

การศึกษาผลตอบสนองไดอิเล็กตริกของ
บุชชิงแรงดันสูงแบบกระดาษชุบน้ำมัน

THE STUDY OF DIELECTRIC RESPONSE OF
OIL IMPREGNATED PAPER BUSHING



นายวริศนันท์ โรจนสุนันท์
WARISANAN ROJANASUNAN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2567

KMITL-2024-EN-M-027-303

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE STUDY OF DIELECTRIC RESPONSE OF
OIL IMPREGNATED PAPER BUSHING



WARISANAN ROJANASUNAN

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING
SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2024
KMITL-2024-EN-M-027-303

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2024

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาผลตอบสนองไดโอดีเล็กทรอนิกส์ของบุซซิ่งแรงดันสูง แบบกระดาศงุ่มน้ำมัน
นักศึกษา	นายวริศนันท์ โรจนสุนันท์
รหัสประจำตัว	65016084
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
พ.ศ.	2567
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. นรเศรษฐ์ พัฒนเดช
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ (ร่วม)	ผศ.ดร. ภาพ จันทรเจริญสุข

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จัดทำมาเพื่อศึกษาประเภทของฉนวนที่ใช้ในบุซซิ่งแรงดันสูง ข้อดีข้อเสียของฉนวนแต่ละชนิด พร้อมกับเทคนิควิธีการต่างๆ ที่ใช้ประเมินสภาพระบบฉนวนของบุซซิ่งแรงดันสูง โดยปกติแล้วบุซซิ่งที่ติดตั้งใช้งานจะเจอกับความเครียดต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นความเครียดทางความร้อน ความเครียดทางไฟฟ้า ความเครียดจากสภาพแวดล้อม ความเครียดจากแรงทางกล ซึ่งความเครียดทั้งหลายนี้เป็นตัวการที่ทำให้สภาพฉนวนแยลง และทำให้คุณสมบัติทางไดโอดีเล็กทรอนิกส์มีการเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพฉนวนที่เสื่อมสภาพจากการใช้งาน โดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เลือกนำเสนอเทคนิคการวัดผลตอบสนองไดโอดีเล็กทรอนิกส์ในเมนเวลาและโดเมนความถี่เพื่อนำมาวิเคราะห์ผลของกระแสรั่วไหลที่ผิวของบุซซิ่งทั้งที่มาจากฝั่งแรงดันสูงและที่มาจากฝั่งกราวด์ โดยใช้เทคนิคการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันซึ่งเป็นผลตอบสนองในโดเมนเวลา และการวัดสเปกโตรสโคปีซึ่งเป็นผลตอบสนองในโดเมนความถี่ ซึ่งผลลัพธ์จากการทดสอบทั้งสองหัวข้อนี้จะถูกนำมาวิเคราะห์ร่วมกันเพื่อหาพารามิเตอร์หรือประเด็นต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับกระแสรั่วไหลนี้ จากผลการทดสอบและผลการวิเคราะห์พบว่า การวัดผลตอบสนองไดโอดีเล็กทรอนิกส์ในโดเมนเวลาและความถี่ ได้ให้แง่มุมและแง่คิดในการประเมินสภาพของฉนวนของระบบบุซซิ่งและสิ่งที่จะต้องปฏิบัติก่อนการทำการทดสอบ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงอื่นๆ ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	THE STUDY OF DIELECTRIC RESPONSE OF OIL IMPREGNATED PAPER BUSHING
Student	Mr. Warisanan Rojanasunan
Student ID.	65016084
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical and Computer Engineering
Year	2024
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Norasage Pattanadech
Thesis Advisor-Co	Asst. Prof. Dr. Phop Chancharoensook

ABSTRACT

This thesis attempts to study the insulation types used in high-voltage bushings, the advantages and disadvantages of each type of insulation, along with various techniques used to evaluate the insulation system condition of high-voltage bushings. Normally, bushings that have already been installed and operated always encounter TEAM stresses that is thermal stress, electrical stress, environmental stress, and mechanical stress. These stresses cause deterioration of the electrical insulation leading to the change of dielectric properties according that deterioration. This thesis chooses to propose the technique of measuring the dielectric response in time and frequency domains to analyze the effects of leakage currents on the surface of the bushings both from the high-voltage side and the ground side. The techniques are polarization and depolarization currents measurement which is the response in the time domain, and dielectric frequency response or frequency domain spectroscopy which is the response in the frequency domain. The results of these two test techniques will be analyzed together to find the parameters or issues related to this leakage current. From the test results and analysis results, it was found that measuring the dielectric response in both time and frequency domains provides perspectives and point of views for evaluating the insulation condition of the bushing system or any high-voltage equipment and what must be done before performing the test.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี ข้าพเจ้าขอแสดงความขอบคุณจากกันบึ้งของหัวใจ แต่ รองศาสตราจารย์ ดอกเตอร์ นรเศรษฐ พัฒนเดช สำหรับความช่วยเหลือต่างๆ ทั้งด้านความรู้ทางวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, ด้านการแก้ไขปัญหา และ ด้านการใช้ชีวิต และได้การมอบโอกาสพร้อมประสบการณ์ต่างๆ จากการทำงานจริง ให้แก่ข้าพเจ้าตลอดช่วงการศึกษาตั้งแต่ปริญญาตรีจนถึงปริญญาโท และขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดอกเตอร์ ภพ จันทร์เจริญสุข ผู้ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาพร้อม สำหรับความช่วยเหลือต่างๆ ในทำนองเดียวกัน

ขอขอบคุณ คุณวรชัย สวัสดิ์มงคล จาก บริษัท ทีไอเอส เอ็นจิเนียริ่ง แอนด์ เซอร์วิส จำกัด สำหรับการสนับสนุนอุปกรณ์ทดสอบ OMICRON DIRANA สำหรับการวัดผลตอบสนองไดอิเล็กตริกในโดเมนความถี่

ขอขอบคุณ นายศิวกร จินเมือง สำหรับการสนับสนุนอุปกรณ์ทดสอบ PDC Analyser-1MOD ในส่วนการวัดกระแสโพลาร์ไรเซชันและกระแสดีโพลาร์ไรเซชัน พร้อมทั้งให้คำแนะนำในการทดสอบ รวมถึงให้ความรู้ใหม่ๆ แก่ข้าพเจ้าอยู่เสมอ

ขอขอบคุณ คุณสุทัศน์ สุขสกุลปัญญา จากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย สำหรับประสบการณ์การทดสอบในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงตั้งแต่ฝึกงานจนถึงปัจจุบัน

ขอขอบคุณ คุณสุวิทย์ ลิขิตสุภิน สำหรับคำแนะนำและแรงจูงใจ ที่มอบให้สำหรับการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงต่างๆ

ขอขอบคุณ คุณสุริยะ มงคลสาธิตพงษ์ จากบริษัท พีดี โซลูชันส์ จำกัด และ บริษัท แพลนมาร์เก็ต โกลด์ จำกัด สำหรับประสบการณ์การทดสอบดิสชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงดันสูง และคำแนะนำในการทดสอบการดิสชาร์จบางส่วนในชีวิตการทำงานจริง

นอกจากนี้ ข้าพเจ้าขอแสดงความขอบคุณอย่างสุดซึ้งแก่ รุ่งพีจากห้องแลปวิเคราะห์ฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง (Dielectric Analytika Laboratory หรือ DikaLab) ได้แก่ นายศิวกร จินเมือง, นายญาณพล กิตติคุณธราดล, นายกิตติพิศ จริยานุรัตน์, นายศักรินทร์ ตระธรรม และ อื่นๆ สำหรับคำแนะนำตลอดมา และขอขอบคุณ นายกฤษดา ดอกไม้, นายโกมินทร์ ชุมพิบูลย์, และปัลย์ อุดมลักษณะานนท์ เพื่อนร่วมชั้นปีตั้งแต่ปริญญาตรีจนถึงปริญญาโท สำหรับการสนับสนุนและช่วยเหลือเกื้อกูลกันตลอดมา และ ขอขอบคุณรุ่นน้องในทีม DikaLab สำหรับความช่วยเหลือในการทดสอบ

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ พี่สาว ญาติ และ แฟนสาว สำหรับกำลังใจในการศึกษาตั้งแต่ปริญญาตรีจนถึงปริญญาโท และการใช้ชีวิตจนกลายเป็นตัวข้าพเจ้าที่ดียิ่งขึ้นในปัจจุบัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.4 สมมุติฐานของการศึกษา.....	2
1.5 ขั้นตอนการศึกษา.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ประเภทของบุงซิ่ง.....	5
2.1.1 บุงซิ่งแบบ Non-condenser.....	5
2.1.2 บุงซิ่งแบบ Condenser.....	5
2.2 สถิติความเสียหายจากบุงซิ่ง.....	13
2.3 เทคนิคการประเมินสภาพฉนวน.....	15
2.4 ความจุไฟฟ้าและความสูญเสียไดอิเล็กตริกของบุงซิ่ง Condenser.....	17
2.4.1 ความจุไฟฟ้าของบุงซิ่งแบบ Condenser.....	19
2.4.2 ความสูญเสียไดอิเล็กตริกของบุงซิ่งแบบ Non-condenser.....	21
2.5 Polarization and Depolarization Current (PDC).....	24
2.6 Frequency domain spectroscopy (FDS) / Dielectric frequency response (DFR)	26
2.7 เปรียบเทียบระหว่างการทดสอบ FDS/DFR กับการวัด Power Factor / Tan δ	27
2.8 กระแสรั่วไหลที่ผิวบุงซิ่ง.....	28
บทที่ 3 การออกแบบการทดลอง.....	29
3.1 การเตรียมอุปกรณ์สำหรับการทดสอบ.....	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การทดสอบในวิทยานิพนธ์	31
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง	37
4.1 การทดสอบผลของการ Guard ต่อผลตอบสนองไดอิเล็กตริกในโดเมนความถี่ FDS/DFR สำหรับบุชชิ่งแบบกระดาดาชุ่มน้ำมัน 22 kV.....	37
4.2 ผลของ Voltage Bandage/ Voltage Collar ต่อผลตอบสนองไดอิเล็กตริกในโดเมนความถี่ FDS/DFR สำหรับบุชชิ่งแบบกระดาดาชุ่มน้ำมัน 22 kV และ 115 kV.....	39
4.3 ผลของ Grounded Bandage/ Grounded Collar ต่อผลตอบสนองไดอิเล็กตริกในโดเมนความถี่ FDS/DFR สำหรับบุชชิ่งแบบกระดาดาชุ่มน้ำมัน 22 kV และ 115 kV...	45
4.4 ผลของ Voltage Collar ต่อผลตอบสนองไดอิเล็กตริกในโดเมนเวลา PDC สำหรับบุชชิ่งแบบกระดาดาชุ่มน้ำมัน 22 kV.....	51
4.5 ผลของ Grounded Collar ต่อผลตอบสนองไดอิเล็กตริกในโดเมนเวลา PDC สำหรับบุชชิ่งแบบกระดาดาชุ่มน้ำมัน 22 kV.....	52
4.6 เปรียบเทียบระหว่าง Voltage Bandage / Voltage Collar และ Grounded Bandage / Grounded Collar ต่อผลตอบสนองไดอิเล็กตริก สำหรับบุชชิ่งแบบกระดาดาชุ่มน้ำมัน 22 kV	53
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	57
5.1 สรุปผล	57
5.2 ข้อเสนอแนะ	58
เอกสารอ้างอิง	59
ภาคผนวก ก บทควมวิชาการ	61
ภาคผนวก ข ผลการจำลองสนามไฟฟ้าในบุชชิ่ง	69
ประวัติผู้เขียน	73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนการศึกษาในปีการศึกษา 2565	2
ตารางที่ 1.2 ขั้นตอนการศึกษาในปีการศึกษา 2566	3
ตารางที่ 1.3 ขั้นตอนการศึกษาในปีการศึกษา 2567	4
ตารางที่ 2.1 ข้อดีข้อเสียของบุชชิงประเภท RBP	9
ตารางที่ 2.2 ข้อดีข้อเสียของบุชชิงประเภท OIP	10
ตารางที่ 2.3 ข้อดีข้อเสียของบุชชิงประเภท RIP	11
ตารางที่ 2.4 ข้อดีข้อเสียของบุชชิงประเภท RIS/RIF	12
ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติพื้นฐานของบุชชิง Condenser	12
ตารางที่ 2.6 ปัญหาที่สามารถเกิดขึ้นได้สำหรับบุชชิงแต่ละประเภท	14
ตารางที่ 2.7 วิธีในการวินิจฉัยสถานะของบุชชิงแบบ On-site	15
ตารางที่ 2.8 ประสิทธิภาพของวิธีในการวินิจฉัยสำหรับกลไกความเสียหายต่างๆ	15
ตารางที่ 2.9 การเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าจากการการช็อตกันระหว่างชั้นตัวนำโดยประมาณ สำหรับแต่ละพิกัดแรงดันและชนิดฉนวน OIP และ RIP	20
ตารางที่ 2.10 การเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าจากการการช็อตกันระหว่างชั้นตัวนำโดยประมาณ สำหรับแต่ละพิกัดแรงดันและชนิดฉนวน RBP	20
ตารางที่ 2.11 ค่าลิมิตตามมาตรฐานและค่าโดยทั่วไปสำหรับ $\tan \delta$ และ PF ตามชนิดฉนวนของ บุช ชิง ที่ความถี่ 50/60 เฮิร์ต และอุณหภูมิ 20°C	21
ตารางที่ 2.12 ค่าลิมิตสำหรับตัดสินใจสภาพบุชชิง OIP และ RIP ตามการเปลี่ยนแปลงของค่า $\tan \delta$ เทียบกับค่าเนมเพลทหรือค่าเริ่มต้นที่อุณหภูมิอ้างอิง	22
ตารางที่ 2.13 ลิมิตของค่า $\tan \delta$ สำหรับบุชชิง RBP	23
ตารางที่ 2.14 ลิมิตของค่า $\tan \delta$ สำหรับบุชชิง Condenser ที่อุณหภูมิ 20°C	23
ตารางที่ 2.15 ความแตกต่างระหว่าง Power factor / $\tan \delta$ กับ FDS/DFR	28
ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ในการวินิจฉัยจากกรณี Voltage Bandage / Voltage Collar ของบุชชิง 22 กิโลโวลต์	41
ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์ในการวินิจฉัยจากกรณี Voltage Bandage / Voltage Collar ของบุชชิง 115 กิโลโวลต์	44
ตารางที่ 4.3 พารามิเตอร์ในการวินิจฉัยจากกรณี Grounded Bandage / Grounded Collar ของ บุชชิง 22 กิโลโวลต์	47
ตารางที่ 4.4 พารามิเตอร์ในการวินิจฉัยจากกรณี Grounded Bandage / Grounded Collar ของ บุชชิง 115 กิโลโวลต์	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1 บุชชิงแบบ Non-condensor.....	6
รูปที่ 2.2 บุชชิงแบบ Condensor.....	7
รูปที่ 2.3 เปรียบเทียบการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าในบุชชิงแบบ Condensor และ Non-condensor	7
รูปที่ 2.4 การแตกตามเส้นรอบวงของฉนวนบุชชิง RBP	8
รูปที่ 2.5 ความเสียหายตามแนวแกนของบุชชิง OIP เนื่องจากการเคลื่อนตัวของชั้นตัวนำ	10
รูปที่ 2.6 การแตกตามเส้นรอบวงของฉนวนบุชชิง RIP	11
รูปที่ 2.7 องค์ประกอบของบุชชิง Condenser แบบมี Test tap และ Voltage tap (ซ้าย: บุชชิงแบบมี test tap, ขวา: บุชชิงแบบมี Voltage tap).....	18
รูปที่ 2.8 วงจรสมมูลอย่างง่ายของบุชชิง Condenser ที่ความถี่เดียว.....	18
รูปที่ 2.9 แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าของบุชชิง.....	19
รูปที่ 2.10 ค่า $\tan \delta$ ที่อุณหภูมิใดๆเทียบกับค่า $\tan \delta$ ที่อุณหภูมิ 20°C	21
รูปที่ 2.11 ผังงานการวินิจฉัยฉนวนบุชชิงแรงดันสูง	24
รูปที่ 2.12 วงจรการทดสอบ PDC	25
รูปที่ 2.13 ผลลัพธ์โดยทั่วไปของการทดสอบ PDC	25
รูปที่ 2.14 วงจรการทดสอบ FDS/DFR	27
รูปที่ 2.15 ผลลัพธ์ FDS/DFR โดยทั่วไปของบุชชิงแบบ OIP	27
รูปที่ 2.16 ผลลัพธ์ FDS/DFR โดยทั่วไปของบุชชิงแบบ OIP	28
รูปที่ 3.1 บุชชิง OIP 22 kV สำหรับการทดสอบ.....	29
รูปที่ 3.2 บุชชิง OIP 115 kV สำหรับการทดสอบ	29
รูปที่ 3.3 Collar จากเทปทองแดง	30
รูปที่ 3.4 PDC-ANALYSER-1MOD	30
รูปที่ 3.5 Omicron DIRANA	30
รูปที่ 3.6 วงจรการทดสอบ ผลของการ Guard ต่อผลการทดสอบ FDS/DFR.....	31
รูปที่ 3.7 วงจรการทดสอบ ผลของการ Voltage Bandage / Voltage Collar ต่อผลการทดสอบ FDS/DFR	32
รูปที่ 3.8 วงจรการทดสอบ ผลของการ Grounded Bandage / Grounded Collar ต่อผลการทดสอบ FDS/DFR.....	33
รูปที่ 3.9 วงจรการทดสอบ ผลของการ Voltage Bandage / Voltage Collar ต่อผลการทดสอบ PDC	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.10 วงจรการทดสอบ ผลของการ Grounded Bandage / Grounded Collar ต่อผลการทดสอบ PDC.....	36
รูปที่ 4.1 วงจรการทดสอบ ผลของการ Guard ต่อผลการทดสอบ FDS/DFR.....	37
รูปที่ 4.2 ผลลัพธ์การทดสอบ ผลของการ Guard ต่อผลการทดสอบ FDS/DFR (ก) ค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริก (ข) ค่าความจุไฟฟ้าส่วนจริง.....	38
รูปที่ 4.3 วงจรการทดสอบ ผลของ Voltage Bandage / Voltage Collar ต่อผลการทดสอบ FDS/DFR ของบุชชิ่ง 22 กิโลโวลต์.....	40
รูปที่ 4.4 ผลลัพธ์การทดสอบ ผลของ Voltage Bandage / Voltage Collar ต่อผลการทดสอบ FDS/DFR ของบุชชิ่ง 22 กิโลโวลต์ (ก) ค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริก (ข) ค่าความจุไฟฟ้าส่วนจริง....	41
รูปที่ 4.5 วงจรการทดสอบ ผลของ Voltage Bandage / Voltage Collar ต่อผลการทดสอบ FDS/DFR ของบุชชิ่ง 115 กิโลโวลต์.....	43
รูปที่ 4.6 ผลลัพธ์การทดสอบ ผลของ Voltage Bandage / Voltage Collar ต่อผลการทดสอบ FDS/DFR ของบุชชิ่ง 115 กิโลโวลต์ (ก) ค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริก (ข) ค่าความจุไฟฟ้าส่วนจริง .	44
รูปที่ 4.7 วงจรการทดสอบ ผลของ Grounded Bandage / Grounded Collar ต่อผลการทดสอบ FDS/DFR ของบุชชิ่ง 22 กิโลโวลต์.....	46
รูปที่ 4.8 ผลลัพธ์การทดสอบ ผลของ Grounded Bandage / Grounded Collar ต่อผลการทดสอบ FDS/DFR ของบุชชิ่ง 22 กิโลโวลต์ (ก) ค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริก (ข) ค่าความจุไฟฟ้าส่วนจริง ..	47
รูปที่ 4.9 วงจรการทดสอบ ผลของ Grounded Bandage / Grounded Collar ต่อผลการทดสอบ FDS/DFR ของบุชชิ่ง 115 กิโลโวลต์.....	49
รูปที่ 4.10 ผลลัพธ์การทดสอบ ผลของ Grounded Bandage / Grounded Collar ต่อผลการทดสอบ FDS/DFR ของบุชชิ่ง 115 กิโลโวลต์ (ก) ค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริก (ข) ค่าความจุไฟฟ้าส่วนจริง.....	50
รูปที่ 4.11 ผลลัพธ์การทดสอบ ผลของ Voltage Bandage / Voltage Collar ต่อผลการทดสอบ PDC ของบุชชิ่ง 22 กิโลโวลต์.....	52
รูปที่ 4.12 ผลลัพธ์การทดสอบ ผลของ Grounded Bandage / Grounded Collar ต่อผลการทดสอบ PDC ของบุชชิ่ง 22 กิโลโวลต์.....	53
รูปที่ 4.13 เปรียบเทียบผล FDS ของ Voltage Bandage และ Grounded Bandage ของบุชชิ่ง 22 กิโลโวลต์ ตำแหน่งได้ครีบ 1 (ก) ค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริก (ข) ค่าความจุไฟฟ้าส่วนจริง.....	54
รูปที่ 4.14 เปรียบเทียบผล PDC ของ Voltage Bandage และ Grounded Bandage ของบุชชิ่ง 22 กิโลโวลต์ ตำแหน่งได้ครีบ 1	55
รูปที่ 4.15 เปรียบเทียบผล FDS ของ Voltage Bandage และ Grounded Bandage ของบุชชิ่ง 22 กิโลโวลต์ ตำแหน่งได้ครีบ 4 (ก) ค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริก (ข) ค่าความจุไฟฟ้าส่วนจริง.....	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.16 เปรียบเทียบผล PDC ของ Voltage Bandage และ Grounded Bandage ของบุงซึ่ง 22
กิโลโวลต์ ตำแหน่งได้ครีบ 4 56



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในระบบไฟฟ้ากำลัง ไม่ว่าจะประเทศไหนก็ตามก็จะมีอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงเข้ามาเป็นองค์ประกอบอยู่เสมอ ไม่ว่าจะเปลี่ยนไฟฟ้ากำลัง หม้อแปลงเครื่องมี้อัด สายเคเบิลไฟฟ้าใต้ดิน สายส่งไฟฟ้าเหนือดิน มอเตอร์ไฟฟ้า เครื่องกำเนิดไฟฟ้า อุปกรณ์ดักจับเสิร์จฟิวส์ คาปาซิเตอร์ แบงค์ ชันท์รีแอ็คเตอร์ ซึ่งการเบรกดาวน์ของอุปกรณ์เหล่านี้ส่งผลต่อการใช้ไฟฟ้าของชาวบ้านและอุตสาหกรรมต่างๆ โดยการเบรกดาวน์ของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงนั้นเกิดจากการที่ฉนวนไม่สามารถทนรับความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นได้นั่นเอง

หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ตัวหนึ่งที่สำคัญในระบบไฟฟ้าเนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าจากแรงดันไฟฟ้าค่าหนึ่งไปสู่แรงดันอีกค่าหนึ่ง โดยในระบบไฟฟ้าส่งจ่ายและจำหน่ายจะเป็นไฟฟ้าแรงดันสูงเพื่อลดขนาดของสายส่งแต่อุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าในบ้านเรือนจะเป็นแรงดันต่ำ ดังนั้นหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังจึงเป็นสิ่งจำเป็น

โดยในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังทุกตัวจะมีอุปกรณ์ที่เรียกว่า บุชชิ่ง หรือ ปลอกฉนวนนำสาย ซึ่งทำหน้าที่ในเชื่อมต่อสายไฟฟ้าจากภายนอกเข้าสู่ขดลวดในหม้อแปลงโดยที่สายไฟไม่ลงกราวด์ ดังนั้น บุชชิ่งจึงเป็นสิ่งจำเป็น การศึกษาพบว่าสิ่งแปลกปลอมของบุชชิ่ง เช่น ความชื้น การดิสชาร์จบางส่วนนั้นสามารถนำไปสู่ความเสียหายของบุชชิ่งได้โดยไม่รู้ตัว ในข้อมูลทางสถิติพบว่า 17.16% ของความล้มเหลวของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังเกิดจากผลสืบเนื่องจากความล้มเหลวของบุชชิ่ง [1] ความล้มเหลวของบุชชิ่งบริเวณส่วนนอกหม้อแปลงส่งผลต่ออุปกรณ์รอบข้างส่วนความล้มเหลวของบุชชิ่งบริเวณภายในหม้อแปลงส่งต่อองค์ประกอบภายในของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

เพื่อที่จะป้องกันความล้มเหลวของบุชชิ่ง จึงต้องมีวิธีในการวินิจฉัยสภาพฉนวนในสภาวะปัจจุบันว่ามีสิ่งผิดปกติหรือไม่ เพื่อที่จะสามารถวางแผนในการป้องกันผลกระทบร้ายแรงที่อาจเกิดขึ้นได้ วิธีในการวินิจฉัยฉนวนมีทั้งแบบออฟไลน์และออนไลน์ ซึ่งมีความสามารถในการวินิจฉัยแตกต่างกันไป

ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ศึกษาการวินิจฉัยฉนวนของบุชชิ่งโดยการวัดผลตอบสนองไดอิเล็กตริกในโดเมนเวลาโดยใช้เทคนิคการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน (Polarization and depolarization current measurement, PDC) และการวัดผลตอบสนองไดอิเล็กตริกในโดเมนความถี่โดยเทคนิคไดอิเล็กตริกสเปกโตรสโคปีในโดเมนความถี่ (Frequency domain spectroscopy, FDS) หรืออีกชื่อคือ การวัดผลตอบสนองไดอิเล็กตริก (Dielectric frequency response, DFR)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาระบบฉนวนของบุชชิง
2. เพื่อศึกษากลไกการเสื่อมสภาพและการล้มเหลวของบุชชิง
3. เพื่อศึกษาการประยุกต์ใช้การวัดผลตอบสนองไดอิเล็กตริกในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ของฉนวนบุชชิง
4. เพื่อจำลองผลของสภาพแวดล้อมต่อการทำงานของบุชชิง

1.3 ขอบเขตการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ศึกษาการประเมินสภาพฉนวนบุชชิงพิกัด 22 กิโลโวลต์ และ 115 กิโลโวลต์ ด้วยวิธีการวัดผลตอบสนองไดอิเล็กตริกในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ พร้อมกับการจำลองกระแสรั่วไหลที่สามารถเกิดขึ้นกับบุชชิงขณะใช้งานได้

1.4 สมมุติฐานของการศึกษา

การทดสอบฉนวนบุชชิง โดยการใช้เทคนิคการวัดผลตอบสนองไดอิเล็กตริกในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่นั้น สามารถนำไปใส่เพิ่มในแผนการบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง เพื่อประเมินสภาพฉนวนไฟฟ้าของบุชชิง เนื่องจากหากบุชชิงล้มเหลวแล้วจะส่งผลกระทบต่อความเสียหายของหม้อแปลงในลักษณะที่ไม่สามารถย้อนกลับได้

1.5 ขั้นตอนการศึกษา

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนการศึกษาในปีการศึกษา 2565

การดำเนินงาน	ภาคการศึกษาที่ 1, ปีการศึกษา 2565					ภาคการศึกษาที่ 2, ปีการศึกษา 2565				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1. ศึกษาหน้าที่ของบุชชิงและโครงสร้างบุชชิงแต่ละประเภท										
2. ศึกษากลไกความล้มเหลวที่เกิดขึ้นกับบุชชิง										
3. ค้นคว้าหาวิธีการประเมินสภาพฉนวนบุชชิง										

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เฉพาะเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การดำเนินงาน	ภาคการศึกษาที่ 1, ปีการศึกษา 2565					ภาคการศึกษาที่ 2, ปีการศึกษา 2565				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
4. เข้าร่วมและนำเสนอ งานประชุมวิชาการ CMD 2022 ณ Kitakyushu, ประเทศ ญี่ปุ่น พร้อมอบรม ทฤษฎีการวัดประจักษ์ ในเนื้อหา										
5. ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับ การวัดผลตอบสนองไดอิเล็กทริกในโดเมนเวลา										
6. ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับ การวัดผลตอบสนองไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่										
7. ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับ การดิสซาร์จบางส่วน										

ตารางที่ 2.2 ขั้นตอนการศึกษาในปีการศึกษา 2566

การดำเนินงาน	ภาคการศึกษาที่ 1, ปีการศึกษา 2566					ภาคการศึกษาที่ 2, ปีการศึกษา 2566					
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.
1. ทดสอบฉนวนบุชซึ่ง ด้วยเทคนิคการวัดผล ตอบสนองไดอิเล็กทริก ในโดเมนเวลา											
2. ทดสอบฉนวนบุชซึ่ง ด้วยเทคนิคการวัดผล ตอบสนองไดอิเล็กทริก ในโดเมนความถี่											

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การดำเนินงาน	ภาคการศึกษาที่ 1, ปีการศึกษา 2566					ภาคการศึกษาที่ 2, ปีการศึกษา 2566					
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.
3. วิเคราะห์ผลการทดสอบ											
4. ฝึกใช้โปรแกรม Comsol Multiphysic สำหรับจำลองสนามไฟฟ้าในบุงซึ่ง											
5. เตรียมข้อมูลและทยอยใส่ข้อมูลในรูปเล่มวิทยานิพนธ์											

ตารางที่ 3.3 ขั้นตอนการศึกษาในปีการศึกษา 2567

การดำเนินงาน	ภาคการศึกษาที่ 1, ปีการศึกษา 2567					ภาคการศึกษาที่ 2, ปีการศึกษา 2567				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1. เข้าร่วมและนำเสนอ งานประชุมวิชาการ ICPADM 2024 ณ ภูเก็ต , ประเทศไทย						-	-	-	-	-
2. จัดทำรูปเล่ม และตรวจสอบ วิทยานิพนธ์ให้เรียบร้อย						-	-	-	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับ การแบ่งประเภทของบุชชิง โครงสร้างพื้นฐานของ บุชชิง สถิติความเสียหายจากบุชชิง ค่าความจุไฟฟ้าของบุชชิง ค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริก การวัดผล ตอบสนองไดอิเล็กตริกในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ และ กระแสรั่วไหลที่ผิวของบุชชิง

2.1 ประเภทของบุชชิง

ประเภทของบุชชิงสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ตามวิธีในการควบคุมความเครียด สนามไฟฟ้า ได้แก่

1. บุชชิงแบบ Non-condenser
2. บุชชิงแบบ Condenser

2.1.1 บุชชิงแบบ Non-condenser

บุชชิงประเภทนี้มักนิยมใช้ในระบบแรงดันต่ำถึงแรงดันปานกลาง เช่น 6.6 กิโลโวลต์ 3.3 กิโลโวลต์ 690 โวลต์ 500 โวลต์ และ 380 โวลต์

โครงสร้างของบุชชิงแบบ Non-condenser นั้นประกอบไปด้วย ตัวนำล้อมรอบไปด้วยฉนวน ทรงกระบอกตัน ซึ่งทำจากพอร์ซเลน แก้ว เรซินหล่อ กระจก หรืออื่นๆ โดยความหนาตามแนวรัศมี (a) ถูกกำหนดโดยความคงทนความเครียดสนามไฟฟ้าของฉนวน ระยะห่างตามแนวแกนระหว่างสัคกี สูงกับสัคกีต่ำ (b) ถูกกำหนดโดยความคงทนความเครียดสนามไฟฟ้าของอากาศโดยรอบ ดังรูปที่ 2.1

จากรูปที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าการกระจายตัวของค่าความเครียดสนามไฟฟ้าไม่ได้เป็นเส้นตรงทั้ง ตามแนวรัศมีหรือตามผิวบุชชิง ความเครียดสนามไฟฟ้าตามแนวรัศมีที่มากเกินไปอาจทำให้เกิด ดิสชาร์จบางส่วนในเนื้อฉนวนซึ่งอาจนำไปสู่การเจาะทะลุที่เนื้อฉนวนได้ ส่วนความเครียดสนามไฟฟ้า ตามผิวบุชชิงที่สูงเกินไปจะนำไปสู่การวาบไฟตามผิวได้ จากโครงสร้างนี้จะเห็นได้ว่ายังมีพิกัดแรงดันสูง มากขึ้นเท่าไรระยะห่างต่างๆ ของบุชชิงก็จะมากขึ้นเช่นกัน

2.1.2 บุชชิงแบบ Condenser

บุชชิงที่พิกัดแรงดันสูงกว่า 52 กิโลโวลต์ เช่น 115 กิโลโวลต์ 230 กิโลโวลต์ และ 500 กิโลโวลต์ โดยทั่วไปจะใช้หลักการเกลี่ยสนามไฟฟ้าโดยใช้ตัวเก็บประจุย่อย ซึ่งเราเรียกบุชชิงประเภทนี้ว่า บุชชิงแบบ Condenser หรือแบบ Capacitance-graded ซึ่งจะประกอบไปด้วย ตัวนำล้อมรอบไปด้วยฉนวนซึ่งทำจากกระจกพันสลับกับชั้นตัวนำคล้ายกับตัวเก็บประจุย่อยหลายตัวต่ออนุกรมกัน ระหว่างตัวนำกับกราวด์แล้วชุบด้วยฉนวนเหลว เช่น น้ำมัน เรซินเหลว หรืออื่นๆ ดังรูปที่ 2.2 เช่นเดียวกับบุชชิงแบบ Non-condenser ความหนาตามแนวรัศมี (a) ถูกกำหนดโดยความคงทน

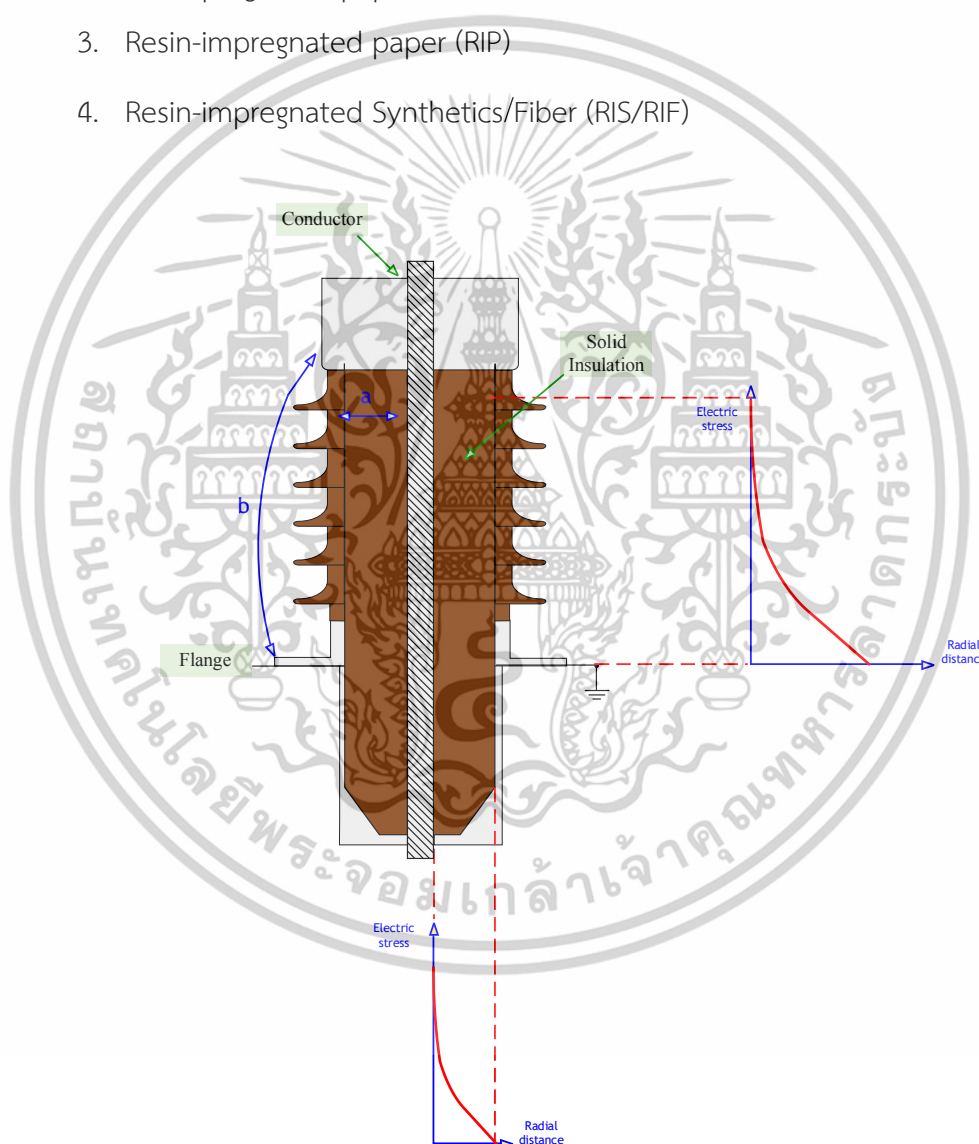
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเครียดสนามไฟฟ้าของฉนวน ระยะห่างตามแนวแกนระหว่างสักร์สูงกับสักร์ต่ำ (b) ถูกกำหนด โดยความคงทนความเครียดสนามไฟฟ้าของอากาศโดยรอบ

โดยเส้นผ่านศูนย์กลางกับความยาวของแต่ละชั้นตัวนำถูกออกแบบมาเพื่อให้ตัวเก็บประจุ ย่อยเกลี่ยความเครียดสนามไฟฟ้าตามแนวรัศมีกับแนวแกนให้มีความสม่ำเสมอมากกว่าแบบ Condenser ตามรูปที่ 2.3

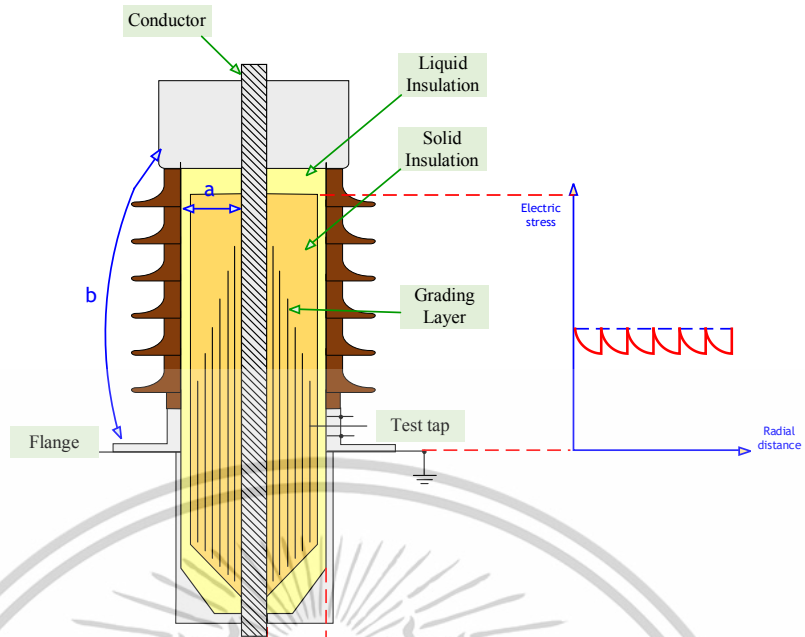
บุชชิ่งแบบ Condenser นั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภทตามวัสดุที่ใช้เป็นฉนวน

1. Resin-bonded paper (RBP)
2. Oil-impregnated paper (OIP)
3. Resin-impregnated paper (RIP)
4. Resin-impregnated Synthetics/Fiber (RIS/RIF)

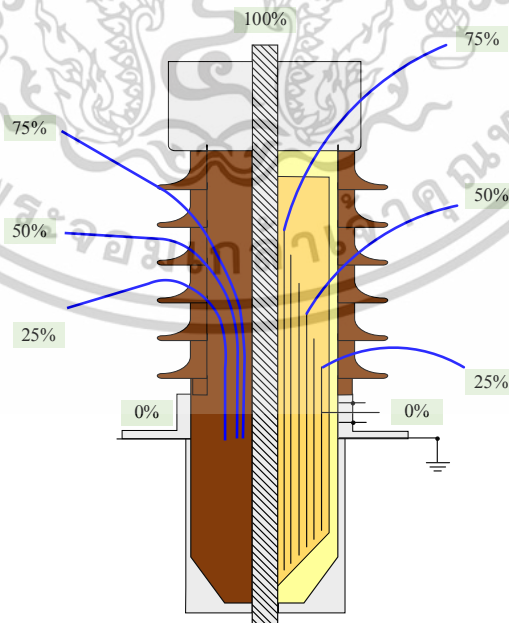


รูปที่ 2.1 บุชชิ่งแบบ Non-condensor [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 บุชชิงแบบ Condensor [2]



รูปที่ 2.3 เปรียบเทียบการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าในบุชชิงแบบ Condensor และ Non-condensor [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2.1 Resin-bonded paper (RBP)

ฉนวนของบุชชิงแบบ Resin-bonded paper (RBP) ประกอบไปด้วย กระจกเคลือบด้วยฟิโนริค เรซิน หรือ อีพ็อกซี เรซิน จากนั้นนำมาพันรอบตัวนำเป็นรูปทรงประบอกภายใต้ความร้อนและความดันค่าหนึ่ง เพื่อให้เรซินยึดติดกับกระจกและมีการนำชั้นตัวนำเข้าไปแทรกเป็นช่วงๆ เพื่อสร้างตัวเก็บประจุย่อย จากโครงสร้างพื้นฐานที่เป็นลามิเนตของกระจกและเรซินนี้ ทำให้อนวนของบุชชิง RBP จะมีอากาศกระจายตัวปริมาณมากกว่าระหว่างเส้นใยกระจกและที่ปลายของชั้นตัวนำที่แทรกเข้าไป โดยบุชชิง RBP จะมีถูกออกแบบให้สามารถรับความเครียดสนามไฟฟ้าแนวรัศมีประมาณ 20 กิโลโวลต์/เซนติเมตร

ถ้าหากบุชชิง RBP ได้รับแรงดันไฟฟ้าสูงมากกว่าแรงดันเริ่มเกิดดิสชาร์จบางส่วน จะทำให้เกิดดิสชาร์จบางส่วนขึ้นบริเวณปลายของชั้นตัวนำซึ่งโดยปกติมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่าความเครียดสนามไฟฟ้าตามแนวรัศมีระหว่างชั้นตัวนำ ซึ่งการดิสชาร์จนี้ทำให้เกิดต้นไม้คาร์บอนขยายตัวตามแนวแกนนำไปสู่ฟอลต์ภายในได้

กระบวนการผลิตที่ไม่สมบูรณ์ หรือผลของความร้อนหรือแรงทางกลจากการใช้งานอาจนำไปสู่การแตกตามเส้นรอบวงตามรูปที่ 2.4 ซึ่งเกิดจากการหดตัวหรือการบวมตัวของฉนวนที่อ่อนแอ นำไปสู่การเกิดช่องว่างอากาศในเนื้อฉนวนและทำให้เกิดการดิสชาร์จบางส่วนขึ้นแม้จะเป็นระดับแรงดันใช้งานก็ตาม ซึ่งการดิสชาร์จนี้จะนำไปสู่การเบรกดาว์นระหว่างชั้นตัวนำ

ในระหว่างการใช้งานถ้ามีความชื้นเข้าไปในบุชชิงจะทำให้เกิดการแยกชั้นของฉนวนหรือ Delamination และทำให้ค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริกสูงขึ้นและไม่นิ่ง

การเกิดแรงดันเกินในสภาวะใช้งานจากเสิร์ชฟ้าผ่าหรือเสิร์ชสวิตชิง นำไปสู่การเบรกดาว์นตามแนวแกนได้โดยเริ่มต้นจากการเบรกดาว์นของอากาศบริเวณปลายของชั้นตัวนำนั่นเอง



รูปที่ 2.4 การแตกตามเส้นรอบวงของฉนวนบุชชิง RBP [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 ข้อดีข้อเสียของบุชชิงประเภท RBP [4]

Advantages	Disadvantages
<ul style="list-style-type: none"> - Non-flammable core - Bushing failure is less likely to release main tank oil - Relatively low costs - No constraints of positioning during transportation, handling and storage 	<ul style="list-style-type: none"> - Generally higher levels of PD – can be used typically up to 400 kV - Aging experience varies - Constraints of handling and storage - The core is affected by water ingress if incorrectly stored - Oil end of busing is susceptible to transport damage

2.1.2.2 Oil-impregnated paper (OIP)

ฉนวนของบุชชิงแบบ Oil-impregnated paper (OIP) ประกอบไปด้วย กระดาษคราฟท์พันรอบตัวนำเป็นทรงกระบอกและมีการนำชั้นตัวนำทำจาก Aluminum foil เข้าไปแทรกเป็นช่วงๆ เพื่อสร้างตัวเก็บประจุย่อย จากนั้นนำไปอบให้แห้งแบบสุญญากาศ แล้วนำไปอิมเพกเนตกับน้ำมันหม้อแปลงซึ่งส่วนใหญ่คือ mineral oil สำหรับแรงดัน Ultra high-voltage ความกว้างของกระดาษที่มีอยู่ไม่เพียงพอที่จะนำมาพันแบบปกติ จึงต้องมีวิธีพิเศษในการขยายขนาด เช่น ใช้หลายชั้น หรือ การพันกระดาษแบบเทป เพื่อให้กระดาษมีการเหลื่อมกัน หรือ Overlapping ซึ่งถ้าเกิดการหลวมจะทำให้ชั้นตัวนำมีโอกาสน้อยเกินไปกลายเป็นจุดอ่อนของบุชชิงประเภทนี้ ดังรูปที่ 2.5

ในกรณีที่กระบวนการผลิตบุชชิง OIP เป็นไปอย่างปกติ จะไม่มีมีเลกุลแก๊สอยู่ในฉนวนเลย ดังนั้นความเครียดสนามไฟฟ้าที่ทำให้เริ่มเกิดการดีสชาร์จบางส่วนจึงสูงกว่าของบุชชิง RBP โดยบุชชิง OIP จะมีถูกออกแบบให้สามารถรับความเครียดสนามไฟฟ้าแนวรัศมีประมาณ 45 กิโลโวลต์/เซนติเมตร

การดีสชาร์จสามารถเกิดขึ้นได้ที่ปลายของชั้นตัวนำเนื่องจาก misalignment ของชั้นตัวนำ และอยู่ภายใต้ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงจากฟ้าผ่าหรือแรงดันทดสอบความถี่กำลัง ถ้าหากได้รับความเครียดแบบนี้บ่อยๆ จะทำให้เกิดก๊าซในน้ำมันและกระดาษจะแห้งและสุดท้ายทำให้เกิดคราบคาร์บอนที่ปลายของชั้นตัวนำและมีแนวโน้มขยายตัวไปในแนวรัศมี นำไปสู่การเบรกดาวน

ฉนวนกระดาษของบุชชิง OIP จะเสื่อมสภาพมากเมื่ออยู่ภายใต้อุณหภูมิสูงและเมื่อฉนวนกระดาษเสื่อมสภาพค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริกและพาวเวอร์แฟคเตอร์ก็จะสูงขึ้น และทำให้เกิดน้ำขึ้นและทำให้ยิ่งเสื่อมสภาพมากยิ่งขึ้น

บุชชิงแบบ OIP ที่มีฉนวนพอร์ซเลนหุ้มจำเป็นต้องเก็บรักษาที่มุมมองค่าเสียหายหนึ่งเนื่องจากมีน้ำมันหุ้มตัวคอนเดนเซอร์ตลอดเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 ความเสียหายตามแนวแกนของบุชชิง OIP เนื่องจากการเคลื่อนตัวของชั้นตัวนำ [5]

ตารางที่ 2.2 ข้อดีข้อเสียของบุชชิงประเภท OIP [4]

Advantages	Disadvantages
<ul style="list-style-type: none"> - Very long history with relatively good performances - Very low partial discharge - can be used at any voltage level - Relatively low costs - Minimal handling and storage requirements - DGA diagnostics are possible 	<ul style="list-style-type: none"> - Vulnerable to insulation oil leaks and water ingress if the gasket/sealing system is compromised - Higher risk of bushing explosion and resultant transformer fire - Positioning angle during transportation, handling, and storage

2.1.2.3 Resin-impregnated Paper (RIP)

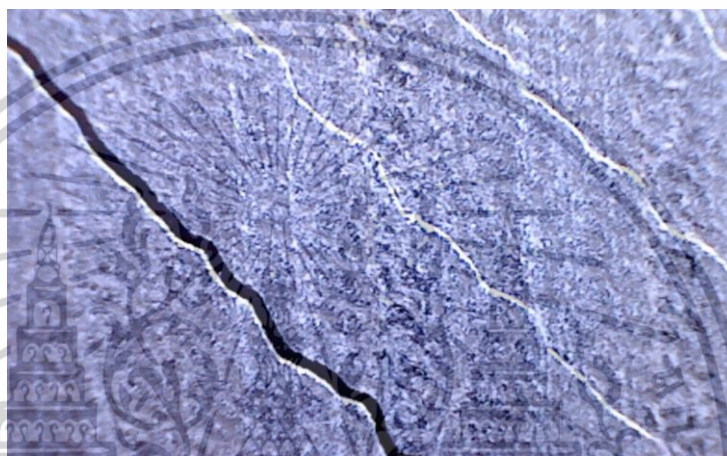
ฉนวนของบุชชิง RIP ถูกพัฒนาขึ้นมาในปีค.ศ. 1960 ประกอบไปด้วย กระดาษย่นพันรอบตัวนำเป็นทรงกระบอกและมีการนำชั้นตัวนำทำจาก Aluminum foil เข้าไปแทรกเป็นช่วงๆ เพื่อสร้างตัวเก็บประจุย่อย จากนั้นนำไปอบให้แห้งแบบสุญญากาศ แล้วนำไปอิมเพกเนตกับ อีพ็อกซีเรซิน ในระหว่างการ curing ของ อีพ็อกซีเรซิน ต้องมีการควบคุมการหดตัวเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดรอยแตกเนื่องจากความเครียดภายใน ดังรูปที่ 2.6 นอกจากนี้รอยแตกยังสามารถเกิดขึ้นได้จากผิว Aluminum foil ที่ไม่เรียบ ผลลัพธ์สุดท้ายที่ได้คือ ฉนวนแห้ง ไม่มีแก๊สกับช่องว่างอากาศ ซึ่งทำให้มีความสูญเสียไดอิเล็กตริกต่ำ และมีการดิสชาร์จบางส่วนน้อย

ในระหว่างการใส่ชั้นตัวนำ ชั้นตัวนำจะมีรูปร่างตามรอยย่นของกระดาษ ดังนั้นระยะห่างระหว่างชั้นตัวนำจะหยากกว่าแบบ RBP และ OIP จึงอาจทำให้เกิดการเบรกดาวนบางส่วนระหว่างชั้นตัวนำได้ ซึ่งสังเกตได้จากค่าพาวเวอร์แฟกเตอร์ที่ลดลงขณะเพิ่มแรงดันทดสอบ ดังนั้นข้อดีในเรื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความคงทนความเครียดสนามไฟฟ้าที่สูงกว่าของ อีพ็อกซี เรซิน อาจไม่เด่นมากนัก โดยบุชชิ่ง RIP จะมีถูกออกแบบให้สามารถรับความเครียดสนามไฟฟ้าแนวรัศมีประมาณ 36 กิโลโวลต์/เซนติเมตร

ถ้าหากบุชชิ่ง RIP อยู่ภายใต้อุณหภูมิสูงจะทำให้เกิดการแยกชั้นขึ้น เนื่องจากถ้าอุณหภูมิของเรซินเกินอุณหภูมิ Glass transition เรซินจะมีองค์ประกอบทางเคมีเปลี่ยนไปและหลังจากเย็นตัวแล้วมันจะไม่กลับมาเป็นเรซินปกติ ซึ่งทำให้เกิดช่องว่างอากาศ รอยแตก นำไปสู่การดิสชาร์จบางส่วนและ/หรือ เบรกดาวน์ได้ โดยที่ถ้าการดิสชาร์จบางส่วนเกิดขึ้นในบุชชิ่ง RIP แล้วมันจะไม่หยุดเนื่องจากไม่มีความสามารถในการฟื้นฟูเหมือนบุชชิ่ง OIP



รูปที่ 2.6 การแตกตามเส้นรอบวงของฉนวนบุชชิ่ง RIP [5]

ตารางที่ 2.3 ข้อดีข้อเสียของบุชชิ่งประเภท RIP [4]

Advantages	Disadvantages
<ul style="list-style-type: none"> - Non-flammable core - Bushing failure is less likely to release main tank oil - The core is less likely to be affected by water ingress - Very low partial discharge levels – can be used at any voltage level - No constraints on the attitude of the bushing during transportation, handling and storage 	<ul style="list-style-type: none"> - Relatively higher costs - Constraints on handling and storage - The oil end of the body must be protected from moisture during storage - Oil end of the bushing is susceptible to transport damage

2.1.2.4 Resin-impregnated Synthetics/Fiber (RIS/RIF)

บุชชิ่งแบบ RIS หรือ RIF เป็นเทคโนโลยีล่าสุดและมีความคล้ายคลึงกับบุชชิ่งแบบ RIP แต่จะมีการใช้ Synthetic mesh แทนการใช้กระดาษย่นเพื่อให้เรซินสามารถแทรกซึมเข้ามาได้จนไม่มีช่องว่างอากาศในเนื้อฉนวนและไม่มีการดิสชาร์จบางส่วน การใช้ synthetic จะช่วยตอบโจทย์เรื่องเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

การเก็บบุชชิงแบบ RIP เนื่องจากตัว synthetic ไม่มีปัญหาเนื่องจากความชื้นเพราะตัวคอนเดนเซอร์ ถูกปกคลุมไปด้วย อีพ็อกซี เรซิน

ณ ปัจจุบัน เทคโนโลยี RIS ใช้อยู่ที่แรงดัน 25 กิโลโวลต์ ถึง 170 กิโลโวลต์ บุชชิงแบบ RIS ไม่มีฉนวนหุ้มด้านล่างส่วนฉนวนหุ้มด้านบนจะใช้วัสดุซิลิโคน

การจัดเก็บบุชชิงแบบ RIS คล้ายกับบุชชิงแบบ OIP ยกเว้นแต่ไม่ต้องมีมุมการเก็บรักษาเหมือนบุชชิงแบบ OIP สามารถเก็บได้ในทุกมุมมอง

ตารางที่ 2.4 ข้อดีข้อเสียของบุชชิงประเภท RIS/RIF [4]

Advantages	Disadvantages
<ul style="list-style-type: none"> - Void free and partial discharge free - Non-flammable core - Bushing failure is less likely to release main tank oil - The core is less likely to be affected by water ingress - No constraints on the attitude of the bushing during transportation, handling and storage - No constraint on storage 	<ul style="list-style-type: none"> - Relatively higher costs - Constraints on handling - Oil end of the bushing is susceptible to transport damage

จากข้อมูลเกี่ยวกับบุชชิงแบบ Condenser ทั้ง 4 ประเภทที่กล่าวมาข้างต้นสามารถสรุปตารางเปรียบเทียบออกมาได้ตามตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติพื้นฐานของบุชชิง Condenser [5]

	RBP	OIP	RIP and RIS
Design description			
Upper (air) envelope	Porcelain	Porcelain/Composite	Porcelain/Composite/Silicone
Intermediate filler	Oil or viscous liquid	Oil	Oil/dry foam/none
Lower (oil) envelope	None (RBP body)	Resin/Porcelain	None (RIP/RIS body)
Basic properties			
PD, pC	<= 100/250	<= 5/10	<= 5/10
PD regeneration	PD always exist	Yes	No
$\tan \delta$	Approx. 0.5%	Approx. 0.3%	Approx. 0.4%
Capacitance behavior	Increasing (Oil penetration)	Stable (Good condition)	Stable (Good condition)
Temperature limits	120 °C (Class E)	105 °C (Class A)	120 °C (Class E)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	RBP	OIP	RIP and RIS
Overload behavior	Well known	Well known	Resin decuring problem
Oil leaks	Yes (oil filled)	Yes	Yes (oil filled)
Resistance to outer flashover	Porcelain rupture	Porcelain rupture	No rupture
Collapse after internal breakdown	Rarely collapse	Often collapse	No collapse
Debris in transformer after internal breakdown	Yes	Yes	Yes (small amount)
Storage problems	Humidity absorption, cracking problems	De-impregnation	Humidity absorption (RIP)
Transformer fire resistance	Medium	Poor to Medium	Good
Earthquake resistance	Medium to Good	Poor to Medium	Good
Resistance to vandalism	Medium	Poor	Good
Service with broken upper envelope	Yes (limited time, dry version)	No	Yes (limited time, dry version)

2.2 สถิติความเสียหายจากบุชชิ่ง

จากข้อมูลของ Cigre WG A2.37 [1] ซึ่งรวบรวมข้อมูลความเสียหายใหญ่ๆ ของหม้อแปลงเป็นจำนวน 964 เคส จากประชากรหม้อแปลง 167.459 ต่อปี ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1996 ถึง ค.ศ. 2010 จะได้ข้อเท็จจริงเกี่ยวกับบุชชิ่งดังนี้

- บุชชิ่งคิดเป็น 14.4% ของสาเหตุที่ทำให้หม้อแปลงเสียหายเมื่อคำนึงถึงทุกระดับแรงดัน
- บุชชิ่งคิดเป็น 17.2% ของสาเหตุที่ทำให้สถานีไฟฟ้าเสียหาย และคิดเป็น 14.2% ของสาเหตุที่ทำให้หม้อแปลง GSU (Generator Step up Unit) เสียหาย เมื่อคำนึงถึงระดับแรงดันมากกว่า 100 กิโลโวลต์
- เมื่อพิจารณาความเสียหายของหม้อแปลงจากอุปกรณ์ของหม้อแปลง บุชชิ่งจะอยู่อันดับที่ 3 ตามหลังขดลวด (47.4%) และ Tap changer (23.2%) และอยู่ก่อนหน้าจุดต่อสาย (6.3%) และ แกนเหล็ก/วงจรมแม่เหล็ก (3.8%)
- อัตราความเสียหายของบุชชิ่งเพิ่มขึ้นตามระดับแรงดันยกเว้น ระดับแรงดันมากกว่า 700 กิโลโวลต์ ดังนี้ ระดับ 69-100 กิโลโวลต์ 0 % ระดับ 100-200 กิโลโวลต์ 13 % ระดับ 200-300

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิโลโวลต์ 16.6 % ระดับ 300-500 กิโลโวลต์ 21.9 % ระดับ 500-700 กิโลโวลต์ 28.7 %
ระดับ ≥ 700 กิโลโวลต์ 9.1 %

- เมื่อพิจารณาความเสียหายของหม้อแปลงจากอายุของหม้อแปลง หม้อแปลงที่ผลิตก่อนปี ค.ศ. 1980 ความเสียหายที่เกิดจากบุชชิงคิดเป็น 15.9% หม้อแปลงที่ผลิตหลังปี ค.ศ. 1980 ความเสียหายที่เกิดจากบุชชิงคิดเป็น 18.1%
- ความเสียหายของหม้อแปลงซึ่งเกิดเพลิงไหม้ และ/หรือ การระเบิด จากการที่บุชชิงเสียหาย คิดเป็น 37.8% (บุชชิง HV 30.6%, บุชชิง MV 5.6% และบุชชิง LV 1.6%)
- ความเสียหายที่เกิดจากบุชชิงทั้งหมด มี 47% ทำให้เกิดกระทบตามมา เช่น เพลิงไหม้ 30.4% ระเบิด 10.4% น้ำมันรั่ว 5.2% และความเสียหายทางอ้อม 0.9%

จึงสามารถสรุปได้ว่า บุชชิงส่งผลกระทบต่อความน่าเชื่อถือของหม้อแปลง ความเสียหายของหม้อแปลงส่วนใหญ่ส่งผลกระทบต่อหม้อแปลง เช่น เพลิงไหม้ ระเบิด และความเสียหายทางอ้อมต่างๆ ซึ่งปัญหาต่างๆของบุชชิงซึ่งนำมาซึ่งความเสียหายของหม้อแปลง แสดงดัง ตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ปัญหาที่สามารถเกิดขึ้นได้สำหรับบุชชิงแต่ละประเภท [6]

Problem	Bushing type				
	OIP	RBP	RIP	RIS	RIF
Oil leakages, low oil level	✓				
Increased contact resistance	✓	✓	✓	✓	✓
Overheating	✓	✓	✓	✓	✓
Partial discharges	✓	✓		✓	✓
Insulation breakdown between layer	✓	✓	✓	✓	✓
Cracking		✓			
Defects at the measurement tap	✓	✓	✓	✓	✓
Moisture ingress	✓	✓	✓		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 เทคนิคการประเมินสภาพฉนวน

วิธีในการวินิจฉัยสถานะของบุชชิงแบบ On-site (periodic และ continuous) ต่างๆ ดังตารางที่ 2.7 นั้นมีความสามารถในการวินิจฉัยเพื่อตรวจจับพัฒนาการของกลไกความเสียหายบางอย่างแตกต่างกัน ความสามารถหรือประสิทธิภาพในการวินิจฉัยของแต่ละวิธีถูกแสดงในตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.7 วิธีในการวินิจฉัยสถานะของบุชชิงแบบ On-site [5]

Diagnostic methods	Periodic (off-line)	Continuous (on-line)
Visual inspection	Yes	Yes
Capacitance	Yes	Yes
$\tan \delta$ or PF (50/60 Hz)	Yes	Yes
FDS, PDC, RVM and Rins	Yes	No
Winding resistance	Yes	No
Infrared scanning	Yes	Yes
PD measurement	Yes	Yes
DGA	Yes	Yes
Moisture in oil	Yes	Yes
Creepage current	No	Yes
Oil pressure	No	Yes
Transients	No	Yes

ตารางที่ 2.8 ประสิทธิภาพของวิธีในการวินิจฉัยสำหรับกลไกความเสียหายต่างๆ [5]

Failure mechanisms	Periodic (off-line) diagnostic methods and effectiveness	Continuous (on-line) diagnostic methods and effectiveness
Mechanical		
Seismic disturbance	VI (H to M)	Oil pressure (H)
Vandalism	VI (M to L)	Oil pressure (H to M), C (L)
Rigid connection to bushing	VI (H), $\tan \delta$ (M), C (L)	C (M), $\tan \delta$ (L), Oil pressure (M to L)
Electrodynamic forces on bushing transformer part	VI (M)	-
Thermal		
Gas bubble evolution	PD (M), AE (H to M)	PD (H to M), AE (H to M)
Current path and contacts	IR (H), VI (M), $\tan \delta$ (M to L), WR (L)	IR (H), C (M), $\tan \delta$ (M to L)
Electric and dielectric		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Failure mechanisms	Periodic (off-line) diagnostic methods and effectiveness	Continuous (on-line) diagnostic methods and effectiveness
Core cracking or delamination	C (H), PD (M), AE (H to M), <i>tan δ</i> (L)	C (H), PD (H to M), AE (H to M)
Electrode ends problems	<i>tan δ</i> (H to M), PD (M), AE (M)	<i>tan δ</i> (M), PD, AE (H to M)
Zig Zag condenser bushings	<i>tan δ</i> (H to M), PD (M), AE (M)	<i>tan δ</i> (M), PD (H to M), AE (M)
Test tap problems	<i>tan δ</i> (H to M), C (H to M), VI (M)	<i>tan δ</i> (M), C (H)
Bushing end shield problems	PD (M to L), AE (H to M)	PD (M), AE (H to M)
VFT problems	PD, AE (M), <i>tan δ</i> (L), C (L), DGA (M)	PD (M), AE (H to M), C (H to M)
Chemical, pollutant and environmental		
Poor sealing (moisture ingress)	<i>tan δ</i> (H), VI (L)	<i>tan δ</i> (M), Oil pressure (H)
Internal moisture generation	<i>tan δ</i> (L), <i>tan δ</i> 2 (H to M)	<i>tan δ</i> (L), PD (L), AE (L)
Corrosive sulphur in OIP bushings	Oil properties (M)	PD (L), AE (L)
Small animal problems	VI (H)	-
Pollutant and environmental	VI (H to M), <i>tan δ</i> (M)	CC (H to M)

สัญลักษณ์แสดงประสิทธิภาพของวิธีวินิจฉัย

H – high: วิธีนี้ไวต่อปรากฏการณ์ดังกล่าว

M – medium: วิธีนี้ค่อนข้างไวต่อปรากฏการณ์ดังกล่าว

L – low: ผลลัพธ์ใช้การได้แต่ส่วนใหญ่ไม่สามารถใช้สรุปได้ ต้องมีการใช้วิธีอื่นเสริมเพิ่มเพื่อยืนยันสมมุติฐาน

สัญลักษณ์แสดงวิธีวินิจฉัย

- C และ *tan δ*: ถูกใช้สำหรับค่าความจุไฟฟ้าของบุชชิ่ง HV C1 และ *tan δ*1 (หรือ PF) ส่วน C2

และ *tan δ*2 ถูกใช้สำหรับตัวแปรระหว่าง Tap และ flange

- VI: Visual inspection การสังเกตโดยรอบ

- IR: Infrared scanning การใช้กล้องรังสีอินฟราเรด

- PD: การวัด Partial discharge

- AE: การระบุความแรงและตำแหน่งของ PD location โดยใช้วิธี acoustic emission

- CC: creepage current กระแสรั่วไหล

- DGA: dissolved gas analysis สำหรับบุชชิ่ง OIP

- Oil properties; Oil pressure สำหรับบุชชิ่ง OIP

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 ความจุไฟฟ้าและความสูญเสียไดอิเล็กตริกของบุชชิ่ง Condensator

จากรูปที่ 2.7 ซึ่งแสดงองค์ประกอบของบุชชิ่งแบบ Condensator เราสามารถวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ 2 ตัวของบุชชิ่ง C1 และ C2 และค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริกของตัวเก็บประจุ ทั้ง 2 $\tan \delta_1$ และ $\tan \delta_2$ ได้ โดยที่ C1 คือค่าความจุไฟฟ้าแรงดันสูงระหว่างจุดต่อทางด้านแรงสูง กับ measuring tap ซึ่งประกอบไปด้วยตัวเก็บประจួយ่อยต่ออนุกรมกัน ส่วน C2 คือ ค่าความจุไฟฟ้าแรงดันต่ำระหว่าง measuring tap กับ flange ที่ต่อลงดินและจุดอื่นที่ต่อลงดิน ค่าความจุไฟฟ้า C2 ไม่สามารถวัดได้ขณะหม้อแปลงใช้งานอยู่ ในขณะที่ C1 สามารถวัดได้ขณะหม้อแปลงใช้งานอยู่หรือไม่ใช้งานอยู่ก็ได้ [3, 5, 7]

โดยอุดมคติแล้ว ตัวเก็บประจุจะไม่มี ความสูญเสียไดอิเล็กตริก เวกเตอร์กระแสจะนำเวกเตอร์แรงดัน 90° แต่ในทางปฏิบัติ ฉนวนที่ใช้งานจะมีความสูญเสียไดอิเล็กตริก ดังนั้นมุมจะน้อยกว่า 90° สำหรับที่ความถี่ใดความถี่หนึ่ง ฉนวนสามารถแทนได้ด้วยตัวเก็บประจุที่ไม่มี ความสูญเสียขนานกับตัวต้านทานที่แสดงถึงความสูญเสียในระบบฉนวน ดังรูปที่ 2.8 [8]

สมการของค่า $\tan \delta$ และ Power factor สามารถพิสูจน์ได้จากวงจรสมมูลอย่างง่าย ดังรูป 2.8 ซึ่งได้สมการต่อไปนี้

$$\text{Dissipation Factor} = \tan \delta = \frac{I_R}{I_C}$$

$$\text{Power Factor} = \cos \phi = \frac{I_R}{I_{\text{Test}}}$$

ในวงจรสมมูล ค่าความจุไฟฟ้าในสุญญากาศและการไหลไรเซชันทั้งหมดถูกแทนด้วยตัวเก็บประจุหนึ่งตัว ส่วนความสูญเสียจากการไหลไรเซชันและความสูญเสียเนื่องจากความนำไฟฟ้าถูกแทนด้วยตัวต้านทานหนึ่งตัว วงจรสมมูลที่มีตัวเก็บประจุและตัวต้านทานนี้อธิบายถึงพฤติกรรมของฉนวนที่ความถี่เดียว โดยปกติถ้าทดสอบที่ความถี่แตกต่างกันจะได้ค่าของตัวเก็บประจุและตัวต้านทานแตกต่างกัน

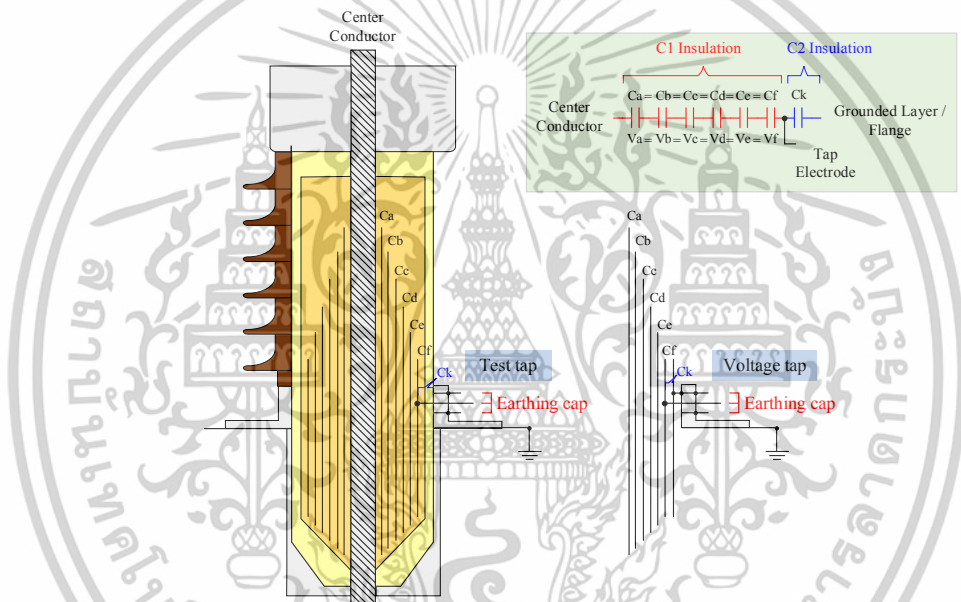
C1 และ $\tan \delta_1$ ถูกใช้สำหรับการวินิจฉัยฉนวนของบุชชิ่งแบบ condensator การเพิ่มขึ้นของ C1 บ่งบอกถึงการเบรกดาวนระหว่างชั้นตัวนำของบุชชิ่ง และการเพิ่มขึ้นของ $\tan \delta_1$ บ่งบอกถึงความสูญเสียที่มากขึ้นของระบบฉนวน ซึ่งส่วนใหญ่เกิดจากสิ่งปนเปื้อน ความชื้น หรือการเสื่อมสภาพจากการใช้งาน

C2 และ $\tan \delta_2$ นั้นมีค่าไม่คงที่ในระหว่างใช้งานเทียบกับ C1 และ $\tan \delta_1$ และค่าของ C2 และ $\tan \delta_2$ นั้นขึ้นอยู่กับการดีไซน์ของบุชชิ่งและหม้อแปลง [9] หรือก็คือค่า C2 คือค่าความจุไฟฟ้าที่มาจากสิ่งใดก็ตามที่อยู่ระหว่างชั้นตัวนำนอกสุดของ C1 และจุดที่ต่อลงกราวด์ในบริเวณนั้นนั่นเอง เช่น flange หม้อแปลงกระแส ซึ่ง C2 และ $\tan \delta_2$ แทบจะไม่ได้ให้ข้อมูลที่มามีประโยชน์ในการวินิจฉัยฉนวนของบุชชิ่ง

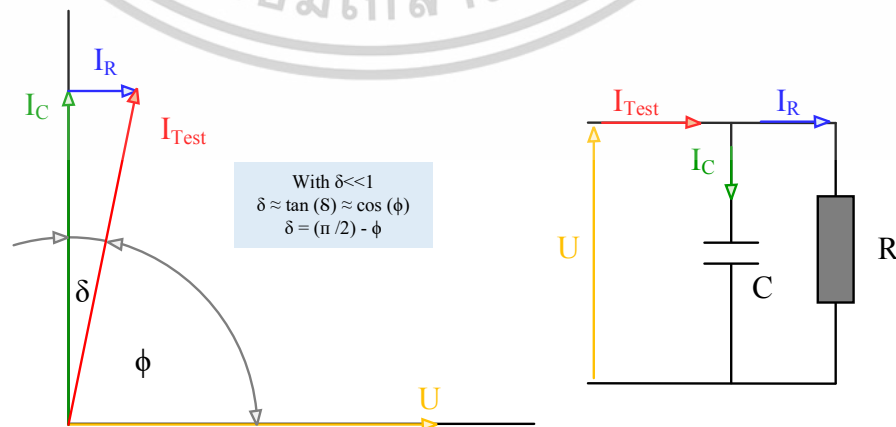
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวัด $\tan \delta$ นั้นมีความไวต่อสิ่งรบกวนภายนอกมากเทียบกับการวัดค่าความจุไฟฟ้า เนื่องจากมุมของ δ มีค่าน้อยมาก สำหรับ $\tan \delta = 0.5\%$ มุม δ มีค่าน้อยกว่า 0.3° ดังนั้นแม้มีสิ่งรบกวนมุม δ เล็กน้อย ซึ่งสามารถเกิดจากความสูญเสียจากบริเวณโดยรอบ จะส่งผลต่อผลลัพธ์อย่างมีนัยยะสำคัญ เช่น ในกรณีที่มีวัตถุแปลกปลอมบนผิวในหรือผิวนอกของสิ่งห่อหุ้มทั้งด้านบนหรือด้านล่าง ค่า $\tan \delta$ อาจมีค่าติดลบได้ [10] หรือถ้าวัด $\tan \delta$ ในกล่องไม้ ความสูญเสียไดอิเล็กตริกของกล่องไม้จะถูกรวมเข้าไปด้วย ดังนั้นผิวของบุชชิงต้องมีความแห้งและสะอาด และไม่ควรทดสอบในสภาพอากาศเปียกชื้น เนื่องจากสิ่งแปลกปลอมที่ผิวจะทำให้ค่า $\tan \delta$ มีความผิดพลาดได้ นอกจากนั้นการทดสอบ On-site อาจถูกรบกวนจากการคัปปลิงจากสายไฟรอบข้างที่มีไฟจ่ายอยู่

ดังที่กล่าวมา การซ้อตกันของตัวเก็บประจุย่อยทำให้ค่าความจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้น แต่ถ้าเกิดมีการลดลงของค่าความจุไฟฟ้าแสดงว่าเกิดจากหน้าสัมผัสที่ไม่แนบสนิทที่ Test tap



รูปที่ 2.7 องค์ประกอบของบุชชิง Condenser แบบมี Test tap และ Voltage tap (ซ้าย: บุชชิงแบบมี test tap, ขวา: บุชชิงแบบมี Voltage tap) [5, 8]



รูปที่ 2.8 วงจรสมมูลอย่างง่ายของบุชชิง Condenser ที่ความถี่เดียว [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.1 ความจุไฟฟ้าของบุชชิ่งแบบ Condenser

ค่าความจุไฟฟ้าของบุชชิ่งแบบ OIP และ RIP นั้นมีค่าคงที่ในระหว่างใช้งาน และค่าความจุไฟฟ้ามีความไวต่อพอลต์ตามแนวรัศมี (การขี้อัดกันของชั้นตัวนำในแกนบุชชิ่ง) ในทางตรงกันข้าม ค่าความจุไฟฟ้าไม่มีความไวต่อพอลต์ตามแนวแกน (การเบรกดาวนที่เคลื่อนตัวขึ้นข้างบนหรือข้างล่างของแกนบุชชิ่ง) แต่ส่วนใหญ่แล้วตามประสบการณ์การพอลต์ตามแนวรัศมีของบุชชิ่งเกิดบ่อยกว่าพอลต์ตามแนวแกน

ค่าความจุไฟฟ้าของบุชชิ่งนั้นมีค่าขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ซึ่งจะมีค่ามากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นแต่ขึ้นน้อยกว่าเมื่อเทียบกับค่า $\tan \delta$ สำหรับบุชชิ่ง OIP สภาพดี การขึ้นอยู่กับอุณหภูมินี้อยู่ที่ประมาณ $0.25e-3 / ^\circ\text{C}$ สำหรับช่วงอุณหภูมิ 5°C ถึง 95°C [11] ซึ่งจะมีค่ามากขึ้นตามความชื้นและอายุการใช้งาน สำหรับบุชชิ่ง RIP สภาพดี การขึ้นอยู่กับอุณหภูมินี้อยู่ที่ประมาณ $0.45e-3 / ^\circ\text{C}$ สำหรับช่วงอุณหภูมิ 25°C ถึง 100°C [12]

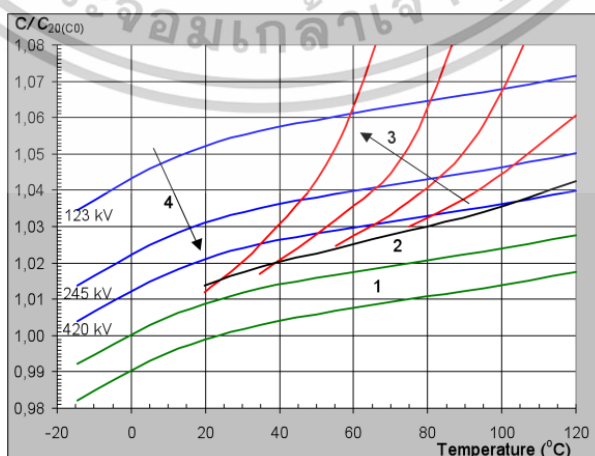
แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าของบุชชิ่งตามสภาพของบุชชิ่ง เทียบกับบุชชิ่งใหม่ แสดงได้ดังรูปที่ 2.9 โดยที่

เส้นหมายเลข 1 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าแบบปกติ ในระหว่างอายุการใช้งานของบุชชิ่ง (พื้นที่ระหว่างเส้นสีเขียว)

เส้นหมายเลข 2 แสดงเกณฑ์สำหรับการประเมินเชิงคุณภาพ ของการเสื่อมสภาพจากการใช้งานและปริมาณความชื้น (เส้นสีดำ)

เส้นหมายเลข 3 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าซึ่งเกิดจากการเสื่อมสภาพจากการใช้งานและปริมาณความชื้น (ทิศทางลูกศรที่วิ่งผ่านเส้นสีแดงแสดงถึงการเพิ่มขึ้นของการเสื่อมสภาพและปริมาณความชื้น)

เส้นหมายเลข 4 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าซึ่งเกิดจากเบรกดาวนระหว่างชั้นตัวนำของแกนบุชชิ่ง condenser (เส้นสีน้ำเงิน) (ทิศทางลูกศรที่วิ่งผ่านเส้นสีน้ำเงินแสดงถึงพิกัดแรงดันที่สูงขึ้น)



รูปที่ 2.9 แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าของบุชชิ่ง [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความชื้นและการเสื่อมสภาพจากการใช้งานทำให้ค่าความจุไฟฟ้าที่อุณหภูมิสูงเท่านั้น ในทางตรงกันข้าม การชดเชยระหว่างชั้นตัวนำในแกนบุชชิ่ง Condenser จะทำให้ความจุไฟฟ้ามากขึ้นโดยไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ แต่ขึ้นอยู่กับจำนวนชั้นตัวนำในแกน Condenser จำนวนชั้นตัวนำในแกน Condenser ขึ้นอยู่กับพิกัดแรงดัน ชนิดของฉนวน (OIP หรือ RIP) และประเภทของชั้นตัวนำ

การเปลี่ยนแปลงของค่าความจุไฟฟ้าจากการชดเชยระหว่างชั้นตัวนำนั้นเป็นตัวที่ใช้ในการตัดสินใจว่าจะทำการเปลี่ยนบุชชิ่งหรือไม่ ถ้าค่าความจุไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงเกินเกณฑ์ที่วางไว้ก็ควรทำการเปลี่ยนบุชชิ่ง โดยสามารถอ้างอิงค่าการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าได้จากตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 การเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าจากการชดเชยระหว่างชั้นตัวนำโดยประมาณ สำหรับแต่ละพิกัดแรงดันและชนิดฉนวน OIP และ RIP [5]

Um, kV	RIP capacitance change, %	OIP capacitance change, %
72.5	12	8.8
123	7.1	4.8
245	4.2	2.7
420	2.6	1.7
550	1.9	1.3
800	1.3	0.9

ค่าความจุไฟฟ้าของบุชชิ่ง RBP นั้นไม่คงที่ในระหว่างการใช้งานเนื่องจากน้ำมันสามารถแทรกซึมเข้าไปในแกน Condenser ได้ ทำให้ไม่สามารถใช้ข้อมูลของค่าความจุไฟฟ้าในการประเมินสภาพบุชชิ่ง RBP ได้เมื่อเทียบกับ OIP และ RIP เนื่องจากการชดเชยระหว่างชั้นตัวนำกับผลของน้ำมันแทรกซึมทำให้ค่าความจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเหมือนกัน ซึ่งค่าการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าจากการชดเชยระหว่างชั้นตัวนำของ RBP แสดงได้ดังตารางที่ 2.10 [13]

ตารางที่ 2.10 การเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าจากการชดเชยระหว่างชั้นตัวนำโดยประมาณ สำหรับแต่ละพิกัดแรงดันและชนิดฉนวน RBP [5, 13]

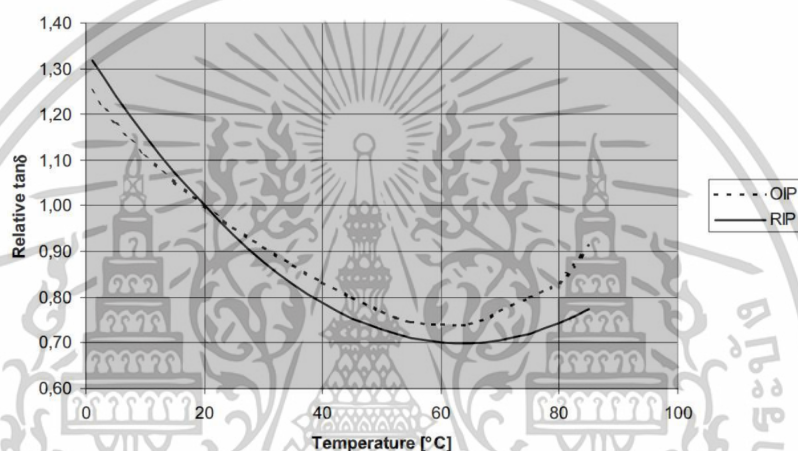
Um, kV	RBP capacitance change, %
72.5	23
123	20
170	18
245	15
300	13
420	10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 ความสูญเสียไดอิเล็กตริกของบุชชิ่งแบบ Non-condenser

ค่าของ $\tan \delta$ และ PF นั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเป็นอย่างมาก ดังนั้นอุณหภูมิของบุชชิ่งต้องมีการบันทึกไว้และผลการวัดต้องคำนวณกลับไปให้อุณหภูมิอ้างอิงตามข้อมูลที่ระบุจากผู้ผลิต ถ้าข้อมูลนี้ไม่มีสามารถใช้กราฟจากรูปที่ 2.10 ในการคำนวณกลับได้ [5, 14] ค่าโดยทั่วไปและลิมิตของ $\tan \delta$ แสดงไว้ในตารางที่ 2.11 สำหรับฉนวนหลักของบุชชิ่ง

การตัดสินใจสภาพของบุชชิ่งโดยใช้ค่า $\tan \delta$ ขึ้นอยู่กับชนิดฉนวนของบุชชิ่ง โดยปกติมี 2 วิธี คือ 1. ใช้ค่า $\tan \delta$ ที่เฉพาะเจาะจงค่าใดค่าหนึ่ง 2. ดูการเปลี่ยนแปลงของค่า $\tan \delta$ ระหว่างการใช้งาน กฎง่ายๆ คือ ถ้าค่า $\tan \delta$ มีค่า 2 เท่าจากค่าเริ่มต้น แสดงว่าสภาพบุชชิ่งแย่มาก [4] เกณฑ์ในการตัดสินใจสำหรับบุชชิ่ง OIP และ RIP อ้างอิงจาก [11, 15, 16] แสดงไว้ดังตารางที่ 2.12



รูปที่ 2.10 ค่า $\tan \delta$ ที่อุณหภูมิใดๆเทียบกับค่า $\tan \delta$ ที่อุณหภูมิ 20°C [4]

ตารางที่ 2.11 ค่าลิมิตตามมาตรฐานและค่าโดยทั่วไปสำหรับ $\tan \delta$ และ PF ตามชนิดฉนวนของบุชชิ่ง ที่ความถี่ 50/60 เฮิร์ต และอุณหภูมิ 20°C

Bushing insulation type	RBP	OIP	RIP
$\tan \delta$ / % (new bushing) [17]	< 1.5	< 0.7	< 0.7
PF /% (new bushing) [18]	< 2	< 0.5	< 0.85
Typical value range, %	0.5 to 0.6	0.2 to 0.4	0.3 to 0.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.12 ค่าลิมิตสำหรับตัดสินใจสภาพบุขซึ่ง OIP และ RIP ตามการเปลี่ยนแปลงของค่า $\tan \delta$ เทียบกับค่าเนมเพลตหรือค่าเริ่มต้นที่อุณหภูมิอ้างอิง

	Bushing condition			
	Good	Moderate	Severe	Extreme
OIP $\tan \delta$ relative change	Up to 1.33	1.34 to 1.66	1.67 to 2	Above 2
RIP $\tan \delta$ relative change	Up to 1.25	1.26 to 1.5	1.51 to 1.75	Above 1.76

โดยที่ Good: สภาพปกติ/สภาพดี วาระการบำรุงรักษาคงเดิม

Moderate: เปลี่ยนแปลงปานกลาง ให้ทำการสังเกตการณ์โดยรอบ ทำการวัดเพิ่มภายใน 1 ปี และ ฝ้าติดตามอย่างต่อเนื่อง

Severe: เปลี่ยนแปลงมาก ให้ทำการสังเกตการณ์โดยรอบ ทำการวัดเพิ่มภายใน 1 เดือน และ ฝ้าติดตามอย่างต่อเนื่อง ควรพิจารณาหยุดใช้งาน

Extreme: เปลี่ยนแปลงอย่างมาก หยุดการใช้งานหรือใช้งานต่อไปในระยะเวลานั้นๆ หลักเดือน และ ฝ้าติดตามอย่างต่อเนื่อง

ในกรณีที่ค่า $\tan \delta$ และ PF สูงผิดปกติควรทำการวัดซ้ำอีกครั้ง โดยทำความสะอาดบุขซึ่ง ก่อนเริ่มการทดสอบใหม่อีกครั้ง นอกจากนั้นสามารถใช้ Collar ต่อกับวงจรการ์ดเพื่อลดผลกระทบจากกระแสรั่วไหลที่ผิว ควรมีการเปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างเฟสเพื่อดูว่าการวัดมีความคลาดเคลื่อนหรือไม่ การเพิ่มขึ้นของค่า $\tan \delta$ ทั้ง 3 เฟสนั้นแทบจะเป็นไปไม่ได้

สำหรับบุขซึ่ง OIP การเปลี่ยนแปลงของค่า $\tan \delta$ ระหว่างใช้งานสามารถมีค่าเป็นลบได้ [10, 19, 20, 21] การลดลงของค่า $\tan \delta$ เหลือ 80% หรือน้อยกว่า ของค่าเริ่มต้น บ่งบอกถึงสถานการณ์เร่งด่วน ควรทำการวัด C2 และ $\tan \delta 2$ ถ้าผลลัพธ์ออกมาพบว่าค่า $\tan \delta 2$ สูงขึ้น ควรทำการเปลี่ยนบุขซึ่ง ซึ่งการเพิ่มขึ้นของ $\tan \delta 2$ จะตามมาด้วยผล DGA ที่ไม่ดี และความชื้นของน้ำมันบุขซึ่งที่สูงขึ้น

สำหรับบุขซึ่ง RBP ลิมิตของค่า $\tan \delta$ ขึ้นอยู่กับแรงดันใช้งาน ดังแสดงในตาราง 2.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.13 ลิมิตของค่า $\tan \delta$ สำหรับบุชชิง RBP [13]

Um, kV	RBP $\tan \delta$ limit, %
72.5	2.3
123	2.0
170	1.8
245	1.5
300	1.3
420	1.0

วิธีการล่าสุดในการวินิจฉัยค่า $\tan \delta$ นั้น จะใช้การวัดในช่วงความถี่ 15 เฮิร์ต ถึง 400 เฮิร์ต [4, 15] ลิมิตสำหรับแต่ละความถี่นี้แสดงไว้ดังตารางที่ 2.14 โดยทั่วไปแล้ว ถ้าสภาพบุชชิงดีจะมีการเปลี่ยนแปลงของค่า $\tan \delta$ น้อยในช่วงความถี่ที่ระบุไว้

ค่า $\tan \delta$ สูงที่ความถี่ต่ำ บ่งบอกถึง ความสูญเสียจากความนำไฟฟ้ามีค่าสูง ซึ่งเกิดจากความชื้นหรือ by products จากการเสื่อมสภาพจากการใช้งาน

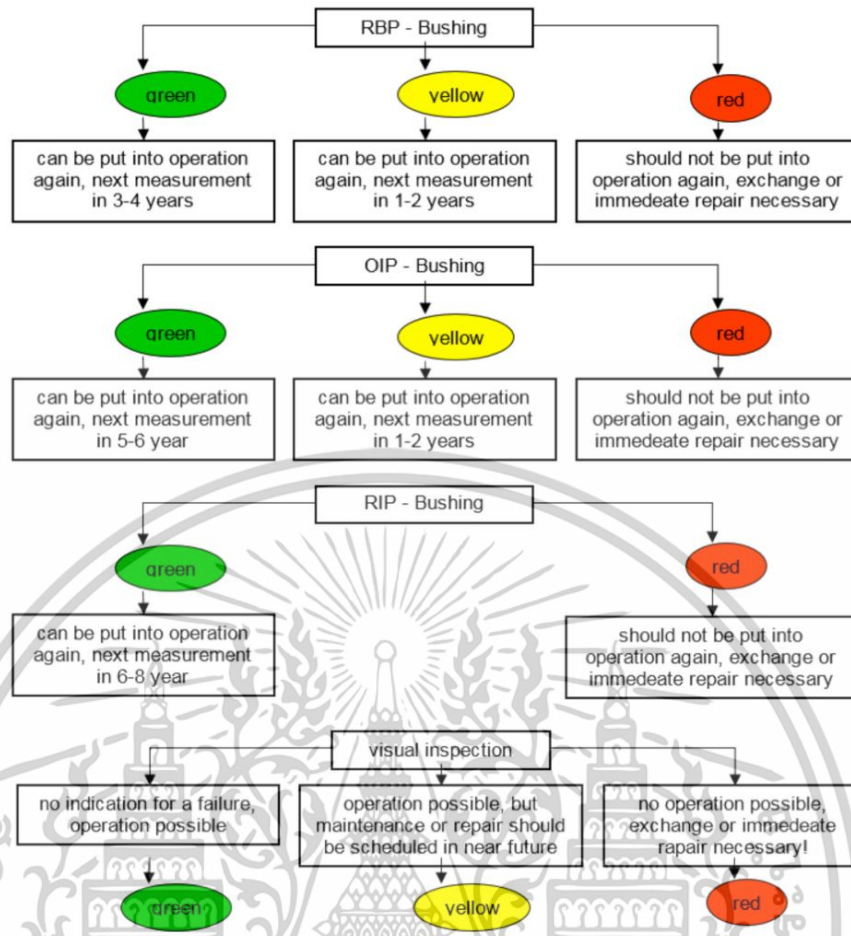
ค่า $\tan \delta$ สูงที่ความถี่สูง บ่งบอกถึง ปัญหาจุดต่อภายในที่ tap วัด หรือจุดต่อไฟแรงสูง หรือการช็อตกันระหว่างชั้นตัวนำแบบมีค่าความต้านทาน

ตารางที่ 2.14 ลิมิตของค่า $\tan \delta$ สำหรับบุชชิง Condenser ที่อุณหภูมิ 20°C [4]

Frequency (Hz)	RBP $\tan \delta$ limit, %		OIP $\tan \delta$ limit, %		RIP $\tan \delta$ limit, %	
	new	aged	new	aged	new	aged
15	<0.6	<0.7	<0.5	<0.7	<0.7	<1.5
50/60	<0.5	<0.5	<0.4	<0.5	<0.6	<1.0
400	<0.6	<0.7	<0.5	<0.7	<0.7	<1.5

โดยใน Annex 5 ของ Cigre 755 ได้มีการเสนอแนะผังงานการวินิจฉัยฉนวนบุชชิงแรงดันสูง พร้อมลิมิตของค่าความจุไฟฟ้าที่ 50/60 เฮิร์ต และ ลิมิตของค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริกไว้ ใช้สำหรับบุชชิงแบบ Condenser ซึ่งมีสถานะเขียว เหลือง แดง เอาไว้ใช้เป็นสีแสดงสถานะของบุชชิงแรงดันสูง ดังรูปที่ 2.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 ผังงานการวินิจฉัยฉนวนบุชชิ่งแรงดันสูง [5]

2.5 Polarization and Depolarization Current (PDC)

การวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน (PDC) เป็นวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลายเพื่อใช้ในการวินิจฉัยสภาพฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง โดยการวัดผลตอบสนองไดอิเล็กตริกในโดเมนเวลา ผลลัพธ์ที่ได้จะถูกแสดงออกมาในรูปกราฟกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน เทียบกับเวลาในสเกลลอการิทึม [22] ตามสมการ

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

$$i_{depol}(t) = -C_0 U_c [f(t) - f(t + T_c)]$$

โดยที่ C_0 คือ ค่าความจุไฟฟ้าสุญญากาศของวัตถุทดสอบ

U_c คือ แรงดันไฟฟ้าทดสอบรูปขั้นบันได

σ_0 คือ ความนำไฟฟ้าของฉนวน

ϵ_0 คือ ค่าสภาพยอมรับได้ในสุญญากาศ บ่งบอกถึงความสามารถของสนามไฟฟ้าในการวิ่ง

ผ่านสุญญากาศ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ε_{∞} คือ ค่าสภาพยอมรับได้สัมผัสสำหรับกระบวนการโพลาริเซชันที่เกิดขึ้นเร็วมาก

$\delta(t)$ คือ ฟังก์ชันเดลต้าซึ่งเกิดจากการจ่ายไฟแบบทันทีทันใด

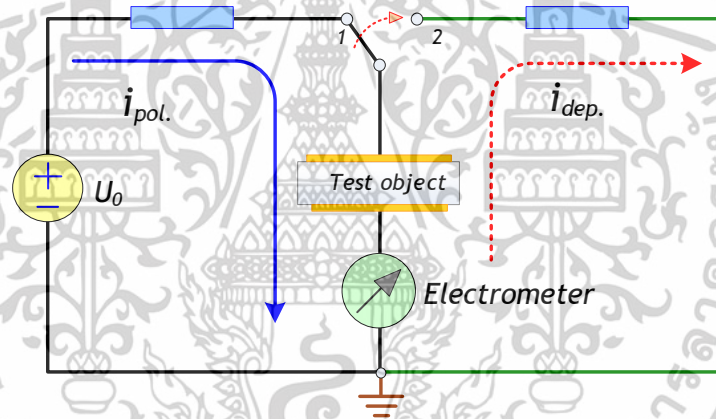
$f(t)$ คือ ฟังก์ชันผลตอบสนองไดอิเล็กตริก

T_c คือ ระยะเวลาที่ใช้ในการจ่ายไฟให้กับวัตถุทดสอบ

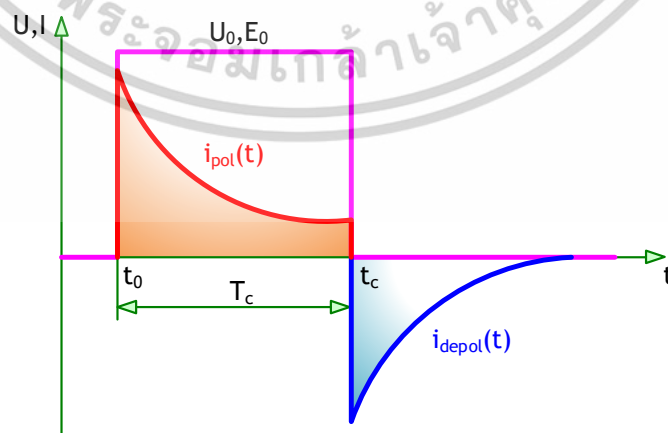
หลักการของการทดสอบ PDC เริ่มจากการจ่ายแรงดันทดสอบไฟฟ้ากระแสตรงเข้าไปที่วัตถุทดสอบแล้ววัดค่ากระแสโพลาริเซชัน จากนั้นทำการปลดแหล่งจ่ายพร้อมเชื่อมวัตถุทดสอบลงกราวด์ เพื่อทำการวัดกระแสดีโพลาริเซชันซึ่งมาจากการดิสชาร์จประจุของวัตถุทดสอบ ดังวงจรในรูปที่ 2.12

ตามทฤษฎีแล้ว ผลลัพธ์ของ PDC นั้นขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างของบุชชิง เนื่องจากถ้าค่าความจุไฟฟ้าสูงจะทำให้กระแสยกตัวสูงขึ้น [5] ตัวอย่างผลลัพธ์แสดงได้ดังรูปที่ 2.13

ผลลัพธ์ของ PDC สามารถวิเคราะห์ได้โดยการเปรียบเทียบกราฟที่วัดได้ปัจจุบันกับกราฟที่วัดได้ครั้งก่อนหน้า หรือ กราฟจากเฟสอื่น หรือ กราฟจากบุชชิงที่มีลักษณะเหมือนกัน หรือ กราฟจากการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ [5]



รูปที่ 2.12 วงจรการทดสอบ PDC



รูปที่ 2.13 ผลลัพธ์โดยทั่วไปของการทดสอบ PDC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 Frequency domain spectroscopy (FDS) / Dielectric frequency response (DFR)

Frequency domain spectroscopy (FDS) หรือ Dielectric frequency response (DFR) เป็นวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลายเพื่อใช้ในการวินิจฉัยสภาพนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง โดยการวัดผลตอบสนองไดอิเล็กตริกในโดเมนความถี่ ผลลัพธ์ที่ได้จะถูกแสดงออกมาในรูปกราฟค่าความจุไฟฟ้าและค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริกเทียบกับความถี่ในสเกลลอการิทึม [22] ตามสมการ

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

โดยที่ ϵ_0 คือ ค่าสภาพยอมรับได้ในสุญญากาศ บ่งบอกถึงความสามารถของสนามไฟฟ้าในการวิ่งผ่านสุญญากาศ

ϵ_r' คือ ส่วนจริงของค่าสภาพยอมรับได้สัมพันธ์เชิงซ้อนของระบบนวน

ϵ_r'' คือ ส่วนจินตภาพของค่าสภาพยอมรับได้สัมพันธ์เชิงซ้อนของระบบนวน

σ_0 คือ ความนำไฟฟ้าของนวน

ω คือ ความถี่เชิงมุม

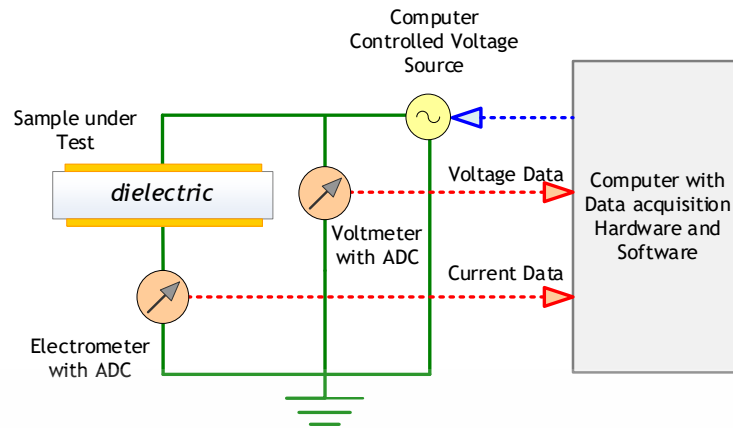
หลักการของการทดสอบ FDS/DFR คือการจ่ายแรงดันไฟฟ้าทดสอบกระแสลับที่ความถี่สูงแล้วค่อยๆลดความถี่ลง พร้อมกับวัดค่าความจุไฟฟ้าและความสูญเสียไดอิเล็กตริกที่แต่ละความถี่ ดังวงจรรูปที่ 2.14

ตามทฤษฎีแล้ว แล้วผลลัพธ์ของ FDS/DFR นั้นไม่ขึ้นอยู่กับขนาดของบุชซึ่งเนื่องจากการทดสอบนี้พิจารณาแค่คุณสมบัติของวัสดุเท่านั้น [5] ตัวอย่างผลลัพธ์แสดงได้ดังรูปที่ 2.15

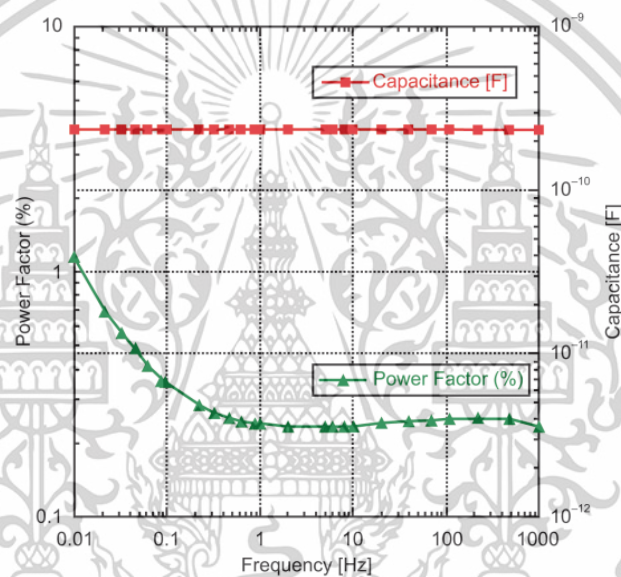
พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวินิจฉัยสภาพนวนบุชซึ่ง ได้แก่

1. ค่าความจุไฟฟ้า ใช้ในการตรวจจับการช็อตถึงกันระหว่างชั้นตัวนำ
2. อัตราส่วนความจุไฟฟ้าระหว่างความจุไฟฟ้าที่ 10 มิลลิเฮิร์ต กับ 50 เฮิร์ต ใช้ในการตรวจจับความชื้นในนวนกระดาด
3. ความสูญเสียไดอิเล็กตริกหรือพาวเวอร์แฟกเตอร์ ใช้ในการเช็คสภาพนวนโดยรวมของบุชซึ่ง ซึ่งประกอบไปด้วยหลายตัวแปร เช่น การเสื่อมสภาพจากการใช้งาน สิ่งปนเปื้อนทางเคมี ความชื้น ความนำไฟฟ้าของน้ำมันบุชซึ่ง และ รอยคราบคาร์บอน [23] ตามหลักการแล้วความสูญเสียไดอิเล็กตริก มีความสูญเสีย 3 องค์ประกอบ คือ ความสูญเสียจากการโพลาริเซชัน ความสูญเสียจากการความนำไฟฟ้าของนวน และความสูญเสียจากการไอออนไนเซชันจากการดิสชาร์จบางส่วน [24]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 วงจรการทดสอบ FDS/DFR



รูปที่ 2.15 ผลลัพธ์ FDS/DFR โดยทั่วไปของบุชชิงแบบ OIP [23]

2.7 เปรียบเทียบระหว่างการทดสอบ FDS/DFR กับการวัด Power Factor / $\tan \delta$

การทดสอบ Power factor / $\tan \delta$ เป็นการทดสอบแบบ Routine ที่หน้างานโดยทั่วไป ที่ 10 กิโลโวลต์ หรือบางครั้งที่แรงดันต่ำกว่าแรงดันพิกัดของระบบฉนวนที่ทำกรทดสอบ แนวโน้มของค่า Power factor / $\tan \delta$ ถูกใช้เพื่อเฝ้าติดตามสภาพความสกปรกและการเสื่อมสภาพของฉนวน

บุชชิง OIP สภาพดีส่วนใหญ่จะมีค่า Power factor / $\tan \delta$ ที่ความถี่ 50/60 เฮิรตซ์ ไม่เกิน 0.5% บุชชิงแบบโพลีเมอร์บางชนิด อาจจะมีค่า Power factor / $\tan \delta$ ที่สูงกว่าค่าของบุชชิง OIP

ค่า Power factor / $\tan \delta$ ที่สูงขึ้นอย่างรวดเร็วหรือมีค่าสูงเกินลิมิตตามมาตรฐานต้องมีการตรวจสอบเพิ่มเติม ตารางที่ 2.15 แสดงความแตกต่างระหว่างการทดสอบที่ความถี่เดียว Power factor / $\tan \delta$ กับการทดสอบที่หลายความถี่ FDS/DFR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

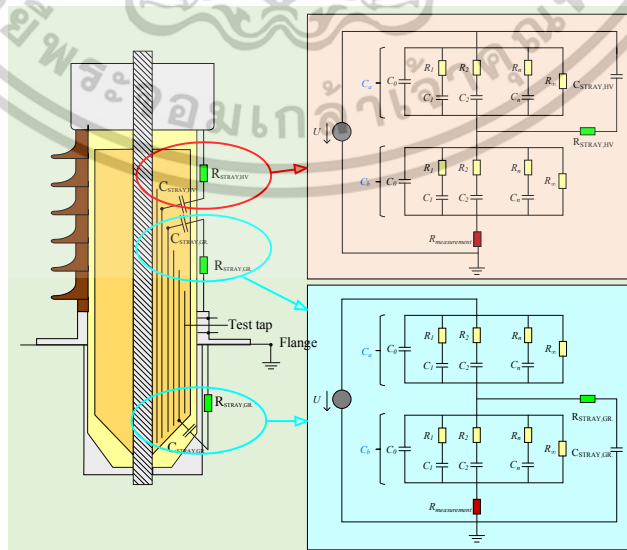
ตารางที่ 2.15 ความแตกต่างระหว่าง Power factor / Tan δ กับ FDS/DFR [23]

Items	Power factor / Tan δ	FDS/DFR
Frequency	Line frequency or close to line frequency (50/60 Hz)	Variable frequency Typically, from 1 kHz down to 10 mHz
Voltage	10 kV or below apparatus rated voltage	Not lower than 140 Vrms
Measurement time	< 1 min	Typically, several minutes dependent on stop frequency
Analysis	Trending, compared with references	Compare with baseline signature and trending
Objective of test	Used to identify general deterioration of insulation	Used to detect insulation degradation or moisture ingress at an early stage

2.8 กระแสรั่วไหลที่ผิวบุขั้ว

ผลของกระแสรั่วไหลได้ถูกพูดถึงและพิสูจน์ใน [25, 26, 27] ว่าภายใต้ผิวบุขั้วซึ่งมีสิ่งสกปรกและเปียกชื้น หรือ ภายใต้น้ำมันหม้อแปลงที่มีความนำไฟฟ้าสูง กระแสรั่วไหลสามารถวิ่งระหว่างปลายของชั้นตัวนำและจุดที่มีศักย์ไฟฟ้าหรือระหว่างปลายของชั้นตัวนำและจุดที่มีศักย์กราวด์

ผลของกระแสรั่วไหลนี้ยังถูกพูดถึงในภาคผนวก C ของมาตรฐาน IEEE เบอร์ C57.12.200 [23] รูปที่ 2.16 แสดงเส้นทางของกระแสรั่วไหลที่ผิวบุขั้ว ซึ่งกระแสรั่วไหลนี้ส่งผลต่อค่าความจุไฟฟ้าและค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริก Tan δ จากการทดสอบ FDS/DFR และส่งผลต่อกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน จากการทดสอบ PDC



รูปที่ 2.16 ผลลัพธ์ FDS/DFR โดยทั่วไปของบุขั้วแบบ OIP [23, 26]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบการทดลอง ตั้งแต่การเตรียมอุปกรณ์สำหรับการทดสอบ และการทดสอบทั้งหมดในวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบไปด้วย รายละเอียดขั้นตอนการทดสอบ และการจัดเตรียมวงจรสำหรับการทดสอบ

3.1 การเตรียมอุปกรณ์สำหรับการทดสอบ

3.1.1 บุชชิงแรงดันสูงแบบกระดาศู่มน้ำมัน

บุชชิงแรงดันสูงแบบกระดาศู่มน้ำมัน OIP ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ประกอบไปด้วย บุชชิง OIP 22 kV ดังรูปที่ 3.1 และบุชชิง OIP 115 kV ดังรูปที่ 3.2 ซึ่งเป็นบุชชิงที่ผ่านการใช้งานมาแล้วทั้งคู่



รูปที่ 3.1 บุชชิง OIP 22 kV สำหรับการทดสอบ



รูปที่ 3.2 บุชชิง OIP 115 kV สำหรับการทดสอบ

3.1.2 เทปทองแดง

เทปทองแดง ดังรูปที่ 3.3 ถูกนำมาใช้เป็น Collar สำหรับการจำลองกระแสรั่วไหลที่ผิวบุชชิง โดยจะนำไปพันที่แกนของบุชชิงภายใต้ครีปต่างๆ ของบุชชิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 Collar จากเทพทองแดง

3.1.3 เครื่องมือทดสอบ PDC

สำหรับการทดสอบการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน หรือ PDC จะใช้เครื่องมือทดสอบ PDC-ANALYSER-1MOD ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 PDC-ANALYSER-1MOD

3.1.4 เครื่องมือทดสอบ FDS/DFR

สำหรับการทดสอบการวัดไดอิเล็กทริกสเปกโตรสโคปีในโดเมนความถี่ หรือ FDS/DFR จะใช้เครื่องมือทดสอบ Omicron DIRANA และ Software Omicron Primary Test Manager ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 Omicron DIRANA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

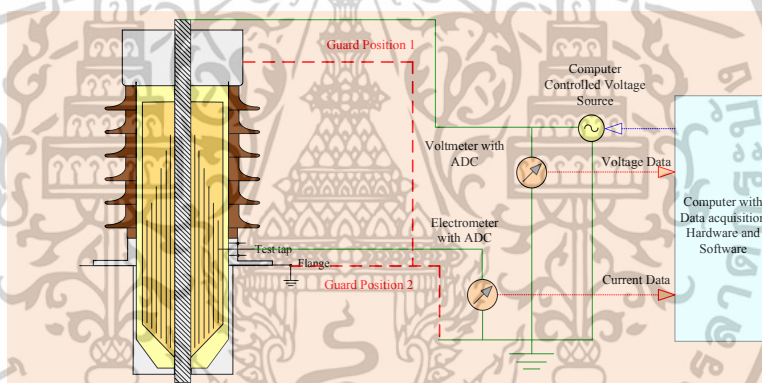
3.2 การทดสอบในวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์นี้มีการทดสอบอยู่ 5 รายการ โดยรายละเอียดขั้นตอนการทดสอบและการจัดเตรียมวงจรสำหรับการทดสอบ จะถูกอธิบายในแต่ละหัวข้อต่อไป

3.2.1 การทดสอบผลของการ Guard ต่อผลตอบสนองไดอิเล็กตริกในโดเมนความถี่ FDS/DFR สำหรับบุชชิ่งแบบกระดาศุ่มน้ำมัน 22 kV

การทดสอบนี้มีจุดประสงค์เพื่อ ศึกษาผลของการ Guard ในวงจรการทดสอบว่าการ Guard ที่ตำแหน่งจุดจ่ายแรงดัน หรือ ที่ตำแหน่งกราวด์ หรือ ทั้งคู่ หรือไม่ Guard เลย จะมีผลต่อการทดสอบในหัวข้อ FDS/DFR อย่างไร โดยวงจรการทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.6 โดยใช้ลักษณะการต่อแบบ ungrounded specimen test (UST)

ขั้นตอนการทดสอบมีดังนี้ ทำการจ่ายแรงดันกระแสสลับ 200 โวลต์ ช่วงความถี่ในการทดสอบคือ 0.01 เฮิรต ถึง 1000 เฮิรต ตามที่ IEEE เบอร์ C57.12.200 แนะนำไว้ โดยห้องทดสอบทำการควบคุมอุณหภูมิคงที่ไว้ที่ 22 °C เนื่องจากอุณหภูมิมีผลต่อผลการทดสอบในหัวข้อนี้



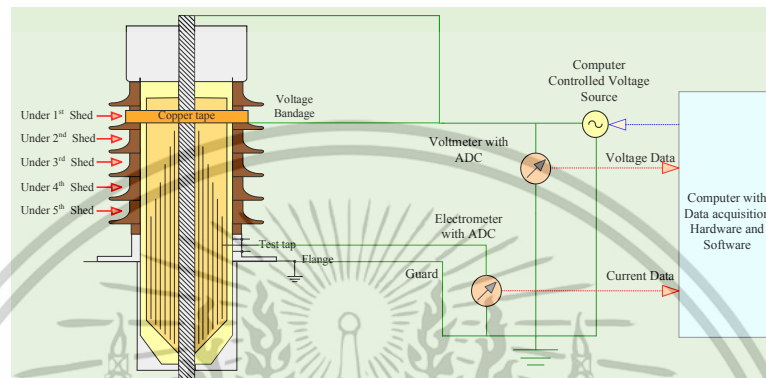
รูปที่ 3.6 วงจรการทดสอบ ผลของการ Guard ต่อผลการทดสอบ FDS/DFR

3.2.2 ผลของ Voltage Bandage / Voltage Collar ต่อผลตอบสนองไดอิเล็กตริกในโดเมนความถี่ FDS/DFR สำหรับบุชชิ่งแบบกระดาศุ่มน้ำมัน 22 kV และ 115 kV

การทดสอบนี้มีจุดประสงค์เพื่อ ศึกษาผลของ Voltage Bandage / Voltage collar ที่แต่ละตำแหน่งของผิวบุชชิ่งตั้งแต่บนลงล่าง ว่ามีผลต่อค่าความจุไฟฟ้าและความสูญเสียไดอิเล็กตริกจากการทดสอบ FDS/DFR หรือไม่ และหากมีจะมีผลในช่วงความถี่ใด โดยวงจรการทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.7 โดยใช้ลักษณะการต่อแบบ ungrounded specimen test (UST) และมีการพัน Bandage/Collar ซึ่งทำจากเทปทองแดง รอบแกนบุชชิ่งได้ครบ ซึ่งมีตำแหน่งพัน Bandage/Collar ทั้งหมด 5 ตำแหน่งสำหรับบุชชิ่ง 22 กิโลโวลต์ และ มีตำแหน่งพัน Bandage/Collar ทั้งหมด 9 ตำแหน่ง สำหรับบุชชิ่ง 115 กิโลโวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนการทดสอบมีดังนี้ ทำการจ่ายแรงดันกระแสสลับ 200 โวลต์ ที่หัวบushing และที่ Bandage/Collar ช่วงความถี่ในการทดสอบคือ 0.01 เฮิรต์ ถึง 1000 เฮิรต์ ตามที่ IEEE เบอร์ C57.12.200 แนะนำไว้ โดยห้องทดสอบทำการควบคุมอุณหภูมิคงที่ไว้ที่ 22 °C สำหรับบushing 22 กิโลโวลต์ และ 29°C สำหรับบushing 115 กิโลโวลต์ เนื่องจากอุณหภูมิมีผลต่อผลการทดสอบในหัวข้อนี้ เมื่อวัดเสร็จ ทำการย้ายตำแหน่ง Bandage/Collar ไปที่ตำแหน่งอื่น แล้วทดสอบในลักษณะเดียวกัน



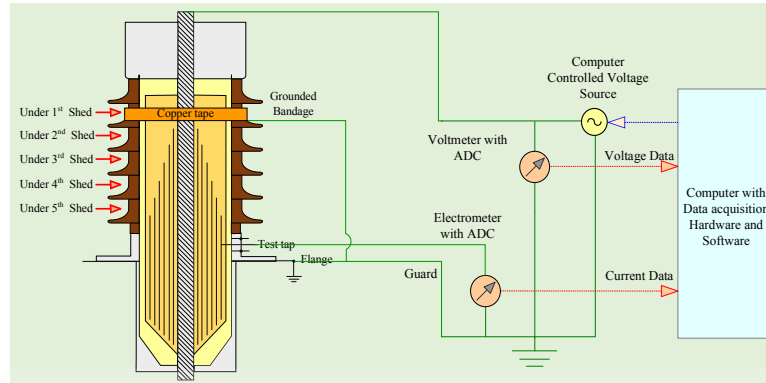
รูปที่ 3.7 วงจรการทดสอบ ผลของการ Voltage Bandage / Voltage Collar ต่อผลการทดสอบ FDS/DFR

3.2.3 ผลของ Grounded Bandage / Grounded Collar ต่อผลตอบสนองไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ FDS/DFR สำหรับบushing แบบกระดาดขุ่มน้ำมัน 22 kV และ 115 kV

การทดสอบนี้มีจุดประสงค์เพื่อ ศึกษาผลของ Grounded Bandage / Grounded Collar ที่แต่ละตำแหน่งของบushing ซึ่งตั้งแต่นล่างลงมา ว่ามีผลต่อค่าความจุไฟฟ้าและความสูญเสียไดอิเล็กทริกจากการทดสอบ FDS/DFR หรือไม่ และหากมีจะมีผลในช่วงความถี่ใด โดยวงจรการทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.8 โดยใช้ลักษณะการต่อแบบ ungrounded specimen test (UST) และมีการพัน Bandage/Collar ซึ่งทำจากเทปทองแดง รอบแกนbushing ได้ครบ ซึ่งมีตำแหน่งพัน Bandage/Collar ทั้งหมด 5 ตำแหน่งสำหรับบushing 22 กิโลโวลต์ และ มีตำแหน่งพัน Bandage/Collar ทั้งหมด 9 ตำแหน่ง สำหรับบushing 115 กิโลโวลต์

ขั้นตอนการทดสอบมีดังนี้ ทำการจ่ายแรงดันกระแสสลับ 200 โวลต์ ที่หัวbushing ส่วน Bandage/Collar ต่อเข้ากับกราวด์ ช่วงความถี่ในการทดสอบคือ 0.01 เฮิรต์ ถึง 1000 เฮิรต์ ตามที่ IEEE เบอร์ C57.12.200 แนะนำไว้ โดยห้องทดสอบทำการควบคุมอุณหภูมิคงที่ไว้ที่ 22 °C สำหรับบushing 22 กิโลโวลต์ และ 29°C สำหรับบushing 115 กิโลโวลต์ เนื่องจากอุณหภูมิมีผลต่อผลการทดสอบในหัวข้อนี้ เมื่อวัดเสร็จ ทำการย้ายตำแหน่ง Bandage/Collar ไปที่ตำแหน่งอื่น แล้วทดสอบในลักษณะเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 วงจรการทดสอบ ผลของการ Grounded Bandage / Grounded Collar ต่อผลการทดสอบ FDS/DFR

3.2.4 ผลของ Voltage Bandage / Voltage Collar ต่อผลตอบสนองไดอิเล็กตริกในโดเมนเวลา PDC สำหรับบุชชิงแบบกระดาศุ่มน้ำมัน 22 kV

การทดสอบนี้มีจุดประสงค์เพื่อ ศึกษาผลของ Voltage Bandage / Voltage Collar ที่แต่ละตำแหน่งของผิวบุชชิงตั้งแต่บนลงล่าง ว่ามีผลต่อค่ากระแสโพล่าไรเซชันและกระแสดีโพล่าไรเซชันจากการทดสอบ PDC หรือไม่ และหากมีจะมีผลที่ช่วงเวลาใด โดยวงจรการทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.9 โดยใช้ลักษณะการต่อแบบ ungrounded specimen test (UST) และมีการพัน Bandage/Collar ซึ่งทำจากเทปทองแดง รอบแกนบุชชิงใต้ครีป ซึ่งมีตำแหน่งพัน Bandage/Collar ทั้งหมด 5 ตำแหน่งสำหรับบุชชิง 22 กิโลโวลต์

ขั้นตอนการทดสอบมีดังนี้

1. การวัดขั้นแรก (Initial measurement)

ทำการทดสอบ PDC โดยข้ามขั้นตอนการจ่ายแรงดันกระแสตรงแล้วไปขั้นตอนช็อตวัตถุทดสอบลงกราวด์เพื่อทำการวัดกระแสดีโพล่าไรเซชัน ซึ่งมาจากการดิสชาร์จประจุของวัตถุทดสอบ โดยเวลาในการดิสชาร์จในการทดสอบนี้คือ 1000 วินาที

การทดสอบขั้นนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ ดูสภาพเริ่มต้นของระบบฉนวนที่ต้องการวัด โดยดูจากกระแสดีโพล่าไรเซชันในเนื้อฉนวน ซึ่งกระแสดีโพล่าไรเซชันนี้ควรจะน้อยและมีค่าคงตัว หากมีค่าสูงอย่างมีนัยยะสำคัญ ก็ควรพิจารณานำไปลบกับค่าจากขั้นตอนการวัดจริง

2. การวัดขั้นตรวจสอบ (Check measurement)

ทำการทดสอบ PDC ตามขั้นตอนปกติ โดยจ่ายแรงดันกระแสตรงค่าน้อย ไม่กี่วินาที แล้วต่อด้วยขั้นตอนช็อตวัตถุทดสอบลงกราวด์เพื่อทำการวัดกระแสดีโพล่าไรเซชันซึ่งมาจากการดิสชาร์จประจุของวัตถุทดสอบ โดยแรงดันทดสอบที่ใช้คือ 50 โวลต์ เวลาในการจ่ายแรงดันคือ 5 วินาที เวลาในการดิสชาร์จคือ 1000 วินาที

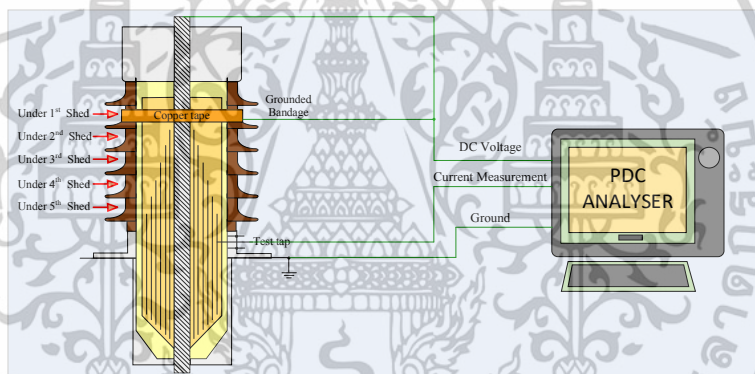
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบขั้นนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ ยืนยันวงจรการทดสอบว่าไม่มีความผิดปกติใดๆ เมื่อทำการจ่ายแรงดันไปแล้ว และเพื่อเลือกขนาดแรงดันที่เหมาะสมสำหรับขั้นตอนการวัดจริงและเวลาในการจ่ายแรงดันและเวลาในการดิสชาร์จ

3. การวัดขั้นจริง (Main measurement)

ทำการทดสอบ PDC ตามขั้นตอนปกติ โดยจ่ายแรงดันกระแสตรง แล้วต่อด้วยขั้นตอนช็อต วัตถุประสงค์ทดสอบลกราวด์เพื่อทำการวัดกระแสดีโพลาริเซชันซึ่งมาจากการดิสชาร์จประจุของวัตถุทดสอบ โดยแรงดันทดสอบที่ใช้คือ 1000 โวลต์ เวลาในการจ่ายแรงดันคือ 1000 วินาที เวลาในการดิสชาร์จคือ 1000 วินาที

ทั้ง 3 ขั้นตอนนี้ จะมีการจ่ายแรงดันกระแสตรง ที่หัวบushing และที่ Bandage/Collar โดยห้องทดสอบทำการคุมอุณหภูมิคงที่ไว้ที่ 22 °C สำหรับbushing 22 กิโลโวลต์ เนื่องจากอุณหภูมิมีผลต่อผลการทดสอบในหัวข้อนี้ เมื่อวัดเสร็จ ทำการย้ายตำแหน่ง Bandage/Collar ไปที่ตำแหน่งอื่น แล้วทดสอบในลักษณะเดียวกัน



รูปที่ 3.9 วงจรการทดสอบ ผลของการ Voltage Bandage / Voltage Collar ต่อผลการทดสอบ PDC

3.2.5 ผลของ Grounded Bandage / Grounded Collar ต่อผลตอบสนองไดอิเล็กทริกในโดเมนเวลาPDC สำหรับbushingแบบกระดาดขุมน้ำมัน 22 kV

การทดสอบนี้มีจุดประสงค์เพื่อ ศึกษาผลของ Grounded Bandage / Grounded Collar ที่แต่ละตำแหน่งของหัวบushingตั้งแต่บนลงล่าง ว่ามีผลต่อค่ากระแสดีโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน จากการทดสอบ PDC หรือไม่ และหากมีจะมีผลในช่วงเวลาใด โดยวงจรการทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.10 โดยใช้ลักษณะการต่อแบบ ungrounded specimen test (UST) และมีการพัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Bandage/Collar ซึ่งทำจากเทปทองแดง รอบแกนบุชชิ่งใต้ครีป ซึ่งมีตำแหน่งพัน Bandage/Collar ทั้งหมด 5 ตำแหน่งสำหรับบุชชิ่ง 22 กิโลโวลต์

ขั้นตอนการทดสอบมีดังนี้

1. การวัดขั้นแรก (Initial measurement)

ทำการทดสอบ PDC โดยข้ามขั้นตอนการจ่ายแรงดันกระแสตรงแล้วไปขั้นตอนช็อตตัวทดสอบลงกราวด์เพื่อทำการวัดกระแสดีโพล่าไรเซชัน ซึ่งมาจากการดิสชาร์จประจุของวัตถุทดสอบ โดยเวลาในการดิสชาร์จในการทดสอบนี้คือ 1000 วินาที

การทดสอบขั้นนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ ดูสภาพเริ่มต้นของระบบฉนวนที่ต้องการวัด โดยดูจากกระแสดีโพล่าไรเซชันในเนื้อฉนวน ซึ่งกระแสดีโพล่าไรเซชันนี้ควรจะน้อยและมีค่าคงตัว หากมีค่าสูงอย่างมีนัยยะสำคัญ ก็ควรพิจารณานำไปลบกับค่าจากขั้นตอนการวัดจริง

2. การวัดขั้นตรวจสอบ (Check measurement)

ทำการทดสอบ PDC ตามขั้นตอนปกติ โดยจ่ายแรงดันกระแสตรงค่าน้อย ไม่กี่วินาที แล้วต่อด้วยขั้นตอนช็อตตัวทดสอบลงกราวด์เพื่อทำการวัดกระแสดีโพล่าไรเซชันซึ่งมาจากการดิสชาร์จประจุของวัตถุทดสอบ โดยแรงดันทดสอบที่ใช้คือ 50 โวลต์ เวลาในการจ่ายแรงดันคือ 5 วินาที เวลาในการดิสชาร์จคือ 1000 วินาที

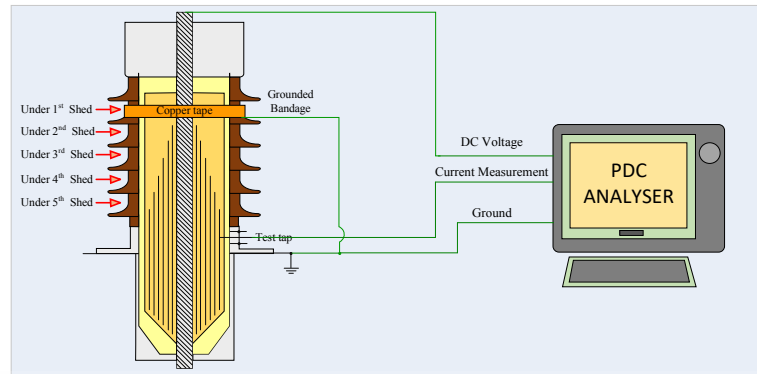
การทดสอบขั้นนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ ยืนยันว่าการทดสอบว่าไม่มีความผิดปกติใดๆ เมื่อทำการจ่ายแรงดันไปแล้ว และเพื่อเลือกขนาดแรงดันที่เหมาะสมสำหรับขั้นตอนการวัดจริงและเวลาในการจ่ายแรงดันและเวลาในการดิสชาร์จ

3. การวัดขั้นจริง (Main measurement)

ทำการทดสอบ PDC ตามขั้นตอนปกติ โดยจ่ายแรงดันกระแสตรง แล้วต่อด้วยขั้นตอนช็อตตัวทดสอบลงกราวด์เพื่อทำการวัดกระแสดีโพล่าไรเซชันซึ่งมาจากการดิสชาร์จประจุของวัตถุทดสอบ โดยแรงดันทดสอบที่ใช้คือ 1000 โวลต์ เวลาในการจ่ายแรงดันคือ 1000 วินาที เวลาในการดิสชาร์จคือ 1000 วินาที

ทั้ง 3 ขั้นตอนนี้ จะมีการจ่ายแรงดันกระแสตรง ที่หัวบุชชิ่ง ส่วนที่ Bandage/Collar ต่อลงกราวด์ โดยห้องทดสอบทำการคุมอุณหภูมิคงที่ไว้ที่ 22 °C สำหรับบุชชิ่ง 22 กิโลโวลต์ เนื่องจากอุณหภูมิมีผลต่อผลการทดสอบในหัวข้อนี้ เมื่อวัดเสร็จ ทำการย้ายตำแหน่ง Bandage/Collar ไปที่ตำแหน่งอื่น แล้วทดสอบในลักษณะเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 วงจรการทดสอบ ผลของการ Grounded Bandage / Grounded Collar ต่อผลการทดสอบ PDC



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดสอบ และการอภิปรายผลการทดสอบทั้งหมดในวิทยานิพนธ์

4.1 การทดสอบผลของการ Guard ต่อผลตอบสนองไดอิเล็กตริกในโดเมนความถี่ FDS/DFR สำหรับบุชชิ่งแบบกระดาษน้ำมัน 22 kV

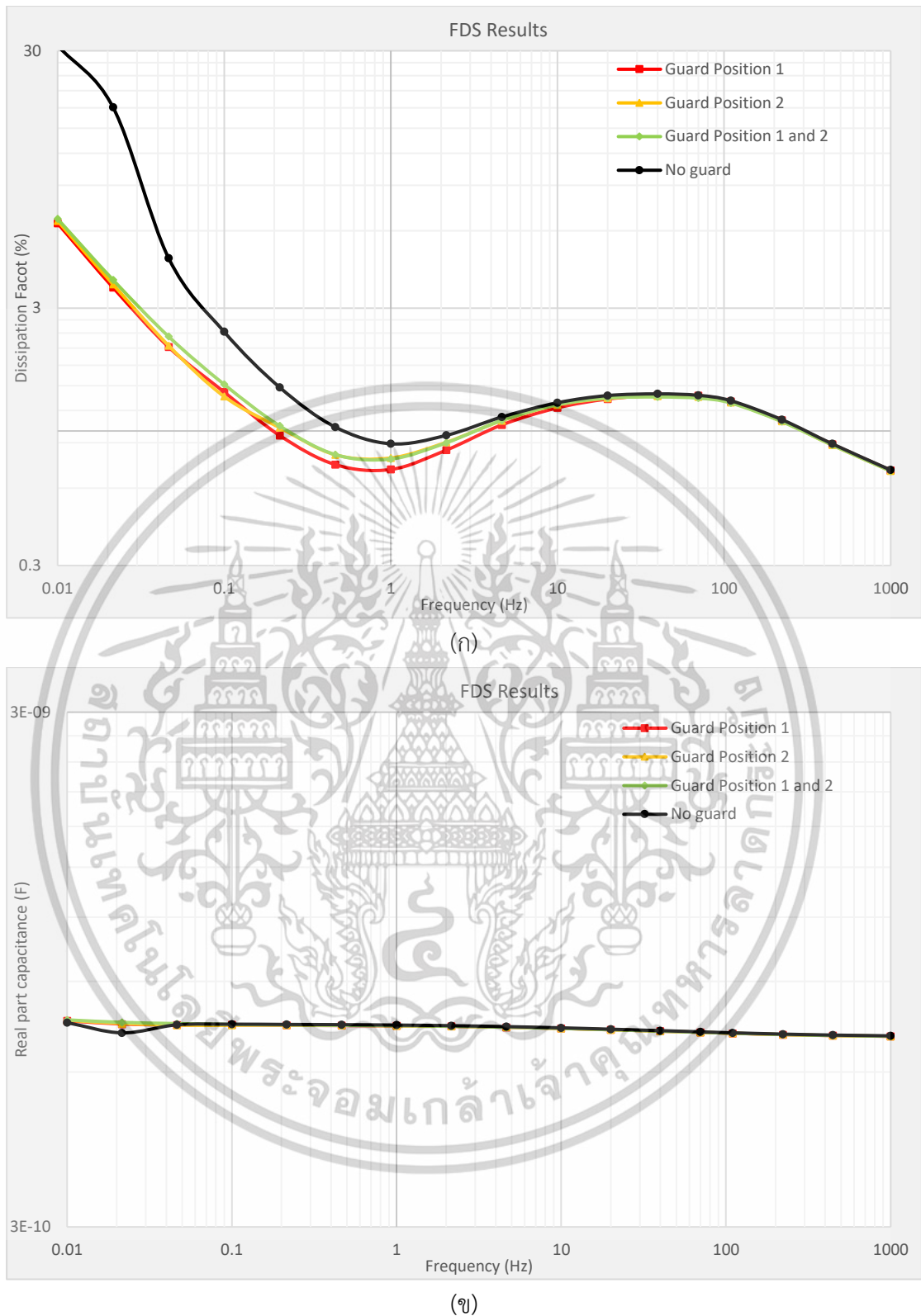
ตัวอย่างวงจรการทดสอบในหัวข้อนี้แสดงดังรูปที่ 4.1 ซึ่งเป็นกรณี Guard 2 ตำแหน่ง ผลการทดสอบในหัวข้อนี้แสดงดังรูปที่ 4.2 จากผลการทดสอบในรูปที่ 4.2(ก) จะเห็นได้ว่าการ Guard นั้นสามารถทำที่จุดเดียวได้ ไม่ว่าจะเป็นตำแหน่งหัวบุชชิ่งหรือที่กราวด์ก็ตาม หรือสามารถ Guard ทั้ง 2 ตำแหน่งก็ได้ จะได้ผลลัพธ์ค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริกเหมือนกันหรือใกล้เคียงกัน แต่ถ้าไม่ Guard เลยจะเห็นได้ว่าผลลัพธ์ค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริกที่ได้ มีค่าสูงขึ้นที่ความถี่ตั้งแต่ประมาณ 1 เฮิร์ตลงไปเมื่อเทียบกับผลลัพธ์ที่มีการ Guard ซึ่งผลลัพธ์เช่นนี้สามารถทำให้การวินิจฉัยผิดพลาดได้ เนื่องจากค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริกที่ความถี่ต่ำเป็นจุดหนึ่งที่สำคัญสำหรับการวินิจฉัยว่าสภาพบุชชิ่งเป็นอย่างไร

ในส่วนของค่าความจุไฟฟ้าส่วนจริง ผลลัพธ์การทดสอบในรูปที่ 4.2(ข) แสดงให้เห็นว่าการ Guard ไม่ว่าจะจุดเดียวหรือสองจุด จะได้ผลลัพธ์ค่าความจุไฟฟ้าส่วนจริงเหมือนกันหรือใกล้เคียงกัน ถ้าไม่ Guard เลยสักตำแหน่ง ผลลัพธ์จะมีความแตกต่างเล็กน้อยคือความจุไฟฟ้าที่ความถี่ต่ำจะมีค่าต่ำกว่าเล็กน้อย ที่ความถี่ประมาณ 0.02 เฮิร์ต ซึ่งไม่มีนัยยะสำคัญ จึงอาจตีได้ว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงใดๆ ของค่าความจุไฟฟ้าส่วนจริง จากผลของการ Guard



รูปที่ 4.1 วงจรการทดสอบ ผลของการ Guard ต่อผลการทดสอบ FDS/DFR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 ผลลัพธ์การทดสอบ ผลของการ Guard ต่อผลการทดสอบ FDS/DFR

(ก) ค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริก (ข) ค่าความจุไฟฟ้าส่วนจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลของ Voltage Bandage/ Voltage Collar ต่อผลตอบสนองไดอิเล็กตริกในโดเมนความถี่ FDS/DFR สำหรับบุชชิ่งแบบกระดาษจุ่มน้ำมัน 22 kV และ 115 kV

4.2.1 Voltage Bandage/ Voltage Collar ของบุชชิ่ง OIP 22 kV

ตัวอย่างวงจรถดสอบในหัวข้อนี้แสดงดังรูปที่ 4.3 ซึ่งเป็นกรณี Voltage Bandage / Voltage Collar ที่ตำแหน่งใต้ครีปที่ 4 ของบุชชิ่ง 22 กิโลโวลต์ ผลการทดสอบในหัวข้อนี้ของบุชชิ่ง 22 กิโลโวลต์ แสดงดังรูปที่ 4.4 และตารางที่ 4.1

จากผลการทดสอบของบุชชิ่ง 22 กิโลโวลต์ ในรูปที่ 4.4(ก) และตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ชัดเจนว่า ในช่วงความถี่ต่ำกว่า 1 เฮิร์ต ค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริกในกรณี Voltage Bandage / Voltage Collar ใต้ครีปที่ 5 มีขนาดสูงที่สุด ตามด้วยใต้ครีปที่ 4 ใต้ครีปที่ 3 ใต้ครีปที่ 2 และใต้ครีปที่ 1 ตามลำดับ สาเหตุเนื่องมาจากกระแสที่ปกติไหลผ่านฉนวนเข้าสู่ระบบวัด ถูกเพิ่มเข้ามาจากการที่ Voltage Bandage / Voltage Collar สร้างเส้นทางกระแสเพิ่มเข้าสู่ระบบฉนวน ดังรูปที่ 2.15 โดยยิ่ง Voltage Bandage / Voltage Collar ใกล้กับชั้นตัวนำมากเท่าไร ก็จะมีค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุคัปปลิงมากยิ่งขึ้น ซึ่งตำแหน่งใต้ครีปที่ 5 จะมีระยะห่างระหว่าง Bandage/Collar กับชั้นตัวนำน้อยที่สุดซึ่งเกิดจากการดีไซน์ของตัวบุชชิ่งเอง ทำให้มีค่าความจุไฟฟ้าคัปปลิงสูงที่สุด ทำให้กระแสที่เข้าสู่ระบบวัดในกรณีนี้สูงที่สุด หรือก็คือมีความสูญเสียสูงที่สุดนั่นเอง

ในส่วนของค่าความจุไฟฟ้าส่วนจริงของบุชชิ่ง 22 กิโลโวลต์ ผลลัพธ์การทดสอบในรูปที่ 4.4 (ข) และตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่า ในทุกช่วงความถี่ ค่าความจุไฟฟ้าส่วนจริงของกรณี Voltage Bandage / Voltage Collar ใต้ครีปที่ 5 มีขนาดสูงที่สุด ตามด้วยใต้ครีปที่ 4 ใต้ครีปที่ 3 ใต้ครีปที่ 2 และใต้ครีปที่ 1 ตามลำดับ โดยยิ่งความถี่ต่ำลงค่าความจุไฟฟ้าจะมีความมากยิ่งขึ้น ซึ่งความแตกต่างของความจุไฟฟ้านี้มาจากความจุไฟฟ้าคัปปลิงที่เสริมเข้ามานั่นเอง โดยกรณีใต้ครีปที่ 5 จะมีความห่างของค่าความจุไฟฟ้าที่ความถี่ต่ำเทียบกับที่ความถี่ใช้งานสูงที่สุด ตามด้วยใต้ครีปที่ 4 ใต้ครีปที่ 3 ใต้ครีปที่ 2 และใต้ครีปที่ 1 ตามลำดับ ซึ่งสามารถดูได้จากค่า Capacitance ratio

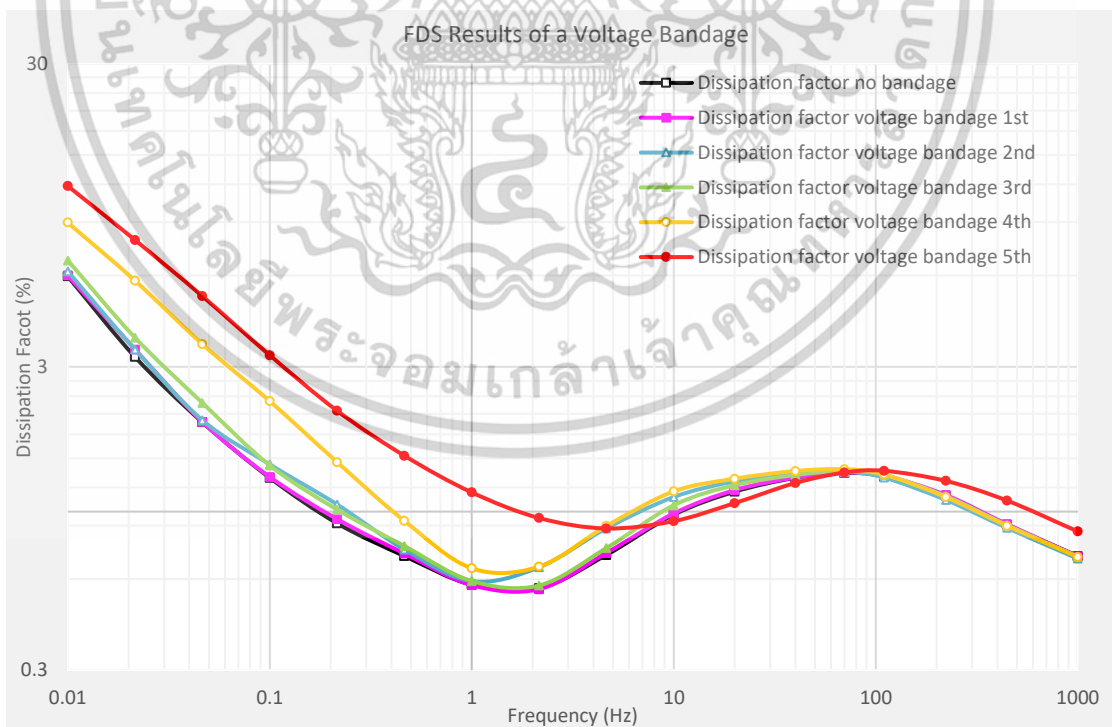
จะเห็นได้ว่าค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริกที่ความถี่ 50 เฮิร์ต ไม่สามารถบ่งบอกถึงผลของกระแสรั่วไหลจากฝั่งแรงดันสูง เนื่องจากทุกตำแหน่งของ Voltage Bandage / Voltage Collar มีค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริกที่ความถี่ 50 เฮิร์ตเท่ากัน โดยที่เราสามารถดูค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริกที่ความถี่ต่ำกว่า 1 เฮิร์ตเพื่อดูผลของกระแสรั่วไหลจากฝั่งแรงดันสูงได้

โดยปกติแล้วค่าอัตราส่วนความจุไฟฟ้าจะถูกใช้ในการตรวจจับความชื้นในฉนวนกระดาษของบุชชิ่ง [28] ดังนั้นการที่อัตราส่วนความจุไฟฟ้าสูงขึ้นจากกระแสรั่วไหลนั้นจะทำให้การวิเคราะห์ผิดพลาดได้ แต่เนื่องจากการทดสอบนี้อัตราส่วนความจุไฟฟ้ามีค่าสูงสุดแค่ 1.1 ซึ่งดูจากกรณีใต้ครีปที่ 5 ดังนั้นจึงไม่ได้ส่งผลกระทบต่อการวินิจฉัย

จากการที่ค่าความสูญเสียไดโอิเล็กทริกสูงที่ความถี่ต่ำ เราสามารถตีความได้ว่าฉนวนบุชซึ่งได้รับความชื้นเข้ามา แต่จริงๆแล้วเกิดจากกระแสรั่วไหลจากฝั่งแรงดันสูง ซึ่งทำให้การวินิจฉัยผิดพลาดได้ [5]

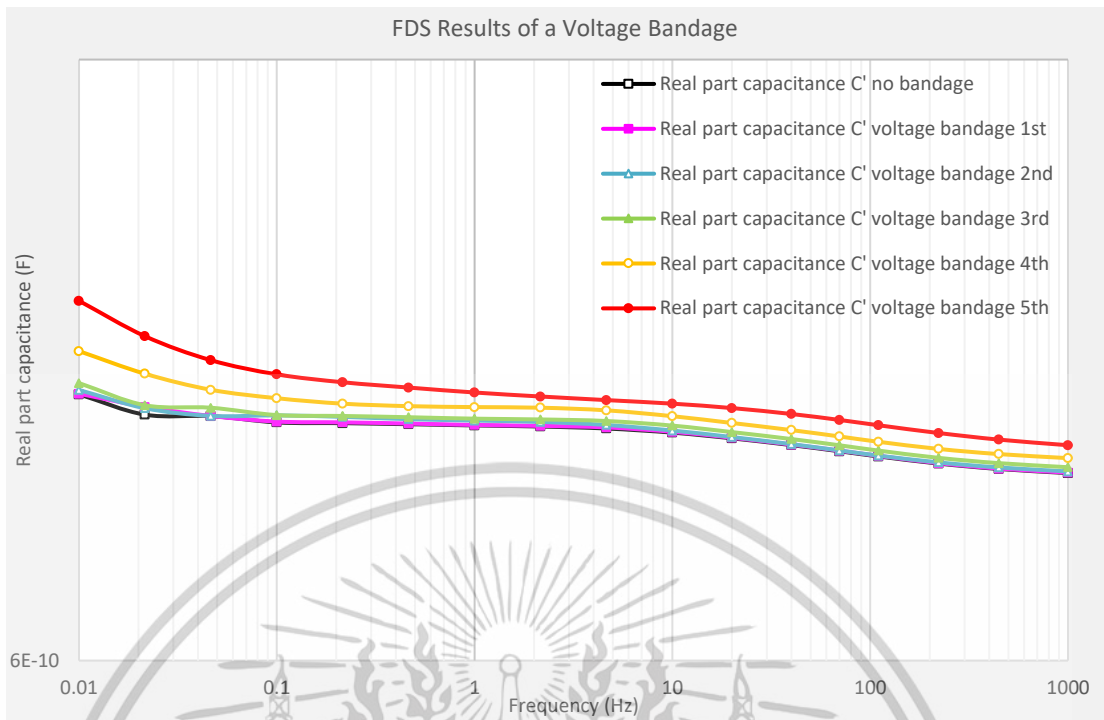


รูปที่ 4.3 วงจรการทดสอบ ผลของ Voltage Bandage / Voltage Collar ต่อผลการทดสอบ FDS/DFR ของบุชซึ่ง 22 กิโลโวลต์



(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

รูปที่ 4.4 ผลลัพธ์การทดสอบ ผลของ Voltage Bandage / Voltage Collar ต่อผลการทดสอบ FDS/DFR ของบุงซิ่ง 22 กิโลโวลต์ (ก) ค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริก (ข) ค่าความจุไฟฟ้าส่วนจริง

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ในการวินิจฉัยจากกรณี Voltage Bandage / Voltage Collar ของบุงซิ่ง 22 กิโลโวลต์

Voltage bandage cases	Dissipation factor at 10 mHz (%)	Dissipation factor at 50 Hz (%)	Capacitance at 10 mHz (pF)	Capacitance at 50 Hz (pF)	Capacitance ratio C(10mHz)/C(50Hz)
No bandage	5.96	1.31	752.370	719.097	1.046
Under 1 st shed	6.01	1.31	752.791	719.463	1.046
Under 2 nd shed	6.20	1.34	755.165	719.669	1.049
Under 3 rd shed	6.73	1.34	759.606	722.793	1.051
Under 4 th shed	8.97	1.37	780.520	728.273	1.072
Under 5 th shed	11.85	1.28	814.597	738.414	1.103

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 Voltage Bandage/ Voltage Collar ของบุชชิง OIP 115 kV

ตัวอย่างวงจรการทดสอบในหัวข้อนี้แสดงดังรูปที่ 4.5 ซึ่งเป็นกรณี Voltage Bandage / Voltage Collar ที่ตำแหน่งได้ครีปที่ 1 ของบุชชิง 115 กิโลโวลต์ ผลการทดสอบในหัวข้อนี้ของบุชชิง 115 กิโลโวลต์ แสดงดังรูปที่ 4.6 และตารางที่ 4.2

จากผลการทดสอบของบุชชิง 115 กิโลโวลต์ ในรูปที่ 4.6(ก) และตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ชัดเจนว่า ในช่วงความถี่สูงกว่า 10 เฮิร์ต ค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริกในกรณี Voltage Bandage / Voltage Collar ได้ครีปที่ 9 มีขนาดสูงที่สุด ตามด้วยได้ครีปที่ 8 จนถึงได้ครีปที่ 1 ตามลำดับ สาเหตุเนื่องมาจากกระแสที่ปกติไหลผ่านฉนวนเข้าสู่ระบบวัด ถูกเพิ่มเข้ามาจากการที่ Voltage Bandage / Voltage Collar สร้างเส้นทางกระแสเพิ่มเข้าสู่ระบบฉนวน ดังรูปที่ 2.15 โดยยิ่ง Voltage Bandage / Voltage Collar ใกล้กับชั้นตัวนำมากเท่าไร ก็จะมีค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุคัปปลิ่งมากยิ่งขึ้น ซึ่งที่ตำแหน่งได้ครีปที่ 5 จะมีระยะห่างระหว่าง Bandage/Collar กับชั้นตัวนำน้อยที่สุดซึ่งเกิดจากการดีไซน์ของตัวบุชชิงเอง ทำให้มีค่าความจุไฟฟ้าคัปปลิ่งสูงที่สุด ทำให้กระแสที่เข้าสู่ระบบวัดในกรณีนี้สูงที่สุด หรือก็คือมีความสูญเสียสูงที่สุดนั่นเอง

ในส่วน of ค่าความจุไฟฟ้าส่วนจริงของบุชชิง 115 กิโลโวลต์ ผลลัพธ์การทดสอบในรูปที่ 4.6 (ข) และตารางที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่า ในทุกช่วงความถี่ ค่าความจุไฟฟ้าส่วนจริงของกรณี Voltage Bandage / Voltage Collar ได้ครีปที่ 9 มีขนาดสูงที่สุด ตามด้วยได้ครีปที่ 8 จนถึงได้ครีปที่ 1 ตามลำดับ โดยยิ่งความถี่ต่ำลงค่าความจุไฟฟ้าจะมีค่ามากยิ่งขึ้น ซึ่งความแตกต่างของความจุไฟฟ้านี้ มาจากความจุไฟฟ้าคัปปลิ่งที่เสริมเข้ามานั่นเอง โดยความห่างของค่าความจุไฟฟ้าที่ความถี่ต่ำเทียบกับที่ความถี่ใช้งานสูงที่สุด จะมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งสามารถดูได้จากค่า Capacitance ratio

จะเห็นได้ว่าค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริกที่ความถี่ 50 เฮิร์ต ค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริกที่ความถี่ 50 เฮิร์ต ไม่แสดงถึงผลของกระแสรั่วไหลจากฝั่งแรงดันสูงอย่างมีนัยยะสำคัญ เนื่องจากทุกตำแหน่งของ Voltage Bandage / Voltage Collar มีค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริกที่ความถี่ 50 เฮิร์ต ไม่ต่างกันมาก โดยที่เราสามารถดูค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริกที่ความถี่สูงกว่า 10 เฮิร์ตเพื่อดูผลของกระแสรั่วไหลจากฝั่งแรงดันสูงได้

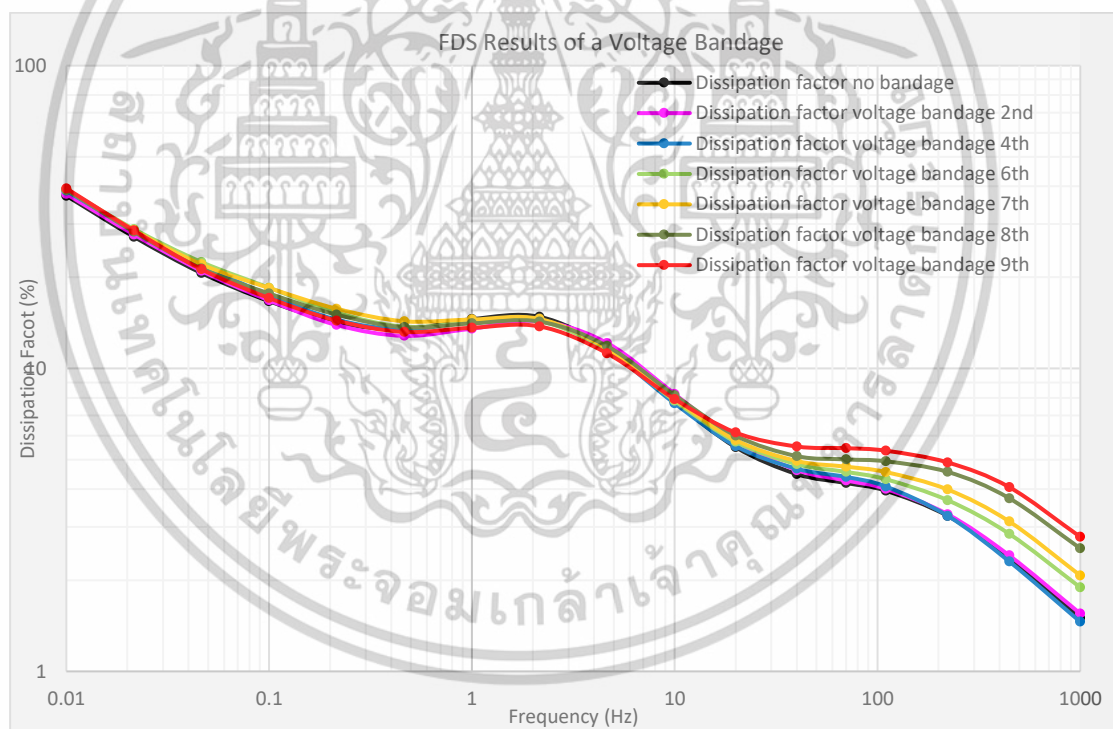
โดยปกติแล้วค่าอัตราส่วนความจุไฟฟ้าจะถูกใช้ในการตรวจจับความชื้นในฉนวนกระดาษของบุชชิง [28] ดังนั้นการที่อัตราส่วนความจุไฟฟ้าสูงขึ้นจากกระแสรั่วไหลนั้นจะทำให้การวิเคราะห์ผิดพลาดได้ แต่เนื่องจากการทดสอบนี้ ทุกกรณีมีอัตราส่วนความจุไฟฟ้ามีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงไม่ได้ส่งผลต่อการวินิจฉัย

จากการที่ค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริกสูงที่ความถี่สูง เราสามารถตีความได้ว่าเป็นผลมาจากปัญหาจุดต่อภายในที่ tap วัด หรือจุดต่อไฟแรงสูง หรือ การช็อตกันระหว่างชั้นตัวนำแบบมีค่าความต้านทาน แต่จริงๆแล้วเกิดจากกระแสรั่วไหลจากฝั่งแรงดันสูง ซึ่งทำให้การวินิจฉัยผิดพลาดได้ [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

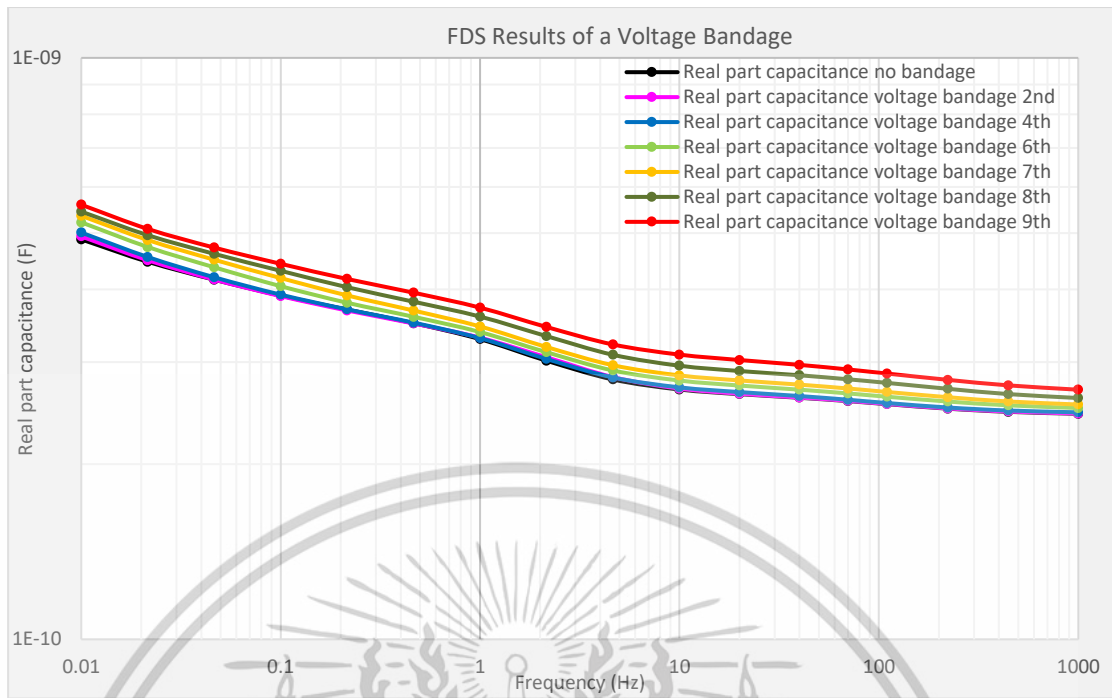


รูปที่ 4.5 วงจรการทดสอบ ผลของ Voltage Bandage / Voltage Collar
ต่อผลการทดสอบ FDS/DFR ของบุงซึ่ง 115 กิโลโวลต์



(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

รูปที่ 4.6 ผลลัพธ์การทดสอบ ผลของ Voltage Bandage / Voltage Collar ต่อผลการทดสอบ FDS/DFR ของบุชชิ่ง 115 กิโลโวลต์ (ก) ค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริก (ข) ค่าความจุไฟฟ้าส่วนจริง

ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์ในการวินิจฉัยจากกรณี Voltage Bandage / Voltage Collar ของบุชชิ่ง 115 กิโลโวลต์

Voltage bandage cases	Dissipation factor at 10 mHz (%)	Dissipation factor at 50 Hz (%)	Capacitance at 10 mHz (pF)	Capacitance at 50 Hz (pF)	Capacitance ratio C(10mHz)/C(50Hz)
No bandage	37.18	4.36	487.330	258.957	1.882
Under 1 st shed	37.35	4.52	491.905	259.362	1.897
Under 2 nd shed	37.70	4.48	493.107	259.236	1.902
Under 3 rd shed	38.28	4.44	497.506	259.463	1.917
Under 4 th shed	38.59	4.55	500.710	260.587	1.921
Under 5 th shed	38.85	4.83	509.265	262.950	1.937
Under 6 th shed	38.96	4.72	521.362	267.210	1.951

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Voltage bandage cases	Dissipation factor at 10 mHz (%)	Dissipation factor at 50 Hz (%)	Capacitance at 10 mHz (pF)	Capacitance at 50 Hz (pF)	Capacitance ratio C(10mHz)/C(50Hz)
Under 7 th shed	38.99	4.87	535.013	272.546	1.963
Under 8 th shed	38.95	5.09	544.043	282.757	1.924
Under 9 th shed	39.33	5.50	559.034	294.401	1.899

4.3 ผลของ Grounded Bandage/ Grounded Collar ต่อผลตอบสนองไดอิเล็กตริกในโดเมนความถี่ FDS/DFR สำหรับบุชชิ่งแบบกระดาษจุ่มน้ำมัน 22 kV และ 115 kV

4.3.1 Grounded Bandage/ Grounded Collar ของบุชชิ่ง OIP 22 kV

ตัวอย่างวงจรถดสอบในหัวข้อนี้แสดงดังรูปที่ 4.7 ซึ่งเป็นกรณี Grounded Bandage / Grounded Collar ที่ตำแหน่งได้ครีบที่ 1 ของบุชชิ่ง 22 กิโลโวลต์ ผลการทดสอบในหัวข้อนี้ของบุชชิ่ง 22 กิโลโวลต์ แสดงดังรูปที่ 4.8 และตารางที่ 4.3

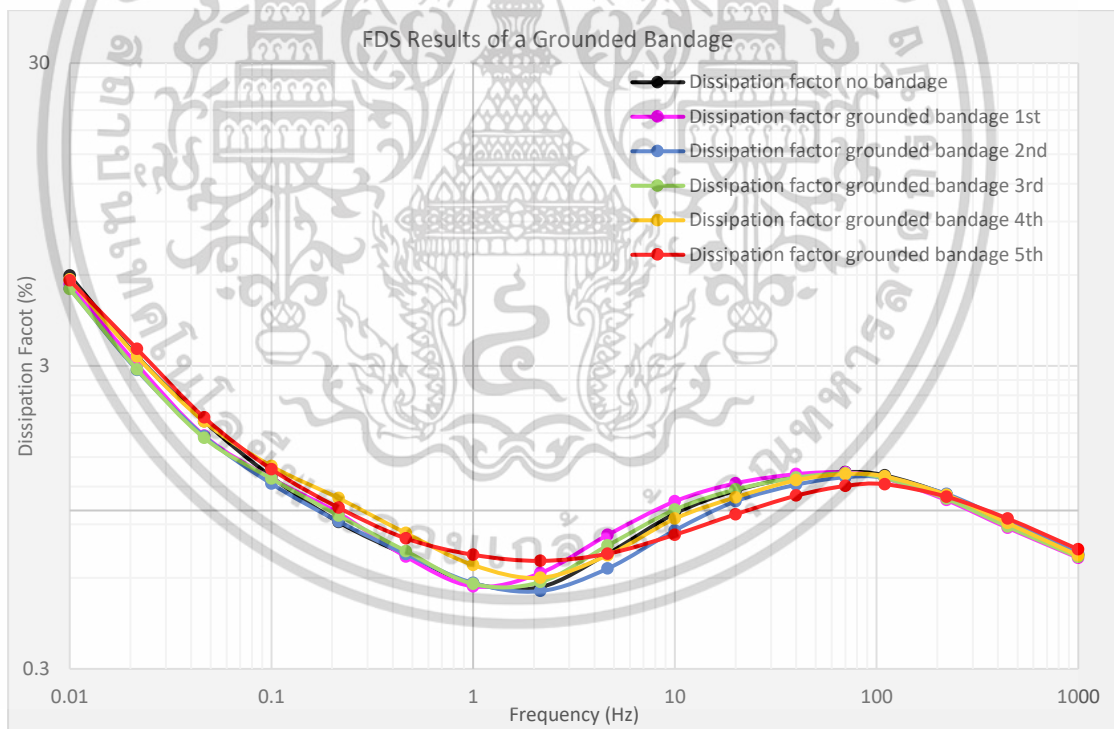
จากผลการทดสอบของบุชชิ่ง 22 กิโลโวลต์ ในรูปที่ 4.8ก) และตารางที่ 4.3 จะเห็นได้ชัดเจนว่า ในทุกช่วงความถี่ ค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริกในกรณี Grounded Bandage / Grounded Collar ทุกตำแหน่งได้ครีบ มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งโดยทฤษฎีแล้วกระแสที่ปกติไหลผ่านฉนวนเข้าสู่ระบบวัดจะมีค่าลดลง เนื่องมาจากการที่ Grounded Bandage / Grounded Collar สร้างเส้นทางกระแสออกจากระบบฉนวน ดังรูปที่ 2.15 โดยยิ่งระยะห่างระหว่างชั้นตัวนำกับ Bandage / Collar มีค่าน้อยก็ จะทำให้ค่าความจุไฟฟ้าคืบถึงสูงขึ้น แต่เนื่องจากกรณีนี้ค่าความจุไฟฟ้าจากทุกกรณีที่ไม่ต่างกันมาก ทำให้กระแสที่ออกจากระบบฉนวนมีค่าใกล้เคียงกัน จึงทำให้ไม่มีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริกที่เด่นชัดเหมือนกรณี Voltage Bandage / Voltage Collar

ในส่วนของค่าความจุไฟฟ้าส่วนจริงของบุชชิ่ง 22 กิโลโวลต์ ผลลัพธ์การทดสอบในรูปที่ 4.8 (ข) และตารางที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่า ในทุกช่วงความถี่ ค่าความจุไฟฟ้าส่วนจริงของกรณี Grounded Bandage / Grounded Collar ได้ครีบที่ 5 มีขนาดต่ำที่สุด ตามด้วยได้ครีบที่ 4 ได้ครีบที่ 3 ได้ครีบที่ 2 และได้ครีบที่ 1 ตามลำดับ แต่ความแตกต่างของแต่ละกรณีมีไม่มาก โดยยิ่งความถี่ต่ำลงค่าความจุไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มเพียงเล็กน้อยอย่างไม่มีนัยยะสำคัญ ซึ่งสามารถดูได้จากค่า Capacitance ratio

จะเห็นว่าค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริกทุกช่วงความถี่ ไม่สามารถบ่งบอกถึงผลของกระแสรั่วไหลจากฝั่งกราวด์ เนื่องจากทุกตำแหน่งของ Grounded Bandage / Grounded Collar มีค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริกเท่ากันที่ความถี่เดียวกัน

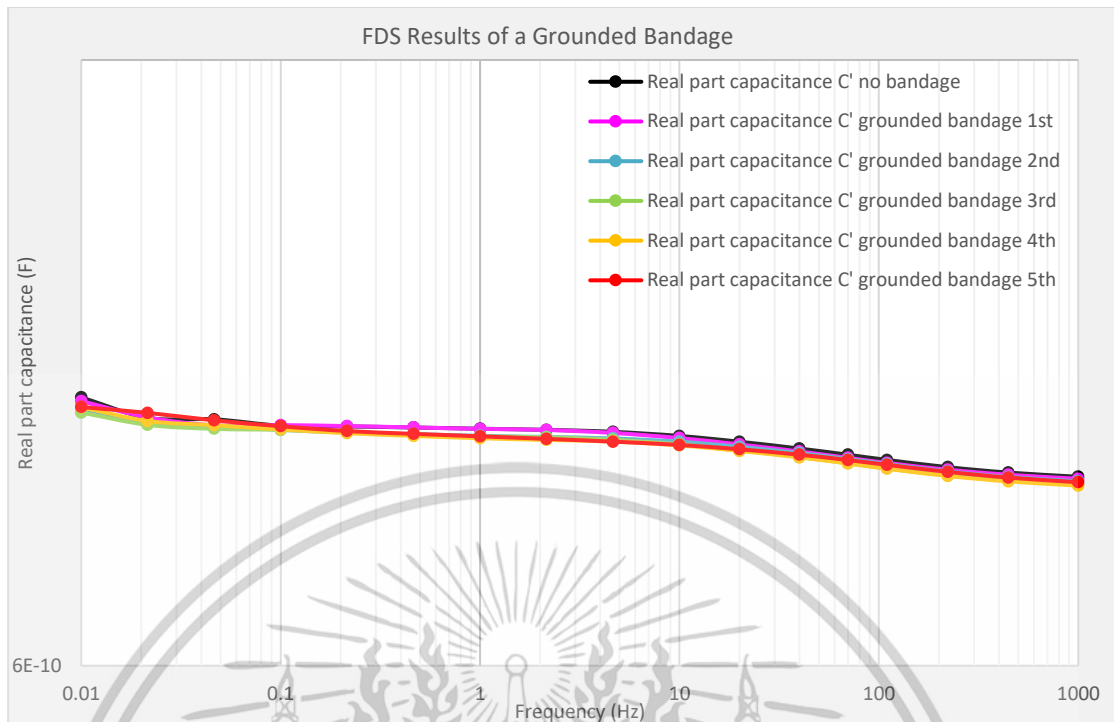


รูปที่ 4.7 วงจรการทดสอบ ผลของ Grounded Bandage / Grounded Collar
ต่อผลการทดสอบ FDS/DFR ของบุชชิง 22 กิโลโวลต์



(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

รูปที่ 4.8 ผลลัพธ์การทดสอบ ผลของ Grounded Bandage / Grounded Collar ต่อผลการทดสอบ FDS/DFR ของบุชชิง 22 กิโลโวลต์

(ก) ค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริก (ข) ค่าความจุไฟฟ้าส่วนจริง

ตารางที่ 4.3 พารามิเตอร์ในการวินิจฉัยจากกรณี Grounded Bandage / Grounded Collar ของบุชชิง 22 กิโลโวลต์

Grounded bandage cases	Dissipation factor at 10 mHz (%)	Dissipation factor at 50 Hz (%)	Capacitance at 10 mHz (pF)	Capacitance at 50 Hz (pF)	Capacitance ratio C(10mHz)/C(50Hz)
No bandage	5.96	1.31	752.370	719.097	1.046
Under 1 st shed	5.58	1.32	749.975	717.256	1.046
Under 2 nd shed	5.41	1.24	745.510	716.427	1.041
Under 3 rd shed	5.39	1.30	742.826	713.950	1.040
Under 4 th shed	5.79	1.28	746.074	713.758	1.045
Under 5 th shed	5.75	1.15	746.275	715.593	1.043

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 Grounded Bandage/ Grounded Collar ของบุงชิ่ง OIP 115 kV

ตัวอย่างวงจรถดสอบในหัวข้อนี้แสดงดังรูปที่ 4.9 ซึ่งเป็นกรณี Grounded Bandage / Grounded Collar ที่ตำแหน่งได้ครีบที่ 8 ของบุงชิ่ง 115 กิโลโวลต์ ผลการทดสอบในหัวข้อนี้ของบุงชิ่ง 115 กิโลโวลต์ แสดงดังรูปที่ 4.10 และตารางที่ 4.4

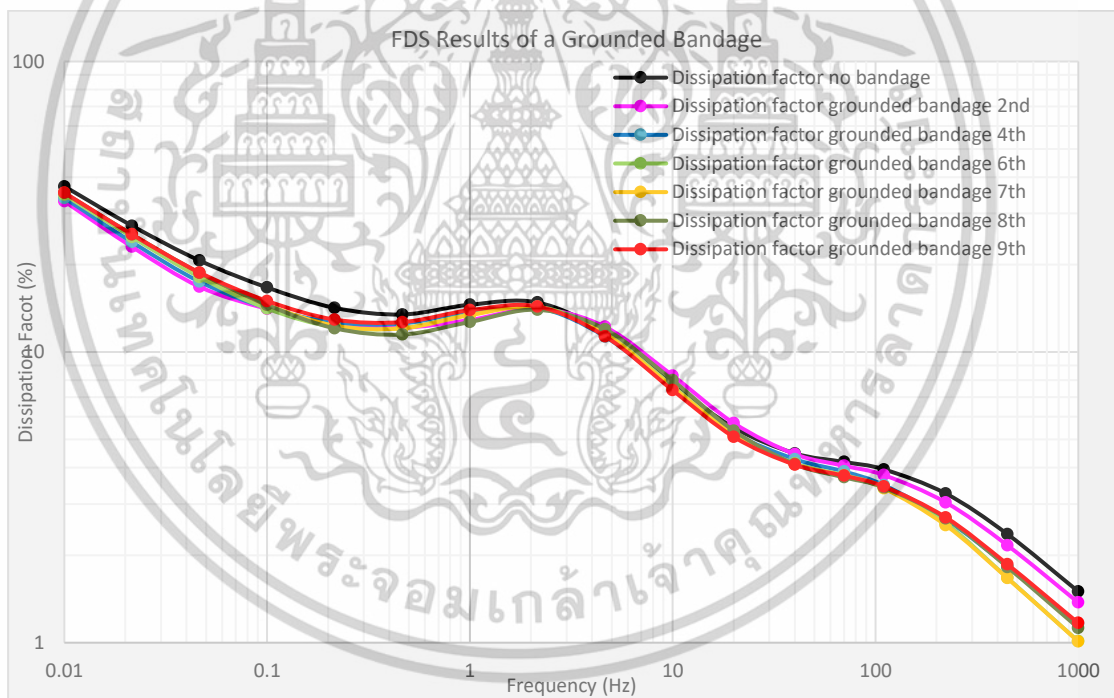
จากผลการทดสอบของบุงชิ่ง 115 กิโลโวลต์ ในรูปที่ 4.10ก) และตารางที่ 4.4 จะเห็นได้ชัดเจนว่า ในทุกช่วงความถี่ ค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริกในกรณี Grounded Bandage / Grounded Collar กรณีไม่มี Bandage / Collar จะมีขนาดสูงที่สุด ตามด้วยตำแหน่งได้ครีบ 1 ได้ครีบ 2 ได้ครีบ 3 ตามลำดับ จากนั้นค่าของตำแหน่ง 3 ถึง 9 จะเริ่มใกล้เคียงกัน ซึ่งโดยทฤษฎีแล้วกระแสที่ปกติไหลผ่านฉนวนเข้าสู่ระบบวัดจะมีค่าลดลง เนื่องมาจากการที่ Grounded Bandage / Grounded Collar สร้างเส้นทางกระแสออกจากระบบฉนวน ดังรูปที่ 2.15 โดยยิ่งระยะห่างระหว่างชั้นตัวนำกับ Bandage / Collar มีค่าน้อยก็จะทำให้ค่าความจุไฟฟ้าคัปปลิงสูงขึ้น แต่เนื่องจากกรณีนี้ค่าความจุไฟฟ้าจากทุกกรณีที่ไม่ต่างกันมาก ทำให้กระแสที่ออกจากระบบฉนวนมีค่าใกล้เคียงกัน จึงทำให้ไม่มีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริกที่เด่นชัดเหมือนกรณี Voltage Bandage / Voltage Collar แต่กรณีของ 115 กิโลโวลต์ จะเห็นว่าแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ เมื่อตำแหน่ง Bandage / Collar ต่ำลงเรื่อยๆ ซึ่งจะสอดคล้องกับค่าความจุไฟฟ้าที่ลดลง

ในส่วน of ค่าความจุไฟฟ้าส่วนจริงของบุงชิ่ง 115 กิโลโวลต์ ผลลัพธ์การทดสอบในรูปที่ 4.10 (ข) และตารางที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่า ในทุกช่วงความถี่ ค่าความจุไฟฟ้าส่วนจริงของกรณี Grounded Bandage / Grounded Collar กรณีไม่มี Bandage / Collar จะมีขนาดสูงที่สุด ตามด้วยตำแหน่งได้ครีบ 1 ได้ครีบ 2 ได้ครีบ 3 ตามลำดับ จากนั้นค่าของตำแหน่ง 3 ถึง 9 จะเริ่มใกล้เคียงกัน โดยยิ่งความถี่ต่ำลงค่าความจุไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มเพียงเล็กน้อยอย่างไม่มีนัยยะสำคัญ ซึ่งสามารถดูได้จากค่า Capacitance ratio

จะเห็นได้ว่าค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริกทุกช่วงความถี่ ไม่สามารถบ่งบอกถึงผลของกระแสรั่วไหลจากฝั่งกราวด์ เนื่องจากทุกตำแหน่งของ Grounded Bandage / Grounded Collar มีค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริกใกล้เคียงกันที่ความถี่เดียวกัน

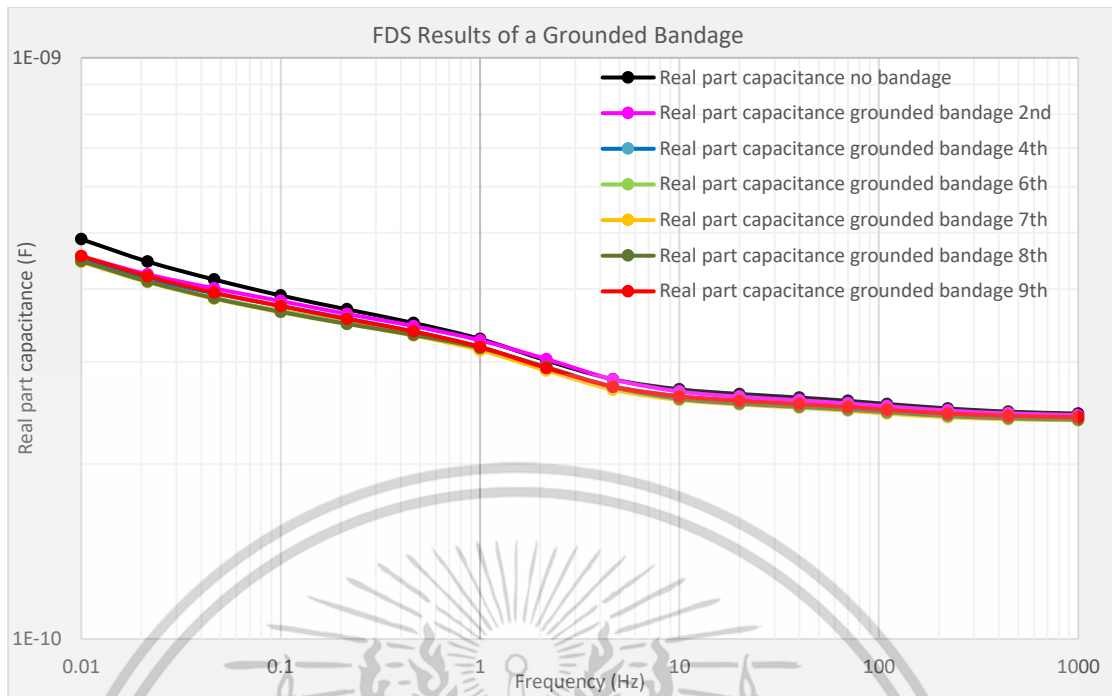


รูปที่ 4.9 วงจรการทดสอบ ผลของ Grounded Bandage / Grounded Collar
ต่อผลการทดสอบ FDS/DFR ของบุชชิง 115 กิโลโวลต์



(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

รูปที่ 4.10 ผลลัพธ์การทดสอบ ผลของ Grounded Bandage / Grounded Collar ต่อผลการทดสอบ FDS/DFR ของบุชชิง 115 กิโลโวลต์ (ก) ค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริก (ข) ค่าความจุไฟฟ้า ส่วนจริง

ตารางที่ 4.4 พารามิเตอร์ในการวินิจฉัยจากกรณี Grounded Bandage / Grounded Collar ของบุชชิง 115 กิโลโวลต์

Grounded bandage cases	Dissipation factor at 10 mHz (%)	Dissipation factor at 50 Hz (%)	Capacitance at 10 mHz (pF)	Capacitance at 50 Hz (pF)	Capacitance ratio C(10mHz)/C(50Hz)
No bandage	37.18	4.36	487.330	258.957	1.882
Under 1 st shed	34.54	4.33	445.964	256.053	1.742
Under 2 nd shed	33.04	4.30	455.245	256.185	1.777
Under 3 rd shed	33.41	4.26	452.885	253.662	1.785
Under 4 th shed	33.91	4.12	450.102	252.057	1.786
Under 5 th shed	34.40	3.90	447.493	250.486	1.787

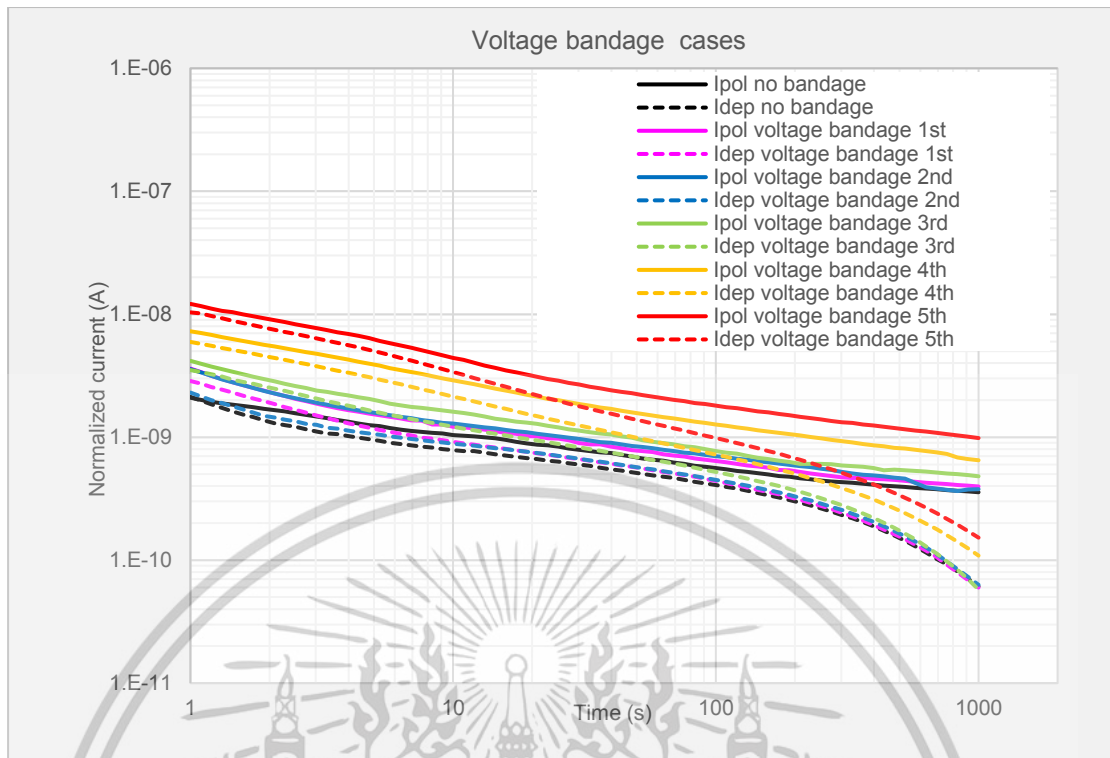
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Grounded bandage cases	Dissipation factor at 10 mHz (%)	Dissipation factor at 50 Hz (%)	Capacitance at 10 mHz (pF)	Capacitance at 50 Hz (pF)	Capacitance ratio C(10mHz)/C(50Hz)
Under 6 th shed	34.80	3.99	445.929	249.359	1.788
Under 7 th shed	35.20	3.97	445.750	248.745	1.792
Under 8 th shed	35.28	3.95	447.149	249.770	1.790
Under 9 th shed	35.36	3.96	455.900	252.535	1.805

4.4 ผลของ Voltage Collar ต่อผลตอบสนองไดอิเล็กทริกในโดเมนเวลา PDC สำหรับบุชชิ่งแบบกระดาษฉนวนน้ำมัน 22 kV

จากผลการทดสอบ PDC ของบุชชิ่ง 22 กิโลโวลต์ ในรูปที่ 4.11 จะเห็นได้ชัดเจนว่า ในกรณีของ Voltage Bandage / Voltage Collar ที่ผิวบุชชิ่ง กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของ Voltage Bandage / Voltage Collar ได้ครีปที่ 5 มีขนาดสูงที่สุด ตามด้วยได้ครีปที่ 4 ได้ครีปที่ 3 ได้ครีปที่ 2 และได้ครีปที่ 1 ตามลำดับ สาเหตุเนื่องมาจากกระแสที่ปกติไหลผ่านฉนวนเข้าสู่ระบบวัด ถูกเพิ่มเข้ามาจากการที่ Voltage Bandage / Voltage Collar สร้างเส้นทางกระแสเพิ่มเข้าสู่ระบบฉนวน ดังรูปที่ 2.15 โดยยิ่ง Voltage Bandage / Voltage Collar ใกล้กับชั้นตัวนำมากเท่าไร ก็จะมีค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุคัปปลิ่งมากยิ่งขึ้น ซึ่งที่ตำแหน่งได้ครีปที่ 5 จะมีระยะห่างระหว่าง Bandage/Collar กับชั้นตัวนำน้อยที่สุดซึ่งมาจากการดีไซน์ของตัวบุชชิ่ง ทำให้ค่าความจุไฟฟ้าคัปปลิ่งมีค่าสูงที่สุด ทำให้กระแสกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันในกรณีนี้สูงที่สุดนั่นเอง

จากการที่กราฟกระแสมีการยกตัวสูงขึ้นทุกช่วงเวลา เราสามารถตีความได้ว่าเกิดการเสื่อมสภาพจากการใช้งาน [5] ดังนั้นกระแสรั่วไหลจากฝั่งแรงดันสูงจะทำให้การวิเคราะห์ผิดพลาดได้

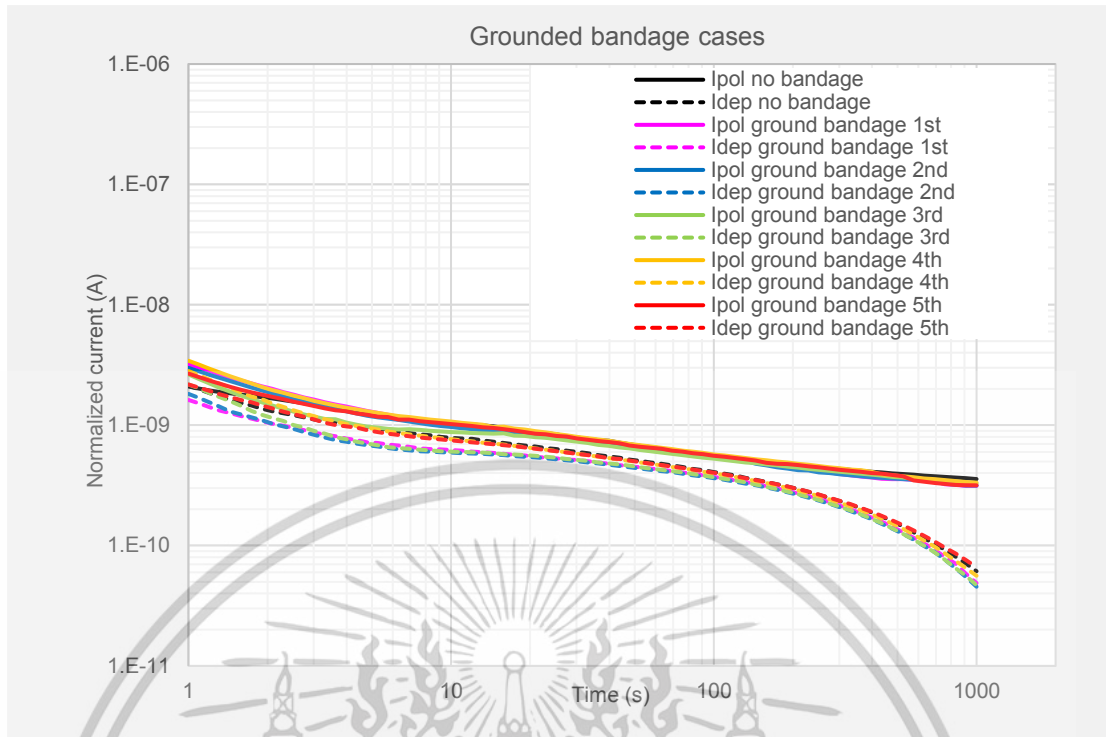


รูปที่ 4.11 ผลลัพธ์การทดสอบ ผลของ Voltage Bandage / Voltage Collar ต่อผลการทดสอบ PDC ของบุงซิ่ง 22 กิโลโวลต์

4.5 ผลของ Grounded Collar ต่อผลตอบสนองไดอิเล็กตริกในโดเมนเวลา PDC สำหรับบุงซิ่งแบบกระดาษฉนวนน้ำมัน 22 kV

จากผลการทดสอบ PDC ของบุงซิ่ง 22 กิโลโวลต์ ในรูปที่ 4.12 จะเห็นได้ชัดเจนว่า ในกรณีของ Grounded Bandage / Grounded Collar ที่ผิวบุงซิ่ง กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของ Grounded Bandage / Grounded Collar ทุกกรณีมีค่าใกล้เคียงกัน ตามทฤษฎีแล้วกระแสที่ปกติไหลผ่านฉนวนเข้าสู่ระบบวัดจะมีค่าลดลง เนื่องมาจากการที่ Grounded Bandage / Grounded Collar สร้างเส้นทางกระแสออกจากระบบฉนวน ดังรูปที่ 2.15 โดยยิ่งระยะห่างระหว่างชั้นตัวนำกับ Bandage / Collar มีค่าน้อยก็จะทำให้ค่าความจุไฟฟ้าคัปปลิงสูงขึ้น แต่จากกรณีนี้จะเห็นว่ากระแสมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยหรือแทบจะไม่ลดเลย แสดงว่า Grounded Bandage / Grounded Collar สร้างตัวเก็บประจุคัปปลิงที่มีค่าใกล้เคียงกัน ทำให้กระแสที่ออกจากระบบฉนวนมีค่าใกล้เคียงกัน จึงทำให้ไม่มีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันที่เด่นชัดเหมือนกรณี Voltage Bandage / Voltage Collar

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 ผลลัพธ์การทดสอบ ผลของ Grounded Bandage / Grounded Collar ต่อผลการทดสอบ PDC ของบุชชิ่ง 22 กิโลโวลต์

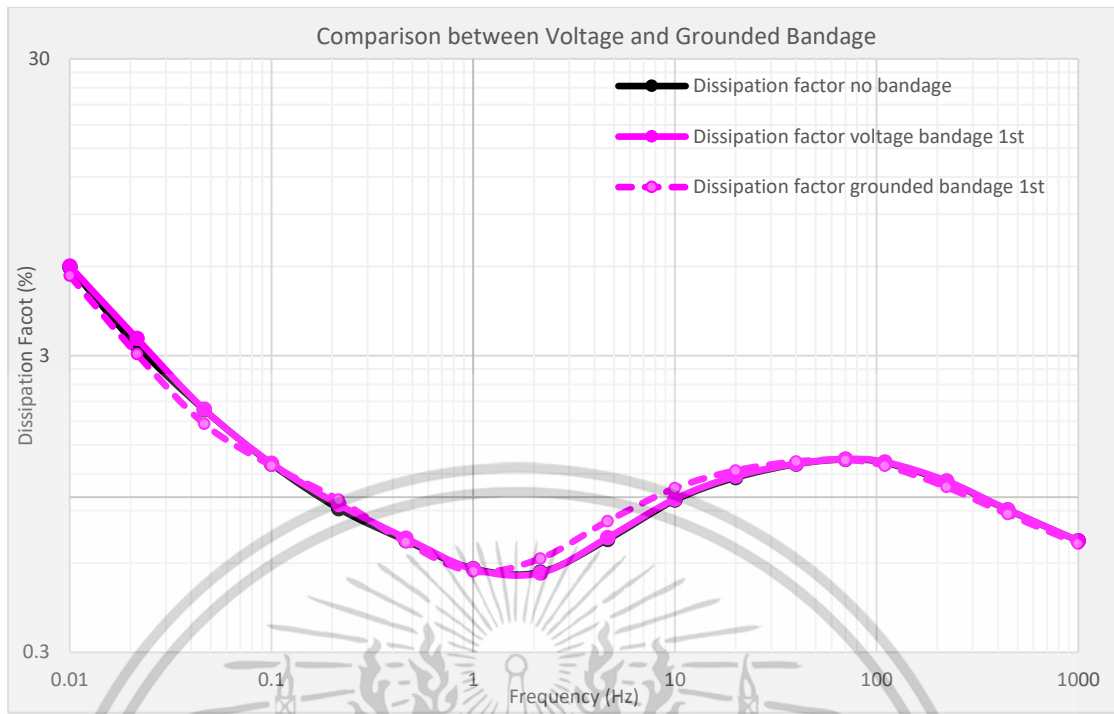
4.6 เปรียบเทียบระหว่าง Voltage Bandage / Voltage Collar และ Grounded Bandage / Grounded Collar ต่อผลตอบสนองไดอิเล็กตริก สำหรับบุชชิ่งแบบกระดาษฉนวนน้ำมัน 22 kV

เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริกและค่าความจุไฟฟ้า ซึ่งเป็นผลตอบสนองไดอิเล็กตริกในโดเมนความถี่ และค่ากระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน ซึ่งเป็นผลตอบสนองไดอิเล็กตริกในโดเมนเวลา ของทั้งกรณี Voltage Bandage / Voltage Collar และกรณี Grounded Bandage / Grounded Collar ในตำแหน่งเดียวกันและมีกรณีไม่มี Bandage/Collar เป็นกราฟอ้างอิง

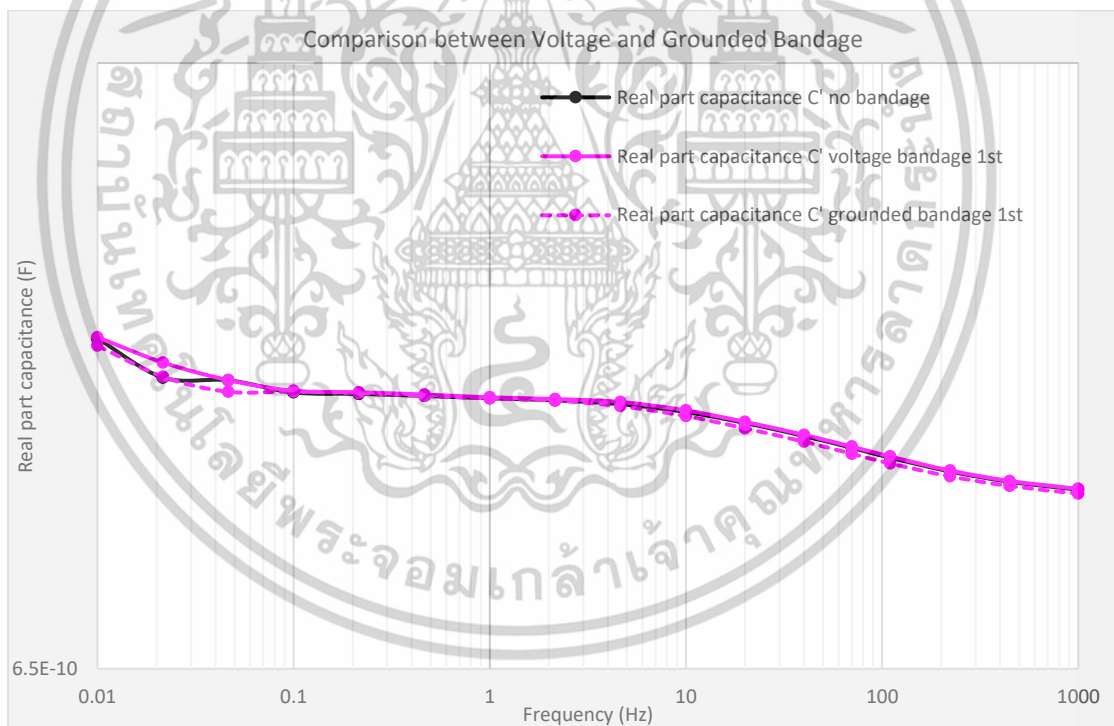
เราสามารถสรุปได้ว่า ถ้ากระแสรั่วไหลมีค่าไม่มากก็จะไม่ทำให้ค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริก ค่าความจุไฟฟ้า ค่ากระแสโพลาริเซชัน และ กระแสดีโพลาริเซชัน มีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด อย่างเช่นกรณี Bandage / Collar ใต้ครีปที่ 1 ดังรูปที่ 4.13 และ 4.14

ถ้ากระแสรั่วไหลมีค่าสูงมากพอ ก็จะทำให้ค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริก ค่าความจุไฟฟ้า ค่ากระแสโพลาริเซชัน และ กระแสดีโพลาริเซชัน มีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด อย่างเช่นกรณี Bandage / Collar ใต้ครีปที่ 4 ดังรูปที่ 4.15 และ 4.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



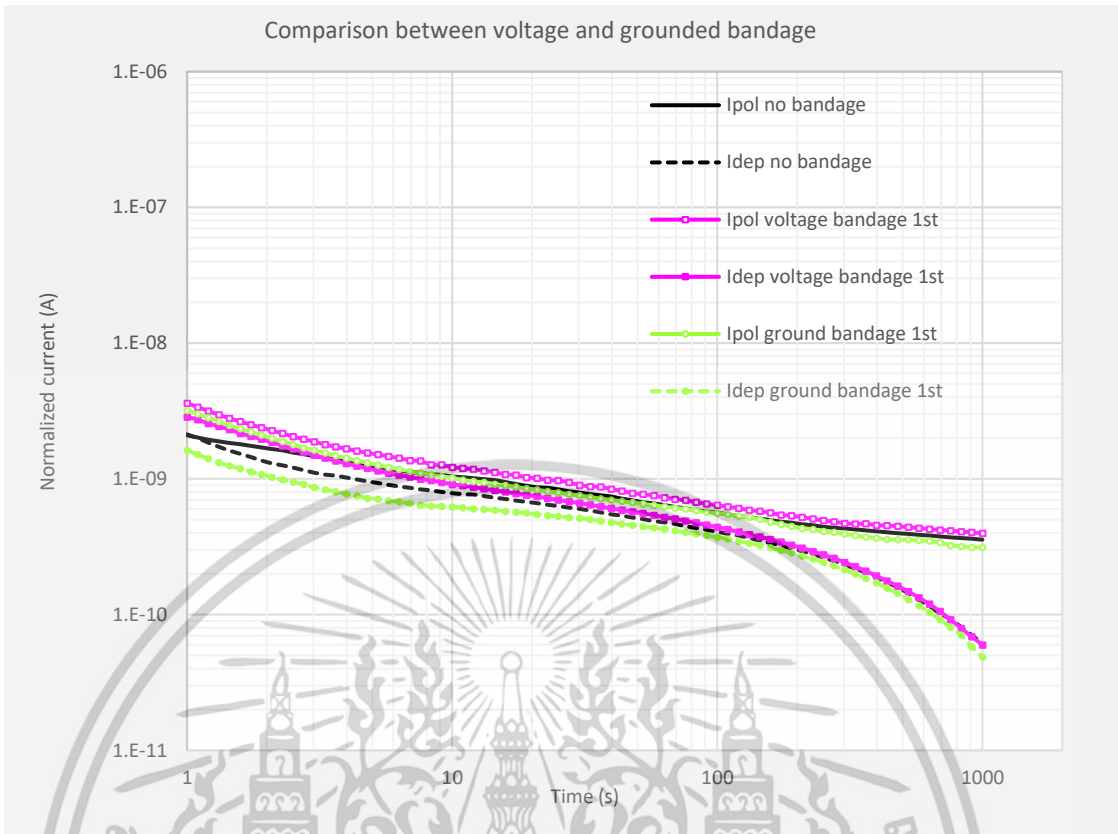
(ก)



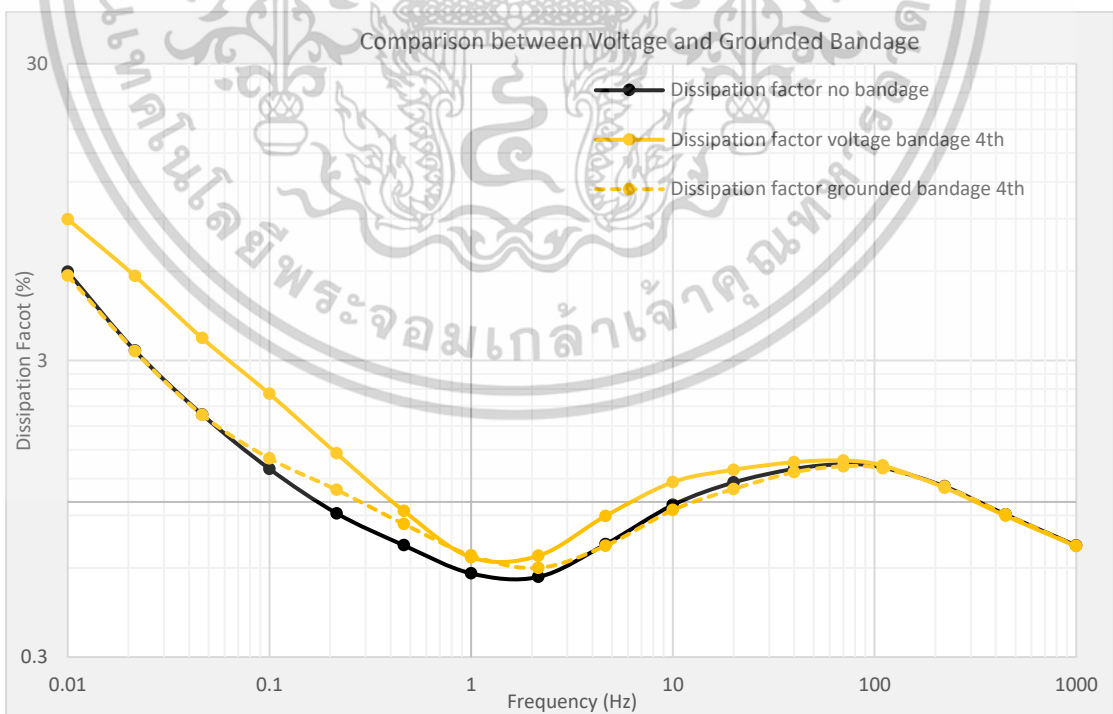
(ข)

รูปที่ 4.13 เปรียบเทียบผล FDS ของ Voltage Bandage และ Grounded Bandage ของบุชชิง 22 กิโลโวลต์ ตำแหน่งใต้คืบ 1 (ก) ค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริก (ข) ค่าความจุไฟฟ้าส่วนจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

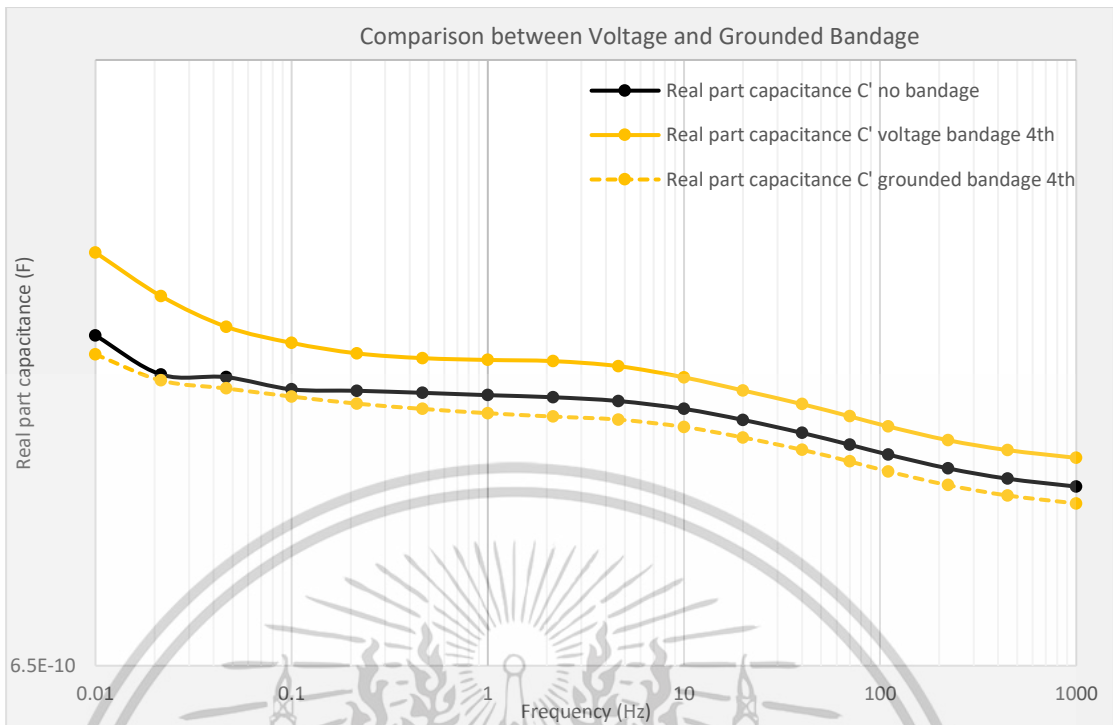


รูปที่ 4.14 เปรียบเทียบผล PDC ของ Voltage Bandage และ Grounded Bandage ของบุงซิ่ง 22 กิโลโวลต์ ตำแหน่งใต้ครีป 1



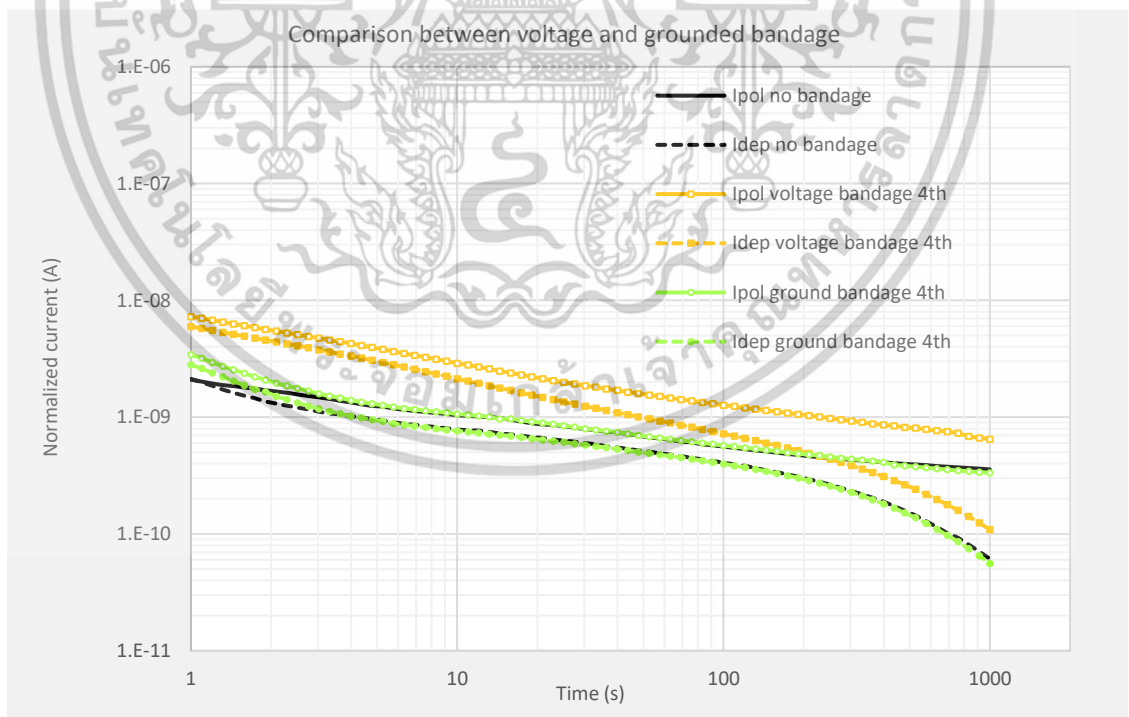
(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

รูปที่ 4.15 เปรียบเทียบผล FDS ของ Voltage Bandage และ Grounded Bandage ของบุชชิง 22 กิโลโวลต์ ตำแหน่งได้ครีบ 4 (ก) ค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริก (ข) ค่าความจุไฟฟ้าส่วนจริง



รูปที่ 4.16 เปรียบเทียบผล PDC ของ Voltage Bandage และ Grounded Bandage ของบุชชิง 22 กิโลโวลต์ ตำแหน่งได้ครีบ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้ศึกษาและทำการทดลองผลของกระแสรั่วไหลที่ผิวบุชชิงแรงดันสูงแบบกระดาดาชุ่มน้ำมันต่อผลตอบสนองไดอิเล็กตริกในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่

โดยเทคนิคที่ใช้ในการวัดผลตอบสนองไดอิเล็กตริกในโดเมนความถี่ คือ เทคนิคไดอิเล็กตริกสเปกโตรสโคปีในโดเมนความถี่ (Frequency domain spectroscopy, FDS) และการวัดผลตอบสนองไดอิเล็กตริกในโดเมนเวลา คือ เทคนิคการวัดกระแสโพลาไรเซชันและกระแสดีโพลาไรเซชัน (Polarization and depolarization current measurement, PDC)

จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่าผลของกระแสรั่วไหลที่ผิวบุชชิงแรงดันสูงแบบกระดาดาชุ่มน้ำมันจากฝั่งแรงดันสูง ซึ่งจำลองโดยการใส่ Voltage Bandage / Voltage Collar ส่งผลต่อผลตอบสนองไดอิเล็กตริกในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่อย่างเห็นได้ชัดเจน ทั้งค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริก ค่าความจุไฟฟ้า ค่ากระแสโพลาไรเซชัน และ กระแสดีโพลาไรเซชัน ซึ่งแตกต่างจากกรณีกระแสรั่วไหลที่ผิวบุชชิงแรงดันสูงแบบกระดาดาชุ่มน้ำมันจากฝั่งกราวด์ ซึ่งจำลองโดยการใส่ Grounded Bandage / Grounded Collar ที่ไม่ได้ส่งผลต่อผลตอบสนองไดอิเล็กตริกทั้งในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่อย่างเห็นได้ชัดเจน

โดยถ้ากระแสรั่วไหลที่ผิวบุชชิงแรงดันสูงแบบกระดาดาชุ่มน้ำมันจากฝั่งแรงดันสูงมีค่าสูงพอ ก็ จะเห็นแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริก ค่าความจุไฟฟ้า ค่ากระแสโพลาไรเซชัน และ กระแสดีโพลาไรเซชัน ได้ชัดเจน

ค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริกที่ความถี่ 50 เฮิร์ต ไม่สามารถระบุผลของกระแสรั่วไหลจากทั้งฝั่งแรงดันสูงและจากฝั่งกราวด์ได้ สำหรับบุชชิง 22 กิโลโวลต์ เราสามารถดูค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริกที่ความถี่ต่ำกว่า 1 เฮิร์ตเพื่อดูผลของกระแสรั่วไหลจากฝั่งแรงดันสูงได้ สำหรับบุชชิง 115 กิโลโวลต์ เราสามารถดูค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริกที่ความถี่สูงกว่า 10 เฮิร์ตเพื่อดูผลของกระแสรั่วไหลจากฝั่งแรงดันสูงได้ สำหรับบุชชิงทั้ง 2 ระดับแรงดัน ผลของกระแสรั่วไหลจากฝั่งกราวด์ไม่สามารถตรวจสอบจากค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริกได้

ค่าอัตราส่วนความจุไฟฟ้าซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างความจุไฟฟ้าที่ 10 มิลลิเฮิร์ต ทหารด้วย ความจุไฟฟ้าที่ 50 เฮิร์ต ไม่เหมาะสำหรับการใช้เป็นตัวบ่งชี้กระแสรั่วไหลจากทั้งฝั่งแรงดันสูงและจากฝั่งกราวด์ แม้ว่าสำหรับบุชชิง 22 กิโลโวลต์อัตราส่วนความจุไฟฟ้าที่จะมีค่าสูงขึ้นไปไม่ได้สูงมากอย่าง มีนัยยะสำคัญ ทำให้ค่าอัตราส่วนความจุไฟฟ้านี้ยังคงสามารถใช้ในการตีความสภาพความชื้นของ ฉนวนกระดาดาชุ่มน้ำมันในบุชชิงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองในวิทยานิพนธ์มีประเด็นต่างๆ ที่สำคัญซึ่งต้องคำนึงถึงในการทดสอบ ได้แก่

1. การเพิ่มขึ้นของค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริก $\tan \delta$ ที่ความถี่ต่ำ สามารถเป็นผลมาจากการที่มีความชื้นหรือ by products จากการเสื่อมสภาพจากการใช้งาน ในระบบฉนวนบุขซึ่งสูง หรือ เกิดจากกระแสรั่วไหลจากฝั่งแรงดันสูงสำหรับบุขซึ่งแรงดัน 22 กิโลโวลต์
2. การเพิ่มขึ้นของค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริก $\tan \delta$ ที่ความถี่สูง สามารถเป็นผลมาจากปัญหาจุดต่อภายในที่ tap วัด หรือจุดต่อไฟแรงสูง หรือ การช็อตกันระหว่างชั้นตัวนำแบบมีค่าความต้านทาน หรือ เกิดจากกระแสรั่วไหลจากฝั่งแรงดันสูงสำหรับบุขซึ่งแรงดัน 115 กิโลโวลต์
3. การยกตัวสูงขึ้นของกราฟกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน สามารถเป็นผลมาจากการเสื่อมสภาพจากการใช้งานของระบบฉนวนบุขซึ่ง หรือเกิดจากกระแสรั่วไหลที่ผิวบุขซึ่งจากฝั่งแรงดันสูง

จากประเด็นทั้ง 3 ข้อนี้นั้น เน้นย้ำให้เห็นว่าผลของกระแสรั่วไหลที่ผิวบุขซึ่งจากฝั่งแรงดันสูงต้องถูกกำจัดออกก่อนที่จะทำการทดสอบผลตอบสนองไดอิเล็กตริก เพื่อที่จะวินิจฉัยสภาพฉนวนบุขซึ่งแรงดันสูงแบบกระดาศู่มน้ำมันที่แท้จริงได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ทำความสะอาดผิวบุขซึ่งให้ทั่วถึงเพื่อลดหรือกำจัดผลของกระแสรั่วไหลที่ผิวก่อนจะทำการทดสอบผลตอบสนองไดอิเล็กตริกทุกหัวข้อ
2. การเปรียบเทียบผลตอบสนองไดอิเล็กตริกต้องเปรียบเทียบที่อุณหภูมิเดียวกันเนื่องจากอุณหภูมิมีผลต่อผลการทดสอบ
3. ควรมีการทดสอบกับบุขซึ่งระดับแรงดันอื่นเพิ่มเติมเพื่อดูลักษณะผลการตอบสนองว่ามีความแตกต่างกันอย่างไร
4. ควรมีการทดสอบกับบุขซึ่งฉนวนประเภทอื่นเพื่อดูลักษณะผลการตอบสนองว่ามีความแตกต่างกันอย่างไร
5. สามารถจำลองสภาพเปราะเปื้อนที่ผิวบุขซึ่งด้วยสิ่งเปราะเปื้อนจริง เช่น ฝุ่นซีเมนต์ ผงเหล็ก เพื่อดูลักษณะผลตอบสนองที่แสดงถึงสภาพหน้างานจริง
6. ควรมีการเก็บข้อมูลผลการทดสอบจากบุขซึ่งที่ติดตั้งใช้งานจริงและเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากห้องปฏิบัติการ เพื่อดูผลของการติดตั้งต่อผลการทดสอบ
7. ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการทดสอบอื่นๆ ที่จะช่วยในการประเมินระบบฉนวนบุขซึ่งซึ่งไม่จำเป็นต้องเป็นแบบกระดาศู่มน้ำมัน
8. ควรศึกษาการทดสอบน้ำมันในบุขซึ่งว่าสภาพน้ำมันมีผลต่อผลตอบสนองไดอิเล็กตริกอย่างไร เช่น ความนำไฟฟ้าของน้ำมัน ความชื้นของน้ำมัน อุณหภูมิของน้ำมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] CIGRE WG A2.37, TRANSFORMER RELIABILITY SURVEY, Technical Brochure 642, 2015.
- [2] H.M. Ryan, High-Voltage Engineering and Testing, 3rd ed., The Institute of Engineering and Technology, 2013.
- [3] M. Krüger, Diagnostic Measurements and Condition Assessment of High Voltage Bushings, CEPED Conference on Electrical Power Equipment Diagnostics, 2015, Kuala Lumpur, Malaysia
- [4] CIGRE WG A2.34, Guide for Transformer Maintenance, Technical Brochure 445, 2011.
- [5] CIGRE WG A2.43, Transformer bushing reliability, Technical Brochure 755, 2019.
- [6] M. Anghuber and J.L. Velásquez Contreras, Dispersing the clouds – gain clear insight into your bushings using advanced diagnostic methods, Omicron
- [7] B. Dupuis, Bushing Power Factor Testing: In-Depth, Omicron slides, 2018
- [8] M. Anghuber, Measuring and analyzing the dielectric response of bushings, Omicron Application Note, 2017
- [9] C2 Or Not To C2, That is the Question, <http://alamo.abbus.com/Bushings/C1C2paperA.htm>
- [10] M. Koch, M. Krüger, The negative dissipation factor and the interpretation of the dielectric response of power transformers, 16th International Symposium on High Voltage Engineering, Cape Town, South Africa, 24-28 August 2009.
- [11] A. Mikulecky, Capacitance and dielectric dissipation factor of transformers bushings, PhD thesis, University of Zagreb, 2006.
- [12] Norbert Koch, Presentation on 9th WG A2.43 meeting, Split, 2014.
- [13] Karl Widmeier, Zustandserfassung und Bewertung von Durchführungen im Betrieb, MICAFIL Symposium, Stuttgart, 1999.
- [14] Bushings Diagnostic and Conditioning, ABB Brochure 2750 515-142en 2000-08-30.
- [15] M. Krüger et al., New Diagnostic Tools for High Voltage Bushings, CIGRE VI Workspot, Foz do Iguacu, Brazil, 2010.
- [16] A. Mikulecky, Diagnostics of Transformers Condenser Type Bushings, University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering and Computing, MSc thesis, 2003.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [17] SC 36A "Insulated Bushings", Insulated bushings for alternating voltages above 1000 V, IEC 60137-2017
- [18] The General Requirements and Test Procedures for Power Apparatus Bushings Working Group, IEEE Standard General Requirements and Test Procedure for Power Apparatus Bushings, IEEE Std. C57.19.00-2004.
- [19] S.D. Kassihin et al., Service experience and reasons of bushings failures of EHV transformers and shunt reactors, CIGRE 1996, Paris, Ref. 12.105.
- [20] Viktor V. Sokolov, Boris V. Vanin, Evaluation and identification of typical defects and failure modes in 110-750 kV bushings, Proceedings of 64th international conference of Doble clients, 1997.
- [21] D. J. Kopacinski and S. J. Mainfese, Negative power factor of Doble insulation test specimens (an analysis), 54AIC87.
- [22] E. Kuffel, W.S. Zaengl, and J. Kuffel, High Voltage Engineering: Fundamentals, 2nd ed., Newnes, 2000.
- [23] Dielectric Tests-Frequency Domain Spectroscopy Working Group, IEEE Guide for the Dielectric Frequency Response Measurement of Bushings, IEEE Std C57.12.200™-2022.
- [24] สำรวย สัจจ์สะอาด, "การทดสอบแบบไม่ทำลาย," วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, กรุงเทพมหานคร, 2549.
- [25] A. Kuchler, High Voltage Engineering Fundamentals - Technology - Applications, 1st ed., Springer Vieweg Berlin, Heidelberg, 2018.
- [26] M. H. Zink, Condition assessment of service-aged high-voltage transformer bushings with oil-paper dielectric by means of dielectric diagnostics, Dissertation Technische Universität Ilmenau, Universitätsverlag Ilmenau, 2013.
- [27] F. Huellmandel, M. Appold, A. Kuchler, R. Krump, and J. Titze, Condition Assessment of High Voltage Bushings by Means of Dielectric Diagnosis with PDC, International Symposium on High Voltage Engineering (ISH), Ljubljana, 2007.
- [28] S. A. Bhumiwat, Insulation Condition Assessment of Transformer Bushings by means of Polarisation / Depolarisation Current Analysis, IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Indianapolis, 2004.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



บทความวิชาการ

W. Rojanasunan, K. Chumpiboon, P. Udomluksananon, S. Jeenmuang, P. Chancharoensook and N. Pattanadech, " The Effect of Surface Leakage Current on Dielectric Response of 22 kV OIP Bushing," 2024 14th IEEE International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM2024), Phuket, Thailand, 2024, pp. 01-05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2024 International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM)

ICPADM 2024

August 4th - 7th 2024
Phuket, Thailand

CALL FOR PAPERS

August 4th - 7th, 2024 **Duangjitt Resort and Spa, Phuket, Thailand**

The 2024 International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM) is the 14th meeting of this conference series. The IEEE Dielectrics and Electrical Insulation Society (DEIS) undertook sponsorship of the conference after the first meeting in June 24-28, 1985.

ICPADM 2024 will be held in Phuket, Thailand organized by King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Thailand

- All accepted papers for ICPADM 2024 will be included in the IEEE Xplore Digital Library
- "Young Researcher and Professional Award" will be announced during the closing ceremony of ICPADM 2024.

INTERNATIONAL ADVISORY COMMITTEE

• Harry	Orton (Canada) (Chair)
• A. S.	Laksamana (India)
• George	Chen (UK)
• Gilbert	Teysbedre (France)
• Harjo	Suwarno (Indonesia)
• Gian	Carlo Montanari (Italy)
• Lisheng	Zhong (China)
• Michael	G. Danikas (Greece)
• Norasage	Pattanasach (Thailand)
• Radek	Polansky (Czech Republic)
• Markus	H. Zink (Germany)
• Sheshakamal	Jayaram (Canada)
• Toan	Phung (Australia)
• Yasuo	Suzuoki (Japan)
• Zulkurnain	Abdul-Malak (Malaysia)

LOCAL ORGANIZING COMMITTEE (CONT.)

• Kemim	Chiangboon, Technical Program chair, KMITL, Thailand
• Krit	Kitwattana, Technical Program co-chair, RMUTT, Thailand
• Chianarong	Banmongkol, Technical Program co-chair, CU, Thailand
• Sakda	Laehachans, Technical Program co-chair, Cigre' A1, Thailand
• Supawud	Nedphogrow, Technical Program co-chair, RMUTP, Thailand
• Naruabadee	Srisang, Technical Program co-chair, KMITL, Thailand
• Supekit	Chotigo, Technical Program co-chair, KMUTT, Thailand
• Suthat	Suksagoolpalya, Technical Program co-chair, EGAT, Thailand
• Sukanya	Kingkham, Technical Program co-chair, KMITL, Thailand
• Worawut	Dachothamsathit, Technical Program co-chair, KMITL, Thailand
• Woraphat	Ekasitthiphong, Technical Program co-chair, KMITL, Thailand
• Phitthaya	Alamrungrong, Technical Program co-chair, KMITL, Thailand
• Panchaya	Poonrathapoom, Technical Program co-chair, KMITL, Thailand
• Patchara	Thangkong, Technical Program co-chair, KMITL, Thailand
• Techatal	Buranasudsawakul, Technical Program co-chair, EIT, Thailand
• Porpattana	Hairmachukittikul, Technical Program co-chair, PKRU, Thailand
• Akarachai	Inthanin, Technical Program co-chair, PKRU, Thailand
• Vadival	Rajaratnam, Technical Program co-chair, PKRU, Thailand
• Patt	Udomluksananon, Special session chair, KMITL, Thailand
• Sirichai	Dangsam, Special session co-chair, RMUTT, Thailand
• Nisanut	Phansiri, Special session co-chair, UBU, Thailand
• Noppol	Yodrayab, Special session co-chair, KMITL, Thailand
• Sanchari	Yodhanee, Special session co-chair, PKRU, Thailand
• Chanathinat	Charyapoo, Special session co-chair, PKRU, Thailand
• Dusit	Suksawat, Sponsorship & Exhibition chair, KMITL, Thailand
• Wiboon	Prophanich, Financial chair, KMITL, Thailand
• Viethya	Rugpong, Financial co-chair, IEEE Thailand Section, Thailand
• Somyot	Tantipattarakul, Industrial chair, EGAT, Thailand
• Sathit	Kirapee, Industrial co-chair, Charoeng Thai Wire & Cable PCL, TH
• Sakda	Manerot, Industrial co-chair, Tesla Power Co., Ltd., Thailand
• Sittipong	Kerdmanee, Industrial co-chair, GPSC, Thailand
• Somchat	Jinwibhakom, Industrial co-chair, KMITL, Thailand
• Warisanan	Rojanasunan, Tutorial chair, KMITL, Thailand
• Winsai	Methavithit, Tutorial co-chair, RMUTK, Thailand
• Kittisak	Thungsook, Tutorial co-chair, RMUTR, Thailand
• Thatchapol	Chungcharoen, Tutorial co-chair, KMITL, Thailand
• Kritsada	Dorkmai, Publication chair, KMITL, Thailand
• Thanpilin	Banthoengjai, Publication co-chair, KMITL, Thailand
• Chanin	Bunlaksananusorn, Publication co-chair, KMITL, Thailand
• Siriwan	Srisang, Hospitality chair, KMITL, Thailand
• Siriwan	Polset, Hospitality co-chair, VRU, Thailand
• Shazia	Kanwal, Hospitality co-chair, KMITL, Thailand
• Aroonsri	Wongpatikarn, Hospitality co-chair, PKRU, Thailand
• Pimpen	Pornchaloempong, Gala diner chair, KMITL, Thailand
• Thanwarat	Srimora, Gala diner co-chair, KMITL, Thailand
• Kittakorn	Kijomkam, Web master chair, KMITL, Thailand
• Sunn	Kittitornkun, Web master co-chair, KMITL, Thailand
• Praditpong	Suksirithawornkul, Secretary of IEEE PES, Thailand

LOCAL ORGANIZING COMMITTEE

• Komsan	Maleesee, Honorary chair, KMITL, Thailand
• Somyot	Kaitwanidvilai, Honorary chair, KMITL, Thailand
• Samruay	Sangkasaad, Honorary chair, OGF, Thailand
• Thaweevat	Nuntiruj, Honorary chair, TTM, Thailand
• Supachai	Jintanalert, Honorary chair, Sukomboon Group, Thailand
• Siriwat	Potivajkul, Honorary chair, KMITL, Thailand
• Boonchai	Techaumnat, Honorary chair, CU, Thailand
• Teerawut	Wetatham, Honorary chair, EGAT, Thailand
• Krischonme	Bhumkittipich, Honorary chair, RMUTT, Thailand
• Nattachote	Rugthacharoencheep, Honorary chair, RMUTP, Thailand
• Boonyang	Piangklang, Honorary chair, RMUTT, Thailand
• Hiran	Prasankan, Honorary chair, PKRU, Thailand
• Rangsan	Ponsamak, Honorary chair, PKRU, Thailand
• Norasage	Pattanasdech, Chairperson, KMITL, Thailand
• Sompob	Polmai, Co-chairperson, KMITL, Thailand
• Chatchai	Suppitaksakul, Co-chairperson, RMUTT, Thailand
• Sathaporn	Promwong, Co-chairperson, KMITL, Thailand
• Anantawat	Kunakorn, Co-chairperson, KMITL, Thailand
• Tehneht	Worthong, Co-chairperson, GPSC, Thailand
• Chaiyatorn	Limapornvanich, Co-chairperson, NIA, Thailand
• Putsadee	Pornphol, Co-chairperson, PKRU, Thailand
• Siwakorn	Jeenmuang, Secretary, KMITL, Thailand
• Angelina	Phimpissada Hanke, Co-secretary, KMITL, Thailand
• Promsak	Apirattakul, Co-secretary, RMUTT, Thailand
• Pichai	Muangpratoom, Co-secretary, RMUTL, Thailand
• Sukanya	Vongtansoon, Co-secretary, PKRU, Thailand
• Theerayod	Wiangtong, Co-secretary, KMITL, Thailand

All accepted papers for ICPADM 2024 will be included in the IEEE Xplore Digital Library

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถเผยแพร่หรือใช้เพื่อการค้า

IEEE Xplore Digital Library

2024 International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM)

The Effect of Surface Leakage Current on Dielectric Response of 22 kV OIP Bushing

Warisanan Rojanasunan
Department of Electrical Engineering,
School of Engineering,
King Mongkut's Institute of
Technology Ladkrabang,
Bangkok, Thailand
65016084@kmitl.ac.th

Komin Chumpiboon
Department of Electrical Engineering,
School of Engineering,
King Mongkut's Institute of
Technology Ladkrabang,
Bangkok, Thailand
kchumpiboon@gmail.com

Patt Udomluksananon
Department of Electrical Engineering,
School of Engineering,
King Mongkut's Institute of
Technology Ladkrabang,
Bangkok, Thailand
udomluksananon.p@gmail.com

Siwakorn Jeenuang
Department of Electrical Engineering,
School of Engineering,
King Mongkut's Institute of
Technology Ladkrabang,
Bangkok, Thailand
66016093@kmitl.ac.th

Phop Chanchaensook
Department of Electrical Engineering,
School of Engineering,
King Mongkut's Institute of
Technology Ladkrabang,
Bangkok, Thailand
phop.ch@kmitl.ac.th

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

Abstract—In this paper the dielectric response in frequency domain or frequency domain spectroscopy (FDS) and dielectric response in time domain or polarization and depolarization current (PDC) measurement are used to assess the effect of surface leakage current both from high voltage side and ground side on the FDS and PDC results of an OIP bushing. The test object in this paper is a 22 kV OIP bushing which is out of service. The surface leakage current can be simulated using the copper tape as a bandage around the bushing core in several locations. From the FDS results, several parameters, i.e., dissipation factor, capacitance, and capacitance ratio together with frequency scanning of capacitance and dissipation factor from many cases were investigated together with PDC results to get the fundamental knowledge of how to interpret the dielectric response of OIP bushing.

Keywords—frequency domain spectroscopy, polarization and depolarization current, OIP bushing, surface leakage current, condition assessment

I. INTRODUCTION

The bushing is a vital component of the transformer because if bushing fails the transformer can no longer operate as an electricity transfer equipment. That's why the condition assessment of the bushing is the key to improve the reliability of the transformer and also the power system.

Typically the offline dielectric diagnostic tools of bushing are capacitance and dissipation factor at power frequency. Unfortunately, some defects have an influence on dissipation factor at lower frequencies, such as moisture [1], and this offline dissipation factor does not include the influence of partial discharge because of low diagnostic voltage. In normal operation the partial discharge provides additional power loss leading to increasing dissipation factor [2].

To gain more information about dielectric condition, the other diagnostic tool must be used. The frequency domain spectroscopy (FDS) technique is now widely accepted in IEEE standard C57.12.200 as an effective method to detect the bushing insulation deterioration. Although the polarization and depolarization current (PDC) measurement technique presently does not have the guidelines standard, it can also have been used for OIP bushing diagnostic [1].

Ideally, the measuring current extracted from test tap represents the bushing core insulation but practically the effect of surface leakage current on the bushing surface both from air side and liquid side influence the measured capacitance and dissipation factor at any frequencies [3] and also influence polarization and depolarization current. That's why before interpreting any results, the test set up must be ensured that this effect is not included in the results to avoid misinterpretation.

II. FREQUENCY DOMAIN SPECTROSCOPY

Frequency domain spectroscopy (FDS) is a non-destructive test used to diagnostic the insulation of high voltage equipment by measuring the dielectric response in frequency domain. The results of FDS are displayed as a frequency scanning of capacitance and dissipation factor according to (1) in logarithm scale [4]. In principle, the FDS results are not influenced by the size of the bushing because only material properties are considered [1].

$$\tan \delta = \frac{\epsilon_r''(\omega) + \frac{\sigma_0}{\omega \epsilon_0}}{\epsilon_r'(\omega)} \quad (1)$$

where ϵ_0 is permittivity of vacuum, ϵ_r' is the real part of complex relative permittivity, ϵ_r'' is the imaginary part of complex relative permittivity, σ_0 is conductivity of the insulation, ω is frequency

The parameters used to assess the bushing insulation condition are capacitance value used to detect the partial breakdown between grading layers, capacitance ratio, which is capacitance at 10 mHz divided by 50 Hz, used to detect moisture in paper [5], and dissipation factor or power factor used to detect global condition of the insulation including several factors for example aging, chemical contaminant, moisture ingress, high oil conductivity, and carbon tracking [6].

Principally, the dissipation factor contains 3 loss components that is polarization loss from polarization mechanisms, conduction loss from conductance of insulation, and ionization loss in the form of partial discharge.

III. POLARIZATION AND DEPOLARIZATION CURRENT MEASUREMENT

The polarization and depolarization current (PDC) measurement is also non-destructive test used to diagnostic the insulation of high voltage equipment by measuring the dielectric response in time domain. The results of PDC are displayed as a polarization current according (2) together with a depolarization current according (3) over time. Both currents are plotted in logarithm scale [4]. Unlike FDS, the PDC results are influenced by the geometry of the bushing because higher capacitance leading to higher polarization current [1].

$$I_{\text{pat}}(t) = C_0 U_c \left[\frac{\sigma_0}{\epsilon_0} + \epsilon_{\infty} \delta(t) + f(t) \right] \quad (2)$$

$$I_{\text{depat}}(t) = -C_0 U_c [f(t) - f(t + T_c)] \quad (3)$$

where C_0 is geometric or vacuum capacitance of the test object, U_c is constant step voltage, σ_0 is conductivity of the insulation, ϵ_0 is permittivity of vacuum, ϵ_{∞} is relative permittivity for very fast polarization processes, $\delta(t)$ is delta function arising from the suddenly applied step voltage, $f(t)$ is dielectric response function, T_c is duration of time during which the voltage had been applied to the test object.

The PDC results can be analyzed by comparing the measured curve with the curve from previous measurement, the curve from other phase bushing, the curve from sister bushing, or the curve from simulation [1].

IV. SURFACE LEAKAGE CURRENT

The effect of leakage current has been proved in [7,8] that under the contaminated and wetted surface or highly conductive transformer oil the surface leakage current can flow between the free ends of grading layers and the voltage side or the ground side. This effect has also been mentioned in annex C of IEEE standard C57.12.200 [6].

Fig. 1 illustrates the paths of the leakage current on the bushing surface. This effect influences the capacitance and dissipation factor from FDS technique and influences the polarization and depolarization current from PDC technique.

V. EXPERIMENT PROCEDURE

The 22 kV OIP bushing is tested by using FDS technique in ungrounded specimen test (UST) with guard measurement configuration over a frequency range of 0.01-1000 Hz according to [6]. The test voltage is 200 V. The room temperature is controlled under 22 °C.

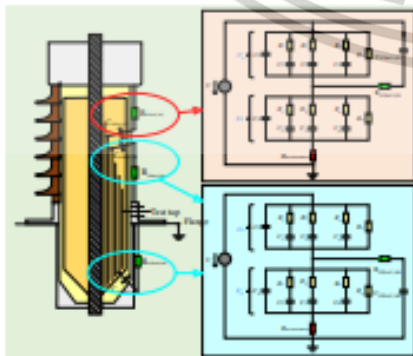


Fig. 1. The paths of the leakage currents on the bushing surface and corresponding equivalent circuits. [6,8]

The 22 kV OIP bushing is tested by using PDC technique in ungrounded specimen test (UST) with guard measurement configuration. The test voltage is 1000 V. The charging time is 1000 second and discharging time is 1000 second. The room temperature is controlled under 22 °C.

In this paper, a bandage made from copper tape was employed to be wrapped circumferentially around the porcelain insulation under the shed to simulate the surface leakage current of bushing. A bandage connected to test voltage is called voltage bandage and a bandage connected to ground is called grounded bandage.

There are 11 scenarios for each technique: no bandage, voltage bandage at 5 different shed locations, and grounded bandage at 5 different shed locations. Fig. 2 and Fig. 3 show the example of test set up of grounded bandage and voltage bandage at under 1st shed.

VI. EXPERIMENT RESULTS AND DISCUSSIONS

The 22 kV OIP bushing's results of 22 cases are classified into 2 groups: PDC and FDS of the voltage bandage case and PDC and FDS of the grounded bandage case. For all graphs from both groups, the no bandage case is used as a baseline or reference.

A. Voltage bandage cases

From the voltage bandage results in Fig. 4(a), it is obvious that the dissipation factor of bandage under 5th shed case is the greatest and followed by 4th shed case, 3rd shed case, 2nd shed case, and 1st shed case respectively.

The reason for this is that the current that normally flows through the insulation is added from the voltage bandage. The lower distance between bandage to grading layer, the more capacitance of coupling capacitor and the more voltage across this capacitor. The coupling capacitance, between bandage under 5th shed to grading layer and voltage across this coupling capacitor are the greatest leading to the highest additional current and also dissipation factor.

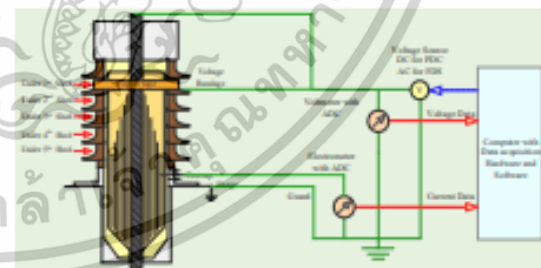


Fig. 2. The test set up of voltage bandage case at under 1st shed.

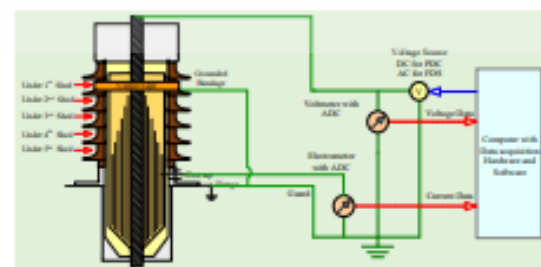


Fig. 3. The test set up of grounded bandage case at under 1st shed.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This is confirmed by the PDC results in Fig. 5 that the polarization current from bandage under 5th shed case is the greatest and followed by 4th shed case, 3rd shed case, 2nd shed case, and 1st shed case respectively.

It is noted that the dissipation factor at 50 Hz do not indicate the effect of surface leakage current from high voltage side because the dissipation factor at 50 Hz from voltage bandage cases are almost the same value. It is important to look at the frequency below 1 Hz to clearly see this effect.

As can be seen in Table 1 and Fig. 4(b), the measured capacitances in all frequency range follow the concept that the lower the frequency, the higher the capacitance. From these results, we can say that the capacitance ratio, capacitance at 10 mHz divided by 50 Hz, can be used to indicate the severity of surface leakage from high voltage side.

Typically, the capacitance ratio is used to detect the moisture in paper according to [5]. If capacitance ratio is also high from the surface leakage from high voltage side, it can lead to wrong interpretation of insulation condition. Fortunately, the maximum capacitance ratio is only 1.1 as can be seen from bandage under 5th shed case. That means this leakage current does not significantly affect the moisture interpretation.

From the dissipation factor trends of voltage bandage case, it can also be interpreted that the bushing insulation is gradually exposure to moisture because dissipation factor is high at low frequency. But actually it is the leakage current from high voltage side that increases the response so the effect of surface leakage current from high voltage side can lead to misinterpret as an high moisture in bushing insulation.

It is mentioned in [1] that the aging effect of bushing leads to vertical shift of the entire curve. PDC results from Fig. 5 also show this behavior so the effect of surface leakage current from high voltage side again bring misinterpretation as an aging effect of bushing insulation.

B. Grounded bandage cases

From the grounded bandage results in Fig. 6(a), the dissipation factors of all cases are close to each other.

The reason for this is that, in principle, the current that normally flows through the insulation is subtracted from the grounded bandage. The lower distance between bandage to grading layer, the more capacitance of coupling capacitor but, in this case, the less voltage across this capacitor. That is why there is no obvious trend of increasing or decreasing of dissipation factor compared to the voltage bandage case. This is confirmed by the PDC results in Fig. 7 that the polarization currents from all grounded bandage cases are nearly the same graph.

It is noted that the dissipation factor and capacitance at any frequency and polarization and depolarization current at any time do not indicate the effect of surface leakage current from ground side.

As can be seen in Table 2 and Fig. 6(b), the measured capacitances in all frequency range are almost the same value leading to stable capacitance ratio around 1.043. From these results, it can be noted that the capacitance ratio, capacitance at 10 mHz divided by 50 Hz, is not suitable for indicating the severity of surface leakage from ground side.

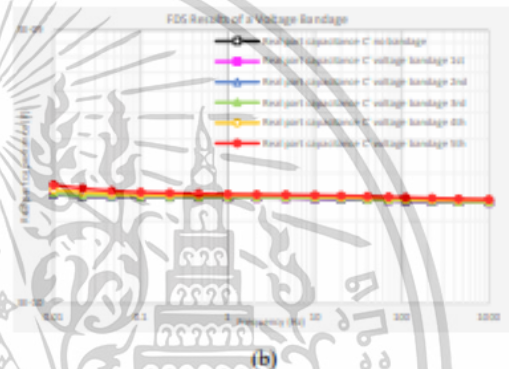
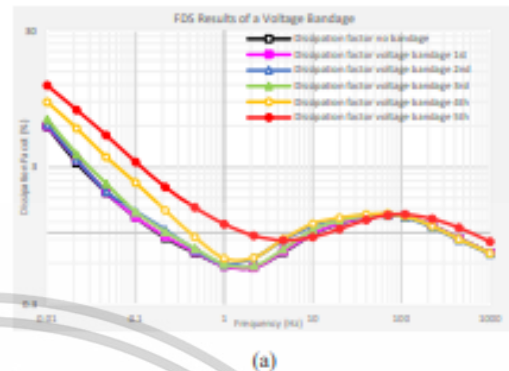


Fig. 4. FDS results of a voltage bandage at different positions: (a) Dissipation factor and (b) Capacitance.

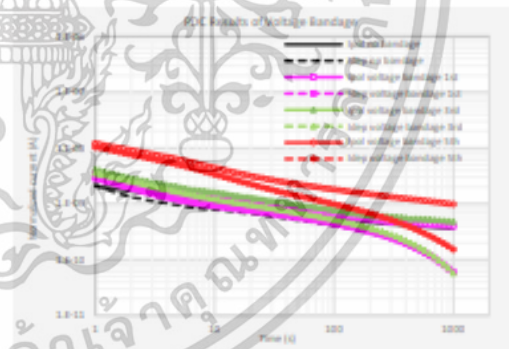


Fig. 5. PDC results of a voltage bandage at different positions.

TABLE I. VOLTAGE BANDAGE CASES'S RESULTS

Voltage bandage cases	Dissipation factor at 10 mHz (%)	Dissipation factor at 50 Hz (%)	Capacitance at 10 mHz (pF)	Capacitance at 50 Hz (pF)	Capacitance ratio C(10mHz)/C(50Hz)
No bandage	5.96	1.31	752.370	719.097	1.046
Under 1 st shed	6.01	1.31	752.791	719.463	1.046
Under 2 nd shed	6.20	1.34	755.165	719.669	1.049
Under 3 rd shed	6.73	1.34	759.606	722.793	1.051
Under 4 th shed	8.97	1.37	790.520	728.273	1.072
Under 5 th shed	11.85	1.28	814.597	738.414	1.103

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

C. Voltage and Grounded bandage comparison

By comparing dissipation factor and capacitance value in frequency domain and polarization and depolarization current in time domain of voltage bandage and grounded bandage case at the same position and having no bandage case as a reference, it can be concluded that as long as the leakage current is not too much there will not be distinctive dissipation factor and capacitance trends and distinctive polarization and depolarization current trends like under 1st shed case according to Fig. 8 and Fig. 9. If too much the leakage current is obtained, it will cause a trend of graphs, for example, like Fig. 10 and Fig. 11 of under 4th shed case.

VII. CONCLUSION

In this paper the effect of surface leakage current on FDS and PDC results of OIP bushing has been performed and discussed. It can be summarized that the effect of surface leakage current from high voltage side influences the dielectric response in both frequency and time domain unlike the case of leakage current from ground side that does not significantly affect the response in any domain. As long as the leakage current from high voltage side is not too much there will not be an obvious increasing or decreasing trend in dissipation factor, capacitance, and polarization and depolarization current.

Dissipation factor at 50 Hz do not indicate the effect of surface leakage current both from high voltage side and ground side. It is recommended to look at the frequency below 1 Hz to clearly see the effect of leakage current from high voltage side

The capacitance ratio which is the capacitance at 10 mHz divided by 50 Hz is not suitable for indicating the severity of surface leakage from both sides. Even though the surface leakage current from high voltage side influences this ratio, its effect does not significantly impact the moisture interpretation.

There are some issues in this paper. The increasing trend of dissipation factor at low frequency can be the result of high moisture exposure of bushing insulation or surface leakage current from high voltage side. The vertical shift of the entire PDC curve can be the result of aging effect of bushing insulation or surface leakage current from high voltage side.

These emphasize that the effect of surface leakage must be excluded or removed before any interpretation of the dielectric responses to actually assess whether insulation condition is good or bad. The good practice is to clean the bushing surface thoroughly to mitigate the leakage current before performing the test.

ACKNOWLEDGMENT

The authors thank all the staff of Dielectric Analytika Laboratory (DikaLab) from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand for providing the support and recommendation for this research both technical and practice.

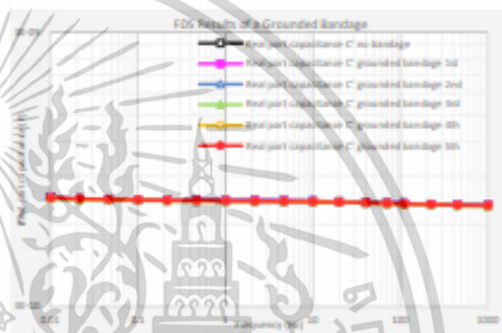
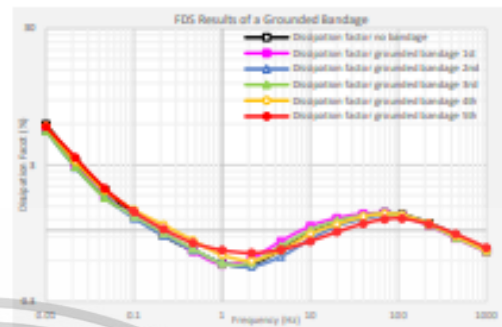


Fig. 6. Frequency response of a grounded bandage at different positions: (a) Dissipation factor and (b) Capacitance

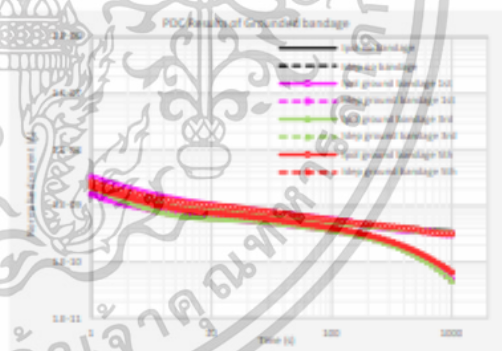


Fig. 7. PDC results of a grounded bandage at different positions.

TABLE II. GROUNDED BANDAGE CASES'S RESULTS

Grounded bandage cases	Dissipation factor at 10 mHz (%)	Dissipation factor at 50 Hz (%)	Capacitance at 10 mHz (pF)	Capacitance at 50 Hz (pF)	Capacitance ratio C(10mHz)/C(50Hz)
No bandage	5.96	1.31	752.370	719.097	1.046
Under 1 st shed	5.58	1.32	749.975	717.256	1.046
Under 2 nd shed	5.41	1.24	745.510	716.427	1.041
Under 3 rd shed	5.39	1.30	742.826	711.950	1.040
Under 4 th shed	5.79	1.28	746.074	711.758	1.045
Under 5 th shed	5.75	1.15	746.275	715.593	1.043

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

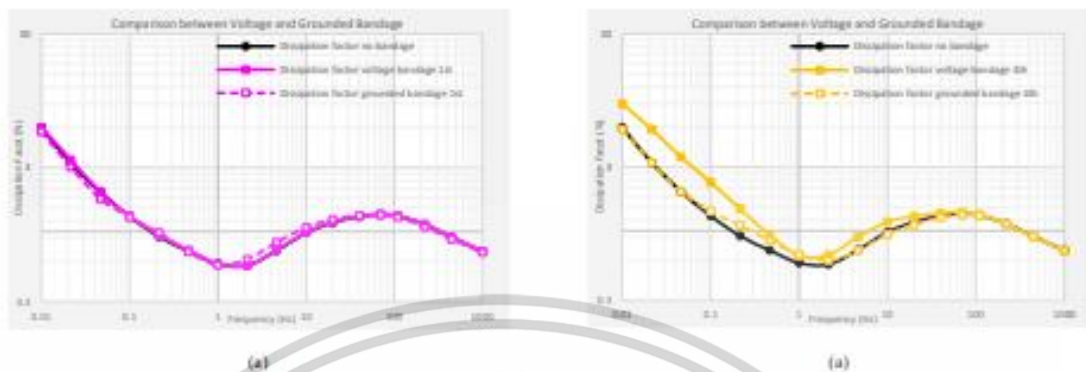


Fig. 8. Comparison between voltage and grounded bandedge under 1st shed case: (a) Dissipation factor and (b) Capacitance.

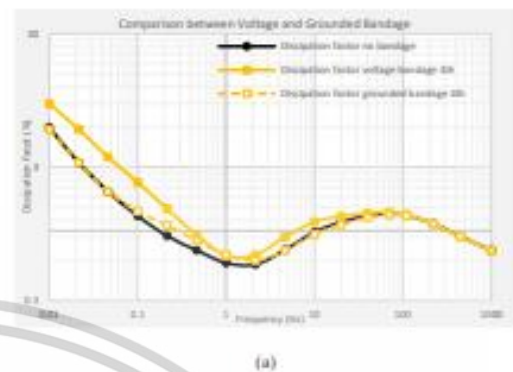


Fig. 10. Frequency domain comparison between voltage and grounded bandedge under 4th shed case: (a) Dissipation factor and (b) Capacitance.

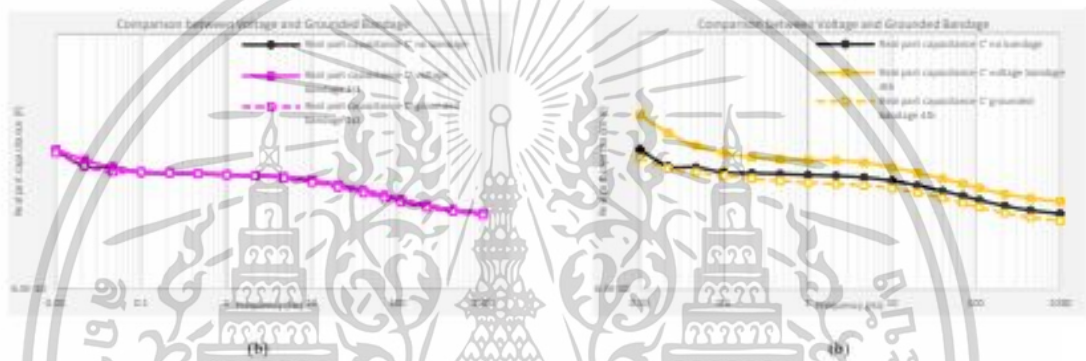


Fig. 9. Time domain comparison between voltage and grounded bandedge under 1st shed case.

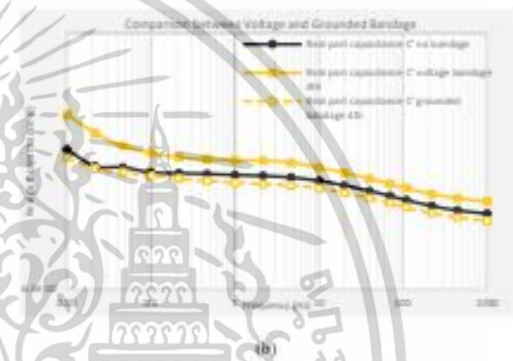


Fig. 11. Time domain comparison between voltage and grounded bandedge under 4th shed case.

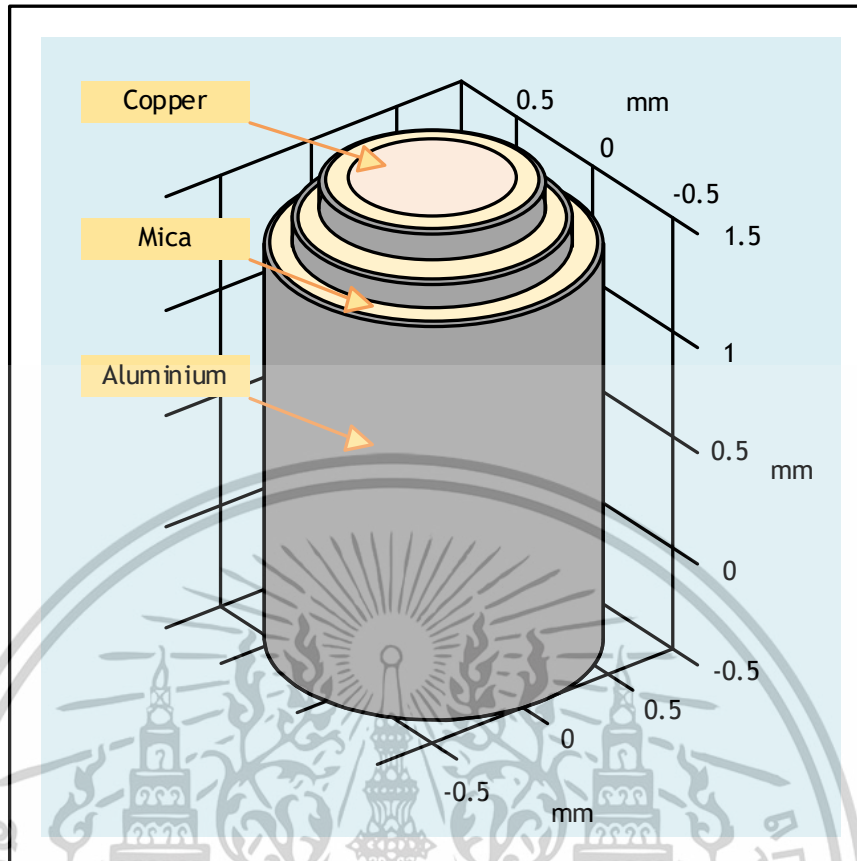
REFERENCES

- [1] CIGRE WG A2.43, Transformer bushing reliability, Technical Brochure 755, 2019.
- [2] N. Pattanadech, R. Haller, S. Korshuber, and M. Muhr, Partial Discharge (PD) – Detection, Identification and Localization, 1st ed., John Wiley & Sons Ltd, 2023.
- [3] F. Huelmandel, M. Appold, A. Küchler, R. Krump, and J. Titze, "Condition Assessment of High Voltage Bushings by Means of Dielectric Diagnosis with PDC," International Symposium on High Voltage Engineering (ISH), Ljubljana, 2007.
- [4] E. Kuffel, W.S. Zaengl, and J. Kuffel, High Voltage Engineering: Fundamentals, 2nd ed., Newnes, 2000.
- [5] S. A. Bharniwat, "Insulation Condition Assessment of Transformer Bushings by means of Polarisation / Depolarisation Current Analysis," IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Indianapolis, 2004.
- [6] Dielectric Tests-Frequency Domain Spectroscopy Working Group, IEEE Guide for the Dielectric Frequency Response Measurement of Bushings, IEEE Std C57.12.200™-2022.
- [7] A. Küchler, High Voltage Engineering Fundamentals - Technology - Applications, 1st ed., Springer Vieweg Berlin, Heidelberg, 2018.
- [8] M. H. Zink, Condition assessment of service-aged high-voltage transformer bushings with oil-paper dielectric by means of dielectric diagnostics, Dissertation Technische Universität Ilmenau, Universitätsverlag Ilmenau, 2013.

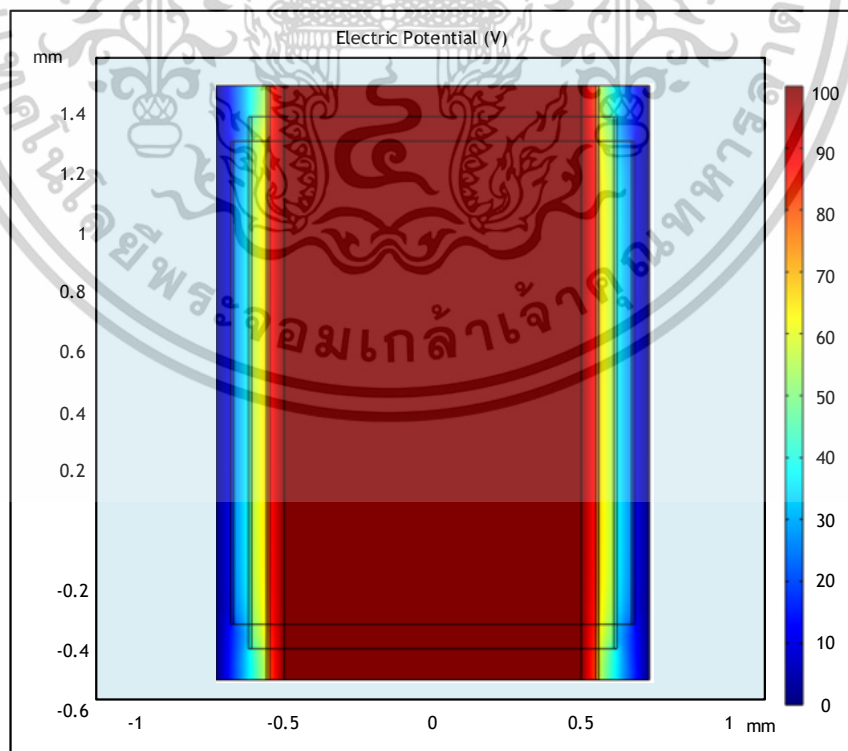
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

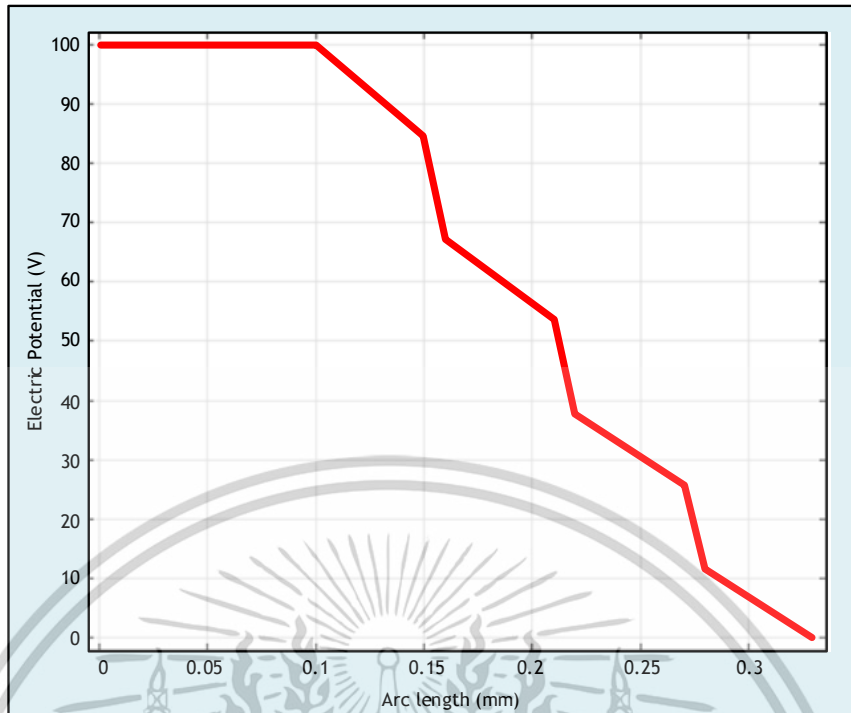


การจำลองบุซซึ่งอย่างง่าย

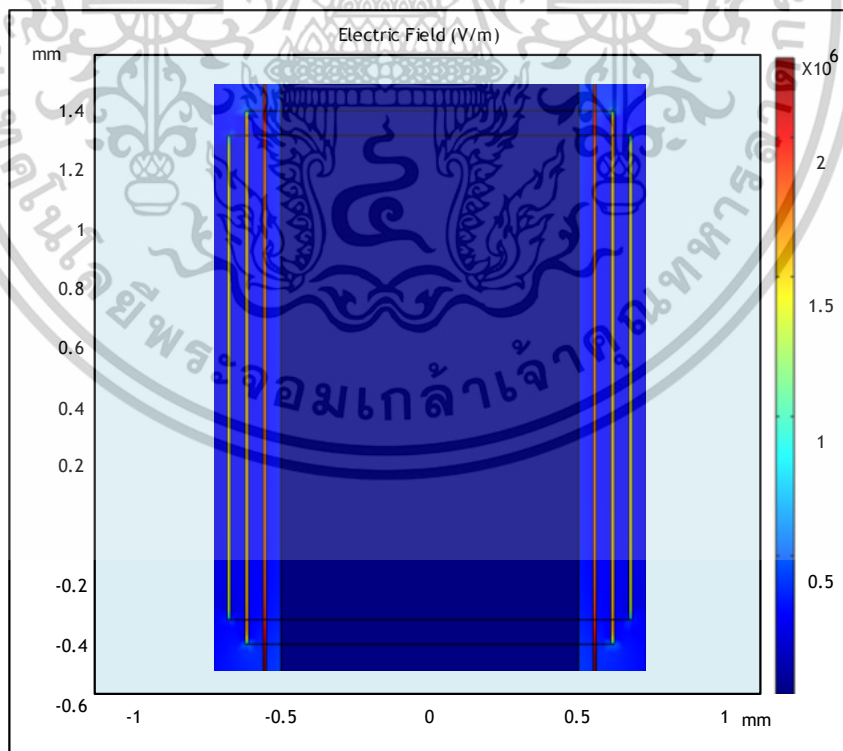


แรงดันไฟฟ้าในระนาบ 2 มิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

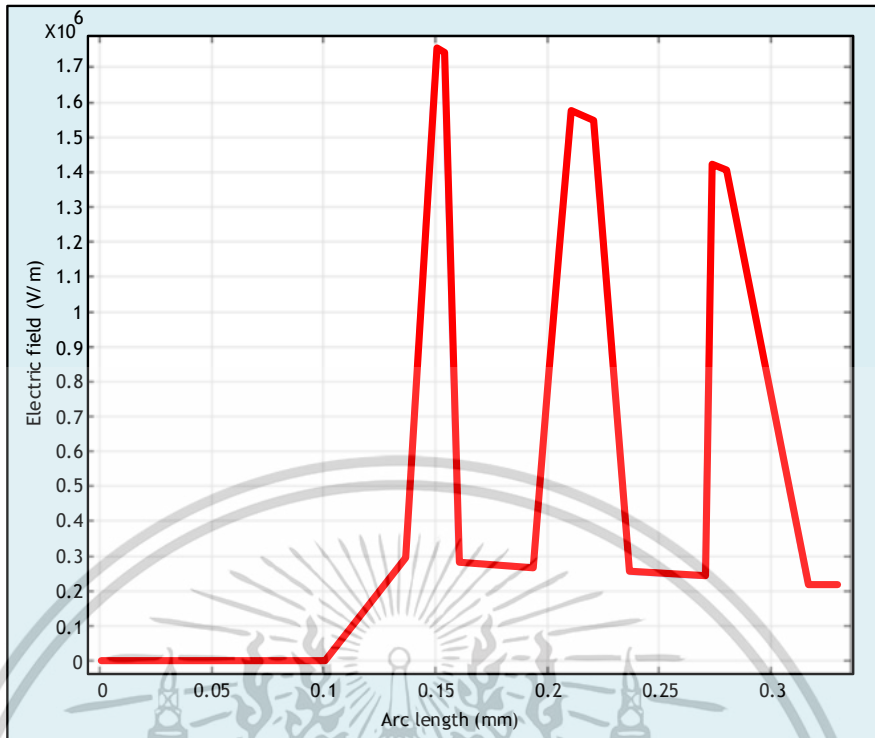


กราฟแสดงขนาดแรงดันไฟฟ้าในแนวนอน



สนามไฟฟ้าในระนาบ 2 มิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



กราฟแสดงขนาดสนามไฟฟ้าในแนวรัศมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายวริศนันท์ โรจนสุนันท์
วัน เดือน ปีเกิด 15 มกราคม 2543 ที่นครปฐม
ที่อยู่ 157/251 หมู่ 1 ตำบลถนนขาด
อำเภอเมืองนครปฐม จังหวัดนครปฐม
รหัสไปรษณีย์ 73000
เบอร์มือถือ 064-1986936



ประวัติการศึกษา:

2561 - 2565 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า (เกียรตินิยมอันดับ 1)
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้องานวิจัยที่สนใจ: 1. การวินิจฉัยสภาพนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง
2. การทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง

ประสบการณ์การทำงาน:

2565 - ปัจจุบัน วิศวกรไฟฟ้า ระดับบังคับบัญชา บริษัท ปูนซิเมนต์ไทย (แก่งคอย) จำกัด
2565 การประเมินสภาพนวนในสายเคเบิลใต้ดินพิกัด 22 กิโลโวลต์
การประเมินสภาพนวนในสายเคเบิลใต้ดินพิกัด 115 กิโลโวลต์ (2565)
2565 - 2566 การประเมินสภาพนวนของขดลวดสเตเตอร์ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูง และ มอเตอร์แรงดันสูง
2566 การตรวจสอบต้นไม้น้ำในนวน XLPE ของหัวต่อสายเคเบิลใต้ดิน (Cable termination) พิกัด 6.6 และ 22 กิโลโวลต์
2566 การวิเคราะห์หาสาเหตุเนื่องจากความล้มเหลวของหัวต่อสายเคเบิลใต้ดินชนิดแห้งเพื่อเชื่อมต่อเข้าสวิตช์เกียร์หุ้มนวนก๊าซพิกัด 115 กิโลโวลต์

ผลงานวิจัย:

บทความวิชาการจากงานประชุมวิชาการที่ผู้เขียนวิทยานิพนธ์เป็นชื่อแรก

W. Rojanasunan, K. Chumpiboon, P. Udomluksananon, S. Jeenmuang, P. Chanchaoensook and N. Pattanadech, " The Effect of Surface Leakage Current on

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Dielectric Response of 22 kV OIP Bushing," 2024 14th IEEE International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM2024), Phuket, Thailand, 2024, pp. 73 – 77

W. Rojanasunan, P. Chanchaoensook, S. Jeenuang, S. Mongkolsatitpong, N. Pattanadech and D. Suksawat, " The Effects of Coupling and Grounding on the Partial Discharge Pulse Propagation in the Underground Cable," 2022 9th International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), Kitakyushu, Japan, 2022, pp. 87-91,

บทความวิชาการจากงานประชุมวิชาการที่ผู้เขียนวิทยานิพนธ์มีส่วนร่วม

P. Udomluksananon, S. Jeenuang, K. Chumpiboon, K. Dorkmai, **W. Rojanasunan** and N. Pattanadech, "The Dielectric Properties in Frequency Domain of the 22 kV Underground Cables with Defective Joint," 2023 International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM), Shimane, Japan, 2023, pp. 01-04

P. Udomluksananon, N. Boonsaner, T. Wiangtong, S. Jeenuang, K. Chumpiboon, K. Dorkmai, **W. Rojanasunan**, and N. Pattanadech, "The Dielectric Characteristics of 22 kV XLPE Underground Cables with Degraded Artificial Joint," 2023 International Symposium on High Voltage Engineering (ISH), Glasgow, UK, 2023, IET Conference Proceedings, pp. 38-42

S. Jeenuang, **W. Rojanasunan**, K. Dorkmai, K. Chumpiboon, P. Udomluksananon and N. Pattanadech, "Partial Discharge Testing on MV Motor – Case Study," 2023 International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM), Shimane, Japan, 2023, pp. 100-102

N. Pattanadech, S. Jeenuang, K. Dorkmai, K. Chumpiboon, P. Udomluksananon, **W. Rojanasunan** and T. Worthong, "Investigation of Stator Winding Insulation Condition of MV Motors Based on Dielectric Response Measurement," 23rd International Symposium on High Voltage Engineering (ISH 2023), Glasgow, UK, IET Conference Proceedings, pp. 138-142.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้