

การศึกษาปัญหาและเทคนิคการบรรเทาผลกระทบของความจุไฟฟ้าแบบไม่สมดุลใน หม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟสขนาดพิกัดแรงดัน 500 kV

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

สุทัศน์ สุขสกุลปัญญา* และ นรเศรษฐ์ พัฒนเดช

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์,

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ลาดกระบัง ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

Suthat Suksagoolpanya* and Norasage Pattanadech

Department of Electrical Engineering, School of Engineering,

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

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

Received: Aug 17, 2023; Revised: Dec 19, 2023; Accepted: Jan 08, 2024

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาผลกระทบจากความไม่สมดุลของค่าความจุไฟฟ้าแฝงของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง พิกัด 500 kV รวมถึงกำหนดแนวทางบรรเทาผลกระทบ หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังดังกล่าวถูกใช้งานในสถานีไฟฟ้าวังน้อยสำหรับส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า โดยเป็นหม้อแปลงเฟสเดียวจำนวน 3 ลูก เนื่องจากก่อนหน้านี้ หม้อแปลงไฟฟ้าเฟส B เกิดความล้มเหลว ทำให้ต้องมีการสั่งผลิตหม้อแปลงไฟฟ้าลูกใหม่เข้ามาแทนที่ โดยเมื่อนำหม้อแปลงไฟฟ้าที่ผลิตใหม่เข้ามาแทนที่พบว่าเกิดจุดร้อนขึ้น ณ บริเวณกับดักเสิร์จที่ฝั่งตติยภูมิ (พิกัด 22 kV) ของหม้อแปลงไฟฟ้ารวมไปถึงพบว่ามีแรงดันไฟฟ้าที่ฝั่งดังกล่าวมีความไม่สมดุล จึงทำให้เกิดแรงดันเกินซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดจุดร้อนดังกล่าว จากการสืบค้นหาโดยละเอียดพบว่า สาเหตุของปัญหาเกิดจากค่าความจุไฟฟ้าระหว่างขดลวดตติยภูมิเทียบกับแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้ามีความไม่สมดุล เนื่องจากหม้อแปลงไฟฟ้าที่สั่งผลิตใหม่มีการออกแบบโครงสร้างที่แตกต่างจากหม้อแปลงไฟฟ้าเดิมของ 2 ลูกที่เหลือ ดังนั้น การแก้ปัญหาคือจำเป็นต้องเพิ่มค่าความจุไฟฟ้าด้วยตัวเก็บประจุเข้าไปขนานกับขดลวดตติยภูมิเทียบกราวด์ โดยได้มีการจำลองโดยใช้โปรแกรม PSCAD เพื่อจำลองถึงค่าความจุไฟฟ้าที่ต้องต่อเพิ่มเข้าไปจนได้ค่าที่เหมาะสมโดยใช้วิธีการทำซ้ำ ซึ่งก็ทำให้แรงดันไฟฟ้าทั้ง 3 เฟส มีค่าสมดุลและไม่มีแรงดันเกินเกิดขึ้น โดยตัวเก็บประจุที่เลือกใช้ในบทความฉบับนี้คือ หม้อแปลงวัดแรงดันแบบตัวเก็บประจุ ซึ่งได้มีการติดตั้งใช้งานจริง จากผลการแก้ไขปัญหามพบว่าแรงดันไฟฟ้าที่บัส 22 kV มีความสมดุลมากขึ้น รวมถึงไม่ทำให้เกิดแรงดันเกินและไม่ตรวจพบจุดร้อนขึ้นที่กับดักเสิร์จที่เชื่อมต่อกับขดลวดตติยภูมิ 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 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 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.

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

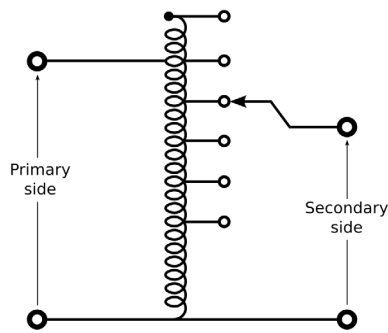
1. บทนำ

หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังมีบทบาทที่สำคัญอย่างมากในระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากำลัง โดยทำหน้าที่แปลงระดับแรงดันขึ้นหรือลงเพื่อให้เหมาะสมกับที่ระบบแรงดัน ซึ่งขึ้นอยู่กับระยะทางที่ใช้ส่งกำลังไฟฟ้า [1–3] เมื่อจำเป็นต้องส่งกำลังไฟฟ้าที่ระยะทางไกลขึ้น ก็จำเป็นต้องใช้แรงดันไฟฟ้าที่ระดับสูงขึ้นในการส่งจ่าย [4–6] โดยในประเทศไทย ณ ปัจจุบันผลิตแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสูงสุดของระบบส่งจ่ายได้แก่ พิกัด 500 kV ยกตัวอย่างเช่น เริ่มต้นส่งกำลังไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง เพื่อส่งมายังภาคกลาง รวมถึงภูมิภาคอื่น ๆ เป็นต้น ดังนั้นระหว่างเส้นทางสายส่งที่ผ่านมายังจังหวัดต่าง ๆ จึงจำเป็นต้องมีสถานีไฟฟ้าเพื่อทำหน้าที่ควบคุมและลดระดับแรงดันไฟฟ้าโดยผ่านหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังเพื่อส่งจ่ายในภูมิภาคโดยรอบสถานีไฟฟ้านั้น ๆ

หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่พิกัด 500 kV ในระบบส่งจ่ายซึ่งอยู่ภายใต้การดูแลของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยจะนิยมใช้เป็นหม้อแปลงเฟสเดียวมาเชื่อมต่อด้วยกันจำนวน 3 ลูก สำหรับใช้งานในระบบไฟฟ้า 3 เฟส เพื่อเพิ่มเสถียรภาพในระบบไฟฟ้า เนื่องจากหากมีความล้มเหลวของหม้อแปลงเฟสใดเฟสหนึ่งเกิดขึ้นก็จะสามารถเปลี่ยนทดแทนด้วยหม้อแปลงลูกสำรองได้ และเหตุผลเรื่องขนาด

ของหม้อแปลงไฟฟ้าซึ่งหากเป็นประเภท 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

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



รูปที่ 1 ขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบออโต้

ข้อดีของการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าแบบออโต้เมื่อเทียบกับการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแยกขดลวดทั่วไป คือ การประหยัดขนาดของหม้อแปลงไฟฟ้า ลดความสูญเสียที่เกิดขึ้นจากหม้อแปลงไฟฟ้า ทำให้การควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้า (Voltage Regulation) ที่ดีกว่า และใช้ขนาดกระแสกระตุ้น (Excitation Current) ที่น้อยกว่า [3] อย่างไรก็ตาม หม้อแปลงไฟฟ้าแบบออโต้ก็จะมีข้อเสียในเรื่อง การรับความเครียดที่สูงเนื่องจากกระแสลัดวงจร (Short Circuit Current) และเนื่องจากการรับแรงดันเกินเสิร์จที่สูงเนื่องจากขดลวดทั้งสองไม่ได้แยกอิสระออกจากกัน [3]

นอกจากนี้ ขดลวดปฐมภูมิ (ฝั่งแรงดันสูง) และขดลวดทุติยภูมิ (ฝั่งแรงดันต่ำ) ของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบออโต้จะมีการเชื่อมต่อแบบสตาร์ (Y) ดังนั้น จึงจำเป็นต้องมีขดลวดดักดินโดยมีวัตถุประสงค์คือ เพื่อลดผลของฮาร์มอนิกลำดับที่สามในระบบไฟฟ้า และ เพื่อใช้เป็นแหล่งจ่ายสำหรับจ่ายโหลดภายในสถานีไฟฟ้า [3] ซึ่งขดลวดดักดินของหม้อแปลงแบบออโต้จะมีรูปแบบการเชื่อมต่อแบบเดลต้า (Δ) โดยจะมีพิกัดแรงดันซึ่งเป็นระดับแรงดันของระบบจำหน่าย ได้แก่ 22 kV และ 33 kV (สำหรับภาคใต้ของประเทศไทย)

จากงานของ L. Tang และ P. Zhao [7] ได้นำเสนอการแก้ไขปัญหาแรงดันเกินที่เกิดขึ้นในขดลวดดักดินในหม้อแปลงไฟฟ้าเฟสเดียวพิกัด 500 kV เนื่องมาจาก ค่าความจุไฟฟ้าระหว่างขดลวดและค่าความจุไฟฟ้าเทียบกราวด์ของขดลวดดักดินมีความไม่สมดุล จึงมีการวางแผนในการปรับเปลี่ยนค่าความจุไฟฟ้าเทียบกราวด์ ของขดลวดดักดินโดยใช้หลักการทางทฤษฎีและการจำลองด้วยโปรแกรม EMTP ซึ่งการแก้ไขปัญหานี้จะใช้หม้อแปลงแรงดันชนิด

ตัวเก็บประจุสองตัวติดตั้งที่ขดลวดดักดินของหม้อแปลงไฟฟ้านี้ สุดท้ายแล้ว วิธีการนี้สามารถแก้ไขปัญหาความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าได้สำเร็จ และจากงานของ Yong Yang, et al. [8] ได้ศึกษาผลของค่าความจุไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าใหม่ที่นำมาแทนที่ซึ่งมีการออกแบบโครงสร้างแตกต่างจากหม้อแปลงไฟฟ้าเดิม ทำให้ค่าความจุไฟฟ้าแตกต่างจากเดิม โดยการวิจัยมีการวิเคราะห์โดยใช้วิธีการวิเคราะห์เวกเตอร์และการจำลองโมเดลด้วยโปรแกรม PSCAD ซึ่งพบว่า ผลของค่าความจุไฟฟ้าเทียบกราวด์และค่าความจุไฟฟ้าระหว่างขดลวดแรงดันสูงกับแรงดันต่ำที่แตกต่างกันของทั้งสามเฟสจะส่งผลให้เกิดความไม่สมดุลของระบบไฟฟ้าสามเฟสและเกิดแรงดันตกคร่อมที่นิวทรัลซึ่งสอดคล้องกันทั้งการคำนวณทางทฤษฎีและผลจากการจำลองด้วยโปรแกรม นอกจากนี้ จากงานของ Mosi Liu และ Zhiyuan Sun [9] ได้นำเสนองานวิจัยการแทนที่หม้อแปลงไฟฟ้าเฟสเดียวพิกัด 500 kV ที่เกิดความล้มเหลว โดยหม้อแปลงไฟฟ้าสำรองมีลักษณะที่แตกต่างกับหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้งานในระบบ จึงได้มีการจำลองการใช้งานในสถานะโหลดต่าง ๆ เพื่อศึกษาองค์ประกอบของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าลำดับลบทั้งที่สถานะคงตัว (Steady) และผลของกระแสไฟฟ้าลัดวงจรที่สถานะชั่วครู่ (Transient) ทั้งก่อนและหลังเปลี่ยนหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยโปรแกรม PSCAD พบว่า ผลขององค์ประกอบลำดับลบหลังแทนที่หม้อแปลงไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นแต่ไม่เกินค่าตามมาตรฐานกำหนด และกระแสไฟฟ้าลัดวงจรที่สถานะชั่วครู่หลังแทนที่หม้อแปลงไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่ไม่ได้ส่งผลต่อการตั้งค่านีเลย

โดยบทความฉบับนี้ได้มีการนำเสนอปัญหาของหม้อแปลงไฟฟ้าเฟสเดียวพิกัด 500 kV ภายใต้การดูแลของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตฯ ที่มีปัญหาการเกิดแรงดันเกินขึ้นและส่งผลกระทบต่อเครื่องจักรกลขึ้น เพื่อศึกษาการแก้ไขปัญหาดังกล่าวที่เกิดขึ้นและเป็นแนวทางในการปฏิบัติหากเกิดปัญหากรณีเดียวกันในอนาคต โดยวิธีการแก้ไขในบทความนี้นำเสนอการจำลองวงจรสมมูลที่มีการต่อตัวเก็บประจุภายนอกเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวด้วยโปรแกรม PSCAD และการนำผลการจำลองไปใช้ในการปฏิบัติจริง

2. หม้อแปลงไฟฟ้าที่ดำเนินการศึกษาวิจัย

หม้อแปลงไฟฟ้าที่กล่าวถึงในบทความฉบับนี้เป็นหม้อแปลงแบบออโต้ (Autotransformer) ซึ่งประกอบด้วย 3 ขดลวดได้แก่ ขดลวดปฐมภูมิ ขดลวดทุติยภูมิ และขดลวดตติยภูมิ ซึ่งมีพิกัดแรงดัน 525/√3, 230/√3 และ 22 kV ตามลำดับ โดยแสดงการติดตั้งหม้อแปลงไฟฟ้าทั้ง 3 ลูกดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 หม้อแปลงไฟฟ้าจำนวน 3 ลูก ที่ถูกติดตั้งในสถานีไฟฟ้าวังน้อย จังหวัดพระนครศรีอยุธยา

โดยในปี 2563 ได้เกิดเหตุการณ์ความล้มเหลวของหม้อแปลงไฟฟ้าเฟส B ทำให้จำเป็นต้องมีการนำหม้อแปลงไฟฟ้าลูกสำรองมาใช้งานแทนที่ แต่อย่างไรก็ตาม หม้อแปลงไฟฟ้าสำรองที่ผลิตตั้งแต่เริ่มต้นได้มีการถูกนำมาใช้งานก่อนหน้านี้แล้ว อันเนื่องมาจากความล้มเหลวครั้งก่อนหน้านี้ ดังนั้นหม้อแปลงสำรองที่นำมาใช้งานดังกล่าวจึงเป็นหม้อแปลงที่ผลิตใหม่ (ต่างผู้ผลิต) โดยข้อกำหนดของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ผลิตใหม่จะต้องออกแบบให้มีความใกล้เคียงการออกแบบของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเดิมให้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ อย่างไรก็ตามเมื่อนำหม้อแปลงไฟฟ้าลูกใหม่ที่ผลิตขึ้นมาใช้งาน พบว่าเกิดปัญหากระแสรั่วไหลที่ไหลผ่านกับดักเสิร์จมีขนาดที่สูงผิดปกติและตรวจพบจุดร้อนขึ้นที่กับดักเสิร์จเมื่อส่องด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน ซึ่งเกิดขึ้นที่กับดักเสิร์จที่ขดลวดตติยภูมิ จากนั้นทางผู้เขียนและคณะจึงได้มีการตั้งสมมติฐานถึงสาเหตุที่ทำให้เกิดปัญหาดังกล่าวขึ้น โดยมีสาเหตุความเป็นไปได้ ได้แก่ การเสื่อมสภาพของกับดักเสิร์จหรือการเกิดปัญหาความไม่สมดุลของแรงดันทำให้เกิดแรงดันเกิน รูปที่ 3 แสดงถึงร่องรอยความเสียหายจากความร้อนของกับดักเสิร์จ



รูปที่ 3 กับดักเสิร์จที่เกิดความเสียหายจากความร้อน

อย่างไรก็ตาม เมื่อทำการเปลี่ยนกับดักเสิร์จตัวใหม่ที่ผ่านการทดสอบคุณภาพตามมาตรฐานแล้วยังคงพบปัญหาดังกล่าว ดังนั้น สาเหตุของปัญหาจึงไม่ได้เกิดจากกับดักเสิร์จ แต่เกิดจากความไม่สมดุลของแรงดันทำให้เกิดแรงดันเกิน

หลังจากนั้น จึงทำการวัดขนาดและรูปคลื่นของแรงดันที่บัส 22 kV ซึ่งเชื่อมต่ออยู่กับขดลวดตติยภูมิหม้อแปลงไฟฟ้าแบบออโต้ทั้ง 3 ลูก โดยใช้ฮอสซิลโลสโคปเชื่อมต่อกับฝั่งแรงดันต่ำของหม้อแปลงวัดแรงดัน (Voltage Transformer) แสดงดังรูปที่ 4 หม้อแปลงวัดแรงดันดังกล่าวจะถูกใช้งานร่วมกับระบบป้องกันของรีเลย์ 59N ซึ่งเป็นรีเลย์ที่ใช้สำหรับตรวจจบบรรทัดโฟลด์สำหรับระบบที่เชื่อมต่อแบบเดลต้า [10],[11] ซึ่งจะไม่มีการวัดสำหรับตรวจจบบรรทัดเกิดเหตุการณ์โฟลด์ลิ่งกราวด์เหมือนระบบที่เชื่อมต่อแบบสตาร์



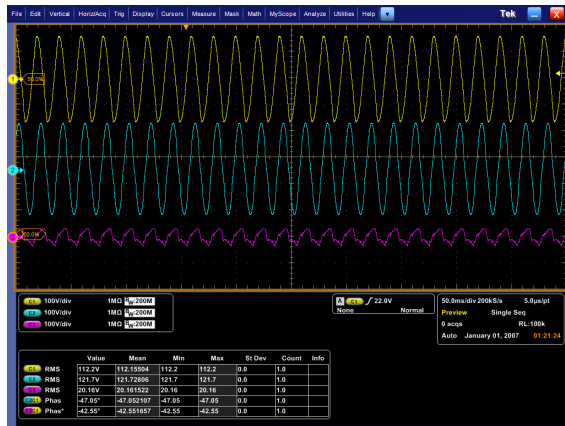
รูปที่ 4 การวัดขนาดและรูปคลื่นของแรงดันที่บัส 22 kV โดยใช้ฮอสซิลโลสโคปเชื่อมต่อกับขดลวดแรงต่ำของหม้อแปลงวัดแรงดัน

ผลการวัดขนาดแรงดันและมุมเฟสแสดงดังต่อไปนี้

- เฟส A เทียบกราวด์ 22.44∠0° kV,
- เฟส B เทียบกราวด์ 24.34∠-47.05° kV และ

- เฟส C เทียบกราวด์ $4.03 \angle -42.05^\circ$ kV

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



รูปที่ 5 ขนาดและรูปคลื่นของแรงดันที่บัส 22 kV

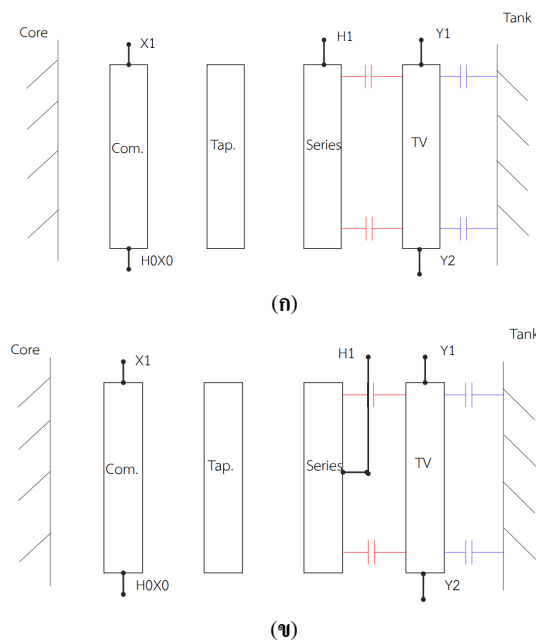
จากผลการวัดแรงดันพบว่าไม่มีแรงดันไม่สมดุลโดยตรวจพบแรงดันเกินที่เฟส A และ B ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้กับดักเสิร์จเกิดความร้อนสูงขึ้น ซึ่งมีความเป็นไปได้ที่จะเกิดจากผลของโครงสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าสำรองที่ผลิตใหม่ (ต่างผู้ผลิต) จึงได้มีการดำเนินการวัดค่าทางไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าทั้ง 3 ลูกเปรียบเทียบกัน โดยใช้เครื่องมือทดสอบ CPC 100 (Omicron) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่มีความสามารถในการวัดค่าแฟลคเตอร์ความสูญเสียในฉนวนรวมถึงค่าความจุไฟฟ้าของฉนวนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงได้ โดยได้ดำเนินการทดสอบโดยจ่ายแรงดันทดสอบกระแสสลับขนาด 10 kV พบว่าค่าความจุไฟฟ้าระหว่างขดลวดปฐมภูมิกับขดลวดตติยภูมิและค่าความจุไฟฟ้าระหว่างขดลวดตติยภูมิเทียบกับกราวด์มีความแตกต่างกัน แสดงผลการวัดดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้ของหม้อแปลงทั้ง 3 ลูก

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

จากตารางพบว่าค่าความจุไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าเฟส B ที่ผลิตใหม่มีความแตกต่างจากของหม้อแปลงไฟฟ้าเดิมอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับค่าความจุไฟฟ้าแฝงระหว่างขดลวดตติยภูมิเทียบกับกราวด์

โดยจากการตรวจสอบรูปแบบการออกแบบขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าทั้ง 2 ผู้ผลิต (เดิมและผลิตใหม่) แสดงดังรูปที่ 6 โดยจากรูป Com. คือ ขดลวดร่วม (Common winding) ซึ่งมีต้นขดลวด X1 เป็นขดลวดตติยภูมิ (230 kV), Tap. คือ ขดลวดสำหรับปรับแท็ปสำหรับปรับระดับแรงดันของลวดผ่าน On-Load Tap-Changer (OLTC), ขดลวด Series คือ ขดลวดฝั่งปฐมภูมิ (500 kV) โดยมี H1 เป็นต้นขดลวด และ TV คือ ขดลวดตติยภูมิ (22 kV) โดยมี Y1 เป็นต้นขดลวด



รูปที่ 6 โครงสร้างรูปแบบขดลวดของหม้อแปลง (ก) ผู้ผลิตเดิม (ข) ผู้ผลิตใหม่

จากรูปที่ 6 แสดงถึงความแตกต่างของโครงสร้างขดลวดภายในหม้อแปลงไฟฟ้า ค่าความจุไฟฟ้าแฝงดังรูปจะส่งผลกระทบทำให้เกิดการซ้อนทับกันของแรงดันไฟฟ้าอันเนื่องมาจากองค์ประกอบความจุไฟฟ้าเสมือนเป็นโวลต์เตจดีไวเซอร์ ซึ่งในสภาวะปกติที่หม้อแปลงไฟฟ้าทั้ง 3 เฟส มีโครงสร้างเหมือนกันก็จะทำให้ค่าความจุไฟฟ้าของทั้ง 3 เฟส

เท่ากัน องค์ประกอบแรงดันไฟฟ้าซ้อนทับ (Superimpose) ดังกล่าวก็จะชดเชยกันซึ่งสามารถสังเกตได้จากการที่แรงดันองค์ประกอบลำดับที่ศูนย์จะมีขนาดเป็นศูนย์

ซึ่งโดยทั่วไปแล้วหลักการในการถ่ายโอนแรงดัน (transferred voltage) จะมีหลักการอยู่ 2 ประเภท ได้แก่

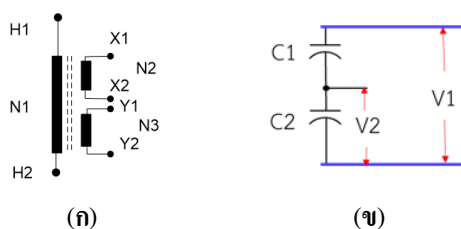
1) การถ่ายโอนแรงดันแบบเหนี่ยวนำ (Inductive): เป็นหลักการที่เมื่อมีกระแสไหลผ่านขดลวดจะสร้างฟลักซ์ไปเกี่ยวข้องกับขดลวดอีกฝั่งหนึ่ง ซึ่งระดับแรงดัน (V_1 , V_2) ที่เกิดการเหนี่ยวนำจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของจำนวนรอบขดลวดทั้งสอง (n_1 , n_2) โดยเป็นหลักการทั่วไปของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งแสดงได้ด้วยสมการต่อไปนี้

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

2) การถ่ายโอนแรงดันแบบความจุไฟฟ้า (capacitive): เป็นหลักการถ่ายโอนอันเนื่องจากผลของสนามไฟฟ้าซึ่งแทนได้ด้วยความจุไฟฟ้าแฝงซึ่งจะอยู่บนพื้นฐานของโวลต์เตจ ดีไวเซอร์ โดยระดับแรงดันจะขึ้นกับอัตราส่วนของค่าความจุไฟฟ้าทั้ง 2 องค์ประกอบ (C_1 , C_2) ซึ่งแสดงด้วยสมการดังต่อไปนี้

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

จากรูปที่ 7 แสดงถึงหลักการถ่ายโอนแรงดันที่ได้อธิบายไปข้างต้น



รูปที่ 7 วงจรสมมูลการถ่ายโอนแรงดัน (ก) แบบความเหนี่ยวนำไฟฟ้า (ข) แบบความจุไฟฟ้า

ดังที่ได้กล่าวไปข้างต้นหลักการในการถ่ายโอนแรงดันภายในหม้อแปลงไฟฟ้าจึงมี 2 ส่วนหลัก ซึ่งในส่วนของความเหนี่ยวนำนี้นั้นจะไม่ได้รับผลกระทบเรื่องความไม่

สมดุลเนื่องจากการออกแบบประกอบสร้างเพื่อให้ได้พิกัดแรงดันของแต่ละขดลวดที่เหมาะสมและมีความสมมาตรในทุก ๆ เฟส แต่จะมีผลในส่วนของความจุไฟฟ้าจากค่าที่วัดได้ในตารางที่ 1 ซึ่งเมื่ออัตราส่วนมีความไม่สมดุลกันก็จะทำให้แรงดันทั้งสามเฟสเกิดความไม่สมดุลซึ่งทำให้มีขนาดแรงดันองค์ประกอบลำดับศูนย์เกิดขึ้น

ค่าความจุไฟฟ้าแฝงระหว่างขดลวดปฐมภูมิกับขดลวดทุติยภูมิและขดลวดตติยภูมิเทียบกราวด์ของหม้อแปลงทั้ง 3 ลูก มีขนาดที่แตกต่างกันส่งผลให้เกิดความไม่สมดุลของแรงดัน [7],[8] ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยการต่อขานตัวเก็บประจุเพิ่มเพื่อชดเชยค่าความจุไฟฟ้าเพื่อให้แรงดันไฟฟ้าทั้ง 3 เฟสมีขนาดที่สมดุล

3. แนวทางการแก้ปัญหา

จากปัญหาที่แสดงในรายละเอียดไปข้างต้น จึงได้มีการกำหนดแนวทางการแก้ปัญหาโดยดำเนินการเก็บข้อมูลในภาคสนามเพื่อวัดขนาดแรงดันและมุมเฟสของรูปคลื่นแรงดันจริงเพื่อข้อมูลมาเปรียบเทียบการจำลองด้วยโปรแกรมซึ่งแสดงดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.1 การวัดขนาดและรูปคลื่นของแรงดันที่บัส 22 kV

จากที่ได้ทำการวัดขนาดและรูปคลื่นของแรงดันที่บัส 22 kV เบื้องต้น ซึ่งเป็นการวัดในสภาวะที่ใช้งานจริงโดยยังมียกกับดักลีสจและหม้อแปลงวัดแรงดันเชื่อมต่ออยู่ การวัดดังกล่าวอาจจะส่งผลให้แรงดันที่วัดได้มีการผิดเพี้ยนไปจากความเป็นจริงอันเนื่องมาจากการจำกัดขนาดของแรงดันโดยกับดักลีสจหรือการอิ่มตัวแกนเหล็กของหม้อแปลงวัดแรงดัน หากเกิดแรงดันเกิน ดังนั้น เพื่อที่จะบันทึกขนาดและรูปคลื่นของแรงดันได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ จึงต้องมีการปลดอุปกรณ์เหล่านี้ออกจากบัส 22 kV และทำการวัดขนาดและรูปคลื่นด้วยโวลต์เตจ ดีไวเซอร์โดยเชื่อมต่อภาคแรงดันต่ำของโวลต์เตจ ดีไวเซอร์ผ่านสายโคแอกเชียลเบิลเชื่อมต่อไปยังออสซิลโลสโคป โวลต์เตจ ดีไวเซอร์ที่ใช้งานเป็นประเภทตัวเก็บประจุ มีพิกัดแรงดัน 100 kV และมีความจุไฟฟ้า 1 nF (โดยมีอัตราส่วนการลดทอนแรงดันของโวลต์เตจ ดีไวเซอร์ของเฟส A, B และ C ได้แก่ 12306:1, 12646:1 และ 12260:1 ตามลำดับ) โดยแสดงการติดตั้งดังรูปที่ 8



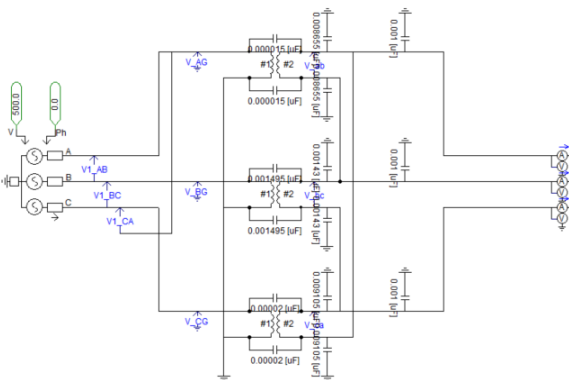
รูปที่ 8 การติดตั้งโวลต์เดจดีไวเซอร์จำนวน 3 ตัวสำหรับการวัดขนาดและรูปคลื่นของแรงดันฝั่งขดลวดคดียภูมิ (22 kV)

โดยวัตถุประสงค์ของการวัดขนาดและรูปคลื่นของแรงดันคือ เพื่อนำข้อมูลผลการวัดที่ถูกต้องและแม่นยำนำไปจำลองด้วยโปรแกรมเพื่อหาค่าความจุไฟฟ้าที่เหมาะสมที่จะนำมาเชื่อมต่อเพิ่มเติม โดยจะแสดงผลการวัดเชิงเปรียบเทียบกับผลการจำลองด้วยโปรแกรม PSCAD ดังตารางที่ 2

3.2 การจำลองด้วยโปรแกรม PSCAD

โปรแกรม PSCAD เป็นโปรแกรมที่ถูกใช้งานอย่างแพร่หลายในการจำลองปรากฏการณ์ในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยผู้ใช้งานสามารถออกแบบวงจรสำหรับการจำลอง และวิเคราะห์ผลลัพธ์การจำลองได้ [12]

สำหรับการจำลองจะใช้ค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้จริงดังแสดงในตารางที่ 1 เพื่อนำมาจำลองไดอะแกรมของหม้อแปลงไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 โมเดลการจำลองการเชื่อมต่อตัวเก็บประจุไฟฟ้าของหม้อแปลงทั้ง 3 ลูก

จากโมเดลการจำลองในรูปที่ 9 จะใช้การจำลองแบบวงจรแบบกลุ่มก้อน (Lump) โดยในงานวิจัยนี้จะพิจารณาถึงผลกระทบของแรงดันไฟฟ้าเทียบกราวด์ ดังนั้น ตัวแปรความต้านทานและความเหนี่ยวนำไฟฟ้าของขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าจึงไม่ถูกนำมาพิจารณา ซึ่งจะพิจารณาเฉพาะตัวแปรค่าความจุไฟฟ้าซึ่งเป็นผลจากโครงสร้างของระบบฉนวนในหม้อแปลงไฟฟ้าเท่านั้น

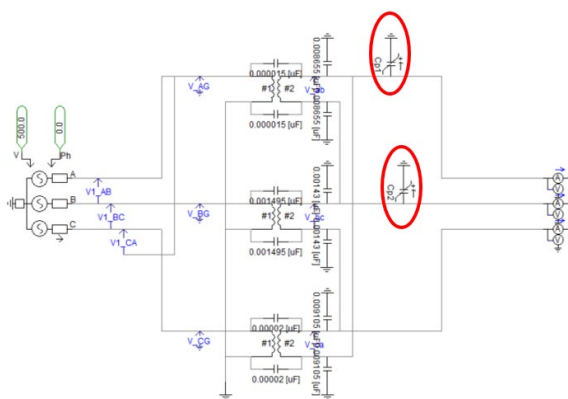
โดยจากรูปที่ 9 กำหนดให้ค่าความจุไฟฟ้าระหว่างขดลวดปฐมภูมิกับขดลวดคดียภูมิเชื่อมต่อที่ตำแหน่งต้นขดลวดและบริเวณปลายขดลวด โดยมีขนาดของความจุไฟฟ้าทั้ง 2 ตำแหน่งเป็นครึ่งหนึ่งของค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้ในตารางที่ 1 นอกจากนี้ กำหนดค่าความจุไฟฟ้าระหว่างขดลวดคดียภูมิเทียบกราวด์เชื่อมต่อให้ค่าความจุไฟฟ้าที่ต้นและปลายของขดลวดซึ่งแสดงด้วยองค์ประกอบความจุไฟฟ้าแบบก้อน (Lump) ซึ่งมีขนาดเป็นครึ่งหนึ่งของค่าความจุไฟฟ้าในตารางที่ 1 รวมถึงค่าความจุไฟฟ้าของโวลต์เดจดีไวเซอร์ของแต่ละเฟสเทียบกราวด์ ซึ่งมีค่า 1 nF เพื่อยืนยันถึงความสามารถในการจำลองด้วยโปรแกรมที่กล่าวไปข้างต้นจึงได้มีการวัดขนาดและรูปคลื่นแรงดันจริงเพื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลอง แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบผลการวัดขนาดแรงดันและมุมเฟสเทียบกราวด์ของบัส 22 kV

เฟส	ผลการจำลองด้วยโปรแกรม PSCAD (kV)	ผลการวัดจริงด้วยโวลต์เดจดีไวเซอร์ (kV)
A	$14.65 \angle 0^\circ$	$15.58 \angle 0^\circ$
B	$22.23 \angle -69.81^\circ$	$23.98 \angle -52.81^\circ$
C	$8.19 \angle -147.5^\circ$	$8.05 \angle -115.9^\circ$

จากผลการเปรียบเทียบในตารางที่ 2 พบว่าการจำลองโดยใช้โมเดลของวงจรแบบก้อน (Lump) ดังกล่าวให้ผลลัพธ์ที่ยอมรับได้ซึ่งก็คือ มีผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับที่ได้ดำเนินการวัดจริงด้วยโวลต์เดจดีไวเซอร์ ซึ่งเพียงพอที่จะใช้โมเดลการจำลองดังกล่าวเพื่อกำหนดค่าความจุไฟฟ้าที่เหมาะสมที่จะต้องต่อเพิ่มเข้าไป

เพื่อหาค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุที่ต้องต่อเพิ่ม จึงได้มีการจำลองด้วยโปรแกรม PSCAD เพื่อกำหนดค่าความจุไฟฟ้าที่เหมาะสมที่ต้องต่อขนานเพิ่มเข้าไปเพื่อให้แรงดันไฟฟ้าทั้ง 3 เฟส มีความสมดุลหรือก็คือแรงดันองค์ประกอบลำดับที่ศูนย์ (Zero Sequence Voltage Component) มีค่าใกล้เคียงศูนย์ให้มากที่สุด โดยจากรูปที่ 10 แสดง รูปแบบการต่อองค์ประกอบค่าความจุไฟฟ้าปรับค่าได้ (Variable Capacitance) โดยเชื่อมต่อที่เทอร์มินัลของขดลวดคดียภูมิเฟส A และ C เพื่อจะดำเนินการจำลองโดยใช้วิธีการทำซ้ำ (Iterative Method)



รูปที่ 10 โมเดลการจำลองการเชื่อมต่อตัวเก็บประจุไฟฟ้าเพิ่มเติม

จากผลการจำลองพบว่าค่าความจุไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สำหรับต่อขนานเพิ่มเข้าไป 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

3.3 การต่อขนานตัวเก็บประจุเพิ่มเติมที่ขดลวดฝั่งคดียภูมิเพื่อให้ได้ค่าความจุไฟฟ้าที่มีความสมดุล

จากผลการจำลองในหัวข้อก่อนหน้านี้ ตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่เลือกใช้งานสำหรับต่อเพิ่มเติมคือ หม้อแปลงวัดแรงดันแบบตัวเก็บประจุ (Capacitor Voltage Transformer, CVT) สำหรับต่อเพิ่มเพิ่มชดเชยค่าความจุไฟฟ้าแสดงดัง

รูปที่ 11 โดยเป็นอุปกรณ์ที่มีสำรองอยู่ในโรงเก็บพัสดุของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย อย่างไรก็ตาม ก่อนที่จะมีการนำไปใช้งานจริง หม้อแปลงวัดแรงดันแบบตัวเก็บประจุทุกตัวจะต้องผ่านการทดสอบตามมาตรฐาน ได้แก่ การทดสอบความคงทนภายใต้แรงดันกระแสสลับ การทดสอบดิสชาร์จบางส่วนเพื่อที่จะสามารถนำไปใช้งานจริงได้อย่างปลอดภัยและมีความน่าเชื่อถือ รวมถึงการวัดค่าความจุไฟฟ้าเพื่อให้สอดคล้องตามค่าที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมในหัวข้อก่อนหน้านี้



รูปที่ 11 หม้อแปลงวัดแรงดันแบบตัวเก็บประจุสำหรับต่อขนานเพิ่มเพื่อชดเชยค่าความจุไฟฟ้า

ในการเชื่อมต่อตัวเก็บประจุเพิ่มเติมจะเลือกใช้งานหม้อแปลงวัดแรงดันแบบตัวเก็บประจุดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 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

จากตารางจะได้ว่าค่าความจุไฟฟ้าจริงที่ต้องเพิ่ม ได้แก่ เฟส A มีค่า 14.87 nF และ เฟส B มีค่า $12.10 + 12.08 + 11.72 + 12.02 = 47.92$ nF จะสังเกตว่าค่าความจุไฟฟ้าที่ใช้

งานจริงมีความแตกต่างจากที่ได้มีการจำลองอันเนื่องมาจากข้อจำกัด ซึ่งยากในการออกแบบหรือเลือกให้ได้ค่าความจุไฟฟ้าเท่ากับที่ได้จำลองไว้ข้างต้น

3.4 การติดตั้งหม้อแปลงวัดแรงดันแบบตัวเก็บประจุ

หลังจากทำการจำลองด้วยโปรแกรม หลังจากนั้นจึงได้ทำการติดตั้งโวลต์เตจ ดีไวเซอร์แบบตัวเก็บประจุ โดยได้ดำเนินการติดตั้งบนฐาน โครงเหล็ก แสดงดังรูปที่ 12



รูปที่ 12 การติดตั้งหม้อแปลงวัดแรงดันแบบตัวเก็บประจุบนฐาน

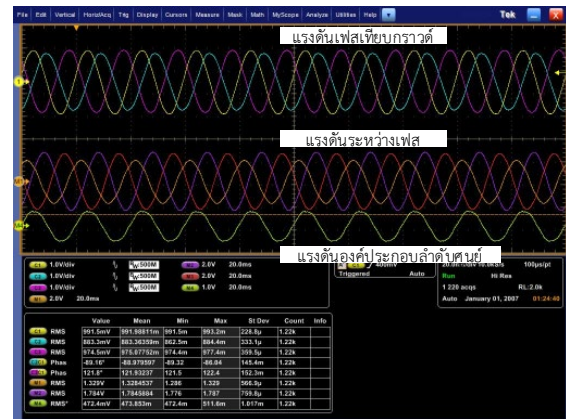
3.5 การวัดขนาดและรูปคลื่นของแรงดันที่บัส 22 kV

หลังจากการติดตั้งจริง

เมื่อดำเนินการติดตั้งหม้อแปลงวัดแรงดันแบบตัวเก็บประจุดังที่ได้แสดงในหัวข้อก่อนหน้าแล้ว จึงได้ดำเนินการวัดขนาดและรูปคลื่นของแรงดันที่บัส 22 kV ขั้ว เพื่อยืนยันผลการทดลอง โดยใช้โวลต์เตจ ดีไวเซอร์ร่วมกับออสซิลโลสโคป ผลการวัดขนาดแรงดันและมุมเฟสแสดงดังต่อไปนี้

- 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) ที่สภาวะคงตัว (Steady State) แสดงดังรูปที่ 13



รูปที่ 13 ขนาดและรูปคลื่นของแรงดันที่บัส 22 kV หลังจากการติดตั้งหม้อแปลงวัดแรงดันแบบตัวเก็บประจุ

จากผลการวัดขนาดแรงดันหลังจากการแก้ไขปัญหาดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงความสมดุลของแรงดันที่ถูกปรับปรุงให้ดีขึ้น รวมถึงไม่ทำให้เกิดแรงดันเกินขึ้น ซึ่งสามารถที่จะดำเนินการติดตั้งกับดักเสิร์จที่พิกัดแรงดัน 22 kV เข้ากับระบบได้โดยไม่ทำให้เกิดความเสียหายอันเนื่องมาจากการเกิดแรงดันเกิน รวมถึงไม่พบจุดร้อนขึ้นที่กับดักเสิร์จดังกล่าว ซึ่งจะเพิ่มเสถียรภาพและความน่าเชื่อถือในการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าดังกล่าว

จากผลการเปรียบเทียบการจำลองแสดงให้เห็นถึงความคลาดเคลื่อนของผลการจำลองเมื่อพิจารณาถึงมุมเฟส ความคลาดเคลื่อนดังกล่าวเกิดจากโมเดลของการจำลองด้วยโปรแกรมใช้ตัวแปรความจุไฟฟ้าแบบกลุ่มก้อน (Lump) จึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนดังกล่าวขึ้น หากต้องการให้ผลการจำลองมีความแม่นยำมากขึ้นจำเป็นต้องใช้วงจรสมมูลโดยใช้องค์ประกอบตัวเก็บประจุแบบกระจาย (Distributed) ซึ่งทำได้ยากในทางปฏิบัติเนื่องจากไม่สามารถวัดได้ รวมถึงจำเป็นต้องทราบโครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าโดยละเอียดภายในหม้อแปลง อย่างไรก็ตามจากผลการเปรียบเทียบแสดงถึงความแตกต่างที่ยอมรับได้ เนื่องจากเมื่อดำเนินการแก้ไขปัญหาดังกล่าวจริง วิธีการนี้สามารถทำให้หม้อแปลงไฟฟ้ากลับมาใช้งานได้อย่างปกติซึ่งแสดงถึงศักยภาพในการใช้งานวงจรการจำลองอย่างง่ายเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวได้

นอกจากนี้ ในทางปฏิบัติจริงการเลือกอุปกรณ์ที่จะนำมาต่อเพิ่มโดยมีค่าความจุไฟฟ้าเท่ากับผลการจำลอง

เป็นไปได้ยากเนื่องจากข้อจำกัดในการออกแบบประกอบสร้างเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมรวมถึงราคาที่สูงเพื่อให้ได้ค่าความจุไฟฟ้าตามที่ได้ทดลองดังกล่าว ดังนั้น จึงได้มีการเลือกใช้งานอุปกรณ์ที่นำมาใช้ทดแทนในบทความนี้คือ โวลต์เตจ ดีไวเซอร์แบบตัวเก็บประจุซึ่งมีสำรองในโรงพัสตุ เพื่อนำมาแก้ปัญหา ซึ่งมีข้อดีคือ เป็นการลดงบประมาณในการแก้ไขปัญหา รวมถึงลดระยะเวลาการดำเนินงานเมื่อเปรียบเทียบกับช่วงระยะเวลาในการสั่งผลิตตัวเก็บประจุไฟฟ้าใหม่ แต่มีข้อเสียที่กล่าวไปข้างต้นคือ จำเป็นต้องใช้หลายอุปกรณ์เพื่อนำมาเชื่อมต่อให้ได้ค่าความจุไฟฟ้าที่เหมาะสม

4. อภิปรายผลและสรุป

บทความฉบับนี้ได้นำเสนอแนวทางการแก้ปัญหาความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าของขดลวดคดียภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังแบบอโต้ พิกัด 500 kV อันเนื่องมาจากความไม่สมดุลของค่าความจุไฟฟ้าแฝง โดยทำการศึกษาค่าตัวแปรต่าง ๆ ในภาคสนามซึ่งได้แก่ ค่าความจุไฟฟ้าระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดคดียภูมิ ค่าความจุไฟฟ้าระหว่างขดลวดคดียภูมิเทียบกับกราวด์ รวมถึงขนาดและรูปคลื่นของแรงดันโดยใช้โวลต์เตจ ดีไวเซอร์แบบตัวเก็บประจุในภาคสนามเพื่อนำข้อมูลทั้งหมดดังกล่าวมาจำลองด้วยโปรแกรม PSCAD เพื่อหาค่าความจุไฟฟ้าของขดลวดคดียภูมิเทียบกับกราวด์ที่เหมาะสมสำหรับการต่อขนานเพิ่มเติมเพื่อแก้ปัญหาความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้า จากผลการจำลองด้วยโปรแกรม PSCAD พบว่าค่าความจุไฟฟ้าที่เหมาะสม คือ การต่อขนานตัวเก็บประจุไฟฟ้าซึ่งมีความจุไฟฟ้า 13 nF และ 39 nF สำหรับเฟส A และเฟส B ตามลำดับ โดยได้เลือกใช้หม้อแปลงวัดแรงดันแบบตัวเก็บประจุเพื่อใช้งานเป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้าสำหรับต่อขนานเพิ่มเติม โดยในติดตั้งจริง ค่าความจุไฟฟ้ามีค่า 14.87 nF และ 47.92 nF สำหรับเฟส A และเฟส B ตามลำดับ โดยได้ดำเนินการติดตั้งจริงบนฐานโครงเหล็ก หลังจากนั้นได้มีการวัดขนาดแรงดันที่บัส 22 kV ซ้ำอีกครั้งเพื่อยืนยันผลการจำลอง ผลการวัดพบว่าขนาดแรงดันไฟฟ้าแต่ละเฟสมีความสมดุลดีขึ้นรวมถึงไม่ทำให้เกิดแรงดันเกินเกิดขึ้น และไม่พบจุดร้อนที่กับดักเสิร์จที่เชื่อมต่อกับขดลวดคดีย

ภูมิ ซึ่งทำให้เพิ่มเสถียรภาพและความน่าเชื่อถือของการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย สำหรับการมอบโอกาสในการศึกษาสำหรับการเขียนงานวิจัยฉบับนี้ ขอขอบคุณกองวิเคราะห์ระบบไฟฟ้า ฝ่ายระบบควบคุมและป้องกันสำหรับการช่วยเหลือในการจำลองด้วยโปรแกรม PSCAD ขอขอบคุณหน่วยงานที่เกี่ยวข้องในโครงการสถานีไฟฟ้าวังน้อย ขอขอบคุณบริษัท PD Solutions Co., Ltd. สำหรับทุนการศึกษาและทำวิจัยขอขอบคุณน้อง ๆ ในห้องปฏิบัติการวิจัยฉนวนและวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง (Dika Lab) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ช่วยสนับสนุนงานวิจัยของข้าพเจ้า โดยเฉพาะอย่างยิ่ง นายสิกร จินเมือง, นาย บัณฑิต อุดมถักษณานนท์, นายโกมินทร์ ชุมพิบูลย์, นาย กฤษดา ดอกไม้ และ นายวิศนันท โรจนสุนันท์

เอกสารอ้างอิง

- [1] M. J. Heathcote, "Transformer theory," in *J & P Transformer Book*, 13th ed., Woburn, MA, USA: Butterworth-Heinemann, 2018, ch. 1, pp. 1–13.
- [2] F. Zhu and B. Yang, "Introduction," in *Power Transformer Design Practices*, Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2021, ch. 1, pp. 1–20.
- [3] K. R. M. Nair, "Transformer Design," in *Power and Distribution Transformers: Practical Design Guide*, Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2021, ch. 1, pp. 1–6.
- [4] A. Küchler, "Introduction," in *High Voltage Engineering*, Heidelberg, Germany: Springer-Verlag GmbH, 2018, ch. 1, pp. 1–4.
- [5] E. Kuffel, W. S. Zaengl and J. Kuffel, "Introduction," in *High Voltage Engineering*, 2nd ed., Woburn, MA, USA: Butterworth-Heinemann, 2000, ch. 1, pp. 1–7.
- [6] S. Sangkasaad, "Introduction," in *High Voltage Engineering*, 3rd Ed., Bangkok, Thailand:

- Chulalongkorn University Press, 2006, ch. 1, pp. 1–7. (in Thai)
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] L. Mosi and S. Zhiyuan, “Research on Single-phase Replacement of 500 kV Transformer based on PSCAD,” in *6th International Conference on Energy and Environmental Protection (ICEEP 2017)*, Zhuhai, China, 2017, pp. 937941, doi: 10.2991/iceep-17.2017.162.
- [10] P. M. Anderson, “Pilot Protection Systems,” in *Power System Protection*, Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 1999, ch. 13, pp. 469–530.
- [11] K. Chayakulkheeree. (2016). EEG456 Electrical Power System Protection and Relays [Lecture note]. Available: http://eestaff.kku.ac.th/~sa-nguan/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
- [12] 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.