การวินิจฉัยฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนด้วยวิธีวัดกระแสโพลาไรซ์เซชัน และดีโพลาไรซ์เซชัน

DIAGNOSIS OF ROTATING MACHINE INSULATION BY POLARIZATION AND DEPOLARIZATION CURRENT MEASUREMENT

โดย

นางสาวเธียรแสงเพ็ญ ช่อผูก

นายพสิษฐ์ วงศ์ปิติรุ่งเรือง

นายพัทธดนย์ สมัดไชย

นายพุฒิพงศ์ จิตต์มณีรัตน์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2560

การวินิจฉัยฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนด้วยวิธีวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและดีโพลาไรซ์เซชัน

DIAGNOSIS OF ROTATING MACHINE INSULATION BY POLARIZATION AND DEPOLARIZATION CURRENT MEASUREMENT

โดย

นางสาวเธียรแสงเพ็ญ ช่อผูก

นายพสิษฐ์ วงศ์ปิติรุ่งเรือง

นายพัทธดนย์ สมัดไชย

นายพุฒิพงศ์ จิตต์มณีรัตน์

b.00265285

TB00109

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DIAGNOSIS OF ROTATING MACHINE INSULATION BY POLARIZATION AND DEPOLARIZATION CURRENT MEASUREMENT

TIANSANGPEN CHORPOOK
PHASIT WONGPITIRUNGRUANG
PATTHADON SAMADCHAI
PUTTIPONG JITMANEERAT

A PAPER SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT
FOR THE BACHELOR DEGREE IN ELECTRICAL ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2560

การวินิจฉัยฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนด้วยวิธีวัดกระแสโพลาไรซ์เซชัน และดีโพลาไรซ์เซชัน

DIAGNOSIS OF ROTATING MACHINE INSULATION BY POLARIZATION AND DEPOLARIZATION CURRENT MEASUREMENT

โดย

นางสาวเธียรแสงเพ็ญ ช่อผูก

นายพสิษฐ์ วงศ์ปิติรุ่งเรือง

นายพัทธดนย์ สมัดไชย

นายพุฒิพงศ์ จิตต์มณีรัตน์

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.นรเศรษฐ พัฒนเดช

ดร.ภพ จันทร์เจริญสุข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2560

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การวินิจฉัยฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนด้วยวิธีวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและดีโพลาไรซ์เซชัน

ผู้จัดทำ

1. นางสาวเธียรแสงเพ็ญ ช่อผูก
2. นายพสิษฐ์ วงศ์ปิติรุ่งเรือง
3. นายพัทธดนย์ สมัดไชย
4. นายพุฒิพงศ์ จิตต์มณีรัตน์

.... อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร.นรเศรษฐ พัฒนเดช)

.... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ดร.ภพ จันทร์เจริญสุข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวินิจฉัยฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนด้วยวิธีวัดกระแสโพลาไรซ์เซชัน และดีโพลาไรซ์เซชัน

นางสาวเธียรแสงเพ็ญ ช่อผูก
นายพสิษฐ์ วงศ์ปิติรุ่งเรือง
นายพัทธดนย์ สมัดไชย
นายพุฒิพงศ์ จิตต์มณีรัตน์
รศ.ดร.นรเศรษฐ พัฒนเดช อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
ดร.ภพ จันทร์เจริญสุข อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
ปีการศึกษา 2560

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาการวินิจฉัยฉนวนของขดลวดสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่พิกัด 13.8 กิโลโวลต์ ที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว 30 ปี ด้วยวิธีการวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของฉนวนสเตเตอร์ก่อนและหลังการจำลองกรณีศึกษา โดยการจำลองปัญหาการฉนวนของขดลวดสเตเตอร์แบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ การเสื่อมสภาพโดยความร้อน ซึ่งแบ่งออกเป็นกรณีย่อยๆ ได้ 3 กรณี คือ อุณหภูมิ 170 190 และ 210 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 ชั่วโมง และการเสื่อมสภาพโดยการเกิดการดิสชาร์จบางส่วน ในการวัดค่ากระแสโพลาไรซ์เซชันและดีโพลาไรซ์เซชันจะป้อนแรงดัน 500 โวลต์ ให้กับวัตถุทดสอบ และทำการวัดค่ากระแสโพลาไรซ์เซชันและดีโพลาไรซ์เซชันอย่างละ 2000 วินาที จากการทดลองพบว่าผลของกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของสเตเตอร์ก่อนและหลังการจำลองแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยเทียบจากกราฟการวิเคราะห์ความชันของกราฟกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน ซึ่งในกรณีการเสื่อมสภาพจากความร้อน จากความชันของกราฟจะเห็นได้ชัดเจนว่ามีลักษณะการหักงอในอุณหภูมิทั้ง 3 กรณี ส่วนกราฟความชันของกรณีการเสื่อมสภาพเนื่องจากการเกิดดิสชาร์จบางส่วนยังไม่สามารถสรุปผลได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DIAGNOSIS OF ROTATING MACHINE INSULATION BY POLARIZATION AND DEPOLARIZATION CURRENT MEASUREMENT

Ms.Tiansangpen	Chorpook	
Mr.Phasit	Wongpitirungruang	
Mr.Patthadon	Samadchai	
Mr.Puttipong	Jitmaneerat	
Assoc.Prof.Dr.techn.	Norasage Pattanadech	Adviser
Dr.Phop	Chancharoensook	Co-Adviser

ABSTRACT

This paper represents the results from polarization and depolarization current (PDC) measurement including conduction current of rotating machine insulation. To perform the experiment, the stator bar with the length of 30 cm obtained from a 30-year-old synchronous generator rated voltage of 13.8kV from hydro power plant Vajiralongkorn dam were used. Two types of stator bars; degradation by thermal stress and degradation by partial discharge (PD) on the conductive tape were investigated. In this research work, the DC voltage of 500V was applied to stator bar for measuring polarization current, $I_{pol}(t)$, and then suddenly disconnected the DC source for measuring depolarization current, $I_{depol}(t)$. These processes took 2000 seconds for polarization and for depolarization current measurements. Focusing on thermal stress, the first stator bar was heated at 170°C, the second and the third stator bars was heated at 190°C, and 210°C for 12 hours respectively. In the case of PD stator bar, the PD stator bar directly obtained from the synchronous machine was used in the experiment. The PDC results were compared with these of the unmodified bar which were clearly different refer from the slope analysis.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยการช่วยจากหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งต้องขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์นรเศรษฐ พัฒนเดช และดร.พีรวุฒิ ยุทธโกวิท อาจารย์ที่ปรึกษา รวมไปถึงคุณปุณยวีร์ ฉายศิริ ที่ได้กรุณาให้ข้อแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อโครงงานมาด้วยดีตลอด และได้กรุณาตรวจแก้ไข ปริญญานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อยเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ คุณวรชัย สวัสดิมงคล ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและดีโพลาไรซ์เซชันจนปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จ และขอขอบคุณพี่ๆ เจ้าหน้าที่บริษัททีไอเอส เอ็นจิเนียริ่ง แอนด์เซอร์วิส จำกัด ทุกท่าน ที่ได้ให้ความร่วมมือและถ่ายทอดความรู้ทางด้านเทคนิคของเครื่องวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและดีโพลาไรซ์เซชันเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณคุณวีระวุฒิ คำสาสินธุ์ ผู้ให้ความรู้เกี่ยวกับกระบวนการการทำงานภายในโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำอย่างละเอียดในระหว่างที่กลุ่มของข้าพเจ้าได้เข้าไปศึกษาดูงานที่โรงไฟฟ้าเขื่อนวชิราลงกรณ (การไฟฟ้าฝ่ายผลิต) ในขณะที่มีการซ่อมบำรุงเครื่องกำเนิดไฟฟ้า อีกทั้งให้ความอนุเคราะห์ในการมอบแท่งสเตเตอร์บาร์แบบโรเบลให้ไว้สำหรับใช้ในการทำวิจัยในหัวข้อโครงงานนี้

ขอขอบคุณคุณพีรพงศ์ กองแดง และพี่ๆ วิศวกรจากบริษัท ราชบุรีเพาเวอร์ จำกัด ที่ได้ให้ความรู้เกี่ยวกับกระบวนการการทำงานภายในโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วมในระหว่างที่กลุ่มของข้าพเจ้าได้เข้าไปศึกษาดูงานที่บริษัทขณะที่มีการซ่อมบำรุงอุปกรณ์ต่างๆ ภายในโรงไฟฟ้า

ขอขอบคุณอาจารย์ภัทรชัย วิชัยยะ ที่ได้กรุณาให้ยืมเครื่องอบความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรดเพื่อใช้สำหรับการวิจัยและเก็บข้อมูล

ขอขอบคุณบริษัท เมเดนชา จำกัด ที่ได้ให้การสนับสนุนเงินทุนสำหรับการจัดหาเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงทุกคน ที่ช่วยแก้ปัญหาด้วยดีมาโดยตลอด

นอกจากนั้นผู้จัดทำต้องขอขอบคุณ คุณนครศักดิ์ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการที่ให้เบิกใช้เครื่องมือ ตลอดจนคุณกมลวรรณเจ้าหน้าที่ห้องธุรการที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับการเบิกใบเสร็จของโครงงาน

ท้ายนี้คณะผู้จัดทำ ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา และครอบครัวซึ่งให้การสนับสนุนในด้านการเงินและให้กำลังใจ อีกทั้งเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านการจัดหาอุปกรณ์ต่างๆ ในการทำโครงงานครั้งนี้จนสำเร็จได้ด้วยดี จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IIII
สารบัญรูปภาพ	VII
สารบัญตาราง	XI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน	2
1.3 ขอบแขตของการศึกษา	2
1.4 วิธีการดำเนินงาน	3
1.5 แผนการดำเนินงาน	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 สเตเตอร์	6
2.1.1 แกนสเตเตอร์	6
2.1.2 โครงสเตเตอร์	6
2.1.3 ขดลวดสเตเตอร์	7
2.2 ปรากฏการณ์โพลาไรซ์เซชัน	13
2.2.1 ปรากฏการณ์โพลาไรซ์เซชันต่อคุณสมบัติฉนวน	14
2.2.2 ชนิดของปรากฏการณ์โพลาไรซ์เซชัน	16
2.3 กระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน	18
2.3.1 กระแสโพลาไรซ์เซชัน	18
2.3.2 กระแสดีโพลาไรซ์เซชัน	20
2.4 วงจรการวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน	21
บทที่ 3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบและออกแบบวิธีการทดลอง	22
3.1 วัตถุทดสอบ	22
3.1.1 การเตรียมวัตถุทดสอบ	22
3.1.2 เตรียมวัตถุทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมของฉนวนตามกรณีศึกษาต่างๆ	22
3.2 การต่อวงจรทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและดีโพลาไรซ์เซชัน	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2.1 อุปกรณ์การทดสอบ 26

3.2.2 วงจรสำหรับการวัดค่ากระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน 27

3.2.3 วงจรให้ความร้อนกับแท่งสเตเตอร์ด้วยหลักการให้รังสีอินฟราเรด 28

3.3 วิธีการทำการทดสอบ 30

3.3.1 การทดสอบฉนวนสภาพดีของขดลวดอาร์เมเจอร์ที่สเตเตอร์หรือฉนวนของแท่งสเตเตอร์โดยวิธีการวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน 30

3.3.2 การทดสอบฉนวนของขดลวดอาร์เมเจอร์ที่สเตเตอร์หรือฉนวนของแท่งสเตเตอร์โดยวิธีการวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันในสภาวะกรณีศึกษาต่างๆ 31

บทที่ 4 ผลการทดสอบ 32

4.1 การทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและดีโพลาไรซ์เซชันของชิ้นทดสอบก่อนและหลังจำลองการเกิดความเสื่อมกับชิ้นทดสอบตามกรณีศึกษาต่างๆ 32

4.1.1 ชิ้นทดสอบก่อนจำลองความเสื่อมตามกรณีศึกษาต่างๆ 32

4.1.2 ชิ้นทดสอบกรณีจำลองความเสื่อมเนื่องจากความร้อน 33

4.1.3 ชิ้นทดสอบกรณีเสื่อมเนื่องจากผลของการเกิด Partial Discharge ในชิ้นทดสอบ 39

4.2 การวิเคราะห์แฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริก (Dielectric dissipation factor ; tanδ) 40

4.2.1 การวิเคราะห์แฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกของชิ้นทดสอบก่อนจำลองความเสื่อมกับชิ้นทดสอบที่จำลองความเสื่อมเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิ 170°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง 40

4.2.2 การวิเคราะห์แฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกของชิ้นทดสอบก่อนจำลองความเสื่อมกับชิ้นทดสอบที่จำลองความเสื่อมเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิ 190°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง 41

4.2.3 การวิเคราะห์แฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกของชิ้นทดสอบก่อนจำลองความเสื่อมกับชิ้นทดสอบที่จำลองความเสื่อมเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิ 210°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง 42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2.4 การวิเคราะห์แฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกของชิ้นทดสอบก่อนจำลองความเสื่อมกับชิ้นทดสอบกรณีเสื่อมเนื่องจากการเกิด Partial Discharge ในชิ้นทดสอบ 43

4.3 การหาค่ากระแสการนำไฟฟ้า (Conductance Current, i_{con}) 44

4.3.1 การหาค่ากระแสการนำไฟฟ้าของชิ้นทดสอบก่อนจำลองความเสื่อมและหลังจำลองความเสื่อมเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิ 170°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง 44

4.3.2 การหาค่ากระแสการนำไฟฟ้าของชิ้นทดสอบก่อนจำลองความเสื่อมและหลังจำลองความเสื่อมเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิ 190°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง 45

4.3.3 การหาค่ากระแสการนำไฟฟ้าของชิ้นทดสอบก่อนจำลองความเสื่อมและหลังจำลองความเสื่อมเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิ 210°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง 46

4.3.4 การหาค่ากระแสการนำไฟฟ้าของชิ้นทดสอบก่อนจำลองความเสื่อมและชิ้นทดสอบกรณีเสื่อมเนื่องจากการเกิด Partial Discharge ในชิ้นทดสอบ 47

4.4 การหาค่าความชันของกราฟกระแสโพลาไรซ์เซชันและดีโพลาไรซ์เซชัน (Slope analysis) 48

4.4.1 การหาค่าความชันของกราฟกระแสโพลาไรซ์เซชันและดีโพลาไรซ์เซชันของชิ้นทดสอบก่อนจำลองความเสื่อม 48

4.4.2 การหาค่าความชันของกราฟกระแสโพลาไรซ์เซชันและดีโพลาไรซ์เซชันของชิ้นทดสอบหลังจำลองความเสื่อมเนื่องจากความร้อน 49

4.4.3 การหาค่าความชันของกราฟกระแสโพลาไรซ์เซชันและดีโพลาไรซ์เซชันของชิ้นทดสอบที่เสื่อมเนื่องจากการเกิด Partial Discharge ในชิ้นทดสอบ 54

บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง 55

เอกสารอ้างอิง 58

ภาคผนวก 60

ภาคผนวก ก PDC-ANALYSER-1MOD User’s Guide ALFF Engineering 61

ภาคผนวก ข IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery 70

ภาคผนวก ค บทความทางวิชาการ 98

ภาคผนวก ง PDC Measurements & analysis : Stator winding insulation 93

ประวัติผู้เขียน 113

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเขื่อนวชิราลงกรณ จ.กาญจนบุรี (ก) สเตเตอร์ (ข) โรเตอร์	5
2.2 แกนสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเขื่อนวชิราลงกรณ จ.กาญจนบุรี	6
2.3 โครงสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเขื่อนวชิราลงกรณ จ.กาญจนบุรี	7
2.4 ขดลวดสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเขื่อนวชิราลงกรณ จ.กาญจนบุรี	7
2.5 การวางขดลวดสเตเตอร์แบบ Random – Wound	8
2.6 แท่งสเตเตอร์แบบคอยล์ (Coil Type)	9
2.7 แท่งสเตเตอร์แบบโรเบล	9
2.8 การวางแท่งทองแดงด้วยวิธี Transposition ภายในแท่งสเตเตอร์แบบโรเบล	10
2.9 โครงสร้างของขดลวดสเตเตอร์	11
2.10 โครงสร้างระบบฉนวนในขดลวดสเตเตอร์	12
2.11 ปรากฏการณ์โพลาไรซ์เซชัน	14
2.12 ปรากฏการณ์ Electronic Polarization	16
2.13 ปรากฏการณ์ Ionic Polarization	16
2.14 ปรากฏการณ์ Dipolar Polarization	17
2.15 ปรากฏการณ์ Hopping Polarization	17
2.16 ปรากฏการณ์ Space Charge Polarization	18
2.17 วงจรวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของฉนวนบริเวณ ขดลวดสเตเตอร์ทั้ง 2 ตำแหน่ง (ก) ฉนวนระหว่างเฟส และ (ข) ฉนวนระหว่างเฟสกับกราวด์	21
3.1 คอยล์ลักษณะรูปเพชรในช่องสล็อตที่สเตเตอร์ซึ่งภายในคือขดลวดอาร์มาเจอร์	22
3.2 การเตรียมชิ้นงานสำหรับทดสอบ (ก) วัดความยาวเพื่อตัดวัตถุทดสอบความยาว 30 เซนติเมตร (ข) การตัดคอยล์เพื่อนำมาทดสอบพฤติกรรมความเสื่อมสภาพของฉนวน (ค) คอยล์ที่ถูกตัดแล้วมีความยาว 30 เซนติเมตร	23
3.3 การเตรียมชิ้นงานสำหรับทดสอบ (ก) แสดงการปอกฉนวนคอนดักทีฟ ระยะ 5 เซนติเมตร (ข) แสดงการขัดหน้าตัดให้เรียบ	24
3.4 การอบชิ้นทดสอบเพื่อไล่ความชื้น (ก) เครื่องอบลมร้อนเพื่อใช้อบไล่ความชื้น (ข) เครื่องอบความร้อนตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 60 องศาเซลเซียส	24
3.5 แท่งสเตเตอร์ทดสอบสำหรับที่อุณหภูมิทดสอบ	25
3.6 แท่งสเตเตอร์ทดสอบสำหรับการเกิด Partial Discharge	25
3.7 PDC Analyzer	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.8 สายไฟที่ใช้ในวงจรทดสอบ (ก) สายสำหรับจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงสูงสำหรับ PDC-Analyzer-1MOD (ข) สายสำหรับวัดกระแสไฟฟ้า (ค) สายกราวด์	26
3.9 วงจรสำหรับวัดค่ากระแสโพลาไรซ์เซชันและค่ากระแสดีโพลาไรซ์เซชัน (ก) ไดอะแกรมการต่อวงจรสำหรับวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันในเนื้อฉนวน (ข) การต่อวงจรสำหรับวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันในเนื้อฉนวน (ค) การต่อวงจรแบบมีการ์ดริง	28
3.10 ไดอะแกรมวงจรอบความร้อน	29
3.11 วงจรอบความร้อน	29
3.12 เครื่องควบคุมอุณหภูมิ FENWAL AR-24L Series	30
3.13 ไดอะแกรมการต่อสายใช้งานของเครื่องควบคุมอุณหภูมิยี่ห้อ FENWAL AR-24L	30
4.1 กราฟแสดงกระแสโพลาไรซ์เซชันและดีโพลาไรซ์เซชันของชิ้นทดสอบก่อนจำลองความเสื่อม	33
4.2 กราฟแสดงกระแสโพลาไรซ์เซชันและดีโพลาไรซ์เซชันของชิ้นทดสอบหลังจำลองความเสื่อมเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิ 170°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง	34
4.3 กราฟแสดงการเปรียบเทียบกระแสโพลาไรซ์เซชันและดีโพลาไรซ์เซชันของชิ้นทดสอบหลังจำลองความเสื่อมเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิ 170°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมงกับของชิ้นทดสอบก่อนจำลองความเสื่อม	34
4.4 กราฟแสดงกระแสโพลาไรซ์เซชันและดีโพลาไรซ์เซชันของชิ้นทดสอบหลังจำลองความเสื่อมเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิ 190°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง	35
4.5 กราฟแสดงการเปรียบเทียบกระแสโพลาไรซ์เซชันและดีโพลาไรซ์เซชันของชิ้นทดสอบหลังจำลองความเสื่อมเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิ 190°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมงกับของชิ้นทดสอบก่อนจำลองความเสื่อม	36
4.6 กราฟแสดงกระแสโพลาไรซ์เซชันและดีโพลาไรซ์เซชันของชิ้นทดสอบหลังจำลองความเสื่อมเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิ 210°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง	37
4.7 กราฟแสดงการเปรียบเทียบกระแสโพลาไรซ์เซชันและดีโพลาไรซ์เซชันของชิ้นทดสอบหลังจำลองความเสื่อมเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิ 210°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมงกับของชิ้นทดสอบก่อนจำลองความเสื่อม	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.8 กราฟแสดงการเปรียบเทียบกระแสโพลาไรซ์เซชันของชิ้นทดสอบหลังจำลองความเสื่อมเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิ 170°C, 190°C และ 210°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง กับชิ้นทดสอบก่อนจำลองความเสื่อม 38

4.9 กราฟแสดงการเปรียบเทียบกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของชิ้นทดสอบหลังจำลองความเสื่อมเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิ 170°C, 190°C และ 210°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง กับชิ้นทดสอบก่อนจำลองความเสื่อม 38

4.10 กราฟแสดงกระแสโพลาไรซ์เซชันและดีโพลาไรซ์เซชันของชิ้นทดสอบกรณีเสื่อมเนื่องจากผลของการเกิด Partial Discharge ในชิ้นทดสอบ 39

4.11 กราฟแสดงการเปรียบเทียบกระแสโพลาไรซ์เซชันและดีโพลาไรซ์เซชันของชิ้นทดสอบกรณีเสื่อมเนื่องจากผลของการเกิด Partial Discharge ในชิ้นทดสอบ กับของชิ้นทดสอบก่อนจำลองความเสื่อม 40

4.12 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าแฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกของชิ้นทดสอบหลังจำลองความเสื่อมเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิ 170°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง กับชิ้นทดสอบก่อนจำลองความเสื่อม 41

4.13 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าแฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกของชิ้นทดสอบหลังจำลองความเสื่อมเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิ 190°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง กับชิ้นทดสอบก่อนจำลองความเสื่อม 42

4.14 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าแฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกของชิ้นทดสอบหลังจำลองความเสื่อมเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิ 210°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง กับชิ้นทดสอบก่อนจำลองความเสื่อม 43

4.15 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าแฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกของชิ้นทดสอบกรณีเสื่อมเนื่องจากการเกิด Partial Discharge ในชิ้นทดสอบ กับชิ้นทดสอบก่อนจำลองความเสื่อม 44

4.16 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่ากระแสการนำไฟฟ้าของชิ้นทดสอบหลังจำลองความเสื่อมเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิ 170°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง กับชิ้นทดสอบก่อนจำลองความเสื่อม 45

4.17 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่ากระแสการนำไฟฟ้าของชิ้นทดสอบหลังจำลองความเสื่อมเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิ 190°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง กับชิ้นทดสอบก่อนจำลองความเสื่อม 46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.18 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่ากระแสการนำไฟฟ้าของชิ้นทดสอบหลังจำลองความเสื่อมเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิ 210°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง กับชิ้นทดสอบก่อนจำลองความเสื่อม	47
4.19 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่ากระแสการนำไฟฟ้าของชิ้นทดสอบกรณีเสื่อมเนื่องจากการเกิด Partial Discharge ในชิ้นทดสอบ กับชิ้นทดสอบก่อนจำลองความเสื่อม	48
4.20 กราฟแสดงความชันของกระแสโพลาไรซ์เซชันและดีโพลาไรซ์เซชันของชิ้นทดสอบก่อนจำลองความเสื่อม	49
4.21 กราฟแสดงความชันของกระแสโพลาไรซ์เซชันและดีโพลาไรซ์เซชันของชิ้นทดสอบหลังจำลองความเสื่อมเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิ 170°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง	50
4.22 กราฟแสดงความชันของกระแสโพลาไรซ์เซชันและดีโพลาไรซ์เซชันของชิ้นทดสอบหลังจำลองความเสื่อมเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิ 190°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง	51
4.23 กราฟแสดงความชันของกระแสโพลาไรซ์เซชันและดีโพลาไรซ์เซชันของชิ้นทดสอบหลังจำลองความเสื่อมเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิ 210°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง	52
4.24 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความชันกระแสโพลาไรซ์เซชันและดีโพลาไรซ์เซชัน (ก) ชิ้นทดสอบก่อนจาลองความเสื่อม (ข) ชิ้นทดสอบเสื่อมเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิ 170°C (ค) ชิ้นทดสอบเสื่อมเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิ 190°C (ง) ชิ้นทดสอบเสื่อมเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิ 210°C	53
4.25 กราฟแสดงความชันของกระแสโพลาไรซ์เซชันและดีโพลาไรซ์เซชันของชิ้นทดสอบที่เสื่อมเนื่องจากการเกิด Partial Discharge ในชิ้นทดสอบ	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

1.1 การวางแผนจัดลำดับขั้นตอนของการดำเนินงาน 3

4.1 ค่าความจุไฟฟ้า กระแสคงค้าง อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของชิ้นทดสอบ 32

4.2 ค่าความจุไฟฟ้า กระแสคงค้าง อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของชิ้นทดสอบ 33

4.3 ค่าความจุไฟฟ้า กระแสคงค้าง อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของชิ้นทดสอบ 35

4.4 ค่าความจุไฟฟ้า กระแสคงค้าง อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของชิ้นทดสอบ 36

4.5 ค่าความจุไฟฟ้า กระแสคงค้าง อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของชิ้นทดสอบ 39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

โครงสร้างของระบบไฟฟ้ากำลัง ประกอบด้วย ระบบผลิตกำลังไฟฟ้า, ระบบส่งกำลังไฟฟ้า และระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า ซึ่งระบบผลิตกำลังไฟฟ้าต้องอาศัยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อเปลี่ยนพลังงานที่ถูกเก็บอยู่ในรูปต่างๆ เช่น ก๊าซธรรมชาติ, ถ่านหิน, พลังงานนิวเคลียร์, น้ำมันดีเซล หรือพลังงานศักย์โน้มถ่วงมาเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยอาศัยหลักการของสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำเพื่อทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้า การใช้งานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าย่อมทำให้เกิดความเสื่อมสภาพซึ่งความเสื่อมสภาพนั้นจะเกิดจากฉนวนเป็นส่วนใหญ่ซึ่งเป็นฉนวนของขดลวดอาร์มาเจอร์ เมื่อใช้งานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิตไฟฟ้าเดินเครื่องเป็นระยะเวลานานย่อมทำให้เกิดความเสื่อมสภาพของฉนวนในขดลวดอาร์มาเจอร์ซึ่งความเสื่อมสภาพจะเกิดจากสาเหตุต่างๆ เช่น ความร้อนในขณะใช้งาน, ความเครียดของสนามไฟฟ้า, แรงทางกลที่เกิดขึ้นจากการเสียดสีและสภาพแวดล้อมที่มีฝุ่นละออง น้ำ หรือน้ำมัน การจำลองสาเหตุของการเสื่อมสภาพของฉนวนของขดลวดอาร์มาเจอร์ที่สเตเตอร์ ในสภาวะต่างๆ ประกอบไปด้วย ความเสื่อมเนื่องจากความร้อน และการเกิด Partial Discharge ภายในฉนวน

ฉนวนของขดลวดอาร์มาเจอร์ประกอบด้วยฉนวนชั้นไมกาและชั้นอีพ็อกซีกลาสส์ โดยการวิเคราะห์ฉนวนเหล่านี้จะใช้หลักการของการวิเคราะได้หลายวิธี ยกตัวอย่างเช่นการทดสอบค่าความต้านทานฉนวน (Insulation Resistance Test) การทดสอบเพื่อหาค่าดัชนีการที่มีขั้ว (Polarization Index Test) การทดสอบการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge Test) และการทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (High Potential Test) แต่การทดสอบด้วยวิธีวิเคราะห์ฉนวนด้วยการวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสโพลาไรซ์ซชันจะทำให้โมเลกุลเปลี่ยนแปลงตามสนามไฟฟ้าซึ่งจะไม่ทำให้ฉนวนเสียสภาพเนื่องจากให้แรงดันต่ำในการทดสอบแตกต่างจากการทดสอบอื่นนั้นจะให้แรงดันสูงในการทดสอบจึงทำให้ฉนวนเสียสภาพได้

การวิเคราะห์ฉนวนด้วยวิธีวัดกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชัน ใช้หลักการของสนามไฟฟ้าโดยให้สนามไฟฟ้าผ่านวัตถุทดสอบคือชิ้นส่วนของขดลวดอาร์มาเจอร์ในสเตเตอร์ สนามไฟฟ้ามีทิศทางจากบวกไปลบซึ่งโครงสร้างโมเลกุลของอีพ็อกซีและไมกา ประกอบด้วยธาตุหลายชนิดด้วยพันธะโควาเลนต์ซึ่งจะมีอิเล็กตรอนอิสระเกดขึ้นขึ้น อิเล็กตรอนอิสระเหล่านั้นจะมีประจุเป็นลบ ซึ่งเมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าแล้วจะถูกเหนี่ยวนำจากสนามไฟฟ้าภายนอกให้มีขั้วบวกและลบขึ้นมาดังนั้นโมเลกุลจะเกิดการเรียงตัวเพราะสนามไฟฟ้าจะทำให้เกิดกระแสไหลขึ้น ดังนั้นเมื่อฉนวนเปลี่ยนแปลงสภาพไปจะส่งผลกระทบต่อโครงสร้างของโมเลกุลซึ่งจะเปลี่ยนแปลงสภาพของฉนวนด้วย ในการวิเคราะห์ด้วยกราฟกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โพลาไรเซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันจะวิเคราะห์ฉนวนก่อนที่จะทำการจำลองจากสาเหตุของกรณีศึกษาต่างๆ แล้วนำผลไปเปรียบเทียบกับค่ากระแสโพลาไรซ์เซชันและดีโพลาไรซ์เซชันหลังการจำลอง โดยสามารถนำผลการจำลองมาเป็นรูปแบบอ้างอิงในการซ่อมบำรุงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ ซึ่งจะส่งผลต่อการซ่อมบำรุงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและสร้างความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้า อีกทั้งยังสามารถลดค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุง และจะช่วยป้องกันอันตรายจากการทำงานกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและเพิ่มความปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงาน ซึ่งจากเหตุผลที่กล่าวมาทั้งหมดกลุ่มของข้าพเจ้าจึงเกิดความสนใจในการศึกษาด้วยวิธีการวิเคราะห์ฉนวนด้วยการวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและดีโพลาไรซ์เซชัน อีกทั้งวิธีนี้ยังไม่ได้รับการศึกษาอย่างแพร่หลายในปัจจุบันดังนั้นจึงนำมาศึกษาเพื่อให้การวิเคราะห์ความเสื่อมสภาพของฉนวนมีเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานจริงซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างมาก

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

1. เพื่อศึกษาโครงสร้างและวัสดุของฉนวนในขดลวดอาร์มาเจอร์ที่สเตเตอร์
2. เพื่อศึกษาโครงสร้างและหลักการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส
3. เพื่อศึกษาทฤษฎีและหลักการวิเคราะห์ฉนวนด้วยวิธีการวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน
4. เพื่อจำลองรูปแบบของตัวอย่างสาเหตุการเสื่อมของฉนวนในขดลวดอาร์มาเจอร์ที่สเตเตอร์เพื่อนำไปซ่อมบำรุงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1. ศึกษาโครงสร้างและส่วนประกอบของฉนวนของขดลวดอาร์มาเจอร์ที่สเตเตอร์
2. ศึกษาโครงสร้างและหลักการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส
3. วิเคราะห์ฉนวนของขดลวดอาร์มาเจอร์ที่สเตเตอร์ด้วยวิธีการวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันจากเครื่อง PDC-Analyser-1MOD มีสาเหตุดังนี้
    - ฉนวนของขดลวดอาร์มาเจอร์ที่มีสภาพดี
    - ฉนวนของขดลวดอาร์มาเจอร์ที่เสื่อมสภาพเนื่องจากการได้รับความร้อน
    - ฉนวนของขดลวดอาร์มาเจอร์ที่เสื่อมสภาพเนื่องจากการเกิด Partial Discharge

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 วิธีการดำเนินงาน

- ศึกษาหลักการและทฤษฎีของปรากฏการณ์ของการเกิดโพลาไรซ์เซชัน
- ออกแบบวงจรการทดสอบและออกแบบชิ้นทดสอบฉนวนของขดลวดอาร์มาเจอร์ใน สเตเตอร์
- จำลองผลการเกิดสนามไฟฟ้าต่อชิ้นทดสอบฉนวนของขดลวดอาร์มาเจอร์ในสเตเตอร์ โดยใช้โปรแกรม COMSOL Multiphysics®
- ทดสอบด้วยวิธีวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันและวิเคราะห์ผล

1.5 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 การวางแผนจัดลำดับขั้นตอนของการดำเนินงาน

การดำเนินงาน	ปี 2560					ปี 2561				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ษ.	พ.ค.
1. ศึกษาทฤษฎี โครงสร้าง และส่วนประกอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	←---→ ←——	——→								
2. ศึกษาหลักการและทฤษฎีของปรากฏการณ์โพลาไรซ์-เซชัน	←---→ ←——	——→								
3. สร้างชิ้นทดสอบสำหรับการทดสอบฉนวนของแท่งสเตเตอร์	←---→ ←——→									
4. เก็บข้อมูลตัวอย่างชิ้นทดสอบโดยใช้เครื่อง PDC Analyzer		←---→ ←——→								
5. ทำการจำลองการเกิดความเสื่อมของฉนวนของชิ้นทดสอบ		←--- ←——	------ ——	---→ ——	 ——→					
6. ศึกษาและดูงานโรงไฟฟ้าพลังน้ำเขื่อนวชิราลงกรณ จังหวัดกาญจนบุรี				←---→ ←——→						

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. ทำการทดสอบกรณีศึกษาการเสื่อมสภาพจากกรณีต่างๆ				- - - - →	- - - - → ←————	- - - - → ————	————→			
8. วิเคราะห์ผลจากการวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน					←- - - - ←————	- - - - → ————	————	————→		
9. จัดทำปริญญานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์							←- - - - ←————	- - - - → ————	————→	

←- - - - - - - - - - - - - - - - → วางแผน ←————————————→ ปฏิบัติงานจริง

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีความรู้และมีความเข้าใจโครงสร้างและการฉนวนของขดลวดอาร์มาเจอร์ในสเตเตอร์

2. มีความรู้และมีความเข้าใจทฤษฎีของกระแสโพลาไรซ์เซชันและการแสดีโพลาไรซ์เซชัน

3. ได้รูปแบบของสาเหตุการเสื่อมสภาพของฉนวนด้วยสาเหตุจากกรณีศึกษาต่างๆ เพื่อนำผลที่ได้ไปประกอบการซ่อมบำรุงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เครื่องกำเนิดไฟฟ้า คือ เครื่องมือที่ใช้สำหรับเปลี่ยนพลังงานกลให้เป็นพลังงานไฟฟ้า โดยอาศัยหลักการการเหนี่ยวนำของแม่เหล็ก คือการเคลื่อนที่ของขดลวดตัวนำตัดผ่านสนามแม่เหล็ก หรือการเคลื่อนที่ของสนามแม่เหล็กตัดผ่านขดลวด แหล่งที่มาของพลังงานกลอาจเป็นลูกสูบ เครื่องยนต์กังหันไอน้ำ กังหันลม กังหันน้ำ หรือแหล่งพลังงานกลอื่นๆ โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีส่วนประกอบหลักอยู่ 2 ส่วน คือ สเตเตอร์ (Stator) เป็นโครงสร้างส่วนที่อยู่กับที่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และโรเตอร์ (Rotor) เป็นโครงสร้างส่วนที่เคลื่อนที่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.1

(ก) (ข)

รูปที่ 2.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเขื่อนวชิราลงกรณ จ.กาญจนบุรี (ก) สเตเตอร์ (ข) โรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1 สเตเตอร์ (Stator) [1,7]

2.1.1 แกนสเตเตอร์ (Stator Core)

แกนสเตเตอร์ ถูกสร้างมาจากแผ่นเหล็กหุ้มฉนวน ความบางของแผ่นเหล็กและชนิดของเหล็กจะถูกเลือกใช้เพื่อลดการสูญเสียเนื่องมาจากกระแสไหลวน (Eddy Current Loss) และการสูญเสียเนื่องจากฮีสเตอร์รีซีส (Hysteresis Loss) โดยนำมาเรียงอัดแน่นซ้อนกัน จากนั้นเชื่อมติดกันแล้วนำไปติดตั้งโดยตรงกับโครงสเตเตอร์ มีลักษณะเป็นช่องสล็อตสำหรับการวางขดลวดอาร์มาเจอร์ และนอกจากนี้ยังทำหน้าที่เป็นเส้นทางเดินของฟลักซ์แม่เหล็ก

รูปที่ 2.2 แกนสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเขื่อนวชิราลงกรณ จ.กาญจนบุรี

2.1.2 โครงสเตเตอร์ (Stator Frame)

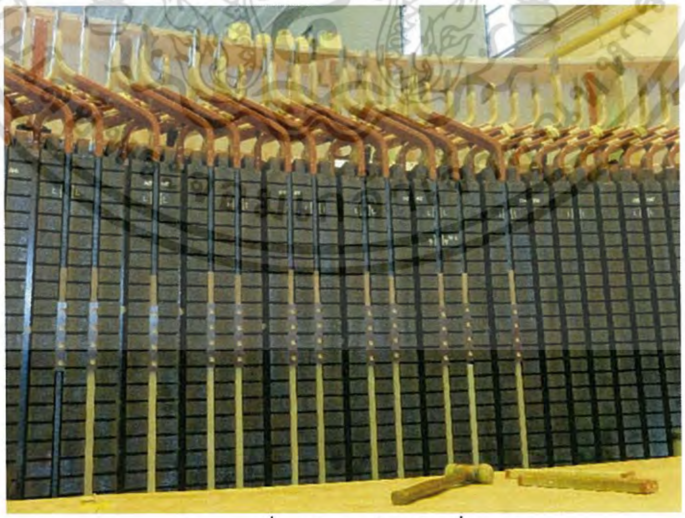
วัตถุประสงค์หลักของโครงสเตเตอร์ คือ การประคับประคองแกนสเตเตอร์ รองรับน้ำหนักของสเตเตอร์ ลดการสั่นสะเทือนและเสียงรบกวน และทนต่อความเครียดจากการลัดวงจร นอกจากนี้ยังทำหน้าที่เป็นท่อทางเดินของก๊าซไฮโดรเจนสำหรับระบบหล่อเย็นในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบหล่อเย็นด้วยไฮโดรเจน (Hydrogen-cooled Generator) ภายในยังมีระบบระบายอากาศ ในตัวระบบหล่อเย็นด้วยไฮโดรเจน โครงสเตเตอร์ยังช่วยเป็นตัวพยุงตัวหล่อเย็น ซึ่งเป็นส่วนที่ทำหน้าที่หล่อเย็นโดยวิธีการแลกเปลี่ยนความร้อนโดยการดูดซับของไฮโดรเจน เนื่องจากโครงสเตเตอร์ให้การประคับประคองแกนสเตเตอร์ จึงจำเป็นต้องมีความแข็งแรงและมีการติดตั้งที่มีความยืดหยุ่นได้ เนื่องจากการขยายหรือหดของแกนเนื่องมาจากความร้อนและแรงทางแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.3 โครงสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเขื่อนวชิราลงกรณ จ.กาญจนบุรี

2.1.3 ขดลวดสเตเตอร์ (Stator Winding)

ขดลวดสเตเตอร์ถูกสร้างมาจากแท่งตัวนำทองแดงที่ถูกพันด้วยฉนวน ถูกวางตัวอยู่ภายในรอบร่องสล็อตของแกนสเตเตอร์ ลักษณะของการวางขดลวดมี 2 ลักษณะ คือ การพันขดลวดแบบชั้นเดียว จำนวนขดลวดต่อกลุ่มจะเท่ากับครึ่งหนึ่งของจำนวนขั้วแม่เหล็ก และการพันขดลวดแบบสองชั้น จำนวนขดลวดต่อกลุ่มจะเท่ากับจำนวนขั้วแม่เหล็ก โดยจะถูกเรียกว่า Top Bar และ Bottom Bar ขดลวดสเตเตอร์จะถูกแบ่งให้เป็น 3 เฟส ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะเป็นการต่อกันแบบวายเกือบทั้งหมด ทั้งสามเฟสถูกเชื่อมต่อกันอย่างสมมาตรและจัดวางแต่ละเฟสห่างกันด้วยมุม 120 องศาทางไฟฟ้า



รูปที่ 2.4 ขดลวดสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเขื่อนวชิราลงกรณ จ.กาญจนบุรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างของขดลวดสเตเตอร์ สามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบ ตามลักษณะการวางในร่องสล็อต

1) การวางขดลวดแบบ Random – Wound [1]

ขดลวดแบบ Random – Wound เป็นกลุ่มตัวนำทองแดงที่ถูกเคลือบด้วยฉนวน พันเป็นวงผ่านช่องสล็อตบนแกนสเตเตอร์ ดังรูปที่ 2.5 แสดงให้เห็นว่าสามารถมองเห็นรอบของขดลวดจำนวนมากได้โดยง่าย ซึ่งการวางขดลวดชนิดนี้มีลักษณะการวางแบบสุ่ม ไม่คำนึงถึงผลของแรงดันต่อรอบของขดลวด สามารถนำไปใช้งานได้กับระดับแรงดันที่ต่ำกว่า 1 กิโลโวลต์ และใช้กับเครื่องจักรกลที่มีพิกัดกำลังต่ำ

รูปที่ 2.5 การวางขดลวดสเตเตอร์แบบ Random – Wound [2]

2) การวางแท่งสเตเตอร์แบบ Form – Wound

แท่งสเตเตอร์แบบ Form – Wound ส่วนมากจะถูกใช้กับมอเตอร์ขนาดใหญ่และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีพิกัดสูง 50 ถึง 100 เมกะโวลต์-แอมแปร์ ลักษณะการวางแท่งสเตเตอร์ต้องคำนึงถึงแรงดันต่อรอบให้เหมาะสม โดยการวางแท่งสเตเตอร์แบบ Form – Wound นี้มีอยู่ 2 แบบ ดังนี้

- แท่งสเตเตอร์แบบคอยล์ (Coil Type) ทำมาจากขดลวดที่ผ่านการฉนวนเรียบร้อยแล้ว ก่อนที่จะทำการวางลงไปในช่องสล็อตบนแกนสเตเตอร์ รูปร่างของแท่งสเตเตอร์จะมีลักษณะเป็นเหลี่ยมคล้ายเพชร จึงถูกเรียกว่า Diamond Shape

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

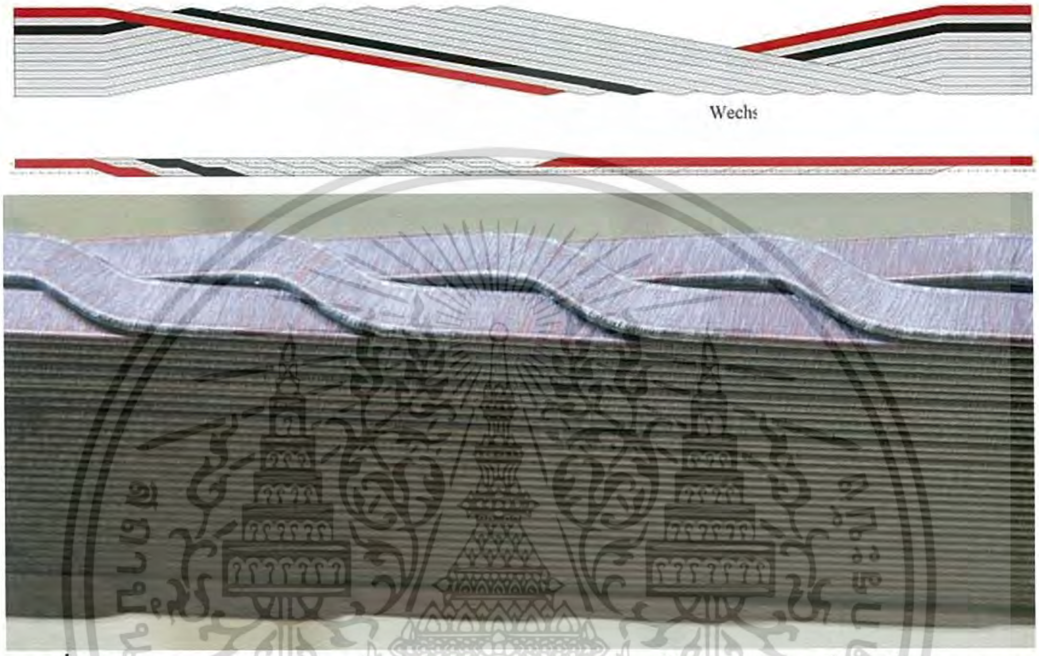
รูปที่ 2.6 แท่งสเตเตอร์แบบคอยล์ (Coil Type) [3]

- แท่งสเตเตอร์แบบโรเบล (Roebel Bar Type) นิยมใช้ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่ เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีกำลังผลิตมากยิ่งต้องการขนาดของขดลวดที่ใหญ่และความแข็งแรงทางกลสูง จึงอาจเป็นเรื่องยากในการเลือกใช้แท่งสเตเตอร์แบบคอยล์ซึ่งมีขนาดใหญ่แทรกลงในช่องสล็อตขนาดเล็กโดยไม่ให้เกิดความเสียหายแก่แท่งสเตเตอร์ขณะกระทำกระบวนการการวางขดลวด ดังนั้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่ในปัจจุบัน ส่วนมากจึงใช้ขดลวดแบบครึ่งรอบ (Half Coil) ซึ่งถูกเรียกว่าแบบโรเบล (Roebel Bar) ดังรูปที่ 2.7 แล้วจึงทำการเชื่อมต่อกันแบบอนุกรม ซึ่งสามารถนำไปติดตั้งได้ง่ายกว่าการติดตั้งโดยใช้ทั้งสองด้านของขดลวดสำหรับ 2 ช่องสล็อต

รูปที่ 2.7 แท่งสเตเตอร์แบบโรเบล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะของการวางแท่งตัวนำทองแดงภายในแท่งสเตเตอร์จะมีการวางตัวกันแบบ Transposition ดังรูปที่ 2.8 การวางแท่งตัวนำทองแดงแบบนี้จะปรากฏในเครื่องจักรที่วางแท่งสเตเตอร์แบบ Form – Wound เท่านั้น ซึ่งจะช่วยลดปัญหาของความสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนได้



รูปที่ 2.8 การวางแท่งทองแดงด้วยวิธี Transposition ภายในแท่งสเตเตอร์แบบโรเบล [4,6]

โครงสร้างของขดลวดสเตเตอร์ สามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือ ขดลวดส่วนที่อยู่ภายในช่องสล็อตและขดลวดส่วนที่อยู่พ้นช่องสล็อต ซึ่งทั้งสองส่วนนี้มีการใช้วัสดุสำหรับการฉนวนที่แตกต่างกัน โดยฉนวนของขดลวดส่วนที่อยู่ภายในช่องสล็อตซึ่งเป็นส่วนที่ตรงและยาว จะมีความแข็งแรงมากกว่าและมีโอกาสเกิดโพรงอากาศน้อยกว่า เนื่องจากสามารถใช้เครื่องอัดความร้อน (Hot Press) บีบอัดด้วยแรงดันและอบด้วยความร้อนได้ ในกระบวนการนี้จะช่วยให้เรซิ่นมีความสามารถในการแทรกซึมเข้าไปในช่องอากาศได้มากกว่าขดลวดส่วนที่อยู่พ้นช่องสล็อตซึ่งเป็นส่วนที่มีลักษณะโค้ง จึงไม่สามารถใช้เครื่องอัดความร้อนในการบีบอัดฉนวนได้ จึงมีความบอบบางและมีโอกาสเกิดจุดบกพร่องได้มากกว่า แต่ในปัจจุบันนี้ในกรรมวิธีการผลิตมีการใช้กระบวนการ Vacuum Pressure Impregnation (VPI) ซึ่งสามารถใช้ได้กับขดลวดทั้งสองส่วน จึงทำให้เกิดความแข็งแรงได้มากขึ้น

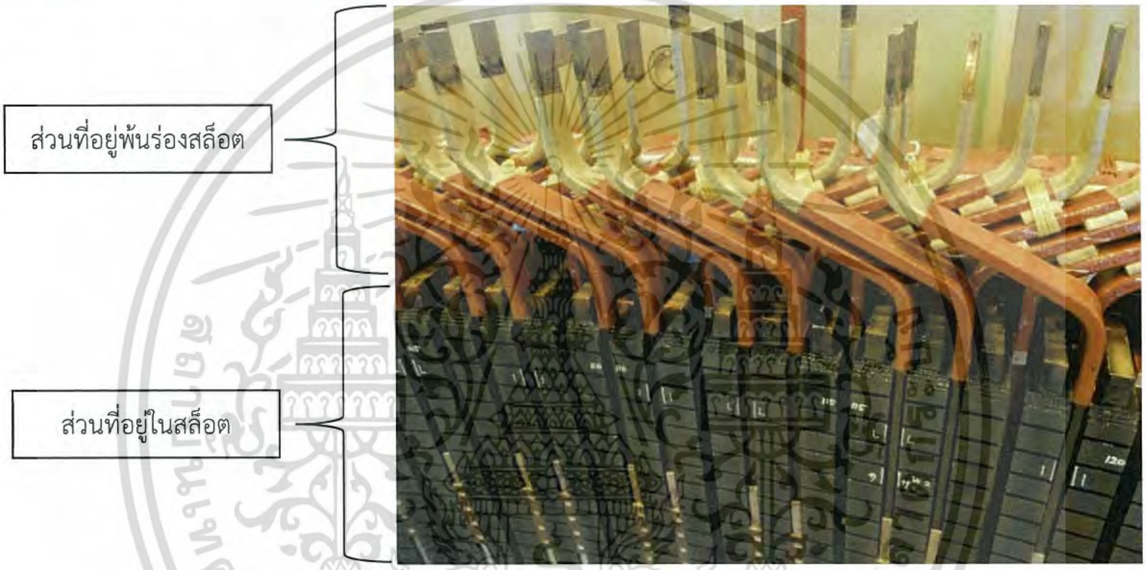
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) ฉนวนขดลวดสเตเตอร์ส่วนที่อยู่ในช่องสล็อต

ฉนวนของขดลวดสเตเตอร์ที่อยู่ในช่องสล็อตประกอบด้วยชั้นฉนวนกราวด์หรือไมกา และชั้นวัสดุตัวนำสำหรับการต้านการเกิดโคโรนา โดยชั้นฉนวนกราวด์จะทนต่อความเข้มสนามไฟฟ้าได้สูงแต่มีความยืดหยุ่นน้อยกว่าฉนวนของขดลวดสเตเตอร์ที่อยู่พ้นช่องสล็อต

2) ฉนวนขดลวดสเตเตอร์ส่วนที่พ้นช่องสล็อต

ฉนวนบริเวณนี้ควรใช้ฉนวนซึ่งมีคุณสมบัติยืดหยุ่นเป็นพิเศษเนื่องจากเป็นส่วนที่ได้รับแรงสั่นสะเทือนจากแรงทางแม่เหล็กไฟฟ้า และประกอบด้วยฉนวนชั้นวัสดุกึ่งตัวนำเคลือบสำหรับลดความเครียดทางไฟฟ้าเพื่อป้องกันการเกิดการปล่อยประจุบางส่วนตามผิวฉนวน

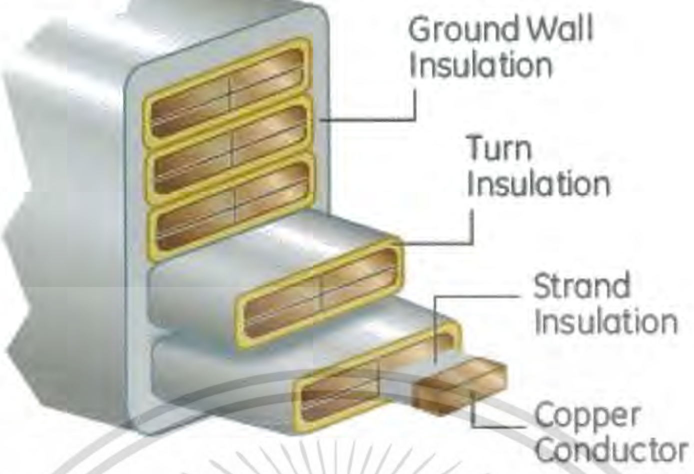


รูปที่ 2.9 โครงสร้างของขดลวดสเตเตอร์

โครงสร้างระบบฉนวนในขดลวดสเตเตอร์

ระบบฉนวนในขดลวดสเตเตอร์ประกอบด้วยหลายๆ ส่วนประกอบ ซึ่งทุกส่วนจะช่วยป้องกันไม่ให้เกิดการลัดวงจรทางไฟฟ้า ช่วยให้ความร้อนที่เกิดจากความสูญเสียในตัวนำถูกส่งไปยังแผงระบายความร้อน (Heat Sink) และช่วยไม่ให้ตัวนำเกิดการสั่นเนื่องจากแรงทางแม่เหล็ก ระบบฉนวนพื้นฐานของขดลวดสเตเตอร์ประกอบด้วย 3 ส่วน ดังรูปที่ 2.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 โครงสร้างระบบฉนวนในขดลวดสเตเตอร์ [5]

1) ฉนวนสแตรนด์ (Strand Insulation)

ฉนวนสแตรนด์เป็นชั้นฉนวนที่ห่อหุ้มติดกับแท่งตัวนำทองแดงของสเตเตอร์ ทำหน้าที่ในการป้องกันการลัดวงจรระหว่างตัวนำภายในสเตเตอร์ แต่เดิมฉนวนชั้นนี้ทำจากวัสดุแร่ไยหิน แต่เนื่องจากต้องการการเพิ่มเนื้อที่สำหรับตัวนำทองแดงเพื่อการผลิตกำลังไฟฟ้าที่มากขึ้น จึงเปลี่ยนมาใช้วัสดุประเภทแก้วโพลีเอสเตอร์ (Polyester Glass)

สำหรับเหตุผลทางกลที่ทำให้มีความจำเป็นที่จะต้องมีฉนวนสแตรนด์ คือ การที่มีตัวนำขนาดใหญ่จะเป็นการยากต่อการดัดงอเพื่อให้ได้รูปร่างที่ต้องการของขดลวด ดังนั้นการที่ตัวนำถูกสร้างโดยใช้ชั้นของฉนวนสแตรนด์ที่มีขนาดเล็กกว่า การดัดงอเพื่อให้ได้รูปร่างตามต้องการจึงมีความง่ายกว่าการใช้อุปกรณ์ขึ้นรูปขดลวดที่จะได้ขดลวดตัวนำขนาดใหญ่กว่า

ในทางไฟฟ้า ถ้าหากตัวนำทองแดงมีขนาดหน้าตัดใหญ่เกินไป ไฟฟ้ากระแสสลับจะไหลที่บริเวณขอบนอกของตัวนำหรือที่เรียกว่าสกินเอฟเฟ็กต์ (Skin Effect) ดังนั้นการกำหนดพื้นที่หน้าตัดของตัวนำทองแดงด้วยฉนวนสแตรนด์จึงทำให้กระแสสามารถไหลในทองแดงได้ทั่วทั้งหมด ทำให้ไม่มีสกินเอฟเฟ็กต์เกิดขึ้นและลดความสูญเสียลง

สำหรับเหตุผลทางไฟฟ้า การซ่อมแซมหรือบำรุงรักษาขดลวดอาจทำความเสียหายแก่ฉนวนสแตรนด์ได้ ดังนั้นฉนวนสแตรนด์จึงต้องมีคุณสมบัติทางกลที่ดี นอกจากนี้ยังอยู่ติดกับตัวนำทองแดงซึ่งรองรับการไหลของกระแสสเตเตอร์ ฉนวนสแตรนด์จึงเป็นจุดที่ได้รับอุณหภูมิสูงสุดในสเตเตอร์ ดังนั้นจึงต้องมีคุณสมบัติทางความร้อนที่ดีเช่นกัน การลัดวงจรเพียงเล็กน้อยในขดลวดแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Form-Wound จะไม่ทำให้ขดลวดเสียสภาพ แต่จะเพิ่มค่าความสูญเสียให้กับขดลวดสเตเตอร์และทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น

วัสดุฉนวนที่นำมาใช้ในชั้นฉนวนสแตรนด์ เช่น กระดาษไมกาบาง, ฟิล์มโพลิเอสเทอร์ลีน, โพลิไอมาย, ฟิล์มไอมายโพลิเมอร์ เป็นต้น

2) ฉนวนเทิร์น (Turn Insulation)

ฉนวนเทิร์นเป็นชั้นฉนวนที่อยู่ถัดจากชั้นฉนวนสแตรนด์ มีหน้าที่ป้องกันการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวดทั้งแบบ Random-Wound และแบบ Form-Wound แต่ในขดลวดแบบ Roebel จะไม่มีชั้นฉนวนเทิร์นแต่จะมีแต่ชั้นฉนวนสแตรนด์

โดยส่วนมากวัสดุฉนวนที่นำมาใช้ในชั้นฉนวนเทิร์นจะเป็นวัสดุชนิดเดียวกันกับชั้นฉนวนกราวด์ (Ground Wall Insulation) เช่น แอสฟัลต์ ไมกา เป็นต้น

3) ฉนวนกราวด์ (Ground Wall Insulation)

ฉนวนกราวด์คือส่วนประกอบที่ทำหน้าที่ในการแยกตัวนำทองแดงออกจากกราวด์ของแกนสเตเตอร์ เป็นเส้นทางเดินหลักของการระบายความร้อนจากตัวนำทองแดงไปยังแกนสเตเตอร์ของขดลวดของเครื่องจักรที่มีการหล่อเย็นทางอ้อมแบบ Form-Wound ดังนั้น ฉนวนชั้นกราวด์ควรจะมีความต้านทานอุณหภูมิที่ต่ำเท่าที่จะเป็นไปได้ เพื่อที่จะป้องกันอุณหภูมิที่ค่อนข้างสูงในตัวนำทองแดง และต้องปราศจากการมีช่องว่าง เช่นโพรงอากาศซึ่งจะปิดกั้นการไหลของความร้อน

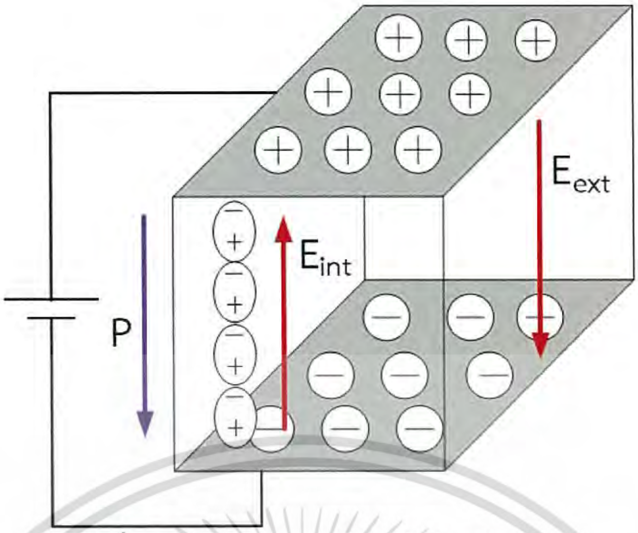
ตัวนำทองแดงอาจได้รับผลกระทบจากแรงแม่เหล็กขนาดใหญ่ ถ้าหากฉนวนกราวด์มีโพรงอากาศหรือช่องว่างอยู่ อาจทำให้ตัวนำทองแดงสามารถสั่นได้อย่างอิสระ ซึ่งจะทำให้ขดลวดตัวนำเกิดการสั่นขึ้นและลงในช่องสล็อต ฉนวนกราวด์จึงต้องทำหน้าที่ในการช่วยป้องกันการสั่นสะเทือนของตัวนำทองแดงอันเนื่องมาจากแรงแม่เหล็กเหล่านี้

วัสดุที่นำมาใช้ในฉนวนกราวด์นี้มีหลายชนิดขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน ซึ่งจะเป็นพวกกระดาษเทปไมกาเสริมแรงด้วยใยแก้ว เป็นต้น

2.2 ปรากฏการณ์โพลาไรซ์เซชัน (Polarization) [8,9,10]

ฉนวนเมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าที่มีทิศทางจากบวกไปลบ จะแสดงความเป็นขั้วเพราะฉนวนประกอบด้วยโมเลกุลภายในเนื้อฉนวน เพราะฉะนั้นฉนวนจะแสดงความเป็นขั้วเกิดสนามไฟฟ้าภายในเนื้อฉนวน โดยกลุ่มหมอกของอิเล็กตรอนเคลื่อนที่สวนทางกับทิศทางของสนามไฟฟ้าภายนอก ในขณะที่ประจุบวกจะเคลื่อนที่ตามทิศทางของสนามไฟฟ้าซึ่งประจุบวกและประจุลบที่เคลื่อนที่ออกจากกันไม่เกินแรงดึงดูดของพันธะของการมีขั้ว โมเลกุลจะถูกโพลาไรซ์เซชันทำให้มีทิศทางตรงกันข้ามกันกับสนามไฟฟ้าภายนอก จากรูปที่ 2.11 ปรากฏการณ์โพลาไรซ์เซชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 ปรากฏการณ์โพลาไรซ์เซชัน [10]

2.2.1 ปรากฏการณ์โพลาไรซ์เซชันต่อคุณสมบัติฉนวน

ปรากฏการณ์โพลาไรซ์เซชันจะเกิดขึ้นเมื่อไดอิเล็กตริกอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอภายนอก พิจารณาจากตัวเก็บประจุที่มีสนามไฟฟ้าโดยมีสุญญากาศเป็นฉนวน, ความหนาแน่นไฟฟ้า เป็นสัดส่วนกับเวกเตอร์สนามไฟฟ้า และมีค่าเปอร์มิตติวิตี้เป็นค่าคงที่

$$D = \varepsilon_0 E \tag{2.3}$$

โดยสนามไฟฟ้าภายในสุญญากาศ จะเกิดปรากฏการณ์โพลาไรซ์เซชันระดับอะตอม ค่าสามารถยอมรับได้ของไดอิเล็กตริกซึ่งสัมพันธ์กับโพลาไรซ์เซชันจากสนามไฟฟ้า

$$P = \chi \varepsilon_0 E \tag{2.4}$$

ค่าความสามารถยอมรับได้ของไดอิเล็กตริกเท่ากับศูนย์ในสุญญากาศ แต่จะเพิ่มขึ้นเพราะปรากฏการณ์โพลาไรซ์เซชันในฉนวนแข็ง โดยมีความสัมพันธ์กับค่าเปอร์มิตติวิตี้

$$\varepsilon = \varepsilon_0 (1 + \chi) \tag{2.5}$$

โพลาไรซ์เซชันมีทิศทางเดียวกับทิศทางของความเข้มสนามไฟฟ้า โดยความสัมพันธ์ระหว่างโพลาไรซ์เซชันกับความหนาแน่นสนามไฟฟ้าแสดงได้ดังสมการที่ 2.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$D = \varepsilon_0 E + P = \varepsilon_0 (1+\chi) E \qquad (2.6)$$

จากสมการข้างบนนั้น พบว่าโพลาไรซ์เซชันสามารถคงอยู่โดยปราศจากสนามไฟฟ้าภายนอก โดยกระบวนการดีโพลาไรซ์เซชันนั้นจะทำให้เกิดความหนาแน่นของสนามไฟฟ้า เมื่อกระบวนการทั้งสองต่างกันจะทำให้ค่าคงที่เวลาต่างกันด้วย ส่งผลให้เวลาและความถี่ขึ้นอยู่กับค่าความสามารถยอมรับได้ของค่าไดอิเล็กทริก

คุณสมบิติของฉนวนในโดเมนเวลา ส่งผลกับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าและฟังก์ชันการตอบสนองของฉนวนเพื่อทำให้ครอบคลุมปรากฏการณ์ทางกายภาพของคายกระแสและการนำกระแสด้วยสมการคณิตศาสตร์ เริ่มต้นด้วยสมการของแม็กซ์เวล สนามไฟฟ้า $E(t)$ สร้างความหนาแน่นกระแส $J(t)$ เป็นผลรวมของกระแสการนำไฟฟ้าและกระแสการกระจัด (Displacement Current)

$$\nabla \times H(t) = J(t) = \sigma_0 E(t) + \frac{dD(t)}{dt} \qquad (2.7)$$

เมื่อ σ_0 คือ ปริมาตรความนำของวัสดุ ดังนั้นการโพลาไรซ์ $P(t)$ ทำให้เกิดการนำกระแสไฟฟ้าและสามารถเขียนการกระจัดได้ดังนี้

$$J(t) = \sigma_0 E_0 + \varepsilon_0 \varepsilon(\infty) \frac{dE(t)}{dt} \frac{dP(t)}{dt} \qquad (2.8)$$

เมื่อ $E(t)$ ถูกกำหนดโดยฟังก์ชันขั้นบันได $H(t)$ และให้ขนาดของแอมพลิจูด E_0 ด้วยวิธีการรวมกันในโดเมนเวลาจะได้ความหนาแน่นของไฟฟ้าทั้งหมดเป็น $J(t)$ เป็น

$$J(t) = \sigma_0 E_0 + \varepsilon_0 E_0 [\varepsilon(\infty)\delta(t) + f(t)] \qquad (2.9)$$

$$\varepsilon(\infty) = 1 + \chi(\infty) \qquad (2.10)$$

เมื่อ $\varepsilon(\infty)$ เป็นเปอร์มิตติวิตี้ความถี่สูง

เมื่อ $\delta(t)$ เป็นฟังก์ชันเดลต้าเป็นอนุพันธ์ของฟังก์ชันขั้นบันได $H(t)$

เมื่อ $f(t)$ แสดงถึงฟังก์ชันการตอบสนองของฉนวนบริสุทธิ์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เวลาขึ้นกับค่าความสามารถในการยอมรับได้ของค่าไดอิเล็กตริกหรือค่าเปอร์มิตติมิตี้สัมพัทธ์ ε_r ฟังก์ชัน $f(t)$ เป็นฟังก์ชันลดแบบเชิงเส้น

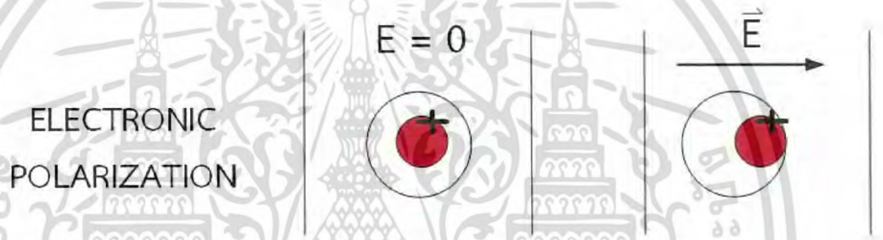
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f(t) = \frac{d\chi(t)}{dt} = \frac{d\varepsilon_r(t)}{dt} \tag{2.11}$$

2.2.2 ชนิดของปรากฏการณ์พาลาไรซ์เซชัน [11]

1) Electronic Polarization หรือ Optical Polarization

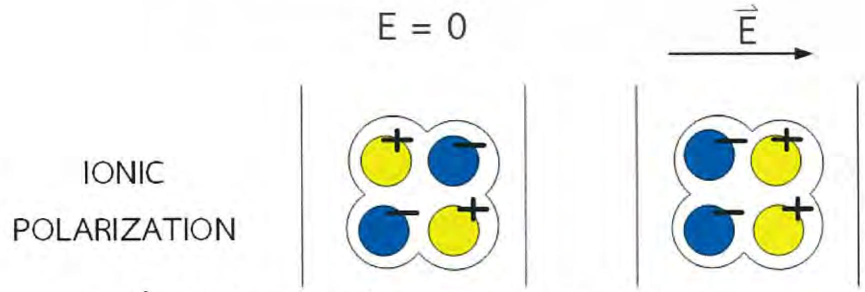
กระบวนการโพลาไรซ์เซชันนี้เป็นการศึกษาในระดับอะตอมดังนั้นเมื่อฉนวนอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าภายนอกซึ่งจะส่งผลให้กลุ่มหมอกของอิเล็กตรอนเปลี่ยนแปลงแต่เนื่องจากแรงสนามไฟฟ้าภายนอกที่กระทำกับอะตอมมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับแรงยึดเหนี่ยวของอะตอมจึงไม่ทำให้เกิดการสูญเสียทางไฟฟ้า กระบวนการนี้เกิดขึ้นภายในเวลา 10^{-15} วินาที ซึ่งมีความสอดคล้องกับความเร็วของแสง จากรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ปรากฏการณ์ Electronic Polarization [10]

2) Ionic Polarization, Vibrational Polarization หรือ Atomic Polarization

กระบวนการโพลาไรซ์เซชันนี้เป็นการศึกษาระดับไอออนที่อยู่ในรูปของผลึกไอออนซึ่งมีขั้วโมเลกุลทำให้ไอออนบวกและไอออนลบสามารถเคลื่อนที่ได้เมื่อมีสนามไฟฟ้าภายนอกมากระทำส่งผลให้โครงสร้างโมเลกุลเกิดการสั่นแล้วเปลี่ยนแปลง ปรากฏการณ์ลักษณะนี้เกิดขึ้นเป็นเวลานานเพราะไอออนบวกเคลื่อนที่ได้ช้าเมื่อเทียบกับไอออนลบซึ่งใช้เวลาเร็วกว่า Electronic Polarization หรือ Optical Polarization ให้เวลาประมาณ 10^{-10} วินาที จากรูปที่ 2.13

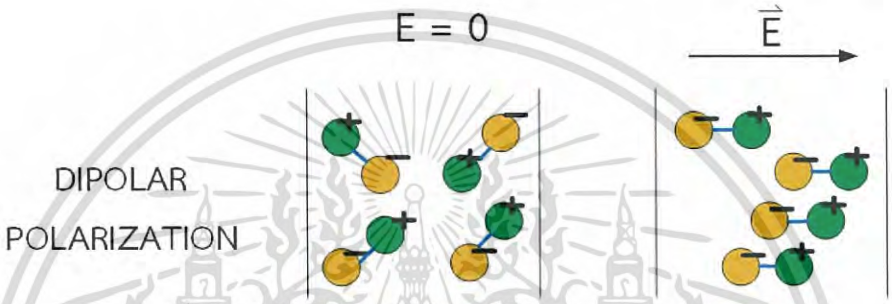


รูปที่ 2.13 ปรากฏการณ์ Ionic Polarization [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) Orientation Polarization หรือ Dipolar Polarization

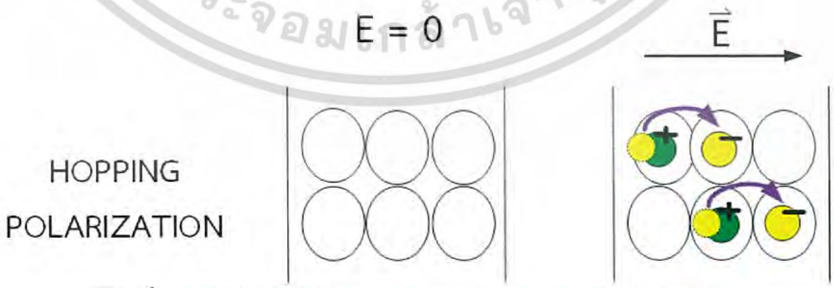
กระบวนการโพลาไรซ์เซชันนี้เป็นการศึกษาการโพลาไรซ์เซชันกับวัสดุไดอิเล็กตริกที่มีโมเลกุลแบบเชิงขั้วถาวร (Permanent Dipole) เช่น กรดไฮโดรคลอริก อะตอมของวัสดุไดอิเล็กตริกจะเรียงตัวอยู่อย่างกระจัดกระจายโดยไม่มีรูปแบบที่แน่นอน แต่เมื่อเราจ่ายสนามไฟฟ้าภายนอกให้วัสดุอิเล็กตริก โมเลกุลนั้นจะมีขั้วอยู่จะเกิดการเรียงตัวใหม่ตามทิศทางของสนามไฟฟ้าที่ให้ ซึ่งจะใช้เวลาเกิดนานกว่า Ionic Polarization ใช้เวลาประมาณ 10^{-5} วินาที



รูปที่ 2.14 ปรากฏการณ์ Dipolar Polarization [10]

4) Hopping Polarization

กระบวนการเกิดปรากฏการณ์โพลาไรซ์เซชันที่เกิดจากประจุภายในฉนวนซึ่งเมื่อฉนวนอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าภายนอกนั้นอิเล็กตรอนสามารถกระโดดจากตำแหน่งเดิมไปตำแหน่งใหม่ซึ่งตำแหน่งเดิมเสมือนกับเป็นโฮลที่เคลื่อนที่ในทิศทางตรงกันข้าม ซึ่งการย้ายตำแหน่งของประจุภายในเนื้อฉนวนจะทำให้เกิดปรากฏการณ์โพลาไรซ์เซชันนี้ ซึ่งใช้เวลามากกว่า Orientation Polarization โดยใช้เวลาประมาณ 1 วินาที

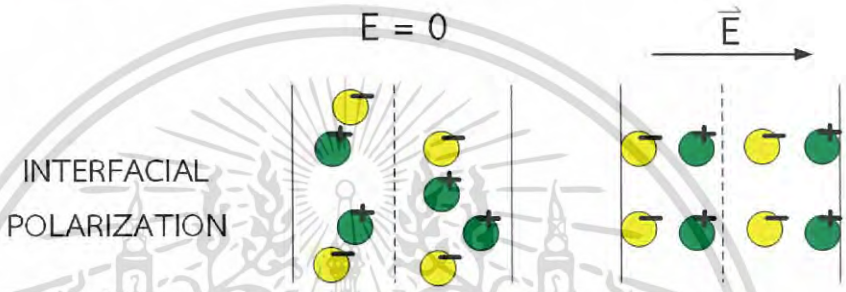


รูปที่ 2.15 ปรากฏการณ์ Hopping Polarization [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5) Space Charge Polarization หรือ Interfacial Polarization

เกิดจากการแพร่กระจายของไอออน โดยก่อนให้สนามไฟฟ้าอนุภาคบวกและลบจะมีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ แต่เมื่ออนุภาคอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าแล้วนั้นส่งผลให้ประจุกระจายตัวในทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางของสนามไฟฟ้า อนุภาคจะเคลื่อนที่มาสะสมประจุที่รอยต่อระหว่างฉนวน 2 ชนิดจึงเป็นที่มาของชื่อว่า Space Charge Polarization ซึ่ง Space Charge Polarization นี้ส่งผลให้การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าภายในเนื้อฉนวนผิดเพี้ยนไป โดยทั่วไปโพลาไรซ์เซชันชนิดนี้เกิดในเฟอร์ไรต์และสารกึ่งตัวนำ โดยมีขนาดที่เล็กมาก



รูปที่ 2.16 ปรากฏการณ์ Space Charge Polarization [10]

ปัจจุบันขนาดของการมีขั้วเกิดขึ้นในเนื้อฉนวนซึ่งสามารถวัดได้จากกระแสที่ไหลในเนื้อฉนวน เพราะไม่สามารถวัดได้โดยตรงและยังคงไม่สามารถบอกความนำของวัสดุฉนวนโดยปราศจากการมีขั้วได้

การให้แรงดันรูปขั้นบันไดให้ฉนวนนานพอที่ทำให้เกิดการมีขั้วจะทำให้เกิดกระแสโพลาไรซ์เซชัน (Polarization Current, i_{pol}) โดยขนาดของกระแสจะเปลี่ยนแปลงตามเวลาจะเรียกกระแสดังกล่าวว่ากระแสชาร์จ (Charging Current)

2.3 กระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน (Polarization and Depolarization Current)

ฉนวนของขดลวดอาร์มาเจอร์ที่สเตเตอร์ประกอบด้วยไมกาผสมเรซินเป็นส่วนใหญ่ เมื่อป้อนแรงดันกระแสตรงให้กับฉนวนนั้นจะเกิดการโพลาไรซ์ชนิด Interfacial Polarization เป็นหลักซึ่งจะเกิดกระแสโพลาไรซ์เซชัน (Polarization Current, i_{pol})

2.3.1 กระแสโพลาไรซ์เซชัน (Polarization current)

กระแสโพลาไรซ์เซชันในทางทฤษฎีประกอบด้วย 3 ส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) กระแสคาปาซิทีฟ (Capacitive Current, i_c) คือกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากผลของตัวเก็บประจุภายในฉนวนซึ่งลดลงอย่างทันทีทันใด

2) กระแสดูดซับ (Absorption Current, i_{ab}) คือกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากกระบวนการโพลาไรซ์เซชันภายในเนื้อฉนวน

3) กระแสการนำไฟฟ้า (Conductance Current, i_{con}) คือ กระแสไฟฟ้าที่เกิดจากค่าความนำไฟฟ้าของวัสดุ

การฉนวนหลายชั้นมีผลกระทบต่อปรากฏการณ์โพลาไรซ์เซชันและการนำไฟฟ้า การนำไฟฟ้าระหว่างชั้นฉนวน โดยความชื้น, อุณหภูมิและอายุการใช้งานจะส่งผลต่อปรากฏการณ์เหล่านี้

ในทางปฏิบัติกระแสโพลาไรซ์เซชันจะประกอบด้วยกระแสรั่วไหลรวมอยู่ด้วย ซึ่งกระแสรั่วไหลนี้เกิดจากสิ่งปนเปื้อนที่ผิวฉนวนหรือเกิดจากความสกปรกขณะทำการทดสอบ โดยกระแสรั่วไหลเป็นกระแสที่สามารถวัดได้ในทางปฏิบัติ (Practical Conduction Current, $i_{con(practical)}$)

$$i_{pol(practical)} = i_c + i_{ab} + i_{con} + i_l \tag{2.12}$$

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

กระแสโพลาไรซ์เซชันในทางทฤษฎีแสดงได้ดังสมการที่ 2.14

$$i_{pol}(t) = C_0 V_0 [\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} + \varepsilon\delta(t) + f(t)] \tag{2.14}$$

โดยที่ C_0 คือ ค่าความจุไฟฟ้าทางเรขาคณิต (Geometric Capacitance) ของวัตถุทดสอบ

V_0 คือ แรงดันกระแสตรงที่ใช้ในการทดสอบ

σ_0 คือ ค่าความนำไฟฟ้ากระแสตรงบริสุทธิ์ (Pure DC Conductivity)

ε_0 คือ ค่าเปอร์มิตติวิตี้ของสุญญากาศ (Permittivity of Vacuum)

ε_{inf} คือ ค่าเปอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์ (Relative Permittivity) ที่เวลาเริ่มต้น (ที่ 0 วินาที)

$\delta(t)$ คือ ฟังก์ชันเดลต้า (Delta Function) ที่เกิดขึ้นจากการจ่ายแรงดันรูปขั้นบันไดแบบทันทีทันใดให้กับวัตถุทดสอบที่เวลาเริ่มต้น

$f(t)$ คือ ฟังก์ชันผลตอบสนองของค่าไดอิเล็กทริก (Dielectric Response Function)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (2.15) สามารถแบ่งกระแสโพลาไรซ์เซชันออกเป็น 3 เทอม เรียงตามลำดับจากซ้ายไปขวาดังนี้

เทอมที่ 1 คือเทอมของ $\frac{\sigma}{\varepsilon}$

ซึ่งเป็นเทอมที่มีความสัมพันธ์กับค่าความนำไฟฟ้าภายในเนื้อฉนวนและเป็นเทอมที่ไม่ขึ้นกับกระบวนการโพลาไรซ์เซชันของฉนวน เทอมที่ 1 นี้จะปรากฏในขณะที่ทำการจ่ายแรงดันให้กับฉนวนเท่านั้นซึ่งเทอมที่ 1 จะเป็นเทอมที่มีความสัมพันธ์กับกระแสการนำไฟฟ้าของฉนวน

เทอมที่ 2 คือเทอมของ $\varepsilon\delta(t)$

ซึ่งเป็นเทอมที่ไม่สามารถทำการวัดได้ในทางปฏิบัติเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของขนาดกระแสที่รวดเร็วซึ่งเทอมที่ 2 จะเกิดกระบวนการโพลาไรซ์ที่ใช้ระยะเวลาในการเกิดรวดเร็ว

เทอมที่ 3 คือเทอมของ $f(t)$

เป็นเทอมที่มีความสัมพันธ์กับกระบวนการโพลาไรซ์เซชันทั้งหมดที่เกิดขึ้นภายในเนื้อฉนวนยกเว้นกระบวนการโพลาไรซ์เซชันที่ใช้ระยะเวลาในการเกิดรวดเร็วดังที่ได้กล่าวไปในเทอมที่ 2 ซึ่งเทอมที่ 3 นี้จะเป็นเทอมที่มีความสัมพันธ์กับกระแสคาปาซิทีฟและกระแสดูดซับ

2.3.2 กระแสดีโพลาไรซ์เซชัน (Depolarization Current)

จากข้อ 2.3.1 การตัดวงจรและลัดวงจรของวงจรเพื่อคายประจุลงกราวด์จะทำให้โมเลกุลและประจุไฟฟ้าเกิดการเรียงตัวเข้าสู่ภาวะปกติ กระแสคายประจุ (Discharge Current) ที่วัดได้จะถูกเรียกว่ากระแสดีโพลาไรซ์เซชัน (Depolarization Current, i_{depol}) โดยกระแสดีโพลาไรซ์ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ

1) กระแสคาปาซิทีฟดิสชาร์จ (Capacitive Discharge Current, $i_{c(discharge)}$) เป็นกระแสเกิดขึ้นและลดลงอย่างทันทีทันใดจะมีลักษณะเหมือนกระแสคาปาซิเตอร์แต่มีขั้วตรงกันข้าม

2) กระแสดูดซับดิสชาร์จ (Absorption Discharge Current, $i_{ab(discharge)}$) เป็นกระแสที่มีค่าสูงในช่วงแรกและเมื่อฉนวนคายประจุจะทำให้กระแสลดลงจะเหมือนกับกระแสโพลาไรซ์เซชันแต่มีขั้วตรงกันข้ามและสำหรับกระแสดีโพลาไรซ์เซชันไม่มีส่วนประกอบของกระแสรั่วไหลรวมอยู่ด้วยเพราะว่าหยุดป้อนแรงดันให้กับฉนวน

ดังนั้น ผลต่างระหว่างกระแสโพลาไรซ์เซชันและดีโพลาไรซ์เซชันมีค่าเท่ากับกระแสการนำไฟฟ้า (Conductance Current, i_{con})

$$i_{con} = i_{pol} - i_{depol} \quad (2.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

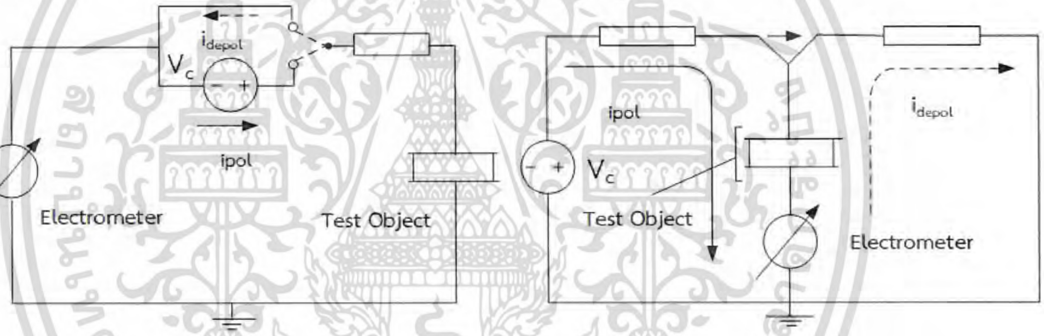
2.4 วงจรการวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน (Polarization and Depolarization Current)

การวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันจะใช้วงจรในการวัดที่ 2 ตำแหน่งได้แก่

1) ฉนวนระหว่างเฟส (Phase to Phase Insulation) ใช้สำหรับวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของฉนวนขดลวดอาร์มาเจอร์ที่สเตเตอร์ สำหรับทดสอบที่ห้องปฏิบัติการเนื่องจากไม่มีการต่อกราวด์

2) ฉนวนระหว่างเฟสกับกราวด์ (Phase to Ground Insulation) ใช้สำหรับวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันชองฉนวนขดลวดอาร์มาเจอร์ที่สเตเตอร์ สำหรับทดสอบแบบหน้างาน เนื่องจากโครงสร้างของสเตเตอร์เป็นส่วนที่ต่อลงกราวด์

ผลการวัดกระแสของทั้งสองบริเวณไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบกันได้เนื่องจากทั้งสองบริเวณมีค่าความจุไฟฟ้าแตกต่างกันมาก



รูปที่ 2.17 วงจรวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของฉนวนบริเวณขดลวดสเตเตอร์ทั้ง 2 ตำแหน่ง (ก) ฉนวนระหว่างเฟส และ (ข) ฉนวนระหว่างเฟสกับกราวด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองและออกแบบวิธีการทดลอง

3.1 วัตถุทดสอบ

3.1.1 การเตรียมวัตถุทดสอบ

วัตถุทดสอบนี้ได้ความอนุเคราะห์มาจากโรงไฟฟ้าพลังงานงานน้ำจากเขื่อนวชิราลงกรณ จังหวัดกาญจนบุรี วัตถุทดสอบนี้เป็นส่วนหนึ่งของคอยล์ที่อยู่ในช่องสล็อตที่สเตเตอร์ซึ่งผ่านการใช้งานมาแล้วเป็นเวลา 30 ปี มีพิกัดแรงดัน 13.8 กิโลโวลต์ ระดับชั้นของการฉนวน B สามารถทนอุณหภูมิได้ 130 องศาเซลเซียสส่วนที่ต้องการนำมาทดสอบแล้ววิเคราะห์ฉนวนจะเป็นส่วนที่อยู่ภายในช่องสล็อตโดยห่างจากส่วนโค้งที่เชื่อมกับส่วนที่อยู่ภายนอกช่องสล็อตความยาว 15 เซนติเมตร โดยฉนวนที่ใช้งานเกี่ยวกับด้านแรงดันไฟฟ้าสูง จะมีขนาดใหญ่กว่าฉนวนที่ใช้งานเกี่ยวกับด้านแรงดันไฟฟ้าต่ำ จากรูปที่ 3.1

รูปที่ 3.1 คอยล์ลักษณะรูปเพชรในช่องสล็อต
ที่สเตเตอร์ซึ่งภายในคือขดลวดอาร์มาเจอร์

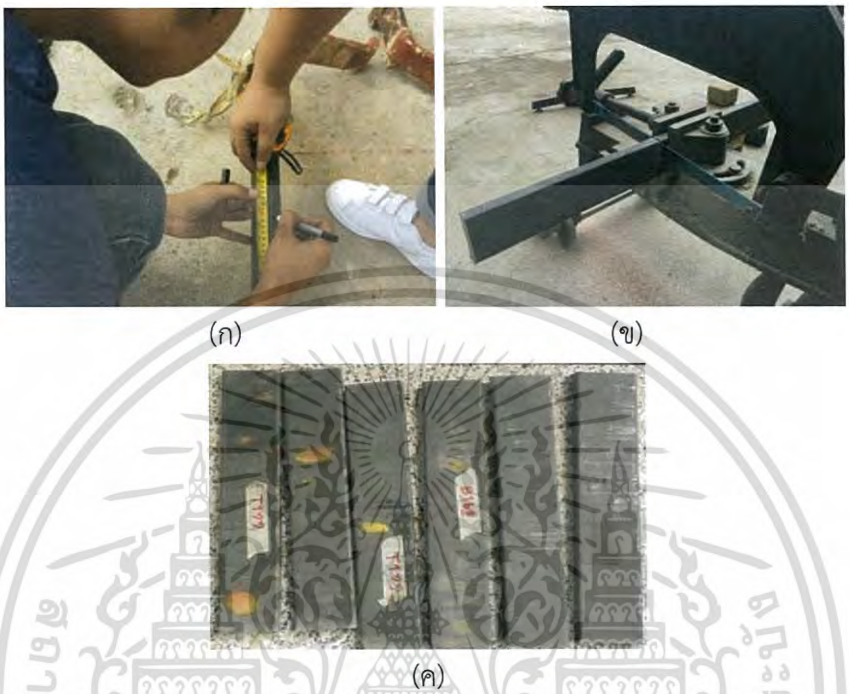
3.1.2 เตรียมวัตถุทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมของฉนวนตามกรณีศึกษาต่างๆ

นำวัตถุทดสอบที่ได้จากการตัดมาแบ่งเป็นประเภทการทดสอบคุณสมบัติของฉนวนจะได้ 2 ประเภทดังนี้

- กรณีการเสื่อมสภาพเนื่องจากผลของความร้อน
- กรณีการเสื่อมสภาพเนื่องจากผลของการเกิด Partial Discharge ในฉนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เตรียมวัตถุทดสอบที่จะใช้ในการศึกษาพฤติกรรมของฉนวน โดยวัดความยาวของวัตถุทดสอบความยาว 30 เซนติเมตร จากนั้นใช้เครื่องตัดแบบอัตโนมัติโดยใช้ใบเลื่อยแบบตัดเหล็ก จากรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 การเตรียมชิ้นงานสำหรับทดสอบ (ก) วัดความยาวเพื่อตัดวัตถุทดสอบความยาว 30 เซนติเมตร (ข) การตัดคอยล์เพื่อนำมาทดสอบพฤติกรรมความเสื่อมสภาพของฉนวน (ค) คอยล์ที่ถูกตัดแล้วมีความยาว 30 เซนติเมตร

การขัดผิวของหน้าตัดของแท่งสเตเตอร์ให้เรียบโดยใช้กระดาษทรายหยาบและกระดาษทรายละเอียด หรือแม้กระทั่งเครื่องเจียร จะช่วยทำให้พื้นที่ของหน้าตัดกับแผ่นอลูมิเนียนมีความสม่ำเสมอ ดังนั้นจะทำให้สนามไฟฟ้าบริเวณพื้นที่หน้าตัดของแท่งสเตเตอร์มีความสม่ำเสมอมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ก) (ข)

รูปที่ 3.3 การเตรียมชิ้นงานสำหรับทดสอบ (ก) แสดงการปอกฉนวนคอนดักทีฟระยะ 5 เซนติเมตร (ข) แสดงการขัดหน้าตัดให้เรียบ

หลังจากที่ได้วัตถุทดสอบผ่านการปอกฉนวนชั้นคอนดักทีฟที่ระยะ 5 เซนติเมตร และขัดหน้าตัดให้เรียบแล้วขั้นตอนต่อไปก็คือการนำแท่งสเตเตอร์ไปไล่ความชื้นที่มีอยู่ในฉนวนโดยการอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 6 ชั่วโมงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งหลังจากที่ผ่านการอบไล่ความชื้นมาแล้วจึงนำแท่งสเตเตอร์เหล่านั้นมาหุ้มด้วยพลาสติกเพื่อป้องกันไอน้ำจากในอากาศซึมเข้าไปในเนื้อฉนวน ก่อนที่จะนำแท่งสเตเตอร์เหล่านี้ไปเก็บค่าทดสอบกระแสโพลาไรซ์เซชันและดีโพลาไรซ์เซชันเพื่ออ้างอิงเป็นค่าฐานในการอ้างอิงกับค่าทดสอบแท่งสเตอร์ที่ผ่านการจำลองสภาวะต่างๆ

(ก) (ข)

รูปที่ 3.4 การอบชิ้นทดสอบเพื่อไล่ความชื้น (ก) เครื่องอบลมร้อนเพื่อใช้อบไล่ความชื้น (ข) เครื่องอบความร้อนตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 60 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. การเตรียมวัตถุทดสอบสำหรับกรณีการเสื่อมสภาพเนื่องจากการผลของความร้อน

การให้ความร้อนแบบจุดร้อนเป็นการให้ความร้อนแบบด้านเดียว ทดสอบที่อุณหภูมิทั้ง 3 ค่า ประกอบด้วย 170, 190 และ 210 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิละ 12 ชั่วโมง จากรูปที่ 3.5

รูปที่ 3.5 แท่งสเตเตอร์ทดสอบสำหรับที่อุณหภูมิทดสอบ

2. การเตรียมวัตถุทดสอบสำหรับกรณีการเสื่อมสภาพเนื่องจากผลของการเกิด Partial Discharge ในฉนวน

แท่งสเตเตอร์นี้มีการเกิด Partial Discharge

รูปที่ 3.6 แท่งสเตเตอร์ทดสอบสำหรับการเกิด Partial Discharge

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การต่อวงจรทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและดีโพลาไรซ์เซชัน

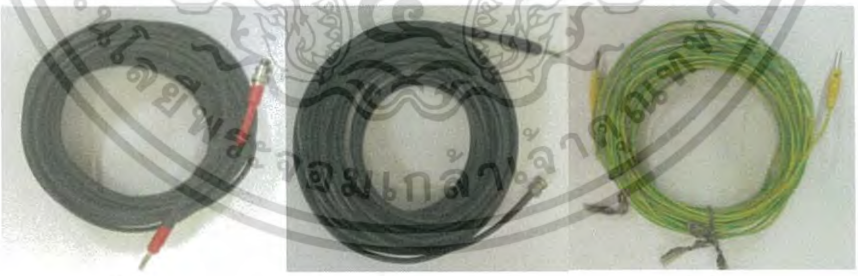
3.2.1 อุปกรณ์การทดสอบ

1. เครื่องมือสำหรับวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและดีโพลาไรซ์เซชัน (PDC Analyzer)

รูปที่ 3.7 PDC Analyzer

2. สายไฟ

- สายสำหรับจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงสูงสำหรับ PDC-Analyzer-1MOD
- สายสำหรับวัดกระแสไฟฟ้า
- สายกราวด์



(ก) (ข) (ค)

รูปที่ 3.8 สายไฟที่ใช้ในวงจรทดสอบ

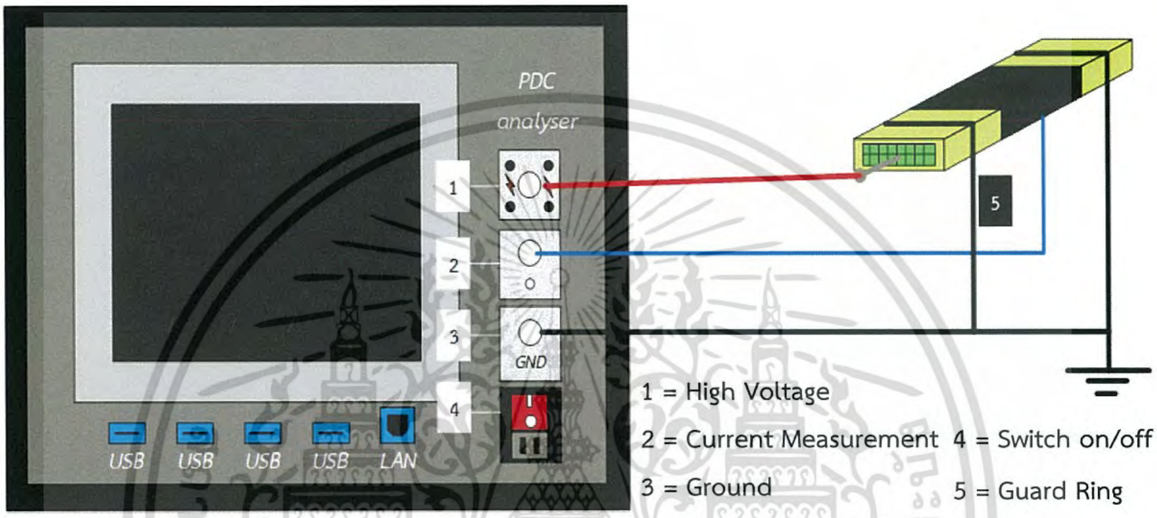
(ก) สายสำหรับจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงสูงสำหรับ PDC-Analyzer-1MOD

(ข) สายสำหรับวัดกระแสไฟฟ้า (ค) สายกราวด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 วงจรสำหรับวัดค่ากระแสโพลาไรซ์เซชันและค่ากระแสดีโพลาไรซ์เซชัน

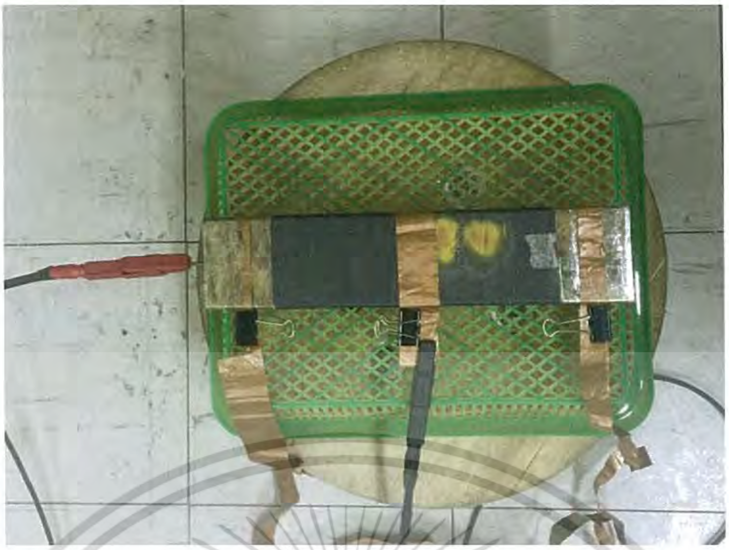
เป็นวงจรวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและดีโพลาไรซ์เซชันของฉนวนระหว่างเฟสแบบมีการ์ดริง (Phase to Phase Insulation with Guard Ring) เป็นวงจรที่ใช้เพื่อการวิเคราะห์สภาพของเนื้อฉนวนที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อผ่านการจำลองความเสื่อม ประกอบด้วยความร้อน และผลของ Partial Discharge ในเนื้อฉนวน



(ก)

(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



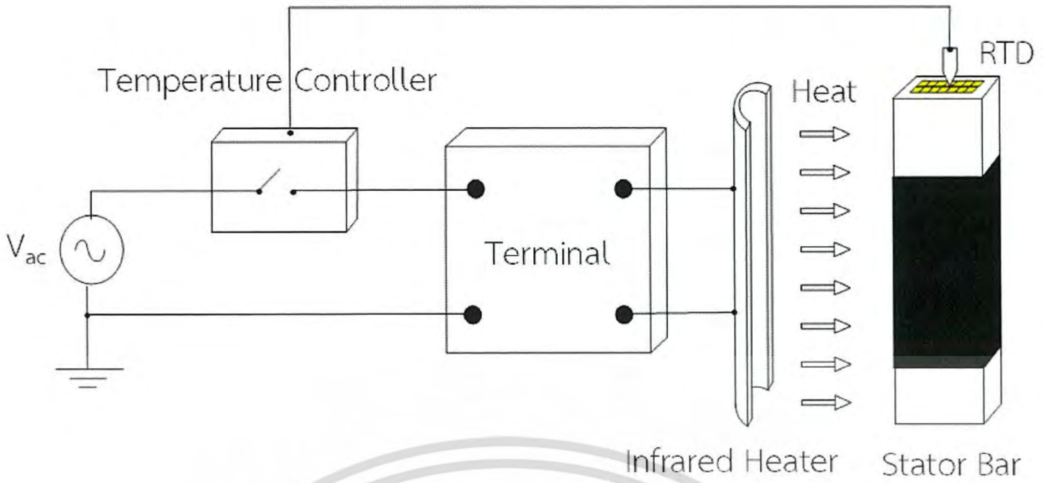
(ค)

รูปที่ 3.9 วงจรสำหรับวัดค่ากระแสโพลาไรซ์เซชันและค่ากระแสดีโพลาไรซ์เซชัน
(ก) ไดอะแกรมการต่อวงจรสำหรับวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันในเนื้อฉนวน
(ข) การต่อวงจรสำหรับวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันในเนื้อฉนวน
(ค) การต่อวงจรแบบมีการ์ดริง

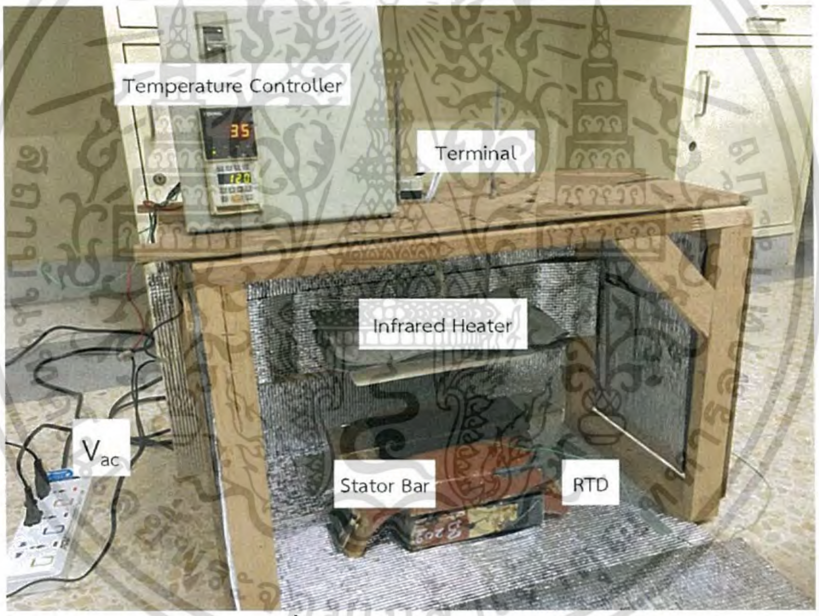
3.2.3 วงจรให้ความร้อนกับแท่งสเตเตอร์ด้วยหลักการให้รังสีอินฟราเรด

การทดสอบนี้เป็นกรณีของการทดสอบความเสื่อมสภาพโดยการให้ความร้อน ใช้หลักการของการแปลงพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ เป็นพลังงานความร้อนโดยใช้แท่งอินฟราเรด เป็นตัวกลางในการเปลี่ยนแปลงพลังงงาน ซึ่งจะมีตัวควบคุมอุณหภูมิทำหน้าที่ตัดต่อวงจรเพื่อควบคุมอุณหภูมิให้คงที่จะรับสัญญาณมาจาก Resistance Temperature Detector (RTD) ซึ่งสัมผัสอยู่ที่บริเวณขดลวดตัวนำ เมื่ออุณหภูมิสูงกว่าค่าที่ตั้งไว้รีเลย์จะรับสัญญาณมาจาก RTD แล้วรีเลย์จะเปิดวงจรทำให้ความร้อนลดลง ในขณะเดียวกันเมื่ออุณหภูมิยังไม่ถึงค่าที่ตั้งไว้ รีเลย์จะไม่เปิดวงจรเพราะฉะนั้นอุณหภูมิจึงสูงขึ้นเรื่อยๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



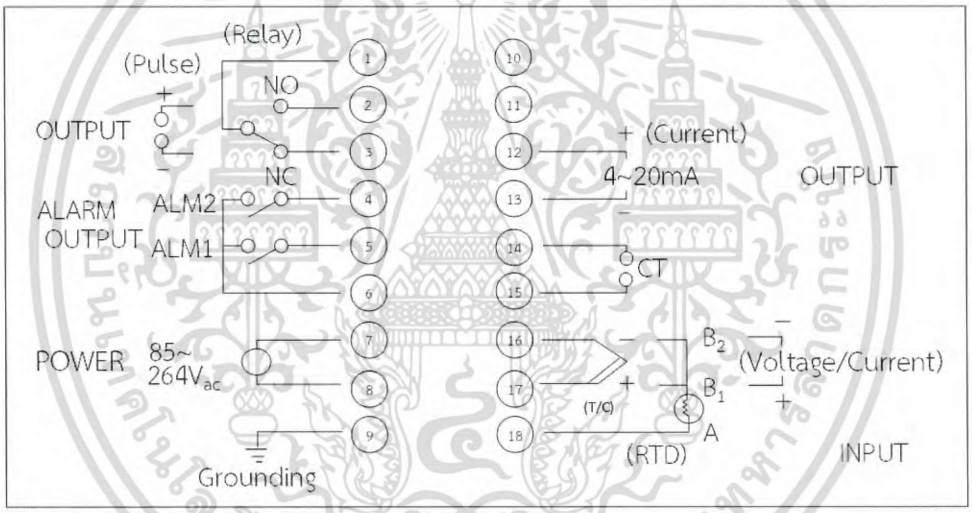
รูปที่ 3.10 ไดอะแกรมวงจรอบความร้อน



รูปที่ 3.11 วงจรอบความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.12 เครื่องควบคุมอุณหภูมิ FENWAL AR-24L Series



รูปที่ 3.13 ไดอะแกรมการต่อสายใช้งานของเครื่องควบคุมอุณหภูมิยี่ห้อ FENWAL AR-24L

3.3 วิธีการทำการทดสอบ

3.3.1 การทดสอบฉนวนสภาพดีของขดลวดอาร์มาเจอร์ที่สเตเตอร์หรือฉนวนของแท่งสเตเตอร์โดยวิธีการวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน

การทดสอบฉนวนสภาพดีจะนำแท่งสเตเตอร์มาต่อวงจรที่มีการ์ดริงเพื่อลดกระแสรั่วไหลตามผิวของฉนวน ณ ที่สภาวะควบคุมอุณหภูมิและความชื้นซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของโมเลกุลในฉนวน การทดสอบจะใช้ระบบปิด การทดสอบที่ห้อง Partial Discharge (PD) ของห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ห้องทดสอบ PD เป็นระบบปิดซึ่งจะสามารถลดปัญหาเรื่องประจุภายนอกเข้าไปรบกวนระบบการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การจ่ายแรงดันจะจ่ายแรงดัน 500 โวลต์ ผ่านตะปูที่ทำให้สามารถหนีบได้ เป็นเวลา 2,000 วินาที เพื่อวัดกระแสโพลาไรซ์เซชัน หลังจากครบกำหนดแล้วก็จะปล่อยให้ดิสชาร์จเป็นเวลา 2,000 วินาทีเท่ากัน เพื่อวัดกระแสดีโพลาไรซ์เซชันเพื่อนำมาวิเคราะห์

3.3.2 การทดสอบฉนวนของขดลวดอาร์มาเจอร์ที่สเตเตอร์หรือฉนวนของแท่งสเตเตอร์โดยวิธีการวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันในสภาวะกรณีศึกษาต่างๆ

1. การทดสอบวัดค่ากระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันกรณีเสื่อมสภาพเนื่องจากการผลของความร้อน

ทำการทดสอบวัดค่ากระแสโพลาไรซ์เซชันหลังจากที่ฉนวนผ่านการจำลองผลของความร้อนภายในฉนวน

2. การทดสอบวัดค่ากระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันกรณีการเสื่อมสภาพเนื่องจากผลของการเกิด Partial Discharge ในฉนวน

ทำการทดสอบวัดค่ากระแสโพลาไรซ์เซชันหลังจากที่ฉนวนผ่านการเกิด Partial Discharge ภายในฉนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการทดสอบ

4.1 การทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและดีโพลาไรซ์เซชันของชิ้นทดสอบก่อนและหลังจำลองการเกิดความเสื่อมกับชิ้นทดสอบตามกรณีศึกษาต่างๆ

จากการทดสอบวัดค่ากระแสโพลาไรซ์เซชันและดีโพลาไรซ์เซชันที่กระทำภายในห้องปฏิบัติการที่ทำการควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง 24-27°C และมีค่าความชื้นสัมพัทธ์อยู่ในช่วง 60-70% โดยทำการป้อนแรงดันกระแสตรงขนาด 500V ซึ่งในการทดลองนี้ได้ทำการวัดค่ากระแสโพลาไรซ์เซชันและดีโพลาไรซ์เซชันของชิ้นทดสอบทั้งหมด 3 กรณี ดังนี้

1. ชิ้นทดสอบก่อนจำลองความเสื่อมตามกรณีศึกษาต่างๆ
2. ชิ้นทดสอบกรณีจำลองความเสื่อมเนื่องจากความร้อน
   - ชิ้นทดสอบหลังจำลองความเสื่อมเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิ 170°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง
   - ชิ้นทดสอบหลังจำลองความเสื่อมเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิ 190°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง
   - ชิ้นทดสอบหลังจำลองความเสื่อมเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิ 210°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง
3. ชิ้นทดสอบกรณีเสื่อมเนื่องจากผลของการเกิด Partial Discharge ในชิ้นทดสอบ

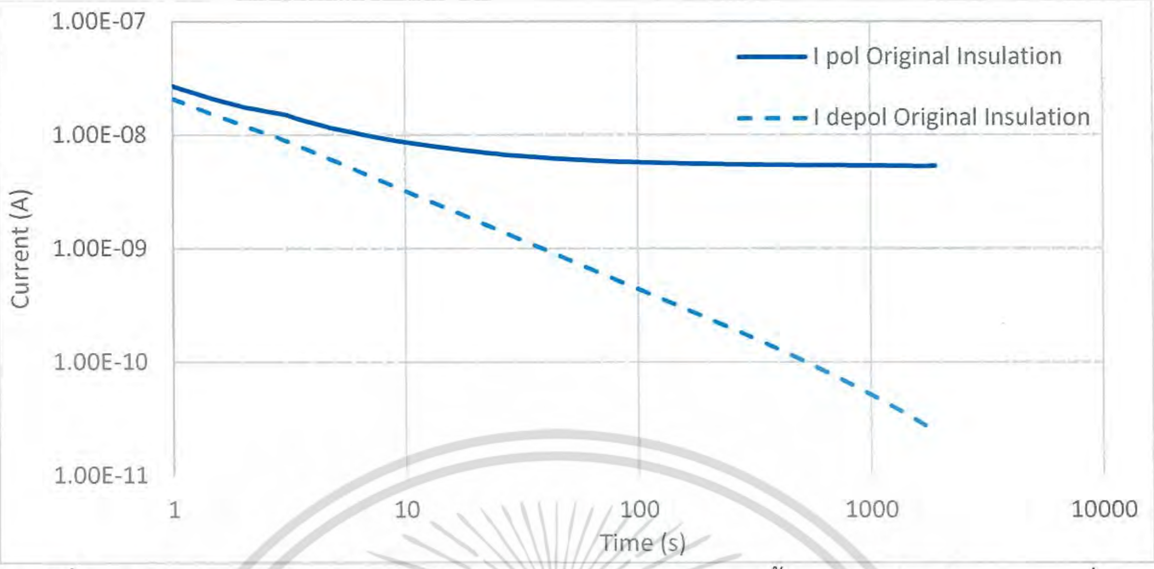
4.1.1 ชิ้นทดสอบก่อนจำลองความเสื่อมตามกรณีศึกษาต่างๆ

การทดสอบในหัวข้อนี้ได้ทำการวัดค่ากระแสโพลาไรซ์เซชันและดีโพลาไรซ์เซชันของชิ้นทดสอบก่อนจำลองความเสื่อมตามกรณีศึกษาต่างๆ

ตารางที่ 4.1 ค่าความจุไฟฟ้า กระแสคงค้าง อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของชิ้นทดสอบ

พารามิเตอร์	ค่าที่วัดได้ขณะทดสอบ
C (pF)	264
I_{re} (pA)	10.1
T (°C)	26.8
%RH	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงกระแสโพลาไรซ์เซชันและดีโพลาไรซ์เซชันของชิ้นทดสอบก่อนจำลองความเสื่อม

4.1.2 ชิ้นทดสอบกรณีจำลองความเสื่อมเนื่องจากความร้อน

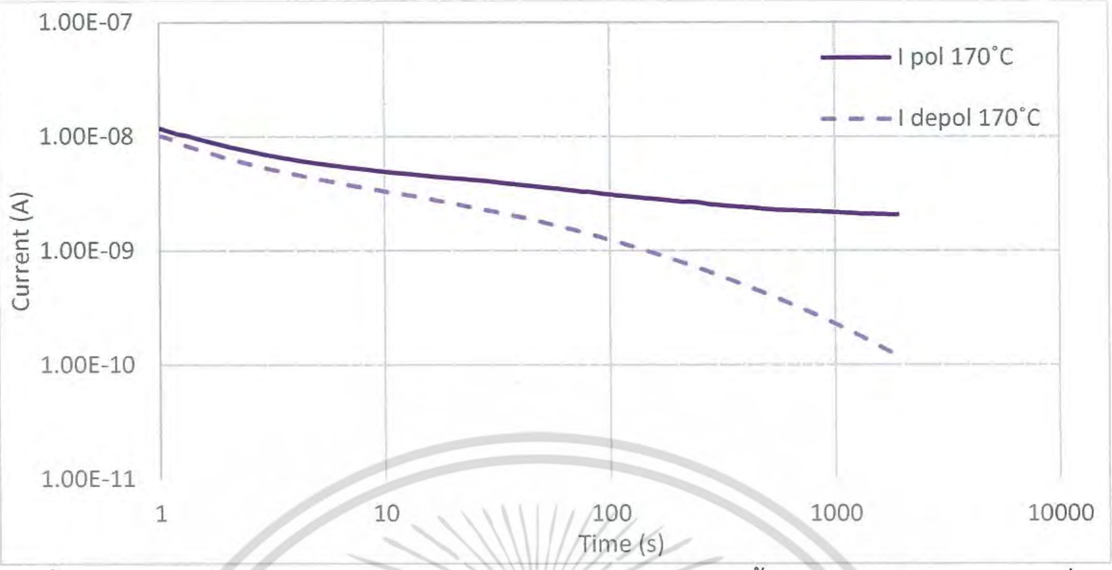
การทดสอบในหัวข้อนี้ได้ทำการวัดค่ากระแสโพลาไรซ์เซชันและดีโพลาไรซ์เซชันของชิ้นทดสอบหลังจำลองความเสื่อมเนื่องจากความร้อนโดยการอบด้วยความร้อน 170˚C, 190˚C และ 210˚C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง และทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบของแต่ละอุณหภูมิกับของชิ้นทดสอบก่อนจำลองความเสื่อม ดังนี้

1. ชิ้นทดสอบหลังจำลองความเสื่อมเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิ 170˚C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

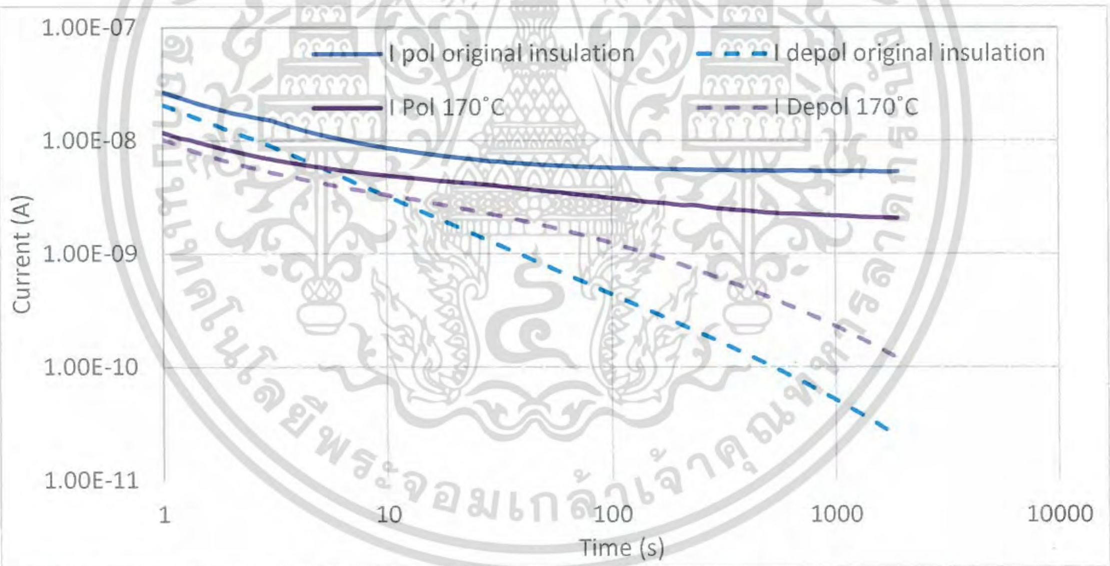
ตารางที่ 4.2 ค่าความจุไฟฟ้า กระแสคงค้าง อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของชิ้นทดสอบ

พารามิเตอร์	หลังอบที่ 170˚C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง
C (pF)	218
I_{re} (pA)	5.0
T (˚C)	24.5
%RH	66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงกระแสโพลาไรซ์เซชันและดีโพลาไรซ์เซชันของชิ้นทดสอบหลังจำลองความเสื่อมเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิ 170˚C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง



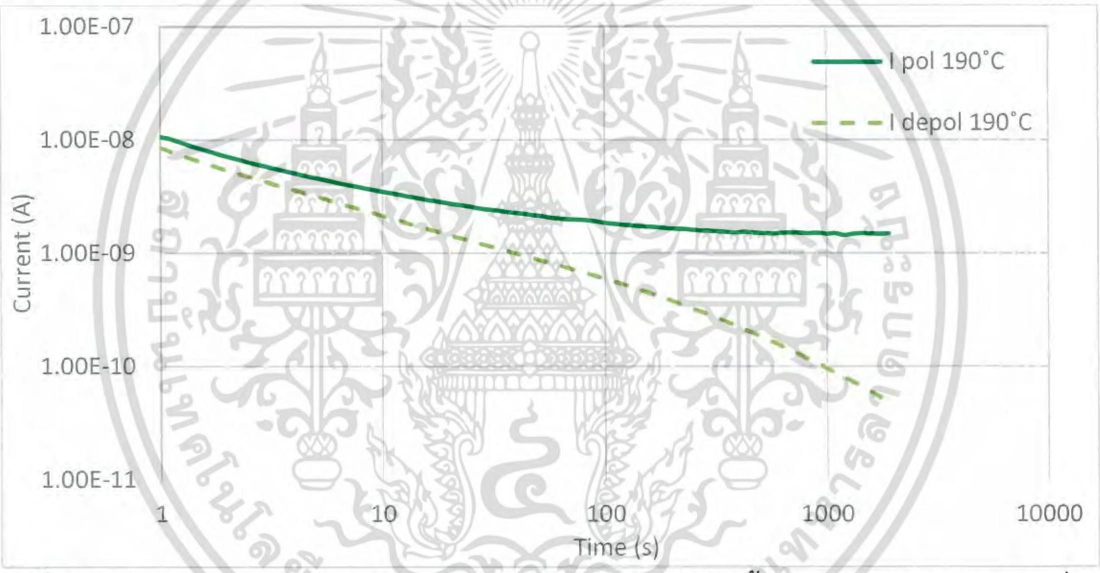
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงการเปรียบเทียบกระแสโพลาไรซ์เซชันและดีโพลาไรซ์เซชันของชิ้นทดสอบหลังจำลองความเสื่อมเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิ 170˚C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง กับของชิ้นทดสอบก่อนจำลองความเสื่อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ชิ้นทดสอบหลังจำลองความเสื่อมเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิ 190˚C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

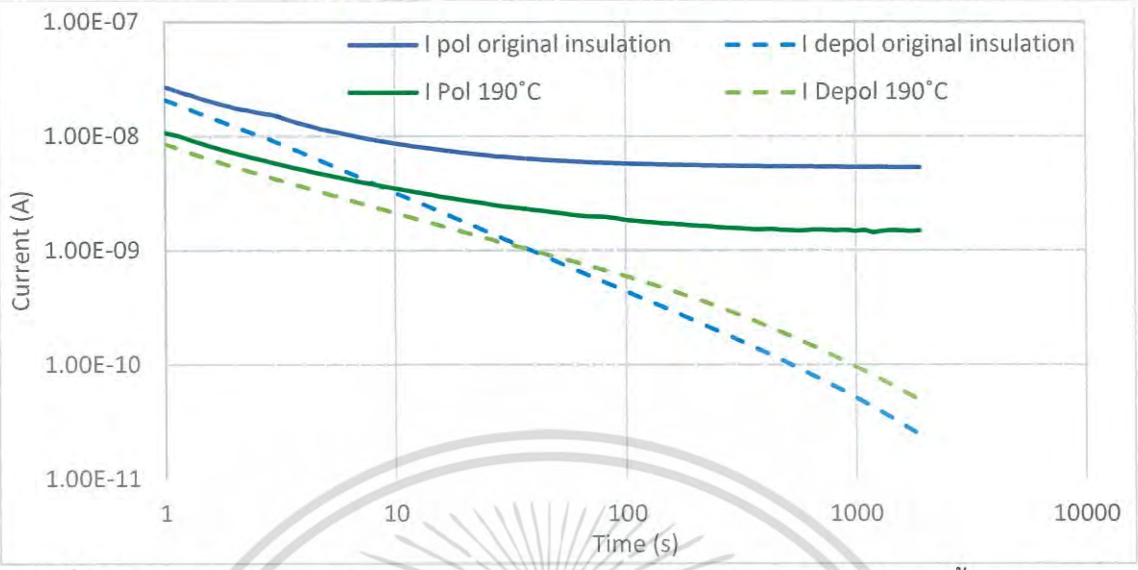
ตารางที่ 4.3 ค่าความจุไฟฟ้า กระแสคงค้าง อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของชิ้นทดสอบ

พารามิเตอร์	หลังอบที่ 190˚C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง
C (pF)	214
I_{re} (pA)	7.9
T (˚C)	26.3
%RH	61



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงกระแสโพลาไรซ์เซชันและดีโพลาไรซ์เซชันของชิ้นทดสอบหลังจำลองความเสื่อมเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิ 190˚C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



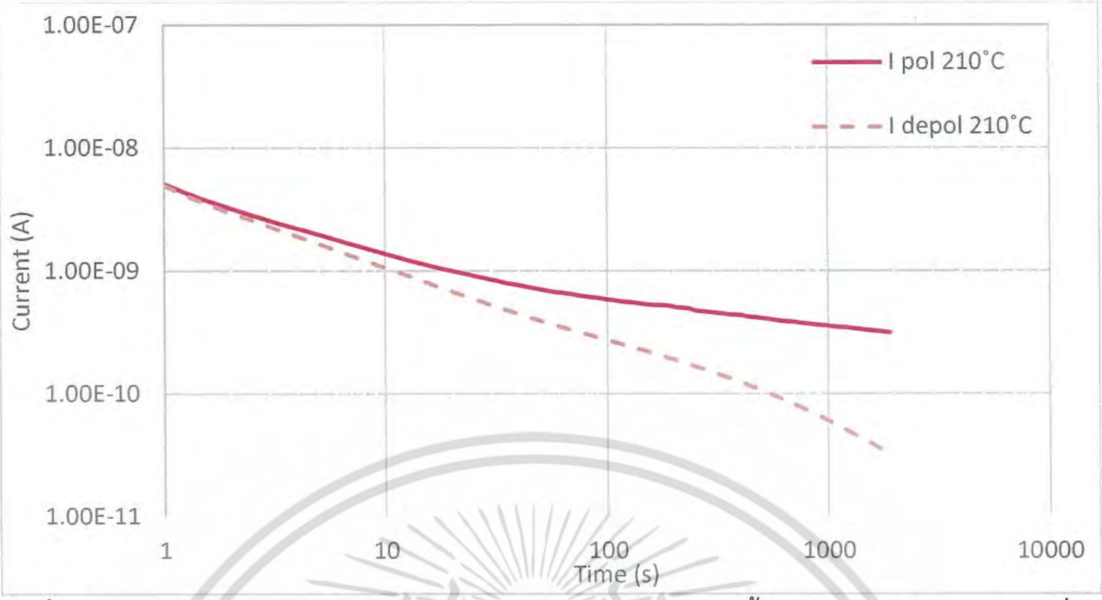
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงการเปรียบเทียบกระแสโพลาไรซ์เซชันและดีโพลาไรซ์เซชันของชิ้นทดสอบหลังจำลองความเสื่อมเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิ 190˚C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง กับของชิ้นทดสอบก่อนจำลองความเสื่อม

3. ชิ้นทดสอบหลังจำลองความเสื่อมเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิ 210˚C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

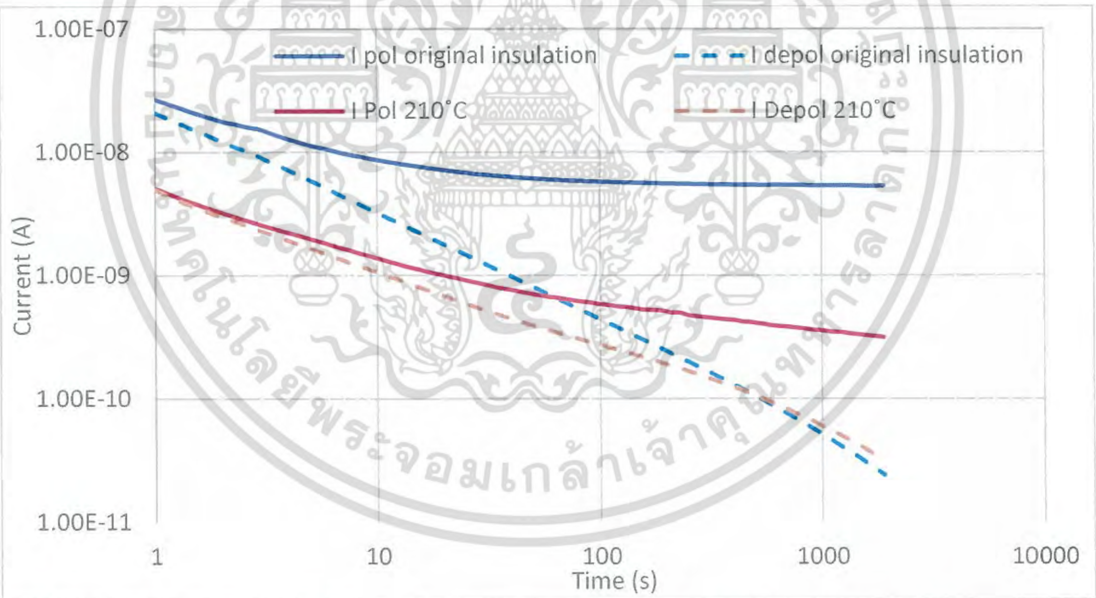
ตารางที่ 4.4 ค่าความจุไฟฟ้า กระแสคงค้าง อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของชิ้นทดสอบ

พารามิเตอร์	หลังอบที่ 210˚C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง
C (pF)	188
I_{re} (pA)	14.0
T (˚C)	26.1
%RH	63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



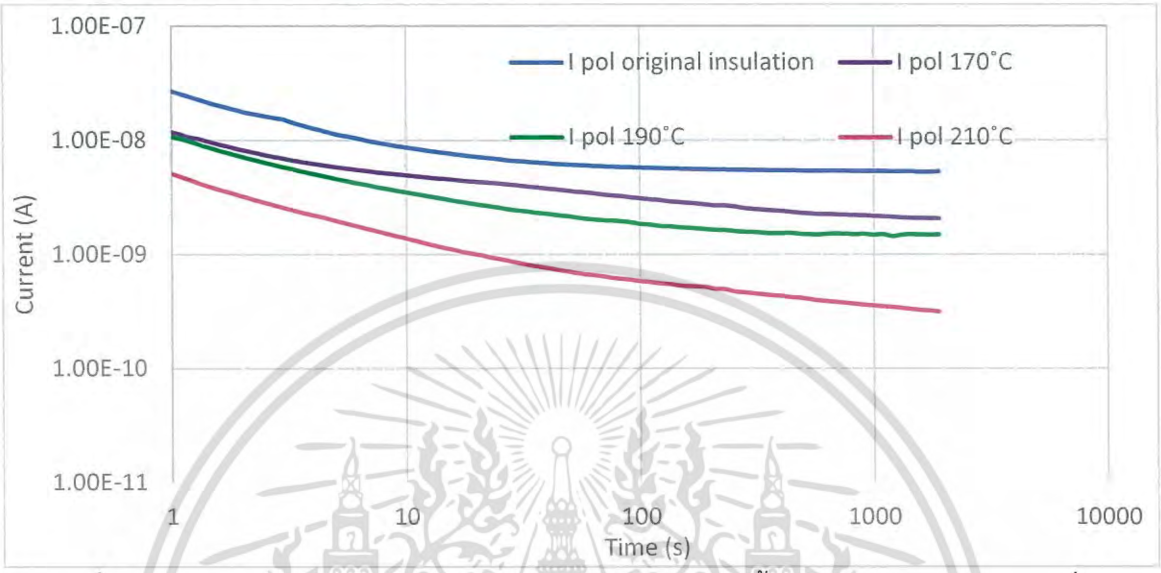
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงกระแสโพลาไรซ์เซชันและดีโพลาไรซ์เซชันของชิ้นทดสอบหลังจำลองความเสื่อมเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิ 210˚C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง



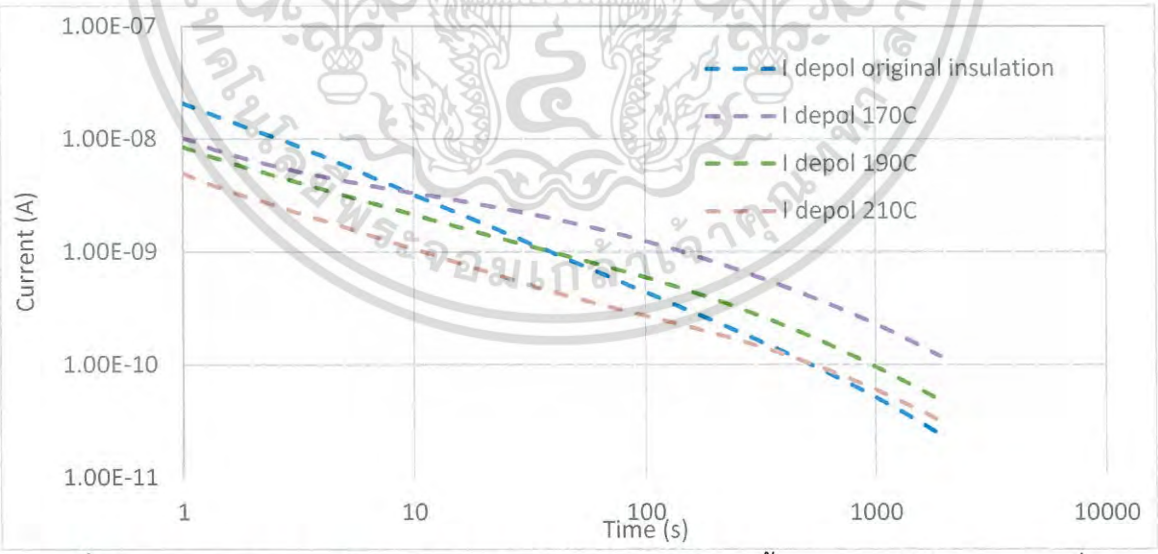
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงการเปรียบเทียบกระแสโพลาไรซ์เซชันและดีโพลาไรซ์เซชันของชิ้นทดสอบหลังจำลองความเสื่อมเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิ 210˚C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง กับของชิ้นทดสอบก่อนจำลองความเสื่อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. เปรียบเทียบกระแสโพลาไรซ์เซชันและดีโพลาไรซ์เซชันของชิ้นทดสอบก่อนจำลองความเสื่อมกับชิ้นทดสอบที่จำลองความเสื่อมเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิ 170°C, 190°C และ 210°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงการเปรียบเทียบกระแสโพลาไรซ์เซชันของชิ้นทดสอบหลังจำลองความเสื่อมเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิ 170°C, 190°C และ 210°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง กับชิ้นทดสอบก่อนจำลองความเสื่อม



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงการเปรียบเทียบกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของชิ้นทดสอบหลังจำลองความเสื่อมเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิ 170°C, 190°C และ 210°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง กับชิ้นทดสอบก่อนจำลองความเสื่อม

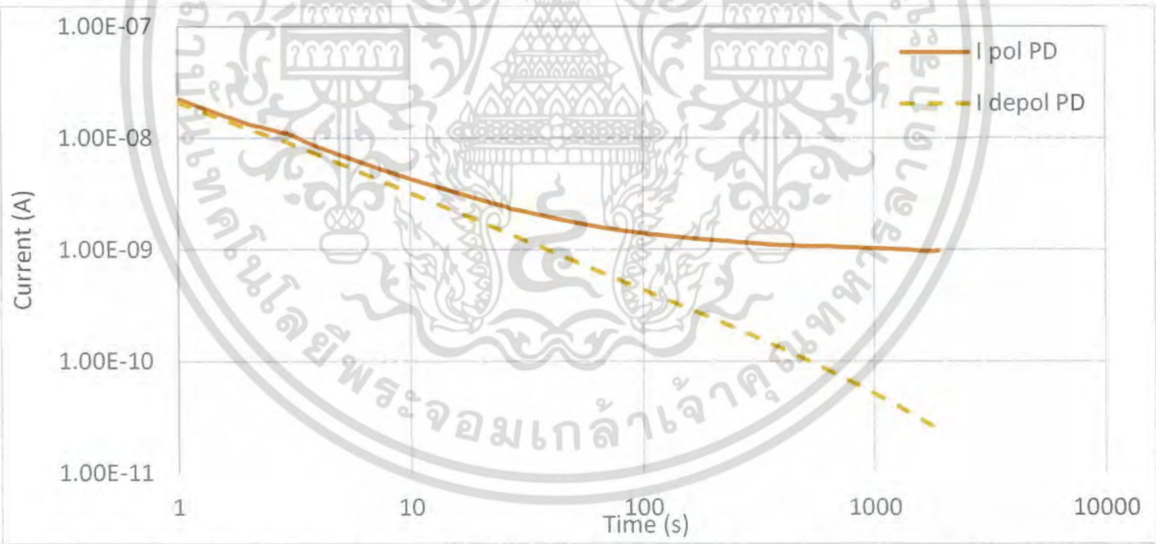
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 ชิ้นทดสอบกรณีเสื่อมเนื่องจากผลของการเกิด Partial Discharge ในชิ้นทดสอบ

การทดสอบในหัวข้อนี้ได้ทำการวัดค่ากระแสโพลาไรซ์เซชันและดีโพลาไรซ์เซชันของชิ้นทดสอบกรณีเสื่อมเนื่องจากผลของการเกิด Partial Discharge ในชิ้นทดสอบ และทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบของแต่ละอุณหภูมิและของชิ้นทดสอบก่อนจำลองความเสื่อม

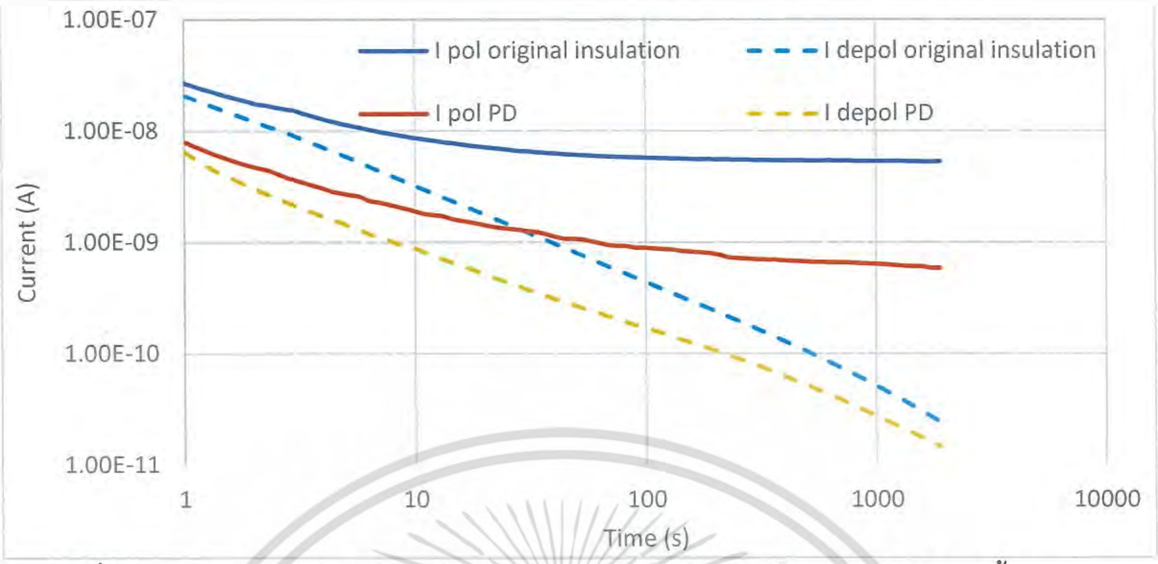
ตารางที่ 4.5 ค่าความจุไฟฟ้า กระแสคงค้าง อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของชิ้นทดสอบ

พารามิเตอร์	กรณีเสื่อมเนื่องจากการเกิด Partial Discharge
C (pF)	344
I_{re} (pA)	15.5
T (°C)	26.1
%RH	64



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงกระแสโพลาไรซ์เซชันและดีโพลาไรซ์เซชันของชิ้นทดสอบกรณีเสื่อมเนื่องจากผลของการเกิด Partial Discharge ในชิ้นทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงการเปรียบเทียบกระแสโพลาไรซ์เซชันและดีโพลาไรซ์เซชันของชิ้นทดสอบ กรณีเสื่อมเนื่องจากผลของการเกิด Partial Discharge ในชิ้นทดสอบ กับของชิ้นทดสอบก่อนจำลองความเสื่อม

4.2 การวิเคราะห์แฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริก (Dielectric dissipation factor ; tanδ)

ในหัวข้อนี้ ทำการวิเคราะห์แฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกของชิ้นทดสอบก่อนจำลองความเสื่อมตามกรณีศึกษาต่างๆ กับชิ้นทดสอบหลังจำลองความเสื่อมแล้ว ได้แก่ การจำลองความเสื่อมเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิ 170°C, 190°C และ 210°C และชิ้นทดสอบที่มีความเสื่อมเนื่องจากการเกิด Partial Discharge ในชิ้นทดสอบ

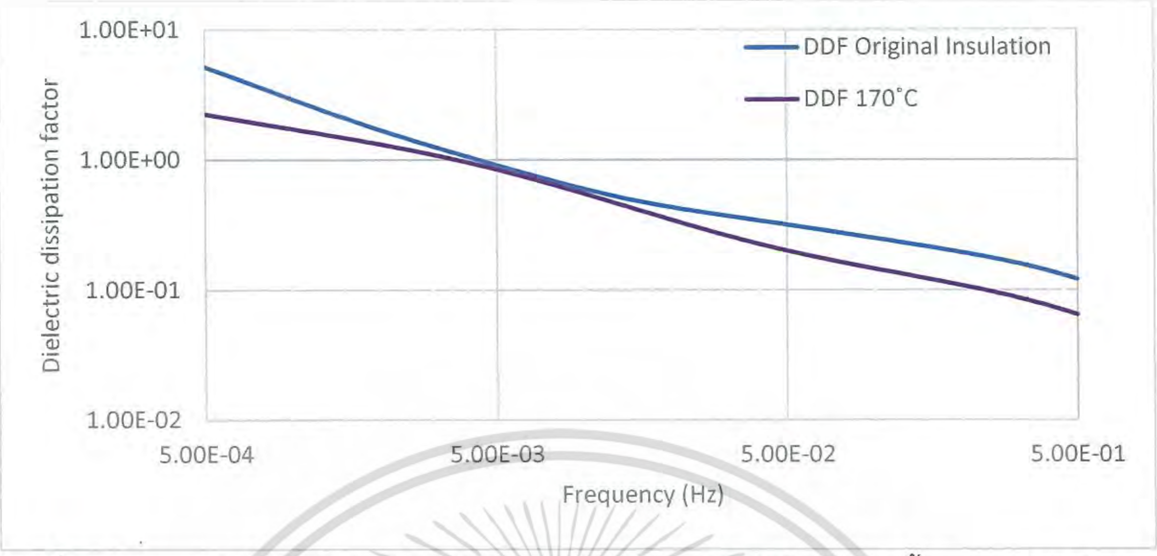
4.2.1 การวิเคราะห์แฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกของชิ้นทดสอบก่อนจำลองความเสื่อมกับชิ้นทดสอบที่จำลองความเสื่อมเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิ 170°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

เปรียบเทียบค่าแฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกของชิ้นทดสอบก่อนและหลังจำลองความเสื่อมเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิ 170°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

ก่อนจำลองความเสื่อม ขณะทดสอบมีอุณหภูมิ 26.8°C ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 64% ค่ากระแสคงค้าง 10.1 พิโคแอมแปร์ และค่าความจุไฟฟ้า 264 พิโคฟารัด

หลังจำลองความเสื่อม ขณะทดสอบมีอุณหภูมิ 24.5°C ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 66% ค่ากระแสคงค้าง 5.0 พิโคแอมแปร์ และค่าความจุไฟฟ้า 218 พิโคฟารัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าแฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกของชิ้นทดสอบหลังจำลองความเสื่อมเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิ 170˚C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง กับชิ้นทดสอบก่อนจำลองความเสื่อม

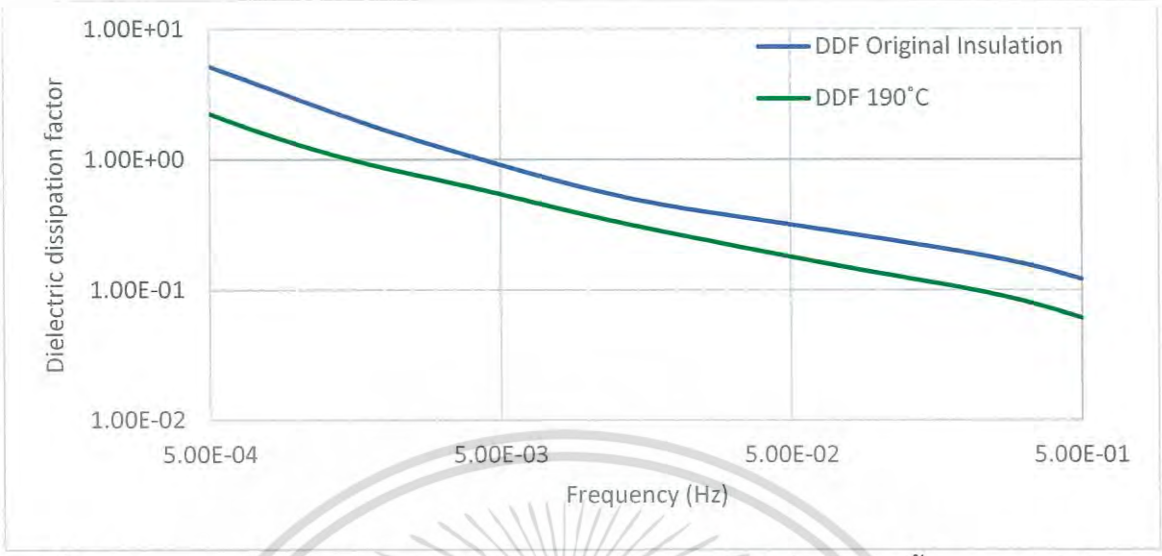
4.2.2 การวิเคราะห์แฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกของชิ้นทดสอบก่อนจำลองความเสื่อมกับชิ้นทดสอบที่จำลองความเสื่อมเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิ 190˚C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

เปรียบเทียบค่าแฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกของชิ้นทดสอบก่อนและหลังจำลองความเสื่อมเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิ 190˚C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

ก่อนจำลองความเสื่อม ขณะทดสอบมีอุณหภูมิ 26.8˚C ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 64% ค่ากระแสคงค้าง 10.1 พิโคแอมแปร์ และค่าความจุไฟฟ้า 264 พิโคฟารัด

หลังจำลองความเสื่อม ขณะทดสอบมีอุณหภูมิ 26.3˚C ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 61% ค่ากระแสคงค้าง 7.9 พิโคแอมแปร์ และค่าความจุไฟฟ้า 214 พิโคฟารัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าแฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกของชิ้นทดสอบหลังจำลองความเสื่อมเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิ 190˚C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง กับชิ้นทดสอบก่อนจำลองความเสื่อม

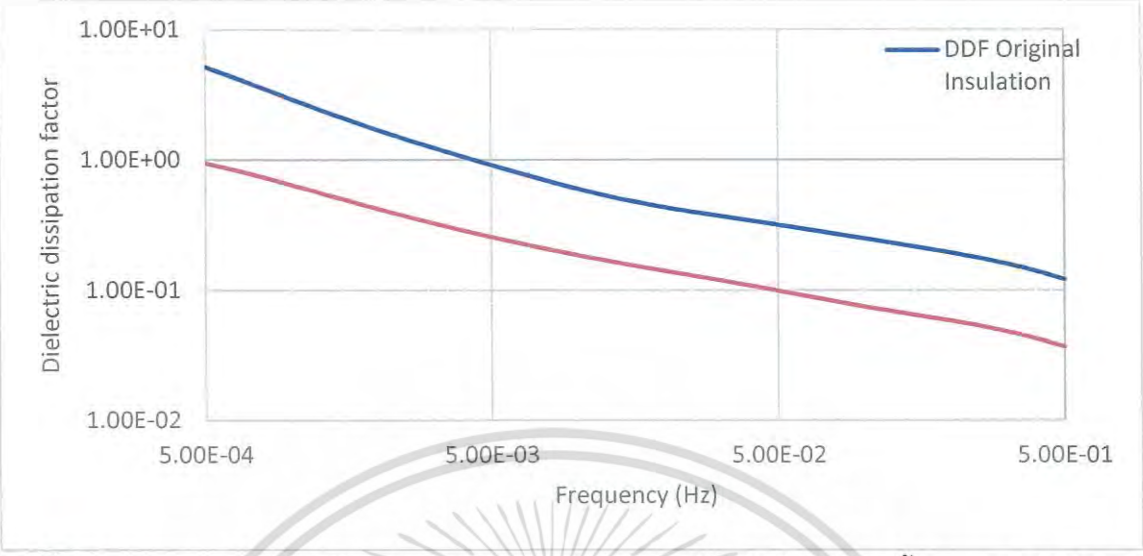
4.2.3 การวิเคราะห์แฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกของชิ้นทดสอบก่อนจำลองความเสื่อมกับชิ้นทดสอบที่จำลองความเสื่อมเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิ 210˚C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

เปรียบเทียบค่าแฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกของชิ้นทดสอบก่อนและหลังจำลองความเสื่อมเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิ 210˚C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

ก่อนจำลองความเสื่อม ขณะทดสอบมีอุณหภูมิ 26.8˚C ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 64% ค่ากระแสคงค้าง 10.1 พิโคแอมแปร์ และค่าความจุไฟฟ้า 264 พิโคฟารัด

หลังจำลองความเสื่อม ขณะทดสอบมีอุณหภูมิ 26.1˚C ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 63% ค่ากระแสคงค้าง 14.0 พิโคแอมแปร์ และค่าความจุไฟฟ้า 188 พิโคฟารัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าแฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกของชิ้นทดสอบหลังจำลองความเสื่อมเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิ 210°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง กับชิ้นทดสอบก่อนจำลองความเสื่อม

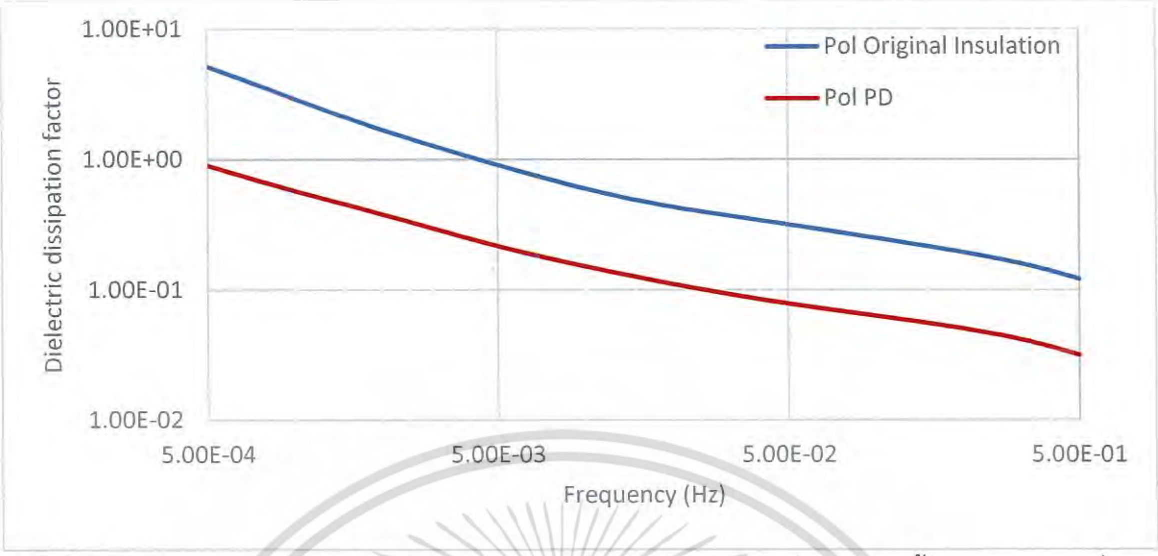
4.2.4 การวิเคราะห์แฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกของชิ้นทดสอบก่อนจำลองความเสื่อมกับชิ้นทดสอบกรณีเสื่อมเนื่องจากการเกิด Partial Discharge ในชิ้นทดสอบ

เปรียบเทียบค่าแฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกของชิ้นทดสอบก่อนจำลองความเสื่อมกับชิ้นทดสอบกรณีเสื่อมเนื่องจากการเกิด Partial Discharge ในชิ้นทดสอบ

ก่อนจำลองความเสื่อม ขณะทดสอบมีอุณหภูมิ 26.8°C ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 64% ค่ากระแสคงค้าง 10.1 พิโคแอมแปร์ และค่าความจุไฟฟ้า 264 พิโคฟารัด

ชิ้นทดสอบที่มีความเสื่อม ขณะทดสอบมีอุณหภูมิ 26.1°C ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 64% ค่ากระแสคงค้าง 15.5 พิโคแอมแปร์ และค่าความจุไฟฟ้า 344 พิโคฟารัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าแฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกของชิ้นทดสอบกรณีเสื่อมเนื่องจากการเกิด Partial Discharge ในชิ้นทดสอบ กับชิ้นทดสอบก่อนจำลองความเสื่อม

4.3 การหาค่ากระแสการนำไฟฟ้า (Conductance Current, i_{con})

ในหัวข้อนี้ ได้ทำการหาค่ากระแสการนำไฟฟ้าของชิ้นทดสอบก่อนจำลองความเสื่อมและชิ้นทดสอบหลังจำลองความเสื่อม เพื่อเปรียบเทียบและตรวจสอบว่าการทดสอบวัดค่ากระแสโพลาไรซ์เซชันและดีโพลาไรซ์เซชันมีความถูกต้อง เนื่องจากค่ากระแสการนำไฟฟ้านี้ควรมีค่าเท่ากันตลอดการทดลอง และมีค่าเป็นผลต่างของกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน ตามสมการที่ 2.15 คือ $I_{con} = I_{pol} - I_{depol}$

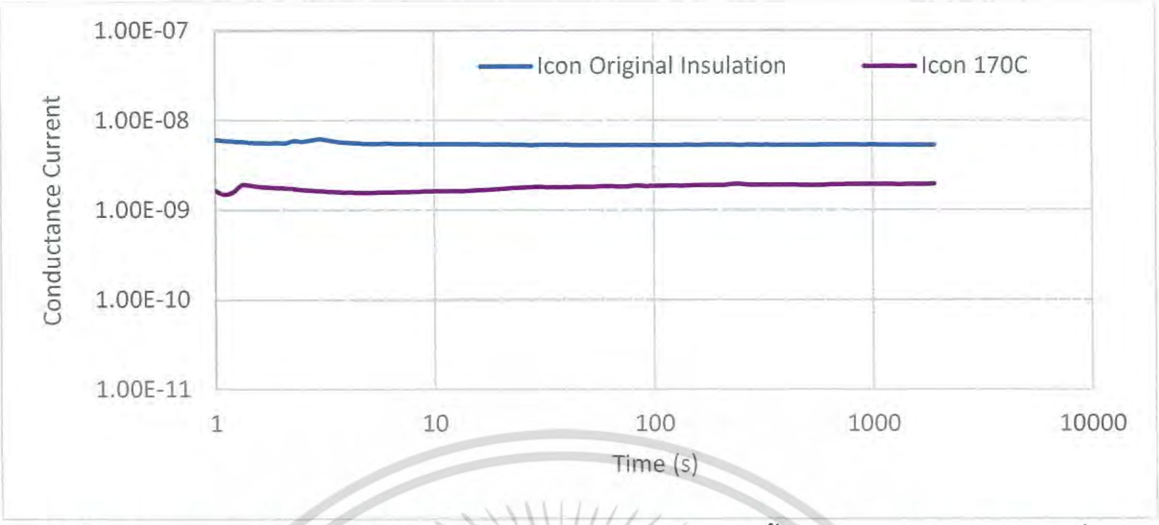
4.3.1 การหาค่ากระแสการนำไฟฟ้าของชิ้นทดสอบก่อนจำลองความเสื่อมและหลังจำลองความเสื่อมเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิ 170˚C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

เปรียบเทียบค่ากระแสการนำไฟฟ้าของชิ้นทดสอบก่อนและหลังจำลองความเสื่อมเนื่องจากความร้อน 170˚C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

ก่อนจำลองความเสื่อม ขณะทดสอบมีอุณหภูมิ 26.8˚C ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 64% ค่ากระแสคงค้าง 10.1 พิโคแอมแปร์ และค่าความจุไฟฟ้า 264 พิโคฟารัด

หลังจำลองความเสื่อม ขณะทดสอบมีอุณหภูมิ 24.5˚C ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 66% ค่ากระแสคงค้าง 5.0 พิโคแอมแปร์ และค่าความจุไฟฟ้า 218 พิโคฟารัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่ากระแสการนำไฟฟ้าของชิ้นทดสอบหลังจำลองความเสื่อมเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิ 170˚C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง กับชิ้นทดสอบก่อนจำลองความเสื่อม

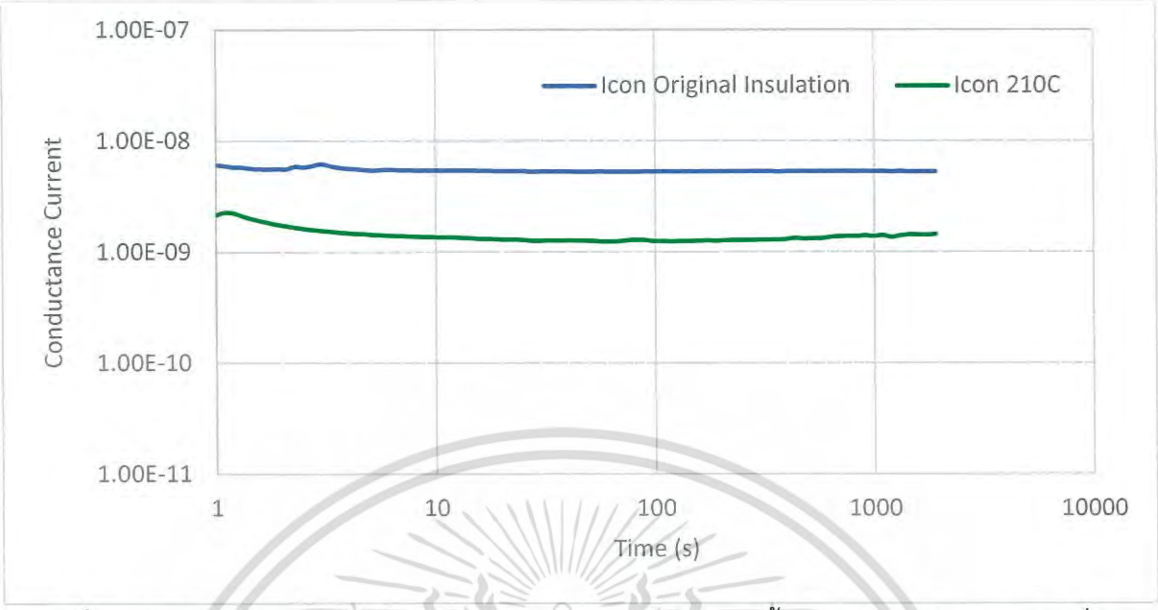
4.3.2 การหาค่ากระแสการนำไฟฟ้าของชิ้นทดสอบก่อนจำลองความเสื่อมและหลังจำลองความเสื่อมเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิ 190˚C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

เปรียบเทียบค่ากระแสการนำไฟฟ้าของชิ้นทดสอบก่อนและหลังจำลองความเสื่อมเนื่องจากความร้อน 190˚C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

ก่อนจำลองความเสื่อม ขณะทดสอบมีอุณหภูมิ 26.8˚C ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 64% ค่ากระแสคงค้าง 10.1 พิโคแอมแปร์ และค่าความจุไฟฟ้า 264 พิโคฟารัด

หลังจำลองความเสื่อม ขณะทดสอบมีอุณหภูมิ 26.3˚C ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 61% ค่ากระแสคงค้าง 7.9 พิโคแอมแปร์ และค่าความจุไฟฟ้า 214 พิโคฟารัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่ากระแสการนำไฟฟ้าของชิ้นทดสอบหลังจำลองความเสื่อมเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิ 190˚C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง กับชิ้นทดสอบก่อนจำลองความเสื่อม

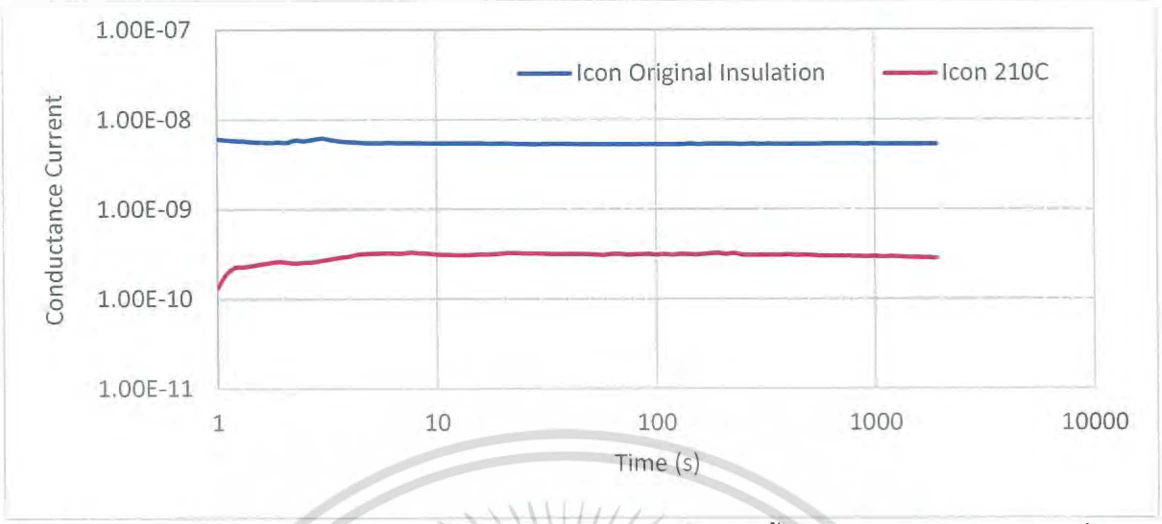
4.3.3 การหาค่ากระแสการนำไฟฟ้าของชิ้นทดสอบก่อนจำลองความเสื่อมและหลังจำลองความเสื่อมเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิ 210˚C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

เปรียบเทียบค่ากระแสการนำไฟฟ้าของชิ้นทดสอบก่อนและหลังจำลองความเสื่อมเนื่องจากความร้อน 210˚C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

ก่อนจำลองความเสื่อม ขณะทดสอบมีอุณหภูมิ 26.8˚C ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 64% ค่ากระแสคงค้าง 10.1 พิโคแอมแปร์ และค่าความจุไฟฟ้า 264 พิโคฟารัด

หลังจำลองความเสื่อม ขณะทดสอบมีอุณหภูมิ 26.1˚C ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 63% ค่ากระแสคงค้าง 14.0 พิโคแอมแปร์ และค่าความจุไฟฟ้า 188 พิโคฟารัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่ากระแสการนำไฟฟ้าของชิ้นทดสอบหลังจำลองความเสื่อมเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิ 210˚C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง กับชิ้นทดสอบก่อนจำลองความเสื่อม

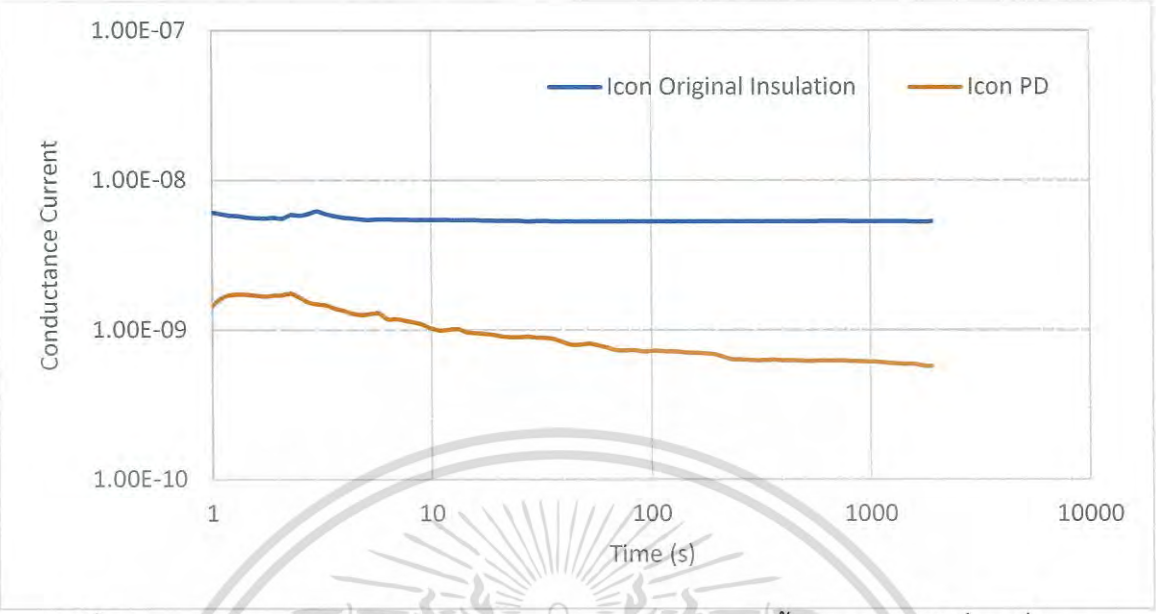
4.3.4 การหาค่ากระแสการนำไฟฟ้าของชิ้นทดสอบก่อนจำลองความเสื่อมและชิ้นทดสอบกรณีเสื่อมเนื่องจากการเกิด Partial Discharge ในชิ้นทดสอบ

เปรียบเทียบค่ากระแสการนำไฟฟ้าของชิ้นทดสอบก่อนจำลองความเสื่อมและชิ้นทดสอบกรณีเสื่อมเนื่องจากการเกิด Partial Discharge ในชิ้นทดสอบ

ก่อนจำลองความเสื่อม ขณะทดสอบมีอุณหภูมิ 26.8˚C ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 64% ค่ากระแสคงค้าง 10.1 พิโคแอมแปร์ และค่าความจุไฟฟ้า 264 พิโคฟารัด

หลังจำลองความเสื่อม ขณะทดสอบมีอุณหภูมิ 26.1˚C ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 64% ค่ากระแสคงค้าง 15.5 พิโคแอมแปร์ และค่าความจุไฟฟ้า 344 พิโคฟารัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่ากระแสการนำไฟฟ้าของชิ้นทดสอบกรณีเสื่อมเนื่องจากการเกิด Partial Discharge ในชิ้นทดสอบ กับชิ้นทดสอบก่อนจำลองความเสื่อม

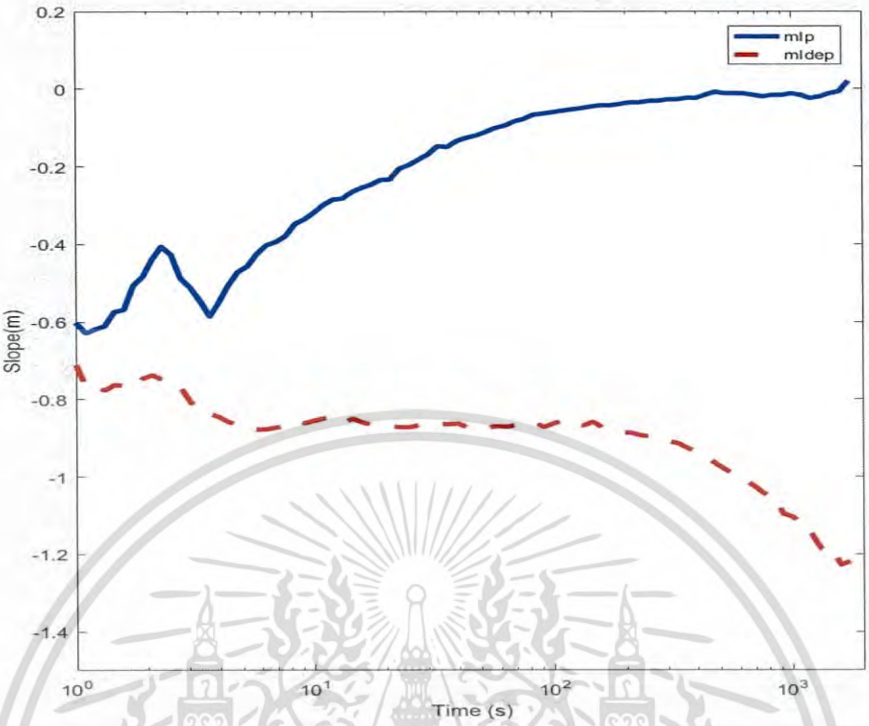
4.4 การหาค่าความชันของกราฟกระแสโพลาไรซ์เซชันและดีโพลาไรซ์เซชัน (Slope analysis)

ในหัวข้อนี้ ได้ทำการหาค่าความชันของกระแสโพลาไรซ์เซชันและดีโพลาไรซ์เซชันของชิ้นทดสอบก่อนจำลองความเสื่อมและหลังจำลองความเสื่อมตามกรณีศึกษาต่างๆ เพื่อใช้สำหรับการวิเคราะห์ผลเพิ่มเติม โดยการสร้างกราฟความชันโดยใช้โปรแกรม MATLAB

4.4.1 การหาค่าความชันของกราฟกระแสโพลาไรซ์เซชันและดีโพลาไรซ์เซชันของชิ้นทดสอบก่อนจำลองความเสื่อม

การทดสอบในหัวข้อนี้ได้ทำการหาค่าความชันของกระแสโพลาไรซ์เซชันและดีโพลาไรซ์เซชันของชิ้นทดสอบก่อนจำลองความเสื่อมตามกรณีศึกษาต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



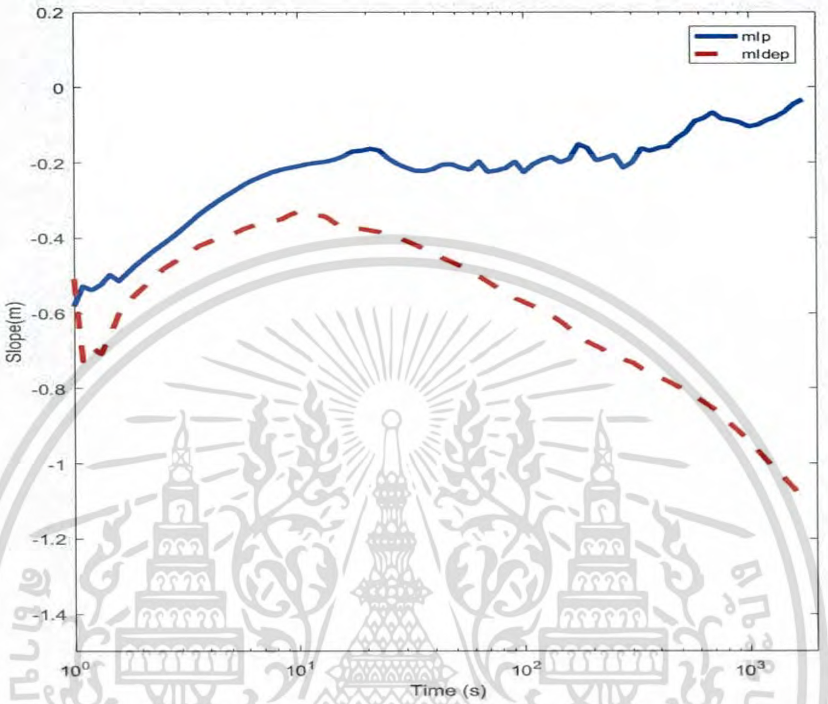
รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความชันของกระแสโพลาไรซ์เซชันและดีโพลาไรซ์เซชันของชิ้นทดสอบก่อนจำลองความเสื่อม

4.4.2 การหาค่าความชันของกราฟกระแสโพลาไรซ์เซชันและดีโพลาไรซ์เซชันของชิ้นทดสอบหลังจำลองความเสื่อมเนื่องจากความร้อน

การทดสอบในหัวข้อนี้ได้ทำการหาค่าความชันของกระแสโพลาไรซ์เซชันและดีโพลาไรซ์เซชันของชิ้นทดสอบหลังจำลองความเสื่อมเนื่องจากความร้อนโดยการอบด้วยความร้อน 170°C, 190°C และ 210°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง และทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบของแต่ละอุณหภูมิกับของชิ้นทดสอบก่อนจำลองความเสื่อม ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

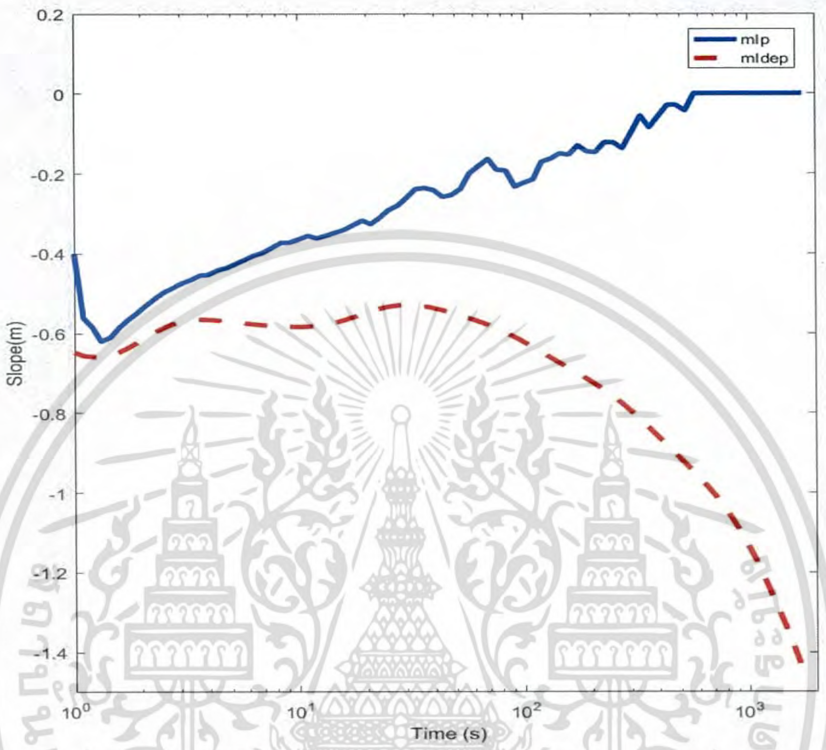
1. ชิ้นทดสอบหลังจำลองความเสื่อมเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิ 170˚C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง



รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความชันของกระแสโพลาไรซ์เซชันและดีโพลาไรซ์เซชันของชิ้นทดสอบหลังจำลองความเสื่อมเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิ 170˚C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

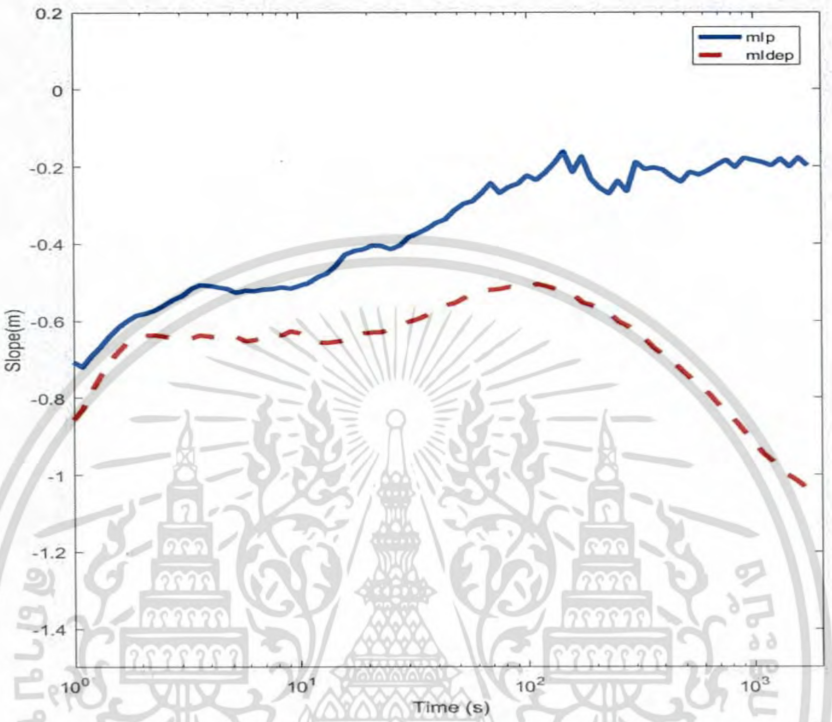
2. ชิ้นทดสอบหลังจำลองความเสื่อมเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิ 190°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง



รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความชันของกระแสโพลาไรซ์เซชันและดีโพลาไรซ์เซชันของชิ้นทดสอบหลังจำลองความเสื่อมเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิ 190°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

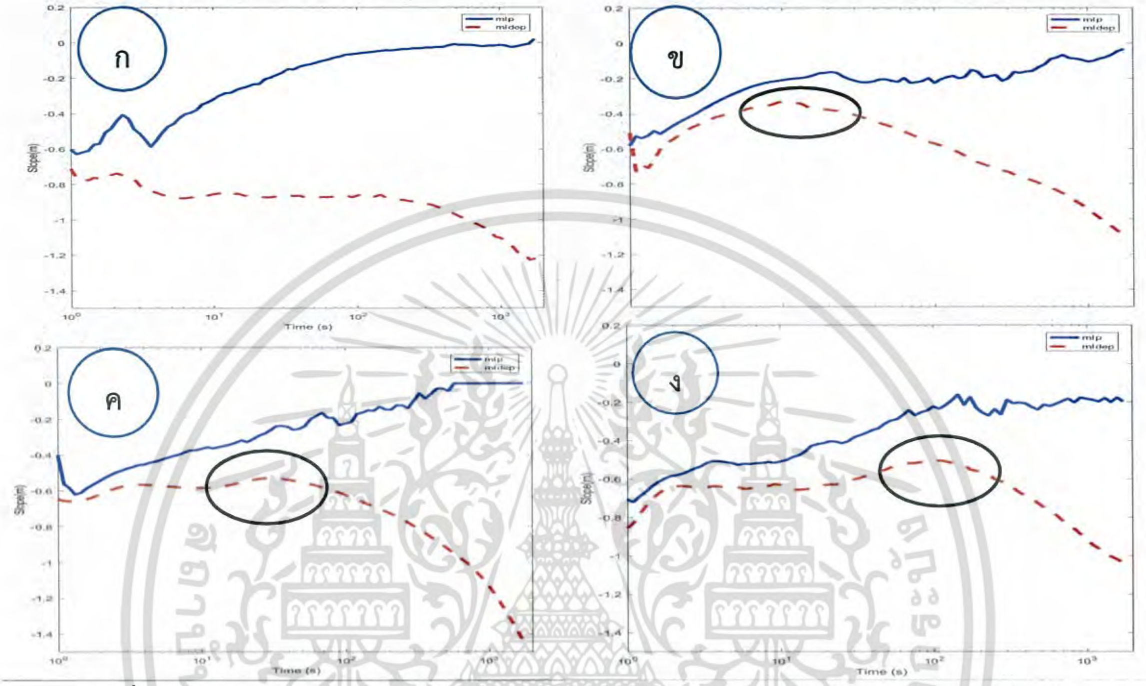
3. ชิ้นทดสอบหลังจำลองความเสื่อมเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิ 210°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง



รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความชันของกระแสโพลาไรซ์เซชันและดีโพลาไรซ์เซชันของชิ้นทดสอบหลังจำลองความเสื่อมเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิ 210°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. เปรียบเทียบกราฟความชันของกระแสโพลาไรซ์เซชันและดีโพลาไรซ์เซชันของชิ้นทดสอบก่อนจำลองความเสื่อมกับชิ้นทดสอบที่จำลองความเสื่อมเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิ 170˚C, 190˚C และ 210˚C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

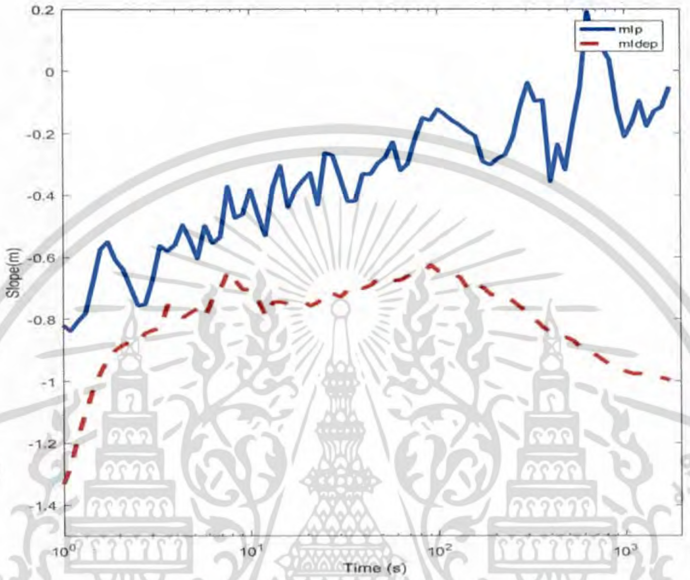


รูปที่ 4.24 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความชันกระแสโพลาไรซ์เซชันและดีโพลาไรซ์เซชัน
(ก) ชิ้นทดสอบก่อนจำลองความเสื่อม (ข) ชิ้นทดสอบเสื่อมเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิ 170˚C
(ค) ชิ้นทดสอบเสื่อมเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิ 190˚C
(ง) ชิ้นทดสอบเสื่อมเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิ 210˚C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.3 การหาค่าความชันของกราฟกระแสโพลาไรซ์เซชันและดีโพลาไรซ์เซชันของชิ้นทดสอบที่เสื่อมเนื่องจากการเกิด Partial Discharge ในชิ้นทดสอบ

การทดสอบในหัวข้อนี้ได้ทำการหาค่าความชันของกระแสโพลาไรซ์เซชันและดีโพลาไรซ์เซชันของชิ้นทดสอบที่เสื่อมเนื่องจากการเกิด Partial Discharge ในชิ้นทดสอบ



รูปที่ 4.25 กราฟแสดงความชันของกระแสโพลาไรซ์เซชันและดีโพลาไรซ์เซชันของชิ้นทดสอบที่เสื่อมเนื่องจากการเกิด Partial Discharge ในชิ้นทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองที่ 4.1 การทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและดีโพลาไรซ์เซชันของชิ้นทดสอบก่อนและหลังจำลองการเกิดความเสื่อมตามกรณีศึกษาต่างๆ

• กรณีชิ้นทดสอบเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน ในการจำลองความเสื่อมโดยการอบชิ้นทดสอบ 3 ชิ้นจนเสื่อมสภาพที่อุณหภูมิ 170°C, 190°C และ 210°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมงตามลำดับ พบว่ากระแสโพลาไรซ์เซชันและดีโพลาไรซ์เซชันในช่วงเริ่มต้นของชิ้นทดสอบก่อนจำลองความเสื่อมมีค่าสูงกว่ากระแสโพลาไรซ์เซชันและดีโพลาไรซ์เซชันของชิ้นทดสอบหลังจำลองความเสื่อม และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างชิ้นทดสอบที่ผ่านการจำลองความเสื่อมมาแล้ว พบว่าค่ากระแสโพลาไรซ์เซชันและดีโพลาไรซ์เซชันมีค่าต่ำลงตามอุณหภูมิที่สูงขึ้นที่ชิ้นทดสอบได้รับตามลำดับ โดยที่บริเวณปลายของกราฟกระแสโพลาไรซ์เซชันแสดงให้เห็นถึงปริมาณกระแสการนำไฟฟ้า (Conductance Current) ซึ่งมีค่าเปลี่ยนไปตามค่าความชื้นโดยค่ากระแสการนำไฟฟ้าที่ลดลงหมายถึงความชื้นที่ลดลงด้วย

• กรณีชิ้นทดสอบเสื่อมสภาพเนื่องจากการเกิด Partial Discharge ภายในชิ้นทดสอบ พบว่ากระแสโพลาไรซ์เซชันและดีโพลาไรซ์เซชันของชิ้นทดสอบที่มีการเกิด Partial Discharge มีค่าต่ำกว่ากระแสโพลาไรซ์เซชันและดีโพลาไรซ์เซชันของชิ้นทดสอบที่ไม่มีการเกิด Partial Discharge ในชิ้นทดสอบ

จากผลการทดลองที่ 4.2 การวิเคราะห์แฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกของชิ้นทดสอบก่อนและหลังจำลองความเสื่อมตามกรณีศึกษาต่างๆ

• กรณีชิ้นทดสอบเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิ 170°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง พบว่าชิ้นทดสอบหลังจำลองความเสื่อมแฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกมีต่ำกว่าของชิ้นทดสอบก่อนจำลองความเสื่อม คือ ชิ้นทดสอบก่อนจำลองความเสื่อมมีความชื้นสูงกว่าของชิ้นทดสอบหลังจำลองความเสื่อมโดยสามารถดูได้จากช่วงของความถี่ต่ำ และชิ้นทดสอบก่อนจำลองความเสื่อมมีความต้านทานต่ำกว่าของชิ้นทดสอบหลังจำลองความเสื่อม หรือชิ้นทดสอบก่อนจำลองความเสื่อมมีความเสื่อมสภาพมากกว่าข องชิ้นทดสอบหลังจำลองความเสื่อม โดยสามารถดูได้จากช่วงของความถี่สูง

• กรณีชิ้นทดสอบเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิ 190°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง พบว่าชิ้นทดสอบหลังจำลองความเสื่อมแฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกมีค่าต่ำกว่าของชิ้นทดสอบก่อนจำลองความเสื่อม คือ ชิ้นทดสอบก่อนจำลองความเสื่อมมีความชื้นสูงกว่าของชิ้นทดสอบหลังจำลองความเสื่อม โดยสามารถดูได้จากช่วงของความถี่ต่ำ และชิ้นทดสอบก่อนจำลองความเสื่อมมีความต้านทานต่ำกว่าของชิ้นทดสอบหลังจำลองความเสื่อม หรือชิ้นทดสอบก่อนจำลองความเสื่อมมีความเสื่อมสภาพมากกว่าของชิ้นทดสอบหลังจำลองความเสื่อม โดยสามารถดูได้จากช่วงของความถี่สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

• กรณีชิ้นทดสอบเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิ 210°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง พบว่า ชิ้นทดสอบหลังจำลองความเสื่อมมีค่าแฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกมีค่าต่ำกว่าของชิ้นทดสอบก่อนจำลองความเสื่อม คือ ชิ้นทดสอบก่อนจำลองความเสื่อมมีความชื้นสูงกว่าของชิ้นทดสอบหลังจำลองความเสื่อม โดยสามารถดูได้จากช่วงของความถี่ต่ำ และชิ้นทดสอบก่อนจำลองความเสื่อมมีความต้านทานต่ำกว่าของชิ้นทดสอบหลังจำลองความเสื่อม หรือชิ้นทดสอบก่อนจำลองความเสื่อมมีความเสื่อมสภาพมากกว่าของชิ้นทดสอบหลังจำลองความเสื่อม โดยสามารถดูได้จากช่วงของความถี่สูง

• กรณีชิ้นทดสอบเสื่อมสภาพเนื่องจากการเกิด Partial Discharge ภายในชิ้นทดสอบ พบว่า ชิ้นทดสอบที่มีการเกิด Partial Discharge มีค่าแฟกเตอร์ความสูญเสียไดอิเล็กตริกมีค่าต่ำกว่าของชิ้นทดสอบก่อนจำลองความเสื่อม

จากการทดลองที่ 4.3 การหาค่ากระแสการนำไฟฟ้าของชิ้นทดสอบทั้งก่อนจำลองความเสื่อมและหลังจำลองความเสื่อมตามกรณีศึกษาต่างๆ

• กรณีชิ้นทดสอบเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิ 170°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง พบว่า ค่ากระแสการนำไฟฟ้าของชิ้นทดสอบก่อนจำลองความเสื่อมมีค่าสูงกว่าของชิ้นทดสอบหลังจำลองความเสื่อม

• กรณีชิ้นทดสอบเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิ 190°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง พบว่า ค่ากระแสการนำไฟฟ้าของชิ้นทดสอบก่อนจำลองความเสื่อมมีค่าสูงกว่าของชิ้นทดสอบหลังจำลองความเสื่อม

• กรณีชิ้นทดสอบเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิ 210°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง พบว่า ค่ากระแสการนำไฟฟ้าของชิ้นทดสอบหลังจำลองความเสื่อมมีค่าสูงกว่าของชิ้นทดสอบหลังจำลองความเสื่อม

• กรณีชิ้นทดสอบเสื่อสภาพเนื่องจากการเกิด Partial Discharge ภายในชิ้นทดสอบ พบว่า ค่ากระแสการนำไฟฟ้าของชิ้นทดสอบก่อนจำลองความเสื่อมมีค่าสูงกว่าของชิ้นทดสอบที่เสื่อมเนื่องจากการเกิด Partial Discharge ภายในชิ้นทดสอบ

จากการทดลองที่ 4.4 การค่าความชันของกระแสโพลาไรซ์เซชันและดีโพลาไรซ์เซชันของชิ้นทดสอบก่อนและหลังจำลองความเสื่อมตามกรณีศึกษาต่างๆ

• กรณีชิ้นทดสอบเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน ในการจำลองความเสื่อมโดยการอบชิ้นทดสอบ 3 ชิ้นจนเสื่อมสภาพที่อุณหภูมิ 170°C, 190°C และ 210°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมงตามลำดับ พบว่า กราฟความชันของกระแสดีโพลาไรซ์เซชันมีแนวโน้มค่อยๆ เป็นบวกเพิ่มขึ้นจนถึงค่าความชันเป็นศูนย์ หลังจากนั้นมีแนวโน้มค่อยๆ เป็นลบมากขึ้น ซึ่งแตกต่างกับกรณีชิ้นทดสอบก่อนจำลองความเสื่อม ซึ่งมีแนวโน้ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความชันค่อนข้างคงที่ และกราฟความชันของกระแสโพลาไรซ์เซชันของชิ้นทดสอบก่อนและหลังจำลองความเสื่อมมีแนวโน้มค่อนข้างคล้ายกัน

• กรณีชิ้นทดสอบเสื่อมสภาพเนื่องจากการเกิด Partial Discharge ภายในเนื้อฉนวน พบว่าไม่สามารถวิเคราะห์รูปแบบของกราฟความชันเนื่องจากความเสื่อมจาก Partial Discharge ได้อย่างชัดเจน ซึ่งอาจเป็นเพราะวิธีนี้ไม่ใช่วิธีที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ผลจากความเสื่อมของ Partial Discharge

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] Greg C. Stone, Edward A. Boulter Ian Culbert and Hussein Dhirani, **Electrical Insulation for Rotating Machines**, 2nd Ed., Wiley-IEEE Press, 2014.

[2] Cen-ping. "Electric Motor Components" [Online]. Available : http://www.cen-ping.com/bldc%20stators.htm

[3] Stimple & Ward Compony. "Electric Motor Coil Gallery" [Online]. Available : http://www.swcoils.com/elelctric-coil-gallery.htm

[4] Stephan 123. "Principle of Roebel Bar" [Online]. Available : https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Roebelstab.jpg

[5] Marketing Communications at GE. "Medium Voltage Motors up to 2MW Available for North America" [Online]. Available : https://www.linkedin.com/pulse/medium-voltage-motors-up-2mw-available-north-america-matt-conkrite

[6] Partzsch Elektromotoren. "The Transposition of Roebel Bar" [Online]. Available : https://www.maschinenmarkt.vogel.de/index.cfm?pid=7502&pk=448583&fk=730706&type=article

[7] Geoff Klempner and Isidor Kerszenbaum, **Operation and Maintenance of Large Turbo-Generators**, 1st Ed., Wiley-IEEE Press, 2004.

[8] พัชรี ทองอินต๊ะ, "การวิเคราะห์ฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนแรงดันสูง โดยวิธีการวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน", **วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต**, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2559.

[9] ภูริชญ์ บูรพสายัณห์ และคณะ, "การศึกษาเทคนิคการวินิจฉัยฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนแรงดันสูง". **ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต**, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2557.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[10] นรเศรษฐ พัฒนเดช, **วัสดุวิศวกรรมไฟฟ้า**, พิมพ์ครั้งที่ 3, ห้างหุ้นส่วนจำกัด มีน เซอร์วิส ซัพพลาย, 2557

[11] PDC-Analyser-1MOD User's Guide, ALFF Engineering.

[12] IEEE std. 43. IEEE Recommended Practice for testing Insulation Resistance of Electric Machinery, 2013

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

PDC-ANALYSER-1MOD User's Guide ALFF Engineering

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PDC-ANALYSER-1MOD

User's Guide

ALFF Engineering
Gomweg 7
CH 8915 Hausen am Albis
Switzerland
phone: +41 44 77 66 77 6
fax: +41 44 77 66 77 7
email: info@alff-engineering.ch
web: www.alff-engineering.ch

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Caution

The PDC-ANALYSER-1MOD contains an externally accessible high voltage source producing up to 2 kV and up to 5mA (internal current limit).

The instrument must be operated only by skilled persons.

The operators are responsible for protecting the test site against the hazards related to high voltages. All the elements of a test setup, which are connected to this high voltage source or which could be set under voltage by any insulation breakdown, must be protected against being contacted by the operator or by any other person as long as the mains power is supplied to the instrument.

Also, the PDC-ANALYSER-1MOD must be stored and operated in a mechanically secured position and all the cables connected to it must be protected against making anyone fall over them or accidentally pull on them.

Content

1 Hardware	3
2 Measuring program	3
3 Evaluation program	4
4 Performing a measurement	4
5 Specifications	7
Appendix A	8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

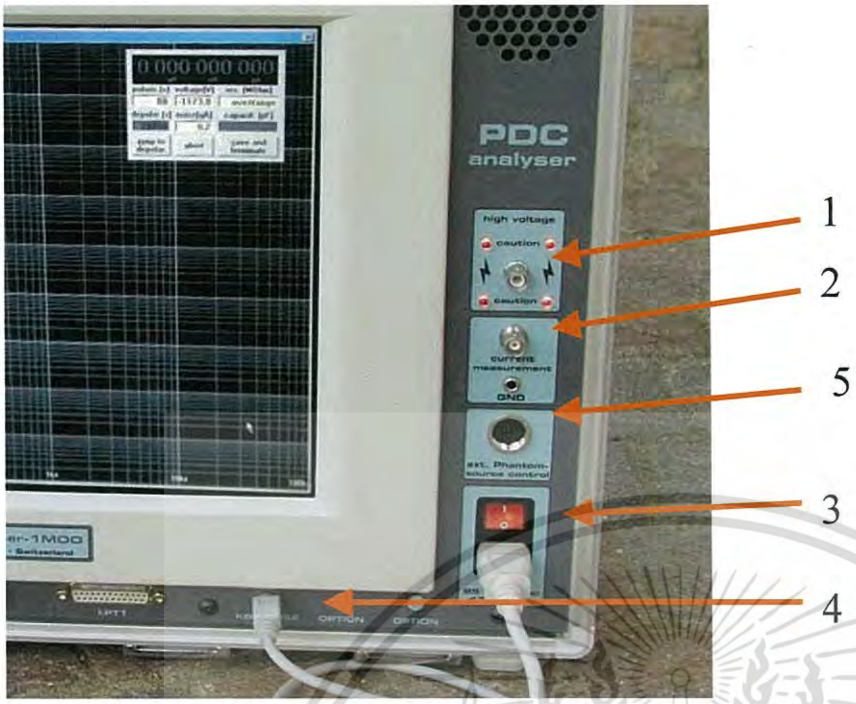


Figure 1: The connections of the **PDC-ANALYSER-1MOD**.

1 Hardware

Please connect the keyboard to jack "4" before turning on the **PDC-ANALYSER-1MOD**.

Use switch "3" to turn on the instrument.

The high voltage cable, which has a SHV plug, is connected to jack "1" and the current sensing cable with the BNC plug is connected to the jack "2" labelled "current measurement".

Plug "5" is for connecting the optional PDC-Phantom-1000XE voltage source, see separate instruction sheet.

For an accurate measurement, a warm-up time period of 60 min is recommended.

2 Measuring program

To perform a measurement with the **PDC-ANALYSER-1MOD**, start "PDC Measurement" by double clicking on this icons on the desktop of the instrument.

On the first window after invoking the program, the measuring parameters can be set:

- The name of directory, where the generated files will be saved.
- The name prefix for generated files (see Appendix A).
- The temperature value (important for the evaluation).
- The test voltage.
- The duration of an initial delay period before the measurement.
- The duration of the polarisation.
- The duration of the depolarisation.
- The description of the test object (only for information).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

After the desired measuring parameters have been set, the measurement can be started by clicking "start measurements".

A new display appears and the instrument is internally initialised (this takes about seven seconds).

Then the first delay duration is counted down and the current from the current sensing cable is displayed. The measurement can be aborted anytime by pressing ALT-F4. The delay duration can be prematurely cancelled by pressing "jump to measurements".

Caution: As soon as the delay duration has been counted down or brought to end by pressing "jump to measurements", the high voltage source is turned on.

Now the polarisation takes place and the polarisation duration is counted down. During this period, the high voltage is indicated with four red lamps around the high voltage SHV jack "1". The polarisation period can be automatically jumped over by setting the polarisation duration to zero on the setup screen. The measurement program can be aborted anytime by pressing ALT-F4. If the accumulated data should be stored, click on "save and terminate" to terminate the program.

After the polarisation duration has been counted down, the high voltage source is set to exactly zero volts and the depolarisation duration is started. Still, the measurement program can be aborted anytime by pressing ALT-F4, but all the data will be lost. If the accumulated data should be stored, click on "save and terminate".

3 Evaluation program

The measured polarisation and depolarisation currents can be evaluated with the *PDC-Evaluation* program. The basic version of this program permits the determination of the resistance, polarisation index (PI), recovery voltage and derived polarisation spectrum in the time domain and the complex capacitance $\underline{C} = C'(\omega) - jC''(\omega)$ and the derived $\tan\delta(\omega)$ in the frequency domain. For more information, see the User's Guide of *PDC-Evaluation* program.

4 Performing a measurement

To perform an accurate measurement, it is important to connect the test object to be investigated as long as possible to **PDC-ANALYSER-1MOD** before starting the measurement, because both the high voltage supply and the current sense input are normally short circuited to ground. Thus, the capacitances of the test object are well discharged.

Now, a 3-phase power transformer is taken as an example of a test object.

The transformer must be connected to the **PDC-ANALYSER-1MOD** as a capacitor (see figure 2). To obtain such an arrangement, all the high voltage bushings could be connected together, the high voltage windings behave as a first electrode of the capacitor under investigation. The second electrode of the capacitor is formed by connecting all the "low" voltage bushings together. The relaxation currents are sensed from the low voltage windings to ground. During the measurement the tank of transformer must be grounded (see figure 3).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

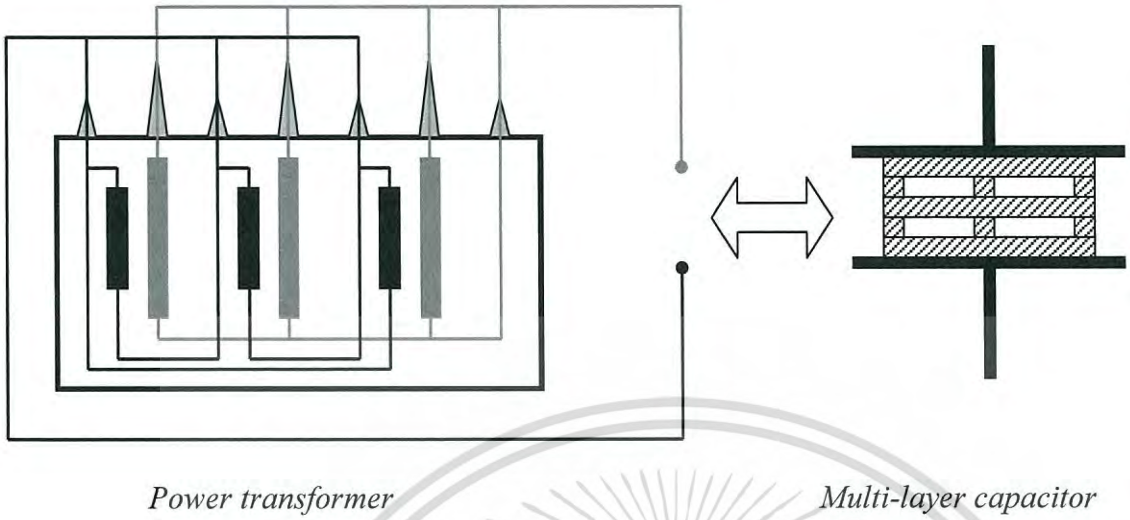


Figure 2: How to connect a power transformer as capacitor for the dielectric investigation of the main insulation.

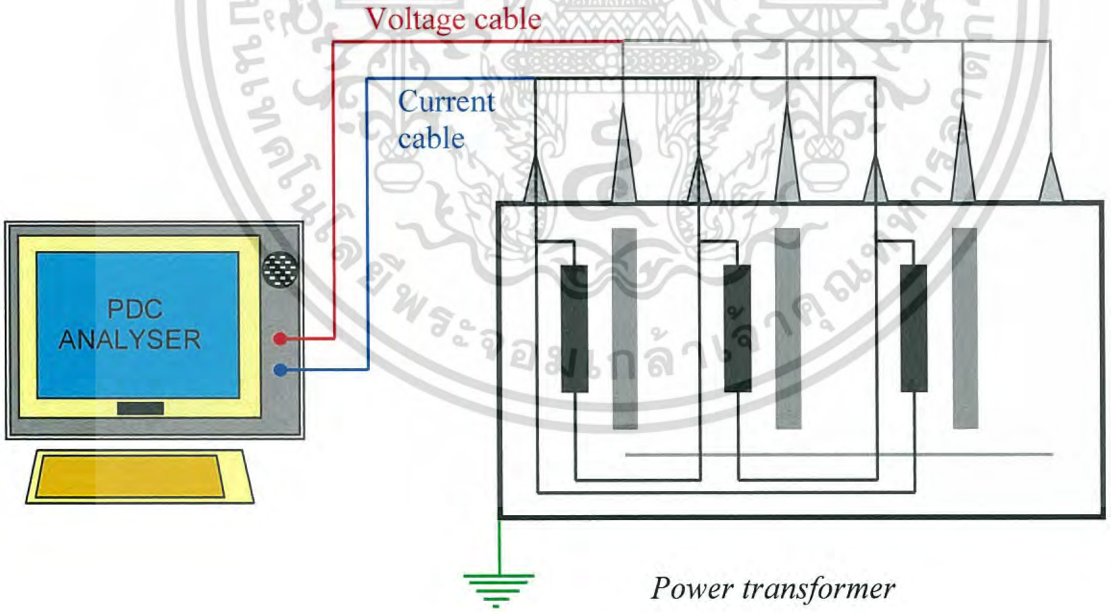


Figure 3: Connection of a power transformer to **PDC-ANALYSER-1MOD**.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Copyright © ALFF Engineering / Switzerland

For an accurate measurement, it is necessary to determine the initial condition of the test object before any application of excitation voltage.

The initial condition (or charging state) of a test object can be determined by monitoring the initial current which flows through it. For visualisation of this current, it is sufficient to start a current measurement with a polarisation duration of zero seconds. It is important, that the initial current is low and at least in a steady state. In case of a high, but constant amplitude of initial current, this current can be considered as an "offset" for the evaluation: it can be subtracted from the measurements.

Before starting the main measurement, it is recommended to carry out control measurements with a short charging duration e.g. 5 seconds to control the whole setup. Verify the amplitudes of measured currents and the value of the capacitance. Such a short control measurement will not affect the main measurement, because the relaxation currents induced by a short charging duration can be neglected after a few minutes of waiting time.

The main measurement can be performed after the *control* measurement by choosing adequate values for the charging voltage amplitude and for the duration of polarisation and depolarisation.

For new power transformers, a charging voltage amplitude of up to 500 V is recommended. Used transformers are less sensitive to the non-linear effects due to their high conductivity of oil. So, for used transformers the excitation voltage can be increased up to 1'000 V. In general, a polarisation duration of 5'000 to 7'000 seconds is sufficient to assess the insulation quality of a power transformer, the same duration is also recommended for the depolarisation duration.

In general, it is important to avoid non-linear effects by keeping the amplitude of the applied excitation voltages as low as possible. It is also recommended to keep the discharge periods between the successive dc voltage applications long enough to avoid any superposition of dielectric responses.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Copyright © ALFF Engineering / Switzerland

5 Specifications

Electrical Insulation Diagnostic System **PDC-ANALYSER-1MOD**

Current measurement

range	±1 mA
resolution (current display when measuring)	1 pA
resolution (recorded data)	0.1 pA
accuracy	0.5 % of the measured value ±1 pA after 1 hour warming up
impedance	10 kΩ
protection	up to 100 mA respectively 1kV for 50ms
noise suppression	up to 10 μA eff at 50 / 60 Hz mains frequency
filtering (current display when measuring)	mean value in 1 s intervals
filtering (recorded data)	mean value in intervals increasing proportionally with the time from the voltage source switching moment

Voltage source

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

Capacitance measurement

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

	source voltage			
	2 kV	1 kV	500 V	100 V
accuracy	±2 % ±5 pF	±2 % ±10 pF	±2 % ±20 pF	±2 % ±100 pF
maximum load capacitance	25 nF	50 nF	100 nF	500 nF

Computer

display	15" TFT, 262'144 colours, resolution 1024 x 786 pixels
processor	Intel Pentium III 1 GHz
memory	SDRAM 256 MB
hard disk	40 GB
standard interfaces	DVD+/-RW, 3½" Floppy, 2 x PCMCIA, parallel and serial ports, Ethernet
options	additional serial ports, Audio in/out, external monitor out

Software

operating system	windows XP home SP2
measuring and control program	installed ready to use, outputs for each measurement one file with polarisation data, one file with depolarisation data and one file with general measurement descriptions
standard evaluation software	installed ready to use, easy to use, extensive possibilities to postprocess, to display, to print and to export the measured data, computation of the complex capacitance in function of frequency, computation of a lumped equivalent circuit of the measured insulation, computation of recovery voltages and the derived "polarisation spectrum", computation of polarisation indexes and of insulation resistances according to all known standards and definitions
advanced evaluation software	quality assessment of oil-paper insulation systems, quantitative determination of moisture content in pressboard and of oil conductivity for power transformers

Miscellaneous

weight	17.3 kg
power supply	90 ... 260 V, 47 ... 63 Hz, <160 VA
size	514 × 185 × 428 (width × depth × height in mm)
temperature (use)	0 ... 35 °C
temperature (stock)	-10 ... 50 °C
pressure	70 ... 106 kPa
humidity	5 ... 80 % non condensing
acceleration	< 2 g
length of standard measurement cables	15 m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Appendix A

The **PDC-ANALYSER-1MOD** generates 3 files for each measurement.

These files are stored in the directory as entered during setup.

The polarisation current data are registered in a *p.dat file. The depolarisation current data are registered in a *d.dat file. Information about the measurement are registered in a *c.txt file.

The name of each generated file is composed of 3 different parts.

Example: The name of a file could be **testa14p.dat**

testa: is a name prefix, which identifies a measurement series.

14: is a number between 01 to 99, which identifies a single measurement in a measurement series with a given name prefix (in this example, testa). This number increments automatically for each further measurement performed in this series.

p: indicates the type of the file, in this example, polarisation current data file.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Recognized as an
American National Standard (ANSI)

IEEE Std 43-2000(R2006)
(Revision of
IEEE Std 43-1974)

IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery

Sponsor

Electric Machinery Committee
of the
IEEE Power Engineering Society

Approved 12 October 2000
American National Standards Institute

Reaffirmed 30 March 2006
Approved 6 March 2000
IEEE-SA Standards Board

Abstract: This document describes the recommended procedure for measuring insulation resistance of armature and field windings in rotating machines rated 1 hp, 750 W or greater. It applies to synchronous machines, induction machines, dc machines, and synchronous condensers. Contained within this documentþis the general theory of insulation resistance (IR) and polarization index (P.I.), as well as factors affectingþthe results,þtest procedures, methods of interpretation, test limitations, and recommended minimum values.
Keywords: absorption current, conduction current, discharge current, geometric capacitive current, insulation resistance, polarization index, surface leakage current

The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.
3 Park Avenue, New York, NY 10016-5997, USA

Copyright © 2000 by the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.
All rights reserved. Published 24 March 2000. Printed in the United States of America.

Print: ISBN 0-7381-1924-5 SH94806
PDF: ISBN 0-7381-1925-3 SS94806

No part of this publication may be reproduced in any form, in an electronic retrieval system or otherwise, without the prior written permission of the publisher.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IEEE Standards documents are developed within the IEEE Societies and the Standards Coordinating Committees of the IEEE Standards Association (IEEE-SA) Standards Board. Members of the committees serve voluntarily and without compensation. They are not necessarily members of the Institute. The standards developed within IEEE represent a consensus of the broad expertise on the subject within the Institute as well as those activities outside of IEEE that have expressed an interest in participating in the development of the standard.

Use of an IEEE Standard is wholly voluntary. The existence of an IEEE Standard does not imply that there are no other ways to produce, test, measure, purchase, market, or provide other goods and services related to the scope of the IEEE Standard. Furthermore, the viewpoint expressed at the time a standard is approved and issued is subject to change brought about through developments in the state of the art and comments received from users of the standard. Every IEEE Standard is subjected to review at least every five years for revision or reaffirmation. When a document is more than five years old and has not been reaffirmed, it is reasonable to conclude that its contents, although still of some value, do not wholly reflect the present state of the art. Users are cautioned to check to determine that they have the latest edition of any IEEE Standard.

Comments for revision of IEEE Standards are welcome from any interested party, regardless of membership affiliation with IEEE. Suggestions for changes in documents should be in the form of a proposed change of text, together with appropriate supporting comments.

Interpretations: Occasionally questions may arise regarding the meaning of portions of standards as they relate to specific applications. When the need for interpretations is brought to the attention of IEEE, the Institute will initiate action to prepare appropriate responses. Since IEEE Standards represent a consensus of all concerned interests, it is important to ensure that any interpretation has also received the concurrence of a balance of interests. For this reason, IEEE and the members of its societies and Standards Coordinating Committees are not able to provide an instant response to interpretation requests except in those cases where the matter has previously received formal consideration.

Comments on standards and requests for interpretations should be addressed to:

Secretary, IEEE-SA Standards Board
445 Hoes Lane
P.O. Box 1331
Piscataway, NJ 08855-1331
USA

> Note: Attention is called to the possibility that implementation of this standard may require use of subject matter covered by patent rights. By publication of this standard, no position is taken with respect to the existence or validity of any patent rights in connection therewith. The IEEE shall not be responsible for identifying patents for which a license may be required by an IEEE standard or for conducting inquiries into the legal validity or scope of those patents that are brought to its attention.

IEEE is the sole entity that may authorize the use of certification marks, trademarks, or other designations to indicate compliance with the materials set forth herein.

Authorization to photocopy portions of any individual standard for internal or personal use is granted by the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., provided that the appropriate fee is paid to Copyright Clearance Center. To arrange for payment of licensing fee, please contact Copyright Clearance Center, Customer Service, 222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923 USA; (978) 750-8400. Permission to photocopy portions of any individual standard for educational classroom use can also be obtained through the Copyright Clearance Center.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Introduction

(This introduction is not part of IEEE Std 43-2000, IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery.)

Insulation resistance measurement has been recommended and used for more than half a century to evaluate the condition of electrical insulation. Whereas individual insulation resistance measurements may be of questionable value, the carefully maintained record of periodic measurements, accumulated over months and years of service, is of unquestioned value as a measure of some aspects of the condition of the electrical insulation. Originally, in 1950, this recommended practice was published by the AIEE as a guide to present the various facets associated with the measurement and understanding of electrical insulation resistance. The guide was revised in 1961 and again in 1974. During the 1970s, several changes were made to the types of insulation used in electric rotating machines. The insulation resistance characteristics of these newer insulation systems are different from the older systems, and therefore required this substantial revision to the standard for measuring insulation resistance. Other changes include the addition of further description of the testing theory and the removal of suggestions regarding maintenance dry-out procedures for older windings (previously Annex A). Recommendations for maintenance procedures are beyond the scope of this document. With this publication as a recommended practice, the IEEE is presenting and recommending electrical insulation resistance measurement as an important factor in monitoring the condition of electrical insulation in rotating machinery.

This recommended practice describes the theory, procedure, and interpretation of the insulation resistance test. It is intended for the following:

- Individuals or organizations who manufacture rotating machines
- Individuals or organizations who are responsible for the acceptance of new rotating machines
- Individuals or organizations who test and maintain rotating machines
- Individuals or organizations who operate rotating machines

This recommended practice is designed to help organizations and individuals

- Evaluate the condition of the electrical insulation used in rotating machines
- Determine if the electrical insulation of a rotating machine is suitable for return-to-service
- Determine if the electrical insulation of a rotating machine is suitable for high-potential testing

This recommended practice is intended to satisfy the following objectives:

a) Promote consistency for insulation test procedures and interpretations
b) Provide useful information on proper application of the insulation resistance test
c) Provide useful information on the technical theory of insulation resistance testing

The revision to this recommended practice was prepared by a working group of the Materials Subcommittee of the Electric Machinery Committee of the IEEE Power Engineering Society. Working group personnel were

Vicki Warren, *Chair*

William Bartley
Thomas Bishop
Robert Draper
Guanzhong Gao
Trilok C. Garg
James Grant
Gary Griffith
Gary Heuston
Alan M. Iverson
Ken Jackson
Wayne Johnson
Chaman L. Kaul
Walter Martiny
William McDermid
Charles Millet
Beant Nindra
Madan Rana
Larry Rodland
David Schump
Susan Soergel
Greg C. Stone
George Stranovsky
Chuck Wilson
John Wilson
Daniel I. Young*

*Chair Emeritus

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำ ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Copyright © 2000 IEEE. All rights reserved.

The following members of the balloting committee voted on this recommended practice:

Vaino Aare
Edwin Averill
Roy L. Balke
William H. Bartley
Kevin D. Becker
Karl W. Berger
Thomas H. Bishop
Paul G. Cummings
Paul L. Dandeno
James H. Dymond
James S. Edmonds
Franklin T. Emery
Jorge Fernandez-Daher
Guanzhong Gao
Trilok C. Garg
Nirmal K. Ghai
Brian E. B. Gott
James Grant
Franklin H. Grooms
Bal K. Gupta
Howard B. Hamilton
Thomas J. Hammons
Richard A. Huber
Alan M. Iversen
Chaman L. Kaul
Rigsby Kavanaugh
Tim Keck
Stephen B. Kuznetsov
Peter H. Landrieu
Walter J. Martiny
William R. McCown
William McDermid
Lloyd McSparran
Edward J. Michaels
J. R. Michalec
Charles Millet
Gerhard J. Neidhoefer
Nils E. Nilsson
Beant S. Nindra
J. L. Oldenkamp
James A. Oliver
William B. Penn
Madan Rana
Robert H. Rehder
Laurence Rodland
Charles M. Rowe
David E. Schump
Manoj R. Shah
John Shea
Jan Stein
Ken Stenroos
Greg C. Stone
James E. Timperley
Paul Vollmar
Paul Dieter Wagner
Vicki Warren
Richard F. Weddleton
Charles A. Wilson
John Wilson
Edward J. Woods
Daniel I. Young
Martin Zgraggen

The final conditions for approval of this standard were met on 6 March 2000. This standard was conditionally approved by the IEEE-SA Standards Board on 30 January 2000, with the following membership:

Richard J. Holleman, *Chair*
Donald N. Heirman, *Vice Chair*
Judith Gorman, *Secretary*

Satish K. Aggarwal
Dennis Bodson
Mark D. Bowman
James T. Carlo
Gary R. Engmann
Harold E. Epstein
Jay Forster*
Ruben D. Garzon
James H. Gurney
Lowell G. Johnson
Robert J. Kennelly
E. G. "Al" Kiener
Joseph L. Koepfinger*
L. Bruce McClung
Daleep C. Mohla
Robert F. Munzner
Louis-François Pau
Ronald C. Petersen
Gerald H. Peterson
John B. Posey
Gary S. Robinson
Akio Tojo
Hans E. Weinrich
Donald W. Zipse

*Member Emeritus

Also included is the following nonvoting IEEE-SA Standards Board liaison:

Robert E. Hebner

Noelle D. Humenick
IEEE Standards Project Editor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิ

 Copyright © 2000 IEEE. All rights reserved.

Contents

1. Overview ... 1

1.1 Scope ... 1
1.2 Purpose ... 1

2. References ... 2

3. Definitions ... 3

4. Safety considerations ... 3

5. Insulation resistance—general theory ... 4

5.1 Components of the measured direct current ... 4
5.2 Characteristics of the measured direct current ... 6
5.3 Insulation resistance readings ... 6
5.4 Polarization index readings ... 7
5.5 Discharge current ... 8

6. Factors affecting insulation resistance ... 8

6.1 Effect of surface condition ... 8
6.2 Effect of moisture ... 9
6.3 Effect of temperature ... 9
6.4 Effect of test voltage magnitude ... 11
6.5 Effect of existing charge on winding resistance measurements ... 12

7. Conditions for measuring insulation resistance ... 12

8. Winding connections for insulation resistance tests ... 12

9. Methods of measuring insulation resistance ... 13

9.1 Direct measurement ... 13
9.2 Calculated measurement ... 13

10. Precautions ... 13

11. Interpretation of insulation resistance and polarization index test results ... 14

11.1 Monitoring insulation condition ... 14
11.2 Suitability for operation or continued testing ... 14
11.3 Limitations of the insulation resistance test ... 15

12. Recommended minimum value of polarization index and insulation resistance ... 15

12.1 Minimum values ... 15
12.2 Polarization index ... 15
12.3 Insulation resistance ... 16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น รวมทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Copyright © 2000 IEEE. All rights reserved.

Annex A (informative)—Variants in polarization index 18

Annex B (informative)—Direct versus alternating voltage testing 19

Annex C (informative)—Regulation in power supplies used for insulation resistance measurement 20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิง

Copyright © 2000 IEEE. All rights reserved.

IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery

1. Overview

1.1 Scope

This document describes a recommended procedure for measuring insulation resistance of armature and field windings in rotating machines rated 1 hp, 750 W or greater. It applies to synchronous machines, induction machines, dc machines, and synchronous condensers. It does not apply to fractional-horsepower machines.

The document also describes typical insulation resistance characteristics of rotating machine windings and how these characteristics indicate winding condition. It recommends minimum acceptable values of insulation resistance for ac and dc rotating machine windings.

Other IEEE standards that include information on insulation resistance measurement are listed in Clause 2.

1.2 Purpose

The purpose of this recommended practice is to

a) Define insulation resistance and polarization index testing of the winding of a rotating machine.

b) Review the factors that affect or change insulation resistance characteristics.

c) Recommend uniform test conditions.

d) Recommend uniform methods for measuring insulation resistance with precautions to avoid erroneous results.

e) Provide a basis for interpreting insulation resistance test results to estimate winding suitability for service or for an overvoltage test. In particular, this standard describes typical insulation problems detected by the insulation resistance test.

f) Present recommended minimum acceptable insulation resistance values and polarization indices for various types of rotating machines.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Copyright © 2000 IEEE. All rights reserved.

2. References

This recommended practice shall be used in conjunction with the following publications. When the following standards are superseded by an approved revision, the revision shall apply.

ASTM D257-99 Standard Test Methods for DC Resistance or Conductance of Insulating Materials.[1]

ASTM D1711-99 Standard Terminology Relating to Electrical Insulation.

ASTM F855-97e1 Standard Specifications for Temporary Protective Grounds to Be Used on De-energized Electric Power Lines and Equipment.

IEC 60085-1: 1984, Thermal evaluation and classification of electrical insulation.[2]

IEEE Std 56-1977 (Reaff 1991), IEEE Guide for Insulation Maintenance of Large Alternating-Current Rotating Machinery (10 000 kVA and Larger).[3, 4]

IEEE Std 62-1995, IEEE Guide for Diagnostic Field Testing of Electric Power Apparatus—Part 1: Oil Filled Power Transformers, Regulators, and Reactors.

IEEE Std 67-1990 (Reaff 1995), IEEE Guide for Operation and Maintenance of Turbine Generators.

IEEE Std 95-1977 (Reaff 1991), IEEE Recommended Practice for Insulation Testing of Large AC Rotating Machinery With High Direct Voltage.[5]

IEEE Std 118-1978 (Reaff 1992), IEEE Standard Test Code for Resistance Measurements.

IEEE Std 432-1992 (Reaff 1998), IEEE Guide for Insulation Maintenance for Rotating Electric Machinery (5 hp to less than 10 000 hp).

IEEE Std 433-1974 (Reaff 1991), IEEE Recommended Practice for Insulation Testing of Large AC Rotating Machinery with High Voltage at Very Low Frequency.

IEEE Std 434-1973 (Reaff 1991), IEEE Guide for Functional Evaluation of Insulation Systems for Large High-Voltage Machines.

IEEE Std 492-1999 IEEE Guide for Operation and Maintenance of Hydro-Generators.

IEEE Std 510-1983 (Reaff 1992), IEEE Recommended Practices for Safety in High-Voltage and High-Power Testing.

[1]ASTM publications are available from the American Society for Testing and Materials, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428-2959, USA (http://www.astm.org/).

[2]IEC publications are available from the Sales Department of the International Electrotechnical Commission, Case Postale 131, 3, rue de Varembé, CH-1211, Genève 20, Switzerland/Suisse (http://www.iec.ch/). IEC publications are also available in the United States from the Sales Department, American National Standards Institute, 11 West 42nd Street, 13th Floor, New York, NY 10036, USA.

[3]Presently under revision.

[4]IEEE publications are available from the Institute of Electrical and Electronics Engineers, 445 Hoes Lane, P.O. Box 1331, Piscataway, NJ 08855-1331, USA (http://www.standards.ieee.org/).

[5]Presently under revision.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Copyright © 2000 IEEE. All rights reserved.

3. Definitions

For the purposes of this recommended practice, the following terms and definitions apply. The IEEE Dictionary of Electrical and Electronics Terms should be referenced for terms not defined in this clause.

3.1 absorption (polarization) current (I_A): A current resulting from molecular polarizing and electron drift, which decays with time of voltage application at a decreasing rate from a comparatively high initial value to nearly zero, and depends on the type and condition of the bonding material used in the insulation system.

3.2 conduction current (I_G): A current that is constant in time, that passes through the bulk insulation from the grounded surface to the high-voltage conductor, and that depends on the type of bonding material used in the insulation system.

3.3 electroendosmosis effect: A phenomenon occasionally observed, more often on older windings, when, in the presence of moisture, different insulation resistance values may be obtained when the polarity of the tester leads are reversed. Typically for older wet windings, the insulation resistance for reverse polarity, where the ground lead is connected to the winding and the negative voltage lead to ground, is much higher than for normal polarity.

3.4 insulation resistance (IR_t): The capability of the electrical insulation of a winding to resist direct current. The quotient of applied direct voltage of negative polarity divided by current across machine insulation, corrected to 40 °C, and taken at a specified time (t) from start of voltage application. The voltage application time is usually 1 min (IR_1) or 10 min (IR_{10}), however, other values can be used. Unit conventions: values of 1 through 10 are assumed to be in minutes, values of 15 and greater are assumed to be in seconds.

3.5 geometric capacitive current (I_C): A reversible current of comparatively high magnitude and short duration, which decays exponentially with time of voltage application, and which depends on the internal resistance of the measuring instrument and the geometric capacitance of the winding.

3.6 polarization index ($P.I._{t2/t1}$): Variation in the value of insulation resistance with time. The quotient of the insulation resistance at time (t_2) divided by the insulation resistance at time (t_1). If times t_2 and t_1 are not specified, they are assumed to be 10 min and 1 min, respectively. Unit conventions: values of 1 through 10 are assumed to be in minutes, values of 15 and greater are assumed to be in seconds (e.g., $P.I._{60/15}$ refers to IR_{60s}/IR_{15s}).

3.7 surface leakage current (I_L): A current that is constant with time, and which usually exists over the surface of the end-turns of the stator winding or between exposed conductors and the rotor body in insulated rotor windings. The magnitude of the surface leakage current is dependent upon temperature and the amount of conductive material, i.e., moisture or contamination on the surface of the insulation.

4. Safety considerations

Insulation resistance testing involves the application of high direct voltages to machine windings. These windings have capacitive and inductive properties that can lead to hazards that may not be readily apparent. It is not possible to cover all safety aspects in this recommended practice and test personnel should consult IEEE Std 510-1983;[6] ASTM F855-97e1; manufacturers' instruction manuals; and union, company, and government regulations.

[6]Information on references can be found in Clause 2.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Copyright © 2000 IEEE. All rights reserved.

Before any testing is conducted, the winding insulation must be discharged. It is not safe to begin testing before the discharge current is zero and there is no discernible return voltage (less than approximately 20 V) after the ground is removed. After completion of the test, the winding should be discharged through a suitable resistor, sized to limit the instantaneous current to 1 A. A minimum discharge time, which is equal to four times the voltage application duration, is recommended. This time interval is based on the R (resistive), L (inductive), C (geometric capacitive), and absorptive characteristics of the circuit during charging (time of the application of the voltage) and discharging (elapsed time since the removal of the voltage source and subsequent grounding of the winding under test). It is important to remember that the testing is not complete until the winding is discharged and there is no discernible voltage. It is recommended that subsequent ac high-potential testing not be conducted until the winding is fully discharged.

During the test period, all appropriate safety measures for the voltages being used must be taken. For test voltages 5000 V and above, the lead between the test set and the winding must be appropriately insulated and spaced from ground; otherwise, surface leakage currents and corona loss may introduce errors in the test data. For safety considerations, and to avoid measuring stray currents, the leads may be shielded.

Restriction of personnel access to the high voltages is mandatory. Use of personal protective equipment is recommended, as is the use of *hot sticks*, insulated ladders, etc. If accessible, the phase neutral and line ends of each winding should be connected together during the test to minimize the effect of high-voltage surge reflections that may result from a winding failure.

The safety measures described are by no means exclusive. These are meant only to signify the nature of the hazards involved. It is the responsibility of the users of the test equipment to completely ascertain the possible hazards involved in the testing, to protect personnel from harm, and to eliminate the risk of damage to the equipment.

5. Insulation resistance—general theory

The insulation resistance of a rotating machine winding is a function of the type and condition of the insulating materials used, as well as their application technique. In general, the insulation resistance varies proportionately with the insulation thickness and inversely with the conductor surface area.

Interpretation of insulation resistance measurements of machine windings and the recommended minimum values of polarization index and insulation resistance are described in Clause 11 and Clause 12, respectively.

5.1 Components of the measured direct current

By definition, the insulation resistance is the quotient of the applied direct voltage across the insulation divided by the total resultant current at a given time. The total resultant current (I_T) is the sum of four different currents: surface leakage (I_L), geometric capacitance (I_C), conductance (I_G), and absorption (I_A).

An equivalent circuit for the various currents in an insulation resistance test is shown in Figure 1.

The geometric capacitance current (I_C) usually does not affect the measurements, because it disappears by the time the first reading is taken at 1 min.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิง...

 Copyright © 2000 IEEE. All rights reserved.

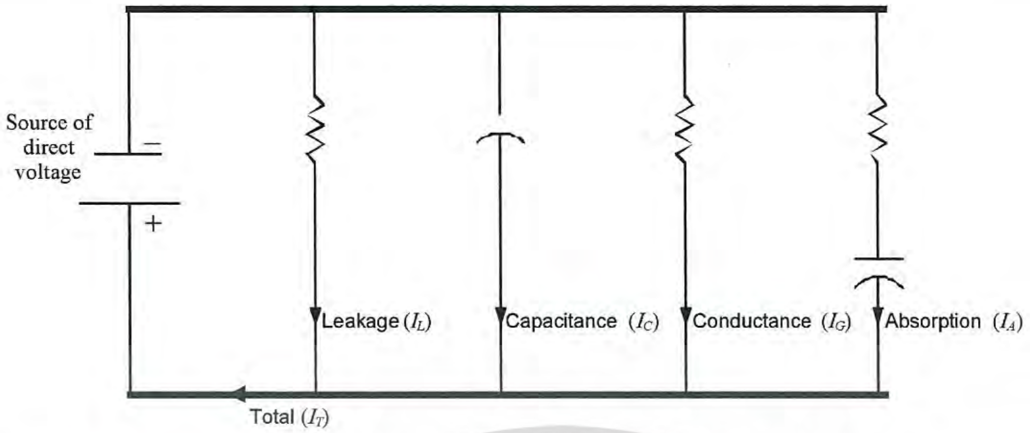


Figure 1—Equivalent circuit showing the four currents monitored during an insulation resistance test

The absorption current (I_A) or polarization current decays at a decreasing rate. The current vs. time relationship is a power function, shown in Equation (1). It may be plotted on a log-log graph as a straight line.

$$I_A = Kt^{-n} \tag{1}$$

where

I_A is absorption current,
K is a function of the particular insulation system and applied test voltage,
t is time of applied direct voltage,
n is a function of the particular insulation system.

The absorption current has two components. The first component is due to the *polarization* of the impregnating materials because the organic molecules, such as epoxy, polyester, and asphalt, tend to change orientation in the presence of a direct electric field. Since these molecules have to strain against the attractive forces of other molecules, it usually takes several minutes after application of the electric field for the molecules to become reoriented, and, thus, for the current-supplied polarizing energy to be reduced to almost zero. A second component of the absorption current is due to the gradual drift of electrons and ions through most organic materials. These electrons and ions drift until they become *trapped* at the mica surfaces commonly found in rotating machine insulation systems. Usually, for clean and dry rotating machine insulation, the insulation resistance between about 30 s and a few minutes is primarily determined by the absorption current.

Since the absorption current is a property of the insulation material and the winding temperature, a specific absorption current is neither good nor bad. In insulation systems manufactured since about 1970 (usually thermosetting polyester or epoxy bonded), the value of the exponent n of the absorption current, $I_A = Kt^{-n}$, is different from the older thermoplastic (asphalt or shellac bonded) materials. This does not imply that more modern insulation materials are *better* because the absorption current is lower and the resulting insulating resistance is higher. For example, polyethylene has essentially no absorption current, yet because of its thermal limitations, it would be completely unsuitable for application in most rotating machines.

The conduction current (I_G) in well-bonded polyester and epoxy-mica insulation systems is essentially zero unless the insulation has become saturated with moisture. Older insulation systems, such as asphaltic-mica or shellac mica-folium may have a natural and higher conduction current due to the conductivity of the tapes that back the mica.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Copyright © 2000 IEEE. All rights reserved.

The surface leakage current (I_L) is constant over time. A high surface leakage current, i.e., low insulation resistance, is usually caused by moisture or some other type of partly conductive contamination present in the machine.

5.2 Characteristics of the measured direct current

Comparing the change in insulation resistance or total current with the duration of the test voltage application may be useful in appraising the cleanliness and dryness of a winding. If the windings are contaminated or wet, the total current (I_T) will be approximately constant with time, since I_L and/or I_G (see Figure 2) will be much larger than the absorption current (I_A). If the windings are clean and dry, the total current (I_T) will normally decrease with time (see Figure 3), since the total current is dominated by the absorption (i.e., polarization) current (I_A).

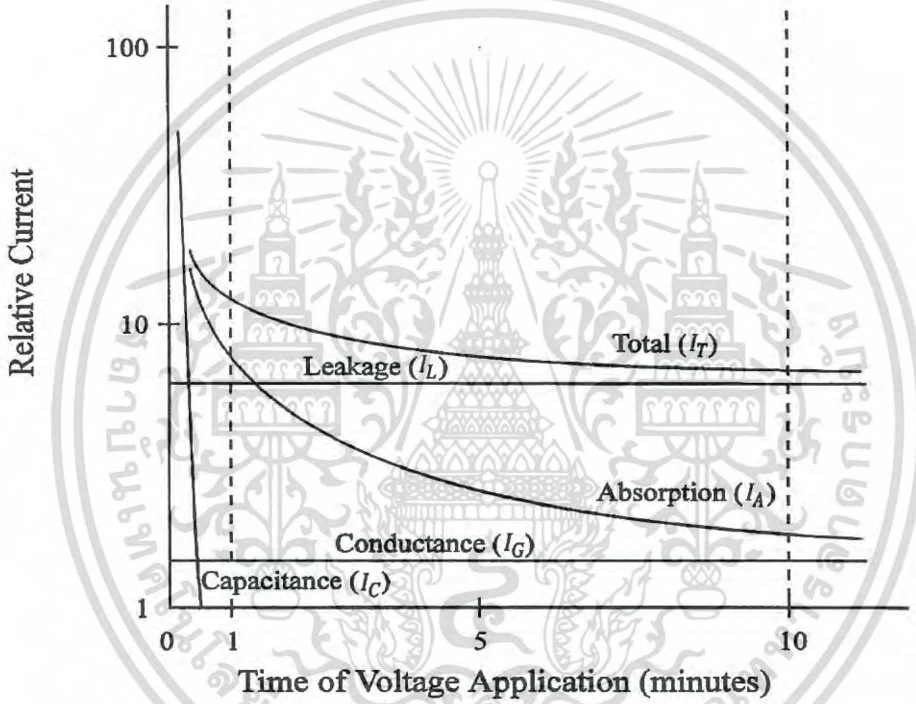


Figure 2—Types of currents for an asphaltic-mica insulation

5.3 Insulation resistance readings

The measurement of insulation resistance constitutes a direct-voltage test and must be restricted to a value appropriate to the voltage rating of the winding and the basic insulation condition. This is particularly important in the case of small, low-voltage machines, or wet windings. If the test voltage is too high, the applied test voltage may over stress the insulation, leading to insulation failure.

Insulation resistance tests are usually conducted at constant direct voltages of 500–10 000 V having negative polarity. Negative polarity is preferred to accommodate the phenomenon of electroendosmosis. Guidelines for test voltages are presented in Table 1. Readings of insulation resistance are taken after the test direct voltage has been applied for 1 min.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิง

 Copyright © 2000 IEEE. All rights reserved.

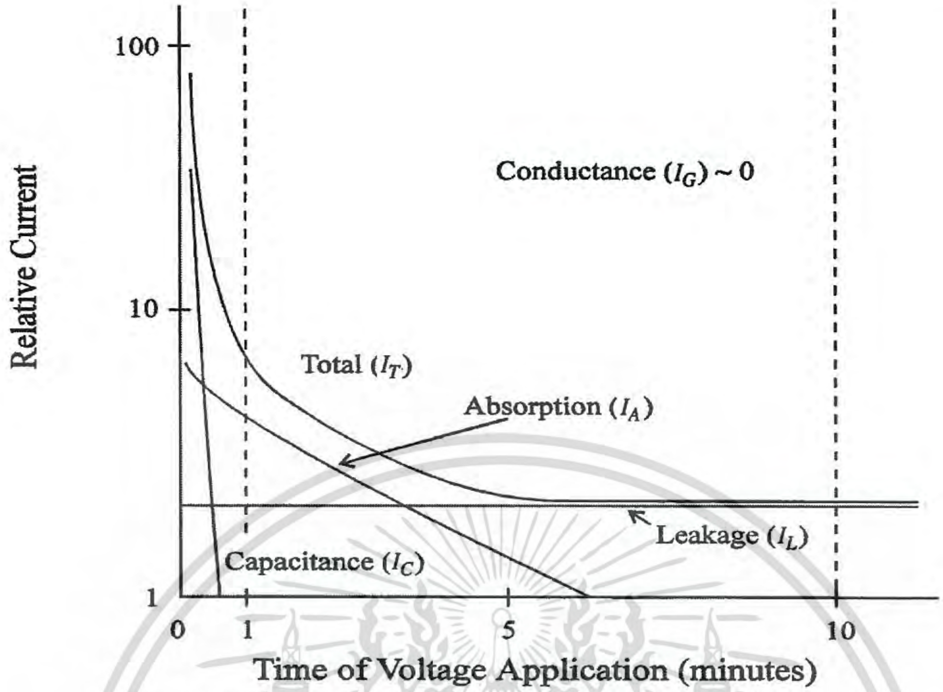


Figure 3—Types of currents for an epoxy-mica insulation with a relatively low surface leakage current and no conductance current

Table 1—Guidelines for dc voltages to be applied during insulation resistance test

Winding rated voltage (V)[a]	Insulation resistance test direct voltage (V)
<1000	500
1000–2500	500–1000
2501–5000	1000–2500
5001–12 000	2500–5000
>12 000	5000–10 000

[a]Rated line-to-line voltage for three-phase ac machines, line-to-ground voltage for single-phase machines, and rated direct voltage for dc machines or field windings.

5.4 Polarization index readings

The measured insulation resistance will usually rapidly increase when the voltage is first applied, and then gradually approach a relatively constant value as time elapses (see Figure 4). The readings of a dry winding in good condition may continue to increase for hours with a continuously applied constant test voltage. For older types of insulation, a reasonably steady value is usually reached in 10–15 min. Modern types of film-coated wire, as well as epoxy-mica or polyester-mica insulated stator windings, may approach a constant value of insulation resistance in 4 min or less. If the winding is wet or dirty, a low steady value will usually be reached 1 min or 2 min after the test voltage is applied.

The polarization index is normally defined as the ratio of the 10 min resistance value (IR_{10}) to the 1 min resistance value (IR_1). (See Annex A for the use of other values.) The polarization index is indicative of the slope of the characteristic curve (see Figure 4) and can be used to assess the insulation condition (see

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Copyright © 2000 IEEE. All rights reserved.

Clause 11 and Clause 12). To provide greater accuracy around the 1 min point and to allow the data to be plotted on log paper, it is also common to take readings at other intervals such as 15 s, 30 s, 45 s, 1 min, 1.5 min, 2 min, 3 min, 4 min, …, and 10 min.

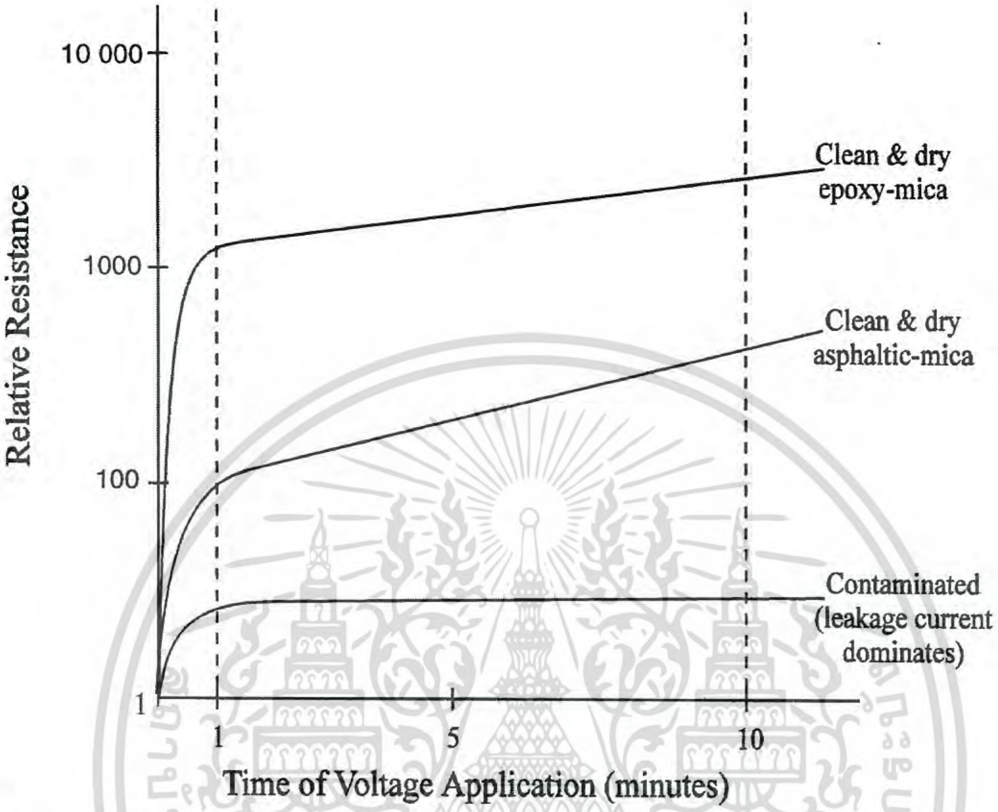


Figure 4—Typical insulation resistance measurements for three different machines

5.5 Discharge current

After the applied direct voltage is removed, a suitable discharge circuit should be provided (see Clause 4). The discharge current manifests itself in two components:

a) A capacitive discharge current component, which decays nearly instantaneously, depending upon the discharge resistance.

b) The absorption discharge current, which will decay from a high initial value to nearly zero with the same characteristics as the initial charging current but with the opposite polarity. This decay may take more than 30 min depending on the insulation type and machine size of the test specimen.

6. Factors affecting insulation resistance

6.1 Effect of surface condition

The surface leakage current (I_L) is dependent upon foreign matter, such as oil and/or carbon dust on the winding surfaces outside the slot. The surface leakage current may be significantly higher on large turbine generator rotors and dc machines, which have relatively large exposed creepage surfaces. There may also be

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Copyright © 2000 IEEE. All rights reserved.

an increase in the surface leakage current on machines where a stress-control coating has been applied to the endwindings.

Dust (or salts) on insulation surfaces, which are ordinarily nonconductive when dry, may become partially conductive when exposed to moisture or oil, and, thus, can lower the insulation resistance. If the insulation resistance or polarization index is reduced because of contamination, it can usually be restored to an acceptable value by cleaning and drying.

6.2 Effect of moisture

Regardless of the cleanliness of the winding surface, if the winding temperature is at or below the dew point of the ambient air, a film of moisture may form on the insulation surface, which can lower the insulation resistance or polarization index. The effect is more pronounced if the surface is also contaminated, or if cracks in the insulation are present. Note that the effects of moisture contamination on a healthy winding should not preclude obtaining acceptable readings.

Some types of older winding insulation systems are hygroscopic (easily absorb water) and moisture may be drawn into the body of the insulation from the humid ambient air. This is particularly true for the older asphaltic-mica and shellac mica-folium insulating materials, as well as for some insulating strips used between uninsulated copper conductors in large turbine generator rotors. Absorbed moisture increases the conduction current (I_G) and significantly lowers the insulation resistance.

In-service machines are usually at a temperature above the dew point. When tests are to be conducted on a machine that has been in service, the tests should be made before the machine winding temperature drops below the dew point.

Machines that are out-of-service (without space heaters) are frequently tested when the winding temperature is below the dew point and may have significantly lower than expected insulation resistance and polarization index readings due to moisture contamination (see Clause 11). It may be necessary to dry out these machines to obtain acceptable readings prior to returning these machines to service or performing high-voltage testing. For appropriate dry-out procedures, consult with the equipment manufacturer. The history of the machine, visual inspections, and other test results may help in assessing the potential risk of returning to service a machine with low insulation resistance and/or polarization index readings due to moisture contamination. It is recommended that a machine with low P.I. and IR_1 readings *not* be subjected to further high-voltage testing.

6.3 Effect of temperature

6.3.1 General theory

The insulation resistance value for a given system, at any given point in time, varies inversely, on an exponential basis, with the winding temperature. There is a contrast between the temperature dependence of resistivity in metals and non-metallic materials, especially in good insulators. In metals, where there are numerous free electrons, higher temperature introduces greater thermal agitation, which reduces the mean free path of electron movement with a consequent reduction in electron mobility and an increase in resistivity. However, in insulators, an increase in temperature supplies thermal energy, which frees additional charge carriers and reduces resistivity. This temperature variation affects all of the current components identified in 5.1 except for the geometric capacitive current. The insulation resistance value of a winding depends upon the winding temperature and the time elapsed since the application of the voltage. The thermal mass of the machine being tested is generally so large that the temperature differential of the winding between the 1 min and 10 min readings of the insulation resistance is negligible, except for measurements during a dryout at rated current. In order to avoid the effects of temperature in trend analysis, subsequent tests should be conducted when the winding is near the same temperature as the previous test. However, if the winding temper-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Copyright © 2000 IEEE. All rights reserved.

ature cannot be controlled from one test time to another, it is recommended that all insulation test values be corrected to a common base temperature of 40 °C using Equation (2). Though the corrected value is an approximation, this permits a more meaningful comparison of insulation resistance values obtained at different temperatures.

The correction may be made by using Equation (2):

$$R_C = K_T R_T \tag{2}$$

where

R_C is insulation resistance (in megohms) corrected to 40 °C,
K_T is insulation resistance temperature coefficient at temperature T °C (from 6.3.2 or 6.3.3),
R_T is measured insulation resistance (in megohms) at temperature T °C.

For winding temperatures below the dew point, it is difficult to predict the effect of moisture condensation on the surface, therefore an attempt to correct to 40 °C for trend analysis would introduce an unacceptable error. In such cases, it is recommended that the history of the machine tested under similar conditions be the predominant factor in determining suitability for return to service. However, since moisture contamination normally lowers the insulation resistance and/or polarization index readings, it is possible to correct to 40 °C for comparison against the acceptance criteria (see Clause 12).

There is no effective means for converting the insulation resistance measured under a specific humidity to the insulation resistance that would occur at a different humidity.

6.3.2 Field measurements for determining K_T

The recommended method of obtaining data for an insulation resistance versus winding temperature curve is by making measurements at several winding temperatures, all above the dew point, and plotting the results on a semi-logarithmic scale. When a logarithmic scale is used for the insulation resistance and a linear scale for the temperature, the test points should approximate a straight line that can be extrapolated to obtain the *corrected value* at 40 °C.

6.3.3 Approximating K_T

If the temperature effects on the insulation system under test is unknown, an approximate value for the temperature coefficient K_T may be obtained by using Figure 5 for resistance halving for each +10 °C increment. Note that this is only an approximation and should not be used to calculate insulation resistance at very large temperature differentials from 40 °C or significant errors could result.

NOTE—Insulation resistance halving for a 10 °C increase in temperature is based on testing of some of the insulation systems of the late 1950s and may not be strictly true for all insulation systems. More recent measurements have indicated a correction factor for insulation resistance halving in the range 5–20 °C. A variation in the K_T factor can lead to significant errors in R_c magnified by the differential between the winding temperature and 40 °C.

K_T can also be approximated for insulation resistance halving for a 10 °C rise in winding temperature by application of Equation (3).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Copyright © 2000 IEEE. All rights reserved.

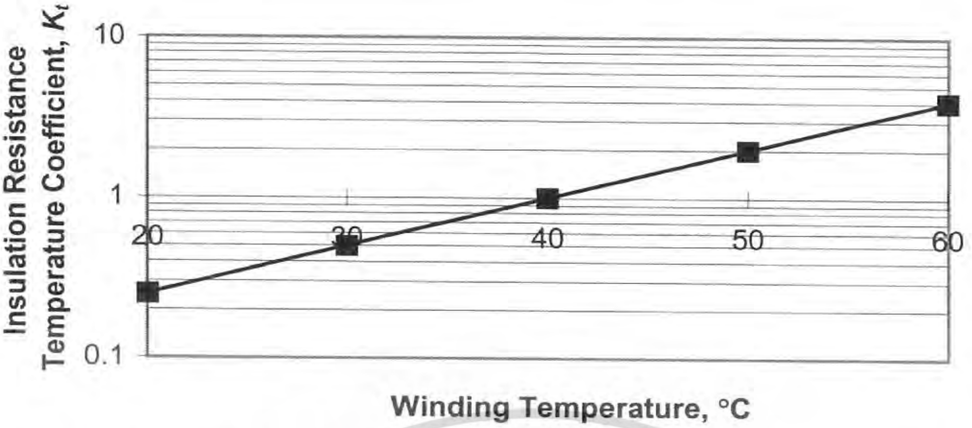


Figure 5—Approximate insulation resistance coefficient, K_T, for insulation halving for 10 °C rise in temperature

For example, if the winding temperature at test time was 35 °C, and the insulation was such that the resistance halved for every 10 °C, then the K_T for correction to 40 °C would be derived in the following way:

$$K_T = (0.5)^{(40-T)/10} \tag{3}$$

or

$$K_T = (0.5)^{(40-35)/10} = (0.5)^{5/10} = (0.5)^{1/2} = 0.707$$

6.3.4 Polarization index correction

When the polarization index is used with the insulation resistance to determine the insulation condition, it is not necessary to make a temperature correction to the *P.I.* Since the machine temperature does not change appreciably between the 1 min and 10 min readings, the effect of temperature on the polarization index is usually small. However, when the initial winding temperature is high, a reduction in the temperature of the insulation system during the test time may result in a substantial increase in the insulation resistance between the 1 min and 10 min readings due to the temperature effect (see 6.3.1). The resulting polarization index may be uncharacteristically high, in which case a repeat measurement at or below 40 °C is recommended as a check of the *P.I.* As stated in 6.2, if either the 1 min or 10 min measurements are taken when the winding temperature is below the dew point, the effects of moisture contamination must be considered during interpretation.

6.4 Effect of test voltage magnitude

Guidelines for test voltages are presented in Table 1 (see 5.3). The value of insulation resistance may decrease somewhat with an increase in applied voltage; however, for insulation in good condition and in a thoroughly dry state, substantially the same insulation resistance will be obtained for any test voltage up to the peak value of the rated voltage.

A significant decrease in insulation resistance with an increase in applied voltage may be an indication of insulation problems. These problems may be due to imperfections or fractures of the insulation, aggravated by the presence of dirt or moisture; or the problems may be due to the effects of dirt or moisture alone or result from other deterioration phenomena. The change in resistance is more pronounced at voltages considerably above rated voltage (see IEEE Std 95-1977).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Copyright © 2000 IEEE. All rights reserved.

6.5 Effect of existing charge on winding resistance measurements

The insulation resistance measurements will be in error if residual charges exist in the insulation. Therefore, prior to measuring the insulation resistance, windings must be completely discharged. Measure the discharge current at the beginning of the test to assure that the winding is completely discharged. A residual charge will show as a reverse deflection of the insulation resistance meter after connections are made but before the voltage is applied. Any reverse deflection should be negligible.

After cessation of application of high direct voltage, grounding of windings is important for safety as well as for accuracy of subsequent tests. The grounding time should be a minimum of four times the charge time (see 5.5).

7. Conditions for measuring insulation resistance

Record the ambient temperature, relative humidity, dew point, winding temperature, length of time out-of-service, test voltage, and connection arrangement at the time the test is performed. It is also important to convert the measurement to a 40 °C basis for future comparisons. (For converting insulation resistance values to this temperature, see 6.3).

It is not necessary that the machine be at standstill when insulation resistance tests are being made. It is often desirable to make insulation resistance measurements when the winding is subject to centrifugal forces similar to those occurring in service. In certain cases, it is practical to make periodic insulation resistance measurements while machines are rotating short circuited for drying. Whenever machines are not at standstill during measurement of insulation resistance, precautions should be taken to avoid damage to equipment and injury to personnel.

To obtain insulation resistance measurements for a directly water-cooled winding, the water should be removed and the internal circuit thoroughly dried. In some cases where water-cooled windings are used, the winding manufacturer may have provided a means of measuring the insulation resistance without need for the coolant water to be drained. In general, if the water is not removed, then the conductivity of the water should be greater than 0.25 μs/cm. More information should be available in the winding manufacturer's manual.

8. Winding connections for insulation resistance tests

It is recommended, when feasible, that each phase be isolated and tested separately. Separate testing allows comparisons to be made between phases. When one phase is tested, the other two phases should be grounded to the same ground as the stator core or rotor body.

When testing all phases simultaneously, only the insulation to ground is tested and no test is made of the phase-to-phase insulation. The phase-to-phase insulation is tested only when one phase is energized and the other phases are grounded.

The connection leads, brush rigging, cables, switches, capacitors, surge arresters, voltage transformers, and other external equipment may greatly influence the insulation resistance reading. It is recommended that measurements of the insulation resistance be made with all external equipment disconnected and grounded. In all cases, a common ground should be used to avoid any undesirable effects on the test results due to stray losses in the ground circuit.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Copyright © 2000 IEEE. All rights reserved.

9. Methods of measuring insulation resistance

9.1 Direct measurement

Direct measurement of insulation resistance may be made with the following instruments:

a) Direct-indicating megohmmeter with self-contained hand or power-driven generator

b) Direct-indicating megohmmeter with self-contained battery

c) Direct-indicating megohmmeter with self-contained rectifier, using a regulated line powered supply

d) Resistance bridge with self-contained galvanometer and batteries

9.2 Calculated measurement

Insulation resistance may be calculated from readings of a voltmeter and microammeter using an external (well-regulated) direct-voltage supply.

NOTE—Recommended value of voltage regulation (line) is less than or equal to 0.1%. Deviations from this may lead to ambiguous results due to unpredictable losses from the charging currents associated with fluctuations in the applied voltage (see Annex C).

The voltmeter-ammeter method is a simple method for the determination of the insulation resistance by measurement of the voltage impressed across the insulation and the current through it. A source of constant direct voltage is required, and the voltmeter must be selected to suit the maximum and minimum voltages that may be used. The ammeter is usually a multirange microammeter selected to measure the full range of currents that may be encountered at the voltages used.

The microammeter must be on the highest range or short circuited during the first few seconds of charge so that it will not be damaged by the capacitive charging current and the initial absorption current. When the microammeter is at test voltage, precautions should be taken to ensure the safety of the operator.

The resistance is calculated from Equation (4).

$$IR_{(t)} = E_{(t)}/I_{(t)} \qquad (4)$$

where

$IR_{(t)}$ is the insulation resistance in megohms,
$E_{(t)}$ is the voltmeter reading in volts,
$I_{(t)}$ is the ammeter reading in microamperes (t) seconds after application of the test voltage.

10. Precautions

A finite amount of time is required to bring the voltage impressed on the insulation to the desired test value. Full test voltage should be applied as rapidly as possible and held constant throughout the test.

Test instruments in which the test voltage is supplied by motor-operated generators, batteries, or rectifiers are usually used for making tests of over 1 min duration. It is essential that the voltage of any test source be constant to prevent fluctuation in the charging current (see Annex C). Stabilization of the supplied voltage may be required.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Copyright © 2000 IEEE. All rights reserved.

Where protective resistors are used in test instruments, their effect on the magnitude of the voltage applied to the insulation under test should be taken into account. The voltage drop in the resistors may be an appreciable percentage of the instrument voltage when measuring a low insulation resistance.

11. Interpretation of insulation resistance and polarization index test results

The insulation resistance and polarization index tests can be used for two purposes:

a) The insulation resistance test history of a given machine, measured at uniform conditions so far as the controllable variables are concerned, is recognized as a useful way of trending some aspects of the insulation condition over years.

b) Estimation of the suitability of a machine for the application of appropriate overvoltage tests or for operation may be based on a comparison of present and previous P.I. and/or IR_1 values.

11.1 Monitoring insulation condition

If the insulation resistance history of the machine is available, comparison of the present test result with previous tests will support concerns about the insulation condition. It is important, however, to compare tests under similar conditions, that is, winding temperature, voltage magnitude, voltage duration, and relative humidity (see Clause 6). For comparison of tests conducted at different winding temperatures, the results should be corrected to the same temperature (see 6.3).

A sharp decline in the IR_1 or *P.I.* from the previous reading may indicate surface contamination, moisture, or severe insulation damage, such as cracks. When a low *P.I.* occurs at an elevated temperature (above 60 °C), a second measurement below 40 °C, but above the dew point, is recommended as a check on the real insulation condition (see 6.3).

For tests conducted under similar conditions, a steady increase in the IR_1, i.e., a decrease in the absorption current with age may indicate decomposition of the bonding materials, especially when the insulation materials are of the thermoplastic (asphaltic-mica or shellac mica-folium) type.

11.2 Suitability for operation or continued testing

When the insulation resistance history is not available, recommended minimum values of the *P.I.* or IR_1 may be used to estimate the suitability of the winding for application of an overvoltage test or for operation (see Clause 12). If the IR_1 or *P.I.* is low because of dirt or excessive moisture, it may be improved to an acceptable value by cleaning and drying. When drying insulation, the *P.I.* can be used to indicate when the drying process may be terminated, i.e., the P.I. results have exceeded the recommended minimum. If the IR_1 is low due to severe insulation deterioration or damage, operation and overvoltage testing of the machine are not recommended.

Machines rated 10 000 kVA and less should have either a value of the polarization index or a value of the insulation resistance (at 40 °C) above the minimum recommended values (see Clause 12) for operation or further overvoltage tests.

Machines rated above 10 000 kVA should have both the polarization index and the insulation resistance above the minimum recommended values (see Clause 12) for operation or further overvoltage testing.

If the IR_1 value (at 40 °C) is greater than 5000 MΩ, the *P.I.* may be ambiguous and can be disregarded (see 12.2.2).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Copyright © 2000 IEEE. All rights reserved.

For varnished cambric, shellac mica-folium, or asphaltic stator windings, a very high *P.I.* (for example, greater than 8) may indicate that the insulation has been thermally aged, and may have a high risk of failure. If physical inspection (tapping on the insulation, for instance) confirms that the insulation is dry and brittle, it is best not to attempt cleaning or overvoltage testing the winding. Failure may occur at any time if the machine is returned to service.

It may be possible to operate machines with P.I. and IR_1 values lower than the recommended minimum values; however, it is not recommended by this standard. In all cases where the test values fall below the recommended minimum values, investigations should be undertaken to determine the cause of such low readings. History of the winding, visual inspections, and other test results should be used to determine advisability of returning the unit to service.

11.3 Limitations of the insulation resistance test

Insulation resistance test data is useful in evaluating the presence of some insulation problems such as contamination, absorbed moisture, or severe cracking; however, some limitations are as follows:

a) Insulation resistance of a winding is not directly related to its dielectric strength. Unless the defect is concentrated, it is impossible to specify the value of insulation resistance at which the insulation system of a winding will fail.

b) Windings having an extremely large end arm surface area, large or slow-speed machines, or machines with commutators may have insulation resistance values that are less than the recommended value. In these cases, historical trending of IR_1 is invaluable in evaluating insulation condition.

c) A single insulation resistance measurement at one particular voltage does not indicate whether foreign matter is concentrated or distributed throughout the winding.

d) Direct-voltage measurements, such as the IR and P.I. tests, may not detect internal insulation voids caused by improper impregnation, thermal deterioration, or thermal cycling in form-wound stator coils (see Annex B).

e) Because insulation resistance tests are conducted while a machine is at standstill, these tests will not detect problems due to rotation, such as loose coils, or vibration leading to endwinding movement.

12. Recommended minimum value of polarization index and insulation resistance

12.1 Minimum values

The recommended minimum *P.I.* and the recommended minimum value of IR_1 of an ac or dc rotating machine winding are the lowest values at which a winding is recommended for an overvoltage test or for operation.

In some cases, special insulating material or designs may provide lower values. Minimum values for these designs should be based on comparison with the historic test values.

12.2 Polarization index

The recommended minimum values of *P.I.* for ac and dc rotating machines are listed in Table 2. Table 2 is based on the thermal class of the insulating materials and, with the exception of noninsulated field windings, applies to all insulating materials regardless of application.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Copyright © 2000 IEEE. All rights reserved.

Table 2—Recommended minimum values of polarization index for all machine components[a] insulation classes per IEC 60085-01: 1984

Thermal class rating	Minimum *P.I.*
Class A	1.5
Class B	2.0
Class F	2.0
Class H	2.0

[a]The P.I. test is not applicable to noninsulated field windings (see 12.2.1).

NOTE—If the 1 min insulation resistance is above 5000 MΩ, the calculated *P.I.* may not be meaningful. In such cases, the *P.I.* may be disregarded as a measure of winding condition (see 12.2.2).

12.2.1 Applicability of polarization index on field windings

The purpose of the insulation resistance and polarization index tests is to determine whether or not an insulation system is suitable for operation or overvoltage testing. The windings of some induction machinery rotors are often not insulated from the rotor body; therefore, a polarization index cannot be performed on these induction machinery rotor windings or field windings. If however, the rotor winding is insulated from the rotor body, as in wound induction rotors and salient pole machines, a polarization index test is applicable. The field windings of many very large turbine generators are made with exposed copper that is not encapsulated in insulation. Though isolated from ground and other components via insulating strips, the immense surface area of the noninsulated copper does not exhibit an absorption current (I_A), in comparison to the leakage current (I_L), when subjected to a direct voltage. The absence of the absorption current alters the IR characteristic curve (see Figure 4) such that there will be very little change in the *IR* value from the 1 min to the 10 min reading. Therefore, the P.I., which describes the slope of the IR curve, is not applicable to noninsulated field windings.

On the other hand, many other types of field windings do not have appreciable amounts of exposed conductors. These designs use conductors that are fully encapsulated in insulation and have a characteristic absorption current (I_A). For these machines, the P.I. can be a worthwhile test for assessing the condition of the insulation system. The recommended minimum, based on the thermal class rating of the field winding insulation, should be used as a reference.

12.2.2 Applicability of polarization index when IR_1 is greater than 5000 MΩ

When the insulation resistance reading obtained after the voltage has been applied for 1 min (IR_1) is higher than 5000 MΩ, based on the magnitude of applied direct voltage, the total measured current (I_T) can be in the submicroampere range (see Figure 1). At this level of required test instrument sensitivity, small changes in the supply voltage, ambient humidity, test connections, and other non-related components can greatly affect the total current measured during the 1–10 min interval required for a P.I. Because of these phenomena, when the IR_1 is higher than 5000 MΩ, the *P.I.* may or may not be an indication of the insulation condition and is therefore not recommended as an assessment tool.

12.3 Insulation resistance

The minimum insulation resistance after 1 min, $IR_{1\ min}$, for overvoltage testing or operation of ac and dc machine stator windings and rotor windings can be determined from Table 3.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Copyright © 2000 IEEE. All rights reserved.

The actual winding insulation resistance to be used for comparison with $IR_{1\ min}$ is the observed insulation resistance, corrected to 40 °C, obtained by applying a constant direct voltage to the entire winding for 1 min.

The minimum insulation resistance of one phase of a three-phase armature winding tested with the other two phases grounded should be approximately twice that of the entire winding. If each phase is tested separately and guard circuits are used on the two phases not under test, the observed minimum resistance should be three times the entire winding.

Table 3—Recommended minimum insulation resistance values at 40 °C (all values in MΩ)

Minimum insulation resistance	Test specimen
$IR_{1\ min} = kV + 1$	For most windings made before about 1970, all field windings, and others not described below
$IR_{1\ min} = 100$	For most dc armature and ac windings built after about 1970 (form-wound coils)
$IR_{1\ min} = 5$	For most machines with random-wound stator coils and form-wound coils rated below 1 kV

NOTES

1—$IR_{1\ min}$ is the recommended minimum insulation resistance, in megohms, at 40 °C of the entire machine winding

2—kV is the rated machine terminal to terminal voltage, in rms kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Copyright © 2000 IEEE. All rights reserved.

Annex A

(informative)

Variants in polarization index

The polarization index (P.I.) is traditionally defined as the ratio of the 10 min insulation resistance (IR_{10}) to the 1 min insulation resistance (IR_1), tested at a relatively constant temperature. In older insulation materials, such as asphaltic-mica, the absorption currents often take 10 min or more to decay to nearly zero (see Figure 3). In more modern insulation systems for form-wound stators, and especially in random-wound machines, the absorption current may decay to nearly zero in 2–3 min (see Figure 4). Thus, for modern insulation, some users calculate a variant of the conventional P.I. The variants include, but are not limited to, those shown in Equation (A.1) and Equation (A.2).

$$P.I. = IR_1/IR_{30s} \tag{A.1}$$

where

$P.I.$	is the polarization index,
IR_1	is the insulation resistance reading after the application of voltage for 1 min,
$IR_{30\,s}$	is the insulation resistance reading after the application of voltage for 30 s.

$$P.I. = IR_5/IR_1 \tag{A.2}$$

where

$P.I.$	is the polarization index,
IR_5	is the insulation resistance reading after the application of voltage for 5 min,
IR_1	is the insulation resistance reading after the application of voltage for 1 min.

The distinguishing features are the shorter times the direct voltage is applied and thus the shorter time that the winding must be grounded (see 6.5). Since in modern windings the absorption current is essentially zero after a few minutes, by using shorter times for the P.I. ratio, the test time can be considerably shortened without any loss of information about the degree of contamination or moisture absorption present. Another variation is to record the insulation resistance every minute and discontinue the test when a stable (three consecutive readings) IR has been measured.

There are limitations in applying these other ratios:

a) There is no standard for what time intervals the IR values are to be recorded. Different organizations use different ratios.

b) There is no agreed upon pass-fail criteria, as has been established for the traditional P.I.

c) Users are encouraged to collect data employing shorter time ratios, to enable suitable pass-fail criteria to be developed in the future.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Copyright © 2000 IEEE. All rights reserved.

Annex B

(informative)

Direct versus alternating voltage testing

Direct-voltage testing is normally done by applying a direct-voltage source between the test specimen conductors and ground and using a dc ammeter to measure the total current. The ratio of the test voltage to the test current will reflect the total resistance between the test specimen and ground. Resistance is determined by Equation (B.1).

$$R = \rho L / A \tag{B.1}$$

where

- R is resistance,
- ρ is resistivity of the material,
- L is length of the path,
- A is cross-sectional area.

Because the resistivity values of the dirt, oil, and water that often contaminate the endwinding areas of rotating machinery are quite low, direct-voltage testing of a contaminated winding normally results in a high surface leakage current and subsequent low resistance reading. This property makes direct-voltage testing a viable method for determining the extent of contamination to an insulation system. In addition, if the insulation system utilizes a cotton-backed tape with mica as the primary electrical insulation, a direct-voltage test might reveal whether or not the cotton has absorbed moisture and has a lower resistivity. Note that most windings manufactured after 1970 do not have these hygroscopic tapes, and a direct-voltage test will not normally detect problems internal to the insulation system, such as thermal deterioration.

Since the primary electrical insulation used in the design of form-wound stator windings is mica, and mica has virtually infinite resistivity (thus a good insulator), only one layer of mica tape would prohibit any direct current. Therefore, if a void exists within the insulation due to improper impregnation, thermal deterioration, or thermal cycling, a direct-voltage test would be unable to detect it. If however, there exists a severe crack through the entire insulation, it is possible that an electrical track would be established between the copper conductors and ground, and would appear as a low resistance.

When a high alternating voltage is connected between the terminals of the test specimen and ground, the capacitance of the test specimen dominates the current. Capacitance is determined by Equation (B.2).

$$C = \varepsilon A / d \tag{B.2}$$

where

- C is capacitance,
- ε is dielectric permittivity of the material,
- A is cross-sectional area,
- d is the thickness of the material.

Since the dielectric permittivity of an insulation system is greatly affected by the presence of voids and/or water, an alternating-voltage test is more sensitive than direct-voltage tests with regard to detection of internal insulation problems associated with all types of insulation systems. Because of the different test capabilities, both a dc and an ac test should be conducted to more completely assess the condition of an insulation system.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Copyright © 2000 IEEE. All rights reserved.

Annex C

(informative)

Regulation in power supplies used for insulation resistance measurement

The regulation of power supplies used in insulation resistance (IR) measuring equipment is important because variations in the test voltage translate into variations in the measurement. This can be seen by considering the relationship in Equation (C.1):

$$i_{(t)} = C \frac{dv(t)}{dt} \quad \text{(C.1)}$$

where

$i_{(t)}$ is the current response,

$\frac{dv(t)}{dt}$ is variation in voltage,

C is capacitance of the object under test.

This variation in the current due to voltage fluctuations is translated into a variation in the insulation resistance (apparent resistance R_A) according to Equation (C.2):

$$R_A = \frac{Vdc}{Idc + i(t)} \quad \text{(C.2)}$$

where

Idc is the current of interest due to the insulation resistance,
$i(t)$ is the capacitive current,
Vdc is the applied direct voltage.

Combining these relationships gives the variation in the apparent resistance shown in Equation (C.3):

$$R_A = \frac{Vdc}{Idc + C[dv(t)/dt]} \quad \text{(C.3)}$$

The regulation can be stated as a percentage of the applied voltage and calculated from values found in general practice. As most IR measurements are not more than 2% accurate, this accuracy can be used for the variation in the apparent resistance.

For example, in stator winding insulation systems constructed using modern materials, the lowest IR value generally encountered is approximately 100 MΩ, a test voltage often used is 5 kV, and large machines have a typical capacitance of approximately 0.25 μF. These numbers give an *i(t)* of 1 μA which, to maintain measurement accuracy, necessitates a *dv/dt* << 4 V/s. The regulation would therefore be 4 V/s in 5 kV, or 0.08% regulated.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Copyright © 2000 IEEE. All rights reserved.

Most IR measurements are made at frequencies below 1 Hz, so these results apply to a low-frequency regulation of the supply, i.e., susceptibility to slowly varying fluctuations in the line voltage. It follows that the 50/60 Hz ripple in the supply may only have a minor impact when considering supply regulation, since the bandwidth of the measurement limits the impact of fluctuations at these frequencies.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Copyright © 2000 IEEE. All rights reserved.

ภาคผนวก ค

บทความทางวิชาการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Diagnosis of Rotating Machine Insulation by Polarization and Depolarization Measurement

T. Chorpook, P. Wongpitirungruang, P. Samadchai, P. Jitmaneerat, P. Nimsanong and N. Pattanadech

Faculty of Engineering, King Mongkut Institute of Technology Ladkrabang
Chalongkung, Ladkrabang, Bangkok, Thailand

Abstract

This paper represents the result from polarization and depolarization current (PDC) measurement including conduction current of rotating machine insulation. To perform the experiment, the stator bar with the length of 30 cm obtained from a 30-year-old synchronous generator rated voltage of 13.8kV from hydro power plant Vajiralongkorn dam were used. Two types of stator bars; degradation by thermal stress and degradation by partial discharge(PD) on the conductive tape were investigated. In this research work, the DC voltage of 500V was applied to stator bar for measuring polarization current, $I_{pol}(t)$, and then suddenly disconnected the DC source for measuring depolarization current, $I_{depol}(t)$. These processes took 2000seconds for polarization and for depolarization current measurements. Focusing on thermal stress, the first stator bar was heated at 170°C, the second and the third stator bars was heated at 190°C, and 210°C respectively. In the case of PD stator bar, the PD stator bar directly obtained from the synchronous machine was used in the experiment. The PDC results were compared with these of the unmodified bar which were clearly different.

Keywords: Polarization Current, Depolarization Current, Rotating Machine Insulation, Stator Bar

1. Introduction

Rotating machines play an important role in many sectors of manufacturing industry. Therefore in-service failure of such machines usually has a negative financial impact on the organization directly concerned. Generally, the weakest point of these machines is to be found in the stator insulation, because of degradation or deterioration during operation, the main causes of which are thermal stress, electrical stress and mechanical stress, as well adverse ambient conditions [1-3]. These days, there are various well-established diagnostic tests which are used to determine the condition of this insulation, the most important of these tests being the following: insulation resistance (IR), polarization index (PI), DC high potential and power factor tip-up [1].

Polarization and depolarization current (PDC) measurement is one of the most promising new diagnostic test techniques available for evaluating insulator condition. In the PDC measurement process, a step DC voltage of not more than 2 kV is applied to the machine under test, such that the applied voltage does not affect insulation integrity or service life.

The purpose of this paper is to compare the PDC characteristics of the two types of stator bars under examination with these of an unmodified stator bar.

2. Theory Background

2.1 Insulation of Rotating Machine [1]

The stator winding insulation system contains several different components and features, which together ensure that electrical shorts (or short circuit) do not occur, that the heat from the conductor I^2R losses is transmitted to a heat sink, and that the conductors do not vibrate in spite of the magnetic forces. The basic stator insulation system components are strand (or subconductor) insulation, turn insulation and groundwall (or ground or earth or main wall) insulation as shown in Fig.1.

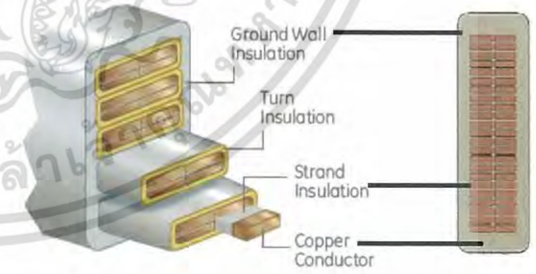


Fig.1 Diagram of the cross section of a coil adapted from [1]

Strand Insulation: The purpose of the strand insulation is to prevent short circuit between sub conductor. The strand insulation must have good mechanical properties. As the strand insulation is immediately adjacent to the copper conductors that are carrying the main stator current, which produces the I^2R loss, the strand insulation is exposed to the highest

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

temperatures in the stator. Therefore the strand insulation must have good thermal properties.

Turn Insulation: The purpose of the turn insulation is to prevent shorts between the turns in a coil. The thermal stresses on the turn insulation are essentially the same as the strand insulation. The turn insulation is adjacent to the copper conductors, which are heated from the I^2R losses in the winding. The higher the melting or decomposition temperature of the turn insulation is, the greater will be the design current that can flow through the stator. In a Roebel bar winding, no turn insulation is used and there is only strand insulation. Thus, some failure mechanisms that can occur with multi-turn coils will not occur with Roebel bar stators

Groundwall Insulation: The purpose of the groundwall insulation is to separate the copper conductors from the grounded stator core. For the electrical design, the groundwall insulation in form-wound multi-turn coils and Roebel bars connected to the phase end of the winding will have the full rated phase-ground voltage across it. This high voltage requires a substantial groundwall insulation thickness. For the thermal design, the groundwall insulation in indirectly cooled form-wound machines is the main path for transmitting the heat from the copper conductors to the stator core (heat sink). Therefore, the groundwall insulation should have as low a thermal resistance as possible, to prevent high temperatures in the copper. For the mechanical design, the groundwall insulation must also help to prevent the copper conductors from vibrating in response to the magnetic forces. If the groundwall were full of air pockets, the copper conductors might be free to vibrate.

2.2 Polarization

When dielectric insulation is under the external uniform field, electric flux density is expressed by

$$D = \varepsilon_0 E \tag{1}$$

where D is the flux density.

ε_0 is the permittivity of free space.

E is the electric field.

Polarization phenomena occur with electric susceptibility(χ), permittivity of free space(ε_0) and electric field(E)

$$P = \chi \varepsilon_0 E . \tag{2}$$

Electric susceptibility (χ) is zero in free space. It can be calculated from the permittivity of the solid dielectric as given by

$$\varepsilon = \varepsilon_0 (1 + \chi) \tag{3}$$

Polarization has the same direction of electrical field which related to the flux density. Hence, the flux density can be rewritten by the equation

$$D = \varepsilon_0 E + P = \varepsilon_0 (1 + \chi) E \tag{4}$$

Current density and response function of dielectric material can be described by Maxwell's equations. By the way, current density is the result of conductivity and displacement current

$$\nabla \times H(t) = J(t) = \sigma_0 E(t) + \frac{dD(t)}{dt} \tag{5}$$

when $E(t)$ is electric field which is under influence of step function.

$J(t)$ is current density.

σ_0 is conductivity of dielectric material.

$$J(t) = \sigma_0 E_0 + \varepsilon_0 \varepsilon(\infty) \frac{dE(t)}{dt} + \frac{dP(t)}{dt} \tag{6}$$

$$J(t) = \sigma_0 E_0 + \varepsilon_0 E_0 [\varepsilon(\infty)\delta(t) + f(t)] \tag{7}$$

Moreover, the high frequency permittivity is given by

$$\varepsilon(\infty) = 1 + \chi(\infty) \tag{8}$$

when $\varepsilon(\infty)$ is high frequency permittivity.

$\delta(t)$ is function which is derivative of step function.

$\chi(\infty)$ is electric susceptibility.

2.3 Polarization and Depolarization Current

Polarization current includes three terms as following:

1. Capacitive current is the effect of displacement of charge in the insulation that decrease in short time.

2. Absorption current occurs by polarization within the insulation.

3. Conduction current is the movement of charge carrier in the insulation.

Whereas Depolarization current includes only the first two terms of the polarization current as following:

1. Capacitive discharge current is the current that decrease instantaneously and has opposite direction of capacitive current.

2. Absorptive discharge current occurs by depolarization process within the insulation.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. Experiment

3.1 Test Object

30-year-old with insulation class F stator bars from hydro power plant Vajiralongkorn dam were prepared with the length of 30cm for investigation.

Fig.2. 30 cm length stator bar

Two types of stator bars; degradation by thermal stress and degradation by PD activity on the conductive tape were tested. Focusing on thermal stress, the first stator bar was heated at 170°C, the second and the third stator bars was heated at 190°C, and 210°C respectively. The thermal stress of the prepared stator bar was done using the infrared heater. The temperature was controlled by the temperature controller. The preparation of the thermal stress stator bars is illustrated in Fig.3. In the case of PD stator bar as shown in Fig.4, the PD stator bar directly obtained from the synchronous machine was used in the experiment.

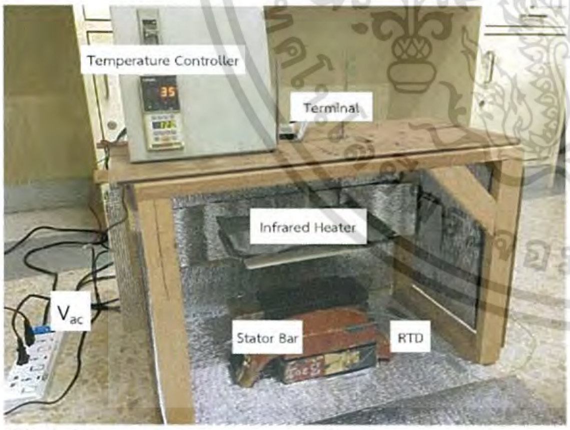


Fig.3. Thermal stress process for the prepared stator bar

Fig.4. Degradation from partial discharge

3.2 Test setup

The PDC test circuit diagram and the PDC test set up are represented in Fig. 4 and Fig.5 respectively. PDC Analyser-1MOD is used in this experiment.

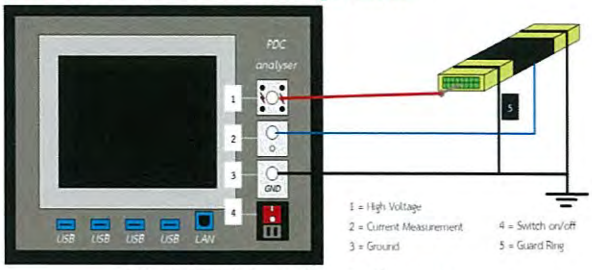


Fig.5 PDC test circuit diagram

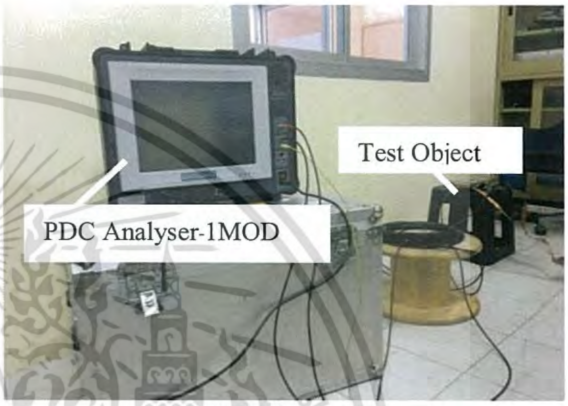


Fig.6 PDC test set up

In this research, the experiment was divided in 3 steps follow the procedure described below:

(a) Initial measurement: this was made to determine the initial condition of the insulation of the cable samples.

(b) Control measurement: this was conducted in order to confirm that there were no abnormalities in the PDC test circuit. In this process a DC test voltage of 50V for a period of 5 seconds was applied to the test object.

(c) Main measurement: The polarization and depolarization current obtained from the main measurement were used to determine the stator winding insulation characteristics. To measure the polarization and depolarization current, it was applied the DC voltage of 500V for 2000 seconds for PDC measurement.

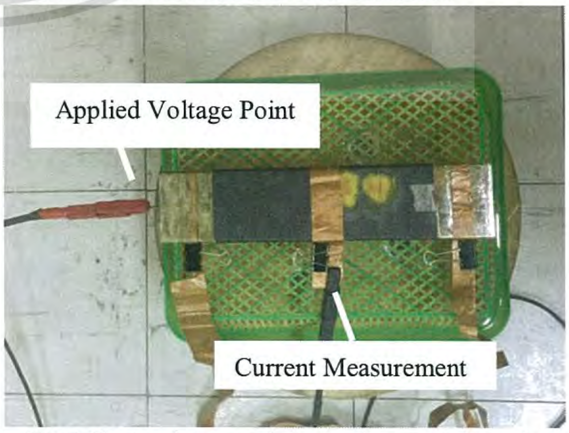


Fig.7. Test voltage applying and current detection positions

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. Test result

From the test experiment, the test results can be categorized into two cases:

A. Thermal stress degradation bar

The PDC test results of the 30-year-old in-service stator bar compared with these of the thermal stress stator bars are demonstrated in Fig.8. It can be seen that both polarization and depolarization currents (a peak value) of the thermal stress stator bars decrease. This may be due to the reason that the thermal stress lessens the amount of water content in the stator bars which has been employed for 30 years.

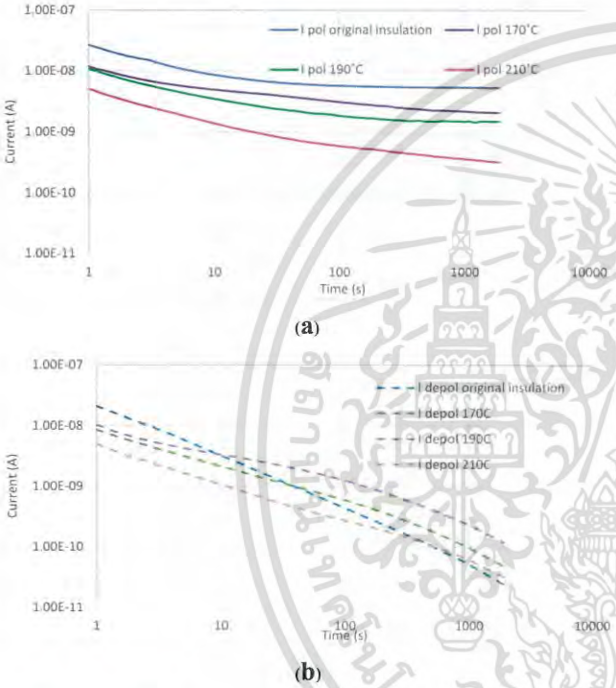


Fig.8. Polarization current and depolarization current of the unmodified 30-year-old in-service stator bar and the thermal stress stator bar (a) polarization current (b) depolarization current

B. Partial discharge degradation bar

The PDC test results of the 30-year-old in-service stator bars compared with these of the PD degradation bar are represented in Fig.9. It is clearly seen that both polarization and depolarization currents of the PD degradation stator bar decrease.

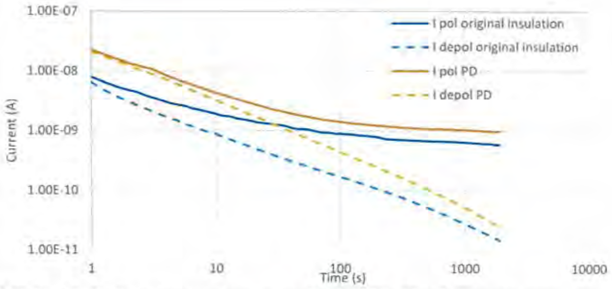


Fig.9. Polarization current and depolarization current of the unmodified 30-year-old in-service stator bar and partial discharge degradation bar

5. Conclusion

From the experiment, the polarization and depolarization currents of the unmodified stator bar, thermal stress degradation bar and PD degradation bar were investigated. It is seen that the PDC obtained from the unmodified stator bar were still higher than these from the degradation bars. It may because of the water content in the unmodified stator is still higher compared with other cases.

ACKNOWLEDGMENT

The authors gratefully acknowledge the contributions of Mr.Worachai Sawatdimongkol from TIS Engineering and Service Co., Ltd. Thailand for PDC measuring instrument, Hydro Power Plant Vajiralongkorn Dam for stator bars, Meidensha corporation for financial support, and staff of high voltage laboratory and Mr. Pattarachai Vichaiya from agricultural engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang for consulting and support.

References

[1] Greg C. Stone, Edward A. Boulter Ian Culbert and Hussein Dhirani, *Electrical Insulation for Rotating Machines*, 2nd ed., Wiley-IEEE Press, 2014, pp.47-78.

[2] A. Küchler, *High Voltage Engineering Fundamentals – Technology Applications*. Springer Vieweg, 2017, pp.269-300.

[3] 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.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

PDC Measurements & analysis : Stator winding insulation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PDC Measurements & analysis

Stator winding insulation

Machine name

Serial number	H21492
Tag ID	A12A2550453R-2
Report No.	-

Report

Date of report	Thursday, January 18, 2018
Prepared and Measured by	1. Ms. Tiansangpen Chorpook 2. Mr. Phasit Wongpitirungruang 3. Mr. Patthadon Samadchai 4. Mr. Puttipong Jitmaneerat 5. Mr. Phethai Nimsanoong
Supervisor	Assoc. Prof. Dr. Norasage Pattanadech
Measurement date	Monday, January 15, 2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table of Contents

1. Machine Details 2
2. Other Information 2
3. PDC Measurements 3
   3.1 Induction motor (6.6 kV) 3
   3.2 PDC test set-up 5
   3.3 PDC test procedure 6
4. Test results 7
5. PDC Analysis 8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. Machine Details

Machine Identification/Tag ID	H21492
Serial No	A12A2550453R-2
Make/Manufacturer	U.S. Electrical Motors
Model/Type	RE
Power Rating (kW)	261
Voltage (kV)	6.6
Current (A)	27.5
Frequency (Hz)	50
Speed (rpm)	2980
No. of Poles	2
Power Factor	88.7%
Insulation Class	F
Manufacturing Year	-
Commissioning Year	-
Maintenance History	-

2. Other Information

Stator Insulation Type	Epoxy Mica
Corona Paint on coil surface	-
Stress Grade System at Slot exits	-
Machine Tested Immediately after Overhaul/Repair	No
Machine in assembled condition (during testing)	Yes
Winding Temperature (during testing)	26.9
Ambient Temperature (during testing)	26.9

Fig.1 induction motor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. PDC Measurements

3.1 Induction motor (6.6 kV)

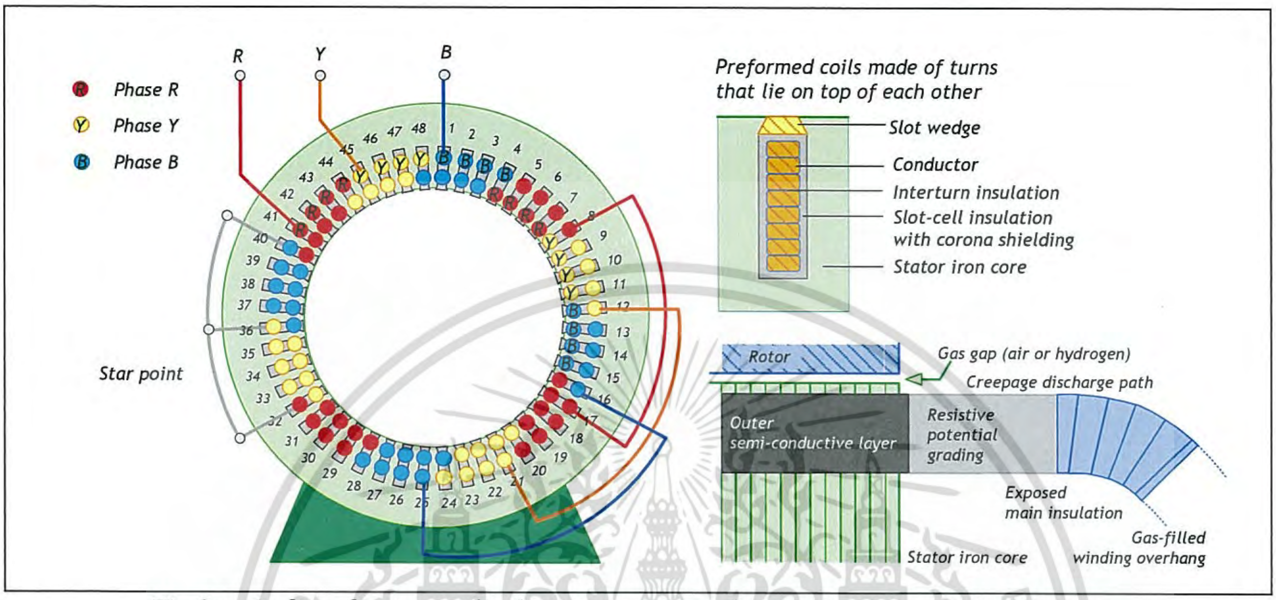


Fig.2a winding diagram of induction motor and typical coil insulation system

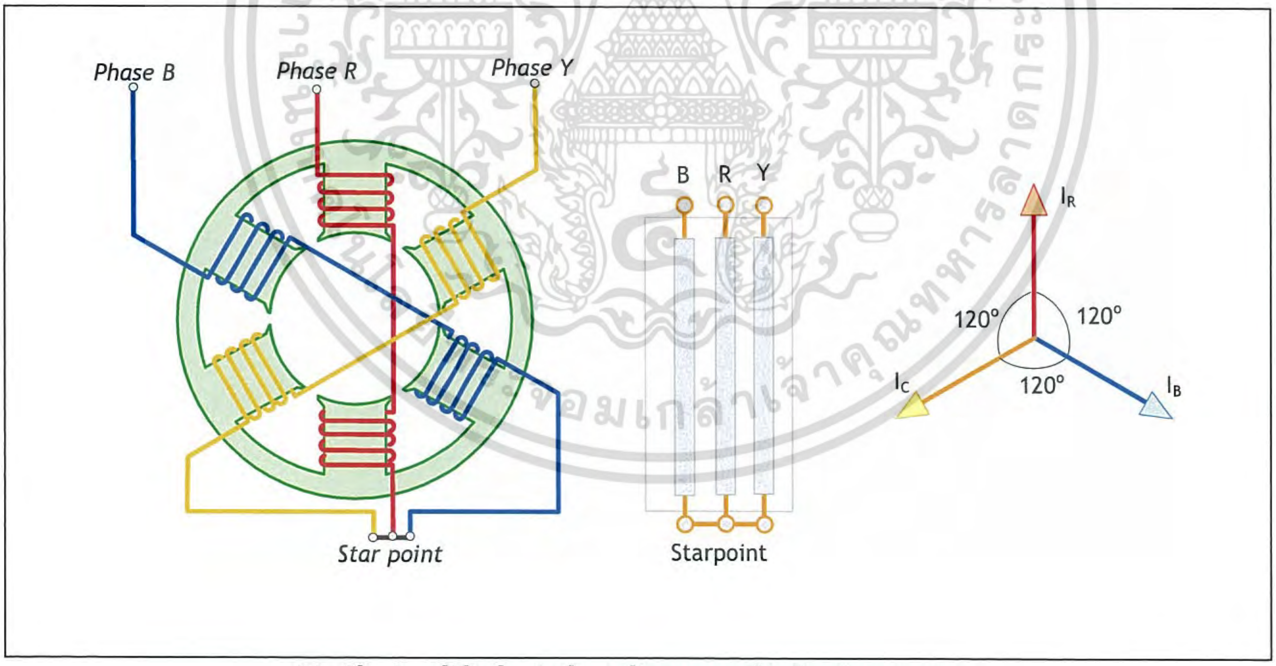


Fig.2b simplified winding diagram of induction motor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Fig.3a induction motor

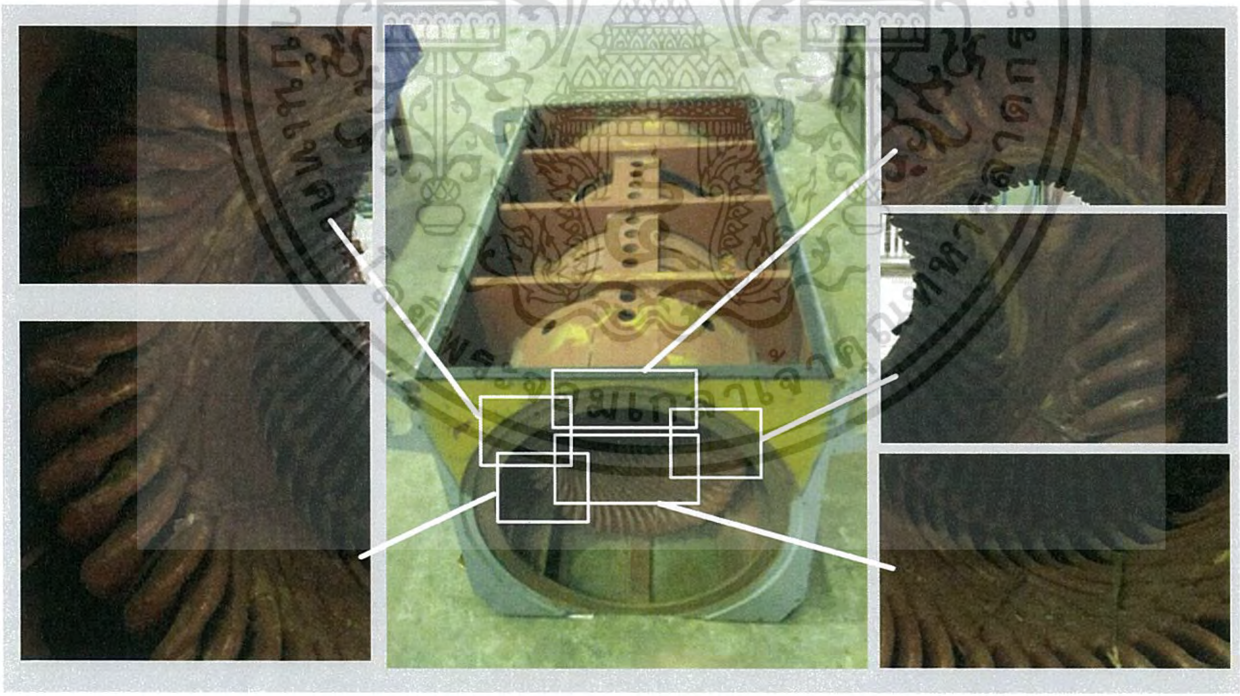


Fig.3b induction motor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 PDC test set-up

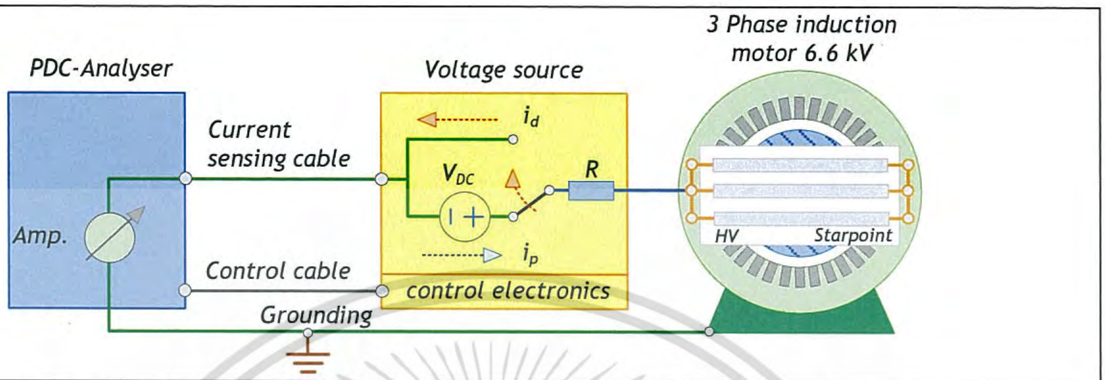


Fig.4a Test circuit diagram for PDC measurement of an induction motor

Fig.4b Test circuit arrangement for PDC measurement of an induction motor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 PDC test procedure

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

(i) *Initial measurement*: As shown in Fig.5a this was made to determine the initial condition of the stator winding insulation. In this process, only the depolarization current was measured, in order to as certain the amount of any remaining charge inside the insulation.

(ii) *Control measurement*: The control measurement procedure was conducted in order to confirm that there were no abnormalities in the PDC test circuit. As shown in Fig. 5b this process consisted of applying a DC test voltage of 50V for a period of 5 seconds to the insulation system in order to measure i_{pol}(t), then short-circuiting the test objectin order to measure i_{dep}(t) for a period until i_{dep}(t) decreased to the minimum level (at least to the same level as the remaining current from the initial measurement).

(iii) *Main measurement*: The polarization and depolarization currents obtained from the main measurementas illustrated in Fig. 5c were used to determine the dielectric characteristics of the stator winding insulation under test. In order to perform the main measurements, a DC test voltage of 1,000V was applied to the stator winding insulation for a period of 1,000 seconds. Then short-circuiting the test object in order to measure i_{dep} (t).

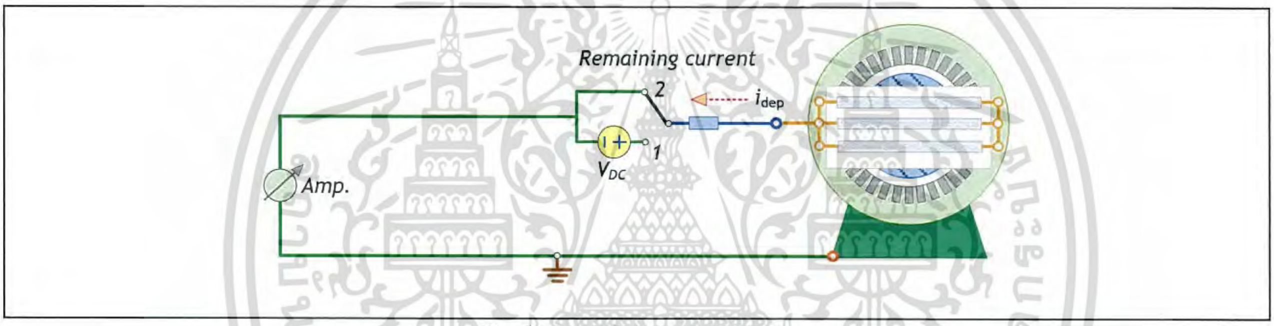


Fig.5a Initial measurement

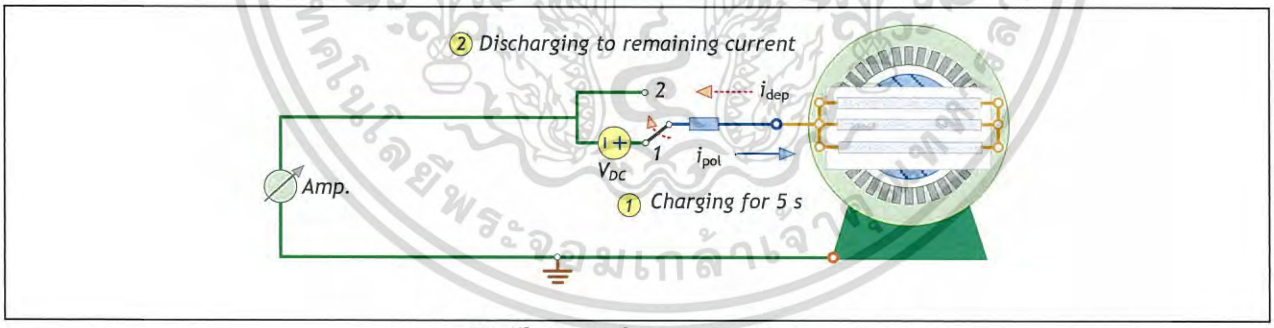


Fig.5b Control measurement

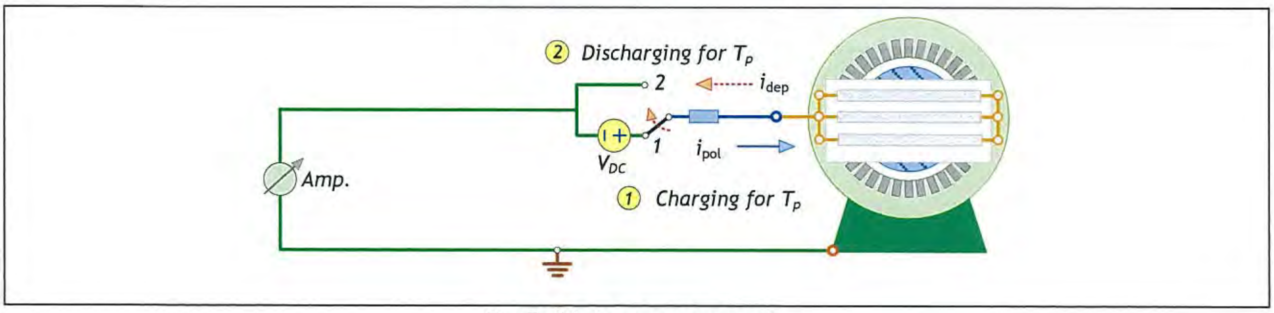


Fig.5c Main measurement

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. Test results

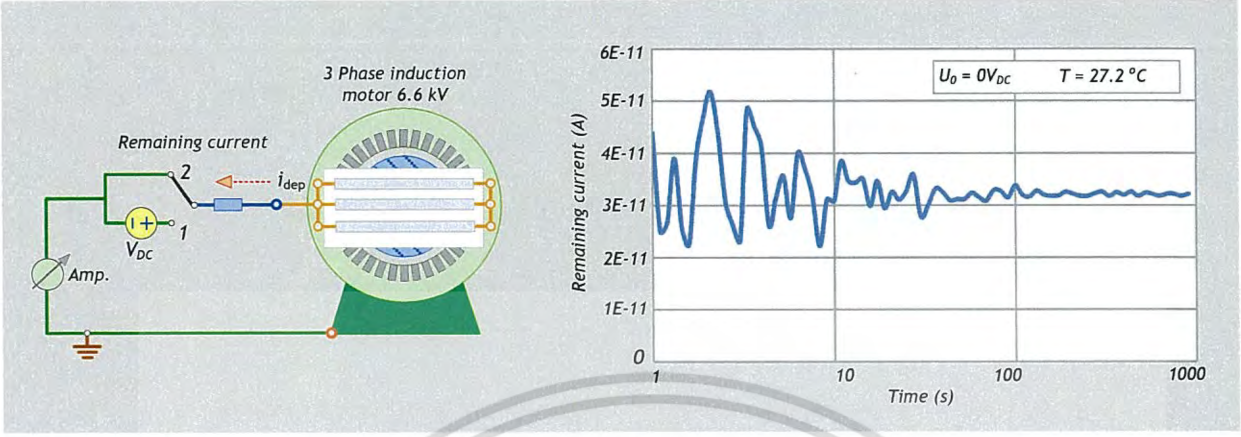


Fig.6a Initial measurement test result

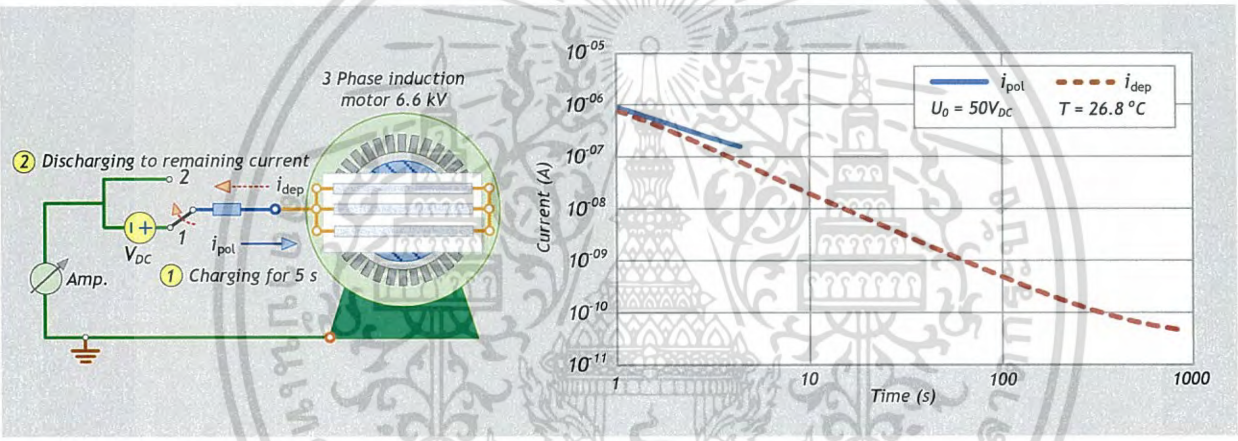


Fig.6b Control measurement test result

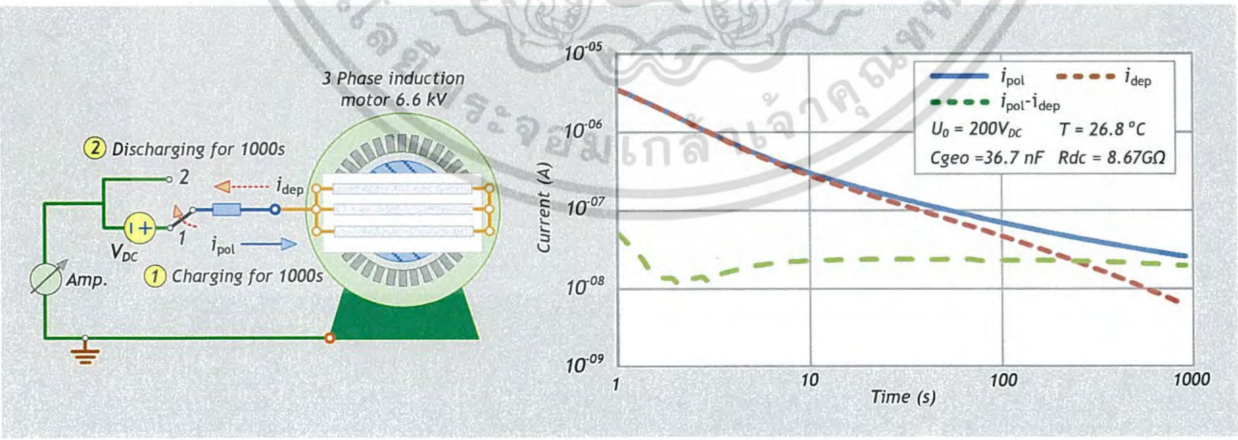


Fig.6c Main measurement test result

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. PDC Analysis

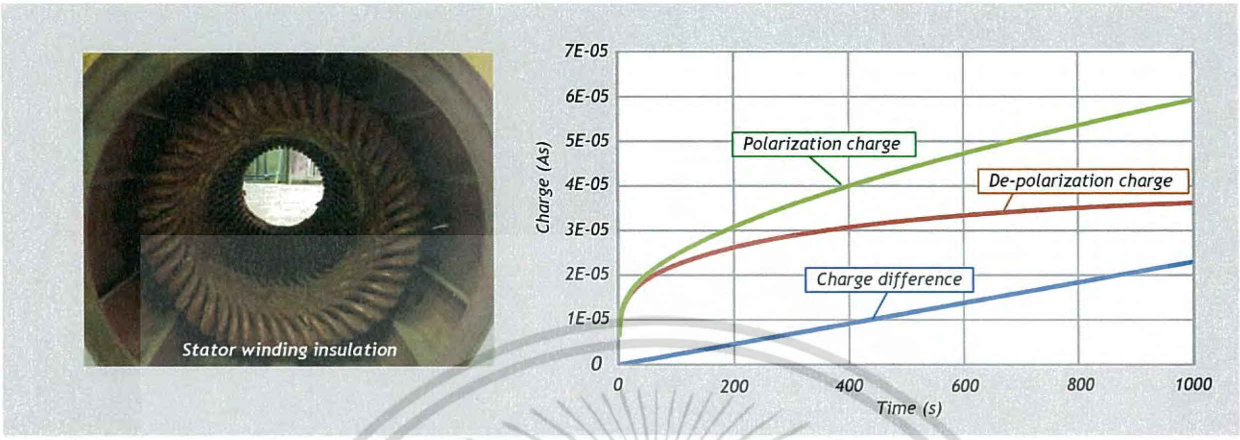


Fig.7a Charge different analysis

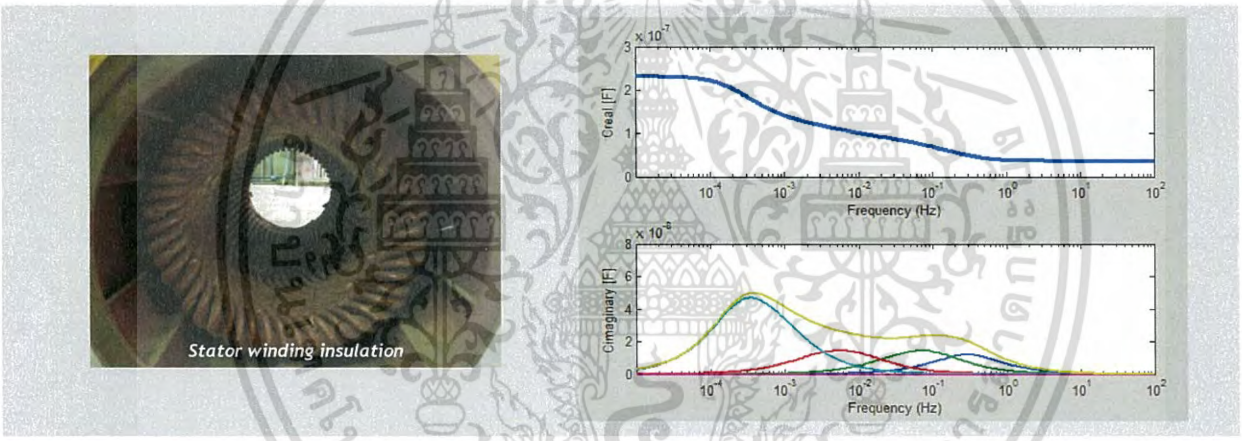


Fig.7b Complex capacitance analysis

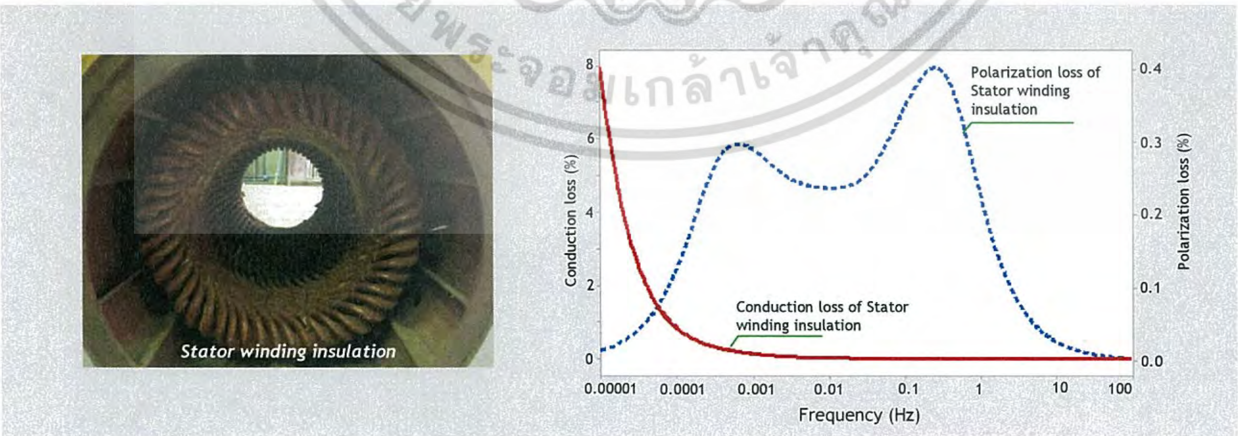


Fig.7c Loss factor (tan δ) analysis

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นางสาวเธียรแสงเพ็ญ ช่อผูก

วัน เดือน ปีเกิด 17 มิถุนายน 2538

ที่อยู่ 1/76 หมู่บ้านหรรษนันท์ 9 หมู่ที่ 7 ตำบลวัดจันทร์ อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก 65000

ประวัติการศึกษา 2560 วิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ชื่อ-นามสกุล นายพสิษฐ์ วงศ์ปิติรุ่งเรือง

วัน เดือน ปีเกิด 11 มกราคม 2539

ที่อยู่ 241-242 หมู่ที่ 10 ตำบลท่าตูม อำเภอศรีมหาโพธิ จังหวัดปราจีนบุรี 25410

ประวัติการศึกษา 2560 วิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ชื่อ-นามสกุล นายพัทธดนย์ สมัดไชย

วัน เดือน ปีเกิด 14 กุมภาพันธ์ 2539

ที่อยู่ 255/3 หมู่ที่ 7 ถนนราชพฤกษ์ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดชัยภูมิ 36000

ประวัติการศึกษา 2560 วิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ชื่อ-นามสกุล นายพุฒิพงศ์ จิตต์มณีรัตน์

วัน เดือน ปีเกิด 5 เมษายน 2539

ที่อยู่ 160/96 หมู่ 13 ตำบลสวนหลวง อำเภอกระทุ่มแบน จังหวัดสมุทรสาคร 74110

ประวัติการศึกษา 2560 วิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้