

การวิเคราะห์แรงสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในหม้อแปลงระบบจำหน่าย  
จากการเกิดลัดวงจรภายนอก

ANALYSIS OF ELECTROMAGNETIC FORCES IN DISTRIBUTION  
TRANSFORMER CAUSED BY EXTERNAL FAULT

นาวพงศ์ นุตาคี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า


คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การวิเคราะห์แรงสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในหม้อแปลงระบบจำหน่าย  
จากการเกิดลัดวงจรภายนอก



นวพงศ์ นุตาคี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
ปีการศึกษา 2556  
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์      การวิเคราะห์แรงสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในหม้อแปลงระบบจำหน่ายจากการ  
เกิดลัดวงจรภายนอก  
Analysis of Electromagnetic Forces in Distribution Transformer Caused by  
External Fault  
ชื่อ-นามสกุล              นายนวพงศ์ นุดาดี  
สาขาวิชา                  วิศวกรรมไฟฟ้า  
อาจารย์ที่ปรึกษา          ผู้ช่วยศาสตราจารย์กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์, Ph.D.  
ปีการศึกษา                2556

---

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันชัย ทรัพย์สิงห์, Ph.D.)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์กานต์ เกิดชื่น, D.Eng.)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์บุญยัง ปลั่งกลาง, Dr.-Ing.)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์, Ph.D.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทฉบับนี้

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สมหมาย ผิวสอาด, Ph.D.)

วันที่ 6 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2556

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์แรงสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในหม้อแปลงระบบจำหน่ายจากการเกิดลัดวงจรภายนอก
ชื่อ – นามสกุล	นายนวพงศ์ นูตาคี
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์, Ph.D.
ปีการศึกษา	2556

### บทคัดย่อ

ความเสียหายของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลกระทบต่อความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้า โดยเมื่อเกิดความเสียหายขึ้นกับหม้อแปลงไฟฟ้า ต้องใช้เวลานานในการแก้ไขปัญหา ดังนั้นควรให้ความสำคัญกับหม้อแปลงไฟฟ้า โดยเริ่มตั้งแต่กระบวนการออกแบบ การผลิต และการบำรุงรักษา เพื่อให้อายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้ายาวนานยิ่งขึ้น โดยอายุการใช้งานของหม้อแปลงนั้นจะขึ้นอยู่กับปัจจัยทางไฟฟ้า ความเครียดทางกล ความร้อน และหนึ่งในปัจจัยที่สำคัญที่สุดคือ การลัดวงจร

วิทยานิพนธ์นี้ นำเสนอการสร้างแบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย เพื่อศึกษาแรงสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้น โดยใช้โปรแกรม MATLAB/simulink และไฟไนต์เอลิเมนต์ มาเปรียบเทียบกับในขณะหม้อแปลงทำงานในสภาวะปกติ และขณะที่เกิดการลัดวงจรแบบสมมาตร โดยการใช้โปรแกรม MATLAB/simulink นั้นเป็นการสร้างแบบจำลองวงจรแม่เหล็กไฟฟ้า ส่วนโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ เป็นการจำลองภาพโครงสร้างของหม้อแปลง จากนั้นนำไปหาค่าความหนาแน่นของเส้นแรงสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อนำไปคำนวณค่าแรงสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้น

ผลการศึกษาพบว่า ทั้งในสภาวะปกติ และลัดวงจรแบบสมมาตร การจำลองหาแรงสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โดยโปรแกรม MATLAB/simulink และไฟไนต์เอลิเมนต์ ให้ค่าแรงสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แตกต่างกันในส่วนองแรงตามแนวแกน ประมาณร้อยละ 44 ซึ่งเป็นแรงที่ส่งผลให้ขดลวดหม้อแปลงเกิดการบิดตัวในแนวขนานกับแกนเหล็ก ค่าแรงสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นแตกต่างกันนี้ เกิดจากความแตกต่างในการใส่ข้อมูลของตัวแปรต่างๆ ในโปรแกรมแต่ละชนิด ดังนั้นในการจำลองหม้อแปลงไฟฟ้า ควรเลือกวิธีการจำลองที่เหมาะสมเพื่อมาประเมินการทำงานของหม้อแปลงให้ถูกต้อง

**คำสำคัญ:** หม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้า ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ แรงสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

<b>Thesis Title</b>	Analysis of Electromagnetic Forces in Distribution Transformer Caused by External Fault
<b>Name - Surname</b>	Mr. Nawapong Nutadee
<b>Program</b>	Electrical Engineering
<b>Thesis Advisor</b>	Assistant Professor Krischonme Bhumkittipich, Ph.D.
<b>Academic Year</b>	2013

## ABSTRACT

Damage of distribution transformers is an important factor that affects reliability of power systems. By this reason, the remedies of transformer problems are complicated and take time to resolve. Consequently, transformers have to be improved the high-quality of administrations in the design process, manufacturing, and maintenance for expanding life time of the transformer which depends on various factors.

In this thesis, a selected distribution transformer has been simulated by using MATLAB/simulink and finite element method (FEM) programs to show an electromagnetic force occurring inside a transformer during normal and short circuit conditions. MATLAB/simulink program was utilized to create a magnetic circuit model comparing to FEM program which was used to draw a transformer structure. The flux density is calculated from each program that was used to determine electromagnetic force in the distribution transformer.

This study demonstrated that, in normal and short circuit conditions, the electromagnetic forces simulated from MATLAB/simulink and FEM programs were slightly different in axial force about 44%, which affects flicking of coils in axial core of transformers. Regarding, there are many different parameters in each program which is calculated the electromagnetic force. Hence, different transformer simulation programs may provide different expected results. Consideration of appropriate simulation program is important to estimate a hold operation of transformer.

**Keywords:** distribution transformer, flux density, finite element method, electromagnetic forces

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความเมตตากรุณาอย่างสูงจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษณ์ หน่ม ภูมิภคพิชญ์ ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และอาจารย์นิติพงศ์ ปานกลาง ที่ให้คำแนะนำข้อมูล และแนวทางในการทำงานวิจัย และความเอาใจใส่ ซึ่งทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความครบถ้วนสมบูรณ์ ผู้วิจัยขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันชัย ทรัพย์สิงห์ ประธานการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญยัง ปลั่งกลาง กรรมการการสอบวิทยานิพนธ์ และรองศาสตราจารย์ ดร.กานท์ เกิดชื่น ผู้ทรงคุณวุฒิ ที่กรุณาให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาตลอดจนให้ความช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ ซึ่งผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ เป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณผู้ทรงคุณวุฒิทั้ง 5 ท่าน ที่ให้ความอนุเคราะห์ประเมินรับรองงานวิจัยและให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ในการทำวิจัย และขอขอบใจเพื่อนนักศึกษาระดับปริญญาโททุกคนที่ให้กำลังใจในการดำเนินกิจกรรมการวิจัยจนได้ความสมบูรณ์ของงาน ขอขอบคุณบุคลากร บัณฑิตวิทยาลัยทุกคนที่เป็นกำลังใจ และให้ความช่วยเหลือตลอดช่วงเวลาของการศึกษาและทำการวิจัย

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชา บ่มเพาะจนผู้วิจัยสามารถนำเอาหลักการมาประยุกต์ใช้และอ้างอิงในงานวิจัยครั้งนี้ นอกเหนือจากนี้ขอขอบคุณผู้บริหารมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่มอบทุนสนับสนุนพัฒนาบุคลากรตลอดระยะเวลาในการศึกษาของผู้วิจัย

คุณค่าอันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบเพื่อบูชาพระคุณบิดา มารดา ครู อาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่าน

นวพงศ์ นุตาดี

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	3
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	4
กิตติกรรมประกาศ.....	5
สารบัญ .....	6
สารบัญตาราง.....	8
สารบัญรูป .....	9
บทที่ 1 บทนำ .....	12
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	12
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	13
1.3 สมมติฐานของงานวิจัย.....	13
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	13
1.5 ขั้นตอนในการดำเนินงาน.....	14
1.6 ข้อจำกัดของวิทยานิพนธ์.....	14
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	14
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	15
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาการเกิดคาร์ลด์วงจรของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	15
2.2 ทฤษฎีหม้อแปลงไฟฟ้า.....	17
2.3 โครงสร้างของหม้อแปลงระบบจำหน่าย.....	19
2.4 กำลังสูญเสียในหม้อแปลง.....	30
2.5 การออกแบบหม้อแปลงระบบจำหน่าย .....	33
2.6 ความเป็นมาของปัญหาที่เกิดขึ้นในปัจจุบัน.....	34
2.7 แรงสนามแม่เหล็กในหม้อแปลงไฟฟ้า.....	36
2.8 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ .....	42
2.9 สรุปผลการศึกษาทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	55
บทที่ 3 การออกแบบและการสร้างแบบจำลอง.....	56
3.1 การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า.....	56

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2 การสร้างแบบจำลองโดยโปรแกรม MATLAB/simulink.....	59
3.3 การสร้างแบบจำลองโดยโปรแกรม FEMLAB .....	67
3.4 สรุปวิธีดำเนินงานวิจัย.....	71
บทที่ 4 ผลการวิจัย.....	72
4.1 การคำนวณความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก และแรงสนามแม่เหล็ก โดยใช้สมการ ...	72
4.2 การจำลองโดยโปรแกรม MATLAB/simulink.....	73
4.3 การจำลองโดย FEMLAB.....	81
4.4 การเปรียบเทียบการจำลอง MATLAB/simulink และ FEMLAB .....	87
4.5 สรุปผลการวิจัย.....	88
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย การอภิปรายผล และข้อเสนอแนะ .....	89
5.1 สรุปผลการจำลองโดยใช้ MATLAB/simulink.....	89
5.2 สรุปผลการจำลองโดยใช้โปรแกรม FEMLAB .....	89
5.3 สรุปผลการเปรียบเทียบการจำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB/simulink และ FEMLAB .....	90
5.4 ข้อเสนอแนะ.....	90
รายการอ้างอิง.....	91
ภาคผนวก .....	93
ภาคผนวก ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	94
ประวัติผู้เขียน.....	120



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ข้อเปรียบเทียบหม้อแปลงไฟฟ้าติดคิริบระบายความร้อนแบบแผ่นกับแบบติดคิริบระบายความร้อนแบบลอนลูกฟูก .....	22
ตารางที่ 2.2 ค่าต่างๆของหม้อแปลง ที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคกำหนด .....	30
ตารางที่ 2.3 สรุปผลการเกิดความผิดปกติภายในหม้อแปลง .....	36
ตารางที่ 3.1 ข้อกำหนดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคหม้อแปลงขนาด 100 kVA.....	56
ตารางที่ 3.2 หม้อแปลงชนิดลวดแบบกลม.....	57
ตารางที่ 3.3 หม้อแปลงชนิดลวดแบบเหลี่ยม .....	58
ตารางที่ 3.4 เปรียบเทียบวงจรแม่เหล็กกับวงจรไฟฟ้า.....	61
ตารางที่ 3.5 คำนวณค่ากระแส .....	62
ตารางที่ 3.6 คำนวณค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็ก .....	63
ตารางที่ 3.7 คำนวณหาพื้นที่ช่องว่างในขดลวด .....	65
ตารางที่ 3.8 คำนวณหาค่าความต้านทานแม่เหล็กที่แกนเหล็ก .....	66
ตารางที่ 3.9 คำนวณหาค่าความต้านทานแม่เหล็กที่ช่องว่าง.....	67
ตารางที่ 3.10 พื้นที่ขดลวด .....	69
ตารางที่ 3.11 ค่ากระแสต่อพื้นที่ของขดลวด.....	69
ตารางที่ 4.1 ผลการคำนวณค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก และแรงสนามแม่เหล็ก โดยใช้สมการ .....	72
ตารางที่ 4.2 ผลการจำลองเปรียบเทียบขดลวดกลม และขดลวดเหลี่ยม MATLAB/simulink .....	80
ตารางที่ 4.3 ผลการจำลองเปรียบเทียบขดลวดกลม และขดลวดเหลี่ยมFEMLAB.....	87
ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบผลระหว่าง MATLAB/simulink และ FEMLAB ขดลวดกลม .....	87
ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบผลระหว่าง MATLAB/simulink และ FEMLAB ขดลวดเหลี่ยม.....	88

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1	สภาพหม้อแปลงเมื่อเกิดการลัดวงจรจากภายนอก ทำให้เกิดความเสียหายที่ขดลวด ..... 12
รูปที่ 1.2	สภาพขดลวดด้านแรงสูง และด้านแรงต่ำ เมื่อเกิดการลัดวงจร..... 13
รูปที่ 2.1	โครงสร้างพื้นฐานของหม้อแปลงไฟฟ้า..... 17
รูปที่ 2.2	หม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส และ 3 เฟส และหม้อแปลงไฟฟ้าในระบบบิลีทรอนิกส์..... 18
รูปที่ 2.3	โครงสร้างของหม้อแปลงระบบจำหน่าย ..... 20
รูปที่ 2.4	ตัวถังหม้อแปลงติดครีบริบายความร้อนแบบแผ่น ..... 21
รูปที่ 2.5	ตัวถังหม้อแปลงติดครีบริบายความร้อนแบบลอนลูกฟูก ..... 21
รูปที่ 2.6	การฉนวนในส่วนต่างๆ ของหม้อแปลง และเดินสายลัดภายใน ..... 24
รูปที่ 2.7	โครงสร้างแกนเหล็กของหม้อแปลง 3 เฟส ชนิดแกน ..... 26
รูปที่ 2.8	ขดลวดทรงกระบอกหนึ่งชั้นพันด้วยลวดตัวนำสี่เหลี่ยม ..... 27
รูปที่ 2.9	ขดลวดทรงกระบอกหลายชั้นพันด้วยลวดตัวนำกลม..... 27
รูปที่ 2.10	ฉนวนกั้นทำหน้าที่ระบายความร้อนภายในชุดของขดลวด ..... 28
รูปที่ 2.11	แผนผังการออกแบบหม้อแปลงจำหน่าย..... 34
รูปที่ 2.12	สถิติการเกิดความผิดปกติของหม้อแปลง ..... 35
รูปที่ 2.13	เส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้า ..... 37
รูปที่ 2.14	แรงที่กระทำในแนวแกน (Axial Forces) ระหว่างขดลวดด้านแรงสูง และด้านแรงต่ำ ขณะเกิดลัดวงจร ..... 38
รูปที่ 2.15	แรงตามแนวแกน ..... 38
รูปที่ 2.16	แรงที่กระทำในแนวนอน (Radial Forces) ระหว่างขดลวดด้านแรงสูง และด้านแรงต่ำ ขณะเกิดลัดวงจร ..... 40
รูปที่ 2.17	ความเสียหายเมื่อหม้อแปลงเกิดลัดวงจร ..... 40
รูปที่ 2.18	แรงสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ทำให้เกิดการผลักรันของขดลวด ..... 41
รูปที่ 2.19	ลักษณะการแบ่งเอลิเมนต์..... 43
รูปที่ 2.20	การแบ่งเอลิเมนต์แบบต่างๆ ภายในวัสดุ..... 44
รูปที่ 2.21	เอลิเมนต์แบบมิติเดียวแบบต่างๆ..... 45
รูปที่ 2.22	เอลิเมนต์สองมิติแบบต่างๆ ..... 45

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.23 เอลิเมนต์สามมิติแบบต่างๆ .....	46
รูปที่ 2.24 การแบ่งชิ้นส่วนออกเป็นเอลิเมนต์สามเหลี่ยม .....	46
รูปที่ 2.25 ตำแหน่งของจุดต่อภายนอกของเอลิเมนต์.....	47
รูปที่ 2.26 การแบ่งชิ้นส่วนสี่เหลี่ยมออกเป็นเอลิเมนต์สามเหลี่ยม.....	48
รูปที่ 2.27 การแบ่งรูปร่างของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย .....	49
รูปที่ 2.28 เอลิเมนต์สามเหลี่ยม.....	50
รูปที่ 2.29 การกระจายศักย์ไฟฟ้าในสนามไฟฟ้าสถิต.....	52
รูปที่ 2.30 เอลิเมนต์แบบสามเหลี่ยมที่มีการจัดลำดับของโหนดในเอลิเมนต์ในลักษณะทวนเข็มนาฬิกา.....	52
รูปที่ 3.1 ตัวอย่างโปรแกรม MATHCAD.....	57
รูปที่ 3.2 เปรียบเทียบระหว่างแกนเหล็กหม้อแปลงและวงจรสมมูลแม่เหล็ก .....	60
รูปที่ 3.3 เปรียบเทียบระหว่างวงจรแม่เหล็กและวงจรไฟฟ้า.....	60
รูปที่ 3.4 การจำลองใน MATLAB/simulink.....	61
รูปที่ 3.5 ภาพตัดด้านบนบนแกนเหล็ก.....	63
รูปที่ 3.6 ภาพตัดด้านบนขดลวด .....	64
รูปที่ 3.7 พื้นที่ของช่องว่าง ระหว่างขดลวด HV และ LV .....	64
รูปที่ 3.8 แกนเหล็กหม้อแปลง .....	66
รูปที่ 3.9 แบบหม้อแปลงขดลวดกลม .....	68
รูปที่ 3.10 แบบหม้อแปลงขดลวดเหลี่ยม.....	68
รูปที่ 3.11 ขั้นตอนการทำงานในการหาแรงสนามแม่เหล็กไฟฟ้า.....	70
รูปที่ 4.1 ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก ( $B_u$ ) ขดลวดกลม สภาวะปกติ.....	73
รูปที่ 4.2 แรงสนามแม่เหล็ก ( $F_r$ ) ด้าน HV ขดลวดกลม สภาวะปกติ .....	73
รูปที่ 4.3 ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก ( $B_u$ ) ขดลวดกลม สภาวะลัดวงจร .....	74
รูปที่ 4.4 แรงสนามแม่เหล็ก ( $F_r$ ) ด้าน HV ขดลวดกลม สภาวะลัดวงจร.....	74
รูปที่ 4.5 ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก ( $B_p$ ) ขดลวดกลม สภาวะปกติ.....	75
รูปที่ 4.6 แรงสนามแม่เหล็ก ( $F_u$ ) ด้าน HV ขดลวดกลม สภาวะปกติ.....	75

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.7 ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก ( $B_p$ ) ขดลวดกลม สภาวะลัดวงจร .....	75
รูปที่ 4.8 แรงสนามแม่เหล็ก ( $F_p$ ) ด้าน HV ขดลวดกลม สภาวะลัดวงจร.....	76
รูปที่ 4.9 ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก ( $B_p$ ) ขดลวดเหลี่ยม สภาวะปกติ .....	76
รูปที่ 4.10 แรงสนามแม่เหล็ก ( $F_p$ ) ด้าน HV ขดลวดเหลี่ยม สภาวะปกติ.....	77
รูปที่ 4.11 ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก ( $B_p$ ) ขดลวดเหลี่ยม สภาวะลัดวงจร .....	77
รูปที่ 4.12 แรงสนามแม่เหล็ก ( $F_p$ ) ด้าน HV ขดลวดเหลี่ยม สภาวะลัดวงจร .....	77
รูปที่ 4.13 ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก ( $B_p$ ) ขดลวดเหลี่ยม สภาวะปกติ .....	78
รูปที่ 4.14 แรงสนามแม่เหล็ก ( $F_p$ ) ด้าน HV ขดลวดเหลี่ยม สภาวะปกติ.....	78
รูปที่ 4.15 ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก ( $B_p$ ) ขดลวดเหลี่ยม สภาวะลัดวงจร .....	79
รูปที่ 4.16 แรงสนามแม่เหล็ก ( $F_p$ ) ด้าน HV ขดลวดเหลี่ยม สภาวะลัดวงจร .....	79
รูปที่ 4.17 หม้อแปลงขดลวดกลม สภาวะปกติ (FEM) .....	81
รูปที่ 4.18 ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก หม้อแปลงขดลวดกลม สภาวะปกติ .....	82
รูปที่ 4.19 หม้อแปลงขดลวดกลม สภาวะลัดวงจร (FEM).....	82
รูปที่ 4.20 ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก หม้อแปลงขดลวดกลม สภาวะลัดวงจร.....	83
รูปที่ 4.21 หม้อแปลงขดลวดเหลี่ยม สภาวะปกติ (FEM).....	84
รูปที่ 4.22 ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก หม้อแปลงขดลวดเหลี่ยม สภาวะปกติ .....	84
รูปที่ 4.23 หม้อแปลงขดลวดเหลี่ยม สภาวะลัดวงจร (FEM) .....	85
รูปที่ 4.24 ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก หม้อแปลงขดลวดเหลี่ยม สภาวะลัดวงจร .....	86

# บทที่ 1

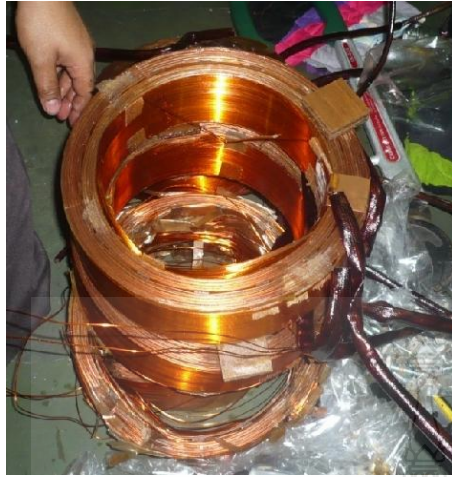
## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ความเสียหายของหม้อแปลงเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้า โดยเมื่อเกิดปัญหาขึ้นกับหม้อแปลง ต้องใช้เวลาในการแก้ปัญหาค่อนข้างนาน ดังนั้นถือว่าหม้อแปลงมีความสำคัญกับระบบมาก จึงต้องให้ความสำคัญตั้งแต่การออกแบบ การผลิต และการบำรุงรักษา เพื่อให้อายุการใช้งานของหม้อแปลงนานขึ้น โดยอายุการใช้งานของหม้อแปลง จะขึ้นอยู่กับ ปัจจัยทางไฟฟ้า ความเครียดทางกล ความร้อน และหนึ่งในปัจจัยที่สำคัญที่สุดคือ การลัดวงจร โดยเฉพาะการลัดวงจรจากภายนอก ซึ่งทำให้เกิดกระแสสูงในขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า และทำให้เกิดแรงสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีค่าสูง กระทำกับขดลวดหม้อแปลง ตามรูปที่ 1.1 และรูปที่ 1.2 แสดงให้เห็นถึงความเสียหายที่เกิดขึ้นกับขดลวดหม้อแปลง อย่างไรก็ตาม วิธีการที่จะบรรเทาแรงสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า ในสภาวะลัดวงจร ขึ้นอยู่กับ การออกแบบ การเลือกใช้วัสดุ และการประกอบหม้อแปลง



รูปที่ 1.1 สภาพหม้อแปลงเมื่อเกิดการลัดวงจรจากภายนอก ทำให้เกิดความเสียหายที่ขดลวด



(ก) ขดลวดต้านแรงสูง



(ข) ขดลวดต้านแรงต่ำ

รูปที่ 1.2 สภาพขดลวดต้านแรงสูง และต้านแรงต่ำ เมื่อเกิดการลัดวงจร

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้า
- 1.2.2 เพื่อศึกษาปัญหาที่ทำให้หม้อแปลงเกิดการลัดวงจร พร้อมบอกสาเหตุการเกิดและการแก้ไข
- 1.2.3 เพื่อศึกษาการออกแบบหม้อแปลง 3 เฟส ขนาด 100 kVA 22kV 400/230 V
- 1.2.4 เพื่อศึกษาการเกิดแรงสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ในหม้อแปลงไฟฟ้า ในสถานะที่เกิดการลัดวงจร

## 1.3 สมมุติฐานของงานวิจัย

ศึกษาสาเหตุที่ทำให้เกิดการลัดวงจรจากภายนอก ศึกษาการทำงานของหม้อแปลง และทำการออกแบบหม้อแปลง โดยอ้างอิงข้อกำหนดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค จากนั้นทำการคำนวณค่ากระแสลัดวงจร และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากออกแบบ มาจำลองในโปรแกรม MATLAB และ FEMLAB เพื่อหาความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก และแรงสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นขณะเกิดการลัดวงจร

## 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.4.1 ออกแบบและจำลองการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้า ระบบจำ 3 เฟส ขนาด 100 kVA 22 kV 400/230 V 50 Hz แบบ Core Type
- 1.4.2 จำลองสถานะการทำงานของหม้อแปลง ในสถานะการทำงานปกติ และสถานะเกิดการลัดวงจร เพื่อศึกษาแรงสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้น
- 1.4.3 วิเคราะห์หาจุดวิกฤติ ที่จะทำให้หม้อแปลงเกิดความเสียหายขณะเกิดการลัดวงจร

## 1.5 ขั้นตอนในการดำเนินงาน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการจำลองสภาวะการทำงานของหม้อแปลง โดยทำการจำลองใน MATLAB/simulink และ FEMLAB เพื่อทำการจำลองหาความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก และแรงสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น ทั้งในสภาวะที่หม้อแปลงไฟฟ้าทำงานปกติ และสภาวะลัดวงจร ซึ่งมีขั้นตอนในการดำเนินงาน ดังนี้

- 1.5.1 ศึกษาและรวบรวมข้อมูลของปัญหาที่ทำให้หม้อแปลงไฟฟ้าเกิดการลัดวงจร
- 1.5.2 ศึกษาและรวบรวมข้อมูลของผลกระทบของระบบไฟฟ้ากำลังเมื่อหม้อแปลงเกิดการลัดวงจร
- 1.5.3 ศึกษาและออกแบบหม้อแปลง และคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ
- 1.5.4 ออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า โดยการคำนวณ ใช้โปรแกรม MATHCAD
- 1.5.5 สร้างโมเดลของหม้อแปลงในโปรแกรม MATLAB/simulink และทำการป้อนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากการคำนวณ
- 1.5.6 สร้างแบบหม้อแปลงตามขนาดที่ออกแบบโดยใช้โปรแกรม SOLIDWORKS และนำแบบหม้อแปลงเข้าไปจำลองในโปรแกรม FEMLAB
- 1.5.7 นำผลการจำลองจากทั้ง 2 โปรแกรม มาเปรียบเทียบกัน ทำการสรุป วิเคราะห์ผลการทดลอง และอภิปรายผลการวิจัย

## 1.6 ข้อจำกัดของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้จะศึกษาถึงลักษณะการเกิดการลัดวงจรจากภายนอก และส่งผลกระทบต่อขดลวดของหม้อแปลง โดยจะเป็นการหาแรงสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มากระทำกับขดลวดและทำให้เกิดความเสียหาย

## 1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.7.1 เป็นการศึกษาผลกระทบที่ทำให้หม้อแปลงเกิดความเสียหาย และจุดที่ต้องระวังในการออกแบบหม้อแปลง
- 1.7.2 เป็นการช่วยลดความเสียหายที่จะเกิดกับหม้อแปลง และทำให้หม้อแปลงมีอายุการใช้งานที่มากขึ้น
- 1.7.3 การเผยแพร่ผลการวิจัยในการประชุมวิชาการด้านวิศวกรรมไฟฟ้า
- 1.7.4 ผลการศึกษาวิจัยและพัฒนาสามารถนำไปเป็นข้อมูลสำหรับการออกแบบหม้อแปลงที่ใช้งานจริง

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับความเสียหายของหม้อแปลงไฟฟ้าในระบบจำหน่าย ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับแปลงแรงดันไฟฟ้าจากแรงดันสูงมาเป็นแรงดันต่ำ หรือแรงดันต่ำไปเป็นแรงดันสูง โดยสามารถจำแนกสาเหตุของความเสียหายของหม้อแปลงได้ดังนี้

1. เกิดการลัดวงจร
2. มีฮาร์โมนิกส์ อยู่ในระบบจำหน่าย มากเกินไป
3. การจ่ายโหลดเกินขนาด
4. แรงดันเกิน
5. ความถี่ของระบบเปลี่ยนแปลง

#### 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาการเกิดการลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้า

ในการทำวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาจากบทความที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยทั้งในประเทศไทยและต่างประเทศ สำหรับการทำวิทยานิพนธ์นี้ เอกสารที่ได้ศึกษามาสรุปได้พอสังเขปดังนี้

Transformer Mechanical Stress Caused by External Short-Circuit: a Time Domain Approach [1]

บทความนี้เป็นการแสดงการเกิดแรงสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ขดลวดของหม้อแปลง เมื่อเกิดการลัดวงจรจากภายนอก โดยการคำนวณจะประกอบด้วยแรงที่เกิดขึ้นในขดลวด ทั้งแนวแรงที่เกิดขึ้นตามแนวแกน และแรงที่เกิดขึ้นตามแนวรัศมีของขดลวด โดยจะมีการเปรียบเทียบวิธีการ 2 วิธี คือวิธีการ ใช้ Time Domain Model และ ใช้ Finite Element Method Magnetic (FEMM) โดยในส่วนของวิธีการ FEMM จะนำค่ากระแสลัดวงจรที่ได้จากการจำลองโดยวิธี Time Domain Model มาป้อนค่าในโปรแกรม และดูผลลัพธ์ค่าพารามิเตอร์ต่าง เปรียบเทียบกัน โดยค่าพารามิเตอร์ที่ได้จะใกล้เคียงกัน โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองเฉพาะในส่วนของแรงที่เกิดขึ้นในแนวรัศมีของขดลวด ส่วนแรงในแนวตามแกนจะได้ทำการวิจัยต่อไป

Investigation of Transformer Electromagnetic Forces Caused by External Faults Using FEM [2]

บทความนี้เป็นการแสดงการเกิดแรงที่ขดลวดของหม้อแปลง เมื่อเกิดการลัดวงจรจากภายนอก โดยการคำนวณจะประกอบด้วยแรงที่เกิดขึ้นในขดลวด ทั้งแนวแรงที่เกิดขึ้นตามแนวแกน และแรงที่เกิดขึ้นตามแนวรัศมีของขดลวด โดยจะมีการเปรียบเทียบวิธีการ 2 วิธี คือวิธีการ ใช้การวิเคราะห์โดยการคำนวณ และใช้ Finite Element Method (FEM) โดยในการจำลองจะทำการจำลอง 4



สภาวะ คือสภาวะปกติ สภาวะเกิดการลัดวงจร สภาวะปกติโดยทำการเปลี่ยนแท็บหม้อแปลง และ สภาวะเกิดการลัดวงจรโดยทำการเปลี่ยนแท็บหม้อแปลง แล้วนำผลมาเปรียบเทียบกัน ซึ่งผลที่ได้จะมี ค่าใกล้เคียงกัน

Finite-Element Analysis of Short-Circuit Electromagnetic Force in Power Transformer [3]

บทความนี้เป็นจำลองแรงที่เกิดจากการลัดวงจรที่ขดลวด โดยใช้โมเดล 3-D ในการพิจารณา โดยจะมีการเปรียบเทียบวิธีการ 2 วิธี คือวิธีการ ใช้การวิเคราะห์โดยการคำนวณ และใช้ Finite Element Method (FEM) ซึ่งผลที่ได้จะมีค่าใกล้เคียงกัน

Calculations for Short Circuit Withstand Capability of a Distribution Transformer [4]

เป็นการคำนวณโดยใช้ค่าพารามิเตอร์จากหม้อแปลง ขนาด 1500 kVA 22kV/415 39.37/2086.81 A โดยเป็นการคำนวณหาค่าในส่วนต่างๆของหม้อแปลงขณะเกิดการลัดวงจร ดังนี้ กระแสลัดวงจรสมมาตร แรงในแนวรัศมี การคำนวณ Spacers เพื่อเป็นช่อง ให้น้ำมันไหลผ่านเพื่อ ระบายความร้อน แรงที่เกิดจากการลัดวงจร ความเครียดที่เกิดขึ้นที่ตัวแคล์มรัคเหล็ก ความสามารถในการ ทนต่อความร้อน โดยผลที่ได้จากการคำนวณ ได้นำไปสร้างหม้อแปลงจริง และได้ส่งห้องทดสอบ KEMA(Netherland) ผลลัพธ์คือทดสอบผ่าน โดยไม่มีสิ่งรบกวนใดๆที่เกิดขึ้น

การสร้างแบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังขณะเกิดการลัดวงจรที่ขดลวด [5]

แบบจำลองการลัดวงจรภายในขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังถูกสร้างขึ้นเพื่อใช้ในการหา ขนาดของกระแสไฟฟ้าลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้า การลัดวงจรภายในประกอบด้วย การลัดวงจร จากขดลวดลงดิน และการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด ในงานวิจัยนี้ทำการออกแบบและจำลองผล บนโปรแกรม PSCAD/EMTDC ผลลัพธ์จากการจำลองจะแสดงขนาดกระแสลัดวงจรลงดินและ การเปรียบเทียบกระแสผลต่างเมื่อเกิดการลัดวงจรที่ขดลวดด้านปฐมภูมิ และทุติยภูมิของหม้อแปลง แบบจำลองที่สร้างขึ้นสามารถใช้เป็นเครื่องมือในการจำลองป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้าแบบต่างๆ ได้

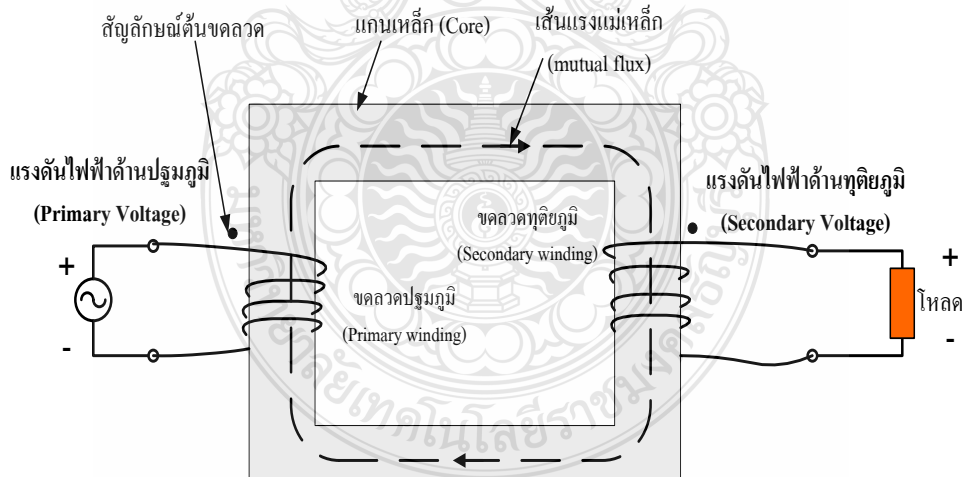
Analysis of Three-Phase Power Transformer Short Circuit Magnetic Field and Forces [6]

งานวิจัยนี้ศึกษาสนามแม่เหล็ก แลแรงที่กระทำบนขดลวดของหม้อแปลง เนื่องจากการ ลัดวงจร โดยใช้แบบจำลองสามมิติของ FEM โดยการพัฒนาจะถูกนำไปใช้ กับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง โดยการตรวจสอบ จะใช้ผลการคำนวณ เทียบกับผลที่ได้การใช้ FEM

## 2.2 ทฤษฎีหม้อแปลงไฟฟ้า

หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ส่งผ่านกำลังไฟฟ้า จากแรงดันระดับหนึ่งไปสู่อีก ระดับแรงดันหนึ่ง โดยอาศัยวงจรแม่เหล็กที่ประกอบขึ้นจากแผ่นเหล็กซิลิกอน ทำเป็นแกนให้เส้นแรง แม่เหล็กไหลผ่าน และมีขดลวดพันรอบแกนเหล็ก ทำหน้าที่สร้างเส้นแรงแม่เหล็ก และ แปลงระดับ แรงดัน นอกจากนี้ยังต้องมีฉนวน ซึ่งอาจจะเป็นฉนวนแข็ง ฉนวนเหลว หรือฉนวนก๊าซ

หลักการงานเบื้องต้นของหม้อแปลงไฟฟ้าในการสร้างแรงดัน โดยพิจารณาหม้อแปลง เฟสเดียว เพื่อง่ายต่อความเข้าใจ สำหรับหม้อแปลงแบบ 3 เฟส ก็มีหลักการงานเช่นเดียวกัน โดยทั่วไป หม้อแปลงไฟฟ้าจะประกอบไปด้วยโครงสร้างที่สำคัญ คือ ขดลวด (Winding) และแกน เหล็ก (Core) ขดลวดจะมี 2 ขด พันอยู่บนแกนเหล็กแกนเดียวกัน ขดที่หนึ่งคือ ขดลวดด้านรับ แรงดันไฟฟ้าหรือขดลวดปฐมภูมิ (Primary Winding) มีจำนวนรอบ  $N_p$  รอบ ขดที่สองคือ ขดลวดด้าน จ่ายแรงดันไฟฟ้าหรือขดลวดทุติยภูมิ (Secondary Winding) มีจำนวนรอบ  $N_s$  รอบ แสดงดังรูปที่ 2.1 สำหรับแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า จะเป็นแกนเหล็กที่ทำมาจากแผ่นเหล็กบางๆ อัดซ้อนกันเป็น แท่ง (Laminated Metal Core) เพราะทำให้ได้ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กมากและช่วยลด การสูญเสียกำลังไฟฟ้าในแกนเหล็กอีกด้วย ในระบบไฟฟ้ากระแสสลับ รูปคลื่นแรงดัน และเส้นแรง แม่เหล็ก  $\phi(t)$  สามารถประมาณได้ด้วยฟังก์ชันไซน์ในเทอมของเวลา ดังสมการที่ 2.1 [7], [8]



รูปที่ 2.1 โครงสร้างพื้นฐานของหม้อแปลงไฟฟ้า



Single phase pole-mounted step-down transformer



Three-phase pole-mounted step-down transformer.



(ก) หม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส      (ข) หม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส      (ค) หม้อแปลงในระบบอิเล็กทรอนิกส์

รูปที่ 2.2 หม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส และ 3 เฟส และหม้อแปลงไฟฟ้าในระบบอิเล็กทรอนิกส์

$$\phi = \phi_m \sin \omega t = A_{Fe} B_m \sin \omega t \quad (2.1)$$

- โดยที่  $\phi_m$  คือ ขนาดเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็ก (Wb)  
 $B_m$  คือ ขนาดความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (T)  
 $A_{Fe}$  คือ พื้นที่หน้าตัดสุทธิของแกนเหล็ก ( $\text{mm}^2$ )  
 $\omega$  คือ ความถี่เชิงมุม เท่ากับ  $2\pi f$  (rad/sec)  
 $f$  คือ ความถี่ของระบบไฟฟ้ากำลัง (Hz)

จากกฎแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำของฟาราเดย์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กตัดผ่านขดลวด จะทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นในขดลวดตามสมการที่ 2.2 โดยกำหนดให้ว่า เส้นแรงแม่เหล็กที่คดล้อมขดลวดที่พันอยู่รอบแกนเหล็กมีค่าเท่ากันทุกรอบ สามารถหาสมการแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำในขดลวดได้ตามสมการที่ 2.3

$$e(t) = N \frac{d\phi}{dt} \quad (2.2)$$

$$e(t) = 2\pi f N A_{Fe} B_m \cos(\omega t - 180) \quad (2.3)$$

- โดยที่  $e(t)$  คือ แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา  
 $N$  คือ จำนวนรอบ

ในการใช้งานจะพิจารณาแรงดันและกระแสเป็นรากกำลังสองเฉลี่ย มากกว่าค่าขณะใดขณะหนึ่ง หรือค่าสูงสุด และค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของรูปคลื่นชานนี้ใดๆ มีค่าเท่ากับ  $1/\sqrt{2}$  เท่า ของค่ายอด ดังนั้น ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของแรงดันหนึ่งวินาทีจะมีค่าเท่ากับ

$$E_{rms} = \sqrt{2}\pi f N A_{Fe} B_m \quad (2.4)$$

จากสมการที่ 2.4 จะได้ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนแรงดันหนึ่งวินาทีที่ด้านปฐมภูมิ และทุติยภูมิ ในเทอมของจำนวนรอบตามสมการที่ 2.5 ฉะนั้น หม้อแปลงจึงสามารถแปลงระดับแรงดันให้สูงขึ้นหรือต่ำลงได้ โดยการพันขดลวดให้มีจำนวนรอบสัมพันธ์กับระดับของแรงดันหนึ่งวินาทีตามสมการ

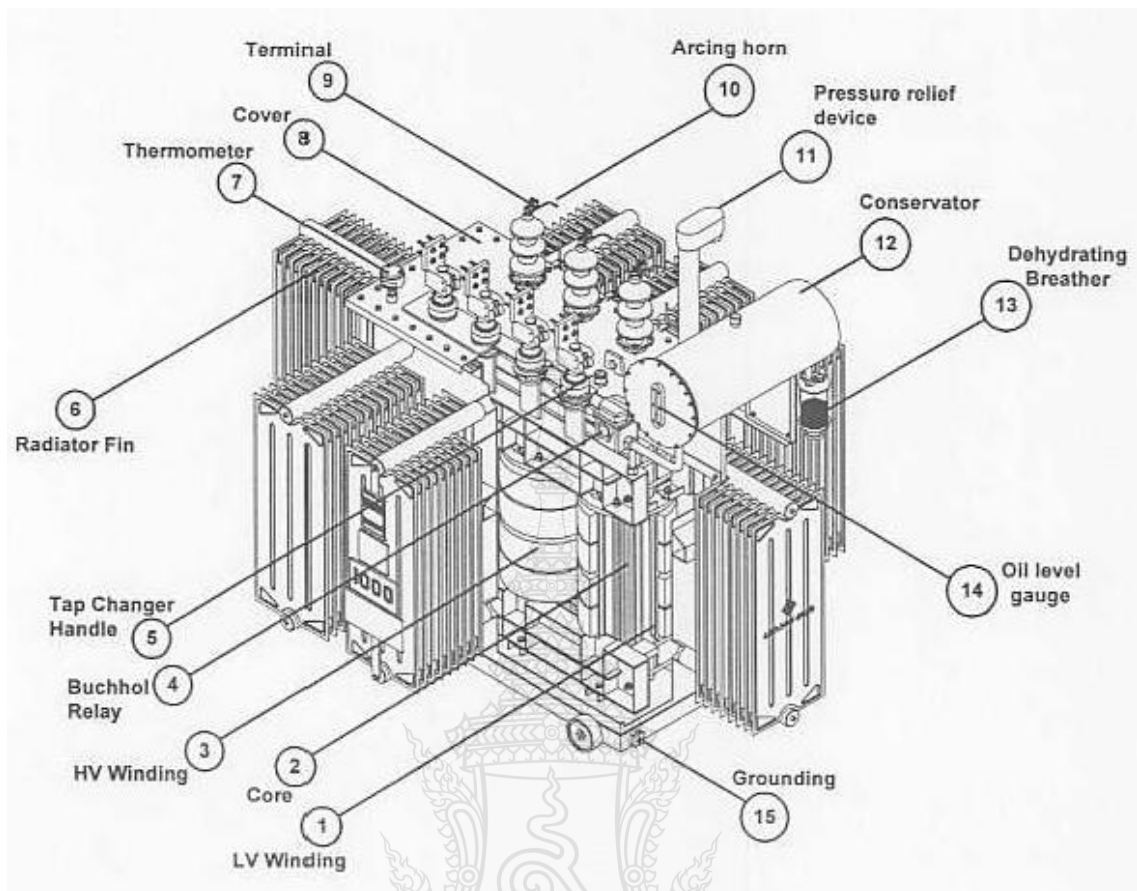
$$\frac{E_p}{E_s} = \frac{N_p}{N_s} \quad (2.5)$$

- โดยที่  $E_p$  คือ แรงดันหนึ่งวินาทีขดลวดปฐมภูมิ  
 $E_s$  คือ แรงดันหนึ่งวินาทีขดลวดด้านทุติยภูมิ  
 $N_p$  คือ จำนวนรอบของขดลวดด้านปฐมภูมิ  
 $N_s$  คือ จำนวนรอบของขดลวดด้านทุติยภูมิ

### 2.3 โครงสร้างของหม้อแปลงระบบจำหน่าย

โครงสร้างของหม้อแปลงจำหน่าย แสดงได้ดังรูปที่ 2.3 สามารถแบ่งโครงสร้างที่สำคัญออกเป็น 4 ส่วน ดังนี้ [9]

1. ส่วนประกอบภายนอก ได้แก่ถังหม้อแปลง ชุดระบายความร้อน น้ำมันหม้อแปลง ถังรองรับน้ำมัน ห้องหายใจ เครื่องทำให้แห้ง ลื่นระบายความดัน บุชโซลทรีเลย์ เครื่องวัดระดับน้ำมัน เครื่องวัดอุณหภูมิ และปลอกกรองแกน เป็นต้น
2. ส่วนต่อภายในและภายนอก ได้แก่ขั้วของสายไฟฟ้า จุดต่อแยกกระดပ်แรงดัน สวิตซ์ต่อแยกกระดပ်แรงดัน และสายลัด เป็นต้น
3. ส่วนที่เป็นวงจรมแม่เหล็ก ได้แก่แกนเหล็กของหม้อแปลง ขาแกนเหล็ก โย้กแกนเหล็ก และเครื่องยึดแกนเหล็ก เป็นต้น
4. ส่วนที่เป็นวงจรไฟฟ้า ได้แก่ขดลวดด้านปฐมภูมิ ขดลวดด้านทุติยภูมิ และฉนวน เป็นต้น

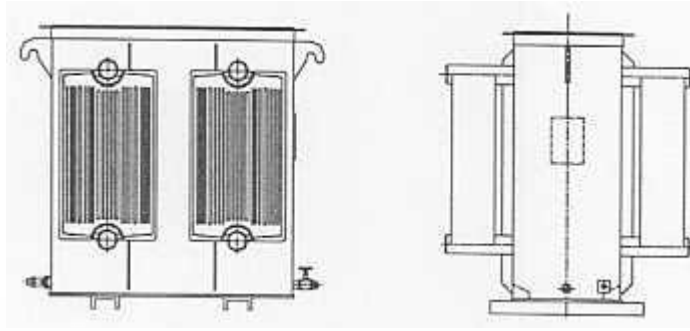


รูปที่ 2.3 โครงสร้างของหม้อแปลงระบบจำหน่าย

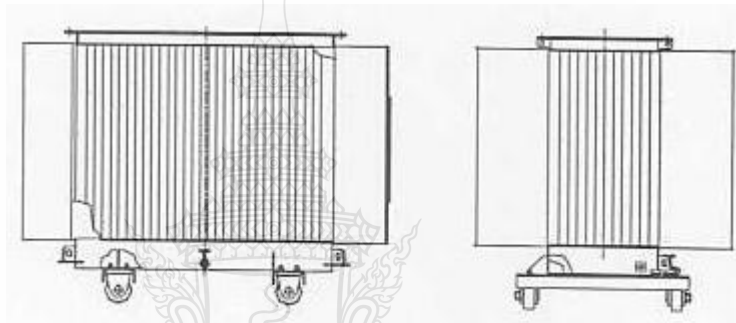
### 2.3.1 โครงสร้างภายนอก

#### 1. ถังหม้อแปลง

ถังหม้อแปลงเป็นอุปกรณ์สำหรับห่อหุ้มฉนวนเหลว หรือก๊าซของหม้อแปลง โครงสร้างของถังหม้อแปลง มีอยู่หลายลักษณะตามความเหมาะสมของผู้ผลิตหม้อแปลงหรือขึ้นอยู่กับผู้ใช้ โดยปกติแล้วผู้ใช้งานต้องการหม้อแปลงที่มีน้ำหนักเบา ราคาถูก สิ้นเปลืองน้อย ระดับความดังของเสียงต่ำ มีความน่าเชื่อถือสูง และอายุการใช้งานนาน สามารถแบ่งลักษณะของถังหม้อแปลงตามชุดระบายความร้อนได้ 2 ชนิดใหญ่ๆ ดังรูปที่ 2.4 และรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.4 ตัวถังหม้อแปลงติดตั้งครีบริบายความร้อนแบบแผ่น



รูปที่ 2.5 ตัวถังหม้อแปลงติดตั้งครีบริบายความร้อนแบบลอนลูกฟูก

ตัวถังหม้อแปลงติดตั้งครีบริบายความร้อนแบบแผ่น (Radiator Fin) ตามรูปที่ 2.4 เป็นตัวถังที่มีความแข็งแรง ทนต่อการสั่นสะเทือน เหมาะสำหรับหม้อแปลงที่มีถังรองรับน้ำมัน (Conservator) ทำให้น้ำมันสัมผัสกับอากาศได้โดยตรง (Open Type) สำหรับตัวถังหม้อแปลงติดตั้งครีบริบายความร้อนแบบลอนลูกฟูก (Corrugate Fin) ตามรูปที่ 2.5 ครีบนอกจากจะทำหน้าที่ระบายความร้อนแล้ว ยังสามารถรองรับต่อการขยายตัวของน้ำมันเมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้น ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องมีถังรองรับน้ำมัน อากาศภายนอกไม่สามารถสัมผัสกับน้ำมันได้โดยตรง (Hermetically Sealed) ข้อเปรียบเทียบระหว่างครีบริบายความร้อนแบบแผ่นกับแบบลอนลูกฟูก แสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ข้อเปรียบเทียบหม้อแปลงไฟฟ้าติดครีบระบายความร้อนแบบแผ่นกับแบบติดครีบระบายความร้อนแบบลอนลูกฟูก

รายการ	ครีบแบบแผ่น	ครีบแบบลอนลูกฟูก
โครงสร้าง	ตัวถังและครีบระบายความร้อน ทำจากแผ่นเหล็กหนา โครงสร้างของหม้อแปลงมีความแข็งแรง	ผนังของถังทำจากแผ่นเหล็กบาง ทำเป็นลอนเพื่อช่วยในการระบายความร้อน มีความกระตือรือร้น
การหมุนเวียนของน้ำมัน	หมุนเวียนได้สะดวก น้ำมันที่ร้อนจะลอยตัวสู่ด้านบนเข้าสู่ชุดระบายความร้อนเมื่อเย็นตัวจะต่ำลงสู่ด้านล่าง หมุนเวียนโดยตลอด	การหมุนเวียนกระจัดกระจายไม่แน่นอน
การเพิ่มโหลด	ทำได้ง่าย โดยการติดตั้งพัดลมช่วยระบายความร้อนที่ชุดระบายความร้อน	ทำได้ยากกว่าต้องใช้พัดลมสำหรับเฉพาะงานเท่านั้น
การทนต่อความดัน	สามารถทนต่อความดันที่เกิดขึ้นภายในได้ 10 PSIg	สามารถทนต่อความดันที่เกิดขึ้นภายในได้ 3.5 PSIg
การบำรุงรักษา	ควรทำการตรวจสอบอย่างน้อยปีละ 1 ครั้ง สังเกตการเปลี่ยนแปลงสีของสารกรองความชื้น (Silica Gel)	ไม่ต้องทำการบำรุงรักษามากนักเพราะน้ำมันไม่สัมผัสอากาศภายนอกโดยตรง

2. น้ำมันหม้อแปลง

น้ำมันที่ใช้ในหม้อแปลงนอกจากทำหน้าที่เป็นฉนวนแล้ว ยังมีหน้าที่พาความร้อนที่เกิดจากกำลังสูญเสียออกจากขดลวดและแกนเหล็ก คุณสมบัติที่สำคัญของน้ำมันหม้อแปลงเพื่อที่จะทำหน้าที่เป็นฉนวน ได้อย่างสมบูรณ์ มีดังนี้

- 1) มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี มีค่าความเป็นฉนวน (Dielectric Strength) สูง
- 2) ระบายความร้อนได้ดี มีความหนืด (Viscosity) ต่ำ
- 3) มีจุดไหล (Pour Point) ต่ำ ไม่แข็งตัวในฤดูหนาว
- 4) ระเหยได้น้อย มีจุดวาบไฟ (Flash Point) สูง
- 5) คงทนต่อปฏิกิริยาทางเคมี ไม่มีสารไปกัดกร่อนส่วนที่เป็นโลหะ
- 6) มีความเป็นกรด (Acidity) ต่ำ
- 7) สะอาดปราศจากความชื้น หรือสิ่งเจือปนต่างๆ

### 3. ถังรองรับน้ำมัน

ถังรองรับน้ำมัน (Conservator) มีลักษณะเป็นถังอยู่สูงเหนือหม้อแปลงภายในบรรจุน้ำมันหม้อแปลงไว้ ทำหน้าที่รองรับการขยายหรือหดตัวของน้ำมันหม้อแปลง เมื่ออุณหภูมิของน้ำมันสูงขึ้น น้ำมันจะขยายตัวผ่านเข้าไปในท่อและลิ้นบังคับเข้าสู่อ่างรองรับน้ำมัน อากาศที่สัมผัสกับน้ำมันจะถูกกรองความชื้น โดยเครื่องหายใจกรองความชื้น (Dehydrating Breather)

ขนาดของถังรองรับน้ำมันนี้จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ซึ่งต้องสามารถรองรับน้ำมันส่วนที่จะขยายตัวได้ จากการทดลอง น้ำมันจะขยายตัวได้ประมาณ 7% ของน้ำมันภายในตัวถังของหม้อแปลงในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 0-100 °C ฉะนั้นเวลาทำการออกแบบถังรองรับน้ำมัน ขนาดของถังรองรับน้ำมันจะต้องสามารถรองรับน้ำมันในส่วนที่จะขยายตัวได้ประมาณ 11-12% ของน้ำมันทั้งหมดที่อยู่ในตัวถังของหม้อแปลง

### 4. ลิ้นระบายความดัน

ลิ้นระบายความดัน (Pressure Relief Device) ความผิดปกติที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลง เช่น เกิดประกายไฟ (Arcing) อันเป็นผลทำให้เกิดก๊าซสูงขึ้น แรงดันของก๊าซที่สูงมากนี้ จะผ่านท่อระบายความดันไปกระแทกแผ่นระบายแรงดัน (Busting Plate) ที่ส่วนบนเพื่อออกสู่ภายนอก

### 5. เครื่องวัดระดับน้ำมัน

โดยทั่วไป เครื่องวัดระดับน้ำมัน (Oil Level Gauge) จะติดตั้งอยู่ข้างๆ ถังรองรับน้ำมัน แบ่งได้เป็น 2 ชนิด ด้วยกันคือ ชนิดที่ใช้หลอดแก้ว (Rod Type Oil Gauge) และชนิดที่มีหน้าปัดเข็มชี้ (Dial Type Oil Gauge) เครื่องวัดชนิดนี้ยังสามารถเพิ่มจุดสัมผัสที่เข็ม เพื่อติดตั้งเครื่องเตือน (Alarm) โดยให้มีเสียงดังไปยังห้องควบคุม เมื่อน้ำมันตกถึงระดับที่ต่ำสุด

### 6. เครื่องวัดอุณหภูมิ

เครื่องวัดอุณหภูมิ (Thermometer) เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับบอกอุณหภูมิของหม้อแปลง การบอกอุณหภูมิส่วนบนของน้ำมันหม้อแปลง (Top Oil Temperature) จะติดตั้งรับความร้อน บนฝาถังหม้อแปลงเป็นบริเวณที่น้ำมันร้อนที่สุด และอุณหภูมิของขดลวด (Winding Temperature) ต้องอาศัยวิธีวัดทางอ้อม โดยขดลวดจะร้อนมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับกระแสที่ไหลผ่าน ฉะนั้นจากค่าของกระแสที่ไหลผ่าน สามารถเปรียบได้กับความร้อน โดยการนำเอากระแสที่ได้จากหม้อแปลงกระแสที่ขั้วต่อสายไฟ ไหลผ่านขดลวดความร้อน เพื่อส่งค่าอุณหภูมิให้แก่เทอร์โมมิเตอร์ และส่งต่อไปที่หน้าปัดแสดงผล



## 7. บุชโฮลรีเลย์

บุชโฮลรีเลย์ (Buchholz Relay) ทำการติดตั้งเฉพาะหม้อแปลงที่มีถังรองรับน้ำมันเท่านั้น และจะต่ออยู่ระหว่างตัวถังหม้อแปลงกับถังรองรับน้ำมัน ทำหน้าที่ตรวจความผิดปกติในหม้อแปลง เช่น จากก๊าซที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลงแจ้งสัญญาณเตือนให้ทราบ ถ้าก๊าซเกินระดับก็จะส่งสัญญาณตัดไฟ เข้า-ออก จากหม้อแปลง และถ้าน้ำมันภายในหม้อแปลงเกิดไหลย้อนกลับเข้าไปถังรองรับน้ำมัน โดยผ่านบุชโฮลรีเลย์ ด้วยความเร็วเกิน 100 cm/sec เนื่องจากเกิดการลัดวงจรภายในหม้อแปลงทำให้แผ่นกั้นในบุชโฮลรีเลย์พลิก ก็จะส่งสัญญาณตัดไฟเข้า-ออก จากหม้อแปลง เช่นเดียวกัน

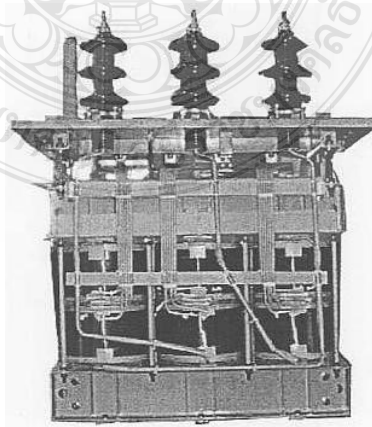
## 8. ปลอกรองแกน

ปลอกรองแกน (Bushing) เป็นอุปกรณ์ฉนวนที่ติดตั้งอยู่ระหว่างตัวถังหม้อแปลงกับภายนอก บริเวณสายลีด (Lead) ต่อออกมาจะอัดแน่นด้วยสารบางอย่างเพื่อทำหน้าที่เป็นฉนวนทางไฟฟ้า ช่วยป้องกันการเกิดโคโรน่า (Corona) ผ่านอากาศ และกระจายความสม่ำเสมอของความเข้มสนามไฟฟ้า (Electric Field)

### 2.3.2 ส่วนต่อภายในและภายนอก

#### 1. สายลีดและปลายขั้ว

สายลีดและปลายขั้ว เป็นแท่งทองแดงหรือข้อต่อของขดลวดคู่ภายนอก ซึ่งจะหุ้มด้วยฉนวนบางส่วนหรือทั้งหมด และต่อขึ้นสู่สะพานไฟฟ้า (Bus-Bar) โดยตรง สำหรับหม้อแปลงชนิดแช่น้ำมัน (Oil-immersed Transformer) ขนาดและรูปร่างของแท่งทองแดงสำคัญมาก ในระบบแรงดันไฟฟ้าสูง โดยจะต้องคำนึงถึงแรงดันเค้นกำบังไฟฟ้า (Dielectric Stress) และโคโรน่าตรงบริเวณขอบหรือมุม การเดินสายลีดและการฉนวนภายในหม้อแปลงแสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การฉนวนในส่วนต่างๆ ของหม้อแปลง และเดินสายลีดภายใน

## 2. ตัวเปลี่ยนแปลงจุดต่อแยก

ตัวเปลี่ยนแปลงจุดต่อแยก (Tap Changer) เป็นอุปกรณ์ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนอัตราส่วนจำนวนรอบของขดลวดหม้อแปลง เพื่อให้ระดับแรงดันไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าคงที่ หรือเป็นการเปลี่ยนแปลงให้อยู่ภายในมาตรฐาน ตัวเปลี่ยนแปลงจุดต่อแยกที่ใช้งานตามมาตรฐานมีอยู่ 2 ชนิด

- 1) ตัวเปลี่ยนแปลงจุดต่อแยกขณะไร้ภาระ (Off Load Tap Changer)
- 2) ตัวเปลี่ยนแปลงจุดต่อแยกขณะรับภาระ (On Load Tap Changer)

### 2.3.3 ส่วนที่เป็นวงจรมแม่เหล็ก

#### 1. แกนเหล็ก

แกนเหล็ก (Steel Core) เป็นทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็ก เพื่อเหนี่ยวนำวงจรไฟฟ้าระหว่างขดลวดด้านปฐมภูมิ และขดลวดด้านทุติยภูมิ ลักษณะการออกแบบและการจัดวางแกนเหล็กของหม้อแปลงนั้น จำแนกตามหลักของวงจรมแม่เหล็กออกเป็น 2 ชนิด ด้วยกันคือ

- 1) ชนิดแกน (Core Type) มีเส้นแรงแม่เหล็กรวมอยู่ที่แกนของหม้อแปลง
- 2) ชนิดเปลือกกรอบ (Shell Type) มีเส้นแรงแม่เหล็กอยู่รอบนอกขดลวดของหม้อแปลง

คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำแกนเหล็กของหม้อแปลง จะต้องมีความซึมซาบของแกนเหล็ก (Permeability) และความต้านทาน (Resistivity) สูง กำลังสูญเสียที่เกิดจากเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง (Hysteresis) ต่ำ ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กสูงประมาณ  $1.45-1.75 \text{ Wb/m}^2$  ปัจจุบันเหล็กที่นำมาใช้งานเป็นประเภทเกรนโอเรียนเตด (Cold Rolled Grain Oriented Silicon Steel; CRGO) ซึ่งได้ผ่านกรรมวิธีทางเคมีและความร้อนแล้วนำมารีดเป็นแผ่นบางๆ และนำมาประกอบเป็นแท่งแกน เพื่อลดกำลังสูญเสียอันเนื่องมาจากกระแสไหลวน (Eddy Current) คุณสมบัติที่สำคัญของแกนเหล็กหม้อแปลงมีดังนี้

- กำลังสูญเสียในแกนเหล็ก ในหน่วย วัตต์ต่อกิโลกรัม ต้องมีค่าต่ำ
- อายุการใช้งานทนทาน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวิธีการออกแบบระบบระบายความร้อน
- ความเค้นเชิงกลสูง เพื่อว่าเมื่อมีการลัดวงจรเกิดขึ้นภายในหม้อแปลงระหว่างที่ใช้งาน หรือสั้นสะเทือนในระหว่างที่มีการขนส่ง หรือแรงยึดต่อขดลวดในระหว่างที่ผลิตในโรงงาน หม้อแปลงจะต้องสามารถรองรับได้

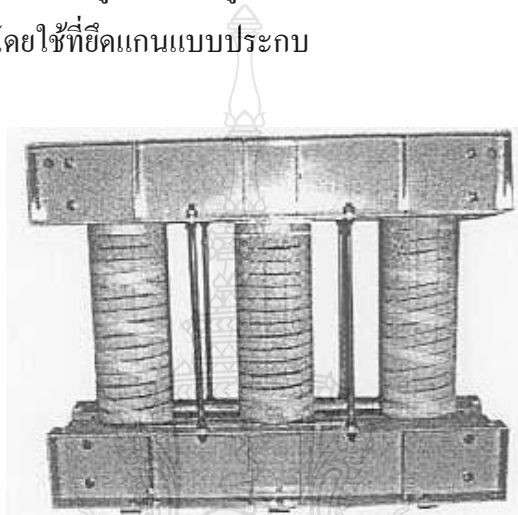
#### 2. โยคและขาแกนเหล็ก

โยคและขาแกนเหล็ก (Yoke and Limb) มีหน้าตัดเป็นชั้น และจำนวนชั้นในส่วนของโยค แกนเหล็กอาจจะน้อยกว่าในส่วนของขาแกนเหล็ก แต่จะมีพื้นที่หน้าตัดที่ใหญ่กว่าประมาณ 5%-10% เนื่องจากมีการปรับตัวของความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นตรงมุมต่อระหว่างขาแกน

เหล็กกับส่วนของโย้แกนเหล็กทำให้เกิดกำลังสูญเสียของกระแสไหลวนมากขึ้น การลดกำลังสูญเสียดังกล่าวจะกระทำได้โดยการเสริมโย้แกนเหล็กเพิ่มเติม เพื่อเพิ่มพื้นที่หน้าตัดให้แก่โย้แกนเหล็ก

### 3. เครื่องยัดแกนเหล็ก

เครื่องยัดแกนเหล็กจะยัดด้วยหมุด (Pin) สอดผ่านทะลุรูของชั้นต่างๆ ฉนวนที่หุ้มหมุดนั้นต้องมีความเป็นฉนวนสูงเพื่อกันไม่ให้เกิดการลัดวงจรระหว่างชั้นขึ้น สำหรับหม้อแปลงจำหน่ายมีการยัดแกนเหล็กได้หลายรูปแบบ ในรูปที่ 2.7 แสดงการประกอบแกนเหล็กติดกับเครื่องยัดแกนแบบไม่ต้องเจาะทะลุโดยใช้ที่ยัดแกนแบบประกบ



รูปที่ 2.7 โครงสร้างแกนเหล็กของหม้อแปลง 3 เฟส ชนิดแกน

#### 2.3.4 ส่วนที่เป็นวงจรไฟฟ้า

##### 1. ขดลวดหม้อแปลง

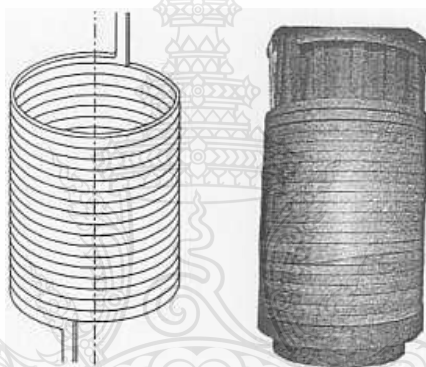
ขดลวดหม้อแปลง (Winding) ประกอบด้วยลวดทองแดงหรืออลูมิเนียม ฉนวน ขั้ว (Terminal) จุดต่อแยก (Tap) เมื่อกล่าวถึงขดลวดหม้อแปลง ก็จะต้องพิจารณาถึงจำนวนรอบของขดลวด ขนาดลวดตัวนำ ร่องระบายความร้อน (Cooling Duct) ฉนวนทรงกระบอก (Insulating Cylinder) และฉนวนกั้น (Insulating Barrier) สิ่งที่ต้องพิจารณาเลือกชนิดของขดลวดมีดังนี้

- 1) กำลังสูญเสียขณะมีโหลด (Load Loss) ต้องมีค่าน้อยที่สุด
- 2) ความแข็งแรงเชิงกล (Mechanical Strength)
- 3) เสถียรรูปที่มีต่อความร้อนสูง
- 4) ความแข็งแรงของฉนวน (Insulation Strength) สูง
- 5) ค่าใช้จ่ายในการผลิตต่ำ

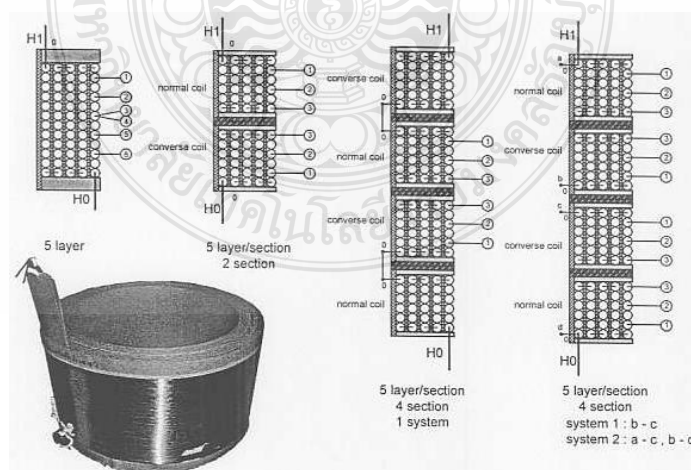
6) โครงสร้างง่ายไม่ซับซ้อน

7) จำนวนรอบในแกนต้องลงตัวพอดี

พื้นที่หน้าตัดของลวดตัวนำมีใช้งานทั้งชนิดกลม และชนิดสี่เหลี่ยม ขนาดและชนิดของขดลวดตัวนำที่ใช้งานจะพิจารณาจากขนาดของแรงดันไฟฟ้า และอัตรากำลังของหม้อแปลง หรือภาระกระแสที่ต้องการ ขดลวดที่ใช้ลวดตัวนำกลมเหมาะสมกับหม้อแปลงขนาดเล็ก และขดลวดที่ใช้ลวดตัวนำสี่เหลี่ยมเหมาะสมกับหม้อแปลงที่ต้องรับภาระสูงๆ การแบ่งชนิดของลวดนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะการจัดวางลวดตัวนำมี 2 ลักษณะ ได้แก่ขดลวดทรงกระบอกพื้นแบบชั้น (Cylindrical Layer Winding) และขดลวดแบบจาน (Disc Winding) ส่วนการพันชนิดอื่นๆ นั้น ได้จากการผสมของขดลวดทั้งสองลักษณะ



รูปที่ 2.8 ขดลวดทรงกระบอกหนึ่งชั้นพันด้วยลวดตัวนำสี่เหลี่ยม

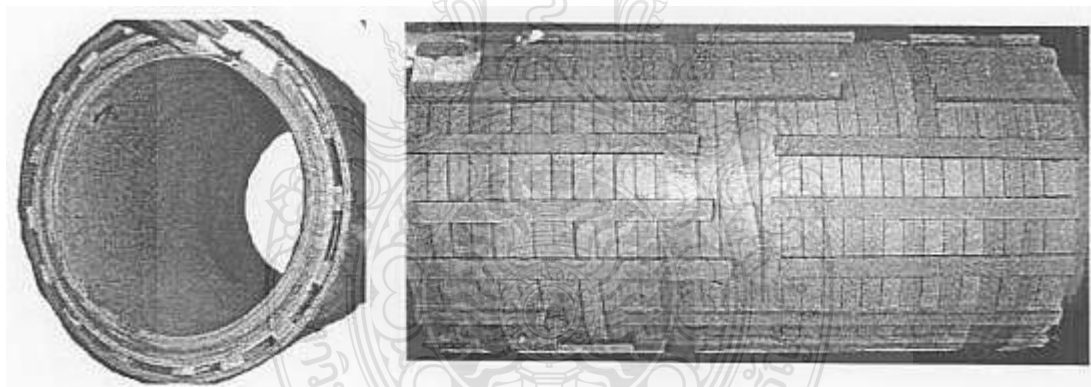


รูปที่ 2.9 ขดลวดทรงกระบอกหลายชั้นพันด้วยลวดตัวนำกลม

โดยทั่วไป หม้อแปลงจำหน่ายนิยมลักษณะการพันขดลวดแบบชั้น ด้านแรงดันต่ำ มีกระแสการะสูงนิยมใช้วิธีการพันเป็นแบบสไปรัล (Spiral Winding) ใช้ลวดตัวนำสี่เหลี่ยมรวมหลายๆตัว ทำเป็นชุดแล้วพันขนานพร้อมกัน ปลายที่โผล่ออกมาตรงให้แน่น แสดงวิธีการพันขดลวดแบบสไปรัลดังรูปที่ 2.8 และด้านแรงสูงมีกระแสประมาณไม่เกิน 30 A นิยมวิธีการพันขดลวดแบบครอสโอเวอร์ (Crossover Winding) ใช้ลวดตัวนำกลมพันเป็นชั้นๆ โดยอาจแบ่งออกเป็นหลายๆตอน เพื่อช่วยลดแรงดันระหว่างชั้น แสดงรูปขดลวดพันแบบครอสโอเวอร์และรูปแบบการลัดสายของจุดต่อแยกแรงดันดังรูปที่ 2.9

## 2. การฉนวน

การฉนวน (Insulation) แบ่งออกเป็นฉนวนภายในขดลวดและฉนวนระหว่างขดลวด ฉนวนภายในขดลวดทำหน้าที่เสมือนกำแพงกันแรงดันไฟฟ้า โดยจะกั้นระหว่างรอบหรือระหว่างชั้นของขดลวด ชนิดของฉนวนที่นิยมใช้งานจะเป็นกระดาษกราฟท์ (Kraft Paper) หรือเพรสบอร์ด (Pressboard) ฉนวนนอกจากจะใช้เพื่อป้องกันแรงดันเกินแล้ว ยังใช้ในการระบายความร้อนอีกด้วย แสดงฉนวนกันทำหน้าที่ระบายความร้อนภายในชุดของขดลวดดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ฉนวนกันทำหน้าที่ระบายความร้อนภายในชุดของขดลวด

### 2.3.5 อุปกรณ์ประกอบหม้อแปลงจำหน่ายตามมาตรฐาน การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

1. บุชชิงแรงดันสูงและแรงดันต่ำพร้อมแคล้มป์รัดสายตัวนำ
2. ฉนวนครอบบุชชิงแรงดันสูง (Bird Guard Cap)
3. อุปกรณ์ล่อฟ้า (Arching Horns)
4. แท็บเซนเจอร์
5. กระเปาะเทอร์โมมิเตอร์

6. แผ่นป้ายรายละเอียด (Nameplate)
7. วาล์วระบายน้ำมัน (ติดด้านล่างของตัวถัง)
8. ขั้วต่อลงดิน
9. หุยกตัวหม้อแปลง
10. หูหิ้วบนฝาครอบตัวถัง
11. วาล์วระบายอากาศ

#### 2.3.6 ข้อกำหนดของหม้อแปลงระบบจำหน่าย

1. พิกัดกำลังไฟฟ้า 100 kVA
2. จำนวนเฟส 3 Phase
3. ความถี่ใช้งาน 50 Hz
4. แรงดันด้านแรงดันสูง และด้านแรงต่ำ 22 kV-400/230 V
5. เปอร์เซ็นอิมพีแดนซ์ 4%
6. แกนเหล็ก จะใช้เหล็กกริดเย็นประเภทเกรน โอริเยลเต็ด มีความหนาของแผ่นเหล็กเท่ากับ 0.3 มม. หรือ 0.27 มม.
7. ชนิดของขดลวด ขดลวดชนิดสไปรัล (Spiral Type) ใช้พันเป็นขดลวดแรงต่ำ และขดลวดชนิดครอสโอเวอร์ (Crossover Type) จะใช้เป็นขดลวดแรงดันสูงของหม้อแปลงจำหน่าย

ข้อกำหนดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ได้มีข้อกำหนดสำหรับผู้ผลิตที่จะนำหม้อแปลงมาจำหน่ายให้กับการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค แสดงได้ตามตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ค่าต่างๆของหม้อแปลง ที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคกำหนด [10]

Transformer Rating ( kVA )	Watt Loss		Short-circuit Impedance (Percent at 75°C)	
	No-load loss, for system voltage of :			Load Loss at 75oC
	22 kV	33 kV		
50	160	170	950	4
100	250	260	1,550	4
160	360	370	2,100	4
250	500	520	2,950	4
315	600	630	3,500	4
400	720	750	4,150	4
500	860	900	4,950	6.5 or more
630	1,010	1,050	5,850	4
1,000	1,270	1,300	12,150	6
1,250	1,500	1,530	14,750	6
1,500	1,820	1,850	17,850	6
2,000	2,110	2,140	21,600	6

## 2.4 กำลังสูญเสียในหม้อแปลง

### 2.4.1 กำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก (Core Loss) [9]

กำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก หรือเรียกว่า กำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะไม่มีโหลด (No Load Loss) จะประกอบด้วยการสูญเสียดังต่อไปนี้

#### 1. การสูญเสียเนื่องจากฮิสเทอรีซิสในแกนเหล็ก (Hysteresis Loss)

เป็นกำลังไฟฟ้าสูญเสียไปในการกลับทิศทางของแม่เหล็ก การลดความสูญเสียเนื่องจากฮิสเทอรีซิส สามารถทำได้โดย การใช้แกนเหล็กที่มีส่วนผสมของซิลิกอน การสูญเสียนี้ขึ้นอยู่กับ

กับคุณภาพหรือเกรดของแกนเหล็ก และความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่เลือกใช้ และเป็นสัดส่วนกับความถี่ของแรงดันไฟฟ้า

$$W_h = k_1 f B^n \quad (2.6)$$

โดยที่  $k_1$  คือ ค่าคงที่  
 $n$  คือ มีค่าเท่ากับ 1.6-2.5

### 2. การสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนในแกนเหล็ก (Eddy Current Loss)

แกนเหล็ก เป็นตัวนำไฟฟ้า และทำนองเดียวกันก็เป็นตัวนำเส้นแรงแม่เหล็กด้วยการเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในแกนเหล็ก จากการเกิดการเปลี่ยนแปลงเส้นแรงแม่เหล็ก เป็นเหตุให้เกิดการไหลของกระแสในแกนเหล็ก กระแสนี้เรียกว่า “ กระแสไหลวน ” ซึ่งจะทำให้เกิดการสูญเสียกำลังไฟฟ้า และเกิดความร้อนขึ้นติดตามมา การลดการสูญเสียจากกระแสไหลวน สามารถทำได้โดยการใช้แกนเหล็กประกอบจากแผ่นเหล็กบางๆ และแผ่นเหล็กแต่ละแผ่นจะต้องเคลือบด้วยฉนวน กำลังไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน จะเป็นสัดส่วนกับกำลังสองของความหนาของแผ่นเหล็กแต่ละแผ่น และกำลังสองของความถี่แรงดันไฟฟ้า

$$W_e = k_2 f^2 B^2 b_s^2 \quad (2.7)$$

โดยที่  $k_2$  คือ ค่าคงที่  
 $b_s^2$  คือ ความหนาของแผ่นเหล็ก  
 ดังนั้น

$$\begin{aligned} P_{core} &= W_h + W_e \\ &= k_1 f B^n + k_2 f^2 B^2 b_s^2 \end{aligned} \quad (2.8)$$

โดยที่  $P_{core}$  คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก

### 3. การคำนวณกำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะไม่มีโหลดในทางปฏิบัติ

ในทางปฏิบัติ สามารถกำหนดหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะไม่มีโหลดได้จากน้ำหนักรวมของแกนเหล็ก และข้อมูลกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กต่อน้ำหนัก โดยนำมาจากเส้น



โคงแสดงคุณลักษณะกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก (Core Loss Curve) ของผู้ผลิตแกนเหล็ก ดังนั้น จากพารามิเตอร์ดังกล่าว สามารถคำนวณกำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะไม่มีโหลดได้ตามสมการ

$$W_c = K_3 W_f W_m \quad (2.9)$$

- โดยที่  $K_3$  คือ แฟกเตอร์ที่ทำให้การสูญเสียขณะไม่มีโหลดเพิ่มขึ้น  
 $W_f$  คือ น้ำหนักรวมของแกนเหล็ก  
 $W_m$  คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กต่อน้ำหนักของแกนเหล็ก 1 กิโลกรัม

#### 2.4.2 กำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดทองแดง (Copper Loss)

กำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดทองแดง หรืออาจเรียกว่า กำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะมีโหลด (Load Loss) ซึ่งเกิดขึ้นจากกระแสที่ไหลในขดลวดของหม้อแปลงขณะจ่ายโหลด ซึ่งจะประกอบด้วย การสูญเสียจากส่วนต่างๆ ดังนี้

- การสูญเสียในขดลวด เนื่องจากกระแสขณะจ่ายโหลด
- การสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน ในขดลวดเนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล

(Leakage Flux) และการสูญเสียปลีกย่อย (Stray Loss) ในขดลวดแกนเหล็ก และอุปกรณ์ที่จับยึดโครงสร้างของหม้อแปลง

ในการคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียของขดลวดสามารถคำนวณได้ดังสมการ 2.10

$$P_{cu} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 \quad (2.10)$$

- โดยที่  $P_{cu}$  คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดทองแดง  
 $I_1$  คือ กระแสของขดลวดแรงสูง  
 $R_1$  คือ ความต้านทานของขดลวดแรงสูง  
 $I_2$  คือ กระแสของขดลวดแรงต่ำ  
 $R_2$  คือ ความต้านทานของขดลวดแรงต่ำ

การวัดค่าความต้านทานของขดลวด ทำการวัดด้วยบริดจ์ที่มีความแม่นยำสูง เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดทองแดง และใช้พิจารณาอุณหภูมิของขดลวดในการทดสอบอูณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของหม้อแปลง การวัดค่าความต้านทานจะต้องระบุอุณหภูมิของขดลวด

ขณะวัด ถ้าอุณหภูมิของบรรยากาศโดยรอบหม้อแปลงมีค่าคงที่เป็นเวลานาน ประมาณได้ว่าอุณหภูมิของขดลวดมีค่าเท่ากับอุณหภูมิของบรรยากาศโดยรอบหม้อแปลง

ค่าความต้านทานที่วัดได้จะแปลงค่าความต้านทานไปที่อุณหภูมิอ้างอิง  $75^{\circ}\text{C}$  สำหรับขดลวดทองแดงคำนวณได้ ตามสมการ ดังนี้

$$R_r = R_a \frac{235 + \theta_r}{235 + \theta_a} \quad (2.11)$$

- เมื่อ  $R_a$  คือ ความต้านทานของขดลวดที่อุณหภูมิ  $\theta_a$  ในสภาวะคงตัว  
 $R_r$  คือ ความต้านทานของขดลวดที่อุณหภูมิอ้างอิง  $\theta_r$  ( $75^{\circ}\text{C}$ )  
 $\theta_a$  คือ อุณหภูมิในสภาวะคงตัว  
 $\theta_r$  คือ อุณหภูมิที่อ้างอิง

#### 2.4.3 กำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมในหม้อแปลง

กำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมในหม้อแปลงจำหน่าย คือ ผลรวมของค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดทองแดง และค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก สามารถคำนวณได้ตามสมการ

$$P_t = P_{cu} + P_{core} \quad (2.12)$$

- เมื่อ  $P_t$  คือ ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมในหม้อแปลงจำหน่าย  
 $P_{cu}$  คือ ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดทองแดง  
 $P_{core}$  คือ ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก

### 2.5 การออกแบบหม้อแปลงระบบจำหน่าย

การออกแบบหม้อแปลงจำหน่าย ก่อนทำการออกแบบจะต้องมีการกำหนดคุณลักษณะต่างๆ ของหม้อแปลงจำหน่ายก่อนทำการออกแบบให้ชัดเจน ได้แก่ พิกัดกำลัง แรงดัน เฟส ความถี่ ระบบไฟฟ้า ชนิดของกลุ่มเวกเตอร์ เฟอร์เซ็นต์อิมพีแดนซ์ลัดวงจร หรือข้อกำหนดของกำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลด กำลังสูญเสียขณะมีโหลด และมาตรฐานการทดสอบ เป็นต้น เนื่องจากการออกแบบจะใช้เงื่อนไขดังกล่าวเป็นข้อกำหนดของการออกแบบ ขั้นตอนการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายสามารถแสดงได้ ดังรูปที่ 2.10 [8]



รูปที่ 2.11 แผนผังการออกแบบหม้อแปลงจำหน่าย

## 2.6 ความเป็นมาของปัญหาที่เกิดขึ้นในปัจจุบัน

หม้อแปลงถือเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญในระบบจำหน่าย ซึ่งเมื่อเกิดปัญหาขึ้นกับหม้อแปลงจะทำให้เกิดไฟดับเป็นบริเวณกว้าง ซึ่งปัญหาที่เกิดกับหม้อแปลงก็มีหลายสาเหตุด้วยกัน โดยสาเหตุของความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับหม้อแปลงไฟฟ้าในระบบจำหน่ายนั้นแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ การเกิดความผิดปกติภายใน และการเกิดความผิดปกติภายนอก [5]

### 2.6.1 ความผิดปกติภายนอก (External Faults)

ผลของการเกิดความผิดปกติภายนอกจะทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับความเครียดภายในหม้อแปลงทำให้อายุการใช้งานของหม้อแปลงลดลง การเกิดความผิดปกติประเภทนี้ประกอบด้วย

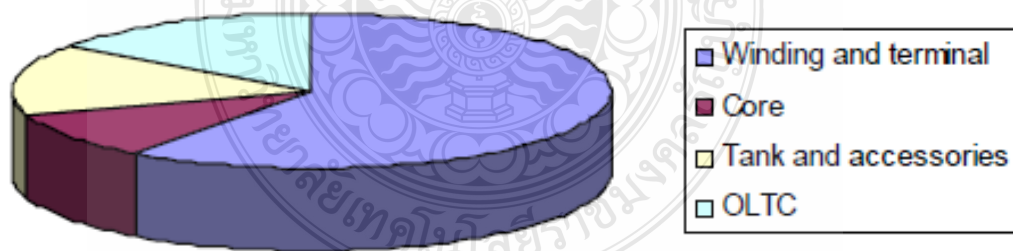
1. การจ่ายโหลดเกินขนาด (Overloads)
2. การลัดวงจรภายนอก (External System Short Circuit)
3. แรงดันเกิน (Over Voltage)
4. ความถี่ของระบบลดลง (Reduced System Frequency)

### 2.6.2 ความผิดปกติภายใน (Internal Faults)

การเกิดความผิดปกติขึ้นภายในนั้นจะทำให้ฉนวนเสื่อมสภาพและทำให้เกิดความเครียดภายในหม้อแปลง ถ้าไม่มีการตรวจสอบและแก้ไขปัญหาดังกล่าวจะทำให้เกิดความผิดปกติภายในหม้อแปลงต่อไป โดยสาเหตุเบื้องต้นประกอบด้วย

1. หม้อแปลงเกิดความร้อนเกิน (Overheating)
2. ฟลักแม่เหล็กเกิน (Overfluxing)
3. การเกิดแรงดันเกิน (Overpressure)

การเกิดความผิดปกติโดยส่วนมากจะเกิดจากความผิดปกติภายในขดลวด และขั้วของหม้อแปลง ซึ่งแสดงเป็นสถิติในรูปแบบที่ 2.12 โดยจะแบ่งเป็นสัดส่วนตามสาเหตุของการเกิดความผิดปกติในแต่ละกรณี



รูปที่ 2.12 สถิติการเกิดความผิดปกติของหม้อแปลง

### ตารางที่ 2.3 สรุปผลการเกิดความผิดปกติภายในหม้อแปลง

ประเภทของความผิดปกติ	สาเหตุของความผิดปกติ
ไดอิเล็กทริก	การลัดวงจรระหว่างขดลวดหรือขดลวดลงดิน
อิลีคทริก	หน้าสัมผัสไม่ดี หรือหน้าสัมผัสโหลดที่ป เสียหาย
อิลีคโตรไดนามิก	แรงที่เกิดจากการลัดวงจรภายในและภายนอก
อิลีคโตรแมกเนติก	กระแสไฟฟ้าไหลวนทำให้เกิดความเหนียว ในวงจรแม่เหล็ก หรือโครงสร้างของตัวถัง ขยายตัว
ความร้อน	อุณหภูมิที่สูงขึ้นผิดปกติ หรือความร้อน เนื่องจากความสกปรกของน้ำมัน
เครื่องกล	การสั่นสะเทือน ความร้อนแต่ละจุด การรั่วไหล หรือข้อบกพร่องของการเปลี่ยนที่ป

สถิติความผิดปกติที่เกิดในขดลวด และเทอมินอล ตามรูปที่ 2.12 จะเห็นว่าเกิดปัญหาค่อนข้างมาก ซึ่งสาเหตุส่วนใหญ่เกิดจากการลัดวงจร โดยในขณะที่เกิดการลัดวงจรจะเกิดแรงที่เข้าไปกระทำกับขดลวดภายในหม้อแปลง ทำให้เกิดความเสียหายขึ้น และสามารถสรุปผลการเกิดความผิดปกติภายในหม้อแปลงได้ตามตารางที่ 2.3 ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จะมุ่งเน้นไปที่การเกิดลัดวงจรภายนอก

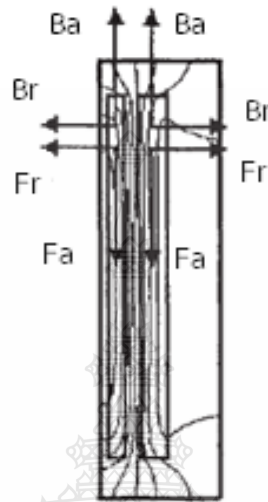
## 2.7 แรงสนามแม่เหล็กในหม้อแปลงไฟฟ้า

สาเหตุที่ทำให้หม้อแปลงพังเมื่อเกิดการลัดวงจร คือ แรงทางกล (Mechanical Forces) ซึ่งสร้างขึ้นโดยขดลวด ไม่ใช่เนื่องจากความเสียหายที่เกิดจากความร้อนโดยตรง ซึ่งสามารถคำนวณได้จากเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล ที่เกิดขึ้นที่จุดต่างๆ ในหม้อแปลง

### 2.7.1 เส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล

หม้อแปลงไฟฟ้า ที่จุดศูนย์กลางขดลวด ความหนาแน่นของ เส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลตามแนวแกน ( $B_a$ ) จะปฏิสัมพันธ์กับ กระแสในขดลวด ที่ทำให้เกิดแรงตามรัศมี ( $F_r$ ) ซึ่งจะเกิดแรงผลักระหว่างขดลวดด้านในและด้านนอก ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลตามแนวรัศมี ( $B_r$ ) จะ

ปฏิสัมพันธ์กับกระแสในขดลวด ทำให้เกิดแรงตามแนวแกน ( $F_a$ ) ซึ่งทำให้เกิดการอัด หรือการขยายของขดลวด ตามแนวแกน แสดงทิศทางตามรูปที่ 2.13 [11]



รูปที่ 2.13 เส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้า

### 2.7.2 แรงสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายในหม้อแปลง

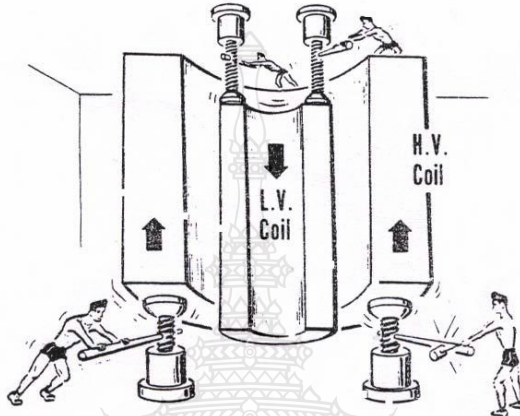
แรงสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เกิดขึ้นจากความสัมพันธ์ของ กระแสลัดวงจร และเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล ในขดลวดหม้อแปลง เมื่อเกิดการลัดวงจร กระแสในขดลวดจะเพิ่มขึ้นสูงมาก ส่งผลทำให้แรงแม่เหล็กไฟฟ้า เพิ่มขึ้นสูงมากเช่นกัน โดยหาได้จากสมการที่ 2.13

$$\vec{F} = L(\vec{I} \times \vec{B}) \quad (2.13)$$

- |       |           |     |   |
|-------|-----------|-----|---|
| เมื่อ | $\vec{F}$ | คือ | เวกเตอร์ ความหนาแน่นของแรง                    |
|       | $\vec{I}$ | คือ | เวกเตอร์ ความหนาแน่นของกระแส                  |
|       | $\vec{B}$ | คือ | เวกเตอร์ ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล |
|       | $L$       | คือ | ความยาวของขดลวด                               |

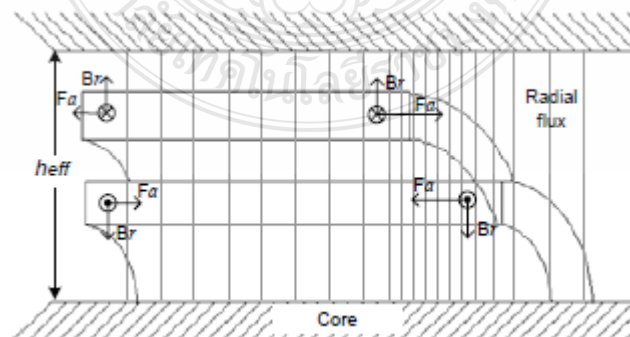
1. แรงตามแนวแกน (Axial Forces)

เกิดระหว่างขดลวดด้านแรงสูง และขดลวดด้านแรงต่ำ ใน Core-Form ของหม้อแปลง แสดงดังรูปที่ 2.14 ทำให้ขดลวดเลื่อนเรียกว่า Telescoping วิธีทำให้แรงที่เกิดขึ้นนี้มีค่าน้อยที่สุดก็คือทำให้ความสูงของขดลวดเท่ากัน และอยู่ระดับเดียวกัน [12]



รูปที่ 2.14 แรงที่กระทำในแนวแกน (Axial Forces) ระหว่างขดลวดด้านแรงสูง และด้านแรงต่ำ ขณะเกิดลัดวงจร

การคำนวณเพื่อวิเคราะห์แรงตามแนวแกน จะต้องรู้รัศมีของฟลักซ์รั้วไหล และความสูงของขดลวดระหว่างด้านแรงสูงและแรงต่ำที่แตกต่างกัน สำหรับเส้นแรงแม่เหล็กรั้วไหลที่เกิดขึ้นที่ปลายขดลวดมีการคดเคี้ยวดังแสดงในรูปที่ 2.13 ซึ่งจะส่งผลให้เกิดแรงสนามแม่เหล็กสูงบริเวณปลายขดลวดทั้งด้านบนและด้านล่าง ดังแสดงดังรูปที่ 2.15 [1]



รูปที่ 2.15 แรงตามแนวแกน

ลักษณะของขดลวดอสมมาตรโดยมีความสูงของขดลวดด้านนอก ที่สั้นกว่าของ ด้านใน ขดลวดนี้จะทำให้เกิดความไม่สมดุลของความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก ซึ่งจะมีรัศมี ขนาดใหญ่ แสดงดังรูปที่ 2.14 และความหนาแน่นเฉลี่ยของรัศมีเส้นแรงแม่เหล็ก จะหาได้ สมการที่ 2.14 [13]

$$B_r = \frac{\mu_0}{2} \frac{a(ni)}{2h_{eff}} [T] \quad (2.14)$$

เพื่อตรวจสอบแรงตามแนวแกน ( $F_a$ ) สำหรับหม้อแปลงที่มีความไม่สมดุลที่ปลาย ด้านหนึ่งของขดลวดจะหาแรงสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ได้จากสมการที่ 2.15 [13]

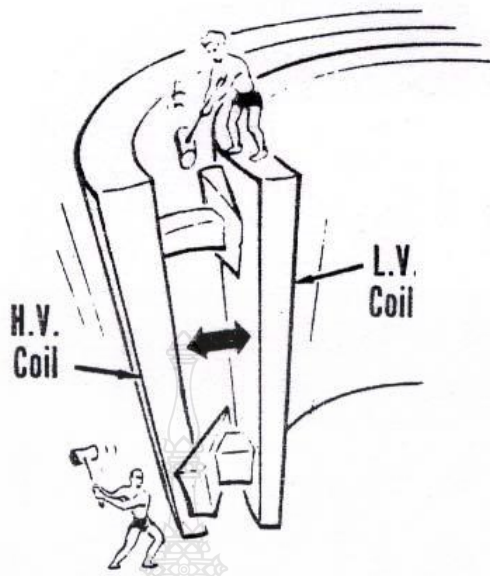
$$F_a = \frac{\mu_0}{2} a(ni)^2 \frac{L_p}{2h_{eff}} [N] \quad (2.15)$$

- เมื่อ
- $F_a$  คือ แรงตามแนวแกน
  - $i$  คือ กระแส
  - $n$  คือ จำนวนรอบของขดลวด
  - $h_{eff}$  คือ รัศมีของฟลักซ์ จากแกนเหล็กถึงขอบแท่งค้ำ
  - $L_p$  คือ ความยาวเฉลี่ยของรอบขดลวด และ
  - $a$  คือ ระยะของ ขดลวดด้านแรงสูง ที่สั้นกว่า ขดลวดด้านแรงต่ำ

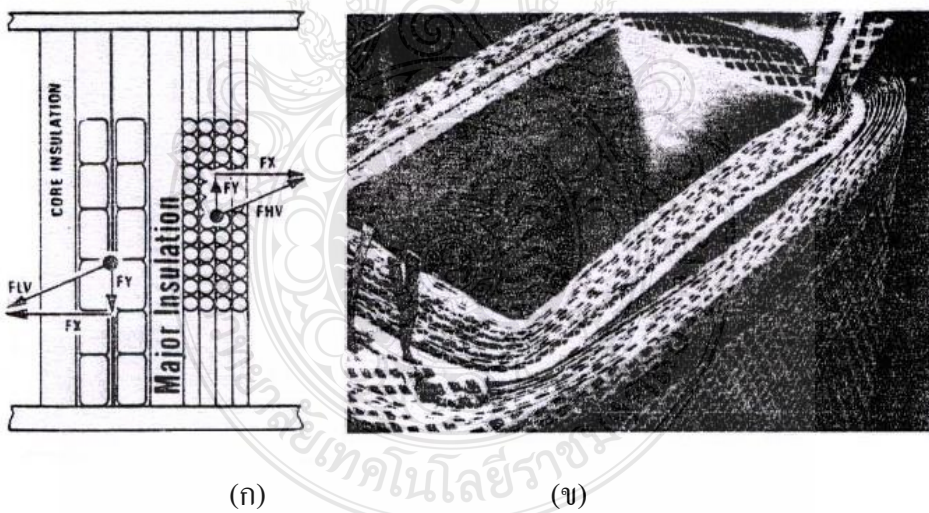
## 2. แรงตามรัศมี (Radial Force)

เกิดระหว่างขดลวดด้านแรงสูง และขดลวดด้านแรงต่ำ ใน Core Form ของ ขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า เนื่องจากขดลวดเป็นแบบทรงกระบอก ดังนั้นแรงผลักที่กระทำในแนวรัศมี (Radial Force) ในสภาวะปกติ จะกระทำสม่ำเสมอเท่ากันทุกจุด จึงไม่มีปัญหาอะไรเกิดขึ้น แต่ถ้าใน สภาวะเกิดการลัดวงจร จะมีแรงมากกระทำสูงมาก ผลรวมของแรง ที่เกิดขึ้น ทำให้เกิดแรงที่ไม่สมดุล ระหว่างขดลวด ด้านแรงสูง และขดลวด ด้านแรงต่ำ ทำให้โอกาสที่ขดลวดจะเกิดการผลัดกันอย่าง รุนแรง มีความเป็นไปได้สูง แสดงดังรูปที่ 2.16 และความเสียหายที่เกิดขึ้นเมื่อหม้อแปลงเกิดลัดวงจร แสดงตามรูปที่ 2.17 [12]



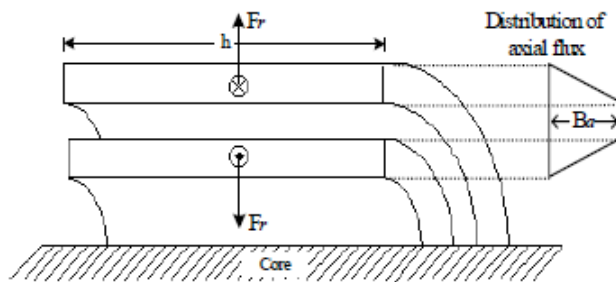


รูปที่ 2.16 แรงที่กระทำในแนวนอน (Radial Forces) ระหว่างขดลวดด้านแรงสูง และด้านแรงต่ำ ขณะเกิดลัดวงจร



(ก) แรงที่ไม่สมดุล (Unbalanced Forces) ระหว่างขดลวดด้าน ปฐมภูมิ และทุติยภูมิ  
 (ข) ความเสียหายของขดลวดเนื่องจาก แรงที่ไม่สมดุล (Unbalanced Forces)

รูปที่ 2.17 ความเสียหายเมื่อหม้อแปลงเกิดลัดวงจร



รูปที่ 2.18 แรงสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ทำให้เกิดการผลักกันของขดลวด [1]

แรงตามรัศมีภายในหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีศูนย์กลางที่ขดลวดตามรูปที่ 2.18 แสดงผลลัพธ์ของแรงที่ด้านในและด้านนอกของขดลวด และยังแสดงให้เห็นความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กตามแนวแกน ( $B_a$ ) เส้นแรงแม่เหล็กนี้ เป็นค่าคงตลอดพื้นที่ระหว่างขดลวด สมการความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล ( $B_a$ ) แสดงได้ดังสมการที่ 2.16 [13]

$$B_a = \frac{1}{2} \frac{\mu_0 n i}{h} [T] \quad (2.16)$$

เมื่อ  $n i$  คือ แอมแปร์-เทริน

$B_a$  คือ ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล

ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กจะสัมพันธ์กับกระแส ซึ่งทำให้เกิดแรงตามรัศมี ( $F_r$ ) ตามรูปที่ 2.18 และสามารถหาค่าแรงสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นได้ตามสมการที่ 2.17 [13]

$$F_r = \frac{1}{2} \mu_0 \frac{(n i)^2}{h} L_P [N] \quad (2.17)$$

เมื่อ  $F_r$  คือ แรงตามรัศมี

$i$  คือ กระแส

$n$  คือ จำนวนรอบของขดลวด

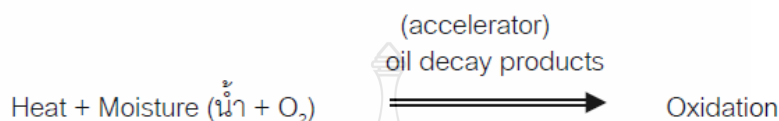
$h$  คือ ความสูงของขดลวด

$L_P$  คือ ความยาวเฉลี่ยของรอบขดลวด

### 2.7.3 ความเครียดในหม้อแปลงไฟฟ้าจากความร้อน (Thermal Stress) [12]

1. การเกิดลัดวงจรขึ้นในหนึ่ง หรือสองวินาทีที่จะเกิดอุณหภูมิสูงขึ้นประมาณ 500 °C ในช่วงระยะเวลาอันสั้น ซึ่งเกิด Decomposition ที่ Cellulose ขึ้นแน่นอน ดังนั้น การเสื่อมสภาพของฉนวนจะถูกสะสมไว้

#### 2. เกิดการ Oxidation



3. การเกิด Oxidation ใดนั้น จะต้องต้องมี Oil Decay Products เป็น Accelerator เท่านั้น

4. Oil Decay Products ซึ่งเรียกว่า Polar Compounds ประกอบด้วย Acids, Peroxides และ Water เป็นต้น

5. ผลที่ได้หลังจากเกิดการ Oxidation คือ เกิด Polar Groups และ Water มากขึ้น เป็นโอกาสให้เกิดการ Oxidation ได้มากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอีก

6. ทำให้เกิด Dielectric Stress ไม่เท่ากัน โดยจะมีความเข้มของ Electric Stress มากที่ Air Space ซึ่งเกิดขึ้น เนื่องจาก Cellulose ถูกทำลายไปทำให้เกิด Ionized ที่ Air Space ภายใน Cellulose นี้ และบางจุดเกิดการเกิด Ionize รวมกันเป็น Glow Discharge หรือ Partial Discharge หรือ Corona ขบวนการนี้จะทำลาย Insulation จำนวนมาก ทำให้ค่อยๆ เกิด Ozone ขึ้น และในที่สุดก็เกิดการ Flashover ขึ้น (Dielectric Breakdown)

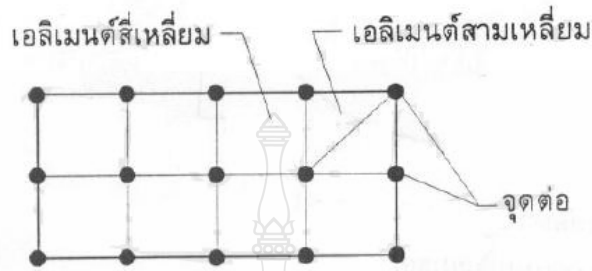
## 2.8 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

### 2.8.1 ทฤษฎี และลักษณะของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [14]

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เป็นหนึ่งในหลายวิธีเชิงตัวเลขที่ใช้สำหรับแก้สมการเชิงอนุพันธ์ (Differential Equations) และเป็นวิธีที่นิยมใช้วิเคราะห์ปัญหาทางด้านวิศวกรรมศาสตร์อย่างกว้างขวาง ซึ่งสามารถใช้วิเคราะห์ปัญหาเรื่องการถ่ายเทความร้อน ปัญหาทางด้านกลศาสตร์ของของแข็ง ทั้งทางด้านสถิตศาสตร์และทางด้านพลศาสตร์ รวมทั้งยังสามารถใช้วิเคราะห์การไหลของของไหลได้

หลักการของไฟไนต์เอลิเมนต์คือ การแบ่งสิ่งที่ต้องการวิเคราะห์ (Domain) ออกเป็นส่วนย่อยเล็กๆ เรียกว่าเอลิเมนต์ (Element) ซึ่งมักจะอยู่ในรูปสี่เหลี่ยมหรือสามเหลี่ยม ดังแสดงในรูปที่ 2.19 ที่จุดตัดของเส้นกรอบเอลิเมนต์เรียกว่า “ จุดต่อ ” (Node) ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะมีการสร้าง

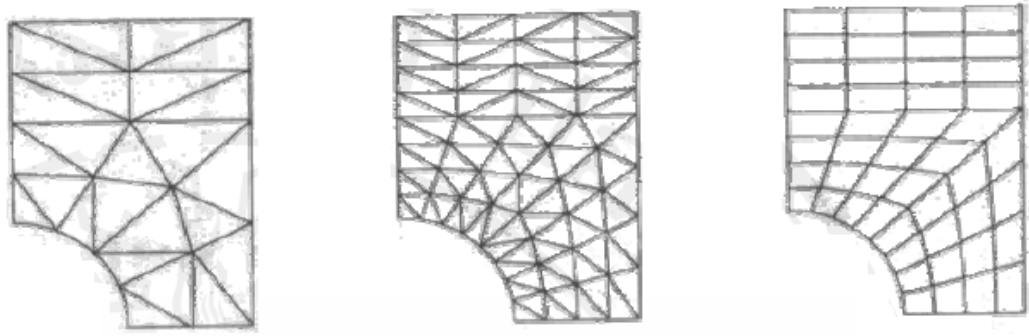
ฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์เพื่อหาคำตอบ (อุณหภูมิ ความเค้น ความเร็ว ฯลฯ) ที่จุดต่อเหล่านั้นพร้อม ๆ กันโดยอาศัยเครื่องคอมพิวเตอร์ แทนที่จะแก้สมการเชิงอนุพันธ์ซึ่งต้องใช้เวลามากกว่าจะหาคำตอบได้ครบทุกจุด



รูปที่ 2.19 ลักษณะการแบ่งเอลิเมนต์

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เป็นวิธีเชิงตัวเลข วิธีหนึ่งที่ใช้สำหรับแก้สมการเชิงอนุพันธ์ และเป็นวิธีที่นิยมใช้วิเคราะห์ปัญหาทางด้านวิศวกรรมศาสตร์อย่างกว้างขวาง ซึ่งสามารถใช้วิเคราะห์ปัญหาด้านกลศาสตร์ของแข็ง เช่น วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงรูปร่างและความเค้นในชิ้นส่วนของเครื่องจักรกล โครงสร้างเครื่องบิน ตัวอาคาร สะพาน และ โครงสร้างอื่นๆ ที่ซับซ้อนได้เป็นอย่างดีไม่ว่าวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์จะอยู่ในสภาวะยืดหยุ่น (Elastic) หรือในสภาวะยืดตัว (Plastic) นอกจากนี้จะใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์ปัญหาทางด้านสถิติศาสตร์ตามที่กล่าวมาแล้ว ยังสามารถจะใช้วิธีวิเคราะห์ปัญหาทางด้านพลศาสตร์ เช่น การสั่นสะเทือนของชิ้นส่วนเครื่องจักรกล การสั่นสะเทือนของโครงสร้าง รวมทั้งยังสามารถใช้วิเคราะห์ปัญหาด้านการถ่ายเทความร้อนการไหลของของไหล การถ่ายเทมวล เป็นต้น

หลักการของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการแก้ปัญหาใดปัญหาหนึ่ง ปัญหานั้นจะประกอบด้วยสมการเชิงอนุพันธ์ และเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมาให้ ค่าผลเฉลยแม่นยำตรง (Exact Solution) ของปัญหาดังกล่าวจะประกอบด้วยค่าของตัวแปรต่างๆกันตามตำแหน่งต่างๆบนรูปร่างลักษณะของปัญหานั้น หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ ค่าผลเฉลยแม่นยำตรงจะประกอบด้วยค่าต่างๆทั้งหมดนับเป็นจำนวนอนันต์ค่า แทนที่จะทำการหาค่าแม่นยำที่ประกอบด้วยค่าต่างๆจำนวนมากมายเช่นนี้ ซึ่งสำหรับปัญหาในทางปฏิบัติจะทำได้หลักการก็คือทำการเปลี่ยนค่าทั้งหมดที่มีจำนวนอนันต์ค่าขึ้นมาเป็นค่าโดยประมาณที่มีจำนวนที่นับได้ (Finite) ด้วยการแทนรูปร่างลักษณะของปัญหาด้วยเอลิเมนต์ (Element) ซึ่งมีขนาดต่างๆกันดังเช่น แสดงในตัวอย่างของแผ่นวัสดุในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 การแบ่งเอลิเมนต์แบบต่างๆ ภายในวัสดุ

วิธีการดังกล่าวซึ่งบ่งเป็นนัยว่า ผลเฉลยของแต่ละเอลิเมนต์นั้นจำเป็นต้องสอดคล้อง กับสมการเชิงอนุพันธ์ และเงื่อนไขของขอบเขตที่กำหนดมาให้ในปัญหานั้นๆ ซึ่งหมายความว่าหลักการของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ คือ การสร้างสมการสำหรับแต่ละเอลิเมนต์ที่ตั้งอยู่บนรากฐานที่ว่าสมการที่สร้างขึ้นมานั้นจำเป็นต้องสอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาที่ทำอยู่นั้น จากนั้นจึงนำสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่สร้างขึ้นมาได้มาประกอบกันเข้าก่อให้เกิดระบบสมการชุดใหญ่ซึ่งในความหมายทางกายภาพก็คล้ายกับการนำทุกเอลิเมนต์มาประกอบรวมเข้าด้วยกันก่อให้เกิดเป็นรูปร่างลักษณะทั้งหมดของปัญหาที่แท้จริง จากนั้นจึงทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่ให้มาลงในระบบสมการชุดใหญ่นี้แล้วจึงทำการแก้สมการดังกล่าว ซึ่งจะก่อให้เกิดผลเฉลยโดยประมาณที่ต้องการ ณ ตำแหน่งต่างๆ ของปัญหานั้น

## 2.8.2 หลักการทั่วไปสำหรับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [14]

### 1. ชนิดของเอลิเมนต์

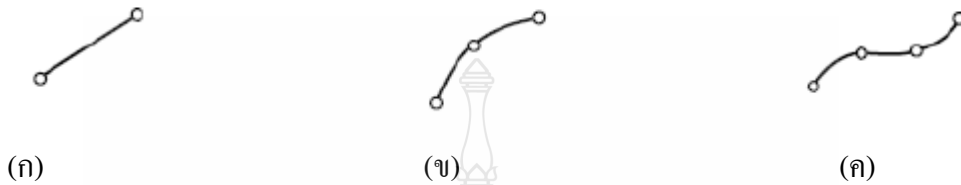
การวิเคราะห์โครงสร้าง หรือ ชิ้นส่วนเครื่องจักรกลด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จำเป็นต้องแบ่งโครงสร้าง หรือชิ้นส่วนออกเป็นส่วนเล็กๆ และเลือกใช้ชนิดของเอลิเมนต์ให้เหมาะสมกับรูปร่างลักษณะของงาน และการกระทำของโหลด ชนิดของเอลิเมนต์อาจจะแบ่งออกได้ 3 ประเภทตามมิติ คือ เอลิเมนต์สำหรับปัญหามิติเดียว สองมิติ และสามมิติ

#### 1) เอลิเมนต์มิติเดียว

เป็นเอลิเมนต์ที่นิยมนำไปใช้ในการวิเคราะห์ปัญหามิติเดียว เช่น ชิ้นส่วนที่มีแรงกระทำในแนวแกน ชิ้นส่วนที่รับแรงบิด การโค้งงอของคาน การนำความร้อนในทิศทางเดียวกัน เป็นต้น รูปที่ 2.21 (ก) คือเอลิเมนต์มิติเดียวที่ประกอบด้วยจุดต่อที่ปลายทั้งสองด้านของแต่ละเอลิเมนต์ ซึ่งเรียกว่าจุดต่อภายนอก รูปที่ 2.21 (ข) เป็นเอลิเมนต์มิติเดียวที่ประกอบด้วยสามจุดต่อ คือจุดต่อภายนอกสองจุดต่อ และจุดต่อภายในหนึ่งจุดต่อ และ รูปที่ 2.21 (ค) คือเอลิเมนต์มิติเดียวที่เป็นเส้นโค้ง



ประกอบด้วยสี่จุดต่อ คือ สองจุดต่อภายนอก และสองจุดต่อภายใน ซึ่งเหมาะสำหรับใช้วิเคราะห์ปัญหาของโครงสร้าง หรือชิ้นงานที่มีการยึดตัวไม่เป็นเส้นตรง เช่น การยึดตัวของท่อนโลหะ อันเนื่องมาจากมวลของท่อนโลหะเอง เป็นต้น



รูปที่ 2.21 เอลิเมนต์แบบมิติเดียวแบบต่างๆ [15]

## 2) เอลิเมนต์สองมิติ

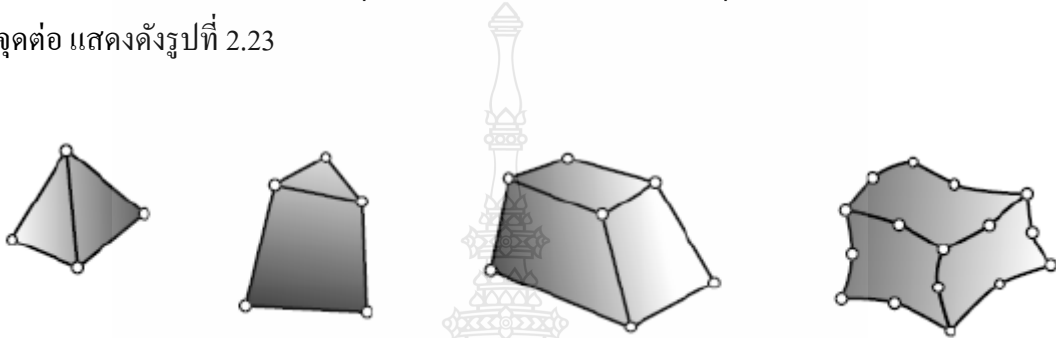
มักใช้กับการวิเคราะห์ความเค้น ความเครียดระนาบ โดยทั่วไปเอลิเมนต์สองมิติจะมีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยม และ สี่เหลี่ยมที่ประกอบด้วยด้านที่เป็นเส้นตรง หรือเส้นโค้ง เช่น รูปที่ 2.22 จะประกอบไปด้วย เอลิเมนต์สี่เหลี่ยมที่ประกอบด้วย 4 จุดต่อ และ 8 จุดต่อชนิดด้านตรง และด้านโค้งแบบไอโซพาราเมตริกซ์ และเอลิเมนต์สามเหลี่ยมที่ประกอบด้วย 3 จุดต่อ และ 6 จุดต่อด้านตรง และด้านโค้งแบบไอโซพาราเมตริกซ์ โดยทั่วไปเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมจะได้รับ ความนิยมนมากกว่าเอลิเมนต์สามเหลี่ยม ทั้งนี้เพราะในกรณีที่ระดับขั้นความเสรีเท่ากับเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมที่ให้ผลเฉลยที่ถูกต้องแม่นยำกว่า ส่วนจะเลือกใช้เอลิเมนต์สี่เหลี่ยม หรือด้านโค้งนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะรูปร่างของชิ้นงานจริง และโดยทั่วไปจะสมมติให้ความหนาของเอลิเมนต์มีค่าคงตัว แต่อาจจะกำหนดให้ความหนาเป็นฟังก์ชันกับพิกัดก็ได้



รูปที่ 2.22 เอลิเมนต์สองมิติแบบต่างๆ [15]

### 3) เอลิเมนต์สามมิติ

จะใช้กับการวิเคราะห์ปัญหาสามมิติทั่วไป ลักษณะของเอลิเมนต์จะเป็นสี่เหลี่ยมปริซึม และรูปกรวยสามเหลี่ยม จะประกอบไปด้วย เป็นเอลิเมนต์สามมิติทรง 6 หน้า (Hexahedron) ชนิดด้านตรง (Linear) 8 จุดต่อ ชนิดเส้นตรงกำลังสอง (Straight-Line Quadratic) 20 จุดต่อ และชนิดเส้นโค้งกำลังสอง (Quadratic with Curve Faces) 20 จุดต่อ และเอลิเมนต์สามมิติทรง 4 หน้า (Tetrahedral) ชนิดด้านตรง 4 จุดต่อชนิดเส้นตรงกำลังสอง 10 จุดต่อ และชนิดเส้นโค้งกำลังสอง 10 จุดต่อ แสดงดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 เอลิเมนต์สามมิติแบบต่างๆ [15]

### 2. การแบ่งชิ้นส่วนออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย

การวิเคราะห์ชิ้นส่วนเครื่องจักรกลด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จำเป็นต้องแบ่งชิ้นส่วนออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยที่เกี่ยวข้องกันด้วยจุดต่อ เพื่อความสะดวกจะพิจารณาปัญหา 2 มิติโดยเลือกใช้เอลิเมนต์สามเหลี่ยมด้านตรงที่ประกอบ 3 จุดต่อ เช่นในรูปที่ 2.24 (ก) ส่วนปัญหาสามมิติก็ใช้หลักการเดียวกัน



(ก)

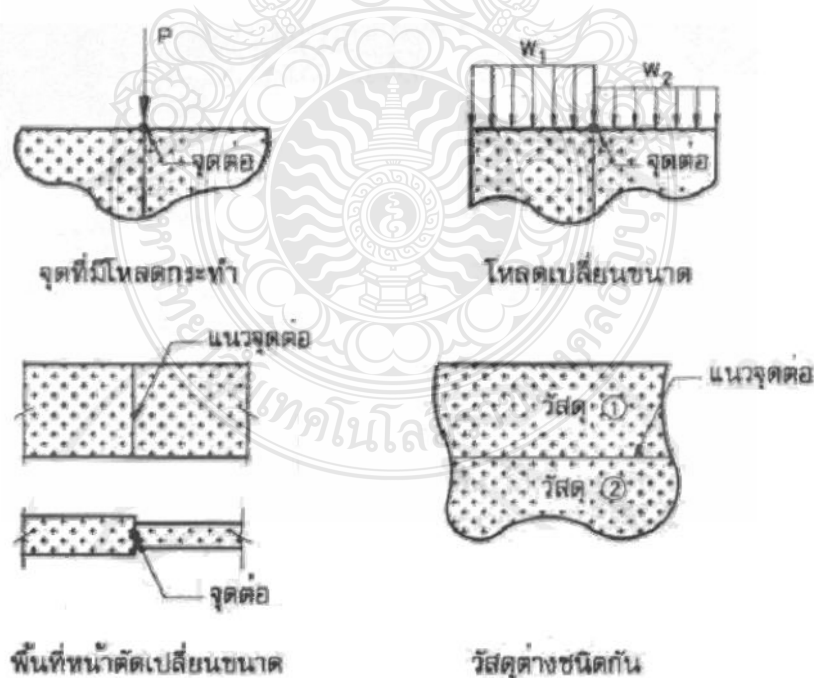
(ข)

รูปที่ 2.24 การแบ่งชิ้นส่วนออกเป็นเอลิเมนต์สามเหลี่ยม

ชิ้นส่วนรูปสามเหลี่ยมในรูปที่ 2.24 (ก) ก่อนข้างจะแบ่งเป็นเอลิเมนต์ย่อยได้ง่าย คือกำหนดจุดต่อในแต่ละด้านของสามเหลี่ยมให้มีจำนวนเท่ากัน ลากเส้นโยงระหว่างจุดต่อจะได้จุดต่อตรงที่เส้นตัดกันเพิ่มขึ้นตามรูป ชิ้นส่วนจะถูกแบ่งออกเป็น 9 เอลิเมนต์ แต่ละด้านจะมีสี่จุดต่อ ระยะระหว่างจุดต่อของแต่ละด้านของสามเหลี่ยมไม่จำเป็นต้องเท่ากัน ขนาดของเอลิเมนต์แต่ละเอลิเมนต์ จึงมีขนาดแตกต่างกันตามต้องการ ถ้าเป็นเอลิเมนต์สามเหลี่ยมด้วยกัน เอลิเมนต์สามเหลี่ยมด้านเท่าจะให้ผลเฉลยที่ดีที่สุด แต่ถ้าจำเป็นต้องใช้เอลิเมนต์สามเหลี่ยมใดๆ มุมภายในของเอลิเมนต์สามเหลี่ยมควรจะอยู่ระหว่าง  $30^\circ$  ถึง  $120^\circ$

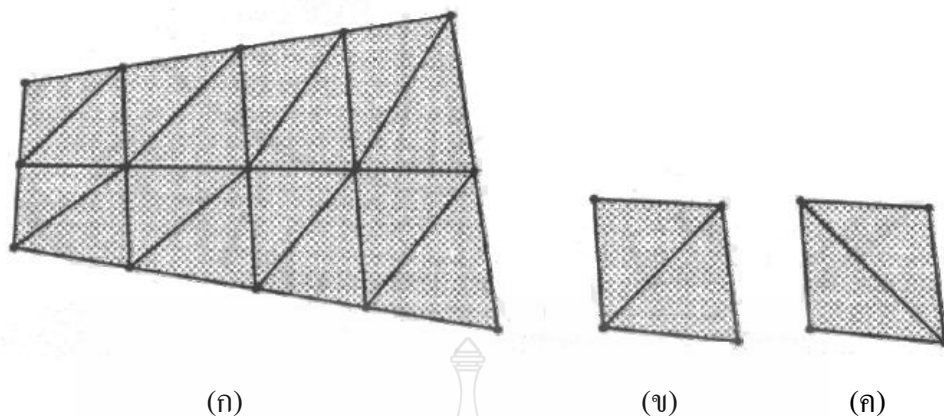
กรณีของชิ้นส่วนเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านโค้ง อาจใช้เอลิเมนต์สามเหลี่ยมด้านตรงแทน เช่นในรูปที่ 2.24 (ข) ซึ่งทำให้ขนาดของแบบจำลองคลาดเคลื่อนไปเล็กน้อยตามเส้นไขว้ปลา ส่วนจำนวนของเอลิเมนต์ทั้งหมดในชิ้นส่วนจะเท่ากับ  $(n-1)^2$  โดยที่  $n$  คือ จำนวนจุดต่อของแต่ละด้านของชิ้นส่วนสามเหลี่ยมที่ต้องการจะแบ่งเป็นเอลิเมนต์ย่อย

การแบ่งชิ้นส่วนอาจจะเริ่มแบ่งออกเป็นเอลิเมนต์สี่เหลี่ยม หรือสามเหลี่ยมที่มีขนาดใหญ่ๆ ก่อน แล้วจึงแบ่งออกเป็นเอลิเมนต์สามเหลี่ยมย่อยอีกครั้งหนึ่ง ตำแหน่งของจุดต่อ (Node) ภายนอกของเอลิเมนต์ย่อยควรจะอยู่ในตำแหน่งที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นส่วน หรือตำแหน่งที่มีโหลดกระทำ หรือตำแหน่งที่มีการใช้วัสดุต่างกัน ตำแหน่งจุดต่อเหล่านั้นดูได้จากรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 ตำแหน่งของจุดต่อภายนอกของเอลิเมนต์





รูปที่ 2.26 การแบ่งชิ้นส่วนสี่เหลี่ยมออกเป็นเอลิเมนต์สามเหลี่ยม

สำหรับชิ้นส่วนรูปสี่เหลี่ยมใน รูปที่ 2.26 (ก) การแบ่งเอลิเมนต์ย่อยๆนั้นทำได้สะดวกคือกำหนดจุดต่อในแต่ละด้านของสี่เหลี่ยมลากเส้นระหว่างจุดต่อที่อยู่ตรงข้าม จุดตัดของแต่ละเส้นจะเป็นจุดต่อภายในชิ้นส่วน และถ้าประสงค์จะแบ่งเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมออกเป็นเอลิเมนต์สามเหลี่ยมย่อยๆก็ทำได้ โดยลากเส้นทแยงมุมของเอลิเมนต์สี่เหลี่ยม การลากเส้นทแยงมุมนั้นควรจะต้องเลือกเส้นทแยงมุมที่สั้นที่สุด เพราะจะทำให้เอลิเมนต์สามเหลี่ยมมีสัดส่วนใกล้เคียงสามเหลี่ยมด้านเท่ามากขึ้น ดูตัวอย่างในรูปที่ 2.26 (ข) และ (ค) ในกรณีที่ใช้เอลิเมนต์สี่เหลี่ยม สัดส่วนด้านยาวสุดต่อด้านสั้นสุดของเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมควรจะเท่ากับ 1 จึงจะทำให้ผลเฉลยใกล้เคียงกับค่าแม่นยำมากขึ้น

### 3. ข้อเสนอแนะสำหรับการจำลองแบบไฟไนต์เอลิเมนต์

การวิเคราะห์ปัญหาทางกลศาสตร์ของแข็งด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เราจำเป็นต้องกำหนดแบบจำลองขึ้นให้เหมือนกับรูปร่างลักษณะเดิมของปัญหาให้มากที่สุด อย่างไรก็ตาม ข้อเสนอแนะต่อไปนี้จะช่วยให้การกำหนดแบบจำลองมีประสิทธิภาพสูงขึ้น หรือให้ผลการคำนวณที่ใกล้เคียงกับค่าแม่นยำ หรือทำให้เชื่อมั่นได้ว่าผลการคำนวณมีความเป็นไปได้ตามสภาพการใช้งานจริงของชิ้นส่วนนั้น (ในกรณีที่ไม่สามารถหาผลเฉลยแม่นยำมาเปรียบเทียบได้) ข้อเสนอแนะดังกล่าวคือ

- 1) ในกรณีที่แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ใช้เอลิเมนต์ที่มีขนาดต่างกัน ความแตกต่างของขนาด (โดยปริมาตร) ของเอลิเมนต์ที่อยู่ติดกันไม่ควรเกินสามเท่า
- 2) พยายามใช้เอลิเมนต์ที่มีรูปร่างหรือสัดส่วนของรูปร่างธรรมดาให้มากที่สุดคือ พยายามทำให้สัดส่วนของรูปร่างเอลิเมนต์ด้านยาวสุดต่อด้านสั้นสุดไม่เกิน 10:1 เอลิเมนต์ที่มีสัดส่วนดังกล่าวใกล้เคียงกันจะให้ผลเฉลยแม่นยำมากขึ้น ส่วนมุมภายในเอลิเมนต์ เช่น ในกรณีของเอลิเมนต์

สี่เหลี่ยม มุมไม่ควรเกิน  $150^\circ$  และ ไม่ควรน้อยกว่า  $30^\circ$  และจุดต่อภายในของด้านของเอलिเมนต์สี่เหลี่ยม (ในกรณีจำเป็นต้องกำหนดจุดต่อภายใน) ควรจะอยู่ในตำแหน่งที่ไม่น้อยกว่า  $1/3$  ของด้านของสี่เหลี่ยม

3) การเลือกใช้เอลิเมนต์ต้องพยายามให้มีการต่อเนื่องของการกระจัดระหว่างเอลิเมนต์อาทิเช่น ไม่ควรเชื่อมต่อเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมกำลังสอง ซึ่งประกอบด้วย 8 จุดต่อ เข้ากับเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมเชิงเส้น ซึ่งประกอบด้วย 4 จุดต่อ 2 เอลิเมนต์ เพราะขณะยึด-หดตัวจะเกิดช่องว่างระหว่างเอลิเมนต์ขึ้น ทั้งนี้เพราะการกระจัดของเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมกำลังสอง และเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมเชิงเส้น จำลองมาจากฟังก์ชันการกระจัดที่มีกำลังต่างกัน

4) ใช้เอลิเมนต์ที่มีขนาดเล็กตรงบริเวณที่มีความแตกต่างของความเค้นสูง เช่น ตรงบริเวณที่คาดว่าความเค้นจะมีความเค้นสูง ส่วนบริเวณที่มีความแตกต่างของความเค้นต่ำ ควรใช้เอลิเมนต์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น

5) การกำหนดหมายเลขจุดต่อของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ต้องพยายามให้ความกว้างแถบ หรือครึ่งความกว้างแถบมีค่าน้อยสุด

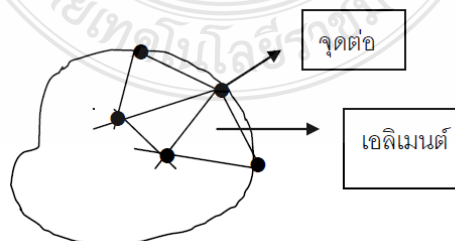
6) พยายามใช้ประโยชน์จากการสมมาตรของรูปร่างโครงสร้าง หรือชิ้นส่วน และการสมมาตรของโหลด เพื่อให้ได้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่มีขนาดเล็กที่สุด

7) การกำหนดเงื่อนไขขอบ หรือเงื่อนไขบังคับของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ จะต้องคำนึงถึงสภาพความเป็นจริงของปัญหา

### 2.8.3 ขั้นตอนทั่วไปของระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์ [16]

ประกอบด้วย 6 ขั้นตอนคือ

1. การแบ่งขอบเขตรูปร่างลักษณะของปัญหาที่ต้องการที่จะหาผลลัพธ์นั้นออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ

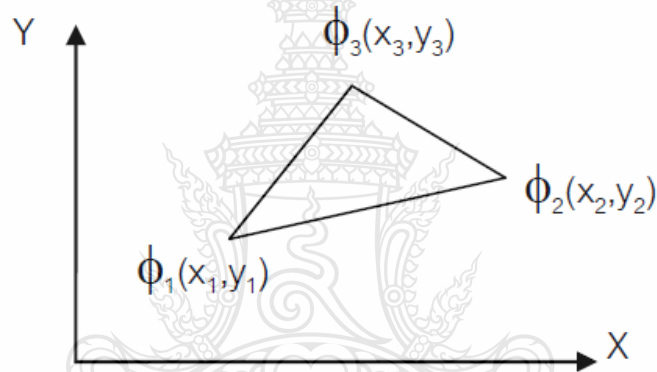


รูปที่ 2.27 การแบ่งรูปร่างของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย

2. เลือกฟังก์ชันประมาณภายในเอลิเมนต์เป็นการสร้างฟังก์ชันสำหรับประมาณค่าตัวแปรต่างๆภายในเอลิเมนต์ โดยใช้ Polynomial อย่างง่าย ตัวอย่าง เช่น ถ้าเอลิเมนต์เป็นรูปสามเหลี่ยมโดยมีจุดต่อที่  $(x_1, y_1)$ ,  $(x_2, y_2)$  และ  $(x_3, y_3)$  การประมาณค่าฟังก์ชัน  $\phi(x, y)$  ณ จุดใดๆภายในเอลิเมนต์โดยใช้ Polynomial อันดับที่ 1 ทำได้โดยใช้สมการ

$$\phi(x, y) = \begin{bmatrix} N_1(x, y) & N_2(x, y) & N_3(x, y) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{Bmatrix} = [N] \{\phi\} \quad (2.18)$$

เมื่อ  $N$  คือ เมทริกซ์ของการประมาณภายในเอลิเมนต์ และ  $\phi_1, \phi_2, \phi_3$  คือค่าของฟังก์ชัน ณ จุดต่อที่โหนด 1, 2 และ 3 ตามลำดับ



รูปที่ 2.28 เอลิเมนต์สามเหลี่ยม

ค่า  $N$  คำนวณได้จาก

$$N_1 = \frac{1}{2} A(a_1 + b_1 x + c_1 y)$$

โดย  $A =$  พื้นที่ของเอลิเมนต์สามเหลี่ยม

$$A = \frac{1}{2} (x_2(y_3 - y_1) + x_3(y_2 - y_1) + x_1(y_3 - y_2)) \quad (2.19)$$

และ	$a_1 = x_2 y_3 - x_3 y_2$	$b_1 = y_2 - y_3$	$c_1 = x_3 - x_2$
	$a_2 = x_3 y_1 - x_1 y_3$	$b_2 = y_3 - y_1$	$c_2 = x_1 - x_3$
	$a_3 = x_1 y_2 - x_2 y_1$	$b_3 = y_1 - y_2$	$c_3 = x_2 - x_1$

3. สร้างสมการของเอลิเมนต์ย่อยแต่ละเอลิเมนต์ตัวอย่างเช่นสมการของเอลิเมนต์สามเหลี่ยมจะอยู่ในรูปของเมทริกซ์

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{Bmatrix} \quad (2.20)$$

โดย  $K$  คือค่าสัมประสิทธิ์ใดๆของเอลิเมนต์ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

$$K_{ij} = (b_i b_j + c_i c_j) / 4A \quad \text{และ} \quad F_i = fA / 3$$

4. นำสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่ได้มาประกอบรวมกันเข้าก่อให้เกิดระบบสมการขนาดใหญ่ขึ้น

$$\sum(\text{Element Equation}) = [k]_{sys} \{\phi\}_{sys} = \{F\}_{sys} \quad (2.21)$$

5. ทำการประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตลงในระบบสมการแล้วจึงแก้ระบบสมการเพื่อหาตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อ ซึ่งอาจเป็นค่าของการเคลื่อนตัวเนื่องจากการเสียดรูปในของแข็ง หรืออาจเป็นค่าของอุณหภูมิสำหรับปัญหาการถ่ายเทความร้อน หรืออาจเป็นความเร็วของการไหลสำหรับปัญหาของไหล เป็นต้น

6. การคำนวณค่าที่ต่อเนื่องอื่นๆหลังจากคำนวณค่าที่จุดต่อจากขั้นตอนที่ 5 ออกมาได้แล้ว เช่น หลังจากรู้การเคลื่อนตัวของการเสียดรูปในของแข็ง ก็สามารถคำนวณค่าความเครียดและความเค้นได้ เมื่อรู้อุณหภูมิที่จุดต่างๆก็สามารถคำนวณหาปริมาณการถ่ายเทความร้อนได้ หรือเมื่อรู้ค่าความเร็วของการไหลก็สามารถนำไปคำนวณหาปริมาณอัตราการไหลทั้งหมดได้ เป็นต้น

จากขั้นตอนทั้ง 6 ขั้นตอนนี้ จะเห็นได้ว่า วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็น วิธีที่มีระเบียบแบบแผนเป็นขั้นเป็นตอน โดยมีหัวใจที่สำคัญคือ การสร้างสมการของเอลิเมนต์ (ขั้นตอนที่ 3) ซึ่งเราควรจะศึกษารายละเอียดทางคณิตศาสตร์เพิ่มเพื่อความเข้าใจมากขึ้นถ้าสนใจในวิธีการสร้าง และคำนวณทางไฟไนต์เอลิเมนต์

#### 2.8.4 ไฟไนต์เอลิเมนต์กับปัญหาเชิงเส้นของการกระจายศักย์ไฟฟ้าในสนามไฟฟ้าสถิต

โจทย์เกี่ยวกับสนามไฟฟ้าสถิต โดยทั่วไปจะอยู่ในรูปของสมการ Laplace's Equation

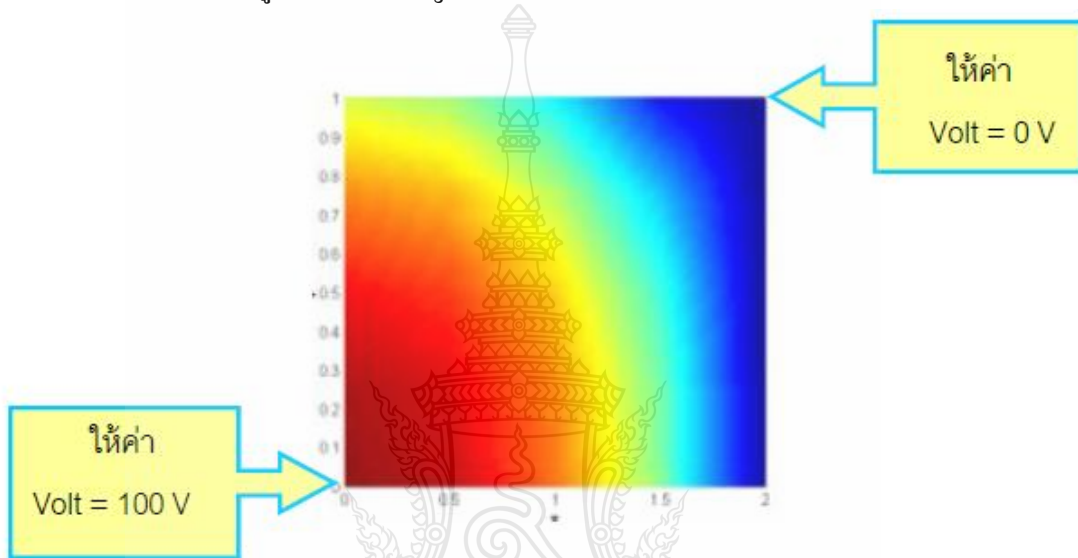
$$\nabla^2 V = 0 \quad (2.22)$$

โดยที่  $V$  คือค่าความต่างศักย์ภายในสนามไฟฟ้า ในขณะที่โจทย์การถ่ายเทความร้อนจะอยู่ในรูปสมการ

$$\nabla^2 T = 0 \quad (2.23)$$

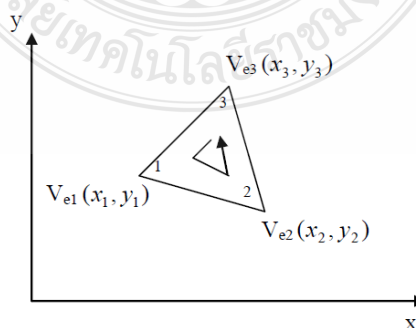
เมื่อ  $T$  คืออุณหภูมิของวัตถุ เงื่อนไขขอบเขตของโจทย์ปัญหาประเภทนี้มักจะอยู่ในรูปการกำหนดให้ความต่างศักย์หรืออุณหภูมิ ณ จุดบางจุดเป็นค่าคงที่ ปัญหาทั้งสองอย่างนี้เราสามารถใช่วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์วิธีการเดียวกันมาประยุกต์ใช้กับโจทย์ปัญหาได้ดังนี้

ตัวอย่าง รูปของโจทย์ปัญหาการกระจายศักย์ไฟฟ้าในสนามไฟฟ้าสถิต



รูปที่ 2.29 การกระจายศักย์ไฟฟ้าในสนามไฟฟ้าสถิต

จากปัญหาทั้ง 2 อย่างนี้ เราสามารถเลือกใช้เอลิเมนต์แบบสามเหลี่ยมในการคำนวณหาค่าของแต่ละโหนดได้ ดังรูปที่ 2.30



รูปที่ 2.30 เอลิเมนต์แบบสามเหลี่ยมที่มีการจัดลำดับของโหนดในเอลิเมนต์ในลักษณะทวนเข็มนาฬิกา

จากรูปที่ 2.30 ค่าความต่างศักย์ที่จุดใดๆภายในเอลิเมนต์สามารถประมาณได้จาก

$$V_e = \sum_{i=1}^3 \alpha_i(x, y) V_{ei} \quad (2.24)$$

$$\begin{aligned} \text{โดย} \quad \alpha_1 &= \frac{1}{2A} [(x_2 y_3 - x_3 y_2) + (y_2 - y_3)x + (x_3 - x_2)y] \\ \alpha_2 &= \frac{1}{2A} [(x_3 y_1 - x_1 y_3) + (y_3 - y_1)x + (x_1 - x_3)y] \\ \alpha_3 &= \frac{1}{2A} [(x_1 y_2 - x_2 y_1) + (y_1 - y_2)x + (x_2 - x_1)y] \end{aligned}$$

และ A คือ พื้นที่ของเอลิเมนต์ (e)

$$A = \frac{1}{2} [(x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - (x_3 - x_1)(y_2 - y_1)] \quad (2.25)$$

สำหรับสมการของแต่ละเอลิเมนต์นั้นเราสามารถนำหลักการของ Variational Method เปลี่ยนสมการจาก  $\nabla^2 V = 0$  ให้อยู่ในรูปการ Minimize พลังงานภายในเอลิเมนต์

$$W_e = \frac{1}{2} \int \varepsilon |\nabla V_e|^2 dS \quad (2.26)$$

โดย  $\nabla V_e = \sum_{i=1}^3 V_{ei} \nabla \alpha_i$  จะได้สมการ 2.26 เป็น

$$W_e = \frac{1}{2} \varepsilon [V_e]^t [C^{(e)}] [V_e] \quad (2.27)$$

และได้ Coefficient Matrix ของเอลิเมนต์อยู่ในรูป

$$[C^{(e)}] = \begin{bmatrix} C_{11}^{(e)} & C_{12}^{(e)} & C_{13}^{(e)} \\ C_{21}^{(e)} & C_{22}^{(e)} & C_{23}^{(e)} \\ C_{31}^{(e)} & C_{32}^{(e)} & C_{33}^{(e)} \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

โดย

$$C_{ij}^{(e)} = \int \nabla \alpha_i \nabla \alpha_j dS \quad (2.29)$$

Matrix Element  $C_{ij}^{(e)}$  ของ Coefficient Matrix คำนวณได้จาก

$$\begin{aligned} C_{12}^{(e)} &= \int \nabla \alpha_1 \nabla \alpha_2 dS \\ &= \frac{1}{4A^2} [(y_2 - y_3)(y_3 - y_1) + (x_3 - x_2)(x_1 - x_3)] \int dS \\ &= \frac{1}{4A} [(y_2 - y_3)(y_3 - y_1) + (x_3 - x_2)(x_1 - x_3)] \\ C_{13}^{(e)} &= \frac{1}{4A} [(y_2 - y_3)(y_1 - y_2) + (x_3 - x_2)(x_2 - x_1)] \end{aligned}$$

$$C_{23}^{(e)} = \frac{1}{4A} [(y_3 - y_1)(y_1 - y_2) + (x_1 - x_3)(x_2 - x_1)]$$

$$C_{11}^{(e)} = \frac{1}{4A} [(y_2 - y_3)^2 + (x_3 - x_2)^2]$$

$$C_{22}^{(e)} = \frac{1}{4A} [(y_3 - y_1)^2 + (x_1 - x_3)^2]$$

$$C_{33}^{(e)} = \frac{1}{4A} [(y_1 - y_2)^2 + (x_2 - x_1)^2]$$

$$C_{21}^{(e)} = C_{12}^{(e)}, \quad C_{31}^{(e)} = C_{13}^{(e)}, \quad C_{32}^{(e)} = C_{23}^{(e)}$$

เมื่อได้ Coefficient Matrix ของแต่ละเอลิเมนต์แล้วขั้นตอนต่อมาคือ การรวมเอา Coefficient Matrix ของแต่ละเอลิเมนต์มาสร้างเป็น Global Coefficient Matrix ในที่นี้ระบบ Index ของลำดับโหนดจะมี 2 ระบบ คือ ระบบ Index สำหรับเอลิเมนต์ย่อยแต่ละเอลิเมนต์ (Local Index) และระบบ Index สำหรับ ทั้งระบบ (Global Index) การนำ Coefficient Matrix ของแต่ละเอลิเมนต์มา ประกอบกันเป็น Global Coefficient Matrix นั้น จะต้องดูความสัมพันธ์ระหว่าง Local Index กับ Global Index

#### 2.8.4 ข้อดีของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [14]

สามารถใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์ปัญหาต่างๆ ได้อย่างกว้างขวาง จึงเป็นที่นิยมใช้กันทั่วไปในงานด้านวิศวกรรมศาสตร์ ข้อได้เปรียบ ของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีธรรมดา มีดังนี้คือ

1. สามารถสร้างแบบจำลองของโครงสร้าง หรือชิ้นงานที่มีรูปร่างลักษณะที่ซับซ้อน ได้เป็นอย่างดี และ สะดวก
2. สามารถจำลองการกระทำของโหลดในสภาพต่างๆ ได้ เช่น โหลดที่กระจายไม่สม่ำเสมอได้ใกล้เคียงกับสภาพจริง
3. ใช้วิเคราะห์โครงสร้าง หรือชิ้นส่วนระบบเครื่องจักรกลที่ประกอบด้วยวัสดุต่างชนิดกันได้ โดยไม่มีความยุ่งยาก
4. สามารถใช้วิเคราะห์ปัญหา ไม่ว่าจะเงื่อนไขขอบ เงื่อนไขบังคับ และจุดรองรับ จะอยู่ในลักษณะใดๆ
5. สามารถจะเลือกขนาดของเอลิเมนต์ที่บริเวณใด บริเวณหนึ่งให้มีใหญ่ หรือเล็กได้ตามความจำเป็น
6. ในการออกแบบชิ้นส่วน หรือระบบสามารถจะเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่างๆ ได้สะดวก และยังประหยัดเวลา และค่าใช้จ่ายด้วย

7. ในการออกแบบ และผลิตชิ้นส่วนเครื่องจักรกลสมัยใหม่ มักนิยมใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์ก่อน ก่อนที่จะผลิตชิ้นส่วนจริง ซึ่งทำให้ประหยัดค่าใช้จ่าย และ มีความถูกต้องแม่นยำสูง

8. ในกรณีของวัสดุประเภทยืดหยุ่นตัวไม่เป็นเชิงเส้น หรือการยืดหยุ่นของวัสดุในช่วงพลาสติก ก็ยังสามารถใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์สิ่งที่ต้องการได้สะดวก เช่น ใช้วิเคราะห์การล้าตัว เป็นต้น

## 2.9 สรุปผลการศึกษาทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สาเหตุของความเสียหายของหม้อแปลงไฟฟ้า มีหลายสาเหตุด้วยกัน แต่สาเหตุที่ทำให้เกิดความเสียหายค่อนข้างมาก คือการลัดวงจรของขดลวดภายในหม้อแปลง ซึ่งเกิดจากแรงสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในขณะลัดวงจร โดยแรงที่เกิดจะมีสองทิศทาง คือ แรงในแนวรัศมีของขดลวด และแรงที่เกิดขึ้นตามแนวแกนของขดลวด ซึ่งความรุนแรงที่เกิด จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายประการ ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้ จึงต้องการนำเสนอการวิเคราะห์แรงที่เกิดจากการลัดวงจร ทั้งในแนวรัศมีของขดลวด และในแนวแกนของขดลวด โดยใช้โปรแกรม MATLAB/simulink จำลองในลักษณะของวงจรแม่เหล็ก และโปรแกรม Finite Element Method (FEMLAB) จำลองในลักษณะเป็นรูปที่ชัดเจน ในการจำลองดังกล่าว จะได้ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก และแรงสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นแต่ละจุดภายในขดลวดของหม้อแปลง แล้วนำผลที่ได้จากทั้ง 2 โปรแกรม มาเปรียบเทียบกัน เพื่อเป็นการรับรองความถูกต้องของการจำลอง



## บทที่ 3

### การออกแบบและการสร้างแบบจำลอง

ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้โปรแกรม MATLAB/simulink และ FEMLAB ในการสร้างแบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้า ขณะเกิดการลัดวงจร และจำลองเหตุการณ์การเกิดความผิดปกติ (Fault) ในระบบไฟฟ้าซึ่งส่งผลให้เกิดการลัดวงจรในหม้อแปลง และทำการหาค่าแรงสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในขณะเกิดการลัดวงจร โดยค่าแรงสนามแม่เหล็กที่หาได้ จะนำไปสู่การออกแบบหม้อแปลงที่นำไปใช้งานจริง

#### 3.1 การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า

ในการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า ต้องมีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงก่อน โดยในวิทยานิพนธ์นี้ ใช้ข้อกำหนดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ตามตารางที่ 3.1 เป็นข้อกำหนดหลักในการออกแบบ และนำค่าที่ได้จากการออกแบบ ไปสร้างแบบจำลองในโปรแกรม โดยในการจำลอง จะใช้ 2 โปรแกรม คือ MATLAB/simulink และ FEMLAB เพื่อทำการเปรียบเทียบผล

ตารางที่ 3.1 ข้อกำหนดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคหม้อแปลงขนาด 100 kVA [10]

รายละเอียด	ค่าที่กำหนด
ขนาดหม้อแปลง	100 kVA
ระบบไฟฟ้า	ด้านแรงดันสูง 22 kV ด้านแรงดันต่ำ 400/230 V
อิมพีแดนซ์	4%
ค่าสูญเสียในแกนเหล็ก	250 W
ค่าสูญเสียในขดลวด	1550 W
ความถี่	50 Hz

### 3.1.1 การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า

ในการออกแบบจะใช้โปรแกรม MATHCAD ในการออกแบบ ซึ่งเป็นโปรแกรมสำหรับคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆของหม้อแปลง ในงานวิจัยนี้เลือกหม้อแปลง ขนาด 100 kVA 22 kV และจากรูปที่ 3.1 เป็นตัวอย่างโปรแกรม MATHCAD ซึ่งจะออกแบบตามข้อกำหนดของการไฟฟ้า หลังจากการคำนวณจะได้ค่าต่างๆ ของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งสามารถนำไปสร้างแบบหม้อแปลงไฟฟ้าได้

Specification	
Rated Power [kVA]	P = 100
Phase	phase = 3
Frequency [Hz]	fr = 50
Step voltage 2.5 % or 5 % of Tapping	step = 2.5
Normal tapping	Kr <sub>ie</sub> = 3
Connection.=1 for Dyn11 Connection = 2 for Yz11	con = 1
Rated voltage LV [kV]	U2 = 0.4
Rated current LV [A]	I2 = 144.338
If2 = 144.338	
Number section in HV	nS1 = 1
Oil system (1 for sealed type or 2 for conservator type or 3 for air cushion type)	Oilsys = 1
Impulse voltage test [kV]	BIL = 125
Withstand voltage test 60 sec.[kV]	Withstand = 50
Induce voltage test 30 sec.[kV]	Induced = 50
Ambient temperature [deg C]	ta = 40
Winding temperature [deg C]	toa = 65
Top oil temperature Sealed & Conservator type = 60 ; Air cushion = 55 [deg C]	toa = 60
Symmetrical Short - circuit current for H.V.[kArms Iscsymhv = 0.068	Asymmetrical Short - circuit current for H.V.[kApeak] Iscasymhv = 0.125
Symmetrical Short - circuit current for L.V.[kArms Iscsymlv = 3.608	Asymmetrical Short - circuit current for L.V.[kApeak] Iscasymlv = 6.869
Volt/turn	u = 6.792
Flux density [Tesla]	BT = 1.654
Core loss [W/kg]	po = 0.664
No - load loss [W]	Pod = 250
Pomax = 233.257	Po = 222.149
Po% = 12.537	Pkd - Pomax = 16.743
Load loss [W]	Pkd = 1.55 × 10 <sup>3</sup>
P75 = 1.307 × 10 <sup>3</sup>	P75max <sub>Kr<sub>ie</sub></sub> = 1.346 × 10 <sup>3</sup>
P75% <sub>Kr<sub>ie</sub></sub> = 18.628	P85max <sub>Kr<sub>ie</sub></sub> = 1.388 × 10 <sup>3</sup>
P85% <sub>Kr<sub>ie</sub></sub> = 15.042	
Impedance voltage [%]	ukd = 4
uk75 = 3.156	uk175 = 4.59
ukdmi = 3.6	ux = 2.873
uk185 = 4.601	ukdmi = 3.6
uk85 = 3.173	ux1 = 4.4
	tolcu = 1.03
	tolfe = 1.05

รูปที่ 3.1 ตัวอย่างโปรแกรม MATHCAD

#### 1. ผลจากการคำนวณแบบขดลวดกลม

การออกแบบหม้อแปลงแบบขดลวดกลม จะได้ค่าพารามิเตอร์ ต่างๆ ตามตารางที่ 3.2 ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

ตารางที่ 3.2 หม้อแปลงขดลวดแบบกลม

รายละเอียด	ค่าที่ออกแบบ
ขนาดหม้อแปลง	100 kVA
Flux Density	1.654 T
Impedance Voltage	3.1%

ตารางที่ 3.2 หม้อแปลงชนิดลวดแบบกลม (ต่อ)

รายละเอียด	ค่าที่ออกแบบ	
Core Loss	223 W	
Load Loss	1307 W	
Frequency	50 Hz	
	Coil	
	Outer Winding (HV)	Inner Winding (LV)
Voltage	22000 V	400 V
Current Density	2.577 A/mm <sup>2</sup>	2.583 A/mm <sup>2</sup>
Winding Turns	3401 turn	34 turn
External Winding Diameter	324 mm	195 mm
Internal Winding Diameter	245 mm	227 mm
Length of Coil	213 mm	213 mm
	Core	
	Leg	Yoke
Area	1.85 m <sup>2</sup>	1.85 m <sup>2</sup>
Length	443 mm	788 mm

2. ผลจากการคำนวณแบบขดลวดเหลี่ยม

การออกแบบหม้อแปลงแบบขดลวดเหลี่ยม จะได้ค่าพารามิเตอร์ ต่างๆตามตารางที่ 3.3 ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

ตารางที่ 3.3 หม้อแปลงชนิดลวดแบบเหลี่ยม

รายละเอียด	ค่าที่ออกแบบ
ขนาดหม้อแปลง	100 kVA
Flux Density	1.654 T

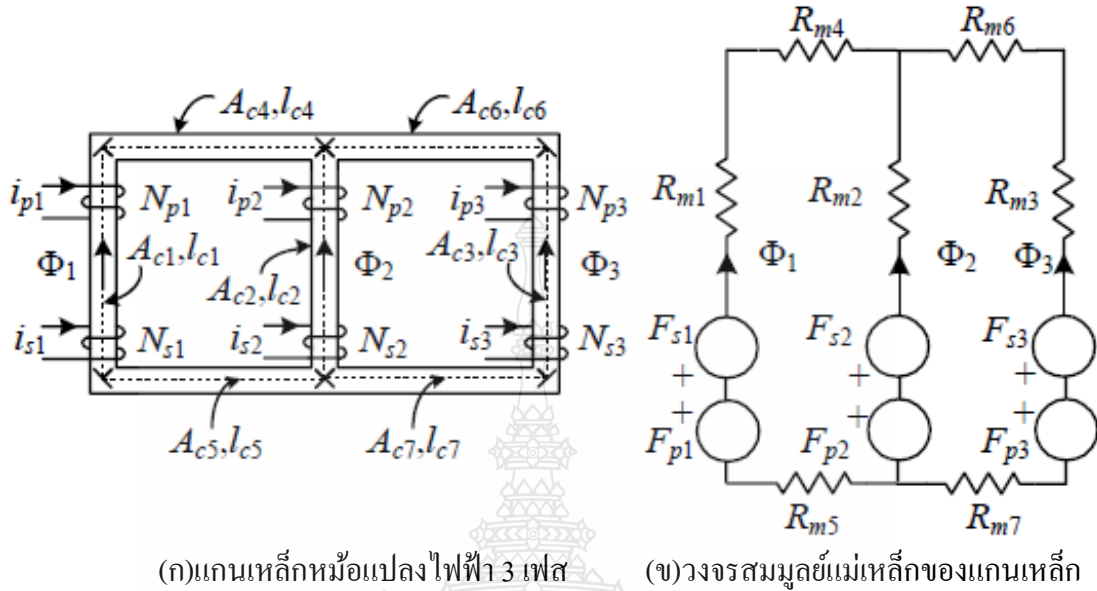
ตารางที่ 3.3 หม้อแปลงขดลวดแบบเหล็ยม (ต่อ)

รายละเอียด	ค่าที่ออกแบบ	
Impedance Voltage	3.1%	
Core Loss	183.7 W	
Load Loss	1226 W	
Frequency	50 Hz	
	Coil	
	Outer Winding (HV)	Inner Winding (LV)
Voltage	22000 V	400 V
Current Density	2.577 A/mm <sup>2</sup>	2.583 A/mm <sup>2</sup>
Winding Turns	3401 turn	34 turn
External Winding	กว้าง 176 mm ยาว 251 mm	กว้าง 158 mm ยาว 233 mm
Internal Winding	กว้าง 227 mm ยาว 334 mm	กว้าง 118 mm ยาว 193 mm
Length of Coil	213 mm	213 mm
	Core	
	Leg	Yoke
Area	1.85 m <sup>2</sup>	1.85 m <sup>2</sup>
Length	443 mm	594 mm

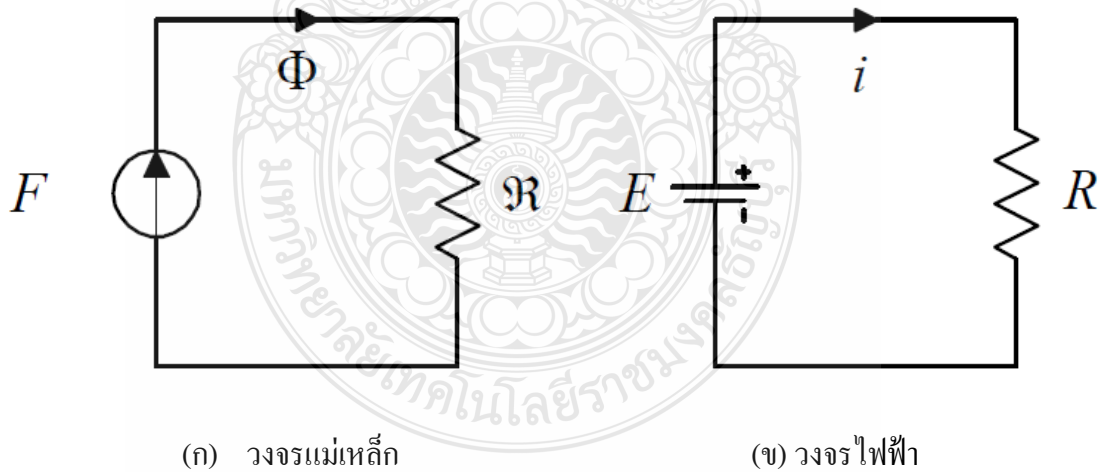
### 3.2 การสร้างแบบจำลองโดยโปรแกรม MATLAB/simulink

ในการจำลอง MATLAB/simulink จำลองภายใต้ตัวแปรของเวลา หรือไทม์โดเมน (Time Domain) โดยทำการจำลองสภาวะการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กที่ไหลในแกนเหล็ก เพื่อหาความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่จุดต่างๆ ในหม้อแปลง ซึ่งในการจำลองหาเส้นแรงแม่เหล็กโดย

ใช้ MATLAB/simulink ต้องทำการแปลงจากวงจรแม่เหล็ก มาเป็นวงจรสมมูลแม่เหล็ก จะแสดงได้ดังรูปที่ 3.2 จากนั้นทำการแปลงจากวงจรสมมูลแม่เหล็ก มาเป็นวงจรสมมูลไฟฟ้า ตามรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.2 เปรียบเทียบระหว่างแกนเหล็กหม้อแปลงและวงจรสมมูลแม่เหล็ก [17]



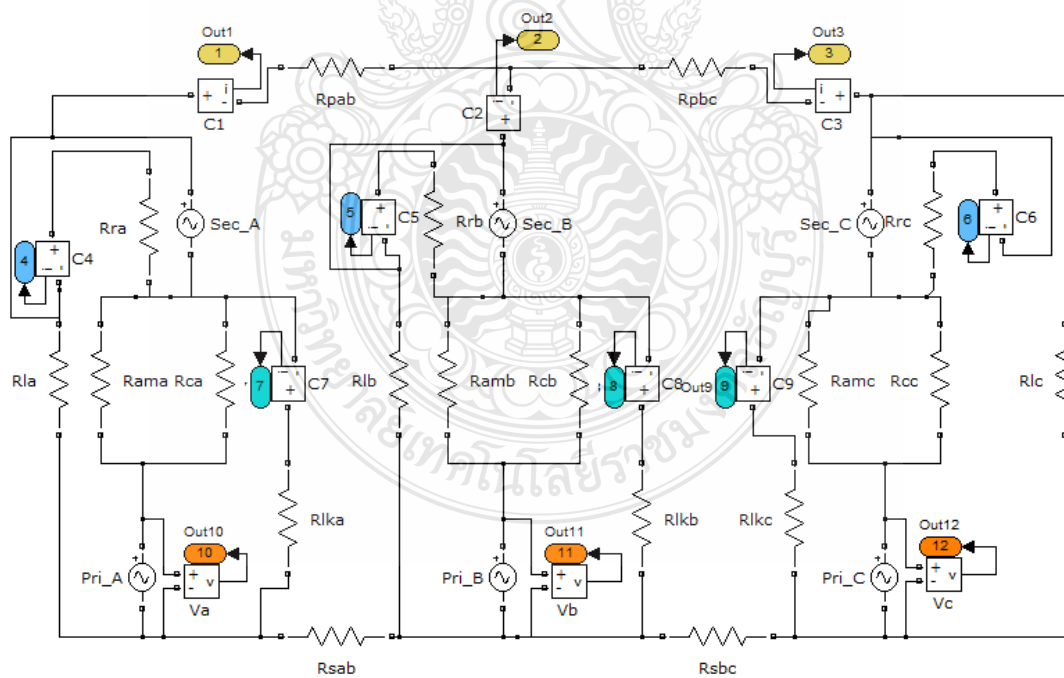
รูปที่ 3.3 เปรียบเทียบระหว่างวงจรแม่เหล็กและวงจรไฟฟ้า

การแปลงวงจรแม่เหล็กเป็นวงจรไฟฟ้า สามารถแทนค่าได้ตามตารางที่ 3.4 เพื่อนำค่าที่ได้ไปจำลองในโปรแกรม

ตารางที่ 3.4 เปรียบเทียบวงจรแม่เหล็กกับวงจรไฟฟ้า

วงจรแม่เหล็ก	วงจรไฟฟ้า
mmf (F)	emf (E)
เส้นแรงแม่เหล็ก	กระแส
$\phi = \frac{F}{\mathcal{R}}$	$I = \frac{E}{R}$
ความต้านทานแม่เหล็ก	ความต้านทานไฟฟ้า
$\mathcal{R} = \frac{l}{\mu A}$	$R = \frac{l}{\sigma A}$
$\mu$ = ความซึมซาบได้	$\sigma$ = สภาพนำไฟฟ้า

สร้างโมเดลใน MATLAB/simulink ตามรูปที่ 3.4 โดยแปลงจากวงจรแม่เหล็กให้เป็นวงจรไฟฟ้า และทำการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จากนั้นนำค่าไปป้อนในโปรแกรม



รูปที่ 3.4 การจำลองใน MATLAB/simulink

### 3.2.1 การคำนวณค่าพารามิเตอร์ ที่ใช้ใน MATLAB/simulink

#### 1. คำนวณค่ากระแสไฟฟ้า

ในการคำนวณหาค่ากระแสลัดวงจร นำค่ากระแสใช้งานสูงสุดของหม้อแปลงหารด้วยค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง ตามสมการที่ 3.1

$$I_{SC}(Tr) = \frac{I_{FL}(Tr) \times 100\%}{\%IZ} \times \frac{1}{1000} \quad (3.1)$$

เมื่อ  $I_{SC}(Tr)$  คือ กระแสลัดวงจรของหม้อแปลง

$I_{FL}(Tr)$  คือ กระแสใช้งานสูงสุดของหม้อแปลง

$\%IZ$  คือ อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง

ตารางที่ 3.5 คำนวณค่ากระแส

สภาวะกระแสของหม้อแปลง		ขดลวดด้านแรงสูง (HV)	ขดลวดด้านแรงต่ำ (LV)
กระแสปกติ (A)	$I_{rms}$	1.51	144
	$I_{peak}$	2.14	204
กระแสลัดวงจร (A)	$I_{rms}$	48.87	4656
	$I_{peak}$	69.11	6583.6

#### 2. คำนวณหาค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (Magnetomotive Force)

ในการคำนวณหาค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็ก นำค่ากระแสที่จ่ายเข้าไปในขดลวดคูณกับจำนวนรอบของขดลวด ตามสมการที่ 3.2 [17]

$$F = NI \quad (3.2)$$

เมื่อ  $F$  คือ แรงเคลื่อนแม่เหล็ก

$N$  คือ จำนวนรอบของขดลวด

$I$  คือ กระแสที่ไหลในขดลวด

จากการคำนวณจะได้ค่าตามตารางที่ 3.6 โดยกระแสที่ใช้ในการคำนวณจะเป็นกระแสสูงสุด

ตารางที่ 3.6 จำนวนค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็ก

รายการ	สถานะ	ขดลวดกลม		ขดลวดเหลี่ยม	
		HV	LV	HV	LV
$I_{peak}$ (A)	Normal	2.14	204	2.14	204
	Short circuit	69.11	6583.6	69.11	6583.6
N (turn)		3,401	34	3,401	34
F=NI (A-turn)	Normal	9,812	9,812	9,812	9,812
	Short circuit	316,531	316,531	316,531	316,531

### 3. การหาพื้นที่ส่วนต่างๆ ของหม้อแปลง

#### 1) การหาพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก ( $A_{core}$ )

การหาพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก สามารถคำนวณได้จากรูปที่ 3.5 ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้พื้นที่ของแกนเหล็ก ของทั้งขดลวดกลม และขดลวดเหลี่ยม เท่ากันคือ 1.85 ตารางเซนติเมตร หรือ 0.0185 ตารางเมตร



(ก) แกนเหล็กขดลวดกลม



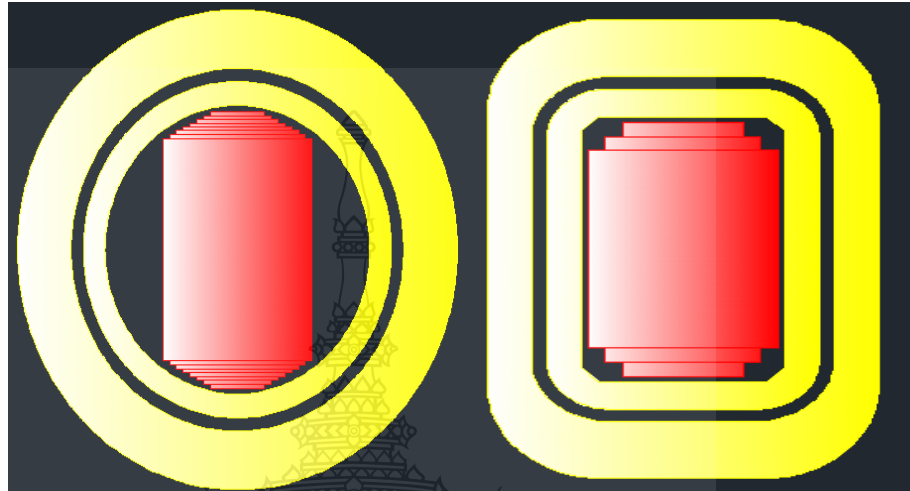
(ข) แกนเหล็กขดลวดเหลี่ยม

รูปที่ 3.5 ภาพตัดด้านบนบนแกนเหล็ก



2) การหาพื้นที่ในช่องว่างต่างๆ ของขดลวด ( $A_{gap}$ )

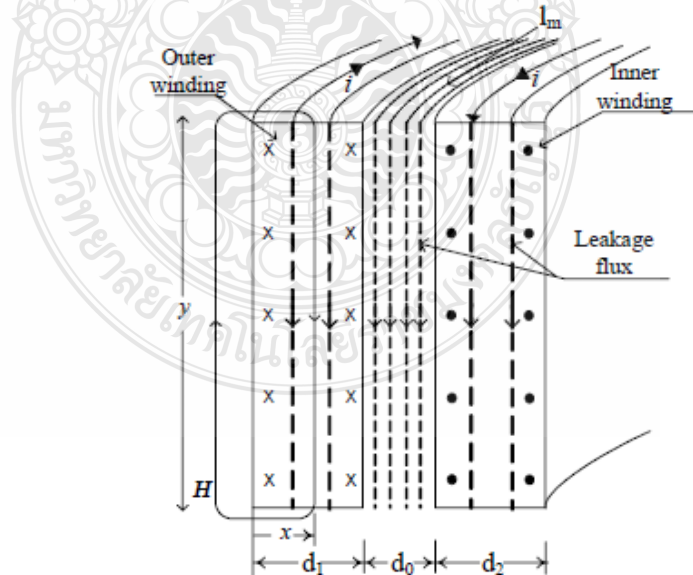
การหาพื้นที่ของช่องว่างต่างๆ แสดงได้ตามรูปที่ 3.6 เป็นภาพตัดด้านบนของขดลวดเพื่อให้มองเห็น ช่องว่างแต่ละจุดได้ชัดเจน



(ก) ขดลวดกลม

(ข) ขดลวดเหลี่ยม

รูปที่ 3.6 ภาพตัดด้านบนขดลวด



รูปที่ 3.7 พื้นที่ของช่องว่าง ระหว่างขดลวด HV และ LV [1]

พื้นที่ของช่องว่างระหว่างขดลวด HV และ LV แสดงได้ตามรูปที่ 3.7 และสามารถคำนวณหาพื้นที่ได้ตามสมการ ที่ 3.3 [1]

$$A_{LEAK} = l_m \left( \frac{d_1}{3} + d_0 + \frac{d_2}{3} \right) m^2 \quad (3.3)$$

เมื่อ  $l_m$  คือ ความยาวเฉลี่ยของขดลวดเส้นรอบวง  
 $d_1, d_2$  คือ ความหนาของขดลวด HV และ LV  
 $d_0$  คือ ระยะระหว่างขดลวด HV และ LV

จากการคำนวณหาพื้นที่ช่องว่างในขดลวดแต่ละช่วง จะได้ค่าตามตารางที่ 3.7 ซึ่งจะนำไปคำนวณหาค่ารีแลคแตนซ์ต่อไป

ตารางที่ 3.7 คำนวณหาพื้นที่ช่องว่างในขดลวด

รายการ	ขดลวดกลม			ขดลวดเหลี่ยม		
	กว้าง (มม.)	ยาว (มม.)	พื้นที่ (ตร.ม.)	กว้าง (มม.)	ยาว (มม.)	พื้นที่ (ตร.ม.)
แกนเหล็ก ถึง ขดลวดแรงต่ำ	4	599.74	0.0023	4	587.28	0.0023
ขดลวดแรงสูง ถึง ขดลวดแรงต่ำ	27.5	741.04	0.0203	9	749.36	0.067
นอกขดลวด	15	1064.46	0.0159	15	1100.32	0.0165
แกนเหล็ก ถึง แท่งค้ำ	96.5	902.75	0.087	104.5	1199.76	0.125

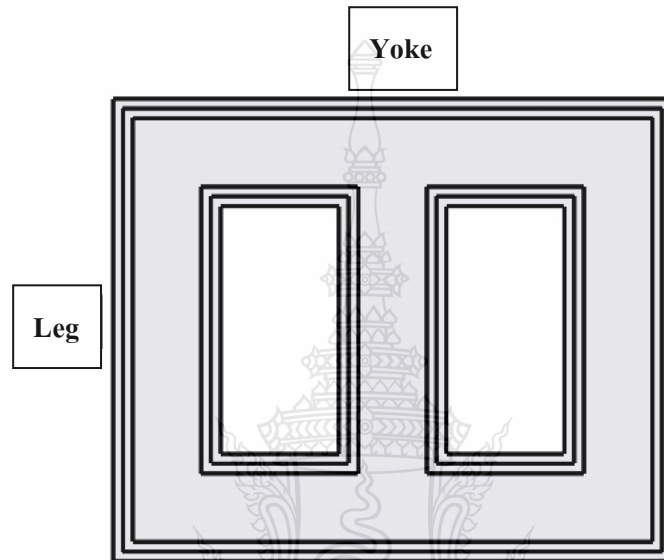
#### 4. การหาค่าความต้านทานแม่เหล็ก ( $\mathcal{R}$ )

##### 1) ความต้านทานแกนเหล็ก ( $\mathcal{R}_c$ )

ในการคำนวณหาความต้านทานแม่เหล็ก ต้องทราบความยาวของแกนเหล็กในแต่ละช่วง และพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก โดยจะได้มาจากการออกแบบ เพื่อมาใช้ในการคำนวณตามสมการที่ 3.4 [18]

$$R_c = \frac{l}{\mu_r \mu_0 A} At / Wb \quad (3.4)$$

เมื่อ  $\mu_r$  คือ ค่าความซึมซาบได้ของแกนแกนเหล็ก = 92,000  
 $\mu_0$  คือ ค่าความซึมซาบได้ของอากาศ =  $4\pi \times 10^{-7}$



รูปที่ 3.8 แกนเหล็กหม้อแปลง

แกนเหล็กหม้อแปลงตามรูปที่ 3.8 แสดงตำแหน่งของ Leg ซึ่งถือว่าเป็นขาของแกนเหล็กหม้อแปลง จากรูปเป็นหม้อแปลง 3 เฟส แบบ Core Type จึงมี 3 ขา และ ตำแหน่งของ Yoke จะอยู่ด้านบน และด้านล่างของแกนเหล็กหม้อแปลง เชื่อมระหว่างขาทั้ง 3 ขา สำหรับค่าความต้านทานแม่เหล็ก ที่คำนวณได้ แสดงตามตารางที่ 3.8

ตารางที่ 3.8 คำนวณหาค่าความต้านทานแม่เหล็กที่แกนเหล็ก

รายการ	ความต้านทาน	แกนเหล็ก ขดลวดกลม	แกนเหล็ก ขดลวดเหลี่ยม
Core Leg	$R_{ca} = R_{cb} = R_{cc}$	207	207
Core Yoke	$R_{pab} = R_{pbc} = R_{sab} = R_{sbc}$	158	113

## 2) ความต้านทานช่องว่าง ( $R_{gap}$ )

ในการคำนวณหาค่าความต้านทานแม่เหล็กในช่องว่าง จะต้องทราบความยาวของช่องว่าง และพื้นที่ของช่องว่าง เพื่อนำมาคำนวณตามสมการที่ 3.5 [18]

$$R_{gap} = \frac{l_{gap}}{\mu_0 A_{gap}} At / Wb \quad (3.5)$$

เมื่อ  $\mu_0$  คือ ค่าความซึมซาบได้ของอากาศ =  $4\pi \times 10^{-7}$

จากการคำนวณตามสมการที่ 3.5 จะได้ค่าความต้านทานแม่เหล็กในช่องว่างแต่ละช่วงของหม้อแปลง ตามตารางที่ 3.9

ตารางที่ 3.9 คำนวณหาค่าความต้านทานแม่เหล็กที่ช่องว่าง

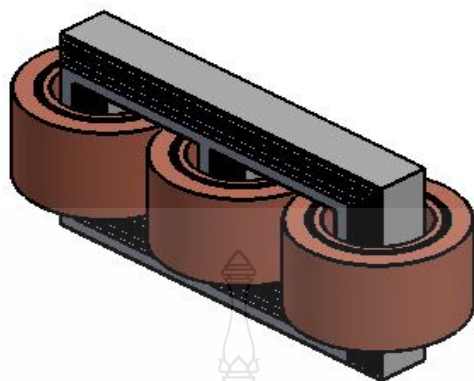
รายการ	ความต้านทาน	ขดลวดกลม	ขดลวดเหลี่ยม
แกนเหล็ก ถึงขดลวดแรงต่ำ	$R_{ama} = R_{amb} = R_{amc}$	$706.91 \times 10^5$	$721.9 \times 10^5$
ขดลวดแรงสูง ถึงขดลวดแรงต่ำ	$R_{lka} = R_{lkb} = R_{lkc}$	$83.21 \times 10^5$	$76.71 \times 10^5$
นอกขดลวด	$R_{la} = R_{lb} = R_{lc}$	$106.21 \times 10^5$	$102.74 \times 10^5$
แกนเหล็ก ถึง แทงค์	$R_{ra} = R_{rb} = R_{rc}$	$8.82 \times 10^5$	$6.63 \times 10^5$

## 3.3 การสร้างแบบจำลองโดยโปรแกรม FEMLAB

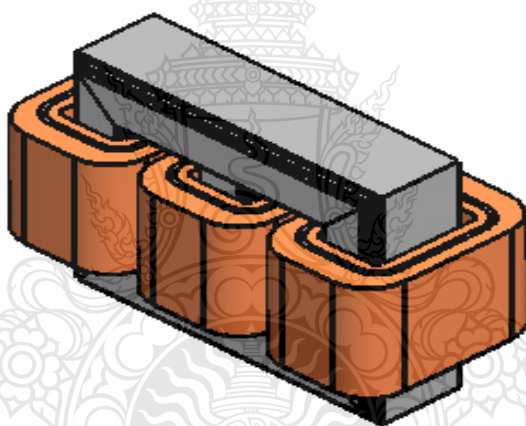
การจำลองโดย FEMLAB เป็นการจำลองเพื่อหาค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้น โดยสามารถที่จะแสดงเป็นรูปที่ชัดเจน ทำให้ทราบความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในแต่ละจุดภายในหม้อแปลง

### 3.3.1 การวาดแบบหม้อแปลงโดย SOLIDWORKS

จากการคำนวณการออกแบบโดยใช้ MATHCAD นำข้อมูลที่ได้ไปวาดแบบของหม้อแปลง โดยใช้โปรแกรม SOLIDWORKS โดยจะเป็นขนาดจริงที่คำนวณได้ แสดงได้ตามรูปที่ 3.9 เป็นแบบของหม้อแปลงขดลวดกลม และรูปที่ 3.10 เป็นแบบหม้อแปลงขดลวดเหลี่ยม



รูปที่ 3.9 แบบหม้อแปลงขดลวดกลม



รูปที่ 3.10 แบบหม้อแปลงขดลวดเหลี่ยม

### 3.3.2 พื้นที่ของขดลวด

ทำการคำนวณหาพื้นที่ของขดลวด เพื่อนำไปคำนวณหา กระแสที่จะป้อนเข้าไปในโปรแกรม เพราะใน โปรแกรมกำหนดให้ป้อนกระแสต่อพื้นที่ สามารถหาพื้นที่ของขดลวดได้ตามตารางที่ 3.10

ตารางที่ 3.10 พื้นที่ขดลวด

ด้านขดลวด	ขดลวดกลม			ขดลวดเหลี่ยม		
	สูง (มม.)	กว้าง (มม.)	พื้นที่ (ตร.ม.)	สูง (มม.)	กว้าง (มม.)	พื้นที่ (ตร.ม.)
LV	213	16	0.0034	213	20	0.0042
HV	213	39.5	0.008	213	41.5	0.0083

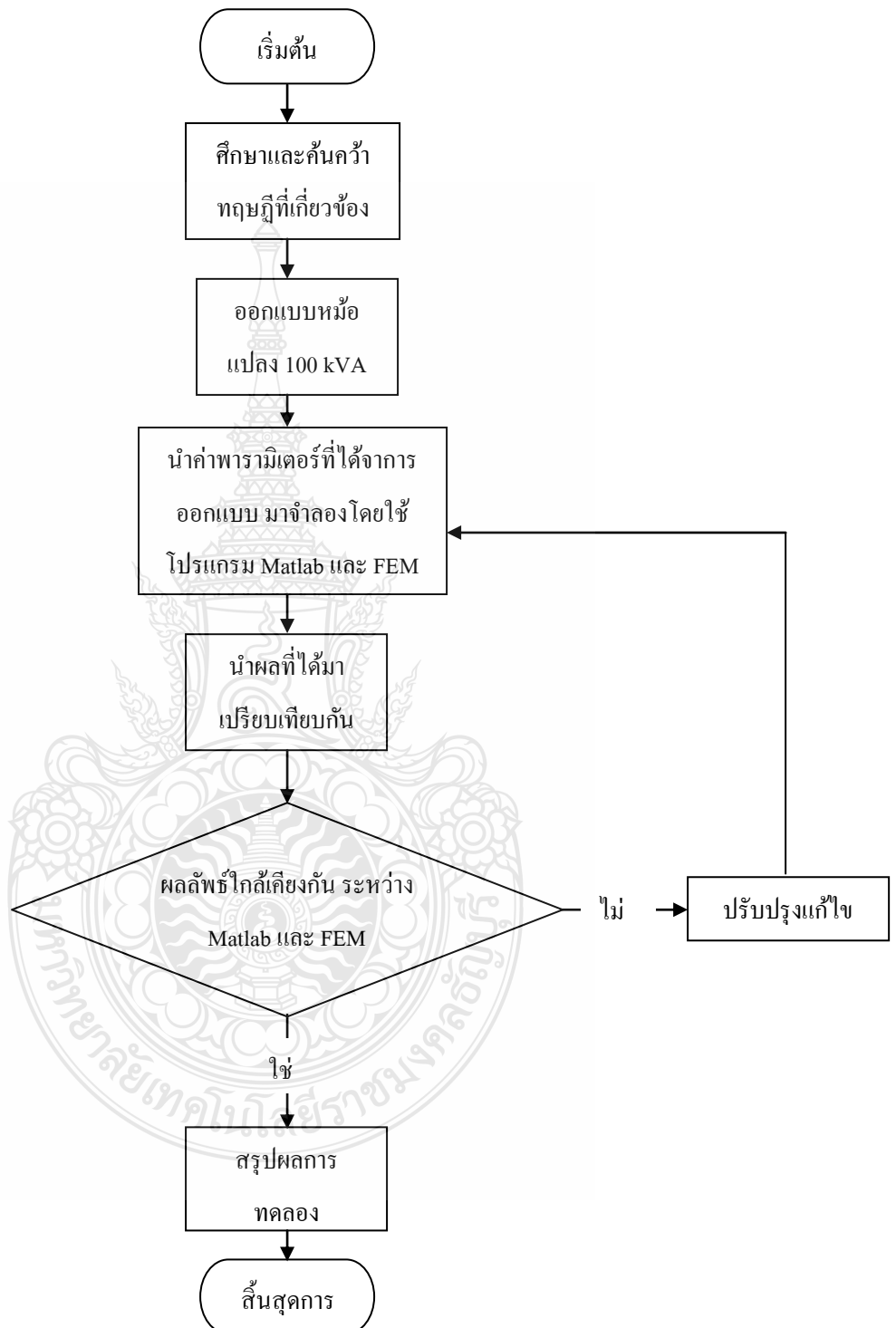
### 3.3.3 กระแสที่ป้อนในโปรแกรม

ต้องคำนวณกระแสที่ป้อนเข้าไปในโปรแกรม โดยจากค่ากระแสที่คำนวณได้ นำไปหารด้วยพื้นที่ของขดลวด จะได้ค่ากระแสที่ป้อนไปในโปรแกรม แสดงได้ตามตารางที่ 3.11

ตารางที่ 3.11 ค่ากระแสต่อพื้นที่ของขดลวด

รายการ		ขดลวดกลม		ขดลวดเหลี่ยม	
		HV	LV	HV	LV
$I_{peak}$ (A)	Normal	2.14	204	2.14	204
	Short Circuit	69.11	6583.6	69.11	6583.6
พื้นที่ขดลวด ( $m^2$ )		0.008	0.0034	0.0083	0.0042
กระแสต่อพื้นที่ ( $I/m^2$ ) Normal		268.5	59886.5	258.13	48,593.65
กระแสต่อพื้นที่ ( $I/m^2$ ) Short Circuit		8661.8	1,931,824	8,326.8	1,567,537

### ขั้นตอนการดำเนินงาน



รูปที่ 3.11 ขั้นตอนการทำงานในการหาแรงสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

### 3.4 สรุปวิธีดำเนินงานวิจัย

สำหรับบทที่ 3 เป็นการนำเสนอแนวความคิด และการคำนวณในการออกแบบ โดยนำงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและทฤษฎีการเกิดแรงสนามแม่เหล็กในบทที่ 2 มาใช้ในการคำนวณ และการจำลอง ในบทถัดไปจะเป็นการนำแบบหม้อแปลงที่ได้ทำการออกแบบ และคำนวณไปจำลองในโปรแกรม เพื่อดูผลของแรงสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น





## บทที่ 4

### ผลการวิจัย

ในบทที่ผ่านมาได้ทำการศึกษาข้อมูลและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องเพื่อทำการออกแบบโมเดลของหม้อแปลงระบบจำหน่าย สำหรับบทนี้จะเป็นการนำเสนอผลการจำลอง ด้วยโปรแกรม MATLAB/simulink และ FEMLAB เพื่อจะหาแรงทางกลที่เกิดขึ้น ทั้งในสภาวะหม้อแปลงจ่ายโหลดปกติ และการลัดวงจร โดยใช้ค่าการคำนวณหาความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก และแรงสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในขดลวด จากสมการในบทที่ 2 เป็นค่าอ้างอิง ซึ่งมีรายละเอียด ดังนี้

#### 4.1 การคำนวณความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก และแรงสนามแม่เหล็ก โดยใช้สมการ

สามารถคำนวณหาความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก และแรงสนามแม่เหล็ก ที่เกิดขึ้นในขดลวดของหม้อแปลงโดยใช้สมการ 2.14 ถึง 2.17 ในบทที่ 2 ซึ่งจะได้ผลการคำนวณตามตารางที่ 4.1 ค่าในตารางเป็นการคำนวณเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/simulink และ FEMLAB

**ตารางที่ 4.1** ผลการคำนวณค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก และแรงสนามแม่เหล็ก โดยใช้สมการ

ความหนาแน่น และแรงสนามแม่เหล็ก	ขดลวดคกลม		ขดลวดเหลี่ยม	
	สภาวะปกติ	สภาวะลัดวงจร	สภาวะปกติ	สภาวะลัดวงจร
ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก $B_a(T)$	0.029	0.93	0.028	0.933
ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก $B_r(T)$	$0.319 \times 10^{-3}$	0.01	$0.29 \times 10^{-3}$	0.0095
แรงตามรัศมี $F_r(N)$	253.6	$2.63 \times 10^5$	255.4	$2.65 \times 10^5$
แรงตามแนวแกน $F_a(N)$	2.8	$0.3 \times 10^4$	2.6	$0.27 \times 10^4$

## 4.2 การจำลองโดยโปรแกรม MATLAB/simulink

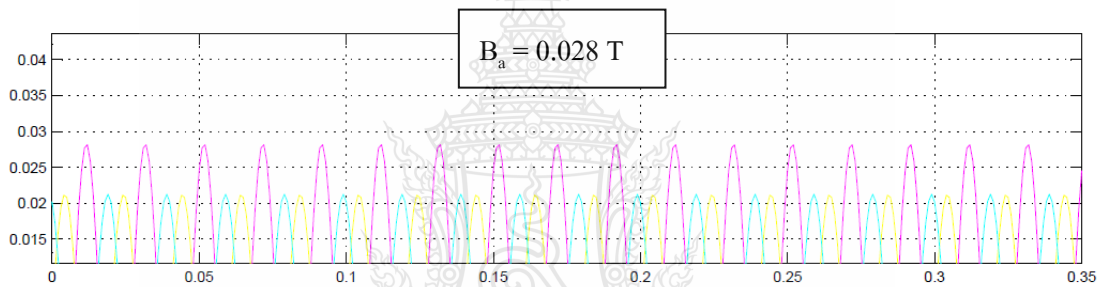
ในการจำลองในโปรแกรม MATLAB/simulink จำลองเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กที่ไหลในแกนเหล็ก เพื่อหาความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่จุดต่างๆ และแรงสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในหม้อแปลง ทั้งในขณะที่หม้อแปลงใช้งานปกติ และเกิดการลัดวงจร โดยในการจำลอง จะทำการจำลองหม้อแปลง 2 แบบ หม้อแปลงแบบขดลวดกลม และหม้อแปลงขดลวดเหลี่ยม

หลังจากได้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆแล้ว ป้อนค่าลงใน MATLAB/simulink และทำการจำลองในสภาวะปกติ และเกิดการลัดวงจร

### 4.2.1. ขดลวดกลม

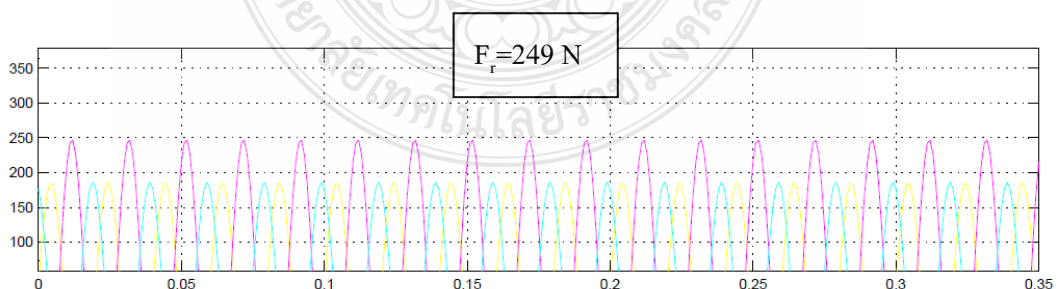
#### 1. แรงสนามแม่เหล็ก ในแนวรัศมี ( $F_r$ )

##### 1) สภาวะปกติ



รูปที่ 4.1 ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก ( $B_a$ ) ขดลวดกลม สภาวะปกติ

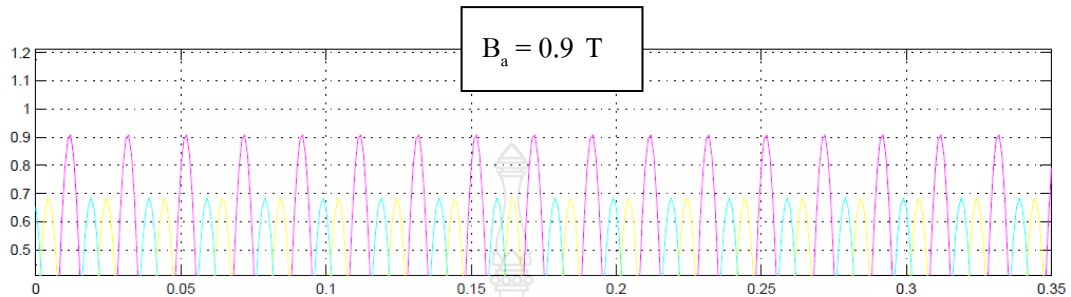
จากการจำลองในสภาวะปกติ จะได้ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก ตามแนวแกน ( $B_a$ ) ตามรูปที่ 4.1 ซึ่งจะมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 0.028 T



รูปที่ 4.2 แรงสนามแม่เหล็ก ( $F_r$ ) ด้าน HV ขดลวดกลม สภาวะปกติ

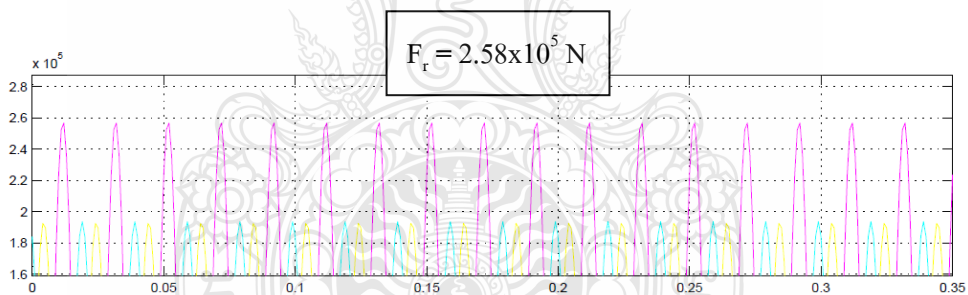
จากการจำลองในสภาวะปกติ จะได้ค่าแรงสนามแม่เหล็กที่เกิดตามแนวรัศมี ตามรูปที่ 4.2 ซึ่งจะมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 249 N

## 2) สภาวะลัดวงจร



รูปที่ 4.3 ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก ( $B_a$ ) ขดลวดกลม สภาวะลัดวงจร

จากการจำลองในสภาวะลัดวงจร จะได้ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก ตามแนวแกน ( $B_a$ ) ตามรูปที่ 4.3 ซึ่งจะมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 0.9 T

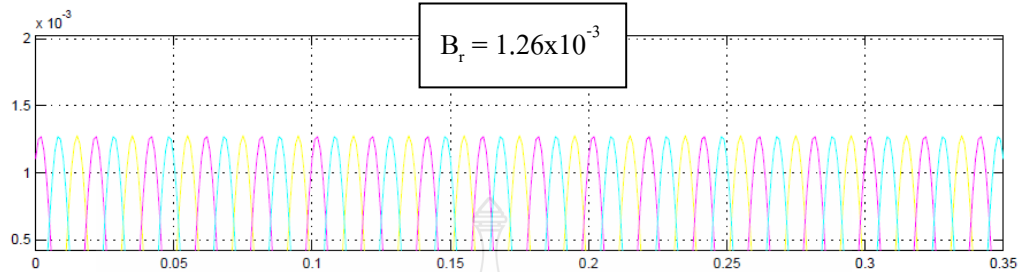


รูปที่ 4.4 แรงสนามแม่เหล็ก ( $F_r$ ) ด้าน HV ขดลวดกลม สภาวะลัดวงจร

จากการจำลองในสภาวะลัดวงจร จะได้ค่าแรงสนามแม่เหล็กที่เกิดตามแนวรัศมี ตามรูปที่ 4.4 ซึ่งจะมีค่าสูงสุดอยู่ที่  $2.58 \times 10^5$  N

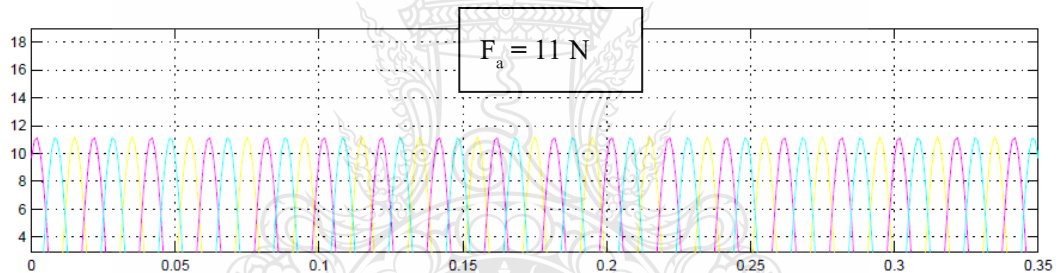
## 2. แรงสนามแม่เหล็ก ในแนวแกน ( $F_a$ )

### 1) สภาวะปกติ



รูปที่ 4.5 ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก ( $B_r$ ) ขดลวดกลม สภาวะปกติ

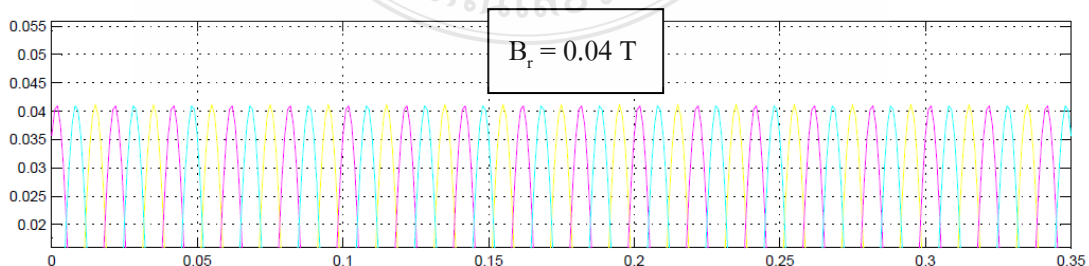
จากการจำลองในสภาวะปกติ จะได้ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก ตามแนวรัศมี ( $B_r$ ) ตามรูปที่ 4.5 ซึ่งจะมีค่าสูงสุดอยู่ที่  $1.26 \times 10^{-3}$  T



รูปที่ 4.6 แรงสนามแม่เหล็ก ( $F_a$ ) ด้าน HV ขดลวดกลม สภาวะปกติ

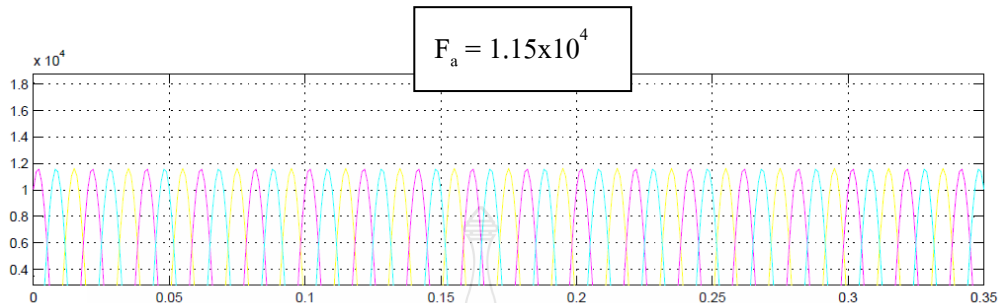
จากการจำลองในสภาวะปกติ จะได้ค่าแรงสนามแม่เหล็กที่เกิดตามแนวแกนตามรูปที่ 4.6 ซึ่งจะมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 11 N

### 2) สภาวะลัดวงจร



รูปที่ 4.7 ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก ( $B_r$ ) ขดลวดกลม สภาวะลัดวงจร

จากการจำลองในสภาวะลัดวงจร จะได้ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก ตาม  
แนวรัศมี ( $B_r$ ) ตามรูปที่ 4.7 ซึ่งจะมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 0.04 T



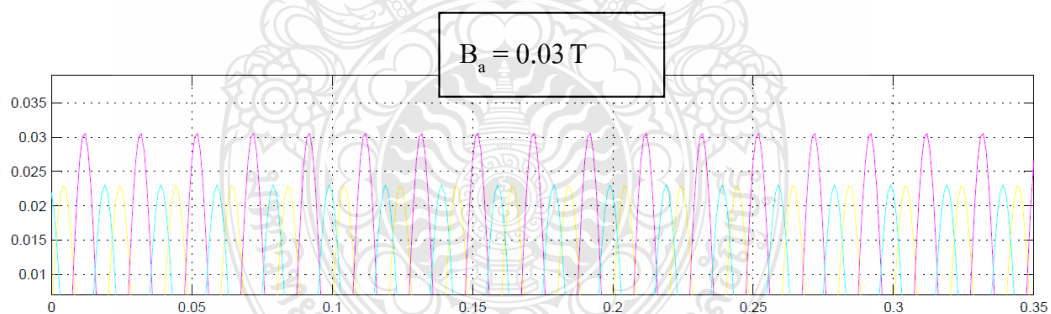
รูปที่ 4.8 แรงสนามแม่เหล็ก ( $F_a$ ) ด้าน HV ขดลวดกลม สภาวะลัดวงจร

จากการจำลองในสภาวะลัดวงจร จะได้ค่าแรงสนามแม่เหล็กที่เกิดตาม  
แนวแกน ตามรูปที่ 4.8 ซึ่งจะมีค่าสูงสุดอยู่ที่  $1.15 \times 10^4$  N

#### 4.2.2 ขดลวดเหลี่ยม

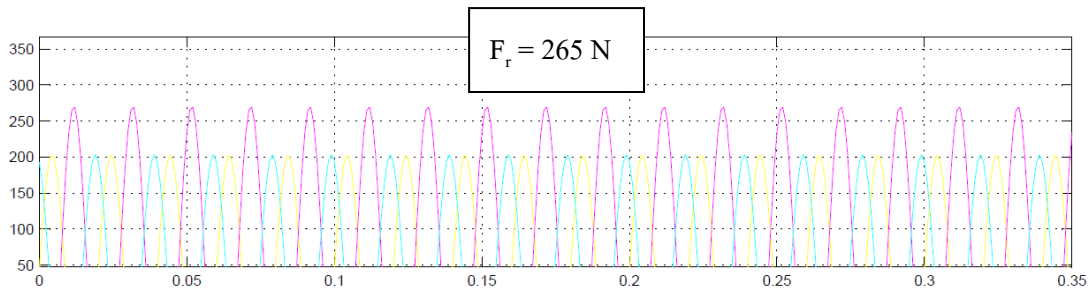
##### 1. แรงสนามแม่เหล็ก ในแนวรัศมี ( $F_r$ )

##### 1) สภาวะปกติ



รูปที่ 4.9 ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก ( $B_a$ ) ขดลวดเหลี่ยม สภาวะปกติ

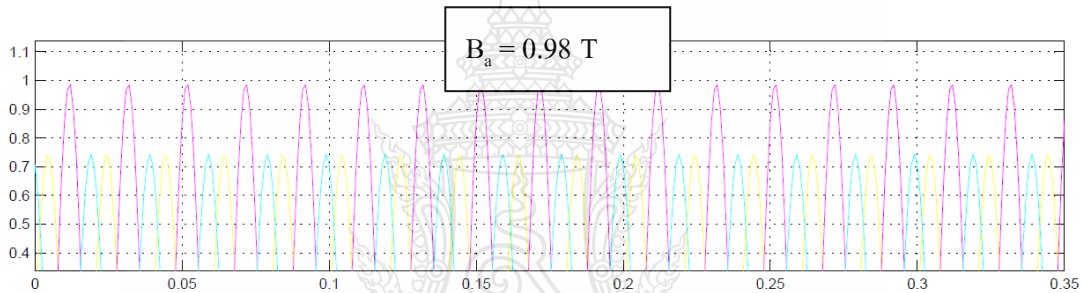
จากการจำลองในสภาวะปกติ จะได้ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก ตาม  
แนวแกน ( $B_a$ ) ตามรูปที่ 4.9 ซึ่งจะมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 0.03 T



รูปที่ 4.10 แรงสนามแม่เหล็ก ( $F_r$ ) ด้าน HV ขดลวดเหลี่ยม สภาวะปกติ

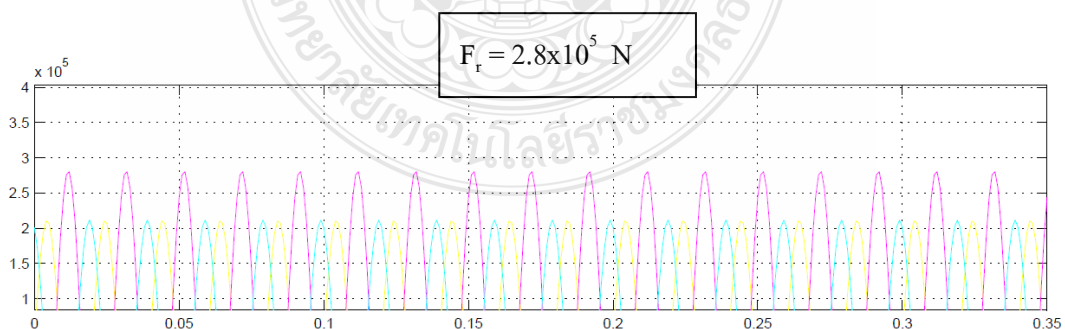
จากการจำลองในสภาวะปกติ จะได้ค่าแรงสนามแม่เหล็กที่เกิดตามแนวรัศมีตามรูปที่ 4.10 ซึ่งจะมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 265 N

2) สภาวะลัดวงจร



รูปที่ 4.11 ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก ( $B_a$ ) ขดลวดเหลี่ยม สภาวะลัดวงจร

จากการจำลองในสภาวะลัดวงจร จะได้ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กตามแนวแกน ( $B_a$ ) ตามรูปที่ 4.11 ซึ่งจะมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 0.98 T

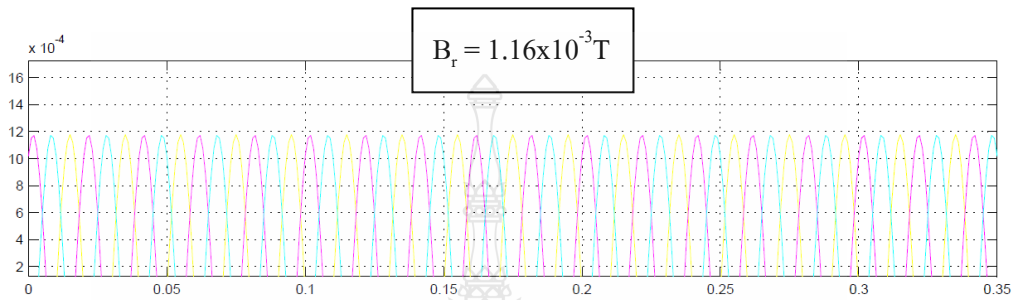


รูปที่ 4.12 แรงสนามแม่เหล็ก ( $F_r$ ) ด้าน HV ขดลวดเหลี่ยม สภาวะลัดวงจร

จากการจำลองในสภาวะลัดวงจร จะได้ค่าแรงสนามแม่เหล็กที่เกิดตามแนวรัศมี ตามรูปที่ 4.12 ซึ่งจะมีค่าสูงสุดอยู่ที่  $2.8 \times 10^5$  N

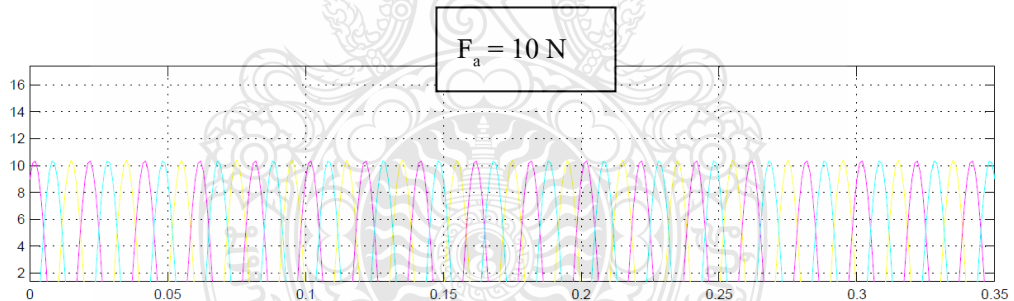
2. แรงสนามแม่เหล็ก ในแนวแกน ( $F_a$ )

1) สภาวะปกติ



รูปที่ 4.13 ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก ( $B_r$ ) ขดลวดเหลี่ยม สภาวะปกติ

จากการจำลองในสภาวะปกติ จะได้ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก ตามแนวรัศมี ( $B_r$ ) ตามรูปที่ 4.13 ซึ่งจะมีค่าสูงสุดอยู่ที่  $1.16 \times 10^{-3}$  T

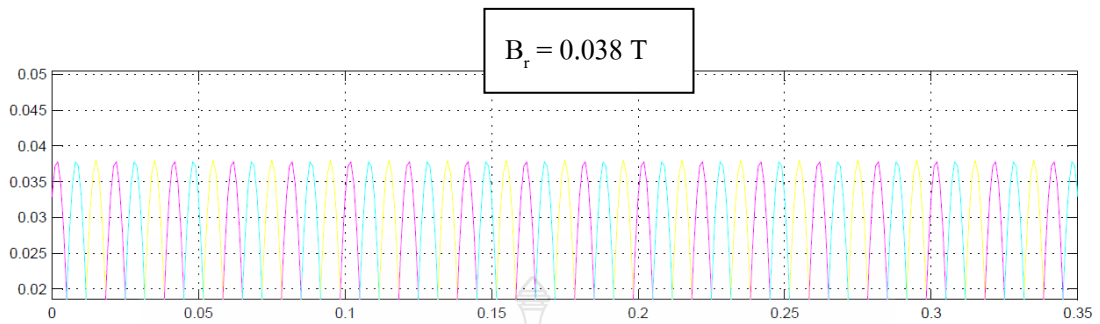


รูปที่ 4.14 แรงสนามแม่เหล็ก ( $F_a$ ) ด้าน HV ขดลวดเหลี่ยม สภาวะปกติ

จากการจำลองในสภาวะปกติ จะได้ค่าแรงสนามแม่เหล็กที่เกิดตามแนวแกนตามรูปที่ 4.14 ซึ่งจะมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 10 N

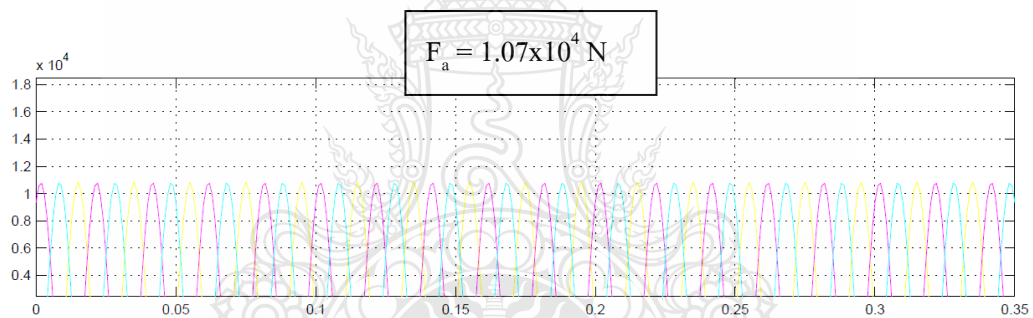


## 2) สภาวะลัดวงจร



รูปที่ 4.15 ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก ( $B_r$ ) ขดลวดเหลี่ยม สภาวะลัดวงจร

จากการจำลองในสภาวะลัดวงจร จะได้ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก ตามแนวรัศมี ( $B_r$ ) ตามรูปที่ 4.15 ซึ่งจะมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 0.038 T



รูปที่ 4.16 แรงสนามแม่เหล็ก ( $F_a$ ) ด้าน HV ขดลวดเหลี่ยม สภาวะลัดวงจร

จากการจำลองในสภาวะลัดวงจร จะได้ค่าแรงสนามแม่เหล็กที่เกิดตามแนวแกน ตามรูปที่ 4.16 ซึ่งจะมีค่าสูงสุดอยู่ที่  $1.07 \times 10^4 \text{ N}$



ตารางที่ 4.2 ผลการจำลองเปรียบเทียบขดลวดกลม และขดลวดเหลี่ยม MATLAB/simulink

ความหนาแน่น และ แรงสนามแม่เหล็ก	ขดลวดกลม		ขดลวดเหลี่ยม	
	สถานะปกติ	สถานะลัดวงจร	สถานะปกติ	สถานะลัดวงจร
ความหนาแน่นของ เส้นแรงแม่เหล็ก $B_u(T)$	0.028	0.9	0.03	0.98
ความหนาแน่นของ เส้นแรงแม่เหล็ก $B_r(T)$	$1.26 \times 10^{-3}$	0.04	$1.16 \times 10^{-3}$	0.038
แรงตามรัศมี $F_r(N)$	249	$2.58 \times 10^5$	265	$2.8 \times 10^5$
แรงตามแนวแกน $F_u(N)$	11	$1.15 \times 10^4$	10	$1.07 \times 10^4$

จากการจำลองโดยใช้ MATLAB/simulink จะสามารถสรุปผลได้ตามตารางที่ 4.1 ซึ่งจะเห็นว่า แรงสนามแม่เหล็กที่เกิดที่ขดลวดเหลี่ยม มีค่าสูงกว่า แรงที่เกิดที่ขดลวดกลม ทั้งนี้เนื่องมาจากการออกแบบ ในงานวิจัยนี้ ขนาดของหม้อแปลง ขดลวดเหลี่ยมมีขนาดใหญ่กว่าขดลวดกลม ทำให้พื้นที่ช่องว่างของขดลวดเหลี่ยม มีพื้นที่มากกว่า ส่งผลให้ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กมากกว่าขดลวดกลม และส่งผลถึงแรงสนามแม่เหล็กมีค่าสูงกว่าขดลวดกลม

### 4.3 การจำลองโดย FEMLAB

การจำลองโดย FEMLAB เป็นการจำลองเพื่อหาค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้น โดยสามารถที่จะแสดงเป็นรูปที่ชัดเจน ทำให้ทราบความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในแต่ละจุดภายในหม้อแปลง ในการจำลอง มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

(1) ทำการวาดรูปหม้อแปลง โดยใช้ SOLIDWORKS ในการจำลองจะเป็นรูปด้านข้างของหม้อแปลง

(2) นำรูปหม้อแปลง เข้ามาในโปรแกรม และทำการกำหนดของเขตในการจำลอง

(3) ทำการป้อนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่คำนวณได้ ตามบทที่ 3

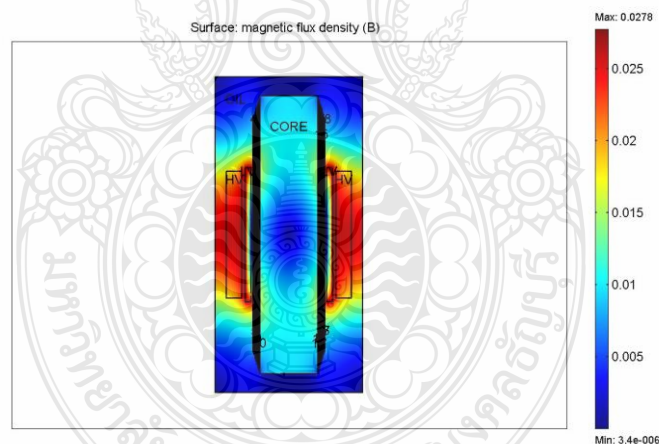
(4) ทำการจำลองผล

(5) พล็อตกราฟ ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้น

ในการจำลองจะทำการจำลองแยกเป็น ขดลวด 2 แบบ คือขดลวดแบบกลม และขดลวดแบบเหลี่ยม และ 2 กรณี คือ สภาวะปกติ และสภาวะลัดวงจร โดยผลการจำลองแสดงได้ดังนี้

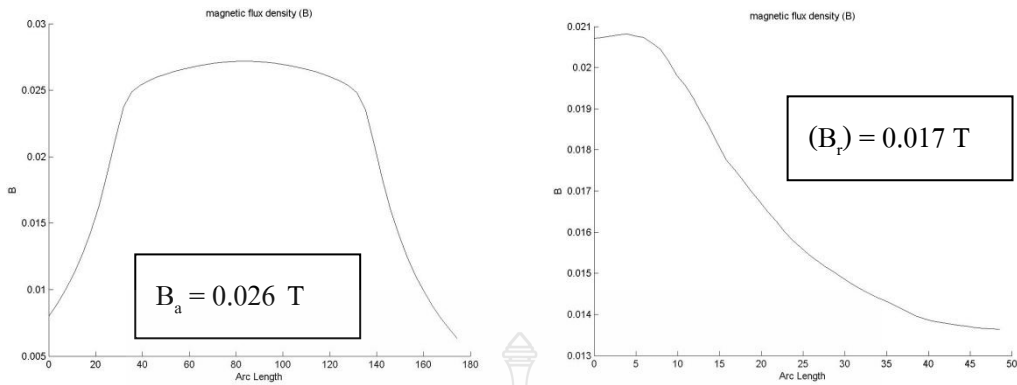
#### 4.3.1 ขดลวดกลม

##### 1. การจำลองในสภาวะปกติ



#### รูปที่ 4.17 หม้อแปลงขดลวดกลม สภาวะปกติ (FEM)

การจำลองขดลวดกลมในสภาวะปกติ ทำการป้อนกระแสเข้าไปในขดลวด ด้าน HV เท่ากับ  $268 \text{ A/m}^2$  และด้าน LV เท่ากับ  $59,886 \text{ A/m}^2$  เพื่อดูความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กแต่ละจุด ซึ่งจะนำมาคำนวณหาค่าแรงสนามแม่เหล็กต่อไป จะแสดงดังรูปที่ 4.17

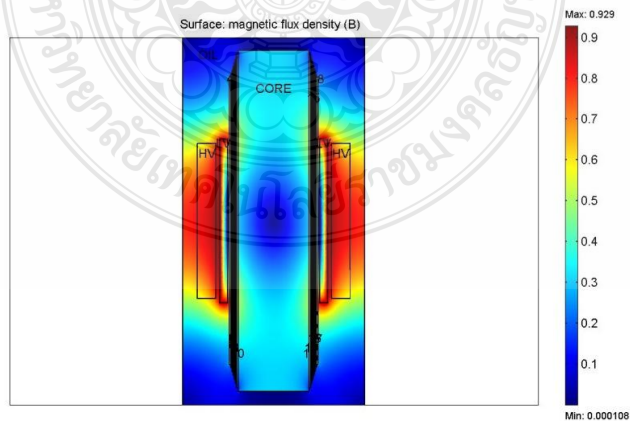


(ก) ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก ( $B_a$ ) (ข) ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก ( $B_r$ )

**รูปที่ 4.18** ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก หม้อแปลงชดลวดกลม สภาวะปกติ

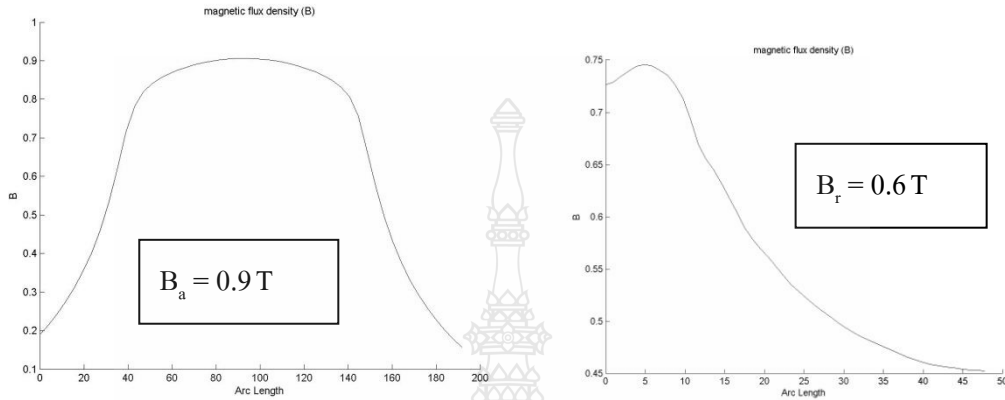
จากการจำลองตามรูปที่ 4.17 สามารถหาความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กได้ โดยจากรูปที่ 4.18 (ก) เป็นความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้น ในช่องว่างระหว่าง ขดลวดด้าน แรงสูงและขดลวดด้านแรงต่ำ โดยกราฟที่ได้ พรีออดจากด้านบนของขดลวด ถึงด้านล่างของขดลวด เพื่อ หาค่าเฉลี่ยของความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้น ในแนวแกนของขดลวด ในส่วนรูปที่ 4.18 (ข) เป็นความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้น ในช่วงระหว่างแกนเหล็ก ถึงผนังแท่ง โดย กราฟที่ได้ พรีออดจากด้านใน ออกไปด้านนอกถึงผนังแท่ง เพื่อดูค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในแนวรัศมีของขดลวด

2. การจำลองในสภาวะลัดวงจร



**รูปที่ 4.19** หม้อแปลงชดลวดกลม สภาวะลัดวงจร (FEM)

การจำลองขดลวดกลมในสภาวะลัดวงจร ทำการป้อนกระแสเข้าไปในขดลวด ด้าน HV เท่ากับ  $8,661 \text{ A/m}^2$  และด้าน LV เท่ากับ  $1,931,824 \text{ A/m}^2$  เพื่อดูความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก แต่ละจุด ซึ่งจะนำมาคำนวณหาค่าแรงสนามแม่เหล็กต่อไป จะแสดงดังรูปที่ 4.19



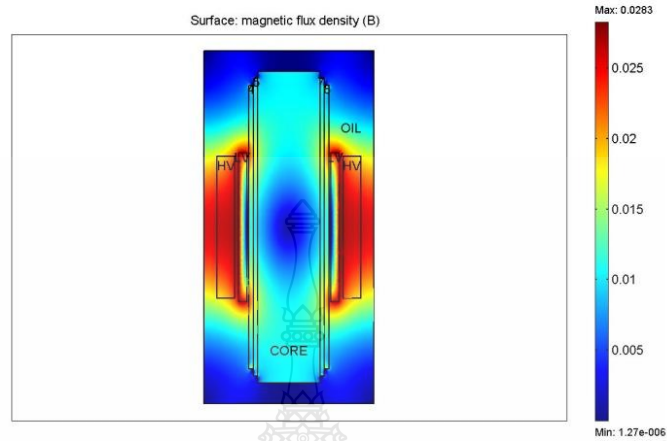
(ก) ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก ( $B_a$ )      (ข) ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก ( $B_r$ )

**รูปที่ 4.20** ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก หม้อแปลงขดลวดกลม สภาวะลัดวงจร

จากการจำลองตามรูปที่ 4.19 สามารถหาความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กได้ โดยจากรูปที่ 4.20 (ก) เป็นความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้น ในช่องว่างระหว่าง ขดลวดด้านแรงสูงและขดลวดด้านแรงต่ำ โดยกราฟที่ได้ พล็อตจากด้านบนของขดลวด ถึงด้านล่างของขดลวด เพื่อหาค่าเฉลี่ยของความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในแนวแกนของขดลวด ในส่วนรูปที่ 4.20 (ข) เป็นความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้น ในช่วงระหว่างแกนเหล็ก ถึงผนังแท่ง โดยกราฟที่ได้ พล็อตจากด้านใน ออกไปด้านนอกถึงผนังแท่ง เพื่อหาความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในแนวรัศมีของขดลวด

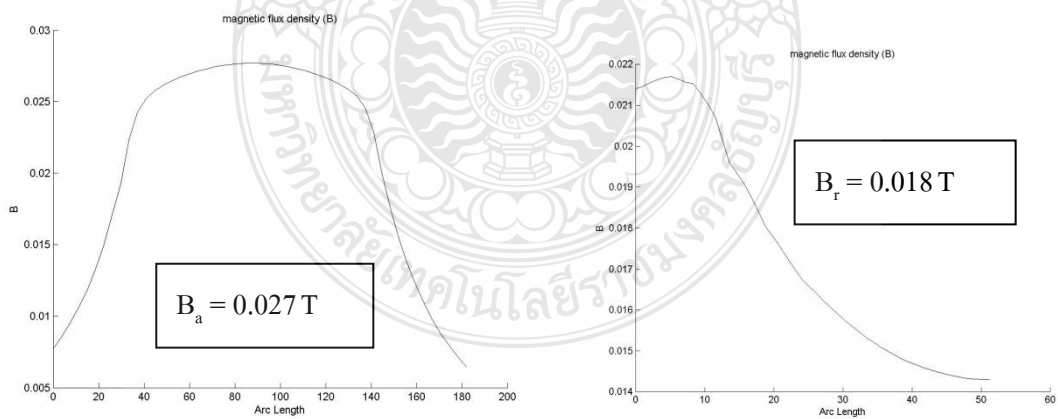
### 4.3.2 ขดลวดเหล็ยม

#### 1. การจำลองในสภาวะปกติ



รูปที่ 4.21 หม้อแปลงขดลวดเหล็ยม สภาวะปกติ (FEM)

การจำลองขดลวดกลมในสภาวะลัดวงจร ทำการป้อนกระแสเข้าไปในขดลวดด้าน HV เท่ากับ  $258 \text{ A/m}^2$  และด้าน LV เท่ากับ  $48,593 \text{ A/m}^2$  เพื่อดูความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก แต่ละจุด ซึ่งจะนำมาคำนวณหาค่าแรงสนามแม่เหล็กต่อไป จะแสดงดังรูปที่ 4.21

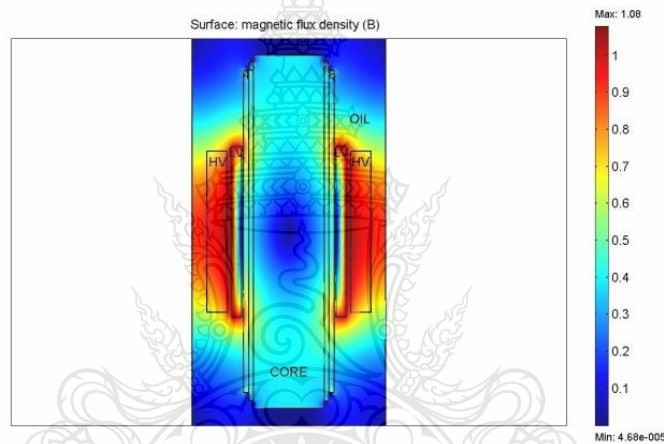


(ก) ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก ( $B_a$ )    (ข) ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก ( $B_r$ )

รูปที่ 4.22 ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก หม้อแปลงขดลวดเหล็ยม สภาวะปกติ

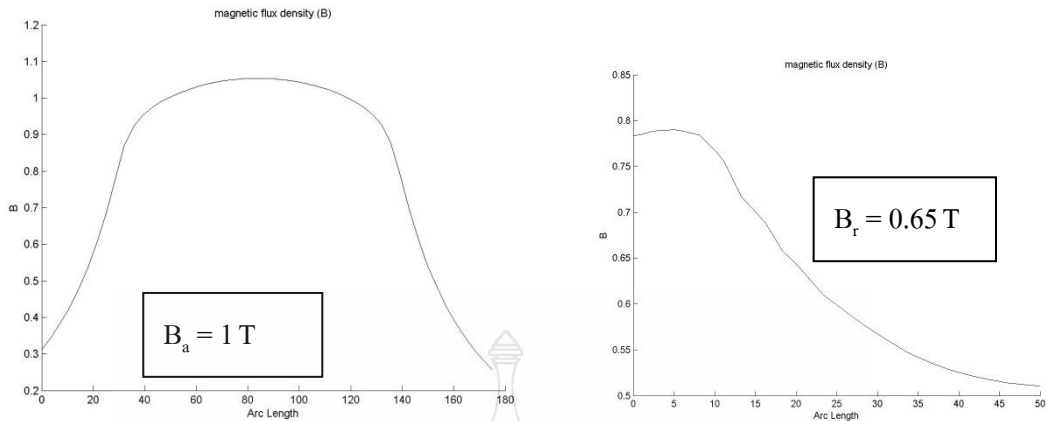
จากการจำลองตามรูปที่ 4.21 สามารถหาความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กได้ โดยจากรูปที่ 4.22 (ก) เป็นความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้น ในช่องว่างระหว่าง ขดลวดด้าน แรงสูงและขดลวดด้านแรงต่ำ โดยกราฟที่ได้ พล็อตจากด้านบนของขดลวด ถึงด้านล่างของขดลวด เพื่อ หาค่าเฉลี่ยของความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในแนวแกนของขดลวด ในส่วนรูปที่ 4.22 (ข) เป็นความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้น ในช่วงระหว่างแกนเหล็ก ถึงผนังแท่งค โดย กราฟที่ได้ พล็อตจากด้านใน ออกไปด้านนอกถึงผนังแท่งค เพื่อหาความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก ในแนวรัศมีของขดลวด

## 2. การจำลองในสภาวะลัดวงจร



รูปที่ 4.23 หม้อแปลงขดลวดเหลี่ยม สภาวะลัดวงจร (FEM)

การจำลองขดลวดกลมในสภาวะลัดวงจร ทำการป้อนกระแสเข้าไปในขดลวด ด้าน HV เท่ากับ  $8,326 \text{ A/m}^2$  และด้าน LV เท่ากับ  $1,567,537 \text{ A/m}^2$  เพื่อดูความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก แต่ละจุด ซึ่งจะนำมาคำนวณหาค่าแรงสนามแม่เหล็กต่อไป จะแสดงดังรูปที่ 4.23



(ก) ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก ( $B_a$ ) (ข) ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก ( $B_r$ )

รูปที่ 4.24 ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก หม้อแปลงขดลวดเหล็ยม สภาวะลัดวงจร

จากการจำลองตามรูปที่ 4.23 สามารถหาความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กได้ โดยจากรูปที่ 4.24 (ก) เป็นความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้น ในช่องว่างระหว่าง ขดลวดด้านแรงสูงและขดลวดด้านแรงต่ำ โดยกราฟที่ได้ พล็อตจากด้านบนของขดลวด ถึงด้านล่างของขดลวด เพื่อหาค่าเฉลี่ยของความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้น ในแนวแกนของขดลวด ในส่วนรูปที่ 4.24 (ข) เป็นความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้น ในช่วงระหว่างแกนเหล็ก ถึงผนังแท่งค โดยกราฟที่ได้ พล็อตจากด้านใน ออกไปด้านนอกถึงผนังแท่งค เพื่อหาความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก ในแนวรัศมีของขดลวด

จากการจำลอง นำค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก และแรงที่เกิดขึ้นทั้งในแนวรัศมีและแนวแกนมาเปรียบเทียบกันระหว่างขดลวดกลม และขดลวดเหล็ยม ตามตารางที่ 4.3 จะเห็นว่า แรงสนามแม่เหล็กที่เกิดที่ขดลวดเหล็ยมมีค่าสูงกว่า แรงที่เกิดที่ขดลวดกลม ทั้งนี้เนื่องมาจากการออกแบบ ในงานวิจัยนี้ ขนาดของขดลวดของหม้อแปลง ขดลวดเหล็ยมมีขนาดใหญ่กว่าขดลวดกลม ทำให้พื้นที่ช่องว่างของขดลวดเหล็ยม มีพื้นที่มากกว่า ทำให้ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กมากกว่า ขดลวดกลม และส่งผลถึงแรงสนามแม่เหล็กมีค่าสูงกว่าขดลวดกลม ซึ่งจะเป็นลักษณะเดียวกันกับที่จำลองใน MATLAB/simulink

**ตารางที่ 4.3** ผลการจำลองเปรียบเทียบขดลวดกลม และขดลวดเหลี่ยม FEMLAB

ความหนาแน่น และแรง สนามแม่เหล็ก	ขดลวดกลม		ขดลวดเหลี่ยม	
	สถานะปกติ	สถานะลัดวงจร	สถานะปกติ	สถานะลัดวงจร
ความหนาแน่นของเส้นแรง แม่เหล็ก $B_a(T)$	0.026	0.9	0.027	1
ความหนาแน่นของเส้นแรง แม่เหล็ก $B_r(T)$	0.017	0.6	0.018	0.65
แรงตามรัศมี $F_r(N)$	228	$25.44 \times 10^4$	238.43	$28.48 \times 10^4$
แรงตามแนวแกน $F_a(N)$	149	$16.96 \times 10^4$	158.95	$18.51 \times 10^4$

#### 4.4 การเปรียบเทียบการจำลอง MATLAB/simulink และ FEMLAB

นำผลจากการจำลอง ระหว่าง MATLAB/simulink และ FEMLAB มาเทียบกัน จะแสดงได้ตามตารางที่ 4.4 เป็นแบบขดลวดกลม และ ตารางที่ 4.5 เป็นแบบขดลวดเหลี่ยม โดยจะเห็นว่าค่า แรงสนามแม่เหล็กตามแนวรัศมี ระหว่าง MATLAB/simulink และ FEMLAB มีค่าใกล้เคียงกัน แต่แรงสนามแม่เหล็ก ในแนวแกน มีค่าแตกต่างกัน ทั้งนี้เกิดจากการคำนวณค่าที่ป้อนใน MATLAB/simulink ต้องมีการพิจารณาค่าแฟคเตอร์อื่นเข้ามาด้วย

**ตารางที่ 4.4** เปรียบเทียบผลระหว่าง MATLAB/simulink และ FEMLAB ขดลวดกลม

ความหนาแน่น และ แรงสนามแม่เหล็ก	คำนวณ		MATLAB		FEMLAB	
	สถานะ ปกติ	สถานะ ลัดวงจร	สถานะ ปกติ	สถานะ ลัดวงจร	สถานะ ปกติ	สถานะ ลัดวงจร
ความหนาแน่นของ เส้นแรงแม่เหล็ก $B_a(T)$	0.029	0.93	0.028	0.9	0.026	0.9
ความหนาแน่นของ เส้นแรงแม่เหล็ก $B_r(T)$	$0.319 \times 10^{-3}$	0.01	$1.26 \times 10^{-3}$	0.04	0.017	0.6
แรงตามรัศมี $F_r(N)$	253.6	$2.63 \times 10^5$	249	$2.58 \times 10^5$	228	$25.44 \times 10^4$
แรงตามแนวแกน $F_a(N)$	2.8	$0.3 \times 10^4$	11	$1.15 \times 10^4$	149	$16.96 \times 10^4$



ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบผลระหว่าง MATLAB/simulink และ FEMLAB ขดลวดเหล็ก

ความหนาแน่น และ แรงสนามแม่เหล็ก	คำนวณ		MATLAB		FEM	
	สถานะปกติ	สถานะ ลัดวงจร	สถานะ ปกติ	สถานะ ลัดวงจร	สถานะ ปกติ	สถานะ ลัดวงจร
ความหนาแน่นของ เส้นแรงแม่เหล็ก $B_a(T)$	0.028	0.933	0.03	0.98	0.027	1
ความหนาแน่นของ เส้นแรงแม่เหล็ก $B_r(T)$	$0.29 \times 10^{-3}$	0.0095	$1.16 \times 10^{-3}$	0.038	0.018	0.65
แรงตามรัศมี $F_r(N)$	255.4	$2.65 \times 10^5$	265	$28 \times 10^4$	238.43	$28.48 \times 10^4$
แรงตามแนวแกน $F_a(N)$	2.6	$0.27 \times 10^4$	10	$1.07 \times 10^4$	158.95	$18.51 \times 10^4$

#### 4.5 สรุปผลการวิจัย

จากการจำลอง ค่าแรงสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในขดลวดแบบเหลี่ยม มีค่าสูงกว่าขดลวดแบบกลมเนื่องจากการออกแบบหม้อแปลง ขดลวดเหลี่ยมมีขนาดใหญ่กว่าขดลวดกลม เมื่อจ่ายกระแสที่เท่ากันเข้าไป ทำให้ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้น ที่ขดลวดเหลี่ยมมีค่ามาก และส่งผลถึงแรงสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นมีค่าสูง สำหรับการเปรียบเทียบระหว่าง MATLAB/simulink และ FEMLAB จะเห็นว่าค่าแรงสนามแม่เหล็กตามแนวรัศมี ระหว่าง MATLAB/simulink และ FEMLAB มีค่าใกล้เคียงกัน แต่แรงสนามแม่เหล็ก ในแนวแกน มีค่าแตกต่างกัน ทั้งนี้เกิดจากการคำนวณค่าที่ป้อนใน MATLAB/simulink ต้องมีการพิจารณาค่าแฟคเตอร์อื่นเข้ามาร่วมด้วย

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย การอภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาทฤษฎีของหม้อแปลง ในสภาวะที่หม้อแปลงใช้งานปกติ และสภาวะลัดวงจร ซึ่งจะศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นกับขดลวดของหม้อแปลง โดยจะเป็นการหาแรงสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มากกระทำกับขดลวดและทำให้เกิดความเสียหาย ซึ่งในการจำลองจากบทที่ 4 จะใช้ 2 โปรแกรม มาทำการจำลองเพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้ว่าถูกต้องมากน้อยเพียงใด โดยโปรแกรมที่ใช้ประกอบด้วย MATLAB/simulink และ FEMLAB และในการจำลองทำการออกแบบหม้อแปลงให้เป็น 2 ลักษณะ คือหม้อแปลงแบบขดลวดกลม และหม้อแปลงแบบขดลวดเหลี่ยม เพื่อเปรียบเทียบค่าแรงสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น ซึ่งสามารถสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะได้ดังต่อไปนี้

#### 5.1 สรุปผลการจำลองโดยใช้ MATLAB/simulink

จากผลการจำลอง จะเห็นว่าเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลที่เกิดขึ้น ในสภาวะปกติมีค่าไม่สูง แต่เมื่อมีการเกิดลัดวงจรขึ้นจะมีค่าสูง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ประกอบไปด้วย ค่ากระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้น ค่าเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลตามช่องว่างต่างๆ ซึ่งเมื่อเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลมีค่าสูง ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กก็มากขึ้น และจะส่งผลให้แรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีค่าสูงตามไปด้วย และจากการเปรียบเทียบค่าแรงสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นระหว่างขดลวดกลม และขดลวดเหลี่ยม จะเป็นว่าค่าแรงสนามแม่เหล็กของขดลวดเหลี่ยมจะมากกว่า ขดลวดกลม ทั้งนี้เนื่องจากขนาดของหม้อแปลงที่ออกแบบในงานวิจัยนี้ ขดลวดแบบเหลี่ยมมีขนาดใหญ่กว่าขดลวดกลม ทำให้ช่องว่างต่างๆ ใหญ่ขึ้นตามไปด้วย เมื่อจ่ายกระแสไปเท่ากัน ก็จะทำให้ มีความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กมากกว่า

#### 5.2 สรุปผลการจำลองโดยใช้โปรแกรม FEMLAB

การจำลองโดยใช้โปรแกรม FEM จะทำให้เห็นภาพโครงสร้างของหม้อแปลงที่ชัดเจน และสามารถเห็นความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในแต่ละจุดของ ตัวหม้อแปลง โดยในการจำลองจะจำลอง 2 สภาวะ คือ สภาวะการใช้งานปกติ และลัดวงจร โดยในสภาวะการใช้งานปกติของหม้อแปลงนั้น จะเห็นว่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้น จะไม่สูง เมื่อเทียบกับ ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก เมื่อหม้อแปลงเกิดการลัดวงจรขึ้น ทั้งนี้จากการใช้โปรแกรม FEMLAB ทำให้ทราบถึงจุดวิกฤต ของขดลวดซึ่งจะอยู่บริเวณ กลางขดลวด ระหว่างขดลวดแรงสูง

และขดลวดแรงต่ำ ทั้งนี้เนื่องมาจากบริเวณดังกล่าวมีเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลที่เกิดขึ้นสูง จึงทำให้เกิดความหนาแน่นของฟลักซ์สูง ซึ่งเป็นจุดที่ต้องมีการระมัดระวังในการออกแบบหม้อแปลง และจากการจำลองเทียบกันระหว่างขดลวดแบบกลม และขดลวดแบบเหลี่ยม จะเป็นว่าได้ผลการจำลองคล้ายๆ กับใช้โปรแกรม MATLAB/simulink คือแรงสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นที่ขดลวดแบบเหลี่ยมจะมากกว่าขดลวดแบบกลม ทั้งนี้เพราะขนาดของขดลวดเหลี่ยมมีขนาดใหญ่กว่า ขดลวดกลม ทำให้ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่ขดลวดเหลี่ยมมากกว่าขดลวดกลม

### 5.3 สรุปผลการเปรียบเทียบการจำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB/simulink และ FEMLAB

จากผลการทดลองในบทที่ 4 จะเห็นว่าค่า ค่าแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ในส่วนของแรงสนามแม่เหล็กที่เกิดทางด้านรัศมีของขดลวด มีค่าใกล้เคียงกัน แต่ในส่วนของแรงสนามแม่เหล็กตามแนวแกนมีค่าที่แตกต่างกันอยู่มากพอสมควร ทั้งนี้ เกิดจากการ คำนวณค่าความต้านทานที่เป็นส่วนของความต้านทานในแนวรัศมีของขดลวด ที่นำมาป้อนใน โปรแกรม MATLAB/simulink ต้องคิดค่าความต้านทานในส่วนอื่นๆ เพิ่มเข้าไปด้วย เนื่องจากการจำลองในบทที่ 4 นั้น จะทำการคำนวณโดยนำพื้นที่ ของขดลวดมาคำนวณเพียงอย่างเดียว ทำให้เกิดข้อผิดพลาดขึ้น

### 5.4 ข้อเสนอแนะ

ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้เป็นการสร้างแบบจำลองของหม้อแปลง ใน 2 โปรแกรม คือ MATLAB/simulink และ FEMLAB เพื่อหาแรงสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้น โดยในการใช้ MATLAB/simulink จะสร้างเป็นวงจรแม่เหล็ก เพื่อใช้ในการจำลอง โดยต้องมีการคำนวณค่าความต้านทานแม่เหล็ก และแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่ป้อนค่าในโปรแกรม ทั้งนี้ทำให้เกิดข้อผิดพลาดในการนำค่าพารามิเตอร์ต่างๆ มาคำนวณ โดยเฉพาะค่าความต้านทานที่เป็นตัวแทนในแนวรัศมีของขดลวด ซึ่งทำให้เกิดค่าที่ผิดพลาดขึ้นได้ สำหรับการ ใช้ FEMLAB ซึ่งแสดงให้เห็นเป็นรูปที่ชัดเจน แต่ยังมีข้อผิดพลาดในการอ่านค่าที่ได้ในแต่ละจุดอยู่ ทั้งนี้ต้องหาวิธีที่ลดข้อผิดพลาดเหล่านี้ต่อไป

## รายการอ้างอิง

- [1] A.C. de Azevedo, A.C. Delaiba, J.C. de Oliveira, “Transformer mechanical stress caused by external short-circuit: a time domain approach”, *International conference on power systems transients*, June 2007.
- [2] Ana C, de Azevedo, Ivan Rezende, Antonio C. Delaiba, “Investigation of Transformer Electromagnetic Forces Caused by External Faults Using FEM”, *IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition Latin America*, Venezuela, 2006.
- [3] Hyun-Mo Ahn, Ji-Yeon Lee, Joong-Kyoung Kim, Yeon-Ho Oh, “Finite-Element Analysis of Short-Circuit Electromagnetic Force in Power Transformer”, *IEEE Transactions on industry applications*, Vol. 47, No. 3, MAY/JUNE 2011.
- [4] Geno P. PETER, “Calculations for short circuit withstand capability of a distribution transformer”, *International Journal of engineering Tome IX*, 2011.
- [5] นายคูสิต อุทิศสุนทร. (2549). การสร้างแบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังขณะเกิดการลัดวงจรที่ขดลวด. (วิทยานิพนธ์หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ).
- [6] Hongkui Li, “Analysis of Three-Phase Power Transformer Short Circuit Magnetic Field and Forces”, *International Conference on Electrical and Control Engineering*, 2010
- [7] นภัทร วัจนเทพินทร์ และปกรณัม สมบูรณ์กิจ. หม้อแปลงไฟฟ้า. สืบค้นจาก <http://eng.rmutsb.ac.th/events/admin2/data/2012/Fundamental>
- [8] ชวรัตน์ เก่งธรรมกิจ. (2546). การออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายให้มีราคาที่เหมาะสมโดยจีเนติกอัลกอริทึม. (วิทยานิพนธ์หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง).
- [9] นุชทิศา สุทธิสินทอง. (2550). การทำนายค่าความสูญเสียในหม้อแปลงจำหน่ายโดยวิธีโครงข่ายประสาทเทียม. (วิทยานิพนธ์หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง).
- [10] การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. (2552). **SPECIFICATION THREE-PHASE TRANSFORMERS FOR 22 kV and 33 kV 50 Hz DISTRIBUTION SYSTEMS.**

## รายการอ้างอิง (ต่อ)

- [11] S.V.Kulkarni and S.A.Khaparde. (2005). **Transformer Engineering Design and Practice**.  
New York, U.S.A. : Marcel Dekker, Inc.
- [12] การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. **Transmission System Maintenance Division**. สืบค้นจาก  
<http://qcc.egat.co.th/EGAT48/Articles48/10.pdf>
- [13] Bharat Heavy Electricals Limited. (2003). **Transformers** (Second edition). New Delhi, India  
: Tata McGraw-Hill.
- [14] **ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์**. สืบค้นจาก [http://archive.lib.cmu.ac.th/full/T/2551/arc1051pp\\_ch3.pdf](http://archive.lib.cmu.ac.th/full/T/2551/arc1051pp_ch3.pdf)
- [15] มนต์ศักดิ์ พิมสาร. **ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์**. สืบค้นจาก <http://www.kmitl.ac.th/~kpmonsak/FEM/IntroductionFEM.pdf>
- [16] **ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์**. สืบค้นจาก <http://sisley.en.kku.ac.th/project/2004/COE2004-22/Report/Term2%20Final%20Report/report.doc>
- [17] A. D. Theocharis, A. Tzinevrakis, V. Charalampakos, J. Miliias-Argitis, and Th. Zacharias, “Transformer Modeling Based on Incremental Reluctances”, *International Conference on Power System Technology*, 2010.
- [18] Arun Balakrishnan, William T. Joines and Thomas G. Wilson, “AIR-GAP RELUCTANCE AND INDUCTANCE CALCULATIONS FOR MAGNETIC CIRCUITS USING A SCHWARZ-CHRISTOFFEL TRANSFORMATION”, *IEEE*, pp. 1050-1056, 1995.

ภาคผนวก



ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่



# การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงาน แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 9

9<sup>th</sup> Conference on Energy Network of Thailand



## พลังงานสีเขียวเพื่อโลกที่สดใส Green Energy Brightens Our World

ณ ชลพฤกษ์ รีสอร์ท อำเภอบ้านนา จังหวัดนครนายก  
8-10 พฤษภาคม 2556

จัดการประชุมโดย  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร





## ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ

### มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ศ.ดร. ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์

ผศ.ดร. กอดขวัญ นามสงวน

ผศ.ดร. ศิวะ อัจฉริยวิริยะ

ดร. สถาพร ทองวิค

ดร. สโรชา เจริญวัย

ดร. สรพงษ์ ภาวสุปรีดิ์

### มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ศ.ดร. สมชาติ โสภณรณฤทธิ

รศ.ดร. สักกมน เทพหัสติน ณ อยุธยา

### มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

ผศ. วิศิษฐ์ สีลาผาดิกุล

### มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ดร. ชโลธร ธรรมแท้

ดร. กิรติ สุลักษณ์

ดร. อีระชาติ พรทิบูลย์

### มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ดร. เพ็ญญารัตน์ จีนดา

ดร. อำนาจ บุญลอย

ดร. ฉัตรชัย นิยมผล

### มหาวิทยาลัยนเรศวร

ผศ.ดร. สมชาย มณีวรรณ

ดร. ยงยุทธ ขนบดีเลิศมรุ่ง

ดร. สิริมาศ เสงวีรัมย์

ดร. สันต์ จันทร์สมศักดิ์

ดร. สุพรรณนิภา วัฒนา

ดร. ศรยุทธ วิทยุฒิ

### มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

รศ.ดร. สมิทธิ์ เอี่ยมสอาด

รศ.ดร. ธวานิตย์ เมธียานนท์

ผศ.ดร. นภาพ แยมไตรพัฒน์

ผศ.ดร. พรชัย นิเวศน์รังสรรค์

ผศ.ดร. วิชาญ คงเกียรติไพบูลย์

ผศ.ดร. สมชาย ศรีพัฒนพิพัฒน์

ผศ.ดร. ศุภเกียรติ ศรีพนมธนากร

ผศ.ดร. ขวัญจิต วงษ์ขารี

ผศ.ดร. สลิลทิพย์ สินธุสนธิชาติ

ผศ.ดร. ประสาน สติธย์เรืองศักดิ์

ดร. วาโย ช่างเจริญ

ดร. สมศักดิ์ เพ็ชรกุล

ดร. วิไลลักษณ์ สระมูล

ดร. อู๊ดทะพล หุยนันท์

อ. กิตติศักดิ์ ยงศิริ

อ. ขวัญชัย หนาแน่น

อ. ปุณยภัทร ภูมิภาค

อ. ไมตรี กระมุทพิจิตร

### มหาวิทยาลัยบูรพา

ดร. มณฑนา รังสีโยภาส

ดร. วิจิรินทร์ ตั้งบัง

### มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

ผศ.ดร.เจริญพร เลิศสถิตอนกร

ผศ.ดร. ณัฐพล ภูมิสะอาด

ดร. อีร์พัฒน์ ชมภูคำ

ดร. โสภา สุวแพทย์

ดร. นิดา ชัยมูล

ดร. มณีนรัตน์ องค์กรณดี

### มหาวิทยาลัยมหิดล

ดร. รุ่ง กิตติพิชัย

ดร. วรศิษฐ์ ตระทีนวินท์

รศ. ศุภชัย นาทะพันธ์

### มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ดร. กฤษณ์ชนม์ ภูมิภักดีพิชญ์

ดร. สมชัย ทิรัญวโรดม

ดร. ขวัญชัย จ้อยเจริญ

ดร. วันชัย ทรัพย์สิงห์

ดร. บุณย์ฤทธิ์ ประสาทแก้ว

ดร. วารุณี อริยะวิริยะ

ดร. ฉัตรชัย ศุภพิทักษ์สกุลนันท์

ดร. บุญยง ปลั่งกลาง

ดร. อำนวย เรืองวารี

### มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา

ดร. โยธิน อึ้งกุล

ดร. ยิงรักษ์ อรรถเวชกุล

### มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์

รศ.ดร. วีระระ เถ้มชาติ

มหาวิทยาลัยรามคำแหง  
ผศ.ดร. สมพร ธนควาณิชย์

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ  
ดร. กิตติ สถาพรประสาธน์

มหาวิทยาลัยศรีปทุม  
ดร. เทพฤทธิ์ ทองชูบ  
ดร. กิรติ ชยะกุลศิริ  
ดร. วิชชากร เสงศรีธวัช  
ดร. ชลธิศ เอี่ยมวรวิมลกุล  
ดร. วริศรา เลิศไพฑูรย์พันธ์  
ดร. นิमित บุญภิรมย์  
อ. อภิรักษ์ สวัสดิ์กิจ  
อ. เมธิญ จันทร์สา

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์  
ผศ.ดร. ชยุต นันทสุลิต

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี  
ผศ.ดร. อำไพศักดิ์ ทับุญญา

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
รศ.ดร. พงษ์เจต พรหมวงศ์  
รศ.ดร. ชินรัชช เชียรพงษ์  
รศ.ดร. จารูวัตร เจริญสุข  
รศ.ดร. จำลอง ปราบแก้ว  
ผศ.ดร. มนต์ศักดิ์ พิมสาร  
ผศ.ดร. ณัฐวุฒิ เดิโปวา  
ดร. ดอน อิศรากร  
ดร. วิชิตา เจษฎารัตินชัย  
ดร. กุลนันทน์ เกียรติกิตติพงษ์

### คณะกรรมการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่  
มหาวิทยาลัยทักษิณ  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต  
มหาวิทยาลัยนเรศวร  
มหาวิทยาลัยบูรพา  
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม  
มหาวิทยาลัยมหิดล  
มหาวิทยาลัยแม่โจ้  
มหาวิทยาลัยรังสิต  
มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช  
มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง  
มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย  
มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์  
มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี  
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ  
มหาวิทยาลัยศรีปทุม  
มหาวิทยาลัยศิลปากร



มหาวิทยาลัยสยาม  
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี  
สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



รหัสอ้างอิงบทความ	ชื่อบทความ	หน้า
EC035	นวัตกรรมระบบควบคุมทางด้านอุณหพลศาสตร์สำหรับการประหยัดพลังงานของเครื่องปรับอากาศ	525
EC036	Determination of the Isostatic Heat and Entropy of Two Different Sizes Shrimp by Sorption Isotherms	531
EC037	โครงสร้างสถานีอัดประจุแบตเตอรี่ในรถไฟฟ้าที่เหมาะสมในประเทศไทย	537
EC038	การวิเคราะห์ข้อมูลโดยวิธีใช้ฟังก์ชันทางสถิติ เพื่อช่วยบริหารจัดการความต้องการใช้พลังงาน	542
EC039	นวัตกรรมสนามแม่เหล็กในพลศาสตร์ของเหลวสำหรับการประหยัดพลังงานของเครื่องทำน้ำแข็งกริตหิมะ	547
EC040	แนวทางการอบแห้งข้าวเปลือกขึ้นด้วยรังสีอินฟราเรด	552
EC041	Using Artificial Neural Network and Thin-Layer Drying Models for Predicting of Drying Kinetics of Skim Crumb Rubber	558
EC042	เครื่องปรับอากาศเธอร์โมอิเล็กทริกขนาดเล็กลำดับเคลื่อนโดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์	564
EC043	การประมาณค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสโดยใช้การคำนวณค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าที่ได้จากกระแสไฟฟ้าที่วัด และที่แผ่นปายมอเตอร์	570
EC044	การศึกษาความเป็นไปได้ในการนำความร้อนเหลือทิ้งจากกระบวนการเคลือบผิวกระป๋องมาใช้ในการอบฝากระป๋องด้วยเทคโนโลยีการแลกเปลี่ยนความร้อน	575
EC045	คุณลักษณะทางความร้อนของทอสีเหลี่ยมจัตุรัสโดยใช้แผ่นติดครีบริปูทรง W	585
EC046	การศึกษาลักษณะสมบัติการเกิดความร้อนและผลกระทบที่มีต่อสายเคเบิลได้นำระบบ 115 กิโลโวลต์	592
EC047	การปรับปรุงอัตราผลผลิตด้านพลังงานและเวลาของการผลิตน้ำแข็งหลอด	600
EC048	การวิเคราะห์แรงแม่เหล็กไฟฟ้าในหม้อแปลงไฟฟ้าในระบบจำหน่ายจากการเกิดลัดวงจรโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	606
EC049	การพัฒนาเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบใช้การอัดประจุสองขั้น	612
EC050	การหาค่าองค์ประกอบทางวงจรไฟฟ้าของกับดักแรงดันเกินฟ้าผ่า	617
EC051	ขดลวดโรกอฟสกีกับวงจรอินทิเกรตแบบใช้งานเพื่อวัดกระแสอิมพัลส์	623
EC053	อุปกรณ์แลกเปลี่ยนแรงดัน : เครื่องมือสำหรับการนำพลังงานกลับคืนมาใช้ใหม่	628
EC054	การศึกษาเชิงตัวเลขแบบสามมิติสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนความดันตกคร่อมและการถ่ายเทความร้อนในทอสีเหลี่ยมจัตุรัสที่มีการติดครีบริปูตัวแบบแยกตัว	632
EC055	อิทธิพลของการจัดวางแผ่นกันออริฟิรูปร่างตัวต่อโครงสร้างการไหลและการถ่ายเทความร้อนแบบราบเรียบในทอสีจัตุรัส	640
EC056	การศึกษาพฤติกรรมของการไหลราบเรียบและการถ่ายเทความร้อนในทอสีจัตุรัสที่มีการติดตั้งครีบริปูวางเอียงติดตั้งเสียบทแยงกึ่งกลางทอ	648
EC057	การออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดไอโซน : ศึกษาเปรียบเทียบวงจรควบคุมแบบ PWM, PS-PWM และ PDM ในวงจรอินเวอร์เตอร์ฟูลบริดจ์แรงดันสูงความถี่สูงแบบ LCC เรโซแนนซ์สำหรับเครื่องกำเนิดไอโซน	656
EC058	การศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการชาร์จแบตเตอรี่ระหว่าง PFM และ PWM ฮาร์ฟบริดจ์ดิซ/ดิซีเรโซแนนท์คอนเวอร์เตอร์	664
EC059	การจำลองการทำงานเพื่อการศึกษาสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสต่อแบบสตาร์ในสภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล	672
EC060	การศึกษาเชิงเปรียบเทียบรูปแบบของแผ่นอิเล็กโทรดที่แตกต่างกันสำหรับเครื่องผลิตก๊าซไฮโดรเจน	680
EC061	การศึกษาปล่องผนังโซลาร์เซลล์ระบายนภาอากาศแบบธรรมชาติที่ติดตั้งกับบ้านจำลอง	686
EC062	การศึกษาหลังคาโซลาร์เซลล์กึ่งนึ่งระบายนภาอากาศร่วมกับพัดลมกระแสตรง	690
EC063	การศึกษาทดสอบปล่องกระแสจกระบายนภาอากาศพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งที่ตึกชั้นล่าง	694



รหัสบทความ:  
EC048

การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 9  
8-10 พฤษภาคม 2556 จังหวัดนครนายก

การวิเคราะห์แรงแม่เหล็กไฟฟ้า ในหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย จากการเกิดลัดวงจร  
โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์  
Analysis of electromagnetic forces in distribution transformer short circuit using Finite  
Element Method

นางวงศ์ นุตาศี, กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์ และนิติพงษ์ ปานกลาง

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
ถนนรังสิต - นครนายก ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรีจังหวัดปทุมธานี 12110  
โทร 0-2549-3571 โทรสาร 0-2549-3422  
E-mail: nawa23@hotmail.com

**บทคัดย่อ**

บทความนี้ นำเสนอการสร้างแบบจำลองหม้อไฟฟ้าแปลงระบบจำหน่าย เพื่อศึกษาแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้น ขณะเกิดการลัดวงจร โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ในการจำลองจะศึกษาแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในขณะที่หม้อแปลงทำงานในสภาวะปกติ และขณะที่เกิดการลัดวงจรแบบสมมาตร โดยจำลองลักษณะความสูงของขดลวด ระหว่างขดลวด ด้านแรงดันสูงมีความสูงแตกต่างกับด้านแรงดันต่ำ เพื่อดูความหนาแน่นของฟลักซ์รั่วไหล และนำไปคำนวณหาแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ซึ่งผลที่ได้จะเห็นว่าเมื่อความสูงของขดลวดไม่เท่ากัน จะส่งผลถึงแรงแม่เหล็กไฟฟ้าทำให้มีค่าสูง และทำให้หม้อแปลงไฟฟ้าเกิดความเสียหาย

**คำหลัก:** ความหนาแน่นของฟลักซ์รั่วไหล, ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์, แรงสนามแม่เหล็กไฟฟ้า, หม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย

**Abstract**

This paper presented the study of electromagnetic forces in distribution transformer using Finite Element Method. This simulation is used to evaluate the electromagnetic force effects in transformer between under normal operation condition and short circuit conditions. We generated various sizes of high voltage and low voltage windings to determine a leakage flux density, and an electromagnetic force. The result suggests that when a height of coils, high voltage or low voltage windings, is not equal, resulting in producing high electromagnetic forces in the simulated transformer condition reading to its damages.

**Keywords:** distribution transformer, Finite Element Method, electromagnetic forces, leakage flux density

**1. บทนำ**

หม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย เป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญมากในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า เมื่อเกิดปัญหากับหม้อแปลงขึ้นจะทำให้ไฟฟ้าดับเป็นบริเวณกว้าง โดยอายุการใช้งานของหม้อแปลง จะขึ้นอยู่กับหลาย

ปัจจัย โดยปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญมาก คือการเกิดลัดวงจรจากภายนอก ทำให้มีกระแสสูงไหลเข้าไปที่ขดลวด และทำให้เกิดแรงสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่สูง แรงสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นนี้เอง ที่ส่งผลให้ขดลวดเกิดความเสียหายขึ้น ทำให้ต้องมีการศึกษา และจำลองสภาวะที่



เกิดขึ้น เพื่อนำไปสู่การออกแบบ และเลือกใช้ฉนวนให้เหมาะสมในแต่ละจุดของหม้อแปลง การจำลองในบทความนี้ ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อวิเคราะห์ความหนาแน่นของฟลักซ์รั่วไหล โดยเลือกใช้โมเดลของหม้อแปลงขนาด 100 kVA 22 KV 400/230 V ซึ่งเป็นหม้อแปลงขนาดที่มีการใช้งานจำนวนมากในระบบของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

## 2. ทฤษฎีและหลักการพื้นฐาน

### 2.1 อิมพีแดนซ์หม้อแปลงไฟฟ้า

เปอร์เซ็นต์อิมพีแดนซ์ ของหม้อแปลงไฟฟ้า เป็นตัวกำหนดค่ากระแสลัดวงจร ค่าแรงดันตก กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ความนำเชื่อถือของระบบไฟฟ้า และอื่นๆ โดยค่าเปอร์เซ็นต์อิมพีแดนซ์ที่เกิดขึ้นจะเป็นผลรวมของค่า เปอร์เซนต์รีซิสแตนซ์ และเปอร์เซ็นต์รีแอกแตนซ์ ตามสมการดังนี้ [1]

$$\%IR = \frac{\text{load\_losses}[kW]}{\text{rated\_power}[kVA]} \times 100 \quad (1)$$

$$\%IX = \frac{\text{reactive\_losses}[kVAr]}{\text{rated\_power}[kVA]} \times 100 \quad (2)$$

$$\%IZ = \sqrt{(\%IR)^2 + (\%IX)^2} \quad (3)$$

เมื่อ  $\%IZ$  คือ เปอร์เซนต์อิมพีแดนซ์  $\%IR$  คือ เปอร์เซนต์รีซิสแตนซ์ และ  $\%IX$  คือ เปอร์เซนต์รีแอกแตนซ์

### 2.2 กระแสลัดวงจร

การศึกษานี้ เป็นการจำลองการเกิดลัดวงจรแบบสมมาตร ซึ่งสามารถคำนวณหากระแสใช้งานสูงสุด และกระแสลัดวงจรของหม้อแปลง ตามสมการที่ [4] และ [5]

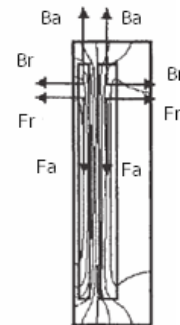
$$I_{FL}(Tr) = \frac{kVA \times 1000}{\sqrt{3}V_L} \quad (4)$$

$$I_{SC}(Tr) = \frac{I_{FL}(Tr) \times 100\%}{\%IZ} \times \frac{1}{1000} \quad (5)$$

เมื่อ  $I_{FL}(Tr)$  คือ กระแสโหลดเต็มพิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้า (kA)  $I_{SC}(Tr)$  คือ กระแสลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้า (kA)  $kVA$  คือ ขนาดพิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้า (kVA) และ  $V_L$  คือ แรงดันไฟฟ้าระหว่างสาย (V)

### 2.3 ฟลักซ์รั่วไหล

หม้อแปลงไฟฟ้า ที่จุดศูนย์กลางขดลวด องค์กรประกอบตามแนวแกนของ ความหนาแน่นของฟลักซ์รั่วไหล (Ba) จะปฏิสัมพันธ์กับ กระแสในขดลวด ที่ทำให้เกิดแรงตามรัศมี (Fr) ซึ่งจะเกิดแรงผลักระหว่างขดลวดด้านในและด้านนอก องค์กรประกอบรัศมีของฟลักซ์รั่วไหล (Br) จะปฏิสัมพันธ์กับกระแสในขดลวด ทำให้เกิดแรงตามแนวแกน (Fa) ซึ่งทำให้เกิดการอัด หรือการขยายของขดลวด ตามแนวแกน แสดงทิศทางตามรูปที่ 1 [1]



รูปที่ 1 ฟลักซ์ที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้า

### 2.4 แรงสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายในหม้อแปลง

แรงสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เกิดขึ้นจากความสัมพันธ์ของ กระแสลัดวงจร และฟลักซ์รั่วไหล ในขดลวดหม้อแปลง เมื่อเกิดการลัดวงจร กระแสในขดลวดจะเพิ่มขึ้นสูงมาก ส่งผลทำให้แรงสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เพิ่มขึ้นสูงมากเช่นกัน โดยแรงสนามไฟฟ้าหาได้จากสมการ ดังนี้ [3]

$$\vec{F} = L(\vec{I} \times \vec{B}) \quad (6)$$

เมื่อ  $\vec{F}$  คือ เวกเตอร์ ความหนาแน่นของแรง  $\vec{I}$  คือ เวกเตอร์ ความหนาแน่นของกระแส  $\vec{B}$  คือ เวกเตอร์ ความหนาแน่นของฟลักซ์รั่วไหล และ  $L$  คือ ความยาวของขดลวด

#### 2.4.1 แรงตามรัศมีในศูนย์กลางขดลวด

แรงตามรัศมีภายในหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีศูนย์กลางที่ขดลวดตามรูปที่ 1 แสดงผลลัพธ์ ของแรงที่ด้านในและด้านนอกของขดลวด และยังแสดงให้เห็นความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กตามแนวแกน (Ba) เส้นแรงแม่เหล็กนี้ เป็น





ค่าคงตลอดพื้นที่ระหว่างขดลวด สมการความหนาแน่นของฟลักซ์รั่วไหล ( $B_a$ ) แสดงได้ดังสมการที่ (6) [4]

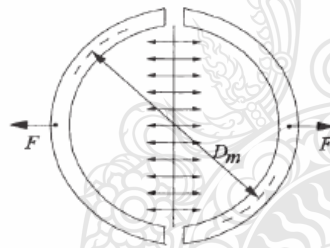
$$B_a = \frac{1}{2} \frac{\mu_0 n i}{H} [T] \quad (6)$$

เมื่อ  $ni$  คือ แอมแปร์-เทริน และ  $B_a$  คือ ความหนาแน่นของฟลักซ์รั่วไหล

ความหนาแน่นของฟลักซ์จะสัมพันธ์กับกระแส ที่ทำให้เกิดแรงตามรัศมี ( $F_r$ ) จะแสดงได้ดังสมการที่ (7)

$$F_r = \frac{1}{2} \mu_0 \frac{(ni)^2}{h} \pi D_m [N] \quad (7)$$

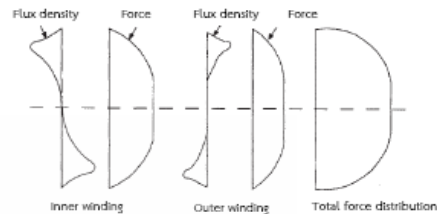
เมื่อ  $F_r$  คือ แรงตามรัศมี  $i$  คือ กระแส  $n$  คือ จำนวนรอบของขดลวด  $h$  คือ ความสูงของขดลวด และ  $D_m$  คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของขดลวด



รูปที่ 2 แรงสนามแม่เหล็ก ทำให้เกิดความเครียดที่วงรอบของขดลวด

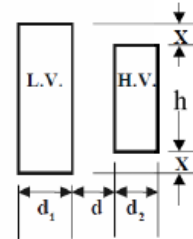
#### 2.4.2 แรงตามแนวแกน ในศูนย์กลางขดลวด

การคำนวณเพื่อวิเคราะห์แรงตามแนวแกน จะต้องรู้รัศมีของฟลักซ์รั่วไหล และความสูงของขดลวดระหว่างด้านแรงสูงและแรงต่ำที่แตกต่างกัน สำหรับฟลักซ์รั่วไหล ที่เกิดขึ้นที่ปลายขดลวดมีการคดเคี้ยวดังแสดงในรูป 1 ซึ่งจะส่งผลให้เกิดแรงสนามแม่เหล็กสูงบริเวณปลายขดลวดทั้งด้านบนและด้านล่าง ดังแสดงดังรูปที่ 3 [3]



รูปที่ 3 แรงตามแนวแกน

รูปที่ 4 แสดงลักษณะ ขดลวดอสมมาตรโดยมีความสูงของขดลวดด้านนอก ที่สั้นกว่าของด้านใน ขดลวดนี้จะทำให้เกิดความไม่สมดุลของความหนาแน่นของฟลักซ์ ซึ่งจะมีรัศมีขนาดใหญ่



รูปที่ 4 ลักษณะขดลวดไม่สมมาตร

ดังนั้นในการคำนวณแรงตามแนวแกน จำเป็นที่จะต้องรู้ความยาวของรัศมีของฟลักซ์ ( $h_{eff}$ ) ความหนาแน่นเฉลี่ยรัศมีของฟลักซ์ ( $B_r$ ) และค่าเฉลี่ยแอมแปร์-เทริน ซึ่งจะเท่ากับ  $(1/2)a(ni)$  ซึ่ง  $a$  เป็นความยาวของส่วนที่ไม่สมดุลแสดงเป็นเศษของความยาวรวมของขดลวด ส่วนนี้ถือว่าเป็นส่วนของการลัดวงจรที่ขดลวด [2] ความหนาแน่นเฉลี่ยของรัศมีฟลักซ์ จะหาได้สมการที่ (8) [4]

$$B_r = \frac{\mu_0}{2} \frac{a(ni)}{2h_{eff}} [T] \quad (8)$$

เพื่อตรวจสอบแรงตามแนวแกน ( $F_r$ ) สำหรับหม้อแปลงที่มีความไม่สมดุลที่ปลายด้านหนึ่งของขดลวดจะหาแรงสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ได้จากสมการที่ (9)

$$F_a = \frac{\mu_0}{2} a(ni)^2 \frac{\pi D_m}{h_{eff}} [N] \quad (9)$$



**รหัสบทความ:**  
**EC048**

การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 9  
8-10 พฤษภาคม 2556 จังหวัดนครนายก

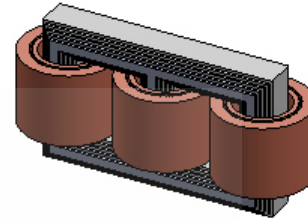
เมื่อ  $F_a$  คือ แรงตามแนวแกน  $i$  คือ กระแส  $n$  คือ จำนวนรอบของขดลวด  $h_{eff}$  คือ รัศมีของฟลักซ์  $(d+d_1+d_2)$   $D_m$  คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของขดลวด และ  $a$  คือ ระยะของ HV winding ที่สั้นกว่า LV winding (2x)

**3. การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า**

การออกแบบหม้อแปลง จะใช้โปรแกรมคำนวณเพื่อออกแบบ โดยให้ลักษณะคอร์ฟอร์มเป็นแบบทรงกลม ซึ่งเป็นที่นิยมใช้ในการผลิตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย และใช้ข้อกำหนดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เป็นค่าอ้างอิง ในการออกแบบ ในตารางที่ 1 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ออกแบบ

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการออกแบบ

ขนาดหม้อแปลง	100 kVA	
Flux density	1.654 T	
Impedance voltage	3.74%	
Core loss	245 W	
Load loss	1548 W	
Frequency	50 Hz	
	coil	
	Outer winding (HV)	Inner winding (LV)
Voltage	22000 V	400 V
Current density	2.577 A/mm <sup>2</sup>	2.583 A/mm <sup>2</sup>
Winding turns	3401 turn	34 turn
External winding diameter	371 mm	274 mm
Internal winding diameter	292 mm	241 mm
Length of coil	213 mm	213 mm
	core	
	Leg	Yoke
Area	185 cm <sup>2</sup>	185 cm <sup>2</sup>
Length	333 mm	772 mm



รูปที่ 5 หม้อแปลงไฟฟ้าที่ออกแบบ

จากรูปที่ 5 หม้อแปลงทำการออกแบบจากค่าที่คำนวณ โดยออกแบบให้เป็นขดลวดแบบกลม โดยใช้โปรแกรม SolidWorks ออกแบบเป็น 3D ให้เห็นโครงสร้างที่ชัดเจน และเพื่อให้ง่ายในการทำความเข้าใจ

**4. ผลการคำนวณ และการจำลอง**

**4.1 ผลการคำนวณแรงสนามแม่เหล็ก**

การคำนวณ โดยให้ขดลวดเป็นแบบสมมาตร คำนวณหาค่ากระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้น ทางด้านแรงต่ำ

ตารางที่ 2 คำนวณค่ากระแส และแรงสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น

	สภาวะปกติ	สภาวะลัดวงจร
กระแส (A)	144 A	3608 A
แรงตามรัศมี (N)	57.09 N	35840 N
แรงตามแนวแกน (N) (ที่ความสูงต่างกัน 10 มม.)	1.003 N	630.27 N
แรงตามแนวแกน (N) (ที่ความสูงต่างกัน 20 มม.)	2.007 N	1260.54 N

**4.2 การจำลองความหนาแน่นของฟลักซ์รั่วไหล**

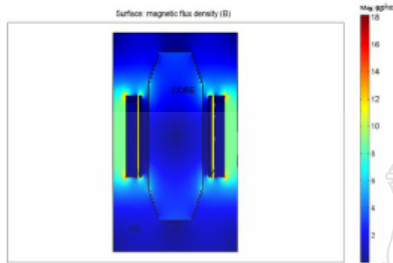
การจำลองจะทำการจำลองหลายสภาวะ เพื่อให้เห็นความเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์รั่วไหล ที่เปลี่ยนแปลงไปตามขนาดของกระแส และรูปแบบของขดลวด





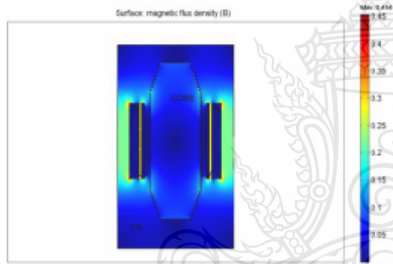
**รหัสบทความ:**  
**EC048**

การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 9  
8-10 พฤษภาคม 2556 จังหวัดนครนายก



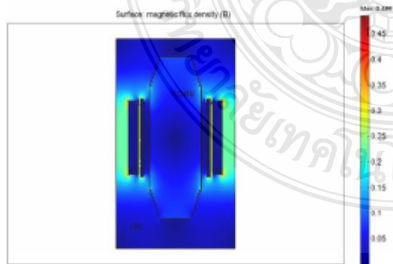
รูปที่ 6 หม้อแปลงใช้งานในสภาวะปกติ

จากรูปที่ 6 การจำลองในสภาวะ การใช้งานปกติของ หม้อแปลงที่จ่ายกระแสโหลดเต็มพิกัดที่ 144 A เพื่อดูขนาด ความหนาแน่นของฟลักซ์ไหล ในสภาวะการใช้งานปกติ



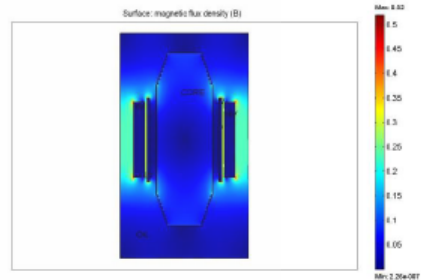
รูปที่ 7 หม้อแปลงในสภาวะลัดวงจร

จากรูปที่ 7 จำลองในสภาวะหม้อแปลงเกิดการ ลัดวงจร โดยกระแสลัดวงจร จะเท่ากับ 3608 A ความ หนาแน่นของสนามแม่เหล็กจะเพิ่มขึ้นสูงมาก



รูปที่ 8 หม้อแปลงในสภาวะลัดวงจร ขดลวดไม่สมมาตร (10 มม.)

ตามรูปที่ 8 จำลองขดลวดไม่สมมาตร โดยให้ขดลวด ด้านแรงสูง ต่ำกว่าด้านแรงต่ำ ประมาณ 10 มม. โดยจะ เห็นว่ามีผลกับ สนามแม่เหล็กไฟฟ้าค่อนข้างมาก โดยเฉพาะบริเวณต้นและปลายของขดลวด



รูปที่ 9 หม้อแปลงในสภาวะลัดวงจร ขดลวดไม่สมมาตร (20 มม.)

จากรูปที่ 9 เป็นแบบจำลองขดลวดไม่สมมาตร โดยให้ ขดลวดด้านแรงสูง ต่ำกว่าด้านแรงต่ำ ประมาณ 20 มม. โดยจะเห็นว่าผลกับ สนามแม่เหล็กไฟฟ้าใกล้เคียงกับ ความแตกต่างของขดลวดที่ 10 มม. เมื่อขดลวดความสูง แตกต่างกัน ซึ่งในทางปฏิบัติจริงๆ การจะทำให้ขดลวด เท่ากันนั้น เป็นไปได้ยากเนื่องจากกระบวนการผลิตใน ชั้นตอนต่างๆ

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบผลการคำนวณ และการใช้ Finite Element Method

	การคำนวณ		FEM	
	ปกติ	สภาวะ ลัดวงจร	ปกติ	สภาวะ ลัดวงจร
ความหนาแน่น ของ ฟลักซ์ รั่วไหล (T)	$144 \times 10^{-3}$	0.36	$15 \times 10^{-3}$	0.35
แรงตามรัศมี (N)	57.09	35840	61.7	33608

**5. สรุป**

บทความนี้ เป็นการศึกษาแรงสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ เกิดขึ้นในหม้อแปลงระบบจำหน่าย ในสภาวะการใช้งาน ปกติ และสภาวะการเกิดการลัดวงจร ซึ่งแรงที่เกิดขึ้นจะมี 2 ลักษณะ คือ แรงตามรัศมีในศูนย์กลางขดลวด และแรง



## รหัสบทความ: EC048

การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 9  
8-10 พฤษภาคม 2556 จังหวัดนครนายก

ตามแนวแกนในศูนย์กลางขดลวด ซึ่งขนาดของแรงที่เกิดขึ้นทั้ง 2 แบบ จะขึ้นอยู่กับทิศทาง และความหนาแน่นของฟลักแม่เหล็กรั่วไหล การจำลองเพื่อหาความหนาแน่นของฟลักแม่เหล็กรั่วไหล ดังกล่าว จะใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ ในการจำลอง ทำให้สามารถมองเห็นความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ในแต่ละจุด และในการจำลองจะเห็นว่า เมื่อมีการลัดวงจรเกิดขึ้น จะทำให้ความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นมาก โดยเฉพาะถ้าลักษณะความสูงของขดลวดไม่เท่ากัน ก็จะมีผลทำให้เกิดแรงแม่เหล็กไฟฟ้าตามแนวแกน มีค่าสูงมากตามไปด้วย ดังนั้นการออกแบบหม้อแปลง ต้องมีการคำนึงถึง เรื่องความสมมาตรของขดลวด และการจับยึดขดลวด เพื่อให้สามารถทนต่อแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นได้ในขณะเกิดการลัดวงจรได้

### 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Hyun-Mo Ahn, Byuk-Jin Lee, Cher-Jin Kim, Heung-Kyo Shin, and Sung-Chin Hahn, "Finite Element Modeling of Power Transformer for Short-circuit Electromagnetic Force Analysis" , This work was supported by the Human Resources Development of the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning(KETEP) grant funded by the Korea government Ministry of Knowledge Economy, IEEE 2011.
- [2] Ana C. de Azevedo, Ivan Rezende, Antonio C. Delaiba, Jose C. de Oliveira, Bismarck C. Carvalho, and Herivelto de S. Bronzeado, "Investigation of Transformer Electromagnetic Forces Caused by External Faults Using FEM", in IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition Latin America, Venezuela, 2006.
- [3] S.V.Kulkarni and S.A.Kharpard, Transformer Engineering Design and Practice.USA: 2004.
- [4] Bharat Heavy Electricals Limited, Transformers. Second edition., India: 2003.

# การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 36

The 36<sup>th</sup> Electrical Engineering Conference (EECON 36)

11-13 ธันวาคม 2556

ณ เฟลิกซ์ ริเวอร์แคว รีสอร์ท จ.กาญจนบุรี



## Volume 2

- (CM) ไฟฟ้าสื่อสาร
- (EL) อิเล็กทรอนิกส์
- (PH) ไฟโตนิคส์
- (CT) ระบบควบคุม  
และการวัดคุม
- (DS) การประมวล  
สัญญาณดิจิทัล
- (CP) คอมพิวเตอร์  
และเทคโนโลยีสารสนเทศ
- (GN) งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง  
กับวิศวกรรมไฟฟ้า
- (BE) วิศวกรรมชีวการแพทย์

Electrical Engineering Dept.  
Faculty of Engineering  
Kasetsart University  
50 Ngamwongwan Road Latyao  
Chatuchak Bangkok 10900  
Tel: 02-797-0999 ext 1503-1504  
Fax: 02-579-7566





Reviewer	Organization
Amnart Suksri	Khon Kaen University
Amnoiy Ruengwaree	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Amorn Jiraseree-amornkun	Mahanakorn University of Technology
Anon Namin	Rajamangala University of Technology Lanna
Anupap Meesomboon	Khon Kaen University
Anuree Lorsawatsiri	Mahanakorn University of Technology
Anuwat Jangwanitlert	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Aphibal Pruksanubal	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Apichai Bhatranand	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Apirada Namsang	Civil Aviation Training Center Thailand
Apiwat Lek-uthai	Chulalongkorn University
Arkhom Mounghaodaeng	Srinakharinwirot University
Arkorn Kaewrawang	Khon Kaen University
Amon Isaramongkolrak	Mahanakorn University of Technology
Arporn Teeramongkonrasmee	Chulalongkorn University
Arthit Sode-Yome	Siam University
Atthapol Ngaopitakkul	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Benjamas Panomruttanarug	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Bongkam Homnan	Dhurakij Pundit University
Bongkoj Sookananta	Ubonratchathani University
Boonchuay Supmonchai	Chulalongkorn University
Boonlert Suechoey	South-East Asia University
Boonruk Chipipop	Rangsit University
Boonsri Kaewkham-ai	Chiang Mai University
Boonyang Plangklang	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Budhapon Sawetsakulanond	Mahanakorn University of Technology
Bundit Thipakorn	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Chainarong Klimanee	Srinakharinwirot University
Chaiwut Chat-uthai	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Chaiyan Jettanasen	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Chaiyaporn Lothongkam	Mahanakorn University of Technology
Chaiyo Thammarat	South-East Asia University
Chaiyut Sumpavakup	Mahanakorn University of Technology
Chanchai Dechthummarong	Rajamangala University of Technology Lanna
Chanchna Tangwongsan	Chulalongkorn University





**Reviewer**

Chanarong Banmongkol  
Chanwit Boonchuay  
Charnchai Pluempitwiriyawej  
Chatchai Suppitsaksakul  
Chawasak Rakpenthai  
Chiranut Sa-ngiamsak  
Chirasak Sinsukudomchai  
Chirawat Wattanapanich  
Chirdpong Deelertpaiboon  
Chowarit Mitsantisuk  
Chutham Sawigun  
Danucha Prasertsom  
Decha Wilairat  
Denchai Worasawate  
Duang-arthit Srimoon  
Dulpichet Rerkpreedapong  
Dusit Thanapatay  
Ekapon Siwapornsathain  
Jakkree Srinonchat  
Jeerasuda Koseeyaporn  
Jirasak Chanwutitum  
Jitkomut Songsiri  
Jonglak Pahasa  
Jukkrit Kluabwang  
Jukkrit Tagapanij  
Kamon Jirasereeamornkul  
Kanadit Chetpattananondh  
Kanchana Silawarawet  
Kanjanapan Sukvichai  
Keerati Chayakulkheeree  
Khanittha Kaewdang  
Kiatyuth Kveeyarn  
Kiattisin Kanjanawanishkul  
Kittisak Tripatpornchai  
Kittiwann Nimkerdphol

**Organization**

Chulalongkorn University  
Rajamangala University of Technology Rattanakosin  
Chulalongkorn University  
Rajamangala University of Technology Thanyaburi  
University of Phayao  
Khon Kaen University  
South-East Asia University  
Walailak University  
King Mongkut's University of Technology North Bangkok  
Kasetsart University  
Mahanakorn University of Technology  
King Mongkut's University of Technology North Bangkok  
Mahidol University  
Kasetsart University  
Rangsit University  
Kasetsart University  
Kasetsart University  
King Mongkut's University of Technology Thonburi  
Rajamangala University of Technology Thanyaburi  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
King Mongkut's University of Technology North Bangkok  
Chulalongkorn University  
University of Phayao  
Rajamangala University of Technology Lanna  
Mahanakorn University of Technology  
King Mongkut's University of Technology Thonburi  
Prince of Songkla University  
Siam University  
Kasetsart University  
Sripatum University  
Ubonratchathani University  
Kasetsart University  
Mahasarakham University  
Rangsit University  
Rajamangala University of Technology Thanyaburi



**Reviewer**

Kobchai Dejhan  
Komsan Hongesombut  
Komson Daroj  
Krischonme Bhumkittipich  
Krissada Asavaskulkiet  
Krit Angkeaw  
Kulyos Audomvongseeree  
Kunnthphonng Srisathit  
Kusumal Chalermyanont  
Kwanchai Eurviriyankul  
Mana Sriyudthsak  
Manop Aorpimai  
Miti Ruchanurucks  
Mongkol Konghirun  
Mongkol Raksapatcharawong  
Monthon Nawong  
Montree Siripruchyanun  
Montri Kamjanadecha  
Montri Somdunyanok  
Naebboon Hoonchareon  
Nalin Sidahao  
Napat Sra-ium  
Nararat Ruangchaijatupon  
Narong Buabthong  
Narong Yoothanom  
Nathabhat Phankong  
Nattachote Rugthaicharoencheep  
Nattapong Phanthuna  
Nattavut Chayavanich  
Nattaya Klairuang  
Nattha Jindapetch  
Natthaphob Nimpitiwan  
Nimit Boonpirom  
Nisachon Tangsangiumvisai  
Nopadon Wiwatcharagoses

**Organization**

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
Kasetsart University  
Ubonratchathani University  
Rajamangala University of Technology Thanyaburi  
Mahidol University  
King Mongkut's University of Technology North Bangkok  
Chulalongkorn University  
Rajamangala University of Technology Rattanakosin  
Prince of Songkla University  
Rajamangala University of Technology Lanna  
Chulalongkorn University  
Mahanakorn University of Technology  
Kasetsart University  
King Mongkut's University of Technology Thonburi  
Kasetsart University  
Dhurakij Pundit University  
King Mongkut's University of Technology North Bangkok  
Prince of Songkla University  
Rajamangala University of Technology Rattanakosin  
Chulalongkorn University  
Mahanakorn University of Technology  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
Khon Kaen University  
Thammasat University  
Sripatum University  
Rajamangala University of Technology Thanyaburi  
Rajamangala University of Technology Phra Nakhon  
Rajamangala University of Technology Phra Nakhon  
King Mongkut's University of Technology Thonburi  
Kasetsart University  
Prince of Songkla University  
Bangkok University  
Sripatum University  
Chulalongkorn University  
King Mongkut's University of Technology North Bangkok



Reviewer	Organization
Nuntiya Chaiyabut	Bangkok University
Ong-Art Sadmai	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Opas Chutatape	Rangsit University
Pairote Thongprasri	Kasetsart University
Paisarn Sonthikorn	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Paitoon Raklua	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Pakorn Kaewtrakulpong	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Panich Intra	Rajamangala University of Technology Lanna
Parnjit Damrongkulkamjorn	Kasetsart University
Pasist Suwanapingkarl	Rajamangala University of Technology Phra Nakhon
Patamaporn Sripadungtham	Kasetsart University
Peerapol Yuvapositionon	Mahanakorn University of Technology
Peerayot Sanposh	Udon Thani Rajabhat University
Pennapa Pairodamonchai	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Petch Nantivatana	Sripatum University
Phaisan Ngamjanyaporn	Rangsit University
Phumin Kirawanich	Mahidol University
Phunsak Thienviboon	Kasetsart University
Pichai Aree	Thammasat University
Pichet Wisartpong	Mahanakorn University of Technology
Pinit Jitjing	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Pinit Thepsatorn	Srinakharinwirot University
Pipat Prommee	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Pisit Liutanakul	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Pisit Vanichchanunt	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Pisit Wisutmethetheekorn	Mahanakorn University of Technology
Piya Warabuntaweekorn	Bangkok University
Poonlap Lamsrichan	Kasetsart University
Pornchai Phukpattaranont	Prince of Songkla University
Pracha Yeunyongkul	Rajamangala University of Technology Lanna
Prajuab Pawarangkoon	Mahanakorn University of Technology
Pramin Artrit	Khon Kaen University
Pranchalee Samanpiboon	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Prasopchok Hothongkham	Rajamangala University of Technology Rattanakosin
Prayoot Akkaraekthalin	King Mongkut's University of Technology North Bangkok



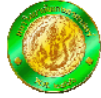
**Reviewer**

Preecha Kocharoen  
Punyaphat Phumiphak  
Rardchawadee Silapunt  
Raungrong Suleesathira  
Rawid Banchuin  
Rungsimant Sitdhikom  
Sakchai Thipchaksurat  
Sakorn Po-Ngam  
Salitip Sinthusonthisat  
Samphan Phrompichai  
Samroeng Hintamai  
Sanchai Dechanupaprittha  
Santitham Prom-on  
Sanun Srisuk  
Sarawan Wonga  
Sarawuth Chaimool  
Sarinee Outrakul  
Sawat Bunnjaweht  
Seangrawee Buakaew  
Sermak Uatrongjit  
Sirichai Dangeam  
Sirichai Wattanasophon  
Siroj Sirisukprasert  
Sirivat Poonvasin  
Sirivit Taechajedcadarungsri  
Siriwich Tadsuan  
Siwapon Srisonphan  
Somboon Nuchprayoon  
Somboon Sooksatra  
Somchai Hiranvarodom  
Somchat Jiriwibhakorn  
Sommart Sang-ngern  
Sompob Polmai  
Somporn Sirisumrannukul  
Songkran Kantawong

**Organization**

Sripatum University  
Mahanakorn University of Technology  
King Mongkut's University of Technology Thonburi  
King Mongkut's University of Technology Thonburi  
Siam University  
Mahanakorn University of Technology  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
King Mongkut's University of Technology Thonburi  
Mahanakorn University of Technology  
Mahanakorn University of Technology  
Sripatum University  
Kasetsart University  
King Mongkut's University of Technology Thonburi  
Nakhon Phanom University  
King Mongkut's University of Technology Thonburi  
King Mongkut's University of Technology North Bangkok  
Kasetsart University  
Mahanakorn University of Technology  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
Chiang Mai University  
Rajamangala University of Technology Thanyaburi  
Kasetsart University  
Kasetsart University  
Kasetsart University  
Khon Kaen University  
South-East Asia University  
Kasetsart University  
Chiang Mai University  
Rangsit University  
Rajamangala University of Technology Thanyaburi  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
Mahanakorn University of Technology  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
King Mongkut's University of Technology North Bangkok  
Bangkok University





**Reviewer**

Songphol Kanjanachuchai  
Songrit Maneewongvatana  
Sorawat Chivapreecha  
Srijidtra Charoenlarnpopparut  
Srisakdi Jangjit  
Suchart Yammen  
Suchin Trirongjitmoah  
Sudchai Boonto  
Sumate Naetiladdanon  
Suneat Pranonsatit  
Supakit Kawdungta  
Supalak Sathiracheewin  
Supatana Auethavekiat  
Supattana Nirukkanaporn  
Surachai Chaitusaney  
Surachoke Thanapitak  
Surapan Airphaiboon  
Surapong Suwankawin  
Suree Pumrin  
Suthathip Maneewongvatana  
Suwat Pattaramalai  
Tanet Wonghong  
Tanin Duangjan  
Tasanee Chayavanich  
Teerasak Somsak  
Teerasit Kasetkasem  
Terdpun Choogorn  
Thamvarit Singhavilai  
Thanadol Pritranan  
Thanakorn Khongdeach  
Thanapong Thanasaksiri  
Theerayod Wiangtong  
Thidarat Tawsook  
Thong Lantharthong  
Thumronnrat Amornraksa

**Organization**

Chulalongkorn University  
King Mongkut's University of Technology Thonburi  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
Kasetsart University  
Kasetsart University  
Naresuan University  
Ubonratchathani University  
King Mongkut's University of Technology Thonburi  
King Mongkut's University of Technology Thonburi  
Kasetsart University  
Rajamangala University of Technology Lanna  
Kasetsart University  
Chulalongkorn University  
Rangsit University  
Chulalongkorn University  
Mahidol University  
King Mongkut's Institute of technology Ladkrabang  
Chulalongkorn University  
Chulalongkorn University  
King Mongkut's University of Technology Thonburi  
King Mongkut's University of Technology Thonburi  
Bangkok University  
Srinakharinwirot University  
King Mongkut's University of Technology Thonburi  
Rajamangala University of Technology Lanna  
Kasetsart University  
Nakhon Sawan Rajabhat University  
Mahidol University  
Mahidol University  
Kasetsart University  
Chiang Mai University  
Mahanakorn University of Technology  
Bangkok University  
Rajamangala University of Technology Phra Nakhon  
King Mongkut's University of Technology Thonburi



**Reviewer**

Titipong Lertwiryaprapa  
Toempong Phetchakul  
Trin Saengsuwan  
Ukrit Mankong  
Umarin Sangpanich  
Upady Hatthasin  
Uthane Supatti  
Uthen Kamnam  
Veerachai Malyavej  
Viboon Chunkag  
Vichai Saelee  
Vijit Kinnares  
Vinai Silaruam  
Virote Pirajnanchai  
Vishnu Thonglek  
Vorapong Silaphan  
Vuttipon Tarateeraseth  
Wachira Chongburee  
Walisa Romsaiyud  
Wanchai Chankaiapol  
Wanchai Chimchavee  
Wanchai Khamsen  
Wanchai Pijitrojana  
Wanchai Subsingha  
Wanchak Lenwari  
Wannarat Suntiamorntut  
Wanwisa Thaiwiro  
Warakorn Srichavengsup  
Warayut Kampeerawat  
Warut Suampun  
Wason Tanjaroen  
Watcharee Veerakachen  
Wattanapong Kurdthongmee  
Wekin Piyarat  
Werapong Chiracharit

**Organization**

King Mongkut's University of Technology North Bangkok  
King Mongkut Institute of Technology Ladkrabang  
Kasetsart University  
Chiang Mai University  
Kasetsart University  
Rajamangala University of Technology Lanna  
Kasetsart University  
Rajamangala University of Technology Lanna  
Mahanakorn University of Technology  
King Mongkut's University of Technology North Bangkok  
South-East Asia University  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
Mahanakorn University of Technology  
Rajamangala University of Technology Thanyaburi  
Rajamangala University of Technology Lanna  
Mahanakorn University of Technology  
Srinakharinwirot University  
Kasetsart University  
Siam University  
Sripatum University  
University of the Thai Chamber of Commerce  
Rajamangala University of Technology Lanna  
Thammasat University  
Rajamangala University of Technology Thanyaburi  
King Mongkut's University of Technology Thonburi  
Prince of Songkla University  
King Mongkut's University of Technology North Bangkok  
Thai-Nichi Institute of Technology  
Khon Kaen University  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
Kasetsart University  
Kasetsart University  
Walailak University  
Srinakharinwirot University  
King Mongkut's University of Technology Thonburi



**Reviewer**

Wibool Piyawattanametha  
Wijitra Petchakit  
Wiklom Teerapabkajorndet  
Wilaiporn Lee  
Witoon Prommee  
Witthawas Pongyart  
Worakarn Wongsachua  
Worapol Pongpech  
Worawat Nakawiro  
Wuthiporn Loetwassana  
Wuttipong Kumwilaisak  
Yan Zhao  
Yongyuth Naras  
Yongyuth Permpoontanalarp  
Yutana Chongjarearn  
Yuttana Kumsuwan  
Yuttapong Jiraksopakun  
Yutthana Kanthaphayao

**Organization**

National Electronics and Computer Technology Center  
Walailak University  
Prince of Songkla University  
King Mongkut's University of Technology North Bangkok  
Rajamangala University of Technology Lanna  
King Mongkut's University of Technology North Bangkok  
Ubonratchathani University  
Dhurakij Pundit University  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
Mahanakorn University of Technology  
King Mongkut's University of Technology Thonburi  
Chulalongkorn University  
Siam University  
King Mongkut's University of Technology Thonburi  
Dhurakij Pundit University  
Chiang Mai University  
King Mongkut's University of Technology Thonburi  
Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi



## สารบัญ

PW062	การวิเคราะห์แรงแม่เหล็กไฟฟ้า ในหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายจากการเกิดลัดวงจรโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	245
PW063	Simulation of the vibration and electrical potential at the operating frequency of Piezoelectric Transformers by Using 3-D Finite Element Method	249
PW064	Applied Game Theory to Wheeling Charge Determination	253
PW065	Maximum Power Transfer Capability between Two Interconnected Areas by Considering Voltage Stability in Transmission System	257
PW066	การพยากรณ์ความต้องการไฟฟ้าระยะสั้นโดยใช้ซอฟต์แวร์เวกเตอร์แมชชีนแบบเหมาะสมด้วยอัลกอริทึมการค้นหาแบบฮิวริสติก	261
PW067	การพยากรณ์ค่าความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุดของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยโดยกระบวนการเกาส์เซียน	265
PW068	การพยากรณ์โหลดระยะกลางสำหรับข้อมูลการแข่งขัน EUNITE 2001	269
PW069	การพยากรณ์กำลังไฟฟ้าสูงสุดของสถานีไฟฟ้าด้วยเทคนิคการกระจายโหลดระดับมหภาคลงสู่ระดับจุลภาค	273
PW070	Feature Selection based on Seasonal Cross-Correlation For Short-Term Wind Forecast	277
PW071	ศักยภาพการผลิตไฟฟ้าจากความร้อนสูญเสียของเครื่องยนต์แก๊สโซลีนขนาดเล็กด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกสโมคูล	281
PW072	การศึกษาความเป็นไปได้ในการพัฒนาเครื่องทำน้ำอุ่นด้วยเตาเหนี่ยวนำไฟฟ้า	285
PW073	ชุดควบคุมและแสดงข้อมูลไฟฟ้าด้วยสมาร์ตโฟน	289
PW074	การศึกษาความเหมาะสมและการเปรียบเทียบผลกระทบของการประหยัดพลังงานด้วยหลอดแอลอีดี และหลอด T8, T5	293
PW075	Design of Embedded System for an Automatic Dissolved Oxygen Proliferate in Pond Powered by Hybrid Renewable Energy	297
PW076	Impact of Inverter Operating Modes in Photovoltaic Generation System on Distribution System	301
PW077	Photovoltaic Array Configuration for Alleviating the Impact of Shading on Power Generation Efficiency	305
PW078	การประเมินผลวิธีการอาณานิคมมดที่ถูกปรับปรุงเพิ่มเติมสำหรับการหาเส้นทางที่สั้นที่สุดในกระบวนการเจาะรูแผ่นวงจรพิมพ์	309
PW079	Substation Design with Consideration of Transient Behavior of Ground Grid Configurations Under Lightning Current	313
PE001	การควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดบีสองทางสำหรับการขนานเข้ากับระบบไฟฟ้า	317
PE002	การพัฒนาอินเวอร์เตอร์ขนาดเล็กสำหรับเชื่อมต่อพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เข้าสู่ระบบไฟฟ้า	321

## การวิเคราะห์แรงแม่เหล็กไฟฟ้าในหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย จากการเกิดลัดวงจร โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

### Analysis of electromagnetic forces in distribution transformer short circuit using Finite Element Method

นวพงศ์ นุตาคี กฤษณ์ชนม์ ภูมิภคพิชญ์ และ นิติพงศ์ ปานกลาง

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ถนนรังสิต - นครนายก ต.คลองหก อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110 โทรศัพท์ : 0-2549-3571 โทรสาร 0-2549-3422 E-mail: naawa23@hotmail.com

PW062

#### บทคัดย่อ

บทความนี้ นำเสนอการสร้างแบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายเพื่อศึกษาแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ขณะเกิดการลัดวงจร โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ในการศึกษาแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในขณะที่หม้อแปลงทำงาน ในสภาวะปกติ และในสภาวะเกิดการลัดวงจรแบบสมมาตร โดยจำลองลักษณะของการพันขดลวด 2 แบบ คือ การพันขดลวดแบบกลม และการพันขดลวดแบบเหลี่ยม เพื่อศึกษาความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กไว้ล และนำไปคำนวณหาแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า ลักษณะของขดลวดมีผลต่อความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กไว้ล โดยลักษณะขดลวดแบบกลม จะมีความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กไว้ลน้อยกว่าขดลวดแบบเหลี่ยม เนื่องจากขดลวดแบบกลม ฟลักซ์แม่เหล็กจะกระจายตัวได้สมมูลกัน จึงส่งผลให้แรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในขดลวดแบบกลมน้อยกว่าขดลวดแบบเหลี่ยม ซึ่งแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีค่ามาก จะส่งผลให้หม้อแปลงไฟฟ้ามีโอกาสเกิดความเสียหายได้ ดังนั้นในการเลือกการออกแบบขดลวดสามารถช่วยลดความเสียหายของหม้อแปลงได้

คำสำคัญ: ความหนาแน่นของฟลักซ์ไว้ล, ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์, แรงสนามแม่เหล็กไฟฟ้า, หม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย

#### Abstract

This paper presents study of electromagnetic forces in transformer using finite element method. The electromagnetic force effects in transformers have been evaluated between normal operation and short circuit conditions. This study proposes two types of coil appearances for simulation, namely, a circular coil type and a square coil type. The density of flux leakage can be computed for representing the electromagnetic forces that occurs in transformers. The simulation results showed that the appearances of coil in transformers effect the density of leakage flux. The circular coils have density of leakage flux less than the square coil resulting in well distributions of leakage flux out off transformers. The electromagnetic force is occurred in circular coil less than a square coil. The high electromagnetic force in short circuit conditions cause damages of transformers. Consequently, the proposed design can reduce the damage from fault to the transformer.

Keywords: distribution transformer, finite element method, electromagnetic forces, leakage flux density

#### 1. บทนำ

หม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย เป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญมากในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า เมื่อเกิดปัญหาหม้อแปลงขึ้นจะทำให้ไฟฟ้าดับเป็นบริเวณกว้าง โดยอายุการใช้งานของหม้อแปลง จะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย โดยปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญมาก คือ การเกิดลัดวงจรจากภายนอก ทำให้มีกระแสสูงไหลเข้าไปที่ขดลวด และทำให้เกิดแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่สูง แรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้เอง ที่ส่งผลให้ขดลวดเกิดความเสียหายขึ้น ทำให้ต้องมีการศึกษา และ จำลองสภาวะที่เกิดขึ้นเพื่อนำไปสู่การออกแบบ และเลือกใช้จำนวนที่เหมาะสมในแต่ละจุดของหม้อแปลง การจำลองในบทความนี้ ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อวิเคราะห์ความหนาแน่นของฟลักซ์ไว้ล โดยเลือกใช้โมเดลของหม้อแปลงขนาด 100 kVA 22 kV 400/230 V ซึ่งเป็นหม้อแปลงขนาดที่มีการใช้งานจำนวนมากในระบบของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

องค์ประกอบของบทความประกอบด้วย ส่วนที่ 2 จะกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของหม้อแปลงไฟฟ้า การลัดวงจร ฟลักซ์แม่เหล็กไว้ล และแรงแม่เหล็กไฟฟ้าภายในหม้อแปลง ส่วนที่ 3 กล่าวถึงการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า ส่วนที่ 4 นำเสนอผลการจำลองการทำงาน และสุดท้ายส่วนที่ 5 นำเสนอผลสรุปและข้อเสนอแนะ

#### 2. ทฤษฎีและหลักการพื้นฐาน

##### 2.1 อิมพีแดนซ์หม้อแปลงไฟฟ้า

เปอร์เซ็นต์อิมพีแดนซ์ ของหม้อแปลงไฟฟ้า เป็นตัวกำหนดค่ากระแสลัดวงจร ค่าแรงดันตก กำลังไฟฟ้าที่รีแอกทีฟ ความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้า และอื่นๆ โดยค่าเปอร์เซ็นต์อิมพีแดนซ์ที่เกิดขึ้นจะเป็นผลรวมของค่า เปอร์เซ็นต์รีซิสแตนซ์ และเปอร์เซ็นต์เรแอกแตนซ์ ตามสมการดังนี้ [1]

$$\%IR = \frac{\text{load\_losses}[kW]}{\text{rated\_power}[kVA]} \times 100 \quad (1)$$

$$\%IX = \frac{\text{reactive\_losses}[kVar]}{\text{rated\_power}[kVA]} \times 100 \quad (2)$$

$$\%IZ = \sqrt{(\%IR)^2 + (\%IX)^2} \quad (3)$$

เมื่อ %IZ คือ เปอร์เซ็นต์อิมพีแดนซ์ %IR คือ เปอร์เซ็นต์รีซิสแตนซ์ และ %IX คือ เปอร์เซ็นต์เรแอกแตนซ์

##### 2.2 กระแสลัดวงจร

การศึกษานี้ เป็นการจำลองการเกิดลัดวงจรแบบสมมาตร ซึ่งสามารถคำนวณหากระแสใช้งานสูงสุด และกระแสลัดวงจรของหม้อแปลง ตามสมการที่ (4) และ (5)



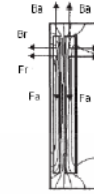
$$I_{FL}(Tr) = \frac{kVA \times 1000}{\sqrt{3}V_L} \quad (4)$$

$$I_{SC}(Tr) = \frac{I_{FL}(Tr) \times 100\%}{\%IZ} \times \frac{1}{1000} \quad (5)$$

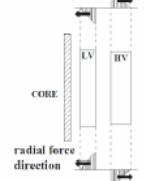
เมื่อ  $I_{FL}(Tr)$  คือกระแสโหลดเต็มที่เกิดขึ้นที่หม้อแปลงไฟฟ้า ( $kA$ )  $I_{SC}(Tr)$  คือกระแสลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้า ( $kA$ )  $kVA$  คือ ขนาดพิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้า ( $kVA$ ) และ  $V_L$  คือแรงดันไฟฟ้าระหว่างสาย ( $V$ )

2.3 ฟลักซ์แม่เหล็กรั่วไหล

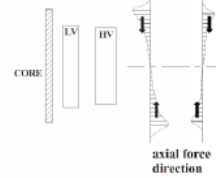
หม้อแปลงไฟฟ้า ที่จุดศูนย์กลางขดลวด ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กรั่วไหลตามแนวแกน ( $B_a$ ) จะปฏิสัมพันธ์กับ กระแสในขดลวด ที่ทำให้เกิดแรงตามรัศมี ( $F_r$ ) ซึ่งจะเกิดแรงผลักระหว่างขดลวด ด้านในและด้านนอก ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กรั่วไหลตามแนวรัศมี ( $B_r$ ) จะปฏิสัมพันธ์กับกระแสในขดลวด ทำให้เกิดแรงตามแนวแกน ( $F_a$ ) ซึ่งทำให้เกิดการอัด หรือการขยายของขดลวด ตามแนวแกน แสดงทิศทางตามรูปที่ 1 [1]



รูปที่ 1 ฟลักซ์รั่วไหลที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้า



รูปที่ 2 แรงแม่เหล็กไฟฟ้า ทำให้เกิดความเครียดที่วงรอบของขดลวด



รูปที่ 3 แรงตามแนวแกน

2.4 แรงแม่เหล็กไฟฟ้าภายในหม้อแปลง

แรงแม่เหล็กไฟฟ้า เกิดขึ้นจากความสัมพันธ์ของ กระแสลัดวงจร และฟลักซ์รั่วไหล ในขดลวดหม้อแปลง เมื่อเกิดการลัดวงจร กระแสในขดลวดจะเพิ่มขึ้นสูงมาก ส่งผลทำให้แรงแม่เหล็กไฟฟ้าเพิ่มขึ้นสูงมากเช่นกัน โดยหาได้จากสมการ ดังนี้ [3]

$$\vec{F} = L(\vec{I}\vec{B}) \quad (6)$$

เมื่อ  $\vec{F}$  คือ เวกเตอร์ ความหนาแน่นของแรง  $\vec{I}$  คือ เวกเตอร์ ความหนาแน่นของกระแส  $\vec{B}$  คือ เวกเตอร์ ความหนาแน่นของฟลักซ์รั่วไหล และ  $L$  คือ ความยาวของขดลวด

2.4.1 แรงตามรัศมีในศูนย์กลางขดลวด

แรงตามรัศมีภายในหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีศูนย์กลางที่ขดลวดตามรูปที่ 1 แสดงผลลัพท์ ของแรงที่ด้านในและด้านนอกของขดลวด และยังแสดงให้เห็นความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กตามแนวแกน ( $B_a$ ) เส้นแรงแม่เหล็กนี้ เป็นค่าคงตลอดพื้นที่ระหว่างขดลวด สมการความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กรั่วไหล ( $B_a$ ) แสดงได้ดังสมการที่ (7) [4]

$$B_a = \frac{1}{2} \frac{\mu_0 ni}{h} [T] \quad (7)$$

เมื่อ  $ni$  คือ แอมแปร์-เทริน และ  $B_a$  คือ ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กรั่วไหล

ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กจะสัมพันธ์กับกระแส ที่ทำให้เกิดแรงตามรัศมี ( $F_r$ ) จะแสดงได้ดังสมการที่ (8)

$$F_r = \frac{1}{2} \mu_0 \frac{(ni)^2}{h} \pi L_p [N] \quad (8)$$

เมื่อ  $F_r$  คือ แรงตามรัศมี  $i$  คือ กระแส  $n$  คือ จำนวนรอบของขดลวด  $h$  คือ ความสูงของขดลวด และ  $L_p$  คือ ความยาวเฉลี่ยของรอบขดลวด

2.4.2 แรงตามแนวแกน ในศูนย์กลางขดลวด

การคำนวณเพื่อวิเคราะห์แรงตามแนวแกน จะต้องรู้รัศมีของฟลักซ์รั่วไหล และความสูงของขดลวดระหว่างด้านแรงสูงและแรงต่ำที่แตกต่างกัน สำหรับฟลักซ์แม่เหล็กรั่วไหล ที่เกิดขึ้นที่ปลายขดลวดมีการคิดเกี่ยวข้องแสดงในรูป 1 ซึ่งจะส่งผลให้เกิดแรงสนามแม่เหล็กสูงบริเวณปลายขดลวดทั้งด้านบนและด้านล่าง ดังแสดงดังรูปที่ 3 [3]

ลักษณะ ขดลวดสมมาตร โดยมีความสูงของขดลวดด้านนอกที่สั้นกว่าของด้านใน ขดลวดนี้ จะทำให้เกิดความไม่สมดุลของความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก ซึ่งจะมีรัศมีขนาดใหญ่ แสดงดังรูปที่ 3 ความหนาแน่นเฉลี่ยของรัศมีฟลักซ์ จะหาได้ สมการที่ (9) [4]

$$B_r = \frac{\mu_0 a(ni)}{2 \cdot 2h_{eff}} [T] \quad (9)$$

เพื่อตรวจสอบแรงตามแนวแกน ( $F_r$ ) สำหรับหม้อแปลงที่มีความไม่สมดุลที่ปลายด้านหนึ่งของขดลวดจะหาแรงแม่เหล็กไฟฟ้า ได้จากสมการที่ (10)

$$F_a = \frac{\mu_0}{2} a(ni)^2 \frac{\pi L_p}{h_{eff}} [N] \quad (10)$$

เมื่อ  $F_a$  คือ แรงตามแนวแกน  $i$  คือ กระแส  $n$  คือ จำนวนรอบของขดลวด  $h_{eff}$  คือ รัศมีของฟลักซ์ จากแกนเหล็กถึงของแท่งค้ ( $d + d_1 + d_2$ )  $L_p$  คือ ความยาวเฉลี่ยของรอบขดลวด และ  $a$  คือ ระยะของ HV winding ที่สั้นกว่า LV winding

3. การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า

การออกแบบหม้อแปลง จะใช้โปรแกรมคำนวณเพื่อออกแบบ โดยให้ลักษณะขดลวดเป็นแบบทรงกลมและแบบเหลี่ยม ซึ่งเป็นที่นิยมใช้ในการผลิตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายและใช้ข้อกำหนดของกรไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเป็นคํ่าอิงในการออกแบบ ในตารางที่ 1 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ออกแบบ

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการออกแบบ

ขนาดหม้อแปลง	100 kVA			
	คอลลีกลม		คอลลีเหลี่ยม	
Flux density (T)	1.654		1.654	
Impedance voltage (%)	3.1		3.1	
	coil		coil	
	HV winding	LV winding	HV winding	LV winding
Voltage (V)	22000	400	22000	400
Current density (A/mm <sup>2</sup> )	2.577	2.583	2.577	2.583
Winding turn (turn)	3401	34	3401	34
External winding (mm)	diameter	diameter	long 334	long 233
	324	227	wide 227	wide 158
Internal winding (mm)	diameter	diameter	long 251	long 193
	245	195	wide 176	wide 118
Length of coil (mm)	213	213	213	213

การออกแบบหม้อแปลง ให้เป็นขดลวดแบบกลม และขดลวดแบบเหลี่ยม โดยการคำนวณ และใช้โปรแกรม Solid Works ออกแบบเป็นสามมิติ ให้เห็นโครงสร้างที่ชัดเจน และเพื่อให้ง่ายในการทำความเข้าใจ แสดงดังรูปที่ 4 สำหรับค่ากระแสในสภาวะปกติ และลัดวงจร แสดงได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่ากระแสค่ากระแสในสภาวะต่างๆ

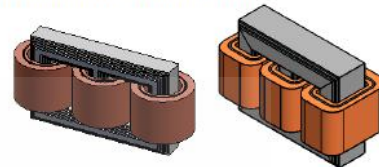
	ขดลวดคํ่าแรงสูง	ขดลวดคํ่าแรงต่ำ
กระแสปกติ (A)	2.62	144
กระแสลัดวงจร (A)	84.65	4,656

4. ผลการจำลองการทำงาน

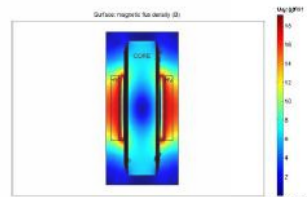
4.1 การจำลองความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กที่ว้ไหล

การจำลองจะทำการจำลองหลายสภาวะ เพื่อให้เห็นความเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กที่ว้ไหล ที่เปลี่ยนแปลงไปตามขนาดของกระแส และรูปแบบของขดลวด และกรจำลองในสภาวะ การใช้งานปกติของหม้อแปลงที่จ่ายกระแสโหลดเต็มทีกคํ่าที่ 144 A แสดงดังรูปที่ 5 และจากรูปที่ 6 แสดงค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กที่ว้ไหลในสภาวะปกติ โดยแสดงค่าจากต้นขดลวดถึงปลายขดลวด แสดงดังรูป (ก) และจาคํ่าในขดลวดถึงคํ่าในนอกขดลวด แสดงดังรูป (ข) จะเห็นได้ว่าค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กที่ว้ไหลในแนวแกน (B) จะมีค่าสูงบริเวณกึ่งกลางขดลวด การจำลองในสภาวะหม้อแปลงเกิดการลัดวงจร โดยกระแสลัดวงจร เท่ากับ 4,656 A ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กที่ว้ไหลจะเพิ่มขึ้นสูงมาก แสดงดังรูปที่ 7

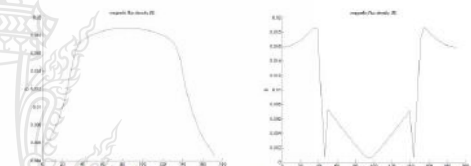
ค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กที่ว้ไหลจะมีค่าสูงกว่าในสภาวะหม้อแปลงใช้งานปกติมาก แสดงเป็นกราฟได้ ดังรูปที่ 8



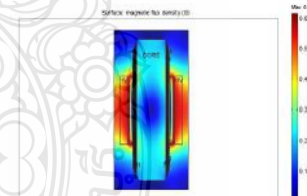
รูปที่ 4 หม้อแปลงไฟฟ้าแบบขดลวดกลม และแบบขดลวดเหลี่ยม



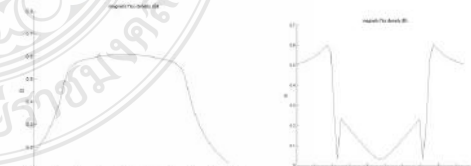
รูปที่ 5 หม้อแปลงแบบขดลวดกลมใช้งานในสภาวะปกติ



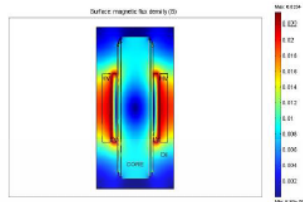
(ก) ฟลักซ์แม่เหล็กที่ว้ไหลตามแนวแกน (ข) ฟลักซ์แม่เหล็กที่ว้ไหลตามแนวรัศมี  
รูปที่ 6 กราฟค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กที่ว้ไหลในสภาวะหม้อแปลงใช้งานปกติ



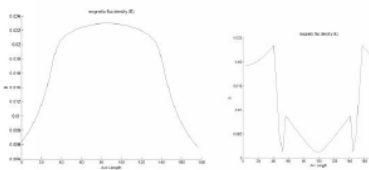
รูปที่ 7 หม้อแปลงแบบขดลวดกลมในสภาวะลัดวงจร



(ก) ฟลักซ์แม่เหล็กที่ว้ไหลตามแนวแกน (ข) ฟลักซ์แม่เหล็กที่ว้ไหลตามแนวรัศมี  
รูปที่ 8 กราฟค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กที่ว้ไหลในสภาวะหม้อแปลงเกิดลัดวงจร

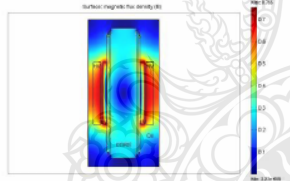


รูปที่ 9 หม้อแปลงแบบขดลวดแบบเหลี่ยมใช้งานในสภาวะปกติ

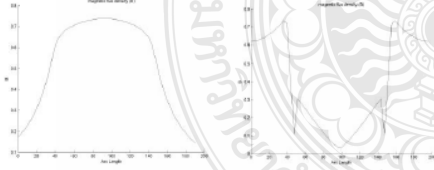


(ก) ฟลักซ์แม่เหล็กทั่วไปตามแนวแกน (ข) ฟลักซ์แม่เหล็กทั่วไปตามแนวรัศมี รูปที่ 10 กราฟความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กทั่วไปในสภาวะหม้อแปลงใช้งานปกติ

การจำลองในสภาวะ การใช้งานปกติของหม้อแปลงขดลวดแบบเหลี่ยมที่จ่ายกระแสโหลดเต็มพิกัดที่ 144 A แสดงได้ดังรูปที่ 9 และจากรูปที่ 10 แสดงค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กทั่วไปในสภาวะปกติ ของขดลวดแบบเหลี่ยม โดยแสดงค่าจากต้นขดลวดถึงปลายขดลวด แสดงดังรูป (ก) และจากด้านในขดลวดถึงด้านนอกขดลวด แสดงดังรูป (ข)



รูปที่ 11 หม้อแปลงแบบเหลี่ยมในสภาวะลัดวงจร



(ก) ฟลักซ์แม่เหล็กทั่วไปตามแนวแกน (ข) ฟลักซ์แม่เหล็กทั่วไปตามแนวรัศมี รูปที่ 12 กราฟความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กทั่วไปในสภาวะหม้อแปลงเกิดลัดวงจร

การจำลองในสภาวะหม้อแปลงเกิดการลัดวงจร โดยกระแสลัดวงจร เท่ากับ 4,656 A แสดงดังรูปที่ 11 ขดลวดแบบเหลี่ยมในสภาวะ

หม้อแปลงเกิดลัดวงจร ค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กทั่วไปจะมีค่าสูงกว่าในสภาวะหม้อแปลงใช้งานปกติมาก แสดงดังรูปที่ 12

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบผลการจำลองขดลวดแบบต่างๆ

		ขดลวดแบบกลม		ขดลวดแบบเหลี่ยม	
		ปกติ	สภาวะลัดวงจร	ปกติ	สภาวะลัดวงจร
ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กทั่วไป (T)	$B_a$	0.0185	0.6	0.23	0.75
	$B_r$	0.012	0.3	0.02	0.5
แรงตามรัศมี (N)		57	59,990	71	74,987
แรงตามแนวแกน (N)		4.7	2,922	7.8	4,871

การเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กทั่วไป และแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้น ระหว่างขดลวดแบบกลม และขดลวดแบบเหลี่ยม แสดงตามตารางที่ 3

5. สรุป

การศึกษาแรงสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงระบบจำหน่าย ในสภาวะการใช้งานปกติ และสภาวะการเกิดการลัดวงจร ซึ่งแรงที่เกิดขึ้นจะมี 2 ลักษณะ คือ แรงตามรัศมีในศูนย์กลางขดลวด และแรงตามแนวแกนในศูนย์กลางขดลวด ซึ่งขนาดของแรงที่เกิดขึ้นทั้ง 2 แบบ จะขึ้นอยู่กับทิศทาง และความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กทั่วไป การจำลองเพื่อหาความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กทั่วไป ดังกล่าว จะใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ในการจำลอง ทำให้สามารถมองเห็นความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในแต่ละจุด และในการจำลองจะเห็นว่า เมื่อมีการลัดวงจรเกิดขึ้น จะทำให้ความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นมาก โดยลักษณะของขดลวด มีผลกับความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กทั่วไปเช่นกัน จะเห็นว่าถ้าพันขดลวดเป็นแบบเหลี่ยม ค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กทั่วไปจะสูงกว่าการพันขดลวดแบบกลม ทั้งนี้เนื่องมาจากการกระจายตัวของฟลักซ์แม่เหล็กทั่วไปในขดลวดแบบกลมจะกระจายได้อย่างสม่ำเสมอมากกว่าขดลวดแบบเหลี่ยม ซึ่งส่งผลให้แรงแม่เหล็กไฟฟ้าขณะเกิดการลัดวงจรกระจายตัวอย่าง สม่ำเสมอเช่นกัน ดังนั้นการออกแบบหม้อแปลง ต้องมีการคำนึงถึง เนื่องการพันขดลวดและการประกอบขดลวดให้ดี เพื่อให้สามารถทนต่อแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในขณะที่การลัดวงจรได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Hyun-Mo Ahn, Byuk-Jin Lee, Cherl-Jin Kim, Heung-Kyo Shin, and Sung-Chin Haha, "Finite Element Modeling of Power Transformer for Short-circuit Electromagnetic Force Analysis", IEEE 2011.
- [2] Ana C. de Azevedo, Ivan Rezende, Antonio C. Delaiba, Jose C. de Oliveira, Bismarck C. Carvalho, "Investigation of Transformer Electromagnetic Forces Caused by External Faults Using FEM", in IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition Latia America, Venezuela, 2006.
- [3] S.V.Kulkarni and S.A.Khapharde, Transformer Engineering Design and Practice, USA: 2004.
- [4] Bharat Heavy Electricals Limited, Transformers. Second edition., India: 2003.



## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายนวพงศ์ นุคาคี
วัน เดือน ปีเกิด	23 กรกฎาคม 2526
ที่อยู่	123/49 หมู่ 5 ตำบลปากเกร็ด อำเภอปากเกร็ด จังหวัดนนทบุรี
การศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ประสบการณ์การทำงาน	วิศวกรออกแบบ บริษัท พีริไซซ์ อิเล็กทริก แมนูแฟคเจอร์ริง จำกัด จังหวัดปทุมธานี
พ.ศ. 2551 - 2553	วิศวกร การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค สำนักงานใหญ่ กรุงเทพมหานคร
พ.ศ. 2553 - ปัจจุบัน	086-9979187
เบอร์โทรศัพท์	nawa23@hotmail.com
อีเมล	

