

อภินันทนาการ



การพัฒนาหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
DEVELOPMENT OF HIGH FREQUENCY TRANSFORMER
BY FINITE ELEMENT METHOD



นายอดิศักดิ์ พรมอยู่ รหัส 54364375

17194857

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
10 ต.ล. 2560
เลขทะเบียน
รายชื่อคณาจารย์

ร/ร
01297
2557

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ปีการศึกษา 2557



ใบรับรองปริญญาโท

ชื่อหัวข้อโครงการ การพัฒนาหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
ผู้ดำเนินโครงการ นายอดิศักดิ์ พรมอยู่ รหัส 54364375
ที่ปรึกษาโครงการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมพร เรืองสินชัยวานิช
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
ปีการศึกษา 2557

.....
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้ปริญญาโทฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

.....ที่ปรึกษาโครงการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมพร เรืองสินชัยวานิช)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อัครพันธ์ วงศ์กังแห)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พนัส นันทฤทธิ์)

ชื่อหัวข้อโครงการ	การพัฒนาหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
ผู้ดำเนินโครงการ	นายอดิศักดิ์ พรมอยู่ รหัส 54364375
ที่ปรึกษาโครงการ	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมพร เรืองสินชัยวานิช
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
ปีการศึกษา	2557

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการศึกษาค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยแบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกคือการจำลองการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์บนโปรแกรม ANSYS 13.0 เพื่อจำลองการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้า ส่วนที่สองการออกแบบการพันขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง ได้แก่ การพันขดลวดแบบชั้น การพันขดลวดแบบแซนด์วิชและการพันขดลวดแบบอินเตอร์ลิฟ เพื่อปรับปรุงค่าประสิทธิภาพ ผลที่ได้จากการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง พบว่า รูปแบบการออกแบบการพันขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงมีความสำคัญอย่างมาก มีผลทำให้ค่าปรับประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงดีขึ้น

Project title Development of High Frequency Transformer by Finite Element Method

Name Mr. Adisak Promyoo ID. 54364375

Project advisor Asst. Prof. Somporn Ruangsinchaiwanich, Ph.D.

Major Electrical Engineering

Department Electrical and Computer Engineering

Academic year 2014

Abstract

This project present the study parameter of high frequency transformer for more efficient Development. There are two parts such as compare effect test between original high frequency transformer with high frequency transformer by finite element method for simulation of original high frequency transformer and effect topology winding such as stack winding sandwich winding interleave winding of high frequency transformer .Therefore effect topology winding is important for development high frequency transformer.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิศวกรรมเรื่องการศึกษาค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงโดยการปรับปรุงประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าให้ดีขึ้นสำเร็จได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับคำแนะนำและความช่วยเหลือรวมทั้งข้อคิดเห็นต่างๆ อันเป็นประโยชน์ในการทำโครงการนี้จาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมพร เรืองสินชัยวานิช ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ช่วยประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้กับผู้ดำเนินโครงการนอกจากนี้ยังต้องขอบคุณทางภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ที่เอื้อเฟื้อเครื่องมือและอุปกรณ์ในการทำโครงการนี้ จนโครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปได้

เหนือสิ่งอื่นใด ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาที่ได้ส่งเสียค่าเล่าเรียนและเป็นกำลังใจให้รวมทั้งเป็นผู้ให้ทุกสิ่งทุกอย่างตั้งแต่เยาว์วัยจนจนถึงปัจจุบัน จนทำให้ได้รับความสำเร็จทุกวันนี้ทางผู้ดำเนินโครงการจะไม่ลืมพระคุณของทุกท่านที่เราได้กล่าวมาข้างต้นตลอดไป

อดิศักดิ์ พรมอยู่

สารบัญ

หน้า

ใบรับรองปริญญาโท	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.6 งบประมาณ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ทฤษฎีหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง	4
2.1.1 โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง	4
2.1.2 หลักการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง	4
2.1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างขดปฐมภูมิและขดทุติยภูมิ	6
2.1.4 การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า	6
2.1.5 ทฤษฎีแม่เหล็ก	7
2.2 รูปแบบการพันของหม้อแปลงไฟฟ้า	8
2.2.1 เทคนิคการพันขดลวดทองแดงสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง	8
2.3 กำลังสูญเสียและประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง	10
2.3.1 กำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก	10

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.2 กำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดตัวนำ.....	13
2.3.3 ประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	16
2.4 ทฤษฎีเกี่ยวกับไฟไนต์เอลิเมนต์.....	16
2.4.1 ขั้นตอนทั่วไปของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	16
2.4.2 เมชในวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	19
2.4.3 สมการไฟไนต์เอลิเมนต์.....	20
2.4.4 ฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์สามมิติ.....	23
2.4.5 เอลิเมนต์สามมิติ.....	24
2.4.6 ทฤษฎีค่าความผิดพลาด.....	26
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	28
3.1 เปรียบเทียบผลการทดลอง.....	30
3.1.1 การทดสอบเพื่อหาค่าสูญเสียในห้องปฏิบัติการ.....	31
3.1.2 การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	32
3.2 การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยวิธีการเปลี่ยนรูปแบบการพัน.....	34
3.2.1 การพันขดลวดแบบชั้น.....	35
3.2.2 การพันขดลวดแบบแซนด์วิช.....	36
3.2.3 การพันขดลวดแบบอินเตอร์ลิฟ.....	37
3.3 ทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยวิธีไฟไนต์.....	38
บทที่ 4 ผลการทดสอบ.....	37
4.1 เปรียบเทียบผลการทดลอง.....	37
4.1.1 ผลการทดสอบเพื่อหาค่าสูญเสียในห้องปฏิบัติการ.....	38
4.1.2 ผลการจำลองการทำงานหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	39
4.1.3 สรุปผลการเปรียบเทียบผลการทดลอง.....	40
4.2 การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยวิธีไฟไนต์.....	40

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.1 ผลการผันขดลวดแบบชั้นแบบที่ 2.....	41
4.2.2 ผลการผันขดลวดแบบเซนคัวร์	41
4.2.3 ผลการผันขดลวดแบบอินเตอร์ลิต์.....	42
4.2.4 ผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการ	43
4.2.5 สรุปผลการออกแบบการผันหม้อแปลงไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการ	45
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	48
5.1 สรุปผลการดำเนิน โครงการ	48
5.2 ประเมินผลการทดลอง.....	49
5.3 ปัญหาข้อเสนอแนะและแนวทางการแก้ไขปัญหา.....	49
5.4 ข้อดีการศึกษาหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพ	50
5.5 แนวทางในการพัฒนาต่อไป.....	50
เอกสารอ้างอิง.....	51
ภาคผนวก	52
ประวัติผู้ดำเนินโครงการ	57

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 รายละเอียดของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง	29
3.2 คุณสมบัติของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ถูกสร้างด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์	33
4.1 ผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการ	37
4.2 ผลการจำลองการทำงานหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	38
4.3 ผลการเปรียบเทียบระหว่างการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการกับการใช้โปรแกรม คอมพิวเตอร์คำนวณหาค่าด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	39
4.4 ผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีรูปแบบการพันที่ต่างกันในห้องปฏิบัติการ	43
4.5 ผลสรุปการเปรียบเทียบค่าความสูญเสียรวมและค่าประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า	46



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าในอุดมคติ ขณะไม่มีโหลด	5
2.2 การทดสอบเบ็ดดวงจร	6
2.3 การทดสอบลัดวงจร	7
2.4 การพันขดลวดแบบชั้น(Stack Winding)	9
2.5 การพันขดลวดแบบแซนด์วิช (Sandwich Winding)	9
2.6 การพันขดลวดแบบอินเตอร์ลีฟ (Interleave Winding)	10
2.7 การจัดเรียงแมกเนติกโคโพลในโดเมนของวัสดุแม่เหล็ก	11
2.8 เส้นแรงแม่เหล็กและวงรอบฮิสเตอร์ีซิส	11
2.9 ลักษณะการเกิดกระแสไหลวนในแกนเหล็ก	12
2.10 แสดงสัญลักษณ์วงจรความต้านทาน.....	13
2.11 ลักษณะการเกิดกระแสไหลวนในลวดทองแดง ขณะกระแสลัดไหลผ่าน	14
2.12 ลักษณะของความหนาผิวนำกระแสของขดลวดทองแดง (Skin Depth)	15
2.13 แสดงการแบ่งรูปร่างปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์แบบต่างๆ.....	17
2.14 เอลิเมนต์สามเหลี่ยมแบบอย่างประกอบด้วย 3 จุด.....	17
2.15 แสดงลักษณะของเมช.....	19
2.16 แสดงเอลิเมนต์ในสามมิติโดยทั่วไปที่ประกอบด้วย r ต่อจุด	20
2.17 แสดงเอลิเมนต์ทรงสี่หน้าในสามมิติ	23
2.18 แสดงการถ่ายเทความร้อนในเอลิเมนต์ทรงสี่หน้า	24
3.1 วิธีคำนวณงานวิจัย.....	28
3.2 โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส	29
3.3 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า.....	30
3.4 การสร้างแบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	31
3.5 การทดสอบหาค่าความสูญเสียแกนเหล็ก	32
3.6 การทดสอบลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง	32
3.7 หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง	32
3.8 รูปแบบการพันแบบชั้นแบบที่ 1	34

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.9 รูปแบบการพันขดลวดแบบชั้นแบบที่ 2.....	34
3.10 รูปแบบการพันขดลวดแบบแซนควิช.....	35
3.11 รูปแบบการพันขดลวดแบบอินเตอร์ลิฟ.....	35
3.12 โครงสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าในไฟไนต์เอลิเมนต์.....	35
4.1 แสดงผลการจำลองการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	38
4.2 กราฟเปรียบเทียบค่าความสูญเสียรวมของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	39
4.3 กราฟเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	40
4.4 ผลการพันขดลวดแบบชั้นแบบที่ 2.....	41
4.5 ผลการพันขดลวดแบบแซนควิช.....	41
4.6 ผลการพันขดลวดแบบอินเตอร์ลิฟ.....	42
4.7 รูปแบบการพันขดลวดแบบต่างๆ.....	43
4.8 กราฟเปรียบเทียบค่าความสูญเสียรวมของหม้อแปลงไฟฟ้าซึ่งมีรูปแบบการพันต่างกัน.....	44
4.9 กราฟเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าซึ่งมีรูปแบบการพันต่างกัน.....	45
4.10 กราฟเปรียบเทียบค่าความสูญเสียรวมของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อเทียบกับหม้อแปลงไฟฟ้า ต้นแบบ.....	46
4.11 กราฟเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อเทียบกับหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ	47

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

หม้อแปลงไฟฟ้า คือ อุปกรณ์สำหรับแปลงระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้มีขนาดแรงดันตามที่ต้องการ หม้อแปลงไฟฟ้าถูกนำไปประยุกต์ใช้งานหลากหลายด้าน เช่น ในระบบส่งจ่ายไฟฟ้า ในเครื่องใช้ไฟฟ้าประเภทต่าง ๆ เช่น โทรทัศน์ เครื่องขยายเสียง วิทยุ หรือแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง นับว่าหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญต่อเครื่องมือเครื่องใช้ทั้งในงานทางไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์

โดยปกติหม้อแปลงไฟฟ้ามักถูกใช้งานเป็นเวลานานและต่อเนื่อง ประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าจะส่งผลโดยตรงต่อการสิ้นเปลืองพลังงานขณะใช้งาน โดยส่วนมากผู้ผลิตหม้อแปลงไฟฟ้าจะเน้นการแข่งขันทางการตลาด ต้นทุนการผลิตหม้อแปลงไฟฟ้า จะเป็นปัจจัยหลักของผู้ผลิตที่พิจารณา ส่งผลโดยตรงต่อการคำนึงถึงประสิทธิภาพของหม้อแปลงที่อาจน้อยลงเพื่อให้หม้อแปลงที่ผลิตสามารถแข่งขันได้ โครงการนี้ มุ่งเน้นการปรับปรุงประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าที่วางขายตามท้องตลาด (โดยสุ่มเลือก) มาพิจารณา ทั้งนี้ขั้นตอนการปรับปรุงจะออกแบบให้มีผลกระทบต่อต้นทุนการผลิตหม้อแปลงไฟฟ้าให้น้อยที่สุด โดยพิจารณาจากพารามิเตอร์เบื้องต้นของหม้อแปลงไฟฟ้า เช่น การสูญเสียในแกนเหล็ก การสูญเสียในตัวนำและรูปแบบการพันของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element) ร่วมพิจารณาการปรับปรุงนี้

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1.2.1 เพื่อศึกษาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า
- 1.2.2 เพื่อศึกษาระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า
- 1.2.3 เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้จากโครงการ

- 1.5.1 เข้าใจค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า
- 1.5.2 สามารถนำระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้วิเคราะห์ประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า
- 1.5.3 ได้หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูงเกินกว่า ต้นแบบที่เสื้อมา อย่างน้อย 2 เปอร์เซ็นต์

1.6 งบประมาณ

ค่าอุปกรณ์การทำโครงการ	1,000 บาท
รวมเป็นเงินทั้งสิ้น (สองพันบาทถ้วน)	<u>1,000 บาท</u>



บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีและหลักการเบื้องต้นในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย 4 ทฤษฎี ได้แก่ ทฤษฎีหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง รูปแบบการพันของหม้อแปลงไฟฟ้า กำลังสูญเสียในหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง และประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า และทฤษฎีเกี่ยวกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

2.1 ทฤษฎีหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง

2.1.1 โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง

โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงจะมีส่วนประกอบสำคัญอยู่ 4 ส่วน ได้แก่ แกนเหล็ก ขดลวดตัวนำ บอบบิ้นและเทปฉนวน

1. แกนเหล็ก

แกนแม่เหล็กชนิดอัดผงอัดเป็นสารที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนซึ่งทำหน้าที่แยกอนุภาคต่างๆ ออกจากกัน นอกจากนี้แกนแม่เหล็กแบบผง โลหะอัดจะมีคุณสมบัติในการสะสมพลังงานได้ดีจึงนิยมใช้เป็นตัวแทน

2. ขดลวดทองแดง

การพันขดลวดทั้งปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง ปกติจะใช้ขดลวดทองแดงอาบน้ำยาพันบนแกนบอบบิ้น ส่วนขนาดของขดลวดทองแดงนั้นขึ้นอยู่กับค่ากระแสสูงสุดที่ไหลผ่านขดลวด ความถี่และผลข้างเคียงอื่นๆ

3. บอบบิ้น

บอบบิ้นจะทำจากพลาสติกชนิดไม่ติดไฟและทนความร้อนได้สูง ส่วนใหญ่บอบบิ้นจะถูกออกแบบให้มีที่พักขดลวดเพื่อความสะดวกในการพันขดลวดทองแดงและยังสามารถป้องกันปัญหาการลัดวงจรระหว่างขดลวดกับแกนเหล็ก

4. เทปฉนวน

เทปฉนวนมีหน้าที่หลักในการแยกระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ เทปฉนวนอาจจะเป็นพวกโพลีเอสเตอร์ (Polyester) หรือ ไมลาร์ (Mylar) ที่มีความหนาในช่วง 0.05-0.1 มิลลิเมตรการเลือกใช้นั้นขึ้นอยู่กับการออกแบบ

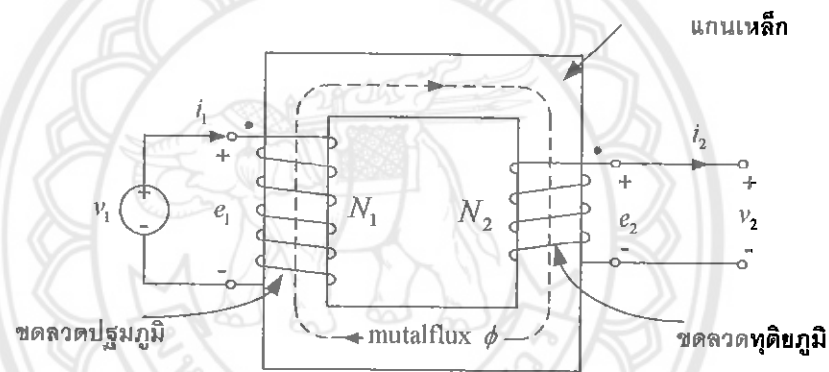
2.1.2 หลักการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง

การทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าอาศัยหลักการความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับเส้นแรงแม่เหล็กในการสร้างแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำให้กับตัวนำกล่าวคือ เมื่อมีกระแสไหลผ่านขดลวด

ตัวนำก็จะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กรอบๆ ตัวนำนั้น และถ้ากระแสที่ป้อนมีขนาดและทิศทางที่เปลี่ยนแปลงไปมาจะทำให้สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นมีการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย เมื่อสนามแม่เหล็กตัดผ่านตัวนำก็จะเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นที่ตัวนำนั้น โดยขนาดของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำจะสัมพันธ์กับความเข้มของสนามแม่เหล็กและความเร็วในการตัดผ่านตัวนำของสนามแม่เหล็ก

ในกรณีนี้หม้อแปลงไฟฟ้าไม่มีการต่อโหลด (ขดลวดด้านทุติยภูมิไม่มีการต่อ โหลด) เมื่อป้อนแรงเคลื่อนไฟฟ้า (v_1) เข้าไปที่ขดลวดปฐมภูมิ พบว่าขดลวดปฐมภูมิสามารถสร้างเส้นแรงแม่เหล็ก จำนวนหนึ่งไหลผ่านตามแกนเหล็กส่งผลให้เกิดแรงดันตกคร่อมที่ขดลวดปฐมภูมิ มีค่าเป็น (e_1) และมีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้า (v_1) ดังนั้นเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$v_1 = e_1 = \frac{d\lambda_1}{dt} = N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad (2.1)$$



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าในอุดมคติ ขณะไม่มีโหลด [1]

เมื่อ $\lambda_1 (= N_1\phi)$ คือ เส้นแรงแม่เหล็ก ซึ่งขดลวดด้านปฐมภูมิ N_1 และค่าเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก (e_1) จะมีความสัมพันธ์กับแรงดันไฟฟ้า (v_1) ดังรูปที่ 2.1 เมื่อหม้อแปลงมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดปฐมภูมิ ทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กไหลผ่านไปตามแกนเหล็ก โดยมีทิศตรงข้ามกับการเปลี่ยนแปลงเส้นแรงแม่เหล็กเชื่อมโยงขดลวดที่เกิดขึ้น

เส้นแรงแม่เหล็กในแกนที่เชื่อมโยงไปทางด้านทุติยภูมิจะทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำ e_2 ซึ่งมีค่าเท่ากับแรงดันที่ขั้ว v_2 โดยสามารถเขียนสมการเป็น

$$v_2 = e_2 = \frac{d\lambda_2}{dt} = N_2 \frac{d\phi}{dt} \quad (2.2)$$

เมื่อพิจารณาอัตราส่วนระหว่างปริมาณด้านปฐมภูมิต่อด้านทุติยภูมิจะได้

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \quad (2.3)$$

2.1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างขดปฐมภูมิและขดทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง

หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงจะมีความสัมพันธ์ของจำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิเป็นไปตามทฤษฎีหม้อแปลงไฟฟ้า จะเป็นสมการดังนี้

$$\frac{N_1}{N_2} = \sqrt{\frac{L_1}{L_2}} \quad (2.4)$$

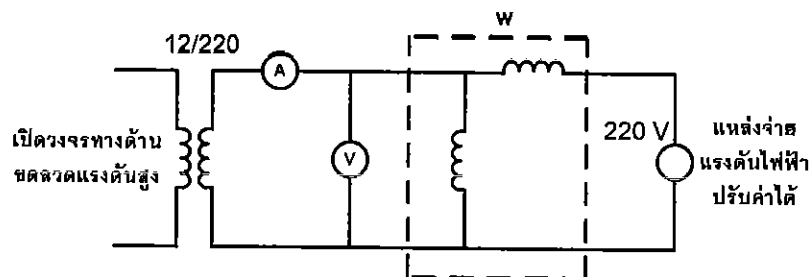
- เมื่อ N_1 คือ จำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิ
 N_2 คือ จำนวนรอบของขดลวดทุติยภูมิ
 L_1 คือ ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดปฐมภูมิ (H)
 L_2 คือ ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดทุติยภูมิ (H)

2.1.4 การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า

การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้ามี 2 วิธี ได้แก่ การทดสอบเปิดวงจร (Open Circuit Test) และการทดสอบลัดวงจร (Short Circuit Test) ดังนี้

1. การทดสอบเปิดวงจร (Open Circuit Test)

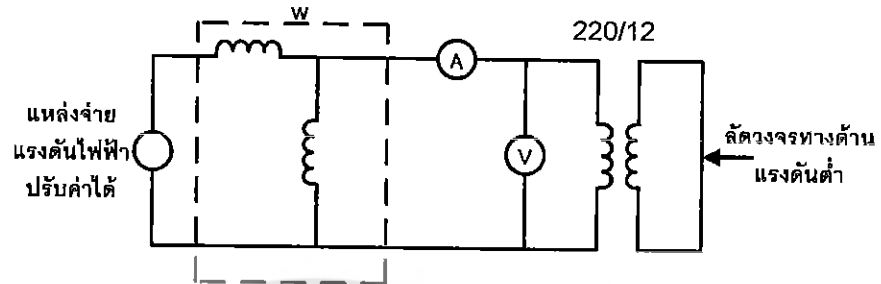
การทดสอบเปิดวงจรเป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความสูญเสียในแกนตัวนำแม่เหล็ก ซึ่งการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง กระทำโดยการเปิดวงจรทางด้านแรงดันไฟฟ้าต่ำ และจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่พิกัดเข้าที่ด้านแรงดันไฟฟ้าสูงดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การทดสอบเปิดวงจร[2]

2. การทดสอบลัดวงจร (Short Circuit Test)

การทดสอบลัดวงจรเป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความสูญเสียในขดลวดทองแดง ซึ่งการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง กระทำโดยการลัดวงจรทางด้านแรงดันไฟฟ้าต่ำ และจ่ายกระแสไฟฟ้าที่พิกัดเข้าที่ด้านแรงดันไฟฟ้าสูง



รูปที่ 2.3 การทดสอบลัดวงจร[2]

2.1.5 ทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้า

สนามแม่เหล็กไฟฟ้าคือปัจจัยที่สำคัญในการแปรผันพลังงานระหว่างพลังงานทางกลกับพลังงานไฟฟ้า

แรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้า (Magneto Motive Force)

แรงเคลื่อนแม่เหล็ก เปรียบเสมือนเป็นแหล่งจ่ายของวงจรแม่เหล็กที่เกิดขึ้น โดยแรงเคลื่อนไฟฟ้าจะเป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับตัวแปรสองส่วน คือ จำนวนรอบของขดลวดที่พันอยู่ในแกนเหล็กและกระแสที่ไหลในขดลวดดังในสมการ (2.5)

$$mmf = F = Ni \quad (2.5)$$

เมื่อ F คือ แรงเคลื่อนแม่เหล็ก (At)

N คือ จำนวนรอบของขดลวด

i คือ กระแสที่ไหลในขดลวด (A)

วัสดุแม่เหล็ก

ความซึมซาบได้ของวัสดุ (Permeability) มีตัวแปร 2 ตัวที่สำคัญ คือ ความซึมซาบได้ของอากาศ และค่าความซึมซาบได้สัมพัทธ์ของวัสดุ (Relative Permeability) โดยค่าความซึมซาบได้ของวัสดุมีผลต่อค่าความเข้มสนามแม่เหล็กและความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กดังในสมการ (2.6)

$$B = \mu H \quad (2.6)$$

เมื่อ B คือ ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (T)

μ คือ ความซึมซาบได้ของวัสดุ

H คือ ความเข้มสนามแม่เหล็ก (At/m)

วงจรแม่เหล็กขณะทำงานไฟกระแสสลับ

เมื่อวงจรแม่เหล็กถูกกระตุ้นด้วยไฟกระแสสลับ ค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้าจะก่อให้เกิดการเหนี่ยวนำของขดลวด โดยสามารถหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าได้จากสมการ (2.7)

$$E_{rms} = 4.44 N f B_{max} A \quad (2.7)$$

2.2 รูปแบบการพันของหม้อแปลงไฟฟ้า

การกำหนดขนาดและวิธีการพันของขดลวดทองแดงที่เหมาะสมจะสามารถช่วยลดการสูญเสียในของลวดทองแดงให้มีค่าน้อยลงได้ สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงจะพันด้วยขดลวดทองแดงอบน้ำยา กระแสสลับที่ไหลผ่านขดลวดนี้มีความถี่สูงและที่ความถี่สูงๆ ลวดทองแดงจะนำกระแสได้แค่ที่ผิวมีผลทำให้พื้นที่หน้าตัดในการนำกระแสลดลง ดังนั้นการสูญเสียในขดลวดจึงมากขึ้นรวมถึงการเรียงซ้อนกันของขดลวดก็ทำให้เกิดการสูญเสียขึ้นในขดลวดเช่นเดียวกัน

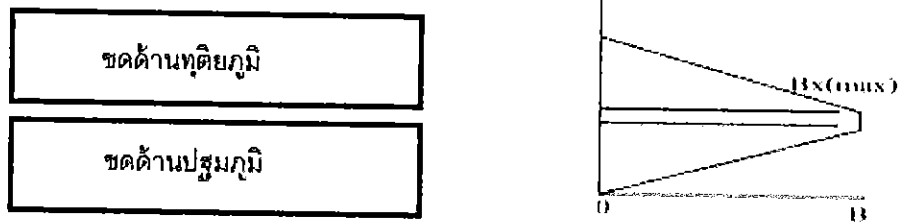
2.2.1 เทคนิคการพันขดลวดทองแดงสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง [3]

รูปแบบในการพันขดลวดทองแดงคำว่า พอร์ชัน (Portion) หมายถึง ชั้นของขดลวดทองแดงชุดหนึ่งๆ ที่มีความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่น้อยที่สุดไปจนถึงมากที่สุดและจำนวนชั้นในพอร์ชันเรียกว่าเลเยอร์ (Layer) คือจำนวนขดลวดทองแดงที่เรียงซ้อนกันในหนึ่งพอร์ชัน โดยมีรูปแบบอยู่ 3 ลักษณะคือ

- การพันขดลวดแบบเป็นชั้น (Stack Winding)
- การพันขดลวดแบบแซนด์วิช (Sandwich Winding)
- การพันขดลวดแบบอินเตอร์ลัค (Interlaced Winding)

1 การพันขดลวดแบบชั้น (Stack Winding)

การพันขดลวดแบบเป็นชั้นเป็นการพันขดลวดค้ำปฐมภูมิให้ครบรอบตามที่ต้องการวางทับซ้อนกันไปทีละชุด ไปเรื่อยๆ จากนั้นจึงพันขดลวดทุติยภูมิทับไปบนปฐมภูมิให้ครบตามที่ต้องการดังรูปที่ 2.4



(a) การพันขดลวดแบบชั้น

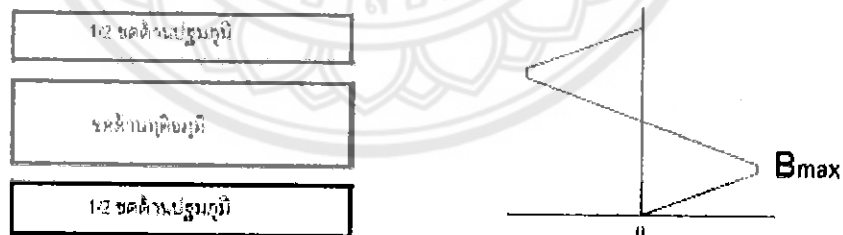
(b) ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในตัว

รูปที่ 2.4 การพันขดลวดแบบชั้น [3]

การกำหนดจำนวนชั้นในพอร์ชัน รูปที่ 2.5(a) จะเห็นว่าจำนวนชั้นของขดลวดปฐมภูมิทั้งหมดอยู่ในพอร์ชัน จำนวนชั้นทั้งหมดของขดลวดทุติยภูมิก็อยู่ในอีกที่หนึ่งพอร์ชันเช่นกันและรูปที่ 2.5(b) แสดงความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในตัว ซึ่งการพันขดลวดแบบชั้นจะเห็นว่าเกิดเส้นแรงแม่เหล็กในตัวในขดลวดทองแดงสูงสุด

2 การพันขดลวดแบบแซนด์วิช (Sandwich Winding)

การพันขดลวดแบบแซนด์วิชเป็นการพันขดลวดทองแดงให้ได้ครบรอบตามที่ต้องการ โดยแบ่งขดลวดปฐมภูมิออกเป็นสองส่วนและนำขดลวดทุติยภูมิคั่นระหว่างกลาง การแบ่งส่วนการพันจะเป็นการลดความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในตัว และลดจำนวนชั้นในแต่ละพอร์ชันลงได้ดังรูปแสดงรูปที่ 2.5



(a) การพันขดลวดแบบแซนด์วิช

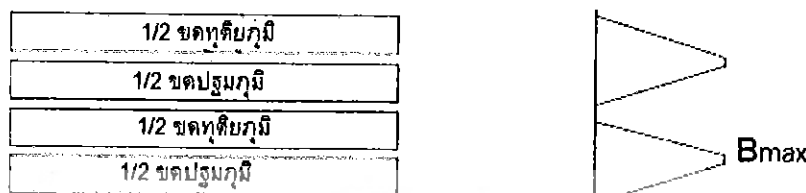
(b) ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในตัว

รูปที่ 2.5 การพันขดลวดแบบแซนด์วิช [3]

การพันขดแบบแซนด์วิชสามารถลดความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในตัวในขดลวดทองแดงได้จากรูปที่ 2.6 (b) การลดจำนวนชั้นของขดลวดในหนึ่งพอร์ชันลง โดยการพันแยกขดลวดปฐมภูมิออกเป็นสองส่วนเท่าๆกัน

3 การพันขดลวดแบบอินเตอร์ลีฟ (Interleave Winding)

การออกแบบการพันหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบอินเตอร์ลีฟ จะมีหลักการออกแบบโดยจัดให้วางตำแหน่งขดปฐมภูมิ และขดทุติยภูมิออกเป็นชั้นๆ แล้วนำไปวางสลับกันกันระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ โดยจะต้องแบ่งเป็นคู่เท่านั้นดังรูปที่ 2.6



(a) การพันขดลวดแบบอินเตอร์ลีฟ (b) ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในตัว

รูปที่ 2.6 การพันขดลวดแบบอินเตอร์ลีฟ [3]

การพันขดลวดแบบอินเตอร์ลีฟสามารถลดความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในตัวทองแดง จากรูปที่ 2.7(b) พบว่าจะความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในตัวทองแดงสูงสุด

2.3 กำลังสูญเสียในหม้อแปลงไฟฟ้าและประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง

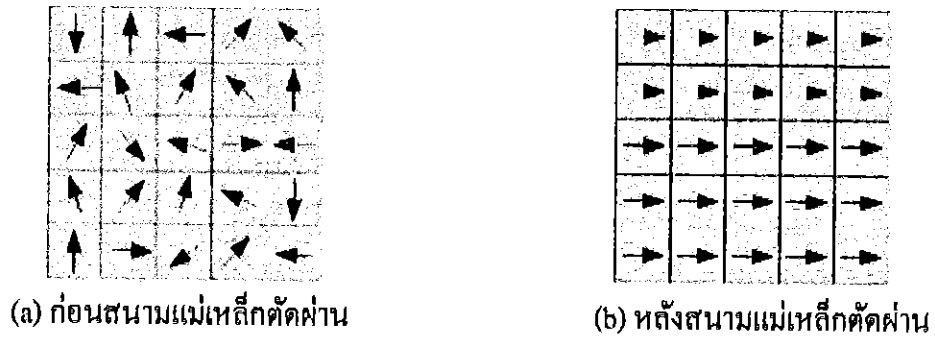
กำลังสูญเสียในหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงจะพิจารณา 2 ส่วนสำคัญ คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก (Core Loss) และกำลังสูญเสียในขดลวดทองแดง (Copper Loss) เมื่อพิจารณาจะมีสาเหตุที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

2.3.1 กำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก (Core Loss; P_c)

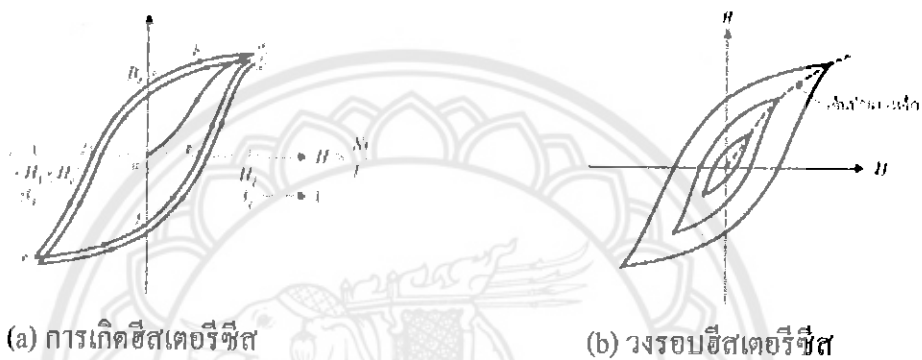
กำลังงานสูญเสียในแกนเหล็ก แบ่งการสูญเสียออกเป็น 2 แบบคือ ความสูญเสียเนื่องจากฮิสเทอรีซิส (Hysteresis Loss) และความสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน (Eddy-Current Loss) ดังรายละเอียดต่อไปนี้

ความสูญเสียเนื่องจากฮิสเทอรีซิส (Hysteresis Loss)

เมื่อสนามแม่เหล็กภายนอกที่กระทำกับวัสดุแม่เหล็กเกิดการกลับทิศทาง โดยอาจจะเกิดการลดค่าลงจนกลายเป็นศูนย์ วัสดุแม่เหล็ก (Ferro Magnetism) จะยังคงมีเส้นแรงแม่เหล็กแม่เหล็กตกค้าง (Residual Flux : ϕ_{res}) อยู่ภายใน เนื่องจากการจัดเรียงตัวกันของ (Magnetic Dipole Moment) ของอะตอมของวัสดุแม่เหล็กดังกล่าวยังคงเป็น โดเมนที่มีความเป็นระเบียบ และมีทิศทางขนานกันจึงยังคงอำนาจแม่เหล็กอ่อน ๆ เอาไว้ได้ รูปที่ 2.7 แสดงการจัดเรียงของแมกเนติกไดโพล (Magnetic Dipole) ของอะตอมต่างๆ ของวัสดุแม่เหล็กก่อนและหลังมีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน



รูปที่ 2.7 การจัดเรียงแมกเนติกโดโพลาในโดเมนของวัสดุแม่เหล็ก [1]



รูปที่ 2.8 เส้นแม่เหล็กและวงรอบฮิสเทอรีซิส [1]

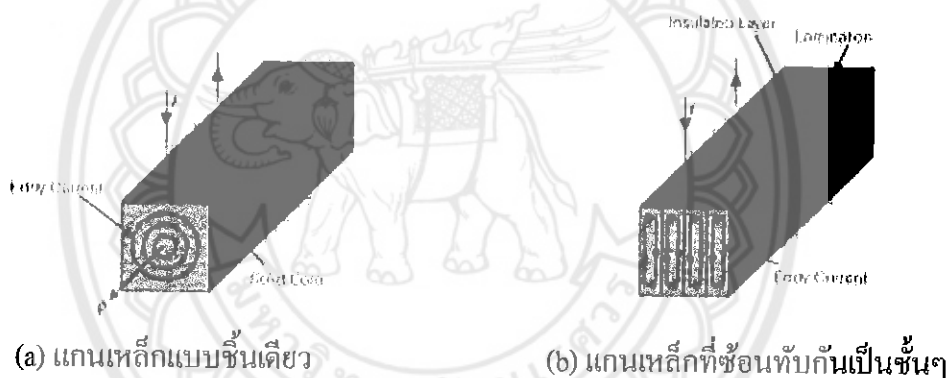
จากเส้นโค้งอิมิตัวของวัสดุแม่เหล็กจะพบว่า วงรอบปิดที่เกิดขึ้นจากการกลับทิศทางของสนามแม่เหล็กเรียกว่า วงรอบฮิสเทอรีซิส (Hysteresis Loop) ดังรูปที่ 2.8 พื้นที่ที่อยู่ภายในวงรอบฮิสเทอรีซิส นี้ก็คือกำลังงานที่สูญเสียในรูปของฮิสเทอรีซิสนั่นเอง วงรอบฮิสเทอรีซิส จะเกิดขึ้นเมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับเข้าไปที่ขดลวด จะทำให้เกิดวงรอบปิดนี้ขึ้นทุกๆ รอบการทำงาน โดยขนาดของวงรอบฮิสเทอรีซิสจะขึ้นอยู่กับความถี่ของไฟที่ป้อนนั่นเอง ถ้าใช้ไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงจะทำให้เกิดการสูญเสียฮิสเทอรีซิสสูงกว่าความถี่ต่ำ กำลังงานสูญเสียสามารถหาได้จากสมการของสแตนเมทซ์ ดังต่อไปนี้

$$P_{\text{loss}} = n_h B_{\text{max}}^{1.6} A l f \tag{2.8}$$

- เมื่อ n_h คือ ค่าคงที่แปรตามธรรมชาติของวัสดุที่ทำแกนเหล็กหม้อแปลงไฟฟ้า
- $A l$ คือ ปริมาตรของแกนเหล็ก (m^3)
- B_{max} คือ ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กแม่เหล็กสูงสุด (T)
- f คือ ความถี่ของกระแสที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (Hz)

ความสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน (Eddy-Current Loss)

ความสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน เกิดขึ้นเนื่องจากมีสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาดัดผ่านจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (EMF) ครอบคลุมตลอด และสนามแม่เหล็กจะเหนี่ยวนำบริเวณแกนเหล็กเช่นกัน ทำให้เกิดกระแสไหลวนในแกนเหล็กอันเนื่องมาจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้น กระแสเหนี่ยวนำนี้จะเกิดขึ้นในลักษณะหมุนวนในแกนเหล็กล้อมรอบสนามแม่เหล็กที่เหนี่ยวนำขึ้นมา เรียกว่ากระแสหมุนวน ดังแสดงในรูปที่ 2.9 กำลังงานสูญเสียในรูปของกระแสหมุนวนนี้ทำให้ลดลงได้โดยการลดขนาดของกระแสหมุนวนที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้น โดยการสร้างแกนเหล็กด้วยแผ่นวัสดุแม่เหล็กซ้อนกันเป็นชั้น ๆ (Lamination) ทำให้กระแสหมุนวนที่เกิดขึ้นถูกจำกัดอยู่ในชั้นย่อยนั้นๆ ช่วยลดกำลังงานสูญเสียดังกล่าวได้ แต่สำหรับความถี่สูงตั้งแต่ 100kHz ขึ้นไปวิธีนี้ไม่สามารถใช้ได้ ในการทำแกนเหล็กหม้อแปลงและการสูญเสียในแกนเหล็กหาได้โดยการทดสอบในสภาวะเปิดวงจร



รูปที่ 2.9 ลักษณะการเกิดกระแสไหลวนในแกนเหล็ก[1]

โดยที่ กำลังงานสูญเสียสามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$P_{eddy} = n_e B_{max}^2 A l f^2 \quad (2.9)$$

- เมื่อ n_e คือ ค่าคงที่แปรตามธรรมชาติของวัสดุที่ทำแกนเหล็กหม้อแปลงไฟฟ้า
 $A l$ คือ ปริมาตรของแกนเหล็ก (m^3)
 B_{max} คือ ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กแม่เหล็กสูงสุด (T)
 f คือ ความถี่ของกระแสที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (Hz)

จากกำลังงานสูญเสียทั้ง 2 ส่วนรวมกัน จะได้กำลังงานสูญเสียรวมในแกนเหล็กดังนี้

$$\begin{aligned}
 P_c &= P_{hvs} + P_{eddy} \\
 &= n_h B_{\max}^{1.6} A l f + n_e B_{\max}^2 A l f^2 \\
 &= A l f (n_h B_{\max}^{1.6} + n_e B_{\max}^2 f)
 \end{aligned}
 \tag{2.10}$$

2.3.2 กำลังงานสูญเสียที่ขดลวดตัวนำ (Copper Loss ; P_{cu})

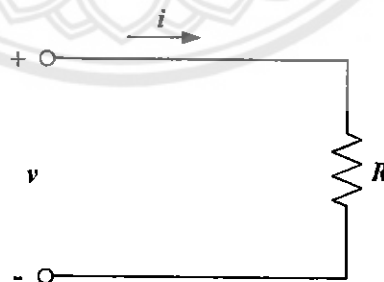
หม้อแปลงไฟฟ้ามีส่วนประกอบ 2 ส่วนที่สำคัญ ได้แก่ แกนเหล็กและขดลวด โดยขดลวดจะทำหน้าที่เป็นตัวนำให้กระแสไหลผ่าน แต่ถ้ามองในอีกมุมหนึ่งจะเห็นว่าขดลวดจะมีค่าความต้านทานในตัวมันเอง ดังสมการ (2.11)

$$R_{coil} = \frac{\rho l_{coil}}{A_{coil}} \tag{2.11}$$

เมื่อ	R_{coil}	คือ ค่าความต้านทานของขดลวด (Ω)
	ρ	คือ ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของขดลวด ($\Omega \cdot m$)
	A_{coil}	คือ พื้นที่หน้าตัดของขดลวด (m^2)
	l	คือ ความยาวของขดลวด (m)

กฎของโอห์มกล่าวว่า แรงดันคร่อมตัวต้านทานจะแปรผันตรงกับกระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทาน ซึ่งค่าคงที่การแปรผันจะมีค่าเท่ากับค่าความต้านทานของตัวต้านทาน ดังสมการ (2.12)

$$v = Ri \tag{2.12}$$



รูปที่ 2.10 แสดงสัญลักษณ์วงจรความต้านทาน[2]

ในความเป็นจริง ตัวต้านทานในทางปฏิบัติมักจะเป็นตัวต้านทานไม่เชิงเส้น เนื่องจากตัวนำทั้งหมดมีลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าที่ขึ้นอยู่กับปัจจัยแวดล้อมอื่นๆ เช่น อุณหภูมิ เป็นต้น

จากสมการ (2.12) และรูปที่ 2.10 แสดงให้เห็นว่า ถ้า $i > 0$ กระแสไหลตามทิศทางของ ลูกศรแล้วจะได้ว่า $v > 0$ เพราะว่าตัวต้านทานเป็นองค์ประกอบแบบดुकกลืนพลังงาน ดังนั้นกระแส จะไหลเข้าขั้วที่มีศักย์สูงกว่าแล้วไหลออกจากขั้วที่มีศักย์ต่ำกว่า

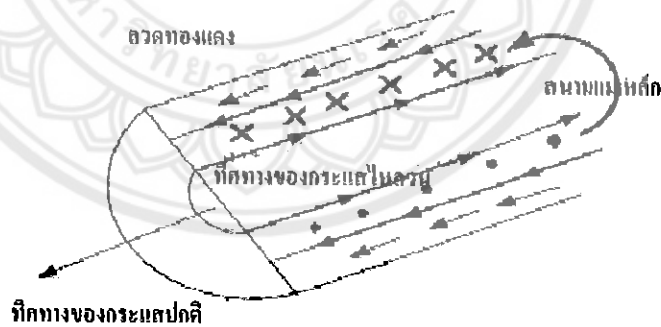
เนื่องจากประจุเคลื่อนที่จากขั้วที่มีศักย์สูงไปยังขั้วที่มีศักย์ต่ำกว่าผ่านตัวต้านทาน พลังงานที่สูญเสียเท่ากับ $q \cdot v$ ซึ่งจะกลายเป็นความร้อนสูญเสียออกนอกระบบไป อัตราของการ กระจายพลังงานในรูปของความร้อน อันเป็นนิยามของกำลังงาน คือ

$$p(t) = v(t)i(t) = Ri^2(t) = \frac{v^2(t)}{R} \tag{2.13}$$

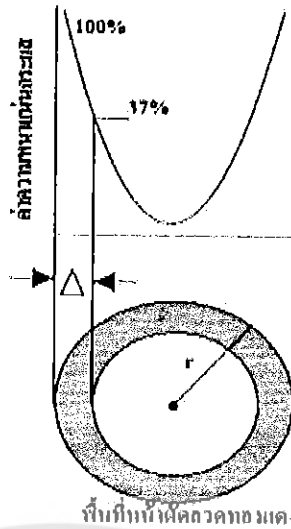
จากสมการ (2.13) พบว่าพลังงานที่เกิดขึ้นที่ตัวต้านทานเป็นพลังงานที่สูญเสียภายใน ขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้านั่นเอง

ผลจากการนำกระแสแค่เพียงที่ผิวของขดลวดทองแดง (Skin Effect)

ลวดทองแดงเมื่อมีกระแสสลับไหลผ่านจะเกิดสนามแม่เหล็กไหลวนที่ภายในและ รอบๆตัวมันสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไหลวน (Eddy Current) ขึ้นมา ภายในตัวลวดทองแดงอีกหนึ่ง การไหลของกระแสไหลวนนี้ จะทำให้กระแสปกติไหลได้เฉพาะที่ ผิวของลวดทองแดง ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ลักษณะของกระแสไหลวนภายในลวดทองแดง ขณะกระแสสลับไหลผ่าน[3]



รูปที่ 2.12 ลักษณะของความหนาผิวนำกระแสของขดลวดทองแดง (Skin Depth)[3]

ปริมาณของกระแสปกติจะยังคงเท่าเดิมแต่ความหนาแน่นของกระแสในลวดทองแดงที่ใกล้ผิวจะมีค่าสูงกว่าเพราะกระแสส่วนใหญ่ไหลได้เฉพาะที่ผิวนั้น การไหลของกระแสไหลวนจะเป็นการจำกัดพื้นที่นำกระแสของลวดทองแดง และมีผลเหมือนพื้นที่นำกระแสของขดลวดทองแดงลดลงจากพื้นที่หน้าตัดเดิมของมัน

จากผิวของลวดทองแดงลึกลงมาในเนื้อลวดทองแดง จนถึงจุดที่ค่าความหนาแน่นของกระแสมีค่าลงมาถึงเพียง 37 เปอร์เซ็นต์ของค่าความหนาแน่นกระแสที่ผิวนั้น เราเรียกว่าระยะนี้ว่าเป็นความหนาผิวนำกระแสของขดลวดทองแดง (Skin Depth) ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.12 ความหนาของผิวนำกระแสนี้ขึ้นอยู่กับความถี่ และสำหรับลวดทองแดงที่ 100 อดาเซลเซียส ค่าความหนาแน่นของผิวนำกระแสจะมีค่า

$$\Delta = \frac{75}{\sqrt{f}} \tag{2.14}$$

- เมื่อ Δ คือ ความหนาของผิวนำ (mm)
- f คือ ความถี่ของกระแส (Hz)

ผลจากปรากฏการณ์ความใกล้เคียง (Proximity Effect)

ผลของปรากฏการณ์ความใกล้เคียงทางผิวของตัวนำทองแดงจะเกิดในตัวนำทองแดงทุกตัวที่มีกระแสไฟฟ้าความถี่สูงไหลผ่าน ในขณะที่กำลังไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากปรากฏการณ์ความใกล้เคียง จะเกิดจากตัวนำทองแดงที่ใกล้ชิดกันตั้งแต่สองตัวขึ้นไป นอกจากนั้นสำหรับกำลังไฟฟ้าสูญเสียจากผลของปรากฏการณ์ทางผิว จะมีผลเพียงแต่ทำให้ค่าความหนาแน่นของ

กระแสที่อยู่ในบริเวณผิวของตัวนำทองแดงเท่านั้น แต่จะไม่มี การเปลี่ยนแปลงขนาดของ กระแสไฟฟ้าที่ไหลอยู่ในตัวนำแต่อย่างใด ขณะที่สำหรับกำลังสูญเสียไฟฟ้าเนื่องจากปรากฏการณ์ ความไถ่เคียง ค่าของกระแสไหลวนในสายตัวนำทองแดงจะเพิ่มอย่างเอ็กซ์โพเนนเชียล (Exponentially Increase) เมื่อจำนวนชั้นของขดลวดทองแดงเพิ่มมากขึ้น

2.3.3 ประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer Performance) [4]

ประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า (η) หมายถึง อัตราส่วนระหว่างกำลังไฟฟ้าขา ออก (Output Power; P_o) ต่อกำลังไฟฟ้าขาเข้า (Input Power; P_{in}) ซึ่งจะต้องมีหน่วยเดียวกัน ดังนั้นสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\eta = \frac{P_o}{P_{in}} = \frac{P_{in} - P_{loss}}{P_{in}} = 1 - \frac{P_{loss}}{P_{in}} \quad (2.15)$$

โดยที่ P_o คือ ผลต่างระหว่างกำลังไฟฟ้าขาเข้าและกำลังไฟฟ้าสูญเสียทั้งหมด

P_{loss} คือ ผลรวมระหว่างความสูญเสียในขดลวดและความสูญเสียในแกนเหล็ก

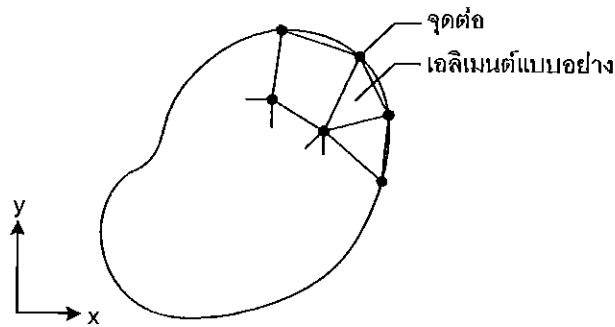
2.4 ทฤษฎีเกี่ยวกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) เป็นวิธีการหาผลเฉลยเชิงตัวเลขวิธีหนึ่ง ที่นิยมใช้กันมากในงานทางวิศวกรรมเนื่องจากเป็นวิธีการคำนวณที่ให้ความแม่นยำ รวดเร็ว และเป็นวิธีที่ประมวลผลการคำนวณที่ซับซ้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพเกินกว่าจะคำนวณได้ด้วยมือโดยอาศัยหลักการง่าย ๆ ของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์กล่าวคือ ทำการเติมรูปทรงของผลิตภัณฑ์ด้วย ชิ้นส่วนเล็กๆ ที่มีรูปทรงเรขาคณิต เช่น สามเหลี่ยม สี่เหลี่ยม ลูกบาศก์ เป็นต้น เนื่องจากสามารถ คำนวณหาคำตอบที่แท้จริงของชิ้นส่วนที่มีรูปทรงเรขาคณิตได้ ดังนั้นเมื่อเติมชิ้นส่วนเล็กๆ เหล่านี้ ลงไปในชิ้นส่วนใหญ่ก็สามารถศึกษาพฤติกรรมโดยรวมของระบบได้ [4]

2.4.1 ขั้นตอนทั่วไปของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

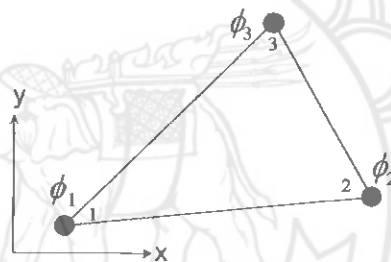
วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ประกอบด้วยขั้นตอนใหญ่ๆ ทั้งหมด 6 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 การแบ่งขอบเขตรูปร่างลักษณะของปัญหาที่ต้องการจะหาผลลัพธ์นั้น ออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ขอบเขตดังกล่าวอาจเป็นขอบเขตของปัญหาชนิด ต่างๆ กัน เช่น ปัญหาความยืดหยุ่นในของแข็ง (Elasticity Problem) ปัญหาเกี่ยวกับอุณหภูมิจึงและความร้อน (Thermal Problem) รวมทั้งปัญหาของการไหล (Fluid Problem)



รูปที่ 2.13 แสดงการแบ่งรูปร่างลักษณะของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์แบบต่างๆ [4]

ขั้นตอนที่ 2 การเลือกฟังก์ชันประมาณภายในเอลิเมนต์ (Element Interpolation Function) เช่น เอลิเมนต์สามเหลี่ยม ดังแสดงในรูปที่ 2.14 เอลิเมนต์ดังกล่าวประกอบด้วย 3 จุดต่อที่มีหมายเลข 1, 2 และ 3 ดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.14 เอลิเมนต์สามเหลี่ยมแบบอย่างประกอบด้วย 3 จุดต่อ โดยมีตัวไม่ทราบค่าอยู่ ณ ตำแหน่งที่จุดต่อ [4]

โดยที่จุดต่อนี้เป็นตำแหน่งของตัวไม่ทราบค่า (Nodal Unknowns) ซึ่งคือ ϕ_1 , ϕ_2 และ ϕ_3 ตัวไม่ทราบค่าที่จุดต่อเหล่านี้ อาจเป็นค่าการขยับหรือหดตัว (Displacement) หากทำปัญหาความยืดหยุ่นในของแข็ง หรืออาจเป็นค่าอุณหภูมิหากทำปัญหาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อน หรือไม่ก็อาจเป็นความเร็วของของเหลวหากทำปัญหาเกี่ยวกับการไหล เป็นต้น ลักษณะการกระจายของตัวไม่ทราบค่าบนเอลิเมนต์นี้ สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันการประมาณภายในและตัวไม่ทราบค่าที่จุดต่อได้ ดังนี้

$$\phi(x, y) = N_1(x, y)\phi_1 + N_2(x, y)\phi_2 + N_3(x, y)\phi_3 \quad (2.16)$$

โดย $N_i(x, y)$, $i = 1, 2, 3$ คือ ฟังก์ชันประมาณภายในเอลิเมนต์ จากสมการ สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของเมทริกซ์ได้ ดังนี้

$$\phi(x, y) = [N_1, N_2, N_3] \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{Bmatrix} \quad (2.17)$$

$$\phi(x, y) = \underset{(1 \times 3)}{[N]} \underset{(3 \times 1)}{\{\phi\}}$$

โดย $[N]$ คือ เมทริกซ์ของฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์ และ $\{\phi\}$ คือ เวกเตอร์เมทริกซ์ที่ประกอบด้วยตัวไม่ทราบค่าที่จุดต่อของเอลิเมนต์นั้น ในวิชานิพนธ์นี้ สัญลักษณ์ $[]$ แสดงถึงเมทริกซ์แถวอน (Row matrix) และ $\{ \}$ แสดงถึงเมทริกซ์แถวตั้ง (Column Matrix)

ขั้นตอนที่ 3 การสร้างสมการของเอลิเมนต์ (Element Equations) ดังตัวอย่างเช่นสมการของเอลิเมนต์สามเหลี่ยมแบบอย่างดังแสดงในรูปที่ 2.15 จะอยู่ในรูปแบบ ดังนี้

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

ซึ่งเขียนย่อได้เป็น

$$[K]_e \{\phi\}_e = \{F\}_e \quad (2.18)$$

โดยขั้นตอนที่ 3 นี้ ถือเป็นหัวใจสำคัญของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การสร้างสมการของเอลิเมนต์ซึ่งอยู่ในรูปแบบของสมการ (2.15) สามารถทำได้โดยวิธีโดยตรง (Direct Approach) วิธีการแปรผัน (Variation Approach) และวิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง (Method of Weighted Residuals)

ขั้นตอนที่ 4 การนำสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่ได้มาประกอบกัน ก่อให้เกิดระบบสมการพร้อมกันขึ้น (System of Simultaneous Equation) ในรูปแบบ ดังนี้

$$\Sigma \left(\text{Element Equation} \right) \Rightarrow [K]_{\text{sys}} \{\phi\}_{\text{sys}} = \{F\}_{\text{sys}} \quad (2.19)$$

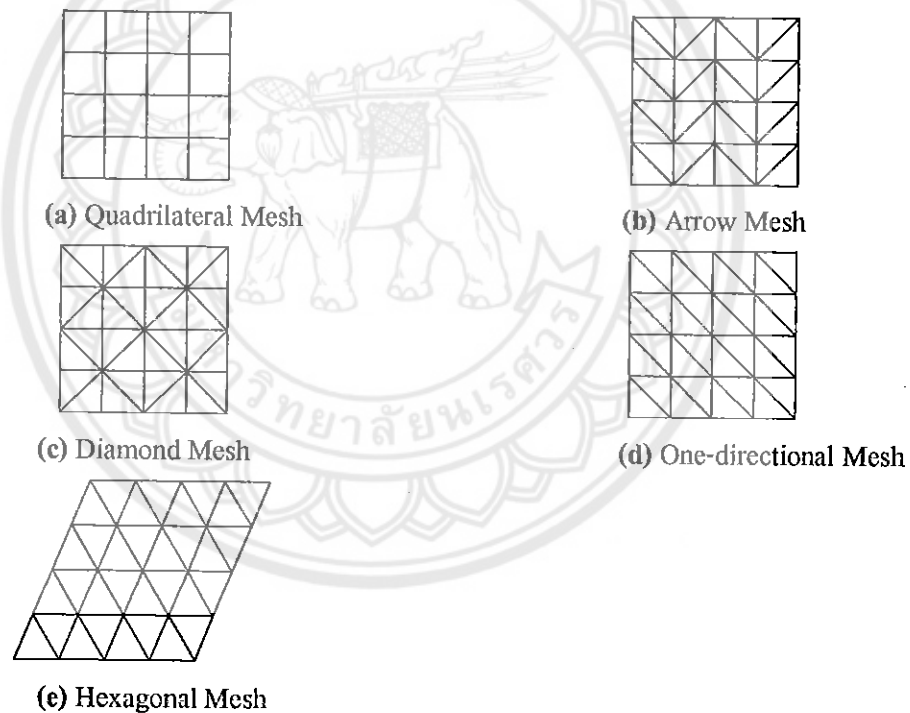
ขั้นตอนที่ 5 ทำการประยุกต์เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) ลงในสมการ (2.19) แล้วจึงแก้สมการนั้นเพื่อหา $\{\phi\}_{\text{sys}}$ อันประกอบด้วยตัวไม่ทราบค่าที่จุดต่อ ซึ่งอาจจะเป็นค่าของการเคลื่อนตัว ณ ตำแหน่งต่างๆ ของโครงสร้าง หรือค่าของอุณหภูมิที่จุดต่างๆ หากเป็นปัญหาที่

เกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อน หรืออาจเป็นค่าของความเร็วของของเหลวหากเป็นปัญหาที่เกี่ยวกับการไหล เป็นต้น

ขั้นตอนที่ 6 เมื่อคำนวณค่าต่างๆ ที่จุดต่อออกมาได้แล้วก็สามารถทำการหาค่าอื่นๆ ที่ต้องการทราบต่อไปได้ เช่น เมื่อทราบค่าการเคลื่อนตัว (Displacement) ณ ตำแหน่งต่างๆ ของโครงสร้างก็สามารถนำไปใช้ในการหาความเครียด (Strain) และความเค้น (Stress) ได้ต่อไป หรือเมื่อทราบความเร็วของของไหลก็สามารถคำนวณหาปริมาณอัตราการไหลทั้งหมดได้

2.4.2 เมชในวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [4]

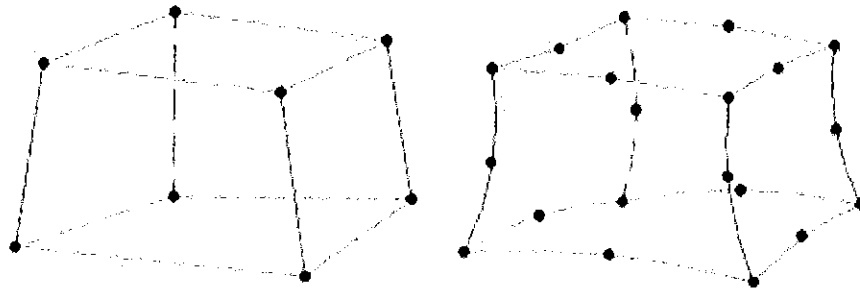
เมช (Mesh) คือ เครือข่ายของชิ้นประกอบที่ไม่ทับซ้อนกันและต่อกันเป็นโดเมน การสร้างเมชเป็นกระบวนการที่ใช้เวลานานในขั้นตอนเตรียมข้อมูล โดยเฉพาะอย่างยิ่งในปัญหาสามมิติ นอกจากนี้ถ้ามีการเปลี่ยนรูปดังเช่นในปัญหาไม่อยู่ตัวที่โดเมนเปลี่ยนรูปร่างตามเวลา การสร้างเมชก็ยิ่งจะทำให้ประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาลดลงไป อีกรูปแบบของเมชก็จะลักษณะ ดังนี้



รูปที่ 2.15 แสดงลักษณะของเมชแบบต่างๆ [4]

สมการไฟไนต์เอลิเมนต์

เมื่อทราบสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขขอบเขตที่เหมาะสม สามารถทำการสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้ระเบียบวิธีถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง (Method of Weighted Residuals) โดยจะเริ่มจากเอลิเมนต์แบบสามมิติโดยทั่วไปที่ประกอบด้วย r จุดต่อดังเช่นแสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.16 แสดงเอลิเมนต์ในสามมิติโดยทั่วไปที่ประกอบด้วย r จุดต่อ [4]

การกระจายของอุณหภูมิภายในเอลิเมนต์สามารถสมมุติให้อยู่ในรูปแบบของฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์ (Element Interpolation Functions) และค่าอุณหภูมิที่จุดต่อ (Nodal Temperature) ได้คือ

$$T(x, y, z, t) = [N(x, y, z)][T(t)] \tag{2.20}$$

โดย $[N]$ แทนเมทริกซ์ที่ประกอบด้วยฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์ซึ่งอยู่ในรูปแบบของพิกัด และ $[T]$ แทนเวกเตอร์ที่ประกอบด้วยอุณหภูมิที่จุดต่อซึ่งขึ้นอยู่กับเวลา t จากสมการ (2.20) ความชันของการกระจายอุณหภูมิในทิศทาง x, y และ z สามารถเขียนในรูปแบบดังนี้

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial T}{\partial x} \\ \frac{\partial T}{\partial y} \\ \frac{\partial T}{\partial z} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \dots & \frac{\partial N_r}{\partial x} \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \dots & \frac{\partial N_r}{\partial y} \\ \frac{\partial N_1}{\partial z} & \frac{\partial N_2}{\partial z} & \dots & \frac{\partial N_r}{\partial z} \end{bmatrix}}_{[B(x,y,z)]} [T(t)] \tag{2.21}$$

โดย $[B(x, y, z)]$ แทนเมทริกซ์แสดงค่าความชันของอุณหภูมิ (Temperature Gradient Interpolation Matrix) ซึ่งสามารถหาคำนวณได้จากเมทริกซ์ $[N]$ ของเอลิเมนต์ที่เลือกใช้

ในการสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์โดยวิธีถ่วงน้ำหนักเศษตคต่าง เริ่มจากการคูณเศษตคต่างซึ่งก็คือสมการเชิงอนุพันธ์นั้นด้วยฟังก์ชันน้ำหนัก W , และหากใช้วิธีของบับโนฟ-กาเลอร์กิน (Bubnov-Galerkin) โดยเลือกฟังก์ชันการกระจาย N , ภายในเอลิเมนต์เป็นฟังก์ชันน้ำหนักจะได้

$$\int_{\Omega^{(e)}} \left(\frac{\partial \dot{Q}_x}{\partial x} + \frac{\partial \dot{Q}_y}{\partial y} + \frac{\partial \dot{Q}_z}{\partial z} - q_o + \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \right) N_i d\Omega = 0 \quad i = 1, 2, \dots, r$$

กระจายออกมาจะได้

$$\int_{\Omega^{(e)}} \left(\frac{\partial \dot{Q}_x}{\partial x} + \frac{\partial \dot{Q}_y}{\partial y} + \frac{\partial \dot{Q}_z}{\partial z} \right) N_i d\Omega - \int_{\Omega^{(e)}} q_o N_i d\Omega = 0 + \int_{\Omega^{(e)}} \rho c \frac{\partial T}{\partial t} N_i d\Omega = 0 \quad (2.22)$$

จากนั้นประยุกต์การอินทิเกรตทีละส่วน (Integrate by Part) ลงบนพจน์แรกของสมการ (2.22) นี้ โดยใช้ทฤษฎีบทของเกาส์ (Gauss's Theorem) ดังแสดงในสมการ (2.23)

$$\int_{\Omega^{(e)}} u(\nabla \cdot \vec{V}) d\Omega = \int_{\Gamma^{(e)}} u(\vec{V} \cdot \hat{n}) d\Gamma - \int_{\Omega^{(e)}} (\nabla u \cdot \vec{V}) d\Omega \quad (2.23)$$

หากให้

$$\begin{aligned} u &= N_i \\ \nabla &= \frac{\partial}{\partial x} \hat{i} + \frac{\partial}{\partial y} \hat{j} + \frac{\partial}{\partial z} \hat{k} \\ \vec{V} &= \dot{Q}_x \hat{i} + \dot{Q}_y \hat{j} + \dot{Q}_z \hat{k} = \vec{q} \end{aligned}$$

ดังนั้น สมการ (2.20) จะเขียนใหม่ได้เป็น

$$\int_{\Gamma^{(e)}} (\vec{q} \cdot \hat{n}) N_i d\Gamma - \int_{\Omega^{(e)}} \left(\frac{\partial N_i}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} + \frac{\partial N_i}{\partial z} \right) \begin{bmatrix} q_x \\ q_y \\ q_z \end{bmatrix} d\Omega - \int_{\Omega^{(e)}} q_o N_i d\Omega + \int_{\Omega^{(e)}} \rho c \frac{\partial T}{\partial t} N_i d\Omega = 0 \quad (2.24)$$

จากนั้นแทนอัตราการถ่ายเทความร้อนซึ่งอยู่ในพจน์ที่สองของสมการ (2.21) นี้ด้วยกฎของฟูเรียร์และใช้สมการ (2.23) แล้วจึงใช้สมการ (2.24) นี้ใหม่ให้อยู่ในรูปของเมทริกซ์ ซึ่งประกอบด้วยสมการย่อยจำนวน r สมการได้ ดังนี้

$$\int_{\Gamma^{(e)}} (\vec{q} \cdot \hat{n}) N_i d\Gamma - \int_{\Omega^{(e)}} [B]^T [k] [B] d\Omega \{T\} - \int_{\Omega^{(e)}} q_o [N] d\Omega + \int_{\Omega^{(e)}} \rho c [N] [N] d\Omega \left[\frac{\partial T}{\partial t} \right] = 0 \quad (2.25)$$

พจน์แรกในสมการ (2.25) แทนปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทผ่านผิวของเอลิเมนต์นั้นๆ หากเอลิเมนต์ที่พิจารณาอยู่นั้นอยู่ภายในเนื้อวัสดุ ปริมาณความร้อนจะถ่ายเทจากเอลิเมนต์หนึ่งไปยังเอ

ลิเมนต์ที่อยู่ติดไปด้วยการนำ หากเอลิเมนต์นั้นอยู่ที่ผิวนอกของวัตถุ ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทผ่านผิวของเอลิเมนต์นั้นจะอยู่ในสภาวะสมดุลกับปริมาณการถ่ายเทความร้อนภายนอกที่เกิดขึ้นที่ผิวของเอลิเมนต์นั้น ซึ่งอาจจะเป็นปริมาณความร้อนที่กำหนดให้ปริมาณความร้อนจากการถ่ายเทแบบการพาด้วยเหตุผลนี้เอง พจน์แรกในสมการ (2.25) จึงครอบคลุมแบบของการถ่ายเทความร้อนในลักษณะต่างๆ กัน ก่อให้เกิดสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ในรูปแบบทั่วไปดังแสดงในสมการ (2.26)

$$[C][T] + [[K_c] + [K_h]][T] = [Q_c] + [Q_e] + [Q_q] + [Q_h] \quad (2.26)$$

โดย

$$[C] = \int_{\Omega^{(e)}} \rho c [N][N] d\Omega \quad (2.27)$$

$$[K_c] = \int_{\Omega^{(e)}} [B]^T [k][B] d\Omega \quad (2.28)$$

$$[K_h] = \int_{\Omega} h [N][N] d\Gamma \quad (2.29)$$

$$[Q_c] = - \int_{\Omega} (\vec{q} \cdot \hat{n}) [N] d\Gamma \quad (2.30)$$

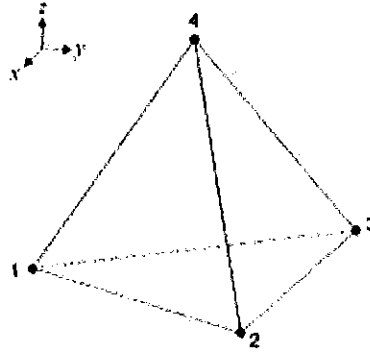
$$[Q_e] = \int_{\Omega} Q [N] d\Omega \quad (2.31)$$

$$[Q_q] = \int_{\Omega} q_s [N] d\Gamma \quad (2.32)$$

$$[Q_h] = \int_{\Omega} h T_{\infty} [N] d\Gamma \quad (2.33)$$

2.4.4 ฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์สามมิติ

เอลิเมนต์แบบสามมิติที่นิยมใช้กันมากในทางปฏิบัติมีอยู่สองแบบ เอลิเมนต์ทรงสี่หน้าและเอลิเมนต์ทรงหกหน้า แต่งานวิจัยเล่มนี้จะศึกษาเอลิเมนต์ทรงสี่หน้า (Tetrahedral Element) ซึ่งประกอบด้วย 4 จุดต่อดังแสดงในภาพ 2.17 มีหลักการคล้ายกับเอลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมใน 2 มิติ กล่าวคือ



รูปที่ 2.17 แสดงเอลิเมนต์ทรงสี่หน้าในสามมิติ [4]

เริ่มจากการสมมุติการกระจายของผลเฉลยโดยประมาณให้อยู่ในรูปแบบ

$$\varphi(x, y, z) = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y + \alpha_4 z \quad (2.34)$$

โดย α_i ที่มี $i=1,2,3,4$ เป็นค่าคงตัวที่หาได้จากเงื่อนไขของค่าที่จุดต่อทั้งสี่ ซึ่งหลังจากทำการหาค่าคงตัวทั้งสี่นี้ได้แล้ว สามารถเขียนลักษณะการกระจายของผลเฉลยโดยประมาณให้อยู่ในรูปของค่าที่จุดต่อได้ ดังนี้

$$\varphi = N_1 \varphi_1 + N_2 \varphi_2 + N_3 \varphi_3 + N_4 \varphi_4 = \underset{(1 \times 4)}{[N]} \underset{(4 \times 1)}{[\varphi]} \quad (2.35)$$

โดย $N_i, i=1,2,3,4$ คือ ฟังก์ชันการประมาณภายใน ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบ ดังนี้

$$N_i = \frac{1}{6V} (a_i + b_i x + c_i y + d_i z) \quad i=1,2,3,4 \quad (2.36)$$

ในที่นี้

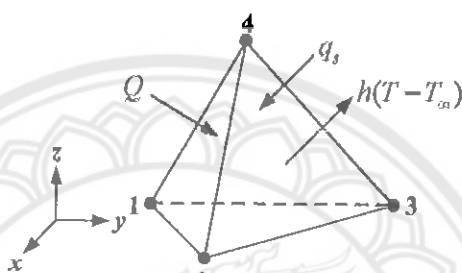
$$V = \text{ปริมาตรของเอลิเมนต์} = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} \quad (2.37)$$

$$a_1 = \begin{vmatrix} x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \\ x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} \quad b_1 = - \begin{vmatrix} 1 & y_2 & z_2 \\ 1 & y_3 & z_3 \\ 1 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} \quad c_1 = - \begin{vmatrix} x_2 & 1 & z_2 \\ x_3 & 1 & z_3 \\ x_4 & 1 & z_4 \end{vmatrix} \quad d_1 = - \begin{vmatrix} x_2 & y_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & 1 \\ x_4 & y_4 & 1 \end{vmatrix} \quad (2.38)$$

และค่าคงที่อื่นๆ $a, b, c, d, i = 2, 3, 4$ ก็มีลักษณะเช่นเดียวกันกับสมการ (2.38) ซึ่งสามารถเขียนขึ้นได้โดยวิธีการวนสลับเปลี่ยนตัวเลข (Cyclic Permutation)

2.4.5 เอลิเมนต์แบบสามมิติ

เอลิเมนต์ทรงสี่หน้าซึ่งประกอบด้วย 4 จุดต่อเป็นเอลิเมนต์ที่นิยมใช้กันมาก ทั้งนี้เนื่องจากเอลิเมนต์ชนิดนี้สามารถนำไปใช้ในการจำลองรูปแบบผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะซับซ้อนได้ โดยง่าย รูปที่ 2.18 แสดงเอลิเมนต์ทรงสี่หน้าที่มีการผลิตความร้อนได้เอง โดยที่ผิวระหว่างจุดต่อ 2-3-4 ที่เกิดการให้ปริมาณความร้อน และการพาความร้อน



รูปที่ 2.18 แสดงการถ่ายเทความร้อนในเอลิเมนต์ทรงสี่หน้า [4]

การกระจายอุณหภูมิในเอลิเมนต์ชนิดนี้สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของสมการได้

คือ

$$T(x, y, z, t) = \underset{(1 \times 4)}{[N(x, y, z)]} \underset{(4 \times 1)}{[T(t)]} \quad (2.39)$$

ในที่นี้ ฟังก์ชันการประมาณภายใน

$$N_i = \frac{1}{6V} (a_i + b_i x + c_i y + d_i z) \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (2.40)$$

โดยปริมาตรของเอลิเมนต์ V และ ค่า a_i, b_i, c_i, d_i ได้แสดงดังในสมการ (2.26) - (2.33) ดังนั้นความชันของการกระจายอุณหภูมิ คือ

17144857

ป
01490
2557
 สำนักหอสมุด
 10 ต.ค. 2560
 (2.41)

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial T}{\partial x} \\ \frac{\partial T}{\partial y} \\ \frac{\partial T}{\partial z} \end{bmatrix} = \frac{1}{6V} \underbrace{\begin{bmatrix} b_1 & b_2 & b_3 & b_4 \\ c_1 & c_2 & c_3 & c_4 \\ d_1 & d_2 & d_3 & d_4 \end{bmatrix}}_{[B]_{3 \times 4}} \begin{bmatrix} T(t) \end{bmatrix}_{(4 \times 1)}$$

เมื่อทราบเมทริกซ์ $[N]$ และ $[B]$ ดังแสดงในสมการ (2.41) แล้ว
 ไฟไนต์เอลิเมนต์เมทริกซ์ต่างๆ ก็สามารถประดิษฐ์ขึ้นได้ เช่น

$$[C] = \frac{\rho c V}{20} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (2.42)$$

$$K_{c,ij} = \frac{1}{36V} (b_i b_j + c_i c_j + d_i d_j) \quad i, j = 1, 2, 3, 4 \quad (2.43)$$

$$[Q_e] = \frac{QV}{4} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

เป็นต้น ในกรณีที่มีการถ่ายเทความร้อนบนผิวด้านใดด้านหนึ่งของเอลิเมนต์ชนิดนี้
 ดังเช่นแสดงในรูปที่ 2.18 ตัวอย่างเช่น เอลิเมนต์เมทริกซ์ที่เกิดขึ้นจากการพาความร้อนบนผิวด้านที่
 ประกอบด้วยจุดต่อ 2-3-4 ซึ่งมีพื้นที่ผิวเท่ากับ A คือ

$$[K_h] = \frac{hA}{12} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 2 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (2.45)$$

$$[Q_h] = \frac{hT_\infty A}{3} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.46)$$

ในทางปฏิบัติหากเอลิเมนต์ทรงสี่หน้ามีตำแหน่งอยู่ที่ขอบหรือมุมของวัตถุของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ และหากเกิดการพาความร้อนรอบผิวของวัตถุนั้น เอลิเมนต์เมทริกซ์ที่เกี่ยวข้องกับการพาความร้อนดังเช่นแสดงในสมการที่ (2.45) – (2.46) จำเป็นต้องถูกประดิษฐ์ขึ้นให้เหมาะสมโดยครบบถ้วน

2.4.5 ทฤษฎีค่าความผิดพลาด (Error Norm Approximation) สำหรับการวิเคราะห์ปัญหาทางแม่เหล็ก [4]

$$\{\Delta B_n^i\} = \{B_n^a\} - \{B_n^i\} \quad (2.47)$$

เมื่อ $\{\Delta B_n^i\}$ คือ ค่าความผิดพลาดของเวกเตอร์ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่โนด n ของเอลิเมนต์ i

$\{B_n^a\}$ คือ ค่าเฉลี่ยของเวกเตอร์ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่โนด n

โดยที่

$$\bar{B}_n^a = \frac{\sum_{i=1}^{N_n^a} \{B_n^i\}}{N_n^a}$$

(2.48)

เมื่อ N_n^a คือ จำนวนเอลิเมนต์ที่เชื่อมต่อกับโนด n

$\{B_n^i\}$ คือ เวกเตอร์ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่โนด n ของเอลิเมนต์ i

ดังนั้น สามารถหาความผิดพลาดได้แต่ละเอลิเมนต์ ดังนี้

$$e_i = \frac{1}{2} \int_{\text{vol}} \{\Delta B\}^T [D]^{-1} \{\Delta B\} d(\text{vol}) \quad (2.49)$$

เมื่อ e_i คือ ค่าพลังงานความผิดพลาดสำหรับเอลิเมนต์ i

vol คือ ปริมาตรของเอลิเมนต์

$[D]$ คือ เมทริกซ์ของแม่เหล็ก

$\{\Delta B\}$ คือ ค่าความผิดพลาดของความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กตำแหน่งที่

ต้องการ (หาได้จาก $\{\Delta B_n^i\}$ ของเอลิเมนต์นั้น)

จะได้ผลรวมความผิดพลาดของโมเดลทั้งหมด คือ

$$e = \sum_{i=1}^{N_r} e_i \quad (2.50)$$

เมื่อ e_i คือ ค่าผิดพลาดของแต่ละเอลิเมนต์
 N_r คือ จำนวนของเอลิเมนต์ในโมเดล i



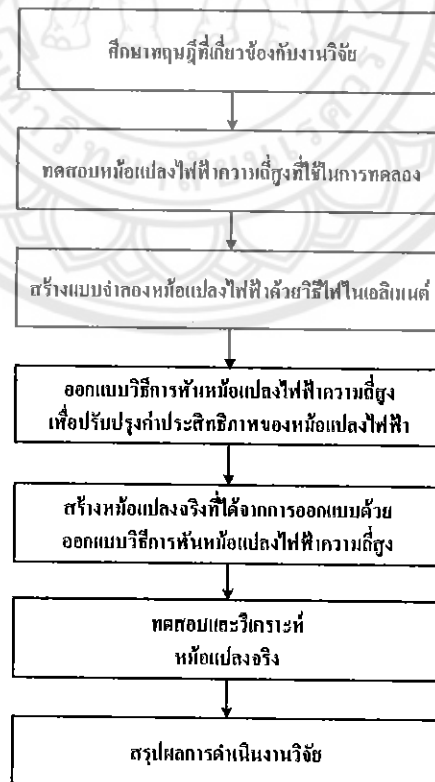
บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีดำเนินงานวิจัยโดยมีขั้นตอนการศึกษาและวิธีการดำเนินงานวิจัย (Research Methodology) 2 ส่วน คือ

ส่วนที่ 1 ศึกษาเปรียบเทียบการทดสอบของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง ซึ่งในส่วนี้จะแบ่งออกเป็นอีก 2 กรณี ได้แก่ กรณีที่ 1 ทำการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงในห้องปฏิบัติการเพื่อหาค่าความสูญเสียรวมของหม้อแปลงไฟฟ้าและค่าประสิทธิภาพในหม้อแปลงไฟฟ้า และกรณีที่ 2 จำลองการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ หาค่าความสูญเสียรวมและค่าประสิทธิภาพในหม้อแปลงไฟฟ้า

ส่วนที่ 2 ทำการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง ด้วยวิธีการเปลี่ยนรูปแบบการพันแบบต่างๆ ได้แก่ การพันขดลวดแบบชั้น (Stack Winding) การพันขดลวดแบบแซนด์วิช (Sandwich Winding) การพันขดลวดแบบอินเตอร์ลีฟ (Interleave Winding) แสดงภาพรวมวิธีการดำเนินงานวิจัยดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 วิธีการดำเนินการวิจัย

หม้อแปลงที่ใช้ในการวิจัย และชุดอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ

หม้อแปลงไฟฟ้าที่นำมาใช้ในการทดสอบ คือ หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง ชนิด 1 เฟส ขนาด 150 VA, 220/12 V, 50 kHz ในส่วนของรายละเอียดของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแสดงในตารางที่ 3.1 โดยโครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าแสดงดังแสดงในรูปที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบ

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้า ความถี่สูง
พิกัดแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)	220/12
พิกัดกระแส (แอมป์)	1.5
พิกัดกำลังไฟฟ้า (โวลต์แอมป์)	150
ความถี่ (กิโลเฮิร์ต)	50
พื้นที่แกนเหล็ก (ตารางมิลลิเมตร)	124
จำนวนรอบของขดลวดค้ำานปฐมภูมิ (รอบ)	123
จำนวนรอบของขดลวดค้ำานทุติยภูมิ (รอบ)	8
พื้นที่หน้าตัดขดลวดค้ำานปฐมภูมิ (ตารางเมตร)	1.642×10^{-7}
พื้นที่หน้าตัดขดลวดค้ำานทุติยภูมิ (ตารางเมตร)	5.838×10^{-7}



รูปที่ 3.2 โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส (ต้นแบบ)

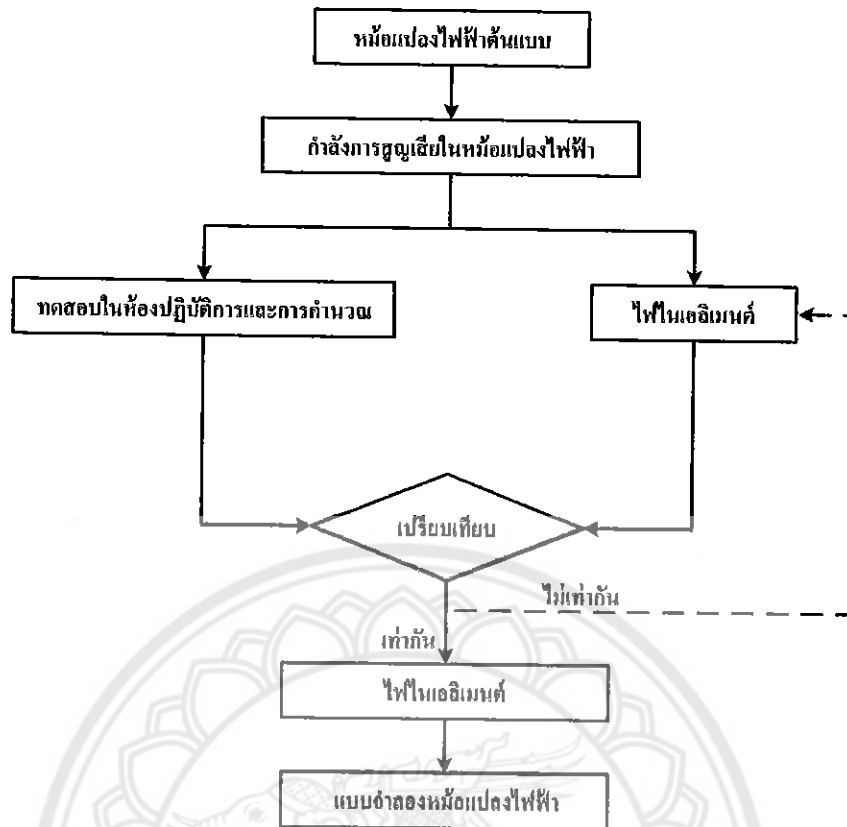
ในส่วนของคุณอุปกรณ์ในการทดสอบเพื่อทดสอบหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็กและค่าความสูญเสียในขดลวดในหม้อแปลงไฟฟ้าประกอบด้วย 5 ส่วนหลัก คือ โวลต์มิเตอร์ (Volt Meter), แอมป์มิเตอร์ (Amp Meter), วัตต์มิเตอร์ (Watt Meter) แหล่งจ่ายไฟฟ้า, (Function Generator) และหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง การต่อเพื่อทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบหาค่าความสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้า

3.1 การศึกษาเปรียบเทียบระหว่างการทดสอบของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงในห้องปฏิบัติการกับการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์คำนวณหาค่าด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การสร้างแบบจำลองไฟฟ้าด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ มีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้ในกรณีนี้เป็นการเปรียบเทียบค่าความสูญเสียรวมของหม้อแปลงไฟฟ้าระหว่างการทดสอบในห้องปฏิบัติการกับการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์วิเคราะห์ผลด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยแสดงการสร้างแบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 การสร้างแบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยวิธีไฟในเอลิเมนต์

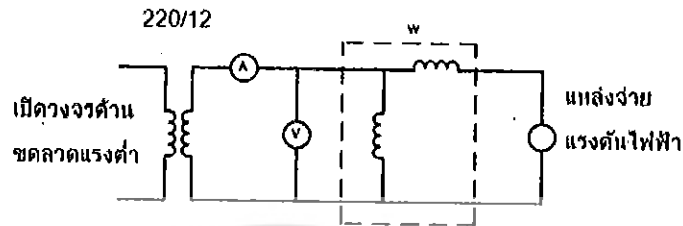
ในส่วนนี้จะแบ่งการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง ออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 จะทำการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงในห้องปฏิบัติการเพื่อหาค่าความสูญเสียและค่าประสิทธิภาพ ส่วนที่ 2 ทำการสร้างแบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง ในโปรแกรม ANSYS 13.0 และจำลองการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง เพื่อหาค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับใช้คำนวณหาค่าความสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้า จากนั้นนำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการ และหาแบบจำลองที่สามารถจำลองการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าได้จริง

3.1.1 การทดสอบเพื่อหาค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการ

การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้ากระทำเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้าและความสูญเสียที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้า การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าทำได้ 2 วิธี คือ การทดสอบเปิดวงจรเพื่อหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก และการทดสอบลัดวงจรเพื่อหาค่าความสูญเสียในขดลวด

การทดสอบเปิดวงจร (Open Circuit Test)

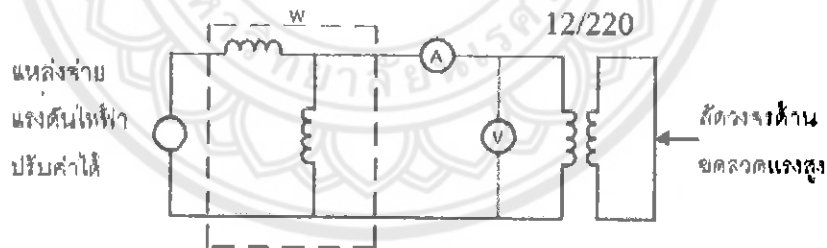
การทดสอบเปิดวงจรเป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความสูญเสียในแกนตัวนำแม่เหล็ก ซึ่งการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง กระทำโดยการเปิดวงจรทางด้านแรงดันไฟฟ้าสูง และจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่พิกัดเข้าที่ด้านแรงดันไฟฟ้าต่ำดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 การทดสอบหาค่าความสูญเสียแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่

การทดสอบลัดวงจร (Short Circuit Test)

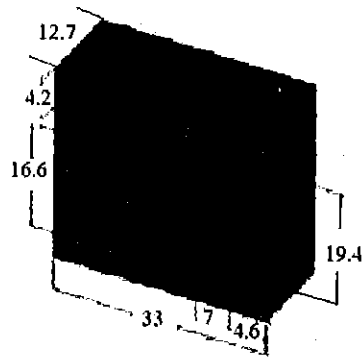
การทดสอบลัดวงจรเป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความสูญเสียในขดลวดทองแดง ซึ่งการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง กระทำโดยการลัดวงจรทางด้านแรงดันไฟฟ้าสูง และจ่ายกระแสไฟฟ้าที่พิกัดเข้าที่ด้านแรงดันไฟฟ้าต่ำดังแสดงในรูป 3.6



รูปที่ 3.6 การทดสอบลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง

3.1.2 การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ในขั้นตอนของการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จะใช้โปรแกรม ANSYS 13.0 ในการจำลองการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงซึ่งรูปที่ 3.7 แสดงขนาดและการกระจายเมชแบบ 3 มิติ ของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงที่ใช้ในงานวิจัย ตามลำดับ



(a) ขนาดของหม้อแปลงไฟฟ้า



(b) การกระจายเมฆของแบบจำลอง

รูปที่ 3.7 หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง

ในการจำลองการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้า นอกจากการสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าให้มีขนาดและลักษณะเช่นเดียวกับหม้อแปลงไฟฟ้าจริงแล้ว สิ่งที่จะต้องพิจารณาอีกประการหนึ่งคือต้องกำหนดคุณลักษณะเฉพาะให้กับหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อให้มีคุณลักษณะเช่นเดียวกับหม้อแปลงไฟฟ้าจริง ซึ่งในการกำหนดค่าคุณลักษณะของหม้อแปลงไฟฟ้าจะประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่เป็นแกนเหล็กและส่วนที่เป็นขดลวด อีกทั้งยังต้องกำหนดค่าสภาพอากาศให้กับแบบจำลองเช่นเดียวกับสภาพอากาศจริงที่ใช้ในการทดสอบ แสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ถูกสร้างด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

Core	Material : Steel Density : 7910 kg/m ³ Thermal Conductivity : 20 W/m. oC Specific Heat : 446 J/kg. oC Relative Permeability : 26
Coil	Material : Copper Density : 8300 kg/m ³ Thermal Conductivity : 386 W/m. oC Specific Heat : 385 J/kg. oC Relative Permeability : 1 Resistivity : 1.724e-008 Ω

Air	Density : 1.205 kg/m ³ Thermal Conductivity : 0.0257 W/m. °C Specific Heat : 1005 J/kg. °C Relative Permeability : 1
-----	--

3.2 ออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง ด้วยวิธีการเปลี่ยนรูปแบบการพันแบบต่างๆ

ในส่วนนี้จะทำการออกแบบการพันหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงเพื่อปรับปรุงค่าประสิทธิภาพ โดยจำลองการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าบน โปรแกรม Ansys 13.0 และทำการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อพิจารณาคูณลักษณะของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง เมื่อใช้วิธีการพันที่แตกต่างกัน ซึ่งวิธีการพันแต่ละแบบมีลักษณะดังต่อไปนี้

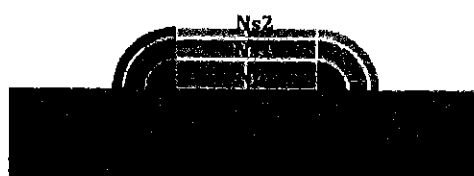
- การพันขดลวดแบบเป็นชั้น (Stack Winding)
- การพันขดลวดแบบแซนด์วิช (Sandwich Winding)
- การพันขดลวดแบบอินเตอร์ลีฟ (Interleave Winding)

3.2.1 การพันขดลวดแบบเป็นชั้น (Stack Winding)

ซึ่งในงานวิจัยนี้พิจารณาการพันขดลวดแบบเป็นชั้น (Stack Winding) เป็น 2 กรณี ได้แก่ การพันขดลวดแบบเป็นชั้นแบบที่ 1 และการพันขดลวดแบบเป็นชั้นแบบที่ 2

การพันขดลวดแบบเป็นชั้นแบบที่ 1 (หม้อแปลงคั่นแบบ)

การพันขดปฐมภูมิไว้ชั้นในสุดและมีขดทุติยภูมิอยู่ชั้นถัดมา โดยพันขดทุติยภูมิทับขดปฐมภูมิไปเรื่อยๆ ตามที่ออกแบบไว้ดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 รูปแบบการพันขดลวดแบบชั้นแบบที่ 1

การพันขดลวดแบบเป็นชั้นแบบที่ 2

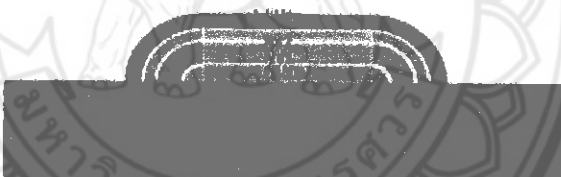
การพันขดลวดแบบเป็นแบบที่ 2 โดยการพันขดลวดทุติยภูมิไว้ที่ในสุดและนำขดลวดปฐมภูมิไว้ชั้นนอกสุดดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 รูปแบบการพันขดลวดแบบชั้นแบบที่ 2

3.2.2 การพันขดลวดแบบแซนด์วิช (Sandwich Winding)

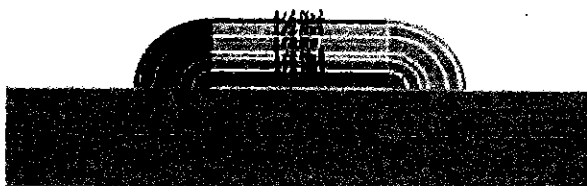
การพันขดลวดแบบแซนด์วิช โดยการแบ่งขดปฐมภูมิออกเป็น 2 ส่วน(เท่ากัน) เมื่อพันขดปฐมภูมิส่วนแรกเสร็จ จากนั้นให้พันขดทุติยภูมิที่บนขดปฐมภูมิจากนั้นจึงพันขดปฐมภูมิส่วนที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 รูปแบบการพันขดลวดแบบแซนด์วิช

3.2.3 การพันขดลวดแบบอินเตอร์ลีฟ (Interleave Winding)

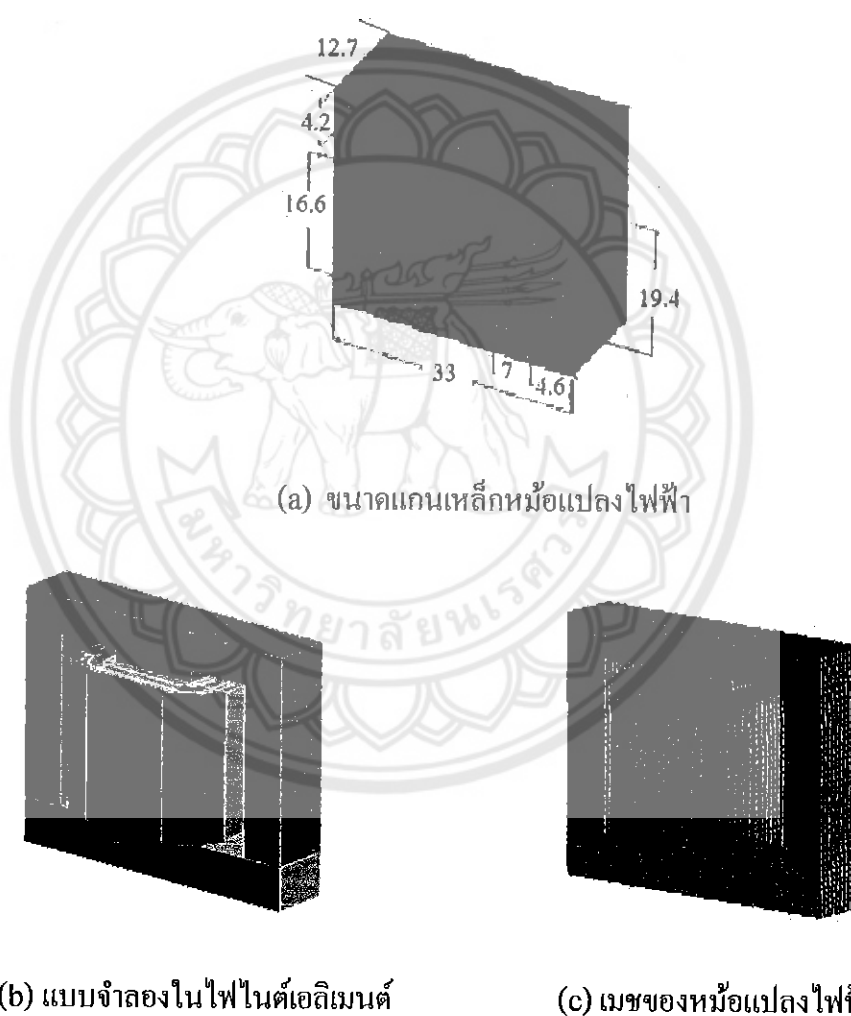
การแบ่งครึ่งของขดลวดปฐมภูมิและขดทุติยภูมิ โดยพันขดลวดปฐมภูมิเพียงครึ่งเดียวก่อน จากนั้นพันขดทุติยภูมิอย่างละครึ่ง และจากนั้นจึงพันส่วนที่เหลืออย่างละครึ่งจนครบ จะเห็นว่า การพันขดลวดแบบอินเตอร์ลีฟจะมีลักษณะขดลวดเป็นคู่ๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 รูปแบบการพันขดลวดแบบอินเตอร์ลีฟ

3.3 การทดสอบหม้อแปลงด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ในการสร้างแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นสามารถสร้างเป็น 2 มิติหรือ 3 มิติ โดยกำหนดคุณสมบัติต่างๆของแกนเหล็กหม้อแปลงไฟฟ้าที่สร้างด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ให้มีค่าใกล้เคียงกับคุณสมบัติกับหม้อแปลงไฟฟ้าจริง นอกจากนั้นแล้วโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองสภาพแวดล้อมภายในแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าด้วย โดยกำหนดคุณสมบัติต่างๆของสภาพอากาศโดยรอบ ดังแสดงในรูป 3.12



รูปที่ 3.12 โครงสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าในไฟไนต์เอลิเมนต์

บทที่ 4

ผลการทดลอง

เนื่องจากงานวิจัยเล่มนี้ได้แบ่งขั้นตอนการศึกษาและวิธีการดำเนินการวิจัยออกเป็น 2 ส่วน ดังนั้นข้อมูลผลการทดลองและผลการวิเคราะห์จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนเช่นกัน คือ

ส่วนที่ 1 ผลการศึกษาเปรียบเทียบการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง ซึ่งในส่วนนี้จะแบ่งออกเป็น 2 กรณี ได้แก่ กรณีที่ 1 การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงในห้องปฏิบัติการเพื่อหาค่าการสูญเสียรวมของหม้อแปลงไฟฟ้าและค่าประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า และกรณีที่ 2 การจำลองการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้า ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อหาค่าการสูญเสียรวมและค่าประสิทธิภาพในหม้อแปลงไฟฟ้า

ส่วนที่ 2 ผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า ด้วยวิธีการเปลี่ยนรูปแบบการพันแบบต่างๆ ได้แก่ การพันขดลวดแบบชั้น (Stack Winding) การพันขดลวดแบบแซนด์วิช (Sandwich Winding) และการพันขดลวดแบบอินเตอร์ลิฟ (Interleave Winding)

4.1 ผลการเปรียบเทียบระหว่างการทดสอบของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงในห้องปฏิบัติการกับการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์คำนวณหาค่าด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

4.1.1 ผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงในห้องปฏิบัติการ

การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงในห้องปฏิบัติการเพื่อหาค่าการสูญเสียกำลังไฟฟ้าและประสิทธิภาพในหม้อแปลงไฟฟ้า แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงในห้องปฏิบัติการ

พารามิเตอร์	ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ
B_{max} (T)	0.01058
P_{loss} (W)	1.925
% η	75.93

4.1.2 ผลการจำลองการทำงานหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นเพื่อจำลองการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าและใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการคำนวณหาค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กหาค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้า และประสิทธิภาพในหม้อแปลงไฟฟ้า แสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการจำลองการทำงานหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

พารามิเตอร์	ผลการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์คำนวณหาค่าด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
B_{max} (T)	0.010709
P_{loss} (W)	1.912
% η	76.10

จากรูปที่ 4.1 แสดงผลการจำลองการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ซึ่ง แสดงการกระจายของเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็กและ แสดงค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก



(a) การกระจายของเส้นแรงแม่เหล็ก

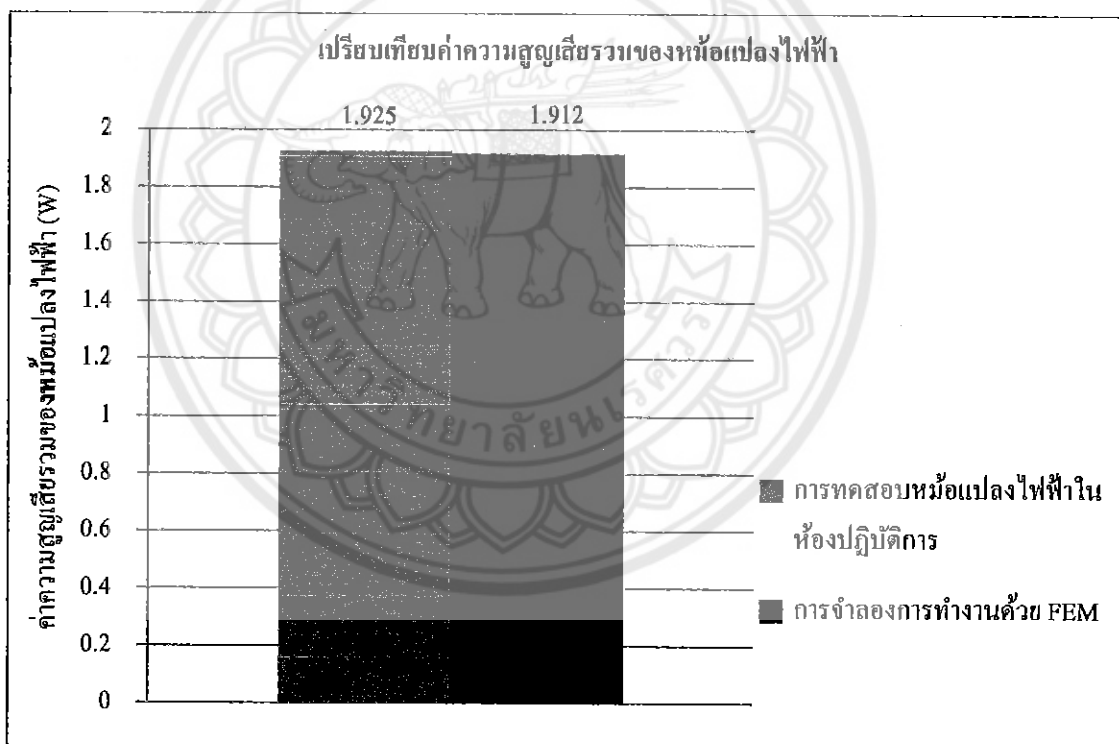
(b) ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก

รูปที่ 4.1 แสดงผลการจำลองการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

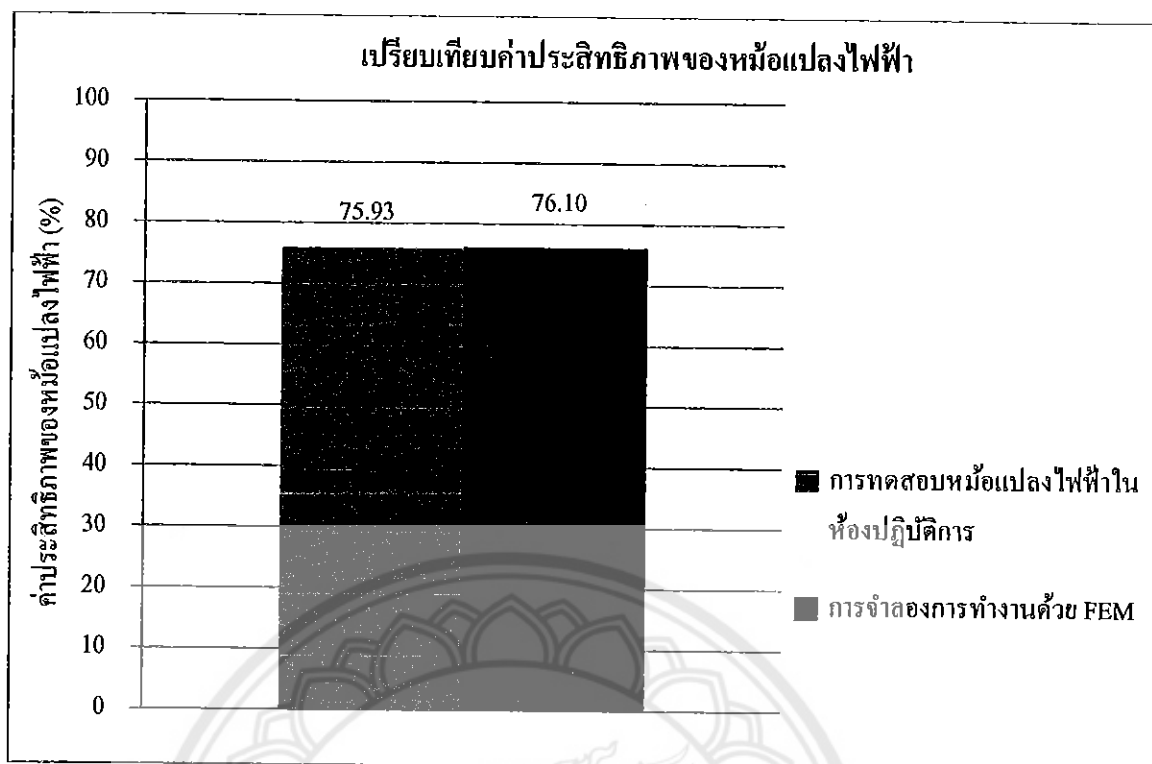
ตารางที่ 4.3 ผลการเปรียบเทียบระหว่างการทดสอบของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงในห้องปฏิบัติการกับการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์คำนวณค่าด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

พารามิเตอร์	ผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงในห้องปฏิบัติการ	ผลการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์คำนวณค่าด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	ค่าความผิดพลาด (%)
B_{max} (T)	0.01058	0.010709	1.26
P_{loss} (W)	1.925	1.912	0.67%
% η	75.93	76.10	0.17

4.1.3 สรุปผลการเปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่างการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงในห้องปฏิบัติการกับการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์คำนวณค่าด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



รูปที่ 4.2 กราฟเปรียบเทียบค่าความสูญเสียรวมของหม้อแปลงไฟฟ้า



รูปที่ 4.3 กราฟเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า

จากรูปที่ 4.2 และรูปที่ 4.3 ผลการทดสอบของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงในห้องปฏิบัติการกับการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์คำนวณค่าด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่า ค่าความสูญเสียรวมมีความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.675 เปอร์เซ็นต์และค่าประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้ามีความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.17 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นค่าน้อยมาก ซึ่งสามารถยอมรับได้

4.2 ผลการออกแบบการพันหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ในส่วนนี้แสดงผลการออกแบบการพันหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงเพื่อปรับปรุงค่าประสิทธิภาพ โดยจำลองการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าบนโปรแกรม Ansys 13.0 และทำการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อพิจารณาคูณลักษณะของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง เมื่อใช้วิธีการพันที่แตกต่างกัน ได้แก่ การพันขดลวดแบบชั้นแบบที่ 2 การพันขดลวดแบบแซนด์วิชและการพันขดลวดแบบอินเตอร์ลิฟ ดังนี้

4.2.1 ผลการพันขดลวดแบบชั้นแบบที่ 2 (Stack Winding) นำขดลวดปฐมภูมิออกด้าน

นอก



(a) การกระจายของเส้นแรงแม่เหล็ก (b) ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก

รูปที่ 4.4 ผลการพันขดลวดแบบชั้นแบบที่ 2

ผลการพันขดลวดแบบชั้นแบบนำขดปฐมภูมิออกด้านนอก พบว่า ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กมีค่าสูงกว่าคั่นแบบ ดังนั้นเมื่อนำไปคำนวณค่าความสูญเสียภายในแกนเหล็ก (Core Loss) จึงทำให้ค่าความสูญเสียในแกนเหล็กมีค่าสูงกว่าหม้อแปลงไฟฟ้าคั่นแบบ

4.2.2 ผลการพันขดลวดแบบแซนด์วิช (Sandwich Winding)



(a) การกระจายของเส้นแรงแม่เหล็ก

(b) ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก

รูปที่ 4.5 ผลการพันขดลวดแบบแซนด์วิช

ผลการพันขดลวดแบบแซนด์วิช พบว่า ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กมีค่าสูงกว่าค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กต้นแบบ ดังนั้นเมื่อนำไปคำนวณค่าความสูญเสียภายในแกนเหล็ก (Core Loss) จึงทำให้ค่าความสูญเสียในแกนเหล็กมีค่าสูงกว่าหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ

4.2.3 ผลการพันขดลวดแบบอินเตอร์ลีฟ (Interleave Winding)



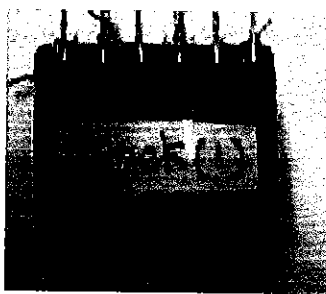
(a) การกระจายของเส้นแรงแม่เหล็ก (b) ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก

รูปที่ 4.6 ผลการพันขดลวดแบบอินเตอร์ลีฟ

ผลการพันขดลวดแบบอินเตอร์ลีฟ พบว่า ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กมีค่าต่ำกว่าค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กต้นแบบ ดังนั้นเมื่อไปคำนวณค่าความสูญเสียภายในแกนเหล็ก (Core Loss) จึงทำให้ค่าความสูญเสียในแกนเหล็กมีค่าต่ำกว่าหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ

4.2.4 ผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงในห้องปฏิบัติการ

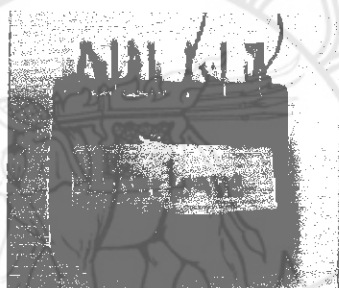
ผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง ด้วยวิธีการเปลี่ยนรูปแบบการพันของขดลวดในหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อหาค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้าและค่าประสิทธิภาพหม้อแปลงไฟฟ้า ในรูปแบบการพันขดลวดที่แตกต่างกัน ได้แก่ การพันขดลวดแบบชั้นแบบที่ 2 การพันขดลวดแบบแซนด์วิชและการพันขดลวดแบบอินเตอร์ลีฟ แสดงดังในรูปที่ 4.7 ตารางที่ 4.4 ตามลำดับ



(a) การพันขดลวดแบบชั้นแบบที่ 2



(b) การพันขดลวดแบบแซนคั้วช

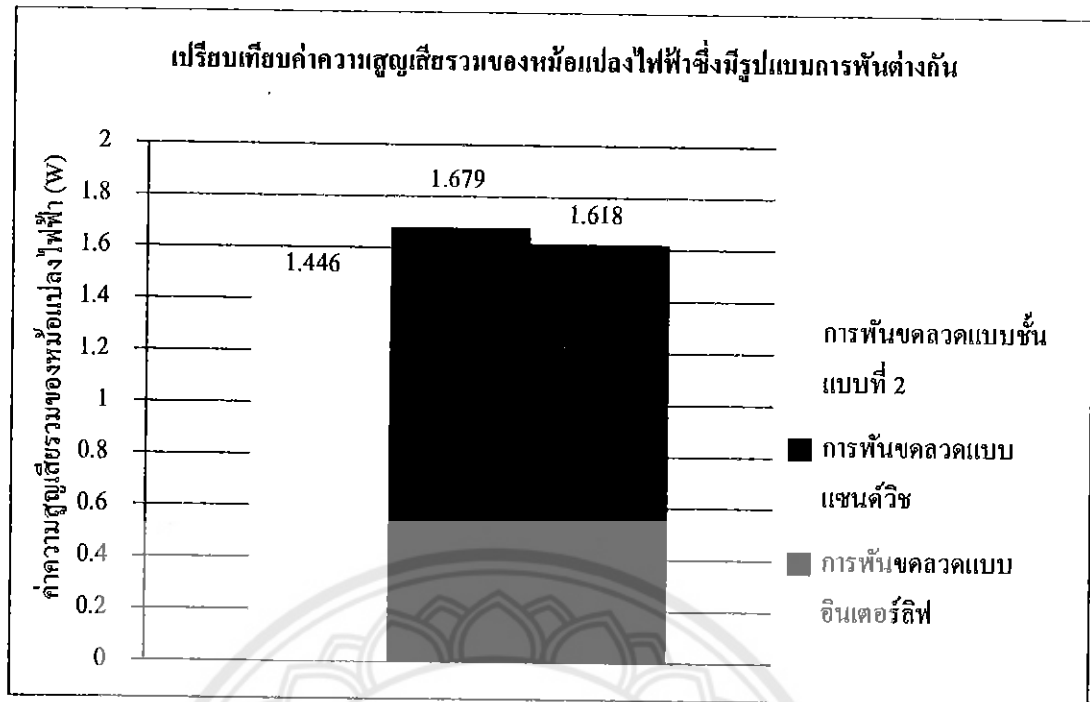


(c) การพันขดลวดแบบอินเตอร์ลิฟ

รูปที่ 4.7 รูปแแบบการพันขดลวดแบบต่างๆ

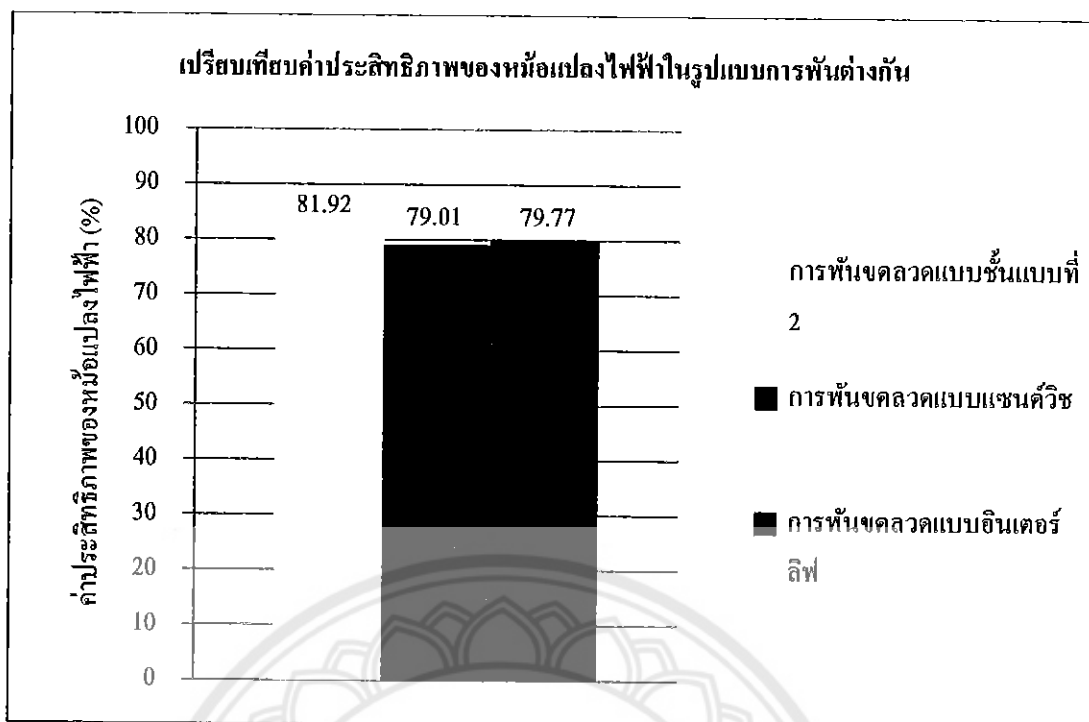
ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีรูปแบบการพันที่ต่างกันในห้องปฏิบัติการ

พารามิเตอร์	การพันขดลวดแบบชั้น แบบที่ 2	การพันขดลวดแบบ แซนคั้วช	การพันขดลวดแบบ อินเตอร์ลิฟ
P_{loss} (W)	1.446	1.679	1.618
$\% \eta$	81.92	79.01	79.77



รูปที่ 4.8 กราฟเปรียบเทียบค่าความสูญเสียรวมของหม้อแปลงไฟฟ้าซึ่งมีรูปแบบการพันต่างกัน

รูปที่ 4.8 แสดงค่าความสูญเสียรวมของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยรูปแบบการพันขดลวดแบบชั้นแบบที่ 2 มีค่าความสูญเสียรวมเท่ากับ 1.446 วัตต์ การพันขดลวดแบบแซนด์วิชมีค่าความสูญเสียรวมเท่ากับ 1.679 วัตต์ และการพันขดลวดแบบอินเตอร์ลิฟมีค่าความสูญเสียรวมเท่ากับ 1.618 วัตต์



รูปที่ 4.9 กราฟเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าในรูปแบบการพันต่างกัน

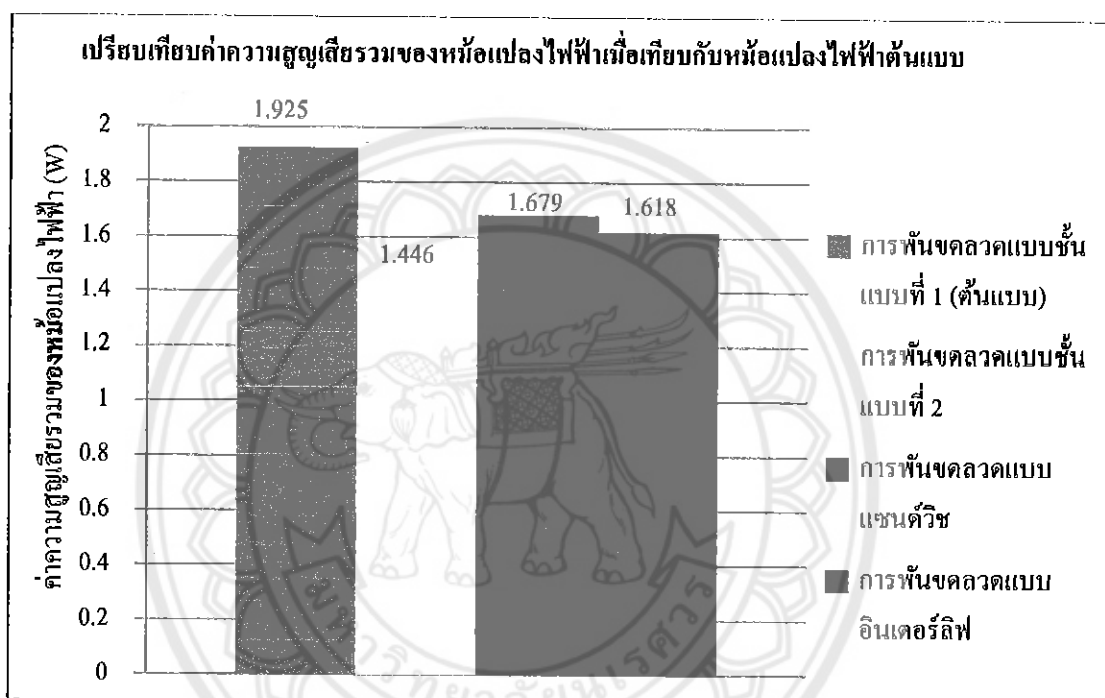
จากรูปที่ 4.9 พบว่า ผลการออกแบบการพันขดลวดแบบชั้นแบบที่ 2 มีค่าประสิทธิภาพเท่ากับ 81.92 เปอร์เซ็นต์ ผลการออกแบบการพันขดลวดแบบแซนด์วิช มีค่าประสิทธิภาพเท่ากับ 79.01 เปอร์เซ็นต์ และผลการออกแบบการพันขดลวดแบบอินเตอร์ลิฟ มีค่าประสิทธิภาพเท่ากับ 79.77 เปอร์เซ็นต์

4.2.5 สรุปผลการทดสอบการออกแบบการพันหม้อแปลงไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการ

ผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า ด้วยวิธีการเปลี่ยนรูปแบบการพันขดลวดแบบต่างๆ ได้แก่ การพันขดลวดแบบชั้นแบบที่ 1 (ต้นแบบ) การพันขดลวดแบบชั้นแบบที่ 2 การพันขดลวดแบบแซนด์วิชและการพันขดลวดแบบอินเตอร์ลิฟ ส่งผลต่อค่าความสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้า และค่าประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า ดังแสดงในตารางที่ 4.5 รูปที่ 4.10 รูปที่ 4.11 ตามลำดับ

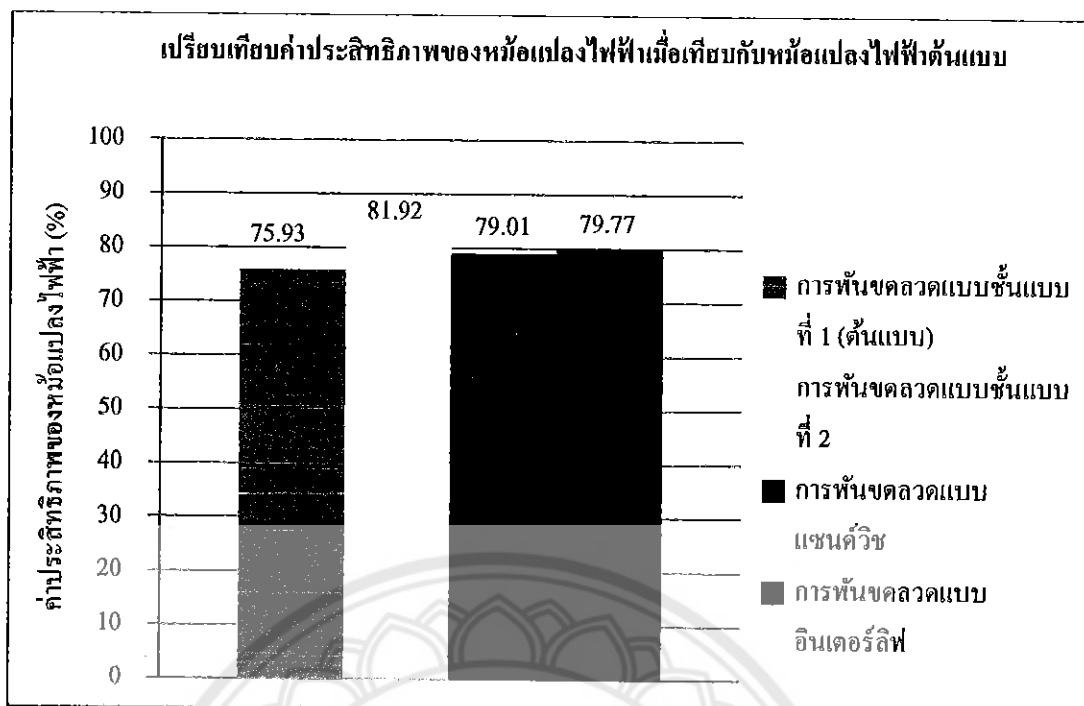
ตารางที่ 4.5 ผลสรุปการเปรียบเทียบค่าความสูญเสียรวมและค่าประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อเทียบกับต้นแบบ

พารามิเตอร์	การพันขดลวดแบบ ชั้นแบบที่ 1 (ต้นแบบ)	การพันขดลวดแบบ ชั้นแบบที่ 2	การพันขดลวด แบบแซนด์วิช	การพันขดลวด แบบอินเตอร์ลิฟ
P_{loss} (W)	1,925	1,446	1,679	1,618
$\% \eta$	75.93	81.92	79.01	79.77



รูปที่ 4.10 กราฟเปรียบเทียบค่าความสูญเสียรวมของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อเทียบกับหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ

จากรูปที่ 4.10 พบว่า ผลการออกแบบการพันขดลวดแบบชั้นแบบที่ 1 (ต้นแบบ) มีค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 1.925 วัตต์ การออกแบบการพันขดลวดแบบชั้นแบบที่ 2 มีค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้ารวมเท่ากับ 1.446 วัตต์ การพันขดลวดแบบแซนด์วิชมีค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 1.679 วัตต์ และการพันขดลวดแบบอินเตอร์ลิฟมีค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้ารวมเท่ากับ 1.618 วัตต์ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าการออกแบบการพันขดลวดแบบชั้นแบบที่ 2 มีค่าความสูญเสียรวมน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ



รูปที่ 4.11 กราฟเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อเทียบกับหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ

จากรูปที่ 4.11 พบว่าการออกแบบด้วยวิธีการพันขดลวดแบบชั้นแบบที่ 1 (ต้นแบบ) มีค่าประสิทธิภาพเท่ากับ 75.93 เปอร์เซ็นต์ การพันขดลวดแบบชั้นแบบที่ 2 มีค่าประสิทธิภาพเท่ากับ 81.92 เปอร์เซ็นต์ การพันขดลวดแบบแกนค้ำมีค่าประสิทธิภาพเท่ากับ 79.01 เปอร์เซ็นต์และการพันขดลวดแบบอินเตอร์ลิฟมีค่าประสิทธิภาพเท่ากับ 79.77 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าการออกแบบการพันขดลวดแบบชั้นแบบที่ 2 มีค่าประสิทธิภาพดีที่สุดเมื่อเทียบกับหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ

บทที่ 5

สรุปผลการทดสอบ

5.1 สรุปผลการดำเนินโครงการ

จากการทดสอบและศึกษาหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงในสภาวะไม่มีภาระทางกล เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า ในรูปแบบการพันขดลวด 4 แบบ ได้แก่ การพันขดลวดแบบชั้นแบบที่ 1 การพันขดลวดแบบชั้นแบบที่ 2 การพันขดลวดแบบแซนด์วิชและการพันขดลวดแบบอินเตอร์ลิฟ สำหรับโครงการนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนดังนี้

ส่วนแรกเปรียบเทียบผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงในห้องปฏิบัติการกับผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่า มีค่าความคลาดเคลื่อนของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กเท่ากับ 1.22 เปอร์เซ็นต์ มีค่าความคลาดเคลื่อนของค่าความสูญเสียรวมเท่ากับ 0.675 เปอร์เซ็นต์ และค่าความคลาดเคลื่อนของค่าประสิทธิภาพเท่ากับ 0.17 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่น้อยมากสามารถยอมรับได้ จากนั้นจึงนำแบบจำลองนี้เป็นต้นแบบสำหรับการออกแบบเพื่อปรับปรุงค่าประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงต่อไป

ส่วนที่สองปรับปรุงประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าโดยออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยวิธีการพันขดลวดแบบต่างๆ ได้แก่ การพันขดลวดแบบชั้นแบบที่ 1 (ต้นแบบ) การพันขดลวดแบบชั้นแบบที่ 2 การพันขดลวดแบบแซนด์วิชและการพันขดลวดแบบอินเตอร์ลิฟ จากการทดสอบพบว่า หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีรูปแบบการพันขดลวดแบบชั้นแบบที่ 1 (ต้นแบบ) มีค่าประสิทธิภาพเท่ากับ 75.93 เปอร์เซ็นต์ การพันขดลวดแบบชั้นแบบที่ 2 มีค่าประสิทธิภาพเท่ากับ 81.92 เปอร์เซ็นต์ การพันขดลวดแบบแซนด์วิชมีค่าประสิทธิภาพเท่ากับ 79.01 เปอร์เซ็นต์ และการพันขดลวดแบบอินเตอร์ลิฟมีค่าประสิทธิภาพเท่ากับ 79.77 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้น การพันขดลวดแบบชั้นแบบที่ 2 เป็นรูปแบบการพันขดลวดที่มีค่าประสิทธิภาพดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงต้นแบบคิดเป็น 5.99 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาเป็นการพันแบบอินเตอร์ลิฟมีค่าประสิทธิภาพเมื่อเปรียบเทียบกับหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงต้นแบบคิดเป็น 3.08 เปอร์เซ็นต์และการพันขดลวดแบบแซนด์วิชมีค่าประสิทธิภาพดีกว่าต้นแบบคิดเป็น 3.84 เปอร์เซ็นต์

5.2 ประเมินผลการทดสอบ

จากการดำเนิน โครงการงานเมื่อเปรียบเทียบกับวัตถุประสงค์ดังนี้

5.2.1 สามารถทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงได้ โดยมี 2 วิธี ได้แก่ ทดสอบโดยการเปิดวงจรและทดสอบ โดยการลัดวงจร ซึ่งสามารถนำค่าที่ได้จากการทดสอบมาคำนวณหาค่าประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงได้

5.2.2 สามารถวิเคราะห์การสูญเสียกำลังไฟฟ้าในแกนเหล็กในรูปแบบการพันขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงทั้ง 4 แบบ ได้แก่ การพันขดลวดแบบชั้นแบบที่ 1 การพันขดลวดแบบชั้นแบบที่ 2 การพันขดลวดแบบแซนควิชและการพันขดลวดแบบอินเตอร์ลิฟ ที่ค่ากระแสอินพุตเท่ากัน

5.2.3 สามารถวิเคราะห์และเปรียบเทียบค่าการสูญเสียกำลังไฟฟ้าและประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าที่รูปแบบการพันขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าทั้ง 4 แบบ

5.2.4 สามารถปรับปรุงหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงให้มีประสิทธิภาพดีขึ้นจากต้นแบบที่เลือกมา

5.3 ปัญหาข้อเสนอนะและแนวทางการแก้ไขปัญหา

5.3.1 ปัญหาเกิดจาก การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงไม่สามารถจ่ายแรงดันที่ค่าพิกัดของหม้อแปลง ไฟฟ้าความถี่สูงได้ เนื่องจากไม่มีแหล่งจ่ายที่ดีพอในการทดสอบดังนั้นจึงต้องจ่ายแรงดันที่ค่าระดับหนึ่งและใช้เทียบเพื่อให้ถึงระดับแรงดันพิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้าได้

5.3.2 หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงมีประสิทธิภาพที่ค่อนข้างสูงอยู่แล้ว ดังนั้นการพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้ดีขึ้นจึงทำได้ค่อนข้างยาก ดังนั้นจึงต้องลดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าทั้งในแกนเหล็กและขดลวดตัวนำเพื่อให้ค่าประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าสูงขึ้น

5.3.3 ปัญหาเกิดจากอุปกรณ์ในการทดสอบมีประสิทธิภาพที่ไม่ค่อยดีนัก เนื่องจากที่ความถี่สูงอาจจะเกิดการคลาดเคลื่อนระหว่างการวัดค่าได้เนื่องจากผลของการนำกระแสได้ที่ผิวหนังตัวนำ

5.4 ข้อดีของการศึกษาหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพ

5.4.1 สามารถนำวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้ในการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า เพื่อประหยัดเวลาและงบประมาณในการออกแบบ

5.4.2 สามารถนำผลการทดสอบไปเปรียบเทียบประสิทธิภาพหม้อแปลงไฟฟ้าในรูปแบบการพันในรูปแบบทั้ง 4 แบบ เพื่อให้ได้หม้อแปลงไฟฟ้าที่ให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุด

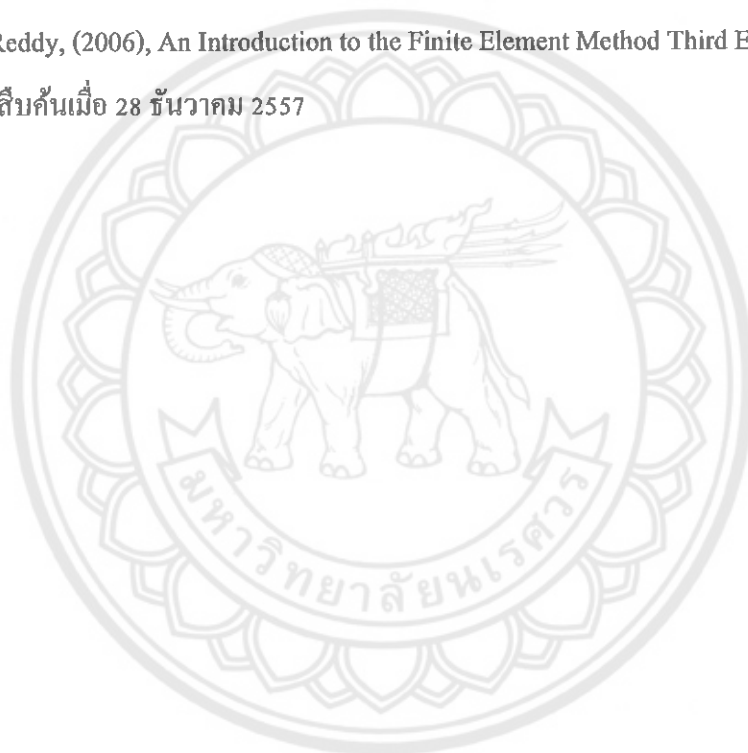
5.4.3 เป็นแนวทางการปรับปรุงประสิทธิภาพหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงและหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่ต่ำให้มีค่าประสิทธิภาพดีขึ้น

5.5 แนวทางในการพัฒนาต่อไป

ผลที่ได้จากการศึกษาและทดสอบในโครงการนี้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับหม้อแปลงสวิตซ์ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ได้ ซึ่งในโครงการนี้กล่าวถึง ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องกับ การสูญเสียกำลังไฟฟ้าในหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงและการพัฒนาหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้หม้อแปลงไฟฟ้าให้ดีขึ้น ในรูปแบบการพันขดลวดในรูปแบบต่างๆ เพื่อให้ประสิทธิภาพดีที่สุดและนอกจากนั้นยังประหยัดพลังงานไฟฟ้าและเพิ่มเวลาการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงได้นานขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] รศ.ดร.วีระเชษฐ ชันเงิน และวุฒิพล ชาราชธีรเศรษฐ์, (2547), อิเล็กทรอนิกส์กำลัง Power Electronics, สืบค้นเมื่อ 17 สิงหาคม 2557
- [2] มงคล ทองสงคราม, (2535), เครื่องกลไฟฟ้ากระแสสลับ เล่ม 1, รมนาการพิมพ์ จำกัด พิมพ์ครั้งที่ 1, สืบค้นเมื่อ 20 พฤษภาคม 2557
- [3] สุวัฒน์ สุคั่น, (2537), เทคนิคและการออกแบบหม้อแปลงสวิตซ์เพาเวอร์ซัพพลาย, บริษัท เอนทานอล จำกัด ,พิมพ์ครั้งที่ 1, สืบค้นเมื่อ 25 พฤษภาคม 2557
- [4] J.N .Reddy, (2006), An Introduction to the Finite Element Method Third Edition, McGraw Hill, สืบค้นเมื่อ 28 ธันวาคม 2557





ภาคผนวก

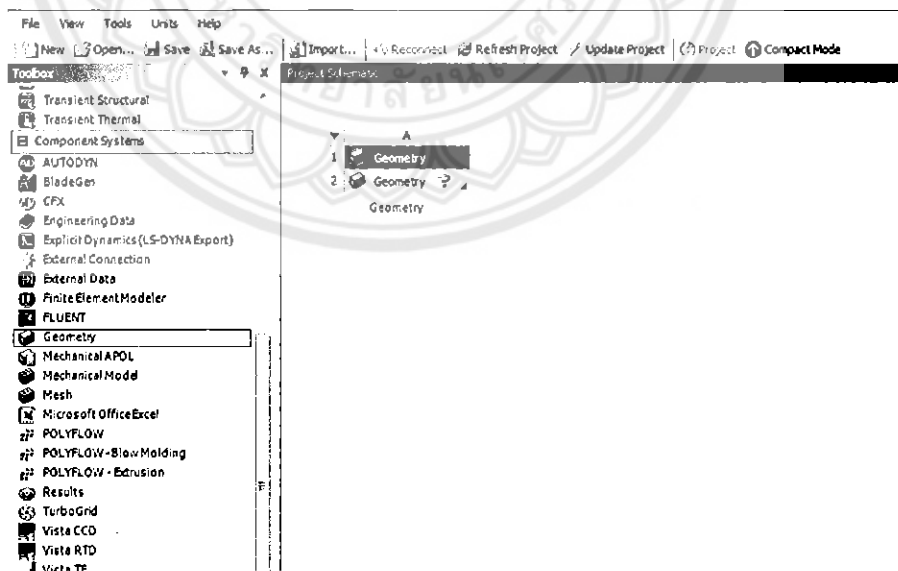
มหาวิทยาลัยนเรศวร

วิธีการการออกแบบแบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าบนโปรแกรม ANSYS 13.0

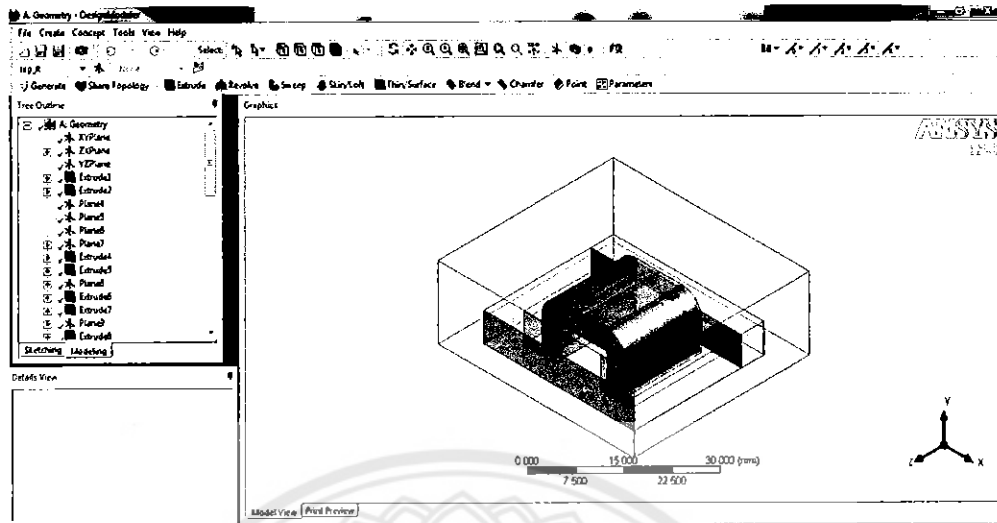
1. เปิดโปรแกรม ANSYS 13.0



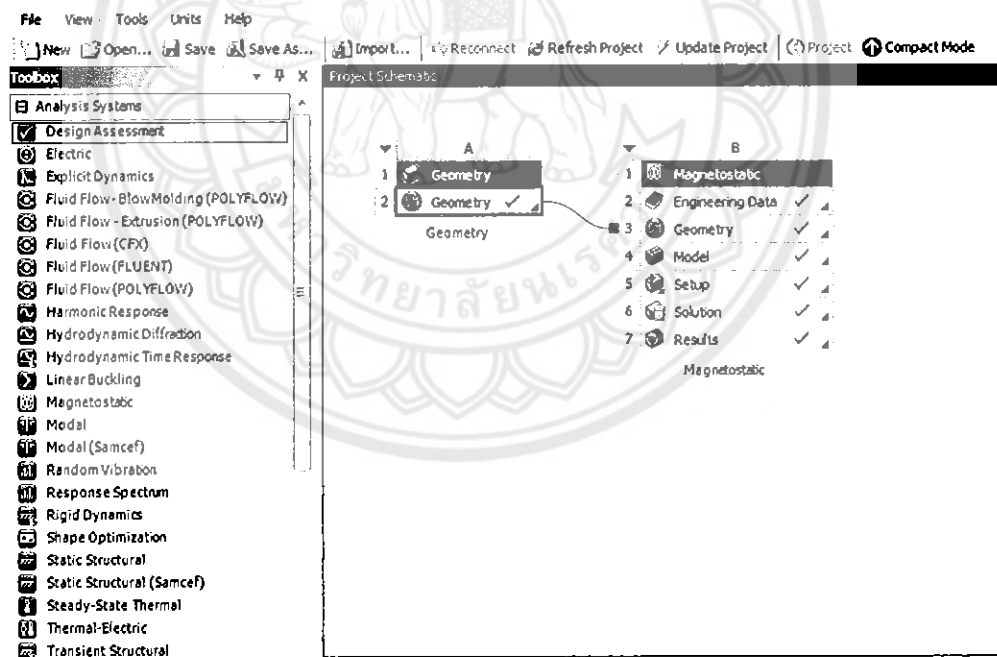
2. คลิก GEOMETRY เพื่อสร้างแบบจำลองหม้อแปลง



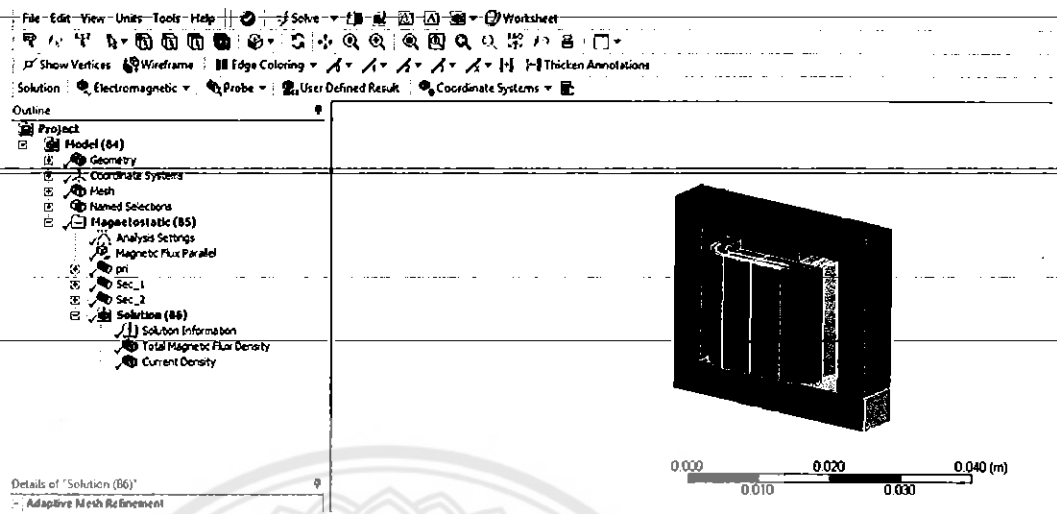
3.สร้างแบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้า



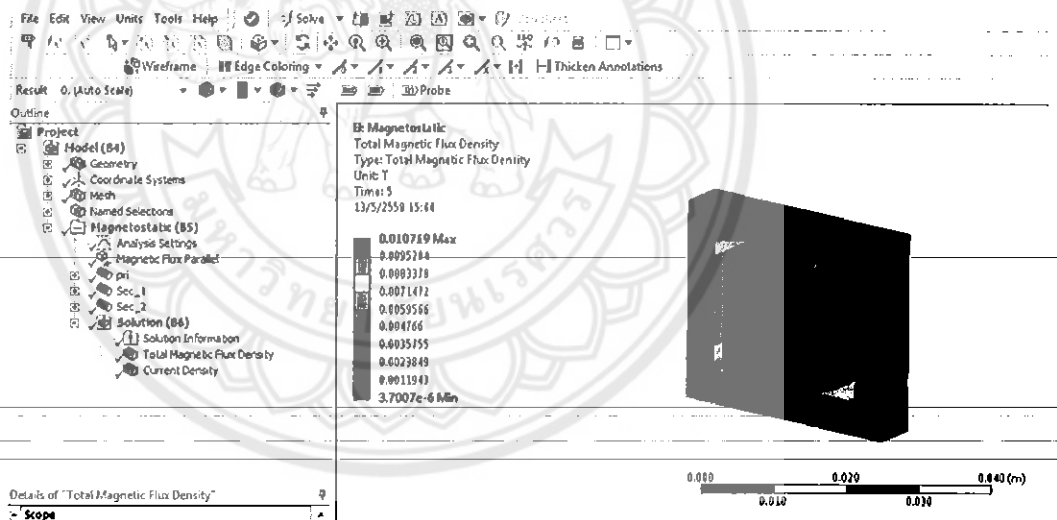
4.ถักิิก MAGNETOSTATIC



5. แบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าในโปรแกรม



6. จำลองการทำงานของหม้อแปลงบนโปรแกรม



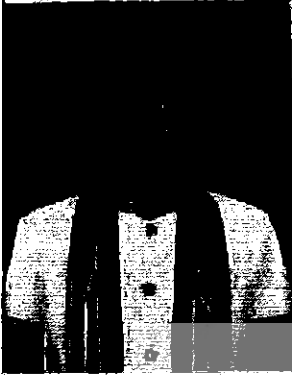
ผลการวัดความยาวขดลวด

ความยาว ขดลวด ทองแดง	การพันขดลวด แบบชั้นแบบที่ 1	การพันขดลวด แบบชั้นแบบที่ 2	การพัน ขดลวดแบบ แซนดวิช	การพันขดลวด แบบอินเตอร์ลิฟ
ความยาว ขดลวดทุติยภูมิ (เอาต์พุตหลัก) SWG 23 (cm)	65	40	50	45

ผลการวัดค่าความเหนี่ยวนำ

พารามิเตอร์ ของขดทุติยภูมิ (เอาต์พุตหลัก)	การพันขดลวด แบบชั้นแบบที่ 1	การพันขดลวด แบบชั้นแบบที่ 2	การพันขดลวด แบบแซนดวิช	การพันขดลวด แบบอินเตอร์ลิฟ
ค่าความเหนี่ยวนำ (ไมโครเฮนรี)	1.44	0.936	1.101	1.046

ประวัติผู้ดำเนินโครงการ



ชื่อ นายอดิศักดิ์ พรมอยู่
ภูมิลำเนา 216 หมู่ 19 ต. หุ่งใหญ่ อ. โพนธิ์ประทับช้าง จ.พิจิตร
66190

ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนตะพานหิน
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail: adisak.22433@gmail.com

