การออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายให้มีราคาที่เหมาะสมโดยใช้จีเนติกอัลกอริธึม

OPTIMAL COST DESIGN OF DISTRIBUTION TRANSFORMERS USING GENETIC ALGORITHMS

ชวรัตน์ เก่งธรรมกิจ

CHAWARAT KENGTHAMAKIT

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2546

ISBN 974-324-705-5

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายให้มีราคาที่เหมาะสมโดยใช้จีเนติกอัลกอริธึม

OPTIMAL COST DESIGN OF DISTRIBUTION TRANSFORMERS USING GENETIC ALGORITHMS

T048947

ชวรัตน์ เก่งธรรมกิจ
CHAWARAT KENGTHAMAKIT

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2546

ISBN 974-324-795-5

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 48947
วัน, เดือน, ปี 13 ม.ค. 2547
.b.....
.i.....

OPTIMAL COST DESIGN OF DISTRIBUTION TRANSFORMERS USING GENETIC ALGORITHMS

CHAWARAT KENGTHAMAKIT

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKIT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2003

ISBN 974-324-795-5

COPYRIGHT 2003

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายให้มีราคาที่เหมาะสมโดยใช้จีเนติกอัลกอริธึม
OPTIMAL COST DESIGN OF DISTRIBUTION TRANSFORMERS USING GENETIC ALGORITHMS

ชื่อนักศึกษา นายชวรัตน์ เก่งธรรมกิจ

รหัสประจำตัว 43061019

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ศุลี	บรรจงจิตร	
ผศ.พิชิต	ลำยอง	
รศ.มณฑล	ลีลาจินดาไกรฤกษ์	
รศ.ศิริวัฒน์	โพธิเวชกุล	
รศ.ดร.ชัยวุฒิ	ฉัตรอุทัย	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 23 กันยายน 2546 เวลา 10.30-12.30 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น ชั้น 4 (ห้อง E12-402)

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(รศ.ดร.บุญวัฒน์ อัตชู)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.......10.......**เดือน**.......ตุลาคม.......**พ.ศ.**.......2546.......

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายให้มีราคาที่เหมาะสมโดยใช้จีเนติกอัลกอริธึม
นักศึกษา	นายชวรัตน์ เก่งธรรมกิจ
รหัสนักศึกษา	43061019
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2546
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอแนวทางพัฒนาการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายแบบน้ำมันให้มีราคาที่เหมาะสมโดยใช้จีเนติกอัลกอริธึม ซึ่งมีพิกัดกำลังตั้งแต่ 50 - 1,000 kVA, 3 เฟส, 50 Hz, แรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ 11,000 – 33,000 V, แรงดันไฟฟ้าด้านทุติยภูมิ 380 - 450 V, Dyn11 โครงสร้างด้านปฐมภูมิใช้ลวดกลมพันแบบครอสโอเวอร์และด้านทุติยภูมิใช้ลวดสี่เหลี่ยมพันแบบสไปรัล ในงานวิจัยเสนอการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายที่มีราคาเหมาะสม 3 รูปแบบ โดยพิจารณาร่วมกับอุณหภูมิเกรเดียนท์ทำให้สามารถออกแบบร่องน้ำมันระบายความร้อนในชุดขดลวดได้อย่างเหมาะสม และมีข้อกำหนดคือกำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลด, กำลังสูญเสียขณะมีโหลด และเปอร์เซ็นต์อิมพิแดนซ์ลัดวงจรจะต้องมีค่าอยู่ภายใต้ข้อกำหนด การออกแบบด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมนี้มีการเปรียบเทียบคุณลักษณะต่าง ๆ กับผลการออกแบบในทางอุตสาหกรรม ผลการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายที่มีราคาเหมาะสมนำมาสร้างต้นแบบและทดสอบพิกัดกำลัง 315 kVA, 3 เฟส, 50 Hz, แรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ 22,000 V, แรงดันไฟฟ้าด้านทุติยภูมิ 400/230 V, จุดต่อแยกแรงดันด้านปฐมภูมิ ±2×2.5 %, Dyn11, ตามข้อกำหนดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ผลการทดสอบพบว่ามีค่าอยู่ภายใต้ข้อกำหนด นอกจากนี้ยังได้ทำการวิเคราะห์ผลของราคาต้นทุนที่เหมาะสม เมื่อเปลี่ยนแปลงตัวแปรหรือข้อกำหนดในย่านต่าง ๆ ทำให้ทราบถึงแนวทางการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายได้ตามคุณลักษณะที่ต้องการและมีราคาต้นทุนรวมต่ำลง

Thesis Title	Optimal Cost Design of Distribution Transformers Using Genetic Algorithms
Student	Mr. Chawarat Kengthamakit
Student ID.	43061019
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2003
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Chaiwut Chat-uthai

ABSTRACT

This Thesis presents the development of oil-immersed type distribution transformers cost design using the genetic algorithm which have rate of 50 – 1,000 kVA, 3-phase, 50 Hz, primary voltage 11,000 – 33,000 V, secondary voltage 380 – 450 V, Dyn11. The construction of primary coil is cross-over winding type using circular wire and the secondary is spiral winding type using rectangular wire. In research, three models of the optimal cost design of distribution transformers having the guarantee of no-load losses, load losses and percent short circuit impedance are illustrated, which have temperature gradients to be considered so that it can be determine size of optimal cooling oil ducts. The characteristics of optimal transformer design are also compared with industrial design. The prototype transformer (315 kVA, 3-phase, 50 Hz, primary voltage 22,000 V, secondary voltage 400 V, primary voltage tap ± 2 × 2.5 %, Dyn11 conforms to Provincial Electricity Authority specifications) is manufactured according to optimal cost design result of distribution transformer and be tested in laboratory. The test results are within guarantee limitation. Furthermore, either the design parameters or limit of specifications of distribution transformers are varied to find the optimal cost. With this regards, the design procedures of distribution transformers at desire characteristic and minimize total cost are achieved.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี ด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาเกี่ยวกับวิธีการออกแบบที่เหมาะสมร่วมกับการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายจาก รศ.ดร. ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ ครู อาจารย์ และผู้สนับสนุน ทุก ๆ ท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอนและให้ความช่วยเหลือกับผู้วิจัยตลอดมา

ขอขอบพระคุณ คุณอัมพรทัต พูลเจริญ ผู้จัดการฝ่ายประกันคุณภาพ คุณสาเรศ ดีภาพร ผู้จัดการส่วนออกแบบ คุณสมชัย เกริกกวิน ผู้จัดการส่วนทดสอบไฟฟ้า และเจ้าหน้าที่ทุก ๆ ท่าน ของ บริษัท ถิรไทย จำกัด ได้ให้ความรู้เกี่ยวกับหม้อแปลงจำหน่ายในด้านต่าง ๆ เอื้ออำนวยสถานที่ เครื่องมือ อุปกรณ์ในการทดสอบ จนผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาของท่านทั้งหลาย

ขอขอบคุณ คุณธีรพล โพธิ์พงศ์วิวัฒน์ คุณต่อพงศ์ ภูมิภาค ที่ช่วยเหลือและให้คำปรึกษาในด้านการใช้งานการออกแบบที่เหมาะสมด้วยจีเนติกอัลกอริธึม ทำให้ผู้วิจัยเข้าใจและนำไปประยุกต์ใช้งานได้เป็นอย่างดี

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อชัย คุณแม่สม เก่งธรรมกิจ ซึ่งเป็นผู้อบรมสั่งสอนและให้โอกาสทางการศึกษากับผู้วิจัยจนสำเร็จสมความตั้งใจ

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ชวรัตน์ เก่งธรรมกิจ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ II
กิตติกรรมประกาศ III
สารบัญ IV
สารบัญตาราง VIII
สารบัญรูป X
บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา 1
1.3 ข้อสมมติฐานของการศึกษา 2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย 2
1.5 ขอบเขตการวิจัย 2
1.6 ขั้นตอนการศึกษา 3

บทที่ 2 หม้อแปลงจำหน่าย 4
2.1 บทนำ 4
2.2 โครงสร้างของหม้อแปลงจำหน่าย 6
2.2.1 โครงสร้างภายนอก 7
2.2.2 ส่วนต่อภายในและภายนอก 10
2.2.3 ส่วนที่เป็นวงจรแม่เหล็ก 11
2.2.4 ส่วนที่เป็นวงจรไฟฟ้า 12
2.3 การออกแบบหม้อแปลงจำหน่าย 15
2.3.1 การกำหนดขนาดพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก 16
2.3.2 การเลือกจำนวนรอบของขดลวด 19
2.3.3 การออกแบบขดลวดของหม้อแปลงจำหน่าย 20
2.3.4 การออกแบบฉนวน 21
2.3.5 การกำหนดรูปทรงของแกนเหล็ก 24

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.3.6 การคำนวณหาน้ำหนัก 26
2.3.7 การคำนวณกำลังสูญเสีย 27
2.3.8 การคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์อิมพิแดนซ์ลัดวงจร 29
2.4 ตัวอย่างการออกแบบหม้อแปลงจำหน่าย 31

บทที่ 3 การออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายให้มีราคาที่เหมาะสมโดยใช้จีเนติกอัลกอริธึม 40
3.1 บทนำ 40
3.2 การหาค่าที่เหมาะสมโดยใช้จีเนติกอัลกอริธึม 42
3.3 คุณลักษณะทางความร้อนของหม้อแปลง 44
3.3.1 การถ่ายเทความร้อนในหม้อแปลงชนิดน้ำมัน 45
3.3.2 การประมาณผลของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของขดลวด 46
3.4 การออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายให้มีราคาที่เหมาะสมโดยใช้จีเนติกอัลกอริธึม 53

บทที่ 4 ผลการออกแบบหม้อแปลงจำหน่าย 61
4.1 บทนำ 61
4.2 โปรแกรมออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายให้มีราคาที่เหมาะสม 61
4.3 ผลการออกแบบหม้อแปลงจำหน่าย 66
4.3.1 ข้อกำหนดของการออกแบบหม้อแปลงจำหน่าย 66
4.3.2 ผลการออกแบบแกนเหล็กหม้อแปลงจำหน่าย 67
4.3.3 ผลการออกแบบขดลวดด้านทุติยภูมิ 68
4.3.4 ผลการออกแบบขดลวดด้านปฐมภูมิ 70
4.3.5 ผลการออกแบบฉนวนและการเดินสาย 71
4.3.6 ผลการออกแบบด้านคุณลักษณะของหม้อแปลงจำหน่าย 73
4.3.7 ผลการออกแบบตัวถังและครีบระบายความร้อนของหม้อแปลงจำหน่าย 74
4.4 ผลการทดสอบหม้อแปลงจำหน่าย 77
4.4.1 การวัดความต้านทานของขดลวด 77
4.4.2 การวัดอัตราส่วนแรงดันและการตรวจสอบการจัดเฟส 78

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.4.3 การวัดความสูญเสียไม่มีโหลดและกระแสไม่มีโหลด 79

4.4.4 การวัดอิมพิแดนซ์ลัดวงจรและความสูญเสียมีโหลดขณะจ่ายโหลดที่พิกัด 80

4.4.5 การทดสอบประจำไดอิเล็กตริก 84

4.4.6 การทดสอบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น 86

4.5 บทสรุป 91

บทที่ 5 การวิเคราะห์การออกแบบหม้อแปลงจำหน่าย 93

5.1 บทนำ 93

5.2 การวิเคราะห์ผลกระทบของตัวแปรที่ใช้ออกแบบหม้อแปลงจำหน่าย 94

5.2.1 การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ประกอบแกนเหล็ก 94

5.2.2 การวิเคราะห์ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก 97

5.2.3 การวิเคราะห์ความหนาแน่นของกระแส 100

5.3 การวิเคราะห์ผลกระทบของข้อกำหนดที่ใช้ออกแบบหม้อแปลงจำหน่าย 103

5.3.1 การวิเคราะห์ผลกระทบของข้อกำหนดกำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลด 104

5.3.2 การวิเคราะห์ผลกระทบของข้อกำหนดกำลังสูญเสียขณะมีโหลด 106

5.3.3 การวิเคราะห์ผลกระทบของข้อกำหนดอิมพิแดนซ์ลัดวงจร 109

5.3.4 การวิเคราะห์ผลกระทบของข้อกำหนดประสิทธิภาพ 111

5.4 การวิเคราะห์ผลกระทบของวัสดุที่ใช้ออกแบบหม้อแปลงจำหน่าย 114

5.4.1 การวิเคราะห์ผลกระทบของวัสดุตามข้อกำหนดกำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลด 115

5.4.2 การวิเคราะห์ผลกระทบของวัสดุตามข้อกำหนดของประสิทธิภาพ 116

5.5 บทสรุป 119

บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 120

เอกสารอ้างอิง 123

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก รูปโครงสร้างและการทดสอบของหม้อแปลงจำหน่าย 125

ภาคผนวก ข คุณสมบัติของแกนเหล็กหม้อแปลงจำหน่าย 136

ภาคผนวก ค การหาค่าที่เหมาะสมด้วยจีเนติกอัลกอริธึม 145

ภาคผนวก ง ตัวอย่างการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายให้มีราคาที่เหมาะสม โดยใช้จีเนติกอัลกอริธึม 163

ภาคผนวก จ ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์และได้รับการตีพิมพ์ 172

ประวัติผู้เขียน 179

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 ข้อเปรียบเทียบหม้อแปลงไฟฟ้าติดครีบระบายความร้อนแบบแผ่นกับแบบติดครีบระบายความร้อนแบบลอนลูกฟูก 8
2.2 สัมประสิทธิ์การใช้ประโยชน์ภายในทรงกลมแกนเหล็กที่มีพิกัดกำลังสูงขึ้น 17
2.3 การคำนวณพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กและจำนวนแผ่นลามิเนท 31
2.4 การตัดแผ่นลามิเนทของแกนเหล็กสัมพันธ์กับรูปที่ 2.16 – 2.18 37
3.1 การเปรียบเทียบผลการคำนวณกับการทดสอบของอุณหภูมิแตกต่างระหว่างขดลวดกับน้ำมันที่ขดลวดด้านปฐมภูมิ 51
3.2 การเปรียบเทียบผลการคำนวณกับการทดสอบของอุณหภูมิแตกต่างระหว่างขดลวดกับน้ำมันที่ขดลวดด้านทุติยภูมิ 52
3.3 การเปรียบเทียบคุณลักษณะโครงสร้างแกนเหล็กของหม้อแปลงจำหน่าย 55
3.4 การเปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงจำหน่าย 55
3.5 การเปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงจำหน่าย 56
3.6 การเปรียบเทียบคุณลักษณะของหม้อแปลงจำหน่าย 56
3.7 การเปรียบเทียบน้ำหนักและต้นทุนของหม้อแปลงจำหน่าย 57
4.1 เงื่อนไขการออกแบบหม้อแปลงจำหน่าย 66
4.2 เงื่อนไขกำหนดลักษณะทางโครงสร้างของการออกแบบหม้อแปลงจำหน่าย 66
4.3 ขนาดการตัดแผ่นลามิเนทของแกนเหล็ก 68
4.4 คุณลักษณะของผลการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายโดยใช้จีเนติกอัลกอริธึม 73
4.5 ผลการวัดค่าความต้านทานของขดลวด 78
4.6 ผลการวัดค่าอัตราส่วนแรงดัน 79
4.7 ผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าสูญเสียและกระแสขณะไม่มีโหลด 80
4.8 ผลการวัดค่ากำลังสูญเสียขณะมีโหลดที่จุดต่อแยกหลัก (Tap 3) 83
4.9 ผลการคำนวณค่ากำลังสูญเสียขณะมีโหลดที่จุดต่อแยกหลัก (Tap 3) 83
4.10 ค่าประสิทธิภาพและแรงดันเรกูเลชันของหม้อแปลงที่ pf = 1 84
4.11 ผลการวัดความต้านทานฉนวนของหม้อแปลงจำหน่าย 84
4.12 ผลการทดสอบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น 87

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่ หน้า

4.13 ผลการวัดค่าความต้านทานของขดลวดหลังจากตัดกระแสไฟฟ้า... 88
4.14 การเปรียบเทียบคุณลักษณะผลการออกแบบกับผลการทดสอบ... 91

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 แบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้า 4
2.2 โครงสร้างของหม้อแปลงจำหน่าย 6
2.3 ตัวถังหม้อแปลงติดครีบระบายความร้อนแบบแผ่น 7
2.4 ตัวถังหม้อแปลงติดครีบระบายความร้อนแบบลอนลูกฟูก 7
2.5 การฉนวนในส่วนต่างๆ ของหม้อแปลงและเดินสายลีดภายใน 10
2.6 โครงสร้างแกนเหล็กของหม้อแปลง 3 เฟส ชนิดแกน 12
2.7 ขดลวดทรงกระบอกหนึ่งชั้นพันด้วยตัวนำหน้าตัดสี่เหลี่ยม 13
2.8 ขดลวดทรงกระบอกหลายชั้นพันด้วยตัวนำหน้าตัดกลม 13
2.9 ฉนวนกั้นทำหน้าที่ระบายความร้อนภายในชุดของขดลวด 14
2.10 แผนผังการออกแบบหม้อแปลงจำหน่าย 15
2.11 ส่วนประกอบภายในทรงกลมแกนเหล็กหม้อแปลง 16
2.12 ลักษณะโครงสร้างของพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กที่ประกอบด้วยแกนเหล็กตั้งแต่ 1 ชั้นแกนเหล็กถึง 5 ชั้นแกนเหล็ก 17
2.13 โครงสร้างของพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็ก 18
2.14 การจัดวางฉนวนและร่องน้ำมันระบายความร้อนในแนวรัศมีของขดลวด 22
2.15 การจัดระยะฉนวนและรูปทรงของขดลวดภายในช่องหน้าต่างแกนเหล็ก 23
2.16 รูปทรงและความยาวในส่วนต่าง ๆ ของแกนเหล็ก 24
2.17 ขาแกนเหล็กด้านริม (outer limb) 25
2.18 ขาแกนเหล็กด้านกลาง (center limb) 25
2.19 โย๊คแกนเหล็ก (yoke) 25
2.20 ผลของสนามแม่เหล็กรั่วไหลจากการจัดเรียงขดลวด 29
2.21 แผนผังแอมแปร์เทินสำหรับขดลวดทรงกระบอกซ้อนกัน 30
2.22 การจัดวางลำดับชั้นในพื้นที่ทรงกลมของแกนเหล็ก (หน่วย mm) 32
2.23 การจัดวางฉนวนกระดาษในระหว่างชั้นขดลวดด้านปฐมภูมิ 35
2.24 ขนาดร่องน้ำมันและฉนวนกระดาษในแนวรัศมี 36
2.25 รูปทรงของแกนเหล็ก 37

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

3.1 แผนผังขั้นตอนการออกแบบที่เหมาะสม 40

3.2 แผนผังของการหาค่าที่เหมาะสมด้วยจีเนติกอัลกอริธึม 42

3.3 การจำลองวงจรทางความร้อนของขดลวด 47

3.4 การจำลองวงจรทางความร้อนแบบมีร่องระบายความร้อนในชุดขดลวด 47

3.5 ฉนวนทำร่องน้ำมันบังพื้นที่ผิวระบายความร้อนของขดลวด 49

3.6 ฉนวนกั้นแรงสูงบังการไหลของน้ำมันที่ขดลวดปฐมภูมิ 50

3.7 วงแหวนฉนวนกระดาษบากเป็นกระโปรงกันระหว่างขดลวดแรงสูงกับแรงต่ำ 50

3.8 การเปรียบเทียบรูปทรงของแกนเหล็ก 57

3.9 แผนผังเปรียบเทียบน้ำหนักจากผลการออกแบบราคาที่เหมาะสมกับทางอุตสาหกรรม 58

3.10 แผนผังเปรียบเทียบต้นทุนจากผลการออกแบบราคาที่เหมาะสมกับทางอุตสาหกรรม 58

4.1 หน้าต่างหลักของการออกแบบหม้อแปลงจำหน่าย 62

4.2 หน้าต่างกำหนดขอบเขตของพารามิเตอร์ 63

4.3 หน้าต่างกำหนดขนาดฉนวนและร่องน้ำมันในแนวรัศมี 63

4.4 หน้าต่างกำหนดขนาดฉนวนและร่องน้ำมันในขดลวด 64

4.5 หน้าต่างกำหนดพารามิเตอร์และวิธีดำเนินงานของจีเนติกอัลกอริธึม 64

4.6 หน้าต่างแสดงผลลัพธ์ขณะทำการประมวลผล 65

4.7 ผลการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายโดยใช้วิธีจีเนติกอัลกอริธึม 65

4.8 การจัดวางลำดับชั้นในพื้นที่ทรงกลมของแกนเหล็ก 67

4.9 รูปทรงของแกนเหล็ก 67

4.10 ลักษณะการเรียงลวดตัวนำขณะทำการพัน 68

4.11 การขึ้นต้นสายของการพันขดลวดทุติยภูมิ 69

4.12 การบิดลวดด้านทุติยภูมิ 69

4.13 การพันขดลวดปฐมภูมิในตอน 70

4.14 ตำแหน่งจุดต่อแยกแรงดันด้านปฐมภูมิ 71

4.15 ขนาดร่องน้ำมันและฉนวนกระดาษในแนวรัศมี 72

4.16 การเดินสายของขดลวดกลุ่มเวกเตอร์ Dyn11 72

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.17 รูปทรงของถังหม้อแปลงจำหน่าย 74
4.18 โครงสร้างการตั้งระยะภายในถังหม้อแปลง 75
4.19 โครงสร้างตัวถังหม้อแปลงจำหน่าย 75
4.20 โครงสร้างภายนอกของหม้อแปลงจำหน่าย 76
4.21 หม้อแปลงจำหน่าย 315 kVA 3 เฟส 50 Hz 22000-400/230 V 76
4.23 การวัดอัตราส่วนแรงดันกลุ่มเวกเตอร์ Dyn11 79
4.24 วงจรทดสอบหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียและกระแสขณะไม่มีโหลด 80
4.25 วงจรทดสอบหาค่ากำลังสูญเสียขณะมีโหลดและเปอร์เซ็นต์อิมพิแดนซ์ลัดวงจร 83
4.26 วงจรทดสอบแรงดันเหนี่ยวนำเกิน 85
4.27 วงจรทดสอบความทนต่อแรงดันตามความถี่กำลังไฟฟ้าของตัวจ่ายอื่น 86
4.28 ผลการทดสอบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของน้ำมันด้านบน 88
4.29 ความสัมพันธ์ของความต้านทานขดลวดปฐมภูมิต่อเวลาหลังจากตัดกระแสไฟฟ้า 89
4.30 ความสัมพันธ์ของความต้านทานขดลวดทุติยภูมิต่อเวลาหลังจากตัดกระแสไฟฟ้า 89
5.1 การเปรียบเทียบราคาต้นทุนกับสัมประสิทธิ์ประกอบแกนเหล็ก 95
5.2 การเปรียบเทียบคุณลักษณะกับสัมประสิทธิ์ประกอบแกนเหล็ก 95
5.3 การเปรียบเทียบรูปทรงของแกนเหล็กกับสัมประสิทธิ์ประกอบแกนเหล็ก 96
5.4 รูปทรงของแกนเหล็กเมื่อเปลี่ยนสัมประสิทธิ์ประกอบแกนในย่านต่าง ๆ 97
5.5 การเปรียบเทียบต้นทุนกับความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก 98
5.6 การเปรียบเทียบคุณลักษณะกับความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก 98
5.7 การเปรียบเทียบรูปทรงของแกนเหล็กกับความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก 99
5.8 การเปรียบเทียบราคาต้นทุนกับความหนาแน่นของกระแส 100
5.9 การเปรียบเทียบคุณลักษณะกับความหนาแน่นของกระแส 101
5.10 การเปรียบเทียบรูปทรงของแกนเหล็กกับความหนาแน่นของกระแส 101
5.11 การเปรียบเทียบอุณหภูมิแตกต่างระหว่างน้ำมันถึงขดลวดกับความหนาแน่นของกระแส 103
5.12 การเปรียบเทียบราคาต้นทุนกับกำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลด 104
5.13 การเปรียบเทียบคุณลักษณะกับกำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลด 105

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.14 การเปรียบเทียบรูปทรงของแกนเหล็กกับกำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลด................................ 106
5.15 การเปรียบเทียบราคาต้นทุนกับกำลังสูญเสียขณะมีโหลด 107
5.16 การเปรียบเทียบคุณลักษณะกับกำลังสูญเสียขณะมีโหลด 108
5.17 การเปรียบเทียบรูปทรงของแกนเหล็กกับกำลังสูญเสียขณะมีโหลด 108
5.18 การเปรียบเทียบราคาต้นทุนกับอิมพิแดนซ์ลัดวงจร 109
5.19 การเปรียบเทียบคุณลักษณะกับอิมพิแดนซ์ลัดวงจร 110
5.20 การเปรียบเทียบรูปทรงของแกนเหล็กกับอิมพิแดนซ์ลัดวงจร.. 110
5.21 การเปรียบเทียบราคาต้นทุนกับประสิทธิภาพ 112
5.22 การเปรียบเทียบคุณลักษณะกับประสิทธิภาพ.. 112
5.23 การเปรียบเทียบรูปทรงของแกนเหล็กกับประสิทธิภาพ... 113
5.24 การเปรียบเทียบราคาต้นทุนเมื่อเปลี่ยนชนิดแกนเหล็กและข้อกำหนดกำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลดในย่านต่าง ๆ.. 115
5.25 การเปรียบเทียบน้ำหนักเมื่อเปลี่ยนชนิดแกนเหล็กและข้อกำหนดกำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลดในย่านต่าง ๆ.. 116
5.26 การเปรียบเทียบราคาต้นทุนเมื่อเปลี่ยนชนิดแกนเหล็กและประสิทธิภาพในย่านต่าง 117
5.27 การเปรียบเทียบน้ำหนักเมื่อเปลี่ยนชนิดแกนเหล็กและประสิทธิภาพในย่านต่าง ๆ 117
5.28 การเปรียบเทียบกำลังสูญเสียเมื่อเปลี่ยนชนิดแกนเหล็กและประสิทธิภาพในย่านต่าง ๆ....... 118

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อุปกรณ์หลักที่ถือว่าเป็นหัวใจสำคัญของระบบจำหน่ายไฟฟ้าก็คือหม้อแปลงจำหน่ายทำหน้าที่ส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าโดยการแปลงแรงดันขึ้นหรือลงในระดับต่างๆ เพื่อความเหมาะสมต่อระบบส่งจ่ายให้กับผู้บริโภคตามบ้านเรือนหรือโรงงานอุตสาหกรรม ปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตหม้อแปลงจำหน่ายมีอัตราการแข่งขันที่สูงขึ้น การเพิ่มอัตราการแข่งขันในเชิงอุตสาหกรรมผู้ผลิตจะต้องมีมาตรการลดต้นทุนการผลิตอย่างเหมาะสมเพื่อเพิ่มผลประกอบการและสามารถแข่งขันกับผู้ผลิตรายอื่น ๆ ได้มากขึ้น ดังนั้นในการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายจะต้องมีการออกแบบให้ราคาต้นทุนการผลิตต่ำและมีคุณลักษณะตรงตามความต้องการของผู้ใช้ แต่อย่างไรก็ตาม ตัวแปรที่ใช้สำหรับกำหนดโครงสร้างมีเป็นจำนวนมาก การออกแบบเพื่อให้ได้คุณลักษณะที่ตรงตามข้อกำหนดและมีความเหมาะสมกับต้นทุนการผลิตบางครั้งการตัดสินใจก็ค่อนข้างยาก ด้วยวิธีการออกแบบที่ใช้เป็นแบบวิธีการลองผิดลองถูก (trial and error) ทำการปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรที่มีอยู่เป็นจำนวนมากไปตามความเหมาะสมของแต่ละบุคคลซึ่งจะขึ้นอยู่กับประสบการณ์ของผู้ออกแบบ ในบางครั้งมีข้อกำหนดของผู้ใช้มีมากขึ้นเช่น กำลังสูญเสียสูงสุด น้ำหนักมากสุด เป็นต้น ทำให้เกิดความยุ่งยากต่อการออกแบบหากผู้ออกแบบขาดประสบการณ์ก็จะทำให้ไม่สามารถหาคุณลักษณะที่เหมาะสมได้ ทั้งในด้านของราคาวัสดุหลักที่ใช้เช่น แผ่นลามิเนทของแกนเหล็กและลวดตัวนำ ที่นำเข้าจากต่างประเทศมีราคาไม่แน่นอน เพื่อการออกแบบหาต้นทุนการผลิตที่เหมาะสมจึงต้องมีการออกแบบใหม่ทุกครั้งที่ราคาวัสดุเปลี่ยนแปลง ทำให้เกิดความยุ่งยากในการออกแบบ ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้วิธีการเชิงตัวเลขในการหาค่าที่เหมาะสม (numerical optimization method) ด้วยจีเนติกอัลกอริธึม (genetic algorithms) ร่วมกับการออกแบบหม้อแปลงจำหน่าย เพื่อหาโครงสร้างที่มีคุณลักษณะตรงตามความต้องการของผู้ใช้และหาต้นทุนการผลิตได้ต่ำลง

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

จุดมุ่งหมายของวิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาแนวทางในการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายร่วมกับวิธีการหาค่าที่เหมาะสมด้วยจีเนติกอัลกอริธึม โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อทำการออกแบบหาโครงสร้างของหม้อแปลงจำหน่ายที่มีราคาต้นทุนการผลิตต่ำ และมีคุณลักษณะตามต้องการ โดยจะทำการศึกษาวิธีการหาค่าที่เหมาะสมด้วยจีเนติกอัลกอริธึมร่วมกับวิธีการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายในด้านต่าง ๆ ได้แก่ การออกแบบแกนเหล็ก, ชุดขดลวด, การฉนวน, การระบายความร้อนในชุดขดลวด, ระยะเผื่อสำหรับการทำงานในทางปฏิบัติ รวมถึงการคำนวณกำลังสูญเสียและ

เปอร์เซ็นต์อิมพิแดนซ์ลัดวงจร เป็นต้น นำผลที่ได้ศึกษามาทำการสร้างโปรแกรมออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายให้มีราคาที่เหมาะสมโดยใช้จีเนติกอัลกอริธึมเพื่อออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายให้มีราคาต้นทุนรวมต่ำ และนำผลการออกแบบไปสร้างต้นแบบจริงเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม เมื่อโปรแกรมที่ได้ทำการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายมีความถูกต้องก็จะสามารถนำมาทำการวิเคราะห์การออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายให้มีราคาที่เหมาะสมในลักษณะต่าง ๆ ได้ตามต้องการ

1.3 ข้อสมมติฐานของการศึกษา

การออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายในทางอุตสาหกรรม จะใช้ผลการออกแบบเดิมมาพัฒนาหาผลการออกแบบใหม่โดยใช้วิธีการลองผิดลองถูกปรับเปลี่ยนตัวแปรต่าง ๆ ตามประสบการณ์ของผู้ออกแบบเพื่อให้ได้ผลการออกแบบใหม่ที่มีความเหมาะสมมากขึ้น ดังนั้นผลการออกแบบของหม้อแปลงจำหน่ายที่มีการผลิตใช้งานอยู่บ่อยๆ จึงมีผลการออกแบบที่ค่อนข้างเหมาะสม แต่ในกรณีที่มีการออกแบบไม่บ่อยนักหรือเป็นการออกแบบใหม่ ก็ยากที่จะหาโครงสร้างของหม้อแปลงที่เหมาะสมได้ ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงได้เสนอแนวทางการออกแบบโดยใช้วิธีการเชิงตัวเลขในการหาค่าทีเหมาะสมด้วยจีเนติกอัลกอริธึมร่วมกับการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายเพื่อหาโครงสร้างที่เหมาะสม มีคุณลักษณะตรงตามความต้องการและมีต้นทุนการผลิตต่ำ

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

การออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายให้มีราคาที่เหมาะสมโดยใช้วิธีจีเนติกอัลกอริธึมนี้ เสนอวิธีการเชิงตัวเลขแบบสโตชาสติก (stochastic) ซึ่งเป็นวิธีการที่อาศัยพื้นฐานทางความน่าจะเป็น โดยใช้หลักการดำเนินงานทางพันธุศาสตร์ทำการพัฒนาข้อมูลในแต่ละรุ่นด้วยการผลิตประชากรในรุ่นต่อไป (reproduction) ครอสโอเวอร์ (cross over) และมิวเตชัน (mutation) เพื่อหาค่าที่เหมาะสมตามความต้องการ ร่วมกับวิธีการออกแบบด้านโครงสร้างของหม้อแปลงจำหน่าย มีการพิจารณาผลของกำลังสูญเสีย, เปอร์เซ็นต์อิมพิแดนซ์ลัดวงจร, การฉนวน, การระบายความร้อนในชุดขดลวด, ทำให้การกำหนดโครงสร้างของหม้อแปลงจำหน่ายมีราคาต้นทุนการผลิตที่เหมาะสมและสามารถสร้างได้จริง

1.5 ขอบเขตการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้เสนอแนวทางพัฒนาการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายให้มีราคาที่เหมาะสมโดยใช้จีเนติกอัลกอริธึมมีขนาดพิกัดกำลังตั้งแต่ 50 – 1,000 kVA, 3 เฟส, 50 Hz, แรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ 11,000 – 33,000 V, แรงดันไฟฟ้าด้านทุติยภูมิ 380 - 450 V, Dyn11 โดยผลการออกแบบจะ

ต้องเป็นไปตามมาตรฐานและข้อกำหนดต่าง ๆ ได้แก่ กำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลด, กำลังสูญเสียขณะมีโหลด, และเปอร์เซ็นต์อิมพิแดนซ์ลัดวงจรจะต้องอยู่ภายในข้อกำหนด เป็นต้น หลังจากทำการออกแบบจะนำผลที่ได้มาสร้างหม้อแปลงต้นแบบและทดสอบคุณลักษณะต่าง ๆ เพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของตัวแปรและวิธีการออกแบบหม้อแปลงจำหน่าย

1.6 ขั้นตอนการศึกษา

วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาวิธีการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายโดยพิจารณาผลการออกแบบที่สามารถผลิตใช้งานได้จริง ร่วมกับวิธีการหาค่าที่เหมาะสมโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาราคาต้นทุนรวมต่ำสุด ขั้นตอนของการศึกษาในงานวิจัยสามารถนำเสนอเป็นลำดับดังนี้

บทที่ 2 เป็นการกล่าวถึงโครงสร้างของหม้อแปลงจำหน่าย วิธีการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายแบบทั่วไป และแสดงตัวอย่างการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 100 kVA การคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็ก น้ำหนัก กำลังสูญเสีย เปอร์เซ็นต์อิมพิแดนซ์ลัดวงจร และเกณฑ์การพิจารณาระยะการฉนวนต่าง ๆ

บทที่ 3 เป็นการกล่าวถึงวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบสโตชาสติก คุณลักษณะทางความร้อนของหม้อแปลงโดยจะทำการประมาณผลอุณหภูมิแตกต่างระหว่างขดลวดกับน้ำมันจากข้อมูลเชิงสถิติในทางปฏิบัติ และจะกล่าวถึงการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมพิกัดกำลัง 315 kVA, 3 เฟส, 50 Hz, แรงดันด้านปฐมภูมิ 11,000V, แรงดันด้านทุติยภูมิ 400/230V, เปอร์เซ็นต์ของจุดต่อแยกแรงดันที่ด้านปฐมภูมิ $\pm 2 \times 2.5\%$, เปอร์เซ็นต์อิมพิแดนซ์ลัดวงจร 4.0 %, Dyn11 มีข้อกำหนดของการออกแบบคือ ค่ากำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลดต้องไม่เกิน 770 W, ค่ากำลังสูญเสียขณะมีโหลดต้องไม่เกิน 3,900 W อ้างอิงการออกแบบตามมาตราฐาน IEC 60076 ทำการออกแบบโดยมีเงื่อนไขของการออกแบบ 3 เงื่อนไข และเปรียบเทียบผลกับทางอุตสาหกรรม

บทที่ 4 เป็นการกล่าวถึงผลการออกแบบและการทดสอบของหม้อแปลงจำหน่ายโดยใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมมีวัตถุประสงค์เพื่อหาราคาต้นทุนต่ำสุดมีพิกัดกำลัง 315 kVA, 3 เฟส, 50 Hz, แรงดันด้านปฐมภูมิ 22,000 V, แรงดันด้านทุติยภูมิ 400/230 V, Dyn11, เปอร์เซ็นต์อิมพิแดนซ์ลัดวงจร 4 % ตามข้อกำหนดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (อ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 60076)

บทที่ 5 เป็นการกล่าวถึงการวิเคราะห์ผลกระทบต่อราคาต้นทุนรวม เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรหรือข้อกำหนดต่าง ๆ จะทำให้ราคาต้นทุนรวมเปลี่ยนแปลงไปในแนวทางได้ ทำให้ทราบแนวทางการออกแบบเพื่อหาราคาต้นทุนรวมได้ต่ำลง

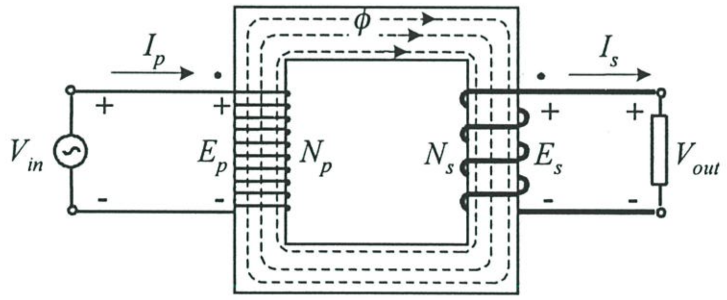
บทที่ 6 เป็นการกล่าวถึงผลสรุปที่ได้จากการวิจัยโดยใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมรวมกับการออกแบบหม้อแปลงจำหน่าย และข้อแสนอแนะต่าง ๆ เพื่อเป็นแนวทางสำหรับการวิจัยต่อเนื่องในอนาคต

บทที่ 2
หม้อแปลงจำหน่าย

2.1 บทนำ

หม้อแปลงไฟฟ้า เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ส่งผ่านกำลังไฟฟ้า จากแรงดันระดับหนึ่งไปสู่อีกระดับแรงดันหนึ่ง โดยอาศัยวงจรแม่เหล็กที่ประกอบขึ้นจากแผ่นเหล็กซิลิกอนทำเป็นแกนให้เส้นแรงแม่เหล็กไหลผ่าน และมีขดลวดพันรอบแกนเหล็กทำหน้าที่สร้างเส้นแรงแม่เหล็กและแปลงระดับแรงดัน นอกจากนี้ยังต้องมีการฉนวนซึ่งอาจเป็นฉนวนแข็ง ฉนวนเหลวหรือฉนวนก๊าซ

หลักการทำงานเบื้องต้นของหม้อแปลงไฟฟ้าในการสร้างแรงดัน โดยพิจารณาหม้อแปลงเฟสเดียวเพื่อง่ายต่อความเข้าใจ สำหรับหม้อแปลงแบบหลายเฟสก็มีหลักการทำงานเช่นเดียวกัน โดยทั่วไป หม้อแปลงไฟฟ้าจะประกอบด้วยขดลวดอย่างน้อย 2 ชุด พันอยู่บนแกนเหล็กเดียวกัน โดยจ่ายแรงดันไฟฟ้าเข้าที่ขดลวดด้านปฐมภูมิมีจำนวนรอบ N_p รอบ และต่อโหลดที่ขดลวดด้านทุติยภูมิมีจำนวนรอบ N_s รอบ แสดงดังรูปที่ 2.1 ในระบบไฟฟ้ากระแสสลับรูปคลื่นแรงดันและเส้นแรงแม่เหล็ก $\phi(t)$ สามารถประมาณได้ด้วยฟังก์ชันไซน์ในเทอมของเวลา ดังสมการที่ 2.1 [1]



รูปที่ 2.1 แบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้า

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

เมื่อ ϕ_m เป็นขนาดของเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็ก (Wb)

B_m เป็นขนาดของความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (T)

A_{Fe} เป็นพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กสุทธิ (sq.m)

ω เป็นความถี่เชิงมุม เท่ากับ $2\pi f$ (rad/sec)

f เป็นความถี่ของระบบไฟฟ้า (Hz)

จากกฎแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำของฟาราเดย์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กตัดผ่านขดลวด จะทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นในขดลวดตามสมการที่ 2.2 โดยกำหนดให้ว่าเส้นแรงแม่เหล็กที่คล้องขดลวดที่พันอยู่รอบแกนเหล็กมีค่าเท่ากันทุกรอบ สามารถหาสมการแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำในขดลวดได้ตามสมการที่ 2.3

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

$$e(t) = 2\pi fNA_{Fe}B_m\cos(\omega t - 180) \tag{2.3}$$

เมื่อ $e(t)$ เป็นแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

N เป็นจำนวนรอบของขดลวด

ในการใช้งานจะพิจารณาแรงดันและกระแสเป็นค่า rms มากกว่าค่าขณะใดขณะหนึ่งหรือค่าสูงสุด และค่า rms ของรูปคลื่นไซน์ใด ๆ มีค่าเท่ากับ $1/\sqrt{2}$ เท่าของค่ายอด ดังนั้นค่า rms ของแรงดันเหนี่ยวนำจะมีค่าเท่ากับ

$$E_{\mathrm{rms}} = \sqrt{2}\pi fNA_{Fe}B_m \tag{2.4}$$

จากสมการที่ 2.4 จะได้ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนแรงดันเหนี่ยวนำที่ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ ในเทอมของจำนวนรอบตามสมการที่ 2.5 ฉะนั้นหม้อแปลงจึงสามารถแปลงระดับแรงดันให้สูงขึ้นหรือต่ำลงได้ โดยการพันขดลวดให้มีจำนวนรอบสัมพันธ์กับระดับของแรงดันเหนี่ยวนำตามสมการ

$$\frac{E_p}{E_s} = \frac{N_p}{N_s} \tag{2.5}$$

เมื่อ E_p และ E_s เป็นแรงดันเหนี่ยวนำที่ขดลวดด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ ตามลำดับ

N_p และ N_s เป็นจำนวนรอบของขดลวดที่ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ ตามลำดับ

2.2 โครงสร้างของหม้อแปลงจำหน่าย

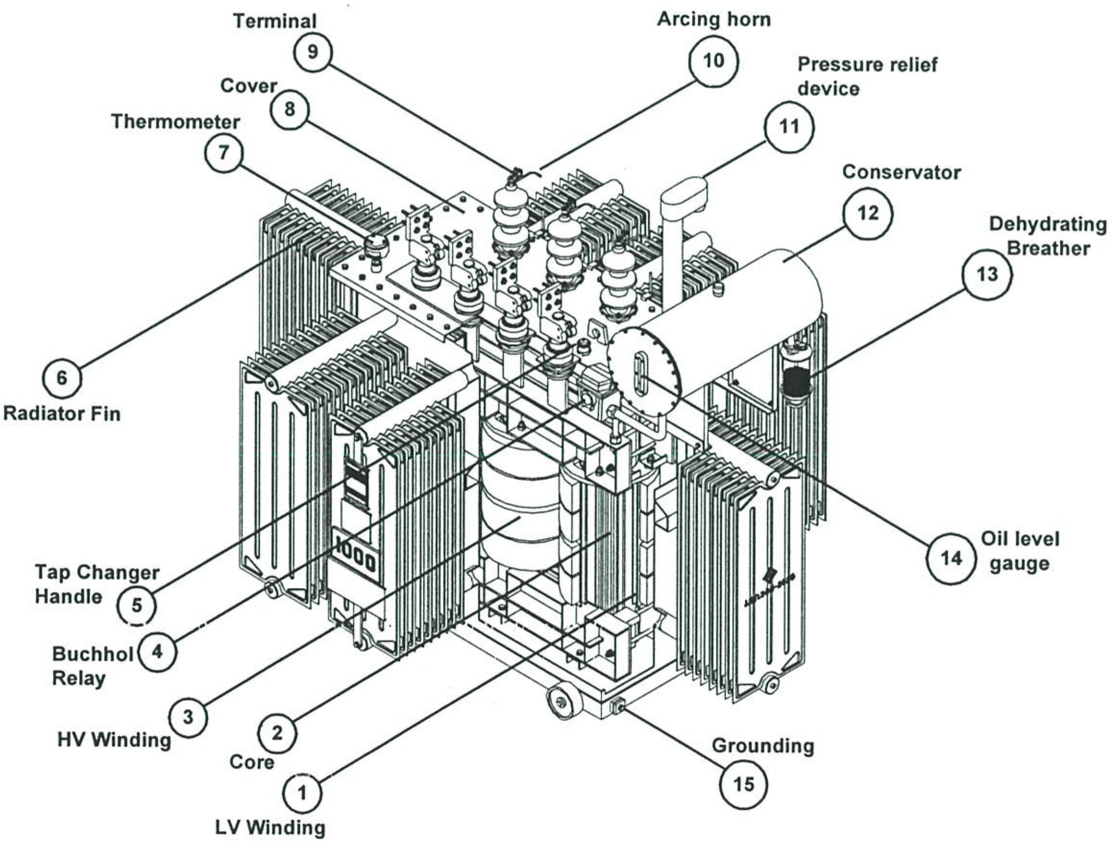
โครงสร้างของหม้อแปลงจำหน่าย [2] แสดงได้ดังรูปที่ 2.2 สามารถแบ่งโครงสร้างที่สำคัญออกเป็น 4 ส่วนดังนี้

1. ส่วนประกอบภายนอก ได้แก่ถังหม้อแปลง ชุดระบายความร้อน น้ำมันหม้อแปลง ถังรองรับน้ำมัน ห้องหายใจ เครื่องทำให้แห้ง ลิ้นระบายความดัน บุชโฮลท์รีเลย์ เครื่องวัดระดับน้ำมัน เครื่องวัดอุณหภูมิ และปลอกรองแกน เป็นต้น

2. ส่วนต่อภายในและภายนอก ได้แก่ขั้วของสายไฟฟ้า จุดต่อแยกระดับแรงดัน สวิตช์ต่อแยกระดับแรงดัน และสายลีด เป็นต้น

3. ส่วนที่เป็นวงจรแม่เหล็ก ได้แก่แกนของหม้อแปลง ขาแกนเหล็ก โย๊คแกนเหล็ก และเครื่องยึดแกนเหล็ก เป็นต้น

4. ส่วนที่เป็นวงจรไฟฟ้า ได้แก่ขดลวดด้านปฐมภูมิ ขดลวดด้านทุติยภูมิ และฉนวน เป็นต้น

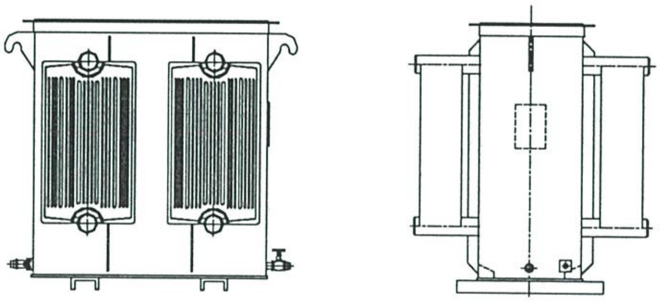


รูปที่ 2.2 โครงสร้างของหม้อแปลงจำหน่าย

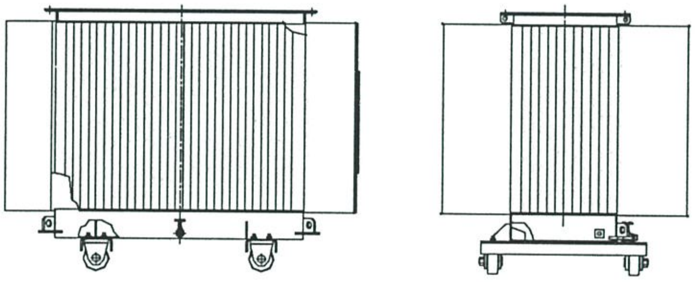
2.2.1 โครงสร้างภายนอก

2.2.1.1 ถังหม้อแปลง

ถังหม้อแปลงเป็นอุปกรณ์สำหรับห่อหุ้มฉนวนเหลว หรือก๊าซของหม้อแปลง โครงสร้างของถังหม้อแปลง มีอยู่หลายลักษณะตามความเหมาะสมของผู้ผลิตหม้อแปลงหรือขึ้นอยู่กับผู้ใช้ โดยปกติแล้วผู้ใช้จะต้องการหม้อแปลงที่มีน้ำหนัก เบา ราคาถูก สั่นสะเทือนน้อย ระดับความดังของเสียงต่ำ มีความเชื่อถือสูง และอายุการใช้งานนาน สามารถแบ่งลักษณะของถังหม้อแปลงตามชุดระบายความร้อนได้ 2 ชนิดใหญ่ ๆ ดังรูปที่ 2.3 และรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.3 ตัวถังหม้อแปลงติดครีบระบายความร้อนแบบแผ่น



รูปที่ 2.4 ตัวถังหม้อแปลงติดครีบระบายความร้อนแบบลอนลูกฟูก

ตัวถังหม้อแปลงติดครีบระบายความร้อนแบบแผ่น (radiator fin) ตามรูปที่ 2.3 เป็นตัวถังที่มีความแข็งแรง ทนต่อการสั่นสะเทือน เหมาะสำหรับหม้อแปลงที่มีถังรองรับน้ำมัน (conservator) ทำให้น้ำมันสัมผัสกับอากาศได้โดยตรง (open type) สำหรับตัวถังหม้อแปลงติดครีบระบายความร้อนแบบลอนลูกฟูก (corrugate fin) ตามรูปที่ 2.4 ครีบนอกจากจะทำหน้าที่ระบายความร้อนแล้วยังสามารถรองรับต่อการขยายตัวของน้ำมันเมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้น ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องมีถังรองรับน้ำมันอากาศภายนอกไม่สามารถสัมผัสกับน้ำมันได้โดยตรง (hermetically sealed) ข้อเปรียบเทียบระหว่างครีบระบายความร้อนแบบแผ่นกับแบบลอนลูกฟูกแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ข้อเปรียบเทียบหม้อแปลงไฟฟ้าติดครีบระบายความร้อนแบบแผ่นกับแบบติดครีบระบายความร้อนแบบลอนลูกฟูก

รายการ	ครีบแบบแผ่น	ครีบแบบลอนลูกฟูก
โครงสร้าง	ตัวถังและครีบระบายความร้อน ทำจากแผ่นเหล็กหนา โครงสร้างของหม้อแปลงมีความแข็งแรง	ผนังของถังทำจากแผ่นเหล็กบาง ทำเป็นลอนเพื่อช่วยในการระบายความร้อน มีความกระทัดรัด
การหมุนเวียนของน้ำมัน	หมุนเวียนได้สะดวก น้ำมันที่ร้อนจะรอยตัวสู่ด้านบนเข้าสู่ชุดระบายความร้อนเมื่อเย็นตัวจะต่ำลงสู่ด้านล่างหมุนเวียนโดยตลอด	การหมุนเวียนกระจัดกระจายไม่แน่นอน
การเพิ่มโหลด	ทำได้ง่าย โดยการติดตั้งพัดลมช่วยระบายความร้อนที่ชุดระบายความร้อน	ทำได้ยากกว่าต้องใช้พัดลมสำหรับเฉพาะงานเท่านั้น
การทนต่อความดัน	สามารถทนต่อความดันที่เกิดขึ้นภายในได้ 10 PSIg	สามารถทนต่อความดันที่เกิดขึ้นภายในได้ 3.5 PSIg
การบำรุงรักษา	ควรทำการตรวจสอบอย่างน้อยปีละ 1 ครั้ง สังเกตการเปลี่ยนแปลงของสีสารกรองความชื้น (silica gel)	ไม่ต้องทำการบำรุงรักษามากนักเพราะน้ำมันไม่สัมผัสอากาศภายนอกโดยตรง

2.2.1.2 น้ำมันหม้อแปลง

น้ำมันที่ใช้ในหม้อแปลงนอกจากจะทำหน้าที่เป็นฉนวนแล้วยังมีหน้าที่พาความร้อนที่เกิดจากกำลังสูญเสียออกจากขดลวดและแกนเหล็ก คุณสมบัติที่สำคัญของน้ำมันหม้อแปลงเพื่อที่จะทำหน้าที่เป็นฉนวนได้อย่างสมบูรณ์ มีดังนี้

1. มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี มีค่าความเป็นฉนวน (dielectric strength) สูง
2. ระบายความร้อนได้ดี มีความหนืด (viscosity) ต่ำ
3. มีจุดไหล (pour point) ต่ำ ไม่แข็งตัวในฤดูหนาว
4. ระเหยได้น้อย มีจุดวาบไฟ (flash point) สูง
5. คงทนต่อปฏิกิริยาทางเคมี ไม่มีสารไปกัดกร่อนส่วนที่เป็นโลหะ
6. มีค่าความเป็นกรด (acidity) ต่ำ
7. สะอาดปราศจากความชื้น หรือสิ่งเจือปนต่างๆ

2.2.1.3 ถังรองรับน้ำมัน

ถังรองรับน้ำมัน (conservator) มีลักษณะเป็นถังอยู่สูงเหนือหม้อแปลงภายในบรรจุน้ำมันหม้อแปลงไว้ ทำหน้าที่รองรับการขยายหรือหดตัวของน้ำมันหม้อแปลง เมื่ออุณหภูมิของน้ำมันสูงขึ้น น้ำมันจะขยายตัวผ่านเข้าไปในท่อและลิ้นบังคับ (valve) เข้าสู่ถังรองรับน้ำมัน อากาศที่สัมผัสกับน้ำมันจะถูกกรองความชื้นโดยเครื่องหายใจกรองความชื้น (dehydrating breather)

ขนาดของถังรองรับน้ำมันนี้จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ซึ่งต้องสามารถรองรับน้ำมันส่วนที่จะขยายตัวได้ จากการทดลองน้ำมันจะขยายตัวได้ประมาณ 7% ของน้ำมันภายในตัวถังของหม้อแปลงในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 0–100 °C ฉะนั้นเวลาทำการออกแบบถังรองรับน้ำมัน ขนาดของถังรองรับน้ำมันจะต้องสามารถรองรับน้ำมันในส่วนที่จะขยายตัวได้ประมาณ 11 – 12 % ของน้ำมันทั้งหมดที่อยู่ในตัวถังของหม้อแปลง

2.2.1.4 ลิ้นระบายความดัน

ลิ้นระบายความดัน (pressure relief device) ความผิดปกติที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลง เช่น เกิดประกายไฟ (arcing) อันเป็นผลทำให้เกิดแรงดันของก๊าซสูงขึ้น แรงดันของก๊าซที่สูงมากนี้ จะผ่านท่อระบายความดันไปกระแทกแผ่นระบายแรงดัน (busting plate) ที่ส่วนบนเพื่อออกสู่ภายนอก

2.2.1.5 เครื่องวัดระดับน้ำมัน

โดยทั่วไป เครื่องวัดระดับน้ำมัน (oil level gauge) จะติดตั้งอยู่ข้าง ๆ ถังรองรับน้ำมัน แบ่งได้เป็น 2 ชนิดด้วยกันคือ ชนิดที่ใช้หลอดแก้ว (rod type oil gauge) และชนิดที่มีหน้าปัดเข็มชี้ (dial type oil gauge) เครื่องวัดชนิดนี้ยังสามารถเพิ่มจุดสัมผัสที่เข็ม เพื่อติดตั้งเครื่องเตือน (alarm) โดยให้มีเสียงดังไปยังห้องควบคุม เมื่อน้ำมันตกถึงระดับต่ำสุด

2.2.1.6 เครื่องวัดอุณหภูมิ

เครื่องวัดอุณหภูมิ (thermometer) เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับบอกอุณหภูมิของหม้อแปลง การบอกอุณหภูมิส่วนบนของน้ำมันหม้อแปลง (top oil temperature) จะติดตัวรับความร้อน บนฝาถังหม้อแปลงเป็นบริเวณที่น้ำมันร้อนที่สุด และอุณหภูมิของขดลวด (winding temperature) ต้องอาศัยวิธีวัดทางอ้อม โดยขดลวดจะร้อนมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับกระแสที่ไหลผ่าน ฉะนั้นจากค่าของกระแสที่ไหลผ่าน สามารถเปรียบได้กับความร้อน โดยการนำเอากระแสที่ได้จากหม้อแปลงกระแสที่ขั้วต่อสายไฟ (BCT) ไหลผ่านขดลวดความร้อน เพื่อส่งค่าอุณหภูมิให้แก่เทอร์โมมิเตอร์ และส่งต่อไปที่หน้าปัดแสดงผล

2.2.1.7 บุชโฮลท์รีเลย์

บุชโฮลท์รีเลย์ (buchholz relay) ทำการติดตั้งเฉพาะหม้อแปลงที่มีถังรองรับน้ำมันเท่านั้น และจะต่ออยู่ระหว่างตัวถังหม้อแปลงกับถังรองรับน้ำมัน ทำหน้าที่ตรวจความผิดปกติในหม้อแปลง เช่นจากก๊าซที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลงแจ้งสัญญาณเตือนให้ทราบ ถ้าก๊าซเกินระดับก็จะก็ส่ง

สัญญาณตัดไฟ เข้า-ออก จากหม้อแปลง และถ้าน้ำมันภายในหม้อแปลงเกิดไหลย้อนกลับเข้าไปถังรองรับน้ำมัน โดยผ่านบุชโฮลท์รีเลย์ด้วยความเร็วเกิน 100 cm/sec. เนื่องจากเกิดการลัดวงจรภายในหม้อแปลงทำให้แผ่นกั้นในบุชโฮลท์รีเลย์พลิกก็จะส่งสัญญาณตัดไฟเข้า-ออก จากหม้อแปลงเช่นเดียวกัน

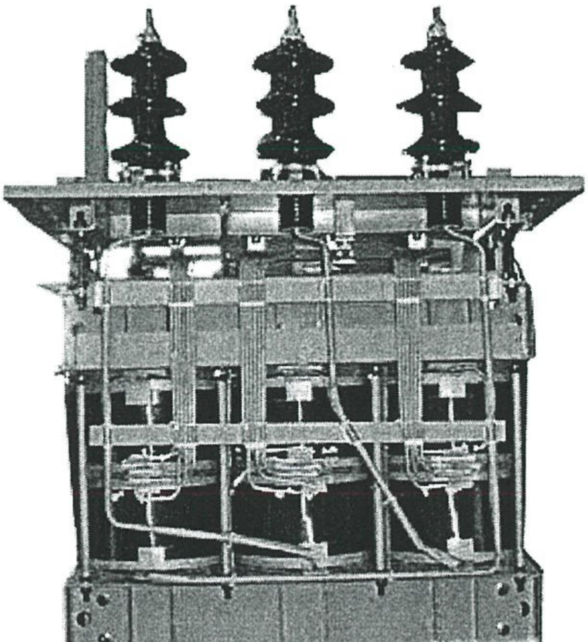
2.2.1.8 ปลอกรองแกน

ปลอกรองแกน (bushing) เป็นอุปกรณ์ฉนวนที่ติดอยู่ระหว่างตัวถังหม้อแปลงกับภายนอกบริเวณสายลีค (lead) ต่อออกมาจะอัดแน่นด้วยสารบางอย่างเพื่อทำหน้าที่เป็นฉนวนทางไฟฟ้า ช่วยป้องกันการเกิดโคโรน่า (corona) ผ่านอากาศ และกระจายความสม่ำเสมอของความเข้มสนามไฟฟ้า (electric field)

2.2.2 ส่วนต่อภายในและภายนอก

2.2.2.1 สายลีดและปลายขั้ว

สายลีดและปลายขั้ว เป็นแท่งทองแดงหรือข้อต่อของขดลวดสู่ภายนอก ซึ่งจะหุ้มด้วยฉนวนบางส่วนหรือทั้งหมด แล้วต่อขึ้นสู่สะพานไฟฟ้า (bus-bar) โดยตรง สำหรับหม้อแปลงชนิดแช่น้ำมัน (oil-immersed transformer) ขนาดและรูปร่างของแท่งทองแดงสำคัญมากในระบบแรงดันไฟฟ้าสูง โดยจะต้องคำนึงถึงแรงดันเค้นกำบังไฟฟ้า (dielectric stress) และโคโรน่าตรงบริเวณขอบหรือมุม การเดินสายลีดและการฉนวนภายในหม้อแปลงแสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การฉนวนในส่วนต่าง ๆ ของหม้อแปลงและเดินสายลีดภายใน

2.2.2.2 ตัวเปลี่ยนแปลงจุดต่อแยก

ตัวเปลี่ยนแปลงจุดต่อแยก (tap changer) เป็นอุปกรณ์ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนอัตราส่วนจำนวนรอบของขดลวดหม้อแปลง เพื่อให้ระดับแรงดันไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าคงที่ หรือเป็นการเปลี่ยนแปลงให้อยู่ภายในมาตรฐาน ตัวเปลี่ยนแปลงจุดต่อแยกที่ใช้งานตามมาตรฐานมีอยู่ 2 ชนิด

1. ตัวเปลี่ยนแปลงจุดต่อแยกขณะไร้ภาระ (off load tap changer)
2. ตัวเปลี่ยนแปลงจุดต่อแยกขณะรับภาระ (on load tap changer)

2.2.3 ส่วนที่เป็นวงจรแม่เหล็ก

2.2.3.1 แกนเหล็ก

แกนเหล็ก (steel core) เป็นทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็ก เพื่อเหนี่ยวนำวงจรไฟฟ้าระหว่างขดลวดด้านปฐมภูมิและขดลวดด้านทุติยภูมิ ลักษณะการออกแบบและการจัดวางแกนเหล็กของหม้อแปลงนั้น จำแนกตามหลักของวงจรแม่เหล็กออกเป็น 2 ชนิดด้วยกันคือ

1. ชนิดแกน (core type) มีเส้นแรงแม่เหล็กรวมอยู่ที่แกนของหม้อแปลง
2. ชนิดเปลือกรอบ (shell type) มีเส้นแรงแม่เหล็กอยู่รอบนอกขดลวดของหม้อแปลง

คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำแกนเหล็กของหม้อแปลงจะต้องมีค่าซึมซาบของแกนเหล็ก (permeability) และความต้านทาน (resistivity) สูง กำลังสูญเสียที่เกิดจากเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง (hysterisis) ต่ำ ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กสูงประมาณ 1.45 - 1.75 Wb/m^2 ปัจจุบันเหล็กที่นำมาใช้งานเป็นประเภทเกรนโอเรียนเตด (cold rolled grain oriented silicon steel; CRGO) ซึ่งได้ผ่านกรรมวิธีทางเคมีและความร้อนแล้วนำมารีดเป็นแผ่นบาง ๆ และนำมาประกอบเป็นแท่งแกนเพื่อลดกำลังสูญเสียอันเนื่องมาจากกระแสไหลวนในขดลวด (eddy current)

คุณสมบัติที่สำคัญของแกนเหล็กหม้อแปลงมีดังนี้

1. กำลังสูญเสียในแกนเหล็ก ในหน่วย วัตต์ต่อกิโลกรัม ต้องมีค่าต่ำ
2. อายุการใช้งานทนทาน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการออกแบบระบบระบายความร้อน
3. ความเค้นเชิงกลสูง เพื่อว่าเมื่อมีการลัดวงจรเกิดขึ้นภายในหม้อแปลงระหว่างที่ใช้งาน หรือสั่นสะเทือนในระหว่างที่มีการขนส่ง หรือแรงยึดต่อขดลวดในระหว่างที่ผลิตในโรงงาน หม้อแปลงจะต้องสามารถรองรับได้

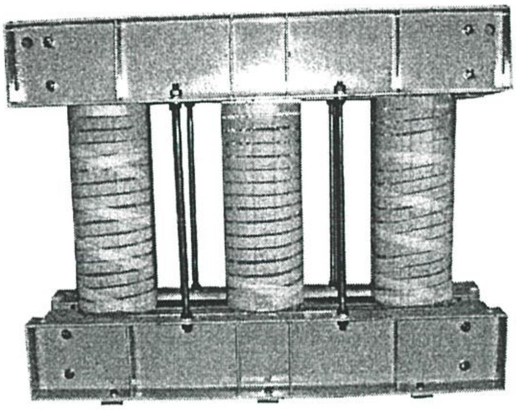
2.2.3.2 โย๊คและขาแกนเหล็ก

โย๊คและขาแกนเหล็ก (yoke & limb) มีหน้าตัดเป็นชั้น และจำนวนชั้นในส่วนของโย๊คแกนเหล็กอาจจะน้อยกว่าในส่วนของขาแกนเหล็ก แต่จะมีพื้นที่หน้าตัดที่ใหญ่กว่าประมาณ 5-10% เนื่องจากมีการปรับตัวของความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นตรงมุมต่อระหว่างขาแกนเหล็ก

กับส่วนของโย๊คแกนเหล็กทำให้เกิดกำลังสูญเสียของกระแสไหลวนมากขึ้น การลดกำลังสูญเสียดังกล่าวจะกระทำได้โดยการเสริมโย๊คแกนเหล็กเพิ่มเติม เพื่อเพิ่มพื้นที่หน้าตัดให้แก่โย๊คแกนเหล็ก

2.2.3.3 เครื่องยึดแกนเหล็ก

เครื่องยึดแกนเหล็กจะยึดด้วยหมุด (pin) สอดผ่านทะลุรูของชั้นต่าง ๆ ฉนวนที่หุ้มหมุดนั้นต้องมีความเป็นฉนวนสูงเพื่อกันไม่ให้เกิดการลัดวงจรระหว่างชั้นขึ้น สำหรับหม้อแปลงจำหน่ายมีการยึดแกนเหล็กได้หลายรูปแบบ ในรูปที่ 2.6 แสดงการประกอบแกนเหล็กติดกับเครื่องยึดแกนแบบไม่ต้องเจาะทะลุโดยใช้ที่ยึดแกนแบบประกบ



รูปที่ 2.6 โครงสร้างแกนเหล็กของหม้อแปลง 3 เฟส ชนิดแกน

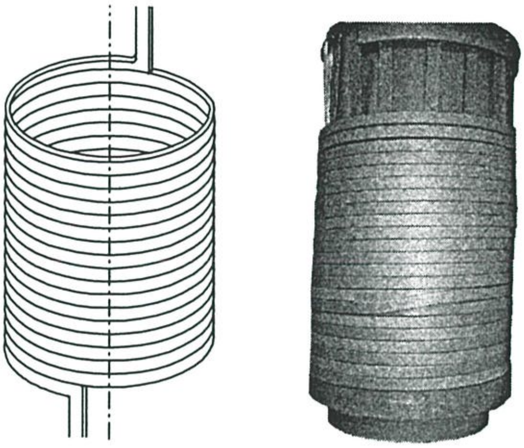
2.2.4 ส่วนที่เป็นวงจรไฟฟ้า

2.2.3.1 ขดลวดหม้อแปลง

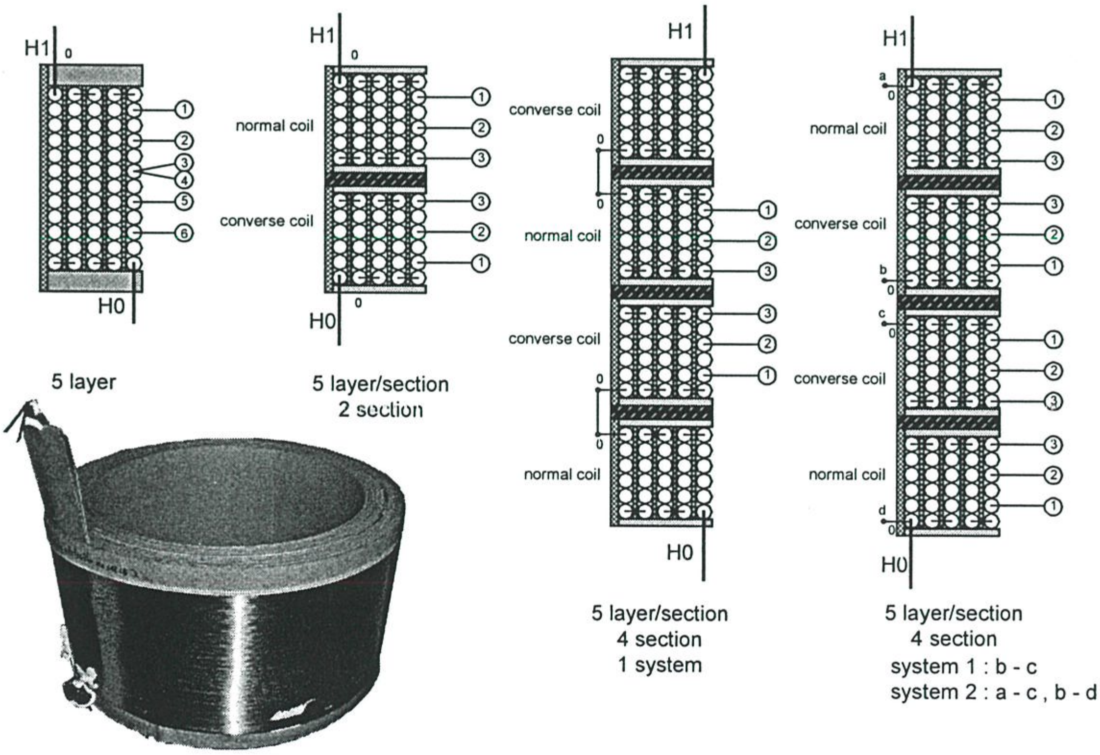
ขดลวดหม้อแปลง (windings) ประกอบด้วยลวดทองแดงหรืออลูมิเนียม, ฉนวน, ขั้ว (terminal), จุดต่อแยก (tap), เมื่อกล่าวถึงขดลวดหม้อแปลง ก็จะต้องพิจารณาถึงจำนวนรอบของขดลวด, ขนาดลวดตัวนำ, ร่องระบายความร้อน (cooling duct), ฉนวนทรงกระบอก (insulating cylinder) ,และฉนวนกั้น (insulating barrier) สิ่งที่ควรพิจารณาเลือกชนิดของขดลวดมีดังนี้

1. กำลังสูญเสียขณะมีโหลด (load loss) ต้องมีค่าน้อยที่สุด
2. ความแข็งแรงเชิงกล (mechanical strength) ต้องสูงพอ
3. เสถียรภาพที่มีต่อความร้อนสูง
4. ความแข็งแรงของฉนวน (Insulation strength) สูง
5. ค่าใช้จ่ายในการผลิตต่ำ
6. โครงสร้างง่ายไม่ซับซ้อน
7. จำนวนรอบในแกนต้องลงตัวพอดี

พื้นที่หน้าตัดของลวดตัวนำมีใช้งานทั้งชนิดกลมและชนิดสี่เหลี่ยม ขนาดและชนิดของลวดตัวนำที่ใช้งานจะพิจารณาจากขนาดของแรงดันไฟฟ้า และอัตรากำลังของหม้อแปลงหรือภาระกระแสที่ต้องการ ขดลวดที่ใช้ลวดตัวนำกลมเหมาะสมกับหม้อแปลงขนาดเล็ก และขดลวดที่ใช้ลวดตัวนำสี่เหลี่ยมเหมาะกับหม้อแปลงที่ต้องรับภาระสูง ๆ การแบ่งชนิดของลวดนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะการจัดวางลวดตัวนำมี 2 ลักษณะ ได้แก่ขดลวดทรงกระบอกพันแบบชั้น (cylindrical layer winding) และขดลวดแบบจาน (disc winding) ส่วนการพันชนิดอื่น ๆ นั้น ได้จากการผสมของขดลวดทั้งสองลักษณะ



รูปที่ 2.7 ขดลวดทรงกระบอกหนึ่งชั้นพันด้วยลวดตัวนำสี่เหลี่ยม

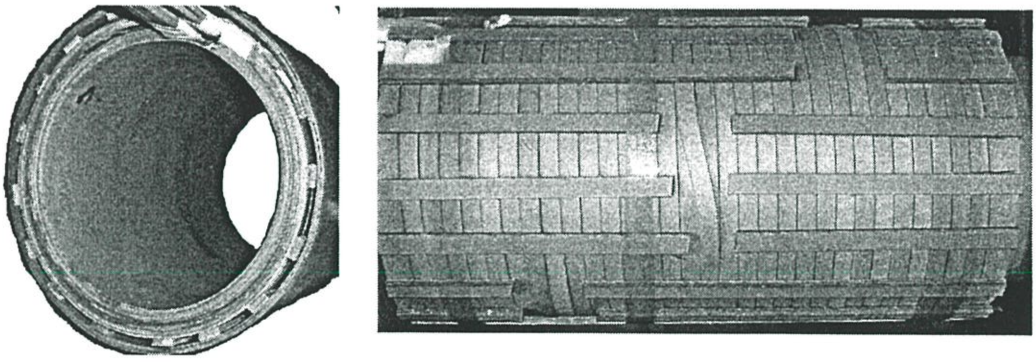


รูปที่ 2.8 ขดลวดทรงกระบอกหลายชั้นพันด้วยลวดตัวนำกลม

โดยทั่วไป หม้อแปลงจำหน่ายนิยมลักษณะการพันขดลวดแบบชั้น ด้านแรงดันต่ำมีกระแสภาระสูงนิยมใช้วิธีการพันเป็นแบบสไพรัล (spiral winding) ใช้ลวดตัวนำสี่เหลี่ยมรวมหลาย ๆ ตัวนำเป็นชุดแล้วพันขนานพร้อมกัน ปลายที่โผล่ออกมาตรึงให้แน่นง่าย แสดงวิธีการพันขดลวดแบบสไพรัลดังรูปที่ 2.7 และด้านแรงสูงมีกระแสประมาณไม่เกิน 30 A นิยมวิธีการพันขดลวดแบบครอสโอเวอร์ (crossover winding) ใช้ลวดตัวนำกลมพันเป็นชั้น ๆ โดยอาจแบ่งออกเป็นหลาย ๆ ตอน เพื่อช่วยลดแรงดันระหว่างชั้น แสดงรูปขดลวดพันแบบครอสโอเวอร์และรูปแบบการลืดสายของจุดต่อแยกแรงดันดังรูปที่ 2.8

2.2.3.2 การฉนวน

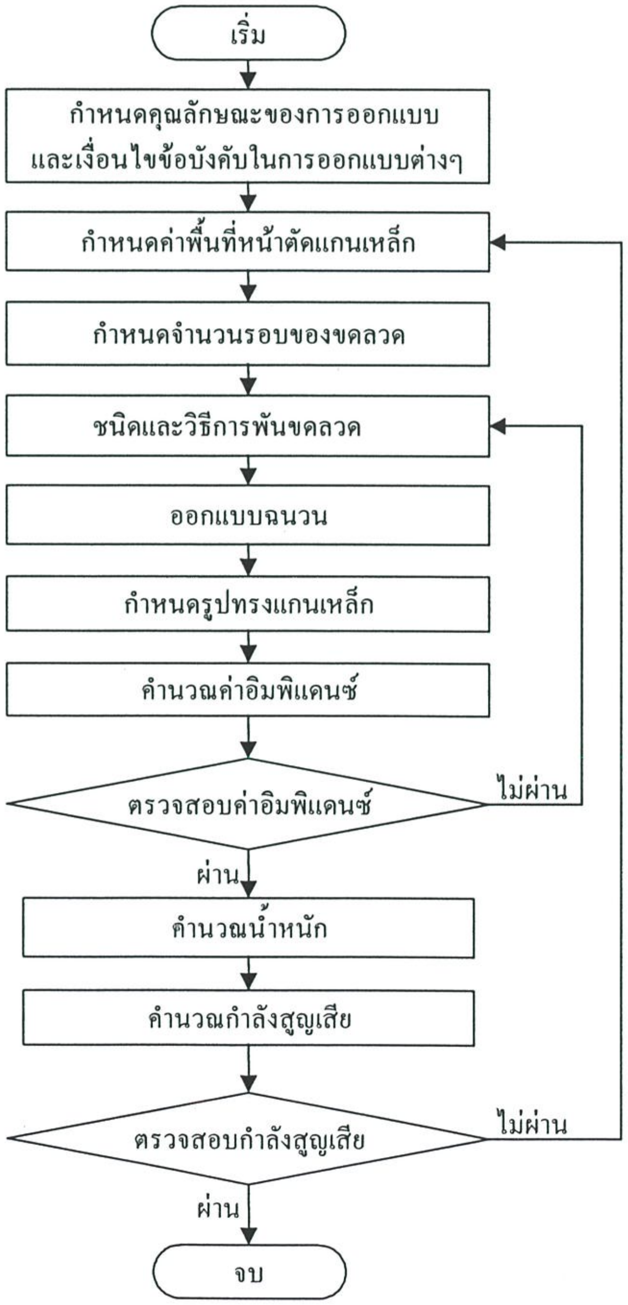
การฉนวน (insulation) แบ่งออกเป็นฉนวนภายในขดลวดและฉนวนระหว่างขดลวด ฉนวนภายในขดลวดทำหน้าที่เสมือนกำแพงกั้นแรงดันไฟฟ้า โดยจะกั้นระหว่างรอบหรือระหว่างชั้นของขดลวด ชนิดของฉนวนที่นิยมใช้งานจะเป็นกระดาษคราฟท์ (kraft paper) หรือเพรสบอร์ด (pressboard) ฉนวนนอกจากจะใช้เพื่อป้องกันแรงดันเกินแล้ว ยังใช้ในการระบายความร้อนอีกด้วย แสดงฉนวนกั้นทำหน้าที่ระบายความร้อนภายในชุดของขดลวดดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ฉนวนกั้นทำหน้าที่ระบายความร้อนภายในชุดของขดลวด

2.3 การออกแบบหม้อแปลงจำหน่าย

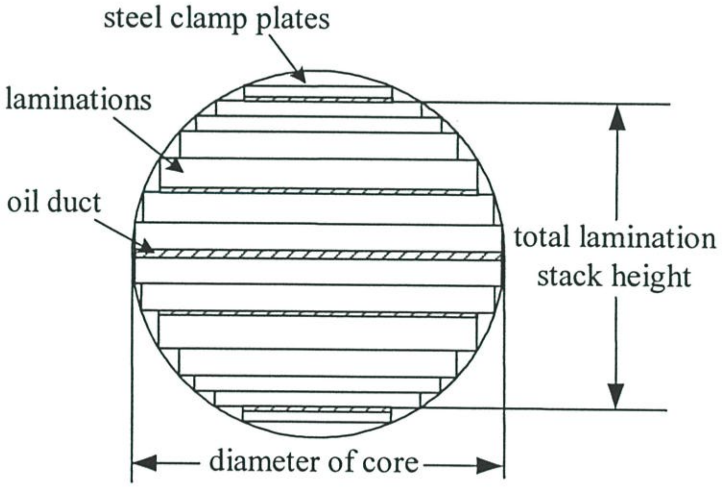
การออกแบบหม้อแปลงจำหน่าย [3-8] ก่อนทำการออกแบบจะต้องมีการกำหนดคุณลักษณะต่าง ๆ ของหม้อแปลงจำหน่ายก่อนทำการออกแบบให้ชัดเจนได้แก่ พิกัดกำลัง, แรงดัน, เฟส, ความถี่ระบบไฟฟ้า, ชนิดของกลุ่มเวกเตอร์, เปอร์เซ็นต์อิมพิแดนซ์ลัดวงจร, หรือข้อกำหนดของกำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลด, กำลังสูญเสียขณะมีโหลด, และมาตรฐานการทดสอบ [9-15] เป็นต้น เนื่องจากการออกแบบจะใช้เงื่อนไขดังกล่าวเป็นข้อกำหนดของการออกแบบ ขั้นตอนการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แผนผังการออกแบบหม้อแปลงจำหน่าย

2.3.1 การกำหนดขนาดพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก

แกนเหล็กของหม้อแปลงที่นิยมนำมาใช้ในทางอุตสาหกรรมเป็นแกนเหล็กซิลิกอนชนิดเกรนโอเรียนเตด (CRGO) มีหลายเกรดให้เลือกใช้งานขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของสมรรถนะ และต้นทุนการผลิตของหม้อแปลง ในทางอุดมคติรูปทรงของแกนเหล็กที่ต้องการคือทรงกลมใช้ประโยชน์ในพื้นที่ทรงกลมได้เต็มที่นั้นคือการเลือกใช้พื้นที่ของแกนเหล็กที่ดีที่สุด แต่อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนความกว้างของแผ่นลามิเนท (laminations) ทุกแผ่นนั้นเป็นไปไม่ได้และไม่เหมาะสมในเชิงอุตสาหกรรม การแก้ปัญหานี้ทำได้โดยการตัดแผ่นเหล็กออกเป็นชั้น (step) แสดงส่วนประกอบภายในทรงกลมแกนเหล็กดังรูปที่ 2.11 จะประกอบด้วยร่องน้ำมันใช้สำหรับระบายความร้อนออกจากแกนเหล็ก แผ่นเหล็กคาร์บอนยึดแกนเหล็กจะต้องมีความแข็งแรงทางกล โดยจะต้องสามารถรองรับน้ำหนักของแกนเหล็กและกันไม่ให้เกิดการโกงงอของแผ่นลามิเนทรวมถึงแรงที่จะเกิดขึ้นในขณะลัดวงจรได้



รูปที่ 2.11 ส่วนประกอบภายในทรงกลมแกนเหล็กหม้อแปลง

การประมาณหาค่าเริ่มต้นของพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็ก เพื่อให้ได้ราคาที่เหมาะสม มีกำลังสูญเสีย และเปอร์เซ็นต์อิมพิแดนซ์ลัดวงจรตามข้อกำหนดสามารถคำนวณตามสมการที่ 2.6 [3] ดังนี้

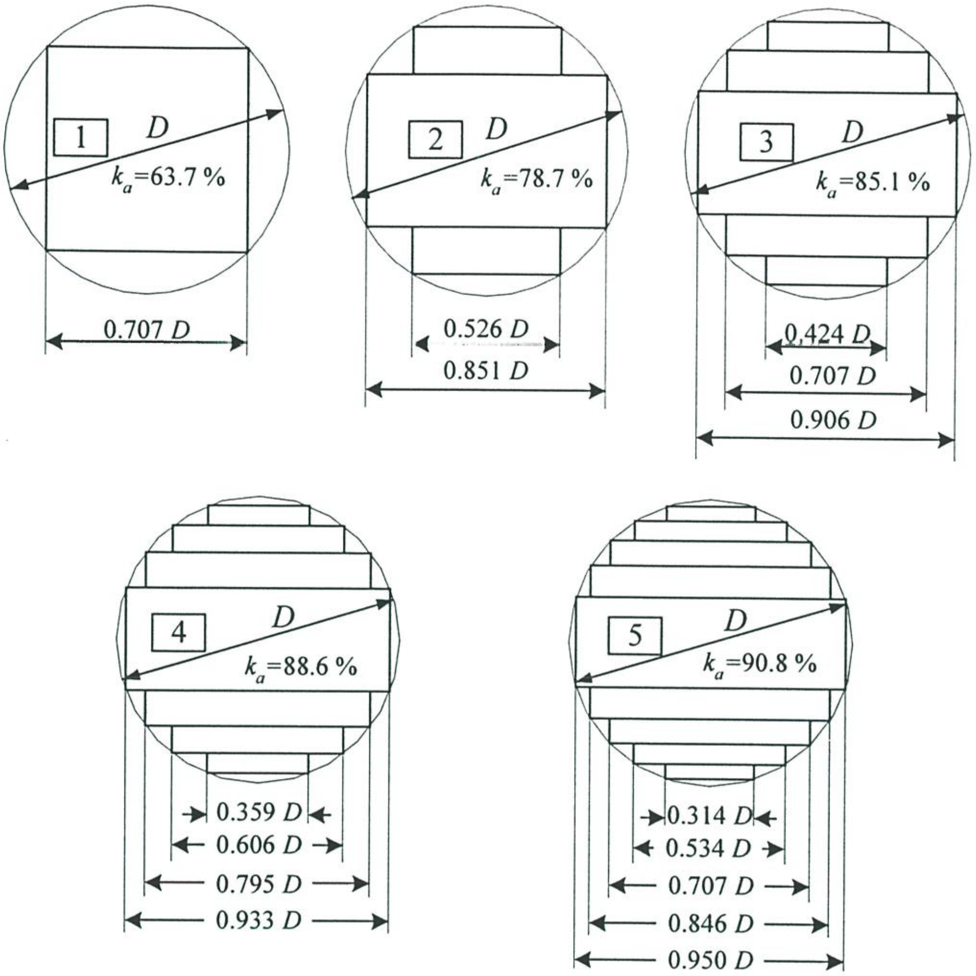
$$A_{Fe} = k_c\sqrt{\frac{S}{fP}} \tag{2.6}$$

โดยที่ S เป็นพิกัดกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลง (VA)

P เป็นจำนวนเฟส

k_c เป็นค่าประกอบของแกนเหล็ก มีค่าใช้งานอยู่ประมาณ 4-6 $\times 10^{-4}$ $m^2J^{-1/2}$

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



รูปที่ 2.12 ลักษณะโครงสร้างของพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็ก ที่ประกอบด้วยแกนเหล็กตั้งแต่ 1 ชั้นแกนเหล็กถึง 5 ชั้นแกนเหล็ก

การคำนวณเลือกใช้พื้นที่ภายในทรงกลมแกนเหล็กอย่างเหมาะสม สามารถคำนวณหาด้านแต่ละด้านของรูปสี่เหลี่ยมอัดในวงกลม เมื่อทราบเส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลมที่ต้องการ สามารถเลือกใช้พื้นที่ภายในทรงกลมแกนเหล็กได้ดังรูปที่ 2.12 ซึ่งจะใช้กับหม้อแปลงที่มีพิกัดกำลังไม่มากนัก สำหรับในกรณีหม้อแปลงที่มีพิกัดกำลังสูงขึ้น สามารถใช้ค่าสัมประสิทธิ์การใช้ประโยชน์ที่แสดงอยู่ในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สัมประสิทธิ์การใช้ประโยชน์ภายในทรงกลมแกนเหล็กที่มีพิกัดกำลังสูงขึ้น

จำนวนชั้นแกนเหล็ก	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
สัมประสิทธิ์การใช้ประโยชน์ , k_a (%)	63.7	78.7	85.1	87.0	89.8	90.8	91.5	92.0	92.5	92.8

48947

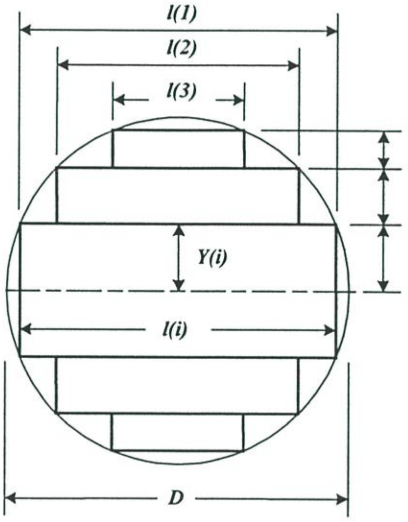
ดังนั้นพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กสุทธิ สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$A_{Fe} = \frac{\pi D^2}{4} k_a k_{Fe} \tag{2.7}$$

เมื่อ D เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนเหล็ก (mm)

k_{Fe} เป็นสัมประสิทธิ์ของเนื้อเหล็ก (iron filling factor)

k_a เป็นสัมประสิทธิ์การใช้ประโยชน์ภายในทรงกลมแกนเหล็ก (utilization factor)



รูปที่ 2.13 โครงสร้างของพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็ก

ในทางปฏิบัติ การเลือกจำนวนชั้นของแกนเหล็ก จะต้องพิจารณาถึงคุณลักษณะด้านโครงสร้างดังนี้ ความกว้างน้อยที่สุดของชั้นแผ่นลามิเนทจะถูกกำหนดโดยความกว้างของแผ่นยึดแกนเหล็กที่อยู่ในขอบเขตพื้นที่ทรงกลมแกนเหล็กเดียวกัน ความเหมาะสมของจำนวนชั้นไม่มากเกินไปซึ่งจะเป็นการไม่ประหยัดต่อระบบการผลิต และการกำหนดความกว้างของแผ่นลามิเนทโดยทั่วไปความกว้างของแผ่นลามิเนทถูกกำหนดค่าใช้งานอยู่แล้วจากกระบวนการผลิตแผ่นลามิเนท ซึ่งจะมีความกว้าง 50, 60, 70, … mm เป็นต้น ความหนาในแต่ละชั้นที่แผ่นลามิเนทสามารถวางได้ภายในทรงกลมแกนเหล็กตามรูปที่ 2.13 สามารถคำนวณหาได้ดังสมการที่ 2.8

$$Y(i) = \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{l(i)}{2}\right)^2} - \sum_{j=0}^{i-1} Y(j) \tag{2.8}$$

เมื่อ i เป็นลำดับชั้นแกนเหล็ก

$l(i)$ เป็นความกว้างของชั้นแกนเหล็ก (mm)

$Y(i)$ เป็นความหนาของชั้นแกนเหล็กโดยที่ $Y(0)$ มีค่าเท่ากับศูนย์ (mm)

ดังนั้นพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กสุทธิสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 2.9

$$A_{Fe} = 2k_{Fe}\sum_{i=1}^{n} Y(i)l(i)\times 10^{-6} \tag{2.9}$$

โดยที่ n เป็นจำนวนชั้นของแกนเหล็ก

2.3.2 การเลือกจำนวนรอบของขดลวด

จำนวนรอบของขดลวดจะสัมพันธ์กับค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก ซึ่งค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กจะถูกเลือกค่าที่เหมาะสมกับคุณลักษณะของหม้อแปลงที่ทำการออกแบบ เพื่อให้ได้ผลการออกแบบหม้อแปลงที่มีคุณลักษณะเป็นไปตามข้อกำหนด ปกติความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กจะถูกเลือกใช้งานใกล้จุดโค้ง จากความสัมพันธ์ของ B - H มีค่าอยู่ในช่วง 1.1 - 1.75 T ขึ้นอยู่กับเกรดของแผ่นลามิเนททีนำมาใช้งาน การคำนวณหาจำนวนรอบของขดลวดจะเริ่มคำนวณที่ด้านแรงดันต่ำก่อน แล้วจึงทำการคำนวณหาจำนวนรอบของขดลวดอื่นๆ ตามอัตราส่วนของแรงดันในสมการที่ 2.5 จำนวนรอบของขดลวดด้านทุติยภูมิคำนวณได้ตามสมการดังนี้

$$N_s = \frac{E_s}{\sqrt{2}\pi f B_m A_{Fe}} \tag{2.10}$$

สำหรับจำนวนรอบที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงจากจุดต่อแยกหลักทางด้านปฐมภูมิ คำนวณได้ตามสมการที่ 2.11

$$N_{tp} = N_p \frac{\%\text{tap}}{100} \tag{2.11}$$

เมื่อ N_{tp} เป็นจำนวนรอบของขดลวดในแต่ละจุดต่อแยกทางด้านปฐมภูมิ

%tap เป็นเปอร์เซ็นต์แรงดันในแต่ละจุดต่อแยกเทียบกับแรงดันที่พิกัด

2.3.3 การออกแบบขดลวดของหม้อแปลงจำหน่าย

การออกแบบขดลวดหม้อแปลงจะต้องทำการออกแบบให้สามารถรองรับต่อปัญหาผิดปกติที่อาจจะเกิดขึ้นได้ เช่นจะต้องทนต่อแรงดันเกินจากผลของเซิจน์ ความเค้นทางกลในขณะเกิดการลัดวงจร หรือขีดจำกัดของอุณหภูมิที่ขดลวดขณะทำงานที่พิกัด เป็นต้น ลวดตัวนำที่นิยมนำมาใช้ในหม้อแปลงมีอยู่สองลักษณะคือลวดสี่เหลี่ยมและลวดกลม การกำหนดเลือกใช้ลักษณะของลวดตัวนำจะพิจารณาจากความหนาแน่นของกระแส และจำนวนตัวนำที่มาขนานกัน ลวดตัวนำกลมมักใช้ขนานกันได้ไม่เกินสองเส้นตามแนวแกน สำหรับลวดตัวนำสี่เหลี่ยมจะขนานกันได้หลายเส้นตามแนวแกนหรือแนวรัศมี

การกำหนดลักษณะลวดตัวนำให้ใช้ขนานกันในทิศทางตามแนวรัศมี แนวแกน หรือจำนวนชั้นของขดลวดจะพิจารณาจากค่าเปอร์เซ็นต์อิมพิแดนซ์ลัดวงจรที่เกิดขึ้นจากการจัดรูปทรงของขดลวดดังกล่าว สำหรับที่พิกัดกระแสสูง ๆ จะใช้ลวดสี่เหลี่ยมจำนวนหลายเส้นขนานกัน และจะต้องมีการสลับสายของลวดตัวนำทำให้ความต้านทานและความเหนี่ยวนำในแต่ละเส้นลวดตัวนำมีค่าใกล้เคียงกัน เพื่อลดกำลังสูญเสียจากผลของกระแสไหลวนในขดลวด (circulating current)

2.3.3.1 การออกแบบขดลวดแรงดันต่ำ

การออกแบบขดลวดแรงดันต่ำ เลือกใช้การพันแบบชั้น ชนิดสไพรัล (spiral winding) โดยลวดตัวนำที่ใช้เป็นชนิดสี่เหลี่ยมมีฉนวนหุ้ม ความสูงและความหนาของขดลวดด้านทุติยภูมิพันแบบชั้น ชนิดสไพรัลนี้ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.12 และ 2.13 ตามลำดับ

$$l_{ws} = T_{as}P_{as}(N_{as}+1)+2B_{ts} \tag{2.12}$$

$$T_{ws} = N_{ls}(T_{rs}P_{rs}+B_{ls})-B_{ls}+N_{ds}B_{ds} \tag{2.13}$$

เมื่อ l_{ws} เป็นความยาวของชุดขดลวดด้านทุติยภูมิ (mm)

T_{ws} เป็นความหนาของชุดขดลวดด้านทุติยภูมิ (mm)

T_{as} เป็นความกว้างของลวดตัวนำรวมฉนวนที่วางในแนวแกน (mm)

T_{rs} เป็นความหนาของลวดตัวนำรวมฉนวนที่วางในแนวรัศมี (mm)

P_{as} เป็นจำนวนลวดตัวนำที่ใช้ขนานวางในแนวแกน

P_{rs} เป็นจำนวนลวดตัวนำที่ใช้ขนานวางในแนวรัศมี

N_{as} เป็นจำนวนรอบต่อชั้นของขดลวดด้านทุติยภูมิที่วางตามแนวแกน

N_{ls} เป็นจำนวนชั้นของขดลวดที่วางในแนวรัศมี

B_{ts} เป็นความหนาของฉนวนที่หัวและท้ายขดลวด (mm)

เมื่อ B_{ls} เป็นความหนาของฉนวนในระหว่างชั้นของขดลวดด้านทุติยภูมิ (mm)

N_{ds} เป็นจำนวนร่องน้ำมันในชุดขดลวดด้านทุติยภูมิ

B_{ds} เป็นความกว้างของร่องน้ำมันในชุดขดลวดด้านทุติยภูมิ (mm)

2.3.3.2 การออกแบบขดลวดแรงดันสูง

การออกแบบขดลวดแรงดันสูงจะเลือกใช้การพันแบบชั้นชนิดครอสโอเวอร์ (crossover winding) โดยจะใช้ลวดตัวนำกลมแบ่งขดลวดออกเป็นตอน (section) เพื่อลดแรงดันวิกฤตในระหว่างชั้นทำให้สามารถลดความหนาของฉนวนระหว่างชั้นได้ ความสูงและความหนาของขดลวดด้านปฐมภูมิพันแบบชั้นชนิดครอสโอเวอร์ สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 2.14 และ 2.15 ตามลำดับ

$$l_{wp} = d_{cp}P_{ap}S_p(N_{ap}+1) + k_d B_{sp} + 2S_p B_{tp} \qquad (2.14)$$

$$T_{wp} = N_{lp}(d_{cp} + B_{lp}) - B_{lp} + N_{dp}B_{dp} \qquad (2.15)$$

เมื่อ T_{wp} เป็นความหนาของชุดขดลวดด้านปฐมภูมิ (mm)

l_{wp} เป็นความยาวของชุดขดลวดด้านปฐมภูมิ (mm)

d_{cp} เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดตัวนำรวมฉนวน (mm)

P_{ap} เป็นจำนวนลวดตัวนำที่ใช้ขนานวางในแนวแกน

S_p เป็นจำนวนตอนของขดลวดด้านปฐมภูมิ

N_{ap} เป็นจำนวนรอบต่อชั้นของขดลวดที่วางในแนวแกน

k_d เป็นสัมประสิทธิ์คูณลดจากฉนวนที่ถูกอบมีค่าประมาณ 0.95

B_{sp} เป็นความหนาของฉนวนรวมในระหว่างตอน (mm)

B_{tp} เป็นความหนาของฉนวนที่หัวและท้ายขดลวดด้านปฐมภูมิ (mm)

N_{lp} เป็นจำนวนชั้นของขดลวดด้านปฐมภูมิ

B_{lp} เป็นความหนาของฉนวนในระหว่างชั้นของขดลวดด้านปฐมภูมิ (mm)

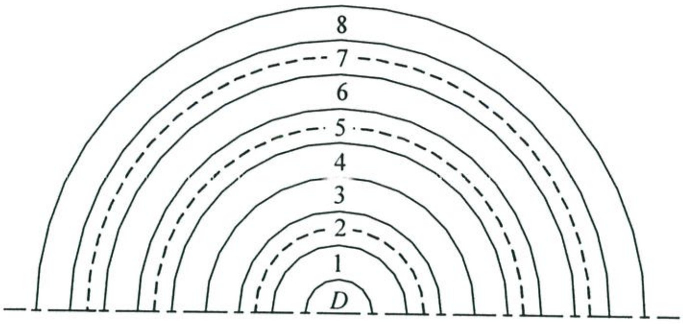
N_{dp} เป็นจำนวนร่องน้ำมันในชุดขดลวดด้านปฐมภูมิ

B_{dp} เป็นความกว้างของร่องน้ำมันในชุดขดลวดด้านปฐมภูมิ (mm)

2.3.4 การออกแบบฉนวน

โดยทั่วไปแล้วฉนวนที่ใช้ในหม้อแปลงจะเป็นกระดาษ และไม้อัดความหนาแน่นสูงเป็นส่วนใหญ่ หน้าที่ของฉนวนนอกจากจะทำหน้าที่ป้องกันแรงดันไฟฟ้าแล้ว ยังทำหน้าที่รับแรงจากการจับยึดเข้ารูปทรงและรับแรงที่เกิดจากความผิดปกติของหม้อแปลง การพิจารณาออกแบบฉนวน

จะพิจารณาจากพิกัดการทดสอบฉนวนไฟฟ้า ในรูปที่ 2.14 แสดงตัวอย่างภาพตัดลำดับการวางฉนวนและร่องน้ำมันระบายความร้อนภายในชุดของขดลวด



(1) ร่องน้ำมันด้านในก่อนฉนวนรองขดลวดแรงต่ำ

(2) ฉนวนกระดาษด้านในรองขดลวดแรงต่ำ

(3) ชุดขดลวดแรงดันต่ำ

(4) ร่องน้ำมันหลังพันขดลวดแรงต่ำ

(5) ฉนวนกระดาษกั้นระหว่างขดลวดแรงสูงกับขดลวดแรงต่ำ

(6) ร่องน้ำมันด้านในก่อนฉนวนรองขดลวดแรงสูง

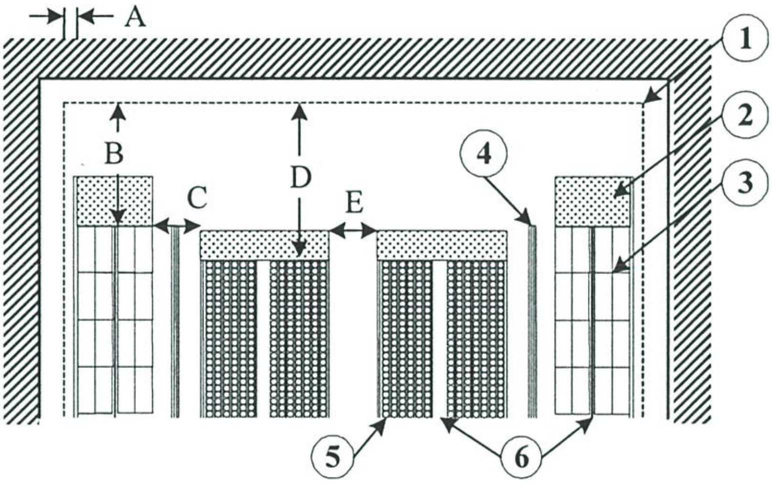
(7) ฉนวนกระดาษด้านในรองขดลวดแรงสูง

(8) ชุดขดลวดแรงดันสูง

รูปที่ 2.14 การจัดวางฉนวนและร่องน้ำมันระบายความร้อนในแนวรัศมีของขดลวด

การทดสอบฉนวนไฟฟ้า จะเป็นการทดสอบความคงทนต่อแรงดันสูง ซึ่งจะแบ่งออกเป็นสองส่วนใหญ่ ๆ คือภายในขดลวดและภายนอกขดลวด การทดสอบฉนวนภายในขดลวดจะเป็นชนิดของการทดสอบแรงดันเหนี่ยวนำเกิน (induced ac voltage tests) ซึ่งเป็นการทดสอบการทนต่อแรงดันเกินในระหว่างรอบของขดลวดและเป็นการตรวจสอบการลัดวงจรภายในขดลวด โดยการป้อนแรงดันไฟสลับประมาณสองเท่าของแรงดันพิกัดและเพิ่มความถี่ขึ้นประมาณสองเท่าเช่นกันเพื่อไม่ให้แกนเหล็กเกิดการอิ่มตัว การทดสอบฉนวนภายนอกขดลวดจะเป็นชนิดของการทดสอบความทนต่อแรงดันตามความถี่กำลังไฟฟ้าของตัวจ่ายอื่น (separate source ac withstand voltage test) ซึ่งเป็นการทดสอบการทนต่อแรงดันเกินที่ระหว่างขดลวดทดสอบถึงขดลวดอื่น ๆ และระหว่างขดลวดทดสอบถึงโครงสร้างต่างๆ โดยการป้อนแรงดัน 1 เฟส ให้กับขดลวดที่ต้องการทดสอบตามพิกัดแรงดันทดสอบ โดยที่ต่อขั้วต่อเส้นไฟของขดลวดที่เหลือ-แกนเหล็ก-โครงและถังหม้อแปลงเข้าด้วยกันและลงดิน ดังนั้นการพิจารณาด้านฉนวนจึงต้องกำหนดค่าให้เหมาะสมกับ

ระดับแรงดันทดสอบ ระยะความปลอดภัยที่ใช้สำหรับออกแบบฉนวนในน้ำมันที่ระยะ 3 kV/mm สำหรับน้ำมันไม่มีฉนวนกระดาษกั้นกลาง และที่ระยะ 5 kV/mm สำหรับน้ำมันมีฉนวนกระดาษกั้น ซึ่งเป็นระยะที่มีการพิสูจน์และกำหนดใช้งานในทางอุตสาหกรรม ในรูปที่ 2.15 แสดงระยะต่าง ๆ ที่ต้องพิจารณาถึงระยะปลอดภัยของฉนวน โดยที่ระยะห่างระหว่างขดลวดแรงสูงกับขดลวดแรงต่ำ (ตำแหน่ง C) เป็นระยะที่ต้องให้ความสำคัญเป็นอย่างมากเพราะเป็นจุดวิกฤตที่สุดโดยเฉพาะที่ต้นขดลวดทั้งสอง



(A) เป็นระยะห่างแกนเหล็กถึงขดลวดแรงต่ำ

(B) เป็นระยะห่างขดลวดแรงต่ำถึงแกนเหล็กบน

(C) เป็นระยะห่างขดลวดแรงต่ำถึงขดลวดแรงสูง

(D) เป็นระยะห่างขดลวดแรงสูงถึงแกนเหล็กบน

(E) เป็นระยะห่างขดลวดแรงสูงถึงขดลวดแรงสูง

(1) เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของแกนเหล็ก

(2) เป็นฉนวนที่ต้นขดลวด

(3) เป็นขดลวดแรงต่ำ

(4) เป็นฉนวนกระดาษกั้นระหว่างขดลวดแรงสูงกับขดลวดแรงต่ำ

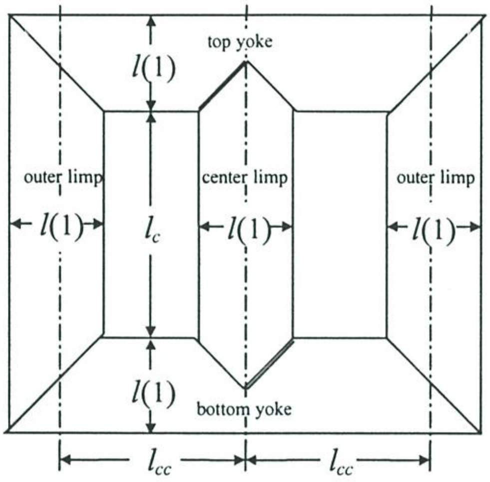
(5) เป็นขดลวดแรงสูง

(6) เป็นร่องระบายความร้อนในชุดขดลวด

รูปที่ 2.15 การจัดระยะฉนวนและรูปทรงของขดลวดภายในช่องหน้าต่างแกนเหล็ก

2.3.5 การกำหนดรูปทรงของแกนเหล็ก

การกำหนดรูปทรงของแกนเหล็กสามารถกำหนดได้หลังจากทราบขนาดรูปทรงของขดลวดแล้วจึงสามารถกำหนดขนาดความกว้างและความสูงของแกนเหล็กได้ รูปที่ 2.16 แสดงรูปทรงของแกนเหล็กและความยาวในส่วนต่างๆ ของแกนเหล็ก



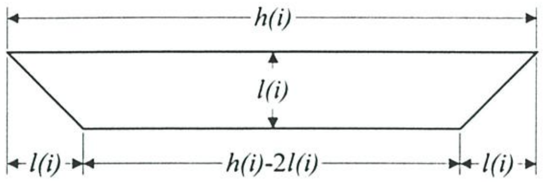
$l(1)$ เป็นความกว้างของแผ่นลามิเนทที่กว้างที่สุด (mm)

l_c เป็นความยาวของขาแกนเหล็กด้านใน (mm)

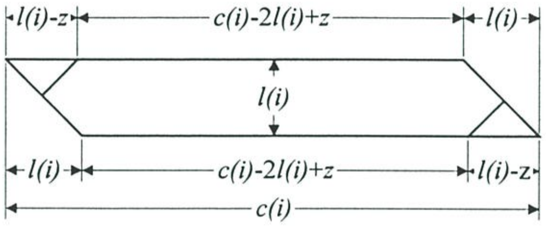
l_{cc} เป็นระยะห่างระหว่างขาแกนเหล็ก (mm)

รูปที่ 2.16 รูปทรงและความยาวในส่วนต่าง ๆ ของแกนเหล็ก

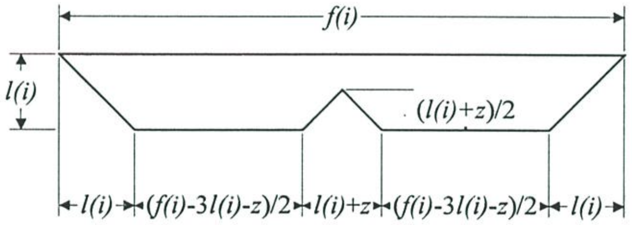
การกำหนดรูปทรงขึ้นอยู่กับความยาวแกนเหล็ก 2 ส่วนคือ ความยาวของแกนเหล็กด้านในและระยะห่างระหว่างขาแกนเหล็ก โดยที่ความยาวของแกนเหล็กด้านใน กำหนดจากผลรวมของความยาวชุดขดลวด ฉนวนที่ใช้กดขดลวดตามมาตรฐานของผู้ผลิตเพื่อให้สามารถทนต่อแรงที่เกิดจากการลัดวงจร และระยะเผื่อสำหรับการทำงาน ทั้งนี้จะต้องพิจารณารวมถึงระยะปลอดภัยจากต้นขดลวดถึงโย๊คแกนเหล็กให้เพียงพอกับแรงดันทดสอบตามมาตรฐาน สำหรับระยะห่างระหว่างขาแกนเหล็ก กำหนดจากผลรวมของเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดแรงสูงด้านนอกสุดกับระยะระหว่างขดลวดแรงสูงถึงแรงสูง หลังจากทราบขนาดและรูปทรงต่างๆ ของแกนเหล็กก็จะสามารถกำหนดการตัดเหล็กแผ่นลามิเนทซึ่งทำจากวัสดุประเภทโอเรียนเต็ดม้วนเย็นมีทิศทางการไหลของสนามแม่เหล็กในทิศทางเดียวต้องทำการตัดเป็นมุม 45 องศา รูปทรงของแผ่นลามิเนทในแต่ละชั้นแกนเหล็กเพื่อกำหนดการตัดเหล็ก แสดงดังรูปที่ 2.17 - 2.19



รูปที่ 2.17 ขาแกนเหล็กด้านริม (outer limb)



รูปที่ 2.18 ขาแกนเหล็กด้านกลาง (center limb)



รูปที่ 2.19 โย๊คแกนเหล็ก (yoke)

จากรูปที่ 2.17 – 2.18 เมื่อ $i=1$ เป็นชั้นที่แผ่นลามิเนทกว้างที่สุด ความยาวของขาแกนเหล็กในชั้นที่ 1 คำนวณได้ดังนี้

$$h(1) = 2l(1) + l_c - z \tag{2.16}$$

$$c(1) = 2l(1) + l_c \tag{2.17}$$

และเมื่อ $i > 1$

$$h(i) = h(1) - \left(l(1) - l(i)\right) \tag{2.18}$$

$$c(i) = c(1) - \left(c(1) - c(i)\right) \tag{2.19}$$

จากรูปที่ 2.19 ความยาวของโย๊คแกนเหล็กคำนวณได้ดังนี้

$$f(i) = 2l_{cc} + l(i) + z \tag{2.20}$$

เมื่อ $h(i)$ เป็นความยาวของขาแกนเหล็กด้านริม (mm)
$c(i)$ เป็นความยาวของขาแกนเหล็กกลาง (mm)
$f(i)$ เป็นความยาวของโย๊คแกนเหล็ก (mm)
z เป็นระยะซ้อนทับของแผ่นลามิเนท (mm)

2.3.6 การคำนวณหาน้ำหนัก

2.3.6.1 การคำนวณหาน้ำหนักของแกนเหล็ก

น้ำหนักของแกนเหล็กรวมจะประกอบด้วย น้ำหนักของขาแกนเหล็กทั้งสาม และน้ำหนักของโย๊คด้านบนและล่างสามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$G_{Fel} = 3A_{Fe}\gamma_{Fe}l_c \tag{2.21}$$

$$G_{Fey} = 2A_{Fe}\gamma_{Fe}\left(2l_{cc} + l(1)\right) \tag{2.22}$$

$$G_{Fe} = G_{Fel} + G_{Fey} \tag{2.23}$$

เมื่อ G_{Fe} เป็นน้ำหนักแกนเหล็กรวม (kg)
G_{Fel} เป็นน้ำหนักของขาแกนเหล็ก (kg)
G_{Fey} เป็นน้ำหนักของโย๊คแกนเหล็ก (kg)
γ_{Fe} เป็นน้ำหนักมวลของแผ่นลามิเนทมีค่า 7.65×10^{-6} kg/mm^3

2.3.6.2 การคำนวณหาน้ำหนักของขดลวด

น้ำหนักของขดลวดจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของวัสดุตัวนำ ความยาวรอบของขดลวด และพื้นที่หน้าตัดสุทธิของตัวนำสามารถคำนวณตามสมการดังนี้

$$G_{cup} = 3\gamma_{cu} A_{cup} M_p N_p \quad (2.24)$$

$$G_{cus} = 3\gamma_{cu} A_{cus} M_s N_s \quad (2.25)$$

$$G_{cu} = G_{cup} + G_{cus} \quad (2.26)$$

เมื่อ G_{cu} เป็นน้ำหนักรวมของตัวนำ (kg)

G_{cup} เป็นน้ำหนักของตัวนำด้านปฐมภูมิ (kg)

G_{cus} เป็นน้ำหนักของตัวนำด้านด้านทุติยภูมิ (kg)

A_{cup} เป็นพื้นที่หน้าตัดสุทธิของตัวนำที่ด้านปฐมภูมิ (sq.mm)

A_{cus} เป็นพื้นที่หน้าตัดสุทธิของตัวนำที่ด้านทุติยภูมิ (sq.mm)

M_p เป็นความยาวรอบเฉลี่ยของขดลวดด้านปฐมภูมิ (mm)

M_s เป็นความยาวรอบเฉลี่ยของขดลวดด้านทุติยภูมิ (mm)

γ_{cu} เป็นน้ำหนักมวลตัวนำ (ทองแดงมีค่าเท่ากับ 8.9×10^{-6} kg/mm^3)

2.3.7 การคำนวณกำลังสูญเสีย

กำลังสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน ซึ่งประกอบด้วย

1. กำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลด (No-load losses)
2. กำลังสูญเสียขณะมีโหลด (Load losses)

2.3.7.1 การคำนวณกำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลด

การคำนวณกำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลด สามารถคำนวณได้จากคุณลักษณะของแกนเหล็กที่ได้จากผู้ผลิต ซึ่งจะให้ค่ากำลังสูญเสียจากแกนเหล็กในรูปของวัตต์ต่อกิโลกรัม สามารถคำนวณหากำลังสูญเสียในแกนเหล็กได้จากข้อมูลดังกล่าวร่วมกับน้ำหนักของแกนเหล็ก ตามสมการดังนี้

$$P_{NL} = k_{wn} P_m G_{Fe} \quad (2.27)$$

เมื่อ P_{NL} เป็นกำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลด (W)

k_{wn} เป็นสัมประสิทธิ์การทำงาน

P_m เป็นกำลังสูญเสียต่อน้ำหนักแกนเหล็ก (W/kg)

ค่าสัมประสิทธิ์ k_{wn} เป็นค่าที่เกิดขึ้นจากการทำงานเช่น การเรียงแผ่นเหล็ก ช่องว่างระหว่างการต่อแผ่นเหล็ก คุณภาพของแผ่นเหล็ก เป็นต้น ในทางปฏิบัติสามารถหาได้จากการทดสอบ

2.3.7.2 การคำนวณกำลังสูญเสียขณะมีโหลด

กำลังสูญเสียขณะมีโหลด เป็นผลรวมของกำลังสูญเสียจากความต้านทานในขดลวดและกำลังสูญเสียขณะมีโหลดอื่น ๆ กำลังสูญเสียจากความต้านทานในขดลวดคำนวณได้จากความสัมพันธ์ของน้ำหนักขดลวดที่อุณหภูมิใด ๆ ได้ดังนี้

$$P_{cu} = 2.38\left(J_s^2 G_{cus} k_{cus} + J_p^2 G_{cup} k_{cup}\right)\left(\frac{235+\theta}{310}\right) \tag{2.28}$$

การคิดค่ากำลังสูญเสียจะแปลงค่าที่ได้ที่อุณหภูมิใดๆ เทียบกับอุณหภูมิอ้างอิงที่ 75 °C ดังนี้

$$P_{cu} = 2.38\left(J_s^2 G_{cus} k_{cus} + J_p^2 G_{cup} k_{cup}\right) \tag{2.29}$$

เมื่อ P_{cu} เป็นกำลังสูญเสียที่ขดลวดจากความต้านทาน (W)

J_p ความหนาแน่นกระแสพิกัดที่ขดลวดปฐมภูมิ (A/mm^2)

J_s ความหนาแน่นกระแสพิกัดที่ขดลวดทุติยภูมิ (A/mm^2)

k_{cup} เป็นสัมประสิทธิ์การทำงานที่ขดลวดปฐมภูมิ

k_{cus} เป็นสัมประสิทธิ์การทำงานที่ขดลวดทุติยภูมิ

กำลังสูญเสียขณะมีโหลดอื่น ๆ (stray losses) เป็นผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการเหนี่ยวนำการเหนี่ยวนำที่ขดลวด, สายลีด, ตัวถัง, หรือตัวยึดแกนเหล็กจะทำให้เกิดกระแสไหลวนที่วัตถุนั้นสามารถแก้ไขให้มีค่าน้อยลงได้หลายกรณี เช่นการจัดขดลวดให้มีระยะห่างที่เหมาะสมกับตัวถังการเลือกการสลับเส้นลวดตัวนำอย่างเหมาะสม การลดสายลีดโดยการออกแบบจำนวนชั้นของขดลวดเป็นจำนวนคู่ ที่พิกัดกระแสสูง ๆ จะมีผลกระทบต่อการเกิดกำลังสูญเสียจากการเหนี่ยวนำมากขึ้น ในทางปฏิบัติสามารถประมาณค่าเพื่อให้สอดคล้องและถูกต้องมากขึ้นจากข้อมูลทางสถิติ ดังนั้นสามารถคำนวณกำลังสูญเสียขณะมีโหลด ได้ดังนี้

$$P_{LL} = P_{cu} + P_s \tag{2.30}$$

เมื่อ P_{LL} เป็นกำลังสูญเสียขณะมีโหลด (W)

P_s เป็นกำลังสูญเสียขณะมีโหลดอื่น ๆ (W)

2.3.8 การคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์อิมพิแดนซ์ลัดวงจร

การพิจารณาสนามแม่เหล็กรั่วไหลที่เกิดขึ้นในขดลวดและค่าซึมซาบของแกนเหล็ก (Permeability) แสดงในรูปที่ 2.20 เป็นตัวอย่างของสนามแม่เหล็กรั่วไหลในขดลวดรูปทรงกระบอก ในรูปที่ 2.20 (ก) สนามแม่เหล็กรั่วไหลเรียงตัวอยู่ในช่องว่างระหว่างขดลวดแรงดันสูงและแรงดันต่ำ โดยจะวิ่งขนานตามความยาวของขดลวด ในรูปที่ 2.20 (ข) เป็นลักษณะของสนามแม่เหล็กรั่วไหลที่ความยาวของขดลวดไม่เท่ากัน สนามแม่เหล็กรั่วไหลมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมาก ดังนั้นในการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าจะต้องมีการออกแบบจัดเรียงขดลวดของด้านแรงดันสูงและด้านแรงดันต่ำให้มีความยาวของขดลวดใกล้เคียงกันมากที่สุดเพื่อให้สนามแม่เหล็กรั่วไหลที่เกิดขึ้นมีความสม่ำเสมอ

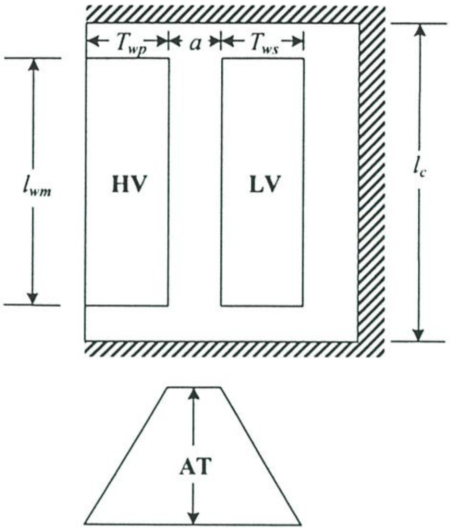
(ก) ความยาวขดลวดเท่ากัน (ข) ความยาวขดลวดไม่เท่ากัน

รูปที่ 2.20 ผลของสนามแม่เหล็กรั่วไหลจากการจัดเรียงขดลวด

การประมาณค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดทรงกระบอกซ้อนกันที่ความยาวขดลวดเท่ากันจะพิจารณาจากผลของสนามแม่เหล็กคล้องขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ โดยกำหนดให้สนามแม่เหล็กรั่วไหลมีค่าคงที่ภายในช่องว่างระหว่างขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ การพิจารณาค่าแอมแปร์เทินจะพิจารณาเฉพาะค่าที่เกิดขึ้นตามความยาวของขดลวดโดยจะไม่พิจารณาผลกระทบของกระแสกระตุ้นไม่สมดุล ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิจึงมีแอมแปร์เทินเท่ากัน แสดงผลของแอมแปร์เทินที่เกิดขึ้นสำหรับรูปทรงขดลวดทรงกระบอกซ้อนกันดังรูปที่ 2.21 ค่าเปอร์เซ็นต์ความเหนี่ยวนำของขดลวดคำนวณได้ดังสมการที่ 2.31 เป็นการประยุกต์ให้เหมาะสมกับการใช้งานที่ความถี่ 50 Hz โดยมีการคูณสัมประสิทธิ์ปรับแต่งตามโครงสร้างเพื่อให้ความสอดคล้องกับค่าจริงมากขึ้น

$$\%X = \frac{1.24 I_s N_s^2 D_m k_R}{E_s l_{wm} \times 10^4}\left(a + \frac{T_{wp} + T_{ws}}{3}\right) \tag{2.31}$$

$$k_R = 1 - \frac{(a + T_{wp} + T_{ws})}{\pi l_{wm}} \tag{2.32}$$



รูปที่ 2.21 แผนผังแอมแปร์เทิน สำหรับขดลวดทรงกระบอกซ้อนกัน

เปอร์เซ็นต์ความความต้านทานสามารถคำนวณได้จากกำลังสูญเสียขณะมีโหลดได้ดังนี้

$$\%R = \frac{P_{LL}}{S} \times 100 \tag{2.33}$$

ดังนั้นสามารถคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์อิมพิแดนซ์ได้ดังสมการที่ 2.34

$$\%Z = \sqrt{\%R^2 + \%X^2} \tag{2.34}$$

เมื่อ
- $\%Z$ เป็นเปอร์เซ็นต์อิมพิแดนซ์ลัดวงจร (%)
- $\%X$ เป็นเปอร์เซ็นต์ความเหนี่ยวนำ (%)
- $\%R$ เป็นเปอร์เซ็นต์ความความต้านทาน (%)
- D_m เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยที่ช่องว่าง (mm)
- l_{wm} เป็นความสูงเฉลี่ยทางไฟฟ้าของขดลวด (mm)
- a เป็นระยะห่างระหว่างขดลวดแรงดันสูงและขดลวดแรงดันต่ำ (mm)
- k_R ค่าปรับแต่งคำนวณตามโครงสร้างของขดลวด

2.4 ตัวอย่างการออกแบบหม้อแปลงจำหน่าย

ในส่วนนี้เป็นการแสดงตัวอย่างการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายชนิดน้ำมัน 3 เฟส, 50 Hz, มีพิกัดกำลัง 100 kVA, แรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ 11,000 V, แรงดันไฟฟ้าด้านทุติยภูมิ 433/250 V, เปอร์เซ็นต์ของจุดต่อแยกแรงดันที่ด้านปฐมภูมิ ±2×2.5%, เปอร์เซ็นต์อิมพิแดนซ์ลัดวงจร 4%, กำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลดต้องไม่เกิน 250 W, กำลังสูญเสียขณะมีโหลดต้องไม่เกิน 1,550 W , Dyn11 ตามมาตราฐาน IEC 60076 กำหนดให้ใช้เหล็กซิลิกอนชนิด M4 [16] ที่ความหนาของแผ่นลามิเนท 0.27 mm มีความหนาแน่นมวล 7.65 $\times 10^{-6}$ kg/mm^3 (แรงดันใช้งานในประเทศบรูไน)

ขั้นตอนที่ 1 การกำหนดขนาดพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก

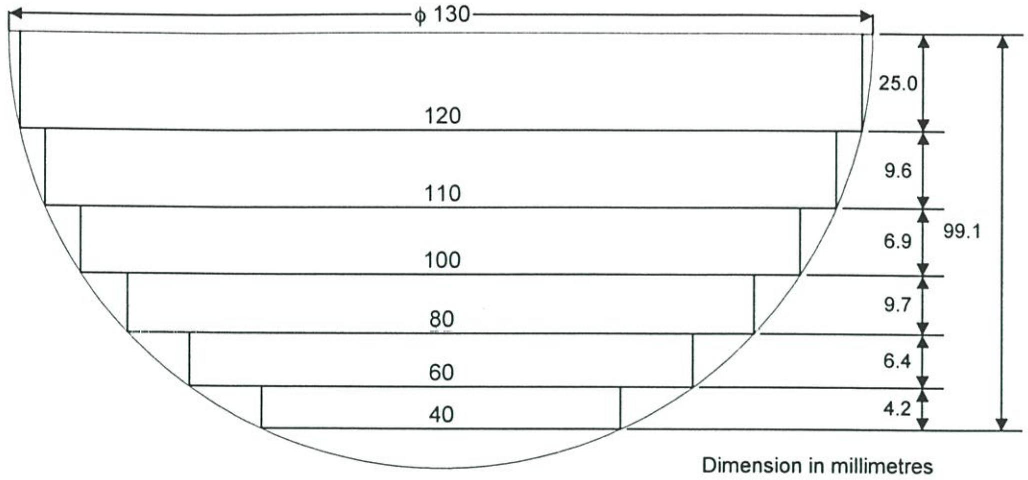
การประมาณพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กได้จากสมการที่ 2.6 โดยกำหนดให้ k_{Fe}=97 % และ $k_c = 4.5\times10^{-4}$ m^{2}J$^{-1/2}$

$$A_{Fe} = k_c\sqrt{\frac{S}{fP}} = 4.5\sqrt{\frac{100,000}{50\times 3}} = 116.189\times10^{-4} \text{ sq.m}$$

จากพื้นที่แกนเหล็กดังกล่าว เลือกจำนวนชั้นแกนเหล็ก 6 ชั้น และกำหนดให้ความกว้างของแผ่นลามิเนทมีค่าต่ำสุดที่ 40 mm พิจารณาหาเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนเหล็กที่ k_a= 90.8 % และ k_{Fe}= 97 % ได้เส้นผ่านศูนย์กลางของแกนเหล็กเท่ากับ 130 mm ดังนั้นสามารถคำนวณหาความหนาในแต่ละชั้นแกนเหล็กได้ตามสมการที่ 2.8 และคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กได้ตามสมการที่ 2.9 การคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กแสดงผลการคำนวณในตารางที่ 2.3 และแสดงการจัดวางลำดับชั้นแกนเหล็กได้ดังรูปที่ 2.22

ตารางที่ 2.3 การคำนวณพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กและจำนวนแผ่นลามิเนท

ลำดับ ชั้นแกน i	ความกว้างชั้น แกนเหล็ก $l(i)$ (mm)	ความหนา ชั้นแกนเหล็ก $Y(i)$ (mm)	พื้นที่หน้าตัด ในชั้นแกน (10^{-4}m^2)	พื้นที่หน้าตัด แกนเหล็กรวม (10^{-4}m^2)	พื้นที่หน้าตัด แกนเหล็กสุทธิ A_{Fe} (10^{-4}m^2)	จำนวนแผ่น ลามิเนท (No.)
1	120	25.00	30.0000	60.0000	58.2000	94
2	110	9.64	10.6051	81.2102	78.7739	36
3	100	6.89	6.8921	94.9944	92.1446	26
4	80	9.70	7.7613	110.5171	107.2015	36
5	60	6.43	3.8568	118.2307	114.6838	24
6	40	4.18	1.6735	121.5777	**117.9304**	16



รูปที่ 2.22 การจัดวางลำดับชั้นในพื้นที่ทรงกลมของแกนเหล็ก

จากผลการคำนวณในตารางที่ 2.1 ทำให้ได้ค่าพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กสุทธิ

$$Y(i) = \sqrt{\left(\frac{130}{2}\right)^2 - \left(\frac{l(i)}{2}\right)^2} - \sum_{j=0}^{i-1} Y(j) = 117.9304\times10^{-4}\ \text{sq.m}$$

ขั้นตอนที่ 2 กำหนดรอบของขดลวด

ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กกำหนดให้ใช้งานที่ 1.6 T เป็นค่าที่เหมาะสมกับคุณลักษณะของหม้อแปลงที่ทำการออกแบบ เนื่องจากกลุ่มเวกเตอร์คือ Dyn11 ดังนั้นแรงดันเฟสที่ขดลวดด้านทุติยภูมิสามารถคำนวณหาได้ดังนี้

$$E_s = \frac{433}{\sqrt{3}} = 250\text{V}$$

การกำหนดจำนวนรอบขดลวดที่ด้านทุติยภูมิคำนวณได้ตามสมการที่ 2.10

$$N_s = \frac{E_s}{\sqrt{2}\pi f B_m A_{Fe}} = \frac{250}{\sqrt{2}\pi\times50\times1.6\times117.9304\times10^{-4}} = 59.6\ \text{รอบ}$$

กำหนดใช้งาน $N_s = 60$ รอบ จะได้ $B_m = 1.59$ T และแรงดันเฟสที่ขดลวดด้านปฐมภูมิเท่ากับแรงดันที่ป้อน $E_p = 11{,}000$ V

การคำนวณหาจำนวนรอบของขดลวดที่พิกัดแรงดันด้านปฐมภูมิตามสมการที่ 2.5

$$N_p = N_s \frac{E_p}{E_s} = 60\frac{11,000}{250} = 2,640 \text{ รอบ}$$

การคำนวณหาจำนวนรอบของขดลวดแต่ละจุดต่อแยกคำนวณได้ตามสมการที่ 2.11

$$N_{tp} = N_p \frac{\%\ \text{tap}}{100} = 2,640\frac{2.5\%}{100} = 66 \text{ รอบ}$$

ขั้นตอนที่ 3 การออกแบบขดลวด

ขดลวดด้านทุติยภูมิ เป็นด้านที่จ่ายแรงดันไฟฟ้าต่ำ (250 V) และกระแสสูง เลือกใช้วิธีการพันแบบชั้น ชนิดสไปรัล ความหนาแน่นของกระแสที่เหมาะสมกับคุณลักษณะของหม้อแปลงประมาณได้ที่ 2.5 A/mm^2 กระแสเฟสในขดลวดด้านทุติยภูมิสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$I_s = \frac{100,000}{\sqrt{3} \times 433} = 133.337 \text{ A}$$

กำหนดให้ใช้ลวดตัวนำสี่เหลี่ยมจำนวนสองเส้นวางขนานกันในแนวรัศมีของชุดขดลวด ขนาดของตัวนำสี่เหลี่ยม 3.0 × 9.0 mm มีฉนวนกระดาษหุ้มตัวนำหนา 0.3 mm

ความหนาของลวดตัวนำรวมฉนวนที่วางในแนวรัศมี $T_{rs} = 3.6$ mm

ความกว้างของลวดตัวนำรวมฉนวนที่วางในแนวแกน $T_{as} = 9.6$ mm

จำนวนลวดตัวนำที่ใช้ขนานวางในแนวรัศมี $P_{rs} = 2$

จำนวนลวดตัวนำที่ใช้ขนานวางในแนวแกน $P_{as} = 1$

พื้นที่หน้าตัดของขดลวดด้านทุติยภูมิ $A_{cus} = (3 \times 9) \times 2 \times 0.96 = 51.84$ sq.mm

โดยที่ ค่า 0.96 เป็นสัมประสิทธิ์คูณลดพื้นที่ของตัวนำจากการลบความคมที่มุมของตัวนำ

ความหนาแน่นของกระแสที่ขดลวดด้านทุติยภูมิ $J_s = \frac{133.337}{51.84} = 2.572$ A/mm^2

จำนวนชั้นของชุดขดลวดด้านทุติยภูมิที่เหมาะสมกับคุณลักษณะของหม้อแปลง ที่ทำให้เปอร์เซ็นต์อิมพิแดนซ์อยู่ตามข้อกำหนด จำนวนชั้นของขดลวดด้านทุติยภูมิ $N_{ls} = 2$ ชั้น ดังนั้นจำนวนรอบต่อชั้นของขดลวดที่วางในแนวแกนมีค่าเป็น $N_{as} = 30$ รอบ และกำหนดให้มีฉนวนที่หัวและท้ายของขดลวดใช้งานที่ $B_{ts} = 10$ mm ดังนั้นความยาวของชุดขดลวดด้านทุติยภูมิคำนวณได้ตามสมการที่ 2.12 ดังนี้

$$l_{ws} = T_{as}P_{as}(N_{as}+1)+2B_{ts} = 9.6\times 1\times(30+1)+2\times 10 = 317.6\text{ mm}$$

จากความยาวของขดลวดที่ได้ เผื่อลักษณะจากการทำงาน โดยกำหนดให้ความยาวของชุดขดลวดใช้งานที่ 320 mm ในระหว่างชั้นของขดลวดต้องมีฉนวนช่วยป้องกันการลัดวงจรภายในชุดขดลวดสามารถคำนวณหาความหนาได้จากความสัมพันธ์ในหัวข้อที่ 2.3.4 ดังนี้

$$B_{ls} = \frac{2E_s N_{as}}{5{,}000 N_s} = \frac{2\times 250\times 30}{5{,}000\times 60} = 0.05\text{ mm}$$

กำหนดใช้ความหนาของฉนวนในระหว่างชั้นของขดลวดด้านทุติยภูมิที่ $B_{ls} = 0.13$ mm กำหนดให้ไม่ใส่ร่องระบายความร้อนในชุดขดลวด เนื่องจากกำลังสูญเสียต่อพื้นที่ระบายความร้อนในชุดขดลวดทุติยภูมิมีค่าไม่มาก ดังนั้นคำนวณหาความหนาของชุดขดลวดได้ตามสมการที่ 2.13

$$T_{ws} = N_{ls}(T_{rs}P_{rs}+B_{ls})-B_{ls} = 2\times(3.6\times 2+0.13)-0.13 = 14.53\text{ mm}$$

จากความหนาของขดลวดที่ได้ เผื่อลักษณะจากการทำงาน โดยกำหนดให้ความหนาของชุดขดลวดใช้งานที่ 15.5 mm

ขดลวดด้านปฐมภูมิ เป็นด้านที่รับแรงดันไฟฟ้าสูง (11,000 V) กระแสต่ำ เลือกใช้วิธีการพันแบบชั้น ชนิดครอสโอเวอร์ ความหนาแน่นของกระแสที่เหมาะสมกับคุณลักษณะของหม้อแปลงประมาณได้ที่ 2.5 A/mm^2 เลือกใช้ตัวนำกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.25 mm และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดตัวนำกลมรวมฉนวนหุ้ม $d_{cp} = 1.329$ mm จำนวน $P_{ap} = 1$ เส้น กระแสเฟสในขดลวดที่ด้านปฐมภูมิสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$I_p = \frac{100{,}000}{\sqrt{3}\times 11{,}000} = 3.03\text{ A}$$

พื้นที่หน้าตัดของขดลวดด้านปฐมภูมิ $A_{cup} = \frac{\pi \times 1.25^2}{4} = 1.227$ sq.mm

ความหนาแน่นของกระแสที่ขดลวดด้านปฐมภูมิ $J_p = \frac{3.03}{1.277} = 2.469$ A/mm^2

จำนวนรอบของขดลวดด้านปฐมภูมิทั้งหมดที่ต้องพัน ได้จากผลรวมของจำนวนรอบที่ด้านปฐมภูมิ กับจำนวนรอบของแต่ละจุดต่อแยกแรงดัน เท่ากับ $2,640 + (2 \times 66) = 2,772$ รอบ

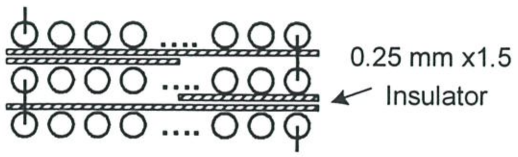
การกำหนดจำนวนชั้นของขดลวดให้เลือกจำนวนชั้นที่มีความสูงของขดลวดด้านปฐมภูมิใกล้เคียงกับขดลวดด้านทุติยภูมิ กำหนดเลือกใช้จำนวนชั้นของขดลวดที่ $N_{lp} = 13$ ชั้น และจำนวนตอน (section) ของขดลวดด้านปฐมภูมิ $S_p = 1$ เนื่องจากเป็นแรงดันที่ไม่สูงมาก ดังนั้นจำนวนรอบต่อชั้นของขดลวดที่วางในแนวแกน $N_{ap} = 2,772/13 \approx 214$ รอบ กำหนดให้มีฉนวนที่หัวและท้ายของขดลวดใช้งานที่ $B_{tp} = 6$ mm จากที่จำนวนตอนของขดลวดมีเพียง 1 ตอน ทำให้ไม่ต้องใส่ฉนวนระหว่างตอน $B_{sp} = 0$ ความยาวของขดลวดปฐมภูมิคำนวณได้ตามสมการที่ 2.14

$$l_{wp} = d_{cp}(N_{ap} + 1) + 2B_{tp} = 1.329 \times (214 + 1) + 2 \times 6 = 297.735 \text{ mm}$$

จากความยาวของขดลวดที่ได้ เผื่อลักษณะจากการทำงาน โดยกำหนดให้ความยาวของชุดขดลวดใช้งานที่ 300 mm ในระหว่างชั้นของขดลวดต้องมีฉนวนช่วยป้องกันการลัดวงจรภายในชุดขดลวดสามารถคำนวณหาความหนาได้จากความสัมพันธ์ในหัวข้อที่ 2.3.4 ดังนี้

$$B_{lp} = \frac{2E_p N_{ap}}{5,000 N_p} = \frac{2 \times 11,000 \times 214}{5,000 \times 2772} = 0.34 \text{ mm}$$

กำหนดให้ใช้ความหนาของฉนวนระหว่างชั้นของขดลวดด้านปฐมภูมิที่ 0.25 mm × 1.5 ใช้กระดาษขนาด 0.25 mm จำนวนแผ่นครึ่งรองระหว่างชั้นของขดลวด แสดงดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 การจัดวางฉนวนกระดาษในระหว่างชั้นขดลวดด้านปฐมภูมิ

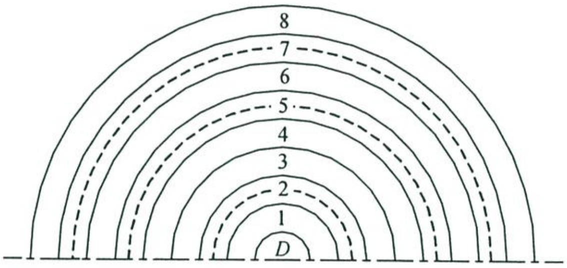
ความหนาของฉนวนในระหว่างชั้นของขดลวดด้านปฐมภูมิ B_{lp} = 0.37 mm เนื่องจากขดลวดด้านปฐมภูมิมีจำนวนชั้นของขดลวดมากการระบายความร้อนได้ไม่ดี กำหนดให้ความกว้างของร่องน้ำมันในชุดขดลวด B_{dp} = 3.0 mm จำนวนร่องน้ำมัน N_{dp} = 1 ดังนั้นความหนาของชุดขดลวดด้านปฐมภูมิคำนวณได้ตามสมการที่ 2.15

$$T_{wp} = N_{lp}(d_{cp} + B_{lp}) - B_{lp} + N_{dp}B_{dp} = 13 \times (1.329 + 0.375) - 0.375 + 3.0 = 24.777 \text{ mm}$$

จากความหนาของขดลวดที่ได้ เผื่อลักษณะจากการทำงาน โดยกำหนดให้ความหนาของชุดขดลวดใช้งานที่ 26.0 mm

ขั้นตอนที่ 4 การออกแบบฉนวน

การออกแบบฉนวนและร่องน้ำมันระบายความร้อนในแนวรัศมีของชุดขดลวด แสดงได้ดังรูปที่ 2.24 ดังนี้



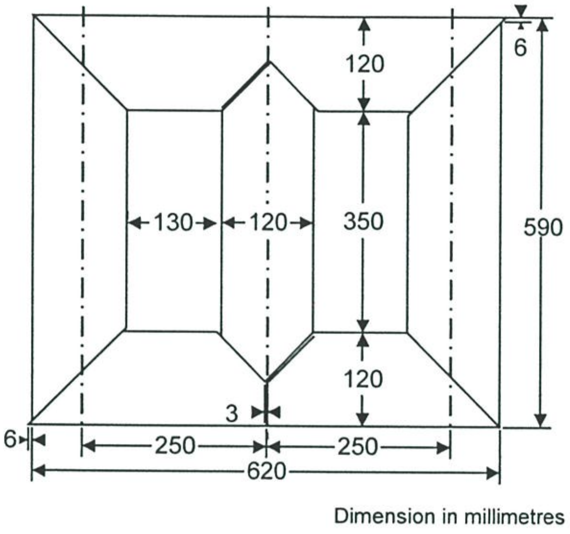
	ความหนา		เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก	
เส้นผ่าศูนย์กลางแกนเหล็ก *D*			130.0	mm
1. ร่องน้ำมันด้านในก่อนฉนวนรองขดลวดด้านทุติยภูมิ	2.0	mm	134.0	mm
2. ฉนวนกระดาษด้านในรองขดลวดด้านทุติยภูมิ	1.0	mm	136.0	mm
3. ความหนาของขดลวดด้านทุติยภูมิ	15.5	mm	167.0	mm
เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยที่ขดลวดด้านทุติยภูมิ			151.5	mm
4. ร่องน้ำมันหลังพันขดลวดด้านทุติยภูมิ	4.0	mm	175.0	mm
5. ฉนวนกระดาษกั้นขดลวดปฐมภูมิกับขดลวดทุติยภูมิ	1.5	mm	178.0	mm
6. ร่องน้ำมันด้านในก่อนฉนวนรองขดลวดด้านปฐมภูมิ	4.5	mm	187.0	mm
7. ฉนวนกระดาษด้านในรองขดลวดด้านปฐมภูมิ	0.5	mm	188.0	mm
8. ความหนาของขดลวดด้านปฐมภูมิ	26.0	mm	240.0	mm
เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยที่ขดลวดด้านปฐมภูมิ			214.0	mm

รูปที่ 2.24 ขนาดร่องน้ำมันและฉนวนกระดาษในแนวรัศมี

ขั้นตอนที่ 5 การกำหนดรูปทรงของแกนเหล็ก

การกำหนดความยาวของขาแกนเหล็ก พิจารณาจากความสูงกับระยะห่างที่เหมาะสมของต้นขดลวดถึงโย๊ค โดยกำหนดให้ความยาวของขาแกนเหล็ก l_c = 350 mm

กำหนดให้ระยะห่างระหว่างชุดขดลวดแรงดันสูงเท่ากับ 10 mm ดังนั้นระยะห่างระหว่างกลางขาแกนเหล็ก l_{cc} = 250 mm รูปทรงของแกนเหล็กแสดงได้ดังรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 รูปทรงของแกนเหล็ก

ตารางที่ 2.4 การตัดแผ่นลามิเนทของแกนเหล็กสัมพันธ์กับรูปที่ 2.16 – 2.18

ลำดับชั้นแกนเหล็ก i	ความกว้างแผ่นลามิเนท $l(i)$; (mm)	แกนเหล็กริม		แกนเหล็กกลาง		แกนเหล็กบนและล่าง	
		จำนวนแผ่น	$h(i)$; (mm)	จำนวนแผ่น	$c(i)$; (mm)	จำนวนแผ่น	$f(i)$; (mm)
1	120	376	584	188	590	376	626
2	110	144	574	72	580	144	616
3	100	104	564	52	570	104	606
4	80	144	544	72	550	144	586
5	60	96	524	48	530	96	566
6	40	64	504	32	510	64	546

ขั้นตอนที่ 6 การคำนวณหาน้ำหนัก

การคำนวณหาน้ำหนักของขาแกนเหล็ก น้ำหนักของโย๊คแกนเหล็ก และน้ำหนักของแกนเหล็กรวม คำนวณได้ตามสมการที่ 2.21-2.23 ดังนี้

$$G_{Fel} = 3A_{Fe}\gamma_i l_c = 3\times117.9304\times7.65\times10^{-4}\times350 = 94.72 \text{ kg}$$

$$G_{Fey} = 2A_{Fe}\gamma_i\left(2l_{cc} + l(1)\right) = 2\times117.9304\times7.65\times10^{-4}\times(2\times250+120)$$

$$G_{Fey} = 111.8687 \text{ kg}$$

$$G_{Fe} = G_{Fel} + G_{Fey} = 94.72 + 111.8687 = 206.588 \text{ kg}$$

การคำนวณหาน้ำหนักของตัวนำด้านทุติยภูมิ น้ำหนักของตัวนำด้านปฐมภูมิ และน้ำหนักของตัวนำรวม คำนวณได้ตามสมการที่ 2.24-2.26 ดังนี้

ความยาวรอบเฉลี่ยของขดลวดด้านทุติยภูมิ $M_s = \pi D_{ms} = \pi\times151.5 = 475.95$ mm

$$G_{cus} = 3\gamma_{cu}A_{cus}M_sN_s = 3\times8.9\times10^{-6}\times51.84\times475.95\times60 = 39.53 \text{ kg}$$

ความยาวรอบเฉลี่ยของขดลวดด้านปฐมภูมิ $M_p = \pi D_{mp} = \pi\times214 = 672.30$ mm

$$G_{cup} = 3\gamma_{cu}A_{cup}M_pN_p = 3\times8.9\times10^{-6}\times1.227\times672.30\times2772 = 61.05 \text{ kg}$$

$$G_{cu} = G_{cup} + G_{cus} = 39.53 + 61.05 = 100.58 \text{ kg}$$

ขั้นตอนที่ 7 การคำนวณหากำลังสูญเสีย

การคำนวณกำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลด คำนวณได้ตามสมการที่ 2.27 จากคุณลักษณะของแกนเหล็กสามารถกำหนดกำลังสูญเสียต่อน้ำหนัก (W/kg) ที่ B_m =1.59 T มีกำลังสูญเสียต่อน้ำหนัก P_m = 0.995 W/kg และมีสัมประสิทธิ์การทำงาน k_{wn} = 1.2 ดังนั้นกำลังสูญเสียในแกนเหล็กคำนวณได้ดังนี้

$$P_{NL} = k_{wn}P_mG_{Fe} = 1.2\times0.995\times206.6 = 246.68 \text{ W}$$

การคำนวณกำลังสูญเสียขณะมีโหลด คำนวณได้ตามสมการที่ 2.29 และ 2.30 โดยกำหนดให้ $k_{cus}=1.04$, $k_{cup}=1.03$ เป็นผลของความต้านทานที่สายลีดจากการทำงานต่าง ๆ และกำหนดให้ $P_s = 0.02P_{cu}$ สามารถคำนวณหากำลังสูญเสียขณะมีโหลดได้ดังนี้

$$P_{cu} = 2.38\left(J_s{}^2G_{cus}k_{cus} + J_p{}^2G_{cup}k_{cup}\right)$$

$$P_{cu} = 2.38\left(2.572^2\times39.5\times1.04 + 2.469^2\times\frac{61.1}{1.05}\times1.03\right) = 1516 \text{ W}$$

$$P_{LL} = P_{cu} + P_s = 1.02P_{cu} = 1.02\times1516 = 1546 \text{ W}$$

ขั้นตอนที่ 8 การคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์อิมพิแดนซ์

การคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์อิมพิแดนซ์ คำนวณได้ตามสมการที่ 2.31 - 2.34 โดยที่ ความสูงทางไฟฟ้าของขดลวดด้านทุติยภูมิ $l_{ws} = 9.6\times30 = 288$ mm และความสูงทางไฟฟ้าของขดลวดด้านปฐมภูมิ $l_{wp} = 1.329\times214 = 284.406$ mm ดังนั้นความสูงเฉลี่ยของขดลวดทางไฟฟ้า $l_{wm} = (288 + 284.406)/2 = 286.2$ mm สามารถคำนวณหาเปอร์เซ็นต์อิมพิแดนซ์ลัดวงจรได้ดังนี้

$$k_R = 1 - \frac{(a + T_{ws} + T_{wp})}{\pi l_{wm}} = 1 - \frac{(15.5 + 4 + 1.5 + 4.5 + 0.5 + 26)}{\pi\times286.2} = 0.9422$$

$$\%X = \frac{1.24I_sN_s{}^2D_mk_R}{E_sl_{wm}\times10^4}\left(a + \frac{T_{wp} + T_{ws}}{3}\right)$$

$$\%X = \frac{1.24\times133.34\times60^2\times178\times0.9422}{250\times286.2\times10^4}\left(10.5 + \frac{15.5 + 26}{3}\right) = 3.385\ \%$$

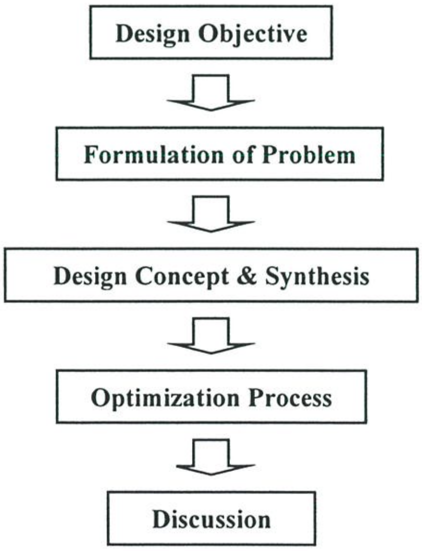
$$\%R = \frac{P_{LL}}{S}\times100 = \frac{1,546}{100,000}\times100 = 1.546\ \%$$

$$\%Z = \sqrt{\%R^2 + \%X^2} = \sqrt{1.546^2 + 3.385^2} = 3.722\ \%$$

บทที่ 3
การออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายให้มีราคาที่เหมาะสม
โดยใช้จีเนติกอัลกอริธึม

3.1 บทนำ

การออกแบบโครงสร้างหรือระบบต่าง ๆ ในงานวิศวกรรมทั่วไปจะทำการออกแบบโดยใช้วิธีการแก้ปัญหาโดยตรง (direct problem solving) คือจะทำการออกแบบด้วยแนวความคิดของผู้ออกแบบ โดยการกำหนดข้อมูลต่าง ๆ ให้กับระบบเพื่อหาผลลัพธ์ให้ได้ตามต้องการ ซึ่งผลลัพธ์อาจเกิดจากการลองผิดลองถูกจนกระทั่งได้ค่าที่มีความเหมาะสมตามเป้าหมายที่ต้องการ ทำให้ต้องเสียเวลาในการออกแบบอีกทั้งโอกาสที่จะได้ค่าที่เหมาะสมตามเป้าหมายที่ตั้งไว้ก็มีความเป็นไปได้น้อย จากเหตุผลดังกล่าวจึงทำให้มีการนำเสนอหลักการออกแบบโดยวิธีการแก้ปัญหาแบบวนกลับ (inverse problem solving) โดยทำการกำหนดผลลัพธ์ที่ต้องการและถามกลับหาข้อมูลที่ต้องกำหนดให้กับระบบ ซึ่งข้อมูลที่ได้อาจมีคำตอบมากกว่าหนึ่งคำตอบ แนวทางการแก้ปัญหาเพื่อหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดและสอดคล้องกับเงื่อนไขที่กำหนดไว้เรานิยมเรียกว่า การหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (optimization) หลักการออกแบบที่เหมาะสมโดยใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมช่วยในการออกแบบประกอบด้วยขั้นตอนต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 3.1 [17]



รูปที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนการออกแบบที่เหมาะสม

การกำหนดเป้าหมายการออกแบบ (design objective) คือการกำหนดความต้องการที่จะให้ผลของการออกแบบนั้นมีลักษณะเป็นอย่างไรตามเงื่อนไขที่กำหนด

กำหนดรูปแบบของปัญหา (formulation of problem) เป็นการศึกษาวิธีและขั้นตอนต่าง ๆ ของสิ่งที่ต้องการออกแบบ รวบรวมสมการที่ใช้ในการออกแบบในส่วนที่เกี่ยวข้องกับเป้าหมายที่ต้องการให้ได้เพียงพอ ทั้งนี้เพราะจะช่วยนำไปสู่การกำหนดสมการเป้าหมายและเงื่อนไขที่ถูกต้อง

หลักการและการสังเคราะห์การออกแบบ (design concept and synthesis) เป็นการพิจารณาความสัมพันธ์ต่าง ๆ ของสมการที่ได้จากขั้นตอนที่ 2 จัดความสัมพันธ์ของสมการต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกันเพื่อให้แสดงถึงสิ่งที่เป้าหมายต้องการ รวมทั้งการกำหนดเงื่อนไขต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบและตัวแปรที่เลือกใช้

การหาค่าที่เหมาะสม (optimization process) เป็นวิธีเชิงตัวเลขในการหาค่าที่เหมาะสม โดยทั่วไปวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบ่งได้ 2 ลักษณะคือ ดิเทอมินิสติก (deterministic) เป็นการหาค่าที่เหมาะสมโดยพื้นฐานของแกรเดียน และสโตชาสติก (stochastic) เป็นการหาค่าที่เหมาะสมโดยพื้นฐานของความน่าจะเป็น

อภิปรายผลการออกแบบ (discussion) เป็นการตรวจสอบผลลัพธ์ที่ได้หลังจากกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมว่ามีลักษณะเป็นตามเป้าหมายและเงื่อนไขที่กำหนดหรือไม่ ซึ่งการที่ผลลัพธ์ไม่เป็นไปตามเป้าหมายที่ต้องการนั้นอาจเกิดจากการพิจารณาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ที่ผิดพลาดหรือสาเหตุใดก็ตามที่อาจเกิดขึ้นได้ ดังนั้นหลังการออกแบบจะต้องมีการนำผลลัพธ์มาอภิปรายเสมอเพื่อตรวจสอบความถูกต้องเสมอ

โดยทั่วไปการหาค่าที่เหมาะสมจะเป็นการหาค่าตัวแปรของฟังก์ชันเป้าหมาย (objective function) และเงื่อนไข (constraints function) ที่กำหนด ซึ่งรูปแบบของฟังก์ชันเป้าหมายและเงื่อนไขจะแสดงดังสมการที่ 3.1 – 3.4 ดังนี้

Minimize	$F(x)$		Objective Function	(3.1)
Subject to				
	$g_j(x) \le 0$	$j = 1,...,l$	Inequality Constraint	(3.2)
	$h_k(x) = 0$	$k = 1,...,m$	Equality Constraint	(3.3)
	$x_i^l \le x_i \le x_i^u$	$i = 1,...,n$	Side Constraint	(3.4)

เมื่อ $x = (x_1,...,x_n)$ เป็นเวกเตอร์ของตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบฟังก์ชันเป้าหมายและฟังก์ชันเงื่อนไขในการหาค่าที่เหมาะสมซึ่งอาจจะเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นหรือไม่เชิงเส้นก็ได้

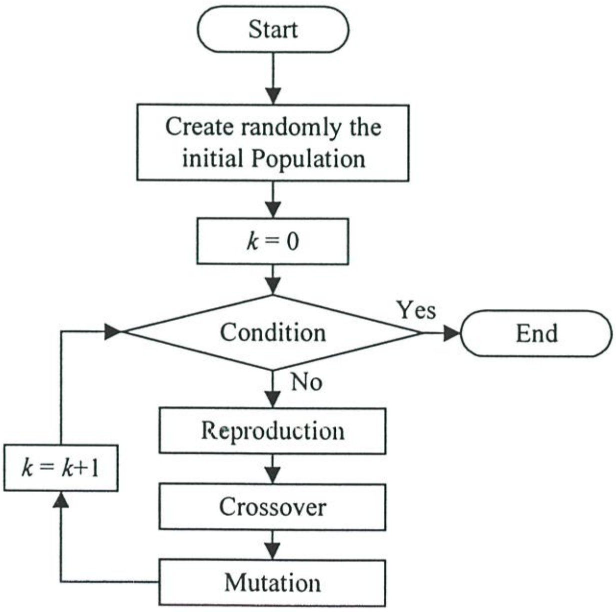
สมการฟังก์ชันเป้าหมายในสมการที่ 3.1 เป็นสมการหาค่าที่เหมาะสมซึ่งกำหนดเป็นค่าสูงสุดหรือต่ำสุดของฟังก์ชันก็ได้ สมการที่ใช้กำหนดฟังก์ชันของเงื่อนไขในสมการที่ 3.2 – 3.4 เป็นเป็นฟังก์ชันของตัวแปร เพื่อกำหนดให้ฟังก์ชันเป้าหมายได้คำตอบที่เป็นไปได้ในทางปฏิบัติ

3.2 การหาค่าที่เหมาะสมโดยใช้จีเนติกอัลกอริธึม

การหาค่าที่เหมาะสมแบบสโตรชาสติกโดยใช้จีเนติกอัลกอริธึม (Genetic algorithms, GAs) เป็นวิธีการหาค่าที่เหมาะสมโดยอาศัยทฤษฎีกลไกการคัดเลือกตามธรรมชาติทางพันธุกรรม [18-20] จึงไม่ถูกควบคุมด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ ทำให้กลไกของการหาค่าที่เหมาะสมนี้มีเอกลักษณ์เฉพาะตัวในการหาค่าที่เหมาะสมกับปัญหาที่มีความซับซ้อน และไม่สามารถใช้วิธีการแก้ปัญหาด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ตามปกติได้ จึงเหมาะสำหรับการแก้ปัญหาทางวิศวกรรมที่มีความซับซ้อนของข้อกำหนดต่าง ๆ มากมาย

ขั้นตอนการหาค่าที่เหมาะสมด้วยจีเนติกอัลกอริธึม

โดยทั่วไปแล้ว ปัญหาทางวิศวกรรมมักจะประกอบด้วยกลุ่มของตัวแปร การประยุกต์ใช้งานจีเนติกอัลกอริธึมเพื่อหาค่าที่เหมาะสมจะเปรียบตัวแปรแต่ละตัวเสมือนยีนส์ (gene) และกลุ่มของตัวแปรจะเปรียบเสมือนโครโมโซม (chromosome) ผลของคำตอบจะถูกวิวัฒนาการทางธรรมชาติของพันธุกรรมจากรุ่นหนึ่งยังรุ่นถัดไป ผลของคำตอบในรุ่นใหม่ที่เกิดขึ้นได้มาจากองค์ประกอบของโครโมโซมที่เหมาะสมของรุ่นก่อน ดังนั้นจึงทำให้ผลของคำตอบในรุ่นใหม่จะถูกพัฒนาให้ดีขึ้น แผนผังการหาค่าที่เหมาะสมด้วยจีเนติกอัลกอริธึมแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แผนผังของการหาค่าที่เหมาะสมด้วยจีเนติกอัลกอริธึม

การเข้ารหัสโครโมโซมมีด้วยกันหลายวิธีขึ้นอยู่กับลักษณะของปัญหาที่ทำการออกแบบ การเข้ารหัสในรูปเลขฐานสองเป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากง่ายต่อการติดตามผล แต่มีบางงานวิจัยที่ได้ทำการทดลองและพบว่าการเข้ารหัสแบบเกรย์ (gray code) ให้ผลการทำงานที่ดีกว่าอยู่เล็กน้อย จากนั้นจะเข้าสู่ขั้นตอนการกำหนดขนาดของโครโมโซมและค่าเริ่มต้นโดยวิธีการสุ่ม (initial population) ขนาดของโครโมโซมนั้นไม่มีการกำหนดไว้ตายตัวขึ้นอยู่กับลักษณะของปัญหาที่ทำการแก้ไข

การกำหนดวนรอบ (Condition) เป็นขั้นตอนการตัดสินใจวนรอบ เพื่อการพัฒนาข้อมูลของโครโมโซม จะทำการวนซ้ำไปจนกระทั่งเงื่อนไขการหยุดเป็นจริง ซึ่งเงื่อนไขการหยุดนี้อาจเป็นจำนวนรอบ (generation) สูงสุด, ความเบี่ยงเบนของสมาชิกระหว่างรอบ หรือค่าฟิทเนสที่มีการกำหนดไว้ล่วงหน้าแล้ว

การคัดเลือกโครโมโซม เป็นกระบวนการที่ใช้เลือกโครโมโซมแต่ละตัวของประชากรสำหรับกระบวนการรีโพรดักชั่น (Reproduction) วิธีการคัดเลือกแบบวงล้อรูเลทเป็นวิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายมากสุด โดยอาศัยกลไกการเลือกตามสัดส่วน มีค่าฟิทเนสเป็นตัววัดคุณภาพความดีของโครโมโซม จากนั้นทำการรวมค่าฟิทเนสของสมาชิกทุกตัวเพื่อกำหนดขอบเขตของวงล้อรูเลท และสร้างตัวเลขสุ่มระหว่าง “0” ถึงค่าผลรวมของฟิทเนส จะเห็นว่าสมาชิกตัวใดมีคุณภาพดี ค่าฟิทเนสมีค่ามาก ดังนั้นจึงมีโอกาศได้รับการพิจารณาในรุ่นต่อมามากขึ้น

การครอสโอเวอร์ (Crossover) เป็นกระบวนการแลกเปลี่ยนข้อมูลในระหว่างโครโมโซม ทำให้ข้อมูลรุ่นต่อมามีความหลากหลายและทำให้โครโมโซมมีโอกาสเกิดลักษณะที่เหมาะสมขึ้น วิธีการครอสโอเวอร์ตามแนวทางชีววิทยาจะเป็นการครอสโอเวอร์แบบ 1 จุด แต่บางสถานการณ์ก็ไม่เหมาะสมกับปัญหาทำให้เกิดแนวความคิดการครอสโคเวอร์แบบหลายจุดขึ้น ซึ่งจะมีความเหมาะสมมากขึ้น การครอสโอเวอร์อีกวิธีหนึ่งเป็นการครอสโอเวอร์แบบยูนิฟอร์ม จะเป็นการแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างบิตของโครโมโซม โดยการสร้างแมสค์ (mask) จากการสุ่มเพื่อกำหนดตำแหน่งของแต่ละบิตที่จะแลกเปลี่ยนข้อมูล ความน่าจะเป็นในการเลือกครอสโอเวอร์จะมีค่าอยู่โดยประมาณ 0.6 - 1.0 การออกแบบวิธีการครอสโอเวอร์ที่มีประสิทธิภาพ จะช่วยเพิ่มให้การคอนเวอร์เจนซ์เร็วขึ้น

การมิวเตชันหรือการผ่าเหล่า (Mutation) เป็นการสร้างความหลากหลายให้แก่โครโมโซม โดยจะเปลี่ยนแปลงเพียงบางบิตของชุดโคโมโซมโดยการสุ่ม ทำให้โครโมโซมรุ่นใหม่เกิดการผ่าเหล่าออกไปจากรุ่นเดิม ถ้าการผ่าเหล่านี้เปลี่ยนแล้วเหมาะสมก็จะยังคงอยู่ต่อไปแต่ถ้าเปลี่ยนแล้วไม่เหมาะสมก็จะถูกคัดเลือกให้หายไป ความน่าจะเป็นในการเลือกมิวเตชันจะมีค่าน้อย ๆ โดยประมาณ 0.01 - 0.1

3.3 คุณลักษณะทางความร้อนของหม้อแปลง

กำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลงทั้งหมดจะถูกเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานความร้อน ทำให้อุณหภูมิของวัสดุมีโอกาสเลยจุดที่วัสดุนั้นจะทนได้ และทำลายฉนวนของหม้อแปลงในที่สุด ทำให้หม้อแปลงใช้งานไม่ได้ ฉะนั้นการระบายความร้อนให้เร็วที่สุดเท่าที่จะเร็วได้ จึงเป็นสิ่งจำเป็น การระบายความร้อนถ้ากระทำได้ถูกวิธีจะสามารถเพิ่มภาระให้กับหม้อแปลงที่มีขนาดพิกัดกำลังเท่าเดิมหรืออาจลดขนาดรูปทรงของหม้อแปลงลงก็ได้

ก่อนที่หม้อแปลงจะถูกนำไปใช้งาน อุณหภูมิภายในหม้อแปลงจะเท่ากับอุณหภูมิรอบ ๆ ภายนอก (ambient temperature) และหลังจากที่หม้อแปลงได้รับภาระ อุณหภูมิภายในหม้อแปลงส่วนที่มีกระแสไหลจะร้อนสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว และถ่ายเทความร้อนให้แก่วัสดุรอบ ๆ ในเวลาต่อมาอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจะช้าลง และเมื่อถึงอุณหภูมิหนึ่งจะไม่เพิ่มขึ้นอีกเลย แสดงได้ว่าความร้อนที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากมีกระแสไหลจะเท่ากับความร้อนที่สามารถระบายออกได้ทำให้อุณหภูมิคงที่

อุณหภูมิของหม้อแปลงสามารถแบ่งออกเป็นอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น (temperature rise) และอุณหภูมิโดยรอบ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นนี้จะขึ้นอยู่กับกำลังสูญเสียภายในหม้อแปลง โดยที่สภาวะอากาศโดยรอบจะไม่มีผลต่ออุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น และอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเท่านั้นที่จะมีผลต่อฉนวนที่ใช้งานภายในหม้อแปลง ขีดจำกัดของอุณหภูมิหม้อแปลงนั้นจะขึ้นอยู่กับวัสดุที่นำมาใช้งาน ฉนวนที่ใช้พันขดลวดส่วนใหญ่มีสารอินทรีย์ และเส้นใยผสมอยู่ได้แก่ กระดาษหนาสีน้ำตาล (kraft paper) กระดาษนิลา (manila paper) แผ่นกระดานสีน้ำตาล (kraft board) และกระดานอัด (press board) เป็นต้น สารดังกล่าวเมื่อถูกความร้อนสูง ๆ จะให้คาร์บอนทำลายความแข็งแรงของฉนวน (insulation strength) และความแข็งแรงเชิงกล (mechanical strength) ในที่สุด ด้วยเหตุนี้มาตรฐานของอุตสาหกรรมหม้อแปลง จึงได้แบ่งชั้นของฉนวนออกเป็น 4 ชั้น ตามสภาพเงื่อนไขที่สามารถทนต่ออุณหภูมิสูงสุดที่เพิ่มขึ้นได้ ณ อุณหภูมิโดยรอบ 40 °C ดังนี้

1. ชั้นหนึ่ง (Class A) ฉนวนชั้นนี้ บังคับให้อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในสภาวะทรงตัว (steady state) ต้องไม่เกิน 55 °C และอนุโลมให้อุณหภูมิที่จุดร้อนสุด (hottest spot) ไม่เกิน 105 °C

2. ชั้นสอง (Class B) ฉนวนชั้นนี้ บังคับให้อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในสภาวะทรงตัว ต้องไม่เกิน 80 °C และอนุโลมให้อุณหภูมิที่จุดร้อนสุดไม่เกิน 150 °C

3. ชั้นสาม (Class F) ฉนวนชั้นนี้ บังคับให้อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในสภาวะทรงตัว ต้องไม่เกิน 115 °C และอนุโลมให้อุณหภูมิที่จุดร้อนสุดไม่เกิน 185 °C

4. ชั้นสี่ (Class H) ฉนวนชั้นนี้ บังคับให้อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในสภาวะทรงตัว ต้องไม่เกิน 150 °C และอนุโลมให้อุณหภูมิที่จุดร้อนสุดไม่เกิน 220 °C

3.3.1 การถ่ายเทความร้อนในหม้อแปลงชนิดน้ำมัน [2]

ความร้อนภายในหม้อแปลงเกิดจากแกนและขดลวดเป็นตัวสร้าง จากนั้นจะถ่ายเทให้แก่สภาวะรอบ ๆ โดยอาศัยระดับอุณหภูมิที่ต่างกัน การถ่ายเทความร้อนมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี แต่ละวิธีไม่ขึ้นแก่กันกล่าวคือ การนำความร้อน การแผ่รังสีและการพาความร้อน ซึ่งวิธีสุดท้ายเป็นวิธีที่สำคัญในการระบายความร้อนภายในหม้อแปลง

การถ่ายเทความร้อนในหม้อแปลงชนิดแช่น้ำมันนั้น ขั้นแรกความร้อนจะระบายออกจากส่วนในของขดลวด ถ้าขดลวดเป็นทองแดงชนิดเนื้อเดียวกันและทุกจุดระบายความร้อนสม่ำเสมอความร้อนจะกระจายออกตามแนวรัศมี

ขั้นที่สอง ความร้อนถ่ายเทจากผิวของขดลวดยังน้ำมันที่อยู่รอบ ๆ ผลต่างของอุณหภูมิระหว่างตัวกลางทั้งสองจะขึ้นอยู่กับปริมาณความร้อนของขดลวดที่สามารถแผ่ออกมา, ความสูงของขดลวด, ขนาดร่องน้ำมันที่ใช้เพื่อระบายความร้อน และความหนาแน่นของน้ำมัน

ขั้นที่สาม เมื่อน้ำมันภายในหม้อแปลงได้รับความร้อน น้ำมันจะหมุนเวียนไปด้วยผลต่างระหว่างความหนาแน่นของน้ำมันที่เย็นและน้ำมันที่ร้อน การถ่ายเทความร้อนในลักษณะเช่นนี้เป็นวิธีการพาความร้อน อัตราความเร็วและลักษณะการไหลของน้ำมันรอบ ๆ ผิวของขดลวดจะขึ้นอยู่กับชนิดของขดลวด, ลักษณะการพันขดลวด, ขนาดร่องน้ำมัน และระบบการถ่ายเทน้ำมัน

ขั้นที่สี่ ความร้อนที่ติดมากับน้ำมันจะถ่ายเทให้ผนังของถังหม้อแปลงด้วยผลต่างของอุณหภูมิระหว่างน้ำมันและผนังของถัง เช่นเดียวกับการถ่ายเทความร้อนในขั้นที่สอง ซึ่งขึ้นกับความร้อนจำเพาะของผนังถังหม้อแปลง และเครื่องมือระบายความร้อน

ขั้นที่ห้า พลังความร้อนจะส่งผลผ่านทะลุความหนาของผนังถังหม้อแปลงออกสู่ภายนอก ผลต่างของอุณหภูมิ ระหว่างผิวชั้นในและผิวชั้นนอกจะมีค่าน้อยกว่า 1 ^{o}C อุณหภูมิของผนังถังภายนอกและภายในจึงเกือบเท่ากัน

ขั้นที่หก เป็นขั้นสุดท้าย ความร้อนจะถ่ายเทจากผนังภายนอกของหม้อแปลง หรือเครื่องมือระบายความร้อนออกสู่อากาศรอบ ๆ ถังหม้อแปลงด้วยวิธีการพาความร้อนของอากาศและการแผ่รังสี หม้อแปลงที่มีผิวเรียบและทาสี จะสามารถแผ่รังสีออกจากถังได้ถึง 55% ของความร้อนทั้งหมดที่จะระบาย แต่ถ้าถังมีท่อระบายความร้อนการแผ่รังสีจะมีค่าลดลง ส่วนการระบายความร้อนด้วยวิธีการพานั้นไม่เหมือนกับการแผ่รังสี ความร้อนจะถูกพาออกจากผิวของวัสดุทั้งหมด ซึ่งจะขึ้นอยู่กับผลต่างของอุณหภูมิอากาศโดยรอบกับผิวของวัสดุ, ความสูงของถังหม้อแปลง และรูปร่างลักษณะของถังหม้อแปลง การถ่ายเทความร้อนด้วยวิธีนี้ มีลักษณะคล้ายคลึงกับการระบายความดัน และจะถ่ายเทได้ดีถ้าผิวถังมีพื้นที่มากและมีอากาศไหลวนเวียนผ่านถังหม้อแปลงมากพอ ความร้อนก็จะถูกพัดพาออกไปได้มาก

3.3.2 การประมาณผลของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของขดลวด

การออกแบบร่องน้ำมันระบายความร้อนภายในชุดขดลวดมีวัตถุประสงค์เพื่อลดอุณหภูมิแตกต่างระหว่างขดลวดกับน้ำมันหรืออุณหภูมิเกรเดียนท์ (Gradient) [4] ซึ่งจะขึ้นอยู่กับพิกัดกำลังสูญเสียในขดลวด พื้นที่สำหรับการระบายความร้อนออกจากขดลวด ความหนาของฉนวนความร้อน และสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุ การออกแบบจะต้องปรับให้อุณหภูมิแตกต่างระหว่างขดลวดกับน้ำมันเหมาะสมกับส่วนระบายความร้อนของหม้อแปลงเพื่อลดต้นทุนการผลิต อุณหภูมิแตกต่างระหว่างขดลวดกับน้ำมันจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ 2 ส่วนตามสมการที่ 3.5 ดังนี้

$$\Delta\theta_g = \Delta\theta_k + \Delta\theta_c \tag{3.5}$$

เมื่อ $\Delta\theta_g$ เป็นอุณหภูมิแตกต่างระหว่างขดลวดกับน้ำมัน (°C)

$\Delta\theta_k$ เป็นอุณหภูมิแตกต่างจากการนำความร้อนที่ฉนวนเฉลี่ย (°C)

$\Delta\theta_c$ เป็นอุณหภูมิแตกต่างจากการพาความร้อนของน้ำมันเฉลี่ย (°C)

การประมาณหาค่าอุณหภูมิแตกต่างระหว่างขดลวดกับน้ำมัน เพื่อละความยุ่งยากในทางปฏิบัติจะทำการพิจารณาเฉพาะอุณหภูมิแตกต่างจากการนำความร้อนที่ฉนวนเฉลี่ยเท่านั้น ส่วนอุณหภูมิแตกต่างจากการพาความร้อนของน้ำมันเฉลี่ยจะประมาณโดยหาค่าคงที่ k_{th} คูณเพิ่มความต้านทานทางความร้อนจากการนำของฉนวนเฉลี่ย ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับขนาดร่องน้ำมันระบายความร้อน พื้นที่ผิวสัมผัสกับน้ำมันในการระบายความร้อน, และคุณลักษณะทางโครงสร้างในการไหลของน้ำมัน ซึ่งสามารถหาได้จากข้อมูลเชิงสถิติในทางปฏิบัติ สมการคำนวณหาความต้านทานโดยการนำความร้อนแสดงในสมการที่ 3.6 ดังนี้ [21-22]

$$R_{th} = \frac{l_{th}}{k_{cond} A_s} \tag{3.6}$$

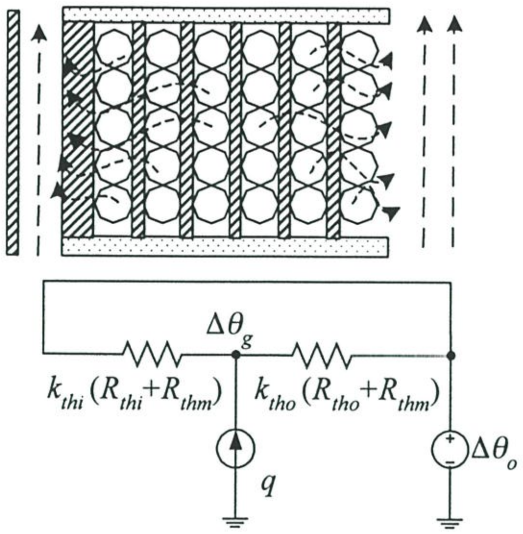
เมื่อ R_{th} ความต้านทานความร้อนของฉนวน (°C /W)

k_{cond} ค่าการนำความร้อนของฉนวน (W/(mm)(°C))

l_{th} ความยาวการไหลของความร้อน (mm)

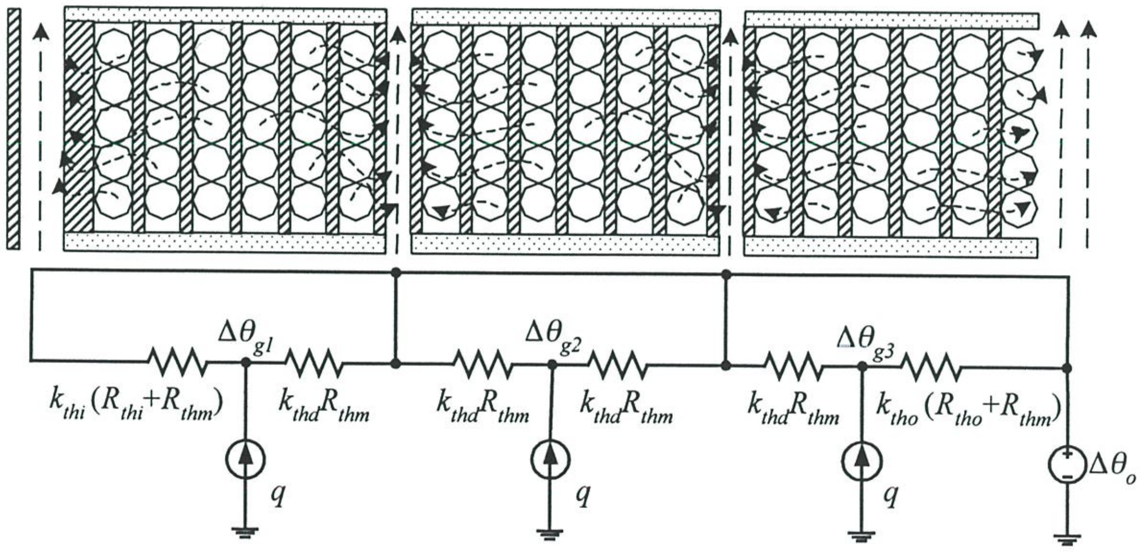
A_s พื้นที่ผิวระบายความร้อน (sq.mm)

กระดาษชุ่มน้ำมันมีค่าการนำความร้อนของฉนวนเท่ากับ 1.65×10^{-4} W/(mm)(°C) [6] การระบายความร้อนภายในขดลวดกำหนดให้ความร้อนระบายออกในแนวรัศมีของขดลวดสามารถจำลองวงจรทางความร้อนของขดลวดได้ดังรูปที่ 3.3 ดังนี้



รูปที่ 3.3 การจำลองวงจรทางความร้อนของขดลวด

จากรูปที่ 3.3 สามารถคำนวณหาอุณหภูมิแตกต่างระหว่างขดลวดกับน้ำมันได้ตามสมการที่ 3.9 และในกรณีที่ขดลวดมีอุณหภูมิสูงจำเป็นจะต้องลดอุณหภูมิลงโดยการเพิ่มร่องน้ำมันระบายความร้อนภายในชุดขดลวด แสดงการจำลองวงจรทางความร้อนแบบมีร่องน้ำมันในชุดขดลวดดังรูปที่ 3.4 สมการคำนวณหาอุณหภูมิแตกต่างระหว่างขดลวดกับน้ำมันเมื่อมีร่องน้ำมันระบายความร้อนภายในขดลวด ตามสมการที่ 3.10



รูปที่ 3.4 การจำลองวงจรทางความร้อนแบบมีร่องระบายความร้อนในชุดขดลวด

$$q = \frac{\text{Coil losses}}{P\left(N_d + 1\right)} \tag{3.7}$$

กรณีไม่มีร่องน้ำมันในขดลวด

$$\Delta\theta_g = qk_{thl}\frac{k_{thi}k_{tho}\left(R_{thi} + R_{thm}\right)\left(R_{tho} + R_{thm}\right)}{k_{thi}R_{thi} + k_{tho}R_{tho} + \left(k_{thi} + k_{tho}\right)R_{thm}} \tag{3.8}$$

กรณีมีร่องน้ำมันในขดลวด

$$\Delta\theta_g = \frac{qk_{thl}k_{thd}R_{thm}}{\left(N_d + 1\right)}\left(\frac{R_{thi} + R_{thm}}{R_{thi} + \left(1 + \frac{k_{thd}}{k_{thi}}\right)R_{thm}} + \frac{R_{tho} + R_{thm}}{R_{tho} + \left(1 + \frac{k_{thd}}{k_{tho}}\right)R_{thm}} + \frac{N_d - 1}{2}\right) \tag{3.9}$$

เมื่อ q เป็นอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ขดลวดต่อชุด (W)

R_{thm} เป็นความต้านทานความร้อนของฉนวนเฉลี่ยระหว่างชั้นต่อชุด ($^{\circ}$C/W)

R_{thi} เป็นความต้านทานความร้อนของฉนวนเฉลี่ยด้านในขดลวด ($^{\circ}$C/W)

R_{tho} เป็นความต้านทานความร้อนของฉนวนด้านนอกขดลวด ($^{\circ}$C/W)

k_{thi} เป็นสัมประสิทธิ์คูณเพิ่มจากการพาความร้อนที่ฉนวนด้านในขดลวด

k_{thd} เป็นสัมประสิทธิ์คูณเพิ่มจากการพาความร้อนที่ร่องน้ำมันในขดลวด

k_{tho} เป็นสัมประสิทธิ์คูณเพิ่มจากการพาความร้อนที่ฉนวนด้านนอกขดลวด

k_{thl} เป็นสัมประสิทธิ์คูณเพิ่มจากระยะห่างต้นขดลวดถึงโย๊คแกนเหล็กรวม

$\Delta\theta_{g1}, \Delta\theta_{g2}, \Delta\theta_{g3}, \ldots, \Delta\theta_{g(N_d+1)}$ เป็นอุณหภูมิแตกต่างที่ฉนวนเฉลี่ยด้านในแต่ละชุดของขดลวด ($^{\circ}$C)

$\Delta\theta_o$ เป็นอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของน้ำมันเฉลี่ย ($^{\circ}$C)

N_d เป็นจำนวนร่องน้ำมันในชุดขดลวด

ความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์คูณเพิ่มจากการพาความร้อนในร่องน้ำมันถูกกำหนดขึ้นจากข้อมูลเชิงสถิติของหม้อแปลงจำหน่ายชนิดน้ำมันมีขนาดไม่เกิน 1,000 kVA ขดลวดด้านปฐมภูมิใช้ลวดตัวนำกลมพันแบบครอสโอเวอร์ ขดลวดด้านทุติยภูมิใช้ลวดสี่เหลี่ยมพันเป็นชั้นแบบสไพรัล โดยสัมประสิทธิ์คูณเพิ่มจากการพาความร้อนในร่องน้ำมันจะขึ้นอยู่กับส่วนหลัก ๆ ทางโครงสร้างของขดลวด 2 ส่วน ตามสมการที่ 3.10 ดังนี้

$$k_{th} = \frac{k_d}{k_s} \tag{3.10}$$

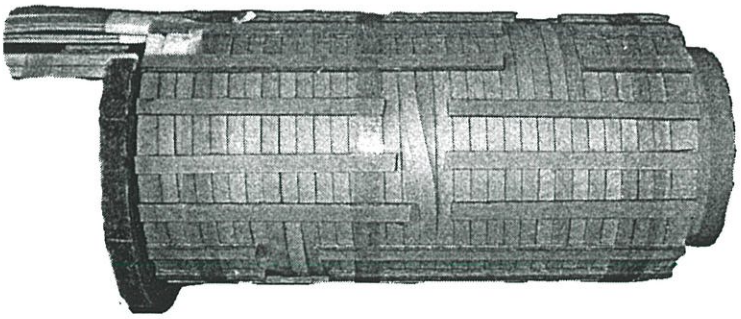
เมื่อ k_{th} เป็นสัมประสิทธิ์คูณเพิ่มจากการพาความร้อนในร่องน้ำมัน

k_d เป็นสัมประสิทธิ์คูณเพิ่มจากผลของขนาดร่องน้ำมัน

k_s เป็นสัมประสิทธิ์คูณลดพื้นที่ระบายความร้อนจากการบังของฉนวน

จากข้อมูลเชิงสถิติในทางปฏิบัติสามารถกำหนด สัมประสิทธิ์คูณเพิ่มจากผลของขนาดร่องน้ำมันระบายความร้อนที่มีขนาดต่าง ๆ ในการระบายความร้อนดังนี้ ร่องน้ำมันที่มีขนาด 4 mm กำหนดให้มีการระบายความร้อยได้เต็มพื้นที่ผิว $k_d = 1$, ร่องน้ำมันที่มีขนาด 3 mm กำหนดให้ $k_d = 2$, ร่องน้ำมันที่มีขนาด 2 mm กำหนดให้ $k_d = 3$, และร่องน้ำมันที่มีขนาดน้อยกว่า 2 mm กำหนดให้ $k_d = 3.5$

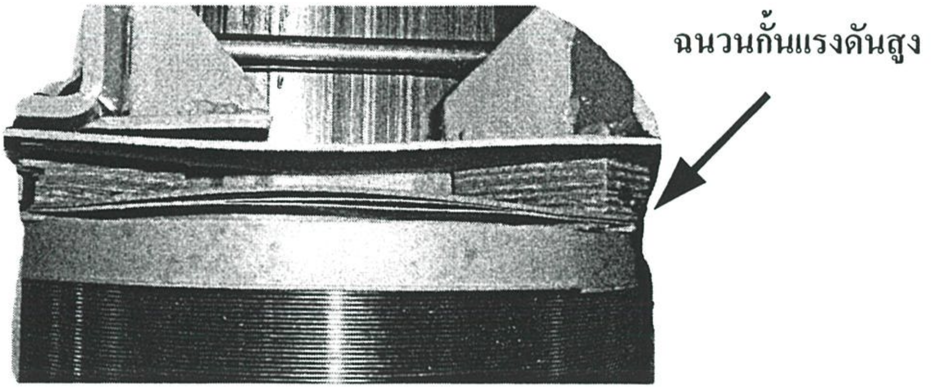
สำหรับสัมประสิทธิ์คูณลดพื้นที่ระบายความร้อนจากการบังของฉนวน เป็นผลมาจากลวดตัวนำที่ถูกบิดเพื่อย้ายตำแหน่งบวมบังการไหลของน้ำมันภายในร่องน้ำมัน และฉนวนที่ใช้ทำร่องน้ำมันระบายความร้อนบังพื้นที่ผิวระบายความร้อยเสียเอง โดยกำหนดให้ร่องน้ำมันในเนื้อของขดลวดมี $k_s = 0.5$ และร่องน้ำมันด้านนอกขดลวดมี $k_s = 0.85$ ฉนวนใช้ทำร่องน้ำมันแสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ฉนวนทำร่องน้ำมันบังพื้นที่ผิวระบายความร้อนของขดลวด

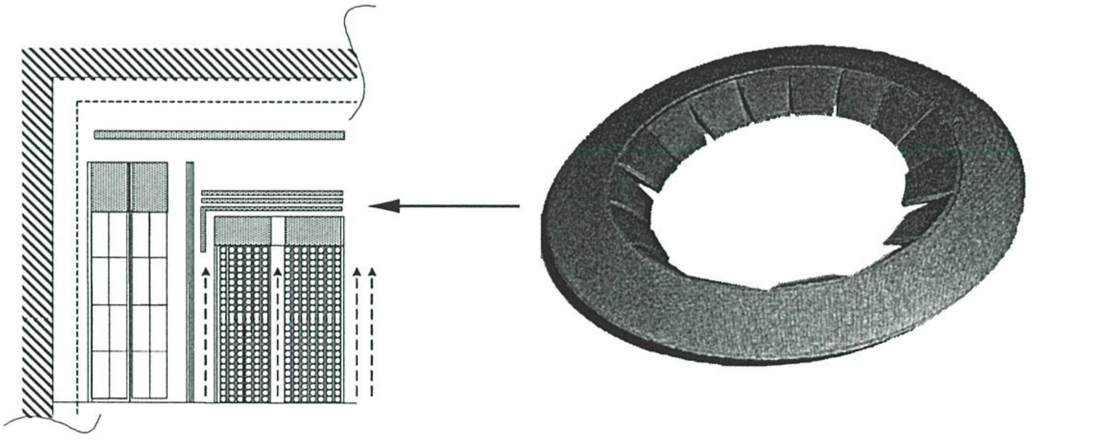
อุณหภูมิแตกต่างระหว่างขดลวดกับน้ำมันนอกจากจะขึ้นอยู่กับคุณลักษณะทางโครงสร้างของร่องน้ำมันแล้วยังขึ้นอยู่กับระยะห่างรวมของต้นขดลวดถึงโย๊คแกนเหล็ก ด้านทุติยภูมิใช้ลวดสี่เหลี่ยมพันแบบสไพรัล กำหนดให้ระยะห่างต้นขดลวดถึงโย๊คแกนเหล็กรวมน้อยกว่า 35 mm และมากกว่า มีค่าสัมประสิทธิ์ $k_{thl} = 3.1$ และ 2.5 ตามลำดับ ด้านปฐมภูมิใช้ลวดตัวนำกลมพันแบบครอสโอเวอร์ กำหนดให้ระยะห่างต้นขดลวดถึงโย๊คแกนเหล็กรวมน้อยกว่า 55 mm และมากกว่า มีค่าสัมประสิทธิ์ $k_{thl} = 2.75$ และ 1.75 ตามลำดับ ปัจจัยที่ทำให้สัมประสิทธิ์ k_{thl} เปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับระยะห่างรวมของต้นขดลวดถึงโย๊คแกนเหล็กเป็นผลมาจากการจัดเรียงขดลวดและฉนวนกั้น

แรงดันสูงเกิน ด้านขดลวดทุติยภูมิพันอยู่ด้านในติดกับแกนเหล็กการระบายความร้อนออกจากขดลวดทำได้ยากกว่าขดลวดปฐมภูมิ แต่ด้านขดลวดปฐมภูมิก็จะถูกกั้นด้วยฉนวน ซึ่งทำหน้าที่กั้นแรงสูงเกินที่ด้านบนและล่างแสดงดังรูปที่ 3.6 ทำให้น้ำมันพาความร้อนออกจากภายในขดลวดได้ยากขึ้น ดังนั้นถ้ามีระยะห่างที่ต้นขดลวดไม่เพียงพอจะทำให้เกิดความร้อนสะสมภายในขดลวดมากขึ้น



รูปที่ 3.6 ฉนวนกั้นแรงสูงบังการไหลของน้ำมันที่ขดลวดปฐมภูมิ

นอกจากนี้ สัมประสิทธิ์คูณเพิ่มจากการพาความร้อนที่ฉนวนด้านในขดลวดด้านแรงสูงจะเพิ่มขึ้น 3 เท่าเมื่อขดลวดมีแรงดันเกิน 22,000 V เนื่องจากร่องน้ำมันด้านในจะถูกฉนวนวงแหวนมีลักษณะเป็นกระโปรงเพิ่มความเป็นฉนวนกั้นระหว่างขดลวดทำให้ร่องน้ำมันด้านในไม่สามารถพาความร้อนออกมาได้มากนักแสดงฉนวนวงแหวนกั้นขดลวดแรงสูงกับแรงต่ำดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 วงแหวนฉนวนกระดาษบากเป็นกระโปรงกันระหว่างขดลวดแรงสูงกับแรงต่ำ

จากข้อกำหนดดังกล่าว แสดงผลการคำนวณหาอุณหภูมิแตกต่างระหว่างขดลวดกับน้ำมันเปรียบเทียบกับผลจากการทดสอบทางปฏิบัติที่โครงสร้างของหม้อแปลงขนาดต่าง ๆ ตามตารางที่ 3.1 - 3.2 และจะเห็นว่าอุณหภูมิแตกต่างระหว่างขดลวดกับน้ำมันมีความผิดพลาดอยู่ไม่เกิน 3 องศา

ดังนั้นจากวิธีการดังกล่าวสามารถมั่นใจได้ว่าเมื่อทำการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายที่มีโครงสร้างของขดลวดและฉนวนตามข้อกำหนดข้างต้นสามารถคำนวณหา อุณหภูมิแตกต่างระหว่างขดลวดกับน้ำมันได้อยู่ในช่วงที่กำหนด

ตารางที่ 3.1 การเปรียบเทียบผลการคำนวณกับการทดสอบของอุณหภูมิแตกต่างระหว่างขดลวดกับน้ำมันที่ขดลวดด้านปฐมภูมิ

	หม้อแปลง (kVA)	**50**	**100**	**160**	**250**	**630**
โครงสร้างขดลวด	แรงดัน (kV)	33	22	33	33	22
	เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ (mm)	0.6	0.9	1	1.3	2.1
	ความหนาของฉนวน (mm)	0.03	0.03	0.04	0.04	0.05
	จำนวนตอนต่อเฟส	2	2	4	4	4
	จำนวนรอบต่อชั้น (Turn)	157	141	71	45	41
	จำนวนชั้นของขดลวด	24	20	23	19	13
	ร่องน้ำมันด้านในขดลวด (mm)	4	4.5	4	4	4.5
	เส้นผ่านศูนย์กลางด้านในขดลวด (mm)	170	187	207	226	280
	ฉนวนทรงกระบอกด้านในขดลวด (mm)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
	เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของขดลวด (mm)	193	214.5	237.5	257.5	315
	ฉนวนทรงกระบอกระหว่างชั้นขดลวด (mm)	0.195	0.195	0.13	0.13	0.195
	ร่องน้ำมันภายในขดลวด (mm)	1.6	3.2	1.6	1.6	3.2
	จำนวนร่องน้ำมันภายในขดลวด	1	1	1	1	1
	เส้นผ่าศูนย์กลางด้านนอกขดลวด (mm)	216	242	268	289	350
	ระยะห่างรวมของขดลวดถึงโย๊คแกนเหล็ก (mm)	64	47	78	75	52
ผลการทดสอบ	กำลังสูญเสียจากทองแดงภายในขดลวด (W)	183	264	317	574	1126
	อุณหภูมิแตกต่างระหว่างขดลวดกับน้ำมัน ($^{\circ}$C)	**15.6**	**13.4**	**13.0**	**20.6**	**20.0**
ผลการคำนวณ	กำลังสูญเสียต่อกลุ่มขดลวด (W)	91	132	158	287	563
	ความต้านทานความร้อนที่พื้นผิวด้านใน ($^{\circ}$C/W)	0.030	0.020	0.016	0.018	0.010
	ความต้านทานความร้อนของฉนวนระหว่างชั้น ($^{\circ}$C/W)	0.061	0.034	0.021	0.020	0.011
	ความต้านทานความร้อนที่พื้นผิวด้านนอก ($^{\circ}$C/W)	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
	สัมประสิทธิ์ทางความร้อนที่ร่องน้ำมันด้านในขดลวด	3.0	1.0	3.0	3.0	1.0
	สัมประสิทธิ์ทางความร้อนที่ร่องน้ำมันภายในขดลวด	7.0	4.0	7.0	7.0	4.0
	สัมประสิทธิ์ทางความร้อนที่ร่องน้ำมันด้านนอกขดลวด	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	อุณหภูมิแตกต่างระหว่างขดลวดกับน้ำมัน ($^{\circ}$C)	**17.6**	**12.1**	**11.6**	**20.4**	**18.4**
อุณหภูมิแตกต่างระหว่างขดลวดกับน้ำมันผิดพลาด ($^{\circ}$C)		**2.0**	**-1.3**	**-1.4**	**-0.2**	**-1.6**

ตารางที่ 3.2 การเปรียบเทียบผลการคำนวณกับการทดสอบของอุณหภูมิแตกต่างระหว่างขดลวดกับน้ำมันที่ขดลวดด้านทุติยภูมิ

	หม้อแปลง (kVA)	**50**	**100**	**160**	**250**	**630**
โครงสร้างขดลวด	แรงดัน (V)	230	230	230	230	230
	ความหนาของตัวนำ (mm)	3.5	5	3	3.6	4
	ความกว้างของตัวนำ (mm)	9	11	7	9	10
	ความหนาของฉนวนหุ้มตัวนำ (mm)	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
	จำนวนตัวนำที่ใช้ขนานตามแนวรัศมี	1	1	2	2	5
	จำนวนตัวนำที่ใช้ขนานตามแนวแกน	1	1	2	2	2
	จำนวนรอบต่อชั้น (Turn)	26	28	21.5	17	21
	จำนวนชั้นของขดลวด	3	2	2	2	1
	ร่องน้ำมันด้านในขดลวด (mm)	2	2	2	2	2
	เส้นผ่านศูนย์กลางด้านในขดลวด (mm)	118	134	152	166	208
	ฉนวนทรงกระบอกด้านในขดลวด (mm)	1	1	1	1	1
	เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของขดลวด (mm)	131.5	148	167	185.5	232
	ฉนวนทรงกระบอกระหว่างชั้นขดลวด (mm)	0.13	0.13	0.13	0.13	0
	ร่องน้ำมันภายในขดลวด (mm)	0	1.6	0	1.6	0
	จำนวนร่องน้ำมันภายในขดลวด	0	1	0	1	0
	เส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอกขดลวด (mm)	145	162	182	205	256
	ร่องน้ำมันด้านนอกขดลวด (mm)	4	4	4	3.5	3.2
	ระยะห่างรวมของขดลวดถึงโย๊คแกนเหล็ก (mm)	57	10	60	59	16
ผลการทดสอบ	กำลังสูญเสียจากทองแดงภายในขดลวด (W)	119	207	317	404	732
	อุณหภูมิแตกต่างระหว่างขดลวดกับน้ำมัน (°C)	**11.0**	**13.7**	**20.3**	**20.5**	**23.8**
ผลการคำนวณ	กำลังสูญเสียต่อกลุ่มขดลวด (W)	119	104	317	202	732
	ความต้านทานความร้อนที่พื้นผิวด้านใน (°C/W)	0.035	0.047	0.043	0.038	0.022
	ความต้านทานความร้อนของฉนวนระหว่างชั้น (°C/W)	0.027	0.014	0.014	0.011	0.006
	ความต้านทานความร้อนที่พื้นผิวด้านนอก (°C/W)	0.017	0.012	0.011	0.009	0.005
	สัมประสิทธิ์ทางความร้อนที่ร่องน้ำมันด้านในขดลวด	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
	สัมประสิทธิ์ทางความร้อนที่ร่องน้ำมันภายในขดลวด	0.00	7.00	0.00	7.00	0.00
	สัมประสิทธิ์ทางความร้อนที่ร่องน้ำมันด้านนอกขดลวด	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18
	อุณหภูมิแตกต่างระหว่างขดลวดกับน้ำมัน (°C)	**12.0**	**14.0**	**19.5**	**17.7**	**26.1**
อุณหภูมิแตกต่างระหว่างขดลวดกับน้ำมันผิดพลาด (°C)		**1.0**	**0.3**	**-0.8**	**-2.8**	**2.3**

3.4 การออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายให้มีราคาที่เหมาะสมโดยใช้จีเนติกอัลกอริธึม

การแก้ปัญหาการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายให้มีราคาที่เหมาะสมโดยใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมด้วยจีเนติกอัลกอริธึม [23-24] มีเป้าหมายของการออกแบบที่ราคาต้นทุนรวมของแกนเหล็กและขดลวดต่ำ รูปแบบของปัญหาจะทำการศึกษาส่วนที่เกี่ยวข้องกับราคาต้นทุนที่เกิดขึ้น ในที่นี้พิจารณาราคาต้นทุนรวมเฉพาะแกนเหล็กและขดลวดเท่านั้น เพราะเป็นวัสดุหลักของหม้อแปลง ราคาของวัสดุจะขึ้นอยู่กับน้ำหนักของวัสดุที่นำมาใช้งาน โดยที่น้ำหนักของแกนเหล็กจะขึ้นอยู่กับกำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลดและรูปทรงของแกนเหล็กซึ่งจะถูกกำหนดโดยรูปทรงของขดลวด ส่วนน้ำหนักของขดลวดจะขึ้นอยู่กับกำลังสูญเสียขณะมีโหลดและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนเหล็ก โดยที่รูปทรงของขดลวดจะต้องมีการจัดให้ได้ค่าเปอร์เซ็นต์อิมพิแดนซ์ลัดวงจรอยู่ตามข้อกำหนด การออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายให้มีราคาที่เหมาะสมสามารถจัดรูปแบบสมการเป้าหมายได้ดังสมการที่ 3.11

$$\text{Minimize} \quad f(x) = C_{Fe}(x) + C_{cu}(x) \tag{3.11}$$

โดยที่ C_{Fe} เป็นราคาต้นทุนของแกนเหล็ก (บาท)

C_{cu} เป็นราคาต้นทุนของลวดทองแดง (บาท)

x เป็นเซตของตัวแปรที่ใช้กำหนดโครงสร้างของหม้อแปลงจำหน่าย

การออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายให้มีราคาที่เหมาะสมนี้ เลือกใช้เซตของตัวแปรที่ใช้กำหนดโครงสร้างของหม้อแปลงจำหน่าย 6 ตัวแปร โดยที่ตัวแปรอื่น ๆ ที่มีผลต่อการออกแบบให้กำหนดเป็นค่าคงที่ ได้แก่ความหนาของฉนวน ความกว้างของร่องระบายความร้อน ในบางส่วนเพื่อเพิ่มความแข็งแรงในการพันหรือการจับยึด เป็นต้น ในการออกแบบนี้ใช้หลักการออกแบบและค่าคงที่ต่าง ๆ ตามการออกแบบดั้งเดิมที่มีการผลิตใช้งานในทางอุตสาหกรรมจึงเป็นการออกแบบที่สามารถผลิตใช้งานได้จริง โดยมีตัวแปรที่ใช้กำหนดโครงสร้างในการออกแบบดังนี้

x_1 เป็นความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (T)

x_2 เป็นพื้นที่หน้าตัดของลวดตัวนำด้านทุติยภูมิมีใช้ทางอุตสาหกรรม (sq.mm)

x_3 เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดตัวนำกลมด้านปฐมภูมิที่มีใช้ทางอุตสาหกรรม (mm)

x_4 เป็นความหนาแน่นกระแสด้านทุติยภูมิ (A/mm^2)

x_5 เป็นความหนาแน่นกระแสด้านปฐมภูมิ (A/mm^2)

x_6 เป็นพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก (sq.m)

การดำเนินงานของการออกแบบหาค่าที่เหมาะสมด้วยจีเนติกอัลกอริธึมโดยผ่านขั้นตอนการคัดเลือกข้อมูล, การครอสโอเวอร์, และมิวเตชัน เพื่อพัฒนาหาคำตอบที่เหมาะสม ตัวแปรที่ได้จากขั้นตอนของการคัดเลือกข้อมูลของจีเนติกอัลกอริธึม จะถูกเปรียบเทียบข้อมูลกับฐานข้อมูลของแกนเหล็กและลวดตัวนำที่มีการใช้งานในทางอุตสาหกรรมเพื่อหาโครงสร้างของหม้อแปลงจำหน่ายที่มีราคาเหมาะสม โดยมีเงื่อนไขเพื่อกำหนดให้หม้อแปลงจำหน่ายมีคุณลักษณะตามต้องการ ดังนี้ กำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลด, กำลังสูญเสียขณะมีโหลด, ค่าเปอร์เซ็นต์อิมพิแดนซ์ลัดวงจร, ความหนาแน่นของกระแส, ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก, ระยะห่างระหว่างขดลวดถึงโย๊คแกนเหล็กรวมต่ำสุด, ระห่างระหว่างขดลวดแรงสูงต่ำสุด และอุณหภูมิแตกต่างเฉลี่ยระหว่างขดลวดถึงน้ำมันสูงสุดต้องมีค่าไม่เกินกว่าค่าตามที่กำหนด

ตัวอย่างการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายให้มีราคาที่เหมาะสมโดยใช้จีเนติกอัลกอริธึม

การออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายให้มีราคาที่เหมาะสมในตัวอย่างนี้ ทำการออกแบบที่พิกัดกำลัง 315 kVA, 3 เฟส, 50 Hz, แรงดันด้านปฐมภูมิ 11,000V, แรงดันด้านทุติยภูมิ 400/230V, เปอร์เซ็นต์ของจุดต่อแยกแรงดันที่ด้านปฐมภูมิ $\pm 2 \times 2.5\%$, เปอร์เซ็นต์อิมพิแดนซ์ลัดวงจร 4.0 %, Dyn11 ระบายความร้อนด้วยน้ำมันและอากาศ ข้อกำหนดของการออกแบบคือ ค่ากำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลดต้องไม่เกิน 770 W, ค่ากำลังสูญเสียขณะมีโหลดต้องไม่เกิน 3,900 W อ้างอิงการออกแบบตามมาตราฐาน IEC 60076 ทำการออกแบบโดยมีเงื่อนไขของการออกแบบ 3 เงื่อนไข และเปรียบเทียบคุณลักษณะต่าง ๆ ของผลการออกแบบด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมกับผลออกแบบที่ผลิตใช้งานในทางอุตสาหกรรม

แบบที่ 1 เป็นการออกแบบด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมโดยไม่พิจารณาผลของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในขดลวด ขนาดของร่องน้ำมันเพื่อระบายความร้อนภายในขดลวดกำหนดตามผลการออกแบบทางอุตสาหกรรม, ชั้นแกนเหล็ก 7 ชั้นแกน และความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด 1.75 T

แบบที่ 2 เป็นการออกแบบด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมโดยพิจารณาร่องน้ำมันระบายความร้อนภายในขดลวดตามความเหมาะสมของอุณหภูมิแตกต่างระหว่างขดลวดกับน้ำมัน กำหนดให้อุณหภูมิแตกต่างระหว่างขดลวดกับน้ำมันสูงสุด 19 $^{\circ}$C, ชั้นแกนเหล็ก 7 ชั้นแกน และความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด 1.75 T

แบบที่ 3 เป็นการออกแบบด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมโดยพิจารณาร่องน้ำมันระบายความร้อนภายในขดลวดตามความเหมาะสมของอุณหภูมิแตกต่างระหว่างขดลวดกับน้ำมัน กำหนดอุณหภูมิแตกต่างระหว่างขดลวดกับน้ำมันสูงสุด 19 $^{\circ}$C, ชั้นแกนเหล็ก 9 ชั้นแกน และความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด 1.80 T

กำหนดให้ใช้เหล็กซิลิก้อนชนิด M4 [16] ความหนาของแผ่นลามิเนท 0.27 mm, k_e = 0.97, k_{wn} = 1.24, k_{cus} =1.04, k_{cup} =1.03 โครงสร้างด้านปฐมภูมิใช้ลวดกลมพันแบบครอสโอเวอร์โดยแบ่งออกเป็น 2 ตอน, ระยะห่างระหว่างชุดของขดลวด B_{sp} = 12 mm, ฉนวนกั้นขดลวดแรงสูงกับแรงต่ำ 2 mm, และด้านทุติยภูมิใช้ลวดสี่เหลี่ยมพันแบบสไพรัลมีความหนาของฉนวนหุ้ม 0.3 mm ราคาวัสดุของแกนเหล็กซิลิก้อนเฉลี่ย 68 บาท/kg และราคาเฉลี่ยของลวดทองแดง 130 บาท/kg และผลการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายที่มีราคาเหมาะสมเปรียบเทียบกับผลการออกแบบในทางอุตสาหกรรม แสดงตามตารางที่ 3.3 – 3.7 ดังนี้

ตารางที่ 3.3 การเปรียบเทียบคุณลักษณะโครงสร้างแกนเหล็กของหม้อแปลงจำหน่าย

คุณลักษณะทางโครงสร้างแกนเหล็ก	การออกแบบหม้อแปลงจำหน่าย			
	อุตสาหกรรม	แบบที่ 1	แบบที่ 2	แบบที่ 3
เส้นผ่านศูนย์กลางแกนเหล็ก ; D (mm)	170	177	177	171
พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็ก ; A_{Fe} (10^{-4} m^2) , x_6	204.53	220.37	220.37	208.83
ความยาวของขาแกนเหล็ก ; l_c (mm)	420	365	3365	375
ระยะห่างระหว่างกลางขาแกนเหล็ก ; l_{cc} (mm)	315	315	315	310
ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก ; B_m (T) , x_1	1.75	1.75	1.75	1.78
กำลังสูญเสียของแกนเหล็ก, P_m (W/kg)	1.373	1.358	1.358	1.448

ตารางที่ 3.4 การเปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงจำหน่าย

โครงสร้างขดลวดทุติยภูมิ	การออกแบบหม้อแปลงจำหน่าย			
	อุตสาหกรรม	แบบที่ 1	แบบที่ 2	แบบที่ 3
ขนาดลวดตัวนำ (mm × mm) , x_2	2.5 × 11	3.6 × 10	2.5 × 10	2.5 × 10
ตัวนำที่ใช้ขนาน (แนวรัศมี × แนวแกน)	3 × 2	2 × 2	3 × 2	3 × 2
ความหนาแน่นกระแส ; J_s (A/mm^2) , x_4	2.87	3.29	3.16	3.16
จำนวนรอบทั้งหมดต่อแกน ; N_s	29	27	27	28
จำนวนรอบต่อชั้นขดลวด ; N_{as}	14.5	13.5	13.5	14
จำนวนชั้นขดลวด ; N_{ls}	2	2	2	2
ร่องน้ำมันด้านในก่อนฉนวนรองขดลวด (mm)	2	2	2	2
ความหนาของฉนวนด้านในรองขดลวด (mm)	1	1	1	1
ฉนวนกั้นระหว่างชั้นขดลวด ; B_{ls} (mm)	0.13	0.13	0	0
ร่องน้ำมันในชุดขดลวดตามแนวแกน ; B_{ds} (mm)	3.2	3.2	3	3
ร่องน้ำมันหลังพันขดลวด (mm)	3.5	3.5	4	4

ตารางที่ 3.5 การเปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงจำหน่าย

โครงสร้างขดลวดปฐมภูมิ	การออกแบบหม้อแปลงจำหน่าย			
	อุตสาหกรรม	แบบที่ 1	แบบที่ 2	แบบที่ 3
เส้นผ่านศูนย์กลางลวดตัวนำ ; d_{cp} (mm) , x_3	∅ 2.1	∅ 2.1	∅ 2.1	∅ 2.1
ความหนาแน่นกระแส ; J_p (A/mm^2) , x_5	2.76	2.76	2.76	2.76
จำนวนรอบทั้งหมดต่อแกน	1,452	1,350	1,350	1,400
จำนวนรอบแต่ละจุดต่อแยก ; N_{tp}	35	32	32	33
จำนวนรอบต่อชั้นขดลวด ; N_{ap}	67	62	62	64
จำนวนชั้นขดลวด ; N_{lp}	11	11	11	11
ร่องน้ำมันด้านในก่อนฉนวนรองขดลวด (mm)	4	4	4	4
ความหนาของฉนวนด้านในรองขดลวด (mm)	0.5	0.5	0.5	0.5
ฉนวนกั้นระหว่างชั้นขดลวด ; B_{lp} (mm)	0.2	0.2	0.2	0.2
ร่องน้ำมันในชุดขดลวดตามแนวแกน ; B_{dp} (mm)	3.2	3.2	1.6	1.6

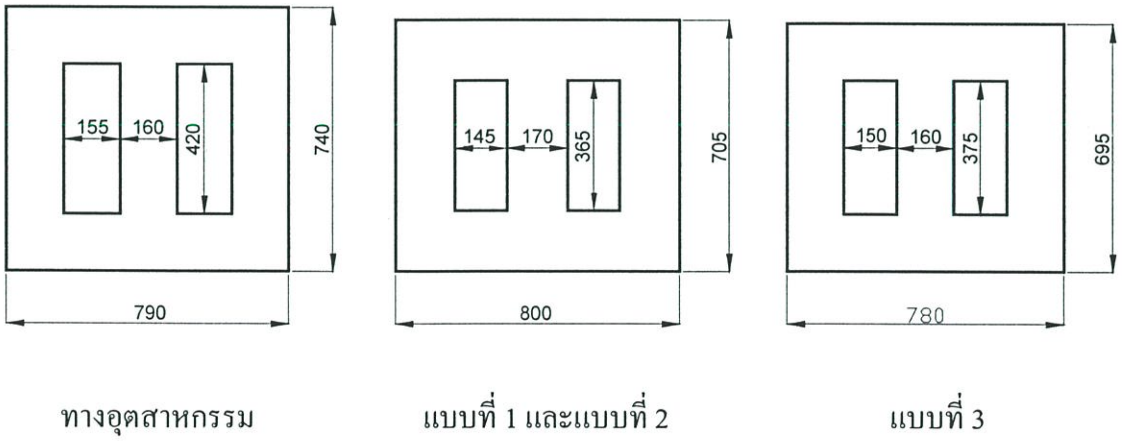
ตารางที่ 3.6 การเปรียบเทียบคุณลักษณะของหม้อแปลงจำหน่าย

คุณลักษณะของหม้อแปลงจำหน่าย	การออกแบบหม้อแปลงจำหน่าย				
	อุตสาหกรรม	ทดสอบ	แบบที่ 1	แบบที่ 2	แบบที่ 3
กำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลด ; P_{NL} (W)	756	711	764	764	770
กำลังสูญเสียจากความต้านทาน ; P_{cu} (W)	3,607	3,389	3,609	3,570	3,613
กำลังสูญเสียขณะมีโหลดอื่น ๆ ; P_s (W)	285	289	285	285	285
กำลังสูญเสียจากขดลวดรวม ; P_{LL} (W)	3,892	3,678	3,894	3,855	3,898
กำลังสูญเสียรวม (W)	4,654	4,389	4,658	4,619	4,668
% อิมพิแดนซ์ ; $\%Z$ (+/- 10%)	4.06%	3.97%	3.82%	3.94%	4.05%
อุณหภูมิแตกต่างระหว่างขดลวดกับน้ำมันด้านทุติยภูมิ; $\Delta\theta_{gs}$ (°C)	14.7	12.4	19.5	17.9	18.0
อุณหภูมิแตกต่างระหว่างขดลวดกับน้ำมันด้านปฐมภูมิ ; $\Delta\theta_{gp}$ (°C)	10.3	11.9	13.9	15.8	15.9
อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน ; $\Delta\theta_{to}$ (°C)	53.4	51.2	55*	55*	55*
อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันเฉลี่ย ; $\Delta\theta_o$ (°C)	44.5	44.0	45.8	45.8	45.8
อุณหภูมิเพิ่มขดลวดด้านทุติยภูมิ ; $\Delta\theta_{ws}$ (°C)	59.9	56.4	65.3	63.7	63.8
อุณหภูมิเพิ่มขดลวดด้านปฐมภูมิ; $\Delta\theta_{wp}$ (°C)	54.8	55.9	59.7	61.6	61.7

ตารางที่ 3.7 การเปรียบเทียบน้ำหนักและต้นทุนของหม้อแปลงจำหน่าย

ต้นทุนของหม้อแปลงจำหน่าย	**การออกแบบหม้อแปลงจำหน่าย**			
	อุตสาหกรรม	**แบบที่ 1**	**แบบที่ 2**	**แบบที่ 3**
น้ำหนักแกนเหล็กรวม ; G_{Fe} (kg)	444.4	454.3	454.3	428.9
น้ำหนักขดลวดปฐมภูมิ ; G_{cup} (kg)	115.4	107.5	108.4	110.2
น้ำหนักขดลวดทุติยภูมิ ; G_{cus} (kg)	76.7	63.7	66.9	67.3
น้ำหนักรวม (kg)	636.4	625.5	629.6	606.5
ราคาต้นทุนแกนเหล็ก ; C_{Fe} (บาท)	30,216	30,895	30,895	29,169
ราคาต้นทุนลวดทองแดง ; C_{cu} (บาท)	24,967	22,253	22,789	23,079
ราคาต้นทุนรวม ; C_{total} (บาท)	55,183	53,148	53,684	52,247
อัตราการลดลงของต้นทุน (%)	-	3.69	2.72	5.32

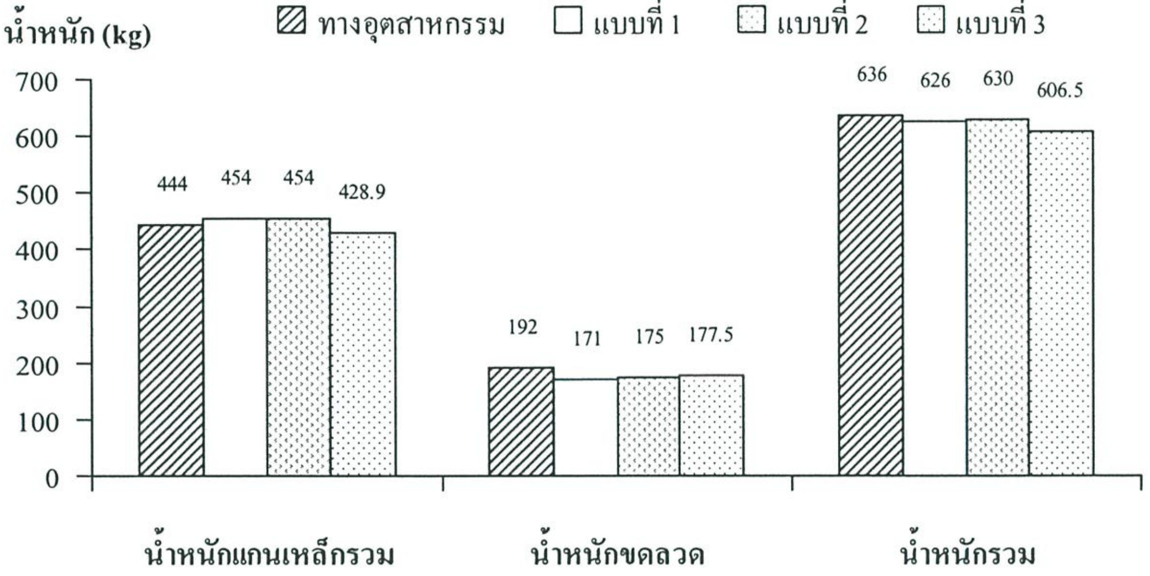
การเปรียบเทียบโครงสร้างและคุณลักษณะของแกนเหล็กหม้อแปลงจำหน่ายในตารางที่ 3.3 สามารถแสดงรูปทรงได้ดังรูปที่ 3.8 พบว่าผลการออกแบบด้วยจีเนติกอัลกอริธึมจะพยายามลดขนาดรูปทรงโดยรวมของแกนเหล็กลงจากแบบทางอุตสาหกรรม ความแตกต่างของแต่ละรูปทรงเกิดจากการปรับโครงสร้างของแกนเหล็กและขดลวดเพื่อหาราคาต้นทุนต่ำสุดภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด จะเห็นว่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กจะพยายามปรับตัวขึ้นสูงสุดเป็นการใช้ประโยชน์แกนเหล็กอย่างเต็มที่



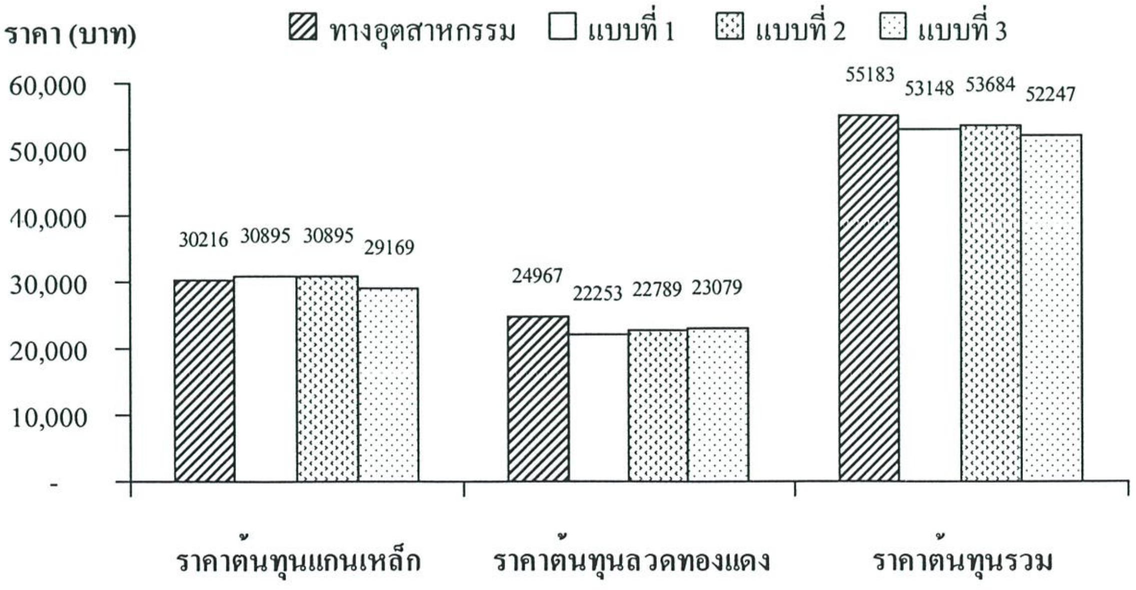
รูปที่ 3.8 การเปรียบเทียบรูปทรงของแกนเหล็ก

ในทำนองเดียวกัน โครงสร้างของขดลวดในตารางที่ 3.4 และ 3.5 พบว่าขนาดของลวดตัวนำโดยรวมจะพยายามปรับตัวลดลงให้ความหนาแน่นของกระแสปรับตัวขึ้นสูงสุด และเมื่อ

พิจารณารูปทรงของขดลวดซึ่งมีความสัมพันธ์กับพื้นที่ในช่องหน้าต่างแกนเหล็ก พบว่าจำนวนรอบของขดลวดจะแปรผันตามความสูงของขดลวด เนื่องจากคุณลักษณะของค่าเปอร์เซ็นต์อิมพิแดนซ์ลัดวงจรซึ่งจะแปรผันตามจำนวนรอบของขดลวดยกกำลังสองและแปรผกผันกับความสูงของขดลวด



รูปที่ 3.9 แผนผังเปรียบเทียบน้ำหนักจากผลการออกแบบราคาที่เหมาะสมกับทางอุตสาหกรรม



รูปที่ 3.10 แผนผังเปรียบเทียบต้นทุนจากผลการออกแบบราคาที่เหมาะสมกับทางอุตสาหกรรม

คุณลักษณะต่าง ๆ ของหม้อแปลงจำหน่ายแสดงผลเปรียบเทียบในตารางที่ 3.6 พบว่าผลการออกแบบด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมได้ค่ากำลังสูญเสีย, เปอร์เซ็นต์อิมพิแดนซ์ลัดวงจร และอุณหภูมิแตกต่างระหว่างขดลวดกับน้ำมันมีค่าอยู่ภายในย่านตามข้อกำหนด โดยอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของน้ำมันด้านบนเป็นค่าที่กำหนดขึ้นเพื่อใช้ประมาณหาอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดเฉลี่ย และมีค่าเป็น 1.2 เท่า ของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของน้ำมันเฉลี่ย แสดงแผนผังการเปรียบเทียบน้ำหนักและราคาต้นทุนได้ดัง รูปที่ 3.9 – 3.10

ผลการออกแบบที่ 1 เป็นการออกแบบโดยไม่พิจารณาผลของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในขดลวดและกำหนดขนาดของร่องน้ำมันตามการออกแบบในทางอุตสาหกรรม ผลการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายนี้ได้โครงสร้างที่เหมาะสมมีการปรับขนาดพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กเพิ่มขึ้น จำนวนรอบและพื้นที่หน้าตัดของขดลวดด้านทุติยภูมิถูกปรับตัวลดลง ซึ่งจะทำให้น้ำหนักของแกนเหล็กเพิ่มขึ้น 9.9 kg (2.2 %) และน้ำหนักของขดลวดลดลง 20.9 kg (10.9 %) ทำให้ราคาต้นทุนของแกนเหล็กเพิ่มขึ้น 679 บาท และราคาต้นทุนของขดลวดลดลง 2,714 บาท ดังนั้น ราคาต้นทุนรวมสามารถลดได้จากทางอุตสาหกรรม 2,035 บาท (3.7 %)

ผลการออกแบบที่ 2 เป็นการออกแบบโดยทำการพิจารณาอุณหภูมิแตกต่างระหว่างขดลวดกับน้ำมัน เพื่อกำหนดขนาดร่องน้ำมันระบายความร้อนให้มีความเหมาะสมกับการระบายความร้อนภายในขดลวด และกำหนดให้อุณหภูมิแตกต่างระหว่างขดลวดกับน้ำมันสูงสุด 19 °C ผลการออกแบบพบว่าขนาดพื้นที่หน้าของตัดแกนเหล็กถูกปรับตัวขึ้น จำนวนรอบของขดลวดลดลง มีลักษณะรูปทรงของแกนเหล็กเหมือนกับแบบที่ 1 โดยทำการเพิ่มพื้นที่ระบายความร้อนในขดลวดทุติยภูมิ ซึ่งจะทำให้น้ำหนักของแกนเหล็กเพิ่มขึ้น 9.9 kg (2.2 %) และน้ำหนักของขดลวดลดลง 16.8 kg (8.7 %) ทำให้ราคาต้นทุนของแกนเหล็กเพิ่มขึ้น 679 บาท และราคาต้นทุนของขดลวดลดลง 2,178 บาท ดังนั้นราคาต้นทุนรวมสามารถลดได้จากทางอุตสาหกรรม 1,499 บาท (2.7 %)

ผลการออกแบบที่ 3 เป็นการออกแบบโดยทำการพิจารณาอุณหภูมิแตกต่างระหว่างขดลวดกับน้ำมัน เพื่อกำหนดขนาดร่องน้ำมันระบายความร้อนภายในขดลวด โดยกำหนดให้อุณหภูมิแตกต่างระหว่างขดลวดกับน้ำมันสูงสุด 19 °C ชั้นแกนเหล็ก 9 ชั้นแกน และความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุดกำหนดใช้งานที่ 1.8 T จากผลการออกแบบพบว่าขนาดพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กปรับตัวลดลง และปรับจำนวนรอบของขดลวดเพิ่มขึ้น ทำให้รูปทรงของแกนเหล็กมีลักษณะเล็กลง แสดงรูปทรงของแกนเหล็กดังรูปที่ 3.8 น้ำหนักของแกนเหล็กและขดลวดปรับตัวลดลง 15.5 kg (3.5 %) และ 14.6 kg (7.6 %) ตามลำดับ ซึ่งจะทำให้ราคาต้นทุนของแกนเหล็กและขดลวดปรับลดลง 1,047 บาท และ 1,888 บาท ตามลำดับ ดังนั้นราคาต้นทุนรวมสามารถลดได้จากทางอุตสาหกรรม 2,936 บาท (5.3 %)

จากผลการออกการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายด้วยจีเนติกอัลกอริธึมทั้ง 3 แบบ จะพบว่าโครงสร้างของหม้อแปลงจำหน่ายจะถูกปรับให้เหมาะสมกับวัสดุที่มีใช้งาน เพื่อหาราคาต้นทุนต่ำสุดและอยู่ภายใต้เงื่อนไขตามที่กำหนด ในการออกแบบที่ 1 เป็นการออกแบบที่ไม่พิจารณาผลของอุณหภูมิแต่จะเห็นว่าผลของอุณหภูมิแตกต่างระหว่างขดลวดกับน้ำมันมีค่ามากกว่าข้อกำหนดอยู่เล็กน้อย เนื่องจากขนาดร่องน้ำมันระบายความร้อนของต้นแบบในทางอุตสาหกรรมมีขนาดกว้างมากและระบายความร้อนออกจากขดลวดได้ดีดังจะเห็นจากผลการทดสอบ ในการออกแบบที่ 2 เป็นการออกแบบโดยพิจารณาผลของร่องน้ำมันที่เหมาะสม อัตราการลดลงของต้นทุนสามารถลงได้เพียง 2.7 % ซึ่งเป็นค่าที่ไม่มากนัก เนื่องมาจากในทางอุตสาหกรรมได้มีการออกแบบและพัฒนาโดยการลองผิดลองถูกจากประสบการณ์ผู้ออกแบบจนกระทั่งได้หม้อแปลงที่มีความเหมาะสมมากขึ้น และในการออกแบบที่ 3 เป็นการออแบบโดยทำการขยายย่านของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กเป็น 1.8 T และจำนวนชั้นแกนเหล็กเป็น 9 ชั้น ทำให้อัตราการลดลงของต้นทุนสามารถลงได้ถึง 5.3 % แต่อย่างไรก็ตาม จากผลของจำนวนชั้นแกนเหล็กเพิ่มขึ้นมีการใช้ประโยชน์ภายในทรงกลมแกนเหล็กมากขึ้นเป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้ราคาลดต่ำลงดังกล่าว แต่ในทางปฏิบัติ อาจเกิดต้นทุนแฝงอยู่ในรูปของการทำงานอันเนื่องมาจากการเรียงแผ่นเหล็กที่มีความยุ่งยากและเสียเวลามากขึ้น สำหรับผลของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่สูงถึง 1.8 T เป็นค่าที่สูงมาก อาจทำให้เกิดเสียงจากการสั่นของแกนเหล็กดังเกินมาตรฐานการทดสอบ และเมื่อนำไปใช้งานที่มีแรงดันสูงเกินเข้าสู่ระบบก็จะทำให้แกนเหล็กของหม้อแปลงเกิดการอิ่มตัวง่ายจึงไม่เหมาะสมกับการนำมาใช้งานมากนัก เมื่อพิจารณารูปทรงจากผลการออกแบบทั้ง 3 แบบ จะเห็นว่ารูปทรงโดยรวมมีขนาดลดลงดังนั้นเมื่อพิจารณาขนาดตัวถังหม้อแปลงจำหน่ายก็จะมีขนาดที่ลดลงตามทำให้ปริมาณการใช้น้ำมันหม้อแปลงลดลง เมื่อกำหนดให้ส่วนระบายความร้อนมีขนาดเท่าเดิม จากผลของกำลังสูญเสียภายในหม้อแปลงเท่าเดิม จะทำให้หม้อแปลงมีราคาต้นทุนที่ลดลงได้อีก จากผลของปริมาณน้ำมันหม้อแปลงที่ลดลง

บทที่ 4
ผลการออกแบบหม้อแปลงจำหน่าย

4.1 บทนำ

การออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายเพื่อทำการสร้างและทดสอบในโครงงานนี้เป็นหม้อแปลงจำหน่ายชนิดน้ำมัน 3 เฟส, 50 Hz, พิกัดกำลัง 315 kVA, แรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ 22000 V, แรงดันไฟฟ้าด้านทุติยภูมิ 400/230 V, Dyn11, และมีค่าเปอร์เซ็นต์อิมพิแดนซ์ลัดวงจร 4 % ตามข้อกำหนดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (อ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 60076) ทำการออกแบบด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมโดยใช้จีเนติกอัลกอริธึม โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาราคาต้นทุนต่ำสุดภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด โปรแกรมที่ใช้ออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายถูกพัฒนาขึ้นจากภาษา Visual Basic ซึ่งเลือกใช้ข้อมูลของวัตถุดิบที่มีใช้ในทางอุตสาหกรรม เพื่อความคล่องตัวในการผลิต และผลการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายให้มีราคาที่เหมาะสมนี้ได้นำมาสร้างและทดสอบเพื่อหาคุณลักษณะต่าง ๆ โดยจะทำการเปรียบเทียบผลการออกแบบกับผลการทดสอบที่เกิดขึ้น

4.2 โปรแกรมการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายให้มีราคาที่เหมาะสม

โปรแกรมการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายให้มีราคาที่เหมาะสมที่พัฒนาขึ้นนี้ใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมในวิธีจีเนติกอัลกอริธึม ช่วยในการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายชนิดน้ำมัน ซึ่งมีพิกัดกำลังตั้งแต่ 50 - 1,000 kVA, 3 เฟส, 50 Hz, แรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ 11,000 - 33,000 V, แรงดันไฟฟ้าด้านทุติยภูมิ 380 - 450 V, Dyn11 โครงสร้างด้านปฐมภูมิใช้ลวดกลมพันแบบครอสโอเวอร์ และด้านทุติยภูมิใช้ลวดสี่เหลี่ยมพันแบบสไพรัล การใช้งานโปรแกรมการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายให้มีราคาที่เหมาะสมต้องมีการกำหนดข้อมูลดังนี้

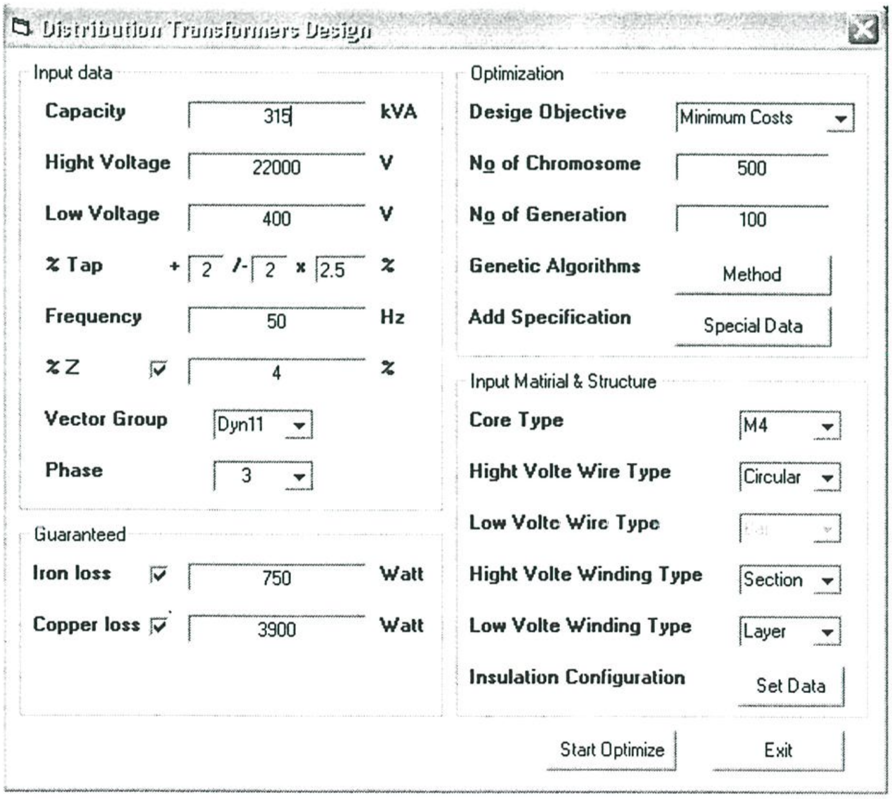
1. กำหนดความต้องการสำหรับการออกแบบ เป็นการป้อนพิกัดของหม้อแปลงจำหน่ายที่ต้องการออกแบบให้กับโปรแกรมได้แก่ พิกัดกำลัง, แรงดันด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ, เปอร์เซ็นต์ของจุดต่อแยกแรงดันด้านปฐมภูมิ, จำนวนเฟส, ความถี่ระบบไฟฟ้า และกลุ่มเวกเตอร์

2. กำหนดคุณลักษณะทางโครงสร้าง เป็นการป้อนคุณลักษณะทางโครงสร้างให้โปรแกรมได้แก่ ชนิดของแกนเหล็ก, จำนวนชั้นของแกนเหล็ก, ชนิดของลวดด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิ, ชนิดของขดลวดด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิ, ระยะห่างระหว่างขดลวดถึงโย๊ครวมน้อยสุด, ระยะห่างระหว่างขดแรงสูงน้อยสุด, ระยะการฉนวนในส่วนต่าง ๆ และกำลังสูญเสียขณะมีโหลดอื่น ๆ ซึ่งการกำหนดข้อมูลในหัวข้อนี้ต้องอาศัยความรู้และประสบการณ์ของผู้ออกแบบบ้าง เพราะถ้าเลือกชนิดที่ไม่เหมาะสมกับคุณลักษณะของหม้อแปลงแล้ว จะทำให้ผลการออกแบบที่ได้รับไม่เหมาะสมกับการใช้งานจริง

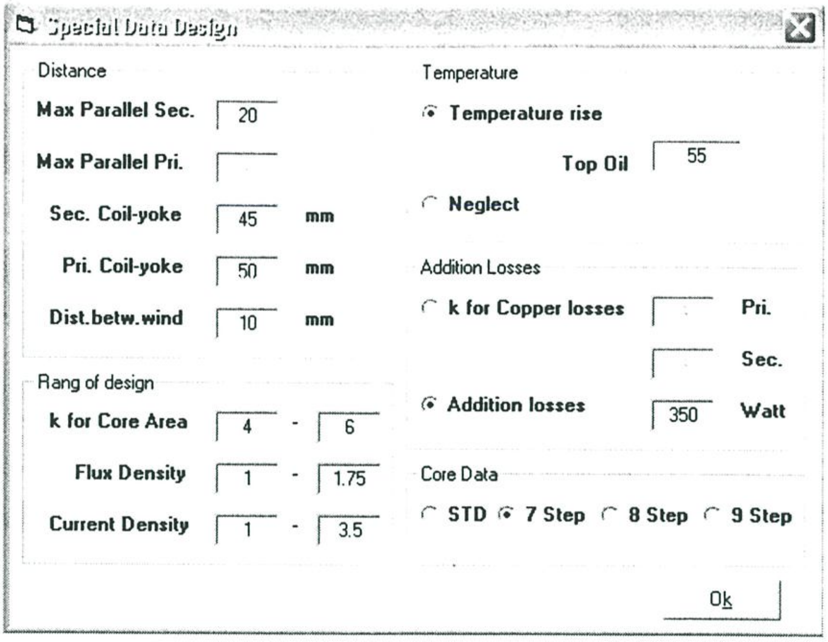
3. กำหนดย่านของตัวแปรเงื่อนไข เป็นย่านของตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบเพื่อให้ผลการออกแบบอยู่ในย่านตามข้อกำหนดได้แก่ สัมประสิทธิ์ประกอบแกนเหล็ก, ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก, ความหนาแน่นของกระแส, และการพิจารณาผลของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น, สำหรับข้อกำหนดของค่ากำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลด, ค่ากำลังสูญเสียขณะมีโหลด และค่าเปอร์เซ็นต์อิมพิแดนซ์ลัดวงจร จะกำหนดหรือไม่ก็ได้ ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของการออกแบบ

4. กำหนดการดำเนินงานของจีเนติกอัลกอริธึม เป็นการกำหนดการทำงานให้กับจีเนติก ซึ่งจะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของการออกแบบ, ระยะเวลาการทำงาน และข้อมูลที่นำมาใช้เป็นฐานข้อมูล ได้แก่ เป้าหมายของการออกแบบ, จำนวนโครโมโซม, จำนวนรอบการทำงาน, วิธีการเข้ารหัส, วิธีการเลือกโครโมโซม, วิธีการครอสโอเวอร์, พิกัดการครอสโอเวอร์ และพิกัดการมิวเตชั่น

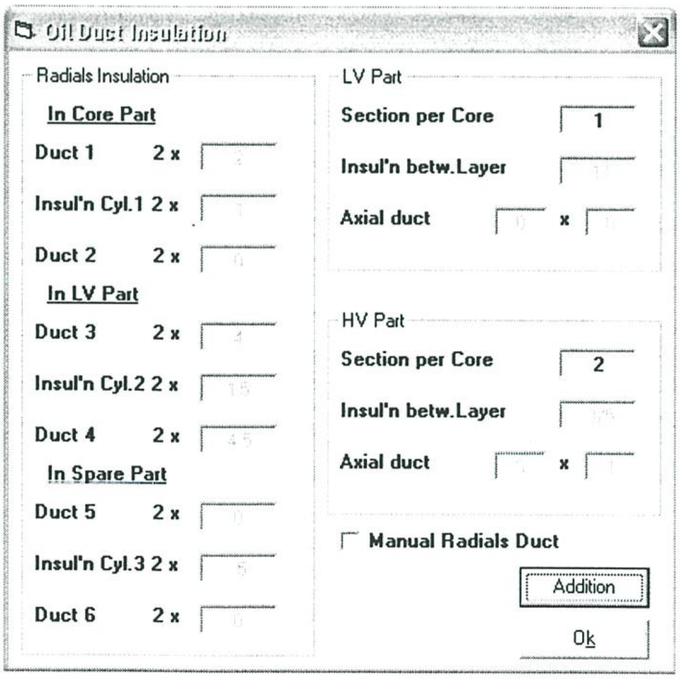
หน้าต่างของโปรแกรมสำหรับกำหนดค่าของตัวแปรต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.1 ถึง 4.5 หลังจากกำหนดค่าของตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการออกแบบแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะเข้าสู่กระบวนการหาค่าเหมาะสมเพื่อหาโครงสร้างของหม้อแปลงจำหน่ายตามต้องการ แสดงผลการออกแบบขณะทำการประมวลผลในรูปที่ 4.6 และผลการออกแบบจากโปรแกรมแสดงในรูปที่ 4.7



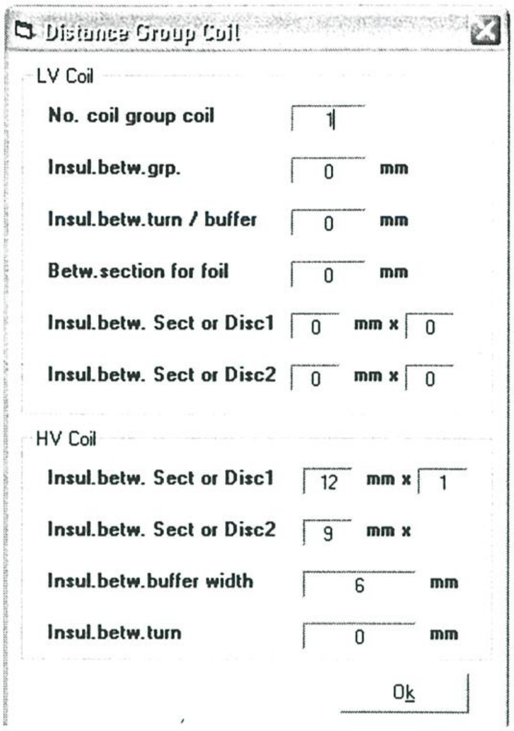
รูปที่ 4.1 หน้าต่างหลักของการออกแบบหม้อแปลงจำหน่าย



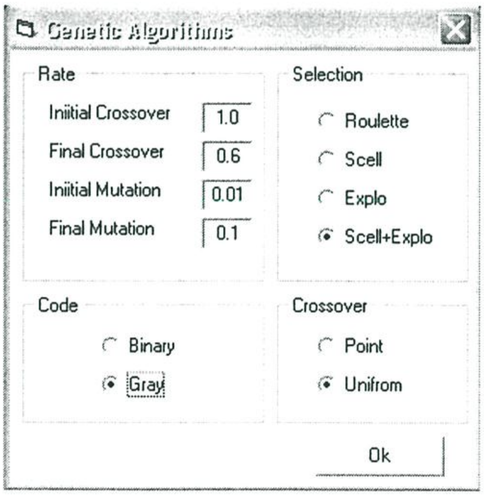
รูปที่ 4.2 หน้าต่างกำหนดขอบเขตของพารามิเตอร์



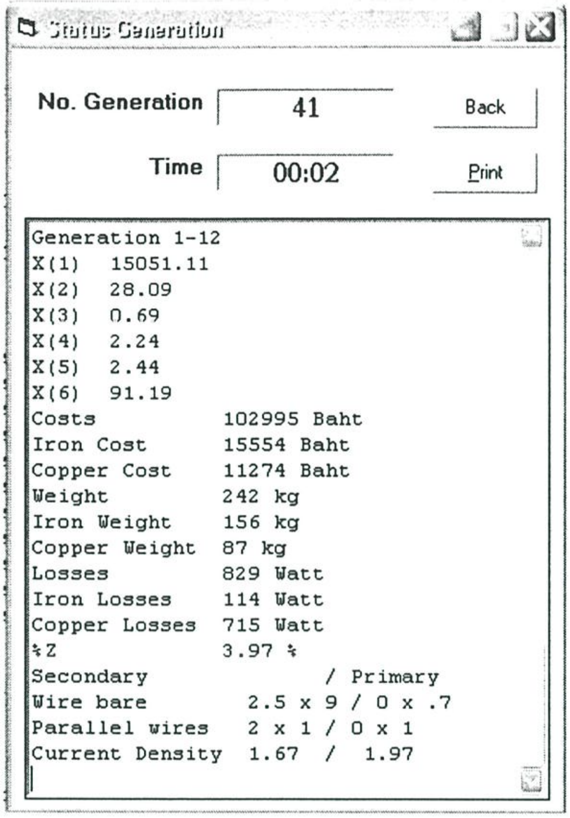
รูปที่ 4.3 หน้าต่างกำหนดขนาดฉนวนและร่องน้ำมันในแนวรัศมี



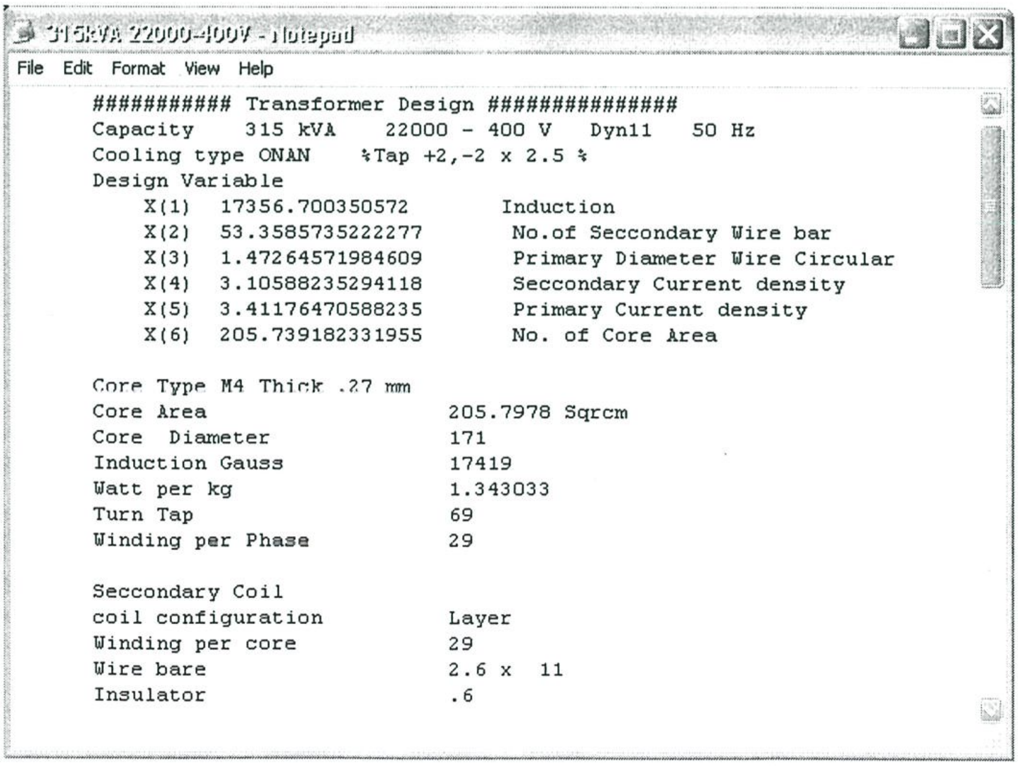
รูปที่ 4.4 หน้าต่างกำหนดขนาดฉนวนและร่องน้ำมันในขดลวด



รูปที่ 4.5 หน้าต่างกำหนดพารามิเตอร์และวิธีดำเนินงานของจีเนติกอัลกอริธึม



รูปที่ 4.6 หน้าต่างแสดงผลลัพธ์ขณะทำการประมวลผล



รูปที่ 4.7 ผลการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายโดยใช้วิธีจีเนติกอัลกอริธึม

4.3 ผลการออกแบบหม้อแปลงจำหน่าย

หม้อแปลงจำหน่ายชนิดน้ำมันที่ทำการออกแบบเพื่อสร้างและทำการทดสอบมีพิกัดกำลัง 315 kVA, 3 เฟส, 50 Hz, แรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิ 22,000 V และ 400/230 V ตามลำดับ, เปอร์เซ็นต์ของจุดต่อแยกแรงดันที่ด้านปฐมภูมิ ± 2 × 2.5 %, Dyn11, ตามข้อกำหนดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค อ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 60076

4.3.1 ข้อกำหนดของการออกแบบหม้อแปลงจำหน่าย

กำหนดให้ใช้แกนเหล็กซิลิก้อนชนิด M4 ที่ความหนาของแผ่นลามิเนท 0.27 mm จำนวนชั้นแกนเหล็กสูงสุดที่ใช้ออกแบบ 7 ชั้นแกน มีเป้าหมายในการออกแบบที่ราคาต้นทุนของแกนเหล็กและขดลวดรวมต่ำ และทำการออกแบบโดยใช้ตัวแปร 6 ตัวแปร ซึ่งจะพิจารณาผลของอุณหภูมิภายในขดลวด มีเงื่อนไขการออกแบบของหม้อแปลงจำหน่ายแสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 เงื่อนไขการออกแบบหม้อแปลงจำหน่าย

เปอร์เซ็นต์อิมพิแดนซ์ลัดวงจร (%)	4.0
กำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลดสูงสุด (W)	750
กำลังสูญเสียขณะมีโหลดสูงสุด (W)	3,900
อุณหภูมิแตกต่างระหว่างขดลวดและน้ำมันสูงสุด (°C)	19

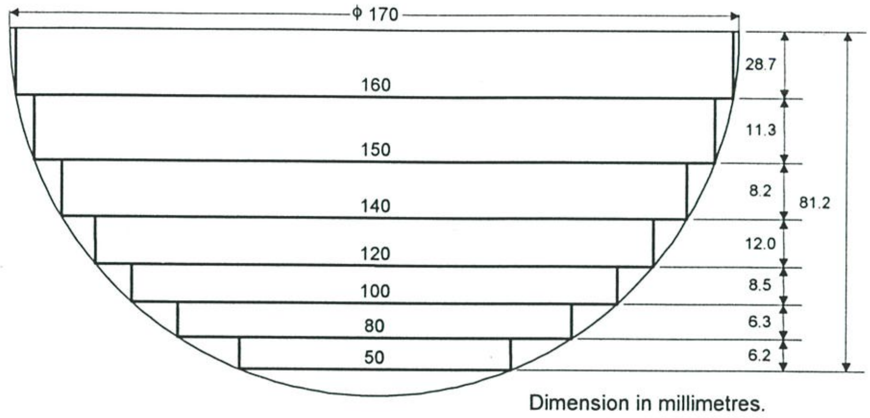
โครงสร้างด้านปฐมภูมิใช้ลวดกลมพันแบบครอสโอเวอร์แบ่งออกเป็น 2 ตอน ระยะห่างระหว่างตอน 15 mm ด้านทุติยภูมิใช้ลวดสี่เหลี่ยมพันแบบสไพรัล ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กใช้งานไม่เกิน 1.75 T ความหนาแน่นของกระแสใช้งานไม่เกิน 3.5 A/mm^2 ข้อกำหนดที่ใช้เป็นข้อมูลเริ่มต้นให้กับโปรแกรมก่อนดำเนินงานแสดงตามตารางที่ 4.2 โดยที่ระยะห่างต่ำสุดที่กำหนดขึ้นเป็นค่าที่กำหนดใช้งานในทางอุตสาหกรรม

ตารางที่ 4.2 เงื่อนไขกำหนดลักษณะทางโครงสร้างของการออกแบบหม้อแปลงจำหน่าย

ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (T)	1.0 – 1.75
ความหนาแน่นของกระแส (A/mm^2)	1.0 – 3.5
สัมประสิทธิ์ประกอบแกนเหล็ก (10^2mm^{2}J$^{-1/2}$)	4.0 – 6.0
กำลังสูญเสียจากการเหนี่ยวนำ (W)	350
ระยะห่างรวมระหว่างขดลวดปฐมภูมิถึงโย๊คแกนเหล็กต่ำสุด (mm)	55
ระยะห่างรวมระหว่างขดลวดทุติยภูมิถึงโย๊คแกนเหล็กต่ำสุด (mm)	30
ความสูงทางไฟฟ้าของขดลวดด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิแตกต่างมากสุด (mm)	10
ระยะห่างระหว่างขดลวดปฐมภูมิต่ำสุด (mm)	10

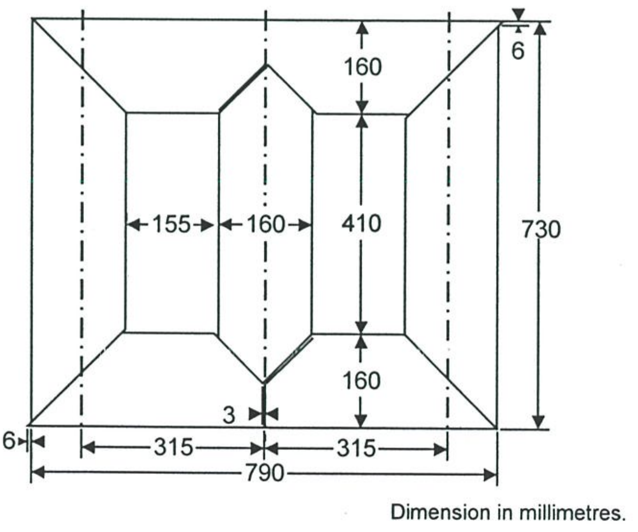
4.3.2 ผลการออกแบบแกนเหล็กหม้อแปลงจำหน่าย

ผลการออกแบบได้พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กมีขนาด A_{Fe} = 204.525 × 10^{-4} sq.m เส้นผ่านศูนย์กลางของแกนเหล็ก D = 170 mm มี 7 ชั้นแกนเหล็กแสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 การจัดวางลำดับชั้นในพื้นที่ทรงกลมของแกนเหล็ก

ความยาวของขาแกนเหล็กด้านในของช่องหน้าต่าง l_c = 410 mm ระยะห่างระหว่างกลางขาแกนเหล็ก l_{cc} = 315 mm และกำหนดระยะซ้อนทับของแผ่นลามิเนท z = 6 mm แสดงรูปทรงของแกนเหล็กดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 รูปทรงของแกนเหล็ก

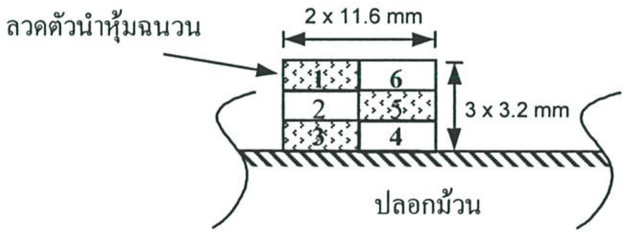
ตารางที่ 4.3 แสดงขนาดและจำนวนแผ่นลามิเนทที่ใช้ประกอบเป็นแกนเหล็ก แสดงรูปอ้างอิงได้ดังรูปที่ 2.16 ถึงรูปที่ 2.18

ตารางที่ 4.3 ขนาดการตัดแผ่นลามิเนทของแกนเหล็ก

ลำดับชั้นแกนเหล็ก i	ความกว้างแผ่นลามิเนท $l(i)$; (mm)	แกนเหล็กริม		แกนเหล็กกลาง		แกนเหล็กบนและล่าง	
		จำนวนแผ่น	$h(i)$; (mm)	จำนวนแผ่น	$c(i)$; (mm)	จำนวนแผ่น	$f(i)$; (mm)
1	160	432	724	216	730	432	796
2	150	168	714	84	720	168	786
3	140	120	704	60	710	120	776
4	120	176	684	88	690	176	756
5	100	128	664	64	670	128	736
6	80	96	644	48	650	96	716
7	50	96	614	48	620	96	686

4.3.3 ผลการออกแบบขดลวดด้านทุติยภูมิ

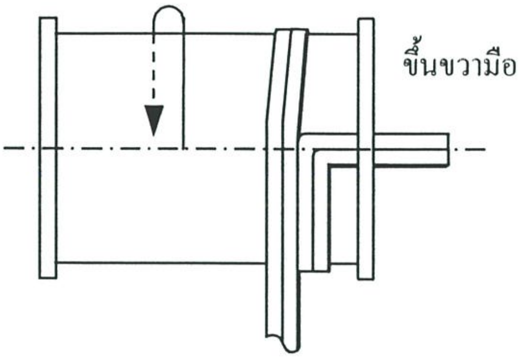
ขดลวดด้านทุติยภูมิ เลือกใช้วิธีการพันแบบชั้นชนิดสไปรัล จำนวนรอบของขดลวดที่ด้านทุติยภูมิ $N_s = 29$ รอบ พันยาวตลอด $N_{ls} = 2$ ชั้น ๆ ละ $N_{as} = 14.5$ รอบ ใช้ลวดตัวนำสี่เหลี่ยมขนาด 2.6 × 11 mm มีฉนวนกระดาษหุ้มลวดตัวนำหนา 0.3 mm จำนวน 6 เส้นวางขนานกันในแนวรัศมี $P_{rs} = 3$ เส้นและในแนวแกน $P_{as} = 2$ เส้น แสดงดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ลักษณะการเรียงลวดตัวนำขณะทำการพัน

แบบไม้ใช้พันขดลวดมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 174 mm กระดาษทำปลอกมีความหนา 1 mm ใช้กระดาษทำฉนวนที่หัวและท้ายขดลวดมีความหนา 8 mm และระหว่างชั้นที่ 1 และ 2 มีร่องน้ำมันกว้าง 3 mm

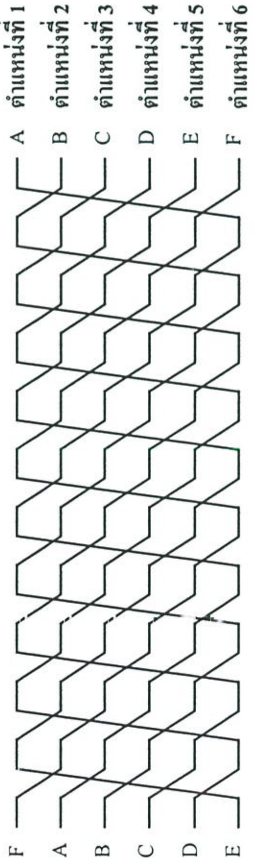
กำหนดให้ลักษณะการพันขดลวดขึ้นด้านขวามือแสดงดังรูปที่ 4.11 การต่อสายลีดของจุดต่อรวมสายแรงดันศูนย์จะอยู่ที่เส้นเริ่มต้นหรืออยู่ด้านในขดลวด สะดวกต่อการเดินสายลีด



รูปที่ 4.11 การขึ้นต้นสายของการพันขดลวดทุติยภูมิ

การบิดลวดตัวนำจะทำการบิดลวด 2 รอบการพัน เป็นการย้ายลวดตัวนำให้ไปอยู่ในทุกตำแหน่งของการจัดเรียงลวดตัวนำ ตามรูปที่ 4.12

ครั้งที่	รอบที่
1	2.4
2	4.8
3	7.3
4	9.7
5	12.1
6	14.5
7	16.9
8	19.3
9	21.8
10	24.2
11	26.6



รูปที่ 4.12 การบิดลวดด้านทุติยภูมิ

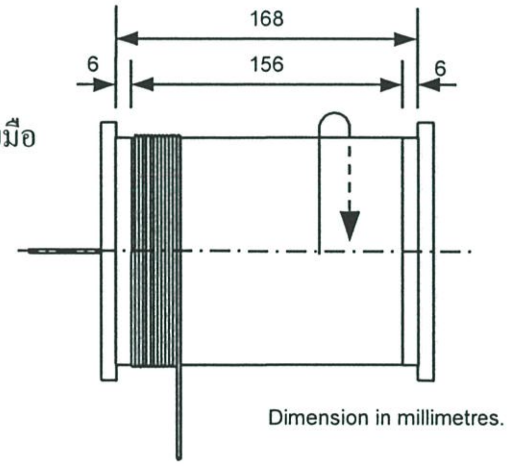
หลังจากพันขดลวดเสร็จจะใส่ร่องน้ำมันขนาด 4 mm และพันด้วยกระดาษหนา 2 mm ความยาวของขดลวดรวมฉนวนหัวและท้าย l_{ws} = 378 mm หลังจากพันเสร็จมีเส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอกของขดลวดด้านทุติยภูมิ 234 mm

4.3.4 ผลการออกแบบขดลวดด้านปฐมภูมิ

ขดลวดด้านปฐมภูมิใช้วิธีการพันแบบชั้นชนิดครอสโอเวอร์ ลวดตัวนำกลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 mm และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดตัวนำกลมรวมฉนวนหุ้ม d_{cp} = 1.583 mm จำนวน P_{ap} = 1 เส้น จำนวนรอบของขดลวดด้านปฐมภูมิทั้งหมด 2,900 รอบ จำนวนรอบของจุดต่อแยกแรงดัน N_{tp} = 69 รอบ จำนวนตอนของขดลวดด้านปฐมภูมิ S_p = 2 ตอน

การออกแบบขดลวดในตอนมีจำนวนรอบของขดลวดต่อตอนเท่ากับ 1450 รอบ แบบไม้ใช้พันขดลวดมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 242 mm กระดาษทำปลอกมีความหนา 0.5 mm และกระดาษฉนวนที่ส่วนหัวและท้ายขดลวดมีความหนา B_{tp} = 6 mm

ชั้นที่	รอบ
1	97
2	194
3	291
4	388
5	485
6	582
7	679
8	776
9	873
10	970
11	1067
12	1164
13	1261
14	1358
15	1450



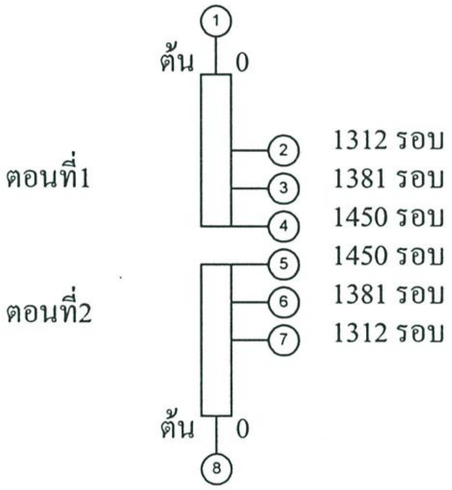
ใส่ร่องน้ำมันระหว่างชั้นที่ 7 กับ 8 ขนาด 1.6 mm

รูปที่ 4.13 การพันขดลวดปฐมภูมิในตอน

กำหนดให้ลักษณะการพันขดลวดขึ้นด้านซ้ายมือ พันตลอดชั้นละ N_{ap} = 97 รอบ จำนวน N_{lp} = 15 ชั้น มีกระดาษกั้นระหว่างชั้น 0.18 mm แผ่นครึ่งดังรูปที่ 2.23 ออกจุดต่อแยกแรงดันของขดลวดในรอบที่ 0 – 1312 – 1381 – 1450 รอบ มีร่องน้ำมันจำนวน N_{dp} = 1 ร่อง ขนาดความกว้าง B_{dp} = 1.6 mm อยู่ระหว่างชั้นที่ 7 และ 8 ของขดลวด แสดงรูปแบบการพันขดลวดดังรูปที่ 4.13

ฉนวนกั้นระหว่างตอนมีขนาด B_{sp} = 15 mm ความยาวของขดลวดปฐมภูมิ l_{wp} = 351 mm ความหนาของชุดขดลวดด้านปฐมภูมิ T_{wp} = 30 mm หลังจากพันเสร็จขดลวดด้านปฐมภูมิมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 303 mm การกำหนดตำแหน่งของจุดต่อแยกแรงดันแสดงดังรูปที่ 4.14

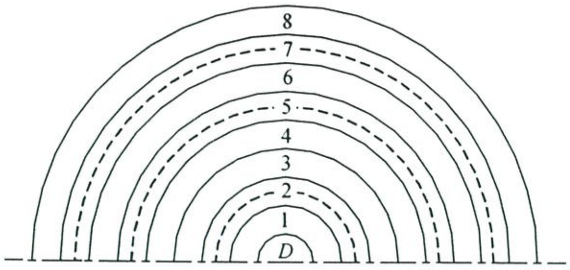
Tap	Connection	Voltage
1	5 – 4	23,100
2	5 – 3	22,550
3	6 – 3	22,000
4	6 – 2	21,450
5	7 – 2	20,900



รูปที่ 4.14 ตำแหน่งจุดต่อแยกแรงดันด้านปฐมภูมิ

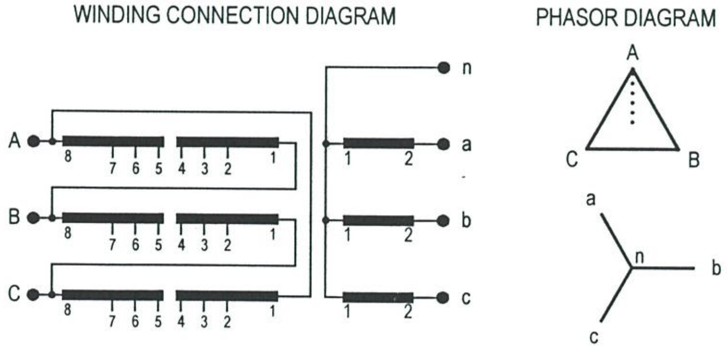
4.3.5 ผลการออกแบบฉนวนและการเดินสาย

การออกแบบฉนวนและระยะห่างในแนวรัศมีสามารถแสดงระยะห่างของร่องน้ำมันและความหนาของฉนวนกั้นระหว่างขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิได้ดังรูปที่ 4.15 และการเดินสายของชุดขดลวดทางด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิตามกลุ่มเวกเตอร์ Dyn11 ได้ดังรูปที่ 4.16



ลำดับการจัดเรียงขดลวด ร่องน้ำมัน และฉนวน	ความหนา	เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก
เส้นผ่าศูนย์กลางแกนเหล็ก *D*		170 mm
1. ร่องน้ำมันด้านในก่อนฉนวนรองขดลวดด้านทุติยภูมิ	2.0 mm	174 mm
2. ฉนวนกระดาษด้านในรองขดลวดด้านทุติยภูมิ	1.0 mm	176 mm
3. ความหนาของขดลวดด้านทุติยภูมิ	23.0 mm	222 mm
เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยที่ขดลวดด้านทุติยภูมิ		199 mm
4. ร่องน้ำมันหลังพันขดลวดด้านทุติยภูมิ	4.0 mm	230 mm
5. ฉนวนกระดาษกั้นขดลวดปฐมภูมิกับขดลวดทุติยภูมิ	2.0 mm	234 mm
6. ร่องน้ำมันด้านในก่อนฉนวนรองขดลวดด้านปฐมภูมิ	4.0 mm	242 mm
7. ฉนวนกระดาษด้านในรองขดลวดด้านปฐมภูมิ	0.5 mm	243 mm
8. ความหนาของขดลวดด้านปฐมภูมิ	30.0 mm	303 mm
เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยที่ขดลวดด้านปฐมภูมิ		273 mm
ระยะห่างระหว่างชุดขดลวดแรงสูง	10.0 mm	

รูปที่ 4.15 ขนาดร่องน้ำมันและฉนวนกระดาษในแนวรัศมี



รูปที่ 4.16 การเดินสายของขดลวดกลุ่มเวกเตอร์ Dyn11

4.3.6 ผลการออกแบบด้านคุณลักษณะของหม้อแปลงจำหน่าย

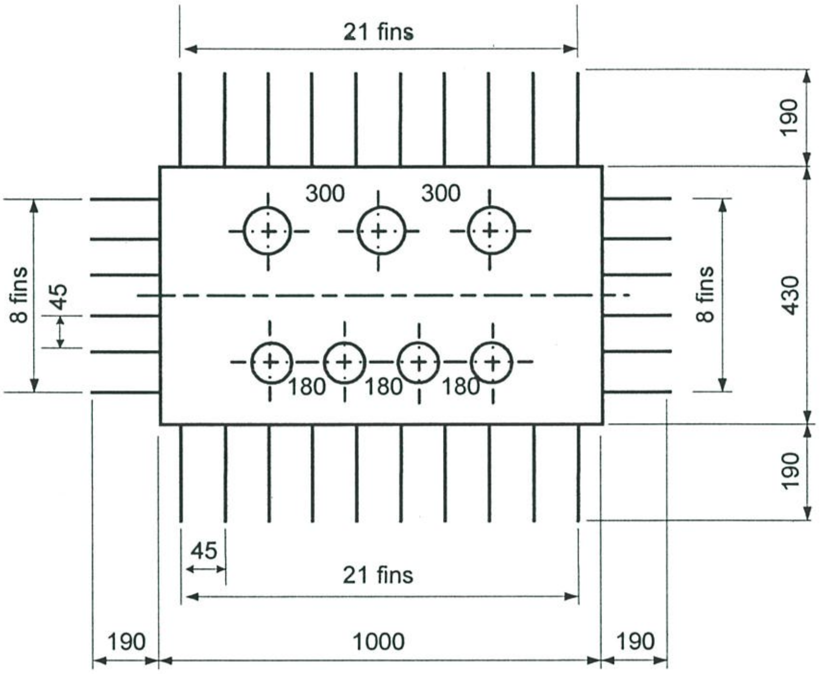
จากผลการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายด้วยจีเนติกอัลกอริธึม ได้คุณลักษณะของหม้อแปลงจำหน่ายต่างๆ แสดงข้อมูลในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 คุณลักษณะของผลการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายโดยใช้จีเนติกอัลกอริธึม

คุณลักษณะของหม้อแปลงจำหน่าย	**ผลการออกแบบหม้อแปลงจำหน่าย**
ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (T)	1.75
กำลังสูญเสียของแกนเหล็ก (W/kg)	1.373
ความหนาแน่นกระแสด้านทุติยภูมิ (A/mm^2)	2.76
ความหนาแน่นกระแสด้านปฐมภูมิ (A/mm^2)	2.70
น้ำหนักแกนเหล็กรวม (kg)	439.7
น้ำหนักขดลวดแรงต่ำ (kg)	79.7
น้ำหนักขดลวดแรงสูง (kg)	117.4
น้ำหนักรวม (kg)	636.8
กำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลด (W)	748
กำลังสูญเสียจากขดลวดทุติยภูมิที่ 75 $^{\circ}$C (W)	1,503
กำลังสูญเสียจากขดลวดปฐมภูมิที่ 75 $^{\circ}$C (W)	1,997
กำลังสูญเสียขณะมีโหลดอื่น ๆ ที่ 75 $^{\circ}$C (W)	350
กำลังสูญเสียขณะมีโหลดที่ 75 $^{\circ}$C (W)	3,850
กำลังสูญเสียรวม (W)	4,598
เปอร์เซ็นต์อิมพิแดนซ์ (+/- 10%)	3.995
อุณหภูมิแตกต่างระหว่างขดลวดทุติยภูมิกับน้ำมัน ($^{\circ}$C)	16.2
อุณหภูมิแตกต่างระหว่างขดลวดปฐมภูมิกับน้ำมัน ($^{\circ}$C)	15.2
ราคาต้นทุนแกนเหล็กที่ 68 บาท/kg (บาท)	29,897
ราคาต้นทุนลวดทองแดงที่ 130 บาท/kg (บาท)	25,623
ราคาต้นทุนรวม (บาท)	55,519

4.3.7 ผลการออกแบบตัวถังและครีบระบายความร้อนของหม้อแปลงจำหน่าย

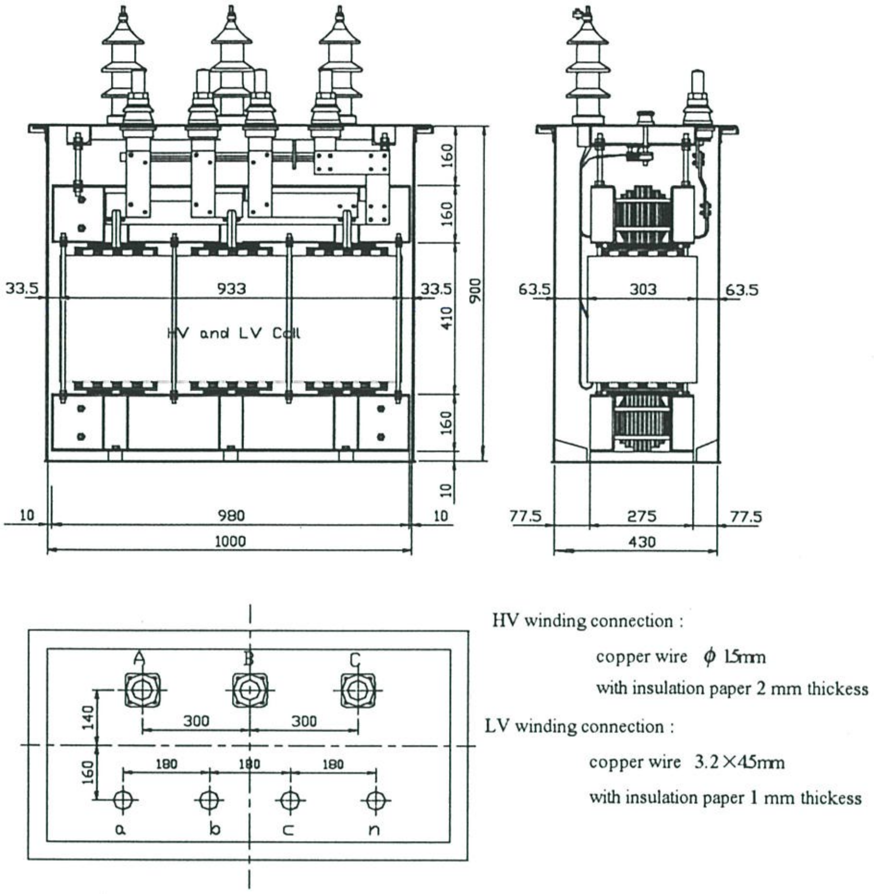
ตัวถังและครีบระบายความร้อนของหม้อแปลงจำหน่ายที่ใช้สำหรับการออกแบบนี้เป็นชนิดปิดน้ำมันไม่สัมผัสกับอากาศภายนอก (hermetically sealed) ตัวถังแบบลอนลูกฟูกมีจำนวนครีบและรูปทรงแสดงดังรูปที่ 4.17



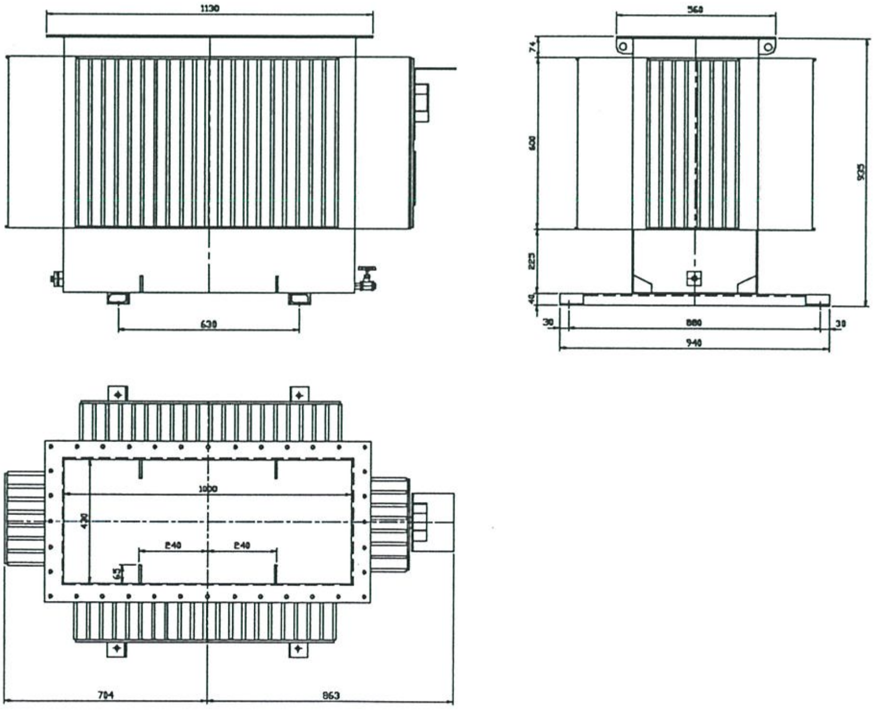
ความสูงถังหม้อแปลง	900	mm
ความสูงต้นครีบถึงฝาถังหม้อแปลง	80	mm
ความสูงครีบ	600	mm
ความสูงฐานถึงท้ายครีบ	220	mm
ความหนาของครีบ	1.5	mm
น้ำมันรวมในถังหม้อแปลง	339	liters

รูปที่ 4.17 รูปทรงของถังหม้อแปลงจำหน่าย

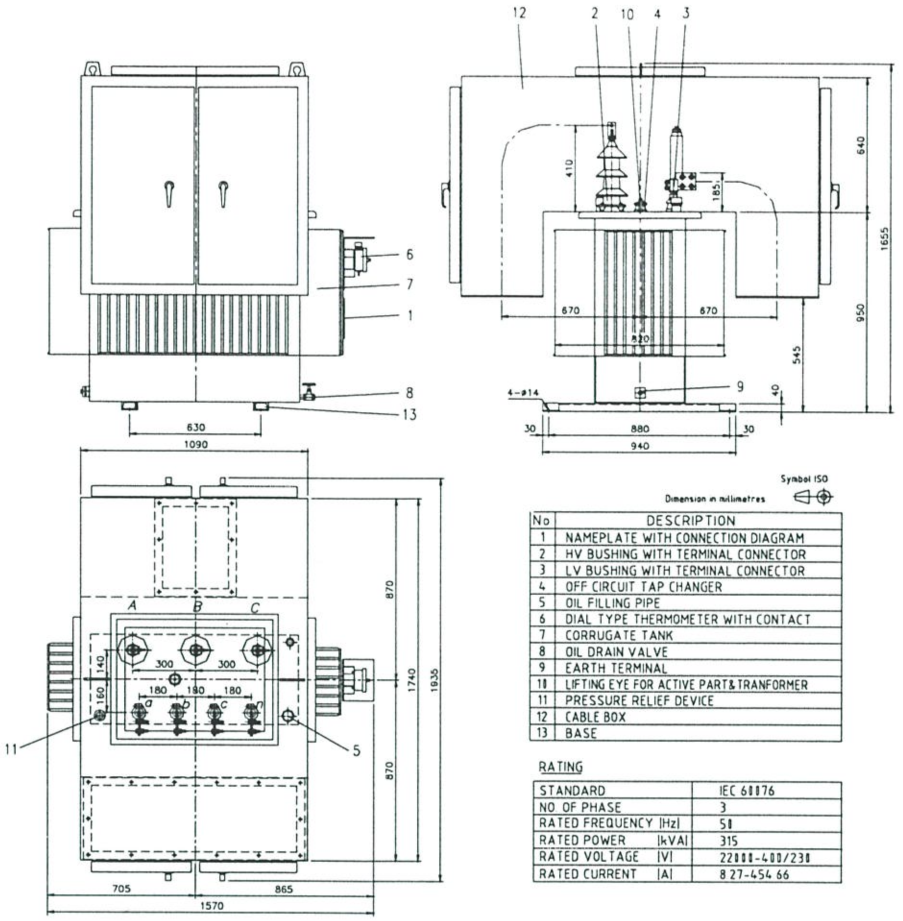
การตั้งระยะภายในตัวถังหม้อแปลง, รูปทรงของถังหม้อแปลง, และรูปทรงภายนอกหลังจากประกอบเสร็จ แสดงดังรูปที่ 4.18, 4.19, และรูปที่ 4.20 ตามลำดับ



รูปที่ 4.18 โครงสร้างการตั้งระยะภายในถังหม้อแปลง



รูปที่ 4.19 โครงสร้างตัวถังหม้อแปลงจำหน่าย

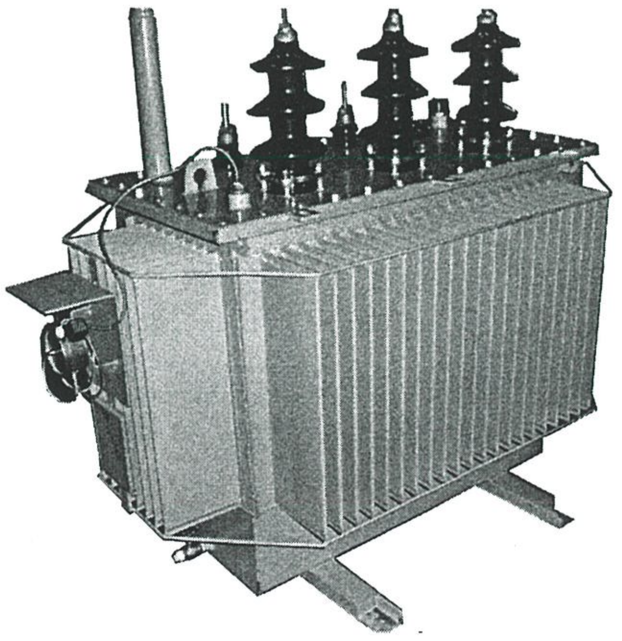


No	DESCRIPTION
1	NAMEPLATE WITH CONNECTION DIAGRAM
2	HV BUSHING WITH TERMINAL CONNECTOR
3	LV BUSHING WITH TERMINAL CONNECTOR
4	OFF CIRCUIT TAP CHANGER
5	OIL FILLING PIPE
6	DIAL TYPE THERMOMETER WITH CONTACT
7	CORRUGATE TANK
8	OIL DRAIN VALVE
9	EARTH TERMINAL
10	LIFTING EYE FOR ACTIVE PART& TRANFORMER
11	PRESSURE RELIEF DEVICE
12	CABLE BOX
13	BASE

RATING

STANDARD	IEC 60076
NO OF PHASE	3
RATED FREQUENCY [Hz]	50
RATED POWER [kVA]	315
RATED VOLTAGE [V]	22000-400/230
RATED CURRENT [A]	8.27-454.66

รูปที่ 4.20 โครงสร้างภายนอกของหม้อแปลงจำหน่าย



รูปที่ 4.21 หม้อแปลงจำหน่าย 315 kVA 3 เฟส 50 Hz 22000-400/230 V

4.4 ผลการทดสอบหม้อแปลงจำหน่าย

การออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายโดยใช้จีเนติกอัลกอริธึม ที่พิกัดกำลัง 315 kVA, 3 เฟส, 50 Hz, แรงดันด้านปฐมภูมิ 22,000 V, แรงดันด้านทุติยภูมิ 400/230 V, เปอร์เซ็นต์ของจุดต่อแยกแรงดันที่ด้านปฐมภูมิ ± 2 × 2.5 %, Dyn11 ตามข้อกำหนดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค อ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 60076 จากการออกแบบในหัวข้อที่ 4.3 ทำการสร้างจริงและทำการทดสอบโดยมีรายการดังนี้

1) การวัดความต้านทานของขดลวด (Measurement of winding resistance)
2) การวัดอัตราส่วนแรงดัน และการตรวจสอบการจัดเฟส (Measurement of voltage ratio and check of phase displacement)
3) การวัดความสูญเสียไม่มีโหลด และกระแสไม่มีโหลด (Measurement of no-load loss and current)
4) การวัดอิมพิแดนซ์ลัดวงจร และความสูญเสียมีโหลดขณะจ่ายโหลดที่พิกัด (Measurement of short-circuit impedance and load loss)
5) การทดสอบประจำไดอิเล็กตริก (Dielectric routine tests)
6) การทดสอบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น (Temperature-rise test)

4.4.1 การวัดความต้านทานของขดลวด

การวัดค่าความต้านทานของขดลวด ทำการวัดด้วยบริดจ์ที่มีความแม่นยำสูง เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดทองแดง และใช้พิจารณาอุณหภูมิของขดลวดในการทดสอบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของหม้อแปลง การวัดค่าความต้านทานจะต้องระบุอุณหภูมิของขดลวดขณะวัด ถ้าอุณหภูมิของบรรยากาศโดยรอบหม้อแปลงมีค่าคงที่เป็นเวลานาน ประมาณได้ว่าอุณหภูมิของขดลวดมีค่าเท่ากับอุณหภูมิของบรรยากาศโดยรอบหม้อแปลง

ค่าความต้านทานที่วัดได้จะแปลงค่าความต้านทานไปที่อุณหภูมิอ้างอิง 75 °C [9-10] สำหรับขดลวดทองแดงคำนวณได้ ตามสมการดังนี้

$$R_r = R_a \frac{235+\theta_r}{235+\theta_a} \tag{4.1}$$

เมื่อ R_a เป็นความต้านทานของขดลวดที่อุณหภูมิ θ_a ในสภาวะคงตัว

R_r เป็นความต้านทานของขดลวดที่อุณหภูมิอ้างอิง θ_r (75 °C)

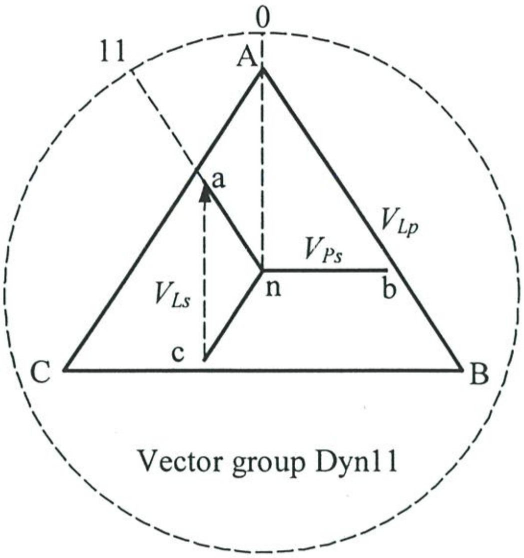
ในการวัดค่าความต้านทานจะวัดที่ขั้ว A, B และ C ของขดลวดแรงสูงที่ภายในต่อเป็นแบบเดลต้า (Δ) ดังนั้นถ้าวัดความต้านทานที่ขั้ว A และ B ค่าความต้านทานต่อเฟสจะเท่ากับ "3/2" ของค่าที่วัดได้ ส่วนขดลวดแรงต่ำซึ่งภายในต่อแบบสตาร์ (Y) เมื่อวัดระหว่างขั้ว a และ b ค่าความต้านทานต่อเฟสจะเท่ากับ "1/2" ของค่าที่วัดได้ รูปการต่อขดลวดภายในแสดงในรูปที่ 4.16 ผลการวัดค่าความต้านทานแสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ผลการวัดค่าความต้านทานของขดลวด

อุณหภูมิของขดลวด (°C)	ความต้านทานขดลวดด้านปฐมภูมิ (Ω)						ความต้านทานขดลวดด้านทุติยภูมิ (mΩ)	
		จุดต่อแยก						
		1	2	3	4	5		
31.6	A – B	16.8	16.33	15.92	15.5	15.01	a - b	4.00
	B – C	16.78	16.33	15.93	15.5	15.04	b - c	4.00
	C – A	16.8	16.35	15.95	15.52	15.08	c - a	4.05
	เฉลี่ย	16.79	16.34	15.93	15.51	15.04	เฉลี่ย	4.02
75.0 (อ้างอิง)	A – B	19.53	18.99	18.51	18.02	17.45	a - b	4.65
	B – C	19.51	18.99	18.52	18.02	17.49	b - c	4.65
	C – A	19.53	19.01	18.55	18.05	17.53	c - a	4.71
	เฉลี่ย	19.53	19.00	18.53	18.03	17.49	เฉลี่ย	4.67

4.4.2 การวัดอัตราส่วนแรงดัน และการตรวจสอบการจัดเฟส

การวัดอัตราส่วนแรงดันโดยใช้ Ratio bridge meter เครื่องวัดนี้มีความสามารถในการวัดอัตราส่วนแรงดันระหว่างขดลวดแรงสูง และขดลวดแรงต่ำ ซึ่งจะต้องเป็นเฟสและมีทิศทางเวกเตอร์เดียวกัน พิจารณาจากรูปที่ 4.23 กลุ่มเวกเตอร์ Dyn11 จะเห็นว่าแรงดันด้านแรงสูง (A-B) และด้านแรงต่ำ (a-c) จะมีมุมต่างกัน 30 องศา ด้วยเหตุนี้เป็นไปไม่ได้ที่จะปรับ Ratio bridge meter ให้สมดุลได้แต่จะสามารถปรับให้สมดุลได้ถ้าวัดเทียบระหว่างแรงดันด้านแรงสูง (A-B) กับแรงดันเฟสของด้านแรงต่ำ (a-n) ด้วยเหตุผลดังกล่าวการวัดอัตราส่วนแรงดันสามารถตรวจสอบกลุ่มเวกเตอร์ ได้ในเวลาเดียวกัน แสดงผลการวัดในตารางที่ 4.6



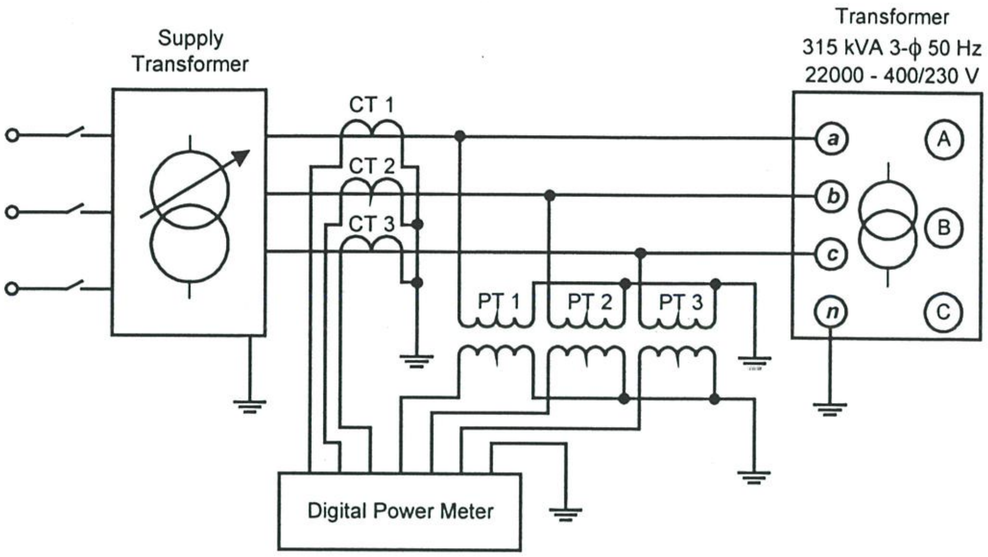
รูปที่ 4.23 การวัดอัตราส่วนแรงดันกลุ่มเวกเตอร์ Dyn11

ตารางที่ 4.6 ผลการวัดค่าอัตราส่วนแรงดัน

จุดต่อแยก	อัตราส่วนแรงดัน	เปอร์เซ็นต์เบี่ยงเบนของอัตราส่วนแรงดัน (ต้องไม่เกิน ± 0.5%)		
		A - B : a – n	B - C : b - n	C - A : c - n
1	100.0	0.00	0.00	0.00
2	97.6	-0.06	-0.07	-0.07
3	95.3	-0.04	-0.04	-0.04
4	92.9	-0.04	-0.04	-0.04
5	90.5	-0.02	-0.02	-0.02

4.4.3 การวัดความสูญเสียไม่มีโหลด และกระแสไม่มีโหลด

ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียและกระแสขณะไม่มีโหลดจะทำการวัดที่แรงดันและความถี่ที่พิกัด โดยการป้อนแรงดันกระแสสลับเข้าทางด้านขดลวดแรงต่ำ ค่าที่อ่านได้จากวัตต์มิเตอร์คือ กำลังสูญเสียของหม้อแปลงขณะไม่มีโหลด และค่ากระแสที่ได้คือกระแสขณะไม่มีโหลดของหม้อแปลง แสดงวงจรทดสอบดังรูปที่ 4.24 และผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 4.7



รูปที่ 4.24 วงจรทดสอบหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียและกระแสขณะไม่มีโหลด

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าสูญเสียและกระแสขณะไม่มีโหลด

เฟส	แรงดันเฟส (V)	กระแสเฟส (A)	กำลัง (W)
A	227.90	6.33	408.00
B	235.30	5.28	134.00
C	226.60	6.92	158.00
เฉลี่ย	229.93	6.18	ผลรวม 700.00
ที่พิกัดแรงดัน	230.94	6.20 (1.36%)	706.14

4.4.4 การวัดอิมพิแดนซ์ลัดวงจร และความสูญเสียมีโหลดขณะจ่ายโหลดที่พิกัด

ค่ากำลังสูญเสียขณะมีโหลด เป็นกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียให้กับหม้อแปลงขณะทำการจ่ายกระแสที่พิกัด ทำการวัดได้โดยลัดวงจรด้านขดลวดแรงต่ำและป้อนกระแสที่พิกัดเข้าทางด้านขดลวดแรงสูง ค่ากำลังสูญเสียขณะมีโหลดที่อ่านได้จะประกอบด้วยค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียจากความต้านทานในขดลวด และกำลังสูญเสียขณะมีโหลดอื่น ๆ

การวัดค่าแรงดันอิมพิแดนซ์ลัดวงจรของหม้อแปลงสามารถวัดได้เช่นเดียวกับการหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะมีโหลด โดยขณะที่ป้อนกระแสมีค่าเท่ากับกระแสที่พิกัด แรงดันที่วัดได้ในขณะนั้นคือแรงดันอิมพิแดนซ์ ซึ่งค่าแรงดันนี้และค่ากำลังสูญเสียขณะมีโหลด จะนำไปคำนวณเป็นค่าเป็นค่าเปอร์เซ็นต์อิมพิแดนซ์, ค่าเปอร์เซ็นต์ความต้านทาน, และค่าเปอร์เซ็นต์ความเหนี่ยวนำ

กำลังสูญเสียขณะมีโหลดและแรงดันอิมพิแดนซ์ของหม้อแปลงที่อุณหภูมิ θ_a คำนวณได้ตามสมการดังนี้

$$P_{LL(\theta_a)} = P_{LL(m)}\left(\frac{I_L}{I_t}\right)^2 \tag{4.2}$$

$$V_z = V_{z(m)}\left(\frac{I_L}{I_t}\right)^2 \tag{4.3}$$

เมื่อ $P_{LL(\theta_a)}$ เป็นกำลังสูญเสียขณะมีโหลดที่อุณหภูมิ θ_a (W)

$P_{LL(m)}$ เป็นกำลังสูญเสียขณะมีโหลดจากการวัดที่อุณหภูมิ θ_a (W)

I_L เป็นกระแสที่พิกัดของหม้อแปลงด้านที่ทดสอบ (A)

I_t เป็นกระแสขณะมีโหลดจากการวัด (A)

V_z เป็นแรงดันอิมพิแดนซ์ลัดวงจรของหม้อแปลง (V)

$V_{z(m)}$ เป็นแรงดันอิมพิแดนซ์ลัดวงจรของหม้อแปลงจากการวัด (V)

กำลังสูญเสียจากความต้านทาน และค่าเปอร์เซ็นต์ความเหนียวนำที่อุณหภูมิ θ_a คำนวณได้ตามสมการดังนี้

$$P_{cu(\theta_a)} = 1.5\left(I_{Lp}{}^2 R_{pm(\theta_a)} + I_{Ls}{}^2 R_{sm(\theta_a)}\right) \tag{4.4}$$

$$P_{s(\theta_a)} = P_{LL(\theta_a)} - P_{cu(\theta_a)} \tag{4.5}$$

$$\%Z_{(\theta_a)} = \frac{V_z}{V_L} \times 100\% \tag{4.6}$$

$$\%R_{(\theta_a)} = \frac{P_{LL(\theta_a)}}{S} \times 100\% \tag{4.7}$$

$$\%X_{(\theta_a)} = \sqrt{\%Z_{(\theta_a)}{}^2 - \%R_{(\theta_a)}{}^2} \tag{4.8}$$

เมื่อ $P_{cu(\theta_a)}$ เป็นกำลังสูญเสียที่ขดลวดจากความต้านทานที่อุณหภูมิ θ_a (W)

I_{Lp} เป็นกระแสพิกัดของหม้อแปลงด้านปฐมภูมิ (A)

I_{Ls} เป็นกระแสพิกัดของหม้อแปลงด้านทุติยภูมิ (A)

เมื่อ $R_{pm(\theta_a)}$ เป็นความต้านทานเฉลี่ยจากการวัดที่ขั้วด้านปฐมภูมิที่อุณหภูมิ θ_a (Ω)

$R_{sm(\theta_a)}$ เป็นความต้านทานเฉลี่ยจากการวัดที่ขั้วด้านทุติยภูมิที่อุณหภูมิ θ_a (Ω)

V_L เป็นแรงดันพิกัดของหม้อแปลงด้านทดสอบ (V)

$\%Z_{(\theta_a)}$ เป็นค่าเปอร์เซ็นต์อิมพิแดนซ์ลัดวงจรที่อุณหภูมิ θ_a (%)

$\%R_{(\theta_a)}$ เป็นค่าเปอร์เซ็นต์ความต้านทานที่อุณหภูมิ θ_a (%)

$\%X_{(\theta_a)}$ เป็นค่าเปอร์เซ็นต์ความเหนียวนำที่อุณหภูมิ θ_a (%)

ค่าของแรงดันอิมพิแดนซ์ลัดวงจรของหม้อแปลง และกำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะมีโหลดจะต้องคำนวณเพื่อชดเชยไปที่อุณหภูมิอ้างอิง 75°C หรือตามที่มาตรฐานกำหนด ดังสมการดังต่อไปนี้

$$P_{LL} = P_{cu(\theta_a)}\left(\frac{235+\theta_r}{235+\theta_a}\right) + P_{s(\theta_a)}\left(\frac{235+\theta_a}{235+\theta_r}\right) \tag{4.9}$$

$$\%Z = \sqrt{\%R^2 + \%X_{(\theta_a)}{}^2} \tag{4.10}$$

การคำนวณหาประสิทธิภาพ และเรกูเลชันของหม้อแปลง คำนวณได้ตามสมการดังนี้

$$\eta = \frac{k_L S\cos\phi}{k_L S\cos\phi + P_{NL} + k_L^2 P_{LL}} \times 100\% \tag{4.11}$$

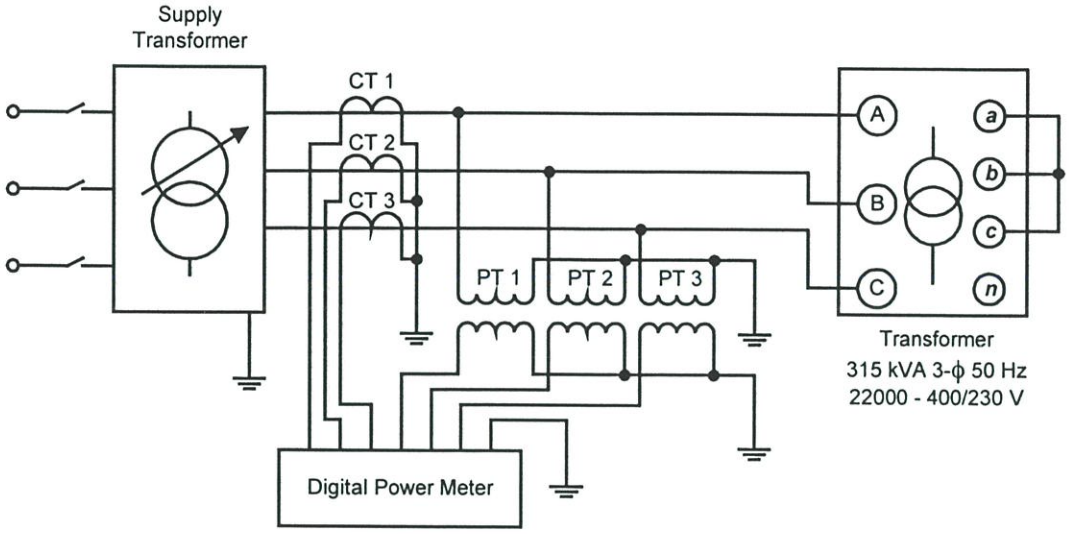
$$\%VR = k_L\left(\%R\cos\phi + \%X\sin\phi\right) + \frac{k_L^2\left[\%R\sin\phi + \%X\cos\phi\right]^2}{200} \tag{4.12}$$

เมื่อ η เป็นประสิทธิภาพของหม้อแปลง

$\%VR$ เป็นเรกูเลชันของหม้อแปลง

k_L เป็นอัตราการใช้ภาระโหลด $\dfrac{\text{Actual kVA}}{\text{Base kVA}}$

วงจรทดสอบหาค่ากำลังสูญเสียขณะมีโหลดและเปอร์เซ็นต์อิมพิแดนซ์ลัดวงจร แสดงดังรูปที่ 4.25 ผลการทดสอบและผลการคำนวณชดเชยไปที่อุณหภูมิอ้างอิง 75°C ตามที่มาตรฐานกำหนด แสดงในตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.9 ตามลำดับ



รูปที่ 4.25 วงจรทดสอบหาค่ากำลังสูญเสียขณะมีโหลดและเปอร์เซ็นต์อิมพิแดนซ์ลัดวงจร

ตารางที่ 4.8 ผลการวัดค่ากำลังสูญเสียขณะมีโหลดที่จุดต่อแยกหลัก (Tap 3)

เฟส	แรงดันเฟส (V)	กระแสเฟส (A)	กำลัง (W)
A	483.60	8.266	1,012
B	481.00	8.266	1,016
C	486.00	8.272	1,044
เฉลี่ย	483.53	8.268	ผลรวม 3,072
ที่พิกัดกระแส	483.45	8.267	3,071

ตารางที่ 4.9 ผลการคำนวณค่ากำลังสูญเสียขณะมีโหลดที่จุดต่อแยกหลัก (Tap 3)

อุณหภูมิ (°C)	31.6	75
กำลังสูญเสียจากความต้านทานที่ขดลวดด้านปฐมภูมิ (W)	1,633	1,899
กำลังสูญเสียจากความต้านทานที่ขดลวดด้านทุติยภูมิ (W)	1,245	1,448
กำลังสูญเสียจากความต้านทานรวม (W)	2,879	3,347
กำลังสูญเสียขณะมีโหลดอื่นๆ (W)	192	165
กำลังสูญเสียขณะมีโหลดที่จุดต่อแยกหลัก (W)	3,071	3,513

เมื่อทราบค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะไม่มีโหลดและขณะมีโหลดของหม้อแปลง สามารถคำนวณหาประสิทธิภาพของหม้อแปลงที่ค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์เท่ากับ 1 ตามตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ค่าประสิทธิภาพและแรงดันเรกูเลชันของหม้อแปลงที่ pf = 1

อุณหภูมิ	31.6	75
กำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลด (W)	706	706
กำลังสูญเสียขณะมีโหลด (W)	3,071	3,513
กำลังสูญเสียรวม (W)	3,777	4,219
ประสิทธิภาพ (%)	98.82	98.68
$\%Z$ (%)	3.806	3.845
$\%R$ (%)	0.975	1.115
$\%X$ (%)	3.679	3.679
$\%VR$ (%)	1.043	1.183

4.4.5 การทดสอบประจำไดอิเล็กตริก

การทดสอบประจำไดอิเล็กตริกจะทำการทดสอบที่จุดต่อแยกหลัก แบ่งเป็น 3 หัวข้อดังนี้

1) การวัดความต้านทานฉนวน (Measurement of insulation resistance)
2) การทดสอบแรงดันเหนี่ยวนำเกิน (Induced AC voltage tests)
3) การทดสอบความทนต่อแรงดันตามความถี่กำลังไฟฟ้าของตัวจ่ายอื่น (Separate source AC withstand voltage test)

4.4.5.1 การวัดความต้านทานฉนวน

การวัดความต้านทานฉนวน เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความต้านทานของฉนวนในหม้อแปลงระหว่างขดลวดกับขดลวด และขดลวดกับกราวด์

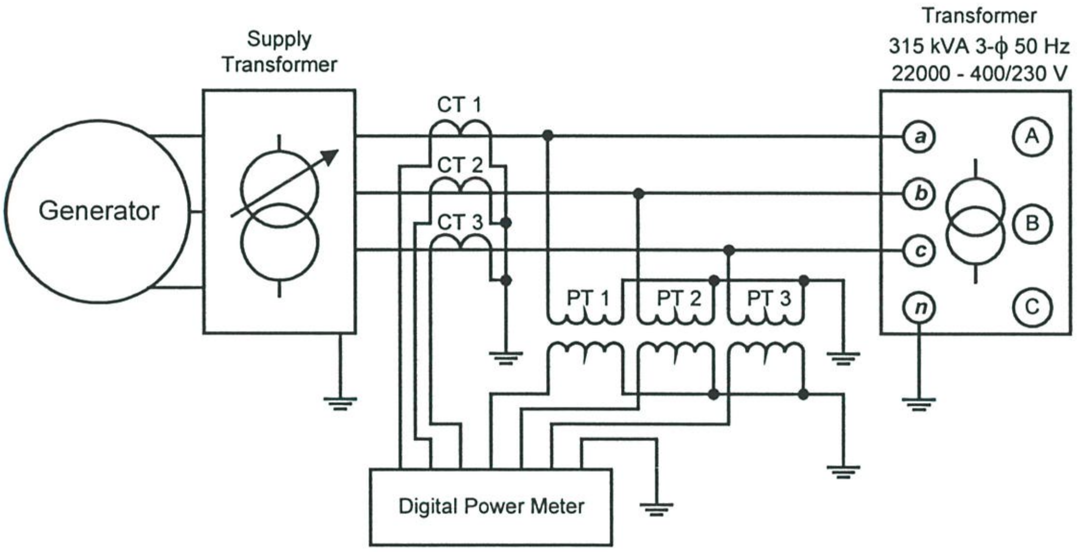
ก่อนการทดสอบจะต่อสายลัดวงจรขั้วขดลวดในแต่ละชุด ใช้เครื่องวัดความต้านทานฉนวน Megohmeter ตั้งแรงดันทดสอบที่ 1000 Vdc สำหรับป้อนให้กับขดลวด ภายหลังที่ป้อนแรงดันแล้วประมาณ 1 นาที จึงจะอ่านค่าที่วัด ผลการทดสอบแสดงได้ดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 ผลการวัดความต้านทานฉนวนของหม้อแปลงจำหน่าย

ตำแหน่งวัด	ความต้านทานฉนวน (MΩ)
ขดลวดปฐมภูมิกับขดลวดทุติยภูมิ	6,000
ขดลวดปฐมภูมิกับตัวถังหม้อแปลง (กราวด์)	5,000
ขดลวดทุติยภูมิกับตัวถังหม้อแปลง (กราวด์)	5,000

4.4.5.2 การทดสอบแรงดันเหนี่ยวนำเกิน

การทดสอบแรงดันเหนี่ยวนำเกิน เป็นการทดสอบเพื่อตรวจสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันเหนี่ยวนำเกินของฉนวนขดลวดในแต่ละเฟส รวมถึงส่วนต่าง ๆ ของขดลวดที่เชื่อมต่อกันจนถึงขั้วต่อสายไฟ การทดสอบจะใช้ความถี่ 200 Hz (เพื่อหลีกเลี่ยงการอิ่มตัวของแกนเหล็ก) ที่แรงดัน 2 เท่าของแรงดันพิกัดของขดลวดที่ทดสอบ แต่จะต้องไม่เกินระดับแรงดันทดสอบความทนต่อแรงดันตามความถี่กำลังไฟฟ้าของตัวจ่ายอื่น และตัวถังหม้อแปลงจะต่อลงกราวด์ในขณะทดสอบ การทดสอบนี้ทำการทดสอบที่ขดลวดด้านทุติยภูมิดังนั้นแรงดันเฟสที่ใช้ทดสอบ 462 V เวลาที่ใช้ทดสอบ 30 วินาทีตามมาตราฐาน แสดงการต่อวงจรทดสอบดังรูปที่ 4.26

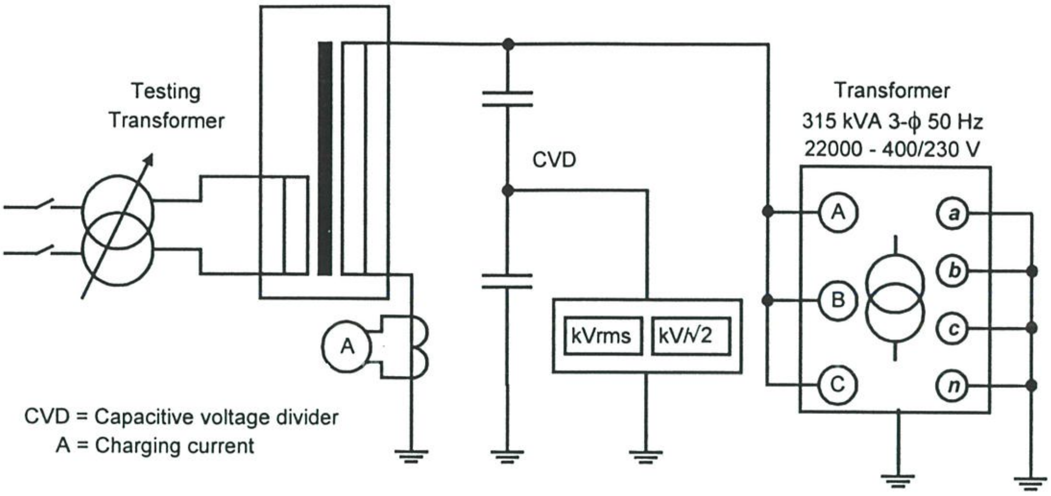


รูปที่ 4.26 วงจรทดสอบแรงดันเหนี่ยวนำเกิน

4.4.5.3 การทดสอบความทนต่อแรงดันตามความถี่กำลังไฟฟ้าของตัวจ่ายอื่น

การทดสอบความทนต่อแรงดันตามความถี่กำลังไฟฟ้าของตัวจ่ายอื่น เป็นการดทดสอบเพื่อตรวจสอบความทนอยู่ได้ต่อความเครียดสนามไฟฟ้า ระหว่างขดลวดที่ทดสอบกับกราวด์ ดังนั้นในขณะที่ทดสอบขดลวดอื่นที่ไม่ได้ทดสอบ และตัวถังจะต้องต่อลงกราวด์ แรงดันทดสอบจากหม้อแปลงทดสอบเป็นแรงดันกระแสสลับเฟสเดียวความถี่ 50 Hz ระดับแรงดันทดสอบจะเป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนด

ก่อนการทดสอบจะต่อสายลัดวงจรขั้วขดลวดในแต่ละชุด ขดลวดที่ไม่ได้ทดสอบ และตัวถังจะต่อลงกราวด์ แรงดังที่ใช้ทดสอบขดลวดด้านปฐมภูมิ 50 kV แรงดังที่ใช้ทดสอบขดลวดด้านทุติยภูมิ 3 kV ช่วงเวลาทดสอบ 1 นาที ตามมาตราฐาน การต่อวงจรแสดงดังรูปที่ 4.27



รูปที่ 4.27 วงจรทดสอบความทนต่อแรงดันตามความถี่กำลังไฟฟ้าของตัวจ่ายอื่น

4.4.6 การทดสอบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

การทดสอบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น เป็นการทดสอบเพื่อต้องการทราบค่าความร้อนของหม้อแปลงที่เกิดขึ้น เมื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าเต็มพิกัด การทดสอบจะต่อวงจรเช่นเดียวกับการทดสอบหาค่ากำลังสูญเสียขณะมีโหลดที่ตำแหน่งจุดต่อแยกหลัก แต่จะจ่ายกำลังไฟฟ้าเท่ากับกำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมที่อุณหภูมิ 75 °C ของหม้อแปลง และจ่ายต่อเนื่องกันไปจนอุณหภูมิน้ำมันส่วนบน (Top oil) คงที่ ซึ่งจะพิจารณาจากความแตกต่างของอุณหภูมิในช่วง 3 ชั่วโมงสุดท้ายต่างกันไม่เกิน 1 °C เมื่ออุณหภูมิของน้ำมันคงที่แล้ว ให้ทำการลดค่ากระแสที่ป้อนลงถึงค่ากระแสพิกัดของหม้อแปลงคงที่ไว้ 1 ชั่วโมง จากนั้นตัดกระแสที่ป้อนให้กับขดลวด แล้ววัดค่าความต้านทานขดลวดด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิเทียบกับเวลา ผลของความต้านทานต่อเวลาจะนำมาเขียนกราฟเทียบกับเวลาเพื่อหาค่าความต้านทาน ณ จุดที่เริ่มตัดกระแสไฟฟ้า (R_o) จากนั้นคำนวณหาอุณหภูมิเฉลี่ยของขดลวดตามสมการที่ 4.13 - 4.14

$$\theta_w = \frac{R_o}{R_a}\left(235+\theta_a\right)-235 \qquad (4.13)$$

$$\Delta\theta_w = \theta_w - \theta_a \qquad (4.14)$$

เมื่อ θ_w เป็นอุณหภูมิเฉลี่ยของขดลวด (°C)

$\Delta\theta_w$ เป็นอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของขดลวด (°C)

R_o เป็นค่าความต้านทานที่หาได้จากกราฟ ณ เวลาที่ 0 นาที (Ω)

กรณีที่การทดสอบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ไม่สามารถทดสอบด้วยค่ากำลังไฟฟ้าหรือกระแสตามพิกัดที่กำหนดไว้ แต่จะต้องจ่ายกำลังสูญเสียได้ไม่น้อยกว่า 80 % ของกำลังสูญเสียรวมที่กำหนด และจ่ายกระแสได้ไม่น้อยกว่า 90 % ของกระแสที่กำหนด ให้แก้ไขผลทดสอบชดเชยอุณหภูมิเพิ่มขึ้นของน้ำมันโดยคูณ k_o กับผลการทดสอบตามสมการที่ 4.15 และชดเชยอุณหภูมิของขดลวดโดยคูณ k_i กับผลการทดสอบตามสมการที่ 4.16

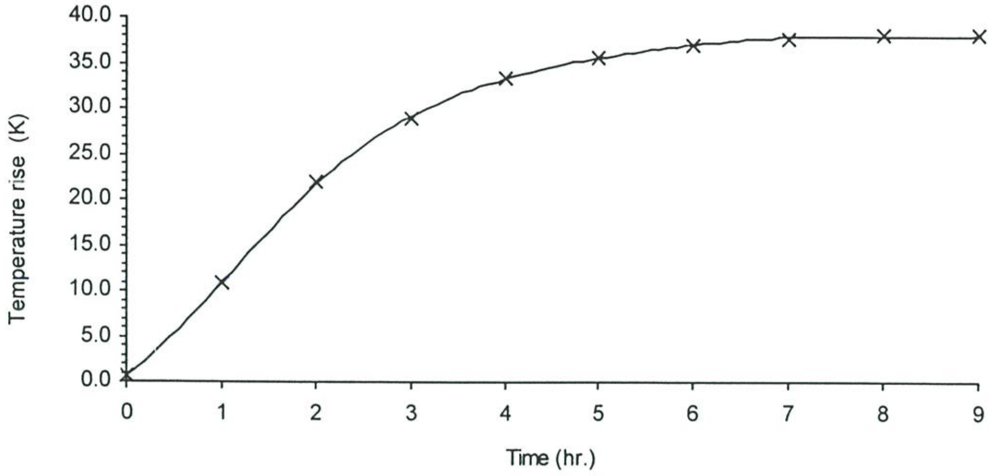
$$k_o = \left(\frac{\text{total losses}}{\text{test losses}} \right)^{0.8} \tag{4.15}$$

$$k_i = \left(\frac{\text{rated current}}{\text{test current}} \right)^{1.6} \tag{4.16}$$

ผลการวัดอุณหภูมิขณะทำการทดสอบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ตามตารางที่ 4.12 และกราฟแสดงรูปของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของน้ำมันด้านบนในรูปที่ 4.28

ตารางที่ 4.12 ผลการทดสอบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

เวลา (hr.)	แรงดันทดสอบ (V)	กระแสทดสอบ (Amp)	กำลังทดสอบ (kW)	น้ำมันด้านบน (°C)	ด้านบนของครีบ (°C)	ด้านล่างของครีบ (°C)	อุณหภูมิโดยรอบ (°C) ตำแหน่ง 1	ตำแหน่ง 2	ตำแหน่ง 3	ตำแหน่ง 4
0	972.0	9.58	4.21	31.1	31.3	30.3	29.9	29.9	30.4	31.4
1	941.5	9.22	4.21	41.2	40.8	32.5	29.9	29.8	30.3	31.2
2	928.2	9.07	4.21	52.3	53.0	41.6	29.7	29.7	30.2	31.0
3	924.2	9.01	4.21	58.8	58.2	45.1	29.6	29.5	30.1	30.9
4	920.9	8.97	4.21	63.4	61.3	47.2	29.5	29.5	30.0	30.9
5	919.2	8.96	4.21	65.3	63.0	48.1	29.4	29.3	29.8	30.7
6	919.2	8.95	4.21	67.0	64.4	49.6	29.6	29.6	30.1	30.6
7	917.6	8.94	4.21	67.3	64.9	49.8	29.3	29.5	29.8	30.3
8	916.4	8.93	4.21	67.6	65.1	49.5	29.3	29.2	29.6	30.5
9	919.5	8.93	4.21	67.6	65.1	49.6	29.3	29.2	29.7	30.4
ลดกระแสลงที่พิกัดกระแส										
9	850.8	8.27	3.61	67.6	65.1	49.6	29.3	29.2	29.7	30.4
10	849.6	8.27	3.58	66.5	64.0	50.1	29.6	29.5	30.1	30.7
ตัดกระแสไฟฟ้า วัดค่าความต้านทานของขดลวด										

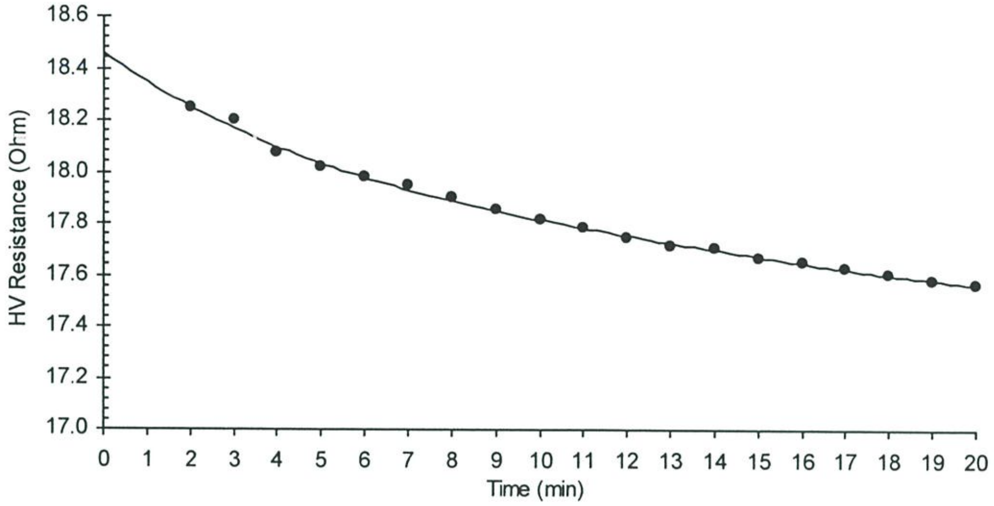


รูปที่ 4.28 ผลการทดสอบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของน้ำมันด้านบน

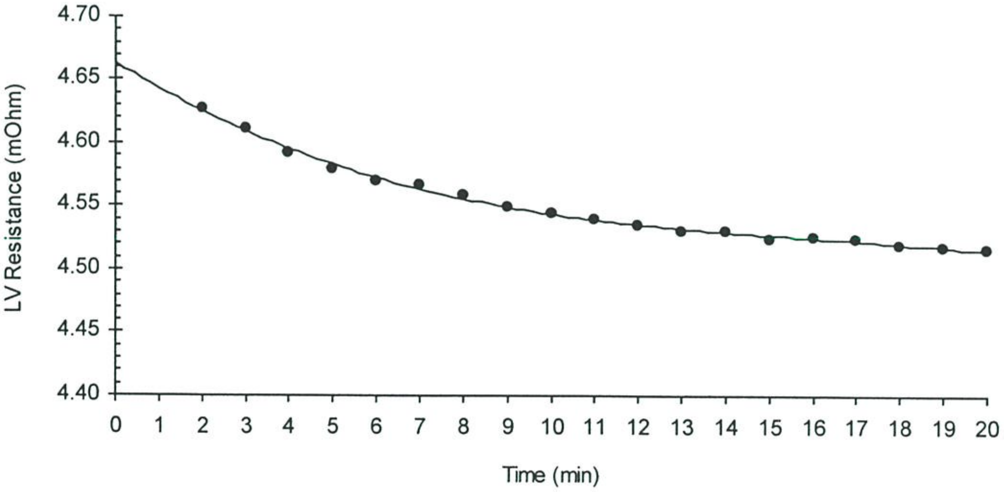
ตารางที่ 4.13 ผลการวัดค่าความต้านทานของขดลวดหลังจากตัดกระแสไฟฟ้า

เวลา (min)	ขดลวดด้านปฐมภูมิ (Ω)	ขดลวดด้านทุติยภูมิ (mΩ)
2	18.246	4.627
3	18.196	4.611
4	18.071	4.592
5	18.016	4.580
6	17.978	4.570
7	17.947	4.567
8	17.899	4.559
9	17.855	4.550
10	17.814	4.545
11	17.782	4.540
12	17.748	4.535
13	17.717	4.531
14	17.704	4.530
15	17.663	4.524
16	17.654	4.526
17	17.631	4.524
18	17.604	4.519
19	17.581	4.517
20	17.561	4.516

ผลการวัดค่าความต้านทานของขดลวดหลังจากตัดกระแสแสดงในตารางที่ 4.13 นำมาแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานขดลวดต่อเวลาดังรูปที่ 4.29 – 4.30



รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ของความต้านทานขดลวดปฐมภูมิต่อเวลาหลังจากตัดกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ของความต้านทานขดลวดทุติยภูมิต่อเวลาหลังจากตัดกระแสไฟฟ้า

จากผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้านบนคงที่ในชั่วโมงที่ 9 อุณหภูมิน้ำมันด้านบนเท่ากับ 67.6 °C อุณหภูมิโดยรอบเฉลี่ยเท่ากับ 29.7 °C สามารถคำนวณหาอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของน้ำมันด้านบน โดยคูณค่าแก้ไขตามสมการที่ 4.3 ได้ดังนี้

$$\Delta\theta_{to} = (67.6 - 29.7)\left(\frac{4219}{4210}\right)^{0.8} = 38.0\ ^\circ\text{C}$$

$$\Delta\theta_{o} = \left(67.6 - \left(\frac{65.1-49.6}{2}\right) - 29.7\right)\left(\frac{4219}{4210}\right)^{0.8} = 30.2\ ^\circ\text{C}$$

จากกราฟในรูปที่ 4.29 – 4.30 สามารถหาค่าความต้านทาน ณ เวลาที่ 0 นาที ได้จากกราฟที่ขดลวดด้านปฐมภูมิมีค่าเท่ากับ 18.42 Ω และขดลวดด้านทุติยภูมิมีค่าเท่ากับ 4.66 mΩ โดยใน ชั่วโมงที่ 10 มีอุณหภูมิห้องเฉลี่ยเท่ากับ 30 °C อุณหภูมิน้ำมันเฉลี่ยเท่ากับ 29.6 °C ดังนั้นจากสมการที่ 4.13- 4.14 สามารถคำนวณหาค่าอุณหภูมิ ณ. เวลา 0 นาที ของขดลวดด้านปฐมภูมิ ; θ_{wp0} และด้านทุติยภูมิ ; θ_{ws0} ดังนี้

$$\theta_{wp0} = \frac{18.42}{15.92}(235+31.6) - 235 = 73.5\ ^\circ\text{C}$$

$$\theta_{ws0} = \frac{4.66}{4.00}(235+31.6) - 235 = 75.6\ ^\circ\text{C}$$

อุณหภูมิแตกต่างระหว่างน้ำมันเฉลี่ยกับขดลวดเฉลี่ยด้านปฐมภูมิ ; θ_{gp} และด้านทุติยภูมิ ; θ_{gs} คำนวณได้ดังนี้

$$\Delta\theta_{gp} = 73.5 - 30 - 29.6 = 13.9\ ^\circ\text{C}$$

$$\Delta\theta_{gs} = 75.6 - 30 - 29.6 = 16.0\ ^\circ\text{C}$$

ดังนั้นอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของขดลวดด้านปฐมภูมิ ; θ_{wp} และด้านทุติยภูมิ ; θ_{ws} สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\Delta\theta_{wp} = 13.9 + 30.2 = 44.1\ ^\circ\text{C}$$

$$\Delta\theta_{wp} = 16.0 + 30.2 = 46.2\ ^\circ\text{C}$$

4.5 บทสรุป

การออกแบบของหม้อแปลงจำหน่ายชนิดน้ำมันขนาดพิกัดกำลัง 315 kVA, 3 เฟส, 50 Hz, แรงดันด้านปฐมภูมิ 22,000 V, แรงดันด้านทุติยภูมิ 400/230 V, เปอร์เซ็นต์ของจุดต่อแยกแรงดันที่ด้านปฐมภูมิ ± 2 × 2.5 %, Dyn11, ตามข้อกำหนดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ทำการออกแบบโดยใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมด้วยจีเนติกอัลกอริธึม มีเป้าหมายของการออกแบบที่ราคาต้นทุนของแกนเหล็กและขดลวดรวมต่ำ พบว่าผลการออกแบบจะพยายามลดขนาดทางโครงสร้างของแกนเหล็กและขดลวดลง ซึ่งจะทำให้คุณลักษณะต่างๆ ของหม้อแปลงได้แก่ ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก, ความหนาแน่นของกระแส, กำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลด, กำลังสูญเสียขณะมีโหลด, และอุณหภูมิแตกต่างระหว่างขดลวดกับน้ำมันถูกปรับตัวขึ้นสูงสุด แต่ยังมีค่าอยู่ภายใต้ข้อกำหนดของการออกแบบ ซึ่งจะทำให้หม้อแปลงจำหน่ายมีราคาต้นทุนที่ต่ำลง เมื่อนำผลการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายโดยใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมนี้มาทำการสร้างเป็นต้นแบบ เพื่อทดสอบหาคุณลักษณะต่าง ๆ การทดสอบความคงทนต่อแรงดันสูงเกินเป็นการทดสอบเพื่อพิสูจน์ระบบการฉนวนที่นำมาใช้กับการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายว่าเพียงพอหรือไม่ต่อแรงดันที่ใช้ทดสอบตามมาตรฐาน การทดสอบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของหม้อแปลงจำหน่ายเพื่อพิสูจน์ระบบการระบายความร้อนที่เหมาะสมกับชนิดของฉนวนตามมาตรฐานทำให้หม้อแปลงมีอายุการใช้งานที่เหมาะสม สำหรับการทดสอบหาค่ากำลังสูญเสียและเปอร์เซ็นต์อิมพิแดนซ์เป็นการทดสอบเพื่อหาประสิทธิภาพ และเรกกูเลชันของหม้อแปลงตามลำดับ ผลการเปรียบเทียบคุณลักษณะต่างๆ ของการออกแบบกับการทดสอบแสดงได้ตามตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.14 การเปรียบเทียบคุณลักษณะผลการออกแบบกับผลการทดสอบ

คุณลักษณะของหม้อแปลงจำหน่าย	เงื่อนไข	ออกแบบ	ทดสอบ	ผิดพลาด
กำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลด (W)	≤ 750	748	706	5.6%
กำลังสูญเสียจากขดลวดปฐมภูมิที่ 75 °C (W)	-	1,997	1,899	4.9%
กำลังสูญเสียจากขดลวดทุติยภูมิที่ 75 °C (W)	-	1,503	1,448	3.7%
กำลังสูญเสียจากการเหนี่ยวนำที่ 75 °C (W)	-	350	165	52.9%
กำลังสูญเสียขณะมีโหลดที่ 75 °C (W)	≤ 3,900	3,850	3,512	8.8%
กำลังสูญเสียรวม (W)	≤ 4,650	4,598	4,218	8.3%
เปอร์เซ็นต์อิมพิแดนซ์ (+/- 10%)	4.0	3.995	3.845	3.8%
อุณหภูมิระหว่างขดลวดปฐมภูมิกับน้ำมัน (°C)	≤ 19	15.2	13.9	8.6% (1.3 °C)
อุณหภูมิระหว่างขดลวดทุติยภูมิกับน้ำมัน (°C)	≤ 19	16.2	16.0	1.2% (0.2 °C)

จากผลการเปรียบเทียบของการออกแบบและการทดสอบในตารางที่ 4.13 พบว่าการทดสอบหาค่ากำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลดและขณะมีโหลด ได้ค่ากำลังสูญเสียต่ำกว่าผลการออกแบบ เนื่องมาจากค่าสัมประสิทธิ์คูณเพิ่มจากปัจจัยของการทำงานของทั้งแกนเหล็กและขดลวดมีการเผื่อความผิดพลาดที่อาจเกิดจากระบบการผลิตหรือวัสดุที่นำมาใช้งาน จึงทำให้ได้ผลการทดสอบที่ต่ำกว่าผลการออกแบบเล็กน้อย แต่มั่นใจได้ว่าผลของการออกแบบจะไม่เกินกว่าค่าตามผลการออกแบบที่กำหนด สำหรับกำลังสูญเสียขณะมีโหลดอื่น ๆ เป็นค่าที่กำหนดให้กับโปรแกรมขณะเริ่มทำการออกแบบ ซึ่งเป็นข้อมูลเชิงสถิติในทางอุตสาหกรรม ผลการออกแบบมีความผิดพลาดมากถึง 52.9% แต่เมื่อเทียบกับกำลังสูญเสียขณะมีโหลดค่าผิดพลาดจากกำลังสูญเสียขณะมีโหลดอื่น ๆ มีค่าเพียง 4.8 % ของกำลังสูญเสียขณะมีโหลด ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้

จากการเปรียบเทียบคุณลักษณะต่าง ๆ ของการออกแบบและการทดสอบได้ค่าอยู่ในย่านตามข้อกำหนดโดยมีผลการทดสอบต่ำกว่าเล็กน้อย การเลือกใช้งานค่าสัมประสิทธิ์การทำงานที่พอดีกับระบบการผลิตจะทำให้ได้ผลการทดสอบที่ตรงตามการออกแบบมีความผิดพลาดน้อย แต่ก็มีโอกาศเสี่ยงต่อผลการทดสอบที่เกินข้อกำหนดถ้าเกิดความผิดพลาดกับระบบการผลิตหรือวัตถุดิบ จึงต้องขึ้นอยู่กับความชำนาญของผู้ออกแบบทำการตัดสินใจเลือกใช้ค่าสัมประสิทธิ์การทำงานที่เหมาะสม จะทำให้ผลการออกแบบราคาที่เหมาะสมหม้อแปลงจำหน่ายโดยใช้จีเนติกอัลกอริธึมมีความเหมาะสมที่สุด

บทที่ 5
การวิเคราะห์การออกแบบหม้อแปลงจำหน่าย

5.1 บทนำ

แนวทางการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายเพื่อหาราคาต้นทุนการผลิตที่เหมาะสมจะต้องทราบถึงคุณลักษณะของตัวแปรหรือข้อกำหนดต่าง ๆ ที่มีผลกระทบต่อการออกแบบเพื่อให้สามารถทำการออกแบบหาคุณลักษณะที่เหมาะสมได้ตรงตามเป้าหมายและลดเวลาการออกแบบลง ตัวแปรที่มีผลต่อการออกแบบหม้อแปลงที่สำคัญได้แก่ สัมประสิทธิ์ประกอบแกนเหล็ก, ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก และความหนาแน่นของกระแส เป็นต้น สำหรับคุณลักษณะของหม้อแปลงหน่ายที่นิยมนำมาเป็นข้อกำหนดให้กับการออกแบบได้แก่ กำลังสูญเสียของหม้อแปลง, เปอร์เซ็นต์อิมพิแดนซ์ลัดวงจร, อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น หรือประสิทธิภาพ เป็นต้น ซึ่งในการวิจัยจะทำการศึกษาถึงพฤติกรรมของตัวแปรและข้อกำหนดต่าง ๆ โดยนำหลักการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายให้มีราคาที่เหมาะสมที่พิสูจน์แล้วว่าสามารถออกแบบและใช้งานได้จริง นำมาช่วยศึกษาพฤติกรรมของตัวแปรหรือข้อกำหนดต่าง ๆ จะส่งผลกระทบต่อราคาต้นทุน, คุณลักษณะ, และรูปทรงของหม้อแปลงให้เปลี่ยนไปในแนวทางได้ ทำให้ทราบแนวทางการออกแบบหม้อแปลงแปลงจำหน่ายได้ตรงตามคุณลักษณะที่ต้องการและมีราคาต้นทุนต่ำลง

หม้อแปลงจำหน่ายที่นำมาศึกษาผลกระทบของราคาต้นทุนมีพิกัดกำลัง 500 kVA, 3 เฟส, 50 Hz, 22,000-400/230V, Dyn11 ด้านปฐมภูมิใช้ลวดกลมพันแบบครอสโอเวอร์ และด้านทุติยภูมิใช้ลวดสี่เหลี่ยมพันแบบสไปรัล มีข้อกำหนดทั่วไปคือ กำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลดสูงสุด 1,000 W กำลังสูญเสียขณะขณะมีโหลดสูงสุด 5,500 W, เปอร์เซ็นต์อิมพิแดนซ์ลัดวงจร 4 %, ความหนาแน่นของกระแสใช้งานอยู่ในย่านระหว่าง 1–3.5 A/mm^2 , ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กใช้งานอยู่ในย่านระหว่าง 1–1.75 T, และอุณหภูมิแตกต่างระหว่างขดลวดกับน้ำมันสูงสุด 19 ^{o}C ทำการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายโดยใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสม มีวัตถุประสงค์เพื่อหาราคาต้นทุนรวมต่ำสุดในแต่ละย่านที่ทำการพิจารณา

ในขั้นตอนของการศึกษา ข้อกำหนดหรือตัวแปรใดที่ไม่ได้ทำการพิจารณาให้กำหนดตามข้อกำหนดดังกล่าว เนื่องจากงานวิจัยนี้พิจารณาราคาต้นทุนเฉพาะแกนเหล็กและขดลวดทองแดง ดังนั้นการพิจารณาต้นทุนรวมที่จะกล่าวต่อไปจึงหมายถึงราคาต้นทุนรวมของแกนเหล็กและขดลวดทองแดงเท่านั้น

5.2 การวิเคราะห์ผลกระทบของตัวแปรที่ใช้ออกแบบหม้อแปลงจำหน่าย

การวิเคราะห์ผลกระทบของตัวแปรที่ใช้ออกแบบหม้อแปลงจำหน่าย เป็นการศึกษาถึงพฤติกรรมของตัวแปรจะส่งผลกระทบต่อคุณลักษณะ, โครงสร้าง, หรือราคาต้นทุนอย่างไร เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรในย่านต่าง ๆ ทำให้ทราบแนวทางการออกแบบได้ตรงตามเป้าหมายและมีราคาต้นทุนต่ำลง ตัวแปรที่จะทำการศึกษามีอยู่ 3 ตัวแปรดังนี้

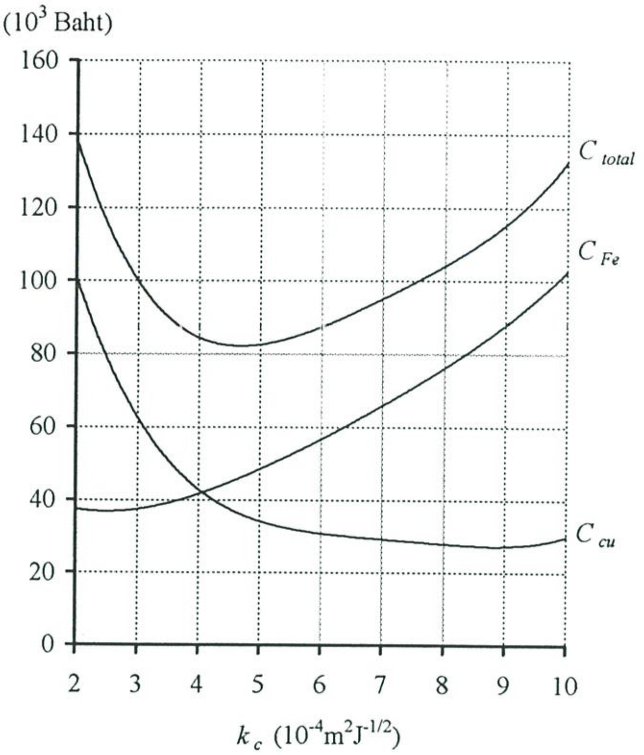
1. สัมประสิทธิ์ประกอบแกนเหล็ก
2. ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก
3. ความหนาแน่นของกระแส

5.2.1 การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ประกอบแกนเหล็ก

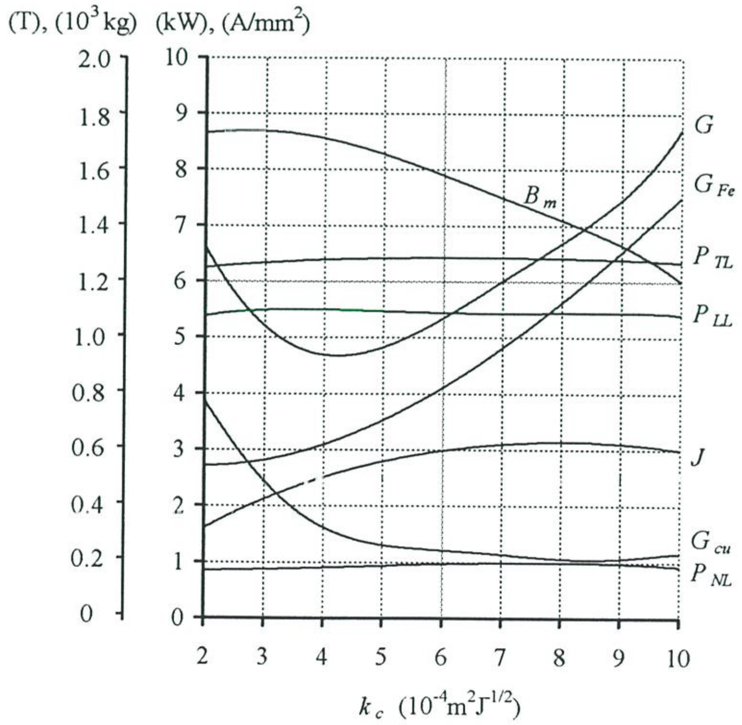
สัมประสิทธิ์ประกอบแกนเหล็กหรือพิจารณาได้อีกความสัมพันธ์หนึ่งคือ พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กแสดงดังสมการที่ 2.6 เมื่อพิกัดกำลัง, จำนวนเฟส, และความถี่ระบบไฟฟ้าเป็นค่าคงที่ พื้นที่หน้าตัดจะแปรผันตามสัมประสิทธิ์ประกอบแกนเหล็ก การศึกษาผลกระทบของสัมประสิทธิ์ประกอบแกนเหล็กต่อราคาต้นทุนและคุณลักษณะต่าง ๆ โดยทำการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายและกำหนดให้สัมประสิทธิ์ประกอบแกนเหล็กเป็นค่าคงที่และปรับเพิ่มขึ้นครั้งละ 1×10^{-4} $m^2J^{-1/2}$ จนถึง 10×10^{-4} $m^2J^{-1/2}$ และเลือกใช้สัมประสิทธิ์การใช้ประโยชน์ภายในทรงกลมแกน 88 %

เมื่อทำการออกแบบโดยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมได้ย่านของสัมประสิทธิ์ประกอบแกนเหล็กอยู่ระหว่าง $2\text{-}10\times10^{-4}$ $m^2J^{-1/2}$ ได้คำตอบอยู่ภายใต้ข้อกำหนด ในกรณีสัมประสิทธิ์ประกอบแกนเหล็กมีค่า 1×10^{-4} $m^2J^{-1/2}$ จะไม่สามารถหาคำตอบได้เพราะถูกจำกัดด้วยความหนาแน่นของกระแส จึงทำให้ไม่สามารถจัดรูปทรงของขดลวดให้อิมพิแดนซ์ลัดวงจรอยู่ในข้อกำหนด (4 %) การเปรียบเทียบราคาต้นทุนกับสัมประสิทธิ์ประกอบแกนเหล็กแสดงดังรูปที่ 5.1 , การเปรียบเทียบคุณลักษณะกับสัมประสิทธิ์ประกอบแกนเหล็กแสดงดังรูปที่ 5.2 และการเปรียบเทียบรูปทรงของแกนเหล็กกับสัมประสิทธิ์ประกอบแกนเหล็กแสดงดังรูปที่ 5.3 ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 3 ย่านดังนี้

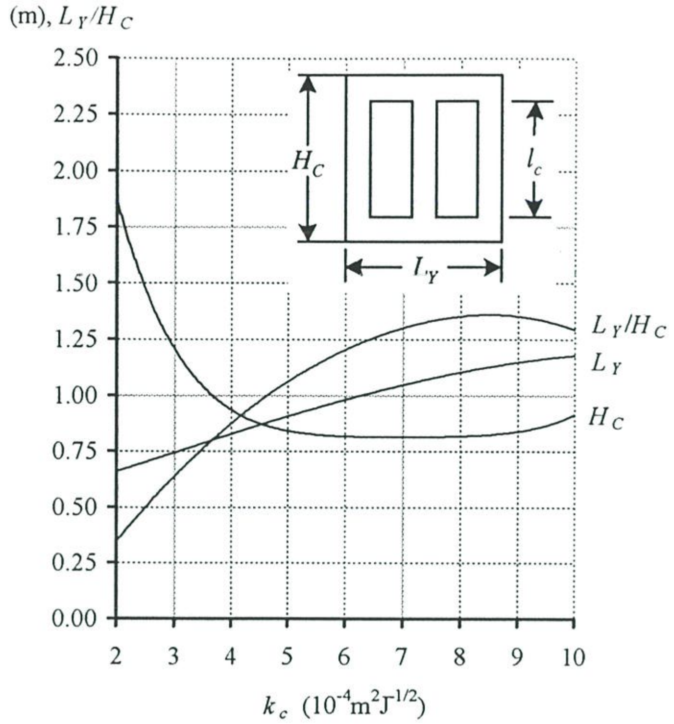
ย่านที่ 1. สัมประสิทธิ์ประกอบแกนเหล็กมีค่าอยู่ระหว่าง $2\text{-}4\times10^{-4}$ $m^2J^{-1/2}$ ราคาต้นทุนของขดลวดทองแดงสูงมากและปรับตัวลดลงในอัตราความชันที่สูง ในขณะที่ราคาต้นทุนของแกนเหล็กปรับตัวลดลงเพียงเล็กน้อย ด้านคุณลักษณะจะเห็นว่าสัมประสิทธิ์ประกอบแกนเหล็ก 2×10^{-4} $m^2J^{-1/2}$ การปรับตัวของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก, ความหนาแน่นของกระแส, กำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลดและขณะมีโหลดอยู่ในย่านต่ำเกิดจากผลกระทบของอิมพิแดนซ์ลัดวงจร และเมื่อสัมประสิทธิ์ประกอบแกนเหล็กเพิ่มขึ้น การปรับตัวของความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กและความหนาแน่นของกระแสเพิ่มขึ้น โดยกำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลดและขณะมีโหลดถูกปรับใกล้ข้อกำหนด ด้านรูปทรงของหม้อแปลงจำหน่ายมีอัตราส่วนความกว้างต่อความสูงของแกนเหล็กน้อยกว่า “1” มีลักษณะทางโครงสร้างที่ผอม-สูง



รูปที่ 5.1 การเปรียบเทียบราคาต้นทุนกับสัมประสิทธิ์ประกอบแกนเหล็ก



รูปที่ 5.2 การเปรียบเทียบคุณลักษณะกับสัมประสิทธิ์ประกอบแกนเหล็ก



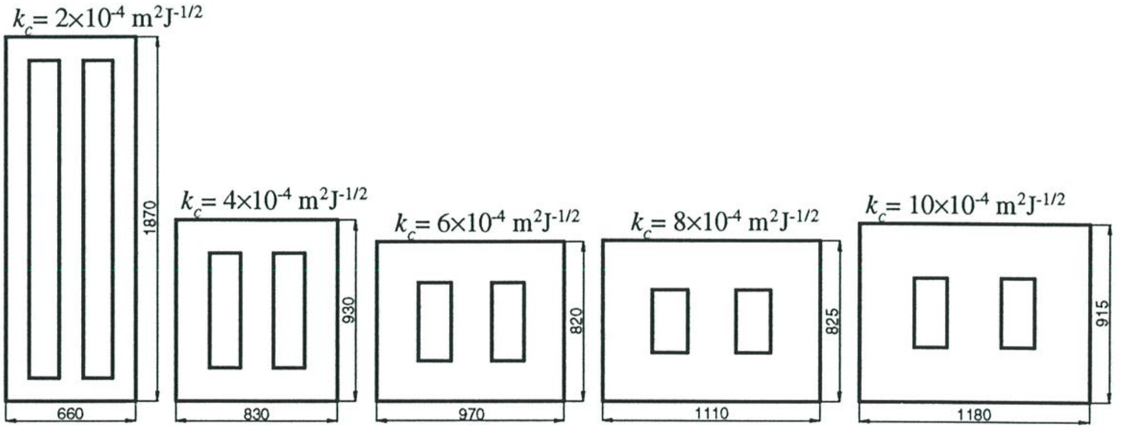
รูปที่ 5.3 การเปรียบเทียบรูปทรงของแกนเหล็กกับสัมประสิทธิ์ประกอบแกนเหล็ก

ย่านที่ 2. สัมประสิทธิ์ประกอบแกนเหล็กอยู่ในย่านระหว่าง 4-6×10^{-4} $m^2J^{-1/2}$ ราคาต้นทุนของขดลวดทองแดงปรับตัวลดลงในอัตราความชันที่ต่ำลง ในขณะที่ราคาต้นทุนของแกนเหล็กเริ่มปรับตัวเพิ่มขึ้น แต่ราคาต้นทุนรวมปรับตัวเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ด้านคุณลักษณะจะเห็นว่าที่ตำแหน่งสัมประสิทธิ์ประกอบแกนเหล็ก 4×10^{-4} $m^2J^{-1/2}$ ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก กำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลดและขณะมีโหลดถูกปรับให้ใกล้กับข้อกำหนด ทำให้สามารถลดน้ำหนักรวมได้ต่ำสุด จากนั้นเมื่อสัมประสิทธิ์ประกอบแกนเหล็กเพิ่มขึ้นความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กจะถูกปรับตัวลดลง น้ำหนักของแกนเหล็กปรับตัวเพิ่มขึ้นและน้ำหนักของขดลวดทองแดงปรับตัวลดลงไม่มาก ทำให้แนวโน้มของน้ำหนักรวมปรับตัวเพิ่มขึ้น ด้านรูปทรงของหม้อแปลงจำหน่ายมีอัตราส่วนความกว้างต่อความสูงของแกนเหล็กอยู่ย่านน้อยกว่าหรือมากกว่า “1” เพียงเล็กน้อย ทำให้ได้ลักษณะทางโครงสร้างที่สมส่วนไม่สูงหรือกว้างเกินไป

ย่านที่ 3. สัมประสิทธิ์ประกอบแกนเหล็กอยู่ในย่านระหว่าง 6-10×10^{-4} $m^2J^{-1/2}$ ราคาต้นทุนของขดลวดทองแดงปรับตัวลดลงได้เพียงเล็กน้อย ในขณะที่ราคาต้นทุนของแกนเหล็กปรับตัวเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นราคาต้นทุนรวมจึงปรับตัวเพิ่มขึ้นตามราคาต้นทุนของแกนเหล็ก ด้านคุณลักษณะจะเห็นว่าเมื่อสัมประสิทธิ์ประกอบแกนเหล็กเพิ่มขึ้นความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กจะถูกปรับตัวลดลงอย่างมาก น้ำหนักของแกนเหล็กปรับตัวเพิ่มขึ้นอย่างมากและน้ำหนักของขดลวดทองแดงเริ่ม

คงที่ ทำให้แนวโน้มของน้ำหนักรวมปรับตัวเพิ่มขึ้นตามน้ำหนักของแกนเหล็ก ด้านรูปทรงของหม้อแปลงจำหน่ายมีอัตราส่วนความกว้างต่อความสูงของแกนเหล็กอยู่ในย่านมากกว่า “1” มากขึ้น ทำให้ได้ลักษณะทางโครงสร้างที่อ้วนและเตี้ย และจะสังเกตุเห็นว่าความสูงที่ได้มีลักษณะเกือบคงโดยที่ความกว้างมากขึ้น ทำให้ทราบว่าความสูงต่ำสุดมีค่าอยู่ในย่านหนึ่งเท่านั้นการเพิ่มสัมประสิทธิ์ประกอบแกนเหล็กจะไม่ทำให้ได้ความสูงต่ำลงได้อีก

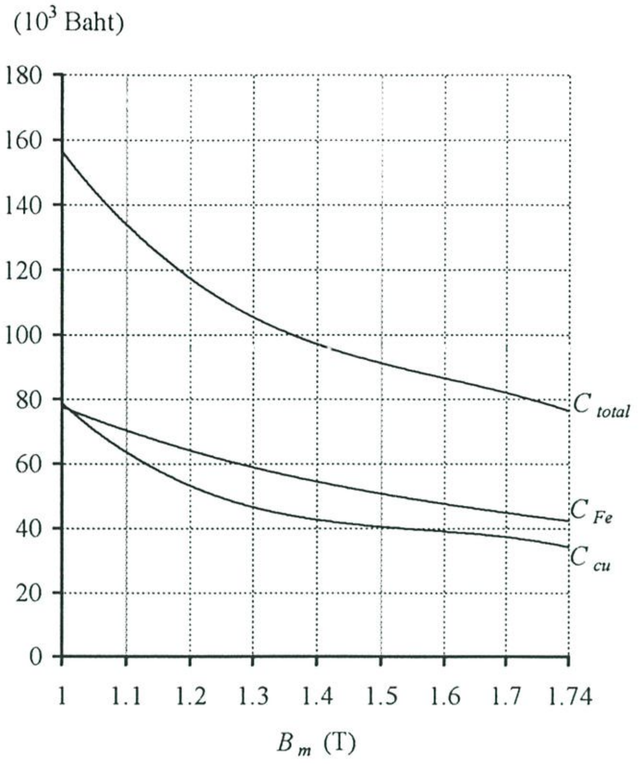
การเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ประกอบของแกนเหล็กจะส่งผลกระทบต่อราคาต้นทุนและคุณลักษณะต่าง ๆ ด้านน้ำหนักของขดลวดทองแดงจะมีผลต่อราคาต้นทุนรวมเป็นอย่างมาก เป็นผลมาจากราคาต้นทุนของวัสดุขดลวดทองแดงแพงกว่าแกนเหล็ก 1.91 เท่า และจะสังเกตุเห็นว่าการปรับตัวของความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กจะแปรผกผันกับน้ำหนักของแกนเหล็ก ในทำนองเดียวกัน การปรับตัวของความหนาแน่นของกระแสจะแปรผกผันกับน้ำหนักของขดลวด โดยที่ตำแหน่งสัมประสิทธิ์ประกอบแกนเหล็ก 4×10^{-4} $m^2J^{-1/2}$ ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสามารถปรับตัวขึ้นสูงสุด กำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลดและขณะมีโหลดได้ค่าอยู่ภายใต้ข้อกำหนด (974 W และ 5,499 W ตามลำดับ) น้ำหนักรวมและราคาต้นทุนรวมต่ำสุด (920 kg และ82,060 บาท ตามลำดับ) ด้านรูปทรงของแกนเหล็กพบว่าสัมประสิทธิ์ประกอบแกนเหล็กที่ค่าน้อย ๆ จะได้รูปทรงของหม้อแปลงที่มีลักษณะผอม-สูง และหากใช้ค่าประกอบแกนเหล็กที่ค่ามาก ๆ จะได้รูปทรงของหม้อแปลงที่อ้วน-เตี้ย แสดงรูปทรงแกนเหล็กเมื่อเปลี่ยนสัมประสิทธิ์ประกอบแกนดังรูปที่ 5.4



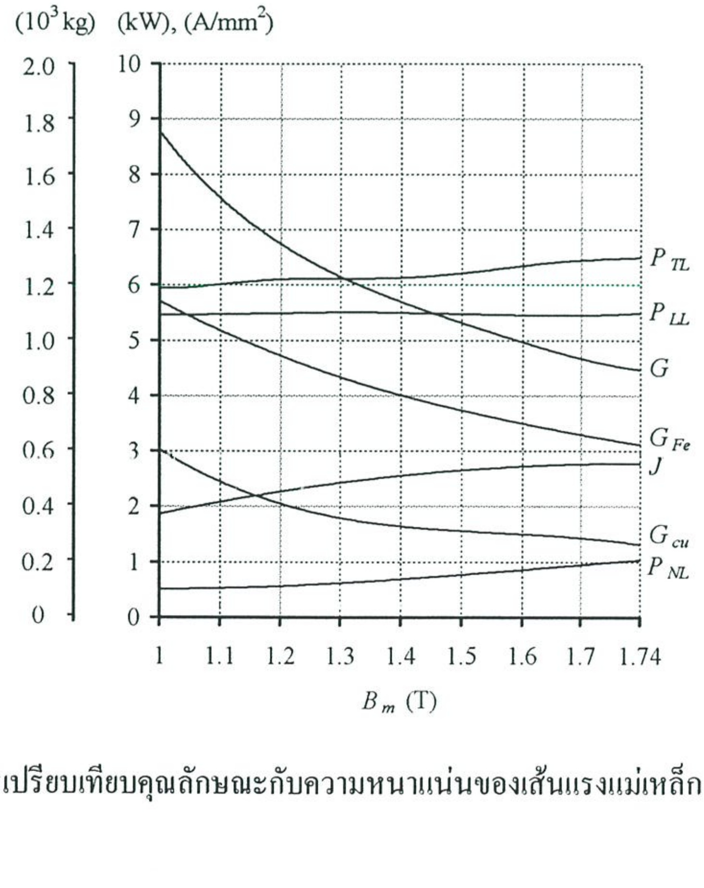
รูปที่ 5.4 รูปทรงของแกนเหล็กเมื่อเปลี่ยนสัมประสิทธิ์ประกอบแกนในย่านต่าง ๆ

5.2.2 การวิเคราะห์ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก

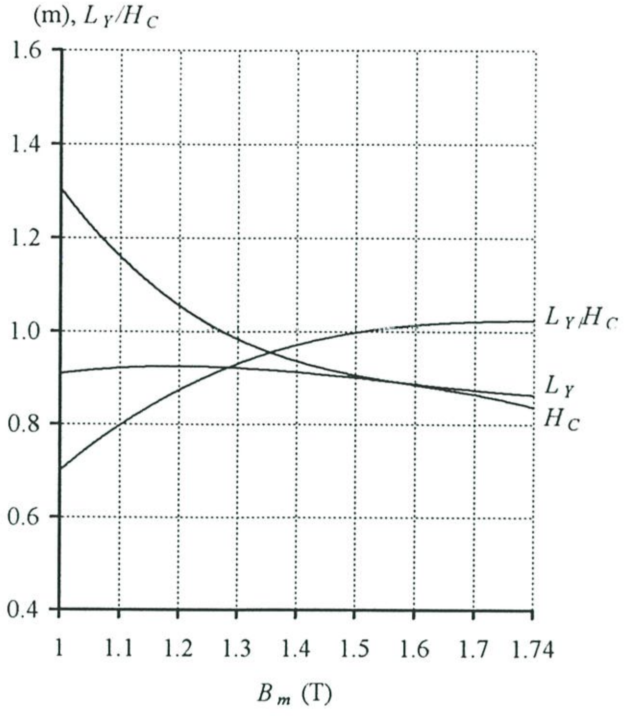
ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กจะสัมพันธ์กับกำลังสูญเสียที่เกิดจากแกนเหล็ก การศึกษาผลกระทบเมื่อเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กต่อราคาต้นทุนและคุณลักษณะต่าง ๆ โดยจะทำการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายและกำหนดเงื่อนไขให้ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุดอยู่ในย่านระหว่าง 1.0–1.8 T ลำดับละ 1.0 T



รูปที่ 5.5 การเปรียบเทียบต้นทุนกับความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก



รูปที่ 5.6 การเปรียบเทียบคุณลักษณะกับความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก



รูปที่ 5.7 การเปรียบเทียบรูปทรงของแกนเหล็กกับความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก

จากการออกแบบโดยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมได้ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กอยู่ในย่าน 1.0-1.74 T มีผลของคำตอบอยู่ภายใต้ข้อกำหนด การเพิ่มความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กมากขึ้นจะไม่ทำให้ราคาต้นทุนรวมลดต่ำลงได้อีกเพราะถูกจำกัดด้วยข้อกำหนดของกำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลด ผลกระทบต่อราคาต้นทุนเปรียบเทียบกับความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กแสดงดังรูปที่ 5.5 เมื่อปรับความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเพิ่มขึ้นนอกจากจะทำให้ราคาต้นทุนของแกนเหล็กลดลงแล้วยังทำให้ราคาต้นทุนของขดลวดทองลดลงตามด้วย ซึ่งจะทำให้ราคาต้นทุนรวมลดลงอย่างมาก ดังจะเห็นว่าที่ตำแหน่ง 1 T มีราคาต้นทุนรวมมากกว่าที่ตำแหน่ง 1.74 T ถึง 2 เท่า

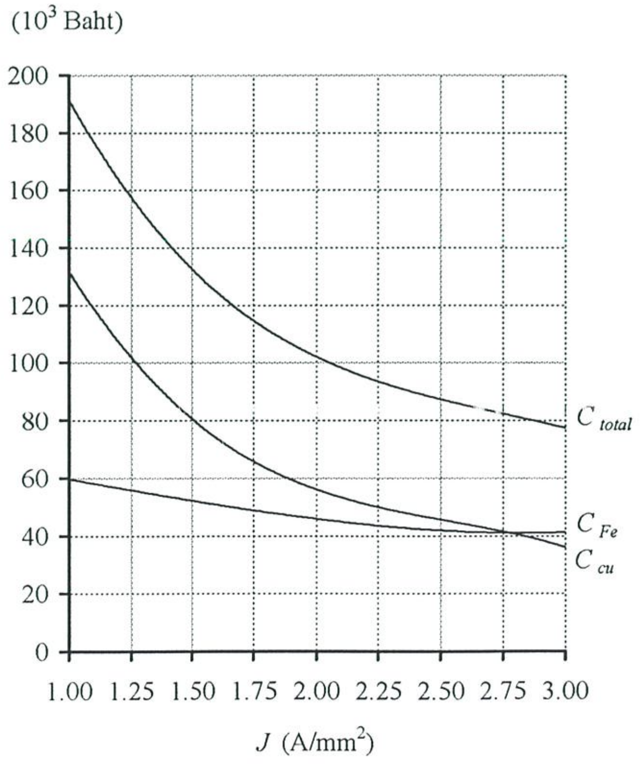
ด้านคุณลักษณะเปรียบเทียบกับความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กแสดงดังรูปที่ 5.6 จะเห็นว่าเมื่อปรับความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเพิ่มขึ้น กำลังสูญเสียขณะมีโหลดจะถูกปรับตัวใกล้กับข้อกำหนด (5,500 W) โดยที่ความหนาแน่นของกระแสจะปรับตัวเพิ่มขึ้น ซึ่งเกิดจากการลดจำนวนรอบของขดลวดทำให้น้ำหนักขดลวดลดลง ในขณะที่กำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลดถูกปรับตัวเพิ่มขึ้นตามความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กทำให้น้ำหนักของแกนเหล็กลดลง ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุดอยู่ที่ 1.74 T กำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลดและขณะมีโหลดได้ค่าอยู่ภายใต้ข้อกำหนด (996 W และ 5,489 W ตามลำดับ) มีน้ำหนักรวมและต้นทนรวมต่ำสุด (890 kg และ 78,195 บาท ตามลำดับ)

ด้านรูปทรงของหม้อแปลงจำหน่ายเปรียบเทียบกับความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กดัง รูปที่ 5.7 จะเห็นว่าที่ย่านความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กน้อย ๆ อัตราส่วนความกว้างต่อความสูงของแกนเหล็กอยู่ในย่านน้อยกว่า “1” ลักษณะทางโครงสร้างที่ได้จะสูง-ผอม และเมื่อความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเพิ่มขึ้นลักษณะทางโครงสร้างจะถูกปรับให้เหมาะสม อัตราส่วนความกว้างต่อความสูงของแกนเหล็กจะใกล้เคียง “1”

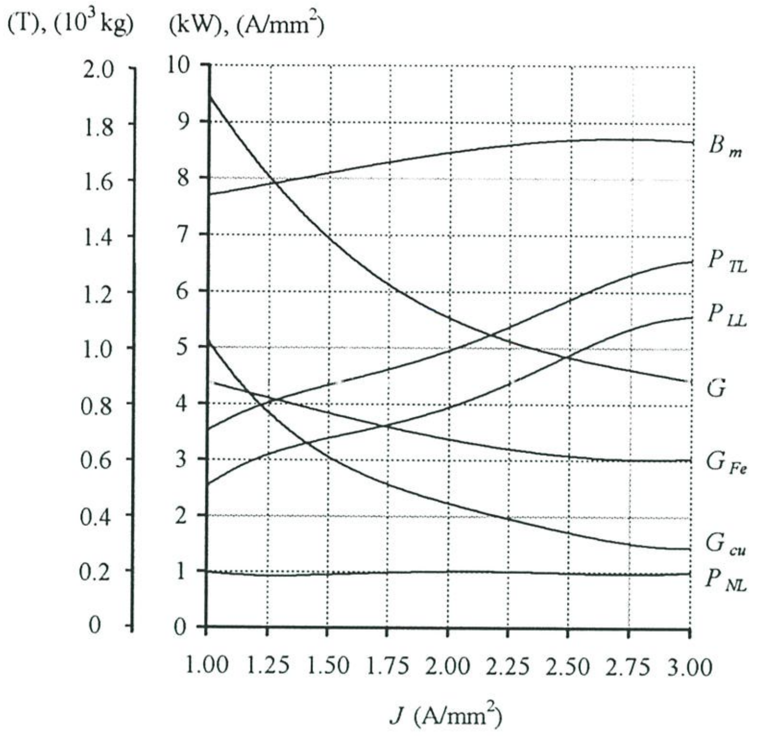
การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กจะส่งผลกระทบโดยตรงต่อกำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลดและราคาต้นทุนเป็นอย่างมาก ณ ตำแหน่งความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุดและไม่ทำให้กำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลดเกินข้อกำหนดจะทำให้ได้ราคาต้นทุนรวมต่ำลง ดังนั้นการเลือกใช้งานความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่ค่าสูงและเป็นที่ยอมรับจะทำให้ได้ราคาต้นทุนรวมต่ำ แต่จะต้องพิจารณาร่วมกับระบบการผลิตหม้อแปลงจำหน่ายเพื่อควบคุมความดังของเสียงให้อยู่ตามข้อกำหนดของมาตราฐานที่ใช้ทำการทดสอบ

5.2.3 การวิเคราะห์ความหนาแน่นของกระแส

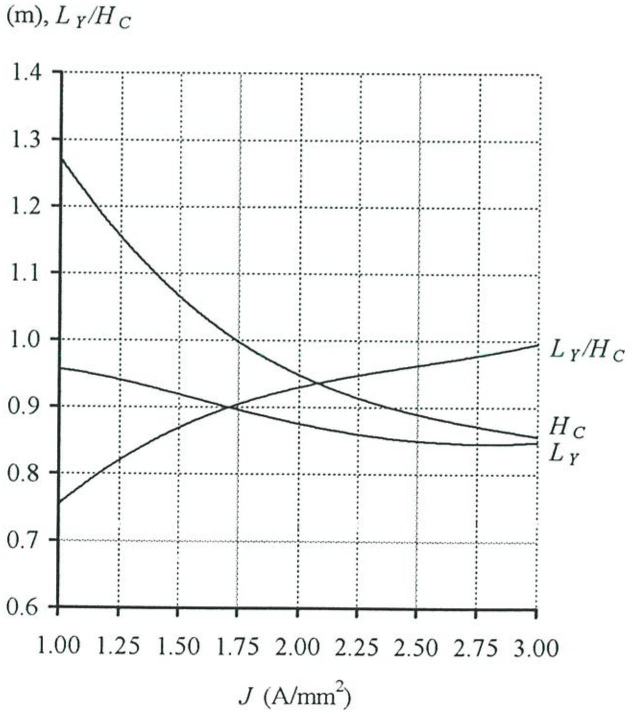
ความหนาแน่นของกระแสสามารถพิจารณาได้อีกความสัมพันธ์หนึ่งคือ พื้นที่หน้าตัดของขดลวด การวิเคราะห์ผลกระทบความหนาแน่นของกระแสต่อราคาต้นทุนและคุณลักษณะต่าง ๆ โดยทำการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายและกำหนดเงื่อนไขให้ความหนาแน่นของกระแสสูงสุดอยู่ในย่านระหว่าง 1–4 A/mm^2 ลำดับละ 1 A/mm^2



รูปที่ 5.8 การเปรียบเทียบราคาต้นทุนกับความหนาแน่นของกระแส



รูปที่ 5.9 การเปรียบเทียบคุณลักษณะกับความหนาแน่นของกระแส



รูปที่ 5.10 การเปรียบเทียบรูปทรงของแกนเหล็กกับความหนาแน่นของกระแส

จากการออกแบบโดยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมได้ย่านของความหนาแน่นของกระแสอยู่ระหว่าง 1-3 A/mm^2 ได้คำตอบอยู่ภายใต้ข้อกำหนด การเพิ่มความหนาแน่นของกระแสมากขึ้นจะ

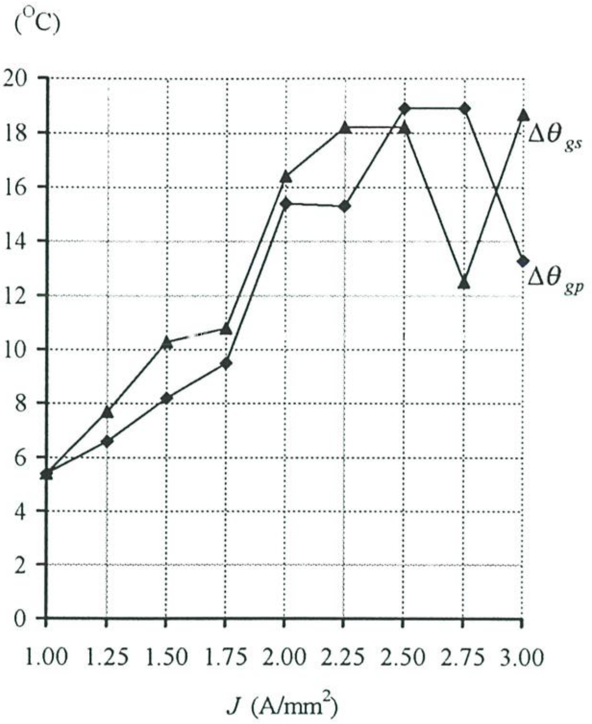
ไม่ทำให้ราคาต้นทุนลดต่ำลงได้อีกเพราะถูกจำกัดด้วยข้อกำหนดของกำลังสูญเสียขณะมีโหลด ผลกระทบต่อราคาต้นทุนของความหนาแน่นกระแสดังรูปที่ 5.8 จะเห็นว่าเมื่อปรับความหนาแน่นของกระแสเพิ่มขึ้นจะทำให้ราคาต้นทุนรวมปรับตัวลดลงอย่างมาก เป็นผลมาจากราคาต้นทุนของขดลวดปรับตัวลดลงอย่างมาก ในขณะที่ราคาต้นทุนของแกนเหล็กปรับลดลงเพียงเล็กน้อย

ด้านคุณลักษณะเปรียบเทียบกับความหนาแน่นของกระแสดังรูปที่ 5.9 จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มความหนาแน่นของกระแสจะทำให้น้ำหนักของแกนเหล็กปรับตัวลงเพียงเล็กน้อยในขณะที่น้ำหนักของขดลวดปรับตัวลดลงอย่างมาก นอกจากนี้ยังเห็นว่าการเพิ่มความหนาแน่นของกระแสจะทำให้ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กปรับตัวขึ้นได้สูงสุดใช้ประโยชน์แกนเหล็กได้อย่างเต็มที่ช่วยลดน้ำหนักแกนทำให้ราคาต้นทุนจากแกนเหล็กลดต่ำลง

ด้านรูปทรงของหม้อแปลงจำหน่ายเปรียบเทียบกับความหนาแน่นของกระแสดังรูปที่ 5.10 จะเห็นว่าการเพิ่มความหนาแน่นของกระแสทำให้รูปทรงที่ได้ลดลง ย่านความหนาแน่นของกระแสน้อย ๆ อัตราส่วนความกว้างต่อความสูงของแกนเหล็กมีค่าน้อยทำให้ลักษณะทางโครงสร้างที่ได้จะสูง-ผอม และเมื่อความหนาแน่นของกระแสเพิ่มขึ้นลักษณะทางโครงสร้างจะถูกปรับให้เหมาะสมอัตราส่วนความกว้างต่อความสูงของแกนเหล็กจะใกล้เคียง “1”

ความหนาแน่นของกระแสจะแปรผันตามกำลังสูญเสียขณะมีโหลด ดังนั้นการเลือกใช้งานความหนาแน่นของกระแสสูงสุดตามข้อกำหนดและไม่ทำให้กำลังสูญเสียขณะมีโหลดเกินข้อกำหนดจะทำให้ได้ผลการออกแบบที่เหมาะสมและมีราคาต่ำ แต่จะต้องพิจารณาควบคู่ไปกับการระบายความร้อนภายในขดลวดให้เหมาะสมกับเครื่องระบายความร้อนด้วย แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิแตกต่างระหว่างน้ำมันถึงขดลวดกับความหนาแน่นของกระแสดังรูปที่ 5.11

จากรูปที่ 5.11 จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มความหนาแน่นของกระแสจะทำให้อุณหภูมิแตกต่างระหว่างน้ำมันถึงขดลวดเพิ่มขึ้น ในกรณีที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นสูงสุดตามข้อกำหนดจำเป็นจะต้องมีการเพิ่มพื้นที่ระบายความร้อนโดยการเพิ่มร่องน้ำมันเพื่อช่วยระบายความร้อนออกจากขดลวด ด้านขดลวดทุติยภูมิจะเพิ่มร่องน้ำมันระบายความร้อนที่ความหนาแน่นกระแส 2.75 A/mm^2 และด้านขดลวดปฐมภูมิจะเพิ่มร่องน้ำมันระบายความร้อนที่ความหนาแน่นกระแส 3.0 A/mm^2 จะเห็นว่าอุณหภูมิมีการปรับตัวลดลงที่ตำแหน่งดังกล่าว



รูปที่ 5.11 การเปรียบเทียบอุณหภูมิแตกต่างระหว่างน้ำมันถึงขดลวดกับความหนาแน่นของกระแส

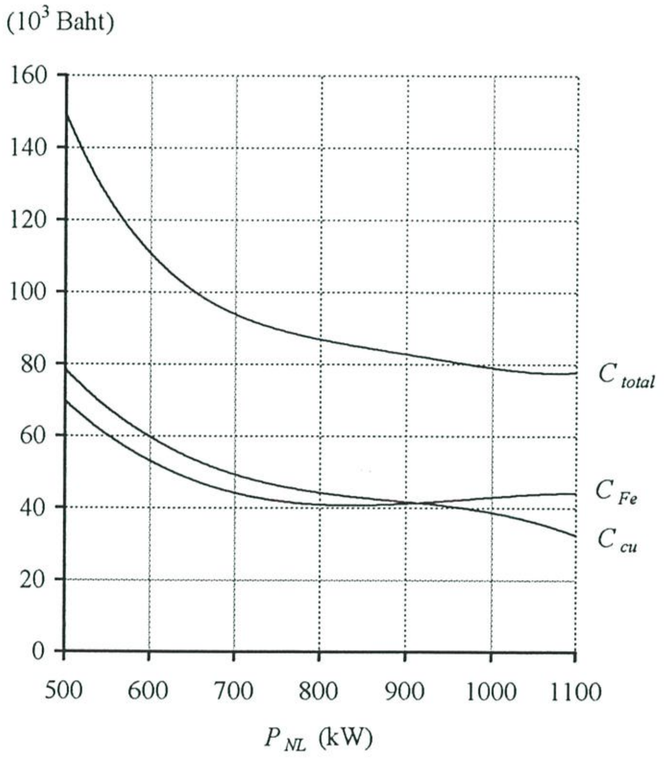
5.3 การวิเคราะห์ผลกระทบของข้อกำหนดที่ใช้ออกแบบหม้อแปลงจำหน่าย

โดยทั่วไป ข้อกำหนดที่ใช้สำหรับออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายมักขึ้นอยู่กับผู้ใช้ เพื่อความเหมาะสมกับระบบที่นำไปใช้งานได้แก่ กำลังสูญเสีย, ประสิทธิภาพ, น้ำหนัก, หรือรูปทรง เป็นต้น ซึ่งในหัวข้อนี้จะทำการศึกษาผลกระทบของราคาต้นทุนและคุณลักษณะต่าง ๆ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงข้อกำหนด การศึกษาข้อกำหนดของการออกแบบนี้ทำให้ทราบพฤติกรรมแนวโนมของราคาต้นทุน คุณลักษณะของตัวแปร และลักษณะทางโครงสร้างเมื่อเปลี่ยนแปลงข้อกำหนดในย่านต่าง ๆ โดยข้อกำหนดที่จะทำการศึกษานี้มีอยู่ 4 ข้อกำหนดดังนี้

1. ข้อกำหนดของกำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลดสูงสุด
2. ข้อกำหนดของกำลังสูญเสียขณะมีโหลดสูงสุด
3. ข้อกำหนดของเปอร์เซ็นต์อิมพิแดนซ์ลัดวงจร
4. ข้อกำหนดของประสิทธิภาพ

5.3.1 การวิเคราะห์ผลกระทบของข้อกำหนดกำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลด

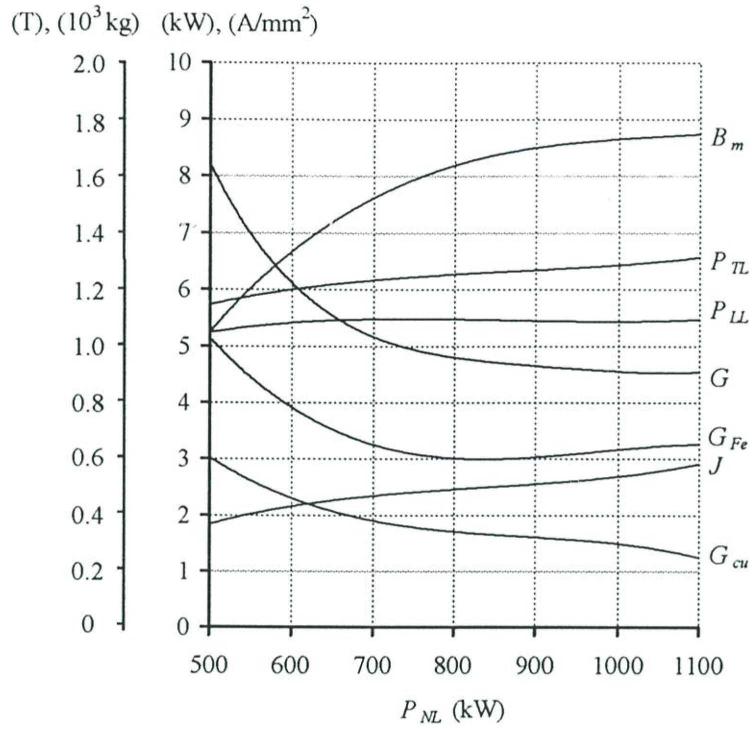
กำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลดเป็นกำลังสูญเสียคงที่ของหม้อแปลงแม้ยังไม่ได้จ่ายภาระโหลดก็ตาม หม้อแปลงที่มีกำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลดน้อยจึงเป็นสิ่งที่ผู้ใช้ต้องการ การวิเคราะห์ผลกระทบของข้อกำหนดกำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลดต่อราคาต้นทุนและคุณลักษณะต่าง ๆ โดยจะทำการออกแบบหม้แปลงจำหน่ายและกำหนดให้ข้อกำหนดของกำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลดสูงสุดเปลี่ยนแปลงอยู่ในย่านระหว่าง 400–1300 W ลำดับละ 100 W



รูปที่ 5.12 การเปรียบเทียบราคาต้นทุนกับกำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลด

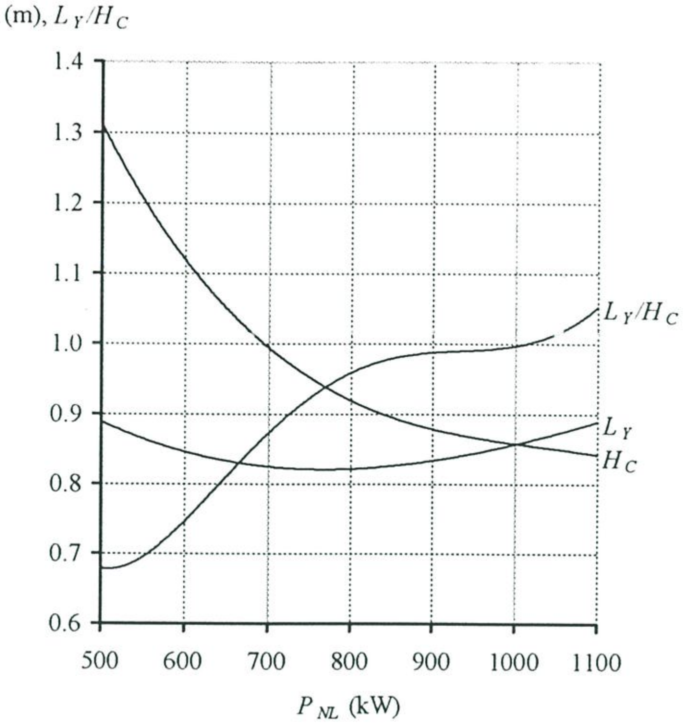
จากการออกแบบโดยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมได้ข้อกำหนดของกำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลดอยู่ในย่านระหว่าง 500 - 1,100 W ได้คำตอบอยู่ภายใต้ข้อกำหนด การเพิ่มข้อกำหนดของกำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลดเกิน 1,100 W จะไม่ทำให้ราคาต้นทุนลดต่ำลงได้อีกเพราะถูกจำกัดด้วยความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด (1.75 T) ในทางกลับกันการลดข้อกำหนดของกำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลดลงต่ำกว่า 500 W จะไม่สามารถหาคำตอบได้เพราะถูกจำกัดด้วยความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กต่ำสุด (1 T) การเปรียบเทียบผลกระทบต่อราคาต้นทุนเมื่อเปลี่ยนแปลงข้อกำหนดของกำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลดดังรูปที่ 5.12 จะเห็นว่าเมื่อปรับข้อกำหนดของกำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลดเพิ่มขึ้น ต้นทุนรวมจะปรับตัวลดลงเป็นผลมาจากการปรับตัวลดลงของต้นทุนแกนเหล็ก

และขดลวดทองแดง ราคาต้นทุนรวมต่ำสุด 77,987 บาท ณ กำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลดและขณะมีโหลด 1,097 W และ 5,453 W ตามลำดับ



รูปที่ 5.13 การเปรียบเทียบคุณลักษณะกับกำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลด

ด้านคุณลักษณะเปรียบเทียบกับข้อกำหนดของกำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลดดังรูปที่ 5.13 จะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงข้อกำหนดของกำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลดจะส่งผลกระทบต่อความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเป็นอย่างมาก และย่านที่ใช้งานของความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กก็จะเป็นตัวจำกัดย่านของข้อกำหนดกำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลดด้วยเช่นกัน กำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลดต่ำสุดอยู่ที่ 444 W โดยมีความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก 1 T กำลังสูญเสียขณะมีโหลด 5,495 W ได้ราคาต้นทุนรวม 168,015 บาท เมื่อปรับข้อกำหนดของกำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลดเพิ่มขึ้นความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กจะปรับตัวเพิ่มขึ้นตาม และเมื่อความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กปรับตัวขึ้นสูงสุด (1.75 T) ซึ่งเป็นข้อจำกัดของการออกแบบนี้ การขยายข้อกำหนดของกำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลดเกินตำแหน่งดังกล่าวจะไม่ทำให้ราคาต้นทุนรวมลดต่ำลงได้อีก



รูปที่ 5.14 การเปรียบเทียบรูปทรงของแกนเหล็กกับกำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลด

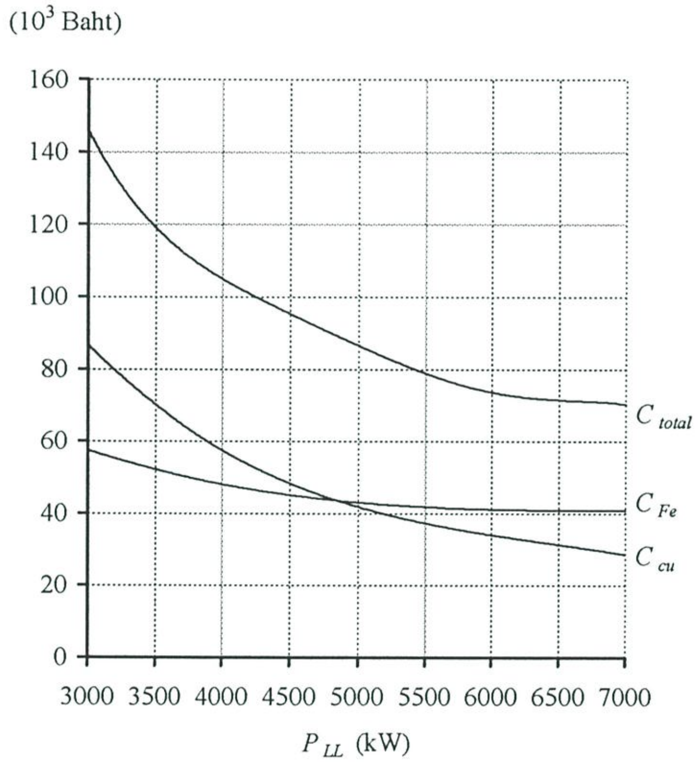
ด้านรูปทรงของหม้อแปลงจำหน่ายเปรียบเทียบกับข้อกำหนดกำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลด ดังรูปที่ 5.14 จะเห็นว่าที่ย่านข้อกำหนดกำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลดต่ำ อัตราส่วนความกว้างต่อความสูงของแกนเหล็กอยู่ย่านน้อยกว่า "1" ลักษณะทางโครงสร้างที่ได้จะสูง-ผอม และเมื่อข้อกำหนดกำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลดเพิ่มขึ้นลักษณะทางโครงสร้างจะถูกปรับให้เหมาะสมขึ้น อัตราส่วนความกว้างต่อความสูงของแกนเหล็กจะใกล้เคียง "1"

5.3.2 การวิเคราะห์ผลกระทบของข้อกำหนดกำลังสูญเสียขณะมีโหลด

กำลังสูญเสียขณะมีโหลดเป็นกำลังสูญเสียของหม้อแปลงที่เปลี่ยนแปลงตามภาระโหลด สำหรับข้อกำหนดของกำลังสูญเสียขณะมีโหลดที่จะทำการศึกษานี้เป็นกำลังสูญเสียขณะทำการจ่ายภาระที่พิกัดโหลด การวิเคราะห์ผลกระทบของข้อกำหนดกำลังสูญเสียขณะมีโหลดต่อราคาต้นทุนและคุณลักษณะต่าง ๆ โดยจะทำการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายและกำหนดให้ข้อกำหนดของกำลังสูญเสียขณะมีโหลดเปลี่ยนแปลงอยู่ในย่าน 1,000 - 10,000 W ลำดับละ 500 W

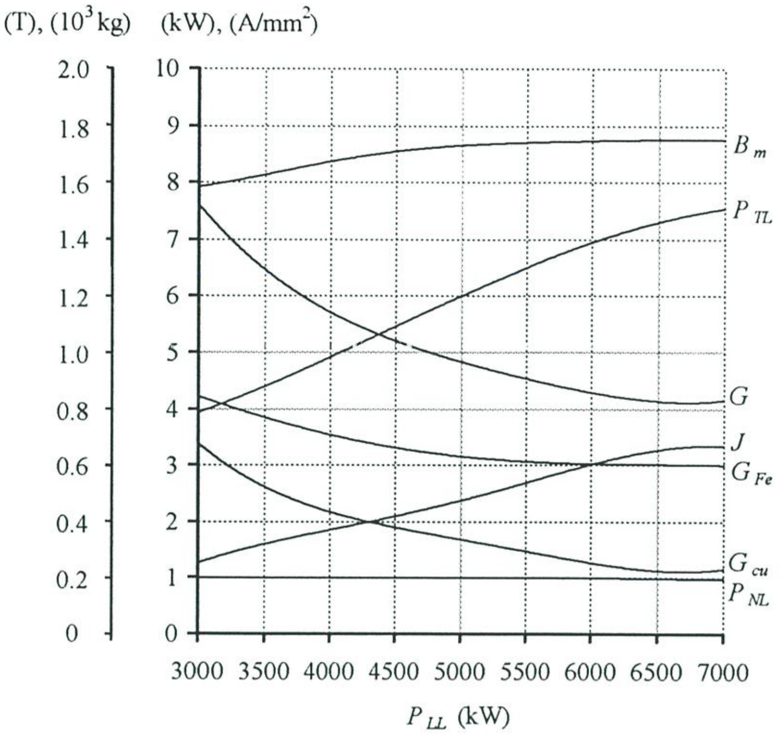
จากการออกแบบโดยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมได้ข้อกำหนดของกำลังสูญเสียขณะมีโหลดอยู่ในย่านระหว่าง 3,000 - 7,500 W ได้คำตอบอยู่ภายใต้ข้อกำหนด กำลังสูญเสียขณะมีโหลดสูงสุดที่ได้ 7,226 W ณ ความหนาแน่นของกระแสด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ 3.34 และ 3.48 A/mm^2 ตามลำดับ กำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลด 864 W ราคาต้นทุนรวมต่ำสุด 67,852 บาท การเพิ่มข้อกำหนดของกำลังสูญเสียขณะมีโหลดเกินตำแหน่งดังกล่าวจะไม่ทำให้ราคาต้นทุนต่ำลงได้อีกเพราะถูก

จำกัดด้วยความหนาแน่นของกระแสสูงสุด (3.5 A/mm^2) ในทางกลับกันกำลังสูญเสียขณะมีโหลดต่ำสุดที่ได้ 2,551 W โดยมีความหนาแน่นของกระแสด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ 1.02 และ 1.09 A/mm^2 ตามลำดับ กำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลด 1,000 W ได้ราคาต้นทุนรวม 171,774 บาท การลดข้อกำหนดของกำลังสูญเสียขณะมีโหลดต่ำกว่านี้จะไม่สามารถหาคำตอบได้เพราะถูกจำกัดด้วยความหนาแน่นของกระแสต่ำสุด (1 A/mm^2)

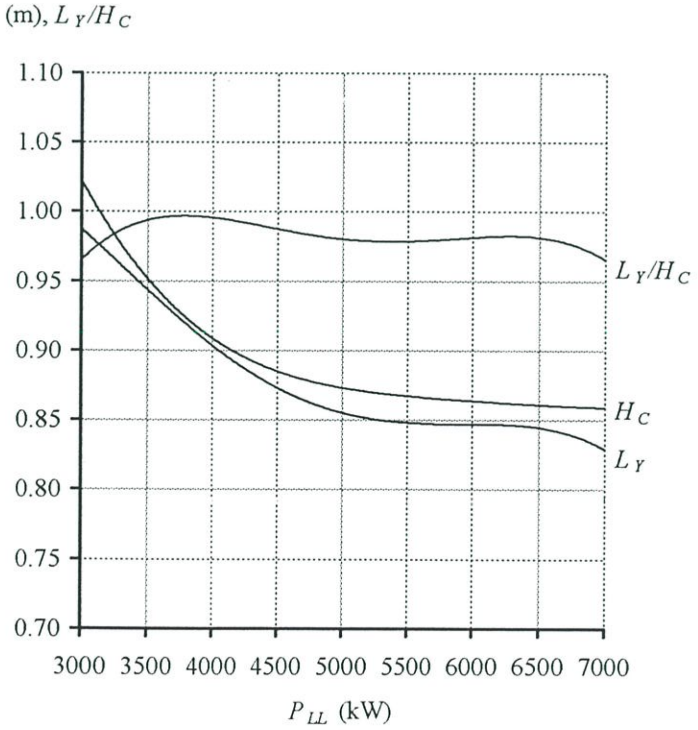


รูปที่ 5.15 การเปรียบเทียบราคาต้นทุนกับกำลังสูญเสียขณะมีโหลด

การเปรียบเทียบผลกระทบต่อราคาต้นทุนเมื่อเปลี่ยนแปลงข้อกำหนดของกำลังสูญเสียขณะมีโหลดดังรูปที่ 5.15 จะเห็นว่าเมื่อปรับข้อกำหนดของกำลังสูญเสียขณะมีโหลดเพิ่มขึ้นต้นทุนของแกนเหล็กจะปรับตัวลดลงเพียงเล็กน้อย ในขณะที่ต้นทุนของขดลวดทองแดงจะปรับตัวลดลงอย่างมาก



รูปที่ 5.16 การเปรียบเทียบคุณลักษณะกับกำลังสูญเสียขณะมีโหลด



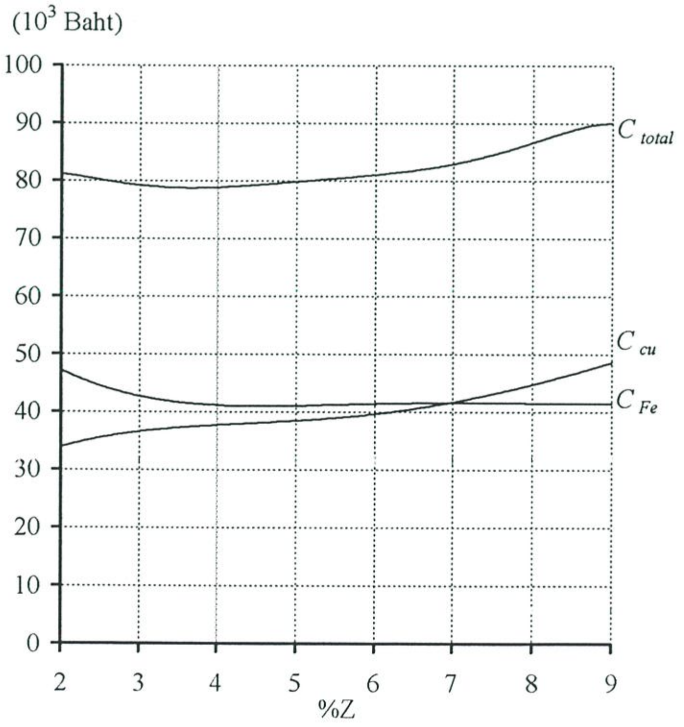
รูปที่ 5.17 การเปรียบเทียบรูปทรงของแกนเหล็กกับกำลังสูญเสียขณะมีโหลด

ด้านคุณลักษณะเปรียบเทียบกับกำลังสูญเสียขณะมีโหลดดังรูปที่ 5.16 จะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงข้อกำหนดของกำลังสูญเสียขณะมีโหลดมีผลกระทบต่อความหนาแน่นของกระแส และย่านที่ใช้งานของความหนาแน่นของกระแสก็จะเป็นตัวจำกัดย่านของข้อกำหนดกำลังสูญเสียขณะมีโหลด

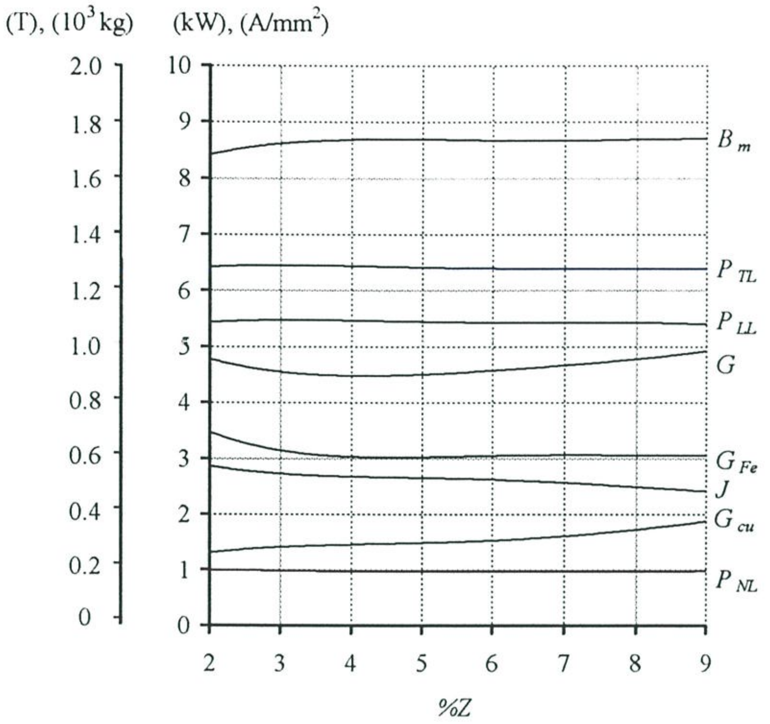
ด้านรูปทรงของหม้อแปลงจำหน่ายเปรียบเทียบกับข้อกำหนดกำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลดดังรูปที่ 5.17 จะเห็นว่า อัตราส่วนความกว้างต่อความสูงของแกนเหล็กจะเปลี่ยนแปลงอยู่ในย่านใกล้เคียง “1” มีรูปทรงที่เหมาะสม

5.3.3 การวิเคราะห์ผลกระทบของข้อกำหนดเปอร์เซ็นต์อิมพิแดนซ์ลัดวงจร

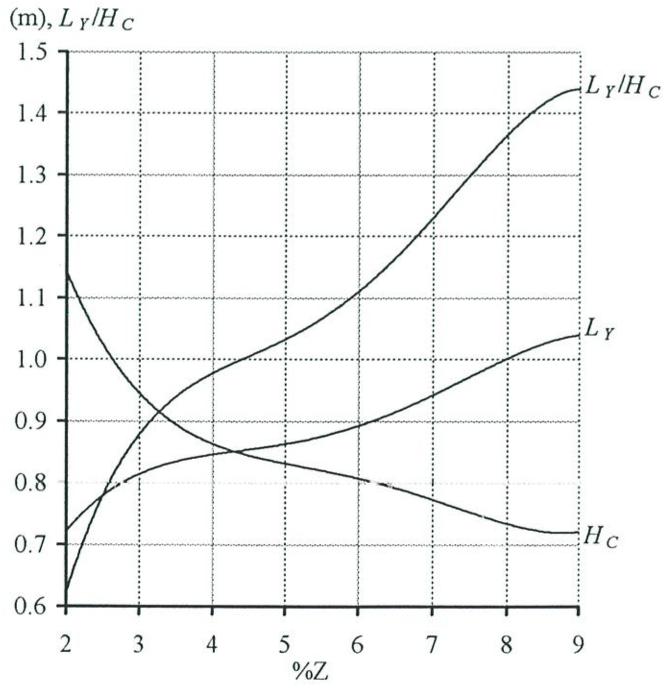
อิมพิแดนซ์ลัดวงจรเป็นความต้านทานไฟฟ้าที่เกิดจากความต้านทานและความเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลง ข้อดีของอิมพิแดนซ์ลัดวงจรคือช่วยลดกระแสขณะเกิดการลัดวงจร และข้อเสียของอิมพิแดนซ์ลัดวงจรคือทำให้เกิดแรงดันตกขณะจ่ายภาระโหลดส่งผลกระทบต่อเรกุเลชัน การวิเคราะห์ผลกระทบของข้อกำหนดเปอร์เซ็นต์อิมพิแดนซ์ลัดวงจรต่อราคาต้นทุน และคุณลักษณะต่าง ๆ โดยจะทำการออกแบบหม้แปลงจำหน่ายและกำหนดให้ข้อกำหนดของเปอร์เซ็นต์อิมพิแดนซ์ลัดวงจรเปลี่ยนแปลงอยู่ในย่านระหว่าง 1–9 % ลำดับละ 1 %



รูปที่ 5.18 การเปรียบเทียบราคาต้นทุนกับเปอร์เซ็นต์อิมพิแดนซ์ลัดวงจร



รูปที่ 5.19 การเปรียบเทียบคุณลักษณะกับเปอร์เซ็นต์อิมพิแดนซ์ลัดวงจร



รูปที่ 5.20 การเปรียบเทียบรูปทรงของแกนเหล็กกับเปอร์เซ็นต์อิมพิแดนซ์ลัดวงจร

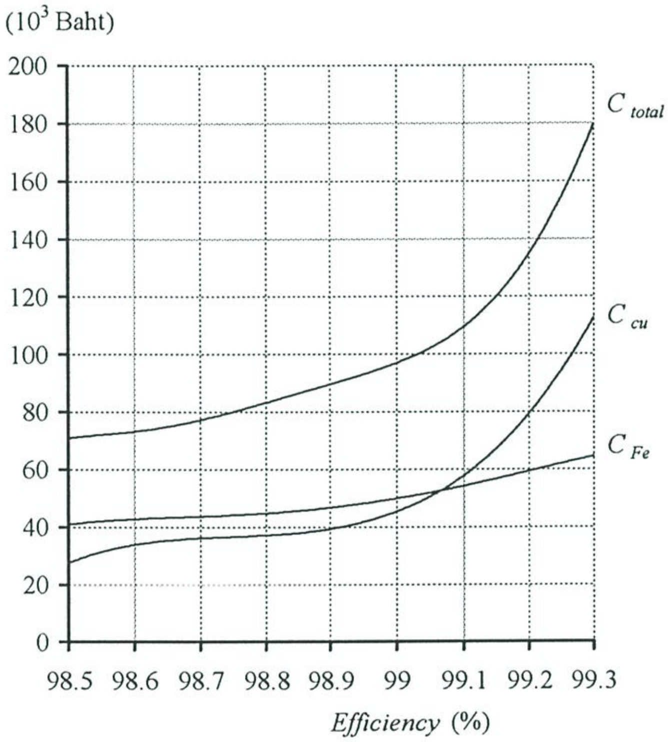
จากการออกแบบโดยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมได้ข้อกำหนดเปอร์เซ็นต์อิมพิแดนซ์ลัดวงจรอยู่ในย่านระหว่าง 2-9 % ได้ผลของคำตอบอยู่ภายใต้ข้อกำหนด การเปรียบเทียบผลกระทบต่อราคาต้นทุนเมื่อเปลี่ยนแปลงข้อกำหนดเปอร์เซ็นต์อิมพิแดนซ์ลัดวงจรแสดงดังรูปที่ 5.18 จะเห็นว่าข้อกำหนดเปอร์เซ็นต์อิมพิแดนซ์ลัดวงจรที่มีราคาต้นทุนรวมต่ำจะอยู่ในย่านระหว่าง 3-5 % ราคาต้นทุนรวมต่ำสุด 78,195 บาท ณ เปอร์เซ็นต์อิมพิแดนซ์ลัดวงจร 3.88 % กำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลดและขณะมีโหลด 996 W และ 5,489 W ตามลำดับ

ด้านคุณลักษณะเปรียบเทียบกับเปอร์เซ็นต์อิมพิแดนซ์ลัดวงจรแสดงดังรูปที่ 5.19 ในช่วงแรกข้อกำหนดเปอร์เซ็นต์อิมพิแดนซ์ลัดวงจรอยู่ในย่านต่ำ ($\%Z$ =2%) ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กจะมีค่าน้อยกว่าข้อจำกัด แต่น้ำหนักของแกนเหล็กปรับตัวขึ้นทำให้กำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลดใกล้กับข้อกำหนด ในขณะเดียวกันความหนาแน่นของกระแสมีค่าสูงใกล้ข้อจำกัด แต่น้ำหนักของขดลวดทองแดงปรับตัวลดลงทำให้กำลังสูญเสียขณะมีโหลดใกล้กับข้อกำหนด จากลักษณะทางโครงสร้างดังกล่าวเป็นการปรับเพื่อให้อิมพิแดนซ์ลัดวงจรมีค่าอยู่ในย่านต่ำ จากนั้นเมื่อเพิ่มข้อกำหนดของเปอร์เซ็นต์อิมพิแดนซ์ลัดวงจรขึ้น ($\%Z$ =4%) ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กสามารถปรับตัวสูงขึ้นใกล้กับข้อจำกัดทำให้สามารถลดน้ำหนักของแกนเหล็กลง ในขณะที่ความหนาแน่นของกระแสปรับตัวลดลงทำให้น้ำหนักของขดลวดทองแดงปรับตัวเพิ่มขึ้น ซึ่งตำแหน่งดังกล่าวเป็นตำแหน่งที่มีน้ำหนักรวมต่ำสุด และเมื่อเพิ่มข้อกำหนดเปอร์เซ็นต์อิมพิแดนซ์ลัดวงจรเกินกว่านี้ น้ำหนักรวมจะถูกปรับตัวขึ้นตามน้ำหนักของขดลวดทองแดง โดยที่น้ำหนักของแกนเหล็กมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ทำให้ทราบว่าน้ำหนักของขดลวดทองแดงจะแปรผันตามข้อกำหนดเปอร์เซ็นต์อิมพิแดนซ์ลัด

ด้านรูปทรงของหม้อแปลงจำหน่ายเปรียบเทียบกับข้อกำหนดของอิมพิแดนซ์ลัดวงจรแสดงดังรูปที่ 5.20 จะเห็นว่าอิมพิแดนซ์ลัดวงจรจะส่งผลกระทบต่อรูปทรงของแกนเหล็กเป็นอย่างมาก อัตราส่วนความกว้างต่อความสูงของแกนเหล็กจะเปลี่ยนแปลงตาม ข้อกำหนดของอิมพิแดนซ์ลัดวงจรที่ย่านต่ำ ๆ อัตราส่วนความกว้างต่อความสูงของแกนเหล็กมีค่าน้อยกว่า “1” มาก ทำให้รูปทรงที่ได้มีลักษณะสูง-ผอม เมื่อข้อกำหนดของอิมพิแดนซ์ลัดวงจรเพิ่มขึ้นย่าน 4-5 % อัตราส่วนความกว้างต่อความสูงของแกนเหล็กมีค่าใกล้ “1” ทำให้รูปทรงสมส่วนขึ้น จากนั้นเมื่อข้อกำหนดของอิมพิแดนซ์ลัดวงจรเพิ่มขึ้นอีกย่าน 6-10 % อัตราส่วนความกว้างต่อความสูงของแกนเหล็กมีค่ามากกว่า“1” ทำให้รูปทรงที่ได้มีลักษณะเตี้ยและป้อม

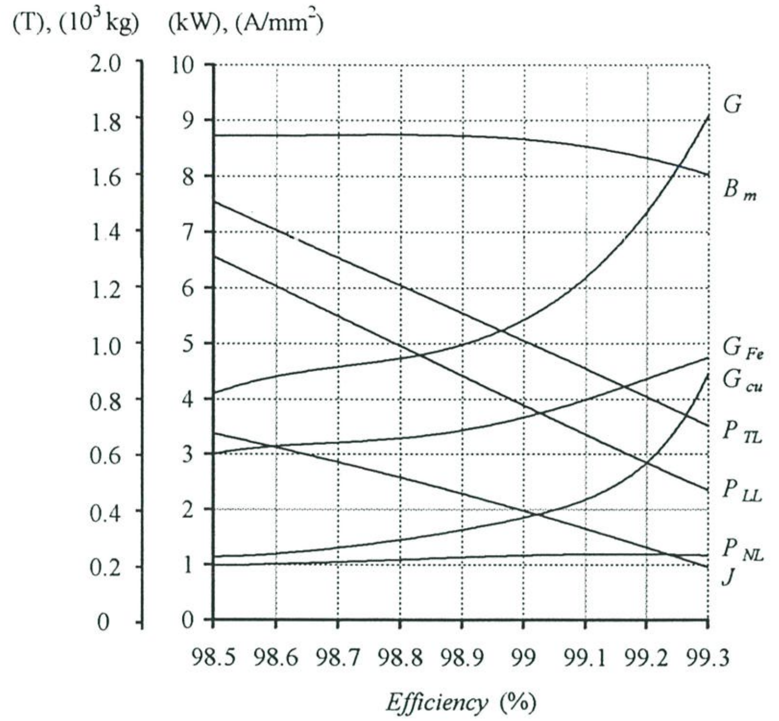
5.3.4 การวิเคราะห์ผลกระทบของข้อกำหนดประสิทธิภาพ

โดยทั่วไป ประสิทธิภาพของหม้อแปลงจำหน่ายมีค่าใช้งานอยู่ในย่านสูงไม่น้อยกว่า 98 % การวิเคราะห์ผลกระทบของข้อกำหนดประสิทธิภาพต่อราคาต้นทุนและคุณลักษณะต่าง ๆ โดยจะทำการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายและกำหนดให้ประสิทธิภาพต่ำสุดเปลี่ยนแปลงอยู่ในย่าน 98.5–99.5 % ลำดับละ 0.1 % และปล่อยให้กำลังสูญเสียเปลี่ยนแปลงเพื่อหาราคาต้นทุนต่ำสุดในแต่ละย่านที่ทำการออกแบบ

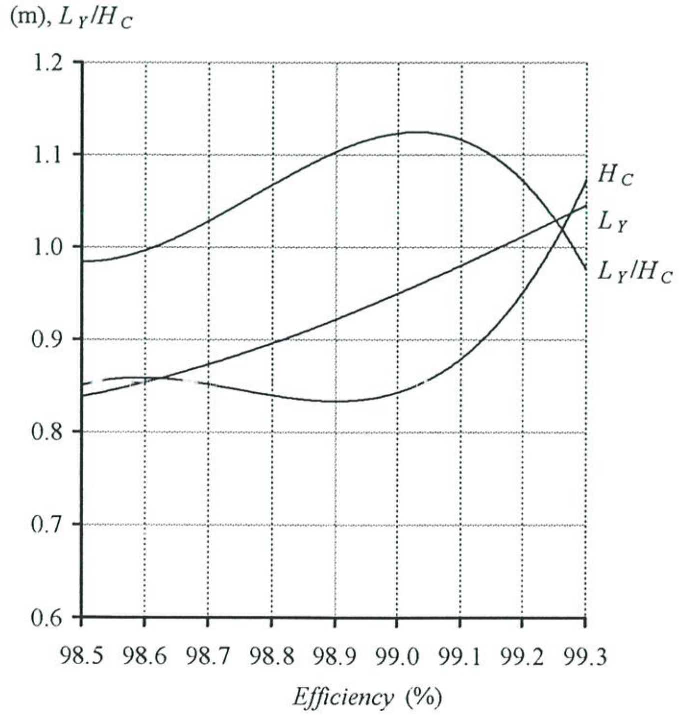


รูปที่ 5.21 การเปรียบเทียบราคาต้นทุนกับประสิทธิภาพ

จากการออกแบบโดยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมได้ประสิทธิภาพอยู่ในย่าน 98.5-99.3 % มีผลของคำตอบอยู่ภายใต้ข้อกำหนด โดยที่ประสิทธิภาพสูงสุดที่ได้ 93.36 % กำลังสูญเสียขณะมีโหลดและขณะไม่มีโหลด 932 W และ 2,275 W ตามลำดับ การเพิ่มข้อกำหนดของประสิทธิภาพมากกว่านี้จะไม่สามารถหาคำตอบได้เพราะถูกจำกัดด้วยค่าความหนาแน่นของกระแสต่ำสุด การเปรียบเทียบราคาต้นทุนกับประสิทธิภาพแสดงดังรูปที่ 5.21 , การเปรียบเทียบคุณลักษณะกับประสิทธิภาพแสดงดังรูปที่ 5.22 และการเปรียบเทียบรูปทรงของแกนเหล็กกับประสิทธิภาพแสดงดังรูปที่ 5.23 โดยสามารถแบ่งย่านการพิจารณาได้เป็น 2 ย่าน ดังนี้



รูปที่ 5.22 การเปรียบเทียบคุณลักษณะกับประสิทธิภาพ



รูปที่ 5.23 การเปรียบเทียบรูปทรงของแกนเหล็กกับประสิทธิภาพ

ย่านที่ 1. ประสิทธิภาพอยู่ในย่านระหว่าง 98.5–99.0 % ราคาต้นทุนของแกนเหล็กและขดลวดทองแดงต่ำและปรับตัวเพิ่มขึ้นในอัตราความชันต่ำ ดังจะเห็นว่าราคาต้นทุนรวมปรับตัวเพิ่มขึ้นในอัตราความชันไม่สูงนัก ด้านคุณลักษณะจะเห็นว่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กปรับตัวอยู่ใกล้ข้อจำกัดและความหนาแน่นของกระแสปรับตัวลดลงทำให้กำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลดปรับตัวเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยแต่กำลังสูญเสียขณะมีโหลดปรับตัวลดลงอย่างมากเพื่อลดกำลังสูญเสียรวมลงหรือเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพให้หม้อแปลงจำหน่าย ด้านรูปทรงของหม้อแปลงจำหน่ายมีอัตราส่วนความกว้างต่อความสูงของแกนเหล็กเพิ่มมากกว่า “1” เพียงเล็กน้อยทำให้ได้ลักษณะทางโครงสร้างอ้วนออกทางแนวกว้าง

ย่านที่ 2. ประสิทธิภาพอยู่ในย่านระหว่าง 99.0–99.3 % ราคาต้นทุนของแกนเหล็กปรับตัวเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยแต่ราคาต้นทุนของขดลวดทองแดงปรับตัวเพิ่มขึ้นอย่างมาก ทำให้ราคาต้นทุนรวมปรับตัวเพิ่มขึ้นมีอัตราความชันที่สูง ด้านคุณลักษณะจะเห็นว่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กปรับตัวลดลงแต่กำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลดปรับตัวเพิ่มขึ้น และความหนาแน่นของกระแสปรับตัวลดลงทำให้กำลังสูญเสียขณะมีโหลดปรับตัลดลงอย่างมาก ด้านรูปทรงของหม้อแปลงจำหน่ายมีอัตราส่วนความกว้างต่อความสูงของแกนเหล็กลดลงมาใกล้ “1” แต่ขนาดความกว้างและความสูงปรับตัวขึ้น ทำให้มีลักษณะโครงสร้างที่ใหญ่

การเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพส่งผลกระทบต่อราคาต้นทุนเป็นอย่างมาก ในช่วงแรกการการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพเพียง 0.1 % ทำให้ราคาต้นทุนเปลี่ยนแปลงประมาณ 1.1 % จากประสิทธิภาพเดิม และในย่านที่ 2 อัตราการเปลี่ยนแปลงของราคาต้นทุนจะเพิ่มขึ้นทุก ๆ การเพิ่มประสิทธิภาพ จะเห็นว่าย่านที่เหมาะสมในการเลือกนำไปใช้งานจึงอยู่ในย่านที่ 1 มีอัตราการเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้น สำหรับย่านที่ 2 เมื่อเพิ่มประสิทธิภาพมากขึ้นจะไม่คุ้มค่ากับราคาต้นทุนที่เสียไป

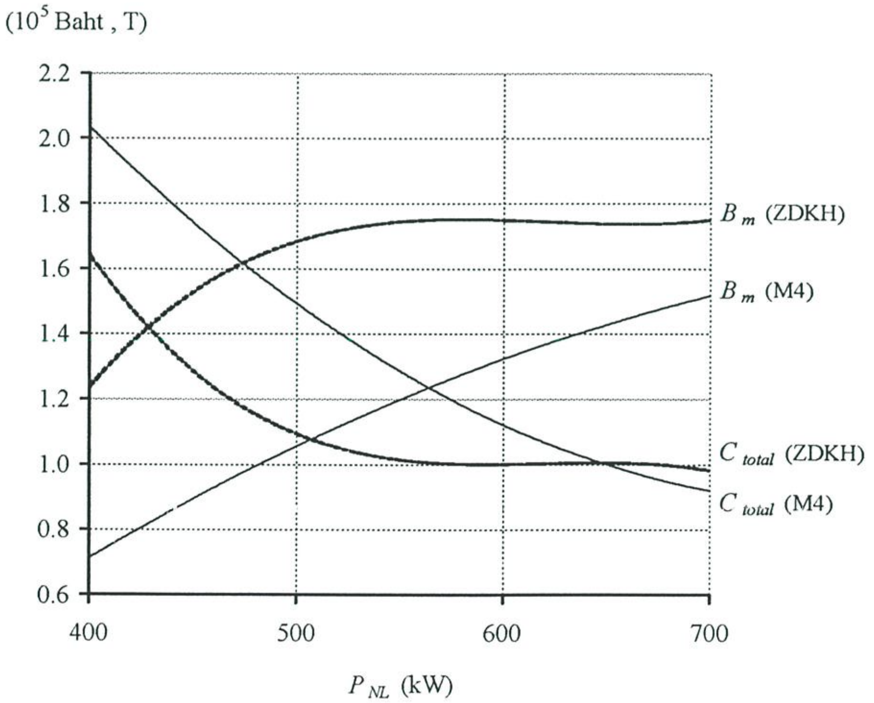
5.4 การวิเคราะห์ผลกระทบของวัสดุที่ใช้ออกแบบหม้อแปลงจำหน่าย

การศึกษาผลกระทบของวัสดุที่ใช้ทำการออกแบบหม้อแปลงจำหน่าย เป็นการศึกษาผลกระทบของราคาต้นทุนรวมเมื่อทำการเปลี่ยนชนิดของแกนเหล็ก โดยแกนเหล็กที่ทำการศึกษานี้มีอยู่ 2 ชนิดคือ แกนเหล็กชนิด M4 ความหนา 0.27 mm (ต้นทุนแกนเหล็ก 68 บาท/kg) และชนิด ZDKII ความหนา 0.23 mm (ต้นทุนแกนเหล็ก 100 บาท/kg) และทำการศึกษาผลกระทบต่อราคาต้นทุนรวมตามการวิเคราะห์ผลกระทบของข้อกำหนดกำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลด และการวิเคราะห์ผลกระทบของข้อกำหนดประสิทธิภาพ ในหัวข้อที่ 5.3.1 และ 5.3.4 ตามลำดับ

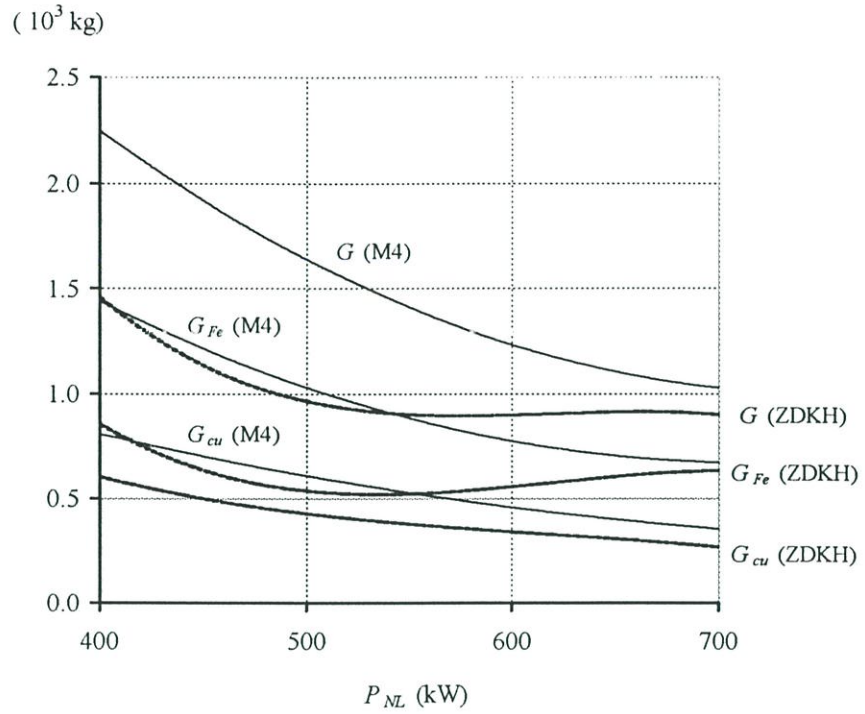
5.4.1 การวิเคราะห์ผลกระทบของวัสดุตามข้อกำหนดกำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลด

การวิเคราะห์ผลกระทบของวัสดุโดย จะทำการออกแบบหม้แปลงจำหน่ายด้วยแกนเหล็กชนิด ZDKH และกำหนดให้ข้อกำหนดของกำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลดสูงสุดเปลี่ยนแปลงอยู่ในย่านระหว่าง 400–1300 W ลำดับละ 100 W

จากการออกแบบโดยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมได้ข้อกำหนดของกำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลดอยู่ในย่านระหว่าง 400 - 700 W ได้คำตอบอยู่ภายใต้ข้อกำหนด การเพิ่มข้อกำหนดของกำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลดเกิน 700 W จะไม่ทำให้ราคาต้นทุนลดต่ำลงได้อีกเพราะถูกจำกัดด้วยความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด (1.75 T) ผลการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายด้วยแกนเหล็กชนิด ZDKH เปรียบเทียบกับแกนชนิด M4 แสดงในรูปที่ 5.24 เป็นการเปรียบเทียบราคาต้นทุนรวม พบว่า การใช้งานแกนเหล็กชนิด ZDKH จะเหมาะสมกับข้อกำหนดของกำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลดอยู่ในย่านต่ำ และการใช้งานแกนเหล็กชนิด M4 จะเหมาะสมกับข้อกำหนดของกำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลดอยู่ในย่านสูงขึ้น ด้านน้ำหนักเปรียบเทียบกับข้อกำหนดกำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลดดังรูปที่ 5.25 พบว่าการออกแบบด้วยแกนเหล็ก ZDKH จะให้น้ำหนักรวมที่ต่ำกว่าการออแบบด้วยแกนเหล็ก M4



รูปที่ 5.24 การเปรียบเทียบราคาต้นทุนเมื่อเปลี่ยนชนิดแกนเหล็กและข้อกำหนดกำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลดในย่านต่าง ๆ

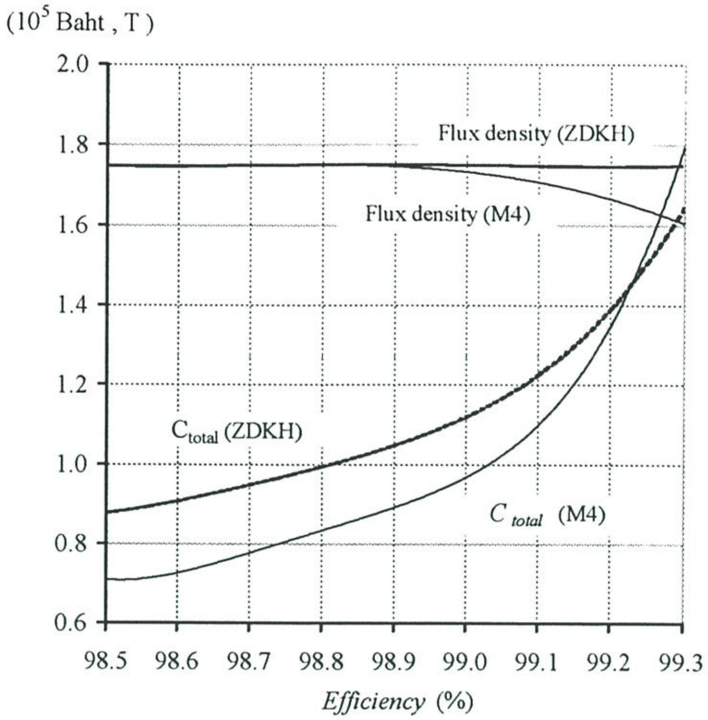


รูปที่ 5.25 การเปรียบเทียบน้ำหนักเมื่อเปลี่ยนชนิดแกนเหล็กและข้อกำหนดกำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลดในย่านต่าง ๆ

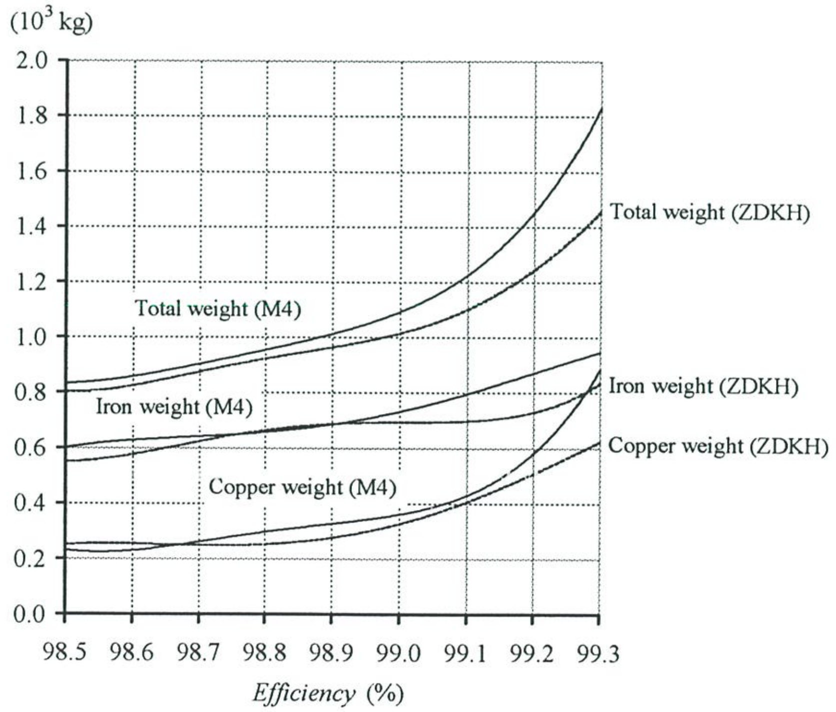
5.4.2 การวิเคราะห์ผลกระทบของวัสดุตามข้อกำหนดของประสิทธิภาพ

การวิเคราะห์ผลกระทบของวัสดุโดยจะทำการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายและกำหนดให้ประสิทธิภาพต่ำสุดเปลี่ยนแปลงอยู่ในย่าน 98.5–99.5 % ลำดับละ 0.1 % และปล่อยให้กำลังสูญเสียเปลี่ยนแปลงเพื่อหาราคาต้นทุนต่ำสุดในแต่ละย่านที่ทำการออกแบบ

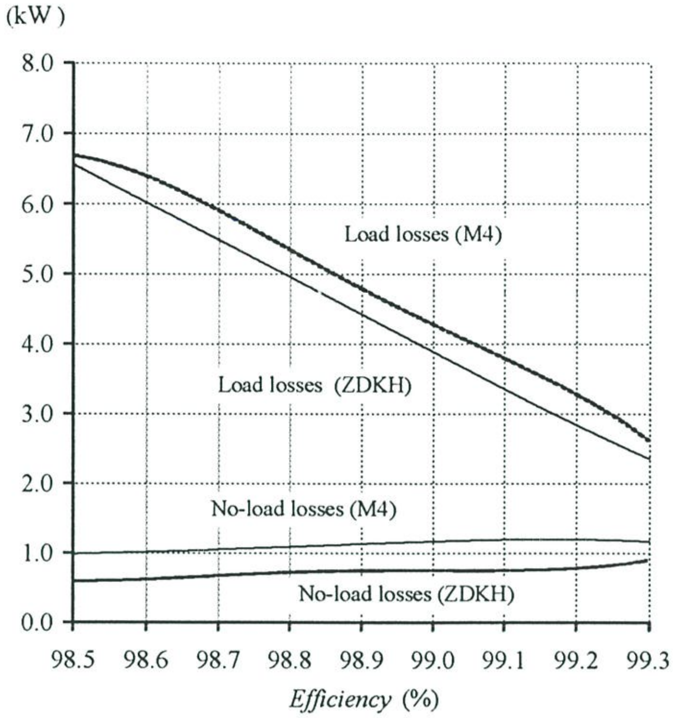
จากการออกแบบโดยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมได้ประสิทธิภาพอยู่ในย่าน 98.5-99.3 % มีผลของคำตอบอยู่ภายใต้ข้อกำหนด โดยที่ประสิทธิภาพสูงสุดที่ได้ 93.37 % กำลังสูญเสียขณะมีโหลดและขณะไม่มีโหลด 813 W และ 2,367 W ตามลำดับ การเพิ่มข้อกำหนดของประสิทธิภาพมากว่านี้จะไม่สามารถหาคำตอบได้เพราะถูกจำกัดด้วยค่าความหนาแน่นของกระแสต่ำสุด ผลการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายด้วยแกนเหล็กชนิด ZDKH เปรียบเทียบกับแกนชนิด M4 ในรูปที่ 5.26 เป็นการเปรียบเทียบราคาต้นทุนรวมพบว่า การใช้งานแกนเหล็กชนิด ZDKH จะเหมาะสมกับข้อกำหนดของประสิทธิภาพอยู่ในย่านที่สูง และการใช้งานแกนเหล็กชนิด M4 จะเหมาะสมกับข้อกำหนดของกำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลดอยู่ในย่านต่ำลง



รูปที่ 5.26 การเปรียบเทียบราคาต้นทุนเมื่อเปลี่ยนชนิดแกนเหล็กและประสิทธิภาพในย่านต่าง ๆ



รูปที่ 5.27 การเปรียบเทียบน้ำหนักเมื่อเปลี่ยนชนิดแกนเหล็กและประสิทธิภาพในย่านต่าง ๆ



รูปที่ 5.28 การเปรียบเทียบกำลังสูญเสียเมื่อเปลี่ยนชนิดแกนเหล็กและประสิทธิภาพในย่านต่าง ๆ

ด้านน้ำหนักเปรียบเทียบกับข้อกำหนดของประสิทธิภาพดังรูปที่ 5.27 พบว่าข้อกำหนดของประสิทธิภาพอยู่ในย่านต่ำ น้ำหนักรวมจากการออกแบบด้วยแกนเหล็กชนิด ZDKH จะให้น้ำหนักต่ำกว่าชนิด M4 เพียงเล็กน้อย เมื่อข้อกำหนดของประสิทธิภาพเพิ่มสูงขึ้น น้ำหนักรวมจากการออกแบบด้วยแกนเหล็กชนิด ZDKH จะต่ำกว่าชนิด M4 มากขึ้น

ด้านคุณลักษณะของกำลังสูญเสียเปรียบเทียบกับข้อกำหนดของประสิทธิภาพดังรูปที่ 5.28 พบว่า การเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของกำลังสูญเสียของแกนเหล็กสองชนิดแตกต่างกัน แกนเหล็กชนิด M4 จะให้ระดับกำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลดที่สูงกว่าแกนเหล็กชนิด ZDKH และแกนเหล็กชนิด ZDKH จะให้ระดับกำลังสูญเสียขณะมีโหลดที่สูงกว่าแกนเหล็กชนิด M4 การเลือกใช้งานชนิดของแกนเหล็กจะขึ้นอยู่กับระดับกำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลด

จากผลการเปรียบเทียบของแกนเหล็กทั้ง 2 ชนิด ทำให้ทราบว่าแกนเหล็กชนิด M4 เหมาะสมกับการใช้งานทั่วไปมีย่านการใช้งานที่กว้างกว่าแกนเหล็กชนิด ZDKH ดังจะเห็นจากผลการเปรียบเทียบข้างต้น สำหรับแกนเหล็กชนิด ZDKH จะเหมาะสำหรับหม้อแปลงที่ต้องการกำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลดต่ำ หรือประสิทธิภาพสูง

5.5 บทสรุป

การศึกษาผลกระทบของราคาต้นทุนรวมของหม้อแปลงจำหน่ายเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรหรือข้อกำหนดต่าง ๆ ทำให้ทราบถึงพฤติกรรมทางคุณลักษณะหรือโครงสร้างต่าง ๆ เปลี่ยนแปลงไปในแนวทางใดที่ทำให้ราคาต้นทุนรวมต่ำสุด จากผลที่ทำการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

1. การเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์ประกอบแกนเหล็กส่งผลกระทบทั้งด้านโครงสร้างและราคาต้นทุนเป็นอย่างมาก จากการศึกษาพบว่าย่านใช้งานของสัมประสิทธิ์ประกอบแกนเหล็กที่สามารถหาราคาต้นทุนรวมต่ำสุดจะอยู่ในย่าน 4–6 $\times 10^{-4}$ $m^2J^{-1/2}$ ซึ่งเป็นย่านที่มีการเปลี่ยนแปลงของราคาต้นทุนรวมต่ำและมีรูปทรงของแกนเหล็กที่เหมาะสม
2. ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุดจะเป็นตัวกำหนดกำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลดสูงสุด ในทางกลับกันข้อกำหนดของกำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลดจะเป็นตัวจำกัดความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเช่นกัน การออกแบบที่ตำแหน่งความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุดและไม่ทำให้กำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลดเกินข้อกำหนดจะทำให้ได้ราคาต้นทุนรวมต่ำลง
3. ความหนาแน่นของกระแสสูงสุดจะเป็นตัวกำหนดกำลังสูญเสียขณะมีโหลดสูงสุด ในทางกลับกันข้อกำหนดของกำลังสูญเสียขณะมีโหลดจะเป็นตัวจำกัดความหนาแน่นของกระแสเช่นกัน การเลือกความหนาแน่นของกระแสสูงสุดโดยไม่ทำให้กำลังสูญเสียขณะมีโหลดเกินข้อกำหนดและมีอุณหภูมิแตกต่างระหว่างขดลวดกับน้ำมันเหมาะสมกับเครื่องระบายความร้อนจะทำให้ได้ราคาต้นทุนรวมที่ต่ำลง
4. อิมพิแดนซ์ลัดวงจรโดยส่วนใหญ่จะเปลี่ยนแปลงตามขนาดของหม้อแปลงเป็นหลัก หม้อแปลงที่มีขนาดใหญ่ขึ้นอิมพิแดนซ์ลัดวงจรที่ทำให้เกิดราคาเหมาะสมจึงปรับเพิ่มขึ้นตาม
5. ประสิทธิภาพของหม้อแปลงจำหน่ายจะขึ้นอยู่กับกำลังสูญเสียขณะมีโหลดเป็นส่วนใหญ่ แต่จะสังเกตุเห็นว่าเมื่อเพิ่มประสิทธิภาพถึงจุดที่ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กไม่สามารถรักษาระดับไว้ที่ข้อจำกัดบนได้ การเปลี่ยนแปลงในช่วงนี้จะทำให้ราคาต้นทุนต่อประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นอยู่ในอัตราที่สูงมาก
6. การพิจารณาเลือกใช้งานชนิดของแกนเหล็กจะพิจารณาจากกำลังสูญเสียและน้ำหนัก การใช้งานทั่วไปเหมาะสมกับ แกนเหล็กชนิด M4 ซึ่งมีย่านการใช้งานที่กว้างกว่าแกนเหล็กชนิด ZDKH สำหรับในกรณีพิเศษที่มีกำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลดต่ำ, ประสิทธิภาพสูง, หรือมีน้ำหนักต่ำ จะพิจารณาเลือกแกนเหล็กชนิด ZDKH จะมีความเหมาะสมกว่า

บทที่ 6
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายโดยทั่วไปจะทำการออกแบบด้วยแนวความคิดของผู้ออกแบบ โดยการกำหนดข้อมูลต่าง ๆ แบบลองผิดลองถูกจนกระทั่งได้ค่าที่มีความเหมาะสมตามเป้าหมายที่ต้องการ ทำให้ต้องเสียเวลาในการออกแบบอีกทั้งโอกาสที่จะได้ค่าที่เหมาะสมตามเป้าหมายที่ตั้งไว้ก็มีความเป็นไปได้น้อย วิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอแนวความคิดการออกแบบราคาของหม้อแปลงจำหน่ายแบบน้ำมันโดยใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมด้วยจีเนติกอัลกอริธึม ซึ่งมีพิกัดกำลังตั้งแต่ 50 – 1,000 kVA, 3 เฟส, 50 Hz, แรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ 11,000 – 33,000 V, แรงดันไฟฟ้าด้านทุติยภูมิ 380 - 450 V, Dyn11 โดยมีข้อกำหนดของการออกแบบคือ กำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลด กำลังสูญเสียขณะมีโหลด เปอร์เซ็นต์อิมพิแดนซ์ลัดวงจร และอุณหภูมิแตกต่างระหว่างขดลวดกับน้ำมัน จะต้องอยู่ภายในข้อกำหนดของการออกแบบ

การศึกษาการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายได้ทำศึกษาขั้นตอนการออกแบบทั้งในด้านทฤษฎีและด้านปฏิบัติของหม้อแปลงจำหน่าย แสดงตัวอย่างการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายแบบทั่วไปในบทที่ 2 พิกัดกำลัง 100 kVA, 3 เฟส, 50 Hz, แรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ 11,000 V, แรงดันไฟฟ้าด้านทุติยภูมิ 433/250 V, เปอร์เซ็นต์ของจุดต่อแยกแรงดันที่ด้านปฐมภูมิ $\pm 2 \times 2.5\%$, เปอร์เซ็นต์อิมพิแดนซ์ลัดวงจร 4%, กำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลดต้องไม่เกิน 250 W, กำลังสูญเสียขณะมีโหลดต้องไม่เกิน 1,550 W , Dyn11 ซึ่งเป็นการออกแบบที่สามารถผลิตใช้งานได้จริงเพราะกำหนดคุณลักษณะที่สอดคล้องกับการทำงานได้และใช้วัสดุที่มีใช้งานในทางอุตสาหกรรม

การออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายให้มีราคาที่เหมาะสมในบทที่ 3 ใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบสโตชาสติกอาศัยหลักการทางความน่าจะเป็น ซึ่งมีความเหมาะสมกับการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายที่มีตัวแปรอยู่เป็นจำนวนมาก ในงานวิจัยนี้พิจารณาผลของอุณหภูมิแตกต่างระหว่างขดลวดกับน้ำมัน โดยทำการพิจารณาอุณหภูมิแตกต่างจากการนำความร้อนที่ฉนวนเฉลี่ยร่วมกับข้อมูลเชิงสถิติในทางปฏิบัติ ผลของอุณหภูมิแตกต่างระหว่างขดลวดกับน้ำมันมีความผิดพลาดอยู่ในย่านไม่เกิน 3 องศา เป็นย่านที่ยอมรับในการออกแบบ เมื่อประยุกต์วิธีการหาค่าที่เหมาะสมร่วมกับการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายโดยพิจารณาผลของอุณหภูมิแตกต่างระหว่างขดลวดกับน้ำมัน ทำให้สามารถออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายมีราคาต้นทุนต่ำลง และมีขนาดร่องน้ำมันที่ความเหมาะสมกับการระบายความร้อน การออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายให้มีราคาที่เหมาะสมใช้เซตของตัวแปรเพื่อกำหนดโครงสร้างของหม้อแปลงจำหน่าย 6 ตัวแปร คือ ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก, พื้นที่หน้าตัดของลวดตัวนำด้านทุติยภูมิที่มีใช้ทางอุตสาหกรรม, เส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดตัวนำกลมด้านปฐมภูมิที่มีใช้ทางอุตสาหกรรม, ความหนาแน่นกระแสด้านทุติยภูมิ, ความหนาแน่นกระแส

ด้านปฐมภูมิ, และพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็ก แสดงตัวอย่างการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายให้มีราคาที่เหมาะสมโดยใช้จีเนติกอัลกอริธึมมีพิกัดกำลัง 315 kVA, 3 เฟส, 50 Hz, แรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ 11,000V, แรงดันไฟฟ้าด้านทุติยภูมิ 400/230V, เปอร์เซ็นต์ของจุดต่อแยกแรงดันที่ด้านปฐมภูมิ $\pm 2 \times 2.5\%$, เปอร์เซ็นต์อิมพิแดนซ์ลัดวงจร 4.0 %, Dyn11 มีข้อกำหนดคือ ค่ากำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลดต้องไม่เกิน 770 W, ค่ากำลังสูญเสียขณะมีโหลดต้องไม่เกิน 3,900 W อ้างอิงการออกแบบตามมาตราฐาน IEC 60076 ทำการออกแบบโดยมีเงื่อนไข 3 เงื่อนไข และเปรียบเทียบคุณลักษณะต่าง ๆ กับผลออกแบบที่ผลิตใช้งานในทางอุตสาหกรรม พบว่าผลการแบบที่ 1 เป็นการออกแบบที่ไม่พิจารณาผลของอุณหภูมิและกำหนดร่องน้ำมันตามต้นแบบทางอุตสาหกรรม แต่ผลของอุณหภูมิแตกต่างระหว่างขดลวดกับน้ำมันมีค่ามากกว่าข้อกำหนดอยู่เพียงเล็กน้อย เนื่องจากขนาดร่องน้ำมันระบายความร้อนของต้นแบบทางอุตสาหกรรมมีขนาดกว้างและระบายความร้อนออกจากขดลวดได้ดี ผลการออกแบบที่ 2 เป็นการออกแบบโดยพิจารณาผลของร่องน้ำมันที่เหมาะสมทำให้อัตราการลดลงของต้นทุนสามารถลงได้ไม่มากนักเมื่อเทียบกับต้นแบบทางอุตสาหกรรม และในการออกแบบที่ 3 เป็นการออแบบโดยทำการขยายย่านของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กเป็น 1.8 T และจำนวนชั้นแกนเหล็กเป็น 9 ชั้น ทำให้อัตราการลดลงของต้นทุนสามารถลงได้มากขึ้น แต่อาจเกิดต้นทุนแฝงอยู่ในรูปของการทำงานอันเนื่องมาจากการเรียงแผ่นเหล็กที่มีความยุ่งยากและเสียเวลามากขึ้น และอาจทำให้เกิดเสียงจากแกนเหล็กดังเกินมาตรฐานการทดสอบได้

ผลการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายที่มีราคาเหมาะสมของในบทที่ 4 เป็นหม้อแปลงจำหน่ายชนิดน้ำมันขนาดพิกัดกำลัง 315 kVA, 3 เฟส, 50 Hz, แรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ 22,000 V, แรงดันไฟฟ้าด้านทุติยภูมิ 400/230 V, เปอร์เซ็นต์ของจุดต่อแยกแรงดันที่ด้านปฐมภูมิ $\pm 2 \times 2.5\ \%$, Dyn11, ตามข้อกำหนดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ทำการออกแบบโดยใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสม มีเป้าหมายของการออกแบบที่ราคาต้นทุนรวมของแกนเหล็กและขดลวดต่ำ นำมาสร้างเป็นต้นแบบและทดสอบเพื่อพิสูจน์ความคงทนต่อแรงดันเกินและหาคุณลักษณะต่าง ๆ ตามข้อกำหนด จากการทดสอบได้ผลต่ำกว่าข้อกำหนด การเลือกใช้งานค่าสัมประสิทธิ์การทำงานที่เหมาะสมจะทำให้ผลจากการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายให้มีราคาเหมาะสมมีความเหมาะสมที่สุด

การวิเคราะห์การออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายในบทที่ 5 เป็นการนำหลักการในการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายให้มีราคาที่เหมาะสมที่ได้พิสูจน์มาแล้วว่าสามารถออกแบบและใช้งานได้จริง มาช่วยวิเคราะห์ผลกระทบของตัวแปรหรือข้อกำหนดต่าง ๆ ต่อราคาต้นทุน คุณลักษณะ และรูปทรงของหม้อแปลงจำหน่าย ทำให้ทราบแนวทางการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายเพื่อหาคุณลักษณะต่าง ๆ ได้ตามต้องการและมีราคาต้นทุนต่ำลง หม้อแปลงจำหน่ายที่นำมาศึกษาขนาดพิกัดกำลัง 500 kVA, 3 เฟส, 50 Hz, แรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ 22,000 V, แรงดันไฟฟ้าด้านทุติยภูมิ 400/230 V, Dyn11 กำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลดสูงสุด 1,000 W, กำลังสูญเสียขณะมีโหลดสูงสุด 5,500 W, เปอร์เซ็นต์อิมพิแดนซ์ลัดวงจร 4 %, ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กใช้งานอยู่ใน

ย่านระหว่าง 1–1.75 T, ความหนาแน่นของกระแสใช้งานอยู่ในย่านระหว่าง 1–3.5 A/mm^2, และอุณหภูมิแตกต่างระหว่างขดลวดกับน้ำมัน 19 ^{O}C ทำการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายโดยใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมมีวัตถุประสงค์เพื่อหาราคาต้นทุนรวมต่ำสุดในแต่ละย่านที่ทำการพิจารณา จากผลการศึกษาพบว่าการใช้งานสัมประสิทธิ์ประกอบแกนเหล็กที่เหมาะสมสามารถหาราคาต้นทุนรวมต่ำและมีรูปทรงที่เหมาะสมจะอยู่ในย่านระหว่าง 4–6 ×10^{-4} m^{2}J$^{-1/2}$ ซึ่งเป็นย่านที่มีการเปลี่ยนแปลงของราคาต้นทุนรวมต่ำ การเลือกใช้งานความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่ตำแหน่งสูงสุดโดยไม่ทำให้กำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลดเกินข้อกำหนด และการเลือกใช้งานความหนาแน่นของกระแสสูงสุดโดยไม่ทำให้กำลังสูญเสียขณะมีโหลดเกินข้อกำหนดโดยมีอุณหภูมิแตกต่างระหว่างขดลวดกับน้ำมันเหมาะสมกับเครื่องระบายความร้อนจะทำให้ได้ราคาต้นทุนรวมที่ต่ำลง

ในงานวิจัยนี้ทำการหม้อแปลงจำหน่ายโดยทำการศึกษาเฉพาะในส่วนของแกนเหล็กและขดลวด ทำการกำหนดย่านของพิกัดกำลังและแรงดันเพื่อวัตถุประสงค์หลักคือต้องการกำหนดโครงสร้างของขดลวดให้อยู่ในโครงสร้างเดียวกันตลอดทุกพิกัดกำลัง ดังนั้นข้อเสนอแนะเพิ่มเติมสำหรับการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายในอนาคตเพื่อปรับปรุงการออกแบบได้ตลอดย่ายของหม้อแปลงจำหน่ายมีดังต่อไปนี้

1. ศึกษาผลกระทบทางความร้อนของส่วนระบายความร้อน เพื่อกำหนดขนาดตัวถังหม้อแปลงและส่วนระบายความร้อนที่เหมาะสม
2. ศึกษาผลกระทบของราคาต้นทุนน้ำมัน ทำให้ทราบราคาต้นทุนรวมและหาโครงสร้างที่เหมาะสมกับส่วนระบายความร้อน
3. ทำการขยายพิกัดกำลังและแรงดัน โดยการเปลี่ยนชนิดของขดลวดให้มีความเหมาะสม ได้แก่ ขดลวดก้นหอย (Helical winding) หรือขดลวดแบบจาน (Disc winding) เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

[1] Fitzgeral, A.E., Kingsley, O.J., and Umans, S.D. **Electric machinery.** 5th Ed. Singapore : McGraw-Hill Book Co., 1992.

[2] ไสว ฐานีพานิชสกุล. **หม้อแปลงไฟฟ้า**. กรุงเทพมหานคร. : ฟันนี่ พับบลิชชิ่ง. 2525.

[3] Banspach, Hans. **Transformer-Design**. Bangkok. : Faculty of Technical Education and Science, King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok. 1975.

[4] Bharat Heavy Electricals Limited. **Transformers**. New Delhi. : Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited. 1987.

[5] Say M.G. **The Performance and Design of Alternating Current Machines.** 3rd Ed. The English Language Book Society and Pitman Publishing, 1958.

[6] Richard L. Bean, Nicholas Chackan, Harold R. Moore and Edward C. Wentz. **Transformers For the Electric Power Industry**. New York : McGraw-Hill Book Company. 1959.

[7] Blume L.F., Boyajian A., Camilli G., Lennox T.C., Minneci S., Montsinger V.M. **Transformer Engineering.** 2nd Ed. New York : John Wiley & Sons. 1951.

[8] Maetin J. Heathcote, Ceng, FIEE. **The J & P Transformer Book.** 12th Ed. Newnes.1998

[9] สำนักงานมาตราฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. **มาตรฐานผลิตภัณฑ์ อุตสาหกรรมหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง มอก. 384-2543.** กรุงเทพมหานคร: กระทรวงอุตสาหกรรม. 2543.

[10] IEC 60076-1. **Power transformers Part 1: General**, 2000.

[11] IEC 60076-2. **Power transformers Part 2: Temperature rise**, 2000.

[12] IEC 60076-3. **Power transformers Part 3: Insulation levels, dielectric tests and external clearances in air**, 2000.

[13] IEC 60076-5. **Power transformers Part 5: Ability to withstand short circuit**, 2000.

[14] IEEE Std C57.12.00-2000. **IEEE Standard General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers**. 2000.

[15] IEEE Std C57.12.90-1999. **IEEE Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers**. 1999.

[16] Nippon Steel Corporation. "Technical Data on Electrical Steel Sheet." Japan.

[17] Chaiwut Chat-uthai. "The Development of Non-Linear Constrained Optimisation Methods Applied to Electromagnetic Device." Ph.D.Thesis of the University of London and for the Diploma of Membership of Imperial College. 1995

[18] Zbigniew Michalewicz. **Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs.** 3rd Ed. New York : Springer-Verlag Belin Heidelberg. 1996.

[19] David E. Goldberg. **Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning.** Reading, Massachusetts : Addison-Wesley Publishing Company, Inc. 1989.

[20] Man K.F.,Tang K.S., Kwong S. **Genetic Algorithms concepts and Design.** Great Britain: Springer-Verlag London Limited. 1999.

[21] รศ.สุนันท์ ศรัณยนิตย์. **การถ่ายเทความร้อน**. กรุงเทพมหานคร : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น). 2545.

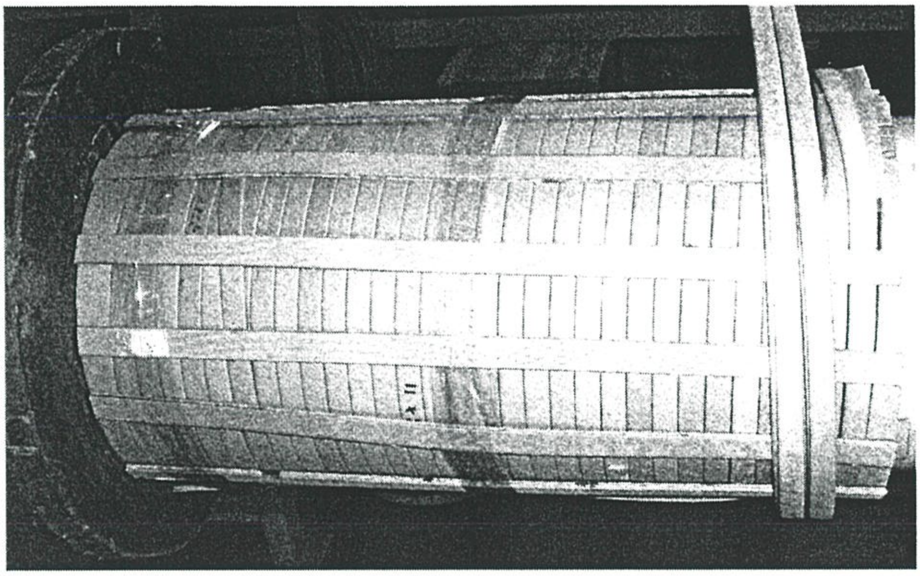
[22] Glenn Swift, Tom S., Waldemar Letn. "A Fundamental Approach to Transformer Termal Modeling-Part I: Theory and Equivalent Circuit," IEEE Trans. on Power Delivery, vol.16, No.2, April. 2001. Pp. 171-175.

[23] ชวรัตน์ เก่งธรรมกิจ, ต่อพงศ์ ภูมิภาค, ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย "การออกแบบราคาที่เหมาะสมของหม้อแปลงจำหน่ายโดยใช้จีเนติกอัลกอริธึม," วิศวกรรมสารลาดกระบัง, ปีที่ 20, ฉบับที่ 2 , มิถุนายน 2546

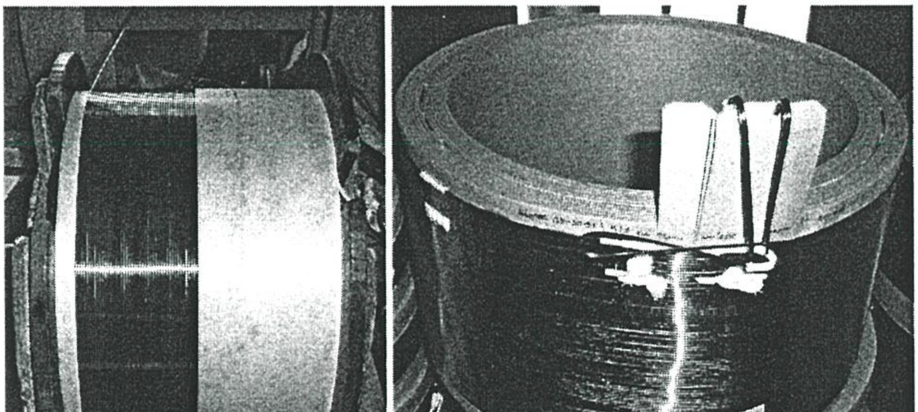
[24] Li Hui, Han Li, He Bei, Yang Shunchang. "Application Research Based on Improved Genetic Algorithm for Optimum Design of Power Transformers," Electrical Machines and Systems, 2001. ICEMS 2001.on page(s) : 242 – 245 vol.1.

ภาคผนวก ก.

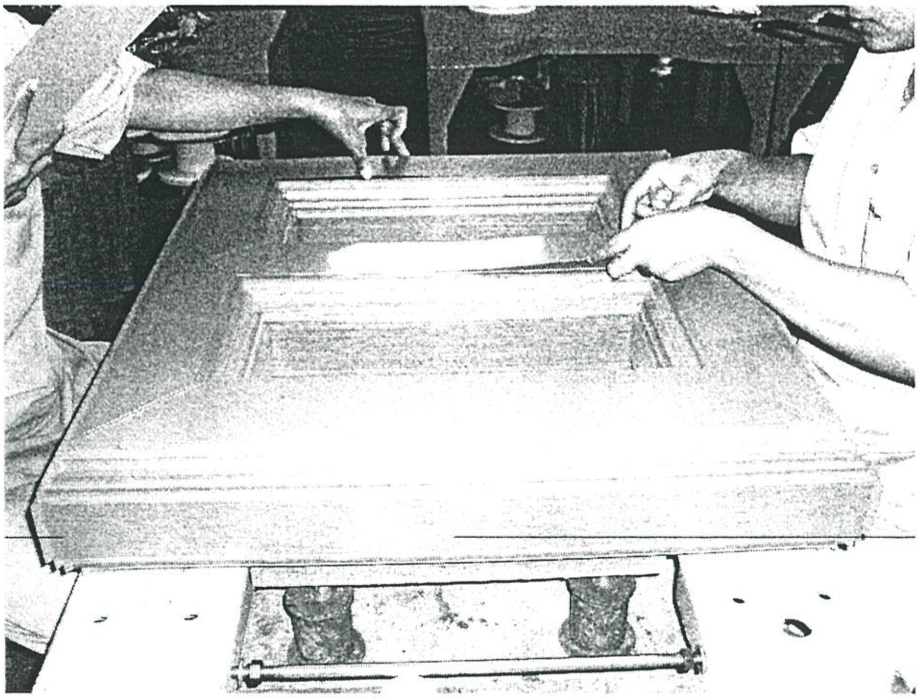
รูปการสร้างและทดสอบหม้อแปลงต้นแบบ



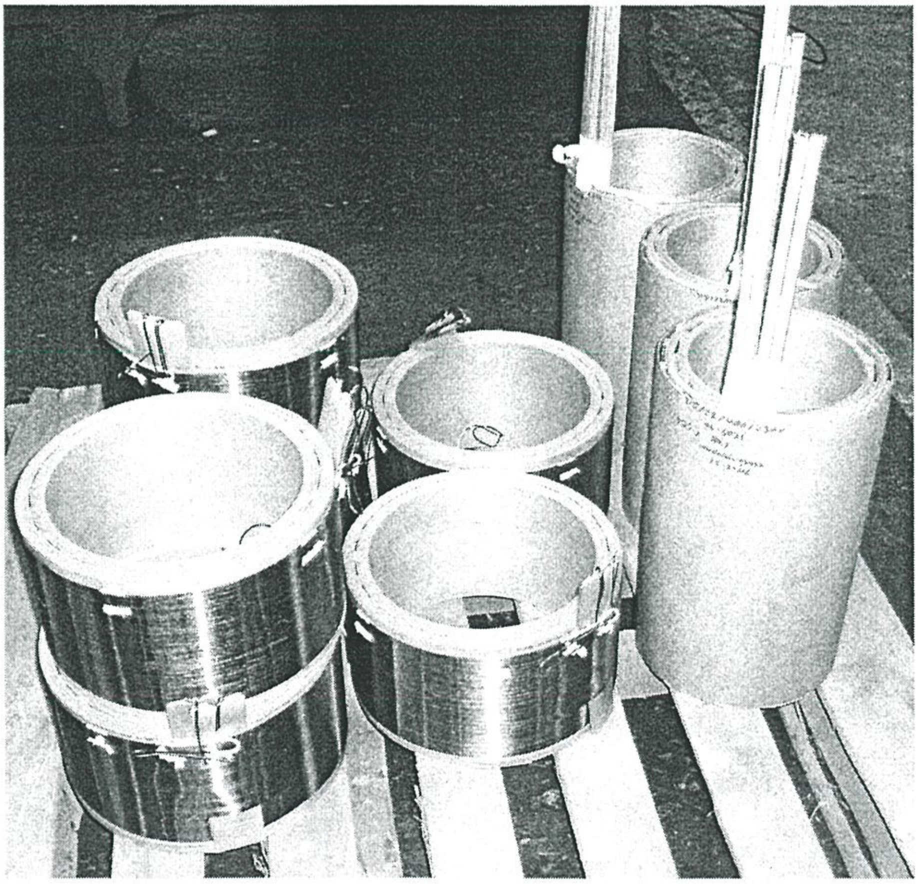
รูปที่ ก.1 การพันขดลวดแรงต่ำด้านทุติยภูมิ



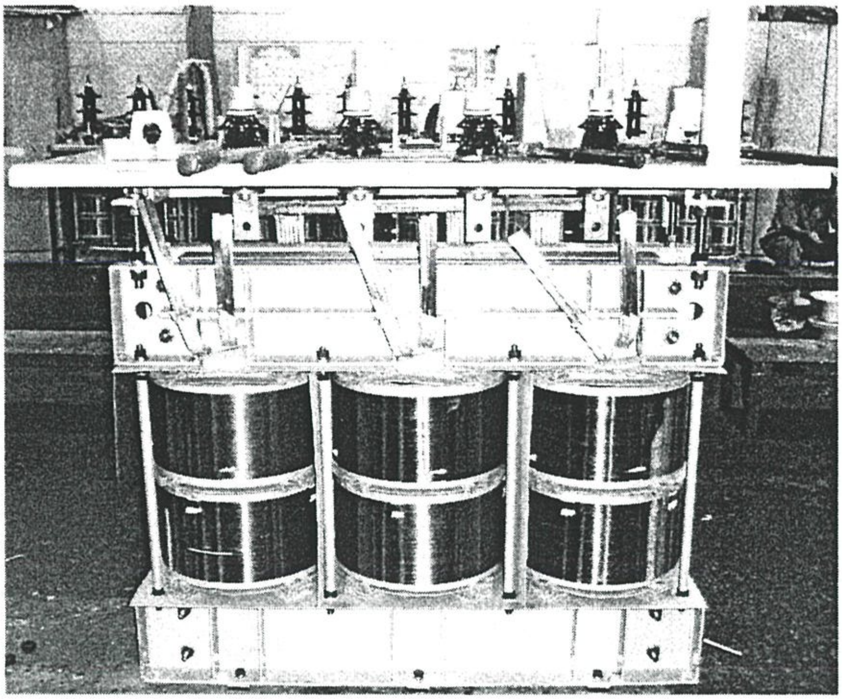
รูปที่ ก.2 การพันขดลวดแรงสูงด้านปฐมภูมิ



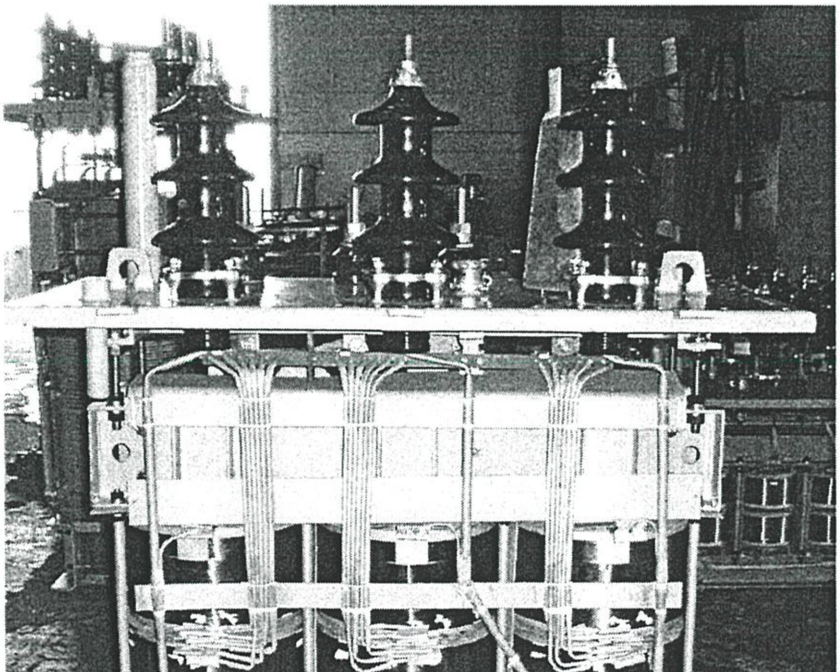
รูปที่ ก.3 การเรียงแกนเหล็กหม้อแปลง



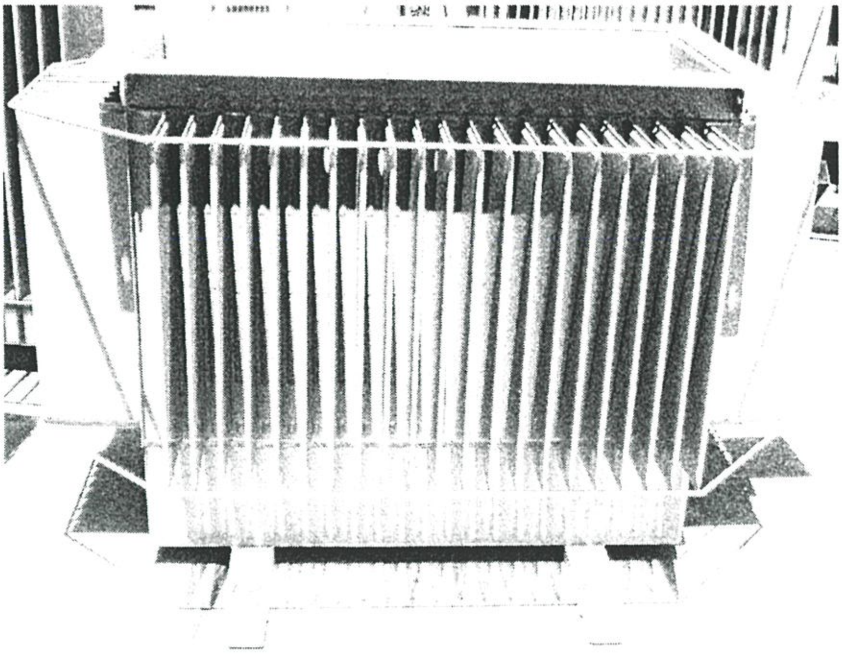
รูปที่ ก.4 การเตรียมขดลวดก่อนประกอบ



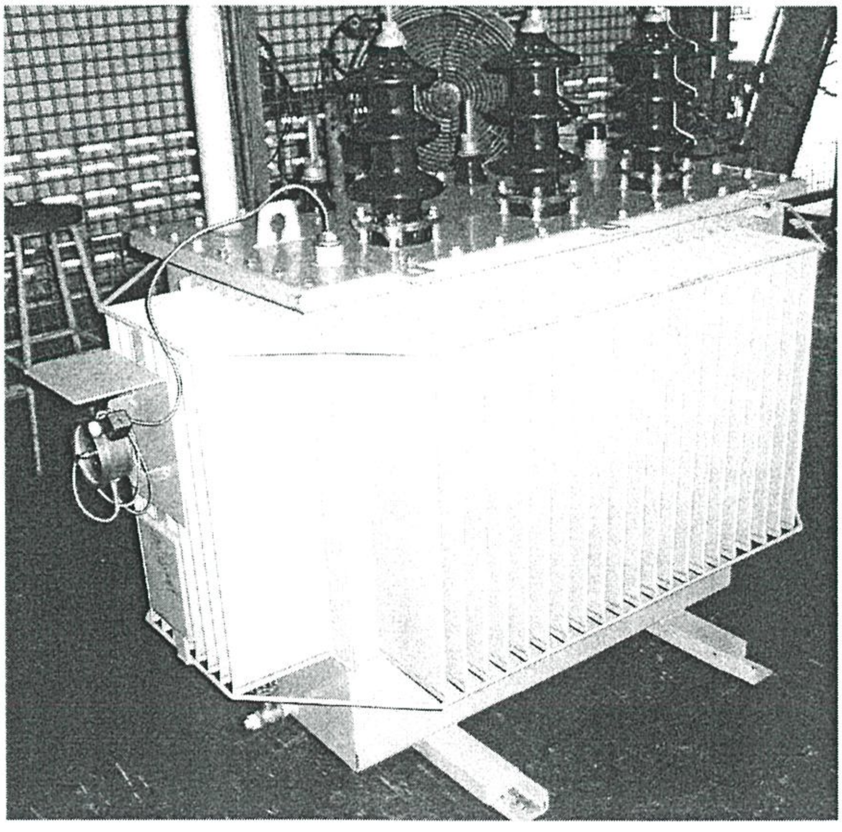
รูปที่ ก.5 การประกอบขดลวดกับแกนเหล็ก



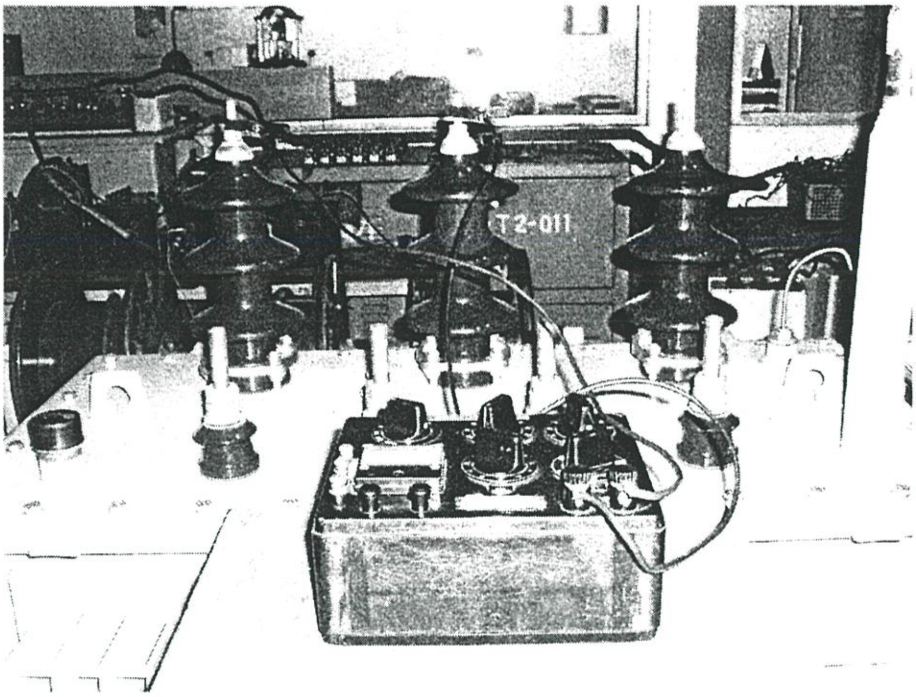
รูปที่ ก.6 การเดินสายของจุดต่อแยกแรงดัน



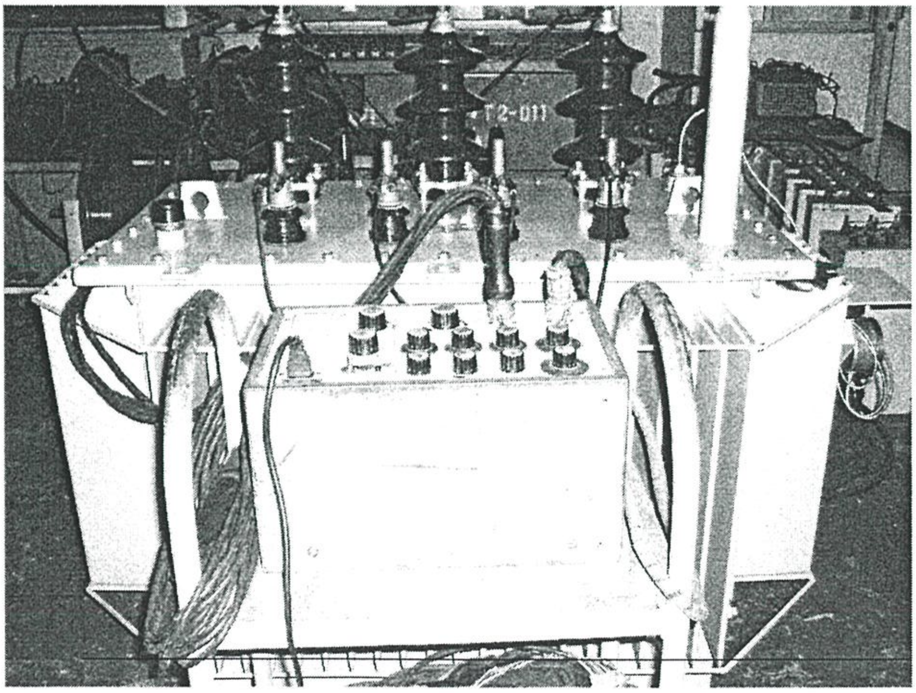
รูปที่ ก.7 ตัวถังของหม้อแปลงจำหน่าย



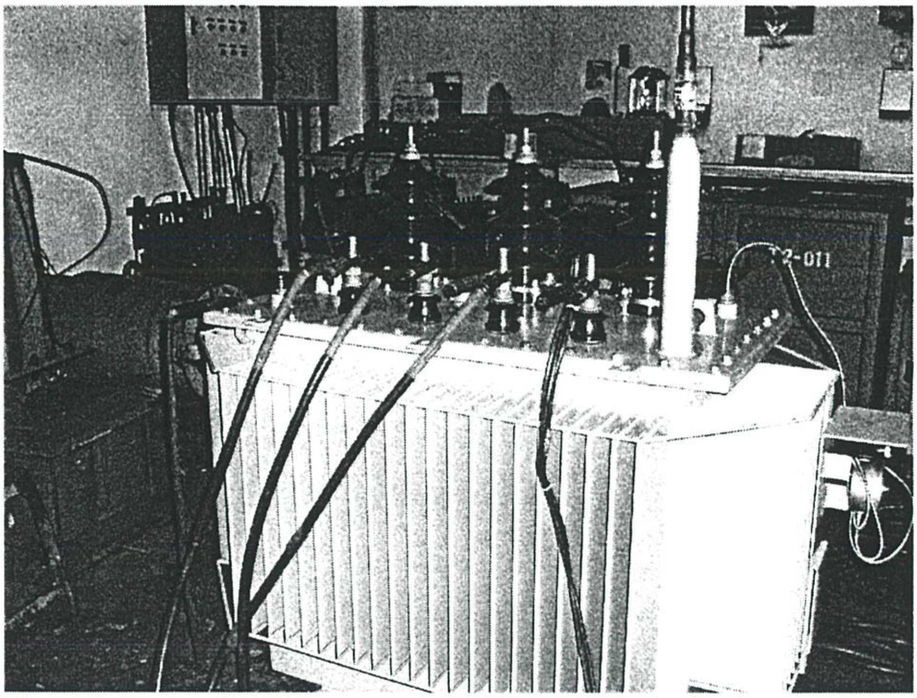
รูปที่ ก.8 หม้อแปลงจำหน่าย 315 kVA 22,000-400/230 V



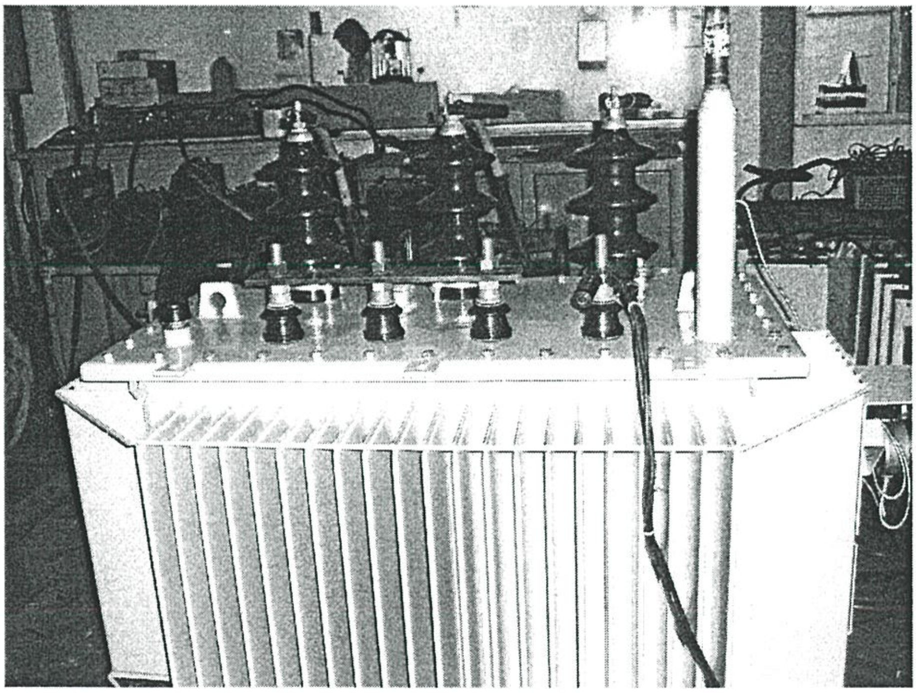
รูปที่ ก.9 การวัดความต้านทานขดลวดด้วยบริดจ์มิเตอร์



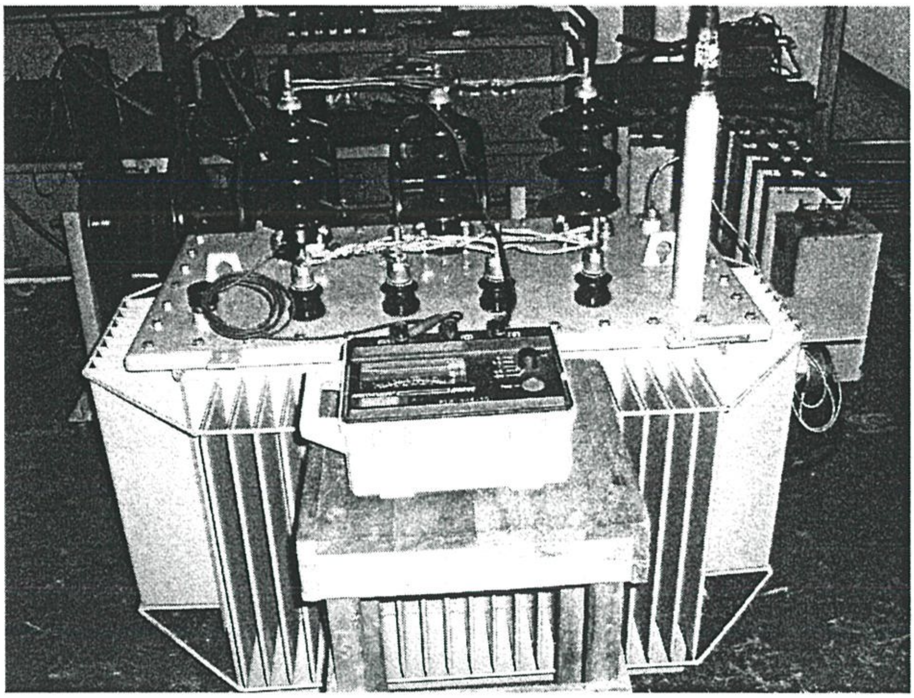
รูปที่ ก.10 การวัดอัตราส่วนของแรงดันและการตรวจสอบการจัดเฟสด้วย Ratio bridge meter



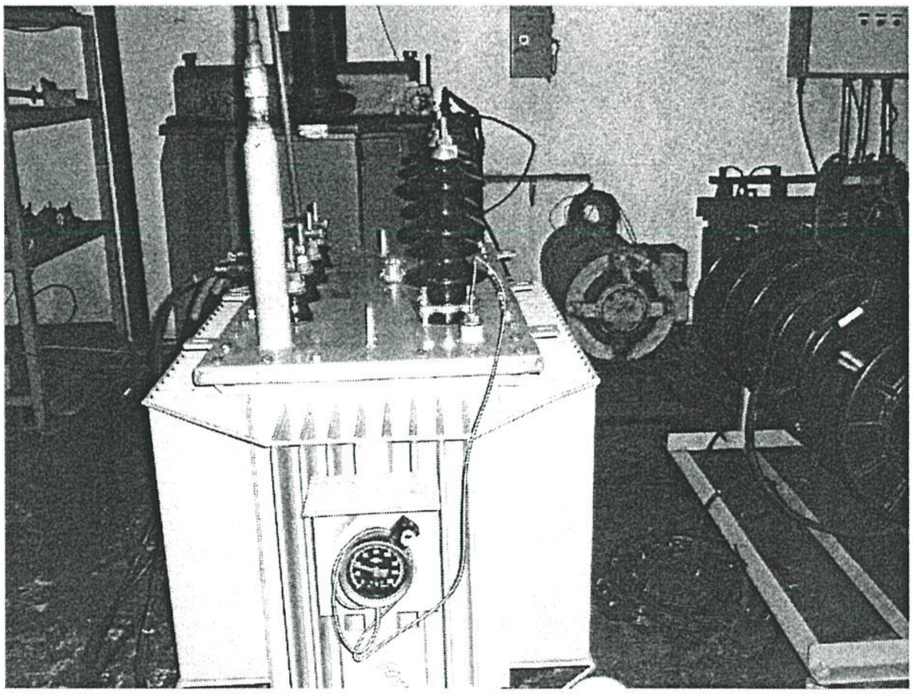
รูปที่ ก.11 การวัดความสูญเสียขณะไม่มีโหลด



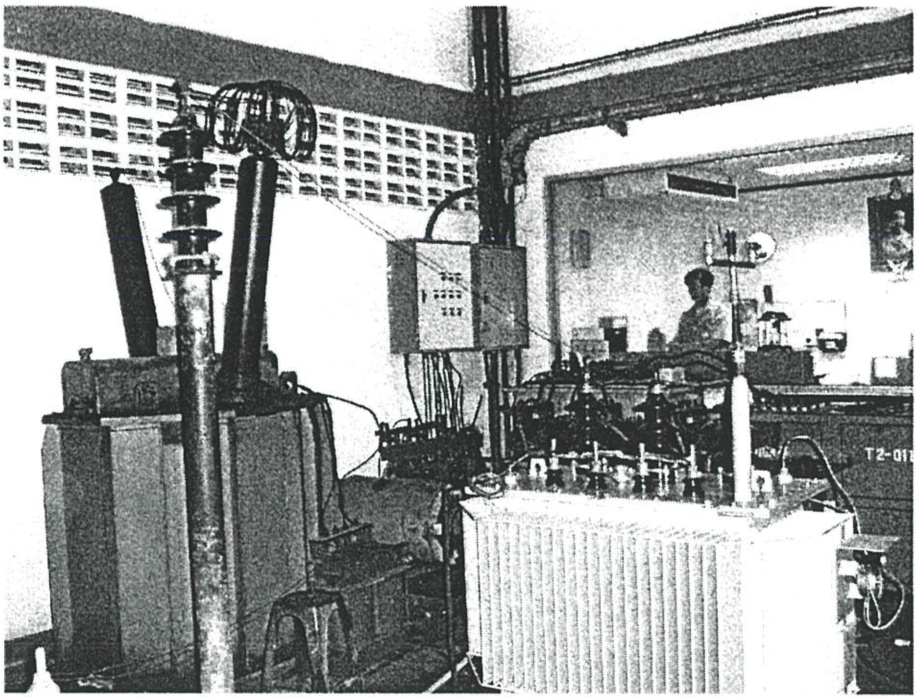
รูปที่ ก.12 การวัดอิมพิแดนซ์ลัดวงจรและความสูญเสียขณะมีโหลด



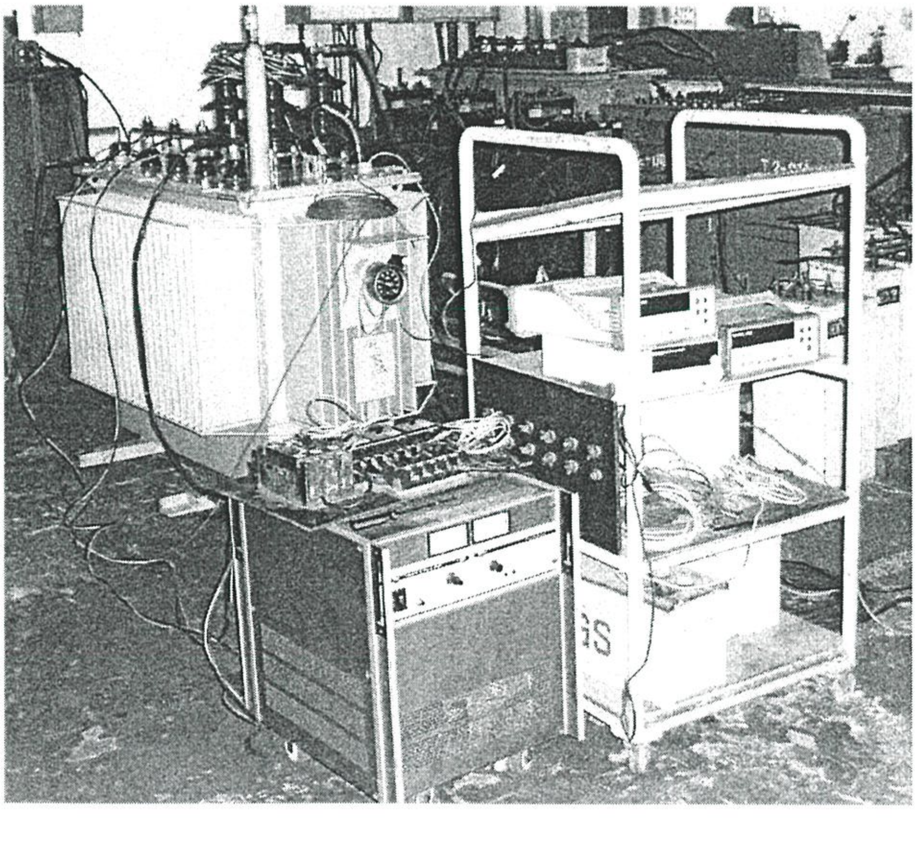
รูปที่ ก.13 การวัดความต้านทานฉนวนด้วย Magohmeter



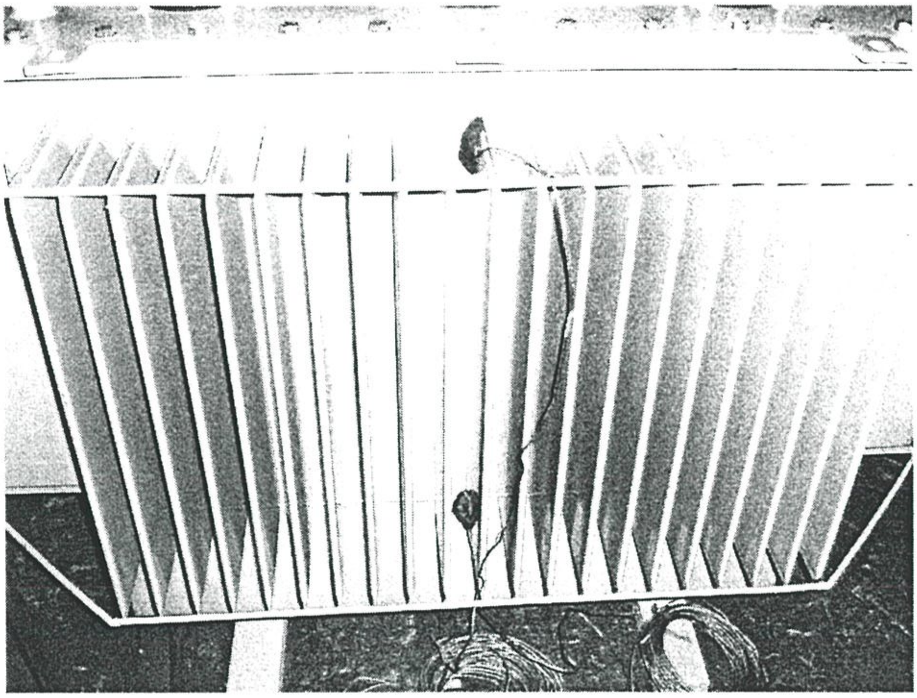
รูปที่ ก.14 การทดสอบแรงดันเหนี่ยวนำเกินโดย Generator ด้านหลัง



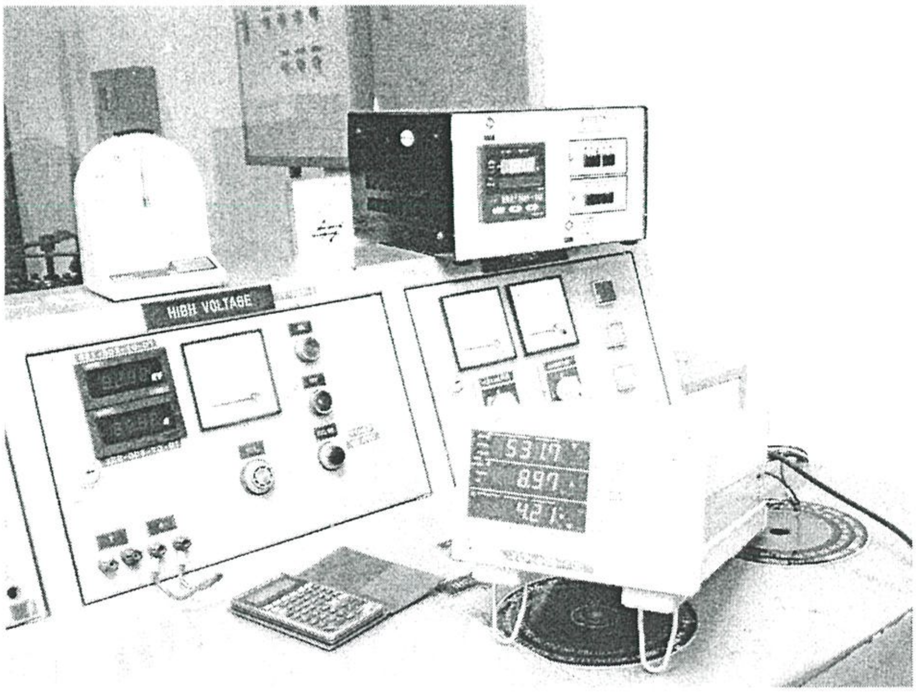
รูปที่ ก.15 การทดสอบความทนต่อแรงดันตามความถี่กำลังไฟฟ้าของตัวจ่ายอื่น



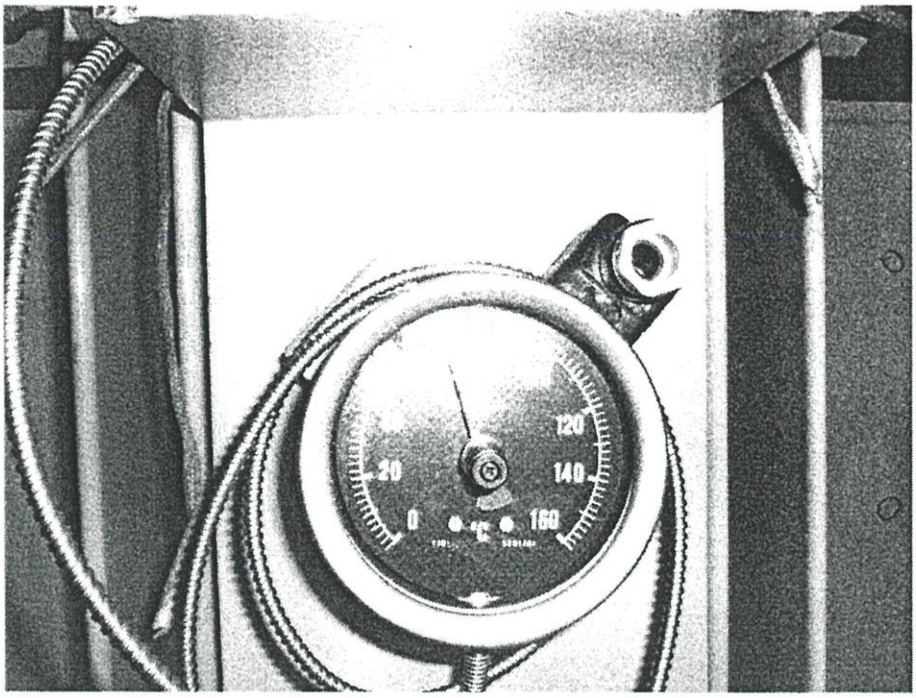
รูปที่ ก.16 เตรียมการทดสอบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น



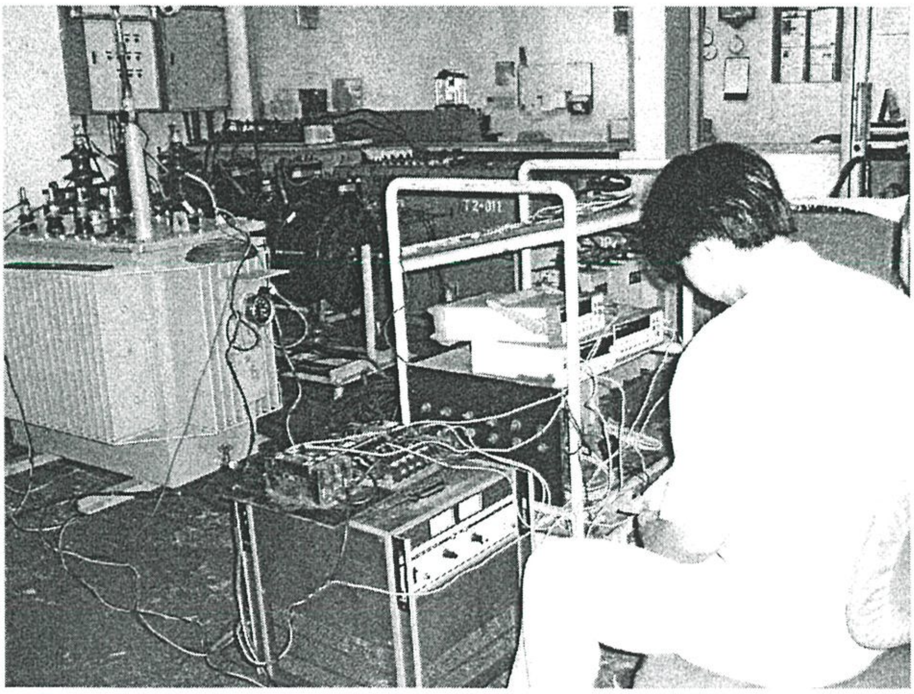
รูปที่ ก.17 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิที่ด้านบนและล่างของครีบ



รูปที่ ก.18 เครื่องวัดที่ใช้ทำการทดสอบ



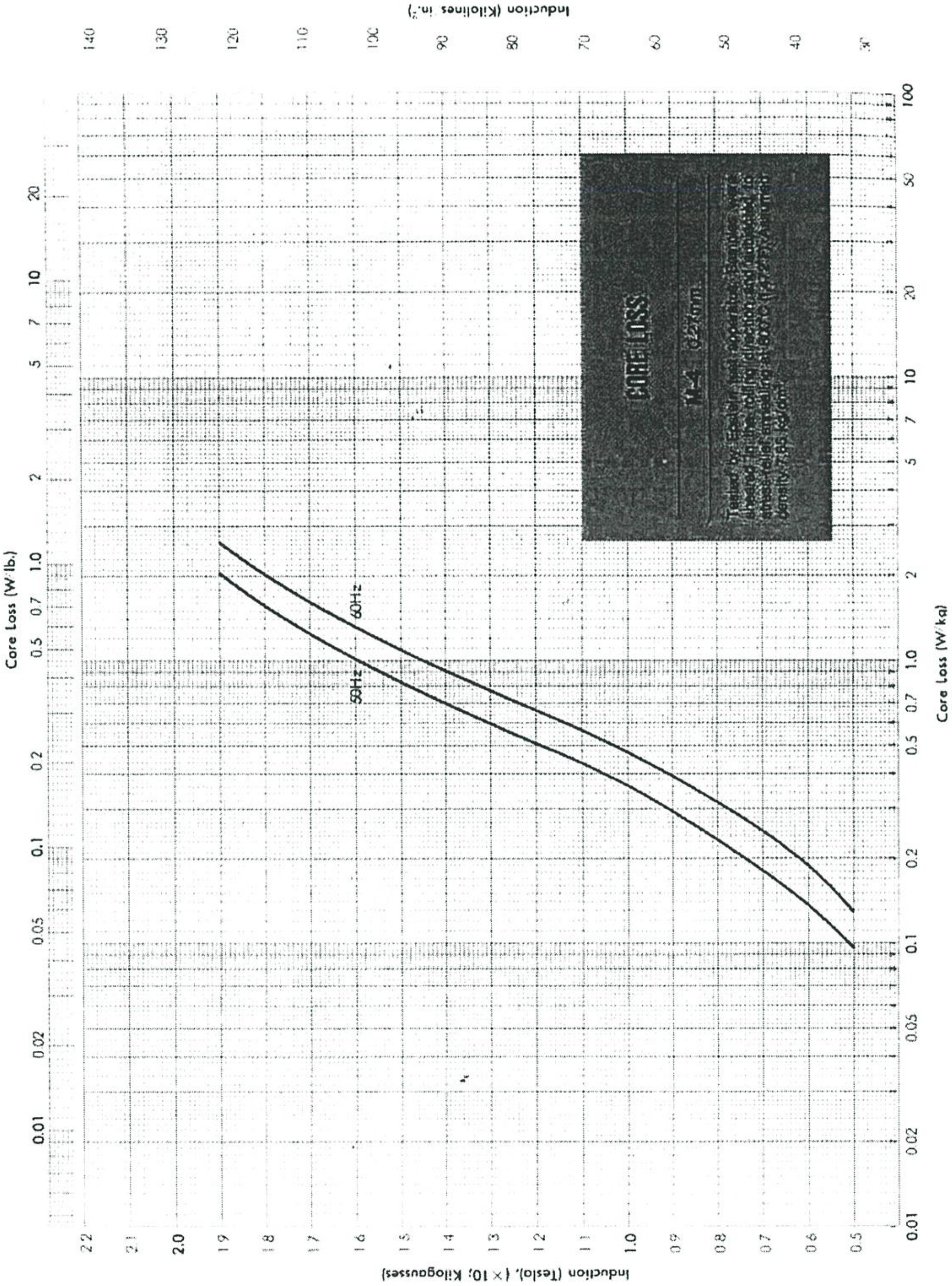
รูปที่ ก.19 อุณหภูมิน้ำมันด้านบนจากเครื่องวัดชนิดเข็มที่หม้อแปลงก่อนทำการตัดกระแสไฟฟ้า



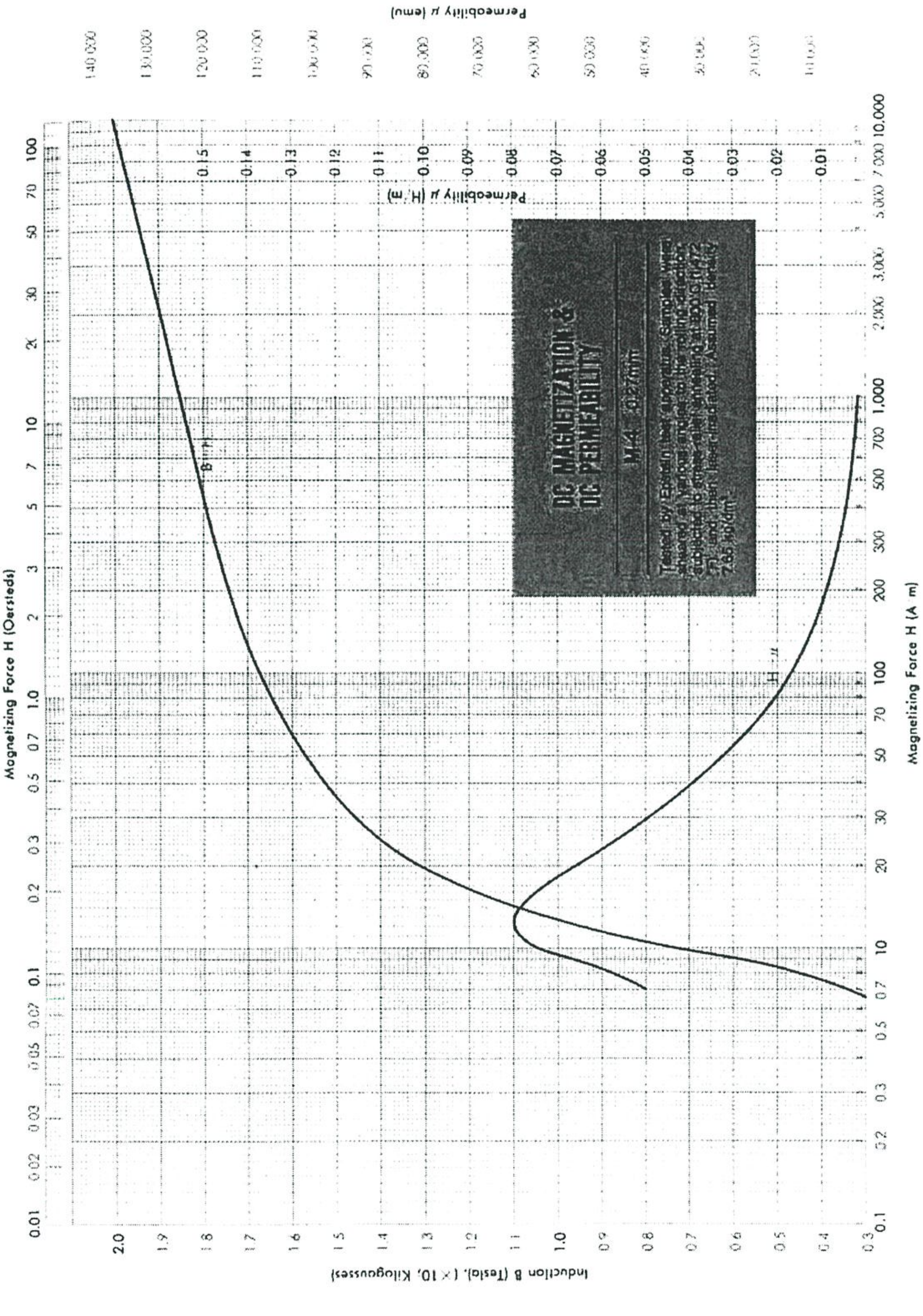
รูปที่ ก.20 การวัดค่าความต้านทานขดลวดหลังจากตัดกระแสไฟ

ภาคผนวก ข.

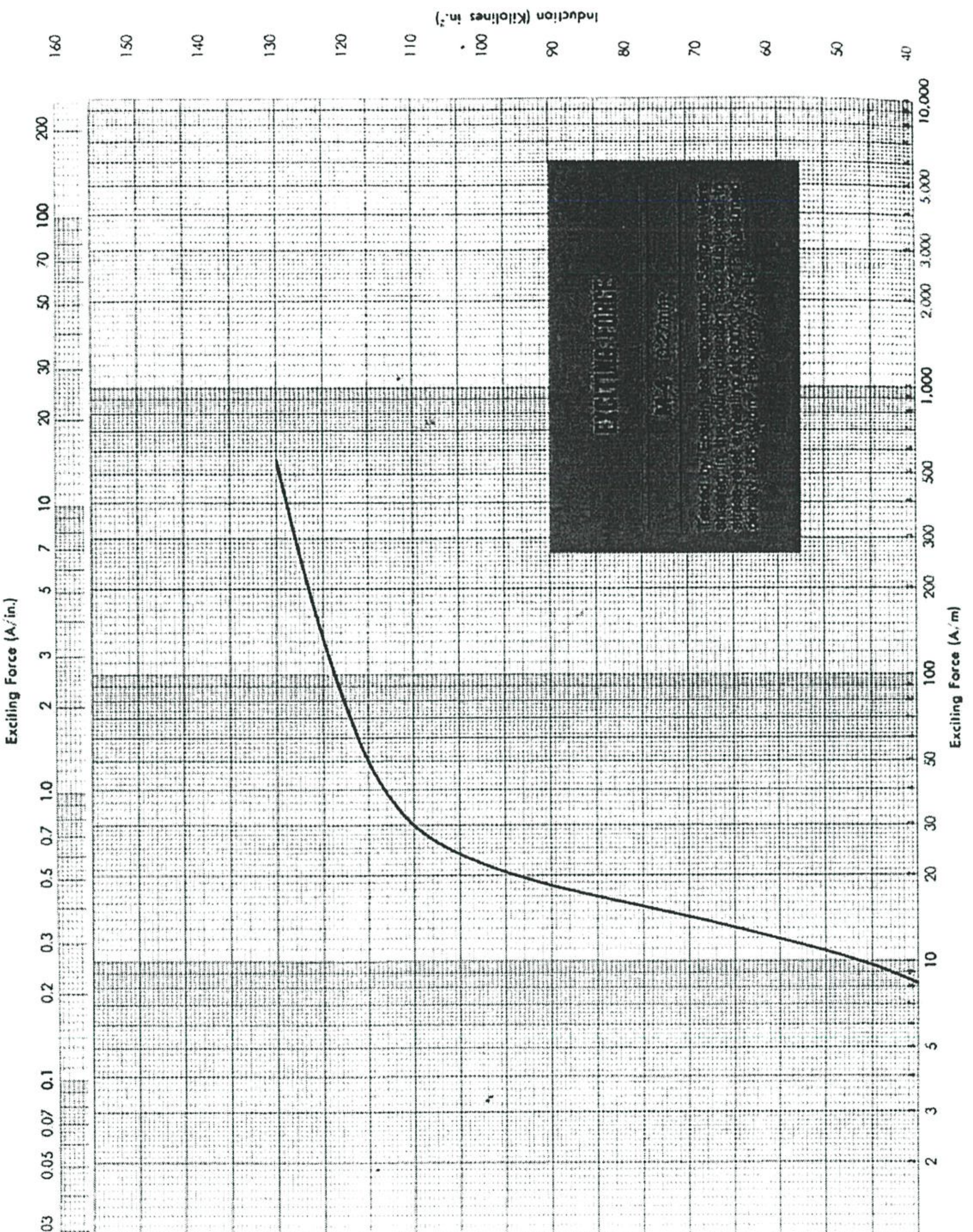
คุณสมบัติของแกนเหล็กหม้อแปลงจำหน่าย



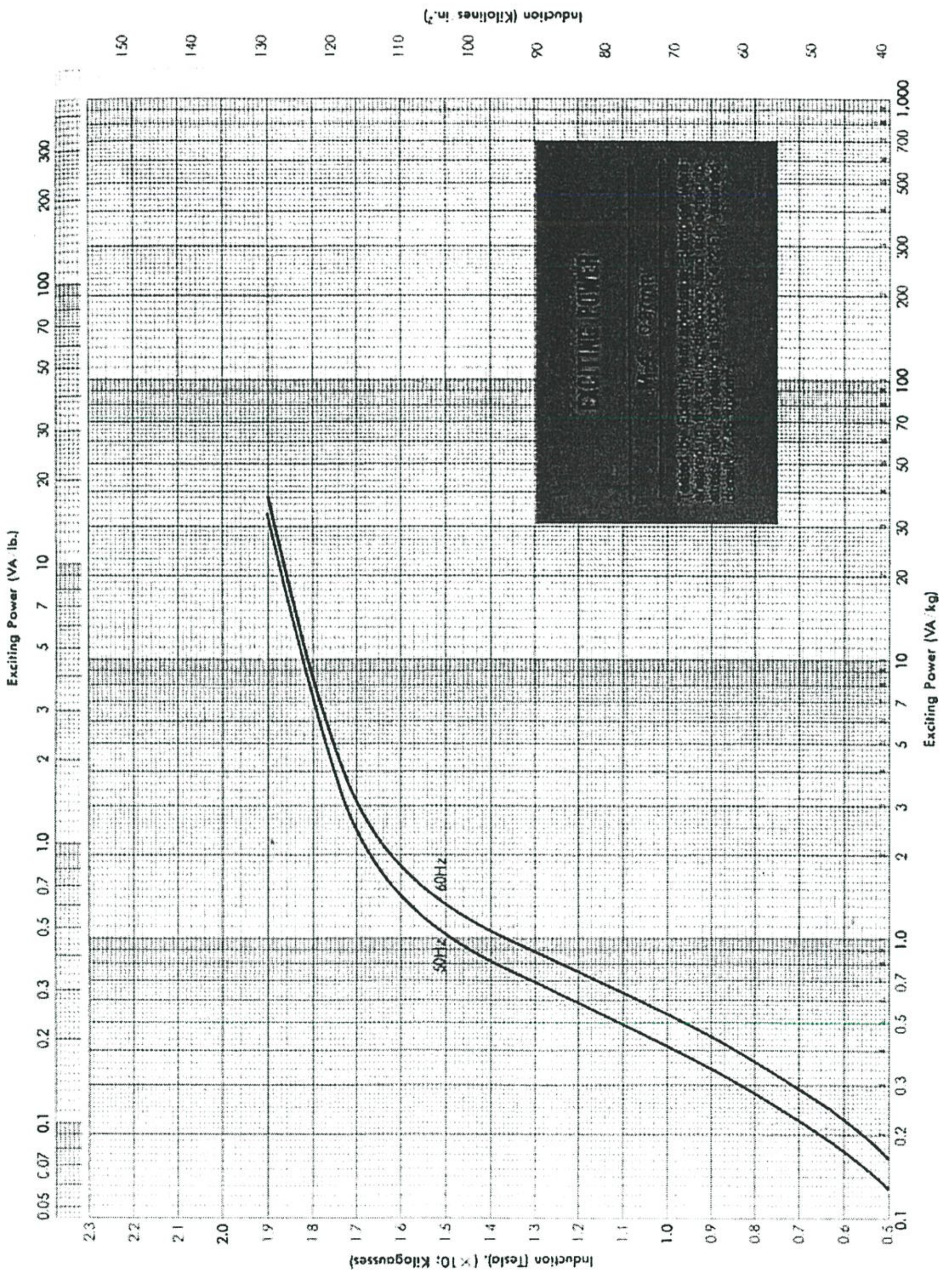
รูปที่ ข.1 Core loss ของแกนเหล็กชนิด M4 0.27 mm



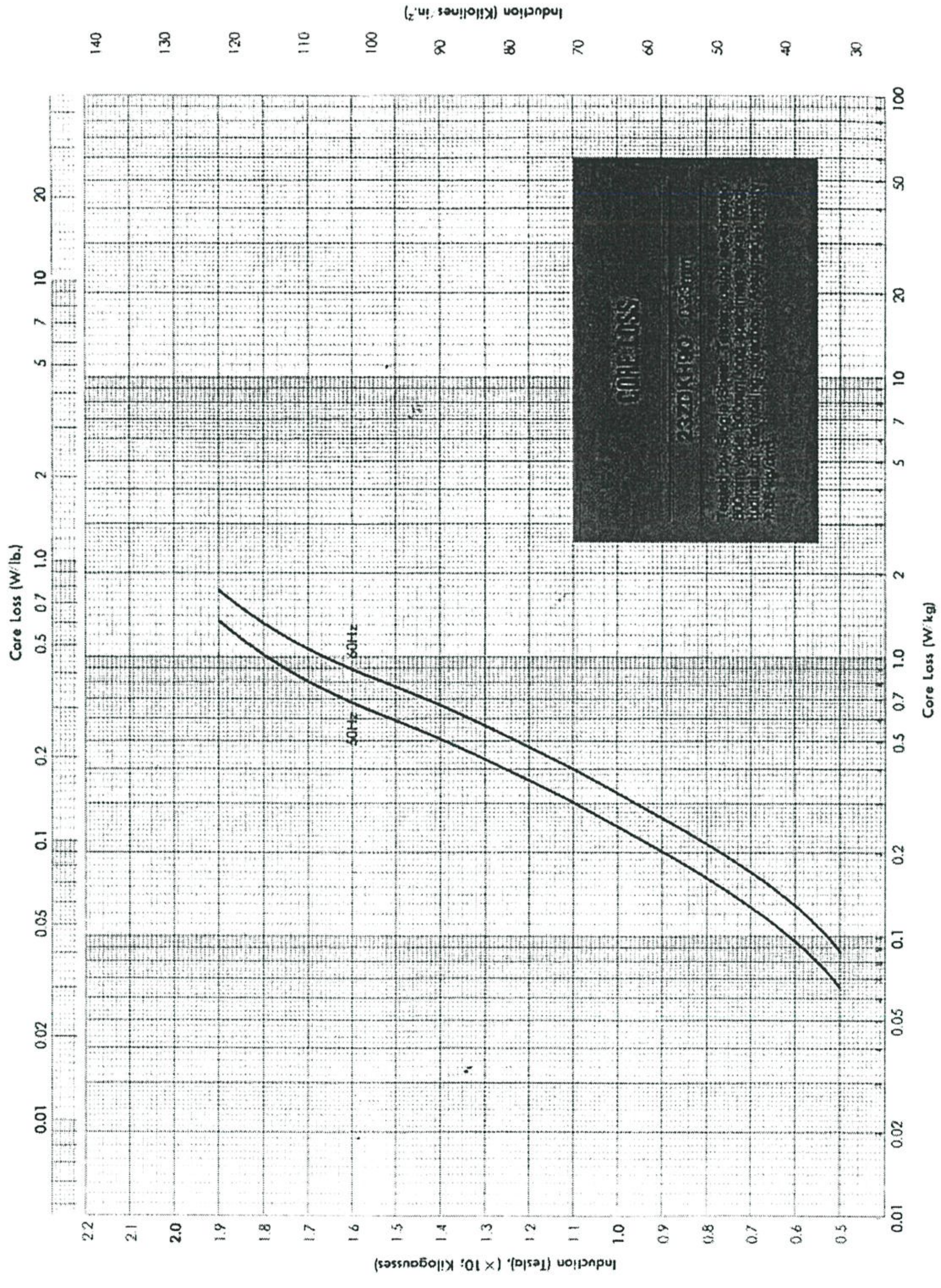
รูปที่ ข.2 DC magnetization & DC permeability ของแกนเหล็กชนิด M4 0.27 mm



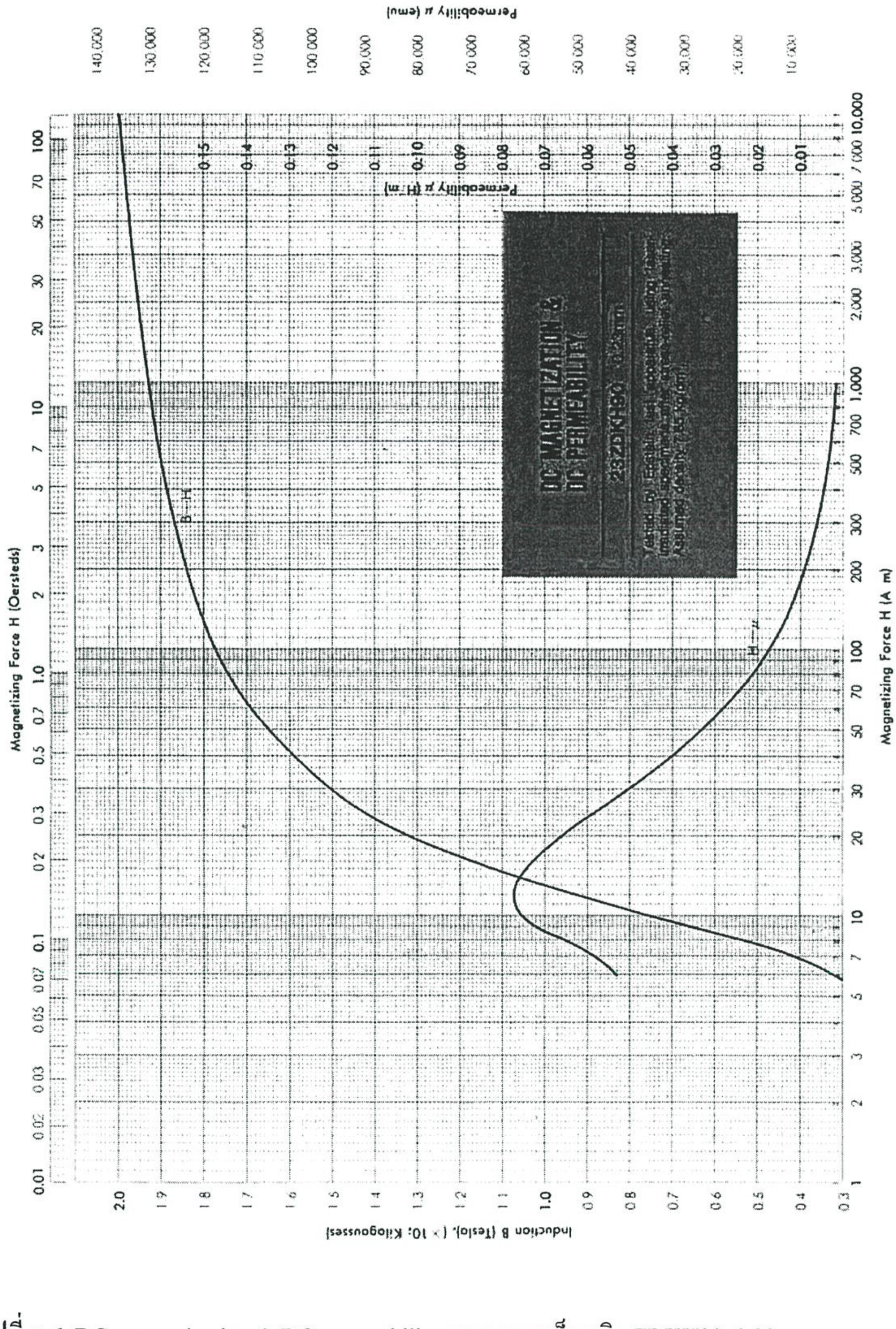
รูปที่ ข.3 Exciting force ของแกนเหล็กชนิด M4 0.27 mm



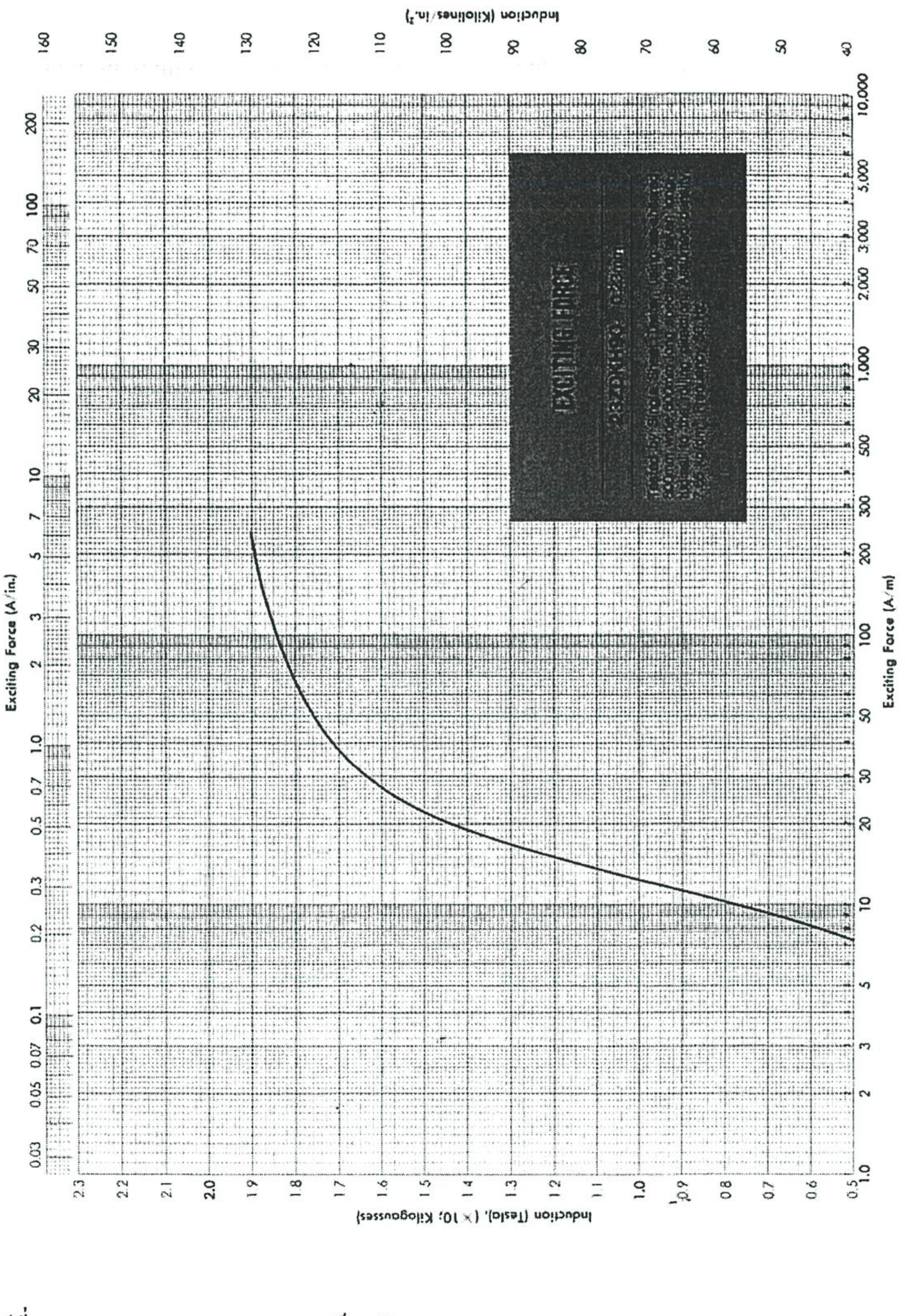
รูปที่ ข.4 Exciting power ของแกนเหล็กชนิด M4 0.27 mm



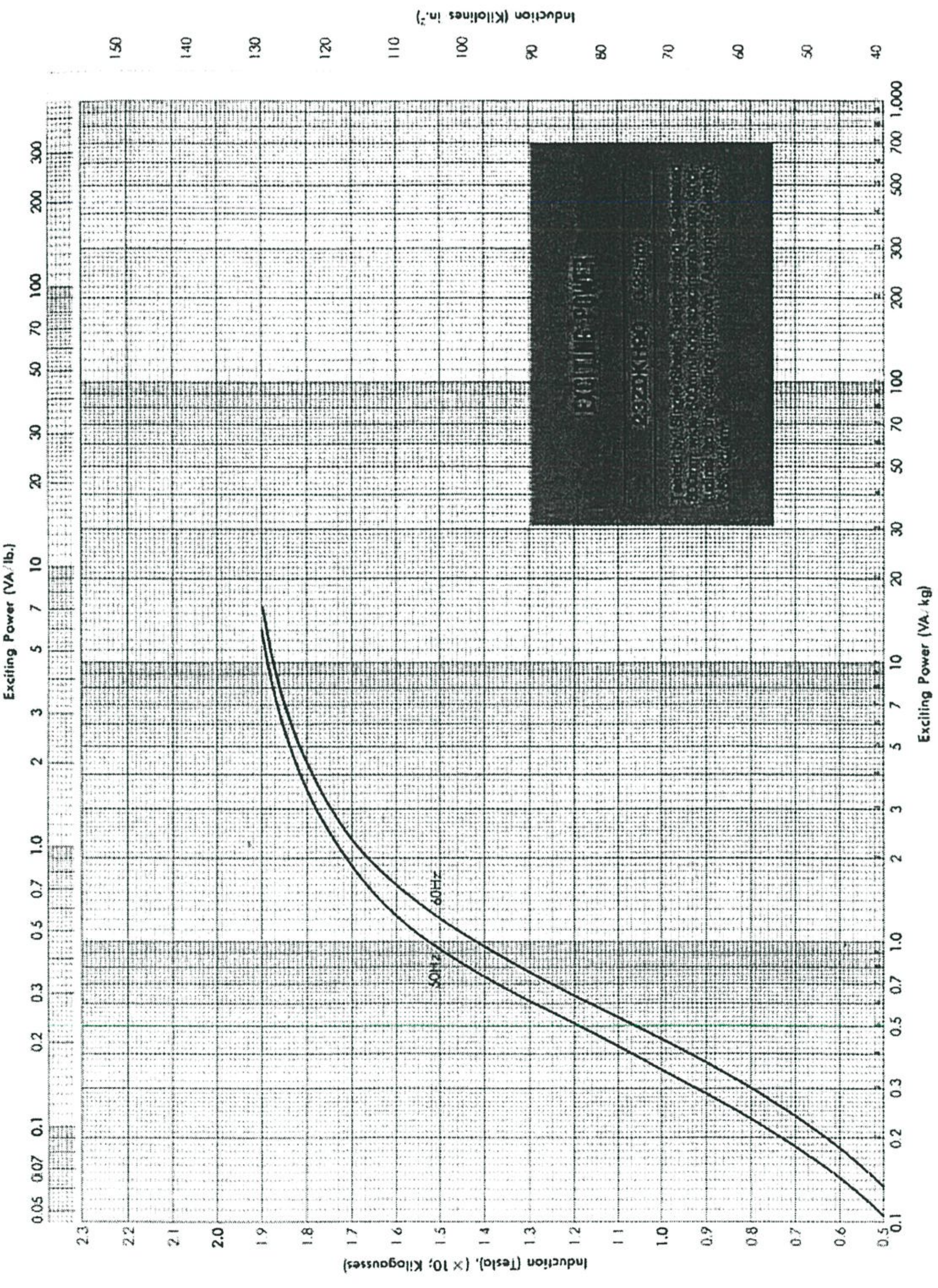
รูปที่ ข.5 Core loss ของแกนเหล็กชนิด ZDKH90 0.23 mm



รูปที่ ข.6 DC magnetization & DC permeability ของแกนเหล็กชนิด ZDKH90 0.23 mm



รูปที่ ข.7 Exciting force ของแกนเหล็กชนิด ZDKH90 0.23 mm



รูปที่ ข.8 Exciting power ของแกนเหล็กชนิด ZDKH90 0.23 mm

ภาคผนวก ค.

การหาค่าที่เหมาะสมด้วยจีเนติกอัลกอริธึม

1. บทนำ

เมนเดล (Mendel) บิดาแห่งวิชาพันธุศาสตร์ค้นพบว่ายีนส์ (Genes) หน่วยเก็บลักษณะทางกรรมพันธุ์เป็นตัวกำหนดลักษณะภายนอกซึ่งยีนส์หลาย ๆ ยีนส์จะเรียงตัวกันอยู่บนเส้นโครโมโซม (Chromosome) ในเซลล์ของสิ่งมีชีวิตโดยจะอยู่กันเป็นคู่ ๆ ยีนส์แต่ละยีนส์จะแตกต่างกันที่ค่าลักษณะต่าง ๆ เรียกว่าแอลลี (Allele) ซึ่งแบบต่าง ๆ ของยีนส์ที่มีแอลลีต่างกันในแต่ละตำแหน่งยีนส์เดียวกันเรียกว่า จีโนไทป์ (Genotype) สำหรับลักษณะภายนอกที่ปรากฏออกมาให้เห็นเรียกว่าฟีโนไทป์ (Phenotype) เช่นคนจะมีโครโมโซม 23 คู่ หรือ 46 โครโมโซม ซึ่งแต่ละโครโมโซมจะประกอบด้วยยีนส์ต่าง ๆ ประมาณ 1250 ยีนส์ตัวอย่างคู่โครโมโซมที่ 1 ของคนประกอบไปด้วยยีนส์ลักษณะสีผม สีผิว สีตา และอื่น ๆ อีกประมาณ 1247 ลักษณะ โครโมโซม 1A มีแอลลีของยีนส์ลักษณะสีผมคือ ผมสีดำ ส่วนโครโมโซม 1B มีแอลลีของยีนส์ลักษณะสีผมคือ ผมสีบลอนด์ การถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมเป็นการถ่ายทอดลักษณะต่าง ๆ ของสิ่งมีชีวิตที่เกิดขึ้นเมื่อมีการแบ่งตัวของเซลล์ ซึ่งมี 2 แบบคือ

1. การเพิ่มจำนวนเซลล์ เป็นการแบ่งตัวแบบไมโตสิส (Mitosis) โดยโครโมโซมแต่ละตัวจะขยายตัวเพิ่มจำนวนตัวเองขึ้นเป็นสองและเยื่อหุ้มนิวเคลียส (Nucleus) จะสลายลงเพื่อดึงแยกโครโมโซมที่เพิ่มจำนวนขึ้นออกจากโครโมโซมเดิมแล้วเยื่อหุ้มนิวเคลียสจะถูกสร้างขึ้นหุ้มเซลใหม่ 2 เซลที่มีโครโมโซมเหมือนเดิม

2. การแบ่งตัวของเซลล์สืบพันธุ์ เป็นการแบ่งตัวแบบไมโอสิส (Meiosis) โดยโครโมโซมจากเซลล์พ่อ 1 โครโมโซมและจากเซลล์แม่ 1 โครโมโซมจะเริ่มจับคู่กันที่โครโมโซมชนิดเดียวกันในขณะเดียวกันโครโมโซมแต่ละตัวที่มาจากทั้งพ่อและแม่ต่างก็จำลองแบบของตนเองเพิ่มขึ้นมาอีกแต่ละโครโมโซม ทำให้ได้จำนวนโครโมโซมทั้งหมดเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าและดำเนินการทางพันธุกรรมจนถึงระยะแบ่งตัว โครโมโซมพ่อพร้อมกับแบบจำลองและโครโมโซมแม่พร้อมกับแบบจำลองที่ได้จะแยกคู่ไปรวมกันเป็นสองนิวเคลียส กลายเป็นเซลล์ใหม่สองเซลล์ ซึ่งจะแบ่งตัวต่อทันที โดยแต่ละโครโมโซมพ่อจะแยกตัวออกจากแบบจำลองและโครโมโซมแม่ก็แยกตัวออกจากแบบจำลองรวมกันใหม่เป็นสี่เซลล์

วิธีการทางพันธุศาสตร์ในระหว่างที่เกิดการแบ่งตัวของไมโอสิสนั้น โครโมโซมจะมีโอกาสแลกเปลี่ยนยีนส์บางยีนส์ซึ่งกันและกัน อันเป็นเหตุให้เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า ครอสโอเวอร์ (Cross over) ของลักษณะต่าง ๆ ขึ้น ซึ่งการคลอสโอเวอร์นั้นเกิดขึ้นขณะที่มีการจำลองแบบเพิ่มขึ้นและเกิดขึ้นระหว่างโครโมโซมพ่อกับโครโมโซมแม่ ไม่ใช่เกิดขึ้นกับแบบจำลอง การคลอสโอเวอร์จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะของยีนส์ต่าง ๆ ของคู่โครโมโซมพ่อกับแม่ เนื่องจากยีนส์แต่ละยีนส์ที่เรียงตัวกันบนเส้นโครโมโซมนั้นไม่ได้อยู่กันอย่างหนาแน่นรวมทั้งมีระยะห่างไม่สม่ำเสมอเพราะคุณสมบัติของยีนส์นั้นเป็นโมเลกุลของสารโปรตีนประกอบตัวกันทางเคมี ดังนั้น

ช่องว่างของยีนส์จะเป็นตำแหน่งที่แตกออกมาได้เมื่อเกิดการคลอสโอเวอร์และยังมีการแลกเปลี่ยนยีนส์ของโครโมโซมอีกด้วย โดยจะถูกย้ายไปอยู่อีกโครโมโซมหนึ่งทั้งหมดนอกจากนี้ยังสามารถที่จะแยกที่ตำแหน่งอื่นได้อีกขึ้นกับความสามารถที่จะเชื่อมกันมากน้อยเพียงใดของช่องว่างระหว่างยีนส์

ประโยชน์ที่เกิดจากการคลอสโอเวอร์คือทำให้มีโอกาสที่จะได้ลักษณะต่าง ๆ กันมาอยู่รวมกันได้หลายแบบมากขึ้น ทำให้สิ่งมีชีวิตรุ่นต่อมามีความหลากหลายขึ้นและอาจทำให้มีโอกาสเกิดสิ่งมีชีวิตที่มีลักษณะต่าง ๆ ที่เหมาะกับสิ่งแวดล้อมที่เปลี่ยนไปเช่นกัน การเกิดเซลล์ใหม่โดยการถ่ายทอดโครโมโซมที่ไม่มีการคลอสโอเวอร์นั้นโครโมโซมใดเคยมียีนส์ลักษณะใดก็จะมีลักษณะเช่นเดิมอยู่สิ่งมีชีวิตในรุ่นต่อไปก็ยังคงมีลักษณะเช่นเดียวกัน โอกาสที่สิ่งมีชีวิตนั้นจะเจริญหรือปรับตัวให้ดีขึ้นย่อมเป็นไปได้ยากกว่าการที่มียีนส์ลักษณะใหม่เกิดขึ้น

ลักษณะต่าง ๆ ของสิ่งมีชีวิตจะสามารถอยู่รอดได้โดยการคัดเลือกทางธรรมชาติ โดยจะคัดเลือกจากโครโมโซมที่มีลักษณะที่ทำให้สิ่งมีชีวิตแข็งแรงเพียงพอหรือเหมาะสมต่อสภาพแวดล้อมซึ่งจะสามารถอยู่รอดและถ่ายทอดไปยังสมาชิกรุ่นต่อไป ดังนั้นการคัดเลือกของธรรมชาติเพื่อถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมเป็นเพียงส่วนประกอบของการเปลี่ยนแปลงของสิ่งมีชีวิตเท่านั้น

การเปลี่ยนแปลงลักษณะของยีนส์ไปจากเดิมที่ควรจะเป็นตามการถ่ายทอดจากโครโมโซมรุ่นก่อน เป็นสาเหตุของการเกิดลักษณะที่แปลกออกไปมากมายสำหรับสิ่งมีชีวิตหนึ่ง ๆ ซึ่งเท่ากับเป็นการให้โอกาสแก่ธรรมชาติในการที่จะเลือกมากขึ้น การเปลี่ยนแปลงนี้เรียกว่า มิวเตชัน (Mutation) หรือการผ่าเหล่า เนื่องจากขบวนการทางวิวัฒนาการโดยธรรมชาติเองนั้นช้ามาก โอกาสที่สิ่งมีชีวิตจะปรับตัวให้เข้ากับสภาพแวดล้อมเป็นไปได้น้อยมาก การผ่าเหล่านั้นทุกลักษณะในยีนส์จะมีโอกาสเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมได้เท่า ๆ กัน ถ้าเปลี่ยนแล้วเหมาะกับสภาพแวดล้อมก็จะยังคงอยู่ต่อไปแต่ถ้าเปลี่ยนแล้วไม่เหมาะสมก็จะถูกคัดเลือกให้หายไป

2. จีเนติกอัลกอริธึมเบื้องต้น

ปี ค.ศ. 1975 John Holland เริ่มสนใจศึกษาในทฤษฎีวิวัฒนาการทางธรรมชาติ (Nature Evolution) ในการกำเนิดประชากร (population) สิ่งมีชีวิตในรุ่นต่อ ๆ ไป โดยกระบวนการธรรมชาติทางชีววิทยาประกอบด้วยการคัดเลือกทางธรรมชาติ (Natural selection) คือสิ่งมีชีวิตใด ๆ แข็งแรงกว่าย่อมมีโอกาสอยู่รอดได้มากกว่านั้นหมายถึงการมีโครโมโซมซึ่งประกอบด้วยยีนส์ต่าง ๆ ที่มีลักษณะที่ดี นั้นจะมีโอกาศอยู่รอดได้มากกว่า โครโมโซมที่สามารถอยู่รอดได้จะถูกถ่ายทอดยีนส์ที่มีลักษณะที่ดีเหล่านั้นไปยังลูกหลานได้มากกว่าเช่นกัน และกระบวนการทางพันธุศาสตร์ (Genetic operation) คือการกำเนิดโครโมโซมใหม่โดยการผสมพันธ์เพื่อถ่ายทอดยีนส์จากครอสโอเวอร์ หรือกลายพันธ์จากมิวเตชัน

จากความเชื่อในวิวัฒนาการทางธรรมชาติ ที่แสดงถึงคุณลักษณะที่เป็นอยู่ของสิ่งมีชิวิตโดยการถ่ายทอดลัษณะต่าง ๆ บนโครโมโซมนั้นมีคุณลักษณะทั่วไปที่ยอมรับกันคือ

1. วิวัฒนาการเป็นผลที่เกิดขึ้นเนื่องจากความเปลี่ยนแปลงบนโครโมโซม ที่เป็นอยู่จริงแสดงลักษณะของสิ่งมีชีวิตนั้น

2. ธรรมชาติทางการคัดเลือกมีความสัมพันธ์กับโครโมโซมที่เสดงถึงประสิทธิภาพของโครงสร้างที่ดี ที่จะคัดเลือกเพื่อถ่ายทอดส่วนของโครงสร้างที่ดี

3. การถ่ายทอดในลักษณะที่เกิดวิวัฒนาการนั้น โครโมโซมพ่อ-แม่ มีการแลกเปลี่ยนส่วนโครงสร้างกันเพื่อสร้างโครโมโซมลูก และเหตุผลที่ทำให้เกิดโครโมโซมลูกที่แตกต่างออกไปคือขบวนการผ่าเหล่า

4. วิวัฒนาการทางธรรมชาติมิได้เป็นสิ่งที่เกิดจากความจดจำ แต่เป็นกระบวนการที่เกิดจากโครงสร้างต่าง ๆ ในโครงโมโซมที่เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมที่เกิดขึ้นในขณะนั้น

Holland ซึ่งมีแรงดลใจจากกลไกการคัดเลือกในธรรมชาติ น่าจะนำมาปรับใช้กับคอมพิวเตอร์ให้ช่วยแก้ปัญหาที่ยุ่งยากต่าง ๆ ในการหาคำตอบที่ดีที่สุดหรือใกล้เคียงที่สุด ในที่สุดเขาจึงค้นพบวิธีการใหม่ที่เรียกว่า จีเนติกอัลกอริธึม (Genetic Algorithms; GAs)

หลักการเบื้องต้นในการใช้งาน GAs แก้ปัญหา โดยจะต้องมีการปรับปรุงรูปแบบของปัญหาในการนำเสนอ GAs เพราะ GAs เป็นวิธีการค้นหาคำตอบโดยอาศัยวิธีการเลียนแบบการคัดเลือกตามธรรมชาติ และธรรมชาติทางพันธุกรรมโดยการรวมกันหรือสลับเปลี่ยนตัวแปรต่าง ๆ อันเป็นองค์ประกอบโครงสร้างของปัญหาที่ให้คำตอบที่ต้องการ ซึ่งอาศัยหลักการสุ่ม เพื่อปรับปรุงความสามารถในการหาคำตอบที่ดีขึ้น การค้นหาคำตอบจากรุ่นหนึ่งไปรุ่นถัดไปตามวิวัฒนาการทางธรรมชาตินั้น คำตอบในรุ่นใหม่เกิดขึ้นจากการสร้างความสัมพันธ์ของโครงสร้างต่าง ๆ ที่ประกอบด้วยค่าตัวแปรที่เหมาะสมในรุ่นก่อน ดังนั้นจึงทำให้ได้คำตอบที่ดีขึ้น จะเห็นว่าวิธีการพื้นฐานของ GAs เป็นแบบการสุ่ม แต่มีหลักการและประสิทธิภาพจากการคาดเดาคำตอบใหม่จากสถิติคำตอบเดิมที่ดี ซึ่งแตกต่างจากวิธีการทั่วไปคือ

1. GAs ค้นหาคำตอบภายใต้โครงสร้างของปัญหาอันเกิดจากการกำหนดรหัส (coding) รูปแบบโครงสร้างจากกลุ่มตัวแปรต่าง ๆ ของปัญหานั้น ไม่ใช่ค้นหาคำตอบจากค่าของกลุ่มตัวแปรนั้น

2. GAs ค้นหาคำตอบโดยพิจารณาจากประชากรคำตอบ หรือกลุ่มคำตอบ ไม่ใช่พิจารณาจากคำตอบใดคำตอบหนึ่ง

3. GAs ค้นหาคำตอบจากผลลัพธ์ของกลุ่มค่าตัวแปรที่เป็นฟังก์ชันเป้าหมายของปัญหา

4. GAs ค้นหาคำตอบโดยอาศัยการถ่วงน้ำหนักความเหมาะสมของแต่ละคำตอบจากกลุ่มคำตอบนั้น ๆ

ฟังก์ชันเป้าหมายกับฟังก์ชันความเหมาะสม

การหาคำตอบที่ดีที่สุดของปัญหาของ GAs มีพื้นฐานอยู่บนผลลัพธ์จากการหาคำตอบที่ผ่านมา วิธีการ GAs จะไม่พิจารณาขั้นตอนการแก้ปัญหา แต่จะพิจารณาโดยตัดสินว่าคำตอบใหม่ที่ได้รับดีขึ้นหรือไม่ หรือเป็นคำตอบที่ใกล้เคียงกับคำตอบที่ต้องการหรือไม่จากฟังก์ชันเป้าหมาย (Objective Function ; f) เนื่องจากแต่ละปัญหาจะสามารถกำหนดฟังก์ชันเป้าหมายซึ่งเป็นฟังก์ชันที่แสดงความสัมพันธ์ของแต่ละตัวแปร พารามิเตอร์ เงื่อนไข หรือข้อกำหนดต่าง ๆ ของปัญหานั้น ๆ ที่ระบุคำตอบใดคำตอบหนึ่งที่สามารถเป็นไปได้ ณ. ค่าพารามิเตอร์ เงื่อนไข หรือข้อกำหนดชุดดังกล่าว สำหรับฟังก์ชันความเหมาะสม (Fitness Function; F) เป็นฟังก์ชันที่กำหนดค่าความเหมาะสม (fitness) ของแต่ละโครโมโซมเปรียบเสมือนค่าความสามารถในการอยู่รอดของแต่ละโครโมโซม และเป็นฟังก์ชันที่กำหนดโอกาศ หรือสัดส่วนที่แต่ละโครโมโซมเหมาะสมจะถูกคัดเลือกมากน้อยเพียงใด นั่นคือฟังก์ชันความเหมาะสมจะเป็นฟังก์ชันที่แสดงถึงค่าคำตอบที่เกิดขึ้นจากชุดตัวแปรของปัญหาของโครโมโซมนั้นเพียงใด โดยทั่วไปแล้วเรามักใช้ฟังก์ชันเป้าหมายเป็นฟังชันความเหมาะสม หรืออาจใช้ฟังก์ชันเป้าหมายที่ถูกปรับให้เหมาะสมกับการนำเสนอ GAs เป็นฟังก์ชันความเหมาะสมก็ได้

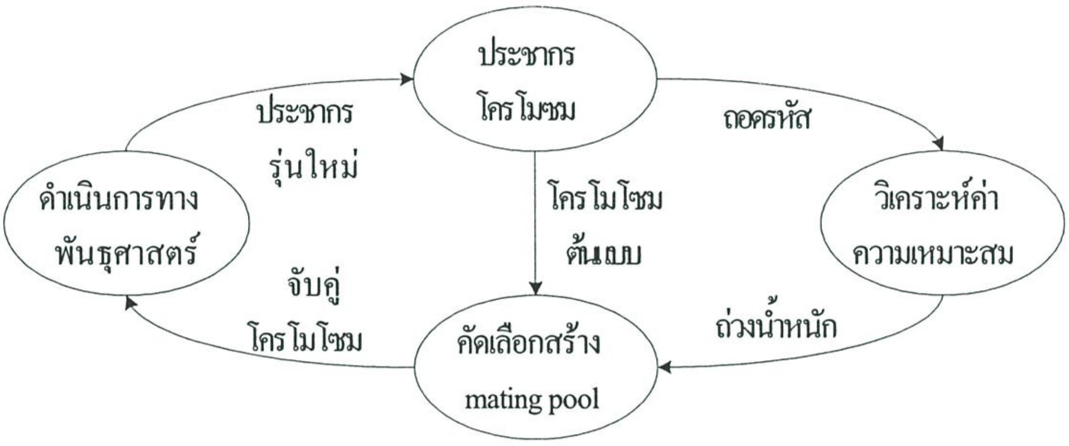
รูปแบบโครโมโซม

เราทราบกันแล้วว่าวิวัฒนาการทางธรรมชาติชีววิทยานั้นเป็นความเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ของสิ่งมีชีวิตเกิดขึ้นโดยโครโมโซม ดังนั้นจุดเริ่มต้นของการจำลองแบบทางธรรมชาติของ GAs เพื่อใช้แก้ปัญหาจึงเริ่มจากการมองปัญหาเทียบเท่ากับโครโมโซมชนิดหนึ่ง ประกอบด้วยยีนส์ลักษณะต่าง ๆ ซึ่งหมายถึงลำดับข้อมูลต่าง ๆ ที่จะแปลงความหมายแล้วให้ค่าคำตอบของปัญหาค่าหนึ่ง การมองภาพยีนส์ของ GAs ให้ถือเสมือนยีนส์ทางพันธุกรรมที่แสดงความหมายหรือเป็นตัวแทนคำตอบใดตำคอบหนึ่ง หรือลักษณะใดลักษณะหนึ่งทางกรรมพันธ์ ในทางพันธุศาสตร์นั้นยีนส์เป็นตัวแสดงลักษณะที่อยู่รอดในแวดล้อมขณะนั้น สำหรับ GAs นั้นยีนส์เป็นตัวแสดงค่าคำตอบของปัญหาที่แปรผันไปตามการประยุกต์ใช้งาน ซึ่งโดยทั่วไปยีนส์หมายถึงตัวแปร พารามิเตอร์ เงื่อนไข หรือข้อกำหนดต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปัญหา ดังนั้นการกำหนดรูปแบบโครโมโซมของแต่ละปัญหาโดยการแปลงตัวแปร พารามิเตอร์ เงื่อนไข หรือข้อกำหนดต่าง ๆ ให้อยู่ในรูปลำดับของยีนส์บนโครโมโซมหรือเรียกว่าสตริง (string) อันประกอบด้วยบิต (bit) หรือว่าอักขระ (character) ซึ่งลักษณะต่าง ๆ ของแต่ละยีนส์คือค่าของบิต (bit value) หรือค่าตัวแปร พารามิเตอร์ ต่าง ๆ ที่เป็นไปได้และรูปแบบของค่าบิตที่จัดเรียงบนโครโมโซมคือ ยีโนไทป์ (genotype) ที่จะแสดงถึงค่าของตัวแปร พารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เป็นไปได้ชุดหนึ่งฟีโนไทป์ (phenotype) นั่นเอง การกำหนดรูปแบบ

โครโมโซมของปัญหาให้เป็นไปตามธรรมชาติ โดยกำหนดรหัสในรูปแบบตัวเลขหรือตัวอักษรในโครโมโซมที่คงที่

วัฎจักรจีเนติกอัลกอริธึม

เมื่อกำหนดรูปแบบโครโมโซมและฟังก์ชันความเหมาะสมของปัญหาแล้ว GAs จะสามารถประมวลผลหาคำตอบของปัญหาได้โดยสร้างวิวัฒนาการกลุ่มคำตอบในรุ่นต่อไปตามวัฎจักรการทำงานของ GAs (Genetic Algorithm Cycle) ดังรูปที่ ค.1 ซึ่งมี 4 ขั้นตอนคือ



รูปที่ ค.1 วัฎจักรจีเนติกอัลกอริธึม

1. สร้างประชากรโครโมโซมรุ่นเก่าตามโครโมโซมที่กำหนดไว้ โดยประชากรต้นกำเนิด (Initial population) เกิดจากการสร้างชุดโครโมโซมต้นกำเนิด จากการสุ่มสร้างค่าแต่ละบิตของแต่ละโครโมโซม

2. วิเคราะห์ค่าความเหมาะสมแต่ละโครโมโซม โดยถอดรหัสค่าตัวแปร พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแต่ละบิตในโครโมโซม และคำนวณค่าความเหมาะสมจากฟังก์ชันความเหมาะสมที่กำหนดไว้

3. สร้าง mating pool คือชุดโครโมโซมต้นแบบหรือชุดโครโมโซมพ่อ-แม่ ที่สามารถอยู่รอดเป็นต้นแบบ ซึ่งอาศัยการจำลองการคัดเลือกทางธรรมชาติ โดยพิจารณาถ่วงน้ำหนักจากค่าความเหมาะสมของแต่ละโครโมโซม หากโครโมโซมใดมีค่าความเหมาะสมมากก็จะมีโอกาศถูกคัดเลือกเป็นต้นแบบมากขึ้น

4. ดำเนินการทางพันธุศาสตร์โดยสุ่มจับคู่โครโมโซมต้นแบบใน mating pool เมื่อสร้างประชากรโครโมโซมรุ่นใหม่ ซึ่งตัวดำเนินการทางพันธุศาสตร์ประกอบด้วย ครอสโอเวอร์ โดยการแลกเปลี่ยนค่าบิตเพียงบางส่วนของโครโมโซมซึ่งกันและกัน หรือมิวเตชัน โดยสุ่มเปลี่ยนค่าบิตบางบิตของแต่ละโครโมโซม เป็นต้น

การค้นหาคำตอบของ GAs จะประมวลผลซ้ำตามวัฏจักร GAs จนกว่าจะได้รับคำตอบที่พึงพอใจตามกฎเกณฑ์ที่ตั้งไว้ หรือในระยะเวลาตามจำนวนรุ่นที่ดำเนินการที่ต้องการ ซึ่งแสดงอัลกอริธึมการทำงาน GAs แบบพื้นฐานดังนี้

จีเนติกอัลกอริธึม ()

```
{
  //กำหนดเวลาเริ่มต้น
  t = 0;
  //สร้างประชากรโครโมโซมต้นแบบโดยการสุ่ม
  Init_population P(t);
  //วิเคราะห์ค่าความเหมาะสมแต่ละโครโมโซมประชากรต้นกำเนิด
  evaluate P(t);
  // ตรวจสอบเงื่อนไขความพอใจ (เช่นเวลา, ค่าความเหมาะสม เป็นต้น)
  while not terminated do
        // เพิ่มการนับของเวลา
        t = t+1
        // คัดเลือกโครโมโซมต้นแบบจากประชากรรุ่นก่อน
        P':=select_parents P(t);
        // แลกเปลี่ยนส่วนยีนส์ภายในโครโมโซมต้นแบบ
        recombine P'(t);
        // มิวเตชันโครโมโซมต้นแบบ
        mutation P'(t);
        // วิเคราะห์ค่าความเหมาะสมของประชากรรุ่นใหม่
        evaluate P'(t);
        // ประชากรรุ่นใหม่กลายเป็นประชากรรุ่นเก่าต่อไป
        P(t):= P'(t);
  end:
}
```

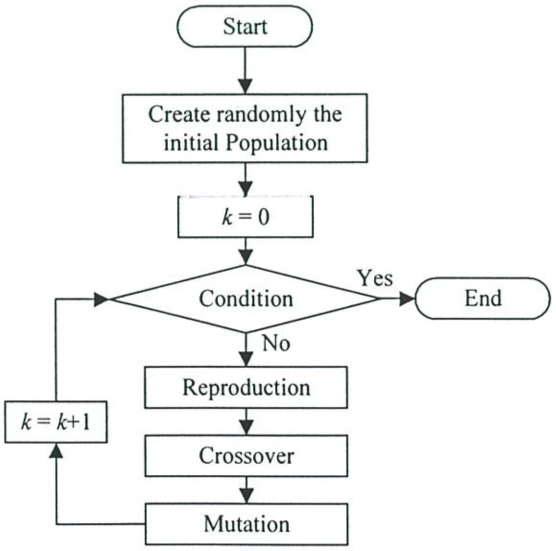
พันธุศาสตร์ทางชีววิทยา กับ จีเนติกอัลกอริธึม

เพื่อเปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างทางพันธุศาสตร์กับจีเนติกอัลกอริธึม เรากล่าวโดยสรุปได้คือ ในทางพันธุศาสตร์แต่ละโครโมโซมประกอบด้วยหน่วยเก็บลักษณะหรือยีนส์ ซึ่งเก็บค่าแสดงลักษณะหรือแอลลี และแต่ละแบบของชุดยีนส์เรียกว่า ยีโนไทป์ ซึ่งแสดงลักษณะกายภาพภายนอกที่ปรากฏเรียกว่า ฟีโนไทป์

สำหรับในทางจีเนติกอัลกอริธึม ตัวแปรหรือพารามิเตอร์ของปัญหาจะถูกแปลงให้อยู่ในรูปสตริง ซึ่งมักเรียกกันว่าโคโมโซม ประกอบด้วยอักขระ หรือบิต แต่ละตำแหน่งของโครโมโซมจะเก็บค่าอักขระ หรือค่าของบิต ที่แสดงถึงโครงสร้างของแต่ละโครโมโซมที่มีค่าตัวแปร หรือพารามิเตอร์ของปัญหาแตกต่างกัน และเป็นตัวกำหนดค่าความเหมาะสมตามฟังก์ชันความเหมาะสมของแต่ละปัญหา ซึ่งสรุปความหมายเปรียบเทียบคำศัพท์ ที่ใช้ทางพันธุศาสตร์กับจีเนติกอัลกอริธึม ได้ดังตารางที่ ค.1

ตารางที่ ค.1 คำศัพท์ทางพันธุศาสตร์กับทางจีเนติกอัลกอริธึม

Genetic Algorithms	**Explanation**
Chromosome(string, individual)	Solution (coding)
Genes(bits)	Part of solution
Locus	Position of gene
Alleles	Values of gene
Phenotype	Decoded solution
Genotype	Encoded solution



รูปที่ ค.2 การทำงานของจีเนติกอัลกอริธึม

3. ตัวอย่างการหาค่าที่เหมาะสมด้วยจีเนติกอัลกอริธึมแบบพื้นฐาน

ในส่วนนี้จะแสดงรายละเอียดการทำงานเกี่ยวกับ GAs ซึ่งเสนอโดย Michalewicz

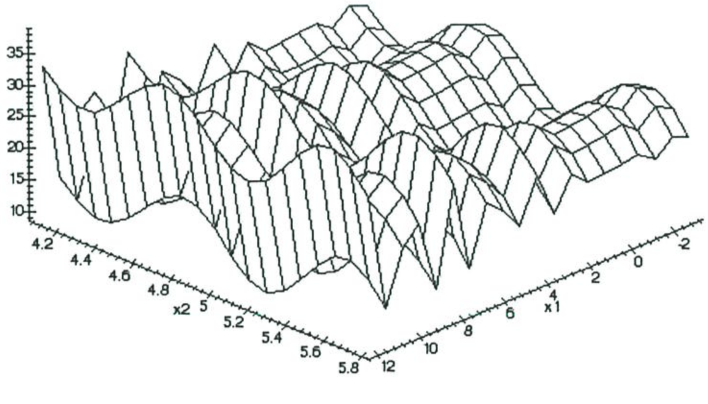
ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสม (Optimization Problem)

การหาค่าที่เหมาะสมในตัวอย่างนี้เป็นการหาค่าสูงสุดของฟังก์ชัน โดยมีฟังก์ชันเป้าหมายแสดงดังสมการที่ ค.1 สมการเงื่อนไข ค.2 และ ค.3 ตามลำดับ ซึ่งสามารถแสดงภาพสามมิติของฟังก์ชันเป้าหมายได้ดังรูปที่ ค.3

$$\max \quad f\left(x_1,x_2\right)=21.5+x_1\sin\left(4\pi x_1\right)+x_2\sin\left(20\pi x_2\right) \qquad \text{ค.1}$$

$$-3.0\le x_1\le 12.1 \qquad \text{ค.2}$$

$$4.1\le x_2\le 5.8 \qquad \text{ค.3}$$



รูป ค.3 กราฟสามมิติของฟังก์ชันเป้าหมาย

การแทนค่า (Representation) เป็นขั้นตอนแรกในการหาค่าที่เหมาะสมโดย GAs เป็นการสร้างเซตคำตอบของตัวแปรที่ใช้ในรูปเลขฐานสอง โดยความยาวของเลขฐานสอง (จำวนวนบิต) ที่แทนคำตอบของตัวแปรจะขึ้นอยู่กับความเที่ยงตรงของคำตอบที่ต้องการ เช่น โดเมนคำตอบของตัวแปร x_j คือ $[a_j,b_j]$ และต้องการความเที่ยงตรงของคำตอบที่ทศนิยมตำแหน่งที่ห้า ความเที่ยงตรงที่ต้องการนี้จะขึ้นอยู่กับช่วงของโดเมนของตัวแปรแต่ละตัว ซึ่งขั้นต่ำจะแบ่งออกเป็น $(b_j-a_j)\times10^5$ ส่วน ดังนั้นจำนวนบิตที่ต้องการ (m_j) หรับตัวแปรแต่ละตัวสามารถหาได้ดังนี้

$$2^{m_j-1} < (b_j - a_j)\times 10^{M_j} \le 2^{m_j} - 1 \qquad \text{ค.4}$$

การแปลงเซตคำตอบจากเลขฐานสองเป็นเลขฐานสิบของตัวแปร x_j สามารถหาได้ดังสมการที่ ค.5

$$x_j = a_j + decimal(substring_j)\times\frac{b_j - a_j}{2^{m_j} - 1} \qquad \text{ค.5}$$

เมื่อ $decimal(substring_j)$ แทนค่าเลขฐานสิบของ $substring_j$ ของตัวแปร x_j ต้องการความเที่ยงตรงของคำตอบที่ทศนิยมตำแหน่งที่ห้า $(M_j = 4)$ จำนวนบิตที่ต้องการของตัวแปร x_1 และ x_2 สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\{12.1-(-3.0)\}\times 10,000 = 151,000$$

$$2^{17} < 151,000 \le 2^{18}, \qquad m_1 = 18$$

$$(5.8-4.1)\times 10,000 = 17,000$$

$$2^{14} < 17,000 \le 2^{15}, \qquad m_2 = 15$$

$$m = m_1 + m_2 = 18 + 15 = 33$$

ผลการคำนวณได้ความยาวของโครโมโซมเท่ากับ 33 บิต สมมติเซตของคำตอบให้เป็นดังนี้

|← 33 bits →|

v_j 000001010100101001 101111011111110

|← 18 bits →| |← 15 bits →|

จากเซตของคำตอบที่กำหนด สามารถแปลงให้อยู่ในเลขฐานสิบได้ดังนี้

	Binary Number	Decimal Number
x_1	000001010100101001	5417
x_2	101111011111110	244318

$$x_1 = -3.0 + 5417 \times \frac{12.1-(-3.0)}{2^{18}-1} = -2.687969$$

$$x_2 = 4.1 + 24318 \times \frac{5.8-4.1}{2^{15}-1} = 5.36165$$

การสร้างประชากรเริ่มต้น (Initial Population) เป็นการสุ่มคำตอบชุดแรกของตัวแปรในรูปของเลขฐานสอง

v_1 =[000001010100101001101111011111110]

v_2 =[001110101110011000000010101001000]

v_3 =[111000111000001000010101001000110]

v_4 =[100110110100101101000000010111001]

v_5 =[000010111101100010001110001101000]

v_6 =[111110101011011000000010110011001]

v_7 =[110100010011111000100110011101101]

v_8 =[001011010100001100010110011001100]

v_9 =[111110001011101100011101000111101]

v_{10} =[111101001110101010000010101101010]

ซึ่งสามารถเปลี่ยนให้อยู่ในระบบเลขฐานสิบได้เป็น

$v_1 = [x_1, x_2]$ = [-2.687969, 5.361653]

$v_2 = [x_1, x_2]$ = [0.474101, 4.170144]

$v_3 = [x_1, x_2]$ = [10.419457, 4.66141]

$v_4 = [x_1, x_2]$ = [6.159951, 4.109598]

$v_5 = [x_1, x_2]$ = [-2.301286, 4.477282]

$v_6 = [x_1, x_2]$ = [11.788084, 4.174346]

$v_7 = [x_1, x_2]$ = [9.342067, 5.121702]

$v_8 = [x_1, x_2]$ = [-0.330256, 4.694977]

$v_9 = [x_1, x_2]$ = [11.671267, 4.873501]

$v_{10} = [x_1, x_2]$ = [11.446273, 4.171908]

การวิเคราะห์ความเหมาะสม (Evaluation) เป็นการหาคำตอบที่ทำให้ฟังก์ชันเป้าหมายมีค่าเหมาะสมที่สุด (ต่ำสุดหรือสูงสุด ตามฟังก์ชันเป้าหมาย) มี 3 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนของการวิเคราะห์ความเหมาะสม

1. การถอดรหัสโครโมโซมยีโนไทป์ ออกเป็นฟีโนไทป์ นั้นคือเป็นการถอดรหัสอักขระเลขฐานสอง ออกเป็นค่าจริงเลขฐานสิบ $x^k = (x_1^k, x_2^k),\ k = 1, 2, \ldots, pop_size$
2. ตรวจสอบความพอใจกับฟังก์ชันเป้าหมาย $f(x^k)$
3. แปลงค่าที่ได้จากค่าเป้าหมายเป็นฟังก์ชันความเหมาะสม สำหรับค่าความเหมาะสมอย่างง่ายในการหาค่าสูงสุดของปัญหาจะเท่ากับค่าเป้าหมาย $eval(v_k) = f(x^k)$, $k = 1, 2, \ldots, pop_size$

กาวิเคราะห์ค่าความเหมาะสม เป็นขั้นตอนของการถอดรหัสจากรูปแบบโคโมโซมที่กำหนดไว้ เพื่อคำนวณค่าความเหมาะสมตามฟังก์ชันความเหมาะสมของปัญหาแต่ละโครโมโซม

ค่าฟังก์ชันความเหมาะสม (fitness function) ของโครโมโซมจากข้างต้นได้ดังนี้

$$eval(v_1) = f(-2.687969, 5.361653) = 19.805119$$
$$eval(v_2) = f(0.474101, 4.170144) = 17.370896$$
$$eval(v_3) = f(10.419457, 4.66141) = \mathbf{9.590546}$$
$$eval(v_4) = f(6.159951, 4.109598) = \mathbf{29.406122}$$
$$eval(v_5) = f(-2.301286, 4.477282) = 15.686091$$
$$eval(v_6) = f(11.788084, 4.174346) = 11.900541$$
$$eval(v_7) = f(9.342067, 5.121702) = 17.958717$$
$$eval(v_8) = f(-0.330256, 4.694977) = 19.763190$$
$$eval(v_9) = f(11.671267, 4.873501) = 26.401669$$
$$eval(v_{10}) = f(11.446273, 4.171908) = 10.252480$$

ดังจะเห็นว่า โคโมโซม v_4 เป็นค่าที่แข็งแรงที่สุดและโคโมโซม v_3 เป็นค่าที่อ่อนแอที่สุด

การคัดเลือก (Selection) เป็นส่วนหนึ่งของการคัดเลือกประชากรที่เหมาะสม ในทางปฏิบัติแบบจำลองการหมุนวงล้อถ่วงน้ำหนัก (roulette wheel) ได้รับความนิยมมากสุด ซึ่งกำหนดขนาดแต่ละช่องของวงล้อนั้นตามค่าความน่าจะเป็นที่จะสุ่มได้ในแต่ละครั้งของแต่ละโครโมโซม ซึ่งมีวิธีการดังนี้

1. คำนวณค่าความเหมาะสม $eval(v_k)$ ของแต่ละโคโมโซม v_k

$$eval(v_k) = f(x), \qquad k = 1,2,...,pop_size$$

2. คำนวณผลรวมของความเหมาะสมของประชากร

$$F = \sum_{k=1}^{pop_size} eval(v_k)$$

3. คำนวณค่าความน่าจะเป็นที่จะสุ่มได้ในแต่ละครั้งของแต่ละโครโมโซม

$$p_k = \frac{eval(v_k)}{F}, \qquad k = 1,2,...,pop_size$$

4. คำนวณความถี่สะสม q_k ของค่าความน่าจะเป็นของแต่ละโครโมโซม v_k

$$q_k = \sum_{j=1}^{k} p_j, \qquad k = 1,2,...,pop_size$$

ขั้นตอนการคัดเลือกเริ่มจากการหมุนวงล้อถ่วงน้ำหนัก pop_size แต่ละครั้ง เพื่อทำการเลือกสำหรับประชากรใหม่แต่ละตัว

ขั้นตอนการคัดเลือก

1. สร้างตัวเลขสุ่ม r มีค่าอยู่ในย่าน [0,1]
2. ถ้า $r \le q_1$, เลือกโคโมโซมตัวแรก v_1 ; หรือเป็นการเลือกโคโมโซม $v_k (2 \le k \le pop_size)$ ลำดับที่ k_{th} ได้จาก r มีค่าอยู่ในย่าน $q_{k-1} < r \le q_k$

ผลรวมค่าความเหมาะสม F ของประชากรคือ

$$F = \sum_{k=1}^{10} eval(v_k) = 178.135372$$

ค่าสุ่มสำหรับการคัดเลือก p_k สำหรับแต่ละโคโมโซม $v_k (k = 1,...,10)$ มีค่าดังนี้

$p_1 = 0.111180$ $p_2 = 0.097515$ $p_3 = 0.053839$ $p_4 = 0.165077$ $p_5 = 0.088057$
$p_6 = 0.066806$ $p_7 = 0.100815$ $p_8 = 0.110945$ $p_9 = 0.148211$ $p_{10} = 0.057554$

ความถี่สะสมของความน่าจะเป็น p_k สำหรับแต่ละโครโมโซม $v_k (k = 1,...,10)$ มีค่าดังนี้

$q_1 = 0.111180$ $q_2 = 0.208695$ $q_3 = 0.262534$ $q_4 = 0.427611$ $q_5 = 0.515668$
$q_6 = 0.582475$ $q_7 = 0.683290$ $q_8 = 0.794234$ $q_9 = 0.942446$ $q_{10} = 1.000000$

ขณะนี้เราพร้อมทำการหมุนวงล้อถ่วงน้ำหนักจำนวน 10 ครั้ง และแต่ละครั้งเราจะทำการเลือกหนึ่งโคโมโซมสำหรับประชากรใหม่ ลำดับการสุ่มจำนวน 10 ครั้ง ในย่าน [0,1] ได้ค่าดังนี้

0.301431	0.322062	0.766503	0.881893	0.350871
0.583392	0.177618	0.343242	0.032685	0.197577

ลำดับแรก $r_1 = 0.301431$ เป็นค่าที่มากกว่า q_3 และน้อยกว่า q_4 ดังนั้นโครโมโซมที่ถูกเลือกสำหรับประชากรใหม่คือ โคโมโซม v_4 , ลำดับที่สอง $r_2 = 0.322062$ เป็นค่าที่มากกว่า q_3 และน้อยกว่า q_4 ดังนั้นโครโมโซมที่ถูกเลือกสำหรับประชากรใหม่คือ โคโมโซม v_4 อีกครั้ง ทำซ้ำเหมือนข้างต้น สุดท้ายแล้ว ประชากรใหม่ที่ได้รับตามโคโมโซมดังนี้

v'_1 =[100110110100101101000000010111001] (v_4)
v'_2 =[100110110100101101000000010111001] (v_4)
v'_3 =[001011010100001100010110011001100] (v_8)
v'_4 =[111110001011101100011101000111101] (v_9)
v'_5 =[100110110100101101000000010111001] (v_4)
v'_6 =[110100010011111000100110011101101] (v_7)
v'_7 =[001110101110011000000010101001000] (v_2)
v'_8 =[100110110100101101000000010111001] (v_4)
v'_9 =[000001010100101001101111011111110] (v_1)
v'_{10} =[001110101110011000000010101001000] (v_2)

ครอสโอเวอร์ (Crossover) ครอสโอเวอร์ที่ใช้นี้เป็นวิธีการครอสโอเวอร์แบบหนึ่งจุด (one-cut-point method) ซึ่งทำการสุ่มเลือกตำแหน่งเพื่อแลกเปลี่ยนส่วนโคโมโซมของทั้งพ่อ-แม่ ตำแหน่งการแลกเปลี่ยนเลือกหลังจากตำแหน่งที่ 17 โดยการวิธีการสุ่ม ซึ่งโคโมโซมทั้งสองจะทำการแลกเปลี่ยนดังนี้

v_1 =[1001101101001011010000000010111001]

v_2 =[0010110101000011000101100110011 00]

ผลของการแลกเปลี่ยนขอบโครโมโซมพ่อ-แม่แสดงดังนี้

v_1' =[10011011010010110001011001100 1100]

v_2' =[0010110101000011010000000010111001]

อัตราความน่าจะเป็นของการครอสโอเวอร์ (probability of crossover) กำหนดเป็น p_c= 0.25 เป็นค่าที่ยอมรับกับปัญหานี้ ซึ่งจะมีโครโมโซม 25 % ที่จะได้รับการครอสโอเวอร์ การครอสโอเวอร์สามารถทำได้ดังนี้

ขั้นตอนการครอสโอเวอร์

begin

$k \leftarrow 0$;

while $(k \le 10)$ **do**

$r_k \leftarrow$ สุ่มตัวเลขในย่าน [0,1]

if $(r_k < 0.25)$ **then**

เลือก v_k สำหรับทำการครอสโอเวอร์

end

$k \leftarrow k+10$;

end

end

ลำดับของตัวเลขที่ได้จากการสุ่มคือ

0.625721	0.266823	0.288644	0.295114	0.163274
0.567461	0.085940	0.392865	0.770714	0.548656

จะเห็นว่าผลการสุ่มตัวเลขครั้งที่ 5 และ 7 มีค่าต่ำกว่า 0.25 ดังนั้นโครโมโซม v_5' และ v_7' จะถูกเลือกทำการครอสโอเวอร์ โดยทำการสร้างตัวเลขจำนวนเต็ม *pos* อยู่ในย่าน [1,32] (เพราะว่าโคโมโซมทั้งหมดมีความยาว 33 บิต) เป็นตำแหน่งที่ทำการแลกเปลี่ยน สมมุติว่าทำการสร้างตัวเลขจำนวนเต็มได้เท่ากับ 1 โคโมโซมทั้งสองจะแลกเปลี่ยนข้อมูลกันหลังจากบิตที่หนึ่งแสดงดังนี้

v_5' =[100110110100101101000000010111001]
v_7' =[000110110100101101000000010111001]

↓

v_5' =[100110110100101101000000010111001]
v_7' =[000110110100101101000000010111001]

มิวเตชัน (Mutation) เป็นตัวดำเนินการผ่าเหล่าตัวหนึ่งที่อาจช่วยให้โคโมโซม มีความเหมาะสมดีขึ้นหลังจากการครอสโอเวอร์ โดยกลับค่าบิตเป็นค่าใหม่ในตำแหน่งบิตที่สุ่มได้ ตามอัตราความน่าจะเป็นของมิวเตชันในแต่ละบิต (probability of mutation, p_m) ที่กำหนด สมมุติให้ยีนส์ที่ 18 ของโคโมโซม v_1 ถูกเลือกทำการมิวเตชัน เมื่อยีนส์มีค่าเป็น 1 จะถูกเปลี่ยนเป็น 0 แสดงได้ดังนี้

v_1 =[100110110100101101000000010111001]

↓

v_1 =[100110110100101100000000010111001]

อัตราความน่าจะเป็นของมิวเตชันในแต่ละบิตกำหนดให้ p_m = 0.01 เป็นค่าที่ยอมรับกับปัญหานี้ ซึ่งจะมีจำนวนบิตทั้งหมดของประชากร 1 % ที่จะได้รับการมิเตชัน เมื่อ $m \times pop_size$ = 33 × 10 = 330 เป็นจำนวนบิตทั้งหมดของประชากร เราคาดว่าจะถูกมิวเตชัน 3.3 บิต ทุกเจเนอเรชันทุก ๆ บิตจะมีโอกาสถูกมิวเตชันเท่า ๆ กัน โดยทำการสร้างลำดับตังเลข $r_k (k = 1,...,30)$ โดยการสุมมีค่าอยู่ในย่าน [0,1] สมมุติยีนส์ที่ถูกมิเตชันแสดงดังนี้

bit_pos	*chrom_num*	*bit_no*	*random_num*
105	4	6	0.009857
164	5	32	0.003113
199	7	1	0.000946
329	10	32	0.001282

หลังจากทำการมิเตชันแสดงประชากรท้ายที่สุดได้ดังนี้

v_1' =[10011011010010110100000000101110 01] (v_4)

v_2' =[1001101101001011010000000010111001] (v_4)

v_3' =[0010110101000011000101100110011 00] (v_8)

v_4' =[1111110010111011000111010001111 01] (v_9)

v_5' =[1001101101001011010000000010111011] (v_4)

v_6' =[1101000100111110001001100111011 01] (v_7)

v_7' =[1001101101001011010000000010111001] (v_2)

v_8' =[1001101101001011010000000010111001] (v_4)

v_9' =[0000010101001010011011110111111 10] (v_1)

v_{10}' =[0011101011100110000000101010010 10] (v_2)

ค่าตัวเลขฐานสิบที่ได้จากการเปลี่ยนแปลง $[x_1, x_2]$ และค่าความเหมาะสม แสดงดังนี้

f (6.159951, 4.109598) = 29.406122

f (6.159951, 4.109598) = 29.406122

f (-0.0330256, 4.694977) = 19.763190

f (11.907206, 4.873501) = 5.702781

f (8.02413, 4.170248) = 19.91025

f (9.342067, 5.121702) = 17.958717

f (6.159951, 4.109598) = 29.406122

f (6.159951, 4.109598) = 29.406122

f (-2.687969, 5.361653) = 19.805119

f (0.474101, 4.170248) = 17.380896

เมื่อจบขั้นตอนนี้เป็นอันเสร็จสิ้นการทำงานหนึ่งรอบของจีเนติกอัลกอริธึม การทดสอบการทำงานหลังจาก 1000 เจนเนอเรชัน เราได้รับโครโมโซมที่ดีที่สุดในเจนเนอเรชันที่ 419 ดังนี้

$$v^* = (1111100000001110001111010010 10110)$$

$$eval(v^*) = f(11.631407, 5.724824) = 38.818208$$

$$x_1^* = 11.631407$$

$$x_2^* = 5.724824$$

$$f(x_1^*, x_2^*) = 38.818208$$

ภาคผนวก ง.

ตัวอย่างการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายให้มีราคาเหมาะสม
โดยใช้จีเนติกอัลกอริธึม

ตัวอย่างการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายให้มีราคาเหมาะสมโดยใช้จีเนติกอัลกอริธึม

ตัวอย่างการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายให้มีราคาที่เหมาะสมในส่วนนี้ จะนำขั้นตอนการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายต้นแบบ พิกัดกำลัง 315 kVA, 3 เฟส, 50 Hz, แรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิ 22,000 V และ 400/230 V ตามลำดับ, เปอร์เซ็นต์จุดต่อแยกแรงดันที่ด้านปฐมภูมิ ± 2 × 2.5 %, Dyn11 ในบทที่ 4 มาแสดงการทำงานเกี่ยวกับการดำเนินงานของจีเนติกอัลกอริธึม โดยใช้ตัวแปรในการกำหนดโครงสร้าง 6 ตัวแปร ดังนี้

1. การกำหนดย่านของตัวแปรในการออกแบบ

- พื้นที่หน้าตัดลวดตัวนำด้านทุติยภูมิ

กำหนดให้จำนวนเส้นตัวนำที่ใช้ขนานกันสูงสุดที่ 16 เส้น ดังนั้นพื้นที่หน้าตัดลวดตัวนำต่ำสุดและสูงสุดสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\text{Sec. Wire Area}_{(\min)} = \frac{I_s}{J_{s(\max)} \times (\text{No. Max Wire})} = 8.1\ \text{mm}^2$$

$$\text{Sec. Wire Area}_{(\max)} = \frac{I_s}{J_{s(\min)}} = 456.7\ \text{mm}^2$$

เมื่อนำค่าที่ได้มาหาพื้นที่หน้าตัดที่มีใช้งานในทางอุตสาหกรรม พื้นที่หน้าตัดของลวดด้านทุติยภูมิต่ำสุดและสูงสุด 8.16 mm^2 และ 79.29 mm^2 (เป็นขนาดลวดที่ใหญ่ที่สุดที่มีใช้งาน) อยู่ในลำดับที่ 37 และ 402 ของฐานข้อมูลตามลำดับ เนื่องจากขดลวดสี่เหลี่ยมมีรูปทรงอย่างหลากหลาย พื้นที่หน้าตัดเดียวกันอาจมีได้หลายรูปทรง ดังนั้นในการเลือกข้อมูลเพื่อเข้ารหัสที่จะกล่าวต่อไปจะใช้ข้อมูลลำดับของพื้นที่หน้าตัดมีการเรียงลำดับจากน้อยไปมาก

- เส้นผ่านศูนย์กลางลวดตัวนำด้านปฐมภูมิ

กำหนดให้จำนวนเส้นตัวนำที่ใช้ขนานกันสูงสุดที่ 2 เส้น ดังนั้นเส้นผ่านศูนย์กลางลวดตัวนำต่ำสุดและสูงสุดสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\text{Pri. Wire diameter}_{(\min)} = \sqrt{\frac{4I_p}{\pi J_{p(\max)} \times (\text{No. Max Wire})}} = 0.93\ \text{mm}$$

$$\text{Pri. Wire diameter}_{(\max)} = \sqrt{\frac{4I_p}{\pi J_{p(\min)}}} = 2.47\ \text{mm}$$

- พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก

พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กจะทำการกำหนดย่านใช้งานจากสัมประสิทธิ์ประกอบแกนเหล็กอยู่ในย่าน 4.0 – 6.0 $\times 10^4$ $m^2J^{-1/2}$ ได้ดังนี้

$$A_{Fe(\min)} = 4\sqrt{\frac{S}{fP}} = 183.3 \times 10^{-4}\ \text{m}^2$$

$$A_{Fe(\max)} = 6\sqrt{\frac{S}{fP}} = 274.9 \times 10^{-4}\ \text{m}^2$$

ตารางที่ ง.1 ย่านการใช้งานของตัวแปร

ตัวแปรใช้กำหนดโครงสร้าง (x)	**ย่านใช้งาน**	
x_1 ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก	10000 – 17500	Gauss
x_2 พื้นที่หน้าตัดของลวดสี่เหลี่ยมด้านทุติยภูมิ	37 – 402	(ลำดับ)
x_3 เส้นผ่านศูนย์กลางของลวดกลมด้านปฐมภูมิ	0.93 – 2.47	Mm
x_4 ความหนาแน่นของกระแสด้านทุติยภูมิ	1.0 – 3.5	A/mm^2
x_5 ความหนาแน่นของกระแสด้านปฐมภูมิ	1.0 – 3.5	A/mm^2
x_6 สัมประสิทธิ์ประกอบแกนเหล็ก	183.3 – 274.9	10^{-4} m^2

2. การแทนค่า (Representation)

การสร้างเซตคำตอบของตัวแปรที่ใช้ในรูปเลขฐานสองตามสมการที่ 4ค ดังนี้

x_1	ต้องการความเที่ยงตรงของคำตอบที่ทศนิยมตำแหน่งที่	1	;	$m_1 = 17$
x_2	ต้องการความเที่ยงตรงของคำตอบที่ทศนิยมตำแหน่งที่	1	;	$m_2 = 12$
x_3	ต้องการความเที่ยงตรงของคำตอบที่ทศนิยมตำแหน่งที่	2	;	$m_3 = 8$
x_4	ต้องการความเที่ยงตรงของคำตอบที่ทศนิยมตำแหน่งที่	2	;	$m_4 = 8$
x_5	ต้องการความเที่ยงตรงของคำตอบที่ทศนิยมตำแหน่งที่	2	;	$m_5 = 8$
x_6	ต้องการความเที่ยงตรงของคำตอบที่ทศนิยมตำแหน่งที่	1	;	$m_6 = 10$

$$m = m_1 + m_2 + m_3 + m_4 + m_5 + m_6 = 63$$

3. การสร้างประชากรเริ่มต้น (Initial Population)

การสุ่มคำตอบชุดแรกของตัวแปรในรูปของเลขฐานสองโดยกำหนดให้จำนวนโครโมโซมที่นำมาแสดงเป็นตัวอย่างนี้ 10 โครโมโซมดังนี้

v_1 = 1010100011011001000100111111001100011010011001000101111111100110

v_2 = 01101010111100110101000101100101010011101101101001111000000001110

v_3 = 10010010110100000110101001101001111011101001000110010111000000010

v_4 = 10101101111010110100110111111001100110110101100110000100111111110

v_5 = 0001110001110011110100010110111101101000110111001001000010000101

v_6 = 1001010010000100101100110111001110110100111010110100010010100 01

v_7 = 0010011010001110010110101000110001011000000000011101111111110001

v_8 = 0001101101111110100001111110011000101011100011110010100110000011

v_9 = 0011110110111011001110010001111000010110001000110001000000001011

v_{10} = 1100101000000000101110111110000001001100110110111101000111110000

ซึ่งสามารถเปลี่ยนให้อยู่ในระบบเลขฐานสิบได้เป็น

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6
v_1 =	14946.746	093.867	1.527	1.745	2.363	272.715
v_2 =	13133.302	269.103	1.948	3.147	1.775	184.557
v_3 =	14301.180	340.498	1.299	3.059	1.490	263.756
v_4 =	15095.292	259.387	1.238	2.049	1.471	240.462
v_5 =	10833.537	269.192	2.357	1.265	2.431	189.485
v_6 =	14351.134	183.713	1.641	2.539	2.020	236.430
v_7 =	11129.540	295.219	1.768	1.000	1.578	273.700
v_8 =	10805.327	082.012	1.762	3.225	2.980	217.975
v_9 =	11808.524	199.846	2.098	2.922	1.961	184.289
v_{10} =	15918.071	207.779	0.986	2.520	2.196	204.805

4. การวิเคราะห์ความเหมาะสม (Evaluation)

จากคำตอบของโครโมโซมในเลขฐานสิบได้ค่าของตัวแปร 6 ตัวแปร ซึ่งจะถูกนำมาหาค่าความเหมาะสมโดยแทนเข้าสู่ลูปการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายแบบทั่วไปในแผนผังดังรูปที่ 2.10 การหาคำตอบที่ทำให้ฟังก์ชันเป้าหมายมีค่าเหมาะสมที่สุด โดยมีฟังก์ชันเป้าหมายคือหาราคาต้นทุนรวมของแกนเหล็กและขดลวดต่ำสุดตามสมการที่ 3.11 โดยจะแปลงให้อยู่ในเทอมของฟังก์ชันสูงสุด ดังนี้

$$\text{Maximum} \quad f(x) = \frac{1000000}{1 + C_{Fe}(x) + C_{cu}(x)} \qquad (ง.1)$$

ในกรณีที่โครโมโซมได้ค่าไม่อยู่ในเงื่อนไขของการออกแบบจำเป็นจะต้องทำโทษเพื่อป้องกันไม่ให้ถูกเลือกในครั้งต่อไป โดยจะทำการหารค่าความเหมาะสมด้วย 1000 สำหรับโครโมโซมที่ไม่ผ่านเงื่อนไขของการออกแบบ

ค่าฟังก์ชันความเหมาะสม (fitness function) ของโครโมโซมจากข้างต้นได้ดังนี้

$$eval(v_1) = 9.7871908946712E\text{-}03$$
$$eval(v_2) = 1.16674829765616E\text{-}02$$
$$eval(v_3) = 1.23816497979704E\text{-}02$$
$$eval(v_4) = 1.21011656046029E\text{-}02$$
$$eval(v_5) = 6.43176269480626$$
$$eval(v_6) = 9.7865224112745E\text{-}03$$
$$eval(v_7) = 5.51852849902047E\text{-}03$$
$$eval(v_8) = 1.11005981643105E\text{-}02$$
$$eval(v_9) - 9.32067030758212E\text{-}03$$
$$eval(v_{10}) = 1.56999373392954E\text{-}02$$

ดังจะเห็นว่า โคโมโซม v_5 เป็นค่าที่มากกว่า 1 หน่วย เป็นโครโมโซมเดียวที่ผ่านเงื่อนไขของการออกแบบ และไม่ถูกทำโทษ

5. การคัดเลือก (Selection)

การคัดเลือกจะใช้วิธีการคัดเลือกด้วยวงล้อถ่วงน้ำหนัก ผลรวมค่าความเหมาะสมของประชากรคือ

$$F = \sum_{k=1}^{10} eval(v_k) = 6.52912644$$

ค่าสุ่มสำหรับการคัดเลือก p_k สำหรับแต่ละโคโมโซม $v_k (k = 1,...,10)$ มีค่าดังนี้

$p_1 = 0.001499$ $p_2 = 0.001787$ $p_3 = 0.001896$ $p_4 = 0.001853$ $p_5 = 0.985088$

$p_6 = 0.001499$ $p_7 = 0.000845$ $p_8 = 0.001700$ $p_9 = 0.001428$ $p_{10} = 0.002405$

ความถี่สะสมของความน่าจะเป็น p_k สำหรับแต่ละโครโมโซม $v_k (k = 1,...,10)$ มีค่าดังนี้

$q_1 = 0.001499$ $q_2 = 0.003286$ $q_3 = 0.005182$ $q_4 = 0.007036$ $q_5 = 0.992124$

$q_6 = 0.993622$ $q_7 = 0.994468$ $q_8 = 0.996168$ $q_9 = 0.997595$ $q_{10} = 1.000000$

ทำการสุ่มหมุนวงล้อถ่วงน้ำหนักจำนวน 10 ครั้ง ได้ค่าดังนี้

0.89591	0.032039	0.249567	0.656737	0.443465
0.496063	0.787427	0.503362	0.772976	0.149376

ประชากรใหม่ที่ได้รับตามโคโมโซมดังนี้

$v'_1 =$ 000111000111001111010001011011110110100011011100100100001000101 (v_5)

$v'_2 =$ 000111000111001111010001011011110110100011011100100100001000101 (v_5)

$v'_3 =$ 000111000111001111010001011011110110100011011100100100001000101 (v_5)

$v'_4 =$ 000111000111001111010001011011110110100011011100100100001000101 (v_5)

$v'_5 =$ 000111000111001111010001011011110110100011011100100100001000101 (v_5)

$v'_6 =$ 000111000111001111010001011011110110100011011100100100001000101 (v_5)

$v'_7 =$ 000111000111001111010001011011110110100011011100100100001000101 (v_5)

$v'_8 =$ 000111000111001111010001011011110110100011011100100100001000101 (v_5)

$v'_9 =$ 000111000111001111010001011011110110100011011100100100001000101 (v_5)

$v'_{10} =$ 000111000111001111010001011011110110100011011100100100001000101 (v_5)

6. ครอสโอเวอร์ (Crossover)

อัตราความน่าจะเป็นของการครอสโอเวอร์ (probability of crossover) จะกำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงลดลงเมื่อจำนวนรอบการทำงานเพิ่มขึ้นดังนี้

$$p_{c(n)} = P_{c(n-1)} - \left(\frac{P_{c(Initial)} - P_{c(Final)}}{No.\ Generation - 1} \right) \quad (ง.2)$$

เมื่อ $P_{c(1)} = P_{c(initial)}$

กำหนดให้ $P_{c(initial)} = 1$ และ $P_{c(Final)} = 0.6$ เป็นค่าที่ยอมรับกับปัญหานี้ ดังนั้นในรอบแรก $P_{c(1)} = 1.0$ ลำดับของตัวเลขที่ได้จากการสุ่มคือ

0.820072	0.338287	0.719617	0.205204	0.547210
0.062391	0.080752	0.771458	0.149474	0.602524

เนื่องจากรอบแรกค่าความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์เป็น 100% ดังนั้นจึงจะต้องทำการครอสโอเวอร์ทุกชุด แต่ในกรณีที่จำนวนรอบการทำงานมากขึ้นความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์จะลดลงทำให้มีเพียงบางโครโมโซมเท่านั้นที่จะทำการครอสโอเวอร์กัน

ในที่นี้จะทำการครอสโอเวอร์แบบจุดชนิด 2 จุด โดยจะทำการสุ่มตำแหน่งที่จะทำการครอสโอเวอร์ในแต่ละคู่ดังนี้

คู่โครโมโซมที่	1 – 2	ทำการครอสตำแหน่งที่	42	และ	55
คู่โครโมโซมที่	3 – 4	ทำการครอสตำแหน่งที่	60	และ	60
คู่โครโมโซมที่	5 – 6	ทำการครอสตำแหน่งที่	41	และ	42
คู่โครโมโซมที่	7 – 8	ทำการครอสตำแหน่งที่	40	และ	49
คู่โครโมโซมที่	9 - 10	ทำการครอสตำแหน่งที่	60	และ	60

เนื่องจากโคโมโซมที่ได้รับจากขั้นตอนการคัดเลือกเป็นชุดข้อมูลเดียวกันทั้ง 10 ชุด ซึ่งได้จากชุดโคโมโซมที่ 5 ทำให้การครอสโอเวอร์นี้ไม่มีผลกระทบกับข้อมูล

7. มิวเตชัน (Mutation)

อัตราความน่าจะเป็นของการมิวเตชัน (probability of mutation) จะกำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนรอบการทำงานเพิ่มขึ้นดังนี้

$$p_{m(n)} = P_{m(n-1)} + \left(\frac{P_{m(Final)} - P_{m(Initial)}}{No.\ Generation - 1} \right) \qquad (ง.3)$$

เมื่อ $P_{m(1)} = P_{m(initial)}$

กำหนดให้ $P_{m(initial)} = 0.01$ และ $P_{m(Final)} = 0.1$ เป็นค่าที่ยอมรับกับปัญหานี้ ดังนั้นในรอบแรก $P_{m(1)} = 0.01$ ลำดับของตัวเลขที่ได้จากการสุ่ม โดยมีค่าต่ำกว่า 0.01 คือ

bit_pos	*chrom_num*	*bit_no*
19	1	19
25	1	25
33	1	33
38	1	38
125	2	62
176	3	50
181	3	55
223	4	34
485	8	44
565	9	61

หลังจากทำการมิเตชันแสดงประชากรท้ายที่สุดได้ดังนี้

$v_1' =$ 000111000111001111110001111011111110110011011100100100001000101

$v_2' =$ 000111000111001111010001011011110110100011011100100100001000111

$v_3' =$ 000111000111001111010001011011110110100011011100110100101000101

$v_4' =$ 000111000111001111010001011011110010100011011100100100001000101

$v_5' =$ 000111000111001111010001011011110110100011011100100100001000101

$v_6' =$ 000111000111000111010001011011110110100011011100100100001000101

$v_7' =$ 000111000111001111010001011011110110100011011100100100001000101

$v_8' =$ 000111000111001111010001011011110110100011001100100100001000101

$v_9' =$ 000111000111001111010001011011110110100011011100100100001000001

$v_{10}' =$ 000111000111001111010001011011110110100011011100100100001000101

ค่าตัวเลขฐานสิบที่ได้จากการเปลี่ยนแปลง $[x_1,...,x_6]$ และค่าความเหมาะสม แสดงดังนี้

$eval(v'_1) =$ 6.49793142201033E-03

$eval(v'_2) =$ 6.43176269480626

$eval(v'_3) =$ 6.60982306361899E-03

$eval(v'_4) =$ 6.43176269480626

$eval(v'_5) =$ 6.43176269480626

$eval(v'_6) =$ 6.43176269480626

$eval(v'_7) =$ 6.43176269480626

$eval(v'_8) =$ 5.99283025730181E-03

$eval(v'_9) =$ 6.43176269480626

$eval(v'_{10}) =$ 6.43176269480626

หลังจากจบขั้นตอนนี้เป็นอันสิ้นสุดการดำเนินงานหนึ่งรอบของจีเนติกัลกอริธึม ตัวอย่างการคำนวณข้างต้นเป็นการยกตัวอย่างขั้นตอนการประยุกต์จีเนติกรวมกับออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายเบื้องต้น

สำหรับหม้อแปลงจำหน่ายต้นแบบจะทำการออกแบบโดยกำหนดใช้จำนวนโคโมโซม 1000 โครโมโซม, จำนวนรอบการทำงาน 1000 รอบ ใช้เวลาประมวลผลประมาณ 1 ชั่วโมง ได้ค่าตัวแปรต่าง ๆ ดังนี้

x_1	ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก	17498.7411	Gauss
x_2	พื้นที่หน้าตัดของลวดสี่เหลี่ยมด้านทุติยภูมิ	42.6774	(ตรงกับลวด 2.6×11)
x_3	เส้นผ่านศูนย์กลางของลวดกลมด้านปฐมภูมิ	1.4172	Mm
x_4	ความหนาแน่นของกระแสด้านทุติยภูมิ	2.8176	A/mm^2
x_5	ความหนาแน่นของกระแสด้านปฐมภูมิ	3.0352	A/mm^2
x_6	พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็ก	204.1777	10^{-4} m^2

ภาคผนวก จ.

ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์และได้รับการตีพิมพ์

การออกแบบราคาที่เหมาะสมของหม้อแปลงจำหน่ายโดยใช้จีเนติกอัลกอริธึม

Optimal Cost Design of Distribution Transformers Using Genetic Algorithms

ชวรัตน์ เก่งธรรมกิจ*　　ต่อพงศ์ ภูมิภาค**　　ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย*

*ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร

**ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร กรุงเทพมหานคร

บทคัดย่อ

จุดมุ่งหมายของการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายในทางอุตสาหกรรมทั่วไปต้องการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายที่มีราคาต้นทุนการผลิตต่ำที่สุดโดยผลการออกแบบจะต้องเป็นไปตามความต้องการของผู้ซื้อหรือมาตรฐานของหม้อแปลงจำหน่ายตามที่กำหนด บทความนี้เสนอการพัฒนาการออกแบบราคาของหม้อแปลงจำหน่ายชนิดน้ำมันโดยใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมด้วยจีเนติกอัลกอริธึม ซึ่งมีพิกัดกำลังตั้งแต่ 50 - 1,000 kVA, 3 เฟส, 50 Hz, แรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ 11,000 - 33,000 V, แรงดันไฟฟ้าด้านทุติยภูมิ 380 - 450 V, Dyn11 โครงสร้างด้านปฐมภูมิใช้ลวดกลมพันแบบครอสโอเวอร์และด้านทุติยภูมิใช้ลวดสี่เหลี่ยมพันแบบสไพรัล บทความนี้เสนอผลการออกแบบราคาที่เหมาะสมของหม้อแปลงจำหน่าย 3 พิกัด ได้แก่ 100 kVA, 800 kVA และ 1,000 kVA โดยมีข้อกำหนดคือค่ากำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลด, ค่ากำลังสูญเสียขณะมีโหลด และค่าเปอร์เซ็นต์อิมพิแดนซ์จะต้องอยู่ภายในข้อกำหนด และมีการเปรียบเทียบคุณลักษณะต่าง ๆ กับวิธีการออกแบบดั้งเดิมในทางอุตสาหกรรม

Abstract

In general, the objective of industrial design for the distribution transformers is to minimize the total cost based on the standard and guaranteed specifications. This paper presents the development of oil-immersed type distribution transformers cost design using the genetic algorithm which have rated of 50 - 1,000 kVA, 3-phase, 50 Hz, primary voltage 11,000 - 33,000 V, secondary voltage 380 - 450 V, Dyn11. The construction of primary coil is cross-over winding type using circular wire and the secondary is spiral winding type using rectangular wire. In this paper, three models of the optimal cost design of distribution transformers having the guarantee of no-load losses, load losses and percent impedance are illustrated, i.e. 100 kVA, 800 kVA and 1,000 kVA. The characteristics of optimal transformer designs are also compared with those of industrial original designs.

1. บทนำ

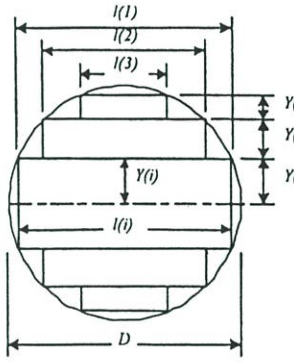
การออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายต้องมีการกำหนดคุณลักษณะต่างๆ ให้ชัดเจนเช่น พิกัดกำลัง แรงดัน เฟส ความถี่ เวกเตอร์กรุ๊ป เปอร์เซ็นต์อิมพิแดนซ์ ข้อกำหนดของกำลังสูญเสียหรือมาตรฐานการทดสอบ เป็นต้น เนื่องจากการออกแบบจะใช้ข้อกำหนดดังกล่าวมาพิจารณาเป็นเงื่อนไขเพื่อให้ผลของการออกแบบได้ตรงตามวัตถุประสงค์ การออกแบบพื้นที่หน้าตัด เส้นผ่านศูนย์กลางหรือจำนวนชั้นของแกนเหล็กจะพิจารณาจากค่ากำลังสูญเสียในแกนเหล็ก กำลังสูญเสียในขดลวดและเปอร์เซ็นต์อิมพิแดนซ์ที่เป็นข้อกำหนดของการออกแบบ โดยขนาดของแกนเหล็กจะถูกปรับให้เหมาะสมตามข้อกำหนดดังกล่าว สำหรับการประมาณหาค่าเริ่มต้นของพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กสามารถคำนวณตามสมการที่ 1 ดังนี้ [1]

$$A_{Fe} = k_c\sqrt{\frac{S}{fP}} \qquad (1)$$

เมื่อ A_{Fe} เป็นพื้นที่หน้าตัดแกนสุทธิ (mm^2) S เป็นพิกัดกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลง (VA) f เป็นความถี่ของระบบไฟฟ้า (Hz) P เป็นจำนวนเฟส k_c เป็นสัมประสิทธิ์ประกอบแกนเหล็กมีค่าอยู่ในช่วง $4 - 6 \times 10^2$ $mm^2.J^{-1/2}$ การเลือกจำนวนชั้นของแกนเหล็กจะต้องพิจารณาถึงคุณลักษณะด้านโครงสร้างดังนี้ ความกว้างน้อยที่สุดของชั้นแผ่นลามิเนทจะถูกกำหนดโดยความกว้างของแผ่นยึดแกนเหล็กที่อยู่ในขอบเขตพื้นที่ทรงกลมแกนเดียวกัน ความเหมาะสมของจำนวนชั้นไม่มากเกินไปซึ่งจะเป็นการไม่ประหยัดต่อระบบการผลิต และการกำหนดความกว้างของแผ่นลามิเนทโดยทั่วไปความกว้างของแผ่นลามิเนทถูกกำหนดค่าใช้งานอยู่แล้วจากกระบวนการผลิตแผ่นลามิเนท ซึ่งมีความกว้าง 50, 60, 70, ... mm เป็นต้น ความหนาในแต่ละชั้นที่แผ่นลามิเนทสามารถวางได้ภายในทรงกลมแกนเหล็กตามรูปที่ 1 สามารถคำนวณหาได้ดังสมการที่ 2 [2]

$$Y(i) = \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{l(i)}{2}\right)^2} - \sum_{j=0}^{i-1} Y(j) \qquad (2)$$

เมื่อ i เป็นลำดับชั้นแกน D เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนเหล็ก (mm) $l(i)$ เป็นความกว้างของชั้นแกน (mm) $Y(i)$ เป็นความหนาของชั้นแกนโดยที่ $Y(0)$ มีค่าเท่ากับศูนย์ (mm) พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กสุทธิภายในทรงกลมแกนสามารถคำนวณหาได้ตามสมการที่ 3



รูปที่ 1 โครงสร้างของพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็ก

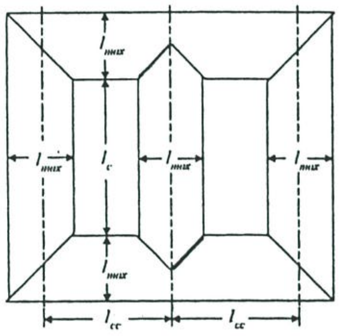
$$A_{Fe} = 2k_e \sum_{i=1}^{n} Y(i)l(i) \qquad (3)$$

โดยที่ k_e เป็นค่าสัมประสิทธิ์คูณลดพื้นที่จากผลของฉนวนเคลือบแผ่นลามิเนท (stacking factor) n เป็นจำนวนชั้นของแกนเหล็ก การกำหนดจำนวนรอบของขดลวดสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 4 โดยการปรับจำนวนรอบของขดลวดให้ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กมีค่าอยู่โดยประมาณ 1.50 – 1.75 T ซึ่งจะต้องพิจารณาคุณลักษณะของหม้อแปลงให้ตรงตามข้อกำหนด

$$\frac{V_p}{N_p} = \frac{V_s}{N_s} = 4.44 fB_m(A_{Fe} \times 10^{-6}) \qquad (4)$$

เมื่อ V_p และ V_s เป็นขนาดพิกัดแรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ (V) ตามลำดับ N_p และ N_s เป็นจำนวนรอบขดลวดด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ (V) ตามลำดับ B_m เป็นความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (T) การกำหนดความหนาแน่นของกระแสในขดลวดจะพิจารณาจากชนิดของลวดตัวนำ ระดับของกำลังสูญเสีย และอุณหภูมิเพิ่มที่ยอมรับได้ ในทางอุตสาหกรรมใช้งานที่ไม่เกิน 3.5 A/mm^2 การพิจารณาด้านการฉนวนต้องกำหนดค่าให้เหมาะสมกับระดับแรงดันทดสอบ ระยะความปลอดภัยที่ใช้สำหรับการ

ออกแบบฉนวนในน้ำมันกำหนดให้ 3 kV/mm สำหรับน้ำมันไม่มีฉนวนกระดาษกั้นกลาง และ 5 kV/mm สำหรับน้ำมันมีฉนวนกระดาษกั้นกลาง ซึ่งเป็นระยะที่กำหนดใช้งานในทางอุตสาหกรรม น้ำหนักของแกนเหล็กรวมประกอบด้วยน้ำหนักของขาแกนทั้งสามและน้ำหนักของ โย๊คแกนเหล็ก (yoke) ด้านบนและล่างตามรูปที่ 2 สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 5



รูปที่ 2 โครงสร้างรูปทรงแกนเหล็กด้านข้าง

$$W_i = A_{Fe}\gamma_i\left(3l_c + 2\left(2l_{cc} + l_{\max}\right)\right) \tag{5}$$

เมื่อ W_i เป็นน้ำหนักของแกนเหล็กรวม (kg) γ_i เป็นความหนาแน่นของแผ่นลามิเนทมีค่า 7.65×10^{-6} kg/mm^3 $l_{\max}$ เป็นความกว้างของแผ่นลามิเนทที่กว้างที่สุด (mm) l_c เป็นความยาวของขาแกน (mm) l_{cc} เป็นระยะห่างระหว่างกลางขาแกน (mm) การคำนวณน้ำหนักของขดลวดสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 6

$$W_c = \gamma_c A_c L_m N \tag{6}$$

เมื่อ W_c เป็นน้ำหนักของขดลวดตัวนำ (kg) γ_c เป็นความหนาแน่นของตัวนำสำหรับทองแดงมีค่าเท่ากับ 8.9×10^{-6} kg/mm^3 A_c เป็นพื้นที่หน้าตัดสุทธิของตัวนำ (mm^2) L_m เป็นความยาวรอบเฉลี่ยของขดลวด (mm) N เป็นจำนวนรอบของขดลวด การคำนวณกำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลดสามารถคำนวณได้จากค่ากำลังสูญเสียจากแกนเหล็กในรูปของวัตต์ต่อกิโลกรัม (W/kg) ที่ได้จากผู้ผลิตร่วมกับน้ำหนักของแกนเหล็กตามสมการที่ 7

$$P_{NL} = k_{wn} P_m W_i \tag{7}$$

เมื่อ P_{NL} เป็นกำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลด (W) k_{wn} เป็นสัมประสิทธิ์คูณเพิ่มจากการทำงาน และคุณภาพของแผ่นลามิเนทเป็นข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ P_m เป็นกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก (W/kg) สำหรับกำลังสูญเสียขณะมีโหลดเป็นผลรวมของค่ากำลังสูญเสียจากความต้านทานในขดลวดและค่ากำลังสูญเสียจากการเหนี่ยวนำ (stray losses) กำลังสูญเสียจากความต้านทานในขดลวดสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 8 และสามารถหาความต้านทานของขดลวดได้ตามสมการที่ 9

$$P_{CL} = I_p^{\,2} R_p + I_s^{\,2} R_s \tag{8}$$

$$R = \frac{\rho L_m N}{A_c} \tag{9}$$

เมื่อ P_{CL} เป็นกำลังสูญเสียที่ขดลวด (W) I_p และ I_s เป็นกระแสพิกัดที่ขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ (A) ตามลำดับ R_p และ R_s เป็นความต้านทานของขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ (Ω) ตามลำดับ R เป็นความต้านทานของขดลวด (Ω) ρ เป็นค่าความต้านทานจำเพาะของลวดตัวนำที่ 75 °C (Ω-mm) กำลังสูญเสียจากการเหนี่ยวนำเป็นผลกระทบจากการเหนี่ยวนำ ในทางปฏิบัติสามารถประมาณค่าเพื่อให้สอดคล้องและถูกต้องมากขึ้นจากข้อมูลทางสถิติ การคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์อิมพิแดนซ์สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 10 โดยสามารถหาค่าเปอร์เซ็นต์ความต้านทานได้ตามสมการที่ 11 และมีการประมาณค่าเปอร์เซ็นต์ความเหนี่ยวนำของขดลวดทรงกระบอกซ้อนกันที่ความยาวของขดลวดเท่ากันที่ความถี่ 50 Hz [3] ตามสมการที่ 12

$$\%Z = \sqrt{\%R^2 + \%X^2} \tag{10}$$

$$\%R = \frac{P_{CL}}{S} \times 100 \tag{11}$$

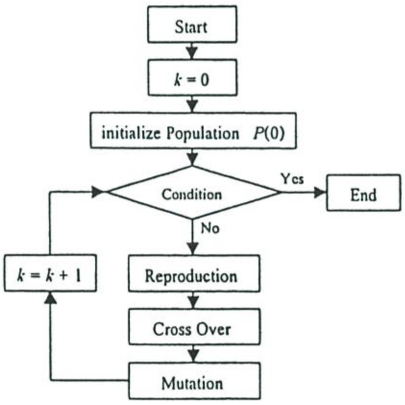
$$\%X = \frac{1.24 I_S N_S^{\,2} D_m k_R}{E_S L_{wm} \times 10^4}\left(a + \frac{b_1 + b_2}{3}\right) \tag{12}$$

เมื่อ $\%Z, \%X, \%R$ เป็นค่าเปอร์เซ็นต์ของอิมพิแดนซ์ ความเหนี่ยวนำ และความต้านทาน ตามลำดับ E_S เป็นแรงดันต่อเฟสที่ด้านทุติยภูมิ (V) D_m เป็นเส้นผ่านศูนย์

กลางเฉลี่ยที่ช่องว่างระหว่างขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ (mm) L_{wm} เป็นความยาวเฉลี่ยของขดลวด (mm) k_R เป็นค่าปรับแต่งตามโครงสร้างของขดลวดคูณลดจากผลของสนามแม่เหล็ก [1] a เป็นช่องว่างระหว่างขดลวดด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ (mm) b_1 เป็นความหนาของชุดขดลวดด้านปฐมภูมิ (mm) b_2 เป็นความหนาของชุดขดลวดด้านทุติยภูมิ (mm)

2. การหาค่าที่เหมาะสมด้วยจีเนติกอัลกอริธึม

การหาค่าที่เหมาะสมโดยใช้จีเนติกอัลกอริธึม (Genetic Algorithms ; GAs) [4-5] ใช้แนวทางทฤษฎีกลไกการคัดเลือกในทางธรรมชาติโดยการคัดเลือกข้อมูลที่ดีที่สุดในแต่ละรุ่น ซึ่งพารามิเตอร์แต่ละตัวจะเปรียบเสมือนยีนส์ (gene)



รูปที่ 3 ขั้นตอนการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีจีเนติก

และกลุ่มของพารามิเตอร์เปรียบเสมือนโครโมโซม (chromosome) กำหนดให้ P เป็นเซ็ตของคำตอบ $P(0)$ เป็นเซตของคำตอบรุ่นแรกที่ได้จากการสุ่ม, $P(k)$ เป็นเซตของคำตอบรุ่นที่ k, และ $P(k+1)$ เป็นเซตของคำตอบรุ่นใหม่ที่ได้จากเซตของคำตอบ $P(k)$ ผ่านการดำเนินงานทางพันธุศาสตร์เพื่อการพัฒนาในแต่ละรุ่นประกอบด้วย การผลิตประชากรในรุ่นต่อไป (Reproduction) ครอสโอเวอร์ (Cross over) และมิวเตชัน (Mutation) มาคัดเลือกโดยพิจารณาความเหมาะสมที่เป้าหมาย สำหรับเงื่อนไขในการหยุดการทำงาน (Condition) จะขึ้นอยู่กับการกำหนดจำนวนครั้งของการทำงาน โดยที่ขั้นตอนของการหาค่าที่เหมาะสมแสดงดังรูปที่ 3

3. การออกแบบราคาที่เหมาะสมของหม้อแปลงจำหน่ายโดยใช้จีเนติกอัลกอริธึม

การออกแบบราคาที่เหมาะสมของหม้อแปลงจำหน่ายโดยใช้จีเนติกอัลกอริธึม มีวัตถุประสงค์ของการออกแบบคือหาราคาต้นทุนการผลิตต่ำที่สุดโดยในการออกแบบนี้พิจารณาราคาต้นทุนเฉพาะส่วนของแกนเหล็กและขดลวดตัวนำซึ่งเป็นราคาวัสดุหลักของหม้อแปลงจำหน่าย กำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function) ได้ดังนี้

$$\text{Minimize } f(x) = C_i W_i(x) + C_{cu} W_{cu}(x) \qquad (13)$$

เมื่อ C_i เป็นราคาเฉลี่ยของแผ่นลามิเนท (บาท/kg) C_{cu} เป็นราคาเฉลี่ยของขดลวดตัวนำ (บาท/kg) W_{cu} เป็นน้ำหนักรวมของขดลวดตัวนำ (kg) และมีข้อกำหนดของการออกแบบคือค่ากำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลด ค่ากำลังสูญเสียขณะมีโหลดและเปอร์เซ็นต์อิมพิแดนซ์ต้องมีค่าอยู่ในย่านที่ตรงตามข้อกำหนด พารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับการออกแบบราคาที่เหมาะสมนี้มี 4 พารามิเตอร์ได้แก่ x_1 เป็นพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็ก (mm^2) ใช้ตามมาตรฐานการผลิตเดียวกับแบบดั้งเดิม (original) x_2 เป็นความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (T) x_3 เป็นพื้นที่หน้าตัดของลวดตัวนำด้านปฐมภูมิ (mm^2) x_4 เป็นพื้นที่หน้าของตัดลวดตัวนำด้านทุติยภูมิ (mm^2) พารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จะถูกเปรียบเทียบข้อมูลกับฐานข้อมูลของแกนเหล็กและลวดตัวนำที่มีใช้งานในทางอุตสาหกรรมเพื่อหาโครงสร้างที่เหมาะสมโดยมีสมการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายตามหัวข้อที่ 1 บทความนี้ได้ทำการออกแบบราคาที่เหมาะสมของหม้อแปลงจำหน่ายชนิดน้ำมัน 3 เฟส 50 Hz Dyn11 จำนวน 3 พิกัดได้แก่ขนาด 100 kVA, 800 kVA และ 1,000 kVA มีเงื่อนไขการออกแบบตามตารางที่ 1 ในตารางที่ 2 แสดงพารามิเตอร์กำหนดเงื่อนไขบังคับให้กับจีเน่ติกอัลกอริธึม และแสดงผลการออกแบบราคาที่เหมาะสมของหม้อแปลงจำหน่ายเปรียบเทียบกับแบบดั้งเดิมในตารางที่ 3 โดยการพิจารณาด้านฉนวน ร่องน้ำมันระบายความร้อนและระยะการทำงานกำหนดใช้ตามแบบดั้งเดิม แกนเหล็กที่ใช้เป็น CRGO ชนิด M4 [6] ที่มีความหนาของแผ่น 0.27 mm $k_e = 0.97$ และมีค่า $k_{wn} = 1.25$ เป็นค่าเดียวกับแบบดั้งเดิม

ตารางที่ 1 พิกัดการออกแบบราคาที่เหมาะสมของหม้อแปลงจำหน่าย

Rating	% Tap	%Z	Guaranteed		Standard
			No-load Losses	Load Losses	
100 kVA 11000-433/250 V	± 2 × 2.5%	4.0 %	250 W	1550 W	IEC 60076
800 kVA 24000-416/240 V	- 4 × 2.5%	6.0 %	1400 W	10500 W	IEC 60076
1000 kVA 22000-400/230 V	± 2 × 2.5%	6.0 %	1600 W	13000 W	IEC 60076

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ที่กำหนดเป็นเงื่อนไขบังคับในการออกแบบด้วยจีเนติกอัลกอริธึม

Parameters for Transformer Design	Range of Parameters
Flux density ; B_m	1.50 – 1.75 T
Current density ; J	1.0 – 3.5 A/mm^2
Form factor ; k_c	4.0 – 6.0 × 10^2 mm^2.J$^{-1/2}$

ตารางที่ 3 ผลการออกแบบราคาที่เหมาะสมของหม้อแปลงจำหน่ายเปรียบเทียบคุณลักษณะกับแบบดั้งเดิม

Distribution Transformer Characteristics	100 kVA		800 kVA		1000 kVA	
	Original	Optimal	Original	Optimal	Original	Optimal
Core diameter (mm)	130	126	208	194	222	221
Core area (mm^2) ; x_1	11793	11212	29947	26932	34031	34970
Flux density (Tesla) ; x_2	1.59	1.59	1.72	1.75	1.70	1.75
Number of turns for low voltage windings	60	63	21	23	18	17
Number of turns for high voltage windings	2772	2910	2098	2298	1800	1699
Number of turns for tap high voltage windings	66	69	53	57	43	40
Gauge of low voltage windings (mm×mm); x_3	3.0 × 9.0	2.8 × 9.0	3.5 × 9.0	3.8 × 9.0	3.0 × 11	4.5 × 11
Parallel number of low voltage windings	2 × 1 = 2	2 × 1 = 2	6 × 2 = 12	5 × 2 = 10	7 × 2 = 14	5 × 2 = 10
Current density of low voltage winding (A/mm^2)	2.57	2.76	3.06	3.38	3.25	3.04
Number of layers for low voltage windings	2	2	1	1	1	1
Diameter of high voltage windings (mm)	1.25	1.3	2.10	2.10	2.60	2.40
Cross section of high voltage windings (mm^2) ; x_4	1.23	1.33	3.46	3.46	5.31	4.52
Current density of high voltage winding (A/mm^2)	2.47	2.28	3.21	3.21	2.85	3.35
Number of layers for high voltage windings	13	14	14	14	14	13
No-load losses (W)	257	248	1173	1123	1386	1530
Load losses (W)	1546	1546	9511	10368	12758	12926
Percent impedance (%)	3.75	3.85	5.74	5.61	6.10	5.63
Core cost (Baht) 68 Baht/kg (Industrial)	14049	13531	51877	47073	64083	63670
Copper cost (Baht) 125 Baht/kg (Industrial)	12575	13074	44825	44330	56463	50312
Total cost (Baht)	26624	26605	96702	91403	120546	113982
Cost reduction (%)	0.07		5.48		5.45	

จากผลการออกแบบในตารางที่ 3 พบว่าการออกแบบด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมจะพยายามลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนเหล็กลงและปรับจำนวนรอบให้ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กมีค่ามากที่สุดแต่จะต้องไม่ทำให้ค่ากำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลดเกินกว่าข้อกำหนด ในทำนองเดียวกันขนาดของลวดตัวนำจะพยายามลดขนาดพื้นที่หน้าตัดโดยรวมลงเพื่อให้ความหนาแน่นของกระแสเพิ่มขึ้นสูงสุดแต่จะต้องไม่ทำให้ค่ากำลังสูญเสียขณะมีโหลดเกินข้อกำหนด

ในกรณีแรกหม้อแปลงขนาด 100 kVA เมื่อเปรียบเทียบผลการออกแบบพบว่าการออกแบบด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมจะมีโครงสร้างและราคาต้นทุนรวมไม่แตกต่างจากแบบดั้งเดิมมากนัก ทั้งนี้เป็นผลมาจากพื้นฐานในการเลือกใช้วัสดุสำหรับออกแบบเป็นลักษณะเดียวกันกับแบบดั้งเดิม ซึ่งมีขนาดพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กที่สามารถเลือกใช้งานได้มีไม่มากนักเพราะถูกจำกัดด้วยความกว้างของแผ่นลามิเนท ทำให้มีสัมประสิทธิ์การใช้ประโยชน์ (utilization factor) ของพื้นที่ในทรงกลมแกนต่ำ (รูปที่ 1) แต่ในกรณีหม้อแปลงขนาด 800 kVA และ 1000 kVA จะมีสัมประสิทธิ์การใช้ประโยชน์ของพื้นที่ในทรงกลมแกนมากขึ้น ความกว้างของแผ่นลามิเนทที่ใช้งานสามารถเลือกได้อย่างหลากหลายทำให้การออกแบบขนาดพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กมีข้อจำกัดน้อยลง

จะเห็นได้ว่าในกรณี 800 kVA จะสามารถออกแบบโครงสร้างที่เหมาะสมซึ่งสามารถลดราคาต้นทุนรวมจากแบบดั้งเดิมได้ถึง 5299 บาท (5.48 %) ในกรณีหม้อแปลงขนาด 1000 kVA จะสามารถออกแบบโครงสร้างที่เหมาะสมซึ่งสามารถลดราคาต้นทุนรวมจากแบบดั้งเดิมได้ถึง 6564 บาท (5.45 %) อย่างไรก็ตาม จากผลการออกแบบจะพบว่าความหนาแน่นของกระแสด้านแรงสูงจะเพิ่มขึ้นจากแบบดั้งเดิมซึ่งจะทำให้มีผลกระทบในด้านความร้อนที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการออกแบบนี้ใช้ระยะร่องน้ำมันและชุดระบายความร้อนตามการออกแบบดั้งเดิม

4. บทสรุป

จากผลการออกแบบราคาที่เหมาะสมของหม้อแปลงจำหน่ายชนิดน้ำมันโดยใช้จีเนติกอัลกอริธึม พบว่าในการออกแบบจะพยายามลดขนาดทางโครงสร้างของแกนเหล็กและขดลวดลง โดยพิจารณาผลในด้านราคาต้นทุนการผลิตที่ต่ำที่สุดซึ่งจะต้องอยู่ภายในข้อกำหนดของการออกแบบ สมการที่ใช้ในการออกแบบราคาที่เหมาะสมเป็นลักษณะเดียวกันกับแบบดั้งเดิมในทางอุตสาหกรรม มีการกำหนดระยะการฉนวนและร่องน้ำมันตามพิกัดกำลังของแบบดั้งเดิม ทำให้มั่นใจได้ว่าผลการออกแบบที่เหมาะสมนี้สามารถได้ราคาที่ต่ำลงและสามารถออกแบบใช้งานได้จริง อย่างไรก็ตาม จะเห็นได้ว่าในการลดขนาดของขดลวดอาจจะทำให้ความหนาแน่นของกระแสสูงขึ้นเป็นผลทำให้เกิดความร้อนเพิ่มขึ้นในขดลวด ในทางปฏิบัติสามารถแก้ไขได้โดยการเพิ่มร่องน้ำมันในชุดขดลวดหรือการลดอุณหภูมิของน้ำมันโดยการเพิ่มชุดระบายความร้อน ดังนั้นในงานวิจัยต่อไปจะนำเอาผลของอุณหภูมิเพิ่มที่ขดลวดมาพิจารณาในการออกแบบด้วย ซึ่งจะทำให้สามารถออกแบบร่องน้ำมันและระบบระบายความร้อนที่มีความเหมาะสมยิ่งขึ้น

5. เอกสารอ้างอิง

[1] H. Banspach, "Transformer – Design," Thai-German Technical Teacher College, 1975.

[2] B. Heavy Electricals Limited, Bhopal. "Transformers," Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, New Delhi, 1987.

[3] L.F. Blume, A. Boyajian, G. Camilli, T.C. Lennox, S. Minneci, V.M. Montsinger. "Transformer Engineering," 2nd Ed., John Wiley & Sons, New York, 1951.

[4] Z. Michalewicz. "Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs" 3rd Ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York, 1996.

[5] L. Hui, H. Li, H. Bei, Y. Shunchang. "Application Research Based on Improved Genetic Algorithm for Optimum Design of Power Transformers," Electrical Machines and Systems, Prod. ICEMS 2001, vol.1, pp. 242 – 245, 2001.

[6] Nippon Steel Corporation. "Technical Data on Electrical Steel Sheet," Japan.

ประวัติผู้เขียน

นายชวรัตน์ เก่งธรรมกิจ เกิดเมื่อวันที่ 2 สิงหาคม 2520 ที่กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2542 มีผลงานวิจัยทางวิชาการเกี่ยวกับการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายเป็นที่ยอมรับและได้รับการตีพิมพ์ เรื่องการออกแบบราคาที่เหมาะสมของหม้อแปลงจำหน่ายโดยใช้จีเนติกอัลกอริธึม วิศวสารลาดกระบัง ปีที่ 20 ฉบับที่ 1 มีนาคม 2546 หน้า 79-82