

การศึกษา เทคนิคการวินิจฉัยของยานยนต์เครื่องจักรกลหมุนเร็ว

THE STUDY OF INSULATION DIAGNOSTIC TECHNIQUE OF HIGH VOLTAGE
ROTATING MACHINE

โดย

นายภูริชฎี	บุรพตพันธ์
นายภาณุวงศ์	ศรีอภัยพร
นายยศพร	กฤษณะพร

ปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพมหานคร

ปีการศึกษา 2557

การศึกษาเทคนิคการวินิจฉัยฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนแรงดันสูง

THE STUDY OF INSULATION DIAGNOSTIC TECHNIQUE OF HIGH VOLTAGE
ROTATING MACHINE

โดย

นายภูริชญ์	บุรพสายัณห์
นายภูวนศวรรค์	สร้อยสุนทร
นายยศธร	กฤษณามระ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2557

THE STUDY OF INSULATION DIAGNOSTIC TECHNIQUE OF HIGH VOLTAGE
ROTATING MACHINE

PURISH BURAPASAYAN
POOWANED SROYSUNTORN
YOSATHORN KRISHSANAMARA

A PAPER SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT
FOR THE BACHELOR DEGREE IN ELECTRICAL ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2014

ปีการศึกษา 2557

การศึกษาเทคนิคการวินิจฉัยฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนแรงดันสูง
THE STUDY OF INSULATION DIAGNOSTIC TECHNIQUE OF HIGH VOLTAGE
ROTATING MACHINE

โดย

นายภูริชญ์ บุรพสายัณห์
นายภูวนศวรร์ สร้อยสุนทร
นายยศธร กฤษณามระ

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.นรเศรษฐ์ พัฒนเดช
ผศ.ดร.พีรวุฒิ ยุทธโกวิท

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2557

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาเทคนิคการวินิจฉัยฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนแรงดันสูง

ผู้จัดทำ

- | | |
|----------------|-------------|
| 1.นาย ภูริชญ์ | บุรพสายัณฑ์ |
| 2.นาย ภูวนศวรร | สร้อยสุนทร |
| 3.นาย ยศธร | กฤษณามระ |



..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นเรศรชฐ พัฒนเดช)



..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิรุฒิ ยุทธโกวิท)

การศึกษาเทคนิคการวินิจฉัยฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนแรงดันสูง

นาย ภูริชญ์ บุรพสายัณห์
นาย ภูวนศวรรย์ สร้อยสุนทร
นาย ยศธร กฤษณามระ
ผศ.ดร.นรเศรษฐ์ พัฒนเดช อาจารย์ที่ปรึกษา
ผศ.ดร.พีรวุฒิ ยุทธโกวิท อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2557

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้ทำการศึกษาการทดสอบฉนวนของขดลวดสเตเตอร์ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยวิธีการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน (Polarization and Depolarization Current, PDC) ด้วยเครื่อง PDC-Analyser-1MOD วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการทดสอบมี 3 ประเภท คือ ขดลวดสเตเตอร์ที่ไม่ผ่านกระบวนการพันฉนวนแบบ Hot press มีพิกัดแรงดัน 6.6 kV จำนวน 1 ขด ขดลวดสเตเตอร์ที่ผ่านกระบวนการพันฉนวนแบบ Hot press มีพิกัดแรงดัน 6.6 kV จำนวน 1 ขด และแท่งสเตเตอร์ที่ตัดจากขดลวดที่ผ่านกระบวนการพันฉนวนแบบ Hot press มีพิกัดแรงดัน 11 kV จำนวน 2 แท่ง การทดสอบแบ่งเป็น 3 กรณี คือ ทดสอบแบบมีร่องสลีตก่อนทำความสะอาดวัตถุทดสอบ ทดสอบแบบมีร่องสลีตหลังทำความสะอาดวัตถุทดสอบ และทดสอบแบบไม่มีร่องสลีตหลังทำความสะอาดวัตถุทดสอบ จากนั้นนำผลการทดสอบที่ได้มาเปรียบเทียบ โดยเปรียบเทียบ 3 กรณี คือ เปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังทำความสะอาดโดยมีร่องสลีต เปรียบเทียบระหว่างมีร่องสลีตกับไม่มีร่องสลีตหลังทำความสะอาด และเปรียบเทียบระหว่างวัตถุทดสอบชนิดเดียวกัน (ขดลวดสเตเตอร์แบบเต็มขดเทียบกัน และแบบแท่งสเตเตอร์เทียบกัน) ผลการทดสอบพบว่า ความปนเปื้อนของฉนวนมีผลทำให้ค่าองค์ประกอบกระแสคอนดักชันของกระแสโพลาริเซชันเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าดัชนีโพลาริเซชัน (Polarization Index, PI) ลดลง นอกจากนี้ควรนำค่าอัตราส่วนตัวเก็บประจุ (C ratio) ค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก (Dielectric Dissipation Factor, DDF หรือ $\tan\delta$) และกราฟกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน (Polarization and Depolarization Current, PDC) ควรถูกนำมาใช้ในการประเมินสภาพฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนแรงดันสูงร่วมกัน เพื่อให้ได้ผลการประเมินสภาพฉนวนที่มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น

THE STUDY OF INSULATION DIAGNOSTIC TECHNIQUE OF HIGH VOLTAGE ROTATING MACHINE

Mr.Purish	Burapasayan	
Mr.Poowaned	Sroysuntorn	
Mr.Yosathorn	Krishsanamara	
Asst.Prof.Dr.Norasage	Pattanadech	Advisor
Asst.Prof.Dr.Peerawut	Yutthagowit	Advisor

ABSTRACT

A paper studied about the insulation testing of stator windings in a generator by using Polarization and Depolarization Current (PDC) method. Test objects were divided into three types such as the stator coil developing by Hot press process with rated 6.6 kV, The stator coil which not developing by Hot Press process with rated 6.6 kV and the stator bar which developing by Hot Press process with rated 11 kV. PDC-Analyser-1MOD was used to measure the currents in this experiment. The tests were divided into three cases for each test objects as follows. In the first case, the stator coil testing was done with the modeled slot before cleaning. In the second case the stator coil testing was achieved with the modeled slot after cleaning, and the third case the stator coil testing without the modeled slot. The test results were compared in three cases, the comparison of the stator coil testing with the model slot before and after cleaning was the first case. The second case is done between the stator coil testing with and without the modeled slot. For the third case the test result obtained from the same configuration stator coil was compared. As the results, the contaminant on the stator coil increased the conduction of current component in the polarization current and decreased the Polarization Index (PI). Besides, the Capacitance ratio (C ratio), Dielectric Dissipation Factor (DDF or $\tan\delta$) and the Polarization and Depolarization Current should be considered to precisely assess a condition of insulation

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยการช่วยเหลือจากหลายท่านโดยเฉพาะอย่างยิ่งต้องขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นรเศรษฐ์ พัฒนเดช และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พีรฤติ ยุทธโกวิท อาจารย์ที่ปรึกษา รวมไปถึงคุณปณณวีร์ ฉายศิริ ที่คอยดูแลเอาใจใส่อย่างใกล้ชิดเสมอมา ให้ข้อเสนอแนะและข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการมาด้วยดีตลอด และได้กรุณาตรวจแก้ไขปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณบริษัท พลูโตเทค จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ให้ไปศึกษาดูงานเป็นเวลา 1 เดือน ให้ความรู้เรื่องต่างๆ เกี่ยวกับมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ขอขอบคุณบริษัท ทีไอเอส เอ็นจิเนียริง แอนด์ เซอร์วิส จำกัด ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ให้ยืมเครื่องวัด PDC มาใช้ในการศึกษาและสอนวิธีการวัดอย่างละเอียด

ขอขอบคุณบริษัท เวล เอ็นจิเนียริง เซอร์วิส จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ให้ไปศึกษาดูงาน การทดสอบมอเตอร์ด้วยเครื่องวัด PDC ในสถานที่ใช้งานจริง

ขอขอบคุณบริษัท โกลว์ พลังงาน จำกัด (มหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์มอบชิ้นงานทดสอบให้ คือ ขดลวดสเตเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้า

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงทุกคน โดยเฉพาะนางสาว พัชรี ทองอินตะ ที่ช่วยแก้ปัญหาด้วยดีมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้คณะผู้จัดทำ ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวซึ่งให้การสนับสนุนในด้านการเงินและให้กำลังใจอีกทั้งเพื่อนๆ พี่ๆ ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านการจัดหาอุปกรณ์ต่างๆ ในการทำโครงการครั้งนี้จนสำเร็จได้ด้วยดี จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูปภาพ	VI
สารบัญตาราง	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	2
1.4 วิธีการดำเนินงาน	3
1.5 แผนการดำเนินงาน	4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	6
2.1.1 หลักการกำเนิดแรงดัน	6
2.1.2 แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดจากการเคลื่อนที่	7
2.1.3 เครื่องจักรกลเชิงโครนัส	9
2.1.4 เครื่องจักรกลเชิงโครนัสสามเฟส	12
2.2 โครงสร้างของขดลวดสเตเตอร์	13
2.3 ระบบฉนวน	14
2.3.1 ระบบฉนวนของขดลวดสเตเตอร์	16
2.3.2 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของฉนวน	19
2.3.3 การเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของฉนวน	20
2.4 การวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน	21
2.4.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน	21
2.4.2 การวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน	27
2.4.3 ผลตอบสนองไดอิเล็กตริก (Dielectric Response Spectroscopy) ในรูปโดเมนความถี่	29
2.4.4 โมเดลไดอิเล็กตริก	31
บทที่ 3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบและวัสดุทดสอบ	34
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ	34
3.1.1 แท่นทดสอบ	34
3.1.2 ร่องสลักตัวอย่าง	36
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ	37
3.2.1 เครื่อง PDC-Analyser-1MOD	37

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.2.2 เครื่อง PDC-Phantom-1000XE	38
3.2.3 อุปกรณ์ต่างๆ	39
3.3 วัตถุทดสอบ (Test object)	42
3.3.1 ขดลวดสเตเตอร์ทดสอบ A	42
3.3.2 ขดลวดสเตเตอร์ทดสอบ B	42
3.3.3 แท่งสเตเตอร์ทดสอบ C	43
3.3.4 แท่งสเตเตอร์ทดสอบ D	43
3.4 การต่อวงจรทดสอบ	44
3.4.1 การดำเนินการทดสอบ	45
บทที่ 4 การทดสอบและผลการทดสอบ	46
4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ	46
4.1.1 วงจรทดสอบ	46
4.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ	46
4.1.3 ขั้นตอนการทดสอบ	46
4.1.4 ผลการทดสอบ	47
4.2 การทดสอบกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน (Polarization and Depolarization Current) ณ ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	52
4.2.1 วงจรทดสอบ	52
4.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ	54
4.2.3 ขั้นตอนการทดสอบ	54
4.2.4 ผลการทดสอบ	55
4.2.5 การเปรียบเทียบผลการทดลอง	75
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	89
5.1 สรุปผลการดำเนินงานโครงการ	89
5.2 ปัญหาที่พบและข้อเสนอแนะ	90
เอกสารอ้างอิง	92
ภาคผนวก	93
ภาคผนวก ก ขั้นตอนการทดสอบกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน	94
ภาคผนวก ข การทดสอบฉนวนแบบต่างๆโดยวิธีทั่วไป	106
ภาคผนวก ค ขั้นตอนการทำ Resin Rich(RR) และ Vacuum Pressure Impregnation (VPI)	112
ภาคผนวก ง เอกสารทางวิชาการ	117
ประวัติผู้เขียน	122

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 การกระตุ้นวงจรแม่เหล็กด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับ	6
2.2 การเกิดแรงดันเหนี่ยวนำจากการเคลื่อนที่	8
2.3 แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดจากการเคลื่อนที่และกฎมือขวาของเฟลมมิ่ง	8
2.4 โครงสร้างพื้นฐานของเครื่องจักรกลซิงโครนัสสามเฟส	9
2.5 โครงสร้างพื้นฐานของเครื่องจักรกลเหนี่ยวนำสามเฟส	9
2.6 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเฟสเดียวแบบ 2 ขั้วแม่เหล็ก	10
2.7 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส 4 ขั้วแม่เหล็ก	11
2.8 การกระจายสนามแม่เหล็กในช่องอากาศแบบ 4 ขั้วแม่เหล็กและ สัญญาณแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ขดลวด	11
2.9 โครงสร้างโรเตอร์ของเครื่องจักรกลซิงโครนัส	13
2.10 ขดลวดสเตเตอร์	14
2.11 โครงสร้างระบบฉนวนของขดลวดสเตเตอร์ในเครื่องจักรกลหมุน	18
2.12 ปรากฏการณ์การมีขั้ว หรือ โพลาริเซชัน	22
2.13 แสดงโมเมนต์เชิงขั้วทางไฟฟ้าระหว่างประจุทั้งสอง	23
2.14 ระยะเวลาที่ใช้ในการเกิดโพลาริเซชันทั้ง 5 แบบภายใต้การป้อนแรงดันรูปซัน	25
2.15 องค์ประกอบของกระแสชาร์จ	26
2.16 กระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน	27
2.17 กราฟของกระแสขณะที่ย้ายไฟ (Charging Current)	28
2.18 กราฟของกระแสขณะที่ย้ายไฟ (Charging Current) ของฉนวนที่มีปัญหาจาก ปรากฏการณ์คอนดักชัน	28
2.19 วงจรวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันของฉนวน บริเวณขดลวด สเตเตอร์ทั้ง 2 ตำแหน่ง	29
2.20 โมเดลลิเนียร์ไดอิเล็กตริก	31
3.1 แทนทดสอบที่ทำการออกแบบ	35
3.2 แทนทดสอบที่ประกอบสร้างจริง	35
3.3 ร่องสล๊อตที่ทำการออกแบบ	36
3.4 ร่องสล๊อตจำลอง	36
3.5 เครื่อง PDC-Analyser-1MOD	37
3.6 เครื่อง PDC-Phantom-1000XE	38
3.7 สายจ่ายแรงดันสูงสำหรับ PDC-Phantom-1000XE	39
3.8 สายจ่ายแรงดันสูงสำหรับ PDC-Analyser-1MO	39
3.9 สายวัดกระแส (Sensing cable)	40
3.10 สายคอนโทรล (Control cable)	40
3.11 สายกราวด์ (Ground wire)	41
3.12 ตัวหนีบ (Jack)	41
3.13 ขดลวดสเตเตอร์ทดสอบ A	42

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.14	42
3.15	43
3.16	43
3.17	44
3.18	45
4.1	46
4.2	47
4.3	48
4.4	49
4.5	49
4.6	50
4.7	51
4.8	52
4.9	52
4.10	55
4.11	57
4.12	59
4.13	60
4.14	62
4.15	64
4.16	65
4.17	67
4.18	69
4.19	70
4.20	72
4.21	74
4.22	76
4.23	77
4.24	79
4.25	81
4.26	82

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.27 กราฟเปรียบเทียบระหว่างกรณีมีร่องสลีตกับไม่มีร่องสลีตหลังทำความสะอาดของขดลวดสเตเตอร์ทดสอบ A	84
4.28 กราฟเปรียบเทียบระหว่างขดลวดสเตเตอร์ทดสอบ A กับ B กรณีมีร่องสลีตหลังทำความสะอาด	86
4.29 กราฟเปรียบเทียบระหว่างขดลวดสเตเตอร์ทดสอบ C กับ D กรณีมีร่องสลีตหลังทำความสะอาด	88

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 การวางแผนจัดลำดับขั้นตอนการดำเนินงาน	4
2.1 การแยกแยะปัญหาที่เกิดกับฉนวนของเครื่องจักรกลหมุน	16
4.1 แสดงค่าต่างๆ จากการทดสอบของมอเตอร์ A	48
4.2 แสดงค่าต่างๆ จากการทดสอบของมอเตอร์ B	50
4.3 แสดงค่าต่างๆ จากการทดสอบของมอเตอร์ C	52
4.4 แสดงค่าต่างๆ จากการทดสอบของขดลวดสเตเตอร์ทดสอบ A แบบมีร่องสลีตก่อนทำความสะอาด	56
4.5 แสดงค่าต่างๆ จากการทดสอบของขดลวดสเตเตอร์ทดสอบ A แบบมีร่องสลีตหลังทำความสะอาด	58
4.6 แสดงค่าต่างๆ จากการทดสอบของขดลวดสเตเตอร์ทดสอบ A แบบไม่มีร่องสลีตหลังทำความสะอาด	59
4.7 แสดงค่าต่างๆ จากการทดสอบของขดลวดสเตเตอร์ทดสอบ B แบบมีร่องสลีตก่อนทำความสะอาด	61
4.8 แสดงค่าต่างๆ จากการทดสอบของขดลวดสเตเตอร์ทดสอบ B แบบมีร่องสลีตหลังทำความสะอาด	63
4.9 แสดงค่าต่างๆ จากการทดสอบของขดลวดสเตเตอร์ทดสอบ B แบบไม่มีร่องสลีตหลังทำความสะอาด	64
4.10 แสดงค่าต่างๆ จากการทดสอบของแท่งสเตเตอร์ทดสอบ C แบบมีร่องสลีตก่อนทำความสะอาด	66
4.11 แสดงค่าต่างๆ จากการทดสอบของแท่งสเตเตอร์ทดสอบ C แบบมีร่องสลีตหลังทำความสะอาด	68
4.12 แสดงค่าต่างๆ จากการทดสอบของแท่งสเตเตอร์ทดสอบ C แบบไม่มีร่องสลีตหลังทำความสะอาด	69
4.13 แสดงค่าต่างๆ จากการทดสอบของแท่งสเตเตอร์ทดสอบ D แบบมีร่องสลีตก่อนทำความสะอาด	71
4.14 แสดงค่าต่างๆ จากการวัดของแท่งสเตเตอร์ทดสอบ D แบบมีร่องสลีตหลังทำความสะอาด	73
4.15 แสดงค่าต่างๆ จากการทดสอบของแท่งสเตเตอร์ทดสอบ D แบบไม่มีร่องสลีตหลังทำความสะอาด	74
4.16 เปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังทำความสะอาดของขดลวดสเตเตอร์ A	76
4.17 เปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังทำความสะอาดของขดลวดสเตเตอร์ B	78
4.18 เปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังทำความสะอาดของแท่งสเตเตอร์ C	80
4.19 เปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังทำความสะอาดของแท่งสเตเตอร์ D	81
4.20 เปรียบเทียบระหว่างกรณีมีร่องสลีตกับไม่มีร่องสลีตหลังทำความสะอาดของขดลวดสเตเตอร์ทดสอบ A	83

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.21 เปรียบเทียบระหว่างกรณีมีร่องสลีตกับไม่มีร่องสลีตหลังทำความสะอาดของ ขดลวดสเตเตอร์ทดสอบ B	85
4.22 เปรียบเทียบระหว่างขดลวดสเตเตอร์ทดสอบ A กับ B กรณีมีร่องสลีตหลัง ทำความสะอาด	87
4.23 เปรียบเทียบระหว่างแท่งสเตเตอร์ C กับ D กรณีมีร่องสลีตหลังทำความสะอาด	88

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

เครื่องจักรกลหมุน (Rotating Machine) เป็นหนึ่งในอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ถูกใช้งานอย่างแพร่หลายทั้งในภาคอุตสาหกรรมและในระบบผลิตกำลังไฟฟ้า สำหรับในภาคอุตสาหกรรมนั้น เครื่องจักรกลหมุนส่วนใหญ่ถูกใช้งานเป็นมอเตอร์ เช่นเป็นมอเตอร์สูบน้ำ เป็นมอเตอร์ขับเคลื่อนสายพาน และเป็นมอเตอร์ในระบบอัตโนมัติต่างๆ เป็นต้น ส่วนในระบบผลิตกำลังไฟฟ้า เครื่องจักรกลหมุนจะถูกใช้งานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งมีหลายขนาดตามกำลังการผลิตของระบบไฟฟ้านั้นๆ จากข้างต้นจะเห็นได้ว่าหากเครื่องจักรกลหมุนได้รับความเสียหายในขณะที่ปฏิบัติงานหรือเกิดการทำงานผิดพลาดก็จะส่งผลกระทบต่อกระบวนการทำงานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องได้รับความเสียหาย อีกทั้งอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานและผู้ที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียง ดังนั้นจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งที่จะทำการป้องกันไม่ให้เครื่องจักรกลหมุนทำงานผิดพลาดหรือเกิดความเสียหายในระหว่างปฏิบัติงาน

ปัญหาที่สำคัญประการหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของเครื่องจักรกลหมุนและก่อให้เกิดความเสียหายต่อเครื่องจักรกลหมุน คือ การเกิดความผิดพร่องหรือเกิดความเสียหายของฉนวนของเครื่องจักรกลหมุน ซึ่งความผิดพร่องที่เกิดขึ้นนี้มีผลมาจากการที่ฉนวนมีการเสื่อมสภาพจากการได้รับความร้อน ความเครียดทางไฟฟ้า ความเครียดทางกล และปัจจัยอื่นๆ จากสภาวะแวดล้อม เช่น ความชื้น ฝุ่นผง และอนุภาคของเสียต่างๆ เป็นต้นในขณะที่ปฏิบัติงานหรือมีผลมาจากการที่ฉนวนได้รับความเสียหายในระหว่างการติดตั้ง ดังนั้นหากสามารถประเมินสภาพฉนวนก่อนที่ฉนวนจะเกิดความผิดพร่องหรือได้รับความเสียหายได้ ก็จะทำให้สามารถลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาเครื่องจักร ทำให้สามารถวางแผนการซ่อมบำรุงรักษาเครื่องจักรได้ดียิ่งขึ้น และทำให้ใช้งานเครื่องจักรได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ อีกทั้งยังเป็นการลดความเสี่ยงในการเกิดอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานได้อีกทางหนึ่ง

ในปัจจุบันนี้วิธีการประเมินสภาพฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี เช่น การทดสอบค่าความต้านทานฉนวน (Insulation resistance Test) การทดสอบค่าดัชนีการมีขั้ว (Polarization Index Test) การทดสอบค่าอัตราส่วนการซึมซับไดอิเล็กตริก (Dielectric Absorption Ratio) การทดสอบความแข็งแรงเชิงกำลังไฟฟ้าของฉนวน (High Potential Test) และการทดสอบเปรียบเทียบเสิร์จ (Surge Test) เป็นต้น ซึ่งวิธีการประเมินสภาพฉนวนดังกล่าวข้างต้นเป็นที่ยอมรับและถูกใช้งานมายาวนาน แต่เนื่องด้วยวิธีการดังกล่าวมีข้อเสียคือ แรงดันที่ใช้ในการทดสอบมีค่าสูง ดังนั้นการประเมินสภาพฉนวนด้วยวิธีการข้างต้นอาจส่งผลให้ฉนวนบอบช้ำหรือเกิดความเสียหายได้และเนื่องด้วยคณะผู้จัดทำมีความสนใจในเรื่องเครื่องจักรกลหมุนแรงดันสูง และด้วยตระหนักว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีความสำคัญต่อระบบการผลิตไฟฟ้าอย่างยิ่ง ดังนั้นจึงมีแนวคิดที่จะศึกษาการทำงาน ระบบฉนวน และวิธีการประเมินสภาพฉนวนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยการทดสอบกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชัน (Polarization and Depolarization Current) ซึ่งเป็นวิธีการ

ประเมินสภาพฉนวนที่มีข้อดีคือใช้แรงดันในการทดสอบต่ำ ดังนั้นจึงไม่ทำให้ฉนวนบอบช้ำหรือเกิดความเสียหายจากแรงดันทดสอบอีกทั้งวิธีการประเมินสภาพฉนวนโดยการทดสอบกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันสามารถจำแนกปัญหาที่เกิดจากกระบวนการมีขั้วของฉนวน (polarization problems) และกระบวนการนำไฟฟ้าของฉนวน (conduction problem) ได้ ซึ่งจะทำให้เกิดประโยชน์ต่อการวินิจฉัยหาสาเหตุของความเสียหายที่เกิดขึ้นกับฉนวนต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาโครงสร้างและหลักการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส (Synchronous Generator)
2. เพื่อศึกษาฉนวนของขดลวดสเตเตอร์ (Stator Bar) ชนิดฟอร์มวาวด์ (Form-wound)
3. เพื่อศึกษาทฤษฎีและวิธีการทดสอบกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน (Polarization and Depolarization Current)
4. เพื่อทดสอบกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน (Polarization and Depolarization Current) ของฉนวนของขดลวดสเตเตอร์และสามารถวิเคราะห์ผลจากการทดสอบได้

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1. ศึกษาโครงสร้างและหลักการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส (Synchronous Generator)
2. ศึกษาฉนวนของขดลวดสเตเตอร์ (Stator Bar) ที่ใช้ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส (Synchronous Generator) ซึ่งจะทำการศึกษาโดยการสร้างแทนสำหรับทดสอบฉนวนของขดลวดสเตเตอร์ โดยขดลวดสเตเตอร์ที่นำมาทดสอบจะมี 3 ประเภท คือ
 - ขดลวดสเตเตอร์ที่ไม่ผ่านกระบวนการพันฉนวนแบบ Hot press มีพิกัดแรงดัน 6.6 kV จำนวน 1 ขด
 - ขดลวดสเตเตอร์ที่ผ่านกระบวนการพันฉนวนแบบ Hot press มีพิกัดแรงดัน 6.6 kV จำนวน 1 ขด
 - แท่งสเตเตอร์ที่ตัดจากขดลวดที่ผ่านกระบวนการพันฉนวนแบบ Hot press มีพิกัดแรงดัน 11 kV จำนวน 2 แท่ง
3. ทดสอบกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน (Polarization and Depolarization Current, PDC) ของขดลวดสเตเตอร์ทดสอบด้วยเครื่อง PDC-Analyser-1MOD

1.4 วิธีการดำเนินงาน

- ศึกษาทฤษฎีการเกิดโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน (Polarization Depolarization)
- ทำการออกแบบและประกอบสร้างแท่นทดสอบโดยใช้โปรแกรม Solid works
- ทำการออกแบบและประกอบสร้างร่องสลิตจำลอง
- ทดสอบกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน (Polarization and Depolarization Current)
- วิเคราะห์ผลการทดสอบ

1.5 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 การวางแผนจัดลำดับขั้นตอนของการดำเนินงาน

การดำเนินงาน	ส.ค.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1. ศึกษาทฤษฎีและส่วนประกอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator)	←-----→								
2. ศึกษาทฤษฎีและวิธีการทดสอบกระแสโพลาริเซชันและ ดีโพลาริเซชัน			←-----→						
3. จัดทำข้อมูลนำเสนอภาคเรียนที่ 1				←-----→					
4. ออกแบบแท่นทดสอบฉนวนของแท่งสเตเตอร์ (Stator Bar) ในโปรแกรม Solid works ที่ใช้ในการทดสอบจริง				←-----→					
5. ทำการสร้างชุดทดสอบ						←-----→			
6. ทำการทดสอบขดลวดสเตเตอร์ (Stator Bar) และตรวจสอบแก้ไขข้อผิดพลาด							←-----→		
7. จัดทำปริญญานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์								←-----→	

←-----→ การวางแผน

←-----→ การปฏิบัติงานจริง

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

โครงการวิทยุกรรมนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับระบบฉนวนไฟฟ้าของลวดสเตเตอร์ (Stator Bar) ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) เพื่อประโยชน์ต่างๆดังต่อไปนี้

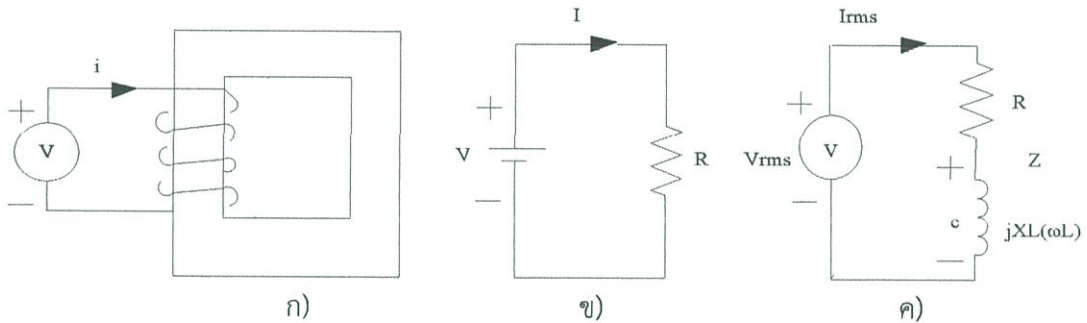
1. สามารถวิเคราะห์สภาพฉนวนโดยใช้กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน (Polarization and Depolarization current), ค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริก ($\tan\delta$), อัตราส่วนตัวเก็บประจุ (C ratio) และค่าดัชนีการเกิดโพลาริเซชัน (Polarization Index) ได้
2. สามารถลดความเสี่ยงต่อความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นในการใช้งานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งจะทำให้ระบบไฟฟ้ามีเสถียรภาพมากขึ้น
3. สามารถนำไปเป็นข้อมูลประกอบเพื่อวางแผนบำรุงรักษาและคาดการณ์ความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นต่อฉนวนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในอนาคตได้

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

2.1.1 หลักการกำเนิดแรงดัน

เมื่อขดลวดของวงจรแม่เหล็กดังรูปที่ 2.1 ก) ได้รับแรงดันกระแสตรง ค่ากระแสที่เกิดขึ้นในขดลวดจะถูกกำหนดโดยค่าความต้านทานไฟฟ้าของขดลวด และค่าแรงดัน RI ที่เกิดขึ้นที่ความต้านทานไฟฟ้าจะมีค่าเท่ากับค่าแรงดันของแหล่งจ่าย V ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ในรูปของวงจรไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 2.1 ข) ในทางตรงกันข้ามเมื่อขดลวดได้รับแรงดันกระแสสลับกระแสที่เกิดขึ้นในขดลวดจะถูกกำหนดโดยค่าอิมพีแดนซ์ (Z) ของขดลวดซึ่งประกอบด้วยค่าความต้านทานจริง (R) และค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า (L) ความสัมพันธ์นี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.1 ค)



รูปที่ 2.1 การกระตุ้นวงจรแม่เหล็กด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับ

โดยปกติค่าแรงดันที่เกิดขึ้นที่ความต้านทานไฟฟ้า (R) จะมีค่าน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับแรงดันเหนี่ยวนำ e (Induced voltage) ที่เกิดขึ้นที่ความต้านทานไฟฟ้าเสมือน $j\omega L$ ซึ่งกำหนดให้มีค่าประมาณแรงดัน v ของแหล่งจ่าย ดังนั้นวงจรแม่เหล็กที่ได้รับการกระตุ้นด้วยระบบไฟฟ้ากระแสสลับจะทำให้เกิดค่าแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นที่ขดลวดเป็นไปตามกฎของฟาราเดย์ ซึ่งกำหนดว่า “แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจากขดลวดซึ่งมีสนามแม่เหล็กเกี่ยวคล้องที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาจะมีค่าแปรผันตรงกับจำนวนรอบของขดลวด (N) และอัตราการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็ก (ϕ)”

$$e = V = N \frac{d\phi}{dt} = \frac{d\lambda}{dt} \quad (2.1)$$

โดยที่	λ	คือ	จำนวนฟลักซ์แม่เหล็กที่เกี่ยวข้องคล้องขดลวด (Flux linkages) มีหน่วยเป็นเวเบอร์-รอบ (Wb-t)
	N	คือ	จำนวนรอบของขดลวดมีหน่วยเป็นรอบ
	ϕ	คือ	เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดนั้นมีหน่วยเป็นเวเบอร์ (Wb)

แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นพิจารณาได้จากกฎของเลนซ์ (Lenz's law) ที่กำหนดว่า“แรงดันเหนี่ยวนำจะต้องมีทิศทางที่ต้านการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กเกี่ยวคล้องซึ่งทำให้เกิดมันขึ้นมา” โดยทั่วไปแล้วความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์แม่เหล็กและกระแสกระตุ้นจะไม่ใช่เชิงเส้น (สารเฟอร์โรแมกเนติก) แต่ในทางปฏิบัติจะกำหนดให้มีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้น ดังนั้นถ้ากำหนดให้ค่าฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นในวงจรแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงในลักษณะสัญญาณรูปไซน์ ดังสมการ

$$\phi(t) = \phi_m \sin \omega t \quad (2.2)$$

$$e = N \frac{d\phi}{dt} = N\omega\phi_m \cos \omega t = E_m \cos \omega t \quad (2.3)$$

$$V_{rms} \approx E_{rms} = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = \frac{N\omega\phi}{\sqrt{2}} = 4.44Nf\phi_m \quad (2.4)$$

2.1.2 แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดจากการเคลื่อนที่

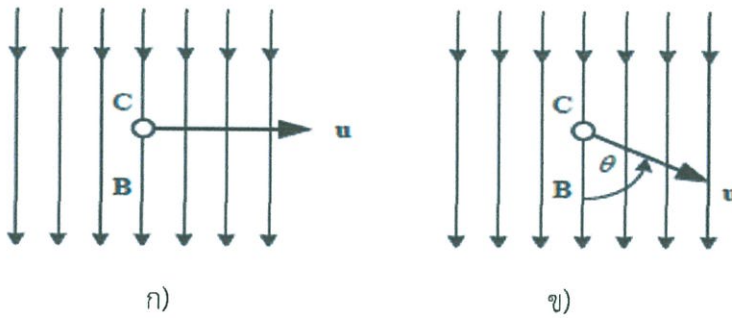
จากหลักการของวงจรแม่เหล็กจะเห็นได้ว่าเมื่อวงจรแม่เหล็กได้รับการกระตุ้นด้วยไฟฟ้ากระแสสลับจะทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นในขดลวดซึ่งถ้าเป็นในกรณีที่ลวดตัวนำหรือขดลวดไม่มีการเคลื่อนที่และฟลักซ์แม่เหล็กที่เกี่ยวข้องขดลวดมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นหรือลดลงของค่ากระแสการเกิดแรงดันเหนี่ยวนำในลักษณะนี้เรียกว่าการเหนี่ยวนำแบบอยู่กับที่ (Statically induced) อย่างไรก็ตามแรงดันเหนี่ยวนำสามารถเกิดขึ้นได้ในอีกลักษณะหนึ่งคือเกิดจากการที่สนามแม่เหล็กมีสภาพอยู่กับที่และลวดตัวนำมีการเคลื่อนที่ตัดสนามแม่เหล็กซึ่งเรียกว่าการเหนี่ยวนำแบบเคลื่อนที่ (Dynamically induced) ซึ่งสามารถนำไปใช้อธิบายการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนเช่นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

จากรูปที่ 2.2 ก) กำหนดให้ลวดตัวนำ C มีความยาวเมตรวางตั้งฉากกับแนวสนามแม่เหล็กที่มีการกระจายสม่ำเสมอ (Uniform) ซึ่งมีค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (เทสลา) เมื่อลวดตัวนำ C เคลื่อนที่ตัดสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉากในทิศทาง u กำหนดให้ลวดตัวนำเคลื่อนที่ไปเป็นระยะทาง dx ในเวลา dt จะเห็นได้ว่าลวดตัวนำได้เคลื่อนที่ไปในพื้นที่ ldx และมีการตัดฟลักซ์แม่เหล็กจำนวน ldx (B) (เวเบอร์) ในเวลา dt ซึ่งจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กเกี่ยวคล้องลวดตัวนำ

ดังนั้นจะเกิดค่าแรงดันเหนี่ยวนำ e ขึ้นที่ลวดตัวนำเรียกชื่อว่าแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดจากการเคลื่อนที่ (Electromotive force, emf) ซึ่งเป็นไปตามความสัมพันธ์ของ

$$e = \frac{Bldx}{dt} = Blu \quad (2.5)$$

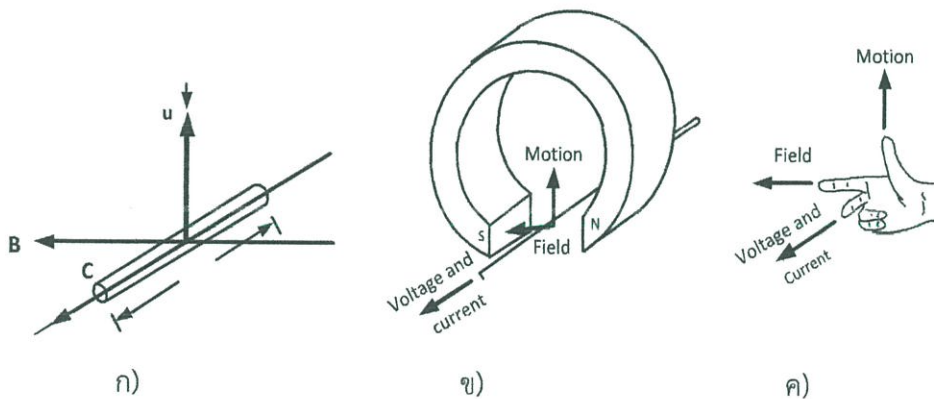
โดยที่	u	คือ	ความเร็ว (Velocity) มีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที (m/s)
	l	คือ	ความยาวแท่งตัวนำมีหน่วยเป็นเมตร (m)
	B	คือ	ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก มีหน่วยเป็นเทสลา (T)



รูปที่ 2.2 การเกิดแรงดันเหนี่ยวนำจากการเคลื่อนที่

ถ้าลวดตัวนำ C เคลื่อนที่ทำมุมกับแนวสนามแม่เหล็กดังรูปที่ 2.2 ข) ค่าแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจะมีค่าเท่ากับ

$$e = Blu \sin \theta \quad (2.6)$$



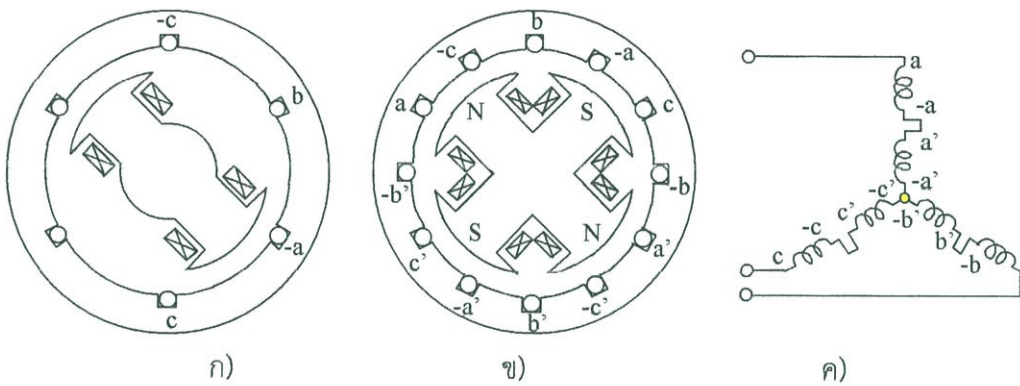
รูปที่ 2.3 แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดจากการเคลื่อนที่และกฎมือขวาของเฟลมมิ่ง

จากหลักการดังกล่าวข้างต้นการเกิดค่าแรงดันเหนี่ยวนำแสดงด้วยโครงสร้าง ดังรูปที่ 2.3 ก) และกำหนดได้โดยการใช้กฎมือขวาของเฟลมมิ่ง (Fleming's right-hand rule) ดังรูปที่ 2.3 ข) และ ค) จะเห็นได้ว่าถ้าลวดตัวนำมีการเคลื่อนที่ในแนวขนาน $\theta = 0$ กับแนวสนามแม่เหล็กจะไม่เกิดแรงดันเหนี่ยวนำดังนั้นหลักการนี้สามารถนำไปอธิบายการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนที่ทำให้

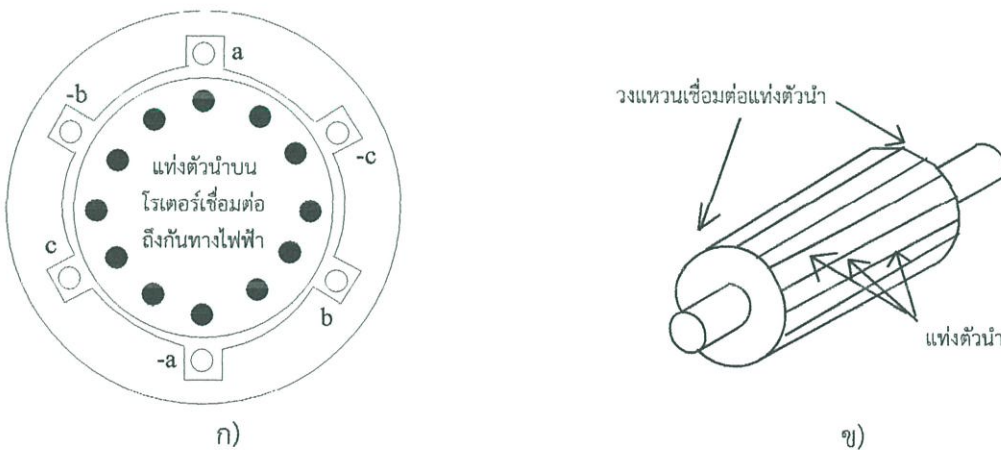
หน้าที่เปลี่ยนรูปพลังงานกลในรูปของความเร็วเป็นพลังงานไฟฟ้าในรูปของแรงดันเหนี่ยวนำโดยมีสนามแม่เหล็กเป็นตัวกลาง

2.1.3 เครื่องจักรกลซิงโครนัส

โดยทั่วไปแล้วเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับสามารถแบ่งออกตามลักษณะการทำงานได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่เครื่องจักรกลซิงโครนัส (Synchronous machines) ดังรูปที่ 2.4 และเครื่องจักรกลเหนี่ยวนำ (Induction machines) ดังรูปที่ 2.5 ในกรณีเครื่องจักรกลซิงโครนัสกระแสในขดลวดโรเตอร์ได้รับโดยตรงมาจากแหล่งจ่ายภายนอกผ่านส่วนสัมผัสที่เป็นวงแหวนและแปรงถ่าน ในกรณีเครื่องจักรกลเหนี่ยวนำกระแสในโรเตอร์เกิดมาจากการเหนี่ยวนำของขดลวดโรเตอร์โดยใช้หลักการของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นที่สเตเตอร์และการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ของโรเตอร์จะเห็นได้ว่าขดลวดที่สเตเตอร์ของเครื่องจักรกลทั้งสองมีลักษณะเช่นเดียวกัน



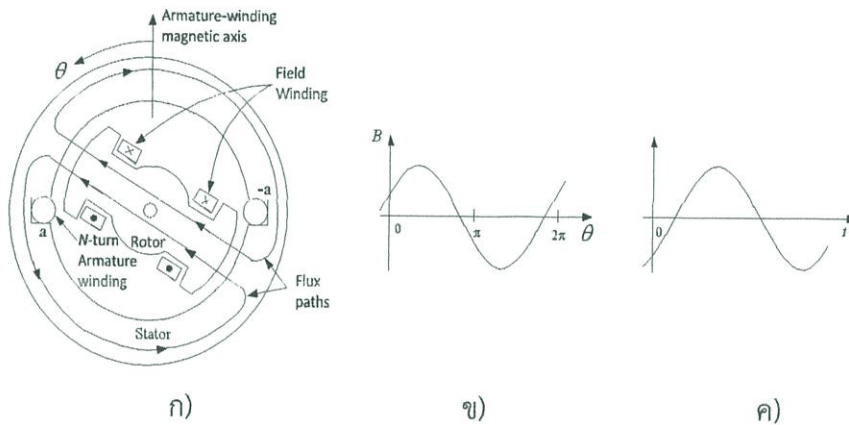
รูปที่ 2.4 โครงสร้างพื้นฐานของเครื่องจักรกลซิงโครนัสสามเฟส



รูปที่ 2.5 โครงสร้างพื้นฐานของเครื่องจักรกลเหนี่ยวนำสามเฟส

โครงสร้างพื้นฐานเครื่องจักรกลซิงโครนัสดังรูปที่ 2.6 ก) แสดงส่วนประกอบดังนี้ ที่โรเตอร์มีขดลวดสนาม (Field winding) ซึ่งมีกระแสไหลในทิศทางดังรูปทำให้เกิดขั้วแม่เหล็ก 2 ขั้ว เป็นขั้ว N

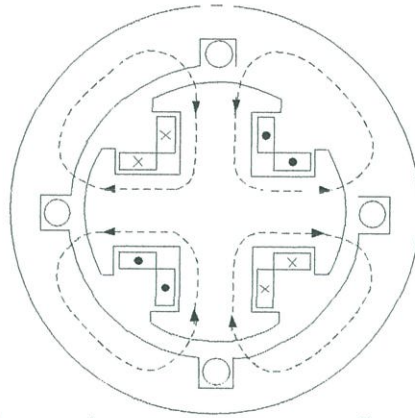
และขั้ว S โดยกำหนดให้มีการกระจายของสนามแม่เหล็กที่เป็นฟังก์ชันของมุมทางกล θ_a ดังรูปที่ 2.6 ข) ที่สเตเตอร์มีขดลวดอาร์มาเจอร์ a และ -a ซึ่งเป็นลวดตัวนำเส้นเดียวกันแต่วางอยู่ในตำแหน่งที่ต่างกัน โดยที่ตำแหน่งของตัวนำ a และ -a จะต้องวางอยู่ในลักษณะที่อยู่ภายใต้ขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์ที่มีขั้วต่างกัน นั่นคือถ้าตัวนำ a อยู่ภายใต้ขั้ว N ตัวนำ -a จะต้องอยู่ภายใต้ขั้ว S ในกรณีนี้เป็นแบบ 2 ขั้วแม่เหล็กตัวนำ a และ -a จะวางอยู่ตรงกันข้ามกันทำมุม π (180°) ทางกล



รูปที่ 2.6 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเฟสเดียวแบบ 2 ขั้วแม่เหล็ก

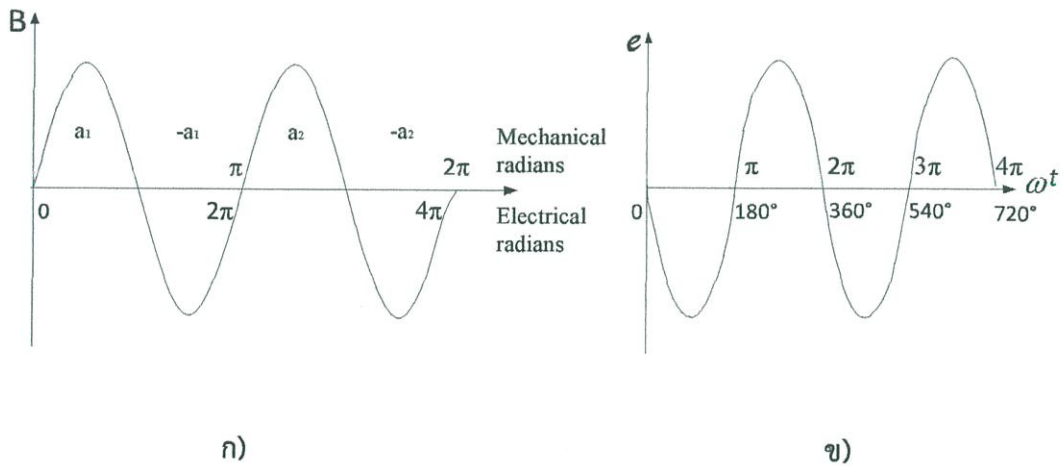
ก) โครงสร้างสเตเตอร์และโรเตอร์ ข) การกระจายสนามแม่เหล็กในช่องอากาศ ค) สัญญาณแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ขดลวด a

เมื่อโรเตอร์เคลื่อนที่หมุนรอบตัวเองจะเกิดการตัดกันระหว่างตัวนำ a และ -a กับสนามแม่เหล็ก ซึ่งจะมีผลทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดจากการเคลื่อนที่ซึ่งจะเห็นว่าตัวนำ a และ -a วางอยู่ภายใต้ขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์ที่มีขั้วต่างกันทิศทางของค่า e ที่เกิดขึ้นในแต่ละตัวนำจึงมีทิศทางที่ตรงกันข้ามกัน แต่เนื่องจากตัวนำ a และ -a เป็นลวดเส้นเดียวกันดังนั้นค่า e ที่ได้จากลวดตัวนำจะมีทิศทางที่เสริมกัน พิจารณาตัวนำ a เมื่อโรเตอร์หมุนครบ 1 รอบ หมายความว่าได้เคลื่อนที่ไปเป็นมุม 2π (360°) ทางกล ตัวนำ a จะเกิดค่า e ทั้งสองทิศทางมีลักษณะเป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับดังรูปที่ 2.6 ค) เรียกว่าเกิดสัญญาณแรงดันไฟฟ้าครบ 1 cycle ซึ่งเป็นมุม 2π (360°) ทางไฟฟ้า จะเห็นว่าในกรณีนี้มุมทางไฟฟ้าจะมีค่าเท่ากับมุมทางกล และถ้าโรเตอร์หมุนด้วยความเร็ว 50 รอบต่อวินาที (3000 รอบต่ออนาที) จะได้สัญญาณไฟฟ้าเกิดขึ้นจำนวน 50 cycles ต่อวินาที ซึ่งเรียกว่ามีความถี่เท่ากับ 50 Hz



รูปที่ 2.7 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส 4 ขั้วแม่เหล็ก

โครงสร้างรูปที่ 2.7 แสดงเครื่องจักรกลซิงโครนัสแบบ 4 ขั้วแม่เหล็กโดยกำหนดให้มีการกระจายของสนามแม่เหล็กที่เป็นฟังก์ชันของมุมทางกล θ_m แสดงดังรูปที่ 2.8 ก) ที่สเตเตอร์มีขดลวดอาร์มาเจอร์ 2 ชุด $a, -a_1$ และ $a, -a_2$ ต่ออนุกรมกันโดยที่ตัวนำ a_1 และ $-a_1$ ซึ่งเป็นขดลวดตัวนำเส้นเดียวกันจะวางตั้งฉากกันในทำนองเดียวกันกับตัวนำ a_2 และ $-a_2$ เมื่อโรเตอร์หมุนครบ 1 รอบเป็นมุม 2π (360°) ทางกลตัวนำแต่ละตัวจะเกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำจำนวน 2 cycles ซึ่งเป็นมุม 4π (720°) ทางไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.8 ข) ดังนั้นถ้าโรเตอร์หมุนด้วยความเร็ว 25 รอบต่อวินาที (1500 รอบต่อวินาที) จะได้สัญญาณไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจำนวน 50 cycles/second หรือมีค่าความถี่เท่ากับ 50 เฮิรต (Hz)



รูปที่ 2.8 การกระจายสนามแม่เหล็กในช่องอากาศแบบ 4 ขั้วแม่เหล็กและสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ขดลวด

ดังนั้นจำนวนขั้วแม่เหล็กและความเร็วรอบของโรเตอร์จะมีผลต่อค่าความถี่ของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเป็นไปตามความสัมพันธ์ดังนี้

$$\theta_e = \frac{P}{2} \theta_m \quad (2.7)$$

โดยที่	θ_e	คือ	มุมทางไฟฟ้า
	θ_m	คือ	มุมทางไฟฟ้ากล
	P	คือ	จำนวนขั้วแม่เหล็ก

และจะได้ว่าความถี่จะขึ้นอยู่กับ

$$f = \frac{P n_s}{2 \cdot 60} \quad (2.8)$$

โดยที่	f	คือ	ความถี่ของสัญญาณไฟฟ้า มีหน่วยเป็นเฮิรตซ์ (Hz)
	n_s	คือ	ความเร็วซิงโครนัส มีหน่วยเป็นรอบต่อนาที (rpm)

หรือเขียนได้ดังนี้

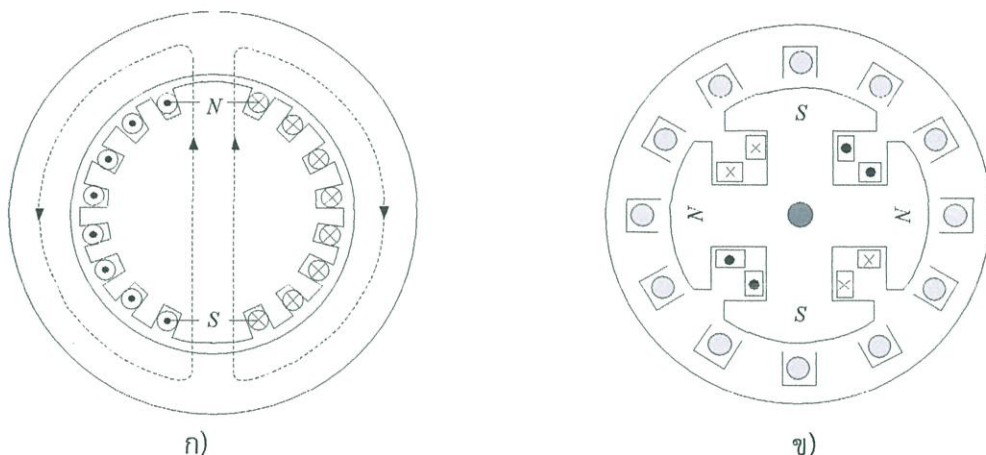
$$n_s = \frac{120f}{p} \quad (2.9)$$

จะเห็นได้ว่าขนาดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับค่าสนามแม่เหล็กของขั้วแม่เหล็กที่โรเตอร์ความถี่ของแรงดันไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับค่าความเร็วซิงโครนัสและจำนวนขั้วแม่เหล็กที่โรเตอร์และในทำนองเดียวกันค่าความเร็วซิงโครนัสจะสามารถกำหนดได้โดยค่าความถี่ของแรงดันไฟฟ้าและจำนวนขั้วแม่เหล็ก

2.1.4 เครื่องจักรกลซิงโครนัสสามเฟส

เครื่องจักรกลซิงโครนัสเป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งมีความเร็วในสภาวะคงตัวแปรผันตรงกับความถี่ของกระแสไฟฟ้าในขดลวดอาร์มาเจอร์ (Armature winding) ที่สเตเตอร์ที่โรเตอร์มีสนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้นโดยการใช้ไฟฟ้ากระแสตรงจ่ายให้กับขดลวดสนาม (Field winding) โรเตอร์จะหมุนด้วยความเร็วเดียวกันกับสนามแม่เหล็กหมุนที่เกิดจากการมีกระแสไฟฟ้าสามเฟสในขดลวดอาร์มาเจอร์สามเฟส โครงสร้างเครื่องจักรกลซิงโครนัสสามเฟสประกอบด้วยส่วนสเตเตอร์และโรเตอร์แสดงดังรูปที่ 2.9 โรเตอร์จะมีโครงสร้างเป็น 2 ลักษณะ คือ

แบบทรงกระบอก (Cylindrical rotor) และแบบขั้วยื่น (Salient-pole rotor)



รูปที่ 2.9 โครงสร้างโรเตอร์ของเครื่องจักรกลซิงโครนัส

โครงสร้างโรเตอร์ขั้วยื่นมีลักษณะที่สามารถสร้างให้มีขั้วแม่เหล็กจำนวนมากได้ในขณะที่โรเตอร์แบบทรงกระบอกจะมีจำนวนขั้วแม่เหล็กได้น้อย ซึ่งจำนวนขั้วแม่เหล็กจะมีผลต่อค่าความเร็วซิงโครนัส ดังสมการที่ 2.8

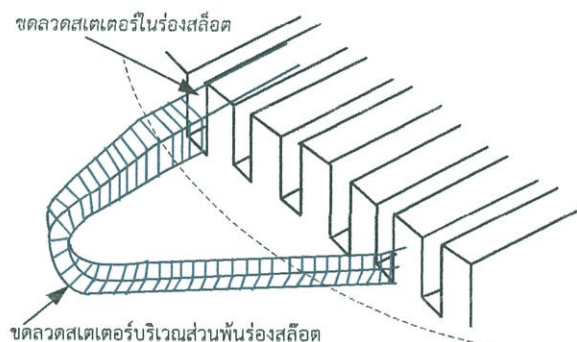
ในกรณีที่เครื่องจักรทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส (Synchronous generator) ถ้าต้องการให้ได้สัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่มีความถี่ค่าเดียวกันจากโรเตอร์ทั้งสองแบบ ค่าผลคูณ P กับ n_s ในสมการที่ 2.8 จะต้องมีค่าคงที่ดังนั้น จะเห็นได้ว่า

ถ้าต้นกำลังทางกลมีความเร็วรอบสูง (High speed n_s สูง) จะต้องใช้โรเตอร์แบบทรงกระบอกซึ่งมีจำนวนขั้วแม่เหล็ก (P) น้อยในทางกลับกันถ้าต้นกำลังทางกลมีความเร็วรอบต่ำ (Low speed n_s ต่ำ) จะต้องใช้โรเตอร์แบบขั้วยื่นซึ่งมีจำนวนขั้วแม่เหล็ก (P) มาก

โดยทั่วไปแล้วเครื่องจักรกลซิงโครนัสส่วนใหญ่จะมีขดลวดอาร์มาเจอร์อยู่บนสเตเตอร์และขดลวดสนามอยู่ที่โรเตอร์ในการสร้างสนามแม่เหล็กจะจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (Excitation) ให้กับขดลวดสนามซึ่งทำได้ 2 ลักษณะคือ ถ้าเป็นเครื่องจักรรุ่นเก่าจะใช้ชุดกระตุ้น (Exciter) ที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งมีโรเตอร์ต่อร่วมเพลลาเดียวกันกับโรเตอร์ของเครื่องจักรกลซิงโครนัสจ่ายกระแสให้ขดลวดสนามโดยผ่านวงแหวนสลิป (Slip rings) และแปรงถ่าน สำหรับเครื่องจักรรุ่นใหม่จะใช้ชุดกระตุ้นเป็นไฟฟ้ากระแสสลับร่วมกับชุดเรียงกระแส (Rectifier) ซึ่งติดตั้งอยู่บนเพลลาเดียวกันกับโรเตอร์ของเครื่องจักรกลซิงโครนัสจะเห็นว่าลักษณะนี้ไม่จำเป็นต้องใช้แปรงถ่าน (Brushless excitation) และวงแหวนสลิป

2.2 โครงสร้างของขดลวดสเตเตอร์

โครงสร้างขดลวดสเตเตอร์จะแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนแรกเป็นส่วนของขดลวดสเตเตอร์ที่อยู่ในสล็อต (Slot Portion) และส่วนที่สองเป็นส่วนของขดลวดสเตเตอร์บริเวณส่วนพันร่อง (Endwinding Portion) ซึ่งเป็นส่วนที่พันออกมาจากสล็อต ดังรูปที่ 2.10 ฉนวนทั้งสองบริเวณจะใช้วัสดุค่อนข้างจะแตกต่างกัน ฉนวนที่อยู่ในร่องสล็อตจะมีโพรงอากาศน้อยกว่าและมีความแข็งแรงมากกว่าฉนวนบริเวณส่วนพันร่อง เนื่องจากฉนวนในบริเวณสล็อตซึ่งเป็นส่วนตรงในกรรมวิธีการผลิตจะใช้เครื่องอัดความร้อน (Hot Press หรือ Heat Press) บีบอัดด้วยแรงดันและอบด้วยความร้อน ทำให้เรซินแทรกซึมในช่องว่างอากาศได้มากกว่าฉนวนบริเวณส่วนพันร่องซึ่งมีลักษณะโค้ง ทำให้ไม่สามารถใช้เครื่องอัดความร้อนบีบอัดได้ ฉนวนบริเวณนี้จึงเป็นส่วนที่บอบบางและมีจุดบกพร่องมากกว่า ปัจจุบันนี้ในกรรมวิธีในการผลิตได้มีการใช้กระบวนการ Vacuum Pressure Impregnation (VPI) ซึ่งจะสามารถใช้ได้กับฉนวนทั้งสองบริเวณ



รูปที่ 2.10 ขดลวดสเตเตอร์

1) ระบบฉนวนขดลวดสเตเตอร์ในร่องสล็อต (Slot Portion)

ฉนวนของขดลวดสเตเตอร์ที่อยู่ในร่องสล็อตจะประกอบด้วยชั้นฉนวนกราวด์และชั้นวัสดุกึ่งตัวนำต้านการเกิดโคโรนา ชั้นฉนวนกราวด์จะทนความเข้มสนามไฟฟ้าได้สูงแต่มีความยืดหยุ่นน้อยกว่าฉนวนที่ใช้พันบริเวณส่วนพันร่อง

2) ระบบฉนวนขดลวดสเตเตอร์บริเวณส่วนพันร่อง (Endwinding Portion)

ฉนวนของขดลวดบริเวณส่วนพันร่องควรใช้ฉนวนซึ่งมีความยืดหยุ่นพิเศษเนื่องจากบริเวณส่วนนี้เป็นส่วนที่ได้รับแรงสั่นสะเทือนเนื่องจากแรงแม่เหล็กไฟฟ้า และการที่ฉนวนมีความยืดหยุ่นจะทำให้สะดวกในการติดตั้งของขดลวด นอกจากนี้ฉนวนบริเวณนี้จะพันหุ้มด้วยชั้นเทปเคลือบลดความเครียดเพื่อป้องกันการเกิดการปล่อยประจุบางส่วนตามผิวฉนวน

2.3 ระบบฉนวน

ปัญหาที่สำคัญอย่างยิ่งประการหนึ่งในเครื่องจักรกลหมุนหรือระบบไฟฟ้าแรงสูง เกิดจากความเสียหายของระบบฉนวน ซึ่งฉนวนจะมีบทบาทสำคัญมากต่อเสถียรภาพและความน่าเชื่อถือของเครื่องจักรกลหมุนหรือระบบไฟฟ้าแรงสูง ความผิดปกติที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะมีผลมาจากความล้มเหลวของฉนวนที่ไม่มีคุณภาพหรือการออกแบบไม่มีประสิทธิภาพหรืออาจเกิดการที่ฉนวนได้รับแรงดันสูงเกินที่คาดหมายมาก

การฉนวนไฟฟ้าแรงสูง หมายถึง เทคนิคการการใช้วัสดุฉนวนกับแรงดันสูงอย่างเหมาะสมและมีประสิทธิภาพ หน้าที่ที่สำคัญที่สุดของตัวฉนวนหรือวัสดุฉนวนก็คือทำหน้าที่เป็นฉนวนคั่นระหว่างตัวนำที่มีระดับแรงดันไฟฟ้าต่างกันหรือระหว่างตัวนำที่มีแรงดันไฟฟ้ากับดิน ในขณะเดียวกันฉนวนยังต้องทำหน้าที่รับแรงทางกล และเผชิญกับ ความร้อน ปฏิกริยาเคมี รวมถึงสภาพแวดล้อมต่างๆ ได้ จึงได้มีความพยายามที่จะศึกษาและหาวิธีการประเมินสภาพฉนวนเพื่อลดความเสี่ยงจากการเสียหายขณะใช้งาน

ในทางปฏิบัติฉนวนจะมีการสูญเสียเกิดขึ้นแบ่งได้ 3 รูปแบบคือ

1) คอนดักชัน (Conduction) : ฉนวนในอุดมคติจะต้องมีความต้านทานสูงเป็นอนันต์ซึ่งไม่สามารถนำกระแสได้ แต่ในทางปฏิบัติแล้วไม่มีฉนวนชนิดไหนที่สามารถเป็นฉนวนได้สมบูรณ์ ดังนั้นจะมีความสูญเสียจากการนำไฟฟ้า หรือ คอนดักชัน (Conduction) เกิดขึ้นกับฉนวน คุณสมบัตินี้จะมีเฉพาะตอนที่ มีแหล่งจ่ายไฟเท่านั้น กล่าวคือถ้าปลดแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าออกจากอุปกรณ์ไฟฟ้าก็จะไม่มีการนำไฟฟ้าเกิดขึ้น

2) โพลาริเซชัน (Polarization) : ความสูญเสียจากการเกิดโพลาริเซชันของฉนวนเมื่อฉนวนอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า คุณสมบัตินี้จะมีอยู่ทั้งในขณะที่จ่ายไฟและปลดแหล่งจ่ายไฟออกจากอุปกรณ์ไฟฟ้า ดังนั้นในขณะที่ปลดแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าออกจะไม่สามารถสัมผัสกับอุปกรณ์ไฟฟ้าได้เพราะจะทำให้ประจุที่ค้างอยู่ในอุปกรณ์ไฟฟ้าดิซชาร์จมายังผู้สัมผัสได้

3) ดิซชาร์จบางส่วน (Partial Discharge)

โดยปกติฉนวนทุกชนิดจะต้องมีการสูญเสียที่เกิดจากคอนดักชัน (Conduction) และ/หรือ โพลาริเซชัน (Polarization) ทั้งสิ้นเป็นอย่างน้อย กระบวนการโพลาริเซชันจะเป็นการสูญเสียที่เป็นตัวบ่งบอกถึงปัญหาที่เกิดขึ้นภายในโมเลกุลของเนื้อฉนวนส่งผลให้ฉนวนเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ในขณะที่กระบวนการคอนดักชันจะเป็นตัวบ่งบอกถึงปัญหาที่เกิดเนื่องจากสิ่งแปลกปลอมหรือสิ่งสกปรกที่ผิวของฉนวน โดยไม่ได้เกิดขึ้นในเนื้อฉนวนและจะไม่ส่งผลให้ฉนวนเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีแต่จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของฉนวนเท่านั้น

ตารางที่ 2.1 การแยกแยะปัญหาที่เกิดกับฉนวนของเครื่องจักรกลหมุน

การเกิดโพลาไรเซชัน	การเกิดคอนดักชัน
เป็นผลจากการเกิดดีสชาร์จบางส่วน	เป็นผลจากความชื้นที่ผิวภายนอก
เป็นผลจากการเสื่อมอายุของโมเลกุลบริเวณรอยต่อของฉนวนสองชนิด	เป็นผลจากน้ำ, หายตน้ำ หรือละอองน้ำที่ผิวภายนอก
เป็นผลจากการเกิดอาร์ก	เป็นผลมาจากความปนเปื้อนที่ผิวภายนอก
เป็นผลจากการเกิดออกซิเดชัน	เป็นผลจากปรากฏการณ์แทรกครีจ (Tracking)
เป็นผลที่เกิดจากน้ำมันหล่อลื่นหรือฝุ่นละออง	เป็นผลจากผงคาร์บอน
เป็นผลจากเศษผงหรือละอองของสารเคมีรวมถึงเกลือ	เป็นผลจากผงโลหะ
เป็นผลจากการกัดกร่อน	เป็นผลมาจากร่องรอยของการเกิดฟอลต์
เป็นผลจากการเสื่อมสภาพจากความร้อน	เป็นผลมาจากการรั่วไหลของกระแส
เป็นผลจากความชื้นภายในเนื้อฉนวน	

2.3.1 ระบบฉนวนของขดลวดสเตเตอร์ในเครื่องจักรกลหมุน

ฉนวนที่นำมาใช้งานในเครื่องจักรกลหมุนมีอยู่หลายประเภท แต่ละประเภทจะมีคุณสมบัติแตกต่างกันไปซึ่งจะต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมกับชนิดงาน เมื่อใช้งานอุปกรณ์นั้นเป็นเวลานานจะทำให้ระบบฉนวนเสื่อมสภาพลง ซึ่งสภาพของฉนวนก็จะไปจำกัดอายุการใช้งานของอุปกรณ์นั้นๆ ระบบฉนวนในเครื่องจักรกลหมุนในระยะเริ่มแรกนั้นจะเป็นระบบฉนวนแบบเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) ซึ่งใช้แอสฟัลต์ (Asphalt) และเซลแล็ค (Shellac) เป็นตัวประสานไมก้า (Mica) ทำให้ระบบฉนวนประเภทนี้ถูกจำกัดการใช้ที่อุณหภูมิแวดล้อมไม่เกิน 130 องศาเซลเซียส แต่ในปัจจุบันระบบฉนวนเปลี่ยนเป็นแบบเทอร์โมเซตติง (Thermosetting) ซึ่งจะใช้โพลีเอสเตอร์ (Polyester) และอีพ็อกซีเรซิน (Epoxy Resin) เป็นตัวประสานไมก้าทำให้ฉนวนมีความแข็งแรงและทนอุณหภูมิแวดล้อมได้สูงกว่าถึง 155 องศาเซลเซียส

2.3.1.1 ระดับชั้นฉนวน (Insulation Class)

การแบ่งระดับชั้นฉนวนนั้น จะใช้อุณหภูมิแวดล้อมที่ฉนวนสามารถทนได้เป็นเกณฑ์ในการแบ่ง ฉนวนแต่ละชนิดจะสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิแวดล้อมเท่าไรนั้นขึ้นอยู่กับวัสดุที่นำมาทำเป็นฉนวนนั่นเอง การแบ่งระดับชั้นฉนวนจะแบ่งได้ดังต่อไปนี้

1) ฉนวนระดับชั้น Y

ฉนวนระดับชั้นนี้จะใช้งานที่อุณหภูมิแวดล้อมไม่เกิน 90 องศาเซลเซียส วัสดุที่นำมาใช้ทำฉนวนประเภทนี้ ได้แก่ ฝ้ายฝ้าย, กระดาษเซลลูโลส (Cellulose Based Paper), เส้นใยไหมธรรมชาติ ที่ไม่มีการชุบน้ำมันวานิชหรือเรซินและรวมไปถึงยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนซ์

2) ฉนวนระดับชั้น A

ฉนวนระดับชั้นนี้จะใช้งานที่อุณหภูมิแวดล้อมไม่เกิน 105 องศาเซลเซียส วัสดุที่นำมาใช้ทำฉนวนประเภทนี้ ได้แก่ ผ้าฝ้าย, ผ้าไหม, กระดาษเซลลูโลส (Cellulose Based Paper) และ ลินิน โดยจะมีการนำวัสดุฉนวนไปชุบด้วยน้ำมันวานิชหรือเรซิน รวมทั้งอีนาเมลที่เป็นประเภทสารอินทรีย์

3) ฉนวนระดับชั้น E

ฉนวนระดับชั้นนี้จะใช้งานที่อุณหภูมิแวดล้อมไม่เกิน 120 องศาเซลเซียส วัสดุที่นำมาใช้ทำฉนวนประเภทนี้ ได้แก่ ลิมาเนตพลาสติกหรือเทอร์โมพลาสติกร่วมกับไฟเบอร์เทอร์โมเซตติ้ง, อีพ็อกซีอีนาเมล หรือวานิช

4) ฉนวนระดับชั้น B

ฉนวนระดับชั้นนี้จะใช้งานที่อุณหภูมิแวดล้อมไม่เกิน 130 องศาเซลเซียส วัสดุที่นำมาใช้ทำฉนวนประเภทนี้ ได้แก่ ไม้ก้ำ, ไฟเบอร์กลาส และแก้วใยหิน (Asbestos) โดยจะใช้เซลแล็ค, แอสฟัลต์ และโพลีเอสเตอร์เรซินเป็นตัวยึดประสาน

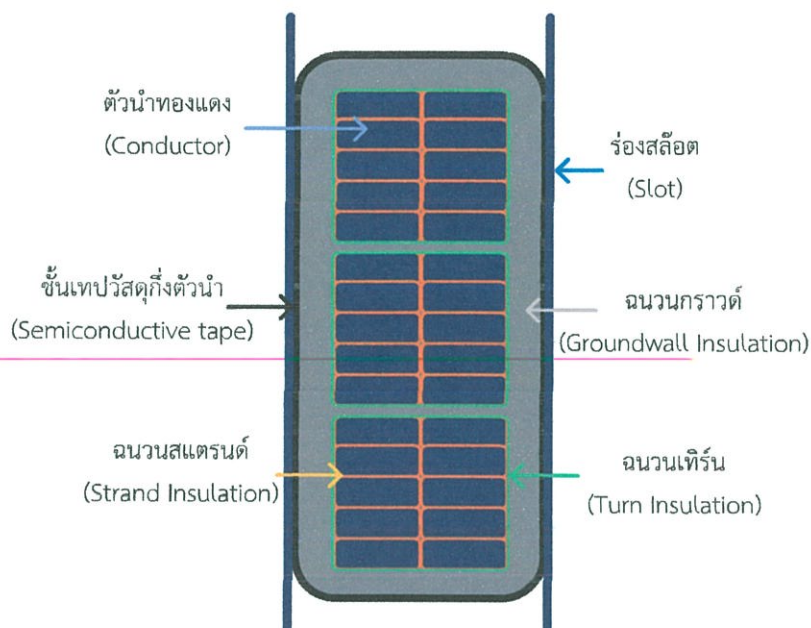
5) ฉนวนระดับชั้น F

ฉนวนระดับชั้นนี้จะใช้งานที่อุณหภูมิแวดล้อมไม่เกิน 155 องศาเซลเซียส วัสดุที่นำมาใช้ทำฉนวนประเภทนี้ ได้แก่ ไม้ก้ำ, ไฟเบอร์กลาส และแก้วใยหิน (Asbestos) เช่นเดียวกันกับระดับชั้น B แต่วัสดุที่ใช้เป็นตัวยึดประสานจะใช้อีพ็อกซีเรซิน (Epoxy Resin)

6) ฉนวนระดับชั้น H

ฉนวนระดับชั้นนี้จะใช้งานที่อุณหภูมิแวดล้อมไม่เกิน 180 องศาเซลเซียส วัสดุที่นำมาใช้ทำฉนวนประเภทนี้ ได้แก่ ไม้ก้ำ, ไฟเบอร์กลาส และแก้วใยหิน (Asbestos) เช่นเดียวกันกับระดับชั้น B แต่วัสดุยึดประสานจะใช้ซิลิโคนเรซิน หรือยางซิลิโคน

2.3.1.2 โครงสร้างระบบฉนวน



รูปที่ 2.11 โครงสร้างระบบฉนวนของขดลวดสเตเตอร์ในเครื่องจักรกลหมุน

ในเครื่องจักรกลหมุนฉนวนนับเป็นส่วนประกอบที่มีความสำคัญมาก อายุการใช้งานจะนานหรือไม่ย่อมขึ้นอยู่กับสภาพของฉนวน โดยระบบฉนวนของขดลวดสเตเตอร์ จะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

1) ฉนวนสแตรนด์ (Strand Insulation)

คือชั้นของฉนวนที่หุ้มขดลวดตัวนำทองแดงย่อยในขดลวดสเตเตอร์ ซึ่งจะทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้เกิดการลัดวงจรระหว่างตัวนำย่อยภายในขดลวดสเตเตอร์ แต่เดิมนั้นฉนวนชั้นนี้จะทำจากวัสดุแร่ใยหิน แต่เนื่องจากต้องการเพิ่มเนื้อที่สำหรับขดลวดโลหะทองแดงเพื่อให้สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากขึ้น จึงเปลี่ยนมาใช้วัสดุประเภท แก้วโพลีเอสเตอร์ (Polyester Glass) แทน

2) ฉนวนเทิร์น (Turn Insulation)

เป็นฉนวนส่วนที่อยู่ถัดจากฉนวนสแตรนด์ (Strand Insulation) ซึ่งจะทำหน้าที่ป้องกันการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด โดยส่วนมากฉนวนชนิดนี้จะใช้วัสดุชนิดเดียวกับฉนวนกราวด์ (Ground Wall Insulation)

3) ฉนวนกราวด์ (Ground Wall Insulation)

เป็นฉนวนส่วนที่อยู่ถัดจากฉนวนเทิร์น (Turn Insulation) โดยฉนวนชั้นนี้จะเป็นฉนวนหลักซึ่งทำหน้าที่เป็นฉนวนระหว่างแท่งโลหะตัวนำกับแกนเหล็กสเตเตอร์ วัสดุที่นำมาใช้ทำฉนวนประเภทนี้มีหลายชนิดขึ้นอยู่กับลักษณะการนำไปใช้งาน ดังนี้

3.1) ไม้ก้ำเทปสำหรับกระบวนการ Vacuum Pressure Impregnation (VPI)

ฉนวนไม้ก้ำเทปชนิดนี้จะไม่มีการเคลือบที่ผิว โดยจะใช้พันสำหรับขดลวดสเตเตอร์ที่อยู่ในสล็อต (Slot Portion) และ บริเวณส่วนพันร่อง (Endwinding Portion) ที่จะนำไปผ่านกระบวนการ Vacuum Pressure Impregnation (VPI)

3.2) ไม้ก้ำเทปผสมเรซินสำหรับกระบวนการ Resin Rich (RR)

ฉนวนไม้ก้ำเทปชนิดนี้จะมีส่วนผสมของเรซินอยู่ โดยจะใช้พันสำหรับขดลวดสเตเตอร์ที่อยู่ในสล็อต (Slot Portion) ที่จะนำไปผ่านกระบวนการ Resin Rich (RR)

3.3) ไม้ก้ำเทปแบบผ่านการอบเรซินสำหรับกระบวนการ Resin Rich (RR)

ฉนวนไม้ก้ำเทปชนิดนี้จะผ่านการอบเรซิน โดยจะใช้พันสำหรับขดลวดสเตเตอร์บริเวณส่วนพันร่อง (Endwinding Portion) ที่จะนำไปผ่านกระบวนการ Resin Rich (RR) เนื่องจากบริเวณดังกล่าวไม่สามารถนำไปผ่านกระบวนการ Resin Rich (RR) เนื่องจากไม่สามารถนำเข้าเครื่อง Hot Press ได้ ดังนั้นจึงต้องใช้ไม้ก้ำแบบผ่านการอบเรซิน

3.4) โครโน่าเทป (Conductive tape)

ฉนวนชนิดนี้จะใช้พันส่วนของขดลวดสเตเตอร์ที่อยู่ในสล็อต (Slot Portion) โดยเป็นฉนวนที่มีค่าความต้านทานต่ำเพื่อที่จะทำให้ศักย์ของโครโน่าเทปมีค่าใกล้เคียงกับศักย์ของแกนสเตเตอร์ ดังนั้นจึงทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ตกคร่อมช่องว่างระหว่างผิวของฉนวนและแกนสเตเตอร์มีค่าต่ำจึงไม่ทำให้เกิดการดิสชาร์จบางส่วนในบริเวณดังกล่าว

3.5) เซมิคอนดักทีฟเทป (Semi-conductive tape)

ฉนวนชนิดนี้จะใช้พันส่วนของขดลวดสเตเตอร์บริเวณส่วนพันร่อง (Endwinding Portion) โดยทำหน้าที่ช่วยลดความเครียดสนามไฟฟ้าและกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าให้มีความสม่ำเสมอ เนื่องจากบริเวณดังกล่าวเป็นบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงจึงทำให้อากาศบริเวณดังกล่าวมีความเสี่ยงต่อทำให้เกิดการดิสชาร์จบางส่วน

3.6) โพลีเอสเตอร์เทป (Polyester heat shrinkable tape)

ฉนวนชนิดนี้จะใช้พันส่วนของขดลวดสเตเตอร์บริเวณส่วนพันร่อง (Endwinding Portion) ซึ่งเป็นบริเวณที่มีความโค้งงอ โดยเป็นฉนวนที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับขดลวดบริเวณดังกล่าว

2.3.2 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการเสื่อมสภาพของฉนวน

ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการเสื่อมสภาพฉนวนไว้ 4 ประเภคือ การเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน ไฟฟ้า สภาวะแวดล้อมและทางกล

1) การเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน

ในฉนวนสารส่วนใหญ่เป็นสารประกอบอินทรีย์ ซึ่งความร้อนจะมีอิทธิพลต่ออายุการใช้งานของฉนวนมาจากสมการของอาร์รีเนียสสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอายุของฉนวนและอุณหภูมิได้ตามสมการที่ 2.10

$$L = A \exp(B/T) \quad (2.10)$$

โดยที่	L	คือ	อายุของฉนวน
	A และ B	คือ	ค่าคงที่

จากสมการที่ 2.10 พบว่าเมื่ออุณหภูมิของฉนวนสูงขึ้นจะทำให้อายุการใช้งานของฉนวนต่ำลง จากการนำสมการของอาร์เรเนียสไปใช้ประมาณค่าอายุการใช้งานของฉนวนระดับชั้น B ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสจะมีอายุการใช้งานประมาณครึ่งหนึ่งของอุณหภูมิที่ 90 องศาเซลเซียส

2) การเสื่อมสภาพเนื่องจากไฟฟ้า

การเสื่อมสภาพเนื่องจากไฟฟ้ามักจะอยู่ในรูปแบบของการเกิดการปล่อยประจุบางส่วน ซึ่งการปล่อยประจุบางส่วนในบริเวณโพรงอากาศแบบแคบๆ แต่เกิดต่อเนื่องกันเป็นเวลานานก็จะทำให้เกิดความร้อนสะสมที่บริเวณนั้น ผลของความร้อนจะทำให้ฉนวนเกิดการลุกไหม้หรือเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีและเสื่อมสภาพในที่สุด

3) การเสื่อมสภาพเนื่องจากสภาวะแวดล้อม

การเสื่อมสภาพจากสาเหตุนี้สืบเนื่องมาจากสิ่งแวดล้อมที่ใช้งานของอุปกรณ์ ฉนวนที่ใช้งานในที่ชื้นและมีฝุ่นละอองสกปรกเปื้อนคราบน้ำมัน ความชื้นจะเป็นอันตรายกับฉนวนประเภทเทอร์โมพลาสติกหรือโพลีเอสเตอร์ซึ่งจะทำให้เกิดรอยแตกบริเวณปลายร่องสล๊อต ส่วนน้ำมันนั้นจะไปละลายพันธะที่ใช้ยึดฉนวนทำให้ฉนวนเกิดรอยแตกได้เช่นเดียวกัน ผลของคราบน้ำมันร่วมกับฝุ่นละอองมักจะส่งผลทางอ้อมคือ คราบน้ำมันและฝุ่นละอองจะไปอุดตันท่อระบายอากาศทำให้การระบายอากาศไม่ดีพอ เกิดความร้อนสะสมและทำให้ฉนวนเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนที่สะสมนั้น

4) การเสื่อมสภาพเนื่องจากผลทางกล

ในระหว่างการใช้งานอุปกรณ์ตามปกตินั้น ขดลวดสเตเตอร์จะได้รับแรงทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Force) ในกรณีที่ขดลวดสเตเตอร์หลวมแรงแม่เหล็กไฟฟ้าจะทำให้ขดลวดสเตเตอร์สั่นและทำให้ฉนวนบริเวณปลายร่องสล๊อตถูกเสียดสีและเกิดรอยแตกได้

2.3.3 การเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของฉนวน

การเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของฉนวนที่มีการใช้อยู่ในปัจจุบันจะมีอยู่ 2 วิธีดังนี้

2.3.3.1 กระบวนการ Resin Rich (RR)

Resin Rich โดยทั่วไปอาจจะเรียกว่า “Cast Coil” หรือ “Hot Press” คือหนึ่งในกระบวนการพันฉนวนของขดลวดสเตเตอร์ในเครื่องจักรกลหมุนโดยอาศัยหลักการให้ความร้อนและความดันแก่ฉนวน จะเป็นการทำให้ฉนวนถูกหล่อหุ้มด้วยน้ำยาอีพ็อกซีเรซิน (Epoxy Resin) ส่งผลให้ฉนวนนั้นแข็งแรงขึ้นโดยจะไม่มีรอยร้าวและสิ่งสกปรกเกิดขึ้นภายในเนื้อฉนวน วิธีการนี้จะสามารถทำโดยเครื่อง Hot Press ซึ่งจะใช้แผ่นเหล็กที่ร้อนมากและอบด้วยน้ำยาอีพ็อกซีเรซิน (Epoxy

Resin) ทนียบแห้งตัวนำสเตเตอร์ที่ผ่านการพันขดลวดเสร็จเรียบร้อยแล้ว จากนั้นเครื่อง Hot Press จะทำการบีบอัดด้วยไฮดรอลิก (Hydraulic) ดังรูปที่ 2.12 เพื่อให้膩ายาอีพ็อกซีเรซิน (Epoxy Resin) ที่เคลือบอยู่บนผิวของฉนวนขดลวดละลายเข้าไปเป็นเนื้อเดียวกัน

ซึ่งวิธีนี้จะสามารถทำได้เฉพาะกับขดลวดสเตเตอร์ในร่องสลิต (Slot Portion) เนื่องจากขดลวดสเตเตอร์บริเวณส่วนพันร่อง (Endwinding Portion) จะมีความโค้งงอจึงไม่สามารถใช้กับเครื่อง Hot Press ได้

2.3.3.2 Vacuum Pressure Impregnation (VPI)

จากกระบวนการ Resin Rich (RR) ที่ผ่านมา พบว่าเมื่อขดลวดผ่านกระบวนการดังกล่าวแล้วยังคงทำให้เกิดช่องว่างอากาศ (Void) ภายในเนื้อฉนวน ดังนั้นจึงมีการปรับปรุงคุณภาพของฉนวนดังกล่าวด้วยกระบวนการ Vacuum Pressure Impregnation (VPI)

Vacuum Pressure Impregnation (VPI) คือ การเคลือบฉนวนด้วย膩ายาอีพ็อกซีเรซิน (Epoxy Resin) บนฉนวนที่พันรอบขดลวดตัวนำไฟฟ้า ซึ่งวิธีการนี้จะทำให้น膩ายาสามารถแทรกซึมเข้าไปได้ในทุกส่วนของฉนวน ซึ่งจะทำใหฉนวนแข็งแรง ไม่มีช่องว่างของอากาศ ไม่มีความชื้นทำใหฉนวนสามารถทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพและมีความน่าเชื่อถือสูงที่สุด

กระบวนการ Vacuum Pressure Impregnation (VPI) แบ่งออกเป็น 2 แบบคือ

1) Individual VPI หรือ Single Bar VPI คือ เมื่อขดลวดแต่ละขดผ่านกระบวนการพันฉนวนแล้วจะถูกนำเข้าสู่กระบวนการ Vacuum Pressure Impregnation (VPI) ก่อนที่จะนำไปประกอบเข้ากับสเตเตอร์

2) Global VPI คือ เมื่อขดลวดแต่ละขดผ่านกระบวนการพันฉนวนแล้วจะถูกนำไปประกอบเข้ากับสเตเตอร์ จากนั้นจึงนำสเตเตอร์ที่ประกอบด้วยขดลวดเสร็จแล้วไปผ่านกระบวนการ Vacuum Pressure Impregnation (VPI)

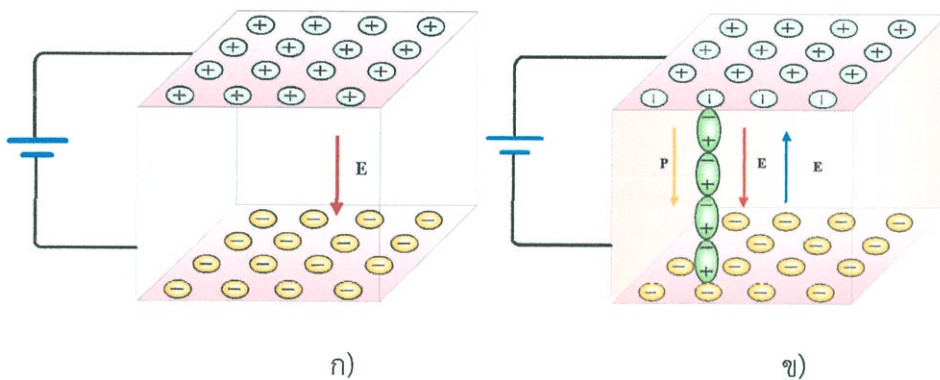
2.4 การวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน (Polarization and Depolarization Current)

2.4.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน

คุณลักษณะสำคัญประการหนึ่งของฉนวนก็คือ การมีขั้วหรือโพลาริเซชัน (polarization, P) เมื่อฉนวนอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าที่ถูกจ่ายจากภายนอก สนามไฟฟ้าจากภายนอกนี้จะทำให้เกิดแรงกระทำต่ออนุภาค (อะตอม, โมเลกุล, ประจุต่างๆ เป็นต้น) ภายในเนื้อฉนวนซึ่งทำใหอนุภาคดังกล่าวเกิดการหมุนเพื่อตอบสนองต่อแรงกระทำจากสนามไฟฟ้าภายนอก ดังรูปที่ 2.12

จากรูปที่ 2.12 พบว่า เมื่อจ่ายแรงดันกระแสตรงให้กับฉนวน อนุภาคฉนวนจะเกิดการหมุนเพื่อตอบสนองต่อแรงกระทำจากสนามไฟฟ้าโดยอนุภาคจะหมุนด้านที่เป็นประจุลบไปยังแผ่นอิเล็กโทรดด้านบวกและหมุนด้านที่เป็นประจุบวกไปยังอิเล็กโทรดด้านลบ และเมื่อปลดแหล่งจ่าย

แรงดันออกจากกระบอก อนุภาคก็จะเกิดการหมุนตัวกลับสู่สภาพเดิมเหมือนดังก่อนหน้าที่จะทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับฉนวน



รูปที่ 2.12 กระบวนการการมีขั้ว หรือ โพลาริเซชัน

ก) ระหว่างแผ่น plate เป็นฉนวนสุญญากาศ ข) กระบวนการมีขั้วในเนื้อฉนวนเมื่อแทนที่สุญญากาศด้วยฉนวน

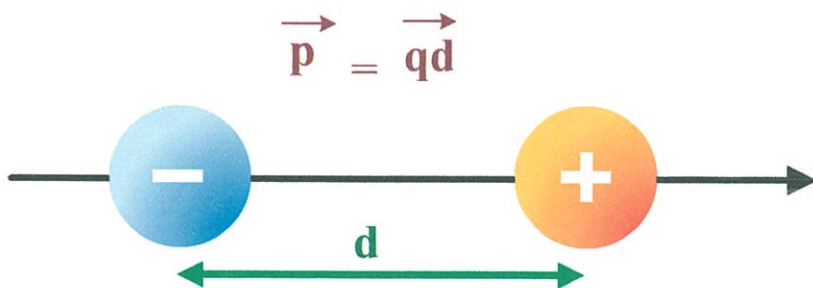
การมีขั้วหรือโพลาริเซชัน, P (C/m^2) คือ อัตราส่วนของโมเมนต์เชิงขั้วทางไฟฟ้า (electric dipole moment) ของฉนวนต่อปริมาตรของฉนวน

$$\text{การมีขั้วหรือโพลาริเซชัน} = \frac{\text{โมเมนต์เชิงขั้วทางไฟฟ้า (electric dipole moment)}}{\text{ปริมาตรของฉนวน}} \quad (2.11)$$

โดยที่โมเมนต์เชิงขั้วทางไฟฟ้า (electric dipole moment, p) เกิดขึ้นได้ดังต่อไปนี้หากมีประจุอยู่ที่จุด 2 จุด จุดหนึ่งมีประจุ $+q$ และอีกจุดหนึ่งมีประจุ $-q$ จะเกิดโมเมนต์เชิงขั้วทางไฟฟ้า (electric dipole moment), p ระหว่างประจุทั้งสองขึ้น โดยที่โมเมนต์เชิงขั้วทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเป็นดังสมการที่ 2.12

$$p = qd \quad (2.12)$$

d คือ เวกเตอร์ระยะกระจัด (displacement vector) มีทิศทางจากประจุลบไปยังประจุบวก ดังนั้น โมเมนต์เชิงขั้วทางไฟฟ้า, p จึงเป็นปริมาณเวกเตอร์และมีทิศจากประจุลบไปประจุบวก



รูปที่ 2.13 แสดงโมเมนต์เชิงขั้วทางไฟฟ้าระหว่างประจุทั้งสอง

ขนาดของการมีขั้วที่เกิดขึ้นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงต่อความเข้มสนามไฟฟ้าที่กระทำกับเนื้อฉนวนตรงเท่าที่ความเข้มสนามไฟฟ้านั้นมีค่าสูงไม่มากพอที่จะทำให้เกิดความเสียหายต่อฉนวนได้ การมีขั้ว หรือ โพลาราไรเซชัน, P สามารถแสดงในรูปสมการได้ ดังนี้

$$P = (\epsilon_r - 1)\epsilon_0 E = \chi\epsilon_0 E \quad (2.13)$$

โดยที่ $\chi = (\epsilon_r - 1)$ คือ dielectric susceptibility ของวัสดุฉนวนซึ่งเป็นแฟคเตอร์ที่แสดงถึงความสามารถของวัสดุในการตอบสนองต่อสนามไฟ

ϵ_0 คือ เพอร์มิตติวิตีของสุญญากาศ

ϵ_r คือ เพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ของวัสดุใดๆ

ในฉนวนสุญญากาศความหนาแน่นของฟลักซ์ไฟฟ้า (dielectric flux density, D) จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับสนามไฟฟ้า (E) ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของฟลักซ์ไฟฟ้า (D) และสนามไฟฟ้า (E) ในสุญญากาศได้ดังสมการที่ 2.14

$$D = \epsilon_0 E \quad (2.14)$$

แต่เมื่อแทนที่ฉนวนสุญญากาศด้วยวัสดุฉนวนใดๆ ความหนาแน่นของฟลักซ์ไฟฟ้าจะเพิ่มมากขึ้น อันเป็นผลเนื่องมาจากการมีขั้วของวัสดุฉนวนดังกล่าว ดังนั้น จึงเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง D และ E ได้ใหม่ ดังสมการที่ 2.15

$$D = \epsilon_0 E + P \quad (2.15)$$

เนื่องจาก $P = (\epsilon_r - 1)\epsilon_0 E = \chi\epsilon_0 E$ ดังนั้น

$$D = \epsilon_0 E + P$$

$$D = \epsilon_0 E + \chi\epsilon_0 E = \epsilon_0 E (1 + \chi) \quad (2.16)$$

และหากสนามไฟฟ้าจากภายนอกที่ป้อนให้กับฉนวนมีความสัมพันธ์กับเวลา จะสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง $D(t)$ กับ $E(t)$ ได้ ดังสมการที่ 2.17 และ 2.18

$$D(t) = \epsilon_0 E(t) + P(t) \quad (2.17)$$

$$D(t) = \epsilon_0 E(t) + \chi \epsilon_0 E(t) = \epsilon_0 E(t)(1 + \chi(t)) \quad (2.18)$$

การมีขั้วที่เกิดขึ้นจะมีทิศทางเดียวกับสนามไฟฟ้าจากภายนอก $E(t)$ และนั่นคือ การมีขั้วจะมีทิศทางเดียวกับ $D(t)$ ด้วยเช่นกัน

การมีขั้ว หรือ โพลาริเซชัน มีด้วยกัน 5 แบบ ดังนี้

1) Electronic Polarization หรือ Optical polarization

Electronic Polarization เกิดจากการเคลื่อนที่ของกลุ่มหมอกอิเล็กตรอนที่อยู่รอบๆ นิวเคลียสเนื่องจากอิทธิพลของสนามไฟฟ้าภายนอก แต่การเคลื่อนที่ของกลุ่มหมอกอิเล็กตรอนดังกล่าวมีขนาดเล็กมากเนื่องจากแรงจากสนามไฟฟ้าภายนอกที่กระทำต่ออะตอมนั้นมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับแรงยึดเหนี่ยวภายในอะตอมที่เกิดจากนิวเคลียสกระทำต่ออิเล็กตรอน การมีขั้วชนิดนี้เกิดขึ้นภายในเวลา 10^{-14} วินาที ซึ่งมีความสอดคล้องกับความเร็วแสงและการมีขั้วแบบนี้จะไม่ทำให้เกิดการสูญเสียทางไฟฟ้า

2) Atomic Polarization หรือ ionic polarization หรือ vibrational polarization

Atomic Polarization เกิดขึ้นเมื่อมีสนามไฟฟ้าจากภายนอกกระทำต่อ Poly atomic molecule ซึ่งจะทำให้อะตอมหรือไอออนของโมเลกุลที่มีหลายอะตอม (Poly atomic molecule) เคลื่อนที่ ซึ่งสนามไฟฟ้าภายนอกสามารถทำให้การจัดเรียงตัวของนิวเคลียสภายในอะตอมและการสั่นของโครงสร้างโมเลกุลเปลี่ยนแปลงไป การมีขั้วแบบนี้ไม่สามารถเกิดขึ้นภายในเวลาที่รวดเร็วดังเช่น electronic polarization ได้เพราะนิวเคลียสของอะตอมเคลื่อนที่ได้ช้ามากเมื่อเทียบกับอิเล็กตรอน

3) Orientation Polarization

Orientation Polarization เกิดขึ้นภายในเนื้อวัสดุที่ประกอบด้วยโมเลกุลหรืออนุภาคที่มีขั้วแบบถาวรโดยธรรมชาติเท่านั้น เช่น น้ำ โดยปกติแล้วภายในเนื้อของวัสดุดังกล่าวโมเลกุลหรืออนุภาคที่มีขั้วจะมีการจัดเรียงตัวโดยธรรมชาติ หรือ หมุนอย่างอิสระอยู่แล้ว ซึ่งจะทำให้สนามไฟฟ้าลัพธ์ภายในเนื้อวัสดุมีค่าเท่ากับศูนย์ นั่นคือ ไม่มีโพลาริเซชันเกิดขึ้นภายในเนื้อวัสดุ แต่เมื่อวัสดุอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า โมเลกุลหรืออนุภาคของวัสดุจะหมุนเพื่อให้โมเลกุลหรืออนุภาคดังกล่าวมีการเรียงตัวสอดคล้องกับสนามไฟฟ้าที่มากกระทำ โพลาริเซชันแบบนี้จะใช้เวลาในการเกิดนานกว่า electronic polarization และ atomic polarization

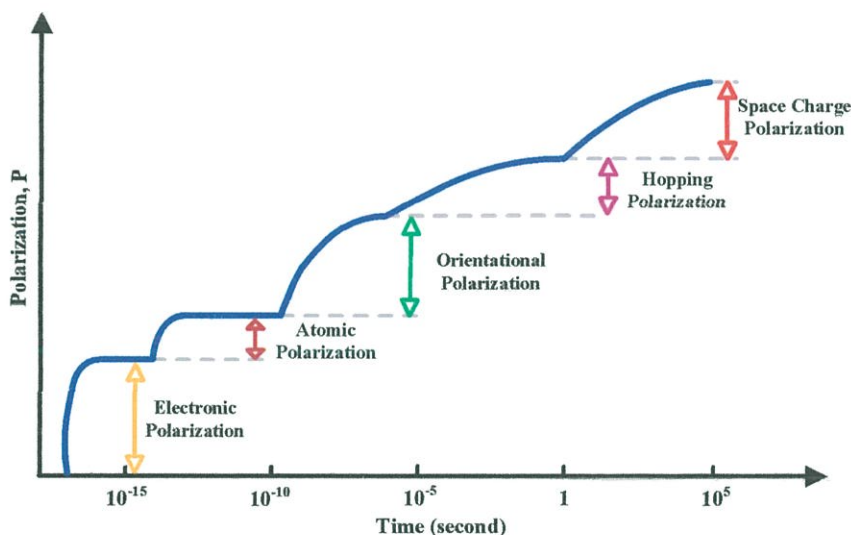
4) Hopping polarization

Hopping polarization จะอธิบายกระบวนการที่ localized charges เช่น ไอออน (ions) และ ช่องว่าง (vacancy) หรือ อิเล็กตรอน และ โฮล (hole) สามารถกระโดดจากตำแหน่งหนึ่งไปยัง

อีกตำแหน่งหนึ่งในระยะเวลาสั้นได้ และ localized charges นั้นจะติดอยู่ในตำแหน่งที่มันกระโดดไป เช่น อนุภาคประจุลบสามารถกระโดดจากตำแหน่งเดิมของมันไปยังอีกตำแหน่งหนึ่งโดยมันจะทิ้งประจุบวก หรือ โฮล ไว้ในตำแหน่งเดิมก่อนหน้านี้ ซึ่งจะทำให้เกิดประจุลบในตำแหน่งใหม่ที่อิเล็กตรอนกระโดดไป จากกระบวนการที่ได้อธิบายข้างต้นสามารถทำให้เกิดขั้วภายในเนื้อวัสดุได้

5) Space charge polarization หรือ interfacial polarization

Space charge polarization เกิดจากการแยกตัวกันของอนุภาคประจุบวกและอนุภาคประจุลบที่สามารถเคลื่อนที่ได้ภายใต้แรงกระทำจากสนามไฟฟ้าภายนอก ซึ่งอนุภาคประจุดังกล่าวอาจเกิดขึ้นเนื่องจากการสัมผัสทางไฟฟ้า หรือ เกิดขึ้นที่ผิวรอยต่อของสาร เมื่ออนุภาคประจุเคลื่อนที่แยกตัวออกจากกันจะทำให้เกิด space charge ขึ้น ซึ่งจะทำให้การกระจายของสนามไฟฟ้าในตอนเริ่มต้นผิดเพี้ยนไป ประจุค้าง (space charge) สามารถเกิดขึ้นที่ผิวรอยต่อของวัสดุที่มีค่า permittivity แตกต่างกันภายใต้สนามไฟฟ้า

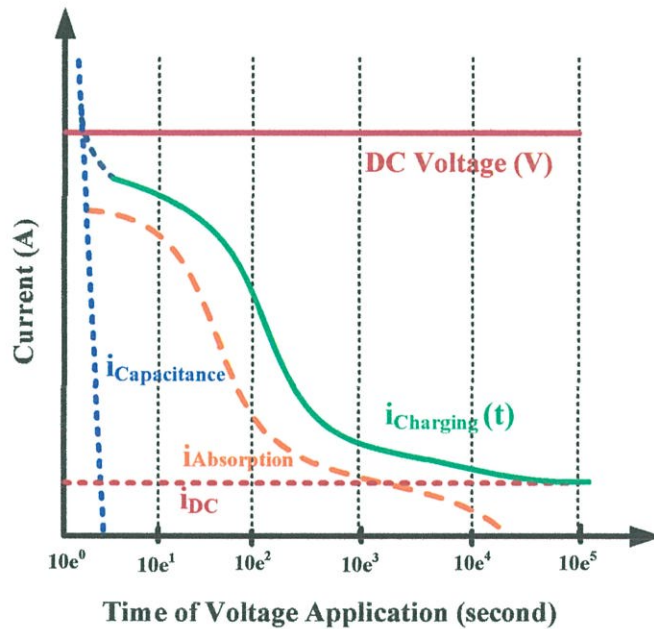


รูปที่ 2.14 ระยะเวลาที่ใช้ในการเกิดโพลาริเซชันทั้ง 5 แบบภายใต้การป้อนแรงดันรูปขั้น

ณ ปัจจุบัน เราสามารถทราบขนาดของการมีขั้ว ($P(t)$) ที่เกิดขึ้นภายในวัสดุฉนวนได้โดยสังเกตจากขนาดของกระแสที่ไหลผ่านเนื้อฉนวนเพราะไม่สามารถวัดขนาดการมีขั้วภายในวัสดุฉนวนโดยการวัดการมีขั้วได้โดยตรง และจนถึงปัจจุบันนี้ เรายังคงไม่สามารถบอกถึงความนำของวัสดุฉนวนโดยปราศจากการเกี่ยวเนื่องกับกระบวนการการมีขั้วได้

พิจารณาการจ่ายแรงดันรูปขั้น (step voltage) ให้กับฉนวนเป็นเวลานานเพียงพอที่จะทำให้เกิดการมีขั้ว จะสามารถสังเกตเห็นกระแสโพลาริเซชัน (polarization current, i_{pol}) ได้ โดยขนาดของกระแสดังกล่าวจะเปลี่ยนแปลงตามเวลา เมื่อจ่ายแรงดันรูปขั้นให้กับฉนวนและทำการวัดกระแสที่

ไหลผ่านเนื้อฉนวนซึ่งจะเรียกกระแสดังกล่าวว่ากระแสชาร์จ (charging current) ซึ่งมีองค์ประกอบ ดังนี้



รูปที่ 2.15 องค์ประกอบของกระแสชาร์จ

$$i_{\text{charging}}(t) = C_0 V_0 \left[\frac{\sigma_0}{\epsilon_0} + \epsilon_{\infty} \delta(t) + f(t) \right] \quad (2.19)$$

โดยที่

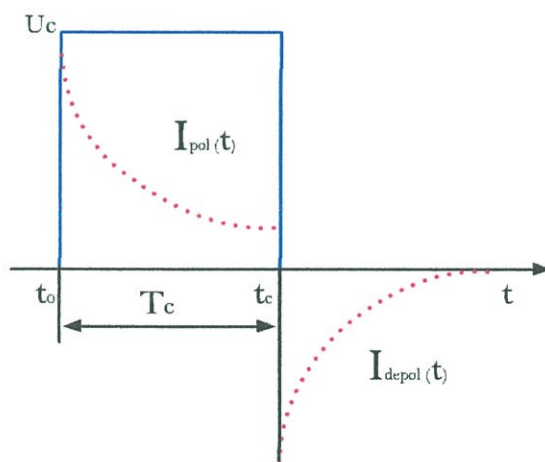
กระแสชาร์จจะประกอบด้วย 3 ส่วน ดังนี้

- 1) เทอมที่ 1 คือ กระแสคอนดักชัน (Conduction Current, i_{DC}) หรือกระแสนำไฟฟ้า ในรูปที่ 2.15 ซึ่งมีความสัมพันธ์กับ DC conductivity ของวัสดุฉนวน ซึ่งมีค่าที่และจะปรากฏในขณะที่ทำการจ่ายแรงดันให้กับวัสดุฉนวนเท่านั้น
- 2) เทอมที่ 2 คือ กระแสคาปาซิแตนซ์ (Capacitance Current, $i_{\text{Capacitance}}$) ในรูปที่ 2.15 ซึ่งจะเกิดขึ้นในช่วงระยะเวลาสั้นมากๆ
- 3) เทอมที่ 3 คือ กระแสดูดซับ (Absorption Current, i_{abs}) ในรูปที่ 2.15 ซึ่งมีความสัมพันธ์กับกระบวนการโพลาริเซชันทั้งหมดที่เกิดขึ้นภายในเนื้อฉนวนในขณะที่ทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้า

2.4.2 การวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน

การวัดกระแสในขณะที่จ่ายไฟหรือชาร์จประจุ (Charging Current) หรือเรียกว่ากระแสโพลาริเซชัน (Polarization Current) จะประกอบด้วยกระแสสามส่วน คือกระแสคอนดักชัน (Conduction Current) รวมกับกระแสคาปาซิแตนซ์ (Capacitance Current) และกระแสดูดซับ (Absorption Current) โดยที่กระแสคอนดักชันจะมีค่าคงที่ตลอดที่ทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าและจะหมดไปเมื่อปลดแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าออกจากอุปกรณ์ไฟฟ้า ส่วนกระแสดูดซับ (Absorption Current) จะสามารถวัดได้ในวงจรที่เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเท่านั้น นอกจากนี้ค่ากระแสคาปาซิแตนซ์ (Capacitance Current) ที่เกิดขึ้นในช่วงระยะเวลาสั้นมากทำให้ไม่สามารถวัดค่าได้ จึงไม่ถูกนำมาพิจารณาด้วย ดังนั้นการวัดกระแสโพลาริเซชัน (Polarization Current) ที่จะกล่าวต่อไปนี้จะพิจารณาเฉพาะองค์ประกอบของกระแสคอนดักชัน (Conduction Current) และกระแสดูดซับ (Absorption Current) เท่านั้น

ส่วนกระแสขณะปลดแหล่งจ่ายไฟหรือดิสชาร์จ (Discharging Current) จะเรียกว่ากระแสดีโพลาริเซชัน (Depolarization Current) โดยจะมีแค่องค์ประกอบของค่ากระแสดูดซับ (Absorption Current) ที่เกิดจากกระบวนการโพลาริเซชันเท่านั้น เนื่องจากขณะปลดแหล่งจ่ายไฟออกหรือดิสชาร์จจะไม่มีค่าองค์ประกอบของค่ากระแสคอนดักชัน (Conduction Current) ซึ่งค่ากระแสดูดซับ (Absorption Current) ขณะดิสชาร์จจะมีขนาดเท่ากับกระแสดูดซับ (Absorption Current) ขณะชาร์จแต่กลับขั้วกัน โดยรูปร่างของกระแสโพลาริเซชัน (Polarization Current) และกระแสดีโพลาริเซชัน (Depolarization Current) ที่วัดได้จะเป็นดังรูปที่ 2.16

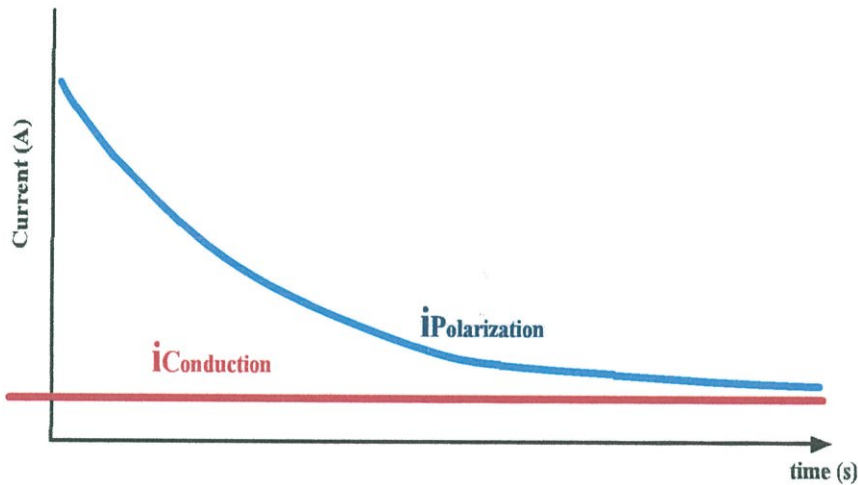


รูปที่ 2.16 กระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน

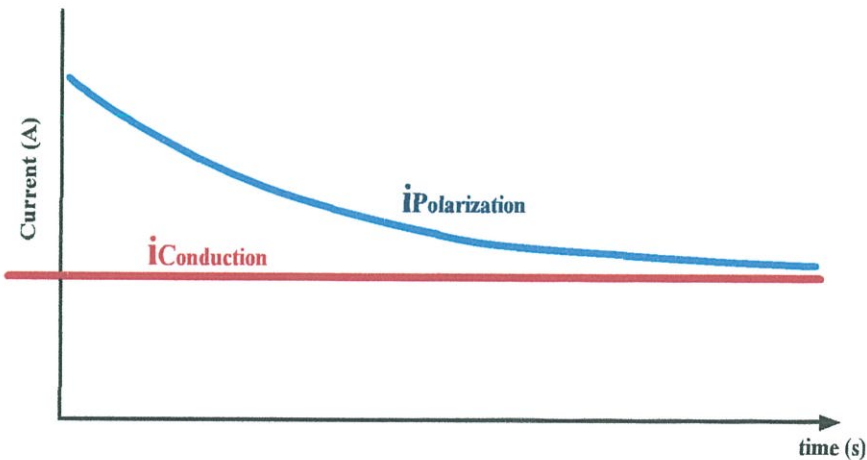
จากรูปที่ 2.17 กระแสคอนดักชัน (Conduction Current) จะมีค่าคงที่ตลอดที่มีการจ่ายแรงดันไฟฟ้าและกระแสดูดซับ (Absorption Current) จะมีค่าสูงในระยะเวลาเริ่มต้นจากนั้นจะมีค่าลดลงเรื่อยๆ แบบเอ็กโพเนนเชียลและเข้าสู่ศูนย์แต่เนื่องจากเป็นกราฟล็อก-ล็อก (log-log graph)

คือมีทั้งแกนนอนและแกนตั้งเป็นสเกลล็อกจึงไม่มีแกนศูนย์ทำให้กราฟของกระแสดูดซับลดลงแล้วเข้าสู่ค่าๆหนึ่ง

แต่ถ้าหากฉนวนมีปัญหาที่เกิดจากกระบวนการคอนดักชัน เช่น มีผงคาร์บอนเยอะ เมื่อทำการวัดค่ากระแสขณะที่ย้ายแรงดันไฟฟ้า (Charging Current) หรือกระแสโพลาริเซชัน (Polarization Current) จะพบว่าองค์ประกอบของกระแสคอนดักชัน (Conduction Current) มีค่าสูงขึ้นดังรูปที่ 2.18 โดยจะเห็นว่ากระแสดูดซับ (Absorption Current) จะมีค่าลดลงแล้วมีค่าเข้าสู่สภาวะคงตัวเร็วขึ้นตามค่ากระแสคอนดักชัน ที่สูงขึ้น ถ้าเป็นแบบนี้แสดงว่าฉนวนจะเกิดปัญหาขึ้นเนื่องจากกระบวนการคอนดักชันและจะส่งผลต่อค่าดัชนีโพลาริเซชัน (Polarization Index) ด้วย



รูปที่ 2.17 กราฟของกระแสขณะที่ย้ายไฟ (Charging Current)

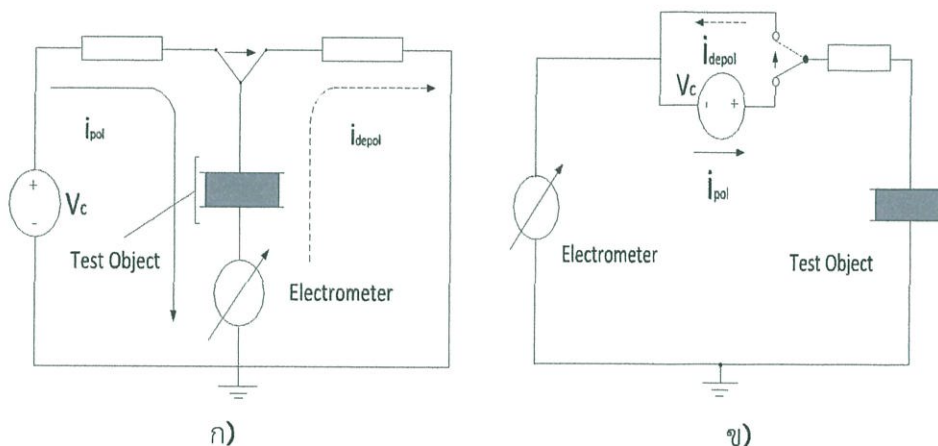


รูปที่ 2.18 กราฟของกระแสขณะที่ย้ายไฟ (Charging Current) ของฉนวนที่มีปัญหาจากกระบวนการคอนดักชัน

ในการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันของฉนวนขอเครื่องจักรกลหมุนจะทำการวัดฉนวนดังกล่าวใน 2 ตำแหน่ง คือ

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

ซึ่งผลการวัดกระแสของทั้งสองบริเวณไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบกันได้เนื่องจากทั้งสองบริเวณมีค่าความจุไฟฟ้า (capacitance) ที่แตกต่างกันมาก



รูปที่ 2.19 วงจรวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันของฉนวนบริเวณขดลวด สเตเตอร์ ทั้ง 2 ตำแหน่ง

ก) ฉนวนระหว่างเฟส และ ข) ฉนวนระหว่างเฟสกับกราวด์

2.4.3 ผลตอบสนองไดอิเล็กทริก (Dielectric Response Spectroscopy) ในรูปโดเมนความถี่

การวิเคราะห์ผลที่อยู่ในรูปโดเมนเวลา สามารถแปลงให้อยู่ในรูปโดเมนความถี่ โดยใช้วิธีการแปลงลาปลาซ (Laplace Transform) หรือ การแปลงฟูเรียร์ (Fourier Transform) สำหรับผลรวมความหนาแน่นของกระแสที่มีฟังก์ชันผลตอบสนองไดอิเล็กทริก และมีผลตอบสนองที่เป็นสเต็ป สามารถพิจารณากระบวนการโพลาริเซชัน อย่างทันทีทันใดได้ดังนี้

$$j(t) = \sigma_0 E(t) + \epsilon_0 \frac{dE(t)}{dt} + \epsilon_0 \frac{d}{dt} \int_0^t f(t-\tau) E(\tau) d\tau \quad (2.20)$$

โดยสามารถเขียนแทนสัญลักษณ์

$$j(t) \Rightarrow j(p); E(t) \Rightarrow E(p); E'(t) \Rightarrow pE(p); f(t) \Rightarrow F(p);$$

และพิจารณาเทอมสุดท้ายที่ติดอยู่ในรูปการคอนโวลูชัน ให้อยู่ในรูปลาปลาซซึ่งสามารถแทนด้วยตัว p (Laplace Operator)

$$j(p) = \sigma_0 E(p) + \varepsilon_0 p E(p) + \varepsilon_0 p F(p) E(p) \quad (2.21)$$

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

$$j(\omega) = E(\omega) [\sigma_0 + i\omega \varepsilon_0 (I + F(\omega))] \quad (2.22)$$

โดย $E(\omega)$ คือ การแปลงฟูเรียร์ของฟังก์ชันผลตอบสนองไดอิเล็กตริก $f(t)$ หรือความสามารถรับได้เชิงซ้อน (complex susceptibility):

$$\begin{aligned} X(\omega) = F(\omega) &= X'(\omega) - iX''(\omega) \\ &= \int_0^{\infty} f(t) \exp(-i\omega t) dt \end{aligned} \quad (2.23)$$

หมายเหตุ สเกลความถี่อยู่ในช่วง $0 \leq \omega \leq \infty$ สามารถรวมสมการ (2.22) และ (2.23) และเขียนเป็นผลรวมความแน่นของกระแส

$$j(t) = \{ \sigma_0 + \varepsilon_0 \omega X''(\omega) + i\omega \varepsilon_0 [1 + X'(\omega)] \} E(\omega) \quad (2.24)$$

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

$$D(\omega) = \varepsilon_0 \varepsilon(\omega) E(\omega) \quad (2.25)$$

เมื่อ

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon'(\omega) - i\varepsilon''(\omega) = (1 + X'(\omega)) - iX''(\omega) \quad (2.26)$$

การวัดผลตอบสนองไดอิเล็กตริก (dielectric response) ในรูปโดเมนความถี่นั้น เป็นไปได้ยากในทางปฏิบัติ เนื่องมาจากเป็นย่านความถี่ที่อยู่ในช่วงกว้าง ซึ่งมีการใช้กันน้อยในทางวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง โดยปกติจะวัด " $C - \tan \delta$ " เพียงความถี่เดียวเท่านั้น อย่างไรก็ตามการวัดผลตอบสนองไดอิเล็กตริกในรูปโดเมนความถี่ ก็ยังมีการทดสอบบ้างสำหรับห้องปฏิบัติการต่างๆ จากสมการที่ 2.24 แสดงให้เห็นค่ากระแสที่ก่อให้เกิดความนำไฟฟ้ากระแสตรง (dc conductivity) σ_0 และ ค่าการสูญเสียของไดอิเล็กตริก (dielectric loss) $X''(\omega)$ ไม่มีความแตกต่างจากการวัดจริง

ส่งผลให้สอดคล้องกับผลการวัดค่าเปอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์ของไดอิเล็กตริก (relative dielectric permittivity) $\tilde{\epsilon}_r(\omega)$ โดยสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$j(\omega) = i\omega\epsilon_0\epsilon_r(\omega)E(\omega) \quad (2.27)$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} \epsilon_r(\omega) &= \epsilon_r'(\omega) - i\epsilon_r''(\omega) \\ &= \epsilon_r'(\omega) - i[\epsilon_r''(\omega) + \sigma_0 / \epsilon_0\omega] \\ &= 1 + X'(\omega) - i[X''(\omega) + \sigma_0 / \epsilon_0] \end{aligned} \quad (2.28)$$

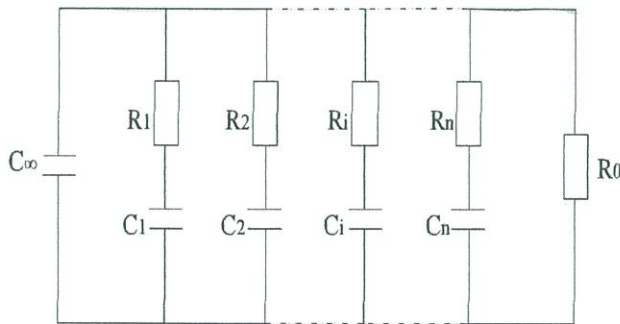
และค่าตัวประกอบความสูญเสียของไดอิเล็กตริก (dissipation factor) หรือ $\tan \delta(\omega)$,

$$\tan \delta(\omega) = \frac{\epsilon_r''(\omega)}{\epsilon_r'(\omega)} = \frac{\epsilon_r''(\omega) + \sigma_0 / \epsilon_0\omega}{\epsilon_r'(\omega)} \quad (2.29)$$

จากค่าของสมการที่ 2.24 แสดงให้เห็นค่าเก็บประจุจริงของวัสดุทดสอบ ส่วนค่าจินตภาพให้เห็นถึงค่าความสูญเสีย ซึ่งอยู่ในรูปโดเมนความถี่ และจะไม่พบความแตกต่างถ้าหากทำการวัด $C - \tan \delta$ ที่ย่านความถี่ความถี่เดียว ดังนั้นการวัด $C - \tan \delta$ ที่ความถี่ในย่านต่างๆเพื่อให้เห็นถึงผลการเสื่อมอายุของฉนวน นับว่าเป็นวิธีวินิจฉัยวิธีใหม่สำหรับเฟื่อระวัง และตรวจพบกระบวนการที่เกิดขึ้นกับฉนวนไฟฟ้า

2.4.4 โมเดลไดอิเล็กตริก

โมเดลไดอิเล็กตริกแบบที่ 2.20 เป็นโมเดลที่แสดงกระบวนการโพลาไรเซชัน โดยนำ R-C ต่อขนานกันอยู่เพื่อใช้ในการหาผลตอบสนองของฉนวน



รูปที่ 2.20 โมเดลลิเนียร์ไดอิเล็กตริก

จากรูปที่ 2.18 ประกอบไปด้วย $R_i C_i$ ซึ่งเกิดจากการจำลองกระแสดีโพลาไรเซชัน

โดย C_0 หรือ C_∞ คือ ค่าเก็บประจุความถี่สูงหาได้จากการวัดด้วยวงจรรบริดจ์

$R_0 (= C_0 \sigma_0 / \epsilon_0)$ คือ ความต้านทานกระแสตรง

สมการที่ใช้จำลองกระแสดีโพลาร์เซชันสามารถเขียนได้ดังนี้

$$i_{depol}(t) = \sum_{i=1}^n A_i \exp(-t/T_i) \quad (2.30)$$

เมื่อ

$$A_i = U_c [1 - \exp(-T_c / \tau_i)] / R_i \quad (2.31)$$

เมื่อ T_c คือ คาบเวลาที่ใช้ในการป้อนแรงดัน U_c
 A_i คือ กระแสที่ได้จำลองขึ้นมา
 T_i คือ เวลาคงตัว (time constant)

ในการจำลองจะจำลองค่าเวลาที่อยู่ในสเกลล็อก ทำการวัดในหลายๆค่าช่วงเวลา ผลรวมที่ได้พยายามให้มีค่าใกล้เคียงกับกระแสดีโพลาร์เซชันมากที่สุด

พิจารณาในรูปโดเมนความถี่ สามารถทำโดยอาศัยสมการที่ (2.27) ซึ่งเป็นความแตกต่างระหว่างกระแสสลับ $I(\omega)$ และแรงดันสลับ $U(\omega)$ ที่เกิดจากการวัด

$$I(\omega) = i\omega C(\omega)U(\omega) \quad (2.32)$$

เมื่อ $C(\omega)$ คือ ค่าตัวเก็บประจุเชิงซ้อน (complex capacitance) มีความสัมพันธ์กับเพอร์มิตติวิตีสัมพันธ์

จากสมการที่ 2.28 จะได้

$$\begin{aligned} C(\omega) &= C'(\omega) - iC''(\omega) \\ &= C_0 \{ \epsilon'_r(\omega) - i[\epsilon''(\omega) + \sigma_0 / \epsilon_0] \} \end{aligned} \quad (2.33)$$

เมื่อ C_0 คือ ค่าตัวเก็บประจุ (geometric capacitance)
 σ_0 คือ ค่าความนำของวัสดุ

จากสมการที่ 2.29 สามารถคำนวณค่าสูญเสีย (dissipation factor) $\tan \delta$ ได้ดังนี้

$$\tan \delta(\omega) = \frac{C''(\omega)}{C'(\omega)} \quad (2.34)$$

โดย $C'(\omega)$ แสดงค่าตัวเก็บประจุจริงของวัสดุ
 $C''(\omega)$ แสดงผลการสูญเสียจากค่าความนำไฟฟ้ากระแสตรง

สำหรับวงจรมุมูลย์ในรูปที่ 2.20 สามารถคำนวณหาค่าเก็บประจุเชิงซ้อน (complex capacitance) $C(\omega)$ จากสมการที่ 2.32 สามารถแสดงในรูปแอดมิตแตนซ์เชิงซ้อน (complex admittance) $Y(\omega)$ ได้ดังสมการที่ 2.35

$$C(\omega) = \frac{Y(\omega)}{i\omega} = C_\infty + \frac{1}{i\omega R_0} + \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{1+i\omega R_i C_i} \quad (2.35)$$

ซึ่ง $C(\omega)$ สามารถแยกออกเป็น ส่วนจริงและจินตภาพได้ดังนี้

$$C'(\omega) = C_\infty + \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{1+(\omega R_i C_i)^2} \quad (2.36)$$

และ

$$C''(\omega) = \frac{1}{\omega R_0} + \sum_{i=1}^n \frac{\omega R_i C_i^2}{1+(\omega R_i C_i)^2} \quad (2.37)$$

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

$$\tan \delta(\omega) = \frac{\frac{1}{\omega R_0} + \sum_{i=1}^n \frac{\omega R_i C_i^2}{1+(\omega R_i C_i)^2}}{C_\infty + \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{1+(\omega R_i C_i)^2}} \quad (2.38)$$

บทที่ 3

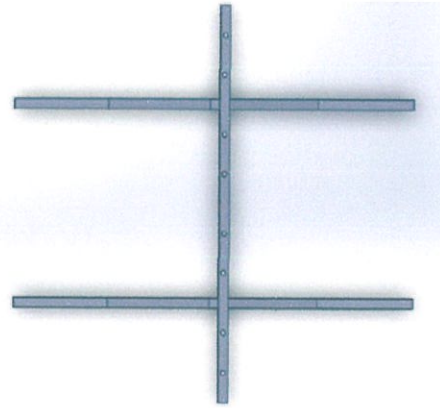
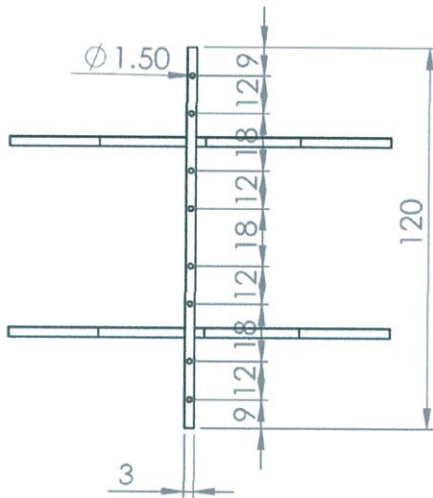
อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบและวัสดุทดสอบ

3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

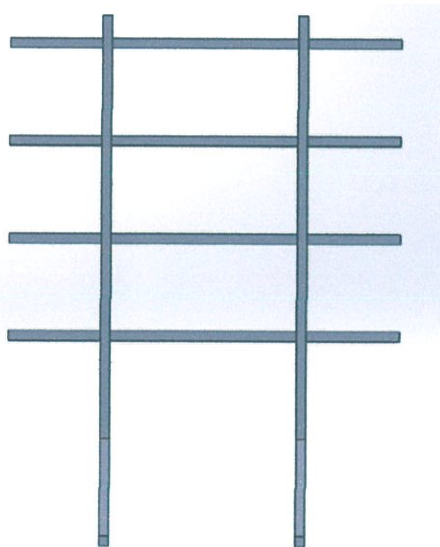
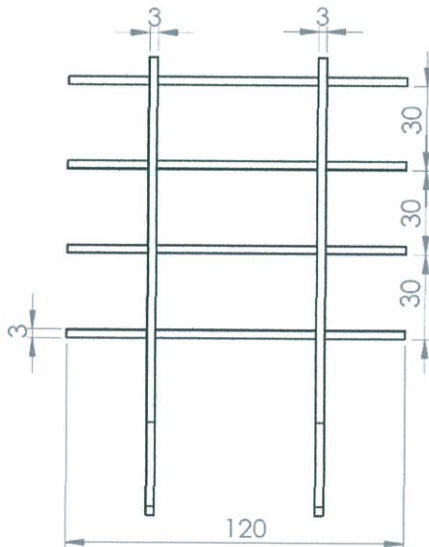
3.1.1 แท่นทดสอบ

ทำการออกแบบแท่นทดสอบสำหรับวางวัสดุทดสอบด้วยโปรแกรม Solid work และประกอบสร้างแท่นทดสอบด้วยเหล็กกล่องและเหล็กฉาก

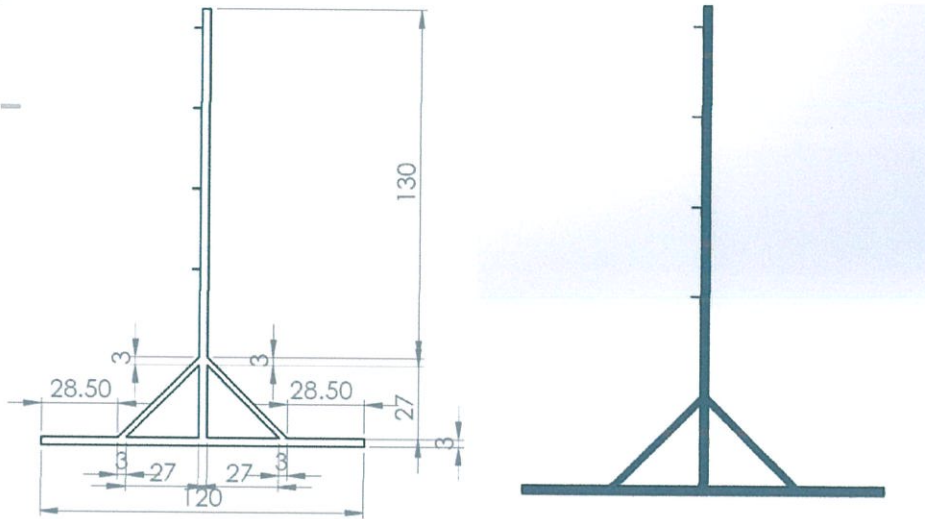
ระยะที่ทำการออกแบบแท่นทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3.1 อยู่ในหน่วยเซนติเมตร (ซม.)



ก)



ข)



ค)

รูปที่ 3.1 แท่นทดสอบที่ทำการออกแบบ

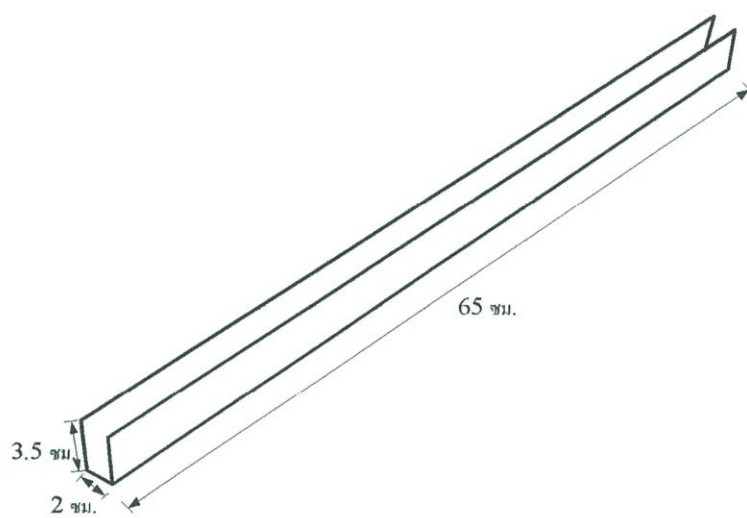
- ก) มุมมองจากด้านบน (Top view)
- ข) มุมมองจากด้านหน้า (Front view)
- ค) มุมมองจากด้านข้าง (Side view)



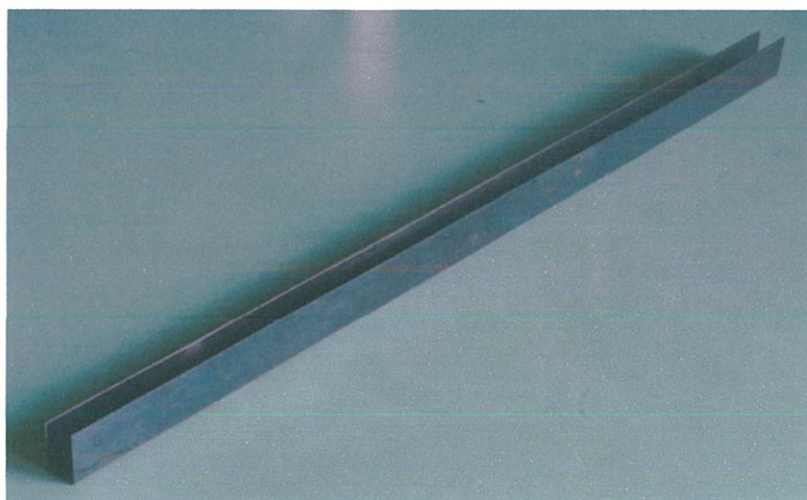
รูปที่ 3.2 แท่นทดสอบที่ประกอบสร้างจริง

3.1.2 ร่องสลีตจําลอง

การออกแบบร่องสลีตจําลองนั้นจะทำการออกแบบตามขนาดของวัตถุทดสอบ



รูปที่ 3.3 ร่องสลีตที่ทำการออกแบบ



รูปที่ 3.4 ร่องสลีตจําลอง

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

3.2.1 เครื่อง PDC-Analyser-1MOD



รูปที่ 3.5 เครื่อง PDC-Analyser-1MOD

- 1) ขั้วจ่ายแรงดันสูง (High Voltage terminal)
- 2) ขั้ววัดกระแส (Current measurement terminal)
- 3) ขั้วกราวด์ (Ground terminal)
- 4) ขั้วต่อสายควบคุมเครื่อง Phantom (External Phantom Source Control terminal)
- 5) สวิตช์เปิด-ปิด (Switch)

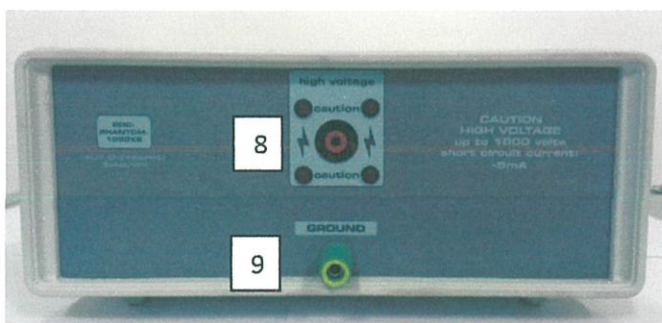
3.2.2 เครื่อง PDC-Phantom-1000XE



ก)



ข)



ค)

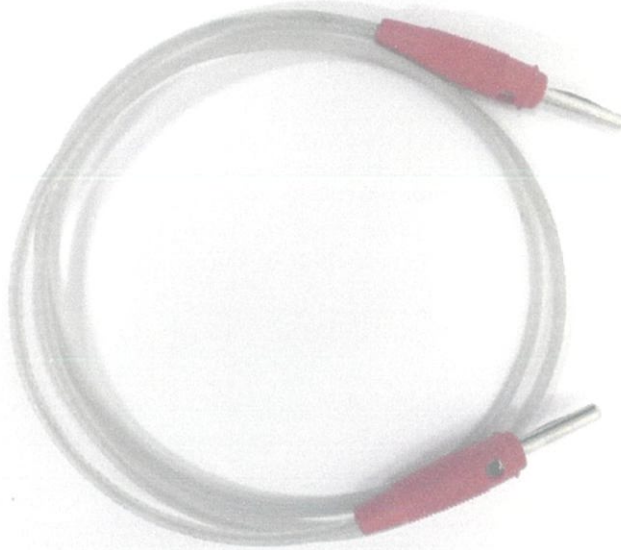
รูปที่ 3.6 เครื่อง PDC-Phantom-1000XE

ก) เครื่อง PDC-Phantom ข) PDC-Phantom (ด้านหน้า) ค) PDC-Phantom (ด้านหลัง)

- 6) ขั้ววัดกระแสออก (Current out terminal)
- 7) ขั้วต่อสายควบคุมเครื่อง Phantom (External Phantom Source Control terminal)
- 8) ขั้วจ่ายแรงดันสูง (High Voltage terminal)
- 9) ขั้วกราวด์ (Ground terminal)

3.2.3 อุปกรณ์ต่างๆ

1) สายจ่ายแรงดันสูงสำหรับ PDC-Phantom-1000XE



รูปที่ 3.7 สายจ่ายแรงดันสูงสำหรับ PDC-Phantom-1000XE

2) สายจ่ายแรงดันสูงสำหรับ PDC-Analyser-1MOD



รูปที่ 3.8 สายจ่ายแรงดันสูงสำหรับ PDC-Analyser-1MO

3) สายวัดกระแส (Sensing cable)



รูปที่ 3.9 สายวัดกระแส (Sensing cable)

4) สายคอนโทรล (Control cable)



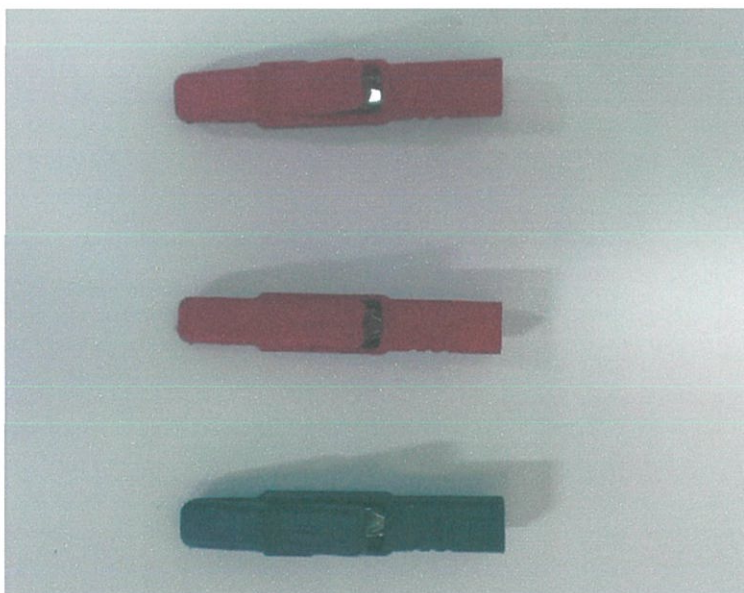
รูปที่ 3.10 สายคอนโทรล (Control cable)

5) สายกราวด์ (Ground wire)



รูปที่ 3.11 สายกราวด์ (Ground wire)

6) ตัวหนีบ (Jack)



รูปที่ 3.12 ตัวหนีบ (Jack)

3.3 วัตถุทดสอบ (Test object)

ขดลวดสเตเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบมีดังนี้

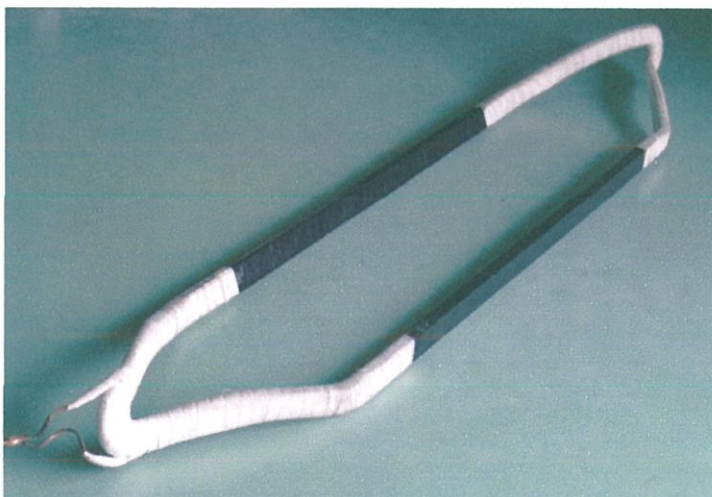
3.3.1 ขดลวดสเตเตอร์ทดสอบ A



รูปที่ 3.13 ขดลวดสเตเตอร์ทดสอบ A

ขดลวดสเตเตอร์ A มีพิกัดแรงดัน 6.6 kV เป็นขดลวดที่ถูกทำขึ้นไว้ใช้งานชั่วคราว ดังนั้นขดลวดจึงไม่ได้ผ่านกระบวนการพันฉนวนด้วยวิธี Hot Press ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ขดลวดสเตเตอร์ A มีช่องอากาศภายในเนื้อฉนวน

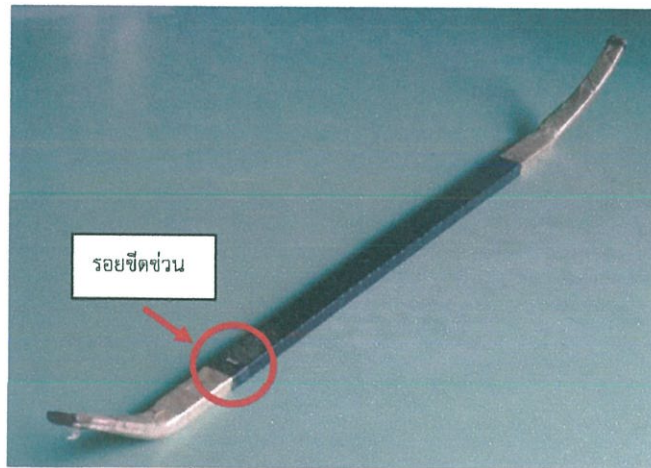
3.3.2 ขดลวดสเตเตอร์ทดสอบ B



รูปที่ 3.14 ขดลวดสเตเตอร์ทดสอบ B

ขดลวดสเตเตอร์ B มีพิกัดแรงดัน 6.6 kV เป็นขดลวดที่ผ่านกระบวนการพันฉนวนด้วยวิธี Hot Press

3.3.3 แท่งสเตเตอร์ทดสอบ C



รูปที่ 3.15 แท่งสเตเตอร์ทดสอบ C

แท่งสเตเตอร์ทดสอบ C มีพิกัดแรงดัน 11 kV เป็นส่วนที่ถูกตัดครึ่งจากขดลวดที่ผ่านกระบวนการพันฉนวนด้วยวิธี Hot Press และจากการตรวจสอบพบว่าแท่งสเตเตอร์ C มีรอยขีดข่วนเล็กน้อยเนื่องจากการจำลองกรณีศึกษาเพื่อทำการทดสอบการเกิดดิสชาร์จบางส่วน

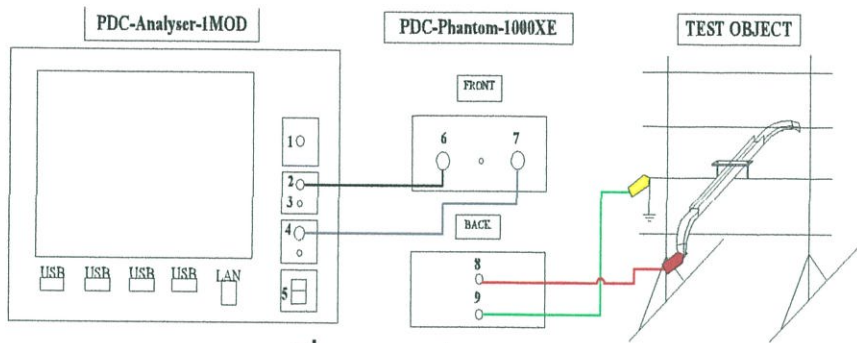
3.3.4 แท่งสเตเตอร์ทดสอบ D



รูปที่ 3.16 แท่งสเตเตอร์ทดสอบ D

แท่งสเตเตอร์ทดสอบ D มีพิกัดแรงดัน 11 kV เป็นส่วนที่ถูกตัดครึ่งจากขดลวดที่ผ่านกระบวนการพันฉนวนด้วยวิธี Hot Press และจากการตรวจสอบพบว่าแท่งสเตเตอร์ D มีรอยขีดข่วนเล็กน้อยเนื่องจากการจำลองกรณีศึกษาเพื่อทำการทดสอบการเกิดดิสชาร์จบางส่วน

3.4 การต่อวงจรทดสอบ

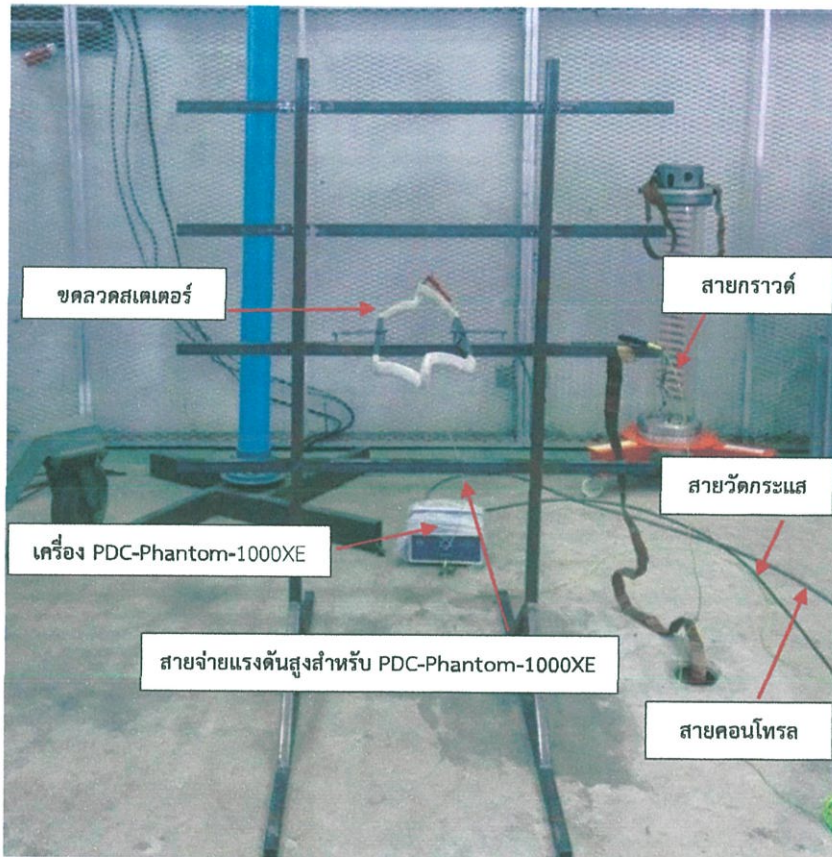


รูปที่ 3.17 การต่อวงจรทดสอบ

- สายสีแดง คือ สายจ่ายแรงดันสูงสำหรับ PDC-Phantom-1000XE
- สายสีดำ คือ สายวัดกระแส (Sensing cable)
- สายสีเทา คือ สายคอนโทรล (Control cable)
- สายสีเขียว คือ สายกราวด์ (Ground wire)



ก)



ข)

รูปที่ 3.18 การต่อวงจรทดสอบจริง

3.4.1 การดำเนินการทดสอบ

การทดสอบกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของขดลวดสเตเตอร์ แบ่งการทดสอบออกเป็น 3 กรณี คือ 1) ขดลวดสเตเตอร์ทดสอบแบบมีร่องสลีตก่อนทำความสะอาด 2) ขดลวดสเตเตอร์ทดสอบแบบมีร่องสลีตหลังทำความสะอาด 3) ขดลวดสเตเตอร์ทดสอบแบบไม่มีร่องสลีตหลังทำความสะอาด โดยมีการทดสอบขดลวดสเตเตอร์ 4 แบบ ได้แก่

- 1) ขดลวดสเตเตอร์ A มีพิกัดแรงดัน 6.6 kV ไม่ได้ผ่านกระบวนการพันฉนวนด้วยวิธี Hot Press
- 2) ขดลวดสเตเตอร์ B มีพิกัดแรงดัน 6.6 kV ผ่านกระบวนการพันฉนวนด้วยวิธี Hot Press
- 3) แท่งสเตเตอร์ทดสอบ C มีพิกัดแรงดัน 11 kV และรอยขีดข่วนเนื่องจากการจำลองกรณีศึกษา เพื่อทำการทดสอบการเกิดดิสชาร์จบางส่วน
- 4) แท่งสเตเตอร์ทดสอบ D มีพิกัดแรงดัน 11 kV และรอยขีดข่วนเนื่องจากการจำลองกรณีศึกษา เพื่อทำการทดสอบการเกิดดิสชาร์จบางส่วน

ซึ่งมีขั้นตอนการทดสอบใน ภาคผนวก ก

บทที่ 4

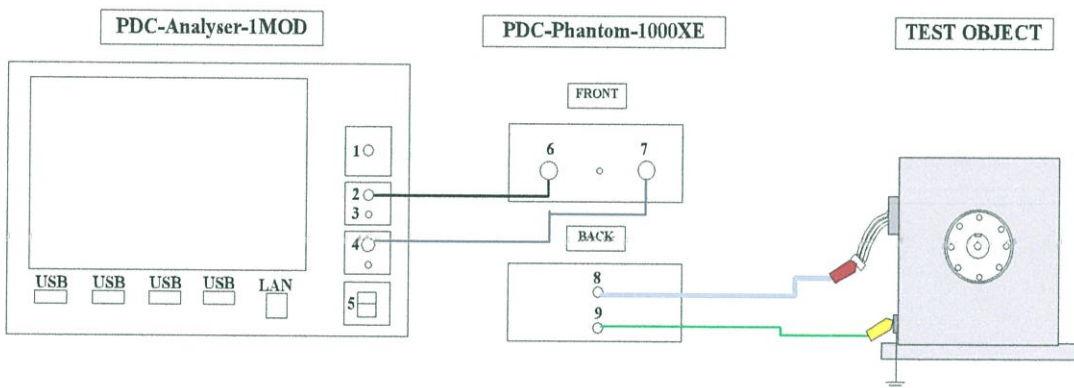
การทดสอบและผลการทดสอบ

4.1 การทดสอบกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน (Polarization and Depolarization Current) ที่บริษัท เวล เอ็นจิเนียริง จำกัด โดยทำการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าจำนวน 3 ตัว ดังนี้

- 1) มอเตอร์ A พิกัด 2300 kW 6.6 kV
- 2) มอเตอร์ B พิกัด 2300 kW 6.6 kV
- 3) มอเตอร์ C พิกัด 1486 kW 6.6 kV

4.1.1 วงจรทดสอบ

มอเตอร์ทั้ง 3 ตัว ถูกทำการทดสอบโดยใช้วงจรดังรูปที่ 4.1 ซึ่งเป็นการทดสอบฉนวนแบบ Phase to Ground แต่เนื่องจากมอเตอร์ทั้ง 3 ไม่สามารถแยกจุด Star Point ได้ ดังนั้นก่อนจ่ายแรงดันทดสอบให้แก่มอเตอร์จึงต้องทำการรวบขั้วแรงสูง (high voltage terminal) ทั้ง 3 ขั้วเข้าด้วยกันก่อน



รูปที่ 4.1 วงจรทดสอบของมอเตอร์ A, B และ C

4.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

- 1) เครื่อง PDC-Analyser-1MOD
- 2) เครื่อง PDC-Phantom-1000XE

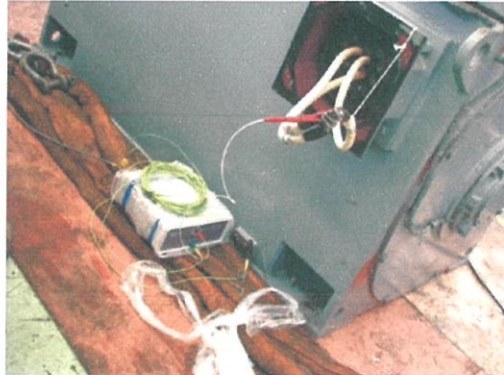
4.1.3 ขั้นตอนการทดสอบ

- 1) ต่อวงจรตามรูปที่ 4.1
- 2) ทำการปรับตั้งค่าเครื่องมือวัดและวัดในขั้นตอนต่างๆ
 - Initial Measurement
 - Control Measurement

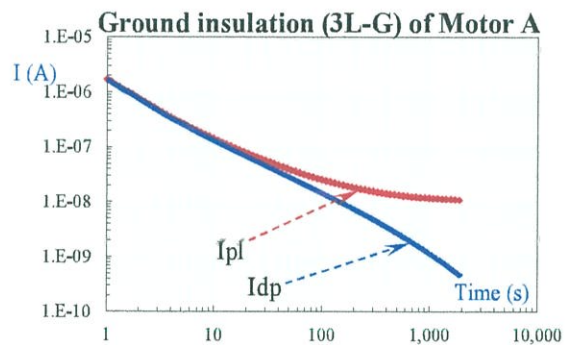
- Main Measurement
- 3) ทำการปรับแก้ค่าจากการวัด
- 4) บันทึกผลการทดสอบ

4.1.4 ผลการทดสอบ

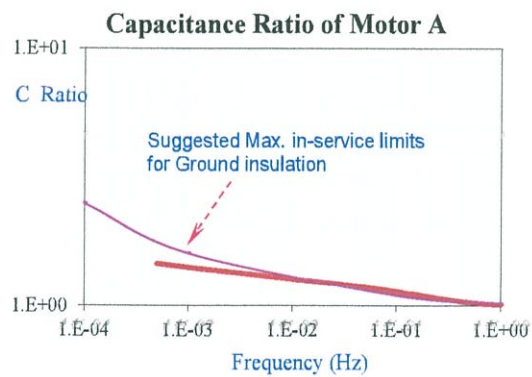
4.1.4.1 มอเตอร์ A พิกัด 2300 kW 6.6 kV



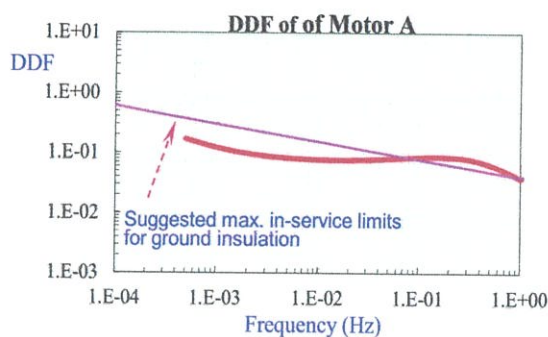
รูปที่ 4.2 วงจรทดสอบของมอเตอร์ A



ก)



ข)



ค)

รูปที่ 4.3 ผลการทดสอบของมอเตอร์ A

ก) กระแสโพลาร์ไรเซชันและดีโพลาร์ไรเซชัน ข) C ratio ค) $\tan\delta$ (DDF)

- กราฟกระแสโพลาร์ไรเซชันและดีโพลาร์ไรเซชัน : จากกราฟพบว่าค่ากระแสโพลาร์ไรเซชันมีความชันมากเนื่องจากองค์ประกอบของกระแสคอนดักชันมีค่าน้อย

- C ratio : จากกราฟ C ratio มีค่าสูงเกินค่าที่ผู้เชี่ยวชาญได้แนะนำในช่วงความถี่ตั้งแต่ 0.1 ถึง 1 Hz

- $\tan\delta$: จากกราฟพบว่า $\tan\delta$ มีค่าสูงเกินค่าที่ผู้เชี่ยวชาญได้แนะนำในช่วงความถี่ตั้งแต่ 0.1 ถึง 1 Hz

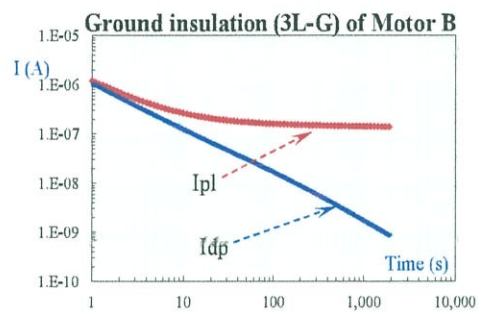
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าต่างๆ จากทดสอบของมอเตอร์ A

มอเตอร์ A	
Rated Voltage (kV)	6.6
Rated Power (kW)	2300
แรงดันที่ใช้ในการทดสอบ (V)	100
เวลาที่ใช้ในการทดสอบ (S)	2000
ค่าตัวเก็บประจุที่ 50 Hz (pF)	232801
ค่าอัตราส่วนตัวเก็บประจุ (C ratio)	สูงกว่าระดับที่ผู้เชี่ยวชาญแนะนำ
ค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก ($\tan\delta$)	สูงกว่าระดับที่ผู้เชี่ยวชาญแนะนำ
Insulation Resistance ที่ 15 วินาที ($G\Omega$)	1.01
Insulation Resistance ที่ 60 วินาที ($G\Omega$)	2.99
Insulation Resistance ที่ 600 วินาที ($G\Omega$)	7.68
Polarization Index ที่ 600 กับ 60 วินาที	2.57

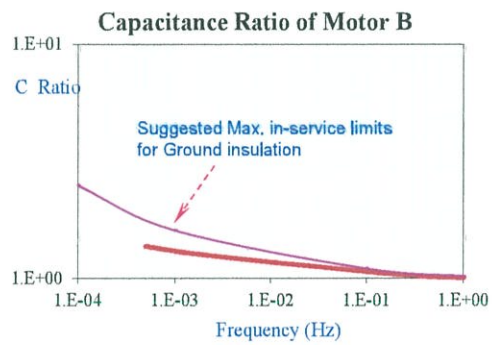
4.1.4.2 มอเตอร์ B พิกัด 2300 kW 6.6 kV



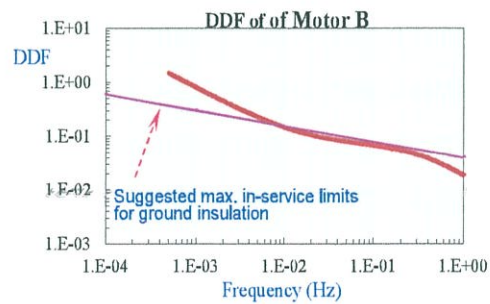
รูปที่ 4.4 วงจรทดสอบของมอเตอร์ B



ก)



ข)



ค)

รูปที่ 4.5 แสดงกราฟผลการทดสอบของมอเตอร์ B

ก) กระแสไหลรั่วและดีโพลาริเซชัน ข) C ratio ค) $\tan \delta$ (DDF)

- กราฟกระแสโพลาร์ไรเซชันและดีโพลาร์ไรเซชัน : จากกราฟพบว่าค่ากระแสโพลาร์ไรเซชันมีความชันน้อยเนื่องจากองค์ประกอบของกระแสคอนดักชันมีค่ามาก

- C ratio : จากกราฟ C ratio มีค่าอยู่ในระดับที่ผู้เชี่ยวชาญได้แนะนำตลอดช่วงความถี่ที่ทำการทดสอบ

- $\tan\delta$: จากกราฟพบว่า $\tan\delta$ มีค่าสูงเกินค่าที่ผู้เชี่ยวชาญได้แนะนำในช่วงความถี่ตั้งแต่ 0.0005 ถึง 0.005 Hz

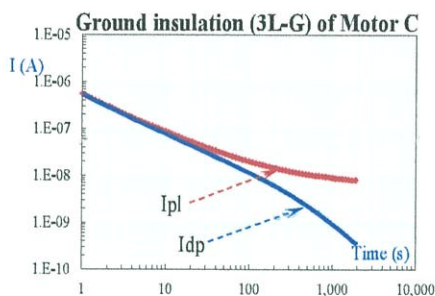
ตารางที่ 4.2 แสดงค่าต่างๆ จากการทดสอบของมอเตอร์ B

มอเตอร์ B	
Rated Voltage (kV)	6.6
Rated Power (kW)	2300
แรงดันที่ใช้ในการทดสอบ (V)	100
เวลาที่ใช้ในการทดสอบ (S)	2000
ค่าตัวเก็บประจุที่ 50 Hz (pF)	240400
ค่าอัตราส่วนตัวเก็บประจุ (C ratio)	อยู่ในระดับที่ผู้เชี่ยวชาญแนะนำ
ค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก ($\tan\delta$)	สูงกว่าระดับที่ผู้เชี่ยวชาญแนะนำ
Insulation Resistance ที่ 15 วินาที (G Ω)	0.443
Insulation Resistance ที่ 60 วินาที (G Ω)	0.595
Insulation Resistance ที่ 600 วินาที (G Ω)	0.695
Polarization Index ที่ 600 กับ 60 วินาที	1.17

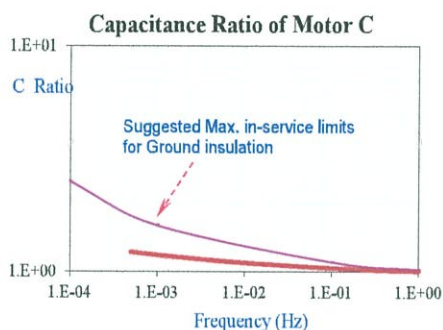
4.1.4.3 มอเตอร์ C พิกัด 1486 kW 6.6 kV



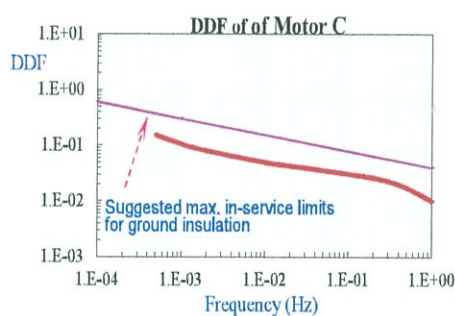
รูปที่ 4.6 วงจรทดสอบของมอเตอร์ C



ก)



ข)



ค)

รูปที่ 4.7 แสดงกราฟผลการทดสอบของมอเตอร์ C

ก) กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน ข) C ratio ค) $\tan\delta$ (DDF)

- กราฟกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน : จากกราฟพบว่าค่ากระแสโพลาริเซชันมีความชันมากเนื่องจากองค์ประกอบของกระแสคอนดักชันมีค่าน้อย

- C ratio : จากกราฟ C ratio มีค่าอยู่ในระดับที่ผู้เชี่ยวชาญได้แนะนำตลอดช่วงความถี่ที่ทำการทดสอบ

- $\tan\delta$: จากกราฟพบว่า $\tan\delta$ มีค่าอยู่ในระดับที่ผู้เชี่ยวชาญได้แนะนำตลอดช่วงความถี่ที่ทำการทดสอบ

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าต่างๆ จากการทดสอบของมอเตอร์ C

มอเตอร์ C	
Rated Voltage (kV)	6.6
Rated Power (kW)	1486
แรงดันที่ใช้ในการทดสอบ (V)	100
เวลาที่ใช้ในการทดสอบ (S)	2000
ค่าตัวเก็บประจุที่ 50 Hz (pF)	123997
ค่าอัตราส่วนตัวเก็บประจุ (C ratio)	อยู่ในระดับที่ผู้เชี่ยวชาญแนะนำ
ค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก (tanδ)	อยู่ในระดับที่ผู้เชี่ยวชาญแนะนำ
Insulation Resistance ที่ 15 วินาที (GΩ)	3.10
Insulation Resistance ที่ 60 วินาที (GΩ)	7.70
Insulation Resistance ที่ 600 วินาที (GΩ)	19.80
Polarization Index ที่ 600 กับ 60 วินาที	2.57

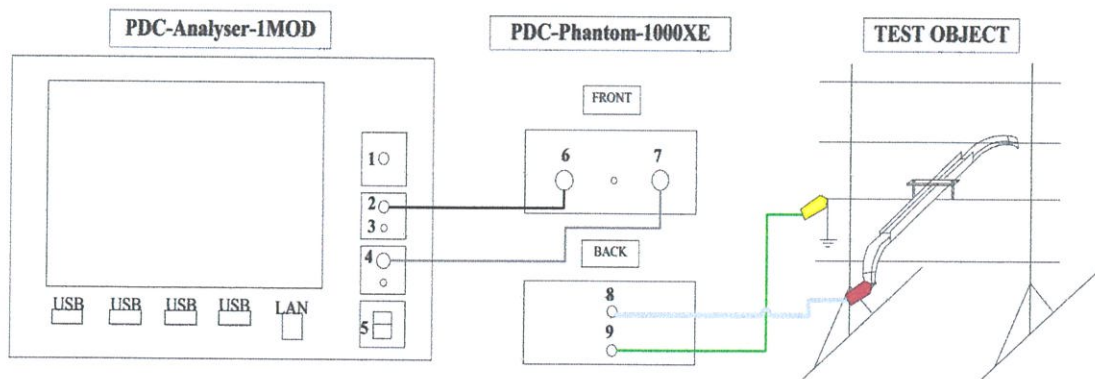
4.2 การทดสอบกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน (Polarization Depolarization

Current) ณ ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังโดยทำการทดสอบขดลวดสเตเตอร์จำนวน 4 แบบ ดังนี้

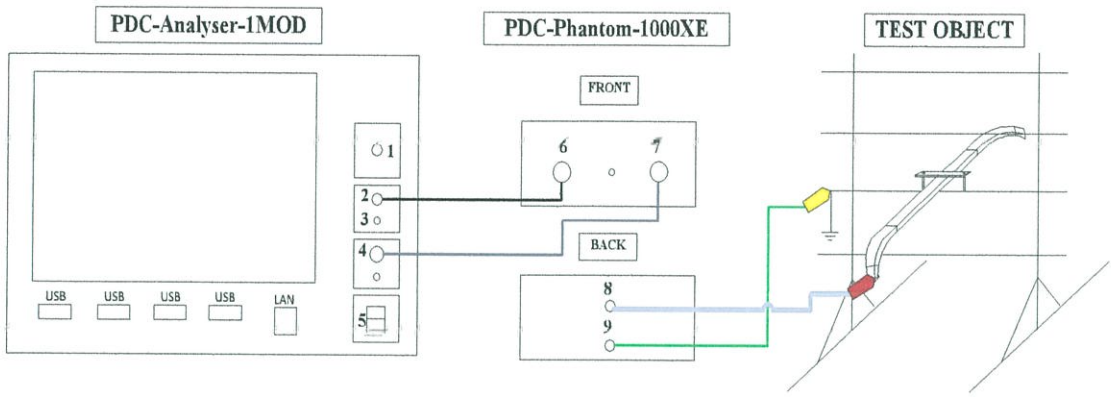
- 1) ขดลวดสเตเตอร์ทดสอบ A พิกัด 6.6 kV
- 2) ขดลวดสเตเตอร์ทดสอบ B พิกัด 6.6 kV
- 3) แท่งสเตเตอร์ทดสอบ C พิกัด 11 kV
- 4) แท่งสเตเตอร์ทดสอบ D พิกัด 11 kV

4.2.1 วงจรทดสอบ

ขดลวดสเตเตอร์ทั้ง 4 แบบ ถูกทำการทดสอบโดยใช้วงจรดังรูปที่ 4.8 ซึ่งเป็นการทดสอบฉนวนแบบ Phase to Ground



ก)



ข)

รูปที่ 4.8 แบบจำลองวงจรทดสอบของขดลวดสเตเตอร์

ก) แบบมีร่องสลีต ข) แบบไม่มีร่องสลีต



ก)



ข)

รูปที่ 4.9 วงจรทดสอบจริงของขดลวดสเตเตอร์

ก) แบบมีร่องสลีต ข) แบบไม่มีร่องสลีต

4.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

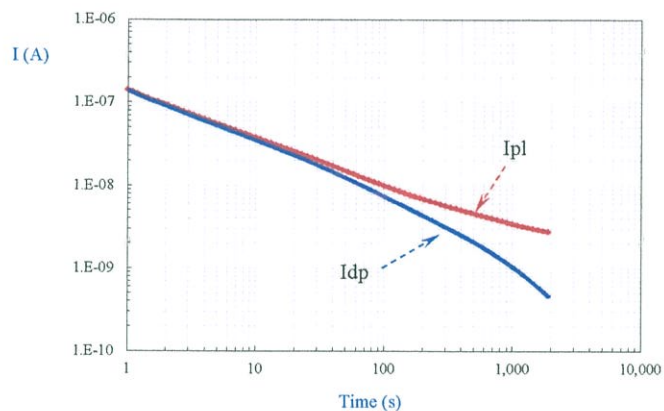
- 1) เครื่อง PDC-Analyser-1MOD
- 2) เครื่อง PDC-Phantom-1000XE
- 3) แท่นทดสอบ
- 4) ร่องสลีตจำลอง (บางกรณี)

4.2.3 ขั้นตอนการทดสอบ

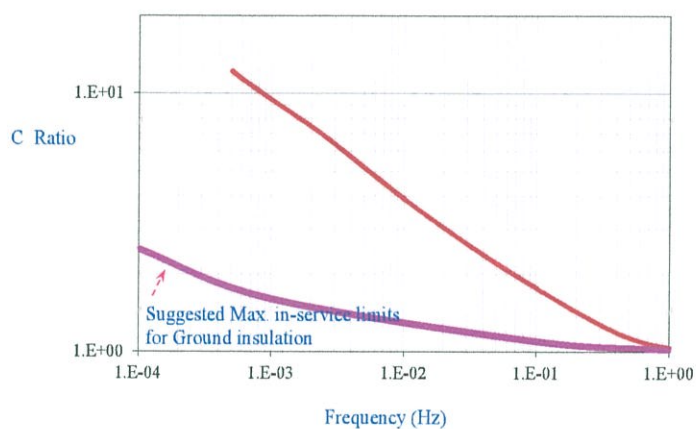
- 1) ต่ วงจรตามรูปที่ 4.8
- 2) การปรับตั้งค่าเครื่องมือวัดและวัดในขั้นตอนต่างๆ
 - Initial Measurement
 - Control Measurement
 - Main Measurement
- 3) ทำการปรับแก้ค่าจากการวัด
- 4) บันทึกผลการทดสอบ

4.2.4 ผลการทดสอบ

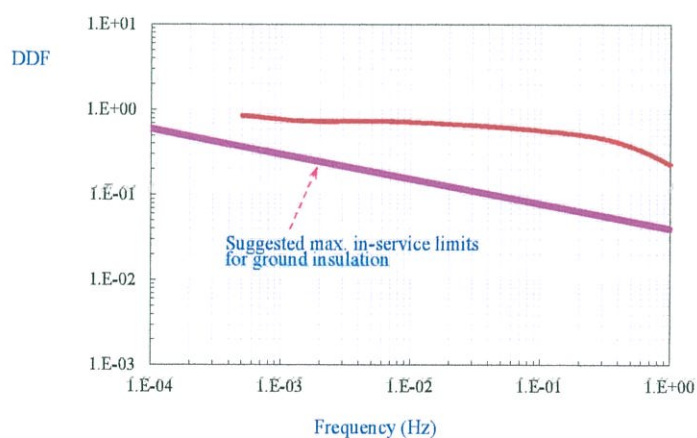
4.2.4.1 ขดลวดสเตเตอร์ทดสอบ A แบบมีร่องสลีตก่อนทำความสะอาด



ก)



ข)



ค)

รูปที่ 4.10 ผลการทดสอบของขดลวดสเตเตอร์ทดสอบ A แบบมีร่องสลีตก่อนทำความสะอาด

ก) กระแสโพลาร์เซชันและดีโพลาร์เซชัน ข) C ratio ค) $\tan \delta$ (DDF)

- กราฟกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน : จากกราฟพบว่าค่ากระแสโพลาริเซชันมีความชันมากเนื่องจากองค์ประกอบของกระแสคอนดักชันมีค่าน้อย

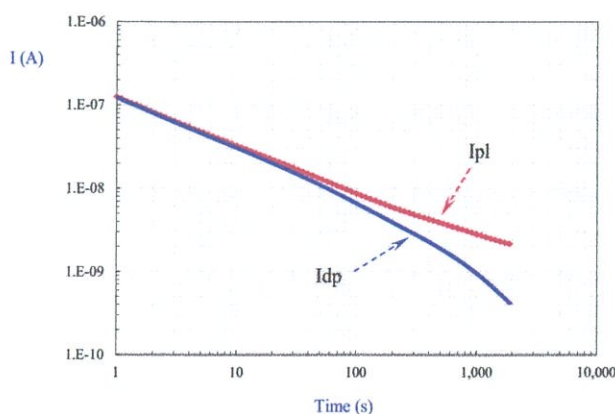
- C ratio : จากกราฟ C ratio มีค่าสูงเกินค่าที่ผู้เชี่ยวชาญได้แนะนำตลอดช่วงความถี่ที่ทำการทดสอบ

- $\tan\delta$: จากกราฟพบว่า $\tan\delta$ มีค่าสูงเกินค่าที่ผู้เชี่ยวชาญได้แนะนำตลอดช่วงความถี่ที่ทำการทดสอบ

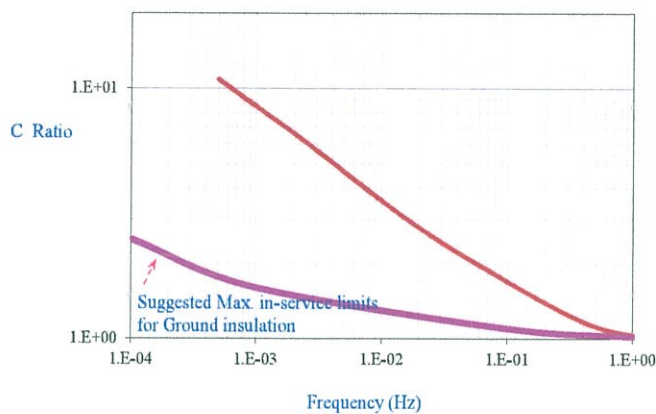
ตารางที่ 4.4 แสดงค่าต่างๆ จากการทดสอบของขดลวดสเตเตอร์ทดสอบ A แบบมีร่องสลิตก่อนทำความสะอาด

ขดลวดสเตเตอร์ทดสอบ A แบบมีร่องสลิตก่อนทำความสะอาดวัตถุทดสอบ	
Rated Voltage (kV)	6.6
แรงดันที่ใช้ในการทดสอบ (V)	100
เวลาที่ใช้ในการทดสอบ (S)	2000
ค่าตัวเก็บประจุที่ 50 Hz (pF)	2133
ค่าอัตราส่วนตัวเก็บประจุ (C ratio)	สูงกว่าระดับที่ผู้เชี่ยวชาญแนะนำ
ค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก ($\tan\delta$)	สูงกว่าระดับที่ผู้เชี่ยวชาญแนะนำ
Insulation Resistance ที่ 15 วินาที ($G\Omega$)	3.34
Insulation Resistance ที่ 60 วินาที ($G\Omega$)	7.53
Insulation Resistance ที่ 600 วินาที ($G\Omega$)	23.70
Polarization Index ที่ 600 กับ 60 วินาที	3.15

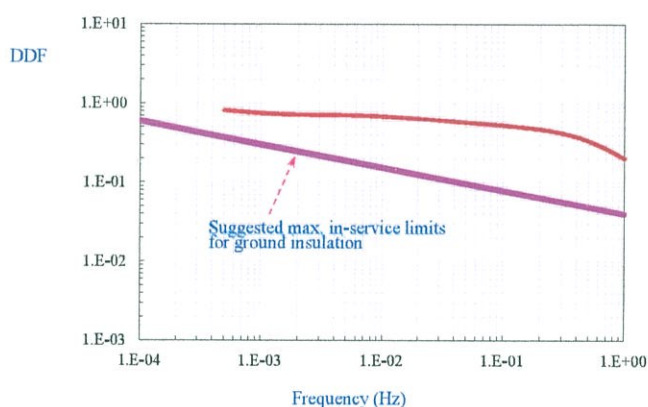
4.2.4.2 ขดลวดสเตเตอร์ทดสอบ A แบบมีร่องสลิตหลังทำความสะอาด



ก)



ข)



ค)

รูปที่ 4.11 ผลการทดสอบของขดลวดสเตเตอร์ทดสอบ A แบบมีร่องสลีตหลังทำความสะอาด
ก) กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน ข) C ratio ค) $\tan\delta$ (DDF)

- กราฟกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน : จากกราฟพบว่าค่ากระแสโพลาริเซชันมีความชันมากเนื่องจากองค์ประกอบของกระแสคอนดักชันมีค่าน้อย

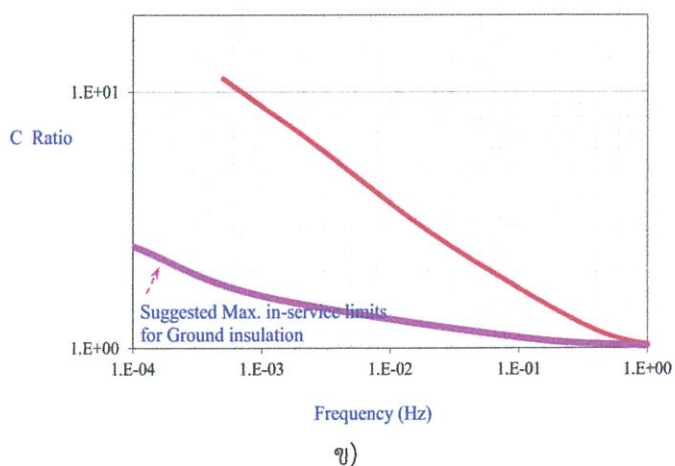
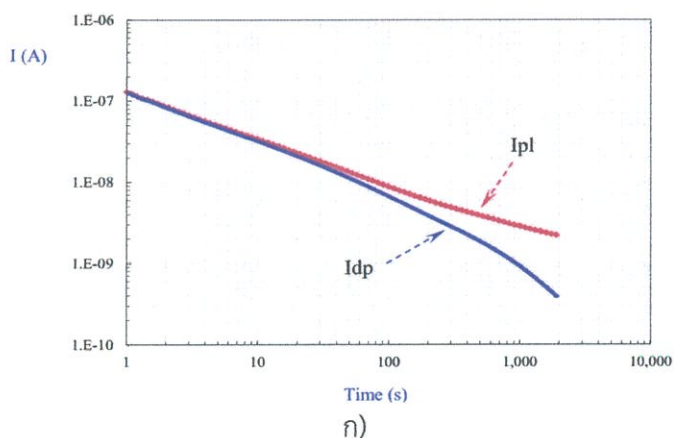
- C ratio : จากกราฟ C ratio มีค่าสูงเกินค่าที่ผู้เชี่ยวชาญได้แนะนำตลอดช่วงความถี่ที่ทำการทดสอบ

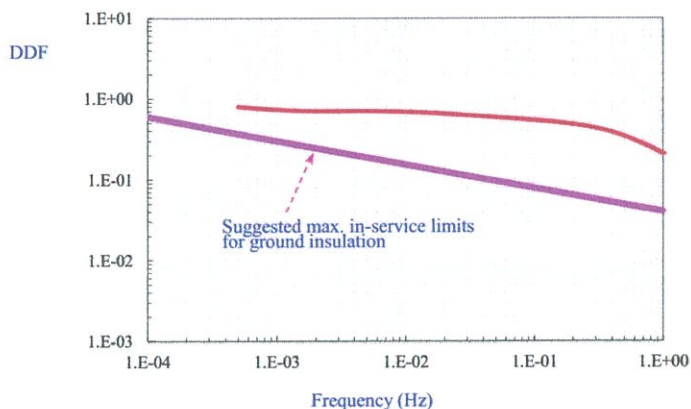
- $\tan\delta$: จากกราฟพบว่า $\tan\delta$ มีค่าสูงเกินค่าที่ผู้เชี่ยวชาญได้แนะนำตลอดช่วงความถี่ที่ทำการทดสอบ

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าต่างๆ จากการทดสอบของขดลวดสเตเตอร์ทดสอบ A แบบมีร่องสลีตหลัง
ทำความสะอาด

ขดลวดสเตเตอร์ทดสอบ A แบบมีร่องสลีตหลังทำความสะอาดวัตถุทดสอบ	
Rated Voltage (kV)	6.6
แรงดันที่ใช้ในการทดสอบ (V)	100
เวลาที่ใช้ในการทดสอบ (S)	2000
ค่าตัวเก็บประจุที่ 50 Hz (pF)	2125
ค่าอัตราส่วนตัวเก็บประจุ (C ratio)	สูงกว่าระดับที่ผู้เชี่ยวชาญแนะนำ
ค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก ($\tan\delta$)	สูงกว่าระดับที่ผู้เชี่ยวชาญแนะนำ
Insulation Resistance ที่ 15 วินาที ($G\Omega$)	3.87
Insulation Resistance ที่ 60 วินาที ($G\Omega$)	8.61
Insulation Resistance ที่ 600 วินาที ($G\Omega$)	28.30
Polarization Index ที่ 600 กับ 60 วินาที	3.29

4.2.4.3 ขดลวดสเตเตอร์ทดสอบ A แบบไม่มีร่องสลีตหลังทำความสะอาด





ค)

รูปที่ 4.12 ผลการทดสอบของขดลวดสเตเตอร์ทดสอบ A แบบไม่มีร่องสลีตหลังทำความสะอาด
ก) กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน ข) C ratio ค) $\tan\delta$ (DDF)

- กราฟกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน : จากกราฟพบว่าค่ากระแสโพลาริเซชันมีความชันมากเนื่องจากองค์ประกอบของกระแสคอนดักชันมีค่าน้อย

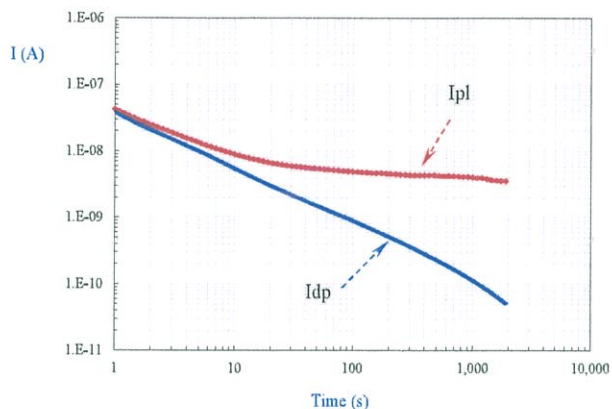
- C ratio : จากกราฟ C ratio มีค่าสูงเกินค่าที่ผู้เชี่ยวชาญได้แนะนำตลอดช่วงความถี่ที่ทำการทดสอบ

- $\tan\delta$: จากกราฟพบว่า $\tan\delta$ มีค่าสูงเกินค่าที่ผู้เชี่ยวชาญได้แนะนำตลอดช่วงความถี่ที่ทำการทดสอบ

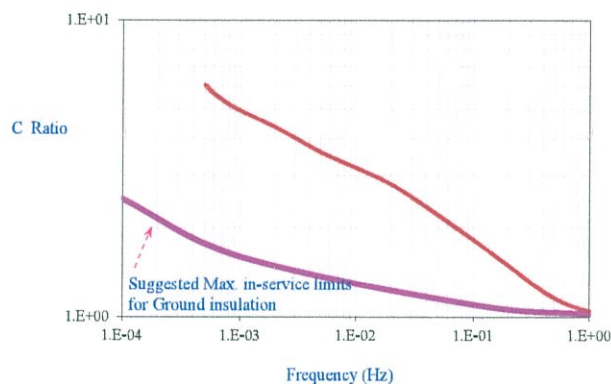
ตารางที่ 4.6 แสดงค่าต่างๆ จากการทดสอบของขดลวดสเตเตอร์ทดสอบ A แบบไม่มีร่องสลีตหลังทำความสะอาด

ขดลวดสเตเตอร์ทดสอบ A แบบไม่มีร่องสลีต	
Rated Voltage (kV)	6.6
แรงดันที่ใช้ในการทดสอบ (V)	100
เวลาที่ใช้ในการทดสอบ (S)	2000
ค่าตัวเก็บประจุที่ 50 Hz (pF)	2116
ค่าอัตราส่วนตัวเก็บประจุ (C ratio)	สูงกว่าระดับที่ผู้เชี่ยวชาญแนะนำ
ค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก ($\tan\delta$)	สูงกว่าระดับที่ผู้เชี่ยวชาญแนะนำ
Insulation Resistance ที่ 15 วินาที ($G\Omega$)	3.71
Insulation Resistance ที่ 60 วินาที ($G\Omega$)	8.41
Insulation Resistance ที่ 600 วินาที ($G\Omega$)	28.00
Polarization Index ที่ 600 กับ 60 วินาที	3.33

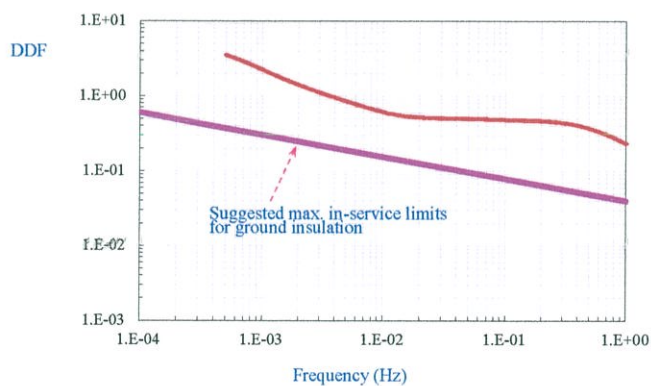
4.2.4.4 ขดลวดสเตเตอร์ทดสอบ B แบบมีร่องสลีตก่อนทำความสะอาด



ก)



ข)



ค)

รูปที่ 4.13 ผลการทดสอบของขดลวดสเตเตอร์ทดสอบ B แบบมีร่องสลีตก่อนทำความสะอาด

ก) กระแสโพลาร์ไรเซชันและดีโพลาร์ไรเซชัน ข) C ratio ค) $\tan\delta$ (DDF)

- กราฟกระแสโพลาร์ไรเซชันและดีโพลาร์ไรเซชัน : จากกราฟพบว่าค่ากระแสโพลาร์ไรเซชันมีความชันน้อยเนื่องจากองค์ประกอบของกระแสคอนดักชันมีค่ามาก

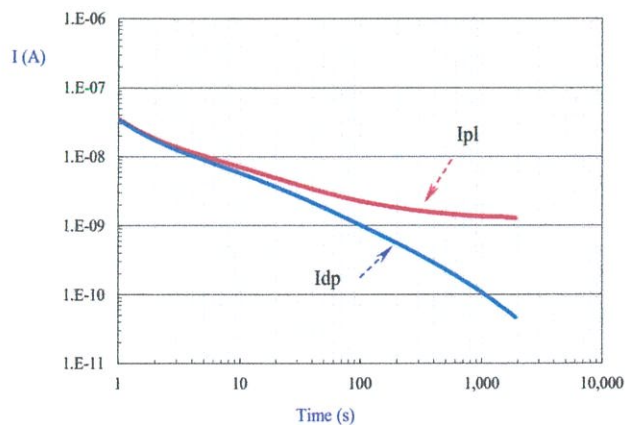
- C ratio : จากกราฟ C ratio มีค่าสูงเกินค่าที่ผู้เชี่ยวชาญได้แนะนำตลอดช่วงความถี่ที่ทำการทดสอบ

- $\tan\delta$: จากกราฟพบว่า $\tan\delta$ มีค่าสูงเกินค่าที่ผู้เชี่ยวชาญได้แนะนำตลอดช่วงความถี่ที่ทำการทดสอบ

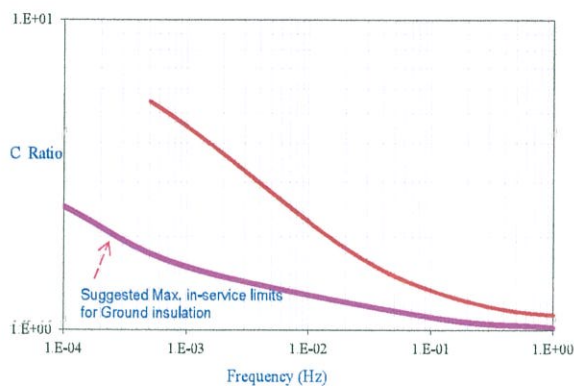
ตารางที่ 4.7 แสดงค่าต่างๆ จากการทดสอบของขดลวดสเตเตอร์ทดสอบ B แบบมีร่องสลิตก่อนทำความสะอาด

ขดลวดสเตเตอร์ทดสอบ B แบบมีร่องสลิตก่อนทำความสะอาดวัตถุทดสอบ	
Rated Voltage (kV)	6.6
แรงดันที่ใช้ในการทดสอบ (V)	100
เวลาที่ใช้ในการทดสอบ (S)	2000
ค่าตัวเก็บประจุที่ 50 Hz (pF)	705
ค่าอัตราส่วนตัวเก็บประจุ (C ratio)	สูงกว่าระดับที่ผู้เชี่ยวชาญแนะนำ
ค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก ($\tan\delta$)	สูงกว่าระดับที่ผู้เชี่ยวชาญแนะนำ
Insulation Resistance ที่ 15 วินาที (G Ω)	13.60
Insulation Resistance ที่ 60 วินาที (G Ω)	19.10
Insulation Resistance ที่ 600 วินาที (G Ω)	23.70
Polarization Index ที่ 600 กับ 60 วินาที	1.24

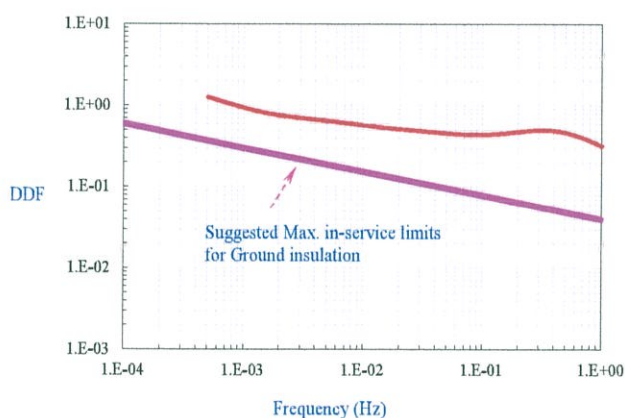
4.2.4.5 ขดลวดสเตเตอร์ทดสอบ B แบบมีร่องสลิตหลังทำความสะอาด



ก)



ข)



ค)

รูปที่ 4.14 ผลการทดสอบของขดลวดสเตเตอร์ทดสอบ B แบบมีร่องสลีตหลังทำความสะอาด

ก) กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน ข) C ratio ค) $\tan \delta$ (DDF)

- กราฟกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน : จากกราฟพบว่าค่ากระแสโพลาริเซชันมีความชันน้อยเนื่องจากองค์ประกอบของกระแสคอนดักชันมีค่ามาก

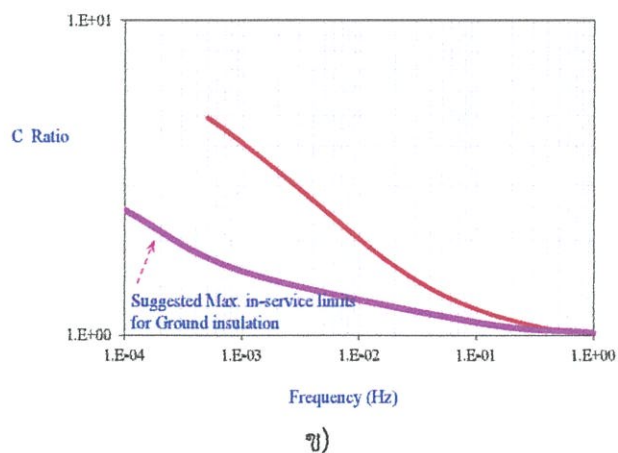
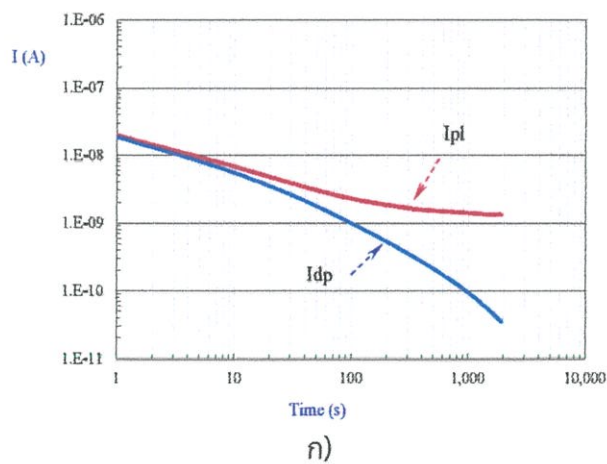
- C ratio : จากกราฟ C ratio มีค่าสูงเกินค่าที่ผู้เชี่ยวชาญได้แนะนำตลอดช่วงความถี่ที่ทำการทดสอบ

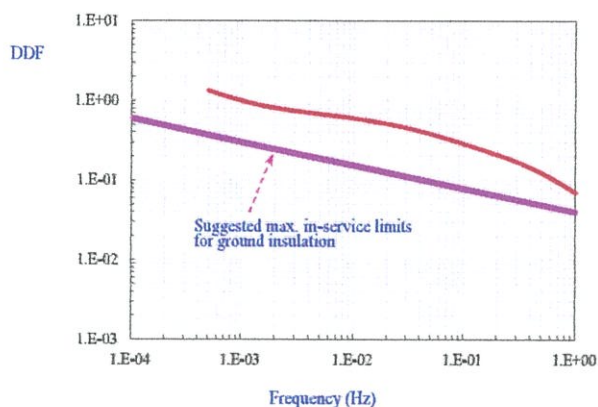
- $\tan \delta$: จากกราฟพบว่า $\tan \delta$ มีค่าสูงเกินค่าที่ผู้เชี่ยวชาญได้แนะนำตลอดช่วงความถี่ที่ทำการทดสอบ

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าต่างๆ จากการทดสอบของขดลวดสเตเตอร์ทดสอบ B แบบมีร่องสลีตหลัง
ทำความสะอาด

ขดลวดสเตเตอร์ทดสอบ B แบบมีร่องสลีตหลังทำความสะอาดวัตถุทดสอบ	
Rated Voltage (kV)	6.6
แรงดันที่ใช้ในการทดสอบ (V)	100
เวลาที่ใช้ในการทดสอบ (S)	2000
ค่าตัวเก็บประจุที่ 50 Hz (pF)	801
ค่าอัตราส่วนตัวเก็บประจุ (C ratio)	สูงกว่าระดับที่ผู้เชี่ยวชาญแนะนำ
ค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก ($\tan\delta$)	สูงกว่าระดับที่ผู้เชี่ยวชาญแนะนำ
Insulation Resistance ที่ 15 วินาที ($G\Omega$)	17.70
Insulation Resistance ที่ 60 วินาที ($G\Omega$)	36.00
Insulation Resistance ที่ 600 วินาที ($G\Omega$)	69.20
Polarization Index ที่ 600 กับ 60 วินาที	1.92

4.2.4.6 ขดลวดสเตเตอร์ทดสอบ B แบบไม่มีร่องสลีตหลังทำความสะอาด





ค)

รูปที่ 4.15 ผลการทดสอบของขดลวดสเตเตอร์ทดสอบ B แบบไม่มีร่องสลีตหลังทำความสะอาด
ก) กระแสไหลาไรเซชันและดีโพลาริเซชัน ข) C ratio ค) $\tan\delta$ (DDF)

- กราฟกระแสไหลาไรเซชันและดีโพลาริเซชัน : จากกราฟพบว่าค่ากระแสไหลาไรเซชันมีความชันน้อยเนื่องจากองค์ประกอบของกระแสคอนดักชันมีค่ามาก

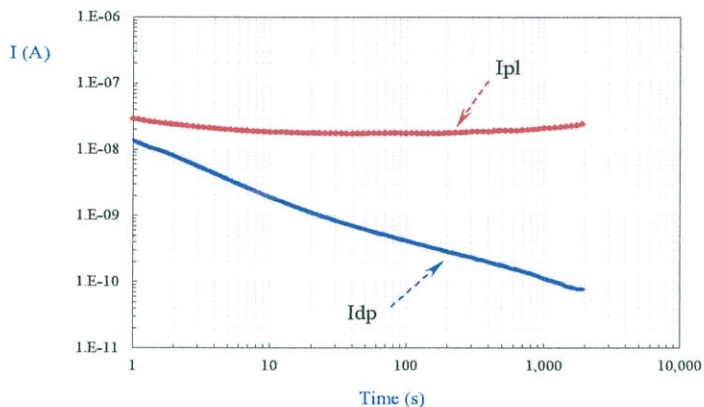
- C ratio : จากกราฟ C ratio มีค่าสูงเกินค่าที่ผู้เชี่ยวชาญได้แนะนำตลอดช่วงความถี่ที่ทำการทดสอบ

- $\tan\delta$: จากกราฟพบว่า $\tan\delta$ มีค่าสูงเกินค่าที่ผู้เชี่ยวชาญได้แนะนำตลอดช่วงความถี่ที่ทำการทดสอบ

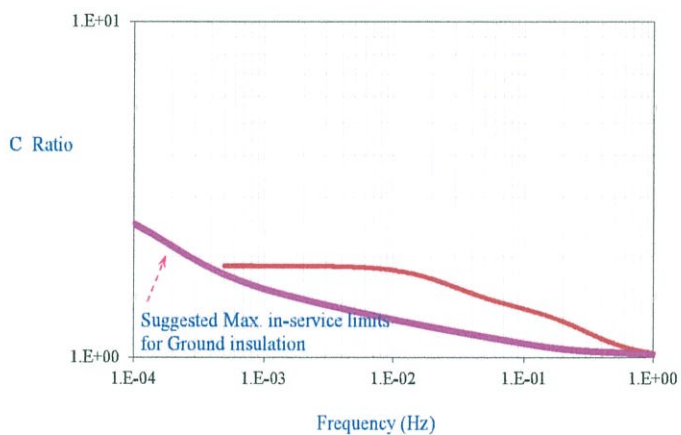
ตารางที่ 4.9 แสดงค่าต่างๆ จากการทดสอบของขดลวดสเตเตอร์ทดสอบ B แบบไม่มีร่องสลีตหลังทำความสะอาด

ขดลวดสเตเตอร์ทดสอบ B แบบไม่มีร่องสลีต	
Rated Voltage (kV)	6.6
แรงดันที่ใช้ในการทดสอบ (V)	100
เวลาที่ใช้ในการทดสอบ (S)	2000
ค่าตัวเก็บประจุที่ 50 Hz (pF)	886
ค่าอัตราส่วนตัวเก็บประจุ (C ratio)	สูงกว่าระดับที่ผู้เชี่ยวชาญแนะนำ
ค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก ($\tan\delta$)	สูงกว่าระดับที่ผู้เชี่ยวชาญแนะนำ
Insulation Resistance ที่ 15 วินาที (G Ω)	17.90
Insulation Resistance ที่ 60 วินาที (G Ω)	35.30
Insulation Resistance ที่ 600 วินาที (G Ω)	67.10
Polarization Index ที่ 600 กับ 60 วินาที	1.90

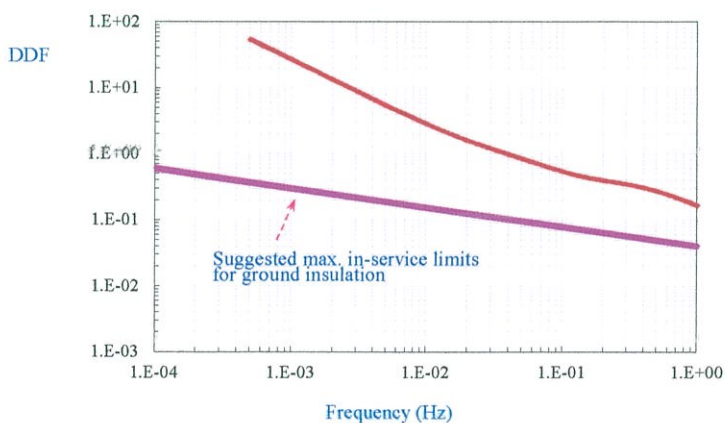
4.2.4.7 แท่งสแตเตอร์ทดสอบ C แบบมีร่องสลิตก่อนทำความสะอาด



ก)



ข)



ค)

รูปที่ 4.16 ผลการทดสอบของแท่งสแตเตอร์ทดสอบ C แบบมีร่องสลิตก่อนทำความสะอาด

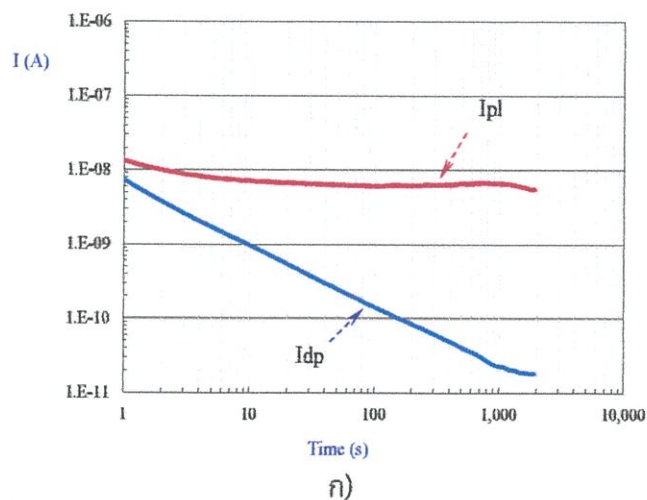
ก) กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน ข) C ratio ค) $\tan \delta$ (DDF)

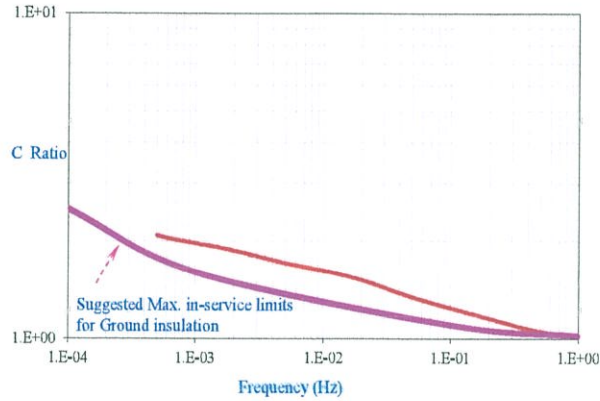
- กราฟกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน : จากกราฟพบว่าค่ากระแสโพลาริเซชันมีความชันน้อยเนื่องจากองค์ประกอบของกระแสคอนดักชันมีค่ามาก
- C ratio : จากกราฟ C ratio มีค่าสูงเกินค่าที่ผู้เชี่ยวชาญได้แนะนำตลอดช่วงความถี่ที่ทำการทดสอบ
- $\tan\delta$: จากกราฟพบว่า $\tan\delta$ มีค่าสูงเกินค่าที่ผู้เชี่ยวชาญได้แนะนำตลอดช่วงความถี่ที่ทำการทดสอบ

ตารางที่ 4.10 แสดงค่าต่างๆ จากการทดสอบของแท่งสแตเตอร์ทดสอบ C แบบมีร่องสลิตก่อนทำความสะอาด

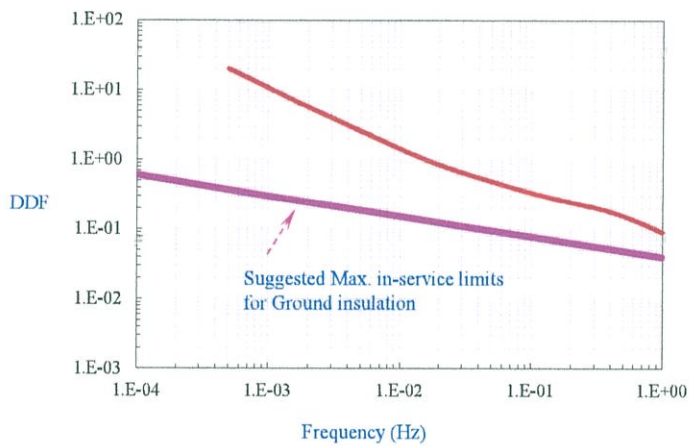
แท่งสแตเตอร์ทดสอบ C แบบมีร่องสลิตก่อนทำความสะอาดวัตถุทดสอบ	
Rated Voltage (kV)	11
แรงดันที่ใช้ในการทดสอบ (V)	100
เวลาที่ใช้ในการทดสอบ (S)	2000
ค่าตัวเก็บประจุที่ 50 Hz (pF)	590
ค่าอัตราส่วนตัวเก็บประจุ (C ratio)	สูงกว่าระดับที่ผู้เชี่ยวชาญแนะนำ
ค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก ($\tan\delta$)	สูงกว่าระดับที่ผู้เชี่ยวชาญแนะนำ
Insulation Resistance ที่ 15 วินาที ($G\Omega$)	5.58
Insulation Resistance ที่ 60 วินาที ($G\Omega$)	5.70
Insulation Resistance ที่ 600 วินาที ($G\Omega$)	5.20
Polarization Index ที่ 600 กับ 60 วินาที	0.91

4.2.4.8 แท่งสแตเตอร์ทดสอบ C แบบมีร่องสลิตหลังทำความสะอาด





ข)



ค)

รูปที่ 4.17 ผลการทดสอบของแท่งสเตเตอร์ทดสอบ C แบบมีร่องสลีตหลังทำความสะอาด

ก) กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน ข) C ratio ค) $\tan\delta$ (DDF)

- กราฟกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน : จากกราฟพบว่าค่ากระแสโพลาริเซชันมีความชันน้อยเนื่องจากองค์ประกอบของกระแสคอนดักชันมีค่ามาก

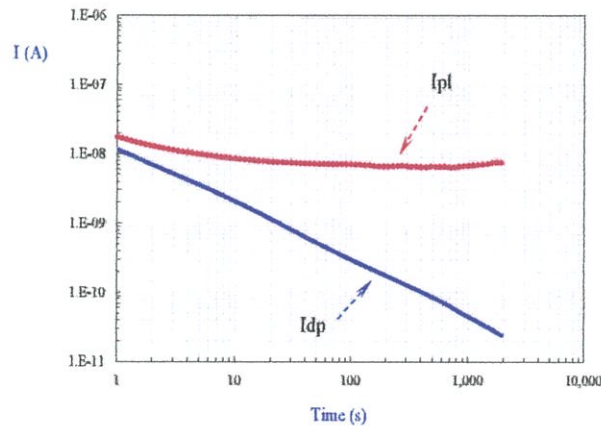
- C ratio : จากกราฟ C ratio มีค่าสูงเกินค่าที่ผู้เชี่ยวชาญได้แนะนำตลอดช่วงความถี่ที่ทำการทดสอบ

- $\tan\delta$: จากกราฟพบว่า $\tan\delta$ มีค่าสูงเกินค่าที่ผู้เชี่ยวชาญได้แนะนำตลอดช่วงความถี่ที่ทำการทดสอบ

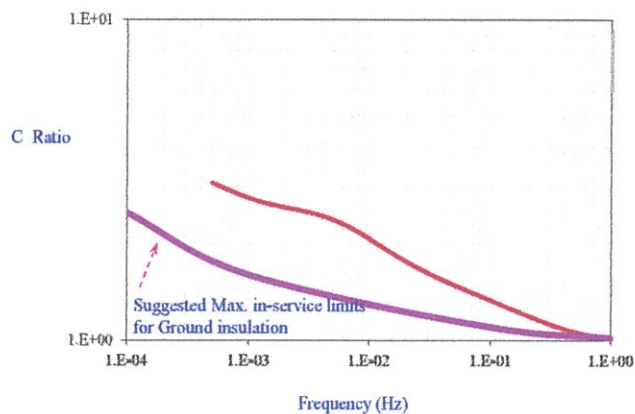
ตารางที่ 4.11 แสดงค่าต่างๆ จากการทดสอบของแท่งสแตเตอร์ทดสอบ C แบบมีร่องสลิตหลัง
ทำความสะดวก

แท่งสแตเตอร์ทดสอบ C แบบมีร่องสลิตหลังทำความสะดวกวัตถุทดสอบ	
Rated Voltage (kV)	11
แรงดันที่ใช้ในการทดสอบ (V)	100
เวลาที่ใช้ในการทดสอบ (S)	2000
ค่าตัวเก็บประจุที่ 50 Hz (pF)	485
ค่าอัตราส่วนตัวเก็บประจุ (C ratio)	สูงกว่าระดับที่ผู้เชี่ยวชาญแนะนำ
ค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก ($\tan\delta$)	สูงกว่าระดับที่ผู้เชี่ยวชาญแนะนำ
Insulation Resistance ที่ 15 วินาที ($G\Omega$)	14.60
Insulation Resistance ที่ 60 วินาที ($G\Omega$)	16.00
Insulation Resistance ที่ 600 วินาที ($G\Omega$)	15.00
Polarization Index ที่ 600 กับ 60 วินาที	0.94

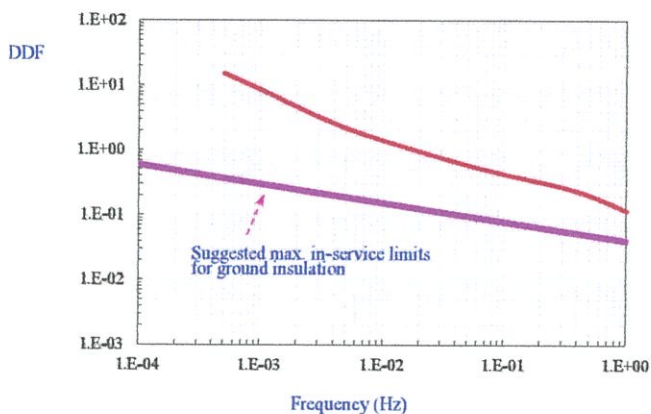
4.2.4.9 แท่งสแตเตอร์ทดสอบ C แบบไม่มีร่องสลิตหลังทำความสะดวก



ก)



ข)



ค)

รูปที่ 4.18 ผลการทดสอบของแท่งสแตเตอร์ทดสอบ C แบบไม่มีร่องสลิตหลังทำความสะอาด
ก) กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน ข) C ratio ค) $\tan\delta$ (DDF)

- กราฟกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน : จากกราฟพบว่าค่ากระแสโพลาริเซชันมีความชันน้อยเนื่องจากองค์ประกอบของกระแสคอนดักชันมีค่ามาก

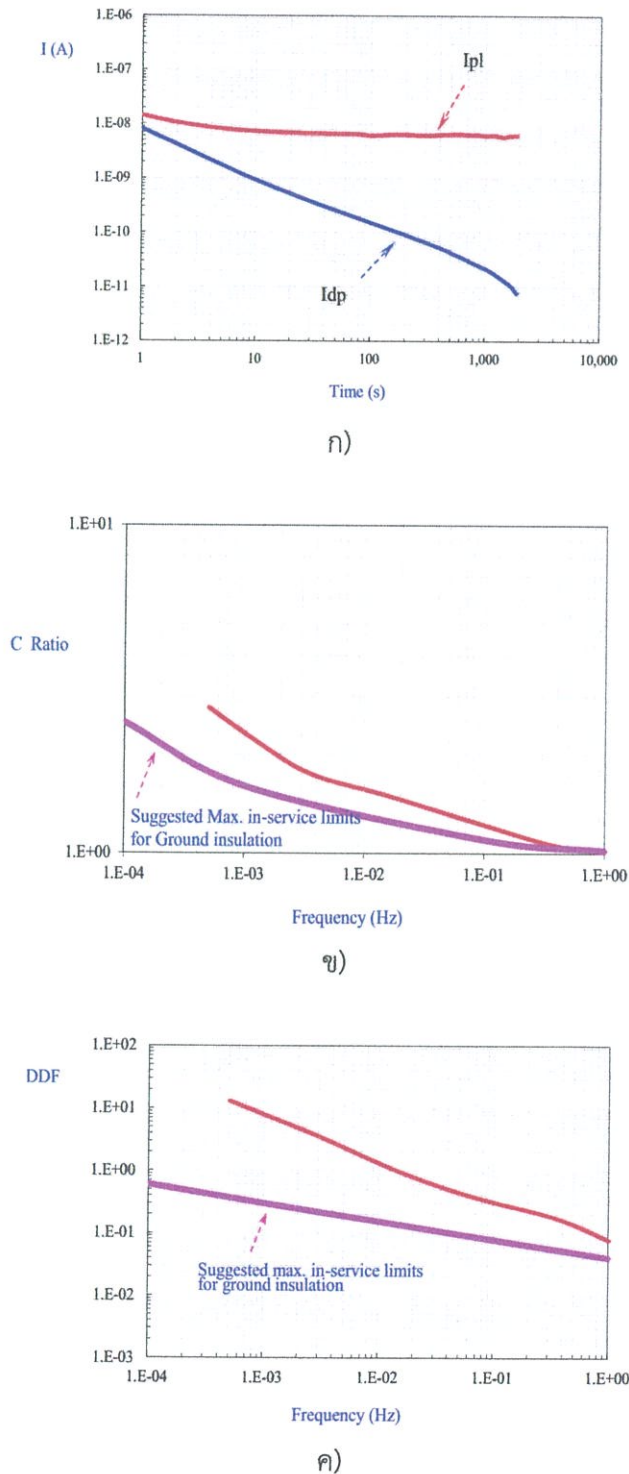
- C ratio : จากกราฟ C ratio มีค่าสูงเกินค่าที่ผู้เชี่ยวชาญได้แนะนำตลอดช่วงความถี่ที่ทำการทดสอบ

- $\tan\delta$: จากกราฟพบว่า $\tan\delta$ มีค่าสูงเกินค่าที่ผู้เชี่ยวชาญได้แนะนำตลอดช่วงความถี่ที่ทำการทดสอบ

ตารางที่ 4.12 แสดงค่าต่างๆ จากการทดสอบของแท่งสแตเตอร์ทดสอบ C แบบไม่มีร่องสลิตหลังทำความสะอาด

แท่งสแตเตอร์ทดสอบ C แบบไม่มีร่องสลิต	
Rated Voltage (kV)	11
แรงดันที่ใช้ในการทดสอบ (V)	100
เวลาที่ใช้ในการทดสอบ (S)	2000
ค่าตัวเก็บประจุที่ 50 Hz (pF)	463
ค่าอัตราส่วนตัวเก็บประจุ (C ratio)	สูงกว่าระดับที่ผู้เชี่ยวชาญแนะนำ
ค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก ($\tan\delta$)	สูงกว่าระดับที่ผู้เชี่ยวชาญแนะนำ
Insulation Resistance ที่ 15 วินาที (G Ω)	12.50
Insulation Resistance ที่ 60 วินาที (G Ω)	14.00
Insulation Resistance ที่ 600 วินาที (G Ω)	15.40
Polarization Index ที่ 600 กับ 60 วินาที	1.10

4.2.4.10 แท่งสแตเตอร์ทดสอบ D แบบมีร่องสลีตก่อนทำความสะอาด



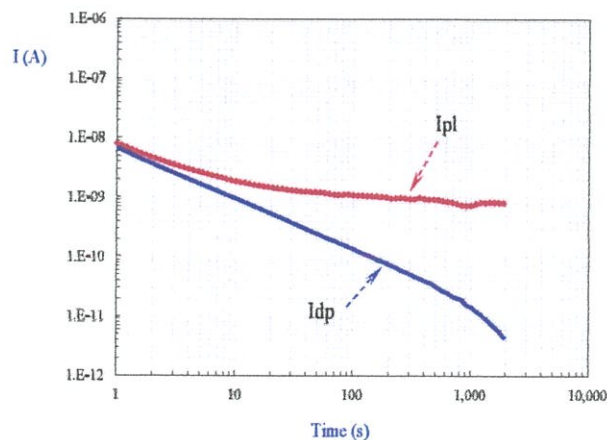
รูปที่ 4.19 ผลการทดสอบของแท่งสแตเตอร์ทดสอบ D แบบมีร่องสลีตก่อนทำความสะอาด
 ก) กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน ข) C ratio ค) $\tan\delta$ (DDF)

- กราฟกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน : จากกราฟพบว่าค่ากระแสโพลาริเซชันมีความชันน้อยเนื่องจากองค์ประกอบของกระแสคอนดักชันมีค่ามาก
- C ratio : จากกราฟ C ratio มีค่าสูงเกินค่าที่ผู้เชี่ยวชาญได้แนะนำตลอดช่วงความถี่ที่ทำการทดสอบ
- $\tan\delta$: จากกราฟพบว่า $\tan\delta$ มีค่าสูงเกินค่าที่ผู้เชี่ยวชาญได้แนะนำตลอดช่วงความถี่ที่ทำการทดสอบ

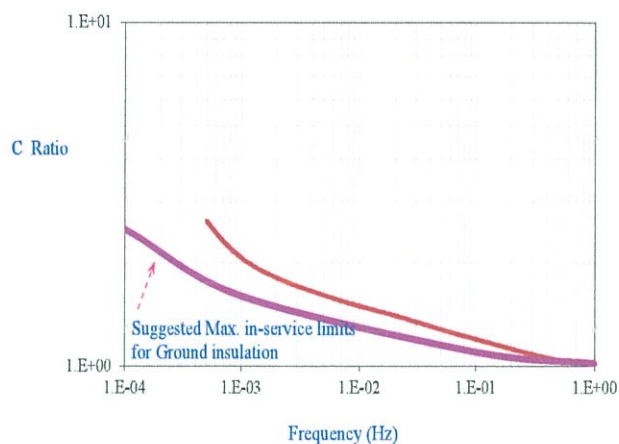
ตารางที่ 4.13 แสดงค่าต่างๆ จากการทดสอบของแท่งสแตเตอร์ทดสอบ D แบบมีร่องสลีตก่อนทำความสะอาด

แท่งสแตเตอร์ทดสอบ D แบบมีร่องสลีตก่อนทำความสะอาดวัตถุทดสอบ	
Rated Voltage (kV)	11
แรงดันที่ใช้ในการทดสอบ (V)	100
เวลาที่ใช้ในการทดสอบ (S)	2000
ค่าตัวเก็บประจุที่ 50 Hz (pF)	562
ค่าอัตราส่วนตัวเก็บประจุ (C ratio)	สูงกว่าระดับที่ผู้เชี่ยวชาญแนะนำ
ค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก ($\tan\delta$)	สูงกว่าระดับที่ผู้เชี่ยวชาญแนะนำ
Insulation Resistance ที่ 15 วินาที ($G\Omega$)	14.10
Insulation Resistance ที่ 60 วินาที ($G\Omega$)	15.20
Insulation Resistance ที่ 600 วินาที ($G\Omega$)	15.40
Polarization Index ที่ 600 กับ 60 วินาที	1.01

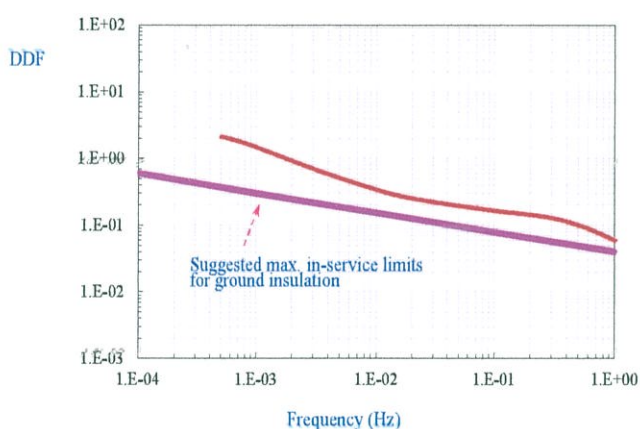
4.2.4.11 แท่งสแตเตอร์ทดสอบ D แบบมีร่องสลีตหลังทำความสะอาด



ก)



ข)



ค)

รูปที่ 4.20 ผลการทดสอบของแท่งสเตเตอร์ทดสอบ D แบบมีร่องสลีตหลังทำความสะอาด
ก) กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน ข) C ratio ค) $\tan\delta$ (DDF)

- กราฟกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน : จากกราฟพบว่าค่ากระแสโพลาริเซชันมีความชันน้อยเนื่องจากองค์ประกอบของกระแสคอนดักชันมีค่ามาก

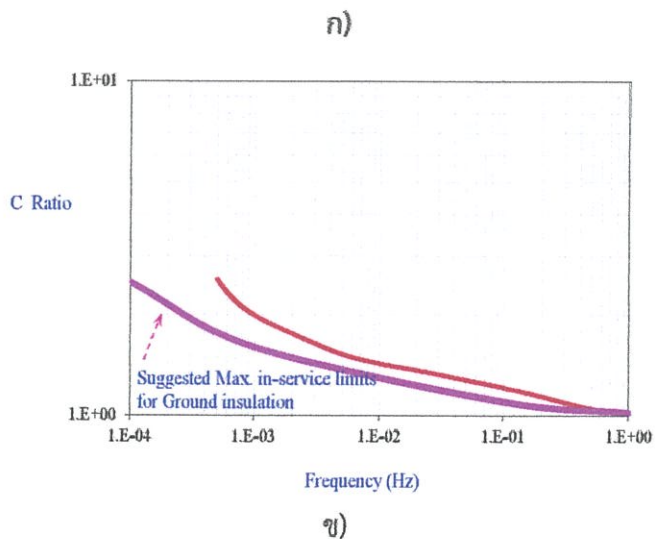
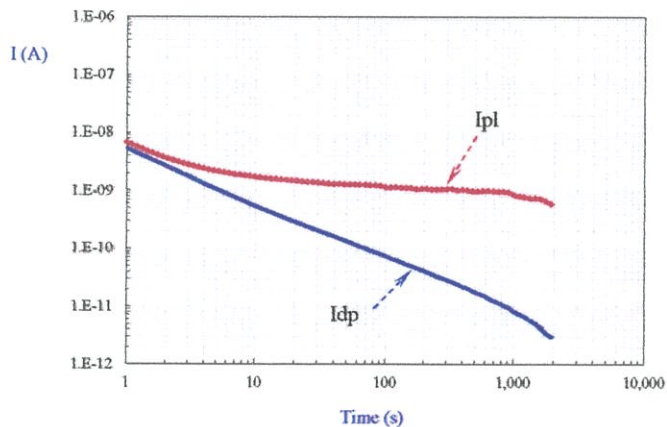
- C ratio : จากกราฟ C ratio มีค่าสูงเกินค่าที่ผู้เชี่ยวชาญได้แนะนำตลอดช่วงความถี่ที่ทำการทดสอบ

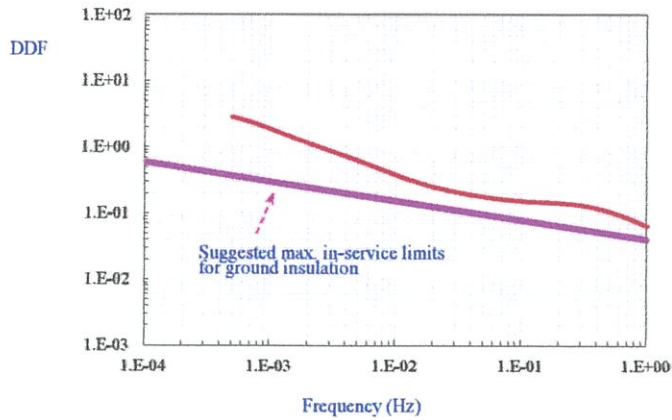
- $\tan\delta$: จากกราฟพบว่า $\tan\delta$ มีค่าสูงเกินค่าที่ผู้เชี่ยวชาญได้แนะนำตลอดช่วงความถี่ที่ทำการทดสอบ

ตารางที่ 4.14 แสดงค่าต่างๆ จากการวัดของแท่งสแตเตอร์ทดสอบ D แบบมีร่องสลิตหลัง
ทำความสะอาด

แท่งสแตเตอร์ทดสอบ D แบบมีร่องสลิตหลังทำความสะอาดวัตถุทดสอบ	
Rated Voltage (kV)	11
แรงดันที่ใช้ในการทดสอบ (V)	100
เวลาที่ใช้ในการทดสอบ (S)	2000
ค่าตัวเก็บประจุที่ 50 Hz (pF)	577
ค่าอัตราส่วนตัวเก็บประจุ (C ratio)	สูงกว่าระดับที่ผู้เชี่ยวชาญแนะนำ
ค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก ($\tan\delta$)	สูงกว่าระดับที่ผู้เชี่ยวชาญแนะนำ
Insulation Resistance ที่ 15 วินาที ($G\Omega$)	62.50
Insulation Resistance ที่ 60 วินาที ($G\Omega$)	86.00
Insulation Resistance ที่ 600 วินาที ($G\Omega$)	116.00
Polarization Index ที่ 600 กับ 60 วินาที	1.35

4.2.4.12 แท่งสแตเตอร์ทดสอบ D แบบไม่มีร่องสลิตหลังทำความสะอาด





ค)

รูปที่ 4.21 ผลการทดสอบของแท่งสแตเตอร์ทดสอบ D แบบไม่มีร่องสลิตหลังทำความสะอาด
ก) กระแสไหลาไรเซชันและดีโพลาริเซชัน ข) C ratio ค) $\tan\delta$ (DDF)

- กราฟกระแสไหลาไรเซชันและดีโพลาริเซชัน : จากกราฟพบว่าค่ากระแสไหลาไรเซชันมีความชันน้อยเนื่องจากองค์ประกอบของกระแสคอนดักชันมีค่ามาก
- C ratio : จากกราฟ C ratio มีค่าสูงเกินค่าที่ผู้เชี่ยวชาญได้แนะนำตลอดช่วงความถี่ที่ทำการทดสอบ
- $\tan\delta$: จากกราฟพบว่า $\tan\delta$ มีค่าสูงเกินค่าที่ผู้เชี่ยวชาญได้แนะนำตลอดช่วงความถี่ที่ทำการทดสอบ

ตารางที่ 4.15 แสดงค่าต่างๆ จากการทดสอบของแท่งสแตเตอร์ทดสอบ D แบบไม่มีร่องสลิตหลังทำความสะอาด

แท่งสแตเตอร์ทดสอบ D แบบไม่มีร่องสลิต	
Rated Voltage (kV)	11
แรงดันที่ใช้ในการทดสอบ (V)	100
เวลาที่ใช้ในการทดสอบ (S)	2000
ค่าตัวเก็บประจุที่ 50 Hz (pF)	504
ค่าอัตราส่วนตัวเก็บประจุ (C ratio)	สูงกว่าระดับที่ผู้เชี่ยวชาญแนะนำ
ค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก ($\tan\delta$)	สูงกว่าระดับที่ผู้เชี่ยวชาญแนะนำ
Insulation Resistance ที่ 15 วินาที ($G\Omega$)	63.80
Insulation Resistance ที่ 60 วินาที ($G\Omega$)	79.30
Insulation Resistance ที่ 600 วินาที ($G\Omega$)	101.0
Polarization Index ที่ 600 กับ 60 วินาที	1.27

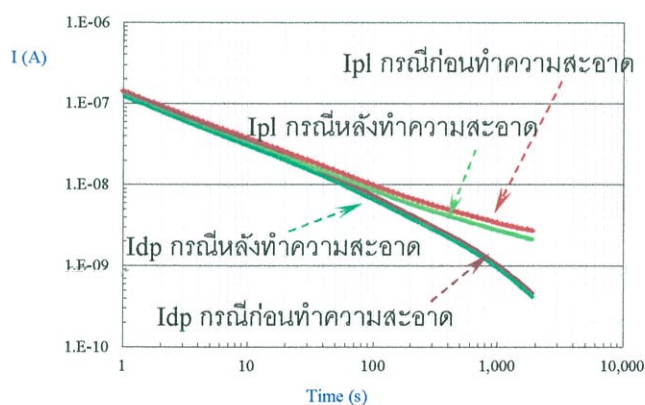
4.2.5 การเปรียบเทียบผลการทดลอง

การเปรียบเทียบผลการทดลองจะแบ่งเป็นกรณีต่างๆ ดังนี้

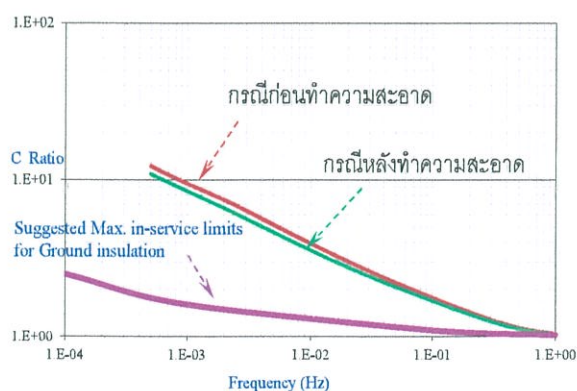
- 1) การเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังทำความสะอาดของขดลวดแต่ละแบบกรณีมีร่องสลีต
- 2) การเปรียบเทียบระหว่างกรณีมีร่องสลีตกับไม่มีร่องสลีตหลังทำความสะอาดของขดลวดสเตเตอร์ทดสอบ A และ B
- 3) การเปรียบเทียบระหว่างขดลวดสเตเตอร์ทดสอบ A กับ B กรณีมีร่องสลีตหลังทำความสะอาด
- 4) การเปรียบเทียบระหว่างขดลวดสเตเตอร์ทดสอบ C กับ D กรณีมีร่องสลีตหลังทำความสะอาด
- 5) การเปรียบเทียบระหว่างขดลวดสเตเตอร์ทดสอบ B กับ D กรณีมีร่องสลีตหลังทำความสะอาด

4.2.5.1 การเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังทำความสะอาดของขดลวดแต่ละแบบกรณีมีร่องสลีต

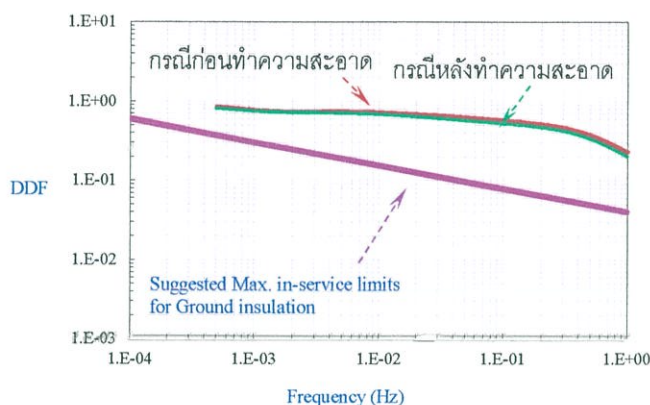
- 1) ขดลวดสเตเตอร์ทดสอบแบบ A



ก)



ข)



ค)

รูปที่ 4.22 กราฟเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังทำความสะอาดของขดลวด A

ก) กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน ข) C ratio ค) $\tan\delta$ (DDF)

- กราฟกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน : จากกราฟค่ากระแสโพลาริเซชันก่อนและหลังทำความสะอาด พบว่าหลังทำความสะอาดค่ากระแสโพลาริเซชันจะมีความชันมากขึ้นเนื่องจากองค์ประกอบของกระแสคอนดักชันมีค่าลดลง

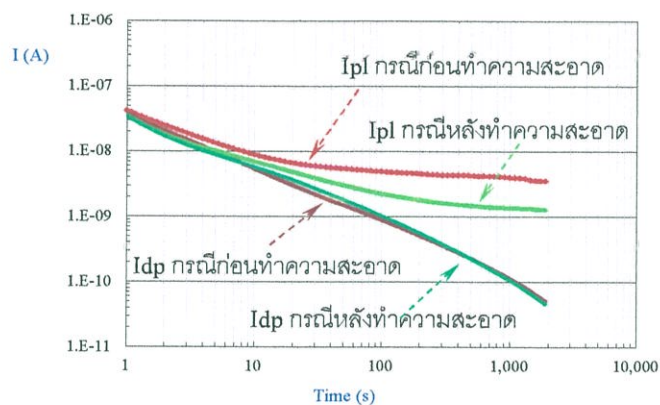
- C ratio : จากกราฟ C ratio ก่อนและหลังทำความสะอาด พบว่ามีค่าสูงเกินค่าที่ผู้เชี่ยวชาญได้แนะนำตลอดช่วงความถี่ที่ทำการทดสอบทั้งสองกรณี โดยหลังทำความสะอาดค่า C ratio จะมีค่าลดลง

- $\tan\delta$: จากกราฟพบว่า $\tan\delta$ ก่อนและหลังทำความสะอาด พบว่ามีค่าสูงเกินค่าที่ผู้เชี่ยวชาญได้แนะนำตลอดช่วงความถี่ที่ทำการทดสอบทั้งสองกรณี โดยหลังทำความสะอาดค่า $\tan\delta$ จะมีค่าลดลง

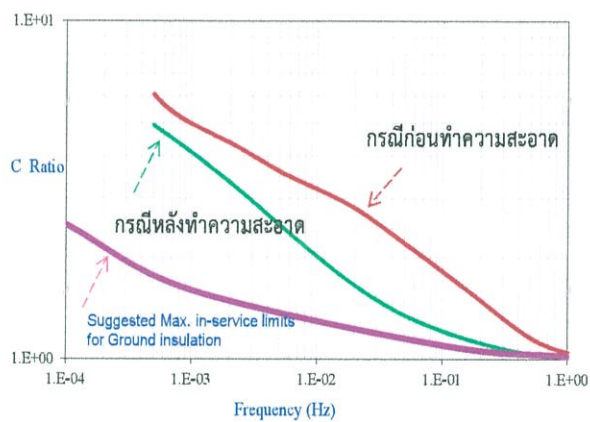
ตารางที่ 4.16 เปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังทำความสะอาดของขดลวดสเตเตอร์ A

	ขดลวดสเตเตอร์ทดสอบแบบ A	
	ก่อนทำความสะอาด	หลังทำความสะอาด
แรงดันที่ใช้ในการทดสอบ (V)	100	100
ค่าตัวเก็บประจุ (pF)	2133	2125
C ratio	สูงกว่าระดับที่ผู้เชี่ยวชาญแนะนำ	สูงกว่าระดับที่ผู้เชี่ยวชาญแนะนำ
$\tan\delta$	สูงกว่าระดับที่ผู้เชี่ยวชาญแนะนำ	สูงกว่าระดับที่ผู้เชี่ยวชาญแนะนำ
Insulation Resistance ที่ 15 วินาที ($G\Omega$)	3.34	3.87
Insulation Resistance ที่ 60 วินาที ($G\Omega$)	7.53	8.16
Insulation Resistance ที่ 600 วินาที ($G\Omega$)	23.70	28.30
Polarization Index ที่ 600 กับ 60 วินาที	3.15	3.29

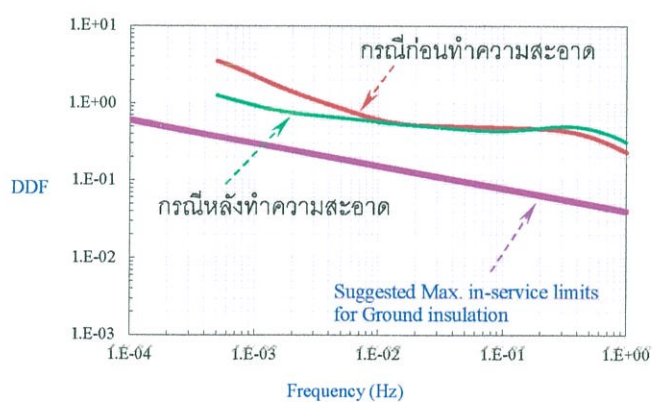
2) ขดลวดสเตเตอร์ทดสอบแบบ B



ก)



ข)



ค)

รูปที่ 4.34 กราฟเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังทำความสะอาดของขดลวด B
 ก) กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน ข) C ratio ค) $\tan \delta$ (DDF)

- กราฟกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน : จากกราฟค่ากระแสโพลาริเซชันก่อนและหลังทำความสะอาด พบว่าหลังทำความสะอาดค่ากระแสโพลาริเซชันจะมีความชันมากขึ้นเนื่องจากองค์ประกอบของกระแสคอนดักชันมีค่าลดลง

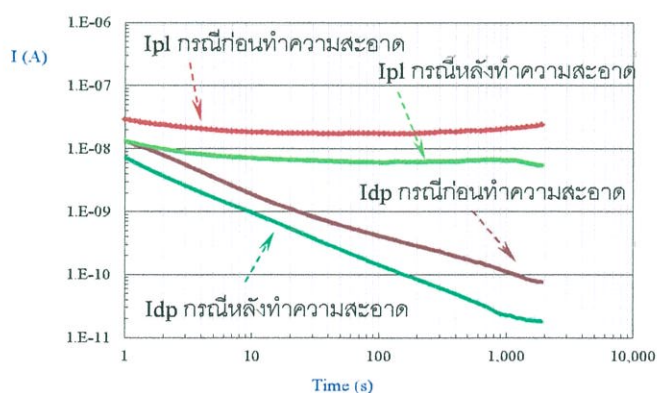
- C ratio : จากกราฟ C ratio ก่อนและหลังทำความสะอาด พบว่ามีค่าสูงเกินค่าที่ผู้เชี่ยวชาญได้แนะนำตลอดช่วงเวลาที่ทำการทดสอบทั้งสองกรณี โดยหลังทำความสะอาดค่า C ratio จะมีค่าลดลง

- $\tan\delta$: จากกราฟพบว่า $\tan\delta$ ก่อนและหลังทำความสะอาด พบว่ามีค่าสูงเกินค่าที่ผู้เชี่ยวชาญได้แนะนำตลอดช่วงเวลาที่ทำการทดสอบทั้งสองกรณี โดยหลังทำความสะอาดค่า $\tan\delta$ จะมีค่าลดลง

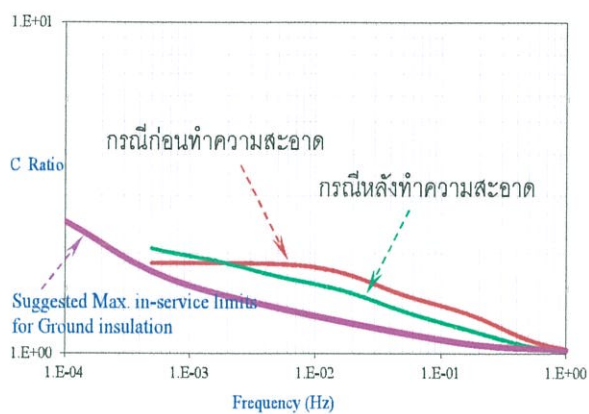
ตารางที่ 4.17 เปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังทำความสะอาดของขดลวดสเตเตอร์ B

	ขดลวดสเตเตอร์ทดสอบแบบ B	
	ก่อนทำความสะอาด	หลังทำความสะอาด
แรงดันที่ใช้ในการทดสอบ (V)	100	100
ค่าตัวเก็บประจุ (pF)	705	801
C ratio	สูงกว่าระดับที่ผู้เชี่ยวชาญแนะนำ	สูงกว่าระดับที่ผู้เชี่ยวชาญแนะนำ
$\tan\delta$	สูงกว่าระดับที่ผู้เชี่ยวชาญแนะนำ	สูงกว่าระดับที่ผู้เชี่ยวชาญแนะนำ
Insulation Resistance ที่ 15 วินาที ($G\Omega$)	13.60	17.70
Insulation Resistance ที่ 60 วินาที ($G\Omega$)	19.10	36.00
Insulation Resistance ที่ 600 วินาที ($G\Omega$)	23.70	69.20
Polarization Index ที่ 600 กับ 60 วินาที	1.24	1.92

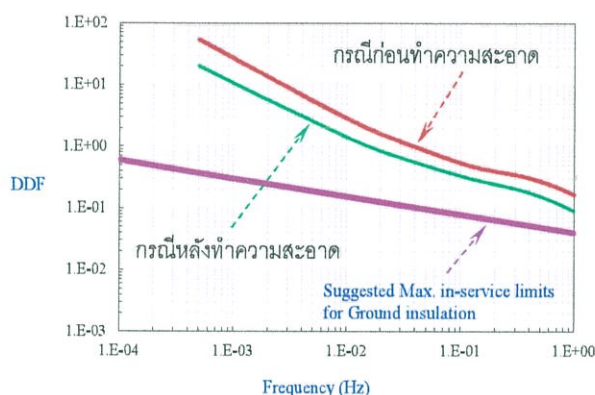
3) แท่งสเตเตอร์ทดสอบแบบ C



ก)



ข)



ค)

รูปที่ 4.23 กราฟเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังทำความสะอาดของแท่งสเตเตอร์ C

ก) กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน ข) C ratio ค) $\tan\delta$ (DDF)

- กราฟกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน : จากกราฟค่ากระแสโพลาริเซชันก่อนและหลังทำความสะอาด พบว่าหลังทำความสะอาดค่ากระแสโพลาริเซชันจะมีความชันมากขึ้นเนื่องจากองค์ประกอบของกระแสคอนดักชันมีค่าลดลง

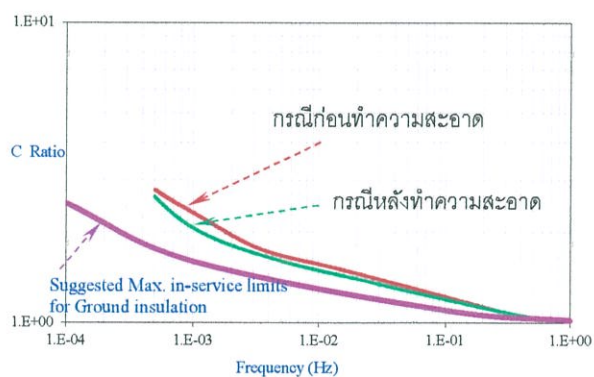
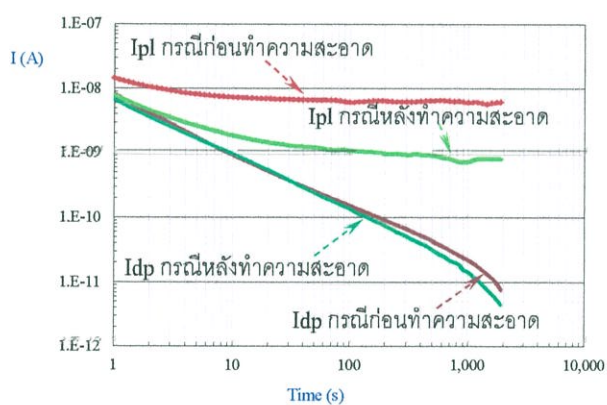
- C ratio : จากกราฟ C ratio ก่อนและหลังทำความสะอาด พบว่ามีค่าสูงเกินค่าที่ผู้เชี่ยวชาญได้แนะนำตลอดช่วงความถี่ที่ทำการทดสอบทั้งสองกรณี โดยหลังทำความสะอาดค่า C ratio จะมีค่าลดลง

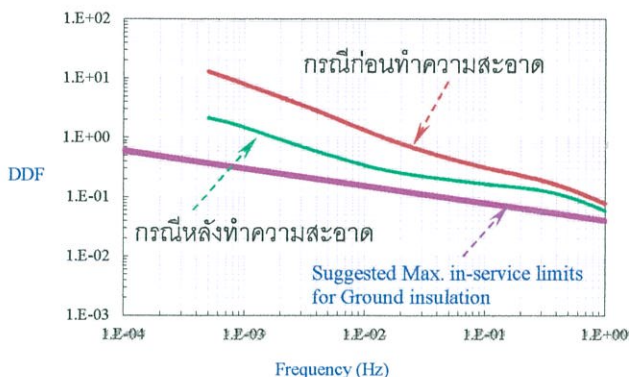
- $\tan\delta$: จากกราฟพบว่า $\tan\delta$ ก่อนและหลังทำความสะอาด พบว่ามีค่าสูงเกินค่าที่ผู้เชี่ยวชาญได้แนะนำตลอดช่วงความถี่ที่ทำการทดสอบทั้งสองกรณี โดยหลังทำความสะอาดค่า $\tan\delta$ จะมีค่าลดลง

ตารางที่ 4.18 เปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังทำความสะอาดของแท่งสแตเตอร์ C

	แท่งสแตเตอร์ทดสอบแบบ C	
	ก่อนทำความสะอาด	หลังทำความสะอาด
แรงดันที่ใช้ในการทดสอบ (V)	100	100
ค่าตัวเก็บประจุ (pF)	590	485
C ratio	สูงกว่าระดับที่ผู้เชี่ยวชาญแนะนำ	สูงกว่าระดับที่ผู้เชี่ยวชาญแนะนำ
tanδ	สูงกว่าระดับที่ผู้เชี่ยวชาญแนะนำ	สูงกว่าระดับที่ผู้เชี่ยวชาญแนะนำ
Insulation Resistance ที่ 15 วินาที ($G\Omega$)	5.58	14.60
Insulation Resistance ที่ 60 วินาที ($G\Omega$)	5.70	16.00
Insulation Resistance ที่ 600 วินาที ($G\Omega$)	5.20	15.00
Polarization Index ที่ 600 กับ 60 วินาที	0.91	0.94

4) แท่งสแตเตอร์ทดสอบแบบ D





ค)

รูปที่ 4.24 กราฟเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังทำความสะอาดของแท่งสแตเตอร์ D

ก) กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน ข) C ratio ค) $\tan\delta$ (DDF)

- กราฟกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน : จากกราฟค่ากระแสโพลาริเซชันก่อนและหลังทำความสะอาด พบว่าหลังทำความสะอาดค่ากระแสโพลาริเซชันจะมีความชันมากขึ้นเนื่องจากองค์ประกอบของกระแสคอนดักชันมีค่าลดลง

- C ratio : จากกราฟ C ratio ก่อนและหลังทำความสะอาด พบว่ามีค่าสูงเกินค่าที่ผู้เชี่ยวชาญได้แนะนำตลอดช่วงความถี่ที่ทำการทดสอบทั้งสองกรณี โดยหลังทำความสะอาดค่า C ratio จะมีค่าลดลง

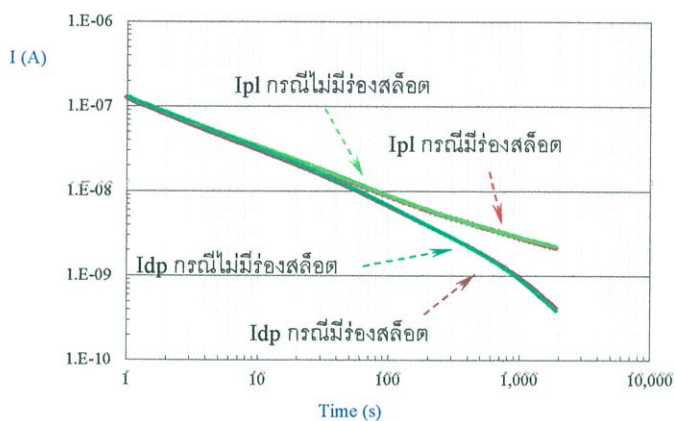
- $\tan\delta$: จากกราฟ $\tan\delta$ ก่อนและหลังทำความสะอาด พบว่ามีค่าสูงเกินค่าที่ผู้เชี่ยวชาญได้แนะนำตลอดช่วงความถี่ที่ทำการทดสอบทั้งสองกรณี โดยหลังทำความสะอาดค่า $\tan\delta$ จะมีค่าลดลง

ตารางที่ 4.19 เปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังทำความสะอาดของแท่งสแตเตอร์ D

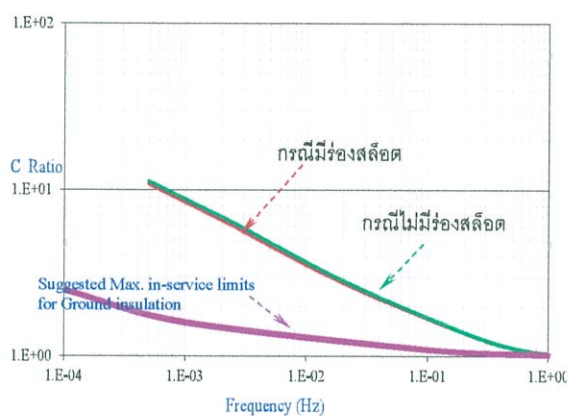
	แท่งสแตเตอร์ทดสอบแบบ D	
	ก่อนทำความสะอาด	หลังทำความสะอาด
แรงดันที่ใช้ในการทดสอบ (V)	100	100
ค่าตัวเก็บประจุ (pF)	562	577
C ratio	สูงกว่าระดับที่ผู้เชี่ยวชาญแนะนำ	สูงกว่าระดับที่ผู้เชี่ยวชาญแนะนำ
$\tan\delta$	สูงกว่าระดับที่ผู้เชี่ยวชาญแนะนำ	สูงกว่าระดับที่ผู้เชี่ยวชาญแนะนำ
Insulation Resistance ที่ 15 วินาที ($G\Omega$)	14.10	62.50
Insulation Resistance ที่ 60 วินาที ($G\Omega$)	15.20	86.00
Insulation Resistance ที่ 600 วินาที ($G\Omega$)	15.40	116.00
Polarization Index ที่ 600 กับ 60 วินาที	1.01	1.35

4.2.5.2 การเปรียบเทียบระหว่างกรณีมีร่องสลีตกับไม่มีร่องสลีตหลังทำความสะอาดของขดลวดสเตเตอร์ทดสอบ A และ B

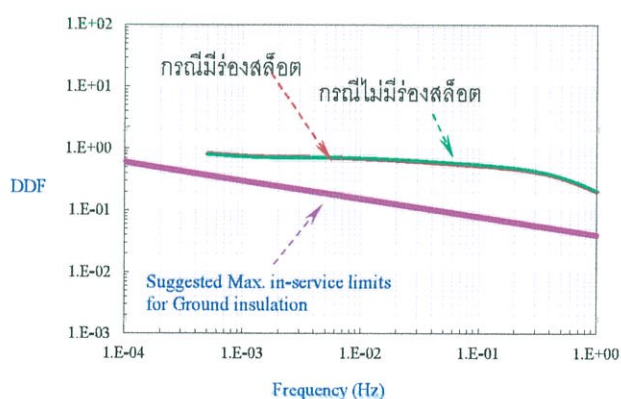
1) ขดลวดทดสอบแบบ A



ก)



ข)



ค)

รูปที่ 4.25 เปรียบเทียบระหว่างกรณีมีร่องสลีตกับไม่มีร่องสลีตหลังทำความสะอาดของขดลวด A

ก) กระแสโพลาร์ไรเซชันและดีโพลาร์ไรเซชัน ข) C ratio ค) $\tan\delta$ (DDF)

- กราฟกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน : จากกราฟกระแสกรณีนีมีและไม่ร่องสลีต พบว่าค่ากระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันมีค่าใกล้เคียงกันทั้งสองกรณี

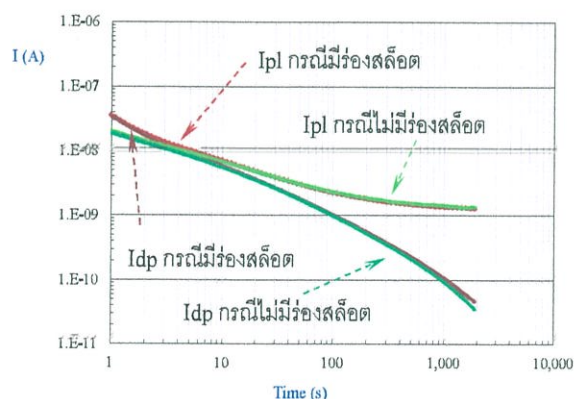
- C ratio : จากกราฟ C ratio กรณีมีและไม่ร่องสลีต พบว่า C ratio มีค่าใกล้เคียงกันทั้งสองกรณี และมีค่าสูงเกินค่าที่ผู้เชี่ยวชาญได้แนะนำตลอดช่วงความถี่ที่ทำการทดสอบ

- $\tan\delta$: จากกราฟ $\tan\delta$ กรณีมีและไม่ร่องสลีต พบว่า $\tan\delta$ มีค่าใกล้เคียงกันทั้งสองกรณี และมีค่าสูงเกินค่าที่ผู้เชี่ยวชาญได้แนะนำตลอดช่วงความถี่ที่ทำการทดสอบ

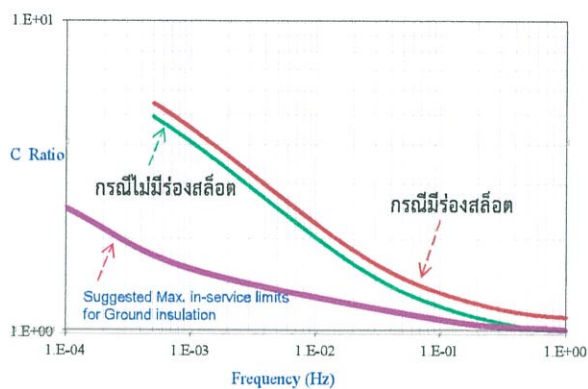
ตารางที่ 4.20 เปรียบเทียบระหว่างกรณีมีร่องสลีตกับไม่มีร่องสลีตหลังทำความสะอาดขดลวดสเตเตอร์ทดสอบ A

	ขดลวดสเตเตอร์ทดสอบแบบ A	
	มีร่องสลีต	ไม่มีร่องสลีต
แรงดันที่ใช้ในการทดสอบ (V)	100	100
ค่าตัวเก็บประจุ (pF)	2125	2116
C ratio	สูงกว่าระดับที่ผู้เชี่ยวชาญแนะนำ	สูงกว่าระดับที่ผู้เชี่ยวชาญแนะนำ
$\tan\delta$	สูงกว่าระดับที่ผู้เชี่ยวชาญแนะนำ	สูงกว่าระดับที่ผู้เชี่ยวชาญแนะนำ
Insulation Resistance ที่ 15 วินาที ($G\Omega$)	3.87	3.71
Insulation Resistance ที่ 60 วินาที ($G\Omega$)	8.61	8.41
Insulation Resistance ที่ 600 วินาที ($G\Omega$)	28.30	28.00
Polarization Index ที่ 600 กับ 60 วินาที	3.29	3.33

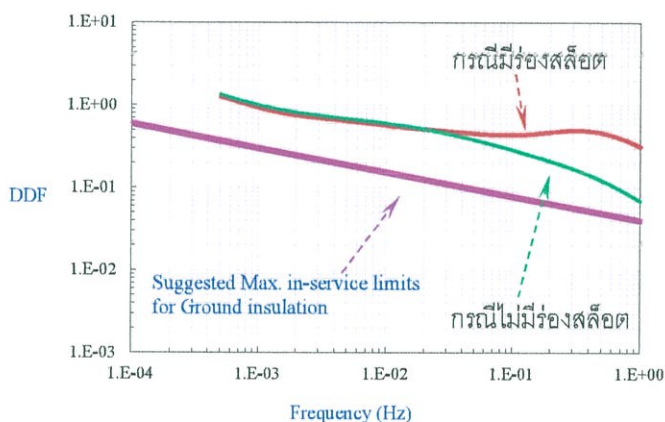
2) ขดลวดสเตเตอร์ทดสอบแบบ B



ก)



ข)



ค)

รูปที่ 4.26 เปรียบเทียบระหว่างกรณีมีร่องสลีตกับไม่มีร่องสลีตหลังทำความสะอาดของ
ขดลวดสเตเตอร์ทดสอบ A ก) กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน ข) C ratio ค) $\tan\delta$ (DDF)

- กราฟกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน : จากกราฟกระแสกรณีมีและไม่มีร่องสลีต พบว่าค่ากระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันมีค่าใกล้เคียงกันทั้งสองกรณี

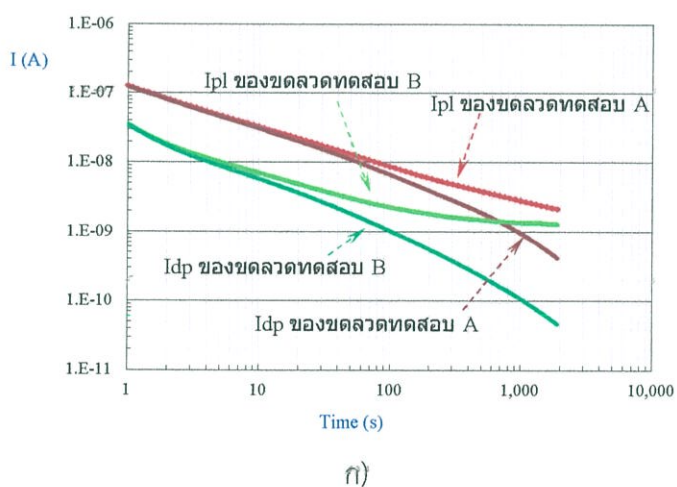
- C ratio : จากกราฟ C ratio กรณีมีและไม่มีร่องสลีต พบว่า C ratio มีค่าใกล้เคียงกันทั้งสองกรณี และมีค่าสูงเกินค่าที่ผู้เชี่ยวชาญได้แนะนำตลอดช่วงความถี่ที่ทำการทดสอบ

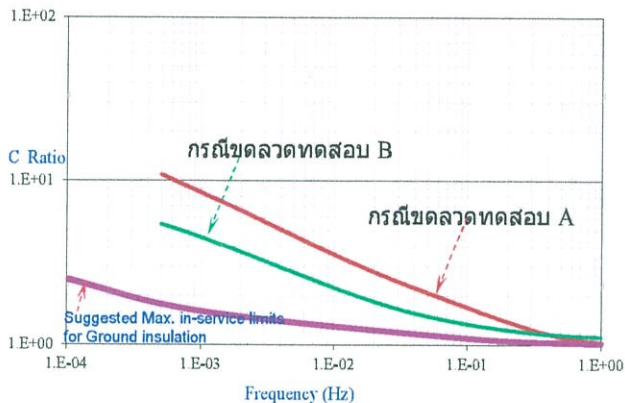
- $\tan\delta$: จากกราฟ $\tan\delta$ กรณีมีและไม่มีร่องสลีต พบว่า $\tan\delta$ มีค่าใกล้เคียงกันทั้งสองกรณี และมีค่าสูงเกินค่าที่ผู้เชี่ยวชาญได้แนะนำตลอดช่วงความถี่ที่ทำการทดสอบ

ตารางที่ 4.21 เปรียบเทียบระหว่างกรณีมีร่องสลิตกับไม่มีร่องสลิตหลังทำความสะอาดของ
ขดลวดสเตเตอร์ทดสอบ B

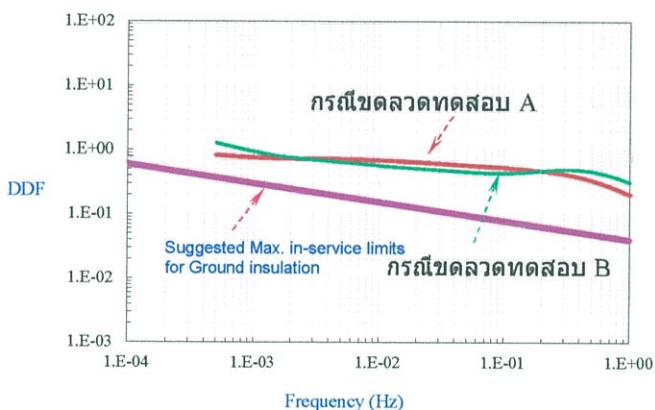
	ขดลวดสเตเตอร์ทดสอบแบบ B	
	มีร่องสลิต	ไม่มีร่องสลิต
แรงดันที่ใช้ในการทดสอบ (V)	100	100
ค่าตัวเก็บประจุ (pF)	801	886
C ratio	สูงกว่าระดับที่ผู้เชี่ยวชาญแนะนำ	สูงกว่าระดับที่ผู้เชี่ยวชาญแนะนำ
$\tan\delta$	สูงกว่าระดับที่ผู้เชี่ยวชาญแนะนำ	สูงกว่าระดับที่ผู้เชี่ยวชาญแนะนำ
Insulation Resistance ที่ 15 วินาที ($G\Omega$)	17.70	17.90
Insulation Resistance ที่ 60 วินาที ($G\Omega$)	36.00	35.30
Insulation Resistance ที่ 600 วินาที ($G\Omega$)	69.20	67.10
Polarization Index ที่ 600 กับ 60 วินาที	1.92	1.90

4.2.5.3 การเปรียบเทียบระหว่างขดลวดสเตเตอร์ทดสอบ A กับ B กรณีมีร่องสลิตหลัง ทำความสะอาด





ข)



ค)

รูปที่ 4.27 เปรียบเทียบระหว่างขดลวดสเตเตอร์ทดสอบ A กับ B กรณีมีร่องสลีตหลัง
 ทำความสะอาด ก) กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน ข) C ratio ค) tanδ (DDF)

- กราฟกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน : จากกราฟกระแส พบว่าค่ากระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของขดลวดสเตเตอร์ A มีค่าสูงกว่าขดลวดสเตเตอร์ B โดยค่ากระแสโพลาริเซชันของขดลวดสเตเตอร์ A จะมีความชันมากกว่าขดลวดสเตเตอร์ B เนื่องจากมีองค์ประกอบของกระแสคอนดักชันต่ำกว่า

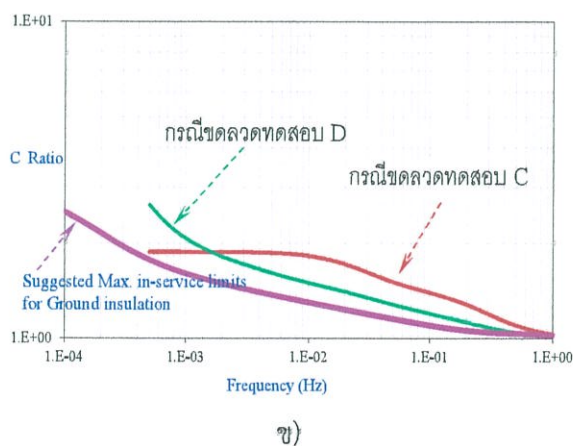
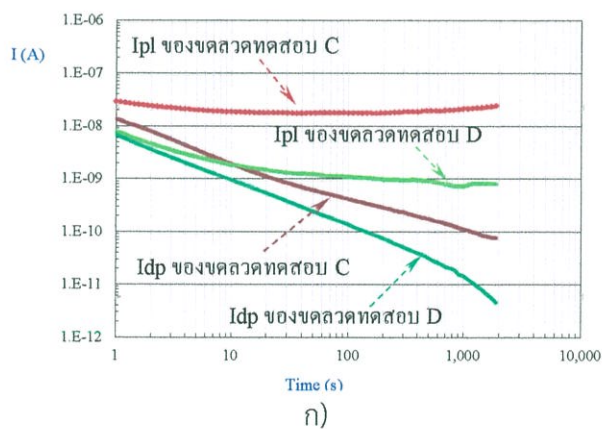
- C ratio : จากกราฟ พบว่าค่า C ratio ของขดลวดสเตเตอร์ A มีค่าสูงกว่าขดลวดสเตเตอร์ B ตลอดช่วงความถี่ที่ทำการทดสอบ

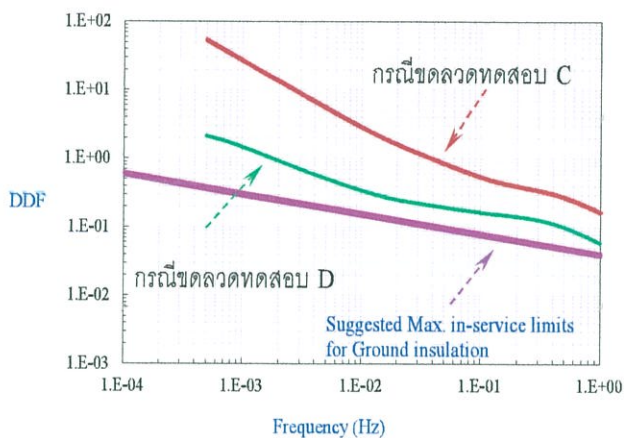
- tanδ : จากกราฟ พบว่าค่า tanδ ของขดลวดสเตเตอร์ A มีค่าสูงกว่าขดลวดสเตเตอร์ B ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 0.005 ถึง 0.1 Hz

ตารางที่ 4.22 เปรียบเทียบระหว่างขดลวดสเตเตอร์ทดสอบ A กับ B กรณีมีร่องสลิตหลังทำความสะอาด

	ขดลวดสเตเตอร์ทดสอบแบบ A	ขดลวดสเตเตอร์ทดสอบแบบ B
แรงดันที่ใช้ในการทดสอบ (V)	100	100
ค่าตัวเก็บประจุ (pF)	2133	801
C ratio	สูงกว่าระดับที่ผู้เชี่ยวชาญแนะนำ	สูงกว่าระดับที่ผู้เชี่ยวชาญแนะนำ
tan δ	สูงกว่าระดับที่ผู้เชี่ยวชาญแนะนำ	สูงกว่าระดับที่ผู้เชี่ยวชาญแนะนำ
Insulation Resistance ที่ 15 วินาที (G Ω)	3.34	17.70
Insulation Resistance ที่ 60 วินาที (G Ω)	7.53	36.00
Insulation Resistance ที่ 600 วินาที (G Ω)	23.70	69.20
Polarization Index ที่ 600 กับ 60 วินาที	3.15	1.92

4.2.5.4 การเปรียบเทียบระหว่างแท่งสเตเตอร์ทดสอบ C กับ D กรณีมีร่องสลิตหลังทำความสะอาด





ค)

รูปที่ 4.28 เปรียบเทียบระหว่างแท่งสแตเตอร์ทดสอบ C กับ D กรณีมีร่องสลิตหลัง
ทำความสะอาด ก) กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน ข) C ratio ค) $\tan\delta$ (DDF)

- กราฟกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน : จากกราฟกระแส พบว่าค่ากระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของแท่งสแตเตอร์ C มีค่าสูงกว่าแท่งสแตเตอร์ D โดยค่ากระแสโพลาริเซชันของแท่งสแตเตอร์ D จะมีความชันมากกว่าแท่งสแตเตอร์ C เนื่องจากมีองค์ประกอบของกระแสคอนดักชันต่ำกว่า

- C ratio : จากกราฟ พบว่าค่า C ratio ของแท่งสแตเตอร์ C มีค่าสูงกว่าแท่งสแตเตอร์ D ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 0.002 ถึง 1 Hz

- $\tan\delta$: จากกราฟ พบว่าค่า $\tan\delta$ ของแท่งสแตเตอร์ C มีค่าสูงกว่าแท่งสแตเตอร์ D ตลอดช่วงความถี่ที่ทำการทดสอบ

ตารางที่ 4.23 เปรียบเทียบระหว่างแท่งสแตเตอร์ C กับ D กรณีมีร่องสลิตหลังทำความสะอาด

	แท่งสแตเตอร์ทดสอบแบบ C	แท่งสแตเตอร์ทดสอบแบบ D
แรงดันที่ใช้ในการทดสอบ (V)	100	100
ค่าตัวเก็บประจุ (pF)	485	577
C ratio	สูงกว่าระดับที่ผู้เชี่ยวชาญแนะนำ	สูงกว่าระดับที่ผู้เชี่ยวชาญแนะนำ
$\tan\delta$	สูงกว่าระดับที่ผู้เชี่ยวชาญแนะนำ	สูงกว่าระดับที่ผู้เชี่ยวชาญแนะนำ
Insulation Resistance ที่ 15 วินาที ($G\Omega$)	14.60	62.50
Insulation Resistance ที่ 60 วินาที ($G\Omega$)	16.00	86.00
Insulation Resistance ที่ 600 วินาที ($G\Omega$)	15.00	116.00
Polarization Index ที่ 600 กับ 60 วินาที	0.94	1.35

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการดำเนินงานโครงการ

จากการทดสอบฉนวนของขดลวดสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง พร้อมทั้งศึกษาจากการดูงานนอกสถานที่ ณ บริษัท เวล เอ็นจิเนียริง จำกัด สามารถสรุปผลการทดสอบได้ ดังนี้

1. จากการเปรียบเทียบผลการทดสอบกรณีก่อนทำความสะอาดและหลังทำความสะอาด พบว่า ค่าความชื้นหรือสิ่งสกปรกต่างๆ ที่อยู่บริเวณผิวฉนวนจะส่งผลต่อกราฟของกระแสโพลาริเซชัน (Polarization Current) โดยทำให้กระแสคอนดักชัน (Conduction Current) มีค่าเพิ่มขึ้น จึงทำให้กระแสโพลาริเซชันในกรณีก่อนทำความสะอาดเข้าสู่ภาวะคงตัวเร็วกว่าการทดสอบในกรณีหลังทำความสะอาด ซึ่งกระแสโพลาริเซชันนี้จะมีความสัมพันธ์กับค่าดัชนีการเกิดโพลาริเซชัน (Polarization Index) หรือค่า PI โดยจากผลการทดสอบสามารถระบุค่า PI ในกรณีก่อนและหลังทำความสะอาดได้ดังนี้

- ขดลวดสเตเตอร์ทดสอบแบบ A ก่อนและหลังทำความสะอาดพบว่ามีค่า PI เท่ากับ 3.15 และ 3.29 ตามลำดับ
- ขดลวดสเตเตอร์ทดสอบแบบ B ก่อนและหลังทำความสะอาดพบว่ามีค่า PI เท่ากับ 1.24 และ 1.92 ตามลำดับ
- แท่งสเตเตอร์ทดสอบแบบ C ก่อนและหลังทำความสะอาดพบว่ามีค่า PI เท่ากับ 0.91 และ 0.94 ตามลำดับ
- แท่งสเตเตอร์ทดสอบแบบ D ก่อนและหลังทำความสะอาดพบว่ามีค่า PI เท่ากับ 1.01 และ 1.35 ตามลำดับ

จากข้างต้น พบว่า ค่า PI เป็นตัวชี้วัดคุณภาพฉนวนที่ดีในกรณีของสิ่งปนเปื้อนที่ผิวฉนวน

2. จากการเปรียบเทียบผลการทดสอบกรณีมีร่องสลีตและไม่มีร่องสลีต พบว่า กราฟกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน, อัตราส่วนตัวเก็บประจุ (C ratio) และ ค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริก ($\tan\delta$) มีค่าใกล้เคียงกันในกรณีของขดลวดสเตเตอร์ A และ B ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าร่องสลีตที่ทำการออกแบบขึ้นไม่มีผลต่อผลการทดสอบในกรณีที่ทำการทดสอบกับขดลวดสเตเตอร์

3. จากผลการทดสอบ พบว่า ขดลวดสเตเตอร์ทดสอบแบบ A และ B และแท่งสเตเตอร์ทดสอบแบบ C และ D มีเส้นกราฟ C ratio และ $\tan\delta$ สูงกว่าระดับที่ผู้เชี่ยวชาญแนะนำ จึงทำให้พบว่าฉนวนที่นำมาทดสอบทั้งหมดมีปัญหาเกิดขึ้นภายในเนื้อฉนวน

4. จากผลการทดสอบของขดลวดสเตเตอร์ A พบว่า มีค่า PI อยู่ในช่วงที่มาตรฐาน IEEE 43 กำหนด แต่มีเส้นกราฟ C ratio และ $\tan\delta$ สูงกว่าระดับที่ผู้เชี่ยวชาญแนะนำ ดังนั้น ในกรณีขดลวดสเตเตอร์ A นี้ จึงเป็นตัวบอกว่า ค่า PI เพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอต่อการประเมินสภาพฉนวนของขดลวดสเตเตอร์ เพราะฉะนั้นควรนำกราฟ C ratio $\tan\delta$ และ PDC มาใช้ประเมินคุณภาพฉนวนร่วมกับ ค่า PI เพื่อให้ได้ผลการประเมินที่มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น

5. จากการเปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่างขดลวดสเตเตอร์ทดสอบ A กับ B และ แท่งสเตเตอร์ทดสอบ C กับ D พบว่า

5.1 กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของขดลวดสเตเตอร์ทดสอบ A มีค่าสูงกว่า B และจากกระแสโพลาริเซชัน (Polarization Current) พบว่าขดลวดสเตเตอร์ทดสอบ A มีกระแสคอนดักชัน (Conduction Current) ต่ำกว่า B , ค่าอัตราส่วนตัวเก็บประจุ (C ratio) ของขดลวดสเตเตอร์ A มีค่าสูงกว่า B ตลอดช่วงความถี่ที่ทำการทดสอบ และค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริก ($\tan\delta$) ของขดลวดสเตเตอร์ทดสอบ A มีค่าสูงกว่า B ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 0.005 ถึง 0.1 Hz ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าฉนวนของขดลวดสเตเตอร์ทดสอบ A มีปัญหาที่เกิดขึ้นจากการสูญเสียจากกระบวนการคอนดักชัน (Conduction) ต่ำกว่าขดลวดสเตเตอร์ทดสอบ B แต่ขดลวดสเตเตอร์ทดสอบ A จะมีปัญหาที่เกิดขึ้นจากกระบวนการโพลาริเซชัน (Polarization) สูงกว่าขดลวดสเตเตอร์ทดสอบ B

5.2 กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของแท่งสเตเตอร์ทดสอบ C มีค่าสูงกว่า D และจากกระแสโพลาริเซชัน (Polarization Current) ของแท่งสเตเตอร์ทดสอบ C มีกระแสคอนดักชัน (Conduction Current) สูงกว่า D , ค่าอัตราส่วนตัวเก็บประจุ (C ratio) ของแท่งสเตเตอร์ทดสอบ C มีค่าสูงกว่า D ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 0.002 ถึง 1 Hz และค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริก ($\tan\delta$) ของแท่งสเตเตอร์ทดสอบ C มีค่าสูงกว่า D ตลอดช่วงความถี่ที่ทำการทดสอบ ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าฉนวนของแท่งสเตเตอร์ทดสอบ C มีปัญหาที่เกิดขึ้นจากกระบวนการคอนดักชัน (Conduction) และโพลาริเซชัน (Polarization) สูงกว่าแท่งสเตเตอร์ทดสอบ D

5.2 ปัญหาที่พบและข้อเสนอแนะ

การทดสอบระบบฉนวนของขดลวดสเตเตอร์ในเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนโดยวิธีการวัดค่ากระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน (Polarization and Depolarization Current) ในห้องปฏิบัติการนั้นเป็นเพียงการทดสอบที่นำขดลวดสเตเตอร์มาทดสอบแยกเพียงชิ้นเดียวเท่านั้นซึ่งต่างกับการทดสอบจริงกับเครื่องจักรกลไฟฟ้าทั้งตัว และยังมีปัจจัยอื่นๆ อีกมากที่มีผลต่อการทดสอบ

เช่น ปัญหาของจุดต่อกราวด์เป็นต้น ซึ่งอาจจะให้ผลการทดสอบที่มีความแตกต่างกันออกไปบ้าง การออกแบบการทดลองเพื่อทำการศึกษาวิเคราะห์ปัญหาและสาเหตุที่เกิดขึ้นกับระบบฉนวนจึงพยายามออกแบบให้ใกล้เคียงกับอุปกรณ์จริงให้มากที่สุด เพื่อให้ผลการทดสอบสามารถใช้เป็นแนวทางเบื้องต้นในการวิเคราะห์ปัญหาและสาเหตุที่เกิดขึ้นกับระบบฉนวนในอุปกรณ์จริงได้ แต่อย่างไรก็ดีควรจะมีการศึกษาอย่างต่อเนื่องโดยทำการทดสอบจากอุปกรณ์จริงก่อน และนำมาแยกทดสอบซ้ำอีกครั้งในห้องปฏิบัติการ เพื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบและนำผลการทดสอบมาปรับใช้กับอุปกรณ์จริงต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] Greg C. Stone, and et al, *Electrical Insulation for Rotating Machines*, 2nd ED, John Wiley & Sons, Inc., 2014.
- [2] สำรวย สังข์สะอาด, *วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง*, พิมพ์ครั้งที่ 3, กรุงเทพมหานคร, 2549.
- [3] นรเศรษฐ พัฒนเดช, *วัสดุวิศวกรรมไฟฟ้า*, พิมพ์ครั้งที่ 3, ห้างหุ้นส่วนจำกัด มิน เซอร์วิส ซัพพลาย, 2557.
- [4] อภิชาติ นิมเทียบ, “เทคนิคตรวจวัดความชื้นของกระดาษฉนวนหม้อแปลงโดยใช้กระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน,” *วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต*, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2552.
- [5] ณ์ัฐพันธ์ อิมโดต และ สุริยันต์ กาขาว, “การศึกษาจุดบกพร่องของฉนวนในเครื่องจักรกลหมุนโดยการทดสอบการปล่อยประจุบางส่วน,” *ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต*, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2550.
- [6] ศุภวัตร น้ำประเสริฐ, “การศึกษาแบบจำลองจุดบกพร่องของฉนวนในเครื่องจักรกลหมุนโดยการทดสอบการปล่อยประจุบางส่วน,” *วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต*, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.
- [7] IEEE Standard 43-2000, Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery.
- [8] IEEE Standard 95-2002, Recommended Practice for Insulation Testing of AC Electric Machinery (2300 V and Above) With High Direct Voltage.
- [9] IEEE Standard 286-2000, Recommended Practice for Measurement of Power Factor Tip-Up of Electric Machinery Stator Coil Insulation.
- [10] S. A. Bhumiwat, “Application of polarizationdepolarisation current (PDC) technique on fault and trouble analysis of stator insulation”, in *CIGRE SC A1 & D1 Joint Colloquium*, Gyeongju, Korea, October 24, 2007, p.79-87.
- [11] 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, p. 1453-1460.
- [12] S. A. Bhumiwat, “Practical experiences on condition assessment of stator insulation using Polarisation / Depolarisation Current technique”, in *CIGRE 2008 Session*, Paris, August 24-29, 2008, pp. D1-210.
- [13] S. A. Bhumiwat, “Insulation Resistance and Polarization of Rotating Machines”, in *Electrical Insulation Conference*, Annapolis, Maryland, June 5-8, 2011.

ภาคผนวก

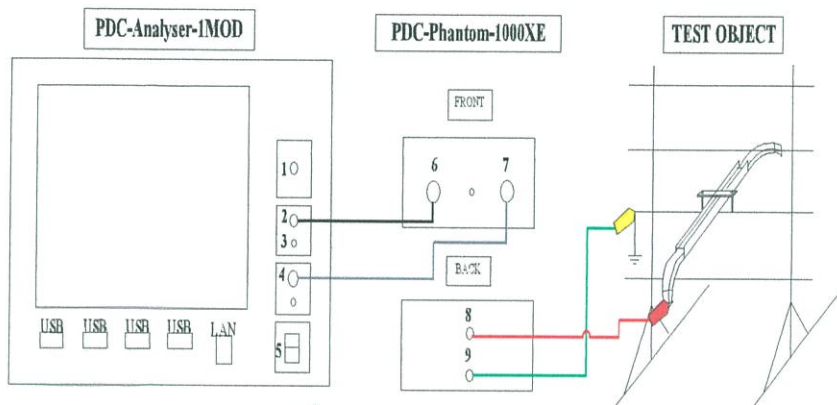
ภาคผนวก ก

ขั้นตอนการทดสอบกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน

ก.1 ขั้นตอนการทดสอบกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน

ขั้นตอนการทดสอบกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันเป็นดังนี้

1) ต่อวงจรทดสอบ

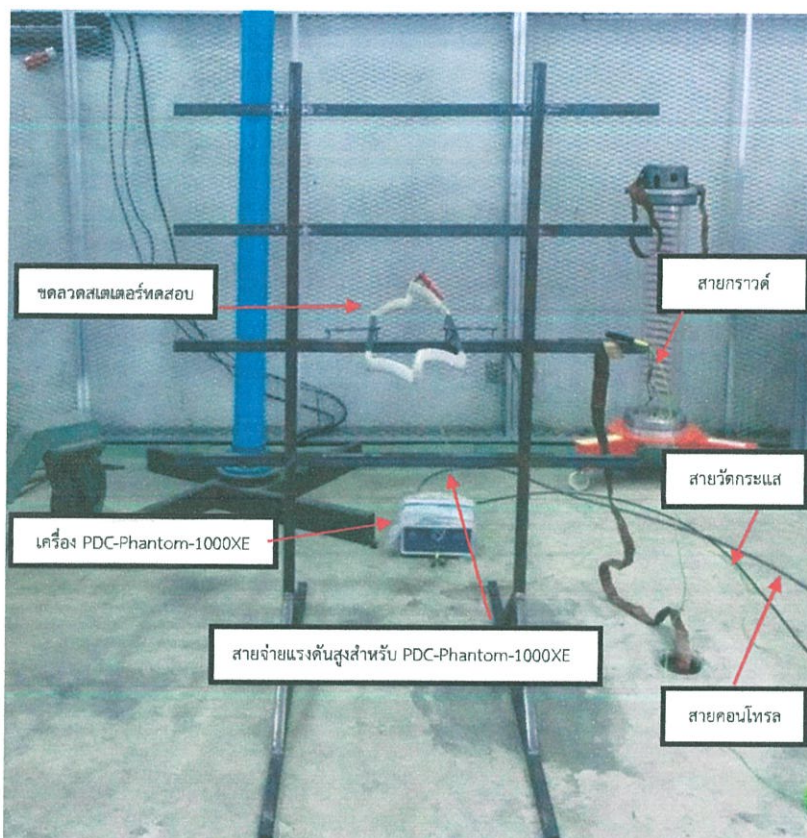


รูปที่ ก.1 การต่อวงจรทดสอบ

สายสีแดง	คือ สายจ่ายแรงดันสูงสำหรับ PDC-Phantom-1000XE
สายสีดำ	คือ สายวัดกระแส (Sensing cable)
สายสีเทา	คือ สายคอนโทรล (Control cable)
สายสีเขียว	คือ สายกราวด์ (Ground wire)



รูปที่ ก.2 PDC-Phantom-1000XE

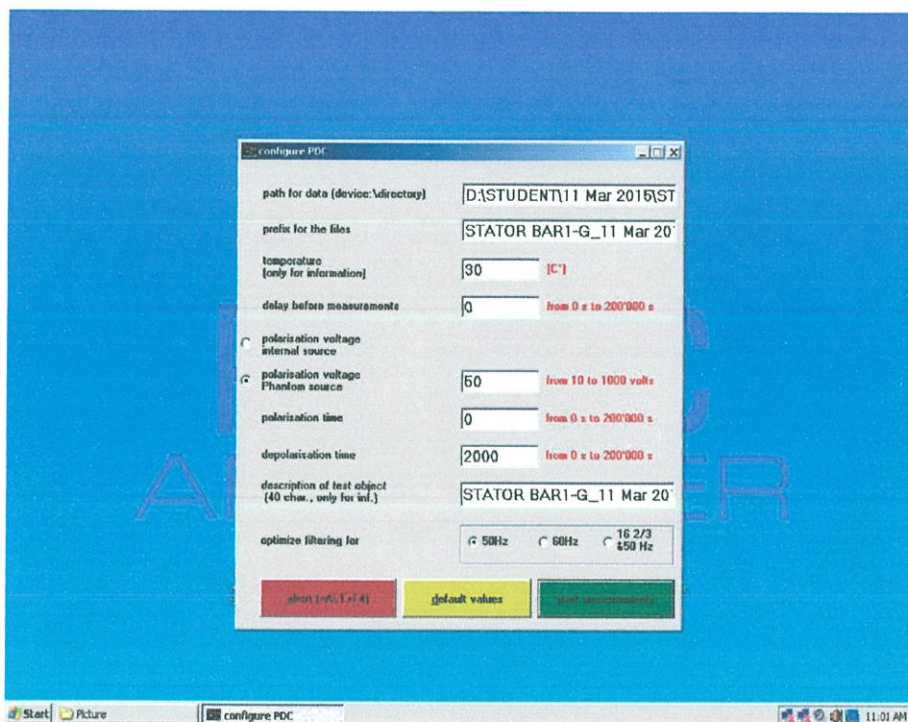


รูปที่ ก.3 การต่อวงจรทดสอบจริง

2) การปรับตั้งค่าต่างๆ ในการทดสอบ

ทำการเปิดโปรแกรม PDC Measurement

- Path for data : กำหนดที่อยู่และตั้งชื่อโฟลเดอร์ในการเก็บบันทึกผลการวัด
- Prefix for the files : ตั้งชื่อไฟล์
- Temperature (Only for information) : อุณหภูมิขณะทำการวัด
- Delay before measurements : ระยะเวลาที่ตั้งไว้ก่อนการวัดเพื่อเป็นเวลาในการดิสชาร์จ
- Polarization Voltage internal source : ใช้แหล่งจ่ายไฟจากเครื่อง PDC-Analyser-1MOD
- Polarization Voltage Phantom source : ใช้แหล่งจ่ายไฟจากเครื่อง PDC-Phantom-1000XE
- Polarization time : เวลาในการโพลาริเซชัน
- Depolarization time : เวลาในการดีโพลาริเซชัน
- Description of test object : คำอธิบายเพิ่มเติมเกี่ยวกับวัตถุทดสอบ
- Optimize filtering for : ความถี่ที่ใช้ในการวัด



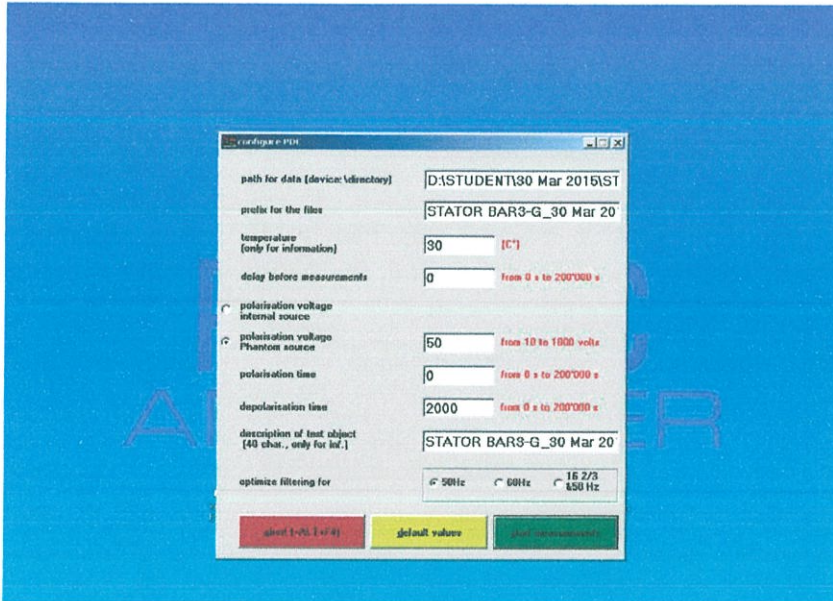
รูปที่ ก.4 แสดงรายการการตั้งค่าต่างๆ สำหรับการทดสอบ

3) ขั้นตอนการทดสอบ

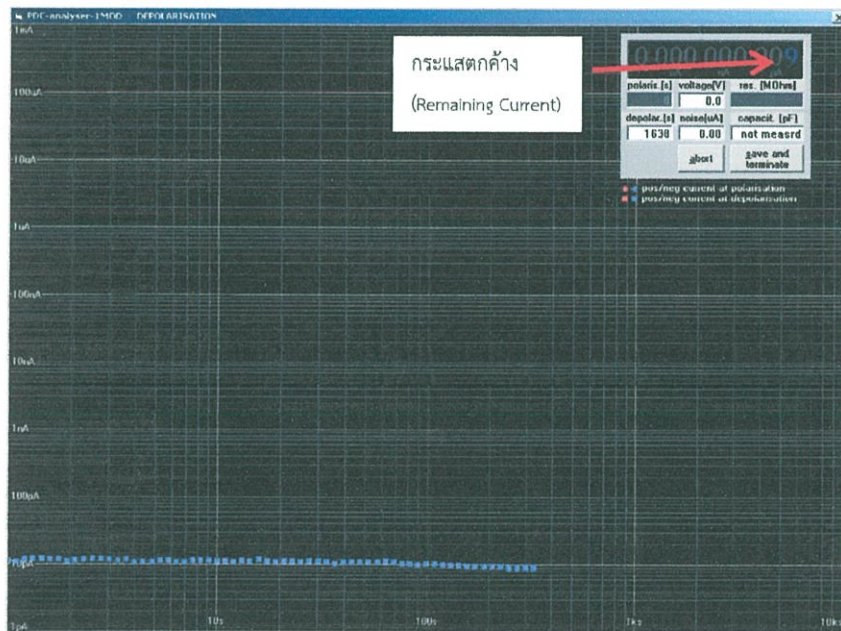
ในการทดสอบมี 3 ขั้นตอน ดังนี้

3.1) ขั้น Initial Measurement

วัตถุประสงค์ของขั้นตอนนี้คือเพื่อดูจุดประสงค์ภายในเนื้องนวนโดยการวัดกระแสตกค้าง (Remaining Current) ขั้นตอนนี้จะทำโดยการตั้งค่าระยะเวลาของการโพลาริเซชันเป็น 0 วินาที หรือกล่าวคือไม่มีการชาร์จประจุไฟฟ้าเข้าไปที่ฉนวน โดยก่อนการทดสอบขั้นถัดไปจะต้องรอจนกว่าค่ากระแสตกค้าง (Remaining Current) หหมดไปหรือมีค่าคงที่ เนื่องจากวงจรที่ใช้ในการทดสอบเป็น วงจรวัดกระแสของฉนวนระหว่างเฟสกับกราวด์ (Phase to Ground Insulation) ดังนั้นจะต้องเลือกที่ช่อง Polarization Voltage Phantom source โดยทำการตั้งค่าเป็นแรงดันไฟฟ้าเป็น 50 โวลต์ ดังรูปที่ ก.5



รูปที่ ก.5 การตั้งค่าก่อนทำการทดสอบขั้น Initial Measurement

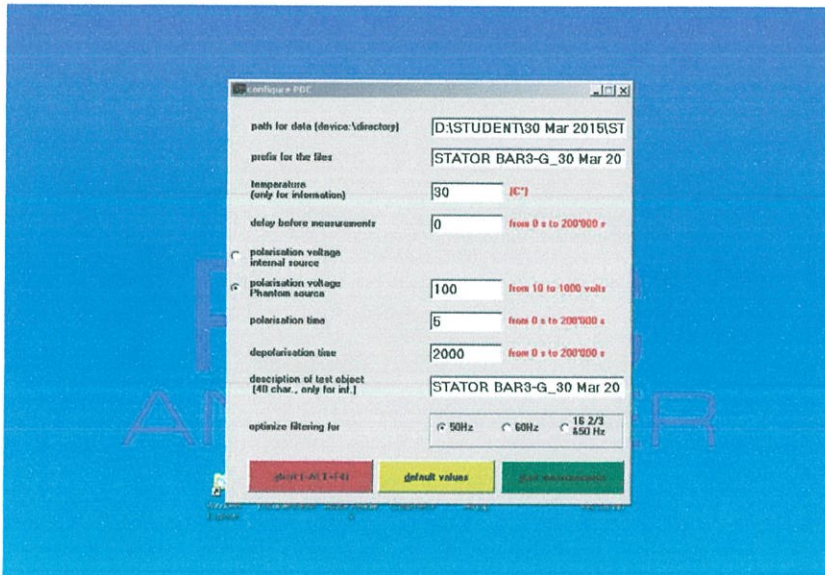


รูปที่ ก.6 การทดสอบขั้น Initial Measurement

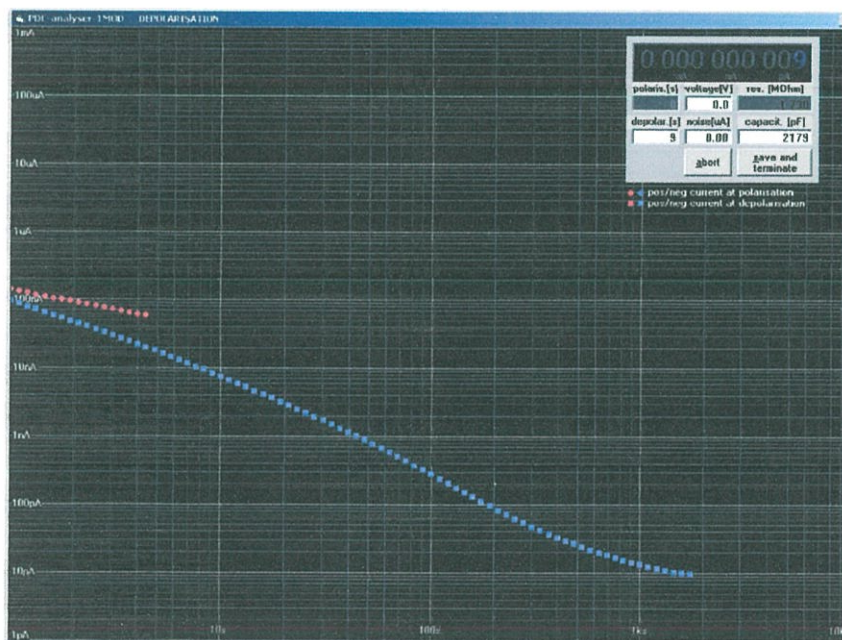
3.2) ชั้น Control Measurement

วัตถุประสงค์ของขั้นตอนนี้คือ เพื่อเป็นการกำหนดแรงดันที่จะป้อนให้กับวัตถุทดสอบเพื่อให้สามารถสังเกตเห็นกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันได้อย่างชัดเจน ซึ่งในขั้นตอนนี้จะทำการ

ป้อนแรงดันและตั้งค่าระยะเวลาการโพลาริเซชันให้มีค่าสั้นๆ เช่น 5 วินาที แล้ววัดค่ากระแสดีโพลาริเซชันขณะดิสชาร์จ แรงดันไฟฟ้าที่แนะนำสำหรับขั้นตอนนี้



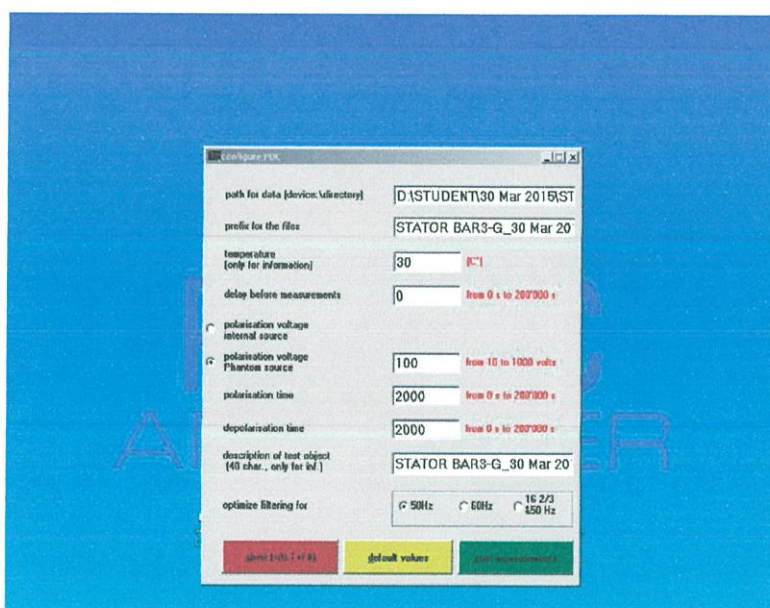
รูปที่ ก.7 การตั้งค่าก่อนทำการทดสอบขั้น Control Measurement



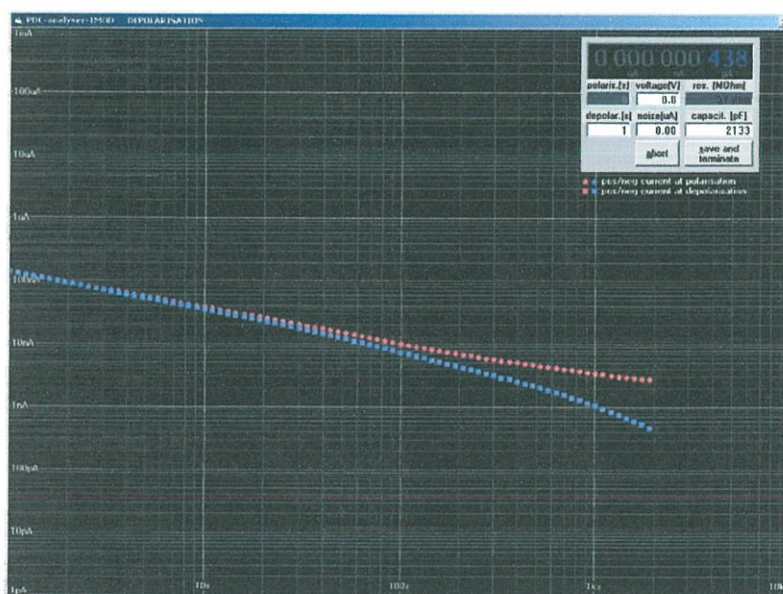
รูปที่ ก.8 การทดสอบขั้น Control Measurement

3.3) ชั้น Main Measurement

เป็นขั้นตอนที่ทำการทดสอบกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของฉนวนและนำผลการทดสอบที่ได้จากขั้นตอนดังกล่าวไปวิเคราะห์ โดยตั้งเวลาการโพลาริเซชันที่เวลา 2000 วินาที และตั้งเวลาการดีโพลาริเซชันที่เวลา 2000 วินาที แล้วกด Start measurement เพื่อทำการวัด



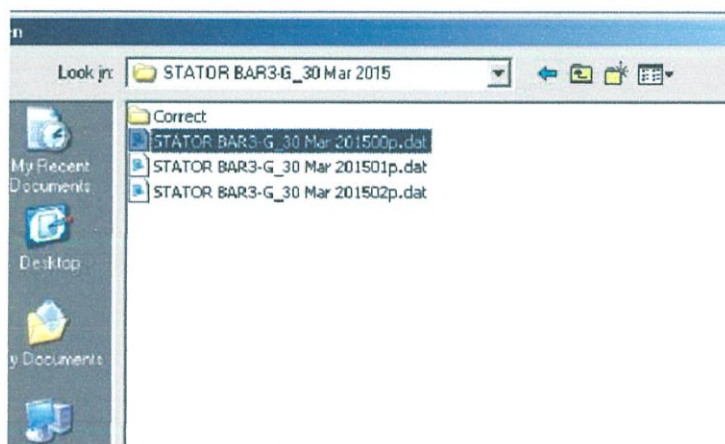
รูปที่ ก.9 การตั้งค่าก่อนทำการทดสอบชั้น Main Measurement



รูปที่ ก.10 การทดสอบชั้น Main Measurement

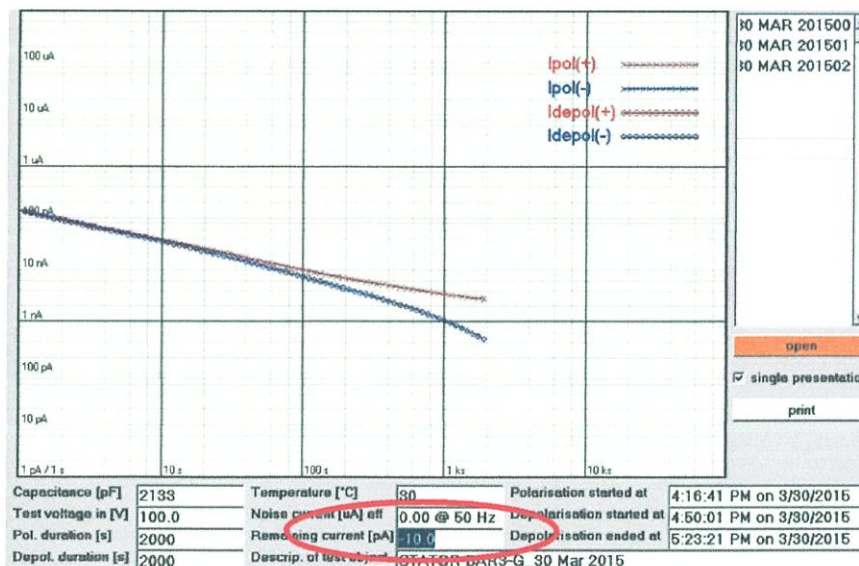
4) การปรับแก้ค่าจากการทดสอบ

หลังจากที่ทำการทดสอบทั้ง 3 ขั้นตอนเครื่องจะทำการบันทึกค่าจากขั้นตอนต่างๆ จากนั้นให้ทำการเปลี่ยนชื่อไฟล์ให้เหมือนกันเพื่อป้องกันความสับสน เช่นดังรูป ก.11 ซึ่ง 00, 01 และ 02 หมายถึงค่าที่ถูกบันทึกจากการทดสอบในขั้นตอน Initial, Control และ Main Measurement ตามลำดับ



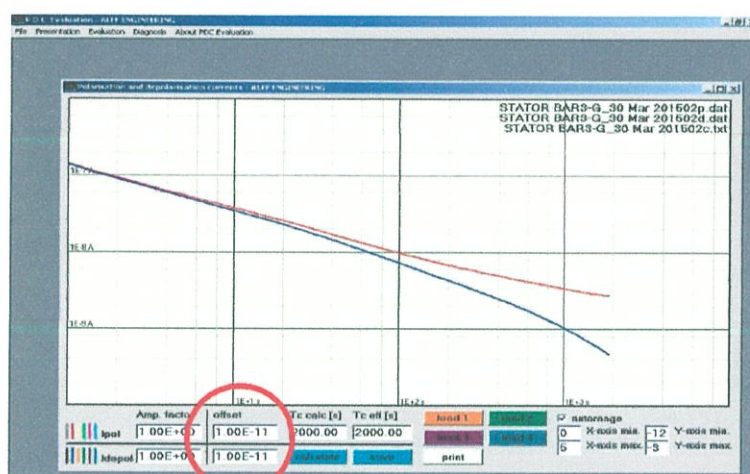
รูปที่ ก.11 ไฟล์ที่ถูกบันทึกจากการทดสอบแต่ละขั้น

จากนั้นทำการเปิดโปรแกรม PDC Evaluation แล้วเปิดไฟล์ของผลการทดสอบในขั้น Main Measurement (ลงท้ายด้วย 02) โดยคลิกที่ปุ่ม Open ทางด้านขวาของรูปที่ ก.12 เพื่อดูค่ากระแสตกค้าง (Remaining Current) ขณะที่ทำการทดสอบ



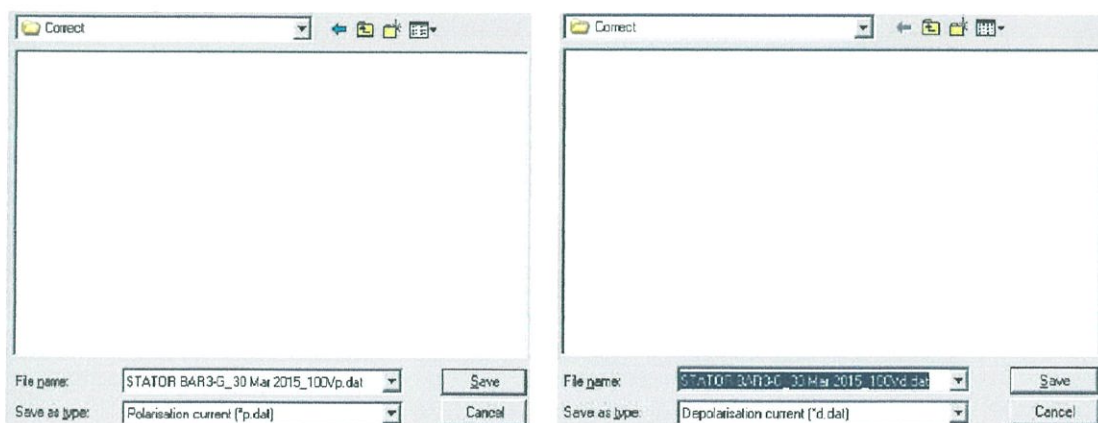
รูปที่ ก.12 แสดงค่ากระแสตกค้าง (Remaining Current)

จากรูปที่ ก.12 จะเห็นว่าค่ากระแสตกค้าง (Remaining Current) มีค่า -10 พิโกแอมแปร์ จากนั้นทำการปรับแก้โดยการเปิดไฟล์ใหม่ที่แถบด้านบนโดยเลือก File>open>เลือกไฟล์ผลการทดสอบ ในชั้น Main Measurement (ลงท้ายด้วย 02) หน้าจอจะแสดงดังรูปที่ ก.13 จากนั้นทำการปรับแก้ค่า โดยการพิมพ์ค่ากระแสตกค้าง (Remaining Current) ลงในช่อง offset ทั้งสองช่อง ซึ่งช่อง offset ค่ากระแสตกค้างทำการป้อนจะเป็น +10 พิโกแอมแปร์ (ให้ใส่หน่วยเป็น E-12 เสมอหลังจากนั้นโปรแกรม จะทำการเปลี่ยนหน่วยให้อัตโนมัติ) จากนั้นกด Calculate ก็จะได้กราฟใหม่หลังจากการปรับแก้



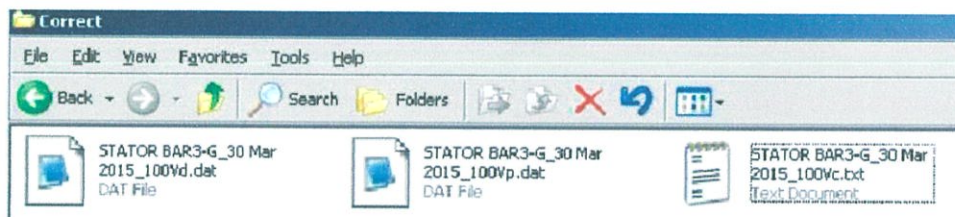
รูปที่ ก.13 การปรับแก้ค่าที่ได้จากการทดสอบ

จากรูปที่ ก.13 ให้ทำการบันทึกข้อมูลหลังจากการปรับแก้ค่าเพื่อนำผลไปวิเคราะห์ โดยบันทึกไว้ในโฟลเดอร์แยกดังรูปที่ ก.14 โดยไฟล์ที่ลงท้ายด้วย p.dat และ d.dat จะหมายถึงผลการทดสอบที่ได้จากการปรับแก้ค่ากระแสตกค้างของกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน ตามลำดับ



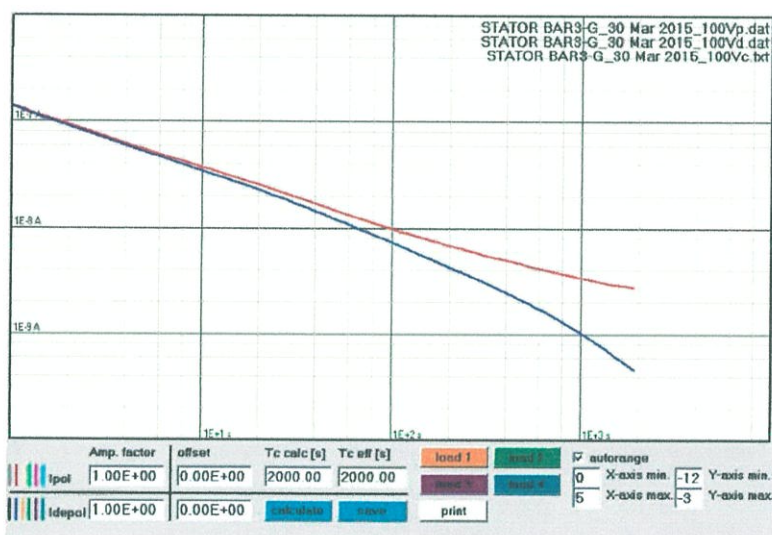
รูปที่ ก.14 การบันทึกไฟล์ของกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันหลังจากทำการปรับแก้ค่า

ต่อมาให้ทำการคัดลอกไฟล์ที่ลงท้าย c.txt ไปใส่ในโพลเดอร์แยกที่ได้สร้างขึ้นมาก่อนหน้านี้ ดังรูปที่ ก.15 แล้วตั้งชื่อให้เหมือนกับอีกสองไฟล์ที่ได้ทำการบันทึกก่อนหน้านี้



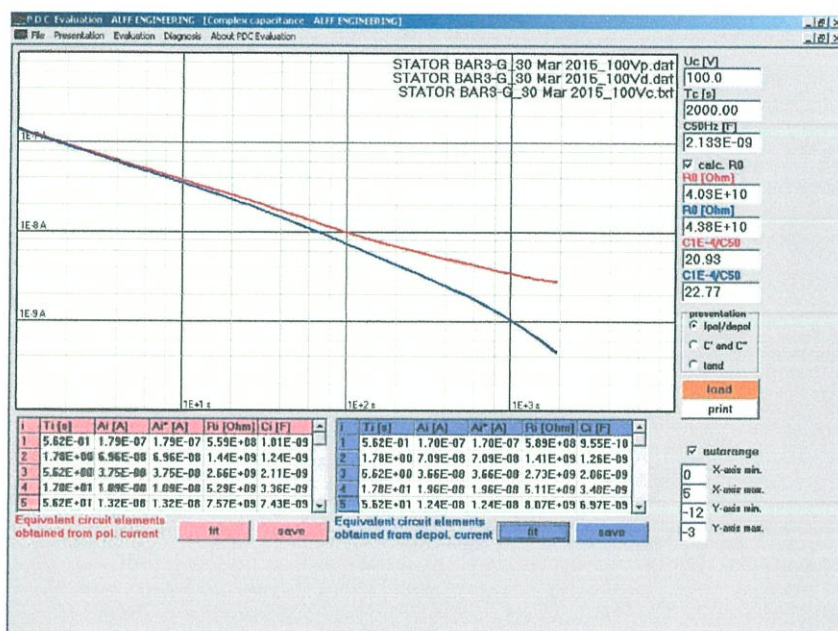
รูปที่ ก.15 การคัดลอกไฟล์

หลังจากการปรับแก้ค่าเรียบร้อยแล้วให้เปิดไฟล์เพื่อแสดงผลโดยคลิกที่ File>open>เลือก โพลเดอร์แยกที่ได้ทำการสร้างไว้>เลือกไฟล์ของกระแสที่ลงท้ายด้วย p.dat จะได้ดังรูปที่ ก.16 ซึ่งจะเป็น การแสดงกราฟของกระแสโพลลาไรเซชันและดีโพลลาไรเซชันที่ได้จากการวัด

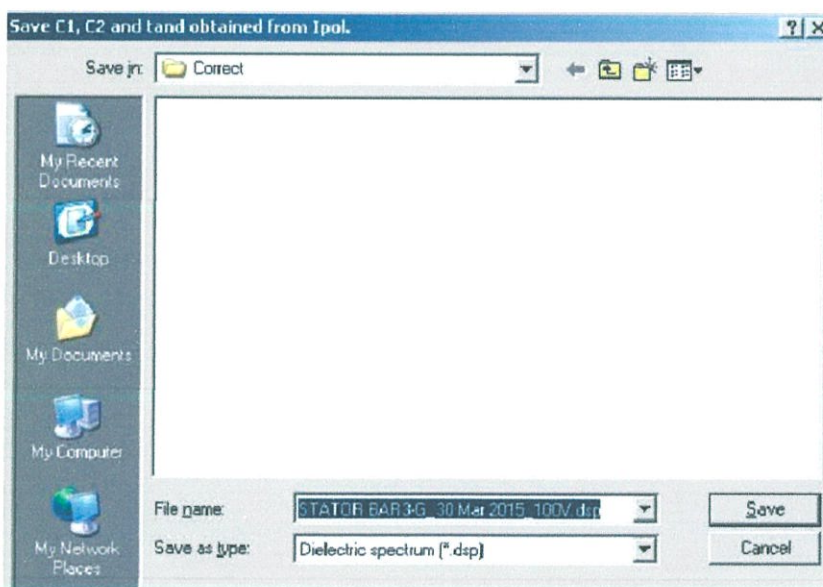


รูปที่ ก.16 กราฟของกระแสโพลลาไรเซชันและดีโพลลาไรเซชันที่ได้จากการทดสอบหลังจากทำการปรับแก้ค่าแล้ว

โปรแกรมสามารถแสดงค่าอัตราส่วนตัวเก็บประจุ (C ratio) และค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริก ($\tan\delta$) โดยคลิกที่แถบด้านบนแล้วเลือก Evaluate>Complex capacitance แล้วทำการบันทึกค่า C ratio และ $\tan\delta$ ที่ได้จากการวัดเพื่อนำไปใช้สำหรับการวิเคราะห์ผลการทดสอบ โดยจากรูปที่ ก.17 ให้คลิกที่ปุ่ม fit ด้านล่างซ้าย จากนั้นคลิกที่ save แล้วทำการบันทึกไฟล์ ดังรูปที่ ก.18

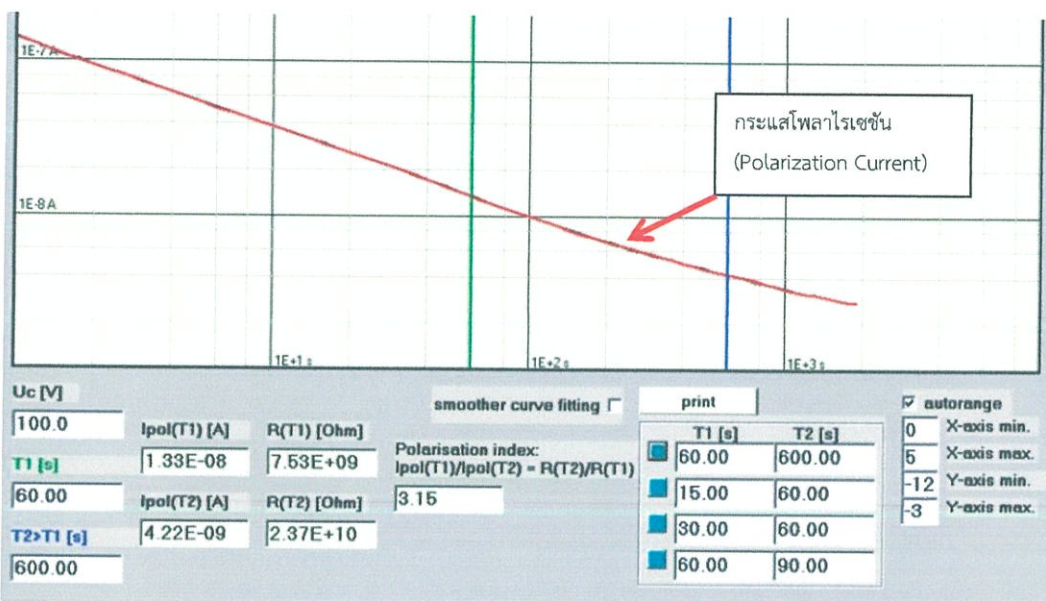


รูปที่ ก.17 แสดงค่าที่ได้จากการ fit



รูปที่ ก.18 การบันทึกไฟล์ของค่า C ratio และ tanδ ที่ได้จากการทดสอบ

นอกจากนี้แล้วโปรแกรมยังสามารถแสดงค่าความต้านทานฉนวน (Insulation Resistance) และค่าดัชนีการเกิดโพลาไรเซชัน (Polarization Index) โดยคลิกที่แถบด้านบนแล้วเลือก Evaluate>Polarization index จะแสดงได้ดังรูปที่ ก.19



รูปที่ ก.19 แสดงค่าความต้านทานฉนวน (Insulation Resistance) และค่าดัชนีการเกิดโพลาริเซชัน (Polarization Index)

ภาคผนวก ข
การทดสอบฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนโดยวิธีอื่นๆ

การทดสอบฉนวนเป็นส่วนหนึ่งของการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ถ้าหากความต้านทานฉนวนมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานที่กำหนด จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้ารั่วไหลผ่านฉนวนเกินกว่าค่าที่ฉนวนรับได้และยังมีผลทำให้ขดลวดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเกิดความร้อนขึ้นและดังนั้นฉนวนจึงถูกทำลายฉนวนในที่สุด ดังนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าวจึงควรมีการทดสอบฉนวนของเครื่องจักรกลหมุน

ข.1 การทดสอบความต้านทานฉนวน (Insulation Resistance Test , IR)

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

$$R_t = \frac{V}{I_t} \quad (ข1)$$

โดยที่ V คือ แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ในการทดสอบ
 I_t คือ ผลรวมของกระแสที่วัดได้หลังจากเวลา t
 R_t คือ ค่าความต้านทานฉนวนที่เวลาใดๆ

ตารางที่ ข.1 ค่าแรงดันทดสอบความต้านทานฉนวนตามมาตรฐาน

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

ข.2 การทดสอบค่าดัชนีโพลาไรเซชัน (Polarization Index Test : PI)

การทดสอบค่าดัชนีโพลาไรเซชันหรือค่าดัชนีการเกิดขั้ว คืออัตราส่วนของความต้านทานฉนวน (IR) ที่วัดได้หลังจากจ่ายแรงดันไฟฟ้าเป็นระยะเวลา 10 นาที (R_{10}) ต่อ 1 นาที (R_1) ดังสมการที่ ข2

$$PI = \frac{R_{10}}{R_1} \quad (\text{ข2})$$



รูปที่ ข.1 เครื่องวัดความต้านทานฉนวน

ตารางที่ ข.2 สภาพของฉนวนโดยประเมินจากค่า PI

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

ตารางที่ ข.3 ค่า PI ต่ำสุดของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับและกระแสดตรง (ตามมาตรฐาน IEEE 43-2000)

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

ข.3 การทดสอบความแข็งแรงเชิงกำลังไฟฟ้าของฉนวน (High Potential Test)

จะแยกเป็นการทดสอบความแข็งแรงเชิงกำลังไฟฟ้าของฉนวนด้วยไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสดตรงและกระแสสลับ ดังนี้

Hipot ย่อมาจาก High potential คือ การทดสอบฉนวนด้วยไฟฟ้าแรงดันสูง จะเป็นการทดสอบแบบทำลาย โดยมีวัตถุประสงค์ของการทดสอบเพื่อตรวจสอบว่ามีข้อบกพร่องใดๆ เกิดขึ้นในฉนวนหรือไม่ หลักการคือถ้าหากฉนวนของขดลวดที่ทำการทดสอบมีจุดบกพร่องเมื่อทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงสูงเข้าไปให้กับขดลวดจะทำให้เกิดการเบรกดาวน์ขึ้นตรงจุดที่มีข้อบกพร่อง ซึ่งโดยปกติแล้วการทดสอบค่าความแข็งแรงเชิงกำลังไฟฟ้าของฉนวนสามารถประเมินผลการทดสอบโดยดูได้จากการทดสอบโดยตรงได้เลย กล่าวคือถ้าหากฉนวนของขดลวดอยู่ในสภาพที่ดีขดลวดนั้นก็จะสามารถทนแรงดันทดสอบได้และไม่เกิดการเบรกดาวน์ขึ้นในขณะที่ทำการทดสอบ แต่ทางกลับกันหากฉนวนของขดลวดอยู่ในสภาพที่เสื่อมสภาพอย่างรุนแรงขดลวดนั้นก็ไม่สามารถทนแรงดันทดสอบได้และเกิดการเบรกดาวน์ขึ้นในขณะที่ทำการทดสอบ

ดังนั้น ข้อเสียของการทดสอบด้วยวิธีนี้คือ การที่เราจ่ายแรงดันทดสอบให้กับขดลวดสูงเกินกว่าระดับแรงดันใช้งานปกติส่งผลให้ฉนวนเกิดการเจาะทะลุ ทำให้ขดลวดนั้นไม่สามารถนำไปใช้งานได้ ซึ่งจะต้องทำการเปลี่ยนหรือพันฉนวนของขดลวดใหม่ส่งผลเสียให้เกิดความสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายและจะเกิดความล่าช้าในการซ่อมบำรุง

แรงดันที่ใช้ในการทดสอบจะแบ่งเป็นสองกรณีดังนี้

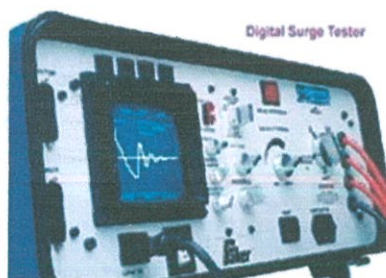
$$\text{แรงดันทดสอบในกรณี AC Hipot} = (2E+1) \text{ kV} \quad (\text{ข3})$$

$$\begin{aligned} \text{แรงดันทดสอบในกรณี DC Hipot} &= 1.7 \times \text{แรงดันทดสอบในกรณี AC Hipot} \\ &= 1.7 \times (2E+1) \text{ kV} \end{aligned} \quad (\text{ข4})$$

โดยที่ E คือ พิกัดแรงดันของขดลวดสเตเตอร์ (kV)

ข.4 การทดสอบเปรียบเทียบเสิร์จ (Surge Test)

เป็นการทดสอบความสมดุลของค่าอิมพีแดนซ์ของฉนวนด้วยวิธีการเปรียบเทียบเสิร์จ ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบกราฟของแรงดัน 2 กราฟที่เกิดขึ้นจากการจ่ายและหยุดจ่ายกระแสที่เป็นพัลส์ไปยังขดลวด 2 ชุด ในกรณีที่ถ้าหากค่าอิมพีแดนซ์มีความสมมาตรหรือมีค่าไม่แตกต่างกันกราฟของแรงดันที่ได้ก็จะซ้อนกัน แต่ถ้าหากขดลวดบางชุดที่มีความบกพร่อง เช่น เกิดการลัดวงจรหรือฉนวนของแกนเหล็กบางส่วนมีการเสื่อมสภาพกราฟของแรงดันที่ได้ก็จะแยกออกจากกันซึ่งผลการทดสอบจะถูกตรวจจับด้วยออสซิลโลสโคป ชนิด 2 เส้น (Dual trace) ดังรูปที่ ข.2



รูปที่ ข.2 เครื่องดิจิทัลออสซิลโลสโคปที่ใช้ทดสอบเปรียบเทียบเสิร์จ

ตาราง ข.4 การอ่านค่ากราฟการทดสอบ Surge Comparison

การทดสอบ ลักษณะของคลื่น	การต่อขดลวดแบบสตาร์	การต่อขดลวดแบบเดลต้า
ตี		
สัตวงจร ระหว่างขด		
สัตวงจร ระหว่างตัวนำ		
ต่อ ตัวนำกลับขั้ว		

ข.5 การทดสอบค่าตัวเก็บประจุ (Capacitance) และ ค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริก (Dielectric Dissipation factor, $\tan\delta$ หรือ DDF)

การวัดค่าตัวเก็บประจุของขดลวดในบางครั้งสามารถทำให้รู้ถึงปัญหาที่เกิดขึ้นกับฉนวนได้ เช่น การเสื่อมคุณภาพเนื่องจากความร้อน หรือ การอึดตัวของฉนวนเนื่องจากความชื้น เป็นต้น

ค่าตัวประกอบพลังงานสูญเสีย (Dissipation factor) และตัวประกอบกำลัง (Power factor) เป็นตัวบ่งชี้การสูญเสียภายในเนื้อฉนวนเนื่องจากกระบวนการเสื่อมสภาพบางอย่างของฉนวน เช่น การเสื่อมสภาพความร้อนและดูดซับความชื้น ซึ่งเมื่อเวลาผ่านไปหากมีการเพิ่มขึ้นของความสูญเสียเหล่านี้ก็จะทำให้เกิดปัญหาขึ้นกับฉนวน

ค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกเป็นคุณสมบัติของวัสดุฉนวนใดๆ โดยคุณสมบัติของฉนวนที่ดีนั้นฉนวนจะต้องทำหน้าที่เป็นตัวเก็บประจุที่ดีนั้นจะต้องมีค่า $\tan\delta$ น้อย

ภาคผนวก ค
ขั้นตอนการทำ Resin Rich(RR) และ
Vacuum Pressure Impregnation (VPI)

ค.1 ขั้นตอนการทำ Resin Rich (RR) มีดังนี้

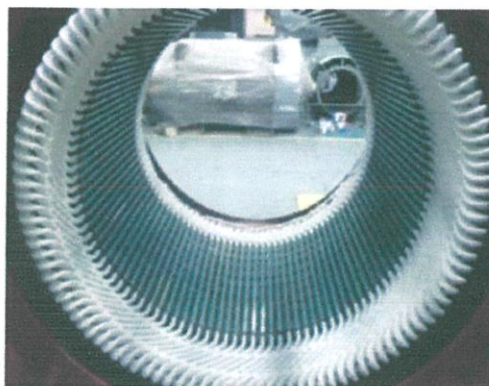
- 1) นำขดลวดที่ผ่านการพันฉนวนมาเข้าเครื่อง Hot Press
- 2) เครื่อง Hot Press จะให้ความร้อนแก่ขดลวดจนถึงอุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เมื่อถึงอุณหภูมิดังกล่าวน้ำยาอีพ็อกซีเรซิน (Epoxy Resin) ที่อยู่ในฉนวนของขดลวดจะละลายเป็นเรซินเหลว
- 3) ต่อมาเครื่อง Hot Press จะให้ความดันแก่ขดลวดประมาณ 100 บาร์ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง (ซึ่งระยะเวลาและความดันที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับความหนาของชั้นฉนวนของขดลวด) เพื่อให้เรซินเหลวละลายเข้าไปเป็นเนื้อเดียวกับฉนวนของขดลวด
- 4) จากนั้นนำขดลวดออกจากเครื่อง Hot Press และปล่อยให้ขดลวดเย็นตัวลงเพื่อร่อนนำไปประกอบเข้ากับสเตเตอร์ของเครื่องจักรกลสำหรับนำไปใช้งาน



รูปที่ ค.1 เครื่อง Hot Press

ค.2 ขั้นตอนการทำ Vacuum Pressure Impregnation (VPI) มีดังนี้

- 1) การเตรียมเครื่องจักรกลหรือชิ้นส่วนที่จะทำกระบวนการ VPI เป็นการพันฉนวนรอบตัวนำของเครื่องจักรกลที่ผลิตใหม่หรือเครื่องจักรกลที่เสีย หรือเกิดปัญหาในการทำงานขึ้นและได้มีการพันขดลวดใหม่อีกครั้งดังรูปที่ ค.2



รูปที่ ค.2 การพันฉนวนของขดตัวนำของสเตเตอร์

2) นำไปอบเพื่อไล่ความชื้น

หลังจากนั้นนำไปเครื่องจักรกลหรือชิ้นส่วนที่ต้องการทำกระบวนการ Vacuum Pressure Impregnation (VPI) ไปเข้าตู้อบ ดังรูปที่ ค.3 ด้วยอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เพื่อไล่ความชื้นออก หลังจากนั้นนำ เครื่องจักรกลหรือชิ้นส่วนที่อบเสร็จแล้วใส่ลงในถังสำหรับกระบวนการ Vacuum Pressure Impregnation (VPI) ดังรูปที่ ค.4



รูปที่ ค.3 ตู้อบชิ้นงาน



รูปที่ ค.4 ถัง VPI

3) ทำการแวกคัม (Vacuum)

โดยจะแวกคัม (Vacuum) ที่ความดัน 0.2 มิลลิบาร์เป็นเวลา 30 นาทีเพื่อให้ฉนวนเป็นสุญญากาศสำหรับให้น้ำยาอีพ็อกซีเรซิน (Epoxy Resin) สามารถแทรกซึมเข้าไปได้ทุกส่วนของเนื้อฉนวน

4) เติมน้ำยาอีพ็อกซีเรซิน (Epoxy Resin)

จากนั้นเริ่มทำการเติมน้ำยาอีพ็อกซีเรซิน (Epoxy Resin) จากถังเก็บน้ำยาเข้ามาในถัง Vacuum Pressure Impregnation (VPI) โดยผ่านทางท่อเข้ามาด้านข้างของถังดังแสดงในรูปที่ ค.5



รูปที่ ค.5 ถังเก็บน้ำยาอีพ็อกซีเรซิน (Epoxy Resin)

5) รักษาระดับการแวคคัม (Vacuum)

ทำการรักษาระดับการ Vacuum ที่ 0.2 มิลลิบาร์ ต่ออีก 30 นาที

6) อัดความดัน

หลังจากที่เติมน้ำยาอีพ็อกซีเรซิน (Epoxy Resin) เข้ามาในถังแล้วจากนั้นให้ทำการอัดด้วยความดัน 6 บาร์เป็นเวลา 2-6 ชั่วโมงเพื่อช่วยให้น้ำยาสามารถไหลเข้าไปแทรกซึมได้ทั่วทุกส่วนของฉนวน

7) ลดความดันลง

เมื่อครบตามเวลา 2-6 ชั่วโมงแล้วให้ทำการลดความดันลงก่อนที่จะนำน้ำยาอีพ็อกซีเรซิน (Epoxy Resin) ออกจากถัง Vacuum Pressure Impregnation (VPI) เพื่อเตรียมนำน้ำยากลับสู่ถังเก็บน้ำยา

8) ถายน้ำยาอีพ็อกซีเรซิน (Epoxy Resin) กลับสู่ถัง

ทำการถายน้ำยาผ่านท่อออกมาทางด้านข้างของถัง Vacuum Pressure Impregnation (VPI) เพื่อนำน้ำยากลับสู่ถังเก็บน้ำยา

9) นำเครื่องจักรกลหรือชิ้นส่วนที่อยู่ในถังออกจากถัง Vacuum Pressure Impregnation (VPI)

10) อบด้วยความร้อน

นำมาเข้าตู้อบอีกครั้ง ที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง เพื่อป้องกันการจับตัวกันเป็นก้อนของน้ำยาอีพ็อกซีเรซิน (Epoxy Resin)

11) ทิ้งไว้ให้เย็นตัว

ทิ้งไว้ให้เย็นตัวเป็นเวลา 8 ชั่วโมง

12) ทำการทดสอบคุณสมบัติการเป็นฉนวนด้วยวิธีต่างๆ

ขั้นตอนสุดท้ายคือการนำเครื่องจักรกลหรือชิ้นส่วนที่ผ่านกระบวนการ Vacuum Pressure Impregnation (VPI) แล้วมาทดสอบคุณสมบัติการเป็นฉนวนเพื่อดูว่าฉนวนนั้นมีประสิทธิภาพดีขึ้นหรือไม่

การเปรียบเทียบระหว่างกระบวนการ Vacuum Pressure Impregnation (VPI) กับ Resin Rich (RR) จะสามารถแสดงได้ดังตารางที่ ค.1

ตารางที่ ค.1 การเปรียบเทียบระหว่างกระบวนการ Vacuum Pressure Impregnation (VPI) กับ Resin Rich (RR)

	Vacuum Pressure Impregnation (VPI)	Resin Rich (RR)
ข้อดี	1. ช่องว่างอากาศ (Void) ภายในเนื้อฉนวนลดลง 2. โอกาสในการเกิดสล็อตติสซาร์จลดลง 3. สามารถใช้ได้กับขดลวดสเตเตอร์ทั้งส่วนที่อยู่ในร่องและพันร่องสล็อต	1. ค่าใช้จ่ายสูงกว่า Vacuum Pressure Impregnation (VPI)
ข้อเสีย	1. ค่าใช้จ่ายสูง	1. ยังคงเหลือช่องว่างอากาศ (Void) ภายในเนื้อฉนวนอยู่ 2. ไม่สามารถใช้ได้กับขดลวดสเตเตอร์ส่วนที่พันร่องสล็อต

ภาคผนวก ง
บทความวิชาการ

การศึกษาเทคนิคการวินิจฉัยฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนแรงดันสูง
THE STUDY OF INSULATION DIAGNOSTIC TECHNIQUE OF HIGH VOLTAGE
ROTATING MACHINE

ภูริชญ์ บุรพสาย์ณห์ ภูวนศวรร์ สร้อยสุนทร ยศธร กฤษณามระ

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าจอมจุกุณฑาคารลาดกระบัง

1 ซอย ดลองกรุง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-329-8000 ต่อ 3925 Email:giggs_goodboy@hotmail.com

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้ทำการศึกษาการทดสอบฉนวนของขดลวดสเตเตอร์ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยวิธีการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน (Polarization and Depolarization Current, PDC) ด้วยเครื่อง PDC-Analyser-1 MOD วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการทดสอบมี 3 ประเภท คือ ขดลวดสเตเตอร์ที่ไม่ผ่านกระบวนการพันฉนวนแบบ Hot press มีพิกัดแรงดัน 6.6 kV จำนวน 1 ขด ขดลวดสเตเตอร์ที่ผ่านกระบวนการพันฉนวนแบบ Hot press มีพิกัดแรงดัน 6.6 kV จำนวน 1 ขด และขดสเตเตอร์ที่ตัดจากขดลวดที่ผ่านกระบวนการพันฉนวนแบบ Hot press มีพิกัดแรงดัน 11 kV จำนวน 2 แท่ง การทดสอบแบ่งเป็น 3 กรณี คือ ทดสอบแบบมีร่องสล๊อตก่อนทำความสะอาดขดทดสอบ ทดสอบแบบมีร่องสล๊อตหลังทำความสะอาดขดทดสอบ และทดสอบแบบไม่มีร่องสล๊อต ผลจากการทดสอบพบว่า ความเปลี่ยนแปลงของฉนวนมีผลทำให้ค่าองค์ประกอบกระแสคอนดักชันของกระแสโพลาริเซชันเพิ่มขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้ค่าดัชนีโพลาริเซชัน (Polarization Index, PI) ลดลง นอกจากนี้ควรนำค่าอัตราส่วนตัวเก็บประจุ (C ratio) ค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก (Dielectric Dissipation Factor, DDF หรือ $\tan\delta$) และกราฟกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน (Polarization and Depolarization Current, PDC) ควรถูกนำมาใช้ในการประเมินสภาพฉนวนร่วมกันเพื่อให้ได้ผลการประเมินสภาพฉนวนที่มีความถูกต้องมากขึ้น

คำสำคัญ: กระแสโพลาริเซชัน, กระแสดีโพลาริเซชัน, ร่องสล๊อต

Abstract

A paper studied about the insulation testing of stator windings in a generator by using Polarization and Depolarization Current (PDC) method. Test objects were divided into three types such as the stator coil developing by Hot press process with rated 6.6 kV, The stator coil which not developing by Hot Press process with rated 6.6 kV and the stator bar which developing by Hot Press process with rated 11 kV. PDC-

Analysers-1MOD was used to measure the currents in this experiment. The tests were divided into three cases for each test objects as follows. In the first case, the stator coil testing was done with the modeled slot before cleaning. In the second case the stator coil testing was achieved with the modeled slot after cleaning, and the third case the stator coil testing without the modeled slot. As the results, the contaminant on the stator coil increased the conduction of current component in the polarization current and decreased the Polarization Index (PI). Besides, the Capacitance ratio (C ratio), Dielectric Dissipation Factor (DDF or $\tan\delta$) and the Polarization and Depolarization Current should be considered to precisely assess a condition of insulation

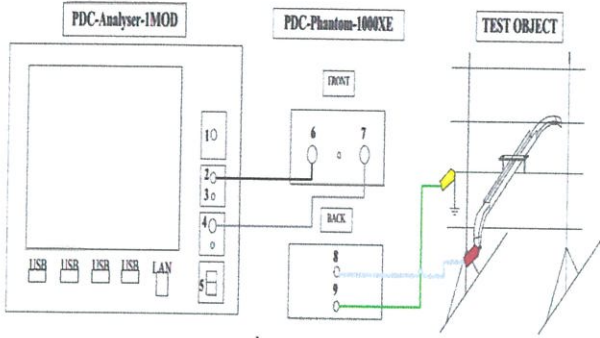
Keywords: Polarization Current, Depolarization Current

1. บทนำ

ปัจจุบันนี้วิธีการประเมินสภาพฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี เช่น การทดสอบค่าความต้านทานฉนวน (Insulation resistance Test) การทดสอบหาค่าดัชนีการมีขั้ว (Polarization Index Test) การทดสอบความแข็งแรงเชิงกำลังไฟฟ้าของฉนวน (High Potential Test) เป็นต้น ซึ่งวิธีการประเมินสภาพฉนวนดังกล่าวข้างต้นเป็นที่ยอมรับและถูกใช้งานมายาวนาน แต่เนื่องด้วยวิธีการดังกล่าวมีข้อเสียคือ แรงดันที่ใช้ในการทดสอบมีค่าสูง ดังนั้น การประเมินสภาพฉนวนด้วยวิธีการข้างต้นอาจส่งผลให้ฉนวนบอบช้ำหรือเกิดความเสียหายได้ ดังนั้นจึงมีแนวคิดที่จะศึกษาการทำงาน ระบบฉนวน และวิธีการประเมินสภาพฉนวนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยการทดสอบกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน (Polarization and Depolarization Current) ซึ่งเป็นวิธีการประเมินสภาพฉนวนที่มีข้อดีคือใช้แรงดันในการทดสอบต่ำ ดังนั้น จึงไม่ทำให้ฉนวนบอบช้ำหรือเกิดความเสียหายจากแรงดันทดสอบ อีกทั้งวิธีการประเมินสภาพฉนวนโดยการทดสอบกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันสามารถจำแนกปัญหาที่เกิดจากกระบวนการมีขั้วของฉนวน (polarization problems) และกระบวนการนำไฟฟ้าของฉนวน (conduction problem) ได้

2.การออกแบบการทดสอบ

2.1 วงจรทดสอบ



รูปที่ 1 วงจรทดสอบ

2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

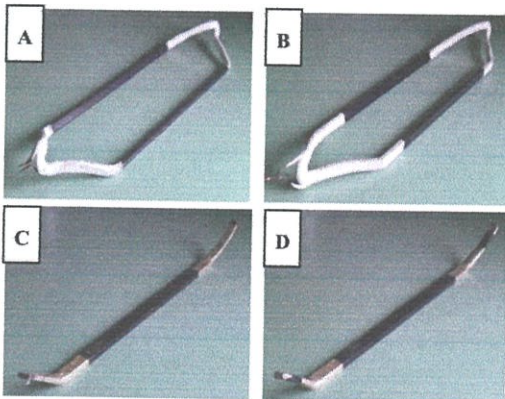
2.2.1 ขดลวดสเตเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ

1) ขดลวดสเตเตอร์ทดสอบ A มีพิกัดแรงดัน 6.6 kV เป็นขดลวดที่ถูกทำขึ้นไว้ใช้งานชั่วคราว ดังนั้น ขดลวดจึงไม่ได้ผ่านกระบวนการพันฉนวนด้วยวิธี Hot Press และด้วยเหตุนี้จึงทำให้ขดลวดสเตเตอร์ A มีช่องอากาศภายในเนื้อฉนวน

2) ขดลวดสเตเตอร์ทดสอบ B มีพิกัดแรงดัน 6.6 kV เป็นขดลวดที่ผ่านกระบวนการพันฉนวนด้วยวิธี Hot Press

3) แท่งสเตเตอร์ทดสอบ C มีพิกัดแรงดัน 11 kV เป็นส่วนที่ถูกตัดครึ่งจากขดลวดที่ผ่านกระบวนการพันฉนวนด้วยวิธี Hot Press และจากการตรวจสอบพบว่าแท่งสเตเตอร์ C มีรอยขีดข่วนเล็กน้อยเนื่องจากการจำลองกรณีศึกษาเพื่อทำการทดสอบการเกิดคิสซาร์บางส่วน

4) แท่งสเตเตอร์ทดสอบ D มีพิกัดแรงดัน 11 kV เป็นส่วนที่ถูกตัดครึ่งจากขดลวดที่ผ่านกระบวนการพันฉนวนด้วยวิธี Hot Press และจากการตรวจสอบพบว่าแท่งสเตเตอร์ D มีรอยขีดข่วนเล็กน้อยเนื่องจากการจำลองกรณีศึกษาเพื่อทำการทดสอบการเกิดคิสซาร์บางส่วน



รูปที่ 2 ขดลวดที่ใช้ในการทดสอบ

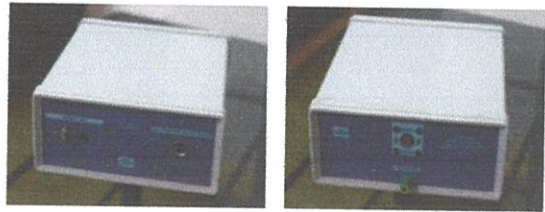
2.2.2 เครื่องมือที่ใช้วัดและบันทึกค่าต่างๆจากการทดสอบ

1) เครื่อง PDC-Analyser-1MOD



รูปที่ 3 เครื่อง PDC-Analyser-1MOD

2) เครื่อง PDC-Phantom-1000XE



รูปที่ 4 เครื่อง PDC-Phantom-1000XE

2.2.3 เครื่องมือที่ทำหน้าที่ทางจรรยาไฟฟ้า

1) แท่นทดสอบ

ทำการออกแบบแท่นทดสอบสำหรับวางวัตถุทดสอบด้วยโปรแกรม Solid work และประกอบสร้างแท่นทดสอบด้วยเหล็กกล่องและเหล็กฉาก

2) ร่องสลีตจำลอง

เนื่องจากการทดสอบนั้นจะเป็นการทดสอบฉนวนที่เทียบกับกราวด์ การที่นำร่องสลีตจำลองมาใช้นั้นเพื่อที่จะเพิ่มพื้นที่ของฉนวนเทียบกราวด์

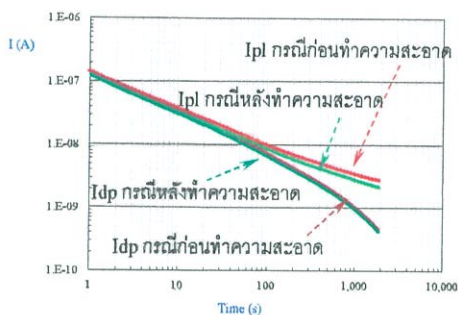


รูปที่ 5 แท่นทดสอบ(ซ้าย) ร่องสลีตจำลอง(ขวา)

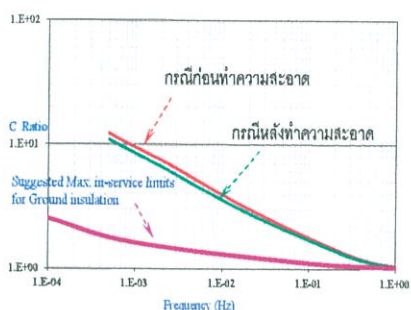
3. การทดสอบและผลการทดสอบ

การเปรียบเทียบระหว่างกรณีมีร่องสลีตก่อนและหลังทำ ความสะอาด ยกตัวอย่างการทดสอบแบบ A และ B

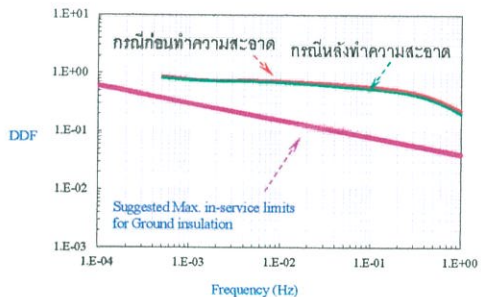
1) ขดลวดทดสอบแบบ A



รูปที่ 6 ค่ากระแสก่อนและหลังทำความสะอาด

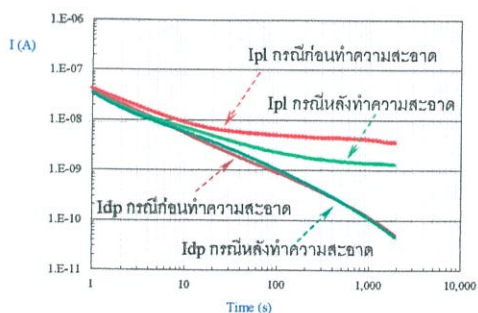


รูปที่ 7 ค่าอัตราส่วนตัวเก็บประจุก่อนและหลังทำความสะอาด

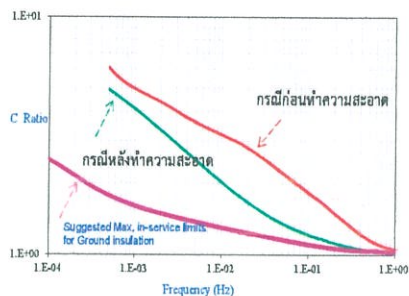


รูปที่ 8 ค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริกก่อนและหลังทำความสะอาด

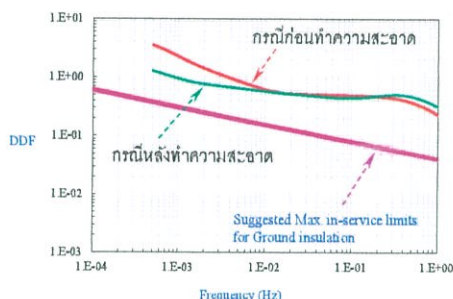
2) ขดลวดทดสอบแบบ B



รูปที่ 9 ค่ากระแสก่อนและหลังทำความสะอาด



รูปที่ 10 ค่าอัตราส่วนตัวเก็บประจุก่อนและหลังทำความสะอาด



รูปที่ 11 ค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริกก่อนและหลังทำความสะอาด

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบระหว่างกรณีก่อนทำความสะอาดและหลังทำความสะอาด การทดสอบแบบ A และ B

	ขดลวดทดสอบแบบ A		ขดลวดทดสอบแบบ B	
	ก่อนทำความสะอาด	หลังทำความสะอาด	ก่อนทำความสะอาด	หลังทำความสะอาด
แรงดันที่ใช้ในการทดสอบ (V)	100	100	100	100
ค่าตัวเก็บประจุ (pF)	2133	2125	705	801
C Ratio ผ่นพรีโซ	ไม่ผ่าน	ไม่ผ่าน	ไม่ผ่าน	ไม่ผ่าน
DDF ผ่นพรีโซ	ไม่ผ่าน	ไม่ผ่าน	ไม่ผ่าน	ไม่ผ่าน
Insulation Resistance ที่ 15 วินาที (GΩ)	3.34	3.87	13.60	17.70
Insulation Resistance ที่ 60 วินาที (GΩ)	7.53	8.61	19.10	36.00
Insulation Resistance ที่ 600 วินาที (GΩ)	23.70	28.30	23.70	69.20
Polarization Index ระหว่าง 600 กับ 60 วินาที	3.15	3.29	1.24	1.92

4. การสรุปผล

ผลการศึกษาระบบบนของขดลวดสเตเตอร์ทดสอบ โดยวิธีการวัดกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชัน (Polarization and Depolarization Current) สามารถสรุปได้คือ จากการทดสอบวัตถุทดสอบ 4 แบบ ได้แก่ ขดลวดสเตเตอร์ทดสอบ A, ขดลวดสเตเตอร์ทดสอบ B, แท่งสเตเตอร์ทดสอบ C และแท่งสเตเตอร์ทดสอบ D พบว่าค่าความชื้น

หรือสิ่งสกปรกต่างๆ ที่เกิดกับผิวฉนวนภายนอกจะส่งผลต่อกราฟของ กระแส โพล่าไรเซชัน (Polarization Current) โดยค่ากระแส โพล่าไรเซชันที่ทำการวัดนี้จะประกอบด้วยกระแสสองส่วนคือ กระแส ดูดซับ (Absorption Current) และ กระแสคอนดักชัน (Conduction Current) ที่เกิดจากการสูญเสียของกระบวนการคอนดักชันซึ่งจะเป็นตัว บ่งบอกถึงปัญหาที่เกิดขึ้นเนื่องจากสิ่งแปลกปลอมหรือสิ่งสกปรกที่ผิวของ ฉนวน โดยจากการทดสอบพบว่าในกรณีก่อนทำความสะอาดขดลวด สเตเตอร์ทดสอบค่ากระแสโพล่าไรเซชันที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงแล้วเข้าสู่ สภาวะคงตัวเร็วกว่าการทดสอบในกรณีหลังทำความสะอาดขดลวด สเตเตอร์หรือกล่าวคือ ในกรณีหลังทำความสะอาดนั้นค่ากระแส โพล่าไรเซชันมีองค์ประกอบของกระแสคอนดักชัน (Conduction Current) ต่ำกว่าในกรณีก่อนทำความสะอาด ดังนั้น จึงทำให้กราฟของ กระแสโพล่าไรเซชันเข้าสู่สภาวะคงตัวช้ากว่า ซึ่งจะสัมพันธ์กับการ ทดสอบการหาค่าดัชนีการเกิด โพล่าไรเซชัน (Polarization Index) หรือค่า PI โดยจากผลการทดสอบ

- ขดลวดสเตเตอร์ทดสอบแบบ A ก่อนและหลังทำความสะอาดพบว่ามีค่า PI เท่ากับ 3.15 และ 3.29 ตามลำดับ
- ขดลวดสเตเตอร์ทดสอบแบบ B ก่อนและหลังทำความสะอาดพบว่ามีค่า PI เท่ากับ 1.24 และ 1.92 ตามลำดับ
- แท่งสเตเตอร์ทดสอบแบบ C ก่อนและหลังทำความสะอาดพบว่ามีค่า PI เท่ากับ 0.91 และ 0.94 ตามลำดับ
- แท่งสเตเตอร์ทดสอบแบบ D ก่อนและหลังทำความสะอาดพบว่ามีค่า PI เท่ากับ 1.01 และ 1.35 ตามลำดับ

ตามมาตรฐาน IEEE 43 ได้กำหนดไว้ว่า ค่าดัชนีการเกิด โพล่าไรเซชัน (Polarization Index) ของฉนวนที่ดีต้องมีค่าอยู่ระหว่าง 2-6 แต่ถ้าหากค่า PI ต่ำกว่า 2 แสดงว่าฉนวนอาจมีสิ่งสกปรกหรือมีความชื้นแต่ไม่สามารถบอกได้ว่าความชื้นที่เกิดขึ้นนั้นเกิดที่ผิวหรือภายในของฉนวน

ดังนั้นจึงต้องมีการ วัดค่าอัตราส่วนตัวเก็บประจุ (C ratio) ซึ่ง เครื่องมือวัด PDC-Analyser-IMOD ก็จะทำการวัด โดยที่ค่า C ratio นี้จะเป็นตัวบ่งบอกว่าฉนวนนั้นมีปัญหาที่เกิดขึ้นภายในเนื้อฉนวนหรือไม่ โดยถ้าหากขดลวดสเตเตอร์ทดสอบมีค่า C ratio สูงกว่า 1 แสดงว่า ฉนวน อาจมีปัญหาเช่น จากความชื้นภายในเนื้อฉนวน , จากผลของปฏิกิริยาเคมี จากการเกิดการปล่อยประจุบางส่วน เป็นต้น ซึ่งล้วนเป็นปัญหาที่เกิดขึ้น ภายในเนื้อฉนวนทั้งสิ้น จากผลการทดสอบพบว่าขดลวดสเตเตอร์ ทดสอบแบบ A B C และ D ทุกกรณีค่า C ratio มีค่าสูงเกินกว่าค่าที่ยอมรับ ได้ตามที่ผู้เชี่ยวชาญแนะนำ ดังนั้นหมายความว่าฉนวนของขดลวด สเตเตอร์ที่นำมาทดสอบทั้งหมดมีปัญหาเกิดขึ้นจากการสูญเสียจาก กระบวนการ โพล่าไรเซชันที่เป็นตัวบ่งบอกถึงปัญหาที่เกิดขึ้นภายใน โมเลกุลของเนื้อฉนวน

และเครื่องมือวัด PDC-Analyser-IMOD ยังสามารถวัดค่า ความสูญเสียไดอิเล็กตริก ($\tan\delta$) หรือ DDF ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกว่า ฉนวนนั้นมีสภาพดีหรือแย่มากและเหมาะสมที่จะนำมาใช้งานหรือไม่ ซึ่งค่า DDF นี้จะสัมพันธ์กับกราฟกระแสและค่า C ratio จากผลการทดสอบ พบว่าขดลวดสเตเตอร์ทดสอบแบบ A B C และ D ทุกกรณีมีค่า $\tan\delta$ หรือ DDF สูงเกินกว่าค่าที่ยอมรับ ได้ตามที่ผู้เชี่ยวชาญแนะนำ ดังนั้น หมายความว่าฉนวนของขดลวดสเตเตอร์ที่นำมาทดสอบทั้งหมดนั้น มี คุณภาพไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้งาน

5. กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยการช่วย จากหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งต้องขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นรเศรษฐ พัฒนเดช และผู้เชี่ยวชาญศาสตราจารย์ ดร.พีรฤทธิ ยุทธโกวิท อาจารย์ที่ปรึกษา รวมไปถึงคุณปุณณวีร์ ฉายศิริ ที่คอยดูแลเอาใจใส่อย่าง ใกล้ชิดเสมอมา ให้ข้อเสนอแนะและข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อ โครงการมาด้วยดีตลอด และได้กรุณาตรวจแก้ไข ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงทุกคน โดยเฉพาะนางสาว พัชรี ทองอินตะ ที่ช่วยแก้ปัญหาด้วยดีมาโดยตลอด

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] ณัฐพันธ์ อิ่มโคด และ สุริยันต์ กาขาว, "การศึกษาจุดบกพร่อง ของฉนวนในเครื่องจักรกลหมุนโดยการทดสอบการปล่อย ประจุบางส่วน," ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้า คุนทหารลาดกระบัง, 2550.
- [2] IEEE Standard 43-2000, Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery.
- [3] S. A. Bhumiwat, "Application of polarization depolarisation current (PDC) technique on fault and trouble analysis of stator insulation", in CIGRE SC A1 & D1 Joint Colloquium, Gyeongju, Korea, October 24, 2007, p.79-87.
- [4] S. A. Bhumiwat, "Practical experiences on condition assessment of statorinsulation using Polarisation / Depolarisation Current technique", in CIGRE 2008 Session, Paris, August 24-29, 2008, pp. D1-210.
- [5] S. A. Bhumiwat, "Insulation Resistance and Polarization of Rotating Machines", in Electrical Insulation Conference, Annapolis, Maryland, June 5-8, 2011.

ประวัติผู้เขียน



นายภูริชญ์ บูรพสายัณห์ เกิดเมื่อวันที่ 2 มิถุนายน พ.ศ.2535 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนนวมินทราชินูทิศเตรียมอุดมศึกษาน้อมเกล้า เข้าศึกษาที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2554
ฝึกงานที่ : บริษัท เจริญชัยหม้อแปลงไฟฟ้า จำกัด



นายภูวนศวรร สร้อยสุนทร เกิดเมื่อวันที่ 23 กรกฎาคม พ.ศ.2535 ที่จังหวัดระยอง สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนสิงห์สมุทร เข้าศึกษาที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2554
ฝึกงานที่ : บริษัท ผลิตไฟฟ้า จำกัด (มหาชน) โรงไฟฟ้าระยอง



นายยศธร กฤษณามระ เกิดเมื่อวันที่ 7 กรกฎาคม พ.ศ.2536 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนบดินทร์เดชา (สิงห์ สิงหเสนี) ๒ เข้าศึกษาที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2554
ฝึกงานที่ : บริษัท เยอรมัน เอนจิเนียริง จำกัด