

การศึกษาผลของค่าความจุไฟฟ้าแฝงในอุปกรณ์ไฟฟ้าฉนวนกระดาษชุบน้ำมัน

THE STUDY OF STRAY CAPACITANCE EFFECT ON OIL-IMPREGNATED
PAPER INSULATING EQUIPMENT



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2567

KMITL-2024-EN-M-027-189

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE STUDY OF STRAY CAPACITANCE EFFECT ON OIL-IMPREGNATED
PAPER INSULATING EQUIPMENT



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2024
KMITL-2024-EN-M-027-189

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2024

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาผลของค่าความจุไฟฟ้าแฝงในอุปกรณ์ไฟฟ้าฉนวน กระดาษจุ่มน้ำมัน
นักศึกษา	นายสุทัศน์ สุขสกุลปัญญา
รหัสประจำตัว	62601052
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2567
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.นรเศรษฐ์ พัฒนเดช

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการศึกษาผลของค่าความจุไฟฟ้าแฝงในอุปกรณ์ไฟฟ้าฉนวนกระดาษจุ่มน้ำมันซึ่งได้แก่ บุขชิงและหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง สำหรับการศึกษาและวิเคราะห์บุขชิงจะแบ่งเป็น 2 กรณีศึกษา กรณีศึกษาที่ 1 เป็นการศึกษาเทคนิคการทดสอบเพื่อเฝ้าระวังสภาพฉนวนของ OIP บุขชิงระดับแรงดันสูงปานกลาง โดยมี 2 เทคนิคการทดสอบ คือ การวัดตัวประกอบกำลังสูญเสียของฉนวน (Insulation Power Factor (IPF) Test) และการวัดกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชัน (Polarization and Depolarization Current: PDC) กับ OIP บุขชิงระดับแรงดัน 25 kV จำนวน 5 ตัว และระดับแรงดัน 34.5 kV จำนวน 5 ตัว ที่ผ่านการใช้งานมาแล้วมากกว่า 25 ปี กรณีศึกษาที่ 2 เป็นการศึกษาสาเหตุการไม่เข้าค่าของค่าคาปาซิแตนซ์เทสแทป (Test tap) ใน RIP บุขชิงที่ติดตั้งใหม่ระดับแรงดัน 123 kV โดยใช้ผลการวัดในสนาม (Onsite test) ของบุขชิงที่ติดตั้งกับหม้อแปลงจำนวน 6 ลูก และผลทดลองในห้องปฏิบัติการและผลการทดลองในสนาม เพื่อศึกษาสาเหตุที่ไม่เข้าค่าของค่าคาปาซิแตนซ์เทสแทป (Test tap) ใน RIP บุขชิงหลังจากติดตั้งกับตัวหม้อแปลงแล้ว ผลการทดสอบในการทดลองที่ 1 พบว่าเทคนิคการวัดค่าตัวประกอบกำลังสูญเสียในฉนวนสำหรับบุขชิงเป็นตัวชี้วัดเบื้องต้นที่สามารถแสดงถึงการเสื่อมสภาพของฉนวนบุขชิงแบบ OIP ได้แต่ไม่สามารถระบุถึงปัญหาที่ทำให้ฉนวนของบุขชิงเสื่อมสภาพได้ และจากเทคนิคการวัดกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชัน (Polarization and Depolarization Current: PDC) พบว่าการเสื่อมสภาพของฉนวนบุขชิงไม่ได้เกิดจากการเสื่อมสภาพของฉนวนกระดาษ ผลการทดสอบในการทดลองที่ 2 พบว่าค่าคาปาซิแตนซ์ของเทสแทปใน RIP บุขชิงที่ติดตั้งใหม่มีค่าเบี่ยงเบนจากโรงงานมากถึงประมาณ 46% สาเหตุที่เกิดการเบี่ยงเบนที่มากนั้นมาจากค่าสเตรย์คาปาซิแตนซ์ที่เกิดจากหม้อแปลงเครื่องมือวัดที่บุขชิง และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวถังที่ติดตั้งบุขชิง เนื่องจากบุขชิง RIP ไม่มีปลอกโลหะกราวด์ส่วนที่อยู่ในตัวถังของหม้อแปลงไฟฟ้า นอกจากนี้ สำหรับการศึกษาและวิเคราะห์หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง จะเป็นการศึกษาผลกระทบจากความไม่สมดุลของค่าความจุไฟฟ้าแฝงของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง พิกัด 500 kV รวมถึงกำหนดแนวทางบรรเทาผลกระทบ ซึ่งสาเหตุเกิดจากการตรวจพบจุดร้อนขึ้น ณ บริเวณกับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดักเสิร์จที่ฝั่งตติยภูมิ (พิกัด 22 kV) ของหม้อแปลงไฟฟ้ารวมไปถึงพบว่ามีความแรงดันไฟฟ้าที่ฝั่งดังกล่าวมีความไม่สมดุล จึงทำให้เกิดแรงดันเกินซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดจุดร้อนดังกล่าว จากการสืบค้นหาโดยละเอียดพบว่าสาเหตุของปัญหาเกิดจากค่าความจุไฟฟ้าระหว่างขดลวดตติยภูมิเทียบแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้ามีความไม่สมดุลเนื่องจากหม้อแปลงไฟฟ้าที่ส่งผลิตใหม่มีการออกแบบโครงสร้างที่แตกต่างจากหม้อแปลงไฟฟ้าเดิมของ 2 ลูกที่เหลือ ดังนั้น การแก้ปัญหาคือจำเป็นต้องเพิ่มค่าความจุไฟฟ้าด้วยตัวเก็บประจุเข้าไปขนานกับขดลวดตติยภูมิเทียบกราวด์ โดยได้มีการจำลองโดยใช้โปรแกรม PSCAD เพื่อจำลองถึงค่าความจุไฟฟ้าที่ต้องต่อเพิ่มเข้าไปจนได้ค่าที่เหมาะสมโดยใช้วิธีการทำซ้ำ ซึ่งก็คือทำให้แรงดันไฟฟ้าทั้ง 3 เฟส มีค่าสมดุลและไม่มีแรงดันเกินเกิดขึ้น โดยตัวเก็บประจุที่เลือกใช้ในบทความฉบับนี้คือ หม้อแปลงวัดแรงดันแบบตัวเก็บประจุ ซึ่งได้มีการติดตั้งใช้งานจริง จากผลการแก้ไขปัญหาคือพบว่าแรงดันไฟฟ้าที่บัส 22 kV มีความสมดุลมากขึ้น รวมถึงไม่ทำให้เกิดแรงดันเกินและไม่ตรวจพบจุดร้อนขึ้นที่บัสดักเสิร์จที่เชื่อมต่อกับขดลวดตติยภูมิ ซึ่งเพิ่มเสถียรภาพและเชื่อมั่นเชื่อถือของการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	The Study of Stray Capacitance Effect on Oil-Impregnated Paper Insulating Equipment
Student	Mr. Suthat Suksagoolpanya
Student ID.	62601052
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2024
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Norasage Pattanadech

ABSTRACT

This thesis presents the study and analysis of effect of stray capacitance on oil-impregnated paper i.e., bushing and power transformer. For the bushing, it can be divided into 2 case studies. In the first case study, there are 2 test techniques for condition monitoring of MV OIP bushing that is insulation power factor (IPF) test and polarization and depolarization current (PDC) measurements applying to 5 samples of 25 kV OIP bushings and 5 samples of 34.5 kV OIP bushings that were in service for 25 years. In the second case study, investigation on the root cause of the unrepeated testing values of the test tap capacitance for the new installed 123 kV RIP bushing compared with factory values was performed by using the onsite measurement results of bushing installed with 6 transformers and using experiment test results both from onsite and laboratory to determine the cause of unrepeated test tap capacitance in RIP bushing after installed with transformer. The test result of the first experiment revealed that IPF testing can indicate the degradation of the insulation but unable to specify its causes and the PDC was performed to ensure whether the major cause of aging was from the insulating paper or not. From the results, it indicated that the insulation was degraded but its major cause did not from the insulating paper. From the test result of the second case study, the onsite test tap capacitance value of RIP bushing deviated from the factory test up to 46%. Such deviation was caused by the existence of the additional stray capacitance due to the bushing socket structure and the bushing current transformers equipped with the bottom side of the RIP bushing inside the transformer. For the power transformer, the effect of unbalanced stray capacitance in single-phase 500 kV power transformers were studied, and the

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 III
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

mitigation technique was established. The problems were the hotspots at the surge arrester of tertiary winding (22 kV) were found and the unbalance of phase voltages was observed, resulting in overvoltage as a root cause of the problem. Once a thorough investigation was done, it was found that there was an effect of unbalanced stray capacitance between tertiary winding and ground core since the new power transformer has some different designs compared with the remaining. Hence, the mitigation technique was performed by adding the capacitor parallel to the tertiary winding until the voltage balance was achieved. Simulation with the PSCAD program was performed to determine the optimum value for additional capacitors, i.e., voltage balance, using an iterative method. In this article, the capacitors used for additional were capacitor voltage transformers, which have been installed. As a result of the troubleshooting, the voltage at the 22 kV bus was more balanced as well as not causing overvoltage, and the hotspots at the surge arrester of tertiary winding were not detected resulting in gaining the stability and reliability of using these transformers.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.นรเศรษฐ์ พัฒนเดช ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากบริษัท พีดี โซลูชัน จำกัด และบริษัท แพลน มาร์เก็ต โกลด์ จำกัด

ขอขอบคุณ กองทดสอบไฟฟ้าแรงสูง ฝ่ายบริหารจัดการสินทรัพย์ระบบส่ง การไฟฟ้าฝ่ายผลิต แห่งประเทศไทย ที่ให้ความอนุเคราะห์ตัวอย่างบุชชิงตลอดจนเครื่องมือที่ใช้ทดสอบต่าง ๆ จนสำเร็จ งานวิจัย

ขอขอบคุณ นายศิวกร จีนเมือง, นายวริศนันท์ โรจนสุนันท์, นายกฤษดา ดอกไม้, นายปัลลย์ อุดมลักษณะนันท์, นายโกมินทร์ ชุมพิบูลย์ รวมถึงนักศึกษาในห้องปฏิบัติการการทดสอบและวินิจฉัย ฉนวนสำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง (Dika Lab) และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงทุกท่านที่ได้ ช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ เสมอมา

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครุอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และ ถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

สุทัศน์ สุขสกุลปัญญา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	I
ABSTRACT.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	V
สารบัญ.....	VI
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญรูป.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
1.4 สมมติฐานของการศึกษา.....	3
1.5 ขั้นตอนของการศึกษา.....	4
บททบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	6
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	8
2.1 ประเภทและโครงสร้างของบุชชิง.....	8
2.1.1 บุชชิงแบบไม่มีคอนเดนเซอร์.....	8
2.1.2 บุชชิงแบบคอนเดนเซอร์.....	7
2.2 เทคนิคการประเมินสภาพฉนวน.....	9
2.2.1 การวัดค่าคาปาซิแตนซ์และค่าตัวประกอบกำลังสูญเสียของฉนวน.....	10
2.2.2 การวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน [8-11].....	12
2.3 หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง.....	14
2.3.1 โครงสร้างพื้นฐานของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง.....	14
2.3.2 หม้อแปลงไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง [18-21].....	17
บทที่ 3 การศึกษาและวิเคราะห์สภาพฉนวนของฉนวนบุชชิง.....	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1	กรณีศึกษาที่ 1 การศึกษาเทคนิคทดสอบเพื่อเฝ้าระวังสภาพฉนวนของ OIP บุษชิงระดับแรงดันสูงปานกลาง	20
3.1.1	การวัดตัวประกอบกำลังสูญเสียของฉนวน (Insulation Power Factor (IPF) Test)	21
3.1.2	การทดสอบ PDC	23
3.1.3	ผลการศึกษาเทคนิคการทดสอบเพื่อเฝ้าระวังสภาพฉนวนของ OIP บุษชิงระดับแรงดันสูงปานกลาง.....	25
3.1.4	สรุปผลการศึกษาเทคนิคการทดสอบเพื่อเฝ้าระวังสภาพฉนวนของ OIP บุษชิงระดับแรงดันสูงปานกลาง.....	28
3.2	กรณีศึกษาที่ 2 การศึกษาการไม่เข้าค่าของค่าคาปาซิแตนซ์ของเทสแทป (Test tap) ใน RIP บุษชิงที่ติดตั้งใหม่	29
3.2.1	ผลการวัดในสนาม (Onsite test).....	29
3.2.2	การทดลองในห้องปฏิบัติการ.....	29
3.2.3	การทดลองในภาคสนาม.....	31
3.2.4	ผลการศึกษาการไม่เข้าค่าของค่าคาปาซิแตนซ์ของเทสแทป (Test tap) ใน RIP บุษชิงที่ติดตั้งใหม่.....	33
3.2.5	สรุปผลการศึกษาการไม่เข้าค่าของค่าคาปาซิแตนซ์ของเทสแทป (Test tap) ใน RIP บุษชิงที่ติดตั้งใหม่	36
บทที่ 4	การศึกษาปัญหาและเทคนิคการบรรเทากรณีศึกษาผลกระทบของความจุไฟฟ้าแบบไม่สมดุลในหม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟสขนาดพิกัดแรงดัน 500 kV	37
4.1	หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังภายใต้การศึกษา.....	37
4.2	สมมติฐาน	38
4.3	ที่มาและสาเหตุของปัญหา.....	38
4.4	แนวทางการแก้ปัญหา.....	42
4.4.1	การวัดขนาดและรูปคลื่นของแรงดันที่บัส 22 kV	42
4.4.2	การจำลองด้วยโปรแกรม PSCAD.....	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.3 การต่อขนานตัวเก็บประจุเพิ่มเติมที่ขดลวดฝั่งตติยภูมิเพื่อให้ได้ค่าความจุไฟฟ้าที่มีความสมดุล	46
4.4.4 การติดตั้งหม้อแปลงวัดแรงดันแบบตัวเก็บประจุ.....	47
4.4.5 การวัดขนาดและรูปคลื่นของแรงดันที่บัส 22 kV หลังจากการติดตั้งจริง.....	47
บทที่ 5 สรุปผลการทดสอบ.....	50
5.1 สรุปผลการทดสอบ	50
5.1.1 กรณีศึกษาที่ 1 การศึกษาเทคนิคการทดสอบเพื่อเฝ้าระวังสภาพนวนของ OIP บุกซึ่งระดับแรงดันสูงปานกลาง	50
5.1.2 กรณีศึกษาที่ 2 การศึกษาการไม่เข้าค่าของค่าคาปาซิแตนซ์ของเทสแทป (Test tap) ใน RIP บุกซึ่งที่ติดตั้งใหม่.....	50
5.1.3 การศึกษาปัญหาและเทคนิคการบรรเทากรณีศึกษาผลกระทบของความจุไฟฟ้าแบบไม่สมดุลในหม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟสขนาดพิกัดแรงดัน 500 kV.....	51
5.2 ข้อเสนอแนะ	51
เอกสารอ้างอิง.....	52
ภาคผนวก.....	55
ประวัติผู้เขียน.....	78

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1	4
ตารางที่ 1.2	4
ตารางที่ 1.3	5
ตารางที่ 1.4	5
ตารางที่ 1.5	5
ตารางที่ 2.1	10
ตารางที่ 3.1	26
ตารางที่ 3.2	27
ตารางที่ 3.3	33
ตารางที่ 3.4	35
ตารางที่ 3.5	35
ตารางที่ 4.1	40
ตารางที่ 4.2	44
ตารางที่ 4.3	46
ตารางที่ 4.4	49

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 บุชชิงแบบไม่มีคอนเดนเซอร์	6
รูปที่ 2.2 บุชชิงแบบคอนเดนเซอร์	7
รูปที่ 2.3 แทปการทดสอบในบุชชิงแบบคอนเดนเซอร์	11
รูปที่ 2.4 หลักการของการทดสอบค่าตัวประกอบกำลังสูญเสียของฉนวน.....	11
รูปที่ 2.5 วงจรการวัด C1 และค่าตัวประกอบกำลังสูญเสียแบบ UST [7].....	12
รูปที่ 2.6 วงจรการวัด C2 และค่าตัวประกอบกำลังสูญเสียแบบ GST- Guard	12
รูปที่ 2.7 ผลการวัดกระแสโพลาร์ไรเซชันและดีโพลาร์ไรเซชัน.....	13
รูปที่ 2.8 ส่วนประกอบของหม้อแปลงไฟฟ้าน้ำมันแบบถังปิด.....	15
รูปที่ 2.9 โครงสร้างพื้นฐานของฉนวนหลัก C _{HL} ในหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดแกนเหล็ก.....	16
รูปที่ 2.10 ชนิดของ OLTC.....	17
รูปที่ 2.11 ขดลวดทางด้านปฐมภูมิและขดลวดทางด้านทุติยภูมิจะไม่ต่อถึงกันทางไฟฟ้าแต่จะมีฟลักซ์แม่เหล็กคล้องร่วมกัน (Magnetic coupled).....	18
รูปที่ 2.12 ขดลวดทางด้านปฐมภูมิและขดลวดทางด้านทุติยภูมิจะต่อถึงกันทางไฟฟ้า	18
รูปที่ 3.1 การตั้ง OIP บุชชิงบนแท่นวางเป็นเวลา 24 ชั่วโมงก่อนการทดสอบ	21
รูปที่ 3.2 วงจรทดสอบสำหรับค่าคาปาซิแตนซ์ของฉนวนหลัก (C1) ด้วยการวัดแบบไม่กราวด์วัสดุทดสอบ (Ungrounded specimen test (UST))	21
รูปที่ 3.3 วงจรทดสอบสำหรับค่าคาปาซิแตนซ์ของฉนวนทดสอบแบบ (C2) ด้วยการวัดแบบกราวด์วัสดุทดสอบและการ์ด (Grounded specimen test (GST-guard))	22
รูปที่ 3.4 วงจรการทดสอบ PDC สำหรับบุชชิง	24
รูปที่ 3.5 วงจรการทดสอบ PDC.....	24
รูปที่ 3.6 ผลการทดสอบ PDC ของบุชชิงหมายเลข 1-5	26
รูปที่ 3.7 ผลการทดสอบ PDC ของบุชชิงหมายเลข 6-10	27
รูปที่ 3.8 การใช้แผ่นฟอลต์อะลูมิเนียมจำลองเป็นผนังโลหะของหม้อแปลง.....	30
รูปที่ 3.9 การใช้แผ่นโลหะม้วนเป็นทรงกระบอกจำลองเป็นผนังโลหะของหม้อแปลง	30
รูปที่ 3.10 ตำแหน่งหม้อแปลงเครื่องมือวัด (Bushing current transformer, BCT) ในหม้อแปลงไฟฟ้า.....	32
รูปที่ 3.11 กราฟเปรียบเทียบค่าคาปาซิแตนซ์ระหว่างวัดในสนามและผลการวัดจากโรงงานผู้ผลิต .	33
รูปที่ 4.1 หม้อแปลงไฟฟ้าจำนวน 3 ลูก ที่ถูกติดตั้งในสถานีไฟฟ้าวังน้อยจังหวัดพระนครศรีอยุธยา	37
รูปที่ 4.2 กัปดักเสิร์จที่เกิดความเสียหายจากความร้อนที่ตำแหน่งหม้อแปลงไฟฟ้าเฟส A.....	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 X
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.3 การวัดขนาดและรูปคลื่นของแรงดันที่บัส 22 kV โดยใช้ฮอสซิลโลสโคปเชื่อมต่อผ่านขดลวดแรงต่ำของหม้อแปลงวัดแรงดัน.....	39
รูปที่ 4.4 ขนาดและรูปคลื่นของแรงดันที่บัส 22 kV.....	39
รูปที่ 4.5 (ก.) โครงสร้างขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าเดิม GEC ALSTHOM (ข.) โครงสร้างขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าใหม่ (ที่นำมาแทนที่) ABB, โครงสร้างรูปแบบขดลวดของหม้อแปลง (ค.) ผู้ผลิตเดิม (ง.) ผู้ผลิตใหม่.....	41
รูปที่ 4.6 วงจรสมมูลการถ่ายโอนแรงดัน (ก) แบบความเหนี่ยวนำไฟฟ้า (ข) แบบความจุไฟฟ้า.....	42
รูปที่ 4.7 การติดตั้งโวลเตจดีไวเดอร์จำนวน 3 ตัวสำหรับการวัดขนาดและรูปคลื่นของแรงดันฝั่งขดลวดตติยภูมิ (22 kV).....	43
รูปที่ 4.8 โมเดลการจำลองการเชื่อมต่อตัวเก็บประจุไฟฟ้าของหม้อแปลงทั้ง 3 ลูก.....	44
รูปที่ 4.9 โมเดลการจำลองการเชื่อมต่อตัวเก็บประจุไฟฟ้าเพิ่มเติม.....	45
รูปที่ 4.10 หม้อแปลงวัดแรงดันแบบตัวเก็บประจุสำหรับต่อขนานเพิ่มเพื่อชดเชยค่าความจุไฟฟ้า ..	46
รูปที่ 4.11 การติดตั้งหม้อแปลงวัดแรงดันแบบตัวเก็บประจุขนาน.....	47
รูปที่ 4.12 ขนาดและรูปคลื่นของแรงดันที่บัส 22 kV หลังจากการติดตั้งหม้อแปลงวัดแรงดันแบบตัวเก็บประจุ.....	48

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ระบบไฟฟ้ากำลัง (Power system) เป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งในด้านความมั่นคงทางพลังงานของประเทศ ซึ่งเป็นระบบที่ผลิต ส่ง และจำหน่ายพลังงานไฟฟ้าไปยังผู้ใช้งานในแต่ละส่วนของประเทศ โดยผ่านการปรับระดับแรงดันไฟฟ้าผ่านหม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer) ซึ่งถือเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญยิ่งต่อระบบ ดังนั้นการบำรุงรักษา ตรวจสอบติดตามและป้องกันการเกิดความล้มเหลวของหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นสิ่งที่จะต้องทำอย่างจริงจัง เมื่อทำจำแนกสาเหตุของปัญหาที่นำไปสู่ความล้มเหลวของหม้อแปลงไฟฟ้าแล้ว ส่วนประกอบที่ถูกกล่าวถึงและหนึ่งในสาเหตุที่ก่อปัญหามากที่สุดคือปลอกฉนวนนำสายหรือบุชชิ่ง (Bushing) ซึ่งบุชชิ่งของหม้อแปลงเป็นโครงสร้างฉนวนที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการเชื่อมผ่านของตัวนำที่มีแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าไหลผ่านองค์ประกอบที่มีการต่อลงดิน เช่น ตัวถังของหม้อแปลง โดยทั่วไปแล้วบุชชิ่งจะเชื่อมแรงดันไฟฟ้าที่ด้านบนของบุชชิ่งและเชื่อมผ่านแกนกลางภายในบุชชิ่งลงสู่ด้านล่างผ่านตัวถังหม้อแปลงเพื่อเชื่อมตัวนำเข้ากับขดลวดภายในหม้อแปลงไฟฟ้า

ในปัจจุบันมีการใช้งานบุชชิ่งอยู่หลากหลายประเภทตามความเหมาะสมและความคุ้มค่าของการใช้งาน ได้แก่ บุชชิ่งที่ฉนวนแบบกระดาษเคลือบเรซิน (RBP), กระดาษชุบน้ำมัน (OIP), กระดาษชุบเรซิน (RIP) และฉนวนแบบสารสังเคราะห์ชุบเรซิน (RIS) ซึ่งโดยรวมแล้วสาเหตุที่ทำให้บุชชิ่งได้รับความเสียหายจนเกิดความล้มเหลวในการใช้งานถูกกล่าวถึงด้วยหลากหลายสาเหตุทั้งการที่ฉนวนได้รับความชื้นเข้าไปภายในบุชชิ่ง, เกิดการวาบไฟตามผิว, แรงดันเกินฟ้าผ่า, เกิดการลัดวงจรของชั้นคาปาซิเตอร์ย่อยระหว่างชั้นฉนวนที่เสื่อมสภาพ, การใช้งานที่ผิดประเภท, เกิดการกัดกร่อนจากกำมะถัน, ไม่มีการเชื่อมต่อที่ปลอกกราวด์ของบุชชิ่งระหว่างหน้าแปลนและเทสแทป ซึ่งการเสื่อมสภาพของบุชชิ่งย่อมเกิดขึ้นได้เมื่อผ่านการใช้งานภายใต้ความเครียดทั้งทางไฟฟ้า ทางกล ความร้อนสูง และสภาพแวดล้อมที่ส่งผลต่ออายุภาพของอุปกรณ์

สำหรับหม้อแปลงซึ่งเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีความสำคัญอย่างมากในระบบจ่ายกำลัง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง (Power Transformer) ความเสียหายเพียงเล็กน้อยอาจนำไปสู่ความล้มเหลวของอุปกรณ์ในภายหลังได้ เช่น ปัญหาจุดร้อนที่กักตุนความร้อน ซึ่งนำไปสู่การลุกไหม้ของอุปกรณ์ดังกล่าว ซึ่งอาจทำให้เกิดผลกระทบที่ใหญ่หลวงตามมา หากไม่สามารถติดตั้งอุปกรณ์ดังกล่าวระหว่างการใช้งานจริงได้ ก็จะส่งผลให้หม้อแปลงต้องรับความเสียหายจากแรงดันเสิร์จที่เกิดขึ้น และอาจทำให้หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังเสียหายจากแรงดันเสิร์จได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ศึกษาจึงเล็งเห็นความสำคัญของการประเมินสภาพของบุชชิง เพื่อให้ทราบถึงความพร้อมสำหรับการใช้งานที่ให้เสถียรภาพต่อหม้อแปลงไฟฟ้า ด้วยการนำเสนอเทคนิคสำหรับการประเมินคุณลักษณะของระบบฉนวนสองเทคนิคพร้อมกัน ได้แก่ การวัดตัวประกอบกำลังสูญเสียของฉนวน (Insulation Power Factor Test, IPF) และการวัดกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชัน (Polarization and Depolarization Current, PDC) ผ่านการทดสอบภายในห้องปฏิบัติการกับบุชชิงที่ผ่านการใช้งานมาแล้วกว่า 25 ปี และการทดสอบภาคสนามกับบุชชิงที่ถูกติดตั้งกับหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้งานจริง รวมถึงการบรรเทาผลกระทบจากค่าความจุไฟฟ้าแฝงของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง โดยทราบได้จากการวัดแรงดันที่ขดลวดตติยภูมิ และการจำลองด้วยโปรแกรม PSCAD เพื่อหาค่าความจุไฟฟ้าที่เหมาะสม เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาและเพิ่มประสิทธิภาพสำหรับการวิเคราะห์เพื่อประเมินสภาพของระบบฉนวนบุชชิงรวมถึงเพื่อบรรเทาผลกระทบจากความจุไฟฟ้าแฝงได้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาคุณลักษณะไฟฟ้าและการประเมินการเสื่อมสภาพของฉนวน OIP บุชชิงและ OIP บุชชิงด้วยวิธีการวัดตัวประกอบกำลังสูญเสียของฉนวนและการวัดกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชันเพื่อศึกษาเทคนิคการทดสอบเพื่อเฝ้าระวังสภาพฉนวนของ OIP บุชชิงระดับแรงดันสูงปานกลางที่ผ่านการใช้งานแล้ว
2. เพื่อศึกษาการไม่เข้าค่าของค่าคาปาซิแตนซ์ของเทสแทป (Test tap) ใน RIP บุชชิงที่ติดตั้งใหม่สำหรับการใช้งานจริงในระบบไฟฟ้ากำลัง
3. เพื่อศึกษาผลกระทบจากความไม่สมดุลของค่าความจุไฟฟ้าแฝงของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังพิกัด 500 kV รวมถึงกำหนดแนวทางบรรเทาผลกระทบ

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาคุณลักษณะทางไฟฟ้าและการประเมินการเสื่อมสภาพของฉนวน OIP บุชชิงและ OIP บุชชิงด้วยวิธีการวัดตัวประกอบกำลังสูญเสียของฉนวนและการวัดกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชัน รวมถึงวิธีบรรเทาผลจากแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลและความจุไฟฟ้าแฝงของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังพิกัด 500kV โดยแบ่งออกเป็น 3 การทดลองดังนี้

1. การศึกษาเทคนิคการทดสอบเพื่อเฝ้าระวังสภาพฉนวนของ OIP บุชชิงระดับแรงดันสูงปานกลางกับ OIP บุชชิงระดับแรงดัน 25 kV จำนวน 5 ตัว และระดับแรงดัน 34.5 kV จำนวน 5 ตัว ที่ผ่านการใช้งานมาแล้วมากกว่า 25 ปี
2. การศึกษาการไม่เข้าค่าของค่าคาปาซิแตนซ์ของเทสแทป (Test tap) ใน RIP บุชชิงที่ติดตั้งใหม่ระดับแรงดัน 123 kV โดยใช้ผลการวัดในสนาม (Onsite test) ของบุชชิงที่ติดตั้งกับหม้อแปลงจำนวน 6 ลูก ด้วยผลทดลองในห้องปฏิบัติการและผลการทดลองในสนาม เพื่อศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สาเหตุที่ไม่เข้าค่าของค่าคาปาซิแตนซ์เทสแทป (Test tap) ใน RIP บุษชิงหลังจากติดตั้งกับตัวหม้อแปลงแล้ว

3. การศึกษาวิธีการแก้ปัญหาจูลร้อนที่กักเก็บความร้อนเนื่องจากความไม่สมดุลของความจุไฟฟ้าแฝงในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังพิกัด 500kV รวมถึงการหาค่าความจุไฟฟ้าโดยการใส่โปรแกรมจำลอง PSCAD ก่อนติดตั้งตัวเก็บประจุแบบขนานและหลังติดตั้ง

1.4 สมมติฐานของการศึกษา

การใช้เทคนิคการทดสอบเพื่อประเมินคุณสมบัติและการเสื่อมสภาพของระบบฉนวนบุษชิงด้วยวิธีการวัดตัวประกอบกำลังสูญเสียของฉนวนและการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันจะสามารถช่วยให้วิเคราะห์เพื่อเฝ้าระวังสภาพฉนวนของ OIP บุษชิงระดับแรงดันสูงปานกลางได้ ผ่านการทดลองกับฉนวนของบุษชิงที่มีการเสื่อมสภาพจากการใช้งานมาแล้ว 25 ปี ทั้ง 10 ตัว ซึ่งคาดการณ์จากการเพิ่มขึ้นของค่าตัวประกอบกำลังสูญเสียของฉนวน นอกจากนี้ผลการทดสอบวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน ช่วยให้สามารถประเมินความชื้นในเนื้อฉนวนกระดาษของบุษชิงทั้ง 10 ตัวได้ อีกทั้งเพื่อศึกษาอิทธิพลของระยะห่างระหว่างผิวของบุษชิงด้านที่อยู่ในหม้อแปลงกับผนังโลหะของหม้อแปลงที่แตกต่างกันจะส่งผลต่อค่าของค่าคาปาซิแตนซ์ที่ไม่เข้ากันของเทสแทป (Test tap) ใน RIP บุษชิง โดยเปรียบเทียบผลการจำลองและทดลองในห้องปฏิบัติการกับการทดลองภาคสนาม

เนื่องจากปัญหาจูลร้อนที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งกักเก็บความร้อน สามารถสันนิษฐานได้ว่าปัญหาเกิดมาจากคุณภาพของกักเก็บความร้อนที่นำมาติดตั้ง แต่เมื่อพิจารณาจากแรงดันแต่ละเฟสที่มีค่าไม่เท่ากันเป็นไปได้ว่าเป็นผลจากความไม่สมดุลของแรงดันเนื่องจากผลของความจุไฟฟ้าแฝง โดยการใช้การจำลองด้วยโปรแกรม PSCAD ในการวิเคราะห์ผลกระทบของค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าและความเสียหายที่เกิดที่หม้อแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ขั้นตอนของการศึกษา

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนการศึกษาปีการศึกษา 2562

การดำเนินงาน	ภาคเรียนที่ 1 ปีการศึกษา 2562					ภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2562				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1. ศึกษาข้อมูลและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	●	●	●							
2. ศึกษาข้อมูลการทดสอบทางไฟฟ้าของบุชชิงแรงสูง			●	●	●					
3. ออกแบบการทดลองและเตรียมเครื่องมือการทดสอบ					●	●	●			
4. ทดสอบเบื้องต้นและแก้ไขปัญหาจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ								●	●	●

ตารางที่ 1.2 ขั้นตอนการศึกษาปีการศึกษา 2563

การดำเนินงาน	ภาคเรียนที่ 1 ปีการศึกษา 2563					ภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2563				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
5. ทดลองวัดในบุชชิงห้องปฏิบัติการ	●	●	●	●						
6. เตรียมข้อมูลการทดลองบุชชิงในภาคสนาม			●	●	●					
7. การทดลองบุชชิงในภาคสนาม						●				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. ดำเนินการวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง							●	●	●	●	●
9. เผยแพร่บทความวิชาการ ICEAST2021										●	

ตารางที่ 1.3 ขั้นตอนการศึกษาปีการศึกษา 2564

การดำเนินงาน	ภาคเรียนที่ 1 ปีการศึกษา 2564					ภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2564				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
10. ศึกษาผลกระทบจากความไม่สมดุลของค่าความจุไฟฟ้าแฝงของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●

ตารางที่ 1.4 ขั้นตอนการศึกษาปีการศึกษา 2565

การดำเนินงาน	ภาคเรียนที่ 1 ปีการศึกษา 2565					ภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2565				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
10. ศึกษาผลกระทบจากความไม่สมดุลของค่าความจุไฟฟ้าแฝงของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●

ตารางที่ 1.5 ขั้นตอนการศึกษาปีการศึกษา 2566

การดำเนินงาน	ภาคเรียนที่ 1 ปีการศึกษา 2566					ภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2567				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
11. ดำเนินการส่งวารสาร	●	●	●	●	●					
12. จัดทำรายงานและเล่มวิทยานิพนธ์						●	●	●	●	●

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ในปี พ.ศ. 2544 Pritpal Singh ได้นำเสนองานวิจัยเรื่อง C2 Power Factor and Capacitance Of Abb Type O Plus C, AB, And Type T Condenser Bushings ในบทความนี้ได้พูดถึงการวัดตัวประกอบกำลัง C2 และค่าความจุไฟฟ้าของบุชชิ่งแบบคอนเดนเซอร์ซึ่งเป็นหัวข้อที่เหล่าหน่วยงานต่างๆ สนใจ ในบทความให้ความสนใจไปที่ตัวประกอบกำลัง C1 และ C2 และค่าความจุไฟฟ้าของบุชชิ่ง และได้พูดถึงความแตกต่างทางโครงสร้างและการออกแบบระหว่าง C1 และ C2 และพูดถึงตัวแปรที่สามารถส่งผลกระทบต่อการวัดได้ [1]

ในปี พ.ศ. 2547 S.A. Bhumiwat ได้นำเสนองานวิจัยเรื่อง Insulation condition assessment of transformer bushings by means of polarisation/depolarisation current analysis ซึ่งได้ศึกษาการประเมินสภาพความเป็นฉนวนของบุชชิ่งหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยวิธีการวิเคราะห์กระแสโพล่าไรเซชัน/กระแสดีโพล่าไรเซชัน (PDC) กับบุชชิ่งแบบคอนเดนเซอร์จำนวนหนึ่ง ซึ่งมีการออกแบบฉนวนที่แตกต่างกันสามแบบ ได้แก่ กระดาษชุบน้ำมัน (OIP), กระดาษประสานเรซินสังเคราะห์ (SRBP) และกระดาษชุบเรซิน (RIP) ซึ่งได้ให้ข้อเสนอแนะสำหรับวิธีการดำเนินการวัด PDC แบบภาคสนาม รวมถึงเอกสารประกอบขั้นตอนการดำเนินการวัด PDC และการประเมินสภาพฉนวนหลัก C1 จากผลการวัดสำหรับบุชชิ่งแต่ละประเภท ซึ่งพิสูจน์ให้เห็นว่าความไวในการตรวจจับการเสื่อมสภาพของฉนวนของเทคนิค PDC นั้นดีกว่าการทดสอบ 50 Hz แบบเดิม [2]

ในปี พ.ศ. 2555 Antun Mikulecky ได้นำเสนองานวิจัยเรื่อง Transformer Bushings – Failure Case Studies ในบทความนี้ได้พูดถึงความสัมพันธ์ระหว่างความล้มเหลวของบุชชิ่งและความสัมพันธ์ของหม้อแปลงและได้พูดถึงความล้มเหลวของบุชชิ่ง 2 ประเภท คือ ความล้มเหลวของบุชชิ่งที่ไม่ทำให้หม้อแปลงเสียหาย และความล้มเหลวที่ขั้วต่อของบุชชิ่งซึ่งส่งผลให้หม้อแปลงล้มเหลวได้ จะเห็นได้ชัดว่าความล้มเหลวของบุชชิ่งทั้งหมดเกิดขึ้นที่ขั้วต่อโดยไม่ต้องใช้วิธีวินิจฉัยใดๆ ความล้มเหลวของบุชชิ่ง 13 กรณีศึกษาได้ถูกวิเคราะห์เพื่อหาสาเหตุ กลไกการล้มเหลว และผลที่ตามมา และได้มีการพูดถึงขีดจำกัดของการวินิจฉัยทั้งแบบออนไลน์และออฟไลน์และได้มีการนำเสนอการปรับปรุงพัฒนาวิธีวินิจฉัย คุณสมบัติบางอย่างของสถานีในมุมมองของการป้องกันอัคคีภัยได้มีการพูดถึง โดยเฉพาะอย่างยิ่งผลกระทบที่เป็นไปได้ของการเชื่อมต่อต่อความล้มเหลวของบุชชิ่ง นอกจากนี้ได้มีการอธิบายถึงการออกแบบ การบริการ การวินิจฉัยสภาพ และคุณสมบัติอื่นๆ ของบุชชิ่งประเภทคอนเดนเซอร์ทั้ง 3 แบบ [3]

ในปี พ.ศ. 2556 Antun Mikulecky และ Zeljko Stih ได้นำเสนองานวิจัยเรื่อง Influence of temperature, moisture content and ageing on oil impregnated paper bushings insulation เป็นการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ ความชื้น และการเสื่อมสภาพตามอายุต่อฉนวนบุชชิ่งชนิดกระดาษชุบน้ำมัน โดยได้กล่าวถึงลูกถ้วยหรือบุชชิ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้หม้อแปลงไฟฟ้าขัดข้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยเฉพาะอย่างยิ่งเหตุไฟไหม้และความเสียหายเป็นวงกว้าง ซึ่งสิ่งนี้สามารถป้องกันได้โดยใช้การตรวจติดตามแบบออฟไลน์และออนไลน์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งโดยการวัดความจุไฟฟ้า หรือ C แพคเกจกำลังสูญเสียไดอิเล็กทริก $\tan\delta$ ซึ่งพารามิเตอร์เหล่านี้มีความซับซ้อนเพราะสามารถเปลี่ยนแปลงได้เมื่อได้รับอิทธิพลจากอุณหภูมิของ โดยได้ทำการเปรียบเทียบจากการวัดบุงซึ่งชนิดกระดาษชุบน้ำมันที่ออกแบบเป็นพิเศษ โดยกำหนดให้ได้รับความชื้นในปริมาณที่แตกต่างกันต่างกันในกรณีการฉนวนและระหว่างการจำลองการเสื่อมสภาพตามอายุ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า $\tan\delta$ เป็นฟังก์ชันของพารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อการตรวจติดตามหรือประเมินสภาพของฉนวนบุงซึ่งได้เมื่อได้รับอิทธิพลของอุณหภูมิ ความชื้น และการเสื่อมสภาพตามอายุ [4]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

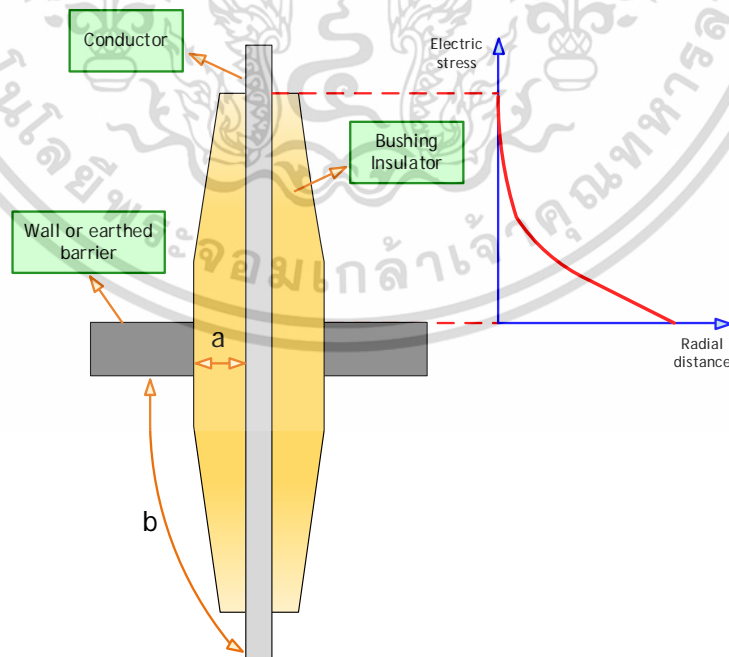
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ประเภทและโครงสร้างของบุชชิ่ง

ประเภทของบุชชิ่งแบ่งออกเป็น 2 ประเภท แยกตามวิธีการในการหักเหสนามไฟฟ้า ได้แก่ บุชชิ่งแบบคอนเดนเซอร์ กับบุชชิ่งแบบไม่มีคอนเดนเซอร์

2.1.1 บุชชิ่งแบบไม่มีคอนเดนเซอร์

บุชชิ่งประเภทนี้จะประกอบไปด้วยตัวนำที่ล้อมรอบด้วยวัสดุฉนวนทรงกระบอกไม่ว่าจะเป็น พอร์ซเลน แก้ว เรซินหล่อ กระจก และอื่นๆ ดังรูปที่ 2.1 โดยความหนาในแนวรัศมี a จะขึ้นอยู่กับความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวน ส่วนระยะตามแนวแกน b จะขึ้นอยู่กับความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของตัวกลางโดยรอบ โดยการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าในบุชชิ่งประเภทนี้จะไม่เป็นเส้นตรงทั้งตามแนวเนื้อฉนวนหรือตามแนวพื้นผิว ความเครียดสูงในเนื้อฉนวนอาจทำให้เกิดการดีสชาร์จบางส่วนได้ส่งผลให้อายุการใช้งานสั้นลง ความเครียดตามแนวแกนอาจส่งผลให้เกิดการวาวไฟตามผิวได้ เมื่อแรงดันพิกัดอุปกรณ์ไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น มิติของบุชชิ่งที่ต้องการจะใหญ่มากจนบุชชิ่งประเภทนี้ใช้ไม่ได้ในเชิงปฏิบัติ

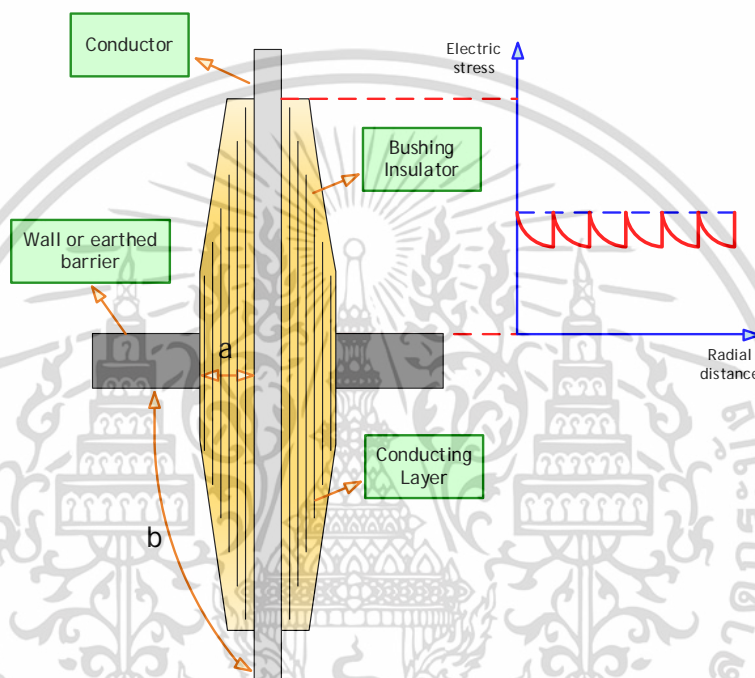


รูปที่ 2.1 บุชชิ่งแบบไม่มีคอนเดนเซอร์ [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 บุชชิ่งแบบคอนเดนเซอร์

ที่แรงดันอุปกรณ์ไฟฟ้าตั้งแต่ 52 kV ขึ้นไป โดยทั่วไปจะใช้บุชชิ่งประเภทนี้ซึ่งแตกต่างจากประเภทก่อนหน้าตรงที่ว่าในเนื้อฉนวนนั้นจะมีชั้นของตัวนำแทรกเพื่อสร้างตัวเก็บประจุย่อยต่ออนุกรมกันในเนื้อฉนวนนั้นดังรูปที่ 2.2 เส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของแต่ละชั้นของตัวนำนั้นถูกออกแบบมาเพื่อที่จะทำให้การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าตามแนวแกนมีความสม่ำเสมอและควบคุมไม่ให้ความเครียดสนามไฟฟ้าตามแนวรัศมีเกินขีดจำกัดของวัสดุฉนวน



รูปที่ 2.2 บุชชิ่งแบบคอนเดนเซอร์ [5]

บุชชิ่งประเภท Condenser แบ่งออกเป็น 4 ชนิดแบ่งตามวัสดุฉนวนที่ใช้ ได้แก่

- 1) บุชชิ่ง Resin bonded paper (RBP)
- 2) บุชชิ่ง Oil-impregnated paper (OIP)
- 3) บุชชิ่ง Resin-impregnated paper (RIP)
- 4) บุชชิ่ง Resin-impregnated Synthetics (RIS)

บุชชิ่ง Resin bonded paper (RBP)

ในปัจจุบัน บุชชิ่ง RBP ถูกจำกัดให้ใช้ในไฟฟ้าแรงดันต่ำโดยเฉพาะใน Switchgear โดยกระดาษจะเคลือบด้วย Phenol หรือ Epoxy resin จากนั้นจึงพันเป็นทรงกระบอกภายใต้ความร้อนและความดัน การใช้บุชชิ่ง RBP ถูกจำกัดด้วยความกว้างของกระดาษ และจากอันตรายของความไม่เสถียรทางความร้อนของฉนวนเนื่องจากแฟคเตอร์ $\tan\delta$ ของวัสดุ บุชชิ่ง RBP ได้รับการออกแบบเพื่อ

ใช้งานที่ความเครียดในแนวรัศมีสูงสุดประมาณ 20 kV/cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฉนวน RBP มีอากาศจำนวนมากกระจายระหว่างเส้นใยของกระดาษ ในกรณีที่เกิด Failure เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าที่ใช้กับบุชชิงเพิ่มขึ้น Partial discharge สามารถเริ่มเกิดขึ้นที่ปลายชั้น ซึ่งมีความเครียดสูงกว่าความเครียดในแนวรัศมีระหว่างชั้นต่างๆ การพันกระดาษในระหว่างการผลิตที่ไม่ถูกต้องอาจส่งผลให้เกิดการแตกร้าวตามเส้นรอบวงที่เกิดจากการหดตัวหรือการยึดเกาะของ Resin ที่ไม่แข็งแรงในช่องว่างที่เกิดขึ้น ส่งผลให้ความเครียดทางไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้น และอาจทำให้ Partial discharge ไฟเกิดขึ้นที่ระดับความเครียดต่ำ

แรงดันเกินที่เกิดขึ้น มักจะเกิดจาก Switching หรือ Lightning ซึ่งเป็นแรงดันเกินชั่วขณะ โดยการ Breakdown ของบุชชิงภายใต้ความเครียดประเภทนี้มักจะเริ่มต้นในแนวแกนจากปลายชั้น เนื่องจากการ Breakdown ของอากาศ โดยสมบูรณ์เป็นการรวมกันของการ Breakdown ในแนวแกน และแนวรัศมี

บุชชิง Oil-impregnated paper (OIP)

ตัวฉนวนกระดาษของ OIP ทำมาจากกระดาษ Kraft ที่ผ่านกระบวนการ vacuum และถูกชุบด้วย mineral oil โดยในกระบวนการพันชั้นตัวฉนวนนั้น จะนำ Aluminum foil แทรกระหว่างฉนวนกระดาษ เพื่อเกลี่ยสนามไฟฟ้าภายในตัวบุชชิง (ดังแสดงในรูปที่ 2.8)

ฉนวนด้านนอกสามารถเป็นได้ทั้ง porcelain หรือ composite (ดังแสดงในรูปที่ 2.9) โดยฉนวน composite ในส่วนท่ตรงกลางด้านในของบุชชิงทำมาจาก fiberglass ช่วยให้ทนต่อแรงทางกลได้สูง (แผ่นดินไหว) ทำให้ปลอดภัยมากยิ่งขึ้น และยังช่วยยืดอายุการใช้งานของบุชชิงได้อีกด้วย

จากมาตรฐาน IEC 60137-2017 บุชชิง OIP สามารถใช้กับแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 24 kV ถึง 550 kV และตามมาตรฐานสามารถใช้งานได้ใญ่ในอุณหภูมิ -30 องศาเซลเซียส ถึง 40 องศาเซลเซียส แต่นำไปใช้งานจริงสามารถใช้ได้ในอุณหภูมิ -60 องศาเซลเซียส ถึง 50 องศาเซลเซียส

จากมาตรฐาน IEEE C57.19.01-2017 บุชชิง OIP สามารถใช้กับแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 25 kV ถึง 500 kV และตามมาตรฐานสามารถใช้งานได้ใญ่ในอุณหภูมิ -30 องศาเซลเซียส ถึง 40 องศาเซลเซียส แต่นำไปใช้งานจริงสามารถใช้ได้ในอุณหภูมิ -60 องศาเซลเซียส ถึง 50 องศาเซลเซียส

บุชชิง Resin-impregnated paper (RIP)

ตัวฉนวนกระดาษของ RIP ทำมาจากกระดาษพิเศษที่ผ่านกระบวนการ vacuum และถูกชุบด้วย epoxy resin โดยในกระบวนการพันชั้นตัวฉนวนนั้น ทำมาจาก Aluminum foil แทรกระหว่างฉนวนกระดาษ เพื่อเกลี่ยสนามไฟฟ้าภายในตัวบุชชิง (ดังแสดงในรูปที่ 2.8)

ฉนวนด้านนอกของบุชชิงสามารถเป็นได้ทั้ง porcelain หรือ composite (ดังแสดงในรูปที่ 2.10) โดยฉนวน composite ในส่วนท่ตรงกลางด้านในของบุชชิงทำมาจาก fiberglass ช่วยให้ทนต่อแรงทางกลได้สูง (แผ่นดินไหว) ทำให้ปลอดภัยมากยิ่งขึ้น และยังช่วยยืดอายุการใช้งานของบุชชิงได้อีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากมาตรฐาน IEC 60137-2017 บุชชิง RIP สามารถใช้กับแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 24 kV ถึง 800 kV และตามมาตรฐานสามารถใช้งานได้ใ้ในอุณหภูมิ -30 องศาเซลเซียส ถึง 40 องศาเซลเซียส แต่นำไปใช้งานจริงสามารถใช้ได้ในอุณหภูมิ -60 องศาเซลเซียส ถึง 50 องศาเซลเซียส

จากมาตรฐาน IEEE C57.19.01-2017 บุชชิง RIP สามารถใช้กับแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 25 kV ถึง 765 kV และตามมาตรฐานสามารถใช้งานได้ใ้ในอุณหภูมิ -30 องศาเซลเซียส ถึง 40 องศาเซลเซียส แต่นำไปใช้งานจริงสามารถใช้ได้ในอุณหภูมิ -60 องศาเซลเซียส ถึง 50 องศาเซลเซียส

บุชชิง Resin-impregnated Synthetics (RIS)

บุชชิง RIS ใช้สำหรับแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 24 kV ถึง 550 kV กระจกจะถูกแทนที่ด้วยผ้าใยโพลีเมอร์สังเคราะห์ซึ่งไม่ดูดซับความชื้น และสามารถใช้ Epoxy resin ที่เติมด้วย Alumina หรือผง Silica ซึ่งเป็นวัสดุฉนวนที่ทนทาน ใช้งานแรงดันสูงได้ มีคุณสมบัติทางความร้อนที่ดีขึ้น กระบวนการผลิตที่สั้นลง และใช้พลังงานน้อยลง แกนคอนเดนเซอร์ถูกเคลือบด้วย Silicone elastomer ค่าการทนความร้อนที่วัดได้ของวัสดุฉนวน RIS ในทิศทางแนวรัศมีของบุชชิงนั้น สูงกว่าวัสดุฉนวน RIP ถึง 2 เท่า

การติดตั้งทดสอบที่ Koeberg Insulator Pollution Test Station (KIPTS) ในแอฟริกาใต้ ประกอบด้วยบุชชิง RIS 123 kV 2 ตัว ตั้งแต่เดือนเมษายน 2552 สถานี KIPTS ซึ่งอยู่ห่างจาก Cape Town ประมาณ 20 km ที่ชายฝั่งมหาสมุทรแอตแลนติก เรียกได้ว่าเป็นสถานีทดสอบมลภาวะกลางแจ้งที่ร้ายแรงที่สุดมีลักษณะเฉพาะโดยการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิรายวันเกิน 20 องศาเซลเซียส และมีความชื้นสูงมารวมถึงหมอกน้ำเค็มมลพิษทางอุตสาหกรรม และฝุ่นจากพื้นที่เกษตรกรรม ไม่พบความล้มเหลวของฉนวนไฟฟ้าในบุชชิง RIS ใดๆในระหว่างการทดสอบหรือหลังการทดสอบ

การติดตั้งอ้างอิงครั้งแรกบุชชิง RIS 72.5 kV 3 ตัว บนหม้อแปลงในเดือนมิถุนายน 2554 ในสถานีย่อย Grynau ที่ดำเนินการโดย Axpo ในสวิตเซอร์แลนด์ Axpo เป็น utility ที่ใหญ่เป็นอันดับ 2 ของสวิตเซอร์แลนด์ สภาพภูมิอากาศที่สถานี อุณหภูมิจะแตกต่างกันระหว่าง -15 องศาเซลเซียสในฤดูหนาว และสูงสุดที่ 30 องศาเซลเซียสในฤดูร้อน ความสูงอยู่สูงจากระดับน้ำทะเล 400 m ติดตั้งระบบออนไลน์เพื่อให้สามารถวัดและบันทึกคุณลักษณะของบุชชิงได้

2.2 เทคนิคการประเมินสภาพฉนวน

จุดประสงค์ของการเฝ้าติดตามและวินิจฉัยบุชชิง คือ เพื่อที่จะสามารถประเมินสภาพของบุชชิงโดยมีผลการวัดหรือผลการทดสอบหรือการตรวจสอบเป็นตัวประเมิน การวัดสามารถทำได้ 2 แบบ คือ วัดแบบเป็นช่วงเวลา หรือ วัดแบบต่อเนื่อง การทดสอบบุชชิงแบบเป็นช่วงเวลาหรือออฟไลน์นั้น จะทำกับหม้อแปลงที่กำลังจ่ายไฟหรือไม่จ่ายไฟนั้นขึ้นอยู่กับวิธีวินิจฉัยนั้นๆ การทดสอบแบบต่อเนื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือออนไลน์นั้นจะทำกับหม้อแปลงที่จ่ายไฟโดยอัตโนมัติโดยมีคอมพิวเตอร์เป็นตัวช่วย วิธีวินิจฉัยที่มีอยู่ในปัจจุบันสำหรับการทดสอบแบบออนไลน์และออฟไลน์นั้นแสดงไว้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 วิธีวินิจฉัยบุชชิ่งสำหรับการทดสอบแบบออนไลน์และออฟไลน์ [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 R_{ms}	Yes	No
Winding resistance	Yes	No
Infrared scanning	Yes	Yes
PD measurement	Yes ¹⁾	Yes ¹⁾
DGA	Yes	Yes ²⁾
Moisture in oil	Yes	Yes ²⁾
Creepage current	No	Yes
Oil pressure	No	Yes
Transients	No	Yes

¹⁾ Sensitivity to low PD detection in the bushings may be a problem

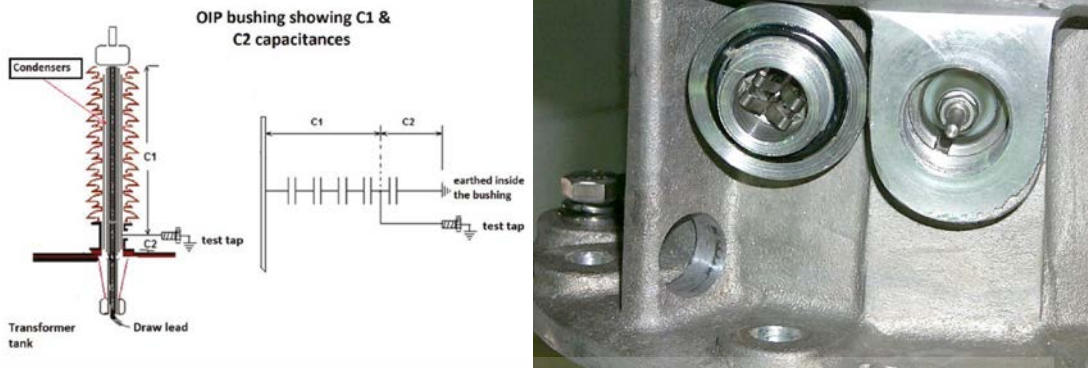
²⁾ Methods appropriate for continuous application but rarely used for bushings primarily because of high costs.

2.2.1 การวัดค่าคาปาซิแตนซ์และค่าตัวประกอบกำลังสูญเสียของฉนวน

ในบุชชิ่งประเภทคอนเดนเซอร์นั้นจะประกอบด้วยตัวเก็บประจุย่อยหลายตัวต่ออนุกรมกันซึ่งเกิดจากชั้นตัวนำที่แทรกอยู่ในเนื้อฉนวน โดยส่วนใหญ่บุชชิ่งซึ่งจะมีส่วนที่เรียกว่าแทปการทดสอบ (Test tap) แสดงดังรูปที่ 2.3 โดยแทปการทดสอบนี้จะเชื่อมต่อกับชั้นตัวนำชั้นนอกสุดเพื่อแบ่งตัวเก็บประจุออกเป็น 2 ส่วนคือ C1 และ C2 เพื่อใช้ในการวัดค่าคาปาซิแตนซ์ ค่าตัวประกอบกำลังสูญเสียของฉนวน และค่าการเกิดดิสชาร์จบางส่วน

C1 เป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้าแรงสูงของบุชชิ่ง ซึ่งเป็นผลรวมของตัวเก็บประจุทุกตัวจากท่อตัวนำไปยังแทปการทดสอบ C2 เป็นตัวเก็บประจุแรงต่ำระหว่างแทปการทดสอบกับปะเก็นของบุชชิ่ง โดยค่าของ C2 จะมากกว่า C1 ในระหว่างการใช้งานแทปการทดสอบจะถูกปิดซึ่งทำให้ C2 ถูกลัดวงจร ดังนั้นจะมีแค่ C1 ที่ยังคงอยู่ในวงจรเวลาหม้อแปลงทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 แทปการทดสอบในบุชชิงแบบคอนเดนเซอร์ [6,7]

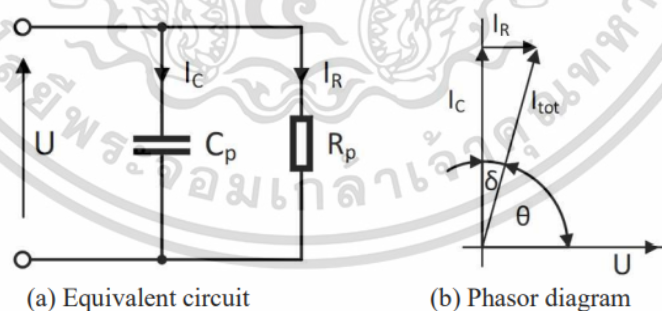
ฉนวนทางไฟฟ้าสามารถแสดงอยู่ในรูปวงจรมุมได้ดังรูปที่ 2.4 ซึ่งประกอบไปด้วยตัวต้านทาน (R_p) ต่อขนานอยู่กับตัวเก็บประจุไฟฟ้า (C_p) ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าแสดงถึงความสูญเสียในฉนวนทั้งหมด โดยค่าตัวประกอบกำลังของฉนวนคืออัตราส่วนระหว่างกำลังไฟฟ้าจริงต่อกำลังไฟฟ้าปรากฏดังสมการ

$$P = S \cdot \cos \theta$$

$$\cos \theta = \frac{P}{S}$$

หรือสามารถในรูปอัตราส่วนระหว่างกระแสความต้านทาน (I_R) กับกระแสโดยรวม (I_{tot}) ดังรูปที่ 2.4

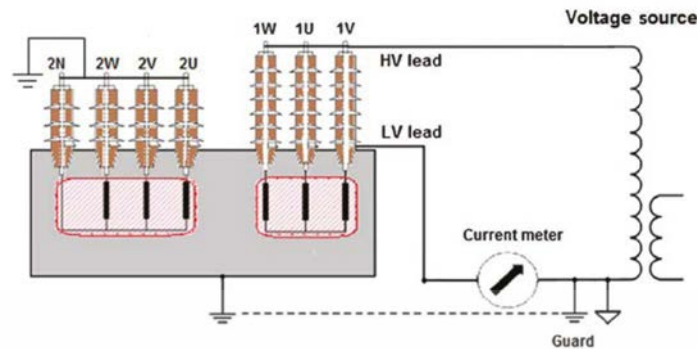
$$\cos \theta = \frac{I_R}{I_{tot}}$$



รูปที่ 2.4 หลักการของการทดสอบค่าตัวประกอบกำลังสูญเสียของฉนวน [4]

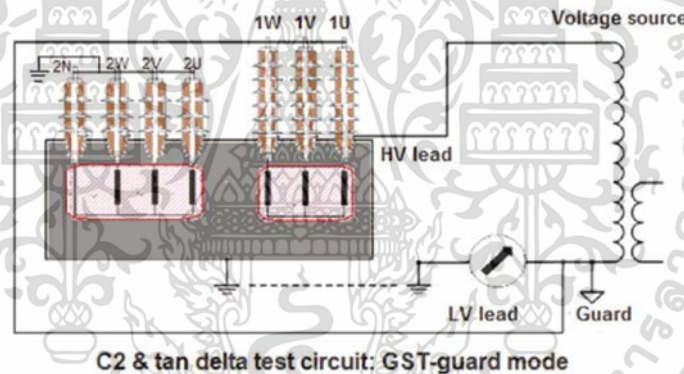
ในการวัดค่าคาปาซิแตนซ์ของฉนวนหลัก C_1 และค่าตัวประกอบกำลังสูญเสียนั้นเราจะต่อวงจรแบบ UST (Ungrounded specimen test) โดยมีการต่อสำหรับกรณีหม้อแปลง 2 ขดลวด คือทำการต่อสาย HV ของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าเข้ากับขั้วต่อของบุชชิง HV และทำการเชื่อมต่อบุชชิง HV ตัวอื่นและ HV นิวทรอลเข้ากับบุชชิงที่กำลังทำการทดสอบอยู่ จากนั้นทำการต่อสาย LV ของแหล่งจ่ายเข้ากับแทปการทดสอบ โดยบุชชิง LV ทั้งหมดและ LV นิวทรอลต่อลงกราวด์ ดังรูปที่ 2.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 วงจรการวัด C1 และค่าตัวประกอบกำลังสูญเสียแบบ UST [7]

ในการวัดค่าคาปาซิแตนซ์ C_2 และค่าตัวประกอบกำลังสูญเสียนั้นเราจะต่อวงจรแบบ GST-Guard (Grounded specimen test - Guard) โดยมีการต่อสำหรับกรณีหม้อแปลง 2 ขดลวด คือ สาย LV ของแหล่งจ่ายแรงดันที่มีการกรัดจะต่อเข้ากับตัวนำของบุชชิ่ง จากนั้นทำการต่อสาย HV ของแหล่งจ่ายเข้ากับแทปการทดสอบ ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 วงจรการวัด C2 และค่าตัวประกอบกำลังสูญเสียแบบ GST- Guard [7]

2.2.2 การวัดกระแสโพลาไรเซชันและกระแสดีโพลาไรเซชัน [8-11]

การวัดกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชัน (Polarization and Depolarization Current: PDC) มีหลักการทำงานคือ ทำการจ่ายแรงดันเสถียรระหว่างขั้วของบุชชิ่งกับกราวด์เพื่อทำให้เกิดการโพลาไรเซชันในเนื้อฉนวน โดยกระแสโพลาไรเซชันที่เกิดขึ้นจะไหลไปที่กราวด์ซึ่งเราสามารถดึงกระแสนี้ออกมาวัดผ่านเทสแทปได้ โดยกระแสโพลาไรเซชันสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$i_{pol}(t) = \frac{U_0}{R_0} \sum_{i=1}^n \left(\frac{U_0}{R_i} e^{-\frac{t}{R_i C_i}} \right)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากเวลาผ่านไปช่วงหนึ่งแหล่งจ่ายแรงดันจะถูกตัดวงจรเพื่อให้ฉนวนเกิดการดีโพลาริเซชัน ผลที่ได้คือกระแสดีโพลาริเซชันที่มีชั่วพลจะไหลจากฉนวนออกมาสู่กราวด์ โดยกระแสดีโพลาริเซชันสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

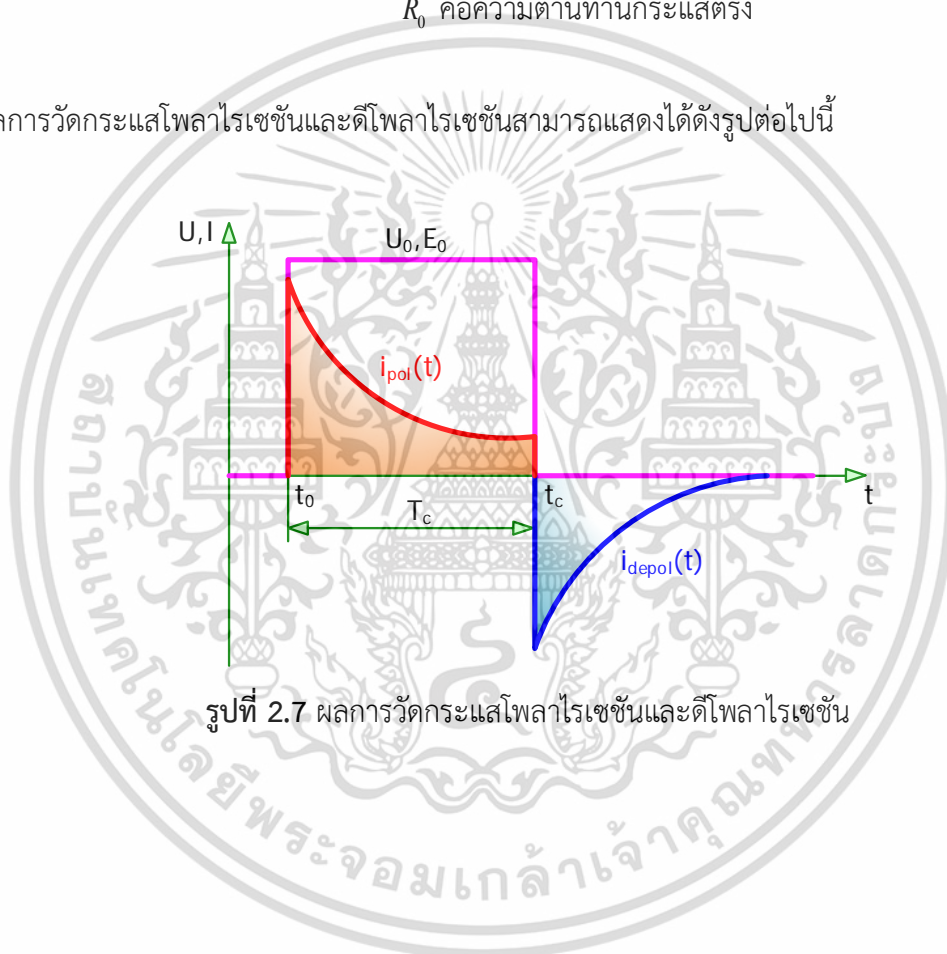
$$i_{\text{depol}}(t) = \sum_{i=1}^n (A_i e^{-\frac{t}{R_i C_i}})$$

$$\text{โดยที่ } A_i = \frac{U_0}{R_0} (1 - e^{-\frac{T_c}{R_i C_i}})$$

U_0 คือแรงดันเสถียรที่จ่ายให้บูชชิง

R_0 คือความต้านทานกระแสตรง

ผลการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันสามารถแสดงได้ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 2.7 ผลการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

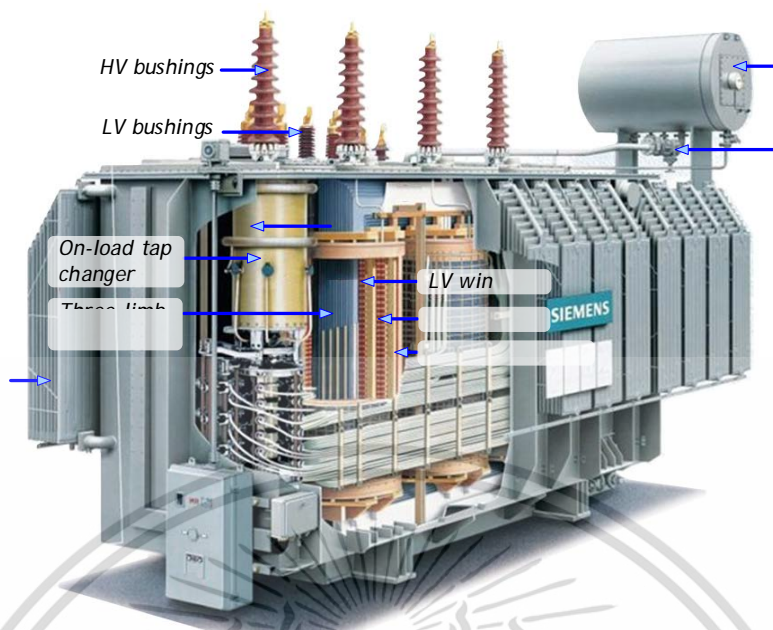
2.3 หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังมีบทบาทที่สำคัญอย่างมากในระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากำลัง โดยทำหน้าที่แปลงระดับแรงดันขึ้นหรือลงเพื่อให้เหมาะสมกับที่ระบบแรงดัน ซึ่งขึ้นอยู่กับระยะทางที่ใช้ส่งกำลังไฟฟ้า เมื่อจำเป็นต้องส่งกำลังไฟฟ้าที่ระยะทางไกลขึ้น ก็จำเป็นต้องใช้แรงดันไฟฟ้าที่ระดับสูงขึ้นในการส่งจ่าย โดยในประเทศไทย ณ ปัจจุบันพิกัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสูงสุดของระบบส่งจ่ายได้แก่ พิกัด 500 kV

หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่พิกัด 500 kV ในระบบส่งจ่ายซึ่งอยู่ภายใต้การดูแลของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยจะนิยมใช้เป็นหม้อแปลงเฟสเดียวมาเชื่อมต่อกันจำนวน 3 ลูก สำหรับใช้งานในระบบไฟฟ้า 3 เฟส เพื่อเพิ่มเสถียรภาพในระบบไฟฟ้า เนื่องจากหากมีความล้มเหลวของหม้อแปลงเฟสใดเฟสหนึ่งเกิดขึ้นก็จะสามารถเปลี่ยนทดแทนด้วยหม้อแปลงลูกสำรองได้ และเหตุผลเรื่องขนาดของหม้อแปลงไฟฟ้าซึ่งหากเป็นประเภท 3 เฟสในตัวจะทำให้มีขนาดที่ใหญ่และมีน้ำหนักที่มาก ด้วยพื้นที่ที่จำกัดของสถานีไฟฟ้าแรงสูงทั่วไป ซึ่งจะทำให้การขนย้ายและติดตั้งมีอุปสรรคเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้งานหม้อแปลงเฟสเดียว 3 ลูก ดังนั้นแล้ว โดยปกติทั่วไปหม้อแปลงเฟสเดียวทั้ง 3 ลูก รวมถึงลูกสำรอง จะต้องมีการออกแบบให้มีพิกัดต่าง ๆ เหมือนกันทุกประการ เพื่อความสมดุลในการใช้งาน นอกจากนี้ ในการผลิตหม้อแปลงไฟฟ้าเฟสเดียวดังกล่าว โดยปกติจะผลิตจำนวน 4 ลูก โดย 1 ลูกที่เหลือจะใช้เป็นสำรองในกรณีที่หม้อแปลงไฟฟ้าลูกใดลูกหนึ่งเกิดความล้มเหลว ทั้งนี้เพื่อเพิ่มเสถียรภาพในการใช้งาน เพิ่มความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้า รวมไปถึงสามารถที่จะลดระยะเวลาการผลิตหม้อแปลงไฟฟ้าใหม่เพื่อมาแทนที่หม้อแปลงไฟฟ้าลูกเดิมที่เกิดความล้มเหลวซึ่งอาจจะใช้เวลา 1 ปี หรือมากกว่า

2.3.1 โครงสร้างพื้นฐานของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

ส่วนประกอบที่สำคัญของหม้อแปลงไฟฟ้า ประกอบด้วย แกนเหล็ก เป็นทางเดินของเส้นฟลักซ์แม่เหล็กและมีขดลวดสองชุด ชุดหนึ่งเป็นด้านป้อนแรงดันไฟฟ้าเข้า อีกชุดหนึ่งเป็นด้านจ่ายแรงดันไฟฟ้าออก นอกจากแกนเหล็กและขดลวด มีฉนวนซึ่งถือเป็นส่วนประกอบสำคัญในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทุกชนิด โดยส่วนประกอบของหม้อแปลงไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ส่วนประกอบของหม้อแปลงไฟฟ้าน้ำมันแบบถังปิด [12]

โดยรายละเอียดของโครงสร้างต่างๆในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังประกอบด้วย

- Radiators หรือครีบของหม้อแปลง ทำหน้าที่ระบายความร้อนหรือรองรับการขยายตัวของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า โดยเมื่อหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังทำงาน อุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจะสูงขึ้น ส่งผลให้เกิดการขยายตัวของน้ำมัน ครีบของหม้อแปลงจึงถูกออกแบบมาเพื่อรองรับการขยายตัวและเพิ่มพื้นที่ให้อากาศไหลผ่าน ส่งผลให้ระบายความร้อนได้ดีขึ้น

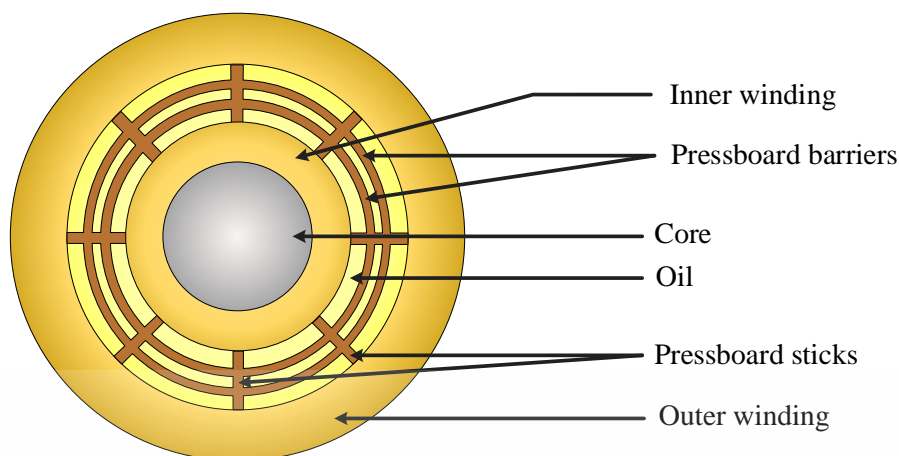
- HV bushing หรือบุชชิงฝั่งแรงดันสูง ทำมาจากพอร์ซเลนมีหน้าที่นำตัวนำแรงดันไฟฟ้าสูงเข้าสู่ขดลวดแรงดันไฟฟ้าสูงของหม้อแปลง และยังเป็นฉนวนระหว่างตัวนำแรงดันไฟฟ้าสูงและตัวถังหม้อแปลงอีกด้วย [13]

- LV bushing หรือบุชชิงฝั่งแรงดันต่ำ ทำมาจากพอร์ซเลนมีหน้าที่นำตัวนำแรงดันไฟฟ้าต่ำเข้าสู่ขดลวดแรงดันไฟฟ้าต่ำของหม้อแปลง และยังเป็นฉนวนระหว่างตัวนำแรงดันไฟฟ้าต่ำและตัวถังหม้อแปลงอีกด้วย [13]

- HV winding หรือขดลวดแรงดันไฟฟ้าสูง ตัวนำที่ใช้ทำมาจากทองแดงรีดอ่อนหุ้มฉนวนกระดาษหรือเคลือบสารฉนวน ตัวนำที่ใช้มีทั้งขนาดหน้าตัดกลม สีเหลี่ยมผืนผ้า หรือแผ่นบาง โดยตัวนำจะรับ/จ่ายแรงดันไฟฟ้าสูง ขึ้นอยู่กับว่าแรงดันไฟฟ้าจะถูกเหนี่ยวนำขึ้นที่ขดลวดฝั่งไหน [14]

- LV winding หรือขดลวดแรงดันไฟฟ้าต่ำ ตัวนำที่ใช้ทำมาจากทองแดงรีดอ่อนหุ้มฉนวนกระดาษหรือเคลือบสารฉนวน ตัวนำที่ใช้มีทั้งขนาดหน้าตัดกลม สีเหลี่ยมผืนผ้า หรือแผ่นบาง ซึ่งขดลวดแรงดันไฟฟ้าต่ำจะอยู่ล้อมรอบแกนเหล็ก และถูกร้อมลอบด้วยขดลวดฝั่งแรงดันไฟฟ้าสูง ดังแสดงรูปที่ 2.9 [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 โครงสร้างพื้นฐานของฉนวนหลัก C_{HL} ในหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดแกนเหล็ก [15]

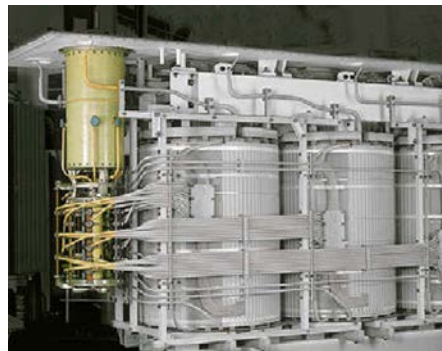
- Tapped winding หรือขดลวดแท็ป มีหน้าที่เป็นแท็บเสริม ทำหน้าที่เปลี่ยนขั้วเพื่อให้ On-load tap changer สามารถเปลี่ยนระดับแรงดันได้ช่วงกว้างขึ้น

- Oil expansion vessel หรือถังรองรับการขยายตัวของน้ำมัน โดยข้างในถังจะบรรจุน้ำมัน ซึ่งควรมีปริมาตรที่ไม่ควรเกินครึ่งหนึ่งของความจุถัง เพื่อรองรับน้ำมันจาก Main tank เมื่อเกิดการขยายตัวในขณะที่หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังทำงานอยู่

- Buchholz relay หรือบุชโฮลรีเลย์ ตั้งอยู่ระหว่างหม้อแปลงกับ Oil expansion vessel ของหม้อแปลง มีหน้าที่ตรวจจับความผิดปกติที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลง เมื่อมีความผิดปกติในหม้อแปลง ความร้อนจะทำให้เกิดก๊าซขึ้น โดยก๊าซที่เกิดขึ้นจะมาแทนที่น้ำมันที่ส่วนบนของบุชโฮลรีเลย์ ทำให้ลูกลอยลูกภายในบุชโฮลรีเลย์ลระดับลงจนถึงระดับหนึ่งจะมีสัญญาณเตือนแจ้งให้ทราบ [16]

- On-load tap changer (OLTC) ทำหน้าที่เปลี่ยนแท็ปของหม้อแปลงเพื่อรักษาระดับแรงดัน หรือการเปลี่ยนเฟสโดยการเปลี่ยนแปลงอัตราหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่ง OLTC สามารถเปลี่ยนทำงานได้ในขณะที่หม้อแปลงยังจ่ายโหลดอยู่ โดยส่วนใหญ่ OLTC ประเภทตัวต้านทานหรือ Resistor-type OLTC จะถูกติดตั้งอยู่ภายในถังหม้อแปลงไฟฟ้า ในขณะที่ OLTC ประเภทรีแอกเตอร์หรือ Reactor-type OLTC จะถูกติดตั้งอยู่ภายในช่องแยกต่างหาก ซึ่งปกติจะเชื่อมกับถังหม้อแปลงไฟฟ้า ดังแสดงรูปที่ 2.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



- ก) OLTC จะถูกติดตั้งอยู่ภายในช่องแยก ข) OLTC จะถูกติดตั้งอยู่ภายในถังหม้อแปลงไฟฟ้า

รูปที่ 2.10 ชนิดของ OLTC [17]

- Three limb core หรือ แกนเหล็กแบบ 3 แกน โดยทั่วไปหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส จะมีลักษณะโครงสร้างแกนเหล็กแบบ 3 แกน และแกนเหล็กสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดได้แก่ Wound Core เพราะการขึ้นรูปพิเศษทำให้ได้ค่าความสูญเสีย และค่ากระแสขณะไม่มีโหลดมีค่าน้อย เนื่องจากโครงสร้างของ Wound Core มีจุดต่อเพียงจุดเดียวตั้ง โดยแผ่นเหล็กแต่ละแผ่นจะวางเรียงกันในลักษณะ Step-Lap หรือก็คือการวางตำแหน่งต่อกันของแผ่นเหล็กแต่ละแผ่นวางเหลื่อมกัน Stacking Core แกนเหล็กชนิดนี้จะมีพื้นที่หน้าตัดแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า, จัตุรัส หรือแบบยอมุม ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดพิกัดกำลังของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยแกนเหล็กแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าและจัตุรัสจะใช้ขดลวดตัวนำและมีความสูญเสียมากกว่าแบบยอมุม

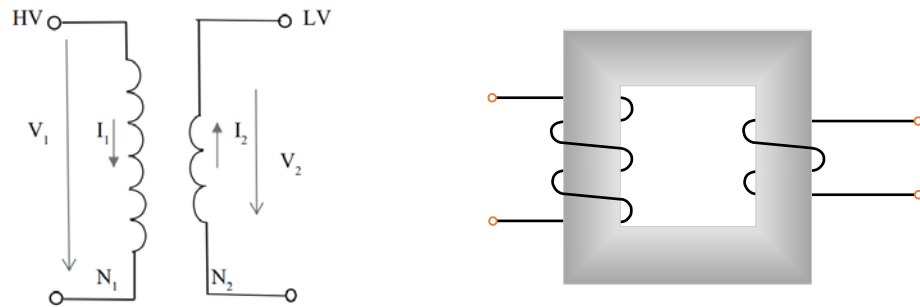
2.3.2 หม้อแปลงไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง [18-21]

ประเภทของหม้อแปลงไฟฟ้า สามารถแบ่งตามลักษณะของขดลวด (Transformer winding) ได้เป็น 2 ประเภท คือ

2.3.2.1 Isolating Transformer

เป็นหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้กันทั่วไป วงจรของขดลวดทางด้านปฐมภูมิจะแยกขาดจากขดลวดทางด้านทุติยภูมิ ซึ่งขดลวดทางด้านปฐมภูมิและขดลวดทางด้านทุติยภูมิจะไม่ต่อถึงกันทางไฟฟ้า แต่จะมีฟลักซ์แม่เหล็กคล้องร่วมกัน (Magnetic coupled)

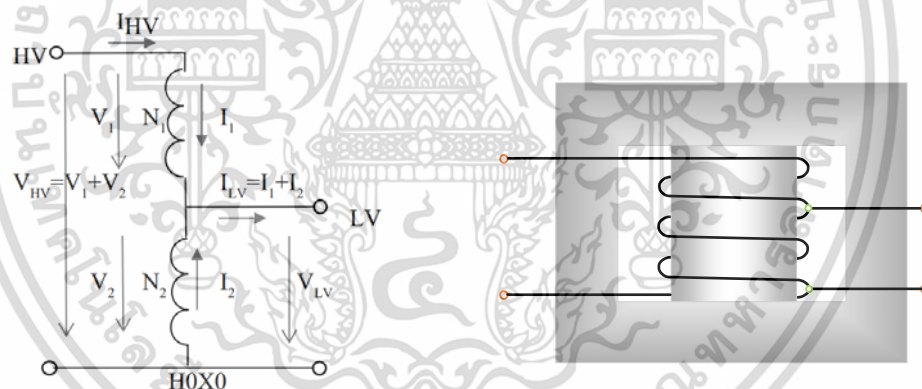
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 ขดลวดทางด้านปฐมภูมิและขดลวดทางด้านทุติยภูมิจะไม่ต่อถึงกันทางไฟฟ้า แต่จะมีฟลักซ์แม่เหล็กคล้องร่วมกัน (Magnetic coupled)

2.3.2.2 Auto Transformer

เป็นหม้อแปลงไฟฟ้าที่ขดลวดทางด้านปฐมภูมิมีการเชื่อมต่อวงจรทางไฟฟ้ากับขดลวดทางด้านทุติยภูมิ ซึ่งขดลวดทางด้านปฐมภูมิและขดลวดทางด้านทุติยภูมิจะต่อถึงกันทางไฟฟ้า และจะมีฟลักซ์แม่เหล็กคล้องร่วมกัน (Magnetic coupled) โดยประโยชน์การใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบนี้คือ สามารถปรับค่าแรงดันไฟฟ้าได้ตามต้องการ



รูปที่ 2.12 ขดลวดทางด้านปฐมภูมิและขดลวดทางด้านทุติยภูมิจะต่อถึงกันทางไฟฟ้า

ข้อดีของ Auto Transformer

- หม้อแปลงไฟฟ้าอัตโนมัติใช้ขดลวดเดียวกันนั้นจึงมีขนาดเล็กและประหยัดค่าใช้จ่าย
- หม้อแปลงไฟฟ้าอัตโนมัติมีการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ดีกว่าเนื่องจากความต้านทานแรงดันตกคร่อมและค่ารีแอกแตนซ์ของขดลวดเดียวกันน้อยกว่า
- หม้อแปลงไฟฟ้าอัตโนมัติมีประสิทธิภาพสูงกว่าหม้อแปลงไฟฟ้าแบบขดลวดสองตัว เนื่องจากมีการสูญเสียไอห่มมีกน้อยลงและการสูญเสียแกนเนื่องจากการลัดวงหม้อแปลงไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อเสียของ Auto Transformer

- ขดลวดทุติยภูมิไม่ได้หุ้มฉนวนจากขดลวดปฐมภูมิ หากใช้หม้อแปลงไฟฟ้าอัตโนมัติเพื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าต่ำจากไฟฟ้าแรงสูง และขดลวดทุติยภูมิขาด แรงดันไฟฟ้าหลักเต็มจะข้ามขั้วต่อทุติยภูมิซึ่งเป็นอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานและอุปกรณ์

การใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าอัตโนมัติ

- ใช้ชดเชยแรงดันไฟฟ้าที่ลดลงโดยการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่าย
- ใช้ในสถานีไฟฟ้าที่แรงดันไฟฟ้าต้องลดระดับลงและเพิ่มขึ้นเท่ากับแรงดันไฟฟ้าที่ปลายรับซึ่งจำเป็นสำหรับอุปกรณ์
- ใช้ในห้องปฏิบัติการเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าที่แตกต่างกันอย่างต่อเนื่อง
- ใช้เหมือนการควบคุมหม้อแปลงไฟฟ้าในตัวปรับแรงดันไฟฟ้า .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การศึกษาและวิเคราะห์สภาพฉนวนของฉนวนบุชชิง

ในบทนี้อธิบายถึงการออกแบบการทดลอง รายละเอียดของการทดลอง ชุดทดสอบ และวงจรการทดสอบในการการศึกษาและวิเคราะห์สภาพฉนวนของฉนวนบุชชิง โดยการทดลองในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะถูกแบ่งออกเป็น 2 กรณีศึกษา ได้แก่ 1. การศึกษาเทคนิคการทดสอบเพื่อเฝ้าระวังสภาพฉนวนของ OIP บุชชิงระดับแรงดันสูงปานกลาง และ 2. การศึกษาการไม่เข้าค่าของค่าคาปาซิแตนซ์ของเทสแทป (Test tap) ใน RIP บุชชิงที่ติดตั้งใหม่

3.1 กรณีศึกษาที่ 1 การศึกษาเทคนิคทดสอบเพื่อเฝ้าระวังสภาพฉนวนของ OIP บุชชิงระดับแรงดันสูงปานกลาง

การทดลองนี้ศึกษาเทคนิคการทดสอบเพื่อเฝ้าระวังสภาพฉนวนของ OIP บุชชิงระดับแรงดันสูงปานกลาง ด้วย 2 เทคนิคการทดสอบ คือ การวัดตัวประกอบกำลังสูญเสียของฉนวน (Insulation Power Factor (IPF) Test) และการวัดกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชัน (Polarization and Depolarization Current: PDC) กับ OIP บุชชิงระดับแรงดัน 25 kV จำนวน 5 ตัว และระดับแรงดัน 34.5 kV จำนวน 5 ตัว ที่ผ่านการใช้งานมาแล้วมากกว่า 25 ปี มีการเตรียมการทดสอบดังนี้

1. ตรวจสอบสภาพภายนอกของ OIP บุชชิงทั้ง 10 ตัว ต้องอยู่ในสภาพสมบูรณ์ ไม่มีน้ำมันรั่วซึมระดับน้ำมันในช่องตาแมวอยู่ในระดับปกติ
2. ตั้ง OIP บุชชิงทั้ง 10 ตัว บนแท่นวางเป็นเวลา 24 ชั่วโมงก่อนการทดสอบ ดังรูปที่ 3.1
3. ต่อหน้าแปลนของบุชชิงทุกตัวลงกราวด์ของห้องปฏิบัติการ
4. ลัดวงจรระหว่างตัวนำแกนกลางและหน้าแปลนของบุชชิงด้วยสายตัวนำ เพื่อคายประจุไฟฟ้าที่ค้างในเนื้อฉนวนของบุชชิง

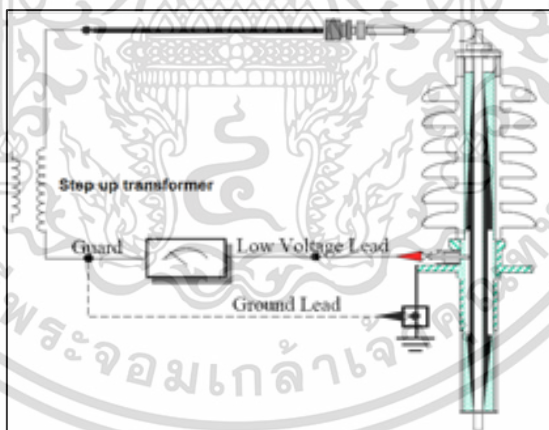
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 การตั้ง OIP บุษชิงบนแท่นวางเป็นเวลา 24 ชั่วโมงก่อนการทดสอบ

3.1.1 การวัดตัวประกอบกำลังสูญเสียของฉนวน (Insulation Power Factor (IPF) Test)

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบทางไฟฟ้าเพื่อใช้ตรวจวัดการเสื่อมสภาพของฉนวนใน OIP บุษชิง โดยชุดเครื่องมือทดสอบจะประกอบไปด้วยภาคจ่ายแรงดัน ภาควัดแรงดัน กระแสรั่วไหลผ่านเนื้อฉนวนและค่ากำลังสูญเสียในเนื้อฉนวน เนื่องจากค่าคาปาซิแตนซ์ของบุษชิงจะประกอบด้วยค่าคาปาซิแตนซ์ของฉนวนหลัก และค่าคาปาซิแตนซ์ของฉนวนทดสอบ (Test tap) ซึ่งต้องใช้วงจรการทดสอบดังรูปที่ 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ



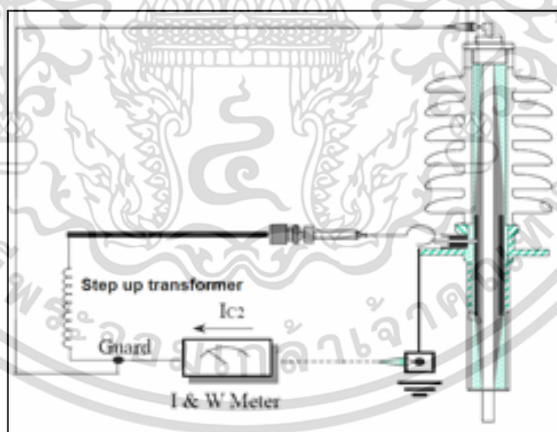
รูปที่ 3.2 วงจรทดสอบสำหรับค่าคาปาซิแตนซ์ของฉนวนหลัก (C₁) ด้วยการวัดแบบไม่กราวด์วัสดุทดสอบ (Ungrounded specimen test (UST)) [22]

ขั้นตอนการวัดตัวประกอบกำลังสูญเสียของฉนวน (Insulation Power Factor (IPF) Test) สำหรับฉนวนหลัก (C₁) มีดังนี้

1. จัดเตรียมเครื่องมือวัดให้พร้อม
2. ปลดสายลัดวงจรระหว่างตัวนำแกนกลางและหน้าแปลนของบุษชิงตัวที่จะวัดออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เปิดฝาปิดทดสอบของบุชชิ่งที่จะทำการวัดออก และทำความสะอาดด้วยผ้าสะอาด
4. ต่อสายป้อนแรงดันสูงเข้าที่หัวของบุชชิ่งที่จะทำการวัดตามรูปที่ 3.2 โดยต้องให้สายป้อนแรงดันสูงตั้งฉากกับแกนของบุชชิ่ง
5. ต่อสายวัดแรงดันต่ำ (Low voltage lead) เข้าที่จุดทดสอบ (Test tap) ของบุชชิ่ง
6. ต่อสายกราวด์ของเครื่องมือวัดเข้ากับกราวด์ของบุชชิ่งที่จะทดสอบ
7. ปรับตำแหน่งของเครื่องมือเป็นตำแหน่งการวัดแบบไม่กราวด์วัสดุทดสอบ (Ungrounded specimen test (UST))
8. ขึ้นแรงดันทดสอบไปที่ 10 kV และค้างอยู่ที่ค่านี้นจนกว่าการวัดจะเสร็จสิ้น
9. ปรับค่าตัวคูณกระแสให้ค่ากระแสรั่วไหลซีทีใกล้เคียงเต็มมาตรวัด
10. ปรับค่าตัวคูณกำลังไฟฟ้าให้ค่ากำลังไฟฟ้าซีทีใกล้เคียงเต็มมาตรวัด
11. ปรับตัวปรับค่ากำลังไฟฟ้าเพื่อหาตำแหน่งที่เข็มวัดชี้ค่ากำลังไฟฟ้าต่ำสุด
12. บันทึกค่าแรงดันทดสอบ ค่ากระแสรั่วไหล ค่ากำลังไฟฟ้าและค่าคาปาซิแตนซ์
13. ลดแรงดันที่ป้อนลงเป็นศูนย์ ปิดเครื่องมือวัดและปลดสายป้อนแรงดันและสายวัดต่าง ๆ ออกจากตัวบุชชิ่ง
14. ลัดวงจรระหว่างตัวนำแกนกลางและหน้าแปลนของบุชชิ่งที่ทดสอบเสร็จแล้ว
15. ทำการทดสอบซ้ำในข้อ 2-14 จนครบกับบุชชิ่งทั้ง 10 ตัว



รูปที่ 3.3 วงจรทดสอบสำหรับค่าคาปาซิแตนซ์ของฉนวนทดสอบ (C₂) ด้วยการวัดแบบกราวด์วัสดุทดสอบและการัด (Grounded specimen test (GST-guard)) [22]

ขั้นตอนการวัดตัวประกอบกำลังสูญเสียของฉนวน (Insulation Power Factor (IPF) Test) สำหรับฉนวนทดสอบ (C₂) มีดังนี้

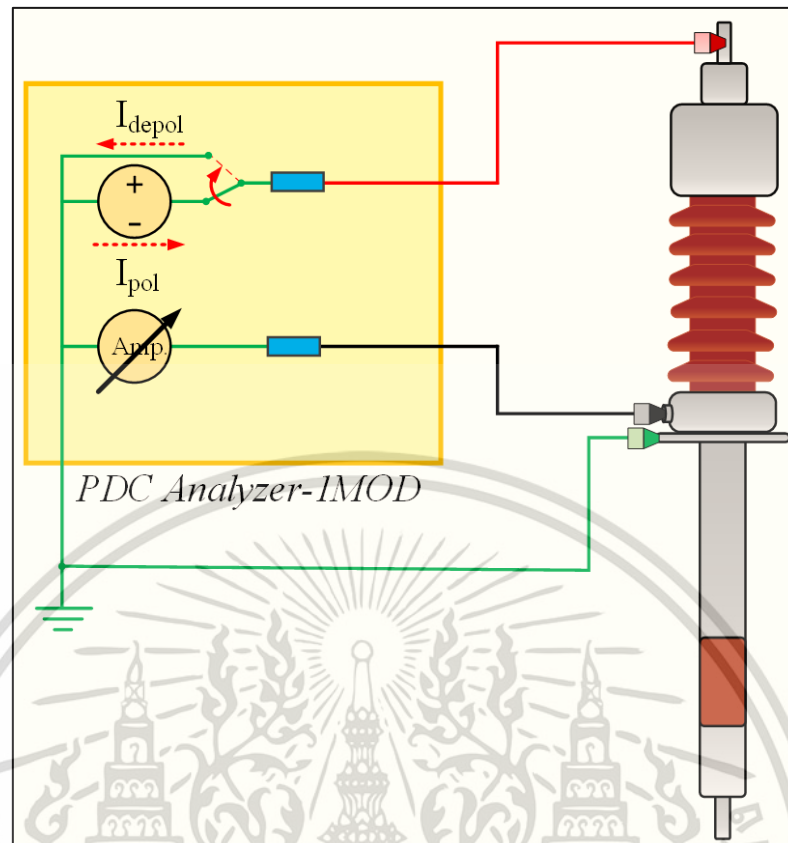
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. จัดเตรียมเครื่องมือวัดให้พร้อม
2. ปลดสายลัดวงจรระหว่างตัวนำแกนกลางและหน้าแปลนของบุชชิ่งตัวที่จะวัดดอก
3. เปิดฝาปิดเทสแทปของบุชชิ่งที่จะทำการวัดดอก และทำความสะอาดด้วยผ้าสะอาด
4. ต่อสายป้อนแรงดันสูงเข้าที่จุดเทสแทป (Test tap) ที่จะทำการวัดตามรูปที่ 3.3 โดยต้องให้สายป้อนแรงดันสูงตั้งฉากกับแกนของบุชชิ่ง
5. ต่อสายวัดแรงดันต่ำ (Low voltage lead) เข้าที่ตัวนำแกนกลางของบุชชิ่ง
6. ต่อสายกราวด์ของเครื่องมือวัดเข้ากับกราวด์ของบุชชิ่ง
7. ปรับตำแหน่งของเครื่องมือเป็นตำแหน่งการวัดแบบกราวด์วัสดุทดสอบและการัด (Grounded specimen test (GST-guard))
8. ขึ้นแรงดันทดสอบไปที่ 2 kV และค้างอยู่ที่ค่านี้นานกว่าการวัดจะเสร็จสิ้น
9. ปรับค่าตัวคูณกระแสให้ค่ากระแสรั่วไหลซีจีใกล้เคียงเต็มมาตรวัด
10. ปรับค่าตัวคูณกำลังไฟฟ้าให้ค่ากำลังไฟฟ้าซีจีใกล้เคียงเต็มมาตรวัด
11. ปรับตัวปรับค่ากำลังไฟฟ้าเพื่อหาตำแหน่งที่เข็มวัดซีจีค่ากำลังไฟฟ้าต่ำสุด
12. บันทึกค่าแรงดันทดสอบ ค่ากระแสรั่วไหล ค่ากำลังไฟฟ้าและค่าคาปาซิแตนซ์
13. ลดแรงดันที่ป้อนลงเป็นศูนย์ ปิดเครื่องมือวัดและปลดสายป้อนแรงดันและสายวัดต่าง ๆ ออกจากตัวบุชชิ่ง
14. ลัดวงจรระหว่างตัวนำแกนกลางและหน้าแปลนของบุชชิ่งที่ทดสอบเสร็จแล้ว
15. ทำการทดสอบซ้ำในข้อ 2-14 จนครบกับบุชชิ่งทั้ง 10 ตัว

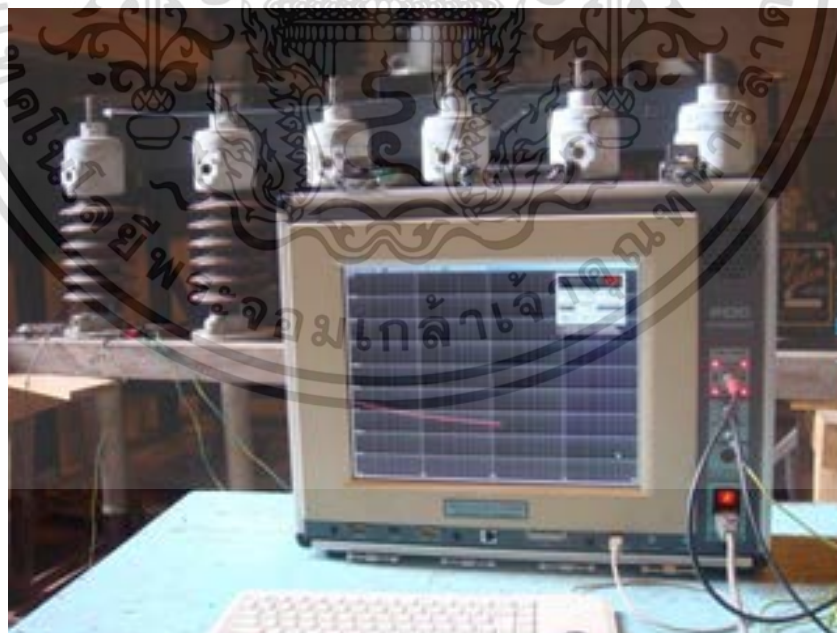
3.1.2 การทดสอบ PDC

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบทางไฟฟ้าเพื่อบ่งบอกคุณลักษณะการตอบสนองของฉนวนของ OIP บุชชิ่งภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสตรง การทดสอบ PDC เป็นการทดสอบไม่ทำลายชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องมือ PDC-Analyzer 1 MOD เพื่อให้ผลการวัดมีความถูกต้องจะต้องทำการคายประจุไฟฟ้าที่ค้างในเนื้อฉนวนหลักของบุชชิ่งออกก่อนด้วยการลัดวงจรระหว่างตัวนำแกนกลางและหน้าแปลนของบุชชิ่ง ซึ่งมีวงจรการทดสอบดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 วงจรการทดสอบ PDC สำหรับบุชชิง



รูปที่ 3.5 วงจรการทดสอบ PDC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนการทดสอบ PDC มีดังนี้

1. จัดเตรียมเครื่องมือวัดให้พร้อม
2. ปลดสายลัดวงจรระหว่างตัวนำแกนกลางและหน้าแปลนของบุชชิ่งตัวที่จะวัดออก
3. เปิดฝาปิดเทสแทปของบุชชิ่งที่จะทำการวัดออก และทำความสะอาดด้วยผ้าสะอาด
4. ต่อสายป้อนแรงดันเข้าที่ตัวนำแกนกลางของบุชชิ่งที่จะทำการวัดตามรูปที่ 3.4 โดยต้องให้สายป้อนแรงดันตั้งฉากกับแกนของบุชชิ่ง
5. ต่อสายวัดกระแสเข้าที่จุดเทสแทปของบุชชิ่ง
6. ต่อสายกราวด์ของเครื่องมือวัดเข้ากับกราวด์ของบุชชิ่ง
7. ทำการวัด PDC สำหรับการวัด PDC ของบุชชิ่ง แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้
 - ขั้นตอนที่ 1: ทำการวัดกระแสคงเหลือภายในเนื้อฉนวน
 - ขั้นตอนที่ 2: ป้อนแรงดันกระแสตรง 100 V ให้กับบุชชิ่งเป็นเวลา 4 วินาที เพื่อตรวจสอบว่ากระแสโพล่าไรเซชันมีค่าเท่าไรและต้องไม่เกิน ± 1 mA เนื่องจากเครื่องมือทดสอบสามารถวัดกระแสได้สูงสุดไม่เกินค่าที่กล่าวไป จากนั้นให้คำนวณหาค่ากระแสโพล่าไรเซชันที่แรงดัน 1,000 V จากค่ากระแสที่ 100 V หากค่ากระแสโพล่าไรเซชันที่ 1,000 V ไม่เกิน ± 1 mA จะทำการวัดกระแสโพล่าไรเซชันต่อด้วยการลัดวงจรที่ชิ้นงานทดสอบเพื่อให้คายประจุจนกว่ากระแสโพล่าไรเซชันจะเข้าสู่ค่ากระแสคงเหลือในขั้นตอนที่ 1 แต่ถ้าคำนวณแล้วค่ากระแสโพล่าไรเซชันที่ 1,000 V เกิน ± 1 mA ให้ลดระดับแรงดันที่ใช้ป้อนลงมาให้เหมาะสม เพื่อให้กระแสโพล่าไรเซชันไม่เกิน ± 1 mA
 - ขั้นตอนที่ 3: ป้อนแรงดันกระแสตรง 1,000 V ให้กับชิ้นงานทดสอบเพื่อวัดกระแสโพล่าไรเซชันเป็นเวลา 1,100 วินาที และลัดวงจรชิ้นงานทดสอบเพื่อวัดกระแสโพล่าไรเซชันเป็นเวลา 1,100 วินาที
8. บันทึกค่า PDC
9. ปิดเครื่องมือวัดและปลดสายป้อนแรงดันและสายวัดต่าง ๆ ออกจากตัวบุชชิ่ง
10. ลัดวงจรระหว่างตัวนำแกนกลางและหน้าแปลนของบุชชิ่งที่ทดสอบเสร็จแล้ว
11. ทำการทดสอบซ้ำในข้อ 2-10 จนครบกับบุชชิ่งทั้ง 10 ตัว

3.1.3 ผลการศึกษาเทคนิคการทดสอบเพื่อเฝ้าระวังสภาพฉนวนของ OIP บุชชิ่งระดับแรงดันสูงปานกลาง

การวัดตัวประกอบกำลังสูญเสียของฉนวน (Insulation Power Factor (IPF) Test) โดยผลการวัดตัวประกอบกำลังสูญเสียของฉนวนของบุชชิ่งจำนวน 10 ตัว แสดงไว้ดังตารางที่ 3.1

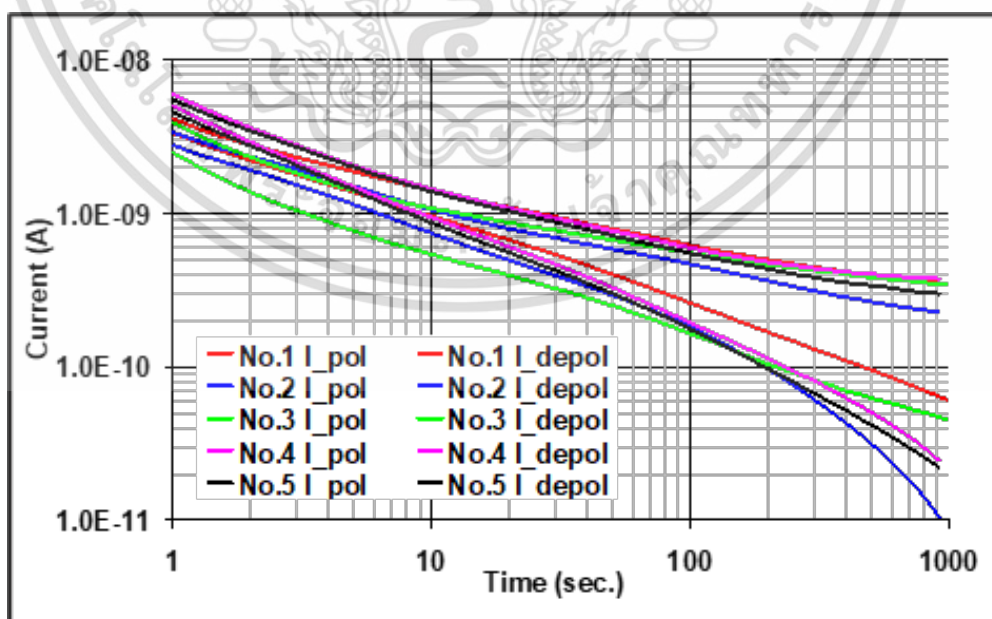
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 ผลการวัดค่า %IPF ของ C_1 ที่ 20°C และของ C_2 ที่อุณหภูมิขณะวัด

บุชชิ่ง หมายเลข	พิกัดแรงดัน (kV)	ค่า %IPF ที่ป้ายชื่อ	ค่า %IPF ของ C_1 ที่ 20°C	ค่า %IPF ของ C_2 ที่อุณหภูมิขณะวัด
1	34.5	0.23	0.81	0.62
2	34.5	0.23	0.54	0.51
3	34.5	0.23	0.57	0.77
4	34.5	0.23	0.73	1.00
5	34.5	0.23	1.01	1.13
6	25.0	0.26	1.06	1.06
7	25.0	0.26	1.21	1.27
8	25.0	0.26	1.11	1.30
9	25.0	0.26	0.66	1.45
10	25.0	0.26	0.65	1.21

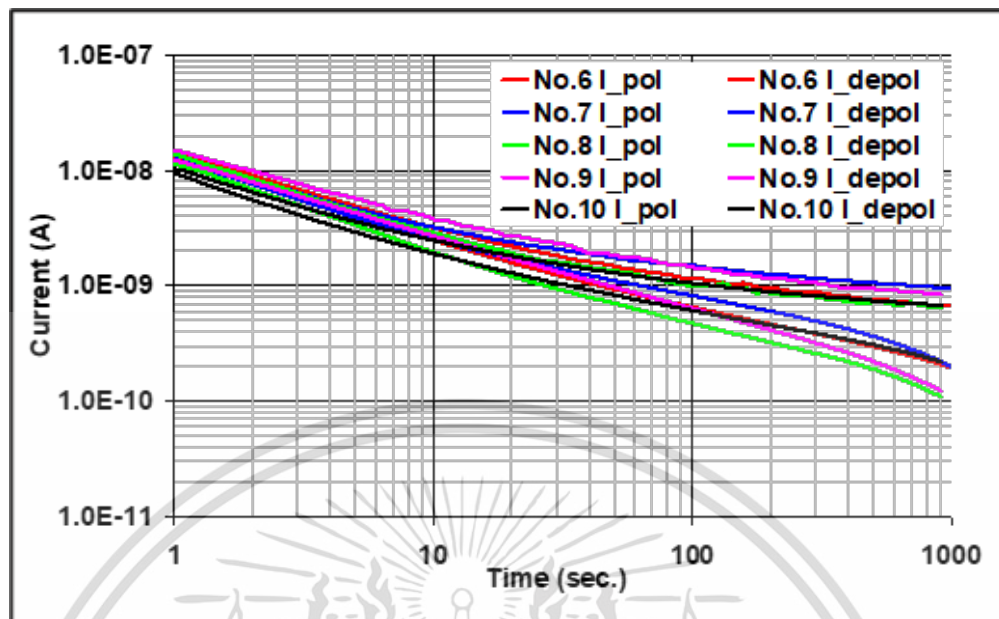
3.1.3.1 การทดสอบ PDC

ผลการทดสอบ PDC ของบุชชิ่งจำนวน 10 ตัว แสดงดังรูปที่ 3.6 ถึงรูปที่ 3.7 และการประเมินความชื้นในเนื้อฉนวนกระดาษ ค่าตัวประกอบกำลังสูญเสียของฉนวนที่ความถี่ 1 Hz และค่าอัตราส่วนระหว่างค่าคาปาซิแตนซ์ที่ความถี่ 1 mHz ต่อความถี่ 1 Hz แสดงดังตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.6 ผลการทดสอบ PDC ของบุชชิ่งหมายเลข 1-5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 ผลการทดสอบ PDC ของบัสซึ่งหมายเลข 6-10

ตารางที่ 3.2 การประเมินความชื้นในเนื้อฉนวนกระดาษ ค่าตัวประกอบกำลังสูญเสียของฉนวนที่ความถี่ 1 Hz และค่าอัตราส่วนระหว่างค่าคาปาซิแตนซ์ที่ความถี่ 1 mHz ต่อความถี่ 1 Hz

บัสซึ่งหมายเลข	ความชื้นในเนื้อฉนวนกระดาษ (%)	ค่าตัวประกอบกำลังสูญเสียที่ 1 Hz (%)	ค่าอัตราส่วนของค่าคาปาซิแตนซ์ที่ความถี่ 1 mHz/1 Hz
1	1.0	0.36	1.14
2	1.0-1.5	0.27	1.12
3	1.0-1.5	0.47	1.14
4	1.0	0.58	1.16
5	1.0-1.5	0.50	1.15
6	1.5	0.72	1.19
7	1.5	0.65	1.17
8	1.0	0.63	1.16
9	1.5	0.69	1.23
10	1.5	0.53	1.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3.2 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากตารางที่ 3.1 แสดงถึงผลการทดสอบของค่าตัวประกอบกำลังสูญเสียของฉนวนหลัก (C_1) ที่ 20 องศา ซึ่งตัวปรับแก้ค่าอุณหภูมิเท่ากับ 1.05 ที่อุณหภูมิขณะวัดเท่ากับ 30 องศา ค่าตัวประกอบกำลังสูญเสียของฉนวนหลัก (C_1) มีการกระจายตัวตั้งแต่ 1 ถึง 4.6 เท่าของค่าที่ระบุที่ป้ายชื่อของบุชชิงแต่ละตัว และมีค่าระหว่าง 0.62% ถึง 1.45% ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำกว่าที่ระบุไว้ในมาตรฐาน IEC 60137 [8] ในขณะที่ผลการทดสอบของค่าตัวประกอบกำลังสูญเสียของเทสแทป (C_2) จะแสดงค่าที่อุณหภูมิขณะวัดเท่านั้น ไม่ได้ปรับแก้ค่ามาที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าฉนวนของบุชชิงที่ใช้งานมาแล้ว 25 ปี ทั้ง 10 ตัว มีการเสื่อมสภาพ จากการเพิ่มขึ้นของค่าตัวประกอบกำลังสูญเสียของฉนวน แต่ไม่สามารถระบุถึงสาเหตุที่ทำให้ฉนวนเสื่อมสภาพได้ เนื่องจากค่าตัวประกอบกำลังสูญเสียของฉนวนจะแสดงสภาพของฉนวนในภาพรวมเท่านั้น ถ้าการเสื่อมสภาพนั้นเกิดจากความชื้นภายนอกเข้าไปในตัวบุชชิง โดยปกติแล้วค่าตัวประกอบกำลังสูญเสียของฉนวนของเทสแทป (C_2) จะมีค่าเพิ่มขึ้น

จากรูปที่ 3.6 ถึง 3.7 และตารางที่ 3.2 แสดงถึงผลการทดสอบ PDC และผลการประเมินความชื้นในเนื้อฉนวนกระดาศของบุชชิงทั้ง 10 ตัว ด้วยโปรแกรม PDC มีค่าความชื้นระหว่าง 1.0% ถึง 1.5% และค่าตัวประกอบกำลังสูญเสียของฉนวนที่ความถี่ 1 Hz มีค่าสูงเล็กน้อย ซึ่งเป็นค่าที่เปลี่ยนแปลงไวต่อความชื้นในเนื้อฉนวน และสอดคล้องกับผลการประเมินความชื้นในเนื้อฉนวนกระดาศ ยกเว้นบุชชิงหมายเลข 1 ถึง 3 ที่มีค่าตัวประกอบกำลังสูญเสียของฉนวนที่ความถี่ 1 Hz ไม่สูงมากนัก ประกอบกับค่าอัตราส่วนระหว่างค่าคาปาซิแตนซ์ที่ความถี่ 1 mHz ต่อความถี่ 1 Hz ของบุชชิงทั้ง 10 ตัว มีค่าใกล้เคียงกันและต่ำกว่า 1.50 จากผลการทดสอบทั้งหมด ความชื้นในเนื้อฉนวน ค่าตัวประกอบกำลังสูญเสียของฉนวนที่ความถี่ 1 Hz และค่าอัตราส่วนระหว่างค่าคาปาซิแตนซ์ที่ความถี่ 1 mHz ต่อความถี่ 1 Hz แสดงให้เห็นว่าสาเหตุหลักของการเสื่อมสภาพในบุชชิงทั้ง 10 ตัว ไม่ได้เกิดจากฉนวนกระดาศเสื่อมสภาพ

3.1.4 สรุปผลการศึกษาเทคนิคการทดสอบเพื่อเฝ้าระวังสภาพฉนวนของ OIP บุชชิงระดับแรงดันสูงปานกลาง

จากผลการทดสอบพบว่าการวัดค่าตัวประกอบกำลังสูญเสียในฉนวนสำหรับบุชชิงแสดงถึงการเสื่อมสภาพของฉนวนบุชชิงแบบ OIP ซึ่งไม่ได้เกิดจากการเสื่อมสภาพของฉนวนกระดาศ

3.2 กรณีศึกษาที่ 2 การศึกษาการไม่ซ้ำค่าของค่าคาปาซิแตนซ์ของเทสแทป (Test tap) ใน RIP บุษซึ่งที่ติดตั้งใหม่

การทดลองนี้ศึกษาสาเหตุการไม่ซ้ำค่าของค่าคาปาซิแตนซ์เทสแทป (Test tap) ใน RIP บุษซึ่งที่ติดตั้งใหม่ระดับแรงดัน 123 kV โดยใช้ผลการวัดในสนาม (Onsite test) ของบุษซึ่งที่ติดตั้งกับหม้อแปลงจำนวน 6 ลูก และผลทดลองให้ห้องปฏิบัติการและผลการทดลองในสนามเพื่อศึกษาสาเหตุที่ไม่ซ้ำค่าของค่าคาปาซิแตนซ์เทสแทป (Test tap) ใน RIP บุษซึ่งหลังจากติดตั้งกับตัวหม้อแปลงแล้ว โดยมีการเตรียมการทดสอบในห้องปฏิบัติการดังนี้

3.2.1 ผลการวัดในสนาม (Onsite test)

เป็นการรวบรวมผลการวัดค่าคาปาซิแตนซ์เทสแทป (Test tap) ใน RIP บุษซึ่งของหม้อแปลงจำนวน 6 ลูก ที่ติดตั้งบุษซึ่งแล้ว โดยรวบรวมผลเฉพาะบุษซึ่งด้านแรงดัน 115 kV เท่านั้น และเปรียบเทียบผลการวัดในสนามกับผลการวัดจากโรงงานผู้ผลิต

3.2.2 การทดลองในห้องปฏิบัติการ

เนื่องจาก RIP บุษซึ่งรุ่นที่ศึกษานี้ เป็นรุ่นที่ส่วนของบุษซึ่งที่อยู่ด้านในหม้อแปลงไม่มีปลอกโลหะกราวด์หุ้ม ดังนั้นการทดลองในห้องปฏิบัติการเป็นการจำลองผลกระทบจากระยะห่างระหว่างผิวของบุษซึ่งด้านที่อยู่ในหม้อแปลงกับผนังโลหะของหม้อแปลง โดยใช้แผ่นพอลิเอทิลีนและแผ่นโลหะม้วนเป็นทรงกระบอกจำลองเป็นผนังโลหะของหม้อแปลง ดังรูปที่ 3.8 และ 3.9 และใช้เครื่องมือทดสอบชุดเดียวกับการวัดตัวประกอบกำลังสูญเสียในฉนวน วัดค่าคาปาซิแตนซ์ของเทสแทป (Test tap) โดยมีเงื่อนไขการวัดต่าง ๆ ดังนี้

1. บุษซึ่งตัวเปล่า ส่วนล่างไม่มีการใส่แผ่นพอลิเอทิลีนหรือแผ่นโลหะ
2. บุษซึ่งส่วนล่างใส่แผ่นพอลิเอทิลีนพันรอบติดกับผิวของบุษซึ่ง โดยวัดค่าคาปาซิแตนซ์ในด้วยการวัดแบบกราวด์ และแบบการ์ด
3. บุษซึ่งส่วนล่างใส่แผ่นโลหะทรงกระบอก ที่มีระยะห่างระหว่างผิวของบุษซึ่งและแผ่นโลหะ 5 cm โดยวัดค่าคาปาซิแตนซ์ในด้วยการวัดแบบกราวด์ และแบบการ์ด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 การใช้แผ่นฟอลต์อะลูมิเนียมยัดลงเป็นผนังโลหะของหม้อแปลงไฟฟ้า



รูปที่ 3.9 การใช้แผ่นโลหะม้วนเป็นทรงกระบอกยัดลงเป็นผนังโลหะของหม้อแปลงไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

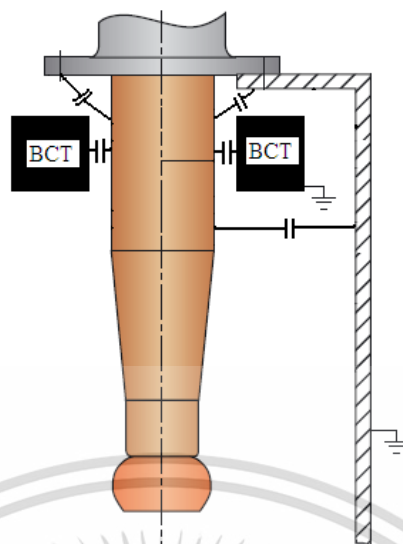
ขั้นตอนการวัดตัวประกอบกำลังสูญเสียของฉนวน (Insulation Power Factor (IPF) Test) สำหรับฉนวนทดสอบ (C₂) มีดังนี้

1. จัดเตรียมเครื่องมือวัดให้พร้อม
2. จัดเตรียมตัวบุงซึ่งให้เป็นไปตามเงื่อนไขการวัดดังกล่าวข้างต้น
3. เปิดฝาปิดทดสอบของบุงซึ่งที่จะทำการวัดออก และทำความสะอาดด้วยผ้าสะอาด
4. ต่อสายป้อนแรงดันสูงเข้าที่จุดทดสอบ (Test tap) ที่จะทำการวัดตามรูปที่ 3.3 โดยต้องให้สายป้อนแรงดันสูงตั้งฉากกับแกนของบุงซึ่ง
5. ต่อสายวัดแรงดันต่ำ (Low voltage lead) เข้าที่ตัวนำแกนกลางของบุงซึ่ง
6. ต่อสายกราวด์ของเครื่องมือวัดเข้ากับกราวด์ของบุงซึ่ง
7. ปรับตำแหน่งของเครื่องมือเป็นตำแหน่งการวัดแบบกราวด์วัสดุทดสอบและการัด (Grounded specimen test (GST-guard))
8. ขึ้นแรงดันทดสอบไปที่ 2 kV และค้างอยู่ที่ค่านี้นจนกว่าการวัดจะเสร็จสิ้น
9. ปรับค่าตัวคูณกระแสให้ค่ากระแสรั่วไหลซีก็ล์เต็มมาตรวัด
10. ปรับค่าตัวคูณกำลังไฟฟ้าให้ค่ากำลังไฟฟ้าซีก็ล์เต็มมาตรวัด
11. ปรับตัวปรับค่ากำลังไฟฟ้าเพื่อหาตำแหน่งที่เข็มวัดชี้ค่ากำลังไฟฟ้าต่ำสุด
12. บันทึกค่าแรงดันทดสอบ ค่ากระแสรั่วไหล ค่ากำลังไฟฟ้าและค่าคาปาซิแตนซ์
13. ลดแรงดันที่ป้อนลงเป็นศูนย์ ปิดเครื่องมือวัดและปลดสายป้อนแรงดันและสายวัดต่าง ๆ ออกจากตัวบุงซึ่ง
14. ทำการทดสอบซ้ำในข้อ 2-13 ให้ครบทุกเงื่อนไขการทดลอง

3.2.3 การทดลองในภาคสนาม

การทดลองในสนามเป็นการทดลองกับบุงซึ่งที่ติดตั้งบนหม้อแปลงแล้ว ซึ่งมีการติดตั้งหม้อแปลงเครื่องมือวัดที่ส่วนด้านล่างของบุงซึ่งด้วย โดยการทดลองนี้ใช้เครื่องมือทดสอบชุดเดียวกับการวัดตัวประกอบกำลังสูญเสียในฉนวน วัดค่าคาปาซิแตนซ์ของทดสอบ (Test tap) โดยมีเงื่อนไขการวัด 2 เงื่อนไข คือ 1. การวัดรวมกระแสรั่วไหลที่ผ่านตัวหม้อแปลงเครื่องมือวัด 2. การวัดไม่รวมกระแสรั่วไหลที่ผ่านตัวหม้อแปลงเครื่องมือวัด โดยมีเตรียมการทดลองดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 ตำแหน่งหม้อแปลงเครื่องมือวัด (Bushing current transformer, BCT)

ในหม้อแปลงไฟฟ้าขั้นตอนการวัดตัวประกอบกำลังสูญเสียของฉนวน (Insulation Power Factor (IPF) Test) สำหรับฉนวนทดสอบ (C₂) มีดังนี้

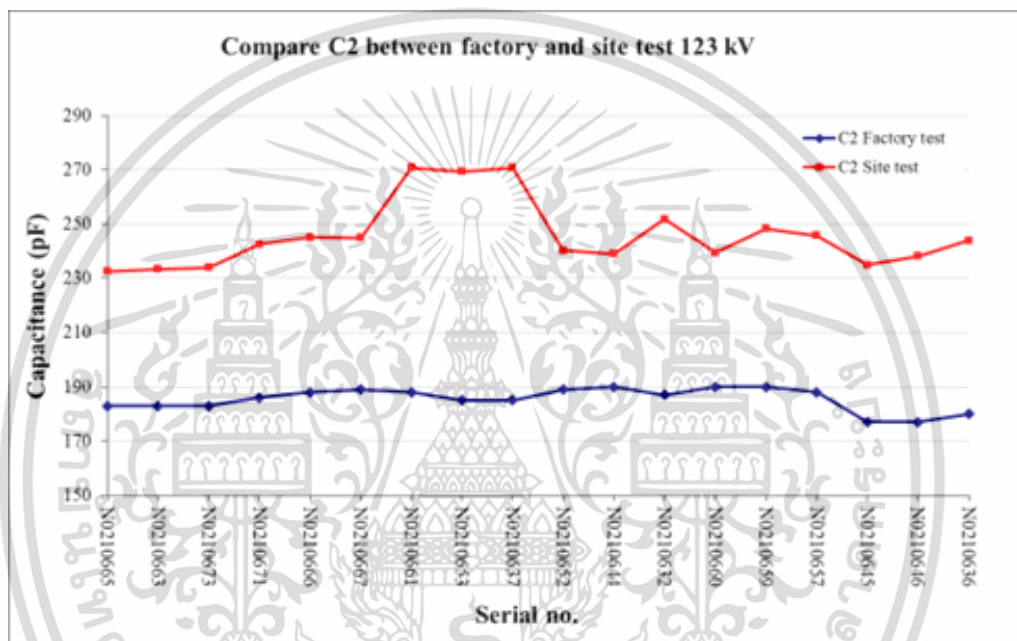
1. จัดเตรียมเครื่องมือวัดให้พร้อม
2. จัดเตรียมตัวหม้อแปลงไฟฟ้าให้พร้อมสำหรับทดสอบ เช่น ปลดสายไฟฟ้าเข้าและออกตัวหม้อแปลงไฟฟ้า และลัดวงจรบุชชิ่งแต่ละหัวของแต่ละด้านขดลวดเข้าด้วยกัน
3. เปิดฝาปิดทดสอบของบุชชิ่งที่จะทำการวัดออก และทำความสะอาดด้วยผ้าสะอาด
4. ต่อสายป้อนแรงดันสูงเข้าที่จุดทดสอบ (Test tap) ที่จะทำการวัดตามรูปที่ 3.3 โดยต้องให้สายป้อนแรงดันสูงตั้งฉากกับแกนของบุชชิ่ง
5. ต่อสายวัดแรงดันต่ำ (Low voltage lead) เข้าที่ตัวนำแกนกลางของบุชชิ่ง
6. ต่อสายกราวด์ของเครื่องมือวัดเข้ากับกราวด์ของบุชชิ่ง
7. ปรับตำแหน่งของเครื่องมือเป็นตำแหน่งการวัดแบบกราวด์วัสดุทดสอบและการัด (Grounded specimen test (GST-guard))
8. ขึ้นแรงดันทดสอบไปที่ 2 kV และค้างอยู่ที่ค่านี้นจนกว่าการวัดจะเสร็จสิ้น
9. ปรับค่าตัวคูณกระแสให้ค่ากระแสรั่วไหลซีโกล์เต็มมาตรวัด
10. ปรับค่าตัวคูณกำลังไฟฟ้าให้ค่ากำลังไฟฟ้าซีโกล์เต็มมาตรวัด
11. ปรับตัวปรับค่ากำลังไฟฟ้าเพื่อหาตำแหน่งที่เข็มวัดชี้ค่ากำลังไฟฟ้าต่ำสุด
12. บันทึกค่าแรงดันทดสอบ ค่ากระแสรั่วไหล ค่ากำลังไฟฟ้าและค่าคาปาซิแตนซ์
13. ลดแรงดันที่ป้อนลงเป็นศูนย์ ปิดเครื่องมือวัดและปลดสายป้อนแรงดันและสายวัดต่าง ๆ ออกจากตัวบุชชิ่ง
14. ทำการทดสอบซ้ำในข้อ 2-13 ให้ครบทุกเงื่อนไขการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.4 ผลการศึกษาการไม่เข้าค่าของค่าคาปาซิแตนซ์ของเทสแทป (Test tap) ใน RIP บุษซึ่งที่ติดตั้งใหม่

3.2.4.1 ผลการวัดในภาคสนาม (Onsite test)

ผลการวัดค่าคาปาซิแตนซ์ของเทสแทป (Test tap) ใน RIP บุษซึ่งที่ติดตั้งใหม่ ที่รวบรวมจากหม้อแปลงจำนวน 6 ลูก แสดงตามตารางที่ 3.3 และกราฟเปรียบเทียบค่าคาปาซิแตนซ์ระหว่างวัดในสนามและผลการวัดจากโรงงานผู้ผลิตแสดงดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 กราฟเปรียบเทียบค่าคาปาซิแตนซ์ระหว่างวัดในสนามและผลการวัดจากโรงงานผู้ผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 ผลการวัดค่าคาปาซิแตนซ์ของเทสแทป (Test tap) ใน RIP บุษซึ่งที่ติดตั้งใหม่ที่รวบรวมจากหม้อแปลงจำนวน 6 ลูก

ชื่อสถานี ไฟฟ้าแรงสูงและ หม้อแปลง	รุ่นของบุช ซึ่ง	เฟส	หมายเลข	C ₂ (pF)		% เบียงเบน	%PF C ₂	
				ผลทดสอบ จากโรงงาน	ผลทดสอบ ในสนาม		ผลทดสอบ จากโรงงาน	ผลทดสอบ ในสนาม
แจ้งวัฒนะ KT1A	SETFT 550-123-	X1	N0210665	183	232.46	27.03	0.70	0.682
		X2	N0210663	183	233.31	27.49	0.70	0.706
		X3	N0210673	183	233.95	27.84	0.70	0.664
สระบุรี 2 KT4A	AE3B Spez.	X1	N0210671	186	242.55	30.40	0.70	0.589
		X2	N0210666	188	245.04	30.34	0.70	0.655
		X3	N0210667	189	244.93	29.59	0.70	0.644
สามพราน 1 KT1A		X1	N0210661	188	270.77	44.03	0.70	0.460
		X2	N0210653	185	269.29	44.56	0.70	0.465
		X3	N0210637	185	270.76	46.36	0.60	0.465
สามพราน 1 KT2A	SETFT 550-123-	X1	N0210652	189	240.22	27.10	0.70	0.530
		X2	N0210644	190	238.9	25.74	0.90	0.530
		X3	N0210632	187	251.75	34.62	0.70	0.500
เจียงใหม่ 3 KT3A	AE2B Spez.	X1	N0210660	190	239.36	25.98	0.90	0.997
		X2	N0210659	190	248.27	30.67	0.00	0.679
		X3	N0210657	188	245.73	30.71	0.70	0.674
เจียงใหม่ 3 KT4A		X1	N0210645	177	234.91	32.71	0.70	0.569
		X2	N0210646	177	238.09	34.51	0.60	0.548
		X3	N0210636	180	243.82	35.45	0.60	0.705

3.2.4.2 การทดลองในห้องปฏิบัติการ

ผลการทดลองในห้องปฏิบัติการเป็นการจำลองผลกระทบจากระยะห่างระหว่างผิวของบุชซึ่งด้านที่อยู่ในหม้อแปลงกับผนังโลหะของหม้อแปลง โดยใช้แผ่นพอลิเอทิลีนและแผ่นโลหะม้วนเป็นทรงกระบอกจำลองเป็นผนังโลหะของหม้อแปลง แสดงผลดังตารางที่ 3.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.4 ผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ

หมายเลข บุชชิง	C ₂ (pF)		% เบี่ยง เบน	% PF C ₂		เงื่อนไข การทดสอบ
	ผลทดสอบ จากโรงงาน	ผล การจำลอง		ผลทดสอบ จากโรงงาน	ผลการ จำลอง	
N0210662	196	226.4	15.51	0.70	3.26	ไม่มี พอลิอะลูมิเนียม เนียม
	196	460.4	134.9	0.70	1.70	พอลิอะลูมิเนียม เนียมลง กราวด์
	196	207.8	6.02	0.70	3.20	การ์ด พอลิอะลูมิเนียม เนียม
	196	257.0	31.12	0.70	3.70	แผ่นโลหะลง กราวด์
	196	213.2	8.78	0.70	3.30	การ์ดแผ่น โลหะ

3.2.4.3 การทดลองในสนาม

การทดลองในสนามเป็นการทดลองกับบุชชิงที่ติดตั้งบนหม้อแปลงแล้ว ซึ่งมีการติดตั้งหม้อแปลงเครื่องมือวัดที่ส่วนด้านล่างของบุชชิงด้วย ผลการทดลองแสดงผลดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ผลการทดลองในสนาม

หมายเลข บุชชิง	C ₂ (pF)		% เบี่ยง เบน	%PF C ₂		เงื่อนไขการ ทดสอบ
	ผลทดสอบ จากโรงงาน	ผลการ จำลอง		ผลทดสอบ จากโรงงาน	ผลการ จำลอง	
N0210662	196	247.7	26.35	0.70	0.63	ไม่การ์ด BCT
	196	222.7	13.60	0.70	0.69	การ์ด BCT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.4.4 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากผลการวัดในสนามที่รวบรวมจากหม้อแปลงไฟฟ้าที่ติดตั้งบุชชิ่ง RIP รุ่นนี้ จำนวน 6 ลูก พิกัดแรงดันของบุชชิ่งเท่ากับ 123 kV พบว่าค่าคาปาซิแตนซ์ของเทสแทป เบี่ยงเบนจากผลทดสอบที่โรงงานประมาณ 32.56% และในจำนวนนี้มีบุชชิ่ง 3 ตัว ที่สถานีไฟฟ้าแรงสูงสามพราน 1 ที่ติดตั้งที่หม้อแปลง KT1A พบค่าเบี่ยงเบนสูงกว่าบุชชิ่งตัวอื่น ๆ

จากปัญหาดังกล่าว เพื่อให้เข้าใจสาเหตุของปัญหาที่แท้จริง โดยมุ่งประเด็นปัญหาที่ค่าสเตรย์คาปาซิแตนซ์ของหม้อแปลงเครื่องมือวัดบุชชิ่ง และตัวถังที่ติดตั้งของบุชชิ่งเป็นสำคัญ โดยได้จำลองและทดสอบในห้องปฏิบัติการโดยใช้แผ่นพอลิเอทิลีนและแผ่นโลหะแทนตัวถังที่ติดตั้งบุชชิ่ง จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อแผ่นพอลิเอทิลีนนิยมนั้นติดกับผิวของบุชชิ่งและกระแสรั่วไหลลงแผ่นพอลิเอทิลีนนิยมนั้นจะวัดด้วยจะได้ค่าเบี่ยงเบนของค่าคาปาซิแตนซ์ของเทสแทปสูงถึง 134.9% และกระแสรั่วไหลส่วนนี้ไม่ถูกวัดจะได้ค่าเบี่ยงเบนของค่าคาปาซิแตนซ์ของเทสแทปลดลงเหลือ 6.02% เท่านั้น

เมื่อเปลี่ยนเป็นแผ่นโลหะซึ่งมีช่องว่างระหว่างผิวของบุชชิ่งและแผ่นโลหะ 5 cm จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อกระแสรั่วไหลลงแผ่นโลหะถูกวัดด้วยจะได้ค่าเบี่ยงเบนของค่าคาปาซิแตนซ์ของเทสแทป 31.12% และกระแสรั่วไหลส่วนนี้ไม่ถูกวัดจะได้ค่าเบี่ยงเบนของค่าคาปาซิแตนซ์ของเทสแทปลดลงเหลือ 8.78% เท่านั้น

จากผลการทดลองในสนามกับหม้อแปลงที่ติดตั้งบุชชิ่งและมีหม้อแปลงเครื่องมือวัดบุชชิ่ง พบว่า เมื่อกระแสรั่วไหลลงหม้อแปลงเครื่องมือวัดถูกวัดด้วยจะได้ค่าเบี่ยงเบนของค่าคาปาซิแตนซ์ของเทสแทป 26.35% และกระแสรั่วไหลส่วนนี้ไม่ถูกวัดจะได้ค่าเบี่ยงเบนของค่าคาปาซิแตนซ์ของเทสแทปลดลงเหลือ 13.6 % เท่านั้น

3.2.5 สรุปผลการศึกษาการไม่ซ้ำค่าของค่าคาปาซิแตนซ์ของเทสแทป (Test tap) ใน RIP บุชชิ่งที่ติดตั้งใหม่

จากผลการทดสอบค่าคาปาซิแตนซ์ของเทสแทปใน RIP บุชชิ่งที่ติดตั้งใหม่ทั้งจากผลการทดลอง จำลอง และผลการวัดในห้องปฏิบัติการและในสนาม พบว่าค่าคาปาซิแตนซ์ของเทสแทปใน RIP บุชชิ่งมีค่าเบี่ยงเบนจากโรงงานมากถึงประมาณ 46%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การศึกษาปัญหาและเทคนิคการบรรเทากรณีศึกษาผลกระทบ ของความจุไฟฟ้าแบบไม่สมดุลในหม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟสขนาด พิกัดแรงดัน 500 kV

ในบทนี้แสดงผลการศึกษาปัญหาและเทคนิคการบรรเทาผลกระทบของความจุไฟฟ้าแบบไม่สมดุลในหม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟสขนาดพิกัดแรงดัน 500 kV ซึ่งส่งผลทำให้เกิดจุดร้อนขึ้นที่กักเก็บเสิร์จ ส่งผลให้อุปกรณ์ดังกล่าวเสียหาย และศึกษาค่าที่ได้หลังจากติดตั้งหม้อแปลงวัดแรงดันแบบตัวเก็บประจุ

4.1 หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังภายใต้การศึกษา

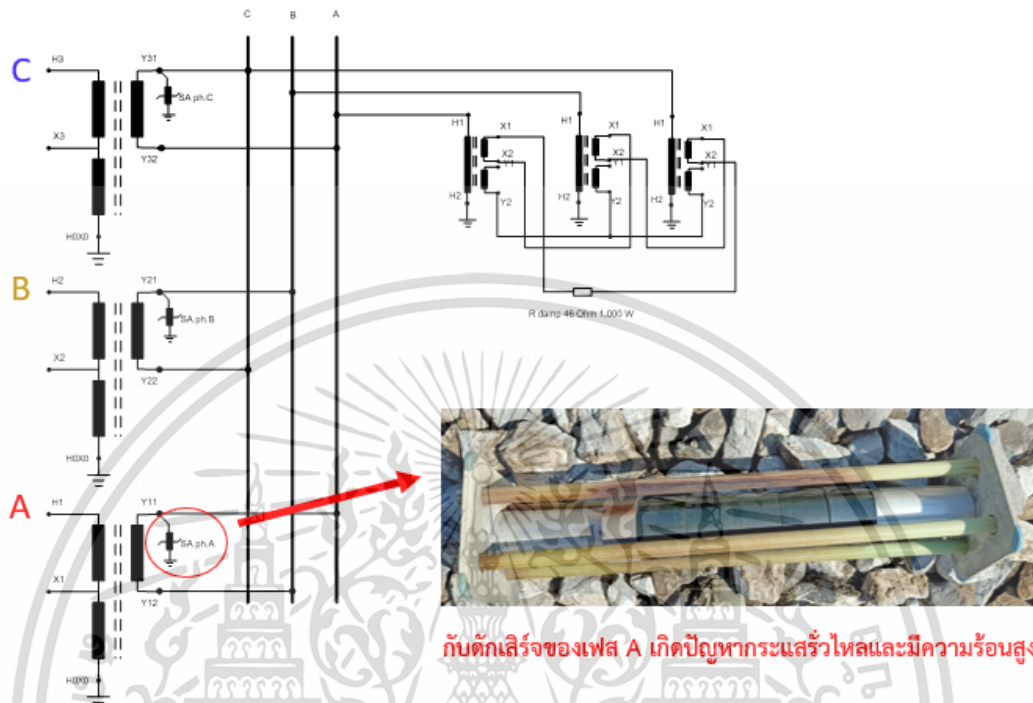
หม้อแปลงไฟฟ้าที่กล่าวถึงในกรณีศึกษานี้เป็นหม้อแปลงแบบออโต้ (Autotransformer) ซึ่งประกอบด้วย 3 ขดลวดได้แก่ ขดลวดปฐมภูมิ ขดลวดทุติยภูมิ และขดลวดตติยภูมิ ซึ่งมีพิกัดแรงดัน 525/√3, 230/√3 และ 22 kV ตามลำดับ โดยแสดงการติดตั้งหม้อแปลงไฟฟ้าทั้ง 3 ลูกดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 หม้อแปลงไฟฟ้าจำนวน 3 ลูก ที่ถูกติดตั้งในสถานีไฟฟ้าวังน้อย
จังหวัดพระนครศรีอยุธยา

เนื่องจากเหตุการณ์ความล้มเหลวของหม้อแปลงไฟฟ้าเฟส B จึงจำเป็นต้องนำหม้อแปลงไฟฟ้าสำรองมาใช้งานแทนที่ แต่อย่างไรก็ตาม หม้อแปลงไฟฟ้าสำรองที่ผลิตตั้งแต่เริ่มต้นได้มีการถูกนำมาใช้งานก่อนหน้านี้แล้ว ดังนั้นหม้อแปลงไฟฟ้าสำรองที่นำมาใช้งานดังกล่าวจึงเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าที่ผลิตใหม่ (ต่างผู้ผลิต) โดยหม้อแปลงไฟฟ้าที่ผลิตใหม่มีความใกล้เคียงกับหม้อแปลงไฟฟ้าเดิมมากที่สุดอย่างไรก็ตามหม้อแปลงไฟฟ้าลูกใหม่ที่ผลิตขึ้นมาใช้งาน แต่พบว่าเกิดปัญหากระแสรั่วไหล เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผ่านกับดักเสิร์จมีขนาดที่สูงผิดปกติและตรวจพบจุดร้อนขึ้นที่กับดักเสิร์จเมื่อส่องด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนซึ่งเกิดขึ้นที่กับดักเสิร์จที่ขดลวดตติยภูมิ



รูปที่ 4.2 กับดักเสิร์จที่เกิดความเสียหายจากความร้อนที่ตำแหน่งหม้อแปลงไฟฟ้าเฟส A

4.2 สมมติฐาน

สาเหตุที่ทำให้เกิดปัญหาดังกล่าวขึ้น เป็นไปได้ว่าเกิดจาก 3 สาเหตุได้แก่ การเสื่อมสภาพของกับดักเสิร์จ, ปัญหา Ferro-resonance หรือการเกิดปัญหาความไม่สมดุลของแรงดันทำให้เกิดแรงดันเกิน อย่างไรก็ตาม เมื่อทำการเปลี่ยนกับดักเสิร์จตัวใหม่ที่ผ่านการทดสอบคุณภาพตามมาตรฐานรวมถึงติดตั้ง R damping เพื่อแก้ปัญหา Ferro-resonance แล้ว แต่ปัญหากับดักเสิร์จที่เกิดความเสียหายจากความร้อนก็ยังคงอยู่ ฉะนั้นสาเหตุของปัญหาจึงไม่ได้เกิดจากกับดักเสิร์จ แต่เกิดจากความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าสามเฟสที่ทำให้เกิดแรงดันเกิน

4.3 ที่มาและสาเหตุของปัญหา

หลังจากทราบที่มาของปัญหา จึงเริ่มทำการวิเคราะห์และหาทางแก้ไขปัญหา โดยการวัดขนาดและรูปคลื่นของแรงดันที่บัส 22 kV ที่ตำแหน่งขดลวดตติยภูมิหม้อแปลงไฟฟ้าแบบอโต้ทั้ง 3 ลูก โดยใช้ ออสซิลโลสโคปเชื่อมต่อกับฝั่งแรงดันต่ำของหม้อแปลงวัดแรงดันไฟฟ้า (Voltage Transformer) แสดงดังรูปที่ 4.3 โดยใช้หม้อแปลงวัดแรงดันไฟฟ้านี้ร่วมกับระบบป้องกันของรีเลย์ 59N ซึ่งเป็นรีเลย์ที่ใช้ตรวจจับกราวด์ฟอลต์สำหรับระบบที่เชื่อมต่อบีบเคลด้า [23],[24]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

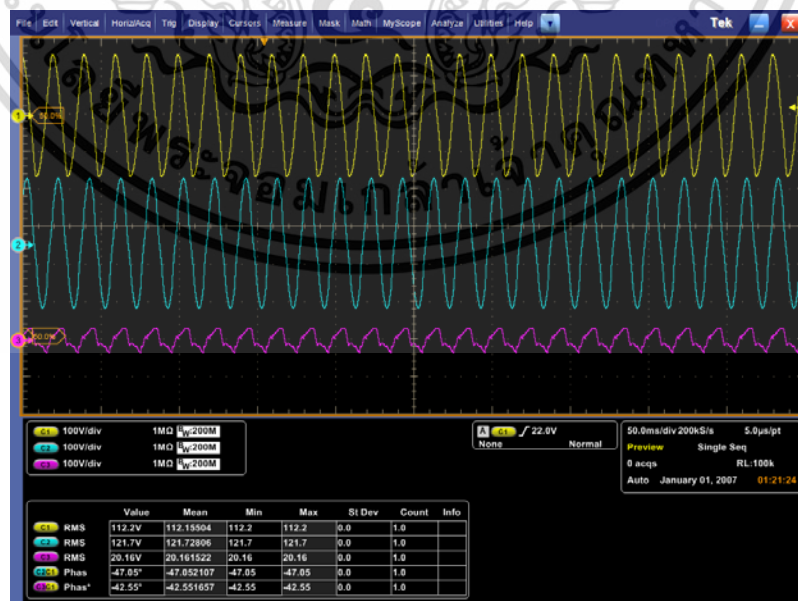


รูปที่ 4.3 การวัดขนาดและรูปคลื่นของแรงดันที่บัส 22 kV โดยใช้ฮอสซิลโลสโคปเชื่อมต่อผ่านขดลวดแรงต่ำของหม้อแปลงวัดแรงดัน

โดยผลการวัดขนาดแรงดันและมุมเฟสแสดงดังต่อไปนี้

- เฟส A เทียบกราวด์ $22.44 \angle 0^\circ$ kV
- เฟส B เทียบกราวด์ $24.34 \angle -47.05^\circ$ kV
- เฟส C เทียบกราวด์ $4.03 \angle -42.05^\circ$ kV

โดยรูปคลื่นของแรงดันที่วัดโดยฮอสซิลโลสโคป ซึ่งดำเนินการวัดในสภาวะหม้อแปลงไร้อโหลด (No load) ที่สภาวะคงตัว (Steady state) แสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ขนาดและรูปคลื่นของแรงดันที่บัส 22 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการวัดแรงดันพบว่า มีแรงดันไม่สมดุลโดยตรวจพบแรงดันเกินที่เฟส A และ B ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้กับดักเสิร์จเกิดความร้อนสูงขึ้น ซึ่งเป็นไปได้ว่าเกิดจากความแตกต่างของโครงสร้างทางกลของหม้อแปลงไฟฟ้าสำรองที่ผลิตใหม่ (ต่างผู้ผลิต) จึงได้มีการดำเนินการวัดค่าทางไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าทั้ง 3 ลูกเปรียบเทียบกัน โดยใช้เครื่องมือทดสอบ CPC 100 (Omicron) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่มีความสามารถในการวัดค่าแพคเตอร์ความสูญเสียในฉนวนรวมถึงค่าความจุไฟฟ้าของฉนวนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงได้ โดยได้ดำเนินการทดสอบโดยจ่ายแรงดันทดสอบกระแสสลับขนาด 10 kV พบว่าค่าความจุไฟฟ้าระหว่างขดลวดปฐมภูมิกับขดลวดตติยภูมิและค่าความจุไฟฟ้าระหว่างขดลวดตติยภูมิเทียบกราวด์มีความแตกต่างกัน แสดงผลการวัดดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้ของหม้อแปลงทั้ง 3 ลูก

เฟส	ค่าความจุไฟฟ้าระหว่างขดลวดปฐมภูมิกับขดลวดตติยภูมิ (nF)	ค่าความจุไฟฟ้าระหว่างขดลวดตติยภูมิเทียบกราวด์ (nF)
A (เดิม)	0.030	17.31
B (ใหม่)	2.990	2.860
C (เดิม)	0.040	18.21

จากตารางที่ 4.1 พบว่าค่าความจุไฟฟ้าระหว่างขดลวดปฐมภูมิกับขดลวดตติยภูมิและค่าความจุไฟฟ้าระหว่างขดลวดตติยภูมิเทียบกราวด์มีความแตกต่างกัน นอกจากนี้ค่าความจุไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าเฟส B ที่ผลิตใหม่ยังมีค่าต่างจากของหม้อแปลงไฟฟ้าเดิมอย่างมีนัยสำคัญโดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับค่าความจุไฟฟ้าแฉ่งระหว่างขดลวดตติยภูมิเทียบกราวด์

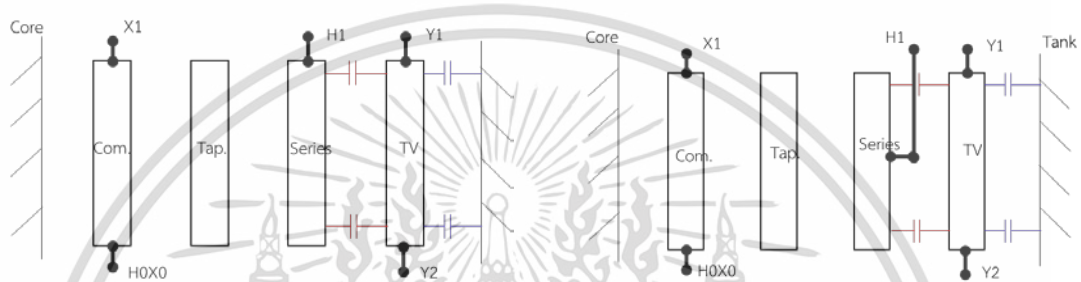
โดยจากการตรวจสอบรูปแบบการออกแบบขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าทั้ง 2 ผู้ผลิต (เดิมและผลิตใหม่) แสดงดังรูปที่ 4.5



(ก.)



(ข.)



(ค.)

(ง.)

รูปที่ 4.5 (ก.) โครงสร้างขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าเดิม GEC ALSTHOM

(ข.) โครงสร้างขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าใหม่ (ที่นำมาแทนที่) ABB

(ค.) โครงสร้างรูปแบบขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าของผู้ผลิตเดิม

(ง.) โครงสร้างรูปแบบขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าของผู้ผลิตใหม่

เนื่องจากผลของความแตกต่างของโครงสร้างขดลวดภายในหม้อแปลงไฟฟ้าดังรูปที่ 4.5 ฉะนั้นค่าความจุไฟฟ้าแฝงจะส่งผลกระทบต่อให้เกิดการซ้อนทับกันของแรงดันไฟฟ้าอันเนื่องมาจากองค์ประกอบความจุไฟฟ้าเสมือนเป็นโวลต์เตจ ดีไวเดอร์ ซึ่งในสภาวะปกติที่หม้อแปลงไฟฟ้าทั้ง 3 เฟส มีโครงสร้างเหมือนกันก็จะทำให้ค่าความจุไฟฟ้าของทั้ง 3 เฟส เท่ากัน องค์ประกอบแรงดันไฟฟ้าซ้อนทับ (Superimpose) ดังกล่าวก็จะขจัดเซย์กันซึ่งสามารถสังเกตได้จากกรณีที่แรงดันองค์ประกอบลำดับที่ศูนย์จะมีขนาดเป็นศูนย์

ซึ่งโดยทั่วไปแล้วหลักการในการถ่ายโอนแรงดัน (transferred voltage) จะมีหลักการอยู่ 2 ประเภท ได้แก่

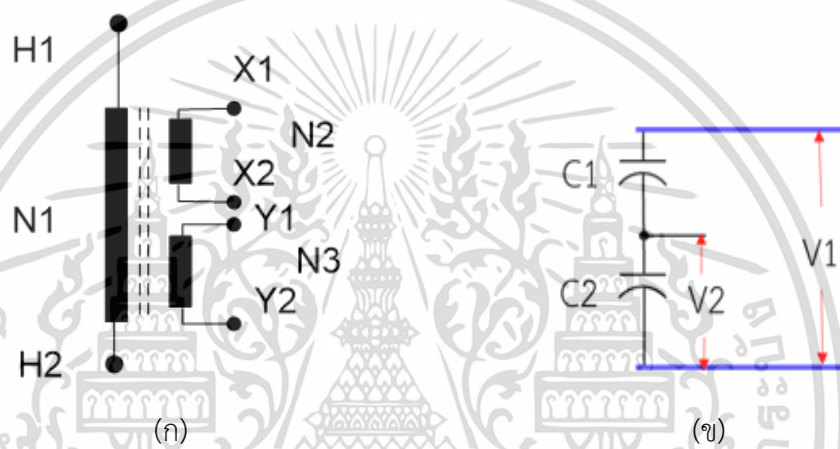
1. การถ่ายโอนแรงดันแบบเหนี่ยวนำ (Inductive) : เป็นหลักการที่เมื่อมีกระแสไหลผ่านขดลวดจะสร้างฟลักซ์ไปเกี่ยวค้ำกับขดลวดอีกฝั่งหนึ่ง ซึ่งระดับแรงดัน (V_1, V_2) ที่เกิดการเหนี่ยวนำจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของจำนวนรอบขดลวดทั้งสอง (n_1, n_2) โดยเป็นหลักการทั่วไปของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งแสดงได้ด้วยสมการที่ (1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad (1)$$

2. การถ่ายโอนแรงดันแบบความจุไฟฟ้า (Capacitive) : เป็นหลักการถ่ายโอนอันเนื่องมาจากผลของสนามไฟฟ้าซึ่งแทนได้ด้วยความจุไฟฟ้าแฝงซึ่งจะอยู่บนพื้นฐานของโวลต์เตจ ดีไวเดอร์ โดยระดับแรงดันจะขึ้นกับอัตราส่วนของค่าความจุไฟฟ้าทั้ง 2 องค์ประกอบ (C_1, C_2) ซึ่งแสดงด้วยสมการที่ (2)

$$\frac{V_1}{V_2} = 1 + \frac{C_2}{C_1} \quad (2)$$



รูปที่ 4.6 วงจรสมมูลการถ่ายโอนแรงดัน (ก) แบบความเหนี่ยวนำไฟฟ้า (ข) แบบความจุไฟฟ้า

ดังที่ได้กล่าวไปข้างต้นหลักการในการถ่ายโอนแรงดันภายในหม้อแปลงไฟฟ้าจึงมี 2 ส่วนหลัก ซึ่งในส่วนของความเหนี่ยวนำนั้นจะไม่ได้รับผลกระทบเรื่องความไม่สมดุลเนื่องจากการออกแบบประกอบสร้างเพื่อให้ได้พิกัดแรงดันของแต่ละขดลวดที่เหมาะสมและมีความสมมาตรในทุก ๆ เฟส แต่จะมีผลในส่วนของความจุไฟฟ้าจากค่าที่วัดได้ในตารางที่ 4.1 ซึ่งเมื่ออัตราส่วนมีความไม่สมดุลกันก็จะทำให้แรงดันทั้งสามเฟสเกิดความไม่สมดุลซึ่งทำให้มีขนาดแรงดันองค์ประกอบลำดับศูนย์เกิดขึ้น

ค่าความจุไฟฟ้าแฝงระหว่างขดลวดปฐมภูมิกับขดลวดตติยภูมิและขดลวดตติยภูมิเทียบกับกราวด์ของหม้อแปลงทั้ง 3 ลูก มีขนาดที่แตกต่างกันส่งผลให้เกิดความไม่สมดุลของแรงดัน [25-26] ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยการต่อขนานตัวเก็บประจุเพิ่มเพื่อชดเชยค่าความจุไฟฟ้าเพื่อให้แรงดันไฟฟ้าทั้ง 3 เฟสมีขนาดที่สมดุล

4.4 แนวทางการแก้ปัญหา

4.4.1 การวัดขนาดและรูปคลื่นของแรงดันที่บัส 22 kV

จากที่ได้ทำการวัดขนาดและรูปคลื่นของแรงดันที่บัส 22 kV เบื้องต้น ซึ่งเป็นการวัดในสภาวะที่ใช้งานจริงโดยยังคงมีกับดักเสิร์จและหม้อแปลงวัดแรงดันเชื่อมต่ออยู่ การวัดดังกล่าวอาจจะส่งผลให้แรงดันเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่วัดได้มีการผิดเพี้ยนไปจากความเป็นจริงอันเนื่องมาจากการจำกัดขนาดของแรงดันโดยกับดักเสิร์จหรือการอิมพัลส์แกมมาของหม้อแปลงวัดแรงดันหากเกิดแรงดันเกิน ดังนั้นจึงต้องมีการปลดอุปกรณ์เหล่านี้ออกจากบัส 22 kV และทำการวัดขนาดและรูปคลื่นด้วยโวลต์เตจ ดีไวเดอร์โดยเชื่อมต่อภาคแรงดันต่ำของโวลต์เตจ ดีไวเดอร์ผ่านสายโคแอกเซียลเคเบิลเชื่อมต่อไปยังออสซิลโลสโคป โวลต์เตจ ดีไวเดอร์ที่ใช้งาน เป็นประเภทตัวเก็บประจุ มีพิกัดแรงดัน 100 kV และมีความจุไฟฟ้า 1 nF (โดยมีอัตราส่วนการลดทอนแรงดันของโวลต์เตจ ดีไวเดอร์ของเฟส A, B และ C เท่ากับ 12306:1, 12646:1 และ 12260:1 ตามลำดับ) โดยแสดงการติดตั้งดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 การติดตั้งโวลต์เตจดีไวเดอร์จำนวน 3 ตัวสำหรับการวัดขนาดและรูปคลื่นของแรงดันฝั่งขดลวดตติยภูมิ (22 kV)

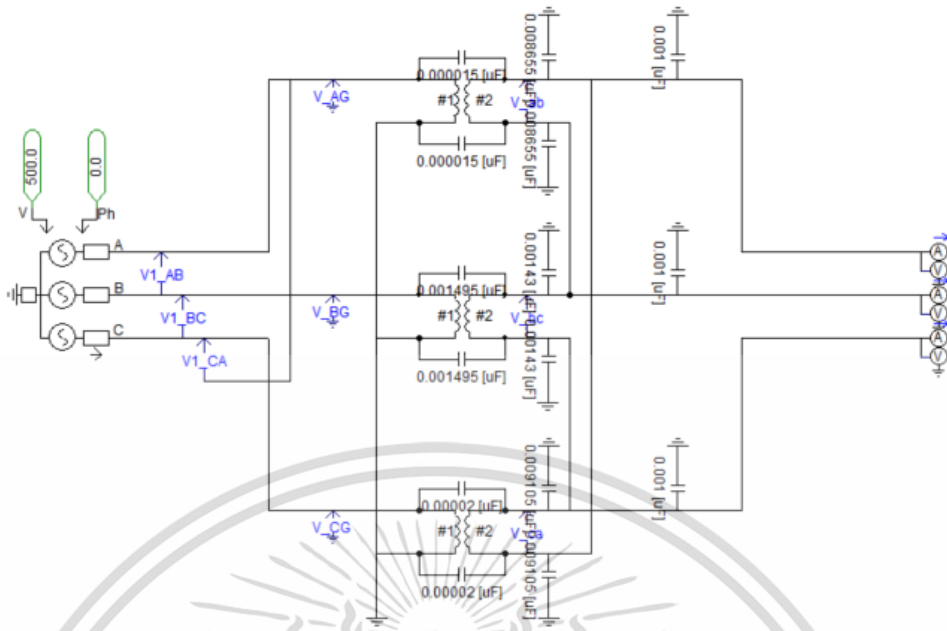
โดยวัตถุประสงค์ของการวัดขนาดและรูปคลื่นของแรงดันคือ เพื่อนำข้อมูลผลการวัดที่ถูกต้องและแม่นยำนำไปจำลองด้วยโปรแกรมเพื่อหาค่าความจุไฟฟ้าที่เหมาะสมที่จะนำมาเชื่อมต่อเพิ่มเติม โดยจะแสดงผลการวัดเชิงเปรียบเทียบกับการจำลองด้วยโปรแกรม PSCAD ดังตารางที่ 4.2

4.4.2 การจำลองด้วยโปรแกรม PSCAD

โปรแกรม PSCAD เป็นโปรแกรมที่ถูกใช้งานอย่างแพร่หลายในการจำลองปรากฏการณ์ในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยผู้ใช้งานสามารถออกแบบวงจรสำหรับการจำลอง และวิเคราะห์ผลลัพธ์การจำลองได้ [27]

ในหัวข้อนี้เป็นการจำลองปรากฏการณ์ในระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้โปรแกรม PSCAD โดยการออกแบบวงจรไฟฟ้าจำลองหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง สำหรับหาค่าความจุไฟฟ้าที่ต้องต่อเพิ่มเข้าไปเพื่อให้แรงดันไฟฟ้าสมดุล โดยออกแบบวงจรดังรูปที่ 4.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 โมเดลการจำลองการเชื่อมต่อตัวเก็บประจุไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าทั้ง 3 ลูก

โดยในการจำลองโดยใช้โปรแกรมจะทำการจำลองแบบวงจรแบบกลุ่มก้อน (Lump) ซึ่งจะพิจารณาถึงผลกระทบของแรงดันไฟฟ้าเทียบกราวด์ ดังนั้นตัวแปรความต้านทานและความเหนี่ยวนำไฟฟ้าของขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าจึงไม่ถูกพิจารณา ซึ่งจะพิจารณาเฉพาะตัวแปรค่าความจุไฟฟ้าซึ่งเป็นผลจากโครงสร้างของระบบฉนวนในหม้อแปลงไฟฟ้าเท่านั้น

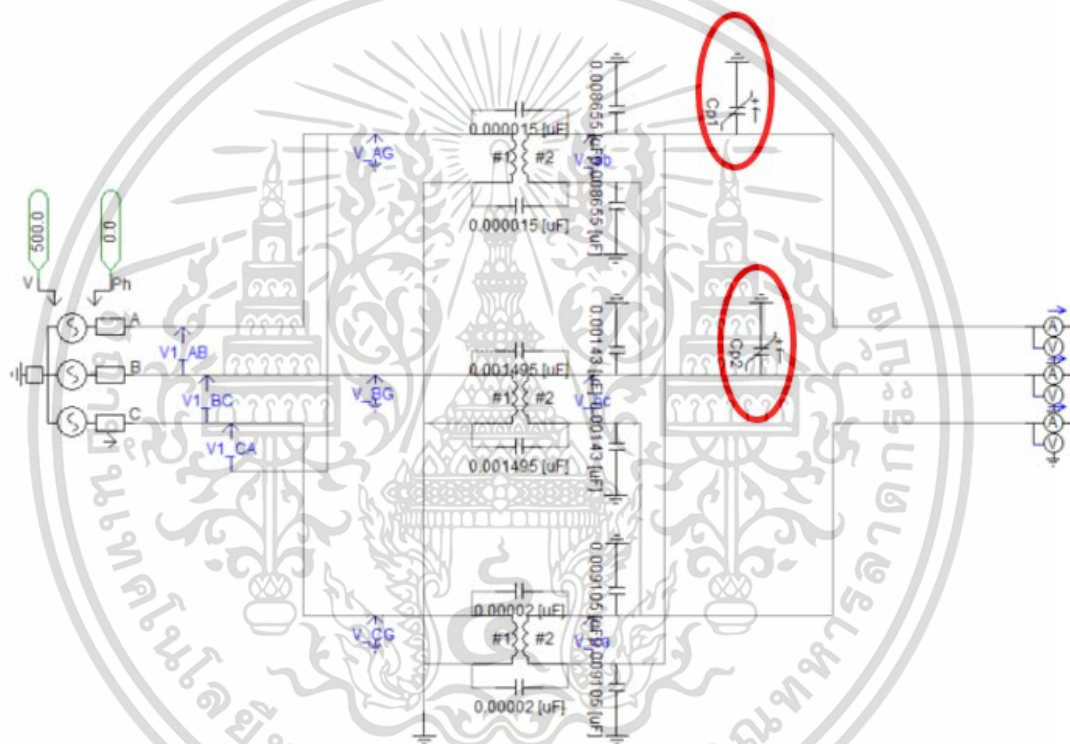
โดยในการจำลองนี้จะกำหนดให้ค่าความจุไฟฟ้าระหว่างขดลวดปฐมภูมิกับขดลวดทุติยภูมิเชื่อมต่อที่ตำแหน่งต้นขดลวดและบริเวณปลายขดลวด โดยมีขนาดของความจุไฟฟ้าทั้ง 2 ตำแหน่งเป็นครึ่งหนึ่งของค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้ในตารางที่ 4.1 และกำหนดค่าความจุไฟฟ้าระหว่างขดลวดทุติยภูมิเทียบกราวด์เชื่อมต่อเพื่อให้ค่าความจุไฟฟ้าที่ต้นและปลายของขดลวดซึ่งมีขนาดเป็นครึ่งหนึ่งของค่าความจุไฟฟ้าในตารางที่ 4.1 รวมถึงค่าความจุไฟฟ้าของโวลต์เตจ ดีไวเดอร์ของแต่ละเฟสเทียบกราวด์ ซึ่งมีค่า 1 nF เพื่อยืนยันความสามารถในการจำลองด้วยโปรแกรม PSCAD จึงได้มีการวัดขนาดและรูปคลื่นแรงดันจริงเพื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลอง แสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบผลการวัดขนาดแรงดันและมุมเฟสเทียบกราวด์ของบัส 22 kV

เฟส	ผลการจำลองด้วยโปรแกรม PSCAD (kV)	ผลการวัดจริงด้วยโวลต์เจจดีไวเดอร์ (kV)
A	14.65 ∠0°	15.58 ∠0°
B	22.23 ∠-69.81°	23.98 ∠-52.81°
C	8.19 ∠-147.5°	8.05 ∠-115.9°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการเปรียบเทียบในตารางที่ 4.2 พบว่าการจำลองโดยใช้โมเดลของวงจรแบบก้อน (Lump) ดังกล่าวให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับที่ได้ดำเนินการวัดจริงด้วยโวลต์เตจ ดีไวเดอร์ ซึ่งเพียงพอที่จะใช้โมเดลการจำลองดังกล่าวเพื่อกำหนดค่าความจุไฟฟ้าที่เหมาะสมที่จะต้องต่อเพิ่มเข้าไปเพื่อหาค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุที่ต้องต่อเพิ่ม จึงได้มีการจำลองด้วยโปรแกรม PSCAD เพื่อกำหนดค่าความจุไฟฟ้าที่เหมาะสมที่ต้องต่อขนานเพิ่มเข้าไปเพื่อให้แรงดันไฟฟ้าทั้ง 3 เฟส มีความสมดุลหรือก็คือ แรงดันองค์ประกอบลำดับที่ศูนย์ (Zero Sequence Voltage Component) มีค่าใกล้เคียงศูนย์ให้มากที่สุด โดยจากรูปที่ 4.9 แสดง รูปแบบการต่อองค์ประกอบค่าความจุไฟฟ้าปรับค่าได้ (Variable Capacitance) โดยเชื่อมต่อที่เทอร์มินัลของขดลวดตติยภูมิเฟส A และ B เพื่อจะดำเนินการจำลองโดยใช้วิธีการทำซ้ำ (Iterative Method)



รูปที่ 4.9 โมเดลการจำลองการเชื่อมต่อตัวเก็บประจุไฟฟ้าเพิ่มเติม

จากผลการจำลองพบว่าค่าความจุไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับต่อขนานเพิ่มเข้าไป ได้แก่ เฟส A และเฟส B ต่อขนานค่าความจุไฟฟ้าเพิ่ม 13 nF และ 39 nF ตามลำดับ ค่าความจุไฟฟ้าที่จำลองได้ดังกล่าวจะทำให้แรงดันไฟฟ้าที่บัส 22 kV มีขนาดแรงดันและมุมเฟสดังต่อไปนี้

- เฟส A เทียบกราวด์ $12.76 \angle -30.12^\circ$ kV
- เฟส B เทียบกราวด์ $12.70 \angle -149.71^\circ$ kV
- เฟส C เทียบกราวด์ $12.65 \angle 89.83^\circ$ kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.3 การต่อขนานตัวเก็บประจุเพิ่มเติมที่ขดลวดฝั่งตติยภูมิเพื่อให้ได้ค่าความจุไฟฟ้าที่มีความสมดุล

จากผลการจำลองในหัวข้อก่อนหน้า จึงเลือกตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่เลือกใช้งานสำหรับต่อเพิ่มเติมคือ หม้อแปลงไฟฟ้าวัดแรงดันแบบตัวเก็บประจุ (Capacitor Voltage Transformer, CVT) สำหรับต่อเพิ่มชดเชยค่าความจุไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 4.10 อย่างไรก็ตาม ก่อนที่จะมีการนำไปใช้งานจริง หม้อแปลงวัดแรงดันแบบตัวเก็บประจุทุกตัวจะต้องผ่านการทดสอบตามมาตรฐาน ได้แก่ การทดสอบความคงทนภายใต้แรงดันกระแสสลับ การทดสอบดิสชาร์จบางส่วนเพื่อที่จะสามารถนำไปใช้งานจริงได้อย่างปลอดภัยและมีความน่าเชื่อถือ รวมถึงการวัดค่าความจุไฟฟ้าเพื่อให้สอดคล้องตามค่าที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมในหัวข้อก่อนหน้านี้



รูปที่ 4.10 หม้อแปลงวัดแรงดันแบบตัวเก็บประจุสำหรับต่อขนานเพิ่มเพื่อชดเชยค่าความจุไฟฟ้า

โดยการเชื่อมต่อตัวเก็บประจุเพิ่มเติมจะเลือกใช้งานหม้อแปลงวัดแรงดันแบบตัวเก็บประจุดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ข้อมูลหม้อแปลงวัดแรงดันแบบตัวเก็บประจุสำหรับใช้ต่อขนานเพิ่มเติม

ลำดับที่	สำหรับต่อเพิ่มเฟส	พิกัดแรงดัน (kV)	ค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้ (nF)
1	A	69	14.87
2	B	69	12.10
3		69	12.08
4		69	11.72
5		69	12.02

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางจะเห็นว่าค่าความจุไฟฟ้าจริงที่ต่อเพิ่ม ได้แก่ เฟส A มีค่า 14.87 nF และ เฟส B มีค่า $12.10 + 12.08 + 11.72 + 12.02 = 47.92$ nF จะสังเกตว่าค่าความจุไฟฟ้าที่ใช้งานจริงมีความแตกต่างจากที่ได้มีการจำลองอันเนื่องมาจากข้อจำกัด ซึ่งยากในการออกแบบหรือเลือกให้ได้ค่าความจุไฟฟ้าเท่ากับที่ได้จำลองไว้ข้างต้น

4.4.4 การติดตั้งหม้อแปลงวัดแรงดันแบบตัวเก็บประจุ

หลังจากทำการจำลองด้วยโปรแกรม หลังจากนั้นจึงได้ทำการติดตั้งโวลต์เตจ ดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ โดยได้ดำเนินการติดตั้งบนฐานโครงเหล็ก แสดงดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 การติดตั้งหม้อแปลงวัดแรงดันแบบตัวเก็บประจุขนาด

4.4.5 การวัดขนาดและรูปคลื่นของแรงดันที่บัส 22 kV หลังจากการติดตั้งจริง

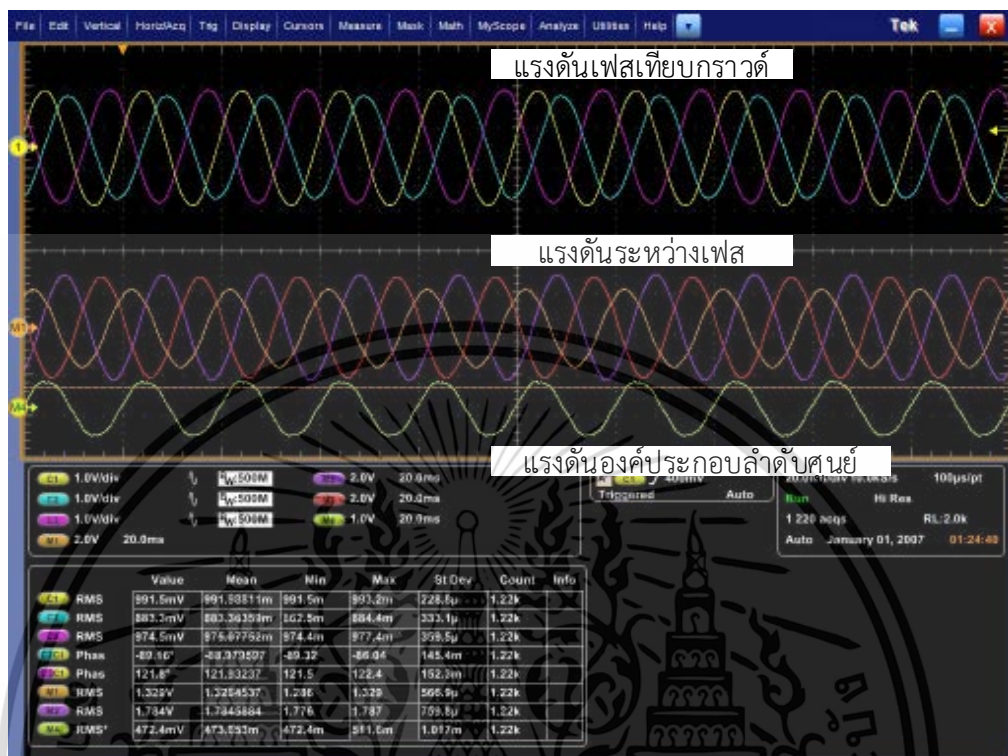
เมื่อดำเนินการติดตั้งหม้อแปลงไฟฟ้าวัดแรงดันแบบตัวเก็บประจุดังที่ได้แสดงในหัวข้อก่อนหน้าแล้ว จึงได้ดำเนินการวัดขนาดและรูปคลื่นของแรงดันที่บัส 22 kV และทำซ้ำ เพื่อยืนยันผลการทดลอง โดยใช้โวลต์เตจดีไวเดอร์ร่วมกับออสซิลโลสโคปจะได้ผลการวัดขนาดแรงดันและมุมเฟสแสดงดังต่อไปนี้

- เฟส A เทียบกราวด์ $12.22 \angle 0^\circ$ kV
- เฟส B เทียบกราวด์ $11.38 \angle -91.29^\circ$ kV
- เฟส C เทียบกราวด์ $11.96 \angle 121.8^\circ$ kV

โดยเมื่อพิจารณาถึงขนาดของแรงดันองค์ประกอบลำดับที่ศูนย์จะมีค่า $3V_0 = 5.79 \angle -12.12^\circ$ kV โดยรูปคลื่นของแรงดันที่วัดโดยใช้ออสซิลโลสโคปหลังจากการติดตั้งหม้อแปลงไฟฟ้าวัดแรงดันแบบตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เก็บประจุ ซึ่งดำเนินการวัดในสภาวะหม้อแปลงไร้โหลด (No load) ที่สภาวะคงตัว (Steady State) แสดงดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 ขนาดและรูปลักษณ์ของแรงดันที่บัส 22 kV หลังจากการติดตั้งหม้อแปลงไฟฟ้าวัดแรงดันแบบตัวเก็บประจุ

จากผลการวัดขนาดแรงดันหลังจากการแก้ไขปัญหาแสดงให้เห็นถึงความสมดุลของแรงดันที่ถูกปรับปรุงให้ดีขึ้น รวมถึงไม่ทำให้เกิดแรงดันเกินขึ้น ซึ่งสามารถที่จะดำเนินการติดตั้งกับดักเสิร์จที่พิกัดแรงดัน 22 kV เข้ากับระบบได้โดยไม่ทำให้เกิดความเสียหายอันเนื่องมาจากการเกิดแรงดันเกิน รวมถึงไม่พบจุดร้อนขึ้นที่กับดักเสิร์จดังกล่าว ซึ่งจะเพิ่มเสถียรภาพและความน่าเชื่อถือในการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าดังกล่าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าแรงดันที่ได้จากการวัดแต่ละครั้งและผลจากการจำลองด้วยโปรแกรม

เฟส	การวัดแรงดันไฟฟ้า ณ วันทดลองติดตั้ง CVT	การวัดแรงดันไฟฟ้า ณ วันติดตั้ง CVT จริง	ผลจำลองด้วย โปรแกรม PSCAD
A	12.3 \angle 0 kV	12.218 \angle 0 kV	12.15 \angle 0 kV
B	14.0 \angle -108.7 kV	11.38 \angle -91.29 kV	14.05 \angle -114.3 kV
C	11.6 \angle 133.2 kV	11.956 \angle 121.8 kV	12.02 \angle 131.1 kV
3V0	4.8 \angle 91.54 kV	5.79 \angle -12.12 kV	4.04 \angle 112.25 kV
V0	1.6 \angle 91.54 kV	1.93 \angle -12.12 kV	1.35 \angle 112.25 kV
ค่า C ที่ใช้เฟส B	35.5 nF	48.029 nF	39 nF
ค่า C ที่ใช้เฟส A	13.3 nF	14.905 nF	13 nF

จากตารางที่ 4.4 แสดงถึงการเปรียบเทียบการจำลองกับการวัดจริงแต่ละครั้งแสดงให้เห็นถึงความคลาดเคลื่อนของผลการจำลองเมื่อพิจารณาถึงมุมเฟส ความคลาดเคลื่อนดังกล่าวเกิดจากโมเดลของการจำลองด้วยโปรแกรมใช้ตัวแปรความจุไฟฟ้าแบบกลุ่มก้อน (Lump) จึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนดังกล่าวขึ้น หากต้องการให้ผลการจำลองมีความแม่นยำมากขึ้นจำเป็นต้องใช้วงจรสมมูลโดยใช้องค์ประกอบตัวเก็บประจุแบบกระจาย (Distributed) ซึ่งทำได้ยากในทางปฏิบัติเนื่องจากไม่สามารถวัดได้ รวมถึงจำเป็นต้องทราบโครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าโดยละเอียดภายในหม้อแปลง อย่างไรก็ตามจากผลการเปรียบเทียบแสดงถึงความแตกต่างที่ยอมรับได้ เนื่องจากเมื่อดำเนินการแก้ไขปัญหาจริง วิธีการนี้สามารถทำให้หม้อแปลงไฟฟ้ากลับมาใช้งานได้อย่างปกติซึ่งแสดงถึงศักยภาพในการใช้งานวงจรการจำลองอย่างง่ายเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวได้

นอกจากนี้ ในทางปฏิบัติจริงการเลือกอุปกรณ์ที่จะนำมาต่อเพิ่มโดยมีค่าความจุไฟฟ้าเท่ากับผลการจำลองเป็นไปได้ยากเนื่องจากข้อจำกัดในการออกแบบประกอบสร้างเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมรวมถึงราคาที่สูงเพื่อให้ได้ค่าความจุไฟฟ้าตามที่ได้ทดลองดังกล่าว ดังนั้น จึงได้มีการเลือกใช้งานอุปกรณ์ที่นำมาใช้ทดแทนในบทความนี้คือ โวลต์เตจ ดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ เพื่อนำมาแก้ปัญหา ซึ่งมีข้อดีคือ เป็นการลดงบประมาณในการแก้ไขปัญหา รวมไปถึงลดระยะเวลาการดำเนินงานเมื่อเปรียบเทียบกับช่วงระยะเวลาในการสั่งผลิตตัวเก็บประจุไฟฟ้าใหม่ แต่มีข้อเสียที่กล่าวไปข้างต้นคือจำเป็นต้องใช้หลายอุปกรณ์เพื่อนำมาเชื่อมต่อให้ได้ค่าความจุไฟฟ้าที่เหมาะสมเป็นไปได้ยากเนื่องจากข้อจำกัดในการออกแบบประกอบสร้างเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมรวมถึงราคาที่สูงเพื่อให้ได้ค่าความจุไฟฟ้าตามที่ได้ทดลองดังกล่าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดสอบ

จากการศึกษาเทคนิคการทดสอบเพื่อเฝ้าระวังสภาพฉนวนของบุชชิงและการทดลองเพื่อวิเคราะห์หาสาเหตุที่ทำให้ค่าคาปาซิแตนซ์ของเทสแทปของ RIP บุชชิงไม่เข้าค่า โดยมี 2 การทดลอง คือ การทดลองที่ 1. การศึกษาเทคนิคการทดสอบเพื่อเฝ้าระวังสภาพฉนวนของ OIP บุชชิงระดับแรงดันสูงปานกลาง 2. การศึกษาการไม่เข้าค่าของค่าคาปาซิแตนซ์ของเทสแทป (Test tap) ใน RIP บุชชิงที่ติดตั้งใหม่ รวมถึงการศึกษาปัญหาจุดร้อนของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่ตำแหน่งกับดักเสิร์จซึ่งเป็นผลมาจากความไม่สมดุลของความจุไฟฟ้าแฝง จากทั้ง 3 กรณีศึกษา สามารถสรุปออกมาได้ดังรายละเอียดต่อไปนี้

5.1 สรุปผลการทดสอบ

5.1.1 กรณีศึกษาที่ 1 การศึกษาเทคนิคการทดสอบเพื่อเฝ้าระวังสภาพฉนวนของ OIP บุชชิงระดับแรงดันสูงปานกลาง

เทคนิคการวัดค่าตัวประกอบกำลังสูญเสียในฉนวนสำหรับบุชชิงเป็นตัวชี้วัดเบื้องต้นที่สามารถแสดงถึงการเสื่อมสภาพของฉนวนบุชชิงแบบ OIP แต่ไม่สามารถระบุถึงปัญหาที่ทำให้ฉนวนของบุชชิงเสื่อมสภาพได้ จากผลการศึกษานี้ใช้เทคนิคการวัดกระแสโพลาไรเซชันและดีโพลาไรเซชัน (Polarization and Depolarization Current: PDC) เพื่อวิเคราะห์หาสาเหตุที่ทำให้ฉนวนกระดาศของบุชชิงเสื่อมสภาพหรือไม่ จากผลการทดสอบพบว่าการเสื่อมสภาพของฉนวนบุชชิงไม่ได้เกิดจากการเสื่อมสภาพของฉนวนกระดาศ แต่มาจากการเสื่อมสภาพของฉนวนเหลวภายในบุชชิงซึ่งเกิดขึ้นได้จากการมีสิ่งแปลกปลอมหรือความชื้น

5.1.2 กรณีศึกษาที่ 2 การศึกษาการไม่เข้าค่าของค่าคาปาซิแตนซ์ของเทสแทป (Test tap) ใน RIP บุชชิงที่ติดตั้งใหม่

จากผลการทดสอบค่าคาปาซิแตนซ์ของเทสแทปใน RIP บุชชิงที่ติดตั้งใหม่พบค่าเบี่ยงเบนจากโรงงานมากถึงประมาณ 46% นั้น จากผลการทดลอง จำลอง และผลการวัดในห้องปฏิบัติการ และในสนามพบว่าสาเหตุที่เกิดการเบี่ยงเบนที่มาก มีสาเหตุมาจากค่าสเตรย์คาปาซิแตนซ์ที่เกิดจากหม้อแปลงเครื่องมือวัดบุชชิง และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวถังที่ติดตั้งบุชชิง เนื่องจากบุชชิง RIP ไม่มีเปลือกโลหะกราวด์ส่วนที่อยู่ในตัวถังของหม้อแปลงไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.3 การศึกษาปัญหาและเทคนิคการบรรเทากรณีศึกษาผลกระทบของความจุไฟฟ้าแบบไม่สมดุลในหม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟสขนาดพิกัดแรงดัน 500 kV

ในกรณีศึกษาที่กล่าวถึงแนวทางการแก้ปัญหาความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าของขดลวดตติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังแบบอโต้ พิกัด 500 kV อันเนื่องมาจากความไม่สมดุลของค่าความจุไฟฟ้าแฝง โดยทำการศึกษาวัดค่าตัวแปรต่าง ๆ ในภาคสนามซึ่งได้แก่ ค่าความจุไฟฟ้าระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดตติยภูมิ ค่าความจุไฟฟ้าระหว่างขดลวดตติยภูมิเทียบกราวด์ รวมถึงขนาดและรูปคลื่นของแรงดันโดยใช้โวลต์เตจ ดิจิทัลแบบตัวเก็บประจุในภาคสนามเพื่อนำข้อมูลทั้งหมดดังกล่าวมาจำลองด้วยโปรแกรม PSCAD เพื่อหาค่าความจุไฟฟ้าของขดลวดตติยภูมิเทียบกราวด์ที่เหมาะสมสำหรับการต่อขนานเพิ่มเติมเพื่อแก้ปัญหาความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้า จากผลการจำลองด้วยโปรแกรม PSCAD พบว่าค่าความจุไฟฟ้าที่เหมาะสม คือ การต่อขนานตัวเก็บประจุไฟฟ้า ซึ่งมีความจุไฟฟ้า 13 nF และ 39 nF สำหรับเฟส A และเฟส B ตามลำดับ โดยได้เลือกใช้หม้อแปลงวัดแรงดันแบบตัวเก็บประจุเพื่อใช้งานเป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้าสำหรับต่อขนานเพิ่มเติม โดยในติดตั้งจริงค่าความจุไฟฟ้ามีค่า 14.87 nF และ 47.92 nF สำหรับเฟส A และเฟส B ตามลำดับ โดยได้ดำเนินการติดตั้งจริงบนฐานโครงเหล็ก หลังจากนั้นได้มีการวัดขนาดแรงดันที่บัส 22 kV ซ้ำอีกครั้งเพื่อยืนยันผลการจำลอง ผลการวัดพบว่าขนาดแรงดันไฟฟ้าแต่ละเฟสมีความสมดุลดีขึ้นรวมถึงไม่ทำให้เกิดแรงดันเกินเกิดขึ้น และไม่พบจุดร้อนที่กัปดักเสิร์จที่เชื่อมต่อกับขดลวดตติยภูมิ ซึ่งทำให้เพิ่มเสถียรภาพและความน่าเชื่อถือของการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากกรณีศึกษาบุชชิง สำหรับผลของบุชชิง RIP ที่ไม่สามารถวัดค่า C ซ้ำอันเนื่องมาจากสภาพการติดตั้ง จึงมีข้อเสนอแนะให้มีการวัดค่าข้อมูลต่าง ๆ หมดไว้ในขณะเริ่มติดตั้งครั้งแรกสำหรับใช้เป็นฐานข้อมูล รวมไปถึงใช้เป็นลายนิ้วมือ (Fingerprint) สำหรับการวิเคราะห์แนวโน้มในอนาคต

จากกรณีศึกษาหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังอันเนื่องเองมาจากความไม่สมดุล จึงจำเป็นในการระบุข้อกำหนดในการสั่งหม้อแปลงไฟฟ้าไม่ใช่เฉพาะเพียงข้อมูลตามที่ระบุในแผ่นป้ายผลิตภัณฑ์เท่านั้น แต่จำเป็นต้องคำนึงถึงโครงสร้างและองค์ประกอบต่าง ๆ ด้วย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Pritpal Singh, "C2 power factor and capacitance of ABB type O Plus C, AB, and type T condenser bushings," Doble Client conference paper, ABB Inc. USA, 2001
- [2] S. A. Bhumiwat, "Insulation condition assessment of transformer bushings by means of polarisation/depolarisation current analysis," Conference Record of the **2004 IEEE International Symposium on Electrical Insulation**, Indianapolis, IN, USA, 2004
- [3] Antun Mikulecky, "Transformer Bushings – Failure Case Studies," journal of energy, Volume 61, 2012
- [4] A. Mikulecky and Z. Stih, "Influence of temperature, moisture content and ageing on oil impregnated paper bushings insulation," in **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, vol. 20, no. 4, pp. 1421-1427, August 2013
- [5] H. M. Ryan. 2013. **High-Voltage Engineering and Testing**. London, United Kingdom: The Institution of Engineering and Technology.
- [6] CIGRE 755. "Transformer bushing reliability" CIGRE WORKING Group A2.43. 2019.
- [7] K. K. Murty. "Retrofitting of a 420 kV draw-lead type bushing with a draw-rod type – Part I" TRANSFORMERS MAGAZINE Volume 8, Issue 3, 2021
- [8] A. K uchler, High Voltage Engineering: Fundamentals– Technology–Applications. Springer Berlin Heidelberg, 2017, Chapter 4.
- [9] E. Kuffel, W.S. Zaengl, and J. Kuffel, **High Voltage Engineering: Fundamentals**. Butterworth-Heinemann, Second edition 2000, Chapter 7.
- [10] K. Thungsook, N. Phumipunepon, T. Worthong, W. Methavithit, W. Vittayakorn and N. Pattanadech, "Polarization and Depolarization Current Characteristics of Thermally Stressed Stator Coils," 2020 **8th International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD)**, Phuket, Thailand, 2020
- [11] ALFF Engineering. "PDC-ANALYSER-1MOD User's Guide," [Online]. Available: https://www.alfengineering.ch/PDF/PDC_User_Guide_Hardware.PDF.
- [12] P.Dharani, Firasat Mulla, Sushma Pattanashetti and Jivita Kulkarni. (2018). "Recent Trends in Transformer Manufacturing", สไลด์ฉบับเมื่อ 21 มกราคม 2567. จาก <https://www.slideshare.net/FirasatMulla/recent-trends-in->

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- transformers3.fna&oh=00_AfCvw9yAH1VlhRbx7Pd_HN1xkb09LnsUqJlOHpG4kwez
w&oe=663307B7
- [13] Huazeng, “หน้าที่ของบุชชิงหม้อแปลงคืออะไร? ข้อกำหนดคืออะไร?”, สืบค้นเมื่อ 15 มกราคม 2567. จาก <https://th.electric-test.com/info/what-is-the-function-of-the-transformer-bushin-72389352.html>
- [14] TCT, “หม้อแปลงไฟฟ้าคืออะไร(Transformer)”, สืบค้นเมื่อ 15 มกราคม 2567. จาก <https://www.thaicentertransformer.com/content/29143/>
- [15] Jun Deng, Zhanlong Zhang, Bo Qi, “IEEE Guide for the Dielectric Frequency Response Measurement of Bushings”, **IEEE standard association**, 2022.
- [16] Thailandindustry.com, “หม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้า”. สืบค้นเมื่อ 15 มกราคม 2567. จาก http://www.thailandindustry.com/indust_newweb/articles_preview.php?cid=1816
- [17] Dr. Dieter Dohnal. ON-LOAD TAP-CHANGERS FOR POWER TRANSFORMERS สืบค้นเมื่อ 28 มกราคม 2567. จาก https://www.reinhausen.com/fileadmin/downloadcenter/company/publikationen/f0126405_on-load_tap-changers_for_power_transformers.pdf
- [18] Martin J. Heathcote, The J&P Transformer Book: A Practical Technology of the Power Transformer. Newnes, Thirteenth edition.
- [19] Electrical4U. (2020). “Auto Transformer: What is it? (Definition, Theory&Diagram)”, สืบค้นเมื่อ 28 มกราคม 2567. จาก <https://www.electrical4u.com/what-is-auto-transformer/>
- [20] มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา. “บทที่ 1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับหม้อแปลงไฟฟ้า” ,สืบค้นเมื่อ 28 มกราคม 2567. จาก <https://blog.rmutl.ac.th/montri/assets/tr01.pdf>
- [21] มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา. “บทที่ 6 การออกแบบระบบไฟฟ้า” สืบค้นเมื่อ 28 มกราคม 2567. จาก <https://blog.rmutl.ac.th/montri/assets/ee2017-06-03.pdf>
- [22] Doble Engineering Company: “Test-data reference book”, TDRB-292, USA, 1992
- [23] P. M. Anderson, “Pilot Protection Systems,” in Power System Protection, Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 1999, ch. 13, pp. 469–530.
- [24] K. Chayakulkheeree. (2016). EEG456 Electrical Power System Protection and Relays [Lecture note]. Available:http://eestaff.kku.ac.th/~sanguan/192424/%A1%D2%C3%BB%E9%CD%A7%A1%D1%B9%C3%D0%BA%BA%E4%BF%BF%E9%D2%A1%D3%C5%D1%A7_%C3%C8_%A1%D5%C3%B5%D4.pdf

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [25] L. Tang and P. Zhao, "Tertiary Voltage Unbalance Compensation for 500kV Single Phase Autotransformer Banks," in *2018 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D)*, Denver, CO, USA, 2018, pp. 16, doi: 10.1109/TDC.2018.8440349.
- [26] Y. Yang, J. Zhang, Y. Jin and B. Wei, "Analysis of imbalanced voltage on 35 kV side after single phase replacement of 500 kV transformer," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 2369, 2022, Art. no. 012065, doi: 10.1088/1742-6596/2369/1/012065.
- [27] Manitoba HVDC Research Centre, Manitoba, Canada. *Power Systems Computer Aided Design User's Guide*, (2018). Accessed: August 1, 2023. [Online]. Available: https://www.pscad.com/knowledge-base/download/pscad_manual_v4_6.pdf.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก
บทความวิชาการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 
1. สุทัศน์ สุขสกุลปัญญา, และ นครเศรษฐ์ พัฒนเดช, "การศึกษาปัญหาและเทคนิคการบรรเทาผลกระทบของความจุไฟฟ้าแบบไม่สมดุลในหม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟสขนาดพิกัดแรงดัน 500 kV," *Engineering and Technology Horizons*, ปีที่ 41 เล่มที่ 1 (มีนาคม 2567). (อยู่ระหว่างการตีพิมพ์บทความ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาปัญหาและเทคนิคการบรรเทาผลกระทบของความจุไฟฟ้าแบบไม่สมดุลใน หม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟสขนาดพิกัดแรงดัน 500 kV

Study of Problem and Effect Mitigation Technique of Unbalance Capacitance in 500 kV Single Phase Transformers

สุทัศน์ สุขสกุลปัญญา* และ นรเศรษฐ พัฒนเดช

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์,

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพมหานคร 10520

Suthat Sukragoolpanya* and Norasage Pattanadech

Department of Electrical Engineering, School of Engineering,

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 10520, Thailand

*Corresponding Author E-mail: 62601052@kmitl.ac.th

Received: MMM DD, YEAR; Revised: MMM DD, YEAR; Accepted: MMM DD, YEAR

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาผลกระทบจากความไม่สมดุลของค่าความจุไฟฟ้าฝั่งของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง พิกัด 500 kV รวมถึงกำหนดแนวทางการบรรเทาผลกระทบ หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังดังกล่าวถูกใช้งานในสถานีไฟฟ้าแรงสูงสำหรับส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า โดยเป็นหม้อแปลงเฟสเดียวจำนวน 3 ลูก เนื่องจากก่อนหน้ามี หม้อแปลงไฟฟ้าเฟส B เกิดความล้มเหลว ทำให้ต้องมีการ สังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าลูกใหม่เข้ามาแทนที่ โดยเมื่อนำหม้อแปลงไฟฟ้าที่ผลิตใหม่เข้ามาแทนที่พบว่าเกิดจุดร้อนขึ้น ณ บริเวณต้นดักเสิร์จที่ฝั่งคดียภูมิ (พิกัด 22 kV) ของหม้อแปลงไฟฟ้ารวมไปถึงพบว่ามีแรงดันไฟฟ้าที่ฝั่งดังกล่าวมีความไม่สมดุล จึงทำให้เกิดแรงดันเกินซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดจุดร้อนดังกล่าว จากการสืบค้นหาโดยละเอียดพบว่าสาเหตุของปัญหาเกิดจากค่าความจุไฟฟ้าระหว่างขดลวดคดียภูมิที่ขมแทนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้ามีความไม่สมดุล เนื่องจากหม้อแปลงไฟฟ้าที่สังเคราะห์ใหม่มีโครงสร้างที่แตกต่างจากหม้อแปลงไฟฟ้าเดิมของ 2 ลูกที่เหลือ ดังนั้น การแก้ปัญหาถือเป็นจะต้องเพิ่มค่าความจุไฟฟ้าด้วยตัวเก็บประจุเข้าไปขนานกับขดลวดคดียภูมิที่ขมกวาด โดยได้มีการจำลองโดยใช้โปรแกรม PSCAD เพื่อจำลองถึงค่าความจุไฟฟ้าที่ต่อต่อกันเข้าไปจนได้ค่าที่เหมาะสมโดยใช้วิธีการทำซ้ำ ซึ่งก็คือทำให้แรงดันไฟฟ้าทั้ง 3 เฟส มีค่าสมดุลและ ไม่มีแรงดันเกินเกิดขึ้น โดยตัวเก็บประจุที่เลือกใช้ในบทความฉบับนี้คือ หม้อแปลงวัดแรงดันแบบตัวเก็บประจุ ซึ่งได้มีการติดตั้งใช้งานจริง จากผลการแก้ไขปัญหามพบว่าแรงดันไฟฟ้าที่บัส 22 kV มีความสมดุลมากขึ้น รวมถึงไม่ทำให้เกิดแรงดันเกินและไม่ตรวจพบจุดร้อนขึ้นที่ต้นดักเสิร์จที่เชื่อมต่อกับขดลวดคดียภูมิ ซึ่งเพิ่มเสถียรภาพและความน่าเชื่อถือของการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง

คำสำคัญ: หม้อแปลงไฟฟ้า, ความจุไฟฟ้า, แรงดันไม่สมดุล, หม้อแปลงวัดแรงดันแบบตัวเก็บประจุ

Abstract

This article presents the study of the effect of unbalanced stray capacitance in single-phase 500 kV power transformers and establishes the mitigation technique. The power transformers were operated in Wang Noi Substation for transmitting the electrical power. There are 3 units of single-phase power transformer. Previously, a transformer of

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

phase B failed after being serviced for several years. Thus, the new power transformer was ordered instead of the failed one. However, once the new system had been operated, the hot-spot at the surge arrester of tertiary winding (22 kV) were found and the unbalance of phase voltage was observed, resulting in overvoltage as a root cause of the problem. Once a thorough investigation was done, it was found that there was an effect of unbalanced stray capacitance between tertiary winding and ground core since the new power transformer has some different design compared with the remaining. Hence, the mitigation technique was performed by adding the capacitor parallel to the tertiary winding until the voltage balance was achieved. Simulation with the PSCAD program was performed to determine the optimum value for additional capacitor, i.e., voltage balance, using an iterative method. In this article, the capacitor used for additional were capacitor voltage transformer, which have been installed. As a result of the troubleshooting, the voltage at the 22 kV bus was more balanced as well as not causing overvoltage, and the hot-spot at the surge arrester of tertiary winding were not detected resulting in gaining the stability and reliability of using these transformer.

Keywords: Power transformer, Capacitance, Unbalance voltage, Capacitor voltage transformer.

1. บทนำ

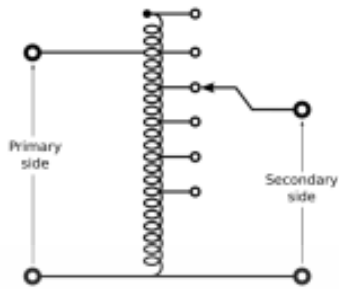
หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังมีบทบาทที่สำคัญอย่างมากในระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากำลัง โดยทำหน้าที่แปลงระดับแรงดันขึ้นหรือลงเพื่อให้เหมาะสมกับที่ระบบแรงดัน ซึ่งขึ้นอยู่กับระยะทางที่ใช้ส่งกำลังไฟฟ้า [1-3] เมื่อจำเป็นต้องส่งกำลังไฟฟ้าที่ระยะทางไกลขึ้น ก็จำเป็นต้องใช้แรงดันไฟฟ้าที่ระดับสูงขึ้นในการส่งจ่าย [4-6] โดยในประเทศไทย ณ ปัจจุบันมีกำลังไฟฟ้ากระแสสลับสูงสุดของระบบส่งจ่ายได้แก่ ทิศ 500 kV ยกตัวอย่างเช่น เริ่มเดินส่งกำลังไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง เพื่อส่งมายังภาคกลาง รวมถึงภูมิภาคอื่น ๆ เป็นต้น ดังนั้นระหว่างเส้นทางสายส่งที่ผ่านมายังจังหวัดต่าง ๆ จึงจำเป็นต้องมีสถานีไฟฟ้าเพื่อทำหน้าที่ควบคุมและลดระดับแรงดันไฟฟ้า โดยผ่านหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังเพื่อส่งจ่ายในภูมิภาคโดยรอบสถานีไฟฟ้านั้น ๆ

หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่ทศ 500 kV ในระบบส่งจ่ายซึ่งอยู่ภายใต้การดูแลของกรมไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยจะนิยมใช้เป็นหม้อแปลงเฟสเดียวมาเชื่อมต่อด้วยกันจำนวน 3 ลูก สำหรับใช้งานในระบบไฟฟ้า 3 เฟส เพื่อเพิ่มเสถียรภาพในระบบไฟฟ้า เนื่องจากหากมีความล้มเหลวของหม้อแปลงเฟสใดเฟสหนึ่งเกิดขึ้นก็จะสามารถเปลี่ยนทดแทนด้วยหม้อแปลงลูกสำรองได้ และเหตุผลเรื่องขนาดของหม้อแปลงไฟฟ้าซึ่งหากเป็นประเภท 3 เฟสในตัวจะ

ทำให้มีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักมาก ด้วยพื้นที่ที่จำกัดของสถานีไฟฟ้าแรงสูงทั่วไป ซึ่งจะทำให้การขนย้ายและติดตั้งมีอุปสรรคเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้งานหม้อแปลงเฟสเดียว 3 ลูก ดังนั้นแล้ว โดยปกติทั่วไปหม้อแปลงเฟสเดียวทั้ง 3 ลูก รวมถึงลูกสำรอง จะต้องมีการออกแบบให้มีทิศต่าง ๆ เหมือนกันทุกประการ เพื่อความสะดวกในการใช้งาน นอกจากนี้ ในการผลิตหม้อแปลงไฟฟ้าเฟสเดียวดังกล่าว โดยปกติจะผลิตจำนวน 4 ลูก โดย 1 ลูกที่เหลือจะใช้เป็นสำรองในกรณีที่มีหม้อแปลงไฟฟ้าลูกใดลูกหนึ่งเกิดความล้มเหลว ทั้งนี้เพื่อเพิ่มเสถียรภาพในการใช้งาน เพิ่มความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้า รวมไปถึงยังสามารถที่จะลดระยะเวลาการผลิตหม้อแปลงไฟฟ้าใหม่เพื่อมาแทนที่หม้อแปลงไฟฟ้าลูกเดิมที่เกิดความล้มเหลวซึ่งอาจจะใช้เวลา 1 ปี หรือมากกว่า

โดยปกติหม้อแปลงที่ทำหน้าที่เชื่อมต่อระหว่างระบบแรงดันที่แตกต่างกันประมาณครึ่งหนึ่ง โดยในประเทศไทยจะพบเจอที่ระบบแรงดัน 230/115 kV และ 500/230 kV โดยหม้อแปลงที่ใช้งานลักษณะดังกล่าวจะเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าแบบออโต้ (Autotransformer) ซึ่งนิยมใช้งานในสถานีไฟฟ้าโดยมีขดลวดปฐมภูมิ (ฝั่งแรงดันสูง) และทุติยภูมิ (ฝั่งแรงดันต่ำ) อยู่บนขดลวดเดียวกัน [1-3] ดังแสดงในรูปที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1 ขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบออโต้

ข้อดีของการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าแบบออโต้เมื่อเทียบกับการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแยกขดลวดทั่วไปคือการประหยัดขนาดของหม้อแปลงไฟฟ้า ลดความสูญเสียที่เกิดขึ้นจากหม้อแปลงไฟฟ้า ทำให้การควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้า (voltage regulation) ที่ดีกว่า และใช้ขนาดกระแสกระตุ้น (excitation current) ที่น้อยกว่า [3] อย่างไรก็ตาม หม้อแปลงไฟฟ้าแบบออโต้ก็จะมีข้อเสียในเรื่องการรับความเครียดที่สูงเนื่องจากกระแสลัดวงจร (short circuit current) และเนื่องจากกรับแรงดันเกินเสิร์จที่สูงเนื่องจากขดลวดทั้งสองไม่ได้แยกอิสระออกจากกัน [3]

นอกจากนี้ ขดลวดปฐมภูมิ (ฝั่งแรงดันสูง) และขดลวดทุติยภูมิ (ฝั่งแรงดันต่ำ) ของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบออโต้จะมีการเชื่อมต่อแบบสแตร์ (Y) ดังนั้น จึงจำเป็นต้องมีขดลวดตือภูมิโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดของฮาร์โมนิกส์ลำดับที่สามในระบบไฟฟ้า และ เพื่อใช้เป็นแหล่งจ่ายสำหรับจ่ายโหลดภายในสถานีไฟฟ้า [3] ซึ่งขดลวดตือภูมิของหม้อแปลงแบบออโต้จะมีรูปแบบการเชื่อมต่อแบบเดลต้า (Δ) โดยจะมีพิกัดแรงดันซึ่งเป็นระดับแรงดันของระบบจำหน่าย ได้แก่ 22 kV และ 33 kV (สำหรับภาคใต้ของประเทศไทย)

จากงานของ L. Tang และ P. Zhao [7] ได้นำเสนอการแก้ไขปัญหาระดับแรงดันเกินที่เกิดขึ้นในขดลวดตือภูมิในหม้อแปลงไฟฟ้าเฟสเดียวพิกัด 500 kV เนื่องมาจาก ค่าความจุไฟฟ้าระหว่างขดลวดและค่าความจุไฟฟ้าเทียบกราวด์ของขดลวดตือภูมิมีความไม่สมดุล จึงมีการวางแผนในการปรับเปลี่ยนค่าความจุไฟฟ้าเทียบกราวด์ ของขดลวดตือ

ภูมิโดยใช้หลักการทางทฤษฎีและการจำลองด้วยโปรแกรม EMTP ซึ่งการแก้ไขปัญหานี้จะใช้หม้อแปลงแรงดันชนิดตัวเก็บประจุสองตัวติดตั้งที่ขดลวดตือภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้านี้ สุดท้ายแล้ววิธีการนี้สามารถแก้ไขปัญหาความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าได้สำเร็จ และจากงานของ Yong Yang, et al. [8] ได้ศึกษาผลของค่าความจุไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าใหม่ที่นำมาแทนที่ซึ่งมีกราวด์แบบ โครงสร้างแตกต่างจากหม้อแปลงไฟฟ้าเดิม ทำให้ค่าความจุไฟฟ้าแตกต่างจากเดิม โดยการวิจัยมีการวิเคราะห์โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ภาคต่อและการจำลองโมเดลด้วยโปรแกรม PSCAD ซึ่งพบว่า ผลของค่าความจุไฟฟ้าที่เทียบกราวด์และค่าความจุไฟฟ้าระหว่างขดลวดแรงดันสูงกับแรงดันต่ำที่แตกต่างกันของทั้งสามเฟสจะส่งผลให้เกิดความไม่สมดุลของระบบไฟฟ้าสามเฟสและเกิดแรงดันตกคร่อมที่นิวทรัล ซึ่งสอดคล้องกันทั้งการคำนวณทางทฤษฎีและผลจากการจำลองด้วยโปรแกรม นอกจากนี้ จากงานของ Mosi Liu และ Zhiyuan Sun [9] ได้นำเสนองานวิจัยการแทนที่หม้อแปลงไฟฟ้าเฟสเดียวพิกัด 500 kV ที่เกิดความล้มเหลว โดยหม้อแปลงไฟฟ้าสำรองมีลักษณะที่แตกต่างกับหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้งานในระบบ จึงได้มีการจำลองการใช้งานในสภาวะโหลดต่างๆ เพื่อศึกษารอบการประกอบของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าลำดับลบ ทั้งที่สภาวะคงตัว (Steady) และ ผลของกระแสไฟฟ้าลัดวงจรที่สภาวะชั่วคราว (Transient) ทั้งก่อนและหลังเปลี่ยนหม้อแปลงไฟฟ้าด้วย โปรแกรม PSCAD พบว่า ผลขององค์ประกอบลำดับลบหลังแทนที่หม้อแปลงไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นแต่ไม่เกินค่าตามที่มาตรฐานกำหนด และกระแสไฟฟ้าลัดวงจรที่สภาวะชั่วคราวหลังแทนที่หม้อแปลงไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่ไม่ได้ส่งผลกระทบต่อการตั้งค่านิวทรัล

โดยบทความฉบับนี้ ได้มีการนำเสนอปัญหาของหม้อแปลงไฟฟ้าเฟสเดียวพิกัด 500 kV ภายใต้การดูแลของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตฯ ที่มีปัญหาการเกิดแรงดันเกินขึ้นและส่งผลกระทบต่อคิกเสิร์จเกิดจุดร้อนขึ้น เพื่อศึกษาการแก้ไขปัญห

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังกล่าวที่เกิดขึ้นและเป็นแนวทางในการปฏิบัติหากเกิดปัญหากรณีเดียวกันในอนาคต โดยวิธีการแก้ไขในบทความนี้นำเสนอการจำลองวงจรสมมูลที่มีการต่อตัวเก็บประจุภายนอกเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวด้วยโปรแกรม PSCAD และการนำผลการจำลองไปใช้ในการปฏิบัติจริง

2. หม้อแปลงไฟฟ้าที่ดำเนินการศึกษาวิจัย

หม้อแปลงไฟฟ้าที่กล่าวถึงในบทความฉบับนี้เป็นหม้อแปลงแบบออโต้ (Autotransformer) ซึ่งประกอบด้วย 3 ขดลวด ได้แก่ ขดลวดปฐมภูมิ ขดลวดทุติยภูมิ และขดลวดคติยภูมิ ซึ่งมีพิกัดแรงดัน $525/\sqrt{3}$, $230/\sqrt{3}$ และ 22 kV ตามลำดับ โดยแสดงการติดตั้งหม้อแปลงไฟฟ้าทั้ง 3 ลูกดังรูปที่ 2



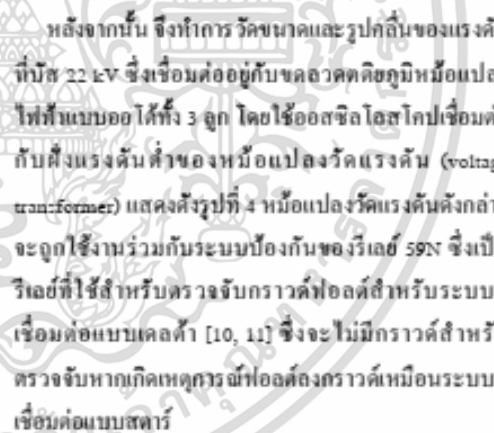
รูปที่ 2 หม้อแปลงไฟฟ้าจำนวน 3 ลูก ที่ถูกติดตั้งในสถานีไฟฟ้าวังน้อย จังหวัดพระนครศรีอยุธยา

โดยในปี 2563 ได้เกิดเหตุการณ์ความล้มเหลวของหม้อแปลงไฟฟ้าเฟส ฮาวให้จำเป็นต้องมีการนำหม้อแปลงไฟฟ้าลูกสำรองมาใช้งานแทนที่ แต่อย่างไรก็ตามหม้อแปลงไฟฟ้าสำรองที่ผลิตตั้งแต่เริ่มต้นได้มีการรูดนำมาใช้งานก่อนหน้าแล้ว อันเนื่องมาจากความล้มเหลวครั้งก่อนหน้า ดังนั้นหม้อแปลงสำรองที่นำมาใช้งานดังกล่าวจึงเป็นหม้อแปลงที่ผลิตใหม่ (ค้างผู้ผลิต) โดยข้อกำหนดของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ผลิตใหม่จะต้องออกแบบให้มีความใกล้เคียงการออกแบบของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเดิมให้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ อย่างไรก็ตามเมื่อนำหม้อแปลงไฟฟ้าลูกใหม่ที่ผลิตขึ้นมาใช้งาน พบว่าเกิดปัญหากระแสรั่วไหลที่ไหลผ่านกับดักเสิร์จมีขนาดที่สูงผิดปกติและตรวจพบจุดร้อนขึ้นที่กับดักเสิร์จเมื่อส่องด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน ซึ่งเกิดขึ้นที่กับดักเสิร์จที่ขดลวดคติยภูมิ จากนั้นทางผู้เขียนและคณะจึงได้มี

การตั้งสมมติฐานถึงสาเหตุที่ทำให้เกิดปัญหาดังกล่าวขึ้น โดยมีสาเหตุความเป็นไปได้ ได้แก่ การเสื่อมสภาพของกับดักเสิร์จหรือการเกิดปัญหาความไม่สมดุลของแรงดันทำให้เกิดแรงดันเกิน รูปที่ 3 แสดงถึงร่องรอยความเสียหายจากความร้อนของกับดักเสิร์จ



หลังจากนั้น จึงทำการ วัดขนาดและรูปคลื่นของแรงดันที่บัส 22 kV ซึ่งเชื่อมต่อกับขดลวดคติยภูมิหม้อแปลงไฟฟ้าแบบออโต้ทั้ง 3 ลูก โดยใช้อสซิลโลสโคปเชื่อมต่อกับฝั่งแรงดันต่ำของหม้อแปลงวัดแรงดัน (voltage transformer) แสดงดังรูปที่ 4 หม้อแปลงวัดแรงดันดังกล่าวจะถูกใช้งานร่วมกับระบบป้องกันของรีเลย์ 59x ซึ่งเป็นรีเลย์ที่ใช้สำหรับตรวจจับการวัดเฟลด์สำหรับระบบที่เชื่อมต่อแบบเดลต้า [10, 11] ซึ่งจะไม่มีการวัดสำหรับตรวจจับหากเกิดเหตุการณ์ที่เฟลด์ของกราวด์เหมือนระบบที่เชื่อมต่อแบบสตาร์



รูปที่ 4 การวัดขนาดและรูปคลื่นของแรงดันที่บัส 22 kV

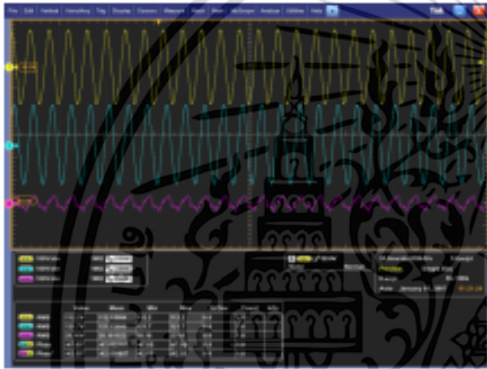
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยใช้ออสซิลโลสโคปเชื่อมต่อกับขดลวดแรงต่ำของหม้อแปลงวัดแรงดัน

ผลการวัดขนาดแรงดันและมุมเฟสแสดงดังต่อไปนี้

- เฟส A เทียบกราวด์ $22.44 \angle 0^\circ$ kV,
- เฟส B เทียบกราวด์ $24.34 \angle -47.05^\circ$ kV และ
- เฟส C เทียบกราวด์ $4.03 \angle -42.05^\circ$ kV

โดยรูปคลื่นของแรงดันที่วัดโดยใช้ออสซิลโลสโคป ซึ่งดำเนินการวัดในสภาวะหม้อแปลงไร้โหลด (No load) ที่สภาวะคงตัว (Steady state) แสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ขนาดและรูปคลื่นของแรงดันที่บัส 22 kV

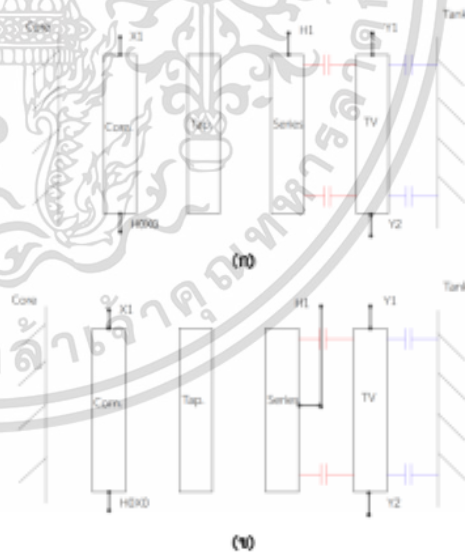
จากผลการวัดแรงดันพบว่าแรงดันไม่สมดุล โดยตรวจพบแรงดันเกินที่เฟส A และ B ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้กับดักเสิร์จเกิดความร้อนสูงขึ้น ซึ่งมีความเป็นไปได้ที่จะเกิดจากผลของโครงสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าสำรองที่ผลิตใหม่ (จากผู้ผลิต) จึงได้มีการดำเนินการวัดค่าทางไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าทั้ง 3 ลูกเปรียบเทียบกัน โดยใช้เครื่องมือทดสอบ CPC 100 (Omicron) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่มีความสามารถในการวัดค่าแฟกเตอร์ความสูญเสียในฉนวน รวมถึงค่าความจุไฟฟ้าของฉนวนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงได้ โดยได้ดำเนินการทดสอบโดยจ่ายแรงดันทดสอบกระแสสลับขนาด 10 kV พบว่าค่าความจุไฟฟ้าระหว่างขดลวดปฐมภูมิกับขดลวดทุติยภูมิและค่าความจุไฟฟ้าระหว่างขดลวดทุติยภูมิเทียบกราวด์มีความแตกต่างกัน แสดงผลการวัดดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้ของหม้อแปลงทั้ง 3 ลูก

เฟส	ค่าความจุไฟฟ้าระหว่างขดลวดปฐมภูมิกับขดลวดทุติยภูมิ (nF)	ค่าความจุไฟฟ้าระหว่างขดลวดทุติยภูมิเทียบกราวด์ (nF)
A (เดิม)	0.030	17.31
B (ใหม่)	2.990	2.860
C (เดิม)	0.040	18.21

จากตารางพบว่าค่าความจุไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าเฟส B ที่ผลิตใหม่มีความแตกต่างจากของหม้อแปลงไฟฟ้าเดิมอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับค่าความจุไฟฟ้าเฟสระหว่างขดลวดทุติยภูมิเทียบกราวด์

โดยจากการตรวจสอบรูปแบบการออกแบบขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้านี้ 2 ผู้ผลิต (เดิมและผลิตใหม่) แสดงดังรูปที่ 6 โดยจากรูป Com. คือ ขดลวดร่วม (Common winding) ซึ่งมีต้นขดลวด X1 เป็นขดลวดทุติยภูมิ (230 kV), Tap. คือ ขดลวดสำหรับปรับแก้สำหรับปรับระดับแรงดันของฉนวน On-Load Tap-Changer (OLTC), ขดลวด Serie: คือ ขดลวดเพิ่มปฐมภูมิ (500 kV) โดยมี H1 เป็นต้นขดลวด และ TV คือ ขดลวดทุติยภูมิ (22 kV) โดยมี Y1 เป็นต้นขดลวด



รูปที่ 6 โครงสร้างรูปแบบขดลวดของหม้อแปลง (ก) ผู้ผลิตเดิม (ข) ผู้ผลิตใหม่

จากรูปที่ 6 แสดงถึงความแตกต่างของโครงสร้างขดลวดภายในหม้อแปลงไฟฟ้า ค่าความจุไฟฟ้าแ่งดังรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะส่งผลกระทบต่อให้เกิดการซ้อนทับกันของแรงดันไฟฟ้า อันเนื่องมาจากองค์ประกอบความจุไฟฟ้าเสมือนเป็น ไวลเดจติไวเคอร์ ซึ่งในสภาวะปกติที่หม้อแปลงไฟฟ้าทั้ง 3 เฟส มีโครงสร้างเหมือนกันก็จะทำให้ค่าความจุไฟฟ้าของ ทั้ง 3 เฟส เท่ากัน องค์ประกอบแรงดันไฟฟ้าซ้อนทับ (superimpose) ดังกล่าวก็จะชดเชยกันซึ่งสามารถสังเกตได้ จากการที่แรงดันองค์ประกอบลำดับที่ศูนย์จะมีขนาดเป็น ศูนย์

ซึ่งโดยทั่วไปแล้วหลักการในการถ่ายโอนแรงดัน (transferred voltage) จะมีหลักการอยู่ 2 ประเภท ได้แก่

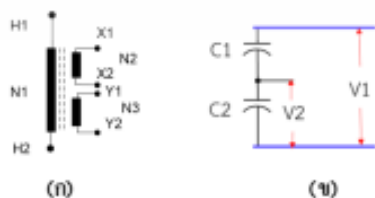
1. การถ่ายโอนแรงดันแบบเหนี่ยวนำ (inductive) : เป็น หลักการที่เมื่อมีกระแสไหลผ่านขดลวดจะสร้างฟลักซ์ที่ เกี่ยวข้องกับขดลวดอีกหนึ่ง ซึ่งระดับแรงดัน (V_1, V_2) ที่ เกิดการเหนี่ยวนำจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของจำนวนรอบ ขดลวดทั้งสอง (n_1, n_2) โดยเป็นหลักการทั่วไปของหม้อ แปลงไฟฟ้า ซึ่งแสดงได้ด้วยสมการต่อไปนี้

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{n_1}{n_2} \tag{1}$$

2. การถ่ายโอนแรงดันแบบความจุไฟฟ้า (capacitive) : เป็น หลักการถ่ายโอนอันเนื่องมาจากผลของสนาม ไฟฟ้าซึ่งแทน ได้ด้วยความจุไฟฟ้าแฝงซึ่งจะอยู่บนพื้นฐานของไวลเดจ ตีไวเคอร์ โดยระดับแรงดันจะขึ้นกับอัตราส่วนของค่า ความจุไฟฟ้าทั้ง 2 องค์ประกอบ (C_1, C_2) ซึ่งแสดงด้วย สมการดังต่อไปนี้

$$\frac{V_1}{V_2} = 1 + \frac{C_2}{C_1} \tag{2}$$

จากรูปที่ 7 แสดงถึงหลักการถ่ายโอนแรงดันที่ได้ อธิบายไปข้างต้น



รูปที่ 7 วงจรสมมูลการถ่ายโอนแรงดัน (ก) แบบ

ความเหนี่ยวนำไฟฟ้า (ข) แบบความจุไฟฟ้า

ดังที่ได้กล่าวไปข้างต้นหลักการในการถ่ายโอนแรงดัน ภายในหม้อแปลงไฟฟ้าจึงมี 2 ส่วนหลัก ซึ่งในส่วนของ ความเหนี่ยวนำนั้นจะไม่ได้รับผลกระทบเรื่องความไม่ สมดุลเนื่องจากการออกแบบประกอบสร้างเพื่อให้ได้ พิกัดแรงดันของแต่ละขดลวดที่เหมาะสมและมีความ สมมาตรในทุกๆ เฟส แต่จะมีผลในส่วนของความจุไฟฟ้า จากค่าที่วัดได้ในตารางที่ 1 ซึ่งเมื่ออัตราส่วนมีความไม่ สมดุลกันก็จะทำให้แรงดันทั้งสามเฟสเกิดความไม่สมดุล ซึ่งทำให้มีขนาดแรงดันองค์ประกอบลำดับศูนย์เกิดขึ้น

ค่าความจุไฟฟ้าแฝงระหว่างขดลวดปฐมภูมิกับขดลวด ดิถีภูมิและขดลวดดิถีภูมิเมื่อบรรทัดของหม้อแปลงทั้ง 3 ลูก มีขนาดที่แตกต่างกันส่งผลให้เกิดความไม่สมดุลของ แรงดัน [7, 8] ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยการต่อขนานตัวเก็บ ประจุเพื่อชดเชยค่าความจุไฟฟ้าเพื่อให้แรงดันไฟฟ้าทั้ง 3 เฟสมีขนาดที่สมดุล

3. แนวทางการแก้ปัญหา

จากปัญหาที่แสดงในรายละเอียดไปข้างต้น จึงได้มีการ กำหนดแนวทางการแก้ปัญหาโดยดำเนินการเก็บข้อมูลใน ทัศนสนามเพื่อ วัดขนาดแรงดันและมุมเฟสของรูปคลื่น แรงดันจริงเพื่อ ข้อมูลมาเปรียบเทียบการจำลองด้วย โปรแกรมซึ่งแสดงดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.1 การวัดขนาดและรูปคลื่นของแรงดันที่บัส 22 kV

จากที่ได้ทำการ วัดขนาดและรูปคลื่นของแรงดันที่บัส 22 kV เบื้องต้น ซึ่งเป็นการวัดในสถานะที่ใช้งานจริง โดย ยังคงมีกับดักเซอร์และหม้อแปลงวัดแรงดันเชื่อมต่ออยู่ การวัดดังกล่าวอาจจะ ส่งผลให้แรงดันที่วัดได้มีการ ผิดเพี้ยนไปจากความเป็นจริงอันเนื่องมาจากการจำกัด ขนาดของแรงดัน โดยกับดักเซอร์หรือการอิมิตัวแทนหลัก ของหม้อแปลงวัดแรงดัน หากเกิดแรงดันเกิน ดังนั้น เพื่อที่จะบันทึกขนาดและรูปคลื่นของแรงดันได้อย่าง ถูกต้องและแม่นยำ จึงต้องมีการปลดอุปกรณ์เหล่านี้ ออก จากบัส 22 kV และทำการวัดขนาดและรูปคลื่นด้วย ไวลเดจติไวเคอร์โดยเชื่อมต่อภาคแรงดันต่ำของไวลเดจ ตีไวเคอร์ผ่านสายโคแอกเซียลเคเบิลเชื่อมต่อไปยัง

ออสซิลโลสโคป โวลเตจดีไวเดอร์ที่ใช้งานเป็นประจำตัวเก็บประจุ มีพิกัดแรงดัน 100 kV และมีความจุไฟฟ้า 1 mF (โดยมีอัตราส่วนการลดทอนแรงดันของโวลเตจดีไวเดอร์ของเฟส A, B และ C ได้แก่ 12306:1, 12646:1 และ 12260:1 ตามลำดับ) โดยแสดงการติดตั้งดังรูปที่ 8

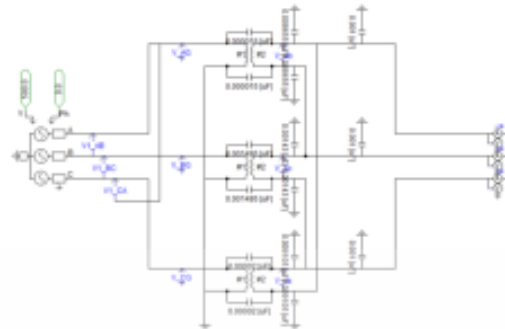


รูปที่ 8 การติดตั้งโวลเตจดีไวเดอร์จำนวน 3 ตัวสำหรับการวัดขนาดและรูปคลื่นของแรงดันฝั่งขดลวดคดียภูมิ (22 kV) โดยวัตถุประสงค์ของการวัดขนาดและรูปคลื่นของแรงดันคือ เพื่อนำข้อมูลผลการวัดที่ถูกค้องและแม่นยำนำไปจำลองด้วยโปรแกรมเพื่อหาค่าความจุไฟฟ้าที่เหมาะสมที่จะนำมาเชื่อมต่อเพิ่มเติม โดยจะแสดงผลการวัดเชิงเปรียบเทียบกับการจำลองด้วยโปรแกรม PSCAD ดังตารางที่ 2

3.2 การจำลองด้วยโปรแกรม PSCAD

โปรแกรม PSCAD เป็น โปรแกรมที่ถูกใช้งานอย่างแพร่หลายในการจำลองปรากฏการณ์ในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยผู้ใช้งานสามารถออกแบบวงจรสำหรับการจำลอง และวิเคราะห์ผลลัพธ์การจำลองได้ [12]

สำหรับการจำลองจะใช้ค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้จริงดังแสดงในตารางที่ 1 เพื่อนำมาจำลองโคแองแกรมของหม้อแปลงไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 โมเดลการจำลองการเชื่อมต่อตัวเก็บประจุไฟฟ้าของหม้อแปลงทั้ง 3 ลูก

จากโมเดลการจำลองในรูปที่ 9 จะใช้การจำลองแบบวงจรแบบกลุ่มก้อน (Lump) โดยในงานวิจัยนี้จะพิจารณาถึงผลกระทบของแรงดันไฟฟ้าพื้นเทียบกราวด์ ดังนั้น ตัวแปรความต้านทานและความเหนี่ยวนำไฟฟ้าของขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าจึงไม่ถูกนำมาพิจารณา ซึ่งจะพิจารณาเฉพาะตัวแปรค่าความจุไฟฟ้าซึ่งเป็นผลจากโครงสร้างของระบบฉนวนในหม้อแปลงไฟฟ้าเท่านั้น

โดยจากรูปที่ 9 กำหนดให้ค่าความจุไฟฟ้าระหว่างขดลวดปฐมภูมิกับขดลวดคดียภูมิเชื่อมต่อที่ตำแหน่งดินขดลวดและบริเวณปลายขดลวด โดยมีขนาดของความจุไฟฟ้าทั้ง 2 ตำแหน่งเป็นครึ่งหนึ่งของค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้ในตารางที่ 1 นอกจากนี้ กำหนดค่าความจุไฟฟ้าระหว่างขดลวดคดียภูมิเทียบกราวด์เชื่อมต่อให้ค่าความจุไฟฟ้าที่คืนและปลายของขดลวดซึ่งแสดงด้วยองค์ประกอบความจุไฟฟ้าแบบก้อน (Lump) ซึ่งมีขนาดเป็นครึ่งหนึ่งของค่าความจุไฟฟ้าในตารางที่ 1 รวมถึงค่าความจุไฟฟ้าของโวลเตจดีไวเดอร์ของแต่ละเฟสเทียบกราวด์ ซึ่งมีค่า 1 mF เพื่อยืนยันถึงความสามารถในการจำลองด้วยโปรแกรมที่กล่าวไปข้างต้นซึ่งได้มีการวัดขนาดและรูปคลื่นแรงดันจริงเพื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลอง แสดงดังตารางที่ 2 ตารางที่ 2 เปรียบเทียบผลการวัดขนาดแรงดันและมุมเฟสเทียบกราวด์ของบัส 22 kV

เฟส	ผลการจำลองด้วยโปรแกรม PSCAD (kV)	ผลการวัดจริงด้วยโวลเตจดีไวเดอร์ (kV)
A	14.65 ∠ 0°	15.58 ∠ 0°
B	22.23 ∠ -69.81°	23.98 ∠ -52.81°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

C	$8.19 \angle -147.5^\circ$	$8.05 \angle -115.9^\circ$
---	----------------------------	----------------------------

จากผลการเปรียบเทียบในตารางที่ 2 พบว่าการจำลองโดยใช้โมเดลของวงจรแบบก้อน (Lump) ดังกล่าวให้ผลลัพธ์ที่ยอมรับได้ซึ่งก็คือ มีผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับที่ได้ดำเนินการวัดจริงด้วยโวลเตจดีไวเดอร์ ซึ่งเพียงพอที่จะใช้โมเดลการจำลองดังกล่าวเพื่อกำหนดค่าความจุไฟฟ้าที่เหมาะสมที่จะต้องต่อเพิ่มเข้าไป

เพื่อกำหนดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุที่ต้องต่อเพิ่มจึงได้มีการจำลองด้วยโปรแกรม PSCAD เพื่อกำหนดค่าความจุไฟฟ้าที่เหมาะสมที่ต้องต่อขนานเพิ่มเข้าไปเพื่อให้แรงดันไฟฟ้าทั้ง 3 เฟส มีความสมดุลหรือก็คือแรงดันองค์ประกอบลำดับที่ศูนย์ (Zero sequence voltage component) มีค่าใกล้เคียงศูนย์ให้มากที่สุด โดยจากรูปที่ 10 แสดง รูปแบบการต่อองค์ประกอบค่าความจุไฟฟ้าปรับค่าได้ (variable capacitance) โดยเชื่อมต่อที่เทอร์มินัลของขดลวดคดียกภูมิเฟส A และ C เพื่อจะดำเนินการจำลองโดยใช้วิธีการทำซ้ำ (iterative method)



รูปที่ 10 โมเดลการจำลองการเชื่อมต่อตัวเก็บประจุไฟฟ้าเพิ่มเติม

จากผลการจำลองพบว่าค่าความจุไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับต่อขนานเพิ่มเข้าไป ได้แก่ เฟส A และเฟส B ต่อขนานค่าความจุไฟฟ้าเพิ่ม 13 μF และ 39 μF ตามลำดับ

ค่าความจุไฟฟ้าที่จำลองได้ดังกล่าวจะทำให้แรงดันไฟฟ้าที่บัส 22 kV มีขนาดแรงดันและมุมเฟสดังต่อไปนี้

- เฟส A เทียบกราวด์ $12.76 \angle -30.12^\circ$ kV,
- เฟส B เทียบกราวด์ $12.70 \angle -149.71^\circ$ kV และ

- เฟส C เทียบกราวด์ $12.65 \angle 89.83^\circ$ kV

3.3 การต่อขนานตัวเก็บประจุเพิ่มเติมที่ขดลวดคดียกภูมิเพื่อให้ได้ค่าความจุไฟฟ้าที่มีความสมดุล

จากผลการจำลองในหัวข้อก่อนหน้า ตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่เลือกใช้งานสำหรับต่อเพิ่มเติมคือ หม้อแปลงวัดแรงดันแบบตัวเก็บประจุ (capacitor voltage transformer, CVT) สำหรับต่อเพิ่มเพิ่มขดเซกค่าความจุไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 11 โดยเป็นอุปกรณ์ที่มีสำรองอยู่ในโรงเก็บพัสดุของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย อย่างไรก็ตาม ก่อนที่จะมีการนำไปใช้งานจริง หม้อแปลงวัดแรงดันแบบตัวเก็บประจุทุกตัวจะต้องผ่านการทดสอบตามมาตรฐาน ได้แก่ การทดสอบความล้นหนายได้แรงดันกระแสสลับ การทดสอบดิสชาร์จบางส่วนเพื่อที่จะสามารถนำไปใช้งานจริงได้อย่างปลอดภัยและมีความน่าเชื่อถือ รวมถึงการวัดค่าความจุไฟฟ้าเพื่อให้สอดคล้องตามค่าที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมในหัวข้อก่อนหน้านี้



รูปที่ 11 หม้อแปลงวัดแรงดันแบบตัวเก็บประจุสำหรับต่อขนานเพิ่มเพื่อขดเซกค่าความจุไฟฟ้า

ในการเชื่อมต่อตัวเก็บประจุเพิ่มเติมจะเลือกใช้งานหม้อแปลงวัดแรงดันแบบตัวเก็บประจุดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ข้อมูลหม้อแปลงวัดแรงดันแบบตัวเก็บประจุสำหรับใช้ต่อขนานเพิ่มเติม

ลำดับที่	สำหรับต่อเพิ่มเฟส	ที่กัลดแรงดัน (kV)	ค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้ (μF)
1	A	69	14.87
2	B	69	12.10
3		69	12.08

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4		69	11.72
5		69	12.02

จากตารางจะเห็นว่าค่าความจุไฟฟ้าจริงที่ต่อเพิ่ม ได้แก่ เฟส A มีค่า 14.87 μF และ เฟส B มีค่า 12.10 + 12.08 + 11.72 + 12.02 = 47.92 μF จะสังเกตว่าค่าความจุไฟฟ้าที่ใช้งานจริงมีความแตกต่างจากที่ได้มีการจำลองขึ้นเนื่องมาจากข้อจำกัด ซึ่งยากในการออกแบบหรือเลือกให้ได้ค่าความจุไฟฟ้าที่เท่ากับที่ได้จำลองไว้ข้างต้น

3.4 การติดตั้งหม้อแปลงวัดแรงดันแบบตัวเก็บประจุ

หลังจากทำการจำลองด้วยโปรแกรม หลังจากนั้นจึงได้ทำการติดตั้งโวลเตจดีไวเซอร์แบบตัวเก็บประจุ โดยได้ดำเนินการติดตั้งบนฐาน โครงเหล็ก แสดงดังรูปที่ 12



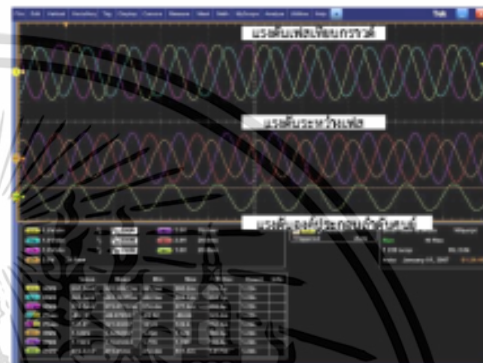
รูปที่ 12 การติดตั้งหม้อแปลงวัดแรงดันแบบตัวเก็บประจุบนฐาน

3.5 การวัดขนาดและรูปคลื่นของแรงดันที่บัส 22 kV

หลังจากการติดตั้งจริง เมื่อดำเนินการติดตั้งหม้อแปลงวัดแรงดันแบบตัวเก็บประจุดังที่ได้แสดงในหัวข้อก่อนหน้าแล้ว จึงได้ดำเนินการวัดขนาดและรูปคลื่นของแรงดันที่บัส 22 kV ซ้ำ เพื่อยืนยันผลการทดลอง โดยใช้โวลเตจดีไวเซอร์ร่วมกับออสซิลโลสโคปผลการวัดขนาดแรงดันและมุมเฟสแสดงดังต่อไปนี้

- เฟส A เทียบกราวด์ $12.22 \angle 0^\circ$ kV,
- เฟส B เทียบกราวด์ $11.38 \angle -91.29^\circ$ kV และ
- เฟส C เทียบกราวด์ $11.96 \angle 121.8^\circ$ kV

โดยเมื่อพิจารณาถึงขนาดของแรงดันองค์ประกอบลำดับที่ศูนย์จะมีค่า $3V_0 = 5.79 \angle -12.12^\circ$ kV โดยรูปคลื่นของแรงดันที่วัดโดยใช้ออสซิลโลสโคปหลังจากการติดตั้งหม้อแปลงวัดแรงดันแบบตัวเก็บประจุ ซึ่งดำเนินการวัดในสถานะหม้อแปลงไร้โหลด (No load) ที่สถานะคงตัว (Steady state) แสดงดังรูปที่ 13



รูปที่ 13 ขนาดและรูปคลื่นของแรงดันที่บัส 22 kV หลังจากการติดตั้งหม้อแปลงวัดแรงดันแบบตัวเก็บประจุ

จากผลการวัดขนาดแรงดันหลังจากการแก้ไขปัญหามองเห็นถึงความสมดุลของแรงดันที่ถูกปรับปรุงให้ดีขึ้น รวมถึงไม่ทำให้เกิดแรงดันเกินขึ้น ซึ่งสามารถที่จะดำเนินการติดตั้งกับคัทเสิร์จที่ติดตั้งแรงดัน 22 kV เข้ากับระบบได้โดยไม่ทำให้เกิดความเสียหายอันเนื่องมาจากการเกิดแรงดันเกิน รวมถึงไม่พบจุดร้อนขึ้นที่กับคัทเสิร์จดังกล่าว ซึ่งจะเพิ่มเสถียรภาพและความน่าเชื่อถือในการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าดังกล่าว

จากผลการเปรียบเทียบการจำลองแสดงให้เห็นถึงความคลาดเคลื่อนของผลการจำลองเมื่อพิจารณาถึงมุมเฟสความคลาดเคลื่อนดังกล่าวเกิดจากโมเดลของการจำลองด้วยโปรแกรมใช้ตัวแปรความจุไฟฟ้าแบบกลุ่มก้อน (Lump) จึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนดังกล่าวขึ้น หากต้องการให้ผลการจำลองมีความแม่นยำมากขึ้นจำเป็นต้องใช้วงจรสมมูลโดยใช้อุปกรณ์ตัวเก็บประจุแบบกระจาย (Distributed) ซึ่งทำได้ยากในทางปฏิบัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากไม่สามารถวัดได้ รวมถึงจำเป็นจะต้องทราบโครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าโดยละเอียดภายในหม้อแปลง อย่างไรก็ตามจากผลการเปรียบเทียบแสดงถึงความแตกต่างที่ยอมรับได้ เนื่องจากเมื่อดำเนินการแก้ไขปัญหาจริง วิธีการนี้สามารถทำให้หม้อแปลงไฟฟ้ากลับมาใช้งานได้เป็นอย่างดีซึ่งแสดงถึงศักยภาพในการใช้งานวงจรจำลองอย่างง่ายเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวได้

นอกจากนี้ ในทางปฏิบัติจริงการเลือกอุปกรณ์ที่จะนำมาต่อเพิ่ม โดยมีค่าความจุไฟฟ้าเท่ากับผลการจำลองเป็นไปได้อย่างถูกต้องเนื่องจากข้อจำกัดในการออกแบบประกอบสร้างเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมรวมถึงราคาที่สูงเพื่อให้ได้ค่าความจุไฟฟ้าตามที่ได้ทดลองดังกล่าว ดังนั้น จึงได้มีการเลือกใช้งานอุปกรณ์ที่นำมาใช้ทดแทนในบทความนี้คือ โวลต์จีโอไดโอดแบบตัวเก็บประจุซึ่งมีสำรองในโรงพัสตุเพื่อนำมาใช้แก้ปัญหา ซึ่งมีข้อดีคือ เป็นการลดงบประมาณในการแก้ไขปัญหารวมไปถึงลดระยะเวลาการดำเนินงานเมื่อเปรียบเทียบกันช่วงระยะเวลาในการสั่งผลิตตัวเก็บประจุไฟฟ้าใหม่ แต่มีข้อเสียที่กล่าวไปข้างต้นคือ จำเป็นต้องใช้หลายอุปกรณ์เพื่อนำมาเชื่อมต่อให้ได้ค่าความจุไฟฟ้าที่เหมาะสม

4. อภิปรายผลและสรุป

บทความฉบับนี้ได้นำเสนอแนวทางการแก้ปัญหาความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าของขดลวดคดขยี้ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังแบบข้อได้ ทิศ 300 kV อันเนื่องมาจากความไม่สมดุลของค่าความจุไฟฟ้าแฝง โดยทำการศึกษาค่าตัวแปรต่าง ๆ ในภาคสนามซึ่งได้แก่ ค่าความจุไฟฟ้าระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดคดขยี้ ค่าความจุไฟฟ้าระหว่างขดลวดคดขยี้เทียบกับกรวด รวมถึงขนาดและรูปคลื่นของแรงดัน โดยใช้โวลต์จีโอไดโอดแบบตัวเก็บประจุในภาคสนามเพื่อนำข้อมูลทั้งหมดดังกล่าวมาจำลองด้วยโปรแกรม PSCAD เพื่อหาค่าความจุไฟฟ้าของขดลวดคดขยี้เทียบกับกรวดที่เหมาะสมสำหรับการต่อขนานเพิ่มเติมเพื่อแก้ปัญหาความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้า จากผลการจำลองด้วยโปรแกรม PSCAD

พบว่าค่าความจุไฟฟ้าที่เหมาะสม คือ การต่อขนานตัวเก็บประจุไฟฟ้าซึ่งมีความจุไฟฟ้า 13 μF และ 39 μF สำหรับเฟส A และเฟส B ตามลำดับ โดยได้เลือกใช้หม้อแปลงวัดแรงดันแบบตัวเก็บประจุเพื่อใช้งานเป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้าสำหรับต่อขนานเพิ่มเติม โดยในคิดั้งจริง ค่าความจุไฟฟ้ามีค่า 14.87 μF และ 47.92 μF สำหรับเฟส A และเฟส B ตามลำดับ โดยได้ดำเนินการติดตั้งจริงบนฐานโครงเหล็ก หลังจากนั้นได้มีการวัดขนาดแรงดันที่บัส 22 kV ซ้ำอีกครั้งเพื่อยืนยันผลการจำลอง ผลการวัดพบว่าขนาดแรงดันไฟฟ้าแต่ละเฟสมีความสมดุลซึ่งรวมถึงไม่ทำให้เกิดแรงดันเกินเกิดขึ้น และไม่พบจุดร้อนที่กับดักเสิร์จที่เชื่อมต่อกับขดลวดคดขยี้ ซึ่งทำให้เพิ่มเสถียรภาพและความน่าเชื่อถือของการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย สำหรับการมอบ โอกาสในการศึกษาวิจัยเพื่อการเขียนงานวิจัยฉบับนี้ ขอขอบคุณกองวิเคราะห์ระบบไฟฟ้า ฝ่ายระบบควบคุมและป้องกัน สำหรับการช่วยเหลือในการจำลองด้วยโปรแกรม PSCAD ขอขอบคุณหน่วยงานที่เกี่ยวข้องในโครงการสถานีไฟฟ้ารังน้อย ขอขอบคุณบริษัท PD Solution Co., Ltd. สำหรับทุนการศึกษาและทำวิจัยขอขอบคุณน้อง ๆ ในห้องปฏิบัติการวิจัยฉนวนและวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง (D&L Lab) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ช่วยสนับสนุนงานวิจัยของข้าพเจ้า โดยเฉพาะอย่างยิ่ง นายศิวกร จินเมือง, นายปัทม์ อุดมลักษณะานนท์, นายโกมินทร์ ชุมทิบูลย์, นายกฤษดา ดอกไม้ และ นายวิศนันทน์ โรจนสุนันท์


เอกสารอ้างอิง

- [1] Martin Heathcote, "J & P Transformer Book," 13th Edition, 2018.
- [2] Fang Zhu, Baitun Yang, "Power Transformer Design Practices," CRC Press, 2021.
- [3] K.R.M. Nair, "Power and Distribution Transformers: Practical Design Guide," CRC Press, 2021.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [4] Andrea Küchler. *High Voltage Engineering Fundamental-Technology-Applications*. Germany : Springer-Verlag GmbH. 2018.
- [5] E. Kuffel, W.S. Zaengl, and J. Kuffel, *High Voltage Engineering: Fundamentals*. Butterworth-Heinemann, Second edition 2000.
- [6] S. Sangkaranad, "High Voltage Engineering", Third Edition, Bangkok, 2006. (in Thai)
- [7] L. Tang and P. Zhao, "Tertiary Voltage Unbalance Compensation for 500kV Single Phase Autotransformer Banks," 2018 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), Denver, CO, USA, 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/TDC.2018.8440349.
- [8] Yong Yang et al, "Analysis of imbalanced voltage on 35 kV side after single phase replacement of 500 kV transformer," *J. Phys.: Conf. Ser.* 2369 012065, 2022.
- [9] Mosi Liu, Zhiyuan Sun, "Research on Single-phase Replacement of 500 kV Transformer based on PSCAD," *Proceedings of the 2017 6th International Conference on Energy and Environmental Protection (ICEEP 2017)*.
- [10] Paul M. Anderson, "Power System Protection," McGraw-Hill, 1999.
- [11] Keerati Chayakulkhoeree, "EEG456 Electrical Power System Protection and Relays," Lecture note, Sripatum University (in Thai).
- [12] "PSCAD™, Power System: Computer Aided Design," User's Guide, 2018.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 
2. S. Suksagoolpanya, and N. Pattanadech, " Condition Monitoring Test Techniques for Medium Voltage OIP Bushings," 7th International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology (ICEAST), Pattaya, Thailand, 2021, pp. 245-248.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Condition Monitoring Test Techniques for Medium Voltage OIP Bushings

Suthat Suksagoolpanya
Electrical Engineering Department,
Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology
Ladkrabang,
Bangkok, Thailand
62601052@kmitl.ac.th

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

Abstract— A bushing is one of the most important parts of a transformer. Failure of the bushing may cause the transformer destruction, which can lead to the failure of the electrical power system. Therefore the insulation monitoring of the bushings is essential.

This paper investigates the approximate 30 years in serviced medium voltage bushings. The 5 units of aged and deteriorated bushings were removed from the electrical power system, and the electrical testing was performed. The electrical testing included the insulation power factor (IPF) testing and the polarization and depolarization current measurement (PDC).

The test results showed that the IPF of the main insulation was increased approximately 1-10 times from the nameplate values and the initial currents of PDC measurement were high for all bushings compared with initial currents of PDC measurement of the good bushing insulation condition from the database. From the test results, the combined test techniques between the power factor testing and the PDC measurement provided useful data for the insulation condition diagnosis of the service bushings.

Keywords—OIP bushing, condenser bushing, power transformer, insulation power factor

I. INTRODUCTION

Electricity Generating Authority of Thailand (EGAT), the only utility responsible for generation and transmission in Thailand, supplies electricity to distribution systems at voltage levels of 22, 24, and 33 kV. EGAT systems have transformers that step the transmission voltage levels down to the distribution voltage levels. The low voltage sides of those transformers are equipped with OIP condenser bushings with rated voltage of 25 and 34.5 kV, as well as the tertiary bushings of tie transformers which have the same rating. Combining all 25 kV and 34.5 kV bushings used in EGAT systems could be in the order of some hundreds of units.

For power transformers, bushing plays an important role. Generally, the bushing comprises the conductor, which leads current to power transformers and the insulation between high voltage conductor and metal tank. Various types of the main bushing insulation are used, for example, oil-impregnated paper (OIP) and resin-impregnated paper (RIP).

EGAT performs time base condition monitoring (TCBM) [1] of bushings by the insulation power factor test. The tests are performed together with the other parts of such a transformer. The initial measurement or nameplate value of the insulation power factor will be considered as a reference value, and the second test will be performed when the bushings have been in service for one year. Then the following measurement will be done before the guarantee of transformer

expires, and after that, the insulation power factor test of bushings will be repeated every six years.

If the value of the measured insulation power factor becomes double from the nameplate value, then the follow-up test shall be performed every six months. If the insulation power factor of a bushing becomes triple from the nameplate but not exceeds 1%, then the bushing should be removed from service. If the insulation power factor of a bushing exceeds 1%, then the bushing should be removed from service immediately.

Polarization and depolarization current (PDC) measurement is a non-destructive testing method that can indicate the deterioration of the insulation by analyzing the insulation behavior. PDC measurement is a quite new test technique applied for insulation testing performing in Thailand. In this research work, PDC measurement was also used for bushing insulation testing.

II. EXPERIMENTAL PROCEDURE

A. Oil Impregnated-paper (OIP) Bushing

Ten oil-impregnated paper bushings were removed from service. Five of them had the maximum voltage for equipment (U_m) of 34.5 kV. The others were 25 kV, as shown in Fig. 1.



(a)



(b)

Fig. 1. 25 kV OIP bushings (a) and 34.5 kV OIP bushing (b) which removed from the system due to the increase of dissipation factor over the limit of EGAT criteria.

B. Insulation Power Factor (IPF) Test

Insulation can be explained as a circuit, as shown in Fig. 2., including parallel resistance (R_p) and capacitance (C_p). The resistance represents the loss of insulation. The insulation power factor is the ratio of real power to apparent power as represented in the equation below.

$$P = S \cdot \cos \theta \tag{1}$$

$$\cos \theta = \frac{P}{S} \tag{2}$$

or the ratio of resistive current (I_R) to total current (I_{tot}), as shown in Fig. 2.

$$\cos \theta = \frac{I_R}{I_{tot}} \tag{3}$$

In addition, IPF values can be calculated to percentage form (%IPF)

$$\%IPF = \cos \theta \times 100 \tag{4}$$

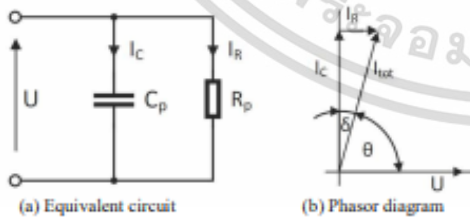


Fig. 2. Principle of insulation power factor test [2].

The insulation power factor test can reliably indicate moisture in a bushing. The low initial values of the IPF indicate that bushings are still in good condition. Increasing of insulation power factor is evidence of changing in dielectric characteristics, the damaging condition is developing.

The main insulation (C_1) of the bushing was measured by using the ungrounded specimen test (UST) [3] shown in Fig. 3. with the test voltage of 10 kV, whereas the tap insulation (C_2) of the bushing was performed by using the grounded specimen test with guard (GST-Guard) [3] shown in Fig. 4. with the test voltage of 1.5 kV.

The results of the insulation power factor of C_1 were corrected to the 20 °C temperature condition for comparison with the previous test by using the correction factor specified in [3, 4]. The test results of all sample bushings are listed in Table 1.

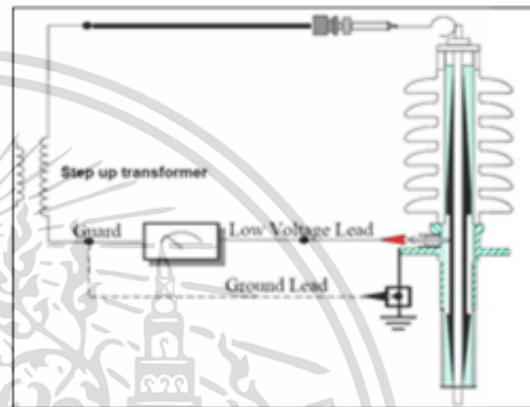


Fig. 3. Test set-up for the C_1 measurement according to [3] with the ungrounded specimen test (UST).

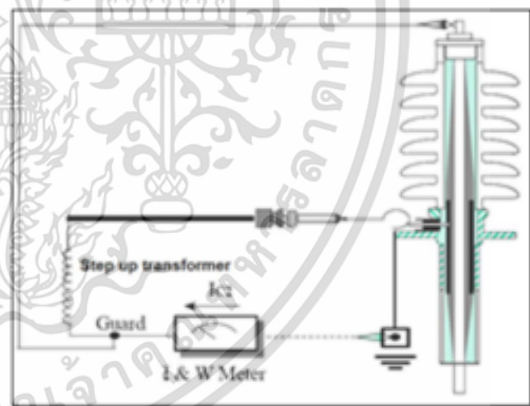


Fig. 4 Test set-up for the C_2 measurement according to [3] with the grounded specimen test with guard (GST-Guard).

TABLE 1. RESULTS OF INSULATION POWER FACTOR (IPF)

Bushing no.	U_m (kV)	Nameplate's %IPF	%IPF of C_1 at 20°C	%IPF of C_2 at T_m
1	34.5	0.23	0.81	0.62
2	34.5	0.23	0.54	0.51
3	34.5	0.23	0.57	0.77
4	34.5	0.23	0.73	1.00
5	34.5	0.23	1.01	1.13
6	25.0	0.26	1.06	1.06
7	25.0	0.26	1.21	1.27
8	25.0	0.26	1.11	1.30
9	25.0	0.26	0.66	1.45
10	25.0	0.26	0.65	1.21

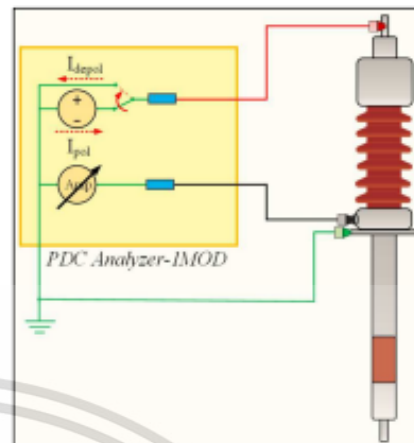


Fig. 5. Diagram of PDC measurement circuit of the bushing.

C. Polarization and Depolarization Current (PDC) Measurement [5-8]

PDC measurement is performed to measure the polarization current when the DC voltage source is applied, and then the depolarization current when disconnecting the DC voltage source by which the test object was shorted circuit immediately. The diagram of PDC measurement for the bushing test is shown in Fig. 5.

The polarization current is given by the following equation:

$$i_{pol} = \frac{U_0}{R_0} \sum_{i=1}^n \left(\frac{U_0}{R_i} e^{-\frac{t}{R_i C_i}} \right) \quad (5)$$

whereas the depolarization current is also given by the equation below:

$$i_{dipol}(t) = \sum_{j=1}^n \left(A_j e^{-\frac{t}{R_j C_j}} \right) \quad (6)$$

Where:

$$A_j = \frac{U_0}{R_j} (1 - e^{-\frac{t}{R_j C_j}}) \quad (7)$$

U_0 is applied DC voltage

R_0 is DC resistance

C_0 is capacitance

For each bushing, the main insulation was discharged by grounding the center conductor and the flange for 12 hours before charging them by a 1000 V, DC voltage, for 1000 seconds. The current during this period is called "polarization current." After that, they were disconnected from the power supply to discharge. The current during this discharging is called "depolarization current." The set-up of PDC measurement is shown in Fig. 6., and the test results are shown in Fig. 7-8. and listed in Table 2.



Fig. 6. Test set-up of PDC measurement.

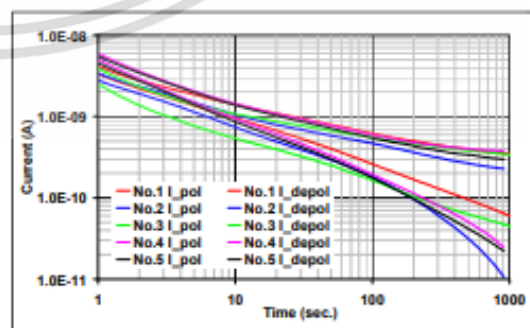


Fig. 7. Polarization and depolarization current measurement of bushing no.1-5.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

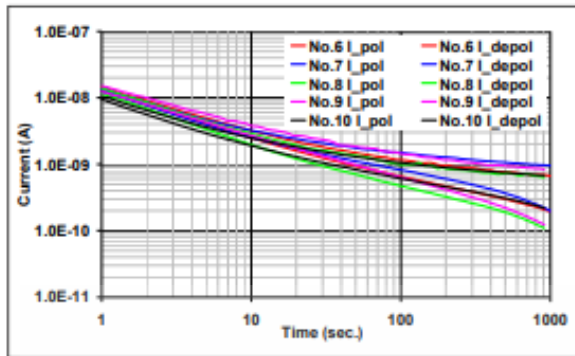


Fig. 8. Polarization and depolarization current measurement of bushing no.6-10.

TABLE II. RESULTS OF POLARIZATION AND DEPOLARIZATION MEASUREMENT

Bushing no.	Moisture content in paper (%)	DDF at 1 Hz (%)	C ratio of 1 mHz/1 Hz
1	1.0	0.36	1.14
2	1.0-1.5	0.27	1.12
3	1.0-1.5	0.47	1.14
4	1.0	0.58	1.16
5	1.0-1.5	0.50	1.15
6	1.5	0.72	1.19
7	1.5	0.65	1.17
8	1.0	0.63	1.16
9	1.5	0.69	1.23
10	1.5	0.53	1.14

III. EXPERIMENT RESULTS

Table I shows the test results of insulation power factor measurement at 20 °C by which the multiplying factor 1.05 was used for the ambient temperature of 30°C [3]. The results of C_1 ranged from 1-4.6 times over the nameplate value. The results of C_2 ranged from 0.62%-1.45%, which were lower than the consideration point specified in [9]. The results of C_2 were presented at the test temperature. The results of the insulation power factor indicate that the insulation was degraded, but the root causes of degradation could not specify since the insulation power factor test represent the overall condition of the insulation. Generally, if the external moisture is the cause of degradation, the insulation power factor of C_2 will increase accordingly.

Table II and Fig. 7 and 8 present the results of PDC measurement. The moisture in the paper of all sample bushings evaluated by the PDC software ranged from 1.0 % - 1.5 %, and the DDF at 1 Hz, sensitive to the moisture content in the paper, were high, which correspond to the

evaluated moisture content in the paper, except for the bushing no. 1-3, the DDF at 1 Hz of them were lower value. The ratio of C at 1 mHz to 1 Hz of all sample bushings was similarly which was below 1.50. The moisture content in the paper, DDF at 1 Hz and the ratio of capacitance showed that the major cause of aging did not come from the insulating paper.

IV. CONCLUSION


Insulation power factor testing can indicate the degradation of the insulation but unable to specify its causes. In this research work, the PDC was performed to ensure whether the major cause of aging was from the insulating paper or not. From the results, it indicated that the insulation was degraded, but its major cause did not from the insulating paper.

ACKNOWLEDGMENT

Authors thank PD solutions and Plan Market Gold CO., LTD. for providing the budget to support the labor work in Dielectric Analytika laboratory. Special thanks for Miss Thanpilin Banthoengjai, Mr. Siwakorn Jeenuang, Mr. Sakkarin Turatham and Miss Nichaya Soubol to prepare some works

REFERENCES

- [1] Cigre WG A2.34: "Guide for transformer maintenance", Technical Brochure 445, France, 2011
- [2] A. Mikulecky and Z. Süh, "Influence of temperature, moisture content and ageing on oil impregnated paper bushings insulation," in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 20, no. 4, pp. 1421-1427, August 2013
- [3] Doble Engineering Company: "Test-data reference book", TDRB-292, USA, 1992
- [4] IEEE C57.19.100-1995(R2003): "IEEE Guide for application of power apparatus bushings"
- [5] Andreas Küchler, High Voltage Engineering: Fundamentals–Technology–Applications. Springer Berlin Heidelberg, 2017, Chapter 4.
- [6] E. Kuffel, W.S. Zaengl, and J. Kuffel, High Voltage Engineering: Fundamentals. Butterworth-Heinemann, Second edition 2000, Chapter 7.
- [7] K. Thungsook, N. Phumipunepon, T. Woribong, W. Methavithit, W. Vittayakorn and N. Pattanadech, "Polarization and Depolarization Current Characteristics of Thermally Stressed Stator Coils," 2020 8th International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), Phuket, Thailand, 2020
- [8] S. A. Bhumrwat, "Insulation condition assessment of transformer bushings by means of polarisation/depolarisation current analysis," Conference Record of the 2004 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Indianapolis, IN, USA, 2004
- [9] IEC 60137: "Insulated bushing for alternating voltages above 1000 V", 5th edition

- 
3. S. Suksagoolpanya, and N. Pattanadech, " Unrepeated of Test Tap Capacitance for installed New RIP Bushings," 7th International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology (ICEAST), Pattaya, Thailand, 2021, pp. 261-263.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Unrepeated of Test Tap Capacitance for Installed New RIP Bushings

Suthat Suksagoolpanya
Electrical Engineering Department,
Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology
Ladkrabang,
Bangkok, Thailand
62601052@kmitl.ac.th

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

Abstract— Capacitance testing is the most important for the service bushing condition assessment. However, for the new Resin Impregnated Paper (RIP) bushing used in EGAT, the repeatable test result quite deviates. The aim of this paper is to investigate the root cause of the unrepeated testing values of the test tap capacitance for the installed new RIP bushings compared with factory values. The measurement results of test tap capacitance were collected from ten installed 123 kV bushings. Those results deviated from the factory values of approximately 33%. A new RIP bushing was used to set up the laboratory test experiment. The laboratory test used a portable insulation power test set to measure the test tap capacitance. The aluminum foil and the sheet metal were used to wrap around the bottom part of the bushing for simulation of the ground electrode and leakage current guarding. Onsite measurement was performed with an installed bushing with BCT (bushing current transformer) by grounding BCT and guarding of the leakage current of BCT. It was found that the test tap capacitance was decreased with increasing the diameter of the simulated ground electrode and decreased with the application of the leakage current guarding. The test results showed that the bottom part of the RIP bushings without the ground sleeve and conditions of BTC such as the diameter of bushing pocket, installation with or without BCT mainly impacted the unrepeated test tap capacitance.

Keywords—OIP bushing, condenser bushing, power transformer, insulation power factor

I. INTRODUCTION

A transformer is the main equipment used in the power system. Transformers consist of various types of the components such as bushing, solid insulation, liquid insulation, protection equipment, and so on [1-2]. From the failure statistic of the transformers. The failure of bushing always leads to the complete destruction of the transformers. Therefore, bushing maintenance is a very important task that has to perform with the correct procedure.

To evaluate the bushing conditions, the dielectric loss factor, the main capacitance (C_1), and the test tap capacitance (C_2) need to be tested [3-5].

In the Electricity Generating Authority of Thailand (EGAT), Resin impregnated paper (RIP) bushings have been introduced to replace oil-impregnated paper (OIP) bushings in the electrical power system. However, after service of RIP bushing for some periods, the test tap capacitance of most RIP bushing largely deviated from the original value tested in the factory.

II. TEST TAP CONSTRUCTION OF BUSHING

Bushing test tap capacitance is the testing point of the bushings for dissipation factor and partial discharge measurement. Bushing test tap capacitance is from capacitance between the external layer of the grounding conductor and the flange, as shown in Fig. 1. by which the test tap and the voltage tap structure are presented.

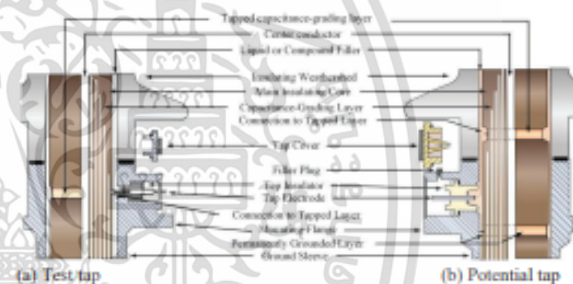


Fig. 1. The basic construction of a bushing with (a) test tap and (b) potential tap.

III. EXPERIMENTAL OF BUSHINGS

A. Onsite Test Tap capacitance

The test tap capacitance (C_2), including the power factor of RIP bushings of power transformers with the maximum voltage for equipment (U_m) of 123 kV were onsite measurement which is summarized in Table 1.

The measured test tap capacitances deviated from the nameplate value of about 32.56 %. Besides, three bushing shows quite higher values of the test tap capacitances. Fig.2 demonstrates the onsite test tap capacitances and their nameplate.

TABLE II TEST TAP CAPACITANCE AND POWER FACTOR OF THE BUSHING SPECIMEN RATED OF 123 KV

Location	Type	Phase	Serial No.	C ₂ (pF)		% dev.	%PF C ₂	
				Factory test	Site test		Factory test	Site test
Chaengwattana Substation KT1A	SETFT 550-123-AE3B Spez.	X1	N0210665	183	232.46	27.03	0.70	0.682
		X2	N0210663	183	233.31	27.49	0.70	0.706
		X3	N0210673	183	233.95	27.84	0.70	0.664
Saraburi 2 Substation KT4A		X1	N0210671	186	242.55	30.40	0.70	0.589
		X2	N0210666	188	245.04	30.34	0.70	0.655
		X3	N0210667	189	244.93	29.59	0.70	0.644
Sam Phran 1 Substation KT1A	SETFT 550-123-AE2B Spez.	X1	N0210661	188	270.77	44.03	0.70	0.460
		X2	N0210653	185	269.29	44.56	0.70	0.465
		X3	N0210637	185	270.76	46.36	0.60	0.465
Sam Phran 1 Substation KT2A		X1	N0210652	189	240.22	27.10	0.70	0.530
		X2	N0210644	190	238.9	25.74	0.90	0.530
		X3	N0210632	187	251.75	34.62	0.70	0.500
Chiang Mai 3 Substation KT3A	X1	N0210660	190	239.36	25.98	0.90	0.997	
	X2	N0210659	190	248.27	30.67	0.00	0.679	
	X3	N0210657	188	245.73	30.71	0.70	0.674	
Chiang Mai 3 Substation KT4A	X1	N0210645	177	234.91	32.71	0.70	0.569	
	X2	N0210646	177	238.09	34.51	0.60	0.548	
	X3	N0210636	180	243.82	35.45	0.60	0.705	

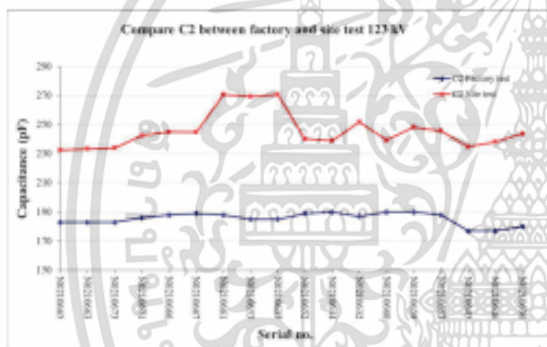


Fig. 2. Test tap capacitance from factory test and site test.

From the test results, in the case of the bushing was uninstalled with the transformers, the test tap capacitance value deviated from the nameplate up to 15.51 %. If the aluminum foil was wrapped around the bottom part of the bushing and aluminum foil was grounded, the test tap capacitance value deviated from the nameplate up to 134.9 %, and if the aluminum foil was guarded, the deviation value was reduced to 6.02 %. For another bottom part structure, the aluminum foil was replaced by the metal sheet. If the metal sheet was guarded, the test tap capacitance value deviated from the nameplate up to 31.12 %, and if the metal sheet was guarded, the deviation value was reduced to 8.78 %. The bushings encapsulated by the aluminum foil and the metal sheet are shown in Fig. 3. and Fig. 4, respectively.

B. Laboratory Test for Test Tap Capacitance of the Bushing Specimens

The capacitance value while using aluminum foil wrapped around the bottom part of the bushing was investigated and then compared with the test tap capacitance values from the nameplate are summarized in Table 2.

TABLE II TEST TAP CAPACITANCE VALUES WITH VARIOUS TEST CONDITIONS

Serial no.	C ₂		% Dev.	% PF C ₂		Test condition
	Factory test	Site test		Factory test	Site test	
N0210662	196	226.4	15.51	0.70	3.26	Without aluminum foil
	196	460.4	134.9	0.70	1.70	Grounded aluminum foil
	196	207.8	6.02	0.70	3.20	Guarded aluminum foil
	196	257.0	31.12	0.70	3.70	Grounded sheet metal
	196	213.2	8.78	0.70	3.30	Guarded sheet metal

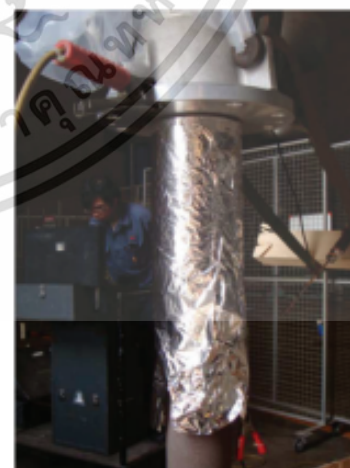


Fig. 3. The extended diameter of the bottom part of the bushing with the aluminum foil.



Fig. 4. The extended diameter of the bottom part of the bushing with the sheet metal.

C. Field Test for Test Tap Capacitance of the Bushing Specimens with Bushing Current Transformer (BCT)

Test tap capacitance of the bushing equipped with the Bushing Current Transformer (BCT) inside the transformer was investigated. One terminal of the BCT secondary winding was grounded at the control cabinet of transformers. The other was connected to a conductor for connecting to the meter or relay in the control room.

Table 3. summarizes the test tap capacitance of the bushing obtained from the onsite test. With guarded BCT, the test tap capacitance deviated from the nameplate values up to 26.35 %, and without guarded BCT, the test tap capacitance deviated from the nameplate values up to 13.60 %.

TABLE III. CAPACITANCE WITH GUARDED BCT AND WITHOUT GUARDED BCT

Serial no.	C_1 (pF)		% dev.	%PF C_2		Test condition
	Factory test	Site test		Factory test	Site test	
N0210662	196	247.7	26.35	0.70	0.63	Without guarded BCT
	196	222.7	13.60	0.70	0.69	Guard BCT

IV. DISCUSSION

To much more understand the mentioned problem, the stray capacitance of the BCT and the bushing socket was considered, and then the experiments were set. The test results pointed that the large deviation of the test tap capacitance obtained from the onsite test and the nameplate value should be due to the existences of the additional stray capacitances between the BCT and the bushing core under the flank inside the transformer tank, as shown in Fig. 6.

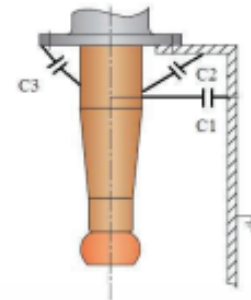


Fig. 5. Bushing stray capacitance in normal case.

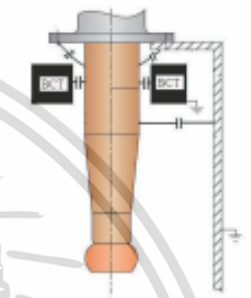


Fig. 6. Additional bushing stray capacitances due to BCT.

From the test results in Table 2. and Table 3, the test tap capacitance C_2 deviated from the nameplate. Besides, the power factor of the capacitance C_2 did not show the intrinsic insulation condition between the last conducting layer of the grading capacitor and bushing flange.

V. CONCLUSION

From the test result, the onsite test tap capacitance value of RIP bushing deviated from the factory test up to 46%. The root cause of such a large deviation was examined. It was found that such deviation was caused by the existence of the additional stray capacitance due to the bushing socket structure and the bushing current transformers equipped with the bottom side of the RIP bushing inside the transformers.

ACKNOWLEDGMENT

Authors thank PD solutions and Plan Market Gold CO., LTD. for providing the budget to support the labor work in the Dielectric Analytika laboratory. Special thanks to Miss Thanpilin Banthoengjai, Mr. Siwakorn Jeenuang, Mr. Sakkarin Turatham, Miss Nichaya Soubol, and Mr. Noppol Yodrayub to prepare some works.

REFERENCES

- [1] Andreas Küchler, High Voltage Engineering: Fundamentals-Technology-Applications. Springer Berlin Heidelberg, 2017, Chapter 4.
- [2] E. Kuffel, W.S. Zaengl, and J. Kuffel, High Voltage Engineering: Fundamentals. Butterworth-Heinemann, Second edition 2000, Chapter 7.
- [3] EGAT document, "Transformer testing standard," 2549
- [4] IEEE C57.19.100-1995(R2003): "IEEE Guide for application of power apparatus bushings."
- [5] D.J. Kopaczynski and S.J. Manifase, "The Doble Tap-Insulation Test For Bushing (A Review)," Test data reference book, 1992, pp. 2-1.1-2-1.15.

ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-นามสกุล	นายสุทัศน์ สุขสกุลปัญญา
วัน เดือน ปีเกิด	4 สิงหาคม 2524 ที่เชียงใหม่
ที่อยู่	90/104 หมู่ 11 ตำบลบางพลีใหญ่ อำเภอบางพลี จังหวัดสมุทรปราการ 10540
ประวัติการศึกษา	2548 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า เกียรตินิยมอันดับหนึ่ง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1.) การทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง 2.) การทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงในสนาม
ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย	
- ประสบการณ์การทำงาน	
พ.ศ. 2549-2558	วิศวกร ประจำแผนกทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง กองทดสอบไฟฟ้าแรงสูง ฝ่ายบริหารจัดการสินทรัพย์ระบบส่ง การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
พ.ศ. 2559-ปัจจุบัน	หัวหน้าแผนกทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง กองทดสอบไฟฟ้าแรงสูง ฝ่ายบริหารจัดการสินทรัพย์ระบบส่ง การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
- ผลงานวิจัย	
พ.ศ. 2556	งานประชุมวิชาการ 18 th International Symposium On High Voltage Engineering (ISH 2013) กรุงโซล ประเทศเกาหลีใต้ - การวิเคราะห์อายุและการเสื่อมสภาพของ 25 kV และ 34.5 kV OIP บุชชิ่งใน กฟผ.
พ.ศ. 2564	งานประชุมวิชาการ ICEAST 2022 กรุงเทพฯ - การศึกษาเทคนิคการทดสอบเพื่อเฝ้าระวังสภาพนวนของ OIP บุชชิ่งระดับแรงดันสูงปานกลาง - การศึกษาการไม่เข้าค่าของค่าคาปาซิแตนซ์ของเทสแทป (Test tap) ใน RIP บุชชิ่งที่ติดตั้งใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้