การวิเคราะห์ฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนแรงดันสูง
โดยวิธีการวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน

HIGH VOLTAGE ROTATING MACHINE INSULATION DIAGNOSIS BY MEANS OF POLARIZATION AND DEPOLARIZATION CURRENT MEASUREMENT

พัชรี ทองอินต๊ะ

PATCHAREE THONGINTA

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2559

KMITL-2016-EN-M-020-159

การวิเคราะห์ฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนแรงดันสูง
โดยวิธีการวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน

HIGH VOLTAGE ROTATING MACHINE INSULATION DIAGNOSIS BY MEANS OF POLARIZATION AND DEPOLARIZATION CURRENT MEASUREMENT

พัชรี ทองอินต๊ะ

PATCHAREE THONGINTA

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2559

KMITL-2016-EN-M-020-159

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

HIGH VOLTAGE ROTATING MACHINE INSULATION DIAGNOSIS BY MEANS OF POLARIZATION AND DEPOLARIZATION CURRENT MEASUREMENT

PATCHAREE THONGINTA

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2016

KMITL-2016-EN-M-020-159

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2016
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT’S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การวิเคราะห์ฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนแรงดันสูงโดยวิธีการวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน

Thesis Title High Voltage Rotating Machine Insulation Diagnosis by Means of Polarization and Depolarization Current Measurement

นักศึกษา นางสาวพัชรี ทองอินต๊ะ

รหัสประจำตัว 57601095

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.นรเศรษฐ พัฒนเดช

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2016-EN-M-020-159

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.อานันทวัฒน์	คุณากร	
รศ.ศิริวัฒน์	โพธิเวชกุล	
ผศ.ดร.ศุภกิตติ์	โชติโก	
ผศ.ดร.พีรวุฒิ	ยุทธโกวิท	
รศ.ดร.นรเศรษฐ	พัฒนเดช	

วัน / เดือน/ ปี ที่สอบ วันอังคารที่ 12 กรกฎาคม พ.ศ. 2559 เวลา 10.00-12.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคารเฉลิมพระเกียรติ ห้อง HM-302

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)
คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่ 12 กรกฎาคม พ.ศ. 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์ฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนแรงดันสูง โดยวิธีการวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน
นักศึกษา	นางสาวพัชรี ทองอินต๊ะ
รหัสประจำตัว	57601095
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2559
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.นรเศรษฐ พัฒนเดช

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการวิเคราะห์ฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนแรงดันสูงด้วยวิธีการวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน (polarization and depolarization current, PDC) ตลอดจนศึกษาผลของอุณหภูมิและความชื้นของสภาพแวดล้อมต่อการวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน โดยได้แบ่งการทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันออกเป็น 2 ส่วน คือ 1. การทดสอบในห้องปฏิบัติการ และ 2. การทดสอบภาคสนาม สำหรับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ได้ถูกแบ่งออกเป็น 4 การทดสอบย่อย คือ 1.1 การทดสอบในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิแตกต่างกัน 1.2 การทดสอบในสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นแตกต่างกัน 1.3 การทดสอบฉนวนที่มีความชื้นอยู่ภายในเนื้อฉนวน และ 1.4 การทดสอบฉนวนที่ได้รับความร้อนเกินอุณหภูมิใช้งาน สำหรับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ จะใช้ขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีพิกัดแรงดัน 6.6 กิโลโวลต์ จำนวน 2 ขด เป็นวัตถุทดสอบ และสำหรับการทดสอบภาคสนามได้ถูกแบ่งออกเป็น 3 การทดสอบย่อย คือ 2.1 การทดสอบแท่งสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีพิกัดแรงดัน 11 กิโลโวลต์ ที่ได้รับความเสียหายจากการเกิดความผิดพร่องในขณะที่ถูกซิงโครไนซ์เข้าไปในระบบไฟฟ้ากำลัง 2.2 การทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีพิกัดแรงดัน 6.6 กิโลโวลต์ ก่อนและหลังกระบวนการพันขดลวดใหม่ และ 2.3 การทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ พิกัด 6.6 กิโวลต์ ตามแผนการซ่อมบำรุงรักษา โดยทำการทดสอบมอเตอร์ในปี พ.ศ. 2557 และ ปี พ.ศ. 2559 และในการทดสอบในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันโดยใช้เครื่องวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน (PDC Analyser) จากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ พบว่า เมื่ออุณหภูมิของสภาพแวดล้อมสูงขึ้นจะส่งผลทำให้กระแสโพลาไรซ์เซชัน และกระแสการนำไฟฟ้าของฉนวนเพิ่มขึ้น ความชื้นของสภาพแวดล้อมที่สูงขึ้นจะส่งผลทำให้กระแสรั่วไหลตามผิวฉนวนสูงขึ้น ความชื้นภายในเนื้อฉนวนที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้กระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของฉนวนเพิ่มมากขึ้น และเมื่อฉนวนได้รับความร้อนเกินอุณหภูมิใช้งาน กระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของฉนวนจะลดลง และจากผลการทดสอบภาคสนาม พบว่า วิธีการทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันสามารถใช้ประเมินคุณภาพของฉนวนและสามารถใช้เป็นแนวทางในการระบุสาเหตุของการเสื่อมสภาพของฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนแรงดันสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	HIGH VOLTAGE ROTATING MACHINE INSULATION DIAGNOSIS BY MEANS OF POLARIZATION AND DEPOLARIZATION CURRENT MEASUREMENT
Student	Ms.Patcharee Thonginta
Student ID.	57601095
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2016
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Techn. Norasage Pattanadech

ABSTRACT

This thesis proposes the rotating machine insulation analysis by using polarization and depolarization current (PDC) measurement and also studies the effect of ambient temperature and humidity to the PDC. The PDC tests are divided into 2 major parts. The first major part was the laboratory test and the second major part was the field test. For the laboratory tests, there were 4 case studies and the 2 stator coils of 6.6 kV induction motor were experimented. The first case was to study the ambient temperature effecting PDC. The second case study was to investigate the ambient humidity effect on PDC. The third case study was to focus on the effect of the humidity inside the stator insulation and the forth case study was performed to study the PDC of the stator insulation undergone thermal stress over operating temperature. For the field tests, 3 case studies were experimented. The first case study was performed with 2 of 11 kV stator bar. One of them was a healthy insulation stator bar. Another one, some parts of the insulation were damaged from the synchronization failure. The second case study was performed to investigate the PDC characteristics of the 6.6 kV induction motor insulation before and after rewinding. The last case study was performed on the 6.6 kV induction motor according to the maintenance plan. The PDC testing in 2014 and 2016 have been done for such motor. The polarization and depolarization current of all experiments were measured by the PDC Analyser. According to the laboratory experiment, the higher ambient temperature caused the higher polarization current and conduction current. Moreover, the higher ambient humidity caused the higher leakage current of the stator bar. Besides, an increase in absorbed moisture in the stator coil insulation increased the depolarization current. Furthermore, the stator coil stressed by high temperature over normal operating condition caused the decreased in polarization and depolarization current. The field tests showed that the PDC measurement can be used to assess the quality of the

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

rotating machine insulation and can be used to be the guideline to identify the problems of the rotating machine insulation.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.นรเศรษฐ พัฒนเดช ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะ ช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์อันดีเกี่ยวกับการศึกษาและการดำเนินชีวิตแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.พีรวุฒิ ยุทธโกวิท ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางในการทำการทดลอง จนในที่สุดทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ อีกทั้งได้กรุณาให้คำแนะนำและคำปรึกษาอันดีในการดำเนินชีวิตแต่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณ คุณวรชัย สวัสดิมงคล ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จ และขอขอบคุณพี่ๆ เจ้าหน้าที่บริษัท ทีไอเอส เอ็นจิเนียริ่ง แอนด์ เซอร์วิส ทุกคน โดยเฉพาะคุณอลัญและคุณเอกชัยที่ได้ให้ความร่วมมือและถ่ายทดอดความรู้ทางด้านเทคนิคในการวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของเครื่องจักรกลหมุนแรงดันสูงเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ คุณธเนศ วอทอง ที่ได้กรุณาให้ความรู้เกี่ยวกับระบบการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆ ภายในโรงไฟฟ้าในระหว่างที่เข้าไปศึกษาดูงานที่บริษัทโกลว์ พลังงาน จำกัด อีกทั้งได้ถ่ายทอดประสบการณ์การทำงานและแนวทางในการดำเนินชีวิตแก่ข้าพเจ้า พร้อมทั้งได้ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้มอเตอร์ในการทำวิจัยจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จ

ขอขอบคุณ คุณนิพนธ์ พันกลั่น ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการบริจาคขดลวดมอเตอร์เพื่อนำมาใช้ในการทำวิจัย และขอขอบคุณพี่ๆ เจ้าหน้าที่ บริษัท กมลวิศวกรรม เซอร์วิส จำกัด ที่ได้ให้ความรู้เกี่ยวกับฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนแรงดันสูงแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณ คุณศักดา มณีโรจน์ ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการอบขดลวดมอเตอร์ เพื่อนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ พร้อมทั้งให้คำปรึกษา คำแนะนำที่ดีตลอดการทำวิจัยจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จ

ขอขอบคุณ คุณเทอดศักดิ์ โตจำนงค์ ที่ได้กรุณาให้เข้าไปศึกษาดูงานที่บริษัท โรงน้ำตาลมิตรผล พร้อมทั้งได้ให้โอกาสในการเข้าไปศึกษาดูงานที่บริษัท พลูโตเทค

ขอขอบคุณ บริษัท พลูโตเทค จำกัด ที่ได้ให้ความกรุณาในการเข้าไปศึกษาดูงานเกี่ยวกับฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนแรงดันสูง และขอขอบคุณพี่ๆ ช่างเทคนิคที่บริษัทพลูโตเทคทุกท่านที่ได้กรุณาถ่ายทอดความรู้และประสบการณ์ในการพันฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนแรงดันสูงแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณ บริษัท เวลเอ็นจิเนียริ่งเซอวิส ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้พื้นที่ภายในบริษัทเพื่อใช้ในการทดสอบ และขอขอบคุณพี่ๆ เจ้าหน้าที่และช่างเทคนิคที่บริษัทเวลเอ็นจิเนียริ่งเซอวิสทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการทำการทดสอบ

ขอขอบคุณ คุณสมพร บริษัทโกลว์ พลังงาน จำกัด ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการบริจาคขดลวดมอเตอร์เพื่อนำมาใช้ในการทดสอบ

ขอขอบคุณ คุณสนั่น บริษัทโกลว์ พลังงาน จำกัด ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้แท่งสเตเตอร์ และใช้พื้นที่ภายในโรงไฟฟ้าโกลว์ เอสพีพี2 ในการทำการทดสอบ และขอขอบคุณคุณสุชาติ มณฑปใหญ่ และพี่ๆ ที่บริษัทโกลว์ พลังงาน จำกัด ทุกคน ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขอขอบคุณ คุณเพทาย นิ่มสนอง คุณกิตติพศ จริยานุรัตน์ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือตลอดการทำวิจัยจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จ

ขอขอบคุณ คุณปุณยวีร์ ฉายศิริ คุณบัญญัติ ลีลาจริยกุล คุณปิยะพล ถือทอง คุณบุษยพล เพาพาน คุณนวคุณ ไตรรัตนาภิรักษ์ คุณวัชรา พงศ์สถิต คุณสุรศักดิ์ น้อยหมอ และคุณวิลาสินี วัฒกไพบูลย์ ที่ได้ให้กำลังใจและคำปรึกษาตลอดการทำวิจัยจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จ

ขอขอบคุณ สำนักงานกองทุนสนับสุนการวิจัย (The Thailand Research Fund) ที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยนี้ และขอขอบคุณพี่ๆ เจ้าหน้าที่ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า และน้อง ๆ ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงทุกคนที่เป็นกำลังใจที่ดีให้แก่ข้าพเจ้าเสมอมา

สุดท้ายต้องขอขอบคุณครอบครัวของข้าพเจ้าที่อดทนและเข้าใจข้าพเจ้าเป็นอย่างดี

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดาซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

พัชรี ทองอินต๊ะ

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย........I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ........II
กิตติกรรมประกาศ........IV
สารบัญ........VI
สารบัญตาราง........IX
สารบัญรูป........X

บทที่ 1 บทนำ........1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา........1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา........2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย........2
1.4 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง........3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ........5

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง........6
2.1 สเตเตอร์........6
2.1.1 การวางขดลวดสเตเตอร์แบบสุ่ม........6
2.1.2 การวางขดลวดสเตเตอร์แบบมีรูปแบบ........6
2.2 ขดลวดสเตเตอร์........7
2.2.1 ฉนวนของขดลวดสเตเตอร์........8
2.2.1.1 ระดับชั้นฉนวน........8
2.2.1.1 โครงสร้างของระบบฉนวน........9
2.3 กระบวนการโพลาไรซ์เซชันและกระบวนการดีโพลาไรซ์เซชันของฉนวน........11
2.3.1 อิเล็กทรอนิกส์โพลาไรซ์เซชัน........11
2.3.2 ไอออนิกโพลาไรซ์เซชัน........12
2.3.3 ออเรนเทชันโพลาไรซ์เซชัน........13
2.3.4 ฮอปปิงโพลาไรซ์เซชัน........14
2.3.5 สเปซชาร์จโพลาไรซ์เซชัน........14
2.4 กระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน........15
2.4.1 กระแสโพลาไรซ์เซชัน........16
2.4.2 กระแสดีโพลาไรซ์เซชัน........18
2.5 ดัชนีการมีขั้ว........19

บทที่ 3 การทดสอบ........20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.1 เครื่องวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน......................................19
3.2 การทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน
ในห้องปฏิบัติการ..22
3.2.1 การทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน
ของขดลวดสเตเตอร์ในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิแตกต่างกัน.......................23
3.2.2 การทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน
ของขดลวดสเตเตอร์ในสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นแตกต่างกัน......................23
3.2.3 การทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน
ของขดลวดสเตเตอร์ที่มีความชื้นอยู่ภายในเนื้อฉนวน....................................23
3.2.4 การทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน
ของขดลวดสเตเตอร์เมื่อฉนวนได้รับความร้อนเกินอุณหภูมิใช้งาน.................23
3.3 การทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน
ในภาคสนาม...26
3.3.1 การทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน
ของแท่งสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ได้รับความเสียหาย
จากการเกิดความผิดพร่องในขณะที่ถูกซิงโครไนซ์เข้าไป
ในระบบไฟฟ้ากำลัง...26
3.3.2 การทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน
ของมอเตอร์ก่อนและหลังกระบวนการพันขดลวดใหม่.................................29
3.3.3 การทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน
ของมอเตอร์ตามแผนการซ่อมบำรุงรักษา...32
3.4 ขั้นตอนการวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน.............................34
3.4.1 การวัดเบื้องต้น...34
3.4.2 การวัดเพื่อกำหนดค่าแรงดันทดสอบ...35
3.4.3 การวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน...............................36

บทที่ 4 ผลการทดสอบ...37
4.1 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ...37
4.1.1 การทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน
ของขดลวดสเตเตอร์ในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิแตกต่างกัน........................38
4.1.2 การทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน
ของขดลวดสเตเตอร์ในสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นแตกต่างกัน.........................41
4.1.2.1 ทำการวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์
เซชันในสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 57% 65%
และ 73% มีอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส..............................41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.1.2.2 ทำการวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน ในสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 60% และ 68% มีอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส....... 44
4.1.3 การทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน ของขดลวดสเตเตอร์ที่มีความชื้นอยู่ภายในเนื้อฉนวน....... 47
4.1.4 การทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน ของขดลวดสเตเตอร์เมื่อฉนวนได้รับความเสียหายเนื่องจากความร้อน....... 50
4.2 การทดสอบภาคสนาม....... 53
4.2.1 การทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน ของแท่งสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เกิดความผิดพร่อง แบบไลน์ทูกราวด์....... 53
4.2.2 การทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน ของมอเตอร์ที่มีฝุ่นบนเปื้อนที่ผิวฉนวนของขดลวดสเตเตอร์....... 55
4.2.3 การทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน ของมอเตอร์ตามแผนการซ่อมบำรุงรักษา....... 59

บทที่ 5 สรุปผลการทดสอบ....... 62
5.1 สรุปผลการทดสอบ....... 62
5.1.1 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ....... 62
5.1.2 การทดสอบภาคสนาม....... 63
5.2 ข้อเสนอแนะ....... 63
เอกาสารอ้างอิง....... 64
ภาคผนวก....... 66
ภาคผนวก ก ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่....... 67
ประวัติผู้เขียน....... 91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

ตารางที่ 4.1 ความต้านทานและดัชนีการมีขั้วของขดลวดสเตเตอร์ในการทดสอบที่ 4.1.1............40
ตารางที่ 4.2 ความต้านทานและดัชนีการมีขั้วของขดลวดสเตเตอร์ในการทดสอบที่ 4.1.2.1..........43
ตารางที่ 4.3 ความต้านทานและดัชนีการมีขั้วของขดลวดสเตเตอร์ในการทดสอบที่ 4.1.2.2..........46
ตารางที่ 4.4 ความต้านทานและดัชนีการมีขั้วของขดลวดสเตเตอร์ในการทดสอบที่ 4.1.3.........49
ตารางที่ 4.5 ความต้านทานและดัชนีการมีขั้วของขดลวดสเตเตอร์ในการทดสอบที่ 4.1.4............52
ตารางที่ 4.6 ความต้านทานและดัชนีการมีขั้วของขดลวดสเตเตอร์ในการทดสอบที่ 4.2.1............55
ตารางที่ 4.7 ความต้านทานและดัชนีการมีขั้วของขดลวดสเตเตอร์ในการทดสอบที่ 4.2.2............58
ตารางที่ 4.8 ความต้านทานและดัชนีการมีขั้วของขดลวดสเตเตอร์ในการทดสอบที่ 4.2.3............61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ หน้า

รูปที่ 2.1 ขดลวดสเตเตอร์ของเครื่องจักรกลหมุน....7
รูปที่ 2.2 ขดลวดสเตเตอร์....7
รูปที่ 2.3 ขดลวดสเตเตอร์เมื่ออยู่ภายในร่องสล็อต....8
รูปที่ 2.4 โครงสร้างระบบฉนวนของขดลวดสเตเตอร์....9
รูปที่ 2.5 การป้อนแรงดันให้กับฉนวน....11
รูปที่ 2.6 อิเล็กทรอนิกส์โพลาไรซ์เซชัน....12
รูปที่ 2.7 ไอออนิกส์โพลาไรซ์เซชัน....12
รูปที่ 2.8 ออเรนเทชันโพลาไรซ์เซชัน....13
รูปที่ 2.9 ออเรนเทชันโพลาไรซ์เซชันภายในเนื้อฉนวน....13
รูปที่ 2.10 ฮอปปิงโพลาไรซ์เซชัน....14
รูปที่ 2.11 สเปซชาร์จโพลาไรซ์เซชัน....15
รูปที่ 2.12 ระยะเวลาที่ใช้ในการเกิดกระบวนการโพลาไรซ์ประเภทต่างๆ....15
รูปที่ 2.13 การจ่ายแรงดันรูปขั้นให้กับฉนวน....16
รูปที่ 2.14 องค์ประกอบของกระแสโพลาไรซ์เซชัน....17
รูปที่ 2.15 กระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน....19
รูปที่ 3.1 ชุดเครื่องวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน....21
รูปที่ 3.2 ขดลวดสเตเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ....22
รูปที่ 3.3 ขดลวดสเตเตอร์ที่แห้งสะอาด....24
รูปที่ 3.4 ขดลวดสเตเตอร์ที่ผ่านการอบทั้ง 2 ครั้ง....24
รูปที่ 3.5 วงจรสมมูลของการทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน สำหรับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ....24
รูปที่ 3.6 ไดอะแกรมวงจรการทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน ของขดลวดสเตเตอร์ในห้องปฏิบัติการ....25
รูปที่ 3.7 วงจรการทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของขดลวด สเตเตอร์ในห้องปฏิบัติการ....25
รูปที่ 3.8 แท่งสเตเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ....27
รูปที่ 3.9 ฉนวนได้รับความเสียหายจากการเกิดความผิดพร่องแบบไลน์ทูกราวด์....27
รูปที่ 3.10 วงจรสมมูลของการทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน ในข้อที่ 3.31....27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่ หน้า

รูปที่ 3.11 ไดอะแกรมวงจรการทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของแท่งสเตเตอร์ 28
รูปที่ 3.12 วงจรการทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของแท่งสเตเตอร์ 28
รูปที่ 3.13 มอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบที่ 3.3.2 ก่อนการพันขดลวดใหม่ 29
รูปที่ 3.14 ผิวฉนวนของขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบที่ 3.3.2 ก่อนการพันขดลวดใหม่ 30
รูปที่ 3.15 มอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบในการทดสอบที่ 3.3.2 หลังการพันขดลวดใหม่ 30
รูปที่ 3.16 ผิวฉนวนของขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์ในการทดสอบที่ 3.3.2 หลังการพันขดลวดใหม่ 30
รูปที่ 3.17 วงจรสมมูลของการทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันในการทดสอบที่ 3.3.2 31
รูปที่ 3.18 ไดอะแกรมวงจรการทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของมอเตอร์ของการทดสอบที่ 3.3.2 31
รูปที่ 3.19 วงจรการทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันในการทดสอบที่ 3.3.2 31
รูปที่ 3.20 มอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบที่ 3.3.3 32
รูปที่ 3.21 วงจรสมมูลของการทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันในการทดสอบที่ 3.3.3 32
รูปที่ 3.22 ไดอะแกรมวงจรการทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน 33
รูปที่ 3.23 วงจรการทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันในการ 33
รูปที่ 3.24 กระแสคายประจุของฉนวน 34
รูปที่ 3.25 กระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของฉนวนในขั้นตอนการวัดเพื่อกำหนดแรงดันทดสอบ 35
รูปที่ 3.26 กระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของฉนวนในขั้นตอนการวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน 36
รูปที่ 4.1 กระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของขดลวดสเตเตอร์ที่อุณหภูมิสภาพแวดล้อม 30 องศาเซลเซียส เทียบกับที่อุณหภูมิสภาพแวดล้อม 20 องศาเซลเซียส 38
รูปที่ 4.2 กระแสโพลาไรซ์เซชันของขดลวดสเตเตอร์ที่อุณหภูมิสภาพแวดล้อม 30 องศาเซลเซียส เทียบกับที่อุณหภูมิสภาพแวดล้อม 20 องศาเซลเซียส 38
รูปที่ 4.3 กระแสดีโพลาไรซ์เซชันของขดลวดสเตเตอร์ที่อุณหภูมิสภาพแวดล้อม 30 องศาเซลเซียส เทียบกับที่อุณหภูมิสภาพแวดล้อม 20 องศาเซลเซียส 39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่ หน้า

รูปที่ 4.4 กระแสการนำไฟฟ้าของขดลวดสเตเตอร์ที่อุณหภูมิสภาพแวดล้อม 30 องศาเซลเซียส เทียบกับที่อุณหภูมิสภาพแวดล้อม 20 องศาเซลเซียส..39

รูปที่ 4.5 กระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของขดลวดสเตเตอร์ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 57%, 65% และ 73% ที่อุณหภูมิสภาพแวดล้อม 30 องศาเซลเซียส............................41

รูปที่ 4.6 กระแสโพลาไรซ์เซชันของขดลวดสเตเตอร์ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 57%, 65% และ 73% ที่อุณหภูมิสภาพแวดล้อม 30 องศาเซลเซียส..42

รูปที่ 4.7 กระแสดีโพลาไรซ์เซชันของขดลวดสเตเตอร์ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 57%, 65% และ 73% ที่อุณหภูมิสภาพแวดล้อม 30 องศาเซลเซียส..42

รูปที่ 4.8 กระแสการนำไฟฟ้าของขดลวดสเตเตอร์ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 57%, 65% และ 73% ที่อุณหภูมิสภาพแวดล้อม 30 องศาเซลเซียส..43

รูปที่ 4.9 กระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของขดลวดสเตเตอร์ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 60% และ 68% ที่อุณหภูมิสภาพแวดล้อม 20 องศาเซลเซียส......................................44

รูปที่ 4.10 กระแสโพลาไรซ์เซชันของขดลวดสเตเตอร์ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 60% และ 68% ที่อุณหภูมิสภาพแวดล้อม 20 องศาเซลเซียส...44

รูปที่ 4.11 กระแสดีโพลาไรซ์เซชันของขดลวดสเตเตอร์ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 60% และ 68% ที่อุณหภูมิสภาพแวดล้อม 20 องศาเซลเซียส...45

รูปที่ 4.12 กระแสการนำไฟฟ้าของขดลวดสเตเตอร์ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 60% และ 68% ที่อุณหภูมิสภาพแวดล้อม 20 องศาเซลเซียส...45

รูปที่ 4.13 กระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของขดลวดสเตอร์ที่แห้งสะอาดและที่ผ่านการแช่น้ำ 24, 72 และ 144 ชั่วโมง..47

รูปที่ 4.14 กระแสโพลาไรซ์เซชันของขดลวดสเตอร์ที่แห้งสะอาดและที่ผ่านการแช่น้ำ 24, 72 และ 144 ชั่วโมง..47

รูปที่ 4.15 กระแสดีโพลาไรซ์เซชันของขดลวดสเตอร์ที่แห้งสะอาดและที่ผ่านการแช่น้ำ 24, 72 และ 144 ชั่วโมง..48

รูปที่ 4.16 กระแสการนำไฟฟ้าของขดลวดสเตอร์ที่แห้งสะอาดและที่ผ่านการแช่น้ำ 24, 72 และ 144 ชั่วโมง..48

รูปที่ 4.17 กระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของขดลวดสเตอร์ที่แห้งสะอาดและที่ผ่านการอบเป็นระยะเวลา 12 และ 48 ชั่วโมง..50

รูปที่ 4.18 กระแสโพลาไรซ์เซชันของขดลวดสเตอร์ที่แห้งสะอาดและที่ผ่านการอบเป็นระยะเวลา 12 และ 48 ชั่วโมง..50

รูปที่ 4.19 กระแสดีโพลาไรซ์เซชันของขดลวดสเตอร์ที่แห้งสะอาดและที่ผ่านการอบเป็นระยะเวลา 12 และ 48 ชั่วโมง..51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่ หน้า

รูปที่ 4.20 กระแสการนำไฟฟ้าของขดลวดสเตอร์ที่แห้งสะอาดและที่ผ่านการอบเป็นระยะเวลา 12 และ 48 ชั่วโมง....51
รูปที่ 4.21 กระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของแท่งสเตเตอร์ที่ฉนวนอยู่ในสภาพดีเทียบกับที่ฉนวนได้รับความเสียหายจากการเกิดความผิดพร่องแบบไลน์ทูกราวด์....53
รูปที่ 4.22 กระแสโพลาไรซ์เซชันของแท่งสเตเตอร์ที่ฉนวนอยู่ในสภาพดีเทียบกับที่ฉนวนได้รับความเสียหายจากการเกิดความผิดพร่องแบบไลน์ทูกราวด์....54
รูปที่ 4.23 กระแสดีโพลาไรซ์เซชันของแท่งสเตเตอร์ที่ฉนวนอยู่ในสภาพดีเทียบกับที่ฉนวนได้รับความเสียหายจากการเกิดความผิดพร่องแบบไลน์ทูกราวด์....54
รูปที่ 4.24 กระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของมอเตอร์ก่อนและหลังกระบวนการพันขดลวดใหม่....56
รูปที่ 4.25 กระแสโพลาไรซ์เซชันของมอเตอร์ก่อนและหลังกระบวนการพันขดลวดใหม่....56
รูปที่ 4.26 กระแสดีโพลาไรซ์เซชันของมอเตอร์ก่อนและหลังกระบวนการพันขดลวดใหม่....57
รูปที่ 4.27 กระแสการนำไฟฟ้าของมอเตอร์ที่ก่อนและหลังกระบวนการพันขดลวดใหม่....57
รูปที่ 4.28 กระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของมอเตอร์ในปี พ.ศ. 2557 เทียบกับในปี พ.ศ. 2559....59
รูปที่ 4.29 กระแสโพลาไรซ์เซชันของมอเตอร์ในปี พ.ศ. 2557 เทียบกับในปี พ.ศ. 2559....59
รูปที่ 4.30 กระแสดีโพลาไรซ์เซชันของมอเตอร์ในปี พ.ศ. 2557 เทียบกับในปี พ.ศ. 2559....60
รูปที่ 4.31 กระแสการนำไฟฟ้าของมอเตอร์ในปี พ.ศ. 2557 เทียบกับในปี พ.ศ. 2559....60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ เมื่อปฏิบัติงานอยู่ในระบบไฟฟ้าจะเกิดการเสื่อมสภาพจากการใช้งานเนื่องจากปัจจัยต่างๆ เช่น ความเครียดสนามไฟฟ้า ความร้อน แรงทางกล และสภาพแวดล้อมในการใช้งาน เป็นต้น ซึ่งการเสื่อมสภาพของอุปกรณ์ไฟฟ้าดังกล่าวนั้นอาจนำไปสู่ความล้มเหลวในการปฏิบัติงานในที่สุด เช่นเดียวกันกับการใช้งานเครื่องจักรกลหมุนแรงดันสูง (เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและมอเตอร์แรงดันสูง) ในระบบไฟฟ้ากำลังย่อมทำให้การฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนแรงดันสูงมีการเสื่อมสภาพจากการใช้งานเนื่องจากปัจจัยต่างๆ ดังกล่าวข้างต้น การเสื่อมสภาพของการฉนวนนี้จะส่งผลกระทบต่อความสามารถในการปฏิบัติงานของเครื่องจักรกลหมุนและส่งผลต่อความน่าเชื่อถือและความมีเสถียรภาพของระบบกำลังไฟฟ้าที่เครื่องจักรกลหมุนถูกติดตั้งใช้งานอยู่ ระบบการฉนวนจึงถือได้ว่าเป็นปัจจัยสำคัญปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อการทำงานของเครื่องจักรกลหมุน ดังนั้น การตรวจสอบและวิเคราะห์เพื่อประเมินสภาพของฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนแรงดันสูงจึงมีความจำเป็นเพื่อใช้เป็นแนวทางในการวางแผนการซ่อมและบำรุงรักษาเครื่องจักรกลให้มีสภาพพร้อมใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดอยู่ตลอดเวลาและเป็นการป้องกันไม่ให้เครื่องจักรกลหมุนเกิดความผิดพร่องในขณะปฏิบัติงานซึ่งจะทำให้เกิดอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานได้

การซ่อมและบำรุงรักษาเครื่องจักรกลหมุนแรงดันสูงในแต่ละครั้งมีค่าใช้จ่ายเป็นจำนวนมาก ดังนั้น หากสามารถคาดเดาสาเหตุของการเสื่อมสภาพของเครื่องจักรกลหมุนในเบื้องต้น ประเมินการเสื่อมสภาพของฉนวนหรือคาดการณ์ระยะเวลาที่เครื่องจักรกลหมุนจะต้องได้รับการซ่อมบำรุงได้ย่อมเป็นผลดีและเป็นประโยชน์ต่อการวางแผนการซ่อมและบำรุงเครื่องจักรกลหมุนและเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงดังกล่าว อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มความน่าเชื่อถือและเสถียรภาพให้กับระบบผลิตกำลังไฟฟ้าได้อีกวิธีหนึ่ง ในปัจจุบันวิธีการที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนแรงดันสูงมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี เช่น การวัดความต้านทานฉนวน การหาค่าดัชนีการมีขั้ว การทดสอบการเกิดดิสชาร์จบางส่วน และการทดสอบไฮพอท เป็นต้น ซึ่งวิธีการที่ได้กล่าวมานี้ใช้แรงดันสูงในการทดสอบ ดังนั้น จึงทำให้ฉนวนเกิดความเสี่ยงในการได้รับความเสียหายจากแรงดันทดสอบ และทำให้ฉนวนมีโอกาสที่จะเกิดการเสื่อมสภาพมากขึ้นจากแรงดันทดสอบ ดังนั้น การทดสอบเพื่อประเมินคุณภาพของฉนวนโดยไม่ทำให้ฉนวนได้รับความเสียหายหรือทำให้ฉนวนได้รับความเสียหายเพิ่มเติมจึงเป็นประโยชน์อย่างมากต่อการซ่อมบำรุงรักษาเครื่องจักรกลหมุนแรงดันสูง และวิธีหนึ่งที่กำลังได้รับความนิยมและมีการวิจัยอย่างแพร่หลายในต่างประเทศ คือ วิธีการวิเคราะห์ฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนแรงดันสูงด้วยวิธีการทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันด้วยความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีในปัจจุบันทำให้การวิเคราะห์ฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนด้วยวิธีการดังกล่าวใช้แรงดันต่ำในการทดสอบ ดังนั้น จึงไม่ทำให้ฉนวนได้รับความเสียหายหรือเกิดความเสียหายเพิ่มเติมจากแรงดันทดสอบ ทั้งนี้ในปัจจุบันการวิเคราะห์ฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนแรงดันสูงด้วยวิธีการดังกล่าวเริ่มมีการนำเข้ามาใช้ภายในประเทศไทย แต่อย่างไรก็ตามพบว่าวิธีการดังกล่าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยังคงไม่ได้รับการศึกษาวิจัยอย่างแพร่หลายนักในประเทศไทย และด้วยเหตุผลข้างต้น จึงได้ทำการศึกษาวิธีการวิเคราะห์ฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนแรงดันสูงด้วยวิธีการทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์ชัน พร้อมทั้งศึกษาผลของอุณหภูมิและความชื้นของสภาพแวดล้อมต่อการทดสอบ โดยทำการทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์ในสภาวะแวดล้อมที่มีอุณหภูมิและความชื้นแตกต่างกัน และได้ทำการจำลองกรณีศึกษาต่างๆ ในห้องปฏิบัติการเพื่อเป็นตัวอย่างในการใช้วิธีการทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันในการวิเคราะห์ฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนแรงดันสูงและได้ทำการทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของแท่งสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและทำการทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของมอเตอร์ในภาคสนามร่วมด้วยเพื่อแสดงให้เห็นถึงความสามารถของการวิเคราะห์ฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนแรงดันสูงด้วยวิธีการทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาทฤษฎีของกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนแรงดันสูง
2. เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิและความชื้นของสภาพแวดล้อมต่อกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนแรงดันสูง
3. เพื่อศึกษาการวิเคราะห์ฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนแรงดันสูงด้วยวิธีการวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันเพื่อนำมาใช้เป็นแนวทางในการประเมินสภาพฉนวน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยนี้ได้ทำการศึกษา วิเคราะห์ และทำการทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนแรงดันสูง พร้อมทั้งศึกษาผลของอุณหภูมิและความชื้นของสภาพแวดล้อมขณะทำการทดสอบต่อการทดสอบ โดยงานวิจัยนี้ ได้แบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ส่วน คือ 1. การทดสอบในห้องปฏิบัติการ และ 2. การทดสอบภาคสนาม โดยในห้องปฏิบัติการ ได้ทำการทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์ที่มีพิกัดแรงดัน 6.6 กิโลโวลต์ จำนวน 2 ขด โดยได้ทำการทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของขดลวดสเตเตอร์ในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิและความชื้นแตกต่างกันเพื่อทำการศึกษาผลของอุณหภูมิและความชื้นของสภาพแวดล้อมขณะทำการทดสอบต่อการทดสอบ และได้ทำการทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของขดลวดสเตเตอร์ที่แห้งสะอาดและที่ผ่านการแช่น้ำเป็นระยะเวลา 24, 72 และ 144 ชั่วโมง เพื่อศึกษาผลของความชื้นที่อยู่ภายในเนื้อฉนวนต่อกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน และได้ทำการทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของขดลวดสเตเตอร์ที่แห้งสะอาดและที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 12 และ 48 ชั่วโมง เพื่อศึกษากระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของฉนวนของขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์เมื่อขดลวดสเตเตอร์ได้รับความร้อนเกินอุณหภูมิใช้งาน และการทดสอบในภาคสนามได้มีการทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของมอเตอร์และแท่งสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อแสดงให้เห็นถึงความสามารถของการประเมินคุณภาพฉนวนโดยวิธีการทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน โดยได้ทำการวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของแท่งสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีพิกัดแรงดัน 11 กิโลโวลต์ ที่ฉนวนอยู่ในสภาพดีและฉนวนได้รับความเสียหายจากเกิดความผิดพร่องในขณะที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าถูกซิงโครไนซ์เข้าไปในระบบไฟฟ้ากำลัง และได้ทำการทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของมอเตอร์ที่มีพิกัดแรงดัน 6.6 กิโลโวลต์ จำนวน 2 ตัว โดยมอเตอร์ตัวที่ 1 ได้ทำการทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของมอเตอร์ก่อนและหลังกระบวนการพันขดลวดใหม่ และมอเตอร์ตัวที่ 2 ได้ทำการทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของมอเตอร์ตามแผนการซ่อมบำรุงรักษา โดยได้ทำการทดสอบมอเตอร์ในปี พ.ศ. 2557 และในปี พ.ศ. 2559

1.4 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ปี พ.ศ. 2545 มีการนำเสนอผลงานเรื่อง “The latest technology for on-site insulation condition assessment of electrical power apparatus” [1] โดย Supatra A. Bhumiwat ใน “Electricity Engineers Association of New Zealand – Conference 2002, Christchurch” โดยได้ มีการนำเทคนิคการวิเคราะห์กระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันมาใช้ในการวิเคราะห์ฉนวนของหม้อแปลง

ปี พ.ศ. 2547 มีการนำเสนอผลงานเรื่อง “Polarization-Depolarization Measurements at Insulation Systems for Rotating Machines” [2] โดย C. Sumereder, R. Woschitz และ M. Muhr ใน The International Symposium on Electrical Insulating materials, Kitakyushu, Japan, June 5-9, 2005 pp. 706-709 โดย C. Sumereder และคณะ ได้นำแท่งสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ผ่านการจ่ายโหลดเป็นระยะเวลาที่แตกต่างกันมาทำการวัดค่าความจุไฟฟ้า โดยทำการวัดค่าความจุไฟฟ้าโดยใช้วิธีการวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันเทียบกับวิธีการดั้งเดิม (เชอร์ริงบริดจ์) ค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากวิธีการวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันจะได้จากการนำกระแสโพลาไรซ์เซชันที่วัดได้มาคำนวณโดยใช้การแปลงฟูเรียร์ จากการทดสอบพบว่า ค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้จากวิธีการวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันจะแตกต่างจากค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้จากวิธีเชอร์ริงบริดจ์ 15 %

ปี พ.ศ. 2549 มีการนำเสนอผลงานเรื่อง “Dielectric Response Studies on Insulating System of High Voltage Rotating Machines” [3] โดย M. Farahani, H. Borsi และ E. Gockenbach ใน “IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,” February, 2006, Vol. 13 pp. 383-393 โดย M. Farahani และคณะ ได้ทำการศึกษาผลตอบสนองของฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนแรงดันสูงโดยการวัดกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน การวัดค่ากำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก และค่าความจุไฟฟ้าของฉนวนในกรณีต่างๆ ดังนี้ กรณีที่ 1. อุณหภูมิแวดล้อมขณะทำการทดสอบเพิ่มขึ้นจาก 25 °C ถึง 90 °C กรณีที่ 2. ฉนวนได้รับความเครียดสนามไฟฟ้า 5.5 kV/mm และได้รับความร้อน 150 °C เป็นระยะเวลา 0-7,000 ชั่วโมง และกรณีที่ 3. ฉนวนได้รับความเครียดสนามไฟฟ้า 8.3 kV/mm เป็นระยะเวลา 0-5,825 ชั่วโมง และหลังจาก 5,825 ชั่วโมง ฉนวนเกิดการเบรกดาวน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทดสอบนี้ M. Farahani ได้นำแท่งสเตเตอร์ของเครื่องจักรกลหมุนที่มีพิกัดแรงดัน 10 kV มาใช้เป็นวัตถุทดสอบ จากการทดสอบ พบว่า ในกรณีที่ 1. เมื่ออุณหภูมิแวดล้อมขณะทำการทดสอบเพิ่มขึ้น กระแสดีโพลาไรซ์เซชัน ค่ากำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก และค่าความจุไฟฟ้าของฉนวนจะเพิ่มขึ้น ในกรณีที่ 2. เมื่อทำการให้ความเครียดสนามไฟฟ้าและความร้อนแก่ฉนวนเป็นระยะเวลา 0-7,000 ชั่วโมง จะทำให้กระแสดีโพลาไรซ์เซชันและค่ากำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกลดลงจากนั้นจะเพิ่มขึ้นทีละน้อย ส่วนค่าความจุไฟฟ้าจะมีค่าลดลง และกรณีที่ 3. เมื่อให้ความเครียดสนามไฟฟ้าแก่ฉนวนเป็นระยะเวลา 0-5,825 ชั่วโมง พบว่า กระแสดีโพลาไรซ์เซชัน ค่ากำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกและค่าความจุไฟฟ้าไม่มีการเปลี่ยนแปลงก่อนฉนวนเกิดการเบรกดาวน์

ปี พ.ศ. 2550 มีการนำเสนอผลงานเรื่อง “Application of Polarisation Depolarisation Current (PDC) technique on fault and trouble analysis of stator insulation” [4] โดย S. A. Bhumiwat ใน “Cigre Sc A1 & D1 Joint Colloquim,” October 24, 2007 pp. 79-87 โดยคุณ S. A. Bhumiwat ได้นำเทคนิคการวิเคราะห์กระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันมาใช้ในการวิเคราะห์ฉนวนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า พบว่า เทคนิคดังกล่าสามารถตรวจพบปัญหาในกรณีที่ฉนวนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีสิ่งปนเปื้อนจำพวกคราบน้ำมันหล่อลื่นผสมกันฝุ่นผงปนเปื้อนอยู่บริเวณผิวฉนวนของขดลวดสตเตอร์ และตรวจพบปัญหาในกรณีที่ฉนวนของขดลวดสเตเตอร์เกิดการลัดวงจรสู่กราวด์ได้

ปี พ.ศ. 2551 มีการนำเสนอผลงานเรื่อง “Practical experiences on condition assessment of Stator insulation using Polarisation / Depolarisation Current technique” [5] โดย S. Bhumiwat ใน “CIGRE 2008 Session,” Paris, 2008 pp. D1-210 โดยได้ มีการนำเทคนิคการวิเคราะห์กระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันมาใช้ในการวิเคราะห์ฉนวนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า พบว่า เทคนิคดังกล่าวสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ฉนวนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในกรณีที่ มีความชื้นอยู่ภายในเนื้อฉนวน ฉนวนมีสิ่งปนเปื้อนที่ผิว ฉนวนได้รับการระบายความร้อนไม่เพียงพอ และผิวฉนวนถูกกัดกร่อน ได้

ปี พ.ศ. 2552 มีงานวิจัยเรื่อง “เทคนิคการตรวจวัดความชื้นของกระดาษฉนวนของหม้อแปลงโดยใช้กระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน” [6] โดย นายอภิชาติ นิ่มเทียน พบว่า ผลการตรวจวัดความชื้นของกระดาษฉนวนของหม้อแปลงที่ผ่านการจุ่มน้ำมันหม้อแปลงแล้วโดยใช้กระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันให้ผลใกล้เคียงกับการตรวจวัดความชื้นด้วยวิธีคาร์ลฟิตเชอร์

ปี พ.ศ. 2556 มีการนำเสนอผลงานเรื่อง “Experience with DC Polarization-Depolarization Measurements on Stator Winding Insulation” [7] โดย G.C. Stone และ M. Sasic ใน “Electrical Insulation Conference”, Ottawa, Ontario, Canada, 2-5 June, 2013 pp. 7-10 โดย G. Stone ได้ทำการศึกษาฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนแรงดันสูง โดยทำการทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน (polarization and depolarization current, PDC) ของฉนวนมอเตอร์ที่ได้รับความเสียหายเนื่องจากความร้อนและของขดลวดสเตเตอร์ที่ผิวฉนวนส่วนที่อยู่ภายในร่องสล็อตได้รับความเสียหาย เทียบกับ การทดสอบ PD, Tip-up แล DC-ramp พบว่า การทดสอบ PD สามารถตรวจพบปัญหาในกรณีที่มอเตอร์ได้รับความเสียหายเนื่องจากความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ร้อนและในกรณีที่ผิวฉนวนในส่วนที่อยู่ภายในร่องสล็อตของขดลวดสเตเตอร์ได้รับความเสียหายได้ แต่การทดสอบวัด PDC, Tip-up และ DC ramp ไม่สามารถตรวจพบความเสียหายในกรณีที่มอเตอร์ได้รับความเสียหายเนื่องจากความร้อนได้ แต่ถึงอย่างไรก็ตามการทดสอบวัด PDC สามารถตรวจพบปัญหาที่เกิดจากผิวฉนวนในส่วนที่อยู่ภายในร่องสล็อตของขดลวดสเตเตอร์ได้รับความเสียหายได้

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีความรู้และเข้าใจในระบบฉนวนของขดลวดสเตเตอร์ของเครื่องจักรกลหมุนแรงดันสูง
2. มีความรู้และเข้าใจในทฤษฎีของกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน
3. ทราบถึงผลของอุณหภูมิและความชื้นของสถาพแวดล้อมต่อการทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของเครื่องจักรกลหมุนแรงดันสูง
4. สามารถประเมินการเสื่อมสภาพของฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนแรงดันสูงได้ด้วยการวิเคราะห์กระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน พร้อมทั้งนำผลการประเมินสภาพฉนวนไปใช้ประกอบการวางแผนซ่อมบำรุงรักษาเครื่องจักรกลหมุนแรงดันสูง
5. สามารถคาดคะเนสาเหตุของการเสื่อมสภาพของฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนแรงดันสูงในเบื้องต้นได้ด้วยการวิเคราะห์กระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เครื่องจักรกลหมุนทุกชนิดมีส่วนประกอบหลัก 2 ส่วน คือ 1. สเตเตอร์ (stator) และ 2. โรเตอร์ (rotor) สเตเตอร์เป็นโครงสร้างส่วนที่อยู่นิ่งหรืออยู่กับที่ของเครื่องจักรกลหมุนและเป็นที่อยู่ของขดลวดสเตเตอร์ (stator winding) ซึ่งขดลวดสเตเตอร์จะมีลักษณะเป็นขดลวดตัวนำถูกหุ้มด้วยฉนวน ส่วนโรเตอร์เป็นโครงสร้างส่วนที่เคลื่อนที่ของเครื่องจักรกลหมุน ทั้งนี้ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาฉนวนของขดลวดสเตเตอร์ของเครื่องจักรกลหมุน ดังนั้น จึงได้กล่าวถึงรายละเอียดของเครื่องจักรกลหมุนในส่วนของสเตเตอร์เพียงเท่านั้น

2.1 สเตเตอร์

สเตเตอร์ทำมาจากแผ่นเหล็กลามิเนต (laminated steel) ที่ถูกอัดซ้อนกันเป็นชั้นๆ และแผ่นเหล็กแต่ละแผ่นจะถูกเคลือบฉนวนไว้ที่ผิวเพื่อป้องกันการเชื่อมถึงกันทางไฟฟ้าของแผ่นเหล็กแต่ละแผ่น ทั้งนี้ เพื่อเป็นการลดการสูญเสียที่เกิดจากกระแสเอ็ดดี้ (eddy current loss) ในแกนเหล็ก ที่สเตเตอร์นี้จะมีส่วนที่เป็นช่องว่างซึ่งถูกเรียกว่า ร่องสล็อต (slot) เพื่อเป็นที่อยู่ของขดลวดสเตเตอร์ ซึ่งขดลวดสเตเตอร์จะมีลักษณะเป็นลวดตัวนำที่ถูกขึ้นรูปสำหรับวางลงในร่องสล็อตถูกหุ้มด้วยฉนวนซึ่งรายละเอียดเกี่ยวกับฉนวนของขดลวดสเตเตอร์จะได้กล่าวต่อไปในภายหลัง

ขดลวดสเตเตอร์ถูกแบ่งออกเป็น 2 แบบ ตามลักษณะการวางตัวของขดลวดสเตเตอร์ในร่องสล็อต ได้แก่

1. การวางขดลวดสเตเตอร์แบบสุ่ม (Random-wound)
2. การวางขดลวดสเตเตอร์แบบมีรูปแบบ (Form-Wound)

2.1.1 การวางขดลวดสเตเตอร์แบบสุ่ม

การวางขดลวดสเตเตอร์แบบสุ่มนี้ จะใช้กับเครื่องจักรกลที่มีพิกัดกำลังต่ำ (หลายร้อยกิโลวัตต์) และถูกใช้งานที่ระดับแรงดันไม่เกิน 1000 โวลต์ การวางขดลวดสเตเตอร์แบบดังกล่าวนี้กลุ่มลวดตัวนำที่เคลือบฉนวนซึ่งทำหน้าที่เป็นขดลวดสเตเตอร์จะถูกวางบนร่องสล๊อตแบบสุ่ม นั่นคือ สามารถวางกลุ่มลวดตัวนำไว้บนร่องสล๊อตใดก็ได้โดยไม่คิดถึงผลของความต่างศักย์ต่อรอบ (volt per turn) ของขดลวด

2.1.2 การวางขดลวดสเตเตอร์แบบมีรูปแบบ

การวางขดลวดแบบมีรูปแบบนี้ ถูกใช้ในเครื่องจักรกลที่ใช้งานที่ระดับแรงดัน 1000 โวลต์ ขึ้นไป โดยการวางขดลวดแบบมีรูปแบบจะเป็นการวางขดลวดโดยคำนึงถึงความต่างศักย์ต่อรอบ (volt per turn) ของขดลวดให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม ซึ่งขดลวดสเตเตอร์ที่ใช้ในการวางขดลวดแบบมีรูปแบบนี้มีอยู่ด้วยกัน 2 แบบ คือ

1. ขดลวดสเตเตอร์แบบคอยล์ (coil type)
2. ขดลวดสเตเตอร์แบบแท่งโรเบล (Roebel bar type)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ก)

(ข)

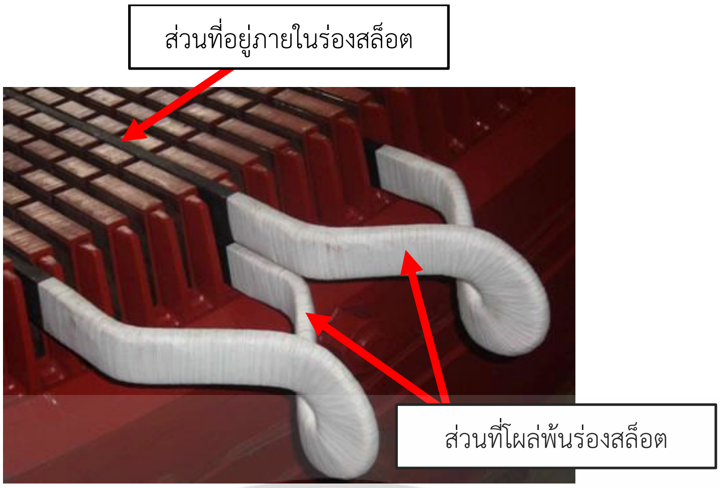
รูปที่ 2.1 ขดลวดสเตเตอร์ของเครื่องจักรกลหมุน ก) ขดลวดสเตเตอร์แบบคอยล์ ข) ขดลวดสเตเตอร์แบบแท่งโรเบล

2.2 ขดลวดสเตเตอร์

ขดลวดสเตเตอร์ถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นส่วนของขดลวดสเตเตอร์ที่อยู่ภายในร่องสล็อต (Slot Portion) และส่วนที่สองเป็นส่วนของขดลวดสเตเตอร์ที่โผล่พ้นร่องสล็อต (End winding Portion) ขดลวดสเตเตอร์จะมีลักษณะเป็นลวดตัวนำที่ถูกขึ้นรูปถูกหุ้มด้วยฉนวนจำพวกไมก้า (mica) ผสมเรซิน (resin) ซึ่งความหนาของฉนวนที่หุ้มนี้จะขึ้นอยู่กับพิกัดแรงดันใช้งานของขดลวดสเตเตอร์

รูปที่ 2.2 ขดลวดสเตเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 ขดลวดสเตเตอร์เมื่ออยู่ภายในร่องสล็อต

ที่มา: www.gef.com.my/rewind_high_voltage_motor.html

2.2.1 ฉนวนของขดลวดสเตเตอร์

ฉนวนถือได้ว่าเป็นหนึ่งในส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องจักรกลหมุน และเมื่อใช้งานเครื่องจักรกลหมุนเป็นเวลานานจะทำให้ฉนวนเกิดการเสื่อมสภาพ ซึ่งการเสื่อมสภาพของฉนวนนี้จะไปจำกัดอายุการใช้งานของเครื่องจักรกลหมุน ดังนั้น การซ่อมแซมและบำรุงรักษาฉนวนพร้อมทั้งการประเมินสภาพฉนวนจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง ระบบฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนในระยะเริ่มแรกนั้นจะเป็นระบบฉนวนแบบเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) ซึ่งใช้แอสฟัลต์ (Asphalt) และเชลแล็ค (Shellac) เป็นตัวประสานไมก้า ทำให้ระบบฉนวนประเภทนี้ถูกจำกัดการใช้งานที่อุณหภูมิไม่เกิน 130 องศาเซลเซียส แต่ในปัจจุบันระบบฉนวนเปลี่ยนเป็นแบบเทอร์โมเซ็ตติ้ง (Thermosetting) ซึ่งจะใช้โพลีเอสเตอร์ (Polyester) และอีพ็อกซี่เรซิน (Epoxy Resin) เป็นตัวประสานไมก้าทำให้ฉนวนมีความแข็งและทนอุณหภูมิแวดล้อมได้สูงกว่าถึง 155 องศาเซลเซียส

2.2.1.1 ระดับชั้นฉนวน (Insulation Class)

การแบ่งระดับชั้นฉนวนนั้นจะใช้อุณหภูมิแวดล้อมที่ฉนวนสามารถทนได้เป็นเกณฑ์ในการแบ่ง ฉนวนแต่ละชนิดจะสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิแวดล้อมเท่าไรนั้นทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัสดุที่นำมาทำเป็นฉนวน การแบ่งระดับชั้นฉนวนสามารถแบ่งได้ดังต่อไปนี้

1. ฉนวนระดับชั้น Y

ฉนวนระดับชั้นนี้จะใช้งานที่อุณหภูมิแวดล้อมไม่เกิน 90 องศาเซลเซียส วัสดุที่นำมาใช้ทำฉนวนประเภทนี้ ได้แก่ ผ้าฝ้าย, กระดาษเซลลูโลส (Cellulose Based Paper), เส้นใยไหมธรรมชาติที่ไม่มีการชุบน้ำมันวานิชหรือเรซินและรวมไปถึงยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนซ์

2. ฉนวนระดับชั้น A

ฉนวนระดับชั้นนี้จะใช้งานที่อุณหภูมิแวดล้อมไม่เกิน 105 องศาเซลเซียส วัสดุที่นำมาใช้ทำฉนวนประเภทนี้ ได้แก่ ผ้าฝ้าย, ผ้าไหม, กระดาษเซลลูโลส และ ลินิน โดยจะมีการนำวัสดุฉนวนไปชุบด้วยน้ำมันวานิชหรือเรซิน รวมทั้งอีนาเมลที่เป็นประเภทสารอินทรีย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ฉนวนระดับชั้น E

ฉนวนระดับชั้นนี้จะใช้งานที่อุณหภูมิแวดล้อมไม่เกิน 120 องศาเซลเซียส วัสดุที่นำมาใช้ทำฉนวนประเภทนี้ ได้แก่ ลิมาเนตพลาสติกหรือเทอร์โมพลาสติกร่วมกับไฟเบอร์เทอร์โมเซ็ตติ้ง, อีพ็อกซี่อีนาเมล หรือวานิช

4. ฉนวนระดับชั้น B

ฉนวนระดับชั้นนี้จะใช้งานที่อุณหภูมิแวดล้อมไม่เกิน 130 องศาเซลเซียส วัสดุที่นำมาใช้ทำฉนวนประเภทนี้ ได้แก่ ไมก้า, ไฟเบอร์กลาส และแก้วใยหิน (Asbestos) โดยจะใช้เชลแล็คแอสฟัลต์ และโพลีเอสเตอร์เรซินเป็นตัวยึดประสาน

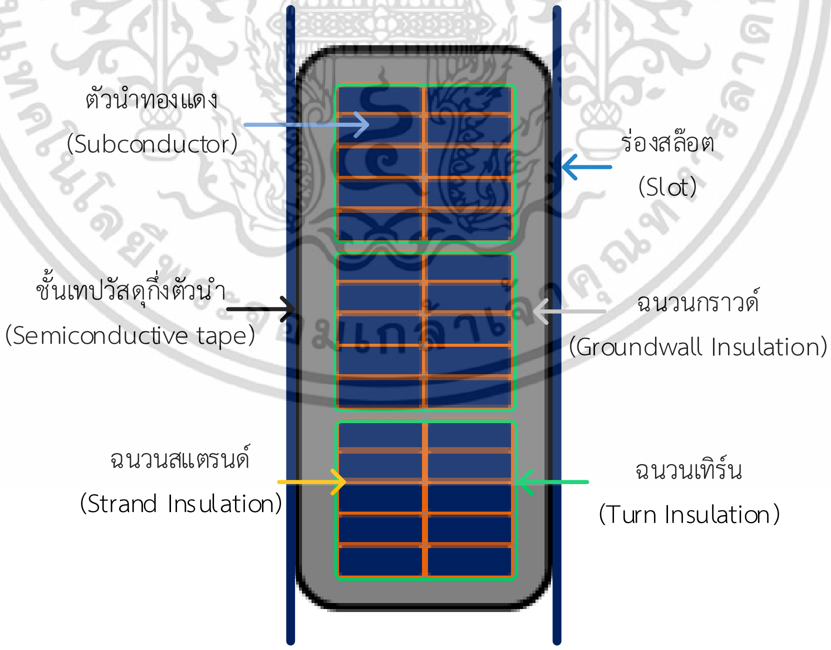
5) ฉนวนระดับชั้น F

ฉนวนระดับชั้นนี้จะใช้งานที่อุณหภูมิแวดล้อมไม่เกิน 155 องศาเซลเซียส วัสดุที่นำมาใช้ทำฉนวนประเภทนี้ ได้แก่ ไมก้า, ไฟเบอร์กลาส และแก้วใยหิน เช่นเดียวกันกับระดับชั้น B แต่วัสดุที่ใช้เป็นตัวยึดประสานจะใช้อีพ็อกซี่เรซิน ซึ่งฉนวนของขดลวดสเตเตอร์ของเครื่องจักรกลหมุนในยุคปัจจุบันจะเป็นฉนวนในระดับชั้นนี้

6) ฉนวนระดับชั้น H

ฉนวนระดับชั้นนี้จะใช้งานที่อุณหภูมิแวดล้อมไม่เกิน 180 องศาเซลเซียส วัสดุที่นำมาใช้ทำฉนวนประเภทนี้ ได้แก่ ไมก้า, ไฟเบอร์กลาส และแก้วใยหิน เช่นเดียวกันกับระดับชั้น B แต่วัสดุยึดประสานจะใช้ซิลิโคนเรซิน หรือยางซิลิโคน

2.2.1.2 โครงสร้างของระบบฉนวน



รูปที่ 2.4 โครงสร้างระบบฉนวนของขดลวดสเตเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไประบบฉนวนของขดลวดสเตเตอร์ จะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนดังนี้ [8]

1. ฉนวนแสตรนด์ (Strand Insulation)

ฉนวนแสตรนด์เป็นฉนวนส่วนที่อยู่ติดกับตัวนำทองแดง (subconductors) ในขดลวด ฉนวนส่วนนี้เป็นส่วนที่ป้องกันไม่ให้เกิดการลัดวงจรระหว่างตัวนำย่อยภายในขดลวด และเนื่องจากฉนวนส่วนดังกล่าวเป็นส่วนที่อยู่ติดกับตัวนำ ดังนั้น จึงต้องมีค่าความนำความร้อน (thermal conductivity) ที่สูงเพื่อที่จะสามารถระบายความร้อนให้กับตัวนำได้ดี ฉนวนในส่วนนี้ ได้แก่ ฉนวนจำพวกไมกา หรืออาจเป็นสารฉนวนที่เคลือบอยู่ที่ผิวของลวดตัวนำ

2. ฉนวนเทิร์น (Turn Insulation)

ฉนวนเทิร์นเป็นฉนวนส่วนที่อยู่ถัดจากฉนวนแสตรนด์ ซึ่งจะทำหน้าที่ป้องกันการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด โดยส่วนมากฉนวนชนิดนี้จะใช้วัสดุชนิดเดียวกับฉนวนกราวด์

3. ฉนวนกราวด์ (Ground Wall Insulation)

ฉนวนกราวด์เป็นฉนวนส่วนที่อยู่ถัดจากฉนวนเทิร์น ซึ่งจะทำหน้าที่ป้องกันการลัดวงจรระหว่างขดลวดและกราวด์ที่สเตเตอร์ ฉนวนในส่วนนี้จะต้องมีค่าความต้านทานทางความร้อน (thermal resistance) ที่ต่ำ เพื่อที่จะทำให้สามารถระบายความร้อนจากตัวนำไปยังตัวระบายความร้อนที่ติดอยู่ที่สเตเตอร์ได้ดี และฉนวนส่วนนี้ยังทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้ขดลวดเกิดการสั่นสะเทือนเนื่องจากแรงจากสนามแม่เหล็กด้วยเช่นกัน วัสดุที่นำมาใช้ทำฉนวนประเภทนี้มีหลายชนิดขึ้นอยู่กับลักษณะการนำไปใช้งาน ดังนี้

3.1 ไมก้าเทปสำหรับกระบวนการแว็คคัมเพรสเชอร์อิมเพร็กเนชัน (Vacuum Pressure Impregnation, VPI)

ฉนวนไมก้าเทปชนิดนี้จะไม่มีเรซินเคลือบที่ผิว โดยจะใช้พันขดลวดสเตเตอร์บริเวณที่อยู่ในร่องสล็อต และ บริเวณโผล่พ้นร่องสล็อตเพื่อที่จะนำไปผ่านกระบวนการแว็คคัมเพรสเชอร์อิมเพร็กเนชัน

3.2 ไมก้าเทปผสมเรซินสำหรับกระบวนการเรซินริช (Resin Rich, RR)

ฉนวนไมก้าเทปชนิดนี้จะมีส่วนผสมของเรซินอยู่ โดยจะใช้พันขดลวดสเตเตอร์บริเวณที่อยู่ภายในร่องสล็อต ซึ่งขดลวดสเตเตอร์ที่พันด้วยเทปชนิดนี้จะถูกนำไปผ่านกระบวนการเรซินริช

3.3 ไมก้าเทปแบบผ่านการอบเรซินสำหรับ

ฉนวนไมก้าเทปชนิดนี้จะผ่านการอบเรซิน โดยจะใช้พันสำหรับขดลวดสเตเตอร์บริเวณโผล่พ้นร่องสล็อต และเนื่องจากบริเวณดังกล่าวไม่สามารถเข้าสู่กระบวนการเรซินริชได้ ดังนั้นจึงต้องใช้ไมก้าแบบผ่านการอบเรซิน

3.4 โคโรน่าเทป (Conductive tape)

ฉนวนชนิดนี้จะใช้พันขดลวดสเตเตอร์บริเวณที่อยู่ภายในร่องสล็อต โดยฉนวนชนิดนี้จะเป็นฉนวนที่มีค่าความต้านทานต่ำเพื่อที่จะทำให้ศักย์ของโคโรน่าเทปมีค่าใกล้เคียงกับศักย์ของแกนสเตเตอร์ ดังนั้น จึงทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ตกคร่อมช่องว่างระหว่างผิวของฉนวนและแกนสเตเตอร์มีค่าต่ำจึงไม่ทำให้เกิดการดิสชาร์จบางส่วนในบริเวณดังกล่าว

3.5 เซมิคอนดักทีฟเทป (Semi-conductive tape)

ฉนวนชนิดนี้จะใช้พันของขดลวดสเตเตอร์บริเวณโผล่พ้นร่องสล็อต โดยทำหน้าที่ช่วยลดความเครียดสนามไฟฟ้าและกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าให้มีความสม่ำเสมอ เนื่องจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

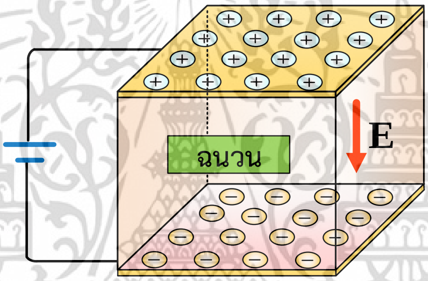
บริเวณดังกล่าวเป็นบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ดังนั้น จึงทำให้อากาศบริเวณดังกล่าวมีความเสี่ยงต่อการเกิดการดิสชาร์จบางส่วนได้

3.6 โพลีเอสเตอร์เทป (Polyester heat shrinkable tape)

ฉนวนชนิดนี้จะใช้พันขดลวดสเตเตอร์บริเวณพันร่องสล็อต ซึ่งเป็นบริเวณที่มีความโค้งงอ โดยเป็นฉนวนที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับขดลวดบริเวณดังกล่าว

2.3 กระบวนการโพลาไรซ์เซชันและกระบวนการดีโพลาไรซ์เซชันของฉนวน (Polarization and Depolarization Process of Dielectric)

เมื่อทำการป้อนแรงดันกระแสตรงให้กับ ฉนวน หรือ ไดอิเล็กตริก ดังแสดงในรูปที่ 2.5 โดยที่ขนาดของแรงดันไม่สามารถทำให้ฉนวนเกิดการเบรกดาวน์ได้ โมเลกุลของฉนวนจะเกิดการตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าจากภายนอกที่มากระทำ ซึ่งจะทำให้เกิด “**กระบวนการโพลาไรซ์ (Polarization process)**” ขึ้นภายในเนื้อฉนวน



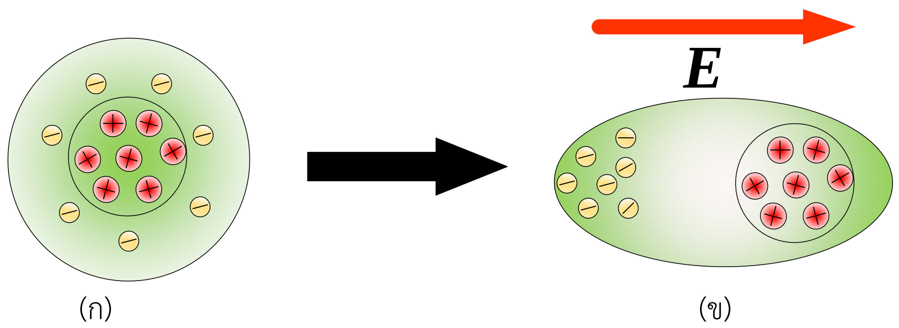
รูปที่ 2.5 การป้อนแรงดันให้กับฉนวน

กระบวนการโพลาไรซ์ที่เกิดขึ้นภายในฉนวนถูกแบ่งออกเป็น 5 ประเภท ดังนี้ [9]

2.3.1 อิเล็กทรอนิกส์โพลาไรซ์เซชัน (Electronic Polarization) หรือ อ็อปติคอลโพลาไรซ์เซชัน (Optical Polarization)

อิเล็กทรอนิกส์โพลาไรซ์เซชันเป็นกระบวนการโพลาไรซ์ในระดับอะตอมของฉนวนซึ่งมีรายละเอียด ดังนี้ เมื่อฉนวนได้รับแรงกระทำจากสนามไฟฟ้าภายนอก กลุ่มหมอกอิเล็กตรอนที่อยู่รอบๆ นิวเคลียสของอะตอมของฉนวนจะเกิดการเคลื่อนที่เพื่อจัดเรียงตัวใหม่ตามแนวสนามไฟฟ้าที่มากระทำ ซึ่งการจัดเรียงตัวใหม่ของกลุ่มหมอกอิเล็กตรอนจะทำให้อะตอมของฉนวนเกิดไดโพล (dipole) หรือเกิดการมีขั้วขึ้น การเคลื่อนที่ของกลุ่มหมอกอิเล็กตรอนเพื่อจัดเรียงตัวใหม่ภายใต้สนามไฟฟ้านี้ถูกเรียกว่า อิเล็กทรอนิกส์โพลาไรซ์เซชัน แต่อย่างไรก็ตามการเคลื่อนที่ของกลุ่มหมอกอิเล็กตรอนดังกล่าวจะมีขนาดเล็กมากเพราะแรงจากสนามไฟฟ้าภายนอกที่กระทำต่อกลุ่มหมอกอิเล็กตรอนและนิวเคลียสมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับแรงยึดเหนี่ยวภายในอะตอมที่นิวเคลียสกระทำต่อกลุ่มหมอกอิเล็กตรอน อิเล็กทรอนิกส์โพลาไรซ์เซชันนี้เป็นการโพลาไรซ์ที่ไม่ทำให้เกิดการสูญเสียทางไฟฟ้า และเป็นกระบวนการโพลาไรซ์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ กระบวนการโพลาไรซ์ประเภทนี้จะเกิดขึ้นภายในเวลาประมาณ 10^{-14} วินาที

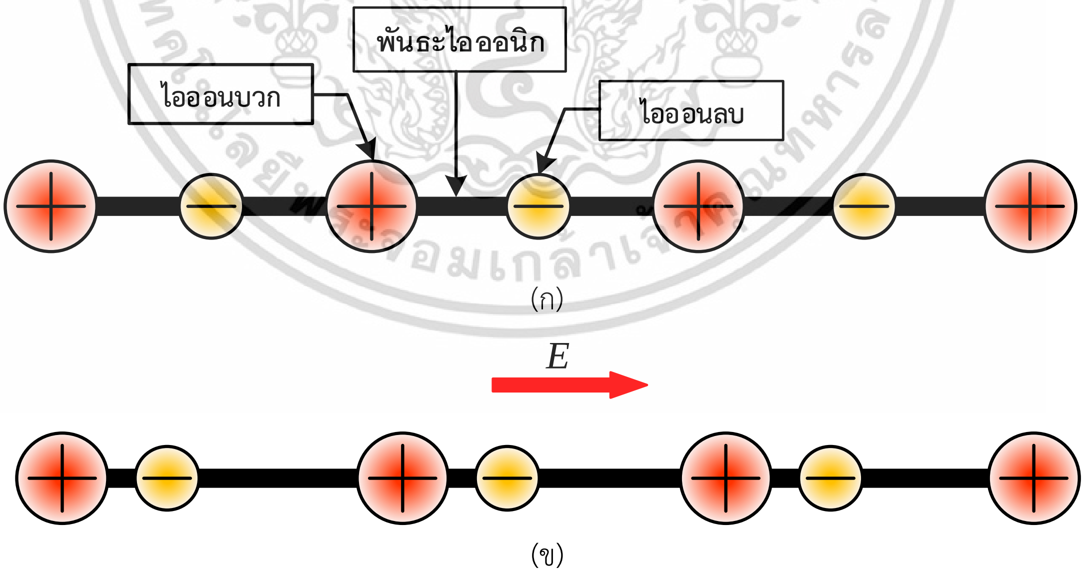
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 อิเล็กทรอนิกส์โพลาไรซ์เซชัน (ก) อะตอมของฉนวนเมื่อไม่มีสนามไฟฟ้ามากระทำ (ข) อะตอมของฉนวนเมื่อมีสนามไฟฟ้ามากระทำ (อะตอมของฉนวนเกิดไดโพล)

2.3.2 ไอออนิกโพลาไรซ์เซชัน (Ionic Polarization) หรือ อะตอมมิคโพลาไรซ์เซชัน (Atomic Polarization)

ไอออนิกโพลาไรซ์เซชันเป็นกระบวนการโพลาไรซ์ที่เกิดขึ้นกับวัสดุที่เป็นผลึกไอออนิก เช่น เกลือ (NaCl) โปรแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) เป็นต้น ซึ่งไอออนิกโพลาไรซ์เซชันมีกระบวนการเกิด ดังนี้ เมื่อฉนวนได้รับแรงกระทำจากสนามไฟฟ้าภายนอก ไอออนบวกและไอออนลบของพันธะไอออนิกจะเคลื่อนที่ โดยที่ไอออนบวกจะเคลื่อนที่ตามทิศทางสนามไฟฟ้าและไอออนลบจะเคลื่อนที่ตรงข้ามกับทิศทางสนามไฟฟ้า ซึ่งการเคลื่อนที่ของไอออนบวกและไอออนลบนี้จะทำให้ไดโพลที่เกิดขึ้นภายในผลึกไอออนิกของฉนวนเกิดความไม่สมดุล ดังนั้น จึงทำให้เกิดไดโพลลัพธ์ขึ้นภายในวัสดุฉนวน การเคลื่อนที่ของไอออนบวกและไอออนลบดังกล่าวจะทำให้เกิดการไม่สมดุลของไดโพลภายในฉนวนซึ่งกระบวนการดังกล่าวถูกเรียกว่า ไอออนิกโพลาไรซ์เซชัน

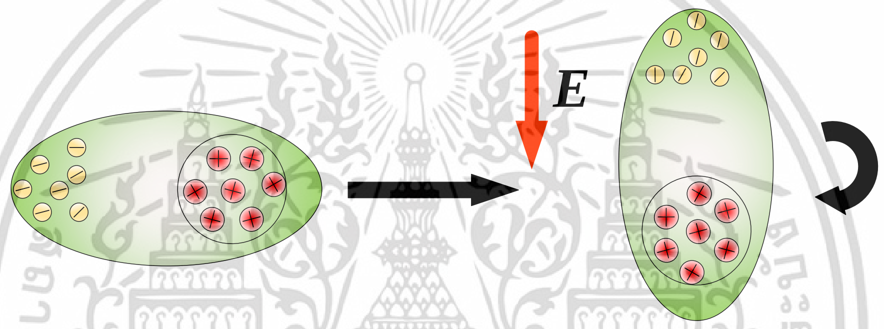


รูปที่ 2.7 อิเล็กทรอนิกส์โพลาไรซ์เซชัน (ก) วัสดุฉนวนเมื่อไม่มีสนามไฟฟ้ามากระทำ (ข) วัสดุฉนวนเมื่อมีสนามไฟฟ้ามากระทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

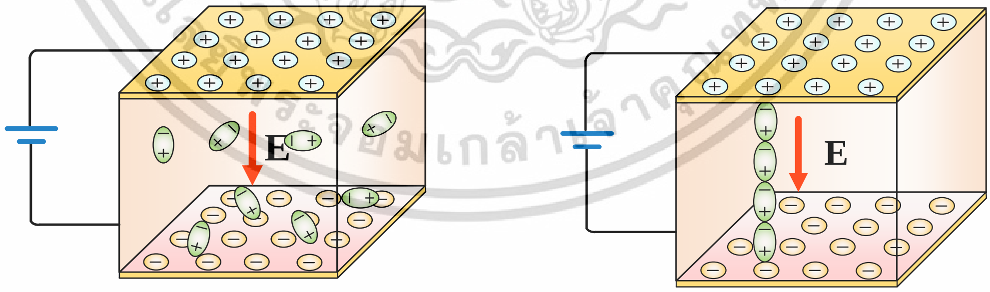
2.3.3. ออเรนเทชันโพลาไรซ์เซชัน (Orientation Polarization) หรือ ไดโพลาร์โพลาไรซ์เซชัน (Dipolar Polarization)

ออเรนเทชันโพลาไรซ์เซชันเป็นการโพลาไรซ์ที่เกิดขึ้นกับไดอิเล็กตริกที่มีโมเลกุลเป็นแบบเชิงขั้วถาวร (permanent dipole) เช่น น้ำ กรดไฮโดรคลอลิก เป็นต้น โดยปกติเมื่อไม่มีสนามไฟฟ้าจากภายนอกมากระทำ โมเลกุลเชิงขั้วถาวรภายในไดอิเล็กตริกจะมีการจัดเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ นั่นคือ โมเลกุลจะหมุนและกระจัดกระจายอย่างอิสระ ซึ่งการจัดเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบของโมเลกุลเชิงขั้วถาวรนี้จะทำให้สนามไฟฟ้าลัพธ์ภายในไดอิเล็กตริกมีค่าเท่ากับศูนย์ แต่เมื่อไดอิเล็กตริกดังกล่าวอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า โมเลกุลของไดอิเล็กตริกจะเกิดการหมุนและมีการเรียงตัวตามแนวสนามไฟฟ้าที่มากระทำ ซึ่งการเรียงตัวของโมเลกุลเพื่อตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าที่มากระทำนี้จะทำให้เกิดออเรนเทชันโพลาไรซ์เซชันขึ้น ซึ่งการโพลาไรซ์เซชันประเภทนี้จะใช้เวลาในการเกิดนานกว่าอิเล็กทรอนิกส์โพลาไรซ์เซชันและอะตอมมิคโพลาไรซ์เซชัน



(ก) (ข)

รูปที่ 2.8 ออเรนเทชันโพลาไรซ์เซชัน (ก) โมเลกุลของฉนวนเมื่อไม่มีสนามไฟฟ้ามากระทำ (ข) โมเลกุลฉนวนเกิดการหมุนเพื่อเรียงตัวตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าที่มากระทำ



(ก) (ข)

รูปที่ 2.9 ออเรนเทชันโพลาไรซ์เซชันภายในเนื้อฉนวน (ก) โมเลกุลภายในเนื้อฉนวนเรียงตัวแบบกระจัดกระจายเมื่อไม่มีสนามไฟฟ้ามากระทำ (ข) โมเลกุลภายในเนื้อฉนวนเรียงตัวตามแนวสนามไฟฟ้าที่มากระทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.4 ฮอปปิงโพลาไรซ์เซชัน (Hopping Polarization)

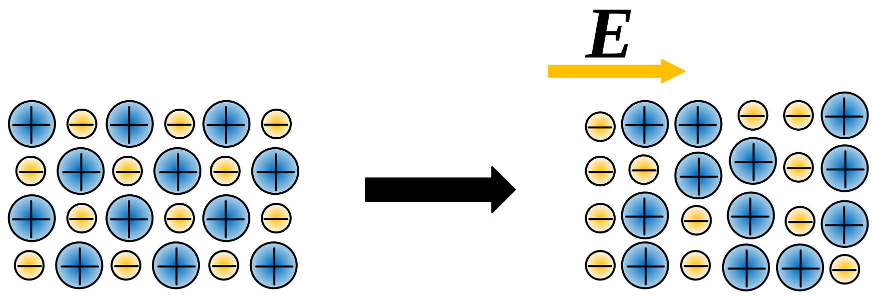
ฮอปปิงโพลาไรซ์เซชันเป็นกระบวนการโพลาไรซ์ที่อธิบายปรากฏการณ์ที่ประจุภายในฉนวน (localized charges) เช่น อิเล็กตรอน และ โฮล (hole) สามารถกระโดดจากตำแหน่งหนึ่งไปยังอีกตำแหน่งหนึ่ง ซึ่งจะทำให้เกิดพฤติกรรมการโพลาไรซ์ภายในฉนวนได้ ฮอปปิงโพลาไรซ์เซชันมีกระบวนการเกิดดังนี้ เมื่อฉนวนอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า อิเล็กตรอนและโฮลภายในฉนวนจะเกิดพฤติกรรมการกระโดดจากอีกตำแหน่งหนึ่งไปยังอีกตำแหน่งหนึ่งโดยที่พฤติกรรมการกระโดดนี้จะเกิดในระยะเวลาสั้น จากนั้นประจุดังกล่าวจะค้างอยู่ในตำแหน่งใหม่ที่กระโดดไป ซึ่งพฤติกรรมการย้ายตำแหน่งของประจุภายในฉนวนจะทำให้เกิดการโพลาไรซ์ภายในเนื้อฉนวน ตัวอย่างฮอปปิงโพลาไรซ์เซชัน เช่น อิเล็กตรอนสามารถกระโดดจากตำแหน่งเดิมของมันไปยังอีกตำแหน่งหนึ่ง ซึ่งการกระโดดของอิเล็กตรอนนี้จะทำให้ตำแหน่งเดิมกลายเป็น โฮล หรือ แสดงพฤติกรรมเป็นประจุบวก และทำให้ตำแหน่งใหม่ที่อิเล็กตรอนกระโดดไปแสดงพฤติกรรมเป็นประจุลบ จากปรากฏการณ์ที่ได้อธิบายข้างต้นสามารถทำให้เกิดขั้วหรือเกิดการโพลาไรซ์ภายฉนวนได้

รูปที่ 2.10 ฮอปปิงโพลาไรซ์เซชัน

2.3.5 สเปซชาร์จโพลาไรซ์เซชัน (Space Charge Polarization) หรือ อินเตอร์เฟเชียลโพลาไรซ์เซชัน (Interfacial Polarization)

สเปซชาร์จโพลาไรซ์เซชันเป็นกระบวนการโพลาไรซ์ที่มีกระบวนการเกิด ดังนี้ เมื่อฉนวนอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า อนุภาคประจุบวกและอนุภาคประจุลบที่สามารถเคลื่อนที่ได้ที่อยู่ภายในเนื้อฉนวนจะเคลื่อนที่แยกออกจากกัน และอนุภาคประจุดังกล่าวจะเคลื่อนที่มาสะสมกันตรงรอยต่อของฉนวน 2 ชนิดที่มีค่าเปอร์มิตติวิตี้ (permittivity) แตกต่างกัน ซึ่งจะทำให้เกิดการสะสมของประจุบวกหรือประจุลบที่รอยต่อของฉนวนดังกล่าว การเคลื่อนที่ของประจุกระทั่งทำให้เกิดการสะสมของประจุที่รอยต่อระหว่างฉนวน 2 ชนิด ถูกเรียกว่า สเปซชาร์จโพลาไรซ์เซชัน ซึ่งสเปซชาร์จโพลาไรซ์เซชันนี้จะทำให้การกระจายของสนามไฟฟ้าภายในเนื้อฉนวนผิดเพี้ยนไป

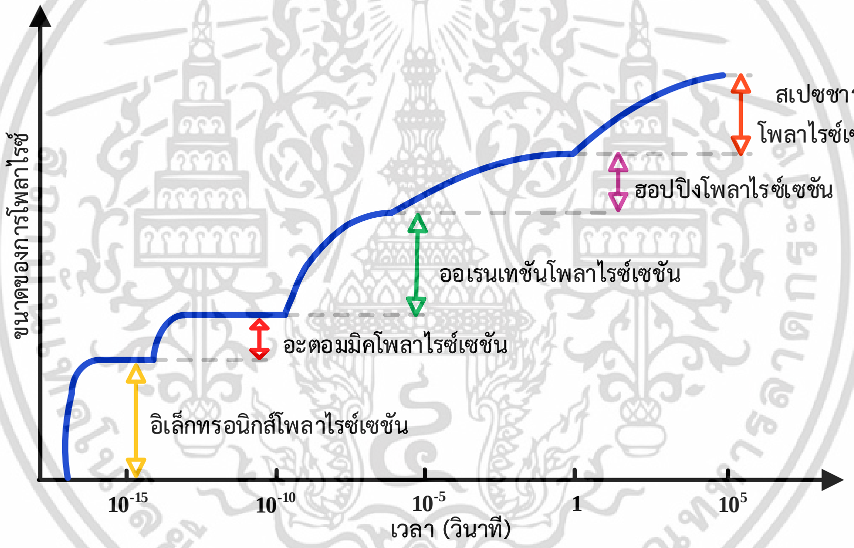
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) (ข)

รูปที่ 2.11 สเปซชาร์จโพลาไรซ์เซชัน (ก) ประจุภายในเนื้อฉนวนเมื่อไม่มีสนามไฟฟ้ามากระทำ (ข) ประจุภายในเนื้อฉนวนเกิดการเคลื่อนที่เมื่อมีสนามไฟฟ้ามากระทำ

ระยะเวลาที่ใช้ในการเกิดกระบวนการโพลาไรซ์ประเภทต่างๆ และขนาดของการโพลาไรซ์แสดงได้ดังรูปที่ 2.12



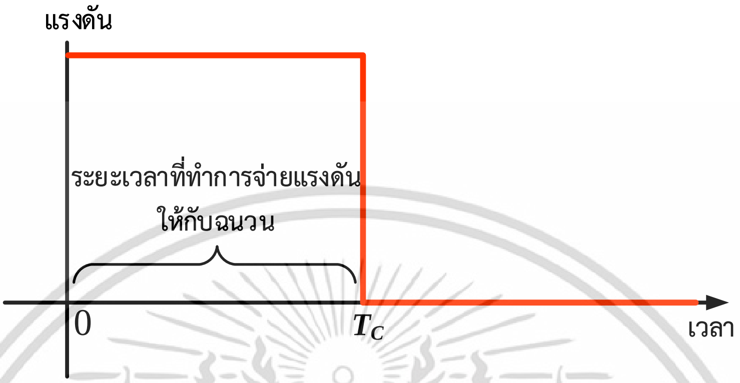
รูปที่ 2.12 ระยะเวลาที่ใช้ในการเกิดกระบวนการโพลาไรซ์ประเภทต่างๆ

2.4 กระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน (Polarization and Depolarization current)

ฉนวนของขดลวดสเตเตอร์ของเครื่องจักรกลหมุนประกอบด้วยไมก้าผสมเรซินเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้น จึงทำให้ฉนวนของขดลวดสเตเตอร์ประกอบด้วยรอยต่อของฉนวนเป็นจำนวนมาก ซึ่งรอยต่อดังกล่าวจะเกิดขึ้นระหว่างวัสดุฉนวนไมก้าและเรซิน และด้วยเหตุนี้ เมื่อทำการป้อนแรงดันกระแสตรงให้กับฉนวน กระบวนการโพลาไรซ์ที่เกิดขึ้นภายในฉนวนจึงเป็นการโพลาไรซ์ประเภทอินเตอร์เฟเชียลโพลาไรซ์เซชันเป็นหลัก และในปัจจุบัน เนื่องจากไม่สามารถวัดขนาดการโพลาไรซ์ภายในฉนวนได้โดยตรง จึงหาขนาดของการโพลาไรซ์ที่เกิดขึ้นภายในฉนวนโดยสังเกตจากขนาดของกระแสที่ไหลผ่านฉนวนขณะที่ฉนวนเกิดการโพลาไรซ์ จากรูปที่ 2.13 เมื่อพิจารณาการป้อนแรงดันกระแสตรงให้กับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฉนวนเป็นเวลานานเพียงพอที่จะทำให้ฉนวนเกิดการโพลาไรซ์และขนาดของแรงดันที่ป้อนไม่เพียงพอที่จะทำให้ฉนวนเกิดการเบรกดาวน์ ฉนวนจะเกิดการโพลาไรซ์เพื่อตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าจากภายนอกที่มากระทำ และเมื่อฉนวนเกิดการโพลาไรซ์จะทำให้เกิดกระแสไหลผ่านเนื้อฉนวน ซึ่งกระแสที่เกิดขึ้นในขณะที่ทำการป้อนแรงดันให้กับฉนวนนี้ คือ กระแสโพลาไรซ์เซชัน (polarization current, i_{pol})

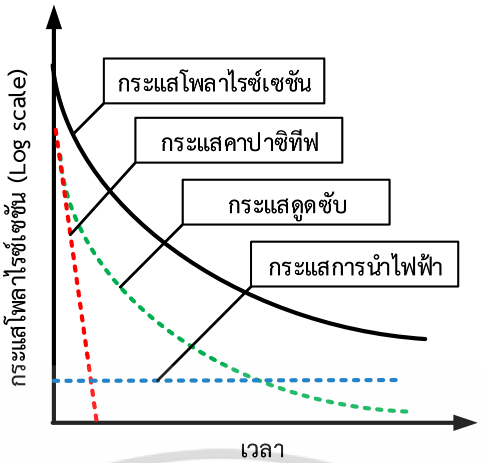


รูปที่ 2.13 การจ่ายแรงดันรูปขั้นให้กับฉนวน

2.4.1 กระแสโพลาไรซ์เซชัน (Polarization current)

กระแสโพลาไรซ์เซชันในทางทฤษฎีจะมีองค์ประกอบ 3 ส่วน คือ 1. กระแสคาปาซิทีฟ (capacitive current, i_C) ซึ่งเป็นกระแสที่เกิดขึ้นและจะลดลงในทันทีทันใด 2. กระแสแอปซอปชัน (absorption current, i_{ab}) ซึ่งเป็นนกระแสที่เกิดขึ้นจากกระบวนการโพลาไรซ์ภายในเนื้อฉนวน และ 3. กระแสการนำไฟฟ้า (conductance current, i_{con}) ซึ่งเป็นกระแสที่เกิดจากค่าความนำไฟฟ้าของวัสดุและมีอยู่ในวัสดุทุกชนิด กระแสโพลาไรซ์เซชันในทางทฤษฎีและองค์ประกอบของกระแสแสดงได้ดังรูปที่ 2.14 แต่ในทางปฏิบัติกระแสโพลาไรซ์เซชันที่วัดได้จะมีกระแสรั่วไหล (leakage current, i_l) รวมอยู่ด้วย ซึ่งกระแสรั่วไหลนี้เกิดขึ้นจากสิ่งปนเปื้อนที่ผิวฉนวนหรือเกิดจากความสกปรกของสภาพแวดล้อมขณะทำการทดสอบ โดยจะพิจารณากระแสการนำไฟฟ้าและกระแสรั่วไหลเป็นกระแสนำไฟฟ้าที่วัดได้ในทางปฏิบัติ (practical conduction current, $i_{con(practical)}$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 องค์ประกอบของกระแสโพลาไรซ์เซชัน

$$i_{pol(parctical)} = i_c + i_{ab} + i_{con} + i_l \tag{1}$$

$$i_{con(parctical)} = i_{con} + i_l \tag{2}$$

กระแสโพลาไรซ์เซชันในทางทฤษฎีสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (3) [10]

$$i_{pol}(t) = C_0 V_0 [\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} + \varepsilon_\infty \delta(t) + f(t)] \tag{3}$$

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_∞ คือ ค่าเปอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์ (relative permittivity) ที่เวลาเริ่มต้น (ที่เวลา 0 วินาที)
$\delta(t)$ คือ ฟังก์ชันเดลต้า (delta function) ที่เกิดขึ้นจากการจ่ายแรงดันรูปขั้นแบบทันทีทันใดให้กับวัตถุทดสอบที่เวลาเริ่มต้น
$f(t)$ คือ ฟังก์ชันผลตอบสนองของไดอิเล็กตริก (dielectric response function)

จากสมการที่ (3) สามารถแบ่งกระแสโพลาร์ไรซ์เซชันออกเป็น 3 เทอม เรียงลำดับจากซ้ายไปขวาดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทอมที่ 1 คือ เทอมของ $\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0}$ ซึ่งเป็นเทอมที่มีความสัมพันธ์กับค่าความนำไฟฟ้าภายในเนื้อฉนวนและเป็นเทอมที่ไม่ขึ้นอยู่กับกระบวนการโพลาไรซ์ของฉนวน เทอมที่ 1 นี้ จะปรากฏในขณะที่ทำการจ่ายแรงดันให้กับฉนวนเท่านั้น ซึ่งเทอมที่ 1 จะเป็นเทอมที่มีความสัมพันธ์กับกระแสการนำไฟฟ้าของฉนวน

เทอมที่ 2 คือ เทอมของ $\varepsilon_\infty \delta(t)$ ซึ่งเป็นเทอมที่ไม่สามารถทำการบันทึกได้ในทางปฏิบัติเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของขนาดกระแสอย่างรวดเร็ว ซึ่งเทอมที่ 2 นี้ จะเกิดจากกระบวนการโพลาไรซ์ที่ใช้ระยะเวลาในการเกิดรวดเร็ว ดังเช่น อิเล็กทรอนิกส์โพลาไรซ์เซชัน เป็นต้น

เทอมที่ 3 คือ เทอมของ $f(t)$ เป็นเทอมที่มีความสัมพันธ์กับกระบวนการโพลาไรซ์ทั้งหมดที่เกิดขึ้นภายในเนื้อฉนวนยกเว้นกระบวนการโพลาไรซ์ที่ใช้ระยะเวลาในการเกิดรวดเร็วดังที่กล่าวไปในเทอมที่ 2 ซึ่งเทอมที่ 3 นี้ จะเป็นเทอมที่มีความสัมพันธ์กับกระแสคาปาซิทีฟและกระแสแอปซอปชัน

2.4.2 กระแสดีโพลาไรซ์เซชัน (Depolarization current)

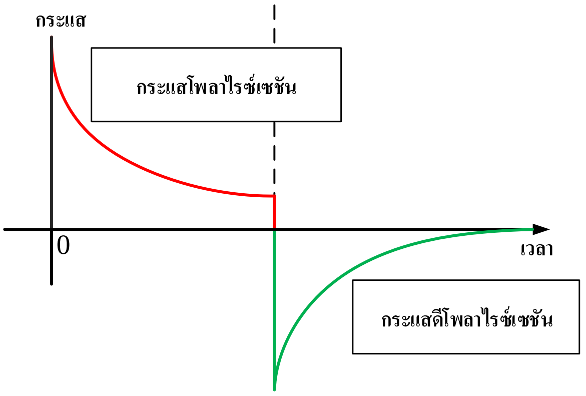
จากข้อ 2.4.1 เมื่อหยุดจ่ายแรงดันให้กับฉนวนและทำการลัดวงจรฉนวนเพื่อให้ฉนวนเกิดการคายประจุลงสู่กราวด์ โมเลกุลและประจุไฟฟ้าภายในเนื้อฉนวนจะเกิดการจัดเรียงตัวเข้าสู่สภาวะปกติก่อนที่จะมีสนามไฟฟ้ามากระทำ กระแสคายประจุ (Discharge current) ที่วัดได้ขณะทำการลัดวงจรให้กับฉนวนจะถูกเรียกว่า กระแสดีโพลาไรซ์เซชัน (depolarization current, i_{depol}) กระแสดีโพลาไรซ์เซชันจะมีองค์ประกอบ 2 ส่วน คือ 1. กระแสคาปาซิทีฟดิสชาร์จ (capacitive discharge current, $i_{c(discharge)}$) ซึ่งเป็นกระแสที่เกิดขึ้นและลงลงอย่างทันทีทันใดและจะมีคุณลักษณะเหมือนกับกระแสคาปาซิทีฟของกระแสโพลาไรซ์เซชันแต่มีขั้วตรงข้ามกัน และ 2. กระแสแอปซอปชันดิสชาร์จ (absorption discharge current, $i_{ab(discharge)}$) ซึ่งเป็นกระแสที่มีค่าสูงในช่วงแรกและเมื่อทำการคายประจุให้กับฉนวนต่อไปเรื่อยๆ กระแสดังกล่าวจะมีค่าลดลง กระแสแอปซอปชันดิสชาร์จนี้จะมีคุณลักษณะเหมือนกับกระแสแอปซอปชันของกระแสโพลาไรซ์เซชันแต่จะมีขั้วตรงข้ามกัน สำหรับกระแสดีโพลาไรซ์เซชันจะไม่มีองค์ประกอบของกระแสการนำไฟฟ้าและกระแสรั่วไหลรวมอยู่ด้วยเนื่องจากทำการหยุดป้อนแรงดันให้กับฉนวนแล้ว กระแสดีโพลาไรซ์เซชันเขียนได้ดังสมการที่ (5) และกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันที่วัดได้แสดงดังรูปที่ 2.15

$$i_{depol} = i_{c(discharge)} + i_{ab(discharge)} \tag{4}$$

$$i_{depol}(t) = -C_0 V_0 \left[f(t) - f(t + T_C) \right] \tag{5}$$

T_C คือ ระยะเวลาที่ทำการจ่ายแรงดันให้กับวัตถุทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 กระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน

เมื่อพิจารณาสมการที่ (1) และ (4) พบว่า สามารถหากระแสการนำไฟฟ้าในทางปฏิบัติได้โดยการนำกระแสดีโพลาไรซ์เซชันที่วัดได้มาลบออกจากกระแสโพลาไรซ์เซชันที่วัดได้ในทางปฏิบัติ

$$i_{con(practical)} = i_{pol(practical)} - i_{depol} \tag{6}$$

$$i_{con(practical)} = i_c + i_{ab} + i_{con} + i_l - i_{c(discharge)} - i_{ab(discharge)} \tag{7}$$

$$i_{con(practical)} = i_{con} + i_l \tag{8}$$

2.5 ดัชนีการมีขั้ว (Polarization Index, P.I.)

ดัชนีการมีขั้วเป็นตัวแปรหนึ่งที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรมในการนำมาใช้ประเมินคุณภาพฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนแรงดันสูง ทั้งนี้ มาตรฐาน [11] ได้นิยามดัชนีการมีขั้วของฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนแรงดันสูงไว้ว่า ดัชนีการมีขั้วคืออัตราส่วนของความต้านทานฉนวนที่นาทีที่ 10 (IR_{10}) ต่อ ความต้านทานฉนวนที่นาทีที่ 1 (IR_1) และมาตรฐาน [11] ได้แนะนำค่า P.I. ที่ต่ำที่สุดที่สามารถยอมรับได้สำหรับฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนไว้ที่ 2

$$P.I. = \frac{IR_{10}}{IR_1} \tag{9}$$

ซึ่งความต้านทานฉนวนที่นาทีที่ 10 ได้มาจากอัตราส่วนของแรงดันทดสอบ (V_{test}) ต่อกระแสโพลาไรซ์เซชันที่วัดได้ที่นาทีที่ 10 ($I_{pol(10)}$) และความต้านทานฉนวนที่นาทีที่ 1 ได้มาจากอัตราส่วนของแรงดันทดสอบต่อกระแสโพลาไรซ์เซชันที่วัดได้ที่นาทีที่ 1 ($I_{pol(1)}$)

$$IR_{10} = \frac{V_{test}}{I_{pol(10)}} \tag{10}$$

$$IR_1 = \frac{V_{test}}{I_{pol(1)}} \tag{11}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
การทดสอบ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการวิเคราะห์ฉนวนของมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงโดยวิธีการวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันพร้อมทั้งศึกษาผลของอุณหภูมิและความชื้นของสภาพแวดล้อมต่อการทดสอบ โดยวิทยานิพนธ์นี้ได้แบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ส่วน คือ 1. การทดสอบในห้องปฏิบัติการ และ 2. การทดสอบภาคสนาม สำหรับการทดสอบในห้องปฏิบัติการได้ทำการทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์ในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิและความชื้นต่างกันเพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิและความชื้นของสภาพแวดล้อมต่อการทดสอบและทำการจำลองกรณีศึกษาเพื่อเป็นตัวอย่างในการใช้กระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันในการวิเคราะห์ฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนแรงดันสูง และสำหรับการทดสอบในภาคสนาม ได้ทำการทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของแท่งสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและทำการทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของมอเตอร์ก่อนและหลังกระบวนการพันขดลวดใหม่ พร้อมทั้งทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของมอเตอร์ตามแผนการซ่อมบำรุงรักษา เพื่อแสดงให้เห็นถึงความสามารถของการใช้กระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันในการวิเคราะห์ฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนแรงดันสูง ทั้งนี้ รายละเอียดของการทดสอบในแต่ละส่วนจะได้กล่าวถึงในภายหลัง

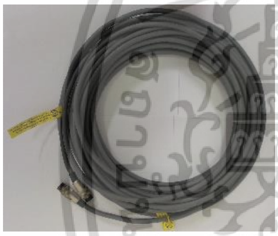
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1 เครื่องวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน (PDC Analyser)

สำหรับการทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันทั้งในห้องปฏิบัติการและในภาคสนาม ได้ทำการวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของวัตถุทดสอบโดยใช้เครื่องวัดกระแสโพลารไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน (PDC Analyser) [12] ดังแสดงในรูปที่ 3.1

(ก)

(ข)


(ค)

(ง)

(จ)

(ฉ)

รูปที่ 3.1 ชุดเครื่องวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน

โดยที่

ก) คือ เครื่องวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน

ข) คือ เครื่องจ่ายแรงดันทดสอบ

ค) คือ สายควบคุม

ง) คือ สายวัดกระแส

จ) คือ สายจ่ายแรงดัน

ฉ) คือ สายกราวด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันในห้องปฏิบัติการ

สำหรับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ได้ทำการทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันเพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิและความชื้นของสภาพแวดล้อมต่อการทดสอบและทำการจำลองกรณีศึกษาเพื่อเป็นตัวอย่างในการใช้กระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันในการวิเคราะห์ฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนแรงดันสูง ในการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ได้นำขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ที่มีพิกัดแรงดัน 6.6 กิโลโวลต์ และมีระดับชั้นของฉนวนอยู่ในชั้น F ดังแสดงในรูปที่ 3.2 จำนวน 2 ขด มาใช้เป็นวัตถุทดสอบของการทดสอบ

รูปที่ 3.2 ขดลวดสเตเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ

การทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันในห้องปฏิบัติการถูกแบ่งออกเป็น 4 การทดสอบย่อย ดังนี้

1. การทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของขดลวดสเตเตอร์ในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิแตกต่างกัน
2. การทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของขดลวดสเตเตอร์ในสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นแตกต่างกัน
3. การทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของขดลวดสเตเตอร์ที่มีความชื้นอยู่ภายในเนื้อฉนวน
4. การทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของขดลวดสเตเตอร์ที่ฉนวนได้รับความร้อนเกินอุณหภูมิใช้งาน

ซึ่งรายละเอียดของแต่ละการทดสอบย่อยเป็นดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1 การทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของขดลวดสเตเตอร์ในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิแตกต่างกัน

สำหรับการทดสอบในข้อ 3.2.1 มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษาผลของอุณหภูมิของสภาพแวดล้อมต่อกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนแรงดันสูง โดยในการทดสอบนี้ ได้ทำการทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์ที่ฉนวนอยู่ในสภาพดีในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส มีความชื้นสัมพัทธ์ 60% เทียบกับที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 63% ทั้งนี้ การทดสอบที่ 3.2.1 จะทำให้ทราบถึงอุณหภูมิของสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมในการทำการทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของขดลวดสเตเตอร์ในห้องปฏิบัติการ

3.2.2 การทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของขดลวดสเตเตอร์ในสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นแตกต่างกัน

สำหรับการทดสอบในข้อ 3.2.2 มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษาผลของความชื้นของสภาพแวดล้อมต่อกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนแรงดันสูง โดยการทดสอบนี้ได้ทำการทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของขดลวดสเตเตอร์ที่ฉนวนอยู่ในสภาพดีในสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 57%-73% มีอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และในสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 60%-68% มีอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ทั้งนี้ การทดสอบที่ 3.2.2 นี้ จะทำให้ทราบถึงความชื้นของสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของขดลวดสเตเตอร์ในห้องปฏิบัติการ

3.2.3 การทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของขดลวดสเตเตอร์ที่มีความชื้นอยู่ภายในเนื้อฉนวน

ในการขนส่งมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อนำมาติดตั้งใช้งาน ในบางครั้งการขนส่งอาจเกิดขึ้นในขณะที่มีพายุฝน ดังนั้น อาจทำให้เกิดความชื้นสะสมภายในเนื้อฉนวนได้ หรือ เมื่อมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าถูกติดตั้งอยู่ในที่ที่มีความชื้นสูงและไม่ได้ถูกใช้งานเป็นเวลานานก็อาจทำให้เกิดความชื้นสะสมภายในเนื้อฉนวนได้เช่นกัน ดังนั้น จึงได้ทำการทดสอบในข้อที่ 3.2.3 ขึ้นเพื่อทำการศึกษาผลของความชื้นที่อยู่ภายในเนื้อฉนวนต่อกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนแรงดันสูง โดยทำการทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของขดลวดสเตเตอร์ที่แห้งสะอาดและฉนวนอยู่ในสภาพดีและที่ผ่านการแช่น้ำเป็นระยะเวลา 24, 72 และ 144 ชั่วโมง โดยได้ทำการทดสอบในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส และมีความชื้นสัมพัทธ์ 46%-56%

3.2.4 การทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของขดลวดสเตเตอร์ที่ฉนวนได้รับความร้อนเกินอุณหภูมิใช้งาน

เมื่อมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าถูกติดตั้งอยู่ในที่ที่มีการระบายความร้อนไม่ดี อาจทำให้ฉนวนของมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้องพบกับความร้อนเกินอุณหภูมิใช้งาน (อุณหภูมิใช้งานปกติของมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอยู่ที่ประมาณ 100 องศาเซลเซียส) ซึ่งเมื่อฉนวนอยู่ใน

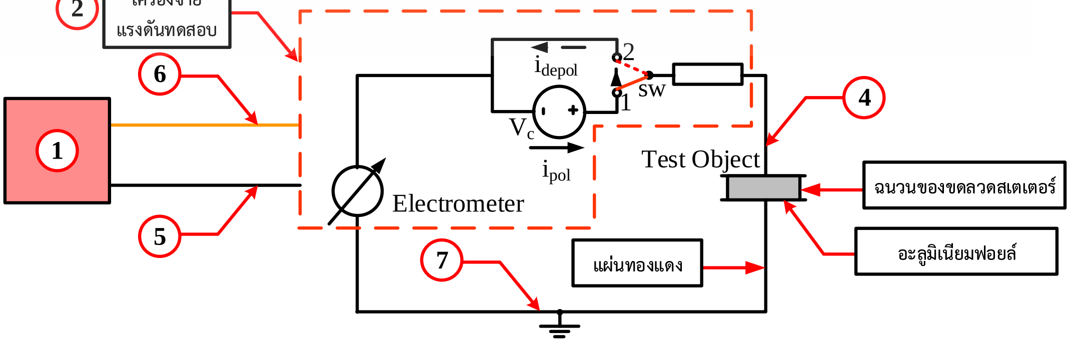
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูง อาจทำให้ฉนวนมีการเสื่อมสภาพที่เร็วขึ้นได้ ดังนั้น จึงได้ทำการทดสอบในข้อที่ 3.2.4 ขึ้นเพื่อศึกษากระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนแรงดันสูง เมื่อฉนวนได้รับความร้อนเกินอุณหภูมิใช้งาน โดยได้ทำการทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของขดลวดสเตเตอร์ที่แห้งสะอาดและฉนวนอยู่ในสภาพดีและที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 12 และ 48 ชั่วโมง โดยทำการทดสอบในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส มีความชื้นสัมพัทธ์ 48%-50% ทั้งนี้ขดลวดสเตเตอร์ที่แห้งสะอาดและที่ผ่านการอบทั้ง 2 ครั้ง ได้ถูกแสดงในรูปที่ 3.3 และ 3.4 ตามลำดับ

รูปที่ 3.3 ขดลวดสเตเตอร์ที่แห้งสะอาด (ยังไม่ได้ผ่านการอบ)

รูปที่ 3.4 ขดลวดสเตเตอร์ที่ผ่านการอบทั้ง 2 ครั้ง

วงจรสมมูล วงจรการทดสอบจริงและไดอะแกรมวงจรทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันในห้องปฏิบัติการแสดงดังรูปที่ 3.5-3.7 ตามลำดับ

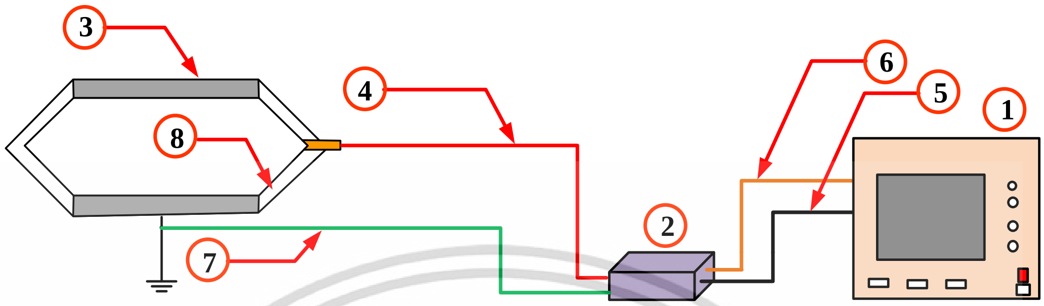


รูปที่ 3.5 วงจรสมมูลของการทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันสำหรับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

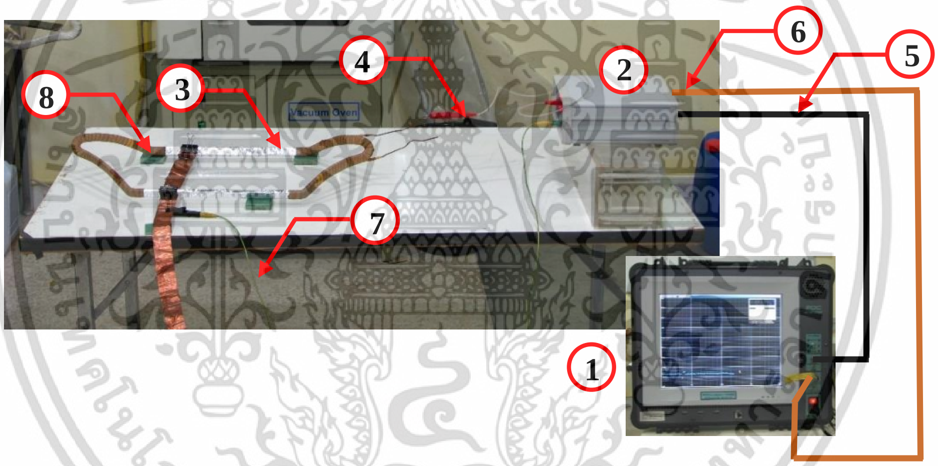
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

Electrometer	คือ มิเตอร์วัดกระแส	i_{pol}	คือ กระแสโพลาไรซ์เซชัน
Test Object	คือ วัตถุทดสอบ	i_{depol}	คือ กระแสดีโพลาไรซ์เซชัน
V_C	คือ แหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรง	SW	คือ สวิตซ์



รูปที่ 3.6 ไดอะแกรมวงจรการทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของขดลวดสเตเตอร์ในห้องปฏิบัติการ



รูปที่ 3.7 วงจรการทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของขดลวดสเตเตอร์ในห้องปฏิบัติการ

โดยที่

1) คือ เครื่องวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน
2) คือ เครื่องจ่ายแรงดันทดสอบ
3) คือ ร่องสล็อตจำลอง
4) คือ สายจ่ายแรงดันสูง
5) คือ สายวัดกระแส
6) คือ สายควบคุม
7) คือ สายกราวด์
8) คือ ขดลวดสเตเตอร์

จากรูปที่ 3.5-3.7 ได้ทำการจำลองร่องสล็อตในการทดสอบโดยใช้อะลูมิเนียมฟอยล์มาพันหุ้มขดลวดสเตเตอร์บริเวณที่อยู่ภายในร่องสล็อต และในการทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชัน สวิตซ์ของเครื่องจ่ายแรงดันทดสอบจะอยู่ที่ตำแหน่งที่ 1 เพื่อทำการจ่ายแรงดันทดสอบขนาด 1,000 โวลต์ให้กับขดลวดสเตเตอร์ จากนั้นเครื่องวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันจะทำการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บันทึกค่ากระแสโพลาไรซ์เซชันเป็นเวลา 2,000 วินาที จากนั้นสวิตซ์ของเครื่องจ่ายแรงดันทดสอบจะเปลี่ยนมาอยู่ที่ตำแหน่งที่ 2 เพื่อทำการลัดวงจรให้กับขดลวดสเตเตอร์เป็นเวลา 2,000 วินาที และในขณะที่ลัดวงจรให้กับฉนวนเครื่องวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันจะทำการบันทึกกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน ทั้งนี้ เครื่องวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันจะทำหน้าที่ควบคุมการจ่ายแรงดันของเครื่องจ่ายแรงดันทดสอบ

3.3 การทดสอบการทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันในภาคสนาม

สำหรับการทดสอบภาคสนาม ได้ทำการทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของเครื่องจักรกลหมุนแรงดันสูงนอกสถานที่เพื่อแสดงให้เห็นถึงความสามารถของการใช้กระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันในการวิเคราะห์ฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนแรงดันสูง ซึ่งการทดสอบภาคสนามได้ถูกแบ่งออกเป็น 3 การทดสอบย่อย ดังนี้

1. การทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของแท่งสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ได้รับความเสียหายจากการเกิดความผิดพร่องในขณะที่ถูกซิงโครไนซ์เข้าไปในระบบไฟฟ้ากำลัง
2. การทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของมอเตอร์ก่อนและหลังกระบวนการพันขดลวดใหม่
3. การทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของมอเตอร์ตามแผนการซ่อมบำรุงรักษา

3.3.1 การทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของแท่งสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ได้รับความเสียหายจากการเกิดความผิดพร่องในขณะที่ถูกซิงโครไนซ์เข้าไปในระบบไฟฟ้ากำลัง

สำหรับการทดสอบในข้อ 3.3.1 ได้ทำการทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของแท่งสเตเตอร์ชนิดโรเบล (Roebel bar) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีพิกัดแรงดัน 11 กิโลโวลต์ ที่ได้รับความเสียหายจากการเกิดความผิดพร่องแบบไลน์ทูกราวด์ (line to ground fault) ในขณะที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าถูกซิงโครไนซ์เข้าไปในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยได้ทำการทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของแท่งสเตเตอร์ที่ฉนวนอยู่ในสภาพดีเทียบกับแท่งสเตเตอร์ที่ฉนวนได้รับความเสียหายจากการเกิดความผิดพร่องแบบไลน์ทูกราวด์ แท่งสเตเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ และฉนวนบริเวณที่เกิดความผิดพร่องแบบไลน์ทูกราวด์ แสดงดังรูปที่ 3.8 และ 3.9 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.8 แท่งสเตเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ

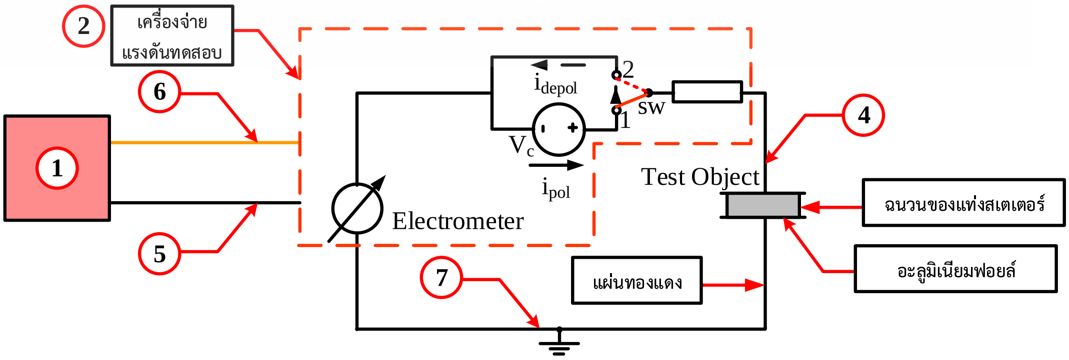
โดยที่

1) คือ แท่งสเตเตอร์ที่ฉนวนอยู่ในสภาพดี

2) คือ แท่งสเตเตอร์ที่ฉนวนได้รับความเสียหายจากการเกิดความผิดพร่องแบบไลน์ทูกราวด์

รูปที่ 3.9 ฉนวนได้รับความเสียหายจากการเกิดความผิดพร่องแบบไลน์ทูกราวด์

วงจรสมมูล ไดอะแกรมวงจรทดสอบ และวงจรทดสอบจริงของการทดสอบในข้อ 3.3.1 แสดงดังรูปที่ 3.10-3.12

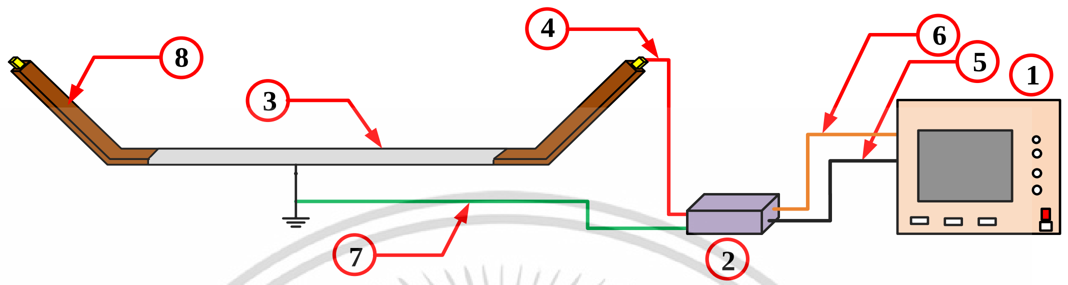


รูปที่ 3.10 วงจรสมมูลของการทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันในข้อที่ 3.31

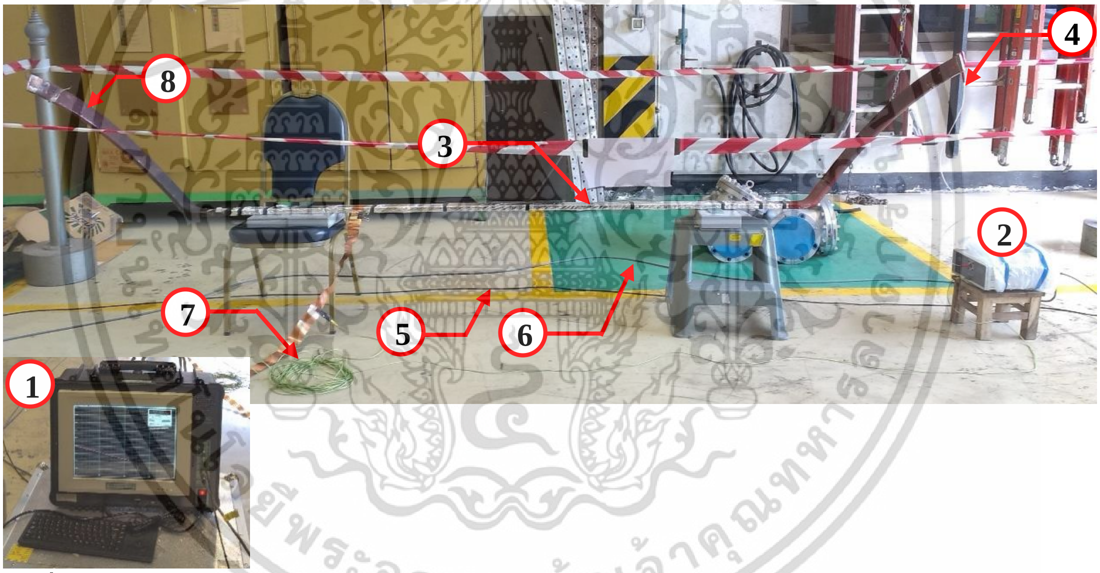
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

Electrometer	คือ มิเตอร์วัดกระแส	i_{pol}	คือ กระแสโพลาไรซ์เซชัน
Test Object	คือ วัตถุทดสอบ	i_{depol}	คือ กระแสดีโพลาไรซ์เซชัน
V_C	คือ แหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรง	SW	คือ สวิตซ์



รูปที่ 3.11 ไดอะแกรมวงจรการทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของแท่งสเตเตอร์



รูปที่ 3.12 วงจรการทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของแท่งสเตเตอร์

โดยที่

1) คือ เครื่องวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน

2) คือ เครื่องจ่ายแรงดันทดสอบ

3) คือ ร่องสล็อตจำลอง

4) คือ สายแรงดันสูง

5) คือ สายวัดกระแส

6) คือ สายควบคุม

7) คือ สายกราวด์

8) คือ แท่งสเตเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.10-3.12 ได้ทำการจำลองร่องสล็อตเพื่อใช้ในการทดสอบโดยใช้อะลูมิเนียมฟอยล์มาพันหุ้มแท่งสเตเตอร์บริเวณที่อยู่ภายในร่องสล็อต และในการทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชัน สวิตซ์ของเครื่องจ่ายแรงดันทดสอบจะอยู่ที่ตำแหน่งที่ 1 เพื่อทำการจ่ายแรงดันทดสอบขนาด 100 โวลต์ให้กับแท่งสเตเตอร์ จากนั้นเครื่องวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันจะทำการบันทึกค่ากระแสโพลาไรซ์เซชันเป็นเวลา 2,000 วินาที จากนั้นสวิตซ์ของเครื่องจ่ายแรงดันทดสอบจะเปลี่ยนมาอยู่ที่ตำแหน่งที่ 2 เพื่อทำการลัดวงจรให้กับแท่งสเตเตอร์เป็นเวลา 2,000 วินาที และในขณะที่ลัดวงจรให้กับฉนวนเครื่องวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันจะทำการบันทึกกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน ทั้งนี้ เครื่องวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันจะทำหน้าที่ควบคุมการจ่ายแรงดันของเครื่องจ่ายแรงดันทดสอบ

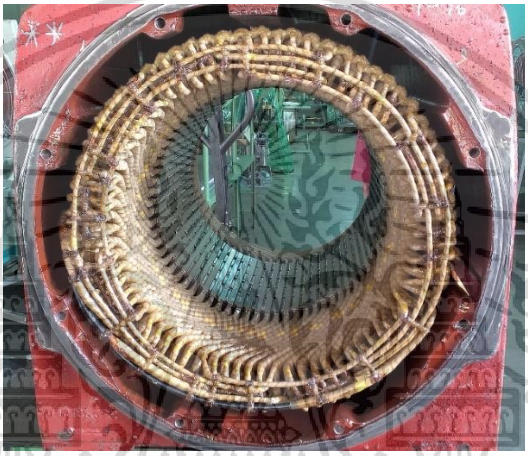
3.3.2 การทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของมอเตอร์ก่อนและหลังกระบวนการพันขดลวดใหม่

สำหรับการทดสอบในข้อ 3.3.2 ได้ทำการทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีพิกัดแรงดัน 6.6 กิโลโวลต์ ก่อนและหลังกระบวนการพันขดลวดใหม่ (rewinding) และจากการตรวจสอบด้วยสายตาก่อนที่มอเตอร์จะเข้าสู่กระบวนการพันขดลวดใหม่ พบว่า มีผงฝุ่นอยู่บริเวณผิวฉนวนของขดลวดสเตเตอร์เป็นจำนวนมาก ดังนั้น การทดสอบในข้อ 3.3.2 จึงเป็นกรณีศึกษาในกรณีของฉนวนที่มีสิ่งปนเปื้อนที่ผิว มอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบก่อนการพันขดลวดใหม่ ผิวฉนวนของขดลวดสเตเตอร์ก่อนการพันขดลวดใหม่ มอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบหลังการพันขดลวดใหม่ และผิวฉนวนของขดลวดสเตเตอร์หลังการพันขดลวดใหม่ แสดงดังรูปที่ 3.13 - 3.16 ตามลำดับ

รูปที่ 3.13 มอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบที่ 3.3.2 ก่อนการพันขดลวดใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.14 ผิวฉนวนของขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบที่ 3.3.2 ก่อนการพันขดลวดใหม่ (พบฝุ่นจำนวนมากบริเวณผิวฉนวนของขดลวดสเตเตอร์)

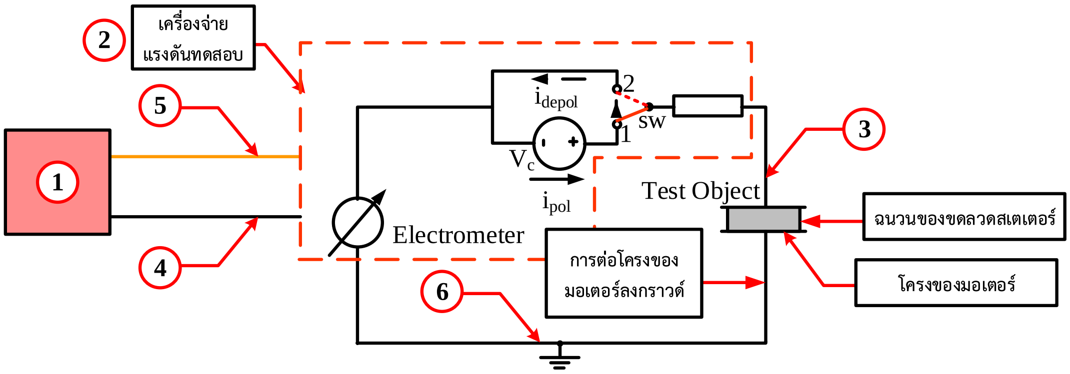


รูปที่ 3.15 มอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบในการทดสอบที่ 3.3.2 หลังการพันขดลวดใหม่

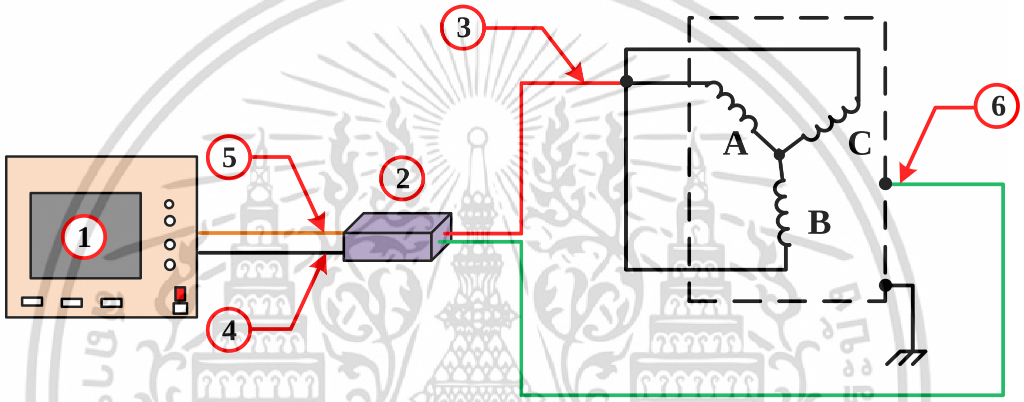
รูปที่ 3.16 ผิวฉนวนของขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์ในการทดสอบที่ 3.3.2 หลังการพันขดลวดใหม่ (ผิวฉนวนสะอาด ไม่สังเกตเห็นฝุ่นบริเวณผิวฉนวนของขดลวดสเตเตอร์)

วงจรสมมูล ไดอะแกรมวงจรทดสอบ และวงจรทดสอบจริงของการทดสอบในข้อ 3.3.2 แสดงดังรูปที่ 3.17-3.19

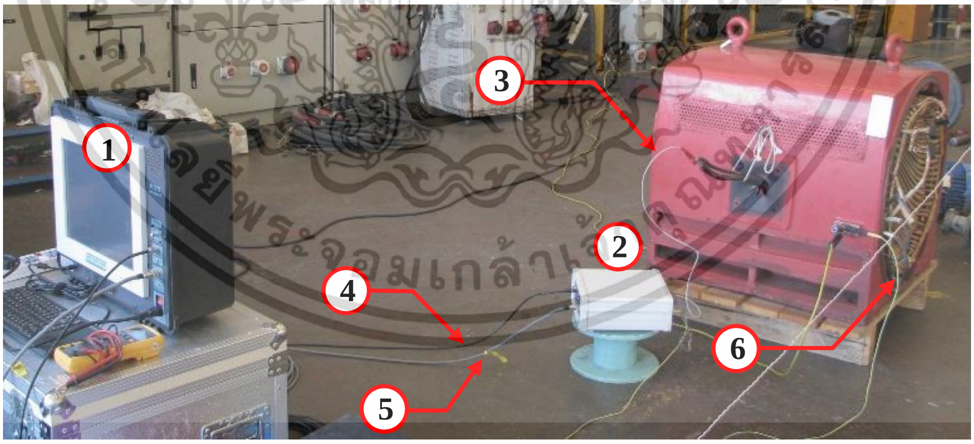
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.17 วงจรสมมูลของการทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันในการทดสอบที่ 3.3.2



รูปที่ 3.18 ไดอะแกรมวงจรการทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของมอเตอร์ของการทดสอบที่ 3.3.2



รูปที่ 3.19 วงจรการทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันในการทดสอบที่ 3.3.2

โดยที่

1) คือ เครื่องวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน

2) คือ เครื่องจ่ายแรงดันทดสอบ

3) คือ สายแรงดันสูง

4) คือ สายวัดกระแส

5) คือ สายควบคุม

6) คือ สายกราวด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

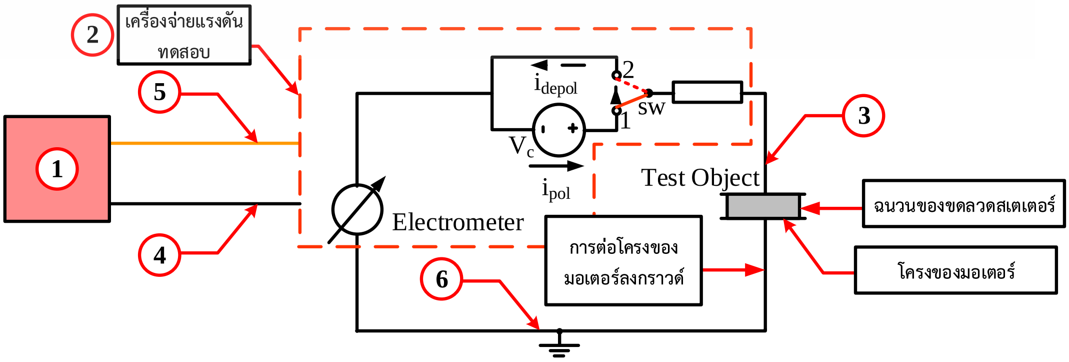
จากรูปที่ 3.17-3.19 ในการทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชัน สวิตซ์ของเครื่องจ่ายแรงดันทดสอบจะอยู่ที่ตำแหน่งที่ 1 เพื่อทำการจ่ายแรงดันทดสอบขนาด 100 โวลต์ ให้กับขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์ทั้ง 3 เฟส พร้อมกัน จากนั้นเครื่องวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันจะทำการบันทึกค่ากระแสโพลาไรซ์เซชันเป็นเวลา 2,000 วินาที จากนั้นสวิตซ์ของเครื่องจ่ายแรงดันทดสอบจะเปลี่ยนมาอยู่ที่ตำแหน่งที่ 2 เพื่อทำการลัดวงจรให้กับขดลวดมอเตอร์ทั้ง 3 เฟส เป็นเวลา 2,000 วินาที และในขณะที่ลัดวงจร เครื่องวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันจะทำการบันทึกกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน ทั้งนี้ เครื่องวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันจะทำหน้าที่ควบคุมการจ่ายแรงดันของเครื่องจ่ายแรงดันทดสอบ

3.3.3 การทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของมอเตอร์ตามแผนการซ่อมบำรุงรักษา

สำหรับการทดสอบในข้อ 3.3.3 ได้ทำการทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีพิกัดแรงดัน 6.6 กิโลโวลต์ หลังจากผ่านกระบวนการทำความสะอาดในปี พ.ศ. 2557 และปี พ.ศ. 2559 มอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.20

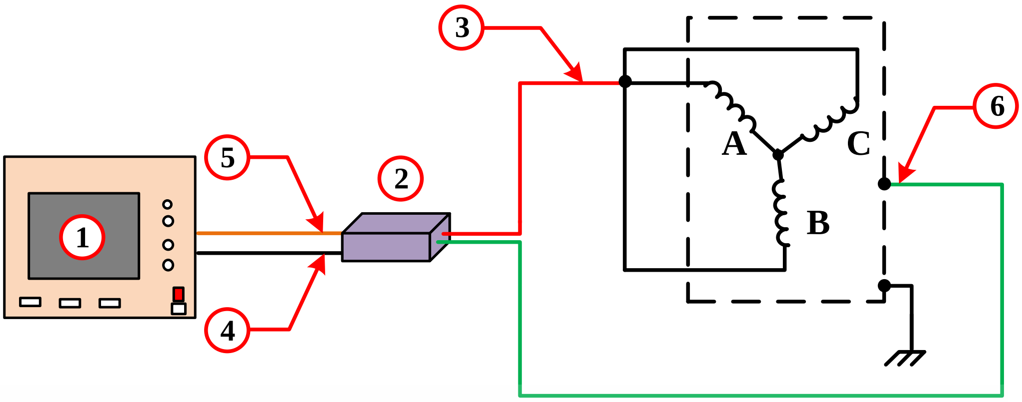
รูปที่ 3.20 มอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบที่ 3.3.3

วงจรสมมูล ไดอะแกรมวงจรทดสอบ และวงจรทดสอบจริงของการทดสอบในข้อ 3.3.2 แสดงดังรูปที่ 3.21-3.23

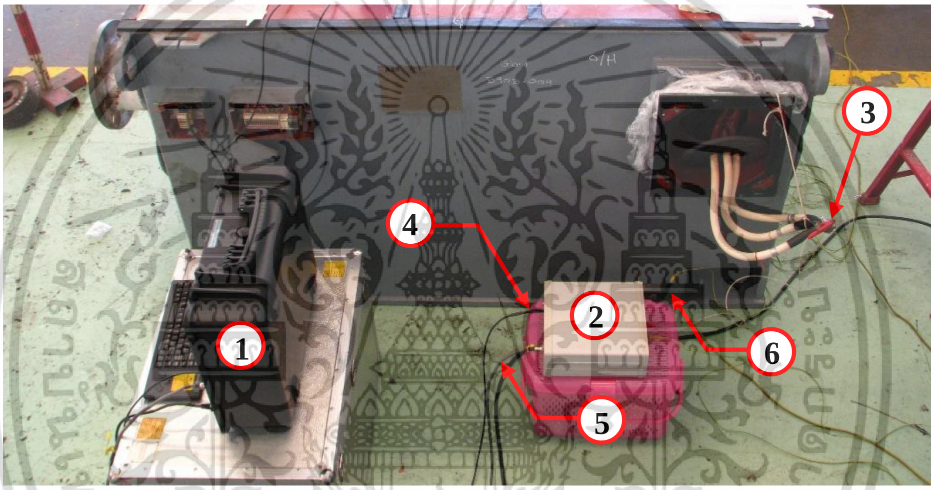


รูปที่ 3.21 วงจรสมมูลของการทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันในการทดสอบที่ 3.3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.22 ไดอะแกรมวงจรการทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของมอเตอร์ของการทดสอบที่ 3.3.3



รูปที่ 3.23 วงจรการทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันในการทดสอบที่ 3.3.3

โดยที่

1) คือ เครื่องวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน

2) คือ เครื่องจ่ายแรงดันทดสอบ

3) คือ สายแรงดันสูง

4) คือ สายวัดกระแส

5) คือ สายควบคุม

6) คือ สายกราวด์

ทั้งนี้ การทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันในการทดสอบที่ 3.3.3 จะเหมือนกับการทดสอบที่ 3.3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 ขั้นตอนการวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน [4], [13]

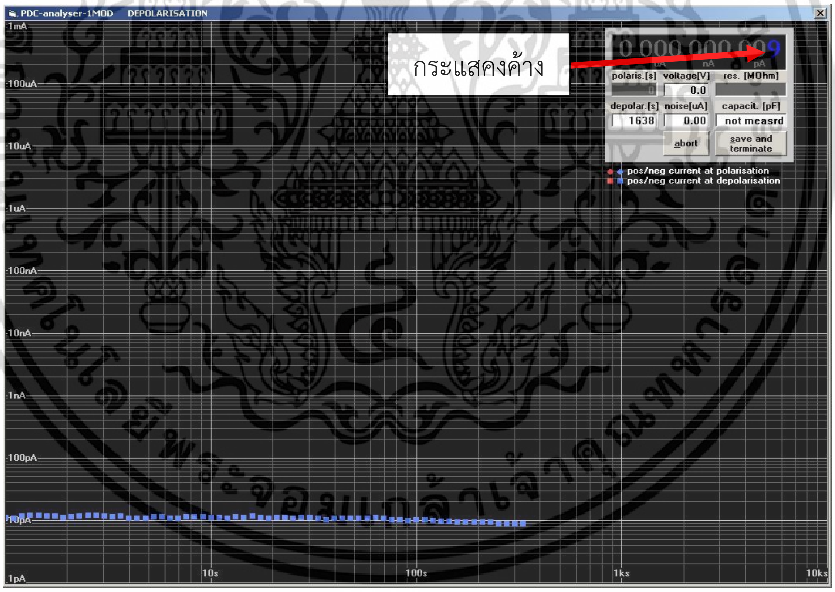
ขั้นตอนในการวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

1. การวัดเบื้องต้น (initial measurement)
2. การวัดเพื่อกำหนดค่าแรงดันทดสอบ (control measurement)
3. การวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน (main measurement)

ซึ่งรายละเอียดของทั้ง 3 ขั้นตอน เป็นดังนี้

3.4.1 การวัดเบื้องต้น

การวัดในขั้นตอนนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อคายประจุที่ค้างอยู่ภายในเนื้อฉนวน โดยในขั้นตอนนี้เครื่องวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันจะทำการลัดวงจรฉนวนเพื่อให้ฉนวนเกิดการคายประจุ และจะทำการคายประจุให้กับฉนวนจนกระทั่งกระแสคายประจุมีค่าอยู่ในระดับไม่เกิน 10 pA หรือจนกระทั่งกระแสคายประจุมีค่าคงที่ ซึ่งค่ากระแสคายประจุค่าสุดท้ายในขั้นตอนนี้จะถูกเรียกว่า กระแสคงค้าง (remaining current)



รูปที่ 3.24 กระแสคายประจุของฉนวน

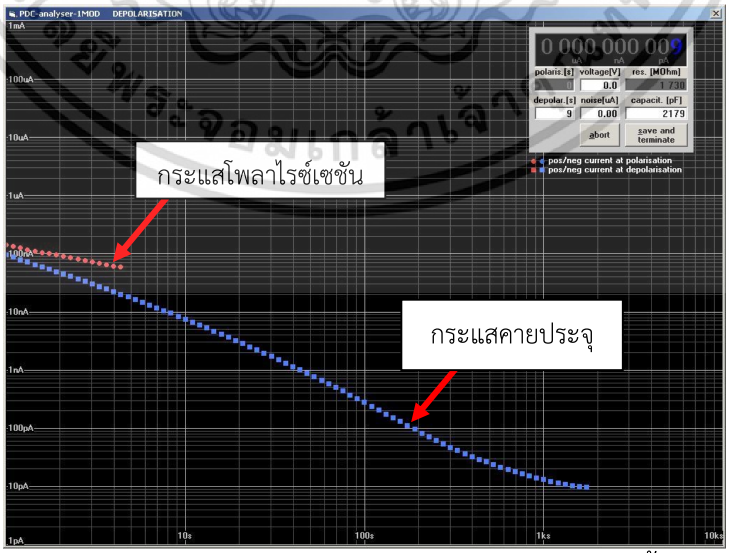
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2 การวัดเพื่อกำหนดค่าแรงดันทดสอบ

ขั้นตอนนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อกำหนดค่าแรงดันที่ใช้ในการทดสอบ ซึ่งค่าแรงดันที่ใช้ในการทดสอบนี้จะต้องเป็นค่าที่สามารถทำให้สังเกตเห็นพฤติกรรมของกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของฉนวนได้อย่างชัดเจน นั่นคือ ขนาดของกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันต้องมากกว่าค่ากระแสคงค้างในขั้นตอนที่ 1 เพียงพอที่จะทำให้กระแสคงค้างไม่มีอิทธิพลต่อกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน โดยในขั้นตอนนี้จะทำการป้อนแรงดันทดสอบที่มีค่าต่ำค่าหนึ่งให้กับวัตถุทดสอบซึ่งแรงดันค่าต่ำที่ทำการป้อนนี้โดยทั่วไปจะอยู่ในช่วง 50-100 โวลต์ เป็นเวลา 5-10 วินาที เพื่อดูขนาดของกระแสโพลาไรซ์เซชันของฉนวนในขณะที่ทำการจ่ายแรงดันว่ามีค่ามากกว่าค่ากระแสคงค้างมากพอหรือไม่ จากนั้นจะทำการคายประจุให้กับฉนวน ซึ่งหลังจากการป้อนแรงดันให้กับฉนวนจะต้องทำการคายประจุให้กับฉนวนจนกระทั่งกระแสคายประจุของฉนวนมีค่าเท่ากับกระแสคงค้างในขั้นตอนแรก ทั้งนี้เพื่อเป็นการป้องกันไม่ให้กระแสในขั้นตอนนี้ส่งผลต่อการวัดในขั้นตอนต่อไป

ในขั้นตอนนี้หากแรงดันที่ทำการป้อนในตอนแรก (50-100 โวลต์) ไม่เพียงพอที่จะทำให้เห็นพฤติกรรมของกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันได้อย่างชัดเจน ก็จะต้องทำการเพิ่มขนาดแรงดันทดสอบจนกระทั่งพบค่าที่ทำให้สังเกตเห็นพฤติกรรมของกระแสได้อย่างชัดเจน

โดยปกติแล้ว แรงดันขนาด 50-100 โวลต์ เป็นระดับที่มากเพียงพอที่จะทำให้สามารถสังเกตเห็นพฤติกรรมของกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันได้อย่างชัดเจนสำหรับมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงเนื่องจากมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดังกล่าวมีค่าความจุไฟฟ้าค่อนข้างสูง (ประมาณหลายสิบ nF ขึ้นไป) แต่หากทำการทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันกับขดลวดสเตเตอร์และแท่งสเตเตอร์ของมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะต้องใช้แรงดันทดสอบที่มีขนาดมากกว่า 500 โวลต์ ในการทดสอบเนื่องจากค่าความจุไฟฟ้าของขดลวดสเตเตอร์และแท่งสเตเตอร์มีค่าค่อนข้างต่ำ (ประมาณหลายร้อย pF)



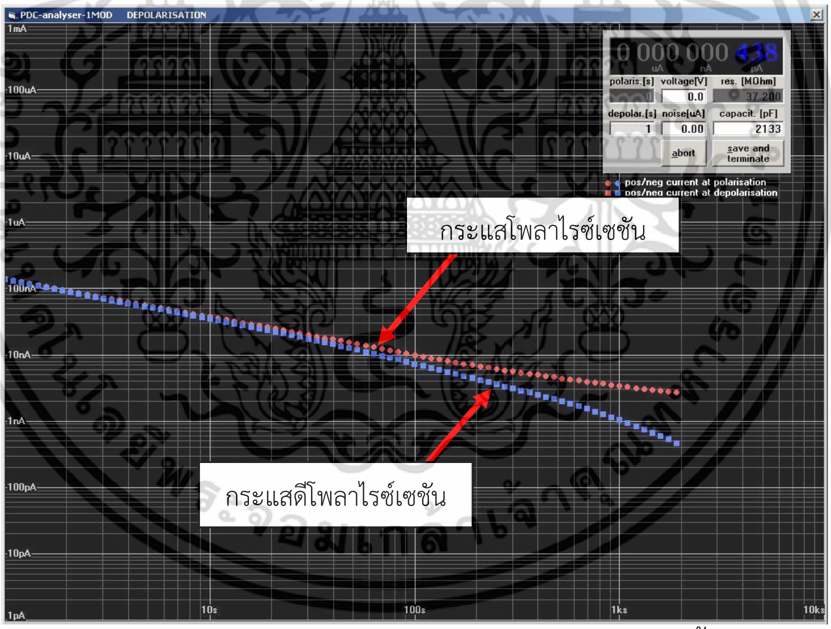
รูปที่ 3.25 กระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของฉนวนในขั้นตอนการวัดเพื่อกำหนดแรงดันทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.3 การวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน

ในขั้นตอนนี้จะทำการวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของฉนวน โดยทำการป้อนแรงดันทดสอบที่ได้จากขั้นตอนที่ 2 ให้กับฉนวน จากนั้นเครื่องวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันจะทำการบันทึกกระแสโพลาไรซ์เซชันตลอดระยะเวลาที่ทำการจ่ายแรงดันให้กับฉนวน จากนั้นฉนวนจะถูกลัดวงจรและเครื่องวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันจะทำการบันทึกกระแสดีโพลาไรซ์เซชันตลอดระยะเวลาที่การลัดวงจรให้กับฉนวน

โดยทั่วไประยะเวลาที่เกิดอินเตอร์เฟเชียลโพลาไรซ์เซชันซึ่งเป็นกระบวนการโพลาไรซ์หลักที่เกิดขึ้นในฉนวนของขดลวดสเตเตอร์จะอยู่ในช่วง 1 – 100,000 วินาที ดังนั้น ระยะเวลาที่ทำการจ่ายแรงดันให้กับฉนวนจะต้องเพียงพอที่จะทำให้สังเกตเห็นพฤติกรรมของกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของฉนวนได้อย่างชัดเจน ซึ่งช่วงเวลาที่ [4] แนะนำ คือ ตั้งแต่ 1,100 วินาทีเป็นต้นไป ทั้งนี้ ผู้ทำการวิจัยได้เลือกระยะเวลาทำการทดสอบที่ 2,000 วินาที เนื่องจากเป็นระยะเวลาที่ทำให้สามารถสังเกตเห็นพฤติกรรมของกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันได้ชัดเจน (สังเกตเห็นการแยกออกจากกันของกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันได้อย่างชัดเจน)



รูปที่ 3.26 กระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของฉนวนในขั้นตอนการวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดสอบ

สำหรับผลการทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันในห้องปฏิบัติการและภาคสนามดังที่จะแสดงต่อไปนี้ กระแสโพลาไรซ์เซชัน กระแสดีโพลาไรซ์เซชัน และกระแสการนำไฟฟ้าจะถูกแสดงเทียบกับเวลาที่ทำการทดสอบในสเกลลอกาลิทึม (logarithm) โดยกำหนดให้กระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสการนำไฟฟ้าแสดงด้วยเส้นหนาทึบและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันแสดงด้วยเส้นประ

4.1 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

การทดสอบในห้องปฏิบัติการมีทั้งหมด 4 การทดสอบ ดังนี้

4.1.1. การทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของขดลวดสเตเตอร์ในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิแตกต่างกัน

4.1.2. การทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของขดลวดสเตเตอร์ในสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นแตกต่างกัน

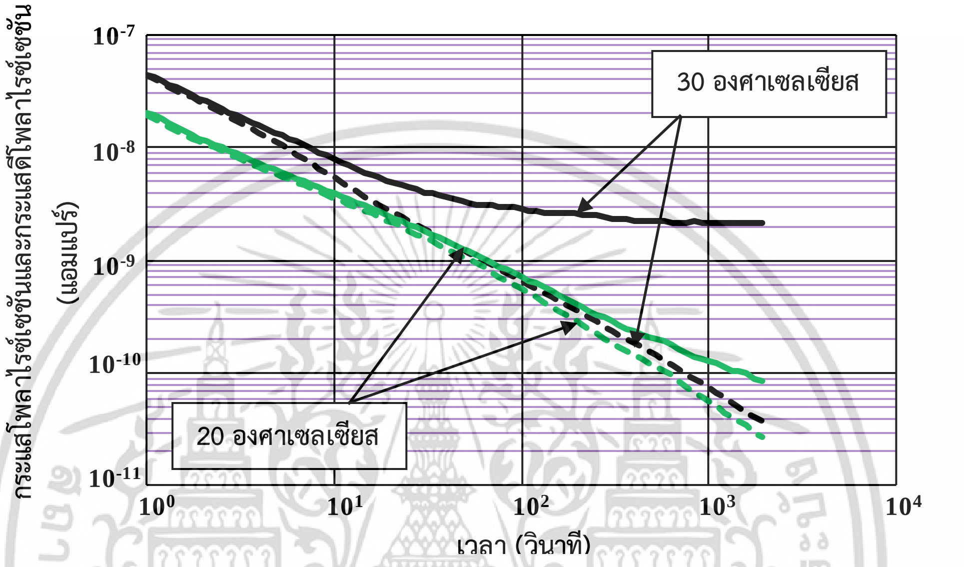
4.1.3. การทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของขดลวดสเตเตอร์ที่มีความชื้นอยู่ภายในเนื้อฉนวน

4.1.4 การทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของขดลวดสเตเตอร์ ที่ฉนวนได้รับความร้อนเกินอุณหภูมิใช้งาน

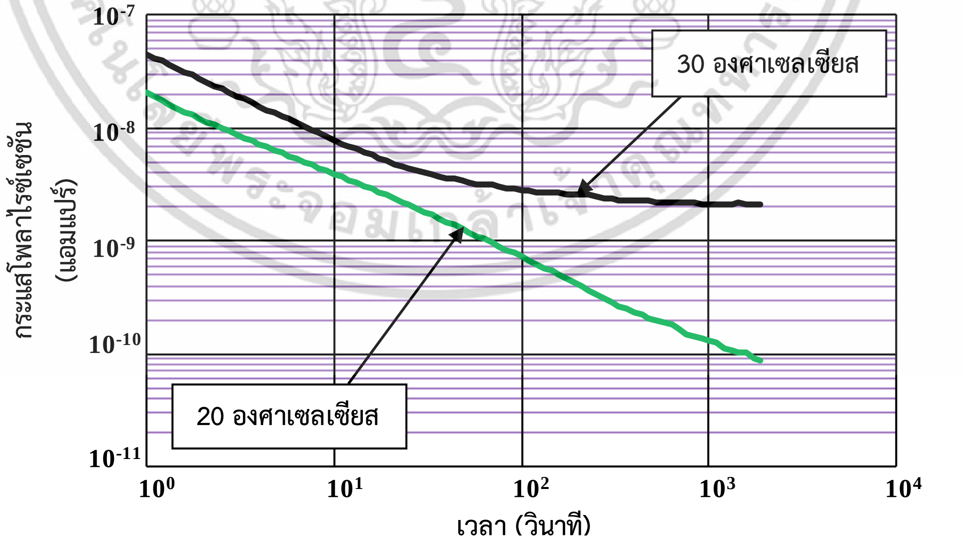
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.1 การทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของขดลวดสเต-เตอร์ในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิแตกต่างกัน

ในการทดสอบข้อที่ 4.1.1 ได้ทำการทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของขดลวดสเตอร์ของมอเตอร์ที่มีพิกัดแรงดัน 6.6 กิโลโวลต์ ในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส มีความชื้นสัมพัทธ์ 63% เทียบกับในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส มีความชื้นสัมพัทธ์ 60% ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.1 – 4.4

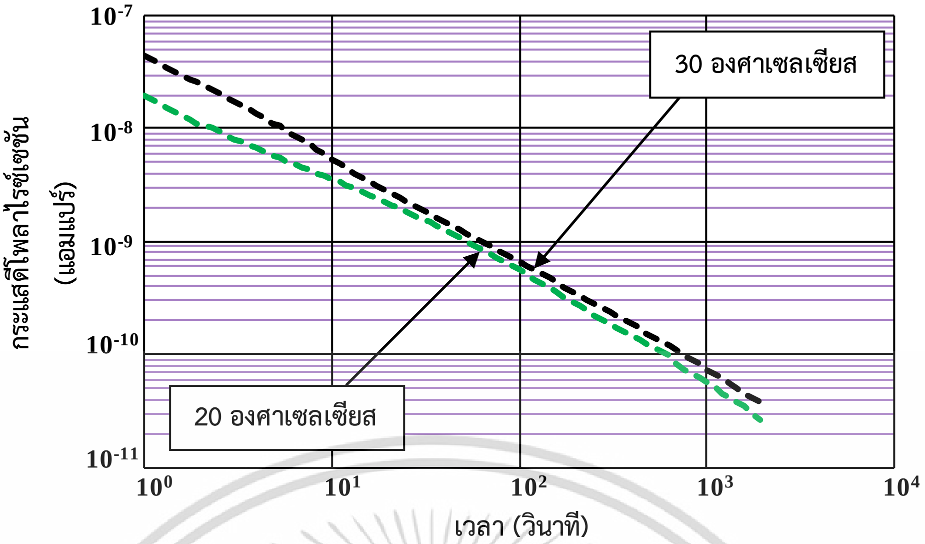


รูปที่ 4.1 กระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของขดลวดสเตเตอร์ที่อุณหภูมิสภาพแวดล้อม 30 องศาเซลเซียส เทียบกับที่อุณหภูมิสภาพแวดล้อม 20 องศาเซลเซียส

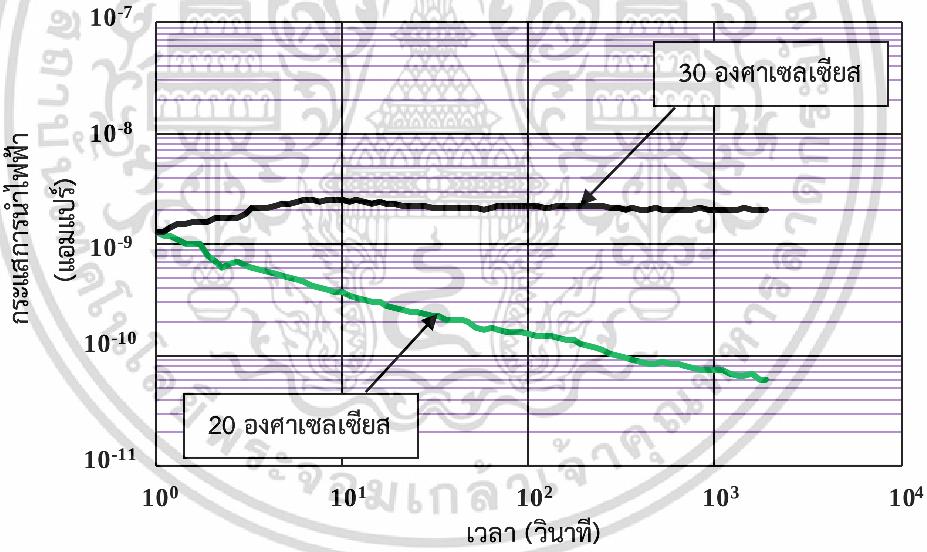


รูปที่ 4.2 กระแสโพลาไรซ์เซชันของขดลวดสเตเตอร์ที่อุณหภูมิสภาพแวดล้อม 30 องศาเซลเซียส เทียบกับที่อุณหภูมิสภาพแวดล้อม 20 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 กระแสดีโพลาไรซ์เซชันของขดลวดสเตเตอร์ที่อุณหภูมิสภาพแวดล้อม 30 องศาเซลเซียส เทียบกับที่อุณหภูมิสภาพแวดล้อม 20 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.4 กระแสการนำไฟฟ้าของขดลวดสเตเตอร์ที่อุณหภูมิสภาพแวดล้อม 30 องศาเซลเซียส เทียบกับที่อุณหภูมิสภาพแวดล้อม 20 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ความต้านทานและดัชนีการมีขั้วของขดลวดสเตเตอร์ในการทดสอบที่ 4.1.1

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	**ความต้านทานที่ 1 นาที (GΩ)**	**ความต้านทานที่ 10 นาที (GΩ)**	**ดัชนีการมีขั้ว**
30	319	459	1.44
20	935	5,400	5.77

จากผลการทดสอบในรูปที่ 4.1 - 4.4 พบว่า เมื่ออุณหภูมิของสภาพแวดล้อมขณะทำการทดสอบเพิ่มขึ้นจาก 20 องศาเซลเซียส เป็น 30 องศาเซลเซียส กระแสโพลาไรซ์เซชัน กระแสดีโพลาไรซ์เซชัน และกระแสการนำไฟฟ้าของขดลวดสเตเตอร์ที่ฉนวนแห้งสะอาดและอยู่ในสภาพดีจะเพิ่มขึ้น โดยที่ กระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสการนำไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดตลอดทั้งกราฟ แต่กระแสดีโพลาไรซ์เซชันจะเพิ่มขึ้นในช่วง 30 วินาทีแรก และเมื่อเวลาผ่านไปกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของทั้ง 2 อุณหภูมิ จะแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น การเพิ่มขึ้นของกระแสการนำไฟฟ้านี้คาดว่าเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของพลังงานของอิเล็กตรอนอิสระภายในเนื้อฉนวนเนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้น ซึ่งการเพิ่มขึ้นของพลังงานของอิเล็กตรอนอิสระนี้จะทำให้อิเล็กตรอนอิสระเคลื่อนที่ภายใต้สนามไฟฟ้าได้ง่ายขึ้น ดังนั้น จึงส่งผลให้กระแสการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น และเมื่อกระแสการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นก็จะส่งผลให้กระแสโพลาไรซ์เซชันสูงขึ้น และจากตารางที่ 4.1 พบว่า ค่าดัชนีการมีขั้วที่คำนวณได้มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิของสภาพแวดล้อมขณะทำการทดสอบเพิ่มขึ้น จากการทดสอบพบว่า กระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันที่แสดงให้เห็นถึงสภาพจริงของฉนวนคือกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันที่ได้จากการทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ซึ่งฉนวนของขดลวดสเตเตอร์ที่แห้งสะอาดและอยู่ในสภาพดีควรมีกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันดังกระแสที่ได้จากการทดสอบที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส จากการทดสอบนี้ทำให้ทราบว่า ในการทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของขดลวดสเตเตอร์ควรทำการทดสอบในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

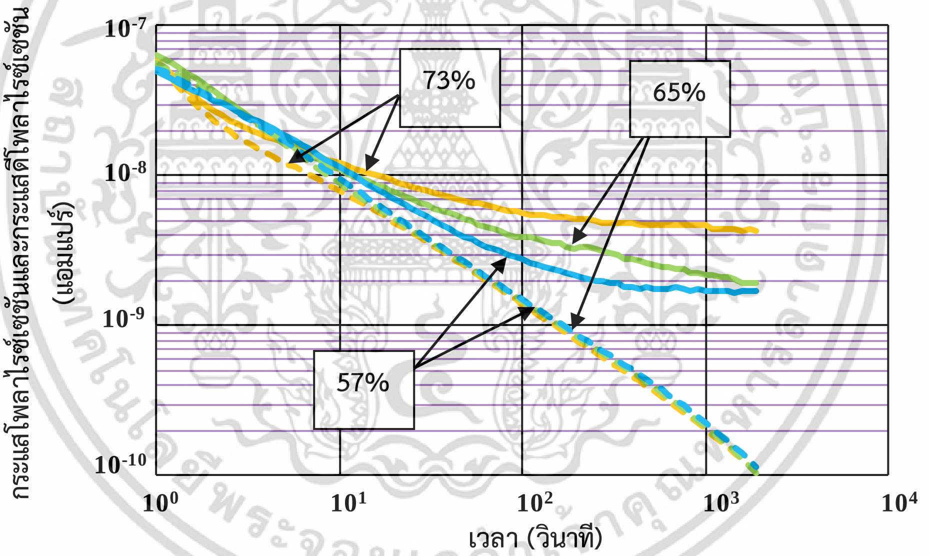
4.1.2 การทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของขดลวดสเต-เตอร์ในสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นแตกต่างกัน

ในการทดสอบข้อที่ 4.1.2 ได้ทำการทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของขดลวดสเตอร์ของมอเตอร์ที่มีพิกัดแรงดัน 6.6 กิโลโวลต์ ในสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นแตกต่างกัน จากนั้นนำผลการทดสอบที่ได้มาทำการเปรียบเทียบ โดยการทดสอบข้อที่ 4.1.2 ถูกแบ่งออกเป็น 2 การทดสอบย่อย ดังนี้

4.1.2.1 การทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันในสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 57% 65% และ 73% และมีอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

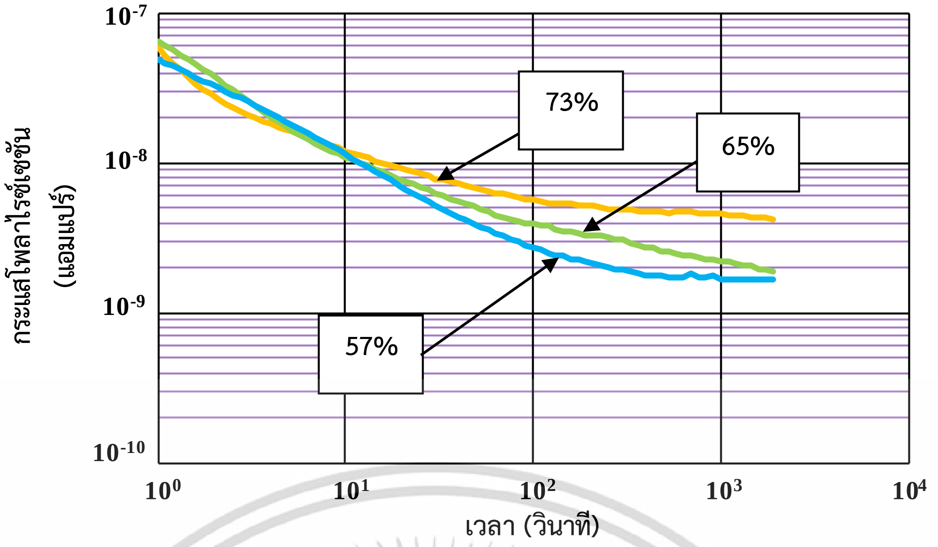
4.1.2.2 การวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันในสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 60% และ 68% และมีอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

4.1.2.1 การทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของขดลวดสเตเตอร์ในสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 57% 65% และ 73% และมีอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

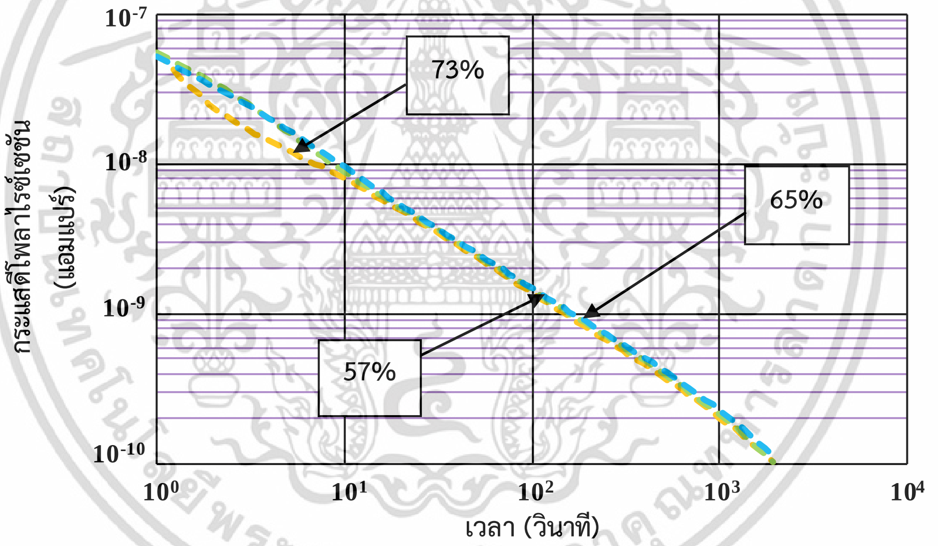


รูปที่ 4.5 กระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของขดลวดสเตเตอร์ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 57%, 65% และ 73% ที่อุณหภูมิสภาพแวดล้อม 30 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

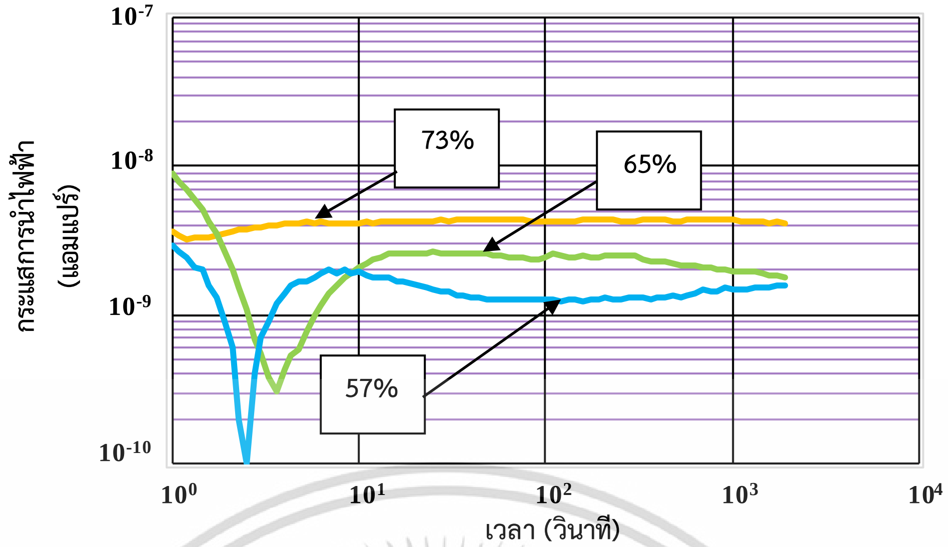


รูปที่ 4.6 กระแสโพลาไรซ์เซชันของขดลวดสเตเตอร์ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 57%, 65% และ 73% ที่อุณหภูมิสภาพแวดล้อม 30 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.7 กระแสดีโพลาไรซ์เซชันของขดลวดสเตเตอร์ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 57%, 65% และ 73% ที่อุณหภูมิสภาพแวดล้อม 30 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 กระแสการนำไฟฟ้าของขดลวดสเตเตอร์ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 57%, 65% และ 73% ที่อุณหภูมิสภาพแวดล้อม 30 องศาเซลเซียส

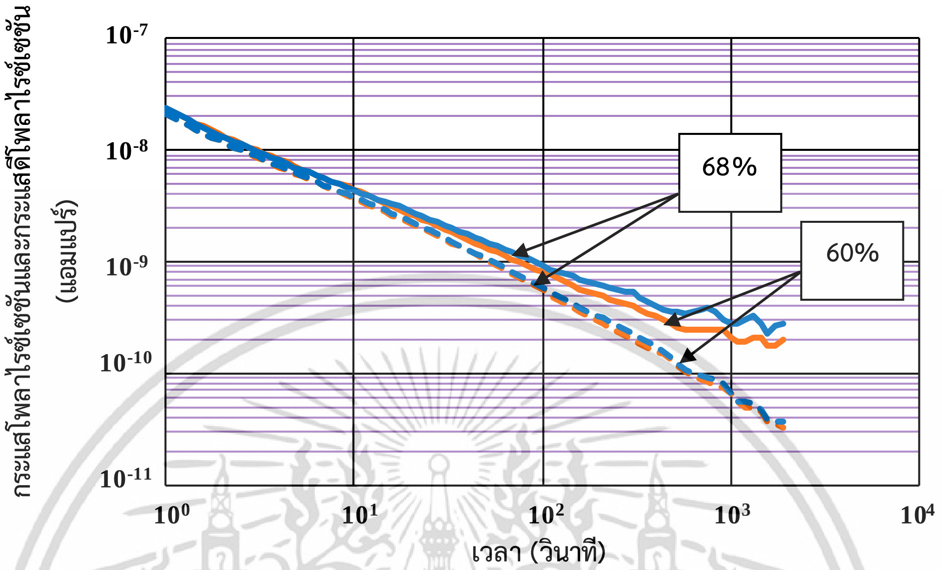
ตารางที่ 4.2 ความต้านทานและดัชนีการมีขั้วของขดลวดสเตเตอร์ในการทดสอบที่ 4.1.2.1

ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	ความต้านทานที่ 1 นาที (GΩ)	ความต้านทานที่ 10 นาที (GΩ)	ดัชนีการมีขั้ว
57	287	577	2.01
65	215	406	1.89
73	155	212	1.37

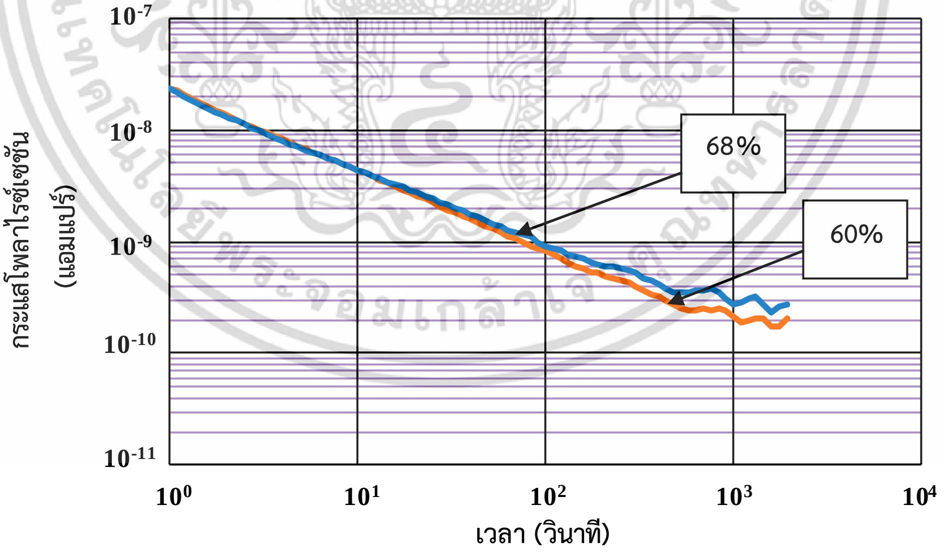
จากผลการทดสอบในรูปที่ 4.5 - 4.6 พบว่า เมื่อความชื้นสัมพัทธ์ของสภาพแวดล้อมขณะทำการทดสอบเพิ่มขึ้น จะทำให้กระแสโพลาไรซ์เซชันเพิ่มขึ้นซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจนตั้งแต่วินาทีที่ 10 ถึงวินาทีที่ 2,000 และจากรูปที่ 4.7 พบว่า เมื่อความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น กระแสดีโพลาไรซ์เซชันจะไม่มีการเปลี่ยนแปลง ยกเว้นที่ความชื้นสัมพัทธ์ 73% กระแสดีโพลาไรซ์เซชันจะมีค่าลดลงเล็กน้อยในช่วง 10 วินาทีแรกของการวัด และจากรูปที่ 4.8 พบว่า เมื่อความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น กระแสการนำไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้น ซึ่งการเพิ่มขึ้นของกระแสการนำไฟฟ้านี้คาดว่าเป็นผลจากการเพิ่มขึ้นของกระแสรั่วไหลตามผิวฉนวนซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณความชื้นของสภาพแวดล้อมขณะทำการทดสอบ และเมื่อพิจารณาดัชนีการมีขั้วที่คำนวณได้ในตารางที่ 4.2 พบว่า ดัชนีการมีขั้วจะลดลงเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ของสภาพแวดล้อมขณะทำการทดสอบเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2.2 การทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันในสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 60% และ 68% และมีอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

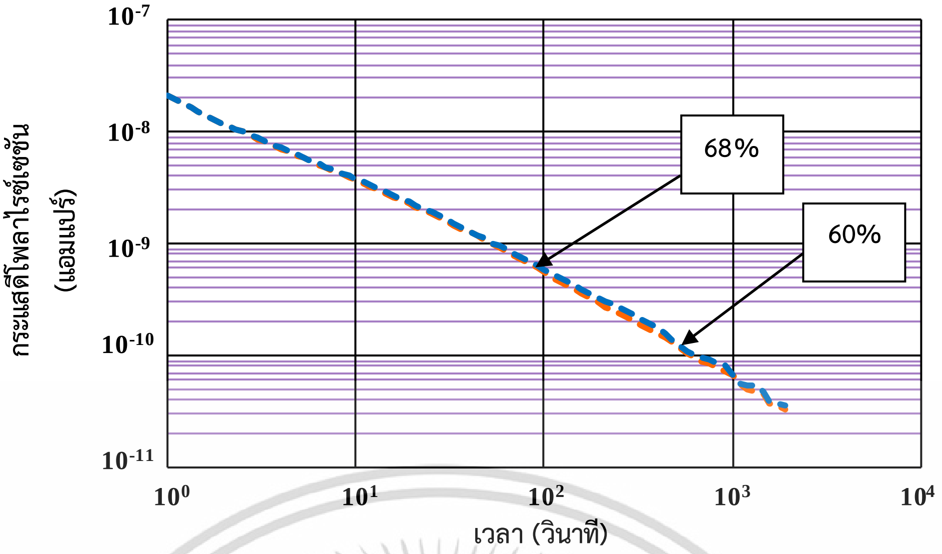


รูปที่ 4.9 กระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของขดลวดสเตเตอร์ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 60% และ 68% ที่อุณหภูมิสภาพแวดล้อม 20 องศาเซลเซียส

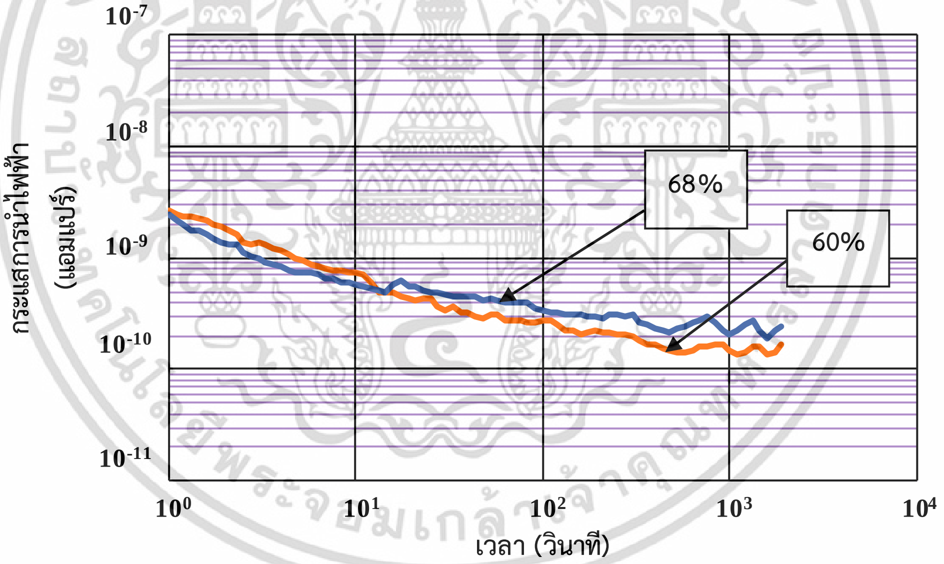


รูปที่ 4.10 กระแสโพลาไรซ์เซชันของขดลวดสเตเตอร์ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 60% และ 68% ที่อุณหภูมิสภาพแวดล้อม 20 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 กระแสดีโพลาไรซ์เซชันของขดลวดสเตเตอร์ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 60% และ 68% ที่อุณหภูมิสภาพแวดล้อม 20 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.12 กระแสการนำไฟฟ้าของขดลวดสเตเตอร์ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 60% และ 68% ที่อุณหภูมิสภาพแวดล้อม 20 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ความต้านทานและดัชนีการมีขั้วของขดลวดสเตเตอร์ในการทดสอบที่ 4.1.2.2

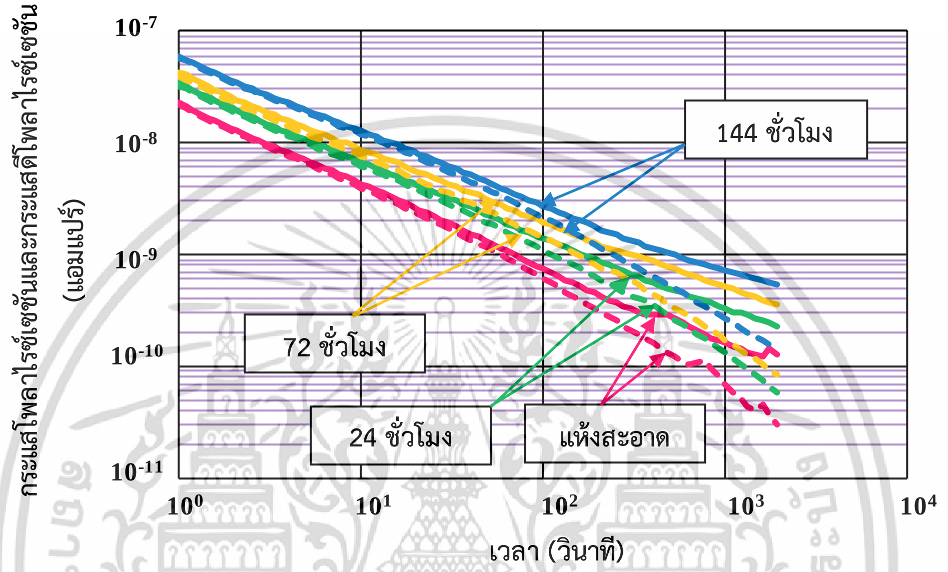
ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	ความต้านทานที่ 1 นาที (GΩ)	ความต้านทานที่ 10 นาที (GΩ)	ดัชนีการมีขั้ว
60	847	4,080	4.82
68	755	2,830	3.75

จากรูปที่ 4.9 - 4.12 พบว่า เมื่อความชื้นสัมพัทธ์ของสภาพแวดล้อมเพิ่มขึ้นจะทำให้กระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ซึ่งการเพิ่มขึ้นของกระแสโพลาไรซ์เซชันจะเห็นได้ชัดเจนตั้งแต่วินาทีที่ 10 ถึง วินาทีที่ 2,000 แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นของความชื้นสัมพัทธ์จะไม่ส่งผลต่อกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของฉนวน ซึ่งการเพิ่มขึ้นของกระแสการนำไฟฟ้านี้คาดว่าเป็นผลจากการเพิ่มขึ้นของกระแสรั่วไหลตามผิวฉนวนเนื่องจากปริมาณความชื้นในสภาพแวดล้อมเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาดัชนีการมีขั้วที่คำนวณได้ในตารางที่ 4.3 พบว่า ดัชนีการมีขั้วจะลดลงเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น จากการทดสอบนี้ทำให้ทราบว่าสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันควรมีความชื้นต่ำเพื่อให้กระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นจากสภาพแวดล้อมส่งผลต่อกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันน้อยที่สุด

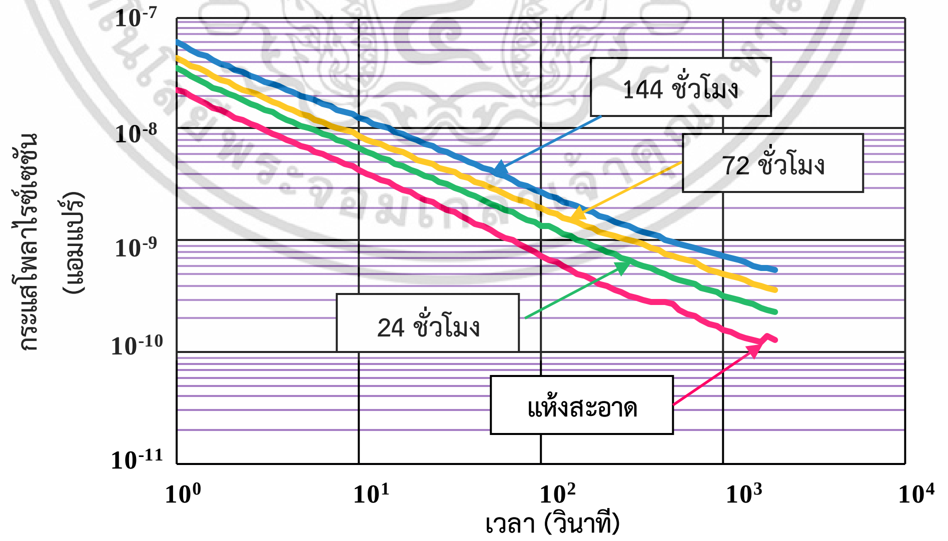
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 การทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของขดลวดสเตเตอร์ที่มีความชื้นอยู่ภายในเนื้อฉนวน

ในการทดสอบข้อที่ 4.1.3 นี้ ได้ทำการทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของขดลวดสเตเตอร์ที่แห้งสะอาดและฉนวนอยู่ในสภาพดีและที่ผ่านการแช่น้ำ 24, 72 และ 144 ชั่วโมง โดยที่สภาพแวดล้อมขณะทำการทดสอบมีอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส และมีความชื้นสัมพัทธ์ 46% – 56%

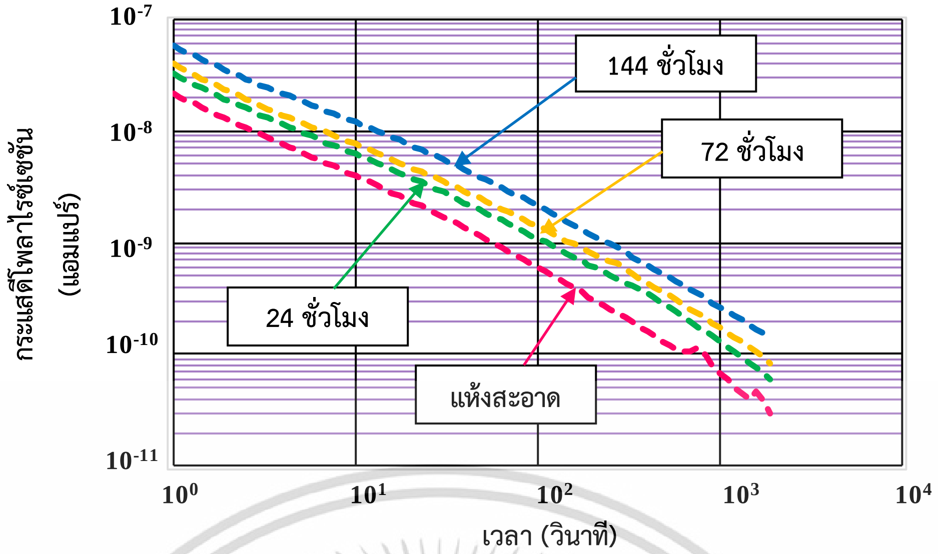


รูปที่ 4.13 กระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน ของขดลวดสเตเตอร์ที่แห้งสะอาดและที่ผ่านการแช่น้ำ 24, 72 และ 144 ชั่วโมง

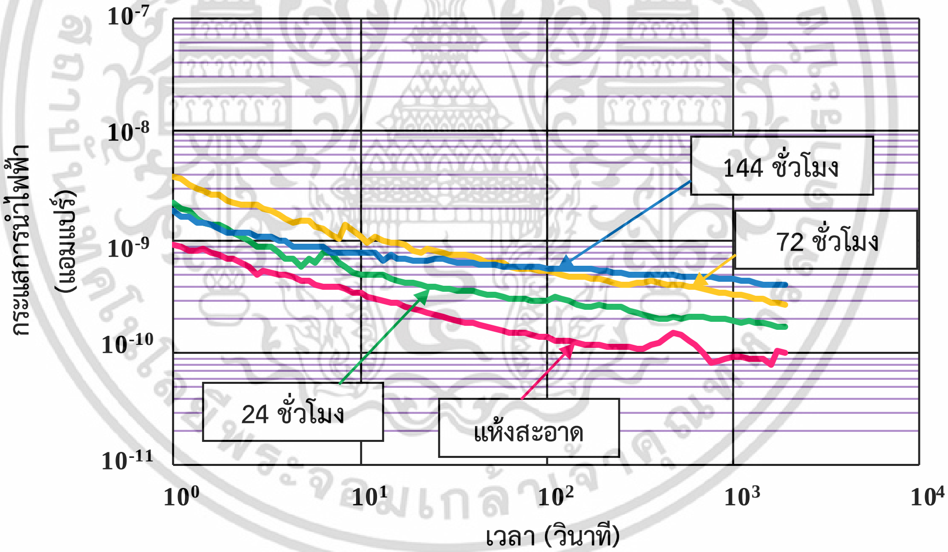


รูปที่ 4.14 กระแสโพลาไรซ์เซชันของขดลวดสเตเตอร์ที่แห้งสะอาดและที่ผ่านการแช่น้ำ 24, 72 และ 144 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 กระแสดีโพลาไรซ์เซชันของขดลวดสเตอร์ที่แห้งสะอาดและที่ผ่านการแช่น้ำ 24, 72 และ 144 ชั่วโมง



รูปที่ 4.16 กระแสการนำไฟฟ้าของขดลวดสเตอร์ที่แห้งสะอาดและที่ผ่านการแช่น้ำ 24, 72 และ 144 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ความต้านทานและดัชนีการมีขั้วของขดลวดสเตเตอร์ในการทดสอบที่ 4.1.3

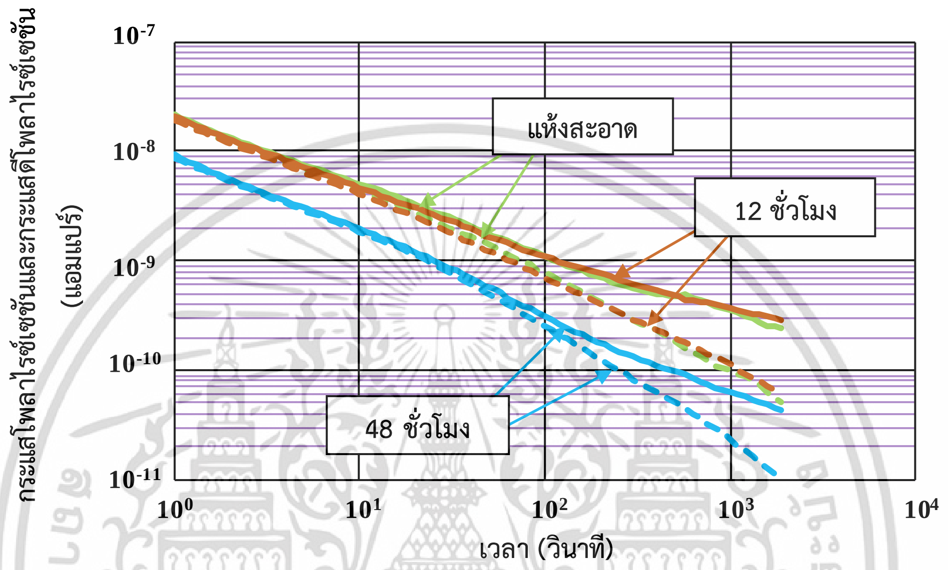
ระยะเวลาการแช่น้ำ (ชั่วโมง)	ความต้านทานที่ 1 นาที (GΩ)	ความต้านทานที่ 10 นาที (GΩ)	ดัชนีการมีขั้ว
แห้งสะอาด	899	4,270	4.75
24	510	2,280	4.47
72	368	1,450	3.95
144	259	1,090	4.20

จากผลการทดสอบในรูปที่ 4.13 - 4.15 พบว่า เมื่อจำนวนชั่วโมงในการแช่น้ำของขดลวดสเตเตอร์เพิ่มมากขึ้น (ความชื้นภายในเนื้อฉนวนเพิ่มมากขึ้น) กระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันจะเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดตลอดทั้งกราฟ และจากรูปที่ 4.16 พบว่า เมื่อจำนวนชั่วโมงในการแช่น้ำเพิ่มมากขึ้น กระแสการนำไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งการเพิ่มขึ้นของกระแสการนำไฟฟ้านี้อาจเป็นผลจากความชื้นที่ถูกดูดซับอยู่ภายในเนื้อฉนวนและเป็นผลจากความชื้นสัมพัทธ์ของสภาพแวดล้อมที่ทำการทดสอบไม่เท่ากัน และเมื่อพิจารณาดัชนีการมีขั้วที่คำนวณได้ในตารางที่ 4.4 พบว่า เมื่อจำนวนชั่วโมงในการแช่น้ำเพิ่มมากขึ้น ดัชนีการมีขั้วของฉนวนยังคงมีค่าใกล้เคียงกันและมีค่าอยู่ภายในช่วงที่มาตรฐาน [11] ยอมรับ

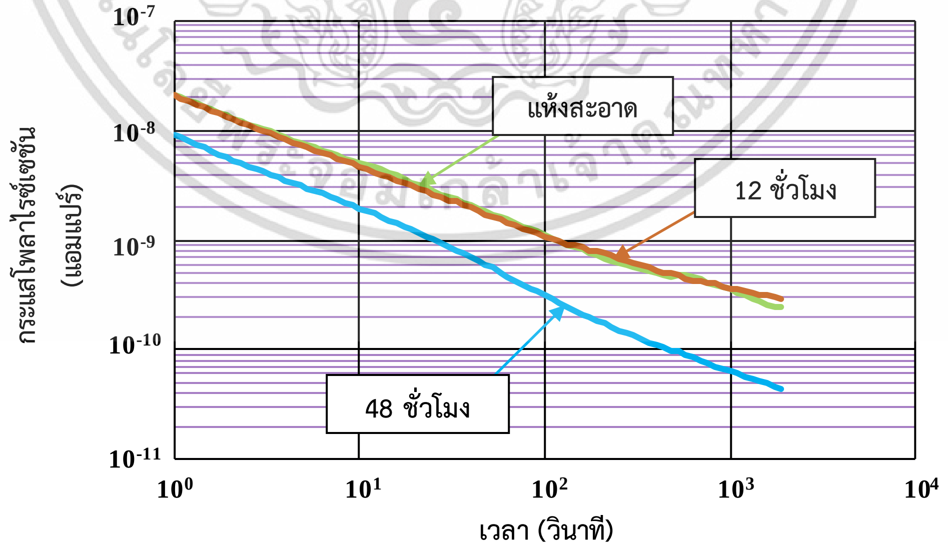
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.4 การทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของขดลวดสเต-เตอร์เมื่อฉนวนได้รับความร้อนเกินอุณหภูมิใช้งาน

ในการทดสอบข้อที่ 4.1.4 นี้ ได้ทำการทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของขดลวดสเตอร์ที่แห้งสะอาดและที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 12 และ 48 ชั่วโมง โดยที่สภาพแวดล้อมขณะทำการทดสอบมีอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส และมีความชื้นสัมพัทธ์ 48% – 50%

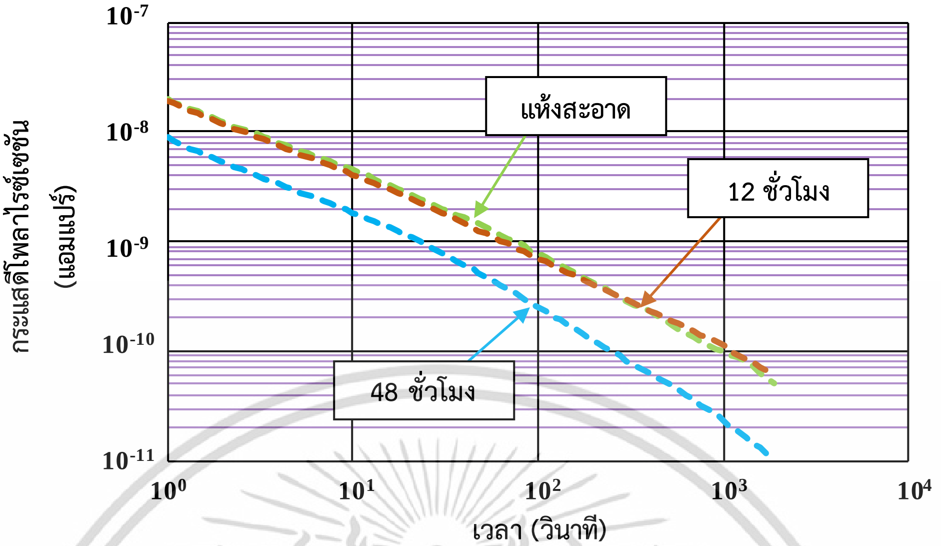


รูปที่ 4.17 กระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของขดลวดสเตอร์ที่แห้งสะอาดและที่ผ่านการอบเป็นระยะเวลา 12 และ 48 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส

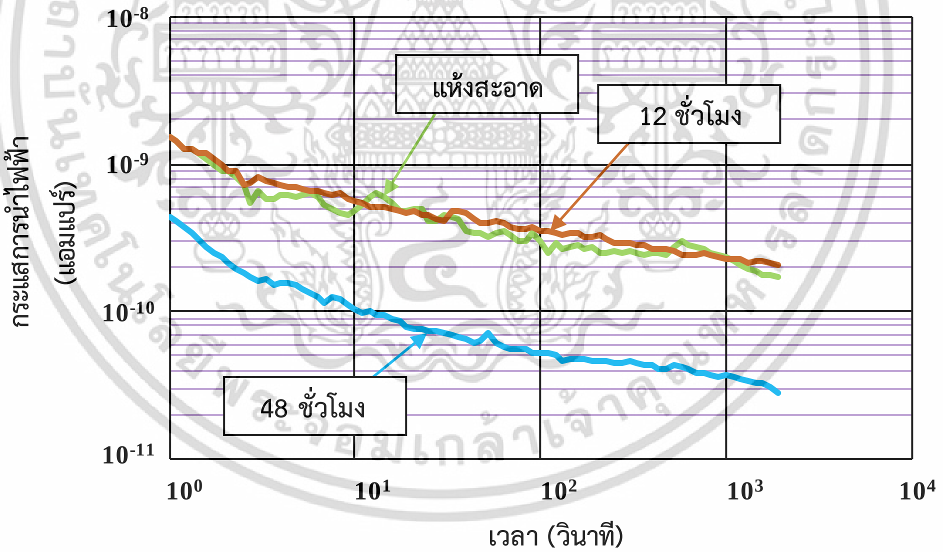


รูปที่ 4.18 กระแสโพลาไรซ์เซชันของขดลวดสเตอร์ที่แห้งสะอาดและที่ผ่านการอบเป็นระยะเวลา 12 และ 48 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 กระแสดีโพลาไรซ์เซชันของขดลวดสเตอร์ที่แห้งสะอาดและที่ผ่านการอบเป็นระยะเวลา 12 และ 48 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.20 กระแสการนำไฟฟ้าของขดลวดสเตอร์ที่แห้งสะอาดและที่ผ่านการอบเป็นระยะเวลา 12 และ 48 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 ความต้านทานและดัชนีการมีขั้วของขดลวดสเตเตอร์ในการทดสอบที่ 4.1.4

ระยะเวลาในการอบ (ชั่วโมง)	ความต้านทานที่ 1 นาที (GΩ)	ความต้านทานที่ 10 นาที (GΩ)	ดัชนีการมีขั้ว
แห้งสะอาด	631	2,110	3.35
12	662	2,300	3.47
48	2050	11,400	5.54

จากผลการทดสอบในรูปที่ 4.17 - 4.20 พบว่า เมื่อขดลวดสเตเตอร์ผ่านการอบเป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง กระแสโพลาไรซ์เซชัน กระแสดีโพลาไรซ์เซชัน และกระแสการนำไฟฟ้าจะยังคงมีค่าใกล้เคียงกับกระแสโพลาไรซ์เซชัน กระแสดีโพลาไรซ์เซชัน และกระแสการนำไฟฟ้าของขดลวดสเตเตอร์ที่แห้งสะอาด แต่เมื่อขดลวดสเตเตอร์ผ่านการอบเป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง พบว่า กระแสโพลาไรซ์เซชัน กระแสดีโพลาไรซ์เซชัน และกระแสการนำไฟฟ้า จะลดลงอย่างเห็นได้ชัดตลอดทั้งกราฟ และเมื่อพิจารณารูปที่ 4.17 – 4.19 พบว่า กราฟกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของขดลวดสเตเตอร์ที่ผ่านการอบเป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง จะมีส่วนโค้งเล็กน้อยที่วินาทีที่ 30 เมื่อพิจารณาดัชนีการมีขั้วที่คำนวณได้ในตารางที่ 4.5 พบว่า เมื่อขดลวดสเตเตอร์ผ่านการอบจะทำให้ค่าดัชนีการมีขั้วของฉนวนสูงขึ้น แต่ทั้งนี้ค่าดัชนีการมีขั้วของขดลวดสเตเตอร์ในตารางที่ 4.5 ยังคงมีค่าอยู่ภายในช่วงที่มาตรฐาน [11] ยอมรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การทดสอบภาคสนาม

การทดสอบภาคสนามมีทั้งหมด 3 การทดสอบ ดังนี้

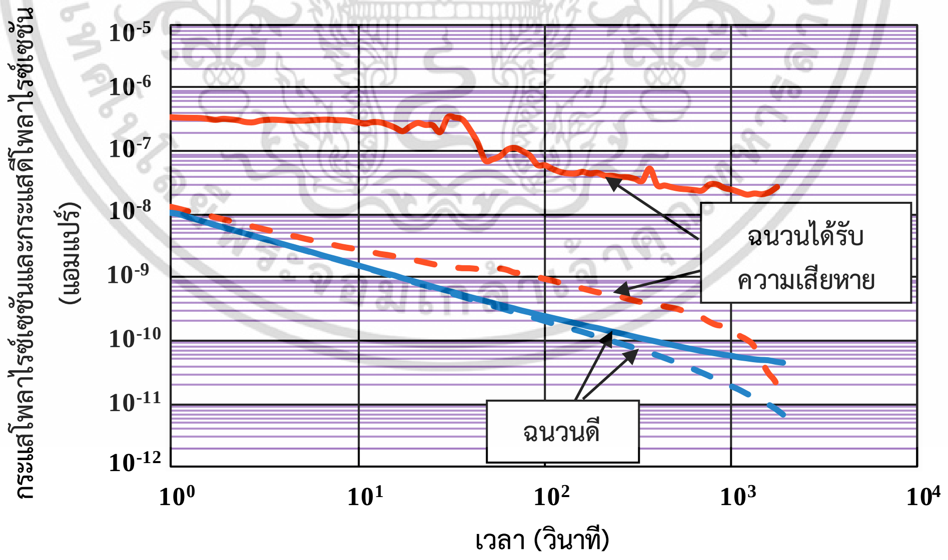
4.2.1 การทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของแท่งสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ได้รับความเสียหายจากการเกิดความผิดพร่องในขณะที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าถูกซิงโครไนซ์เข้าไปในระบบไฟฟ้ากำลัง

4.2.2 การทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของมอเตอร์ก่อนและหลังกระบวนการพันขดลวดใหม่

4.2.3 การทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของมอเตอร์ตามแผนการซ่อมบำรุงรักษา

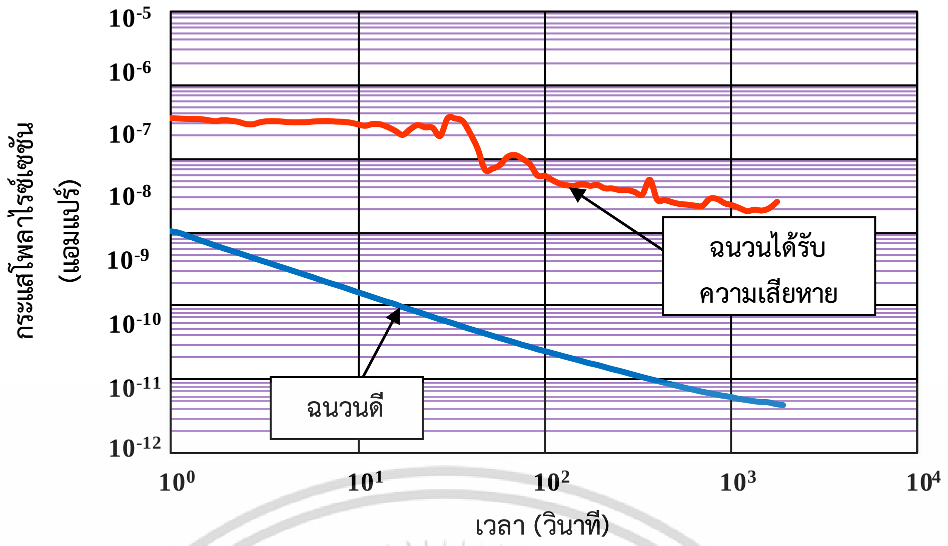
4.2.1 การทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของแท่งสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ได้รับความเสียหายจากการเกิดความผิดพร่องในขณะที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าถูกซิงโครไนซ์เข้าไปในระบบไฟฟ้ากำลัง

การทดสอบในข้อที่ 4.2.1 นี้ ได้ทำการทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของแท่งสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีพิกัดแรงดัน 11 กิโลโวลต์ โดยทำการวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของแท่งสเตเตอร์ที่ฉนวนอยู่ในสภาพดีเทียบกับที่ฉนวนได้รับความเสียหายจากการเกิดความผิดพร่องแบบไลน์ทูกราวด์ในขณะที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าถูกซิงโครไนซ์เข้าไปในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยสภาพแวดล้อมขณะทำการทดสอบมีอุณหภูมิ 31 องศาเซลเซียส มีความชื้นสัมพัทธ์ 70%

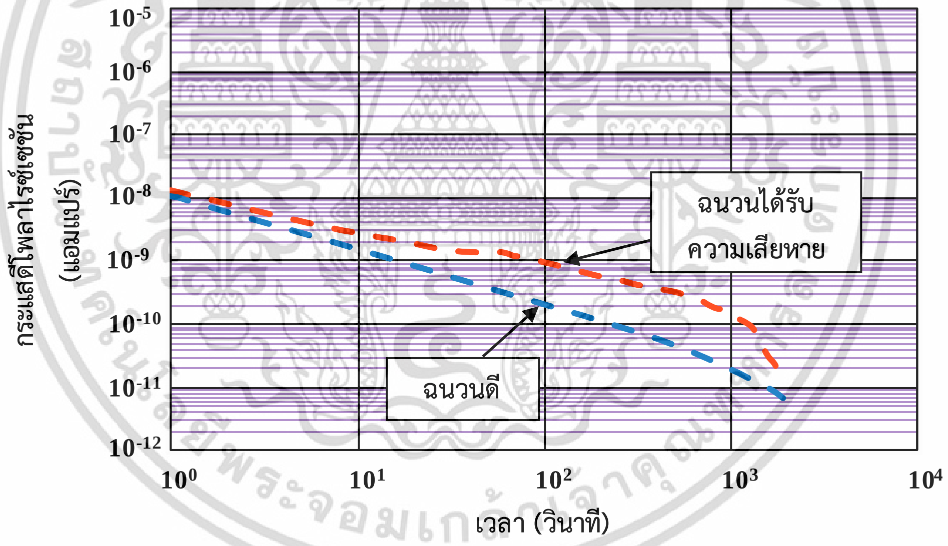


รูปที่ 4.21 กระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของแท่งสเตเตอร์ที่ฉนวนอยู่ในสภาพดีเทียบกับที่ฉนวนได้รับความเสียหายจากการเกิดความผิดพร่องแบบไลน์ทูกราวด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 กระแสโพลาไรซ์เซชันของแท่งสเตเตอร์ที่ฉนวนอยู่ในสภาพดีเทียบกับที่ฉนวนได้รับความเสียหายจากการเกิดความผิดพร่องแบบไลน์ทูกราวด์



รูปที่ 4.23 กระแสดีโพลาไรซ์เซชันของแท่งสเตเตอร์ที่ฉนวนอยู่ในสภาพดีเทียบกับที่ฉนวนได้รับความเสียหายจากการเกิดความผิดพร่องแบบไลน์ทูกราวด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ความต้านทานและดัชนีการมีขั้วของขดลวดสเตเตอร์ในการทดสอบที่ 4.2.1

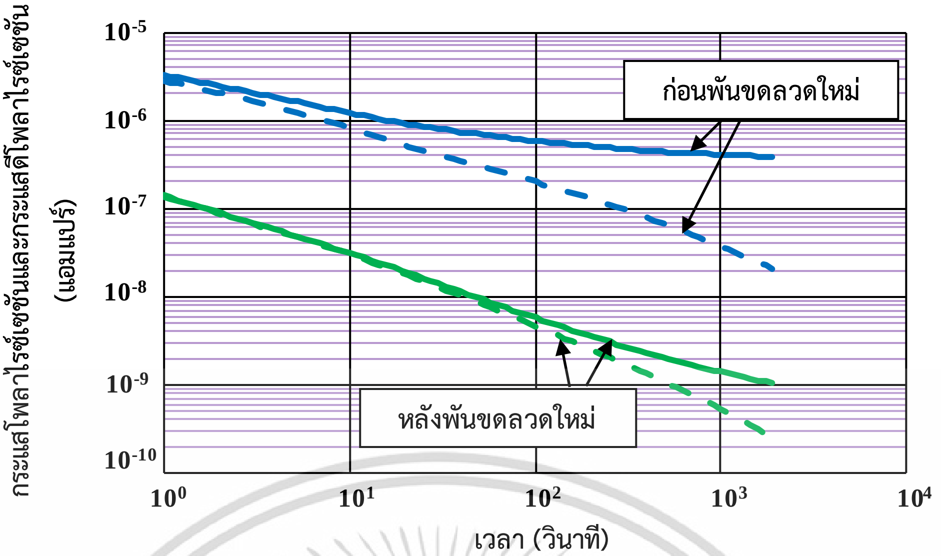
	ความต้านทานที่ 1 นาที (GΩ)	**ความต้านทานที่ 10 นาที (GΩ)**	**ดัชนีการมีขั้ว**
ขดลวดสเตเตอร์ที่ฉนวนอยู่ในสภาพดี	2,800	35,000	4.82
ขดลวดสเตเตอร์ที่ฉนวนได้รับความเสียหาย	10.8	42.1	3.90

จากรูปที่ 4.21 – 4.23 พบว่า กระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของแท่งสเตเตอร์ที่ฉนวนได้รับความเสียหายมีค่าสูงกว่ากระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของแท่งสเตเตอร์ที่ฉนวนอยู่ในสภาพดีและมีลักษณะของกราฟแตกต่างจากกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของแท่งสเตเตอร์ที่ฉนวนอยู่ในสภาพดีอย่างชัดเจน

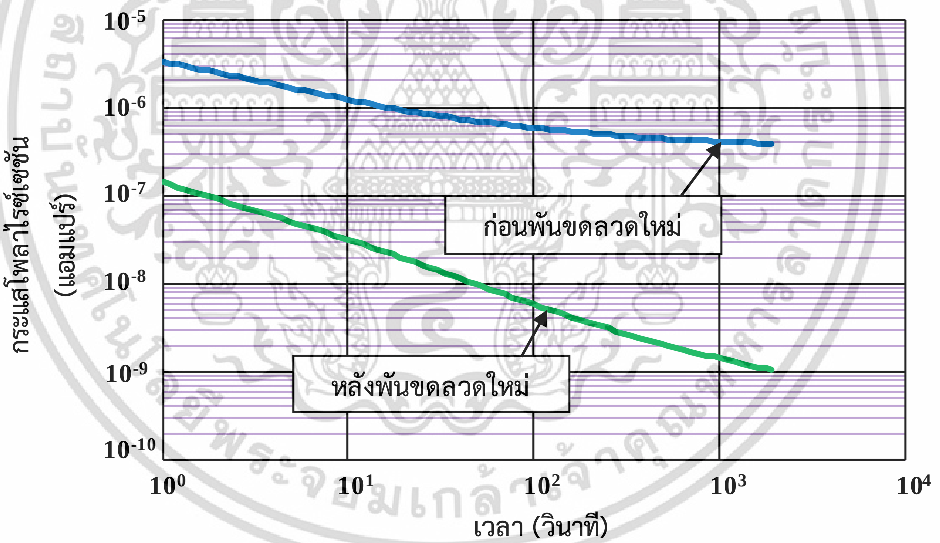
4.2.2 การทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของมอเตอร์ก่อนและหลังกระบวนการพันขดลวดใหม่

การทดสอบที่ 4.2.2 นี้ ได้ทำการทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีพิกัดแรงดัน 6.6 กิโลโวลต์ ก่อนและหลังกระบวนการพันขดลวดใหม่ โดยก่อนกระบวนการพันขดลวดใหม่ พบว่า มีฝุ่นอยู่ที่บริเวณผิวของขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์เป็นจำนวนมาก สำหรับการทดสอบก่อนกระบวนการพันขดลวดใหม่ ได้ทำการทดสอบในสภาวะแวดล้อมที่มีอุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส มีความชื้นสัมพัทธ์ 55% และสำหรับการทดสอบหลังกระบวนการพันขดลวดใหม่ ได้ทำการทดสอบในสภาวะแวดล้อมที่มีอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส มีความชื้นสัมพัทธ์ 73%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

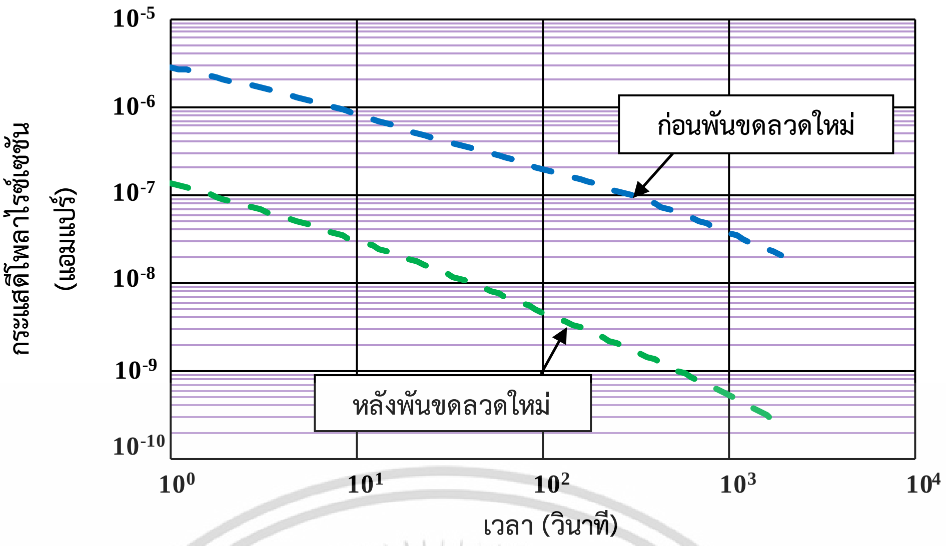


รูปที่ 4.24 กระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของมอเตอร์ก่อนและหลังกระบวนการพันขดลวดใหม่

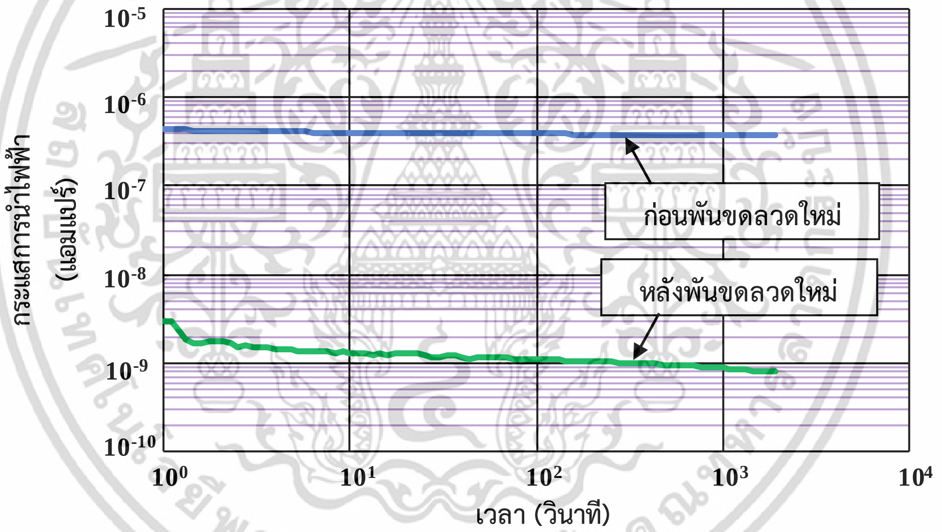


รูปที่ 4.25 กระแสโพลาไรซ์เซชันของมอเตอร์ก่อนและหลังกระบวนการพันขดลวดใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.26 กระแสดีโพลาไรซ์เซชันของมอเตอร์ก่อนและหลังกระบวนการพันขดลวดใหม่



รูปที่ 4.27 กระแสการนำไฟฟ้าของมอเตอร์ที่ก่อนและหลังกระบวนการพันขดลวดใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 ความต้านทานและดัชนีการมีขั้วของขดลวดสเตเตอร์ในการทดสอบที่ 4.2.2

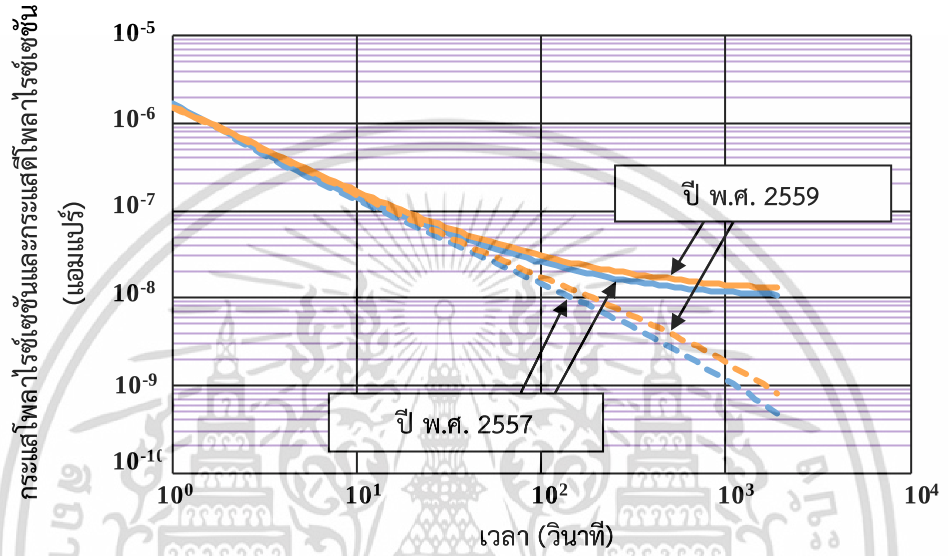
	ความต้านทานที่ 1 นาที (MΩ)	**ความต้านทานที่ 10 นาที (MΩ)**	**ดัชนีการมีขั้ว**
ก่อนพันขดลวดใหม่	152	233	1.53
หลังพันขดลวดใหม่	11,900	54,600	4.57

จากรูปที่ 4.24 – 4.27 พบว่า กระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของมอเตอร์ก่อนเข้าสู่กระบวนการพันขดลวดใหม่มีขนาดสูงกว่ากระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของมอเตอร์หลังเข้าสู่กระบวนการพันขดลวดใหม่อย่างเห็นได้ชัดตลอดทั้งกราฟ ซึ่งการที่กระแสดีโพลาไรซ์เซชันของมอเตอร์ก่อนการพันขดลวดใหม่มีขนาดสูงกว่าหลังพันขดลวดใหม่ได้แสดงให้เห็นถึงการเสื่อมสภาพของฉนวนของขดลวดสเตอร์เนื่องจากระยะเวลาในการใช้งาน และในรูปที่ 4.27 พบว่ากระแสการนำไฟฟ้าของมอเตอร์ก่อนพันขดลวดใหม่มีขนาดสูงกว่าหลังพันขดลวดใหม่ตลอดทั้งกราฟ ซึ่งผลการทดสอบในรูปที่ 4.27 นี้ สอดคล้องกับการพบฝุ่นปนเปื้อนที่บริเวณผิวของขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์และในรูปที่ 4.26 ได้แสดงให้เห็นว่าฉนวนใหม่ก่อนการใช้งานจะมีคุณสมบัติการเป็นฉนวนที่ดีกว่าแนวนเก่าที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว และเมื่อพิจารณาค่าดัชนีการมีขั้วที่คำนวณได้ในตารางที่ 4.7 พบว่า ค่าดัชนีการมีขั้วของมอเตอร์ก่อนพันขดลวดใหม่มีค่าต่ำกว่าที่มาตรฐาน [11] ยอมรับ แต่ค่าดัชนีการมีขั้วของมอเตอร์หลังพันขดลวดใหม่มีค่าอยู่ในช่วงที่มาตรฐาน [11] ยอมรับ ซึ่งค่าดัชนีการมีขั้วที่คำนวณได้นี้ทำให้เห็นว่าฉนวนใหม่ก่อนการใช้งานจะมีคุณสมบัติการเป็นฉนวนที่ดีกว่าฉนวนเก่าที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว

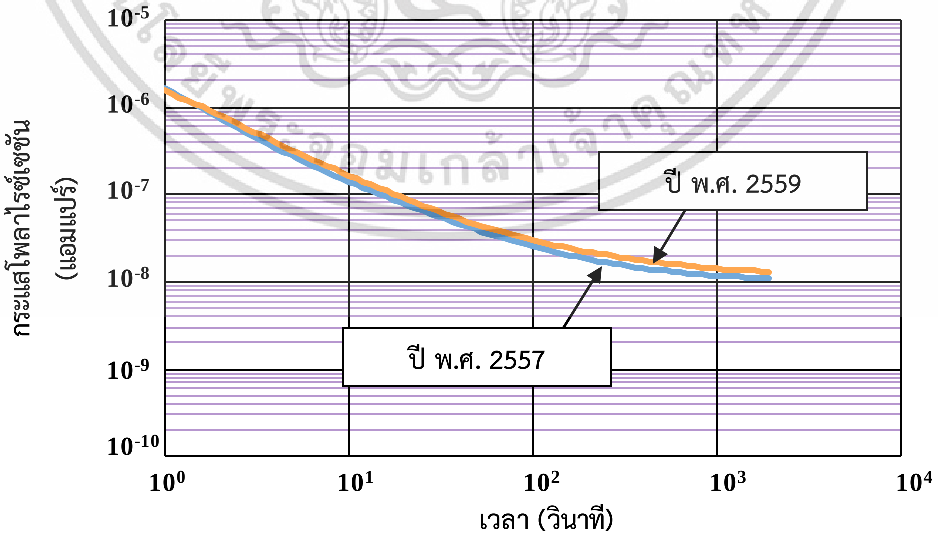
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 การทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของมอเตอร์ตามแผนการซ่อมบำรุงรักษา

การทดสอบที่ 4.2.3 นี้ ได้ทำการทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีพิกัดแรงดัน 6.6 กิโลโวลต์ หลังผ่านกระบวนการทำความสะอาดในปี พ.ศ. 2557 และ พ.ศ. 2559 โดยได้ทำการทดสอบมอเตอร์ในสภาวะแวดล้อมที่มีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 32-33 องศาเซลเซียส

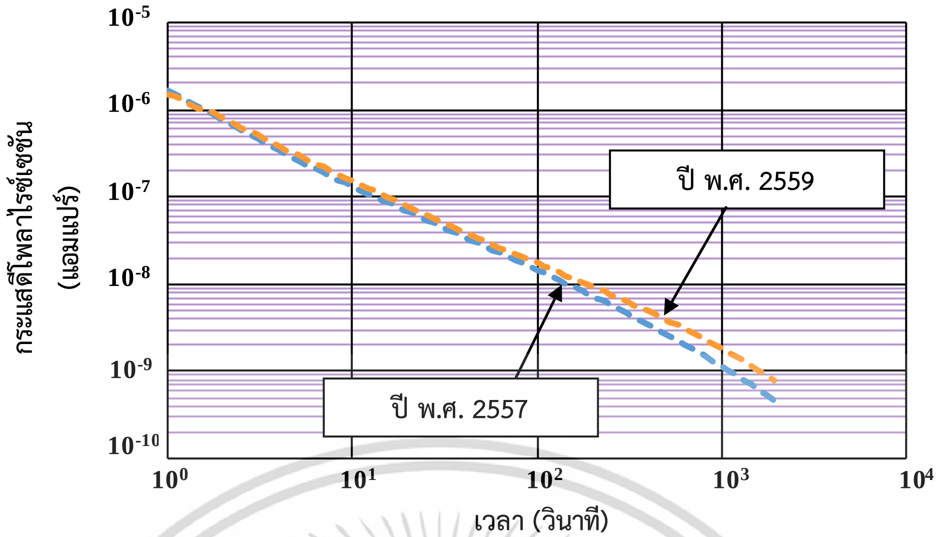


รูปที่ 4.28 กระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของมอเตอร์ในปี พ.ศ. 2557 เทียบกับในปี พ.ศ. 2559

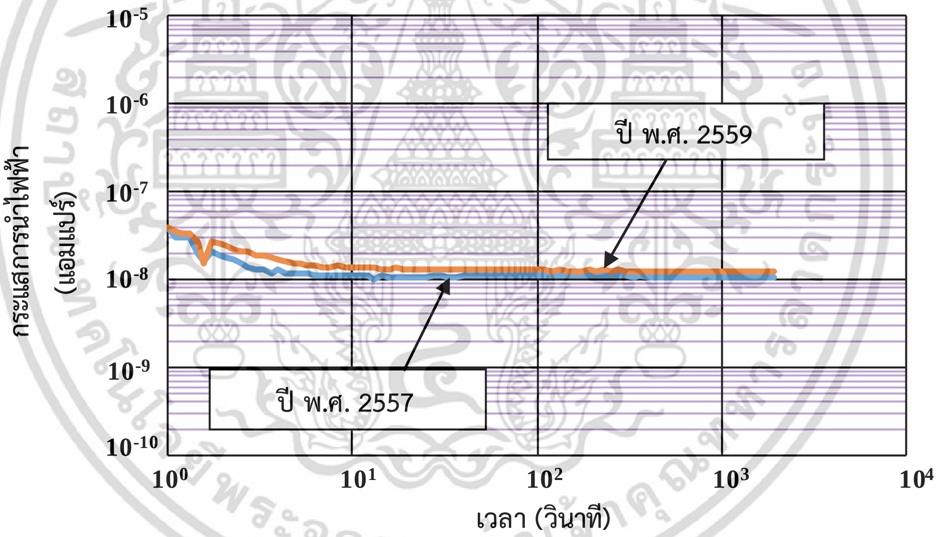


รูปที่ 4.29 กระแสโพลาไรซ์เซชันของมอเตอร์ในปี พ.ศ. 2557 เทียบกับในปี พ.ศ. 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.30 กระแสดีโพลาไรซ์เซชันของมอเตอร์ในปี พ.ศ. 2557 เทียบกับในปี พ.ศ. 2559



รูปที่ 4.31 กระแสการนำไฟฟ้าของมอเตอร์ในปี พ.ศ. 2557 เทียบกับในปี พ.ศ. 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 ความต้านทานและดัชนีการมีขั้วของขดลวดสเตเตอร์ในการทดสอบที่ 4.2.3

	ความต้านทานที่ 1 นาที (MΩ)	ความต้านทานที่ 10 นาที (MΩ)	ดัชนีการมีขั้ว
ปี พ.ศ. 2557	28.8	77.7	2.7
ปี พ.ศ. 2559	24.8	63.4	2.5

จากรูปที่ 4.28 – 4.31 พบว่า กระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของมอเตอร์ในปี พ.ศ. 2559 มีขนาดสูงกว่าของปี พ.ศ. 2557 ซึ่งการเพิ่มขึ้นของกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของมอเตอร์แสดงให้เห็นถึงการเสื่อมสภาพของฉนวนของขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์ตามอายุการใช้งานที่มากขึ้น และในรูปที่ 4.31 พบว่า กระแสการนำไฟฟ้าของมอเตอร์ของปี พ.ศ. 2559 มีขนาดสูงกว่าของปี พ.ศ. 2557 เล็กน้อย และจากดัชนีการมีขั้วของมอเตอร์ที่คำนวณได้ในตารางที่ 4.8 พบว่า ในปี พ.ศ. 2559 มีค่าดัชนีการมีขั้วต่ำกว่าในปี พ.ศ. 2557 เล็กน้อย ซึ่งค่าดัชนีการมีขั้วของทั้ง 2 ปี ยังคงมีค่าอยู่ในช่วงที่มาตรฐาน [11] ยอมรับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามอเตอร์ดังกล่าวยังคงสามารถปฏิบัติงานต่อไปได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลการทดสอบ

5.1 สรุปผลการทดสอบ

5.1.1 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

จากการทดสอบ พบว่า อุณหภูมิของสภาพแวดล้อมขณะทำการทดสอบจะส่งผลต่อกระแสโพลาไรซ์เซชัน โดยอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้กระแสโพลาไรซ์เซชันเพิ่มขึ้น ซึ่งการเพิ่มขึ้นของกระแสโพลาไรซ์เซชันนี้เป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของกระแสการนำไฟฟ้าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ดังนั้น ควรทำการทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของขดลวดสเตเตอร์ในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิต่ำ ดังเช่น ในวิทยานิพนธ์นี้ ได้ทำการทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส และพบว่า ความชื้นของสภาพแวดล้อมขณะทำการทดสอบส่งผลต่อกระแสโพลาไรซ์เซชัน โดยปริมาณความชื้นที่มากขึ้นจะส่งผลให้กระแสโพลาไรซ์เซชันเพิ่มขึ้น ซึ่งการเพิ่มขึ้นของกระแสโพลาไรซ์เซชันเป็นผลจากการเพิ่มขึ้นของกระแสรั่วไหลตามผิวฉนวนเมื่อสภาพแวดล้อมขณะทำการทดสอบมีความชื้นมากขึ้น ดังนั้น ควรทำการทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของขดลวดสเตเตอร์ในสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นต่ำ และจากการจำลองกรณีศึกษา พบว่า ความชื้นที่ถูกดูดซับอยู่ภายในเนื้อฉนวนจะส่งผลต่อกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันโดยเมื่อความชื้นภายในเนื้อฉนวนเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้กระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ความชื้นภายในเนื้อฉนวนยังส่งผลให้กระแสการนำไฟฟ้าที่คำนวณได้เพิ่มขึ้น และพบว่า เมื่อฉนวนได้รับความร้อนเกินอุณหภูมิใช้งานในระยะเวลาหนึ่ง ความร้อนจะส่งผลทำให้กระแสโพลาไรซ์เซชัน กระแสดีโพลาไรซ์เซชัน และกระแสการนำไฟฟ้าลดลง ซึ่งจะส่งผลทำให้ค่าดัชนีการมีขั้วของฉนวนเพิ่มขึ้น และจะส่งผลให้กราฟกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันมีส่วนโค้งเล็กน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.2 การทดสอบภาคสนาม

จากการทดสอบภาคสนาม พบว่า การทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันสามารถตรวจจับปัญหาที่เกิดจากการมีฝุ่นผงปนเปื้อนที่ผิวฉนวนได้และสามารถนำมาใช้เป็นข้อมูลเพื่อดูแนวโน้มการเสื่อมสภาพของฉนวนได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

ทั้งนี้ ในการทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันเพื่อนำมาใช้ประเมินคุณภาพฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนแรงดันสูงจำเป็นที่จะต้องมีข้อมูลกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของฉนวนที่อยู่ในสภาพดีไว้เป็นข้อมูลอ้างอิงเพื่อเอาไว้เปรียบเทียบกับกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของฉนวนเมื่อทำการวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันในครั้งต่อๆ ไป

สำหรับงานวิจัยต่อไปในอนาคต ควรทำการรวบรวมกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนแรงดันสูงที่เกิดปัญหาหรือได้รับความเสียหายจากกรณีต่างๆ และทำการจำแนกข้อมูลเหล่านั้นไว้เป็นข้อมูลอ้างอิงสำหรับเครื่องจักรกลหมุนแรงดันสูงที่เกิดความเสียหายหรือปัญหาในกรณีนั้นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] Supatra A. Bhumiwat, “The latest Technology for On-Site Insulation Condition Assessment of Electrical Power Apparatus,” **Electricity Engineers Association of New Zealand**, Christchurch, June 21-22, 2002.

[2] C. Sumereder, R. Woschitz and M. Muhr, “Polarization-Depolarization Measurements at Insulation Systems for Totating Machines,” **The International Symposium on Electrical Insulating Materials**, Kitakyushu, Japan, June 5-9, 2005, pp. 706-709.

[3] M. Farahani, H. Borsi and E. Gockenbach, “Dielectric Response Studies on Insulating System of High Voltage Rotating Machines,” **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, February, 2006, Vol. 13 pp. 383-393.

[4] S. A. Bhumiwat, “Application of Polarisation Depolarisation Current (PDC) technique on fault and trouble analysis of stator insulation,” **Cigre Sc A1 & D1 Joint Colloquim**, October 24, 2007, pp. 79-87.

[5] S. Bhumiwat, “Practical experiences on condition assessment of stator insulation using Polarisation / Depolarisation Current technique,” **CIGRE 2008 Session**, Paris, August 24-29, 2008, pp. D1-210.

[6] อภิชาติ นิ่มเทียน. **“เทคนิคการตรวจวัดความชื้นของกระดาษฉนวนของหม้อแปลงโดยใช้กระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน”** วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง, 2552.

[7] G.C. Stone and M. Sasic, “Experience with DC Polarization-Depolarization Measurements on Stator Winding Insulation,” **Electrical Insulation Conference**, Ottawa, Ontario, Canada, June 2-5, 2013, pp. 7-10.

[8] Greg C. Stone, Edward A. Boulter Ian Culbert and Hussein Dhirani, **Electrical Insulation for Rotating Machines**, 1st Ed., Wiley-IEEE Press, 2004.

[9] Kwan Chi Kao, **Dielectric Phenomena in Solids**, 1st Ed., Academic Press, 2004.

[10] Walter S. Zaengl, “Dielectric Spectroscopy in Time and Frequency Domain for HV Power Equipment, Part I: Theoretical Considerations,” **IEEE Electrical Insulation Magazine**, September-October, 2003, pp. 5-19.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

[12] J. Alff, V. Der Houhanessian, W. S. Zaengl and A. J. Kachler, "A novel, compact Instrument for the measurement and evaluation of relaxation currents conceived for on-site diagnosis of electrical power apparatus," **IEEE International Symposium on Electrical Insulation**, Anaheim, USA, April 2-5, 2000, pp. 161-167.

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก
ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. พัชรี ทองอินต๊ะ และ นรเศรษฐ พัฒนเดช, “การวินิจฉัยฉนวนของเครื่องกำเนิด ไฟฟ้าด้วยวิธีการวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน,” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ ๓๘, วันที่ ๑๘ – ๒๐ พฤศจิกายน ๒๕๕๘, โรงแรมวรบุรี อโยธยา คอนเวนชั่น รีสอร์ท, จังหวัดพระนครศรีอยุธยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ ๓๘
The 38th Electrical Engineering Conference (EECON-38)

EECON XXXVIII

UTCC University of the Thai Chamber of Commerce
มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย

ไฟฟ้ากำลัง (PW)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)

Volume I

AEC Synergy

วันที่ ๑๘ - ๒๐ พฤศจิกายน พ.ศ. ๒๕๕๘
โรงแรมวรบุรี อโยธยา คอนเวนชั่น รีสอร์ท จังหวัดพระนครศรีอยุธยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีก... ที่มีการนำไปใช้

UTCC School of Engineering
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย
MAN MANAGEABLE INSULATOR
QTC
CROWN CERAMICS

การวินิจฉัยฉนวนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยวิธีการวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน

Generator Insulation Diagnosis Using Polarization and Depolarization Current Measurement

พัชรี ทองอินต๊ะ[1] และ นรเศรษฐ พัฒนเดช[1]

[1]ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

patcharee.th24@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการวินิจฉัยคุณลักษณะสมบัติการฉนวนของแท่งสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยอาศัยการวิเคราะห์กระแสโพลาไรเซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน (Polarization and Depolarization Current, PDC) การวินิจฉัยคุณลักษณะสมบัติการฉนวนของแท่งสเตเตอร์เริ่มจากการนำแท่งสเตเตอร์ชนิดโรเบลบาร์ (Roebel bar) จำนวน 2 แท่ง ที่มีสภาพฉนวนแตกต่างกันมาทำการทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันด้วยเครื่องวิเคราะห์กระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน (PDC Analyser) จากนั้นเครื่องวิเคราะห์ดังกล่าวจะนำข้อมูลกระแสที่วัดได้ไปคำนวณหาดัชนีการมีขั้ว (Polarization Index, PI) แฟคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก (Dielectric Dissipation Factor, DDF) และอัตราส่วนค่าความจุไฟฟ้า (Capacitance ratio, C ratio) เพื่อนำมาใช้เป็นตัวแปรในการวิเคราะห์และวินิจฉัยคุณลักษณะสมบัติการฉนวนของแท่งสเตเตอร์ร่วมกับกราฟกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน ในบทความนี้การทดสอบถูกแบ่งออกเป็น 3 กรณี โดยกรณีแรก คือ ฉนวนของแท่งสเตเตอร์อยู่ในสภาพดี กรณีที่สอง คือ ฉนวนของแท่งสเตเตอร์ได้รับความชื้น และกรณีที่สาม คือ ฉนวนของแท่งสเตเตอร์ได้รับความเสียหาย จากการทดสอบพบว่ากระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันสามารถบ่งบอกถึงสภาพการเสื่อมของฉนวนได้ และการใช้ดัชนีการมีขั้วเพียงตัวเดียวในการวิเคราะห์และวินิจฉัยคุณลักษณะสมบัติการฉนวนไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการวินิจฉัยคุณลักษณะสมบัติการฉนวนที่มีประสิทธิภาพได้

คำสำคัญ: กระแสโพลาไรซ์เซชัน กระแสดีโพลาไรซ์เซชัน เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ฉนวนของแท่งสเตเตอร์

Abstract

This paper presents the diagnosis of stator bar insulation characteristic of generator by polarization and depolarization current (PDC) analysis. The diagnosis process was started with the measuring of PDC of two roebel stator bars which were different in insulation characteristic. Then, the PDC analyser evaluated the measured currents to compute Polarization Index (PI), Dielectric Dissipation Factor (DDF) and Capacitance ratio (C ratio). These parameters were analyzed and compared with PDC value to evaluate the characteristic of the stator insulation. In this paper, experiments were divided into three cases testing with various stator bars, the first case was experimented with the good insulation bar, the second case was tested with the moisture insulation bar and the third case was examined with the damaged insulation bar. The experimental results showed that PDC can identify the aging of an insulation. Only PI cannot be used to analyze and diagnose the insulation characteristic effectively.

Keywords: Polarization current, Depolarization current, Generator, stator bar insulation

1. บทนำ

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นหนึ่งในอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อระบบผลิตกำลังไฟฟ้า ดังนั้น หากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเกิดความผิดพร่องหรือได้รับความเสียหายก็จะส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบและทำให้ความน่าเชื่อถือของระบบลดลง ซึ่งสาเหตุหลักประการหนึ่งที่ทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเกิดความผิดพร่องและได้รับความเสียหาย คือ การเสื่อมสภาพของฉนวนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังนั้น หากสามารถวิเคราะห์และวินิจฉัยสภาพฉนวนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าก่อนที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะเกิดความผิดพร่องและได้รับความเสียหายได้ก็ย่อมเป็นประโยชน์ต่อระบบผลิตกำลังไฟฟ้า และยังเป็นการช่วยให้ผู้ปฏิบัติงานใช้งานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ พร้อมทั้งยังสามารถนำข้อมูลการวิเคราะห์และวินิจฉัยสภาพฉนวนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไปใช้ประกอบการวางแผนซ่อมบำรุงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นได้

ปัจจุบันวิธีการที่ใช้ในการวิเคราะห์และวินิจฉัยคุณลักษณะสมบัติการฉนวนเพื่อทำให้ทราบถึงสภาพของการฉนวนมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี เช่น การวัดค่าความต้านทานฉนวน (insulation resistance) และหาค่าดัชนีการมีขั้ว (Polarization Index, PI) ของฉนวนด้วยเครื่องวัดความต้านทานฉนวน (insulation resistance meter) การวัดแฟคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก (Dielectric Dissipation Factor, DDF) ด้วยวิธีการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดสอบทิปอัฟ (Tip-up test) และการทดสอบการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (Partial discharge test) เป็นต้น แต่วิธีการดังกล่าวใช้แรงดันในการทดสอบสูงซึ่งอาจส่งผลให้ฉนวนเกิดความบอบช้ำหรือเกิดความเสียหายเพิ่มขึ้นจากแรงดันทดสอบได้ ดังนั้น หากมีวิธีการทดสอบเพื่อวิเคราะห์และวินิจฉัยคุณลักษณะสมบัติการฉนวนโดยที่ฉนวนได้รับความบอบช้ำหรือความเสียหายเพิ่มเติมจากการทดสอบน้อยที่สุดก็ย่อมเป็นประโยชน์ต่อการวิเคราห์และวินิจฉัยคุณลักษณะสมบัติการฉนวนต่อไป

ด้วยเหตุดังกล่าว การวิเคราะห์และวินิจฉัยคุณลักษณะสมบัติการฉนวนด้วยการวิเคราะห์กระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน (polarization and depolarization current, PDC) จึงถูกนำเสนอขึ้นมาเนื่องด้วยการทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันมีข้อดี คือ ใช้แรงดันในการทดสอบต่ำ [1-3] ดังนั้น การวิเคราะห์และวินิจฉัยคุณลักษณะสมบัติของฉนวนด้วยวิธีดังกล่าวจึงไม่ทำให้ฉนวนได้รับความบอบช้ำและความเสียหายเพิ่มเติมจากแรงดันทดสอบ

2. ทฤษฎี

2.1 กระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน

เมื่อจ่ายแรงดันกระแสตรงให้กับฉนวนโดยที่ขนาดของแรงดันไม่สามารถทำให้ฉนวนเกิดการเบรกดาวน์ได้ โมเลกุลของฉนวนจะเกิดการเรียงตัวตามแนวสนามไฟฟ้าที่กระทำต่อฉนวนและในขณะที่โมเลกุลของฉนวนเกิดการเรียงตัวจะเกิดกระแสโพลาไรซ์เซชันขึ้น จากนั้นเมื่อทำการปลดแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรงออกโมเลกุลของฉนวนจะกลับเข้าสู่สภาพเดิมก่อนที่จะมีการเรียงตัวของโมเลกุลตามแนวสนามไฟฟ้าและขณะที่โมเลกุลของฉนวนกลับสู่สภาพเดิมจะเกิดกระแสดีโพลาไรซ์เซชันขึ้น

2.2 ตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์และวินิจฉัยฉนวนร่วมกับกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน

ดัชนีการมีขั้ว

ดัชนีการมีขั้ว คือ อัตราส่วนของความต้านฉนวนที่ 10 นาที ต่อความต้านทานฉนวนที่ 1 นาที [5]

อัตราส่วนค่าความจุไฟฟ้า

อัตราส่วนค่าความจุไฟฟ้า คือ อัตราส่วนของค่าความจุไฟฟ้าของฉนวนที่ความถี่ใดๆ ต่อค่าความจุไฟฟ้าของฉนวนที่ความถี่ 50 เฮิร์ต

แฟคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก

แฟคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกเป็นดัชนีชี้วัดอายุการใช้งานฉนวนที่สำคัญตัวหนึ่งซึ่งถูกนิยามว่าเป็นอัตราส่วนของส่วนจินตภาพของค่าเปอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์ต่อส่วนจริงของค่าเปอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์

3. การทดสอบ

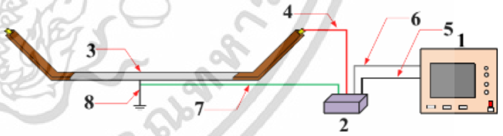
ในการทดสอบเพื่อวิเคราะห์และวินิจฉัยคุณลักษณะสมบัติการฉนวนของแท่งสเตเตอร์ แท่งสเตเตอร์ได้ถูกจำลองเป็น 3 กรณีศึกษา คือ กรณีที่ 1. แท่งสเตเตอร์ที่ฉนวนอยู่ในสภาพดี (bar1) กรณีที่ 2. แท่งสเตเตอร์ที่ฉนวนได้รับความชื้น (bar2) (ฉนวนได้รับความชื้นจากการทิ้งแท่งสเตเตอร์ไว้ในสภาวะแวดล้อมที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 76% - 78% เป็นระยะเวลา 1 สัปดาห์) และกรณีที่ 3. แท่งสเตเตอร์ที่ฉนวนได้รับความเสียหาย (bar3)

3.1 วัตถุทดสอบ

แท่งสเตเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบถูกนำมาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีพิกัดแรงดัน 11 กิโลโวลต์ และใช้อากาศในการระบายความร้อน (Air cool cooling system) โดยแท่งที่ 1. คือ แท่งสเตเตอร์ที่ฉนวนอยู่ในสภาพดี และแท่งที่ 2. คือ แท่งสเตเตอร์ที่ฉนวนได้รับความเสียหายจากการเกิดความผิดพร่องระหว่างเฟสกับกราวด์ (line to ground fault) ที่เกิดจากการสูญเสียการเชื่อมต่อเข้ากับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (loss of synchronization) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

3.2 วงจรทดสอบ

วงจรทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันสำหรับเครื่องจักรกลหมุนแรงดันสูงแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ วงจรวัดกระแสสำหรับฉนวนระหว่างเฟส และวงจรวัดกระแสสำหรับฉนวนระหว่างเฟสกับกราวด์ ซึ่งวงจรทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันที่ถูกใช้เพื่อวิเคราะห์และวินิจฉัยคุณลักษณะสมบัติการฉนวนของแท่งสเตเตอร์ในบทความนี้ คือ วงจรวัดกระแสสำหรับฉนวนระหว่างเฟสกับกราวด์



รูปที่ 1 ไดอะแกรมแสดงการต่อวงจรทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันสำหรับฉนวนระหว่างเฟสกับกราวด์

1. เครื่องวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน
2. เครื่องช่วยจ่ายแรงดัน
3. ร่องสล๊อตจำลอง
4. สายไฟแรงดันสูง
5. สายตรวจจับกระแส
6. สายควบคุมเครื่องช่วยจ่ายแรงดัน
7. สายกราวด์ของเครื่องช่วยจ่ายแรงดัน
8. สายทองแดงเชื่อมต่อร่องสล๊อตกับกราวด์

3.3 ขั้นตอนการทดสอบ

ขั้นตอนการทดสอบเริ่มจากต่อวงจรดังรูปที่ 1 จากนั้นทำการวัดกระแสคงค้าง (remaining current) เพื่อหาค่าประจุไฟฟ้าที่ค้างอยู่ภายในเนื้อฉนวน จากนั้นทำการวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันเบื้องต้น (pretest) เพื่อกำหนดระดับแรงดันที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบ ซึ่งระดับแรงดันที่เหมาะสมคือระดับแรงดันที่ให้ค่ากระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันชัดเจน จากนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

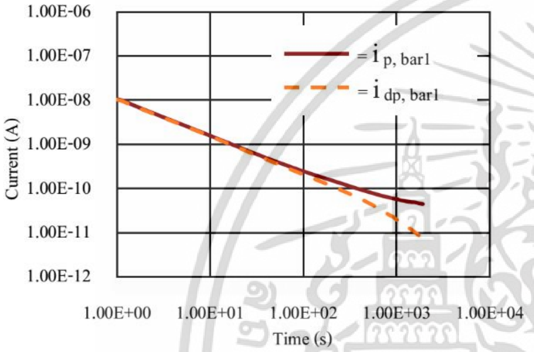
ทำการทดสอบหาพฤติกรรมของกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน (test) โดยผลการทดสอบที่ได้จะเป็นกราฟกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน จากนั้นเครื่องวิเคราะห์กระแสจะนำค่าที่ได้จากกราฟกระแสไปทำการคำนวณหาค่าดัชนีการมีขั้ว อัตราส่วนค่าความจุไฟฟ้า และแฟคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก เพื่อนำมาใช้ประกอบการวิเคราะห์ฉนวน ต่อไป

4. ผลการทดสอบ

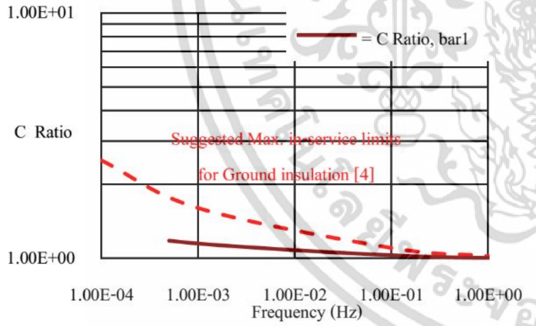
ผลการทดสอบวัดกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันทั้ง 3 กรณี แสดงดังรูปที่ 2-10 ตามลำดับ โดยที่

i_p= กระแสโพลาไรซ์เซชัน และ i_{dp}= กระแสดีโพลาไรซ์ซชัน

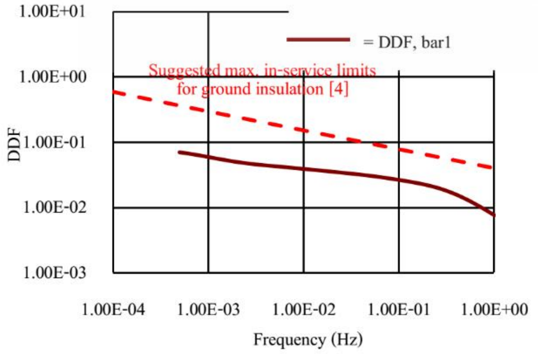
กรณีที่ 1. แท่งสเตเตอร์ที่ฉนวนอยู่ในสภาพดี (bar1)



รูปที่ 2 กระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของแท่งสเตเตอร์ที่ฉนวนอยู่ในสภาพดี (bar1)



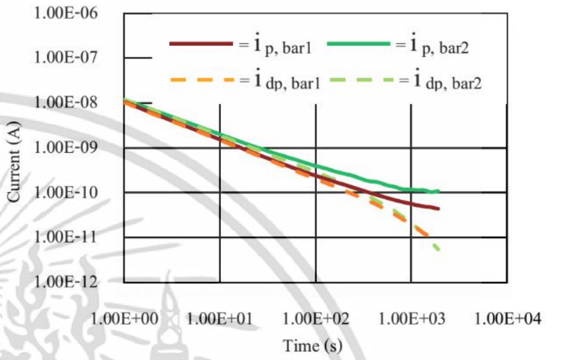
รูปที่ 3 อัตราส่วนค่าความจุไฟฟ้าของแท่งสเตเตอร์ที่ฉนวนอยู่ในสภาพดี (bar1)



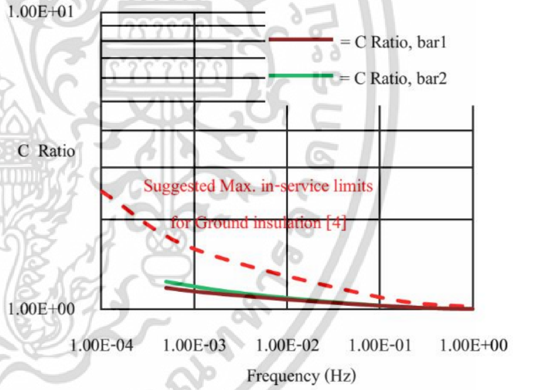
รูปที่ 4 แฟคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของแท่งสเตเตอร์ที่ฉนวนอยู่ในสภาพดี (bar1)

จากการทดสอบ พบว่า หากฉนวนอยู่ในสภาพดีจะได้ลักษณะของกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันเป็นเส้นตรงในล็อคสเกลดังรูปที่ 2 และอัตราส่วนค่าความจุไฟฟ้าและแฟคเตอร์กำลัง-สูญเสียไดอิเล็กตริกจะมีขนาดต่ำกว่าค่าสูงสุดที่ยอมรับให้เกิดขึ้นได้ (Suggested max. in-service limits for ground insulation) [4] ดังรูปที่ 3 และ 4 ตามลำดับ ซึ่งในกรณีที่ 1 ฉนวนมีค่าดัชนีการมีขั้วเป็น 4.82

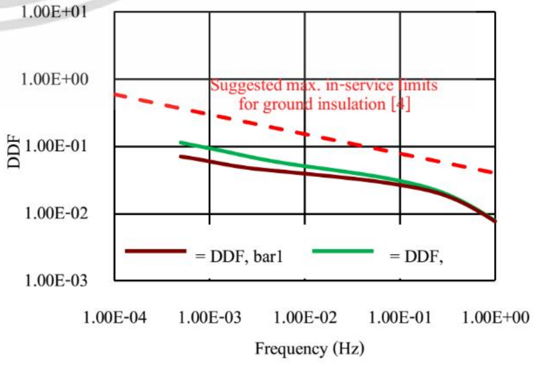
กรณีที่ 2. แท่งสเตเตอร์ที่ฉนวนได้รับความชื้น (bar2)



รูปที่ 5 กระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของแท่งสเตเตอร์ที่ฉนวนได้รับความชื้น (bar2) เปรียบเทียบกับแท่งสเตเตอร์ที่ฉนวนอยู่ในสภาพดี (bar1)



รูปที่ 6 อัตราส่วนค่าความจุไฟฟ้าของแท่งสเตเตอร์ที่ฉนวนได้รับความชื้น(bar2) เปรียบเทียบกับแท่งสเตเตอร์ที่ฉนวนอยู่ในสภาพดี (bar1)

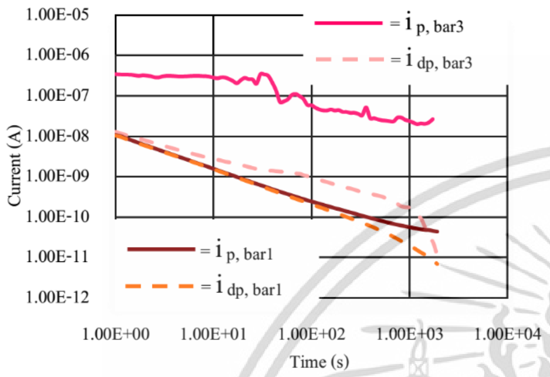


รูปที่ 7 แฟคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของแท่งสเตเตอร์ที่ฉนวนได้รับความชื้น (bar2) เปรียบเทียบกับแท่งสเตเตอร์ที่ฉนวนอยู่ในสภาพดี (bar1)

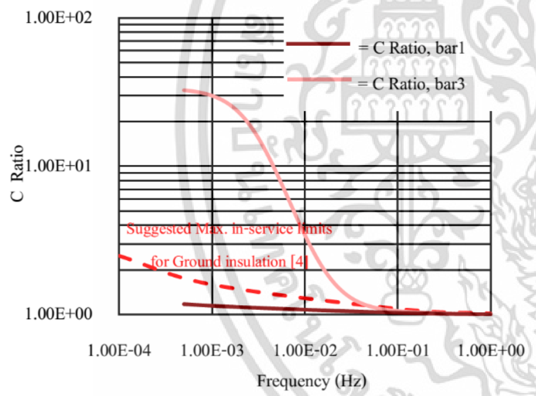
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดสอบ พบว่า เมื่อแท่งสเตเตอร์มีปริมาณความชื้นมากขึ้นกระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน อัตราส่วนค่าความจุไฟฟ้า และแฟคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกมีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีที่ 1 (bar1) และพบว่าในกรณีที่ 2 (bar2) ฉนวนมีค่าดัชนีการมีขั้วเป็น 3.96

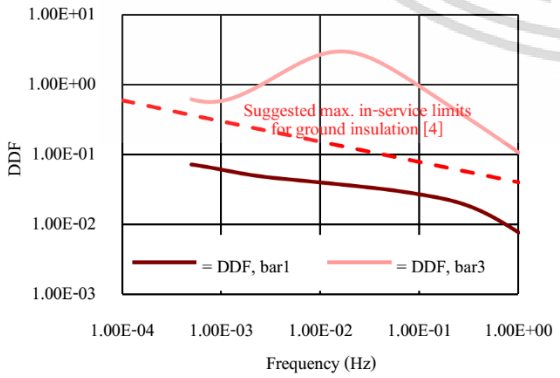
กรณีที่ 3. แท่งสเตเตอร์ที่ฉนวนได้รับความเสียหาย (bar3)



รูปที่ 8 กระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันของแท่งสเตเตอร์ที่ฉนวนได้รับความเสียหาย (bar3) เปรียบเทียบกับแท่งสเตเตอร์ที่ฉนวนอยู่ในสภาพดี (bar1)



รูปที่ 9 อัตราส่วนค่าความจุไฟฟ้าของแท่งสเตเตอร์ที่ฉนวนได้รับความเสียหาย (bar3) เปรียบเทียบกับแท่งสเตเตอร์ที่ฉนวนอยู่ในสภาพดี (bar1)



รูปที่ 10 ค่าสูญเสียไดอิเล็กตริกของแท่งสเตเตอร์ที่ฉนวนได้รับความเสียหาย (bar3) เปรียบเทียบกับแท่งสเตเตอร์ที่ฉนวนอยู่ในสภาพดี (bar1)

จากการทดสอบ พบว่า กระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน อัตราส่วนค่าความจุไฟฟ้า และแฟคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก มีลักษณะของกราฟแตกต่างจากกรณีที่ 1 (bar1) และมีค่าสูงกว่าในกรณีที่ 1 ซึ่งในกรณีที่ 3 (bar3) ฉนวนมีค่าดัชนีการมีขั้วเป็น 3.90 ซึ่งเป็นค่าที่แสดงว่าฉนวนยังอยู่ในสภาพดี ค่าดังกล่าวนี้จะขัดแย้งกับคุณลักษณะสมบัติจริงของฉนวน ดังนั้น ค่าดัชนีการมีขั้วเพียงอย่างเดียวจึงอาจไม่เพียงพอต่อการวินิจฉัยคุณสมบัติของฉนวนได้

5. สรุปผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบ พบว่า ความชื้นที่ผิวมีผลทำให้กระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชัน อัตราส่วนค่าความจุไฟฟ้า และแฟคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก มีค่าสูงขึ้น และเมื่อฉนวนได้รับความเสียหายก็จะส่งผลให้กราฟกระแสและกราฟตัวแปรอื่นๆ มีลักษณะเปลี่ยนไป ซึ่งเห็นได้ว่าการใช้กระแสโพลาไรซ์เซชันและกระแสดีโพลาไรซ์เซชันร่วมกับตัวแปรอื่นๆ ในการวิเคราะห์และวินิจฉัยคุณสมบัติการฉนวนจะบอกให้ทราบถึงสภาวะการเสื่อมของฉนวนได้ดี และจากกรณีศึกษาที่ 3 ค่าดัชนีการมีขั้วของฉนวนมีค่าอยู่ในช่วงที่มาตรฐาน IEEE 43 [5] แนะนำ ซึ่งจากกรณีดังกล่าวได้แสดงให้เห็นว่าการใช้ดัชนีการมีขั้วของฉนวนเพียงตัวเดียวไม่สามารถทำให้เกิดการวินิจฉัยคุณภาพของฉนวนอย่างมีประสิทธิภาพได้

เอกสารอ้างอิง

[1] S. A. Bhumiwat, "Application of polarization depolarization current (PDC) technique on fault and trouble analysis of stator insulation," in *CIGRE SC A1 & D1 Joint Colloquium*, Gyeongju, Korea, October 24, 2007, pp. 79-87.

[2] S. A. Bhumiwat, "Practical experiences on condition assessment of Stator insulation using Polarisation / Depolarisation Current technique," *CIGRE*, 2008, pp. D1-210.

[3] S. A. Bhumiwat, "Insulation Resistance and Polarization of Rotating Machines," *Electrical Insulation conference*, Annapolis, Maryland, 5-8 June, 2011, pp. 249-253.

[4] S. A. Bhumiwat, "On-site non-destructive dielectric response diagnosis of rotating machines," *IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 17, no. 5, October 2010, pp. 1453-1460.

[5] *Recommended practices for testing Insulation Resistance of electric machinery*, IEEE Standard 43, 2013.

เกี่ยวกับผู้เขียน : นางสาวพัชรี ทองอินต๊ะ จบการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ขณะนี้กำลังศึกษาต่อระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. P. Thonginta, N. Pattanadech and P. Yutthagowith, “ PDC Analysis for Evaluation Motor Insulation,” 9^{th} International Symposium on EMC and Transients in infrastructures and International Student Session, วันที่ ๒๖ – ๒๗ พฤศจิกายน ๒๕๕๘, โรงแรมแอมบาสเดอร์ ซิตี้ จอมเทียน, จังหวัดชลบุรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ISET / ISS 2015 – PATTAYA

The 9th International Symposium on EMC and Transients in Infrastructures

The 11th International Student Session

26 - 27 November 2015
Ambassador City Jomtien, Chonburi, Thailand

Organized by

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand

In Cooperation with

Doshisha University, Kyoto, Japan

Chubu University, Kasugai, Japan

Tsuruoka National College of Technology, Tsuruoka, Japan

University of Bologna, Bologna, Italy

Seoul National University, Seoul, Korea

Federal Institute of Technology Lausanne, Switzerland

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PDC Analysis for Evaluation Motor Insulation

P. Thonginta, N. Pattanadech, and P. Yutthagowith

***Abstract*— This paper presents motor insulation evaluation by analyzing polarization and depolarization currents (PDC) of motor insulation. The insulation evaluation begins with measuring PDC of the motor insulation before and after rewinding by using PDC analyser which is a special tool for measuring PDC. Then, measured polarization current will be used to calculate polarization index (P.I.) which will be used to evaluate the motor insulation together with PDC analysis. The experimental results show that PDC analysis can be used to evaluate the motor insulation efficiently.**

***Keywords*— Polarization current, Depolarization current, Polarization index, Surface contaminant, Motor insulation.**

I. Introduction

Nowadays, many techniques have been applied to evaluate rotating machine insulation such as insulation resistance measurement, partial discharge (PD) detection or hi-pot test etc., but these techniques make the insulation undergo high level of test voltage. Therefore, the insulation can be damaged by test voltage, or aging level of the insulation can be increased by test voltage, also. To avoid these problems, the insulation evaluation technique of which test voltage can neither damage the insulation nor increase the aging of the insulation should be studied.

The insulation evaluation using polarization and depolarization currents (PDC) is an interesting technique due to low level of test voltage, so the insulation will not be damaged by test voltage, and aging of the insulation will not be increased by test voltage, also. For these useful reasons, this paper, thus, presents motor insulation evaluation by PDC analysis.

II. Theory

A. Polarization of Dielectric

When an insulation undergoes the DC voltage, molecules inside the insulation will rotate themselves corresponding to the static electric field resulting from the DC voltage and then the polarization current can be measured, but if the DC voltage is disconnected, molecules which once rotated themselves corresponding to the external electric field will again rotate themselves back to the original state and then the depolarization current can be measured. The polarization current (i_{pol}) can be shown in (1);

$$i_{pol}(t) = C_0 V_c [\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} + \varepsilon_\infty \delta(t) + f(t)] \qquad (1)$$

where, C_0 is the geometric capacitance of test object.

V_c is the DC voltage supplied to the insulation.

σ_0 is the pure dc conductivity of the insulation.

ε_0 is the vacuum permittivity.

ε_∞ is the relative permittivity at $t = t_0$.

$\delta(t)$ is the delta function arising from the suddenly applied step voltage at $t = t_0$.

$f(t)$ is the dielectric response function.

t_0 is the time which the DC voltage is initially supplied to the insulation.

According to (1), the polarization current contains three terms: The first one is related to the intrinsic conductivity of the test object and is independent of any polarization process, the last one represents all the activate polarization processes during the voltage application, and the middle part with the delta function cannot be recorded in practice due to the large dynamic range of current amplitudes inherent with the very fast polarization processes [1];

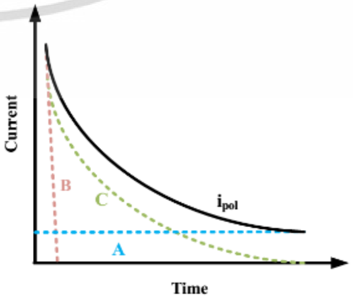


Fig. 1. The polarization current.

where, A is conduction current which is related to the first term of the polarization current.

B represents the second term of the polarization current in.

This work was supported in part by King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Research Funding No. KREF055706 and by the Thailand Research Fund under grant No. IRG5780006.

P. Thonginta, N. Pattanadech, and P. Yutthagowith are with the Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand, 10520 (patcharee.th24@gmail.com).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

C is absorption current which is related to the third term of the polarization current.

The depolarization current (i_{depol}) can be shown as (2);

$$i_{depol}(t) = -C_0 V_c [f(t) - f(t + T_C)] \qquad (2)$$

where, T_C is the period of time applying DC voltage to the insulation.

B. Polarization Index (P.I.)

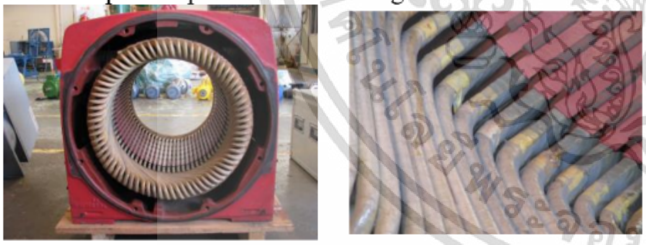
P.I. is one of parameters widely used to evaluate the quality of the insulation of rotating machine. According to the standard [2], there is definition for P.I. as follows. P.I. is normally defined as the ratio of the 10 minutes resistance value (IR_{10}) to the 1 minutes resistance value (IR_1) [2]. The standard also recommends the minimum P.I. value of an ac or dc rotating machine winding insulation for operation that P.I. value should be at least 2.

$$\text{P.I.} = \frac{IR_{10}}{IR_1} \qquad (3)$$

III. Test Object and Test Procedure

A. Test Object

Three phases induction motor of which rated voltage is 6,600 volts was used as a test object in the experiment. Have a close look to the stator winding of the motor before rewinding, the dust was found on the surface of the stator winding, so this motor is a good example for surface contaminant case. Surface contaminant have been known as one of important problems of rotating machine insulation.



a) b)

Fig. 2. a) Three phase, 6,600 kV motor before rewinding. b) Surface contaminant at stator winding.

B. Test Procedure

The experiment began with measuring the polarization and the depolarization current of motor insulation before and after rewinding. Both polarization current and depolarization currents were measured for 2000 seconds. Then, P.I. values were calculated from recorded polarization current. For this experiment, the polarization and depolarization currents and the P.I. values were used together to evaluate the insulation of the motor.

IV. Test Results

The recorded polarization and depolarization currents before and after rewinding are shown as follows;
where, i_p stands for the polarization current.
i_{dp} stands for the depolarization current.

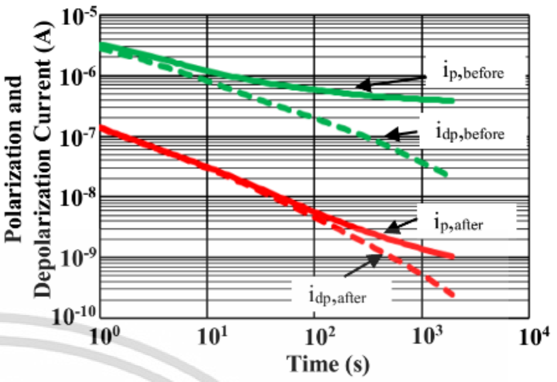


Fig. 4. Recorded polarization and depolarization currents.

From Fig. 4, the polarization and depolarization current amplitude before rewinding is higher than that after rewinding, and calculated P.I. value before and after rewinding is 1.53 and 4.58, respectively. The difference between polarization and depolarization currents before rewinding illustrate that the conduction current is very high, and the high conduction current implied that motor insulation has surface contaminant problem, and P.I. value before rewinding is lower than the minimum P.I. value recommended by the standard [2]. For the polarization and depolarization currents after rewinding, the difference between polarization and depolarization currents illustrate that conduction current is very low, and P.I. value after rewinding is higher than the minimum P.I. value recommended by the standard [2].

V. Conclusion

From the experimental results, the currents before rewinding show that the motor insulation before rewinding has surface contaminant problem, which is consistent with the physical observation of the motor. The currents amplitude and P.I. values before and after rewinding illustrates that the motor insulation quality after rewinding is better than that before rewinding. Therefore, PDC analysis can be used to evaluate the motor insulation efficiently in the case of surface contaminant problem.

References

[1] Walter S. Zaengl, "Dielectric Spectroscopy in Time and Frequency Domain for HV Power Equipment, Part I: Theoretical Considerations," *IEEE Trans. Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 19, pp. 5-19, Sept-Oct, 2003.

[2] IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Electric Machinery, IEEE Standard 43, 2013.

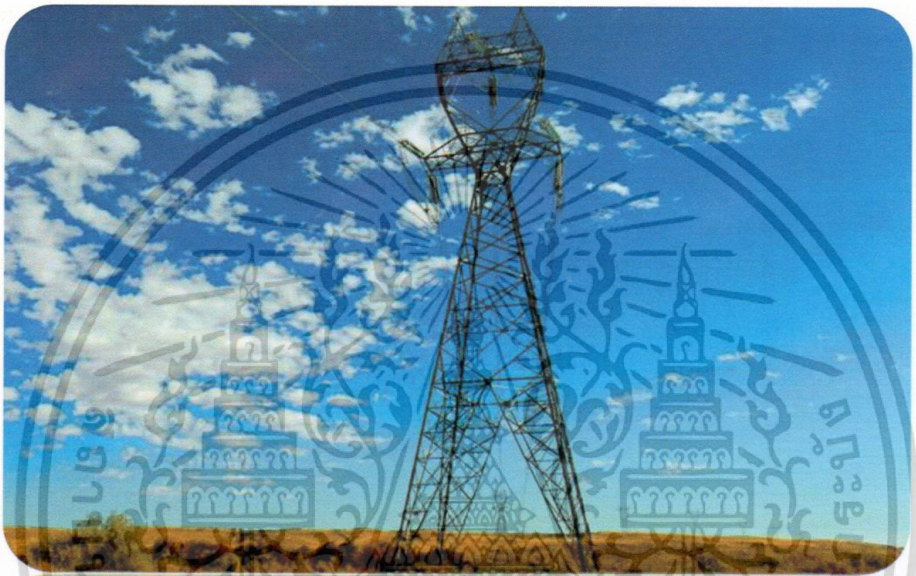
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. P. Thonginta, N. Pattanadech, P. Yutthagowith and S. Potivejkul, “Ambient Temperature and Humidity Effects to Polarization and Depolarization Current of Stator coil,” The 2nd Symposium on Lightning Protection and High Voltage Engineering (ISLH), **วันที่ ๙ – ๑๐ มีนาคม ๒๕๕๙, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ISLH 2016

The 2nd International Symposium on Lightning Protection and High Voltage Engineering



March 9-10, 2016
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Bangkok, Thailand

ISLH | KMITL 2016

PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LIGHTNING PROTECTION AND HIGH VOLTAGE ENGINEERING 2016

IEEE PES Power & Energy Society Thailand Chapter

Lucy Electric APE PTS Combination LAMOOL Kumwell

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น หรือห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Ambient Temperature and Humidity Effects to Polarization and Depolarization Current of Stator coil

P. Thonginta[1*], N. Pattanadech[1], P. Yutthagowith[1], S. Potivejkul[1]

[1]Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
1 Soi Chalongkung 1 Ladkrabang Bangkok 10520 Thailand
patcharee.th24@gmail.com

Abstract

This paper represents ambient temperature and humidity effects to polarization and depolarization current of 6.6 kV motor stator coil. In this paper, the polarization and depolarization currents of two stator coils were measured at 2 different conditions. For the first condition, the polarization and depolarization currents were investigated at 20^{o}C and 30^{o}C of ambient temperature with variant of ambient humidity. For the second condition, the polarization and depolarization currents were experimented at 60% of ambient humidity with variant of ambient temperature. The experimental results showed that an increase in ambient humidity and temperature significantly increased the conduction part of the polarization current and had a slight effect on the depolarization current.

Keywords: polarization and depolarization current, temperature effect, humidity effect, stator coil

1. Introduction

Nowadays, many methods, such as insulation resistance test, partial discharge test and DC hi-pot test, have been used to evaluate the quality of rotating machine insulation, but these methods might put the insulation of rotating machine at risk of damage due to high level of testing voltage. Therefore, non-destructive insulation evaluation method is very important.

Due to low level of testing voltage, polarization and depolarization current (PDC) measurement is one of the interesting non-destructive insulation evaluation methods. Generally, many factors such as temperature, humidity, degree of insulation degradation and so on effect on the PDC of the insulation. For the aforementioned reason, this paper proposes the effects of ambient humidity and temperature to the polarization and depolarization currents measurement.

2. Polarization of dielectric

When an insulation undergoes the DC voltage, molecules inside the insulation will rotate themselves corresponding to the static electric field, and the polarization current can be measured while molecules are rotating. After that if the DC voltage is disconnected, molecules which once rotated themselves corresponding to the external electric field will again rotate back to the original state by which the depolarization current can be measured. The polarization current (i_{pol}) can be written in eq. (1);

$$i_{pol}(t) = C_0 V_c [\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} + \varepsilon_\infty \delta(t) + f(t)] \qquad (1)$$

where, C_0 is the geometric capacitance of test object.

V_c is the DC voltage supplied to the insulation.

σ_0 is the pure dc conductivity of the insulation.

ε_0 is the vacuum permittivity.

ε_∞ is the relative permittivity at $t = t_0$.

$\delta(t)$ is the delta function arising from the suddenly applied step voltage at $t = t_0$.

$f(t)$ is the dielectric response function.

t_0 is the time which the DC voltage is initially supplied to the insulation.

According to eq. (1), the polarization current contains three terms: The first one is related to the intrinsic conductivity of the test object and is independent of any polarization process, the middle part with the delta function cannot be recorded in practice due to the large dynamic range of current amplitudes inherent with the very fast polarization processes, and the last one represents all the activate polarization processes during the voltage application [1]. The component of the polarization current is illustrated in Fig. 1.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

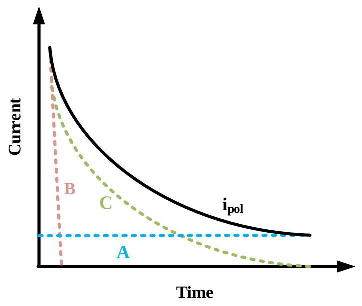


Fig. 1. The polarization current.

where,

A is a conduction part of the polarization current which is related to the first term of eq. (1) and leakage current of the test specimen.

B represents the second term of eq. (1).

C is an absorption current which is related to the third term of eq. (1).

The depolarization current (i_{depol}) can be expressed in eq. (2);

$$i_{depol}(t) = -C_0 V_c [f(t) - f(t+T_C)] \quad (2)$$

where,

T_C is the period of time applying DC voltage to the insulation.

3. Experiment

In the experiment, polarization and depolarization current measurements of two stator coils were performed. The first stator coil and the second stator coil were experimented in condition 1 and condition 2, respectively.

3.1 Test specimen

The two stator coils used in the experiment were the spare parts of a fire pump induction motor rated 6.6 kV. The stator slot of two stator coils was simulated by using aluminum foil.

3.2 Test circuit and measurement

The diagram of test circuit is demonstrated in Fig 2.

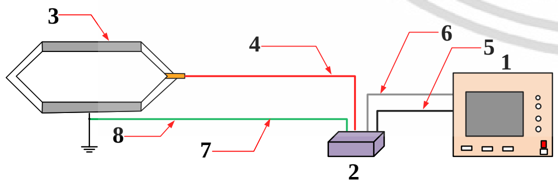


Fig. 2. Diagram of test circuit

1. PDC Analyser
2. Auxiliary voltage source
3. Dummy Slot
4. High voltage wire
5. Sensing current cable
6. Phantom control cable
7. Ground wire of Phantom
8. Slot to ground wire

3.3 Test procedure

Polarization and depolarization current measurement was performed by the following steps. First, the test specimen was discharged by which the discharging current was measured. After discharging current was low enough, the second step was continued. For the second step, 100 DC voltage was applied to the test specimen to identify the appropriate test voltage for the measurement. Then, the measurement was completed by applying the appropriate DC voltage to the test specimen, and the polarization and depolarization currents were measured.

4. Test results

Test results from the experimentation are as follows.

Condition 1.1: The effect of ambient humidity on polarization and depolarization currents was experimented at ambient temperature of 30ºC and ambient humidity of 57%-73%.

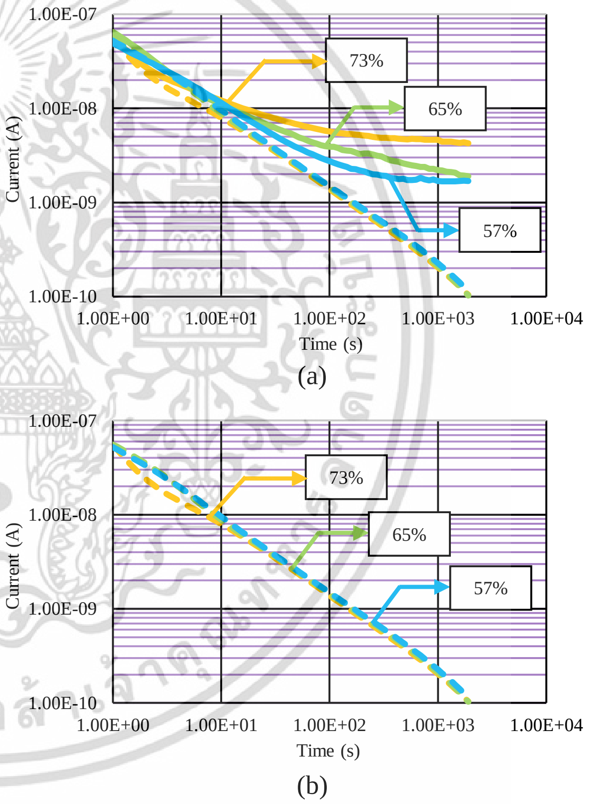
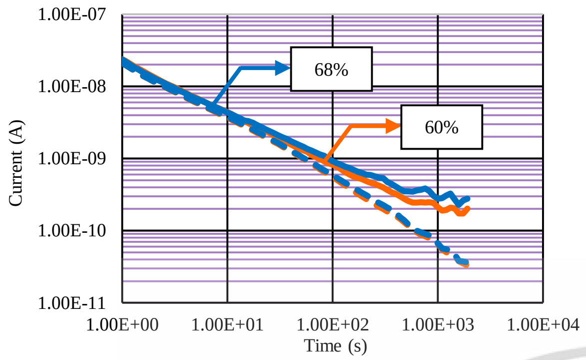


Fig. 3. Polarization and depolarization current of the stator coil tested at 30ºC ambient temperature with variant in ambient humidity (a) polarization and depolarization current (b) depolarization current

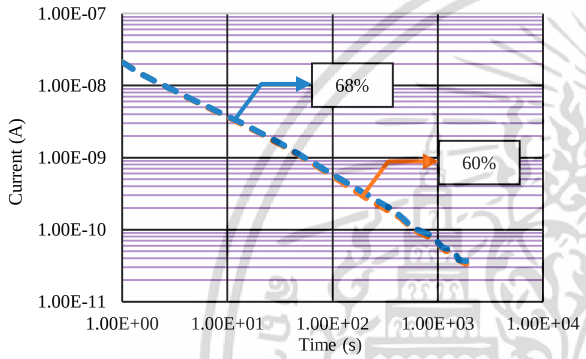
Fig. 3(a) depicts an increase in the tail part of the polarization currents when ambient humidity changed from 65% to 73%, and Fig. 3(b) shows a slight difference of the depolarization currents.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Condition 1.2: The effect of ambient humidity on polarization and depolarization currents was experimented at ambient temperature of 20ºC and ambient humidity of 60%-68%.



(a)

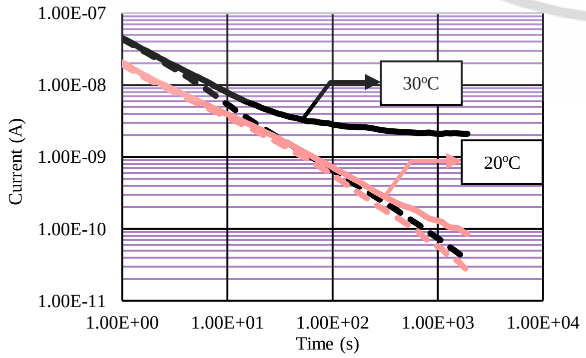


(b)

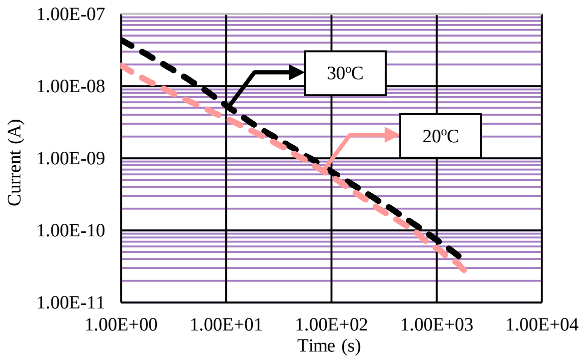
Fig. 4. Polarization and depolarization current of the stator coil tested at 20ºC ambient temperature with variant in ambient humidity (a) polarization and depolarization current (b) depolarization current

Fig. 4(a) represents a little increase in conduction current when ambient humidity changed from 60% to 30%; meanwhile, Fig. 4(b) shows a complete overlap of depolarization currents.

Condition 2: The effect of ambient temperature on polarization and depolarization currents was experimented at ambient humidity of 60% and ambient temperature of 20%-30%.



(a)



(b)

Fig. 5. Polarization and depolarization current of the stator coil tested at 60% ambient humidity with variant in ambient temperature (a) polarization and depolarization current (b) depolarization current

Fig. 5(a) reveals an increase in the tail part of polarization currents; that was, the conduction part of the polarization current had been substantial increased when ambient temperature increased from 20ºC to 30ºC, and Fig. 5(b) shows a slight increase of depolarization current of the mentioned condition.

5. Conclusion

From the experiment, it can be concluded that an increase in ambient humidity and temperature significantly increased the conduction current of the polarization current and has a slight effect on the depolarization current.

Acknowledgement

This research would not be completed without supporting from Glow Energy Public Co., LTD. Special thanks to Mr. Worrachai Sawatdhimongkul, and many thanks to all staffs at TIS Engineering and Service Co.,Ltd..

References

[1] Walter S. Zaengl, "Dielectric Spectroscopy in Time and Frequency Domain for HV Power Equipment, Part I: Theoretical Considerations," *IEEE Trans. On Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. *19*, pp. *5-19*, Sept-Oct, *2003*.

[2] M. Farahani, H. Borsi and E. Gockenbach, "Dielectric Response Studies on Insulating System of High Voltage Rotating Machines," *IEEE Trans. On Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. *13*, *no. 1*, pp. *383-393*, Feb, 2006.

[3] E. David and R. Soltani, "PDC Measurements to Assess Machine Insulation," *IEEE Trans. On Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. *17*, *no. 5*, pp. *1461-1469*, Feb, 2010.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. Patcharee THONGINTA and Norasage Pattanadech, “Medium Voltage Motor Insulation Diagnosis using Polarization and Depolarization Current (PDC) Measurement,” The International Conference on Electrical Engineering, วันที่ 3 – 7 กรกฎาคม 2559, Okinawa Jichikaikan, Okinawa, Japan

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This conference is supported by JSPS KAKENHI Grant No. 15HP0702.

ID 90479

Medium Voltage Motor Insulation Diagnosis using Polarization and Depolarization Current (PDC) Measurement

Patcharee THONGINTA and Norasage PATTANADECH
Electrical Engineering Department, Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand

Tehneht WORTHONG
Electrical supervisor – Coal Fired Units Complex - Maintenance,
Glow Energy Public Co., LTD., Rayong, Thailand

Abstract

This paper presents the medium voltage motor insulation diagnosis by using polarization and depolarization current (PDC) measurement. In this research, three stator insulation problems, contaminated insulations and damaged insulations, were analyzed and categorized into 3 cases. Case 1 are service – aged stator insulation problems, which is absorbed moisture stator insulation with dust contaminant, found during the operation of the motor. For case 2, oil spill problem was simulated by smearing lubricating oil on the surface of stator insulation. In Case 3, damaged insulation problems were simulated by making one hole and two holes on the surface of stator winding insulation. For case 3, there were 2 sub cases. The first sub case was one hole damaged on the insulation and the second sub case was two holes damaged on the insulation. Test results show that PDC measurement has good sensitivity to dust contaminant and absorbed moisture problem.

Keywords: motor, insulation, polarization current, depolarization current

1 INTRODUCTION

Electric motor is one of important electric apparatus used in electric power system and industry, so it is important to prevent the electric motor from any risk of being damaged. Generally, it is known that many motor failures occur from aging of the insulation of stator winding. Therefore, the stator winding insulation is considered to be one of important parts of the motor. To prevent motor from any failures due to the aging of the stator winding insulation, many insulation diagnosis technique, such as partial discharge (PD) test, insulation resistance test, hi pot test, etc., have been applied to verify the quality of stator winding insulation, but these techniques makes the insulation undergoes high electrical stress. Therefore, the insulation might be damaged and the aging of the insulation might be increased. This paper presents the motor insulation diagnosis by using polarization and depolarization current (PDC) measurement which is a modern well-known insulation diagnosis technique in this decade. The PDC measurement was accomplished by using PDC Anslyser [1].The key advantage of the analyzer is its ability to measure both polarization and depolarization currents in the range of 10^{-12} A [2]. Therefore, the insulation test under low testing voltage is possible. Due to low testing voltage, the electrical stress thus cannot damage the stator winding insulation of the motor or increase the aging of the stator winding insulation. In this paper, three motor insulation problems were analyzed by PDC measurement. The first problem, which was the first case in the experiment, was absorbed moisture and dust contaminant problem which was the service – aged stator insulation problem found in the motor during the operation. The second problem, which was the second case in the experiment, was simulated by smearing the lubricating oil on the surface of the stator winding insulation and the third problem, which was the third case in the experiment, was damaged insulation problems simulated by making one hole and two holes on the surface of stator winding insulation. The third case was categorized into two sub cases. The first sub case was one hole damaged on the insulation and the second sub case was two holes damaged on the insulation.

2 THEORY

2.1 Polarization in dielectric

When a DC voltage is applied across the insulation, molecules and free charges inside the insulation will respond to the applied voltage. The charge distribution in molecules and the free charges will be shifted by the applied electric field. The positive

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

charges of molecules and the positive free charges will displace toward the applied electric field, but the negative charges of molecules and the negative free charges will displace in the opposite direction. The mentioned shifting of the charges inside the insulation is called the polarization process of dielectric, and when the polarization process occurs, the shifting of the charges inside the insulation will result in the polarization current simultaneously. Then, if the DC voltage is disconnected from the insulation, and the appropriate short circuit is applied to the insulation, the charges distribution of molecules and the free charges will align themselves back to the original state as being before applying voltage to the insulation. The shifting of the charges distribution and free charges after applying short circuit to the insulation is called depolarization process of dielectric. When the depolarization process occurs, the shifting of the charges inside the insulation also results in depolarization current. The polarization current (i_{pol}) can be written in eq. (1);

$$i_{pol}(t)=C_0V_c[\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0}+\varepsilon_\infty\,\delta(t)+f(t)] \quad (1)$$

where, C_0 is the geometric capacitance of test object.

V_c is the DC voltage supplied to the insulation.

σ_0 is the pure dc conductivity of the insulation.

ε_0 is the vacuum permittivity.

ε_∞ is the relative permittivity at $t=t_0$.

$\delta(t)$ is the delta function arising from the suddenly applied step voltage at $t=t_0$.

$f(t)$ is the dielectric response function.

t_0 is the time which the DC voltage is initially supplied to the insulation

According to eq. (1), the polarization current contains three terms: The first one is related to the intrinsic conductivity of the test object and is independent of any polarization process, the middle part with the delta function cannot be recorded in practice due to the large dynamic range of current amplitudes inherent with the very fast polarization processes, and the last one represents all the activate polarization processes during the voltage application [3]. The depolarization current (i_{depol}) can be expressed in eq. (2);

$$i_{depol}(t)=-C_0V_c[f(t)-f(t+T_C)] \quad (2)$$

where,

T_C is the period of time applying DC voltage to the insulation.

2.2 The components of measured polarization current

The measured polarization current ($i_{pol\ (measured)}$) contains three components. The first component is conduction current (i_{con}). The conduction current is the summation of the leakage current (i_L) and the conductance current (i_G) through the insulation volume [4] and appears only when the DC voltage is applied to the test specimen. For the conduction current, the conductance current is the result of the shifting of free charges in polarization process and relates to the first term of eq. (1). The leakage current arises from the surface contaminant, such as conductive particles or surface water, of the test specimen. The second component is capacitive current (i_C). The capacitive current will decreases exponentially with the time constant equal to the product of the capacitance of the test specimen and the instrument resistance [4]. According to the short period of the capacitive current, the capacitive current will not influent to the overall measured polarization current and the capacitive current is related to the second term in eq. (1). The Third component is the absorption current (i_A) which is a result of shifting of electric charges in polarization process. The absorption current is an inverse function of the time [4], and it is related to the last term of eq. (1). The polarization current component can be illustrated in Fig. 1.

$$i_{pol(measured)}=i_{con}+i_C+i_A \quad (3)$$

$$i_{con}=i_G+i_L \quad (4)$$

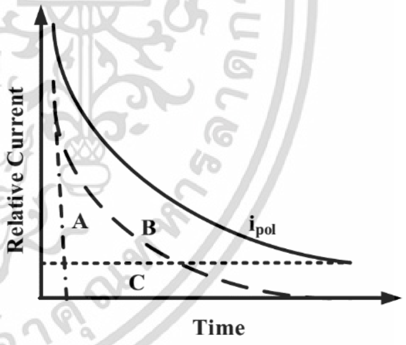


Figure 1. The components of the measured polarization current illustrated in log – log scale

From Fig. 1,
A is the capacitive current.
B is the adsorption current.
C is the conduction current.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 The component of the measured depolarization current

The depolarization current contains two components. The first component is capacitive discharge current which decreases nearly instantaneously. The second component is the absorption discharge current. The absorption discharge current has the same characteristic as the absorption current of polarization current, but the absorption discharge current has the opposite polarity to the absorption current.

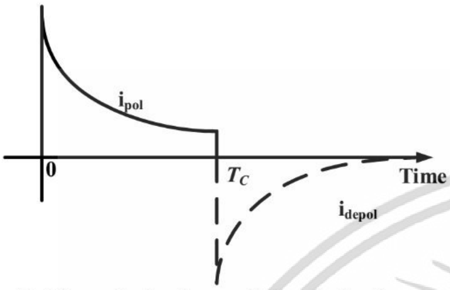


Figure 2. The polarization and depolarization current

3 EXEPERIMENTATION

3.1 Test specimens

In the experiment, the PDC of 6.6 kV 3 phase induction motor was investigated. The experimented motor was electric motor used in fire sprinkler's system and didn't operate for long time. From visual inspection, a lot of dust was found on the surface of stator winding insulation. Therefore, this motor is considered to be a good example of dust contaminant stator insulation problem.

Figure 3. The experimented motor

Figure 4. The dust found on the surface of stator winding insulation

3.2 Test arrangement

Commonly, PDC measurement has 2 types of test arrangement. The first type is phase to ground type and the second type is phase to phase type. Phase to ground type is used to investigate the PDC of phase to ground insulation and phase to phase type is to investigate the PDC of phase to phase insulation. Two types of test arrangement are illustrated in Fig. 5.

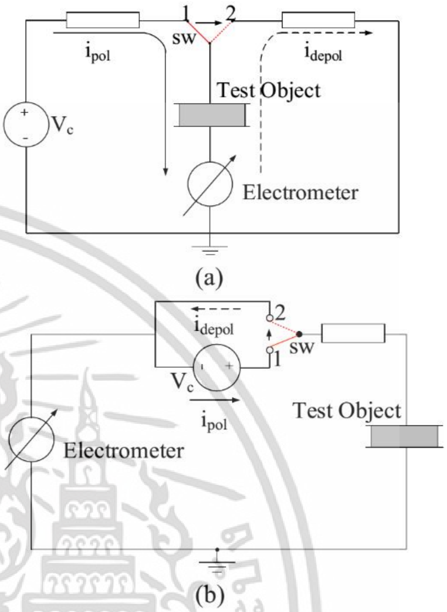


Figure 5. Test arrangement for PDC measurement of phase to phase insulation (a) and phase to ground insulation (b) [5]

From Fig. 5, i_{pol} stands for polarization current. i_{depol} stands for depolarization current. SW is switch. V_c is DC voltage supply.

In this research, phase to ground insulation was examined, so the test arrangement used in the experiment was phase to ground type. For the test specimens, stator windings of the motor was connected in the star connection. In case 1, three phases to ground insulation was investigated. For case 2 and case 3, the neutral point of the star connection was separated, so one phase to ground insulation was investigated.

A) three phases to ground insulation investigation In three phases to ground insulation investigation, the DC testing voltage was applied to all three phases simultaneously, and the stator frame of the motor was grounded.

B) one phase to ground insulation investigation In one phase to ground insulation investigation, the DC testing voltage was applied to the interested phase, and the other two phase are isolated from ground. The stator frame of the motor was also grounded.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The test arrangement diagrams and test circuits are illustrated in Fig. 6 to Fig. 9.

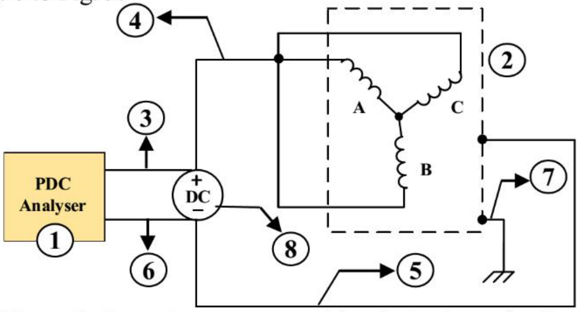


Figure 6. three phases to ground insulation investigation diagram

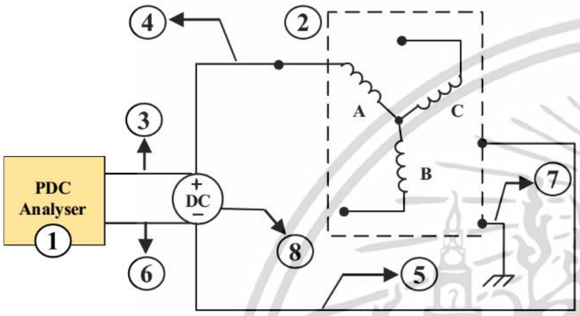


Figure 7. one phase to ground insulation investigation diagram

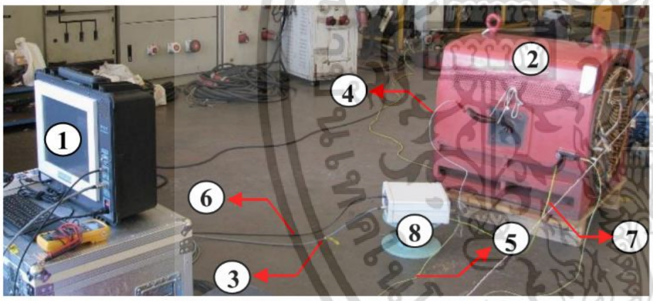


Figure 8. Test circuit for three phases to ground insulation investigation

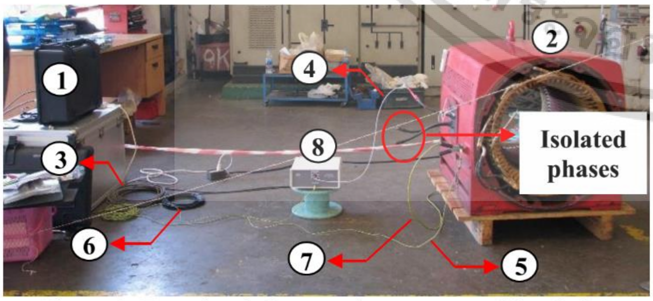


Figure 9. Test circuit for one phase to ground insulation investigation

1) PDC Analyser
2) Test object
3) Control cable
4) High voltage wire
5) Ground wire of PDC Analyser
6) Current sensing Cable
7) Ground wire of test object
8) Auxiliary voltage source

3.3 Test procedure

PDC measurement was performed by the following steps. In the first step, the insulation under test is discharged. Wait until the discharging current is low enough or stable. Then, the second step is performed. In the second step, the pre testing voltage is applied to the insulation for short period, and the insulation is discharged again. In the second step, the testing voltage is determined based on the clarity of the PDC test results. After testing voltage is determined, the PDC measurement is performed. In each case, the PDC were measured for 2,000 seconds and testing voltage of 100 V was used.

4 TEST RESULTS

In this paper, the PDC test results were shown in log – log scale. The solid line indicates the polarization current. The dash line indicates the depolarization current.

Case 1: Absorbed moisture stator with dust contaminant

For case1, the PDC of the motor were measured before and after rewinding, and the test results were compared. The PDC test results of case 1 are shown in Fig. 10.

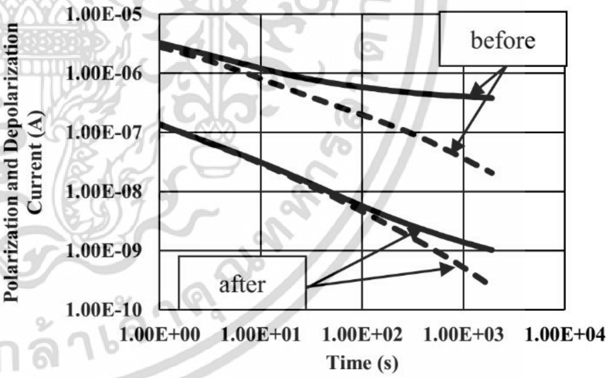


Figure 10. PDC of motor A before and after rewinding

From Fig. 10, both polarization current and depolarization current strongly decreased after rewinding. Beside, clear difference of the polarization current compared to the depolarization current before rewinding clarified that the conduction current before rewinding was very high.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Case 2: Absorbed moisture stator with oil spill simulation

In case2, lubricating oil was smeared on the surface of stator winding insulation of the interested phase. The PDC measurement was performed before and after smearing the lubricating oil and the PDC test results were compared. The PDC test results are illustrated in Fig. 12.

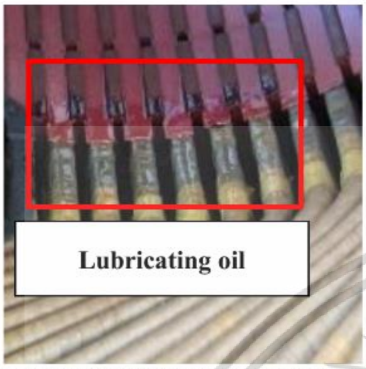


Figure 11. Lubricating oil applied on the surface of stator winding

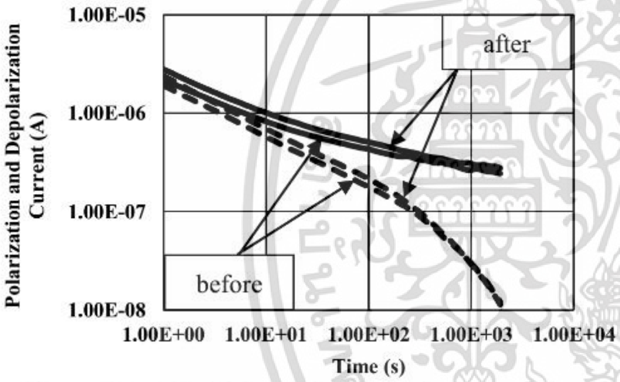


Figure 12. PDC of Motor A before and after applying the lubricating oil

From Fig. 12, after smearing lubricating oil on the surface of stator winding insulation, both polarization current and depolarization current slightly increased. In this case, short time applied lubricating oil on the insulation surface (about 1 hour) may very slightly affect the PDC.

Case 3: Damaged insulation problems

Case 3.1: one hole simulation on the stator winding insulation outside the slot portion

In case 3.1, damaged insulation problem was simulated. The problem was simulated by making a 3 mm hole on the surface of stator winding insulation of interested phase outside the slot portion. The PDC was measured before and after making the hole and the PDC test results were compared. The PDC test results of case 3.1 are shown in Fig. 14.

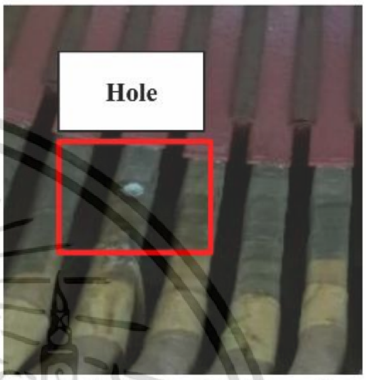


Figure 13. one hole damaged on the surface of stator winding insulation

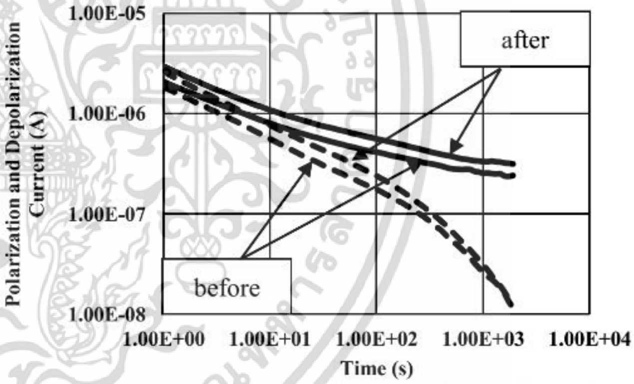


Figure 14. PDC of motor A before and after making a hole

From Fig. 14, the PDC test results showed that both polarization current and depolarization current before and after making a hole had slight difference. In this case, the hole had a slight effect to the PDC.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Case 3.2: two holes simulation on the stator winding insulation outside the slot portion

In case 3.2, damaged insulation problem was simulated. The problem was simulated by making two 3 mm holes on the surface of stator winding insulation of interested phase outside the slot portion. The PDC was measured before and after making the holes and the PDC test results were compared. The PDC test results of case 3.2 are shown in Fig. 16.

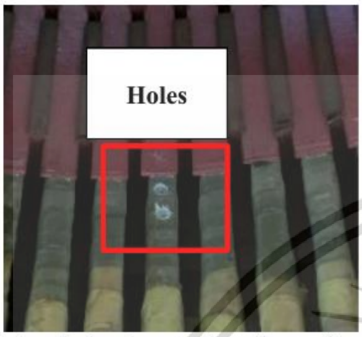


Figure 15. two holes damaged on the surface of stator winding insulation

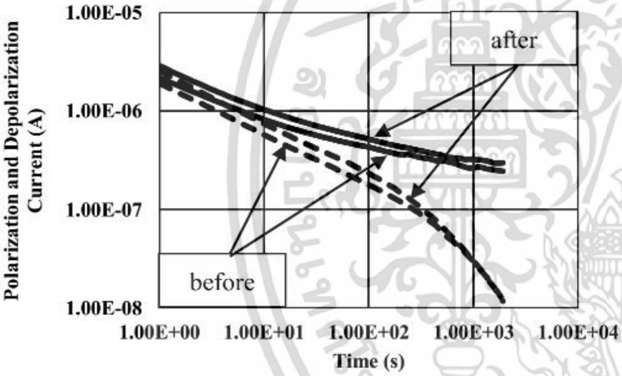


Figure 16. PDC of motor A before and after making holes

From Fig. 16, the PDC test results before and after making the holes had slightly difference. In this case, the holes had a slight effect to the PDC.

5 CONCLUSION

The PDC test results of case 1 shows that PDC measurement has good sensitivity to the dust contaminant and absorbed moisture problem. For case 2, according to short time applied lubricating oil, PDC measurement thus shows a very slight effect to this problem. For case 3, according to the small size of the holes, thus the hole have a slight effect to PDC.

ACKNOWLEDOGEMENT

Authors would like to thank Well Engineering Services CO., LTD for supporting the accommodation and Glow Energy Public Co., LTD for supporting the test specimen in this research work, and authors would like to give the special thanks to "The Thailand Research Fund" under "The Research and Researchers for Industries" program for financial support in this research work.

REFERENCES

[1] J. Alff, V. Der Hauhanessian, W. S. Zaengle and A. J. Kachler, "A novel, compact instrument for the measurement and evaluation of relaxation currents conceived for on-site deagnosis of electrical power apparatus," IEEE international symposirm on electrical insulation, Anaheim, CA, USA, April 2-5, 2003.

[2] Supatra A. Bhumiwat, "On-site Non-destructive Dielectric Response Diagnosis of Rotating Machines," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 17, No. 5, pp. 1453-1460, Oct 2010.

[3] Walter S. Zaengl, "Dielectric Spectroscopy in Time and Frequency Domain for HV Power Equipment, Part I: Theoretical Considerations," IEEE Trans. Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 19, pp. 5-19, Sept-Oct, 2003.

[4] IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Electric Machinery, IEEE Standard 43, 2013.

[5] S. A. Bhumiwat, "Application of polarization depolarization current (PDC) technique on fault and trouble analysis of stator insulation," in CIGRE SC A1 & D1 Joint Colloquium, Gyeongju, Korea, October 24, 2007, pp. 79-87.

Contact E-mail Address: patcharee.th24@gmail.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นางสาวพัชรี ทองอินต๊ะ
วัน เดือน ปีเกิด 12 มกราคม 2535 ที่พิษณุโลก
ที่อยู่ 33 หมู่บ้านนาจาน หมู่ที่ 18 ตำบล หนองกระท้าว อำเภอ นครไทย จังหวัด พิษณุโลก 65120
ประวัติการศึกษา 2556 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้