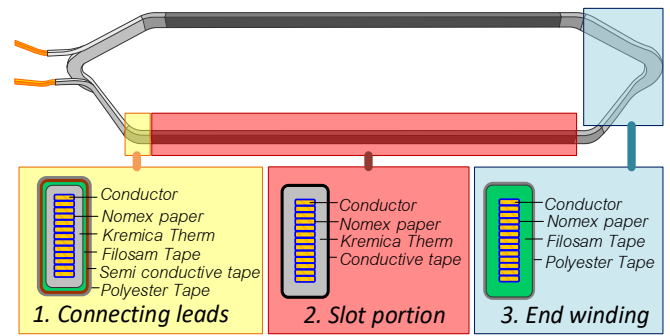


Fig. 3. Sections of the stator coil investigated.

#### B. Test arrangement

The PDC was measured by a PDC-Analyser-1MOD to record both the polarization and depolarization current of the specimen under test. These experiments were performed at the ambient temperature of 22-26 °C and 50-65 % RH. The test arrangement of PDC measurement on phase-to-phase insulation was shown in Fig. 4. When switch 1 was closed, the DC voltage (300 V) was applied to the tested specimen. The polarization current was measured for a specific time (1,000 s.). After that, the DC supplied voltage was disconnected from the test circuit by the process of switch 1 being opened and switch 2 being closed simultaneously. The depolarization current was measured for 1,000 s.

#### C. Test procedure

PDC measurement needs to be consequently performed for three steps as follows:

- 1) Initial measurement : Measuring the remaining charge inside the insulation system under test, only the depolarization is measured.
- 2) Control measurement : Verifying the test circuit whether there are any abnormalities in the test circuit by applying the voltage for polarization current measurement for 5-10 s. and then measuring the depolarization current until depolarization current decreases to the same level of the remaining current.
- 3) Main measurement : Applying the test voltage for polarization current measurement very short time for 1,000 s. and then shorted-circuit the test object for measuring the depolarization current.

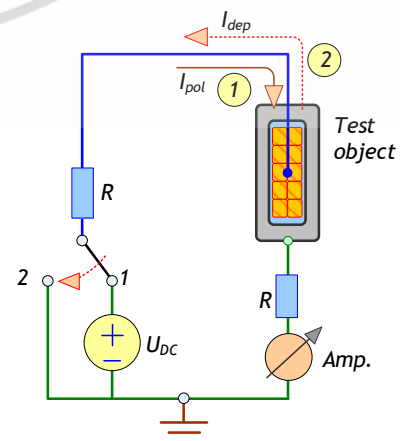


Fig. 4. Diagram of phase to phase insulation PDC measurement circuit.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### IV. EXPERIMENTAL RESULTS

##### A. Polarization and depolarization current

The polarization and depolarization current results of the stator coil obtained from each step of manufacturing process are shown in Fig.4.

After the first process of stator coil manufacturing, the stator coil had the lowest polarization and depolarization currents compared with these of the stator coil finished from other process.

After the second and the third process of stator coil manufacturing, the polarization and depolarization currents of the stator coil were increased and the polarization and the depolarization current had high influence on the initial exponential shape of the conduction currents from the beginning of measurement to 10 s.

Then after pressing and curing the stator coil at 160 °C in the fourth process, the polarization and depolarization currents of the stator coil were reduced again due to combination of the multi insulation to be homogeneous insulation.

After the fifth process of stator coil manufacturing, the polarization and depolarization currents of the stator coil increased compared with these of the stator coil from the fourth process. The higher amplitude of both polarization and depolarization current refers to lower insulation resistance.

##### B. DC conductivity

The DC conductivities or the conduction currents are illustrated in log-log scales in Fig. 5.

After the first process of stator coil manufacturing, the stator coil had the lowest conduction current and the conduction current of the stator coil obtained from the second and the third process of stator coil manufacturing had high influence on the initial exponential shape of the conduction currents from the beginning of measurement to 10 s. The conduction current of the stator coil obtained from the fourth process was smooth and reduced again due to combination of the multi insulation to be homogeneous insulation. The conduction current of the stator coil obtained from the fifth process was higher than that from the fourth process that show the effect of end winding portion to DC conductivity.

##### C. Complex capacitance

Fig. 6a and Fig. 6b show the complex capacitance of the stator coil at each step of manufacturing. From PDC Analyzer, the extrapolated were calculated down to  $10^{-5}$  Hz and up to 100 Hz.

The real capacitance of the stator coil obtained from the first manufacturing process was quite constant because the insulation had merely one layer of NOMEX and, the real capacitance existing from the fourth manufacturing process slightly increased. The real capacitance of the stator coil obtained from the second, third and fifth manufacturing processes at low frequency were similarly high. However, their real capacitance at high frequency were different.

The imaginary capacitance of the stator coil obtained from the first, fourth and fifth manufacturing processes had similar shape but their value were different. The imaginary capacitances of the stator coil obtained from the second and third manufacturing processes were different.

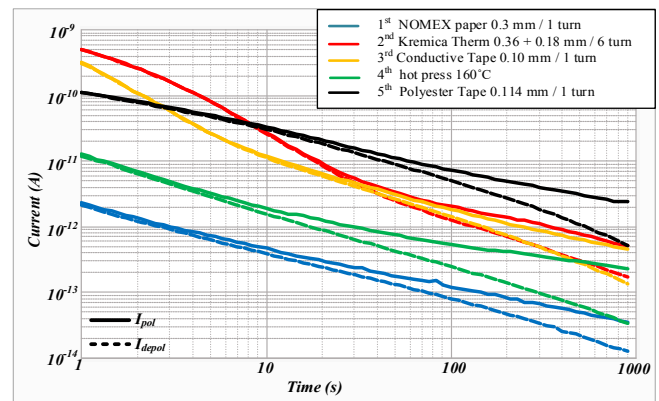


Fig. 4. PDC measurement of the stator coil at each step of manufacturing.

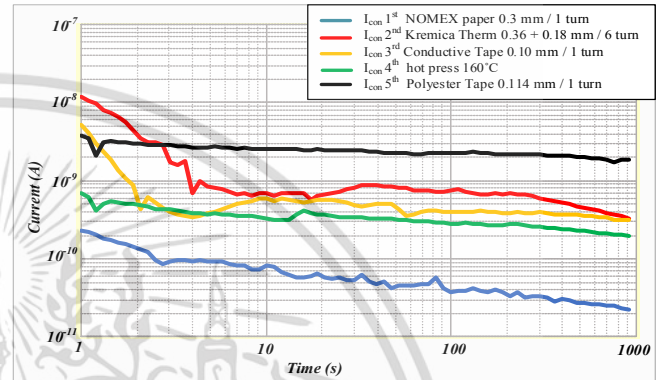
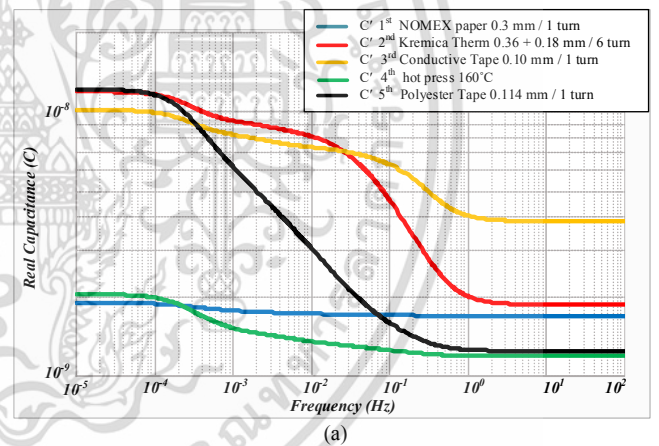
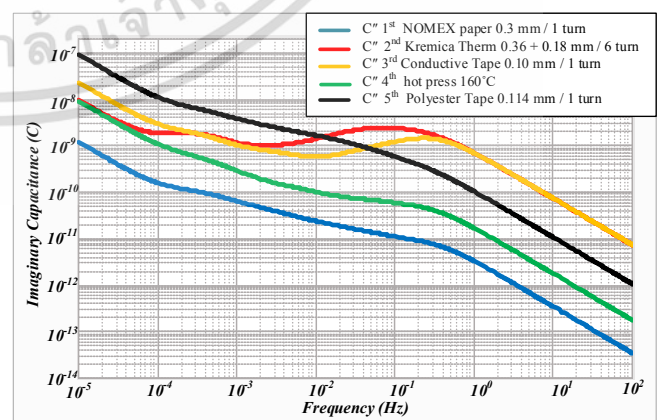


Fig. 5. DC conductivity of the stator coil at each step of manufacturing.



(a)



(b)

Fig. 6. Complex capacitance of the stator coil at each step of manufacturing (a) real capacitance (b) imaginary capacitance.

## V. CONCLUSION

The differences between polarization currents and depolarization currents of the stator coil obtained from manufacturing process can be summarized as follows:

From the experiments, it was founded the polarization currents, the depolarization currents, the DC conductivities and the complex capacitances of the investigated stator coil obtained from each step of manufacturing process were clearly different. It is obviously seen that the amplitude of the polarization current, the depolarization current and the DC conductivity is reduced after the hot press and curing process. However, after the endwinding portion is wounded, all the mentioned currents are relatively increased. Moreover, the complex capacitance both the real and the imaginary capacitances of the investigated stator coil are also changed for each step of the manufacturing process. The hot press and curing process also improves the manitude of the real and imaginary capacitance of the stator coil investigated.

## ACKNOWLEDGMENT

This research is kindly endowed by TIS Engineering and Service Co., Ltd., and Asia Motor service Center CO., LTD, Thailand.

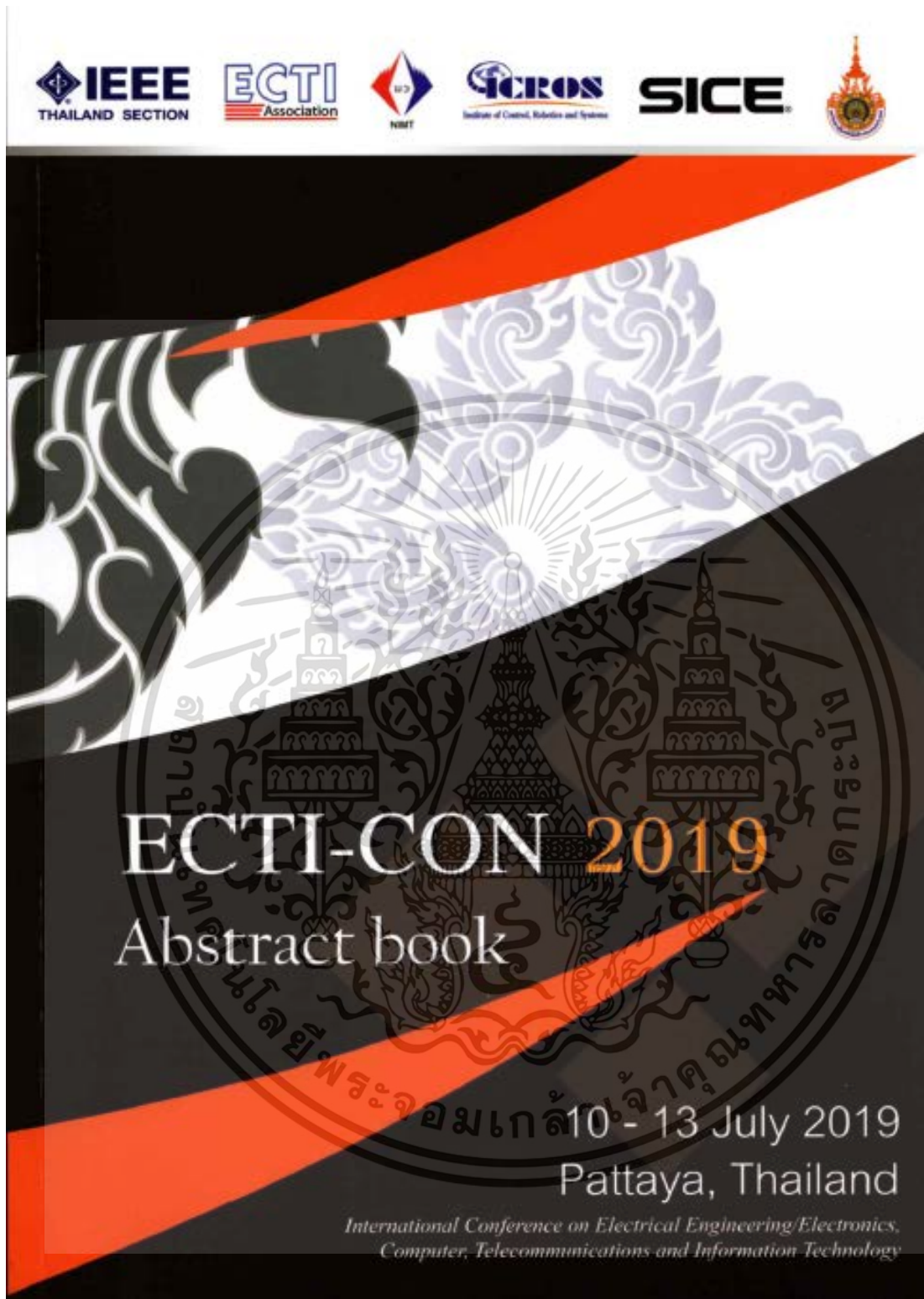
## REFERENCE

- [1] Greg C. Stone, Edward A. Boulter Ian Culbert and Hussein Dhirani, *Electrical Insulation for Rotating Machines*, 2<sup>nd</sup>ed., Wiley-IEEE Press, 2014, pp.47-78.
- [2] IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery, IEEE Std 43-2000, 2000.
- [3] IEEE Recommended Practice for Measurement of Power Factor Tip-Up of Electric Machinery Stator Coil Insulation, IEEE Std 286-2000, 2000.
- [4] M. Farahani, H. Borsi and E. Gockenbach, "Dielectric Response Studies on Insulating System of High Voltage Rotating Machines," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. Germany*, vol. 13, no. 1, February 2006, pp. 383-393.
- [5] M. Shadmand and H. M. Goudarzi, "PDC characteristics of Modern Stator Insulation Systems," *IEEE 11<sup>th</sup> International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials. Iran*, 2015, pp. 1015-1018.
- [6] E. David and R. Soltani, "PDC Measurements to Assess Machine Insulation," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. Canada*, vol. 17, no. 5, October 2010, pp.1461-1469.
- [7] A. Küchler, *High Voltage Engineering Fundamentals – Technology Applications*. Springer Vieweg, 2017, pp.269-300.
- [8] M. Kaufhold, K. Schäfer, K. Bauer, A. Bethge and J. Risse, "Interface Phenomena in Stator Winding Insulation—Challenges in Design, Diagnosis, and Service Experience," *IEEE Electrical Insulation Magazine. Berlin*, vol. 18, no. 2, March 2002, pp. 27-36.
- [9] W. S. Zaengl, "Dielectric Spectroscopy in Time and Frequency Domain for HV Power Equipment, Part I:Theoretical Considerations," *IEEE Electrical Insulation Magazine. Switzerland*, vol. 19, no. 5, September 2003, pp. 5-19.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



2. N. Pattanadech, S. Boonsathitthavorn, and N. Phumipunepon, "Dielectric Properties of Stator Coil Insulation of Medium Voltage Motor," The 16th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, Pattaya, Thailand, 2019, pp. 1-4.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Dielectric Properties of Stator coil Insulation of Medium Voltage Motor

N. Pattanadech

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

S.Boonsathitthavorn

Department of Electrical Engineering,  
Faculty of Engineering,  
King Mongkut's Institute of Technology  
Ladkrabang, Bangkok, Thailand  
worawit.sam@gmail.com

N. Phumipunepon

Department of Electrical Engineering,  
Faculty of Engineering,  
King Mongkut's Institute of Technology  
Ladkrabang, Bangkok, Thailand  
natnaree.nuta@gmail.com

**Abstract**—One of the non-destructive methods commonly used to characterize the electrical properties of power devices is polarization and depolarization current (PDC) method. The objective of this paper is first to compare the dielectric properties of the stator coil without overhang insulation, the stator coil after hot-press process, and the stator coil with overhang insulation. The second objective is to compare dielectric properties of newly wound stator coil, the stator coil heated at 60 °C, and the stator coil heated at 90 °C for a specific time. The stator coils in this research were designed for a 6.6 kV 260 kW synchronous motor. For the stator coil without overhang insulation, the slot portion stator coil was wound by Nomex paper, Kremica tape, and conductive tape. For the overhang insulation, the end portion was wound by Filosam tape and polyester tape. Then, the PDC measurement was performed. The parameters from PDC analysis were used to assess dielectric properties. These parameters were composed of the PDC shapes, capacitance ratio, polarization loss and conduction loss. Test results showed that different insulation types applied for each part of the stator coil manufacturing provided different dielectric properties. This point should be considered when PDC measurement is performed with the whole insulation system of the high voltage motors.

**Keywords**— polarization and depolarization current, overhang, dielectric properties, capacitance ratio, polarization loss and conduction loss

## I. INTRODUCTION

The rotating machines play an important role in the industrial sector, energy sector, etc. since they are capital assets and their failure may result in immense financial losses. Their reliability depends on the healthy condition of the insulation. The insulation systems of the rotating machines are a complex combination of materials. In the past, the natural binding dielectric materials were employed as stator insulation of HV rotating machines. Until the advent of synthetic materials (Polyester, Epoxy, Silicone resins) has been developed, they have introduced and then utilized as the insulation system of the rotating machines [1]. These materials used in stator winding depend on the required performance of the rotating machine.

The basic type of stator winding for the large rotating machine is form-wound stators which can be divided into two types, coil type and Roebel bar type [2]. For medium voltage motors, they use the form-wound coils (stator coils). The forming of stator coils begins with a loop of wire shaped into a diamond shape and then winding the insulation over the coil loop. For machines operated at 6 kV or above, the insulation of the end-winding (overhang) and slot portion is different because the stator coils have undergone the high electric stress, especially in the slot portion. This part has to

apply the slot semiconductive coating to prevent partial discharge on the coil surface [2].

There are various standard methods applied for insulation testing to verify the insulation condition such as the testing of Insulation resistance (IR), Polarization index (PI), DC high potential, Power factor tip-up and Dissipation factor, Loss angle and Capacitance, and Partial Discharge (PD) measurements [2-5]. For the past few decades, polarization and depolarization current (PDC) measurement has been introduced as one of time domain dielectric spectroscopy techniques applied for insulation condition testing [6-9]. PDC testing shows the advantage that it neither makes damages nor increases ageing to tested object due to testing with a given low voltage. Therefore, this method is suitable to analyze the insulation of stator coils.

Dielectric loss is one of the main factors to evaluate the integrity of insulation. Dielectric loss consists of conduction loss, polarization loss and ionization loss. Practically, PDC measurement provides total loss factor or so-called dielectric dissipation factor containing both conduction loss factor and polarization loss factor. Ionization loss factor should not exist since a low step voltage is used for testing. To enhance the understanding about insulation characteristics, Fourier transform is used to transform parameters in time domain into frequency domain. Then, the derived parameters in frequency domain such as complex capacitance, polarization loss factor and conduction loss factor can be used for further analysis of the insulation condition. This paper presents the application of derived parameters for dielectric analysis of the new coil and the simulated degraded stator coils caused by thermal stress.

## II. PDC MEASUREMENT AND ANALYSIS

### A. Principle of PDC measurement

The principle of PDC measurement is illustrated in Fig. 1. In PDC measurement, when switch 1 is turn on a given step DC voltage is applied to the test object. The polarization current (or the charging current) is measured and recorded for a specific time. Then, switch 2 is turn on for short circuit the test object. Simultaneously, the depolarization current (or the discharge current) is measured and recorded for a given time.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

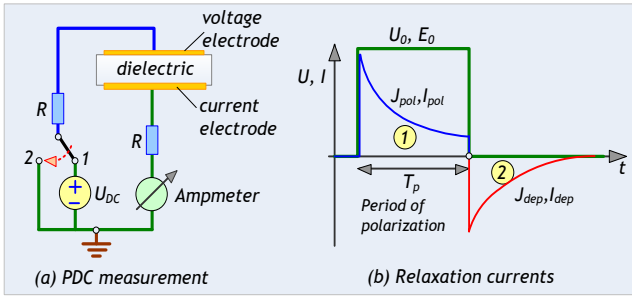


Fig. 1. Principle of PDC measurements.

### B. Dielectric response in frequency domain

In this part, Fourier transform is used for transforming parameters obtained from PDC measurement in time domain into frequency domain [6-9].

The relation between a measured current  $\underline{I}(\omega)$  and applied voltage  $\underline{U}(\omega)$  as

$$\underline{I}(\omega) = j\omega \underline{C}(\omega) \underline{U}(\omega) \quad (1).$$

Where  $\underline{C}(\omega)$  is the complex capacitance

$$\underline{C}(\omega) = C'(\omega) - jC''(\omega) \quad (2).$$

Where  $C'(\omega)$  and  $C''(\omega)$  represents the real part and the imaginary part of complex capacitance respectively which can be expressed in (3) and (4) respectively.

$$C'(\omega) = C_0 + \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{1 + (\omega R_i C_i)^2} \quad (3)$$

and

$$C''(\omega) = \frac{I}{\omega R_{dc}} + \sum_{i=1}^n \frac{\omega R_i C_i^2}{1 + (\omega R_i C_i)^2} \quad (4).$$

Where  $R_{dc}$  is DC resistance of the test object.  $R_i$  and  $C_i$  is partial resistance and partial capacitance obtained from curve fitting technique and  $C_0$  is geometrical capacitance.

The capacitance ratio ( $C_{ratio}$ ) is the ratio between real capacitance and geometrical capacitance. The capacitance ratio is given by the following equation.

$$C_{ratio} = \frac{C'(\omega)}{C_0} \quad (5)$$

The total loss factor ( $\tan \delta$ ), the conduction loss factor ( $\tan \delta_\sigma$ ) and the polarization loss factor ( $\tan \delta_{pol}$ ) can be expressed in (6) - (8)

$$\begin{aligned} \tan \delta(\omega) &= \tan \delta_\sigma(\omega) + \tan \delta_{pol}(\omega) = \frac{C''(\omega)}{C'(\omega)} \\ &= \frac{I}{\omega R_{dc}} + \sum_{i=1}^n \frac{\omega R_i C_i^2}{1 + (\omega R_i C_i)^2} \end{aligned} \quad (6).$$

The conduction loss factor can be expressed as

$$\tan \delta_\sigma(\omega) = \frac{I}{\omega R_{dc} C'(\omega)} \quad (7)$$

and the polarization loss can be expressed as

$$\tan \delta_{pol}(\omega) = \frac{I}{C'(\omega)} \sum_{i=1}^n \frac{\omega R_i C_i^2}{1 + (\omega R_i C_i)^2} \quad (8).$$

## III. EXPERIMENTAL DETAIL

### A. Preparation specimens

The stator coils used in this research were designed for a 6.6 kV 260 kW synchronous motor. The temperature class of the stator coils was 155 °C (class F).

In this research, there are two objectives, first to compare the dielectric properties of the stator coil without overhang insulation, the stator coil without overhang insulation after hot-press process, and the stator coil with overhang insulation. The second objective is to compare dielectric properties of newly wound stator coil, the stator coil heated at 60 °C for 3 hours, and the stator coil heated at 90 °C for 3 hours.

For the first objective, the experiment was divided into three cases as follows:

#### 1) Case A: the stator coil without overhang insulation

The copper wire covered with Nomex paper was looped and shaped into a coil. In the slot portion, the coil was wound by Kremica tape and then by the conductive tape respectively.

#### 2) Case B: the stator coil without overhang insulation after hot-press process

After additional insulation applied on the slot portion stator coil, the slot portion of the stator coil was pressed and heated at 160 °C for one and a half hour by hot coil curing press machine. During the hot-pressing process, the coil legs were cured the resin in Kremica tape, making a rigid winding having specified mechanical and electrical characteristics.

#### 3) Case C: the stator coil with overhang insulation

After the hot-press process process, the end winding portion or overhang of the stator coil was wound by Filosam tape and polyester tape.

Sections of the overhang portion and slot portion of stator coil are shown in Fig. 2.

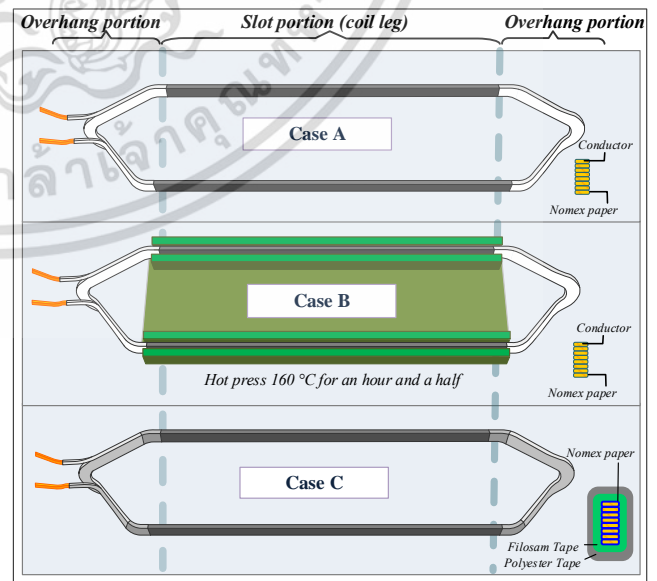


Fig. 2. Sections of the stator coil investigated.

### B. PDC Test Set-up

The PDC measurement circuit used to investigate the dielectric response is illustrated in Fig. 1(a). To perform the experiment, when switch 1 was turned on, a step DC voltage was applied to the tested specimen. Simultaneously, the polarization current was measured and recorded for a specific time. After that switch 2 was turned on (switch 1 was turned off), the DC supplied voltage was disconnected from the test circuit and the test object was shorted circuit, the depolarization current was measured for a given time. The PDC test results were plotted in a log-log scale. In this experiment, PDC-Analyser-1Mod was employed.

### C. PDC Test Procedure

The 3-step test procedure for PDC measurement was as follows: initial measurement, control measurement, and main measurement [9].

The initial measurement determined the insulation condition of the test specimen prior to the experiment, wherein the depolarization current was measured to determine the remaining charge inside the insulation.

The control measurement was used to check whether there were no abnormalities occurring in the PDC test circuit or not, whereby a step DC test voltage of 50V was applied for a period of 5 seconds to the insulation system in order to measure  $i_{pol}(t)$  and then the test object was short-circuited to measure the minimum level of  $i_{dep}(t)$ .

The main measurement was used to determine the PDC, whereby a step DC test voltage of 300V was applied to the test specimen for 1,000 seconds to record the  $i_{pol}(t)$  measurements, after that the test specimen was short-circuited in order to measure  $i_{dep}(t)$  for 1,000 seconds.

## IV. TEST RESULTS AND DISCUSSION

From the experiment, the PDC test results in time domain were recorded and analyzed. PDC shapes showed polarization and conduction mechanisms of the test object under a tested step dc voltage. For capacitance ratio, conduction loss factor and polarization loss factor, they were presented in the frequency domain.

### A. The dielectric properties of the stator coil without overhang insulation, the stator coil after hot-press process, and the stator coil with overhang.

The comparison of PDC test results of stator coil without overhang insulation, stator coil after hot-press process, and stator coil with overhang insulation are illustrated in Fig. 3. The PDC shapes of the stator coil after hot-press process is lower and smoother than stator coil without overhang insulation. For stator coil with overhang insulation, the PDC shapes aren't only high but also quite linear.

Capacitance ratios are shown in Fig. 4 that the stator coil after hot-press process can reduce capacitance ratio at low frequency. The effect of additional insulation winding on overhang portion of stator coil increases the capacitance ratio at very low frequency.

The conduction loss factor and polarization loss factor of the stator coil without overhang insulation, the stator coil after hot-press process, and the stator coil with overhang insulation are shown in Fig.5. The effect of additional insulation over overhang portion and hot press process increases the conduction loss factor but for the stator coil without overhang insulation after hot-press process the polarization loss factor decreases.

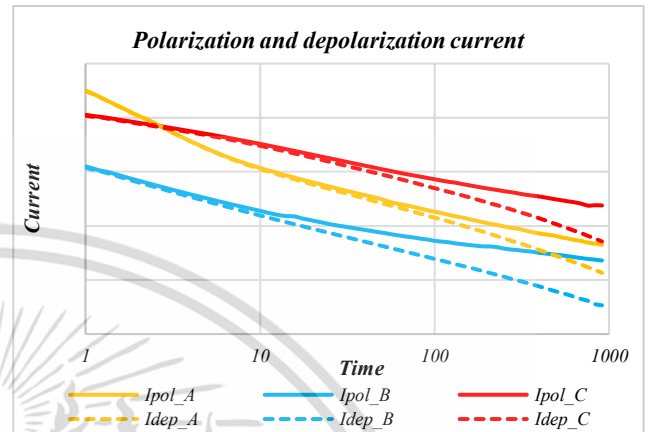


Fig. 3. The PDC test results of the stator coil without overhang insulation, the stator coil after hot-press process, and the stator coil with overhang insulation.

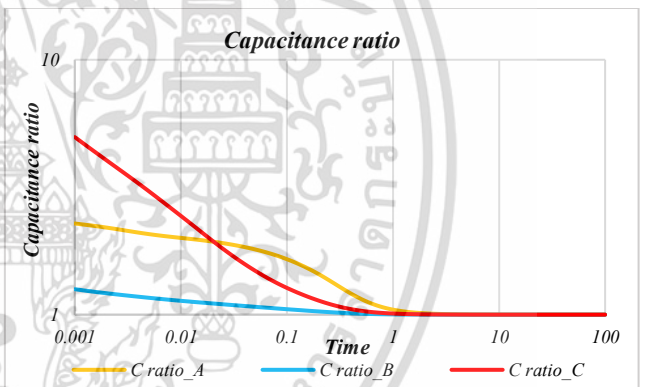


Fig. 4. Capacitance ratio of the stator coil without overhang insulation, the stator coil after hot-press process, and the stator coil with overhang insulation.

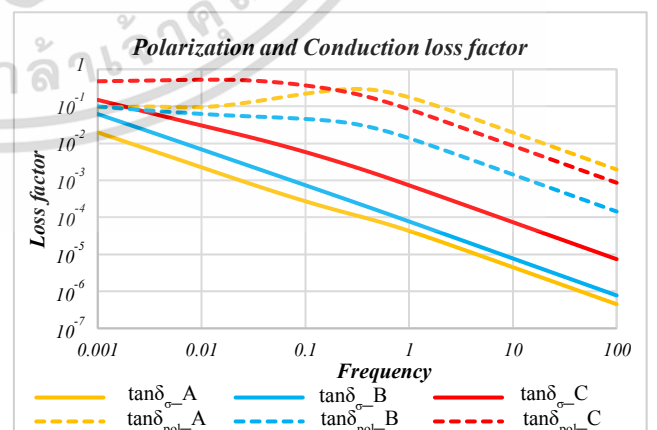


Fig. 5. The polarization and conduction loss factor of the stator coil without overhang insulation, the stator coil after hot-press process, and the stator coil with overhang insulation.

B. The dielectric properties of newly wound stator coil, the stator coil heated at 60 °C for 3 hours and the stator coil heated at 90 °C for 3 hours.

The PDC test results of newly wound stator coil, the stator coil heated at 60 °C for 3 hours and the stator coil heated at 90 °C for 3 hours is illustrated in Fig. 6. The PDC shapes of the test specimens are similar. Likewise, the capacitance ratios, and conduction loss factor and polarization loss factor of the test specimens are also similar that are demonstrated in Fig. 7 and 8 respectively.

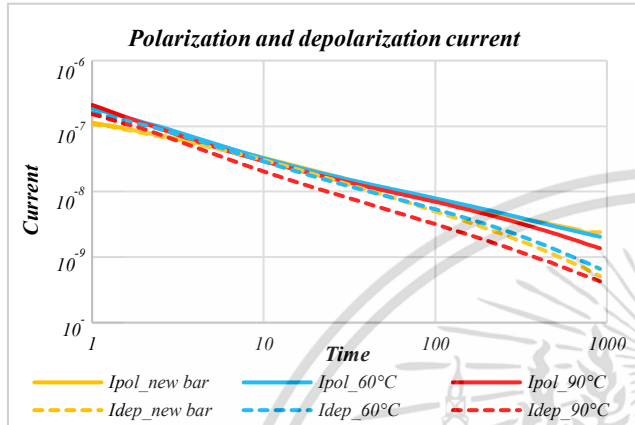


Fig. 6. The PDC test results of the newly wound stator coil, the stator coil heated at 60 °C for 3 hours and the stator coil heated at 90 °C for 3 hours.

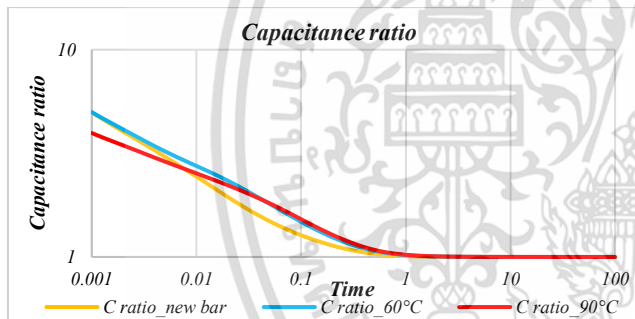


Fig. 7. Capacitance ratio of the newly wound stator coil, the stator coil heated at 60 °C for 3 hours and the stator coil heated at 90 °C for 3 hours.

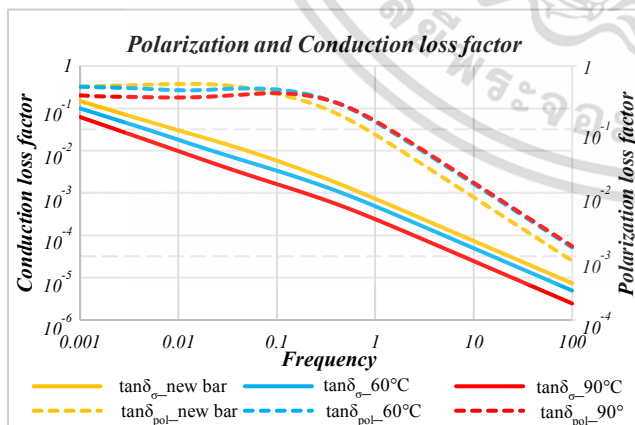


Fig. 8. The polarization and conduction loss factor of the newly wound stator coil, the stator coil heated at 60 °C for 3 hours and the stator coil heated at 90 °C for 3 hours.

## V. CONCLUSION

The hot-pressing process causes a combination of the multi-layer insulation to be homogeneous insulation. The stator coil without overhang insulation after hot-press process, the PDC shapes tend to be lower, the capacitance ratio, and polarization loss factor decrease but the conduction loss factor slightly increases.

For the effect of additional insulation winding on the overhang portion of stator coil, the PDC shapes is raised due to the higher absorption current. The capacitance ratios at very low-frequency increase because of the slow process of interfacial polarization. The conduction loss factor and polarization loss factor of the stator coil with overhang are also higher.

From the test results of newly wound stator coil compared with the stator coil heated at 60 °C for 3 hours and the stator coil heated at 90 °C for 3 hours, it was founded that the dielectric properties of the investigated stator coils are quite similar since their insulation can withstand temperature of up to 155 °C.

## ACKNOWLEDGMENT

This research is kindly endowed by Research and Researchers for Industries (research funding number MSD62I0049), TIS Engineering and Service Co., Ltd., and Asia Motor service Center CO., LTD, Thailand.

## REFERENCES

- [1] Rao, Burjupati, (2010). Assessment of Stator winding Insulation, PART 1 - Review of deterioration mechanisms and condition monitoring techniques. The Journal of CPRI, ISSN 0973 -0388.
- [2] Greg C. Stone, Edward A. Boulter Ian Culbert and Hussein Dhirani, Electrical Insulation for Rotating Machines, 2nd ed., Wiley-IEEE Press, 2014.
- [3] IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery, IEEE Std 43-2000, 2000.
- [4] IEEE Recommended Practice for Measurement of Power Factor Tip-Up of Electric Machinery Stator Coil Insulation, IEEE Std 286-2000, 2000.
- [5] IEEE Trial-Use Guide to the Measurement of Partial Discharges in Rotating Machinery, IEEE Std 1434-2000, 2000.
- [6] W. S. Zaengl, "Dielectric Spectroscopy in Time and Frequency Domain for HV Power Equipment, Part I: Theoretical Considerations," IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 19, no. 5, pp. 5-19, 2003.
- [7] E. Kuffel, W.S. Zaengl, and J. Kuffel, High Voltage Engineering: Fundamentals. Butterworth-Heinemann, Second edition 2000
- [8] J. Alif, V. Der Houhanessian, W. S. Zaengl and A.J. Kachler, "A novel, compact instrument for the measurement and evaluation of relaxation currents conceived for on-site diagnosis of electrical power apparatus," IEEE Int'l. Sympos. Electr. Insul., Anaheim, USA, pp. 161-167, 2000.
- [9] S. Boonsathithavorn, N. Phumipunepon, P. Kitcharoen and N. Pattanadech, "Dielectric Properties of Resin Rich Stator Coil of High Voltage Motor during Processing," 2018 Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), Perth, WA, 2018, pp. 1-4.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายเศรษฐวิทย์ บุญสถิตย์ถาวร  
 วัน เดือน ปีเกิด 13 มกราคม 2530  
 ที่อยู่ 427/49 ถนนประชาราษฎร์ 2 แขวงบางซื่อ เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร  
 10800  
 อีเมล worawit.sam@gmail.com  
 โทรศัพท์ 096-5542449  
 ประวัติการศึกษา 2554 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
 มหาวิทยาลัยรังสิต  
 2558 M.Sc.: Marketing Management Award MSc with Merit  
 Bournemouth University 2015, Bournemouth, United Kingdom  
 ความชำนาญเฉพาะด้าน 1.) ด้านเทคนิคเครื่องจักรกลไฟฟ้า  
 2.) การซ่อมบำรุงรักษาเครื่องจักรกลไฟฟ้า  
 3.) งานบริหารและการจัดการ  
 ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย  
 พ.ศ.2554-2555 เคยทำงานที่ EGCO ENGINEERING & SERVICE COMPANY LIMITED  
 ในตำแหน่ง Engineering Electrical Maintenance  
 พ.ศ.2558-ปัจจุบัน ทำงานที่ บริษัท เอเซียมอเตอร์เซอร์วิส เซ็นเตอร์ จำกัด  
 ในตำแหน่ง Engineering Electrical Power