

การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสม

DESIGN OF SMALL TRANSFORMERS USING
OPTIMIZATION TECHNIQUES



วิทยานิพนธ์เสนอแนะส่วนหนึ่งของการศึกษาดำเนินการตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2545

ISBN 974-324-053-5

การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสม

DESIGN OF SMALL TRANSFORMERS USING
OPTIMIZATION TECHNIQUES



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 44097
วัน, เดือน, ปี 28 ต.ค. 2545

b.....
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2545

ISBN 974-324-053-5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**DESIGN OF SMALL TRANSFORMER USING
OPTIMIZATION TECHNIQUES**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2002

ISBN 974-324-053-5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2002

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการเว้นงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสม
DESIGN OF SMALL TRANSFORMERS USING OPTIMIZATION
TECHNIQUES

ชื่อนักศึกษา นายธีรพล โปธิ์พงษ์วิวัฒน์
รหัสประจำตัว 42061058
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.ชัยวุฒิ นิตร์อุทัย

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.พิชิต	ลำยอง	
ผศ.ดร.วิจิตร	กิลเรศ	
ผศ.ดร.ชนินทร์	บุญดิษณานุสรณ์	
ดร.อนันท์วัฒน์	คุณากร	
ผศ.ดร.ชัยวุฒิ	นิตร์อุทัย	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 18 กันยายน 2545 เวลา 10.30-12.30 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น ชั้น 4 (ห้อง E12-404)

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(รศ.ดร.บุญวัฒน์ อัครชู)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....๒3.....เดือน.....กันยายน.....พ.ศ. ๒๕๔๕.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสม
นักศึกษา	นายธีรพล โปธิ์พงษ์วิวัฒน์
รหัสประจำตัว	42061058
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2545
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.ชัชวดี ฉัตรอุทัย

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอแนวทางพัฒนาการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสม โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบลดระดับแรงดันที่มีขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้าไม่เกิน 200 VA แรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ 220-230 V ให้ได้ตรงตามความต้องการการออกแบบจะกำหนดเป้าหมายให้หม้อแปลงไฟฟ้ามีความสูญเสียต่ำ (ประสิทธิภาพสูง) โดยจะพิจารณาการหาค่าที่เหมาะสมของโครงสร้างซึ่งประกอบด้วยสองส่วนหลักได้แก่ โครงสร้างแกนเหล็กแบบเซตล์ (E-I) และโครงสร้างขดลวด โดยตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบเลือกใช้พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก ช่องพันขดลวดและความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก จากการเปรียบเทียบวิธีการหาค่าที่เหมาะสมเชิงตัวเลขแบบคิโทมินิสติก (SUMT) และแบบสโตชาสติก (จินेटิก) โดยใช้โปรแกรมที่พัฒนาด้วยภาษา Visual Basic พบว่าแบบจินेटิกสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้ดีกว่าผลที่ได้จากการออกแบบนำมาสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบขนาด 50 VA, 25 VA และ 5.1 VA ทำการทดสอบหาค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้น และค่าอุณหภูมิเพิ่มสูงสุดขณะใช้งานที่พิกัด ผลการทดสอบต้นแบบพบว่ามีความใกล้เคียงกับค่าที่ออกแบบไว้ นอกจากนี้ยังได้วิเคราะห์ผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าที่เหมาะสมเมื่อได้มีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ในการออกแบบได้แก่ ชนิดของแกนเหล็ก ค่าความหนาแน่นกระแส และผลการออกแบบเมื่อกำหนดเป้าหมายให้มีราคารวมต่ำ เป้าหมายให้มีน้ำหนักรวมต่ำและเป้าหมายให้มีค่าความสูญเสียต่ำโดยมีราคาไม่เกินกว่าค่าที่กำหนดท้ายที่สุดได้นำเสนอแนวความคิดในการออกแบบโดยการกำหนดขนาดแกนเหล็กที่ต้องการแล้วใช้ค่าความหนาของแกนเหล็กและความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กเป็นตัวแปรในการออกแบบ

Thesis Title	Design of Small Transformers Using Optimization Techniques
Student	Mr. Teeraphon Phophongviwat
Student ID.	42061058
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2002
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Chaiwut Chat-uthai

ABSTRACT

This thesis presents the development of the design of small transformers using the optimization techniques. The objective is to design the step-down transformers, which have rated less than 200 VA and primary voltage 220-230 V, in order to have the desired characteristics. The design objective is defined as the small transformer having minimum losses (high efficiency). The design process is to determine the optimal construction of transformer which consists of two main parts, ie shell-type core (E-I) and winding. The cross-section area of core, window area of winding and magnetic flux density are defined to be the design variables. The comparison of numerical optimization techniques which based on the deterministic (SUMT) and stochastic (genetic) methods using the program developed from Visual Basic shows that the genetic algorithm is better for the design applications. The prototypes of the optimal transformers rated of 50 VA, 25 VA and 5.1 VA are constructed and the power losses and temperature rise of transformers are tested. The test results of the prototypes are in agreement with the design results. Furthermore, the analysis of optimal design of transformers i.e., the change of design parameters (core materials, current density), having minimum cost, having minimum weight, having minimum loss low cost, and having minimum cost low loss, are illustrated and discussed. Finally, the proposed idea of optimal design which the core size is defined and the thickness of core and magnetic flux density is set to be the design variables is also presented.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างดี ด้วยคำแนะนำ ปรีกษาเกี่ยวกับการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กและหลักการออกแบบที่เหมาะสมจาก ผศ.ดร. ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ คุณต่อพงศ์ ภูมิภาค ที่ช่วยเหลือให้คำแนะนำในบางปัญหาที่เกิดขึ้น ซึ่งมีส่วนช่วยทำให้ผู้วิจัยเข้าใจในปัญหานั้น

ขอขอบคุณ คุณวินัย สิทธิพันธ์เจริญ วิศวกรฝ่ายออกแบบของบริษัท ไทยตาบุงจิ จำกัด คุณมณฑา เทียมเมือง และคุณวรชาติ แซ่ก๊ก ที่ช่วยเหลือในการสร้างต้นแบบหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อใช้ทดสอบผลการออกแบบ

ขอขอบคุณ ผศ.พิชิต ถ้ายอง หัวหน้าศูนย์บริการและพัฒนาวิศวกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่อำนวยความสะดวกในการใช้งานอุปกรณ์ต่าง ๆ เพื่อทำการทดสอบต้นแบบหม้อแปลงไฟฟ้า

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ นักศึกษาสำหรับความช่วยเหลือต่าง ๆ ที่มีให้กับผู้วิจัย
ท้ายที่สุดนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อเสถียร คุณแม่สุรีย์ โพธิ์พงษ์วิวัฒน์ ซึ่งเป็นผู้ให้โอกาสทางการศึกษาและกำลังใจกับผู้วิจัยตั้งแต่เริ่มต้นจนสำเร็จสมความตั้งใจ

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ธีรพล โพธิ์พงษ์วิวัฒน์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา	1
1.3 สมมติฐานของการศึกษา	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	3
บทที่ 2 หม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็ก.....	5
2.1 บทนำ.....	5
2.2 โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็ก	6
2.2.1 โครงสร้างวงจรแม่เหล็ก.....	6
2.2.2 โครงสร้างขดลวดตัวนำ.....	7
2.2.3 การคำนวณความยาวขดลวด	8
2.2.4 ความต้านทานไฟฟ้าของขดลวด	9
2.3 กำลังสูญเสียในหม้อแปลงไฟฟ้า	10
2.3.1 กำลังสูญเสียในแกนเหล็ก	10
2.3.2 กำลังสูญเสียในขดลวด	11
2.4 สมการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าเบื้องต้น	11
2.4.1 ออกแบบโดยใช้สมการแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ.....	12
2.4.2 ออกแบบโดยใช้สมการ Power Capability	13
2.5 ตัวอย่างการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็ก.....	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ในวงกว้าง

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กที่เหมาะสม	20
3.1 บทนำ.....	20
3.2 พื้นฐานการออกแบบที่เหมาะสม.....	20
3.2.1 การแก้ปัญหาโดยตรงและการแก้ปัญหาวนกลับ	21
3.2.2 หลักการออกแบบที่เหมาะสม	22
3.2.2.1 กำหนดเป้าหมายการออกแบบ (design objective).....	23
3.2.2.2 กำหนดรูปแบบของปัญหา (formulation of problem)	23
3.2.2.3 หลักการและการสังเคราะห์การออกแบบ (design concept and synthesis).....	23
3.2.2.4 การหาค่าที่เหมาะสม (optimization process)	23
3.2.2.5 อภิปรายผลการออกแบบ (discussion).....	23
3.3 หลักการเบื้องต้นของการหาค่าที่เหมาะสม.....	23
3.3.1 จุดที่เหมาะสม (Optimal Point)	23
3.3.1 การหาค่าที่เหมาะสมแบบดิเทอมีนิสติก	25
3.3.2 การหาค่าที่เหมาะสมแบบสโตคาสติก.....	26
3.4 การเปรียบเทียบวิธีการหาค่าที่เหมาะสม.....	27
3.5 ตัวอย่างการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กที่เหมาะสม	29
บทที่ 4 ผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็ก.....	35
4.1 บทนำ.....	35
4.2 โปรแกรมการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็ก.....	35
4.3 ผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็ก	38
4.4 ผลการทดสอบต้นแบบหม้อแปลงไฟฟ้า	40
4.4.1 การทดสอบแบบเบ็ดเสร็จและลัดวงจร	41
4.4.2 การทดสอบโวลต์เตจเรกกูเลชัน	45
4.4.3 การทดสอบเมื่อเปลี่ยนแปลงภาระทางไฟฟ้า.....	47
4.4.5 การทดสอบอุณหภูมิเพิ่มขึ้นสูงสุดขณะใช้งานที่พิกัด.....	48
4.4.6 การทดสอบความผิดปกติของสัญญาณไฟฟ้า.....	50
4.5 บทสรุป.....	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการแข่งขันเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนูญาดเห็นาเบเซประยชนดานการค้ำ
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 วิเคราะห์การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็ก	55
5.1 บทนำ.....	55
5.2 สมการเป้าหมายและเงื่อนไขในการออกแบบ	55
5.3 ผลการออกแบบและการวิเคราะห์	57
5.3.1 เปรียบเทียบผลการออกแบบในแต่ละเป้าหมาย.....	57
5.3.2 การเปลี่ยนแปลงชนิดวัสดุของแกนเหล็ก	59
5.3.3 การเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นกระแส	63
5.4 การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้ากรณีที่มีเป้าหมายรอง.....	68
5.5 การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กเมื่อใช้ D และ B_{max} เป็นตัวแปร	70
5.6 บทสรุป.....	73
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	76
เอกสารอ้างอิง.....	80
ภาคผนวก ก. ขนาดและคุณสมบัติของแกนเหล็ก.....	82
ภาคผนวก ข. ขนาดและคุณสมบัติของลวดตัวนำ.....	91
ภาคผนวก ค. ผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า.....	93
ภาคผนวก ง. อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า.....	99
ภาคผนวก จ. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์.....	101
ประวัติผู้เขียน	109

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ข้อมูลลวดตัวนำของหม้อแปลงไฟฟ้า 50 VA, 220/110 V, 50 Hz.....	14
2.2 ผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า 50VA, 220/110, ความถี่ 50 Hz, $J \approx 4 \text{ A/mm}^2$, $B_{\text{max}} = 1.4 \text{ T}$ และ 5.1 VA, 120/24 V, ความถี่ 60 Hz, $B_{\text{max}} = 1.6 \text{ T}$, $J \approx 4 \text{ A/mm}^2$	18
3.1 ผลลัพธ์ของการหาค่าที่ต่ำสุดของสมการ 3.6.....	28
3.2 ผลลัพธ์ของการหาค่าที่ต่ำสุดของสมการ 3.7.....	28
3.3 เปรียบเทียบความยาวจากการวัดและคำนวณขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 5.1 VA.....	31
3.4 เปรียบเทียบความยาวจากการวัดและคำนวณ(วิธีใหม่)ขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	32
3.5 ผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าพิกัด 5.1 VA, 120/24 V, 60 Hz, $B_{\text{max}} = 1.4 \text{ T}$, แกนเหล็ก RM-800, $J \approx 4 \text{ A/mm}^2$	34
4.1 ผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าพิกัด 50 VA, 220/110, 50 Hz, $J \approx 4 \text{ A/mm}^2$	38
4.2 ผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าพิกัด 25 VA, 220/110, 50 Hz, $J \approx 4 \text{ A/mm}^2$	39
4.3 ผลการทดสอบแบบเปิดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ 50 VA และ 25 VA.....	42
4.4 ผลการทดสอบแบบลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ 50 VA และ 25 VA.....	43
4.5 การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการออกแบบและทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ.....	43
4.6 ผลการทดสอบ โวลต์เตจเรกกูเลชันของหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ 50 VA และ 25 VA ทดสอบโดยการรักษาระดับแรงดันด้านปฐมภูมิให้มีค่าคงที่.....	46
4.7 ผลการทดสอบ โวลต์เตจเรกกูเลชันของหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ 50 VA และ 25 VA ทดสอบโดยการรักษาระดับแรงดันด้านทุติยภูมิให้มีค่าคงที่.....	46
4.8 ความสามารถในการทนอุณหภูมิเพิ่มของฉนวนแต่ละชนิด.....	49
4.9 ผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มสูงสุดขณะใช้งานที่พิกัด.....	49
4.10 ปริมาณกระแสกระตุ้นและ % THD ของหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบขณะไร้อภาระ.....	50
5.1 ผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าพิกัด 50 VA, 220/110 V, 50 Hz, $J \approx 4 \text{ A/mm}^2$ โดยใช้แกนเหล็ก RM-800 ที่เป้าหมายต่าง ๆ แบบ 3 และ 5 ตัวแปร.....	58
5.2 ผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าพิกัด 50 VA, 220/110 V, 50 Hz, $J \approx 4 \text{ A/mm}^2$ โดยใช้แกนเหล็ก RM-KTA ที่เป้าหมายต่าง ๆ แบบ 3 และ 5 ตัวแปร.....	60
5.3 ผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าพิกัด 50 VA, 220/110 V, 50 Hz, $J \approx 4 \text{ A/mm}^2$ โดยใช้แกนเหล็ก RG-11 ที่เป้าหมายต่าง ๆ แบบ 3 ตัวแปร.....	61
5.4 เปรียบเทียบความสูญเสียที่เกิดขึ้นเมื่อแทนแกนเหล็กชนิด RG-11 และ RM-KTA โดยใช้ขนาดโครงสร้างเดิมที่ได้จากการออกแบบของแกนเหล็กชนิด RM-800.....	63

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ภายใต้การดูแลของสำนักงานคณะกรรมการกฤษฎีกา กระทรวงพาณิชย์ โดยขอสงวนไว้
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.5 ผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าพิกัด 50 VA, 220/110 V, 50 Hz, แกนเหล็ก RM-800 โดยใช้ J ต่าง ๆ ที่เป้าหมาย Min L แบบ 3 ตัวแปร	64
5.6 ผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าพิกัด 50 VA, 220/110 V, 50 Hz, แกนเหล็ก RM-800 โดยใช้ J ต่าง ๆ ที่เป้าหมาย Min C แบบ 3 ตัวแปร	66
5.7 ผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าพิกัด 50 VA, 220/110 V, 50 Hz, โดยใช้แกนเหล็ก RM-800 และ J ต่าง ๆ ที่เป้าหมาย Min W แบบ 3 ตัวแปร	67
5.8 ผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 50 VA, 220/110 V, 50 Hz, $J \approx 4 \text{ A/mm}^2$ แกนเหล็ก RM-800 โดยมีค่าความสูญเสียต่ำเป็นเป้าหมายหลักและราคาเป็นเงื่อนไข	69
5.9 ผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 12 VA, 220/12 V, 50 Hz, แกนเหล็ก RG-11, $J \approx 2 \text{ A/mm}^2$ ที่เป้าหมายในการออกแบบต่าง ๆ	72
5.10 ผลการทดสอบเปิดและปิดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 12 VA, 220/12 V, 50 Hz, แกนเหล็ก RG-11 $J \approx 2 \text{ A/mm}^2$	72
5.11 ผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มขณะใช้งานที่พิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 12 VA, 220/12 V, 50 Hz, แกนเหล็ก RG-11 $J \approx 2 \text{ A/mm}^2$	73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้า	6
2.2 โครงสร้างวงจรแม่เหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็ก.....	6
2.3 การตัดแกนเหล็กรูป E และ I แบบประหยัดไม่มีเศษวัสดุเหลือจากการตัด.....	7
2.4 ลักษณะการพันขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็ก.....	8
2.5 ภาพตัดขวางของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็ก	8
3.1 แผนผังขั้นตอนการออกแบบทางวิศวกรรม.....	20
3.2 การแก้ปัญหาโดยตรง	21
3.3 การแก้ปัญหาแบบย้อนกลับ.....	21
3.4 แผนผังขั้นตอนการออกแบบที่เหมาะสม.....	22
3.5 ค่าตอบของค่าต่ำสุดของฟังก์ชัน $f(x)$ เป็นจุดเดียวกันกับค่าสูงสุดของฟังก์ชัน $-f(x)$	24
3.6 กราฟค่าของฟังก์ชันเป้าหมาย $f(x)$ บน โดเมน x	25
3.7 แผนผังของกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบดิเทอมีนิสติก.....	26
3.8 แผนผังของกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบจินตึก	27
3.9 รูปร่างของ $f(x) = 100(x_2 - x_1^2)^2 + (1 - x_1)^2$	28
3.10 รูปร่างของ $f(x) = 21.5 + x_1 \sin(4\pi x_1) + x_2 \sin(20\pi x_2)$ ในช่วงที่กำหนด.....	28
3.11 โครงสร้างของแกนเหล็กที่ใช้เป็นตัวแปรในการออกแบบ.....	30
3.12 ลักษณะของกระสวยพันขดลวด	30
3.13 หม้อแปลงไฟฟ้าที่ได้จากการผลิตในภาคอุตสาหกรรมขนาด 5.1 VA, 120/24 V, 60 Hz.....	31
3.14 การเรียงของตัวนำในกระสวยพันขดลวด.....	31
3.15 หม้อแปลงไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบที่เหมาะสมขนาด 5.1 VA, 120/24 V, 60 Hz	33
4.1 แผนผังของขบวนการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสม.....	36
4.2 หน้าต่างกำหนดเป้าหมายและพารามิเตอร์ในการออกแบบ.....	36
4.3 หน้าต่างแสดงผลลัพธ์ที่ได้ขณะประมวลผล.....	37
4.4 หน้าต่างแสดงผลลัพธ์ที่ได้จากการหาค่าที่เหมาะสม.....	37
4.5 ดันแบบหม้อแปลงไฟฟ้าความสูญเสียรวมค่านำขนาด 50 VA แบบ 2 ตัวแปรและ 3 ตัวแปร.....	40
4.6 ดันแบบหม้อแปลงไฟฟ้าความสูญเสียรวมค่านำขนาด 50 VA แบบ 4 ตัวแปรและ 5 ตัวแปร.....	41
4.7 ดันแบบหม้อแปลงไฟฟ้าความสูญเสียรวมค่านำขนาด 25 VA แบบ 3 ตัวแปรและ 5 ตัวแปร.....	41
4.8 การต่อเครื่องมือวัดในการทดสอบแบบเปิดวงจรและลัดวงจร	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของทางโรงเรียนเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 วงจรสมมูลย์แบบประมาณของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 50 VA แบบ 2 ตัวแปร	44
4.10 วงจรสมมูลย์แบบประมาณของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 50 VA แบบ 3 ตัวแปร	44
4.11 วงจรสมมูลย์แบบประมาณของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 50 VA แบบ 4 ตัวแปร	44
4.12 วงจรสมมูลย์แบบประมาณของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 50 VA แบบ 5 ตัวแปร	44
4.13 วงจรสมมูลย์แบบประมาณของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 25 VA แบบ 3 ตัวแปร	45
4.14 วงจรสมมูลย์แบบประมาณของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 25 VA แบบ 5 ตัวแปร	45
4.15 ผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ 50 VA เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของภาระ	47
4.16 ผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ 25 VA เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของภาระ	48
4.17 สัญญาณกระแสกระตุ้นของหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบขนาด 50 VA แบบ 2 ตัวแปร	51
4.18 สัญญาณกระแสกระตุ้นของหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบขนาด 50 VA แบบ 3 ตัวแปร	51
4.19 สัญญาณกระแสกระตุ้นของหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบขนาด 50 VA แบบ 4 ตัวแปร	51
4.20 สัญญาณกระแสกระตุ้นของหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบขนาด 50 VA แบบ 5 ตัวแปร	52
4.21 สัญญาณกระแสกระตุ้นของหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบขนาด 25 VA แบบ 3 ตัวแปร	52
4.22 สัญญาณกระแสกระตุ้นของหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบขนาด 25 VA แบบ 5 ตัวแปร	52
5.1 ผลลัพธ์ที่ได้จากการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าพิกัด 50 VA, 220/110 V, 50 Hz, แกนเหล็ก RM-800 $J \approx 4 \text{ A/mm}^2$ โดยมีค่าความสูญเสียต่ำเป็นเป้าหมายหลักและราคาเป็นเงื่อนไข	70
5.2 ต้นแบบหม้อแปลงไฟฟ้าพิกัด 12 VA, 220/12 V, 50 Hz, แกนเหล็ก RG-11 $J \approx 2 \text{ A/mm}^2$	72
6.1 โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้า 50 VA แบบต่าง ๆ ที่ได้จากการออกแบบกรณี 3 ตัวแปร	78
6.1 โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้า 50 VA แบบต่าง ๆ ที่ได้จากการออกแบบกรณี 5 ตัวแปร	78

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็ก (small transformers) ได้ถูกนำมาใช้งานกันอย่างแพร่หลายในเครื่องใช้ไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ การเลือกใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับความต้องการ เช่น เมื่อพิจารณาถึงค่าความสูญเสียและการประหยัดพลังงานก็จะเลือกใช้หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีค่าความสูญเสียต่ำ หรือเมื่อผู้ผลิตหม้อแปลงไฟฟ้าต้องการลดต้นทุนการผลิตเพื่อเพิ่มผลประกอบการก็จะเลือกผลิตหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีราคาต่ำเป็นต้น จากการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กโดยวิธีทั่วไป เมื่อต้องการออกแบบโดยกำหนดคุณลักษณะการใช้งานที่ต้องการ หรือปรับคุณลักษณะของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ได้ให้เปลี่ยนไป จะใช้วิธีทดลองผิดลองถูก (trial and error) จากประสบการณ์และความชำนาญของผู้ออกแบบโดยการเปลี่ยนขนาดโครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าเช่น ขนาดของแกนเหล็กและจำนวนรอบของขดลวด ซึ่งวิธีการนี้จะทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย อีกทั้งยังมีโอกาสที่จะไม่ได้หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีคุณลักษณะตามที่ต้องการที่ดีที่สุดด้วย ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำวิธีการเชิงตัวเลขในการหาค่าที่เหมาะสม (numerical optimization method) ซึ่งเป็นวิธีการหาค่าสูงสุดหรือต่ำสุดของฟังก์ชันมาช่วยในการหาโครงสร้างที่เหมาะสมเพื่อให้ได้หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีคุณลักษณะตามที่ต้องการ

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

จุดมุ่งหมายของวิทยานิพนธ์นี้คือการศึกษาแนวทางในการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมเพื่อให้ได้หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีคุณลักษณะตามต้องการ โดยจะทำการศึกษาวิธีการหาค่าที่เหมาะสม ศึกษาการคำนวณโครงสร้างต่าง ๆ ของหม้อแปลงไฟฟ้าได้แก่ แกนเหล็กและความยาวของขดลวด รวมถึงศึกษาวิธีการคำนวณค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้น แล้วนำผลการศึกษาที่ได้ไปสร้าง โปรแกรมออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมเพื่อนำไปใช้ออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า และนำผลที่ได้จากการออกแบบไปสร้างต้นแบบหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม ซึ่งเมื่อได้โปรแกรมที่สามารถออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าได้อย่างถูกต้องแล้วจะนำไปใช้วิเคราะห์การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าในลักษณะต่าง ๆ ตามที่ต้องการ

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กโดยวิธีทั่วไป เมื่อผู้ออกแบบต้องการที่จะกำหนดคุณลักษณะของหม้อแปลงไฟฟ้า ผู้ออกแบบจะใช้วิธีการปรับขนาดของแกนเหล็กและค่า B_{max} ตามประสบการณ์ที่มีอยู่ แต่จะทราบได้อย่างไรว่าควรที่จะปรับขนาดของแกนเหล็กและค่า B_{max} ไปเท่าใดจึงจะได้หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีคุณลักษณะตามที่ต้องการ ซึ่งเป็นไปได้ยากที่จะทำการลองปรับไปจนได้ค่าที่เหมาะสม ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอแนวทางการออกแบบโดยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมโดยคาดว่าจะสามารถช่วยให้ได้ขนาดโครงสร้างของแกนเหล็กและค่า B_{max} ที่เหมาะสม ซึ่งจะช่วยให้ได้หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีคุณลักษณะตามต้องการ

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้เสนอวิธีการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กที่เหมาะสม โดยอาศัยทฤษฎีของการหาค่าที่เหมาะสมซึ่งจะพิจารณาจากแบบดีเทอร์มินิสติก (deterministic) และแบบสโตชาสติก (stochastic) ซึ่งหลักการของวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบดีเทอร์มินิสติก เป็นการหาค่าที่เหมาะสมโดยใช้พื้นฐานของแอมแปร์เดียน ในส่วนแบบสโตชาสติก เป็นการหาค่าที่เหมาะสมโดยใช้พื้นฐานของความน่าจะเป็น ในการนำวิธีการหาค่าที่เหมาะสมเข้ามาช่วยออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กนี้จะนำมาใช้หาขนาดโครงสร้างของแกนเหล็กและค่า B_{max} ที่เหมาะสมเพื่อให้ได้หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีคุณลักษณะตามต้องการ

1.5 ขอบเขตการวิจัย

ขอบเขตในการวิจัยของวิทยานิพนธ์นี้คือการเสนอแนวทางการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสม เพื่อออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบลดระดับแรงดันที่มีขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้าไม่เกิน 200 VA แรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ 220-230 V ให้มีคุณลักษณะตามต้องการ ได้แก่ หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีค่าความสูญเสียรวมต่ำ หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีราคารวมต่ำ และหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีน้ำหนักรวมต่ำ หลังการออกแบบจะนำผลที่ได้มาสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบเพื่อทดสอบคุณลักษณะต่าง ๆ เพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของกระบวนการออกแบบรวมถึงสมการที่ใช้ในการคำนวณโครงสร้าง จากนั้นวิเคราะห์ผลที่มีต่อการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าที่เหมาะสมเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบ ได้แก่ ชนิดของแกนเหล็กและค่าความหนาแน่นกระแสของลวดตัวนำ

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

ขั้นตอนการศึกษาของวิทยานิพนธ์นี้ได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนได้แก่ ส่วนแรกเป็นการศึกษาวิธีการหาค่าที่เหมาะสมและหลักการออกแบบที่เหมาะสม ส่วนที่สองเป็นการศึกษาวิธีการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กซึ่งทั้งสองส่วนมีรายละเอียดดังนี้

ส่วนแรกทำการศึกษาลักษณะและวิธีการหาค่าที่เหมาะสม โดยได้ทำการศึกษารูปแบบที่เหมาะสมทั้งสองแบบได้แก่ แบบดีเทอร์มินิสติก โดยวิธี SUMT (sequential unconstrained minimization techniques) และแบบสโตชาสติก โดยวิธีจีเนติก (genetic algorithms, GAs) จากนั้นเขียนโปรแกรมที่ใช้ในการหาค่าที่เหมาะสมทั้งสองแบบแล้วทดลองใช้แก้ปัญหาต่าง ๆ เพื่อศึกษาถึงข้อดี-เสียพร้อมทั้งข้อกำหนดของการหาค่าที่เหมาะสมในแต่ละแบบ

ในส่วนที่สองทำการศึกษารูปแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กโดยการรวบรวมวิธีการออกแบบที่มีการใช้งานกันอยู่ รวมถึงวิธีการคำนวณโครงสร้างของแกนเหล็กและขดลวด จากนั้นนำมาทดสอบหาวิธีที่ให้ความแม่นยำในการคำนวณขนาดโครงสร้างที่ดีที่สุด โดยการนำมาเปรียบเทียบกันกับโครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กจริงที่มีอยู่ เมื่อได้วิธีการคำนวณโครงสร้างแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะทำการพิจารณาพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการออกแบบที่มีส่วนในการกำหนดคุณลักษณะของหม้อแปลงไฟฟ้าเช่น น้ำหนัก ราคาและค่าความสูญเสียซึ่งได้แก่ ขนาดของแกนเหล็กและค่า B_{max} จากนั้นจะนำพารามิเตอร์เหล่านี้ไปใช้เป็นตัวแปรในการออกแบบ โดยใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสม หลังการออกแบบนำผลที่ได้มาสร้างต้นแบบเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของวิธีการออกแบบและสมการต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณโครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้า

ขั้นตอนของการศึกษาในงานวิจัยที่ได้กล่าวมาข้างต้นสามารถนำเสนอได้ดังนี้

บทที่ 2 เป็นการกล่าวถึงโครงสร้างพื้นฐานของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็ก วิธีการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กแบบทั่วไป โดยได้แสดงรายละเอียดพร้อมทั้งตัวอย่างการคำนวณน้ำหนัก ราคาและความสูญเสียที่เกิดขึ้นของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็ก

บทที่ 3 เป็นการกล่าวถึงทฤษฎีเบื้องต้นของการหาค่าที่เหมาะสมแบบดีเทอร์มินิสติกและแบบสโตชาสติก โดยนำมาเปรียบเทียบกันโดยใช้ให้หาค่าที่เหมาะสมของฟังก์ชันทดสอบต่าง ๆ และกล่าวถึงหลักการออกแบบที่เหมาะสม

บทที่ 4 กล่าวถึงผลการออกแบบและทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กพิกัด 5.1 VA, 120/24 V, 60 Hz, 50 VA และ 25 VA, 220/110 V, 50 Hz แกนเหล็กชนิด RM-800, $J \approx 4 \text{ A/mm}^2$ ลวดตัวนำเป็นฉนวนคลาส A โดยใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบจีเนติกซึ่งมีเป้าหมายในการออกแบบให้ค่าความสูญเสียรวมที่เกิดขึ้นในแกนเหล็กและขดลวดมีค่าต่ำที่สุด

บทที่ 5 เป็นการวิเคราะห์การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กที่เหมาะสมโดยใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบจีเนติกที่เป้าหมายต่าง ๆ โดยมีการกำหนดพารามิเตอร์ในการออกแบบแตกต่างกัน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กันได้แก่ ชนิดของแกนเหล็กและค่าความหนาแน่นกระแสของลวดตัวนำ รวมถึงการออกแบบที่มีเป้าหมายมากกว่าหนึ่งเป้าหมาย และยังสามารถเสนอวิธีการออกแบบโดยเลือกใช้ความหนาของจำนวนแผ่นลามีเนทที่ใช้ประกอบเป็นแกนเหล็กร่วมกับความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเป็นตัวแปรในการออกแบบด้วย

บทที่ 6 เป็นกรกล่าวถึงผลสรุปที่ได้จากการวิจัยที่แสดงให้เห็นว่าหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กพิศดเดียวกันที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสม จะมีลักษณะของโครงสร้างที่แตกต่างกันไปตามพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบ และมีข้อเสนอแนะต่าง ๆ เพิ่มเติมเพื่อเป็นแนวทางสำหรับการวิจัยที่ต่อเนื่องในอนาคต



บทที่ 2

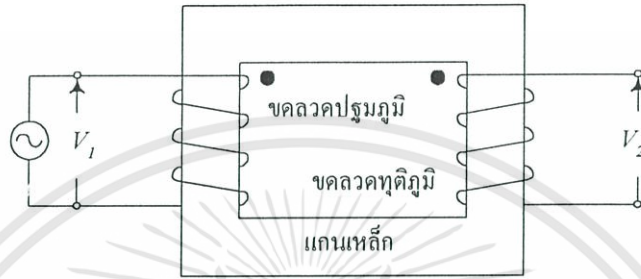
หม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็ก

2.1 บทนำ

เนื้อหาในส่วนนี้จะกล่าวถึงหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับเปลี่ยนระดับแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้นหรือลดต่ำลงตามที่ต้องการ โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กประกอบด้วยขดลวดสองชุดพันอยู่บนแกนเหล็กรูป E-I กำลังไฟฟ้าจะถ่ายเทออกจากขดลวดด้านหนึ่งไปสู่ขดลวดอีกด้านหนึ่งผ่านทางสนามแม่เหล็ก ซึ่งเส้นแรงแม่เหล็กจะกระจายอยู่ในแกนเหล็กที่ขดลวดพันอยู่ ขดลวดที่ต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้าเรียกว่าขดลวดปฐมภูมิ ส่วนอีกขดลวดหนึ่งต่อเข้ากับภาระไฟฟ้าเรียกว่าขดลวดทุติยภูมิ เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าเข้าไปทางขดลวดปฐมภูมิที่ความถี่และระดับแรงดันที่กำหนดจะได้แรงดันไฟฟ้าปรากฏที่ขดลวดทุติยภูมิที่ความถี่เดียวกัน โดยระดับแรงดันไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนจำนวนรอบของขดลวดด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ ในทางอุดมคติจะไม่พิจารณาความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด ดังนั้นระดับแรงดันไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนจำนวนรอบของขดลวดด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิเท่านั้น กรณีที่ระดับแรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิสูงกว่าระดับแรงดันไฟฟ้าด้านทุติยภูมิเรียกว่า หม้อแปลงลดระดับแรงดัน (step-down transformer) ส่วนหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีระดับแรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิต่ำกว่าระดับแรงดันไฟฟ้าด้านทุติยภูมิเรียกว่า หม้อแปลงเพิ่มระดับแรงดัน (step-up transformer) หม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กโดยทั่วไปจะเป็นแบบลดระดับแรงดัน โดยมีระดับแรงดันด้านปฐมภูมิประมาณ 220 – 230 V พิกัดกำลังไฟฟ้าไม่เกิน 200 VA [1] การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กโดยทั่วไปนั้นจะเริ่มจากการประมาณขนาดพื้นที่หน้าตัดของวงจรแม่เหล็กและกำหนดค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่ใช้ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของผู้ออกแบบ จากนั้นจะกำหนดจำนวนรอบของขดลวดจากสมการแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำและเลือกขนาดของแกนเหล็กที่จะนำมาเรียงซ้อนกันเป็นวงจรแม่เหล็ก เมื่อทราบโครงสร้างแกนเหล็กและขดลวดแล้วจะคำนวณหาคุณลักษณะของหม้อแปลงไฟฟ้าในด้านต่าง ๆ เช่น น้ำหนัก ราคาและค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้น ซึ่งหากไม่เป็นที่พอใจก็สามารถที่จะปรับปรุงแก้ไขได้โดยการเปลี่ยนแปลงขนาดพื้นที่หน้าตัดของวงจรแม่เหล็กหรือค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่ใช้ซึ่งขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพและความชำนาญของผู้ออกแบบเพื่อให้ได้หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีคุณลักษณะตามต้องการ

2.2 โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็ก

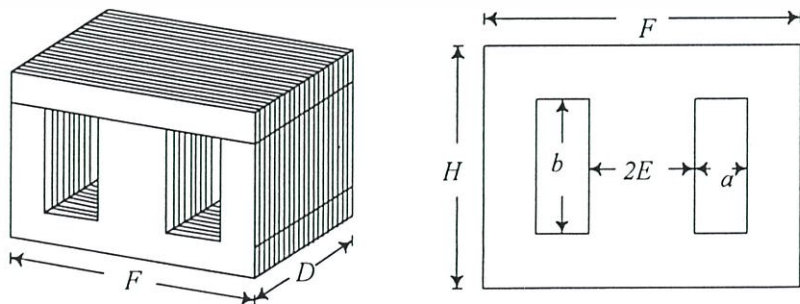
หม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กที่ใช้งานกันอยู่โดยทั่วไปมีขดลวดสองชุดพันรอบแกนเหล็กที่ทำด้วยสาร ferromagnetic เป็นแผ่นเหล็กบาง ๆ (laminated core) นำมาวางเรียงซ้อนกัน ส่วนประกอบที่สำคัญของหม้อแปลงไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 2.1 โดยแกนเหล็กจะทำหน้าที่เป็นวงจรแม่เหล็กมีพลังงานสนามแม่เหล็กสะสมอยู่ ขดลวดเป็นส่วนที่ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้า

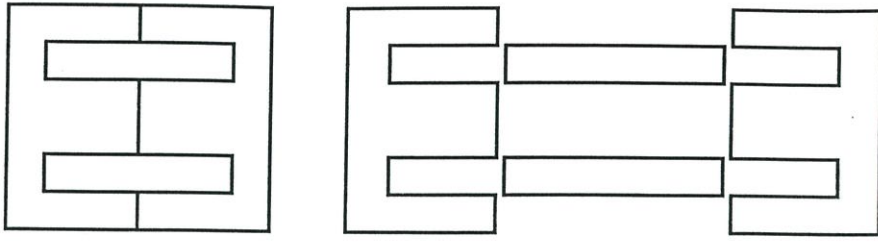
2.2.1 โครงสร้างวงจรแม่เหล็ก

โครงสร้างวงจรแม่เหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กโดยทั่วไปนิยมใช้โครงสร้างเป็นแบบเซลล์แสดงดังรูปที่ 2.2 ซึ่งเป็นการประกอบกันของแผ่นเหล็กรูป E และ I ขนาดขากกลางของแกนเหล็กจะเป็นสองเท่าของขาข้าง เนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กหลักที่เกิดขึ้นบริเวณขากกลางจะแบ่งกระจายออกด้านข้างด้านละเท่า ๆ กัน ส่วนขนาดของช่องฟันขดลวดนั้นจะมีขนาดสัดส่วนขึ้นกับเป้าหมายของการออกแบบและลักษณะการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้า [2] แต่การออกแบบแกนเหล็กแบบไม่มีการสูญเสียวัสดุจากการตัดจะกำหนดให้ขนาดความกว้างของช่องฟันขดลวด (a) เป็นครึ่งหนึ่งของขนาดขากกลาง ($2E$) และความสูง (b) จะมีขนาดเป็นสามเท่าของความกว้าง (a) ซึ่งลักษณะสัดส่วนของแกนเหล็กที่ได้จากการออกแบบนี้จะเรียกว่าแกนแบบประหยัดขนาดความกว้าง (F) และความสูง (H) ของแกนเหล็กจะมีสัดส่วนกันเป็น 5:6 แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.2 โครงสร้างวงจรแม่เหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 การตัดแกนเหล็กรูป E และ I แบบประหยัด ไม่มีเศษวัสดุเหลือจากการตัด

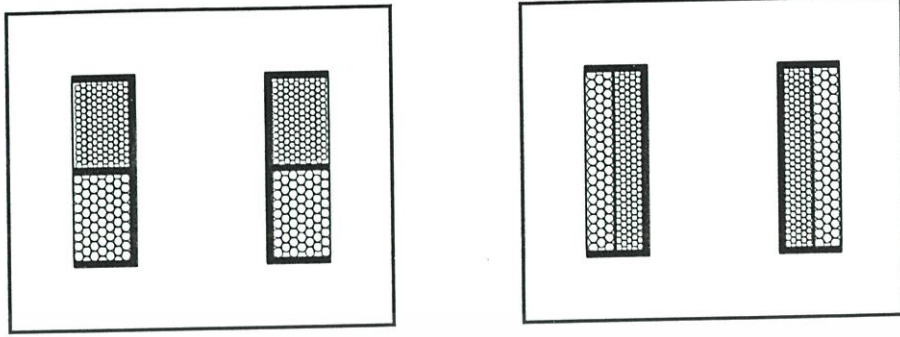
แกนเหล็กซึ่งทำหน้าที่เป็นวงจรแม่เหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าจะทำด้วยสาร ferromagnetic ซึ่งมีคุณสมบัติทางแม่เหล็กที่ดีคือ มีค่าความซึมซาบแม่เหล็กสูง เพื่อลดค่าความสูญเสียทางแม่เหล็กเนื่องจากวงฮิสเทอรีซิส (hysteresis loss) และเพื่อลดการรั่วของเส้นแรงแม่เหล็กซึ่งจะทำให้สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นกระจายอยู่ในส่วนที่เป็นแกนเหล็กเท่านั้น โครงสร้างแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กแผ่นเหล็กที่ประกอบเป็นวงจรแม่เหล็กจะเป็นแผ่นบาง ๆ มีความหนา 0.35-0.5 มม. วางเรียงอัดซ้อนกันเพื่อเป็นการลดค่าความสูญเสียทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากกระแสไหลวนในแกนเหล็ก (eddy current loss) ซึ่งค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนเหล็กทั้งสองค่าเรียกรวมกันว่าค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก

2.2.2 โครงสร้างขดลวดตัวนำ

ขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กมีโครงสร้างเป็นกลุ่มลวดตัวนำพื้นที่หน้าตัดกลมทำด้วยทองแดงหรืออลูมิเนียมจำนวนสองชุดหรือมากกว่าพันอยู่รอบวงจรแม่เหล็กเดียวกันแต่ไม่มีการต่อดึงกันทางไฟฟ้า การเลือกใช้ขนาดของตัวนำขึ้นกับพิกัดกำลังไฟฟ้า แรงดันใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้ารวมถึงความหนาแน่นกระแส (current density) และวิธีการระบายความร้อน การออกแบบจะคำนวณขนาดของตัวนำที่ต้องการแล้วนำไปเลือกขนาดตัวนำมาตรฐานจากตารางข้อมูลลวดตัวนำซึ่งมาตรฐานที่มีการใช้งานในปัจจุบันได้แก่ AWG (American Wire Gauge), SWG (Standard Wire Gauge) ข้อมูลที่ได้จากตารางข้อมูลลวดตัวนำได้แก่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ, mm (รวมฉนวนและไม่รวมฉนวน) พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ, mm² (หรือ cmil) น้ำหนักของตัวนำ, g/m และความต้านทานของตัวนำ, kg / Ω (หรือ Ω / ความยาว)

ลักษณะการพันขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กโดยทั่วไปมี 2 ลักษณะแสดงดังรูปที่ 2.3 การพันของขดลวดในรูป 2.3 ก เป็นการพันขดลวดปฐมภูมิแยกกระสวยกับขดลวดทุติยภูมิ ส่วนการพันขดลวดรูป 2.3 ข เป็นการพันขดลวดปฐมภูมิซ้อนทับกันกับขดลวดทุติยภูมิบนกระสวยเดียวกัน การพันขดลวดทั้งสองลักษณะมีข้อได้เปรียบแตกต่างกัน ซึ่งสิ่งที่จะต้องพิจารณาในการเลือกใช้ได้แก่ เส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล วิธีการฉนวนระหว่างขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ การระบายความร้อน และการสร้างกระสวยพันขดลวด รวมถึงวิธีการคำนวณความยาวลวดตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



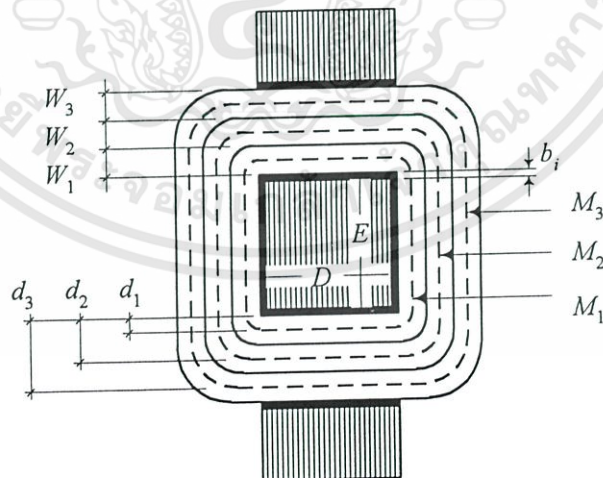
ก) พันขดลวดแยกกัน

ข) พันขดลวดซ้อนทับกัน

รูปที่ 2.4 ลักษณะการพันขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็ก

2.2.3 การคำนวณความยาวขดลวด [2-3]

จากรูปที่ 2.5 เป็นภาพตัดขวางของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กซึ่งกำหนดให้มีขดลวด 3 ชุดเป็นขดลวดปฐมภูมิ 1 ชุดและขดลวดทุติยภูมิ 2 ชุดคือ W_1 , W_2 และ W_3 ตามลำดับ โดย M_1 , M_2 และ M_3 เป็นระยะความยาวเฉลี่ยของขดลวดแต่ละชุด ซึ่งความยาวรวมของขดลวดแต่ละชุดสามารถคำนวณได้จาก ความยาวเฉลี่ยของขดลวดชุดนั้นคูณกับจำนวนรอบของขดลวดชุดที่พิจารณา โดยความยาวเฉลี่ยของขดลวดแต่ละชุดนั้นสามารถกำหนดได้จากโครงสร้างของแกนเหล็ก $f(E, D)$ และความหนาของกระดาษพันขดลวด (b_i)



รูปที่ 2.5 ภาพตัดขวางของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาขดลวดชุดที่ 1 ความยาวเฉลี่ยของขดลวดชุดนี้คือผลรวมของความยาวรอบกระสวย (b_i) กับเส้นรอบวงของวงกลมที่มีรัศมีเท่ากับระยะจากขอบกระสวยพื้นขดลวดถึงกึ่งกลางความหนาของขดลวดชุดนี้คือ $W_1/2$ ดังนั้นความยาวเฉลี่ยของขดลวดปฐมภูมิสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.1

$$M_1 = 2(E + D + 4b_i) + 2\pi \frac{W_1}{2} \quad (2.1)$$

ส่วนความยาวเฉลี่ยของขดลวดทุติยภูมิชุดที่ 1 สามารถคำนวณได้ทำนองเดียวกันกับขดลวดปฐมภูมิคือเป็นผลรวมของความยาวรอบกระสวยกับเส้นรอบวงของวงกลมที่มีรัศมีเท่ากับระยะจากขอบกระสวยพื้นขดลวดถึงกึ่งกลางความหนาของขดลวดชุดนี้คือ $W_1 + W_2/2$ สำหรับขดลวดทุติยภูมิชุดที่ 2 (หรือมากกว่าสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีขดลวดหลายชุด) ก็สามารถคำนวณได้ในทำนองเดียวกัน

$$M_2 = 2(E + D + 4b_i) + 2\pi \left(W_1 + \frac{W_2}{2} \right) \quad (2.2)$$

$$M_3 = 2(E + D + 4b_i) + 2\pi \left(W_1 + W_2 + \frac{W_3}{2} \right) \quad (2.3)$$

จากสมการที่ 2.1-2.3 จะเห็นได้ว่าความยาวเฉลี่ยของขดลวดแต่ละชุดนั้นขึ้นอยู่กับระยะความยาวรอบกระสวยพื้นขดลวด (b_i) และระยะจากขอบกระสวยพื้นขดลวดถึงกึ่งกลางความหนาของขดลวดชุดที่พิจารณา (d) ดังนั้นสามารถเขียนสมการทั่วไปของการหาระยะความยาวเฉลี่ยของขดลวดได้ดังนี้

$$M_i = b_i + 2\pi d_i \quad (2.4)$$

กำหนดให้ N เป็นจำนวนรอบของขดลวดจะได้ความยาวของขดลวด (l) ดังนี้

$$l_i = M_i \times N_i \quad (2.5)$$

2.2.4 ความต้านทานไฟฟ้าของขดลวด

การหาความยาวของขดลวดในหัวข้อที่ผ่านมาจะทำให้สามารถคำนวณหาความต้านทานของขดลวดได้โดยใช้ข้อมูลที่ได้จากตารางข้อมูลลวดตัวนำ ซึ่งมีความสัมพันธ์ของความต้านทานต่อระยะความยาวหรือความต้านทานต่อหน้าหน้าก้อย่างใดอย่างหนึ่ง ความสัมพันธ์นี้จะเป็นค่าความ

ต้านทานที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส แต่ขณะที่หม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายภาระอุณหภูมิภายในขดลวดจะมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้ความต้านทานภายในขดลวดมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย [4] ดังสมการที่ 2.6

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{234.5 + t_2}{234.5 + t_1} \quad (2.6)$$

เมื่อ R_1 และ R_2 เป็นค่าความต้านทานของขดลวดที่อุณหภูมิ t_1 และ t_2 ตามลำดับ

สมการที่ 2.6 นี้เป็นความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของขดลวดตัวนำทองแดง ซึ่งจากการที่ค่าของความต้านทานจะเพิ่มขึ้นเมื่อจ่ายภาระ ดังนั้นการออกแบบจะต้องคำนึงถึงอุณหภูมิขณะใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้าด้วย

2.3 กำลังสูญเสียในหม้อแปลงไฟฟ้า

กำลังสูญเสียในหม้อแปลงไฟฟ้าแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ซึ่งประกอบด้วย

1. กำลังสูญเสียในแกนเหล็ก (core loss)
2. กำลังสูญเสียในขดลวด (copper loss)

2.3.1 กำลังสูญเสียในแกนเหล็ก P_{core}

การสูญเสียภายในแกนเหล็กประกอบด้วย การสูญเสียที่เกิดจากกระแสไหลวนภายในแกนเหล็ก และการสูญเสียที่เกิดจากวงฮิสเทอรีซิส ซึ่งการสูญเสียที่เกิดจากกระแสไหลวนเป็นผลที่เกิดจากการเหนี่ยวนำภายในแกนเหล็กที่วางอยู่ในบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กโดยมีแกนเหล็กเป็นตัวนำ ส่วนการสูญเสียที่เกิดจากวงฮิสเทอรีซิส เกิดจากการที่เมื่อแกนเหล็กได้รับแรงเคลื่อนแม่เหล็กจะสร้างเส้นแรงแม่เหล็กขึ้นตามลักษณะของความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กและความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก เมื่อลดระดับแรงเคลื่อนแม่เหล็กลงเส้นแรงแม่เหล็กที่สร้างขึ้นไม่ลดลงตามแนวทางเดิมแต่จะเหลือตกค้างอยู่ในแกนเหล็กค่าหนึ่ง โดยปริมาณจะขึ้นอยู่กับความถี่ของระบบไฟฟ้าและคุณลักษณะของสารที่ใช้ทำแกนเหล็ก

สารแม่เหล็กที่ใช้ทำแกนเหล็กจะเลือกใช้สารที่มีส่วนผสมของซิลิกอนสูงและพยายามทำให้มีคุณสมบัติการสูญเสียในแกนเหล็กน้อยที่สุดโดยการทำให้มีคุณสมบัติในการซึมซาบแม่เหล็กสูง การกำหนดคุณสมบัติของสารแม่เหล็กแต่ละชนิดเพื่อการออกแบบคำนวณจำเป็นต้องอาศัยเส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรค่าต่าง ๆ เช่น ความหนาของแผ่นเหล็ก ความถี่ ชนิดของสาร และแนวของการรีดแผ่นเหล็ก เป็นต้น

โดยทั่วไปเหล็กแผ่นที่นำมาประกอบเป็นโครงสร้างวงจรแม่เหล็กจะมีกรรมวิธีการผลิต 2 วิธี คือ ชนิดรีดแผ่นเหล็กร้อนและรีดแผ่นเหล็กเย็น [5]

ชนิดรีดแผ่นเหล็กร้อนที่ใช้อยู่ในอุตสาหกรรมจะมีค่าความซึมซาบได้ของสารแม่เหล็กตลอดทุกแนวของแผ่นทุกทิศทางที่พิจารณาจะมีขนาดใกล้เคียงกัน แผ่นเหล็กชนิดนี้สามารถใช้ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กได้ประมาณ 1.4-1.5 เทสลา

ชนิดรีดเย็น แผ่นเหล็กชนิดนี้ตามแนวรีดจะมีความซึมซาบของสารแม่เหล็กสูงกว่าแบบแรกมากและค่าการสูญเสียในแกนเหล็กก็จะมีค่าต่ำกว่าด้วย ประมาณ 2 เท่า เหล็กชนิดนี้ก่อนการนำมาใช้หลังจากการรีดต้องนำไปอบลดความเค้นในเนื้อเหล็กลง ซึ่งกรรมวิธีการอบใช้อุณหภูมิประมาณ 750 องศาเซลเซียสแล้วลดอุณหภูมิลงช้า ๆ เหล็กชนิดนี้สามารถใช้ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กได้ประมาณ 1.6-1.7 เทสลา แต่เหล็กชนิดนี้มีข้อเสียคือถ้านำมาตัดเฉียงแนวรีด(ไม่ตรงตามแนวรีด) ค่าของความซึมซาบแม่เหล็กจะลดลงอย่างมาก 10-20 เท่าและค่าความสูญเสียของแกนเหล็กจะเพิ่มขึ้นอย่างมากอีกด้วย

2.3.2 กำลังสูญเสียในขดลวด P_{cu}

กำลังสูญเสียในขดลวดเป็นค่าสูญเสียที่เกิดจากความร้อนในขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าซึ่งสามารถคำนวณได้จากกระแสที่ไหลผ่านขดลวดและความต้านทานของขดลวดนั้น ปริมาณกระแสที่ไหลผ่านจะขึ้นอยู่กับพิกัดของการจ่ายภาระ การหาค่ากำลังสูญเสียในขดลวดจะพิจารณาได้ดังนี้

$$P_{cu} = I_p^2 R_p + I_s^2 R_s \quad (2.7)$$

เมื่อ R_p, R_s เป็นความต้านทานไฟฟ้าของขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิตามลำดับ
 I_p, I_s เป็นปริมาณกระแสที่ไหลผ่านขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิตามลำดับ

ตามปกติหม้อแปลงไฟฟ้าจะทำงานจ่ายภาระที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นการสูญเสียในขดลวดซึ่งเกิดจากความต้านทานและกระแสจะมีการเปลี่ยนแปลงตามภาระ ส่วนการสูญเสียในแกนเหล็กซึ่งขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของแกนเหล็กจะมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามภาระ

2.4 สมการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าเบื้องต้น

การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าโดยทั่วไปนั้นจะพิจารณาจากพิกัดกำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า ความถี่ ความหนาแน่นกระแสและคุณลักษณะของแกนเหล็กที่ใช้ งาน การออกแบบวิธีต่างๆ ที่ใช้งานมีดังต่อไปนี้

วิธีที่ 1 [6]

$$V = \sqrt{2} \pi f N B A_c \quad (2.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ V เป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของขดลวดด้านที่พิจารณา, V
 f เป็นความถี่ของระบบไฟฟ้า, Hz
 N เป็นจำนวนรอบของขดลวดที่พิจารณา
 B เป็นความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก, Wb / m²
 A_c เป็นพื้นที่หน้าตัดของวงจรมแม่เหล็ก, m²

วิธีที่ 2 [2]

$$P = \frac{JfBA_cA_w}{141.8} \quad (2.9)$$

- เมื่อ P เป็นพิกัดกำลังของหม้อแปลงไฟฟ้า, VA
 J เป็นความหนาแน่นกระแสของหม้อแปลงไฟฟ้า, A / mm²
 f เป็นความถี่ของระบบไฟฟ้า, Hz
 B เป็นความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก, Tesla
 A_c เป็นพื้นที่หน้าตัดของวงจรมแม่เหล็ก, cm²
 A_w เป็นพื้นที่พื้นลวดตัวนำของแกนเหล็ก, cm²

2.4.1 ออกแบบโดยใช้สมการแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ

โครงสร้างหลักของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กจะประกอบไปด้วยโครงสร้างของแกนเหล็กและโครงสร้างของขดลวดตัวนำ จากสมการที่ 2.8 ซึ่งเป็นสมการแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ เมื่อจัดสมการใหม่ดังสมการที่ 2.10 จะเห็นได้ว่าเทอมด้านซ้ายเป็นอัตราส่วนของแรงเคลื่อนไฟฟ้าต่อจำนวนรอบเป็นเทอมที่แสดงถึงโครงสร้างของขดลวดตัวนำส่วนเทอมด้านขวาเป็นเทอมที่แสดงถึงโครงสร้างแกนเหล็ก

$$\frac{V}{N} = \sqrt{2\pi} fBA_c \quad (2.10)$$

จากโครงสร้างของแกนเหล็กที่เป็นการเรียงอัดซ้อนกันของแผ่นเหล็กซิลิกอน โดยทั่วไปจะมีช่องว่างระหว่างแผ่นอยู่เล็กน้อย ดังนั้นปริมาตรและรูปร่างภายนอกกับปริมาตรของเนื้อแกนเหล็กจริงจึงไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงกำหนดค่า $s.f.$ (Stacking factor) เป็นอัตราส่วนปริมาตรเหล็กจริงต่อปริมาตรภายนอกเมื่อซ้อนกัน ค่าอัตราส่วน $s.f.$ นี้จะมีค่าน้อยกว่าหนึ่งเสมอ โดยทั่วไปค่าอัตราส่วน $s.f.$ ของแกนเหล็กแต่ละชนิดจะต่างกันออกไปตามวิธีการผลิต การฉาบผิวหน้าและการอัดแกน ดังนั้นจากสมการที่ 2.10 จะเปลี่ยนเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{V}{N} = \sqrt{2\pi} f B A_c s. f. \quad (2.11)$$

จากสมการที่ 2.11 เมื่อกำหนดค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าต่อจำนวนรอบและความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่ต้องการ ทำให้ทราบพื้นที่หน้าตัดของวงจรมแม่เหล็ก การพิจารณาเลือกใช้แกนเหล็กจากขนาดของแกนเหล็กมาตรฐานเพื่อประกอบเป็นวงจรมแม่เหล็ก จำเป็นต้องพิจารณาพื้นที่ช่องว่างพันขดลวดด้วย โดยจะต้องมีพื้นที่เพียงพอสำหรับการวางกลุ่มขดลวดทั้ง 2 ชุด ซึ่งพื้นที่ที่ต้องการในการพันขดลวดพิจารณาได้จาก จำนวนรอบของตัวนำ ความหนาแน่นกระแสของลวดตัวนำ

2.4.2 ออกแบบโดยใช้สมการ Power Capability

การออกแบบโดยสมการที่ 2.9 การพิจารณาจะจัดรูปสมการใหม่และปรับหน่วยได้ดังสมการที่ 2.12 เพื่อแยกส่วนของเทอมที่แสดงถึงโครงสร้างของแกนเหล็ก เมื่อจัดรูปใหม่แล้วจะเห็นว่าวิธีการออกแบบนี้เป็นการกำหนดกำลังไฟฟ้าที่ต้องการจ่ายให้ภาระ ความหนาแน่นกระแสของลวดตัวนำ ความถี่ที่ใช้งานและความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กเพื่อหาขนาดผลคูณของพื้นที่หน้าตัดวงจรมแม่เหล็กกับพื้นที่พันขดลวด ผลคูณนี้เรียกว่า Area Product การออกแบบด้วยวิธีนี้เมื่อได้ผลคูณแล้วจะนำไปเลือกแกนเหล็ก โดยวิธีเลือกแกนเหล็กจะพิจารณาเช่นเดียวกับกับวิธีแรก

$$A_c A_w = \frac{141.8P}{J f B} \quad (2.12)$$

- เมื่อ P เป็นพิกัดกำลังของหม้อแปลงไฟฟ้า, VA
 J เป็นความหนาแน่นกระแสของลวดตัวนำ, A/ mm²
 f เป็นความถี่ของระบบไฟฟ้า, Hz
 B เป็นความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก, Tesla
 A_c เป็นพื้นที่หน้าตัดของวงจรมแม่เหล็ก, cm²
 A_w เป็นพื้นที่พันลวดตัวนำของแกนเหล็ก, cm²

จากวิธีการออกแบบทั้งสองวิธีข้างต้นเห็นได้ว่า สมการที่ใช้ในการออกแบบจะเป็นการพิจารณาออกแบบโครงสร้างของแกนเหล็กก่อนแล้วจึงนำมาตรวจสอบว่าสามารถที่จะพันขดลวดได้หรือไม่ ซึ่งวิธีการพิจารณาโครงสร้างของแกนเหล็กอาจใช้วิธีแบบง่าย [2] ดังสมการที่ 2.13 เพื่อประมาณโครงสร้างของแกนเหล็ก

$$A_c = \frac{\sqrt{P}}{5.58} \quad (2.13)$$

- เมื่อ A_c เป็นพื้นที่หน้าตัดของวงจรมแม่เหล็ก, in²

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

P เป็นพิกัดกำลังของหม้อแปลงไฟฟ้า, VA

2.5 ตัวอย่างการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็ก

ในส่วนนี้จะเป็นการแสดงตัวอย่างการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 50 VA, 220/110 V, ความถี่ 50 Hz, $B_{\max} = 1.4$ T, ค่าความสูญเสียในแกนเหล็กต่อน้ำหนัก 6 W/kg. และผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 5.1 VA, 120/24 V, 60 Hz, $B_{\max} = 1.6$ T. ค่าความสูญเสียในแกนเหล็กต่อน้ำหนัก 8 W/kg.

โดยกำหนดให้ใช้แกนเหล็ก 50RM-800 ความหนา 0.5 mm. มีความหนาแน่น 7800 kg/m³ ความหนาแน่นกระแสของลวดตัวนำ = 4 A/sq.mm. ราคาแกนเหล็ก 50 บาท/ kg

การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 50 VA, 220/110 V, 50 Hz

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดขนาดของลวดตัวนำ

ขนาดของตัวนำด้านปฐมภูมิ, α_{wp} และทุติยภูมิ, α_{ws} สามารถพิจารณาได้จากปริมาณกระแสที่พิกัดและความหนาแน่นกระแสจากตารางขนาดตัวนำ (ภาคผนวก ก.) จะได้ขนาดของตัวนำด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิดังนี้

ตารางที่ 2.1 ข้อมูลลวดตัวนำของหม้อแปลงไฟฟ้า 50 VA, 220/110 V, 50 Hz

	ตัวนำด้านปฐมภูมิ	ตัวนำด้านทุติยภูมิ
พิกัดกระแส (A)	0.227	0.455
พื้นที่หน้าตัด (mm ²)	0.05675	0.12566
เส้นผ่านศูนย์กลาง (mm.)	0.27	0.40
เส้นผ่านศูนย์กลางรวมฉนวน (mm ²)	0.304	0.439
น้ำหนักต่อความยาว (g/m)	0.51	1.1179
น้ำหนักต่อความต้านทาน (kg/ohm)	1.61×10^{-3}	7.91×10^{-3}
ราคา (บาท/kg)	150	145.7

ขั้นตอนที่ 2 กำหนดขนาดพื้นที่หน้าตัดของวงจรมแม่เหล็กจากสมการที่ 2.11

$$A_c = \frac{\sqrt{VA}}{5.58} = \frac{\sqrt{50}}{5.58} = 1.267 \text{ in}^2$$

ขั้นตอนที่ 3 หาจำนวนรอบของขดลวดด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$N_p = \frac{V_p}{\sqrt{2\pi fBA_c s.f.}} = \frac{220}{\sqrt{2\pi \times 50 \times 1.4 \times 1.267 \times (0.0254)^2 \times 0.98}} = 882 \text{ รอบ}$$

$$N_s = N_p \times \frac{V_s}{V_p} = 882 \times \frac{110}{220} = 441 \text{ รอบ}$$

ขั้นตอนที่ 4 คำนวณพื้นที่ที่ขดลวดตัวนำต้องการ, W_a

$$W_a = \frac{a_{wp} N_p + a_{ws} N_s}{K_w} = \frac{\pi \left((0.304)^2 882 + (0.439)^2 441 \right)}{4 \times 0.35} = 374 \text{ mm}^2$$

เมื่อ K_w เป็น window utilization factor มีค่าประมาณ 0.3-0.5

ขั้นตอนที่ 5 เลือกขนาดของแกนเหล็ก (ภาคผนวก ข)

การเลือกขนาดของแกนเหล็กจะพิจารณาพื้นที่ช่องว่างพื้นที่ขดลวด โดยจะต้องมีพื้นที่เพียงพอที่ลวดตัวนำต้องการ (จากที่คำนวณได้ในขั้นตอนที่ 4)

จากความต้องการพื้นที่ในการพันขดลวด (374 mm^2) และขนาดพื้นที่หน้าตัดของวงจรมแม่เหล็ก (817 mm^2) เลือกแกนเหล็ก # EI-66 ซึ่งมีพื้นที่ช่องว่างพื้นที่ขดลวดเท่ากับ 363 mm^2 และมีขนาดความกว้างของแกนกลาง 22 mm . ดังนั้นต้องใช้แกนเหล็กจำนวน 74 แผ่นมาเรียงซ้อนกัน

ขั้นตอนที่ 6 ปรับจำนวนรอบของขดลวด

เนื่องจากขนาดและความหนาของแผ่นแกนเหล็กที่เลือกใช้ ทำให้ขนาดพื้นที่หน้าตัดของวงจรมแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงไป จึงจำเป็นต้องปรับขนาดของจำนวนรอบของขดลวดเพื่อให้ได้ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กมีค่าตรงกับที่ต้องการ

$$N_p = \frac{V_p}{\sqrt{2\pi fBA_c s.f.}} = \frac{220}{\sqrt{2\pi \times 50 \times 1.4 \times 817 \times 10^{-6} \times 0.98}} = 886 \text{ รอบ}$$

$$N_s = N_p \times \frac{V_s}{V_p} = 886 \times \frac{110}{220} = 443 \text{ รอบ}$$

ขั้นตอนที่ 7 คำนวณน้ำหนักแกนเหล็ก

จากโครงสร้างของแกนเหล็กดังรูปที่ 2.2 และขนาดของแกนเหล็กที่เลือกใช้สามารถคำนวณหาน้ำหนักของแกนเหล็ก (W_c) ได้จากผลคูณของปริมาตรแกนเหล็กปริมาตร (v_c) และความหนาแน่นของสารที่ใช้ ซึ่งสามารถแสดงการคำนวณได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{ปริมาตรแกนเหล็ก } (v_c) \quad v_c = (C \times F \times D) - 2(a \times b \times D) = 107.45 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$\text{น้ำหนักแกนเหล็ก } (W_c) \quad W_c = \sigma_c \times v_c = 7800 \times 107.45 \times 10^{-6} = 0.838 \text{ kg.}$$

ขั้นตอนที่ 8 คำนวณน้ำหนักขดลวด (W_{cu})

น้ำหนักของขดลวดสามารถคำนวณหาได้จากผลคูณของจำนวนรอบกับความยาวเฉลี่ยต่อรอบของขดลวด จากสมการที่ 2.1-2.5 สามารถคำนวณหาความยาวเฉลี่ยต่อรอบของขดลวดได้ดังนี้

ความยาวเฉลี่ยต่อรอบของขดลวดปฐมภูมิ

$$M_p = 2(E + D + 4b_i) + 2\pi \frac{W_1}{2} = 176 \text{ mm.}$$

ความยาวเฉลี่ยต่อรอบของขดลวดทุติยภูมิ

$$M_s = 2(E + D + 4b_i) + 2\pi \left(W_1 + \frac{W_2}{2} \right) = 178 \text{ mm.}$$

ความยาวของขดลวดปฐมภูมิ $l_p = M_p \times N_p = 176 \times 886 = 155.88 \text{ m.}$

ความยาวของขดลวดทุติยภูมิ $l_s = M_s \times N_s = 178 \times 443 = 78.79 \text{ m.}$

น้ำหนักขดลวดค้ำปฐมภูมิ $W_{cup} = 0.51 \times l_p = 0.51 \times 155.88 = 79.5 \text{ g.}$

น้ำหนักขดลวดค้ำทุติยภูมิ $W_{cus} = 1.1179 \times l_s = 1.1179 \times 78.79 = 88.08 \text{ g.}$

น้ำหนักรวมของขดลวด $W_{cu} = W_{cup} + W_{cus} = 79.50 + 88.08 = 167.58 \text{ g.}$

น้ำหนักรวมของหม้อแปลงไฟฟ้า $W_t = W_c + W_{cu} = 0.838 + 0.167 = 1.006 \text{ kg.}$

ขั้นตอนที่ 9 คำนวณค่าความสูญเสียรวมของหม้อแปลงไฟฟ้า (P_t)

ความสูญเสียรวมของหม้อแปลงไฟฟ้าประกอบด้วยความสูญเสียในแกนเหล็กและความสูญเสียในขดลวด

ความสูญเสียในแกนเหล็ก $P_{core} = p_c W_c = 6 \times 0.838 = 5.03 \text{ W}$

ความต้านทานในขดลวดค้ำปฐมภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_p = \frac{W_{cup}}{1.61 \times 10^{-3}} = \frac{79.50 \times 10^{-3}}{1.61 \times 10^{-3}} = 49.38 \text{ ohm}$$

ความต้านทานในขดลวดด้านทุติยภูมิ

$$R_s = \frac{W_{cus}}{7.91 \times 10^{-3}} = \frac{88.08 \times 10^{-3}}{7.91 \times 10^{-3}} = 11.14 \text{ ohm}$$

ความสูญเสียในขดลวดปฐมภูมิ $P_{cup} = I_p^2 R_p = 0.227^2 \times 2.55 \text{ W}$

ความสูญเสียในขดลวดทุติยภูมิ $P_{cus} = I_s^2 R_s = 0.455^2 \times 2.3 \text{ W}$

ความสูญเสียรวมของหม้อแปลงไฟฟ้า

$$P_t = P_{core} + P_{cup} + P_{cus} = 5.03 + 2.55 + 2.30 = 9.88 \text{ W}$$

ขั้นตอนที่ 10 คำนวณราคาของหม้อแปลงไฟฟ้า (C_t)

ราคาแกนเหล็ก $C_{core} = 50 \times W_{core} = 50 \times 0.838 = 41.9 \text{ บาท}$

ราคาขดลวด $C_{cu} = (150 \times W_{cup}) + (145.7 \times W_{cus}) = 24.76 \text{ บาท}$

ราคารวมของหม้อแปลงไฟฟ้า $C_t = C_c + C_{cu} = 66.66 \text{ บาท}$

จากตัวอย่างการออกแบบจะได้หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีพิกัดกำลังและแรงดันตามที่กำหนด โดยมีน้ำหนัก ราคาและความสูญเสียค่าหนึ่งตามขนาดของแกนเหล็ก จำนวนรอบของขดลวด และการเลือกใช้ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก รวมถึงชนิดของวัสดุ ซึ่งหากจะปรับน้ำหนัก ราคาหรือความสูญเสียรวมที่เกิดขึ้นให้มีค่าตามที่ต้องการจะสามารถทำได้โดยการปรับขนาดของแกนเหล็ก และค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเพื่อลดหรือเพิ่มจำนวนรอบของขดลวดให้ได้ น้ำหนัก ราคาหรือความสูญเสียตามที่ต้องการ ในส่วนของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 5.1 VA, 120/24 V, ความถี่ 60 Hz, $B_{max} = 1.6 \text{ T}$. ก็สามารถออกแบบได้ในทำนองเดียวกัน

ตารางที่ 2.2 ผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า 50VA, 220/110, ความถี่ 50 Hz, $J \approx 4 \text{ A/MM}^2$,
 $B_{\text{max}} = 1.4 \text{ T}$ และ 5.1 VA, 120/24 V, ความถี่ 60 Hz, $B_{\text{max}} = 1.6 \text{ T}$. $J \approx 4 \text{ A/MM}^2$

	50 VA		5.1 VA	
D (mm.)	37		26	
E (mm.)	22		10	
a (mm.)	11		7.5	
b (mm.)	33		18.5	
ข้อมูลลวดตัวนำ	ขดปฐมภูมิ	ขดทุติยภูมิ	ขดปฐมภูมิ	ขดทุติยภูมิ
เส้นผ่านศูนย์กลางกลาง (mm.)	0.1200	0.2700	0.2700	0.4000
เส้นผ่านศูนย์กลางรวมฉนวน (mm.)	0.1470	0.3040	0.3040	0.4390
น้ำหนักต่อความยาว (g/m)	0.1006	0.5100	0.5100	1.1179
น้ำหนักต่อความต้านทาน (g/ Ω)	0.0639	1.6100	1.6100	7.9100
ราคา (บาท/kg)	185.90	150.00	150.00	145.70
Window Utilization Factor	0.35		0.5	
พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็ก (mm ²)	814		260	
จำนวนรอบด้านปฐมภูมิ (รอบ)	886		1103	
จำนวนรอบด้านทุติยภูมิ (รอบ)	443		220	
ความต้านทานขดลวดปฐมภูมิ (Ω)	49.38		175.75	
ความต้านทานขดลวดทุติยภูมิ (Ω)	11.14		6.84	
น้ำหนักแกนเหล็ก (kg.)	0.838		0.146	
น้ำหนักขดลวด (kg.)	167.58		22.24	
น้ำหนักรวม (kg.)	1.006		0.168	
ความสูญเสียในแกนเหล็ก (W)	5.03		1.17	
ความสูญเสียในขดลวด(W)	4.85		0.63	
ความสูญเสียรวม (W)	9.88		1.79	
ราคาแกนเหล็ก (บาท)	41.90		7.30	
ราคาลวดตัวนำ (บาท)	24.76		3.74	
ราคารวม (บาท)	66.66		11.04	

จากผลการออกแบบที่แสดงดังตารางที่ 2.2 จะเห็นได้ว่าคุณลักษณะต่าง ๆ ของหม้อแปลงไฟฟ้าได้แก่ น้ำหนัก ราคาและค่าความสูญเสีย จะขึ้นอยู่กับทางเลือกใช้ขนาดของแกนเหล็กและค่า B_{max} ที่เลือกใช้ ซึ่งขนาดของแกนเหล็กนั้นสามารถกำหนดได้โดยสมการต่าง ๆ แต่จะเห็นได้ว่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการเหล่านี้ช่วยเพียงให้ผู้ออกแบบสามารถเริ่มออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อให้มีพิกัดกำลังและแรงดันไฟฟ้าสามารถใช้งานได้ที่ความถี่ที่กำหนดเท่านั้น โดยไม่สามารถที่จะกำหนดคุณลักษณะของหม้อแปลงไฟฟ้าได้ หากผู้ออกแบบต้องการที่จะปรับคุณลักษณะของหม้อแปลงไฟฟ้า ก็จะต้องทำการออกแบบใหม่โดยใช้ข้อมูลเดิมที่ได้จากการออกแบบนี้แล้วทดลองปรับขนาดของแกนเหล็กและค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่ใช้เช่น หากต้องการลดค่าความสูญเสียรวมที่เกิดขึ้นลงก็ทดลองปรับขนาดแกนเหล็กให้ใหญ่ขึ้นเพื่อลดจำนวนรอบของขดลวดซึ่งจะทำให้ค่าความสูญเสียในขดลวดลดลง พร้อมกันนี้ทั้งก็ลดค่า B_{max} ลงด้วยเพื่อให้ค่าสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนเหล็กลดลง จากวิธีการปรับคุณลักษณะของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบนี้ผู้ออกแบบจะทราบได้อย่างไรว่าควรที่จะเพิ่มขนาดของแกนเหล็กและลดค่า B_{max} ไปอีกเท่าใดจึงจะได้ค่าความสูญเสียรวมต่ำที่สุด ซึ่งเป็นได้ยากมากที่จะทำการทดลองปรับไปจนได้ค่าต่ำที่สุด ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงนำหลักการและวิธีการหาค่าที่เหมาะสมเข้ามาช่วยในการหาขนาดของโครงสร้างและค่า B_{max} เพื่อที่จะทำให้ได้หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีคุณลักษณะตามที่ต้องการมากที่สุด



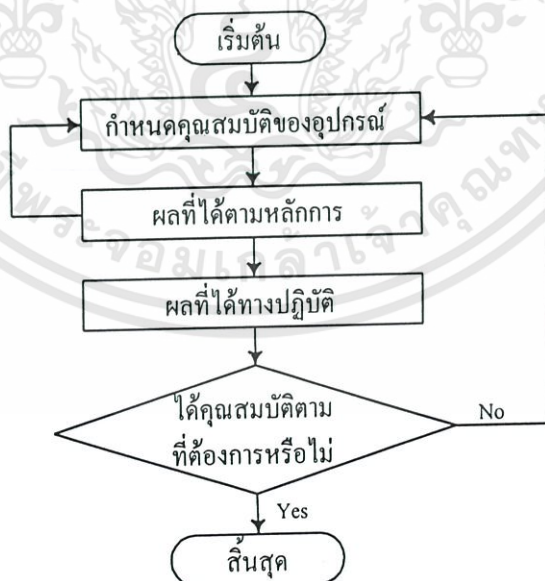
บทที่ 3

การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กที่เหมาะสม

3.1 บทนำ

เนื้อหาในบทนี้เป็นกรกล่าวถึงวิธีการหาค่าที่เหมาะสม ซึ่งเป็นวิธีการแก้ปัญหาแบบวนกลับที่นำมาใช้ช่วยออกแบบโครงสร้างหรือระบบต่าง ๆ ในงานวิศวกรรม [7] เพื่อให้ได้คำตอบตรงตามเป้าหมายและเงื่อนไขที่กำหนด ขั้นตอนหนึ่งของการออกแบบที่เหมาะสมนี้จะใช้ร่วมกันกับการหาค่าที่เหมาะสมซึ่งเป็นวิธีเชิงตัวเลขในการหาคำตอบที่ดีที่สุดของปัญหาภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด การหาค่าที่เหมาะสมสามารถนำมาใช้ในการหาค่าสูงสุดหรือต่ำสุดก็ได้ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำแนวความคิดจากวิธีการหาค่าที่เหมาะสมและหลักการออกแบบที่เหมาะสมซึ่งได้มีการนำมาใช้ออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าและอุปกรณ์แม่เหล็กไฟฟ้า [8-13] เพื่อให้สามารถกำหนดคุณลักษณะของหม้อแปลงไฟฟ้าได้ โดยทั่วไปเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมมี 2 วิธีได้แก่ หลักการของเกรเดียนต์และหลักการทางพันธุศาสตร์ร่วมกับความน่าจะเป็น ซึ่งทั้งสองหลักการมีความเหมาะสมกับลักษณะของปัญหาที่แตกต่างกัน ในตอนท้ายได้แสดงวิธีการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมด้วย

3.2 พื้นฐานการออกแบบที่เหมาะสม [14]



รูปที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนการออกแบบทางวิศวกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แนวความคิดโดยทั่วไปของการออกแบบทางด้านวิศวกรรมจะมีขั้นตอนต่าง ๆ ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งประกอบด้วย การกำหนดคุณสมบัติของอุปกรณ์ที่ต้องการออกแบบ (device specification) การพิจารณาผลที่ได้จากหลักการทางทฤษฎี (conceptual solution) การพิจารณาผลที่ได้ทางปฏิบัติ (practical solution) และการตรวจสอบคุณสมบัติของอุปกรณ์ที่ได้ออกแบบแล้ว จะเห็นได้ว่าการออกแบบด้วยแนวความคิดนี้ผู้ออกแบบสามารถพิจารณาเปลี่ยนแปลงแก้ไขแนวทางการออกแบบได้ระหว่างการออกแบบจนทำให้ได้ผลลัพธ์ตามที่ต้องการ วิธีการออกแบบนี้จะเป็นการออกแบบโดยวิธีแก้ปัญหาโดยตรง ซึ่งวิธีการแก้ปัญหามี 2 ลักษณะคือ การแก้ปัญหาโดยตรงและการแก้ปัญหาแบบย้อนกลับ

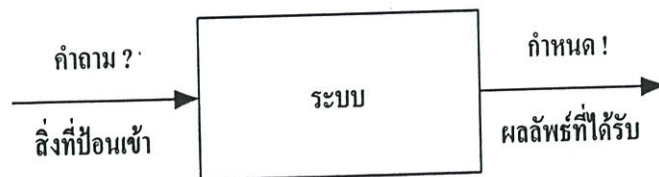
3.2.1 การแก้ปัญหาโดยตรงและการแก้ปัญหาแบบย้อนกลับ

การแก้ปัญหาโดยตรง (direct problem solving) คือการพิจารณาผลลัพธ์ที่ได้จากระบบว่าจะเป็นอย่างใดเมื่อสิ่งที่ป้อนเข้าสู่ระบบมีการเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 3.2 เพื่อให้ง่ายต่อการเข้าใจจะสมมติว่าระบบในรูปที่ 3.2 คือ $z = x + y$ จะเห็นว่า สิ่งที่ป้อนเข้าสู่ระบบคือ x และ y ในขณะที่ผลลัพธ์ที่ได้รับจากระบบคือ z ถ้าเรากำหนดให้ $x = 10$ และ $y = 20$ เราสามารถคำนวณหาคำตอบหรือผลลัพธ์ที่ได้รับจากระบบคือ $z = 30$



รูปที่ 3.2 การแก้ปัญหาโดยตรง

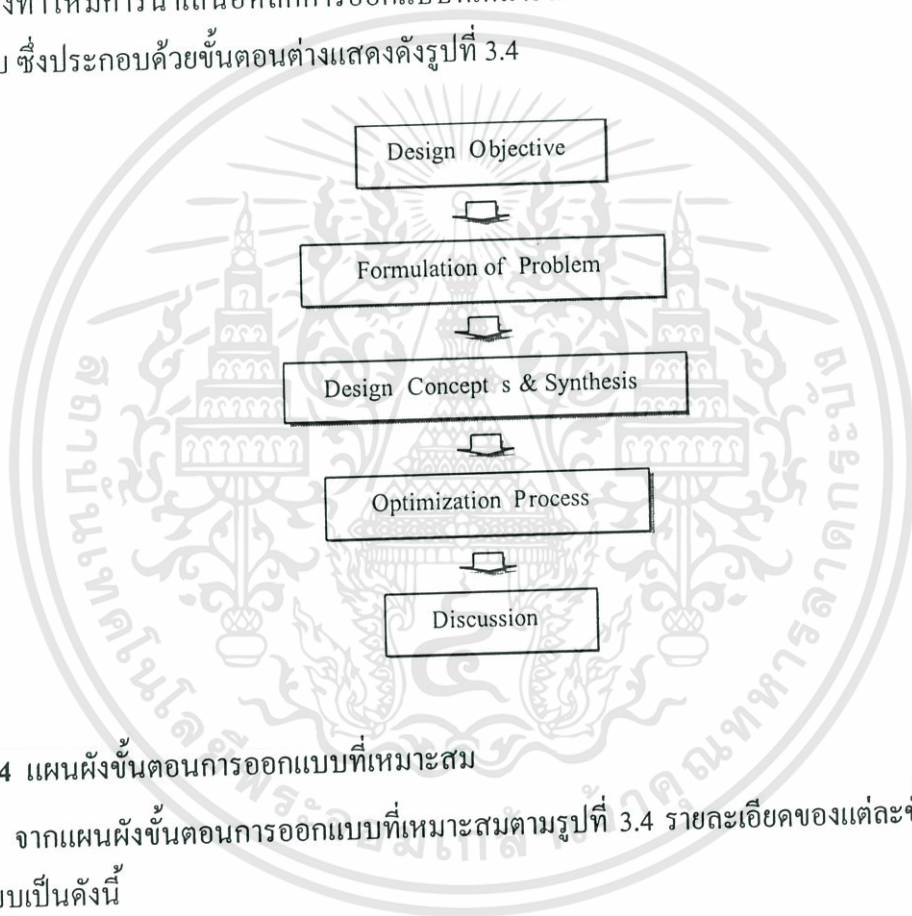
การแก้ปัญหาแบบย้อนกลับ (inverse problem solving) วิธีการแก้ปัญหานี้จะกำหนดผลลัพธ์ที่ต้องการได้จากระบบ โดยคำถามที่จะต้องป้อนสิ่งใดเข้าสู่ระบบเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ตามที่กำหนด เพื่อง่ายต่อการทำความเข้าใจให้พิจารณาจากรูปที่ 3.3 โดยสมมติอีกครั้งว่าถ้าระบบคือ $z = y + x$ ถ้าเรากำหนดให้ $z = 30$ เราจะมีคำถามว่า x และ y ควรจะเป็นอย่างไร ในกรณีนี้คำตอบที่เป็นไปได้มีมากกว่าหนึ่งคำตอบ ไม่ใช่เพียงคำตอบ $x = 10$ และ $y = 20$ เท่านั้นอาจจะเป็น $x = 15$ และ $y = 15$ ก็ได้ ซึ่งวิธีการแก้ปัญหาลักษณะนี้อาจจะกำหนดเงื่อนไขของสิ่งที่ป้อนเข้าก็ได้เช่น $0 < x, y < 20$ แนวทางการแก้ปัญหาแบบย้อนกลับนี้เป็นแนวของหลักการหาค่าที่เหมาะสม



รูปที่ 3.3 การแก้ปัญหาแบบย้อนกลับ

3.2.2 หลักการออกแบบที่เหมาะสม [14]

การออกแบบโครงสร้างหรือระบบต่าง ๆ ในงานวิศวกรรมจะมีการกำหนดเป้าหมายและเงื่อนไขขึ้นเพื่อให้ตรงกับความต้องการใช้งาน ซึ่งการออกแบบโครงสร้างหรือระบบต่าง ๆ ที่มีความซับซ้อนซึ่งจะทำให้การออกแบบด้วยแผนผังดังรูปที่ 3.1 จะเป็นไปได้ด้วยความยุ่งยากและจำเป็นต้องใช้ความรู้และประสบการณ์ของผู้ออกแบบอย่างสูง ผลลัพธ์อาจเกิดจากการลองผิดลองถูกจนกระทั่งได้ค่าที่มีความเหมาะสมตามเป้าหมายที่ต้องการซึ่งต้องเสียเวลาในการออกแบบอีกทั้งโอกาสที่จะได้ค่าที่เหมาะสมตามเป้าหมายที่ตั้งไว้ก็มีความเป็นไปได้น้อยและเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงวัตถุดิบหรือราคาของวัสดุก็จำเป็นต้องทำการลองผิดลองถูกใหม่ซึ่งทำให้เสียเวลาและต้นทุนในการสร้างต้นแบบเพื่อทดสอบ จากเหตุผลข้างต้นจึงทำให้มีการนำเสนอหลักการออกแบบที่เหมาะสมโดยใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมช่วยในการออกแบบ ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนต่างแสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แผนผังขั้นตอนการออกแบบที่เหมาะสม

จากแผนผังขั้นตอนการออกแบบที่เหมาะสมตามรูปที่ 3.4 รายละเอียดของแต่ละขั้นตอนในการออกแบบเป็นดังนี้

3.2.2.1 กำหนดเป้าหมายการออกแบบ (design objective)

การกำหนดเป้าหมายคือความต้องการที่จะให้ผลของการออกแบบนั้นมีลักษณะเป็นอย่างไรตามเงื่อนไขที่กำหนด เช่น การออกแบบปีกของเครื่องบินให้มินน้ำหนักน้อยที่สุดภายใต้เงื่อนไขของความแข็งแรง การออกแบบผลิตภัณฑ์ของโรงงานอุตสาหกรรมให้มีราคาต้นทุนต่ำที่สุดภายใต้ประสิทธิภาพที่กำหนดหรือการออกแบบอุปกรณ์ไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพสูง (ความสูญเสียต่ำ) โดยมีเงื่อนไขให้ทำงานที่เต็มพิกัด ซึ่งเป้าหมายของการออกแบบต่าง ๆ ที่ได้กล่าวมานี้ การออกแบบอาจมีความต้องการหลายเป้าหมายเช่น น้ำหนักน้อยร่วมกับราคาถูก หรืออาจจะเป็นราคาถูกร่วมกับประสิทธิภาพสูง เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งกรณีนี้จะออกแบบโดยทำให้เป้าหมายหลักมีค่าที่เหมาะสม โดยจัดให้เป้าหมายรองเป็นเงื่อนไข แต่โดยหลักการแล้วจะกำหนดให้มีเป้าหมายเดียว เพื่อให้เป้าหมายนั้นมีค่าที่เหมาะสมตามที่ต้องการสูงสุด

3.2.2.2 กำหนดรูปแบบของปัญหา (formulation of problem)

ขั้นตอนนี้ของการออกแบบที่เหมาะสมเป็นการศึกษาวิธีและขั้นตอนต่าง ๆ ของสิ่งที่ต้องการออกแบบ รวบรวมวิธีและสมการต่าง ๆ ที่ใช้ในการออกแบบในส่วนที่เกี่ยวข้องกับเป้าหมายที่ต้องการให้ได้มากที่สุด ทั้งนี้เพราะจะช่วยนำไปสู่การกำหนดสมการเป้าหมายและเงื่อนไขที่เหมาะสม

3.2.2.3 หลักการและการสังเคราะห์การออกแบบ (design concept and synthesis)

ขั้นตอนนี้เป็นการพิจารณาความสัมพันธ์ต่าง ๆ ของสมการที่ได้จากขั้นตอนที่ 2 จัดความสัมพันธ์ของสมการต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกันเพื่อให้แสดงถึงสิ่งที่เป้าหมายต้องการ รวมทั้งการกำหนดเงื่อนไขต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบและตัวแปรที่เลือกใช้ ซึ่งในขั้นตอนนี้จำเป็นต้องใช้ความรู้ทั้งด้านทฤษฎีร่วมกับการปฏิบัติเพื่อที่จะพิจารณากำหนดสมการเป้าหมายและเงื่อนไขได้อย่างถูกต้องเหมาะสม

3.2.2.4 การหาค่าที่เหมาะสม (optimization process)

การออกแบบที่เหมาะสมในส่วนนี้เมื่อได้สมการเป้าหมายและสมการเงื่อนไขที่ใช้ในการออกแบบแล้วจะนำเข้าสู่กระบวนการหาค่าที่เหมาะสม ซึ่งการหาค่าที่เหมาะสมแต่ละวิธีจะมีความเหมาะสมกับลักษณะของฟังก์ชันเป้าหมายที่ต่างกันรวมถึงความสามารถของส่วนประมวลผลด้วย

3.2.2.5 อภิปรายผลการออกแบบ (discussion)

ผลลัพธ์ที่ได้หลังจากกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมจะต้องมีการตรวจสอบว่ามีลักษณะเป็นตามเป้าหมายและเงื่อนไขที่กำหนดหรือไม่ ซึ่งการที่ผลลัพธ์ไม่เป็นไปตามเป้าหมายที่ต้องการนั้นอาจเกิดจากการพิจารณาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ที่ผิดพลาดหรือสาเหตุใดก็ตามที่อาจเกิดขึ้นได้ ซึ่งไม่มีผลการออกแบบใดที่เรียกว่าสำเร็จสมบูรณ์จนกว่าได้มีการนำเสนอและอภิปรายผลการออกแบบนั้น

3.3 หลักการเบื้องต้นของการหาค่าที่เหมาะสม

โดยทั่วไปการหาค่าที่เหมาะสมจะเป็นการหาค่าตัวแปรของฟังก์ชันเป้าหมาย (objective function) และเงื่อนไข (constraints function) ที่กำหนด [15] ซึ่งรูปแบบของฟังก์ชันเป้าหมายและเงื่อนไขจะแสดงดังสมการที่ 3.1-3.3 ดังนี้

$$\text{Minimize} \quad F(\mathbf{x}) \quad \text{Objective Function} \quad (3.1)$$

Subject to

$$g_j(\mathbf{x}) \leq 0 \quad j = 1, \dots, l \quad \text{Inequality Constraint} \quad (3.2)$$

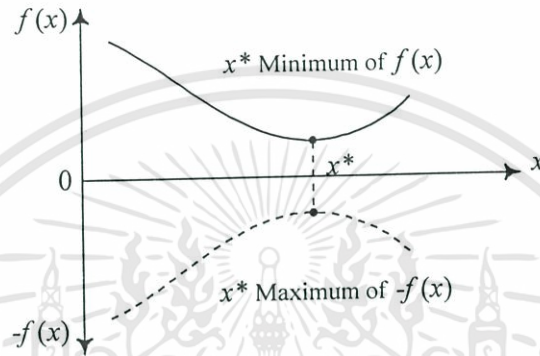
$$h_k(\mathbf{x}) = 0 \quad k = 1, \dots, m \quad \text{Equality Constraint} \quad (3.3)$$

$$x_i^l \leq x_i \leq x_i^u \quad i = 1, \dots, n \quad \text{Side Constraint} \quad (3.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)$ เป็นเวกเตอร์ของตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบฟังก์ชันเป้าหมายและฟังก์ชันเงื่อนไขในการหาค่าที่เหมาะสมซึ่งอาจจะเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นหรือไม่เชิงเส้นก็ได้

สมการที่ 3.1 เป็นสมการที่แสดงถึงฟังก์ชันเป้าหมายที่ต้องการหาค่าที่เหมาะสมซึ่งอาจเป็นการหาค่าสูงสุดหรือต่ำสุดของฟังก์ชันก็ได้ จากรูปที่ 3.5 จะเห็นได้ว่า x^* เป็นจุดต่ำสุดของฟังก์ชัน $f(x)$ และเป็นจุดสูงสุดของฟังก์ชัน $-f(x)$ ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่าการหาค่าต่ำสุดของฟังก์ชันจะมีความหมายเดียวกันกับการหาค่าสูงสุดของค่าลบของฟังก์ชันนั้น [16]



รูปที่ 3.5 ค่าตอบของค่าต่ำสุดของฟังก์ชัน $f(x)$ เป็นจุดเดียวกันกับค่าสูงสุดของฟังก์ชัน $-f(x)$

สมการที่ 3.2 แสดงถึงฟังก์ชันของเงื่อนไขที่น้อยกว่าหรือเท่ากับศูนย์ (inequality constraint) ซึ่งในการออกแบบอาจจะมีเงื่อนไข กำหนดเป็นฟังก์ชันที่อยู่ในรูปของตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบเพื่อให้ฟังก์ชันนั้นมีค่าที่น้อยกว่าหรือเท่ากับค่าที่กำหนด

สมการที่ 3.3 เป็นสมการที่แสดงถึงฟังก์ชันของเงื่อนไขที่เท่ากับศูนย์ (equality constraint) ซึ่งในการออกแบบอาจจะมีเงื่อนไข กำหนดเป็นฟังก์ชันที่อยู่ในรูปของตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบเพื่อให้ฟังก์ชันนั้นมีค่าเท่ากับค่าที่กำหนด

สมการที่ 3.4 เป็นสมการที่ใช้กำหนดช่วงของค่าตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบเพื่อป้องกันการได้ค่าคำตอบที่เป็นไปไม่ได้ทางปฏิบัติ

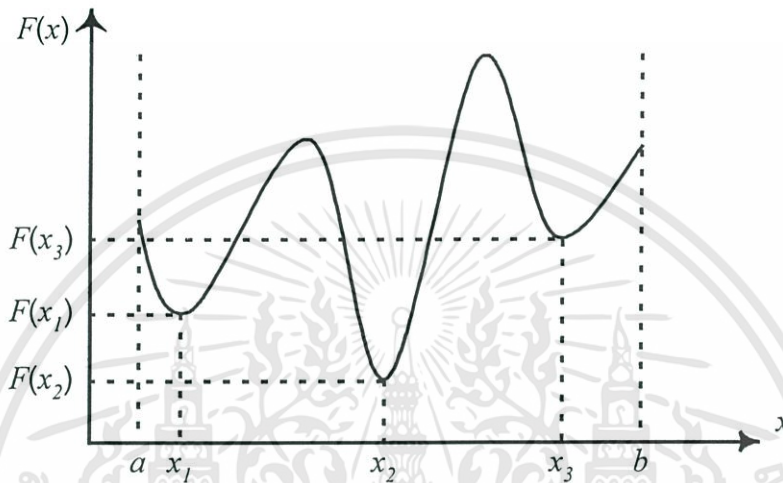
โดยทั่วไปวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบ่งได้ 2 ลักษณะคือ

1. ดิเทอร์มินิสติก เป็นการหาค่าที่เหมาะสมโดยพื้นฐานของแกรเดียน
2. สโตคาสติก เป็นการหาค่าที่เหมาะสมโดยพื้นฐานของความน่าจะเป็น

3.3.1 จุดที่เหมาะสม (Optimal Point)

ความหมายของจุดที่เหมาะสมสามารถถูกกำหนดได้ดังนี้ สมมติว่ามีโดเมนที่กำลังพิจารณาของตัวแปร x โดยที่ x^* และ x^{**} เป็นจุดในโดเมน x นั้นด้วย จุด x^* จะถูกเรียกว่าเป็นจุดที่เหมาะสมเฉพาะที่ (local optimal point) ถ้าไม่มีจุดใดเลยในย่านใกล้เคียงที่ดีกว่าจุด x^* ขณะที่จุด x^{**} จะถูกเรียกว่าเป็นจุดที่เหมาะสมที่สุด (global optimal point) ถ้าไม่มีจุดใดเลยในย่านใกล้เคียงที่ดีกว่าจุด x^{**} จะถูกเรียกว่าเป็นจุดที่เหมาะสมที่สุด (global optimal point) ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กล่าวว่าเป็นจุดเหมาะสมที่สุดของทั้งหมด (global optimal point) ถ้าไม่มีจุดใดเลยในโดเมน x นั้นที่ดีกว่า x^{**} พิจารณารูปที่ 3.6 ซึ่งแสดงค่าของฟังก์ชันเป้าหมาย $f(x)$ บนโดเมน $x \in [a, b]$ เราจะเห็นว่าจุด x_1 , x_2 และ x_3 ทุกจุดจะเรียกว่าเป็นจุดต่ำสุดเฉพาะที่เพราะเมื่อพิจารณาค่าของฟังก์ชันเป้าหมายรอบ ๆ จุดเหล่านี้แต่ละจุดแล้วจะมีค่าฟังก์ชันมากกว่าของจุดทั้งสามนั่นเอง ขณะที่จุด x_2 ก็ยังเป็นจุดต่ำสุดของทั้งหมดด้วย เพราะค่าของฟังก์ชันเป้าหมายที่มีค่าน้อยที่สุดอยู่ที่จุด x_2 ในโดเมน x



รูปที่ 3.6 กราฟค่าของฟังก์ชันเป้าหมาย $f(x)$ บนโดเมน x

3.3.1 การหาค่าที่เหมาะสมแบบคิเทอมินิสติก

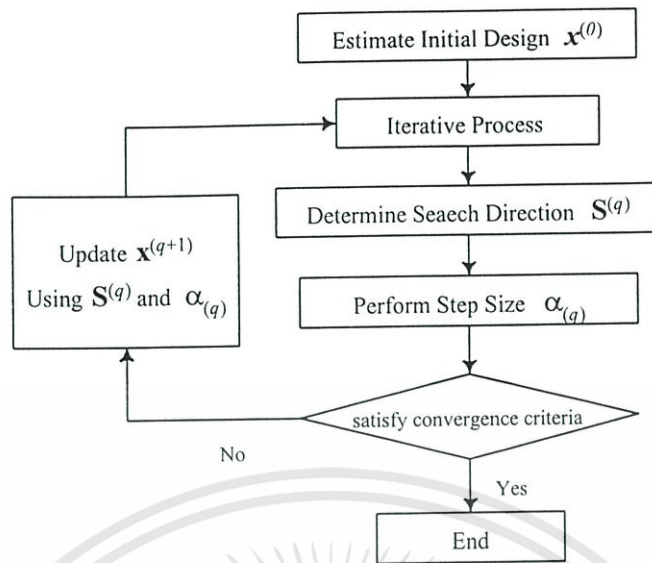
กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบคิเทอมินิสติกจะอาศัยพื้นฐานของเกรเดียนต์ [17-19] โดยเริ่มจากการกำหนดค่าเริ่มต้นของตัวแปร $x^{(0)}$ และใช้ค่าเริ่มต้นนี้หาค่าทิศทางและขนาดการลู่เข้าสู่คำตอบของฟังก์ชัน หลังจากนั้นจะมีการตรวจสอบความถูกต้องของเงื่อนไขต่าง ๆ ที่กำหนดว่าพอใจหรือไม่ หากไม่พอใจก็จะมีหาค่าทิศทางและขนาดการลู่เข้าสู่คำตอบของฟังก์ชันซ้ำใหม่วนไปจนกว่าจะเป็นที่พอใจ ซึ่งสามารถกำหนดเป็นสมการได้ดังนี้

$$x^{(q+1)} = x^{(q)} + \alpha_q S^{(q)} \quad (3.5)$$

เมื่อ q เป็นจำนวนของการทำซ้ำ

S เป็นเวกเตอร์ทิศทางที่ลู่เข้าสู่เป้าหมาย

α เป็นขนาดระยะในการเคลื่อนที่ไปตามทิศทางของ S



รูปที่ 3.7 แผนผังของกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบคิโทมินิสติก

แผนผังของกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบคิโทมินิสติกแสดงในรูปที่ 3.7 กระบวนการของการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีนี้ประกอบด้วยขั้นตอนหลัก 3 ขั้นตอนดังนี้

1. การดำเนินการทิศทางของเวกเตอร์ S ในช่วงที่เป็นไปได้ของคำตอบ
2. กระทำการค้นหาระยะทางที่ต้องเคลื่อนที่ไป (step size) ในทิศทางของเวกเตอร์ S
3. พิจารณาการสิ้นสุดกระบวนการเมื่อได้คำตอบที่ยอมรับได้ตามเงื่อนไข

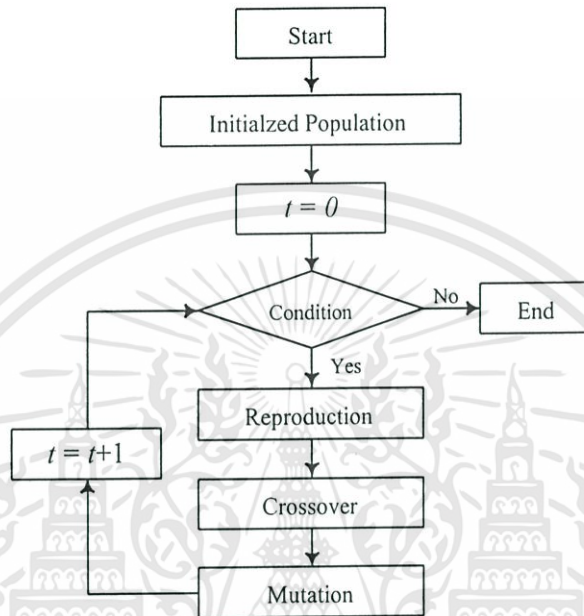
3.3.2 การหาค่าที่เหมาะสมแบบสโตชาสติก

การหาค่าที่เหมาะสมแบบสโตชาสติก (Genetic algorithms, GAs) เป็นวิธีการหาคำตอบโดยอาศัยการเลียนแบบการคัดเลือกตามธรรมชาติและธรรมชาติทางพันธุกรรม [20-22] โดยการรวมกันหรือสลับเปลี่ยนตัวแปรต่าง ๆ ของฟังก์ชันเป้าหมายซึ่งอาศัยหลักของความน่าจะเป็นเพื่อปรับปรุงความสามารถในการค้นหาคำตอบให้ดีขึ้น การหาคำตอบจากรุ่นหนึ่งยังรุ่นถัดไปตามวิวัฒนาการทางธรรมชาติ คำตอบรุ่นใหม่เกิดขึ้นจากการสร้างความสัมพันธ์ของโครงสร้างต่าง ๆ ที่ประกอบด้วยค่าของตัวแปรที่เหมาะสมในรุ่นก่อน ดังนั้นจึงทำให้ได้คำตอบที่ดีขึ้น ดังนั้นจะเห็นได้ว่าวิธีการพื้นฐานของการหาค่าที่เหมาะสมแบบจินเนติกมีหลักการในการหาคำตอบแตกต่างจากวิธีทั่วไป [22] คือ

1. การหาค่าที่เหมาะสมแบบจินเนติกค้นหาคำตอบโดยการกำหนดรหัสของตัวแปรจากกลุ่มของคำตอบที่เป็นไปได้
2. การหาค่าที่เหมาะสมแบบจินเนติกค้นหาคำตอบโดยพิจารณาจากเซตของกลุ่มคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมด ไม่ได้หาคำตอบจากคำตอบใดคำตอบหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การหาค่าที่เหมาะสมแบบจينيติกอาศัยผลของฟังก์ชันเป้าหมายที่ดีขึ้นในการหาคำตอบ ไม่ได้อาศัยการลู่เข้าของอนุพันธ์
4. การหาค่าที่เหมาะสมแบบจينيติกอาศัยหลักการของความน่าของการเลียนแบบการคัดเลือกตามธรรมชาติและธรรมชาติทางพันธุกรรม ไม่ได้ใช้หลักการดิเทอมินิสติก



รูปที่ 3.8 แผนผังของกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบจينيติก

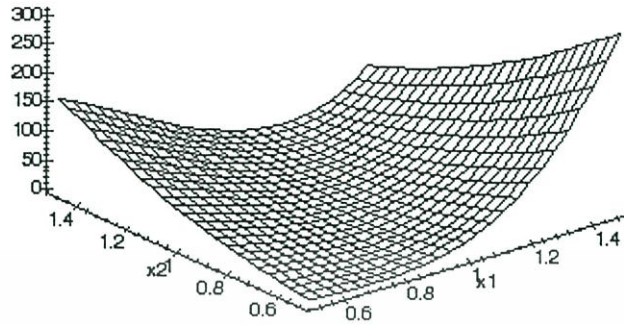
3.4 การเปรียบเทียบวิธีการหาค่าที่เหมาะสม

สมการที่นำมาใช้ทดสอบเปรียบเทียบวิธีการหาค่าที่เหมาะสมในส่วนนี้มี 2 สมการซึ่งเป็นสมการที่เมื่อพล็อตกราฟแล้วมีรูปร่างแตกต่างกัน สมการแรกได้แก่ Rosenbrock's function [14] ซึ่งเป็นสมการที่มีรูปร่างโค้งแบบพาราโบลาแสดงดังรูปที่ 3.8 และเป็นสมการที่มีจุดต่ำสุดเพียงจุดเดียวคือที่ $[1 \ 1]^T$ สมการที่สองเป็นสมการที่เมื่อพล็อตกราฟในช่วง $-3 < x_1 < 12.1$ และ $4.1 < x_2 < 5.8$ [20] แล้วมีรูปร่างดังรูปที่ 3.9 จากรูปจะเห็นได้ว่าเป็นสมการที่มีจุดต่ำสุดเฉพาะที่มากมาย ในการทดสอบนี้จะทำการเปรียบเทียบ หลักการของดิเทอมินิสติกจะใช้วิธี SUMT (Sequential Unconstraint Minimization Technique) แบบ Quadratic Extended Penalty Function [17] หลักการสโตชาสติกจะใช้วิธีจينيติก

$$f(\mathbf{x}) = 100(x_2 - x_1^2)^2 + (1 - x_1)^2 \quad (3.6)$$

$$f(\mathbf{x}) = 21.5 + x_1 \sin(4\pi x_1) + x_2 \sin(20\pi x_2) \quad (3.7)$$

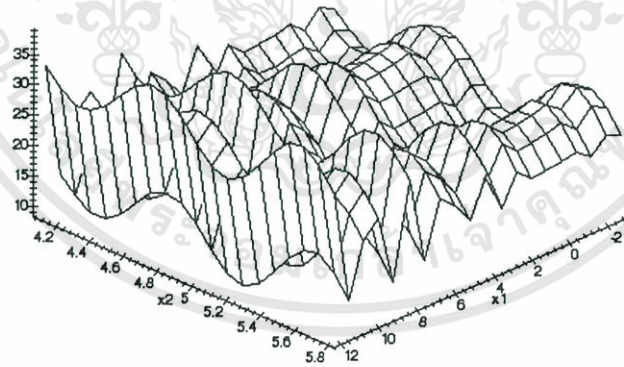
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 รูปร่างของ $f(\mathbf{x}) = 100(x_2 - x_1^2)^2 + (1 - x_1)^2$

ตารางที่ 3.1 ผลลัพธ์ของการหาค่าที่ต่ำสุดของสมการ 3.6

	SUMT	GAs
$f(\mathbf{x})$	4.28E-09	1.06E-07
x_1	0.99998	0.99969
x_2	0.99995	0.99940



รูปที่ 3.10 รูปร่างของ $f(\mathbf{x}) = 21.5 + x_1 \sin(4\pi x_1) + x_2 \sin(20\pi x_2)$ ในช่วงที่กำหนด

ตารางที่ 3.2 ผลลัพธ์ของการหาค่าที่ต่ำสุดของสมการ 3.7

	SUMT	GAs
$f(\mathbf{x})$	4.33748	4.140926
x_1	11.87122	11.85815
x_2	5.37247	5.77594

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 3.1 จะเห็นได้ว่าการหาค่าที่เหมาะสมด้วยหลักการดิเทอมีนิสติกวิธี SUMT และหลักการสโตชาสติกด้วยวิธีจินติก สามารถที่จะหาค่าตอบได้ใกล้เคียงกัน แต่จากตารางที่ 3.2 จะเห็นได้ว่าการหาค่าที่เหมาะสมด้วยหลักการดิเทอมีนิสติก มีโอกาสที่จะสิ้นสุดการหาค่าตอบโดยที่ยังไม่ได้จุดต่ำสุดของทั้งหมด ซึ่งในส่วนของหลักการสโตชาสติกด้วยวิธีจินติกจะเห็นได้ว่ามีแนวโน้มที่จะได้ค่าต่ำสุดของทั้งหมดมากกว่าเนื่องจากหลักการสโตชาสติกด้วยวิธีจินติกซึ่งใช้หลักของความน่าจะเป็นในการหาค่าตอบที่ได้จึงมีโอกาที่จะทำให้คำตอบไม่สิ้นสุดที่จุดต่ำสุดเฉพาะที่

3.5 ตัวอย่างการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กที่เหมาะสม

จากขั้นตอนของการออกแบบที่เหมาะสมสามารถที่จะนำมาใช้ออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กได้ดังนี้ ตัวอย่างจะนำหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 5.1 VA ที่ได้ออกแบบไว้แล้วด้วยวิธีทั่วไปมาทำการออกแบบใหม่ด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสม ซึ่งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. กำหนดเป้าหมายการออกแบบ

ตัวอย่างนี้กำหนดให้เป้าหมายของการออกแบบมีค่าความสูญเสียรวมต่ำขณะจ่ายภาระที่พิกัด

2. กำหนดรูปแบบของปัญหา

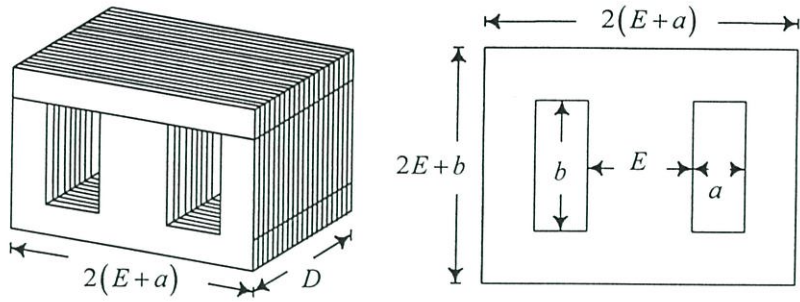
จากเป้าหมายที่กำหนดให้หม้อแปลงไฟฟ้ามีค่าความสูญเสียต่ำ ดังนั้นจะต้องทำการศึกษาถึงส่วนที่เกี่ยวข้องกับความสูญเสียที่เกิดขึ้น ซึ่งประกอบไปด้วยความสูญเสียเนื่องจากแกนเหล็กและความสูญเสียในขดลวด ความสูญเสียเนื่องจากแกนเหล็กสามารถคำนวณได้จากผลคูณของน้ำหนักแกนเหล็กกับค่าความสูญเสียต่อน้ำหนักของสารที่นำมาใช้ทำแกนเหล็ก ส่วนของขดลวดนั้นจะขึ้นอยู่กับกระแสที่จ่ายให้กับภาระและความต้านทานของขดลวด ซึ่งจะเห็นได้ว่าการหาค่าของความสูญเสียที่เกิดขึ้นนั้นจะมีความสัมพันธ์เกี่ยวกับโครงสร้างของแกนเหล็กเพราะน้ำหนักของแกนเหล็กสามารถคำนวณได้จากปริมาตรของแกนเหล็กและความหนาแน่นของสารที่นำมาใช้ทำแกนเหล็ก ขณะที่ความต้านทานไฟฟ้าของขดลวดก็จะคำนวณจากความยาวเฉลี่ยที่พันรอบแกนเหล็กของขดลวด[23]

3. หลักการและการสังเคราะห์การออกแบบ

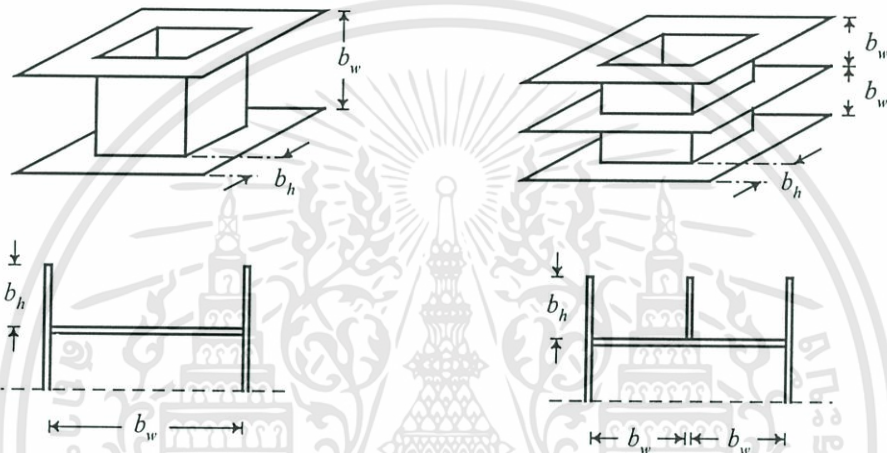
เมื่อออกแบบโดยใช้วัสดุชนิดเดียวกันกับที่ออกแบบไว้เดิมและจากการที่คุณลักษณะของแกนเหล็กจะเปลี่ยนแปลงไปตามโครงสร้างของแกนเหล็กดังนั้นจะเลือกให้ ขนาด โครงสร้างต่าง ๆ ของแกนเหล็ก (D, E, a, b) เป็นตัวแปรในการออกแบบครั้งนี้ จากรูปของโครงสร้างแกนเหล็กและกระสวยพันลวดดังรูปที่ 3.11 และ 3.12 สามารถกำหนดสมการเป้าหมายได้ดังสมการที่ 3.6

$$\text{Minimize} \quad P_t(D, E, a, b) = P_{core}(D, E, a, b) + P_{cu}(D, E, a, b) \quad (3.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 โครงสร้างของแกนเหล็กที่ใช้เป็นตัวแปรในการออกแบบ



รูปที่ 3.12 ลักษณะของกระสวยพินขดลวด

การออกแบบครั้งนี้จะกำหนดให้มีเงื่อนไขเดียวกันกับการออกแบบเดิมคือขนาดแกนเหล็กที่ใช้จะต้องมีช่องพินขดลวดเพียงพอต่อความต้องการพื้นที่ของขดลวด ซึ่งสามารถกำหนดได้ดังสมการที่ 3.7

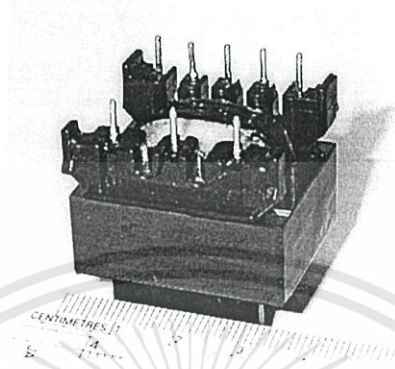
$$W_a(D, E, a, b) = \frac{a_{wp} N_p(D, E, a, b) + a_{ws} N_s(D, E, a, b)}{K_w} \leq a \times b \quad (3.7)$$

ในส่วนของเงื่อนไขขอบเขตกำหนดดังนี้

$$0.003 \text{ m.} \leq (D, E, a, b) \leq 0.05 \text{ m.} \quad (3.8)$$

ขั้นตอนต่อไปก่อนที่จะเข้าสู่ขบวนการหาค่าที่เหมาะสมในการหาค่าของตัวแปรต่าง ๆ ที่กำหนดไว้ เพื่อความถูกต้องของคำตอบที่ได้จะต้องมีการตรวจสอบสมการที่มีผลต่อค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้น จากสมการต่าง ๆ ที่ใช้ในการออกแบบจะเห็นได้ว่าการคำนวณความยาวของขดลวดเป็นการประมาณจากค่าของ Window Utilization Factor ซึ่งขึ้นกับขนาดของตัวนำที่ใช้ โดยการตรวจสอบจะนำหม้อแปลงไฟฟ้าที่ทราบจำนวนรอบ โครงสร้างของแกนเหล็กและกระสวยพินขดลวด นำมาแยกส่วนเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และวัดความยาวจริง ในการทดสอบนี้ใช้หม้อแปลงไฟฟ้าที่ได้จากการผลิตในภาคอุตสาหกรรมขนาด 5.1 VA, 120/24 V, 60 Hz ลวดตัวนำขนาด 0.12/0.27 mm. พันเป็นจำนวน 1830/380 รอบ ดังรูปที่ 3.10 ซึ่งผลการวัดความยาวลวดตัวนำแสดงดังตารางที่ 3.3

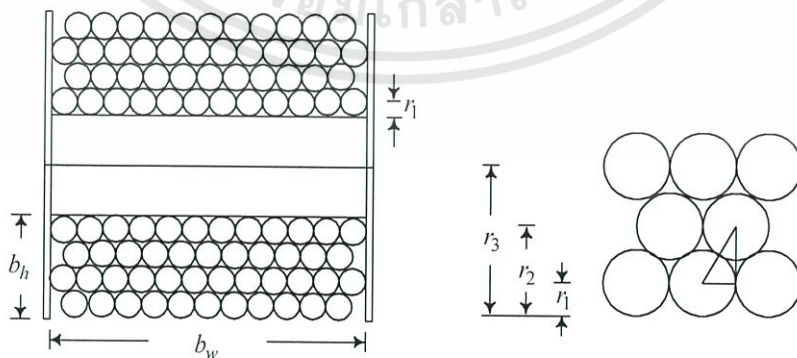


รูปที่ 3.13 หม้อแปลงไฟฟ้าที่ได้จากการผลิตในภาคอุตสาหกรรมขนาด 5.1 VA, 120/24 V, 60 Hz

ตารางที่ 3.3 เปรียบเทียบความยาวจากการวัดและคำนวณขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 5.1 VA

	คำนวณ (m.)	วัดจริง (m.)	% ผิดพลาด
ขดลวดปฐมภูมิ (m)	157.77	147.12	6.75
ขดลวดทุติยภูมิ (m)	37.58	29.8	20.7

จากตารางที่ 3.1 จะเห็นได้ว่าความยาวของขดลวดที่คำนวณได้มีความผิดพลาด อาจเกิดจากการเลือกใช้ค่า Window Utilization Factor ที่ไม่เหมาะสม [3] ซึ่งสามารถที่จะเปลี่ยนวิธีคำนวณความยาวขดลวดใหม่ได้ [24-25] พิจารณารูปที่ 3.11 ซึ่งแสดงการเรียงของตัวนำในกระสวยพันขดลวด



รูปที่ 3.14 การเรียงของตัวนำในกระสวยพันขดลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปสามารถคำนวณความยาวของระยะจากกระสวยถึงขดลวดแต่ละชั้นได้ดังนี้

$$r = r_1 = \frac{d}{2} \quad (3.9)$$

$$r_2 = r_1 + r\sqrt{3}, \quad r_3 = r_2 + r\sqrt{3} \quad (3.10)$$

$$r_n = r_{n-1} + r\sqrt{3} \quad (3.11)$$

- เมื่อ r เป็นรัศมีของตัวนำ, mm
 r_1, r_2 เป็นรัศมีของตัวนำชั้นที่ 1 และ 2 ตามลำดับ, mm
 d เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางรวมของตัวนำ, mm

ความยาวต่อรอบของแต่ละชั้นสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$l(x_i) = \sum_{k=1}^n \left[\left\{ 4 \times \left\{ \frac{b_l(x_i)}{4} + r_k \right\} + 2\pi r_k \right\} \times T_L^k(x_i) \right] \quad (3.12)$$

$$T_L^k(x_i) = \frac{b_w(x_i)}{d} \quad (3.13)$$

- เมื่อ l เป็นความยาวต่อรอบของขดลวดแต่ละชั้น, mm
 T_L เป็นจำนวนรอบต่อชั้นของขดลวด

จากสมการที่ 3.9-3.13 สามารถแสดงเป็นสมการทั่วไปได้ดังนี้

$$l(x_i) = b_l + (0.933\pi d T_L) N \quad (3.14)$$

เมื่อได้สมการที่ใช้ในการคำนวณความยาวของขดลวดใหม่แล้ว นำไปทดสอบเพื่อเปรียบเทียบกับหม้อแปลงไฟฟ้าเดิม ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 เปรียบเทียบความยาวจากการวัดและคำนวณ(วิธีใหม่)ขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า

	คำนวณ (m)	วัดจริง (m)	% ผิดพลาด
ขดลวดปฐมภูมิ (m)	148.24	147.12	0.68
ขดลวดทุติยภูมิ (m)	28.42	29.8	-4.86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการคำนวณหาความยาวขดลวดแบบใหม่ จากตารางที่ 3.3 และ 3.4 เห็นได้ว่าผลลัพธ์ที่ได้จะมีความผิดพลาดน้อยลงและเป็นสมการที่ไม่มีพารามิเตอร์ที่จำเป็นต้องอาศัยประสบการณ์ของผู้ออกแบบเป็นผู้กำหนด ซึ่งสมการนี้สามารถใช้ได้กับตัวนำทุกขนาดจึงทำให้ใช้งาน ได้สะดวกและถูกต้องกว่า

4. การหาค่าที่เหมาะสม

จากผลการเปรียบเทียบวิธีการหาค่าที่เหมาะสม โดยหลักการของดิเทอมนิสติกด้วยวิธี SUMT แบบ QUAP ที่ต้องมีการกำหนดค่าเริ่มต้นของตัวแปรนั้นมีความเหมาะสมน้อยกว่าการออกแบบโดยหลักการสโตศาสตร์ด้วยวิธีจินติก ซึ่งเป็นวิธีที่ไม่ต้องกำหนดค่าเริ่มต้นในการออกแบบและค่าตอบที่ได้มีค่าที่ถูกต้องกว่า ดังนั้นในการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กที่เหมาะสมนี้จะใช้วิธีจินติกโดยมีเป้าหมายให้ค่าความสูญเสียรวมต่ำและผลที่ได้จากการออกแบบนำไปสร้างต้นแบบแสดงดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 หม้อแปลงไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบที่เหมาะสมขนาด 5.1 VA, 120/24 V, 60 Hz

5. อภิปรายผลการออกแบบ

จากผลการออกแบบที่แสดงในตารางที่ 3.5 จะเห็นได้ว่าหลักการออกแบบที่เหมาะสมนั้นช่วยให้ความสูญเสียลดลงจากการออกแบบด้วยวิธีทั่วไปซึ่งมีความสูญเสีย 1.790 W เป็น 1.443 W คิดเป็น 19.4 % และลดลงจากการออกแบบในอุตสาหกรรมซึ่งมีความสูญเสีย 1.450 W เป็น 1.443 W คิดเป็น 0.48 % จากค่าที่ลดลงจะเห็นได้ว่าเมื่อเปรียบเทียบกับารออกแบบในอุตสาหกรรมมีค่าน้อยมาก ทั้งนี้เนื่องจากในอุตสาหกรรมได้มีการออกแบบและพัฒนาด้วยวิธีลองผิดลองถูกโดยใช้ประสบการณ์และความชำนาญของผู้ออกแบบ แต่วิธีลองผิดลองถูกนี้เมื่อออกแบบแล้วจะต้องทำการสร้างและทดสอบทำให้เกิดมีความสูญเสียจากต้นทุนการทดสอบเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นข้อได้เปรียบอีกประการหนึ่งของการออกแบบที่เหมาะสมคือทำให้มีการสูญเสียเนื่องจากการลองผิดลองถูกลดน้อยลง

ตารางที่ 3.5 ผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าพิกัด 5.1 VA, 120/24 V, 60 Hz, $B_{\max} = 1.6$ T
แกนเหล็ก RM-800, $J \approx 4$ A/mm²

	วิธีที่ 1	วิธีที่ 2	วิธีที่ 3
D (mm)	26	15	16
E	10	10	10
a	7.5	7.5	7
b	18.5	18.5	18
N_p	1103	1830	1764
R_p	175.75	209	202.5
N_s	220	380	364
R_s	6.84	8.86	8.46
W_{core}	0.146	0.084	0.087
W_{cu}	0.022	0.030	0.027
W_t	0.168	0.113	0.114
P_{core}	1.17	0.672	0.696
P_{cu}	0.63	0.778	0.747
P_t	1.79	1.450	1.443

หมายเหตุ

วิธีที่ 1 เป็นการออกแบบด้วยวิธีทั่วไป

วิธีที่ 2 เป็นการออกแบบในอุตสาหกรรม

วิธีที่ 3 เป็นการออกแบบด้วยวิธีการออกแบบที่เหมาะสม

บทที่ 4

ผลการออกแบบและทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็ก

4.1 บทนำ

เนื้อหาในส่วนของผลการออกแบบและทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้านี้เป็นการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมพิกัด 50 VA และ 25 VA, 220/110 V, 50 Hz แกนเหล็กชนิด RM-800, $J \approx 4 \text{ A/mm}^2$ ลวดตัวนำใช้ฉนวนคลาส A โดยใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบจินตึก โดยมีเป้าหมายให้ค่าความสูญเสียรวมที่เกิดขึ้นในแกนเหล็กและขดลวดมีค่าต่ำที่สุด การออกแบบจะใช้โปรแกรมที่พัฒนาโดยภาษา Visual Basic version 6.0 บนระบบปฏิบัติการ Windows 95 หรือสูงกว่า ผลจากการออกแบบที่เหมาะสมได้นำไปสร้างเพื่อทดสอบหาคุณลักษณะต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้น ในการทดสอบประกอบไปด้วยการทดสอบเปิดวงจร (open circuit test) และลัดวงจร (short circuit test) เพื่อพิจารณาถึงค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนเหล็กและขดลวดตามลำดับ นอกจากนี้ยังได้ทำการทดสอบการจ่ายภาระไฟฟ้า (load test) การวัดอุณหภูมิเพิ่มขึ้นขณะใช้งานที่พิกัด (temperature rise) รวมถึงความผิดเพี้ยนของสัญญาณไฟฟ้า (total harmonics distortion) รวมถึงปริมาณกระแสกระตุ่นด้วย ซึ่งการทดสอบเหล่านี้ทดสอบเพื่อให้แน่ใจได้ว่าวิธีการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมนี้ สามารถนำไปใช้ออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าได้จริง

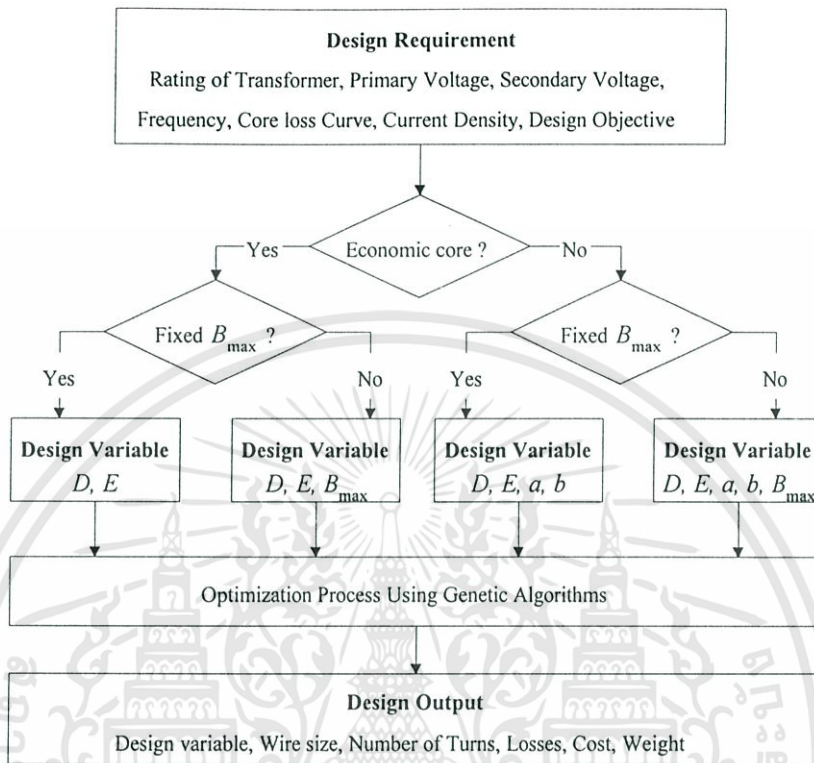
4.2 โปรแกรมการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็ก

โปรแกรมการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กนี้พัฒนาขึ้นจากภาษา Visual Basic version 6.0 โดยใช้จินตึกอัลกอริทึมในการหาค่าที่เหมาะสม โดยมีขั้นตอนการออกแบบแสดงแผนผังดังรูปที่ 4.1 และหน้าต่างของโปรแกรมแสดงดังรูปที่ 4.2 ถึง 4.4 ขั้นตอนแรกของการออกแบบจะเป็นการกำหนดคุณลักษณะของหม้อแปลงไฟฟ้ารวมถึงเป้าหมายที่ต้องการออกแบบ ขั้นตอนต่อไปเลือกตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบซึ่งมีให้เลือก 4 ลักษณะดังนี้

1. แบบ 2 ตัวแปร เป็นการเลือกใช้โครงสร้างของแกนเหล็ก D และ E เป็นตัวแปรในการออกแบบ โดยกำหนดให้ B_{\max} เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบ
2. แบบ 3 ตัวแปร เป็นการเลือกใช้โครงสร้างของแกนเหล็ก D, E และ B_{\max} เป็นตัวแปรในการออกแบบ
3. แบบ 4 ตัวแปร เป็นการเลือกใช้โครงสร้างของแกนเหล็ก D, E, a และ b เป็นตัวแปรในการออกแบบ โดยกำหนดให้ B_{\max} เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

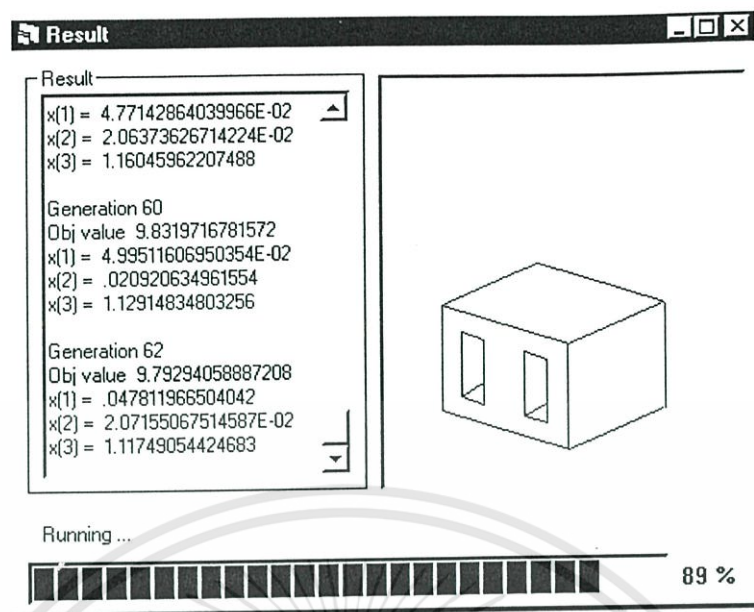
4. แบบ 5 ตัวแปร เป็นการเลือกใช้โครงสร้างของแกนเหล็ก $D E b$ และ B_{max} เป็นตัวแปรในการออกแบบ



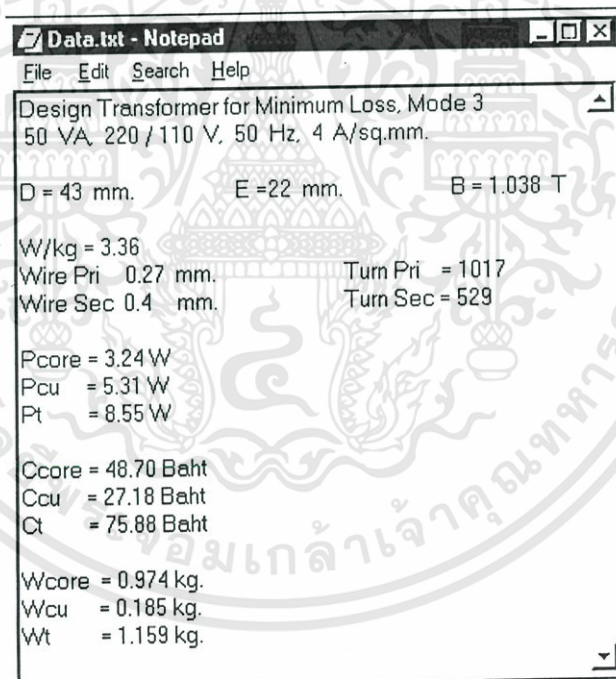
รูปที่ 4.1 แผนผังของขบวนการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสม

รูปที่ 4.2 หน้าต่างกำหนดเป้าหมายและพารามิเตอร์ในการออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 หน้าต่างแสดงผลลัพธ์ที่ได้ขณะประมวลผล



รูปที่ 4.4 หน้าต่างแสดงผลลัพธ์ที่ได้จากการหาค่าที่เหมาะสม

หลังจากการกำหนดพารามิเตอร์และตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการออกแบบแล้ว ขั้นตอนต่อไป จะเข้าสู่ขบวนการหาค่าที่เหมาะสมเพื่อหาโครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าตามที่ต้องการ ซึ่งผลลัพธ์ ที่ได้จากโปรแกรมจะแสดงค่าของตัวแปรที่ออกแบบ, ขนาดของลวดตัวนำ, จำนวนรอบ, น้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของแกนเหล็กและน้ำหนักของลวดตัวนำ, ราคาแกนเหล็ก, ราคาขดลวด, ความสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนเหล็ก, ความสูญเสียที่เกิดขึ้นในขดลวด

4.3 ผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็ก

หม้อแปลงไฟฟ้าที่ออกแบบเพื่อทดสอบกำหนดให้มีพิกัด 50 VA และ 25 VA, 220/110 V, 50 Hz $J \approx 4 \text{ A/mm}^2$ แกนเหล็กที่ใช้ในการออกแบบเป็นชนิด RM-800 มีเป้าหมายในการออกแบบให้ค่าความสูญเสียรวมต่ำ และทำการออกแบบโดยใช้ตัวแปรทั้ง 4 ลักษณะเพื่อเปรียบเทียบโครงสร้างและค่าความสูญเสียรวมที่เกิดขึ้น ซึ่งในการออกแบบกรณี 2 ตัวแปรและ 4 ตัวแปรนั้นจะกำหนดให้ใช้ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก $B_{\max} = 1.4 \text{ T}$ (หรือตามที่ต้องการโดยพิจารณาจากคุณสมบัติของแกนเหล็กที่ใช้)

ตารางที่ 4.1 ผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าพิกัด 50 VA, 220/110, 50 Hz, $J \approx 4 \text{ A/mm}^2$

	2 ตัวแปร	3 ตัวแปร	4 ตัวแปร	5 ตัวแปร
D (mm.)	30.0	43.0	36.0	40.0
$2E$ (mm.)	22.7	22.0	18.7	20.5
a (mm.)	E	E	12.0	11.5
b (mm.)	$3E$	$3E$	31.0	30.5
B_{\max} (T)	1.40	1.04	1.40	1.17
N_{pri} (Turn)	1042	1017	1054	1040
N_{sec} (Turn)	542	529	543	541
P_{core} (W)	4.32	3.27	3.89	3.32
P_{cu} (W)	4.61	5.49	4.91	5.21
P_t (W)	8.93	8.76	8.80	8.54
W_{core} (kg.)	0.72	0.97	0.65	0.80
W_{cu} (kg.)	0.16	0.18	0.17	0.18
W_t (kg.)	0.88	1.15	0.82	0.98

จากตารางที่ 4.1 ซึ่งเป็นผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 50 VA เมื่อเปรียบเทียบค่าความสูญเสียรวมของการออกแบบที่กำหนดให้ช่องพันขดลวดเป็นสัดส่วนกับขนาดกลางของแกนเหล็ก ระหว่างแบบ 2 ตัวแปร ($B_{\max} = 1.4 \text{ T}$, $P_t = 8.93 \text{ W}$) ซึ่งใช้ค่า B_{\max} เป็นพารามิเตอร์ที่ถูกกำหนดในการออกแบบ และแบบ 3 ตัวแปร ($B_{\max} = 1.04 \text{ T}$, $P_t = 8.76 \text{ W}$) ซึ่งใช้ค่า B_{\max} เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวแปรในการออกแบบพบว่าการใช้แบบ 3 ตัวแปรมีค่าความสูญเสียรวมที่ลดลงกว่าแบบ 2 ตัวแปร 0.17 W (คิดเป็น 1.9%) จะเห็นได้ว่าโครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบกรณี 2 ตัวแปรเป็นการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าที่เหมาะสมที่ $B_{\max} = 1.4$ T (ค่าที่กำหนด) ซึ่งที่ค่า B_{\max} นี้จะทำให้มีค่าความสูญเสียรวมที่สูงกว่าแบบ 3 ตัวแปรที่ $B_{\max} = 1.04$ T (ค่าที่เหมาะสม) อย่างไรก็ตามในแบบ 2 ตัวแปรถ้าผู้ออกแบบกำหนดค่า $B_{\max} = 1.04$ T (ค่าเดียวกับที่ได้จากโปรแกรมในการออกแบบ 3 ตัวแปร) ผลการออกแบบที่ได้จะให้ผลลัพธ์เช่นเดียวกันกับแบบ 3 ตัวแปรแต่ก็เกินไปได้ยากที่ผู้ออกแบบจะเลือกค่า B_{\max} ในลักษณะนี้ เมื่อพิจารณาค่าความสูญเสียรวมที่เกิดขึ้นกรณีการออกแบบ 4 ตัวแปร ($B_{\max} = 1.4$ T, $P_t = 8.80$ W) กับกรณีแบบ 5 ตัวแปร ($B_{\max} = 1.17$ T, $P_t = 8.54$ W) จะพบว่าแบบ 5 ตัวแปรมีค่าความสูญเสียรวมที่ต่ำกว่า 0.26 W (คิดเป็น 2.95%) ซึ่งเป็นเพราะแบบ 5 ตัวแปรมีการใช้ค่า B_{\max} ที่เหมาะสมกว่าในการออกแบบ เช่นเดียวกันกับกรณีของแบบ 2 ตัวแปรและ 3 ตัวแปร

ตารางที่ 4.2 ผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าพิกัด 25 VA, 220/110, 50 Hz, $J \approx 4$ A/mm²

	2 ตัวแปร	3 ตัวแปร	4 ตัวแปร	5 ตัวแปร
D (mm.)	30.5	36.5	27.0	38.5
$2E$ (mm.)	18.4	20.2	17.7	20
a (mm.)	E	E	11.4	9.6
b (mm.)	$3E$	$3E$	26.3	28.1
B_{\max} (T)	1.40	0.98	1.40	1.02
N_{pri} (Turn)	1287	1404	1511	1294
N_{sec} (Turn)	669	730	786	673
P_{core} (W)	2.89	2.10	2.47	2.24
P_{cu} (W)	2.77	3.36	3.12	3.14
P_t (W)	5.66	5.46	5.59	5.38
W_{core} (kg.)	0.48	0.70	0.41	0.69
W_{cu} (kg.)	0.10	0.12	0.11	0.11
W_t (kg.)	0.58	0.82	0.52	0.90

ดังนั้นจะพบว่าที่หม้อแปลงไฟฟ้าพิกัดเดียวกันเมื่อออกแบบที่ B_{\max} ต่างกันก็จะให้ผลลัพธ์ที่ต่างกัน นั่นคือโครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าจะมีความเหมาะสมขึ้นอยู่กับเงื่อนไขและพารามิเตอร์ที่กำหนดในการออกแบบ จากผลการเปรียบเทียบที่ได้จะพบว่าค่า B_{\max} จะเป็นค่าหนึ่งซึ่งมีผลต่อโครงสร้างที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสม เมื่อพิจารณาการออกแบบโดยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลือกใช้ตัวแปรทั้ง 4 แบบจะพบว่าการออกแบบโดยเลือกใช้แบบ 5 ตัวแปรคือ D, E, a, b และ B_{max} จะให้โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีค่าความสูญเสียต่ำที่สุด เนื่องจากการออกแบบโดยเลือกใช้ตัวแปรเหล่านี้โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าสามารถที่จะปรับเปลี่ยนได้โดยอิสระ ซึ่งผลที่ได้จากการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 25 VA 220/110 V, 50 Hz ในตารางที่ 4.2 ก็จะมีลักษณะเช่นเดียวกัน

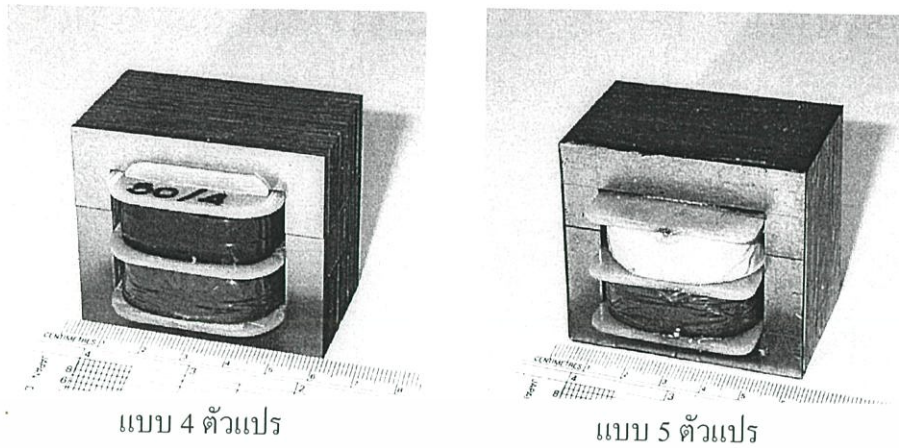
4.4 ผลการทดสอบต้นแบบหม้อแปลงไฟฟ้า

การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสม เป็นวิธีการเชิงตัวเลขที่นำมาใช้ออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าให้ได้คุณลักษณะตามเป้าหมายที่ต้องการของผู้ออกแบบ ในกระบวนการออกแบบได้มีการรวบรวมสมการที่ใช้ในการคำนวณโครงสร้างแกนเหล็กและขดลวดจากแหล่งข้อมูลต่าง ๆ เช่น ตำราจากต่างประเทศ [2,3,6,23] บทความจากวารสาร [24,25] และจากประสบการณ์ของผู้ออกแบบ ดังนั้นเพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องในทางปฏิบัติของวิธีการออกแบบและสมการที่ใช้คำนวณโครงสร้างต่าง ๆ ของหม้อแปลงไฟฟ้า จะนำผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กจากตารางที่ 4.1 และ 4.2 มาสร้างต้นแบบเพื่อทดสอบ คุณลักษณะต่าง ๆ ที่คำนวณได้จากการออกแบบได้แก่ ขนาด 50 VA, 220/110 V, 50 Hz ทั้ง 4 แบบ และ ขนาด 25 VA, 220/110 V, 50 Hz แบบ 3 ตัวแปรและแบบ 5 ตัวแปร ซึ่งต้นแบบหม้อแปลงไฟฟ้างี้แสดงดังรูปที่ 4.5 ถึง 4.7 โดยการทดสอบจะทำการทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าได้แก่ ค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนเหล็กและขดลวดโดยการทดสอบแบบเปิดวงจรและการทดสอบแบบลัดวงจร ค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงภาระ ความผิดเพี้ยนของรูปสัญญาณไฟฟ้าเนื่องจากคุณลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้น (non-linear) ของแกนเหล็ก และนอกจากนี้ยังได้ทดสอบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นขณะใช้งานที่พิกัดด้วย



รูปที่ 4.5 ต้นแบบหม้อแปลงไฟฟ้าความสูญเสียรวมต่ำขนาด 50 VA แบบ 2 ตัวแปรและ 3 ตัวแปร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 ดันแบบหม้อแปลงไฟฟ้าความสูญเสียรวมต่ำขนาด 50 VA แบบ 4 ตัวแปรและ 5 ตัวแปร



รูปที่ 4.7 ดันแบบหม้อแปลงไฟฟ้าความสูญเสียรวมต่ำขนาด 25 VA แบบ 3 ตัวแปรและ 5 ตัวแปร

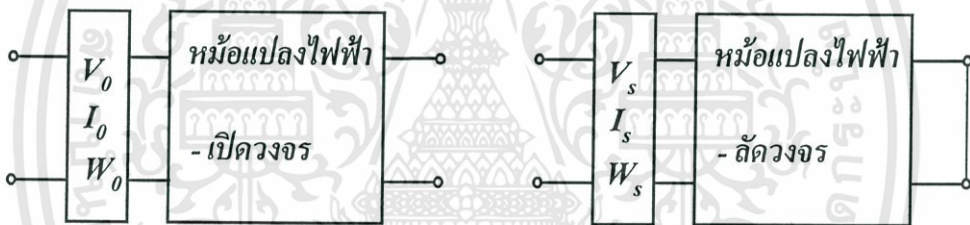
4.4.1 การทดสอบแบบเปิดวงจรและลัดวงจร

การทดสอบแบบเปิดวงจรเป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก ซึ่งการทดสอบสามารถกระทำได้โดยการเปิดวงจรของขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าด้านใดด้านหนึ่ง (เรียกว่าขดลวดทุติยภูมิ) จ่ายแรงดันและความถี่ไฟฟ้าตามพิกัดเข้าสู่ขดลวดอีกด้านหนึ่ง (เรียกว่าขดลวดปฐมภูมิ) เครื่องมือวัดต่าง ๆ จะต่ออยู่ทางด้านปฐมภูมิในตำแหน่งดังรูปที่ 4-8 ขณะทดสอบขดลวดด้านทุติยภูมิซึ่งเปิดวงจรอยู่จะไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดจึงไม่มีความสูญเสียจากขดลวดด้านนี้เกิดขึ้น ส่วนกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดทางด้านปฐมภูมิเป็นกระแสที่ทำให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็กขึ้นในวงจรแม่เหล็ก และฟลักซ์แม่เหล็กนี้จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ขดลวดทั้งสองซึ่งกระแสที่ไหลผ่านขดลวดทางด้านปฐมภูมิขณะทดสอบนี้เรียกว่ากระแสกระตุ้น ปริมาณของกระแสกระตุ้นนี้จะขึ้นกับชนิดของแกนเหล็กและน้ำหนักของแกนเหล็กที่ใช้ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะมีขนาดประมาณ 2-10 % ของกระแสที่พิกัด [26] ทำให้ขณะทดสอบแบบเปิดวงจรจะมีค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นจากขดลวดด้านปฐมภูมิน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนเหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในทางการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นค่ากำลังไฟฟ้าที่อ่านได้จากวัตต์มิเตอร์จะกำหนดให้เป็นกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในแกนเหล็กที่ใช้ในการเปลี่ยนรูปพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานสนามแม่เหล็กซึ่งค่าความสูญเสียนี้จะคงที่

การทดสอบแบบลัดวงจรเป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความสูญเสียในขดลวด กระทำได้โดยการลัดวงจรด้านใดด้านหนึ่งของหม้อแปลงไฟฟ้า (เรียกว่าขดลวดทุติยภูมิ) ด้วยแอมป์มิเตอร์แล้วจ่ายแรงดันไฟฟ้าเข้าสู่ขดลวดอีกด้านหนึ่ง (เรียกว่าขดลวดปฐมภูมิ) ซึ่งมีวัตต์มิเตอร์ต่ออยู่ด้วยแล้วค่อย ๆ ปรับแรงดันไฟฟ้าให้กระแสที่อ่านได้จากแอมป์มิเตอร์เป็นค่ากระแสพิสัยของขดลวด ค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นขณะกระแสด้านลัดวงจรเป็นกระแสที่พิสัยนี้จะเป็นค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นทั้งหมดของหม้อแปลงไฟฟ้าซึ่งประกอบด้วยค่าความสูญเสียในแกนเหล็กและค่าความสูญเสียในขดลวด แต่เนื่องจากค่าความสูญเสียในแกนเหล็กจะขึ้นอยู่กับขนาดแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้ขดลวดด้านปฐมภูมิ ซึ่งในขณะที่ทำการทดสอบนี้แรงดันไฟฟ้ามักมีค่าต่ำกว่าพิสัยมาก ดังนั้นค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนเหล็กจึงมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นในขดลวด จึงทำให้อาจประมาณได้ว่าค่าความสูญเสียที่อ่านได้จากวัตต์มิเตอร์เป็นค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นในขดลวดเพียงอย่างเดียว



รูปที่ 4.8 การต่อเครื่องมือวัดในการทดสอบแบบเปิดวงจรและลัดวงจร

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบแบบเปิดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ 50 VA และ 25 VA

	V_0	I_0	W_0
50 VA แบบ 2 ตัวแปร	220.05	0.0569	4.18
50 VA แบบ 3 ตัวแปร	220.07	0.0266	3.03
50 VA แบบ 4 ตัวแปร	220.01	0.0416	3.73
50 VA แบบ 5 ตัวแปร	220.31	0.0285	3.14
25 VA แบบ 3 ตัวแปร	220.89	0.0138	1.91
25 VA แบบ 5 ตัวแปร	220.15	0.0157	2.08

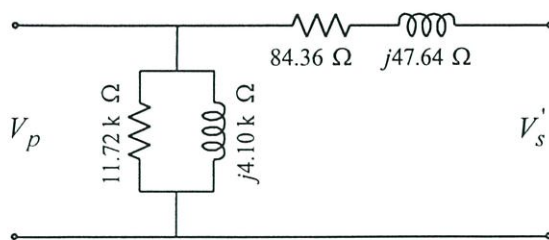
ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบแบบลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ 50 VA และ 25 VA

	V_s	I_s	W_s
50 VA แบบ 2 ตัวแปร	23.35	0.241	4.90
50 VA แบบ 3 ตัวแปร	26.76	0.239	5.56
50 VA แบบ 4 ตัวแปร	23.50	0.236	4.88
50 VA แบบ 5 ตัวแปร	25.76	0.242	5.25
25 VA แบบ 3 ตัวแปร	30.20	0.121	3.32
25 VA แบบ 5 ตัวแปร	28.60	0.121	3.21

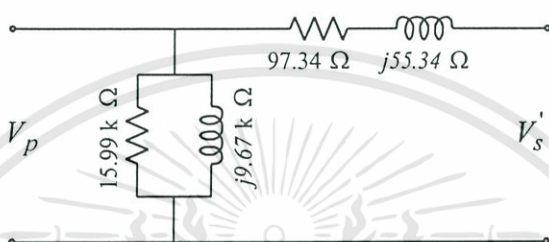
ตารางที่ 4.5 การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการออกแบบและทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ

	Core Loss			Cu Loss		
	ออกแบบ	ทดสอบ	ผิดพลาด	ออกแบบ	ทดสอบ	ผิดพลาด
50 VA แบบ 2 ตัวแปร	4.32	4.18	3.24 %	4.61	4.90	-6.29 %
50 VA แบบ 3 ตัวแปร	3.27	3.03	7.34 %	5.49	5.56	-1.28 %
50 VA แบบ 4 ตัวแปร	3.89	3.73	4.11 %	4.91	4.88	0.61 %
50 VA แบบ 5 ตัวแปร	3.32	3.14	5.42 %	5.21	5.25	-0.77 %
25 VA แบบ 3 ตัวแปร	2.10	1.91	9.05 %	3.36	3.32	1.19 %
25 VA แบบ 5 ตัวแปร	2.24	2.08	7.14 %	3.14	3.21	-2.23 %

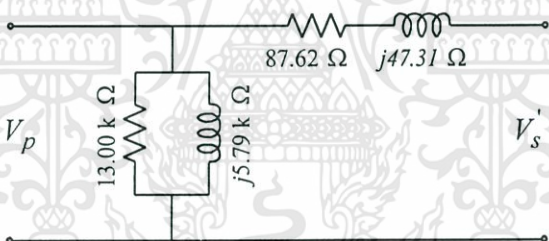
จากผลการทดสอบแบบเปิดวงจรและลัดวงจรที่แสดงดังตารางที่ 4.3 และ 4.4 เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการออกแบบซึ่งแสดงดังตารางที่ 4.5 พบว่าค่าความสูญเสียในแกนเหล็กที่ได้จากการทดสอบมีค่าต่างกันเล็กน้อย ซึ่งอาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในของแกนเหล็กที่เกิดจากการตัดและค่าความสูญเสียต่อหน้าพื้นที่อ่านได้จากกราฟ ในกรณีของค่าความสูญเสียในขดลวดจะเห็นได้ว่ามีค่าต่างกันเล็กน้อย เนื่องจากวิธีการคำนวณความยาวของขดลวดได้มีการปรับปรุงสมการเพิ่มขึ้นแล้ว ส่วนค่าที่ผิดพลาดอาจเกิดเนื่องจากขนาดของกระสวยพันขดลวด, ลักษณะการเรียงตัวและความตึงในการพันขดลวด รวมทั้งความผิดพลาดที่เกิดจากการวัดในขณะทำการทดสอบ จากผลการทดสอบสามารถแสดงวงจรสมมูลแบบประมาณของต้นแบบหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อพิจารณาทางด้านปฐมภูมิได้ดังรูปที่ 4.9 ถึง 4.14



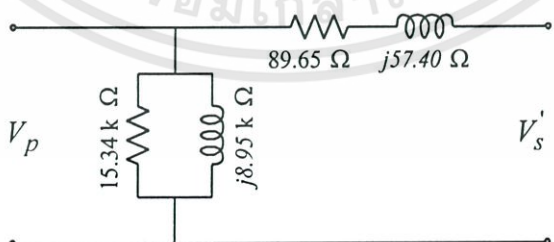
รูปที่ 4.9 วงจรสมมูลย์แบบประมาณของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 50 VA แบบ 2 ตัวแปร



รูปที่ 4.10 วงจรสมมูลย์แบบประมาณของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 50 VA แบบ 3 ตัวแปร

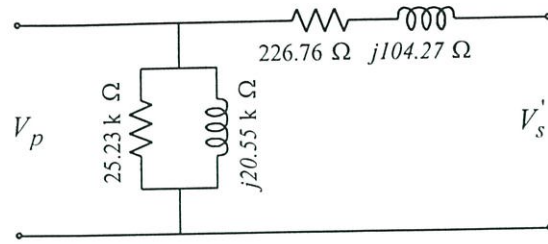


รูปที่ 4.11 วงจรสมมูลย์แบบประมาณของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 50 VA แบบ 4 ตัวแปร

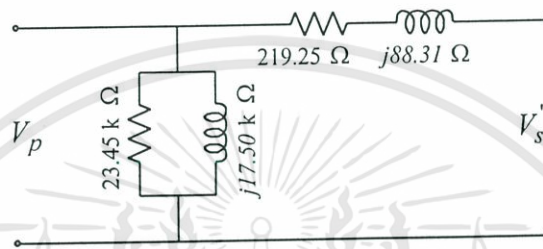


รูปที่ 4.12 วงจรสมมูลย์แบบประมาณของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 50 VA แบบ 5 ตัวแปร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 วงจรสมมูลย์แบบประมาณของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 25 VA แบบ 3 ตัวแปร



รูปที่ 4.14 วงจรสมมูลย์แบบประมาณของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 25 VA แบบ 5 ตัวแปร

4.4.2 การทดสอบโวลต์เตจเรกกูเลชัน

หม้อแปลงไฟฟ้าขณะจ่ายภาระแรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิจะมีค่าคงที่ ส่วนของแรงดันไฟฟ้าด้านทุติยภูมิซึ่งต่ออยู่กับภาระจะมีค่าเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของภาระที่ต่ออยู่ เมื่อภาระมีปริมาณมากขึ้นแรงดันไฟฟ้าด้านทุติยภูมิจะลดลง (กรณีตัวประกอบกำลังไฟฟ้าล่าช้า, p.f. lagging) ซึ่งมีผลเสียต่อภาระคือจะทำให้ไม่สามารถทำงานได้เต็มที่ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของภาระให้มีการเปลี่ยนแปลงไปจากแรงดันที่พิกัดให้น้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ สาเหตุที่ทำให้แรงดันไฟฟ้าลดลงเนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดขึ้นในขดลวด อัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าด้านทุติยภูมินี้เรียกว่า โวลต์เตจเรกกูเลชัน การเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันไฟฟ้าด้านทุติยภูมิจากขณะไร้ภาระถึงจ่ายภาระเต็มพิกัดที่ตัวประกอบกำลังที่กำหนด สามารถแสดงให้อยู่ในรูปเปอร์เซ็นต์ได้ดังสมการที่ 4.1 ผลการทดสอบขณะจ่ายภาระที่พิกัดที่ตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 0.8 ล้าหลังแสดงดังตารางที่ 4.6

$$\% \text{ Voltage regulation} = \frac{V_{no\text{load}} - V_{full\text{load}}}{V_{no\text{load}}} \times 100 \quad 4.1$$

จากตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบโวลต์เตจเรกกูเลชันของหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ 50 VA และ 25 VA ที่ออกแบบโดยวิธีการหาค่าที่เหมาะสม โดยการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้มีค่าคงที่เมื่อจ่ายภาระทางไฟฟ้าที่ค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.8 เห็นได้ว่าโวลต์เตจเรกกูเลชันมีค่าอยู่ในช่วงที่มีการใช้งานทั่วไป [1] และเมื่อนำผลการทดสอบโดยการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าด้านทุติยภูมิให้คงที่ขณะจ่ายภาระที่พิกัดที่ตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 0.8 ส้าหลังดังตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบค่าโวลต์เตจเรกกูเลชันที่ได้จากการทดสอบในตารางที่ 4.7 จะมีค่าสูงกว่าเล็กน้อยเนื่องจากเมื่อเพิ่มแรงดันด้านปฐมภูมิจะทำให้กระแสไฟฟ้าด้านปฐมภูมิเพิ่มสูงขึ้น พิจารณาค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยวงจรสมมูลย์ที่ได้จากการทดสอบเปิดและลัดวงจร จะเห็นได้ว่ามีค่าแตกต่างกันอยู่บ้างเพราะจากค่าที่ได้จากการคำนวณเป็นการคำนวณจากวงจรสมมูลย์แบบประมาณจึงอาจมีความคลาดเคลื่อนขึ้นได้

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบโวลต์เตจเรกกูเลชันของหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ 50 VA และ 25 VA ทดสอบโดยการรักษาระดับแรงดันด้านปฐมภูมิให้มีค่าคงที่

	แรงดันไฟฟ้า		% Reg
	ขณะไร้อภาระ	ขณะจ่ายภาระที่พิกัด	
50 VA แบบ 2 ตัวแปร	110.00	103.2	6.18
50 VA แบบ 3 ตัวแปร	110.05	103.4	6.04
50 VA แบบ 4 ตัวแปร	109.95	102.9	6.41
50 VA แบบ 5 ตัวแปร	110.10	103.6	5.90
25 VA แบบ 3 ตัวแปร	110.05	101.3	7.95
25 VA แบบ 5 ตัวแปร	110.05	102.1	7.22

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบโวลต์เตจเรกกูเลชันของหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ 50 VA และ 25 VA ทดสอบโดยการรักษาระดับแรงดันด้านทุติยภูมิให้มีค่าคงที่

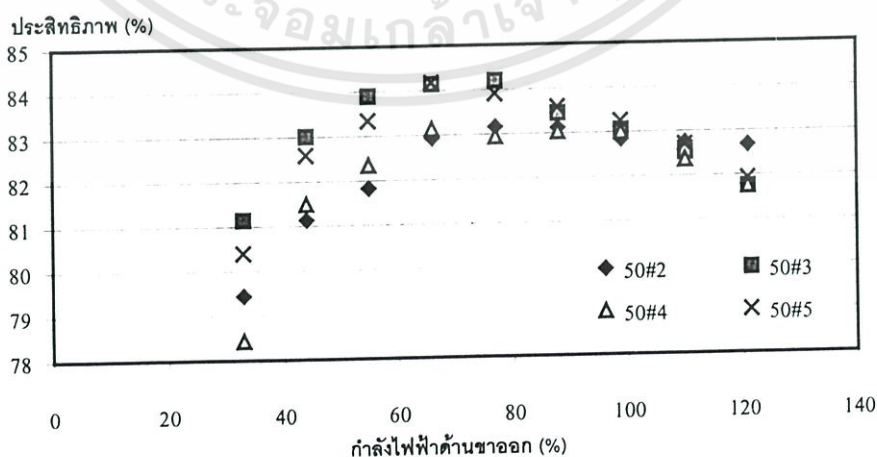
	แรงดันไฟฟ้า		% Reg จาก การทดสอบ	% Reg จาก การคำนวณ
	ขณะไร้อภาระ	ภาระที่พิกัด		
50 VA แบบ 2 ตัวแปร	118.25	110.2	7.30	10.00
50 VA แบบ 3 ตัวแปร	120.0	110.1	8.99	11.56
50 VA แบบ 4 ตัวแปร	119.4	110.1	8.45	10.28
50 VA แบบ 5 ตัวแปร	120.0	109.8	9.29	10.99
25 VA แบบ 3 ตัวแปร	121.8	110.2	10.53	12.88
25 VA แบบ 5 ตัวแปร	120.75	110.1	9.67	12.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.3 การทดสอบเมื่อเปลี่ยนแปลงภาระทางไฟฟ้า

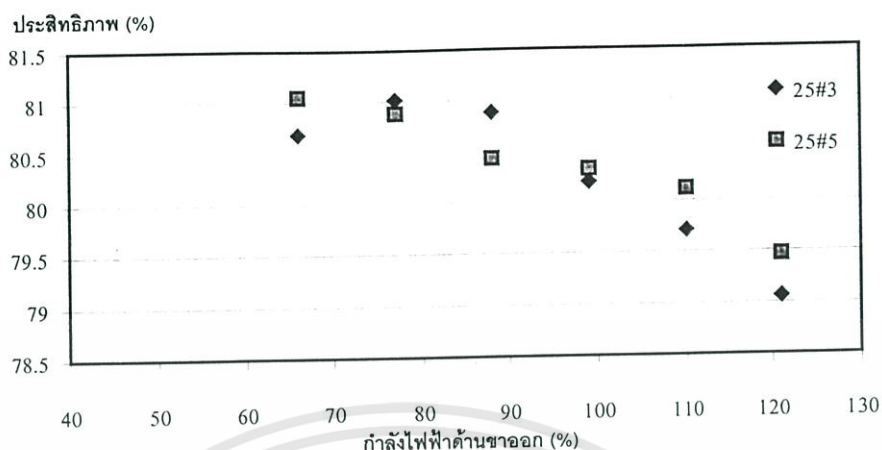
โดยทั่วไปภาระของหม้อแปลงไฟฟ้าจะมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ซึ่งทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดมีค่าไม่คงที่ดังนั้นความสูญเสียในขดลวดจึงเปลี่ยนแปลงตามการเปลี่ยนแปลงของภาระด้วย ส่วนความสูญเสียในแกนเหล็กจะมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามการเปลี่ยนแปลงของภาระ รูปที่ 4.15 และ 4.16 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับกำลังไฟฟ้าด้านออกของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของภาระ ซึ่งภาระที่ใช้ในการทดสอบเป็นค่าความต้านทานไฟฟ้าเนื่องจากการทดสอบต้องการให้ทุกค่าภาระไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงมีค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเท่ากัน ซึ่งหากเป็นภาระชนิด ค่าความต้านทานรวมกับค่าความเหนี่ยวนำ หรือค่าความต้านทานรวมกับค่าความจุขณะทดสอบจะรักษาให้ค่าตัวประกอบกำลังคงที่ได้ยาก

จากผลการทดสอบที่แสดงดังรูปที่ 4.15 ซึ่งเป็นผลการทดสอบต้นแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 50 VA จะเห็นได้ว่าที่พิกัดของกำลังด้านออกหม้อแปลงไฟฟ้า ต้นแบบที่ได้จากการออกแบบกรณี 5 ตัวแปรจะมีประสิทธิภาพสูงที่สุดตามด้วยแบบ 3, 4 และ 2 ตามลำดับ ซึ่งเป็นไปตามผลที่ได้จากการออกแบบไว้ เมื่อเปลี่ยนแปลงภาระจะพบว่าที่กำลังด้านออกประมาณ 80 % หม้อแปลงไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบกรณี 3 ตัวแปรจะมีประสิทธิภาพสูงกว่าต้นแบบอื่น เนื่องจากที่กำลังด้านออกประมาณ 80 % นี้เป็นตำแหน่งที่ทำให้ค่าความสูญเสียในขดลวดของต้นแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ 3 ตัวแปรลดลงเข้าใกล้ค่าความสูญเสียในแกนเหล็กซึ่งเป็นตำแหน่งที่ทำให้จ่ายกำลังไฟฟ้าได้ประสิทธิภาพสูงสุด จากผลการออกแบบที่แสดงในตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าหม้อแปลงไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบกรณี 3 ตัวแปรมีค่าความสูญเสียในแกนเหล็กน้อยที่สุดจึงทำให้ประสิทธิภาพสูงสุดของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ 3 ตัวแปรนี้สูงกว่าแบบอื่น ส่วนของการทดสอบต้นแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 25 VA ก็เป็นในลักษณะเดียวกัน



รูปที่ 4.15 ผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ 50 VA เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของภาระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 ผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ 25 VA เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของภาระ

4.4.5 การทดสอบอุณหภูมิเพิ่มขึ้นสูงสุดขณะใช้งานที่พิกัด

ความสูญเสียที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งในแกนเหล็กและในขดลวดขณะจ่ายภาระจะเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานความร้อนทำให้อุณหภูมิของแกนเหล็กและขดลวดเพิ่มสูงขึ้น อุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นนี้จะเป็นอันตรายต่อฉนวนของขดลวดหากสูงเกินกว่าที่ฉนวนจะทนได้ ซึ่งอุณหภูมิที่ฉนวนแต่ละชนิดสามารถทนได้แสดงดังตารางที่ 4.8 โดยวิธีการวัดค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นสูงสุดขณะใช้งานที่พิกัดจะกระทำโดยการวัดค่าความแตกต่างของความต้านทานในขดลวดจากอุณหภูมิปกติและอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นสูงสุด แล้วนำมาคำนวณหาค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ซึ่งวิธีการวัดค่าความต้านทานตามมาตรฐาน ISO 5826 [27] สามารถทำได้โดยเริ่มต้นด้วยการวัดค่าความต้านทานภายในขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าและอุณหภูมิแวดล้อมขณะเริ่มทดสอบ จากนั้นให้หม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายภาระที่พิกัดแล้วใช้เทอร์โมมิเตอร์วัดความเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิขดลวดทั้งสอง สังเกตการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงต่ำกว่า $2^{\circ}\text{C}/\text{h}$ ให้ปลดภาระออก (โดยทั่วไปจะใช้เวลาประมาณ 4 ชั่วโมง) แล้ววัดค่าความต้านทานภายในขดลวดที่สูงขึ้น นำค่าความต้านทานที่วัดได้ขณะเริ่มทำการทดสอบและหลังการปลดภาระออกรวมถึงอุณหภูมิแวดล้อม แทนลงในสมการที่ 4.2 จะได้ค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในขดลวด

$$t_2 - t_a = \frac{R_2 - R_1}{R_1} (235 + t_1) + (t_1 - t_a) \quad 4.2$$

เมื่อ t_2 เป็น อุณหภูมิในขดลวดหลังปลดภาระออก, $^{\circ}\text{C}$

t_1 เป็น อุณหภูมิในขดลวดที่ได้จากการวัดค่าความต้านทานเมื่อเริ่มทดสอบ, $^{\circ}\text{C}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

t_a เป็น อุณหภูมิแวดล้อมหลังปลดภาระออก, °C

R_1 เป็น ค่าความต้านทานที่วัดได้เมื่อเริ่มทดสอบ, Ω

R_2 เป็น ค่าความต้านทานที่วัดได้หลังปลดภาระออก, Ω

ตารางที่ 4.8 ความสามารถในการทนอุณหภูมิเพิ่มขึ้นของฉนวนแต่ละชนิด [27]

Type of cooling	Part	Method of determination	Limits of temperature rise, °C for classes of insulation				
			A	E	B	F	H
Air	Windings	Resistance	60	75	85	105	130
		Internal indicators	60	75	85	110	135
		Probe	55	70	80	100	120
	Magnetic circuit	Thermometer	50	65	75	95	120
		Internal indicators	60	75	85	110	135
Water	Windings	Resistance	70	85	95	115	140
		Internal indicators	70	85	95	120	145
		Probe	65	80	90	110	130
	Magnetic circuit	Thermometer	60	75	85	105	130
		Internal indicators	70	85	95	120	145

ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นสูงสุดขณะใช้งานที่พิกัด

	อุณหภูมิเริ่ม ทดสอบ, °C	อุณหภูมิหลัง ทดสอบ, °C	อุณหภูมิเพิ่มสูงสุดขณะใช้งานที่พิกัด		
			Primary	Secondary	Core
50 VA แบบ 2 ตัวแปร	26.5	26.4	55.4	49.6	37.1
50 VA แบบ 3 ตัวแปร	27.8	26.8	48.1	45.8	35.4
50 VA แบบ 4 ตัวแปร	27.1	28	55.3	51.6	36.5
50 VA แบบ 5 ตัวแปร	27.5	27.3	46.9	42.7	33.8
25 VA แบบ 3 ตัวแปร	28.4	28.7	37.5	36.2	24.9
25 VA แบบ 5 ตัวแปร	25.9	26.4	33.2	33.2	21.6

ผลการทดสอบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นสูงสุดเพิ่มขณะใช้งานที่พิกัดแสดงดังตารางที่ 4.9 ซึ่งจากเอกสารผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของฉนวนแบบหม้อแปลงไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบราคาไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมนั้นมีค่าไม่เกินกว่าที่มาตรฐานกำหนด ทำให้มั่นใจได้ว่าสามารถใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าตามพิกัดที่ได้ออกแบบไว้ได้โดยหม้อแปลงไฟฟ้าจะไม่เกิดความเสียหาย

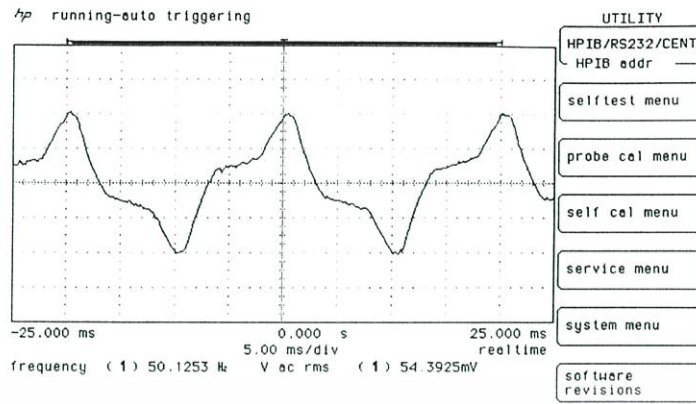
4.4.6 การทดสอบความผิดเพี้ยนของสัญญาณไฟฟ้า

เนื่องจากแกนเหล็กซึ่งทำหน้าที่เชื่อมต่อวงจรระหว่างขดลวดทางด้านปฐมภูมิและขดลวดทางด้านทุติยภูมิมีคุณลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น (non-linear) จึงทำให้สัญญาณของกระแสกระตุ้นซึ่งเกิดจากการจ่ายแรงดันไฟฟ้าสัญญาณรูปไซน์เข้าที่ขดลวดปฐมภูมิมิลักษณะไม่เป็นไซน์ ลักษณะสัญญาณของกระแสกระตุ้นนี้จะขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของวงฮิสเตอร์ซิสซึ่งเป็นไปตามคุณลักษณะของแกนเหล็กและค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่ใช้ และในส่วนของปริมาณกระแสกระตุ้นจะขึ้นอยู่กับน้ำหนักของแกนเหล็กที่ใช้ใช้งานด้วย

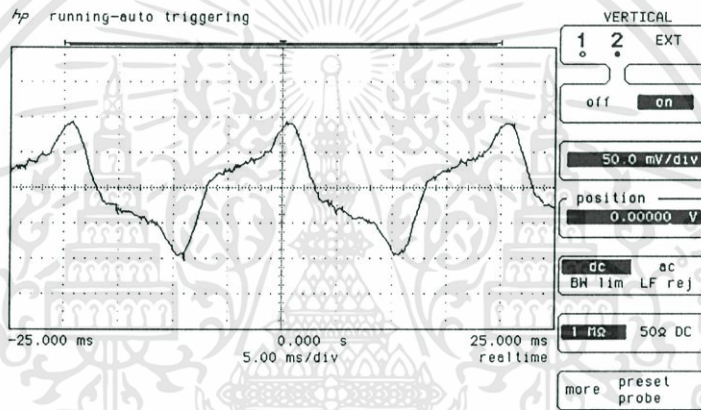
จากผลการทดสอบต้นแบบหม้อแปลงไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบด้วยแกนเหล็กชนิด RM-800 ในตารางที่ 4.10 และรูปที่ 4.17 ถึง 4.22 ซึ่งเป็นสัญญาณของกระแสกระตุ้น จะเห็นได้ว่าต้นแบบหม้อแปลงไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบโดยใช้ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่สูงกว่าจะมีความผิดเพี้ยนของสัญญาณและปริมาณกระแสกระตุ้นที่สูงกว่าเช่น เมื่อเปรียบเทียบหม้อแปลงไฟฟ้า 50 VA แบบ 2 ตัวแปร ซึ่งใช้ค่า $B_{\max} = 1.4$ T แกนเหล็กหนัก 0.72 kg. และแบบ 3 ตัวแปร ซึ่งใช้ค่า $B_{\max} = 1.04$ T แกนเหล็กหนัก 0.97 kg ปริมาณกระแสกระตุ้นของแบบ 3 ตัวแปรจะใช้น้อยกว่า ซึ่งแบบ 4 ตัวแปรและ 5 ตัวแปรก็จะเป็นในทำนองเดียวกัน

ตารางที่ 4.10 ปริมาณกระแสกระตุ้นและ % THD ของหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบขณะไร้อภาระ

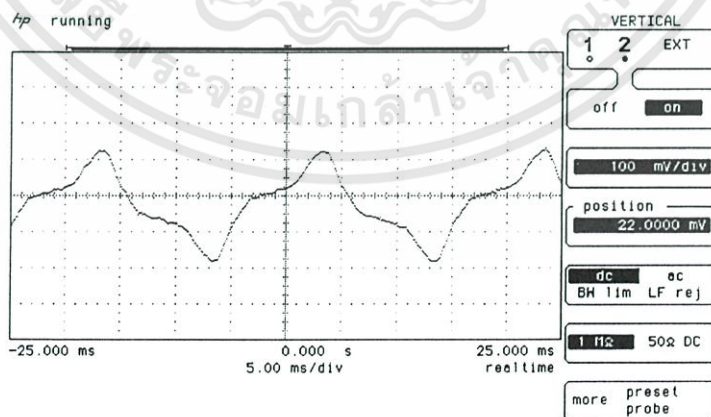
	%THD _i	I (mA)	3 rd		5 th	
			%THD _i	I (mA)	%THD _i	I (mA)
50 VA แบบ 2 ตัวแปร	39.45	54.8	38.40	19.6	8.85	4.5
50 VA แบบ 3 ตัวแปร	36.74	27.6	34.39	8.6	12.74	3.1
50 VA แบบ 4 ตัวแปร	37.05	41.6	35.77	14.0	9.03	3.5
50 VA แบบ 5 ตัวแปร	35.61	28.5	34.07	9.1	10.28	2.7
25 VA แบบ 3 ตัวแปร	28.28	13.8	26.15	3.5	3.50	1.4
25 VA แบบ 5 ตัวแปร	29.79	15.7	27.72	4.2	10.41	1.6



รูปที่ 4.17 สัญญาณกระแสกระตุ้นของหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบขนาด 50 VA แบบ 2 ตัวแปร

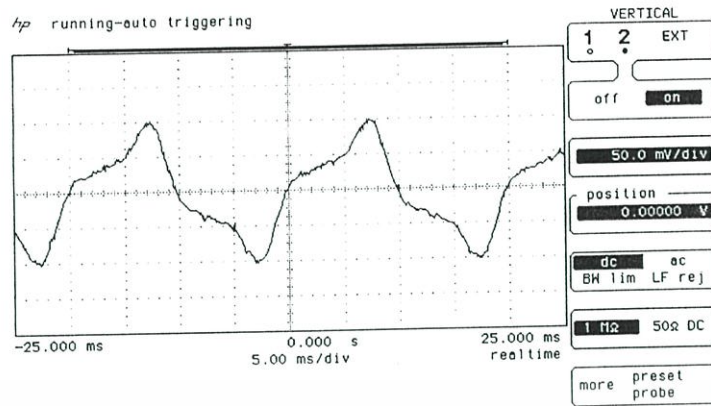


รูปที่ 4.18 สัญญาณกระแสกระตุ้นของหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบขนาด 50 VA แบบ 3 ตัวแปร

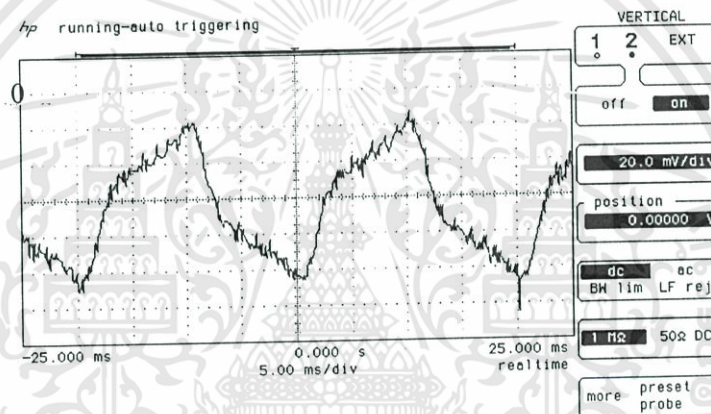


รูปที่ 4.19 สัญญาณกระแสกระตุ้นของหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบขนาด 50 VA แบบ 4 ตัวแปร

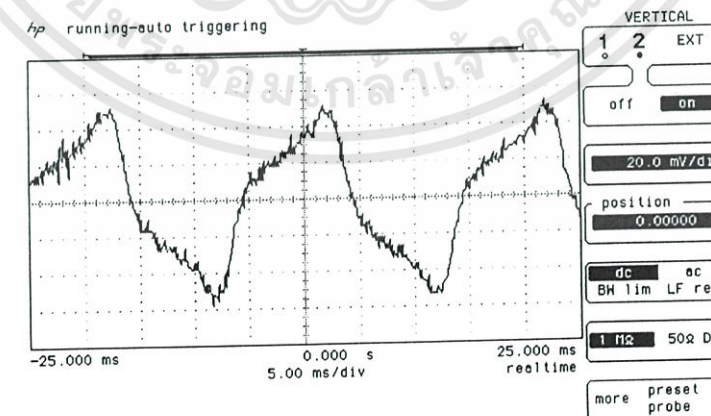
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 สัญญาณกระแสกระตุ้นของหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบขนาด 50 VA แบบ 5 ตัวแปร



รูปที่ 4.21 สัญญาณกระแสกระตุ้นของหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบขนาด 25 VA แบบ 3 ตัวแปร



รูปที่ 4.22 สัญญาณกระแสกระตุ้นของหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบขนาด 25 VA แบบ 5 ตัวแปร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 บทสรุป

จากผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กที่เหมาะสมขนาด 50 VA และ 25 VA, 220/110 V, 50 Hz, $J \approx 4 \text{ A/mm}^2$ โดยมีเป้าหมายให้ค่าความสูญเสียรวมต่ำโดยใช้เงินตักอัตรารีดริ่มเมื่อได้นำมาสร้างต้นแบบเพื่อทดสอบคุณลักษณะต่าง ๆ ได้แก่ การทดสอบแบบเปิดวงจรและลัดวงจร เพื่อหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็กและขดลวด การทดสอบโวลท์เตจเรกกูเลชัน การทดสอบเมื่อเปลี่ยนแปลงภาระทางไฟฟ้า การทดสอบอุณหภูมิขณะใช้งานที่พิกัดและการทดสอบความผิดพลาดของสัญญาณไฟฟ้า จากผลการทดสอบแบบเปิดวงจรและลัดวงจรเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากการออกแบบพบว่าค่าความสูญเสียที่ได้จากการทดสอบมีค่าใกล้เคียงกันกับที่ได้ออกแบบไว้โดยมีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย ซึ่งอาจมีสาเหตุจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในของแกนเหล็กที่เกิดจากการตัด, ขนาดของกระสวยพันขดลวด, ลักษณะการเรียงตัวและความตึงในการพันขดลวด, ความสูญเสียค่าน้อย ๆ ที่เกิดขึ้นในแกนเหล็กและในขดลวดขณะทดสอบแบบเปิดและลัดวงจรตามลำดับรวมทั้งความผิดพลาดที่เกิดจากการวัดในขณะที่ทำการทดสอบ

ผลการทดสอบโวลท์เตจเรกกูเลชันมีค่าอยู่ในช่วงที่ใช้งานทั่วไป ซึ่งจากการทดสอบจะเห็นได้ว่าการทดสอบสองลักษณะคือการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิให้คงที่โดยการจ่ายภาระที่พิกัดที่ตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 0.8 ล้าหลัง และการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าด้านทุติยภูมิให้คงที่โดยการจ่ายภาระที่พิกัดที่ตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 0.8 ล้าหลัง ผลที่ได้เห็นได้ว่ามีค่าอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ เหตุผลที่ต้องทำการทดสอบในสองลักษณะคือในการใช้งานจริงระดับแรงดันไฟฟ้าที่ใช้อยู่ในชีวิตประจำวันที่จ่ายให้กับขดลวดด้านปฐมภูมิจะมีค่าคงที่ แต่ในการคำนวณจากวงจรสมมูลย์เมื่อมีการกำหนดขนาดของภาระที่นำมาต่อและการใช้แรงดันไฟฟ้าด้านทุติยภูมิอ้างอิงในการคำนวณจึงทำให้ต้องมีการทดสอบดังกล่าว

ผลการทดสอบประสิทธิภาพเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของภาระของต้นแบบขนาด 50 VA เห็นได้ว่าที่พิกัดกำลังไฟฟ้าด้านออกหม้อแปลง ต้นแบบที่ได้จากการออกแบบกรณี 5 ตัวแปรจะมีประสิทธิภาพสูงที่สุดตามด้วยแบบ 3, 4 และ 2 เมื่อลดการจ่ายภาระลงหม้อแปลงไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบกรณี 3 ตัวแปรจะมีประสิทธิภาพสูงกว่าต้นแบบอื่น เนื่องจากหม้อแปลงไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบกรณี 3 ตัวแปรมีค่าความสูญเสียในแกนเหล็กน้อยที่สุด เมื่อลดการจ่ายภาระลงทำให้ค่าความสูญเสียในขดลวดลดลงเข้าใกล้ค่าความสูญเสียในแกนเหล็กซึ่งเป็นตำแหน่งที่ทำให้จ่ายกำลังไฟฟ้าได้ประสิทธิภาพสูงสุด

ในส่วนของการทดสอบอุณหภูมิที่ขึ้นสูงสุดเพิ่มขณะใช้งานที่พิกัดจากการทดสอบจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของต้นแบบหม้อแปลงไฟฟ้ามีค่าไม่เกินกว่าที่มาตรฐานกำหนดทำให้มั่นใจได้ว่าสามารถใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าตามพิกัดที่ได้ออกแบบไว้ได้โดยไม่ทำให้ฉนวนของขดลวดและหม้อแปลงไฟฟ้าจะไม่เกิดความเสียหาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบสัญญาณไฟฟ้าและปริมาณกระแสกระตุ้น เห็นได้ว่าต้นแบบหม้อแปลงไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบโดยใช้ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่สูงกว่าจะมีความผิดเพี้ยนของสัญญาณและปริมาณกระแสกระตุ้นที่สูงกว่าแต่เนื่องจากปริมาณของกระแสกระตุ้นมีค่าน้อยกว่ากระแสที่พิกัดมาก จึงทำให้ความผิดเพี้ยนของสัญญาณไฟฟ้าที่เกิดจากความไม่เป็นเชิงเส้นของแกนเหล็กมีผลต่อสัญญาณไฟฟ้ารวมน้อยมาก

จากผลการออกแบบและทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบโดยการหาค่าที่เหมาะสมแบบต่าง ๆ ที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่าการออกแบบกรณี 5 ตัวแปรจะให้ผลลัพธ์ที่ทำให้หม้อแปลงไฟฟ้ามีคุณลักษณะตามเป้าหมายดีที่สุด แต่หากพิจารณาโครงสร้างที่ได้จะพบว่ามีความสูญเสียวัสดุที่เกิดจากการที่ช่องพันขดลวดไม่เป็นสัดส่วนกันกับขากลางของแกนเหล็ก ซึ่งการออกแบบกรณี 3 ตัวแปรความเหมาะสมของโครงสร้างที่ได้จะมีผลทำให้คุณลักษณะของหม้อแปลงไฟฟ้ามีค่าต่ำกว่าเล็กน้อยแต่จะไม่มี ความสูญเสียของวัสดุเกิดขึ้น ดังนั้นเมื่อผู้ออกแบบต้องการที่จะมุ่งเน้นถึงคุณลักษณะของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ต้องการผู้ออกแบบควรเลือกออกแบบโดยใช้แบบ 5 ตัวแปรหรือหากยอมรับให้คุณลักษณะของหม้อแปลงไฟฟ้ามีค่าต่ำลงเล็กน้อยแต่จะไม่มี ความสูญเสียของวัสดุก็ควรเลือกออกแบบโดยใช้แบบ 3 ตัวแปร ส่วนในกรณี 2 และ 4 ตัวแปรนั้นหากผู้ออกแบบสามารถกำหนดค่า B_{max} ที่เหมาะสมได้ดังเช่นที่โปรแกรมหาได้ก็สามารถที่จะนำไปใช้ ออกแบบได้เช่นกันแต่คงเป็นไปได้ยากที่ผู้ออกแบบจะสามารถกำหนดได้

บทที่ 5

วิเคราะห์การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็ก

5.1 บทนำ

ในการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสม ค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดไว้ในการออกแบบเช่น วัสดุที่นำมาใช้ทำแกนเหล็ก ค่าความหนาแน่นกระแสของลวดตัวนำ จะมีผลต่อคุณลักษณะและโครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้า เนื้อหาที่จะกล่าวถึงในบทนี้เป็นการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กที่เหมาะสม โดยใช้จินตคณิตออลกอริทึมตามเป้าหมายต่าง ๆ ซึ่งมีการกำหนดชนิดของแกนเหล็ก และค่าความหนาแน่นกระแสของลวดตัวนำที่ใช้แตกต่างกัน โดยจะใช้โครงสร้างของแกนเหล็ก และค่า B_{max} แบบ 3 และ 5 ตัวแปรเพื่อวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้น โดยในกรณีแบบ 3 ตัวแปรจะกำหนดให้กว้าง (a) และความสูง (b) ของช่องพันขดลวดเป็นอัตราส่วนกับขนาดขากลางของแกนเหล็ก (E) เป็น 2:1 และ 2:3 ตามลำดับ เป้าหมายในการออกแบบที่จะนำมาวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบผลได้แก่ เป้าหมายค่าความสูญเสียรวมต่ำ (minimum loss, Min L) เป้าหมายราคาวัสดุรวมต่ำ (minimum cost, Min C) เป้าหมายน้ำหนักรวมต่ำ (minimum weight, Min W) และนำเสนอแนวทางการออกแบบที่มีลักษณะเป็นเป้าหมายหลักและเป้าหมายรองได้แก่ การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีค่าความสูญเสียรวมต่ำโดยมีราคาวัสดุรวมไม่เกินกว่าที่กำหนด ภายหลังจากการวิเคราะห์การออกแบบโดยเลือกใช้ตัวแปรโครงสร้างของแกนเหล็กและความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กแบบ 3 และ 5 ตัวแปรแล้ว ยังได้มีการนำเสนอแนวทางการออกแบบโดยเลือกใช้ความหนาของจำนวนแผ่นลามิเนต (D) ที่ใช้ประกอบเป็นแกนเหล็กร่วมกับค่า B_{max} เป็นตัวแปรในการออกแบบ และนำผลที่ได้จากการออกแบบมาสร้างต้นแบบและทำการทดสอบด้วย

5.2 สมการเป้าหมายและเงื่อนไขในการออกแบบ

เป้าหมายที่ใช้ในการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อวิเคราะห์ผลการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างแกนเหล็ก E-I และค่า B_{max} ได้แก่ ค่าความสูญเสียรวมต่ำ (พิจารณาค่าความสูญเสียในแกนเหล็กและขดลวดขณะจ่ายภาระที่พิกัด) ราคาวัสดุรวมต่ำ (พิจารณาราคาของแกนเหล็กและลวดตัวนำ) น้ำหนักรวมต่ำ (พิจารณาน้ำหนักของแกนเหล็กและลวดตัวนำ) ซึ่งสมการเป้าหมายเหล่านี้จะใช้โครงสร้างของแกนเหล็กและค่า B_{max} แบบ 3 ตัวแปรและ 5 ตัวแปรในการออกแบบ โดยในกรณีราคาวัสดุรวมต่ำการวิเคราะห์จะไม่นำต้นทุนที่สูญเสียเนื่องจากการตัดแกนเหล็กที่ไม่เป็นสัค

ส่วนกันของแกน E และ I มาร่วมพิจารณาและราคาของลวดตัวนำจะกำหนดตามราคาที่ใช้จริงในอุตสาหกรรม ดังนั้นสมการของเป้าหมายต่าง ๆ สามารถกำหนดได้ดังนี้

กรณีค่าความสูญเสียรวมต่ำแบบ 3 ตัวแปร

$$\text{Minimize} \quad F(D, E, B_{\max}) = P_{core}(D, E, B_{\max}) + P_{cu}(D, E, B_{\max}) \quad (5.1)$$

กรณีค่าความสูญเสียรวมต่ำแบบ 5 ตัวแปร

$$\text{Minimize} \quad F(D, E, a, b, B_{\max}) = P_{core}(D, E, a, b, B_{\max}) + P_{cu}(D, E, a, b, B_{\max}) \quad (5.2)$$

เมื่อ P_{core} เป็นค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก (W), P_{cu} เป็นค่าความสูญเสียในขดลวด (W)

กรณีราคาวัสดุรวมต่ำแบบ 3 ตัวแปร

$$\text{Minimize} \quad F(D, E, B_{\max}) = C_{core}(D, E, B_{\max}) + C_{cu}(D, E, B_{\max}) \quad (5.3)$$

สมการเป้าหมายกรณีราคารวมต่ำแบบ 5 ตัวแปร

$$\text{Minimize} \quad F(D, E, a, b, B_{\max}) = C_{core}(D, E, a, b, B_{\max}) + C_{cu}(D, E, a, b, B_{\max}) \quad (5.4)$$

เมื่อ C_{core} เป็นราคาของแกนเหล็ก, บาท

C_{cu} เป็นราคาของขดลวด, บาท

สมการเป้าหมายกรณีน้ำหนักรวมต่ำแบบ 3 ตัวแปร

$$\text{Minimize} \quad F(D, E, B_{\max}) = W_{core}(D, E, B_{\max}) + W_{cu}(D, E, B_{\max}) \quad (5.5)$$

สมการเป้าหมายกรณีน้ำหนักรวมต่ำแบบ 5 ตัวแปร

$$\text{Minimize} \quad F(D, E, a, b, B_{\max}) = W_{core}(D, E, a, b, B_{\max}) + W_{cu}(D, E, a, b, B_{\max}) \quad (5.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ W_{core} เป็นราคาของแกนเหล็ก, kg.
 W_{cu} เป็นราคาของขดลวด, kg.

ส่วนของสมการเงื่อนไขจะกำหนดให้ช่องพันขดลวดมีพื้นที่เพียงพอกับที่ขดลวดต้องการ

$$\text{กรณี 3 ตัวแปร } g_1 = (D, E, B_{\max}) = 0.933dT_L(D, E, B_{\max}) \leq b_w(D, E) \quad (5.7)$$

$$\text{กรณี 5 ตัวแปร } g_1 = (D, E, a, b, B_{\max}) = 0.933dT_L(D, E, a, b, B_{\max}) \leq b_w(D, Ea, b) \quad (5.8)$$

เมื่อ d เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางรวมฉนวนของตัวนำ, mm.
 T_L เป็นจำนวนรอบของขดลวดที่พันได้ในแต่ละชั้น, รอบ
 b_w เป็นความกว้างของกระสวยพันขดลวด, mm.

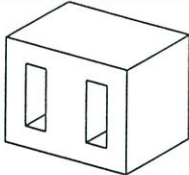
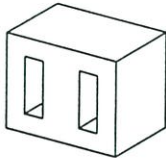
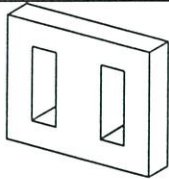

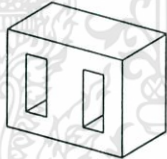
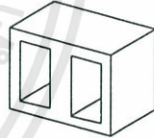
5.3 ผลการออกแบบและการวิเคราะห์

หม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กที่ใช้วิเคราะห์ผลการออกแบบด้วยเป้าหมายและเงื่อนไขต่าง ๆ มีขนาด 50VA , 220/110 V, 50 Hz, แกนเหล็กที่ใช้ในการวิเคราะห์มี 3 ชนิดคือ RM-800, RM-KTA และ RG-11 ส่วนของตัวนำใช้ลวดทองแดงกลม ความหนาแน่นกระแสที่ใช้ออกแบบมีค่าอยู่ระหว่าง $2 - 5 \text{ A/mm}^2$ ซึ่งเป็นค่าความหนาแน่นกระแสที่มีการใช้อยู่ในอุตสาหกรรม

5.3.1 เปรียบเทียบผลการออกแบบในแต่ละเป้าหมาย

หม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมจะมีโครงสร้างที่แตกต่างกันออกไปตามเป้าหมายที่กำหนดในการออกแบบเช่น เมื่อออกแบบโดยมีเป้าหมายให้หม้อแปลงไฟฟ้ามีความสูญเสียรวมต่ำ วิธีการหาค่าที่เหมาะสมจะหาขนาด โครงสร้างแกนเหล็กและค่า B_{\max} ที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ค่าความสูญเสียรวมของแกนเหล็กและขดลวดต่ำ ในส่วนเป้าหมายการออกแบบอื่น ๆ ก็เป็นลักษณะเดียวกันก็จะมีโครงสร้างและค่า B_{\max} ที่เหมาะสมแตกต่างกันไปเพื่อให้ได้เป้าหมายตามที่ต้องการ ตารางที่ 5.1 เป็นผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าพิกัด 50 VA, 220/110 V, 50 Hz, $J \approx 4 \text{ A/mm}^2$ โดยใช้แกนเหล็ก RM-800 ที่เป้าหมายต่าง ๆ แบบ 3 และ 5 ตัวแปร (รายละเอียดทั้งหมดของการออกแบบแสดงในภาคผนวก ง) ผลลัพธ์ที่ได้พบว่าโครงสร้างและค่า B_{\max} ในแต่ละเป้าหมายของการออกแบบมีค่าแตกต่างกันเพื่อให้เป้าหมายที่กำหนดมีค่าต่ำสุดตามที่ต้องการ

ตารางที่ 5.1 ผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าพิกัด 50 VA, 220/110 V, 50 Hz, $J \approx 4 \text{ A/mm}^2$ โดยใช้แกนเหล็ก RM-800 ที่เป้าหมายต่าง ๆ แบบ 3 และ 5 ตัวแปร

	Minimum loss	Minimum cost	Minimum weight
โครงสร้าง แกนเหล็ก แบบ 3 ตัวแปร	 $B_{\max} = 1.04 \text{ T}$	 $B_{\max} = 1.60 \text{ T}$	 $B_{\max} = 1.60 \text{ T}$
P_{core} (W)	3.27	5.22	1.82
P_{cu} (W)	5.49	4.26	7.26
P_{total} (W)	8.76	9.48	9.08
C_{core} (บาท)	29.22	20.11	21.90
C_{cu} (บาท)	28.07	21.78	37.15
C_{total} (บาท)	57.29	41.90	59.05
W_{core} (kg.)	0.97	0.67	0.44
W_{cu} (kg.)	0.19	0.15	0.25
W_{total} (kg.)	1.16	0.82	0.69
โครงสร้าง แกนเหล็ก แบบ 5 ตัวแปร	 $B_{\max} = 1.17 \text{ T}$	 $B_{\max} = 1.60 \text{ T}$	 $B_{\max} = 1.60 \text{ T}$
P_{core} (W)	3.32	4.92	1.33
P_{cu} (W)	5.21	4.53	8.97
P_{total} (W)	8.53	9.45	10.30
C_{core} (บาท)	24.00	18.60	15.49
C_{cu} (บาท)	26.94	23.16	45.89
C_{total} (บาท)	50.94	41.76	61.38
W_{core} (kg.)	0.80	0.62	0.31
W_{cu} (kg.)	0.18	0.16	0.31
W_{total} (kg.)	0.98	0.78	0.62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 5.1 เมื่อพิจารณาผลที่ได้จากการออกแบบในกรณี Min L จะเห็นได้ว่าค่า B_{max} ที่ได้จากการหาค่าที่เหมาะสมจะเป็นค่าที่มีความสูญเสียต่อน้ำหนักของแกนเหล็กไม่สูงและโครงสร้างแกนเหล็กที่ได้จะมีขนาดใหญ่ จะมีผลทำให้จำนวนรอบของขดลวดที่ใช้ลดลง อย่างไรก็ตามการที่โครงสร้างแกนเหล็กมีขนาดใหญ่จะทำให้ น้ำหนักของแกนเหล็กและความยาวต่อรอบของขดลวดมีค่าที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความสูญเสียต่อน้ำหนักของแกนเหล็กที่มีค่าไม่สูงและจำนวนรอบที่ลดลงแล้ว การเพิ่มขึ้นของน้ำหนักแกนเหล็กและความยาวต่อรอบของขดลวดจะมีผลต่อค่าความสูญเสียรวมที่น้อยกว่า ดังนั้นค่าความสูญเสียรวมที่เกิดขึ้นจึงมีค่าต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับเป้าหมายอื่นซึ่งมีจำนวนรอบของตัวนำมากกว่าและความสูญเสียต่อน้ำหนักของแกนเหล็กที่สูงกว่าจึงทำให้การออกแบบด้วยโครงสร้างเช่นนี้มีค่าความสูญเสียรวมที่ต่ำกว่า

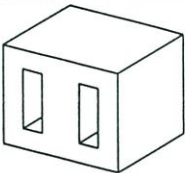
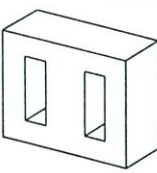
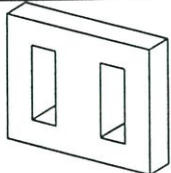
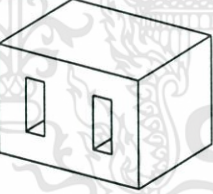

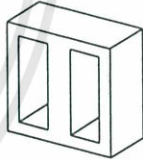
ผลลัพธ์ที่ได้จากการออกแบบเป้าหมาย Min C และ Min W ค่า B_{max} จะมีค่าสูงเพื่อให้โครงสร้างของแกนเหล็กมีขนาดเล็ก โครงสร้างของแกนเหล็กนี้จะสัมพันธ์กับจำนวนรอบของขดลวด ถ้าพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กมีขนาดใหญ่ก็จะมีจำนวนรอบของขดลวดน้อย ซึ่งเป้าหมาย Min C จะมีพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กใหญ่กว่าเป้าหมาย Min W เพื่อที่จะใช้จำนวนรอบที่น้อยกว่าเป็นการลดราคาของขดลวดซึ่งมีราคาต่อน้ำหนักสูงกว่าแกนเหล็ก

การเปรียบเทียบระหว่างการออกแบบโดยใช้ตัวแปรในการออกแบบ 3 และ 5 ตัวแปรพบว่าแบบ 5 ตัวแปรให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าเนื่องจากโครงสร้างของแกนเหล็กสามารถที่จะปรับให้มีขนาดที่เหมาะสมกับพื้นที่ที่ขดลวดตัวนำต้องการได้มากกว่า เมื่อพิจารณาโครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ออกแบบตามเป้าหมายต่าง ๆ จะเห็นได้ว่าโครงสร้างของแกนเหล็กและขดลวดจะแตกต่างกันออกไปตามความเหมาะสมของแต่ละเป้าหมายและเงื่อนไขที่กำหนด ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับ การออกแบบด้วยวิธีทั่วไปนั้นจะทำให้โอกาสที่จะได้โครงสร้างที่เหมาะสมตามแต่ละเป้าหมายจะมีมากขึ้น

5.3.2 การเปลี่ยนแปลงชนิดวัสดุของแกนเหล็ก

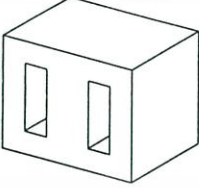
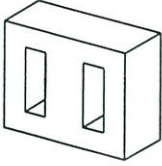
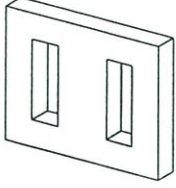
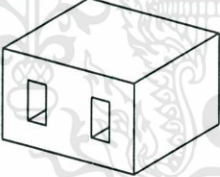
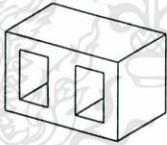
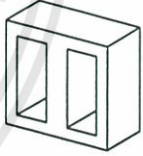
แกนเหล็กซึ่งทำหน้าที่เป็นวงจรแม่เหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าจะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับเนื้อสารและกรรมวิธีที่ใช้ในการผลิต [23] การเลือกใช้ชนิดของแกนเหล็กจะมีผลโดยตรงต่อโครงสร้างแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งในส่วนนี้จะวิเคราะห์ผลการออกแบบที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างและค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบโดยการกำหนดเป้าหมายต่าง ๆ เมื่อใช้ชนิดของสารที่ใช้ทำแกนเหล็กแตกต่างกันได้แก่ แกนเหล็กชนิด RM-800, RM-KTA และ RG-11 ผลการออกแบบที่เป้าหมายต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 5.2 และ 5.3 รายละเอียดทั้งหมดของการออกแบบแสดงในภาคผนวก ง

ตารางที่ 5.2 ผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าพิกัด 50 VA, 220/110 V, 50 Hz, $J \approx 4 \text{ A/mm}^2$ โดยใช้แกนเหล็ก RM-KTA ที่เป้าหมายต่าง ๆ แบบ 3 และ 5 ตัวแปร

	Minimum loss	Minimum cost	Minimum weight
โครงสร้าง แกนเหล็ก แบบ 3 ตัวแปร	 $B_{\max} = 1.30 \text{ T}$	 $B_{\max} = 1.60 \text{ T}$	 $B_{\max} = 1.60 \text{ T}$
P_{core} (W)	2.29	2.52	1.82
P_{cu} (W)	4.26	4.90	7.26
P_{total} (W)	6.55	7.42	9.08
C_{core} (บาท)	47.49	29.21	21.90
C_{cu} (บาท)	21.79	25.06	37.15
C_{total} (บาท)	69.29	54.27	59.05
W_{core} (kg.)	0.95	0.58	0.44
W_{cu} (kg.)	0.15	0.17	0.25
W_{total} (kg.)	1.10	0.75	0.69
โครงสร้าง แกนเหล็ก แบบ 5 ตัวแปร	 $B_{\max} = 1.02 \text{ T}$	 $B_{\max} = 1.60 \text{ T}$	 $B_{\max} = 1.60 \text{ T}$
P_{core} (W)	2.21	2.23	1.33
P_{cu} (W)	4.16	5.11	8.97
P_{total} (W)	6.37	7.34	10.30
C_{core} (บาท)	74.84	27.12	15.49
C_{cu} (บาท)	21.29	26.15	45.89
C_{total} (บาท)	96.13	53.27	61.38
W_{core} (kg.)	1.50	0.54	0.31
W_{cu} (kg.)	0.14	0.18	0.31
W_{total} (kg.)	1.64	0.72	0.62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.3 ผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าพิกัด 50 VA, 220/110 V, 50 Hz, $J \approx 4 \text{ A/mm}^2$ โดยใช้แกนเหล็ก RG-11 ที่เป้าหมายต่าง ๆ แบบ 3 ตัวแปร

	Minimum loss	Minimum cost	Minimum weight
โครงสร้าง แกนเหล็ก แบบ 3 ตัวแปร	 $B_{\max} = 1.60 \text{ T}$	 $B_{\max} = 1.60 \text{ T}$	 $B_{\max} = 1.60 \text{ T}$
P_{core} (W)	1.30	0.60	0.41
P_{cu} (W)	3.02	4.94	8.55
P_{total} (W)	4.32	5.54	8.96
C_{core} (บาท)	86.48	40.07	27.57
C_{cu} (บาท)	15.42	25.26	43.71
C_{total} (บาท)	101.90	65.34	71.28
W_{core} (kg.)	1.24	0.57	0.34
W_{cu} (kg.)	0.10	0.17	0.30
W_{total} (kg.)	1.34	0.74	0.64
โครงสร้าง แกนเหล็ก แบบ 5 ตัวแปร	 $B_{\max} = 1.52 \text{ T}$	 $B_{\max} = 1.60 \text{ T}$	 $B_{\max} = 1.60 \text{ T}$
P_{core} (W)	1.39	0.47	0.31
P_{cu} (W)	2.76	6.01	8.94
P_{total} (W)	4.15	6.48	9.25
C_{core} (บาท)	95.33	31.79	20.73
C_{cu} (บาท)	14.09	30.73	45.76
C_{total} (บาท)	109.42	62.52	66.49
W_{core} (kg.)	1.36	0.45	0.30
W_{cu} (kg.)	0.10	0.21	0.31
W_{total} (kg.)	1.46	0.66	0.61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากเส้นกราฟคุณลักษณะของแกนเหล็กทั้ง 3 ชนิด (ภาคผนวก ก) จะเห็นได้ว่าแกนเหล็กชนิด RG-11, RM-KTA และ RM-800 มีความสูญเสียต่อน้ำหนักที่ค่า B_{max} เดียวกันแตกต่างกันโดยเรียงลำดับจากน้อยไปมาก และมีความหนาแน่นของสารที่แตกต่างกันด้วยคือแกนเหล็กชนิด RG-11 มีความหนาแน่นของสารเท่ากับ 7.65 g/cm^3 แกนเหล็กชนิด RM-800 และ RM-KTA มีความหนาแน่นเท่ากันคือ 7.8 g/cm^3 เมื่อพิจารณาคคุณลักษณะต่าง ๆ และโครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าดังกล่าวผลการออกแบบที่แสดงในตารางที่ 5.1 ถึง 5.6 จะเห็นได้ว่าในการออกแบบโดยใช้แกนเหล็กแต่ละชนิดจะมีโครงสร้างและค่า B_{max} ที่เหมาะสมแตกต่างกัน โครงสร้างที่เหมาะสมนี้จะทำให้เป้าหมายเป็นไปตามที่กำหนดเฉพาะตามคุณลักษณะของแกนเหล็กชนิดที่ใช้ในการออกแบบเท่านั้น เช่น เมื่อนำแกนเหล็กชนิด RG-11 และ RM-KTA ซึ่งมีความสูญเสียต่อน้ำหนักที่ค่า B_{max} เดียวกันต่ำกว่าแกนเหล็กชนิด RM-800 มาสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าโดยใช้ขนาดโครงสร้างเดิมที่ได้จากการออกแบบเป้าหมายค่าความสูญเสียรวมต่ำโดยใช้แกนเหล็ก RM-800 ความสูญเสียรวมที่เกิดขึ้นของหม้อแปลงไฟฟ้าตัวใหม่ที่ได้จากการเปลี่ยนชนิดของแกนเหล็กจะมีค่าลดลงกว่าเดิมเนื่องจากค่าความสูญเสียต่อน้ำหนักของแกนเหล็กที่นำมาแทนมีค่าที่ต่ำกว่า แต่ความสูญเสียรวมที่ลดลงนี้จะสูงกว่าการออกแบบโดยใช้แกนเหล็กชนิด RG-11 และ RM-KTA ที่มีเป้าหมายให้ค่าความสูญเสียรวมต่ำดังที่แสดงดังตารางที่ 5.4 โดยโครงสร้างที่เหมาะสมสำหรับกรณีของเป้าหมายราคารวมต่ำและเป้าหมายน้ำหนักรวมต่ำจะพิจารณาในในทำนองเดียวกัน โดยกรณีนี้จะพิจารณาในส่วนของค่าความหนาแน่นของแกนเหล็กที่มีผลต่อน้ำหนักและราคาต่อน้ำหนักของวัสดุที่นำมาแทนซึ่งจะเห็นได้ว่าแกนเหล็กแต่ละชนิดมีค่าแตกต่างกัน ดังนั้นผลที่ได้ก็จะเป็นเช่นเดียวกับกรณีเป้าหมายค่าความสูญเสียต่ำ

จากตารางที่ 5.4 เห็นได้ว่าเมื่อนำแกนเหล็กชนิด RM-KTA และ RG-11 ซึ่งมีค่าความสูญเสียต่อน้ำหนักที่ค่า B_{max} เดียวกันกับแกนเหล็กชนิด RM-800 ต่ำกว่ามาสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าโดยใช้ขนาดโครงสร้างเดิมที่ได้จากการออกแบบกรณีเป้าหมายค่าความสูญเสียรวมต่ำโดยใช้แกนเหล็ก RM-800 ค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนเหล็กจะลดลงแต่ค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นในขดลวดจะยังคงมีค่าเท่าเดิมเพราะ โครงสร้างของแกนเหล็กมีขนาดเท่าเดิม ซึ่งผลที่ได้นี้จะแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมนั้นจะเหมาะสมสำหรับแกนเหล็กชนิดที่ใช้เป็นพารามิเตอร์ในการออกแบบเท่านั้น เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงชนิดของแกนที่ใช้ในการออกแบบโครงสร้างที่เหมาะสมสำหรับแกนเหล็กก็จะเปลี่ยนแปลงไป

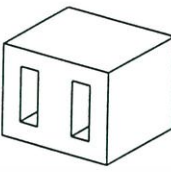
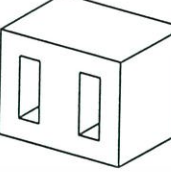
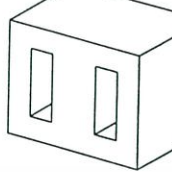
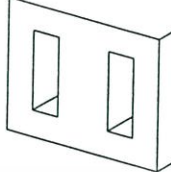



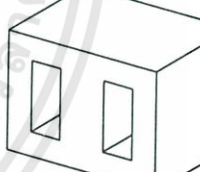
ตารางที่ 5.4 เปรียบเทียบความสูญเสียที่เกิดขึ้นเมื่อแทนแกนเหล็กชนิด RG-11 และ RM-KTA โดยใช้ขนาดโครงสร้างเดิมที่ได้จากการออกแบบของแกนเหล็กชนิด RM-800

	โครงสร้าง RM-800			RM-KTA	RG-11
	RM-800	RM-KTA	RG-11	Optimum	Optimum
W/kg	3.456	1.603	0.504	2.411	1.054
W_{core} (kg)	0.997	0.997	0.978	0.95	1.235
W_{cu} (kg)	0.182	0.182	0.182	0.148	0.104
W_{total} (kg)	1.179	1.179	1.16	1.098	1.339
C_{core} (บาท)	29.91	49.84	68.44	47.49	86.48
C_{cu} (บาท)	26.89	26.89	26.89	21.79	15.42
C_{total} (บาท)	56.8	76.73	95.33	69.28	101.9
P_{core} (W)	3.45	1.6	0.493	2.29	1.3
P_{cu} (W)	5.26	5.26	5.26	4.26	3.02
P_{total} (W)	8.71	6.86	5.753	6.55	4.32

5.3.3 การเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นกระแส

ค่าความหนาแน่นกระแสเป็นพารามิเตอร์หนึ่งในการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าที่เป็นตัวกำหนดขนาดของตัวนำ การเลือกใช้ค่าความหนาแน่นกระแสในการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กล้วนมีค่าอยู่ระหว่าง $2 - 5 \text{ A/mm}^2$ เมื่อค่าความหนาแน่นกระแสที่ลดลงจะทำให้ตัวนำมีขนาดใหญ่ขึ้น ที่ความยาวของขดลวดเท่ากันความต้านทานมีค่าลดลงแต่น้ำหนักเพิ่มขึ้น จากการเปลี่ยนแปลงของค่าความหนาแน่นกระแสที่ใช้นี้จะเห็นได้ว่ามีผลต่อเป้าหมายของการออกแบบตารางที่ 5.5 ถึง 5.10 เป็นผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 50 VA, 220/110 V, 50 Hz, แกนเหล็ก RM-800 ที่ค่าความหนาแน่นกระแสและเป้าหมายของการออกแบบต่าง ๆ (รายละเอียดทั้งหมดของการออกแบบแสดงในภาคผนวก ง)

ตารางที่ 5.5 ผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าพิกัด 50 VA, 220/110 V, 50 Hz, แกนเหล็ก RM-800 โดยใช้ J ต่าง ๆ ที่เป้าหมาย Min L แบบ 3 และ 5 ตัวแปร

	5 A/mm ²	4 A/mm ²	3 A/mm ²	2 A/mm ²
โครงสร้างแกนเหล็กแบบ 3 ตัวแปร	 $B_{\max} = 1.24$ T	 $B_{\max} = 1.04$ T	 $B_{\max} = 0.92$ T	 $B_{\max} = 0.71$ T
P_{core} (W)	3.82	3.27	3.30	3.10
P_{cu} (W)	5.89	5.49	4.32	3.29
P_{total} (W)	9.71	8.76	7.62	6.39
C_{core} (บาท)	24.44	29.22	36.35	52.90
C_{cu} (บาท)	20.34	28.07	39.01	68.37
C_{total} (บาท)	44.78	57.29	75.36	121.27
W_{core} (kg.)	0.82	0.97	1.21	1.76
W_{cu} (kg.)	0.13	0.19	0.27	0.48
W_{total} (kg.)	0.95	1.16	1.48	2.24
โครงสร้างแกนเหล็กแบบ 5 ตัวแปร	 $B_{\max} = 1.00$ T	 $B_{\max} = 1.17$ T	 $B_{\max} = 0.89$ T	 $B_{\max} = 0.70$ T
P_{core} (W)	3.62	3.32	3.20	2.80
P_{cu} (W)	6.01	5.21	4.40	3.56
P_{total} (W)	9.63	8.53	7.60	6.36
C_{core} (บาท)	34.70	24.00	37.68	48.20
C_{cu} (บาท)	20.77	26.94	39.72	74.03
C_{total} (บาท)	55.46	50.94	77.40	122.22
W_{core} (kg.)	1.16	0.80	1.26	1.61
W_{cu} (kg.)	0.14	0.18	0.27	0.52
W_{total} (kg.)	1.30	0.98	1.53	2.13

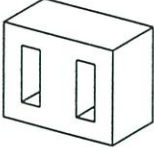
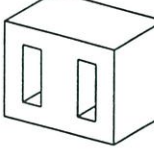
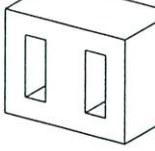
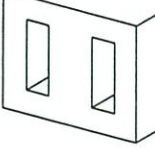



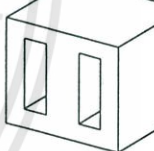
จากตารางที่ 5.5 จะเห็นได้ว่าเมื่อค่าความหนาแน่นกระแสมีค่าลดลงตัวนำจะมีขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้ความต้านทานไฟฟ้าในขดลวดลดลง ส่งผลให้ความสูญเสียในขดลวดลดลง แต่ต้องการพื้นที่ในการพันขดลวดเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเป็นสัดส่วนกันของช่องพันขดลวดกับขากลางของแกนเหล็กทำให้โครงสร้างแกนเหล็กต้องมีขนาดใหญ่ขึ้นทั้งพื้นที่หน้าตัดวงจรแม่เหล็กและพื้นที่พันขดลวด (จากสมการแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อโครงสร้างแกนเหล็กเพิ่มขึ้นจำนวนรอบจะลดลง เพื่อให้แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำคงที่) ความสูญเสียในแกนเหล็กจะมีค่าเพิ่มขึ้น เพื่อทำให้ความสูญเสียในแกนเหล็กไม่เพิ่มสูงมาก จึงลดค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่ใช้ลง ซึ่งการเพิ่มขึ้นของขนาดแกนเหล็กรวมถึงการลดลงของจำนวนรอบขดลวดและค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กจะได้จากการใช้เทคนิคอัลกอริทึมเป็นตัวประมวลผลเพื่อหาค่าที่เหมาะสมในการเพิ่มขึ้นและลดลง

เมื่อพิจารณากรณีแบบ 5 ตัวแปร จะเห็นได้ว่าโครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ได้มีความแตกต่างจากการออกแบบโดยการใช้ 3 ตัวแปร จากการศึกษาความหนาแน่นกระแสมีค่าลดลงตัวนำจะมีขนาดใหญ่ขึ้นต้องการพื้นที่ในการพันขดลวดเพิ่มขึ้น แบบ 5 ตัวแปรจะเพิ่มพื้นที่หน้าตัดวงจรแม่เหล็กและปรับพื้นที่พันขดลวดให้เหมาะสม โดยพื้นที่หน้าตัดวงจรแม่เหล็กจะมีขนาดไม่เปลี่ยนแปลงมากนักแต่จะลดค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กลงซึ่งต่างกับแบบ 3 ตัวแปร

จากตารางที่ 5.1 ซึ่งเป็นผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าพิกัด 50 VA, 220/110 V, 50 Hz เป้าหมายต่าง ๆ แบบ 3 ตัวแปรและ 5 ตัวแปร พบว่าในกรณีของ Min C นั้น เนื่องจากการที่ราคาของลวดตัวนำสูงกว่าแกนเหล็กประมาณ 5 เท่า (ราคาที่ใช้ในการออกแบบ) ดังนั้นหม้อแปลงไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบเป้าหมายนี้จะใช้ลวดตัวนำน้อย เมื่อค่าความหนาแน่นกระแสของลวดตัวนำซึ่งเป็นพารามิเตอร์ในการออกแบบลดลง ลวดตัวนำจะมีขนาดใหญ่ขึ้น น้ำหนักต่อความยาวเพิ่มขึ้น ราคาลดลง แต่อัตราการเพิ่มขึ้นของราคาน้อยกว่าน้ำหนักที่เพิ่ม ดังนั้นเมื่อต้องการลดลวดตัวนำที่ใช้จึงลดจำนวนรอบลงโดยเพิ่มขนาดแกนเหล็กขึ้นและเพื่อไม่ให้แกนเหล็กมีขนาดใหญ่การออกแบบกรณี Min C นี้จะใช้ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่สูง

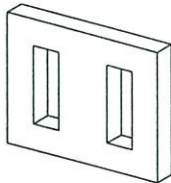
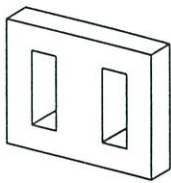
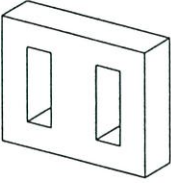
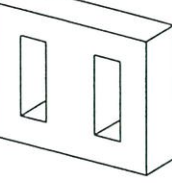


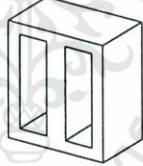
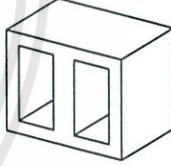
จากตารางที่ 5.6 ผลการออกแบบที่ได้เมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างเดิมที่ได้จากการออกแบบในตารางที่ 5.1 เมื่อลดค่าความหนาแน่นกระแสแสดงลวดตัวนำจะมีขนาดใหญ่ขึ้น โดยโครงสร้างของแกนเหล็กจะมีขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการพื้นที่ในการวางตัวของขดลวด ดังนั้นน้ำหนักของแกนเหล็กและขดลวดจะมีค่าเพิ่มขึ้นรวมทั้งราคาของแกนเหล็กและขดลวดก็จะเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกันถึงแม้ว่าเมื่อตัวนำมีขนาดใหญ่ขึ้นราคาต่อน้ำหนักจะลดลงก็ตาม แต่ผลของน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นมีมากกว่า

ตารางที่ 5.6 ผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าพิกัด 50 VA, 220/110 V, 50 Hz, แกนเหล็ก RM-800 โดยใช้ J ต่างๆ ที่เป้าหมาย Min C แบบ 3 ตัวแปร

	5 A/mm ²	4 A/mm ²	3 A/mm ²	2 A/mm ²
โครงสร้างแกนเหล็ก	 $B_{\max} = 1.60 \text{ T}$	 $B_{\max} = 1.60 \text{ T}$	 $B_{\max} = 1.60 \text{ T}$	 $B_{\max} = 1.60 \text{ T}$
P_{core} (W)	4.25	5.22	6.06	7.44
P_{cu} (W)	5.93	4.26	3.09	1.89
P_{total} (W)	10.18	9.48	9.15	9.33
C_{core} (บาท)	16.11	20.11	22.99	29.10
C_{cu} (บาท)	20.49	21.78	27.89	39.22
C_{total} (บาท)	36.59	41.90	50.89	68.32
W_{core} (kg.)	0.54	0.67	0.77	0.97
W_{cu} (kg.)	0.14	0.15	0.19	0.27
W_{total} (kg.)	0.68	0.82	0.96	1.24
โครงสร้างแกนเหล็ก	 $B_{\max} = 1.60 \text{ T}$	 $B_{\max} = 1.60 \text{ T}$	 $B_{\max} = 1.60 \text{ T}$	 $B_{\max} = 1.60 \text{ T}$
P_{core} (W)	3.82	4.92	6.11	7.13
P_{cu} (W)	6.38	4.53	3.01	1.97
P_{total} (W)	10.20	9.45	9.13	9.10
C_{core} (บาท)	14.43	18.60	23.06	27.10
C_{cu} (บาท)	22.05	23.16	27.19	40.91
C_{total} (บาท)	36.48	41.76	50.25	68.01
W_{core} (kg.)	0.48	0.62	0.77	0.90
W_{cu} (kg.)	0.15	0.16	0.19	0.29
W_{total} (kg.)	0.63	0.78	0.96	1.19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.7 ผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าพิกัด 50 VA, 220/110 V, 50 Hz, โดยใช้แกนเหล็ก RM-800 และ J ต่าง ๆ ที่เป้าหมาย Min W แบบ 3 ตัวแปร

	5 A/mm ²	4 A/mm ²	3 A/mm ²	2 A/mm ²
โครงสร้างแกนเหล็กแบบ 3 ตัวแปร	 $B_{\max} = 1.60 \text{ T}$	 $B_{\max} = 1.60 \text{ T}$	 $B_{\max} = 1.60 \text{ T}$	 $B_{\max} = 1.60 \text{ T}$
P_{core} (W)	2.81	3.58	4.58	6.04
P_{cu} (W)	11.13	6.88	4.37	2.53
P_{total} (W)	13.94	10.47	8.94	8.57
C_{core} (บาท)	10.79	13.81	17.32	22.70
C_{cu} (บาท)	38.45	35.21	39.40	52.59
C_{total} (บาท)	49.24	49.02	56.72	75.29
W_{core} (kg.)	0.36	0.46	0.58	0.76
W_{cu} (kg.)	0.25	0.24	0.27	0.37
W_{total} (kg.)	0.61	0.70	0.85	1.13
โครงสร้างแกนเหล็กแบบ 5 ตัวแปร	 $B_{\max} = 1.60 \text{ T}$	 $B_{\max} = 1.60 \text{ T}$	 $B_{\max} = 1.60 \text{ T}$	 $B_{\max} = 1.60 \text{ T}$
P_{core} (W)	2.46	2.80	2.88	4.20
P_{cu} (W)	9.46	7.68	6.16	3.29
P_{total} (W)	11.92	10.49	9.04	7.48
C_{core} (บาท)	9.67	10.68	11.39	16.02
C_{cu} (บาท)	32.69	39.31	55.56	68.31
C_{total} (บาท)	42.37	49.98	66.94	84.32
W_{core} (kg.)	0.32	0.36	0.38	0.53
W_{cu} (kg.)	0.26	0.27	0.38	0.48
W_{total} (kg.)	0.54	0.63	0.76	1.01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 5.1 ซึ่งเป็นผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็ก 50 VA, 220/110 V, 50 Hz เป้าหมายต่าง ๆ แบบ 3 และ 5 ตัวแปร พบว่าในกรณีของ Min W ใช้แกนเหล็กน้อยกว่าเป้าหมายอื่น ส่วนขดลวดจะใช้มากกว่าเป้าหมายอื่น จากตารางที่ 5.7 ผลการออกแบบที่ได้เมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างเดิมที่ได้จากการออกแบบในตารางที่ 5.1 เมื่อลดค่าความหนาแน่นกระแสแสดง ลวดตัวนำจะมีขนาดใหญ่ขึ้น โครงสร้างของแกนเหล็กมีขนาดใหญ่ขึ้นตามเพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการพื้นที่ในการวางตัวของขดลวด ดังนั้นน้ำหนักของแกนเหล็กและขดลวดจะมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้น้ำหนักรวมของหม้อแปลงไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบในส่วนของารออกแบบ 3 ตัวแปรและ 5 ตัวแปรจะเห็นได้ว่า แบบ 5 ตัวแปรน้ำหนักของแกนเหล็กจะมีค่าใกล้เคียงกับขดลวดซึ่งเป็นเพราะความหนาแน่นของแกนเหล็กและขดลวดมีค่าใกล้เคียงกันรวมทั้งแบบ 5 ตัวแปรแกนเหล็กสามารถปรับให้โครงสร้างมีความเหมาะสมได้ดีกว่าแบบ 3 ตัวแปร

5.4 การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้ากรณีที่มีเป้าหมายรอง

จากผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่า ในการออกแบบแต่ละครั้งที่พิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้าเดียวกันเมื่อพารามิเตอร์และเงื่อนไขการออกแบบเปลี่ยนแปลงไป ผลลัพธ์ที่ได้จะเห็นได้ว่าโครงสร้างของแกนเหล็กและค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่ใช้เป็นตัวแปรในการออกแบบจะมีค่าที่เหมาะสมแตกต่างกัน โดยในการออกแบบจะพิจารณาถึงสิ่งที่เป้าหมายต้องการเท่านั้น โดยไม่สนใจผลอื่นที่เกิดขึ้นเช่นการออกแบบโดยกำหนดให้มีค่าความสูญเสียรวมต่ำ ก็จะไม่สนใจราคาและน้ำหนักที่เกิดขึ้นว่าจะมีค่ามากหรือน้อยเพียงใด ซึ่งผลที่ได้การออกแบบอาจทำให้ได้โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีค่าความสูญเสียต่ำแต่มีราคาและน้ำหนักที่สูง จากเหตุผลดังกล่าวจึงนำเสนอการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีหลายเป้าหมาย ซึ่งในการออกแบบจะกำหนดให้เป็นเป้าหมายหลักและเป้าหมายรองโดยจัดให้เป้าหมายรองเปลี่ยนเป็นเงื่อนไขของการออกแบบ ในการวิเคราะห์นี้จะแสดงผลของการออกแบบโดยใช้ตัวแปรในการออกแบบ 3 ตัวแปรซึ่งมีสัดส่วนความกว้างและสูงของช่องพันขดลวดเป็นอัตราส่วนกับขนาดกลางของแกนเหล็กเป็น 2:1 และ 2:3 ตามลำดับ การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีหลายเป้าหมายในส่วนนี้จะกำหนดให้เป็น การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีค่าความสูญเสียรวมต่ำ โดยกำหนดราคาเป็นเงื่อนไข

ข้อมูลที่ได้จากการออกแบบที่ผ่านมาของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 50 VA, 220 V, 50 Hz ความหนาแน่นกระแสประมาณ 4 A/sq.mm. โดยใช้แกนเหล็ก RM-800 ซึ่งมีเป้าหมายให้ค่าความสูญเสียต่ำแบบ 3 ตัวแปรนั้นมีราคารวมเป็น 57.29 บาท มีค่าสูงกว่าการออกแบบซึ่งมีเป้าหมายให้ราคารวมต่ำแบบ 3 ตัวแปรซึ่งมีราคา 41.9 บาท (คิดเป็น 36.73 %) และในส่วนของเป้าหมายให้ราคารวมต่ำแบบ 3 ตัวแปรนั้นมีค่าความสูญเสียรวมเป็น 9.48 W มีค่าสูงกว่าการออกแบบซึ่งมีเป้าหมายให้ความสูญเสียรวมต่ำแบบ 3 ตัวแปรซึ่งมีความสูญเสีย 8.76 W (คิดเป็น 8.22 %) ซึ่งจะเห็นได้ว่าในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

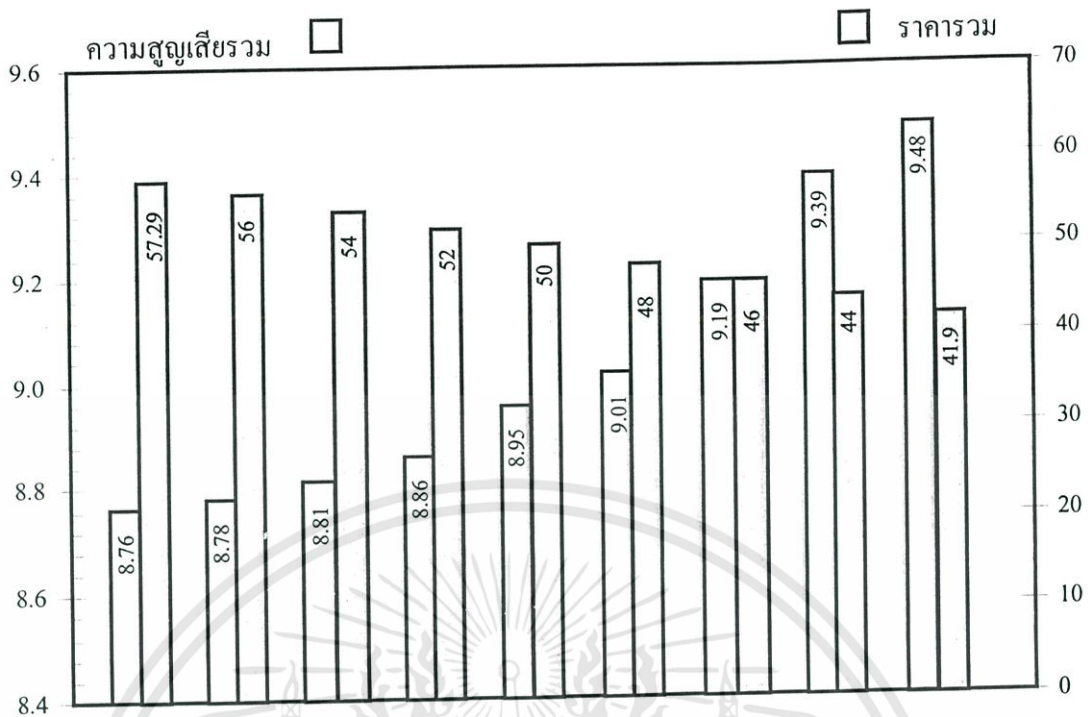
การออกแบบที่มีเป้าหมายเดียวคุณลักษณะของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ได้จะก็จะมีเหมาะสมเพียงเป้าหมายและเงื่อนไขที่กำหนดเท่านั้น ดังนั้นเมื่อต้องการออกแบบให้หม้อแปลงไฟฟ้ามีความสูญเสียต่ำโดยมีการกำหนดราคาเป็นเงื่อนไขสามารถกำหนดสมการเงื่อนไขได้ดังนี้

$$g_1(D, E, B_{\max}) = C_{core}(D, E, B_{\max}) + C_{cu}(D, E, B_{\max}) \leq \text{ราคาที่กำหนด} \quad (5.9)$$

ตารางที่ 5.8 ผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 50 VA, 220/110 V, 50 Hz, $J \approx 4 \text{ A/mm}^2$ แกนเหล็ก RM-800 โดยมีค่าความสูญเสียต่ำเป็นเป้าหมายหลักและราคาเป็นเงื่อนไข

ราคาที่กำหนด	Min L	56	54	52	50	48	46	44	Min C
D (mm.)	43	37.76	34.95	35.58	39.56	32.13	29.60	33.22	35.63
E (mm.)	22	22.67	22.90	22.77	21.67	22.00	22.52	21.36	20.05
B_{\max} (T)	1.04	1.06	1.12	1.19	1.28	1.33	1.42	1.51	1.58
P_{core} (W)	3.27	3.16	3.28	3.75	4.27	3.90	4.32	4.94	5.22
P_{cu} (W)	5.49	5.62	5.53	5.11	4.68	5.12	4.87	4.45	4.26
P_t (W)	8.76	8.78	8.81	8.86	8.95	9.01	9.19	9.39	9.48
C_{core} (บาท)	29.22	27.26	25.73	25.90	26.08	21.84	21.08	21.27	20.11
C_{cu} (บาท)	28.07	28.74	28.28	26.10	23.92	26.16	24.91	22.73	21.78
C_t (บาท)	57.29	56.00	54.00	52.00	50.00	48.00	46.00	44.00	41.90
W_{core} (kg.)	0.97	0.91	0.86	0.86	0.87	0.73	0.70	0.71	0.67
W_{cu} (kg.)	0.19	0.20	0.19	0.18	0.16	0.18	0.17	0.15	0.15
W_t (kg.)	1.16	1.11	1.05	1.04	1.03	0.91	0.87	0.86	0.82

จากตารางที่ 5.8 ซึ่งเป็นผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กพิกัด 50 VA, 220/110 V, 50 Hz, $J \approx 4 \text{ A/mm}^2$ แกนเหล็ก RM-800 โดยมีค่าความสูญเสียต่ำเป็นเป้าหมายหลักและราคาเป็นเงื่อนไข เมื่อกำหนดให้ราคาที่เป็นเงื่อนไขอยู่ในช่วง 41.9 บาท (ซึ่งเป็นราคารวมของกรณี Min C) ถึง 57.29 บาท (ซึ่งเป็นราคารวมของกรณี Min L) จะเห็นได้ว่าเมื่อราคาที่เป็นเงื่อนไขมีค่าต่ำลงค่าความสูญเสียที่ต่ำที่สุดที่หาได้จะมีค่าสูงขึ้นดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 ผลลัพธ์ที่ได้จากการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าพิกัด 50 VA, 220/110 V, 50 Hz, แกนเหล็ก RM-800 $J \approx 4 \text{ A/mm}^2$ โดยมีค่าความสูญเสียต่ำเป็นเป้าหมายหลักและราคาเป็นเงื่อนไข

5.5 การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กเมื่อใช้ D และ B_{\max} เป็นตัวแปร

การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมโดยการเลือกใช้โครงสร้างของแกนเหล็กและความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเป็นตัวแปรในการออกแบบที่ผ่านมานั้นจะเห็นได้ว่าโครงสร้างที่ได้เปลี่ยนแปลงไปตามเป้าหมายและเงื่อนไขที่กำหนด วิธีการหาค่าที่เหมาะสม การพิจารณาเลือกใช้ตัวแปรและจำนวนของตัวแปรจะมีผลต่อค่าของคำตอบที่ได้ จากตัวอย่างการออกแบบที่ผ่านมาพบว่าการเลือกใช้โครงสร้างของแกนเหล็กและความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเป็นตัวแปรแบบ 5 ตัวแปรจะให้ผลที่ดีกว่าแบบ 3 ตัวแปร แต่การออกแบบทั้งสองแบบจะสังเกตได้ว่าขนาดของแกนเหล็กที่ได้นั้น ไม่มีการผลิตใช้งานในปัจจุบัน ดังนั้นจะพบว่าต้นทุนในการสร้างแกนเหล็กจะมีราคาสูงมาก ซึ่งไม่เหมาะสมในการสร้างเพื่อนำไปใช้งานจริง ดังนั้นในส่วนนี้จะเสนอแนวทางการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมให้มีเป้าหมายตามความต้องการ โดยที่ผู้ออกแบบสามารถพิจารณากำหนดขนาดแกนเหล็ก (E) ที่มีการผลิตใช้งานจริงเป็นพารามิเตอร์ และใช้ความหนาของจำนวนแผ่นลามิเนต (D) ที่ประกอบเป็นแกนเหล็ก ร่วมกับความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเป็นตัวแปรในการออกแบบ ดังนั้นสมการเป้าหมายและเงื่อนไขของการออกแบบสามารถกำหนดได้ดังนี้

สมการเป้าหมายกรณีความสูญเสียรวมต่ำ

Minimize

$$F(D, B_{\max}) = P_{core}(D, B_{\max}) + P_{cu}(D, B_{\max}) \quad (5.10)$$

สมการเป้าหมายกรณีราคารวมต่ำ

Minimize

$$F(D, B_{\max}) = C_{core}(D, B_{\max}) + C_{cu}(D, B_{\max}) \quad (5.11)$$

สมการเป้าหมายกรณีน้ำหนักรวมต่ำ

Minimize

$$F(D, B_{\max}) = W_{core}(D, B_{\max}) + W_{cu}(D, B_{\max}) \quad (5.12)$$

ส่วนของสมการเงื่อนไขจะกำหนดให้ช่องพันขดลวดมีพื้นที่เพียงพอกับที่ลวดตัวนำที่ต้องการ

$$g_1 = (D, B_{\max}) = 0.933d_{TL}(D, B_{\max}) \leq b_w(D) \quad (5.13)$$

การออกแบบในกรณีนี้จะเลือกใช้ขนาดของแกนเหล็กที่มีการผลิตได้แก่ แกนเหล็กชนิด RG-11 ขนาด 57 mm. และกำหนดพิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้าจากวิธีการออกแบบโดยทั่วไป [2] จะได้พิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้าอยู่ในช่วงประมาณ 12 VA, 220/12 V, 50 Hz, $J \approx 2 \text{ A/mm}^2$ ซึ่งผลการออกแบบโดยกำหนดให้มีเป้าหมายในการออกแบบกรณีต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 5.9 (ซึ่งรายละเอียดทั้งหมดของการออกแบบแสดงดังภาคผนวก ง)

จากตารางที่ 5.9 จะเห็นได้ว่าการออกแบบโดยเลือกใช้ความหนาของจำนวนแผ่นลามีเนทที่ใช้ประกอบเป็นวงจรแม่เหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าและความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเป็นตัวแปรสามารถออกแบบได้โดยให้ผลลัพธ์เช่นเดียวกันกับการเลือกพารามิเตอร์อื่นเป็นตัวแปรในการออกแบบ แต่วิธีการเลือกตัวแปรเช่นนี้จะมีข้อดีคือสามารถสร้างใช้งานได้สะดวกกว่า เมื่อนำผลลัพธ์ของการออกแบบเป้าหมายค่าความสูญเสียต่ำมาสร้างต้นแบบแสดงดังรูปที่ 5.2 เพื่อทดสอบหาคุณลักษณะต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้น ในการทดสอบประกอบไปด้วยการทดสอบเปิดวงจรและลัดวงจร เพื่อพิจารณาถึงค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนเหล็กและขดลวดตามลำดับ โดยการทดสอบนี้เครื่องมือวัดจะต่ออยู่ทางด้านปฐมภูมิ นอกจากนี้ยังได้ทำการการวัดอุณหภูมิขณะใช้งานที่พิกัดด้วย ซึ่งผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 5.10 และ 5.11

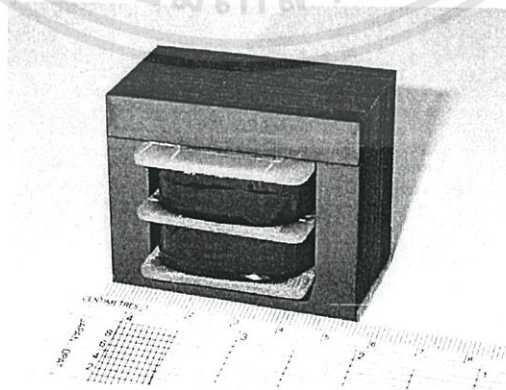
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.9 ผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 12 VA, 220/12 V, 50 Hz, แกนเหล็ก RG-11 $J \approx 2 \text{ A/mm}^2$ ที่เป้าหมายในการออกแบบต่าง ๆ

	Min L	Min C	Min W
D (mm.)	32.2	16.5	11.4
B_{\max} (T)	1.3	1.6	1.6
P_{core} (W)	0.42	0.29	0.20
P_{cu} (W)	0.81	0.97	1.42
P_t (W)	1.23	1.26	1.62
C_{core} (บาท)	26.68	13.69	9.44
C_{cu} (บาท)	12.89	17.22	25.15
C_t (บาท)	39.56	30.90	34.59
W_{core} (kg.)	0.53	0.27	0.19
W_{cu} (kg.)	0.09	0.11	0.17
W_t (kg.)	0.62	0.39	0.36

ตารางที่ 5.10 ผลการทดสอบเปิดและปิดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 12 VA, 220/12 V, 50 Hz, แกนเหล็ก RG-11 $J \approx 2 \text{ A/mm}^2$

	V	I	W
การทดสอบเปิดวงจร	220.2	0.026	0.45
การทดสอบปิดวงจร	15.5	0.058	0.86



รูปที่ 5.2 ต้นแบบหม้อแปลงไฟฟ้าพิกัด 12 VA, 220/12 V, 50 Hz, แกนเหล็ก RG-11 $J \approx 2 \text{ A/mm}^2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.11 ผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มขณะใช้งานที่พิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 12 VA, 220/12 V, 50 Hz, แกนเหล็ก RG-11 $J \approx 2 \text{ A/mm}^2$

	ขดลวดปฐมภูมิ	ขดลวดทุติยภูมิ	แกนเหล็ก
อุณหภูมิแวดล้อมขณะเริ่มทดสอบ (°C)	26.7	26.7	6.8
อุณหภูมิแวดล้อมหลังการทดสอบ (°C)	26.0	26.0	
ค่าความต้านทานขณะเริ่มทดสอบ (Ω)	94.81	0.327	
อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น (°C)	12.0	11.5	

จากตารางที่ 5.10 และ 5.11 ซึ่งเป็นผลการทดสอบต้นแบบหม้อแปลงไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบโดยเลือกใช้ความหนาของจำนวนแผ่นลามิเนตที่ใช้ประกอบเป็นวงจรมแม่เหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าและความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเป็นตัวแปร จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าค่าความสูญเสียในแกนเหล็กและในขดลวดมีค่าใกล้เคียงกับที่ได้ออกแบบไว้ โดยจะมีค่าสูงกว่าเล็กน้อยเนื่องจากขณะทำการทดสอบแบบเปิดวงจรจะมีกระแสไหลผ่านขดลวดด้านปฐมภูมิล็กน้อยซึ่งค่าความสูญเสียที่วัดได้จะมีค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นในขดลวดนี้รวมอยู่ด้วย ทำนองเดียวกันขณะทดสอบแบบปิดวงจรก็จะมีค่าความสูญเสียในแกนเหล็กรวมอยู่ด้วย ในส่วนของการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มขณะใช้งานที่พิกัดจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นมีค่าต่ำ เนื่องจากการออกแบบนี้ใช้ค่าความหนาแน่นกระแสของตัวนำเท่ากับ $J \approx 2 \text{ A/mm}^2$ เป็นค่าที่ต่ำในช่วงการใช้ของค่าความหนาแน่นกระแสของตัวนำโดยทั่วไป ดังนั้นจะเห็นได้ว่าค่าความหนาแน่นกระแสของตัวนำซึ่งเป็นพารามิเตอร์ในการออกแบบจะมีผลต่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นขณะใช้งาน โดยเมื่อค่าความหนาแน่นกระแสของตัวนำเพิ่มขึ้นอุณหภูมิเพิ่มขณะใช้งานก็จะมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย

5.6 บทสรุป

การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสม ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่กำหนดไว้ในการออกแบบเช่น วัสดุที่นำมาใช้ทำแกนเหล็ก ค่าความหนาแน่นกระแสของลวดตัวนำ จะมีผลต่อคุณลักษณะและโครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ได้ดังนี้

จากผลการออกแบบเมื่อเปรียบเทียบระหว่างเป้าหมายที่ออกแบบจะเห็นได้ว่ากรณีเป้าหมายค่าความสูญเสียต่ำจะมีโครงสร้างแกนเหล็กขนาดใหญ่กว่ากรณีเป้าหมายการรวมต่ำและกรณีเป้าหมายน้ำหนักรวมต่ำแต่กรณีนี้จะใช้ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่ต่ำกว่าเพื่อลดความสูญเสียต่ำน้ำหนักขดลวดให้กับขนาดโครงสร้างที่ใหญ่ซึ่งมีน้ำหนักมาก ซึ่งโครงสร้างของแกนเหล็กขนาดใหญ่จะทำให้สามารถลดจำนวนรอบของขดลวดลงได้ทำให้ค่าความสูญเสียในขดลวดมีค่าต่ำ กรณีการออกแบบเป้าหมายการรวมต่ำและเป้าหมายน้ำหนักรวมต่ำจะใช้ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่สูงเพื่อให้โครงสร้างของแกนเหล็กจะมีขนาดเล็กซึ่งจะทำให้ราคาและน้ำหนักมี

ค่าต่ำ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาการเลือกใช้ตัวแปรในการออกแบบพบว่าแบบ 5 ตัวแปรให้ผลลัพธ์ที่เหมาะสมกว่าตามเป้าหมายและเงื่อนไขที่พิจารณาในทุกเป้าหมายที่ออกแบบ แต่หากพิจารณาในส่วนของความสูญเสียที่เกิดขึ้นจากเศษของแกนเหล็กในแบบ 5 ตัวแปรที่ช่องว่างพันขดลวดไม่เป็นสัดส่วนกันกับขากลางของแกนเหล็กจะทำให้แบบ 3 ตัวแปรมีความเหมาะสมกว่า

เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบได้แก่ ชนิดของแกนเหล็กและค่าความหนาแน่นกระแสของลวดตัวนำพบว่า แกนเหล็กแต่ละชนิดจะให้ผลลัพธ์ของการออกแบบที่มีโครงสร้างของแกนเหล็กและค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่เหมาะสมแตกต่างกัน โครงสร้างที่เหมาะสมนี้จะทำให้เป้าหมายเป็นไปตามที่กำหนดเฉพาะตามคุณลักษณะของแกนเหล็กชนิดที่ใช้ในการออกแบบเท่านั้น หากใช้โครงสร้างและค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเดิมที่ได้จากการออกแบบโดยใช้แกนเหล็กชนิดหนึ่งไปใช้แทนที่แกนเหล็กอีกชนิดหนึ่ง ค่าเป้าหมายที่ออกแบบจะอาจจะมีค่าลดลงจากคุณสมบัติของแกนเหล็กที่นำมาแทนของแกนเหล็กที่นำมาแทน แต่ความเหมาะสมของ โครงสร้างเดิมนั้นจะน้อยกว่าการออกแบบโดยใช้แกนเหล็กชนิดที่นำไปแทนในการออกแบบ

ในส่วนของค่าความหนาแน่นกระแสของลวดตัวนำเมื่อมีค่าลดลง การออกแบบเป้าหมาย ค่าความสูญเสียรวมดำนั้น จะเห็นได้ว่าค่าความสูญเสียรวมจะลดลงเนื่องจากเมื่อค่าความหนาแน่นกระแสมีค่าลดลงตัวนำจะมีขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้ความต้านทานไฟฟ้าในขดลวดลดลง ส่งผลให้ความสูญเสียในขดลวดลดลง แต่ต้องการพื้นที่ในการพันขดลวดเพิ่มขึ้นทำให้โครงสร้างแกนเหล็กต้องมีขนาดใหญ่ขึ้น ความสูญเสียในแกนเหล็กจะมีค่าเพิ่ม เพื่อทำให้ความสูญเสียในแกนเหล็กมีค่าต่ำจึงลดค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่ใช้ลง ซึ่งการเพิ่มขึ้นของขนาดแกนเหล็กรวมถึงการลดลงของจำนวนรอบขดลวดและค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กจะได้จากการใช้เงินดิกล้อกริซึมเป็นตัวประมวลผลเพื่อหาค่าที่เหมาะสมในการเพิ่มขึ้นและลดลง สำหรับการออกแบบเป้าหมายราคารวมต่ำและน้ำหนักรวมต่ำ เมื่อค่าความหนาแน่นกระแสของลวดตัวนำลดลงราคารวมและน้ำหนักรวมจะมีค่าเพิ่มขึ้น

จากผลการออกแบบห่อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่มีการกำหนดเป้าหมายในการออกแบบเป้าหมายเดียวทำให้ความเหมาะสมของห่อแปลงไฟฟ้าที่ได้มีเพียงด้านที่พิจารณาเท่านั้นคุณลักษณะอื่นที่ไม่ใช่เป้าหมายที่พิจารณาอาจมีค่าไม่เหมาะสม การออกแบบห่อแปลงไฟฟ้าที่มีหลายเป้าหมายจึงเป็นทางเลือกหนึ่งของการออกแบบเพื่อให้ได้ความเหมาะสมตรงกับความต้องการของผู้ออกแบบมากขึ้น ซึ่งการออกแบบห่อแปลงไฟฟ้าที่มีค่าความสูญเสียรวมต่ำโดยกำหนดราคาเป็นเงื่อนไขที่ได้แสดงนั้น ทำให้เห็นได้ว่าวิธีการออกแบบห่อแปลงไฟฟ้าที่เหมาะสมโดยการใช้เงินดิกล้อกริซึมสามารถออกแบบให้มีความหลากหลายได้ตามความต้องการของผู้ออกแบบ นอกจากการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ในการออกแบบและการกำหนดเป้าหมายใน

การออกแบบที่มีหลายเป้าหมายแล้วการเลือกใช้ตัวแปรในการออกแบบที่เปลี่ยนแปลงไปได้แก่ การ
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลือกใช้ความหนาของจำนวนแผ่นลามีเนทที่ใช้ประกอบเป็นวงจรแม่เหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า และความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเป็นตัวแปรในการออกแบบ ผลลัพธ์ที่ได้จากการออกแบบสามารถนำไปสร้างต้นแบบได้สะดวกขึ้นและจากการทดสอบต้นแบบหม้อแปลงไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจะเห็นได้ว่ายังคงสามารถนำไปใช้งานได้ตามที่ออกแบบไว้ จากที่กล่าวมาทั้งหมดนี้จะสรุปได้ว่า โครงสร้างของแกนเหล็กและค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่เหมาะสมของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กพิกัด 50 VA, 220/110 V, 50 Hz จะสามารถมีได้หลากหลายแบบดังรูปที่ 5.7 โดยจะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์นี้เสนอวิธีการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กโดยอาศัยทฤษฎีของการหาค่าที่เหมาะสมเพื่อออกแบบให้ได้หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีคุณลักษณะตามต้องการ วิธีการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้กันโดยทั่วไป ผู้ออกแบบสามารถออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าให้มีพิกัดกำลัง แรงดันไฟฟ้าและความถี่ตามที่กำหนดเท่านั้น โดยไม่สามารถที่จะกำหนดคุณลักษณะอื่น ๆ ของหม้อแปลงไฟฟ้าได้ ในกรณีที่ผู้ออกแบบต้องการที่จะปรับเปลี่ยนคุณลักษณะของหม้อแปลงไฟฟ้าเช่น ค่าความสูญเสีย ราคาต้นทุน น้ำหนัก ก็จะต้องทำการออกแบบโดยใช้วิธีลองผิดลองถูกซึ่งขึ้นกับประสบการณ์ของผู้ออกแบบเช่น การปรับขนาดของแกนเหล็กหรือค่า B_{max} ที่ใช้ แต่เป็นไปได้ยากที่ผู้ออกแบบจะทราบได้ว่าควรที่จะปรับขนาดของแกนเหล็กและค่า B_{max} เป็นเท่าใด จึงจะได้หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีคุณลักษณะตามที่ต้องการ ซึ่งวิธีนี้จะพบว่าทำให้เสียเวลาในการออกแบบและอาจทำให้ต้นทุนของการออกแบบสูงขึ้นอย่างมาก วิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอแนวทางโดยใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมเข้ามาช่วยในการออกแบบเพื่อที่จะทำให้ได้หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีคุณลักษณะตามที่ต้องการ โดยในการออกแบบจะเลือกใช้โครงสร้างของแกนเหล็กและค่า B_{max} เป็นตัวแปรของการออกแบบซึ่งแบ่งเป็นลักษณะต่าง ๆ ได้แก่แบบ 2, 3, 4 และ 5 ตัวแปร

วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่ได้นำมาใช้ออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าคือ แบบคิเทอมินิสติก และแบบสโตชาสติก จากผลการออกแบบในบทที่ 3 สรุปได้ว่าวิธีการแบบสโตชาสติกให้ผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าได้เหมาะสมกว่าวิธีการแบบคิเทอมินิสติกคือ สามารถหาโครงสร้างที่เหมาะสมของหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อให้ได้คุณลักษณะตามที่ต้องการได้ดีกว่า

ผลการออกแบบและทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กพิกัด 50 VA และ 25 VA, แรงดันไฟฟ้า 220/110 V, 50 Hz, $J \approx 4 \text{ A/mm}^2$, แกนเหล็กชนิด RM-800 จำนวน 6 ชั้นแบบซึ่งมีเป้าหมายให้ค่าความสูญเสียรวมต่ำโดยใช้ตัวแปรลักษณะต่าง ๆ ในบทที่ 4 พบว่าการออกแบบกรณีใช้ 5 ตัวแปรจะให้ผลที่ทำให้หม้อแปลงไฟฟ้ามีค่าความสูญเสียต่ำที่สุด แต่การเลือกใช้ตัวแปรลักษณะนี้ โครงสร้างของแกนเหล็กที่ได้เมื่อนำไปใช้งานจริง การตัดแกนเหล็กจะมีเศษที่เหลือเนื่องจากช่องพันขดลวดไม่เป็นสัดส่วนกับขนาดขากลางของแกนเหล็ก ในขณะที่กรณีแบบ 3 ตัวแปรซึ่งมีค่าความสูญเสียสูงกว่าเล็กน้อยจะไม่มีเศษเหลือ ดังนั้นการออกแบบกรณี 5 ตัวแปรจะมีความเหมาะสมในการออกแบบเมื่อผู้ออกแบบต้องการค่าความสูญเสียที่ต่ำสุด หากพิจารณาต้นทุนที่สูงขึ้นซึ่งเกิดจากการตัดแกนเหล็กการออกแบบกรณี 3 ตัวแปรจะมีความเหมาะสมกว่า เมื่อพิจารณากรณีแบบ 2 และ 4 ตัวแปรจะพบว่ามีความเหมาะสมน้อยกว่าเนื่องจากผู้ออกแบบไม่สามารถที่จะกำหนดค่า B_{max} ในการออกแบบที่เหมาะสมได้เหมือนกับการออกแบบกรณี 3 และ 5 ตัวแปร ในส่วนของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

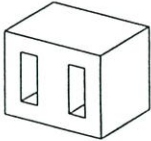
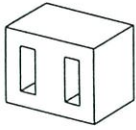
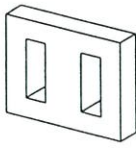
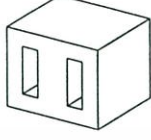
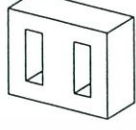
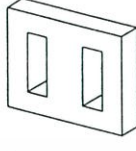

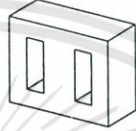
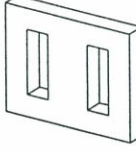

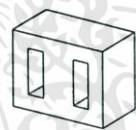
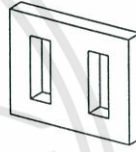


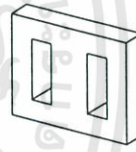


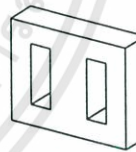

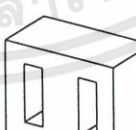
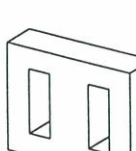
การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กที่มีเป้าหมายของการออกแบบเพื่อให้หม้อแปลงไฟฟ้ามีคุณลักษณะอื่นเช่น ราคารวมต่ำหรือน้ำหนักรวมต่ำการเลือกใช้ตัวแปรกรณีต่าง ๆ ก็ให้ผลเช่นเดียวกัน

เมื่อนำผลที่ได้จากการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 50 VA โดยใช้ตัวแปรในการออกแบบกรณี 2, 3, 4 และ 5 ตัวแปร และขนาด 25 VA โดยใช้ตัวแปรในการออกแบบกรณี 3 และ 5 ตัวแปรมาสร้างต้นแบบเพื่อทดสอบคุณลักษณะต่าง ๆ ได้แก่ การทดสอบแบบเปิดวงจรและลัดวงจร การทดสอบโวลต์เตจเรกกูเลชัน การทดสอบประสิทธิภาพเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงภาระทางไฟฟ้า การทดสอบอุณหภูมิเพิ่มขึ้นขณะใช้งานที่พิกัดและการทดสอบความผิดพลาดของสัญญาณไฟฟ้า จากผลการทดสอบในบทที่ 4 พบว่าหม้อแปลงไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมสามารถนำไปใช้งานได้จริงโดยมีคุณลักษณะตามที่ออกแบบ

จากการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมจะเห็นได้ว่าจะมีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของการออกแบบไว้เช่น วัสดุที่นำมาใช้ทำแกนเหล็ก ค่าความหนาแน่นกระแสของลวดตัวนำ พารามิเตอร์เหล่านี้จะมีผลต่อโครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ได้เช่น แกนเหล็กแต่ละชนิดจะมีโครงสร้างของแกนเหล็กและค่า B_{max} เหมาะสมที่แตกต่างกันตามเป้าหมายของการออกแบบที่กำหนดเพื่อให้ได้หม้อแปลงไฟฟ้ามีคุณลักษณะตามที่ต้องการ โครงสร้างที่เหมาะสมนี้จะทำให้เป้าหมายเป็นไปตามที่กำหนดเฉพาะคุณลักษณะของแกนเหล็กชนิดที่ใช้ในการออกแบบเท่านั้น หากใช้โครงสร้างและค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเดิมที่ได้จากการออกแบบโดยใช้แกนเหล็กชนิดหนึ่งไปใช้แทนที่แกนเหล็กอีกชนิดหนึ่ง คุณลักษณะตามเป้าหมายที่ออกแบบจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากคุณสมบัติของแกนเหล็กที่นำมาแทน ในส่วนของค่าความหนาแน่นกระแสของลวดตัวนำที่ใช้ในการออกแบบเมื่อมีค่าเปลี่ยนแปลงไปก็จะทำให้โครงสร้างที่ได้จากการหาค่าที่เหมาะสมเปลี่ยนแปลงไปด้วยเช่นกัน

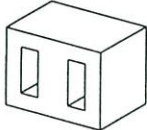
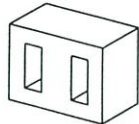
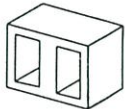
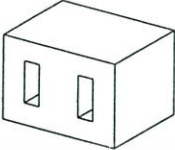
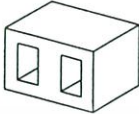
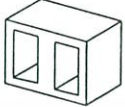
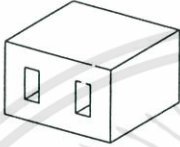
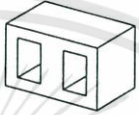
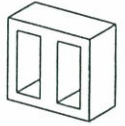
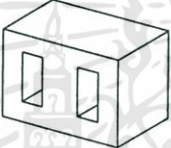


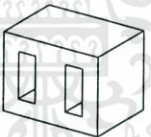
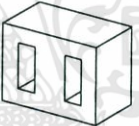




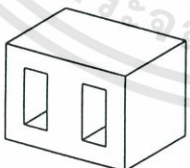
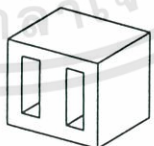
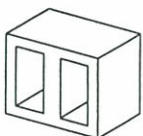
การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยวิธีการที่นำเสนอนี้จะช่วยกำหนด โครงสร้างของแกนเหล็กและค่า B_{max} ที่ทำให้หม้อแปลงไฟฟ้าที่ได้มีคุณลักษณะตามที่ต้องการ โดยโครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ได้จะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบ โดยเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของการออกแบบ โครงสร้างแกนเหล็กที่ได้ก็จะเปลี่ยนแปลงไปแสดงดังรูปที่ 6.1 และ 6.2 จากรูปจะเห็นได้ว่าหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กที่ออกแบบด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมจะมีโครงสร้างได้หลากหลายตามคุณลักษณะและข้อกำหนดของผู้ออกแบบ ซึ่งจะมีความสะดวกและมีข้อได้เปรียบกว่าวิธีการออกแบบที่ใช้กันทั่วไป

ในส่วนข้อเสนอแนะสำหรับการออกแบบ เนื่องจากการผลิตหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กในอุตสาหกรรมได้มีการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มขึ้นขณะใช้งาน โดยปัจจุบันยังไม่สามารถคำนวณได้จะใช้วิธีสร้างต้นแบบแล้วทดสอบ ซึ่งถ้าหากสามารถคำนวณได้ขณะออกแบบจะทำให้ลดความสูญเสียจากการสร้างต้นแบบเพื่อทดสอบลงได้

	Minimum loss	Minimum cost	Minimum weight
RM-800	 $B_{\max} = 1.04 \text{ T}$	 $B_{\max} = 1.60 \text{ T}$	 $B_{\max} = 1.60 \text{ T}$
RM-KTA	 $B_{\max} = 1.30 \text{ T}$	 $B_{\max} = 1.60 \text{ T}$	 $B_{\max} = 1.60 \text{ T}$
RG-11	 $B_{\max} = 1.60 \text{ T}$	 $B_{\max} = 1.60 \text{ T}$	 $B_{\max} = 1.60 \text{ T}$
5 A/mm ²	 $B_{\max} = 1.24 \text{ T}$	 $B_{\max} = 1.60 \text{ T}$	 $B_{\max} = 1.60 \text{ T}$
4 A/mm ²	 $B_{\max} = 1.04 \text{ T}$	 $B_{\max} = 1.60 \text{ T}$	 $B_{\max} = 1.60 \text{ T}$
3 A/mm ²	 $B_{\max} = 0.92 \text{ T}$	 $B_{\max} = 1.60 \text{ T}$	 $B_{\max} = 1.60 \text{ T}$
2 A/mm ²	 $B_{\max} = 0.71 \text{ T}$	 $B_{\max} = 1.60 \text{ T}$	 $B_{\max} = 1.60 \text{ T}$

รูปที่ 6.1 โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้า 50 VA แบบต่าง ๆ ที่ได้จากการออกแบบกรณี 3 ตัวแปร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	Minimum loss	Minimum cost	Minimum weight
RM-800	 $B_{\max} = 1.17 \text{ T}$	 $B_{\max} = 1.60 \text{ T}$	 $B_{\max} = 1.60 \text{ T}$
RM-KTA	 $B_{\max} = 1.02 \text{ T}$	 $B_{\max} = 1.60 \text{ T}$	 $B_{\max} = 1.60 \text{ T}$
RG-11	 $B_{\max} = 1.52 \text{ T}$	 $B_{\max} = 1.60 \text{ T}$	 $B_{\max} = 1.60 \text{ T}$
5 A/mm ²	 $B_{\max} = 1.00 \text{ T}$	 $B_{\max} = 1.60 \text{ T}$	 $B_{\max} = 1.60 \text{ T}$
4 A/mm ²	 $B_{\max} = 1.17 \text{ T}$	 $B_{\max} = 1.60 \text{ T}$	 $B_{\max} = 1.60 \text{ T}$
3 A/mm ²	 $B_{\max} = 0.89 \text{ T}$	 $B_{\max} = 1.60 \text{ T}$	 $B_{\max} = 1.60 \text{ T}$
2 A/mm ²	 $B_{\max} = 0.70 \text{ T}$	 $B_{\max} = 1.60 \text{ T}$	 $B_{\max} = 1.60 \text{ T}$

รูปที่ 6.2 โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้า 50 VA แบบต่าง ๆ ที่ได้จากการออกแบบกรณี 5 ตัวแปร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] RS Components, Pte Ltd. **April 2000 Singapore Catalogue** [Singapore Priced Catalogue]. RS Trade Counter. April 2000. pp.1167. 2000.
- [2] Eric Lowdon. **Practical Transformer Design Handbook**. 2nd Ed. TAB BOOK. Inc. 1989.
- [3] McLyman, Colonel William T. **Transformer and Inductor Design Handbook**. New York : Marcel Dekker, Inc. 1988.
- [4] Nasar S.A. **Electromechanics and Electric Machines**. 2nd Ed. New York : Jonh Wiley & Sons, Inc. 1983.
- [5] พีรศักดิ์ วรสุนทรโรสถ. **เครื่องจักรไฟฟ้า 1**. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า วิทยาเขตพระนครเหนือ. 2523.
- [6] Flanagan, William M. **Handbook of transformer design and applications**. 2nd Ed. New York : McGraw-Hill, Inc. 1993.
- [7] Ramamoorthy M. **Computer-Aided Design of Electrical Equipment**. New Delhi : Afliated East-West Press PVT . 1987.
- [8] Petkov R. "Optimum design of a high-power, high-frequency transformer." IEEE Trans. on Power Electronics., vol. 11, no. 1, January 1996. Pp. 33-42.
- [9] Barba P.D., Navarra P., Savini A. and Sikora R. "Optimum Design of Iron-Core Electromagnets." IEEE Trans. on Magnetics., vol. 26, no. 2, March 1990. pp. 646-649.
- [10] Kang M., Enjeti P.N. and Pitel I.J. "Analysis and Design of Electronic Transformers for Electric Power Distribution System." Proc. IEEE-IASAM, New Orleans, USA, Oct 1997. pp. 1689-1694.
- [11] Vandelac J.P., Ziogas P.D. "A Novel Approach for Minimizing High-Frequency Transformer Copper Losses." IEEE Trans. on Power Electronics., vol. 3, on. 3, July 1988. Pp. 266-277.
- [12] Hurley W.G., Wolfle W.H. and Breslin J.G. "Optimized Transformer Design: Inclusive of High-Frequency Effects." IEEE Trans. on Power Electronics., vol. 13, no. 4, July 1998. pp. 651-659.
- [13] Ngo Khai D.T., Alley R.P., Yerman A.J. and Kuo M.H. "Design Issues for the Transformer in a Low-Voltage Power Supply with High Efficiency and High Power

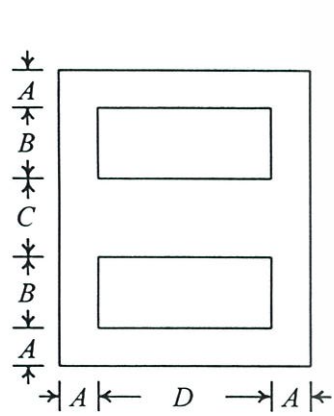
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Density.” IEEE Trans. on Power Electronics., vol. 7, no. 3, July 1992. pp. 592-600.
- [14] Chaiwut Chat-uthai. “The Development of Non-Linear Constrained Optimisation Methods Applied to Electromagnetic Devices.” Ph.D.Thesis of the University of London and for the Diploma of Membership of Imperial College. 1995.
- [15] Ashok D. Belegundu., Tirupathi R. Chandrupatla. **Optimization Concepts and Applications in Engineering.** New Jersey : Prentice-Hall. Inc. 1999.
- [16] S.S. Rao. **Optimization Theory and Applications.** 2nd Ed. New Delhi : Wiley Eastern, 1994.
- [17] Garret N. Vanderplaats. **Numerical Optimization Techniques for Engineering Design with Applications.** New York : McGraw-Hill, Inc. 1984
- [18] Panos Y. Papalambros., Douglass J. Wilde. **Principles of Optimal Design Modeling and Computation.** New York : Cambridge University Press. 1988.
- [19] Stephen G. Nash., Ariela Sofer. **Linear and Nonlinear Programming.** International Editions. Singapore : McGraw-Hill. Inc. 1996.
- [20] Zbigniew Michalewicz. **Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs.** 3rd Ed. New York : Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 1996.
- [21] Mitsuo Gen., Runwei Cheng. **Genetic Algorithms & Engineering Design.** New York : John Wiley & Sons, Inc. 1996.
- [22] David E. Goldberg. **Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning.** Reading, Massachusetts : Addison-Wesley Publishing Company, Inc. 1989.
- [23] Members of the Staff of the Department of Electrical Engineering Massachusetts Institute of Technology. **Magnetic Circuits and Transformers.** New York : John Wiley & Sons, Inc. 1954.
- [24] P.N. Murgatroyd. “Optimal designs for multilayer air-cored toroidal inductors with circular windows.” IEE Proc., Vol. 135, Pt.B, No. 5, September 1988. Pp202-209.
- [25] P.N. Murgatroyd. “The Brooks inductor: a study of optimal solenoid cross-sections.” IEE Proceedings., Vol. 133, Pt.B, No. 5, September 1986. pp. 309-314.
- [26] Wardle H. **Fundamentals of Electrotechnology 1: Experimental Approach.** London : Hutchinson Educational . 1972.
- [27] ISO 5826 International Standard. **Transformer for resistance welding machines- General specifications applicable to all transformers.** International Standard, 1983.

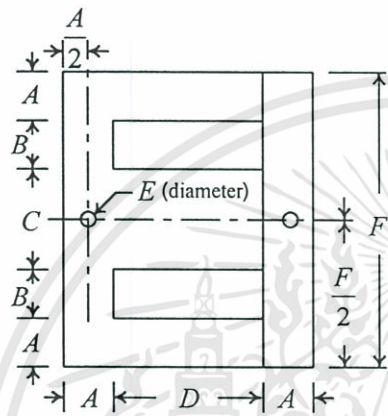
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



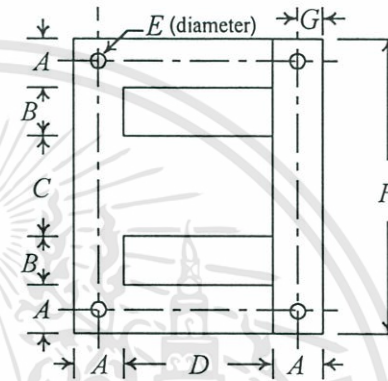
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



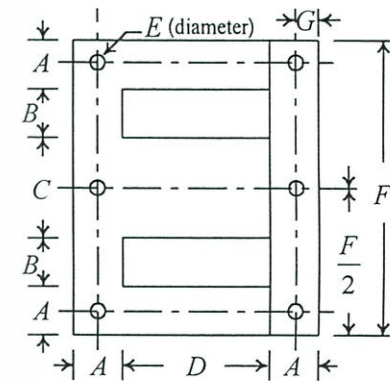
Style 1



Style 2



Style 3



Style 4

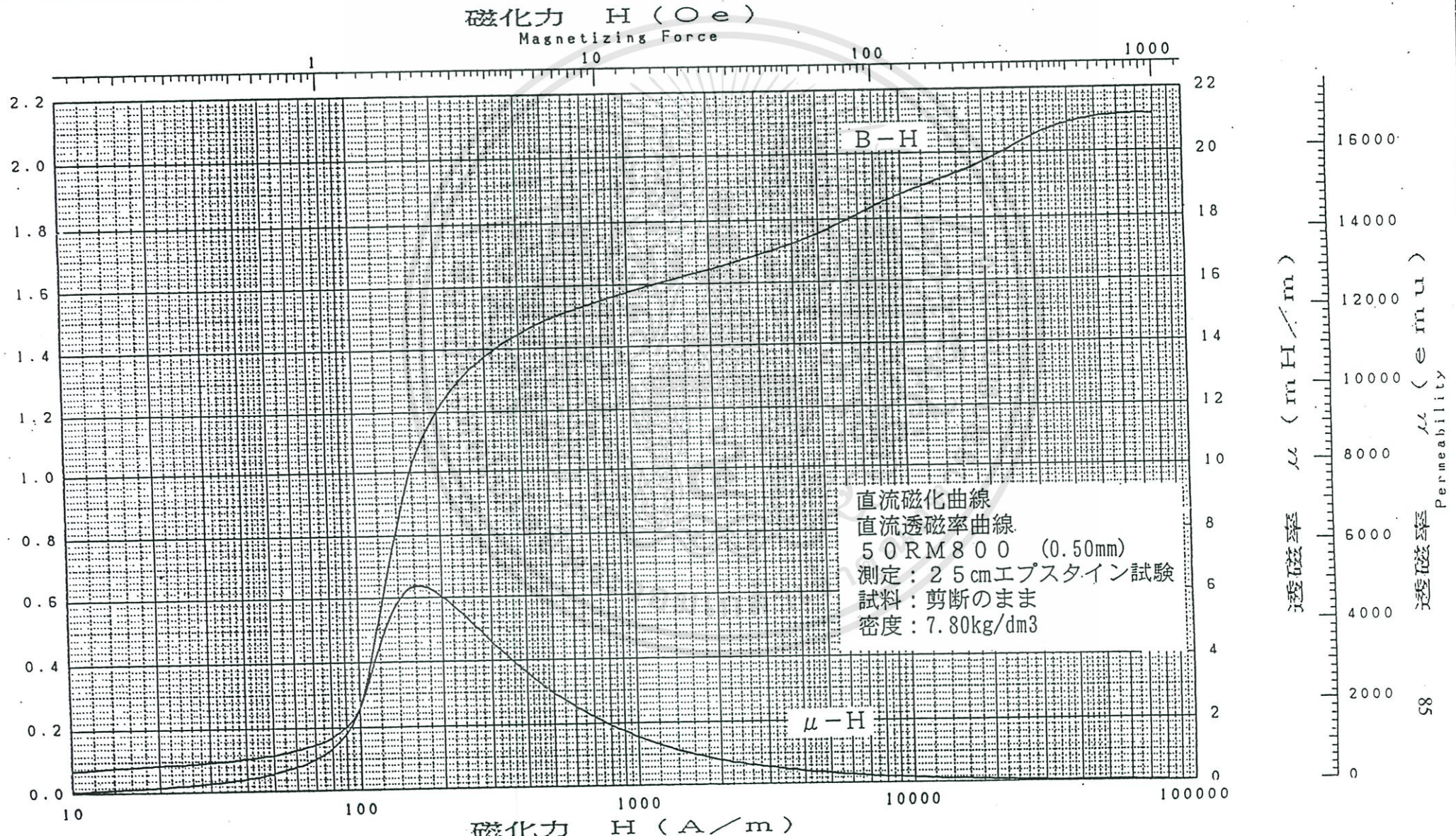
ตารางที่ ก.1 ขนาดของแกนเหล็กที่มีการใช้งานในปัจจุบัน

Lamination	Style	Units	Dimensions						
			A	B	C	D	E	F	G
EE 2425	1	in	1/8	1/4	1/4	1/2			
		mm	3.2	6.4	6.4	12.7			
EE 2627	1	in	3/16	1/4	3/8	11/16			
		mm	4.8	6.4	9.5	17.5			
EI-3/8	2	in	3/16	5/16	3/8	3/4	3/32	1 3/8	
		mm	4.8	7.9	9.5	19.1	2.4	34.9	
EI-1/2	2	in	1/4	5/16	1/2	13/16	1/8	1 5/8	
		mm	6.4	7.9	12.7	20.6	3.2	41.3	
EI-5/8	2	in	5/16	5/16	5/8	15/16	5/32	1 7/8	
		mm	7.9	7.9	15.8	23.8	4.0	47.6	
EI-3/4	2	in	3/8	3/8	3/4	1 1/8	0.132	2 1/4	
		mm	9.5	9.5	19.1	28.6	3.4	57.2	

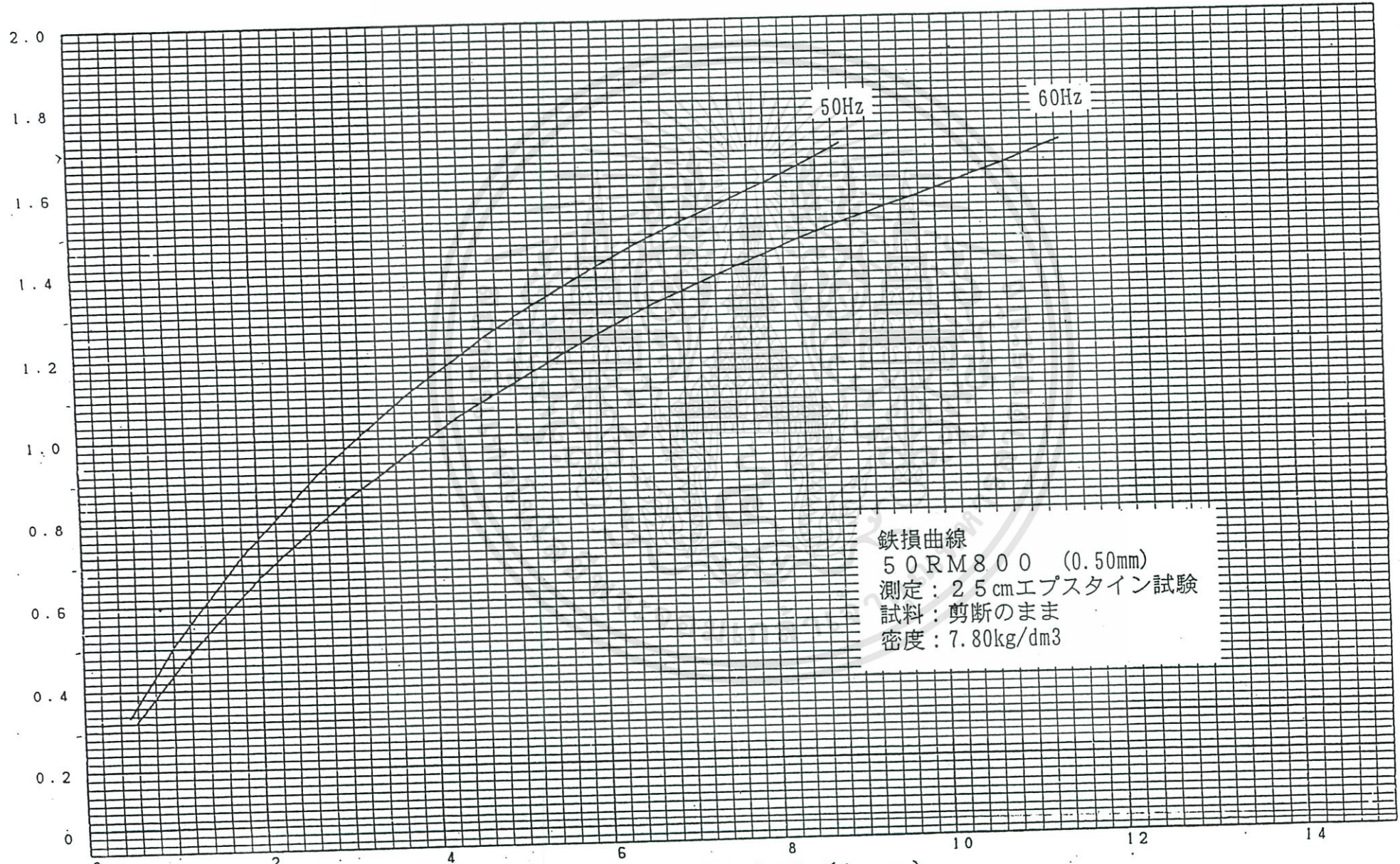
ตารางที่ ก.1 (ต่อ)

Lamination	Style	Units	Dimensions						
			A	B	C	D	E	F	G
EI-7/8	3	in	7/16	7/16	7/8	1 5/16	5/32	2 5/8	7/32
		mm	11.1	11.1	22.2	33.3	4.0	66.7	5.6
EI-1	3	in	1/2	1/2	1	1 1/2	7/32	3	1/4
		mm	12.7	12.7	25.4	38.1	5.6	76.2	6.4
EI-1 1/8	3	in	9/16	9/16	1 1/8	1 11/16	7/32	3 3/8	9/32
		mm	14.3	14.3	28.6	42.9	5.6	95.3	7.9
EI-1 1/4	3	in	5/8	5/8	1 1/4	1 11/16	7/32	3 3/8	9/32
		mm	15.9	15.9	31.8	47.6	5.6	85.7	7.1
EI-1 3/8	3	in	11/16	11/16	1 3/8	2 1/16	7/32	3 3/4	5/16
		mm	17.5	17.5	34.9	52.4	5.6	104.8	8.7
EI-1 1/2	3	in	3/4	3/4	1 1/2	2 1/4	7/32	4 1/2	3/8
		mm	19.1	19.1	38.1	57.2	5.6	114.3	9.5
EI-1 3/4	3	in	7/8	7/8	1 3/4	2 5/8	9/32	5 1/4	7/16
		mm	22.2	22.2	44.4	66.7	7.1	133.4	11.1
EI-19	3	in	7/8	1 3/4	1 3/4	3	17/64	7	7/16
		mm	22.2	44.4	44.4	76.2	6.7	177.8	11.1
EI-2	3	in	1	1	2	3	5/16	6	5/16
		mm	25.4	25.4	50.8	76.2	7.9	152.4	7.9
EI-2 1/4	4	in	1 1/8	1 1/8	2 1/4	3 3/8	5/16	6 3/4	5/16
		mm	28.6	28.6	57.2	85.7	7.9	171.5	7.9
EI-2 1/2	4	in	1 1/4	1 1/4	2 1/2	3 3/4	25/64	7 1/2	3/8
		mm	31.8	31.8	63.5	95.3	9.9	190.5	9.5
EI-3	3	in	1 1/2	1 1/2	3	4 1/2	3/8	9	3/8
		mm	38.1	38.1	76.2	114.3	9.5	228.6	9.5
EI-4	4	in	2	2	4	6	13/32	12	7/16
		mm	50.8	50.8	101.6	152.4	10.3	304.8	11.1
EI-5	4	in	2 1/2	2 1/2	5	7 1/2	35/64	15	9/16
		mm	63.5	63.5	127	190.5	13.9	381	14.3

《 直 流 磁 化 特 性 試 験 》



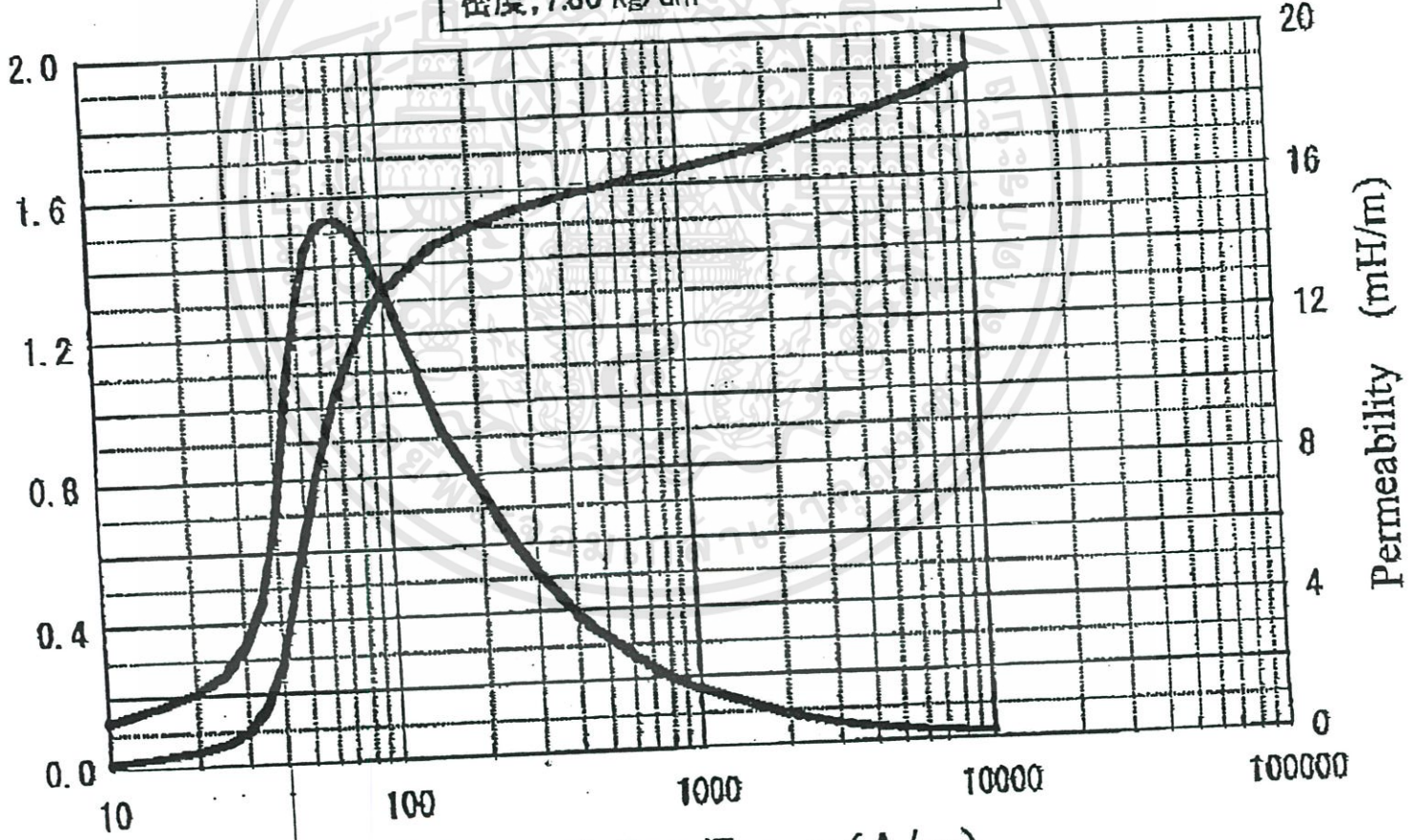
<< 鉄損曲線 >>



鉄損曲線
50RM800 (0.50mm)
測定：25cm Epstein 試験
試料：剪断のまま
密度：7.80kg/dm³

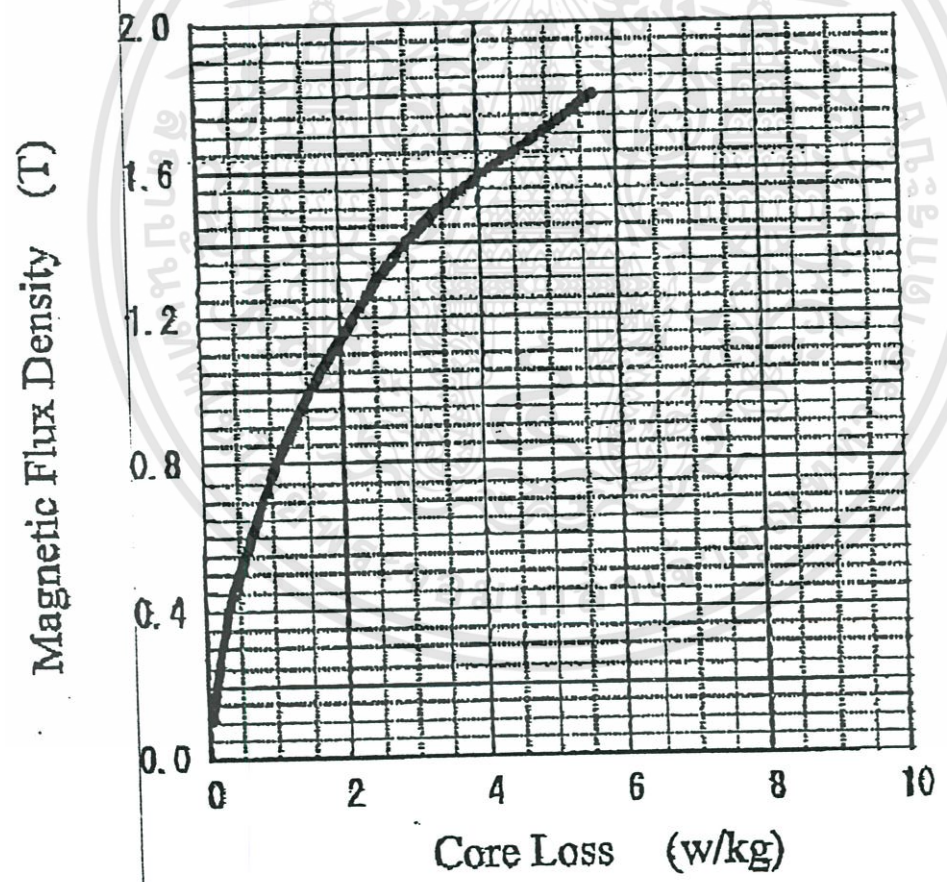
直流磁化曲線
直流透磁率曲線
規格: 50RSY*D
板厚: 0.500 mm
測定: 25cmI7'スライ試験
試料: 750°C × 2Hr, N2雰囲気中焼鈍後
密度: 7.80 kg/dm³

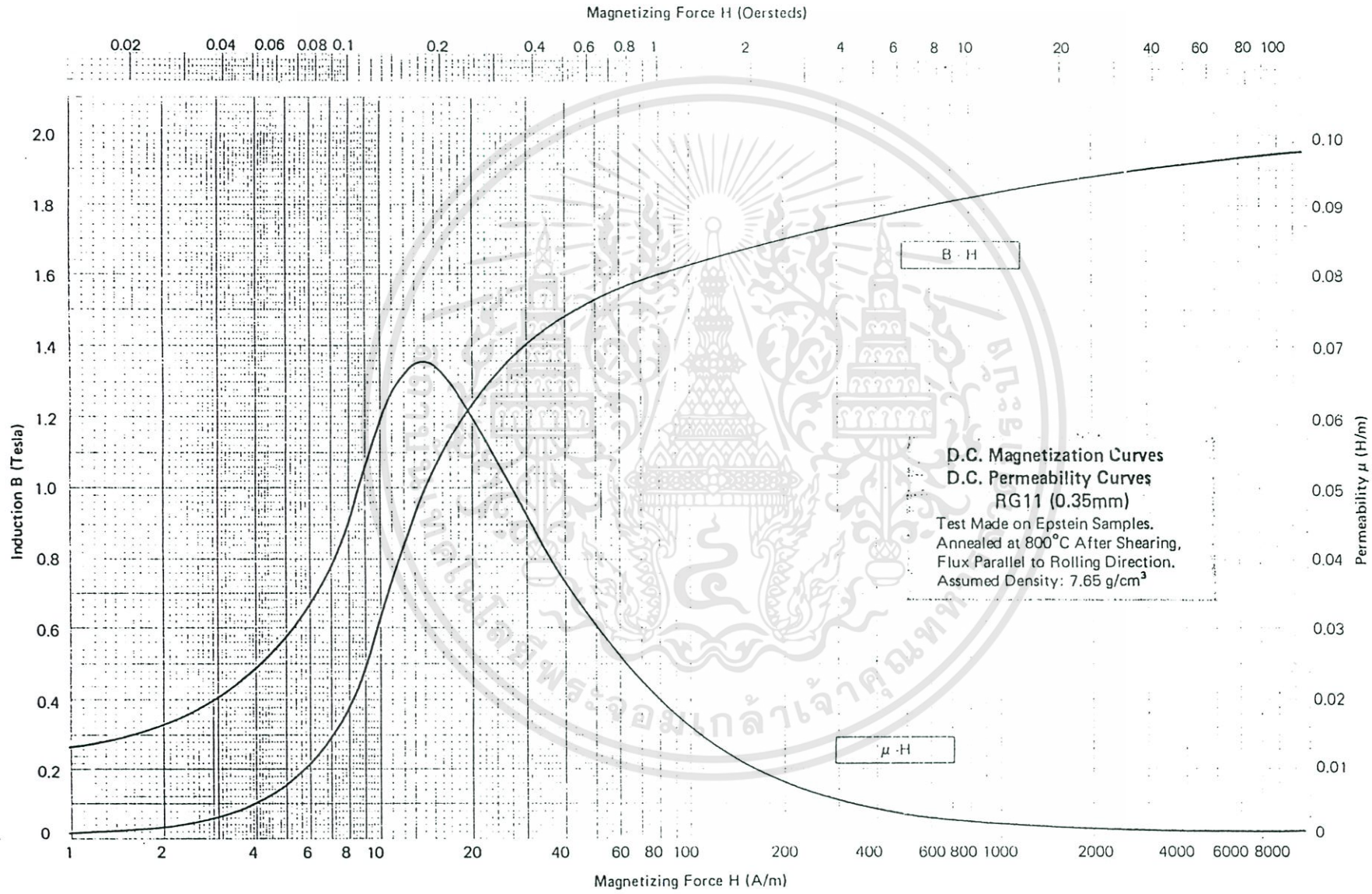
Magnetic Flux Density (T)

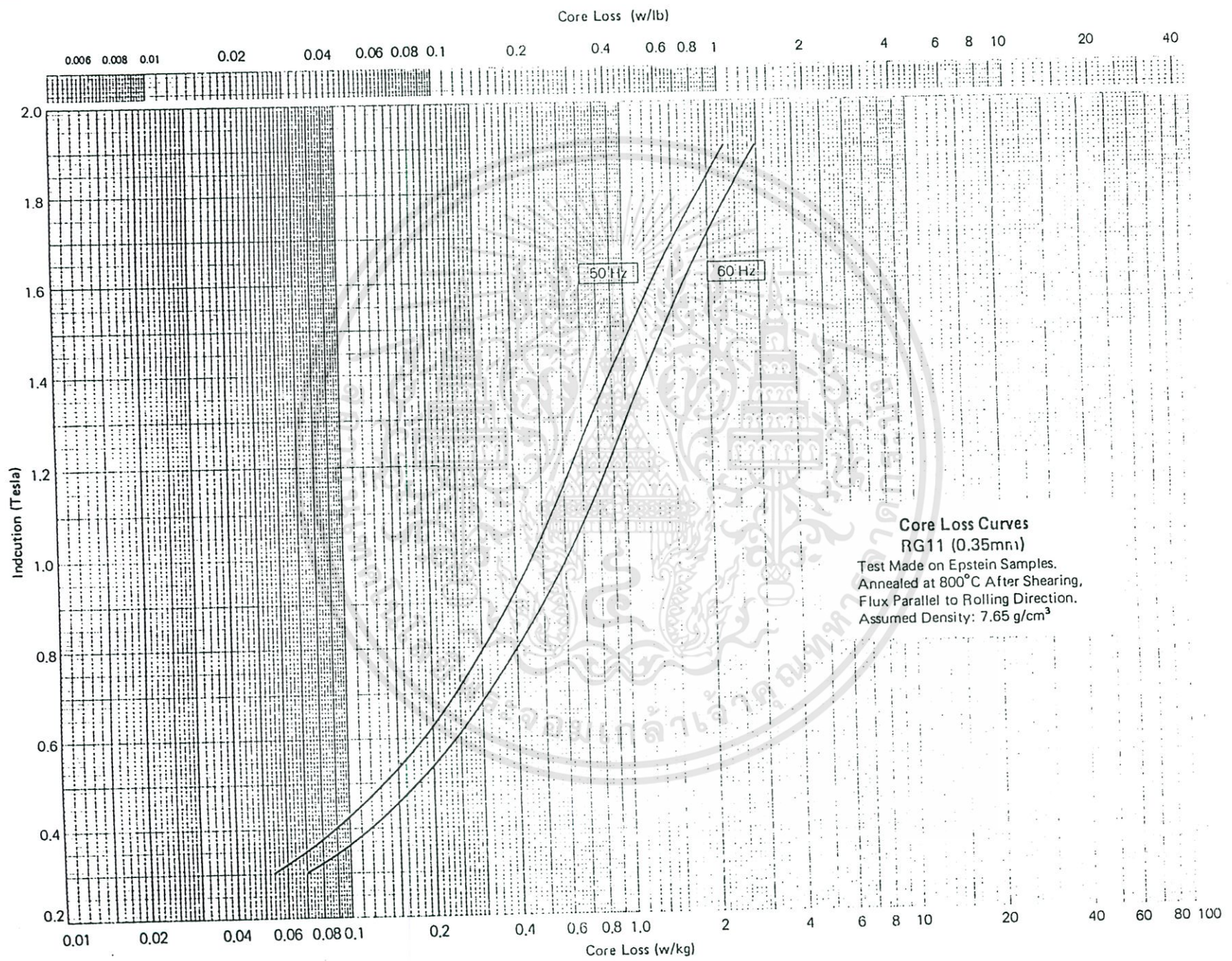


Magnetizing Force (A/m)

鉄損曲線 (50Hz)
規格: 50RSY*D
板厚: 0.500 mm
測定: 25cmIブスライン試験
試料: 750°C×2Hr, N2雰囲気中焼鈍後
密度: 7.80 kg/dm²







Core Loss Curves
 RG11 (0.35mm)
 Test Made on Epstein Samples.
 Annealed at 800°C After Shearing,
 Flux Parallel to Rolling Direction.
 Assumed Density: 7.65 g/cm³



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 ขนาดและคุณสมบัติของลวดตัวนำ

DIA (mm)	UEW/NEW	UEW/PEW	sq. mm.	g/m	L ohm/km	kg/ohm
2.60		2.728	5.309292	47.21000	3.280	14.39000
2.30		2.422	4.154756	36.95000	4.191	8.81000
2.00		2.118	3.141593	27.94000	5.543	5.04000
1.80		1.914	2.544690	22.63000	6.913	3.27000
1.70		1.814	2.269801	20.19000	7.595	2.66000
1.60		1.721	2.010619	17.88000	8.743	2.05000
1.50		1.612	1.767146	15.71000	9.756	1.61000
1.40		1.508	1.539380	13.69000	11.200	1.00000
1.30		1.408	1.327323	11.80000	12.990	0.90800
1.20		1.304	1.130973	10.06000	15.560	0.64700
1.10		1.204	0.950332	8.45000	18.540	0.45600
1.00	1.062	1.102	0.785398	6.98000	22.400	0.31600
0.95	1.008	1.038	0.708822	6.30500	24.320	0.25900
0.90	0.956	0.986	0.636173	5.65600	27.660	0.20400
0.85	0.904	0.934	0.567450	5.04200	30.380	0.16600
0.80	0.852	0.882	0.502655	4.47000	35.000	0.12800
0.75	0.798	0.830	0.441786	3.92900	39.030	0.10100
0.70	0.746	0.776	0.384845	3.42200	45.720	0.07500
0.65	0.694	0.724	0.331831	2.95100	53.020	0.05600
0.60	0.644	0.672	0.282743	2.51400	62.230	0.04000
0.55	0.592	0.620	0.237583	2.11300	74.040	28.50000
0.50	0.542	0.560	0.196350	1.74600	89.580	19.50000
0.45	0.49	0.508	0.159043	1.41400	111.800	12.60000
0.40	0.439	0.456	0.125664	1.11790	141.400	7.91000
0.37	0.407	0.424	0.107521	0.95600	161.500	5.92000
0.35	0.387	0.402	0.096211	0.85550	184.700	4.63000
0.32	0.357	0.372	0.080425	0.71520	221.000	3.24000
0.30	0.337	0.352	0.070686	0.63000	254.000	2.48000
0.29	0.324	0.340	0.066052	0.58740	269.100	2.18000
0.28	0.314	0.330	0.061575	0.55000	294.100	1.87000
0.27	0.304	0.320	0.057256	0.51000	316.600	1.61000
0.26	0.294	0.310	0.053093	0.47210	334.800	1.41000
0.25	0.284	0.298	0.049087	0.44000	370.200	1.19000
0.24	0.274	0.288	0.045239	0.41000	402.200	1.02000
0.23	0.264	0.278	0.041548	0.36950	427.800	0.86400
0.22	0.252	0.266	0.038013	0.34000	480.100	0.70800
0.21	0.241	0.256	0.034636	0.31000	522.800	0.55930
0.20	0.231	0.246	0.031416	0.27940	565.700	0.49400
0.19	0.221	0.236	0.028353	0.25000	640.600	0.39000
0.18	0.211	0.226	0.025447	0.22630	693.400	0.32600
0.17	0.199	0.214	0.022698	0.21000	803.200	0.26100
0.16	0.189	0.204	0.020106	0.17880	883.900	0.20200
0.15	0.177	0.192	0.017671	0.15710	1006.000	0.15600
0.14	0.167	0.182	0.015394	0.13690	1155.000	0.11850
0.13	0.157	0.172	0.013273	0.11800	1325.000	0.08900
0.12	0.147	0.162	0.011310	0.10060	1572.000	0.06390
0.11	0.135	0.150	0.009503	0.08450	1876.000	0.04500
0.10	0.125	0.140	0.007854	0.06980	2263.000	0.03080
0.09	0.113		0.006362	0.05656	2762.000	0.02040
0.08	0.103		0.005027	0.04471	3500.000	0.01270
0.07	0.091		0.003848	0.03422	4578.000	0.00740
0.06	0.081		0.002827	0.02514	6223.000	0.00400
0.05	0.069		0.001963	0.01746	8960.000	0.00195
0.04	0.056		0.001257	0.01118	14000.000	0.00080

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.1 ผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 50 VA, 220/110 V, 50 Hz, $J \approx 4 \text{ A/mm}^2$ ออกแบบที่แกนเหล็กและเป้าหมายต่างๆ แบบ 3 ตัวแปร

	Minimum loss			Minimum cost			Minimum weight		
	RM-800	RM-KTA	RG-11	RM-800	RM-KTA	RG-11	RM-800	RM-KTA	RG-11
D (mm.)	43.00	46.94	47.55	35.63	24.12	24.56	13.48	13.48	10.69
$2E$ (mm.)	22.00	20.79	23.79	20.05	22.75	22.53	26.35	26.35	28.32
B_{\max} (T)	1.038	1.301	1.598	1.580	1.599	1.586	1.585	1.585	1.586
A_c (mm ²)	946	976	1131	714	549	553	355	355	303
A_w (mm ²)	726	324	425	302	388	381	521	521	602
W/kg	3.360	2.411	1.054	7.787	4.308	1.048	4.146	4.146	1.048
a_p (mm.)	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27
a_s (mm.)	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40
N_p (turn)	1030	796	560	896	1152	1152	1796	1796	2104
N_s (turn)	536	414	291	466	599	599	934	934	1094
L_p (m.)	172.67	134.02	95.32	134.30	153.96	154.97	227.51	227.51	267.86
L_s (m.)	91.21	70.84	49.90	70.66	81.57	82.33	121.22	121.22	142.58
R_p (Ω)	54.70	42.46	30.20	42.54	48.77	49.09	72.07	72.07	84.85
R_s (Ω)	12.89	10.01	7.05	9.99	11.53	11.64	17.13	17.13	20.15
P_{core} (W)	3.27	2.29	1.30	5.22	2.52	0.60	1.82	1.82	0.41
P_{cu} (W)	5.49	4.26	3.02	4.26	4.90	4.94	7.26	7.26	8.55
P_{total} (W)	8.76	6.55	4.32	9.48	7.42	5.54	9.08	9.08	8.96
C_{core} (Baht)	29.22	47.49	86.48	20.11	29.21	40.07	21.90	21.90	27.57
C_{cu} (Baht)	28.07	21.79	15.42	21.78	25.06	25.26	37.15	37.15	43.71
C_{total} (Baht)	57.29	69.29	101.90	41.90	54.27	65.34	59.05	59.05	71.28
W_{core} (kg.)	0.974	0.950	1.235	0.670	0.584	0.572	0.438	0.438	0.344
W_{cu} (kg.)	0.190	0.148	0.104	0.147	0.170	0.171	0.252	0.252	0.296
W_{total} (kg.)	1.164	1.097	1.340	0.818	0.754	0.744	0.690	0.690	0.640

ตารางที่ ค.2 ผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 50 VA, 220/110 V, 50 Hz, โดยใช้แกนเหล็กชนิด RM-800 ออกแบบที่ความหนาแน่นกระแสและเป้าหมายต่าง ๆ

แบบ 3 ตัวแปร

	Minimum loss				Minimum cost				Minimum weight			
	5 A/mm ²	4 A/mm ²	3 A/mm ²	2 A/mm ²	5 A/mm ²	4 A/mm ²	3 A/mm ²	2 A/mm ²	5 A/mm ²	4 A/mm ²	3 A/mm ²	2 A/mm ²
<i>D</i> (mm.)	45.94	43.00	44.92	48.00	28.66	35.63	33.67	33.99	10.07	14.48	17.72	20.14
<i>2E</i> (mm.)	19.46	22.00	24.01	28.02	20.01	20.05	22.05	24.69	27.63	26.06	26.38	28.33
<i>B</i> _{max} (T)	1.243	1.038	0.922	0.708	1.592	1.580	1.591	1.569	1.583	1.580	1.593	1.599
<i>A</i> _c (mm ²)	894	946	1078	1345	573	714	743	839	278	377	468	571
<i>A</i> _w (mm ²)	284	726	432	589	300	302	365	457	572	509	522	602
W/kg	4.689	3.360	2.721	1.759	7.918	7.787	7.910	7.674	7.823	7.788	7.932	7.986
<i>a</i> _p (mm.)	0.25	0.27	0.32	0.40	0.25	0.27	0.32	0.40	0.25	0.27	0.32	0.40
<i>a</i> _s (mm.)	0.35	0.40	0.45	0.55	0.35	0.40	0.45	0.55	0.35	0.40	0.45	0.55
<i>N</i> _p (turn)	910	1030	1017	1062	1107	896	856	768	2295	1695	1357	1108
<i>N</i> _s (turn)	473	536	529	552	576	466	445	399	1194	882	706	576
<i>L</i> _p (m.)	151.52	172.67	183.67	215.65	152.53	134.30	131.45	124.40	286.44	215.12	185.62	166.56
<i>L</i> _s (m.)	78.43	91.21	96.12	112.07	79.01	70.66	68.66	63.91	148.20	115.12	96.99	85.84
<i>R</i> _p (Ω)	56.02	54.70	40.54	30.48	56.40	42.54	29.02	17.58	105.91	68.14	40.97	23.54
<i>R</i> _s (Ω)	14.49	12.89	10.79	8.31	14.60	9.99	7.71	4.74	27.38	16.27	10.88	6.36
<i>P</i> _{core} (W)	3.82	3.27	3.30	3.10	4.25	5.22	6.06	7.44	2.81	3.58	4.58	6.04
<i>P</i> _{cu} (W)	5.89	5.49	4.32	3.29	5.93	4.26	3.09	1.89	11.13	6.88	4.37	2.53
<i>P</i> _{total} (W)	9.71	8.76	7.62	6.39	10.18	9.48	9.15	9.33	13.94	10.47	8.94	8.57
<i>C</i> _{core} (Baht)	24.44	29.22	36.35	52.90	16.11	20.11	22.99	29.10	10.79	13.81	17.32	22.70
<i>C</i> _{cu} (Baht)	20.34	28.07	39.01	68.37	20.49	21.78	27.89	39.22	38.45	35.21	39.40	52.59
<i>C</i> _{total} (Baht)	44.78	57.29	75.36	121.27	36.59	41.90	50.89	68.32	49.24	49.02	56.72	75.29
<i>W</i> _{core} (kg.)	0.815	0.974	1.212	1.763	0.537	0.670	0.766	0.970	0.360	0.460	0.577	0.757
<i>W</i> _{cu} (kg.)	0.134	0.190	0.267	0.478	0.135	0.147	0.191	0.274	0.253	0.238	0.270	0.368
<i>W</i> _{total} (kg.)	0.948	1.164	1.479	2.241	0.672	0.818	0.958	1.244	0.612	0.699	0.847	1.124

ตารางที่ 3 ผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 50 VA, 220/110 V, 50 Hz, $J \approx 4 \text{ A/mm}^2$ ออกแบบที่แกนเหล็กและเป้าหมายต่าง ๆ แบบ 5 ตัวแปร

	Minimum loss			Minimum cost			Minimum weight		
	RM-800	RM-KTA	RG-11	RM-800	RM-KTA	RG-11	RM-800	RM-KTA	RG-11
D (mm.)	40.00	51.99	59.79	31.40	39.96	33.88	22.63	22.63	22.66
$2E$ (mm.)	20.50	27.97	25.99	20.44	16.02	15.19	12.12	12.12	12.38
a (mm.)	11.50	10.20	10.21	11.34	14.05	16.30	16.47	16.47	15.51
b (mm.)	30.50	27.82	21.06	30.12	24.24	26.18	43.81	43.81	41.13
B_{\max} (T)	1.165	1.024	1.520	1.595	1.582	1.573	1.598	1.598	1.582
A_c (mm ²)	820	1454	1554	642	640	515	274	274	280
A_w (mm ²)	351	284	215	342	341	427	721	721	638
W/kg	4.157	1.477	1.019	7.943	4.114	1.041	4.297	4.297	1.046
a_p (mm.)	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27
a_s (mm.)	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40
N_p (turn)	1040	679	428	988	999	1249	2305	2305	2279
N_s (turn)	541	354	223	514	519	650	1199	1199	1185
L_p (m.)	165.30	131.22	87.10	142.79	160.27	188.38	281.08	281.08	279.92
L_s (m.)	87.79	69.07	45.62	75.13	85.29	100.19	149.71	149.71	149.47
R_p (Ω)	51.95	41.57	27.59	45.23	50.77	59.67	89.04	89.04	88.67
R_s (Ω)	12.24	9.76	6.45	10.62	12.05	14.16	21.16	21.16	21.12
P_{core} (W)	3.32	2.21	1.39	4.92	2.23	0.47	1.33	1.33	0.31
P_{cu} (W)	5.21	4.16	2.76	4.53	5.11	6.01	8.97	8.97	8.94
P_{total} (W)	8.53	6.37	4.15	9.45	7.34	6.48	10.30	10.30	9.25
C_{core} (Baht)	24.00	74.84	95.33	18.60	27.12	31.79	15.49	15.49	20.73
C_{cu} (Baht)	26.94	21.29	14.09	23.16	26.15	30.73	45.89	45.89	45.76
C_{total} (Baht)	50.94	96.13	109.42	41.76	53.27	62.52	61.38	61.38	66.49
W_{core} (kg.)	0.800	1.497	1.362	0.620	0.542	0.454	0.310	0.310	0.296
W_{cu} (kg.)	0.181	0.144	0.095	0.157	0.177	0.208	0.311	0.311	0.310
W_{total} (kg.)	0.981	1.641	1.457	0.777	0.720	0.662	0.620	0.620	0.606

ตารางที่ ก.4 ผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 50 VA, 220/110 V, 50 Hz, โดยใช้แกนเหล็กชนิด RM-800 ออกแบบที่ความหนาแน่นกระแสและเป้าหมายต่าง ๆ

แบบ 5 ตัวแปร

	Minimum loss				Minimum cost				Minimum weight			
	5 A/mm ²	4 A/mm ²	3 A/mm ²	2 A/mm ²	5 A/mm ²	4 A/mm ²	3 A/mm ²	2 A/mm ²	5 A/mm ²	4 A/mm ²	3 A/mm ²	2 A/mm ²
D (mm.)	45.91	40.00	43.78	53.22	34.86	31.40	40.74	45.76	25.81	35.90	27.70	37.09
$2E$ (mm.)	26.46	20.50	25.83	24.70	16.41	20.44	19.97	18.75	12.98	10.74	11.62	12.96
a (mm.)	11.26	11.50	13.75	16.29	12.31	11.34	12.28	12.19	14.34	17.24	14.68	18.75
b (mm.)	23.30	30.50	31.61	37.34	25.21	30.12	28.30	36.53	34.38	31.24	49.25	39.49
B_{max} (T)	0.997	1.165	0.886	0.704	1.594	1.595	1.595	1.589	1.564	1.589	1.562	1.587
A_c (mm ²)	1215	820	1131	1315	572	642	814	858	335	385	322	481
A_w (mm ²)	262	351	435	608	310	342	347	445	493	539	723	740
W/kg	3.131	4.157	2.544	1.740	7.935	7.943	7.953	7.890	7.614	7.880	7.592	7.862
a_p (mm.)	0.25	0.27	0.32	0.40	0.25	0.27	0.32	0.40	0.25	0.27	0.32	0.40
a_s (mm.)	0.35	0.40	0.45	0.55	0.35	0.40	0.45	0.55	0.35	0.40	0.45	0.55
N_p (turn)	835	1040	1009	1093	1109	988	779	741	1930	1651	2010	1325
N_s (turn)	434	541	525	569	577	514	405	386	1004	859	1045	689
L_p (m.)	154.83	165.30	187.43	234.64	163.61	142.79	128.27	128.92	244.06	240.56	263.14	216.96
L_s (m.)	79.98	87.79	97.63	120.72	85.33	75.13	66.88	67.12	125.74	128.34	136.07	111.13
R_p (Ω)	57.25	51.95	41.37	33.16	60.49	45.23	28.31	18.22	90.24	76.20	58.09	30.66
R_s (Ω)	14.78	12.24	10.96	8.95	15.77	10.62	7.50	4.98	23.23	18.14	15.27	8.24
P_{core} (W)	3.62	3.32	3.20	2.80	3.82	4.92	6.11	7.13	2.46	2.80	2.88	4.20
P_{cu} (W)	6.01	5.21	4.40	3.56	6.38	4.53	3.01	1.97	9.46	7.68	6.16	3.29
P_{total} (W)	9.63	8.53	7.60	6.36	10.20	9.45	9.13	9.10	11.92	10.49	9.04	7.48
C_{core} (Baht)	34.70	24.00	37.68	48.20	14.43	18.60	23.06	27.10	9.67	10.68	11.39	16.02
C_{cu} (Baht)	20.77	26.94	39.72	74.03	22.05	23.16	27.19	40.91	32.69	39.31	55.56	68.31
C_{total} (Baht)	55.46	50.94	77.40	122.22	36.48	41.76	50.25	68.01	42.37	49.98	66.94	84.32
W_{core} (kg.)	1.157	0.800	1.256	1.607	0.481	0.620	0.769	0.903	0.322	0.356	0.380	0.534
W_{cu} (kg.)	0.137	0.181	0.272	0.517	0.145	0.157	0.186	0.286	0.215	0.266	0.381	0.477
W_{total} (kg.)	1.293	0.981	1.528	2.124	0.626	0.777	0.955	1.189	0.537	0.622	0.760	1.011

ตารางที่ ค.5 ผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 25 VA, 220/110 V, 50 Hz, โดยใช้แกนเหล็กชนิด RG-800, $J \approx 4 \text{ A/mm}^2$ ที่เป้าหมายค่าความสูญเสียต่ำแบบ 3 และ 5 ตัวแปร

	Minimum loss		Minimum weight		Minimum cost	
	#3	#5	#3	#5	#3	#5
D (mm.)	36.5	38.5	12.2	24.9	18.7	30.9
$2E$ (mm.)	20.2	20.0	22.9	12.0	20.1	11.9
a (mm.)		9.6	0.0	17.9	0.0	12.7
b (mm.)		28.1	0.0	23.0	0.0	25.5
B_{\max} (T)	0.977	1.015	1.593	1.504	1.594	1.580
W/kg	3.018	3.230	7.928	6.965	7.942	7.793
a_p (mm.)	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
a_s (mm.)	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27
N_p (turn)	1404	1294	2276	2249	1684	1748
N_s (turn)	730	673	1184	1170	876	909
R_p (Ω)	120.83	112.83	159.52	184.67	122.91	142.07
R_s (Ω)	34.77	32.48	45.52	52.60	35.32	40.49
P_{core} (W)	0.697	0.693	0.298	0.247	0.354	0.286
P_{cu} (W)	0.116	0.108	0.138	0.160	0.107	0.133
P_{total} (W)	0.813	0.801	0.437	0.407	0.461	0.419
C_{core} (Baht)	2.10	2.24	2.37	1.72	2.81	2.23
C_{cu} (Baht)	3.36	3.14	4.41	5.10	3.41	3.93
C_{total} (Baht)	5.46	5.38	6.78	6.82	6.22	6.15
W_{core} (kg.)	48.70	40.00	14.92	12.34	17.70	14.28
W_{cu} (kg.)	27.89	27.28	20.89	24.16	16.15	18.59
W_{total} (kg.)	76.59	67.28	35.81	36.50	33.85	32.87

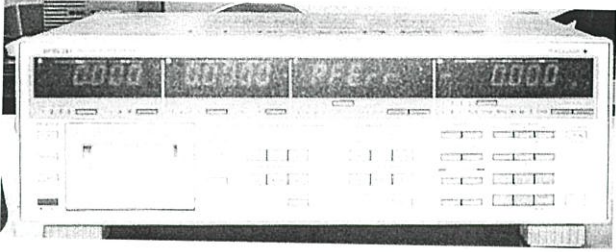
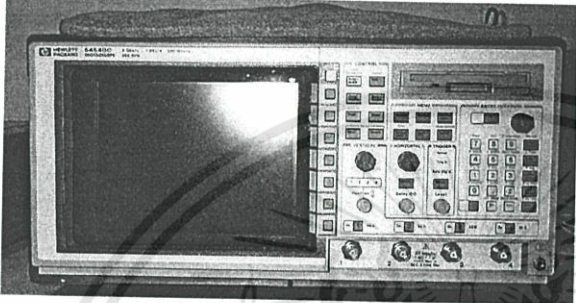
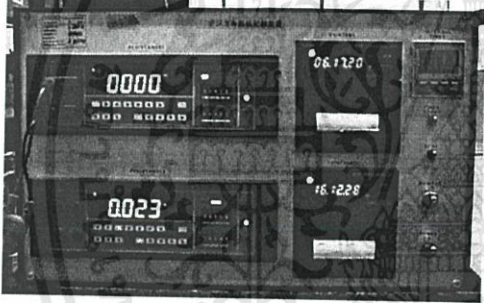

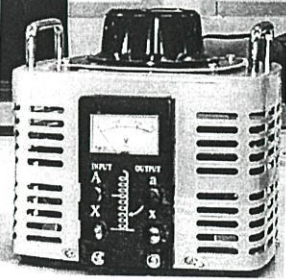
ตารางที่ ค.6 ผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 12 VA, 220/12 V, 50 Hz โดยใช้แกนเหล็กชนิด RG-11, $J \approx 2 \text{ A/mm}^2$ ที่เป้าหมายต่างๆ แบบใช้ D และ B_{\max} เป็นตัวแปร

	Minimum loss	Minimum weight	Minimum cost
D (mm.)	32.2	11.4	16.5
B_{\max} (T)	1.3	1.6	1.6
W/kg	0.7944	1.054298	1.054345
a_p (mm.)	0.19	0.19	0.19
a_s (mm.)	0.8	0.8	0.8
N_p (turn)	1242	2919	2014
N_s (turn)	72	166	115
R_p (Ω)	107.81	237.89	161.11
R_s (Ω)	0.34	0.71	0.49
W_{core} (kg.)	0.534	0.189	0.274
W_{cu} (kg.)	0.086	0.167	0.114
W_{total} (kg.)	0.619	0.356	0.388
P_{core} (W)	0.42	0.20	0.29
P_{cu} (W)	0.81	1.42	0.97
P_{total} (W)	1.23	1.62	1.26
C_{core} (Baht)	26.68	9.44	13.69
C_{cu} (Baht)	12.89	25.15	17.22
C_{total} (Baht)	39.56	34.59	30.90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	<p>Digital power meter YOGOGAWA 2531</p>
	<p>Oscilloscope HP 54540 C</p>
	<p>Digital ohm meter TSURUGA 3563</p>
	<p>Multimeter - FLUKE 89 IV - FLUKE 10</p>
	<p>Variac 0-250 V, 12 A</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

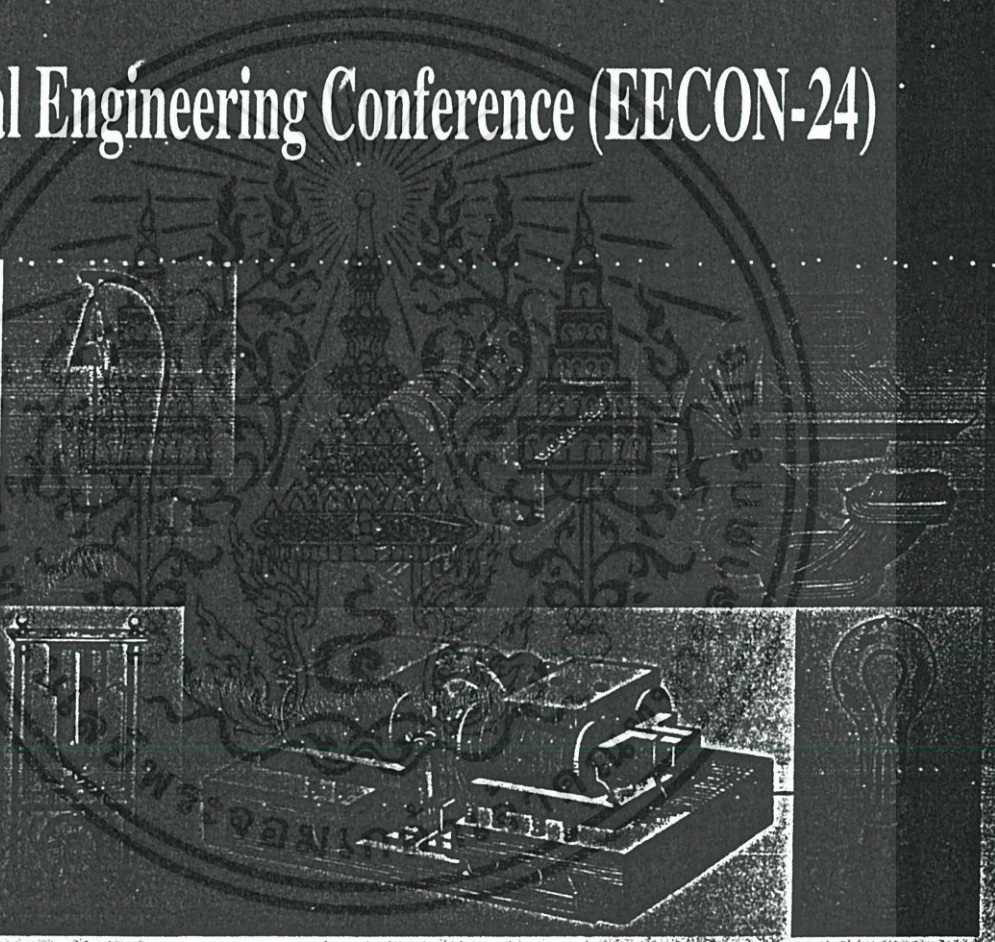


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 24

24th Electrical Engineering Conference (EECON-24)

Logos of participating organizations: ZOOMER, EECON-24 KMITL, and NECTEC.



สาขาความ
ไฟฟ้ากำลัง (PW)
อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)
ระบบควบคุมและการวัดคุม (CT)
งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ
วิศวกรรมไฟฟ้า (GN)

ดำเนินการโดย คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
22-23 พฤศจิกายน 2544
โทร : 0-2730-2350 โทรสาร : 0-2326-9065

ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น <http://www.ladkrabang.com> ด้านการค้า
อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กประสิทธิภาพสูงโดยวิธีการหาค่าที่เหมาะสม

Design of High-Efficiency Small Transformers Using Optimization Techniques

ธีรพล โพธิ์พงษ์วิวัฒน์ วีระศักดิ์ วงศ์วิวัฒน์ ชัยวุฒิ ฉัตรฤทธิ

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการพัฒนาโปรแกรมออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กแบบเชลล์ที่มีประสิทธิภาพสูงด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสม โดยการพิจารณาตัวแปรในการออกแบบประกอบด้วยพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กและขนาดพื้นที่หน้าตัดของช่องว่างพันขดลวด ในการออกแบบโครงสร้างของแกนเหล็กและขดลวดตัวนำจะใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมเชิงตัวเลขแบบมีเงื่อนไข โดยมีเป้าหมายที่ทำให้มีประสิทธิภาพสูง (ค่าสูญเสียรวมต่ำ) และนำเสนอแนวความคิดใหม่ในการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าที่เหมาะสมโดยมีหลายเป้าหมาย เช่น มีประสิทธิภาพสูงและน้ำหนักน้อย มีประสิทธิภาพสูงและราคาต่ำ ในบทความนี้นำเสนอผลการออกแบบของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 1000 VA, 220/110 V และ 360 VA, 220/36 V จากผลการออกแบบโครงสร้างจะพบว่าหม้อแปลงไฟฟ้าที่ได้มีค่าประสิทธิภาพที่สูงขึ้น นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นถึงโครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูงจะเปลี่ยนแปลงไปเมื่อกำหนดค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กในการออกแบบที่แตกต่างกัน

Abstract

This paper presents the development of the program for designing a shell-type high-efficiency small transformers using the optimization techniques. The cross-section area of core and window area of winding are defined to be the design variables and the effect of the chosen values of magnetic flux density are also discussed. The constructions of core and winding having minimum total losses (high-efficiency) are obtained by using the numerical constrained optimization techniques and the new idea of multi-objectives design optimization such as high-efficiency and minimum weight, high-efficiency and minimum cost are suggested. In this paper, the optimum constructions of 1000 VA, 220/110 V and 360 VA, 220/36 V transformers are illustrated. The results show that the transformer construction having high-efficiency performance can be achieved. Furthermore, the change of transformer constructions having high-efficiency with various designed flux densities are also illustrated.

Keywords: high-efficiency small transformers, optimization techniques, multi-objective design optimization

1. บทนำ

หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นส่วนประกอบที่สำคัญอย่างหนึ่งในระบบไฟฟ้า ซึ่งจำเป็นต้องออกแบบให้มีประสิทธิภาพสูงเพื่อลดความสูญเสียในระบบหม้อแปลงไฟฟ้าทำหน้าที่ส่งพลังงานไฟฟ้าจากขดลวดด้านหนึ่งไปยังขดลวดอีกด้านหนึ่ง โดยใช้วงจรแม่เหล็กเดียวกัน หม้อแปลงไฟฟ้าประกอบด้วยโครงสร้างที่สำคัญ 2 ส่วนได้แก่ แกนเหล็กและขดลวด โดยที่ขดลวดจะทำหน้าที่สร้างสนามแม่เหล็กให้เกิดขึ้นในแกนเหล็กซึ่งทำหน้าที่เป็นวงจรแม่เหล็ก ความสามารถของการส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าในหม้อแปลงไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กของแกนเหล็ก คุณภูมิที่ใช้งาน ความถี่ของระบบไฟฟ้า การออกแบบที่เหมาะสมสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กโดยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมเชิงตัวเลขแบบมีเงื่อนไขโดยกำหนดเป้าหมายในการออกแบบลักษณะต่างๆ เช่น การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีน้ำหนักรวมน้อย หรือมีราคาต่ำ หรือมีค่าสูญเสียรวมต่ำ ได้มีการนำเสนอมาแล้วอย่างต่อเนื่อง [1-3] ในบทความนี้จะกล่าวถึงวิธีการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กแบบเชลล์ โดยมีเป้าหมายการออกแบบที่ทำให้ค่าความสูญเสียรวมต่ำ (ประสิทธิภาพสูง) และเสนอแนวความคิดใหม่ในการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าที่เหมาะสมโดยมีหลายเป้าหมาย เช่น มีประสิทธิภาพสูงและน้ำหนักน้อย มีประสิทธิภาพสูงและราคาต่ำ โดยในการออกแบบจะพิจารณาในส่วนของการออกแบบโครงสร้างแกนเหล็กและขดลวดที่มีค่าเหมาะสมตามเป้าหมายที่ต้องการ รวมถึงผลของการเลือกใช้ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก สมการความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างแกนเหล็กกับขดลวดสามารถแสดงได้ในรูปของอัตราส่วนแรงดันต่อรอบดังนี้

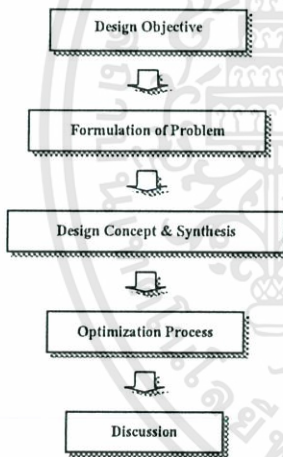
$$\frac{V_p}{N_p} = \frac{V_s}{N_s} = \sqrt{2} \pi f B_{\max} A_c F_s \quad (1)$$

เมื่อ V_p และ V_s เป็นพิกัดแรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ (V) ตามลำดับ N_p และ N_s เป็นจำนวนรอบขดลวดด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ ตามลำดับ f เป็นความถี่ของระบบไฟฟ้า (Hz) B_{\max} เป็นค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (T) A_c เป็นพื้นที่หน้าตัดของวงจรแม่เหล็ก (m^2) และ F_s เป็นค่า stacking factor จากสมการที่ 1 จะเห็นได้ว่า เทอมซ้ายมือจะเกี่ยวข้องกับโครงสร้างของขดลวด และเทอมด้านขวามือจะเกี่ยวข้องกับโครงสร้างของแกนเหล็ก ดังนั้นในการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าที่เหมาะสมตามเป้าหมายต่าง ๆ สามารถพิจารณาได้จากความ

สัมพันธของสมการที่ 1 จากการวิจัยที่ผ่านมาได้มีการนำต้นแบบที่ได้สร้างจากการออกแบบโดยใช้แกนหลักมาตรฐานมาทดสอบเปรียบเทียบกันระหว่างการออกแบบโดยใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสม (แบบ 2 ตัวแปร E, D) กับวิธี Area Product [4-5] พบว่าวิธีการหาค่าที่เหมาะสมให้ผลที่ดีกว่าตามเป้าหมายของการออกแบบ ในงานวิจัยนี้ได้มีการพิจารณาถึงขนาดพื้นที่หน้าตัดของแกนหลัก (E, D) และขนาดพื้นที่หน้าตัดของช่องว่างพันธคลวด (a, b) เป็นตัวแปรในการออกแบบ (แบบ 4 ตัวแปร E, D, a, b)

2. การแก้ปัญหาทางวิศวกรรมโดยวิธีการหาค่าที่เหมาะสม

ในงานวิศวกรรมการออกแบบเป็นงานที่ต้องมีการปรับปรุงพัฒนาและแก้ไขการออกแบบให้เหมาะสมเนื่องจากมีความต้องการในการใช้งานที่แตกต่างกัน รวมถึงราคาของวัสดุที่มีการเปลี่ยนแปลง ทำให้มีปัญหาในการออกแบบ ดังนั้นเพื่อลดปัญหาในการออกแบบและเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพจึงได้มีการนำวิธีการหาค่าที่เหมาะสมมาช่วยในการออกแบบ ขั้นตอนทั่วไปของการออกแบบ [6-7] แสดงได้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ขั้นตอนทั่วไปของการออกแบบที่เหมาะสม

จากรูปที่ 1 ขั้นตอนแรกเป็นการกำหนดเป้าหมายของการออกแบบในทางทฤษฎีการหาค่าที่เหมาะสมจะกำหนดเป้าหมายของการออกแบบเพียงเป้าหมายเดียวเท่านั้นเพื่อความชัดเจนในการแก้ปัญหา ในกรณีที่เป้าหมายของการออกแบบมากกว่าหนึ่งจะกำหนดให้มีเป้าหมายหลักเพียงเป้าหมายเดียวและให้เป้าหมายอื่นเป็นเป้าหมายรองโดยจัดให้อยู่ในรูปของเงื่อนไขการออกแบบแทน ขั้นตอนต่อไปเป็นการรวบรวมสมการที่เกี่ยวข้องในการแก้ปัญหาของการออกแบบซึ่งผู้ออกแบบจะต้องทำความเข้าใจในวิธีการออกแบบรวมถึงข้อกำหนดต่าง ๆ และขั้นตอนต่อไปจะเป็นการพิจารณาจัดความสัมพันธ์และสังเคราะห์สมการต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องโดยในขั้นตอนนี้จะรวมถึงการลดรูปตัวแปร โดยการจัดให้แบ่ง

อยู่ในสมการอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกัน ในขั้นตอนต่อไปเป็นกระบวนการวิธีเชิงตัวเลขในการหาค่าที่เหมาะสม และขั้นตอนสุดท้ายเป็นการตรวจสอบความสัมพันธ์ของผลลัพธ์ที่ได้กับสมการเป้าหมายและเงื่อนไขว่าเป็นไปตามที่กำหนดหรือไม่ หากผลลัพธ์ที่ได้เป็นไปไม่ได้ในทางปฏิบัติ ผู้ออกแบบสามารถที่จะพิจารณาหาข้อผิดพลาดต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นได้ และกลับไปเริ่มต้นออกแบบอีกครั้งหนึ่ง

โดยทั่วไปการแก้ปัญหาในการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไขจะจัดให้อยู่ในรูปสมการคณิตศาสตร์ดังนี้[7]

Minimize $F(x)$ Objective function (1)

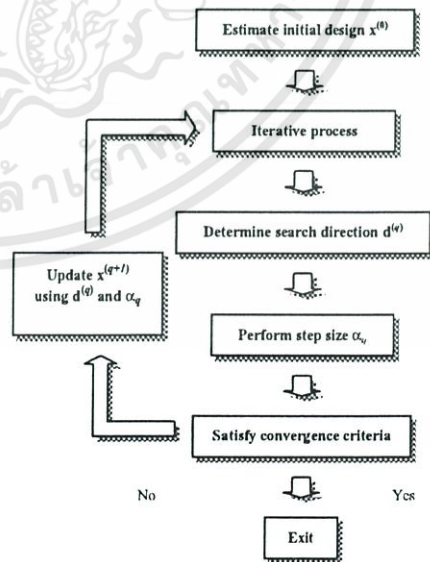
Subject to

$h_j(x) = 0 \quad j = 1, \dots, m$ Equality constraints (2)

$g_k(x) \leq 0 \quad k = 1, \dots, l$ Inequality constraints (3)

$x_i^L \leq x_i \leq x_i^U \quad i = 1, \dots, n$ Side constraints (4)

เมื่อ $x = (x_1, \dots, x_n)$ เป็นเวกเตอร์ของตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบ โดยสมการเป้าหมายจะจัดให้อยู่ในรูปตัวแปรของ x สมการที่ 2 และ 3 เป็นเงื่อนไข (constraints) ของการออกแบบซึ่งจัดให้อยู่ในรูปสมการที่เท่ากับศูนย์ และน้อยกว่าหรือเท่ากับศูนย์ตามลำดับ เพื่อใช้เป็นเงื่อนไขในการหาค่าที่เหมาะสม ซึ่งสมการที่ 2 และ 3 อาจจะเป็นฟังก์ชันที่เป็นเชิงเส้นหรือไม่เป็นเชิงเส้นก็ได้ สมการที่ 4 เป็นเงื่อนไขที่ถูกกำหนดให้เป็นขอบเขตของตัวแปรในการออกแบบเพื่อที่จะป้องกันการได้ค่าคำตอบของตัวแปรที่เป็นไปไม่ได้ในทางปฏิบัติ



รูปที่ 2 ขั้นตอนทั่วไปของวิธีการหาค่าที่เหมาะสม

บทความนี้ใช้วิธีเชิงตัวเลขในการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไข ซึ่งมีแผนผังขั้นตอนการทำงานดังรูปที่ 2 ประกอบไปด้วยขั้นตอนที่สำคัญ 3 ขั้นตอนดังนี้

1. หาริทิศทางการเข้าสู่จุดค่าสุดของสมการเป้าหมาย
2. การกำหนดขนาดของระยะที่ต้องเคลื่อนที่ไปในทิศทางที่เข้าสู่
3. พิจารณาการสิ้นสุดกระบวนการเมื่อได้ค่าตอบที่ยอมรับได้โดยเงื่อนไขของสมการที่ 2 ถึง 4 ต้องเป็นจริง

วิธีการจะเริ่มด้วยการกำหนดค่าเริ่มต้นของตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบ $x^{(0)}$ และอาศัยข้อมูลจากจุดเริ่มต้นทำการปรับเปลี่ยนค่าใหม่โดยการซ้ำดังสมการที่ 5

$$x(q) = x(q-1) + \alpha q s(q) \tag{5}$$

เมื่อ q เป็นจำนวนการทำซ้ำ s เป็นเวกเตอร์ของทิศทางที่เข้าสู่จุดค่าสุดของเป้าหมาย α เป็นขนาดระยะที่เคลื่อนที่ในทิศทาง s

3. การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กที่เหมาะสม

จากขั้นตอนของการออกแบบที่เหมาะสม ในขั้นตอนแรกเป็นการกำหนดเป้าหมายของการออกแบบ โดยในบทความที่กำหนดให้เป็นการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กมีเป้าหมายเป็น

1. ค่าสูญเสียรวมต่ำ (ประสิทธิภาพสูง)
2. ค่าสูญเสียรวมต่ำและมีราคาต่ำ
3. ค่าสูญเสียรวมต่ำและมีน้ำหนักรวมต่ำ

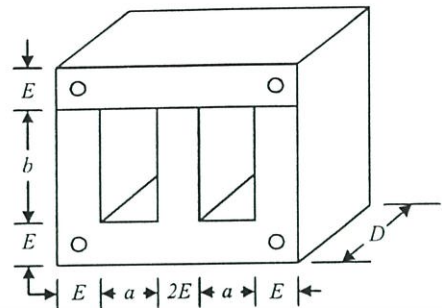
ในขั้นตอนต่อมาเป็นการพิจารณาสมการของการออกแบบที่เกี่ยวข้องกับเป้าหมายที่กำหนดไว้ นั่นคือ น้ำหนัก ราคา และค่าสูญเสีย

น้ำหนักของโครงสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าประกอบด้วยสองส่วนหลักคือแกนเหล็กและขดลวด ซึ่งน้ำหนักของแกนเหล็กสามารถกำหนดได้จากปริมาตรของแกนเหล็ก (V_{core}) และค่าความหนาแน่นของแกนเหล็ก (σ_{core}) ซึ่งโครงสร้างแกนเหล็กแบบเซลล์ที่ใช้ในการออกแบบนี้กำหนดให้พิจารณาขนาดพื้นที่ที่ช่องว่างสำหรับกรพันขดลวดด้วยโดยแสดงโครงสร้างดังรูปที่ 3 ดังนั้นสามารถกำหนดสมการของน้ำหนักแกนเหล็ก (W_{core}) ได้ดังนี้

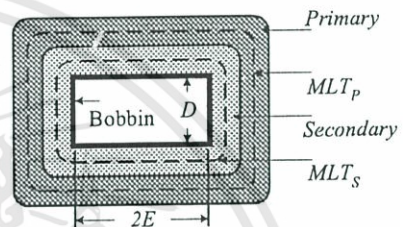
$$W_{core}(a, b, D, E) = \sigma_{core} V_{core} \quad \text{kg} \tag{6}$$

$$V_{core} = [(4E + 2a)(2E + b)D] - [2abd] \quad \text{m}^3 \tag{7}$$

การคำนวณขนาดน้ำหนักขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าจะพิจารณาจากโครงสร้างดังรูปที่ 4 ซึ่งประกอบด้วย ขดลวดด้านปฐมภูมิ ขดลวดด้านทุติยภูมิและกระสวยพันขดลวด โดยการคำนวณนั้นจะพิจารณาจากปริมาตรของขดลวด (V_{cu}) และค่าความหนาแน่นของลวดตัวนำ (σ_{cu}) ดังสมการ



รูปที่ 3 โครงสร้างแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็ก



รูปที่ 4 โครงสร้างขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็ก

$$W_{cu}(a, b, D, E) = \sigma_{cu} V_{cu} \quad \text{kg} \tag{8}$$

$$V_{cu} = (A_{wp} N_p MLT_p) + (A_{ws} N_s MLT_s) \quad \text{m}^3 \tag{9}$$

เมื่อ MLT_p และ MLT_s เป็นความยาวเฉลี่ยต่อรอบ (m) ของขดลวดด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิตามลำดับ A_{wp} และ A_{ws} เป็นพื้นที่หน้าตัด (mm^2) ขดลวดด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิตามลำดับ ดังนั้นสมการเป้าหมายในกรณีของน้ำหนักรวมต่ำ (Min W) สามารถกำหนดได้ดังต่อไปนี้

$$\text{Minimize } F(W) = W_{core} + W_{cu} \tag{10}$$

ราคาของโครงสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าประกอบด้วยสองส่วนคือราคาแกนเหล็กและราคาขดลวด ราคาของแกนเหล็กสามารถกำหนดได้จากน้ำหนักของแกนเหล็ก (W_{core}) และราคาต่อกิโลกรัมของแกนเหล็ก (K_{core}) ส่วนราคาขดลวดสามารถกำหนดได้จากน้ำหนักของขดลวด (W_{cu}) และราคาต่อกิโลกรัมของขดลวด (K_{cu}) ดังนั้นสมการเป้าหมายในกรณีของราคารวมต่ำ (Min C) สามารถกำหนดได้ดังต่อไปนี้

$$\text{Minimize } F(C) = (K_{core} W_{core}) + (K_{cu} W_{cu}) \tag{11}$$

การออกแบบในกรณีของราคารวม โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ได้จะมีลักษณะของโครงสร้างที่ไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับการเลือกแกนเหล็กและขดลวดในช่วงเวลาที่ออกแบบ ซึ่งจะแตกต่างกับในกรณีของ

น้ำหนักรวม และในกรณีของค่าสูญเสียรวมที่จะมีโครงสร้างที่แน่นอนไม่เปลี่ยนแปลงความราคาของแกนเหล็กและขดลวด

ค่าสูญเสียรวมของหม้อแปลงไฟฟ้าประกอบด้วยค่าสูญเสียในแกนเหล็ก (P_{core}) และในขดลวดตัวนำ (P_{cu}) ซึ่งค่าสูญเสียในแกนเหล็กสามารถกำหนดได้จากน้ำหนักและค่าสูญเสียวัตต์ต่อกิโลกรัมของแกนเหล็ก (p_c) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับชนิดและการเลือกใช้ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กของแกนเหล็ก

$$P_{core} = p_c W_{core} \tag{12}$$

สำหรับค่าสูญเสียในขดลวดตัวนำจะขึ้นอยู่กับชนิด ความยาว และอุณหภูมิใช้งานของลวดทองแดงดังนี้

$$P_{cu} = R_T \rho \left(\frac{S}{V_p} \right)^2 \left(\frac{l_p}{A_{wp}} + n^2 \frac{l_s}{A_{ws}} \right) \tag{13}$$

เมื่อ R_T เป็นความต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิใช้งาน (Ω) ρ เป็นความต้านทานจำเพาะของลวดทองแดง ($\Omega \cdot m$) S เป็นพิคกัล้างไฟฟ้า (VA) V_p เป็นพิคกัล้างแรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ (V) n เป็นค่าอัตราส่วนจำนวนรอบ l_p และ l_s เป็นขนาดความยาวขดลวด (m) ของด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิตามลำดับ ดังนั้นสมการเป้าหมายในกรณีของค่าสูญเสียรวมค่า (Min L) สามารถกำหนดได้ดังต่อไปนี้

$$\text{Minimize } F(L) = P_{core} + P_{cu} \tag{14}$$

จากสมการเป้าหมายของการออกแบบในกรณีต่าง ๆ ที่ได้แสดงข้างต้นนั้น ทำให้สามารถพิจารณากำหนดสมการเป้าหมายของการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าที่เหมาะสมโดยมีหลายเป้าหมายได้ดังนี้

ค่าสูญเสียรวมต่ำและมีราคารวมต่ำ Min L+C

$$\text{Minimize } F(L+C) = F(L) + F(C) \tag{15}$$

ค่าสูญเสียรวมต่ำและมีน้ำหนักรวมต่ำ Min L+W

$$\text{Minimize } F(L+W) = F(L) + F(W) \tag{16}$$

โดยแต่ละเป้าหมายของการออกแบบจะต้องมีเงื่อนไขเป็นข้อจำกัดของการออกแบบดังนี้

- ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่ใช้จะต้องมีค่าไม่เกินกว่าค่าที่กำหนดให้
- พื้นที่ช่องว่างสำหรับพันขดลวดจะต้องเพียงพอที่จะสามารถใส่ขดลวดได้
- ค่าพารามิเตอร์ในการออกแบบที่กำหนดให้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดในการออกแบบ

แกนเหล็ก	RM-14	Frequency (Hz)	50
J (A/mm ²)	2	K_{core} (Baht/kg)	50
B_{max} (T)	1.0	K_{cu} (Baht/kg)	200
Stacking factor	0.98	Ambient Temp. (°C)	35
Winding factor	0.45	Operate Temp. (°C)	75

4. ผลการออกแบบและการวิเคราะห์

บทความนี้ใช้วิธีการเชิงตัวเลขในการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไขโดยวิธี SUMT (Sequential Unconstrained Minimization Techniques) ซึ่งเป็นวิธีการจัดรูปสมการของปัญหาแบบมีเงื่อนไขให้อยู่ในรูปสมการของปัญหาที่ไม่มีเงื่อนไขแบบ QUAP (Quadratic Extended Penalty Function) [6-7] ผลการออกแบบได้จากการพัฒนาโปรแกรมการออกแบบโดยใช้ Microsoft Visual Basic 6.0

บทความนี้จะแสดงผลการเปรียบเทียบโครงสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบโดยกำหนดเป้าหมายต่าง ๆ ซึ่งผลการออกแบบโครงสร้างที่ขนาดพิคกัล้าง 360 VA, 220/36 V และ 1000 VA, 220/110 V แสดงดังตารางที่ 2 และ 3 ตามลำดับ

ตารางที่ 2 ผลการออกแบบโครงสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าพิคกัล้าง 360 VA 220/36 V โดยมีเป้าหมายการออกแบบในลักษณะต่างๆ

	Min W	Min C	Min L	Min C+L	Min L+W
$2E$ (cm)	3.78	3.64	3.58	3.66	3.44
D (cm)	3.66	7.89	10.42	7.95	7.41
a (cm)	2.23	1.99	1.7	1.79	4.05
b (cm)	9.95	5.36	4.82	6.27	4.7
N_p (turn)	729	352	271	347	396
N_s (turn)	119	57	44	56	64
W_t (kg)	5.48	6.13	6.89	6.47	6.27
C_t (Baht)	589	503	514	510.5	541.5
P_r (W)	29.17	22.06	21.31	21.98	24.38
η (%)	90.80	92.89	93.11	92.91	92.20

หมายเหตุ การออกแบบใช้แกนเหล็ก RM-14, ขดลวด SWG. #20 / #13 ประสิทธิภาพคิดที่ภาระเต็มพิคกัล้าง p.f. 0.8 lagging

พิจารณาจากตารางที่ 2 เป็นผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 360 VA 220/36 V เมื่อเป้าหมายของการออกแบบกำหนดให้หาค่าสูญเสียรวมต่ำ (Min L) จะเห็นได้ว่าแบบ Min L มีประสิทธิภาพเท่ากับ 93.11 % (ค่าสูญเสียรวมเท่ากับ 21.31 W) ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงที่สุดเมื่อเทียบกับกรณีแบบ Min W (90.80 %) แบบ Min C (92.89 %) แบบ Min L+C (92.91 %) และแบบ Min L+W (92.20 %)

เมื่อเป้าหมายของการออกแบบกำหนดให้มีค่าสูญเสียรวมต่ำและราคารวมต่ำ (Min L+C) ซึ่งเป็นการนำเอาราคารวมมารวมเป็นเป้าหมาย จะพบว่าผลลัพธ์ทำให้ราคาของแบบ Min L+C (510.5 บาท) จะต่ำกว่าแบบ Min L (514 บาท) แต่ก็ยังคงมีราคาสูงกว่าแบบ Min C (503 บาท) ถ้าพิจารณาในเรื่องของประสิทธิภาพ แบบ Min L+C (92.91 %) จะมีประสิทธิภาพที่ต่ำกว่าแบบ Min L (93.11 %) แต่ยังคงสูงกว่าแบบ Min C (92.89 %) และเมื่อเป้าหมายกำหนดให้มีค่าสูญเสียรวมต่ำและน้ำหนักรวมต่ำ (Min L+W) ซึ่งเป็นการนำเอาน้ำหนักรวมมารวมเป็นเป้าหมายจะเห็นได้ว่ามีผลทำให้น้ำหนักของแบบ Min L+W (6.27 kg) จะต่ำกว่าแบบ Min L (6.89 kg) แต่ยังคงสูงกว่าแบบ Min W (5.48 kg) ถ้าพิจารณาด้านประสิทธิภาพ แบบ Min L+W (92.20 %) จะมีประสิทธิภาพต่ำกว่าแบบ Min L (93.11 %) แต่ยังคงสูงกว่าแบบ Min W (90.80 %)

ตารางที่ 3 ผลการออกแบบโครงสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าพิกัด 1000 VA 220/110 V โดยมีเป้าหมายการออกแบบในลักษณะต่างๆ

	Min W	Min C	Min L	Min L+C	Min L+W
2E (cm)	3.19	4.2	4.46	5.48	4.54
D (cm)	9.28	12.46	14.8	9.41	10.91
a (cm)	4.41	3.32	2.61	2.7	4.26
b (cm)	8.33	6.23	6.49	7.88	5.38
N _p (turn)	341	193	152	195	204
N _s (turn)	170	96	76	97	102
W _t (kg)	13.11	14.71	16.86	16.01	14.67
C _t (Baht)	1542	1294	1314	1302	1325
P _t (W)	55.38	43.57	42.84	43.06	45.02
η (%)	93.53	94.84	94.92	94.89	94.67

หมายเหตุ การออกแบบใช้แกนเหล็ก RM-14, ขดลวด SWG. #15 / #13 ประสิทธิภาพคิดที่ภาระเต็มพิกัด p.f. 0.8 lagging

พิจารณาจากตารางที่ 3 เป็นผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 1000 VA 220/110 V เมื่อกำหนดเป้าหมายการออกแบบให้มีค่าสูญเสียรวมต่ำ (Min L) จะเห็นได้ว่าแบบ Min L มีประสิทธิภาพเท่ากับ 94.92 % (ค่าสูญเสียรวมเท่ากับ 42.84 W) ซึ่งจะมีค่าประสิทธิภาพสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีแบบ Min W (93.53 %) แบบ Min C (94.84 %) แบบ Min L+C (94.89 %) และแบบ Min L+W (94.67 %)

เมื่อกำหนดเป้าหมายของการออกแบบให้มีค่าสูญเสียรวมต่ำและราคารวมต่ำ (Min L+C) ซึ่งเป็นการนำเอาราคารวมมารวมเป็นเป้าหมายในการออกแบบจะเห็นได้ว่ามีผลทำให้ราคาของแบบ Min L+C (1302 บาท) จะต่ำกว่าแบบ Min L (1314 บาท) แต่ยังคงมีราคาที่สูงกว่าแบบ Min C (1294 บาท) ถ้าพิจารณาด้านประสิทธิภาพ แบบ Min L+C (94.89 %) จะมีประสิทธิภาพที่ต่ำกว่าแบบ Min L (94.92 %) แต่ยังคงสูง

กว่าแบบ Min C (94.84 %) และเมื่อเป้าหมายของการออกแบบกำหนดให้มีค่าสูญเสียรวมต่ำและน้ำหนักรวมต่ำ (Min L+W) ซึ่งเป็นการนำเอาน้ำหนักรวมมารวมเป็นเป้าหมายจะเห็นได้ว่ามีผลทำให้น้ำหนักรวมของแบบ Min L+W (14.67 kg) จะต่ำกว่าแบบ Min L (16.86 kg) แต่ยังคงสูงกว่าแบบ Min W (13.11 kg) ถ้าพิจารณาในเรื่องของประสิทธิภาพ แบบ Min L+W (94.67 %) จะมีประสิทธิภาพที่ต่ำกว่าแบบ Min L (94.92 %) แต่ยังคงสูงกว่าแบบ Min W (93.53 %)

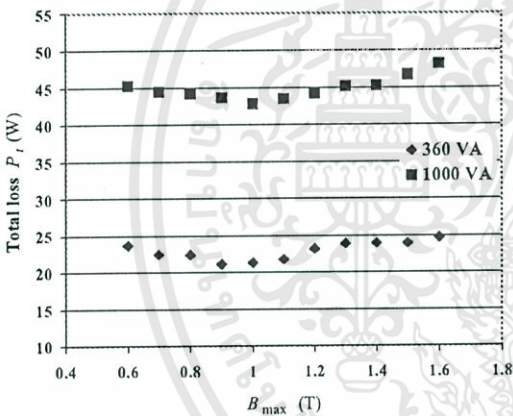
จากตารางที่ 4 และ 5 แสดงผลการออกแบบโครงสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าพิกัด 360 VA, 220/36 V และ 1000 VA, 220/110 V โดยมีเป้าหมายการออกแบบให้มีค่าสูญเสียรวมต่ำ (Min L) เมื่อเลือกใช้ค่า B_{max} ในการออกแบบที่ค่าต่าง ๆ จะเห็นได้ว่าการกำหนดค่า B_{max} ที่แตกต่างกันนั้น จะส่งผลทำให้โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้ามีลักษณะเปลี่ยนแปลงไป ทั้งนี้เนื่องจากค่า B_{max} มีความสัมพันธ์โดยตรงกับโครงสร้างของแกนเหล็กซึ่งจะมีผลกระทบต่อโครงสร้างของขดลวดด้วยตามสมการที่ 1 รวมถึงในส่วนของค่าสูญเสียรวมของหม้อแปลงไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในแต่ละค่าของ B_{max} ที่เลือกใช้ก็จะแตกต่างกัน จากผลที่ได้พบว่าที่เงื่อนไขของการออกแบบเดียวกันจะมีค่า B_{max} ค่าหนึ่งที่ทำให้เกิดค่าสูญเสียรวมน้อยที่สุดเช่น ที่หม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 360 VA, 220/36 V ค่า B_{max} = 0.9 T มีค่าสูญเสียรวม 21.1 W ประสิทธิภาพ 93.2 % ซึ่งเป็นค่าประสิทธิภาพสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับค่า B_{max} อื่น ๆ ส่วนของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 1000 VA, 220/110 V ค่า B_{max} = 1 T มีค่าสูญเสียรวม 42.84 W ประสิทธิภาพ 94.92 % ซึ่งเป็นค่าประสิทธิภาพสูงที่สุด จากผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูงทั้งสองขนาด (360 VA และ 1000 VA) ซึ่งใช้แกนเหล็กชนิดเดียวกันพบว่าค่า B_{max} ที่เหมาะสมไม่จำเป็นต้องเป็นค่าเดียวกัน

ตารางที่ 4 ผลการออกแบบโครงสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าพิกัด 360 VA 220/36 V โดยมีเป้าหมายการออกแบบให้มีค่าสูญเสียรวมต่ำ (Min L) เมื่อกำหนดค่า B_{max} ในการออกแบบที่ค่าต่าง ๆ

B _{max} (T)	0.6	0.7	0.9	1	1.1	1.2	1.3	1.5	1.6
2E (cm)	4.64	4.99	4.2	3.58	3.27	2.28	2.32	3.05	2.38
D (cm)	11.7	9.35	9.06	10.4	9.35	12.2	8.68	5.42	6.47
a (cm)	1.9	1.87	1.8	1.7	2.04	2.01	2.27	2.62	2.74
b (cm)	5.37	5.18	4.97	4.82	4.73	4.71	5.2	4.71	4.53
N _p (turn)	311	309	295	271	300	302	385	407	409
N _s (turn)	50	50	48	44	49	49	63	66	67
W _t (kg)	11.3	9.92	7.58	6.89	5.87	5.16	4.44	3.94	3.66
C _t (Baht)	791	696	558	514	471	458	437	394	390
P _t (W)	23.7	22.5	21.1	21.3	21.8	23.2	23.9	24.0	24.7
η (%)	92.40	92.75	93.17	93.11	92.96	92.54	92.34	92.31	92.10

ตารางที่ 5 ผลการออกแบบโครงสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าพิกัด 1000 VA 220/110 V โดยมีเป้าหมายการออกแบบให้มีความสูญเสียรวมต่ำ (Min L) เมื่อกำหนดค่า B_{max} ในการออกแบบที่ค่าต่าง ๆ

B_{max} (T)	0.6	0.7	0.9	1	1.1	1.2	1.3	1.5	1.6
$2E$ (cm)	7.89	6.27	3.78	4.46	5.96	4.14	5.85	4.93	4.93
D (cm)	11.1	16.7	17.1	14.8	7.51	9.98	5.41	5.72	5.72
a (cm)	2.2	2.6	2.79	2.61	3.39	2.64	3.35	3.01	3.01
b (cm)	9.38	5.65	6.73	6.49	6.83	8.43	8.11	8.5	8.5
N_p (turn)	192	137	173	152	205	203	245	238	223
N_s (turn)	96	68	86	76	102	101	122	119	111
W_t (kg)	29.9	26.5	17	16.9	14.5	12.9	12	10.4	10.2
C_t (Baht)	2065	1814	1425	1314	1231	1141	1139	1018	964
P_t (W)	45.2	44.4	43.7	42.8	43.5	44.2	45.2	46.7	48.2
η (%)	94.65	94.74	94.82	94.92	94.84	94.76	94.65	94.48	94.32



รูปที่ 5 ค่าสูญเสียรวมที่ได้จากการออกแบบของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยมีเป้าหมายการออกแบบให้มีความสูญเสียรวมต่ำ (Min L) เมื่อกำหนดค่า B_{max} ในการออกแบบที่ค่าต่าง ๆ

5. บทสรุป

จากการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กแบบเซลล์ด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมเชิงตัวเลข โดยการเสนอรูปแบบของเป้าหมายในการออกแบบที่ทำให้ค่าสูญเสียรวมต่ำซึ่งจะมีผลทำให้มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้นโดยใช้ตัวแปรในการออกแบบ 4 ค่า (E, D, a, b) และเมื่อมีการเพิ่มเป้าหมาย (ราคาและน้ำหนัก) ในการพิจารณาหาค่าที่เหมาะสมจะช่วยให้ได้โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีลักษณะที่ดีขึ้นตามเป้าหมายที่เพิ่มเข้ามาด้วย ดังนั้นการออกแบบโดยการพิจารณาสองเป้าหมายร่วมกันในลักษณะนี้จะช่วยให้สามารถออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กได้ตรงตามความต้องการยิ่งขึ้น ในกรณีของการเปลี่ยนแปลงค่า B_{max} ที่ใช้ใน

การออกแบบสามารถแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างที่ออกแบบด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมเชิงตัวเลขสามารถมีได้หลายแบบ โครงสร้างที่เหมาะสมจะเปลี่ยนแปลงไปตามพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบเช่น ค่า B_{max} อย่างไรก็ตามการพิจารณาการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กที่เหมาะสมโดยการเพิ่มเป้าหมายในการพิจารณาจะมีผลทำให้สมการที่ใช้ในการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธี *SUMT* แบบ *QUAP* ซึ่งเป็นวิธีการหาค่าที่เหมาะสมเชิงตัวเลขในรูปแบบของการหาค่าอนุพันธ์อาจเกิดปัญหาขึ้นได้ในกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมเนื่องมาจากฟังก์ชันในการคำนวณจะมีลักษณะที่ซับซ้อนยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] R. Petkov, "Optimum Design of a High-Power High-Frequency Transformer," *IEEE Trans. Power Electronics*, Vol.11, No.1, 1996, pp.33-42.
- [2] W. Gerard, W. H. Wolfe and J. G. Breslin, "Optimized Transformer Design: Inclusive of High-Frequency Effects," *IEEE Trans. Power Electronics*, Vol.13, No.4, July 1998, pp.651-659.
- [3] อศวิณ อัสวตมางกูร, ชีรพล โพธิ์พงษ์วิวัฒน์, ชัยวุฒิ ฉัตรฤทัย, "การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กย่านความถี่ต่ำที่เหมาะสม", *วิศวกรรมสาร* ๒๐๑๖, ปีที่ 17, ฉบับที่ 1, มีนาคม 2543.
- [4] W.T. McLyman, *Transformer and Inductor Design Handbook*. Marcel Dekker, N. Y., 1990.
- [5] W.M. Flanagan, *Handbook of Transformer Design & Application*, McGraw-Hill, New York, 1993.
- [6] J.S. Arora, *Introduction to Optimum Design*. McGraw-Hill, N.Y., 1989.
- [7] G.N. Vanderplaats, *Numerical Optimization Techniques for Engineering Design with Applications*. McGraw-Hill, N. Y., 1984.

ประวัติผู้เขียน

นายธีรพล โปธิ์พงษ์วิวัฒน์ เกิดเมื่อวันที่ 25 เดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2518 ที่อำเภอท่าม่วง จังหวัดกาญจนบุรี ปีการศึกษา 2539 สำเร็จการศึกษาประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง แผนกวิชาช่างไฟฟ้ากำลัง จากสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตเทคนิคกรุงเทพฯ และปีการศึกษา 2542 สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ขณะศึกษามีผลงานวิจัยทางวิชาการได้รับการยอมรับตีพิมพ์และเข้าร่วมนำเสนอผลงานในการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 24 เรื่องการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กประสิทธิภาพสูงโดยใช้วิธีออปติไมเซชัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้