



วิเคราะห์การลัดวงจรหม้อแปลงไฟฟ้า



วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา 2568
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนเรศวร

วิเคราะห์การลัดวงจรหม้อแปลงไฟฟ้า



วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา 2568
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนเรศวร

วิทยานิพนธ์ เรื่อง “วิเคราะห์การลัดวงจรหม้อแปลงไฟฟ้า”
ของ พรรคพล บุญเรือง
ได้รับการพิจารณาให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

กฤติเดช ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์
(รองศาสตราจารย์ ดร.กฤติเดช บัวใหญ่)

สมพร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมพร เรืองสินชัยวานิช)

Pirawadee P. อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิรวดี ผลประเสริฐ)

Shm กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายใน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิทธิโชค ผูกพันธุ์)

อนุมัติ

นพด. อินทจามรัส
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชมนาด อินทจามรัส)

หัวหน้าภาควิชาภาษาศาสตร์ คติชนวิทยา ปรัชญาและศาสนา คณะมนุษยศาสตร์
รักษาราชการแทนคณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

15 พ.ค. 2569

ชื่อเรื่อง	วิเคราะห์การลัดวงจรหม้อแปลงไฟฟ้า
ผู้วิจัย	พรรคพล บุญเรือง
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.สมพร เรืองสินชัยวานิช
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิรวดี ผลประเสริฐ
ประเภทสารนิพนธ์	วิทยานิพนธ์ วศ.ม. สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2568
คำสำคัญ	หม้อแปลงไฟฟ้า, การลัดวงจร, การจำลอง

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของหม้อแปลงไฟฟ้าในสภาวะเปิดวงจร สภาวะลัดวงจร และสภาวะความผิดปกติในระบบไฟฟ้าสามเฟส ได้แก่ การลัดวงจรระหว่างสาย (Line-to-Line: L-L) และการลัดวงจรระหว่างสายกับดิน (Line-to-Ground: L-G) โดยใช้การทดลองร่วมกับการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมของแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้า

ผลการศึกษาพบว่า ในสภาวะเปิดวงจร แรงดันด้านทุติยภูมิมีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำประมาณ 0–1.6% ขณะที่กระแสและกำลังไฟฟ้ามีค่าความคลาดเคลื่อนประมาณ 16–20% เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องมือวัดและการสูญเสียจริงภายในแกนเหล็ก สำหรับการทดสอบลัดวงจร พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนของแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าอยู่ในช่วงประมาณ 1–7% แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถอธิบายพฤติกรรมของหม้อแปลงได้ใกล้เคียงกับการทดลองจริง

ในกรณีการลัดวงจรระหว่างสายและการลัดวงจรระหว่างสายกับดิน พบว่าระบบเกิดความไม่สมดุลของแรงดันและกระแส โดยเฉพาะการลัดวงจรระหว่างสายกับดินที่ทำให้เกิดกระแสลำดับศูนย์และฟลักซ์แม่เหล็กไม่สมดุลภายในแกนเหล็ก

โดยสรุป ผลการจำลองด้วย MATLAB/Simulink สามารถแสดงแนวโน้มพฤติกรรมของหม้อแปลงไฟฟ้าได้สอดคล้องกับผลการทดลอง แม้ว่าบางพารามิเตอร์จะมีค่าความคลาดเคลื่อนสูง เนื่องจากข้อจำกัดของแบบจำลองและการสูญเสียจริงภายในระบบ แต่ยังสามารถใช้เป็นแนวทางในการวิเคราะห์พฤติกรรมของหม้อแปลงไฟฟ้าในสภาวะต่าง ๆ ได้อย่างเหมาะสม

Title	SHORT CIRCUIT ANALYSIS OF POWER TRANSFORMER
Author	Phakkhaphon Bunreang
Advisor	Assoc. Prof. Somporn Ruangsinchaiwanich, Ph.D.
Co-Advisor	Asst. Prof. Jirawadee Polprasert, D.Eng.
Academic Paper	M.Eng Thesis in Electrical Engineering, Naresuan University, 2025
Keywords	Power Transformer, Short Circuit, Simulation

ABSTRACT

This research aims to study the behavior of transformers under open-circuit, short-circuit, and three-phase fault conditions, including Line-to-Line (L-L) and Line-to-Ground (L-G) faults. Experimental testing and MATLAB/Simulink simulation were used to compare voltage, current, and power characteristics under various operating conditions.

The results showed that, under open-circuit conditions, the secondary voltage had a low percentage error of approximately 0–1.6%, while the current and power showed percentage errors of approximately 16–20% due to measurement limitations and actual core losses. For the short-circuit test, the percentage errors of voltage, current, and power were within approximately 1–7%, indicating that the simulation model could represent transformer behavior close to the experimental results.

In the case of L-L and L-G faults, the system exhibited voltage and current imbalance. Particularly, the L-G fault caused zero-sequence current and unbalanced magnetic flux inside the transformer core.

In conclusion, the MATLAB/Simulink model was able to represent the transformer behavior consistently with the experimental results. Although some parameters showed relatively high errors due to model limitations and actual system losses, the simulation was still suitable for analyzing transformer behavior under various operating conditions.

ประกาศคุณูปการ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้อย่างราบรื่น ด้วยความช่วยเหลือและคำแนะนำจากหลายส่วน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร เป็นอย่างสูง ที่ได้อนุเคราะห์ให้ทุนสนับสนุนในการวิจัยในการดำเนินงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่เอื้ออำนวยให้ผู้วิจัยสามารถดำเนินการศึกษาค้นคว้าได้อย่างสมบูรณ์และเป็นระบบ จนบรรลุวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.สมพร เรืองสินชัยวานิช ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้สละเวลาอันมีค่าให้คำแนะนำอย่างใกล้ชิด พร้อมทั้งสนับสนุนแนวทางการดำเนินงานทั้งในด้านห้องปฏิบัติการ อุปกรณ์ในการวิจัย ตลอดจนให้ความช่วยเหลือและเอาใจใส่ทุกขั้นตอน อันเป็นแรงสนับสนุนสำคัญที่ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณคณะอาจารย์และเจ้าหน้าที่ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าที่ถ่ายทอดความรู้และข้อเสนอแนะอันมีค่าในการประยุกต์ใช้เพื่อพัฒนาวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ รุ่นพี่ และรุ่นน้องทุกท่านที่คอยให้คำปรึกษา รับฟังปัญหา และเป็นกำลังใจอันสำคัญตลอดระยะเวลาการทำวิทยานิพนธ์

เหนือสิ่งอื่นใด ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และน้องชาย ผู้เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนในทุกด้านอย่างดีที่สุดเสมอมา อันเป็นแรงผลักดันสำคัญที่ทำให้ผู้วิจัยสามารถก้าวข้ามอุปสรรคต่างๆ จนประสบความสำเร็จครั้งนี้

พรรคพล บุญเรือง

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....ค	
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....ง	
ประกาศคุุณูปการ.....จ	
บทที่ 1 บทนำ.....1	
ความเป็นมาของปัญหา.....1	
จุดมุ่งหมายของการวิจัย.....1	
ความสำคัญของงานวิจัย.....2	
ขอบเขตของการวิจัย.....2	
นิยามศัพท์เฉพาะ.....3	
สมมติฐานของการวิจัย.....3	
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....3	
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....4	
โครงสร้างหม้อแปลงไฟฟ้า.....4	
หลักการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้า.....8	
การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า.....13	
โปรแกรม MATLAB / Simulink.....20	
บทความที่เกี่ยวข้อง.....21	
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....28	
แผนการดำเนินงานวิจัย.....28	
หม้อแปลงในการทดลอง.....29	
เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....31	
เงื่อนไขและขั้นตอนการทดลอง.....31	
การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink.....35	

การวิเคราะห์ข้อมูล.....	38
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์.....	40
เกณฑ์การประเมินความคลาดเคลื่อน.....	40
การทดสอบเปิดวงจร.....	40
การทดสอบลัดวงจร.....	45
การทดสอบลัดวงจรระหว่างสาย.....	49
การทดสอบลัดวงจรระหว่างสายกับดิน.....	54
การเปรียบเทียบค่ากระแสลัดวงจรกับค่าทฤษฎี.....	59
การอภิปรายผลการทดลอง.....	60
ข้อจำกัดของงานวิจัย.....	61
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	63
สรุปผลการวิจัย.....	63
ข้อเสนอแนะ.....	64
บรรณานุกรม.....	65
ภาคผนวก.....	68
ประวัติผู้วิจัย.....	73

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1	รายละเอียดของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง.....	30
ตารางที่ 2	เครื่องมือในการทดลอง.....	31
ตารางที่ 3	แสดงผลการทดลองเปิดวงจร.....	43
ตารางที่ 4	แสดงค่าความคลาดเคลื่อนในการทดสอบเปิดวงจร.....	44
ตารางที่ 5	แสดงผลการทดสอบลัดวงจร.....	47
ตารางที่ 6	แสดงความคลาดเคลื่อนในการทดลองลัดวงจร.....	48
ตารางที่ 7	แสดงผลการทดสอบลัดวงจรระหว่างสาย.....	52
ตารางที่ 8	แสดงความคลาดเคลื่อนในการทดสอบลัดวงจรระหว่างสาย.....	53
ตารางที่ 9	แสดงผลการทดสอบลัดวงจรระหว่างสายกับดิน.....	57
ตารางที่ 10	แสดงความคลาดเคลื่อนในการทดสอบลัดวงจรระหว่างสายกับดิน.....	58
ตารางที่ 11	แสดงการเปรียบเทียบค่ากระแสลัดวงจร.....	60

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพ 1 แกนหลัก.....	5
ภาพ 2 ขดลวด.....	5
ภาพ 3 แผนภาพเชิงโครงสร้างของการตรวจจับความผิดปกติ.....	7
ภาพ 4 การเกิดฮิสเทอรีซิส.....	11
ภาพ 5 การเกิดกระแสไหลวน.....	11
ภาพ 6 วงจรการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะเปิดวงจร.....	13
ภาพ 7 วงจรสมมูลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าขณะเปิดวงจร.....	14
ภาพ 8 แผนภาพเฟสเซอร์การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าขณะเปิดวงจร.....	14
ภาพ 9 วงจรการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าขณะลัดวงจร.....	16
ภาพ 10 วงจรสมมูล การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าขณะลัดวงจร.....	16
ภาพ 11 แผนภาพเฟสเซอร์การทดสอบลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	16
ภาพ 12 กระแสปฐมภูมิในการทดสอบการลัดวงจรระหว่างสาย.....	18
ภาพ 13 การจำกัดกระแสลัดวงจรหม้อแปลงไฟฟ้า ในกรณีความผิดปกติแบบสายเดี่ยว (SLG).....	20
ภาพ 14 แผนภาพขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	28
ภาพ 15 หม้อแปลงต้นแบบ.....	29
ภาพ 16 หม้อแปลงที่สร้าง.....	29
ภาพ 17 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า.....	31
ภาพ 18 แสดงการเปิดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	32
ภาพ 19 แสดงการลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	33
ภาพ 20 แสดงการลัดระหว่างสาย (L-L) ของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	33
ภาพ 21 แสดงการลัดระหว่างสายกับดิน (L-G) ของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	34
ภาพ 22 ตัวอย่างโมเดลที่จำลองผ่านโปรแกรม MATLAB/Simulink.....	35
ภาพ 23 ตัวอย่างกราฟแรงดัน และกระแสจากสโคป.....	36

ภาพ 24 การตั้งค่าพารามิเตอร์ในการทดสอบเปิดวงจร.....	37
ภาพ 25 การตั้งค่าพารามิเตอร์ในการทดสอบลัดวงจร.....	37
ภาพ 26 การตั้งค่าการเกิดฟอลต์ในเฟส และเวลาในการควบคุม.....	38
ภาพ 27 วงจรการทดสอบเปิดวงจรจากการทดลอง.....	41
ภาพ 28 วงจรการทดสอบเปิดวงจรจากการจำลอง.....	41
ภาพ 29 การวัดกระแส และแรงดันในการทดลอง.....	41
ภาพ 30 การวัดกำลังไฟฟ้าในการทดลอง.....	42
ภาพ 31 การวัดกระแส และแรงดันในการจำลอง.....	42
ภาพ 32 วงจรการทดสอบลัดวงจรจากการทดลอง.....	45
ภาพ 33 วงจรการทดสอบลัดวงจรจากการจำลอง.....	46
ภาพ 34 การวัดกระแส และแรงดันในการทดลอง.....	46
ภาพ 35 การวัดกำลังไฟฟ้าในการทดลอง.....	46
ภาพ 36 การวัดกระแส และแรงดันในการจำลอง.....	47
ภาพ 37 วงจรการทดสอบลัดวงจรระหว่างสายจากการทดลอง.....	50
ภาพ 38 วงจรการทดสอบลัดวงจรจากการจำลอง.....	50
ภาพ 39 การวัดกระแส และแรงดันในการทดลอง.....	50
ภาพ 40 การวัดกระแส และแรงดันในการจำลอง.....	51
ภาพ 41 วงจรการทดสอบลัดวงจรระหว่างสายกับดินจากการทดลอง.....	54
ภาพ 42 วงจรการทดสอบลัดวงจรระหว่างสายกับดินจากการจำลอง.....	54
ภาพ 43 การวัดกระแส และแรงดันในการทดลอง.....	55
ภาพ 44 การวัดกระแส และแรงดันในการจำลอง.....	56

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของปัญหา

หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นหัวใจหลักในระบบ ทำหน้าที่แปลงระดับแรงดันเพื่อให้เหมาะกับการส่งและการจ่ายพลังงานไปยังผู้ใช้งานในระดับต่าง ๆ ซึ่งมีบทบาทสำคัญต่อความเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าโดยรวม อย่างไรก็ตาม ในสถานะการใช้งานจริง หม้อแปลงไฟฟ้าอาจเผชิญกับความผิดปกติของระบบ เช่น การลัดวงจร เป็นสาเหตุที่ก่อให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ ส่งผลกระทบต่อคุณภาพพลังงานไฟฟ้า

การลัดวงจรในระบบไฟฟ้าสามเฟสเกิดขึ้นได้หลายลักษณะ เช่น การลัดวงจรระหว่างสาย (Line-to-Line: L-L) และการลัดวงจรระหว่างสายกับดิน (Line-to-Ground: L-G) โดยแต่ละกรณีส่งผลต่อแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าแตกต่างกัน ทำให้ระบบเกิดความไม่สมดุลและอาจนำไปสู่ความเสียหายรุนแรงหากไม่มีการวิเคราะห์และป้องกันที่เหมาะสม การศึกษาพฤติกรรมของหม้อแปลงไฟฟ้าในสถานะต่าง ๆ เช่น การเปิดวงจร การลัดวงจร และการเกิดความขัดข้องในรูปแบบต่าง ๆ จึงมีความสำคัญในการทำความเข้าใจลักษณะการทำงานของระบบไฟฟ้ากำลัง การใช้แบบจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ยังเป็นเครื่องมือสำคัญที่ช่วยให้สามารถวิเคราะห์พฤติกรรมของระบบในสถานะที่ไม่สามารถทดลองจริงอย่างปลอดภัย

ในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการศึกษาพฤติกรรมของหม้อแปลงไฟฟ้าในสถานะเปิดวงจรและลัดวงจร รวมถึงการวิเคราะห์การลัดวงจรในระบบสามเฟส โดยใช้การทดลองในห้องปฏิบัติการและการจำลอง เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่สามารถอธิบายพฤติกรรมของระบบและนำไปประยุกต์ใช้ได้จริง

1.2 จุดมุ่งหมายของการวิจัย

1. ศึกษาพฤติกรรมของหม้อแปลงไฟฟ้าในสถานะเปิดวงจรและลัดวงจร
2. เพื่อวิเคราะห์การลัดวงจรในระบบไฟฟ้าสามเฟส ได้แก่ การลัดวงจรระหว่างสาย (L-L) และการลัดวงจรระหว่างสายกับดิน (L-G)
3. เพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองและผลการจำลอง
4. เพื่อวิเคราะห์ค่าความคลาดเคลื่อนของการทดลองและการจำลอง

1.3 ความสำคัญของงานวิจัย

งานวิจัยมีความสำคัญในการศึกษาพฤติกรรมของหม้อแปลงไฟฟ้าในสถานะต่าง ๆ เฉพาะสถานะความผิดปกติ เช่น การลัดวงจร ซึ่งเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อความปลอดภัยของระบบไฟฟ้ากำลัง

ในการวิเคราะห์การลัดวงจรในรูปแบบต่าง ๆ เช่น การลัดวงจรระหว่างสาย (L-L) และการลัดวงจรระหว่างสายกับดิน (L-G) ช่วยให้สามารถเข้าใจลักษณะการเปลี่ยนแปลงของแรงดันและกระแสในระบบได้อย่างชัดเจน เป็นพื้นฐานสำคัญในการออกแบบระบบ และวางแผนการทำงานของระบบไฟฟ้า

นอกจากนี้ การเปรียบเทียบการทดลองและจำลองยังช่วยประเมินความแม่นยำของแบบจำลอง และสามารถนำไปพัฒนาเครื่องมือในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าในกรณีที่ไม่สามารถทดลองจริงได้ ทำให้งานวิจัยนี้มีประโยชน์ทั้งในการประยุกต์ใช้งานจริง

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาพฤติกรรมของหม้อแปลงไฟฟ้าในสถานะปกติและสถานะผิดปกติ โดยทำการทดลองและจำลองเฉพาะกรณีการเปิดวงจร การลัดวงจร การลัดวงจรระหว่างสาย (Line-to-Line: L-L) และการลัดวงจรระหว่างสายกับดิน (Line-to-Ground: L-G) เท่านั้น เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าภายใต้สถานะต่าง ๆ โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ร่วมกับการทดลองจริง

ทั้งนี้ งานวิจัยไม่ได้ครอบคลุมการลัดวงจรทุกประเภท เช่น การลัดวงจรสามเฟส (Three-Phase Fault) หรือการลัดวงจรระหว่างสามเฟสกับดิน เนื่องจากการทดลองดังกล่าวอาจทำให้เกิดกระแสลัดวงจรสูงมาก ส่งผลต่อความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงาน และอาจเกินขีดความสามารถของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง นอกจากนี้ยังมีข้อจำกัดด้านเครื่องมือวัด อุปกรณ์ป้องกัน และกำลังไฟฟ้าของระบบทดลอง จึงกำหนดขอบเขตการศึกษาเฉพาะกรณีที่สามารถควบคุมและวิเคราะห์ได้อย่างปลอดภัยและเหมาะสมภายในห้องปฏิบัติการ

ในการจำลองระบบ ได้ใช้แบบจำลองวงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าโดยอ้างอิงค่าพารามิเตอร์จากการทดสอบเปิดวงจรและการทดสอบลัดวงจร อย่างไรก็ตาม แบบจำลองดังกล่าวยังมีข้อจำกัดในการแทนพฤติกรรมไม่เชิงเส้นของแกนเหล็ก การอิ่มตัวแม่เหล็ก และการสูญเสียจริงทั้งหมดภายในหม้อแปลงไฟฟ้า

1.5 นิยามคำศัพท์เฉพาะ

หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer): อุปกรณ์ที่ใช้แปลงระดับแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้นหรือต่ำลง

ขดลวด (Winding): สายไฟที่พันอยู่ในหม้อแปลง ใช้สร้างสนามแม่เหล็กเพื่อถ่ายเทพลังงาน

การลัดวงจร (Short Circuit): การที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านทางที่มีความต้านทานต่ำมาก ทำให้กระแสสูงผิดปกติ

ความคลาดเคลื่อน (Error): ความแตกต่างระหว่างค่าที่วัดได้กับค่าที่คำนวณหรือจำลอง

แบบจำลอง (Simulation): การสร้างระบบเสมือนในคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ศึกษาพฤติกรรมแทนของจริง

1.6 สมมติฐานของการวิจัย

1. หม้อแปลงไฟฟ้าจะมีพฤติกรรมสอดคล้องกับทฤษฎีในสภาวะเปิดวงจรและลัดวงจร
2. ผลการจำลองสามารถแสดงแนวโน้มของพฤติกรรมระบบได้ใกล้เคียงกับการทดลอง
3. การลัดวงจรในรูปแบบต่าง ๆ จะส่งผลให้แรงดันและกระแสในแต่ละเฟสเกิดความไม่สมดุล

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เข้าใจพฤติกรรมของหม้อแปลงไฟฟ้าในสภาวะเปิดวงจร ลัดวงจร และสภาวะความผิดปกติได้อย่างชัดเจน
2. สามารถวิเคราะห์ผลของการลัดวงจรต่อแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าในระบบสามเฟส
3. ได้แนวทางในการใช้แบบจำลองเพื่อวิเคราะห์ระบบในกรณีที่ไม่สามารถทดลองจริงได้
4. สามารถนำผลการศึกษาไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบ วิเคราะห์ และป้องกันระบบไฟฟ้ากำลัง

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาครั้งนี้เกี่ยวกับ การวิเคราะห์ลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยผู้เขียนได้ทบทวน ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง รวมทั้งศึกษาบทความวิชาการที่เกี่ยวข้อง ใช้เป็นกรอบความรู้พื้นฐานในการ ดำเนินงานและสร้างการจำลองที่สามารถสะท้อนพฤติกรรมของหม้อแปลงได้อย่างใกล้เคียงกับความเป็นจริง โดยเนื้อหาที่เกี่ยวข้องสามารถแบ่งออกเป็น

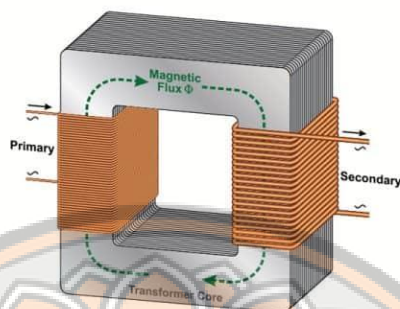
- 2.1 โครงสร้างหม้อแปลงไฟฟ้า
- 2.2 หลักการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้า
- 2.3 การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า
- 2.4 โปรแกรม MATLAB / Simulink
- 2.5 บทความที่เกี่ยวข้อง

2.1 โครงสร้างหม้อแปลงไฟฟ้า

โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer Structure) ถือเป็นหัวใจสำคัญของการ ออกแบบและการใช้งานหม้อแปลง เนื่องจากองค์ประกอบแต่ละส่วนมีบทบาทต่อสมรรถนะ ความ ทนทาน และความน่าเชื่อถือของอุปกรณ์ หม้อแปลงไฟฟ้าในระบบกำลังต้องสามารถรองรับแรงดัน และกระแสสูง รวมทั้งทนต่อสภาวะแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงได้เป็นเวลานานหลายสิบปี ดังนั้นการทำ ความเข้าใจโครงสร้างของหม้อแปลงจึงเป็นส่วนสำคัญในการวิเคราะห์ทั้งในสภาวะปกติและเมื่อเกิด ความผิดปกติ เช่น การลัดวงจรระหว่างเฟส (Line-to-Line, L-L) การลัดวงจรลงดิน (Line-to- Ground, L-G) และการลัดวงจรระหว่างรอบ (Inter-turn fault) โดยทั่วไปโครงสร้างของหม้อแปลง ไฟฟ้าประกอบด้วย 5 ส่วนหลัก ได้แก่ (1) แกนเหล็ก (Core) (2) ขดลวด (Windings) (3) ระบบ ฉนวน (Insulation System) (4) ระบบระบายความร้อน (Cooling System) และ (5) อุปกรณ์ ประกอบ (Accessories)

(1) แกนเหล็ก (Core) เป็นองค์ประกอบแรกที่ต้องกล่าวถึงเนื่องจากเป็นเส้นทางหลักของ ฟลักซ์แม่เหล็กซึ่งเชื่อมโยงระหว่างขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ การใช้แกนช่วยการเหนี่ยวนำไฟฟ้า

อย่างมาก เพราะฟลักซ์ถูกบังคับให้อยู่ในเส้นทางที่มีรีลักแตนซ์ต่ำแทนที่จะกระจายไปในอากาศ แสดง
ดังภาพ 1



ภาพ 1 แกนเหล็ก

(2) ขดลวด (Windings) เป็นองค์ประกอบสำคัญของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ทำหน้าที่ถ่ายโอนพลังงานจากขดลวดด้านปฐมภูมิไปยังด้านทุติยภูมิผ่านการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า โดยทั่วไปขดลวดจะผลิตจากตัวนำไฟฟ้าที่มีค่าการนำสูง เช่น ทองแดงหรืออะลูมิเนียม และพันรอบแกนเหล็กเพื่อสร้างสนามแม่เหล็ก เมื่อกระแสไหลผ่านขดลวดด้านปฐมภูมิ สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในแกนจะเหนี่ยวนำแรงดันไปยังขดลวดด้านทุติยภูมิตามกฎหมายของฟาราเดย์ คุณภาพและจำนวนรอบขดลวดจึงเป็นตัวกำหนดทั้งแรงดัน กระแส ความร้อน และความปลอดภัยของหม้อแปลงโดยตรง แสดงดังภาพ 2



ภาพ 2 ขดลวด

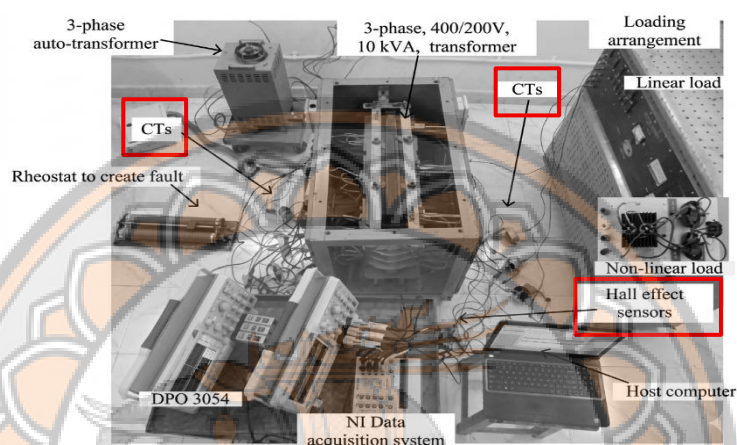
(3) ระบบฉนวน (Insulation System) มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อความน่าเชื่อถือของหม้อแปลงไฟฟ้า เนื่องจากการป้องกันไม่ให้เกิดการลัดวงจรระหว่างขดลวด และขดลวดกับแกนเหล็ก ซึ่งจะทำให้หม้อแปลงเกิดความเสียหายร้ายแรงได้ ฉนวนในหม้อแปลงจึงไม่เพียงเป็นอุปกรณ์ทางไฟฟ้า แต่ยังเป็นปัจจัยที่กำหนดอายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งระบบ ฉนวนที่ใช้ในหม้อแปลงไฟฟ้ามักประกอบด้วยวัสดุแตกต่างกันหลายชนิดเพื่อทำงานร่วมกัน ได้แก่ ฉนวนของขดลวด (Turn Insulation) ฉนวนระหว่างชั้นขดลวด (Inter – Layer Insulation) ฉนวนระหว่างขดลวดกับแกน (Main Insulation) และของเหลวฉนวน เช่น น้ำมันหม้อแปลง (Transformer Oil) ซึ่งทำหน้าที่ทั้งเป็นฉนวนไฟฟ้าและตัวกลางระบายความร้อน โดยในกรณีของหม้อแปลงชนิดแห้ง อาจจะใช้ฉนวนแข็ง อายุการใช้งานของฉนวนนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัย โดยเฉพาะ อุณหภูมิ ที่เกิดจากความร้อนสะสมในหม้อแปลงไฟฟ้า หากอุณหภูมิสูงขึ้นเพียง 6 – 8 องศาเซลเซียส สามารถลดอายุการใช้งานของฉนวนลง ซึ่งอธิบายด้วยสมการจากกฎของอาร์เรเนียส ได้ดังสมการ (1)

$$L = L_0 e^{\frac{E_a}{kT}} \quad (1)$$

โดยที่	L	คือ อายุการใช้งานฉนวน (ชั่วโมง : h)
	L_0	คือ ค่าอ้างอิงของอายุการใช้งาน (ชั่วโมง : h)
	E_a	คือ ค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาเสื่อมสภาพ (จูล : J)
	k	คือ ค่าคงที่โบลต์ซมันน์ (จูลต่อเคลวิน : J/K)
	T	คือ อุณหภูมิในหน่วยเคลวิน (เคลวิน : K)

สมการนี้เป็นการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจะเร่งกระบวนการเสื่อมสภาพทางเคมีของฉนวน และทำให้ความสามารถทนแรงดันลดลง ซึ่งความผิดปกติของฉนวนเกิดได้จากหลายสาเหตุ เช่น ความร้อนสูงกว่าปกติจาก การสูญเสียในขดลวด การสูญเสียในแกนเหล็ก การสั้นสะพานเชิงกลที่เกิดจากแรงแม่เหล็กในเหตุการณ์ลัดวงจร หรือแม้กระทั่งการปนเปื้อนของความชื้นและก๊าซในน้ำมันหม้อแปลง ปัญหาเหล่านี้สามารถเร่งให้ฉนวนเสื่อมสภาพจนเกิดการลัดวงจร ในงานวิจัยของ Yassa Nacera et al. (2022) ที่ใช้จำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) ได้แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิและการกระจายสนามไฟฟ้าภายในขดลวดมีผลต่อการเสื่อมของฉนวนโดยตรง โดยเฉพาะในกรณีที่มีจำนวน

รอบขดลวดเปลี่ยนแปลงหรือมีการกระจายฟลักซ์ไม่สมดุล ซึ่งทำให้บางบริเวณของฉนวนรับความเครียดทางไฟฟ้ามากกว่าปกติ นอกจากนี้งานวิจัยของ Prasad A. Venikar et al. (2016) แสดงระบบทดลองหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟสโดยใช้ซีที และเซ็นเซอร์ฮอลล์เอฟเฟกต์ในการวัดแรงดันและกระแสและส่งข้อมูลภาพสู่ระบบ เพื่อวิเคราะห์ความผิดปกติของระบบ แสดงดังภาพ 3



ภาพ 3 แผนภาพเชิงโครงสร้างของการตรวจจับความผิดปกติ

(4) ระบบระบายความร้อน (Cooling System) เป็นองค์ประกอบที่มีความสำคัญต่อความปลอดภัยและอายุของหม้อแปลง เนื่องจากหม้อแปลงไฟฟ้าทุกเครื่องจะเกิดความร้อนสะสมจากสูญเสียในขดลวด และสูญเสียในแกนเหล็ก หากไม่สามารถระบายความร้อนได้ ความร้อนจะสูงเกินไปจะทำให้ฉนวนเสื่อมสภาพเร็วกว่าปกติ ขดลวดเสียรูปจากแรงเชิงกล และนำไปสู่ความล้มเหลวของหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งระบบ ดังนั้นการออกแบบระบบระบายความร้อนที่เหมาะสมจึงเป็นหนึ่งในปัจจัยหลักที่กำหนดสมรรถนะของหม้อแปลงไฟฟ้า กลไกสะสมความร้อนของหม้อแปลงไฟฟ้าสามารถอธิบายได้ดังสมการ (2)

$$Q_{\text{loss}} = P_{\text{cu}} + P_{\text{core}} \quad (2)$$

โดยที่ Q_{loss} คือ พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้น (จูล : J)

P_{cu} คือ การสูญเสียในขดลวด (วัตต์ : W)

P_{core} คือ การสูญเสียในแกนเหล็ก (วัตต์ : W)

ความร้อนที่เกิดขึ้นนี้จะต้องถูกถ่ายเทออกไปสู่สิ่งแวดล้อมผ่านตัวนำ การพาความร้อน และการแผ่รังสี สมดุลความร้อนของหม้อแปลงจึงสามารถเขียนได้ดังสมการ (3)

$$Q_{\text{loss}} = Q_{\text{dissipated}} \quad (3)$$

โดยที่ $Q_{\text{dissipated}}$ คือ ความร้อนที่ถูกระบายออกจากหม้อแปลง (วัตต์ : W)

ในงานของ Yassa Nacera et al. (2022) แสดงให้เห็นว่าการสะสมความร้อนในขดลวดและฉนวนสัมพันธ์กับจำนวนรอบและความหนาแน่นของกระแส ซึ่งสามารถเร่งการเสื่อมสภาพของฉนวนได้ ในขณะที่งานวิจัยของ Tamer A. Kawady et al. (2008) ศึกษาการวิเคราะห์กระแสลัดวงจรในหม้อแปลงและพบว่าความร้อนจากฟอลต์ที่เกิดขึ้นชั่วขณะสามารถทำให้ขดลวดเปลี่ยนรูปถาวร หากกระบบระบายความร้อนไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิ

2.2 หลักการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้า

หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ทำหน้าที่ถ่ายโอนพลังงานจากวงจรหนึ่งสู่อีกวงจรหนึ่งผ่านการเหนี่ยวนำแม่เหล็ก โดยไม่มีการเชื่อมต่อทางไฟฟ้าโดยตรง องค์ประกอบสำคัญของหม้อแปลงไฟฟ้าคือแกนเหล็กและขดลวดที่พันรอบแกน เมื่อมีกระแสไฟฟ้ากระแสสลับไหลในขดลวดปฐมภูมิ จะทำให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา และเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้าในขดลวดทุติยภูมิ ความสัมพันธ์ของแรงดันระหว่างด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิสามารถอธิบายได้ดังสมการ (4)

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (4)$$

สมการดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าแรงดันไฟฟ้ามีความสัมพันธ์โดยตรงกับจำนวนรอบของขดลวด โดยการเพิ่มจำนวนรอบจะทำให้แรงดันเพิ่มขึ้น ขณะที่การลดจำนวนรอบจะทำให้แรงดันลดลง ซึ่งเป็นหลักการสำคัญในการปรับระดับแรงดันในระบบไฟฟ้า

โดยที่	V_1	คือ แรงดันด้านปฐมภูมิ (โวลต์ : V)
	V_2	คือ แรงดันด้านทุติยภูมิ (โวลต์ : V)
	N_1	คือ จำนวนรอบด้านปฐมภูมิ (รอบ : turn)
	N_2	คือ จำนวนรอบด้านทุติยภูมิ (รอบ : turn)

จากสมการแสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนรอบขดลวดเป็นตัวกำหนดอัตราส่วนแรงดันโดยตรง หากขดปฐมภูมิมีจำนวนรอบมากกว่าขดทุติยภูมิ แรงดันที่ได้จะถูกลดลง (Step – Down Transformer) ในทางกลับกัน หากขดลวดทุติยภูมิมีจำนวนรอบที่มากกว่า แรงดันที่ได้จะเพิ่มขึ้น (Step – Up Transformer) นอกจากนี้ความสัมพันธ์ของกระแสเขียนได้ดังสมการ (5)

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}$$

(5)

โดยที่	I_1	คือ กระแสปฐมภูมิ (แอมแปร์ : A)
	I_2	คือ กระแสทุติยภูมิ (แอมแปร์ : A)

จากสมการ (4) และ (5) พบว่าการอนุรักษ์กำลังไฟฟ้า กล่าวไว้ว่า กำลังไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ และทุติยภูมิใกล้เคียงกัน (ละเว้นการสูญเสีย) จะได้ดังสมการ (6)

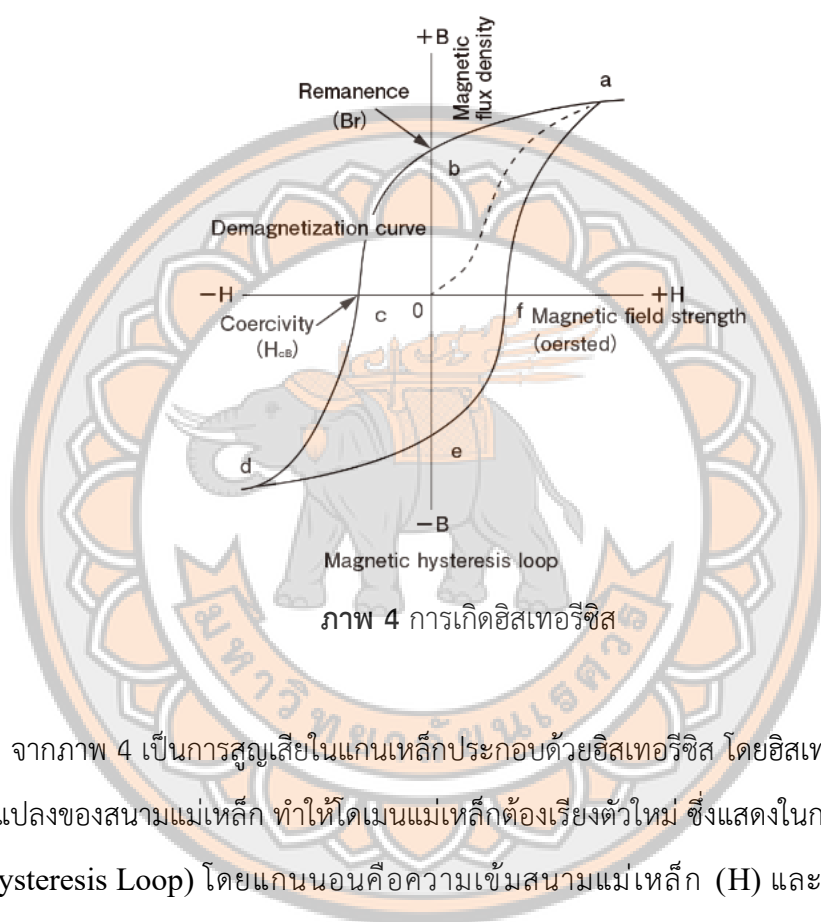
$$V_1 I_1 \approx V_2 I_2 \quad (6)$$

จากสมการที่ 6 มีการละเว้นความสูญเสียพลังงาน (Power Losses) ที่เกิดขึ้นภายในตัว โดยความต้านทานในขดลวดเป็นศูนย์ และไม่มีการสูญเสียในแกนเหล็ก (Core Loss)

การสูญเสียในแกนเหล็กของหม้อแปลงประกอบด้วยการสูญเสียฮิสเทอรีซิส และการสูญเสียกระแสไหลวน โดยฮิสเทอรีซิสเกิดจากการเปลี่ยนทิศทางของสนามแม่เหล็กทำให้โดเมนแม่เหล็กต้องเรียงตัวใหม่ ส่วนกระแสไหลวนเกิดจากการเหนี่ยวนำให้มีกระแสไหลเป็นวงภายในแกนเหล็ก ซึ่งทั้ง

สองกรณีทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อน และสามารถลดได้ด้วยการเลือกวัสดุที่เหมาะสมและการใช้แกนเหล็กแบบลามิเนชัน เขียนได้ดังสมการ (7)

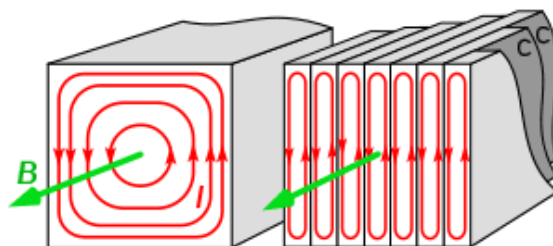
$$P_h = k_n f B_{\max}^n V \quad (7)$$



ภาพ 4 การเกิดฮิสเทอรีซิส

จากภาพ 4 เป็นการสูญเสียในแกนเหล็กประกอบด้วยฮิสเทอรีซิส โดยฮิสเทอรีซิสเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก ทำให้โดเมนแม่เหล็กต้องเรียงตัวใหม่ ซึ่งแสดงในกราฟวงจรฮิสเทอรีซิส (Hysteresis Loop) โดยแกนนอนคือความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) และแกนตั้งคือความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (B)

ส่วนกระแสไหลวน (B) เกิดจากการเหนี่ยวนำให้มีกระแสไหลวน ภายในแกนเหล็ก ทำให้เกิดการสูญเสียในรูปของความร้อน แสดงดังภาพ 5



ภาพ 5 การเกิดกระแสไหลวน

ส่วนการสูญเสียจากกระแสไหลวนเกิดจากแรงดันไฟฟ้าที่ถูกเหนี่ยวนำภายในเนื้อเหล็กจนทำให้เกิดกระแสหมุนวน โดยสามารถเขียนได้ดังสมการ (8)

$$P_e = k_e f^2 B_{\max}^2 t^2 V \quad (8)$$

เมื่อรวมทั้งสองกรณีจะได้กำลังสูญเสียรวมของแกนเหล็ก ดังสมการ (9)

$$P_{\text{core}} = P_h + P_e \quad (9)$$

จะได้ ดังสมการ (10)

$$P_{\text{core}} = k_h f B_{\max}^n + k_e f^2 B_{\max}^2 t^2 V \quad (10)$$

โดยที่	P_h	คือ กำลังสูญเสียจากฮิสเทอรีซิส (วัตต์ : W)
	P_e	คือ กำลังสูญเสียจากกระแสไหลวน (วัตต์ : W)
	P_{core}	คือ กำลังสูญเสียรวมของแกนเหล็ก (วัตต์ : W)
	K_h	คือ ค่าคงที่ขึ้นกับคุณสมบัติของวัสดุแกนเหล็ก (Hysteresis Constant)
	K_e	คือ ค่าคงที่ขึ้นกับคุณสมบัติของแกนเหล็ก (Eddy Current Constant)
	F	คือ ความถี่ของระบบไฟฟ้า (เฮิร์ตซ์ : Hz)
	$B_{\max}$	คือ ค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุด (เทสลา : T)

- n คือ ค่าคงที่เชิงประจักษ์ มักอยู่ในช่วง 1.6 – 2 ขึ้นอยู่กับวัสดุแกนเหล็ก
- t คือ ความหนาของแผ่นเหล็กที่ใช้ทำแกนเหล็ก (เมตร : m)
- V คือ ปริมาตรของแกนเหล็ก (ลูกบาศก์เมตร : m³)

ในงานวิจัยของ Hamed Mashinchi Maheri et al. (2020) เสนอวิธีการวิเคราะห์การสูญเสียในแกนเหล็กโดยใช้สมการเชิงประจักษ์แบบสไตน์เมตซ์ (Steinmetz) เพื่อคำนวณทั้งการสูญเสียจากฮิสเทอรีซิสและกระแสไหลวน ซึ่งช่วยให้สามารถเลือกวัสดุแกนและกำหนดขนาดแผ่นเหล็กได้อย่างแม่นยำขึ้น

มาที่ขดลวด นอกจากจะเป็นตัวกำหนดแรงดันและกระแสแล้ว ขดลวดยังเป็นแหล่งการสูญเสียจากความต้านทานของขดลวดหรือเรียกว่า การสูญเสียในขดลวด (Copper Loss) คำนวณได้จากสมการ (11)

$$P_{cu} = I^2 R \quad (11)$$

โดยที่

- I คือ กระแสที่ไหลในขดลวด (แอมแปร์ : A)
- R คือ ความต้านทานของขดลวด (โอห์ม Ω)
- P_{cu} คือ กำลังสูญเสียในขดลวด (วัตต์ W)

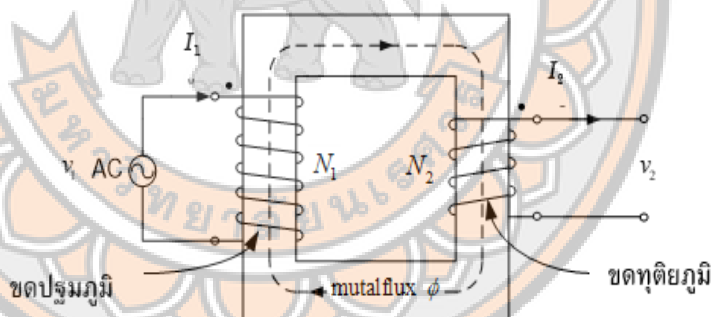
ความร้อนที่เกิดขึ้นไม่เพียงลดประสิทธิภาพ แต่ยังเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้ฉนวนเสื่อมสภาพเร็วกว่าปกติ อีกทั้งยังมีความเสี่ยงต่อความผิดปกติ เช่น การลัดวงจรระหว่างรอบ ซึ่งแม้จะเกิดขึ้นเพียงบางส่วนของขดลวดแต่ยังสามารถสร้างกระแสลัดวงจรในวงจรเล็กๆ และก่อให้เกิดแรงแม่เหล็กเชิงกลที่ทำให้ขดลวดบิดงอเสียหายได้อย่างรุนแรง ในงานวิจัยของ Prasad A. Venikar et al. (2016) ได้เสนอวิธีการตรวจจับความผิดปกติระหว่างรอบในระยะเริ่มต้น โดยใช้การวิเคราะห์ความต่างของอิมพีแดนซ์และกระแสลำดับเชิงลบ ซึ่งสามารถตรวจจับความผิดปกติขนาดเล็กได้อย่างทันที และป้องกันไม่ให้เกิดปัญหาลุกลามไปสู่ความล้มเหลวของหม้อแปลงทั้งระบบ

2.3 การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า

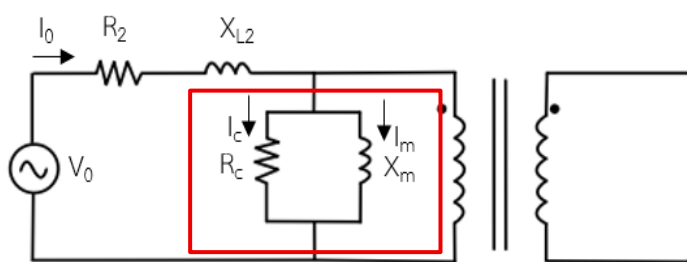
เมื่อได้ทำความเข้าใจหลักการของหม้อแปลงไฟฟ้าในหัวข้อก่อนหน้านี้แล้ว จะเห็นได้ว่าหม้อแปลงในทางปฏิบัติไม่ได้ทำงานอย่างสมบูรณ์แบบตามทฤษฎี เนื่องจากมีทั้งการสูญเสีย ความร้อน ฟลักซ์รั่ว และปัญหาที่เกิดจากความผิดปกติ เช่น การลัดวงจรระหว่างรอบ การลัดวงจรระหว่างเฟส และการลัดวงจรลงดิน ดังนั้นการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าจึงมีความสำคัญ ช่วยประเมินพฤติกรรมที่แท้จริง และยืนยันข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองทางทฤษฎี ในวิจัยนี้จะมีเป็นการทดสอบ 2 กรณี

2.3.1 การทดสอบแบบเปิดวงจร (Open Circuit Test)

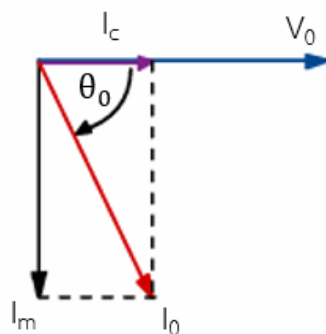
ในการทดสอบเปิดวงจรเพื่อหาค่าการสูญเสียแกนเหล็ก (Core Loss) โดยต่อแรงดันเข้าที่ขดลวดปฐมภูมิในขณะที่ด้านทุติยภูมิเปิดวงจร กระแสที่วัดได้จะมีค่าน้อยมาก เห็นถึงคุณสมบัติของแกนเหล็ก เช่น การอิ่มตัวและการสูญเสียฮิสเทอรีซิสและกระแสไหลวน จากงานวิจัยของ Hamed Mashinchi Maheri et al. (2020) ได้เสนอการวิเคราะห์ค่าการสูญเสียในแกนเหล็กโดยใช้สมการสไตน์เมทซ์ (Steinmetz) ที่ปรับปรุงเพื่อประเมินค่าฮิสเทอรีซิสได้แม่นยำขึ้น



ภาพ 6 วงจรการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะเปิดวงจร



ภาพ 7 วงจรสมมูลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าขณะเปิดวงจร



ภาพ 8 แผนภาพเฟสเซอร์การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าขณะเปิดวงจร

จากภาพ 6 วงจรทดสอบ สามารถเขียนเป็นวงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าในสภาวะเปิดวงจรได้ดังภาพ 7 โดยในการทดสอบนี้กระแสต้านปฐมภูมิ (I_0) มีค่าน้อยมาก ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวด (Copper Loss) มีค่าน้อยมากจนสามารถละเลยได้ ดังนั้นกำลังไฟฟ้าที่วัดได้จากการทดลองจึงถือเป็นกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก (Core Loss) ทั้งหมด ดังกล่าว กระแสรวม I_0 สามารถแยกออกเป็น 2 องค์ประกอบ ได้แก่ การสูญเสียในแกนเหล็ก (I_c) และกระแสแม่เหล็ก (I_m) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับพารามิเตอร์ของวงจรสมมูล ได้แก่ ความต้านทานแกนเหล็ก (R_c) และรีแอกแตนซ์ (X_m)

จากภาพ 8 คือแผนภาพเฟสเซอร์ของกระแสรวม I_0 จะล้าหลังแรงดัน (V_0) เป็นมุมเฟส (θ_0) ขณะที่กระแส (I_c) จะอยู่ในเฟสเดียวกันกับแรงดัน (V_0) เนื่องจากเป็นองค์ประกอบที่แทนกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก ส่วนกระแส (I_m) จะล้าหลังแรงดัน (V_0) เป็นมุม 90 องศาเนื่องจากเป็นกระแสที่ใช้ในการสร้างแม่เหล็กในแกนเหล็ก ดังสมการ (12) และสมการ (13)

$$I_c = I_0 \cos \theta_0 \quad (12)$$

$$I_m = I_0 \sin \theta_0 \quad (13)$$

$$R_c = \frac{V_0}{I_c} \quad (14)$$

$$X_m = \frac{V_0}{I_m} \quad (15)$$

โดย I_c คือ กระแสที่สูญเสียในแกนเหล็ก (แอมแปร์ A)
 I_m คือ กระแสแม่เหล็ก (แอมแปร์ A)

R_c คือ ความต้านทานแกนเหล็ก (โอห์ม Ω)

X_m คือ รีแอกแตนซ์แม่เหล็ก (โอห์ม Ω)

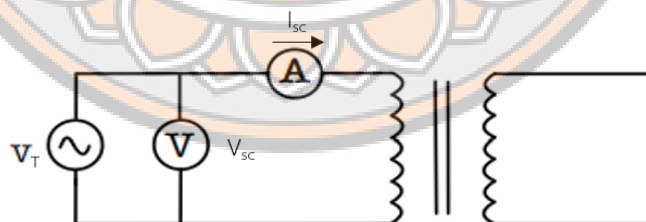
จากความสัมพันธ์ของกระแสในวงจรสมมูล สามารถพิจารณาได้ว่า ความต้านทานแกนเหล็ก (R_c) มีผลโดยตรงต่อกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในแกนเหล็ก ขณะที่รีแอกแตนซ์ (X_m) มีผลต่อขนาดของกระแสแม่เหล็ก ดังนั้นค่าทั้งสองพารามิเตอร์จึงมีบทบาทสำคัญในการอธิบายพฤติกรรมของหม้อแปลงในสภาวะไม่มีโหลด และถูกนำไปใช้ในการสร้างแบบจำลองในโปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อให้ผลการจำลองมีความใกล้เคียงกับการทดลองจริงและสามารถหามุมเฟสระหว่างแรงดัน (V_o) กับกระแสไฟฟ้าขณะไม่มีโหลด (I_o) ได้ดังสมการที่ (16)

$$P_0 = V_o I_o \cos \theta_0$$

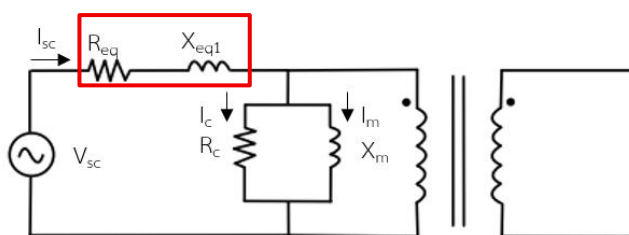
(16)

2.3.2. การทดสอบลัดวงจร (Short Circuit Test)

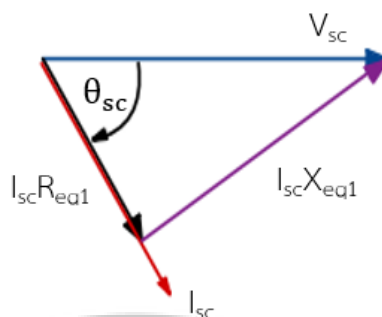
การทดสอบลัดวงจรทำเพื่อหาค่าการสูญเสียในขดลวด (Copper Loss) และพารามิเตอร์ความต้านทานและรีแอกแตนซ์รั่ว โดยต่อด้านทุติยภูมิให้ลัดวงจรเต็มที่และป้อนแรงดันต่ำเข้าสู่ด้านปฐมภูมิให้กระแสเท่ากับฟลักซ์



ภาพ 9 วงจรการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าขณะลัดวงจร



ภาพ 10 วงจรสมมูล การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าขณะลัดวงจร



ภาพ 11 แผนภาพเฟสเซอร์การทดสอบลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้า

จากภาพ 9 วงจรทดสอบ สามารถเขียนเป็นวงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าในสภาวะลัดวงจรได้ดังภาพ 10 โดยในการทดสอบนี้การลัดวงจรด้านทุติยภูมิ และจ่ายแรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ จนกระแสมีค่าถึงค่าพิกัด

เนื่องจากแรงดันที่ใช้ในการทดสอบมีค่าต่ำมาก ส่งผลให้ฟลักซ์ในแกนเหล็กเหล็กมีค่าน้อย จึงทำให้กำลังสูญเสียในแกนเหล็ก (Core Loss) มีค่าน้อยมากและสามารถละเลยได้ ดังนั้นวงจรสมมูลจึงพิจารณาเฉพาะส่วนที่อนุกรม ซึ่งประกอบด้วยความต้านทานสมมูล และรีแอคแตนซ์สมมูลของหม้อแปลง

ในสภาวะนี้ อิมพีแดนซ์รวมของหม้อแปลงสามารถเขียนได้ในรูป สมการ (17)

$$Z_{eq} = R_{eq} + jX_{eq} \quad (17)$$

ค่าความต้านทานสมมูลสามารถเขียนได้ในรูป สมการ (18)

$$R_{eq} = \frac{P_{sc}}{(I_{sc})^2} \quad (18)$$

ค่ารีแอคแตนซ์สมมูลสามารถเขียนได้ในรูป สมการ (19)

$$X_{eq} = \sqrt{(Z_{eq})^2 - (R_{eq})^2} \quad (19)$$

โดย	Z_{eq}	คือ อิมพีแดนซ์สมมูลเมื่อพิจารณาทางด้านปฐมภูมิ (โอห์ม Ω)
	R_{eq}	คือ ความต้านทานสมมูลเมื่อพิจารณาทางด้านปฐมภูมิ (โอห์ม Ω)
	X_{eq}	คือ รีแอกแตนซ์สมมูลเมื่อพิจารณาทางด้านปฐมภูมิ (โอห์ม Ω)

นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้ยังมีศึกษาพฤติกรรมการลัดวงจรในลักษณะที่ไม่สมดุล เช่น การลัดวงจรระหว่างสาย (L-L) หรือระหว่างสายกับดิน (L-G) จะทำให้กระแสในแต่ละเฟสไม่เท่ากัน ซึ่งเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของอิมพีแดนซ์ในแต่ละเฟส และทำให้ระบบมีความซับซ้อนมากขึ้น

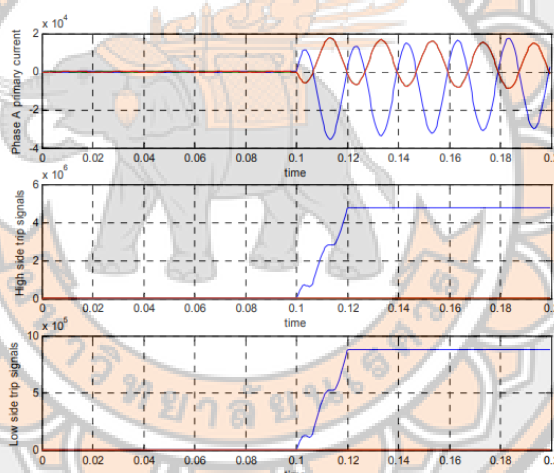
2.3.2.1 การทดสอบลัดวงจรระหว่างสาย (Line To Line, L - L)

เกิดขึ้นเมื่อสองเฟสสัมผัสกันโดยตรง ทำให้แรงดันระหว่างเฟสกลายเป็นศูนย์ ส่งผลให้กระแสลัดวงจรไหลผ่านเส้นทางที่มีอิมพีแดนซ์ต่ำที่สุด กระแสที่เกิดขึ้นจะมีค่าสูงและตอบสนองอย่างรวดเร็ว ทำให้สภาวะแม่เหล็กและไฟฟ้าภายในหม้อแปลงเปลี่ยนแปลงอย่างเฉียบพลัน ในกรณีนี้ ระบบไฟฟ้าจะเกิดความไม่สมดุล (Unbalance) เนื่องจากกระแสและแรงดันในแต่ละเฟสมีค่าไม่เท่ากัน กล่าวคือเฟสที่เกิดการลัดวงจรจะมีกระแสสูงมาก ขณะที่เฟสที่ไม่เกิดการลัดวงจรจะมีค่าที่แตกต่างออกไป ส่งผลให้ความสัมพันธ์แบบสามเฟสสมดุล (120 องศา) ถูกทำลายลง

ในเชิงแม่เหล็ก ส่งผลให้แกนเหล็กเกิดการอิ่มตัวเฉพาะบางส่วน งานวิจัยของ Aleksandr Serebryakov et al. (2019) พบว่าในการลัดวงจรระหว่างสาย ฟลักซ์รั่วจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และการอิ่มตัวของแกนเหล็กมีบทบาทสำคัญต่อค่ากระแสลัดวงจรจริง รวมถึงทำให้เกิดความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นอย่างชัดเจนในเชิงไฟฟ้า การลัดวงจรระหว่างสาย จะทำให้เกิดกระแสลำดับลบ (Negative Sequence Current) ในปริมาณสูง ซึ่งเป็นผลโดยตรงจากความไม่สมดุลของระบบ และเป็นสาเหตุของการเกิดความร้อนเฉพาะจุดในขดลวดและฉนวน ตามที่รายงานในงานวิจัยของ Tamer A. Kawady et al. (2008) แสดงดังภาพ 12 แสดงกราฟกระแสในกรณีการลัดวงจรระหว่างสาย โดยแกนนอนคือเวลา (Time) และแกนตั้งคือค่ากระแสไฟฟ้า (Current) ซึ่งกราฟด้านบนแสดงลักษณะกระแสแบบ instantaneous ของแต่ละเฟส ที่มีลักษณะเป็นคลื่นสลับ ส่วนกราฟด้านล่างแสดงค่ากระแส

ในรูปของขนาด (Magnitude) ที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเกิดการลัดวงจร แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของระบบที่เปลี่ยนจากสภาวะปกติไปสู่สภาวะผิดปกติ และสะท้อนถึงความไม่สมดุลของกระแสในแต่ละเฟสอย่างชัดเจน

โดยสรุป การลัดวงจรระหว่างสายเป็นเหตุการณ์ที่ทำให้ทั้งระบบไฟฟ้าและระบบแม่เหล็กของหม้อแปลงเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรุนแรง แม้จะไม่ใช่เหตุการณ์ที่เกิดบ่อยที่สุด แต่สามารถก่อให้เกิดกระแสสูง แรงดันตก และความร้อนสะสม ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่นำไปสู่การเสื่อมสภาพของขดลวดและฉนวน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาพฤติกรรมของกระแสและฟลักซ์ภายใต้สภาวะนี้ เพื่อประเมินความสามารถของหม้อแปลงในการรองรับความผิดปกติทั้งในเชิงกลและเชิงแม่เหล็ก



ภาพ 12 กระแสปฐมภูมิในการทดสอบการลัดวงจรระหว่างสาย

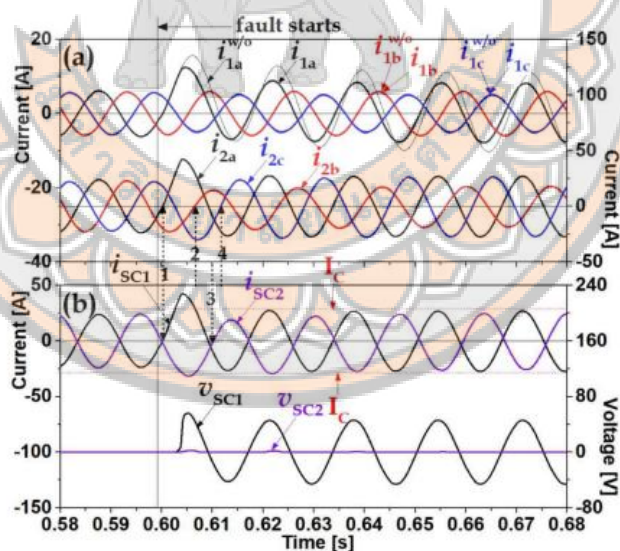
2.3.2.2 การลัดวงจรระหว่างสายกับดิน (Line To Ground Fault : L - G)

การลัดวงจรระหว่างสายกับดิน (Line-to-Ground: L-G) เป็นความผิดปกติที่เกิดขึ้นได้บ่อยในระบบไฟฟ้า เนื่องจากเฟสมีโอกาสดัมผัสกับโครงสร้างที่ต่อดินได้ง่าย เมื่อเกิดการลัดวงจร กระแสจะไหลกลับผ่านเส้นทางดิน ทำให้เกิดกระแสลัดวงจรในระบบ แม้ว่าขนาดกระแสโดยรวมอาจไม่สูงเท่ากับการลัดวงจรระหว่างสาย (L-L) แต่ส่งผลกระทบต่อระบบในเชิงลึกมากกว่า โดยเฉพาะต่อความสมดุลของฟลักซ์ในแกนเหล็กและแรงดันในเฟสอื่นในกรณีนี้ ระบบไฟฟ้าจะเกิดความไม่สมดุล (Unbalance) อย่างชัดเจน เนื่องจากกระแส

และแรงดันในแต่ละเฟสมีค่าไม่เท่ากัน โดยเฉพาะเฟสที่เกิดการลัดวงจรจะมีกระแสสูง ขณะที่เฟสอื่นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน ส่งผลให้ความสัมพันธ์แบบสามเฟสสมดุลถูกทำลายลง และเกิดองค์ประกอบของกระแสลำดับบวก ลำดับลบ และลำดับศูนย์รวมกัน

ในเชิงไฟฟ้า การลัดวงจรระหว่างสายและดิน (L-G) จะทำให้เกิดกระแสลำดับศูนย์ (Zero Sequence Current) ในปริมาณมาก ซึ่งกระแสนี้จะไหลผ่านขดลวดทั้งสามเฟสในทิศทางเดียวกัน ส่งผลให้ฟลักซ์ลำดับศูนย์ถูกบังคับให้ไหลผ่านเส้นทางที่มีรีแอกแตนซ์สูงกว่าเส้นทางฟลักซ์ปกติ ทำให้เกิดการสูญเสียและความร้อนสะสมเพิ่มขึ้น

ในเชิงแม่เหล็ก ฟลักซ์ที่ไม่สมดุลจะทำให้เกิดการอิ่มตัวของแกนเหล็กเฉพาะบางส่วน ซึ่งเป็นบริเวณที่ไม่ควรเกิดการอิ่มตัว นอกจากนี้ยังอาจทำให้เกิดฟลักซ์รั่วเพิ่มขึ้น และกระแสแม่เหล็กมีค่าผิดปกติ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Tae-Hee Han et al. (2022) ที่แสดงให้เห็นว่าหลังเกิดการลัดวงจร กระแสจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และรูปคลื่นของแรงดันและกระแสจะเสียสมดุลอย่างชัดเจน



ภาพ 13 การจำกัดกระแสลัดวงจรหม้อแปลงไฟฟ้า ในกรณีความผิดปกติแบบสายเดี่ยว (SLG)

จากภาพ 13 แสดงพฤติกรรมของกระแสและแรงดันเมื่อเกิดการลัดวงจร โดยกราฟ (a) แสดงกระแสในแต่ละเฟส โดยแกนนอนคือเวลา (Time) และแกนตั้งคือค่ากระแสไฟฟ้า (Current) ส่วนกราฟ (b) แสดงทั้งกระแสและแรงดัน โดยแกนนอนเป็นเวลา และแกนตั้ง

เป็นค่าทางไฟฟ้า ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของระบบจากสภาวะปกติไปสู่สภาวะผิดปกติ และสะท้อนถึงความไม่สมดุลของระบบอย่างชัดเจนนอกจากนี้ งานวิจัยของ Prasad A. Venikar et al. (2016) ระบุว่า การลัดวงจรระหว่างสายกับดินสามารถทำให้ฟลักซ์รั่วและกระแสแม่เหล็กมีค่าผิดปกติ ซึ่งเป็นปัจจัยกระตุ้นให้เกิดการลัดวงจรระหว่างรอบ (Inter-turn Fault) ภายในหม้อแปลงต่อเนื่อง โดยมีสาเหตุมาจากความเค้นของฉนวนและความร้อนเฉพาะจุดที่เพิ่มขึ้น

โดยสรุป การลัดวงจรระหว่างสายกับดินเป็นเหตุการณ์ที่แม้กระแสลัดวงจรอาจไม่สูงที่สุด แต่มีความรุนแรงต่อแกนเหล็กและฉนวน เนื่องจากการเกิดฟลักซ์ลำดับศูนย์ ความไม่สมดุลของระบบ การอิ่มตัวเฉพาะจุด และแรงดันไฟฟ้าเกินในเฟสที่ไม่ได้ลัดวงจร ดังนั้นการวิเคราะห์การลัดวงจรลักษณะนี้จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการประเมินความสามารถของหม้อแปลงในการรองรับความผิดปกติในระบบจริง

2.4. โปรแกรม MATLAB/Simulink สำหรับการวิเคราะห์หม้อแปลงไฟฟ้า

การวิเคราะห์พฤติกรรมของหม้อแปลงไฟฟ้าภายใต้สภาวะปกติและสภาวะผิดปกติ จำเป็นต้องอาศัยเครื่องมือที่สามารถจำลองปรากฏการณ์ทั้งในเชิงไฟฟ้าและเชิงแม่เหล็กได้อย่างถูกต้องและครบถ้วน เนื่องจากหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear) อันเกิดจากคุณสมบัติของแกนเหล็ก เช่น การอิ่มตัวของฟลักซ์ (Saturation) การเกิดฟลักซ์รั่ว (Leakage Flux) รวมถึงผลกระทบจากสภาวะลัดวงจรในรูปแบบต่าง ๆ โดยเฉพาะการลัดวงจรระหว่างสาย (Line-to-Line: L-L) และการลัดวงจรระหว่างสายกับดิน (Line-to-Ground: L-G) ซึ่งก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของกระแสและแรงดันอย่างรุนแรง และส่งผลให้ระบบเกิดความไม่สมดุล

โปรแกรม MATLAB/Simulink จึงถูกนำมาใช้เป็นเครื่องมือหลักในการจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง เนื่องจากสามารถสร้างแบบจำลองในโดเมนเวลา (Time Domain Simulation) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยข้อดีสำคัญของโปรแกรมคือสามารถแสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสในลักษณะเวลาจริง ทำให้สามารถสังเกตพฤติกรรมของระบบเมื่อเกิดเหตุการณ์ผิดปกติได้อย่างชัดเจน

2.5. บทความที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยของ Liangchang Fei et al. (2024) กล่าวปัญหาการเกิดลัดวงจรระหว่างรอบขดลวด (Interturn Short Circuit Fault) ในหม้อแปลงกำลัง โดยเฉพาะในส่วนของการขดลวดปรับแต่ง (Regulating Winding) ซึ่งเป็นส่วนเล็กๆ ของหม้อแปลงแต่มีผลกระทบที่รุนแรงเมื่อเกิดความเสียหาย ในงานวิจัยได้พัฒนาโมเดลระหว่างสนามแม่เหล็กกับวงจร เพื่อดูพฤติกรรมกระแส ฟลักซ์ และแรงแม่เหล็ก เมื่อเกิดลัดวงจร จากการวิเคราะห์การลัดวงจรจะเกิดขึ้นเพียงไม่กี่รอบ แต่กระแสที่เกิดขึ้นจากลัดวงจรมีค่ามาก เช่น กรณีลัดวงจรหนึ่งรอบทำให้กระแสสูงถึง 118 กิโลแอมแปร์ เมื่อพิจารณาผลของจำนวนรอบที่ลัดวงจร พบว่าการเพิ่มจากหนึ่งรอบเป็นห้ารอบทำให้ค่ากระแสลัดวงจรลดลง

งานของ Prasad A. Venikar et al. (2016) การศึกษาอัลกอริทึมที่ตรวจจับความผิดปกติจากการลัดวงจรระหว่างรอบขดลวด ของหม้อแปลงไฟฟ้าได้ตั้งแต่ระยะเริ่มต้น ก่อนจะรุนแรงหรือเสียหายใหญ่ ลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวดเป็นปัญหา เนื่องจากกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยมากช่วงเริ่ม งานวิจัยนี้ใช้ทฤษฎีองค์ประกอบสมมาตร โดยคำนวณความต่างของอิมพีแดนซ์ลำดับบวก และกระแสลำดับลบ ระหว่างขั้วปฐมภูมิและทุติยภูมิ เพื่อหาสัญญาณของลัดวงจรระหว่างรอบขดลวด โดยอัลกอริทึมนี้สามารถปรับค่าตำแหน่งการเปลี่ยนแท็ปได้ ในงานวิจัยนี้สื่อถึงจำนวนรอบ มีผลโดยตรงกับการเกิดความเสียหายจากลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้า

งานวิจัยของ Tamer A. Kawady et al. (2008) มุ่งศึกษาการตรวจจับความผิดปกติในขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง โดยที่เน้นความผิดปกติภายใน (Internal Fault) ซึ่งครอบคลุมทั้งการลัดวงจรระหว่างสายกับดิน การลัดวงจรระหว่างเฟส และการลัดวงจรระหว่างรอบขดลวด รวมถึงความผิดปกติที่มีความต้านทานสูง จากสมการแม่เหล็กไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ทำงานสภาวะปกติ โดยวัดค่าจริงได้แตกต่างจากค่าที่สมการทำนายไว้ จะใช้ดัชนีบ่งชี้การเกิดความผิดปกติ วิธีทดสอบด้วยโปรแกรม EMTP (Electromagnetic Transient Program) ครอบคลุมสถานการณ์ต่าง ๆ เช่นการลัดระหว่างรอบขดลวด การลัดลงดินที่มีความต้านทานสูง กระแสแม่เหล็กย่านเริ่มต้น การโอเวอร์เอ็กไซเตชัน และความผิดปกติภายนอก ผลของการทดสอบพบว่าตัวตรวจจับที่เสนอนี้สามารถแยกแยะระหว่างกระแสย่านเริ่มต้น กับความผิดปกติภายในได้ชัดเจน ไม่เกิดการทำงานผิดพลาดอีกทั้งยังตรวจจับ การลัดวงจรระหว่างรอบได้

งานของ Zaiping Zheng et al. (2022) จากงานวิจัยเป็นการศึกษา กลไกการเกิดลัดวงจรระหว่างรอบขดลวด โดยเน้นการเกิดลัดวงจรที่ 15 รอบจาก 36 รอบ ทำให้เกิดกระแสลัดวงจรระหว่างรอบ ความร้อนสูงขึ้น การสูญเสียขดลวดเพิ่มขึ้น และฉนวนเสียหาย ซึ่งในงานวิจัยนี้อัตราส่วนจำนวนรอบที่ลัดวงจรมีความสำคัญอย่างมาก มีจำนวนรอบขดลวดเฟสหนึ่งถูกลัดวงจรไปกี่รอบเมื่อเทียบกับจำนวนทั้งหมด จำนวนรอบอาจเปลี่ยนไปเล็กน้อย โดยจำนวนรอบลดลงส่งผลความต้านทานที่ต่ำลง ทำให้เกิดกระแสไหลวน หรือเรียกว่า กระแสลัดวงจรระหว่างรอบในค่าที่สูงผิดปกติ

งานวิจัยของ Tae – Hee Han et al. (2022) งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบ ตัวจำกัดกระแสลัดวงจรยิ่งยวด (Superconducting Fault Current limiter) ของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส ที่ใช้ขดลวดปฐมภูมิ - ทติยภูมิ ร่วมกับ โมดูลยิ่งยวด จำนวน 2 ตัว แทนที่จะใช้ 3 ตัวตามปกติ โดยต่ออยู่กับขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงบนแกนเหล็ก (E – I) จุดประสงค์หลักคือการบำรุงรักษา แต่ยังคงให้ประสิทธิภาพ การจำกัดกระแสลัดวงจรลงดินสามเฟสได้ดี ผลการทดลองพบว่าการใช้โมดูลยิ่งยวด 2 ตัวจำกัดกระแสลัดวงจรลงดินได้อย่างมีดี ผ่านการเปลี่ยนสถานะของตัวนำยิ่งยวดจากไร้ความต้านทานไปสู่มีความต้านทานสูง เมื่อกระแสเกินกำหนด

งานของ Aleksandr Serebryakov et al. (2019) ศึกษาการคำนวณกระแสลัดวงจรสองเฟส ในระบบที่ใช้หม้อแปลงซึ่งมีการต่อขดลวดแบบ วาย – เดลต้า-11 เป็นรูปแบบการต่อที่ใช้ทั่วไปในระบบ โรงผลิตไฟฟ้าจ่ายไฟ 25 kV เนื้อหามุ่งเน้นไปที่วิเคราะห์ความถูกต้องในการคำนวณอิมพีแดนซ์ลัดวงจรของหม้อแปลงและสถานีไฟฟ้าย่อยในกรณีลัดวงจรสองเฟส วิเคราะห์เห็นว่า เมื่อหม้อแปลงไฟฟ้าต่อแบบ วาย- เดลต้า – 11 กระแสในขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ แต่ละเฟสจะสมดุลกัน และสามารถคำนวณกระแสลัดวงจรได้จากแบบจำลองไม่ต้องเปลี่ยนรูปแบบการต่อขดลวด

งานวิจัยของ Ji-Sun Lee et al. (2023) มุ่งเน้นการพัฒนาแบบจำลองที่ผู้ใช้สามารถกำหนดเอง (User Defined Model: UDM) การวิเคราะห์ความผิดปกติภายในหม้อแปลง จุดประสงค์หลักของงานคือเพื่อสร้างเครื่องมือที่มีความยืดหยุ่นสูง สามารถปรับแต่งได้ตามสถานการณ์ที่ต้องการศึกษา โดยเฉพาะความผิดปกติชนิดระหว่างรอบ (Inter-turn fault) ที่เกิดขึ้นภายในรอบขดลวด ซึ่งเป็นหนึ่งในความเสียหายที่ตรวจจับได้ยาก ทีมวิจัยได้ออกแบบกำหนดเอง (UDM) บน MATLAB/Simulink โดยกำหนดสมการเชิงคณิตศาสตร์ที่ครอบคลุมทั้งพฤติกรรมทางไฟฟ้าและทางแม่เหล็กของหม้อแปลง เมื่อทำการจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถสะท้อนการตอบสนองของหม้อแปลงได้สมจริง โดยรูปคลื่นแรงดันและกระแสที่ได้ในการจำลองมีความสอดคล้องกับข้อมูลจากจริง

นอกจากนี้ยังสามารถปรับใช้เพื่อศึกษาความผิดปกติชนิดอื่น ๆ ได้โดยไม่ต้องสร้างโมเดลใหม่ทั้งหมด ซึ่งช่วยลดเวลาและค่าใช้จ่ายในการวิจัยและออกแบบ งานนี้จึงถือเป็นอีกหนึ่งก้าวที่สำคัญในการทำให้การจำลองหม้อแปลงมีความยืดหยุ่นและแม่นยำ ข้อจำกัดของงานคือยังต้องการการยืนยันผลจากการทดสอบภาคสนามในระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่ เพื่อให้มั่นใจว่าสามารถประยุกต์ใช้ได้จริงในเชิงอุตสาหกรรม

งานวิจัยของ Pavel Sorochenko et al. (2024) ได้ประยุกต์แนวคิดแบบจำลองเสมือน (Digital Twin) เข้ากับหม้อแปลงไฟฟ้า เพื่อสร้างแบบจำลองเสมือนที่สามารถทำงานควบคู่กับหม้อแปลงจริงในระบบไฟฟ้าได้ โดยใช้ MATLAB/Simulink ในการพัฒนาโมเดล และเชื่อมโยงกับข้อมูลการทำงานจริงจากหม้อแปลงผ่านระบบสื่อสารดิจิทัล แนวทางนี้ทำให้สามารถเฝ้าระวัง ตรวจสอบ และคาดการณ์ความผิดปกติแบบเรียลไทม์ ผลแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองเสมือน (Digital Twin) สามารถทำนายแนวโน้มการเกิดความผิดปกติ เช่น การลัดระหว่างรอบ (Inter-turn fault) หรือการเสื่อมสภาพของฉนวน ได้อย่างแม่นยำ อีกทั้งยังสามารถใช้วิเคราะห์สมรรถนะของหม้อแปลงในสภาพการทำงานที่หลากหลาย ซึ่งช่วยให้ผู้ปฏิบัติงานสามารถวางแผนบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์ (Predictive maintenance) งานนี้ยังได้พิสูจน์ว่าแบบจำลองเสมือน (Digital Twin) ช่วยลดความเสี่ยงในการเกิดความเสียหายรุนแรง และเพิ่มความเชื่อมั่นในการใช้งานหม้อแปลงในระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่ ข้อจำกัดคือระบบแบบจำลองเสมือน (Digital Twin) ต้องการการเชื่อมต่อข้อมูลที่ต่อเนื่องและความน่าเชื่อถือของเซ็นเซอร์สูง หากระบบสื่อสารหรืออุปกรณ์วัดมีข้อผิดพลาด อาจทำให้การทำนายไม่แม่นยำเท่าที่ควร

งานวิจัยของ Francis Katende et al. (2022) ได้ทำการศึกษาโดยเน้นการทดสอบพื้นฐานของหม้อแปลง ได้แก่ การทดสอบเปิดวงจร และการทดสอบลัดวงจร เพื่อนำค่าไปคำนวณหาพารามิเตอร์ของวงจรสมมูล จากนั้นจึงนำพารามิเตอร์เหล่านี้ไปใช้สร้างแบบจำลองใน MATLAB/Simulink จุดประสงค์คือเพื่อความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของวิธีการจำลองเมื่อเปรียบเทียบกับ การทดสอบจริง ผลการวิจัยพบว่าค่าพารามิเตอร์จากการจำลองมีความใกล้เคียงกับค่าที่ได้ในห้องปฏิบัติการ และสามารถสะท้อนพฤติกรรมจริงของหม้อแปลงในสถานะต่าง ๆ ได้อย่างถูกต้อง งานนี้ยังได้แสดงให้เห็นว่า การใช้วิธีทดสอบควบคู่กับ MATLAB/Simulink ช่วยลดเวลาและต้นทุนในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้า โดยไม่จำเป็นต้องทำการทดสอบซ้ำหลายครั้ง ข้อจำกัดของ

งานคือการศึกษาเน้นที่หม้อแปลงสามเฟสขนาดกลาง ซึ่งยังต้องมีการขยายผลไปสู่หม้อแปลงขนาดใหญ่เพื่อยืนยันความแม่นยำในระดับอุตสาหกรรม

งานวิจัยของ U. Rajendra Prasad et al. (2019) ได้เสนอแนวทางใหม่โดยผสมผสานการใช้การเรียนรู้ของเครื่องจักร (Machine Learning) เข้ากับการจำลองใน MATLAB/Simulink เพื่อใช้ตรวจจับความผิดปกติชนิดการลัดวงจรระหว่างรอบ (Inter-turn fault) จุดประสงค์ของงานนี้คือการแก้ปัญหาการตรวจจับความผิดปกติระยะเริ่มต้นที่มักไม่สามารถตรวจพบได้ด้วยวิธีการดั้งเดิม ทีมวิจัยได้พัฒนาอัลกอริทึมโดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการจำลองและการทดสอบจริงในการฝึกโมเดล ผลแสดงให้เห็นว่าอัลกอริทึมสามารถตรวจจับการลัดวงจรระหว่างรอบ (Inter-turn fault) ได้อย่างแม่นยำและรวดเร็ว โดยเฉพาะในกรณีที่ความผิดปกติมีขนาดเล็กและซับซ้อน นอกจากนี้ยังสามารถแยกความแตกต่างระหว่างสภาวะปกติและผิดปกติได้ดีกว่าวิธีที่อาศัยการวิเคราะห์สัญญาณไฟฟ้าแบบดั้งเดิม งานวิจัยนี้มีความสำคัญเพราะช่วยลดโอกาสที่หม้อแปลงจะเกิดความเสียหายรุนแรงในอนาคต และเป็นการเปิดทางให้นำการเรียนรู้ของเครื่องจักร (Machine Learning) มาใช้ในระบบไฟฟ้ากำลังมากยิ่งขึ้น ข้อจำกัดของงานคือยังต้องการข้อมูลที่มีคุณภาพสูงเพื่อฝึกโมเดล และต้องทดสอบเพิ่มเติมในสภาพแวดล้อมที่ซับซ้อนยิ่งขึ้น

งานวิจัยของ Haihui Song et al. (2012) เป็นหนึ่งในงานสำคัญที่วางรากฐานด้านการจำลองความผิดปกติภายในหม้อแปลงไฟฟ้า โดยมุ่งเน้นการศึกษาปัญหาการลัดวงจรระหว่างรอบขดลวด (Inter-turn fault) เป็นปัญหาในตรวจจับได้ยากทางปฏิบัติ เนื่องจากสัญญาณความผิดปกติที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กและมักถูกกลบด้วยสัญญาณปกติของหม้อแปลง ทีมวิจัยได้ใช้ MATLAB/Simulink ในการสร้างแบบจำลองเชิงพลวัตของหม้อแปลง โดยนำสมการวงจรสมมูลเข้ามาเชื่อมโยงกับโมเดลเชิงแม่เหล็กไฟฟ้า จุดประสงค์ของงานนี้คือการจำลองพฤติกรรมของแรงดันและกระแสที่เกิดขึ้นเมื่อมีการลัดวงจรเพียงบางรอบของขดลวด เพื่อให้เข้าใจกลไกการเปลี่ยนแปลงสัญญาณในช่วงแรกเริ่มของความผิดปกติ แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นสามารถสะท้อนพฤติกรรมจริงได้อย่างแม่นยำ โดยค่ากระแสและแรงดันที่เกิดจากการจำลองมีความใกล้เคียงกับค่าที่วัดจากการทดลองในห้องปฏิบัติการ ซึ่งยืนยันว่าโมเดลนี้สามารถนำไปใช้เป็นเครื่องมือในระบบป้องกันได้จริง จุดเด่นของงานนี้คือการชี้ให้เห็นว่าการลัดวงจรระหว่างขดลวด (Inter-turn fault) แม้จะมีเพียงไม่กี่รอบก็ส่งผลกระทบต่ออย่างมีนัยสำคัญต่อการทำงาน แสดงให้เห็นว่าสัญญาณความผิดปกติสามารถถูกตรวจจับได้หากใช้เครื่องมือ

ที่มีความไว งานวิจัยนี้จึงถือเป็นพื้นฐานในการพัฒนาระบบป้องกันหม้อแปลงที่มีความแม่นยำสูงในยุคต่อมา

งานวิจัยของ Rafael M.R. Barros et al. (2018) ได้มุ่งเน้นไปที่การทดสอบความทนทานต่อกระแสลัดวงจร ของหม้อแปลง โดยให้ความสำคัญกับแรงทางกลที่เกิดขึ้นในขดลวดและโครงสร้างของหม้อแปลงเมื่อมีกระแสลัดวงจรขนาดใหญ่ จุดประสงค์หลักของงานนี้คือการทำความเข้าใจกลไกความเสียหายเชิงกลในระหว่างที่เกิดเหตุการณ์ผิดปกติ เพื่อหาวิธีการออกแบบที่สามารถเพิ่มความทนทานให้แก่หม้อแปลง การทดสอบได้ดำเนินการกับหม้อแปลงกำลังหลายขนาดโดยใช้วิธีการจำลองและการทดสอบจริง ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าความเสียหายของหม้อแปลงมักเกิดจากแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่สูงเกินไปซึ่งกระทำต่อขดลวด ส่งผลให้เกิดการบิดงอหรือการเคลื่อนตัวของขดลวด หากไม่มีการออกแบบรองรับที่เพียงพอ งานวิจัยนี้เสนอแนวทางการปรับปรุงการจัดเรียงขดลวดและการเลือกวัสดุ เพื่อช่วยให้หม้อแปลงมีความสามารถในการทนต่อแรงกลสูงขึ้น นอกจากนี้ยังได้เสนอการใช้ซอฟต์แวร์จำลองทางกลควบคู่กับการวิเคราะห์ทางไฟฟ้าเพื่อประเมินความแข็งแรงเชิงกลก่อนการผลิตจริง

งานวิจัยของ Daniil I. Ivanchenko et al. (2021) มีจุดเด่นอยู่ที่การวิเคราะห์กรณีลัดวงจรชนิดสายต่อดิน (Line-to-Ground fault: L-G) ที่วิจัยได้สร้างแบบจำลองหม้อแปลงที่สามารถสะท้อนการเปลี่ยนแปลงของกระแสและแรงดันในแต่ละตำแหน่งของขดลวดเมื่อเกิดความผิดปกติ จุดประสงค์คือเพื่อทำความเข้าใจการกระจายของกระแสลัดวงจรและการตอบสนองของระบบเมื่อเกิดการลัดวงจรระหว่างสายกับดิน (L-G) ซึ่งเป็นความผิดปกติที่พบบ่อยในระบบไฟฟ้ากำลัง ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าตำแหน่งของการลัดวงจรมีผลอย่างมากต่อขนาดและทิศทางของกระแสที่ไหลผ่านขดลวด รวมถึงผลกระทบต่อแรงดันในจุดต่าง ๆ ของหม้อแปลง งานนี้ชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของการเลือกตำแหน่งเซ็นเซอร์ตรวจวัดและการออกแบบระบบป้องกันที่เหมาะสม เพื่อให้สามารถตรวจจับและตัดตอนความผิดปกติได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ ข้อค้นพบนี้มีความหมายอย่างยิ่งต่อการพัฒนาระบบป้องกันหม้อแปลงในระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่

งานวิจัยของ Alexey Stulov et al. (2019) ได้ทำการศึกษาที่มุ่งเน้นการปรับปรุงความแม่นยำของพารามิเตอร์หม้อแปลงด้วยวิธีการทดสอบแบบพลวัต (Dynamic parameter test) โดยใช้การกระตุ้นด้วยสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาเพื่อหาค่าพารามิเตอร์แทนที่จะใช้วิธีการทดสอบแบบสถิต (Static Test) เช่นที่นิยมในอดีต วัตถุประสงค์คือเพื่อให้ค่าพารามิเตอร์ที่ได้มีความใกล้เคียง

กับพฤติกรรมจริงของหม้อแปลงในสถานะที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว เช่น ขณะเกิดฟอลต์หรือการสวิตช์ซึ่ง ผลการศึกษาพบว่าวิธีทดสอบแบบพลวัต (Dynamic Test) สามารถให้ค่าพารามิเตอร์ที่สะท้อนการเปลี่ยนแปลงเชิงพลวัตได้ดีกว่า และเมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองในกรณีเกิดฟอลต์ค่าที่ได้จากการวัดแบบพลวัต (Dynamic Test) ให้ความแม่นยำมากกว่าการทดสอบแบบสถิต (Static Test) อย่างชัดเจน

งานวิจัยของ Daoyu Hu, M. Hu et al. (2017) ได้มุ่งเน้นการออกแบบและวิเคราะห์ทางแม่เหล็กไฟฟ้าของหม้อแปลงขนาด 330 kVA โดยใช้วิธีการคำนวณสนามแม่เหล็กด้วยซอฟต์แวร์การจำลอง จุดประสงค์หลักคือการทำผลกระทบของโครงสร้างและวัสดุที่ใช้ต่อสมรรถนะการทำงานของหม้อแปลง ทีมวิจัยได้ออกแบบหม้อแปลงโดยใช้แกนเหล็กอีอี (EE) และทำการวิเคราะห์กระจายสนามแม่เหล็ก รวมทั้งตรวจสอบการสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนและขดลวด ผลการวิจัยพบว่า การออกแบบที่ใช้แกนอีอี (EE) สามารถลดการสูญเสียในแกนและควบคุมการกระจายของฟลักซ์แม่เหล็กได้ดีกว่าโครงสร้างแบบดั้งเดิม นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นว่าการเลือกขนาดและวัสดุของขดลวดมีผลโดยตรงต่อการสูญเสียทางไฟฟ้า งานนี้แสดงให้เห็นการวิเคราะห์ทางแม่เหล็กไฟฟ้าในการออกแบบหม้อแปลงกำลัง ซึ่งช่วยให้นักวิจัยและวิศวกรสามารถสร้างหม้อแปลงที่มีความเหมาะสมกับการใช้ได้มากขึ้น

งานวิจัยของ Wei Pi et al. (2020) ได้ทำการออกแบบและจำลองหม้อแปลงขนาด 120 kVA โดยมุ่งเน้นไปที่การตรวจสอบสมรรถนะการทำงานผ่านการจำลองด้วย MATLAB/Simulink จุดประสงค์ของงานคือการทดสอบว่าวงจรสมมูลที่สร้างขึ้นสามารถใช้ทำนายการตอบสนองของหม้อแปลงในสถานะต่าง ๆ ได้หรือไม่ ทีมวิจัยได้สร้างโมเดลวงจรสมมูลและทำการจำลองการทดสอบทั้งในสถานะเปิดวงจรและลัดวงจร รวมทั้งวิเคราะห์การกระจายของแรงดันและกระแสภายในหม้อแปลง ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถสะท้อนพฤติกรรมจริงได้ใกล้เคียงกับการทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยเฉพาะในกรณีการทดสอบลัดวงจรที่สามารถทำนายค่ากระแสลัดวงจรได้อย่างแม่นยำ งานนี้จึงเป็นหลักฐานว่าการใช้ MATLAB/Simulink เป็นเครื่องมือในการออกแบบและตรวจสอบหม้อแปลงมีความเป็นไปได้สูง ข้อจำกัดของงานคือยังจำกัดอยู่ที่หม้อแปลงขนาดเล็กถึงปานกลาง

งานวิจัยของ Oksana Hoholyuk et al. (2021) ได้ทำการพัฒนาแบบจำลองกระบวนการแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่ต่ำในหม้อแปลง โดยมุ่งเน้นการปรับปรุงความถูกต้องของการวิเคราะห์เมื่อใช้

MATLAB/Simulink จุดประสงค์ของงานคือเพื่อให้สามารถวิเคราะห์ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงได้ละเอียดขึ้น โดยเฉพาะในกรณีที่เกี่ยวข้องกับการอิ่มตัวของแกนและการสูญเสียในแกน ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่ได้รับการปรับปรุงสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็ก แรงดัน และกระแสได้ใกล้เคียงกับผลการวัดจริง อีกทั้งยังสามารถนำไปใช้ในการจำลองสถานการณ์ที่ซับซ้อน เช่น การเกิดกระแสฟุ้งเข้า และ เพอโรเรโซแนนซ์ ได้อย่างแม่นยำ งานนี้จึงช่วยยกระดับการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าให้ครอบคลุมพฤติกรรมไม่เชิงเส้นของหม้อแปลง ข้อจำกัดคือยังต้องการการยืนยันผลจากการทดลองในระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่

งานวิจัยที่ผ่านมาเน้นการศึกษาความผิดปกติภายในหม้อแปลงและการตรวจจับฟอลต์เป็นหลัก ขณะที่ยังขาดการวิเคราะห์พฤติกรรมของหม้อแปลงในระดับระบบ โดยเฉพาะการเปรียบเทียบการลัดวงจรระหว่างสาย และการลัดวงจรระหว่างสายกับดิน อย่างเป็นระบบ งานวิจัยนี้จึงมุ่งเติมเต็มช่องว่างดังกล่าวโดยใช้ MATLAB/Simulink เพื่อจำลองและเปรียบเทียบพฤติกรรมของฟอลต์ทั้งสองรูปแบบในเชิงเวลา



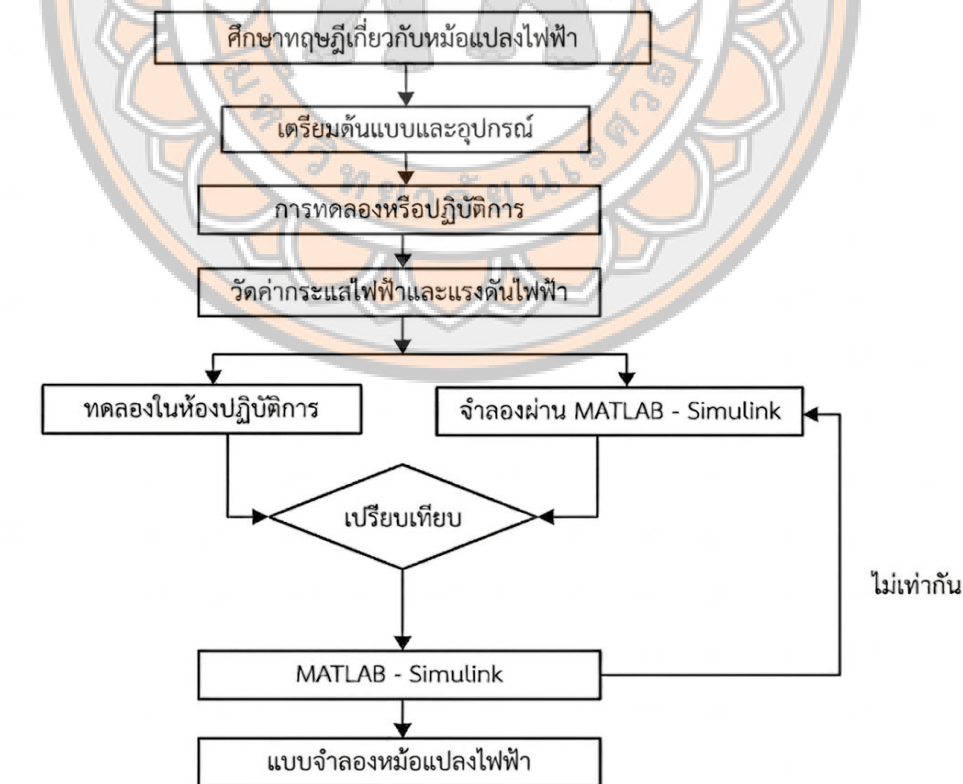
บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการดำเนินงานวิจัย โดยมีขั้นตอนการศึกษาและวิธีการการดำเนินงานวิจัย (Research Methodology)

ศึกษาการทดลองของหม้อแปลงไฟฟ้า ในส่วนนี้จะแบ่งออกอีก 2 กรณี ได้แก่ กรณีที่ 1 ทำการทดลองในห้องปฏิบัติการ และกรณีที่ 2 สร้างแบบจำลองการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าในระบบด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink ในการเปรียบเทียบทั้งเชิงแนวโน้มและค่าความคลาดเคลื่อนโดยค่าที่อยู่ในช่วงประมาณไม่เกิน 10% ถือว่าใกล้เคียง ส่วนค่าที่สูงกว่านั้นวิเคราะห์ว่าเกิดจากข้อจำกัดของแบบจำลองและการสูญเสียจริงของระบบ แสดงดังภาพ 14



ภาพ 14 แผนภาพขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

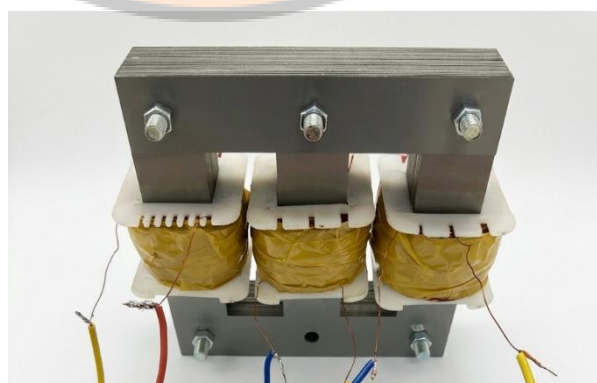
ในงานวิจัยนี้ การศึกษาแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก ได้แก่ การทดลองหม้อแปลงต้นแบบ การทดลองหม้อแปลงที่สร้างขึ้น และการจำลองแบบจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink โดยผลที่ได้จากทั้งสามส่วนจะถูกนำมาเปรียบเทียบเพื่อวิเคราะห์ความแตกต่างของพฤติกรรมทางไฟฟ้าในสถานะต่าง ๆ

3.2 หม้อแปลงในการทดลอง

หม้อแปลงไฟฟ้าที่นำมาใช้ในการทดลอง คือหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส ขนาด 600 โวลต์แอมป์, 400/230 โวลต์, 50 เฮิร์ตซ์ จำนวน 1 ตัว แสดงดังภาพ 15 ซึ่งเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีคุณลักษณะสอดคล้องกับการใช้งานในระบบไฟฟ้ากำลังจริง การเลือกหม้อแปลงขนาดดังกล่าวมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสามารถสะท้อนลักษณะพฤติกรรมหม้อแปลงไฟฟ้าที่เหมาะสม



ภาพ 15 หม้อแปลงต้นแบบ



ภาพ 16 หม้อแปลงที่สร้าง

จากภาพ 16 เป็นหม้อแปลงที่สร้างขึ้นโดยปรับจำนวนรอบของขดลวด และขนาดของแกนเหล็ก โดยมีพารามิเตอร์ดังตาราง 1

ตารางที่ 1 รายละเอียดของหม้อแปลงในการทดลอง

ในการทดสอบหม้อแปลง โดยมีการปรับเปลี่ยนจำนวนรอบขดลวด และขนาดแกนเหล็ก

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้า	
	หม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส (ต้นแบบ)	หม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส (ที่สร้าง)
พิกัดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)	400/230	380/220
พิกัดกระแส (แอมป์)	0.9	1.36
พิกัดกำลังไฟฟ้า (โวลต์แอมป์)	600	300
ความถี่ (เฮิรตซ์)	50	50
ความหนาแกนเหล็ก (มิลลิเมตร)	30	40
จำนวนรอบของด้านปฐมภูมิ (รอบ)	900	500
จำนวนรอบของด้านทุติยภูมิ (รอบ)	300	150
พื้นที่หน้าตัดขดลวดด้านปฐมภูมิ (ตารางเมตร)	1.845×10^{-6}	1.025×10^{-6}
พื้นที่หน้าตัดขดลวดด้านทุติยภูมิ (ตารางเมตร)	1.23×10^{-6}	0.615×10^{-6}

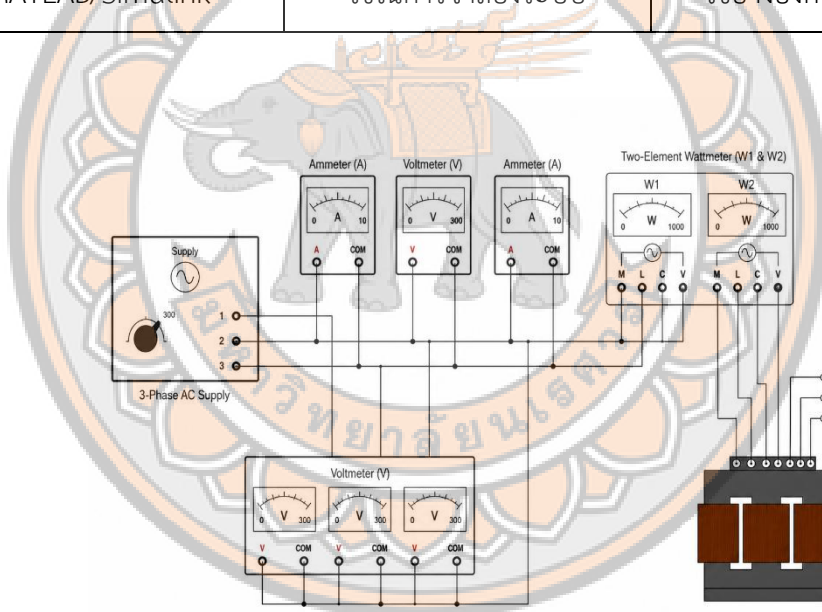
จากตาราง 1 พบว่า การเปลี่ยนแปลงจำนวนรอบขดลวด และขนาดแกนเหล็กส่งผลต่อค่าทางไฟฟ้า เช่น แรงดัน กระแส และความสูญเสีย ซึ่งสามารถนำมาใช้วิเคราะห์ความแตกต่างของพฤติกรรมในสภาวะต่าง ๆ เพื่อให้การทดลองมีความถูกต้องและสามารถวัดค่าทางไฟฟ้าได้อย่างเหมาะสม จึงได้เลือกใช้อุปกรณ์ที่มีคุณสมบัติตรงตามความต้องการของการทดลอง โดยรายละเอียดของอุปกรณ์แสดงดังตารางที่ 2

3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

ในการทดลองประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้าและเครื่องมือวัดค่าทางไฟฟ้า เพื่อใช้ในการวัดแรงดัน และกระแส ดังภาพ 17 สำหรับการวิเคราะห์พฤติกรรมของหม้อแปลงไฟฟ้า ดังตาราง 2

ตาราง 2 เครื่องมือในการทดลอง

เครื่องมือ	รายละเอียด	ความแม่นยำ
แหล่งจ่ายไฟ	220 V 50 Hz	$\pm 1.0\%$
ดิจิตอลมัลติมิเตอร์	ใช้วัดแรงดัน และกระแส	$\pm 2.0\%$
วัตต์มิเตอร์	ใช้วัดกำลังไฟฟ้า	$\pm 1.0\%$
MATLAB/Simulink	ใช้ในการจำลองระบบ	ใช้อ้างอิงค่าพารามิเตอร์



ภาพ 17 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า

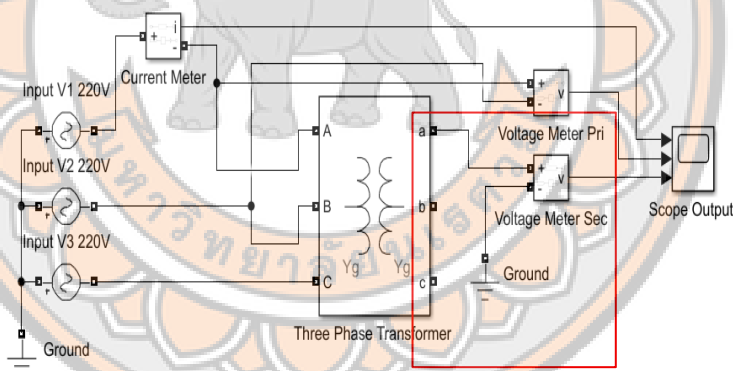
3.4 เงื่อนไขและขั้นตอนการทดลอง

ในการทดลองครั้งนี้ ใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแรงดัน 220 โวลต์ ที่ความถี่ 50 เฮิรตซ์ เพื่อจ่ายให้กับหม้อแปลงไฟฟ้าในการทดสอบทุกกรณี โดยทำการทดลองภายใต้อุณหภูมิห้องเฉลี่ย

ประมาณ 25–30 องศาเซลเซียส เพื่อให้สภาวะการทดลองมีความใกล้เคียงกันในแต่ละครั้ง และลดผลกระทบจากอุณหภูมิต่อค่าความต้านทานของขดลวดและการสูญเสียในระบบ

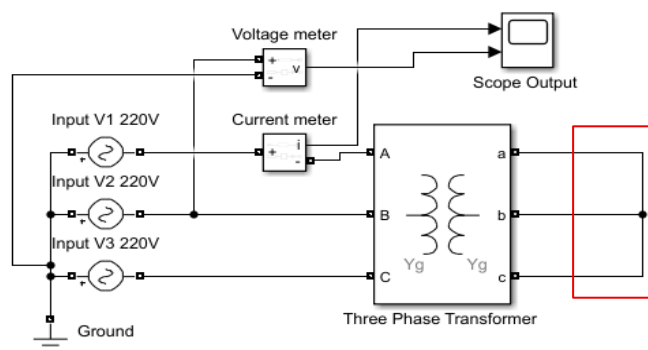
เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย มัลติมิเตอร์สำหรับวัดแรงดัน และกระแส วัดตมิตเตอร์สำหรับวัดกำลังไฟฟ้า และคอมพิวเตอร์ที่ติดตั้งโปรแกรม MATLAB/Simulink สำหรับการจำลองระบบไฟฟ้า โดยเครื่องมือวัดแรงดันมีความละเอียด 0.01 โวลต์ เครื่องมือวัดกระแสมีความละเอียด 0.001 แอมแปร์ และวัตต์มิเตอร์มีช่วงการวัด 0–600 วัตต์ ซึ่งอาจส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนในการอ่านค่ากำลังไฟฟ้าขนาดต่ำ โดยเฉพาะในสภาวะเปิดวงจรที่กำลังไฟฟ้ามีค่าประมาณ 1 วัตต์

ในการทดสอบเปิดวงจร ได้ทำการจ่ายแรงดัน 220 โวลต์ เข้าด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง ขณะที่ด้านทุติยภูมิเปิดวงจร จากนั้นทำการวัดค่าแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้า เพื่อนำไปคำนวณค่าพารามิเตอร์ความต้านทานแกนเหล็ก (R_c) และรีแอคแตนซ์ (X_m) ของวงจรสมมูลหม้อแปลง แสดงดังภาพ 18



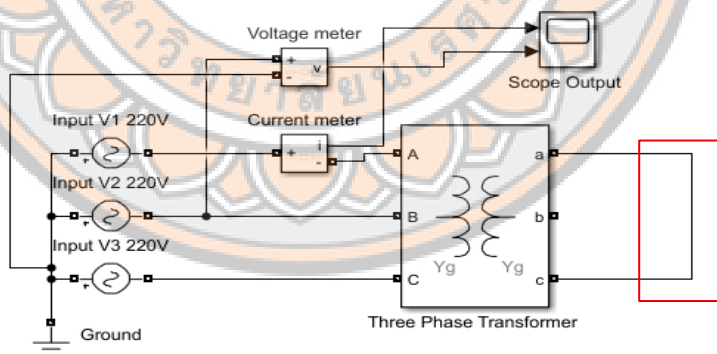
ภาพ 18 แสดงการเปิดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้า

สำหรับการทดสอบลัดวงจร ได้ทำการลัดวงจรด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง และจ่ายแรงดันเข้าด้านปฐมภูมิ จากนั้นวัดค่าแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้า เพื่อนำไปคำนวณค่าพารามิเตอร์ ความต้านทานสมมูล (R_{eq}) และรีแอคแตนซ์สมมูล (X_{eq}) ของวงจรสมมูลแสดงดังภาพ 19

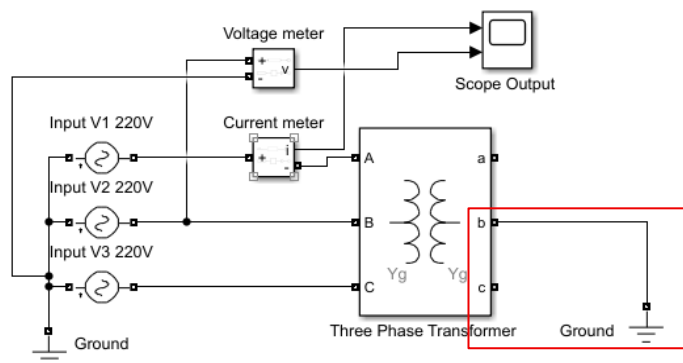


ภาพ 19 แสดงการลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้า

ในส่วนของการทดลองการลัดวงจรระหว่างสาย (L-L) แสดงดังภาพ 20 และการลัดวงจรระหว่างสายกับดิน (L-G) แสดงดังภาพ 21 ได้กำหนดจุดเกิดฟอลต์โดยใช้สวิตช์ควบคุม และกำหนดช่วงเวลาในการเกิดความผิดปกติทั้งในการทดลองจริงและการจำลองด้วย MATLAB/Simulink เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของแรงดันและกระแสในแต่ละเฟสภายใต้สภาวะผิดปกติ โดยค่าที่ได้จากการทดลองจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการจำลองเพื่อวิเคราะห์ค่าความคลาดเคลื่อนและประเมินความแม่นยำของแบบจำลอง



ภาพ 20 แสดงการลัดวงจรระหว่างสาย (L-L) ของหม้อแปลง



ภาพ 21 แสดงการลัดระหว่างสายกับดิน (L-G) ของหม้อแปลง

3.4.1 ขั้นตอนการทดลอง

การทดสอบเปิดวงจร

1. จ่ายแรงดัน 220 โวลต์ 50 เฮิร์ตซ์ เข้าด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง
2. เปิดคัตทุติยภูมิให้เป็นวงจรเปิด
3. วัดค่าแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้า
4. บันทึกค่าที่ได้เพื่อนำไปคำนวณ ความต้านทาน และรีแอ็กแตนซ์

การทดสอบลัดวงจร

1. ลัดวงจรด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง
2. จ่ายแรงดันด้านปฐมภูมิ
3. วัดค่าแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้า
4. บันทึกค่าที่ได้เพื่อนำไปคำนวณ ความต้านทานสมมูล และรีแอ็กแตนซ์

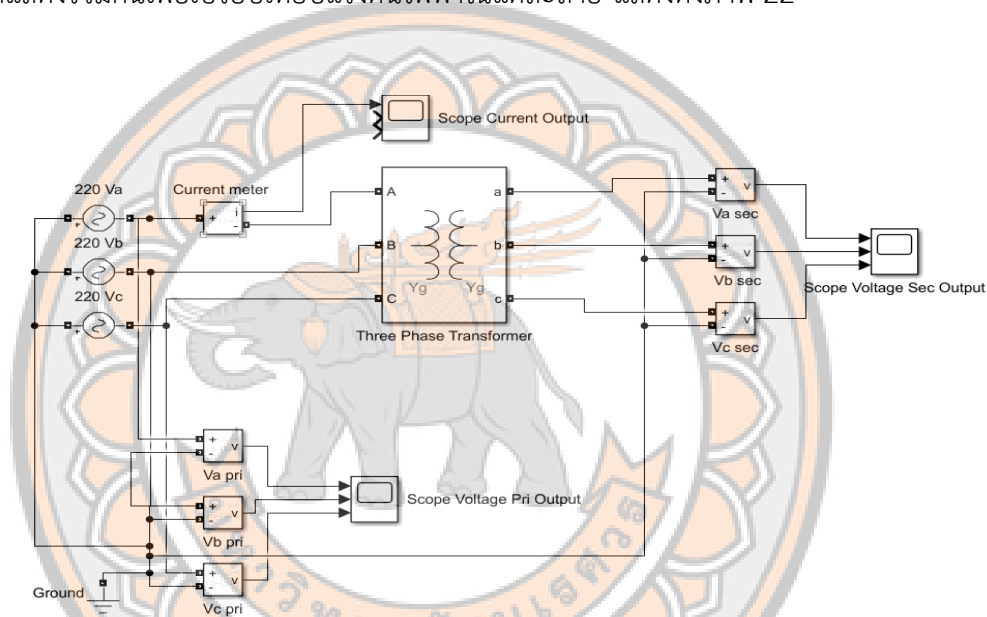
สมมูล

การทดลองฟอลต์

1. กำหนดจุดฟอลต์ด้วยสวิตช์ควบคุม
2. จ่ายแรงดัน 220 โวลต์ 50 เฮิร์ตซ์
3. กำหนดเวลาการเกิดฟอลต์ใน MATLAB/Simulink
4. วัดรูปคลื่นแรงดันและกระแส
5. เปรียบเทียบกับผลการทดลอง

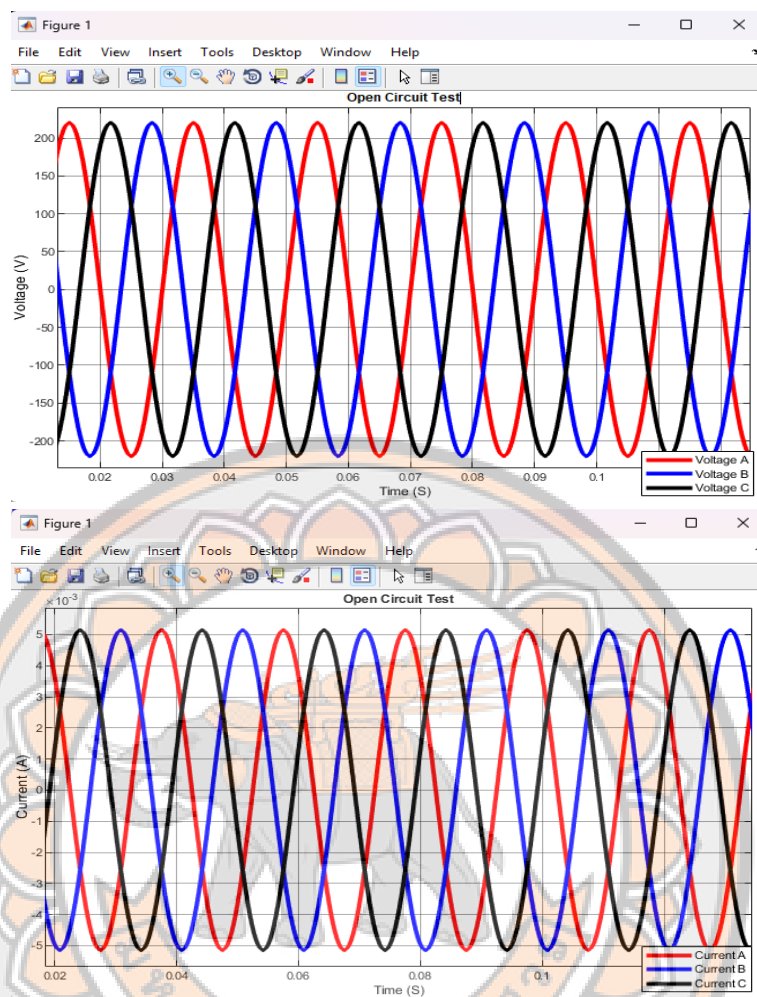
3.5 การจำลองระบบของหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink

การจำลองในงานวิจัยนี้ดำเนินการใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลกับการทดลองจริง โดยแบบจำลองถูกออกแบบให้มีโครงสร้างสอดคล้องกับระบบทดลอง เพื่อให้สามารถสะท้อนพฤติกรรมของหม้อแปลงไฟฟ้าได้อย่างใกล้เคียงสภาพจริง แบบจำลองประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก ได้แก่ แหล่งจ่ายไฟฟ้า 3 เฟส (AC Voltage Source) หม้อแปลงไฟฟ้า สโคป (Scope) โดยที่ตัวสโคปสามารถแยกเป็นการวัดทีละเฟส และสามารถแสดงรวมกันเพื่อเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าในแต่ละสาย แสดงดังภาพ 22



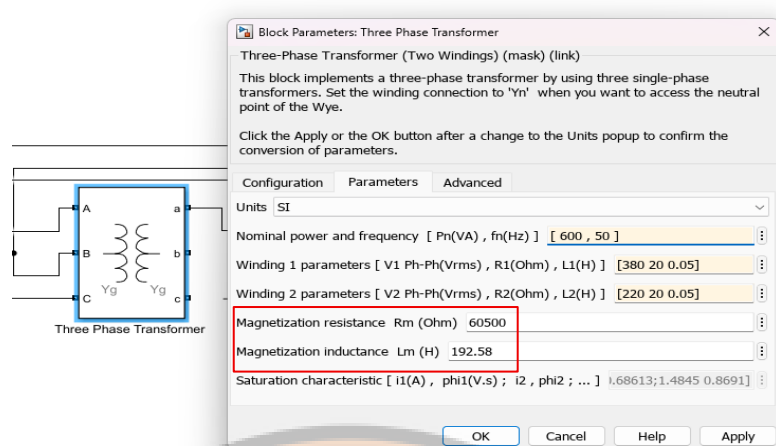
ภาพ 22 ตัวอย่างโมเดลที่จำลองผ่านโปรแกรม MATLAB/Simulink

ผลการจำลองจากโปรแกรม MATLAB/Simulink โดยแกนนอนแสดงถึงเวลา (Time) หน่วยเป็นวินาที (S) เหมือนกัน ในส่วนของแกนตั้งค่าทางไฟฟ้าที่ทำการวัด ซึ่งประกอบไปด้วยกระแส (Current) หน่วยเป็นแอมแปร์ (A) และแรงดัน (Voltage) หน่วยเป็นโวลต์ (V) แสดงดังภาพ 23 โดยในแต่ละภาพจะแสดงตัวแปรเพียงชนิดเดียว เส้นกราฟในแต่ละภาพใช้สีเดียวกันเพื่อแสดงค่าของตัวแปรนั้นๆ ในแต่ละเฟสของระบบสามเฟส ซึ่งช่วยให้สามารถเปรียบเทียบพฤติกรรมของแรงดันและกระแสในสภาวะต่าง ๆ ได้อย่างชัดเจน



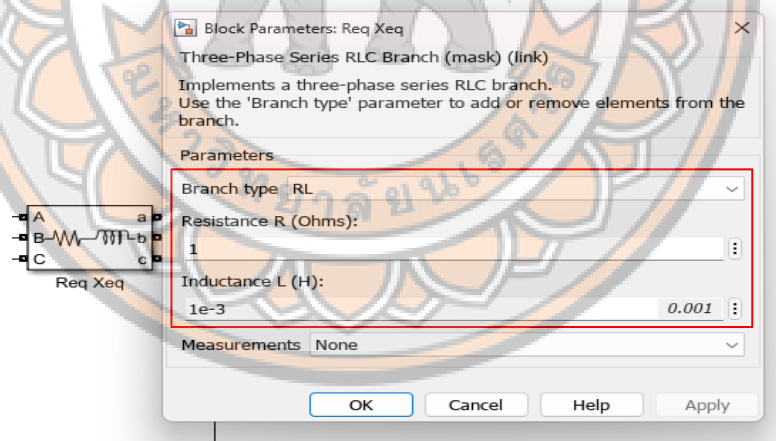
ภาพ 23 ตัวอย่างกราฟแรงดัน และกระแสจากสโคป

แรงดัน และกระแสของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในแบบจำลองถูกกำหนดค่าที่ได้จากการทดสอบเปิดวงจร และการทดสอบลัดวงจรเพื่อให้แบบจำลองมีความสอดคล้องกับพฤติกรรมของหม้อแปลงไฟฟ้า ในการกำหนดแบบจำลอง ได้มีการตั้งค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูล ได้แก่ ความต้านทานแกนเหล็ก (R_c) รีแอคแตนซ์ (X_m) ความต้านทานสมมูล (R_{eq}) และรีแอคแตนซ์สมมูล (X_{eq})



ภาพ 24 การตั้งค่าพารามิเตอร์ในการทดสอบเปิดวงจร

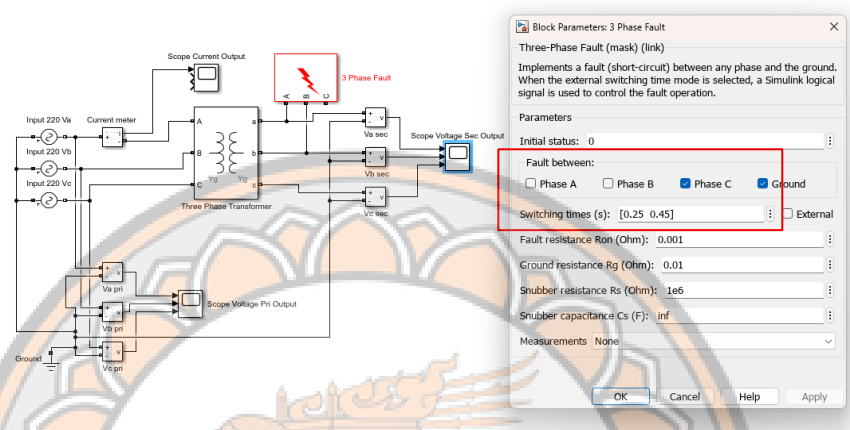
จากภาพ 24 การตั้งค่าพารามิเตอร์สำหรับการทดสอบเปิดวงจรในโปรแกรม MATLAB/Simulink โดยกำหนดค่าในส่วนของ **Magnetizing Branch** เพื่อแทนพฤติกรรมของแกนเหล็ก ซึ่งมีผลต่อกระแสแม่เหล็ก และกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก



ภาพ 25 การตั้งค่าพารามิเตอร์ในการทดสอบลัดวงจร

จากภาพ 25 การตั้งค่าพารามิเตอร์สำหรับการทดสอบลัดวงจรในโปรแกรม MATLAB/Simulink โดยกำหนดในส่วนของ **Series Branch** เพื่อแทนความต้านทาน และรีแอ็กแตนซ์ของขดลวด ซึ่งมีผลต่อกระแสลัดวงจร และพฤติกรรมของระบบในสภาวะผิดปกติ

นอกจากนี้ในการจำลองสถานะผิดปกติ ได้มีการกำหนดช่วงเวลาในการเกิดลัดวงจรโดยใช้สวิตช์ควบคุม เพื่อให้สามารถวิเคราะห์พฤติกรรมของระบบก่อนเกิดความผิดปกติ ขณะเกิดความผิดปกติ และหลังความผิดปกติได้อย่างชัดเจน



ภาพ 26 การตั้งค่าการเกิดฟอลต์ในเฟส และเวลาในการควบคุม

จากภาพ 26 การตั้งค่าควบคุมเวลาในการเกิดความผิดปกติ โดยใช้สวิตช์ในโปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อกำหนดช่วงเวลาในการเกิดลัดวงจร ทำให้สามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน และกระแสในแต่ละช่วงเวลา วิเคราะห์พฤติกรรมของระบบเมื่อเกิดสภาวะลัดวงจร

3.6 การวิเคราะห์ข้อมูล

ในงานวิจัยนี้ ข้อมูลที่ได้จากการทดลองจริง และการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink จะถูกนำมาวิเคราะห์ทั้งในเชิงปริมาณ และคุณภาพ เพื่อประเมินพฤติกรรมของหม้อแปลงไฟฟ้าในสภาวะการทำงานปกติ และสภาวะผิดปกติ รวมถึงเพื่อประเมินความถูกต้องของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น

ในส่วนของการวิเคราะห์เชิงปริมาณ จะทำการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองจริงกับค่าที่ได้จากการจำลอง โดยใช้ตัวชี้วัดทางสถิติได้แก่ค่าร้อยละความคลาดเคลื่อน (%Error) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ (20)

$$\%Error = \frac{|X_{exp} - X_{sim}|}{X_{exp}} \times 100 \quad (20)$$

โดย X_{exp} คือ ค่าที่ได้จากการทดลอง
 X_{sim} คือ ค่าที่ได้จากการจำลอง

หากในกรณีลัดวงจรลงดินแล้วค่า (X_{exp}) มีค่าเป็น 0 สมการนี้จะไม่สามารถหาค่าได้เนื่องจากตัวหารเป็นศูนย์ครับ ในการวิเคราะห์งานส่วนนี้ เปลี่ยนจากการหา (%Error) สัมพัทธ์ ไปเป็นการรายงานค่า ผลต่างโดยตรง (Absolute Error) หรือใช้การเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนเทียบกับค่าพิกัด (Rated Value) ของหม้อแปลงแทน เพื่อให้ยังสามารถประเมินความแม่นยำของแบบจำลอง

ในส่วนของการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ จะพิจารณารูปคลื่นแรงดัน และกระแสในโดเมนเวลา โดยมุ่งเน้นการเปรียบเทียบแนวโน้มของรูปคลื่น ค่ากระแสลัดวงจร และความไม่สมดุลของระบบในกรณีการเกิดลัดวงจรระหว่างสาย (L-L) และการลัดวงจรระหว่างสายกับดิน (L-G)



บทที่ 4

ผลการวิจัย

ในวิจัยศึกษาพฤติกรรมหม้อแปลงในสภาวะการทำงานปกติ และสภาวะผิดปกติ โดยใช้การทดลอง หม้อแปลงต้นแบบ หม้อแปลงที่สร้าง และการจำลองผ่านโปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อนำผลมาเปรียบเทียบ และวิเคราะห์ความสอดคล้องของพฤติกรรมระบบ

4.1 เกณฑ์การประเมินความคลาดเคลื่อน

ในการเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการจำลอง ใช้ค่าร้อยละเป็นเกณฑ์การประเมิน เพื่อวิเคราะห์ความแม่นยำของแบบจำลองเมื่อเทียบการทดลอง โดยค่าความคลาดเคลื่อนแสดงถึงพฤติกรรมของหม้อแปลงไฟฟ้าได้ใกล้เคียงกับสภาวะจริง

โดยทั่วไป งานวิจัยทางวิศวกรรมไฟฟ้ามักยอมรับค่าความคลาดเคลื่อนในช่วงไม่เกิน 10% สำหรับการทดลอง และการจำลอง เนื่องจากระบบจริงมีปัจจัยต่อผลการทดลองหลายด้าน เช่น ความไม่สมบูรณ์ของวัสดุ การสูญเสียในระบบ ความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัด และผลกระทบจากอุณหภูมิ

ดังนั้น ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำกว่า 10% จะถือว่าผลการจำลองมีความสอดคล้องกับการทดลองและสามารถใช้แทนพฤติกรรมของหม้อแปลงไฟฟ้าได้อย่างเหมาะสม

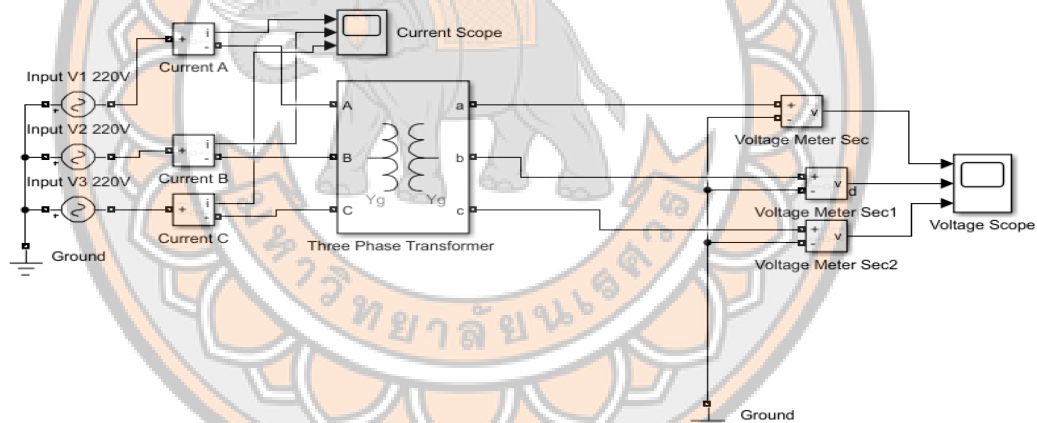
4.2 การทดสอบเปิดวงจร (Open Circuit Test)

การทดสอบเปิดวงจรเพื่อศึกษาพฤติกรรมของหม้อแปลงในสภาวะไม่มีโหลด แสดงดังภาพ 27 และภาพ 28 โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่ากระแสไม่มีโหลด และกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก ซึ่งเป็นค่าที่สำคัญที่วิเคราะห์การทำงานของหม้อแปลง

ในการทดสอบนี้ได้ทำการจ่ายแรงดันขนาด 220 โวลต์ ที่ 50 เฮิร์ตซ์ เข้าด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง โดยปล่อยให้ด้านทุติยภูมิอยู่ในสภาวะเปิดวงจร ทำการวัดแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้า แสดงดังภาพ 29 และภาพ 30



ภาพ 27 วงจรการทดสอบเปิดวงจรจากการทดลอง



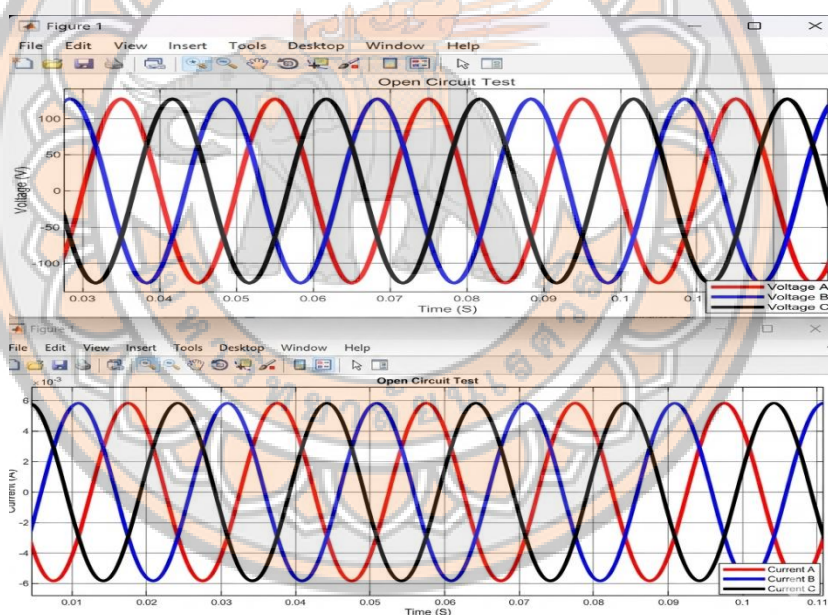
ภาพ 28 วงจรการทดสอบเปิดวงจรจากการจำลอง



ภาพ 29 การวัดกระแส และแรงดันในการทดลอง



ภาพ 30 การวัดกำลังไฟฟ้าในการทดลอง



ภาพ 31 รูปคลื่นแรงดัน และกระแส RMS ในการทดสอบเปิดวงจร

จากกราฟภาพ 31 การทดสอบเปิดวงจร พบว่าแกนนอนแสดงเวลา (Time) และแกนตั้งแสดงค่าแรงดัน (Voltage) และกระแส (Current) ของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยรูปคลื่นมีลักษณะเป็นคลื่นไซน์ต่อเนื่อง แสดงถึงการทำงานของระบบไฟฟ้า ขณะที่ค่ากระแสมีขนาดต่ำ เนื่องจากเป็นกระแสไม่ไหลที่ใช้สำหรับสร้างฟลักซ์แม่เหล็กภายในแกนเหล็ก ช่วยลดการสูญเสียแกนเหล็กเท่านั้น ซึ่งสอดคล้องกับหลักการทดสอบเปิดวงจรที่เกี่ยวข้องกับค่าความต้านทานการสูญเสียในแกน

เหล็ก (R_c) และรีแอ็กแตนซ์แม่เหล็ก (X_m) นอกจากนี้ ค่าที่แสดงในกราฟเป็นค่าอาร์เอ็มเอส (Root Mean Square) ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากระแสสลับและการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าในสภาวะคงตัว (Steady State)

ตารางที่ 3 แสดงผลการทดสอบเปิดวงจร

พารามิเตอร์	หม้อแปลงต้นแบบ	หม้อแปลงที่สร้าง	ผลการจำลอง
แรงดันด้านปฐมภูมิ (V)	220	220	220
แรงดันด้านทุติยภูมิ (V)	125	125	127
กระแสไฟฟ้า (A)	0.006	0.007	0.0058
กำลังไฟฟ้า (W)	1.32	1.54	1.287

จากตาราง 3 พบว่าผลการจำลองมีแรงดันขาออก 127 โวลต์ ซึ่งใกล้เคียงทฤษฎี แบบจำลองอิงอัตราส่วนของจำนวนรอบอย่างเหมาะสม ขณะที่กระแสมีค่า 0.0058 แอมแปร์ กำลังไฟฟ้า 1.287 วัตต์ ซึ่งต่ำกว่าการทดลองจริง แบบจำลองมีลักษณะอุดมคติไม่มีการสูญเสียจริงทั้งหมด

ในส่วนของหม้อแปลงต้นแบบ เมื่อจ่ายแรงดัน 220 โวลต์ จะได้แรงดันขาออกที่ 125 โวลต์ ซึ่งเป็นไปตามอัตราส่วนจำนวนรอบตามทฤษฎี โดยกระแสมีค่า 0.006 แอมแปร์ แสดงให้เห็นว่าอิมพีแดนซ์สูง ส่งผลให้การสร้างฟลักซ์มีขนาดเล็ก กำลังไฟฟ้ามีค่า 1.32 วัตต์ สะท้อนถึงการสูญเสียในแกนเหล็กเป็นหลัก

ในส่วนของหม้อแปลงที่สร้างขึ้นพบว่า เมื่อจ่ายแรงดัน 220 โวลต์ จะได้แรงดันขาออกที่ 125 โวลต์ กระแสไม่มีโหลดมีขนาดถึง 0.007 แอมแปร์ กำลังไฟฟ้ามีค่า 1.54 วัตต์ ซึ่งสูงกว่าหม้อแปลงต้นแบบ แสดงว่าการสูญเสียในแกนเหล็กมากขึ้น สาเหตุเกิดจากการประกอบที่ไม่แน่น ทำให้มีช่องว่างอากาศ (Air Gap) ส่งผลให้ใช้กระแสแม่เหล็กมากขึ้น

โดยสรุป เมื่อเปรียบเทียบพบว่าผลมีแนวโน้มสอดคล้องกันในเชิงพฤติกรรม ซึ่งแตกต่างในเชิงปริมาณ โดยหม้อแปลงที่สร้างมีค่าการสูญเสียที่สูง การจำลองมีค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นนั้นสามารถอธิบายได้จากข้อจำกัดในการจำลอง ซึ่งสามารถนำไปคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนเป็นค่าร้อยละ (%Error) เพื่อแสดงในตารางถัดไป

ตารางที่ 4 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนในการทดสอบเปิดวงจร

พารามิเตอร์	หม้อแปลงต้นแบบ	หม้อแปลงต้นแบบ	หม้อแปลงที่สร้าง
	กับ	กับ	กับ
	หม้อแปลงที่สร้าง (%)	ผลการจำลอง (%)	ผลการจำลอง (%)
แรงดันทุติยภูมิ	0	1.6	1.6
กระแส	16.67	2.5	19.66
กำลังไฟฟ้า	16.67	2.5	19.66

จากตาราง 4 พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนของแรงดันขาออกมีค่าต่ำมาก โดยมีค่า 0% ระหว่างหม้อแปลงต้นแบบกับหม้อแปลงที่สร้างและประมาณ 1.6% แสดงให้เห็นว่าความสัมพันธ์ของจำนวนรอบขดลวดและอัตราส่วนแรงดันมีความถูกต้องและสอดคล้องกับทฤษฎีเป็นอย่างดี เนื่องจากแรงดันเป็นพารามิเตอร์ที่ขึ้นกับอัตราส่วนรอบของขดลวดเป็นหลัก จึงมีความคลาดเคลื่อนต่ำที่สุดในทุกกรณี

ในส่วนของกระแส พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 16.67% ระหว่างหม้อแปลงต้นแบบกับหม้อแปลงที่สร้าง และ 19.66% ระหว่างหม้อแปลงที่สร้างกับผลการจำลอง ขณะที่ค่าระหว่างหม้อแปลงต้นแบบกับผลการจำลองมีเพียง 2.5% แสดงให้เห็นว่ากระแสมีความไวต่อปัจจัยทางกายภาพของหม้อแปลงมากกว่าแรงดัน เช่น คุณสมบัติของแกนเหล็ก ฟลักซ์รั่ว การสูญเสียในแกนเหล็ก ความแปรผันของค่าความต้านทานขดลวด รวมถึงความไม่สมบูรณ์ของการประกอบหม้อแปลง ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อค่ากระแสแม่เหล็กในสภาวะเปิดวงจร ค่าความคลาดเคลื่อนของกระแสสูงกว่าเกณฑ์ 10% ที่กำหนดไว้

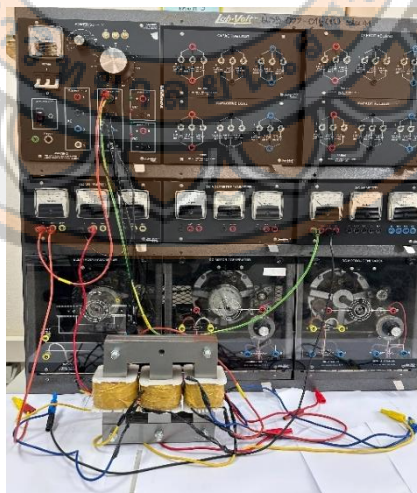
สำหรับกำลังไฟฟ้า พบว่ามีแนวโน้มของความคลาดเคลื่อนสอดคล้องกับกระแส เนื่องจากกำลังไฟฟ้าในสภาวะเปิดวงจรเกิดจากการสูญเสียในแกนเหล็กเป็นหลัก ซึ่งขึ้นกับทั้งกระแสและคุณสมบัติของวัสดุ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อน 16.67% และ 19.66% ในกรณีที่เกี่ยวข้องกับหม้อแปลงที่สร้างขึ้น สะท้อนให้เห็นว่าการสูญเสียจริงภายในระบบมีมากกว่าที่แบบจำลอง MATLAB/Simulink สามารถแทนได้ครบถ้วน นอกจากนี้ ในการทดลองเปิดวงจร กำลังไฟฟ้ามียุคต่ำประมาณ 1 W ขณะที่เครื่องมือวัดมีช่วงสเกลค่อนข้างกว้าง จึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการอ่านค่าได้ง่าย และส่งผลให้ค่าความคลาดเคลื่อนสูงกว่า 10%

โดยสรุป ค่าความคลาดเคลื่อนของแรงดันมีค่าต่ำกว่า 2% แสดงให้เห็นว่าสามารถอธิบายอัตราส่วนแรงดันของหม้อแปลงได้ตามหลักการทางทฤษฎี ขณะที่ค่าความคลาดเคลื่อนของกระแสและกำลังไฟฟ้าที่มีค่าสูงกว่า 10% เกิดจากข้อจำกัดแบบจำลองที่ยังไม่สามารถแทนพฤติกรรมไม่เชิงเส้นของแกนเหล็ก ฟลักซ์รั่ว และการสูญเสียจริงทั้งหมดได้ รวมถึงข้อจำกัดของเครื่องมือวัดในช่วงค่าต่ำ อย่างไรก็ตาม แนวโน้มยังคงสอดคล้องกัน และสามารถใช้อธิบายพฤติกรรมของหม้อแปลงไฟฟ้าในสถานะเปิดวงจรได้อย่างเหมาะสม

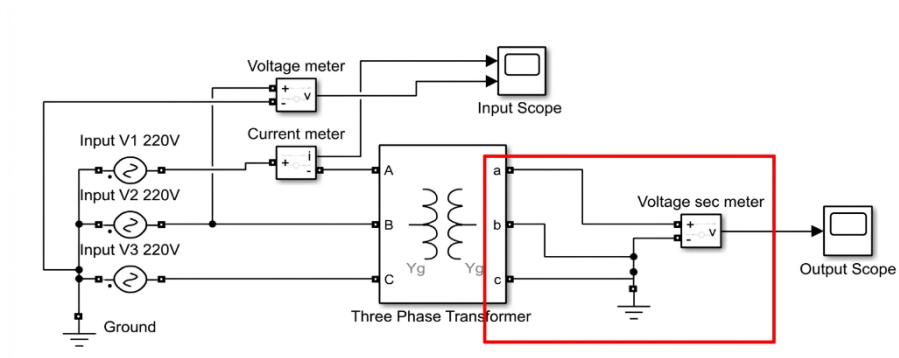
4.3 การทดสอบลัดวงจร

การทดสอบลัดวงจรเป็นการทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมของหม้อแปลงในสถานะที่มีอิมพีแดนซ์ต่ำมาก แสดงดังภาพ 32 และภาพ 33 โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์การสูญเสียในขดลวด

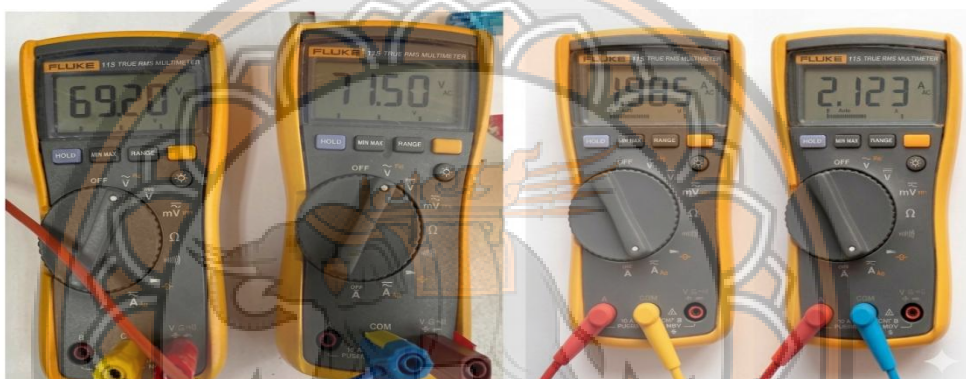
ทำการลัดด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง และจ่ายแรงดันด้านปฐมภูมิ แรงดันที่จ่ายนั้น 220 โวลต์ ขณะที่ความถี่ของระบบกำหนดที่ 50 เฮิร์ตซ์ ทำการวัดแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้า ดังภาพ 34 และภาพ 35



ภาพ 32 วงจรการทดสอบลัดวงจรจากการทดลอง



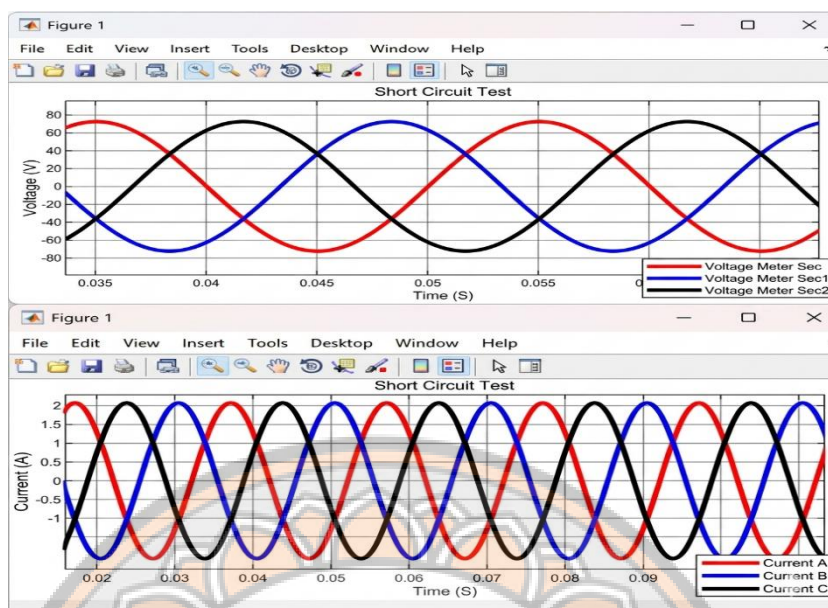
ภาพ 33 วงจรการทดสอบลัดวงจรจากการจำลอง



ภาพ 34 การวัดกระแส และแรงดันในการทดลอง



ภาพ 35 การวัดกำลังไฟฟ้าในการทดลอง



ภาพ 36 การวัดกระแส และแรงดันในการจำลอง

จากภาพ 36 พบว่าแกนนอนแสดงเวลา (Time) และแกนตั้งแสดงค่าแรงดัน (Voltage) และกระแส (Current) ของหม้อแปลง โดยเมื่อเกิดสภาวะลัดวงจร กระแสมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากอิมพีแดนซ์มีค่าต่ำ ส่งผลให้กระแสเพิ่มขึ้นตามหลักการของการลัดวงจร ขณะที่แรงดันมีแนวโน้มลดลงจากผลของแรงดันตกคร่อมภายในหม้อแปลง ซึ่งสอดคล้องกับหลักการที่ใช้วิเคราะห์ค่าความต้านทานสมมูล (R_{eq}) และรีแอ็กแตนซ์สมมูล (X_{eq}) ของหม้อแปลง ค่าที่แสดงในกราฟเป็นค่าอาร์เอ็มเอส (Root Mean Square) ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากระแสสลับและใช้ในการประเมินพฤติกรรมของหม้อแปลงไฟฟ้าในสภาวะลัดวงจร โดยสามารถสะท้อนค่าทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจริงในสภาวะคงตัวได้อย่างเหมาะสม

ตารางที่ 5 แสดงผลการทดสอบลัดวงจร

พารามิเตอร์	หม้อแปลงต้นแบบ	หม้อแปลงที่สร้าง	ผลการจำลอง
แรงดันด้านปฐมภูมิ (V)	220	220	220
แรงดันด้านทุติยภูมิ (V)	69.20	71.50	70.20
กระแส (A)	1.985	2.123	2.075
กำลังไฟฟ้า (W)	137.36	146.58	142.41

จากตาราง 5 ผลการจำลองพบว่า เมื่อจ่ายแรงดันด้านปฐมภูมิ 220 โวลต์ จะได้แรงดันขาออก 70.20 โวลต์ กระแส 2.075 แอมแปร์ และกำลังไฟฟ้า 142.41 วัตต์ ซึ่งสอดคล้องกับหลักการของหม้อแปลงในสภาวะลัดวงจร โดยเมื่อลัดวงจรอิมพีแดนซ์ของระบบจะมีค่าต่ำ ส่งผลให้กระแสสูงขณะที่กำลังไฟฟ้าส่วนใหญ่เกิดจากการสูญเสียในขดลวด ทำให้ค่าเพิ่มขึ้นตามกระแส ค่าที่ได้จากการจำลองใกล้เคียงทฤษฎี แบบจำลองไม่มีผลกระทบ เช่น อุณหภูมิและความไม่สมบูรณ์ของวัสดุ

ในส่วนของหม้อแปลงต้นแบบพบว่า ภายใต้เงื่อนไข จะได้แรงดันขาออก 69.20 โวลต์ กระแส 1.985 แอมแปร์ และกำลังไฟฟ้า 137.36 วัตต์ ซึ่งต่ำกว่าแบบจำลอง ความแตกต่างสามารถอธิบายได้จากพฤติกรรมของระบบจริง มีการสูญเสีย เช่น ฟลักซ์รั่ว การเปลี่ยนแปลงของความต้านทานตามอุณหภูมิ ส่งผลให้อิมพีแดนซ์โดยรวมเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

จากหม้อแปลงที่สร้างขึ้นพบว่า แรงดันขาออกอยู่ 71.50 โวลต์ กระแส 2.123 แอมแปร์ และกำลังไฟฟ้า 146.58 วัตต์ ซึ่งมีค่าสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับอีกสองกรณี แสดงให้เห็นว่าการสูญเสียในระบบมีมากขึ้น อาจเกิดจากการพันขดลวด เกิดฟลักซ์รั่วไหลมากขึ้น

โดยสรุป ค่าที่ได้จากทั้งสามกรณีมีแนวโน้มสอดคล้องกับหลักการทางทฤษฎี โดยกระแสมีค่าสูงเนื่องจากอิมพีแดนซ์ต่ำ และกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามกระแส ซึ่งมีความแตกต่างในเชิงปริมาณ โดยผลการจำลองค่าใกล้เคียงเชิงทฤษฎีมากที่สุด หม้อแปลงต้นแบบสะท้อนพฤติกรรมจริง และหม้อแปลงที่สร้างแสดงให้เห็นปัจจัยทางกายภาพต่อการสูญเสียในระบบ ความแตกต่างดังกล่าวสามารถนำไปวิเคราะห์ในตารางถัดไป

ตารางที่ 6 แสดงความคลาดเคลื่อนในการทดสอบลัดวงจร

พารามิเตอร์	หม้อแปลงต้นแบบ กับ หม้อแปลงที่สร้าง (%)	หม้อแปลงต้นแบบ กับ ผลการจำลอง (%)	หม้อแปลงที่สร้าง กับ ผลการจำลอง (%)
แรงดันทุติยภูมิ	3.324	1.445	1.852
กระแส	6.952	4.534	2.313
กำลังไฟฟ้า	6.712	3.676	2.928

จากตารางที่ 6 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนของการทดสอบลัดวงจร พบว่าความคลาดเคลื่อนของแรงดันทุติยภูมิต่ำ มีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 1.445–3.324% ซึ่งแรงดันของหม้อแปลงไฟฟ้ายังเป็นไปตามหลักการของอัตราส่วนขดลวด มีผลกระทบจากปัจจัยภายนอกน้อยเมื่อเทียบกับพารามิเตอร์อื่น

ในส่วนของการกระแสพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนประมาณ 2.313–6.952% โดยค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดเกิดขึ้นระหว่างหม้อแปลงต้นแบบกับหม้อแปลงที่สร้างขึ้น แสดงให้เห็นว่ากระแสมีความไวต่ออิมพีแดนซ์สมมูล ซึ่งเกิดจากความต้านทาน ฟลักซ์รั่ว และสภาพทางกายภาพของหม้อแปลงที่แตกต่างกัน

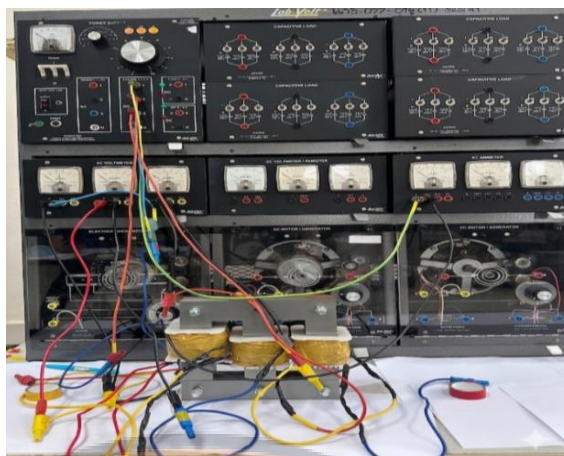
ในส่วนกำลังไฟฟ้า พบว่าค่าใกล้เคียงกับกระแส ค่าประมาณ 2.928–6.712% กำลังไฟฟ้าเกิดการสูญเสียในขดลวดเป็นหลัก จึงทำให้แนวโน้มของความคลาดเคลื่อนสอดคล้องกัน

โดยสรุป ค่าความคลาดเคลื่อนทั้งหมดอยู่ในช่วงต่ำกว่า 7% ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้สำหรับการทดลองทางวิศวกรรมไฟฟ้า แสดงว่าผลการจำลองสามารถสะท้อนพฤติกรรมของหม้อแปลงไฟฟ้าได้ใกล้เคียงกับการทดลองจริง และความแตกต่างที่เกิดขึ้นสามารถอธิบายได้จากข้อจำกัดของแบบจำลอง รวมถึงปัจจัยทางกายภาพของหม้อแปลง เช่น ความไม่สมบูรณ์ของวัสดุ และผลกระทบจากอุณหภูมิ

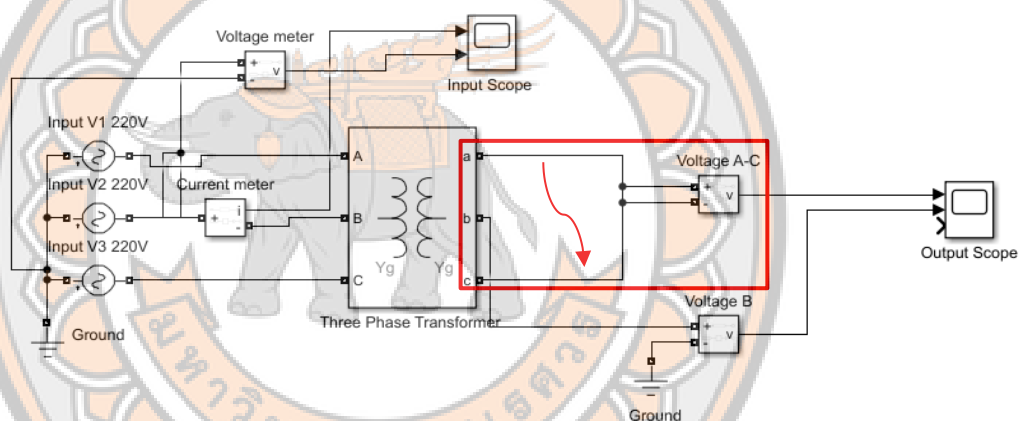
4.4 การทดสอบลัดวงจรระหว่างสาย

การทดสอบลัดวงจรระหว่างสายเพื่อศึกษาพฤติกรรมของหม้อแปลงในสภาวะผิดปกติเกิดจากการสัมผัสกันโดยตรงระหว่างสายไฟสองเฟส แสดงดังภาพ 37 และภาพ 38 ซึ่งทำให้ระบบเกิดสภาวะอิมพีแดนซ์ต่ำ และกระแสลัดวงจรไหลสูง

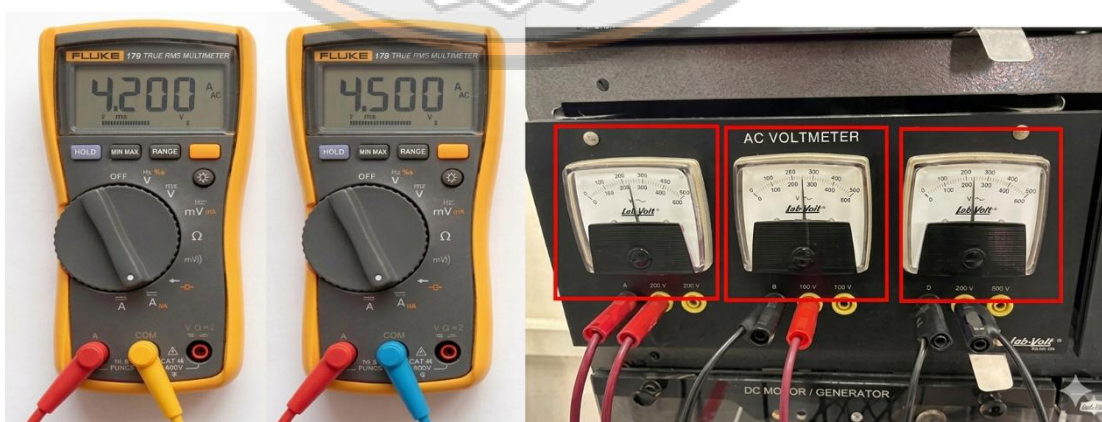
ในการทดสอบได้ทำการจ่ายแรงดันเข้าด้านปฐมภูมิ 220 โวลต์ โดยความถี่ของระบบที่ 50 เฮิรตซ์ส่วนของด้านทุติยภูมิทำการลัดวงจร 2 เฟสเข้าด้วยกัน ในการลัดทำการลัดระหว่าง เฟส A และเฟส C ทำการวัดแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้า แสดงดังภาพ 39 และภาพ 40



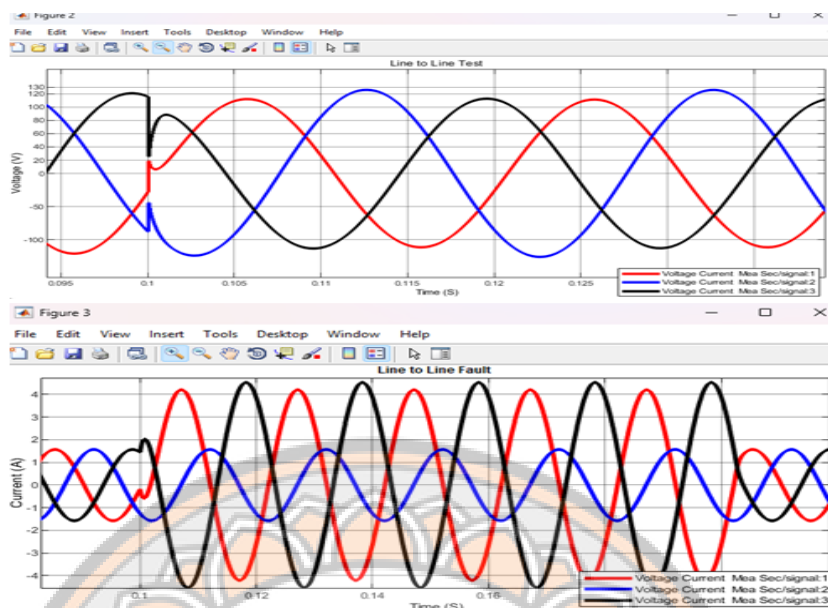
ภาพ 37 วงจรการทดสอบลัดวงจรระหว่างสายจากการทดลอง



ภาพ 38 วงจรการทดสอบลัดวงจรระหว่างสาย ในการจำลอง



ภาพ 39 การวัดกระแส และแรงดันในการทดลอง



ภาพ 40 กราฟกระแส และแรงดันในการจำลอง

จากภาพ 40 พบว่าแกนนอนแสดงเวลา (Time) และแกนตั้งแสดงค่าแรงดัน (Voltage) และกระแส (Current) โดยหลังเกิดลัดวงจร กระแสของเฟสมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว และรูปคลื่นเกิดความไม่สมดุล ซึ่งสอดคล้องกับหลักการลัดวงจรระหว่างสายที่ทำให้อิมพีแดนซ์ของระบบลดลงอย่างมาก ทำให้กระแสลัดวงจรสูง รวมถึงทำให้เกิดฟลักซ์รั่วและแรงเค้นทางแม่เหล็กภายในหม้อแปลงเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ ค่าแรงดันและกระแสในช่วงเกิดฟอลต์เป็นค่าขณะสูงสุด (Peak Value) ซึ่งใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมกระแสกระชากและผลกระทบของการลัดวงจรต่อระบบไฟฟ้าและหม้อแปลงไฟฟ้า

ตารางที่ 7 แสดงผลการทดสอบการลัดวงจรระหว่างสาย

พารามิเตอร์	เฟส	หม้อแปลงต้นแบบ	หม้อแปลงที่สร้าง	ผลการจำลอง
แรงดันปฐมภูมิ (V)	A	220	220	220
	B	220	220	220
	C	220	220	220
แรงดันทุติยภูมิ (V)	A	120	125	118.65
	B	120	125	128.39
	C	120	125	118.65
กระแส (A)	I _{fault}	4.5	4.2	4.55

จากตาราง 7 ผลการจำลองพบว่าจ่ายแรงดันด้านปฐมภูมิ 220 โวลต์ จะได้แรงดันขาออกของเฟส A และ C ประมาณ 118.65 โวลต์ และของเฟส B ประมาณ 128.39 โวลต์ และกระแสมีค่า 4.55 แอมแปร์ หลังเกิดการลัดวงจรระหว่างเฟส A และ C ระบบเกิดความไม่สมดุลของแรงดันระหว่างเฟส ซึ่งสอดคล้องกับหลักการลัดวงจรระหว่างสาย (Line-to-Line Fault: L-L) ที่ทำให้อิมพีแดนซ์ของเส้นทางกระแสลดลง ส่งผลให้กระแสลัดวงจรเพิ่มสูงขึ้น และแรงดันในเฟสที่เกี่ยวข้องกับฟอลต์ลดลงจากแรงดันตกคร่อมภายในระบบ

สำหรับเฟส B ซึ่งไม่ได้ลัดวงจรโดยตรง พบว่าค่าแรงดันมีแนวโน้มสูงกว่าเฟส A และ C ทั้งในการทดลองและการจำลอง เนื่องจากเมื่อเกิดฟอลต์ระหว่างเฟส A และ C ระบบสามเฟสจะเกิดการกระจายแรงดันใหม่ (Voltage Redistribution) ทำให้เฟสที่ไม่ได้เกิดฟอลต์มีผลกระทบน้อยและรักษาระดับแรงดันไว้ได้ใกล้เคียงค่าปกติ นอกจากนี้ ในแบบจำลอง MATLAB/Simulink ที่มีลักษณะใกล้เคียงระบบอุดมคติและมีการสูญเสียภายในต่ำ อาจทำให้แรงดันของเฟส B มีค่าสูงกว่าผลการทดลอง

จากหม้อแปลงต้นแบบพบว่า แรงดันขาออกมีค่าประมาณ 120 โวลต์ และกระแสมีค่า 4.5 แอมแปร์ ซึ่งสะท้อนพฤติกรรมเมื่อเกิดลัดวงจร โดยกระแสเพิ่มจากอิมพีแดนซ์ของระบบ ขณะที่แรงดันบางเฟสลดลงจากผลของแรงดันตกคร่อมภายในขดลวดและฟลักซ์รั่วภายในหม้อแปลง

ส่วนหม้อแปลงที่สร้างขึ้นพบว่า แรงดันด้านทุติยภูมิของแต่ละเฟสมีค่าประมาณ 125 โวลต์ และมีกระแสลัดวงจรประมาณ 4.2 แอมแปร์ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าผลการจำลอง แสดงให้เห็นว่าปัจจัยทาง

กายภาพ เช่น ความต้านทานขดลวด คุณภาพของแกนเหล็ก และลักษณะการพันขดลวด มีผลต่อพฤติกรรมของหม้อแปลงในสภาวะลัดวงจร ทำให้ค่าที่ได้แตกต่างจากแบบจำลองเชิงอุดมคติ

ในส่วนองแรงดันของหม้อแปลงต้นแบบและหม้อแปลงที่สร้างขึ้นที่มีค่าประมาณ 120 และ 125 โวลต์ตามลำดับ เป็นค่าแรงดันภายใต้สภาวะการทำงานปกติ ขณะที่ค่าแรงดันประมาณ 118.65 โวลต์จากการจำลองเป็นค่าที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะลัดวงจรระหว่างสาย (L-L Fault) ซึ่งทำให้กระแสลัดวงจรเพิ่มสูงขึ้นและเกิดแรงดันตกคร่อมภายในระบบ ส่งผลให้แรงดันของเฟสที่เกิดฟอลต์ลดลงจากค่าปกติ

โดยสรุป ผลการทดลองและผลการจำลองมีความสอดคล้องกับหลักการของการลัดวงจรระหว่างสาย โดยเมื่อเกิดฟอลต์ระหว่างเฟส A และ C กระแสลัดวงจรจะเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากอิมพีแดนซ์ลดลง และระบบเกิดความไม่สมดุลของแรงดันระหว่างเฟส ขณะเดียวกันเฟส B ซึ่งไม่อยู่ในเส้นทางฟอลต์จะยังคงมีแรงดันสูงกว่าเฟสที่เกิดการลัดวงจร ส่งผลให้ค่าของเฟส B สูงกว่าเฟส A และ C ตามพฤติกรรมของระบบไฟฟ้าสามเฟสในสภาวะผิดปกติ

ตารางที่ 8 แสดงความคลาดเคลื่อนในการทดสอบลัดวงจรระหว่างสาย

พารามิเตอร์	เฟส	หม้อแปลงต้นแบบ กับ หม้อแปลงที่สร้าง (%)	หม้อแปลงต้นแบบ กับ ผลการจำลอง (%)	หม้อแปลงที่สร้าง กับ ผลการจำลอง (%)
แรงดันทุติยภูมิ	A	4.167	1.125	5.351
	B	4.167	6.992	2.640
	C	4.167	1.125	5.351
กระแส	I_{fault}	7.143	1.098	7.692

จากตาราง 8 พบว่าความคลาดเคลื่อนของแรงดันขาออกอยู่ในช่วงประมาณ 1.125–6.992% โดยเฟส B มีค่าสูง เมื่อเปรียบเทียบระหว่างหม้อแปลงต้นแบบกับผลการจำลอง แรงดันในเฟสที่ได้รับผลจากฟอลต์มีความไวต่อพารามิเตอร์ภายในระบบมากกว่าเฟสอื่น

ในส่วนองกระแสลัดวงจร ค่าความคลาดเคลื่อนประมาณ 1.098–7.692% ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้สำหรับการทดลองทางวิศวกรรมไฟฟ้า ความแตกต่างที่เกิดขึ้นสามารถอธิบาย

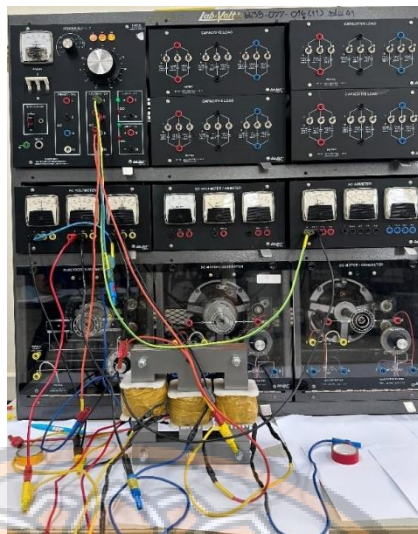
ข้อจำกัดแบบจำลอง และปัจจัยของระบบ เช่น พลักซ์รั่ว ความไม่สมบูรณ์ของวัสดุ และความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัด

โดยสรุปผลมีความสอดคล้องหลักการของการลัดวงจรระหว่างสาย โดยเมื่อเกิดฟอลต์ กระแสจะเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากอิมพีแดนซ์ของระบบลดลง และระบบเกิดความไม่สมดุลของแรงดันและกระแสระหว่างเฟส ขณะที่ค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้ยังอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ เห็นว่าแบบจำลองสะท้อนพฤติกรรมของหม้อแปลงไฟฟ้าในสภาวะลัดวงจรระหว่างสายได้อย่างเหมาะสม

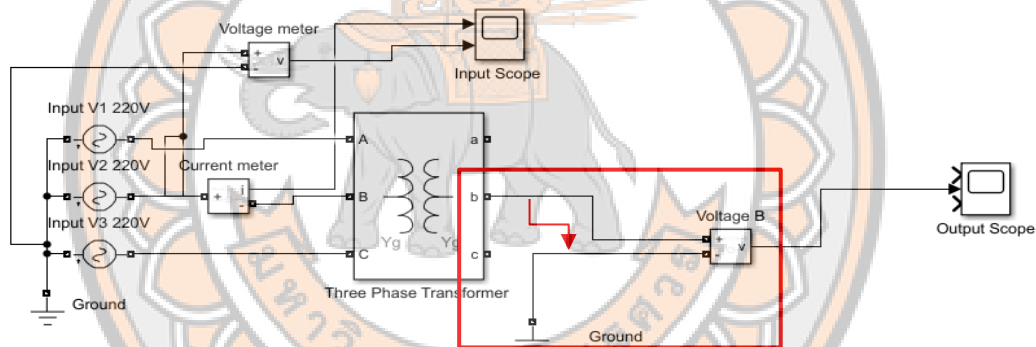
4.5 การทดสอบลัดวงจรระหว่างสายกับดิน

การทดสอบการลัดวงจรระหว่างสายกับดิน (Line-to-Ground Fault: L-G) เป็นการทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมของหม้อแปลงไฟฟ้าในสภาวะผิดปกติ ที่เกิดจากการสัมผัสกันระหว่างสายไฟฟ้ากับจุดต่อลงดิน แสดงดังภาพ 41 และภาพ 42 ซึ่งทำให้ระบบเกิดความไม่สมดุลของแรงดันและกระแสภายในระบบไฟฟ้า รวมถึงทำให้เกิดกระแสลัดวงจรไหลกลับผ่านทางดิน ทำการวัดแรงดันและกระแส แสดงดังภาพ 43

ในการทดสอบ ได้ทำการจ่ายแรงดันเข้าด้านปฐมภูมิที่ 220 โวลต์ โดยกำหนดความถี่ของระบบที่ 50 เฮิร์ตซ์ ส่วนด้านทุติยภูมิทำการลัดวงจรระหว่างเฟสกับดิน โดยกำหนดให้เกิดฟอลต์ที่เฟส B ส่งผลให้กระแสในเฟสที่เกิดการลัดวงจรเพิ่มสูงขึ้น ขณะที่แรงดันและกระแสของเฟสอื่นเกิดความไม่สมดุล เนื่องจากกระแสลัดวงจรไหลผ่านเส้นทางที่มีอิมพีแดนซ์ต่ำกว่าสภาวะปกติ นอกจากนี้ยังทำให้เกิดกระแสลำดับศูนย์ (Zero Sequence Current) และส่งผลต่อฟลักซ์แม่เหล็กภายในแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าอีกด้วย



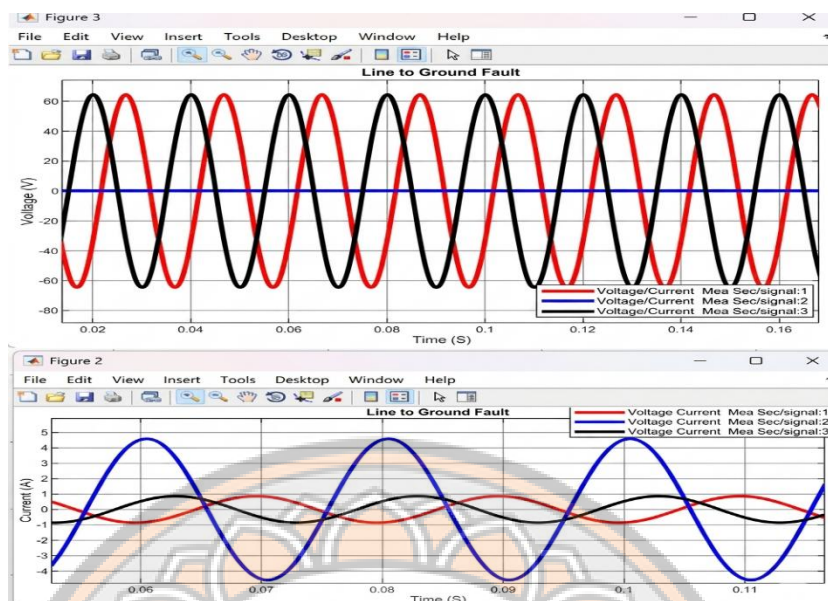
ภาพ 41 วงจรการทดสอบลัดวงจรระหว่างสายกับดิน ในการทดลอง



ภาพ 42 วงจรการทดสอบลัดวงจรระหว่างสายกับดิน ในการจำลอง



ภาพ 43 การวัดกระแส และแรงดันในการทดลอง



ภาพ 44 การวัดกระแส และแรงดันในการจำลอง

จากภาพ 44 การลัดวงจรระหว่างสายกับดิน พบว่าแกนนอนแสดงเวลา (Time) และแกนตั้งแสดงค่าแรงดัน (Voltage) และกระแส (Current) ของระบบ โดยหลังเกิดฟอลต์ กระแสในเฟสที่เกิดลัดวงจรมีค่าสูงขึ้น ขณะที่แรงดันและกระแสของเฟสอื่นเกิดความไม่สมดุล ซึ่งสอดคล้องกับหลักการของการลัดวงจรระหว่างสายกับดิน (Line-to-Ground Fault: L-G) เกิดกระแสลำดับศูนย์ (Zero Sequence Current) ไหลในระบบ ทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กภายในแกนเหล็กเกิดความไม่สมดุล อันเป็นสาเหตุของการเกิดความร้อนสะสมและความเค้นต่อฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้า นอกจากนี้ค่ากระแสที่แสดงในช่วงเกิดฟอลต์เป็นค่ากระแสสูงสุด (Peak Current) ซึ่งใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมกระแสกระชากและผลกระทบของการลัดวงจรต่อระบบไฟฟ้าและหม้อแปลงไฟฟ้าได้อย่างเหมาะสม

ตารางที่ 9 แสดงผลการทดสอบลัดวงจรระหว่างสายกับดิน

พารามิเตอร์	เฟส	หม้อแปลงต้นแบบ	หม้อแปลงที่สร้างขึ้น	ผลการจำลอง
แรงดันปฐมภูมิ (V)	A	220	220	220
	B	220	220	220
	C	220	220	220
แรงดันทุติยภูมิ (V)	A	60	70	65
	B	0	0	0
	C	60	70	65
กระแส (A)	I_{fault}	4.351	4.122	4.58

จากตาราง 9 พบว่าผลการจำลองการลัดวงจรระหว่างสายกับดิน จ่ายแรงดันเข้าด้านปฐมภูมิ 220 โวลต์ จะได้แรงดันขาออกของเฟส A และ C ประมาณ 65 โวลต์ ในขณะที่เฟส B เป็น 0 โวลต์ กระแสลัดวงจรประมาณ 4.58 แอมแปร์ แสดงให้เห็นว่าหลังเกิดฟอลต์ระบบเกิดความไม่สมดุลของแรงดัน และกระแสอย่างชัดเจน เนื่องจากกระแสลัดวงจรไหลผ่านเส้นทางที่มีอิมพีแดนซ์ต่ำกว่าสภาวะปกติ ทำให้แรงดันในเฟสที่เกิดการฟอลต์ลดลงอย่างมาก ทำให้เปลี่ยนแปลงของแรงดันในเฟสอื่นตามหลักของการลัดวงจรระหว่างสายกับดิน

จากหม้อแปลงต้นแบบพบว่า แรงดันขาออกของเฟส A และ C มีค่าประมาณ 60 โวลต์ ขณะที่เฟส B เป็น 0 โวลต์ กระแสลัดวงจร 4.351 แอมแปร์ ซึ่งสะท้อนให้เห็นพฤติกรรมของระบบจริงเมื่อเกิดลัดวงจรระหว่างสายกับดิน โดยแรงดันของเฟสที่เกิดฟอลต์ลดลงจนใกล้ศูนย์ เนื่องจากการไหลของกระแสผ่านดิน ทำให้สูญเสียความสมดุลของแรงดัน นอกจากนี้กระแสที่สูงขึ้นยังส่งผลต่อฟลักซ์ไม่สมดุลในแกนเหล็ก

จากหม้อแปลงที่สร้างพบว่า แรงดันขาออกของเฟส A และ C มีค่าประมาณ 70 โวลต์ ขณะที่เฟส B เป็น 0 โวลต์ กระแสลัดวงจร 4.122 แอมแปร์ ซึ่งต่ำกว่าการจำลอง เห็นว่าปัจจัยทางกายภาพของหม้อแปลง เช่น ความต้านทานขดลวด ฟลักซ์รั่ว และคุณสมบัติของแกนเหล็ก ส่งผลต่อพฤติกรรมของระบบสถานะลัดวงจร ทำให้ค่าที่ได้แตกต่างจากแบบจำลองเชิงอุดมคติ

โดยสรุปผลมีแนวโน้มสอดคล้องกับหลักการลัดวงจรระหว่างสายกับดิน โดยเมื่อเกิดฟอลต์กระแสลัดวงจรจะเพิ่มขึ้นต่อ เนื่องจากอิมพีแดนซ์ของระบบลดลง และระบบเกิดความไม่สมดุลของ

แรงดันเฟสอย่างชัดเจน นอกจากนี้การเกิดกระแสลำดับศูนย์ (Zero Sequence Current) ยังส่งผลต่อฟลักซ์แม่เหล็กภายในแกนเหล็กเกิดความไม่สมดุล ซึ่งอาจทำให้เกิดความร้อนสะสม และความเค้นต่อฉนวนของหม้อแปลงเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ค่าที่ได้จากการทดลองและการจำลองยังมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน และแบบจำลองสามารถอธิบายพฤติกรรมของหม้อแปลงในสภาวะนี้ได้อย่างชัดเจน

ตารางที่ 10 แสดงความคลาดเคลื่อนในการทดสอบลัดวงจรระหว่างสายกับดิน

พารามิเตอร์	เฟส	หม้อแปลงต้นแบบ	หม้อแปลงต้นแบบ	หม้อแปลงที่สร้าง
		กับ หม้อแปลงที่สร้าง (%)	กับ ผลการจำลอง (%)	กับ ผลการจำลอง (%)
แรงดัน	A	16.667	8.33	7.69
	B	≈ 0	≈ 0	≈ 0
	C	16.667	8.33	7.69
กระแส	I_{fault}	5.556	5	11.11

จากตาราง 10 ค่าความคลาดเคลื่อนแรงดันในเฟส A และ C ระหว่างหม้อแปลงต้นแบบกับหม้อแปลงที่สร้างขึ้นมีค่าสูงสุดประมาณ 16.667% ขณะที่ผลการทดลองกับผลการจำลองมีค่าความคลาดเคลื่อนประมาณ 7–8% แสดงให้เห็นว่าแบบจำลอง MATLAB/Simulink สามารถอธิบายพฤติกรรมของระบบในสภาวะลัดวงจรระหว่างสายกับดินได้ใกล้เคียงกับการทดลองจริง โดยเฉพาะพฤติกรรมของแรงดันในเฟสที่ไม่ได้เกิดฟอลต์ ส่วนเฟส B ซึ่งเป็นเฟสที่เกิดการลัดวงจรกับดินโดยตรงมีแรงดันใกล้เคียง 0 V ในทุกกรณี จึงทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าใกล้ศูนย์ ซึ่งสอดคล้องกับหลักการของการลัดวงจรระหว่างสายกับดิน

สำหรับค่าความคลาดเคลื่อนของกระแส พบว่าระหว่างหม้อแปลงต้นแบบกับหม้อแปลงที่สร้างขึ้น และระหว่างหม้อแปลงต้นแบบกับผลการจำลอง มีค่าอยู่ประมาณ 5% ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ทางวิศวกรรมไฟฟ้า ขณะที่ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างหม้อแปลงที่สร้างขึ้นกับผลการจำลองมีค่าสูงสุดประมาณ 11.11% ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์ 10% เล็กน้อย สาเหตุเกิดจากการลัดวงจรระหว่างสายกับดินเป็นสภาวะที่มีความไม่สมดุลสูง ทำให้เกิดกระแสลำดับศูนย์ (Zero Sequence Current) ฟลักซ์แม่เหล็กไม่สมดุล และฟลักซ์รั่วภายในแกนเหล็กมากกว่าสภาวะปกติ นอกจากนี้ยังมี

ผลจากความต้านทานขดลวด คุณสมบัติของแกนเหล็ก การสูญเสียจริงในระบบ และข้อจำกัดของเครื่องมือวัด ซึ่งแบบจำลอง MATLAB/Simulink ไม่สามารถแทนพฤติกรรมจริงได้ครบถ้วน จึงทำให้ค่ากระแสมีความคลาดเคลื่อนสูงกว่าแรงดัน อย่างไรก็ตาม แนวโน้มของผลการทดลองและผลการจำลองยังคงสอดคล้องกัน และสามารถใช้อธิบายพฤติกรรมของหม้อแปลงไฟฟ้าในสภาวะลัดวงจรระหว่างสายกับดินได้อย่างเหมาะสม

4.6 การเปรียบเทียบค่ากระแสลัดวงจรกับค่าทฤษฎี

การเปรียบเทียบค่ากระแสลัดวงจรที่คำนวณจากทฤษฎีกับค่าจากการทดลองและการจำลอง เพื่อประเมินความสอดคล้องของพฤติกรรมหม้อแปลงไฟฟ้าในสภาวะลัดวงจร โดยอาศัยหลักการของหม้อแปลง ซึ่งค่ากระแสลัดวงจรจะขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้าและอิมพีแดนซ์สมมูลของระบบ การคำนวณค่ากระแสลัดวงจรทางทฤษฎี ได้คำนวณค่าอิมพีแดนซ์สมมูลจากการทดสอบลัดวงจร โดยพิจารณาจากอัตราส่วนของแรงดันลัดวงจรต่อกระแสลัดวงจร ดังสมการ (21)

$$Z_{eq} = \frac{V_{sc}}{I_{sc}} \quad (21)$$

เมื่อ V_{sc} คือ แรงดันลัดวงจร
 I_{sc} คือ กระแสลัดวงจร

จากการทดลองพบว่าแรงดันลัดวงจรมีค่า 69.20 โวลต์ และกระแสลัดวงจรมีค่า 1.985 แอมแปร์ ดังนั้นค่าอิมพีแดนซ์สมมูลของหม้อแปลงสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$Z_{eq} = \frac{69.20}{1.985} = 34.86 \, \Omega$$

จากนั้นนำค่าอิมพีแดนซ์สมมูลไปคำนวณค่ากระแสลัดวงจรทางทฤษฎีภายใต้แรงดันใช้งาน 220 โวลต์ ดังสมการ (22)

$$I_{sc} = \frac{V}{Z_{eq}} \quad (22)$$

$$I_{sc} = \frac{220}{34.86} \approx 6.31 \, A$$

ตารางที่ 11 แสดงการเปรียบเทียบค่ากระแสลัดวงจร

วิธีการ	กระแสลัดวงจร (A)
ค่าการคำนวณ	6.31
ผลการทดลอง	4.50
ผลการจำลอง	4.55

จากตารางค่ากระแสลัดวงจรทางทฤษฎีมีค่าสูงกว่าผลการทดลองและผลการจำลอง เนื่องจากการคำนวณทางทฤษฎีอาศัยสมมติฐานของระบบอุดมคติ และพิจารณาเฉพาะอิมพีแดนซ์สมมูลของหม้อแปลงเป็นหลัก จึงไม่ได้รวมผลของการสูญเสียจริงภายในระบบ เช่น ความต้านทานของสายไฟ จุดต่อสาย ฟลักซ์รั่ว และความอิ่มตัวของแกนเหล็ก ส่งผลให้ค่ากระแสที่คำนวณได้มีค่าสูง

ขณะที่ผลการจำลองมีค่าใกล้เคียงผลการทดลองมากกว่า เนื่องจากแบบจำลอง MATLAB/Simulink ได้มีการกำหนดพารามิเตอร์ของหม้อแปลงจากข้อมูลการทดลองจริง เช่น ค่าความต้านทานขดลวด ค่าฟลักซ์รั่ว และค่าพารามิเตอร์จากการทดสอบเปิดวงจรและลัดวงจร ทำให้แบบจำลองสามารถสะท้อนพฤติกรรมของหม้อแปลงจริงได้ใกล้เคียงมากขึ้น ไม่ได้เป็นแบบอุดมคติสมบูรณ์เหมือนการคำนวณทางทฤษฎี

โดยสรุป แม้ว่าค่ากระแสลัดวงจรจากทฤษฎีจะมีค่าสูง แต่ค่าที่ได้คงสอดคล้องกับหลักการของการลัดวงจรในหม้อแปลงไฟฟ้า และแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นอธิบายพฤติกรรมของระบบได้ในเชิงวิศวกรรมไฟฟ้า

4.7 การอภิปรายผลการทดลอง

ผลการทดลองและผลการจำลองมีแนวโน้มสอดคล้องกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในบทที่ 2 โดยเฉพาะงานที่ศึกษาการจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าด้วย MATLAB/Simulink และการวิเคราะห์สภาวะลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้า

จากการทดสอบเปิดวงจร พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนของแรงดันมีค่าต่ำ ขณะที่กระแสมีค่าสูงกว่า ซึ่งสอดคล้องกับงานของ Francis Katende et al. (2022) และ Wei Pi et al. (2020) ที่พบว่าแบบจำลอง MATLAB/Simulink สามารถอธิบายพฤติกรรมแรงดันของหม้อแปลงได้ใกล้เคียงกับการทดลองจริง แต่ค่ากระแสยังได้รับผลกระทบจากการสูญเสียจริง ฟลักซ์รั่ว และพฤติกรรมไม่เชิงเส้นของแกนเหล็ก

ในกรณีการลัดวงจรระหว่างสาย (L-L) และการลัดวงจรระหว่างสายกับดิน (L-G) พบว่าหลังเกิดฟอลต์ กระแสลัดวงจรมีค่าเพิ่มสูงขึ้นและแรงดันของระบบเกิดความไม่สมดุล ซึ่งสอดคล้องกับ

งานของ Daniil I. Ivanchenko et al. (2021) และ Tamer A. Kawady et al. (2008) ที่กล่าวว่า การเกิดฟอลต์ทำให้อิมพีแดนซ์ของระบบลดลง ส่งผลให้กระแสลัดวงจรเพิ่มขึ้น

ในงานวิจัยนี้พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนของกระแสสูงกว่าแรงดัน ซึ่งสอดคล้องกับงานของ Oksana Hoholyuk et al. (2021) ที่ระบุว่าแบบจำลองทั่วไปยังไม่สามารถแทนพฤติกรรมการอิ่มตัวของแกนเหล็ก (Saturation) ฟลักซ์รั่ว และการสูญเสียเชิงไม่เส้นได้ครบถ้วน จึงทำให้ค่ากระแสจากการจำลองแตกต่างจากการทดลองจริงมากกว่าแรงดัน

อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ยังแตกต่างจากบางงานวิจัยในบทที่ 2 เนื่องจากศึกษาเฉพาะการทดสอบพื้นฐานและการลัดวงจรบางประเภทเท่านั้น ยังไม่ได้ครอบคลุมการลัดวงจรระหว่างรอบขดลวด (Inter-turn Fault) หรือการประยุกต์ใช้ AI และ Machine Learning ในการวิเคราะห์ความผิดปกติของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งสามารถนำไปพัฒนาต่อยอดในอนาคตได้

4.8 ข้อจำกัดของงานวิจัย

การศึกษาพฤติกรรมของหม้อแปลงไฟฟ้าภายใต้สภาวะเปิดวงจร ลัดวงจร การลัดวงจรระหว่างสาย (L-L) และการลัดวงจรระหว่างสายกับดิน (L-G) มีข้อจำกัดบางประการส่งผลกระทบต่อความแม่นยำ ดังนี้

แบบจำลองในโปรแกรม MATLAB/Simulink มีลักษณะใกล้เคียงระบบอุดมคติ จึงไม่สามารถสะท้อนพฤติกรรมจริงของหม้อแปลงได้ทั้งหมด เช่น การอิ่มตัวของแกนเหล็ก (Magnetic Saturation) ฟลักซ์รั่ว (Leakage Flux) การสูญเสียที่ไม่เป็นเชิงเส้น ส่งผลให้ค่ากระแสและกำลังไฟฟ้าจากการจำลองมีความคลาดเคลื่อนสูงกว่าแรงดันในบางสภาวะ โดยเฉพาะการทดสอบเปิดวงจรและการลัดวงจรระหว่างสายกับดินที่ระบบเกิดความไม่สมดุลสูง

การทดลองจริงยังได้รับผลกระทบจากปัจจัยภายนอก เช่น ความคลาดเคลื่อนของอุปกรณ์วัด ความต้านทานของสายไฟ จุดต่อวงจร และอุณหภูมิของขดลวด ซึ่งค่าที่วัดได้แตกต่างจากค่าทางทฤษฎีและผลการจำลอง นอกจากนี้ การวัดแรงดันและกระแสของแต่ละเฟสไม่สามารถวัดพร้อมกันแบบ Real-time ได้ทั้งหมด จึงมีความแตกต่างของค่าที่วัดได้ในช่วงเวลาเกิดฟอลต์

หม้อแปลงไฟฟ้าที่สร้างขึ้นยังมีข้อจำกัดด้านกระบวนการผลิต เช่น ความแน่นของการพันขดลวด คุณสมบัติของแกนเหล็ก และช่องว่างอากาศภายในแกนเหล็ก (Air Gap) ซึ่งส่งผลกระทบต่อความต้านทาน ฟลักซ์แม่เหล็ก และการสูญเสียภายในหม้อแปลง ทำให้ค่าที่ได้แตกต่างจากหม้อแปลงต้นแบบและแบบจำลอง

ในส่วนของการกำลังไฟฟ้าขณะเปิดวงจร พบว่าค่ากำลังไฟฟ้ามีขนาดต่ำประมาณ 1 วัตต์ ขณะที่เครื่องมือวัดกำลังไฟฟ้าที่ใช้มีช่วงสเกลการวัดค่อนข้างกว้าง (0–600 W) มีผลต่อความละเอียดในการอ่านค่าต่ำ การเปลี่ยนแปลงของเข็มวัดมีน้อยจนใกล้เคียง 0 W จึงเกิดความคลาดเคลื่อนสูงในการอ่าน

ค่ากำลังไฟฟ้า โดยเฉพาะในการทดสอบเปิดวงจรที่กำลังไฟฟ้าส่วนใหญ่เกิดจากการสูญเสียในแกนเหล็กซึ่งมีค่าต่ำมาก

การจำลองสภาวะลัดวงจรในงานวิจัยนี้เป็นการจำลองภายใต้เงื่อนไขแรงดัน 220 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ เท่านั้น จึงอาจยังไม่ครอบคลุมสภาวะการทำงานจริงของระบบไฟฟ้าที่อาจมีการเปลี่ยนแปลงแรงดัน และความถี่ รวมถึงยังไม่ได้ครอบคลุมความผิดปกติทุกประเภท เช่น การลัดวงจรระหว่างรอบขดลวด (Inter-turn Fault) หรือการลัดวงจรสามเฟส เนื่องจากข้อจำกัดด้านความปลอดภัยและขอบเขตของการทดลอง

นอกจากนี้ การวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้พิจารณาค่าแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าในช่วงเวลาสั้นของการเกิดฟอลต์ จึงไม่ได้วิเคราะห์ผลกระทบ ความร้อน แรงทางกล และการเสื่อมสภาพของฉนวนเมื่อหม้อแปลงทำงานภายใต้สภาวะผิดปกติเป็นเวลานาน

แม้ในงานจะมีข้อจำกัด แต่ผลที่ได้ยังสามารถแสดงแนวโน้มและพฤติกรรมของหม้อแปลงไฟฟ้าในสภาวะปกติ และสภาวะผิดปกติได้สอดคล้องกับหลักการทางทฤษฎี ยังนำไปใช้เป็นแนวทางการศึกษาและพัฒนาแบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าในอนาคตต่อไปได้



บทที่ 5

บทสรุป

5.1 สรุปผลการวิจัย

พฤติกรรมของหม้อแปลงไฟฟ้าในสภาวะปกติและสภาวะผิดปกติ โดยทำการศึกษาทั้งจากการทดลองจริงของหม้อแปลงต้นแบบ หม้อแปลงที่สร้างขึ้น และการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้า ภายใต้สภาวะเปิดวงจร ลัดวงจร การลัดวงจรระหว่างสาย (Line-to-Line Fault: L-L) และการลัดวงจรระหว่างสายกับดิน (Line-to-Ground Fault: L-G)

การทดสอบเปิดวงจร พบว่าแรงดันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงมีค่าใกล้เคียงกับค่าทางทฤษฎีตามอัตราส่วนรอบขดลวด ขณะที่ค่ากระแสไม่มีโหลดและกำลังไฟฟ้ามียุคต่ำ เนื่องจากกระแสส่วนใหญ่เป็นกระแสแม่เหล็ก (Magnetizing Current) ที่ใช้สำหรับสร้างฟลักซ์แม่เหล็กภายในแกนเหล็ก รวมถึงชดเชยการสูญเสียในแกนเหล็ก ซึ่งสอดคล้องกับหลักการของการทดสอบเปิดวงจรที่เกี่ยวข้องกับค่าความต้านทานการสูญเสียในแกนเหล็ก (R_c) และรีแอกแตนซ์แม่เหล็ก (X_m)

จากการทดสอบลัดวงจร พบว่ากระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจน แม้แรงดันในการทดสอบจะมีค่าต่ำกว่าสภาวะปกติ เนื่องจากอิมพีแดนซ์มีค่าต่ำ ทำให้กระแสสามารถไหลได้มากขึ้นตามหลักการของการลัดวงจร ขณะที่กำลังไฟฟ้าที่วัดได้ส่วนใหญ่เกิดจากการสูญเสียในขดลวด ซึ่งสอดคล้องกับหลักการของการทดสอบลัดวงจรที่เกี่ยวข้องกับค่าความต้านทานสมมูล (R_{eq}) และรีแอกแตนซ์สมมูล (X_{eq}) ของหม้อแปลงไฟฟ้า

สำหรับการทดสอบการลัดวงจรระหว่างสาย (L-L) พบว่าเมื่อเกิดการลัดวงจรระหว่างสองเฟส กระแสไฟฟ้าในระบบเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว และเกิดความไม่สมดุลของแรงดันและกระแสระหว่างเฟส เนื่องจากอิมพีแดนซ์ของเส้นทางกระแสลดลงอย่างมาก ส่งผลให้เกิดฟลักซ์รั่วและแรงดันทางแม่เหล็กภายในหม้อแปลงเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นลักษณะสำคัญของระบบไฟฟ้าเมื่อเกิดการลัดวงจรระหว่างสาย

ในการลัดวงจรระหว่างสายกับดิน (L-G) ระบบเกิดความไม่สมดุลของแรงดันและกระแส โดยแรงดันของเฟสที่เกิดฟอลต์ลดลงจนใกล้ศูนย์ และเกิดกระแสลัดวงจรไหลกลับผ่านดิน เกิดกระแส

ลำดับศูนย์ (Zero Sequence Current) และฟลักซ์แม่เหล็กไม่สมดุลภายในแกนเหล็ก ส่งผลต่อความร้อนสะสมและความเค้นต่อฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้า

เมื่อเปรียบเทียบผล มีค่าความคลาดเคลื่อนของแรงดันมีค่าต่ำ ขณะที่ค่ากระแส และกำลังไฟฟ้ามีค่าความคลาดเคลื่อนสูง เนื่องจากแบบจำลองใน MATLAB/Simulink มีลักษณะใกล้เคียงระบบอุดมคติและไม่สามารถสะท้อนพฤติกรรมจริงทั้งหมดได้ เช่น การอิ่มตัวของแกนเหล็ก ฟลักซ์รั่ว ความไม่สมบูรณ์ของวัสดุ และการสูญเสียที่ไม่เป็นเชิงเส้น รวมถึงผลกระทบจากความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัดและสภาพแวดล้อมในการทดลองจริง อย่างไรก็ตาม ค่าความคลาดเคลื่อนยังอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับสำหรับงานทางวิศวกรรมไฟฟ้า และผลการจำลองยังสามารถแสดงแนวโน้มพฤติกรรมของหม้อแปลงไฟฟ้าได้สอดคล้องกับผลการทดลอง

5.2 ข้อเสนอแนะ

ควรมีการปรับปรุงแบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้าให้สามารถพิจารณาปัจจัยทางกายภาพ และการสูญเสียในระบบได้ละเอียดมากขึ้น เช่น การอิ่มตัวของแกนเหล็ก ฟลักซ์รั่ว และการสูญเสียในแกนเหล็ก เพื่อเพิ่มความแม่นยำให้ใกล้เคียงกับการทดลองจริงมากยิ่งขึ้น

ควรพัฒนาอุปกรณ์และวิธีการทดลองให้สามารถวัดค่าแรงดันและกระแสของแต่ละเฟสได้ พร้อมกันแบบเวลาจริง (Real-Time Measurement) เพื่อเพิ่มความถูกต้องและลดความคลาดเคลื่อน โดยเฉพาะในการศึกษาความผิดปกติของระบบไฟฟ้าสามเฟส

ควรมีการศึกษาค้นคว้าความผิดปกติของหม้อแปลงในรูปแบบอื่นเพิ่มเติม เช่น การลัดวงจรสามเฟส การลัดวงจรภายในในรอบขดลวด (Inter-turn Fault) และการศึกษาผลกระทบทางความร้อนของหม้อแปลงภายใต้สภาวะลัดวงจร เพื่อให้ครอบคลุมพฤติกรรมของหม้อแปลงไฟฟ้าในสภาวะต่าง ๆ มากยิ่งขึ้น

ข้อมูลแรงดัน กระแส และรูปคลื่นที่ได้จากการทดลองและการจำลองในงานวิจัยนี้ นำไปประยุกต์ใช้เป็นฐานข้อมูลในการพัฒนาระบบปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence: AI) และ Machine Learning ในอนาคต เพื่อใช้จำแนกและตรวจจับความผิดปกติของหม้อแปลงไฟฟ้า เช่น การลัดวงจรระหว่างสาย (L-L) และการลัดวงจรระหว่างสายกับดิน (L-G) ได้อัตโนมัติ โดยอาศัยรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน กระแส และความไม่สมดุล ช่วยเพิ่มความแม่นยำและความรวดเร็วในการวิเคราะห์ความผิดปกติของหม้อแปลงไฟฟ้าได้มากยิ่งขึ้น



บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

- Almehdhar, A., Prochazka, R., & Vanis, M. (2022). Application of SFRA method for evaluation of short-circuit tests of power transformers. *International Conference on Diagnostics in Electrical Engineering (Dignostika)*.
- Barros, R. M. R., da Costa, E. G., Araujo, J. F., de Andrade, F. L. M., & Ferreira, T. V. (2018). Contribution of inrush current to mechanical failure of power transformer windings. *IET Journals*.
- Du, G., Xie, Q., Chen, S., & Guo, Z. (2021). A balanced design concept of anti-explosion and design scheme of pressure relief device of UHV transformer. *3rd International Conference on Smart Power & Internet Energy Systems*.
- Etumi, A. A., Anayi, F. J., Fahmy, A. A., & Eldukhri, E. E. (2014). Auto-cross correlation coefficients used for detecting an internal fault in three-phase transformer. *IEEE*.
- Gutten, M., Janura, R., & Brandt, M. (2016). Analysis of short-circuit effects on transformer state by frequency method. *Conference on Diagnostics in Electrical Engineering (CDEE)*.
- Hamouda, M., Al-Amyal, F., & Számel, L. (2022). Modeling and simulation of switched reluctance motor with internal fault capability. *IEEE International Conference on Electrical and Power Engineering*.
- Han, T.-H., Ko, S.-C., & Lim, S.-H. (2022). Analysis on three-phase ground fault current limiting operations of three-phase transformer type SFCL using two superconducting modules. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 32(6).
- Hao, M., Wei, W., Xiaoguang, X., Guanzhen, L., Liqing, L., & Junji, F. (2020). Analysis of short-circuit current of transformers in both mechanical and thermal ways. *China International Conference on Electricity Distribution*.
- Hoholyuk, O., Gogolyuk, P., & Fuchyla, O. (2021). Improvement of the mathematical model of low-frequency electromagnetic processes of power transformer using MATLAB/Simulink. *Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering*.
- Hu, D., Hu, M., Xu, Y. G., Sheng, X. F., Li, J. N., Li, Z., Hong, Z., & Jin, J. (2017). Design and electromagnetic analysis of a 330 kVA single-phase HTS transformer. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*.
- Ivanchenko, D. I., & Aleksey, B. A. (2021). Transformer fault analysis using instantaneous symmetrical components. *IEEE*.
- Kamat, P., Sutar, D., & Prasad, P. P. (2018). Efficient energy harvesting using current transformer for smart grid application. *International Conference on Trends in Electronics and Informatics*.
- Karunadasa, J. P., Navarathna, K. G. L., Abeyrathna, R. V. C. N., Perera, K. A. N. C., & Sandaruwan, K. D. N. (2018). Novel three-phase transformer model to accommodate the effects of load injected DC. *Moratuwa Engineering Research Conference*.
- Kawady, T. A., Labna, H. E., & Taalab, A. E. (2008). A practical winding fault detector for power transformers. *IEEE*.

- Katende, F., & Katende, J. (2022). Determination of per-phase equivalent circuit parameters of three-phase transformer using MATLAB/Simulink. IST-Africa Conference.
- Lee, J.-S., Seo, W.-S., & Kang, S.-H. (2023). An internal fault model of a transformer bank using MATLAB/Simulink. International Conference on Advanced Power System Automation and Protection.
- Pi, W., Wang, T., Zhang, H., Yang, Y., & Wang, Y. (2020). Design and simulation of a 120 kVA single-phase HTS transformer. IEEE Transactions on Applied Superconductivity.
- Prasad, U. R., Vyjayanthi, C., & Jaison, K. (2019). Modeling and detection of inter-turn faults in distribution transformer. IEEE.
- Rafi, R., Bhuiyan, A. B. M. N., Mohammad, N., Akter, R., Gani, M. M., & Ghosh, S. (2023). Analyzing the efficacy of differential relay systems for transformer protection under different internal faults. IEEE International Conference on Power Systems.
- Saini, A., Sharma, M., & Chantola, A. (2018). Inter-disc fault simulation in transformer windings. International Conference on Inventive Communication and Computational Technologies.
- Serebryakov, A., & Osokin, V. (2019). Calculation of two-phase short-circuit current in electrical network when powered from transformer (Y/ Δ -11). IEEE.
- Sharanya, M., Meenakshi Devi, M., & Geethanjali, M. (2018). Fault detection and location in DC microgrid. National Power Engineering Conference.
- Song, H., Zhao, F., & He, D. (2012). Simulation study on internal fault of transformer. International Conference on Solid State Devices and Materials Science.
- Sorochenko, P., Zatsepina, V., & Zatsepin, Y. (2024). Analyzing Simulink modeling capabilities of real technological disruption in power system section. International Conference on Industrial Engineering.
- Stulov, A., Tikhonov, A., & Dryazgov, D. (2020). Combined model for design of single-phase transformer with amorphous steel wound core. International Conference on Industrial Engineering.
- Stulov, A., Tikhonov, A., & Karzhevin, A. (2019). Model of special transformer for transient processes analysis in three-phase mode. Ural Conference on Electrical Power Engineering.
- Surdacki, P., Jaroszynski, L., & Wozniak, L. (2017). Limiting short-circuit current with a 10 kVA superconducting transformer. IEEE.
- Yan, C., Zhang, P., Xu, Y., & Shu, J. (2022). Modeling and simulation of transformer inter-turn short-circuit faults based on field-circuit coupling. IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation.
- Yan, C., Wang, W., Zhang, P., Liu, Z., Shu, J., & Zhang, B. (2023). Coupled field-circuit modeling and analysis for interturn short-circuit faults in onboard traction transformer. IEEE International Magnetic Conference.
- Zheng, Z., Li, Q., Li, X., Zheng, P., Wang, K., & Cui, P. (2022). Analysis and fault-tolerant control of inter-turn short-circuit fault for five-phase permanent magnet synchronous machine. IEEE.

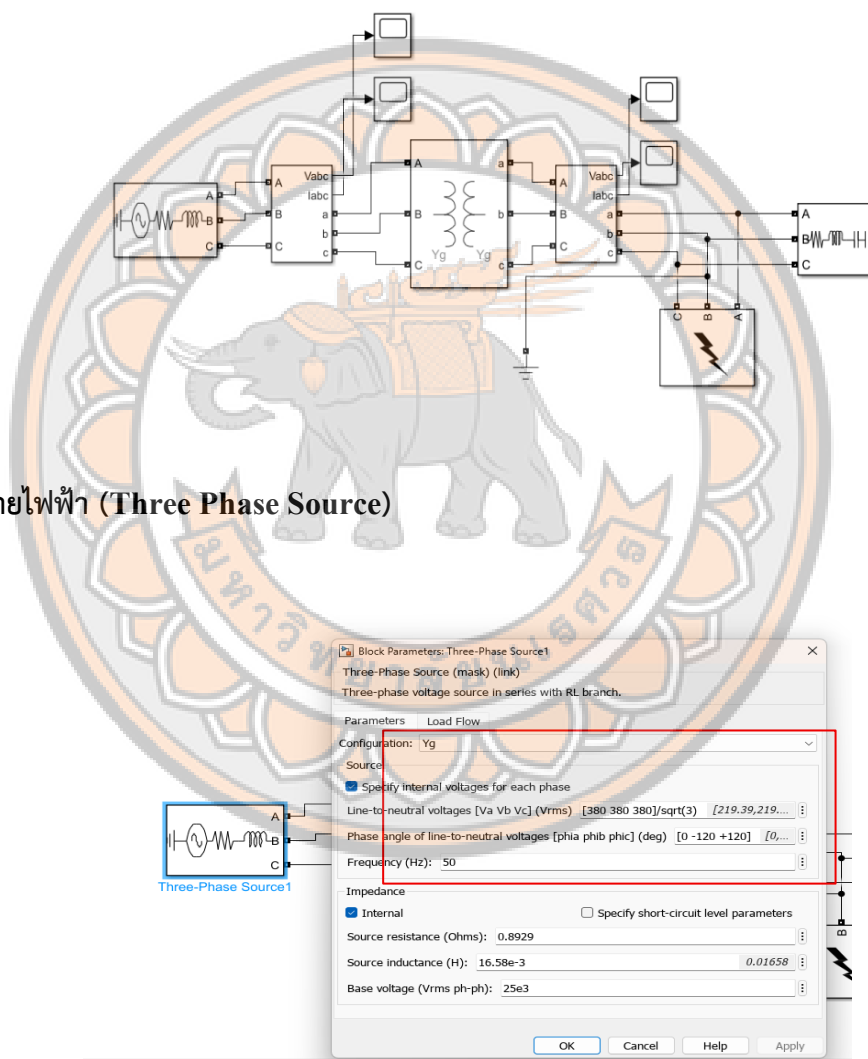


ภาคผนวก

ภาคผนวก

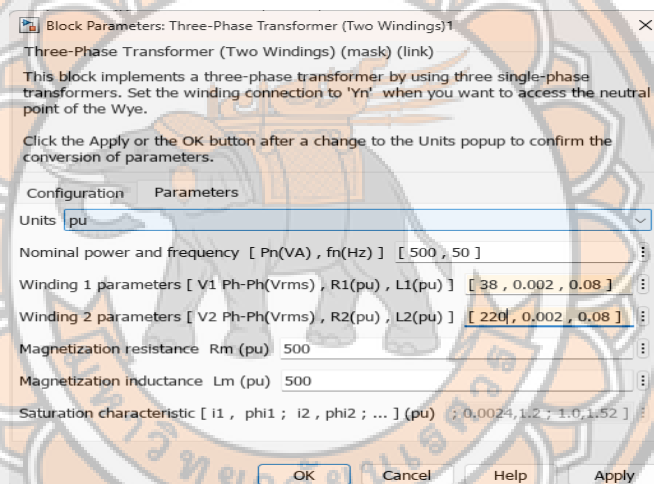
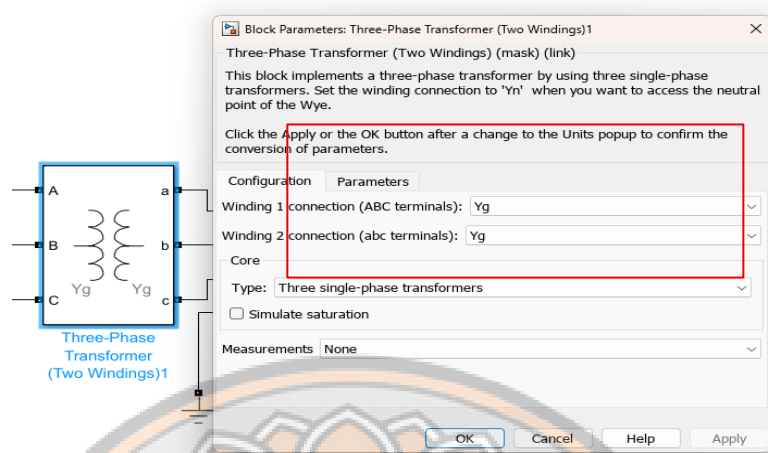
รายละเอียดของแบบจำลองระบบการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าโดยจำลองผ่านโปรแกรม MATLAB / Simulink โดยอธิบายโครงสร้างของวงจรและการตั้งค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์แต่ละส่วน เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ระบบภายใต้สภาวะปกติ และสภาวะลัดวงจร

แหล่งจ่ายไฟฟ้า (Three Phase Source)



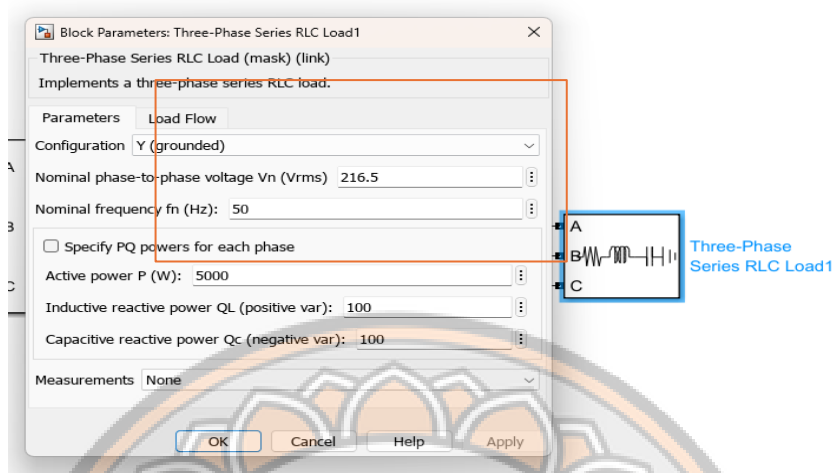
ในการตั้งค่านั้นจะต้องตั้งค่าแรงดันขาเข้า มุมเฟส และความถี่ที่ใช้ให้เท่ากับการทดลองจริง

หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer)



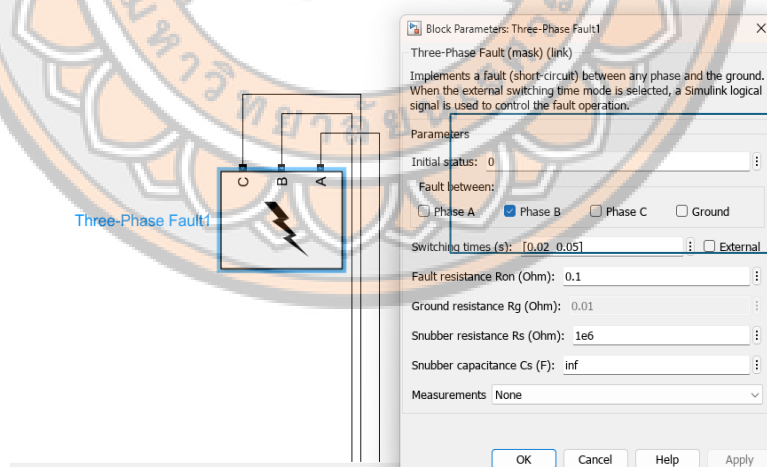
ในการตั้งค่าหม้อแปลงนั้น ต้องตั้งค่ารูปแบบของหม้อแปลงไฟฟ้าก่อน จากภาพได้เลือกรูปแบบของหม้อแปลง และภาพล่างนั้นแสดงให้เห็นถึงค่าพารามิเตอร์ในการตั้งค่าของหม้อแปลงไฟฟ้า

โหลด (Load)



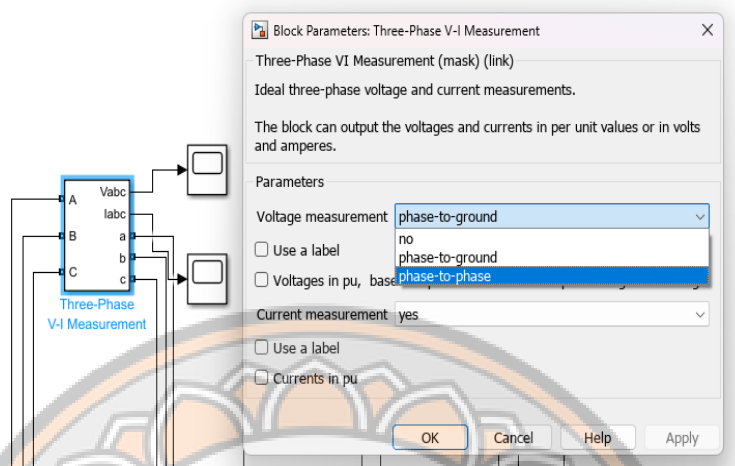
ในการตั้งค่าโหลดนั้น ต้องตั้งค่ารูปแบบของโหลดก่อน หลังจากนั้นจึงตั้งค่าแรงดัน ความถี่ และกำลังไฟฟ้า

อุปกรณ์จำลองความขัดข้อง (Fault Block)



ในการตั้งค่าอุปกรณ์จำลองความขัดข้องนั้น จะตั้งค่าตามที่ต้องการให้เกิดการลัดวงจรประเภทไหน เช่น การลัด 1 เฟส ตามที่แสดงดังภาพ ยังมีการตั้งเวลาให้ความขัดข้องเกิดขึ้นเวลาเท่าไร กราฟจะแสดงออกมาตามเวลาที่กำหนด

เครื่องมือวัดค่า (Measurement Block)



เป็นตัวช่วยในการแสดงค่าให้ออกมาเป็นรูปกราฟจากตัวสโคป และการตั้งค่าให้วัดออกมาในรูปแบบไหนได้ ตามที่เลือก