การจัดการความรู้เพื่อวินิจฉัยรูปแบบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง

KNOWLEDGE MANAGEMENT FOR PARTIAL DISCHARGE PATTERNS OF HIGH VOLTAGE EQUIPMENT

โดย

นายทัตเทพ แก้วกิ่ง

นายธนภพ หอมเพชร

นายธนานพ สมลือแสน

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2558

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การจัดการความรู้เพื่อวินิจฉัยรูปแบบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง

KNOWLEDGE MANAGEMENT FOR PARTIAL DISCHARGE PATTERNS OF HIGH VOLTAGE EQUIPMENT

T144324

โดย

นายทัตเทพ แก้วกิ่ง

นายธนภพ หอมเพชร

นายธนานพ สมลือแสน

วพ.
ท343ก
2558

สจพ.
เลขทะเบียน 144324
วัน.เดือน.ปี 09 พ.ย. 2559

b.18817314
i.

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2558

KNOWLEDGE MANAGEMENT FOR PARTIAL DISCHARGE PATTERNS OF HIGH VOLTAGE EQUIPMENT

THATTHEP KAEWKING
THANAPOP HORMPHET
THANANOP SOMLUESAEN

THE DISSERTATION 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
2015

ปีการศึกษา 2558

การจัดการความรู้เพื่อวินิจฉัยรูปแบบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง

KNOWLEDGE MANAGEMENT FOR PARTIAL DISCHARGE PATTERNS OF HIGH VOLTAGE EQUIPMENT

โดย

นายทัตเทพ แก้วกิ่ง
นายธนภพ หอมเพชร
นายธนานพ สมลือแสน

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.นรเศรษฐ พัฒนเดช
รศ.ดร.อานันทวัฒน์ คุณากร

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2558

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การจัดการความรู้เพื่อวินิจฉัยรูปแบบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง

ผู้จัดทำ

1.นายทัตเทพ	แก้วกิ่ง
2.นายธนภพ	หอมเพชร
3.นายธนานพ	สมลือแสน

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.นรเศรษฐ พัฒนเดช)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.อานันทวัฒน์ คุณากร)

การจัดการความรู้เพื่อนวินิจฉัยรูปแบบการเกิดดีสชาร์จบางส่วน ของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง

นายทัตเทพ แก้วกิ่ง
นายธนภพ หอมเพชร
นายธนานพ สมลือแสน
รศ.ดร.นรเศรษฐ พัฒนเดช อาจารย์ที่ปรึกษา
รศ.ดร.อานันทวัฒน์ คุณากร อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2558

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอการศึกษาโครงสร้างและรูปแบบการเสื่อมสภาพของบุชชิ่งชนิด OIP (Oil Impregnated Paper) ในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยทดสอบการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge : PD), ค่าแฟคเตอร์กำลังสูญเสีย (Dissipation Factor), ค่า Dielectric response แบบ PDC (Polarization and Depolarization Current) และแบบ FDS (Frequency Domain Spectroscopy) ร่วมกับการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (EGAT) สำหรับบุชชิ่ง OIP จำนวน 14 ลูก ในการทดสอบ โดย 12 ลูก เป็นของบริษัทแห่งหนึ่ง และ 2 ลูก เป็นของห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง แล้วนำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบกัน พบว่าการทดสอบแต่ละวิธีมีผลการทดสอบที่สอดคล้องกัน โดยผลการทดสอบและผลวิเคราะห์ถูกนำเสนออยู่ในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์นี้สามารถนำไปเป็นฐานข้อมูลทางวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง และข้อมูลในการวิเคราะห์ผลการทดสอบบุชชิ่งต่อไป

Knowledge management for partial discharge patterns of high voltage equipment

Mr.Thatthep Kaewking
Mr.Thanapop Hormphet
Mr.Thananop Somluesaen
Assoc.Prof.Dr.NorasagePattanadechAdvisor
Assoc.Prof.Dr.AnantawatKunakorn Advisor

Abstract

This dissertation presents studies deterioration for OIP (Oil Impregnated Paper) bushings in an electrical power system by testing of the partial discharge (PD), the dissipation factor, the resistance, the polarization and depolarization current (PDC) and the frequency domain spectroscopy (FDS). This work is collaborated with Electricity Generating Authority of Thailand (EGAT). There are 14 OIP bushings under investigation, twelve of them are from manufacturing companies and other two are available in the High Voltage Laboratory of King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang. These tests give satisfactory trends in insulation diagnosis. Test results proposed in this dissertation can be useful in the database development for the OIP bushing condition monitoring.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยการช่วยเหลือจากหลายท่านโดยเฉพาะอย่างยิ่งรองศาสตราจารย์ ดร.นรเศรษฐ พัฒนเดช และรองศาสตราจารย์ ดร.อานันทวัฒน์คุณากร อาจารย์ที่ปรึกษา ที่คอยดูแลเอาใจใส่อย่างใกล้ชิดเสมอมา ให้ข้อแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อโครงงานมาด้วยดีตลอด และได้กรุณาตรวจแก้ไข ปริญญานิพนธ์นี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง คุณสุทัศน์ สุขสกุลปัญญา ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านความรู้และให้เข้าทำการทดสอบบุชชิ่งร่วมกับห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง บางพลี

ขอขอบคุณบริษัท ละมูลวิศวกรรม ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ให้บุชชิ่งขนาด 24 kV และ 33 kV มาใช้ในการศึกษา

ขอขอบคุณบริษัท ทีไอเอส เอ็นจิเนียริ่ง แอนด์เซอร์วิส จำกัด ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ให้ยืมเครื่องวัด PDC มาใช้ในการศึกษา

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ ในห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกคน โดยเฉพาะ นายปิยะพล ถือทอง, นายสุรศักดิ์ น้อยหมอ และนางสาวพัชรี ทองอินต๊ะ ที่ช่วยแก้ปัญหาด้วยดีมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้คณะผู้จัดทำ ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา และครอบครัวซึ่งให้การสนับสนุนในด้านการเงินและให้กำลังใจอีกทั้งเพื่อนๆ พี่ๆ ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านการจัดหาอุปกรณ์ต่างๆ ในการทำโครงงานครั้งนี้จนสำเร็จได้ด้วยดี จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ I

ABSTRACT II

กิตติกรรมประกาศ III

สารบัญ IV

สารบัญรูปภาพ VI

สารบัญตาราง XI

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน 2

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงงาน 2

1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงงาน 2

1.5 แผนการดำเนินงาน 3

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการทำโครงงาน 4

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 5

2.1 ปลอกฉนวนตัวนำแรงดันสูง (Electrical Bushing) 5

2.1.1 ชนิดของบุชชิ่งไฟฟ้า 6

2.1.2 มาตรฐาน Bushing 10

2.1.3 ตัวแปรที่สำคัญในการออกแบบบุชชิ่ง 10

2.1.4 การประยุกต์ใช้บุชชิ่ง 13

2.1.5 อุปกรณ์เสริมที่ใช้ในบุชชิ่ง 15

2.1.6 การทดสอบบุชชิ่ง (Tests on Bushings) 17

2.2 การวัดค่าเก็บประจุ C และแฟกเตอร์ tanδ 19

2.2.1 Schering bridge 19

2.3 การดีสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge) 22

2.3.1 ผลกระทบของการเกิดดีสชาร์จบางส่วน 22

2.3.2 ชนิดของดีสชาร์จบางส่วน (Type of Partial Discharge) 23

2.3.3 วงจรสมมูลของดีสชาร์จบางส่วน 27

2.3.4 สื่อสัญญาณที่ใช้ตรวจจับ PD 29

2.3.5 วงจรพื้นฐานการวัด PD 29

2.3.6 การต่อวงจรระบบวัด PD ในวงจรทดสอบ 32

2.3.7 การปรับเทียบเครื่องตรวจจับ PD ในวงจรทดสอบ 33

2.3.8 การแสดงผลดีสชาร์จบางส่วน 34

2.3.9 เครื่องตรวจจับ PD แบบใช้คอมพิวเตอร์เป็นฐาน 35

2.3.10 การวิเคราะห์รูปแบบการเกิดดีสชาร์จบางส่วน 35

2.4 การวัดกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชัน 40

2.4.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับกระแสโพลาไรเซชันและกระแสดีโพลาไรเซชัน 40

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.4.2 การวัดกระแสโพลาไรเซชันและกระแสดีโพลาไรเซชัน 44

บทที่ 3 การออกแบบวงจรทดสอบ 47

3.1 ออกแบบสร้างฐานบุชชิ่ง 47

3.1.1 การออกแบบฐานรองบุชชิ่ง 47

3.2 การทดสอบที่ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง สจล. 48

3.2.1 บุชชิ่งที่ใช้ในการทดสอบ 48

3.2.2 การทดสอบดีสชาร์จบางส่วน 49

3.2.3 การทดสอบกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชัน 54

3.3 การทดสอบที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง กฟผ. บางพลี 58

3.3.1 บุชชิ่งที่ใช้ในการทดสอบ 58

3.3.2 การทดสอบดีสชาร์จบางส่วน 60

3.3.3 การทดสอบแฟคเตอร์กำลังสูญเสีย 66

3.3.4 การทดสอบกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชัน 68

3.3.5 การทดสอบ Frequency domain spectroscopy 69

บทที่ 4 การทดสอบและผลการทดสอบ 72

4.1 การทดสอบที่ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 72

4.1.1 ออกแบบสร้างโครงเหล็กเพื่อนเป็นฐานวางบุชชิ่ง 72

4.1.2 จำลองและวัดการเกิดดีสชาร์จบางส่วน 72

4.1.3 การทดสอบกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชัน 75

4.2 การทดสอบที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย บางพลี 77

4.2.1 การทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วน 77

4.2.2 การทดสอบกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชัน 98

4.2.3 การทดสอบ FDS 101

4.2.4 การทดสอบแฟคเตอร์กาลังสูญเสีย 111

บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง 113

5.1 สรุปผลการดำเนินโครงการ 113

5.2 ปัญหาที่พบและข้อเสนอแนะ 114

เอกสารอ้างอิง 115

ภาคผนวก 116

ภาคผนวก ก บทความวิชาการ 117

ภาคผนวก ข ขั้นตอนการทดสอบแฟคเตอร์กำลังสญเสีย 122

ภาคผนวก ค ขั้นตอนการทดสอบกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชัน 129

ภาคผนวก ง ขั้นตอนการทดสอบ Frequency domain spectroscopy 142

ประวัติผู้เขียน 148

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 บุชชิ่งขณะติดตั้งกับหม้อแปลงไฟฟ้า	6
2.2 Solid type bushing ขนาด 15 kV และ 25 kV	7
2.3 Oil-impregnated paper bushing ขนาด 115 kV	8
2.4 โครงสร้างภายนอกของบุชชิ่งไฟฟ้าชนิด OIP	9
2.5 Bushing Potential Device	15
2.6 Lapp Test Terminal	16
2.7 วงจร Schering Bridge	19
2.8 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของวงจร Schering Bridge	21
2.9 รูปแบบของดีสชาร์จบางส่วน (PD) แบบต่างๆ	23
2.10 แบบจำลองการเกิดโคโรนาดีสชาร์จ	24
2.11 ลักษณะรูปแบบของฉนวนที่ทำให้เกิดดีสชาร์จตามผิวบางส่วน	25
2.12 ดีสชาร์จภายในเมื่อป้อนแรงดันกระแสสลับ	27
2.13 วงจรสมมูลของวัสดุที่มีโพรงก๊าซและเกิดดีสชาร์จบางส่วนภายใน	28
2.14 วงจรพื้นฐานการวัด PD	30
2.15 รูปคลื่นกระแสและแรงดันทดสอบของ PD	31
2.16 วงจรทดสอบตรวจจับ PD แบบตรง	32
2.17 การปรับเทียบวงจรทดสอบวัด PD	33
2.18 การแสดงผลของ PD	34
2.19 เครื่องตรวจจับ PD โดยใช้คอมพิวเตอร์เป็นฐาน	35
2.20 ผลของโคโรนาดีสชาร์จด้านลบในฉนวนอากาศ	37
2.21 ผลของโคโรนาดีสชาร์จด้านบวกในฉนวนอากาศ	37
2.22 ผลของโคโรนาดีสชาร์จด้านลบในฉนวนน้ำมัน	37
2.23 ผลของโคโรนาดีสชาร์จด้านบวกในฉนวนน้ำมัน	38
2.24 รูปแบบการเกิดดีสชาร์จตามผิวบนผิวของฉนวนไมก้า	38
2.25 ผลของดีสชาร์จตามผิวในอากาศ	38
2.26 ผลของดีสชาร์จตามผิวในน้ำมัน	38
2.27 ผลของดีสชาร์จเนื่องจากฟองอากาศในน้ำมัน	39
2.28 ผลของดีสชาร์จเนื่องจากช่องว่างระหว่างกระดาษฉนวน	39
2.29 ผลของดีสชาร์จเนื่องจากตะกอนโลหะในฉวนน้ำมัน	39
2.30 ผลของดีสชาร์จเนื่องจากการเชื่อมชิ้นส่วนโลหะไม่แน่น	39
2.31 กระบวนการการมีขั้ว หรือโพลาไรเซชัน	40
2.32 โมเมนต์เชิงขั้วทางไฟฟ้าระหว่างประจุทั้งสอง	41
2.33 ระยะเวลาที่ใช้ในการเกิดโพลาไรเซชันทั้ง 5 แบบภายใต้การป้อนแรงดันรูปขั้น	43
2.34 องค์ประกอบของกระแสชาร์จ	44
2.35 กระแสโพลาไรเซชัน และกระแสดีโพลาไรเซชัน	45
2.36 กราฟของกระแสขณะที่จ่ายไฟ (Charging Current)	46

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.37 กราฟของกระแสขณะที่จ่ายไฟ (Charging Current) ของฉนวนที่มีปัญหาจากกระบวนการคอนดักชัน	46
3.1 แบบจำลองโครงเหล็ก	47
3.2 solid bushing พิกัด 24 kV	48
3.3 solid bushing พิกัด 33 kV	48
3.4 Oil impregnated paper bushing พิกัด 123 kV	49
3.5 หม้อแปลงไฟฟ้า พิกัด 40 kVA พิกัดแรงดัน 460 V/75,000 V ความถี่ 50 Hz	49
3.6 ตู้ควบคุมแรงดันไฟฟ้า	50
3.7 ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว 1 nF พิกัด 100 kV ที่ความถี่ 50/60 Hz	50
3.8 OMICRON CPL 542A	51
3.9 OMICRON MPP 600	51
3.10 OMICRON MPD 600	51
3.11 OMICRON MCU 502	52
3.12 OMICRON CAL 542	52
3.13 คอมพิวเตอร์พร้อมโปรแกรม MTRONIX SOFTWARE FOR MPD AND MI	52
3.14 ถังน้ำมัน	53
3.15 น้ำมันหม้อแปลง	53
3.16 วงจรการดีสชาร์จบางส่วน	53
3.17 การต่อวงจรทดสอบดีสชาร์จบางส่วน	54
3.18 เครื่อง PDC-Analyser-1MOD	54
3.19 เครื่อง PDC-Phantom-1000XE	55
3.20 การต่อวงจรทดสอบกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชัน	56
3.21 วงจรทดสอบกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชัน	56
3.22 บุชชิ่งชนิด OIP condenser bushing พิกัด 123 kV	58
3.23 บุชชิ่งชนิด OIP condenser bushing พิกัด 115 kV	59
3.24 OIP condenser bushing พิกัด 25 kV	59
3.25 ตู้ควบคุมแรงดันไฟฟ้า	60
3.26 หม้อแปลงขั้นบันได	60
3.27 ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว	61
3.28 ตัวเก็บประจุมาตรฐาน	61
3.29 โวลเตจดิไวเดอร์	62
3.30 กล่องเครื่องมือวัดดีสชาร์จบางส่วน ยี่ห้อ HIPOTRONICS	62
3.31 คอมพิวเตอร์พร้อมโปรแกรม DDX 9101 Remote Control	63
3.32 ถังน้ำมัน	63
3.33 น้ำมันหม้อแปลง	64
3.34 ชิลด์	64

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.35 วงจรการวัดการเกิดดีสชาร์จบางส่วน	65
3.36 Junction box	66
3.37 เครื่องวัดแฟคเตอร์กาลังสูญเสีย ยี่ห้อ Tettex	66
3.38 วงจรการทดสอบแฟคเตอร์กาลังสูญเสีย (tanδ)	67
3.39 เครื่อง PDC-Analyser-1MOD	68
3.40 วงจรการทดสอบกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชัน	68
3.41 การต่อวงจรทดสอบกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชัน	69
3.42 เครื่อง Dirana	69
3.43 คอมพิวเตอร์	70
3.44 วงจรการทดสอบ Frequency domain spectroscopy	70
3.45 การต่อวงจร Frequency domain spectroscopy	70
3.46 วงจรทดสอบดีสชาร์จบางส่วน และแฟคเตอร์กำลังสูญเสีย	71
4.1 โครงเหล็กสาหรับวางบุชชิ่งขนาด 123 kV	72
4.2 การจำลองดีสชาร์จบางส่วนของบุชชิ่ง 24 kV แบบปกติ	73
4.3 การจำลองดีสชาร์จบางส่วนของบุชชิ่ง 24 kV แบบโคโรนาดีสชาร์จ	73
4.4 การจำลองดีสชาร์จบางส่วนของบุชชิ่ง 24 kV แบบดีสชาร์จตามผิว	73
4.5 การจำลองดีสชาร์จบางส่วนของบุชชิ่ง 33 kV แบบปกติ	74
4.6 การจำลองดีสชาร์จบางส่วนของบุชชิ่ง 33 kV แบบโคโรนาดีสชาร์จ	74
4.7 การจำลองดีสชาร์จบางส่วนของบุชชิ่ง 33 kV แบบดีสชาร์จตามผิว	74
4.8 กราฟกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชันกับเวลาของบุชชิ่ง 33 kV แบบหุ้มฟลอยด์เต็ม	75
4.9 กราฟกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชันกับเวลาของบุชชิ่ง 33 kV หุ้มฟลอยด์ 2/3	76
4.10 กราฟเปรียบเทียบระหว่างทั้งสองกรณี	76
4.11 การทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนของบุชชิ่ง Bushing1	79
4.12 การทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนของบุชชิ่ง Bushing2	81
4.13 การทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนของบุชชิ่ง Bushing3	82
4.14 การทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนของบุชชิ่ง Bushing4	84
4.15 การทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนของบุชชิ่ง Bushing5	85
4.16 การทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนของบุชชิ่ง Bushing6	87
4.17 การทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนของบุชชิ่ง Bushing7	88
4.18 การทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนของบุชชิ่ง Bushing8	90
4.19 การทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนของบุชชิ่ง Bushing9	91
4.20 การทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนของบุชชิ่ง Bushing10	93
4.21 การทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนของบุชชิ่ง Bushing11	95
4.22 การทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนของบุชชิ่ง Bushing12	96
4.23 การทดสอบกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชันของบุชชิ่ง Alstom1	98
4.24 การทดสอบกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชันของบุชชิ่ง Alstom2	98

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.25 การทดสอบกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชันของบุชชิ่ง Bushing1	98
4.26 การทดสอบกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชันของบุชชิ่ง Bushing2	99
4.27 การทดสอบกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชันของบุชชิ่ง Bushing3	99
4.28 การทดสอบกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชันของบุชชิ่ง Bushing4	99
4.29 การทดสอบกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชันของบุชชิ่ง Bushing5	100
4.30 การทดสอบกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชันของบุชชิ่ง Bushing6	100
4.31 กราฟการทดสอบความเป็นฉนวนในรูปแบบโดเมนต์ความถี่ (FDS) ของ Alstom1	101
4.32 กราฟการทดสอบความเป็นฉนวนในรูปแบบโดเมนต์ความถี่ (FDS) ของ Alstom2	102
4.33 กราฟการทดสอบความเป็นฉนวนในรูปแบบโดเมนต์ความถี่ (FDS) ระหว่าง Alstom1 กับ Alstom2	103
4.34 กราฟการทดสอบความเป็นฉนวนในรูปแบบโดเมนต์ความถี่ (FDS) ของ Bushing1	104
4.35 กราฟการทดสอบความเป็นฉนวนในรูปแบบโดเมนต์ความถี่ (FDS) ของ Bushing2	105
4.36 กราฟการทดสอบความเป็นฉนวนในรูปแบบโดเมนต์ความถี่ (FDS) ของ Bushing3	106
4.37 กราฟการทดสอบความเป็นฉนวนในรูปแบบโดเมนต์ความถี่ (FDS) ของ Bushing4	107
4.38 กราฟการทดสอบความเป็นฉนวนในรูปแบบโดเมนต์ความถี่ (FDS) ของ Bushing5	108
4.39 กราฟการทดสอบความเป็นฉนวนในรูปแบบโดเมนต์ความถี่ (FDS) ของ Bushing6	109
ข.1 เครื่อง Tettex 2840 High Precision C and Tanδ Measuring Bridge	123
ข.2 แผงด้านหน้าเครื่อง Tettex 2840 High Precision C and Tanδ Measuring Bridge	123
ข.3 แผงด้านหลังเครื่อง Tettex 2840 High Precision C and Tanδ Measuring Bridge	124
ข.4 หน้าหลังสำหรับการปรับค่าต่างๆ	125
ข.5 หน้าต่างหลัก	125
ข.6 หน้าต่าง DUT Info	126
ข.7 Textbox สำหรับใส่ข้อมูล	127
ข.8 หน้าต่างสำหรับกำหนดค่าที่ให้แสดงผล	127
ข.9 วงจรการวัดแฟคเตอร์กำลังสูญเสีย	128
ข.10 ผลการวัดแฟคเตอร์กำลังสูญเสีย	128
ค.1 การต่อวงจรทดสอบ	130
ค.2 วงจรทดสอบ PDC	130
ค.3 วงจรการทดสอบกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชัน	132
ค.4 การต่อวงจร PDC	132
ค.5 แสดงรายการการตั้งค่าต่างๆ สำหรับการทดสอบ	133
ค.6 การตั้งค่าก่อนทำการทดสอบขั้น Initial Measurement	134
ค.7 การทดสอบขั้น Initial Measurement	135
ค.8 การตั้งค่าก่อนทำการทดสอบขั้น Control Measurement	135
ค.9 การทดสอบขั้น Control Measurement	136
ค.10 การตั้งค่าก่อนทำการทดสอบขั้น Main Measurement	136

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
ค.11 การทดสอบขั้น Main Measurement	137
ค.12 ไฟล์ที่ถูกบันทึกจากการทดสอบแต่ละขั้น	137
ค.13 แสดงค่ากระแสรตกค้าง (Remaining Current)	138
ค.14 การปรับแก้ค่าที่ได้จากการทดสอบ	138
ค.15 การบันทึกไฟล์ของกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชันหลังจากทำการปรับแก้ค่า	139
ค.16 การคัดลอกไฟล์	139
ค.17 กราฟของกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชันที่ได้จากการทดสอบหลังจากทำการปรับแก้ค่าแล้ว	140
ค.18 แสดงค่าที่ได้จากการ fit	140
ค.19 การบันทึกไฟล์ของค่า C ratio และ tanδ ที่ได้จากการทดสอบ	141
ค.20 แสดงค่าความต้านทานฉนวน (Insulation Resistance) และค่าดัชนีการเกิดโพลาไรเซชัน (Polarization Index)	141
ง.1 ด้านหน้าเครื่อง DIRANA	143
ง.2 ด้านหลังเครื่อง DIRANA	143
ง.3 การต่อวงจรการทดสอบ frequency domain spectroscopy	144
ง.4 วงจรการทดสอบ frequency domain spectroscopy	144
ง.5 การต่อสายด้านหลังเครื่อง DIRANA	145
ง.6 แทบ Measurements	145
ง.7 ตั้งค่าSettings ที่ Measurement Configuration	146
ง.8 สถานะการทดสอบ	146
ง.9 ผลการทดสอบ	147

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ลำดับขั้นตอนการทำวิจัย	3
2.1 Correction Factor สำหรับการติดตั้งบุชชิ่งที่ระดับความสูงมากกว่า 1000 เมตร	14
2.2 ระยะ creepage โดยแบ่งระดับของการปนเปื้อนเป็น 4 ระดับ	14
2.3 พิกัดกระแสและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ Draw-Lead Conductor	16
2.4 รูปแบบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนในสภาวะต่างๆ	36
4.1 ผลการทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนของ บุชชิ่ง Alstom1	77
4.2 ผลการทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนของ บุชชิ่ง Alstom2	78
4.3 ผลการเกิดดีสชาร์จบางส่วนของ Alstom1 และ Alstom2 สาหรับทุกแรงดันทดสอบ	79
4.4 ผลการทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนของ บุชชิ่ง Bushing1	80
4.5 ผลการทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนของ บุชชิ่ง Bushing2	81
4.6 ผลการทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนของ บุชชิ่ง Bushing3	82
4.7 ผลการเกิดดีสชาร์จบางส่วนของ Bushing1 - Bushing3 สาหรับทุกแรงดันทดสอบ	83
4.8 ผลการทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนของ บุชชิ่ง Bushing4	84
4.9 ผลการทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนของ บุชชิ่ง Bushing5	86
4.10 ผลการทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนของ บุชชิ่ง Bushing6	87
4.11 ผลการเกิดดีสชาร์จบางส่วนของ Bushing4 – Bushing6 สาหรับทุกแรงดันทดสอบ	88
4.12 ผลการทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนของ บุชชิ่ง Bushing7	89
4.13 ผลการทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนของ บุชชิ่ง Bushing8	90
4.14 ผลการทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนของ บุชชิ่ง Bushing9	92
4.15 ผลการเกิดดีสชาร์จบางส่วนของ Bushing7 – Bushing9 สาหรับทุกแรงดันทดสอบ	92
4.16 ผลการทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนของ บุชชิ่ง Bushing10	94
4.17 ผลการทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนของ บุชชิ่ง Bushing11	95
4.18 ผลการทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนของ บุชชิ่ง Bushing12	97
4.19 ผลการทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนของ บุชชิ่ง Bushing12	97
4.20 ค่าแฟคเตอร์กาลังสูญเสีย, ค่าความเก็บประจุ, ค่าความต้านทาน และค่าอิมพิแดนซ์ ที่ความถี่ 50 Hz	111
4.21 ค่าแฟคเตอร์กาลังสูญเสีย ค่าความเก็บประจุ และค่ากระแส ที่แรงดันต่างๆ ที่ความถี่ 50 Hz ของบุชชิ่ง Alstom1	111
4.22 ค่าแฟคเตอร์กาลังสูญเสีย ค่าความเก็บประจุ และค่ากระแส ที่แรงดันต่างๆ ที่ความถี่ 50 Hz ของบุชชิ่ง Alstom2	112

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ปัจจุบันปลอกฉนวนนำสาย (Bushing) เป็นส่วนประกอบที่สำคัญอย่างยิ่งของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์เชื่อมต่อสายไฟแรงสูงจากขดลวดภายในหม้อแปลงไฟฟ้าออกสู่ภายนอก เพื่อป้องกันการเบรกดาวน์ระหว่างตัวนำกับตัวถังของหม้อแปลงไฟฟ้า เพราะฉะนั้นคุณภาพของบุชชิ่งจึงเป็นสิ่งที่ต้องพิจารณา คุณภาพของบุชชิ่งสามารถสังเกตได้จากพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ (Power factor : PF), ค่าแฟคเตอร์กำลังสูญเสีย ($\tan\delta$) ค่าการเกิดดีสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge : PD), ค่า Dielectric response แบบ PDC (Polarization Depolarization Current) และแบบ FDS (Frequency Domain Spectroscopy) เป็นต้น โดยพารามิเตอร์เหล่านี้ได้จากการทดสอบหรือการวัด และทำการประเมินโดยอ้างอิงตามมาตรฐาน หากบุชชิ่งมีคุณสมบัติไม่ได้ตามที่มาตรฐานกำหนด เมื่อนำไปใช้งานบุชชิ่งอาจเกิดการชำรุดเสียหาย และส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อหม้อแปลงไฟฟ้า ดังนั้นการดูแลรักษา และการตรวจสอบบุชชิ่งอยู่เป็นประจำจึงเป็นสิ่งที่จำเป็น

การทดสอบหาความบกพร่องของบุชชิ่งมีหลายวิธี วิธีการทดสอบดีสชาร์จบางส่วนเป็นวิธีที่มีคุณภาพวิธีหนึ่งที่ช่วยในการวิเคราะห์หาสาเหตุของความเสื่อมสภาพ ซึ่งการดีสชาร์จบางส่วน คือการเบรกดาวน์ที่ไม่สมบูรณ์เนื่องจากพลังงานที่ทำให้เกิดการดีสชาร์จนั้นไม่มากพอที่ทำให้ฉนวนเบรกดาวน์สมบูรณ์ได้ ซึ่งการดีสชาร์จทำให้ฉนวนเริ่มเสื่อมสภาพ และนำไปสู่การเบรกดาวน์สมบูรณ์ในที่สุด วิธีการทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนสามารถทำได้หลายวิธี แต่ละวิธีมีข้อดีและข้อเสียต่างกัน เช่น การทดสอบแบบ Conventional (ตามมาตรฐาน IEC-60270, IEC-60137) ซึ่งบอกผลเฉพาะขนาดของดีสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้น ส่วนการทดสอบแบบ Nonconventional เช่น UHF และ Acoustic โดยบอกเฉพาะตำแหน่งที่เกิดการดีสชาร์จบางส่วน แต่ไม่สามารถบอกขนาดได้ ปัจจุบันนิยมทดสอบแบบ Conventional มากกว่าแบบ Nonconventional เพราะมีความแม่นยำและน่าเชื่อถือมากกว่า ปัญหาที่สำคัญประการหนึ่งของการวิเคราะห์การเกิดดีสชาร์จบางส่วนในบุชชิ่ง สามารถตรวจจับการดีสชาร์จบางส่วนได้ แต่ไม่สามารถบอกได้ว่าเกิดจากสาเหตุใด เนื่องจากยังขาดบุคคลที่มีความรู้ในการวิเคราะห์และการวิจัยที่เกี่ยวข้องในประเทศไทยยังมีน้อย

จากเหตุผลข้างต้น ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จึงทำการศึกษาและรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับการดีสชาร์จบางส่วนในบุชชิ่งที่ใช้กับหม้อแปลงไฟฟ้า ทำการทดสอบบุชชิ่งชนิดต่างๆ โดยทำการทดสอบการดีสชาร์จบางส่วน การทดสอบแฟคเตอร์กำลังสูญเสีย การทดสอบ FDS และการทดสอบ PDC เพื่อนำองค์ความรู้ไปวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้น และสามารถบอกได้ว่าการเกิดดีสชาร์จบางส่วนแต่ละรูปแบบในบุชชิ่งเกิดจากสาเหตุใด เพื่อสามารถประเมินการซ่อมบำรุงได้อย่างเหมาะสมที่สุด

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

1. ศึกษาโครงสร้างของบุชชิ่ง
2. ศึกษามาตรฐาน ที่เกี่ยวข้องกับบุชชิ่ง
3. ศึกษามาตรฐาน ที่เกี่ยวข้องกับการเกิดดีสชาร์จบางส่วน
4. ศึกษาทฤษฎีและหลักการการทดสอบดีสชาร์จบางส่วนในรูปแบบต่างๆ
5. ศึกษาทฤษฎีและหลักการการทดสอบกระแสโพลาไรเซชัน และดีโพลาไรเซชันของบุชชิ่ง
6. ทำการทดสอบบุชชิ่งตามมาตรฐาน IEC-60137
7. ทำการทดสอบการดีสชาร์จบางส่วนของบุชชิ่ง และรวบรวมผลการทดสอบเพื่อนำไปวิเคราะห์ผล
8. ทำการทดสอบกระแสโพลาไรเซชัน และดีโพลาไรเซชันของบุชชิ่ง

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงงาน

1. เพื่อศึกษามาตรฐานและงานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย โดยทำการศึกษาจากมาตรฐาน IEC, IEEE, และวิทยานิพนธ์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง
2. ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวกับการวัดดีสชาร์จบางส่วนและหลักการที่เกี่ยวกับการวัดดีสชาร์จบางส่วนตามมาตรฐาน IEC-60270
3. ศึกษาวิธีการทดสอบบุชชิ่งตามมาตรฐาน IEC-60137, IEEE-C57.19.00, IEEE-C57.19.01, IEEE-C57.19.100
4. ศึกษาโครงสร้างภายในของบุชชิ่ง
5. ศึกษาและวิเคราะห์การเกิดดีสชาร์จบางส่วนของบุชชิ่ง
6. ศึกษาและวิเคราะห์กระโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชั่นของบุชชิ่ง
7. ทำการทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนของบุชชิ่งภายในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
8. ทำการทดสอบกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชันของบุชชิ่งภายในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
9. รวบรวมผลการทดสอบที่ได้จากการทดสอบร่วมกับการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) เพื่อวิเคราะห์รูปแบบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนจากสาเหตุต่างๆ

1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงงาน

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาโครงสร้างภายในของบุชชิ่ง การทดสอบต่างๆ ในบุชชิ่ง โดยการศึกษาการทดสอบดีสชาร์จบางส่วน (Partial discharge) ตามมาตรฐานกำหนด และการทดสอบกระแสดีโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชันของบุชชิ่งที่พิกัดต่างๆ โดยทำการทดสอบบางส่วนร่วมกับการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย แล้วนำผลการทดสอบที่ได้มาวิเคราะห์หาสาเหตุของการเสื่อมสภาพของบุชชิ่ง โดยรวบรวมข้อมูลการวิเคราะห์ผลการทดสอบรูปแบบต่างๆ ในบุชชิ่งจากบทความวิจัยที่ได้รับการยอมรับมาประกอบในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ เพื่อเป็นแนวทางในการวิเคราะห์ผลกระทบและความเสียหายจากการทดสอบต่างๆ ที่เกิดขึ้นในบุชชิ่ง และนำมาประเมินการซ่อมบำรุงที่เหมาะสมที่สุด

1.5 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 ลำดับขั้นตอนการทำวิจัย

วิธีการดำเนินงาน	ปีการศึกษา 2558								
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.
1) ค้นคว้ามาตรฐานและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง									
2) ศึกษาโครงสร้างของบุชชิ่ง									
3) ศึกษาทฤษฎีและรูปแบบการเกิดดีสชาร์จบางส่วน									
4) ทำการทดสอบบุชชิ่งที่ กฟผ.									
5) ทำการทดสอบบุชชิ่งที่ สจล.									
6) รวบรวมข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ									
7) วิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดสอบ									
8) สรุปผลการทดสอบ									
9) จัดทำปริญญานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์									

การวางแผน

การปฏิบัติงานจริง

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการทำโครงงาน

1. มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนรูปแบบต่างๆ ในบุชชิ่ง
2. ทราบถึงผลกระทบจากสภาพแวดล้อมรูปแบบต่างๆ ของบุชชิ่ง
3. ทราบถึงโครงสร้างภายในของบุชชิ่งแต่ละชนิด ที่พิกัดต่างๆ โดยละเอียด
4. รวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับการเกิดดีสชาร์จบางส่วนและบุชชิ่งจากงานวิจัย วิทยานิพนธ์และมาตรฐาน
5. สามารถวิเคราะห์หาสาเหตุการเกิดดีสชาร์จบางส่วนในบุชชิ่งได้
6. วิเคราะห์คุณภาพของบุชชิ่งจากการวัดกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชันได้
7. สามารถนำความรู้ไปใช้ในการประเมินคุณภาพของบุชชิ่งว่าควรได้รับการบำรุงรักษาอย่างไร เพื่อลดความเสียหาย
8. สามารถนำเอาสถิติที่รวบรวมมาใช้เป็นข้อมูลอ้างอิง เกี่ยวกับการทดลองดีสชาร์จบางส่วนในบุชชิ่งได้
9. ได้รับประสบการณ์จริงจากการทดสอบบุชชิ่ง

บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในการดำเนินการเพื่อวิเคราะห์เกี่ยวกับความเสื่อมสภาพในปลอกฉนวนนำสายนั้น สามารถศึกษาได้จากผลการทดสอบของการเกิดดีสชาร์จบางส่วนภายในปลอกฉนวนนำสาย และผลการทดสอบแฟคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก tanδ ซึ่งจำเป็นต้องใช้องค์ความรู้ที่หลากหลาย รวมไปถึงความเข้าใจในองค์ประกอบและคุณลักษณะตามมาตรฐานของวัตถุทดสอบนั้นๆ เพื่อประกอบการวิเคราะห์หาสาเหตุของการเสื่อมสภาพของฉนวน ผู้จัดทำจึงได้รวบรวมทฤษฎี บทความวิจัย และมาตรฐานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องและมีความสำคัญต่อการวิจัย แล้วนำมาเรียบเรียงไว้ในบทนี้ โดยประกอบไปด้วยทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับปลอกฉนวนนำสายตามมาตรฐาน เพื่อให้ทราบถึงคุณลักษณะที่สำคัญต่างๆ ในปลอกฉนวนนำสาย ซึ่งเน้นไปที่ OIP Bushing เป็นหลัก, การนำปลอกฉนวนนำสายไปประยุกต์ใช้งาน, อุปกรณ์เสริมต่างๆ ที่ใช้กับปลอกฉนวนนำสาย, ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบแฟคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก tanδ, ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการเกิดดีสชาร์จบางส่วน ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการโพลาไรเซชัน และตัวอย่างการวิเคราะห์ผลของกราฟการทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนจากบทความวิจัยที่มีความน่าเชื่อถือ เพื่อนำมาประกอบการวิเคราะห์ผลการทดสอบที่ผู้จัดทำได้ไปเข้าร่วมทดสอบปลอกฉนวนนำสายพิกัดต่างๆ กับทางการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

2.1 ปลอกฉนวนตัวนำแรงดันสูง (Electrical Bushing)

ตามมาตรฐาน ANSI/IEEE Std. C57.19.00 ปลอกฉนวนตัวนำแรงดันสูงหรือบุชชิ่งเป็นโครงสร้างฉนวนที่ประกอบด้วยตัวนำไฟฟ้าที่อยู่ตรงแกนกลาง มีหน้าที่เป็นฉนวนเพื่อป้องกันการเบรกดาวน์ระหว่างตัวนำไฟฟ้ากับตัวถังของหม้อแปลง หรืออาจกล่าวได้อีกอย่างหนึ่งว่าบุชชิ่งไฟฟ้ามีหน้าที่เพื่อถ่ายทอดกำลังไฟฟ้าจากภายในสู่ภายนอกของหม้อแปลงไฟฟ้า ผ่านตัวนำที่ถูกร้อยผ่านจุดศูนย์กลางของบุชชิ่งในแนวยาว เมื่อมีกำลังไฟฟ้าซึ่งเป็นผลลัพธ์ของแรงดันและกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้น ฉนวนในบุชชิ่งควรทนค่าแรงดัน Withstand ได้ และกระแสในตัวนำควรมีค่าไม่เกินกระแสพิกัด เพื่อทำให้ความร้อนที่เนื้อฉนวนไม่เกินพิกัดด้วย ในทางปฏิบัติบุชชิ่งไม่ได้ถูกใช้งานที่พิกัดในการถ่ายทอดกำลังไฟฟ้า แต่ถูกใช้งานที่พิกัดที่แรงดัน และกระแสสูงสุดตามที่ออกแบบไว้ [1]

รูปที่ 2.1 บุชชิ่งขณะติดตั้งกับหม้อแปลงไฟฟ้า [2]

2.1.1 ชนิดของบุชชิ่งไฟฟ้า

ชนิดของบุชชิ่งสามารถแบ่งตามการใช้งานจริงได้หลายรูปแบบ ดังนี้

1. แบ่งตามชนิดของฉนวนที่ปลายบุชชิ่ง
2. แบ่งตามโครงสร้างของบุชชิ่ง
3. แบ่งตามฉนวนภายในบุชชิ่ง

2.1.1.1 แบ่งตามชนิดของฉนวนที่ปลายบุชชิ่ง

สามารถแบ่งได้ดังนี้

- Air to oil bushings

บุชชิ่งชนิดนี้มีปลายด้านหนึ่งสัมผัสกับอากาศ และปลายอีกด้านหนึ่งสัมผัสกับน้ำมัน ซึ่งน้ำมันเป็นฉนวนที่ดีกว่าอากาศในสภาวะความดันปกติ ดังนั้นด้านที่สัมผัสกับน้ำมันจึงสั้นกว่าด้านที่สัมผัสกับอากาศ [1,3]

- Air to air bushings

บุชชิ่งชนิดนี้มีปลายทั้งสองด้านสัมผัสกับอากาศ โดยเป็นบุชชิ่งที่เชื่อมตัวนำระหว่างภายในอาคารและภายนอกอาคารจึงมีปลายด้านหนึ่งสัมผัสกับอากาศภายนอกอาคารและอีกด้านหนึ่งสัมผัสกับอากาศภายในอาคาร ในด้านที่สัมผัสกับอากาศภายนอกอาคารมีระยะยาวกว่าเนื่องจากสภาพแวดล้อมภายนอกมีมลภาวะมากกว่า เช่น ฝุ่น ควัน ฝน และอาจเกิดปรากฏการฟ้าผ่า เป็นต้น

- Special bushings

บุชชิ่งชนิดนี้เป็นบุชชิ่งชนิดพิเศษ ซึ่งปลายบุชชิ่งแต่ละด้านสัมผัสกับก๊าซอื่นๆ ตัวอย่าง เช่น SF_6 to air bushings และ SF_6 to oil bushings.

2.1.1.2 แบ่งตามโครงสร้างของบุชชิ่ง

สามารถแบ่งตามโครงสร้างของบุชชิ่งอย่างง่ายเป็นสองชนิด คือ Solid type และ Capacitance-graded (Condenser type) [1,3]

- Solid bushing

โครงสร้างของ Solid-type bushing ประกอบด้วยแท่งตัวนำตรงกลาง และหุ้มด้วย porcelain หรือ epoxy resin insulators ที่ปลายทั้งสองด้าน บุชชิ่งชนิดนี้ใช้สำหรับหม้อแปลงขนาดเล็ก และ circuit switchers ของหม้อแปลง ส่วนช่องว่างระหว่างตัวนำกับฉนวนนั้นเป็นอากาศสำหรับบุชชิ่งแรงดันต่ำ และอาจเติมน้ำมันหรือสารชนิดพิเศษอื่นลงไปในช่องว่างสำหรับบุชชิ่งแรงดันสูง

รูปที่ 2.2 Solid type bushing ขนาด 15 kV และ 25 kV

- Capacitance-graded bushings

Capacitance-graded bushing เป็นบุชชิ่งที่ได้รับความนิยมใช้อย่างมาก บุชชิ่งชนิดนี้ใช้สำหรับระบบแรงดันมากกว่า 25 kV ไปจนถึงแรงดัน 1,500 kV โดยโครงสร้างของบุชชิ่งชนิดนี้ประกอบด้วย แกนตัวนำตรงกลางซึ่งถูกพันด้วยกระดาษฉนวนชั้นหนึ่ง และพันทับอีกชั้นหนึ่งด้วยตัวนำ (Foil) สลับกันไป ซึ่งผู้ผลิตแต่ละรายอาจใช้วิธีการผลิตที่ต่างกัน เช่น การเคลือบสารกึ่งตัวนำลงบนกระดาษคราฟ เป็นต้น

ที่พิกัดแรงดันมากกว่า 52 kV นิยมใช้บุชชิ่งชนิด Capacitance-graded bushing ซึ่งเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Condenser bushing ซึ่งบุชชิ่งชนิดนี้วัสดุฉนวนที่ใช้ทำมาจากกระดาษที่ผ่าน

กระบวนการเพิ่มประสิทธิภาพความเป็นฉนวน โดยชนิดของกระดาษที่นำมาใช้เป็นวัสดุฉนวน แบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ Resin-bonded paper (RBP), Oil-impregnated paper (OIP) และ Resin-impregnated paper (RIP) ซึ่งทั้งสามชนิดใช้วิธีการนำกระดาษฉนวนไปพันรอบแกนตัวนำสลับกับแผ่นฟอยล์ซึ่งเป็นตัวนำไฟฟ้า

Resin-bounded paper (RBP) bushing กระดาษถูกฉาบด้วย phenolic หรือ epoxy resin และพันเป็นทรงกระบอกภายใต้ความร้อนและความดันที่เหมาะสม หลังจากนั้นนำตัวนำมาแทรกเป็นช่วงๆ โดยระยะห่างระหว่างชั้นตัวนำต้องผ่านการคำนวณเพื่อกำหนดค่าที่เหมาะสม ซึ่งถูกออกแบบให้ทำงานได้ที่ความเครียดทางไฟฟ้าในแนวรัศมี 20 kV/cm บุชชิ่งชนิดนี้มีค่าแฟคเตอร์กำลังสูญเสียและระดับการดีสชาร์จบางส่วนสูงกว่า Capacitance-graded bushing ชนิดอื่นๆ โดยมาตรฐานระบุให้มีค่าไม่เกิน 2.00%±0.08 pF และ 100 pC บุชชิ่งชนิดนี้ห้ามนำไปใช้กับน้ำมันและสามารถติดตั้งได้ทุกมุมติดตั้ง แต่ไม่แนะนำให้ใช้กับหม้อแปลงไฟฟ้าเพราะว่ามีการดีสชาร์จบางส่วนสูงและมีอายุการใช้งานสั้น บุชชิ่งชนิดนี้จึงเหมาะสมกับการติดตั้งบริเวณผนัง

Oil-impregnated paper (OIP) bushings ทำมาจากกระดาษคราฟ เมื่อผ่านการแทรกชั้นด้วยตัวนำในระยะที่เหมาะสมแล้ว นำไปชุบน้ำมันก่อนนำไปอบสุญญากาศ โดยน้ำมันที่ใช้ในการชุบต้องเป็นน้ำมันแร่ โดยก่อนกระบวนการชุบน้ำมันต้องตรวจสอบให้แน่ใจว่ามีความชื้น หรือฟองก๊าซอยู่น้อยที่สุด โดยบุชชิ่งชนิดนี้ออกแบบให้ทนความเครียดฉนวนในแนวรัศมี 40 kV/cm และต้องมีค่าแฟคเตอร์กำลังสูญเสียไม่เกิน 0.05% และมีค่าการดีสชาร์จไม่เกิน 10 pC โดยสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิตั้งแต่ -50 องศาเซลเซียส ถึง 105 องศาเซลเซียส

Resin-impregnated paper (RIP) bushings ใช้สำหรับบุชชิ่งที่มีแรงดันสูง 520 kV ซึ่งมีส่วนประกอบต่างๆ คล้ายกับบุชชิ่งชนิด OIP ในกระบวนการผลิตนั้นฉนวนทำมาจาก craped paper tape โดยนำไปพันรอบตัวนำ แล้วอบด้วยเครื่องอบภายใต้การควบคุมความร้อน และสุญญากาศ แล้วจึงเติม epoxy resin ลงไป บุชชิ่งชนิดนี้ออกแบบให้ทนความเครียดทางไฟฟ้าในแนวรัศมีได้ประมาณ 30 kV/cm บุชชิ่งชนิดนี้ต้องมีค่าแฟคเตอร์กำลังสูญเสียไม่เกิน 0.08% และมีค่าการดีสชาร์จไม่เกิน 10 pC โดยสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิตั้งแต่ -30 องศาเซลเซียส ถึง 95 องศาเซลเซียส

รูปที่ 2.3 Oil-impregnated paper bushing ขนาด 115 kV

2.1.1.3 แบ่งตามฉนวนภายในบุชชิ่ง

ฉนวนที่อยู่ภายในบุชชิ่งทั้งแบบ Solid type และ Condenser type สามารถใช้ได้หลายชนิด เช่น ในการทำบุชชิ่งสำหรับระบบแรงดัน 25 kV ใช้ porcelain หรือ resin เป็นวัสดุฉนวน และในระบบแรงดันที่สูงกว่านี้ ใช้ soft papers หรือ hardboards เป็นวัสดุฉนวนแทน เป็นต้น ซึ่งชนิดของฉนวนเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณา ดังนั้นเพื่อทำให้พิจารณาคุณสมบัติบุชชิ่งจากฉนวนได้ง่ายขึ้น จึงมีการแบ่งชนิดของบุชชิ่งตามฉนวนภายใน โดยแบ่งได้ดังนี้ [1]

- Air insulated bushings
- Oil filled bushing
- Resin bounded or impregnated paper insulated bushings
- Cast insulation bushings
- Gas insulation bushings
- Oil impregnated paper insulated bushings

รูปที่ 2.4 โครงสร้างภายนอกของบุชชิ่งไฟฟ้าชนิด OIP

2.1.2 มาตรฐาน Bushing

มาตรฐานสำหรับการทดสอบอุปกรณ์ทางไฟฟ้ามีอยู่หลายฉบับ ซึ่งส่วนใหญ่ถูกเขียนโดย IEEE (International Electrical Power Engineering Society) และ IEC (International Electrical Commission) ซึ่งมาตรฐานที่สำคัญและเกี่ยวข้องกับบุชชิ่งมีอยู่ด้วยกัน 5 ฉบับ คือ [1]

- IEEE C57.19.00 เป็นมาตรฐานที่อธิบายคุณลักษณะของบุชชิ่ง และขั้นตอนทดสอบสำหรับบุชชิ่งที่ติดตั้งอยู่ภายนอกอาคาร บอกถึงคำนิยามต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ข้อมูลทางด้านไฟฟ้า ข้อมูลทางด้านแมคคานิค รวมถึงขั้นตอนการทดสอบ มาตรฐานนี้ถูกใช้กันอย่างแพร่หลาย

- IEEE C57.19.01 เป็นมาตรฐานที่กำหนดลักษณะเฉพาะและมิติสำหรับอุปกรณ์บุชชิ่งภายนอกอาคาร กำหนดค่า Test Voltage ที่ Rated Voltage ระหว่าง 15 kV ถึง 800 kV กำหนดขีดจำกัดของ Partial Discharge, Power Factor, Capacitance ทั้งก่อนและหลังการทดสอบตามมาตรฐาน

- IEEE C57.19.03 เป็นมาตรฐานที่อธิบายคำศัพท์เฉพาะ และขั้นตอนการทดสอบสำหรับบุชชิ่งที่ใช้กระแสตรง โดยมาตรฐานนี้ให้ข้อมูลคล้ายกับมาตรฐาน IEEE C57.19.00 แต่เกี่ยวกับบุชชิ่งที่เป็นกระแสตรง ซึ่งรวมถึง Oil-filled convertor transformer และ Air-to-air DC bushing

- IEEE C57.19.100 เป็นมาตรฐานที่ให้ข้อมูลเกี่ยวกับการใช้งานอุปกรณ์ Power Bushing, การให้ความร้อนเกินพิกัดใน Nameplate สำหรับ Bushing ที่ใช้ใน Power Transformer, เซอกิตเบรกเกอร์ และ Bushing ที่ต่อในแต่ละบัส

- IEC Publication 137 เป็นมาตรฐานสำหรับบุชชิ่งที่ทำงานด้วยไฟฟ้าที่มากกว่า 1,000 V และถูกใช้อย่างแพร่หลายในทวีปยุโรปและทวีปเอเชีย

2.1.3 ตัวแปรที่สำคัญในการออกแบบบุชชิ่ง

2.1.3.1 ขนาดตัวนำและวัสดุที่ใช้

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำสามารถประมาณค่าได้จากพิกัดกระแส ซึ่งพิกัดกระแสนั้นประกอบไปด้วย 2 ปัจจัย คือ [1]

1. ระยะความลึกเชิงผิว (Skin Depth) ของทองแดง ที่ความถี่ 60 Hz มีค่าประมาณ 1.3 เซนติเมตร และอะลูมิเนียมมีค่าประมาณ 1.6 เซนติเมตร ทำให้กระแสส่วนมากไหลจากตัวนำส่วนนอกเข้าไปในแนวรัศมีตามระยะความลึกผิว (Skin Depth) δ

2. ความสูญเสียภายในตัวนำทองแดง

$$P_{loss} = I^2 \rho \frac{L}{A} = 4I^2 \rho \frac{L}{\pi(D_1^2 - D_0^2)} \qquad (2.1)$$

โดย

I = พิกัดกระแส

ρ = ความต้านทานของวัสดุตัวนำ, โอห์ม-เมตร

ทองแดงบริสุทธิ 100% = 1.7241×10^{-3} โอห์ม-เมตร

อะลูมิเนียม 55% = 3.1347×10^{-3} โอห์ม-เมตร

L = ความยาวของตัวนำ, เมตร

A = พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ = $\pi(D_1^2 - D_0^2) / 4$

D_1 = เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของตัวนำ, เมตร

D_0 = $D_1 - \delta$, เมตร

δ = ระยะความลึกเชิงผิว (Skin Depth) ของตัวนำ ในกรณีที่เป็นการใช้ท่อตัวนำ

ทองแดง ที่ความถี่ 60 Hz $\approx$ 0.0127 เมตร

ทองแดง ที่ความถี่ 60 Hz $\approx$ 0.0159 เมตร

จากสมการ (2.1) เห็นได้ว่า P_{loss} ลดลงก็ต่อเมื่อ D_1 เพิ่มขึ้น ดังนั้นการออกแบบต้องเพิ่มระยะเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของตัวนำ

สำหรับการใช้งานที่พิกัดกระแสสูงมีประโยชน์หลายอย่างที่ได้จากการเพิ่มระยะเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของตัวนำ เช่น

- จากสมการ (2.1) สังเกตได้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้าลดลงเมื่อ $d = D_1$ มีค่าเพิ่มขึ้น เพราะฉะนั้นการที่ตัวนำมีเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ทำให้เกิดการดีสชาร์จบางส่วนได้ยากขึ้น

- ความแข็งแรงทางกลของตัวนำขึ้นอยู่กับผลรวมของพื้นที่ภาคตัดขวางของตัวนำ ดังนั้นตัวนำที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่าสามารถรับแรงทางกลได้มากกว่า

2.1.3.2 ฉนวน

ฉนวนต้องมีความยาวที่มากพอที่สามารถทนแรงดัน steady-state และ transient ที่บุชชิ่งได้รับเมื่อนำไปใช้งาน โดยความยาวของฉนวนขึ้นอยู่กับชนิดของฉนวนที่ใช้ และในกรณีนี้ที่ปลายทั้งสองด้านของบุชชิ่งใช้ฉนวนคนละชนิดกันต้องดูจากชนิดของบุชชิ่ง และสามารถเปรียบเทียบความเป็นฉนวนได้โดยสังเกตความยาวของฉนวน [1]

2.1.3.3 ฉนวนอากาศ

ปัจจัยพื้นฐานที่เราต้องทราบคือความยาวของบุชชิ่งซึ่งใช้อากาศเป็นฉนวน โดยปกติแล้วบุชชิ่งถูกออกแบบมาให้ใช้งานที่ระดับความสูงไม่เกิน 1,000 เมตร จากระดับน้ำทะเล ถ้าใช้งานที่ความสูงมากกว่า 1,000 เมตร ต้องใช้บุชชิ่งที่มีความยาวมากกว่าเดิม โดยภายใต้สภาวะที่ปลอดภัย ฉนวนอากาศที่ใช้สำหรับ capacitance graded bushings ควรมีระยะสั้นกว่าบุชชิ่งแบบที่ไม่มีการแบ่งแรงดัน อย่างไรก็ตามหากบุชชิ่งได้รับการเจือปน ทำให้ผลของการแบ่งแรงดันหายไปและ

คุณสมบัติของบุชชิ่งที่มีการแบ่งแรงดันกับแบบที่ไม่มีการแบ่งแรงดันให้ผลไม่ต่างกันในผลระยะยาว (15–30 นาที) [1]

2.1.3.4 ฉนวนน้ำมัน

น้ำมันแร่มีความเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีกว่าอากาศ ดังนั้นความยาวของบุชชิ่งด้านที่จุ่มน้ำมันจึงมีระยะ 30-40% ของความยาวด้านที่เป็นอากาศ หากต้องการให้น้ำมันรักษาความบริสุทธิ์ไว้ได้ต้องใช้บุชชิ่งแบบ oil-immersed insulators หากมีการปนเปื้อนในน้ำมัน ตัวอย่างเช่น มีคาร์บอนเจือปนอยู่ในน้ำมันของ oil-insulated circuit breaker ทำให้เกิดริ้วเล็กๆ บนผิวของฉนวนภายนอก [1]

2.1.3.5 ก๊าซอัดความดัน (SF_6)

ระยะของบุชชิ่งสามารถน้อยกว่าหรือเท่ากับฉนวนแบบจุ่มน้ำมัน สามารถเลือกใช้ได้หลากหลายความดัน แต่ฉนวนชนิดนี้มีความเป็นอันตรายและเป็นสารมีพิษ ดังนั้นจึงต้องระวังไม่ให้เกิดการรั่วไหล [1]

2.1.3.6 Flange

หน้าที่ของ flange คือ ใช้ในการติดตั้งบุชชิ่งเข้ากับอุปกรณ์ และเพื่อยึดฉนวนให้วางอยู่ในตำแหน่งที่ต้องการ โดย flange ทำมาจากอะลูมิเนียมสำหรับบุชชิ่งแรงดันสูง แต่อาจใช้เหล็กแทนได้สำหรับบุชชิ่งที่ไม่ได้ใช้ในระบบแรงดันสูง นอกจากนี้ high-current bushing ใช้อะลูมิเนียมหรือวัสดุที่ไม่เป็นแม่เหล็กเพื่อหลีกเลี่ยงความสูญเสียทางแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสเหนี่ยวนำที่มาจากตัวนำ [1]

2.1.3.7 Oil Reservoir

ที่เก็บน้ำมันเป็นสิ่งจำเป็นที่ต้องมีสำหรับบุชชิ่งขนาดใหญ่ ซึ่งต้องมีที่เก็บน้ำมันเนื่องจากเหตุผล 2 ประการ คือ เพื่อการขยายตัวของน้ำมันเมื่อได้รับความร้อน และบุชชิ่งแบบ OIP ตัวฉนวนต้องจุ่มอยู่ในน้ำมันเพื่อรักษาคุณภาพของฉนวน ดังนั้นที่เก็บน้ำมันต้องมีน้ำมันท่วมทั้งตัวฉนวนอยู่เสมอ และเนื่องด้วยน้ำมันเป็นของเหลวที่ไม่สามารถอัดได้ จึงต้องใช้วิธีอัดก๊าซเข้าไปช่วยให้เหมาะสม ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการรั่วซึมของน้ำมันได้ [1]

สำหรับบุชชิ่งที่ติดตั้งในมุมเอียงไม่เกิน 30 องศา จากแนวดิ่ง ที่เก็บน้ำมันติดตั้งอยู่บริเวณปลายของบุชชิ่ง ส่วนในฉนวนที่เล็กๆ ที่เก็บน้ำมันอาจติดตั้งอยู่ภายในส่วนบนของบุชชิ่งก็ได้ และสำหรับ oil-filled bushing ที่ติดตั้งในแนวนอน ที่เก็บน้ำมันติดตั้งอยู่บริเวณ flange

ที่วัดระดับน้ำมันมักติดตั้งพร้อมกันกับที่เก็บน้ำมัน ซึ่งโดยปกติแล้วแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ ชนิด clear-glass กับชนิด magnetic โดยชนิดแรกทำมาจากกระจกใสซึ่งสามารถเห็นระดับน้ำมันจากมุมต่างๆ รอบบุชชิ่ง ส่วนชนิดที่สองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือส่วนภายในที่เก็บน้ำมันซึ่งสามารถลอยได้และสัมผัสกับแม่เหล็กทำให้สามารถหมุนในแนวตั้งฉากกับผนังของที่เก็บน้ำมัน และส่วนที่สองเป็นส่วนที่อยู่ภายนอกของที่เก็บน้ำมัน ซึ่งเป็นหน้าปัดซึ่งสัมผัสกับแม่เหล็กภายในจึงทำให้แสดงระดับของแม่เหล็กภายใน ที่วัดชนิด magnetic มีข้อเสียคือสามารถแสดงมุมเฟสได้เพียง 120 องศาเท่านั้น

2.1.3.8 ระบบการยึดของบุชชิ่งกับหม้อแปลงไฟฟ้า

ระบบการยึดเป็นสิ่งที่สำคัญมากสำหรับบุชชิ่งเพราะว่าต้องทำหน้าที่รับแรงทางกลของบุชชิ่ง โดยชนิดของระบบการยึดของบุชชิ่งแบ่งได้เป็น 3 ชนิด คือ Mechanically champed type โดยใช้น็อตยึดที่บริเวณ flange ,ชนิดที่สอง The center-champed type ซึ่งเป็นการใช้สปริงติดอยู่ในที่เก็บน้ำมันในส่วนบนของบุชชิ่ง ซึ่งวิธีนี้เมื่อสปริงหดตัวทำให้ตัวนำตรงกลางตึง และในเวลาเดียวกันทำให้อุปกรณ์ เช่น Flange และประเก็นยึดติดกันแน่นขึ้นด้วย ระบบการยึดชนิดนี้ถูกใช้ใน capacitance-graded bushing แต่ระบบชนิดนี้มีข้อเสียคืออาจเกิดการรั่วของน้ำมันซึ่งขึ้นอยู่กับน้ำหนักและการสั่นสะเทือนของบุชชิ่ง และชนิดสุดท้ายคือ The cemented type โดยใช้ metal flange ล้อมรอบส่วนปลายของบุชชิ่ง มีช่องว่างอากาศเล็กๆ เกิดขึ้นระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของบุชชิ่งและเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของ flange ช่องว่างนี้เติมปูนแข็งที่ทนแรงกดทางกลได้และยืดหยุ่นพอที่ใช้กับ porcelain ระบบการยึดชนิดนี้เกิดการรั่วซึมของน้ำมันและการแตกของฉนวนได้ง่ายเมื่อได้รับความเครียดทางกล และนิยมใช้กับ pressurized gas bushing [1]

อย่างไรก็ตามวิธีการต่างๆ ที่ใช้ในการยึดบุชชิ่งต้องสามารถรับแรงทางกลได้ ซึ่งการทดสอบสำหรับบุชชิ่งที่ใช้ภายนอกอาคารสามารถทำได้โดยการใช้เชือกผูกบริเวณปลายด้านบนของบุชชิ่งแล้วดึง เพื่อจำลองแรงที่บุชชิ่งได้รับเมื่อใช้งานจริง เช่น แรงลม แรงจากหิมะน้ำแข็ง เป็นต้น

2.1.4 การประยุกต์ใช้บุชชิ่ง

2.1.4.1 การประยุกต์ใช้ในที่สูง

หากต้องใช้บุชชิ่งในที่ที่สูงกว่า 1,000 เมตร ฉนวนภายนอกต้องเผชิญกับความหนาแน่นอากาศที่ต่ำลง ซึ่งมาตรฐานได้กำหนดค่าความยาวต่ำสุดที่ฉนวนอากาศจำเป็นต้องมี โดยสามารถหาค่าได้จากการกำหนดค่าที่ความสูง 1,000 เมตรเป็นมาตรฐานแล้วเทียบด้วย Correction Factor ในตารางที่ 2.1 เช่น หากสมมุติให้ที่ระดับความสูง 1,000 เมตร บุชชิ่งต้องมีความยาวเท่ากับ 2.5 เมตร แล้วต้องไปติดตั้งที่ระดับความสูง 3,000 เมตร ซึ่งจากตารางแล้วมีค่า Correction Factor = 0.8 เราจึงต้องออกแบบบุชชิ่งให้มีความยาวเป็น 2.5/0.8 = 3.125 เมตร เพื่อทำให้บุชชิ่งทนต่อสภาพความกดอากาศได้ ส่วนของฉนวนอื่นๆ กล่าวคือ น้ำมัน และแกนกลางให้ออกแบบตามมาตรฐานปกติเพราะความกดอากาศไม่มีผลต่อส่วนดังกล่าว [1]

ตารางที่ 2.1 Correction Factor สำหรับการติดตั้งบุชชิ่งที่ระดับความสูงมากกว่า 1000 เมตร

Altitude (m)	Altitude Correction Factor For Dielectric Strength
1,000	1.00
1,200	0.98
1,500	0.95
1,800	0.92
2,100	0.89
2,400	0.86
2,700	0.83
3,000	0.80
3,600	0.75
4,200	0.70
4,500	0.67

2.1.4.2 การใช้งานในสภาพแวดล้อมที่มีสิ่งปนเปื้อนสูง

ฉนวนได้รับผลกระทบจากมลภาวะ จึงจำเป็นต้องมีระยะ creepage ที่เพียงพอ เพื่อที่สามารถทนต่อผลกระทบที่ก่อให้เกิดความเสียหายกับเนื้อฉนวนภายนอกได้ ซึ่งระยะ creepage เป็นระยะที่วัดจากขั้วด้านหนึ่งถึงขั้วอีกด้านหนึ่งโดยผ่านผิวภายนอกของฉนวนที่มีลักษณะเป็นลูกคลื่น โดยระยะ creepage ต่อระดับความปนเปื้อนต่างๆ ได้ถูกกำหนดไว้ในตารางที่ 2.2 [1]

ตารางที่ 2.2 ระยะ creepage โดยแบ่งระดับของการปนเปื้อนเป็น 4 ระดับ

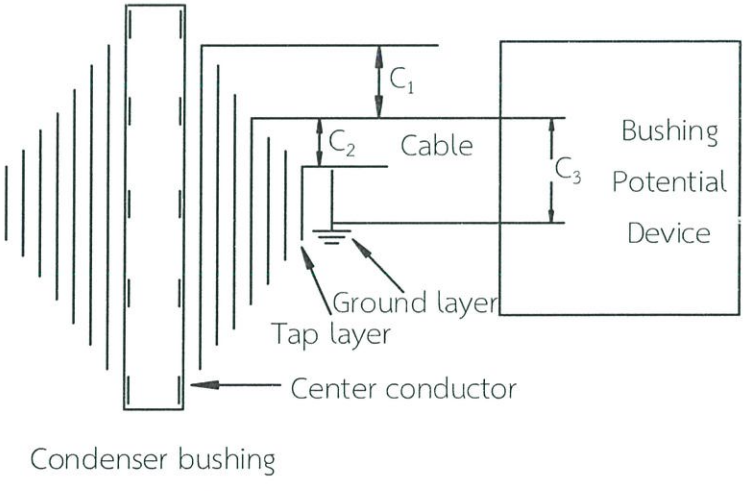
Contamination Level	Equivalent Salt-Deposit Density (ESDD), mg/cm^2	Recommended Minimum Creep Distance, mm/kV
Light	0.03-0.08	28
Medium	0.08-0.25	35
Heavy	0.25-0.6	44
Extra heavy	Above 0.6	54

2.1.5 อุปกรณ์เสริมที่ใช้ในบุชชิ่ง

2.1.5.1 Bushing Potential Device (BPD)

อุปกรณ์นี้มักถูกออกแบบให้รับขนาดแรงดันที่ต่ำและลดทอนกำลังไฟฟ้าที่ Power Frequency เพื่อจ่ายแรงดันให้แก่ Synchronoscope, Voltmeter, Voltage-responsive relays หรืออุปกรณ์อื่นๆ เพียงแค่เชื่อมต่อ Bushing Potential Device (BPD) เข้าไปที่ Voltage Tap ของ Condenser Bushing แรงดันขาออกของ BPD อยู่ในช่วง 110-120 V หารด้วย √3 และค่ากำลังไฟฟ้าขาออกอยู่ในช่วงตั้งแต่ 25 W ถึง 200 W ที่พิกัด 115 kV และที่พิกัด 765 kV ของบุชชิ่งตามลำดับ [1]

โครงสร้างอย่างง่ายของ BPD และ bushing voltage tap แสดงไว้ในรูปที่ 2.5 BPD ประกอบไปด้วยหลายๆ อุปกรณ์คือ special fitting บนส่วนท้ายของ shield, สายเคเบิล weatherproof ถูกประกอบไว้ที่ voltage tap ของบุชชิ่ง, padding capacitor ที่คอยลดแรงดันใน BPD, หม้อแปลงมี reacance ที่ปรับค่าได้, ratio หม้อแปลง Auxiliary ที่ปรับค่าได้, tapped capacitor ใช้เพื่อเก็บค่าตัวประกอบกำลังของภาระโหลด, protective spark gap ใช้ในกรณีที่เกิดแรงดันชั่วคราวในบุชชิ่ง, ground switch ใช้เพื่อการหยุดการจ่ายไฟของอุปกรณ์ อุปกรณ์ที่กล่าวมาทั้งหมดมักถูกติดตั้งอยู่ที่ด้านข้างของหม้อแปลง การ phase shift ที่ output มีผลอย่างมากต่อความถี่ output โดยเกิดการ phase shift มากที่สุดเมื่อ BPD ได้รับโหลดที่พิกัดของมัน และมีแรงดันในระบบต่ำเทียบกับพิกัดของบุชชิ่ง ถ้า BPD ถูกใช้เพื่อรองรับภาระโหลดมากกว่าพิกัดของมันทำให้เกิดแรงดันขึ้นที่ tap มากขึ้น หากมากขึ้นในระดับหนึ่ง ทำให้เกิด protective gap ซึ่งปรากฏการณ์นี้อาจเกิดขึ้นจากการเกิด resonant ในวงจร BPD ได้เช่นกัน

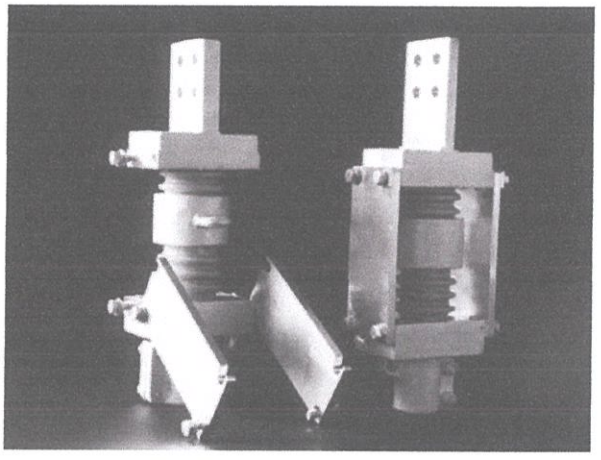


รูปที่ 2.5 Bushing Potential Device

2.1.5.2 Upper Test Terminal

ใช้ในการทดสอบและบำรุงรักษาบุชชิ่ง หม้อแปลง และอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ ซึ่งจำเป็นต้องตัดการเชื่อมต่อของสาย Lead จากขั้วโดยใช้ Lapp Test Terminal ดังรูปที่ 2.6 จากรูปดังกล่าวสามารถสังเกตได้ว่า Lapp Test Terminal มี Shunting Bar เปิดและปิดอยู่โดยใช้เนื้อ Porcelain เชื่อมอยู่กับขั้วทั้งสองฝั่ง และ Shunting Bar เชื่อมอยู่กับขั้วทั้ง 2 ฝั่งในการใช้งานตามปกติเช่นกัน

เมื่อมีการบำรุงรักษา Shunting Bar ฝั่งหนึ่งถูกนำออกไปเพื่อไม่ให้ขั้วด้านบนและด้านล่างเชื่อมถึงกันได้ ซึ่งทำให้สายตัวนำแยกออกจากบุชชิ่ง แล้วเชื่อมต่อกับหม้อแปลงหรืออุปกรณ์อื่นๆ ต่อไป บุชชิ่งและขั้วภายนอกต้องถูกออกแบบเพื่อให้สามารถใช้งานกับ Lapp Test Terminal ได้ ซึ่งขั้วภายนอกจำเป็นต้องมีความคงทนเมื่ออยู่บนยอดของ Test Terminal โดยไม่มีการหักงอใดๆ ของ Top Terminal ของบุชชิ่ง หรือส่วน Upper Part ของใจกลางตัวนำเกิดขึ้น [1]



รูปที่ 2.6 Lapp Test Terminal [1]

2.1.5.3 Draw-Lead Conductors

เป็นสายตัวนำที่ใช้กับบุชชิ่งที่มีพิกัดกระแสตั้งแต่ 1,200 A ขึ้นไป ในทางปฏิบัติมีการร้อยสายเคเบิลที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กกว่าโพรงกลางท่อผ่านเข้าไปในบุชชิ่งและเชื่อมต่อโดยตรงกับขดลวดในหม้อแปลง ถ้าหากจำเป็นต้องนำบุชชิ่งออกในบางกรณีอาจมีการลดระดับน้ำมันในหม้อแปลงลงตามความจำเป็นให้ต่ำกว่าระดับด้านบนของแท้งค์หม้อแปลงหรือฝาแท้งค์ แล้วปลด Draw-Lead ออกจาก Top Terminal ของบุชชิ่งออก เราจึงสามารถยกบุชชิ่งออกไปเพื่อเปลี่ยนตัวใหม่เข้ามา เมื่อเปลี่ยนบุชชิ่งใหม่ต้องติดตั้ง Top terminal เข้ากับ Draw-Lead อีกครั้งด้วย การใช้ Draw-Lead ช่วยให้เปลี่ยนบุชชิ่งได้รวดเร็วกว่า และไม่ต้องเสียเวลากับการเพิ่มหรือลดปริมาณน้ำมันสำหรับหม้อแปลงอีกด้วย โดยความสามารถในการรับกระแสไฟฟ้าของ Draw-Lead Conductor แสดงไว้ในตารางด้านล่างดังนี้ [1]

ตารางที่ 2.3 พิกัดกระแสและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ Draw-Lead Conductor

Nominal System Voltage, kV	Maximum Draw-Lead Current Rating, A	Bottom-Connected Current Rating, A	Minimum Diameter Inside Tube, mm
34.5-69	400	1200	22
138-230	800	1200	41
345-765	800	1200	51

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

2.1.6 การซ่อมบำรุงและการประเมินปัญหา

หากเราติดตั้งบุชชิ่งได้อย่างสมบูรณ์ ไม่เกิดรอยแตกร้าว หรือเกิดความเสียหายใดๆ บุชชิ่งสามารถทำงานได้ปกติ แต่ถ้าหากเกิดความร้อน มีแรงทางกลมากระทำ หรือมีกระแสไฟฟ้ามากเกินพิกัดที่ทนไหว ทำให้บุชชิ่งเกิดปัญหา อย่างไรก็ตามการเกิดเหตุการณ์เช่นนี้อาจเกิดจากการออกแบบที่มีข้อบกพร่อง หรือบุชชิ่งได้รับความเสียหายระหว่างขนส่ง หรือระหว่างการติดตั้งได้ ปัญหาทั้งหมดที่เกิดขึ้นข้างต้นสามารถเฝ้าสังเกตโดยการตรวจสอบเป็นระยะและการซ่อมบำรุง ความถี่และชนิดของการตรวจสอบและซ่อมบำรุงบุชชิ่งนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของบุชชิ่งและราคาการติดตั้งบุชชิ่งแต่ละลูกไป หัวข้อย่อยต่อไปนี้เป็นปัญหาและการซ่อมบำรุงที่เกิดขึ้นเป็นประจำ [1]

2.1.6.1 ระดับน้ำมัน (oil level)

ระดับน้ำมันเป็นสิ่งที่มีความสำคัญต่อการทำงานของบุชชิ่ง ความผิดปกติของระดับน้ำมันนั้นสามารถนำไปสู่การเกิดปัญหาในบุชชิ่งได้ การที่น้ำมันต่ำกว่าระดับปกติสามารถประเมินได้ว่าบุชชิ่งนั้นเกิดการรั่ว โดยโอกาสที่เป็นไปได้คือ การรั่วผ่านประเก็น เหล็กอัลลอยด์ รอยเชื่อม หรือฉนวนมีรอยแตกร้าว การรั่วที่ปลายด้านที่ติดกับอากาศนั้นอาจแสดงว่ามีน้ำเข้าไปในบุชชิ่ง ซึ่งหากเกิดเหตุการณ์เช่นนี้ควรตรวจสอบให้เร็วที่สุดไม่ว่ามีน้ำอยู่จริงหรือไม่ก็ตาม หากมีน้ำในบุชชิ่งมากเกินไปทำให้ฉนวนทั้งภายนอกและภายในของบุชชิ่งเสื่อมสภาพได้ หากปัญหาไม่ได้รับการแก้ไขอาจทำให้กระดาษที่ใช้ชุบน้ำมันแห้งจนบุชชิ่งไม่สามารถทนต่อไปไหว มีโอกาสเกิดการระเบิดขึ้นได้ [1]

สำหรับความผิดปกติที่เกิดจากระดับน้ำมันสูงเกินไปเนื่องจากระบบการเติมน้ำมันอาจเกิดการรั่วของน้ำมันผ่านประเก็น รอยเชื่อม จนกระทั่งอาจทำให้บุชชิ่งแตกร้าวได้

2.1.6.2 การวัดแฟคเตอร์กำลังสูญเสียและค่าความเก็บประจุ (Power-Factor/Capacitance Measurements)

การวัดแฟคเตอร์กำลังสูญเสียและความเก็บประจุสามารถทำได้ 2 วิธี โดยวิธีแรกคือ Grounded specimen test (GST) ซึ่งเป็นการวัดตามเส้นทางรั่วของกระแส กำลัง และความเก็บประจุ ระหว่างตัวนำและส่วนที่ต่อลงกราวด์ทุกส่วน การที่เราต่อกราวด์สามารถช่วยลดผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นได้ [1]

วิธีที่สองคือ Ungrounded specimen test (UST) ซึ่งเป็นการวัดค่าเดียวกับวิธีแรก แต่วัดระหว่างตัวนำและอิเล็กโตรดที่ไม่ได้ต่อลงกราวด์ ปกติแล้วคือโวลต์เตจแท็บหรือเทสแท็บ ประโยชน์ของวิธีนี้คือ สามารถลดผลกระทบจากการรั่วของกระแส กำลัง และความเก็บประจุได้ และสามารถวัดได้ในขณะที่บุชชิ่งถูกติดตั้งเพราะไม่ได้ต่อกราวด์

มาตรฐาน IEEE C57.19.100 บอกว่าการวัดแฟคเตอร์กำลังสูญเสียและความเก็บประจุต้องวัดตอนที่ติดตั้ง หนึ่งปีต่อมา และทุกสามถึงห้าปีหลังจากนั้น การเพิ่มขึ้นของแฟคเตอร์กำลังสูญเสียนั้นแสดงถึงการเสื่อมสภาพของส่วนประกอบบางชิ้นของระบบฉนวน หรืออาจแสดงถึงการที่ส่วนของบุชชิ่งด้านปลายที่ติดกับอากาศมีความสกปรก หรือเปียก หรือการที่มีกระแสรั่วไหลผ่านฉนวนอยู่

144324

การอ่านค่าได้ถูกต้องมากขึ้นเราสามารถทำได้โดยการทำความสะอาดก่อนที่ทำการวัด ในอีกกรณีหนึ่ง การเพิ่มขึ้นของแฟคเตอร์กำลังสูญเสียนั้นอาจแสดงถึงการเสื่อมสภาพภายในของฉนวนก็ได้ การเพิ่มขึ้นของแฟคเตอร์กำลังสูญเสียผ่าน C_1 กล่าวคือจากตัวนำไปสู่เทสแท็บ ปกติแล้วแสดงถึงการเสื่อมสภาพภายในแกน การเพิ่มขึ้นของแฟคเตอร์กำลังสูญเสียผ่าน C_2 กล่าวคือจากเทสแท็บไปสู่แฟรงค์ ปกติแล้วแสดงการเสื่อมสภาพของส่วนที่เป็นแกนหรือน้ำมันของบุชชิ่ง ถ้าแฟคเตอร์กำลังสูญเสียนั้นเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าของตอนที่ติดตั้งครั้งแรกต้องทำการตรวจสอบและเฝ้าระวังให้บ่อยมากขึ้น แต่ถ้าหากเพิ่มขึ้นเป็นสามเท่าต้องทำการปลดบุชชิ่งนั้นออกจากการทำงาน [IEEE c57.19.100]

การเพิ่มขึ้นของความเก็บประจุก็สำคัญเช่นกัน เป็นการแสดงว่ามีสิ่งผิดปกติอยู่ภายในบุชชิ่ง ถ้าเกิดค่าความเก็บประจุเปลี่ยนแปลงไป 2% ถึง 5% ของค่าที่ควรวัดได้ตามพิกัดของบุชชิ่งแสดงว่ามีชั้นของการเกลี่ยแรงดันสองชั้น หรือมากกว่านั้นลัดวงจรกันอยู่ กรณีเช่นนี้บุชชิ่งควรถูกปลดออกจากการทำงานให้เร็วที่สุด

2.1.6.3 ความเสียหายและการปนเปื้อนของฉนวนด้านที่ติดกับอากาศ (Damage or Contamination of Air-End Insulator)

ฉนวนโดยเฉพาะในส่วนที่เป็นโพสิเลนซึ่งเป็นส่วนที่กระทบกระเทือนง่าย การดูแล การขนส่งหรือการกระทบกระเทือนจากอุปกรณ์อื่นอาจทำให้มีชิ้นส่วนหลุดออกมาซึ่งปกติแล้วเราสามารถซ่อมได้โดยการลับ หรือตะไบแล้วหาสีที่เหมาะสมมาทาในจุดที่ชำรุด ในบางกรณีใช้วัสดุผสมเติมแทนชิ้นส่วนที่หายไปได้ แต่ความเสียหายอาจกระทบไปสู่ส่วนอื่นของฉนวนด้วย ในบริเวณที่เกิดการชำรุดเราจึงต้องเฝ้าสังเกตการรั่วของน้ำมันเป็นระยะเวลาหนึ่งจนกระทั่งวัสดุผสมไม่หลุดออก [1]

บุชชิ่งที่ติดตั้งในบริเวณที่มีความเป็นมลภาวะสูงต้องมีการล้างอยู่เป็นประจำ โดยสามารถล้างได้โดยการหยุดการทำงานของบุชชิ่งแล้วทำความสะอาดด้วยมือโดยใช้สารเคมีทำความสะอาด หรือไม่อาจใช้วิธีการฉีดน้ำที่มีสภาพนำไฟฟ้าต่ำฉีดล้างขณะที่บุชชิ่งกำลังทำงาน

2.1.6.4 การติดตั้งขั้วที่ไม่เหมาะสม (Improper Installation of Terminals)

การต่อขั้วที่ไม่เหมาะสมไม่ว่าเป็นด้านใดของบุชชิ่งทำให้เกิดความร้อนขึ้น ปกติแล้วปัญหานี้เกิดจากการที่ขั้วต่อที่เป็นเกลียวและไม่เหมาะสมต่อขนาดกระแสที่ไหลผ่าน การตรวจสอบปัญหานี้สามารถทำได้โดยวิธีเทอร์โมกราฟฟี่ [1]

2.1.6.5 การเสียหายของโวลต์เตจแท็บ (Broken Voltage Tap Connection)

บางกรณีการขนส่งที่ไม่ดีทำให้แกนในของฉนวนนั้นเคลื่อนตัว ซึ่งทำให้ชั้นเกลี่ยแรงดันเสียหายได้ ในกรณีของบุชชิ่งที่เก่าเราใช้สปริงเป็นส่วนประกอบของแท็บ ซึ่งเกิดการเคลื่อนตัวได้ในขณะขนส่ง ทั้งสองกรณีนี้ทำให้เกิดความเสียหายต่อเทสแท็บ ซึ่งทำให้บุชชิ่งไม่สามารถทำงานได้ และการวัดแฟคเตอร์กำลังสูญเสียและความเก็บประจุไม่สามารถเกิดขึ้นได้เช่นกัน [1]

2.1.6.6 การวิเคราะห์ก๊าซที่ละลายในน้ำมัน (Dissolved-Gas-in-Oil Analysis)

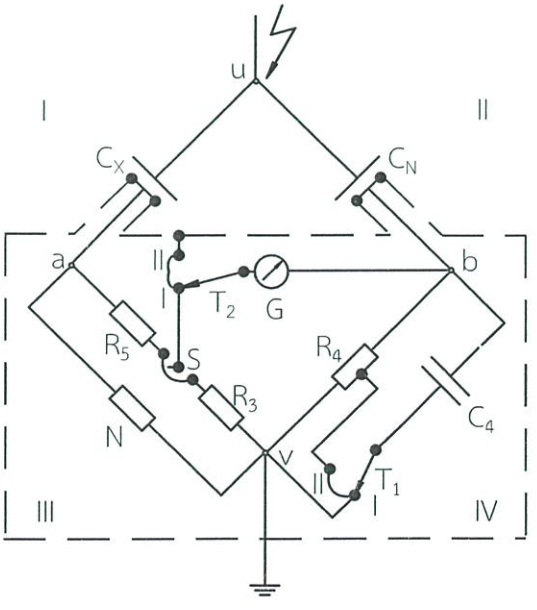
ยังไม่มีการรับรองให้การวิเคราะห์ก๊าซที่ละลายในน้ำมันนั้นเป็นการทดสอบประจำ เพราะว่าบุชชิ่งมีเพียงแค่พิกัดของปริมาณน้ำมันเท่านั้น พอถูกเก็บตัวอย่างน้ำมันไป แล้วถูกเติมกลับให้เต็มเช่นเดิม อย่างไรก็ตามถ้าหากการวัดแฟคเตอร์กำลังสูญเสียและความเก็บประจุแสดงถึงการที่มีสิ่งผิดปกติในบุชชิ่งแล้ว การวิเคราะห์ก๊าซที่ละลายในน้ำมันก็ควรแสดงความผิดปกติได้เช่นกัน โดยหากมีก๊าซ CO และ CO_2 จำนวนมากนั้นแสดงถึงการเสื่อมสภาพของกระดาษฉนวนในบุชชิ่ง แต่ก๊าซชนิดอื่นๆ แสดงถึงการเกิดอาร์คในผลิตภัณฑ์หรือการเกิดความร้อนเกิน [1]

2.2 การวัดค่าเก็บประจุ C และแฟกเตอร์ tan δ

กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกในวัสดุฉนวนหรือในอุปกรณ์ที่หาได้จากสมการ $P_d = \omega CU^2 \tan\delta$ โดยการวัดค่า tanδ และค่าเก็บประจุ C วิธีวัดค่าทั้งสองชนิดนี้โดยทั่วไปมี 2 วิธี คือ วัตต์มิเตอร์และวิธีบริดจ์ ในที่นี้กล่าวแต่เฉพาะวิธีบริดจ์ ซึ่งเหมาะกับการใช้ในย่านความถี่ปานกลาง คือ 10 ถึง 10^6 Hz บริดจ์ที่นิยมใช้กัน คือ schering bridge ที่ใช้กับความถี่พลังงานตั้งแต่ 50 Hz ถึง 100 kHz [4]

2.2.1 Schering bridge

Schering bridge เป็นอุปกรณ์สำหรับวัดค่าเก็บประจุ และแฟคเตอร์กำลังสูญเสีย-ไดอิเล็กตริก tanδ ของตัวเก็บประจุ โดยการเปรียบเทียบกับค่าเก็บประจุมาตรฐาน ซึ่งเป็นแบบอากาศหรือก๊าซอัดความดัน (compressed gas standard capacitor) มีกำลังสูญเสียต่ำที่ความถี่พลังงาน หรือความถี่อื่นๆ วงจรของ Schering bridge ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 วงจร Schering Bridge

C_x = ค่าเก็บประจุของวัตถุทดสอบหรือที่ต้องการวัด

R_x = ความต้านทานสมมูลกับกำลังสูญเสียในไดอิเล็กตริก

C_N = ค่าเก็บประจุมาตรฐาน

R_3 = ความต้านทานไร้ความเหนี่ยวนำและปรับค่าได้

R_4 = ความต้านทานไร้ความเหนี่ยวนำ

C_4 = ค่าเก็บประจุปรับค่าได้

G = กัลป์วานอมิเตอร์ความไวสูงสำหรับสมดุลวงจร

การปรับวงจรบริดจ์ให้สมดุลโดยการปรับค่า R_3 และ R_4 จนกระทั่งเข็มของกัลป์วานอมิเตอร์ชี้ศูนย์ เมื่อบริดจ์สมดุลแล้ว จึงเขียนสมการได้ว่า

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{Z_3}{Z_4} \tag{2.3}$$

เมื่อ Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 เป็นอิมพีแด๊นซ์ของส่วนวงจรแขน I, II, III, IV ตามลำดับ คือ

$$Z_1 = \frac{R_x}{1+j\omega C_x R_x} \tag{2.4}$$

$$Z_2 = \frac{-j}{\omega C_N} \tag{2.5}$$

$$Z_3 = R_3 \tag{2.6}$$

$$Z_4 = \frac{R_4}{1+j\omega C_4 R_4} \tag{2.7}$$

นั่นคือ

$$\frac{R_x}{R_a(1+j\omega C_x R_x)} = \frac{-j(1+j\omega C_4 R_4)}{\omega C_N R_4} \tag{2.8}$$

โดยการเทียบค่าจริงได้

$$\frac{R_x}{1+\omega^2 C_x^2 R_x^2} = \frac{C_4 R_4}{C_N} \tag{2.9}$$

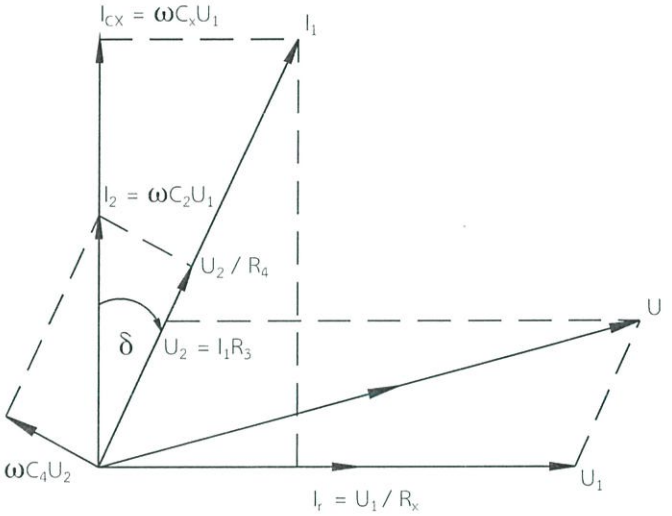
จากรูป 2.4 เมื่อ C_x และ R_x ต่อกันแบบขนาน

ได้

$$\cos\delta = \frac{\omega C_x R_x}{\sqrt{1+\omega^2 C_x^2 R_x^2}} \tag{2.10}$$

แทนค่าในสมการ (2.9) ได้

$$C_x = \frac{C_N \cos^2\delta}{\omega C_x C_4 R_x R_3} \tag{2.11}$$



รูปที่ 2.8 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของวงจร Schering Bridge

จากรูป 2.5 ได้

$$\tan\delta = \frac{\omega C_4}{1/R_x} \tag{2.12}$$

$$\tan\delta = \frac{1/R_x}{\omega C_x} = \frac{1}{\omega C_x R_x} \tag{2.13}$$

$$\omega C_4 R_4 = \frac{1}{\omega C_x R_x} \tag{2.14}$$

$$\frac{1}{C_x R_x} = \omega^2 C_4 R_4 \tag{2.15}$$

แทนค่า $\frac{1}{C_x R_x}$ ในสมการ (2.11) ได้

$$C_x = \frac{C_N R_4 \cos^2 \delta}{R_3} \qquad (2.16)$$

นั่นคือ $C_x = \frac{C_N R_4}{R_3}$ โดยประมาณ

และ $\tan\delta = \omega C_4 R_4$ (2.17)

ในทางปฏิบัติ R_4 จัดไว้เป็นค่าคงตัวเฉพาะ ที่มีสวิตช์เลือกให้เปลี่ยนได้หลายค่า เพื่อให้สามารถวัดได้ละเอียดถูกต้องในช่วงกว้างของค่า C ส่วน R_3 เป็นความต้านทานที่ปรับได้ละเอียด และ C_4 เป็นค่าเก็บประจุที่ปรับได้เป็นหลัก x10 และมีค่าสัมพันธ์โดยตรงกับค่าแฟคเตอร์กำลังสูญเสีย $\tan\delta$

การวัดค่า C และ $\tan\delta$ ด้วย Schering bridge ดังกล่าวอาจมีการรบกวนจากภาคแรงสูงที่มีต่อวงจรภาคแรงต่ำ ซึ่งอาจมีค่าคาบเกี่ยวผ่านค่าเก็บประจุสเตรย์ ฉะนั้นตั้งแต่ภาคแรงต่ำของค่าเก็บประจุมาตรฐาน C_N และวัสดุทดสอบมาถึงอิมพีแดนซ์ของวงจร III, IV และกัลป์วานอมิเตอร์มีชิลด์ป้องกันแบบ 2 ชั้น (Double screen shielding) และป้องกันมิให้บริดจ์เสียหายจากแรงดันเกิน เนื่องจากภาคแรงสูงเกิดผิดพร่องขึ้นใน I หรือ II จึงใส่กับดักแรงดันเกินหรือสปาร์กแกปไว้ในวงจรภาคแรงต่ำ

2.3 การดีสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge)

ดีสชาร์จบางส่วน (Partial discharge : PD) คือการเสียสภาพความเป็นฉนวนเพียงบางส่วนของระบบการฉนวน เป็นการเกิดเบรกดาวน์หรือดีสชาร์จที่ไม่ได้เชื่อมถึงกันระหว่างอิเลคโตรด ไม่ได้เป็นการเสียสภาพการเป็นฉนวนสมบูรณ์ทั้งระบบ การเกิดดีสชาร์จบางส่วนเกิดขึ้นในระบบฉนวนที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ฉนวนที่มีความไม่สม่ำเสมอ ฉนวนที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน หรือฉนวนที่มีสิ่งเจือปน ซึ่งทำให้ความเครียดของสนามไฟฟ้าบางจุดมีค่าสูงกว่าความเครียด-สนามไฟฟ้าวิกฤต และอาจทำให้เกิดการเบรกดาวน์ทั้งระบบได้

ดีสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge) เกิดขึ้นได้ทั้งสนามไฟฟ้ากระแสสลับและสนามไฟฟ้ากระแสตรง แต่ภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสสลับเกิดดีสชาร์จขึ้นซ้ำทุกๆ รอบ (cycle) ของแรงดัน โดยปกติเกิดขณะที่แรงดันที่ป้อนเพิ่มจากศูนย์ไปสู่ค่ายอด (peak)

2.3.1 ผลกระทบของการเกิดดีสชาร์จบางส่วน

ดีสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นแต่ละครั้งมีพลังงานถ่ายเทให้กับพื้นผิวฉนวน เป็นเหตุให้เกิดความร้อนเพิ่มขึ้นเฉพาะจุด เป็นผลให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี ทำให้ฉนวนเสียเป็นจุดๆ และเกิดมากขึ้น และอาจนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์อย่างสมบูรณ์ได้ ทำให้ฉนวนเสียหาย และอายุการใช้งานฉนวนสั้นลง

การเกิดดีสชาร์จบางส่วนบนสายส่งแรงสูงแบบขึงอากาศนั่น มีการสูญเสียพลังงานตลอดเวลา และยิ่งกว่านั้นการเกิดดีสชาร์จแบบนี้ ทำให้เกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแพร่กระจายออกไปรบกวนระบบสื่อสารย่านความถี่วิทยุด้วย

นอกจากนี้การเกิดดีสชาร์จบางส่วนยังส่งผลให้เกิดก๊าซโอโซน (O_3), เสียงฮีสซิ่ง (Hissing), เกิดความร้อน และปฏิกิริยาเคมีขึ้นด้วย

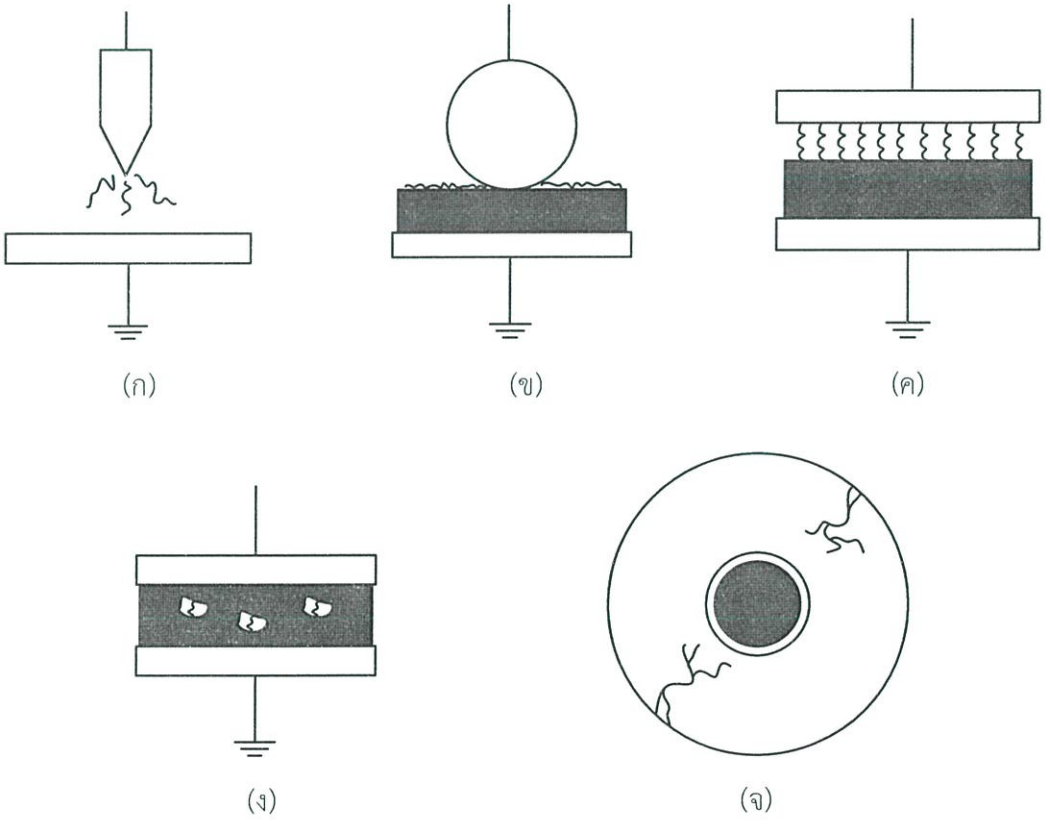
2.3.2 ชนิดของดีสชาร์จบางส่วน (Type of Partial Discharge)

ดีสชาร์จบางส่วนสามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ

1) โคโรนาดีสชาร์จ (Corona Discharge) ดังรูปที่ 2.9 ก

2) ดีสชาร์จตามผิว (Surface Discharge) ดังรูปที่ 2.9 ข

3) ดีสชาร์จบางส่วนแบบภายใน (Internal Discharge) ดังรูปที่ 2.9 ค, ง, จ



รูปที่ 2.9 รูปแบบของดีสชาร์จบางส่วน (PD) แบบต่างๆ (ก) โคโรนาดีสชาร์จ (ข) ดีสชาร์จตามผิว (ค) ดีสชาร์จภายในรอยต่อ (ง) ดีสชาร์จภายในโพรงก๊าซ (จ) ดีสชาร์จภายในมีสิ่งแปลกปลอม

2.3.2.1 โคโรนาดีสชาร์จ (Corona Discharge)

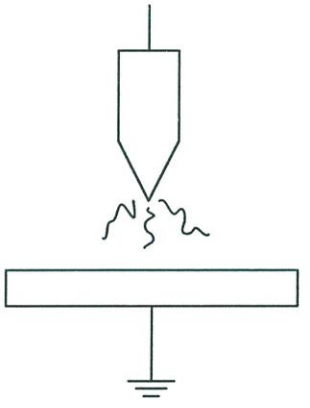
โคโรนาดีสชาร์จ (Corona Discharge) เกิดบริเวณรอบๆ อิเล็กโตรดปลายแหลม หรือขอบคม ที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงเกินกว่าค่าสนามไฟฟ้าวิกฤตของอากาศ เช่น สายตัวนำแรงสูงที่มีขนาดเล็กเกินไป หรือผิวสายตัวนำที่ไม่เรียบพอ ทำให้อากาศรอบๆ บริเวณนั้นเกิดปฏิกิริยาไอออไนเซชั่น โดยผลอันเนื่องมาจากโคโรนามีดังนี้

1. เมื่อเกิดโคโรนาในอากาศอาจสังเกตหรือรับรู้ได้ด้วยร่างกายคน คือได้ยินเสียงฮีสซิ่ง (เสียงแมลงบิน), มีกลิ่นโอโซน (O_3) และในยามมืดสนิทมีแสงเรืองเกิดขึ้น

2. โคโรนาดีสชาร์จเกิดขึ้นในรูปพัลส์สั้นๆ ซึ่งมีสเปกตรัมความถี่สูงถึง MHz คลื่นความถี่สูงนี้ยังรบกวนระบบสื่อสารด้วย

3. การเกิดโคโรนาย่อมหมายถึง มีพลังงานสูญเสียเกิดขึ้นตลอดเวลา จึงเป็นสิ่งไม่พึงปรารถนาในการออกแบบระบบสายส่งจึงหลีกเลี่ยงมิให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่าค่าสนามวิกฤต

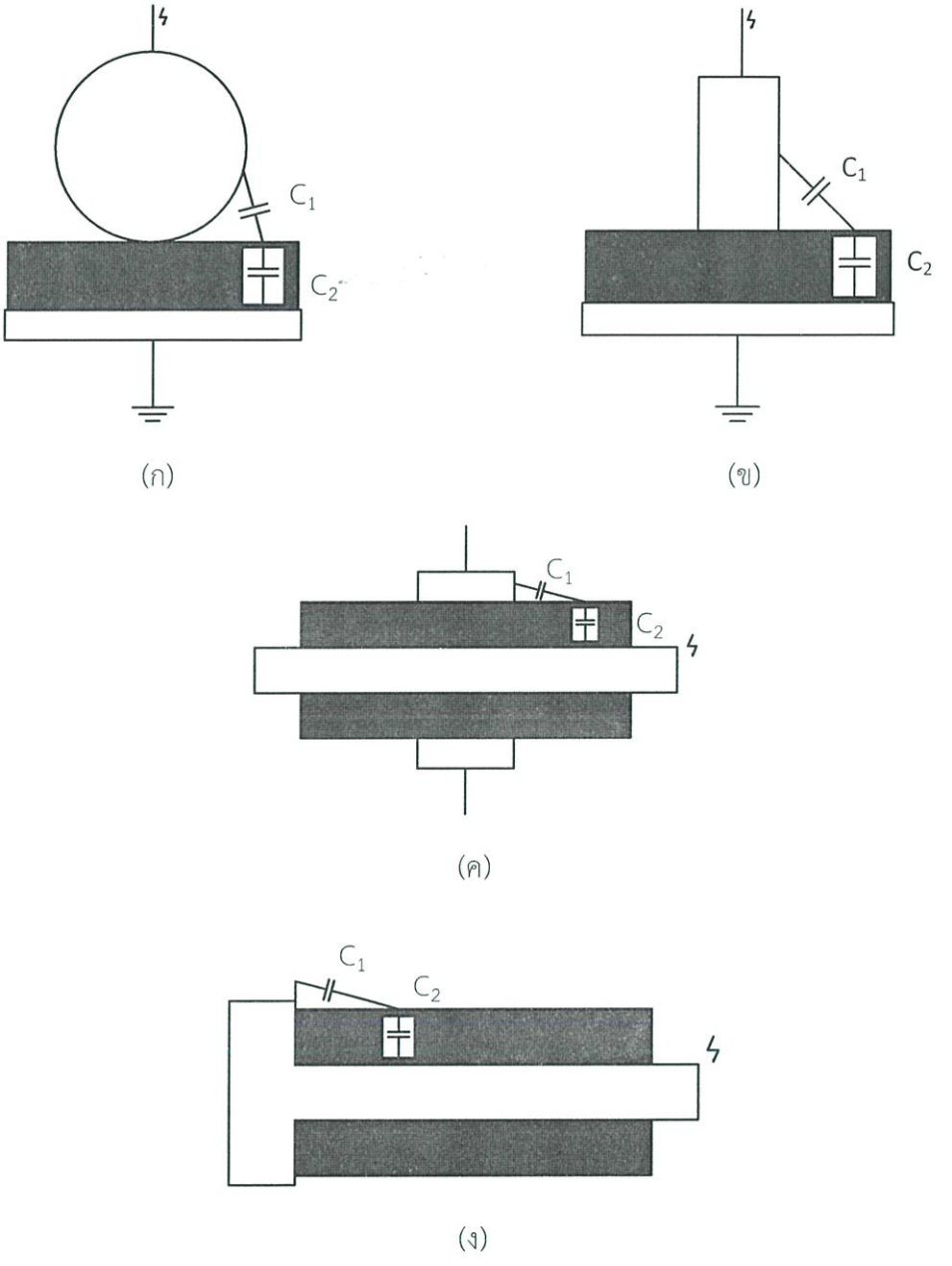
พลังงานสูญเสียเนื่องจากโคโรนาขึ้นอยู่กับความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดของผิวตัวนำ ด้วยเหตุนี้ในระบบสายส่งแรงสูงจึงลดความเครียดสนามไฟฟ้าโดยการใช้สายควบ (bundled-conductors) นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับสภาวะบรรยากาศ ฝน หมอก น้ำค้าง ทำให้เกิดโคโรนาง่าย



รูปที่ 2.10 แบบจำลองการเกิดโคโรนาดีสชาร์จ

2.3.2.2 ดีสชาร์จตามผิว (Surface Discharge)

ดีสชาร์จตามผิวอาจเกิดขึ้นตามแนวรอยต่อของฉนวนต่างชนิดกัน เช่น ของแข็งกับก๊าซ หรือของแข็งกับของเหลว เมื่อมีความเครียดสนามไฟฟ้าตามแนวผิวรอยต่อของฉนวนสูงเกินค่าวิกฤต ตัวอย่างเช่น ปลอกฉนวนนำสาย ปลายสายเคเบิล หรือดีสชาร์จภายนอกกระทบเข้ากับฉนวนซึ่งความเครียดสนามไฟฟ้าในเนื้อฉนวนไม่สูงพอที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์เจาะทะลุฉนวนได้ เช่น แผ่นคั่นระหว่างอิเล็กโตรด หรือปลอกฉนวนนำสายดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ลักษณะรูปแบบของฉนวนที่ทำให้เกิดดีสชาร์จตามผิวบางส่วน
(ก) อิเล็กโตรดทรงกลมกับระนาบคั่นแผ่นฉนวน (ข) แท่งร็อดกับระนาบคั่นแผ่นฉนวน
(ค) ปลอกฉนวนตัวนำ (ง) ปลายสายเคเบิลแรงสูง

รูปที่ 2.11 ก) และ 2.11 ข) ดีสชาร์จตามผิวเกิดขึ้นที่บริเวณแท่งร็อด หรือทรงกลมสัมผัสหรือใกล้กับแผ่นฉนวน หรือแผ่นแก้วเพราะความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณนั้นสูงกว่าบริเวณอื่น เมื่อเพิ่มแรงดันหรือมีความเครียดเพิ่มสูงขึ้นทำให้ดีสชาร์จขยายตัวกว้างยาวขึ้นห่างออกไปจากแท่งร็อด หรือทรงกลมสู่ขอบแผ่นฉนวน หรือแผ่นแก้ว ถ้าแผ่นฉนวนหรือแผ่นแก้วหนามากพอและแผ่นไม่กว้างเกินไปทำให้เกิดการวาปไฟข้ามผ่านแผ่นฉนวนไปหาอิเล็กโตรดระนาบได้ ถ้าแผ่นแก้วไม่หนามากและแผ่นกว้างทำให้การเกิดดีสชาร์จตามผิวกว้างออกไประดับหนึ่ง แล้วเกิดเบรกดาวน์เจาะทะลุแผ่นแก้วไป

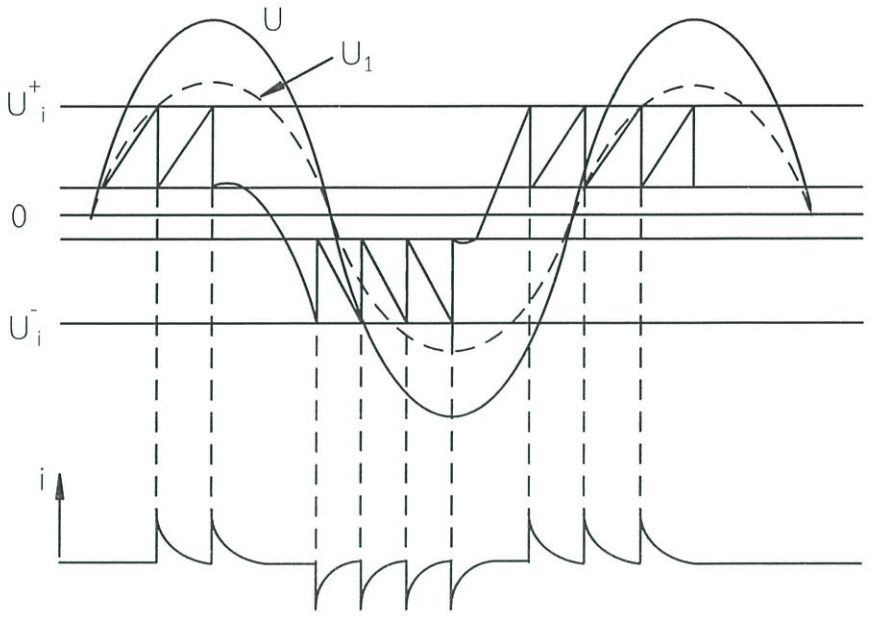
ดีสชาร์จบางส่วนตามผิวที่เริ่มต้นเกิดขึ้นอธิบายได้ด้วยค่าความซึมซาบผ่าน (permittivity) ซึ่งในฉนวนแข็งมีค่าสูงกว่าอากาศหลายเท่า ค่าความจุไฟฟ้า C_2 จึงมีค่ามากกว่า C_1 ฉะนั้นตามหลักของโวลต์เตจดิไวเดอร์แรงดันตกคร่อมส่วนใหญ่อยู่ที่ C_1 นั่นหมายถึงค่าความเครียดสนามไฟฟ้าในส่วนนั้นมีค่าสูงกว่า ทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณดังกล่าวมีค่าเกินค่าวิกฤตดีสชาร์จบางส่วนจึงเริ่มเกิดขึ้น เมื่อแรงดันเพิ่มสูงมากขึ้นทำให้เกิดดีสชาร์จบางส่วนตามผิวขึ้น ซึ่งขึ้นกับความจุไฟฟ้าของฉนวนแข็ง C_2 ถ้าค่า C_2 ยิ่งมากดีสชาร์จบางส่วนตามผิวยิ่งแรงมากขึ้น

2.3.2.3 ดีสชาร์จบางส่วนภายใน (Internal Discharge)

ดีสชาร์จบางส่วนภายในหมายถึง ดีสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นในเนื้อฉนวนแข็งหรือฉนวนเหลวที่มีโพรง หรือฟองก๊าซภายใน หรือสิ่งเจือปนแปลกปลอมที่มีค่าความซึมซาบผ่าน (permittivity) ต่ำกว่าเนื้อฉนวนหลัก ซึ่งทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าในโพรงหรือสิ่งเจือปนดังกล่าวมีค่าสูงกว่าฉนวนรอบๆ ซึ่งอาจพิสูจน์ได้จากการวิเคราะห์จากความซึมซาบผ่าน (permittivity) โดยนำวัสดุที่มีความซึมซาบผ่านต่างกันวางซ้อนกันในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอเมื่อชั้นฉนวนซ้อนได้รับแรงดันถึงระดับหนึ่งแล้วทำให้ฉนวนโดยรอบเสียหายเกิดการกัดกร่อน การฉนวนเสื่อมสภาพ อายุการใช้งานสั้นลง และในบางกรณีอาจนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์ได้ในที่สุด

ถ้าแรงดันคร่อมโพรงถึงค่าความคงทนของก๊าซในโพรงเท่ากับแรงดันเริ่มต้นดีสชาร์จ (U_i) ทำให้เกิดเบรกดาวน์ หรือดีสชาร์จในโพรง ในกรณีแรงดันที่ป้อนเป็นแรงดันกระแสสลับเบรกดาวน์ทำให้เกิดขึ้นที่ยอดทั้งสองของรูปคลื่น จำนวนครั้งดีสชาร์จขึ้นอยู่กับแรงดันที่ป้อน ดังรูปที่ 2.12 เส้นประแสดงถึงแรงดันคร่อมโพรงที่ควรเป็น ถ้าหากไม่เกิดดีสชาร์จ เมื่อ U มีค่าถึง U_i^+ หรือ U_i^- จนกระทั่งถึง U_i อีก แล้วจึงดีสชาร์จใหม่อีก เกิดซ้ำเช่นนี้ ทั้งทางครึ่งบวกและครึ่งลบของรูปคลื่นทุกครั้งที่เกิดดีสชาร์จมีกระแสพัลส์เกิดขึ้นทั้งครึ่งบวกและครึ่งลบเช่นกัน

เมื่อก๊าซในโพรงเบรกดาวน์เกิดอิเล็กตรอนและไอออนบวกในโพรง เมื่อเคลื่อนที่ไปถึงผนังของโพรง ถ้าพลังงานมากพอทำให้พันธะทางเคมีแตกสลาย และเกิดความร้อนขึ้นในโพรง มีเขม่าคาร์บอนที่ผิวใน เกิดกัดกร่อนเนื้อสารเป็นร่องรอยตามผิวในโพรง สภาพนำไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกเพิ่มมากขึ้น ผลทางปฏิกิริยาเคมีทำให้สภาพการฉนวนเสื่อมลง ความหนาของฉนวนลดน้อยลง และนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์ในที่สุด อายุของฉนวนที่มีดีสชาร์จภายในขึ้นอยู่กับแรงดันที่ป้อน และจำนวนครั้งที่ดีสชาร์จเบรกดาวน์โดยกระบวนการนี้เองอาจเกิดขึ้นภายในสองสามวันหรือหลายปี อย่างไรก็ตามหากมีดีสชาร์จภายใน ทำให้อายุการใช้งานของอุปกรณ์สั้นลง



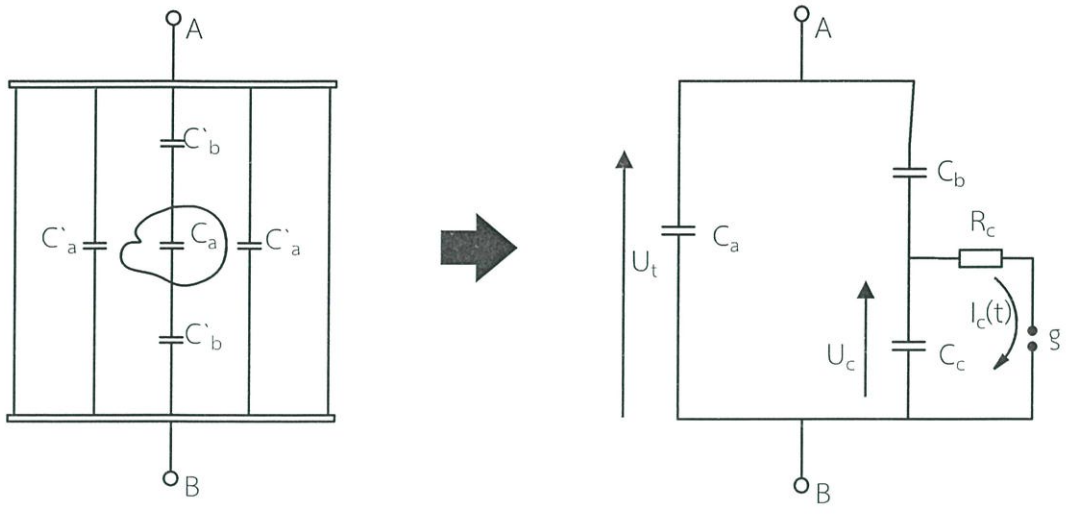
รูปที่ 2.12 ดีสชาร์จภายในเมื่อป้อนแรงดันกระแสสลับ

โดย U = แรงดันระหว่างอิเล็กโตรด
U_1 = แรงดันคร่อมโพรง
U_i = แรงดันเริ่มต้นดีสชาร์จ
I = กระแสพัลส์ดีสชาร์จ

2.3.3 วงจรสมมูลของดีสชาร์จบางส่วน

ด้วยเหตุที่ดีสชาร์จบางส่วนภายในที่เกิดขึ้นในเนื้อฉนวน หรืออุปกรณ์ซึ่งไม่สามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตา ดังนั้นเพื่อทำให้สามารถตรวจจับหรือวัดค่าดีสชาร์จบางส่วนในฉนวนได้ จึงมีการเขียนวงจรสมมูลของฉนวนที่มีดีสชาร์จบางส่วนขึ้น ไม่ว่าเป็นดีสชาร์จบางส่วนชนิดใดก็สามารถเขียนวงจรสมมูลได้ เพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจ จึงใช้วงจรสมมูลสำหรับฉนวนที่มีโพรงก๊าซ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์การเกิดและหาปริมาณดีสชาร์จบางส่วนภายใน ดังวงจรสมมูลของฉนวนในรูปที่ 2.13 [4]

ในรูปที่ 2.13 ก) แสดงวัสดุฉนวน มีโพรงก๊าซภายในเนื้อฉนวน และฉนวนวางอยู่ระหว่างอิเล็กโตรด A-B โพรงก๊าซเขียนแทนด้วยความจุไฟฟ้า C_c ส่วนฉนวนที่ต่ออนุกรมกับโพรงก๊าซหรือC_c เขียนแทนด้วยความจุไฟฟ้า C_b, ส่วนที่ต่ออนุกรมกับ C_c นี้ รวมกันได้เป็น C_b ส่วนฉนวนที่สมบูรณ์ดีอยู่โดยรอบของ C_c ให้ค่าเป็น C_a, และรวมกันในส่วนนี้ได้เป็น C_a ดังรูปที่ 2.13 ข) ซึ่งค่าความจุไฟฟ้าของวัสดุทดสอบ C_t มีค่าโดยประมาณเท่าๆ กับ C_a ซึ่งมีค่ามากกว่า C_c และ C_b มากๆ นั่นคือ $C_t \approx C_a >> > C_b$



(ก) (ข)

รูปที่ 2.13 วงจรสมมูลของวัสดุที่มีโพรงก๊าซและเกิดดีสชาร์จบางส่วนภายใน

ถ้าป้อนแรงดัน U_t ที่ขั้ว A-B จนแรงดันตกคร่อมโพรงก๊าซมีค่าสูงกว่าค่าแรงดันเบรกดาวน์ของโพรงก๊าซที่แทนด้วย C_c ทำให้เกิดเบรกดาวน์ในโพรงก๊าซ ซึ่งเขียนแทนด้วยแกป g และมีความต้านทาน R_c ต่ออนุกรมอยู่เป็นตัวจำกัดกระแสดีสชาร์จ $i_c(t)$ ซึ่งมีลักษณะเป็นพัลส์ช่วงกว้างเป็นนาโนวินาที และทำให้เกิดแรงดันตก δU_c ที่โพรงก๊าซเกิดการปล่อยประจุออกมาเป็น

$$\Delta q_c = \delta U_c C_c \tag{2.18}$$

กระแส $i_c(t)$ นี้ไหลอยู่ภายในที่ไม่สามารถวัดได้ แต่การดีสชาร์จของ C_c ทำให้เกิดการถ่ายเทประจุของ C_b และ C_a ในวงจรสมมูล เป็นผลให้เกิดแรงดันตกที่ขั้ว A-B เท่ากับ δU_t ซึ่งหาได้จากประจุใน C_c คือ

$$\delta U_t = \frac{C_b \delta U_c}{C_b + C_a} \tag{2.19}$$

ค่าแรงดันตกนี้ไม่ให้ข้อมูลอะไรเกี่ยวกับ δq_c เลย แต่เป็นสัดส่วนกับ $C_b \delta U_c$ ค่า δU_t สามารถวัดได้เป็นพัลส์รูปขั้น ขึ้นอยู่กับ $i_c(t)$

เมื่อแทนค่า

$$\delta U_c = \frac{\delta q_c}{C_c} \tag{2.20}$$

ได้ $$\delta U_t = \frac{C_b \delta q_c}{C_c (C_b + C_a)} \quad (2.21)$$

ค่าของ δU_t มีค่าเพียงเป็นมิลลิโวลต์ถึงโวลต์ ในขณะที่ δU_c มีค่าเป็นกิโลโวลต์ แต่ไม่ทราบค่า C_c และ C_b จึงไม่สามารถหาความสัมพันธ์ของ δU_t กับ δU_c และ δq_c ได้ อย่างไรก็ตาม การดีสชาร์จในโพรงก๊าซ C_c เป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงถ่ายเทประจุ หรือกระแสในวงจรภายนอกที่สามารถตรวจวัดได้

2.3.4 สื่อสัญญาณที่ใช้ตรวจจับ PD

การตรวจจับและวัดค่า PD นั้นอาศัยผลที่เกิดจากดีสชาร์จบางส่วน ซึ่งมีผลสืบเนื่องในรูปแบบต่างๆ คือ [4]

1) มีกระแสพัลส์ไฟฟ้าเกิดขึ้นขณะที่เกิดดีสชาร์จบางส่วน

2) เกิดกำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก วัดค่า $\tan\delta = f(U)$ เส้นกราฟหักมุมเมื่อเริ่มเกิด PD

3) เกิดคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ในย่านความถี่สูง รบกวนระบบสื่อสาร

4) เกิดแสงเรือง เนื่องจากเกิดไอออไนเซชันเป็นโคโรนา

5) เกิดโคโรนาในอากาศ ทำให้มีกลิ่นโอโซน (O_3) และเกิดเสียงฮิสซิ่ง (hissing)

6) เกิดความดันก๊าซเพิ่มสูงขึ้น

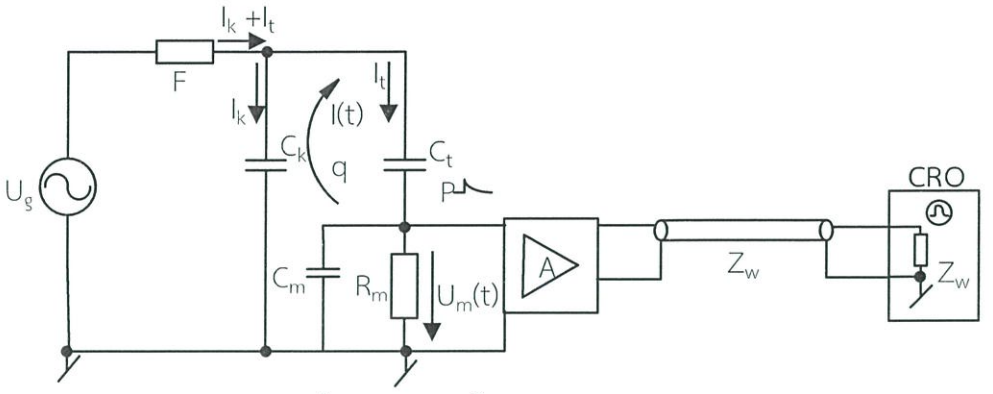
7) เกิดความร้อน

8) เกิดปฏิกิริยาทางเคมี

การตรวจจับ PD ส่วนมากอาศัยผลทางไฟฟ้า ซึ่งให้ผลที่มีความถูกต้องดีกว่าวิธีอื่นๆ คือ ดีสชาร์จทำให้เกิดกระแสพัลส์ไหลผ่านวงจรต่ออันดับกับฉนวนทดสอบ จึงสามารถวัดแรงดันตกคร่อมอิมพีแด๊นซ์ที่ต่ออยู่ในวงจรได้ การใช้สื่อสัญญาณอื่นมีความไวน้อยกว่า บางอย่างก็ต้องเกิด PD มากๆ จึงตรวจจับได้ การตรวจจับสื่อสัญญาณพัลส์ไฟฟ้าสามารถวิเคราะห์ได้ด้วยวงจรสมมูลการดีสชาร์จบางส่วน

2.3.5 วงจรพื้นฐานการวัด PD

วงจรพื้นฐานสำหรับวัดดีสชาร์จบางส่วน PD ประกอบด้วยตัวจ่ายแรงดันทดสอบ (U_s) คือ หม้อแปลงทดสอบป้อนแรงดันให้กับวัสดุทดสอบ และตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว (C_k) ผ่านตัวกรองความถี่สูง (F) ดังวงจรในรูปที่ 2.14 [4]



รูปที่ 2.14 วงจรพื้นฐานการวัด PD

ในวงจรรูปที่ 2.14

U_s คือ ตัวจ่ายแรงดันสูงกระแสสลับป้อนให้กับตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว C_k และวัสดุทดสอบ P

F คือ ตัวกรอง ประกอบด้วยอิมพีแด็นซ์มีค่าสูงที่ความถี่สูง นั่นคือตัวกรองซึ่งทำหน้าที่กันไม่ให้คลื่นรบกวนความถี่สูงจากตัวจ่ายเข้าไปรบกวนวงจรทดสอบ แต่ยอมให้กระแสทดสอบความถี่ต่ำไหลผ่านไปได้ ในเวลาเดียวกัน ตัวกรองทำหน้าที่กันไม่ให้สัญญาณดีสชาร์จบางส่วน (PD) จากวัสดุทดสอบไหลหนีออกไปทางตัวจ่ายแรงดันได้ ตัวกรองนี้อาจประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำ L หรือประกอบตัวเก็บประจุ C เป็นวงจร π ก็ได้

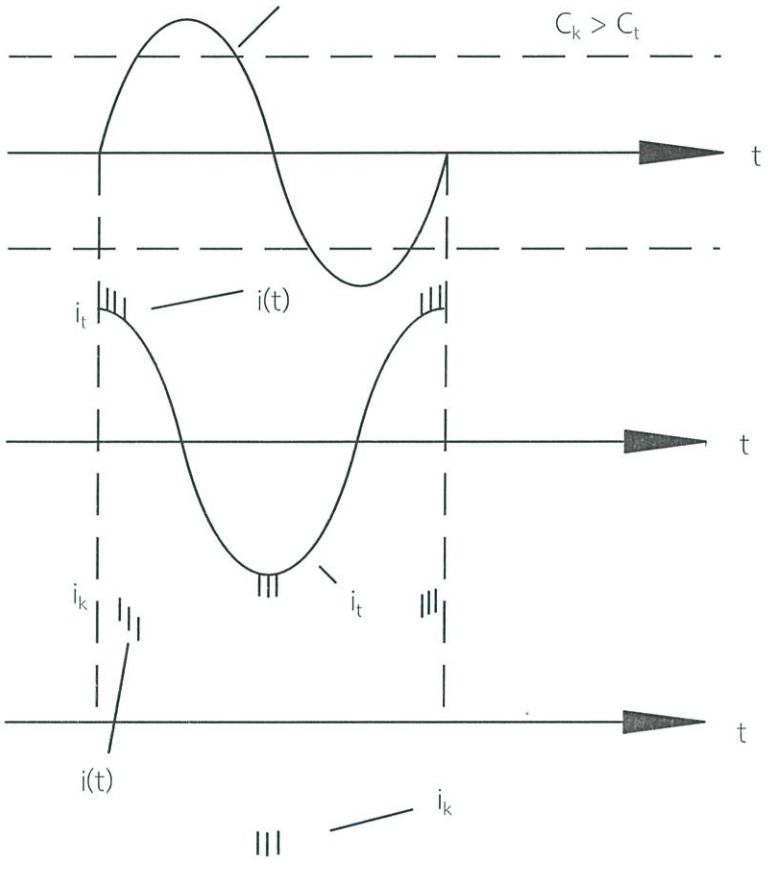
C_k คือ ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว มีค่าความจุไฟฟ้าประมาณเท่าๆ กับค่าความจุไฟฟ้าของวัสดุทดสอบหรือใหญ่กว่า ในเชิงปฏิบัติ C_k มีค่าความจุไฟฟ้าประมาณ 1000 pF เพื่อให้มีค่าอิมพีแด็นซ์ต่ำพอที่สามารถทำให้กระแสดีสชาร์จบางส่วน i(t) ซึ่งมีค่า <100 uA และเป็นพัลส์แคบๆ ไหลได้ครบวงจรเป็นกระแสที่วัดได้

ตามที่ได้กล่าวแล้วว่าเมื่อเกิดดีสชาร์จในโพรงก๊าซของฉนวนทำให้แรงดันที่ขั้วทดสอบ A-B ตกไปเท่ากับ δU_t และเป็นเหตุให้เกิดการถ่ายเทประจุจากตัวเก็บประจุ C_k เข้าไปทดแทนนั่นคือมีกระแสไหลวน i(t) ที่สามารถตรวจจับ หรือวัดได้ (measurable current) ซึ่งมีลักษณะเป็นพัลส์ซ้อนอยู่บนรูปคลื่นกระแสที่ป้อนให้กับวัสดุทดสอบ i_t และตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว i_k (C du/dt) กระแสทั้งสองมีมุมเฟสนำหน้าแรงดันที่ป้อนประมาณ 90 องศา ถ้าไม่มีค่าเก็บประจุสเตรย์ขนานกับ C_k กระแสพัลส์ PD ที่ซ้อนบนรูปคลื่นกระแสป้อนนี้ มีขนาดเท่ากันแต่ขั้วตรงกันข้าม ดังรูปที่ 2.15

การวัดที่ถูกต้อง ค่าความต้านทานวัด R_m ดังรูปที่ 2.14 ต้องสมคู่กัน (match) กับเคเบิลวัดที่มี Z_w แรงดันที่วัดที่ CRO หรือเครื่องบันทึกทรานเซี้ยนต์ ก็คือ

$$U_m(t) = \frac{(i_t + i)Z_w R_m}{R_m + Z_w} \qquad (2.22)$$

ถ้าค่าเก็บประจุวัสดุทดสอบน้อย แรงดันที่ได้จากกระแส PD นี้ i(t) จำแนกจากกระแสประจุ i(t) ได้ชัดเจน



รูปที่ 2.15 รูปคลื่นกระแสและแรงดันทดสอบของ PD

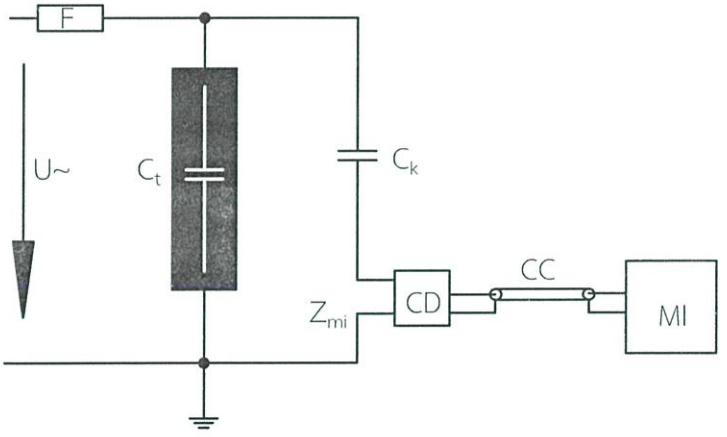
โดย u_t = แรงดันที่ป้อน
i_t = กระแสที่ป้อนให้กับวัสดุทดสอบ C_t
i_k = กระแสที่จ่ายให้กับตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว C_k
i(t) = กระแสพัลส์ดีสชาร์จบางส่วน (PD) ที่วัดได้

กระแสพัลส์ PD คือ i(t) ในแต่ละครึ่งไซเคิลของแรงดันที่ป้อน มีจำนวนพัลส์มากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับขนาดแรงดันทดสอบ และลักษณะตำแหน่งของการเกิดผิดพร่อง ถ้าวัสดุทดสอบมีจุดผิดพร่องหลายแห่ง จำนวนพัลส์ PD มีมากขึ้น ซึ่งมีช่วงห่างระหว่างพัลส์เป็น μs หรือเร็วกว่านั้น โดยทั่วไปสามารถสังเกตเห็นอัตราการเกิดดีสชาร์จมีค่าสูงมากที่สุด เมื่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน dU_t/dt มีค่าสูงสุด ฉะนั้นขั้วของพัลส์จึงไม่ขึ้นอยู่กับขั้วของแรงดันทดสอบ(U_t) แต่ขึ้นอยู่กับเครื่องหมายการเปลี่ยนแปลงโดยมีเครื่องหมายตรงกันข้าม ในกรณีดีสชาร์จโคโรนาซึ่งเป็นดีสชาร์จบางส่วนเกิดภายนอก เกิดที่ยอดของแรงดันทดสอบ และเครื่องหมายของพัลส์ PD ต้องสอดคล้องกับเครื่องหมาย (ขั้ว) ของแรงดันทดสอบที่ป้อน

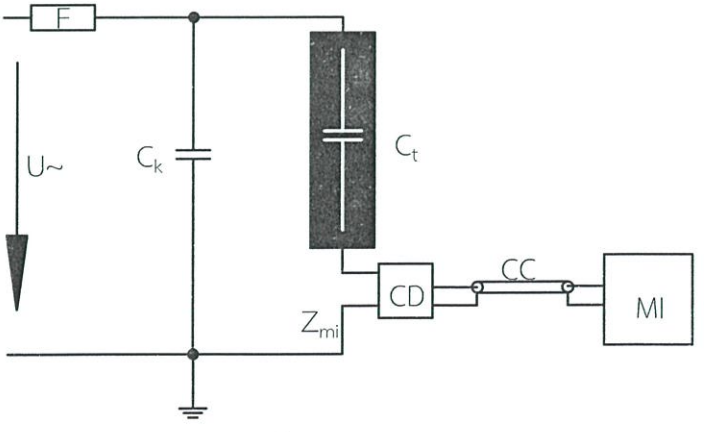
ในรูปที่ 2.14 เป็นวงจรที่ใส่แอมปลิฟายเออร์ที่มีแบนด์วิดท์สูงมากที่ต้นทางเคเบิลวัดทำให้เคเบิลวัดสัญญาณไม่ต่อทางไฟฟ้ากับความต้านทาน R_m เพราะ R_m มีค่าสูง มีผลให้วัดคลาดเคลื่อนในการนี้จึงใส่ตัวเก็บประจุ C_m ประมาณ 10 pF ที่ต่อระหว่างปลายล่าง C_t กับดิน และขนานกับ R_m จึงเป็นทางเบี่ยงของสัญญาณประกอบที่มีความถี่สูงมากๆ ของ i(t) ฉะนั้นถ้า i(t) เป็นพัลส์สั้นๆ รูปร่างและค่ายอดบิดเบือน C_m ทำการอินทีเกรตกระแส และ R_m ที่ใส่ไว้มีผลให้เกิดการหน่วงด้วยเวลาคงตัว $R_mC_tC_k/(C_t+C_k)$

2.3.6 การต่อวงจรระบบวัด PD ในวงจรทดสอบ

การต่อวงจรระบบวัด PD ในวงจรทดสอบ มีความแตกต่างตรงที่การต่ออิมพีแด๊นซ์วัด Z_m ซึ่งมาตรฐานการวัด PD คือ IEC 60270 เรียกว่าตัวต่อคาบเกี่ยว (coupling device) CD ประกอบเป็นอิมพีแด๊นซ์วัด Z_{mi} ต่อที่ต้นระบบวัดแบ่งเป็น 2 แบบ ดังในรูปที่ 2.16 ก) และ 2.16 ข) ซึ่งเป็นวงจรตรวจจับ PD วิธีตรง (straight detection circuit)



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.16 วงจรทดสอบตรวจจับ PD แบบตรง
ก) CD ต่ออนุกรมกับ C_k ข) CD ต่ออนุกรมกับ C_t

โดย U คือ แรงสูงตัวจ่าย
F คือ ตัวกรอง
Z_{mi} คือ อิมพีแด๊นซ์ป้อนเข้าของระบบ
CC คือ เคเบิลวัด
C_t คือ ค่าเก็บประจุวัสดุทดสอบ
C_k คือ ค่าเก็บประจุคาบเกี่ยว
CD คือ ตัวต่อคาบเกี่ยว

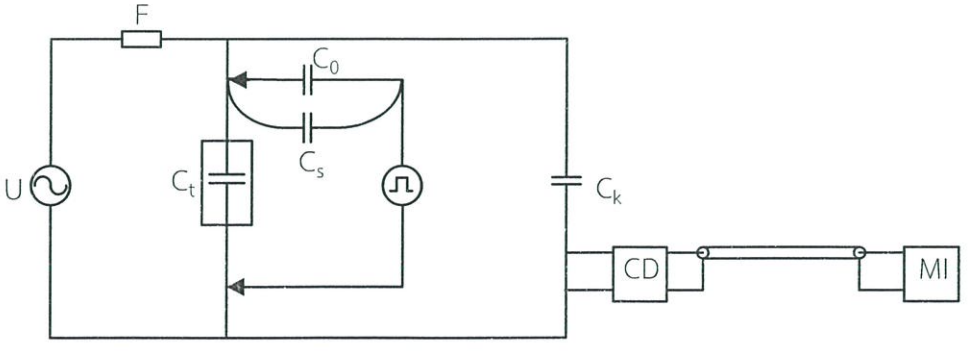
ความแตกต่างของวงจรแบบ ก) และ แบบ ข) คือ แบบ ก) ตัวต่อคาบเกี่ยว CD ต่ออนุกรมกับ C_k ที่มีศักย์เป็นดิน เป็นแบบที่ใช้กันมากในทางปฏิบัติ ไม่เสี่ยงต่อการเกิดเบรกดาวน์ เพราะทราบค่าแรงดันที่กำหนดของ C_k แต่ความไวในการวัดน้อยกว่าแบบ ข) เพราะ PD ที่เกิดขึ้นนั้นเกิดขึ้นในวัสดุทดสอบ C_t แบบ ข) มีความไวสูงกว่า เพราะตัวค่าคาบเกี่ยว CD ต่ออนุกรมโดยตรงกับวัสดุทดสอบ C_t ค่าเก็บประจุสเตรย์ทั้งหลายด้านแรงสูงกับดินเพิ่มค่า C_k ทำให้ความไวของวงจรวัด PD สูงขึ้น แต่มีข้อเสียที่เสี่ยงต่อการเกิดเบรกดาวน์ที่วัสดุทดสอบ ทำให้เครื่องวัด PD เสียหาย

2.3.7 การปรับเทียบเครื่องตรวจจับ PD ในวงจรทดสอบ

เนื่องจากสัญญาณ PD ที่เข้าเครื่องวัด แปรตามขนาดของตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว C_k และวัสดุทดสอบ C_t จึงต้องมีการปรับเทียบด้วย PD มาตรฐานก่อนทำการป้อนแรงดันเข้าวงจรทดสอบ โดยใช้เครื่องดีสชาร์จมาตรฐานที่ทราบค่าประจุไฟฟ้าถูกต้องแน่นอน ซึ่งเป็นการจำลองการเกิด PD ด้วยการส่งกระแสพัลส์ที่มีขนาดของประจุมาตรฐาน q_0 ที่ขั้วทั้งสองของวัสดุทดสอบ ดังรูปที่ 2.17 เครื่องปรับเทียบดีสชาร์จมาตรฐานประกอบด้วยแหล่งจ่ายรูปขั้น U_0 ต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุขนาดเล็ก C_0 มาตรฐาน IEC

กำหนดให้ $C_0 \leq 0.1$ Ca

ถ้า C_0 เป็นตัวเก็บประจุแรงต่ำ กำหนดช่วงเวลาขึ้นของ U_0 เป็น $t_r \geq 60$ ns

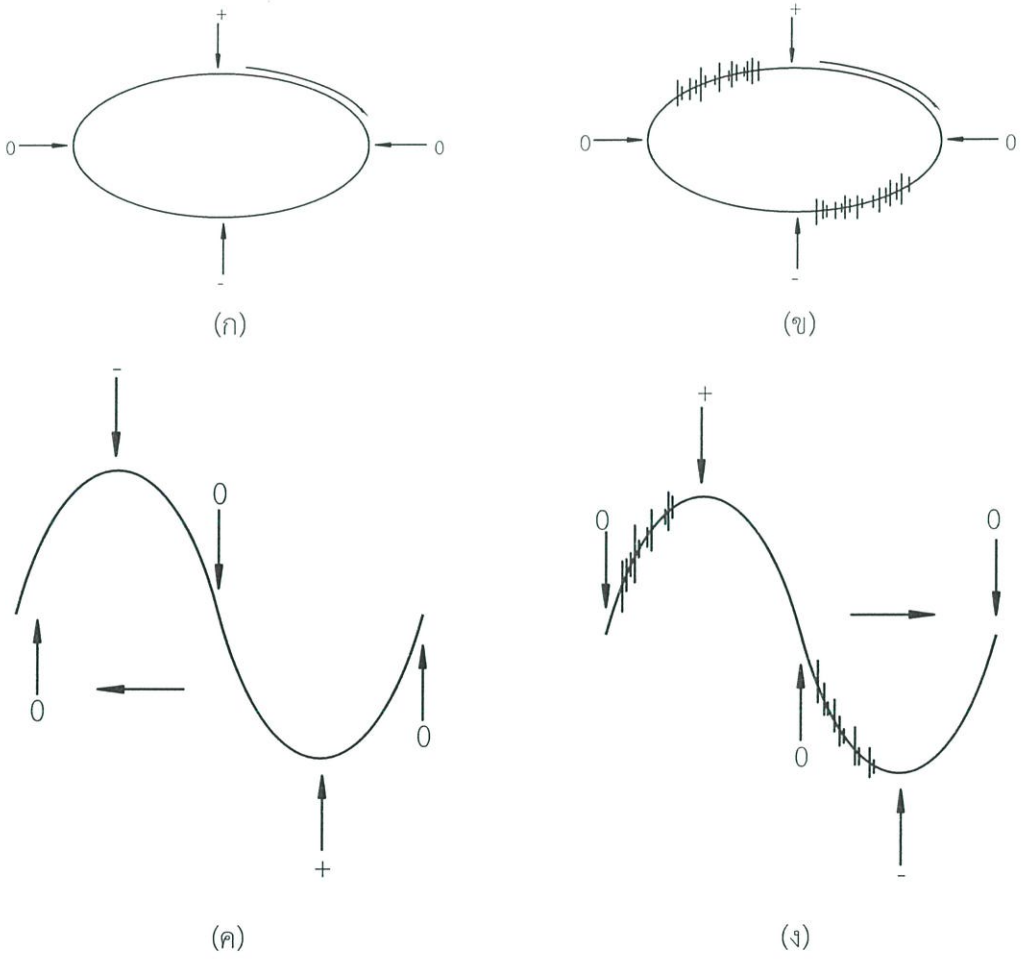


รูปที่ 2.17 การปรับเทียบวงจรทดสอบวัด PD

2.3.8 การแสดงผลดีสชาร์จบางส่วน

การวัดค่า PD อาจวัดด้วยมิเตอร์ความถี่สูงออกมาเป็น micro-volt (μV) หรือ picocoulomb (pC) แต่ทราบเพียงขนาดของ PD เท่านั้น วิธีที่นิยมใช้แสดงผลวัด PD ในปัจจุบัน คือการแสดงผลบนจอออสซิลโลสโคป ซึ่งอาจแสดงได้ 2 แบบ คือให้รูปพัลส์ของ PD ปรากฏบนฐานเวลารูปอิลิปส์ ซึ่งมีเครื่องหมายแสดงตำแหน่งยอดบวก ยอดลบ และตำแหน่งศูนย์ของรูปแรงดันทดสอบ ดังรูปที่ 2.18 ก, ข หรือแสดงให้รูปคลื่นพัลส์ PD ปรากฏกบนฐานเวลารูปคลื่นไซน์ ดังรูป 2.18 ค, ง

การแสดง PD บนฐานเวลารูปคลื่นไซน์มีผลดีที่วัดขนาดได้ถูกต้อง และสังเกตตำแหน่งที่เกิดได้แน่นอน การแสดงบนฐานเวลารูปอิลิปส์มีข้อดี คือ แยกได้ว่า PD เกิดจากสาเหตุอะไร



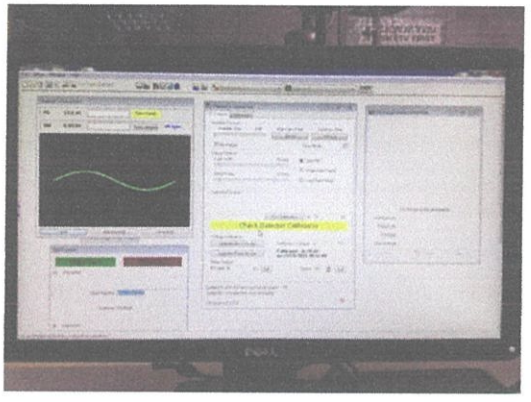
รูปที่ 2.18 การแสดงผลของ PD

ก) ฐานเวลารูปอิลิปส์ ข) ตัวอย่าง PD บนฐานเวลารูปอิลิปส์

ค) ฐานเวลารูปคลื่นไซน์ ง) ตัวอย่าง PD บนฐานเวลารูปคลื่นไซน์

2.3.9 เครื่องตรวจจับ PD แบบใช้คอมพิวเตอร์เป็นฐาน

ความเจริญก้าวหน้าด้านเทคโนโลยีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น คอมพิวเตอร์ ช่วยให้วิศวกรสามารถพัฒนาเครื่องตรวจจับ PD ได้สะดวกและมีประสิทธิภาพสูง โดยใช้คอมพิวเตอร์เป็นฐาน ช่วยให้สามารถวิเคราะห์สาเหตุ PD ที่เกิดในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงเป็นประเภทใด ง่ายต่อการระบุตำแหน่งที่เกิด PD ในเคเบิล วงจรภาคดิจิตอลทั้งหมดโปรแกรมไว้ในชิป FPGA บนแก่น PCB ที่ติดตั้งภายในคอมพิวเตอร์ เครื่องตรวจจับ PD ดังกล่าวเป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60270 ดังตัวอย่างเครื่องตรวจจับ PD ใช้คอมพิวเตอร์เป็นฐาน ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 เครื่องตรวจจับ PD โดยใช้คอมพิวเตอร์เป็นฐาน

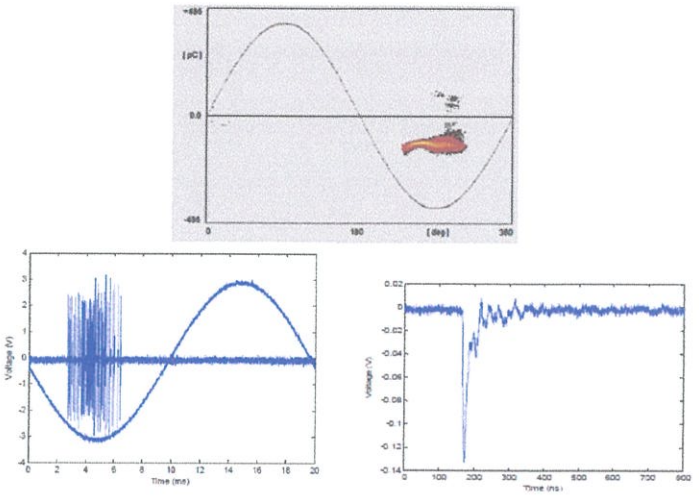
2.3.10 การวิเคราะห์รูปแบบการเกิดดีสชาร์จบางส่วน

การเกิดดีสชาร์จบางส่วนสามารถเกิดได้จากสาเหตุหลายประการ เพราะฉะนั้นการวิเคราะห์ถึงสาเหตุดังกล่าวจึงเป็นเรื่องสำคัญ ในทางปฏิบัติเมื่อทำการทดสอบหารูปแบบของดีสชาร์จบางส่วนในวัสดุทดสอบนั้น ผลที่ได้คือผลอันเนื่องมาจากการเกิดดีสชาร์จบางส่วนในแต่ละส่วนรวมเข้าด้วยกัน การวิเคราะห์เพื่อแยก และการระบุสาเหตุดังกล่าวสามารถทำได้โดยการแยกรูปแบบของการเกิดดีสชาร์จบางส่วนในวัสดุทดสอบออกมาให้ได้ จาก [5] แสดงรูปแบบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนในสภาวะต่างๆ ได้ดังตารางที่ 2.4

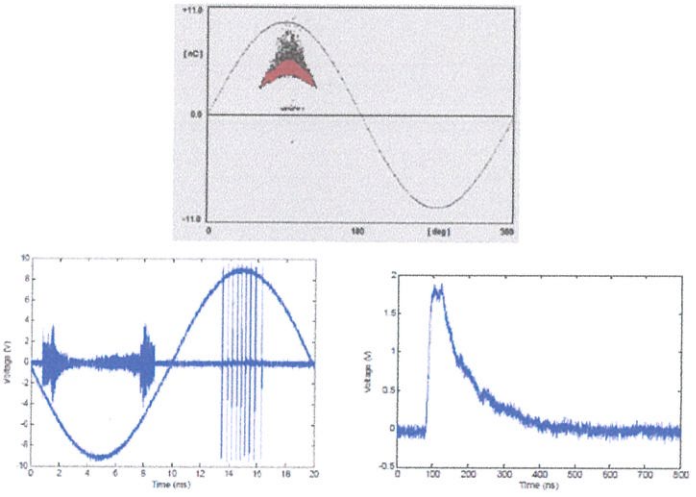
ตารางที่ 2.4 รูปแบบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนในสภาวะต่างๆ

รูปแบบ PD	มุมที่เกิด	ขนาด	หมายเหตุ
โคโรนาด้านลบในฉนวนอากาศ (รูปที่ 2.20)	270°	เล็ก	- อัตราการเกิดซ้ำขึ้นอยู่กับแรงดัน - มีการเกิดซ้ำมากที่ 10% สูงกว่าแรงดันเริ่มเกิด - แรงดันเริ่มเกิดต่ำกว่าโคโรนาด้านบวก
โคโรนาด้านลบในฉนวนน้ำมัน (รูปที่ 2.21)	270°	เล็ก	- มีการเกิดซ้ำน้อยที่ 10% สูงกว่าแรงดันเริ่มเกิด - แรงดันเริ่มเกิดใกล้เคียงกับโคโรนาด้านบวก
โคโรนาด้านบวกในฉนวนอากาศ (รูปที่ 2.22)	90°	ใหญ่	- จำนวนการเกิดดีสชาร์จเกิดขึ้นอยู่กับแรงดัน - มีการเกิดซ้ำมากที่ 10% สูงกว่าแรงดันเริ่มเกิด - แรงดันเริ่มเกิดสูงกว่าโคโรนาด้านลบ
โคโรนาด้านบวกในฉนวนน้ำมัน (รูปที่ 2.23)	90°	ใหญ่	- มีการเกิดซ้ำน้อยที่ 10% สูงกว่าแรงดันเริ่มเกิด - แรงดันเริ่มเกิดใกล้เคียงกับโคโรนาด้านลบ - มีเสียงดีสชาร์จด้านบวกชัดเจน
ดีสชาร์จตามผิวในฉนวนอากาศ (รูปที่ 2.24, 2.25)	0°-90° 180°-270°	เล็ก-กลาง	- รูปแบบดีสชาร์จขึ้นกับรูปทรงของอิเล็กโตรด - มีการเกิดซ้ำมากที่ 10% สูงกว่าแรงดันเริ่มเกิด
ดีสชาร์จตามผิวในฉนวนน้ำมัน (รูปที่ 2.26)	330°-90° 150°-270°	เล็ก-กลาง	- รูปแบบดีสชาร์จสมมาตรรอบแกน x ทุกครึ่งคาบ - มีการเกิดซ้ำมากที่ 10% สูงกว่าแรงดันเริ่มเกิด
ดีสชาร์จจากฟองอากาศ (รูปที่ 2.27)	เกือบทุกมุม	ขึ้นอยู่กับขนาดฟองอากาศ	- จำนวนดีสชาร์จขึ้นอยู่กับจำนวนฟองอากาศ - มีการเกิดซ้ำน้อยที่ 10% สูงกว่าแรงดันเริ่มเกิด - รูปแบบดีสชาร์จสมมาตรรอบแกน x ทุกครึ่งคาบ
ดีชาร์จระหว่างกระดาษฉนวน (รูปที่ 2.28)	330°-90° 150°-270°	ขึ้นอยู่กับขนาดช่องว่าง	- มีการเกิดซ้ำมากที่ 10% สูงกว่าแรงดันเริ่มเกิด - รูปแบบดีสชาร์จสมมาตรรอบแกน x ทุกครึ่งคาบ
ดีสชาร์จจากตะกอนโลหะในน้ำมัน (รูปที่ 2.29)	เกือบทุกมุม	เล็ก-กลาง	- มีการเกิดซ้ำน้อยที่ 10% สูงกว่าแรงดันเริ่มเกิด - รูปแบบดีสชาร์จสมมาตรรอบแกน x ทุกครึ่งคาบ
ดีสชาร์จเพราะเชื่อมโลหะไม่แน่น (รูปที่ 2.30)	0°-90° 180°-270°	ใหญ่มาก	- มีการเกิดซ้ำน้อยที่ 10% สูงกว่าแรงดันเริ่มเกิด - รูปแบบดีสชาร์จสมมาตรรอบแกน x ทุกครึ่งคาบ - มีเสียงดีสชาร์จชัดเจน

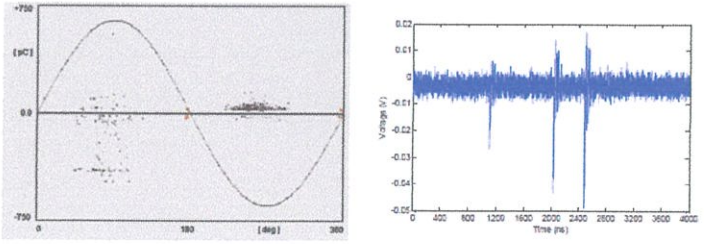
- ผลของรูปแบบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนในสภาวะต่างๆ



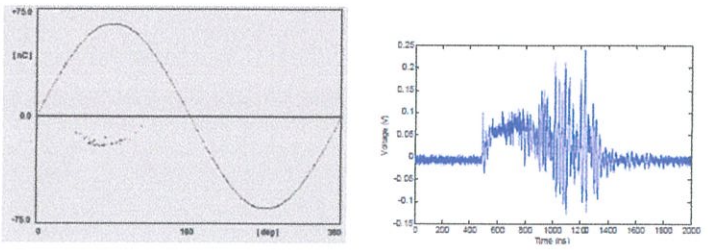
รูปที่ 2.20 ผลของโคโรนาดีสชาร์จด้านลบในฉนวนอากาศ



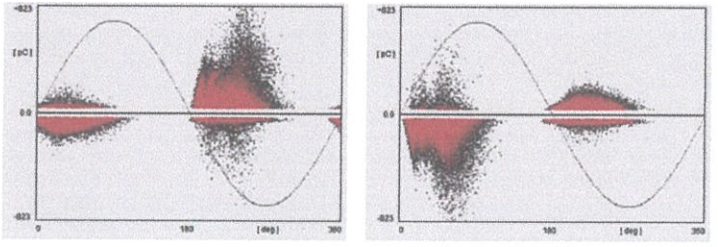
รูปที่ 2.21 ผลของโคโรนาดีสชาร์จด้านบวกในฉนวนอากาศ



รูปที่ 2.22 ผลของโคโรนาดีสชาร์จด้านลบในฉนวนน้ำมัน

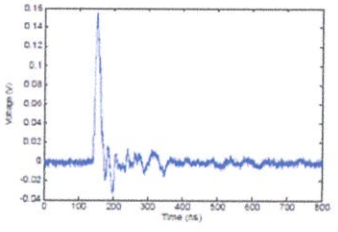


รูปที่ 2.23 ผลของโคโรนาดีสชาร์จด้านบวกในฉนวนน้ำมัน

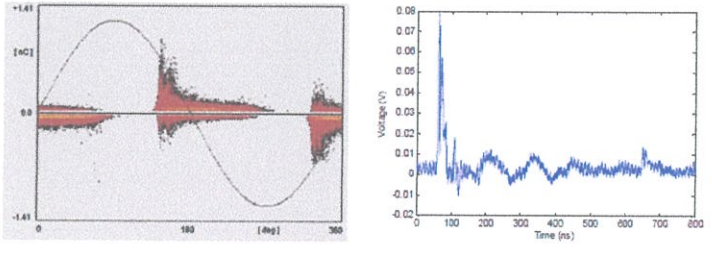


(A) (B)

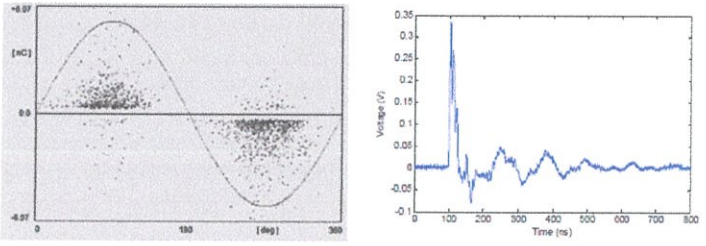
รูปที่ 2.24 รูปแบบการเกิดดีสชาร์จตามผิวบนผิวของฉนวนไมก้า
A) High Voltage เชื่อมเข้ากับด้านบนของอิเล็กโตรด
B) High Voltage เชื่อมเข้ากับแผ่นทองแดงที่มีขอบแหลม



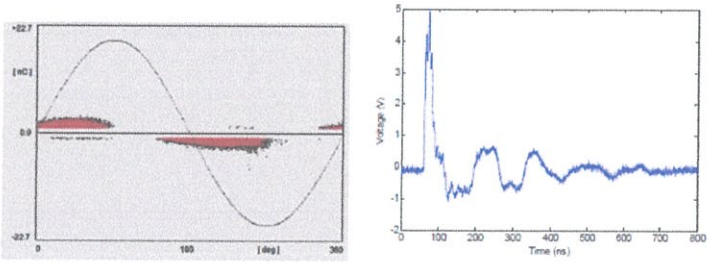
รูปที่ 2.25 ผลของดีสชาร์จตามผิวในอากาศ



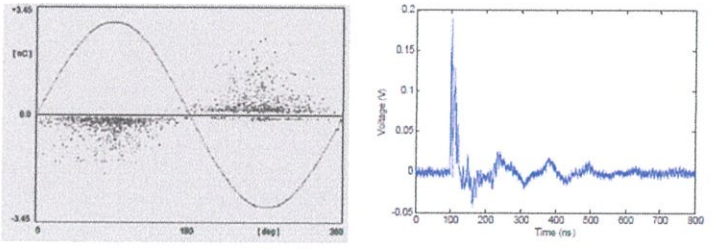
รูปที่ 2.26 ผลของดีสชาร์จตามผิวในน้ำมัน



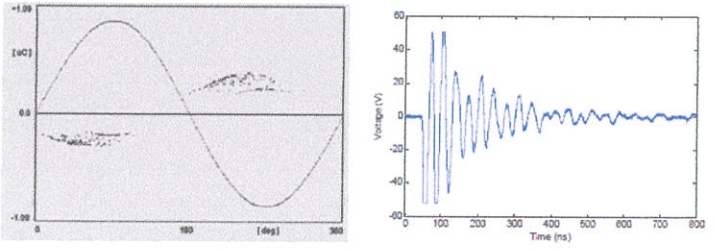
รูปที่ 2.27 ผลของดีสชาร์จเนื่องจากฟองอากาศในน้ำมัน



รูปที่ 2.28 ผลของดีสชาร์จเนื่องจากช่องว่างระหว่างกระดาษฉนวน



รูปที่ 2.29 ผลของดีสชาร์จเนื่องจากตะกอนโลหะในฉวนน้ำมัน



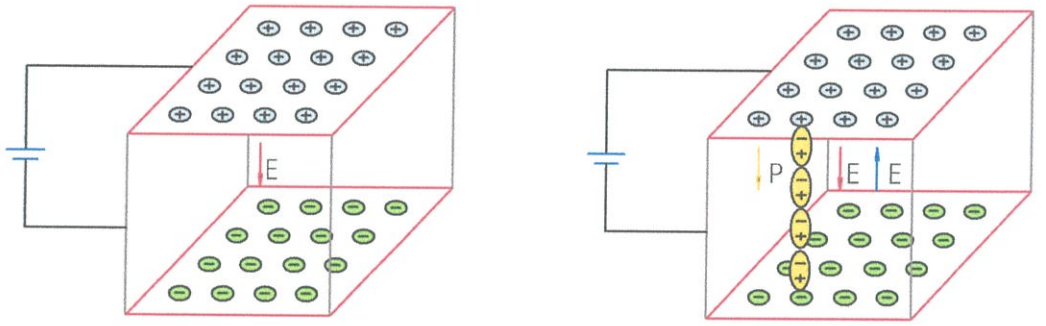
รูปที่ 2.30 ผลของดีสชาร์จเนื่องจากการเชื่อมชิ้นส่วนโลหะไม่แน่น

2.4 การวัดกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชัน (Polarization and Depolarization Current) [9]

2.4.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับกระแสโพลาไรเซชันและกระแสดีโพลาไรเซชัน

คุณลักษณะสำคัญประการหนึ่งของฉนวนคือ การมีขั้วหรือโพลาไรเซชัน (polarization, P) เมื่อฉนวนอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าที่ถูกจ่ายจากภายนอก สนามไฟฟ้าจากภายนอกนี้ทำให้เกิดแรงกระทำต่ออนุภาค (อะตอม, โมเลกุล, ประจุต่างๆ เป็นต้น) ภายในเนื้อฉนวนซึ่งทำให้อนุภาคดังกล่าวเกิดการหมุนเพื่อตอบสนองต่อแรงกระทำจากสนามไฟฟ้าภายนอก ดังรูปที่ 2.31

จากรูปที่ 2.31 พบว่าเมื่อจ่ายแรงดันกระแสตรงให้กับฉนวน ทำให้อนุภาคฉนวนเกิดการหมุนเพื่อตอบสนองต่อแรงกระทำจากสนามไฟฟ้า โดยอนุภาคหมุนด้านที่เป็นประจุลบไปยังแผ่นอิเล็กโตรดด้านบวกและหมุนด้านที่เป็นประจุบวกไปยังอิเล็กโตรดด้านลบ และเมื่อปลดแหล่งจ่ายแรงดันออกจากระบบ ทำให้อนุภาคเกิดการหมุนตัวกลับสู่สภาพเดิมเหมือนดังก่อนหน้าที่ทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับฉนวน



(ก) (ข)

รูปที่ 2.31 กระบวนการการมีขั้ว หรือโพลาไรเซชัน
ก) ระหว่างแผ่นอิเล็กโตรดเป็นฉนวนสูญญากาศ
ข) ระหว่างแผ่นอิเล็กโตรดแทนที่สูญญากาศด้วยฉนวน

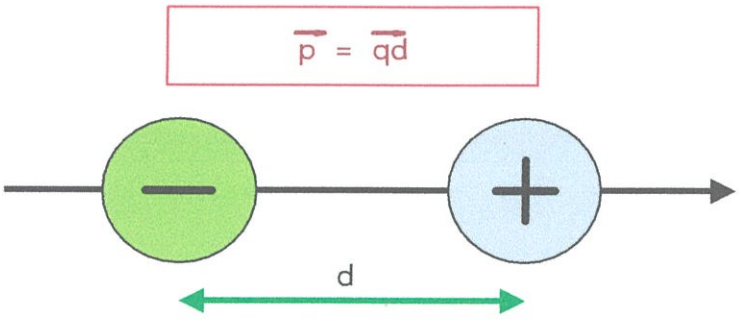
การมีขั้วหรือโพลาไรเซชัน, P (C/m^2) คือ อัตราส่วนของโมเมนต์เชิงขั้วทางไฟฟ้า (electric dipole moment) ของฉนวนต่อปริมาตรของฉนวน

$$\text{การมีขั้วหรือโพลาไรเซชัน} = \frac{\text{โมเมนต์เชิงขั้วทางไฟฟ้า (electricdipole moment)}}{\text{ปริมาตรของฉนวน}} \qquad (2.23)$$

โดยที่โมเมนต์เชิงขั้วทางไฟฟ้า (electric dipole moment, p) เกิดขึ้นได้หากมีประจุอยู่ที่จุด 2 จุด จุดหนึ่งมีประจุ +q และอีกจุดหนึ่งมีประจุ −q ทำให้เกิดโมเมนต์เชิงขั้วทางไฟฟ้าระหว่างประจุทั้งสอง โมเมนต์เชิงขั้วทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเป็นดังสมการที่ 2.24

$$p = qd \qquad (2.24)$$

d คือ เวกเตอร์ระยะกระจัด (displacement vector) มีทิศทางจากประจุลบไปยังประจุบวก ดังนั้นโมเมนต์เชิงขั้วทางไฟฟ้าจึงเป็นปริมาณเวกเตอร์ที่มีทิศจากประจุลบไปประจุบวก



รูปที่ 2.32 โมเมนต์เชิงขั้วทางไฟฟ้าระหว่างประจุทั้งสอง

ขนาดของการมีขั้วที่เกิดขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงต่อความเข้มสนามไฟฟ้าที่กระทำกับเนื้อฉนวน ตราบเท่าที่ความเข้มสนามไฟฟ้านั้นมีค่าสูงไม่มากพอที่ทำให้เกิดความเสียหายต่อฉนวนได้ การมีขั้ว หรือโพลาไรเซชันสามารถแสดงในรูปสมการ ดังนี้

$$P = (\varepsilon_r - 1)\varepsilon_0 E = \chi\varepsilon_0 E \qquad (2.25)$$

เมื่อ $\chi = (\varepsilon_r - 1)$ คือ dielectric susceptibility ซึ่งเป็นแฟคเตอร์แสดงความสามารถในการตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าของฉนวน

ε_0 คือ เปอร์มิตติวิตี้ของสุญญากาศ

ε_r คือ เปอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์ของวัสดุใดๆ

ในฉนวนสุญญากาศความหนาแน่นของฟลักซ์ไฟฟ้า (dielectric flux density, D) เป็นสัดส่วนโดยตรงกับสนามไฟฟ้า (E) ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของฟลักซ์ไฟฟ้า และสนามไฟฟ้าในสุญญากาศได้ดังสมการที่ 2.26

$$D = \varepsilon_0 E \qquad (2.26)$$

เมื่อแทนที่ฉนวนสุญญากาศด้วยวัสดุฉนวนใดๆ ทำให้ความหนาแน่นของฟลักซ์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น อันเป็นผลเนื่องมาจากการมีขั้วของวัสดุฉนวนดังกล่าว ดังนั้นจึงเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง D และ E ได้ใหม่ ดังสมการที่ 2.27

เนื่องจาก $D = \varepsilon_0 E + P \qquad (2.27)$

$$P = (\varepsilon_r - 1)\varepsilon_0 E = \chi\varepsilon_0 E$$

ดังนั้น $D = \varepsilon_0 E + \chi\varepsilon_0 E = \varepsilon_0 E(1+\chi) \qquad (2.28)$

หากสนามไฟฟ้าจากภายนอกที่ป้อนให้กับฉนวนมีความสัมพันธ์กับเวลา สามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง D(t) กับ E(t) ได้ ดังสมการที่ 2.29 และ 2.30

$$D(t) = \varepsilon_0 E(t) + P(t) \qquad (2.29)$$

$$D(t) = \varepsilon_0 E(t) + \chi\varepsilon_0 E(t) = \varepsilon_0 E(t)(1+\chi(t)) \qquad (2.30)$$

การมีขั้วที่เกิดขึ้นมีทิศทางเดียวกับสนามไฟฟ้าจากภายนอก E(t) และนั่นหมายถึงการมีขั้วมีทิศทางเดียวกับ D(t) ด้วยเช่นกัน

การมีขั้ว หรือโพลาไรเซชัน มีด้วยกัน 5 แบบ ดังนี้

1) Electronic Polarization หรือ Optical polarization

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

2) Atomic Polarization หรือ Ionic polarization หรือ Vibrational polarization

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

3) Orientation Polarization

Orientation Polarization เกิดขึ้นภายในเนื้อวัสดุที่ประกอบด้วยโมเลกุลหรืออนุภาคที่มีขั้วแบบถาวรโดยธรรมชาติเท่านั้น เช่น น้ำ โดยปกติแล้วภายในเนื้อของวัสดุดังกล่าว โมเลกุลหรืออนุภาคที่มีขั้วมีการจัดเรียงตัวโดยธรรมชาติ หรือหมุนอย่างอิสระอยู่แล้ว ซึ่งทำให้สนามไฟฟ้าลัพธ์ภายในเนื้อวัสดุมีค่าเท่ากับศูนย์ นั่นหมายถึงไม่มีโพลาไรเซชันเกิดขึ้นภายในเนื้อวัสดุ หากวัสดุอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า โมเลกุลหรืออนุภาคของวัสดุต้องหมุนเพื่อให้โมเลกุลหรืออนุภาคดังกล่าวมีการเรียงตัวให้สอดคล้องกับสนามไฟฟ้าฟ้าที่มากระทำ โพลาไรเซชันแบบนี้ใช้เวลาในการเกิดนานกว่า electronic polarization และ atomic polarization

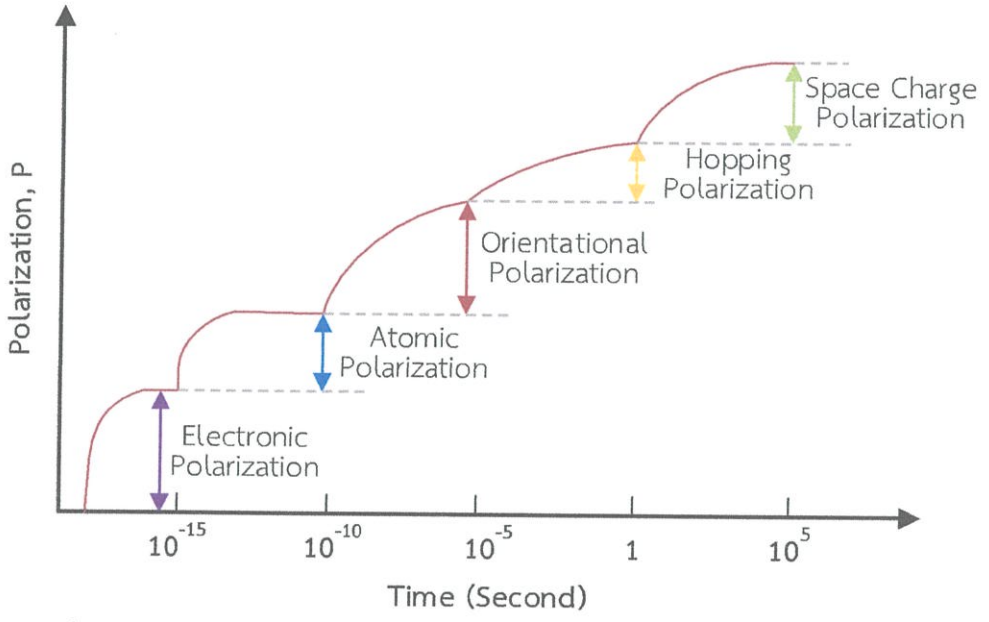
4) Hopping polarization

Hopping polarization สามารถอธิบายกระบวนการที่ localized charges เช่น ไอออน (ions) และช่องว่าง (vacancy) หรือ อิเล็กตรอน และโฮล์ (hole) ซึ่งสามารถกระโดดจากตำแหน่งหนึ่งไปยังอีกตำแหน่งหนึ่งในระยะเวลาสั้นได้ และ localized charges นั้นติดอยู่ในตำแหน่งที่มันกระโดดไป เช่น อนุภาคประจุลบสามารถกระโดดจากตำแหน่งเดิมของมันไปยังอีกตำแหน่งหนึ่งโดยมันทิ้งประจุบวก หรือโฮล ไว้ในตำแหน่งเดิมก่อนหน้านี้ ซึ่งทำให้เกิดประจุลบในตำแหน่งใหม่ที่อิเล็กตรอนกระโดดไป จากกระบวนการที่ได้อธิบายข้างต้นสามารถทำให้เกิดขั้วภายในเนื้อวัสดุได้

5) Space charge polarization หรือ Interfacial polarization

Space charge polarization เกิดจากการแยกตัวกันของอนุภาคประจุบวก และอนุภาคประจุลบที่สามารถเคลื่อนที่ได้ภายใต้แรงกระทำจากสนามไฟฟ้าภายนอก ซึ่งอนุภาคประจุดังกล่าวอาจเกิดขึ้นเนื่องจากการสัมผัสทางไฟฟ้า หรือเกิดขึ้นที่ผิวรอยต่อของสาร เมื่ออนุภาคประจุเคลื่อนที่แยกตัวออกจากกันทำให้เกิด space charge ขึ้น ซึ่งทำให้การกระจายของสนามไฟฟ้าใน

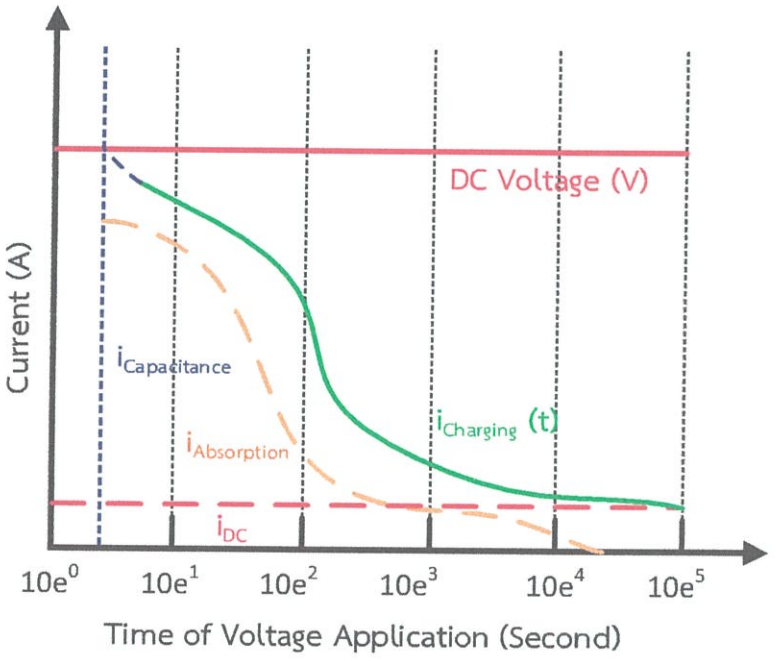
ตอนเริ่มต้นผิดเพี้ยนไป ประจุค้าง (space charge) สามารถเกิดขึ้นที่ผิวรอยต่อของวัสดุที่มีค่า permittivity แตกต่างกันภายใต้สนามไฟฟ้า



รูปที่ 2.33 ระยะเวลาที่ใช้ในการเกิดโพลาไรเซชันทั้ง 5 แบบภายใต้การป้อนแรงดันรูปขั้น

ณ ปัจจุบัน เราสามารถทราบขนาดของการมีขั้ว (P(t)) ที่เกิดขึ้นภายในวัสดุฉนวนได้โดยสังเกตจากขนาดของกระแสที่ไหลผ่านเนื้อฉนวนเพราะไม่สามารถวัดขนาดการมีขั้วภายในวัสดุฉนวนโดยการวัดการมีขั้วได้โดยตรง และจนถึงปัจจุบัน เรายังคงไม่สามารถบอกถึงความนำของวัสดุฉนวนโดยปราศจากการเกี่ยวเนื่องกับกระบวนการการมีขั้วได้

พิจารณาการจ่ายแรงดันรูปขั้น (step voltage) ให้กับฉนวนเป็นเวลานานเพียงพอที่ทำให้เกิดการมีขั้ว สามารถสังเกตเห็นกระแสโพลาไรเซชัน (polarization current, i_{pol}) ได้โดยขนาดของกระแสดังกล่าวเปลี่ยนแปลงตามเวลา เมื่อจ่ายแรงดันรูปขั้นให้กับฉนวนและทำการวัดกระแสที่ไหลผ่านเนื้อฉนวนซึ่งเรียกกระแสดังกล่าวว่ากระแสชาร์จ (charging current) ซึ่งมีองค์ประกอบดังนี้



รูปที่ 2.34 องค์ประกอบของกระแสชาร์จ

$$i_{charging}(t) = C_0 V_0 \left(\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} + \varepsilon_\infty \delta(t) + f(t)\right) \qquad (2.31)$$

โดยที่

กระแสชาร์จประกอบด้วย 3 ส่วน ดังนี้

1) เทอมที่ 1 คือกระแสคอนดักชัน (Conduction Current, i_{DC}) หรือกระแสนำไฟฟ้า ในรูปที่ 2.34 ซึ่งมีความสัมพันธ์กับ DC conductivity ของวัสดุฉนวน ซึ่งมีค่าที่และปรากฏในขณะจ่ายแรงดันให้กับวัสดุฉนวนเท่านั้น

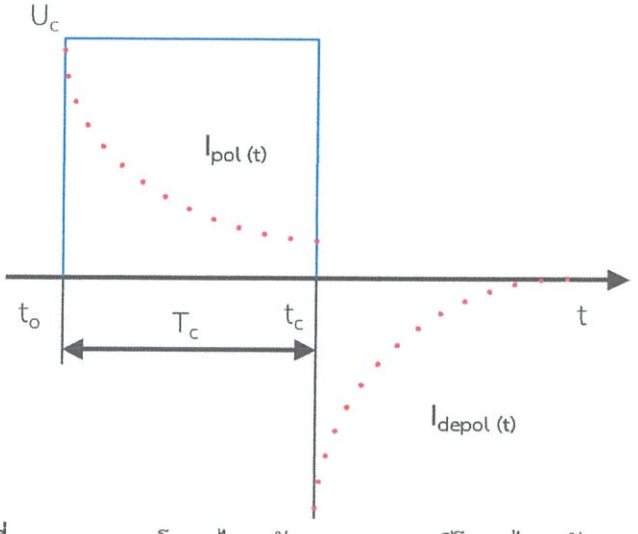
2) เทอมที่ 2 คือกระแสคาปาซิแตนซ์ (Capacitance Current, $i_{Capacitance}$) ในรูปที่ 2.34 ซึ่งเกิดขึ้นในช่วงระยะเวลาสั้นมากๆ

3) เทอมที่ 3 คือกระแสดูดซับ (Absorption Current, i_{abs}) ในรูปที่ 2.34 ซึ่งมีความสัมพันธ์กับกระบวนการโพลาไรเซชันทั้งหมดที่เกิดขึ้นภายในเนื้อฉนวนในขณะที่ทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้า

2.4.2 การวัดกระแสโพลาไรเซชันและกระแสดีโพลาไรเซชัน

การวัดกระแสในขณะที่จ่ายไฟหรือชาร์จประจุ (Charging Current) หรือเรียกว่ากระแสโพลาไรเซชัน (Polarization Current) ประกอบด้วยกระแสสามส่วน คือกระแสคอนดักชัน (Conduction Current), กระแสคาปาซิแตนซ์ (Capacitance Current) และกระแสดูดซับ (Absorption Current) โดยที่กระแสคอนดักชันมีค่าคงที่ตลอดที่ทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าและหมดไปเมื่อปลดแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าออกจากอุปกรณ์ไฟฟ้า ส่วนกระแสดูดซับสามารถวัดได้ในวงจรที่เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเท่านั้น นอกจากนี้ค่ากระแสคาปาซิแตนซ์ที่เกิดขึ้นในช่วงระยะเวลาสั้นมากทำให้ไม่สามารถวัดค่าได้จึงไม่ถูกนำมาพิจารณาด้วย ดังนั้นการวัดกระแสโพลาไรเซชันจึงพิจารณาเฉพาะองค์ประกอบของกระแสคอนดักชัน และกระแสดูดซับเท่านั้น

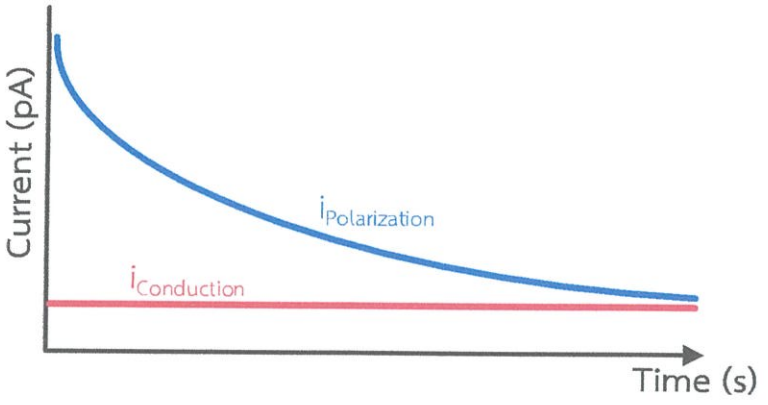
ส่วนกระแสขณะปลดแหล่งจ่ายไฟหรือดีสชาร์จ (Discharging Current) เรียกว่า กระแสดีโพลาไรเซชัน (Depolarization Current) โดยมีแค่องค์ประกอบของค่ากระแสดูดซับที่เกิดจากกระบวนการโพลาไรเซชันเท่านั้น เนื่องจากขณะปลดแหล่งจ่ายไฟออกหรือดีสชาร์จนั้นไม่มีค่าองค์ประกอบของค่ากระแสคอนดักชัน ซึ่งค่ากระแสดูดซับขณะดีสชาร์จมีขนาดเท่ากับกระแสดูดซับขณะชาร์จแต่กลับขั้วกัน โดยรูปร่างของกระแสโพลาไรเซชัน (Polarization Current) และกระแสดีโพลาไรเซชัน (Depolarization Current) ที่วัดได้เป็นดังรูปที่ 2.35



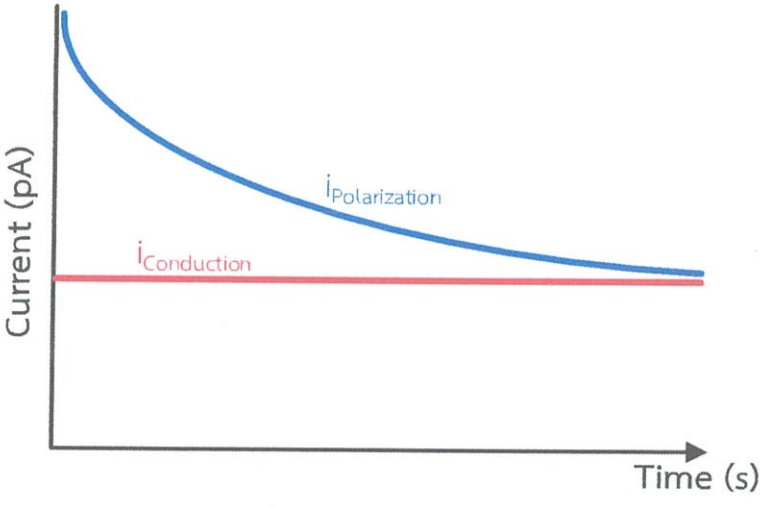
รูปที่ 2.35 กระแสโพลาไรเซชัน และกระแสดีโพลาไรเซชัน

จากรูปที่ 2.36 กระแสคอนดักชันมีค่าคงที่ตลอดเวลาที่มีการจ่ายแรงดันไฟฟ้า และกระแสดูดซับมีค่าสูงในระยะเวลาเริ่มต้นจากนั้นมีค่าลดลงเรื่อยๆ แบบเอ็กโพเนนเชียล และลู่เข้าสู่ศูนย์แต่เนื่องจากเป็นกราฟล็อก–ล็อก (log–log graph) คือมีทั้งแกนนอนและแกนตั้งเป็นสเกลล็อกจึงไม่มีแกนศูนย์ทำให้กราฟของกระแสดูดซับลดลงแล้วเข้าสู่ค่าๆ หนึ่ง

หากฉนวนมีปัญหาที่เกิดจากกระบวนการคอนดักชัน เช่น มีผงคาร์บอนเยอะ เมื่อทำการวัดค่ากระแสขณะที่จ่ายแรงดันไฟฟ้า (Charging Current) หรือกระแสโพลาไรเซชัน (Polarization Current) พบว่าองค์ประกอบของกระแสคอนดักชันมีค่าสูงขึ้นดังรูปที่ 2.37 โดยเห็นว่ากระแสดูดซับมีค่าลดลงแล้วมีค่าเข้าสู่สภาวะคงตัวเร็วขึ้นตามค่ากระแสคอนดักชันที่สูงขึ้น ถ้าเป็นแบบนี้แสดงว่าฉนวนเกิดปัญหาขึ้นเนื่องจากกระบวนการคอนดักชัน



รูปที่ 2.36 กราฟของกระแสขณะที่จ่ายไฟ (Charging Current)



รูปที่ 2.37 กราฟของกระแสขณะที่จ่ายไฟ (Charging Current) ของฉนวนที่มีปัญหาจากกระบวนการคอนดักชัน

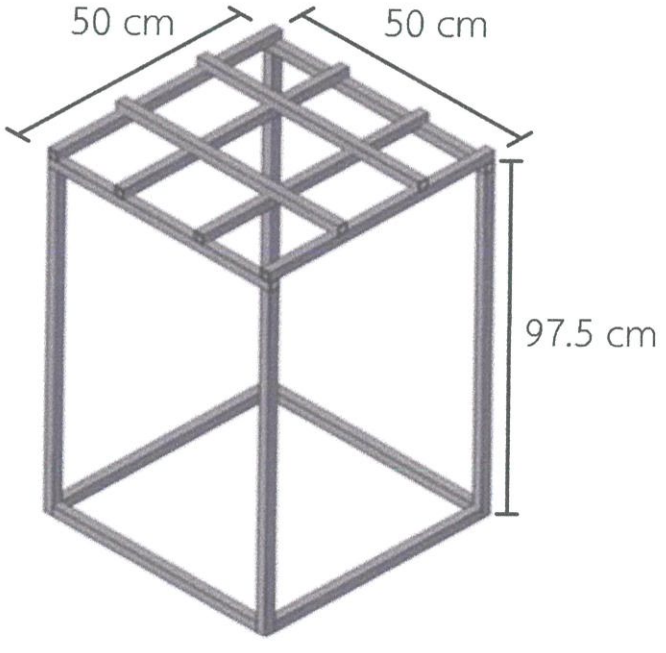
บทที่ 3
การออกแบบวงจรทดสอบ

บทนี้กล่าวถึงการทดสอบต่างๆ ของบุชชิ่งเพื่อนำไปวิเคราะห์รูปแบบของความบกพร่องของบุชชิ่ง โดยทำการทดสอบร่วมกับการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย บางพลี และทำการทดสอบที่ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) ซึ่งวิธีการทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC-60137, IEC-60270 และ IEEE C57.19.01

3.1 ออกแบบสร้างฐานบุชชิ่ง

3.1.1 การออกแบบฐานรองบุชชิ่ง

ใช้โปรแกรม AutoCAD และ STAAD Pro ในการออกแบบและคำนวณการรับน้ำหนักของบุชชิ่ง ซึ่งได้ออกแบบให้ฐานสามารถรองรับน้ำหนักได้ไม่เกิน 200 กิโลกรัม ออกแบบโครงเหล็กขนาด กว้าง 50 เซนติเมตร ยาว 50 เซนติเมตร สูง 97.5 เซนติเมตร โดยใช้เหล็กกล่องขนาด 1 นิ้ว



รูปที่ 3.1 แบบจำลองโครงเหล็กในโปรแกรม AutoCAD

3.2 การทดสอบที่ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง สจล.

3.2.1 บุชชิ่งที่ใช้ในการทดสอบ

ประกอบด้วยชนิด solid bushing พิกัด 24 kV 1 ลูก และ solid bushing พิกัด 33 kV 1 ลูก

รูปที่ 3.2 solid bushing พิกัด 24 kV

รูปที่ 3.3 solid bushing พิกัด 33 kV

รูปที่ 3.4 Oil impregnated paper bushing พิกัด 123 kV

3.2.2 การทดสอบดีสชาร์จบางส่วน

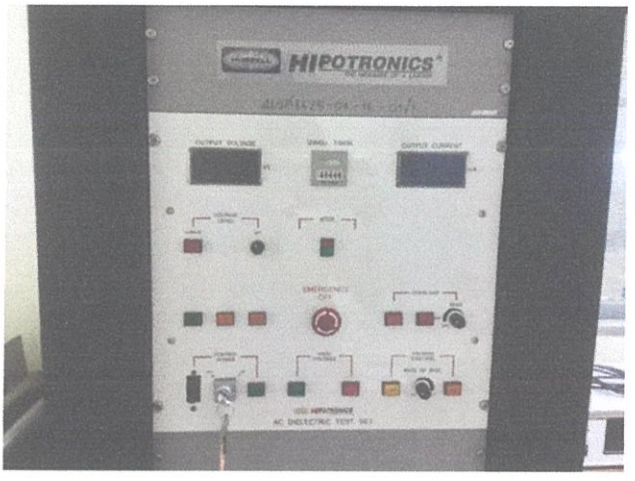
3.2.2.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบดีสชาร์จบางส่วน

1) หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer) ใช้ในการแปลงแรงดันไฟฟ้า เพื่อนำไปทดสอบบุชชิ่ง โดยหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้มีพิกัด 40 kVA พิกัดแรงดัน 460 V/75,000 V ความถี่ 50 Hz

รูปที่ 3.5 หม้อแปลงไฟฟ้า พิกัด 40 kVA พิกัดแรงดัน 460 V/75,000 V ความถี่ 50 Hz

2) ตู้ควบคุมแรงดันไฟฟ้า

ใช้ในการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้หม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งทำงานควบคู่กับหม้อแปลงไฟฟ้าเสมอในทุกการทดสอบ



รูปที่ 3.6 ตู้ควบคุมแรงดันไฟฟ้า

3) ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว (Coupling capacitor)

ใช้สำหรับจ่ายประจุทดแทนเมื่อวัตถุทดสอบเกิดการดีสชาร์จ โดยตัวเก็บประจุที่ใช้ มีค่า 1 nF มีพิกัด 100 kV ที่ความถี่ 50/60 Hz

รูปที่ 3.7 ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว 1 nF พิกัด 100 kV ที่ความถี่ 50/60 Hz

4) ชุดอุปกรณ์การวัดดีสชาร์จบางส่วน

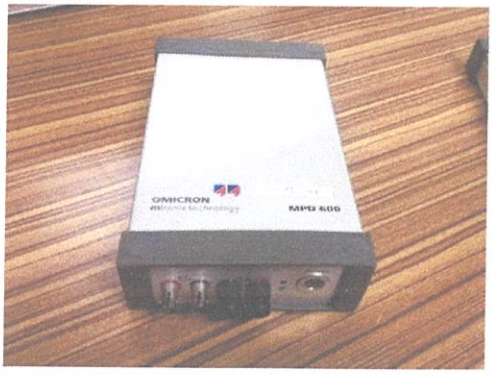
- OMICRON CPL 542A

รูปที่ 3.8 OMICRON CPL 542A

- OMICRON MPP 600 คือ แบตเตอรี่สำหรับเครื่อง MPD 600

รูปที่ 3.9 OMICRON MPP 600

- OMICRON MPD 600



รูปที่ 3.10 OMICRON MPD 600

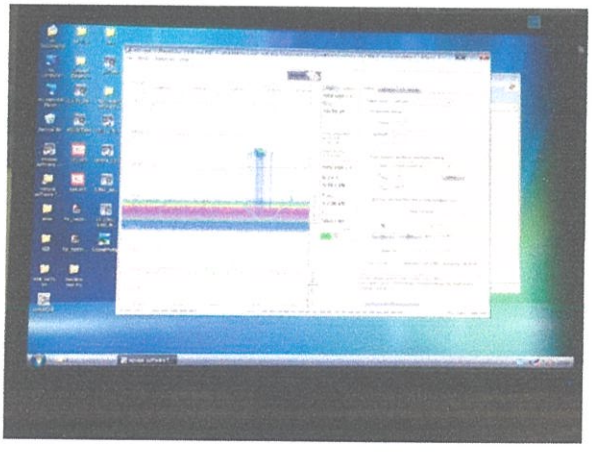
- OMICRON MCU 502 รับค่าจาก MPD 600 แล้วแปลงค่าเป็นข้อมูลดิจิตอล เพื่อประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์

รูปที่ 3.11 OMICRON MCU 502

- OMICRON CAL 542 ใช้สำหรับปรับเทียบเครื่องมือทดสอบการดีสชาร์จ

รูปที่ 3.12 OMICRON CAL 542

- คอมพิวเตอร์พร้อมโปรแกรม mtronix Software for MPD and MI

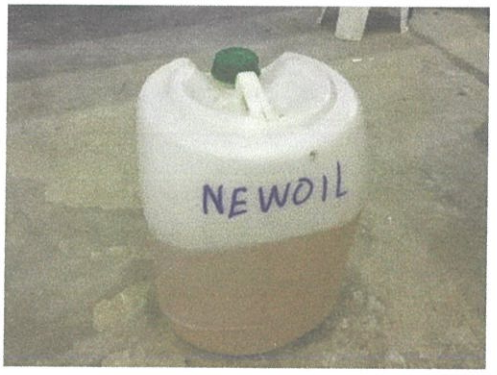


รูปที่ 3.13 คอมพิวเตอร์พร้อมโปรแกรม mtronix Software for MPD and MI

5) ถังน้ำมัน

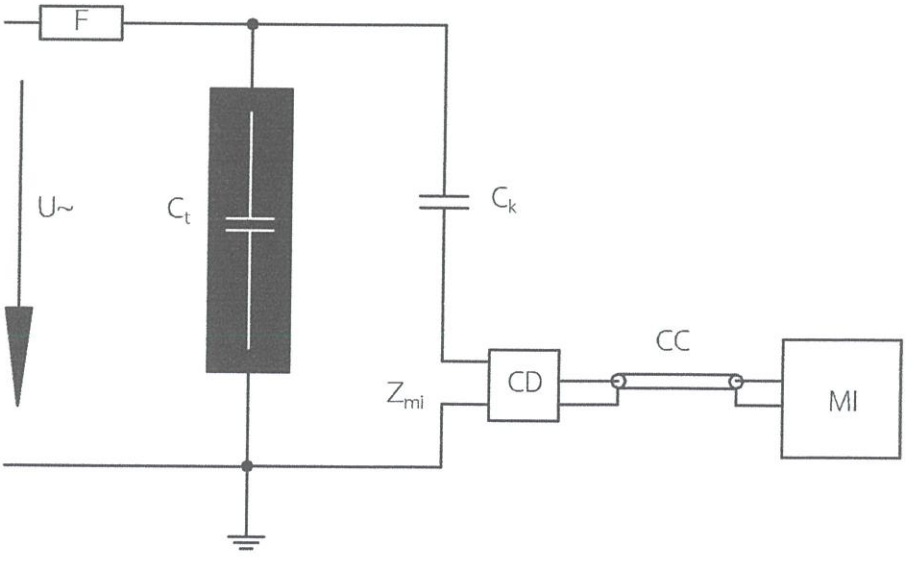
รูปที่ 3.14 ถังน้ำมัน

6) น้ำมันหม้อแปลง

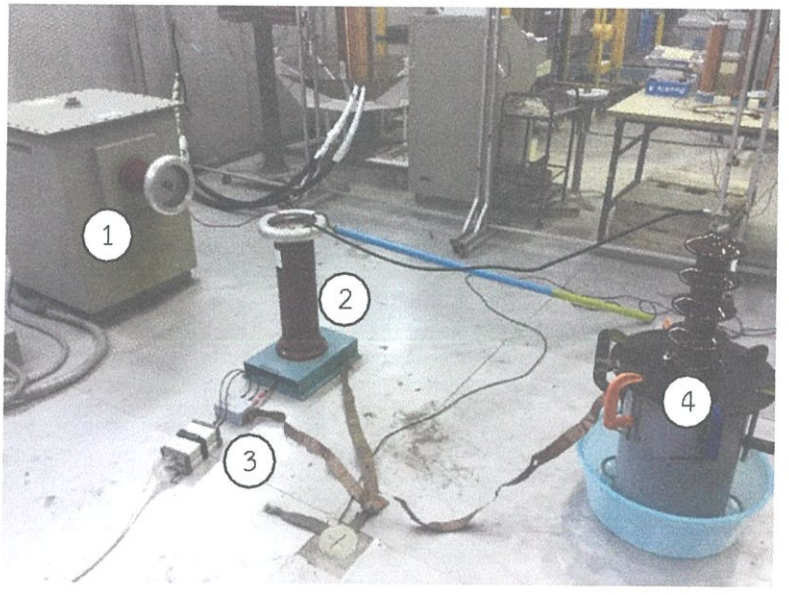


รูปที่ 3.15 น้ำมันหม้อแปลง

3.2.2.2 วงจรการทดสอบดีสชาร์จบางส่วน



รูปที่ 3.16 วงจรการวัดการเกิดดีสชาร์จบางส่วน



รูปที่ 3.17 การต่อวงจรทดสอบดีสชาร์จบางส่วน
1) หม้อแปลงไฟฟ้า 2) ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว 3) Coupling Divide 4) วัสดุทดสอบ (บุชชิ่ง)

3.2.2.3 วิธีการทดสอบดีสชาร์จบางส่วน

ทดสอบบุชชิ่งทั้งสองพิกัด โดยจำลองข้อบกพร่องของบุชชิ่ง โดยการต่อตัวนำปลายแหลมเพื่อให้เกิดโคโรน่าดีสชาร์จ และใช้น้ำเกลือที่อิ่มตัวแล้ว หยดลงบุชชิ่ง บริเวณเนื้อ porcelain เพื่อให้เกิดการดีสชาร์จตามผิว แล้วนำไปทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วน

3.2.3 การทดสอบกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชัน

3.2.3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชัน

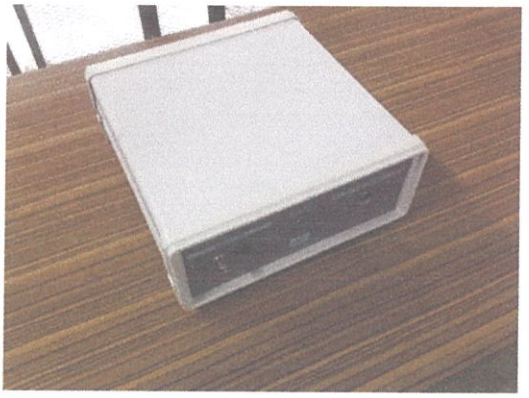
1) เครื่อง PDC-Analyser-1MOD

รูปที่ 3.18 เครื่อง PDC-Analyser-1MOD

โดย

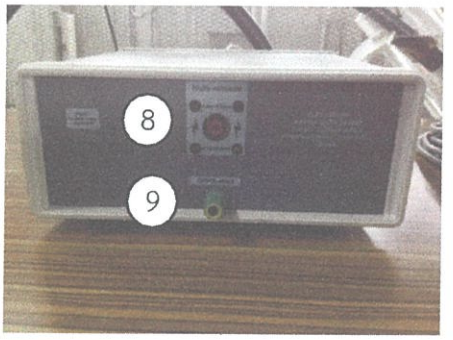
(1) ขั้วจ่ายแรงดันสูง (High Voltage terminal)
(2) ขั้ววัดกระแส (Current measurement terminal)
(3) ขั้วกราวด์ (Ground terminal)
(4) ขั้วต่อสายควบคุมเครื่อง Phantom (External Phantom Source Control terminal)
(5) สวิตซ์เปิด-ปิด (Switch)

2) เครื่อง PDC-Phantom-1000XE



(ก)

(ข)



(ค)

รูปที่ 3.19 เครื่อง PDC-Phantom-1000XE
(ก) เครื่อง PDC-Phantom (ข) PDC-Phantom (ด้านหน้า) (ค) PDC-Phantom (ด้านหลัง)

โดย

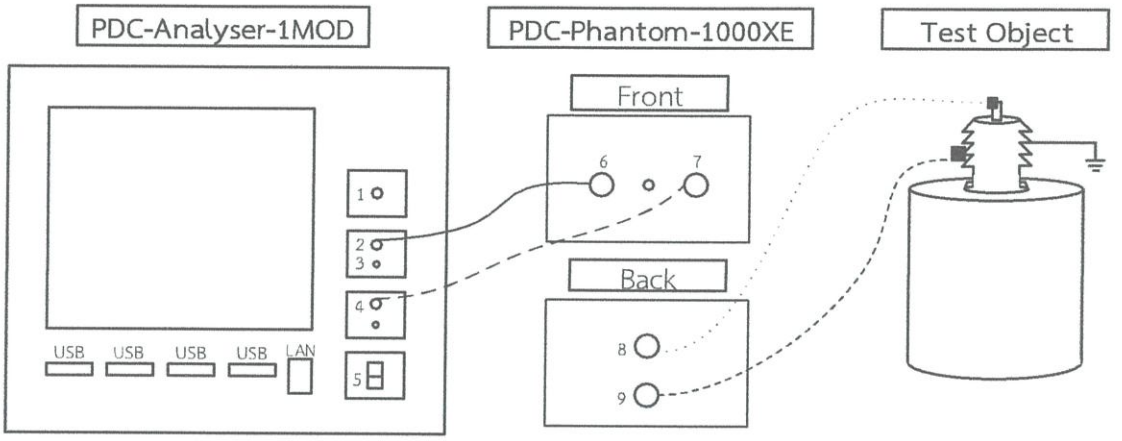
(6) ขั้ววัดกระแสออก (Current out terminal)

(7) ขั้วต่อสายควบคุมเครื่องPhantom (External Phantom Source Control terminal)

(8) ขั้วจ่ายแรงดันสูง (High Voltage terminal)

(9) ขั้วกราวด์ (Ground terminal)

3.2.3.2 วงจรทดสอบกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชัน



รูปที่ 3.20 การต่อวงจรทดสอบกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชัน

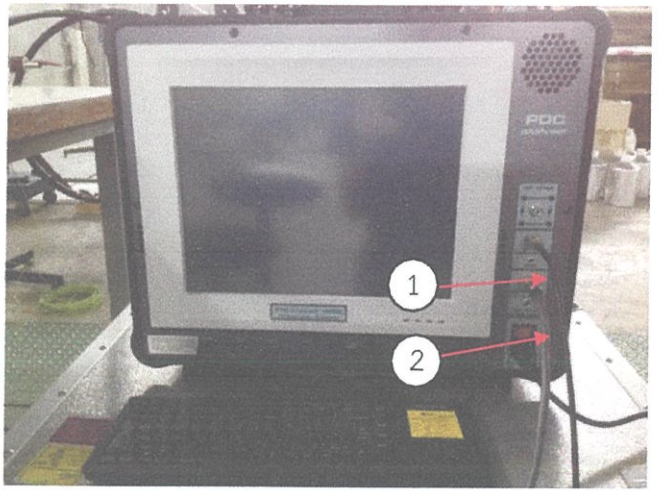
โดย

เส้น ..... คือ สายจ่ายแรงดันสูงสำหรับ PDC-Phantom-1000XE

เส้น ——— คือ สายวัดกระแส (Sensing cable)

เส้น – – – คือ สายคอนโทรล (Control cable)

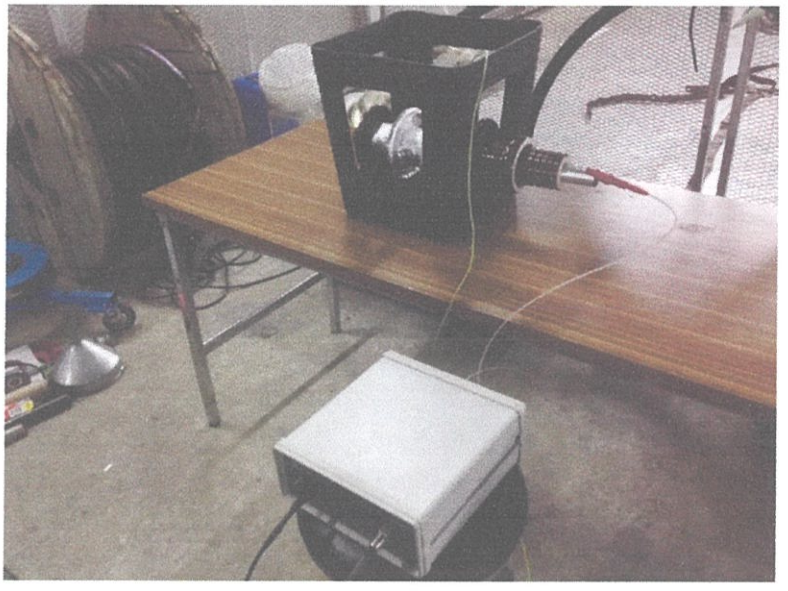
เส้น ----- คือ สายกราวด์ (Ground wire)



(ก)

รูปที่ 3.21 วงจรทดสอบกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชัน

(ก) การต่อวงจรเข้าเครื่อง PDC-Analyser-1MOD (1) สายวัดกระแส (2) สายคอนโทรล



(ข)

(ค)

รูปที่ 3.21 วงจรทดสอบกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชัน (ต่อ)
(ข) การต่อวงจรวัดเข้ากับ solid bushing (ค) การต่อวงจรเข้ากับ OIP bushing

3.2.3.3 วิธีการทดสอบกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชัน

- การทดสอบใน Solid bushing พิกัด 33 kV

การทดสอบกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชันของบุชชิ่ง แบ่งการทดสอบเป็น 2 กรณี คือ

1) บุชชิ่งหลังหุ้มฟอยล์ทั้งลูก

2) บุชชิ่งหลังแกะฟอยล์ออก 2 ชั้นของบุชชิ่ง

ซึ่งมีทดสอบตามขั้นตอนในภาคผนวก ค

- การทดสอบใน Oil impregnated paper bushing พิกัด 123 kV

การทดสอบกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชันของบุชชิ่ง โดยแต่กรณีทดสอบที่อุณหภูมิและความชื้นต่างกัน ซึ่งมีการทดสอบตามขั้นตอนในภาคผนวก ค

3.3 การทดสอบที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง กฟผ. บางพลี

3.3.1 บุชชิ่งที่ใช้ในการทดสอบ

การทดสอบครั้งที่ 1 ประกอบด้วยบุชชิ่งชนิด Oil impregnated paper bushing พิกัด 123 kV 3 ลูก และพิกัด 25 kV 3 ลูก

การทดสอบครั้งที่ 2 ประกอบด้วยบุชชิ่งชนิด Oil impregnated paper bushing พิกัด 123 kV 8 ลูก

รูปที่ 3.22 บุชชิ่งชนิด OIP condenser bushing พิกัด 123 kV

รูปที่ 3.23 บุชชิ่งชนิด OIP condenser bushing พิกัด 115 kV

รูปที่ 3.24 OIP condenser bushing พิกัด 25 kV

3.3.2 การทดสอบดีสชาร์จบางส่วน

3.3.2.1 เครื่องมือที่ใช้การทดสอบดีสชาร์จบางส่วน

1) ตู้ควบคุมแรงดัน ใช้ในการควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้หม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งทำงานควบคู่กันเสมอในทุกการทดสอบ

รูปที่ 3.25 ตู้ควบคุมแรงดันไฟฟ้า

2) หม้อแปลงขั้นบันได (Cascade transformer) ใช้เพื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส โดยหม้อแปลงที่ใช้ในการทดสอบนั้นมี 3 ชั้น โดยแต่ละชั้นมีพิกัดแรงดัน 400 kV ทำให้สามารถจ่ายแรงดันสูงสุดได้ 1,200 kV มีพิกัดกำลัง 900 kVA

รูปที่ 3.26 หม้อแปลงขั้นบันได

3) ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว (Coupling capacitor)
ประจุ 1,045 pF พิกัดแรงดัน 800 kV ที่ 50 Hz

รูปที่ 3.27 ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว

4) ตัวเก็บประจุมาตรฐาน (Standard capacitor)
พิกัดแรงดัน 600 kV ค่าความจุไฟฟ้า C_{12} = 49.98 pF ,C_{13} = 10.30 pF ,C_{13}/C_s = 8,000 ,C_{20} = 228 pF ,C_{2E} = 1.60 pF ,C_{10} = 1.53 pF

รูปที่ 3.28 ตัวเก็บประจุมาตรฐาน

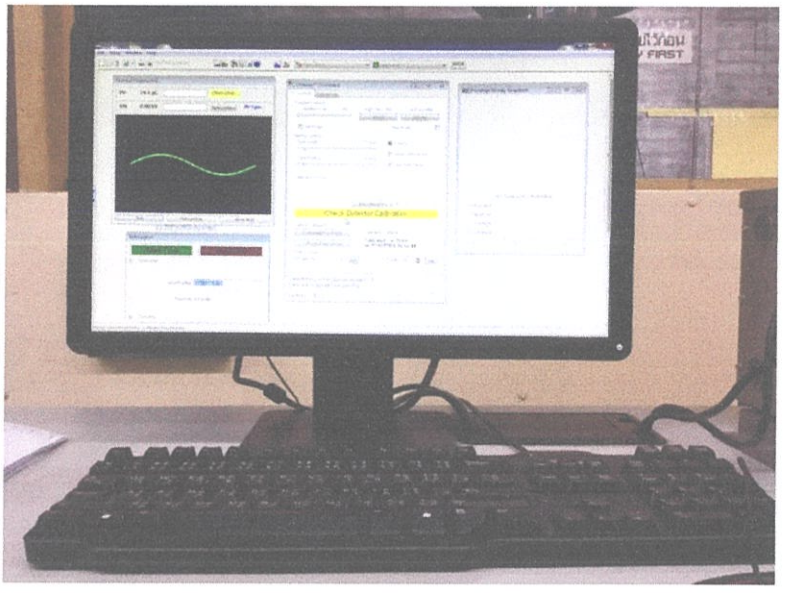
5) โวลเตจดิไวเดอร์ (Voltage divider)
ชนิด CM 1,200 มีประจุ 90.4 pF พิกัดแรงดัน 1,200 kV ที่ 50 Hz

รูปที่ 3.29 โวลเตจดิไวเดอร์

6) ชุดอุปกรณ์การวัดดีสชาร์จบางส่วน
- กล่องเครื่องมือวัดดีสชาร์จบางส่วน ยี่ห้อ HIPOTRONICS

รูปที่ 3.30 กล่องเครื่องมือวัดดีสชาร์จบางส่วน ยี่ห้อ HIPOTRONICS

- คอมพิวเตอร์พร้อมโปรแกรม DDX 9101 Remote Control

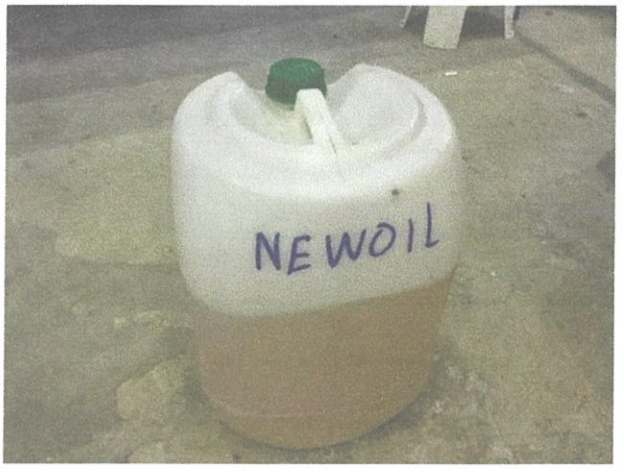


รูปที่ 3.31 คอมพิวเตอร์พร้อมโปรแกรม DDX 9101 Remote Control

7) ถังน้ำมัน

รูปที่ 3.32 ถังน้ำมัน

8) น้ำมันหม้อแปลง

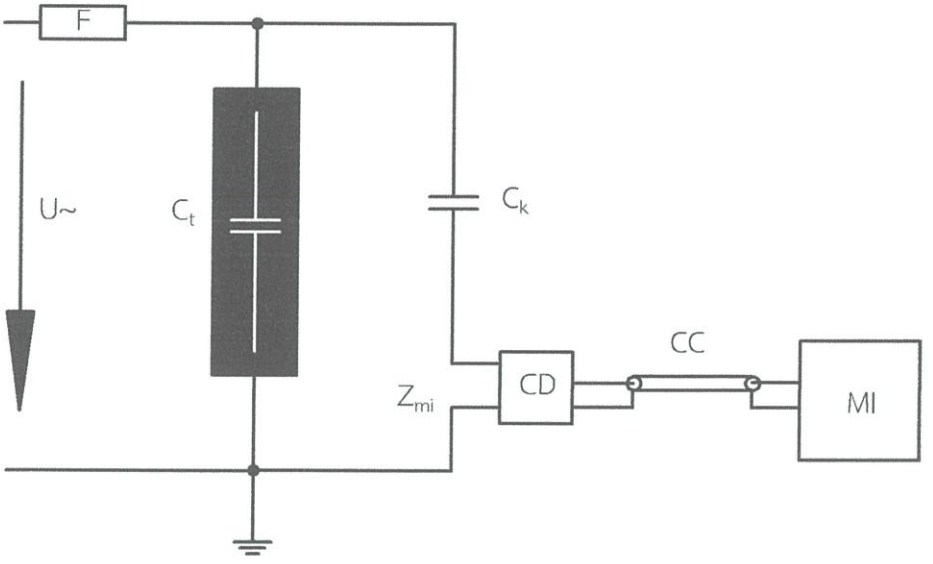


รูปที่ 3.33 น้ำมันหม้อแปลง

9) ชิลด์ (shield) สำหรับลดความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณขั้วด้านแรงสูง

รูปที่ 3.34 ชิลด์

3.3.2.2 วงจรการทดสอบดีสชาร์จบางส่วน



รูปที่ 3.35 วงจรการวัดการเกิดดีสชาร์จบางส่วน

3.3.2.3 วิธีการทดสอบดีสชาร์จบางส่วน

ทำการทดสอบบุชชิ่งพิกัด 123 kV จำนวน 8 ลูก บุชชิ่งพิกัด 115 kV จำนวน 3 ลูก และบุชชิ่งพิกัด 25 kV จำนวน 3 ลูก ที่ระดับแรงดัน 5 ระดับ ได้แก่ 1) $0.5U_m/\sqrt{3}$ 2) $1.05U_m/\sqrt{3}$ 3) $1.5U_m/\sqrt{3}$ 4) U_m 5) แรงดันที่ฉนวนทนอยู่ได้ตามมาตรฐาน ($U_{withstand}$)

1) ต่อวงจรทดสอบ ดังรูปที่ 3.46

2) บันทึกค่าสภาวะทดสอบ (อุณหภูมิ และความชื้น)

3) ขึ้นแรงดันเป็นขั้นๆ ตามระดับแรงดันข้างต้น แล้วบันทึกผลการทดสอบทุกๆ ระดับแรงดัน

4) เมื่อขึ้นแรงดันถึงแรงดันที่ฉนวนทนอยู่ได้ตามมาตรฐาน ให้คงระดับแรงดันไว้เป็นเวลา 60 วินาที

5) ลดระดับแรงดันลงเป็นขั้นๆ ตามระดับแรงดันข้างต้น แล้วบักทึกผลการทดสอบทุกๆ ระดับแรงดัน

6) นำผลการทดสอบไปวิเคราะห์ ข้อบกพร่องของบุชชิ่ง

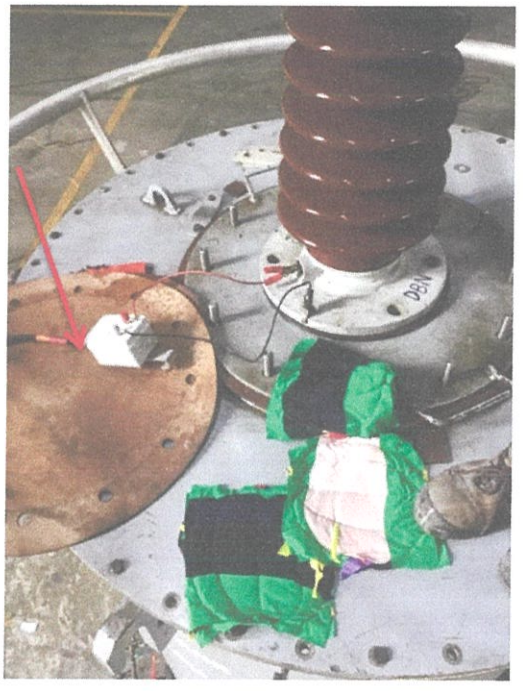
ขณะทดสอบต้องต่ออุปกรณ์ที่ไม่เกี่ยวกับวงจรทดสอบลงดิน เพื่อลดสัญญาณรบกวน

3.3.3 การทดสอบแฟคเตอร์กำลังสูญเสีย

3.3.3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบแฟคเตอร์กำลังสูญเสีย

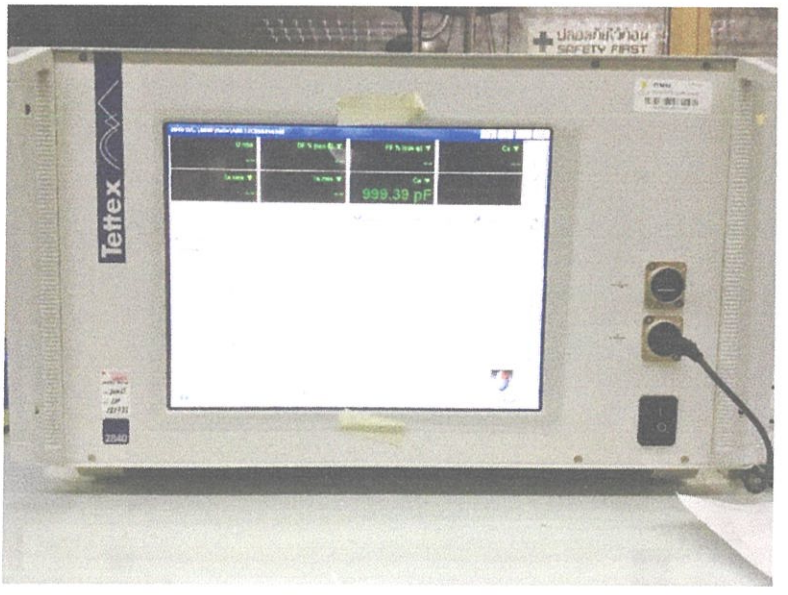
1) ชุดอุปกรณ์การวัดแฟคเตอร์กำลังสูญเสีย

- Junction box



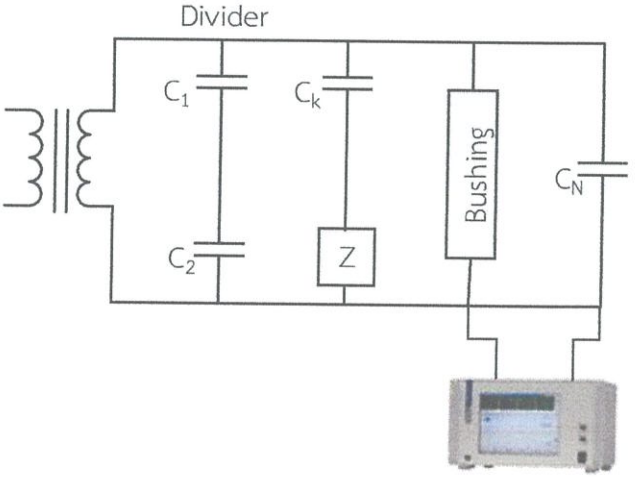
รูปที่ 3.36 Junction box

- เครื่องวัดแฟคเตอร์กำลังสูญเสีย ยี่ห้อ Tettex



รูปที่ 3.37 เครื่องวัดแฟคเตอร์กำลังสูญเสีย ยี่ห้อ Tettex

3.3.3.2 วงจรการทดสอบแฟคเตอร์กำลังสูญเสีย (tanδ)



รูปที่ 3.38 วงจรการทดสอบแฟคเตอร์กำลังสูญเสีย (tanδ)

3.3.3.3 วิธีการทดสอบแฟคเตอร์กำลังสูญเสีย (tanδ)

ทำการทดสอบบุชชิ่งพิกัด 123 kV จำนวน 8 ลูก บุชชิ่งพิกัด 115 kV จำนวน 3 ลูก และบุชชิ่งพิกัด 25 kV จำนวน 3 ลูก ที่ระดับแรงดัน 5 ระดับ ได้แก่ 1) $0.5U_m/\sqrt{3}$ 2) $1.05U_m/\sqrt{3}$ 3) $1.5U_m/\sqrt{3}$ 4) U_m 5) แรงดันที่ฉนวนทนอยู่ได้ตามมาตรฐาน ($U_{withstand}$)

1) ต่อวงจรทดสอบ ดังรูปที่ 3.46

2) บันทึกค่าสภาวะทดสอบ (อุณหภูมิ และความชื้น)

3) ขึ้นแรงดันเป็นขั้นๆ ตามระดับแรงดันข้างต้น แล้วบันทึกผลการทดสอบทุกๆ ระดับแรงดัน

4) เมื่อขึ้นแรงดันถึงแรงดันที่ฉนวนทนอยู่ได้ตามมาตรฐาน ให้คงระดับแรงดันไว้เป็นเวลา 60 วินาที

5) ลดระดับแรงดันลงเป็นขั้นๆ ตามระดับแรงดันข้างต้น แล้วบักทึกผลการทดสอบทุกๆ ระดับแรงดัน

6) นำผลการทดสอบไปวิเคราะห์ ข้อบกพร่องของบุชชิ่ง

ขณะทดสอบต้องต่ออุปกรณ์ที่ไม่เกี่ยวกับวงจรทดสอบลงดิน เพื่อลดสัญญาณรบกวน

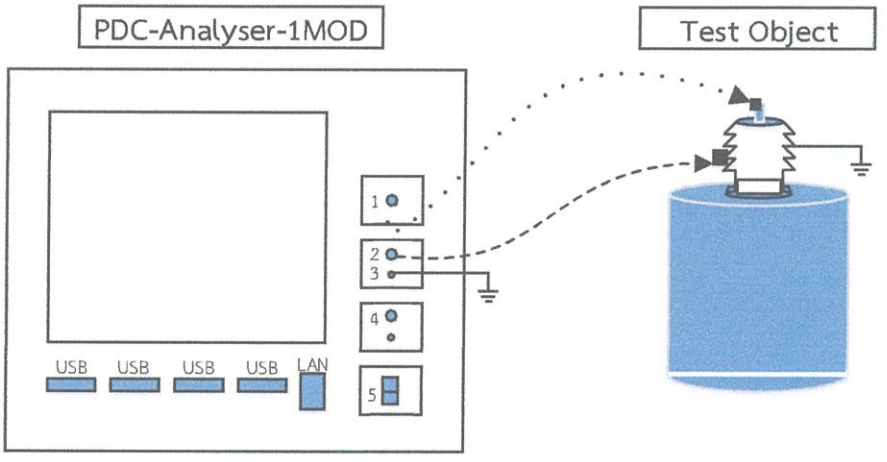
3.3.4 การทดสอบกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชัน

3.3.4.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชัน

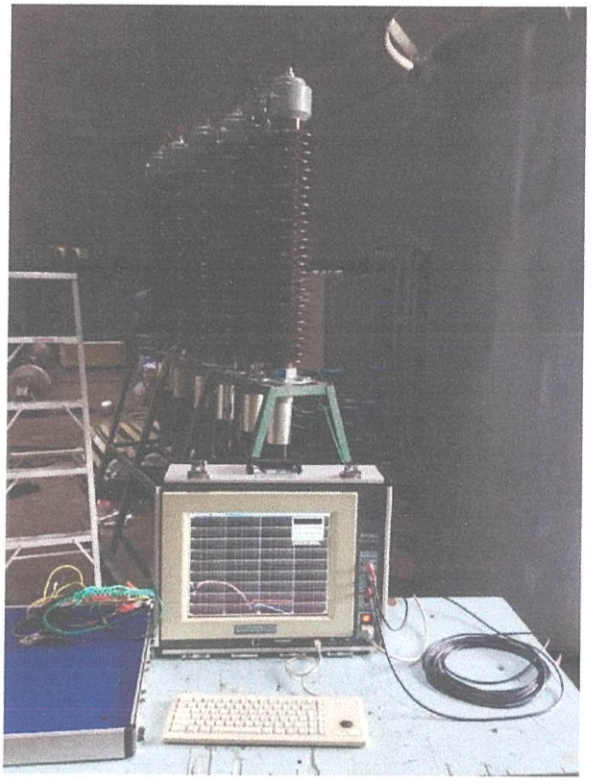
1) เครื่อง PDC-Analyser-1MOD

รูปที่ 3.39 เครื่อง PDC-Analyser-1MOD

3.3.4.2 วงจรการทดสอบกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชัน



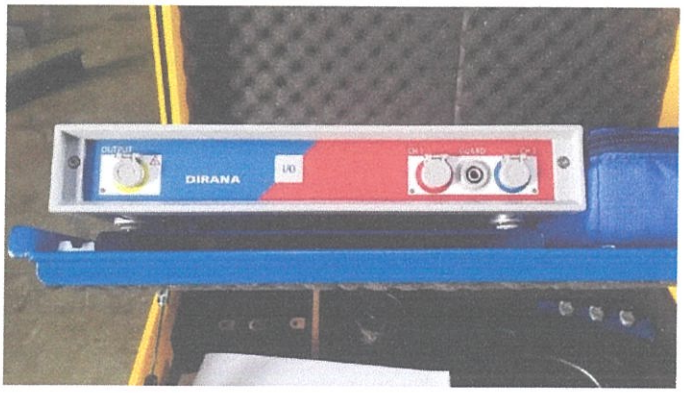
รูปที่ 3.40 วงจรการทดสอบกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชัน



รูปที่ 3.41 การต่อวงจรกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชัน

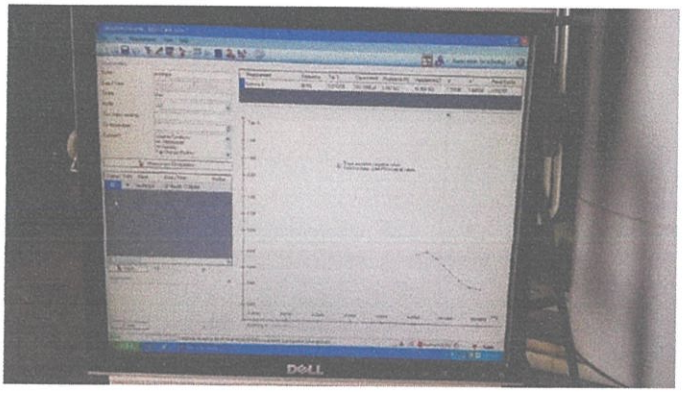
3.3.4.3 วิธีการทดสอบกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชัน
ทำการทดสอบบุชชิ่งพิกัด 123 kV จำนวน 8 ลูก โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้
1) ต่อวงจรทดสอบ ดังรูปที่ 3.40
2) ทำการทดสอบตามขั้นตอนที่กล่าวไว้ในภาคผนวก ค.

3.3.5 การทดสอบ Frequency domain spectroscopy
3.3.5.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ Frequency domain spectroscopy
1) เครื่อง Dirana



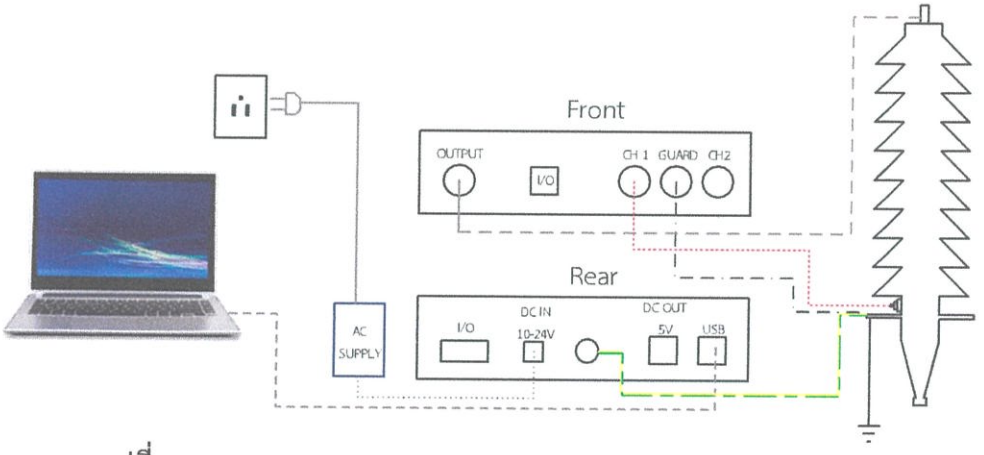
รูปที่ 3.42 เครื่อง Dirana

2) คอมพิวเตอร์และโปรแกรม DIRANA 1.6



รูปที่ 3.43 คอมพิวเตอร์

3.3.5.2 วงจรการทดสอบ frequency domain spectroscopy (FDS)



รูปที่ 3.44 วงจรการทดสอบ Frequency domain spectroscopy

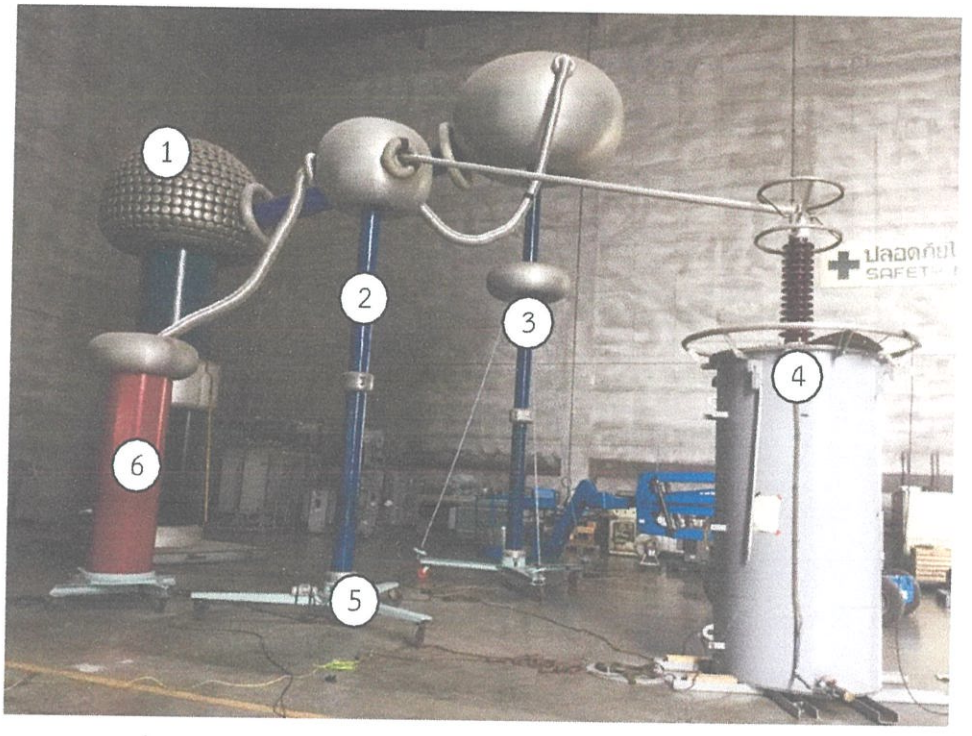
รูปที่ 3.45 การต่อวงจร Frequency domain spectroscopy

3.3.5.3 วิธีการทดสอบ frequency domain spectroscopy

ทำการทดสอบบุชชิ่งพิกัด 123 kV จำนวน 8 ลูก โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

1) ต่อวงจรทดสอบ ดังรูปที่ 3.44

2) ทำการทดสอบตามขั้นตอนที่กล่าวไว้ในภาคผนวก ง.



รูปที่ 3.46 วงจรทดสอบดีสชาร์จบางส่วน และแฟคเตอร์กำลังสูญเสีย
(1) หม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับจ่ายแรงดัน (2) ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว (3) โวลต์เตจดิไวเดอร์
(4) วัสดุทดสอบ (บุชชิ่ง) (5) Coupling Device (6) ตัวเก็บประจุมาตรฐาน

บทที่ 4
การทดสอบและผลการทดสอบ

บทนี้กล่าวถึงการทดสอบและผลการทดสอบต่างๆ คือ การทดสอบกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชัน (PDC) การทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วน (PD) การทดสอบค่าแฟคเตอร์กำลังสูญเสีย (Tanδ) และการทดสอบความเป็นฉนวนในรูปของโดเมนต์ความถี่ (FDS) รวมไปถึงการออกแบบสร้างฐานวางบุชชิ่งขนาด 123 kV ด้วย

4.1 การทดสอบที่ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ทำการทดสอบ ดังนี้

1) ออกแบบสร้างโครงเหล็กเพื่อเป็นฐานวางบุชชิ่ง
2) จำลองและวัดการเกิดดีสชาร์จบางส่วนแบบโคโรนาดีสชาร์จ และแบบดีสชาร์จตามผิว
3) การทดสอบกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชัน

4.1.1 ออกแบบสร้างโครงเหล็กเพื่อนเป็นฐานวางบุชชิ่ง

จากการออกแบบโครงเหล็กสำหรับวางบุชชิ่งขนาด 123 kV ทำการจำลองโครงเหล็กในโปรแกรม AutoCAD และทำการสร้างโครงเหล็กจริงได้ดังรูปที่ 4.1

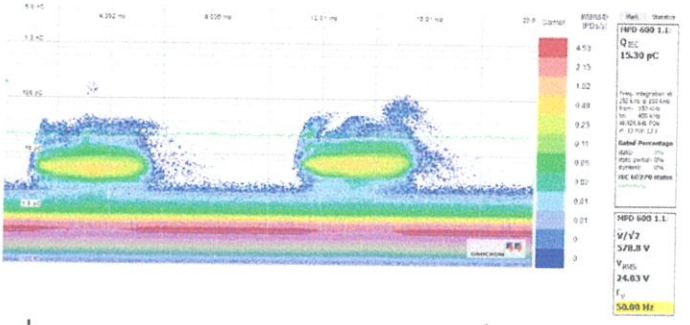
รูปที่ 4.1 โครงเหล็กสำหรับวางบุชชิ่งขนาด 123 kV

4.1.2 จำลองและวัดการเกิดดีสชาร์จบางส่วนแบบโคโรนาดีสชาร์จ และแบบดีสชาร์จตามผิว

จากการจำลองการเกิดดีสชาร์จบางส่วนทั้งสองแบบ คือ โคโรนาดีสชาร์จ และดีสชาร์จตามผิว ในบุชชิ่งขนาด 24 kV และ 33 kV ได้ผลการทดสอบดังนี้

4.1.2.1 ผลการทดสอบบุชชิ่งขนาด 24 kV

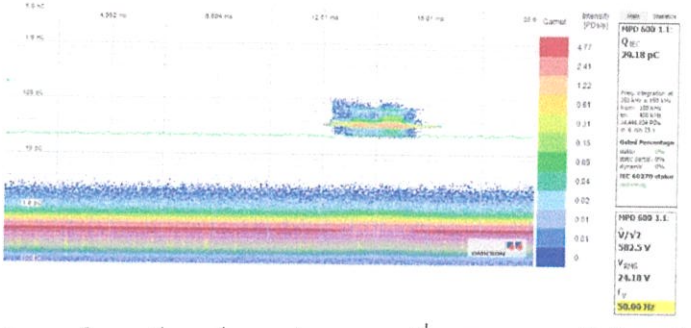
- ไม่มีการจำลองดีสชาร์จ



รูปที่ 4.2 การจำลองดีสชาร์จบางส่วนของบุชชิ่ง 24 kV แบบปกติ

เกิดโคโรนาดีสชาร์จด้านแรงต่ำ บริเวณมุม 20-100 และโคโรนาดีสชาร์จด้านแรงสูง บริเวณมุม 200-280

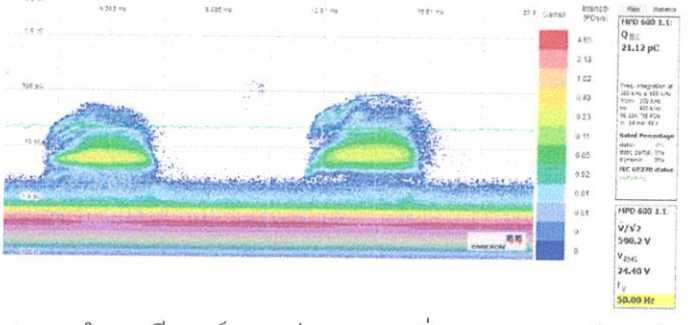
- โคโรนาดีสชาร์จ



รูปที่ 4.3 การจำลองดีสชาร์จบางส่วนของบุชชิ่ง 24 kV แบบโคโรนาดีสชาร์จ

โคโรนาดีสชาร์จด้านแรงสูง จะเกิดบริเวณมุม 220-270 องศา

- ดีสชาร์จตามผิว

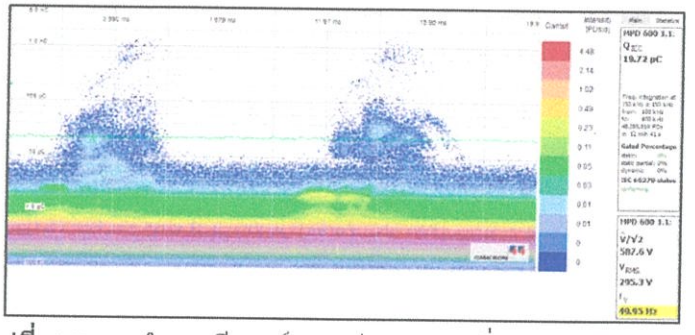


รูปที่ 4.4 การจำลองดีสชาร์จบางส่วนของบุชชิ่ง 24 kV แบบดีสชาร์จตามผิว

เกิดโคโรนาดีสชาร์จบริเวณมุม 50-90 องศา และดีสชาร์จตามผิวเกิดบริเวณมุม 30-100 องศา และบริเวณมุม 220-270 องศา

4.1.2.2 ผลการทดสอบบุชชิ่งขนาด 33 kV

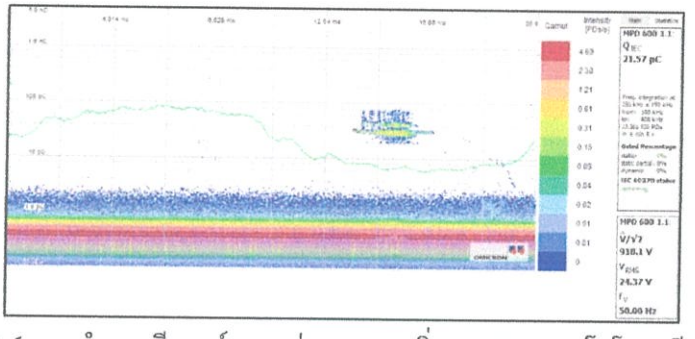
- ไม่มีการจำลองดีสชาร์จ



รูปที่ 4.5 การจำลองดีสชาร์จบางส่วนของบุชชิ่ง 33 kV แบบปกติ

เกิดโคโรนาดีสชาร์จด้านแรงสูงบริเวณมุม 220-280 องศา

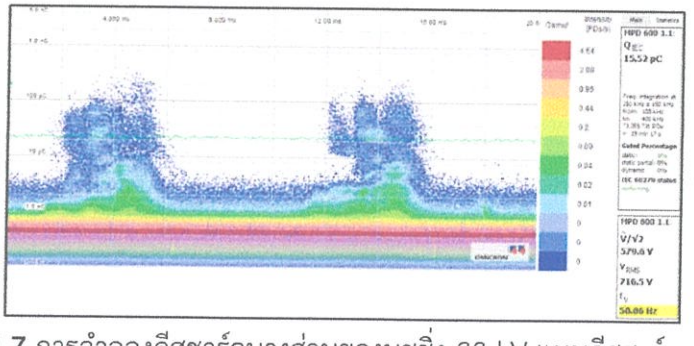
- โคโรนาดีสชาร์จ



รูปที่ 4.6 การจำลองดีสชาร์จบางส่วนของบุชชิ่ง 33 kV แบบโคโรนาดีสชาร์จ

โคโรนาดีสชาร์จด้านแรงสูงเกิดบริเวณมุม 240-280 องศา มักจะเกิดก่อนการดีสชาร์จประเภทอื่น

- ดีสชาร์จตามผิว



รูปที่ 4.7 การจำลองดีสชาร์จบางส่วนของบุชชิ่ง 33 kV แบบดีสชาร์จตามผิว

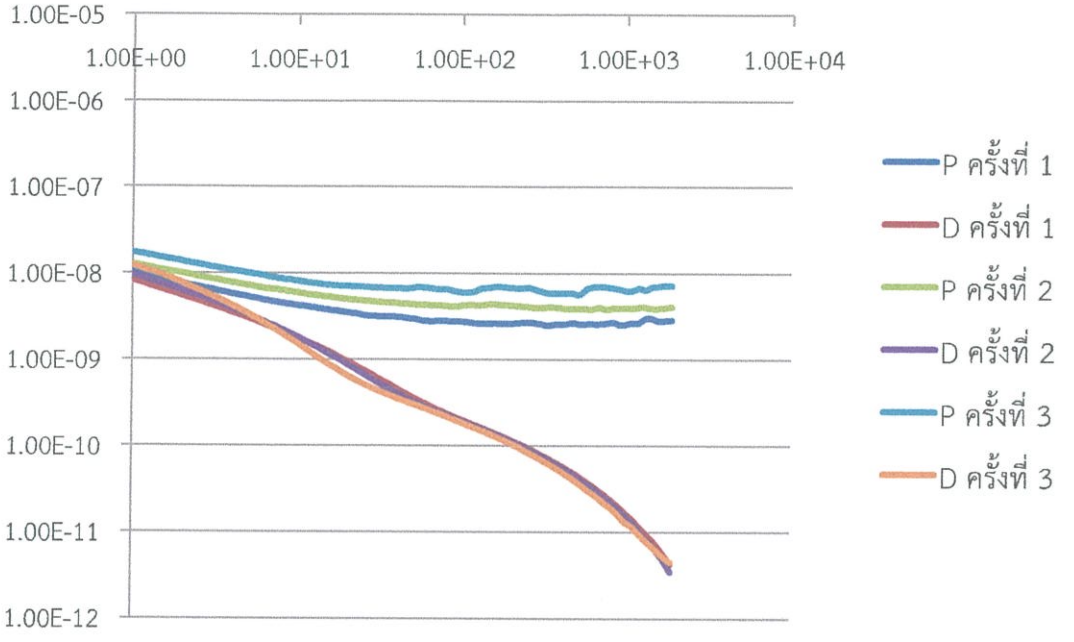
เกิดดีสชาร์จตามผิวบริเวณมุม 40-140 องศา และ 220-270 องศา มีลักษณะคล้ายๆ กัน

4.1.3 การทดสอบกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชัน

การทดสอบนี้ทำกับบุชิ่งขนาด 33 kV โดยได้ผลการทดสอบดังนี้

4.1.3.1 ผลการทดสอบสำหรับบุชชิ่งขนาด 33 kV

- กรณีพันฟลอยด์สามปีก



รูปที่ 4.8 กราฟกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชันกับเวลาของบุชชิ่ง 33 kV แบบหุ้มฟลอยด์เต็ม

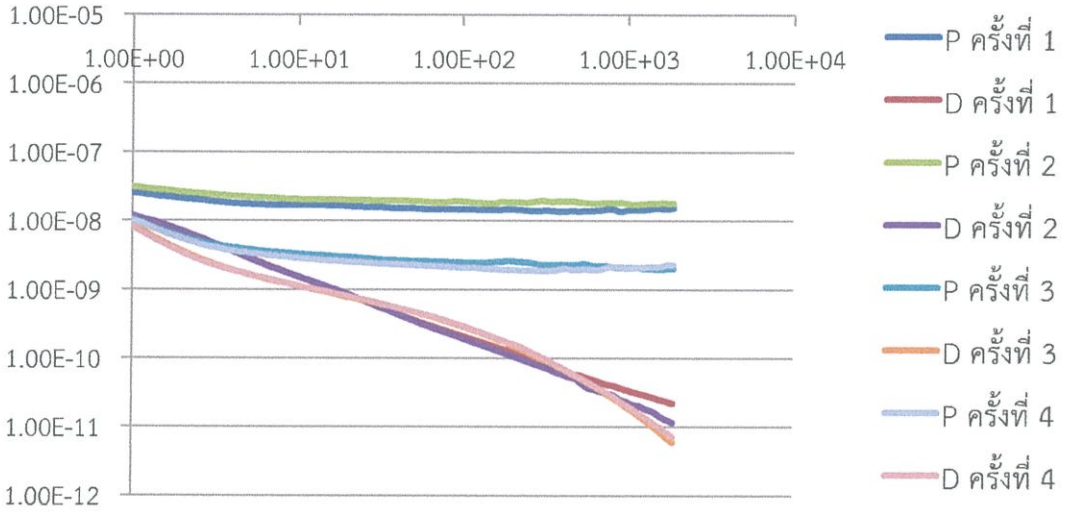
การทดสอบครั้งที่ 1 อุณหภูมิ 30.7 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 56 %

การทดสอบครั้งที่ 2 อุณหภูมิ 30.4 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 58 %

การทดสอบครั้งที่ 3 อุณหภูมิ 29.9 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 60 %

จากผลการทดสอบพบว่า ผลที่ได้มีกระแสคอนดักชั่นสูง เนื่องจากมีกระแสรั่วไหลมาก ซึ่งกระแสคอนดักชั่นมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นสัมพัทธ์มากขึ้น

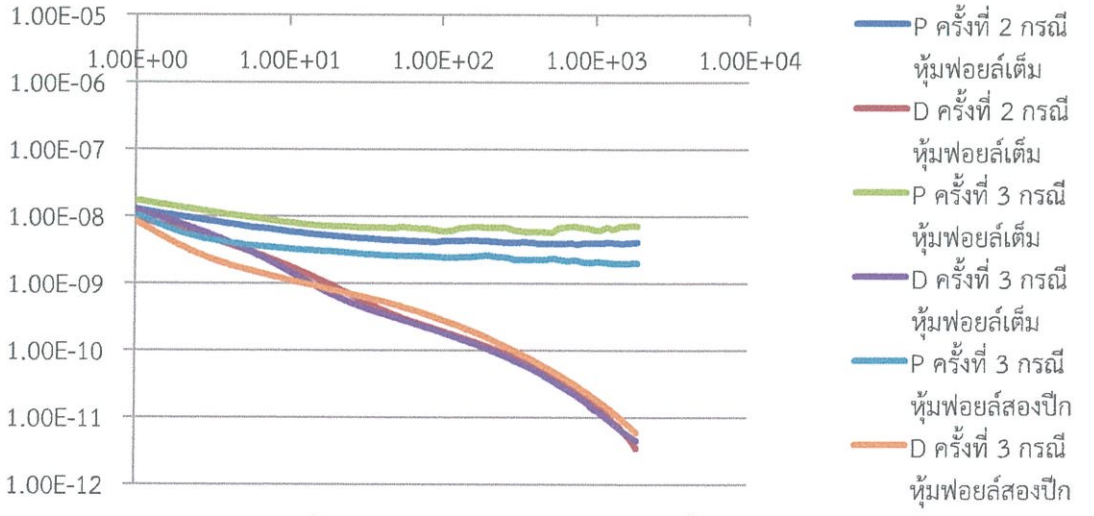
- กรณีพันฟลอยด์สองปีก



รูปที่ 4.9 กราฟกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชันกับเวลาของบุชชิ่ง 33 kV หุ้มฟลอยด์ 2 ใน 3ส่วน

การทดสอบครั้งที่ 1 อุณหภูมิ 29.5 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 63 %
การทดสอบครั้งที่ 2 อุณหภูมิ 29.4 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 64 %
การทดสอบครั้งที่ 3 อุณหภูมิ 29.9 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 59 %
การทดสอบครั้งที่ 4 อุณหภูมิ 30.6 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 54 %

ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น กระแสคอนดักชั่นก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 4.10 กราฟเปรียบเทียบระหว่างทั้งสองกรณี

เมื่อนำกราฟมาเปรียบเทียบกันจะเห็นได้ว่ากระแสโพลาไรซ์ของกรณีหุ้มฟอย 2 ปีกจะลดลงเนื่องจากกระแสที่ไหลผ่านเนื้อฉนวนน้อยลง

4.2 การทดสอบที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย บางพลี

โดยทำการทดสอบ ดังนี้

1) การทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วน
2) การทดสอบกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชัน
3) การทดสอบFDS
4) การทดสอบแฟคเตอร์กำลังสูญเสีย (Dissipation factor)

4.2.1 การทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วน

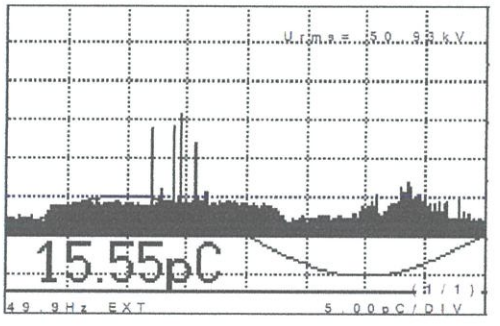
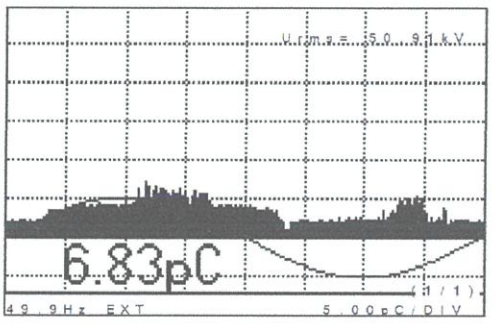
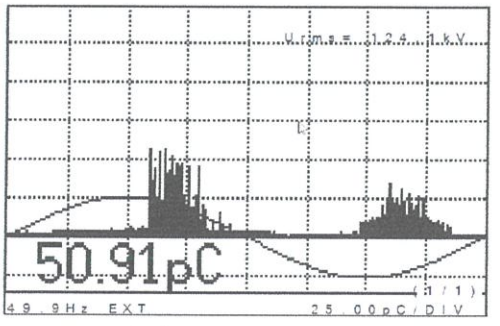
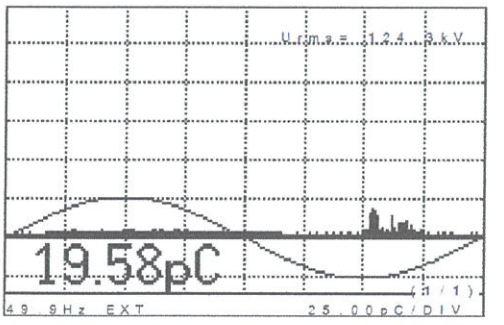
การทดสอบนี้ทำกับบุชชิ่งจำนวน 14 โดยเป็นพิกัด 123 kV 6 ลูก พิกัด 115 kV 3 ลูก และเป็นพิกัด 25 kV 3 ลูก มีผลการทดสอบดังนี้

4.2.1.1 ผลการทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนในบุชชิ่งของ สจล.

- Alstom 1

Oil impregnated paper bushing พิกัด 123 kV

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนของ บุชชิ่ง Alstom1

 Discharge = 15.55 pC Voltage = 50.93 kV	 Discharge = 6.83 pC Voltage = 50.91 kV
 Discharge = 50.91 pC Voltage = 124.1 kV	 Discharge = 19.58 pC Voltage = 124.3 kV

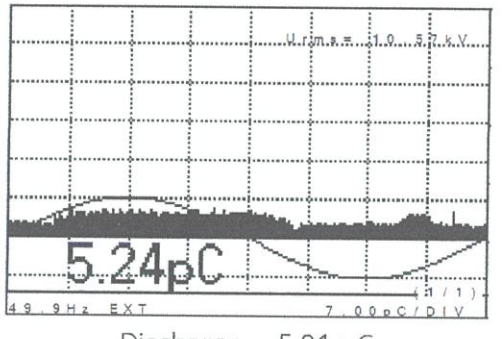
จากผลการทดลองพบว่าเกิด PDIV ที่ 50.93 kV พัลส์เกิดบริเวณ 90-160 องศา และเมื่อคงระดับแรงดันเป็นเวลา 3 นาที พบว่าการดีสชาร์จมีค่าลดลง และพัลส์ขนาดใหญ่หายไป จากนั้นเมื่อเพิ่มระดับแรงดันจะเกิดพัลส์อีกครั้งบริเวณที่เดิม และจะหายไปเมื่อคงระดับแรงดันไว้ขณะหนึ่ง

เนื่องจากในช่วงแรกมีอิเล็กตรอนอิสระอยู่ภายในโพรง เมื่อแรงดันเพิ่มขึ้นทำให้เกิดการดีสชาร์จภายในโพรง ทำให้เกิดพัลส์ขนาดใหญ่ ช่วงที่สองจะเกิดพัลส์เล็กๆ จนกระทั่งจุดที่มีการดีสชาร์จสูงสุด เพราะว่าตอนเริ่มเกิดดีสชาร์จภายในโพรงอากาศ ความดันภายในโพรงอากาศจะลดลงตามกดของพาสเชน เมื่อความดันอากาศลดลงจะทำให้จำนวนการเกิดดีสชาร์จมากขึ้น ช่วงที่สามการดีสชาร์จจะลดลงจนถึงค่าคงที่ค่าหนึ่ง เมื่อโพรงอากาศแตกจากผลของการดีสชาร์จ ผลพลอยได้ทำให้เกิดไอออนล้อมรอบผิวโพรงอากาศ ซึ่งทำหน้าที่เป็นชิลด์ ทำให้แรงดันตกคร่อมโพรงอากาศลดลง ซึ่งจะทำให้ขนาดการดีสชาร์จลดลง

- Alstom 2

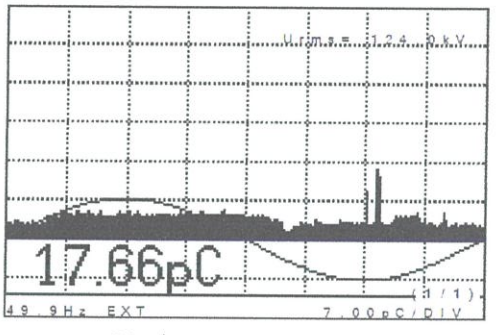
Oil impregnated paper bushing พิกัด 123 kV

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนของ บุชชิ่ง Alstom2



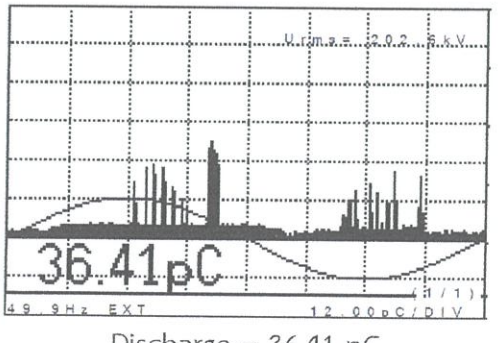
Discharge = 5.24 pC

Voltage = 10.57 kV



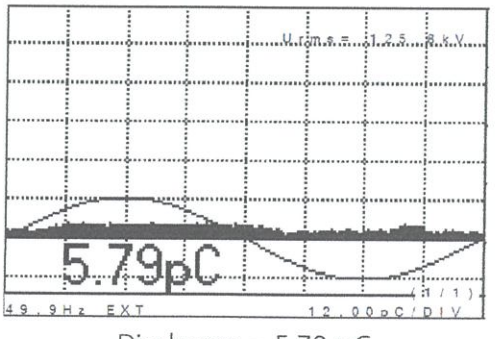
Discharge = 17.66 pC

Voltage = 124.0 kV



Discharge = 36.41 pC

Voltage = 202.6 kV



Discharge = 5.79 pC

Voltage = 125.8 kV

เกิดโคโรนาดีสชาร์จด้านแรงสูง เมื่อขึ้นแรงดันพิกัด

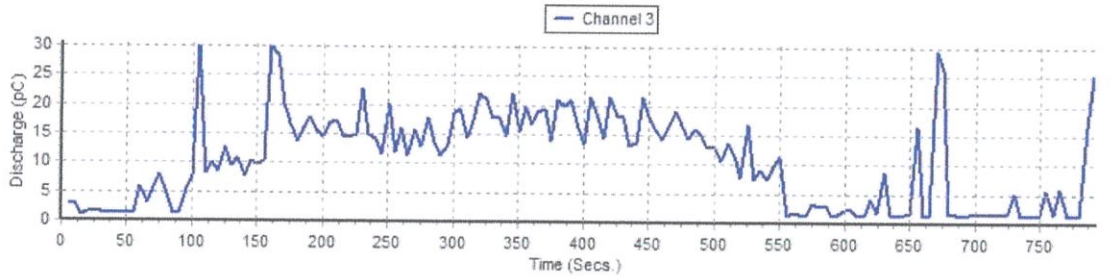
ตารางที่ 4.3 ผลการเกิดดีสชาร์จบางส่วนของ Alstom1 และ Alstom2 สำหรับทุกแรงดันทดสอบ

Alstom 1		Alstom 2	
Voltage (kV)	Discharge (pC)	Voltage (kV)	Discharge (pC)
50.93	15.55	10.57	5.24
50.91	6.83	35.87	5.24
74.89	18.74	74.88	6.76
75.09	8.67	107.1	7.17
107.2	99.58	124.0	17.66
107.8	12.87	202.6	36.41
124.1	50.91	125.8	5.79
124.3	19.58	108.4	5.24
		76.24	5.79
		35.37	5.52
		9.473	5.24

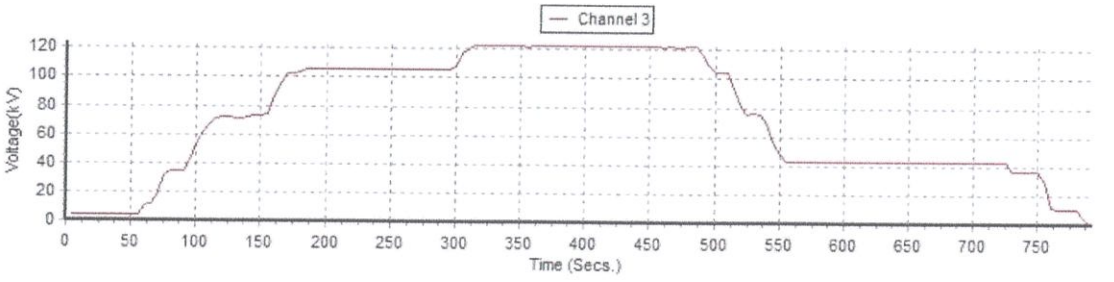
4.2.1.2 ผลารทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนในบุชชิ่งของบริษัทแห่งหนึ่ง

- Bushing 1

Oil impregnated paper bushing พิกัด 123 kV



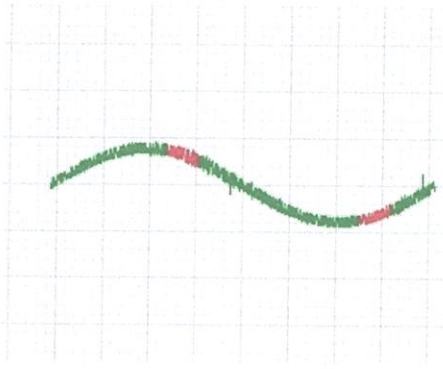
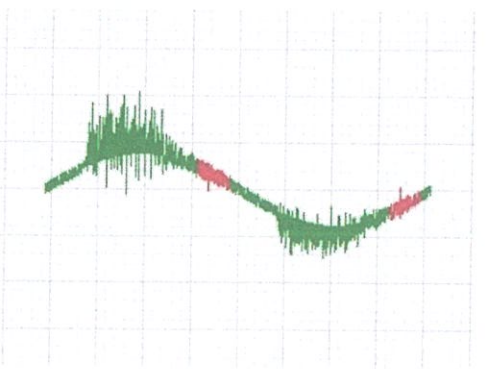
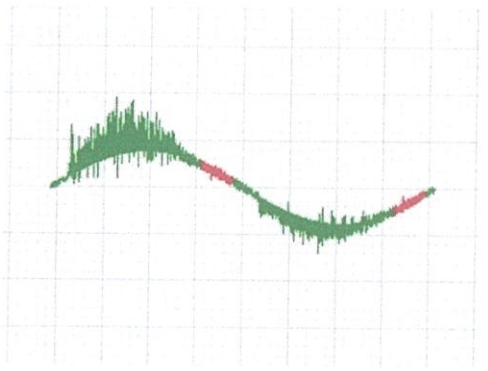
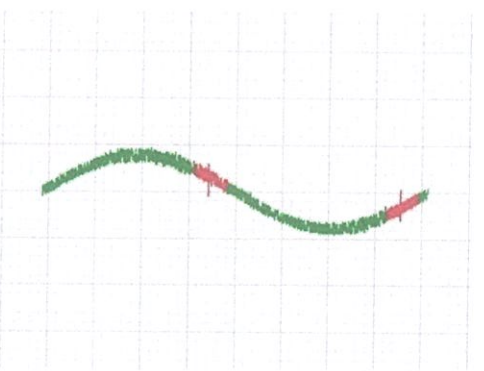
(ก)



(ข)

รูปที่ 4.11 การทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนของบุชชิ่ง Bushing1
(ก) กราฟการเกิดดีสชาร์จบางส่วนกับเวลาในการทดสอบ
(ข) กราฟแรงดันทดสอบกับเวลาในการทดสอบ

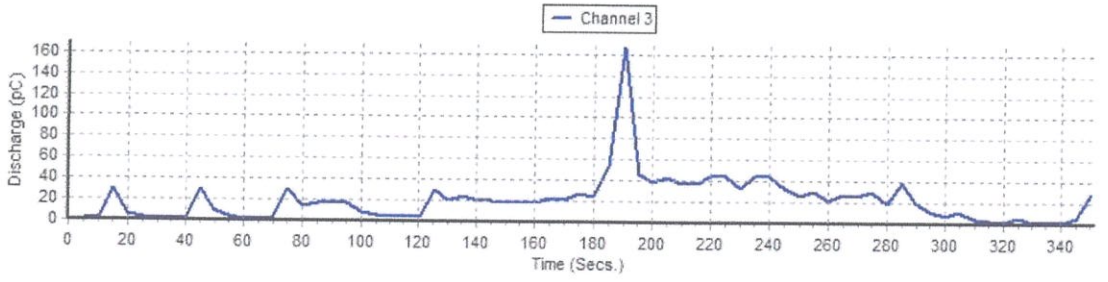
ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนของ บุชชิ่ง Bushing1

 Discharge = 3.34 pC Voltage = 10.63 kV	 Discharge = 9.54 pC Voltage = 73.58 kV
 Discharge = 20.63 pC Voltage = 122.29 kV	 Discharge = 1.48 pC Voltage = 36.88 kV

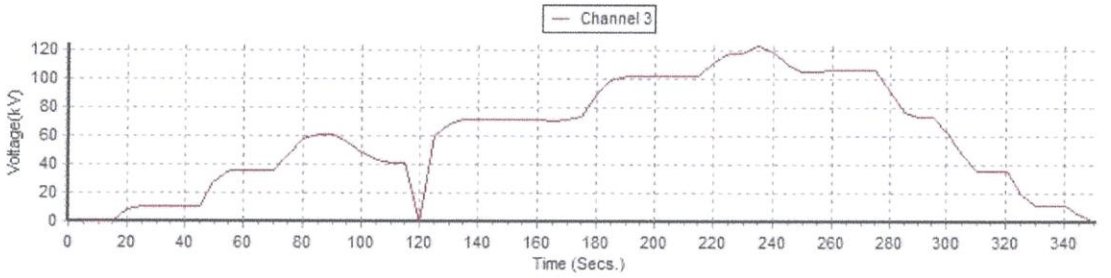
เกิดโคโรนาดีสชาร์จด้านแรงต่ำ

- Bushing 2

Oil impregnated paper bushing พิกัด 123 kV



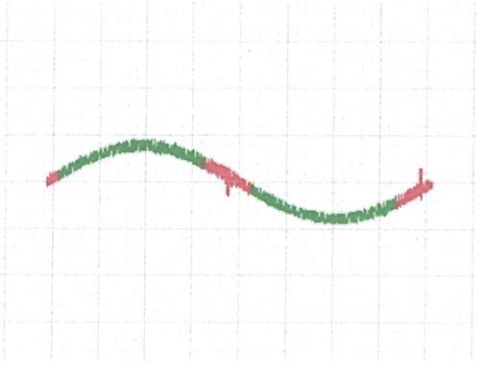
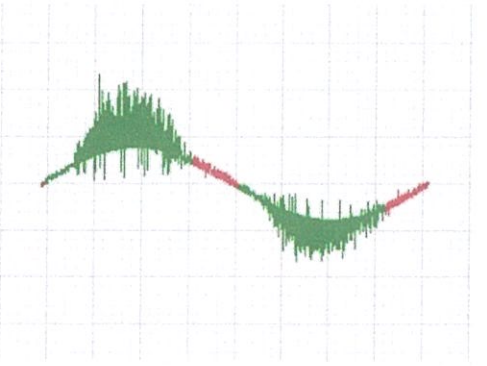
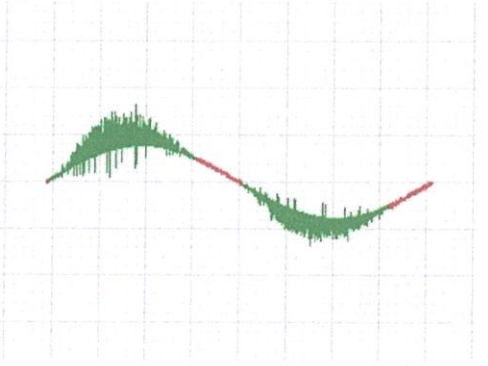
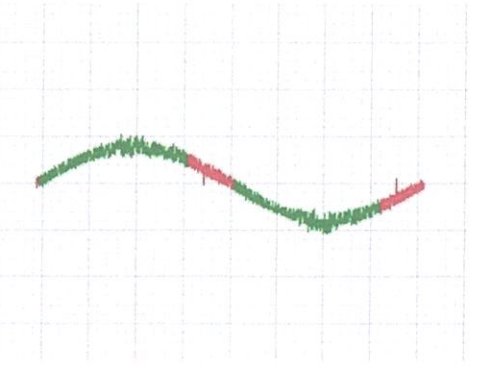
(ก)



(ข)

รูปที่ 4.12 การทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนของบุชชิ่ง Bushing2
(ก) กราฟการเกิดดีสชาร์จบางส่วนกับเวลาในการทดสอบ
(ข) กราฟแรงดันทดสอบกับเวลาในการทดสอบ

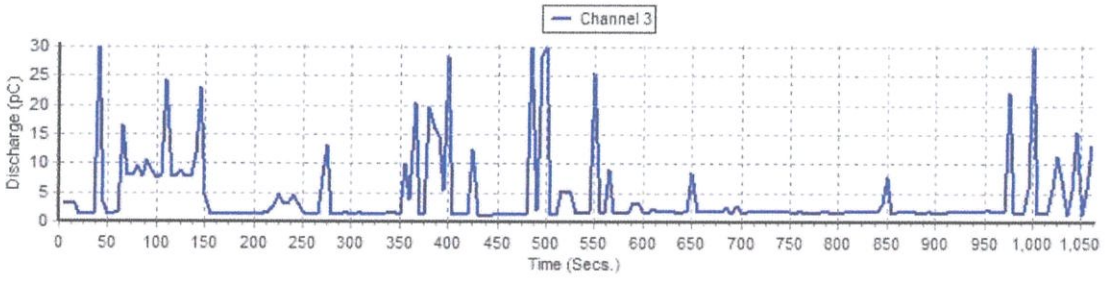
ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนของ บุชชิ่ง Bushing2

 Discharge = 1.49 pC Voltage = 10.56 kV	 Discharge = 23.08 pC Voltage = 71.49 kV
 Discharge = 44.42 pC Voltage = 123.23 kV	 Discharge = 2.22 pC Voltage = 36.02 kV

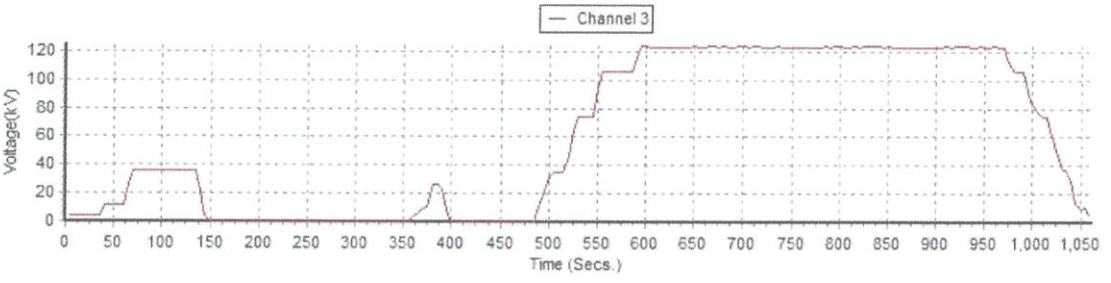
เกิดโคโรนาดีสชาร์จด้านแรงต่ำ

- Bushing 3

Oil impregnated paper bushing พิกัด 123 kV



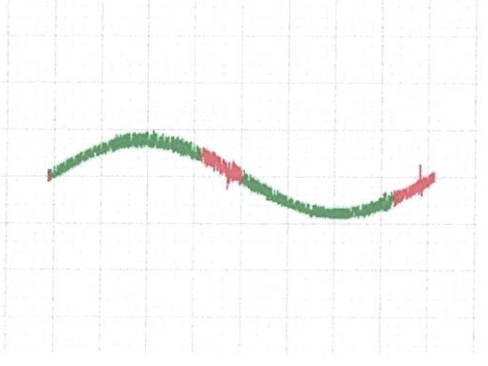
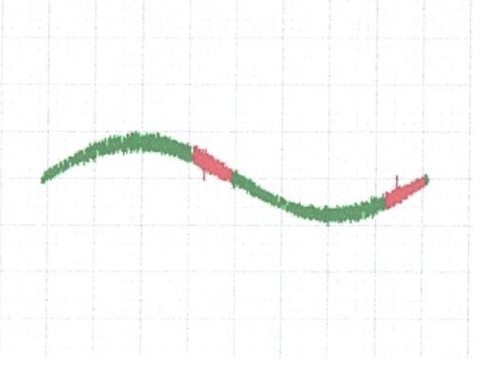
(ก)



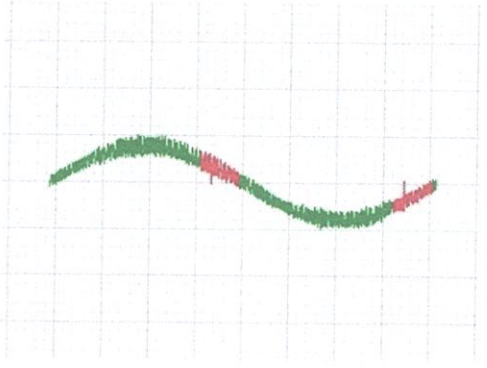
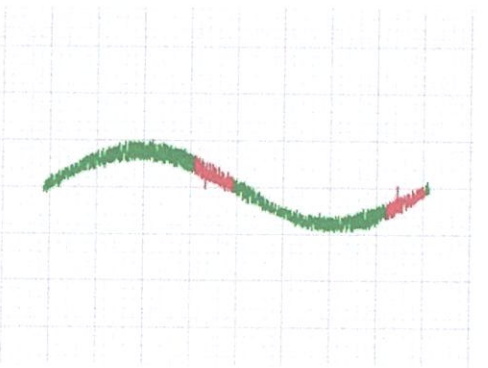
(ข)

รูปที่ 4.13 การทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนของบุชชิ่ง Bushing3
(ก) กราฟการเกิดดีสชาร์จบางส่วนกับเวลาในการทดสอบ
(ข) กราฟแรงดันทดสอบกับเวลาในการทดสอบ

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนของ บุชชิ่ง Bushing3

	
Discharge = 1.44 pC Voltage = 11.52 kV	Discharge = 1.62 pC Voltage = 105.97 kV

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนของ บุชชิ่ง Bushing3 (ต่อ)

 Discharge = 1.66 pC Voltage = 123.20 kV	 Discharge = 1.77 pC Voltage = 106.78 kV

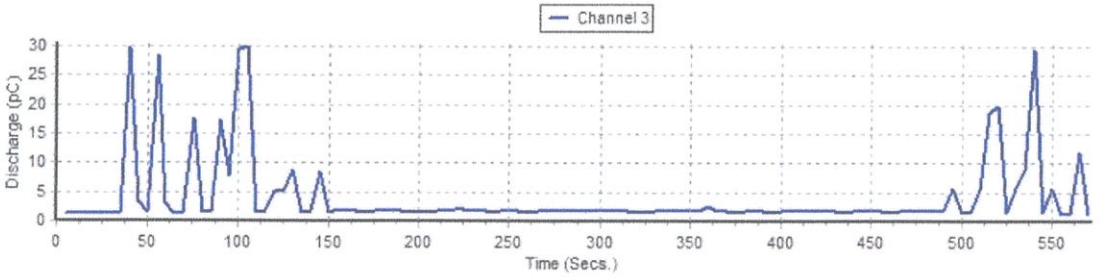
ไม่เกิดการดีสชาร์จ

ตารางที่ 4.7 ผลการเกิดดีสชาร์จบางส่วนของ Bushing1 - Bushing3 สำหรับทุกแรงดันทดสอบ

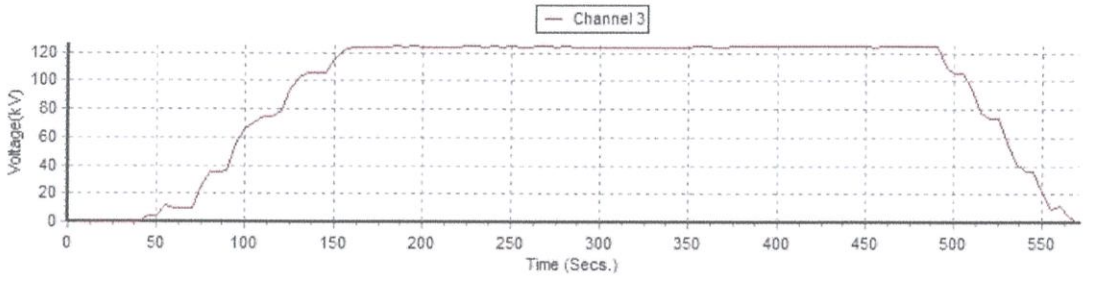
Bushing1		Bushing2		Bushing3	
Voltage (kV)	Discharge (pC)	Voltage (kV)	Discharge (pC)	Voltage (kV)	Discharge (pC)
10.63	3.34	10.56	1.49	11.52	1.44
34.79	1.33	35.83	1.43	35.37	3.69
73.58	9.54	71.49	23.08	73.97	1.55
105.24	16.45	101.97	41.70	105.97	1.62
122.29	20.63	123.23	44.42	123.20	1.66
105.01	13.95	105.94	29.87	106.78	1.77
75.79	7.72	73.76	14.42	74.05	1.68
36.88	1.48	36.02	2.22	35.85	1.59
10.77	1.18	11.52	1.39	10.07	1.33

- Bushing 4

Oil impregnated paper bushing พิกัด 123 kV



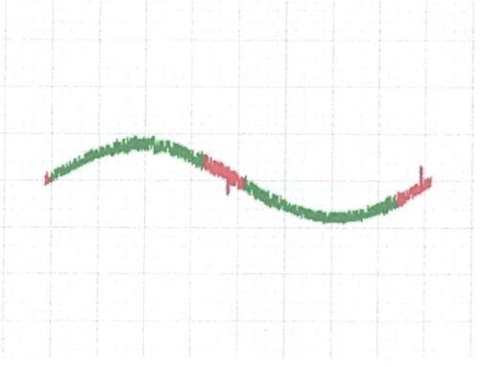
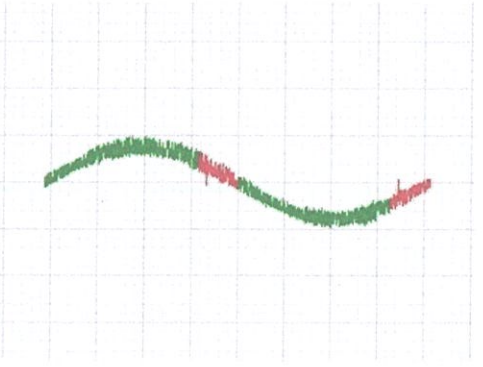
(ก)



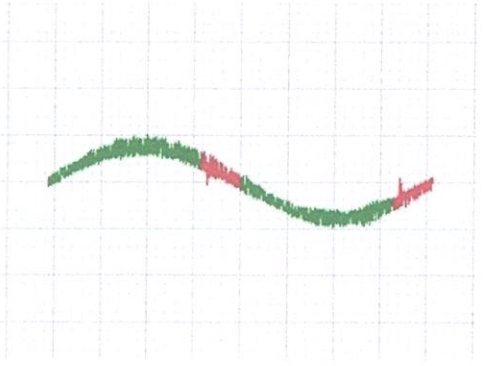
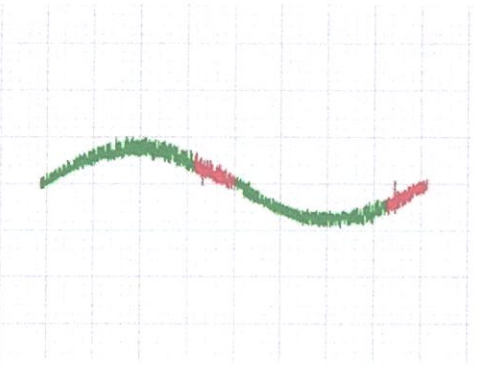
(ข)

รูปที่ 4.14 การทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนของบุชชิ่ง Bushing4
(ก) กราฟการเกิดดีสชาร์จบางส่วนกับเวลาในการทดสอบ
(ข) กราฟแรงดันทดสอบกับเวลาในการทดสอบ

ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนของ บุชชิ่ง Bushing4

	
Discharge = 1.35 pC Voltage = 10.14 kV	Discharge = 1.66 pC Voltage = 105.75 kV

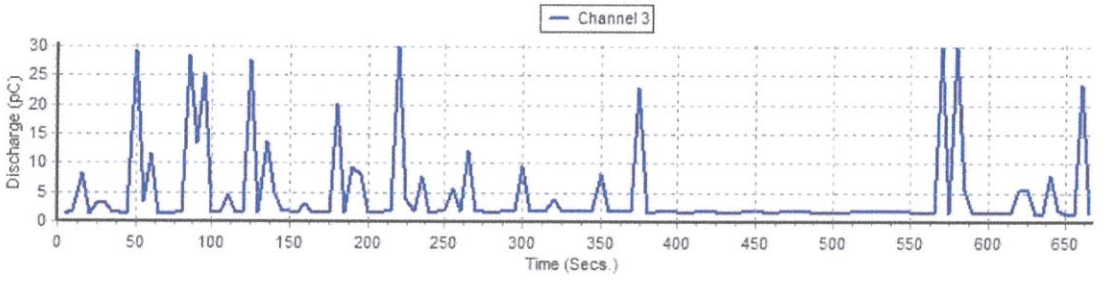
ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนของ บุชชิ่ง Bushing4 (ต่อ)

	
Discharge = 1.64 pC Voltage = 123.99 kV	Discharge = 1.55 pC Voltage = 105.65 kV

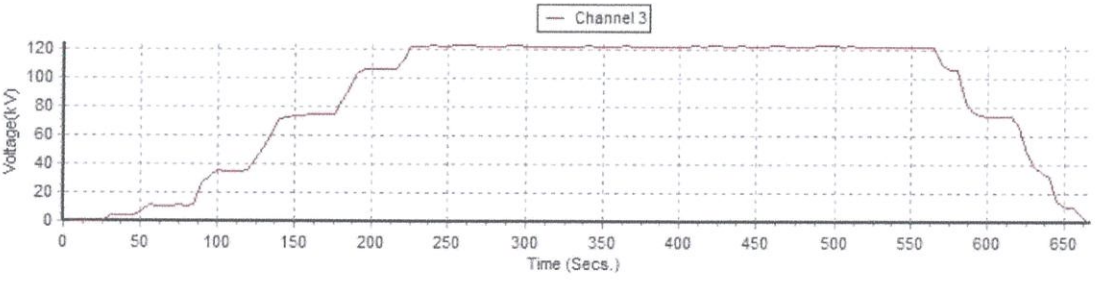
ไม่เกิดการดีสชาร์จ

- Bushing 5

Oil impregnated paper bushing พิกัด 123 kV



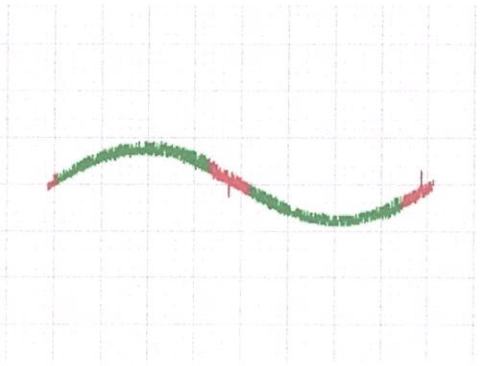
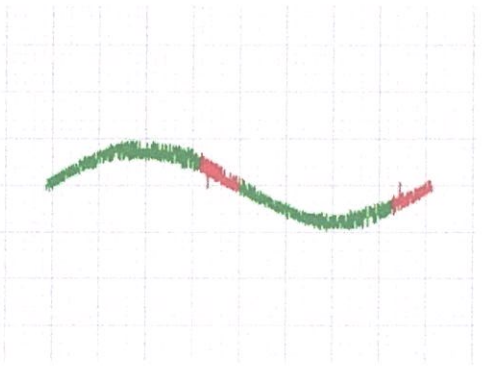
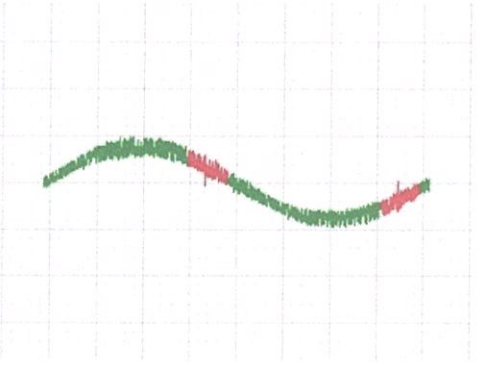
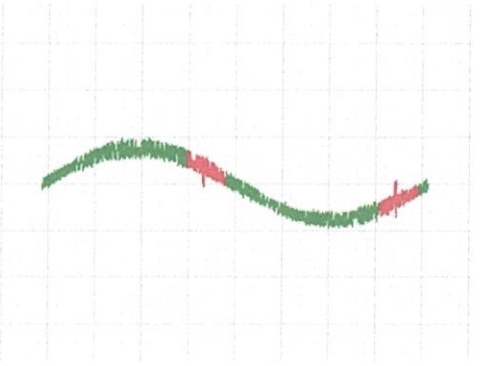
(ก)



(ข)

รูปที่ 4.15 การทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนของบุชชิ่ง Bushing5
(ก) กราฟการเกิดดีสชาร์จบางส่วนกับเวลาในการทดสอบ
(ข) กราฟแรงดันทดสอบกับเวลาในการทดสอบ

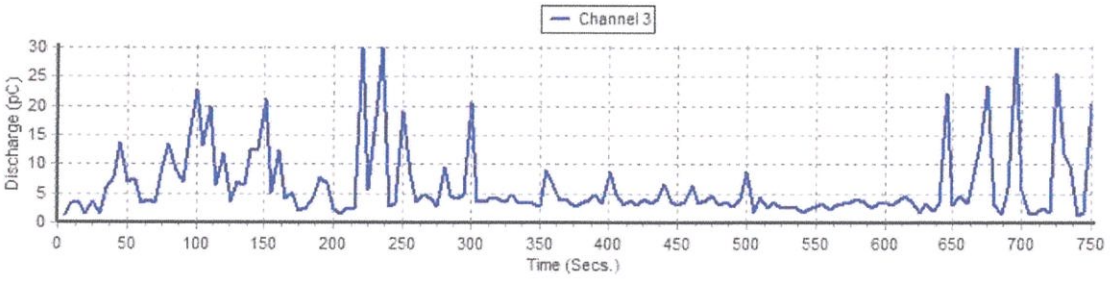
ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนของ บุชชิ่ง Bushing5

 Discharge = 1.33 pC Voltage = 11.02 kV	 Discharge = 1.79 pC Voltage = 106.03 kV
 Discharge = 1.80 pC Voltage = 123.08 kV	 Discharge = 1.65 pC Voltage = 106.09 kV

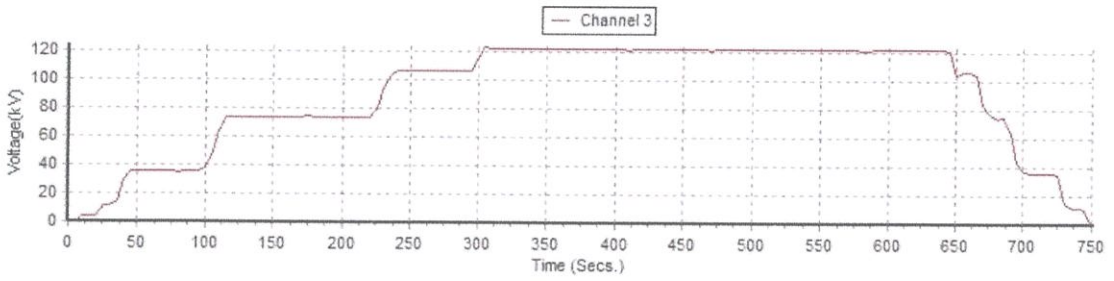
ไม่เกิดการดีสชาร์จ

- Bushing 6

Oil impregnated paper bushing พิกัด 123 kV



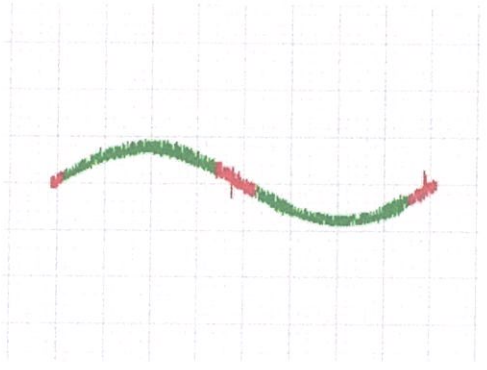
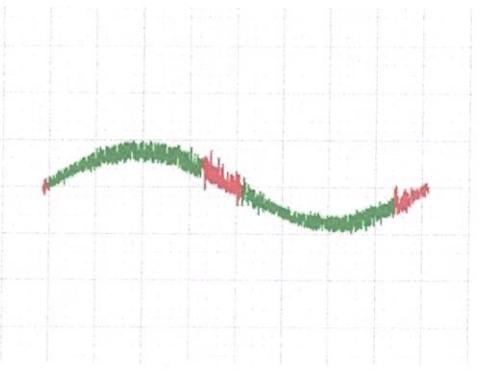
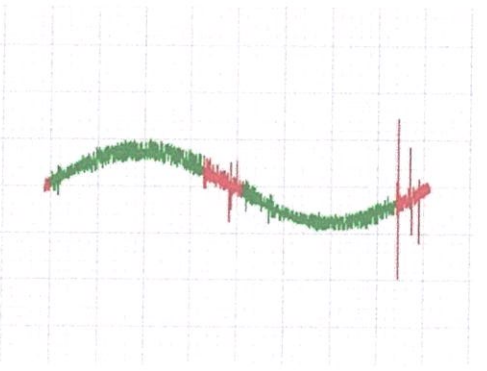
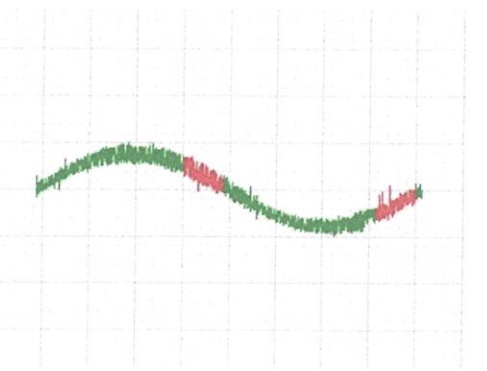
(ก)



(ข)

รูปที่ 4.16 การทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนของบุชชิ่ง Bushing6
(ก) กราฟการเกิดดีสชาร์จบางส่วนกับเวลาในการทดสอบ
(ข) กราฟแรงดันทดสอบกับเวลาในการทดสอบ

ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนของ บุชชิ่ง Bushing6

 Discharge = 1.53 pC Voltage = 11.22 kV	 Discharge = 2.87 pC Voltage = 106.68 kV
 Discharge = 3.89 pC Voltage = 122.51 kV	 Discharge = 1.83 pC Voltage = 106.03 kV

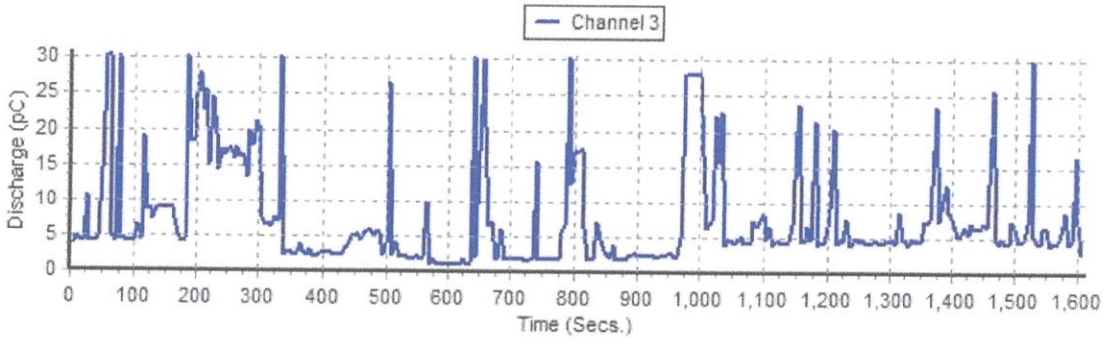
ไม่เกิดการดีสชาร์จ

ตารางที่ 4.11 ผลการเกิดดีสชาร์จบางส่วนของ Bushing4 – Bushing6 สำหรับทุกแรงดันทดสอบ

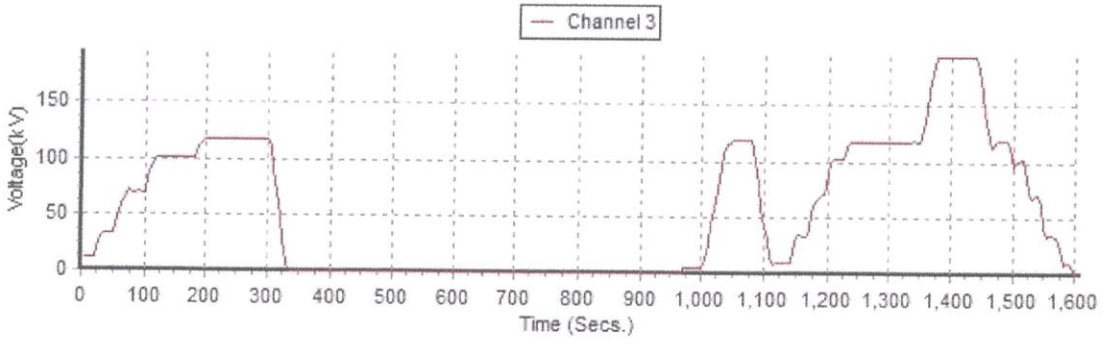
Bushing4		Bushing5		Bushing6	
Voltage (kV)	Discharge (pC)	Voltage (kV)	Discharge (pC)	Voltage (kV)	Discharge (pC)
0.00	1.33	0.00	1.47	0.00	1.36
10.14	1.35	11.02	1.33	11.22	1.53
34.70	1.44	35.04	1.50	74.03	2.74
74.34	1.68	74.28	1.60	106.68	2.87
105.75	1.66	106.03	1.79	122.51	3.89
123.99	1.64	123.08	1.80	106.03	1.83
105.65	1.55	106.09	1.65	74.58	1.63
73.67	1.54	73.85	1.71	36.23	2.04
35.81	1.44	35.32	1.64	10.84	1.51
11.15	1.36	10.99	1.36		

- Bushing 7

Oil impregnated paper bushing พิกัด 115 kV



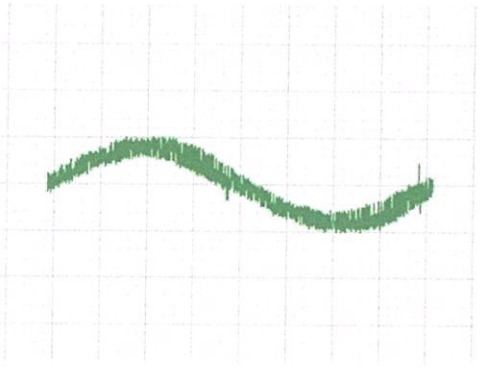
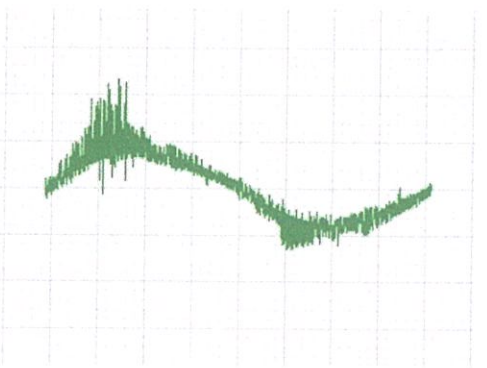
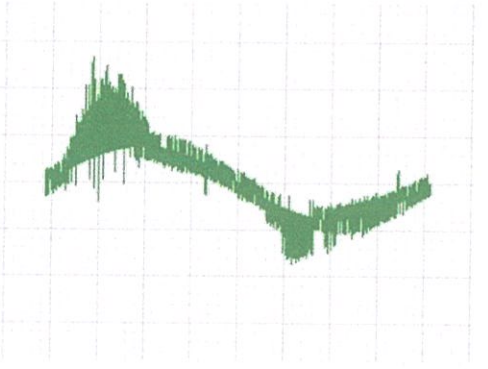
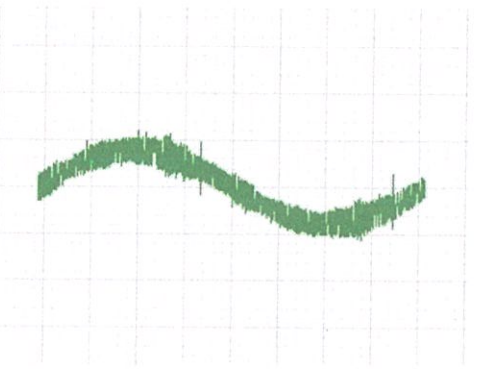
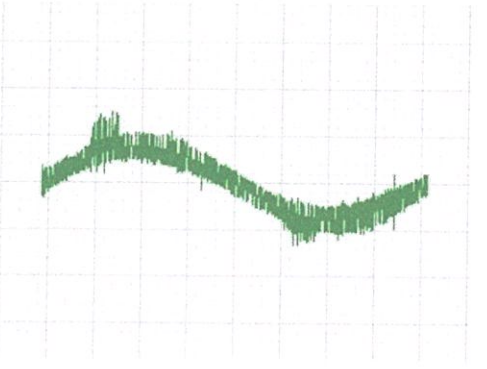
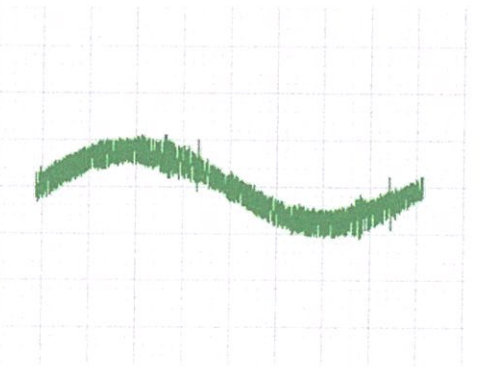
(ก)



(ข)

รูปที่ 4.17 การทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนของบุชชิ่ง Bushing7
(ก) กราฟการเกิดดีสชาร์จบางส่วนกับเวลาในการทดสอบ
(ข) กราฟแรงดันทดสอบกับเวลาในการทดสอบ

ตารางที่ 4.12 ผลการทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนของ บุชชิ่ง Bushing7

 Discharge = 4.54 pC Voltage = 11.35 kV	 Discharge = 22.92 pC Voltage = 118.18 kV
 Discharge = 16.26 pC * Voltage = 117.49 kV	 Discharge = 4.10 pC ** Voltage = 102.76 kV
 Discharge = 8.19 pC Voltage = 193.76 kV	 Discharge = 4.11 pC Voltage = 118.85 kV

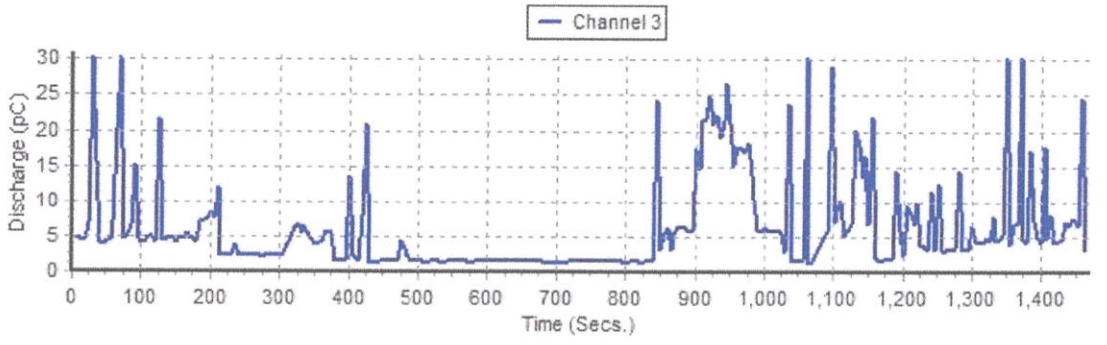
หมายเหตุ : * ก่อนเปลี่ยนซีลด์

** หลังเปลี่ยนซีลด์

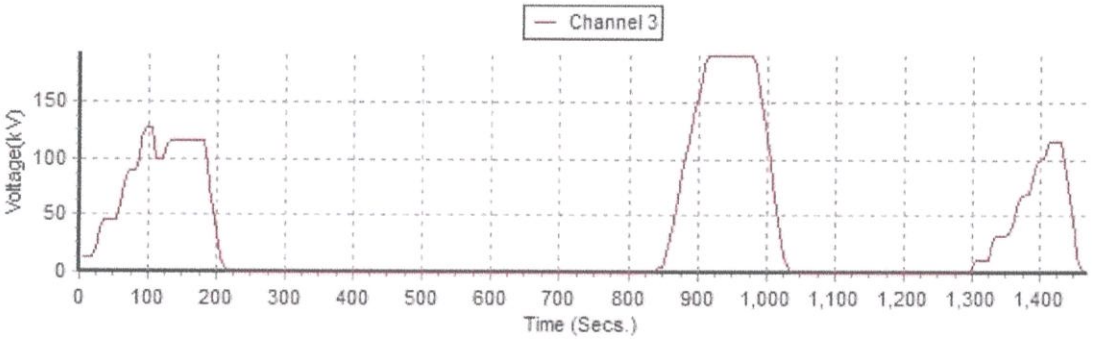
ขณะเริ่มต้นการทดสอบเมื่อขึ้นแรงดันทดสอบเกิดโคโรนาดีสชาร์จ ดังนั้นต้องทำการเปลี่ยนชีลด์เพื่อทดสอบว่าโคโรนาดีสชาร์จเกิดจากระบบทดสอบหรือเกิดจากบุชชิ่ง พบว่าเมื่อเปลี่ยนชีลด์ที่มีขนาดใหญ่พอทำให้โคโรนาดีสชาร์จดังกล่าวหายไป

- Bushing 8

Oil impregnated paper bushing พิกัด 115 kV



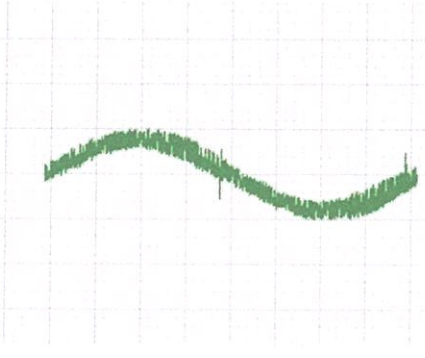
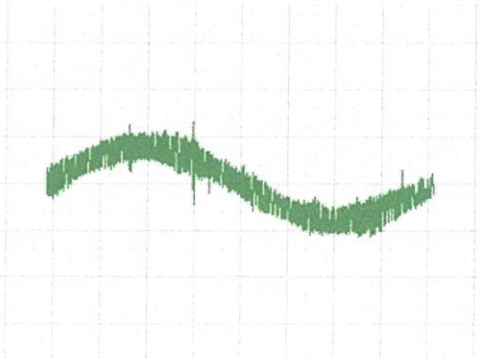
(ก)



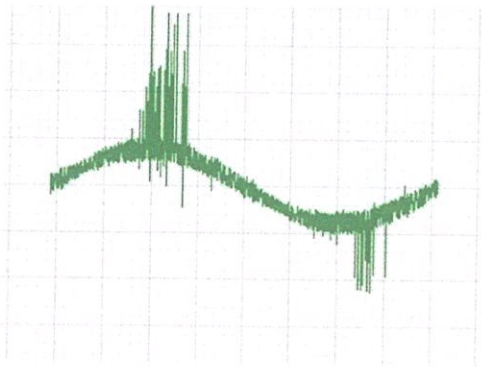
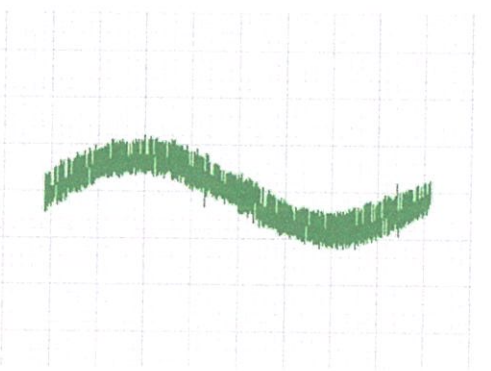
(ข)

รูปที่ 4.18 การทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนของบุชชิ่ง Bushing8
(ก) กราฟการเกิดดีสชาร์จบางส่วนกับเวลาในการทดสอบ
(ข) กราฟแรงดันทดสอบกับเวลาในการทดสอบ

ตารางที่ 4.13 ผลการทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนของ บุชชิ่ง Bushing8

 Discharge = 4.37 pC Voltage = 13.54 kV	 Discharge = 4.49 pC Voltage = 115.88 kV

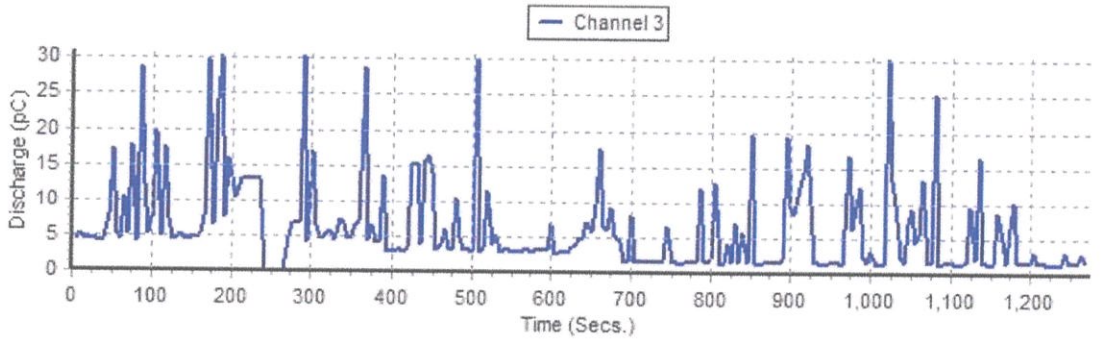
ตารางที่ 4.13 ผลการทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนของ บุชชิ่ง Bushing8 (ต่อ)

	
Discharge = 22.74 pC Voltage = 190.84 kV	Discharge = 4.56 pC Voltage = 116.09 kV

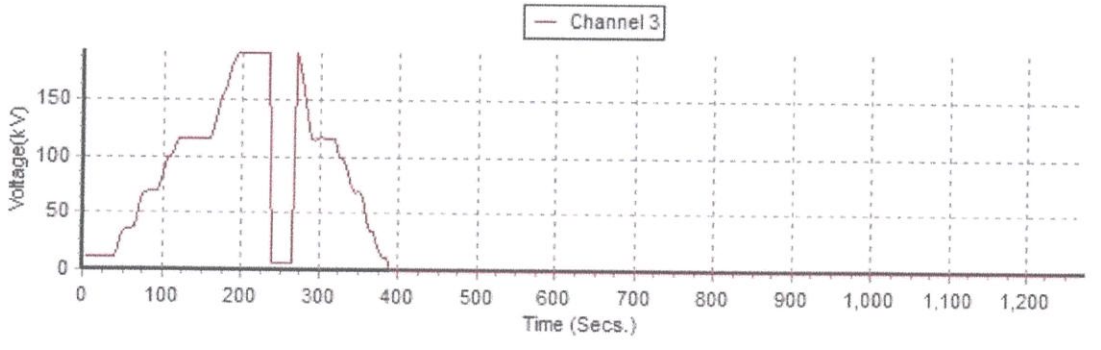
เกิดโคโรนาดีสชาร์จทั้งด้านแรงต่ำและด้านแรงสูงที่ระดับแรงดันทนอยู่ได้

- Bushing 9

Oil impregnated paper bushing พิกัด 115 kV



(ก)



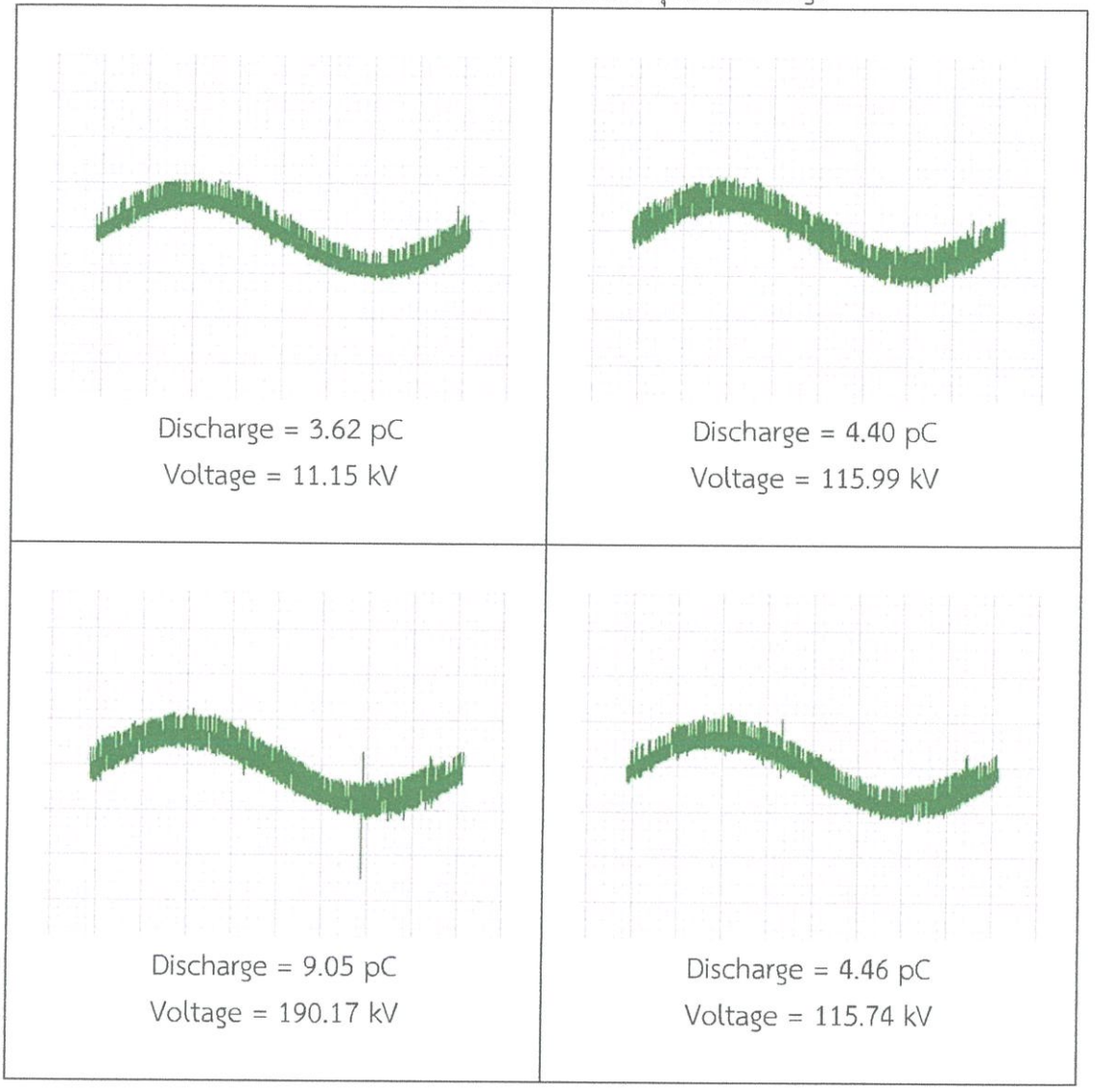
(ข)

รูปที่ 4.19 การทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนของบุชชิ่ง Bushing9

(ก) กราฟการเกิดดีสชาร์จบางส่วนกับเวลาในการทดสอบ

(ข) กราฟแรงดันทดสอบกับเวลาในการทดสอบ

ตารางที่ 4.14 ผลการทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนของ บุชชิ่ง Bushing9



เกิดโคโรนาดีสชาร์จด้านแรงสูง 1 พัลส์ เมื่อขึ้นระดับแรงดันทนอยู่ได้

ตารางที่ 4.15 ผลการเกิดดีสชาร์จบางส่วนของ Bushing7 – Bushing9 สำหรับทุกแรงดันทดสอบ

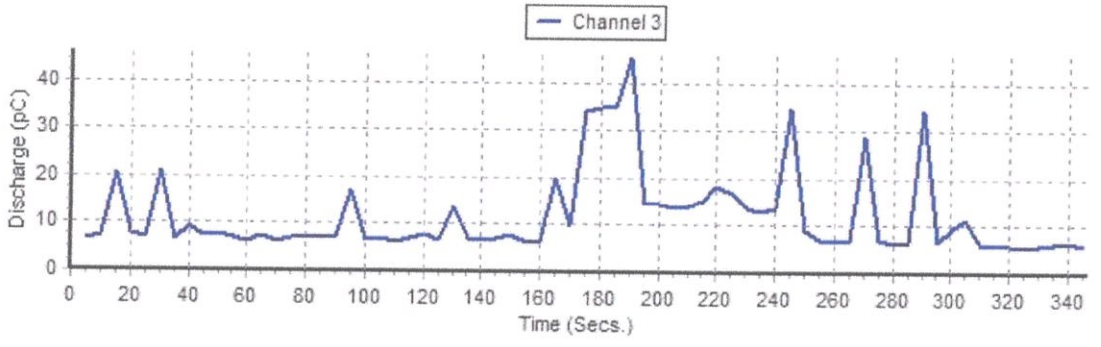
Bushing7		Bushing8		Bushing9	
Voltage (kV)	Discharge (pC)	Voltage (kV)	Discharge (pC)	Voltage (kV)	Discharge (pC)
11.35	4.54	11.15	3.62	13.54	4.37
33.09	4.21	72.03	22.30	45.20	4.64
70.46	4.36	99.39	4.28	99.28	4.11
100.77	4.17	115.99	4.40	115.88	4.49
118.18	22.92	190.17	9.05	190.84	22.74
117.49	16.26	115.74	4.46	11.25	4.58
115.53	4.39	99.14	4.56	32.92	5.20

ตารางที่ 4.15 ผลการเกิดดีสชาร์จบางส่วนของ Bushing7 – Bushing9 สำหรับทุกแรงดันทดสอบ (ต่อ)

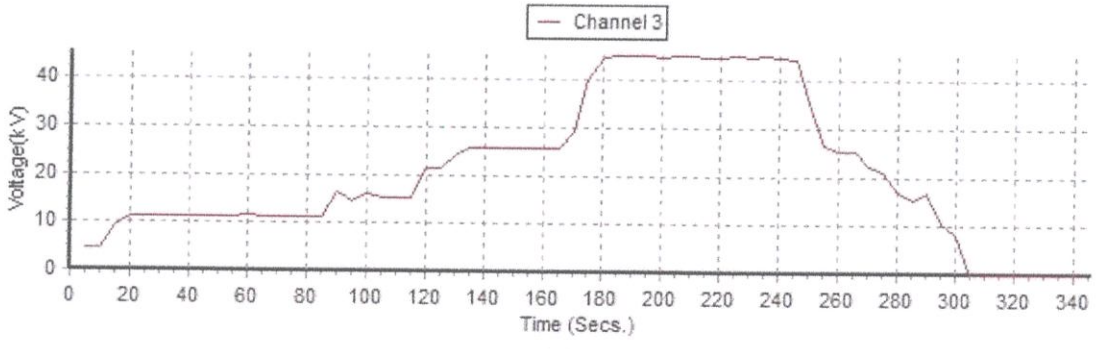
Bushing7		Bushing8		Bushing9	
Voltage (kV)	Discharge (pC)	Voltage (kV)	Discharge (pC)	Voltage (kV)	Discharge (pC)
10.40	4.33	70.81	27.21	109.06	8.30
33.46	4.41	33.48	6.51	116.09	4.56
70.08	4.53	10.71	4.96		
102.76	4.10				
193.76	8.19				
118.85	4.11				
102.40	4.63				
33.47	4.11				
10.36	4.00				

- Bushing 10

Oil impregnated paper bushing พิกัด 25 kV



(ก)



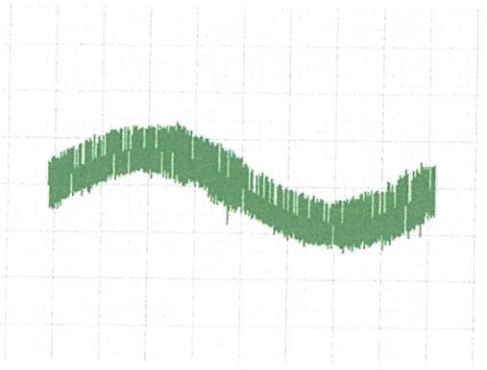
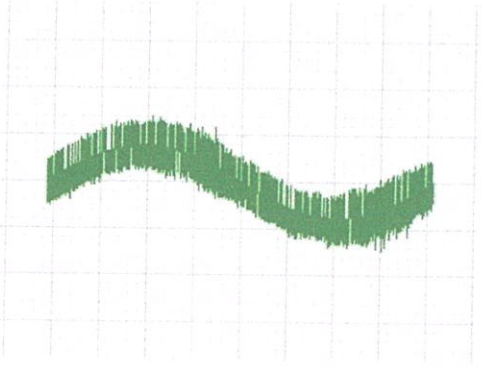
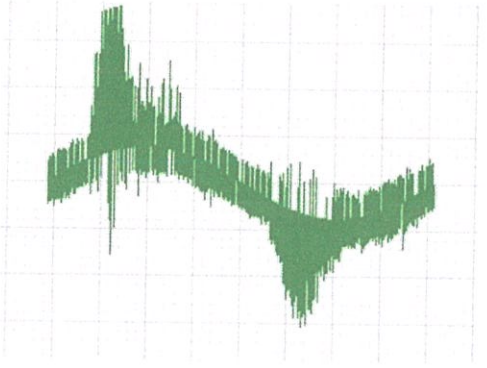
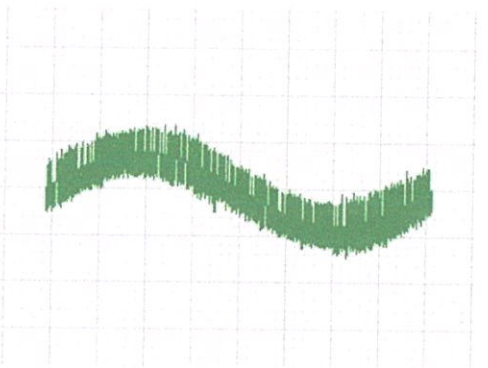
(ข)

รูปที่ 4.20 การทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนของบุชชิ่ง Bushing10

(ก) กราฟการเกิดดีสชาร์จบางส่วนกับเวลาในการทดสอบ

(ข) กราฟแรงดันทดสอบกับเวลาในการทดสอบ

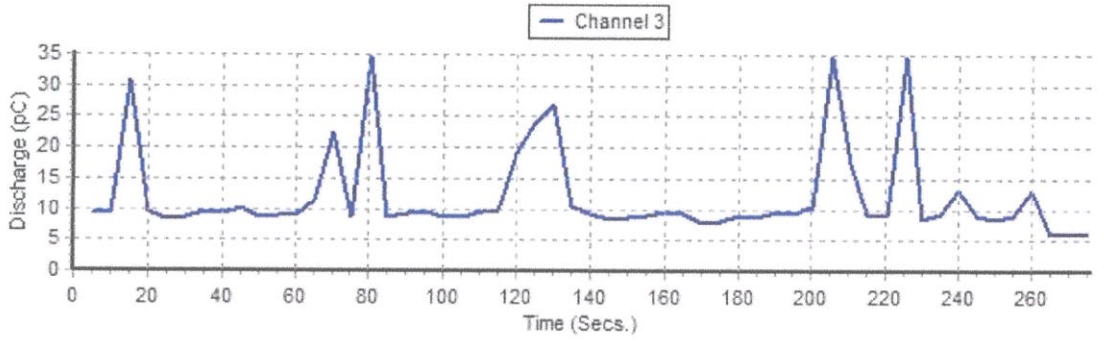
ตารางที่ 4.16 ผลการทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนของ บุชชิ่ง Bushing10

 Discharge = 24.43 pC Voltage = 11.32 kV	 Discharge = 7.19 pC Voltage = 26.01 kV
 Discharge = 31.95 pC Voltage = 44.91 kV	 Discharge = 7.30 pC Voltage = 25.67 kV

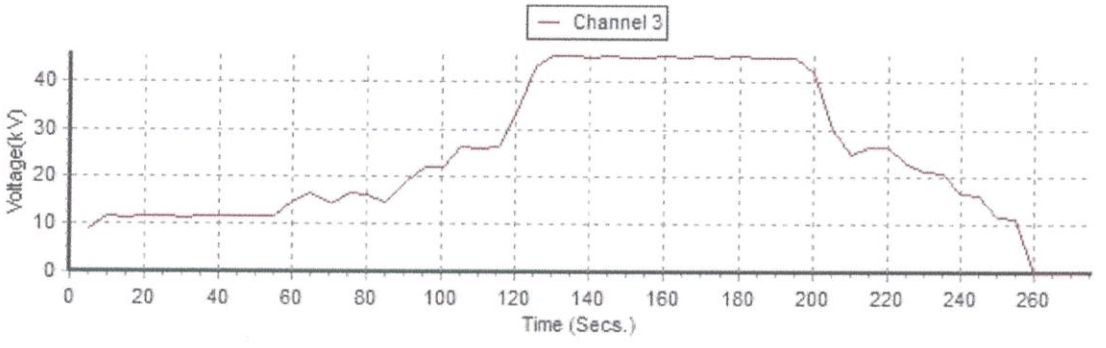
เกิดโคโรนาดีสชาร์จด้านแรงต่ำและด้านแรงสูง โดยสังเกตุได้จากมีบริเวณที่พัลส์มีขนาดสูงเท่าๆ กัน และเกิดดีสชาร์จตามผิวโดยสังเกตุได้จากมีบริเวณที่พัลส์เป็นกระจุกกัน ที่ระดับแรงดันทนอยู่ได้

- Bushing 11

Oil impregnated paper bushing พิกัด 25 kV



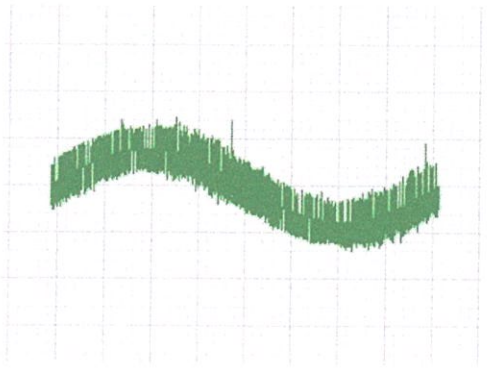
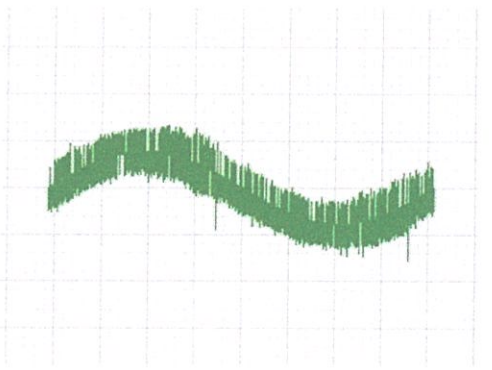
(ก)



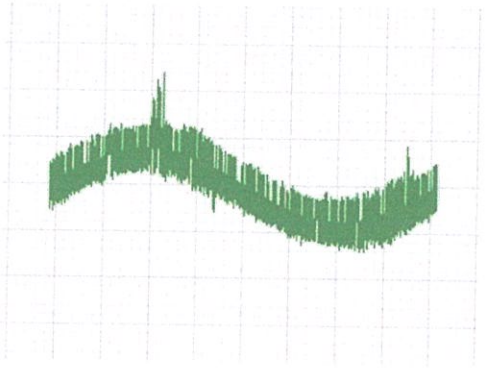
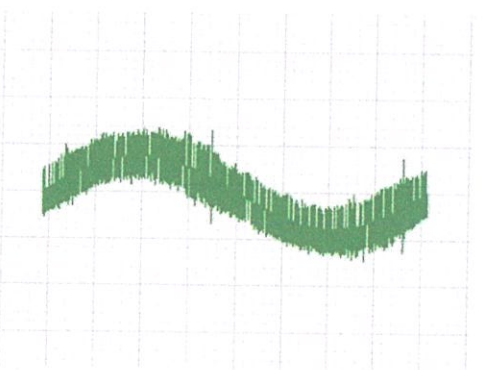
(ข)

รูปที่ 4.21 การทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนของบุชชิ่ง Bushing11
(ก) กราฟการเกิดดีสชาร์จบางส่วนกับเวลาในการทดสอบ
(ข) กราฟแรงดันทดสอบกับเวลาในการทดสอบ

ตารางที่ 4.17 ผลการทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนของ บุชชิ่ง Bushing11

	
Discharge = 8.86 pC Voltage = 11.43 kV	Discharge = 9.79 pC Voltage = 26.20 kV

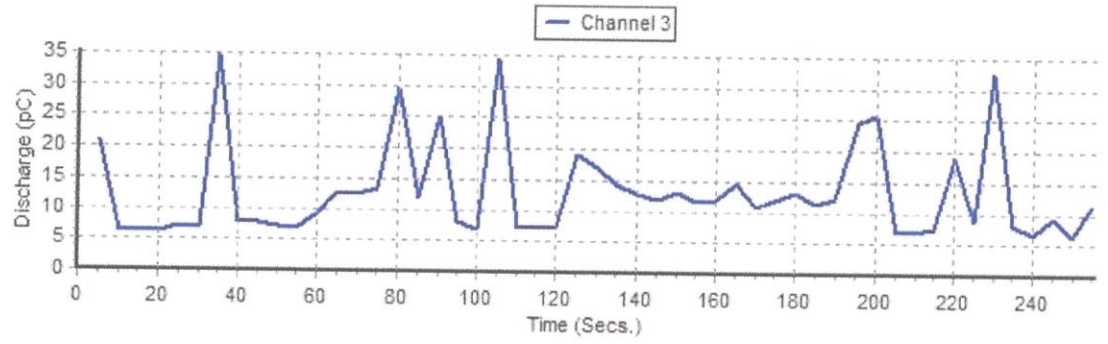
ตารางที่ 4.17 ผลการทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนของ บุชชิ่ง Bushing11 (ต่อ)

	
Discharge = 13.97 pC Voltage = 45.22 kV	Discharge = 8.69 pC Voltage = 21.54 kV

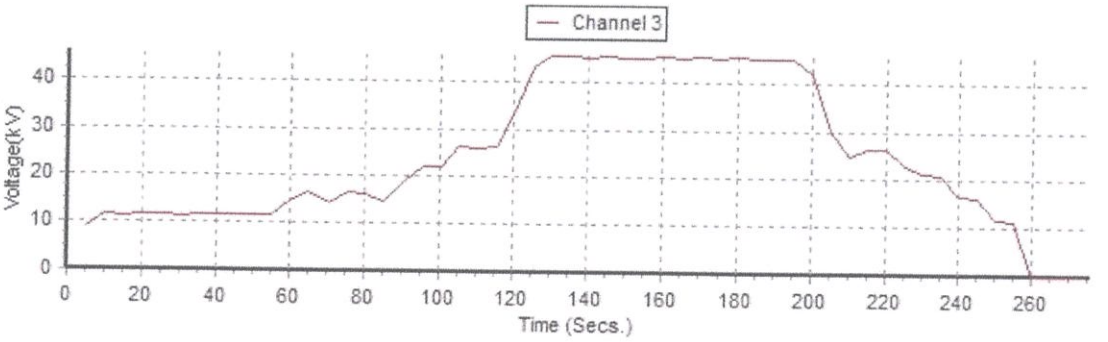
ในกรณีนี้ เกิดโคโรนาดีสชาร์จด้านแรงต่ำที่ระดับแรงดันทนอยู่ได้

- Bushing 12

Oil impregnated paper bushing พิกัด 25 kV



(ก)



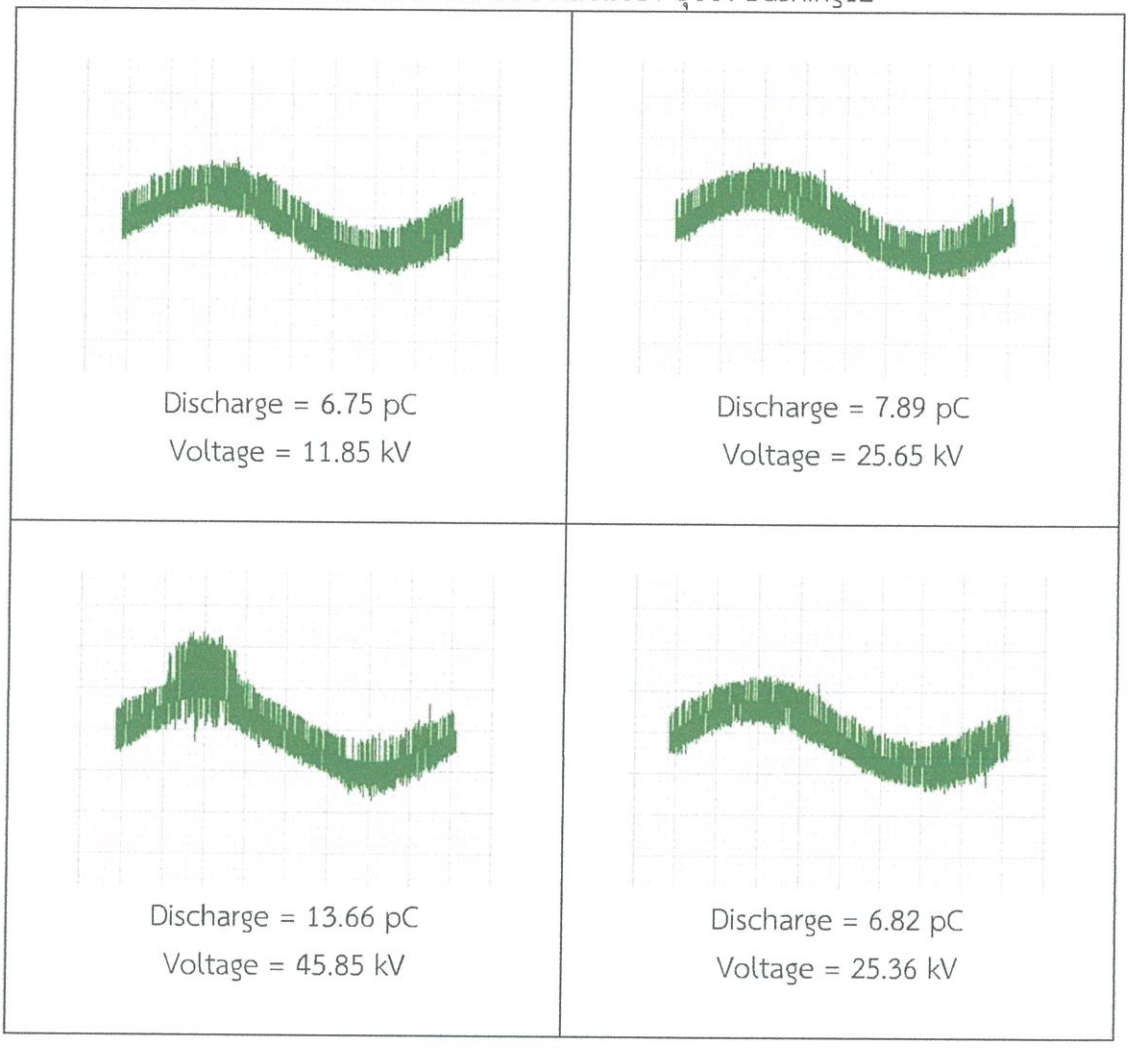
(ข)

รูปที่ 4.22 การทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนของบุชชิ่ง Bushing12

(ก) กราฟการเกิดดีสชาร์จบางส่วนกับเวลาในการทดสอบ

(ข) กราฟแรงดันทดสอบกับเวลาในการทดสอบ

ตารางที่ 4.18 ผลการทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนของ บุชชิ่ง Bushing12



ในกรณีนี้ เกิดโคโรนาดีสชาร์จด้านแรงต่ำที่แรงดันทนอยู่ได้

ตารางที่ 4.19 ผลการทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนของ บุชชิ่ง Bushing12

Bushing 10		Bushing 11		Bushing 12	
Voltage (kV)	Discharge (pC)	Voltage (kV)	Discharge (pC)	Voltage (kV)	Discharge (pC)
11.32	24.43	11.43	8.86	11.85	6.75
15.47	6.25	14.91	9.10	15.85	34.70
26.01	7.19	21.96	10.42	21.22	7.97
44.91	31.95	26.20	9.79	25.65	7.89
25.67	7.30	45.22	13.97	45.85	13.66
21.21	6.66	21.54	8.69	25.36	6.82
17.34	7.54	16.52	9.53	21.55	6.32
10.70	6.82	11.20	9.03	16.10	6.61
				11.03	7.70

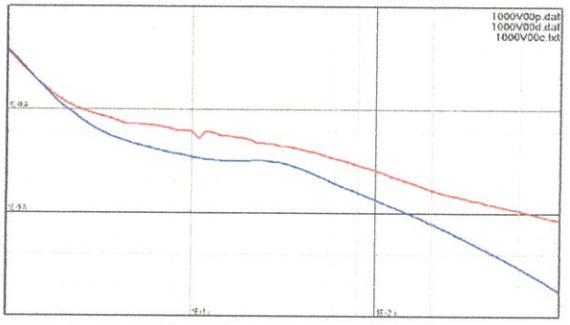
4.2.2 การทดสอบกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชัน

การทดสอบนี้ทำกับบุชชิ่งจำนวน 8 ลูก ซึ่งมีพิกัด 123 kV ทั้งหมด โดยเป็นขอห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สจล. จำนวน 2 ลูก และเป็นของบริษัทแห่งหนึ่ง จำนวน 6 ลูก มีผลการทดสอบดังนี้

4.2.2.1 ผลการทดสอบกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชันในบุชชิ่งของ สจล.

- Alstom 1

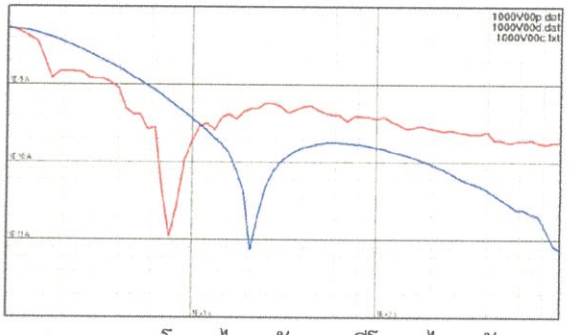
Oil impregnated paper bushing พิกัด 123 kV



รูปที่ 4.23 การทดสอบกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชันของบุชชิ่ง Alstom1

- Alstom 2

Oil impregnated paper bushing พิกัด 123 kV

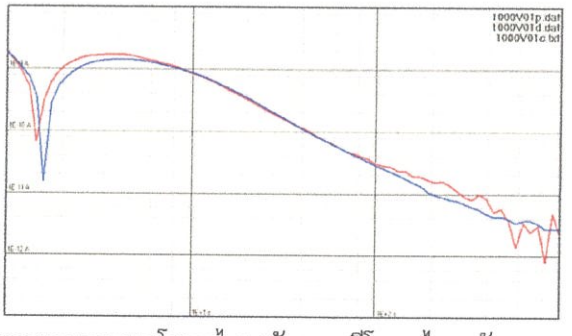


รูปที่ 4.24 การทดสอบกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชันของบุชชิ่ง Alstom2

4.2.2.2 ผลารทดสอบกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชันในบุชชิ่งของบริษัทแห่งหนึ่ง

- Bushing 1

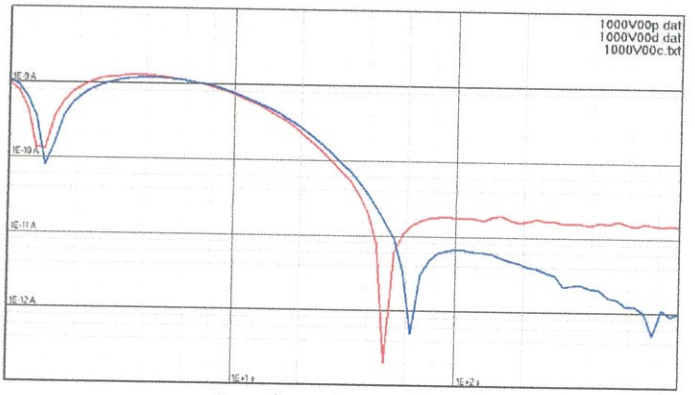
Oil impregnated paper bushing พิกัด 123 kV



รูปที่ 4.25 การทดสอบกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชันของบุชชิ่ง Bushing1

- Bushing 2

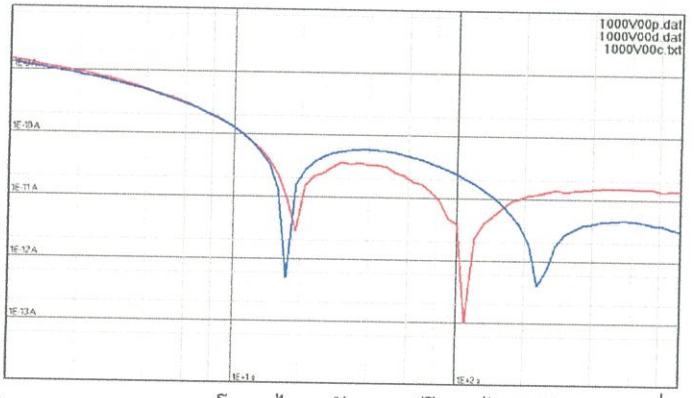
Oil impregnated paper bushing พิกัด 123 kV



รูปที่ 4.26 การทดสอบกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชันของบุชชิ่ง Bushing2

- Bushing 3

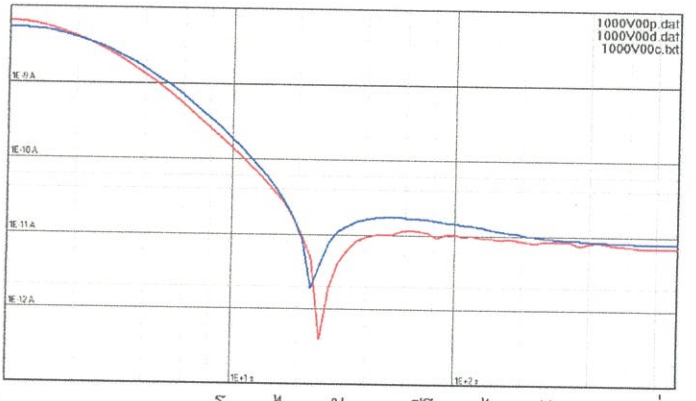
Oil impregnated paper bushing พิกัด 123 kV



รูปที่ 4.27 การทดสอบกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชันของบุชชิ่ง Bushing3

- Bushing 4

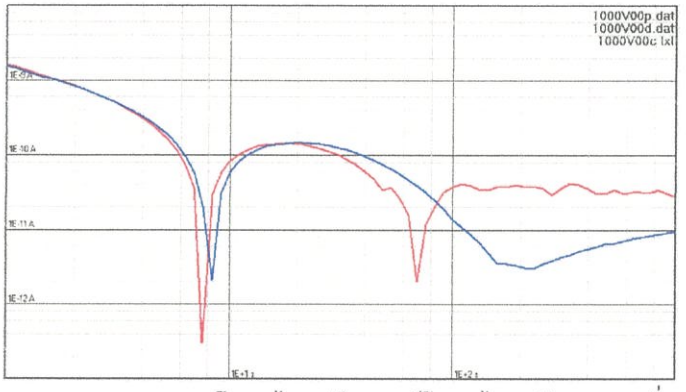
Oil impregnated paper bushing พิกัด 123 kV



รูปที่ 4.28 การทดสอบกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชันของบุชชิ่ง Bushing4

- Bushing 5

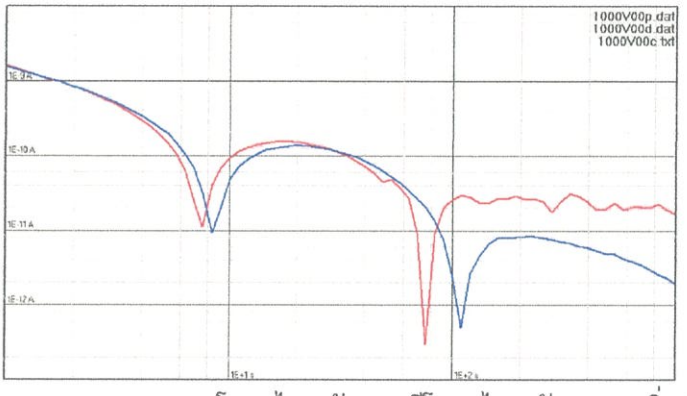
Oil impregnated paper bushing พิกัด 123 kV



รูปที่ 4.29 การทดสอบกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชันของบุชชิ่ง Bushing5

- Bushing 6

Oil impregnated paper bushing พิกัด 123 kV



รูปที่ 4.30 การทดสอบกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชันของบุชชิ่ง Bushing6

จากผลการทดสอบกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชันพบว่า ผลการทดลองสำหรับ Bushing 1-6 กระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชันมีการลดลง และเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยผู้เชี่ยวชาญได้สันนิษฐานว่าอาจจะมีสาเหตุมาจากการเกิดกระแสรั่วไหลลงกราวนด์

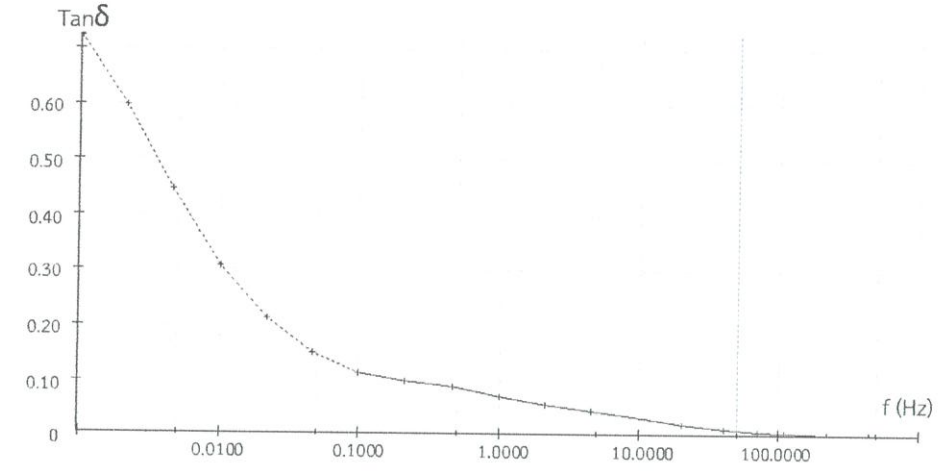
4.2.3 การทดสอบ FDS

การทดสอบนี้ทำกับบุชชิ่งจำนวน 8 ลูก ซึ่งมีพิกัด 123 kV ทั้งหมด โดยเป็นของห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สจล. จำนวน 2 ลูก และเป็นของบริษัทแห่งหนึ่ง จำนวน 6 ลูก มีผลการทดสอบดังนี้

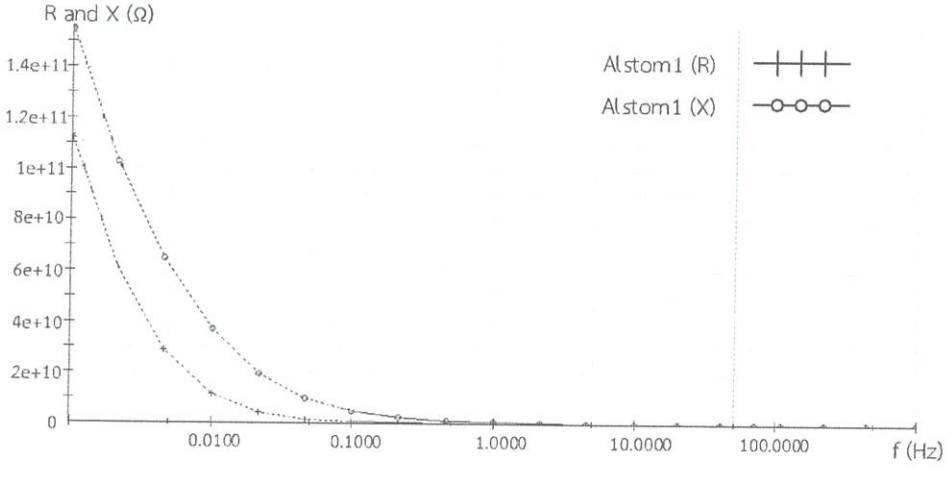
4.2.3.1 ผลการทดสอบFDSในบุชชิ่งของ สจล.

- Alstom 1

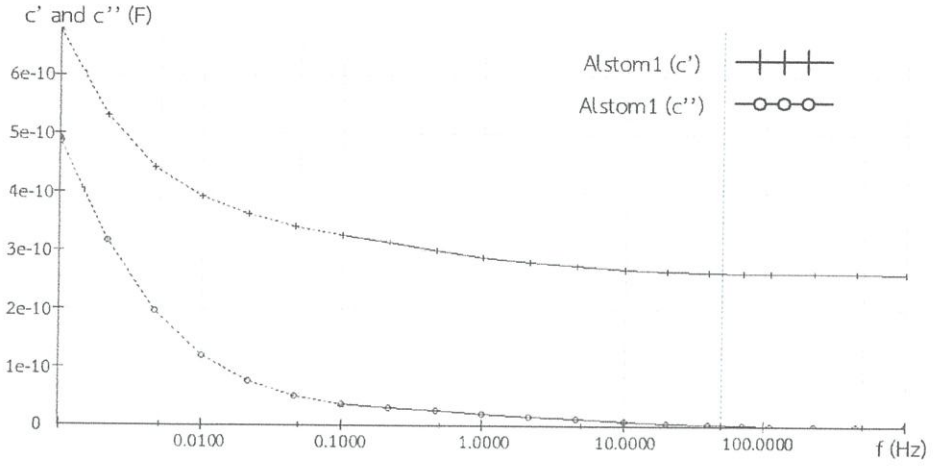
Oil impregnated paper bushing พิกัด 123 kV



(ก)



(ข)

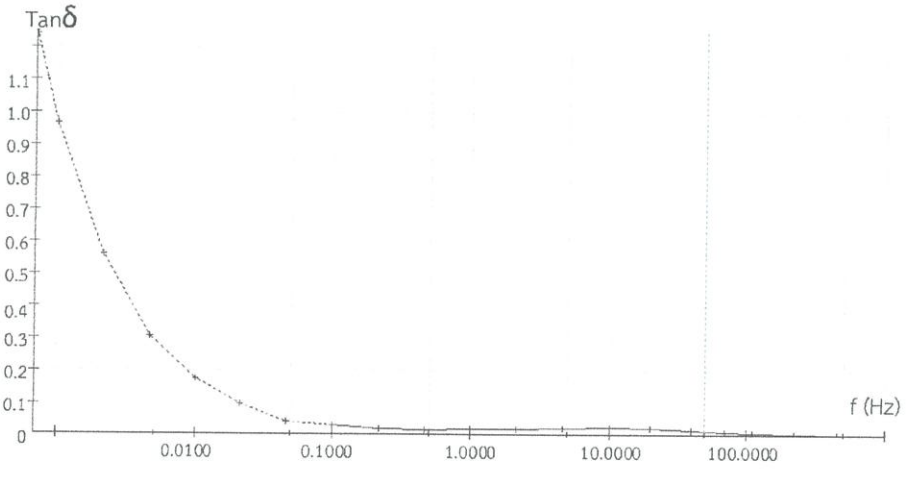


(ค)

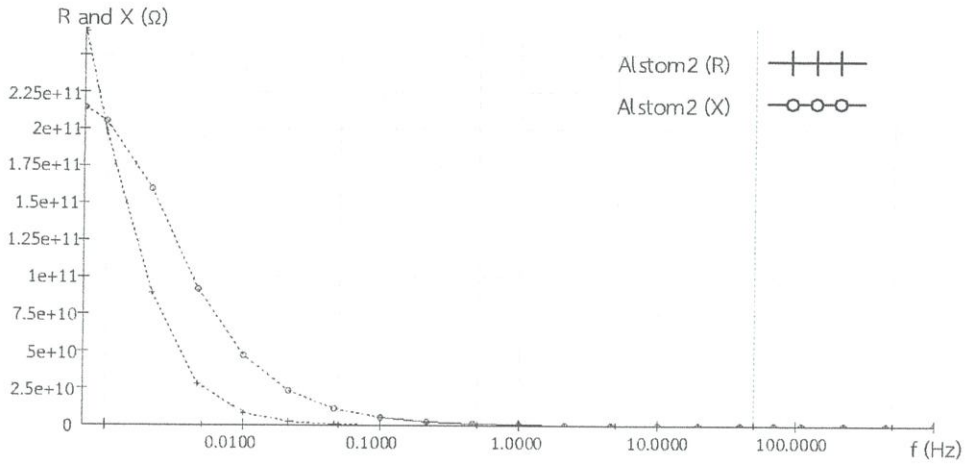
รูปที่ 4.31 กราฟการทดสอบความเป็นฉนวนในรูปแบบโดเมนต์ความถี่(FDS) ของ Alstom1
(ก) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์กำลังสูญเสียกับความถี่
(ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานและอิมพิแดนซ์กับความถี่
(ค) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเก็บประจุกับความถี่

- Alstom 2

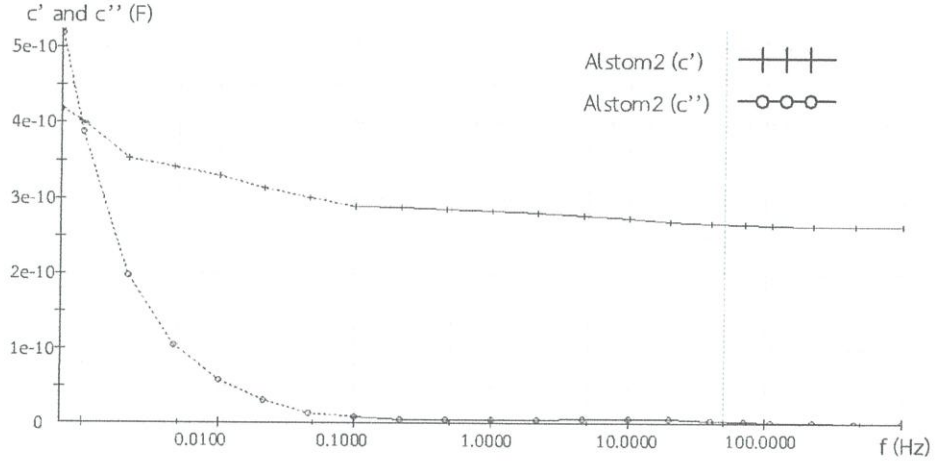
Oil impregnated paper bushing พิกัด 123 kV



(ก)



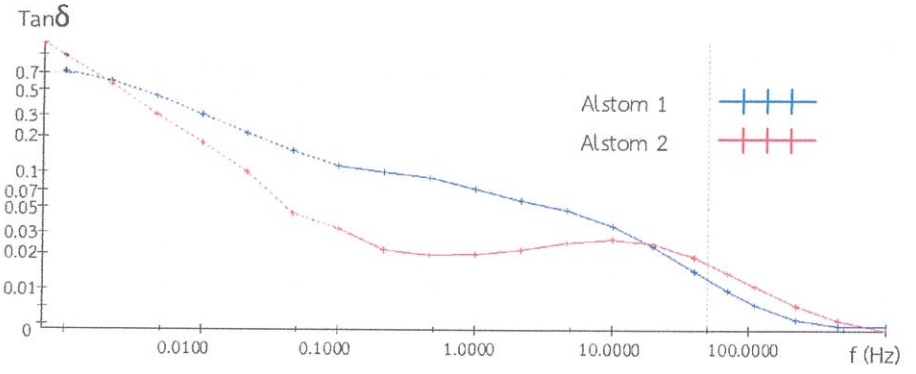
(ข)



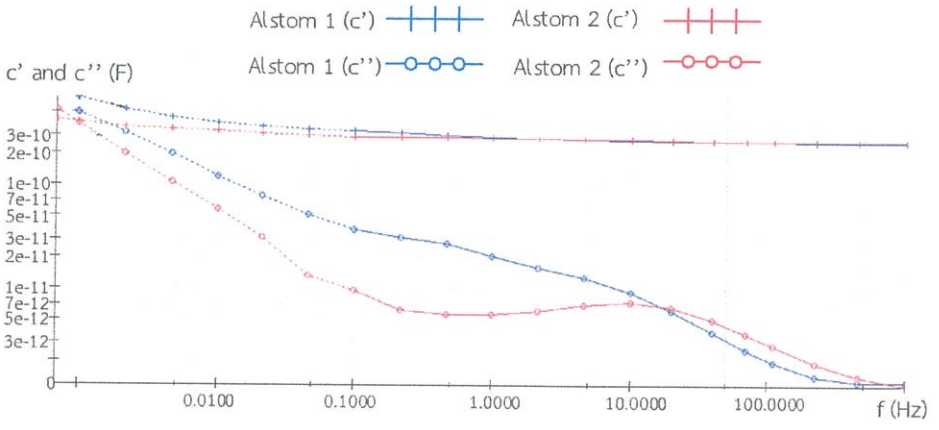
(ค)

รูปที่ 4.32 กราฟการทดสอบความเป็นฉนวนในรูปแบบโดเมนต์ความถี่(FDS) ของ Alstom2
(ก) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์กำลังสูญเสียกับความถี่
(ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานและอิมพิแดนซ์กับความถี่
(ค) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเก็บประจุกับความถี่

- เปรียบเทียบระหว่าง Alstom1 กับ Alstom2



(ก)



(ข)

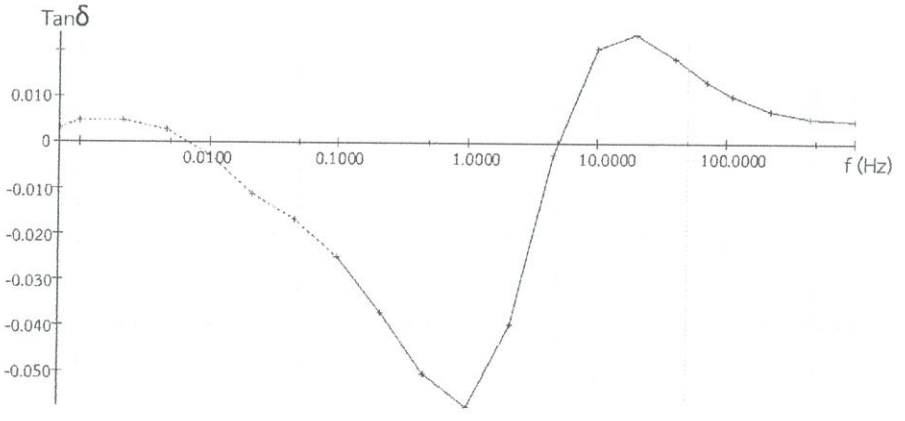
รูปที่ 4.33 กราฟการทดสอบความเป็นฉนวนในรูปแบบโดเมนต์ความถี่(FDS)
ระหว่าง Alstom1 กับ Alstom2
(ก) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์กำลังสูญเสียกับความถี่
(ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเก็บประจุกับความถี่

จากกราฟเปรียบเทียบในรูปที่ 4.33 จะเห็นได้ว่าบุชชิ่ง Alstom2 มีค่าแฟคเตอร์กำลังสูญเสีย ค่า c' และ c'' ต่ำกว่าบุชชิ่ง Alstom2 นั้นหมายถึงความเสื่อมสภาพของบุชชิ่ง Alstom2 นั้น น้อยกว่า ซึ่งสอดคล้องกับผลการเกิดดีสชาร์จบางส่วน

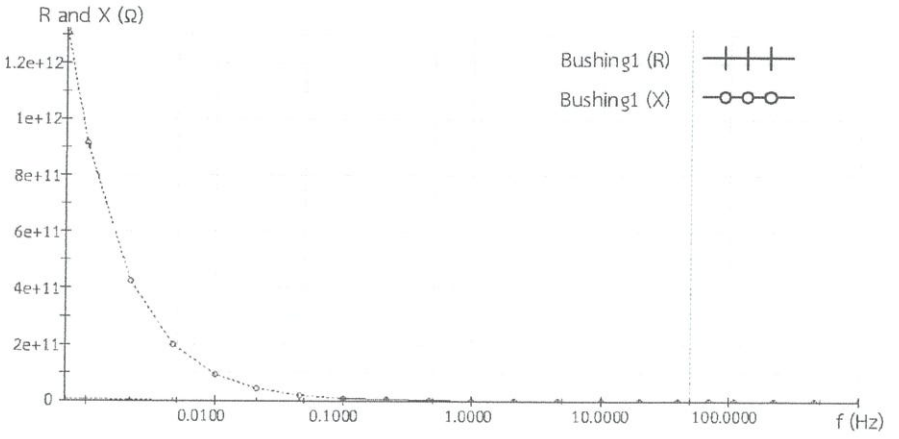
4.2.3.2 ผลารทดสอบFDSในบุชชิ่งของบริษัทแห่งหนึ่ง

- Bushing 1

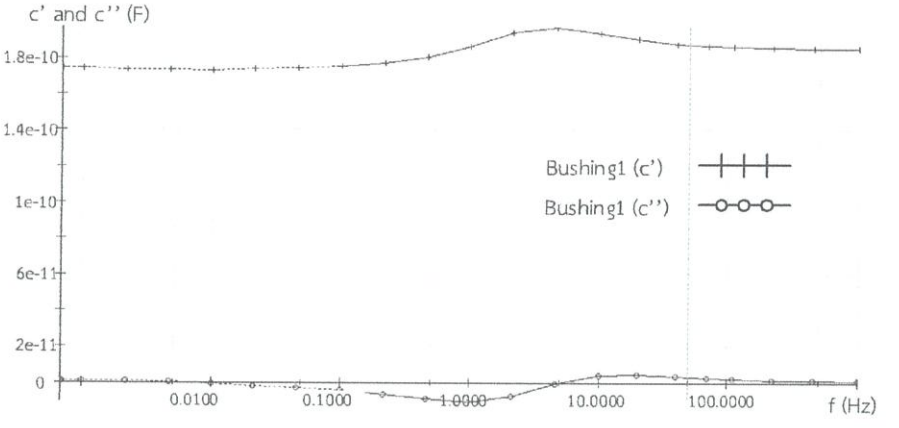
Oil impregnated paper bushing พิกัด 123 kV



(ก)



(ข)

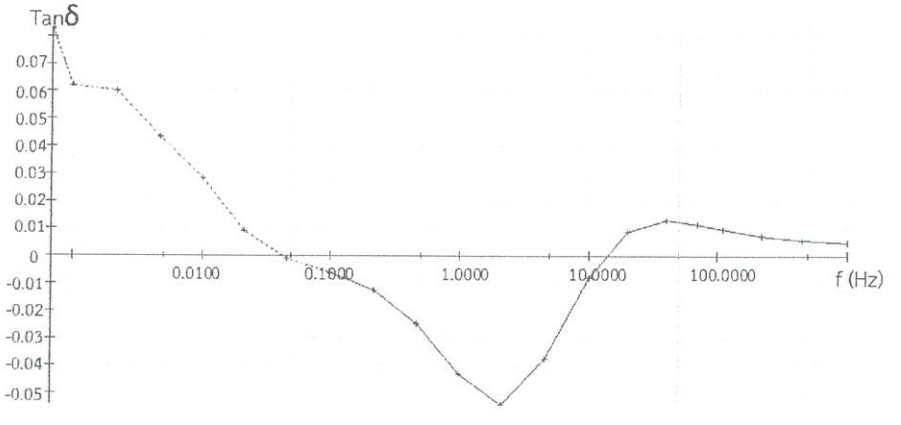


(ค)

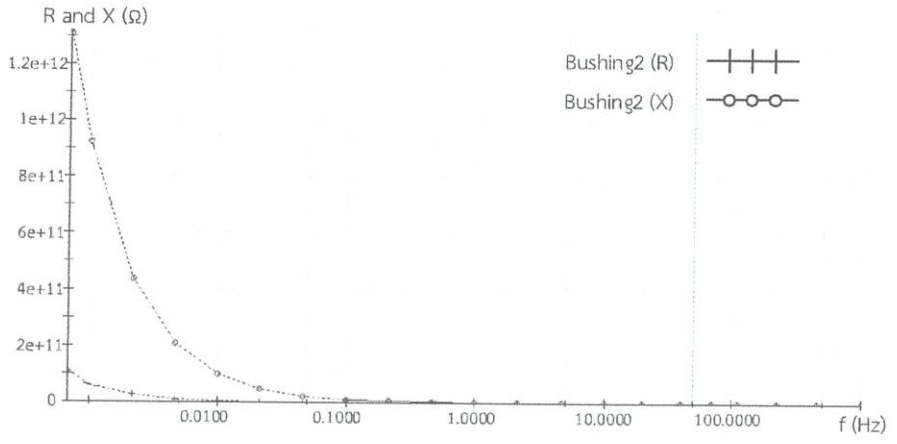
รูปที่ 4.34 กราฟการทดสอบความเป็นฉนวนในรูปแบบโดเมนต์ความถี่(FDS) ของ Bushing1
(ก) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์กำลังสูญเสียกับความถี่
(ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานและอิมพิแดนซ์กับความถี่
(ค) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเก็บประจุกับความถี่

- Bushing 2

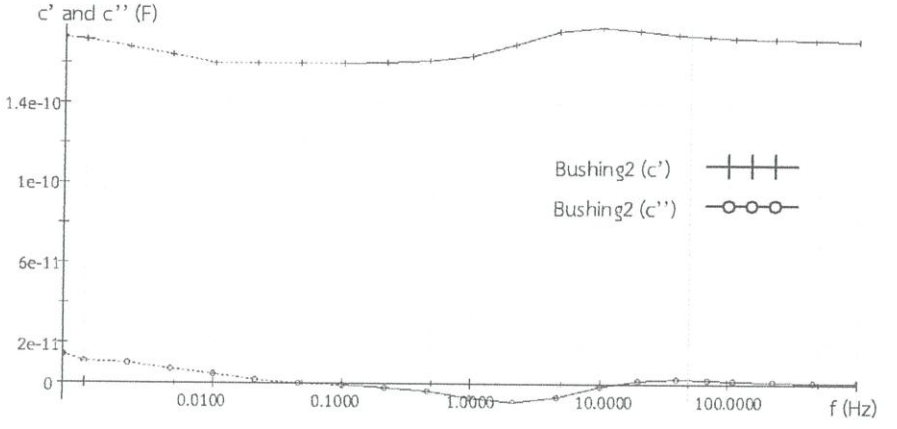
Oil impregnated paper bushing พิกัด 123 kV



(ก)



(ข)

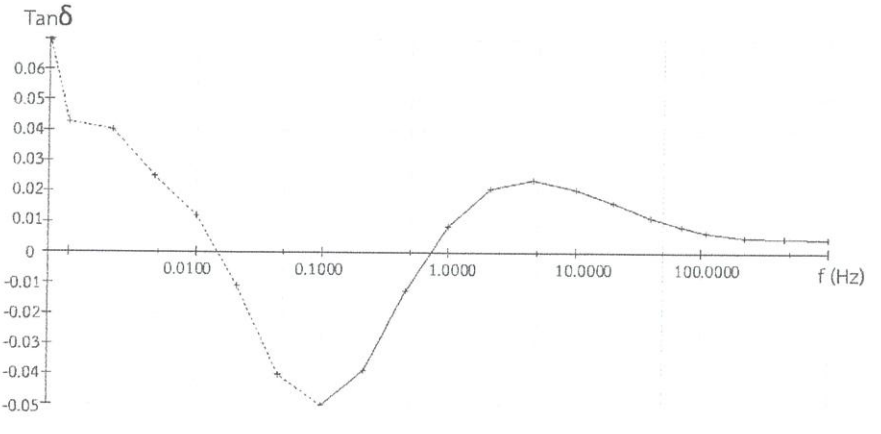


(ค)

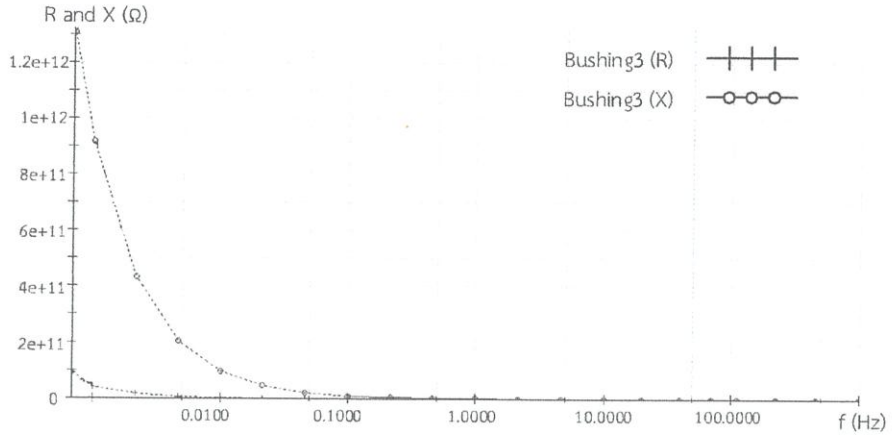
รูปที่ 4.35 กราฟการทดสอบความเป็นฉนวนในรูปแบบโดเมนต์ความถี่(FDS) ของ Bushing2
(ก) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์กำลังสูญเสียกับความถี่
(ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานและอิมพิแดนซ์กับความถี่
(ค) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเก็บประจุกับความถี่

- Bushing 3

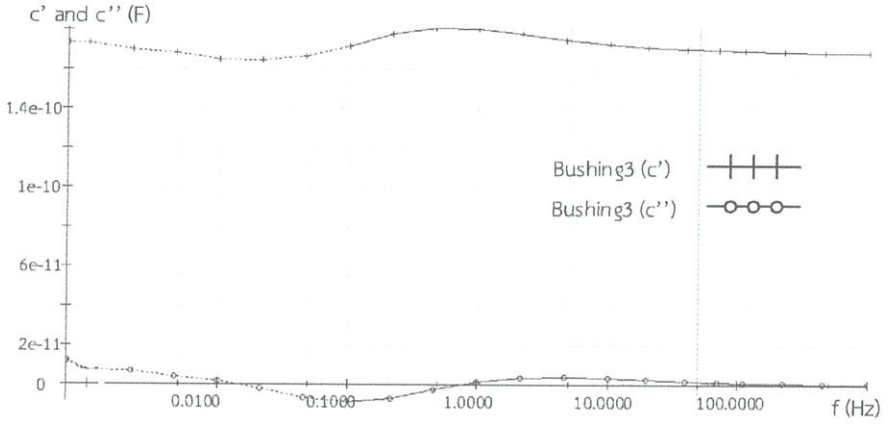
Oil impregnated paper bushing พิกัด 123 kV



(ก)



(ข)

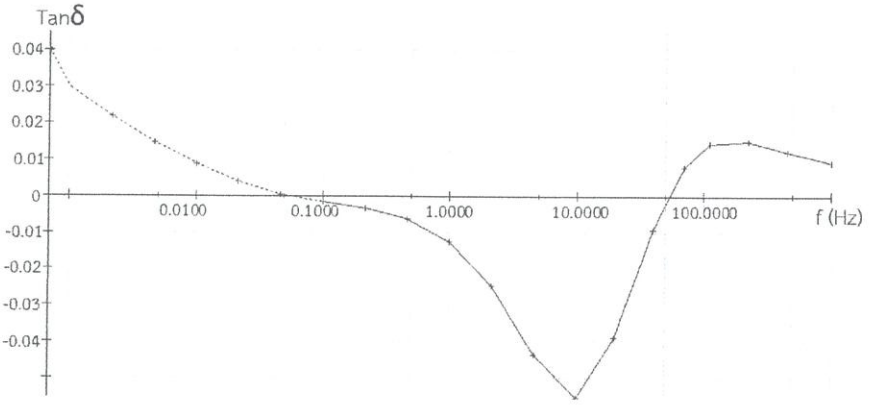


(ค)

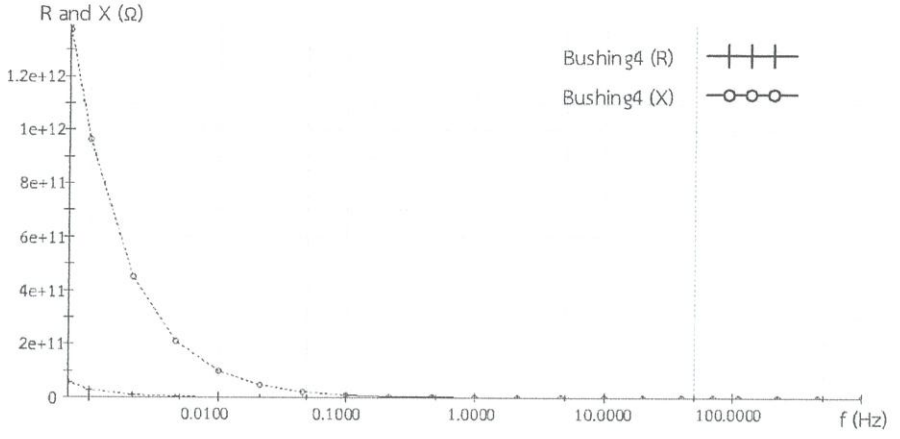
รูปที่ 4.36 กราฟการทดสอบความเป็นฉนวนในรูปแบบโดเมนต์ความถี่(FDS) ของ Bushing3
(ก) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์กำลังสูญเสียกับความถี่
(ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานและอิมพิแดนซ์กับความถี่
(ค) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเก็บประจุกับความถี่

- Bushing 4

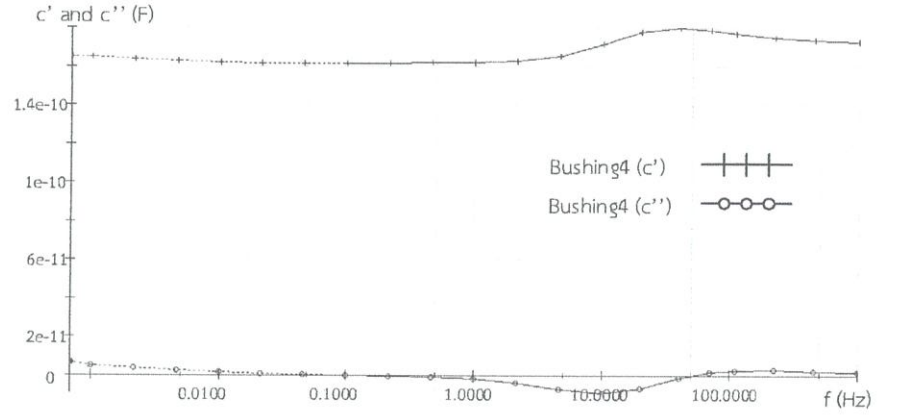
Oil impregnated paper bushing พิกัด 123 kV



(ก)



(ข)

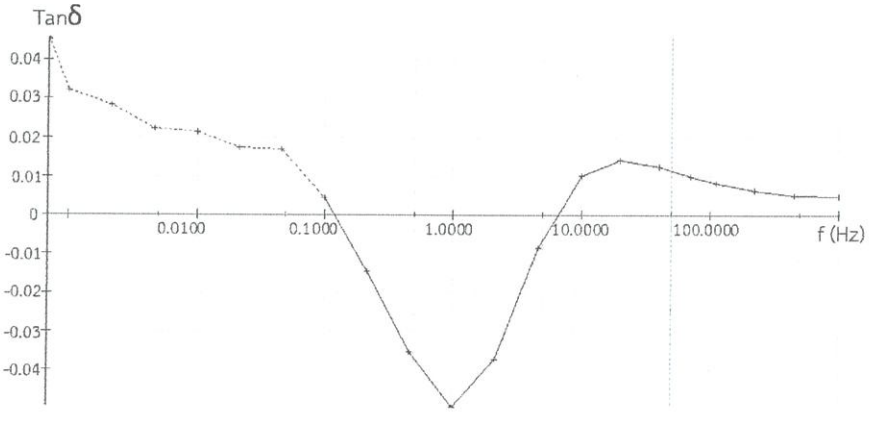


(ค)

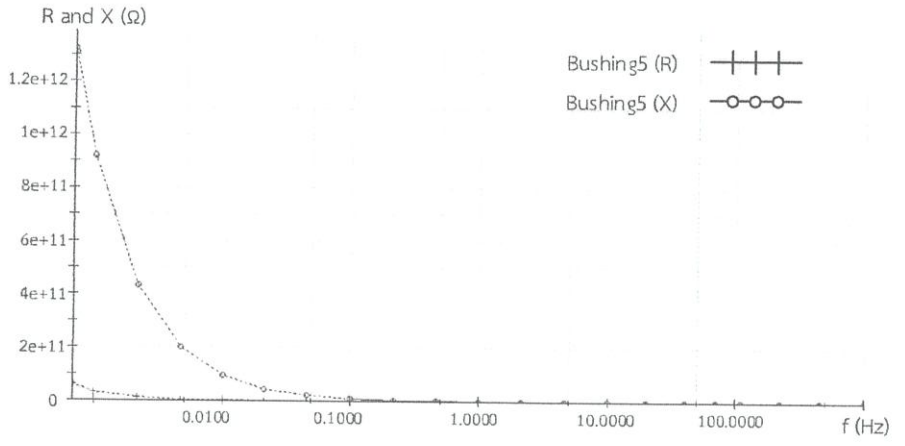
รูปที่ 4.37 กราฟการทดสอบความเป็นฉนวนในรูปแบบโดเมนต์ความถี่(FDS) ของ Bushing4
(ก) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์กำลังสูญเสียกับความถี่
(ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานและอิมพิแดนซ์กับความถี่
(ค) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเก็บประจุกับความถี่

- Bushing 5

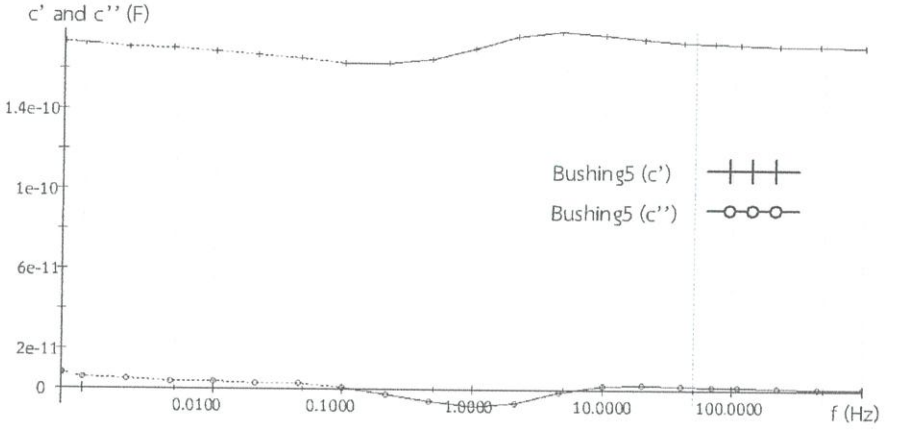
Oil impregnated paper bushing พิกัด 123 kV



(ก)



(ข)

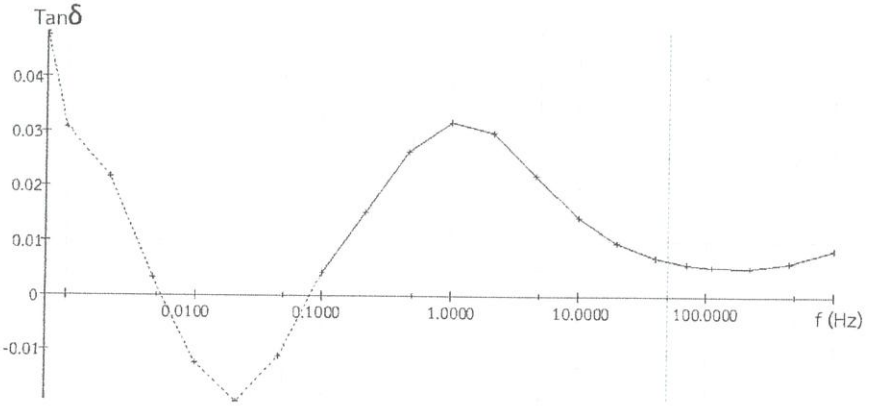


(ค)

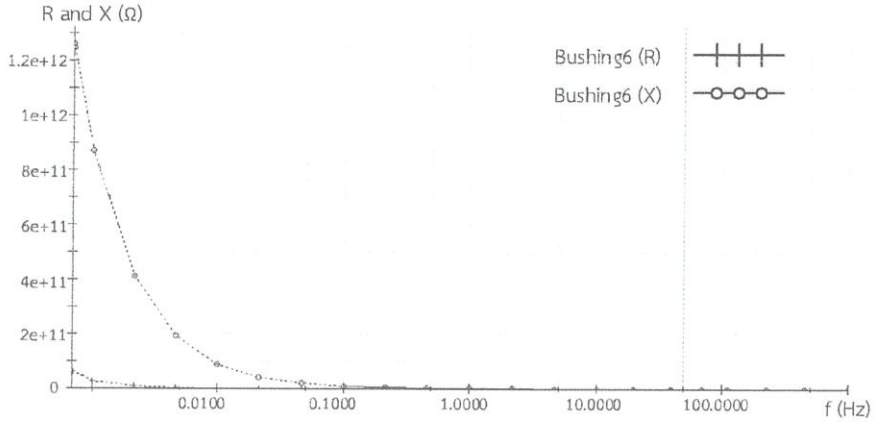
รูปที่ 4.38 กราฟการทดสอบความเป็นฉนวนในรูปแบบโดเมนต์ความถี่(FDS) ของ Bushing5
(ก) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์กำลังสูญเสียกับความถี่
(ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานและอิมพิแดนซ์กับความถี่
(ค) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเก็บประจุกับความถี่

- Bushing 6

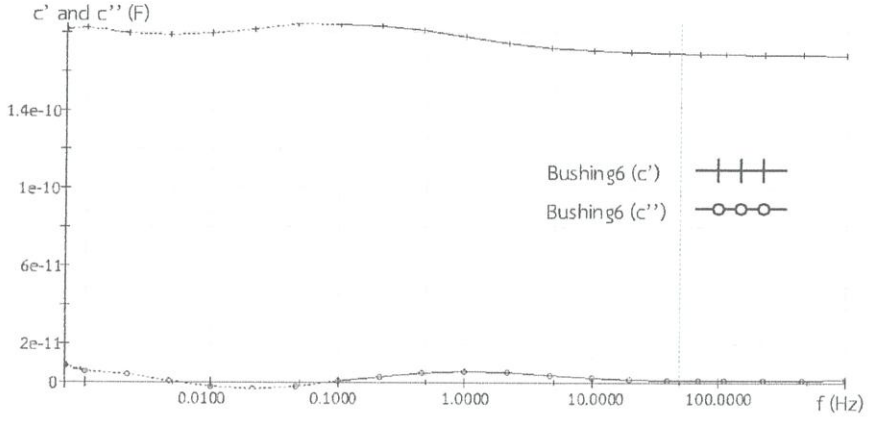
Oil impregnated paper bushing พิกัด 123 kV



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.39 กราฟการทดสอบความเป็นฉนวนในรูปแบบโดเมนต์ความถี่(FDS) ของ Bushing6
(ก) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์กำลังสูญเสียกับความถี่
(ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานและอิมพิแดนซ์กับความถี่
(ค) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเก็บประจุกับความถี่

จากผลการทดสอบ frequency domain spectroscopy พบว่า ค่าแฟคเตอร์กำลังสูญเสีย และค่า C'' มีค่าติดลบในบางช่วงความถี่ โดยผู้เชี่ยวชาญได้สันนิษฐานว่าอาจจะมีสาเหตุมาจากการเกิดกระแสรั่วไหลลงกราวนด์

ตารางที่ 4.20 ค่าแฟคเตอร์กำลังสูญเสีย, ค่าความเก็บประจุ, ค่าความต้านทาน และค่าอิมพิแดนซ์ ที่ความถี่ 50 Hz

Bushing	ค่าแฟคเตอร์กำลังสูญเสีย (Tanδ)	ค่าความเก็บประจุ (C)	ค่าความต้านทาน (R)	ค่าอิมพิแดนซ์ (Z)
Alstom1	0.012307	263.7945 pF	980.446 MΩ	12.066 MΩ
Alstom2	0.016691	266.4201 pF	715.822 MΩ	11.946 MΩ
Bushing1	0.016299	187.3966 pF	1.042 GΩ	16.984 MΩ
Bushing2	0.012569	174.4231 pF	1.452 GΩ	18.248 MΩ
Bushing3	0.010374	170.0609 pF	1.804 GΩ	18.716 MΩ
Bushing4	-0.002348	179.7059 pF	-7.543 GΩ	17.713 MΩ
Bushing5	0.011448	173.5601 pF	1.602 GΩ	18.339 MΩ
Bushing6	0.006554	169.4182 pF	2.867 GΩ	18.788 MΩ

4.2.4 การทดสอบแฟคเตอร์กำลังสูญเสีย

การทดสอบนี้ทำกับบุชชิ่งจำนวน 2 ลูก ซึ่งมีพิกัด 123 kV ทั้งหมด โดยเป็นขอห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สจล. ทั้ง 2 ลูก มีผลการทดสอบดังนี้

4.2.4.1 ผลการทดสอบแฟคเตอร์กำลังสูญเสียในบุชชิ่งของ สจล.

- Alstom 1

Oil impregnated paper bushing พิกัด 123 kV

ตารางที่ 4.21 ค่าแฟคเตอร์กำลังสูญเสีย ค่าความเก็บประจุ และค่ากระแส ที่แรงดันต่างๆ ที่ความถี่ 50 Hz ของบุชชิ่ง Alstom1

U rms	DF (tanδ) @ 20°C	Cx	Frequency	Ix rms
9.788 kV	0.01682	266.47 pF	50.03 Hz	819.88 μA
35.265 kV	0.01699	266.47 pF	50.06 Hz	2.9567 mA
72.28 kV	0.01673	266.49 pF	50.06 Hz	6.0590 mA
103.09 kV	0.01637	266.48 pF	50.08 Hz	8.6463 mA
124.35 kV	0.01606	266.47 pF	50.04 Hz	10.424 mA
102.98 kV	0.01593	266.45 pF	50.07 Hz	8.6322 mA
71.91 kV	0.01601	266.44 pF	50.02 Hz	6.0215 mA
35.312 kV	0.01613	266.43 pF	50.08 Hz	2.9597 mA
10.199 kV	0.0162	266.43 pF	50.02 Hz	854.69 μA

- Alstom 2

Oil impregnated paper bushing พิกัด 123 kV

ตารางที่ 4.22 ค่าแฟคเตอร์กำลังสูญเสีย ค่าความเก็บประจุ และค่ากระแส ที่แรงดันต่างๆ ที่ความถี่ 50 Hz ของบุชชิ่ง Alstom2

U rms	DF (tanδ) @ 20°C	Cx	Frequency	Ix rms
10.166 kV	0.01049	263.76 pF	50.02 Hz	842.78 μA
35.584 kV	0.0104	263.76 pF	49.99 Hz	2.9487 mA
74.84 kV	0.01008	263.74 pF	49.97 Hz	6.2002 mA
106.72 kV	0.00979	263.72 pF	49.97 Hz	8.8342 mA
123.18 kV	0.00949	263.71 pF	49.98 Hz	10.198 mA
106.00 kV	0.00944	263.70 pF	49.98 Hz	8.7790 mA
74.74 kV	0.00953	263.71 pF	49.97 Hz	6.1886 mA
35.706 kV	0.00985	263.72 pF	49.99 Hz	2.9583 mA
10.167 kV	0.01008	263.73 pF	49.98 Hz	842.14 μA

บทที่ 5
สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการดำเนินงานโครงงาน

จากการทดสอบบุชชิ่งชนิด oil impregnated paper ที่ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย(บางพลี) สามารถสรุปผลการทดสอบโดยแบ่งตามสถานที่ของการทดสอบได้ ดังนี้

5.1.1 ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

- ทำการออกแบบสร้างโครงเหล็กขนาด 50x50x97.5 เซนติเมตร เพื่อใช้วางบุชชิ่งขนาด 123 kV

- ทำการจำลองการเกิดดีสชาร์จบางส่วนแบบโคโรนาดีสชาร์จ และดีสชาร์จตามผิว ในบุชชิ่งขนาด 24 kV และ 33 kV พบว่าโคโรนาดีสชาร์จเกิดพัลส์สูงในบริเวณมุม 180-270 องศา และดีสชาร์จตามผิวเกิดพัลส์ถี่ๆ และเกิดทั้งด้านแรงดันบวกและลบ

- ทำการวัดกระแสโพลาไรเซชันและกระแสดีโพลาไรเซชันในบุชชิ่งขนาด 33 kV โดยกำหนดความชื้นและขนาดของอิเล็กโตรดด้านกราวด์เป็นตัวแปรต้น พบว่าหากความสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น กระแสคอนดักชั่นจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย และเปรียบเทียบขนาดของอิเล็กโตรดด้านกราวน์พบว่ากระแสโพลาไรซ์ของกรณีหุ้มฟอยล์ 2 ส่วน (ฟอยล์น้อยลง) มีค่าลดลง เนื่องจากกระแสที่ไหลผ่านเนื้อฉนวนน้อยลง เพราะว่าอิเล็กโตรดมีขนาดเล็กลง ทำให้พื้นที่ที่กระแสไหลผ่านได้น้อยลง และกระแสคอนดัคชั่นน้อยลง เพราะว่าระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรดมากขึ้น

5.1.2 ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (บางพลี)

- ทำการทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนในบุชชิ่ง 14 ลูก (123 kv 8 ลูก, 115 kv 3 ลูก และ 25 kv 3 ลูก) พบว่ามีการเกิดดีสชาร์จบางส่วนในบุชชิ่ง ดังนี้

1.) Alstom1 พบว่าเกิดพัลส์บริเวณ 90-160 องศา และเมื่อคงระดับแรงดันเป็นเวลา 10 นาที พบว่าการดีสชาร์จมีค่าลดลง และพัลส์ขนาดใหญ่หายไป จากนั้นเมื่อเพิ่มระดับแรงดันจะเกิดพัลส์อีกครั้งบริเวณที่เดิม และจะหายไปเมื่อคงระดับแรงดันไว้ขณะหนึ่ง

เนื่องจากในช่วงแรกมีอิเล็กตรอนอิสระอยู่ภายในโพรง เมื่อแรงดันเพิ่มขึ้นทำให้เกิดการดีสชาร์จภายในโพรง ทำให้เกิดพัลส์ขนาดใหญ่ ช่วงที่สองจะเกิดพัลส์เล็กๆ จนกระทั่งจุดที่มีการดีสชาร์จสูงสุด เพราะว่าตอนเริ่มเกิดดีสชาร์จภายในโพรงอากาศ ความดันภายในโพรงอากาศจะลดลง ตามกดของพาสเชน เมื่อความดันอากาศลดลงจะทำให้จำนวนการเกิดดีสชาร์จมากขึ้น ช่วงที่สามการดีสชาร์จจะลดลงจนถึงค่าคงที่ค่าหนึ่ง เมื่อโพรงอากาศแตกจากผลของการดีสชาร์จผลพลอยได้ทำให้เกิดไอออนล้อมรอบผิวโพรงอากาศ ซึ่งทำหน้าที่เป็นชิลด์ ทำให้แรงดันตกคร่อมโพรงอากาศลดลง ซึ่งจะทำให้ขนาดการดีสชาร์จลดลง

2.) การทดสอบดีสชาร์จบางส่วนบนบุชชิ่ง “Bushing7” พบว่าขณะเริ่มต้นการทดสอบเมื่อขึ้นแรงดันทดสอบเกิดโคโรนาดีสชาร์จ ดังนั้นต้องทำการเปลี่ยนชีลด์เพื่อทดสอบว่าโคโรนาดีสชาร์จ

เกิดจากระบบทดสอบหรือเกิดจากบุชชิ่ง พบว่าเมื่อเปลี่ยนซีลด์ที่มีขนาดใหญ่พอทำให้โคโรนาดีสชาร์จดังกล่าวหายไป

- ทำการวัดกระแสโพลาไรเซชันและกระแสดีโพลาไรเซชันในบุชชิ่ง 8 ลูก (123 kV 8 ลูก) พบว่ากราฟระหว่างกระแสและเวลานั้น มีการแกว่งขึ้นลง ซึ่งหมายถึงการมีกระแสรั่วลงกราวด์ ทำให้เกิดการกลับขั่วภายในเนื้อฉนวน

- ทำการวัดผลการตอบสนองไดอิเล็กทริกแบบ frequency domain spectroscopyในบุชชิ่ง 8 ลูก (123 kV 8 ลูก) พบว่ากราฟระหว่างค่าแฟคเตอร์กำลังสูญเสียและความถี่มีค่าเป็นลบ ซึ่งหมายถึงการมีกระแสรั่วลงกราวด์ ทำให้เกิดการกลับขั่วภายในเนื้อฉนวน

- ทำการทดสอบค่าแฟคเตอร์กำลังสูญเสียในบุชชิ่ง (123 kv 2 ลูก) พบว่า Alstom1 มีค่าแฟคเตอร์กำลังสูญเสียมากกว่า Alstom2 ซึ่งหมายความว่า Alstom1 นั้นมีการสูญเสียมากกว่า Alstom2 ด้วย ซึ่งสอดคล้องกับผลการดีสชาร์จบางส่วน โดยการดีสชาร์จบางส่วนในบุชชิ่ง Alstom1 มีค่ามากกว่า Alstom2

5.2 ปัญหาที่พบและข้อเสนอแนะ

การทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนในบุชชิ่งชนิด oil impregnated paper ที่มีขนาดใหญ่นั้น จำเป็นต้องมีฐานและถังเพื่อบรรจุน้ำมันหม้อแปลง สำหรับป้องกันการเบรกดาวน์ ซึ่งน้ำมันที่มีไม่เพียงพอต่อในการทดลองและมีราคาสูง ดังนั้นจึงไม่สามารถทำการทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนบนบุชชิ่ง ในห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จึงได้ร่วมทำการทดสอบที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยเท่านั้น ซึ่งมีการทดสอบไม่บ่อยนัก และทำการทดสอบในเวลาทำการเท่านั้น การทดสอบกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชัน และการวัดผลการตอบสนองไดอิเล็กทริกแบบ frequency domain spectroscopy เป็นการทดสอบที่ตรวจจับกระแสที่มีปริมาณน้อยมาก การกราวด์จึงเป็นสิ่งสำคัญ ต้องทำการทดสอบในขณะที่ไม่มีการใช้งานอุปกรณ์อื่นอยู่จึงทำได้ลำบาก ปัญหาเหล่านี้เป็นอุปสรรคต่อการทำโครงงาน หากมีการจัดเวลาในการทดลองที่ดี ทำให้การทำโครงการเป็นไปได้อย่างดีด้วย

เอกสารอ้างอิง

[1] James H. Harlow, **ELECTRIC POWER TRANSFORMER ENGINEERING**, Second Edition, Boca Raton London New York, Taylor & Francis Group, 2006.

[2] TRENCH, **OIP Transformer Outdoor Bushings Type COT(C) 125...COT (C) 1800 24kV to 550kV up to 5000A IEC 60137**, TRENCH, 2008.

[3] ZEESHAN AHMED, **Analysis of Partial Discharge in OIP Bushing Models**, Stockholm Sweden, KTH Electrical Engineering, 2011.

[4] สำรวย สังข์สะอาด, **วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง**, กรุงเทพมหานคร, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์, 2528.

[5] MOHAMAD GHAFFARIAN NIASAR, **Partial Discharge Signatures of Defects in Insulation Systems Consisting of Oil and Oil-impregnated Paper**, Stockholm Sweden, KTH Electrical Engineering, 2012.

[6] จีรศักดิ์ บุญโชติ, "การตรวจสอบดิสชาร์จบางส่วนภายในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังโดยการวิเคราะห์ก๊าซในน้ำมันหม้อแปลง," **วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต**, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2555.

[7] IEC 60137, **Insulated bushings for alternating voltages above 1,000 V**, 2008.

[8] IEC 60270, **High-voltage test techniques – Partial discharge measurements**, 2000.

[9] นายภูริชญ์ บูรพสายัณห์, นายภูวเนศวร์ สร้อยสุนทร และนายยศธร กฤษณามระ, "การศึกษาเทคนิคการวินิจฉัยฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนแรงดันสูง," **ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต**, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2557.

[10] M. Ghaffarian Niasar, N. Taylor, P. Janus, X. Wang, H. Edin, **Partial Discharges in a Cavity Embedded in Oil Impregnated Paper: Effect of Electrical and Thermal Aging,** Stockholm Sweden, KTH Royal Institute of Technology, 2015.

[11] A. Küchler, F. Hüllmandel, K. Böhm. **Condition assessment of aged transformer bushing insulations,** FHWS University of Applied Sciences Schweinfurt, Germany, 2006.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
บทความวิชาการ

การจัดการความรู้เพื่อวินิจฉัยรูปแบบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง

Knowledge management for partial discharge patterns of high voltage equipment

ทัดเทพ แก้วกิ่ง ธนภพ หอมเพชร ธนานพ สมลือแสน

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าจอมคุณทหารลาดกระบัง

1 ซอย ฉลองกรุง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-329-8000 ต่อ 3925 Email: phet-t@hotmail.com

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอการศึกษาโครงสร้างและรูปแบบการเสื่อมสภาพของบุชชิ่ง ชนิด OIP (Oil Impregnated Paper) ในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยทดสอบการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge : PD), ค่าแฟคเตอร์กำลังสูญเสีย (Dissipation Factor), ค่า Dielectric response แบบ PDC (Polarization and Depolarization Current) และแบบ FDS (Frequency Domain Spectroscopy) ที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (KMITL) และที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (EGAT) โดยทำการทดลองในบุชชิ่ง OIP จำนวน 14 ลูก โดยผลการทดสอบและผลวิเคราะห์ถูกนำเสนออยู่ในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์นี้ สามารถนำไปเป็นฐานข้อมูลทางวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง และข้อมูลในการวิเคราะห์ผลการทดสอบบุชชิ่ง

คำสำคัญ: บุชชิ่ง, ดีสชาร์จบางส่วน, กระแสโพลาไรเซชั่น

Abstract

This paper present insulation characteristics of deterioration for OIP (oil-impregnated paper) bushing by testing partial discharge (PD), dissipation factor, mega ohm, polarization and depolarization current (PDC) and frequency domain spectroscopy (FDS). The experiment way performed at high voltage laboratory of king mongkut's institute technology ladkrabang and high voltage laboratory of electrical generating authority of Thailand. Fourteen bushing unit was examined. Test results and test analysis are presented in this paper properly. Knowledge from these analysis can be applied for electrical engineering database.

Keywords: bushing, oil impregnated paper, partial discharge, polarization and depolarization current, frequency domain spectroscopy

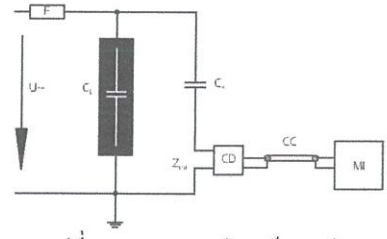
1.บทนำ

ปัจจุบันบุชชิ่ง (Bushing) เป็นส่วนประกอบที่สำคัญอย่างยิ่งของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์เชื่อมต่อสายไฟแรงสูงจากขดลวดภายในหม้อแปลงไฟฟ้าออกสู่ภายนอก เพื่อป้องกันการเบรกดาวน์ เพราะฉะนั้นคุณภาพของบุชชิ่งจึงเป็นสิ่งที่ต้องพิจารณา คุณภาพของบุชชิ่งสามารถสังเกตได้จากพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ (Power factor : PF), ค่าแฟคเตอร์กำลังสูญเสีย ($\tan\delta$), ค่าการเกิดดีสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge : PD), ค่า Dielectric response แบบ PDC (Polarization Depolarization Current) และแบบ FDS (Frequency Domain Spectroscopy) เป็นต้น โดยพารามิเตอร์เหล่านี้ได้จากการทดสอบหรือการวัด ซึ่งมีมาตรฐานเป็นบรรทัดฐานในการประเมิน หากบุชชิ่งมีคุณสมบัติไม่ได้ตามที่มาตรฐานกำหนด เมื่อนำไปใช้งานบุชชิ่งอาจเกิดการชำรุดเสียหาย และส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อหม้อแปลงไฟฟ้า ดังนั้นการดูแลรักษา และการตรวจสอบบุชชิ่งอยู่เป็นประจำจึงเป็นสิ่งที่จำเป็น

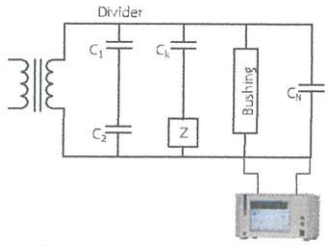
จากเหตุผลข้างต้น ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จึงทำการศึกษาและรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับการดีสชาร์จบางส่วนในบุชชิ่งที่ใช้กับหม้อแปลงไฟฟ้า ทำการทดสอบบุชชิ่งชนิดต่างๆ โดยทำการทดสอบการดีสชาร์จบางส่วน การทดสอบแฟคเตอร์กำลังสูญเสีย การทดสอบ FDS และการทดสอบ PDC เพื่อนำองค์ความรู้ไปวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้น และสามารถบอกได้ว่าการเกิดดีสชาร์จบางส่วนแต่ละรูปแบบในบุชชิ่งเกิดจากสาเหตุใด เพื่อสามารถประเมินการซ่อมบำรุงได้อย่างเหมาะสมที่สุด

2.การออกแบบการทดสอบ

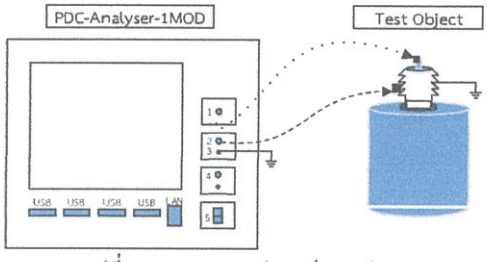
2.1 วงจรทดสอบ



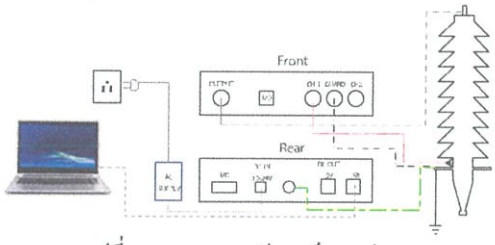
รูปที่ 1 วงจรทดสอบดีสชาร์จบางส่วน



รูปที่ 1 วงจรทดสอบดีสชาร์จบางส่วน



รูปที่ 1 วงจรทดสอบดีสชาร์จบางส่วน



รูปที่ 1 วงจรทดสอบดีสชาร์จบางส่วน

2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

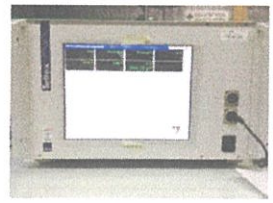
2.2.1 บุชชิ่งที่ใช้ในการทดสอบ

- Oil impregnated paper bushing 123 kV 8 ลูก
- Oil impregnated paper bushing 115 kV 3 ลูก
- Oil impregnated paper bushing 25 kV 3 ลูก

รูปที่ 1 วงจรทดสอบดีสชาร์จบางส่วน

2.2.2 เครื่องมือที่ใช้วัดและบันทึกค่าต่างๆจากการทดสอบ

(ก)



(ข)

(ค)

(ง)

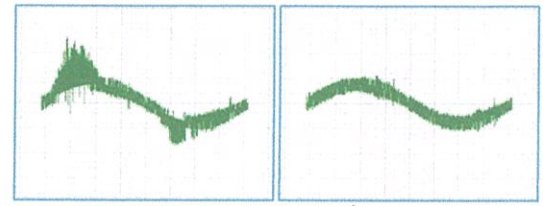
รูปที่ 1 เครื่องมือที่ใช้ในการวัดและบันทึกผลของการทดสอบ

ก) โปรแกรม DDX 9101 Remote Control ข) เครื่อง Tettex 2840

ค) เครื่อง PDC-Analyser-1MOD ง) เครื่อง DIRANA

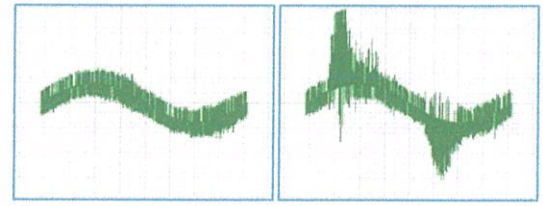
3. การทดสอบและผลการทดสอบ

- การทดสอบการดีสชาร์จบางส่วนบน OIP bushing พิกัด 115 kV



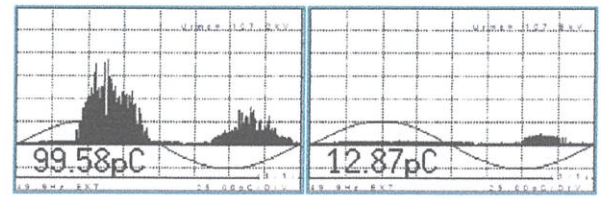
ขณะเริ่มต้นการทดสอบเมื่อขึ้นแรงดันทดสอบเกิดโคโรนาดีสชาร์จ ดังนั้นต้องทำการเปลี่ยนชีลด์เพื่อทดสอบว่าโคโรนาดีสชาร์จเกิดจากระบบทดสอบหรือเกิดจากบุชชิ่ง พบว่าเมื่อเปลี่ยนชีลด์ที่มีขนาดใหญ่พอทำให้โคโรนาดีสชาร์จดังกล่าวหายไป

- การทดสอบดีสชาร์จบางส่วนบน OIP bushing พิกัด 25 kV



เกิดโคโรนาดีสชาร์จด้านแรงต่ำและด้านแรงสูง โดยสังเกตุได้จากมีบริเวณที่พัลส์มีขนาดสูงเท่าๆ กัน และเกิดดีสชาร์จตามผิวโดยสังเกตุได้จากมีบริเวณที่พัลส์เป็นกระจุกกัน ที่ระดับแรงดันทนอยู่ได้

- การทดสอบดีสชาร์จบางส่วนบน OIP bushing พิกัด 123 kV



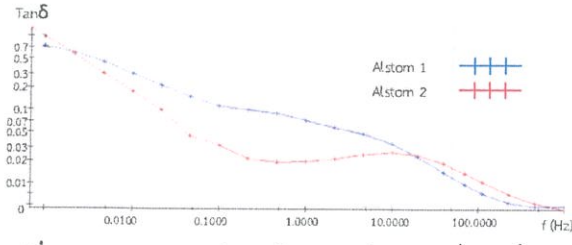
จากผลการทดลองพบว่าเกิด PDIV ที่ 50.93 kV พัลส์เกิดบริเวณ 90-160 องศา และเมื่อคงระดับแรงดันเป็นเวลา 3 นาที พบว่าการดีสชาร์จมีค่าลดลง และพัลส์ขนาดใหญ่หายไป จากนั้นเมื่อเพิ่มระดับแรงดันจะเกิดพัลส์อีกครั้งบริเวณที่เดิม และจะหายไปเมื่อคงระดับแรงดันไว้ขณะหนึ่งเช่นเดิม

เนื่องจากในช่วงแรกมีอิเล็กตรอนอิสระอยู่ภายในโพรง เมื่อแรงดันเพิ่มขึ้นทำให้เกิดการดีสชาร์จภายในโพรง ทำให้เกิดพัลส์ขนาดใหญ่ ช่วงที่สองจะเกิดพัลส์เล็กๆ จนกระทั่งจุดที่มีการดีสชาร์จสูงสุด เพราะว่าตอนเริ่มเกิดดีสชาร์จภายในโพรงอากาศ ความดันภายในโพรงอากาศจะลดลง ตามกฎของพาสเชน เมื่อความดันอากาศลดลงจะทำให้จำนวนการเกิดดีสชาร์จมากขึ้น ช่วงที่สามการดีสชาร์จจะลดลงจนถึงค่าคงที่ค่าหนึ่ง เมื่อโพรงอากาศแตกจากผลของการดีสชาร์จ ผลพลอยได้จะทำให้เกิดไอออนล้อมรอบผิวโพรงอากาศ ซึ่งทำหน้าที่เป็นชิลด์ ทำให้แรงดันตกคร่อมโพรงอากาศลดลง ซึ่งจะทำให้ขนาดการดีสชาร์จลดลง

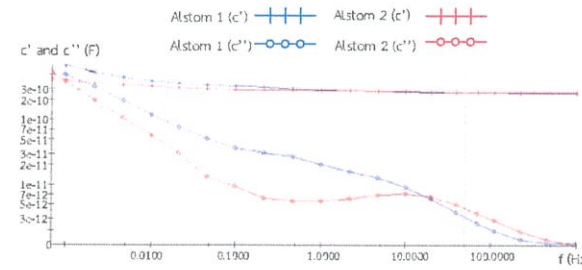
ตารางที่ 1 ผลการทดสอบดีสชาร์จบางส่วน

Alstom 1		Alstom 2		Bushing 7		Bushing 10	
Voltage (kV)	Discharge (pC)	Voltage (kV)	Discharge (pC)	Voltage (kV)	Discharge (pC)	Voltage (kV)	Discharge (pC)
50.93	15.55	10.57	5.24	11.35	4.54	11.32	24.43
50.91	6.83	35.87	5.24	33.09	4.21	15.47	6.25
74.89	18.74	74.88	6.76	70.46	4.36	26.01	7.19
75.09	8.67	107.1	7.17	100.77	4.17	44.91	31.95
107.2	99.58	124.0	17.66	118.18	22.92	25.67	7.30
107.8	12.87	202.6	36.41	117.49	16.26	21.21	6.66
124.1	50.91	125.8	5.79	115.53	4.39	17.34	7.54
124.3	19.58	108.4	5.24	10.40	4.33	10.70	6.82
		76.24	5.79	33.46	4.41		
		35.37	5.52	70.08	4.53		
		9.473	5.24	102.76	4.10		
				193.76	8.19		
				118.85	4.11		
				102.40	4.63		
				33.47	4.11		
				10.36	4.00		

หมายเหตุ : ตัวเลขสีแดงหมายถึงมีปริมาณดีสชาร์จ เกินกว่าค่ามาตรฐาน



รูปที่ X ผลการทดสอบแฟคเตอร์กำลังสูญเสีย (tanδ) ที่ความถี่ต่างๆ



รูปที่ ผลการทดสอบค่าคาปาซิเตอร์ที่ความถี่ต่างๆ

จากกราฟเปรียบเทียบในรูปที่ จะเห็นได้ว่าบุชชิ่ง Alstom2 มีค่าแฟคเตอร์กำลังสูญเสีย ค่า c' และ c'' ต่ำกว่าบุชชิ่ง Alstom2 นั้นหมายถึงความเสื่อมสภาพของบุชชิ่ง Alstom2 นั้นน้อยกว่า ซึ่งสอดคล้องกับผลการเกิดดีสชาร์จบางส่วน

4. การสรุปผล

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ประกอบด้วยการวินิจฉัยรูปแบบต่างๆ เช่น การเกิดดีสชาร์จบางส่วน และแฟคเตอร์กำลังสูญเสียในบุชชิ่ง ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าส่วนใหญ่แล้ว ดีสชาร์จบางส่วนจะเกิดในรูปแบบโคโรน่าดีสชาร์จ ซึ่งโคโรนาดีสชาร์จด้านแรงต่ำมักจะเกิดที่มุม 0-90 องศา และโคโรนาดีสชาร์จด้านแรงสูงมักจะเกิดที่มุม 180-270 องศา โคโรนาดีสชาร์จอาจจะเกิดจากวงจรทดสอบหรือการรบกวนจากภายนอก ดังนั้นต้องมีการชิลด์ที่ดี

ในกรณีของบุชชิ่ง ALSTOM 1 พบว่ามีการเกิดดีสชาร์จบางส่วนอย่างรวดเร็วและค่อยๆลดลงเมื่อเวลาผ่านไป โดยช่วงแรกเกิดดีสชาร์จขนาดใหญ่อย่างรวดเร็วเมื่อป้อนแรงดันถึงค่าแรงดันเริ่มเกิด ช่วงที่สองเกิดดีสชาร์จมากขึ้น ขนาดการดีสชาร์จเพิ่มสูงขึ้นอย่างช้าๆ และช่วงสุดท้ายขนาดดีสชาร์จลดลงอย่างช้าๆ เนื่องจากในช่วงแรกมีอิเล็กตรอนอิสระอยู่ภายในโพรง เมื่อแรงดันเพิ่มขึ้นทำให้เกิดการดีสชาร์จภายในโพรง ทำให้เกิดพัลส์ขนาดใหญ่ ช่วงที่สองจะเกิดพัลส์เล็กๆ จนกระทั่งจุดที่มีการดีสชาร์จสูงสุด เพราะว่าตอนเริ่มเกิดดีสชาร์จภายในโพรงอากาศ ความดันภายในโพรงอากาศจะลดลง ตามกฎของพาสเชน เมื่อความดันอากาศลดลงจะทำให้จำนวนการเกิดดีสชาร์จมากขึ้น ช่วงที่สามการดีสชาร์จจะลดลงจนถึงค่าคงที่ค่าหนึ่ง เมื่อโพรงอากาศแตกจากผลของการดีสชาร์จ ผลพลอยได้ทำให้เกิดไอออนล้อมรอบผิวโพรงอากาศ ซึ่งทำหน้าที่เป็นชิลด์ ทำให้แรงดันตกคร่อมโพรงอากาศลดลง ซึ่งจะทำให้ขนาดการดีสชาร์จลดลง

จากการทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ทำให้มีความชำนาญในการทดสอบบุชชิ่งด้วยวิธีต่างๆ และสามารถประเมินความเสียหายของบุชชิ่งได้

5. กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยการช่วยเหลือจากหลายท่านโดยเฉพาะอย่างยิ่งรองศาสตราจารย์ ดร.นรเศรษฐ พัฒนเดช และรองศาสตราจารย์ ดร.อานันทวัฒน์ คุณากรอาจารย์ที่ปรึกษา รวมไปถึงคุณปุณยวีร์ ฉายศิริ ที่คอยดูแลเอาใจใส่อย่างใกล้ชิดเสมอมา ให้ข้อแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อโครงงานมาด้วยดีตลอด และได้กรุณาตรวจแก้ไข ปริญญานิพนธ์นี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง บางพลี) ที่ให้ความอนุเคราะห์เข้าทำการทดสอบบุชชิ่งร่วมกับห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง บางพลี

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ ในห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกคน โดยเฉพาะ นายปิยะพล ถือทอง, นายสุรศักดิ์ น้อยหมอ และนางสาวพัชรี ทองอินต๊ะ ที่ช่วยแก้ปัญหาด้วยดีมาโดยตลอด

6. เอกสารอ้างอิง

[1] สำรวย สังข์สะอาด, วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, กรุงเทพมหานคร, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์, 2528.

[2] IEC 60137, Insulated bushings for alternating voltages above 1,000 V, 2008.

[3]IEC 60270, High-voltage test techniques – Partial discharge measurements, 2000.

[4]James H. Harlow, ELECTRIC POWER TRANSFORMER ENGINEERING, Second Edition, Boca Raton London New York, Taylor & Francis Group, 2006.

[5] M. Ghaffarian Niasar, N. Taylor, P. Janus, X. Wang, H. Edin, Partial Discharges in a Cavity Embedded in Oil Impregnated Paper: Effect of Electrical and Thermal Aging, Stockholm Sweden, KTH Royal Institute of Technology, 2015.

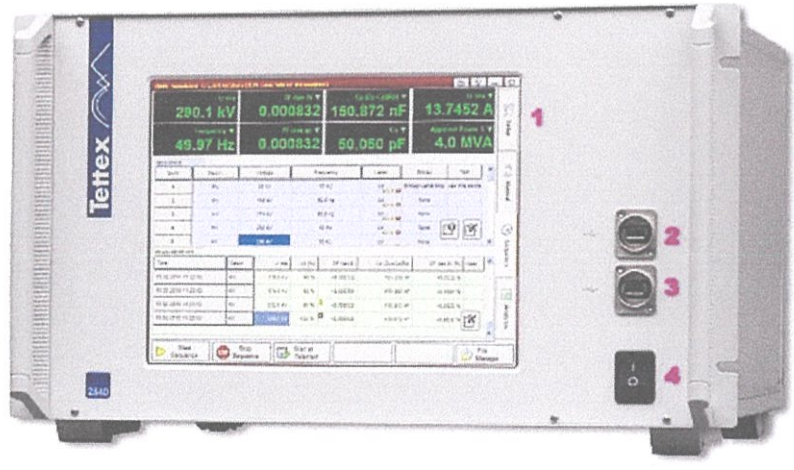
ภาคผนวก ข
ขั้นตอนการทดสอบแฟคเตอร์กำลังสูญเสีย

ข.1 เครื่อง Tettex 2840 High Precision C and Tanδ Measuring Bridge

รูปที่ ข.1 เครื่อง Tettex 2840 High Precision C and Tanδ Measuring Bridge

Tettex 2840 เป็นเครื่องที่ใช้วัด Power factor, Dissipation factor, Capacitance โดยอาศัยหลักการเปรียบเทียบความต่างเฟสระหว่างกระแสที่มาจากบุชชิ่งและกระแสจากตัวเก็บประจุมาตรฐาน

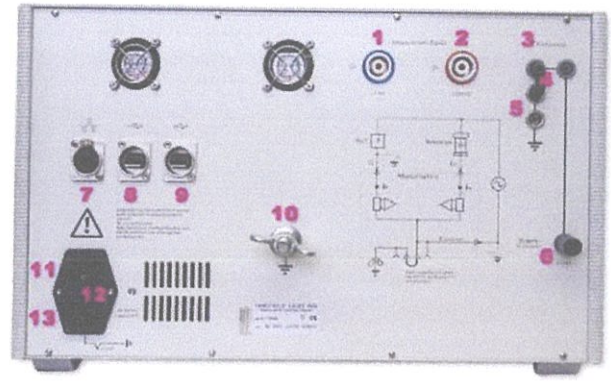
ข.1.1 แผงด้านหน้า



รูปที่ ข.2 แผงด้านหน้าเครื่อง Tettex 2840 High Precision C and Tanδ Measuring Bridge

1. Touch screen interface
2. USB Interface 1
3. USB Interface 2
4. Mains Power Switch

ข.1.2 แผงด้านหลัง



รูปที่ ข.3 แผงด้านหลังเครื่อง Tettex 2840 High Precision C and Tanδ Measuring Bridge

1. Measurement Input Cx
2. Measurement Input Cn
3. $V_{(Common)}$
4. $V_{(Common)}$ ที่สามารถเชื่อมต่อกับดินด้วย Black Jumper
5. Earth connection
6. Ext. HV Supply Connection
7. Ethernet Interface
8. USB Interface 3
9. USB Interface 4
10. Safety Ground Connection
11. Mains Power Switch
12. Mains Fuse
13. Mains Input Socket

ข.2 ขั้นตอนการทดสอบแฟคเตอร์กำลังสูญเสีย

รูปที่ ข.4 หน้าหลังสำหรับการปรับค่าต่างๆ

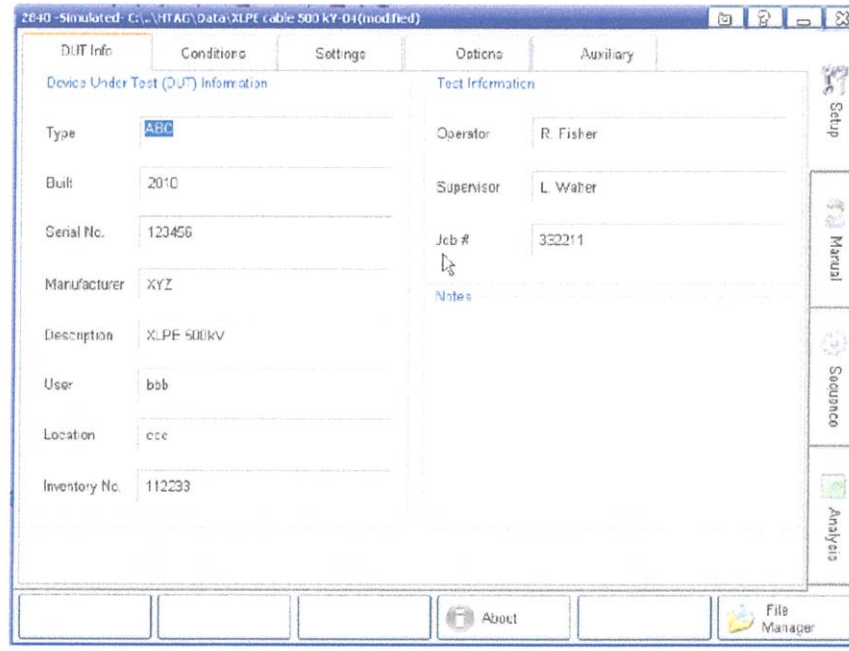
1. ให้เลือกที่ Quick Measurement จะแสดงหน้าต่างหลักดังรูปที่ ข.4

รูปที่ ข.5 หน้าต่างหลัก

2.หน้าต่างหลักประกอบไปด้วย Setup, Manual, Sequence, Analysis โดยให้ทำการเลือกที่ Setup เพื่อเข้าไปทำการตั้งค่าข้อมูลของ Test Object

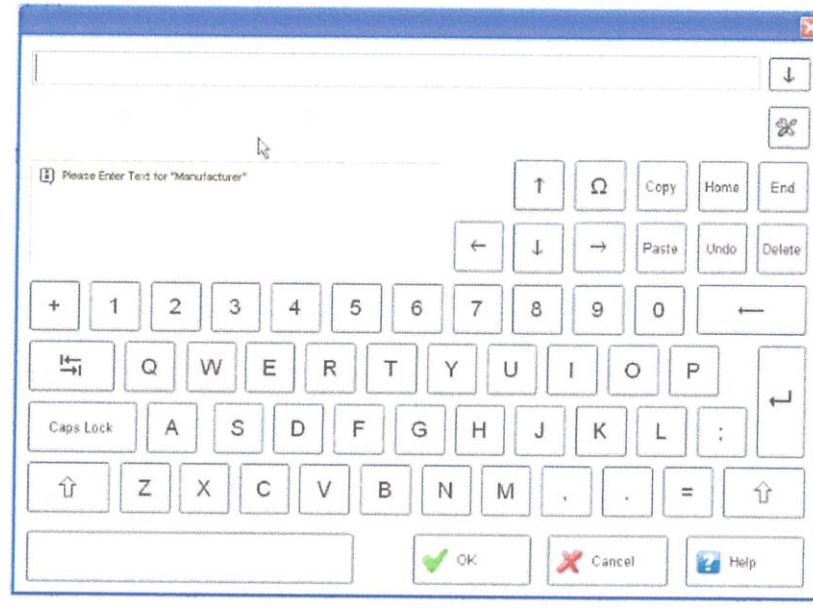
ต่อไปหน้าต่าง Setup ประกอบไปด้วย DUT Info, Conditions, Settings, Options, Auxiliary ให้เลือกที่ DUT Info เพื่อใส่ข้อมูลของ Test Object

ใส่ข้อมูลของ Test Object ใน DUT Info เพื่อทำการบันทึกผลไว้ตรวจสอบในภายหลังการทดสอบ โดยมีเนื้อหาดังรูป ข.6



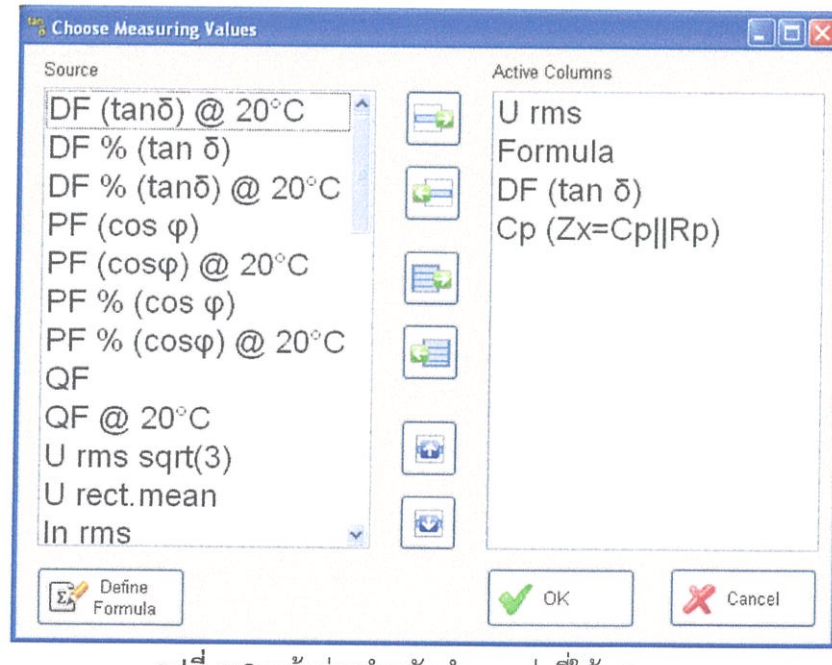
รูปที่ ข.6 หน้าต่าง DUT Info

เมื่อทำการใส่ข้อมูลจะขึ้น Textbox ให้พิมพ์ตัวเลข ตัวหนังสือ และสัญลักษณ์ได้ดังรูป ข.7



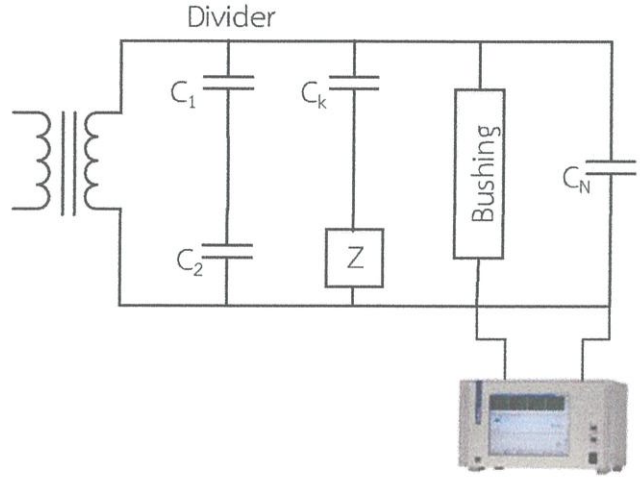
รูปที่ ข.7 Textbox สำหรับใส่ข้อมูล

สามารถกำหนดการแสดงผลของหน้าต่างหลักได้โดยการเข้าไปตั้งค่าที่ Define Columns แล้วเลือก Measuring Values เพื่อเลือกค่าที่จะแสดงผลในหน้าต่างหลักได้ดังนี้ เมื่อเสร็จแล้วจึงกด OK เพื่อเข้าสู่หน้าต่างหลักและเตรียมพร้อมสำหรับการทดสอบต่อไป



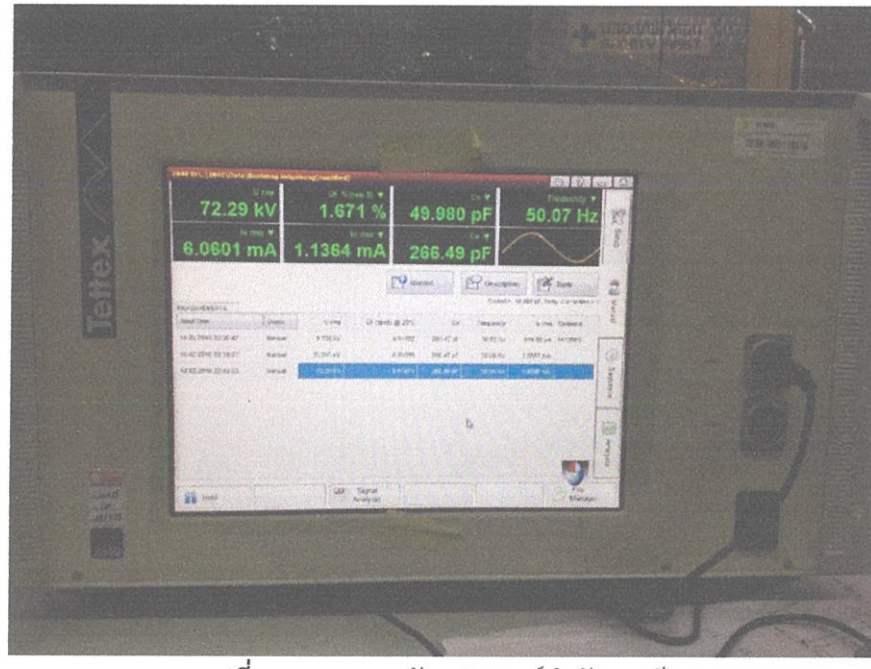
รูปที่ ข.8 หน้าต่างสำหรับกำหนดค่าที่ให้แสดงผล

ต่อวงจรทดสอบดังรูปที่ ข.9



รูปที่ ข.9 วงจรการวัดแฟคเตอร์กำลังสูญเสีย

ทำการจ่ายแรงดันตามระดับที่กำหนด กด Recordแล้วทำการบันทึกค่าแต่ละระดับโดยกดที่ Hold ณ ระดับแรงดันที่ต้องการที่แสดงข้อมูล ณ ตำแหน่งเวลานั้นๆ ดังรูปที่ ข.10



รูปที่ ข.10 ผลการวัดแฟคเตอร์กำลังสูญเสีย

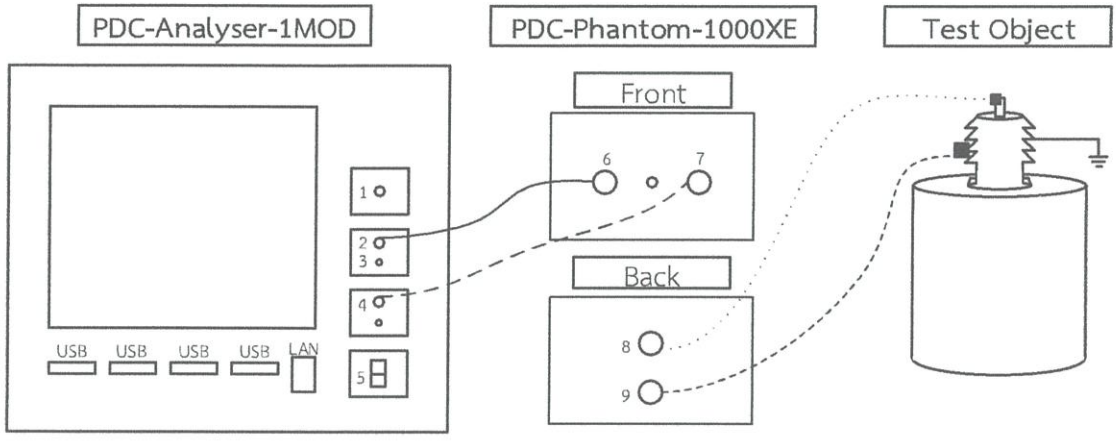
ภาคผนวก ค
ขั้นตอนการทดสอบกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชัน

ค.1 ขั้นตอนการทดสอบกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชัน

ยกตัวอย่างการทดสอบในกรณีทำการทดสอบฉนวนบุชชิ่ง

1) ต่อวงจรทดสอบ

1.1) ต่อวงจรแบบใช้เครื่อง Phantom-1000XE



รูปที่ ค.1 การต่อวงจรทดสอบ

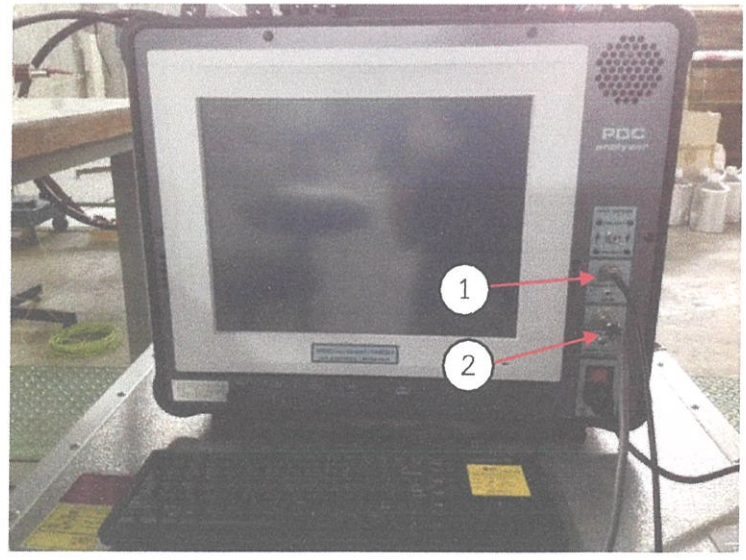
โดย

เส้น ..... คือ สายจ่ายแรงดันสูงสำหรับ PDC-Phantom-1000XE

เส้น —— คือ สายวัดกระแส (Sensing cable)

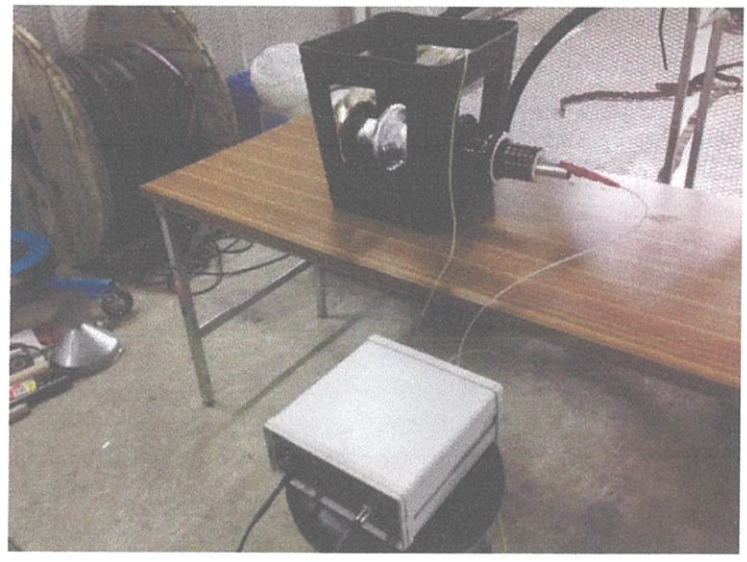
เส้น - - - คือ สายคอนโทรล (Control cable)

เส้น ----- คือ สายกราวด์ (Ground wire)



(ก)

1) สายวัดกระแส 2) สายคอนโทรล



(ข)

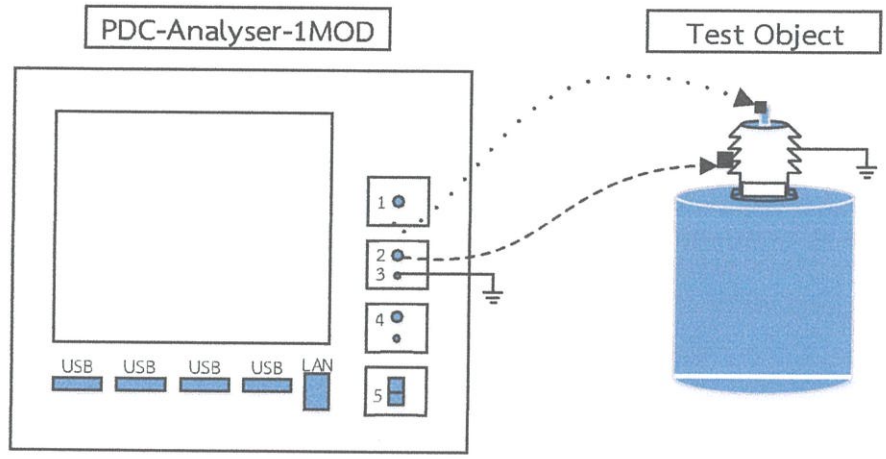
(ค)

รูปที่ ค.2 วงจรทดสอบ PDC

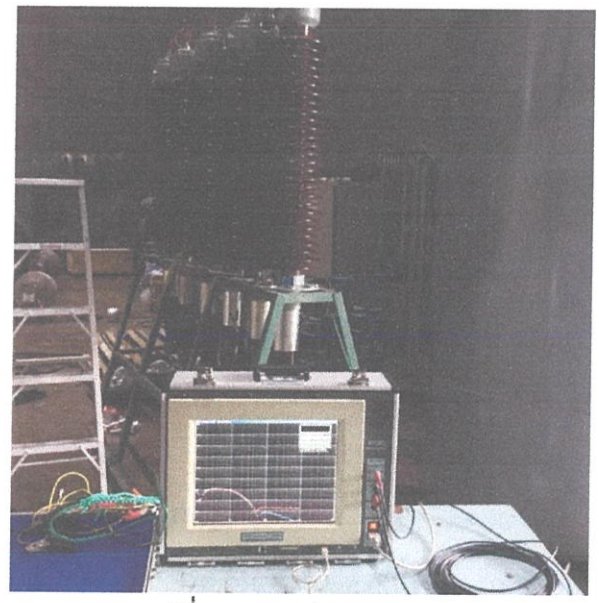
(ก) การต่อวงจรเข้าเครื่อง PDC-Analyser-1MOD (ข) การต่อวงจรวัดเข้ากับ solid bushing

(ค) การต่อวงจรเข้ากับ OIP bushing

1.2) ต่อวงจรแบบไม่ใช้เครื่อง Phantom-1000XE



รูปที่ ค.3 วงจรการทดสอบกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชัน



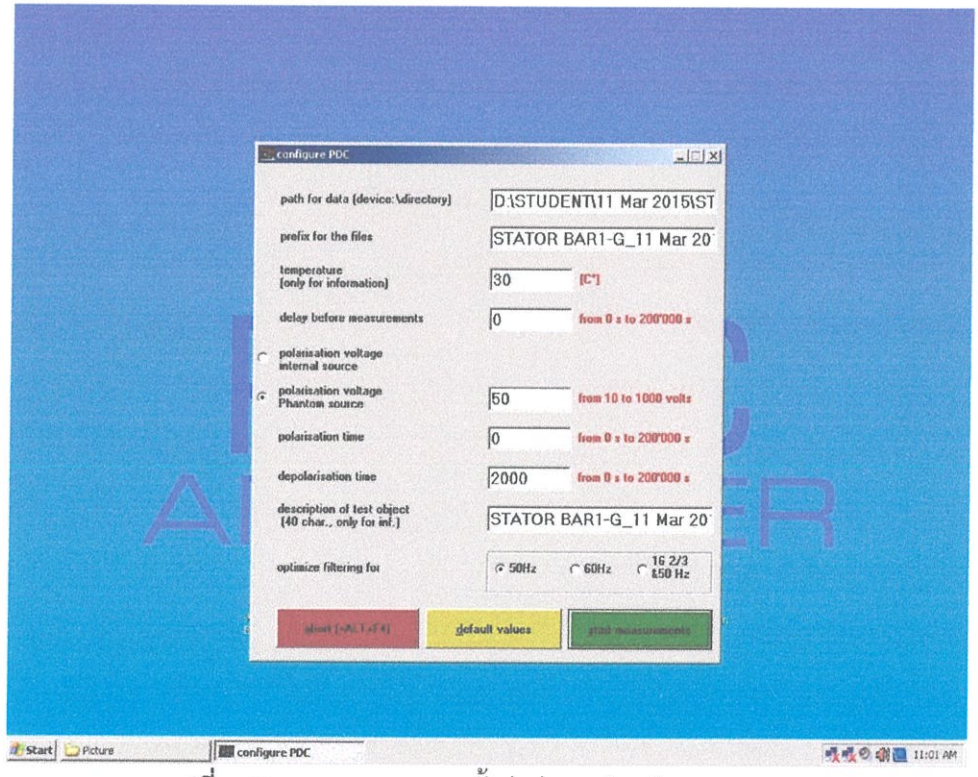
รูปที่ ค.4 การต่อวงจร PDC

ใช้เครื่อง Phantom-1000XE เมื่อไม่สามารถแยกนิวตรอนออกจากกราวน์ได้

2) การปรับตั้งค่าต่างๆ ในทดสอบ

ทำการเปิดโปรแกรม PDC Measurement

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



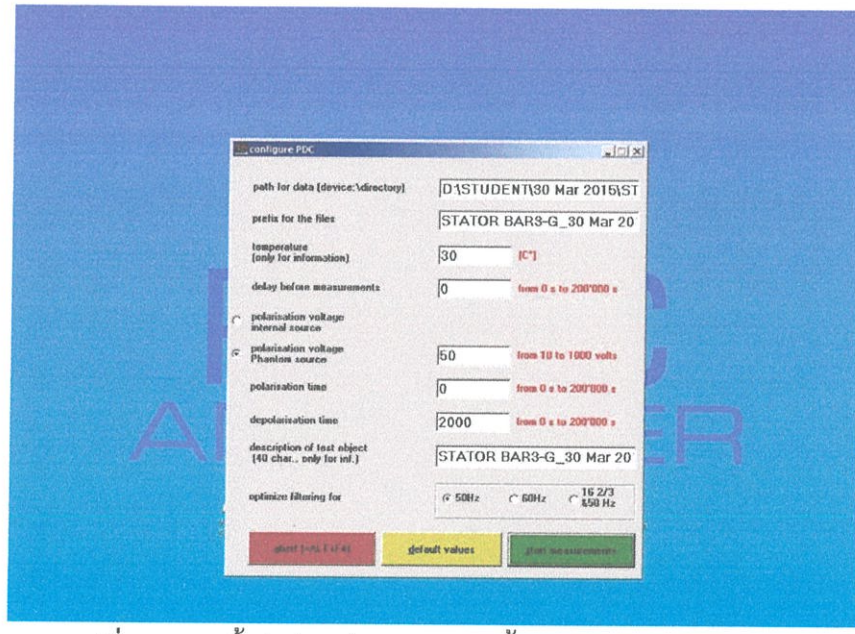
รูปที่ ค.5 แสดงรายการการตั้งค่าต่างๆ สำหรับการทดสอบ

3) ขั้นตอนการทดสอบ

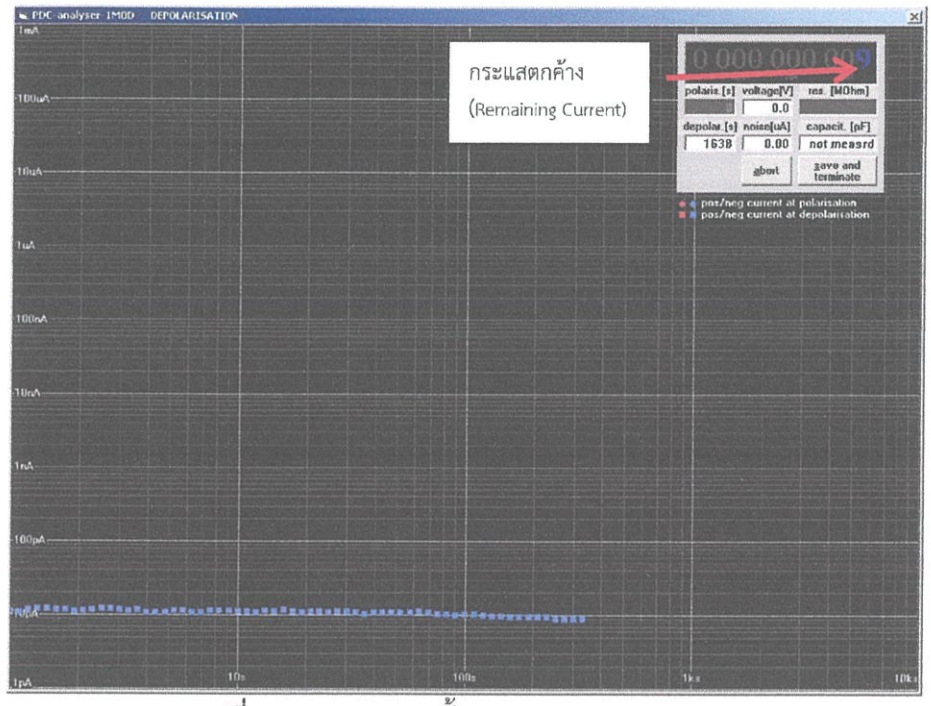
ในการทดสอบหรือการวัดจะมีขั้นตอน ดังนี้

3.1) ขั้น Initial Measurement

วัตถุประสงค์ของขั้นตอนนี้คือเพื่อกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นของวัสดุทดสอบก่อนที่จะนำวัสดุทดสอบไปทดสอบที่แรงดันไฟฟ้าใดๆ ขั้นตอนนี้ทำโดยการตั้งค่าระยะเวลาของการโพลาไรเซชันเป็น 0 วินาที หรือกล่าวคือไม่มีการชาร์จของแรงดันไฟฟ้าที่ถูกป้อนเข้าไปเครื่อง PDC-Analyser-1MOD ที่ใช้วัดทำการตรวจวัดกระแสดีโพลาไรเซชันซึ่งบอกทั้งขนาดและขั้วของประจุตกค้างอยู่ภายในฉนวนภายใต้การทดสอบ ค่ากระแสตกค้าง (Remaining Current) ปกติแล้วมีค่าจะอยู่ในช่วงพิโกแอมแปร์ (pA) ถ้าฉนวนที่ทำการทดสอบได้ทำการดีสชาร์จลงดินเป็นอย่างดีก่อนการทดสอบค่ากระแสตกค้าง (Remaining Current) จะมีค่าต่ำกว่า 10 พิโกแอมแปร์เท่านั้น โดยก่อนการทดสอบขั้นถัดไปต้องรอจนกว่าค่ากระแสตกค้าง (Remaining Current) หมดไปหรือมีค่าคงที่เพื่อนำค่าไปหักลบออกจากค่าที่วัดได้จริงๆ และในขั้นตอนนี้เนื่องจากเป็นการทดสอบฉนวนบุชชิ่ง ดังนั้นจะต้องเลือกที่ช่อง Polarization Voltage Phantom source โดยทำการตั้งค่าเป็นแรงดันไฟฟ้าเป็น 500 โวลต์ เสมอ ดังรูปที่ ค.6



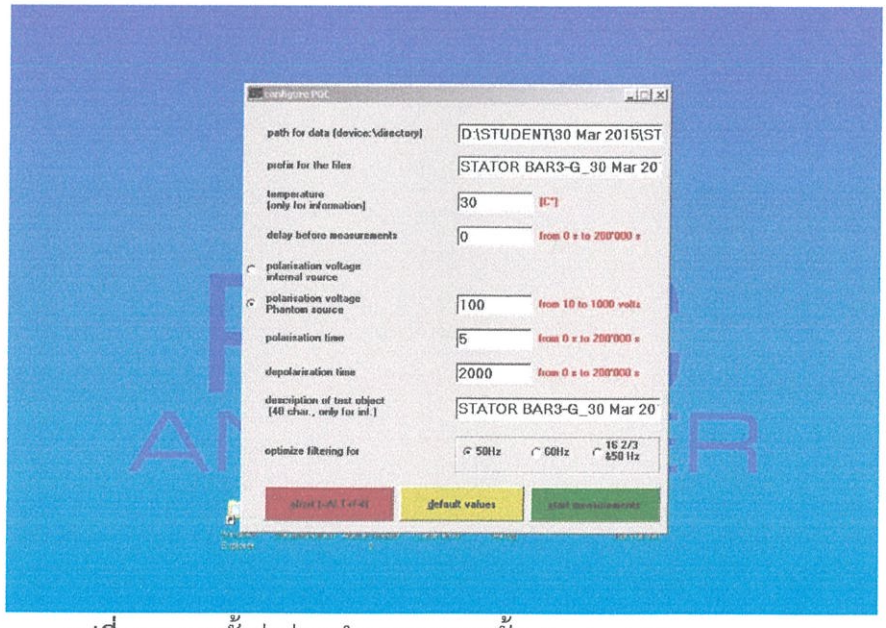
รูปที่ ค.6 การตั้งค่าก่อนทำการทดสอบขั้น Initial Measurement



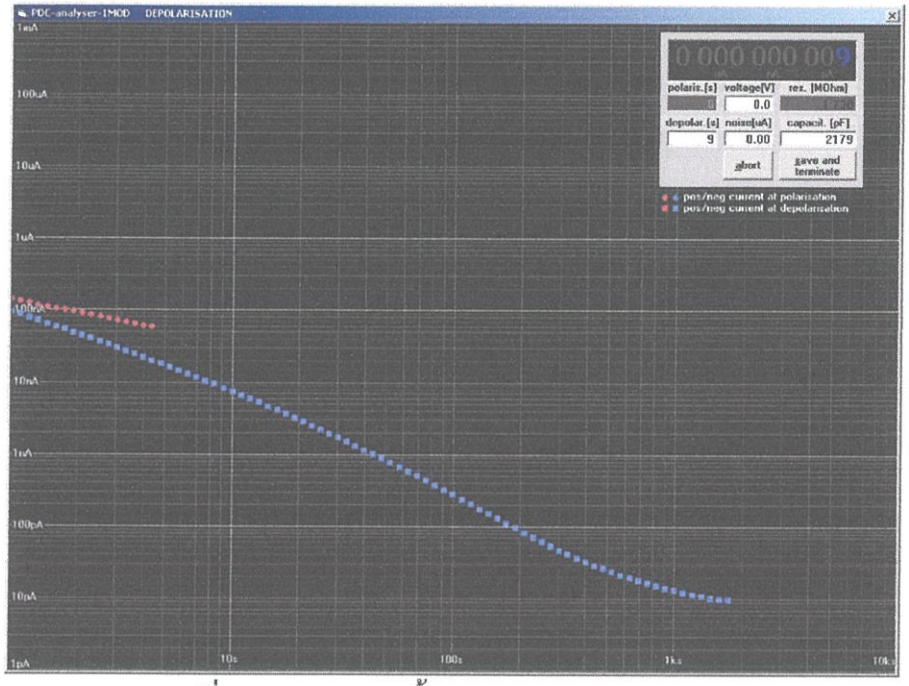
รูปที่ ค.7 การทดสอบขั้น Initial Measurement

3.2) ขั้น Control Measurement

ขั้นนี้ทำการป้อนแรงดันและตั้งค่าระยะเวลาการโพลาไรเซชันให้มีค่าสั้นๆ เช่น 5 วินาที แล้ววัดค่ากระแสดีโพลาไรเซชันขณะดิสชาร์จ แรงดันไฟฟ้าที่แนะนำสำหรับขั้นตอนนี้เท่ากับ 100 – 500 โวลต์สำหรับการทดสอบบุชชิ่ง วัตถุประสงค์ของขั้นตอนนี้คือเพื่อตรวจสอบขนาดของกระแสดีโพลาไรเซชันและค่าตัวเก็บประจุ ดังรูปที่ ค.8 ซึ่งต้องรอจนกระทั่งกระแสดีโพลาไรเซชันลดลงถึงระดับต่ำสุดหรืออย่างน้อยให้ระดับเดียวกับกระแสตกค้าง (Remaining Current) ของขั้นตอน Initial Measurement ก่อนทำการวัดในขั้นตอน Main Measurement ต่อไป

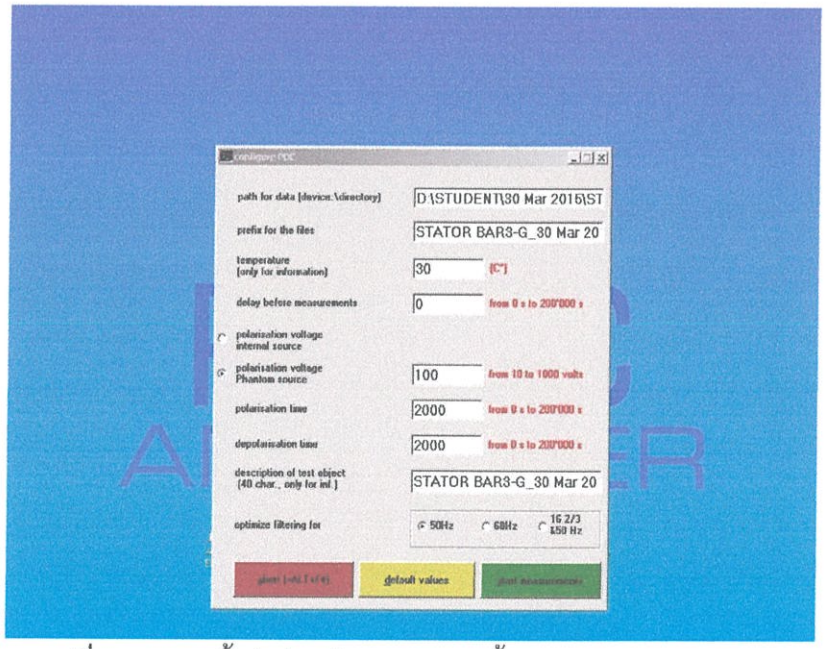


รูปที่ ค.8 การตั้งค่าก่อนทำการทดสอบขั้น Control Measurement

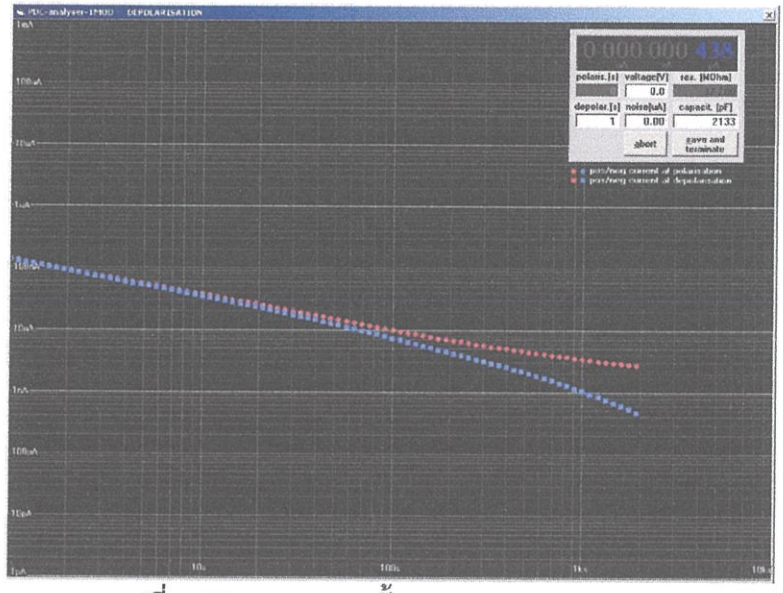


รูปที่ ค.9 การทดสอบขั้น Control Measurement

3.3) ขั้น Main Measurement
เป็นขั้นตอนที่ทำการทดสอบหรือวัดค่าจริงๆ



รูปที่ ค.10 การตั้งค่าก่อนทำการทดสอบขั้น Main Measurement



รูปที่ ค.11 การทดสอบขั้น Main Measurement

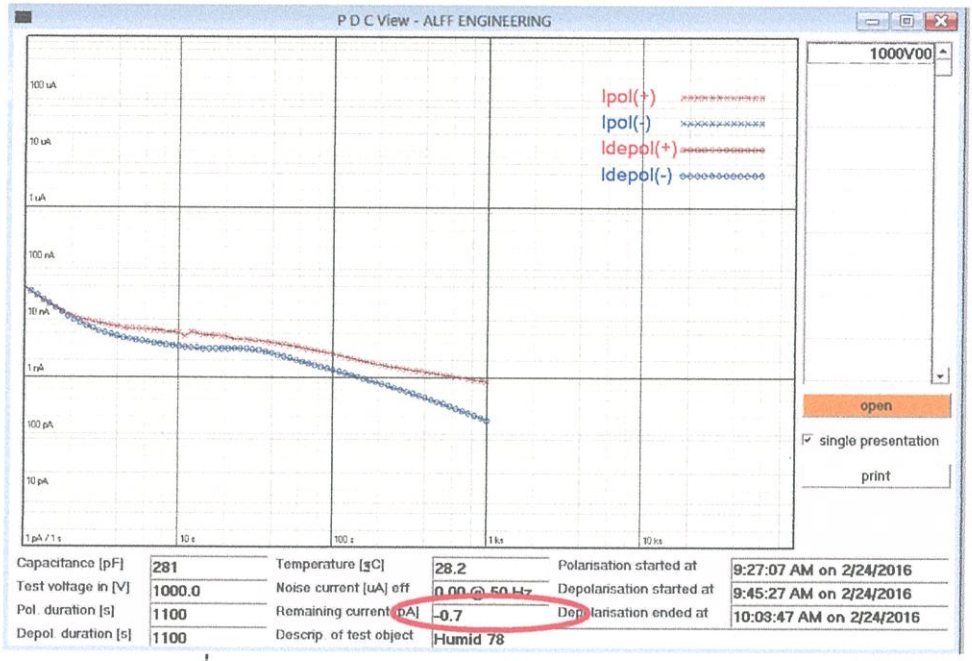
4) การปรับแก้ค่าจากการทดสอบ

หลังจากที่ทำการทดสอบหรือการวัดทั้ง 3 ขั้นตอนได้แก่ Initial, Control และ Main Measurement เครื่องทดสอบได้ทำการบันทึกค่าจากขั้นตอนต่างๆ จากนั้นให้ทำการเปลี่ยนชื่อไฟล์ให้เหมือนกันเพื่อป้องกันความสับสน เช่นดังรูป ก.11 ซึ่ง 00, 01 และ 02 หมายถึงค่าที่ถูกบันทึกจากการทดสอบในขั้นตอน Initial, Control และ Main Measurement ตามลำดับ

Name	Date modified	Type	Size
Correct	2/25/2016 11:50 A...	File folder	
1000V00c	2/24/2016 10:03 A...	Text Document	1 KB
1000V00d	2/24/2016 10:03 A...	Probe Document	2 KB
1000V00p	2/24/2016 10:03 A...	Probe Document	2 KB

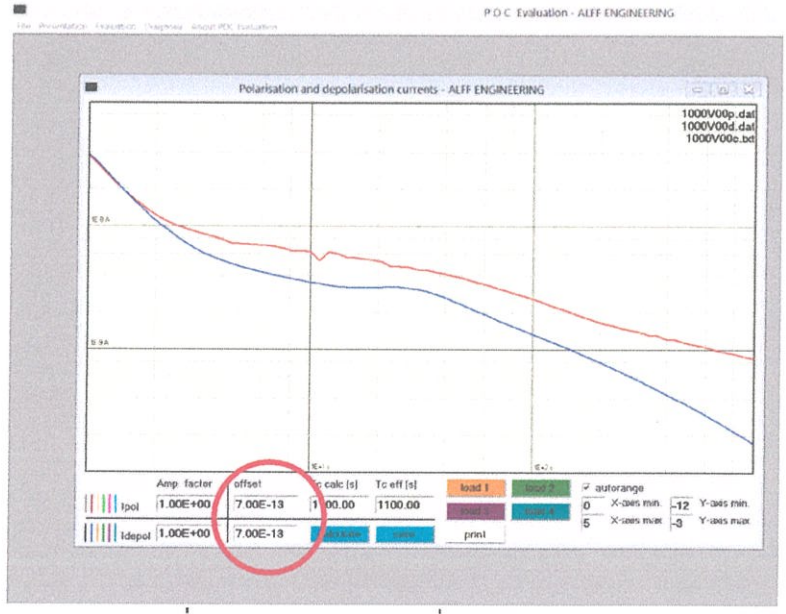
รูปที่ ค.12 ไฟล์ที่ถูกบันทึกจากการทดสอบแต่ละขั้น

จากนั้นทำการเปิดโปรแกรม PDC Evaluation แล้วเปิดไฟล์ของผลการทดสอบในขั้น Main Measurement (ลงท้ายด้วย 02) โดยคลิ๊กที่ปุ่ม Open ทางด้านขวาล่างของรูปที่ ค.13 เพื่อดูค่ากระแสตกค้าง (Remaining Current) ขณะที่ทำการทดสอบ



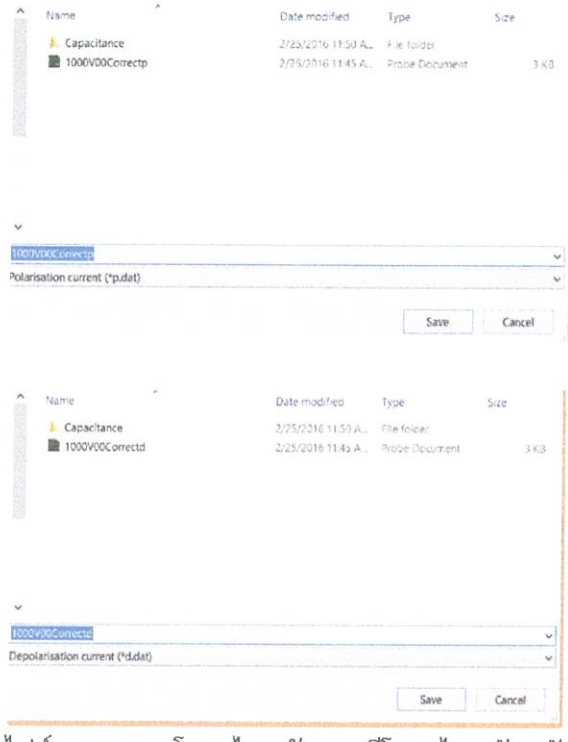
รูปที่ ค.13 แสดงค่ากระแสรตกค้าง (Remaining Current)

จากรูปที่ ค.13 เห็นว่าค่ากระแสตกค้าง (Remaining Current) มีค่า -0.7 พิโกแอมแปร์ จากนั้นทำการปรับแก้โดยการเปิดไฟล์ใหม่ที่แทบด้านบนโดยเลือก File>open>เลือกไฟล์ผลการทดสอบในขั้น Main Measurement (ลงท้ายด้วย 02) หน้าจอจะแสดงดังรูปที่ ค.14 จากนั้นทำการปรับแก้ค่าโดยการพิมพ์ค่ากระแสตกค้าง (Remaining Current) ลงในช่อง offset ทั้งสองช่อง ซึ่งจากการที่กระแสตกค้าง (Remaining Current) มีค่า -0.7 พิโกแอมแปร์ ดังนั้นในช่อง offset ค่าที่ต้องทำการปรับแก้จะมีค่าเท่ากับ +0.7 พิโกแอมแปร์ (ให้ใส่หน่วยเป็น E-12 เสมอหลังจากนั้นโปรแกรมจะทำการเปลี่ยนหน่วยให้เอง) จากนั้นกด Calculate ก็จะได้กราฟใหม่หลังจากการปรับแก้



รูปที่ ค.14 การปรับแก้ค่าที่ได้จากการทดสอบ

จากรูปที่ ค.14 ให้ทำการบันทึกข้อมูลหลังจากการปรับแก้ค่าเพื่อนำผลไปวิเคราะห์ต่อ โดยบันทึกไว้ในโฟลเดอร์แยกดังรูปที่ ค.15 โดยไฟล์ที่ลงท้ายด้วย p.dat และ d.dat ซึ่งหมายถึงค่าที่ได้จากการทดสอบของกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชัน ตามลำดับ

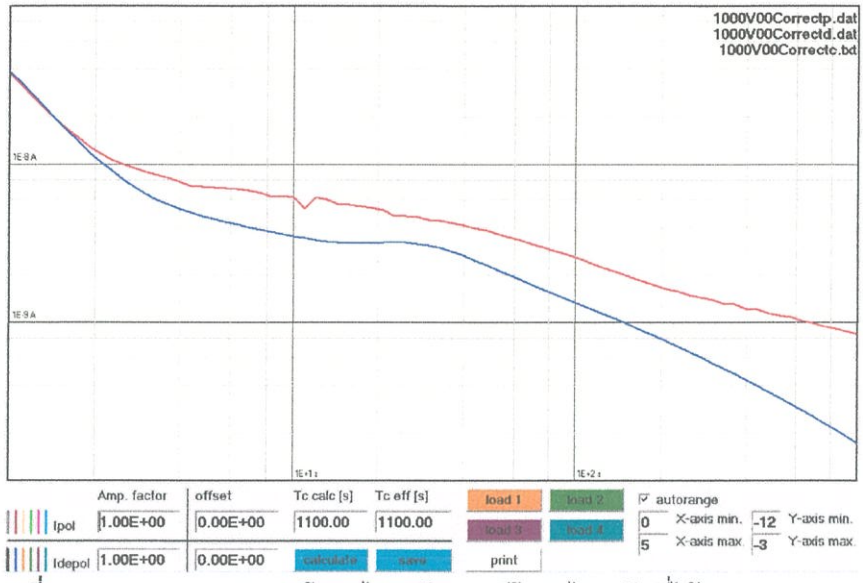


รูปที่ ค.15 การบันทึกไฟล์ของกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชันหลังจากทำการปรับแก้ค่า

ต่อมาให้ทำการคัดลอกไฟล์ที่ลงท้าย c.txt ไปใส่ในโฟลเดอร์แยกที่ได้สร้างขึ้นมาก่อนหน้านี้ ดังรูปที่ ค.16 แล้วตั้งชื่อให้เหมือนกับอีกสองไฟล์ที่ได้ทำการบันทึกก่อนหน้านี้

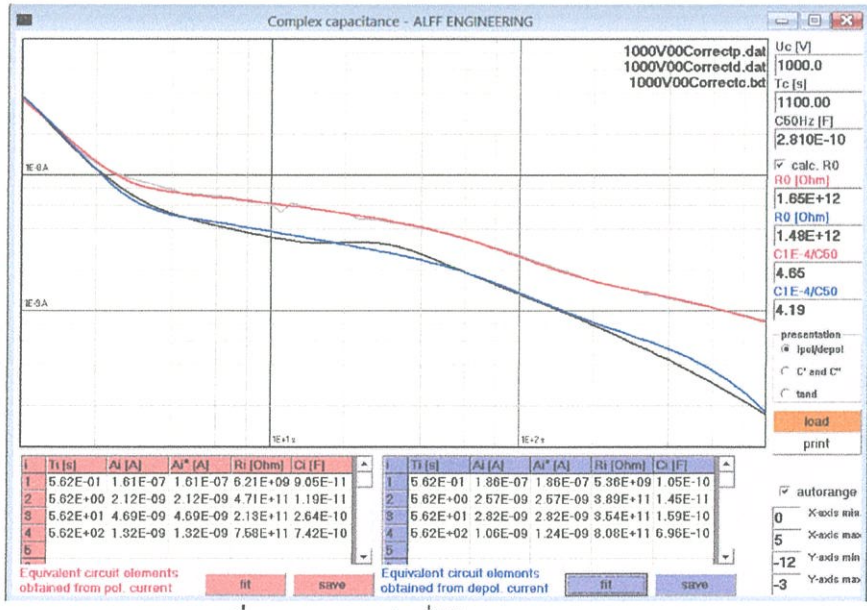
รูปที่ ค.16 การคัดลอกไฟล์

หลังจากการปรับแก้ค่าเรียบร้อยแล้วให้เปิดไฟล์เพื่อแสดงผลโดยคลิ๊กที่ File>open>เลือกโฟลเดอร์แยกที่ได้ทำการสร้างไว้>เลือกไฟล์ของกระแสที่ลงท้ายด้วย p.dat จะได้ดงรูปที่ ค.17 ซึ่งจะเป็นการแสดงกราฟของกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชันที่ได้จากการวัด

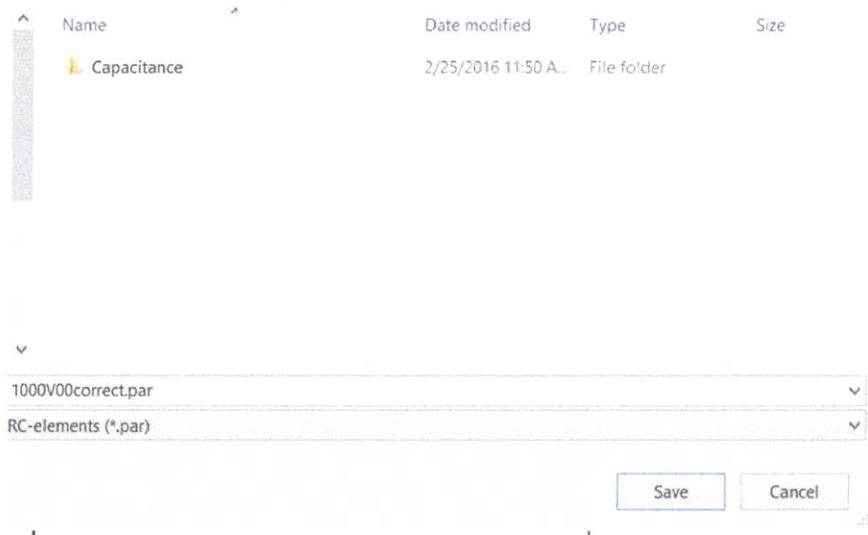


รูปที่ ค.17 กราฟของกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชันที่ได้จากการทดสอบหลังจากทำการปรับแก้ค่าแล้ว

โปรแกรมสามารถแสดงค่าอัตราส่วนตัวเก็บประจุ (C ratio) และค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริก (tanδ) โดยคลิ๊กที่แถบด้านบนแล้วเลือก Evaluate>Complex capacitance แล้วทำการบันทึกค่า C ratio และ tanδ ที่ได้จากการวัดเพื่อนำไปใช้สำหรับการวิเคราะห์ผลการทดสอบ โดยจากรูปที่ ข.18 ให้คลิ๊กที่ปุ่ม fit ด้านล่างซ้าย จากนั้นคลิ๊กที่ save แล้วทำการบันทึกไฟล์ ดังรูปที่ ค.19

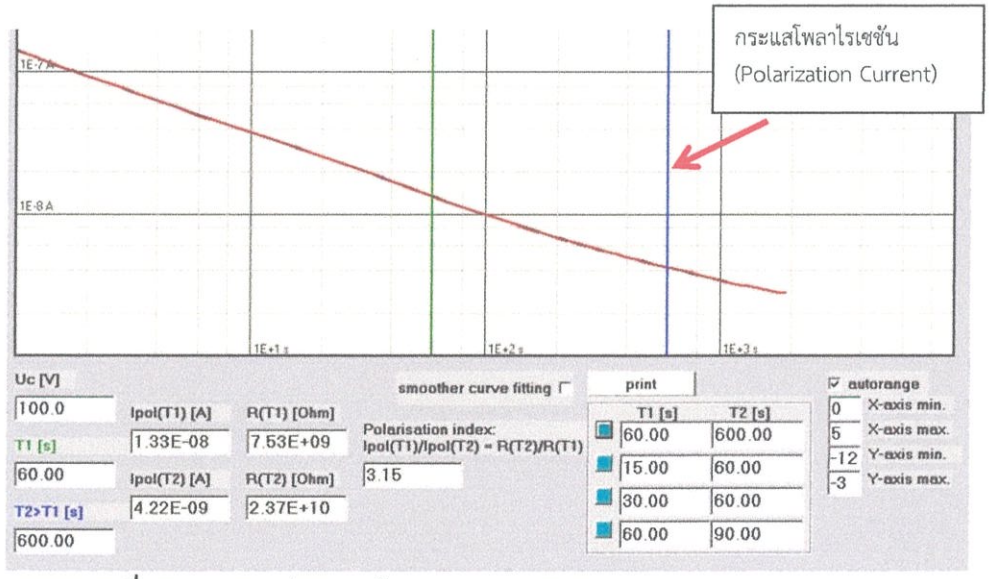


รูปที่ ค.18 แสดงค่าที่ได้จากการ fit



รูปที่ ค.19 การบันทึกไฟล์ของค่า C ratio และ tanδ ที่ได้จากการทดสอบ

นอกจากนี้แล้วโปรแกรมยังสามารถแสดงค่าความต้านทานฉนวน (Insulation Resistance) และค่าดัชนีการเกิดโพลาไรเซชัน (Polarization Index) โดยคลิ๊กที่แถบด้านบนแล้วเลือก Evaluate>Polarization index จะแสดงได้ดังรูปที่ ค.20



รูปที่ ค.20 แสดงค่าความต้านทานฉนวน (Insulation Resistance) และ ค่าดัชนีการเกิดโพลาไรเซชัน (Polarization Index)

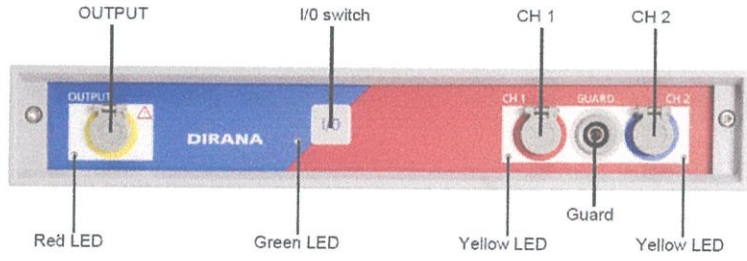
ภาคผนวก ง
ขั้นตอนการทดสอบ Frequency Domain Spectroscopy

ง.1 เครื่อง DIRANA

ง.1.1 ด้านหน้าเครื่อง DIRANA

บนแผงด้านหน้า(ซ้ายไปขวา) ดังรูปที่

- ไฟ LED สีแดงแสดงผลสถานะอันตราย
- จุดเชื่อม OUTPUT
- ไฟ LED สีเขียวแสดงผลขณะเปิดเครื่อง
- สวิตช์ขาเข้า-ขาออก I/O
- จุดเชื่อม CH 1
- จุดเชื่อม CH 2
- ไฟ LED สีเหลืองแสดงผล CH 1 และ CH 2

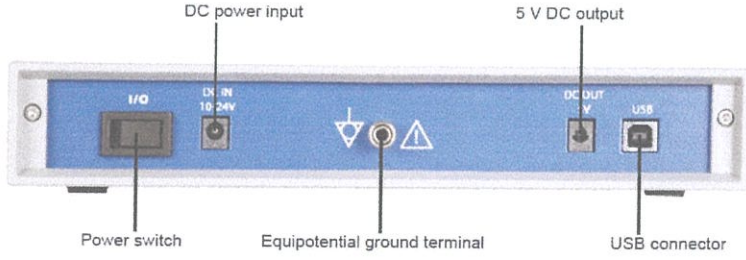


รูปที่ ง.1 ด้านหน้าเครื่อง DIRANA

ง.1.2 ด้านหลังเครื่อง DIRANA

บนแผงด้านหลัง(ซ้ายไปขวา) ดังรูปที่ ง.2

- สวิตช์เปิด-ปิดเครื่อง
- จุดเชื่อมไฟฟ้า DC ขาเข้า
- จุดเชื่อมกราวด์
- ไฟฟ้า 5โวลต์ขาออก
- จุดเชื่อม USB

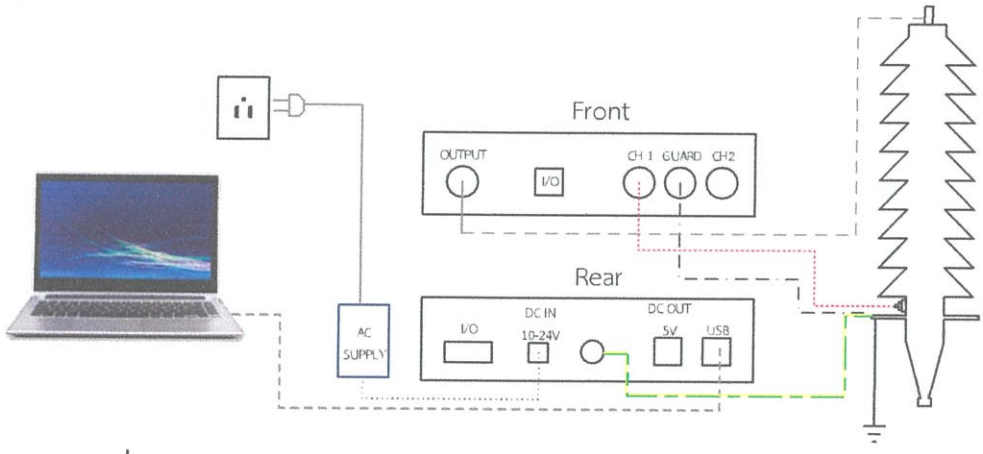


รูปที่ ง.2 ด้านหลังเครื่อง DIRANA

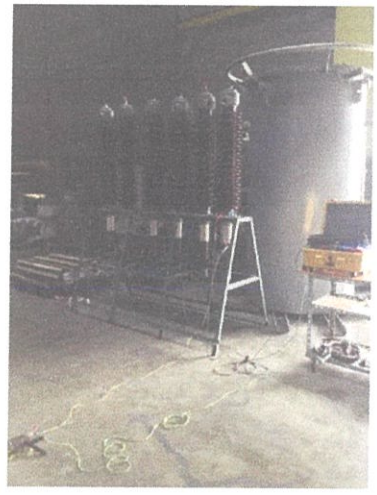
ง.2 ขั้นตอนการทดสอบ Frequency Domain Spectroscopy

1) ขั้นตอนการต่อวงทดสอบ Frequency Domain Spectroscopy เป็นดังนี้

1.1) ต่อวงจรทดสอบ



รูปที่ ง.3 การต่อวงจรการทดสอบ frequency domain spectroscopy



รูปที่ ง.4 วงจรการทดสอบ frequency domain spectroscopy

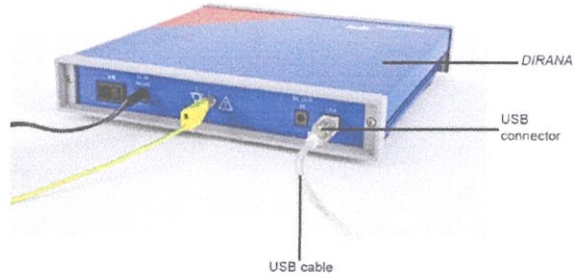
1.2) ต่อสาย DC Output ของเครื่อง AC power supply กับ DC power input กับแผงด้านหลังของ DIRANA

1.3) ต่อ AC power supply กับ สาย power cable

1.4) ต่อสายเมนปลั๊กของ power cable กับ power outlet

1.5) กดปุ่ม power ที่แผงด้านหลังของ DIRANA

1.6) เชื่อมต่อ DIRANA กับคอมพิวเตอร์ โดยเชื่อมสาย USB 2.0 A/B กับจุดต่อ USB บนแผงด้านหลังของ DIRANA



รูปที่ ง.5 การต่อสายด้านหลังเครื่อง DIRANA

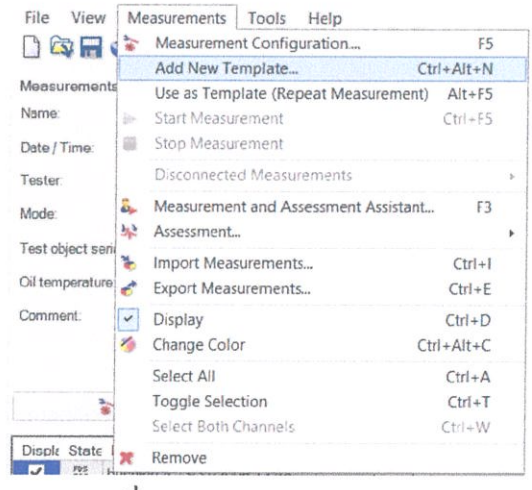
1.7) เชื่อมสาย USB กับคอมพิวเตอร์โดยใช้สาย USB 2.0 A/A cable

1.8) ติดตั้งซอฟต์แวร์ DIRANA 1.6 ลงบนคอมพิวเตอร์

2) การปรับตั้งค่าต่างๆ ในการทดสอบ

2.1) ทำการเปิดโปรแกรม DIRANA 1.6

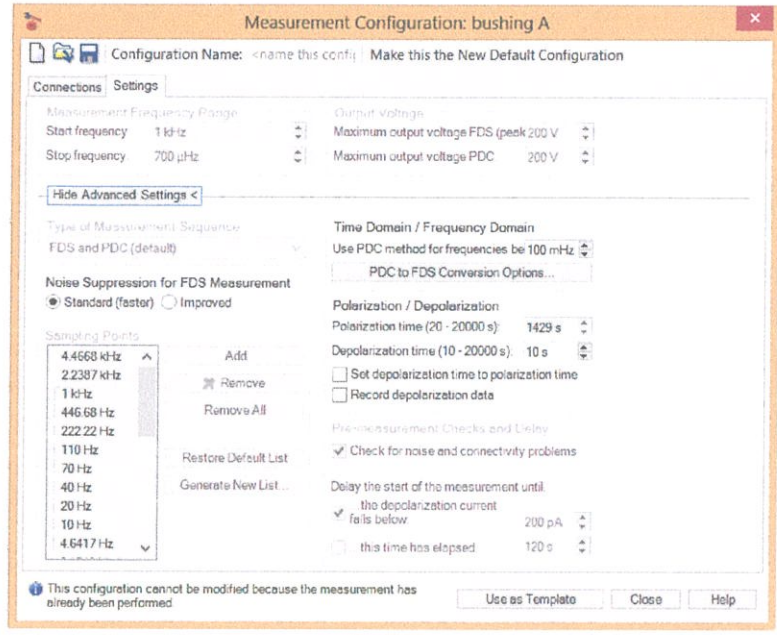
2.2) กดแถบ Toolbar Measurements แล้วเลือก Add New Template ดังรูป จากนั้นตั้งชื่อบุชชิ่งที่ทำการทดสอบ



รูปที่ ง.6 แทบ Measurements

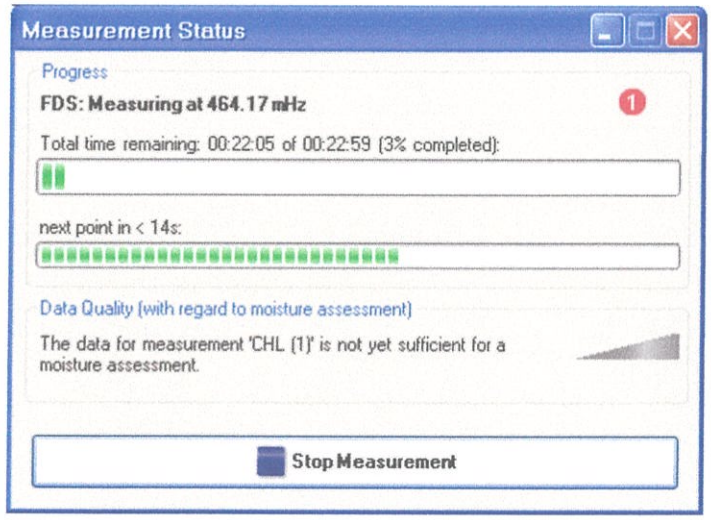
2.3) ตั้งค่าที่ Measurements pane แล้วกดที่ Measurement Configuration

2.4) ตั้งค่าSettings ที่ Measurement Configuration ดังรูป



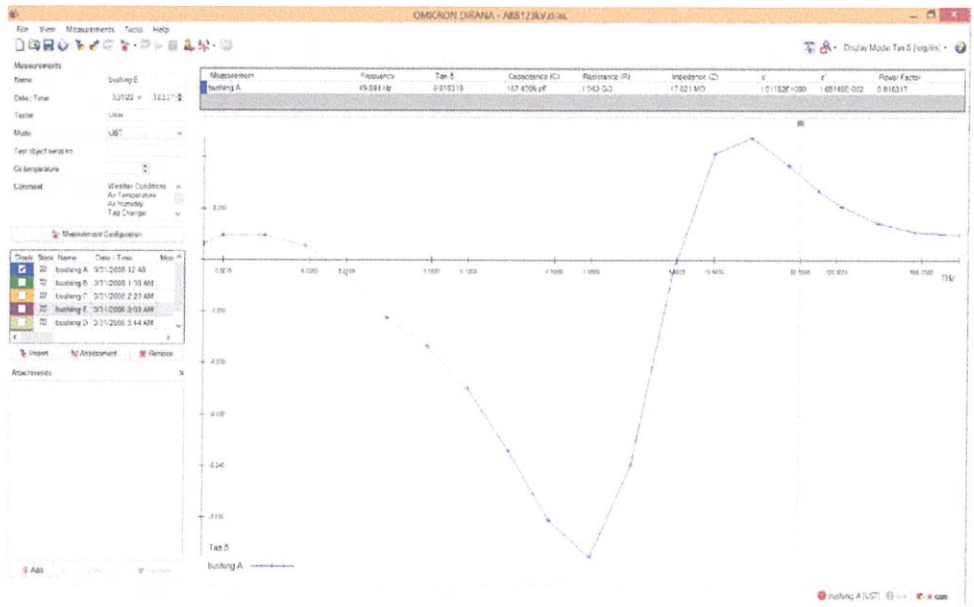
รูปที่ ง.7 ตั้งค่าSettings ที่ Measurement Configuration

2.6) กด Start Measurement ที่แถบ Toolbar แล้วรอให้เครื่องดำเนินการจนเสร็จสิ้น



รูปที่ ง.8 สถานะการทดสอบ

2.7) จะได้กราฟ FDS(เส้นประ) ต่อด้วย PDC(เส้นทึบ) ดังรูป



รูปที่ ง.9 ผลการทดสอบ

2.8) กด Add New Template อีกครั้งเพื่อเพิ่มพื้นที่บันทึกผลการทดสอบครั้งใหม่ (ไฟล์เดิม) แล้วกลับไปทำตามข้อ 2.2 ใหม่ เพื่อเริ่มการทดสอบถัดไป

ประวัติผู้เขียน

นายทัตเทพ แก้วกิ่ง เกิดเมื่อวันที่ 21 กันยายน พ.ศ.2536 ที่จังหวัดสกลนคร สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนสกลราชวิทยานุกูล เข้าศึกษาที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2555
ฝึกงานที่ : บริษัท เอ็ม.ซี.ที จำกัด

นายธนภพ หอมเพชร เกิดเมื่อวันที่ 8 กุมภาพันธ์ พ.ศ.2536 ที่จังหวัดสกลนคร สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนสกลราชวิทยานุกูล เข้าศึกษาที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2555
ฝึกงานที่ : บริษัท LUVATA Heating Cooling Technology Thailand

นายธนานพ สมลือแสน เกิดเมื่อวันที่ 7 ธันวาคม พ.ศ.2536 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนสาธิตจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยฝ่ายมัธยม เข้าศึกษาที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2555
ฝึกงานที่ : บริษัท พรีไซส์อิเล็คตริกมานูแฟคเจอริ่ง จำกัด