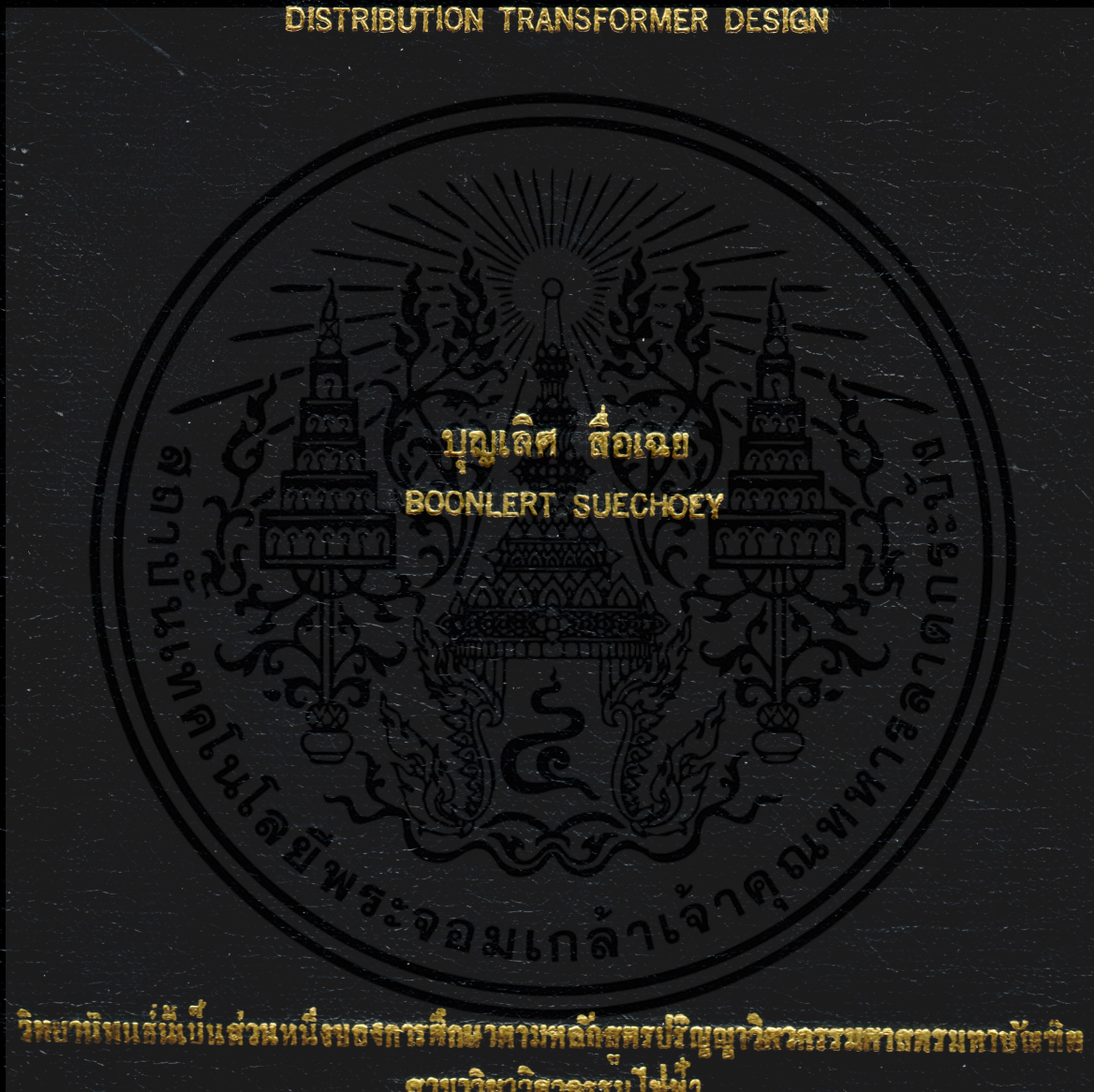


การพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายแบบจุ่มในน้ำมัน

DEVELOPMENT OF A SOFTWARE FOR OIL-IMMERSED
DISTRIBUTION TRANSFORMER DESIGN



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตที่
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2543

ISBN 974-622-911-7

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายแบบจุ่มในน้ำมัน

DEVELOPMENT OF A SOFTWARE FOR OIL-IMMERSED
DISTRIBUTION TRANSFORMER DESIGN



บุญเลิศ สือเฉย
BOONLERT SUECHOEY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2543

ISBN 974-622-911-7

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 37659
วัน, เดือน, ปี..... 19 ก.ย. 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**DEVELOPMENT OF A SOFTWARE FOR OIL-IMMERSED
DISTRIBUTION TRANSFORMER DESIGN**



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

2000

ISBN 974-622-911-7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2000

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายแบบจุ่มในน้ำมัน
DEVELOPMENT OF A SOFTWARE FOR OIL-IMMERSED
DISTRIBUTION TRANSFORMER DESIGN

ชื่อนักศึกษา นายบุญเลิศ สือเฉย

รหัสประจำตัว 38061221

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.ศุภี บรรจงจิตร

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ชัยวุฒิ	ฉัตรอุทัย	
ผศ.พิชิต	ถ้ายอง	
รศ.มณฑล	ลีลาจินดาไกรฤกษ์	
รศ.ศุภี	บรรจงจิตร	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 6 กรกฎาคม 2543 เวลา 12.00-13.00 น.

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

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(รศ.ดร.มนต์ สวรรค์ชัย)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....๙.๖.....เดือน.....พ.ศ.....๒๕๔๓.....

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายแบบ จุ่มในน้ำมัน
ชื่อนักศึกษา	นายบุญเลิศ สีอเฉย
รหัสประจำตัว	38061221
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2543
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ศุติ บรรจงจิตร

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ เป็นการนำเสนอผลการวิจัยและพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายแบบจุ่มในน้ำมันที่ใช้ในพื้นที่บริการของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ในการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายนั้นมีขั้นตอนและพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบเป็นจำนวนมากซึ่งทำให้เสียเวลาในการวิเคราะห์ออกแบบ ทำให้เกิดข้อผิดพลาดได้ง่ายและทางการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคได้ทำการเปลี่ยนแปลงแก้ไขคุณสมบัติของหม้อแปลงจำหน่ายโดยทำการลดค่าความสูญเสียลงจากเดิม และได้ทำการเพิ่มเวกเตอร์กรุป Yzn 11 ด้วย ดังนั้นเพื่อเป็นการรองรับการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว วิทยานิพนธ์นี้จึงทำการศึกษาขั้นตอนและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในการวิเคราะห์ออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายแล้วทำการพัฒนาซอฟต์แวร์ขึ้นเพื่อรองรับการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวและยังช่วยให้ผู้ออกแบบสามารถทำการวิเคราะห์ออกแบบได้สะดวกรวดเร็วยิ่งขึ้น และยังสะดวกต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการออกแบบทำให้ซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นนี้ใช้งานง่ายมีประสิทธิภาพ และทำให้หม้อแปลงจำหน่ายที่ได้จากการวิเคราะห์ออกแบบนี้มีคุณสมบัติเป็นไปตามข้อกำหนดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค มีราคาต้นทุนในการผลิตต่ำ และมีอายุการใช้งานยาวนานยิ่งขึ้นจากการวิเคราะห์ออกแบบดังกล่าวได้ทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นกับผลการทดสอบในทางปฏิบัติเพื่อเป็นการแสดงให้เห็นว่าซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถใช้ในการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Thesis Title	Development of a Software for Oil-Immersed Distribution Transformer Design
Student	Mr. Boonlert Suechoey
Student ID.	38061221
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2000
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Sulee Bunjongjit

ABSTRACT

The thesis presents the research and development of a software for oil - immersed distribution transformer design using in the Provincial Electricity Authority(PEA.). The design of oil - immersed distribution transformer utilizes the concept and parameter in design analysis and made an error easily. The provincial electricity authority has changed the characteristics of distribution transformer by decreasing loss and adding vector group Yzn11. So for this problem, this thesis studies the concept and parameter for design and analysis of distribution transformer and software development for this property and coned help designers comfortable to change parameter easily for design. Development of a software is easily used with efficiency for this distribution transformer using the property of PEA. with the low price to produce and long aging of life. From design and analysis , the results obtained from development of a software and from an experimental result show an effective development of a software in distribution transformer design.

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาจากท่าน รองศาสตราจารย์สุติ บรรจงจิตร ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ บริษัททงษ์พิมานการไฟฟ้า จำกัด เป็นอย่างสูงที่ได้กรุณาเอื้อเฟื้อสถานที่ วัสดุอุปกรณ์คำแนะนำและข้อมูลต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ในการจัดทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านเป็นอย่างสูงที่กรุณาตรวจสอบและให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ต่อการจัดทำวิทยานิพนธ์ นอกจากนี้ขอขอบคุณเพื่อนๆทุกคนและผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องที่มีส่วนช่วยเหลือให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

บุญเลิศ สือเฉย



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญภาพ.....	XI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 แนวความคิดของวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	1
1.3 ประโยชน์ที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์.....	2
1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	2
บทที่ 2 โครงสร้างและส่วนประกอบของหม้อแปลงจำหน่าย.....	4
2.1 หลักการทำงานเบื้องต้นของหม้อแปลง.....	4
2.2 สมการแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ.....	5
2.3 โครงสร้างและส่วนประกอบของหม้อแปลงที่ใช้ในระบบจำหน่าย.....	6
2.4 การเลือกวัสดุที่ใช้ในการสร้างหม้อแปลงจำหน่าย.....	7
2.4.1 การเลือกวัสดุที่ใช้เป็นแกนเหล็กหม้อแปลง.....	7
2.4.2 การเลือกวัสดุที่ใช้เป็นขดลวดหม้อแปลง.....	7
2.4.3 การเลือกวัสดุที่ใช้เป็นฉนวน.....	8
2.4.4 น้ำมันหม้อแปลง.....	8
2.4.5 แท้ปเซนเจอร์.....	9
2.4.6 บุชชิ่ง.....	10
2.4.7 ตัวถังหม้อแปลง.....	10
2.4.8 ครีประบายความร้อน.....	11
2.4.9 ถังรองรับน้ำมัน.....	12
2.4.10 ท่อหายใจกรองความชื้น.....	12

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การวิเคราะห์และขั้นตอนการออกแบบหม้อแปลงจำหน่าย.....	14
3.1 การเลือกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของแกนเหล็กหม้อแปลง.....	14
3.1.1 อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่าศูนย์กลางแกนเหล็กหม้อแปลง.....	14
3.1.2 พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กหม้อแปลง.....	15
3.2 การเลือกค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก.....	15
3.2.1 อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก.....	16
3.3 การเลือกชนิดของขดลวด.....	16
3.3.1 ขดลวดชนิดสไปรัล.....	17
3.3.2 ขดลวดชนิดครอส โอเวอร์.....	17
3.4 การเลือกขนาดตัวนำและความหนาแน่นของกระแส.....	18
3.4.1 อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นของกระแส.....	18
3.5 เวกเตอร์กลุ่มหรือการต่อขดลวดของหม้อแปลง.....	18
3.5.1 การต่อขดลวดแบบ Dyn 11.....	19
3.5.2 การต่อขดลวดแบบ Yzn 11.....	19
3.6 คุณลักษณะทางความร้อนของหม้อแปลง.....	20
3.6.1 ขีดจำกัดของอุณหภูมิเพิ่ม.....	20
3.6.2 วิธีการระบายความร้อนของหม้อแปลง.....	21
3.6.3 สัญลักษณ์ที่ใช้เรียกตามวิธีการระบายความร้อน.....	22
3.6.4 การถ่ายเทความร้อน.....	22
3.6.5 การแผ่รังสีความร้อน.....	23
3.6.6 การพาความร้อน.....	23
3.6.7 การถ่ายเทความร้อนร่วมของการแผ่รังสีความร้อนและการพาความร้อน.....	24
3.6.8 ขีดจำกัดความร้อนเกินและผลที่มีต่อความเป็นฉนวน.....	25
3.7 ขั้นตอนการออกแบบหม้อแปลงจำหน่าย.....	25
3.7.1 การออกแบบแกนเหล็ก.....	26
3.7.2 การออกแบบขดลวด.....	31
3.7.3 การออกแบบฉนวน.....	34
3.7.4 การคำนวณหาคุณสมบัติของหม้อแปลง.....	35

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.7.5 การออกแบบตัวถังและครีบบระบายความร้อนของหม้อแปลง.....	41
บทที่ 4 การพัฒนาซอฟต์แวร์เพื่อใช้วิเคราะห์ห้ออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายแบบจุ่มในน้ำมัน.....	44
4.1 การเลือกพิกัดกำลังไฟฟ้า พิกัดแรงดันด้านแรงสูง และเวกเตอร์กรุป ของหม้อแปลงจำหน่าย.....	44
4.2 การคำนวณออกแบบพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กของหม้อแปลงจำหน่าย.....	45
4.3 การคำนวณออกแบบขดลวดด้านแรงดันต่ำของหม้อแปลงจำหน่าย.....	47
4.4 การคำนวณออกแบบขดลวดด้านแรงดันสูงของหม้อแปลงจำหน่าย.....	47
4.5 การคำนวณขนาดของแกนเหล็กในส่วนต่างๆ ของหม้อแปลงจำหน่าย.....	47
4.6 การคำนวณและกำหนดพารามิเตอร์แกนเหล็กของหม้อแปลงจำหน่าย.....	53
4.7 การคำนวณคุณสมบัติทางไฟฟ้าของหม้อแปลงจำหน่าย.....	54
4.8 การคำนวณออกแบบขนาดตัวถังและพื้นที่ผิวการระบายความร้อน ของหม้อแปลงจำหน่าย.....	55
4.9 การคำนวณต้นทุนวัสดุหลักที่ใช้ในการสร้างหม้อแปลงจำหน่าย.....	56
บทที่ 5 วิธีการใช้งานซอฟต์แวร์สำหรับวิเคราะห์ห้ออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายแบบจุ่มในน้ำมัน..	61
5.1 ข้อยกจำกัดของการใช้งาน.....	61
5.2 การเริ่มต้นและจบการทำงานของ OIDS.....	61
5.3 โปรแกรมช่วยเหลือ.....	70
บทที่ 6 ตัวอย่างการใช้งาน OIDS.....	71
6.1 ตัวอย่างที่ 1 การวิเคราะห์ห้ออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 160 kVA 3 ph 50 Hz 22 kV - 400/230 V เวกเตอร์กรุป Dyn 11.....	71
6.1.1 สรุปผลจากการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายตัวอย่างที่ 1.....	77
6.2 ตัวอย่างที่ 2 การวิเคราะห์ห้ออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 160 kVA 3 ph 50 Hz 33 kV - 400/230 V เวกเตอร์กรุป Dyn 11.....	82
6.2.1 สรุปผลจากการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายตัวอย่างที่ 2.....	88

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

6.3 ตัวอย่างที่ 3 การวิเคราะห์ห้ออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 100 kVA 3 ph 50 Hz 22 kV - 400/230 V เวกเตอร์กรุป Yzn 11.....	93
6.3.1 สรุปผลจากการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายตัวอย่างที่ 3.....	99
6.4 ตัวอย่างที่ 4 การวิเคราะห์ห้ออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 100 kVA 3 ph 50 Hz 33 kV - 400/230 V เวกเตอร์กรุป Yzn 11.....	104
6.4.1 สรุปผลจากการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายตัวอย่างที่ 4.....	110
6.5 ขั้นตอนการสร้างหม้อแปลงจำหน่าย.....	115
บทที่ 7 ผลการทดสอบหม้อแปลงจำหน่าย.....	117
7.1 การทดสอบประจำ.....	117
7.2 การทดสอบเฉพาะ.....	117
7.3 การทดสอบหม้อแปลงที่สร้าง.....	118
7.3.1 ผลการทดสอบหม้อแปลงตัวอย่างที่ 1.....	118
7.3.2 ผลการทดสอบหม้อแปลงตัวอย่างที่ 2.....	122
7.3.3 ผลการทดสอบหม้อแปลงตัวอย่างที่ 3.....	126
7.3.4 ผลการทดสอบหม้อแปลงตัวอย่างที่ 4.....	130
7.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	134
บทที่ 8 สรุปผลการวิจัยและขอเสนอแนะ.....	134
บรรณานุกรม.....	137
ภาคผนวก	
ก. กราฟค่าความสูญเสียของแกนเหล็ก.....	139
ข. ตารางกำหนดค่าสูญเสียของหม้อแปลง 3 เฟส ตามมาตรฐาน กฟภ.....	143
ค. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์.....	145
ประวัติผู้เขียน.....	168

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 อิทธิพลของเส้นผ่าศูนย์กลางของแกนเหล็กและความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก ต่อพารามิเตอร์ต่างๆ ของหม้อแปลง.....	16
3.2 ชัดจำกัดอุณหภูมิเพิ่มสำหรับหม้อแปลงแบบจุ่มน้ำมัน.....	20
7.1 การเปรียบเทียบขนาดและน้ำหนักของแกนเหล็กระหว่างข้อมูลจากการออกแบบ กับข้อมูลจากการสร้างหม้อแปลงตัวอย่างที่ 1.....	118
7.2 การเปรียบเทียบขนาดและน้ำหนักของขดลวดแรงดันต่ำระหว่างข้อมูลจากการออกแบบ กับข้อมูลจากการสร้างหม้อแปลงตัวอย่างที่ 1.....	118
7.3 การเปรียบเทียบขนาดและน้ำหนักของขดลวดแรงดันสูงระหว่างข้อมูลจากการออกแบบ กับข้อมูลจากการสร้างหม้อแปลงตัวอย่างที่ 1.....	119
7.4 การเปรียบเทียบปริมาตรน้ำมันหม้อแปลงที่ใช้ระหว่างข้อมูลจากการออกแบบ กับข้อมูลจากการสร้างหม้อแปลงตัวอย่างที่ 1.....	119
7.5 การเปรียบเทียบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของหม้อแปลงระหว่างข้อมูลจากการออกแบบ กับข้อมูลจากการสร้างหม้อแปลงตัวอย่างที่ 1.....	119
7.6 แสดงผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มของหม้อแปลงตัวอย่างที่ 1.....	119
7.7 แสดงผลทดสอบค่าความผิดพลาดของอัตราส่วนแรงดันของหม้อแปลงตัวอย่างที่ 1.....	120
7.8 แสดงผลการวัดค่าความต้านทานขดลวดของหม้อแปลงตัวอย่างที่ 1.....	120
7.9 แสดงผลการวัดค่าความต้านทานฉนวนของหม้อแปลงตัวอย่างที่ 1.....	120
7.10 การเปรียบเทียบต้นทุนวัสดุหลักระหว่างข้อมูลจากการออกแบบกับข้อมูล จากการสร้างหม้อแปลงตัวอย่างที่ 1.....	120
7.11 การเปรียบเทียบขนาดและน้ำหนักของแกนเหล็กระหว่างข้อมูลจากการออกแบบ กับข้อมูลจากการสร้างหม้อแปลงตัวอย่างที่ 2.....	122
7.12 การเปรียบเทียบขนาดและน้ำหนักของขดลวดแรงดันต่ำระหว่างข้อมูลจากการออกแบบ กับข้อมูลจากการสร้างหม้อแปลงตัวอย่างที่ 2.....	122
7.13 การเปรียบเทียบขนาดและน้ำหนักของขดลวดแรงดันสูงระหว่างข้อมูลจากการออกแบบ กับข้อมูลจากการสร้างหม้อแปลงตัวอย่างที่ 2.....	123
7.14 การเปรียบเทียบปริมาตรน้ำมันหม้อแปลงที่ใช้ระหว่างข้อมูลจากการออกแบบ กับข้อมูลจากการสร้างหม้อแปลงตัวอย่างที่ 2.....	123

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
7.15 การเปรียบเทียบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของหม้อแปลงระหว่างข้อมูลจากการออกแบบ กับข้อมูลจากการสร้างหม้อแปลงตัวอย่างที่ 2.....	123
7.16 แสดงผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มของหม้อแปลงตัวอย่างที่ 2.....	123
7.17 แสดงผลทดสอบค่าความผิดพลาดของอัตราส่วนแรงดันของหม้อแปลงตัวอย่างที่ 2.....	124
7.18 แสดงผลการวัดค่าความต้านทานขดลวดของหม้อแปลงตัวอย่างที่ 2.....	124
7.19 แสดงผลการวัดค่าความต้านทานฉนวนของหม้อแปลงตัวอย่างที่ 2.....	124
7.20 การเปรียบเทียบต้นทุนวัสดุหลักระหว่างข้อมูลจากการออกแบบกับข้อมูล จากการสร้างหม้อแปลงตัวอย่างที่ 2.....	124
7.21 การเปรียบเทียบขนาดและน้ำหนักของแกนเหล็กระหว่างข้อมูลจากการออกแบบ กับข้อมูลจากการสร้างหม้อแปลงตัวอย่างที่ 3.....	126
7.22 การเปรียบเทียบขนาดและน้ำหนักของขดลวดแรงดันต่ำระหว่างข้อมูลจากการออกแบบ กับข้อมูลจากการสร้างหม้อแปลงตัวอย่างที่ 3.....	126
7.23 การเปรียบเทียบขนาดและน้ำหนักของขดลวดแรงดันสูงระหว่างข้อมูลจากการออกแบบ กับข้อมูลจากการสร้างหม้อแปลงตัวอย่างที่ 3.....	127
7.24 การเปรียบเทียบปริมาตรน้ำมันหม้อแปลงที่ไซระหว่างข้อมูลจากการออกแบบ กับข้อมูลจากการสร้างหม้อแปลงตัวอย่างที่ 3.....	127
7.25 การเปรียบเทียบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของหม้อแปลงระหว่างข้อมูลจากการออกแบบ กับข้อมูลจากการสร้างหม้อแปลงตัวอย่างที่ 3.....	127
7.26 แสดงผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มของหม้อแปลงตัวอย่างที่ 3.....	127
7.27 แสดงผลทดสอบค่าความผิดพลาดของอัตราส่วนแรงดันของหม้อแปลงตัวอย่างที่ 3.....	128
7.28 แสดงผลการวัดค่าความต้านทานขดลวดของหม้อแปลงตัวอย่างที่ 3.....	128
7.29 แสดงผลการวัดค่าความต้านทานฉนวนของหม้อแปลงตัวอย่างที่ 3.....	128
7.30 การเปรียบเทียบต้นทุนวัสดุหลักระหว่างข้อมูลจากการออกแบบกับข้อมูล จากการสร้างหม้อแปลงตัวอย่างที่ 3.....	128
7.31 การเปรียบเทียบขนาดและน้ำหนักของแกนเหล็กระหว่างข้อมูลจากการออกแบบ กับข้อมูลจากการสร้างหม้อแปลงตัวอย่างที่ 4.....	130
7.32 การเปรียบเทียบขนาดและน้ำหนักของขดลวดแรงดันต่ำระหว่างข้อมูลจากการออกแบบ กับข้อมูลจากการสร้างหม้อแปลงตัวอย่างที่ 4.....	130

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
7.33 การเปรียบเทียบขนาดและน้ำหนักของขดลวดแรงดันสูงระหว่างข้อมูลจากการออกแบบ กับข้อมูลจากการสร้างหม้อแปลงตัวอย่างที่ 4.....	131
7.34 การเปรียบเทียบปริมาตรน้ำมันหม้อแปลงที่ใช้ระหว่างข้อมูลจากการออกแบบ กับข้อมูลจากการสร้างหม้อแปลงตัวอย่างที่ 4.....	131
7.35 การเปรียบเทียบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของหม้อแปลงระหว่างข้อมูลจากการออกแบบ กับข้อมูลจากการสร้างหม้อแปลงตัวอย่างที่ 4.....	131
7.36 แสดงผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มของหม้อแปลงตัวอย่างที่ 4.....	131
7.37 แสดงผลทดสอบค่าความผิดพลาดของอัตราส่วนแรงดันของหม้อแปลงตัวอย่างที่ 4.....	132
7.38 แสดงผลการวัดค่าความต้านทานขดลวดของหม้อแปลงตัวอย่างที่ 4.....	132
7.39 แสดงผลการวัดค่าความต้านทานฉนวนของหม้อแปลงตัวอย่างที่ 4.....	132
7.40 การเปรียบเทียบต้นทุนวัสดุหลักระหว่างข้อมูลจากการออกแบบกับข้อมูล จากการสร้างหม้อแปลงตัวอย่างที่ 4.....	132
ข.1 กำหนดค่าสูญเสียตามข้อกำหนดเดิมของหม้อแปลง 3 เฟส ตามมาตรฐาน กฟภ.....	144
ข.2 กำหนดค่าสูญเสียตามข้อกำหนดใหม่ของหม้อแปลง 3 เฟส ตามมาตรฐาน กฟภ.....	144

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 แสดงวงจรของหม้อแปลง.....	4
2.2 แสดงโครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าและอุปกรณ์ภายนอก.....	6
2.3 ลักษณะตัวเปลี่ยนแท่งขณะปิดวงจร.....	9
2.4 แสดงโครงสร้างและส่วนประกอบของบุชชิ่ง.....	10
2.5 แสดงตัวถังหม้อแปลง.....	11
2.6 แสดงครีบริบายความร้อน.....	11
2.7 ท่อหายใจกรองความชื้น.....	13
3.1 พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กของหม้อแปลงแบบคอร์.....	15
3.2 ขดลวดชนิดสไพร์ด.....	17
3.3 ขดลวดชนิดครอสโอเวอร์.....	18
3.4 การต่อขดลวดหม้อแปลงเวกเตอร์กรุป Dyn 11.....	19
3.5 การต่อขดลวดหม้อแปลงเวกเตอร์กรุป Yzn 11.....	20
3.6 แสดงการถ่ายเทความร้อนของหม้อแปลงน้ำมัน.....	21
3.7 การจัดเรียงแกนเหล็กในพื้นที่วงกลม.....	27
3.8 โครงสร้างแกนเหล็กของหม้อแปลงสามเฟสชนิดคอร์.....	28
3.9 แสดงรายละเอียดของขาแกนเหล็ก Outer limb.....	28
3.10 แสดงรายละเอียดของขาแกนเหล็ก Center limb.....	29
3.11 แสดงรายละเอียดของโยค(Yoke).....	29
3.12 แสดงการจัดวางขดลวดของหม้อแปลง.....	34
3.13 แสดงไดอะแกรมการกระจายของเส้นแรงแม่เหล็กไว้.....	38
3.14 ไดอะแกรมเส้นแรงแม่เหล็กไว้ของหม้อแปลงชนิดคอร์.....	39
4.1 แสดงขั้นตอนการทำงานของซอฟต์แวร์ฟอร์มที่ 1 การเลือกพิกัดกำลังไฟฟ้า พิกัดแรงดันดันแรงสูงและเวกเตอร์กรุป.....	45
4.2 แสดงขั้นตอนการทำงานของซอฟต์แวร์ฟอร์มที่ 2 การคำนวณออกแบบพื้นที่ หน้าตัดแกนเหล็ก.....	46
4.3 แสดงขั้นตอนการทำงานของซอฟต์แวร์ฟอร์มที่ 3 การคำนวณออกแบบขดลวด ดันแรงดันต่ำเวกเตอร์กรุป Dyn 11.....	48

สารบัญญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.4 แสดงขั้นตอนการทำงานของซอฟต์แวร์ฟอร์มที่ 4 การคำนวณออกแบบขดลวด ด้านแรงดันต่ำเวกเตอร์รูป Yzn 11.....	49
4.5 แสดงขั้นตอนการทำงานของซอฟต์แวร์ฟอร์มที่ 5 การคำนวณออกแบบขดลวด ด้านแรงดันสูง.....	50
4.6 แสดงขั้นตอนการทำงานของซอฟต์แวร์ฟอร์มที่ 6 การคำนวณหาขนาด ขาของแกนเหล็ก Outer limb.....	51
4.7 แสดงขั้นตอนการทำงานของซอฟต์แวร์ฟอร์มที่ 7 การคำนวณหาขนาด ขาของแกนเหล็ก Center limb.....	52
4.8 แสดงขั้นตอนการทำงานของซอฟต์แวร์ฟอร์มที่ 8 การคำนวณหาขนาด โยคของแกนเหล็ก.....	53
4.9 แสดงขั้นตอนการทำงานของซอฟต์แวร์ฟอร์มที่ 9 การคำนวณและกำหนด พารามิเตอร์ของแกนเหล็ก.....	54
4.10 แสดงขั้นตอนการทำงานของซอฟต์แวร์ฟอร์มที่ 10 การคำนวณคุณสมบัติ ทางไฟฟ้าของหม้อแปลงจำหน่าย.....	55
4.11 แสดงขั้นตอนการทำงานของซอฟต์แวร์ฟอร์มที่ 11 การคำนวณออกแบบตัวถัง และพื้นที่ผิวการระบายความร้อน.....	57
4.12 แสดงขั้นตอนการทำงานของซอฟต์แวร์ฟอร์มที่ 12 การคำนวณต้นทุนวัสดุหลัก ที่ใช้ในการสร้างหม้อแปลงจำหน่าย.....	58
4.13 แสดงขั้นตอนการทำงานทั้งหมดของ OIDTS.....	59
5.1 แสดงเมนูหลักของระบบปฏิบัติการวินโดวส์.....	62
5.2 แสดงการเริ่มต้นการทำงานของ OIDTS.....	62
5.3 แสดงฟอร์มที่ 1 ของ OIDTS.....	63
5.4 แสดงฟอร์มที่ 2 ของ OIDTS.....	63
5.5 แสดงฟอร์มที่ 3 ของ OIDTS.....	64
5.6 แสดงฟอร์มที่ 4 ของ OIDTS.....	65
5.7 แสดงฟอร์มที่ 5 ของ OIDTS.....	65
5.8 แสดงฟอร์มที่ 6 ของ OIDTS.....	66
5.9 แสดงฟอร์มที่ 7 ของ OIDTS.....	66

สารบัญญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5.10 แสดงฟอร์มที่ 8 ของ OIDs.....	67
5.11 แสดงฟอร์มที่ 9 ของ OIDs.....	68
5.12 แสดงฟอร์มที่ 10 ของ OIDs.....	69
5.13 แสดงฟอร์มที่ 11 ของ OIDs.....	70
5.14 แสดงฟอร์มที่ 12 ของ OIDs.....	70
6.1 แสดงผลลัพธ์การออกแบบตัวอย่างที่ 1 ฟอร์มที่ 1.....	71
6.2 แสดงผลลัพธ์การออกแบบตัวอย่างที่ 1 ฟอร์มที่ 2.....	72
6.3 แสดงผลลัพธ์การออกแบบตัวอย่างที่ 1 ฟอร์มที่ 3.....	72
6.4 แสดงผลลัพธ์การออกแบบตัวอย่างที่ 1 ฟอร์มที่ 5.....	73
6.5 แสดงผลลัพธ์การออกแบบตัวอย่างที่ 1 ฟอร์มที่ 6.....	73
6.6 แสดงผลลัพธ์การออกแบบตัวอย่างที่ 1 ฟอร์มที่ 7.....	74
6.7 แสดงผลลัพธ์การออกแบบตัวอย่างที่ 1 ฟอร์มที่ 8.....	74
6.8 แสดงผลลัพธ์การออกแบบตัวอย่างที่ 1 ฟอร์มที่ 9.....	75
6.9 แสดงผลลัพธ์การออกแบบตัวอย่างที่ 1 ฟอร์มที่ 10.....	75
6.10 แสดงผลลัพธ์การออกแบบตัวอย่างที่ 1 ฟอร์มที่ 11.....	76
6.11 แสดงผลลัพธ์การออกแบบตัวอย่างที่ 1 ฟอร์มที่ 12.....	76
6.12 แสดงผลลัพธ์การออกแบบตัวอย่างที่ 2 ฟอร์มที่ 1.....	82
6.13 แสดงผลลัพธ์การออกแบบตัวอย่างที่ 2 ฟอร์มที่ 2.....	83
6.14 แสดงผลลัพธ์การออกแบบตัวอย่างที่ 2 ฟอร์มที่ 3.....	83
6.15 แสดงผลลัพธ์การออกแบบตัวอย่างที่ 2 ฟอร์มที่ 5.....	84
6.16 แสดงผลลัพธ์การออกแบบตัวอย่างที่ 2 ฟอร์มที่ 6.....	84
6.17 แสดงผลลัพธ์การออกแบบตัวอย่างที่ 2 ฟอร์มที่ 7.....	85
6.18 แสดงผลลัพธ์การออกแบบตัวอย่างที่ 2 ฟอร์มที่ 8.....	85
6.19 แสดงผลลัพธ์การออกแบบตัวอย่างที่ 2 ฟอร์มที่ 9.....	86
6.20 แสดงผลลัพธ์การออกแบบตัวอย่างที่ 2 ฟอร์มที่ 10.....	86
6.21 แสดงผลลัพธ์การออกแบบตัวอย่างที่ 2 ฟอร์มที่ 11.....	87
6.22 แสดงผลลัพธ์การออกแบบตัวอย่างที่ 2 ฟอร์มที่ 12.....	87
6.23 แสดงผลลัพธ์การออกแบบตัวอย่างที่ 3 ฟอร์มที่ 1.....	93

สารบัญญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
6.24 แสดงผลลัพท์การออกแบบตัวอย่างที่ 3 ฟอรัมที่ 2.....	94
6.25 แสดงผลลัพท์การออกแบบตัวอย่างที่ 3 ฟอรัมที่ 4.....	94
6.26 แสดงผลลัพท์การออกแบบตัวอย่างที่ 3 ฟอรัมที่ 5.....	95
6.27 แสดงผลลัพท์การออกแบบตัวอย่างที่ 3 ฟอรัมที่ 6.....	95
6.28 แสดงผลลัพท์การออกแบบตัวอย่างที่ 3 ฟอรัมที่ 7.....	96
6.29 แสดงผลลัพท์การออกแบบตัวอย่างที่ 3 ฟอรัมที่ 8.....	96
6.30 แสดงผลลัพท์การออกแบบตัวอย่างที่ 3 ฟอรัมที่ 9.....	97
6.31 แสดงผลลัพท์การออกแบบตัวอย่างที่ 3 ฟอรัมที่ 10.....	97
6.32 แสดงผลลัพท์การออกแบบตัวอย่างที่ 3 ฟอรัมที่ 11.....	98
6.33 แสดงผลลัพท์การออกแบบตัวอย่างที่ 3 ฟอรัมที่ 12.....	98
6.34 แสดงผลลัพท์การออกแบบตัวอย่างที่ 4 ฟอรัมที่ 1.....	105
6.35 แสดงผลลัพท์การออกแบบตัวอย่างที่ 4 ฟอรัมที่ 2.....	105
6.36 แสดงผลลัพท์การออกแบบตัวอย่างที่ 4 ฟอรัมที่ 4.....	106
6.37 แสดงผลลัพท์การออกแบบตัวอย่างที่ 4 ฟอรัมที่ 5.....	106
6.38 แสดงผลลัพท์การออกแบบตัวอย่างที่ 4 ฟอรัมที่ 6.....	107
6.39 แสดงผลลัพท์การออกแบบตัวอย่างที่ 4 ฟอรัมที่ 7.....	107
6.40 แสดงผลลัพท์การออกแบบตัวอย่างที่ 4 ฟอรัมที่ 8.....	108
6.41 แสดงผลลัพท์การออกแบบตัวอย่างที่ 4 ฟอรัมที่ 9.....	108
6.42 แสดงผลลัพท์การออกแบบตัวอย่างที่ 4 ฟอรัมที่ 10.....	109
6.43 แสดงผลลัพท์การออกแบบตัวอย่างที่ 4 ฟอรัมที่ 11.....	109
6.44 แสดงผลลัพท์การออกแบบตัวอย่างที่ 4 ฟอรัมที่ 12.....	110
6.45 แผนผังการผลิตหม้อแปลง.....	116
7.1 แสดงอุณหภูมิแวดล้อมขณะทดสอบตัวอย่างที่ 1.....	121
7.2 แสดงผลทดสอบอุณหภูมิน้ำมันด้านบนตัวอย่างที่ 1.....	121
7.3 แสดงผลทดสอบอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนตัวอย่างที่ 1.....	121
7.4 แสดงอุณหภูมิแวดล้อมขณะทดสอบตัวอย่างที่ 2.....	125
7.5 แสดงผลทดสอบอุณหภูมิน้ำมันด้านบนตัวอย่างที่ 2.....	125
7.6 แสดงผลทดสอบอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนตัวอย่างที่ 2.....	125

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
7.7 แสดงอุณหภูมิแวดล้อมขณะทดสอบตัวอย่างที่ 3.....	129
7.8 แสดงผลทดสอบอุณหภูมิน้ำมันด้านบนตัวอย่างที่ 3.....	129
7.9 แสดงผลทดสอบอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนตัวอย่างที่ 3.....	129
7.10 แสดงอุณหภูมิแวดล้อมขณะทดสอบตัวอย่างที่ 4.....	133
7.11 แสดงผลทดสอบอุณหภูมิน้ำมันด้านบนตัวอย่างที่ 4.....	133
7.12 แสดงผลทดสอบอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนตัวอย่างที่ 4.....	133
ก.1 กราฟค่าความสูญเสียของแกนเหล็ก(1).....	140
ก.2 กราฟค่าความสูญเสียของแกนเหล็ก(2).....	141
ก.3 กราฟค่าความสูญเสียของแกนเหล็ก(3).....	142



บทที่ 1

บทนำ

1.1 แนวความคิดของวิทยานิพนธ์

ในสภาวะปัจจุบันแหล่งพลังงานต่างๆ เป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับชีวิตประจำวัน พลังงานไฟฟ้านับเป็นพลังงานชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญต่อภาคอุตสาหกรรมและชีวิตประจำวันซึ่งมีความต้องการใช้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว นโยบายและวิธีการต่างๆ ในการประหยัดพลังงานจึงได้ถูกกำหนดขึ้นเพื่อให้พลังงานมีความเพียงพอต่อความต้องการ หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญต่อระบบไฟฟ้าและเป็นอุปกรณ์ที่สามารถลดค่าความสูญเสียลงได้ อันได้แก่ ค่าความสูญเสียขณะไม่มีโหลด(No Load) และขณะมีโหลด(On Load) ซึ่งก็หมายความว่าสามารถประหยัดพลังงานได้มากและทางการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคได้ทำการแก้ไขข้อกำหนดคุณสมบัติของหม้อแปลงจำหน่าย (Distribution Transformer) โดยลดค่าสูญเสียดังกล่าวลงจากเดิม และทำการเพิ่มเวกเตอร์รูปของหม้อแปลงจำหน่ายเป็นแบบ Yzn 11 ด้วย

ในการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายนั้นมีขั้นตอนและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในการออกแบบเป็นจำนวนมากซึ่งทำให้เกิดความยุ่งยากในการวิเคราะห์ออกแบบ ทำให้เสียเวลาและอาจเกิดข้อผิดพลาดได้โดยง่าย เสี่ยงต่อการสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายและแรงงาน ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว วิทยานิพนธ์นี้จึงได้ทำการศึกษาถึงขั้นตอนและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในการวิเคราะห์ออกแบบ และข้อกำหนดคุณสมบัติของหม้อแปลงจำหน่ายที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคได้แก้ไขใหม่ คุณสมบัติตามมาตรฐาน มอก.384-2525 และ IEC-76 หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง แล้วทำการวิจัยและพัฒนาซอฟต์แวร์ขึ้น ซอฟต์แวร์ที่ถูกพัฒนาขึ้นนี้จะเป็เครื่องมือช่วยให้ผู้ออกแบบสามารถทำการวิเคราะห์และออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายได้อย่างถูกต้อง รวดเร็วและแม่นยำ ลดการเสียเวลาและข้อผิดพลาดที่อาจจะเกิดขึ้นได้ ทำให้สามารถ วิเคราะห์ออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายได้อย่างมีประสิทธิภาพ การออกแบบที่ถูกต้องจะทำให้หม้อแปลงจำหน่ายสามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ยืดอายุการใช้งานของหม้อแปลงจำหน่าย อันจะมีผลทำให้เกิดความมั่นคงต่อระบบจำหน่ายมากยิ่งขึ้น และซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นนี้ยังสามารถคำนวณราคาต้นทุนวัสดุหลักที่ใช้ในการผลิตหม้อแปลงจำหน่าย ทำให้ผู้ผลิตลดความเสี่ยงต่อการสิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย แรงงานและเวลาลงได้ ทำให้มีราคาต้นทุนในการผลิตต่ำและมีคุณสมบัติเป็นไปตามข้อกำหนด

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

- 1.ศึกษาวิธีการและขั้นตอนในการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายทั้งในทางทฤษฎีและในทางปฏิบัติ

2. พัฒนาซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ขึ้นเพื่อเป็นเครื่องมือช่วยให้ผู้ออกแบบ หรือผู้ผลิตสามารถวิเคราะห์ห่ออกแบบวิจัย และพัฒนาห่อแปลงจำหน่ายได้อย่างถูกต้อง สะดวก รวดเร็วและแม่นยำ
3. ช่วยให้ผู้ออกแบบหรือผู้ผลิตสามารถทำการวิจัยและพัฒนาห่อแปลงจำหน่ายได้มากขึ้น
4. ช่วยแก้ปัญหาคงความยุ่งยากในการวิเคราะห์ห่ออกแบบห่อแปลงจำหน่าย
5. สามารถนำซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ไปใช้ในการศึกษาค้นคว้าและวิจัยต่อไป

1.3 ประโยชน์ที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์

1. ผู้ออกแบบหรือผู้ผลิตสามารถทำการออกแบบ วิจัยและพัฒนาห่อแปลงจำหน่ายให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้นมีความปลอดภัยในการใช้งานสูงและมีอายุการใช้งานยาวนานยิ่งขึ้น
2. ผู้ออกแบบหรือผู้ผลิตสามารถทำการวิจัยและพัฒนาห่อแปลงจำหน่ายได้ง่าย รวดเร็วและถูกต้องมากขึ้น
3. ผู้ออกแบบหรือผู้ผลิตสามารถนำซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นนี้มาทำการวิเคราะห์ห่อแปลงจำหน่ายให้มีต้นทุนในการผลิตต่ำลงได้
4. ผู้ออกแบบหรือผู้ผลิตสามารถนำซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นนี้มาทำการวิเคราะห์ห่อแปลงจำหน่ายมีค่าพลังงานสูญเสียต่ำลงได้ อันจะส่งผลให้เกิดการประหยัดค่าใช้จ่ายและประหยัดพลังงาน
5. สามารถนำซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นนี้ไปใช้ในการศึกษาค้นคว้าและวิจัยต่อไป
6. การออกแบบที่ถูกต้องจะทำให้ห่อแปลงจำหน่ายสามารถใช้งานได้มีประสิทธิภาพ และยังส่งผลให้ระบบจำหน่ายมีความมั่นคงมากยิ่งขึ้น

1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ทำการวิจัยและศึกษาคุณสมบัติและค้นหาวิธีการออกแบบห่อแปลงจำหน่ายแบบจุ่มในน้ำมัน (ONAN) ชนิด 3 เฟส โดยศึกษาข้อมูลจากทฤษฎีและจากการทดลองในทางปฏิบัติแล้วนำข้อมูลที่ได้มาทำการวิจัยและพัฒนาซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์สำหรับออกแบบห่อแปลงจำหน่ายแบบจุ่มในน้ำมัน และทำการศึกษาถึงวัสดุและอุปกรณ์ต่างๆ ที่จะนำมาสร้างห่อแปลงจำหน่ายนอกจากนี้ยังได้นำผลการออกแบบห่อแปลงจำหน่ายจากซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นมาทำการสร้างห่อแปลงจริงนี้แล้วนำผลการทดสอบห่อแปลงจากการสร้างจริงมาทำการวิเคราะห์และปรับปรุงพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบให้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น ตัวอย่างของห่อแปลงจำหน่ายที่ทำการวิเคราะห์ห่อแปลงโดยซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นแล้วนำผลการวิเคราะห์ออกแบบจากซอฟต์แวร์มาทำการสร้างจริงมีพิถีพิถันดังนี้

- 1.หม้อแปลงจำหน่ายขนาด 160 kVA 3 ph 50 Hz 22 kV-400/230 V เวกเตอร์กรุป Dyn 11
- 2.หม้อแปลงจำหน่ายขนาด 160 kVA 3 ph 50 Hz 33 kV-400/230 V เวกเตอร์กรุป Dyn 11
- 3.หม้อแปลงจำหน่ายขนาด 100 kVA 3 ph 50 Hz 22 kV-400/230 V เวกเตอร์กรุป Yzn 11
- 4.หม้อแปลงจำหน่ายขนาด 100 kVA 3 ph 50 Hz 33 kV-400/230 V เวกเตอร์กรุป Yzn 11

วิทยานิพนธ์นี้กล่าวถึงหม้อแปลงจำหน่ายชนิดระบายความร้อนด้วยน้ำมันโดยอากาศธรรมชาติชนิดสามเฟส 50 Hz แรงดันสูง 22 และ 33 kV แรงดันต่ำ 400/230 โวลท์ พิกัดกำลังไฟฟ้าตั้งแต่ 50 - 250 kVA เวกเตอร์กรุป Dyn 11 และ Yzn 11 และพิกัดกำลังไฟฟ้าตั้งแต่ 315-2000 kVA เวกเตอร์กรุป Dyn 11 โดยยึดถือตามมาตรฐานดังนี้

- 1.มาตรฐานการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
- 2.มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง มอก. 384 - 2525
- 3.IEC 76 POWER TRANSFORMER



บทที่ 2

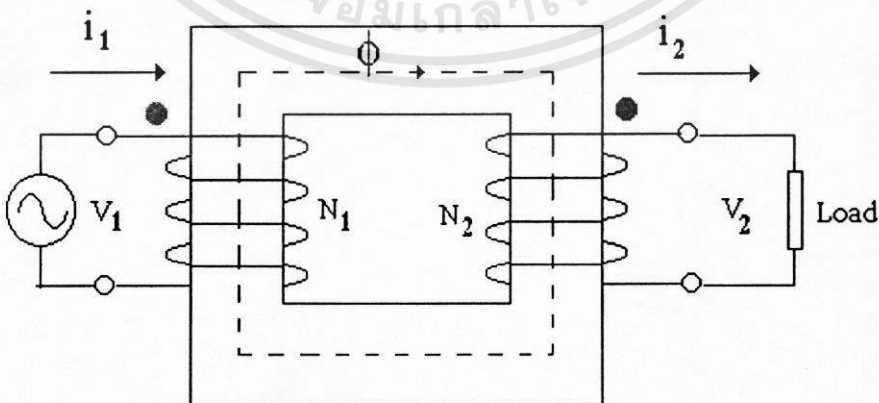
โครงสร้างและส่วนประกอบของหม้อแปลงจำหน่าย

หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับชนิดหนึ่งที่ใช้ในการเพิ่มหรือลดระดับแรงเคลื่อนไฟสลับจากระดับหนึ่งไปสู่อีกระดับหนึ่ง ส่วนประกอบที่สำคัญของหม้อแปลงไฟฟ้าคือวงจรแม่เหล็กและวงจรไฟฟ้า วงจรแม่เหล็กประกอบด้วยแผ่นเหล็กซิลิกอน ส่วนวงจรไฟฟ้าประกอบด้วยขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิซึ่งพันรอบแกนเหล็กซิลิกอน

หม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในระบบจำหน่ายตามข้อกำหนดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคนั้นจะมีขนาดตั้งแต่ 10 - 50 kVA ชนิดหนึ่งเฟส และขนาด 50 - 2000 kVA ชนิดสามเฟสซึ่งใช้ในการลดขนาดแรงดันจากระบบจำหน่ายคือ 22 และ 33 kV ลงมาเป็นขนาดแรงดัน 400/230 โวลต์ ชนิดสามเฟส และ 460/230 โวลต์ ชนิดหนึ่งเฟส มีการระบายความร้อนด้วยน้ำมันโดยอากาศธรรมชาติ (Self Air Cooled)

2.1 หลักการทำงานเบื้องต้นของหม้อแปลง

เมื่อมีกระแสไหลเข้าขดลวดปฐมภูมิ จะเกิดเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้ากระแสสลับขึ้นในแกนเหล็กเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้ากระแสสลับนี้จะเคลื่อนที่ไปตามแกนเหล็กและตัดกับขดลวดทุติยภูมิจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในขดลวดทุติยภูมิ ซึ่งมีความถี่เท่ากับความถี่ของเครื่องกำเนิดที่ป้อนแรงดันให้กับขดลวดปฐมภูมิ เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดขึ้นที่ขดลวดทุติยภูมินี้เอง จึงทำให้ขดลวดทุติยภูมิสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าได้ ซึ่งพลังงานไฟฟ้านี้ถ่ายทอดมาจากขดลวดปฐมภูมิ ไปยังขดลวดทุติยภูมิได้ด้วยเส้นแรงแม่เหล็ก



ภาพที่ 2.1 แสดงวงจรของหม้อแปลง

2.2 สมการแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ (Emf Equation of a Transformer)

กำหนดให้

ϕ_m คือ จำนวนเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด (webers)

B_m คือ ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด (Tesla)

A คือ พื้นที่หน้าตัดสุทธิของแกนเหล็ก (sq.m)

N คือ จำนวนรอบของขดลวด (turn)

f คือ ความถี่ (Hz)

ค่าของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำตามกฎของฟาราเดย์เมื่อจำนวนรอบของขดลวดเท่ากับ N รอบ โดยกำหนดว่าเส้นแรงแม่เหล็กที่คล้องขดลวดที่พันอยู่รอบแกนเหล็กมีค่าเท่ากันทุกรอบดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์เป็นดังสมการ

$$e(t) = N \frac{d\phi(t)}{dt} \quad (2.1)$$

เมื่อ

$e(t)$ คือ แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ

$\frac{d\phi(t)}{dt}$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กต่อเวลา

กำหนดให้การเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็ก $\phi(t)$ เป็นแบบ sinusoidal ดังนั้นจะได้

$$\phi(t) = \phi_m \sin \omega t \quad (2.2)$$

$$\phi(t) = A \cdot B_m \sin \omega t \quad (2.3)$$

และจากสมการที่ 2.1 จะได้

$$e(t) = \omega \cdot N \cdot A \cdot B_m \cos \omega t \quad (2.4)$$

$$e(t) = E_{\max} \cos \omega t \quad (2.5)$$

เมื่อ

$$E_{\max} = 2\pi f \cdot N \cdot A \cdot B_m \quad (2.6)$$

แต่ในทางปฏิบัติจะใช้ค่า rms ดังนั้นจะได้

$$E_{\text{rms}} = 0.707 E_{\max} \quad (2.7)$$

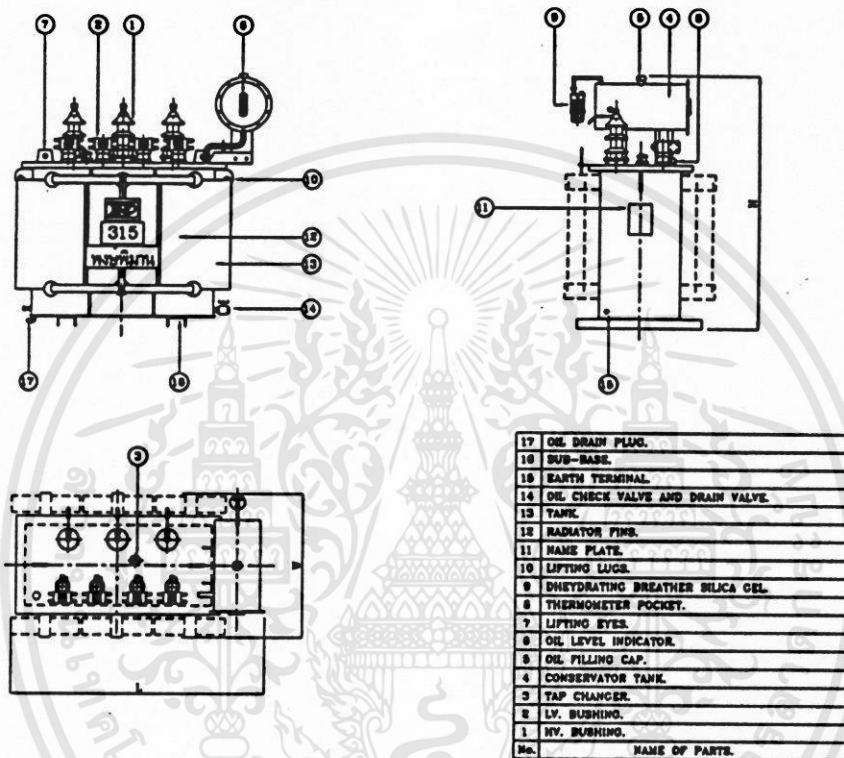
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_{\text{rms}} = 0.707 \times 2\pi f.N.A.B_m \quad (2.8)$$

$$E_{\text{rms}} = 4.44f.N.A.B_m \quad (2.9)$$

2.3 โครงสร้างและส่วนประกอบของหม้อแปลงที่ใช้ในระบบจำหน่าย

หม้อแปลงเป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่มีโครงสร้างง่ายกว่าอุปกรณ์อื่นๆ ในชนิดเดียวกันข้อแตกต่างที่เห็นได้ชัดก็คือ สนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงโดยไม่ต้องอาศัยส่วนที่เคลื่อนที่ (Rotation part)



ภาพที่ 2.2 แสดงโครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าและอุปกรณ์ประกอบภายนอก

โครงสร้างและส่วนประกอบที่สำคัญของหม้อแปลงมีดังนี้

1. ส่วนประกอบภายนอก ประกอบด้วย ถังหม้อแปลง(Transformer Tank) ห้องรองรับน้ำมัน (Conservator) อุปกรณ์กระจายความร้อน(Radiator Fin) ขั้วต่อสาย(Terminal) ห้องหายใจและห้องกรองความชื้น(Breather and Silica gel) เครื่องวัดน้ำมัน(Oil Gauge) น้ำมันหม้อแปลง(Transformer Oil) บุชชิ่ง(Bushing) และอุปกรณ์ป้องกันอื่นๆ เช่น เทอร์โมมิเตอร์ บุคโฮลรีเลย์(Buchhol Relay) วาล์วระบายอากาศ(Pressure Relief) เป็นต้น

2. ส่วนต่อภายในและภายนอก ประกอบด้วย สายตัวนำ แท็ปเชนเจอร์(Tapchanger) ฉนวนปลายขั้ว(Terminal Insulator) เป็นต้น

3. ส่วนที่เป็นวงจรแม่เหล็ก (Magnetic Circuit) ประกอบด้วยแกนเหล็กซิลิกอน และส่วนที่จับยึดโครงสร้างของแกนเหล็ก (Clamping) เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ส่วนที่เป็นวงจรไฟฟ้า (Electric Circuit) ประกอบด้วยขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ และเครื่องรัด (Bracing Device) เป็นต้น

5. ฉนวน (Insulation) เป็นฉนวนในลักษณะต่าง ๆ ที่ใช้ในส่วนต่าง ๆ ของหม้อแปลง เช่น ฉนวนระหว่างขดลวดแรงต่ำ กับขดลวดแรงสูง เป็นต้น

โครงสร้างและส่วนประกอบดังที่กล่าวมาแล้วนั้น หม้อแปลงทุกเครื่องไม่จำเป็นต้องมีครบทุกชิ้น ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานของหม้อแปลงและขนาดพิกัดของหม้อแปลงด้วยเช่น แท็ปเชนเจอร์ (Tap changer) บุคโฮลรีเลย์ และเทอร์โมมิเตอร์ เป็นต้น อาจจะมีหรือไม่มีก็ได้

2.4 การเลือกวัสดุที่ใช้ในการสร้างหม้อแปลงจำหน่าย

2.4.1 การเลือกวัสดุที่ใช้เป็นแกนเหล็กหม้อแปลง

แกนเหล็กเป็นโครงสร้างของหม้อแปลงดังที่กล่าวไปแล้วข้างต้นว่า แกนเหล็กมีอิทธิพลต่อน้ำหนัก ขนาด ราคา และคุณสมบัติอื่น ๆ ของหม้อแปลง นอกจากนี้แกนเหล็กยังใช้เป็นวงจรของเส้นแรงแม่เหล็กเพื่อเหนี่ยวนำวงจรไฟฟ้าระหว่างขดลวดแรงสูง และขดลวดแรงต่ำ และใช้เป็นที่ยึดของขดลวดด้วย ในการสร้างหม้อแปลงจำหน่ายจะใช้เหล็กรีดเย็นประเภทเกรนโอเรียนเตด (Cold Rolled Grain Oriented Sheet Steel Lamination) มีความหนาของแผ่นเหล็กเท่ากับ 0.23 , 0.27 หรือ 0.30 มม. และมีความกว้างตั้งแต่ 40 มม. ขึ้นไป มาประกอบเป็นโครงสร้างของแกนเหล็ก โดยเหล็กประเภทนี้จะมีความต้านทานไฟฟ้า และความซึมซาบทางแม่เหล็กได้สูงและมีกำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะไม่มีโหลดต่ำ ที่ผิวของแกนเหล็กแต่ละแผ่น จะเคลือบด้วยน้ำยาฉนวน เพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียอันเนื่องมาจากกระแสไหลวน (eddy current losses) เกรดและความหนาของแผ่นเหล็กที่ต่างกันจะมีผลทำให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะไม่มีโหลดไม่เท่ากัน โดยแผ่นเหล็กที่มีความหนามากจะมีกำลังไฟฟ้าสูญเสียค่อนน้ำหนัก (W/kg) มากกว่าแผ่นเหล็กที่มีความหนาน้อย

2.4.2 การเลือกวัสดุที่ใช้เป็นขดลวดหม้อแปลง

ขดลวดของหม้อแปลง (Winding) เป็นส่วนประกอบที่สำคัญในส่วนของวงจรไฟฟ้า ซึ่งเป็นตัวนำทองแดงหรืออะลูมิเนียมก็ได้ ในการเลือกใช้นิคมของขดลวดควรพิจารณาถึง ค่ากำลังสูญเสียขณะรับโหลด (Load Loss) จะต้องมีค่าต่ำ เสถียรภาพที่มีต่อความร้อนสูง มีความแข็งแรงของฉนวน (Insulation Strength) สูง และมีความแข็งแรงเชิงกล (Mechanical Strength)

โดยทั่วไปตัวนำที่นิยมนำมาใช้พันเป็นขดลวดนี้จะเป็นทองแดงหุ้มฉนวน รูปร่างลักษณะของขดลวดมีทั้งชนิดกลมและชนิดแบน (Rectangular) ลวดทองแดงชนิดกลมจะหุ้มด้วยฉนวนประเภทโพลีไวนิล (Polyvinyl Formal) มีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 0.20 - 3.20 มม. ส่วนชนิดแบนจะหุ้มด้วยกระดาษฉนวน (Kraft Paper) ขดลวดมีความหนาประมาณ 0.75 - 6.00 มม. และมีความกว้างประมาณ 1.00 - 14.00 มม. ขนาดและชนิดของตัวนำที่ใช้จะขึ้นอยู่กับพิกัดของแรงดันไฟฟ้าและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิกัดกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลง ตัวนำชนิดกลมเหมาะสำหรับหม้อแปลงขนาดเล็ก ส่วนตัวนำชนิดแบนเหมาะสำหรับหม้อแปลงที่ต้องรับโหลดสูงๆ

2.4.3 การเลือกวัสดุที่ใช้เป็นฉนวน

ฉนวนของหม้อแปลงจำหน่ายนั้นเป็นส่วนที่สำคัญเกี่ยวกับความปลอดภัยและอายุการใช้งานของหม้อแปลงจำหน่ายเนื่องจากต้องใช้งานกับไฟฟ้าแรงสูง ดังนั้นวัสดุที่ใช้สำหรับทำฉนวนต้องมีคุณสมบัติทางไฟฟ้า คือต้องเป็นความต้านทานไฟฟ้า มีความคงทนไดอิเล็กตริก (Dielectric Strength) สูง และยังคงคำนึงถึงคุณสมบัติทางกลของวัสดุและความคงทนต่อความชื้น (Moisture) ความร้อนและปฏิกิริยาเคมี สำหรับวัสดุหลัก ๆ ที่ใช้เป็นฉนวนสำหรับการสร้างหม้อแปลงจำหน่าย มีดังนี้คือ กระดาษและกระดาษอัด (Paper and Pressboard) โดยสามารถแบ่งชนิดของกระดาษได้ตามวัตถุประสงค์ธรรมชาติที่ใช้ผลิตกระดาษ ดังนี้

1. กระดาษสีน้ำตาล (Kraft Paper) ผลิตจากเส้นใย (Fibers) ของไม้มีความหนาของกระดาษ ตั้งแต่ 0.05-0.5 มม.
2. กระดาษอัด ผลิตจากไม้และฝ้าย (Cotton) ที่ใช้โดยทั่วไปมีความหนา 0.8 - 5.0 มม.

กระดาษฉนวนสำหรับหม้อแปลงจำหน่ายจัดเป็นฉนวนคลาส A มีความคงทนต่อความร้อนได้ถึงอุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส โดยไม่ทำให้ความเป็นฉนวนเสื่อมสภาพลง เมื่อกระดาษแห้งจะมีความคงทนของไดอิเล็กตริกได้ดีและมีการสูญเสียของไดอิเล็กตริกต่ำ แต่กระดาษสามารถดูดซึมความชื้นได้ง่าย ดังนั้นในการสร้างหม้อแปลงจำหน่ายจะต้องอบส่วนแกนเหล็กและขดลวดที่ประกอบขึ้นรูปแล้วให้แห้งแล้วนำไปจุ่มน้ำมันในถังหม้อแปลงเพื่อป้องกันความชื้นและรักษาความคงทนของไดอิเล็กตริกของกระดาษไว้

2.4.4 น้ำมันหม้อแปลง (Transformer Oil)

น้ำมันหม้อแปลงใช้เป็นฉนวนระหว่างขดลวดและแกน ระหว่างขดลวดกับส่วนที่นำกระแสได้ น้ำมันหม้อแปลงนับว่าเป็นฉนวนที่สำคัญของหม้อแปลงเช่นเดียวกับกระดาษและยังเป็นตัวกลางในการระบายความร้อนของแกนเหล็กและขดลวด น้ำมันหม้อแปลงที่จะนำมาใช้งานจะต้องมีคุณสมบัติตามมาตรฐานดังนี้

1. มีการระบายความร้อนที่ดีหรือมีความหนืดต่ำ (Low Viscosity)
2. มีความต้านทานต่อการรวมตัวกับออกซิเจน (Oxidation)
3. มีความคงทนของไดอิเล็กตริก (Dielectric Breakdown) สูง
4. มีอุณหภูมิของจุดติดไฟ (Flash Point) สูง มาตรฐานกำหนดไว้ไม่ต่ำกว่า 140 องศาเซลเซียส
5. ไม่มีความชื้น (Moisture) หรือสิ่งอื่นเจือปน เช่น ผุ่นละออง
6. มีสภาพความเป็นกรดน้อยที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบความคงทนไดอิเล็กตริกของน้ำมันหม้อแปลงด้วยเครื่องมือทดสอบน้ำมัน ตามมาตรฐานต้องได้ผลเฉลี่ยจากการทดสอบไม่ต่ำกว่า 30 เควี ต่อระยะ 2.5 มม. จึงจะถือว่าน้ำมันหม้อแปลงนี้ผ่านการทดสอบและสามารถนำไปใช้งานได้

2.4.5 แท็ปเชนเจอร์ (Tap changer)

แท็ปเชนเจอร์หรือตัวเปลี่ยนแท็ป เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนอัตราส่วนจำนวนรอบของขดลวดหม้อแปลง เพื่อรักษาระดับแรงดันของผู้ใช้ไฟฟ้าให้คงที่ แท็ปเชนเจอร์มีสองลักษณะคือ

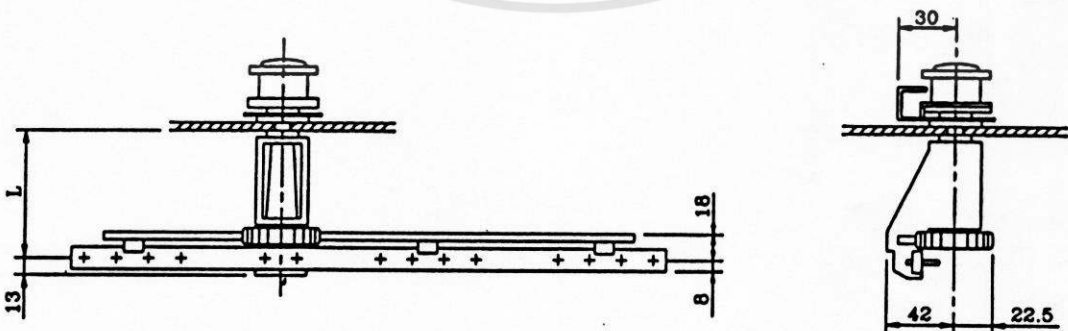
1. ตัวเปลี่ยนแท็ปขณะปิดวงจร(Off-Circuit Tapchanger) เป็นตัวเปลี่ยนแท็ปที่ง่ายไม่ซับซ้อน และมีราคาถูกเหมาะสมสำหรับหม้อแปลงที่ใช้ในระบบจำหน่าย มีขั้น(Step)ของการเปลี่ยนแรงดันประมาณ 3-5 ขั้น ก่อนจะทำการเปลี่ยนแท็ปจะต้องปิดวงจรเสียก่อน

2. ตัวเปลี่ยนแท็ปขณะจ่ายโหลด(On-Load Tapchanger) เป็นตัวเปลี่ยนแท็ปที่สามารถทำการปรับขึ้นของการเปลี่ยนแรงดันได้ในขณะที่หม้อแปลงจ่ายโหลดอยู่ แต่จะมีวงจรการต่อซับซ้อนยุ่งยากและมีราคาแพงมากกว่าชนิดปิดวงจร มีขั้นของการเปลี่ยนแรงดันละเอียดและมากกว่าตัวเปลี่ยนแท็ปขณะปิดวงจร เหมาะสำหรับหม้อแปลงที่มีขนาดแรงดันไฟฟ้าสูง

การเลือกใช้แท็ปจะต้องพิจารณาดังนี้

1. ระดับแรงดันที่พิกัดของหม้อแปลง
2. เปอร์เซนต์การเปลี่ยนแรงดันในแต่ละขั้น
3. อัตราทนกระแสสูงสุด
4. ระดับแรงดันระหว่างหน้าสัมผัส(Contact) ที่อยู่ใกล้กัน
5. จำนวนขั้นของการเปลี่ยนแรงดัน

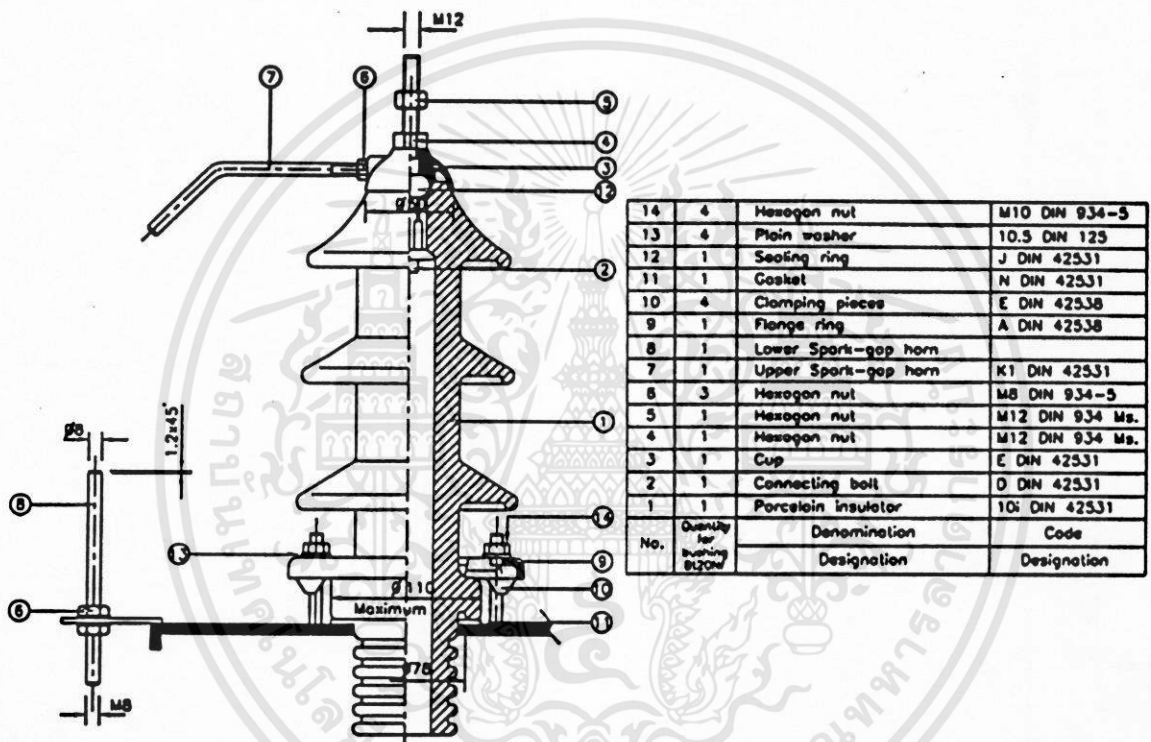
สำหรับตัวเปลี่ยนแท็ปที่ใช้กับหม้อแปลงจำหน่ายตามมาตรฐานการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคจะเป็นตัวเปลี่ยนแท็ปขณะปิดวงจรมีขั้นของการเปลี่ยนแรงดัน $\pm 2 \times 2.5 \%$ ของพิกัดแรงดันทางด้านแรงสูง



ภาพที่ 2.3 ลักษณะตัวเปลี่ยนแท็ปขณะปิดวงจร(Off-circuit tapchanger)

2.4.6 บุชชิ่ง (Bushing)

เป็นอุปกรณ์ฉนวนที่สำคัญที่ต่ออยู่ระหว่างสายตัวนำภายในหม้อแปลงกับสายตัวนำของระบบจำหน่าย (Transmission Lines) โดยทั่วไปบุชชิ่งที่ใช้กับหม้อแปลงจำหน่ายนั้นจะเป็นบุชชิ่งชนิดกระเบื้อง (Porcelain Bushing) ระดับแรงดันใช้งานไม่เกิน 36 kV มีโครงสร้างง่าย ๆ ประกอบด้วยสายตัวนำที่ต่อจากภายในหม้อแปลง หุ้มด้วยกระเบื้องดิน ลักษณะภายนอกของผิวบุชชิ่งดังกล่าวมีทั้งแบบเรียบและเป็นแบบลูกคลื่น ทั้งนี้เพื่อยืดระยะทางที่กระแสรั่วตามผิว

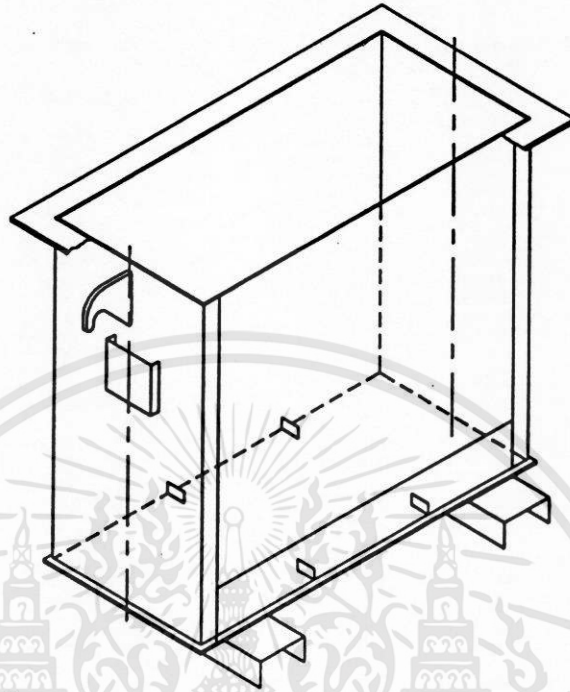


ภาพที่ 2.4 แสดงโครงสร้างและส่วนประกอบของบุชชิ่ง

2.4.7 ตัวถังหม้อแปลง (Transformer tank)

หม้อแปลงชนิดที่ใช้น้ำมันเหลวหรือก๊าซอัดความดันเป็นฉนวนและเป็นตัวระบายความร้อน จำเป็นต้องใช้ถังบรรจุฉนวนเหลวหรือก๊าซอัดความดันรวมทั้งส่วนประกอบโครงสร้างภายในทั้งหมด นอกจากนี้แล้วยังใช้ตัวถังของหม้อแปลงเป็นส่วนป้องกันหม้อแปลงจากแรงภายนอกอื่น ๆ ที่อาจทำให้หม้อแปลงเสียหาย และเป็นส่วนสำคัญที่ช่วยระบายความร้อนออกไปสู่อากาศโดยรอบ จึงใช้ตัวถังเป็นโลหะ ถ้าเป็นหม้อแปลงขนาดเล็กตัวถังส่วนใหญ่เป็นแบบเรียบ แต่ถ้านำขนาดของหม้อแปลงใหญ่ขึ้นพื้นที่ผิวในการระบายความร้อนของตัวถังแบบเรียบจะไม่เพียงพอเนื่องจากความร้อน

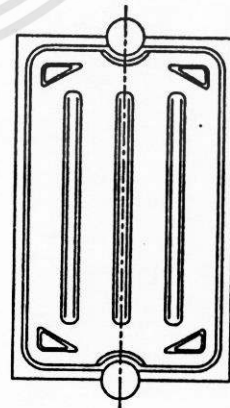
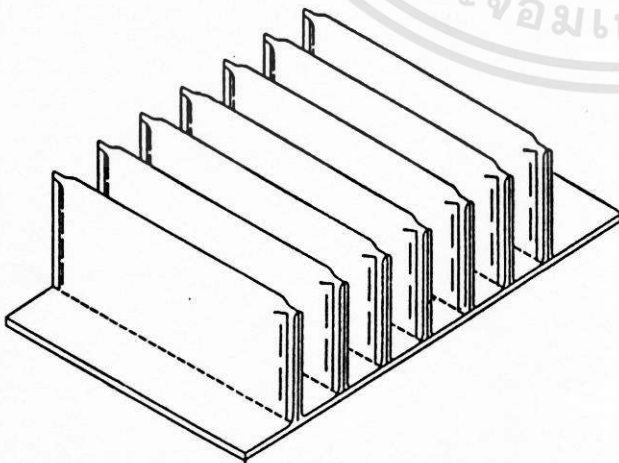
ที่เกิดขึ้นอาจทำให้อุณหภูมิของตัวหม้อแปลงสูงเกินขีดจำกัด ดังนั้นเพื่อเพิ่มพื้นที่ในการระบายความร้อนอาจใช้วิธีติดครีบริบายความร้อนชนิดแผ่น(Radiator Fin) หรือติดครีบริบายความร้อนแบบลอนลูกฟูก(Corrugated Fin)



ภาพที่ 2.5 แสดงตัวถังหม้อแปลง

2.4.8 ครีบริบายความร้อน (Radiator Fin)

มีหน้าที่ระบายความร้อนจากน้ำมันส่งต่อให้แก่อากาศรอบนอก โครงสร้างภายในของครีบริบาย (Fin) จะกลวงเพื่อให้ น้ำมันไหลผ่านเข้าออกได้ วัสดุที่ใช้ในการสร้าง ส่วนขนาดและจำนวนครีบริบายนั้นขึ้นอยู่กับขนาดของหม้อแปลงและความต้องการในการออกแบบของผู้ใช้ครีบริบายความร้อน



ภาพที่ 2.6 แสดงครีบริบายความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.9 ถังรองรับน้ำมัน (Conservator Tank)

มีหน้าที่รองรับการขยายตัวของน้ำมันซึ่งมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวสูงมาก ในขณะที่น้ำมันร้อนจะขยายตัวผ่านเข้าไปในท่อและลิ้นบังคับ (Valve) โดยปกติแล้วน้ำมันในถังหม้อแปลงนั้นจะมีน้ำมันอยู่ในระดับหนึ่งที่อุณหภูมิห้อง หลังจากใช้งานหรือหม้อแปลงจ่ายโหลดแล้วอุณหภูมิของน้ำมันภายในถังหม้อแปลงจะสูง และขยายตัวไหลเข้าสู่ถังรองรับน้ำมันนี้

โครงสร้างของอุปกรณ์ชนิดนี้เป็นถังกลมทรงกระบอก ทำด้วยโลหะเชื่อมอย่างดี อากาศภายนอกไม่สามารถซึมเข้าไปได้ โดยทั่วไปถังนี้จะติดตั้งอยู่ที่ข้างผนังของถังหม้อแปลง หรือเหนือฝาถังขนาดของถังรองรับน้ำมันนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ซึ่งต้องรองรับน้ำมันในส่วนที่ขยายตัวจากการทดลองพบว่าน้ำมันจะขยายตัวประมาณ 7% ของน้ำมันภายในถังหม้อแปลง (Tank) ระหว่างช่วงอุณหภูมิ 0° - 100° C ฉะนั้นเวลาออกแบบถังรองรับน้ำมัน ขนาดของถังจะต้องสามารถรองรับน้ำมันส่วนที่ขยายตัวได้ 10-12% ของน้ำมันทั้งหมดในถังหม้อแปลงนี้ได้

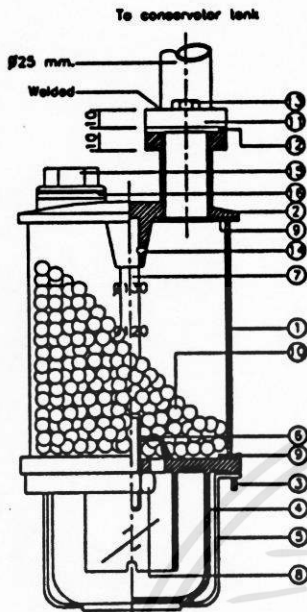
ถังรองรับน้ำมันนี้บางครั้งอาจมีก๊าซไนโตรเจนอัดอยู่เพื่อรักษาคุณภาพของน้ำมันมิให้ถูกความชื้นและทำปฏิกิริยากับอากาศ (Oxidation) ซึ่งจะทำลายสภาพความเป็นฉนวนของน้ำมันหม้อแปลง

2.4.10 ท่อหายใจรองความชื้น (Dehydrating Breather)

ความชื้น (Moisture) มีความสำคัญต่อความเป็นฉนวนของน้ำมัน ท่อหายใจรองความชื้นหรือเครื่องทำให้แห้ง มีหน้าที่ปรับความดันภายในและภายนอกถังให้เท่ากัน และป้องกันความชื้นของอากาศและฝุ่นเข้าไปในหม้อแปลงได้ ฝุ่นจะถูกกรองด้วยน้ำมันที่อยู่ก้นถ้วยท่อหายใจ (Breather) นี้ ส่วนความชื้นจะถูกดูดโดยสารเคมี (Silica Gel) สารนี้มีหน้าที่ดูดความชื้น ในสภาพที่ใช้งานได้ สารเคมีนี้จะมีสีน้ำเงิน แต่จะเปลี่ยนเป็นสีชมพูเมื่อเสื่อมคุณภาพแล้ว จึงควรเปลี่ยนสารใหม่ หรือทำให้แห้งแล้วค่อยนำกลับเข้าใช้งานอีก

ความชื้นในหม้อแปลงไม่เพียงแต่ลดค่าความเป็นฉนวน (Dielectric Strength) ของน้ำมันลงเท่านั้น แต่ยังสร้างมูลน้ำมัน (Sludge) ให้อีกด้วย อากาศจะทำปฏิกิริยา (Oxidation) กับน้ำมันสร้างมูลน้ำมันทำให้น้ำมันเปลี่ยนเป็นสีดำ มูลน้ำมันนี้จะรวมตัวเป็นตะกอน เกาะติดตามร่องของขดลวดและแกนเหล็ก (Core Loss) เป็นผลให้ฉนวนไฟฟ้า (Insulation) ของขดลวด (Winding) เสื่อมคุณภาพลง

อย่างไรก็ตามถังรองรับน้ำมันและท่อหายใจรองความชื้นอาจจะไม่มีก็ได้ ถ้าเป็นหม้อแปลงชนิดที่มีก๊าซไนโตรเจนอัดอยู่ในถังหม้อแปลงหรือเรียกว่า หม้อแปลงแบบปิดสนิท (Sealed Tank)



16	1	Gasket	Rubber
15	1	Filling plug	Aluminium
14	1	Pin	Steel
13	2	Hexagon bolts	Steel
12	1	Gasket	Rubber
11	1	Clomp	Steel
10	-	Silicogel	Silicogel
9	2	Gasket	Rubber
8	1	Hexagon bolt	Brass
7	1	Clamping bolt	Brass
6	1	Moisture absorbent stopping cover	Aluminium
5	1	Belt	Steel
4	1	Oil pot	Plastic
3	1	Cover lower	Aluminium
2	1	Cover upper	Aluminium
1	1	Glass cylinder	Glass
No. Pieces		NAME OF PARTS	Material

ภาพที่ 2.7 ท่อหายใจรองความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การวิเคราะห์และขั้นตอนการออกแบบหม้อแปลงจำหน่าย

ในการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายนั้นวิศวกรผู้ออกแบบจะต้องอาศัยความรู้และประสบการณ์ทั้งทางทฤษฎีและทางปฏิบัติ เพื่อที่จะออกแบบให้หม้อแปลงมีคุณสมบัติเป็นไปตามข้อกำหนดที่ต้องการ ขั้นตอนในการออกแบบนั้นจะต้องเลือกค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลทำให้หม้อแปลงมีคุณสมบัติตามข้อกำหนด หลักการในการวิเคราะห์และเลือกค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบมีดังนี้

3.1 การเลือกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของแกนเหล็กหม้อแปลง

ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของแกนเหล็กหม้อแปลง ขึ้นอยู่กับจำนวนของตัวประกอบ (Factor) หลายชนิดด้วยกัน เช่น ค่ากำลังไฟฟ้าที่กำหนด ค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจร (Short circuit Impedance) ความสูงของหม้อแปลง ชนิดของแกนเหล็ก (Type of Core) และคุณภาพของแผ่นเหล็กที่นำมาประกอบเป็นแกนเหล็ก

ด้วยเหตุดังกล่าวข้างต้นการที่จะได้มาซึ่งสูตรสำเร็จทั่วไป สำหรับหาขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของแกนเหล็ก ให้มีความถูกต้องอย่างแท้จริงนั้นค่อนข้างจะยากและมีความซับซ้อนมาก ในทางปฏิบัติขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของแกนเหล็ก จะถูกเลือกจากวิศวกรผู้ออกแบบโดยพิจารณาจากข้อมูลออกแบบหม้อแปลงในอดีต ที่หม้อแปลงเหล่านั้นผ่านการทดสอบ และนำมาใช้งานได้อย่างไรก็ตามขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของแกนเหล็ก จะถูกเปลี่ยนแปลงจนกระทั่งได้ผลลัพธ์ของการออกแบบสอดคล้องกับข้อกำหนดในเอกสารข้อกำหนดรายละเอียดหม้อแปลง

3.1.1 อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางแกนเหล็กหม้อแปลง

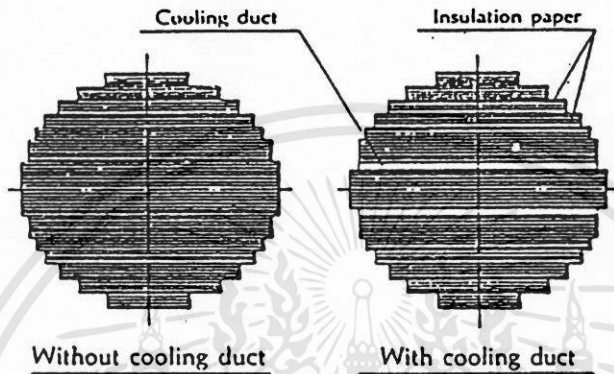
การเพิ่มขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของแกนเหล็กหม้อแปลง จะมีผลทำให้พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กเพิ่มขึ้นตามด้วย ดังนั้นจะยังผลส่งให้จำนวนรอบของขดลวดลดลง และแรงดันต่อรอบเพิ่มมากขึ้นโดยเปอร์เซ็นต์รีแอกแตนซ์ จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนรอบและเส้นผ่าศูนย์กลางของขดลวด และเป็นสัดส่วนผกผันกับแรงดันต่อรอบ และความสูงของขดลวด

การที่มีความจำเป็นต้องเพิ่มขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของแกนเหล็กหม้อแปลง ทำให้ความสูงขดลวดลดลง และเพิ่มขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของขดลวด ดังนั้นค่าเปอร์เซ็นต์รีแอกแตนซ์จะมีค่ามากขึ้น แต่กำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะไม่มีโหลดเพิ่มมากขึ้นด้วย สำหรับกำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะมีโหลดจะลดลง เนื่องจากน้ำหนักของขดลวดทองแดงลดลง เพราะจำนวนรอบของขดลวดนั่นเอง และในทางกลับกันการลดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางแกนเหล็กของหม้อแปลง จะมีผลทำให้น้ำหนักของแกน

เหล็กและกำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะไม่มีโหลดลดลง แต่น้ำหนักของทองแดงและกำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะมีโหลดเพิ่มขึ้น

3.1.2 พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กหม้อแปลง

หม้อแปลงชนิดคอร์ มีโครงสร้างพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กเป็นวงกลม โดยการจัดเรียงแผ่นเหล็กเป็นชั้น ๆ (Step Core) อยู่ภายในวงกลมหรือเส้นรอบวงของวงกลมแสดงดังภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กของหม้อแปลงแบบคอร์

พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กขึ้นอยู่กับจำนวนชั้น (Number of step) ของแผ่นเหล็ก เกรดของแผ่นเหล็ก (Grade of Core Steel) จำนวนที่ใช้เคลือบผิวของแผ่นเหล็ก และวิธีการจับยึดโครงสร้างของแกนเหล็ก

การใช้จำนวนชั้นของแผ่นเหล็กมากขึ้น จะทำให้พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กมีค่ามากขึ้นด้วย แต่อย่างไรก็ตามต้องใช้แรงงานในการตัดแผ่นเหล็กที่มีความกว้างหลาย ๆ ขนาด รวมทั้งแรงงานในการจัดเรียงแผ่นเหล็กมากเป็นพิเศษด้วย ดังนั้นการเลือกใช้จำนวนชั้นของแผ่นเหล็กที่เหมาะสมจะทำให้ราคาต้นทุนการสร้างหม้อแปลงประหยัดลงได้

3.2 การเลือกค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก

ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กจะต้องเลือกใช้ค่าที่เหมาะสม เพื่อที่จะได้ผลลัพธ์ออกมาเป็นไปตามข้อกำหนด โดยทั่วไปความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กจะเลือกใช้ค่าที่ใกล้กับจุดโค้ง (Knee Point) ของกราฟเส้นโค้งแม่เหล็ก (Magnetization Curve) อย่างไรก็ตามต้องคำนึงถึงเงื่อนไขต่าง ๆ ที่จะไม่ทำให้เกิดผลเสีย เช่น ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กมากเกินไป การเปลี่ยนแปลงของแรงดันและระดับเสียงรบกวนของหม้อแปลง เป็นต้น

3.2.1 อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก

การเพิ่มความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็ก จะมีผลทำให้แรงดันต่อรอบของขดลวดสูงขึ้น ดังนั้นจำนวนรอบของขดลวดจะถูกลดลง และผลของรีแอกแตนซ์ก็จะลดลงเช่นกัน

นอกจากนี้ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่เพิ่มขึ้น ทำให้พื้นที่หน้าตัดและน้ำหนักของแกนเหล็กลดลงแต่ต้านกำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะไม่มีโหลดจะเพิ่มขึ้นและผลจากการทำให้จำนวนรอบของขดลวดลดลง จึงทำให้น้ำหนักของขดลวดทองแดงและกำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะมีโหลดลดลงตามไปด้วย ในทางตรงกันข้ามการลดค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กจะเป็นเหตุให้พื้นที่หน้าตัดและน้ำหนักของแกนเหล็กเพิ่มขึ้น กำลังไฟฟ้าขณะไม่มีโหลดลดลงและน้ำหนักของขดลวดทองแดงและกำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะมีโหลดเพิ่มขึ้น

อิทธิพลของเส้นผ่าศูนย์กลางของแกนเหล็กและความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่มีผลต่อพารามิเตอร์ต่าง ๆ เป็นไปตามตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 อิทธิพลของเส้นผ่าศูนย์กลางของแกนเหล็กและความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กต่อพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของหม้อแปลง

พารามิเตอร์	เส้นผ่าศูนย์กลางแกนเหล็ก	ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก
น้ำหนักของขดลวดทองแดง	ลดลง	ลดลง
กำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะมีโหลด	ลดลง	ลดลง
น้ำหนักของแกนเหล็ก	เพิ่มขึ้น	ลดลง
กำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะไม่มีโหลด	เพิ่มขึ้น	เพิ่มขึ้น

3.3 การเลือกชนิดของขดลวด

ขดลวดที่ออกแบบเพื่อใช้กับหม้อแปลงชนิดคอร์ เรียกว่าขดลวดที่มีจุดศูนย์กลางร่วม กล่าวคือขดลวดชนิดนี้ประกอบด้วยขดลวดแรงต่ำและขดลวดแรงสูง ที่มีรูปร่างเป็นทรงกระบอกสวมทับขาแกนเหล็กแต่ละขา ขดลวดแรงต่ำจะสวมอยู่ชั้นในติดกับขาของแกนเหล็ก และขดลวดแรงสูงจะสวมอยู่ชั้นนอกต่อจากขดลวดแรงต่ำเป็นลำดับต่อมา

ขดลวดที่ใช้กับหม้อแปลงชนิดคอร์มีอยู่ 4 ชนิด คือ

- ขดลวดชนิดสไปรัล (Spiral Type)
- ขดลวดชนิดครอสโอเวอร์ (Crossover Type)
- ขดลวดชนิดเฮลิคัล (Helical Type)
- ขดลวดชนิดคันทินิวอัส-ดิสก์ (Continuous Disc Type)

ขดลวดชนิดสไพร์ลและครอสโอเวอร์ ใช้สำหรับเป็นขดลวดของหม้อแปลงจำหน่าย ส่วนขดลวดชนิดเฮลิคัลและคันทินิวอัส-คิสค์ใช้สำหรับเป็นขดลวดของหม้อแปลงกำลัง(Power Transformer)

3.3.1 ขดลวดชนิดสไพร์ล

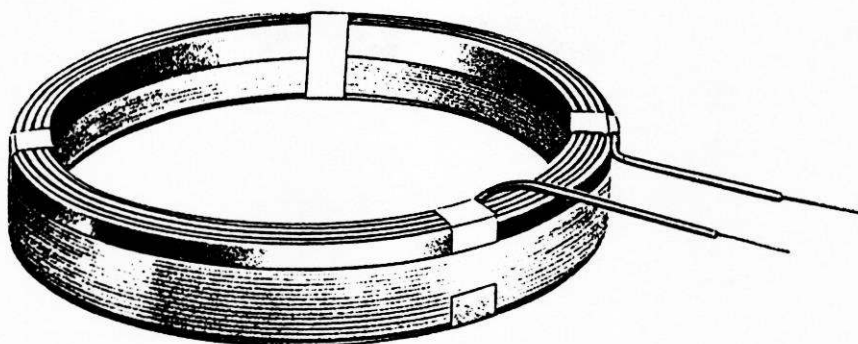
เป็นขดลวดที่สามารถรับกระแสได้สูง ใช้พันเป็นขดลวดแรงต่ำของหม้อแปลงจำหน่าย การพันขดลวดชนิดสไพร์ล สามารถจะพันเป็นขดลวดชั้นเดียว สองชั้น สามชั้นหรือสี่ชั้นก็ได้ขึ้นอยู่กับ การออกแบบและพิกัดกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลง โดยการพันจะพันต่อเนื่องตลอดความยาวตามแนวแกน (Axial length) ขดลวดที่ไขพันประกอบด้วยจำนวนของลวดทองแดงแบนสี่เหลี่ยมวางขนานกัน (Rectangular strips) โดยลวดทองแดงจะหุ้มด้วยกระดาษฉนวน



ภาพที่ 3.2 ขดลวดชนิดสไพร์ล

3.3.2 ขดลวดชนิดครอสโอเวอร์

ขดลวดชนิดนี้เหมาะสำหรับวงจรที่มีกระแสไม่มากกว่า 20 แอมแปร์ จะใช้เป็นขดลวดแรงดันสูงของหม้อแปลงจำหน่าย ขดลวดชนิดนี้จะประกอบด้วยการนำขดลวดแต่ละตอน(Section)มาต่ออนุกรมกัน โดยขดลวดแต่ละตอนประกอบด้วยจำนวนของชั้นที่มีจำนวนของรอบตัวนำต่อชั้น (Turns per Layer) ซึ่งพันด้วยขดลวดตัวนำกลมอบน้ำยา โดยทั่วไปความยาวตามแนวแกน(Axial) ของขดลวดแต่ละตอนประมาณ 50-100 มม. มีความหนาแนวรัศมี (Radial Width) ประมาณ 25-50 มม. และระยะห่างการวางขดลวด แต่ละตอนที่ใกล้กันมีระยะห่างประมาณ 6 มม.



ภาพที่ 3.3 ขดลวดชนิดครอสโอเวอร์

3.4 การเลือกขนาดตัวนำ และความหนาแน่นของกระแส

พื้นที่หน้าตัดของตัวนำในขดลวดแรงสูงและแรงต่ำ สามารถหาได้ก็ต่อเมื่อเลือกค่าความหนาแน่นของกระแสที่เหมาะสมกับขดลวด ข้อจำกัดของความหนาแน่นของกระแสในขดลวดขึ้นอยู่กับชนิดของขดลวด กำลังไฟฟ้าสูญเสีย และระดับของอุณหภูมิเพิ่ม (Temperature Rise) ที่จะสูงเกินขีดจำกัดของมาตรฐาน ซึ่งจะทำให้ฉนวนได้รับความเสียหาย ดังนั้นค่าความหนาแน่นของกระแสจะมีค่าต่าง ๆ กัน สำหรับหม้อแปลงต่างชนิดกัน สำหรับหม้อแปลงจำหน่ายมีค่าความหนาแน่นของกระแสโดยประมาณอยู่ระหว่าง 2.0-3.0 แอมแปร์/มม.²

3.4.1 อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นของกระแส

การเพิ่มค่าความหนาแน่นของกระแส มีผลทำให้น้ำหนักของขดลวดทองแดงลดลง แต่จะไปเพิ่มกำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะมีโหลดและความร้อนในขดลวด อย่างไรก็ตามเมื่อน้ำหนักของขดลวดทองแดงลดลง จะส่งผลทำให้น้ำหนักของแกนเหล็ก และกำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะไม่มีโหลดลดลง เนื่องจากโครงสร้างของแกนเหล็กมีขนาดเล็กลง

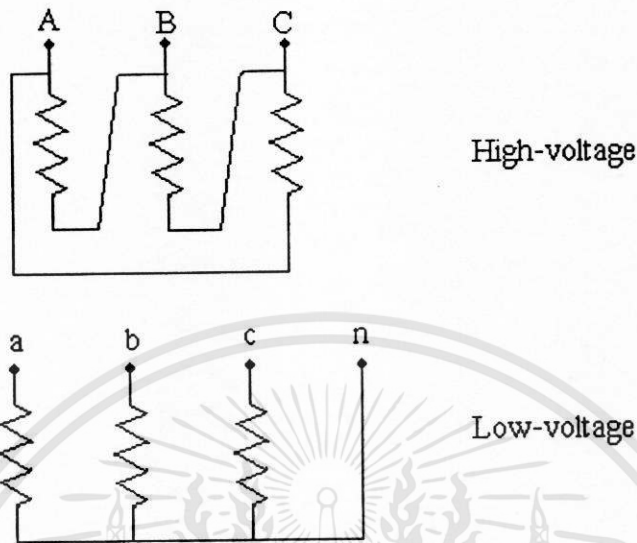
3.5 เวกเตอร์กรุปหรือการต่อขดลวดของหม้อแปลง

ในการต่อขดลวดของหม้อแปลง 3 เฟสนั้นสามารถต่อได้หลายแบบ สำหรับหม้อแปลงจำหน่ายตามข้อกำหนดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคนั้น มีการต่อขดลวดหรือมีเวกเตอร์กรุป Dyn 11 และ Yzn 11 แต่เวกเตอร์กรุป Yzn 11 นั้นจะใช้กับหม้อแปลงจำหน่ายที่มีขนาดไม่เกิน 250 kVA

3.5.1 การต่อขดลวดแบบ Dyn 11

การต่อขดลวดแบบนี้ทางคานแรงสูงต่อแบบเดลต้า ส่วนทางคานแรงต่ำต่อแบบวายมีข้อดีคือ ขั้วนิวทรัล(Neutral) ทางคานแรงต่ำมีจุดต่อลงดินได้ ฮาร์โมนิกที่สามของแรงดันและกระแสจะ

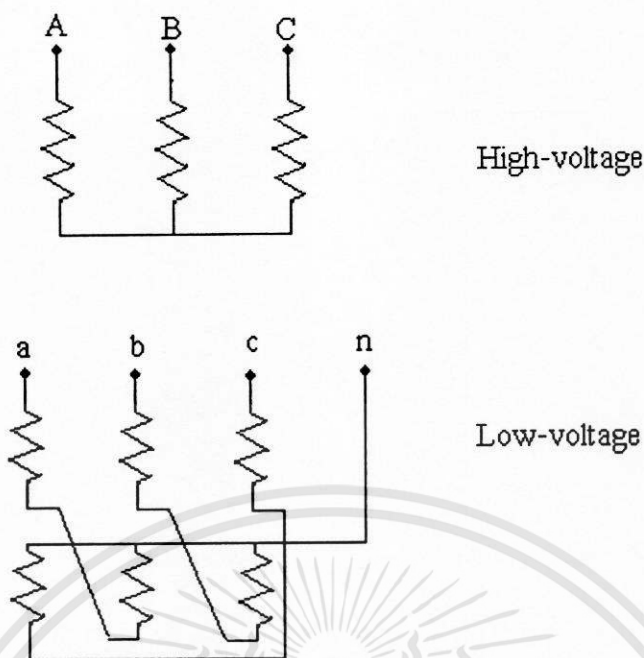
ไหลวนในขดลวดที่ต่อแบบเดลต้าโดยจะไม่รบกวนระบบที่หม้อแปลงต่ออยู่ ข้อเสียคือ ทางด้านแรงสูงถ้าเกิดฟอลท์ขึ้นที่เฟสใดเฟสหนึ่งจะส่งผลให้หม้อแปลงเฟสที่เหลือไม่สามารถใช้งานได้



ภาพที่ 3.4 การต่อขดลวดหม้อแปลงเวกเตอร์กรุป Dyn 11

3.5.2 การต่อขดลวดแบบ Yzn 11

การต่อขดลวดแบบนี้ทางด้านแรงสูงต่อแบบวาย ส่วนทางด้านแรงต่ำต่อแบบซิกแซกมีข้อดีคือ ขั้วนิวตรอล(Neutral) ทั้งทางด้านแรงสูงและแรงต่ำสามารถต่อลงดินได้ หม้อแปลงสามารถใช้แทนการต่อแบบ Dyn 11 ได้ และสามารถรับโหลดที่ไม่สมดุลได้ แรงดันฮาร์โมนิกที่สามารถหวังเฟสกับนิวตรอลจะถูกจำกัดโดยการตรงข้ามกันของแรงดันครึ่งหนึ่งของขดลวดซึ่งต่ออนุกรมกันในหนึ่งเฟส และขดลวดจะมีความแข็งแรงทางกล ส่วนข้อเสียคือขดลวดตัวนำและฉนวนจะถูกใช้ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น การต่อขดลวดและส่วนประกอบต่างๆ ไม่สามารถทำได้ในพื้นที่แคบจึงทำให้หม้อแปลงมีขนาดใหญ่ขึ้นและทำให้มีราคาเพิ่มขึ้นด้วย การต่อขดลวดแบบนี้จึงเหมาะกับหม้อแปลงขนาดเล็กที่รับโหลดไม่มาก



ภาพที่ 3.5 การต่อขดลวดหม้อแปลงเวกเตอร์กรุป Yzn 11

3.6 คุณลักษณะทางความร้อนของหม้อแปลง

กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่แกนเหล็กและขดลวดของหม้อแปลง เป็นสาเหตุทำให้เกิดความร้อนขึ้น และความร้อนนี้ต้องถูกระบายออกจากหม้อแปลง โดยมีอุณหภูมิที่ไม่ทำให้ฉนวนเสื่อมสภาพ อุณหภูมิในหม้อแปลง คือสิ่งสำคัญที่มีผลต่อพิกัดเควีเอทีที่กำหนด (Rated kVA) และอายุการใช้งานของหม้อแปลง

3.6.1 ขีดจำกัดของอุณหภูมิเพิ่ม (Limits of Temperature Rise)

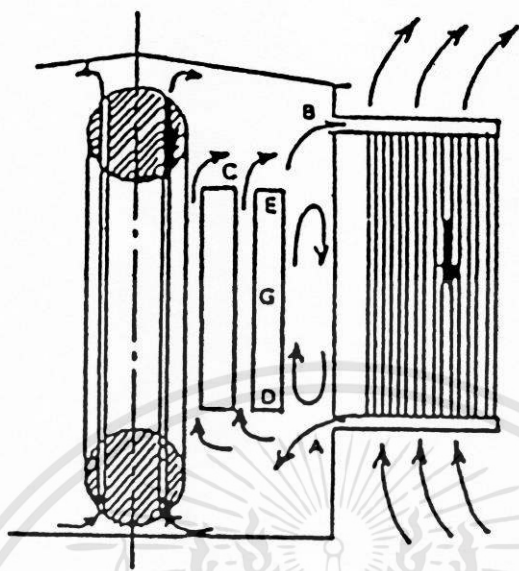
ตามมาตรฐานได้กำหนดขีดจำกัดอุณหภูมิเพิ่มสำหรับหม้อแปลงที่ระบายความร้อนด้วยน้ำมัน โดยอากาศธรรมชาติ (Oil-Immersed Self-Cooled Transformer) หรือตัวข้อ ONAN โดยกำหนดให้อุณหภูมิแวดล้อม (Ambient Temperature) สูงสุดเท่ากับ 40 องศาเซลเซียส สถานที่ติดตั้งใช้งานไม่เกิน 1000 เมตรเหนือระดับน้ำทะเล กรณีที่สถานที่ติดตั้งใช้งานสูงเกิน 1000 เมตรเหนือระดับน้ำทะเล อุณหภูมิเพิ่มเฉลี่ยจะลดลง 1 องศาเซลเซียสต่อระยะความสูงทุกๆ 400 เมตร

ตารางที่ 3.2 ขีดจำกัดอุณหภูมิเพิ่มสำหรับหม้อแปลงแบบจุ่มน้ำมัน

	อุณหภูมิเพิ่ม ($^{\circ}\text{C}$)
น้ำมันส่วนบน (Top Oil)	ไม่เกิน 60
ขดลวด	ไม่เกิน 65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีคนนำไปใช้

สำหรับแกนเหล็กและชิ้นส่วนอื่นๆ อุณหภูมิต้องไม่สูงถึงค่าที่จะทำให้แกนเหล็กหรือส่วนที่ติดกันเสียหายได้



ภาพที่ 3.6 แสดงการถ่ายเทความร้อนของหม้อแปลงน้ำมัน

3.8.2 วิธีการระบายความร้อนของหม้อแปลง

การสูญเสีย (Losses) พลังงานไฟฟ้าต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลงเช่น การสูญเสียในแกนเหล็ก (Core Loss) การสูญเสียในขดลวดทองแดง (Copper Loss) และในส่วนต่าง ๆ ของหม้อแปลงในขณะที่จ่ายโหลดอยู่ พลังงานสูญเสียทั้งหมดจะเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานความร้อน ทำให้อุณหภูมิของวัสดุมีโอกาสเลจจุดสูงสุดที่วัสดุนั้นจะทนได้ และทำลายฉนวนของหม้อแปลงในที่สุด ทำให้หม้อแปลงใช้งานไม่ได้ (Failure) ดังนั้นการระบายความร้อนของหม้อแปลงจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างยิ่ง

การระบายความร้อน ถ้ากระทำถูกวิธีจะสามารถเพิ่มอัตรากำลัง (Rating) ของหม้อแปลงได้ โดยขนาดเท่าเดิม หรืออาจลดขนาด (กว้าง , ยาว , สูง) ของหม้อแปลงได้โดยที่ขนาดกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงยังคงเดิม

โดยธรรมชาติแล้ว ความร้อนจะระบายออก (Dissipate) ตามผิวของวัตถุ (Material) ด้วยวิธีการแผ่รังสี (Radiation) และวิธีการนำพา (Convection) ในหม้อแปลงนั้นการระบายความร้อนจะใช้วิธีใดขึ้นอยู่กับขนาดทั้งรูปร่างและอัตรากำลังของหม้อแปลงที่ใช้

หม้อแปลงก่อนที่จะถูกนำไปใช้งานนั้นอุณหภูมิภายในหม้อแปลงเท่ากับอุณหภูมิรอบ ๆ ภายนอก (Ambient Temperature) หลังจากที่หม้อแปลงจ่ายโหลด อุณหภูมิภายในหม้อแปลงโดยเฉพาะส่วนที่มีกระแสไหล (Active Component) จะถีบตัวขึ้นอย่างรวดเร็ว และจะถ่ายเทความร้อนให้แก่

วัสดุหรืออากาศรอบ ๆ ทำให้มีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจนถึงจุดๆ หนึ่งก็จะไม่เพิ่มขึ้นอีก แสดงว่าความร้อนที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากมีกระแสไหลผ่าน จะเท่ากับความร้อนที่ระบายออกผลก็คือ อุณหภูมิคงที่

3.6.3 สัญลักษณ์ที่ใช้เรียกตามวิธีการระบายความร้อน

1. ตัวกลางระบายความร้อน

O คือ น้ำมันแร่ (Mineral Oil)

L คือ น้ำมันไมติดไฟ เช่น askarel

G คือ ก๊าซ

W คือ น้ำ

A คือ อากาศ

S คือ ฉนวนแข็ง

2. แบบการถ่ายเทความร้อน

N คือ โดยธรรมชาติ

F คือ โดยการขับ เช่น พัดลม, บีบ

วิธีการระบายความร้อนของหม้อแปลงชนิดจุ่มน้ำมัน มีหลายวิธีดังนี้

1. ระบายความร้อน โดยอาศัยอากาศธรรมชาติใช้ตัวย่อคือ ONAN

2. ระบายความร้อน โดยเพิ่มกำลังการหมุนเวียนของอากาศใช้ตัวย่อคือ ONAF

3. ระบายความร้อน โดยเพิ่มกำลังการหมุนเวียนของน้ำมันด้วยบีบขับ โดยอากาศธรรมชาติใช้ตัวย่อคือ OFAN

4. ระบายความร้อน โดยเพิ่มกำลังการหมุนเวียนของน้ำมันด้วยบีบขับ โดยเพิ่มกำลังการหมุนเวียนของอากาศใช้ตัวย่อคือ OFAF

5. ระบายความร้อน โดยเพิ่มกำลังการหมุนเวียนให้แก่น้ำและน้ำมันใช้ตัวย่อคือ OFWF

3.6.4 การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer)

ความร้อนในหม้อแปลงชนิดจุ่มน้ำมันมีระบบถ่ายเทความร้อน 2 ขั้นตอนคือ

1 ระบบความร้อนของแกนเหล็กและขดลวดถ่ายเทสู่น้ำมัน

2 ระบบความร้อนของน้ำมันถ่ายเทสู่อากาศ

โดยความร้อนจะถูกถ่ายเทด้วยวิธีใดวิธีหนึ่ง หรือ ทั้ง 3 วิธีดังต่อไปนี้

- วิธีการนำความร้อน (Conduction)

- วิธีการแผ่รังสีความร้อน (Radiation)

- วิธีการพาความร้อน (Convection)

เมื่อพิจารณาถึงวิธีการถ่ายเทความร้อนจากขดลวด ของหม้อแปลงไปสู่บรรยากาศแวดล้อม การถ่ายเทความร้อนแต่ละวิธีจะถูกปฏิบัติแยกจากกัน โดยการนำความร้อนมีความสำคัญน้อยที่สุด และการพาความร้อนมีความสำคัญมากที่สุด ดังนั้นการออกแบบการระบายความร้อนของหม้อแปลง จึงพิจารณาเฉพาะการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนเท่านั้น

3.6.5 การแผ่รังสีความร้อน

การถ่ายเทความร้อนโดยวิธีการแผ่รังสีความร้อน เกิดขึ้นเพราะทุกส่วนของวัสดุที่มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเหนืออุณหภูมิแวดล้อม จะแผ่พลังงานความร้อนมาในรูปของคลื่น (Waves) พลังงานความร้อนสูงสุดที่ถูกแผ่ออกมาที่อุณหภูมิหนึ่ง จะเกิดขึ้นในช่วงความยาวคลื่นหนึ่ง แต่หากอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจุดของพลังงานความร้อนสูงสุดจะเลื่อนไปในช่วงความยาวคลื่นที่สั้นกว่า โดยทั่วไปพื้นที่ของพลังงานความร้อนสูงสุดมักอยู่ในช่วงอินฟราเรด (Infrared Spectrum)

พื้นที่สำหรับการแผ่รังสีความร้อนที่มีประสิทธิภาพคือ พื้นผิวภายนอกที่ห่อหุ้มด้วยวัสดุ พื้นที่ผิวที่แผ่รังสีความร้อนได้จริงคือ ผลคูณของความสูงและความยาวของถังผิวเรียบ (Plain Tank) ที่ห่อหุ้มหม้อแปลง อย่างไรก็ตามค่าของพื้นที่ผิวซึ่งมีแฟกเตอร์ของการแผ่รังสี (Emissivity Factor) ถ้าพื้นผิวมีสีดำสนิทจะมีแฟกเตอร์ของการแผ่รังสีเท่ากับ 1 แต่ถ้าแฟกเตอร์ของการแผ่รังสีน้อยกว่า 1 ประสิทธิภาพของการแผ่รังสีความร้อนจะมีค่าลดลงเท่ากับพื้นที่ผิวที่ห่อหุ้มด้วยแฟกเตอร์ของการแผ่รังสี การแผ่รังสีของสีที่ใช้ในทางปฏิบัติส่วนมากจะมีค่าใกล้เคียงกับ 1 โดยทั่วไปประมาณ 0.90-0.95 เช่น สีเขียวหรือสีเทา เป็นต้น

การถ่ายเทความร้อนโดยวิธีการแผ่รังสีความร้อนสามารถเขียนเป็นสมการโดยกฎของสเตฟานโบลซ์มานน์ (Stefan Boltzman Law) ได้ดังนี้[10]

$$W_{\text{rad}} = 5.7 \times 10^{-8} \times E(T_2^4 - T_1^4) \quad (3.1)$$

โดยที่

W_{rad} คือ กำลังไฟฟ้สูญเสียวัดต่อตารางเมตรของพื้นผิว

E คือ แฟกเตอร์ของการแผ่รังสี (0.90-0.95)

T_1 คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ของบรรยากาศแวดล้อม ($^{\circ}\text{C}$)

T_2 คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ของวัสดุส่วนที่ร้อน ($^{\circ}\text{C}$)

3.6.6 การพาความร้อน

เมื่อนำวัสดุที่ร้อนจุ่มลงไปในของไหล ความร้อนของวัตถุจะถูกพาออกจากพื้นผิวของวัตถุไปสู่ตัวกลางที่เย็นกว่าวัตถุนั้น การเพิ่มอุณหภูมิในของไหลจะทำให้ความหนาแน่นของตัวกลางลดลง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นจะทำให้เกิดขบวนการไหลเวียนของของไหล โดยของไหลที่เบากว่าจะจากไปและจะมีของไหลที่หนักกว่ามาแทนที่ ขบวนการไหลเวียนของของไหลจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ความร้อนที่ถูกถ่ายเทโดยการพาความร้อน สามารถคำนวณได้จากสมการ[10]

$$W_{con} = K\theta_c^n \quad (3.2)$$

โดยที่

W_{con} คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียวัดต่อตารางเมตร

K คือ ค่าคงที่

θ_c คือ อุณหภูมิเพิ่ม ($^{\circ}C$)

n คือ ค่ายกกำลังประมาณ 1.0-1.25 ขึ้นอยู่กับรูปร่างและพื้นผิวของวัตถุที่จะระบาย

ความร้อน

สำหรับถังผิวดังเรียบอยู่ในอากาศที่มีความสูงประมาณ 60 ซม. ขึ้นไป และมีอุณหภูมิเพิ่มถึง 75 องศาเซลเซียส ที่ระดับน้ำทะเลจะมีค่าคงที่ต่าง ๆ ดังนี้

$$K = 2.17$$

$$n = 1.25$$

การสูญเสียที่ทำให้เกิดอุณหภูมิเพิ่ม มีการเปลี่ยนแปลงตามรากที่สองของความหนาแน่นของอากาศ สำหรับพื้นที่ผิวของถังหม้อแปลงที่มีการติดครีบบระบายความร้อน ซึ่งต้องมีความต้านทานของการไหลของอากาศ จึงจำเป็นต้องมีค่าแฟคเตอร์แก้ไขคือ แฟคเตอร์ความเสียดทานของอากาศ (Air Friction Factor) ซึ่งมีค่าเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับลักษณะของครีบบระบายความร้อน ดังนั้นแฟคเตอร์นี้จะต้องหาค่าโดยการทดลอง

$$W_{con} = 2.17F_a \theta_c^{1.25} \sqrt{P} \quad (3.3)$$

โดยที่

F_a คือ แฟคเตอร์ความเสียดทานของอากาศ

P คือ ความกดดันของบรรยากาศ (ที่ระดับน้ำทะเลมีค่าเท่ากับ 1)

3.6.7 การถ่ายเทความร้อนร่วมของการแผ่รังสีความร้อนและการพาความร้อน

ผลรวมของการถ่ายเทความร้อน จากถังหม้อแปลงพื้นผิวแนวตั้งเรียบสามารถรวมเป็นสมการดังนี้[10]

$$W = 5.7 \times 10^{-8} E (T_2^4 - T_1^4) + 2.17 F_a \theta_c^{1.25} \sqrt{P} \quad (3.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทางปฏิบัติพื้นที่ผิวของตัวถังหม้อแปลงอาจจะไม่สามารถระบายความร้อนออกสู่อากาศ เพื่อให้อุณหภูมิของหม้อแปลงขณะใช้งานมีค่าไม่สูงเกินกว่าข้อกำหนดได้ ดังนั้นผู้ออกแบบจึงต้องทำการออกแบบให้หม้อแปลงมีพื้นที่ผิวในการระบายความร้อนได้อย่างเพียงพอ โดยทำการติดตั้งครีระบายความร้อนที่ด้านข้างของตัวถังหม้อแปลงเพื่อช่วยในการระบายความร้อน พื้นที่ผิวของการระบายความร้อนหาได้จากสมการ

$$A_R = W_t / W_k \quad (3.5)$$

โดยที่

A_R คือ พื้นที่ผิวของการระบายความร้อน(ตารางเมตร)

W_t คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมของหม้อแปลง(วัตต์)

W_k คือ ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียต่อพื้นที่ผิวการระบายความร้อน(วัตต์ต่อตารางเมตร)

ค่า W_k หรือค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียต่อพื้นที่ผิวการระบายความร้อนนั้นในทางปฏิบัติจะทำการออกแบบให้หม้อแปลงมีอุณหภูมิเพิ่มประมาณ 40-50 °C ดังนั้นค่า W_k ที่ใช้ในการออกแบบจึงมีค่าประมาณ 500 วัตต์ต่อตารางเมตร

3.6.8 ขีดจำกัดความร้อนเกินและผลที่มีต่อความเป็นฉนวน

ขีดจำกัดอุณหภูมิของหม้อแปลงนั้นขึ้นกับวัสดุที่ใช้ ฉนวนที่พันขดลวดส่วนใหญ่มีสารอินทรีย์ (Organic Materials) และเส้นใย (Fibrous) ผสมอยู่ เช่น กระดาษหนาสีน้ำตาล (Kraft Paper) กระดาษมันนิลา (Manila Paper) แผ่นกระดานสีน้ำตาล (Kraft Board) และกระดานอัด (Press Board) เป็นต้น สารดังกล่าวเมื่อถูกความร้อนสูง ๆ จะให้คาร์บอนออกมาและเปราะ อุณหภูมิจึงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อกำเนิดคาร์บอน ทำลายความแข็งแรงของฉนวน และความแข็งแรงเชิงกล และยังทำลายอายุการใช้งานของฉนวนให้สั้นลงด้วย ปัจจัยอื่นๆ นอกจากความร้อนที่ทำลายอายุการใช้งานของฉนวนได้แก่ การพับ ฉีก ดึงหรือรอยแตกของฉนวน เป็นต้น

3.7 ขั้นตอนการออกแบบหม้อแปลงจำหน่าย

ในการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายนั้นวิศวกรผู้ออกแบบจำเป็นต้องทราบข้อกำหนดรายละเอียด(Specification)ของหม้อแปลงจำหน่าย เพื่อที่จะได้ทำการออกแบบหม้อแปลงให้มีคุณสมบัติเป็นไปตามที่ต้องการ ข้อกำหนดรายละเอียดหรือข้อมูลเริ่มต้น(Initial Data)ที่ใช้สำหรับออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายมีดังนี้

- พิกัดกำลังไฟฟ้า
- จำนวนเฟส
- ความถี่ใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- แรงดันคานแรงสูงและแรงต่ำ
- เวกเตอร์รูป
- ชนิดของการระบายความร้อน
- เปอร์เซนต์อิมพีแดนซ์

ในการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายนั้นสามารถแบ่งขั้นตอนหลักในการออกแบบได้ดังนี้

- ออกแบบแกนเหล็ก
- ออกแบบขดลวดและฉนวน
- คำนวณคุณสมบัติต่างๆ ของหม้อแปลง
- ออกแบบตัวถังและครีบบระบายความร้อน

3.7.1 การออกแบบแกนเหล็ก

แกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าประกอบด้วยแผ่นเหล็กซิลิคอนบาง ๆ นำมาวางเรียงกันแต่ละแผ่นฉาบด้วยฉนวนเพื่อลดการเกิดกระแสไหลวนในแกนเหล็ก ทำให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กลดลง ความหนาของแผ่นเหล็กซิลิคอนมีผลต่อการเกิดกระแสไหลวนในแกนเหล็ก จำนวนเปอร์เซ็นต์ของซิลิคอนในเหล็กรวมทั้งขั้นตอนในการทำแผ่นเหล็กซิลิคอนมีผลต่อการเกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากฮิสเตอร์ซิส กำลังไฟฟ้าสูญเสียทั้งสองเกิดเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ในแกนเหล็ก การเพิ่มจำนวนซิลิคอนทำให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียลดลง แต่จะทำให้เหล็กนั้นแข็งและเปราะ เหล็กซิลิคอนที่ใช้โดยทั่วไปในการประกอบสร้างหม้อแปลงจำหน่ายนี้เป็นเกรด M-3, M-4 และ M-5 ความหนา 0.3, 0.27 และ 0.30 มม. ค่าแฟกเตอร์ของแผ่นเหล็กแผ่นมีค่า 0.97 และมี ความหนาแน่น 7.65 kg/dm^3

ในการออกแบบหม้อแปลงที่กำหนดขนาดมาให้สามารถที่จะออกแบบได้หลายวิธี เช่น ออกแบบให้ต้นทุนน้อยที่สุดโดยไม่คำนึงถึงกำลังไฟฟ้าสูญเสีย หรือ ในทางกลับกันอาจจะออกแบบให้มีกำลังไฟฟ้าสูญเสียน้อยที่สุด การออกแบบหม้อแปลงโดยให้ประหยัดที่สุดสามารถกระทำได้ถึงค่าหนึ่งเท่านั้น เพราะจะถูกจำกัดด้วยความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากกำลังไฟฟ้าสูญเสียในหม้อแปลงและถูกจำกัดด้วยค่าความหนาแน่นฟลักซ์อิมิตัวในแกนเหล็กหม้อแปลงที่ผลิต โดยทั่วไปจะทำการออกแบบโดยประมาณให้มีราคาของแกนเหล็กเท่ากับราคาของขดลวดทองแดง

ในด้านประสิทธิภาพของหม้อแปลงนั้นสามารถออกแบบให้มีประสิทธิภาพสูงสุดที่โหลดที่กำหนดได้โดยการออกแบบให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กมีค่าเท่ากับกำลังไฟฟ้าสูญเสียในทองแดง แต่หม้อแปลงที่ออกแบบนี้เป็นหม้อแปลงในระบบจำหน่ายมีแนวโน้มว่าวันหนึ่ง ๆ จะใช้งานที่โหลดน้อยกว่าที่กำหนดเป็นเวลานานมากกว่าการใช้โหลดที่กำหนด การออกแบบจึงมักจะให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กมีค่าน้อยเท่าที่จะเป็นไปได้ ดังนั้นพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กจะหาได้จากการเลือกค่าความหนาแน่นฟลักซ์(B) ซึ่งกำหนดด้วยค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก

แกนเหล็กของหม้อแปลงนี้เป็นแบบคอร์ พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กเป็นรูปเหลี่ยมอัดในวงกลมจำนวนชั้น(Step)ของแกนเหล็กขึ้นอยู่กับการออกแบบ ถ้าจำนวนชั้นของแกนเหล็กมากก็จะได้พื้นที่หน้าตัดมาก เมื่อเรียงแกนเหล็กเสร็จแล้วก่อนจะประกอบเหล็กเคลมปจะใช้กระดาษฉนวนกั้นระหว่างเหล็กซิลิคอนกับเหล็กเคลมปเสียก่อน เพื่อป้องกันการเหนียวนำในเหล็กเคลมปทำให้เกิดความร้อนสูง

การคำนวณหาขนาดของแกนเหล็กที่นำมาจัดเรียงในวงกลมในแต่ละชั้นสามารถคำนวณได้จากสมการ[8]

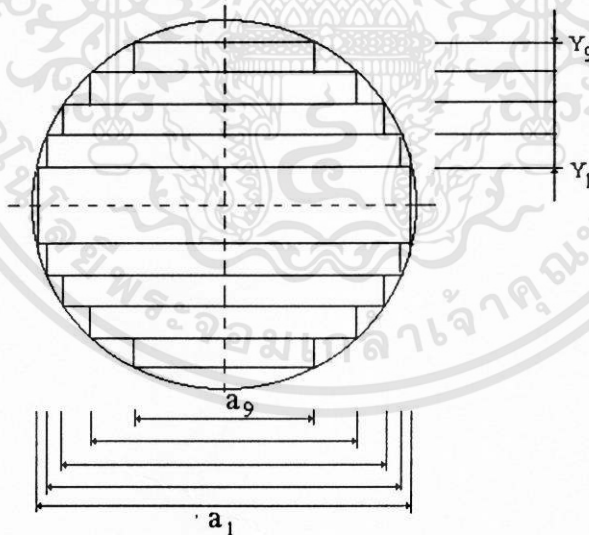
$$F(Y) = 2 \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - Y^2} \quad (3.6)$$

โดยที่

F(Y) คือ ความกว้างของแผ่นเหล็ก(a_y)ในแต่ละชั้น(มม.)

D คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของแกนเหล็ก(มม.)

Y คือ ความหนาของแกนเหล็กในแต่ละชั้น(มม.)

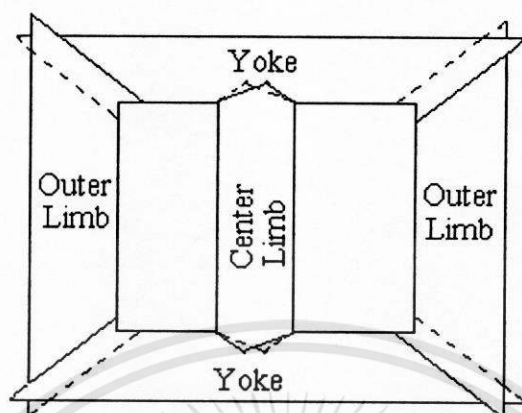


ภาพที่ 3.7 การจัดเรียงแกนเหล็กในพื้นที่วงกลม

3.7.1.1 โครงสร้างของแกนเหล็ก (Core Construction)

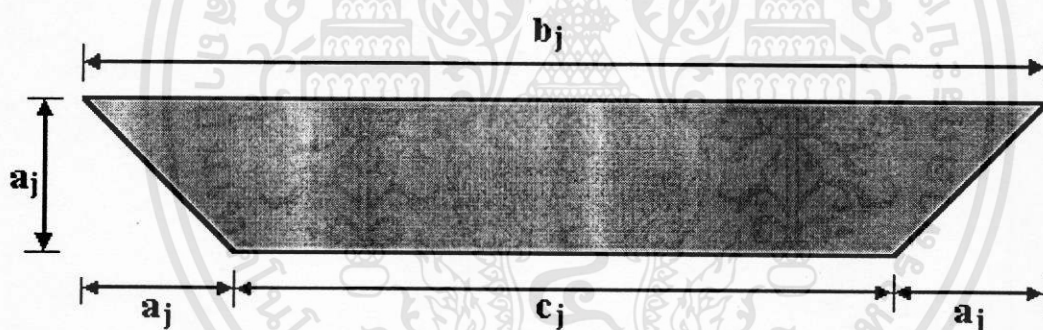
ในการจัดเรียงแผ่นเหล็กเพื่อให้เป็นโครงสร้างแกนเหล็กหม้อแปลง จะมีส่วนประกอบของขาแกนเหล็ก (Outer Limb และ Center Limb) และ โยค (Yoke) ดังแสดงในรูปที่ 3.8 เพื่อให้เส้น

แรงแม่เหล็กมีเส้นทางขนานกับแนวรีดของแผ่นเหล็กมากที่สุด ดังนั้นในการตัดแผ่นเหล็กตรงรอยต่อของขาแกนเหล็กและโยคจะทำมุมกัน 45 องศา



ภาพที่ 3.8 โครงสร้างแกนเหล็กของหม้อแปลง 3 เฟส ชนิดคอร์

3.7.1.1.1 ขาแกนเหล็ก Outer Limb



ภาพที่ 3.9 แสดงรายละเอียดของขาแกนเหล็ก Outer limb

จากรูปที่ 3.9 กำหนดให้

c_j คือ ความสูงด้านในของขาแกนเหล็ก Outer Limb ที่ชั้นใด ๆ หรือความสูงของช่องหน้าต่าง(Windows)

b_j คือ ความสูงด้านนอกของขาแกนเหล็ก Outer Limb ที่ชั้นใด ๆ

เมื่อ $j = 1$ จะได้

$$b_j = 2a_j + c_j \quad (3.7)$$

และเมื่อ $j \neq 1$ จะได้

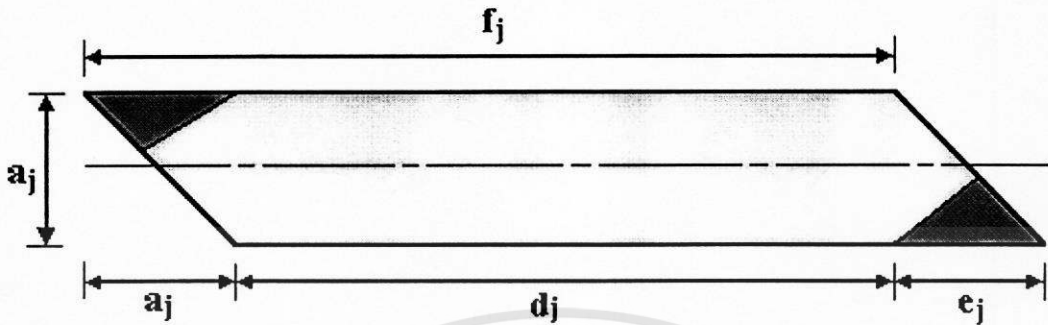
$$c_j = c_{j-1} + a_{j-1} - a_j \quad (3.8)$$

$$b_j = b_{j-1} - a_{j-1} + a_j \quad (3.9)$$

เมื่อ $j = 1, 2, 3, \dots, 9$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7.1.1.2 ขาแกนเหล็ก Center Limb



ภาพที่ 3.10 แสดงรายละเอียดของขาแกนเหล็ก Center Limb

จากรูปที่ 3.10 กำหนดให้

d_j คือ ความสูงด้านในของขาแกนเหล็ก Center Limb มีค่าเท่ากับ c_j

e_j คือ ความยาวที่ตัดออกเพื่อเข้ามุมในการจัดเรียงแผ่นเหล็ก Center Limb ที่ชั้นใด ๆ

f_j คือ ความสูงของขาแกนเหล็ก Center Limb ที่ชั้นใด ๆ

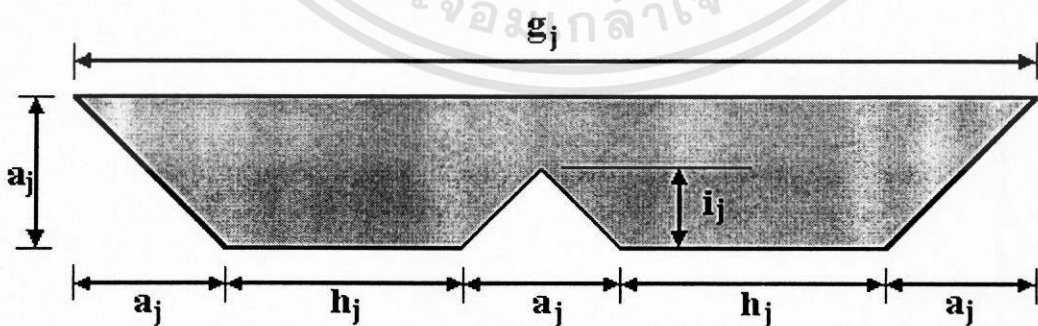
β คือ มุมมีค่า 45 องศา

โดยที่

$$e_j = a_j - 20 \quad (3.10)$$

$$f_j = d_j + e_j \quad (3.11)$$

3.7.1.1.3 โยค (Yoke)



ภาพที่ 3.11 แสดงรายละเอียดของโยค(Yoke)

จากรูปที่ 3.11 กำหนดให้

h_j คือ ความกว้างด้านในของโยคที่ชั้นใด ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

g_j คือ ความกว้างด้านนอกของ โยคที่ชั้นใด ๆ

i_j คือ ความสูงของพื้นที่สามเหลี่ยมที่ตัดออก

α คือ มุมมีค่า 90 องศา

เมื่อ $j = 1$ จะได้

$$g_j = 2h_j + 3a_j \quad (3.12)$$

และเมื่อ $j \neq 1$ จะได้

$$h_j = h_{j-1} + a_{j-1} - a_j \quad (3.13)$$

$$g_j = g_{j-1} - a_{j-1} + a_j \quad (3.14)$$

$$i_j = (a_j / 2) \tan [(180 - \alpha) / 2] \quad (3.15)$$

3.7.1.2 จำนวนน้ำหนักของแกนเหล็ก

น้ำหนักของแกนเหล็กทั้งหมดประกอบด้วย น้ำหนักของ Outer Limb, น้ำหนักของ Center Limb และน้ำหนักของ Yoke โดยสามารถคำนวณได้จากสมการ

3.7.1.2.1 น้ำหนักแกนเหล็ก Outer Limb

$$W_{OL} = b_s D_s a_j PCS_{OL} (c_j + a_j) \quad (3.16)$$

โดยที่

b_s คือ ความหนาของแผ่นเหล็ก(มม.)

W_{OL} คือ น้ำหนักของ Outer Limb ที่ชั้นใด ๆ

D_s คือ ความหนาแน่นของแผ่นแกนเหล็กมีค่า 7.65 kg/dm^3

PCS_{OL} คือ จำนวนแผ่นเหล็กของ Outer Limb ที่ชั้นใด ๆ

3.7.1.2.2 น้ำหนักแกนเหล็ก Center Limb

$$W_{CL} = b_s D_s PCS_{CL} a_j (f_j - e_j) \quad (3.17)$$

โดยที่

W_{CL} คือ น้ำหนักของ Center Limb ที่ชั้นใด ๆ

PCS_{CL} คือ จำนวนแผ่นเหล็กของ Center Limb ที่ชั้นใด ๆ

3.7.1.2.3 น้ำหนักโยค (Yoke)

$$W_Y = b_s D_s P C S_Y [a_j \times (2h_j + 2a_j) - (1/2) i_j a_j] \quad (3.18)$$

โดยที่

W_Y คือ น้ำหนักของ Yoke ที่ขึ้นใดๆ

$P C S_Y$ คือ จำนวนแผ่นเหล็กของ Yoke ที่ขึ้นใดๆ

ดังนั้นน้ำหนักรวมทั้งหมดของแกนเหล็ก สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$W_T = \sum (W_{OL} + W_{CL} + W_Y) \quad (3.19)$$

โดยที่

W_T คือ น้ำหนักรวมทั้งหมดของแกนเหล็ก

3.7.2 การออกแบบขดลวด

3.7.2.1 ขดลวดแรงต่ำ

ในการออกแบบขดลวดแรงต่ำจะเลือกแบบที่ใช้พันขดลวดชนิดสไปรัล (spiral) โดยใช้ลวดทองแดงแบนสี่เหลี่ยมมุมกระดาชจนวน สมการที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบขดลวดแรงต่ำมีดังนี้

1. คำนวณหาจำนวนรอบแรงต่ำ สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$N_s = V_s / (4.44 f A B_m) \quad (3.20)$$

โดยที่

V_s คือ แรงดันของขดลวดแรงต่ำต่อเฟส

2. ความหนาแน่นของกระแสหาได้จากสมการ

$$J = I_s / a_s \quad (3.21)$$

โดยที่

I_s คือ กระแสของขดลวดแรงต่ำต่อเฟส (แอมแปร์)

a_s คือ พื้นที่หน้าตัดลวดตัวนำด้านแรงต่ำ (แอมแปร์ต่อตร.มม.)

กำหนดให้

H_{ia} คือ ความสูงของขดลวดแรงต่ำตามแนวแกน (axial) (มม.)

W_{ir} คือ ความกว้างของขดลวดแรงต่ำตามแนวรัศมี (radial) (มม.)

W_{ic} คือ ความกว้างของลวดตัวนำชนิดแบน (มม.)

T_{ic} คือ ความหนาของลวดตัวนำชนิดแบน (มม.)

N_{SL} คือ จำนวนรอบของขดลวดที่พันในแต่ละชั้น

W_{in} คือ ความกว้างของฉนวนหุ้ม-ท้ายของขดลวดที่พัน(มม.)

L_a คือ จำนวนชั้นของขดลวดที่พัน

T_{in} คือ ความหนาของกระดาษฉนวนระหว่างชั้นของขดลวด(มม.)

N_{LA} คือ จำนวนตัวนำที่จัดวางตามแนวแกน

N_{LR} คือ จำนวนตัวนำที่จัดวางตามแนวรัศมี

3. ความสูงของขดลวดแรงต่ำตามแนวแกน(axial) หาได้จากสมการ

$$H_{ia} = w_{ic} \times N_{LA} \times (N_{SL} + 1) + 2w_{in} \quad (3.22)$$

4. ความกว้างของขดลวดแรงต่ำตามแนวรัศมี(radial) หาได้จากสมการ

$$W_{ir} = (T_{ic} \times N_{LR} \times L_a) + T_{in} \quad (3.23)$$

5. ความต้านทานต่อเฟสของขดลวดแรงต่ำหาได้จากสมการ

$$R = \rho L N_s / a_s \quad (3.24)$$

โดยที่

ρ คือ ความต้านทานจำเพาะของตัวนำ(Specific Resistive of Conductor) ($\Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$)

L คือ ความยาวรอบเฉลี่ยของขดลวด

3.7.2.2 ขดลวดแรงสูง

ในการออกแบบขดลวดแรงสูงจะเลือกแบบที่ใช้พันขดลวดชนิดสกรอสโอเวอร์(Cross over) โดยใช้ลวดทองแดงชนิดกลมอาบฉนวน สมการที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบขดลวดแรงสูงมีดังนี้

1. กำหนดหาจำนวนรอบของขดลวดแรงสูง สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$N_p = (V_p / V_s) \times N_s \quad (3.25)$$

โดยที่

V_p คือ แรงดันของขดลวดแรงสูงต่อเฟส

2. ความหนาแน่นของกระแส สามารถหาได้จากสมการ

$$J = I_p / a_p \quad (3.26)$$

โดยที่

I_p คือ กระแสของขดลวดแรงสูงต่อเฟส(แอมแปร์)

a_p คือ พื้นที่หน้าตัดลวดตัวนำด้านแรงสูง(แอมแปร์ต่อตร.มม.)

กำหนดให้

H_{ha} คือ ความสูงตามแนวแกนของขดลวดแรงสูง(มม.)

b_{hl} คือ ระยะห่างระหว่างขดลวดแรงสูงกับโยค(Yoke)(มม.)

W_{hr} คือ ความกว้างตามแนวรัศมีของขดลวดแรงสูง(มม.)

H_{hs} คือ ความสูงตามแนวแกนของขดลวดแรงสูงในแต่ละ section(มม.)

N_{hs} คือ จำนวน section ของขดลวดแรงสูง

b_{h2} คือ ระยะห่างระหว่างขดลวดในแต่ละ section(มม.)

N_{ps} คือ จำนวนรอบของขดลวดในแต่ละ section

N_{pl} คือ จำนวนรอบของขดลวดในแต่ละชั้น

N_{ls} คือ จำนวนชั้นของขดลวดในแต่ละ section

d_c คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของลวดตัวนำชนิดกลม(มม.)

T_{in} คือ ความหนาของกระดาษฉนวนระหว่างชั้นของขดลวดที่พัน(มม.)

3. ความสูงตามแนวแกนของขดลวดแรงสูง สามารถหาได้จากสมการ

$$H_{ha} = H_{la} - 2b_{h1} \quad (3.27)$$

4. ความสูงตามแนวแกนของขดลวดแรงสูงในแต่ละ section สามารถหาได้จากสมการ

$$H_{as} = [H_{ha} - (N_{hs} - 1) \times b_{h2}] / N_{hs} \quad (3.28)$$

5. จำนวนรอบของขดลวดในแต่ละ section สามารถหาได้จากสมการ

$$N_{ps} = N_p / N_{hs} \quad (3.29)$$

6. จำนวนรอบของขดลวดในแต่ละชั้น สามารถหาได้จากสมการ

$$N_{pl} = H_{as} / d_c \quad (3.30)$$

7. จำนวนชั้นของขดลวดในแต่ละ section สามารถหาได้จากสมการ

$$N_{ls} = N_{ps} / N_{pl} \quad (3.31)$$

8. ความกว้างตามแนวรัศมีของขดลวดแรงสูง สามารถหาได้จากสมการ

$$W_{hr} = d_c \times N_{ls} + (N_{ls} - 1) \times T_{in} \quad (3.32)$$

3.7.2.3 น้ำหนักของขดลวด

น้ำหนักของขดลวดจะขึ้นอยู่กับค่าความถ่วงจำเพาะ(Specific Gravity) ของวัสดุตัวนำ จำนวนรอบของขดลวด และพื้นที่หน้าตัดของขดลวด โดยสามารถคำนวณได้ตามสมการ[8]

$$M_w = D_w a_w L N \quad (3.33)$$

โดยที่

M_w คือ น้ำหนักของตัวนำ (กก.)

D_w คือ ความหนาแน่นของตัวนำทองแดงมีค่าเท่ากับ 8.9×10^3 กก./ม.³

a_w คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ(ตร.มม.)

L คือ ความยาวรอบเฉลี่ยของขดลวด

3.7.3 การออกแบบฉนวน

ในการออกแบบฉนวนนั้นเป็นการออกแบบเพื่อหาความหนาฉนวนของขดลวดกับส่วนต่างๆ ฉนวนของขดลวดสามารถแบ่งได้ดังนี้

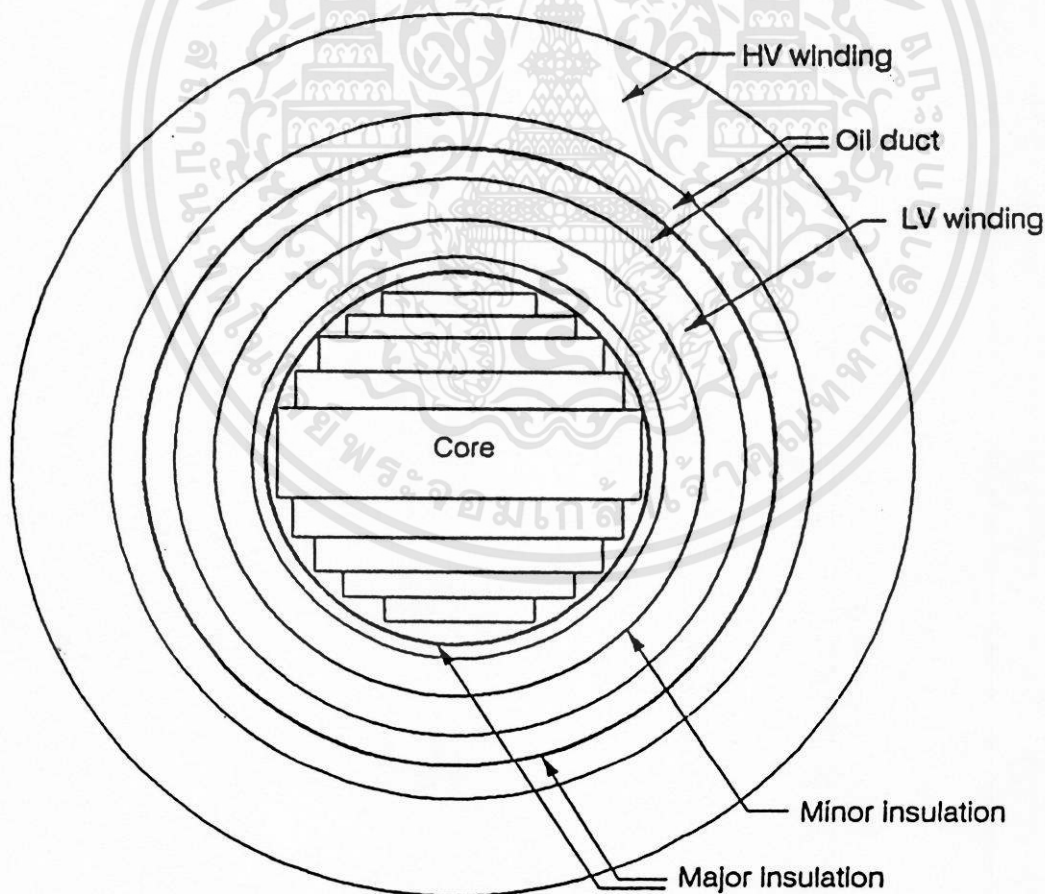
1. ฉนวนหลัก (Major Insulation)

ฉนวนหลักประกอบด้วยฉนวนระหว่างขดลวดแรงต่ำกับขาแกนเหล็ก ฉนวนระหว่างขดลวดแรงสูงกับขดลวดแรงต่ำ

2. ฉนวนรอง (Minor Insulation)

ประกอบด้วยฉนวนระหว่างรอบและระหว่างชั้นของขดลวด ซึ่งรายละเอียดของการจัดวางฉนวนขึ้นอยู่กับชนิดของขดลวด และวิธีการของวิศวกรผู้ออกแบบ

ในการออกแบบฉนวนของขดลวดแรงต่ำกับขาของแกนเหล็ก หรือฉนวนระหว่างชั้นของขดลวดแรงต่ำ จะพิจารณาเฉพาะความแข็งแรงทางกลเท่านั้น แต่ระยะความหนาของฉนวนอื่น ๆ การพิจารณาจะขึ้นอยู่กับแรงดันสูงที่กำหนด และการออกแบบของวิศวกรผู้ผลิต



ภาพที่ 3.12 แสดงการจัดวางขดลวดของหม้อแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7.4 การคำนวณหาคุณสมบัติของหม้อแปลง

3.7.4.1 กำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะไม่มีโหลด

กำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะไม่มีโหลดหรือเรียกว่า กำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก (Core Loss) จะประกอบด้วย การสูญเสียดังต่อไปนี้

- การสูญเสียเนื่องจากฮิสเตอร์รีซิส (Hysteresis) ในแกนเหล็ก
- การสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนในแกนเหล็ก
- การสูญเสียในขดลวดเนื่องจากกระแสกระตุ้น
- การสูญเสียปลิก้อย เนื่องจากกระแสไหลวนในอุปกรณ์ที่ใช้จับยึดแกนเหล็ก
- การสูญเสียเนื่องจากไดอิเล็กตริก

โดยทั่วไปกระแสกระตุ้นของหม้อแปลงจำหน่ายมีค่าประมาณ 1-5% ของกระแสโหลดที่พิกัด ดังนั้นการสูญเสียในขดลวดเนื่องจากกระแสกระตุ้นสามารถที่จะไม่นำมาพิจารณาได้ อีกทั้งแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหม้อแปลงจำหน่ายมีระดับต่ำกว่า 50 kV จึงทำให้การสูญเสียเนื่องจากไดอิเล็กตริกไม่ต้องนำมาพิจารณาเช่นเดียวกัน ดังนั้นกำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะไม่มีโหลดจะประกอบด้วยส่วนสำคัญคือการสูญเสียเนื่องจากฮิสเตอร์รีซิสและกระแสไหลวนในแกนเหล็ก

3.7.4.1.1 การสูญเสียเนื่องจากฮิสเตอร์รีซิสในแกนเหล็ก

เป็นกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียไปในการกลับทิศทางของแม่เหล็ก การลดการสูญเสียเนื่องจากฮิสเตอร์รีซิส สามารถทำได้โดยการใช่แกนเหล็กที่มีส่วนผสมของซิลิคอน (Silicon) การสูญเสียนี้ขึ้นอยู่กับคุณภาพหรือเกรดของแกนเหล็ก และความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่เลือกใช้ และเป็นสัดส่วนกับความถี่ของแรงดันไฟฟ้า สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$W_h = K_1 f B^n \quad (3.34)$$

โดยที่

K_1 คือ ค่าคงที่

n มีค่าเท่ากับ 1.6 - 2.5

3.7.4.1.2 การสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนในแกนเหล็ก

แกนเหล็กเป็นตัวนำไฟฟ้า และในทำนองเดียวกันก็เป็นตัวนำเส้นแรงแม่เหล็กด้วย การเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในแกนเหล็ก จากการเกิดการเปลี่ยนแปลงเส้นแรงแม่เหล็ก เป็นเหตุให้เกิดการไหลของกระแสในแกนเหล็กกระแสนี้เรียกว่า กระแสไหลวน ซึ่งจะทำให้เกิดการสูญเสียกำลังไฟฟ้า และเกิดความร้อนขึ้นคิดตามมา การลดการสูญเสียจากกระแสไหลวนสามารถทำได้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยการใช้แกนเหล็กประกอบจากเหล็กแผ่นบางๆ และแผ่นเหล็กแต่ละแผ่นจะต้องเคลือบด้วยฉนวน กำลังไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนจะเป็นสัดส่วนกับกำลังสองของความหนาของแผ่นเหล็กแต่ละแผ่น และกำลังสองของความถี่แรงดันไฟฟ้า ซึ่งเป็นไปตามสมการ

$$W_e = K_2 f^2 B^2 b_s^2 \quad (3.35)$$

โดยที่

K_2 คือ ค่าคงที่

b_s คือ ความหนาแน่นของแผ่นเหล็ก

ดังนั้นกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในหม้อแปลงขณะไม่มีโหลด สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\begin{aligned} W_e &= W_h + W_e \\ &= K_1 f B^n + K_2 f^2 B^2 b_s^2 \end{aligned} \quad (3.36)$$

3.7.4.1.3 การคำนวณกำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะไม่มีโหลดในทางปฏิบัติ

ในทางปฏิบัติการออกแบบหม้อแปลงจำหน่าย สามารถกำหนดหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสีย ขณะไม่มีโหลดได้ จากน้ำหนักรวมของแกนเหล็ก และข้อมูลกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กต่อน้ำหนัก โดยนำมาจากเส้นโค้งแสดงคุณลักษณะกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก (Core Loss Curve) ของผู้ผลิตแกนเหล็ก ดังนั้น จากพารามิเตอร์ดังกล่าว สามารถคำนวณกำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะไม่มีโหลดได้ตามสมการ[3]

$$W_e = K_3 W_t W_m \quad (3.37)$$

โดยที่

K_3 คือ แฟกเตอร์ที่ทำให้การสูญเสียขณะไม่มีโหลดเพิ่มขึ้น

W_t คือ น้ำหนักรวมของแกนเหล็ก

W_m คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กต่อน้ำหนักของแกนเหล็ก 1 กก.

แฟกเตอร์ K_3 หาได้จากการปฏิบัติและทดลอง ซึ่งเป็นกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากสาเหตุต่อไปนี้

- พื้นที่หน้าตัดของขาแกนเหล็กและ โยต์ มีการกระจายของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กไม่เท่ากัน
- แรงกลที่มีผลทำให้แผ่นเหล็กเกิดการบอบซ้ำ
- ผลจากรอยต่อ (Joints) ในเส้นทางของเส้นแรงแม่เหล็ก
- ทักษะ (Skill) และความสามารถของแรงงานในการจัดเรียงแผ่นเหล็ก

สำหรับความถูกต้องแม่นยำของการคำนวณนั้น นอกจากจะคำนวณน้ำหนักรวมของแกนเหล็กได้ถูกต้อง และกำหนดแฟกเตอร์กำลังไฟฟ้าสูญเสียเพิ่ม (K_3) ได้อย่างเหมาะสมแล้ว การใช้ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักก็มีความสำคัญเช่นกัน

เส้นโค้งแสดงลักษณะกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก เป็นเส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก และกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนัก ซึ่งวิศวกรผู้ออกแบบมักจะกำหนดค่าประมาณคงที่ค่าหนึ่ง ไม่ว่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กจะเปลี่ยนแปลงอย่างไรก็ตาม ดังนั้น จะมีผลทำให้ผลการทดลองกำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะไม่มีโหลดกับผลของการคำนวณจากการออกแบบไม่ตรงกัน และอาจผิดพลาดมากกว่าความคลาดเคลื่อน (Tolerance) ที่กำหนดไว้ในมาตรฐานที่ใช้อย่างยิ่ง

3.7.4.2 กำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะมีโหลด

กำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะมีโหลดในหม้อแปลงอาจเรียกว่า การสูญเสียในขดลวดทองแดง (Copper Losses) ซึ่งเกิดขึ้นจากกระแสที่ไหลในขดลวดของหม้อแปลงขณะจ่ายโหลด ซึ่งจะประกอบด้วย การสูญเสียจากส่วนต่าง ๆ ดังนี้

- การสูญเสียในขดลวดเนื่องจากกระแสขณะจ่ายโหลด
- การสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนในขดลวดเนื่องจากเส้นแม่เหล็กรั่วไหล (Leakage Flux)

และการสูญเสียปลิกย่อย (Stray Losses) ในขดลวดแกนเหล็กและอุปกรณ์ที่จับยึดโครงสร้างของหม้อแปลง

ในการคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียของขดลวดทองแดงสามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$P_C = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 \quad (3.38)$$

โดยที่

P_C คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียของขดลวดทองแดง

I_1 และ R_1 คือ กระแสและความต้านทานของขดลวดแรงสูง

I_2 และ R_2 คือ กระแสและความต้านทานของขดลวดแรงต่ำ

ค่าความต้านทานของขดลวด สามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$R = \rho \frac{LN}{a_w} \quad (3.39)$$

โดยที่

ρ = ความต้านจำเพาะ (Specific Resistance) ของตัวนำ

L = ความยาวรอบเฉลี่ยของขดลวด

N = จำนวนรอบของขดลวด

a_w = พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ

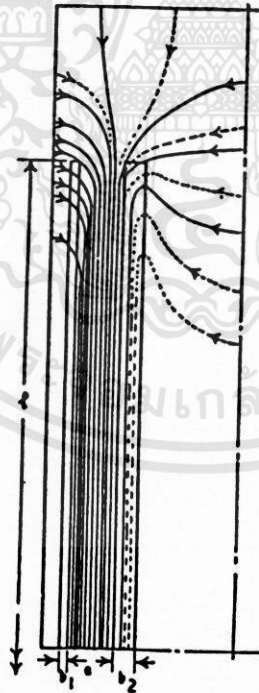
สำหรับการสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนในขดลวด และการสูญเสียปลิกซ์ย่อย สามารถหาได้จาก การปฏิบัติและทดลอง โดยกำหนดเป็นแฟคเตอร์ของการสูญเสีย I^2R ในขดลวด (K_4) มีค่าประมาณ 8% ของการสูญเสีย I^2R ในขดลวด ดังนั้น กำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะมีโหลดสามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$P_L = P_C + K_4 P_C \quad (3.40)$$

ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะมีโหลดของหม้อแปลงจำหน่ายตามข้อกำหนดจะอ้างอิงที่อุณหภูมิเท่ากับ 75°C

3.7.4.3 รีแอกแตนซ์รั่ว (Leakage Reactance)

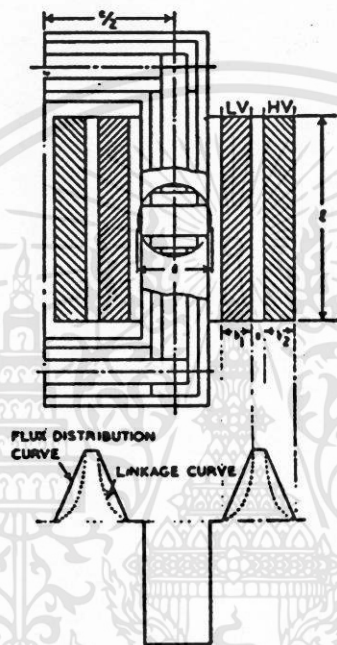
การประมาณค่ารีแอกแตนซ์รั่วคือ การประมาณการกระจายของเส้นแรงแม่เหล็กรั่ว (Leakage Flux) และผลของเส้นแรงแม่เหล็กที่มีต่อขดลวดแรงสูงและแรงต่ำ รูปที่ 3.12 แสดงการกระจายของเส้นแรงแม่เหล็กรั่ว



ภาพที่ 3.13 แสดงไดอะแกรมการกระจายของเส้นแรงแม่เหล็กรั่ว

สนามแม่เหล็กรั่วประกอบด้วยสนามแม่เหล็ก 2 ส่วนดังนี้

1. สนามแม่เหล็กในร่อนน้ำมัน (Oil Duct) ระหว่างขดลวดแรงสูงและแรงต่ำ มีค่าคงที่ และมีความเข้มสม่ำเสมอโดยมีเส้นแรงแม่เหล็กไปตามแนวตั้ง (Longitudinal Flux)
2. สนามแม่เหล็กที่มีเส้นแรงแม่เหล็กคล้องขดลวด (Flux Linking) โดยมีความเข้มลดลงเป็นเชิงเส้น (Linearly) จากค่าสูงสุดจนกระทั่งเป็นศูนย์ที่พื้นผิวภายนอกและภายในของขดลวดแรงสูงและขดลวดแรงต่ำ ดังรูปที่ 3.14



ภาพที่ 3.14 โคอีแกนรณเส้นแรงแม่เหล็กรั่วของหม้อแปลงชนิดคอร์

เมื่อพิจารณาจากภาพ เปรอร์เซ็นตรีแอกแคนเซนรั่วระหว่างขดลวดแรงสูงและแรงต่ำ สามารถคำนวณได้ดังสมการ[8],[11]

$$X = \{ 2\pi f \mu_0 l_m AT / (l E_t) \} \times [a + (b_1 + b_2) / 3] \times 100 \tag{3.41}$$

โดยที่

- μ_0 คือ ความซาบซึมได้สัมบูรณ์ (Absolute permeability) มีค่าเท่ากับ $4\pi \times 10^{-7}$ H/m
- l_m คือ ความยาวรอบเฉลี่ยของขดลวดแรงสูงและแรงต่ำ(เมตร)
- AT คือ แอมแปร์ - รอบ (Ampere-turns) ของขดลวดแรงสูงหรือแรงต่ำ
- l คือ ความยาวตามแนวแกนขดลวด(เมตร)
- E_t คือ แรงดันคอรอบ
- a คือ ระยะห่างระหว่างขดลวดแรงสูงและแรงต่ำ(เมตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

b_1 คือ ความกว้างตามแนวรัศมีของขดลวดแรงต่ำ(เมตร)

b_2 คือ ความกว้างตามแนวรัศมีของขดลวดแรงสูง(เมตร)

3.7.4.4 อิมพีแดนซ์ลัดวงจร (Short Circuit Impedance)

อิมพีแดนซ์ลัดวงจรของหม้อแปลงคือ ผลรวมทางเวกเตอร์ของเปอร์เซ็นต์ความต้านทาน (Percentage resistive drop) และเปอร์เซ็นต์รีแอกแตนซ์(Percentage reactive drop)ในขดลวดหม้อแปลง สามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$\% Z = \sqrt{(\%R^2 + \%X^2)} \quad (3.42)$$

โดยที่

$\%R$ คือ Percentage resistive

$\%X$ คือ Percentage reactive

3.7.4.5 โวลต์เตจเรกูเลชัน (Voltage Regulation)

ค่าโวลต์เตจเรกูเลชันของหม้อแปลงจะกำหนดโดยอัตราส่วนของขนาดแรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตขณะไม่มีโหลดและขณะจ่ายโหลดที่พิกัดที่ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ใดๆ สามารถคำนวณได้ดังสมการ[3]

$$\% \text{ Regulation} = (R\cos\theta + X\sin\theta) + \{(X\cos\theta - R\sin\theta)^2 / 200\} \quad (3.43)$$

โดยที่

R คือ Percentage resistive drop

X คือ Percentage reactive drop

$\cos\theta$ คือ Lagging power factor

3.7.4.6 ประสิทธิภาพของหม้อแปลง

สามารถหาได้ดังสมการ

$$\% \text{ Efficiency} = \frac{\text{Output}}{\text{Input}} \times 100 \quad (3.44)$$

$$= \frac{\text{Input} - \text{Losses}}{\text{Input}} \times 100 \quad (3.45)$$

$$= \left(1 - \frac{\text{Losses}}{\text{Input}}\right) \times 100 \quad (3.46)$$

3.7.4.7 กระแสลัดวงจร(สมมาตร)ของหม้อแปลง
สามารถหาได้ดังสมการ

$$I_{sc}(\text{sym}) = \frac{I_{LV}(\text{rated})}{\%Z} \quad (3.47)$$

3.7.5 การออกแบบตัวถังและครีบบระบายความร้อนของหม้อแปลง

3.7.5.1 การออกแบบตัวถังหม้อแปลง

ตัวถังของหม้อแปลง จะสร้างจากเหล็กที่มีความหนาประมาณ 3 - 6 มม. ขึ้นอยู่กับพิกัดกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลง ขนาดของถังหม้อแปลงจะถูกกำหนดโดยขนาดของแกนเหล็กและขดลวดของหม้อแปลงและระยะห่างระหว่างขดลวดกับส่วนที่ค่อลงดินของหม้อแปลง ขนาดของถังหม้อแปลงสามารถหาได้ดังนี้สมการ

1. ความกว้างของถังหม้อแปลง(T_w) สามารถหาได้ดังสมการ

$$T_w = \phi_{HV} + 2\Delta_w + \Delta_c \quad (3.48)$$

โดยที่

ϕ_{HV} คือ เส้นผ่าศูนย์กลางด้านนอกของขดลวดแรงดันสูง(มม.)

Δ_w คือ ระยะที่เผื่อไว้สำหรับสายตัวนำระหว่างแท็บและระหว่างขดลวดแรงดันต่ำกับบุชชิ่งแรงต่ำ(มม.)

Δ_c คือ ระยะห่างระหว่างขดลวดแรงสูงกับตัวถังหม้อแปลง(มม.)

2. ความยาวของถังหม้อแปลง(T_L) สามารถหาได้ดังสมการ

$$T_L = 2h_j + 2a_j + \phi_{HV} + 2\Delta_c \quad (3.49)$$

3. ความสูงของถังหม้อแปลง(T_H) สามารถหาได้ดังสมการ

$$T_H = b_j + \Delta_H \quad (3.50)$$

โดยที่

Δ_H คือ ระยะเวลาสูงของชุดประกอบหม้อแปลงกับฝาถังหม้อแปลง(มม.)

3.7.5.2 การออกแบบครีบริบายความร้อน

เมื่อพื้นที่ผิวของถังเรียบไม่สามารถระบายความร้อนของหม้อแปลงให้มีอุณหภูมิเป็นไปตามข้อกำหนดได้ ดังนั้นผู้ออกแบบจึงต้องทำการติดตั้งครีบริบายความร้อน เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการระบายความร้อน การหาพื้นที่ผิวของการระบายความร้อนสามารถหาได้ดังนี้

1. พื้นที่ผิวการระบายความร้อนของตัวถังผิวเรียบ(A_T) สามารถหาได้ดังสมการ

$$A_T = 2T_H(T_L + T_w) \quad (3.51)$$

2. พื้นที่ผิวการระบายความร้อนทั้งหมดสามารถหาได้ดังสมการที่ 3.5
3. พื้นที่ผิวของครีบริบายความร้อน(A_F) ที่ต้องการติดตั้งเพิ่ม สามารถหาได้ดังสมการ

$$A_F = A_R - A_T \quad (3.52)$$

ชนิดของครีบริบายความร้อนนั้นสามารถแบ่งได้ 2 ลักษณะคือ ครีบริบายความร้อนชนิดแผ่น(Radiator Fin) และครีบริบายความร้อนชนิดลอนลูกฟูก(Corrugated Fin) การหาขนาดความกว้างและความสูงของครีบริบายในแต่ละชนิดนั้นผู้ออกแบบจะต้องทำการพิจารณาเลือกขนาดของครีบริบายให้เหมาะสมกับขนาดของตัวถังหม้อแปลงและให้มีความสัมพันธ์กับขนาดการผลิตของโรงงานผู้ผลิต ดังนั้นจำนวนแผ่นครีบริบายความร้อนชนิดแผ่นสามารถหาได้ดังสมการ

$$F_{NR} = A_F / (F_{WR} \times F_{HR}) \quad (3.53)$$

โดยที่

F_{NR} คือ จำนวนแผ่นครีบริบายความร้อนชนิดแผ่น

F_{WR} คือ ความกว้างของครีบริบายความร้อนชนิดแผ่น(มม.)

F_{HR} คือ ความสูงของครีบริบายความร้อนชนิดแผ่น(มม.)

ในส่วนของจำนวนลอนครีบริบายความร้อนชนิดลอนลูกฟูก สามารถหาได้ดังนี้

1. ด้านความยาวของตัวถังจำนวนลอนครีบริบายความร้อนชนิดลอนลูกฟูกสามารถหาได้ดังสมการ

$$F_{NCL} = (T_L - 2\Delta_L) / \Delta_D \quad (3.54)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

F_{NCL} คือ จำนวนลอนครีประบายความร้อนด้านความยาวของตัวถัง

Δ_L คือ ระยะปลายที่เหลือของครีประบายความร้อนชนิดลอนลูกฟูก(มม.)

Δ_D คือ ระยะห่างระหว่างลอนครี(มม.)

2. ด้านความกว้างของตัวถังจำนวนลอนครีประบายความร้อนชนิดลอนลูกฟูกสามารถหาได้ดังสมการ

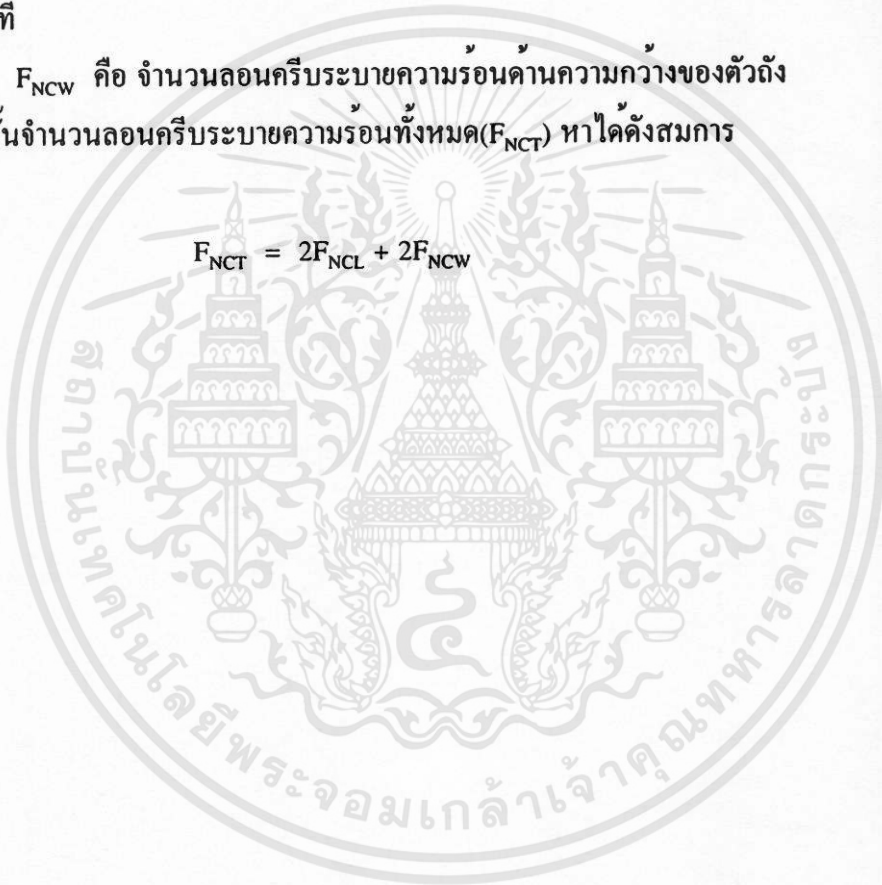
$$F_{NCW} = (T_w - 2\Delta_L) / \Delta_D \quad (3.55)$$

โดยที่

F_{NCW} คือ จำนวนลอนครีประบายความร้อนด้านความกว้างของตัวถัง

ดังนั้นจำนวนลอนครีประบายความร้อนทั้งหมด(F_{NCT}) หาได้ดังสมการ

$$F_{NCT} = 2F_{NCL} + 2F_{NCW} \quad (3.56)$$



บทที่ 4

การพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับวิเคราะห์ออกแบบหม้อแปลง จำหน่ายแบบจุ่มในน้ำมัน

วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการสร้างซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ขึ้นเพื่อเป็นเครื่องมือช่วยในการวิเคราะห์ ออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายแบบจุ่มในน้ำมัน โดยใช้โปรแกรมเคลไพล์ของบริษัท Borland เป็น เครื่องมือช่วยในการสร้างและตั้งชื่อซอฟต์แวร์นี้ว่า “ซอฟต์แวร์วิเคราะห์และออกแบบหม้อแปลง จำหน่ายแบบจุ่มในน้ำมัน” (Oil-Immersed Distribution Transformer Analysis and Design Software) โดยเรียกย่อๆ ว่า OIPTS

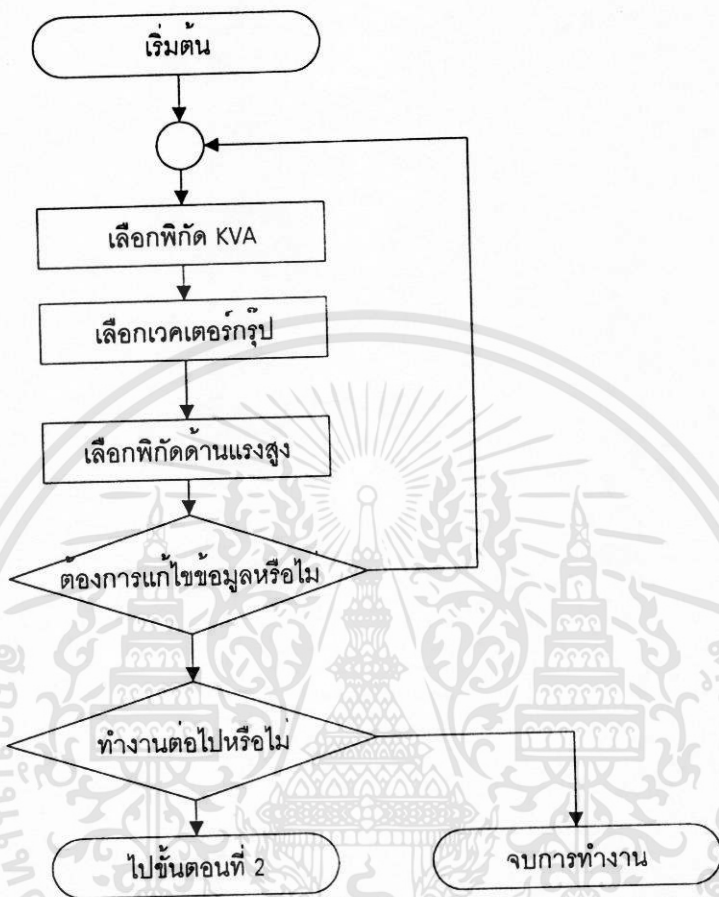
ในการวิเคราะห์ออกแบบสร้าง OIPTS นั้นสามารถแบ่งขั้นตอนการทำงานของซอฟต์แวร์ได้ ดังนี้

- ขั้นตอนที่ 1. การเลือกพิกัดกำลังไฟฟ้า พิกัดแรงดันด้านแรงสูง และเวกเตอร์รูปของหม้อแปลงจำหน่าย
- ขั้นตอนที่ 2. การคำนวณออกแบบพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กของหม้อแปลงจำหน่าย
- ขั้นตอนที่ 3. การคำนวณออกแบบขดลวดด้านแรงดันต่ำของหม้อแปลงจำหน่าย
- ขั้นตอนที่ 4. การคำนวณออกแบบขดลวดด้านแรงดันสูงของหม้อแปลงจำหน่าย
- ขั้นตอนที่ 5. การคำนวณขนาด(Dimension) ของแกนเหล็กในส่วนต่างๆ ของหม้อแปลงจำหน่าย
- ขั้นตอนที่ 6. การคำนวณและกำหนดพารามิเตอร์แกนเหล็กของหม้อแปลงจำหน่าย
- ขั้นตอนที่ 7. การคำนวณคุณสมบัติทางไฟฟ้าของหม้อแปลงจำหน่าย
- ขั้นตอนที่ 8. การคำนวณออกแบบขนาดตัวถังและพื้นที่ผิวการระบายความร้อนของหม้อแปลงจำหน่าย
- ขั้นตอนที่ 9. การคำนวณต้นทุนวัสดุหลักที่ใช้ในการผลิตหม้อแปลงจำหน่าย

4.1 ขั้นตอนที่ 1 การเลือกพิกัดกำลังไฟฟ้า พิกัดแรงดันด้านแรงสูงและเวกเตอร์รูปของหม้อแปลงจำหน่าย

ได้ทำการออกแบบซอฟต์แวร์ฟอร์มที่ 1 เพื่อทำการเลือกและกำหนดพิกัดกำลังไฟฟ้า พิกัดแรงดันด้านแรงสูงและเวกเตอร์รูปของหม้อแปลงจำหน่ายเพื่อใช้เป็นข้อมูลเริ่มต้น(Initial Data) สำหรับการวิเคราะห์ออกแบบ ผลที่ได้แสดงทางจอภาพและเครื่องพิมพ์ โดยสามารถเลือกข้อมูลที่ ต้องการได้จากซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้น พิกัดแรงดันด้านแรงสูงตามมาตรฐานการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

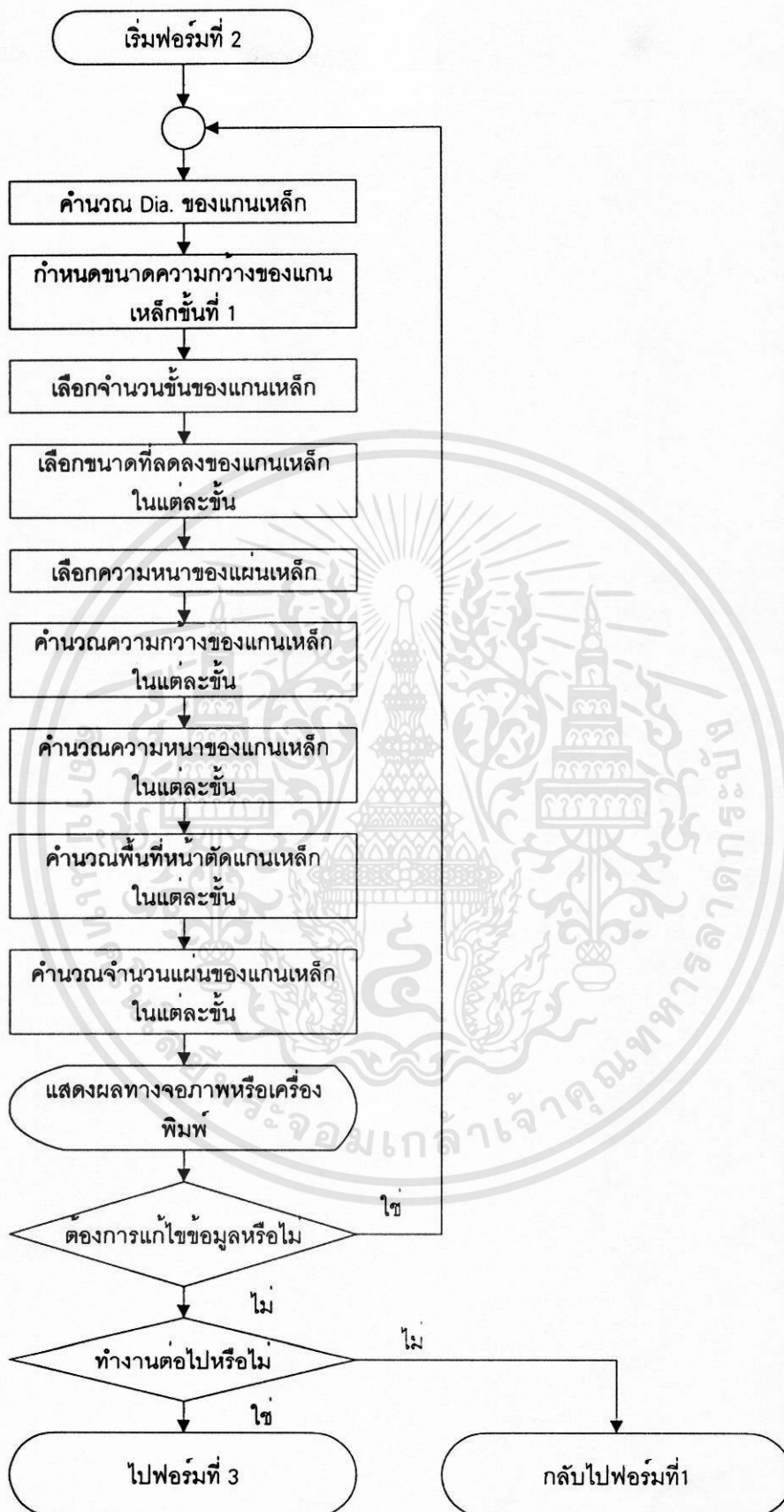
(กฟภ.) มีสองพิกัดคือ 22 kV และ 33 kV และมีเวกเตอร์รูป Dyn 11 พิกัดกำลังไฟฟ้า 50 - 2000 kVA และ Yzn 11 พิกัดกำลังไฟฟ้า 50 - 250 kVA ขั้นตอนการทำงานแสดงได้ดังภาพที่ 4.1



ภาพที่ 4.1 แสดงขั้นตอนการทำงานของซอฟต์แวร์ฟอร์มที่ 1 การเลือกพิกัดกำลัง พิกัดแรงดันด้านแรงสูงและเวกเตอร์รูป

4.2 ขั้นตอนที่ 2 การคำนวณออกแบบพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กของหม้อแปลงจำหน่าย

ได้ทำการออกแบบซอฟต์แวร์ฟอร์มที่ 2 เพื่อทำการคำนวณออกแบบพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กของหม้อแปลงจำหน่าย โดยแสดงผลที่ได้ทางจอภาพและเครื่องพิมพ์ ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณออกแบบจะรับข้อมูลมาจากฟอร์มที่ 1 และสามารถป้อนข้อมูลเข้าโดยตรงทางแป้นพิมพ์และยังสามารถเลือกข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ออกแบบจากซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นได้ ขั้นตอนการทำงานแสดงได้ดังภาพที่ 4.2



ภาพที่ 4.2 แสดงขั้นตอนการทำงานของซอฟต์แวร์ฟอร์มที่ 2 การคำนวณออกแบบพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็ก

4.3 ขั้นตอนที่ 3 การคำนวณออกแบบขดลวดด้านแรงดันต่ำของหม้อแปลงจำหน่าย

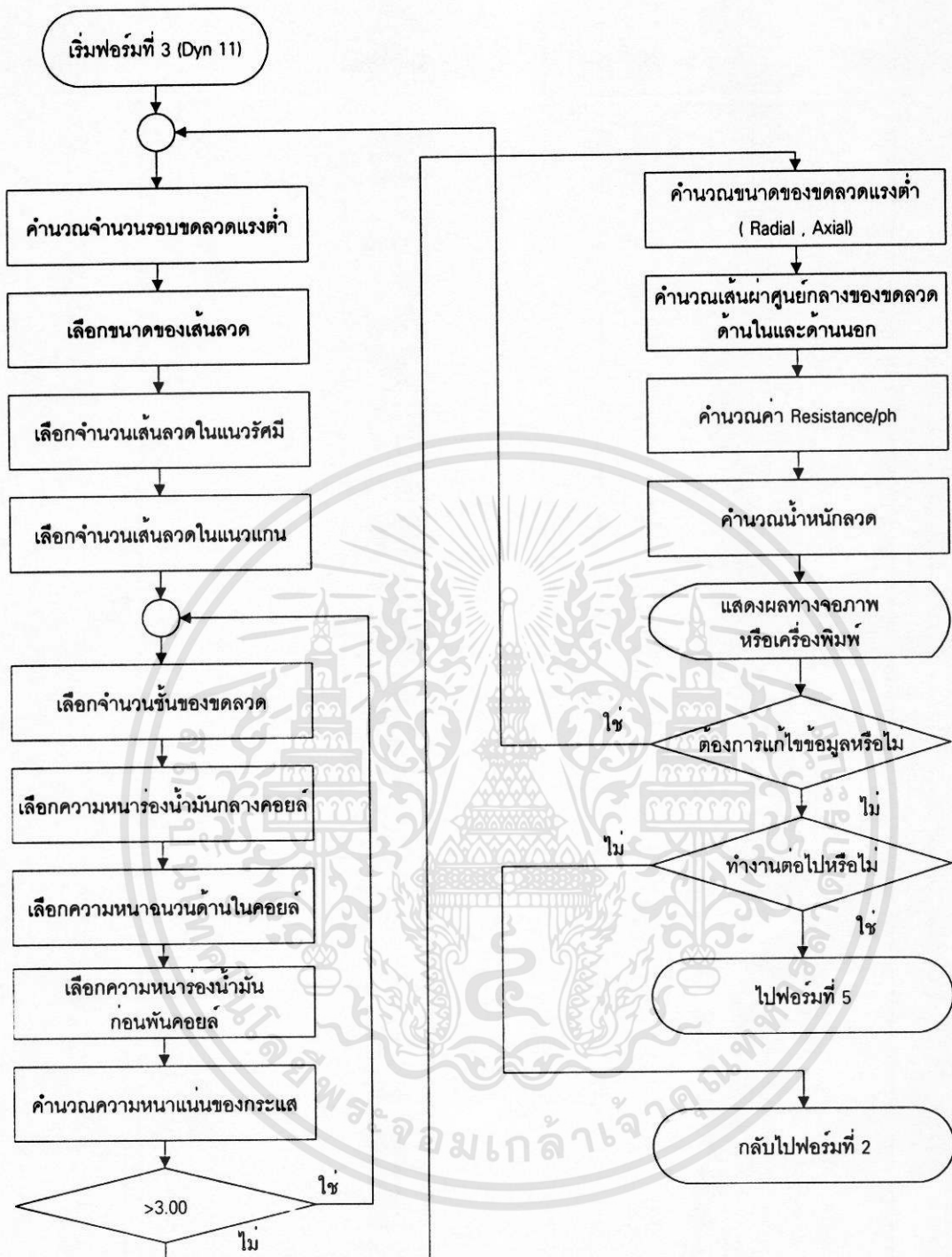
ได้ทำการออกแบบซอฟต์แวร์ฟอร์มที่ 3 เวกเตอร์กรุป Dyn 11 และฟอร์มที่ 4 เวกเตอร์กรุป Yzn 11 เพื่อทำการคำนวณออกแบบขดลวดด้านแรงดันต่ำของหม้อแปลงจำหน่าย โดยแสดงผลที่ได้ทางจอภาพและเครื่องพิมพ์ ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณออกแบบจะรับข้อมูลมาจากฟอร์มที่ 1 และฟอร์มที่ 2 และสามารถป้อนข้อมูลเข้าโดยตรงทางแป้นพิมพ์ และยังสามารถเลือกข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ออกแบบจากซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นได้ การคำนวณออกแบบจะแยกตามเวกเตอร์กรุปที่ถูกเลือกจากฟอร์มที่ 1 ถ้าต้องการแก้ไขข้อมูลจากการออกแบบที่ผ่านมาก็สามารถที่จะย้อนกลับไปทำการแก้ไขข้อมูลจากฟอร์มที่ผ่านมาได้ ขั้นตอนการทำงานแสดงได้ดังภาพที่ 4.3 และ 4.4

4.4 ขั้นตอนที่ 4 การคำนวณออกแบบขดลวดด้านแรงดันสูงของหม้อแปลงจำหน่าย

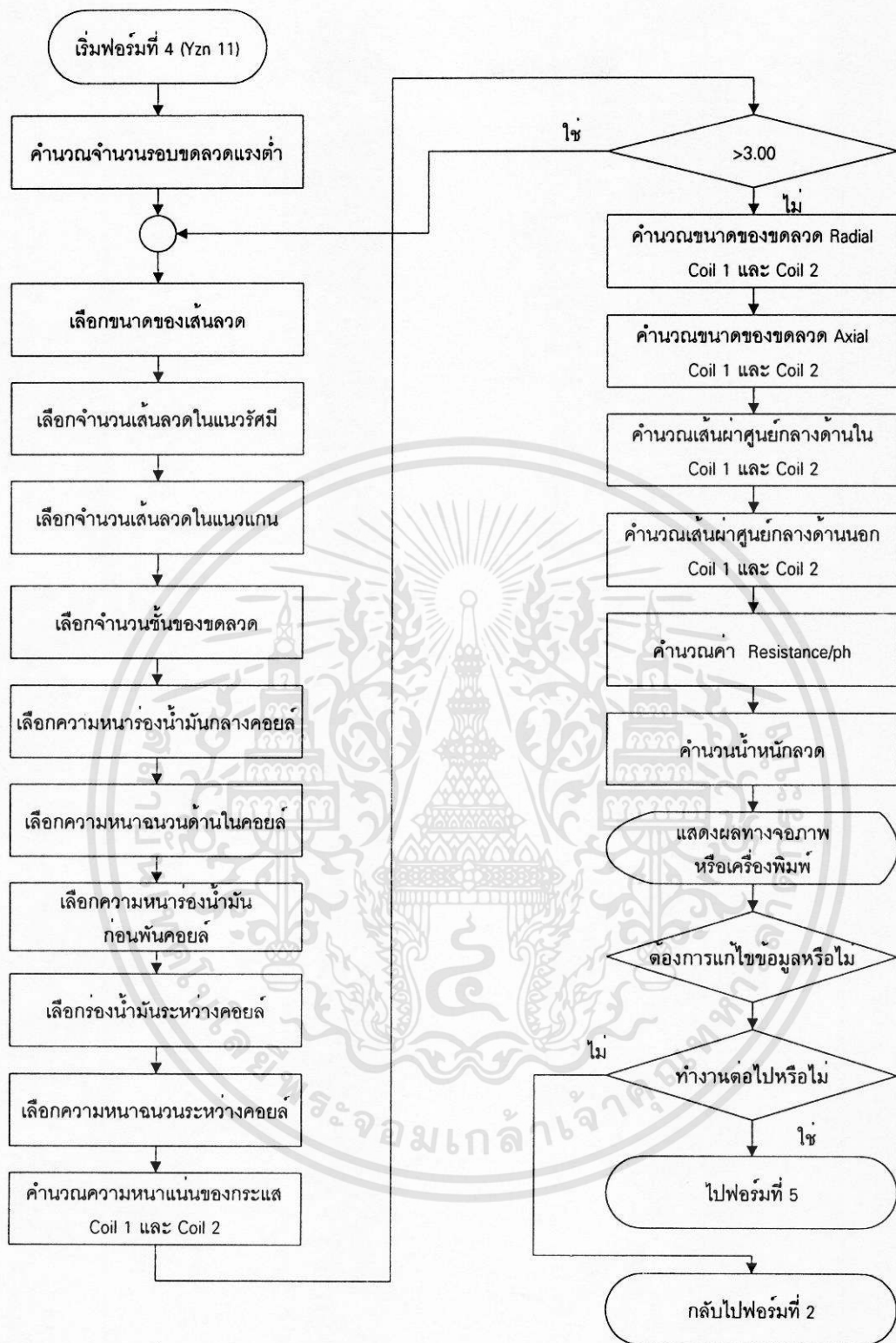
ได้ทำการออกแบบซอฟต์แวร์ฟอร์มที่ 5 เพื่อทำการคำนวณออกแบบขดลวดด้านแรงดันสูงของหม้อแปลงจำหน่าย โดยแสดงผลที่ได้ทางจอภาพและเครื่องพิมพ์ ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณออกแบบจะรับข้อมูลมาจากฟอร์มที่ 1, 2 และฟอร์มที่ 3 หรือฟอร์มที่ 4 ตามเวกเตอร์กรุปที่ถูกเลือก และสามารถป้อนข้อมูลเข้าโดยตรงทางแป้นพิมพ์และยังสามารถเลือกข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ออกแบบจากซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นได้ การคำนวณออกแบบจะเป็นการคำนวณออกแบบขดลวดแรงดันสูงที่มีเวกเตอร์กรุป Dyn 11 และ Yzn 11 โดยเวกเตอร์กรูปรุ่นนี้จะถูกเลือกตั้งแต่ฟอร์มที่ 1 เช่นเดียวกับการคำนวณออกแบบขดลวดแรงต่ำ ถ้าต้องการแก้ไขข้อมูลจากการออกแบบที่ผ่านมาก็สามารถที่จะย้อนกลับไปทำการแก้ไขข้อมูลจากฟอร์มที่ผ่านมาได้ ขั้นตอนการทำงานแสดงได้ดังภาพที่ 4.5

4.5 ขั้นตอนที่ 5 การคำนวณขนาด (Dimension) ของแกนเหล็กในส่วนต่างๆ ของหม้อแปลงจำหน่าย

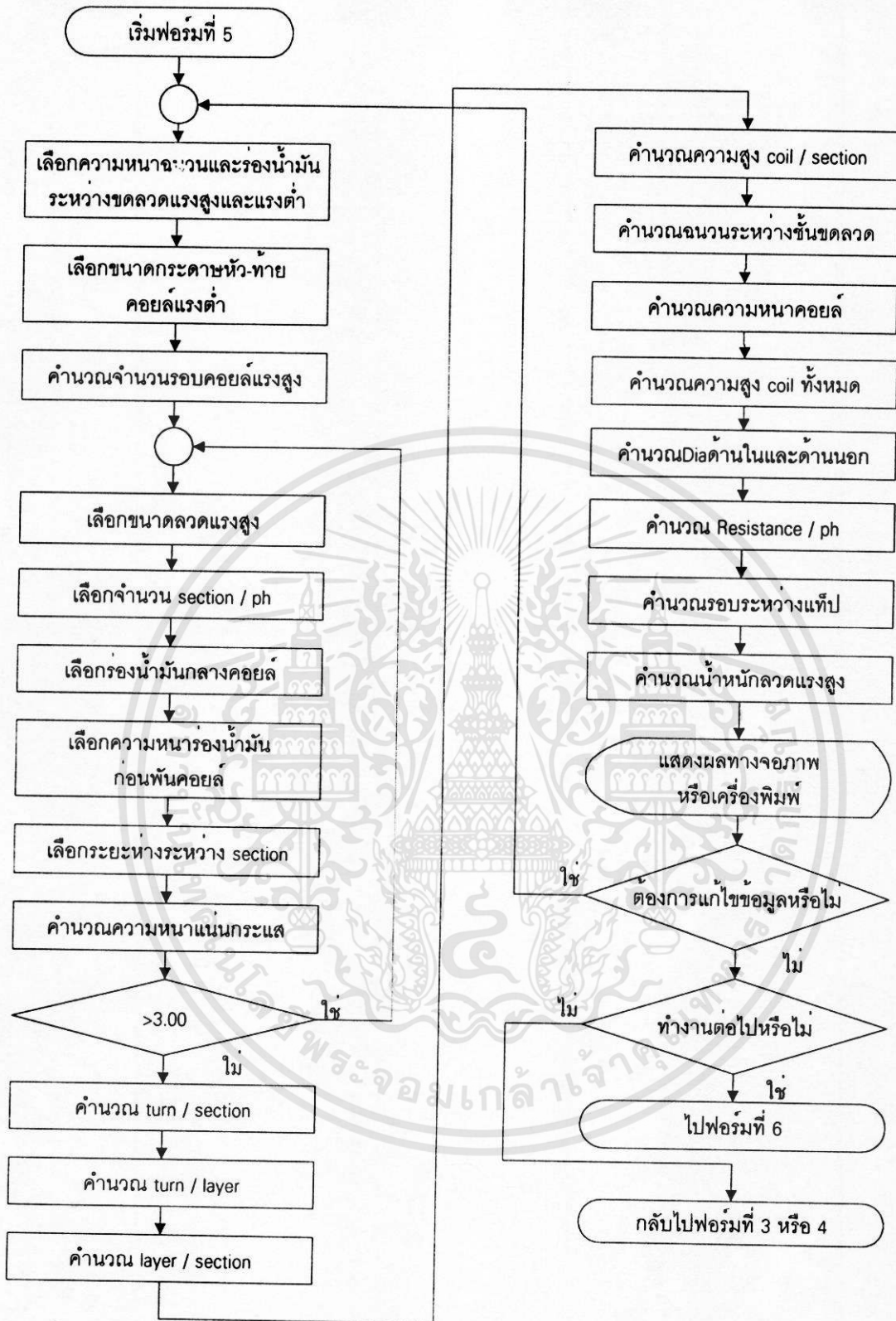
ได้ทำการออกแบบซอฟต์แวร์ฟอร์มที่ 6, 7 และ 8 เพื่อทำการคำนวณขนาดของแกนเหล็กในส่วนต่างๆของหม้อแปลงจำหน่าย โดยแสดงผลที่ได้ทางจอภาพและเครื่องพิมพ์ ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณออกแบบจะรับข้อมูลมาจากฟอร์มที่ 1, 2, 3 หรือ 4 และฟอร์มที่ 5 การคำนวณออกแบบจะแบ่งเป็น 3 ส่วนคือ ส่วนแรกจะเป็นการคำนวณหาขนาดขาของแกนเหล็ก(Outer Limb) ดังฟอร์มที่ 6 ส่วนที่สองจะเป็นการคำนวณหาขนาดขาของแกนเหล็ก(Center Limb) ดังฟอร์มที่ 7 และส่วนสุดท้ายจะเป็นการคำนวณหาขนาดโยคของแกนเหล็ก(Yoke) ดังฟอร์มที่ 8 ถ้าต้องการแก้ไขข้อมูลจากการออกแบบที่ผ่านมาก็สามารถที่จะย้อนกลับไปทำการแก้ไขข้อมูลจากฟอร์มที่ผ่านมาได้ ขั้นตอนการทำงานแสดงได้ดังภาพที่ 4.6, 4.7 และ 4.8



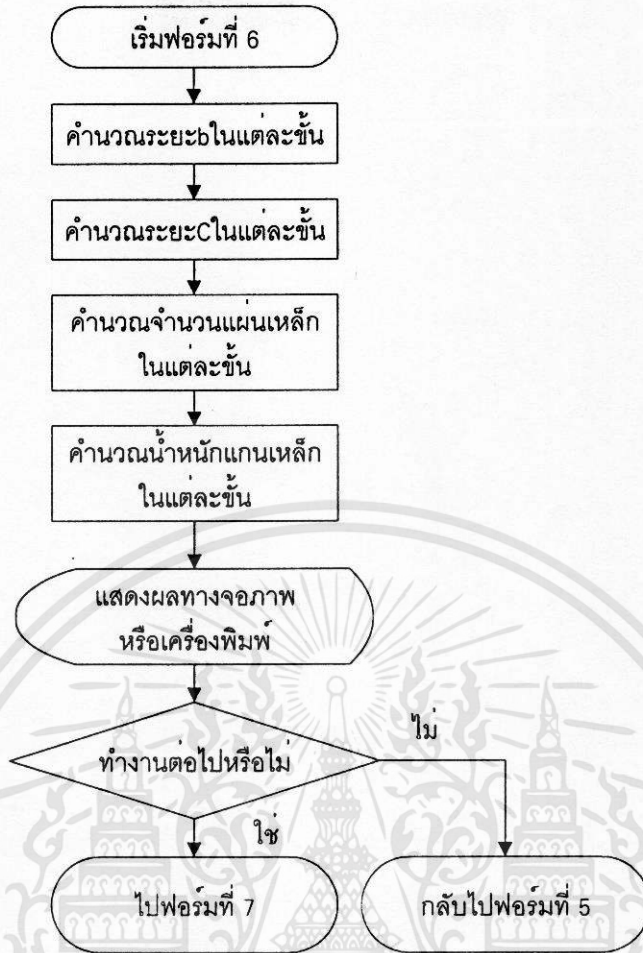
ภาพที่ 4.3 แสดงขั้นตอนการทำงานของซอฟต์แวร์ฟอร์มที่ 3 การคำนวณออกแบบขดลวดด้านแรงดันต่ำเวกเตอร์กรุป Dyn 11



ภาพที่ 4.4 แสดงขั้นตอนการทำงานของซอฟต์แวร์ฟอร์มที่ 4 การคำนวณออกแบบขดลวดด้านแรงดันต่ำเวกเตอร์กรุป Yzn 11



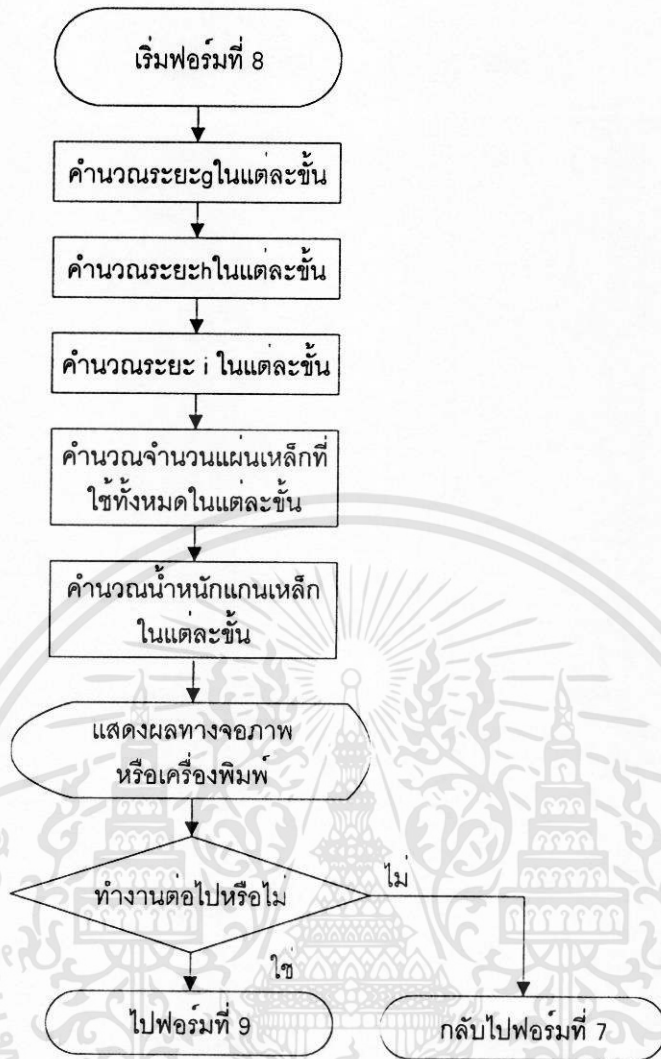
ภาพที่ 4.5 แสดงขั้นตอนการทำงานของซอฟต์แวร์ฟอร์มที่ 5 การคำนวณออกแบบขดลวดคานแรงดันสูง



ภาพที่ 4.6 แสดงขั้นตอนการทำงานของซอฟต์แวร์ฟอร์มที่ 6 การคำนวณหาขนาดของแกนเหล็ก (Outer Limb)



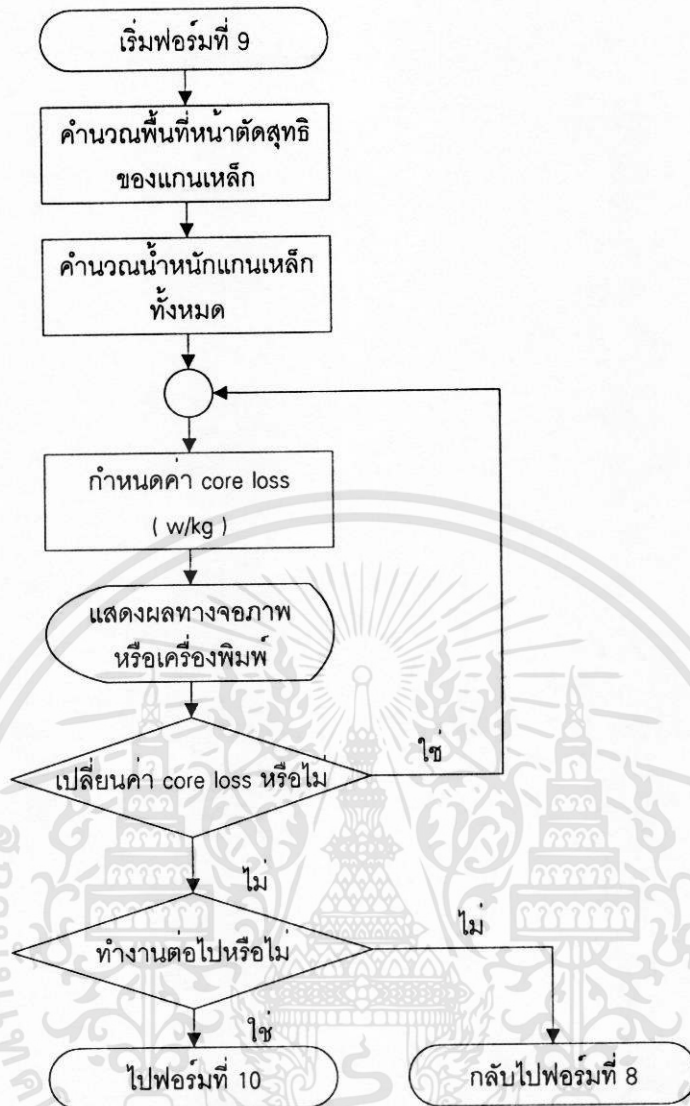
ภาพที่ 4.7 แสดงขั้นตอนการทำงานของซอฟต์แวร์ฟอร์มที่ 7 การคำนวณหาขนาดขาของแกนเหล็ก (Center Limb)



ภาพที่ 4.8 แสดงขั้นตอนการทำงานของซอฟต์แวร์ฟอร์มที่ 8 การคำนวณหาขนาดโยคของแกนเหล็ก (Yoke)

4.6 ขั้นตอนที่ 6 การคำนวณและกำหนดพารามิเตอร์แกนเหล็กของหม้อแปลง

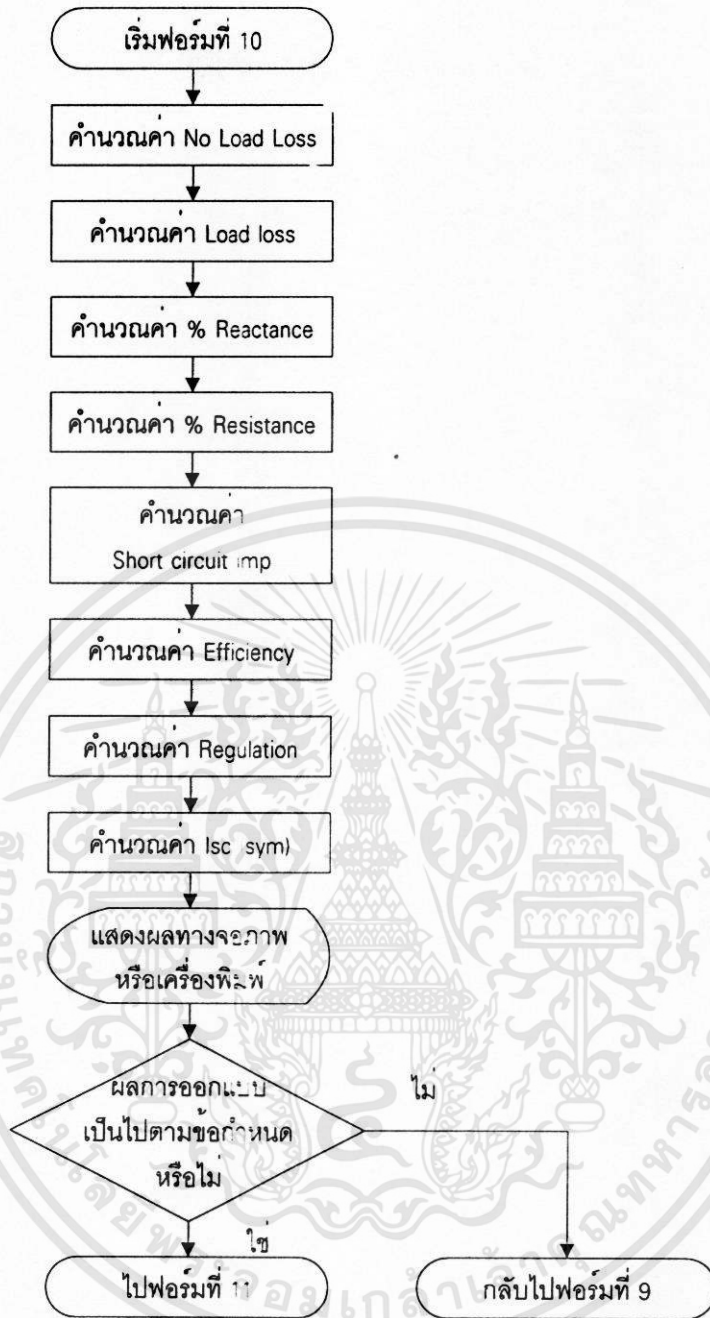
ได้ทำการออกแบบซอฟต์แวร์ฟอร์มที่ 9 เพื่อทำการคำนวณและกำหนดพารามิเตอร์แกนเหล็กของหม้อแปลงจำหน่าย โดยแสดงผลที่ได้ทางจอภาพและเครื่องพิมพ์ ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณออกแบบจะรับข้อมูลมาจากฟอร์มที่ 1, 2, 6, 7 และ 8 และสามารถป้อนข้อมูลเข้าโดยตรงทางแป้นพิมพ์ และยังสามารถเลือกข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ออกแบบจากซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นได้ ถ้าต้องการแก้ไขข้อมูลจากการออกแบบที่ผ่านมาก็สามารถที่จะย้อนกลับไปทำการแก้ไขข้อมูลจากฟอร์มที่ผ่านมาได้ ขั้นตอนการทำงานแสดงได้ดังภาพที่ 4.9



ภาพที่ 4.9 แสดงขั้นตอนการทำงานของซอฟต์แวร์ฟอร์มที่ 9 การคำนวณและกำหนดพารามิเตอร์แกนเหล็ก

4.7 ขั้นตอนที่ 7 การคำนวณคุณสมบัติทางไฟฟ้าของหม้อแปลงจำหน่าย

ได้ทำการออกแบบซอฟต์แวร์ฟอร์มที่ 10 เพื่อทำการคำนวณคุณสมบัติทางไฟฟ้าของหม้อแปลงจำหน่ายเพื่อให้เป็นข้อมูลในการตรวจสอบผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ออกแบบว่าเป็นไปตามข้อกำหนดหรือไม่โดยแสดงผลที่ได้ทางจอภาพและเครื่องพิมพ์ ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณจะรับข้อมูลมาจากฟอร์มที่ผ่านมาทั้งหมด ถ้าผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ออกแบบไม่เป็นไปตามข้อกำหนดก็สามารถที่จะย้อนกลับไปทำการแก้ไขข้อมูลจากฟอร์มที่ผ่านมาได้ ขั้นตอนการทำงานแสดงได้ดังภาพที่ 4.10



ภาพที่ 4.10 แสดงขั้นตอนการทำงานของซอฟต์แวร์ฟอร์มที่ 10 การคำนวณคุณสมบัติทางไฟฟ้าของหม้อแปลงจำหน่าย

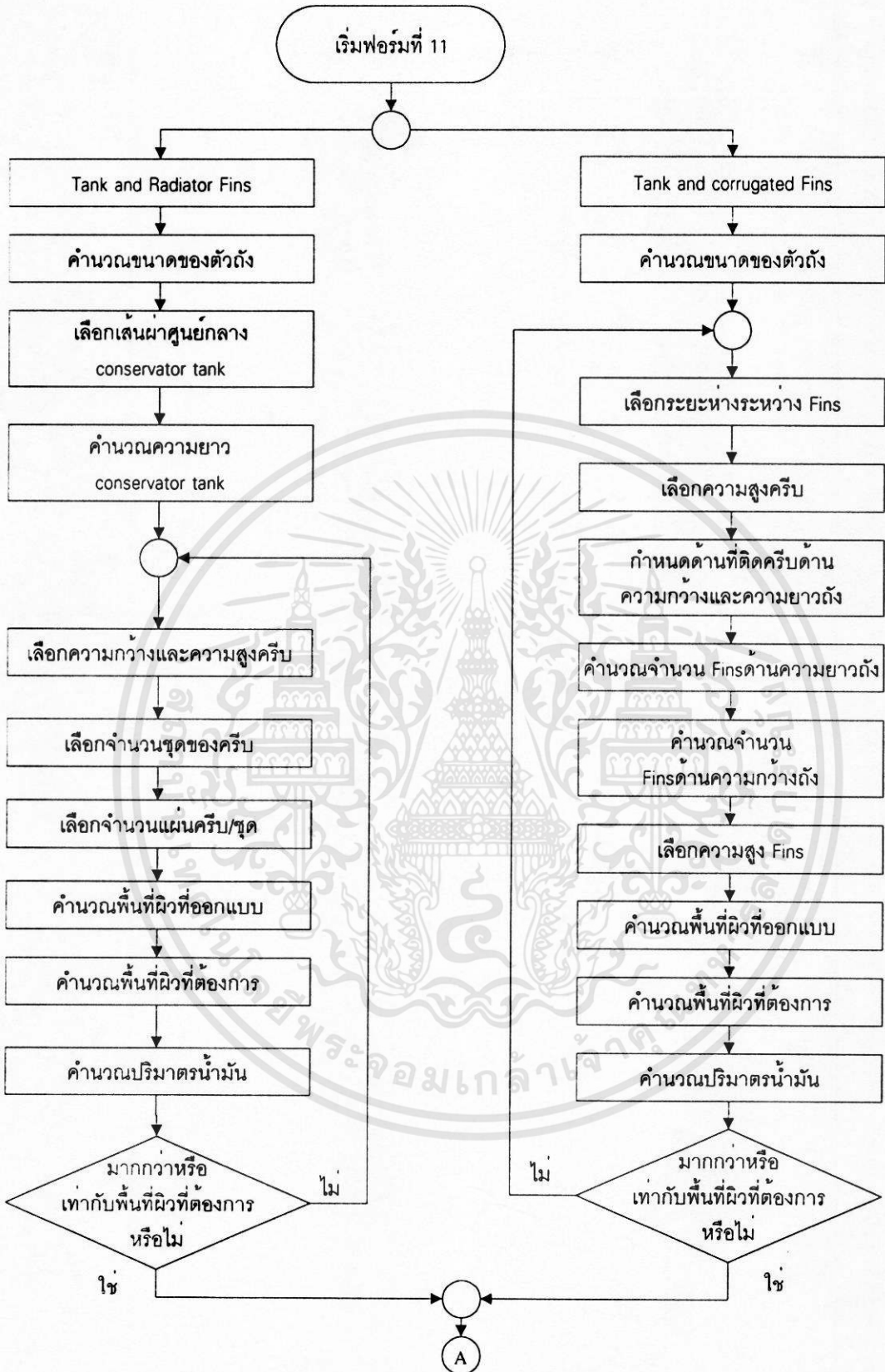
4.8 ขั้นตอนที่ 8 การคำนวณออกแบบขนาดตัวถังและพื้นที่ผิวการระบายความร้อนของหม้อแปลงจำหน่าย

ได้ทำการออกแบบซอฟต์แวร์ฟอร์มที่ 11 เพื่อทำการคำนวณออกแบบขนาดตัวถังและพื้นที่ผิวการระบายความร้อนของหม้อแปลงจำหน่าย โดยแสดงผลที่ได้ทางจอภาพและเครื่องพิมพ์ ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณออกแบบจะรับข้อมูลมาจากฟอร์มที่ 5, 9 และ 10 และสามารถป้อนข้อมูลเข้า

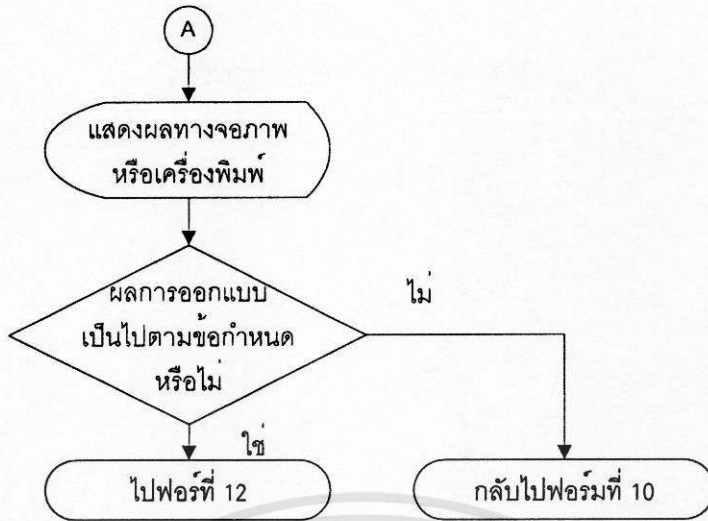
โดยตรงทางเป็นพิมพ์และยังสามารถเลือกข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ออกแบบจากซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นได้ การคำนวณออกแบบจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนแรกจะเป็นการคำนวณออกแบบครีบบระบายความร้อนชนิดแผ่น(Radiator) ส่วนที่สองจะเป็นการคำนวณออกแบบครีบบระบายความร้อนชนิดลอนลูกฟูก(Corrugated) ถ้าต้องการแก้ไขข้อมูลจากการออกแบบที่ผ่านมาก็สามารถย้อนกลับไปทำการแก้ไขข้อมูลจากฟอร์มที่ผ่านมาได้ ขั้นตอนการทำงานแสดงได้ดังภาพที่ 4.11

4.9 ขั้นตอนที่ 9 การคำนวณต้นทุนวัสดุหลักที่ใช้ในการผลิตหม้อแปลงจำหน่าย

ได้ทำการออกแบบซอฟต์แวร์ฟอร์มที่ 12 เพื่อทำการคำนวณต้นทุนวัสดุหลักที่ใช้ในการผลิตหม้อแปลงจำหน่าย โดยแสดงผลที่ได้ทางจอภาพและเครื่องพิมพ์ ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณออกแบบจะรับข้อมูลมาจากฟอร์มที่ผ่านมามาทั้งหมด และสามารถป้อนข้อมูลเข้าโดยตรงทางเป็นพิมพ์และยังสามารถเลือกข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ออกแบบจากซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นได้ วัสดุหลักที่ใช้ในการผลิตหม้อแปลงจำหน่ายที่นำมาคำนวณต้นทุนได้แก่ น้ำหนักของแกนเหล็ก น้ำหนักขดลวดแรงสูงและแรงต่ำ และปริมาณน้ำมันหม้อแปลง ถ้าต้องการแก้ไขข้อมูลจากการออกแบบที่ผ่านมาก็สามารถที่จะย้อนกลับไปทำการแก้ไขข้อมูลจากฟอร์มที่ผ่านมาได้ ขั้นตอนการทำงานแสดงได้ดังภาพที่ 4.12



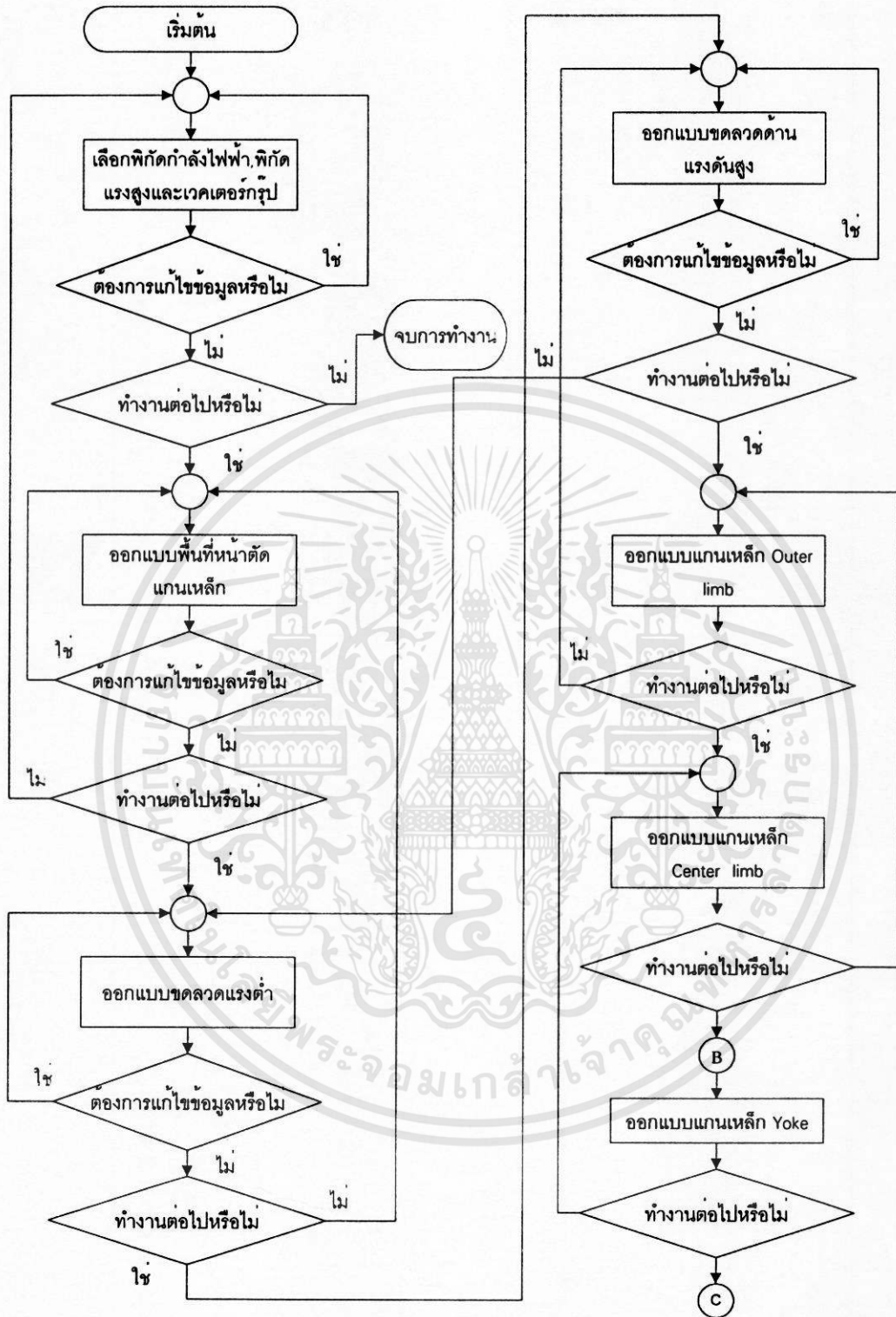
ภาพที่ 4.11 แสดงขั้นตอนการทำงานของซอฟต์แวร์ฟอร์มที่ 11 การคำนวณออกแบบขนาดตัวถัง และพื้นที่ผิวการระบายความร้อน



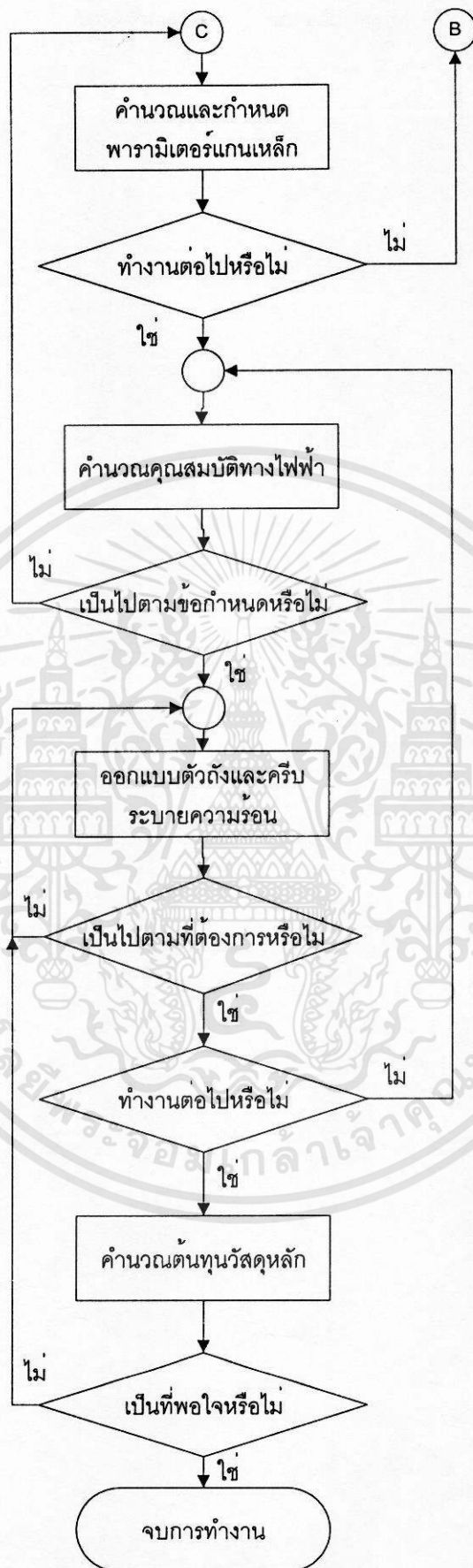
ภาพที่ 4.11 (ต่อ)



ภาพที่ 4.12 แสดงขั้นตอนการทำงานของซอฟต์แวร์ฟอร์มที่ 12 การคำนวณต้นทุนวัสดุหลักที่ใช้ในการผลิตหม้อแปลงจำหน่าย



ภาพที่ 4.13 แสดงขั้นตอนการทำงานทั้งหมดของ OIDS



ภาพที่ 4.13 (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

วิธีการใช้งานซอฟต์แวร์สำหรับวิเคราะห์ห้ออกแบบหม้อแปลง จำหน่ายแบบจุ่มในน้ำมัน

5.1 ข้อจำกัดของการใช้งาน

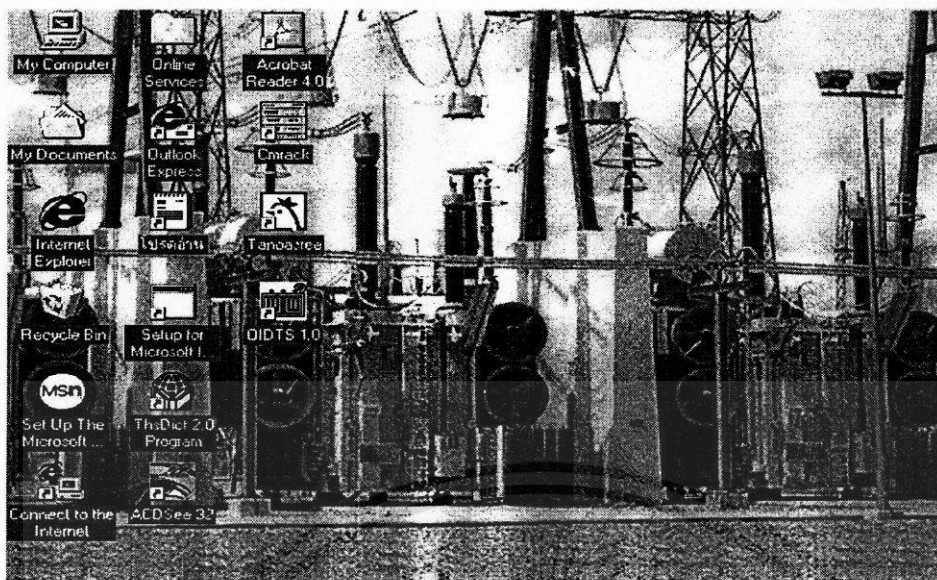
ซอฟต์แวร์สำหรับวิเคราะห์ห้ออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายแบบจุ่มในน้ำมัน (Oil-Immersed Distribution Transformer Analysis and Design Software) หรือ OIATS เป็นชื่อของซอฟต์แวร์ที่ถูกพัฒนาขึ้นโดยใช้เดลไฟล์ (Delphi) ซึ่งมีคุณสมบัติในการทำงานบนระบบปฏิบัติการ Microsoft Windows โดยมีข้อจำกัดในการใช้งานดังนี้

1. เครื่องคอมพิวเตอร์ควรมีซีพียู Pentium ขึ้นไป
2. หน่วยความจำหลัก 4 MB ขึ้นไป
3. จอภาพแบบ Super VGA ขึ้นไป
4. เมาส์ (Mouse)
5. ติดตั้ง Microsoft Windows 95 ขึ้นไป
6. ผู้ใช้ควรมีพื้นฐานการใช้งานซอฟต์แวร์ที่ทำงานบนระบบปฏิบัติการ Microsoft Windows

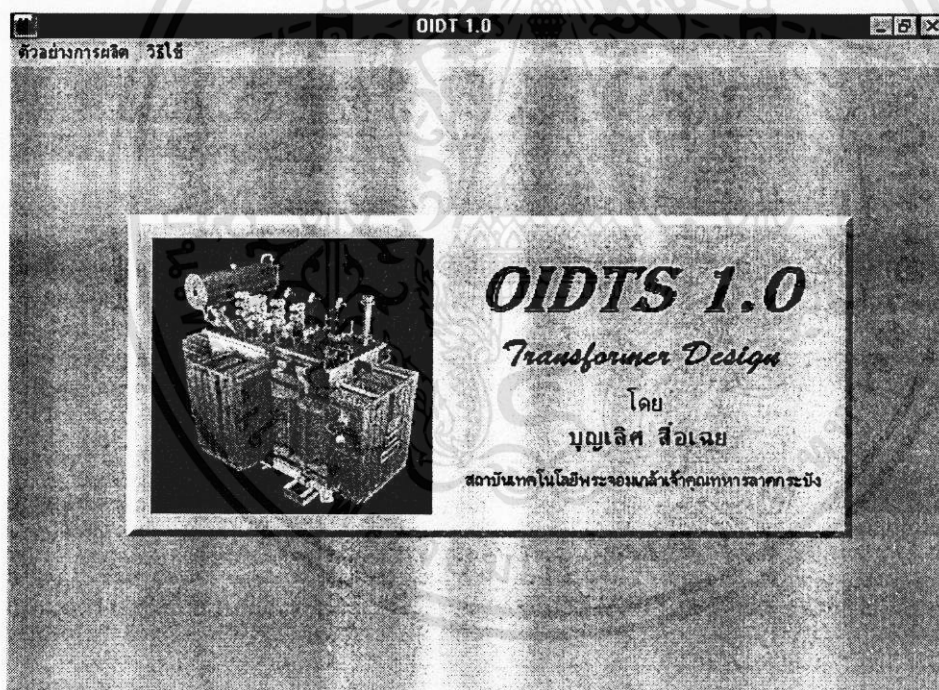
5.2 การเริ่มต้นและจบการทำงานของ OIATS

การเริ่มการทำงานของ OIATS สามารถทำได้โดยการใช้เมาส์คลิกสองครั้งติดต่อกันที่ไอคอนชื่อ OIATS 1.0 ที่อยู่ในกลุ่มโปรแกรม OIATS 1.0 บนเมนูหลักของระบบปฏิบัติการวินโดวส์ดังภาพที่ 5.1

เมื่อ OIATS เริ่มทำงานจะปรากฏบนจอมอนิเตอร์ดังภาพที่ 5.2 จากนั้นก็จะเริ่มการใช้งานของซอฟต์แวร์โดยเริ่มทำงานจากฟอร์มที่ 1 ไปจนถึงฟอร์มที่ 12 การใช้งานในแต่ละฟอร์มสามารถอธิบายได้ดังนี้



ภาพที่ 5.1 แสดงเมนูหลักของระบบปฏิบัติการวินโดวส์

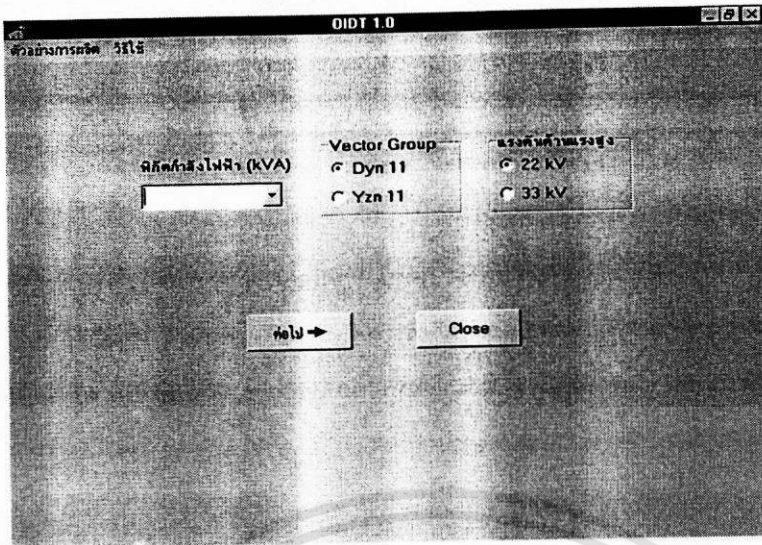


ภาพที่ 5.2 แสดงการเริ่มต้นการทำงานของ OIDTS

5.2.1 ฟอรัมที่ 1 การเลือกพิกัดกำลังไฟฟ้า เวกเตอร์กรุป และพิกัดแรงดันด้านแรงสูง

สามารถทำการคลิกที่ปุ่มของซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นเพื่อเลือกพิกัดกำลังไฟฟ้า เวกเตอร์กรุป และพิกัดแรงดันด้านแรงสูงของหม้อแปลงจำหน่ายได้ ถ้าต้องการทำงานต่อไปคลิกที่ปุ่ม “ต่อไป” ถ้าต้องการจบการทำงานคลิกที่ปุ่ม “Close”

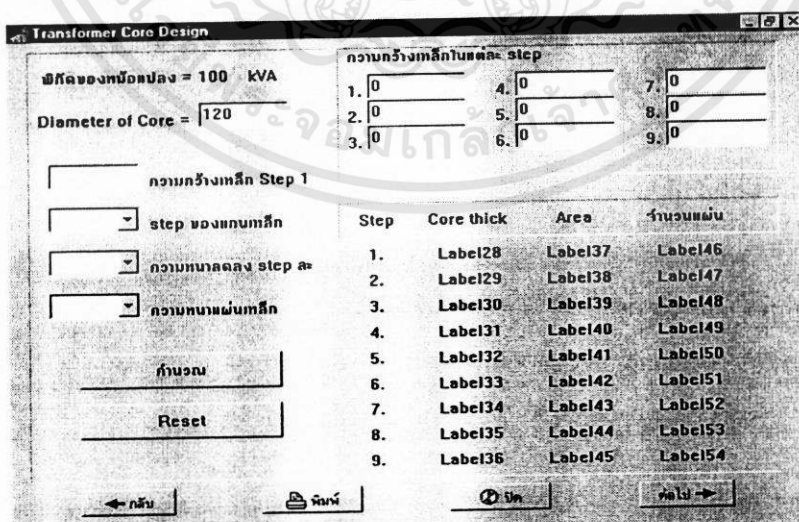
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 5.3 แสดงฟอร์มที่ 1 ของ OIDS

5.2.2 ฟอร์มที่ 2 การคำนวณออกแบบพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กของหม้อแปลงจำหน่าย

ซอฟต์แวร์จะทำการคำนวณเส้นผ่าศูนย์กลางของแกนเหล็ก จากนั้นผู้ใช้ทำการกำหนดขนาดเริ่มต้นของแกนเหล็กชั้นที่ 1, จำนวนชั้น (Step) ของแกนเหล็ก, ความกว้างของแกนเหล็กลดลงชั้นละและความหนาของแผ่นเหล็ก จากนั้นคลิกปุ่ม “คำนวณ” ซอฟต์แวร์จะทำการคำนวณความกว้างเหล็กในแต่ละชั้น, ความหนาในแต่ละชั้น, พื้นที่หน้าตัดในแต่ละชั้นและจำนวนแผ่นในแต่ละชั้นของแกนเหล็ก ถ้าต้องการทำงานต่อไปคลิกที่ปุ่ม “ต่อไป” ต้องการย้อนกลับไปฟอร์มที่ผ่านมาคลิกที่ปุ่ม “กลับไป” ต้องการแสดงผลทางเครื่องพิมพ์คลิกที่ปุ่ม “พิมพ์” หรือต้องการจบการทำงานก็คลิกที่ปุ่ม “ปิด”

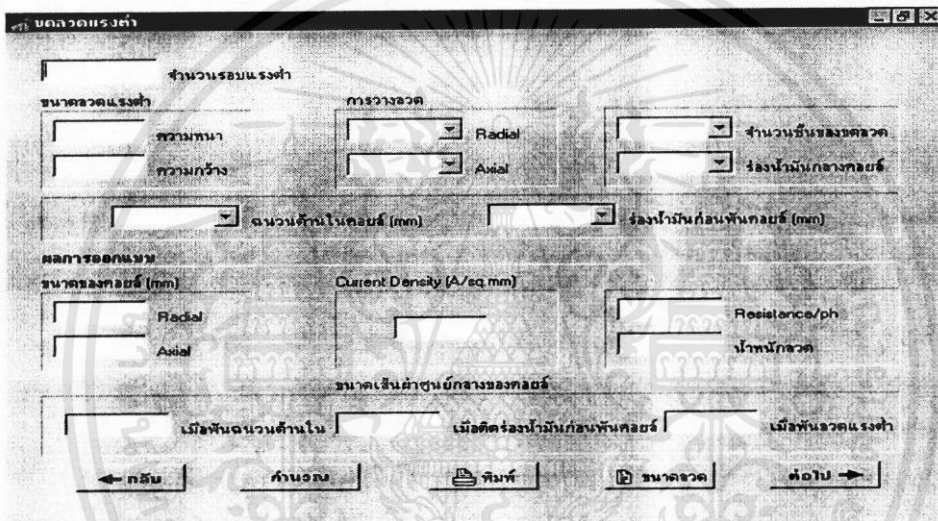


ภาพที่ 5.4 แสดงฟอร์มที่ 2 ของ OIDS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.3 ฟอรม์ที่ 3 การคำนวณออกแบบขดลวดแรงดันต่ำเวกเตอร์กรุป Dyn 11

ซอฟต์แวร์จะทำการคำนวณจำนวนรอบแรงต่ำ จากนั้นผู้ใช้ทำการเลือกขนาดลวด, การวางลวด, จำนวนชั้นของขดลวด, ฉนวนด้านในคอยล์และเลือกร่องน้ำมันก่อนพันคอยล์ จากนั้นคลิกปุ่ม “คำนวณ” ซอฟต์แวร์จะทำการคำนวณขนาดของคอยล์, ความหนาแน่นกระแส, เส้นผ่าศูนย์กลางเมื่อพันฉนวนด้านใน, เส้นผ่าศูนย์กลางเมื่อติดร่องน้ำมันกลางคอยล์, เส้นผ่าศูนย์กลางเมื่อพันลวดแรงต่ำ, Resistance/ph และน้ำหนักของขดลวด โดยที่ค่าความหนาแน่นของกระแสจะต้องมีค่าไม่เกิน 3.00 A/mm^2 ถ้ามากกว่าจะต้องทำการเลือกขนาดลวดหรือกำหนดการวางลวดใหม่ ถ้าต้องการทำงานต่อไปคลิกที่ปุ่ม “ต่อไป” ต้องการย้อนกลับไปฟอรม์ที่ผ่านมาคลิกที่ปุ่ม “กลับไป” ต้องการแสดงผลทางเครื่องพิมพ์คลิกที่ปุ่ม “พิมพ์”



ภาพที่ 5.5 แสดงฟอรม์ที่ 3 ของ OIDTS

5.2.4 ฟอรม์ที่ 4 การคำนวณออกแบบขดลวดแรงดันต่ำเวกเตอร์กรุป Yzn 11

การใช้งานของฟอรม์ที่ 4 จะคล้ายกันกับฟอรม์ที่ 3 แต่จะมีผลการคำนวณออกแบบต่างกันคือ ฟอรม์ที่ 3 การออกแบบขดลวดจะมีขดลวดหนึ่งชุดต่อเฟส แต่ฟอรม์ที่ 4 จะมีขดลวดสองชุดต่อเฟส

5.2.5 ฟอรม์ที่ 5 การคำนวณออกแบบขดลวดแรงดันสูง

ซอฟต์แวร์จะทำการคำนวณจำนวนรอบแรงสูง จากนั้นผู้ใช้ทำการเลือกร่องน้ำมันหลังพันลวดแรงต่ำ, ร่องน้ำมันก่อนพันลวดแรงสูง, ความหนากระดาษฉนวน, กระดาษหุ้มท้ายคอยล์แรงต่ำ, ขนาดลวดแรงสูง, จำนวน Section/ph, ร่องน้ำมันกลางคอยล์และระยะห่างระหว่าง Section จากนั้นคลิกปุ่ม “คำนวณ” ซอฟต์แวร์จะทำการคำนวณหาความหนาแน่นกระแส, Turn/Section, Turn/Layer, Layer/Section, ความสูงคอยล์/Section, ฉนวนระหว่างชั้น, ความหนาของคอยล์, ความสูงคอยล์ทั้งหมด, เส้นผ่าศูนย์กลางด้านใน, เส้นผ่าศูนย์กลางด้านนอก, Resistance/ph, จำนวนรอบ

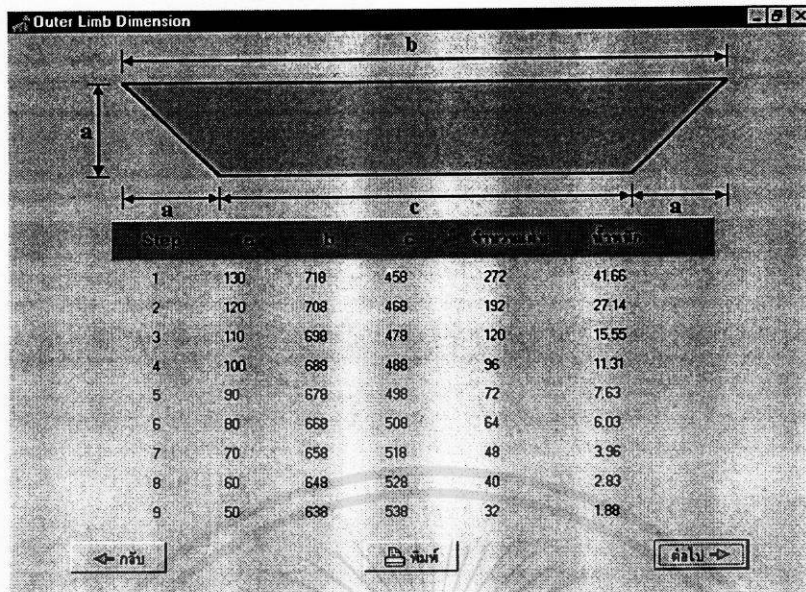
ระหว่างแท็บและน้ำหนักของขดลวด ถ้าต้องการทำงานต่อไปคลิกที่ปุ่ม “ต่อไป” ต้องการย้อนกลับไปฟอร์มที่ผ่านมากลิกที่ปุ่ม “กลับ” ต้องการแสดงผลทางเครื่องพิมพ์คลิกที่ปุ่ม “พิมพ์”

ภาพที่ 5.6 แสดงฟอร์มที่ 4 ของ OIDS

ภาพที่ 5.7 แสดงฟอร์มที่ 5 ของ OIDS

5.2.6 ฟอร์มที่ 6 การคำนวณออกแบบขาแกนเหล็ก Outer Limb

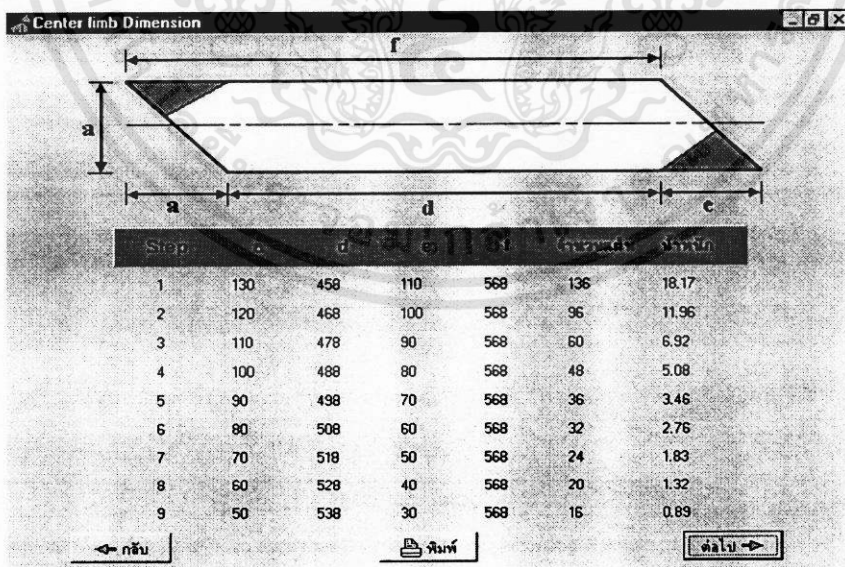
ซอฟต์แวร์จะคำนวณขนาดของความสูงของแกนเหล็ก(b)ในแต่ละชั้น, ความสูงของช่องหน้าต่าง(c)ในแต่ละชั้น, จำนวนแผ่นเหล็กที่ใช้ทั้งหมดในแต่ละชั้น และน้ำหนักแกนเหล็กในแต่ละชั้น ถ้าต้องการทำงานต่อไปคลิกที่ปุ่ม “ต่อไป” ต้องการย้อนกลับไปฟอร์มที่ผ่านมากลิกที่ปุ่ม “กลับ” ต้องการแสดงผลทางเครื่องพิมพ์คลิกที่ปุ่ม “พิมพ์”



ภาพที่ 5.8 แสดงฟอร์มที่ 6 ของ OIDTS

5.2.7 ฟอร์มที่ 7 การคำนวณออกแบบขาแกนเหล็ก Center Limb

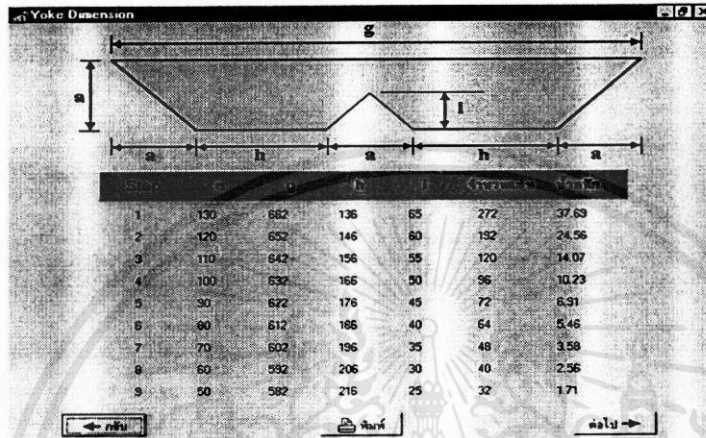
ซอฟต์แวร์จะคำนวณขนาดของความสูงของขาแกนเหล็ก(d)ในแต่ละชั้น, ขนาดของส่วนที่ตัดออก(e)ในแต่ละชั้น, ความยาว(f)ในแต่ละชั้น, จำนวนแผ่นเหล็กที่ใช้ทั้งหมดในแต่ละชั้นและน้ำหนักแกนเหล็กในแต่ละชั้น ถ้าต้องการทำงานต่อไปคลิกที่ปุ่ม “ต่อไป” ต้องการย้อนกลับไปฟอร์มที่ผ่านมาคลิกที่ปุ่ม “กลับ” ต้องการแสดงผลทางเครื่องพิมพ์คลิกที่ปุ่ม “พิมพ์”



ภาพที่ 5.9 แสดงฟอร์มที่ 7 ของ OIDTS

5.2.8 ฟอรั่มที่ 8 การคำนวณออกแบบแกนเหล็ก Yoke

ซอฟต์แวร์จะคำนวณขนาดของความยาวแกนเหล็ก(g)ในแต่ละชั้น, ขนาดความกว้างของช่องหน้าค่าง(h)ในแต่ละชั้น, ขนาดความสูงของส่วนที่ตัดออก(i)ในแต่ละชั้น, จำนวนแผ่นเหล็กที่ใช้ทั้งหมดในแต่ละชั้นและน้ำหนักแกนเหล็กในแต่ละชั้น ถ้าต้องการทำงานต่อไปคลิกที่ปุ่ม “ต่อไป” ต้องการย้อนกลับไปฟอรั่มที่ผ่านมากลิกที่ปุ่ม “กลับ” ต้องการแสดงผลทางเครื่องพิมพ์คลิกที่ปุ่ม “พิมพ์”



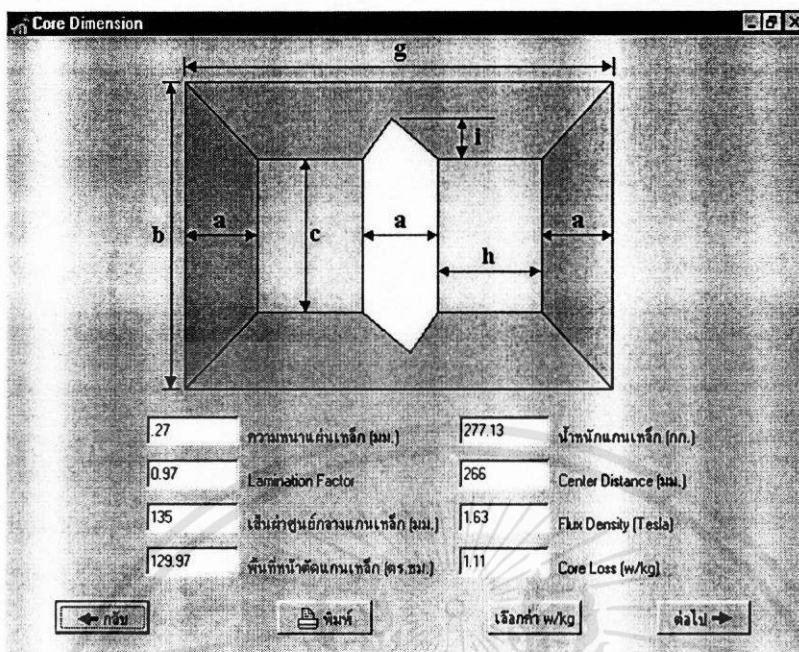
ภาพที่ 5.10 แสดงฟอรั่มที่ 8 ของ OIDS

5.2.9 ฟอรั่มที่ 9 การคำนวณและกำหนดพารามิเตอร์ของแกนเหล็ก

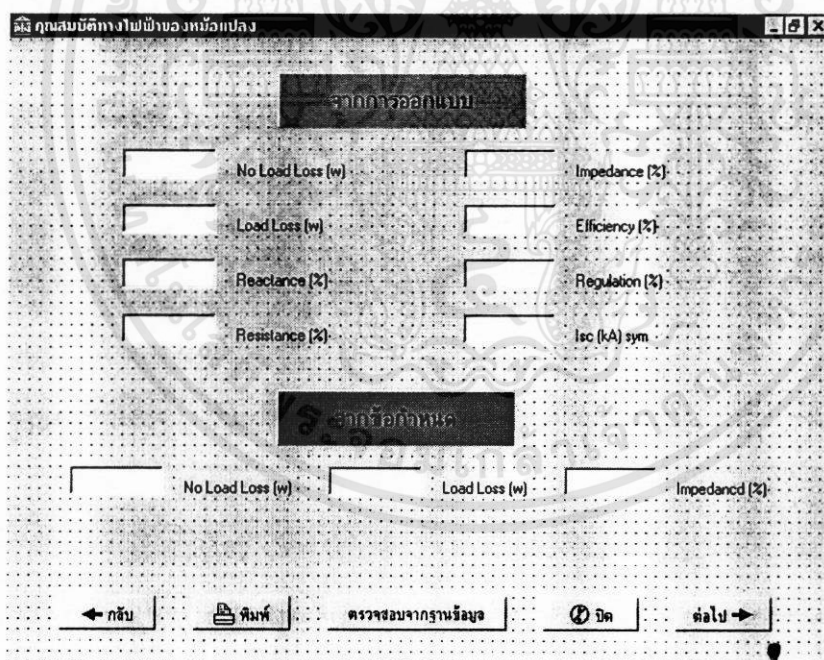
ซอฟต์แวร์จะแสดงค่าความหนาแผ่นเหล็ก, Lamination factor, เส้นผ่าศูนย์กลางแกนเหล็กและซอฟต์แวร์จะคำนวณหาน้ำหนักของแกนเหล็กที่ใช้ทั้งหมด, Center distance, Flux density จากนั้นผู้ใช้ทำการเลือกค่า Core loss(W/kg) โดยคลิกปุ่ม “เลือกค่า W/kg” จากนั้นก็ทำการป้อนข้อมูลเข้าทางเป็นพิมพ์ ถ้าต้องการทำงานต่อไปคลิกที่ปุ่ม “ต่อไป” ต้องการย้อนกลับไปฟอรั่มที่ผ่านมากลิกที่ปุ่ม “กลับ” ต้องการแสดงผลทางเครื่องพิมพ์คลิกที่ปุ่ม “พิมพ์”

5.2.10 ฟอรั่มที่ 10 การคำนวณคุณสมบัติทางไฟฟ้าของหม้อแปลงจำหน่าย

ซอฟต์แวร์จะทำการคำนวณค่าคุณสมบัติต่างๆ ทางไฟฟ้าของหม้อแปลงจำหน่ายคือ No load loss, Loadloss, %Reactance, %Resistance, %Impdance, Efficiency, Regulation และกระแสลัดวงจรสมมาตร(Symmetrical short circuit current) และสามารถเช็คค่า No load loss, Load loss และ %Impdance ที่มีค่าตามข้อกำหนดได้โดยคลิกที่ปุ่ม “ตรวจสอบจากฐานข้อมูล” ถ้าต้องการทำงานต่อไปคลิกที่ปุ่ม “ต่อไป” ต้องการย้อนกลับไปฟอรั่มที่ผ่านมากลิกที่ปุ่ม “กลับ” ต้องการแสดงผลทางเครื่องพิมพ์คลิกที่ปุ่ม “พิมพ์”



ภาพที่ 5.11 แสดงฟอร์มที่ 9 ของ OIDS



ภาพที่ 5.12 แสดงฟอร์มที่ 10 ของ OIDS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.11 ฟอรัมที่ 11 การออกแบบตัวถังและครีบบระบายความร้อน

ซอฟต์แวร์จะคำนวณความกว้าง, ความยาว, ความสูงของตัวถังหม้อแปลงและคำนวณพื้นที่ผิวของการระบายความร้อน จากนั้นผู้ใช้ทำการเลือกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของถังคอนเซอร์เวเตอร์ (Conservator tank) ซอฟต์แวร์ก็จะคำนวณความยาวของถังคอนเซอร์เวเตอร์ ขึ้นตอนต่อมาเป็นการออกแบบครีบบระบายความร้อนโดยแบ่งเป็นสองชนิดคือชนิดแรกเป็นครีบบนชนิดแผ่น (Radiator fin) สามารถทำได้โดยเลือกความกว้าง, ความสูง, จำนวนชุด, จำนวนแผ่นต่อชุดของครีบบระบายความร้อนชนิดแผ่น ชนิดที่สองเป็นครีบบนระบายความร้อนชนิดลอนลูกฟูก (Corrugated fin) สามารถทำได้โดยเลือกความสูงครีบบน, ความสูง Fin, ระยะห่างระหว่าง Fin, จำนวนด้านความยาวของถังที่ติดครีบบน และจำนวนด้านความกว้างของถังที่ติดครีบบนเมื่อคลิกที่ปุ่ม “คำนวณ” ซอฟต์แวร์จะทำการคำนวณค่าพื้นที่ผิวการระบายความร้อนที่ออกแบบ ปริมาตรน้ำมันหม้อแปลง, จำนวน Fin ด้านความยาวของถังและจำนวน Fin ด้านความกว้างของถัง ถ้าต้องการทำงานต่อไปคลิกที่ปุ่ม “ต่อไป” ต้องการย้อนกลับไปฟอรัมที่ผ่านมากลิกที่ปุ่ม “กลับ” ต้องการแสดงผลทางเครื่องพิมพ์คลิกที่ปุ่ม “พิมพ์”

ภาพที่ 5.13 แสดงฟอรัมที่ 11 ของ OIDS

5.2.12 ฟอรัมที่ 12 การคำนวณต้นทุนวัสดุหลักที่ใช้ในการผลิตหม้อแปลงจำหน่าย

ซอฟต์แวร์จะทำการคำนวณและแสดงค่าราคาต้นทุนวัสดุหลักคือ ราคาแกนเหล็กหม้อแปลง, ราคาขดลวดแรงต่ำ, ราคาขดลวดแรงสูง, ราคาน้ำมันหม้อแปลง และราคาต้นทุนรวมทั้งหมด ถ้าต้องการย้อนกลับไปฟอรัมที่ผ่านมากลิกที่ปุ่ม “กลับ” ต้องการแสดงผลทางเครื่องพิมพ์คลิกที่ปุ่ม “พิมพ์” และถ้าต้องการจบการทำงานคลิกที่ปุ่ม “จบการทำงาน”

ราคาต้นทุนวัสดุหลัก

ราคาวัสดุ (บาท)	ราคาวัสดุ OIDS (บาท)
<input type="text"/>	<input type="text"/>
ราคาแกนเหล็ก (บาท)	ราคาแกนเหล็ก (บาท)
<input type="text"/>	<input type="text"/>
ราคาหลอดแสงสว่าง (บาท)	ราคาหลอดแสงสว่าง (บาท)
<input type="text"/>	<input type="text"/>
ราคาหลอดแสงสว่าง (บาท)	ราคาหลอดแสงสว่าง (บาท)
<input type="text"/>	<input type="text"/>
ราคาโคมไฟแสงสว่าง (บาท)	ราคาโคมไฟแสงสว่าง (บาท)
<input type="text"/>	<input type="text"/>
ราคาวัสดุอื่นทั้งหมด (บาท)	ราคาวัสดุอื่นทั้งหมด (บาท)

← กลับ พิมพ์ จบการทำงาน

ภาพที่ 5.14 แสดงฟอร์มที่ 12 ของ OIDS

5.3 โปรแกรมช่วยเหลือ

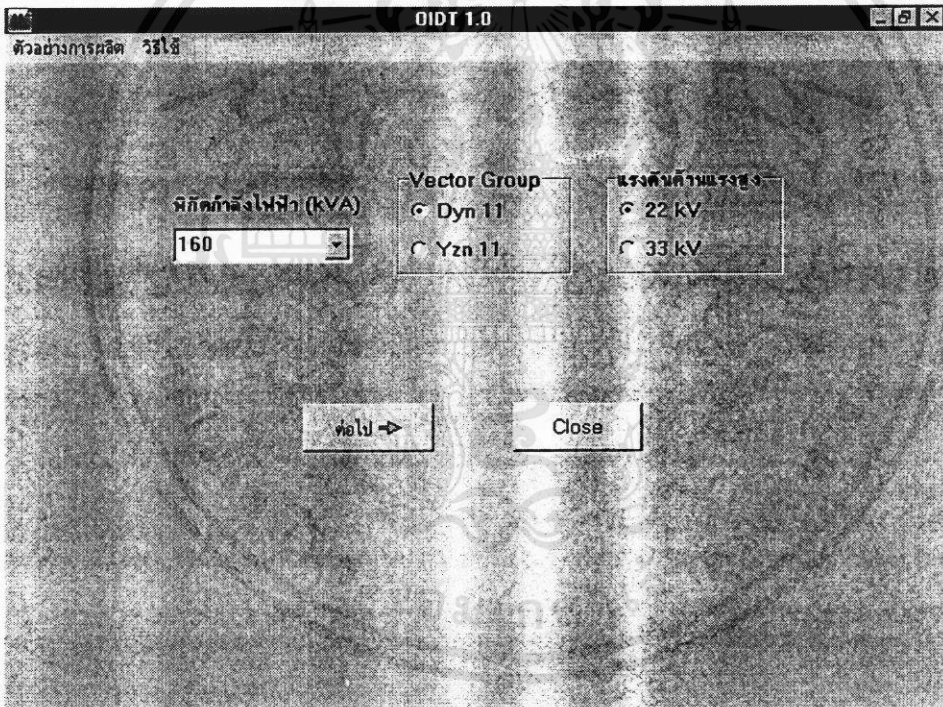
ผู้ใช้สามารถเรียกใช้งานโปรแกรมช่วยเหลือของ OIDS ได้โดยการคลิกที่เมนู “วิธีใช้” โปรแกรมช่วยเหลือนี้จะอธิบายวิธีการใช้งาน OIDS และขั้นตอนการทำงานต่างๆ เพื่อช่วยแก้ปัญหาในเรื่องของการใช้งานให้กับผู้ใช้ซอฟต์แวร์

บทที่ 6

ตัวอย่างการใช้งาน OIDTS

ในบทนี้จะกล่าวถึงการนำซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้น(OIDTS) มาทำการวิเคราะห์ห่ออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายโดยจะแยกการออกแบบตามพิกัดแรงดันสูงคือ 22 kV และ 33 kV เวกเตอร์กรุป Dyn 11 และ Yzn 11 ดังตัวอย่างการวิเคราะห์ห่ออกแบบดังต่อไปนี้

6.1 ตัวอย่างที่ 1 การวิเคราะห์ห่ออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 160 kVA 3 ph
50 Hz 22 kV - 400/230 V เวกเตอร์กรุป Dyn 11
ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ห่ออกแบบโดย OIDTS เป็นดังนี้



ภาพที่ 6.1 แสดงผลลัพธ์การออกแบบตัวอย่างที่ 1 ฟอรัมที่ 1

Transformer Core Design

กำลังของหม้อแปลง = 160 kVA

Diameter of Core = 135

130 กว้างเหล็ก Step 1

9 step ของหม้อเหล็ก

10 กว้างหน้าคดลง step a=

0.27 กว้างหน้าคดเหล็ก

คำนวณ

Reset

กลับ พิมพ์ โทค ไป

กว้างเหล็กในแต่ละ step

1. 130	4. 100	7. 70
2. 120	5. 90	8. 60
3. 110	6. 80	9. 50

Step	Core thick	Area	จำนวนแผ่น
1.	18.2	45.9	68
2.	12.72	29.62	48
3.	8.21	17.52	30
4.	6.21	12.06	24
5.	4.97	8.67	18
6.	4.06	6.3	16
7.	3.35	4.54	12
8.	2.75	3.2	10
9.	2.23	2.17	8

ภาพที่ 6.2 แสดงผลลัพธ์การออกแบบตัวอย่างที่ 1 ฟอรัมที่ 2

ขนาดลวดรับค่า

49 จำนวนรอบแรงต่ำ

ขนาดลวดรับค่า

3.5 ความหนา

7.5 ความกว้าง

การวางลวด

2 Radial

2 Axial

2 จำนวนชั้นของลวด

0 ร่องน้ำมันกลางลวด

1.5 ฉนวนด้านในลวด (mm)

0 ร่องน้ำมันก่อนพันลวด (mm)

ผลการออกแบบ

ขนาดของลวด (mm)

17 Radial

413 Axial

Current Density (A/sq.mm)

2.27

.004043 Resistance/ph

64.82 ไร้นักลวด

ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของลวด

138 เมื่อพันฉนวนด้านใน 138 เมื่อตัดร่องน้ำมันก่อนพันลวด 172 เมื่อพันลวดแรงต่ำ

กลับ คำนวณ พิมพ์ ขนาดลวด ไป

ภาพที่ 6.3 แสดงผลลัพธ์การออกแบบตัวอย่างที่ 1 ฟอรัมที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขดลวดแรงสูง

จำนวนระหว่างขดลวดแรงสูงและแรงต่ำ: 3.2 3.2 3.5 10

ร่องน้ำมันหลังพื้นขดลวดแรงต่ำ ร่องน้ำมันก่อนพื้นขดลวดแรงสูง กระดาษฉนวน กระดาษทิว-ซาออลยัดแรงต่ำ

ขดลวดแรงสูง: 4900 1.20 4 1.6 9.6

จำนวนรอบแรงสูง ขนาดขดลวด จำนวน section/ph ร่องน้ำมันกลางคอลลี่ ระยะห่างระหว่าง section

ผลการออกแบบ:

2.14 1225 70 18 90

Current Density Turn/section Turn/layer Layer/section ความสูงคอลลี่/section

0.2 29 388 194 252

จำนวนระหว่างชั้น ความหนาคอลลี่ ความสูงคอลลี่ทั้งหมด dia. ด้านใน dia. ด้านนอก

52.33 117 103.66

Resistance/ph จำนวนรอบระหว่าง Tap น้ำหนักขดลวด

กลับ จำนวน พิมพ์ ต่ไป

ภาพที่ 6.4 แสดงผลลัพธ์การออกแบบตัวอย่างที่ 1 ฟอรัมที่ 5

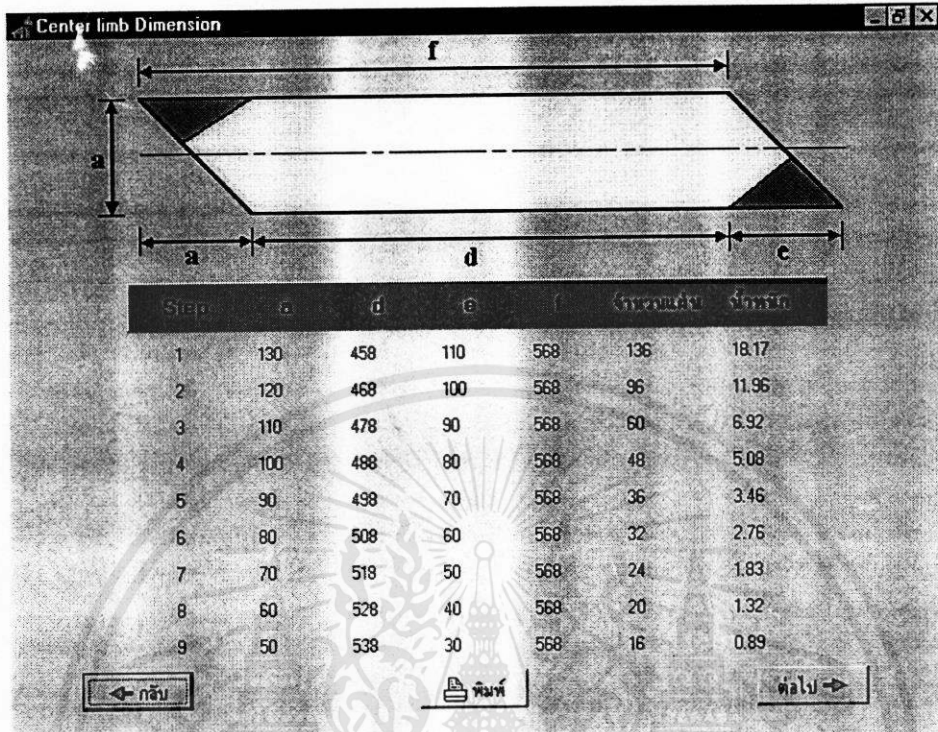
Outer Limb Dimension

Step	a	b	c	จำนวนเส้น	น้ำหนัก
1	130	718	458	272	41.66
2	120	708	468	192	27.14
3	110	698	478	120	15.55
4	100	688	488	96	11.31
5	90	678	498	72	7.63
6	80	668	508	64	6.03
7	70	658	518	48	3.96
8	60	648	528	40	2.83
9	50	638	538	32	1.88

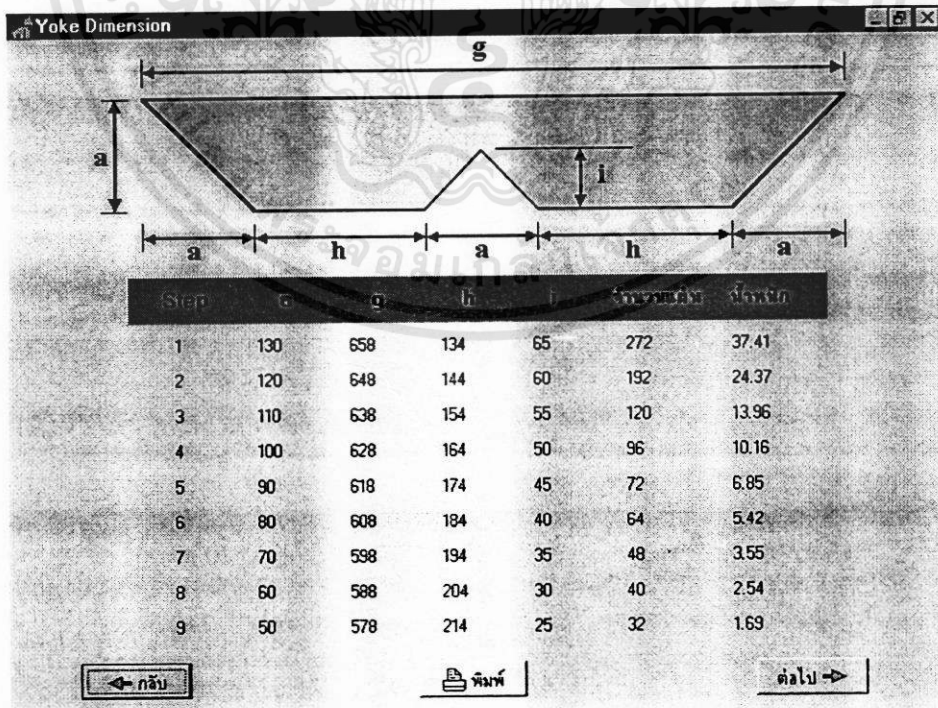
กลับ พิมพ์ ต่ไป

ภาพที่ 6.5 แสดงผลลัพธ์การออกแบบตัวอย่างที่ 1 ฟอรัมที่ 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

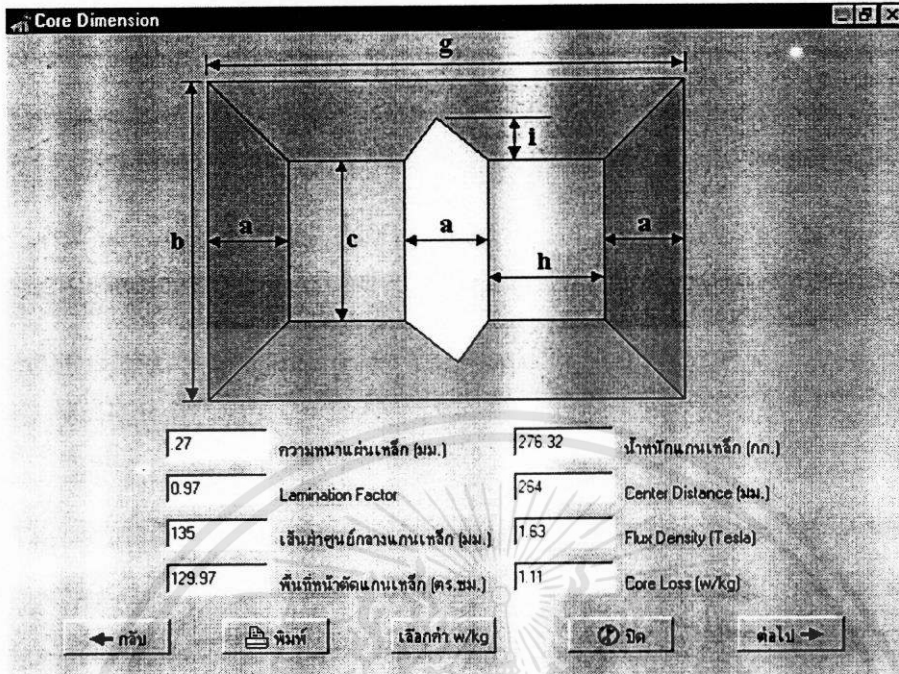


ภาพที่ 6.6 แสดงผลลัพธ์การออกแบบตัวอย่างที่ 1 รูปแบบที่ 7

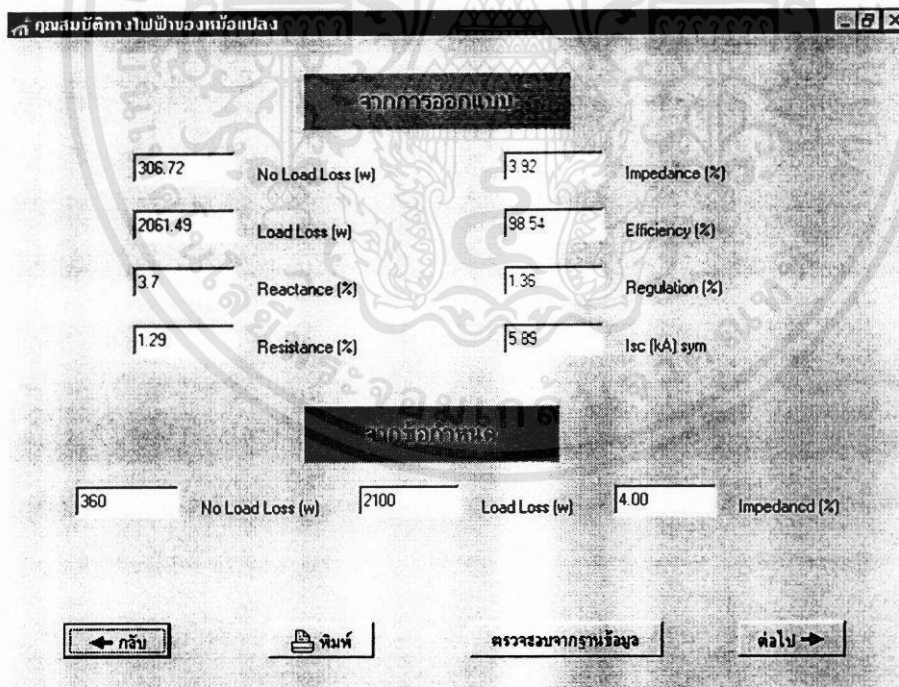


ภาพที่ 6.7 แสดงผลลัพธ์การออกแบบตัวอย่างที่ 1 รูปแบบที่ 8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 6.8 แสดงผลลัพธ์การออกแบบตัวอย่างที่ 1 ฟอรัมที่ 9



ภาพที่ 6.9 แสดงผลลัพธ์การออกแบบตัวอย่างที่ 1 ฟอรัมที่ 10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวถังและกริบระบายความร้อน

ตัวถัง

กว้าง: 362 ยาว: 880 สูง: 888 Conservator dia: 190 Conservator length: 612

Radiator Fins

กว้าง: 400 สูง: 600

จำนวนชุด: 2 จำนวนแผ่น/ชุด: 3

ผลการออกแบบ Radiator

พื้นที่ผิวที่ออกแบบ: 5.09 พื้นที่ผิวที่ต้องการ: 4.74

ปริมาตรน้ำมันหม้อแปลง: 229.03

Corrugated Fins

ความสูงกริบ: 600 ความสูง Fins: 100 ระยะห่างระหว่าง Fins: 60

ติดกริบด้านความยาว: 1 ติดกริบด้านความกว้าง: 2

ผลการออกแบบ Corrugated

จำนวน Fins ด้านความยาว: 13 จำนวน Fins ด้านความกว้าง: 5

พื้นที่ผิวที่ออกแบบ: 4.97 พื้นที่ผิวที่ต้องการ: 4.74

ปริมาตรน้ำมันหม้อแปลง: 211.08

← กลับ พิมพ์ คำนวณ ต่อไป →

ภาพที่ 6.10 แสดงผลลัพธ์การออกแบบตัวอย่างที่ 1 ฟอรัมที่ 11

ต้นทุนวัสดุหลัก

Radiator		Corrugated	
24869.19	ราคาแกนเหล็ก (บาท)	24869.19	ราคาแกนเหล็ก (บาท)
10046.93	ราคาขดลวดแรงต่ำ (บาท)	10046.93	ราคาขดลวดแรงต่ำ (บาท)
17622.3	ราคาขดลวดแรงสูง (บาท)	17622.3	ราคาขดลวดแรงสูง (บาท)
10306.13	ราคาน้ำมันหม้อแปลง (บาท)	9498.69	ราคาน้ำมันหม้อแปลง (บาท)
62844.55	ราคาวัสดุหลักทั้งหมด (บาท)	62037.11	ราคาวัสดุหลักทั้งหมด (บาท)

← กลับ พิมพ์ จบการทำงาน

ภาพที่ 6.11 แสดงผลลัพธ์การออกแบบตัวอย่างที่ 1 ฟอรัมที่ 12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.1.1 สรุปผลจากการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายตัวอย่างที่ 1

1. ข้อกำหนดรายละเอียด(Specification)

พิกัดกำลังไฟฟ้า	160 kVA
จำนวนเฟส	3
ความถี่	50 Hz
แรงดันสูง	22 kV
แรงดันต่ำ(L-L / L-E)	400/230 V
เวกเตอร์กรุป	Dyn 11
ค่าสูญเสียขณะไม่มีโหลด	360 W
ค่าสูญเสียขณะมีโหลด	2100 W
อิมพีแดนซ์ลัดวงจร	4 %

2. เกณฑ์ของหม้อแปลงจำหน่าย (ตัวอย่างที่ 1)

ความหนาของแผ่นเหล็ก	0.27 มม.
ลามีเนชันแพคเตอร์	0.97
เส้นผ่าศูนย์กลางกลางแกนเหล็ก	135 มม.
พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็ก	129.97 ตร.ซม.
ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก	1.63 เทสลา
ค่าความสูญเสียแกนเหล็ก	1.11 W/kg
น้ำหนักของแกนเหล็ก	276.32 กก.

2.1 ขนาดของขาแกนเหล็ก Outer limb (ตัวอย่างที่ 1)

Step	a	b	c	จำนวนแผ่นทั้งหมด	น้ำหนัก
1	130	718	458	272	41.66
2	120	708	468	192	27.14
3	110	698	478	120	15.55
4	100	688	488	96	11.31
5	90	678	498	72	7.63
6	80	668	508	64	6.03
7	70	658	518	48	3.96
8	60	648	528	40	2.83
9	50	638	538	32	1.88

2.2 ขนาดของขาแกนเหล็ก Center limb (ตัวอย่างที่ 1)

Step	a	d	e	f	จำนวนแผ่นทั้งหมด	น้ำหนัก
1	130	458	110	568	136	18.17
2	120	468	100	568	96	11.96
3	110	478	90	568	60	6.92
4	100	488	80	568	48	5.08
5	90	498	70	568	36	3.46
6	80	508	60	568	32	2.76
7	70	518	50	568	24	1.83
8	60	528	40	568	20	1.32
9	50	538	30	568	16	0.89

2.3 ขนาดของแกนเหล็ก Yoke (ตัวอย่างที่ 1)

Step	a	g	h	i	จำนวนแผ่นทั้งหมด	น้ำหนัก
1	130	658	134	65	272	37.41
2	120	648	144	60	192	24.37
3	110	638	154	55	120	13.96
4	100	628	164	50	96	10.16
5	90	618	174	45	72	6.85
6	80	608	184	40	64	5.42
7	70	598	194	35	48	3.55
8	60	588	204	30	40	2.54
9	50	578	214	25	32	1.69

3. ขดลวดของหม้อแปลง (ตัวอย่างที่ 1)

	แรงต่ำ สไฟร์ล	แรงสูง ครอสโอเวอร์
ชนิดของการพันขดลวด	Star	Delta
วัสดุของตัวนำ	ทองแดง	ทองแดง
รูปร่างขดลวด	สี่เหลี่ยมแบน	กลม
ขนาดเส้นลวด(กว้าง×หนา / เส้นผ่าศูนย์กลาง)	3.5 × 7.5	1.20
จำนวนเส้นลวด		
- แนวนอร์มี	2	1
- แนวแกน	2	1
ความหนาแน่นกระแส(A/mm. ²)	2.27	2.14
จำนวนรอบทั้งหมด	49	4900
จำนวนตอนต่อเฟส	1	4
จำนวนรอบต่อหนึ่งตอน	49	1225
จำนวนรอบต่อชั้น	24.5	70
จำนวนชั้นต่อตอน	2	18
ความสูงคอยล์ต่อหนึ่งตอน(มม.)	413	90
ความสูงคอยล์ทั้งหมด(มม.)	413	388
ความหนาคอยล์(มม.)	17.0	29.0
เส้นผ่าศูนย์กลางด้านใน(มม.)	135	194

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นผ่าศูนย์กลางด้านนอก(มม.)	172	252
ความต้านทานต่อเฟส (20 °C)(โอห์ม)	0.004043	52.33
น้ำหนักขดลวดทองแดง(กก.)	64.82	103.66
จำนวนรอบขดลวดแต่ละแท่ง		
แท่ง 1. 23100 โวลท์	4900 รอบ	
2. 22550 โวลท์	4783 รอบ	
3. 22000 โวลท์	4666 รอบ	
4. 21450 โวลท์	4549 รอบ	
5. 20900 โวลท์	4432 รอบ	

4. ฉนวนและร่องน้ำมันระบายความร้อนของขดลวดหม้อแปลง (ตัวอย่างที่ 1)

4.1 ขดลวดแรงต่ำ

ฉนวนด้านในคอยล์(มม.)	1.50
ร่องน้ำมันก่อนพันคอยล์(มม.)	0
ร่องน้ำมันกลางคอยล์(มม.)	0
ฉนวนระหว่างชั้นของขดลวด(มม.)	0
ร่องน้ำมันหลังพันขดลวด(มม.)	3.2
กระดาษฉนวนหัว-ท้ายคอยล์(มม.)	10
กระดาษฉนวนระหว่างขดลวดแรงสูงกับแรงต่ำ (มม.)	3.5

4.2 ขดลวดแรงสูง

ฉนวนด้านในคอยล์(มม.)	0
ร่องน้ำมันก่อนพันคอยล์(มม.)	0
ร่องน้ำมันกลางคอยล์(มม.)	0
ฉนวนระหว่างชั้นของขดลวด(มม.)	0.20
ระยะห่างระหว่างตอน(Section) (มม.)	9.6

5. ตัวถังและครีบบระบายความร้อน (ตัวอย่างที่ 1)

5.1 ตัวถัง

ความกว้าง(มม.)	362
ความยาว(มม.)	880
ความสูง(มม.)	888
เส้นผ่าศูนย์กลางกลางคอนเซอเวเตอร์(มม.)	190

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาวถึงคอนเซอร์เวเตอร์(มม.) 612

5.2 ครีประบายความร้อนชนิดแผ่น(Radiator fin)

ความกว้างครีบ(มม.) 400

ความสูงครีบ(มม.) 600

จำนวนแผ่นครีบต่อชุด 3

จำนวนชุดต่อเครื่อง 2

5.3 ครีประบายความร้อนชนิดลอนลูกฟูก(Corrugated fin)

ความสูงครีบ(มม.) 600

ความสูง Fin(มม.) 100

ระยะห่างระหว่าง Fin (มม.) 60

จำนวน Fin ต่อชุด

- ด้านกว้างของถัง 5

- ด้านยาวของถัง 13

จำนวนชุดต่อเครื่อง

- ด้านกว้างของถัง 2

- ด้านยาวของถัง 1

ปริมาตรน้ำมัน(ลิตร)

- ครีชนิดแผ่น 229.03

- ครีชนิดลอนลูกฟูก 211.08

6. คุณสมบัติทางไฟฟ้าของหม้อแปลง (ตัวอย่างที่ 1)

No load loss 306.72 W

Load loss 2061.49 W

% Reactance 3.70 %

% Resistance 1.29 %

% Impedance 3.92 %

Efficiency 98.54 %

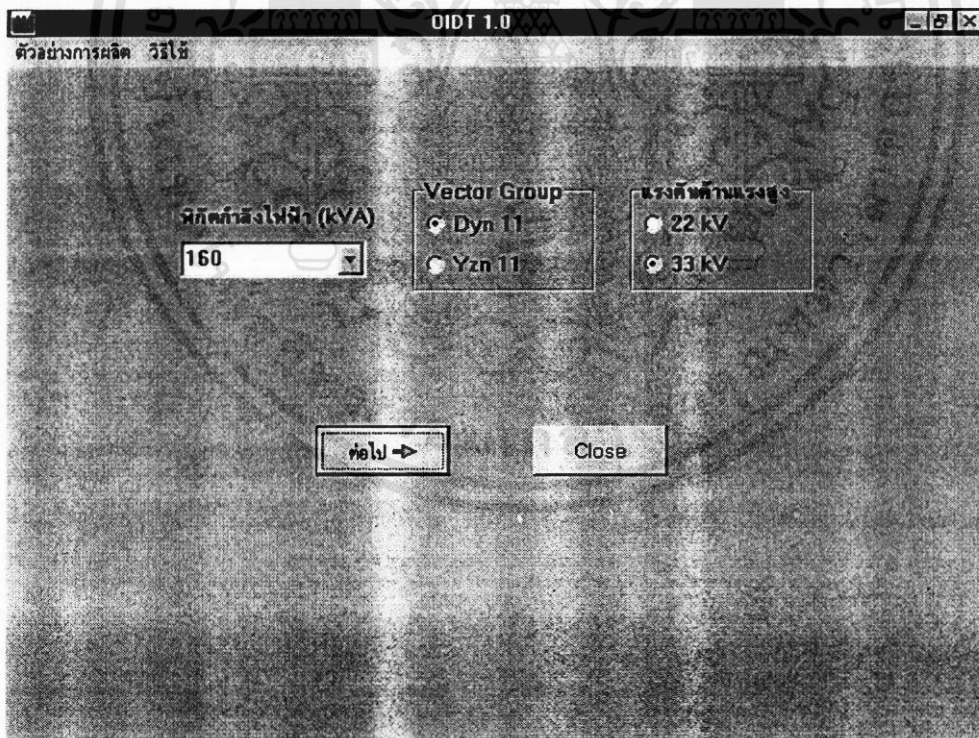
Regulation(Pf.=1) 1.36 %

Short circuit current(Sym.) 5.89 kA

7. ต้นทุนวัสดุหลัก (ตัวอย่างที่ 1)

ราคาแกนเหล็ก	24869.19 บาท
ราคาขดลวดแรงต่ำ	10046.93 บาท
ราคาขดลวดแรงสูง	17622.30 บาท
ราคาน้ำมันหม้อแปลง	
- Radiator	10306.13 บาท
- Corrugated	9498.69 บาท
ราคาค่าต้นทุนรวม	
- Radiator	62844.55 บาท
- Corrugated	62037.11 บาท

6.2 ตัวอย่างที่ 2 การวิเคราะห์ห่ออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 160 kVA 3 ph 50 Hz 33 kV - 400/230 V เวกเตอร์กรุป Dyn 11 ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ห่ออกแบบโดย OI DTS เป็นดังนี้



ภาพที่ 6.12 แสดงผลลัพธ์การออกแบบตัวอย่างที่ 2 ฟอรัมที่ 1

Transformer Core Design

พิกัดของหม้อแปลง = 160 KVA
 Diameter of Core = 135

130 ความกว้างเหล็ก Step 1
 9 step ของแกนเหล็ก
 10 ความหนาของ step a:
 0.27 ความหนาแผ่นเหล็ก

คำนวณ
 Reset

ความกว้างเหล็กในแต่ละ step

1. 130	4. 100	7. 70
2. 120	5. 90	8. 60
3. 110	6. 80	9. 50

Step	Core thick	Area	จำนวนแผ่น
1.	18.2	45.9	68
2.	12.72	29.62	48
3.	8.21	17.52	30
4.	6.21	12.06	24
5.	4.97	8.67	18
6.	4.06	6.3	16
7.	3.35	4.54	12
8.	2.75	3.2	10
9.	2.23	2.17	8

← กลับ พิมพ์ บันทึก ต่อไป →

ภาพที่ 6.13 แสดงผลลัพธ์การออกแบบตัวอย่างที่ 2 ฟอรัมที่ 2

ขนาดลวดแรงต่ำ

49 จำนวนรอบแรงต่ำ

ขนาดลวดแรงต่ำ

3 ความหนา
 9 ความกว้าง

การวางลวด

2 Radial
 2 Axial

2 จำนวนชั้นของลวด
 16 ร่องน้ำมันกลางลวด

1.5 จำนวนด้านในของลวด (mm)
 0 ร่องน้ำมันก่อนพันลวด (mm)

ผลการออกแบบ

ขนาดของลวด (mm)

16.6 Radial
 490 Axial

Current Density (A/sq.mm)
 2.21

0.003921 Resistance/ph
 66.5 ไฟฟ้าลวด

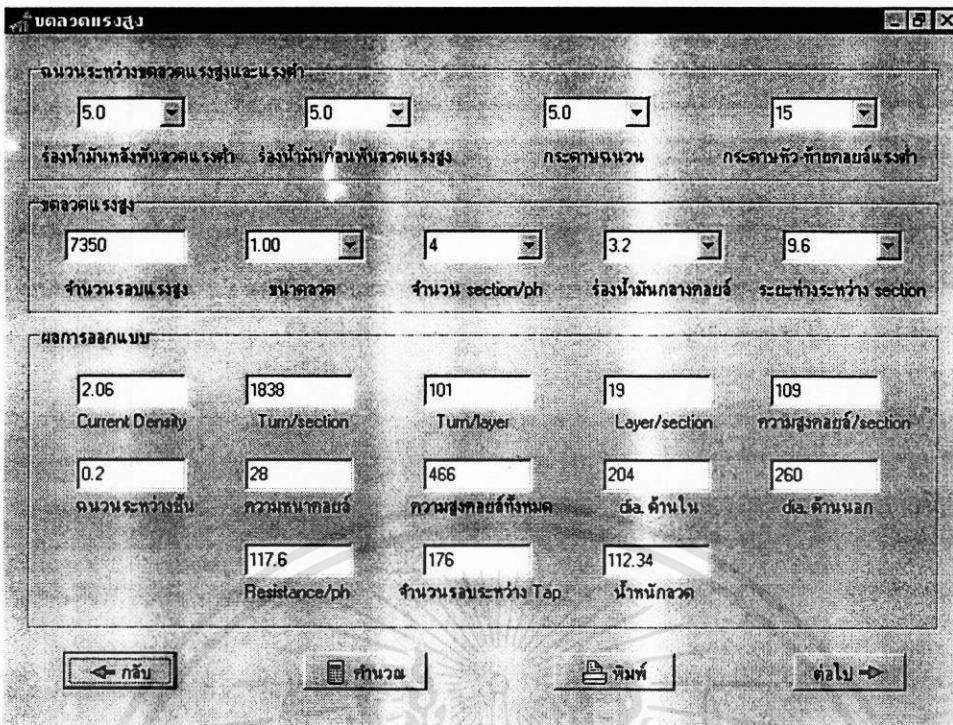
ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของลวด

138 เมื่อพันดวนด้านใน 138 เมื่อติดร่องน้ำมันก่อนพันลวด 171 เมื่อพันลวดแรงต่ำ

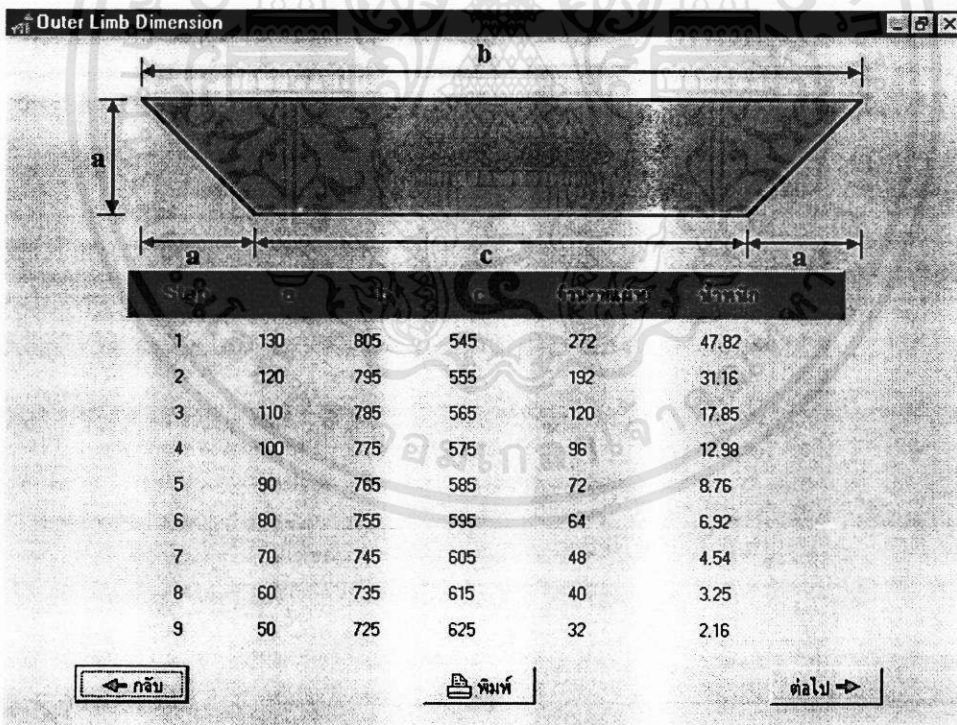
← กลับ คำนวณ พิมพ์ ขนาดลวด ต่อไป →

ภาพที่ 6.14 แสดงผลลัพธ์การออกแบบตัวอย่างที่ 2 ฟอรัมที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

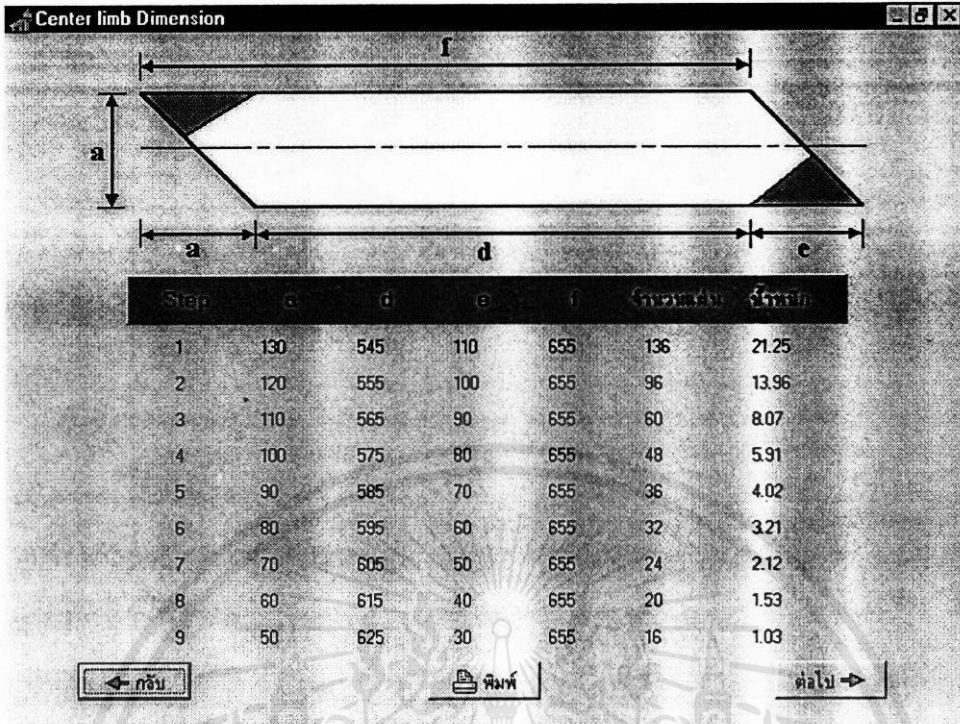


ภาพที่ 6.15 แสดงผลลัพธ์การออกแบบตัวอย่างที่ 2 ฟอรัมที่ 5

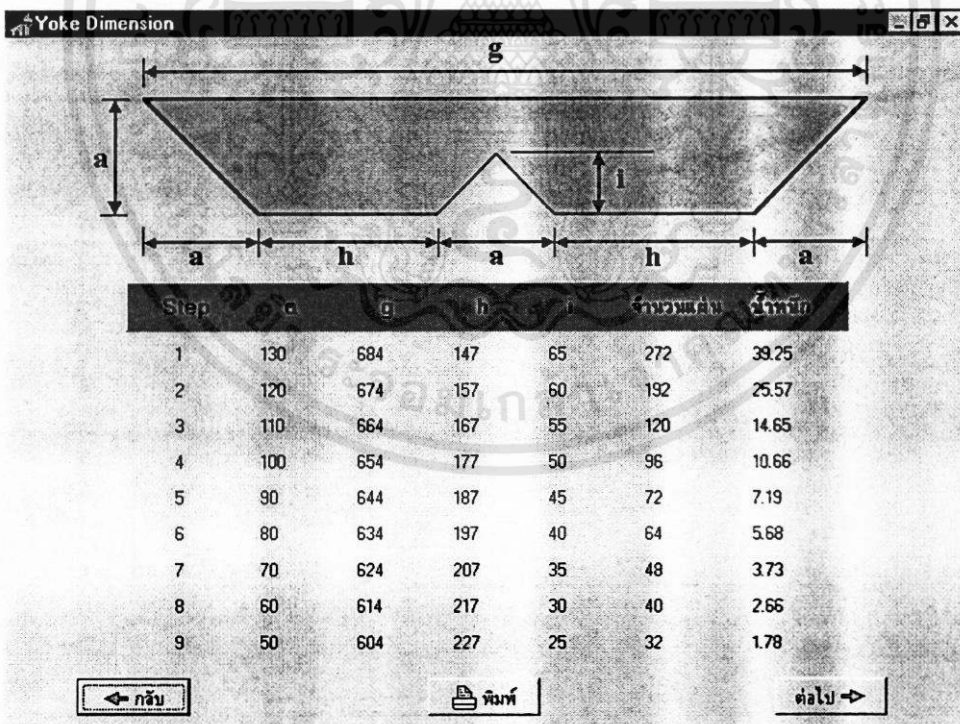


ภาพที่ 6.16 แสดงผลลัพธ์การออกแบบตัวอย่างที่ 2 ฟอรัมที่ 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

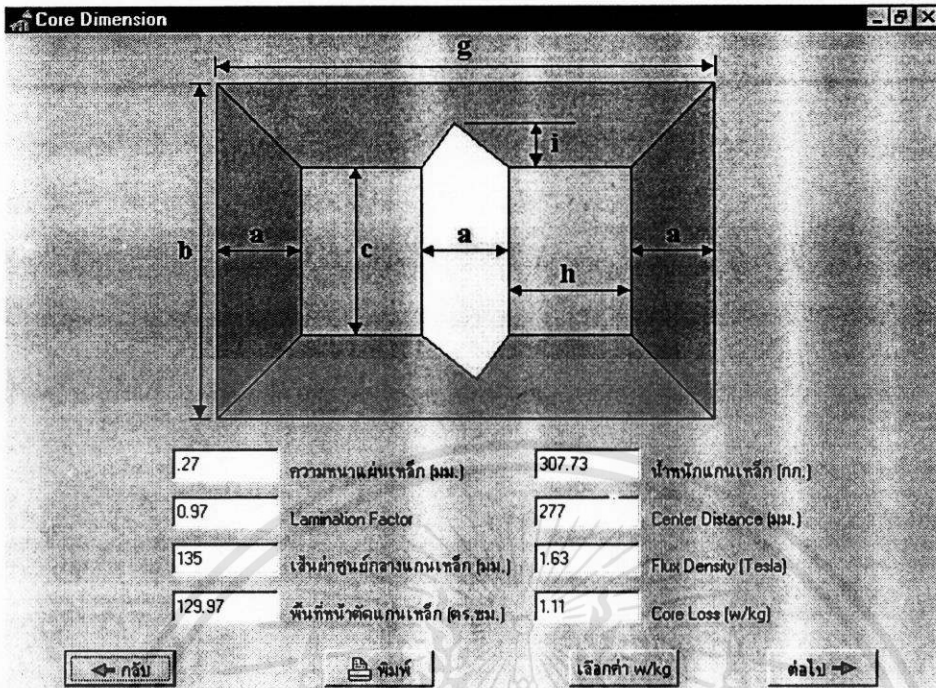


ภาพที่ 6.17 แสดงผลลัพธ์การออกแบบตัวอย่างที่ 2 ฟอর্মที่ 7

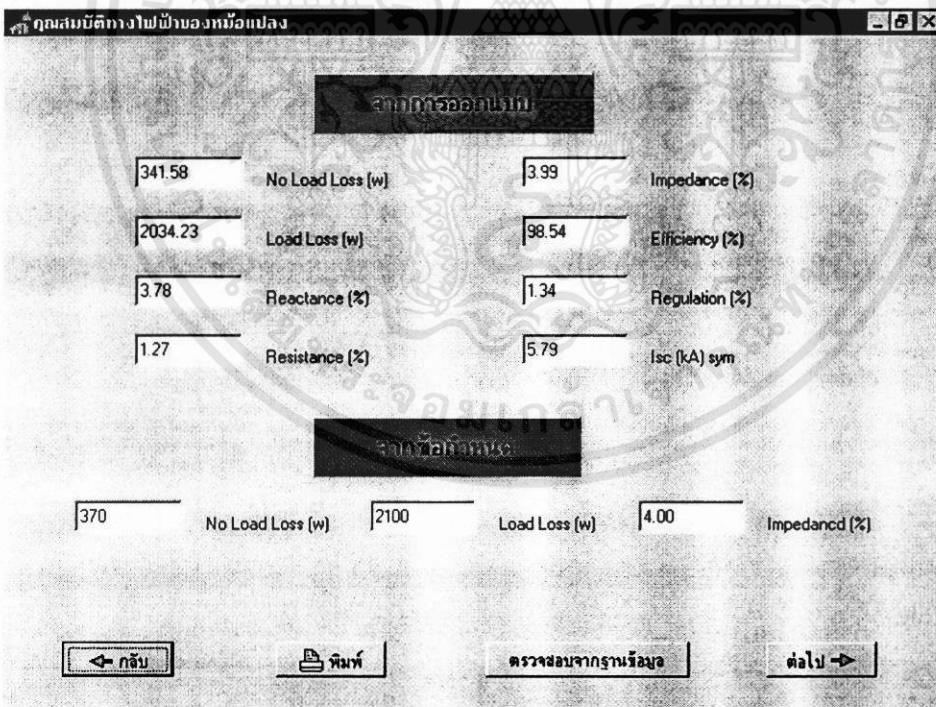


ภาพที่ 6.18 แสดงผลลัพธ์การออกแบบตัวอย่างที่ 2 ฟอর্মที่ 8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 6.19 แสดงผลลัพธ์การออกแบบตัวอย่างที่ 2 ฟอรัมที่ 9



ภาพที่ 6.20 แสดงผลลัพธ์การออกแบบตัวอย่างที่ 2 ฟอรัมที่ 10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวถังและกริประบายความร้อน

ตัวถัง

390 กว้าง 934 ยาว 995 สูง 190 Conservator dia. 640 Conservator length

Radiator Fins

400 กว้าง 700 สูง

2 จำนวนชุด 2 จำนวนแผ่น/ชุด

Corugated Fins

700 ความสูงกริป 70 ความสูง Fins 60 ระยะห่างระหว่าง Fins

1 ดัดกริปด้านความยาว 2 ดัดกริปด้านความกว้าง

ผลการออกแบบ Radiator

4.87 พื้นที่ผิวที่สแลกแบบ 4.75 พื้นที่ผิวที่ต้องการ

287.23 ปริมาตรน้ำมันหม้อแปลง

ผลการออกแบบ Corugated

14 จำนวน Fins ด้านความยาว 5 จำนวน Fins ด้านความกว้าง

4.99 พื้นที่ผิวที่สแลกแบบ 4.75 พื้นที่ผิวที่ต้องการ

269.66 ปริมาตรน้ำมันหม้อแปลง

← กลับ พิมพ์ จำนวน ต่อไป →

ภาพที่ 6.21 แสดงผลลัพธ์การออกแบบตัวอย่างที่ 2 ฟอรัมที่ 11

ต้นทุนวัสดุหลัก

วัสดุ	ราคา	หน่วย	รวม
เหล็ก	27695.68	ราคาแกนเหล็ก (บาท)	27695.68
อลูมิเนียม	10307.32	ราคาขดลวดแรงต่ำ (บาท)	10307.32
ทองแดง	19097.41	ราคาขดลวดแรงสูง (บาท)	19097.41
น้ำมันหม้อแปลง	12925.44	ราคาน้ำมันหม้อแปลง (บาท)	12134.49
วัสดุทั้งหมด	70025.86	ราคาวัสดุหลักทั้งหมด (บาท)	69234.91

← กลับ พิมพ์ จบการทำงาน

ภาพที่ 6.22 แสดงผลลัพธ์การออกแบบตัวอย่างที่ 2 ฟอรัมที่ 12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.1 สรุปผลจากการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายตัวอย่างที่ 2

1. ข้อกำหนดรายละเอียด(Specification)

พิกัดกำลังไฟฟ้า	160 kVA
จำนวนเฟส	3
ความถี่	50 Hz
แรงดันสูง	33 kV
แรงดันต่ำ(L-L / L-E)	400/230 V
เวกเตอร์กรุป	Dyn 11
ค่าสูญเสียขณะไม่มีโหลด	370 W
ค่าสูญเสียขณะมีโหลด	2100 W
อิมพีแดนซ์ลัดวงจร	4 %

2. แกนเหล็กของหม้อแปลงจำหน่าย (ตัวอย่างที่ 2)

ความหนาของแผ่นเหล็ก	0.27 มม.
ลามีเนชันแพคเตอร์	0.97
เส้นผ่าศูนย์กลางแกนเหล็ก	135 มม.
พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็ก	129.97 ตร.ซม.
ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก	1.63 เทสลา
ค่าความสูญเสียแกนเหล็ก	1.11 W/kg
น้ำหนักของแกนเหล็ก	307.73 กก.

2.1 ขนาดของขาแกนเหล็ก Outer limb (ตัวอย่างที่ 2)

Step	a	b	c	จำนวนแผ่นทั้งหมด	น้ำหนัก
1	130	805	545	272	47.82
2	120	795	555	192	31.16
3	110	785	565	120	17.85
4	100	775	575	96	12.98
5	90	765	585	72	8.76
6	80	755	595	64	6.92
7	70	745	605	48	4.54
8	60	735	615	40	3.25
9	50	725	625	32	2.16

2.2 ขนาดของขาแกนเหล็ก Center limb (ตัวอย่างที่ 2)

Step	a	d	e	f	จำนวนแผ่นทั้งหมด	น้ำหนัก
1	130	545	110	655	136	21.25
2	120	555	100	655	96	13.96
3	110	565	90	655	60	8.07
4	100	575	80	655	48	5.91
5	90	585	70	655	36	4.02
6	80	595	60	655	32	3.21
7	70	605	50	655	24	2.12
8	60	615	40	655	20	1.53
9	50	625	30	655	16	1.03

2.3 ขนาดของแกนเหล็ก Yoke (ตัวอย่างที่ 2)

Step	a	g	h	i	จำนวนแผ่นทั้งหมด	น้ำหนัก
1	130	684	147	65	272	39.25
2	120	674	157	60	192	25.57
3	110	664	167	55	120	14.65
4	100	654	177	50	96	10.66
5	90	644	187	45	72	7.19
6	80	634	197	40	64	5.68
7	70	624	207	35	48	3.73
8	60	614	217	30	40	2.66
9	50	604	227	25	32	1.78

3. ขดลวดของหม้อแปลง (ตัวอย่างที่ 2)

	แรงต่ำ สไฟร์ล	แรงสูง คروش โอเวอร์
ชนิดของการพันขดลวด	Star	Delta
การต่อขดลวด	ทองแดง	ทองแดง
วัสดุของตัวนำ	สี่เหลี่ยมแบน	กลม
รูปร่างขดลวด	3.0 × 9.0	1.00
ขนาดเส้นลวด(กว้าง×หนา / เส้นผ่าศูนย์กลาง)		
จำนวนเส้นลวด		
- แนวนอร์มัล	2	1
- แนวแกน	2	1
ความหนาแน่นกระแส(A/mm. ²)	2.21	2.06
จำนวนรอบทั้งหมด	49	7350
จำนวนตอนต่อเฟส	1	4
จำนวนรอบต่อหนึ่งตอน	49	1838
จำนวนรอบต่อชั้น	24.5	101
จำนวนชั้นต่อตอน	2	19
ความสูงคอยล์ต่อหนึ่งตอน(มม.)	490	109
ความสูงคอยล์ทั้งหมด(มม.)	490	466
ความหนาคอยล์(มม.)	16.6	28.0
เส้นผ่าศูนย์กลางด้านใน(มม.)	135	204

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นผ่าศูนย์กลางด้านนอก(มม.)	171	260
ความต้านทานต่อเฟส (20 °C)(โอห์ม)	0.003921	117.60
น้ำหนักขดลวดทองแดง(กก.)	66.50	112.34
จำนวนรอบขดลวดแต่ละแท่ง		
แท่ง 1. 34650 โวลท์	7350 รอบ	
2. 33825 โวลท์	7174 รอบ	
3. 33000 โวลท์	6998 รอบ	
4. 32175 โวลท์	6822 รอบ	
5. 31350 โวลท์	6646 รอบ	

4. ฉนวนและร่องน้ำมันระบายความร้อนของขดลวดหม้อแปลง (ตัวอย่างที่ 2)

4.1 ขดลวดแรงต่ำ

ฉนวนด้านในคอยล์(มม.)	1.50
ร่องน้ำมันก่อนพันคอยล์(มม.)	0
ร่องน้ำมันกลางคอยล์(มม.)	1.60
ฉนวนระหว่างชั้นของขดลวด(มม.)	0
ร่องน้ำมันหลังพันขดลวด(มม.)	5.0
กระดาษฉนวนหัว-ท้ายคอยล์(มม.)	15
กระดาษฉนวนระหว่างขดลวดแรงสูงกับแรงต่ำ (มม.)	5.0

4.2 ขดลวดแรงสูง

ฉนวนด้านในคอยล์(มม.)	0
ร่องน้ำมันก่อนพันคอยล์(มม.)	5.0
ร่องน้ำมันกลางคอยล์(มม.)	3.2
ฉนวนระหว่างชั้นของขดลวด(มม.)	0.20
ระยะห่างระหว่างตอน(Section) (มม.)	9.6

5. ตัวถังและครีบบระบายความร้อน (ตัวอย่างที่ 2)

5.1 ตัวถัง

ความกว้าง(มม.)	390
ความยาว(มม.)	934
ความสูง(มม.)	995
เส้นผ่าศูนย์กลางกลางคอนเซอริเวเตอร์(มม.)	190

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาวถึงคอนเซอ์เวเตอร์(มม.) 640

5.2 ครีประบายความร้อนชนิดแผ่น(Radiator fin)

ความกว้างครีป(มม.) 400

ความสูงครีป(มม.) 700

จำนวนแผ่นครีปต่อชุด 2

จำนวนชุดต่อเครื่อง 2

5.3 ครีประบายความร้อนชนิดลอนลูกฟูก(Corrugated fin)

ความสูงครีป(มม.) 700

ความสูง Fin(มม.) 70

ระยะห่างระหว่าง Fin (มม.) 60

จำนวน Fin ต่อชุด

- ด้านกว้างของถึง 5

- ด้านยาวของถึง 14

จำนวนชุดต่อเครื่อง

- ด้านกว้างของถึง 2

- ด้านยาวของถึง 1

ปริมาตรน้ำมัน(ลิตร)

- ครีชนิดแผ่น 287.23

- ครีชนิดลอนลูกฟูก 269.66

6. คุณสมบัติทางไฟฟ้าของหม้อแปลง (ตัวอย่างที่ 2)

No load loss 341.58 W

Load loss 2034.23 W

% Reactance 3.78 %

% Resistance 1.27 %

% Impedance 3.99 %

Efficiency 98.54 %

Regulation(Pf.=1) 1.34 %

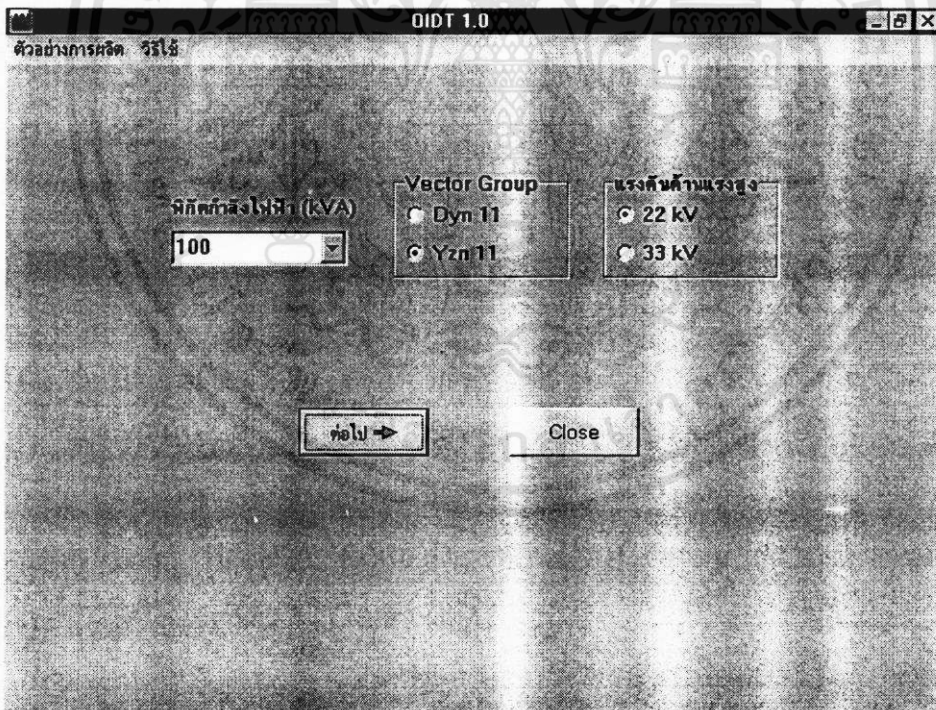
Short circuit current(Sym.) 5.79 kA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. ต้นทุนวัสดุหลัก (ตัวอย่างที่ 2)

ราคาแกนเหล็ก	27695.68 บาท
ราคาขดลวดแรงต่ำ	10307.32 บาท
ราคาขดลวดแรงสูง	19097.41 บาท
ราคาน้ำมันหม้อแปลง	
- Radiator	12925.44 บาท
- Corrugated	12134.49 บาท
ราคาค่าต้นทุนรวม	
- Radiator	70025.86 บาท
- Corrugated	69234.91 บาท

6.3 ตัวอย่างที่ 3 การวิเคราะห์ห่ออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 100 kVA 3 ph 50 Hz 22 kV - 400/230 V เวกเตอร์กรุป Yzn 11 ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ห่ออกแบบโดย OIDS เป็นดังนี้



ภาพที่ 6.23 แสดงผลลัพธ์การออกแบบตัวอย่างที่ 3 ฟอรัมที่ 1

Transformer Core Design

พิกัดของหม้อแปลง = 100 kVA
Diameter of Core = 120

110 กว้างครึ่งเหล็ก Step 1
8 step ของแกนเหล็ก
10 กว้างหนาตลง step a=
0.27 กว้างหนาแผ่นเหล็ก

คำนวณ
Reset

← กลับ พิมพ์ วัตถุ ต่อไป →

กว้างครึ่งเหล็กในแต่ละ step

1. 110	4. 80	7. 50
2. 100	5. 70	8. 40
3. 90	6. 60	9. 0

Step	Core thick	Area	จำนวนแผ่น
1.	23.98	51.17	90
2.	9.19	17.82	34
3.	6.52	11.38	24
4.	5.04	7.81	20
5.	4.01	5.45	16
6.	3.23	3.76	12
7.	2.58	2.5	10
8.	2.02	1.57	8
9.	-	-	-

ภาพที่ 6.24 แสดงผลลัพธ์การออกแบบตัวอย่างที่ 3 ฟอรัมที่ 2

ชนิดลวดแร่ค่าแบบ Yzn11

36 จำนวนรอบแร่ค่า

ขนาดลวดแร่ค่า

4.5 ความหนา
9.5 ความกว้าง

การวางลวด

2 Radial
1 Axial

1 จำนวนชั้นลวด
0 ร่องน้ำมันกลางลวด

1.5 ฉนวนด้านในคอร์ด
0 ร่องน้ำมันก่อนพันคอร์ด
3.2 ร่องน้ำมันระหว่างคอร์ด
0 ฉนวนระหว่างคอร์ด

ผลการออกแบบ Coil I

1.74 Current density
11 ขนาดคอร์ด (Radial)
375 ขนาดคอร์ด (Axial)
123 dia. ด้านใน
146 dia. ด้านนอก

ผลการออกแบบ Coil II

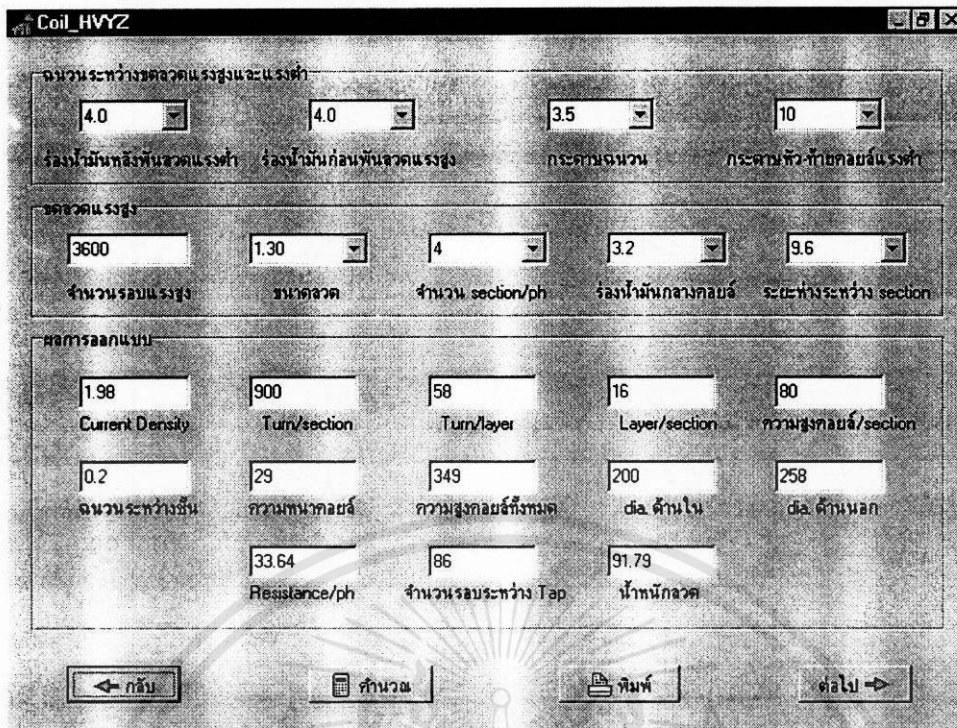
1.74 Current density
11 ขนาดคอร์ด (Radial)
375 ขนาดคอร์ด (Axial)
152 dia. ด้านใน
175 dia. ด้านนอก

.007037 Resistance/ph
74.8 น้ำหนักลวด

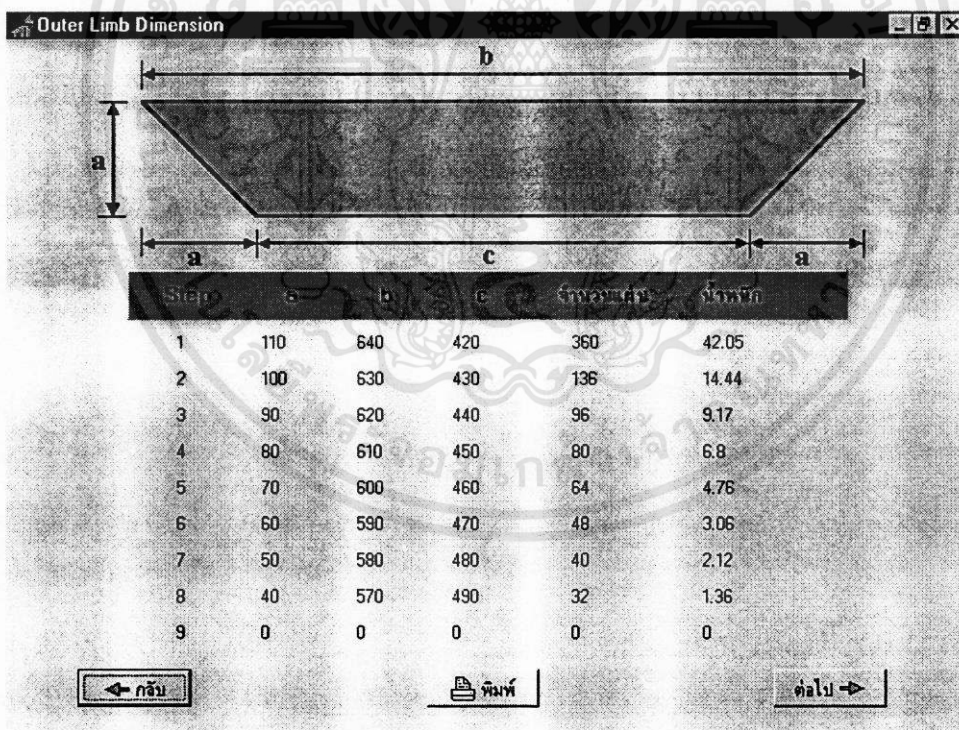
← กลับ คำนวณ พิมพ์ ขนาดลวด ต่อไป →

ภาพที่ 6.25 แสดงผลลัพธ์การออกแบบตัวอย่างที่ 3 ฟอรัมที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

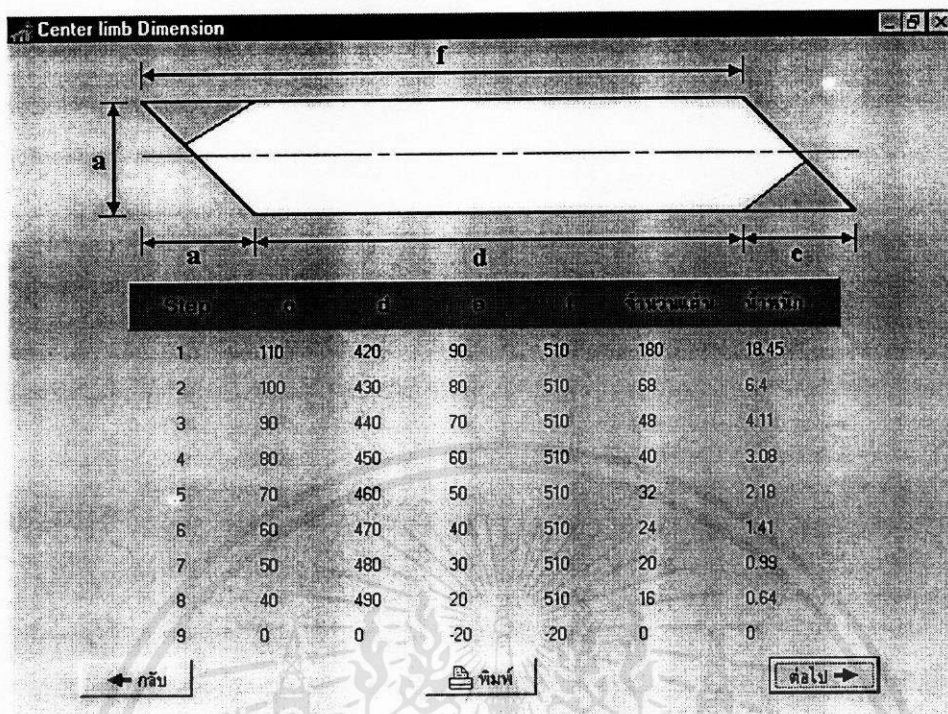


ภาพที่ 6.26 แสดงผลลัพธ์การออกแบบตัวอย่างที่ 3 ฟอর্মที่ 5

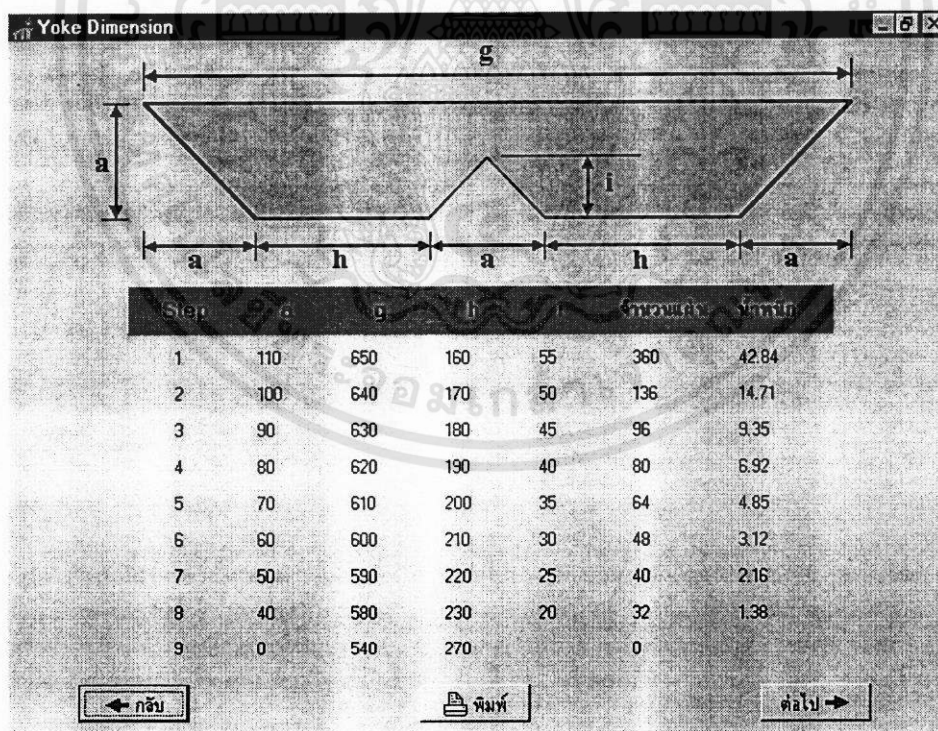


ภาพที่ 6.27 แสดงผลลัพธ์การออกแบบตัวอย่างที่ 3 ฟอর্মที่ 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

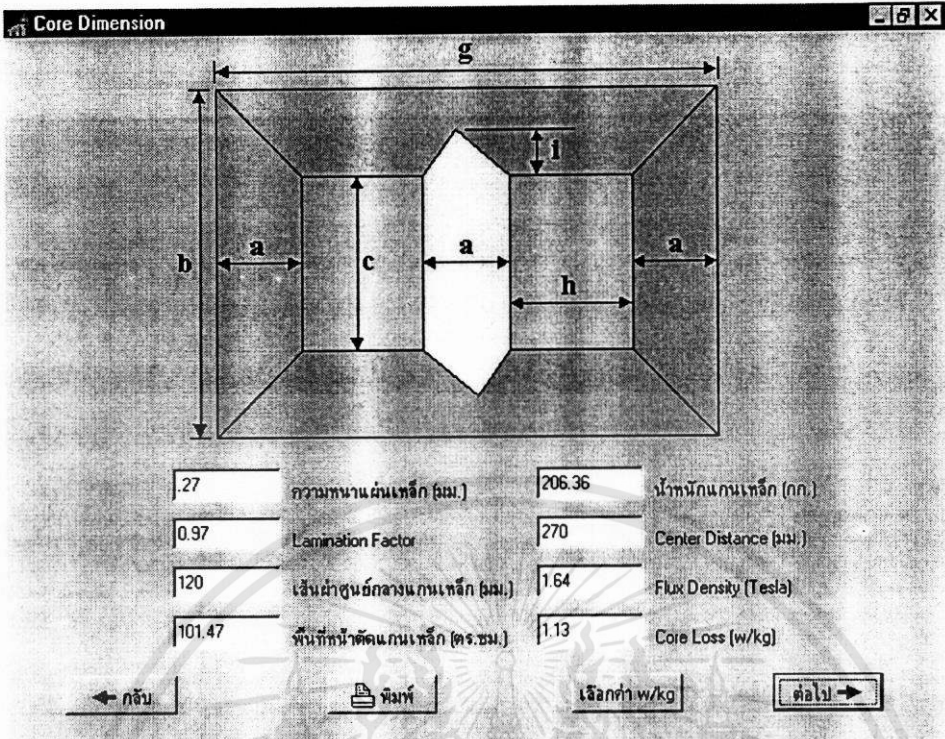


ภาพที่ 6.28 แสดงผลลัพธ์การออกแบบตัวอย่างที่ 3 ฟอรัมที่ 7

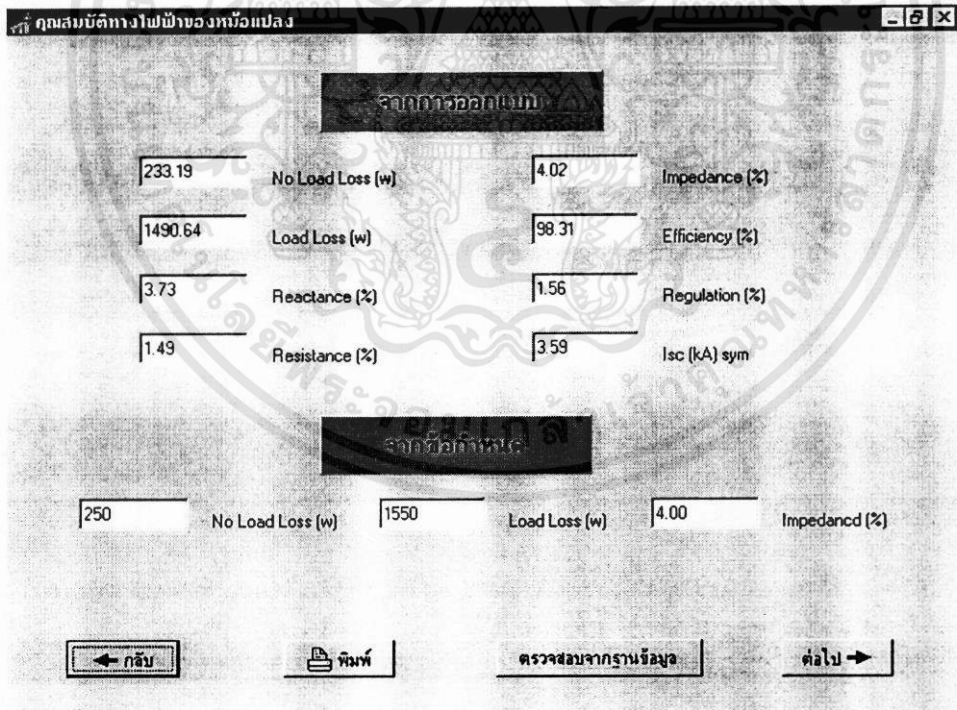


ภาพที่ 6.29 แสดงผลลัพธ์การออกแบบตัวอย่างที่ 3 ฟอรัมที่ 8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 6.30 แสดงผลลัพธ์การออกแบบตัวอย่างที่ 3 ฟอর্মที่ 9



ภาพที่ 6.31 แสดงผลลัพธ์การออกแบบตัวอย่างที่ 3 ฟอর্মที่ 10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวถังและกริประบายความร้อน

ตัวถัง

368 กว้าง 898 ยาว 810 สูง 190 Conservator dia 618 Conservator length

Radiator Fins

400 กว้าง 500 สูง

2 จำนวนชุด 2 จำนวนแผ่น/ชุด

Corrugated Fins

600 ความสูงกริป 50 ความสูง Fins 60 ระยะห่างระหว่าง Fins

1 ติดกริปด้านความยาว 2 ติดกริปด้านความกว้าง

ผลการออกแบบ Radiator

3.65 พื้นที่ผิวที่ออกแบบ 3.45 พื้นที่ผิวที่ต้องการ

214.16 ปริมาตรน้ำมันหม้อแปลง

ผลการออกแบบ Corrugated

14 จำนวน Fins ด้านความยาว 5 จำนวน Fins ด้านความกว้าง

3.49 พื้นที่ผิวที่ออกแบบ 3.45 พื้นที่ผิวที่ต้องการ

195.85 ปริมาตรน้ำมันหม้อแปลง

← กลับ พิมพ์ จำนวน ต่อไป →

ภาพที่ 6.32 แสดงผลลัพธ์การออกแบบตัวอย่างที่ 3 ฟอรัมที่ 11

ต้นทุนวัสดุหลัก

ราคาต้นทุนวัสดุหลัก

Radiator		Corrugated	
18572.7	ราคาแกนเหล็ก (บาท)	18572.7	ราคาแกนเหล็ก (บาท)
11594.61	ราคาชุดขวดแรงต่ำ (บาท)	11594.61	ราคาชุดขวดแรงต่ำ (บาท)
15603.57	ราคาชุดขวดแรงสูง (บาท)	15603.57	ราคาชุดขวดแรงสูง (บาท)
9637.15	ราคาน้ำมันหม้อแปลง (บาท)	8813.05	ราคาน้ำมันหม้อแปลง (บาท)
55408.02	ราคาวัสดุหลักทั้งหมด (บาท)	54583.93	ราคาวัสดุหลักทั้งหมด (บาท)

← กลับ พิมพ์ จบการทำงาน

ภาพที่ 6.33 แสดงผลลัพธ์การออกแบบตัวอย่างที่ 3 ฟอรัมที่ 12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3.1 สรุปผลจากการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายตัวอย่างที่ 3

1. ข้อกำหนดรายละเอียด(Specification)

พิกัดกำลังไฟฟ้า	100 kVA
จำนวนเฟส	3
ความถี่	50 Hz
แรงดันสูง	22 kV
แรงดันต่ำ(L-L / L-E)	400/230 V
เวกเตอร์กรุป	Yzn 11
ค่าสูญเสียขณะไม่มีโหลด	250 W
ค่าสูญเสียขณะมีโหลด	1550 W
อิมพีแดนซ์ลัดวงจร	4 %

2. แกนเหล็กของหม้อแปลงจำหน่าย (ตัวอย่างที่ 3)

ความหนาของแผ่นเหล็ก	0.27 มม.
ลามีเนชันแพคเตอร์	0.97
เส้นผ่าศูนย์กลางแกนเหล็ก	120 มม.
พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็ก	101.47 ตร.ซม.
ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก	1.64 เทสลา
ค่าความสูญเสียแกนเหล็ก	1.13 W/kg
น้ำหนักของแกนเหล็ก	206.36 กก.

2.1 ขนาดของขาแกนเหล็ก Outer limb (ตัวอย่างที่ 3)

Step	a	b	c	จำนวนแผ่นทั้งหมด	น้ำหนัก
1	110	640	420	360	42.05
2	100	630	430	136	14.44
3	90	620	440	96	9.17
4	80	610	450	80	6.80
5	70	600	460	64	4.76
6	60	590	470	48	3.06
7	50	580	480	40	2.12
8	40	570	490	32	1.36
9	0	0	0	0	0

2.2 ขนาดของขาแกนเหล็ก Center limb (ตัวอย่างที่ 3)

Step	a	d	e	f	จำนวนแผ่นทั้งหมด	น้ำหนัก
1	110	420	90	510	180	18.45
2	100	430	80	510	68	6.40
3	90	440	70	510	48	4.11
4	80	450	60	510	40	3.08
5	70	460	50	510	32	2.18
6	60	470	40	510	24	1.41
7	50	480	30	510	20	0.99
8	40	490	20	510	16	0.64
9	0	0	0	0	0	0

2.3 ขนาดของแกนเหล็ก Yoke (ตัวอย่างที่ 3)

Step	a	g	h	i	จำนวนแผ่นทั้งหมด	น้ำหนัก
1	110	650	160	55	360	42.84
2	100	640	170	50	136	14.71
3	90	630	180	45	96	9.35
4	80	620	190	40	80	6.92
5	70	610	200	35	64	4.85
6	60	600	210	30	48	3.12
7	50	590	220	25	40	2.16
8	40	580	230	20	32	1.38
9	0	0	0	0	0	0

3. ขดลวดของหม้อแปลง (ตัวอย่างที่ 3)

	แรงต่ำ สไฟรล์	แรงสูง คอรสโอเวอร์
ชนิดของการพันขดลวด	สไฟรล์	คอรสโอเวอร์
การต่อขดลวด	Zigzag	Star
วัสดุของตัวนำ	ทองแดง	ทองแดง
รูปร่างขดลวด	สี่เหลี่ยมแบน	กลม
ขนาดเส้นลวด(กว้าง×หนา / เส้นผ่าศูนย์กลาง)	4.5 × 9.5	1.30
จำนวนเส้นลวด		
- แนวนรัศมี	2	1
- แนวแกน	1	1
ความหนาแน่นกระแส(A/mm. ²)	1.74	1.98
จำนวนรอบทั้งหมด	36	3600
จำนวนตอนต่อเฟส	1	4
จำนวนรอบต่อหนึ่งตอน	36	900
จำนวนรอบต่อชั้น	36	58
จำนวนชั้นต่อตอน	1	16
ความสูงคอยล์ต่อหนึ่งตอน(มม.)	375	80
ความสูงคอยล์ทั้งหมด(มม.)	375	349
ความหนาคอยล์ทั้งหมด(คอยล์1&2)(มม.)	25.2	29.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นผ่าศูนย์กลางด้านใน(มม.)		200
- คอยล์ 1 (มม.)	123	-
- คอยล์ 2 (มม.)	152	-
เส้นผ่าศูนย์กลางด้านนอก(มม.)		258
- คอยล์ 1 (มม.)	146	
- คอยล์ 2 (มม.)	175	
ความต้านทานต่อเฟส (20 °C)(โอห์ม)	0.007037	33.64
น้ำหนักขดลวดทองแดง(กก.)	74.80	91.76
จำนวนรอบขดลวดแต่ละแท่ง		
แท่งที่ 1. 23100 โวลท์	3600 รอบ	
2. 22550 โวลท์	3514 รอบ	
3. 22000 โวลท์	3428 รอบ	
4. 21450 โวลท์	3342 รอบ	
5. 20900 โวลท์	3256 รอบ	

4. ฉนวนและร่องน้ำมันระบายความร้อนของขดลวดหม้อแปลง (ตัวอย่างที่ 3)

4.1 ขดลวดแรงต่ำ

ฉนวนด้านในคอยล์(มม.)	1.50
ร่องน้ำมันก่อนพันคอยล์ 1 (มม.)	0
ร่องน้ำมันกลางคอยล์ 1&2 (มม.)	0
ฉนวนระหว่างชั้นของขดลวดคอยล์ 1&2 (มม.)	0
ร่องน้ำมันระหว่างคอยล์(มม.)	3.2
กระดาษฉนวนระหว่างคอยล์ 1 กับ 2 (มม.)	0
ร่องน้ำมันหลังพันขดลวดคอยล์ที่ 2 (มม.)	4.0
กระดาษฉนวนระหว่างขดลวดแรงสูงกับแรงต่ำ (มม.)	3.5
กระดาษฉนวนหัว-ท้ายคอยล์(มม.)	10

4.2 ขดลวดแรงสูง

ฉนวนด้านในคอยล์(มม.)	0
ร่องน้ำมันก่อนพันคอยล์(มม.)	4.0
ร่องน้ำมันกลางคอยล์(มม.)	3.2
ฉนวนระหว่างชั้นของขดลวด(มม.)	0.20
ระยะห่างระหว่างตอน(Section) (มม.)	9.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ตัวถังและครีบบระบายความร้อน (ตัวอย่างที่ 3)

5.1 ตัวถัง

ความกว้าง(มม.)	368
ความยาว(มม.)	898
ความสูง(มม.)	810
เส้นผ่าศูนย์กลางคอนเซอร์เวเตอร์(มม.)	190
ความยาวถึงคอนเซอร์เวเตอร์(มม.)	618

5.2 ครีบบระบายความร้อนชนิดแผ่น(Radiator fin)

ความกว้างครีบ(มม.)	400
ความสูงครีบ(มม.)	500
จำนวนแผ่นครีบต่อชุด	2
จำนวนชุดต่อเครื่อง	2

5.3 ครีบบระบายความร้อนชนิดลอนลูกฟูก(Corrugated fin)

ความสูงครีบ(มม.)	600
ความสูง Fin(มม.)	50
ระยะห่างระหว่าง Fin (มม.)	60
จำนวน Fin ต่อชุด	
- ด้านกว้างของถัง	5
- ด้านยาวของถัง	14
จำนวนชุดต่อเครื่อง	
- ด้านกว้างของถัง	2
- ด้านยาวของถัง	1
ปริมาตรน้ำมัน(ลิตร)	
- ครีบบชนิดแผ่น	214.16
- ครีบบชนิดลอนลูกฟูก	195.85

6. คุณสมบัติทางไฟฟ้าของหม้อแปลง (ตัวอย่างที่ 3)

No load loss	233.19 W
Load loss	1490.64 W
% Reactance	3.73 %
% Resistance	1.49 %
% Impedance	4.02 %

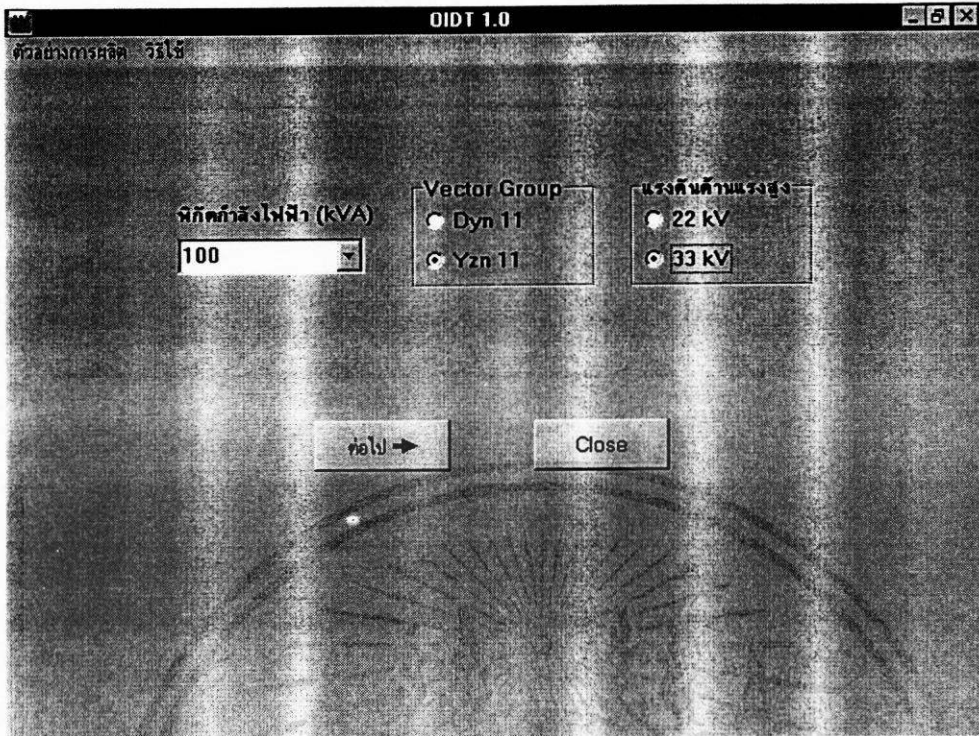
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Efficiency	98.31 %
Regulation(Pf.=1)	1.56 %
Short circuit current(Sym.)	3.59 kA

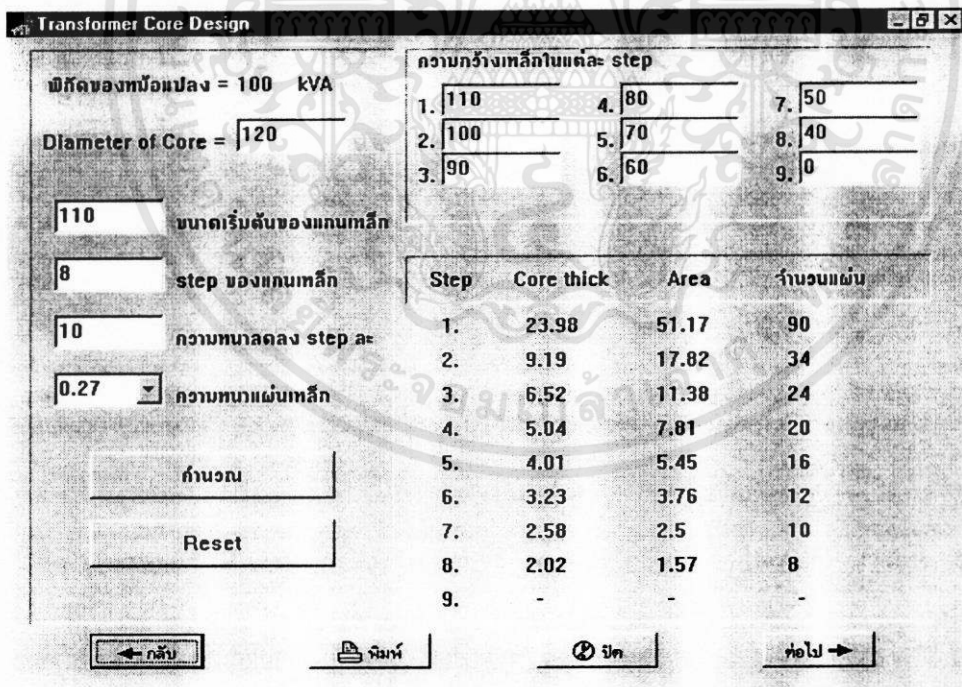
7. ต้นทุนวัสดุหลัก (ตัวอย่างที่ 3)

ราคาแกนเหล็ก	18572.70 บาท
ราคาขดลวดแรงต่ำ	11594.61 บาท
ราคาขดลวดแรงสูง	15603.57 บาท
ราคาน้ำมันหม้อแปลง	
- Radiator	9637.15 บาท
- Corrugated	8813.05 บาท
ราคาค่าต้นทุนรวม	
- Radiator	55408.02 บาท
- Corrugated	54583.93 บาท

6.4 ตัวอย่างที่ 4 การวิเคราะห์ห้ออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 100 kVA 3 ph 50 Hz 33 kV - 400/230 V เวกเตอร์กรุป Yzn 11 ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ห้ออกแบบโดย OIDS เป็นดังนี้



ภาพที่ 6.34 แสดงผลลัพธ์การออกแบบตัวอย่างที่ 4 ฟอรัมที่ 1



ภาพที่ 6.35 แสดงผลลัพธ์การออกแบบตัวอย่างที่ 4 ฟอรัมที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขดลวดเรียงตามแบบ Yzn11

จำนวนรอบแรงต่ำ: 36

ขนาดขดแรงต่ำ: ความหนา 3.5, ความกว้าง 10

การวางขด: Radial 2, Axial 1

จำนวนชั้นขดขด: 1, ร่องน้ำมันกลางขด: 0

จำนวนคานในขด: 1.5, ร่องน้ำมันก่อนพันขด: 0, ร่องน้ำมันระหว่างขด: 3.2, จำนวนระหว่างขด: 0

ผลการออกแบบ Coil I: Current density 2.13, ขนาดขด (Radial) 9, ขนาดขด (Axial) 394, dia. ด้านใน 123, dia. ด้านนอก 142

ผลการออกแบบ Coil II: Current density 2.13, ขนาดขด (Radial) 9, ขนาดขด (Axial) 394, dia. ด้านใน 148, dia. ด้านนอก 167

Resistance/ph: 008365, น้ำหนักขด: 59.6

ปุ่ม: กลับ, จำนวน, พิมพ์, ขนาดขด, ต่อไป

ภาพที่ 6.36 แสดงผลลัพธ์การออกแบบตัวอย่างที่ 4 ฟอรัมที่ 4

Coil_HVYZ

จำนวนระหว่างขดขด แรงสูงและแรงต่ำ: 5.0, 5.0, 5.0, 15

ร่องน้ำมันทั้งขดขดแรงต่ำ, ร่องน้ำมันก่อนพันขดขดแรงสูง, กระดาษฉนวน, กระดาษทิวท้ายขดขดแรงต่ำ

ขดขดแรงสูง: จำนวนรอบแรงสูง 5400, ขนาดขด 1.10, จำนวน section/ph 4, ร่องน้ำมันกลางขด 3.2, ระยะห่างระหว่าง section 9.6

ผลการออกแบบ: Current Density 1.84, Turn/section 1350, Turn/layer 72, Layer/section 19, ความสูงขด/section 85

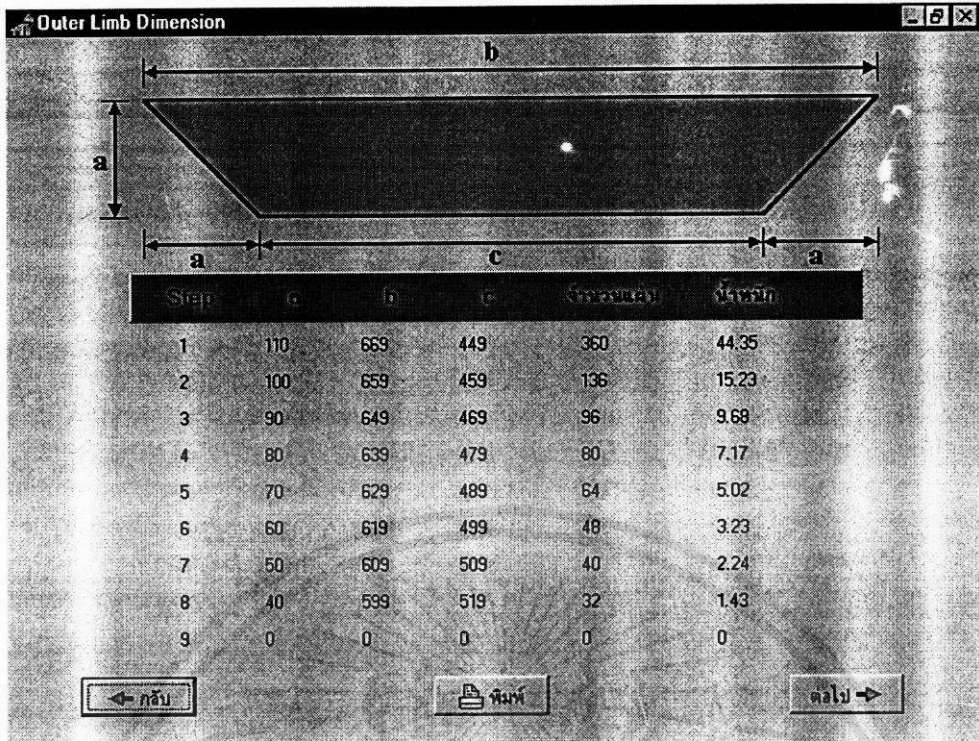
จำนวนระหว่างชั้น 0.2, ความหนาขด 30, ความสูงขดทั้งหมด 369, dia. ด้านใน 200, dia. ด้านนอก 260

Resistance/ph 70.79, จำนวนรอบระหว่าง Tap 129, น้ำหนักขด 99.01

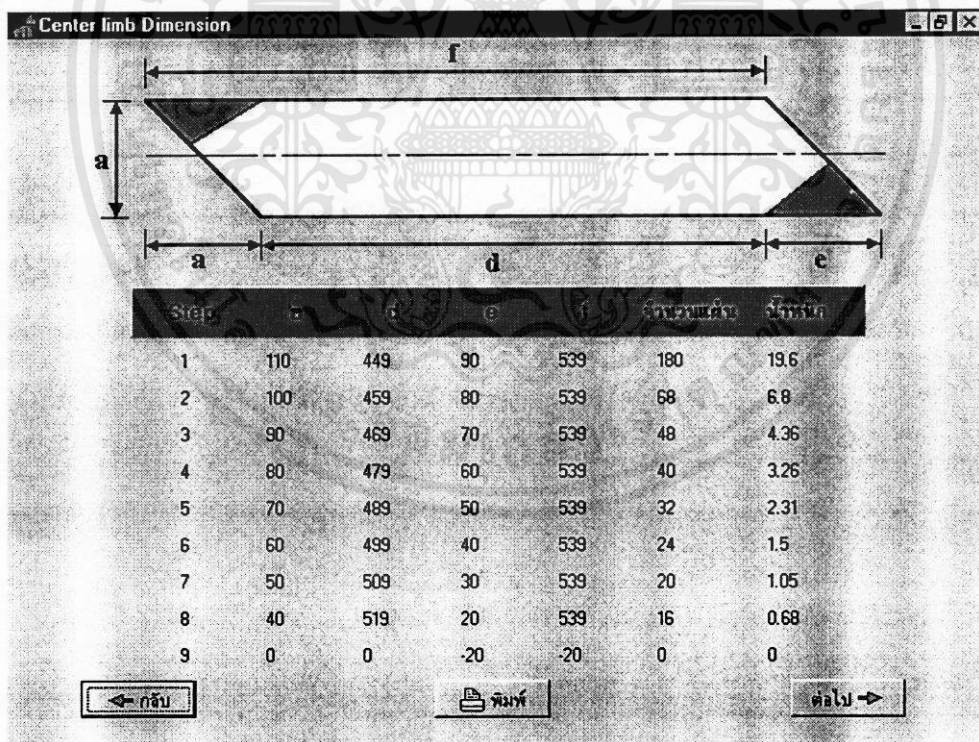
ปุ่ม: กลับ, จำนวน, พิมพ์, ต่อไป

ภาพที่ 6.37 แสดงผลลัพธ์การออกแบบตัวอย่างที่ 4 ฟอรัมที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

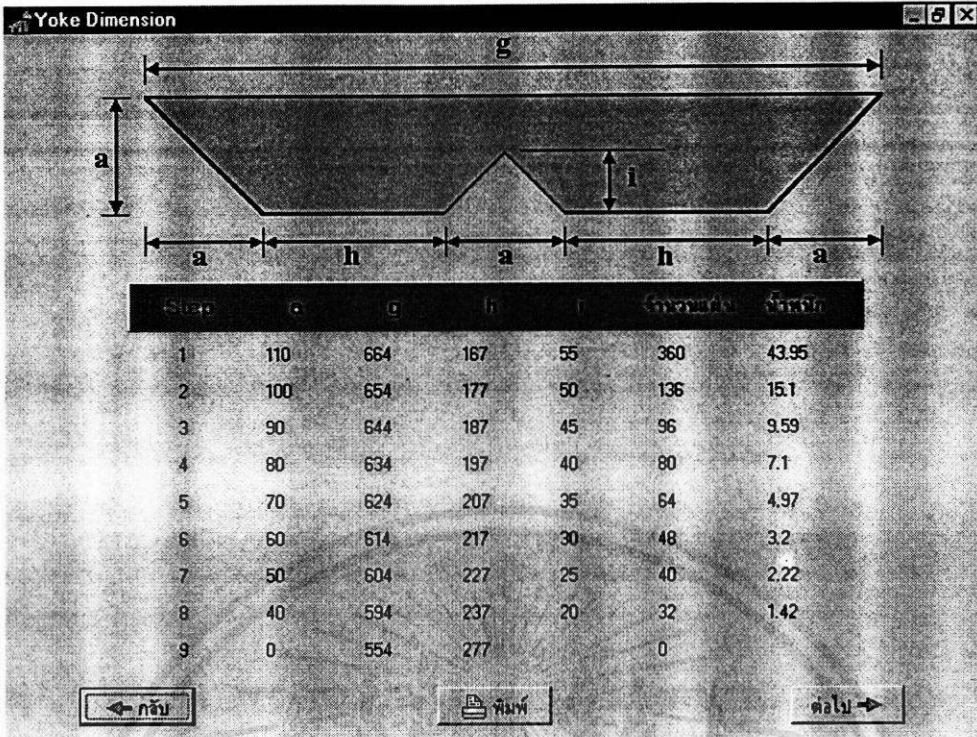


ภาพที่ 6.38 แสดงผลลัพธ์การออกแบบตัวอย่างที่ 4 รูปแบบที่ 6

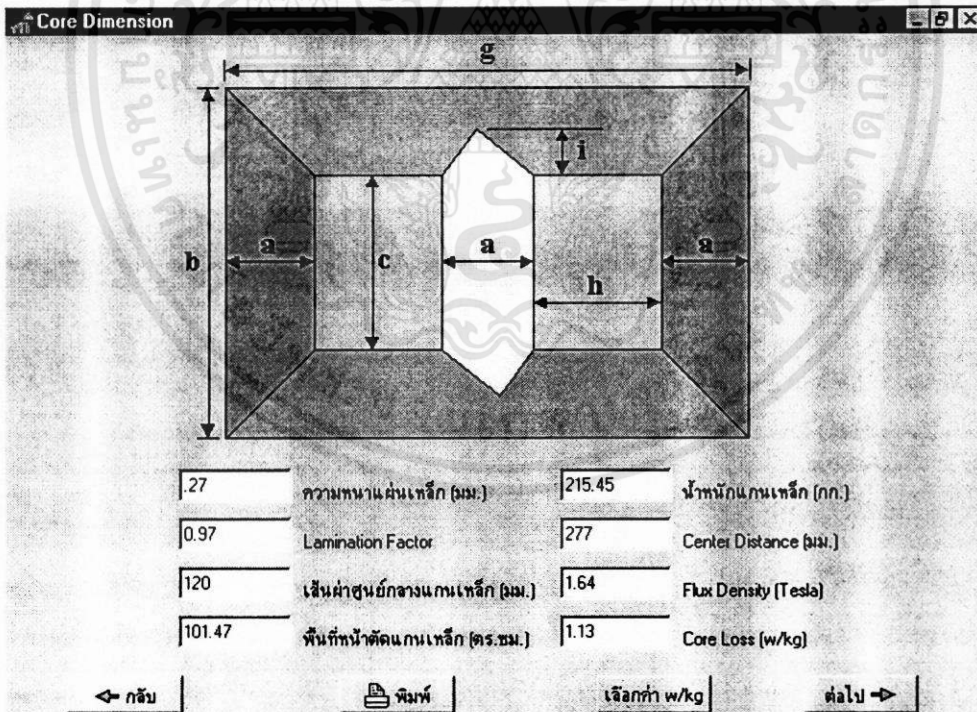


ภาพที่ 6.39 แสดงผลลัพธ์การออกแบบตัวอย่างที่ 4 รูปแบบที่ 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 6.40 แสดงผลลัพธ์การออกแบบตัวอย่างที่ 4 ฟอর্মที่ 8



ภาพที่ 6.41 แสดงผลลัพธ์การออกแบบตัวอย่างที่ 4 ฟอর্মที่ 9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของหม้อแปลง

จากผลการคำนวณ

243.46	No Load Loss (w)	4.15	Impedance (%)
1540.51	Load Loss (w)	98.25	Efficiency (%)
3.85	Reactance (%)	1.61	Regulation (%)
1.54	Resistance (%)	3.48	Isc (kA sym)

การเลือกเฟ้น

260	No Load Loss (w)	1550	Load Loss (w)	4.00	Impedance (%)
-----	------------------	------	---------------	------	---------------

← กลับ พิมพ์ ตรวจสอบจากฐานข้อมูล ไป →

ภาพที่ 6.42 แสดงผลลัพธ์การออกแบบตัวอย่างที่ 4 ฟอรัมที่ 10

ตัวถังและกระบะระบายความร้อน

ตัวถัง

390	934	859	190	640
กว้าง	ยาว	สูง	Conservator dia.	Conservator length

Radiator Fins

400	500
กว้าง	สูง
2	2
จำนวนชุด	จำนวนแผ่น/ชุด

Corrugated Fins

600	50	60
ความสูงกรีบ	ความสูง Fins	ระยะห่างระหว่าง Fins
1	2	
ติดกรีบด้านความยาว	ติดกรีบด้านความกว้าง	

ผลการออกแบบ Radiator

3.87	3.57
พื้นที่ผิวที่ออกแบบ	พื้นที่ผิวที่ต้องการ
254.08	
ปริมาณน้ำมันหม้อแปลง	

ผลการออกแบบ Corrugated

14	5
จำนวน Fins ด้านความยาว	จำนวน Fins ด้านความกว้าง
3.71	3.57
พื้นที่ผิวที่ออกแบบ	พื้นที่ผิวที่ต้องการ
235.14	
ปริมาณน้ำมันหม้อแปลง	

← กลับ พิมพ์ จำนวน ไป →

ภาพที่ 6.43 แสดงผลลัพธ์การออกแบบตัวอย่างที่ 4 ฟอรัมที่ 11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก	1.64 เทสลา
ค่าความสูญเสียแกนเหล็ก	1.13 W/kg
น้ำหนักของแกนเหล็ก	215.45 กก.

2.1 ขนาดของขาแกนเหล็ก Outer limb (ตัวอย่างที่ 4)

Step	a	b	c	จำนวนแผ่นทั้งหมด	น้ำหนัก
1	110	669	449	360	44.35
2	100	659	459	136	15.23
3	90	649	469	96	9.68
4	80	639	479	80	7.17
5	70	629	489	64	5.02
6	60	619	499	48	3.23
7	50	609	509	40	2.24
8	40	599	519	32	1.43
9	0	0	0	0	0

2.2 ขนาดของขาแกนเหล็ก Center limb (ตัวอย่างที่ 4)

Step	a	d	e	f	จำนวนแผ่นทั้งหมด	น้ำหนัก
1	110	449	90	539	180	19.60
2	100	459	80	539	68	6.80
3	90	469	70	539	48	4.36
4	80	479	60	539	40	3.26
5	70	489	50	539	32	2.31
6	60	499	40	539	24	1.50
7	50	509	30	539	20	1.05
8	40	519	20	539	16	0.68
9	0	0	0	0	0	0

2.3 ขนาดของแกนเหล็ก Yoke (ตัวอย่างที่ 4)

Step	a	g	h	i	จำนวนแผ่นทั้งหมด	น้ำหนัก
1	110	664	167	55	360	43.95
2	100	654	177	50	136	15.10
3	90	644	187	45	96	9.59
4	80	634	197	40	80	7.10
5	70	624	207	35	64	4.97
6	60	614	217	30	48	3.20
7	50	604	227	25	40	2.22
8	40	594	237	20	32	1.42
9	0	0	0	0	0	0

3. ขดลวดของหม้อแปลง (ตัวอย่างที่ 4)

ชนิดของการพันขดลวด	แรงต่ำ สไฟรัล Zigzag	แรงสูง ครอสโอเวอร์ Star
วัสดุของตัวนำ	ทองแดง	ทองแดง
รูปร่างขดลวด	สี่เหลี่ยมแบน	กลม
ขนาดเส้นลวด(กว้าง×หนา/เส้นผ่าศูนย์กลาง)	3.5 × 10.0	1.10
จำนวนเส้นลวด		
- แนวนอร์ศมี	2	1
- แนวแกน	1	1
ความหนาแน่นกระแส(A/mm. ²)	2.13	1.84
จำนวนรอบทั้งหมด	36	5400
จำนวนตอนต่อเฟส	1	4
จำนวนรอบต่อหนึ่งตอน	36	1350
จำนวนรอบต่อชั้น	36	72
จำนวนชั้นต่อตอน	1	19
ความสูงคอยล์ต่อหนึ่งตอน(มม.)	394	85
ความสูงคอยล์ทั้งหมด(มม.)	394	369
ความหนาคอยล์ทั้งหมด(คอยล์1&2)(มม.)	21.2	30.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นผ่าศูนย์กลางด้านใน(มม.)		200
- คอยล์ 1 (มม.)	123	-
- คอยล์ 2 (มม.)	148	-
เส้นผ่าศูนย์กลางด้านนอก(มม.)		260
- คอยล์ 1 (มม.)	142	
- คอยล์ 2 (มม.)	167	
ความต้านทานต่อเฟส (20 °C)(โอห์ม)	0.008365	70.79
น้ำหนักขดลวดทองแดง(กก.)	59.60	99.01
จำนวนรอบขดลวดแต่ละแท็บ		
แท็บ 1. 34650 โวลท์	5400 รอบ	
2. 33825 โวลท์	5271 รอบ	
3. 33000 โวลท์	5142 รอบ	
4. 32175 โวลท์	5013 รอบ	
5. 31350 โวลท์	4884 รอบ	

4. ฉนวนและร่องน้ำมันระบายความร้อนของขดลวดหม้อแปลง (ตัวอย่างที่ 4)

4.1 ขดลวดแรงต่ำ

ฉนวนด้านในคอยล์(มม.)	1.50
ร่องน้ำมันก่อนพันคอยล์ 1 (มม.)	0
ร่องน้ำมันระหว่างคอยล์ 1&2 (มม.)	3.2
ฉนวนระหว่างชั้นของขดลวดคอยล์ 1&2 (มม.)	0
กระดาษฉนวนระหว่างคอยล์ 1 กับ 2 (มม.)	0
ร่องน้ำมันหลังพันขดลวดคอยล์ที่ 2 (มม.)	5.0
กระดาษฉนวนระหว่างขดลวดแรงสูงกับแรงต่ำ (มม.)	5.0
กระดาษฉนวนหัว-ท้ายคอยล์(มม.)	15

4.2 ขดลวดแรงสูง

ฉนวนด้านในคอยล์(มม.)	0
ร่องน้ำมันก่อนพันคอยล์(มม.)	5.0
ร่องน้ำมันกลางคอยล์(มม.)	3.2
ฉนวนระหว่างชั้นของขดลวด(มม.)	0.20
ระยะห่างระหว่างตอน(Section) (มม.)	9.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ตัวถังและครีบบระบายความร้อน (ตัวอย่างที่ 3)

5.1 ตัวถัง

ความกว้าง(มม.)	390
ความยาว(มม.)	934
ความสูง(มม.)	859
เส้นผ่าศูนย์กลางคอนเซอร์เวเตอร์(มม.)	190
ความยาวถังคอนเซอร์เวเตอร์(มม.)	640

5.2 ครีบบระบายความร้อนชนิดแผ่น(Radiator fin)

ความกว้างครีบบ(มม.)	400
ความสูงครีบบ(มม.)	500
จำนวนแผ่นครีบบต่อชุด	2
จำนวนชุดต่อเครื่อง	2

5.3 ครีบบระบายความร้อนชนิดลอนลูกฟูก(Corrugated fin)

ความสูงครีบบ(มม.)	600
ความสูง Fin(มม.)	50
ระยะห่างระหว่าง Fin (มม.)	60
จำนวน Fin ต่อชุด	
- ด้านกว้างของถัง	5
- ด้านยาวของถัง	14
จำนวนชุดต่อเครื่อง	
- ด้านกว้างของถัง	2
- ด้านยาวของถัง	1
ปริมาตรน้ำมัน(ลิตร)	
- ครีบบชนิดแผ่น	254.08
- ครีบบชนิดลอนลูกฟูก	235.14

6. คุณสมบัติทางไฟฟ้าของหม้อแปลง (ตัวอย่างที่ 4)

No load loss	243.46 W
Load loss	1540.51 W
% Reactance	3.85 %
% Resistance	1.54 %
% Impedance	4.15 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Efficiency	98.25 %
Regulation(Pf.=1)	1.61 %
Short circuit current(Sym.)	3.48 kA

7. ต้นทุนวัสดุหลัก (ตัวอย่างที่ 4)

ราคาแกนเหล็ก	19390.55 บาท
ราคาขดลวดแรงต่ำ	9238.68 บาท
ราคาขดลวดแรงสูง	16830.85 บาท
ราคาน้ำมันหม้อแปลง	
- Radiator	11433.61 บาท
- Corrugated	10581.46 บาท
ราคาค่าต้นทุนรวม	
- Radiator	56893.69 บาท
- Corrugated	56041.54 บาท

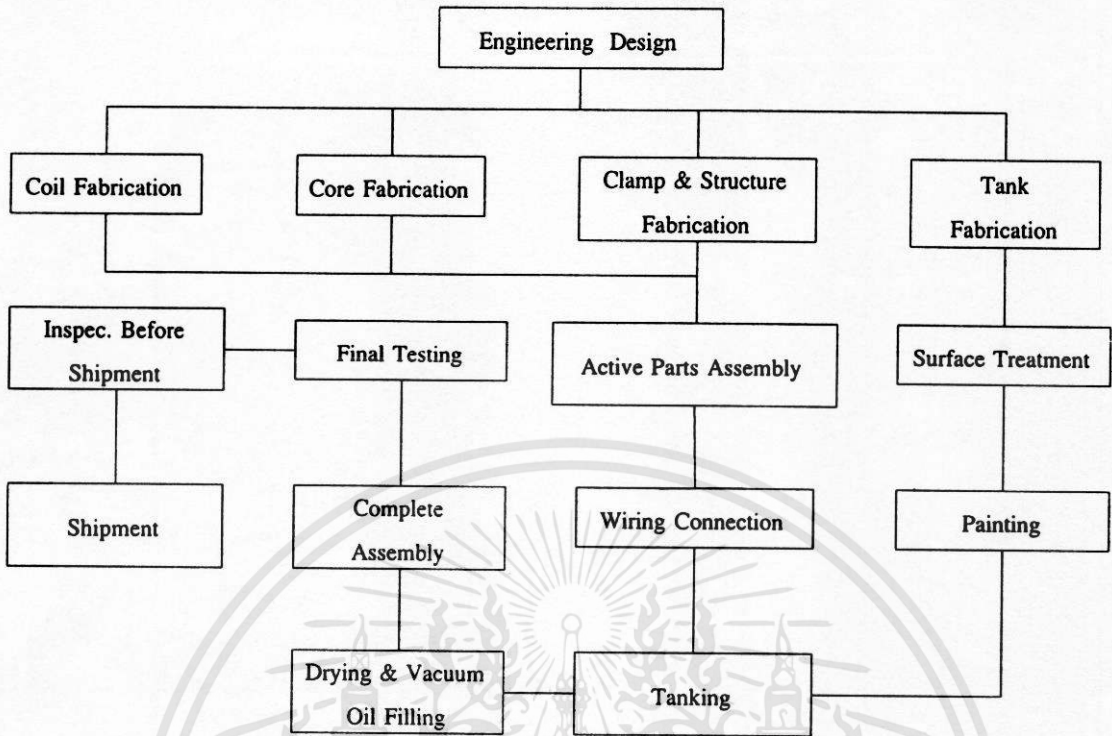
หมายเหตุ

ราคาของวัสดุที่ใช้ในการคำนวณต้นทุนวัสดุในการผลิตหม้อแปลงจำหน่ายเป็นดังนี้

1. แกนเหล็กกิโลกรัมละ 90 บาท
2. ขดลวดสีเหลี่ยมเบนิกิโลกรัมละ 155 บาท
3. ขดลวดกลมอบน้ำยากิโลกรัมละ 170 บาท
4. น้ำมันหม้อแปลงลิตรละ 45 บาท

6.5 ขั้นตอนการสร้างหม้อแปลงจำหน่าย

ในการสร้างหม้อแปลงจำหน่ายนั้นสามารถแบ่งได้หลายขั้นตอน การสร้างในบางขั้นตอนนั้นสามารถที่จะทำงานไปพร้อมๆ กันได้ ขั้นตอนการสร้างหม้อแปลงจำหน่ายแสดงได้ดังภาพที่ 6.45



ภาพที่ 6.45 แผนผังการผลิตหม้อแปลง

บทที่ 7

ผลการทดสอบหม้อแปลงจำหน่าย

การทดสอบเป็นสิ่งสำคัญเพื่อเป็นเครื่องยืนยันถึงคุณภาพของการวิเคราะห์ออกแบบ และคุณภาพของการสร้างหรือผลิต หม้อแปลงจำหน่ายที่สร้างหรือผลิตขึ้นก็เช่นกันก็จะต้องทำการทดสอบเพื่อตรวจสอบคุณสมบัติของหม้อแปลงจำหน่ายว่าเป็นไปตามข้อกำหนดหรือไม่ และเพื่อทำการตรวจเช็คระบบและอุปกรณ์ต่างๆ ของหม้อแปลงด้วยว่าสามารถใช้งานได้อย่างปลอดภัย คงทนต่อภาวะการณต่างๆ ที่อาจจะเกิดขึ้น การทดสอบหม้อแปลงจำหน่ายมีรายละเอียดในการทดสอบดังนี้

7.1 การทดสอบประจำ (Routine Test)

การทดสอบประจำนี้ หม้อแปลงจำหน่ายที่ผลิตหรือสร้างขึ้นจะต้องผ่านการทดสอบประจำทุกเครื่อง การทดสอบประจำมีรายละเอียดในการทดสอบดังนี้

1. การวัดค่าความต้านทานของขดลวด (Measurement of winding resistance)
2. การวัดค่าอัตราส่วนแรงดัน และตรวจสอบสัญลักษณ์เฟส หรือเวกเตอร์กรุป (Measurement of voltage ratio and check of phase displacement)
3. การวัดค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจร และค่าความสูญเสียขณะจ่าย โหลดที่พิกัด (Measurement of short-circuit impedance and load loss)
4. การวัดค่าสูญเสียขณะไม่มีโหลด (Measurement of no-load loss)
5. การทดสอบไดอิเล็กตริก (Dielectric routine test) แยกหัวข้อการทดสอบได้ดังนี้
 - การวัดค่าความต้านทานฉนวน (Measurement of insulation resistance)
 - การทดสอบความคงทนแรงดันจากแหล่งจ่ายอื่น (Separate-source voltage withstand test)
 - การทดสอบความคงทนต่อแรงดันเหนี่ยวนำเกิน (Induced overvoltage withstand test)

7.2 การทดสอบเฉพาะ (Type Test)

การทดสอบเฉพาะนี้จะทำการทดสอบหม้อแปลงจำหน่ายที่สร้างขึ้นเพียงบางเครื่องหรือตามที่ใช้ต้องการให้ทดสอบ รายละเอียดในการทดสอบมีดังนี้

1. การทดสอบอุณหภูมิเพิ่ม (Temperature rise test)
2. การทดสอบไดอิเล็กตริกเฉพาะ (Dielectric type test) แยกหัวข้อได้ดังนี้
 - Lightning impulse test

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.3 การทดสอบหม้อแปลงจำหน่ายที่สร้าง

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นมาทำการวิเคราะห์ออกแบบหม้อแปลงจำหน่าย แล้วนำผลลัพธ์จากการออกแบบมาทำการสร้างจริง โดยใช้ครีบริบายความร้อนชนิดลอนลูกฟูก (Corrugated Fin) ผลการทดสอบมีรายละเอียดดังนี้

7.3.1 ผลการทดสอบหม้อแปลงตัวอย่างที่ 1 ขนาด 160 kVA 3 ph 50 Hz 22 kV-400/230 V เวกเตอร์รูป Dyn 11

ตารางที่ 7.1 การเปรียบเทียบขนาดและน้ำหนักของแกนเหล็กระหว่างข้อมูลจากการออกแบบกับข้อมูลจากการสร้างหม้อแปลงตัวอย่างที่ 1

รายการ	ข้อมูลจากการออกแบบ	ข้อมูลจากการสร้าง	ค่าคลาดเคลื่อน(%)
1.ความสูง Outer limb(มม.)	718	718	0
2.ความสูง Center limb(มม.)	568	568	0
3.ความยาว Yoke(มม.)	658	658	0
4.น้ำหนัก Outer limb(กก.)	117.99	117.10	-0.75
5.น้ำหนัก Center limb(กก.)	52.39	51.50	-1.69
6.น้ำหนัก Yoke(กก.)	105.95	105.10	-0.80
7.น้ำหนักทั้งหมด(กก.)	276.33	273.70	-0.95

ตารางที่ 7.2 การเปรียบเทียบขนาดและน้ำหนักของขดลวดแรงดันต่ำระหว่างข้อมูลจากการออกแบบกับข้อมูลจากการสร้างหม้อแปลงตัวอย่างที่ 1

รายการ	ข้อมูลจากการออกแบบ	ข้อมูลจากการสร้าง	ค่าคลาดเคลื่อน (%)
1.ความสูงขดลวด(มม.)	413	415	0.48
2.ความหนาของขดลวด(มม.)	17	17.5	2.94
3.เส้นผ่าศูนย์กลางคานใน(มม.)	135	135	0
4.เส้นผ่าศูนย์กลางคานนอก(มม.)	172	171	-0.58
5.น้ำหนักขดลวด(กก.)	64.82	65.5	1.05

ตารางที่ 7.3 การเปรียบเทียบขนาดและน้ำหนักของขดลวดแรงดันสูงระหว่างข้อมูลจากการออกแบบกับข้อมูลจากการสร้างหม้อแปลงตัวอย่างที่ 1

รายการ	ข้อมูลจากการออกแบบ	ข้อมูลจากการสร้าง	ค่าคลาดเคลื่อน (%)
1.ความสูงตอตอน(มม.)	90	90	0
2.ความสูงทั้งหมด(มม.)	388	387	-0.26
3.ความหนาของขดลวด(มม.)	29	28	-3.45
4.เส้นผ่าศูนย์กลางคานใน(มม.)	194	195	0.51
5.เส้นผ่าศูนย์กลางคานนอก(มม.)	252	251	-0.39
6.น้ำหนักขดลวด(กก.)	103.66	104.50	0.81

ตารางที่ 7.4 การเปรียบเทียบปริมาตรน้ำมันหม้อแปลงที่ใช้ระหว่างข้อมูลจากการออกแบบกับข้อมูลจากการสร้างหม้อแปลงตัวอย่างที่ 1

รายการ	ข้อมูลจากการออกแบบ	ข้อมูลจากการสร้าง	ค่าคลาดเคลื่อน(%)
ปริมาตรน้ำมัน(ลิตร)	211.08	215	-1.86

ตารางที่ 7.5 การเปรียบเทียบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของหม้อแปลงระหว่างข้อมูลจากการออกแบบกับข้อมูลจากการสร้างหม้อแปลงตัวอย่างที่ 1

รายการ	ข้อกำหนด (PEA.)	จากการออกแบบ	จากการสร้าง	ค่าคลาดเคลื่อน(%)
1.No load loss(w)	360	306.72	304.5	-0.72
2.Load loss(w)	2100	2061.49	2049.38	-0.59
3.Short cct. imp.(%)	4.00	3.92	3.96	1.02
4.Regulation(%)	-	1.36	1.35	-0.73
5.Efficiency(%)	-	98.54	98.55	0.01

ตารางที่ 7.6 แสดงผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มของหม้อแปลงตัวอย่างที่ 1

รายการ	ข้อกำหนด(PEA.)	ผลการทดสอบ
1.Top oil rise(°C)	60	37.00
2.HV. winding temp. rise(°C)	65	42.78
3.LV. winding temp. rise(°C)	65	48.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7.7 แสดงผลทดสอบค่าความผิดพลาดของอัตราส่วนแรงดันของหม้อแปลงตัวอย่างที่ 1

	ค่าความผิดพลาด (%)				
	Tap 1	Tap 2	Tap 3	Tap 4	Tap 5
phase A	0.11	0.11	0.13	0.05	0.08
phase B	0.11	0.11	0.13	0.05	0.08
phase C	0.11	0.11	0.13	0.05	0.08

ตารางที่ 7.8 แสดงผลการวัดค่าความต้านทานขดลวดของหม้อแปลงตัวอย่างที่ 1

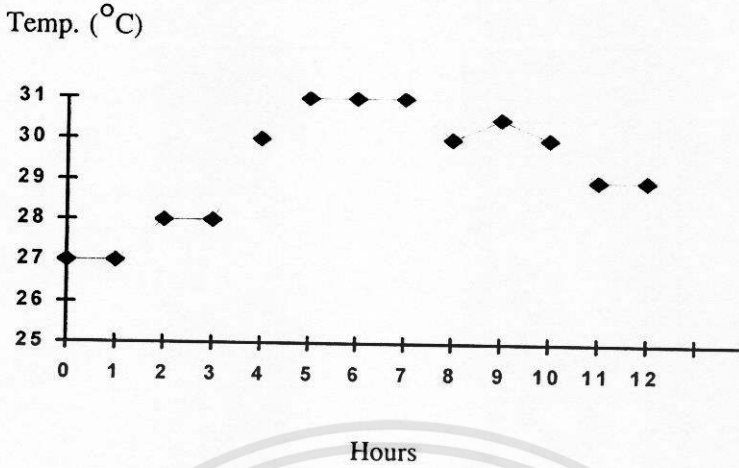
รายการ	ค่าความต้านทานขดลวด (Ω)			
	phase A	phase B	phase C	Average
ขดลวดแรงสูง	51.80	51.85	51.83	51.83
ขดลวดแรงต่ำ	0.00406	0.00407	0.00406	0.00406

ตารางที่ 7.9 แสดงผลการวัดค่าความต้านทานฉนวนของหม้อแปลงตัวอย่างที่ 1

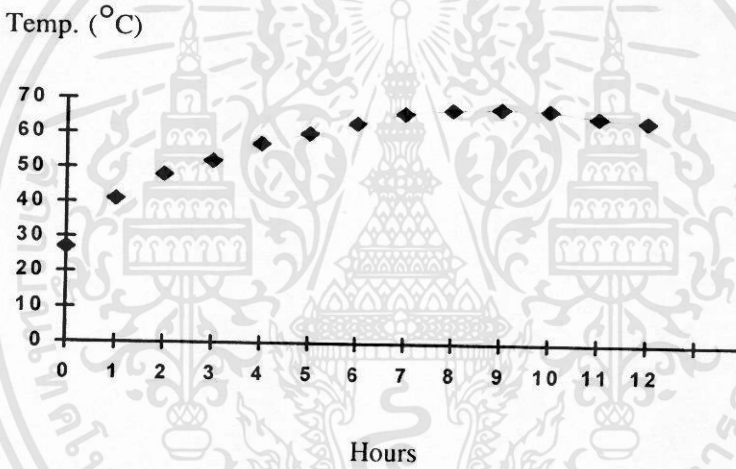
ตำแหน่งที่วัด	ค่าความต้านทานฉนวน(M Ω)
Pri. - Sec.	3500
Pri. - Earth	3500
Sec. - Earth	3000

ตารางที่ 7.10 การเปรียบเทียบต้นทุนวัสดุหลักระหว่างข้อมูลจากการออกแบบกับข้อมูลจากการสร้างหม้อแปลงตัวอย่างที่ 1

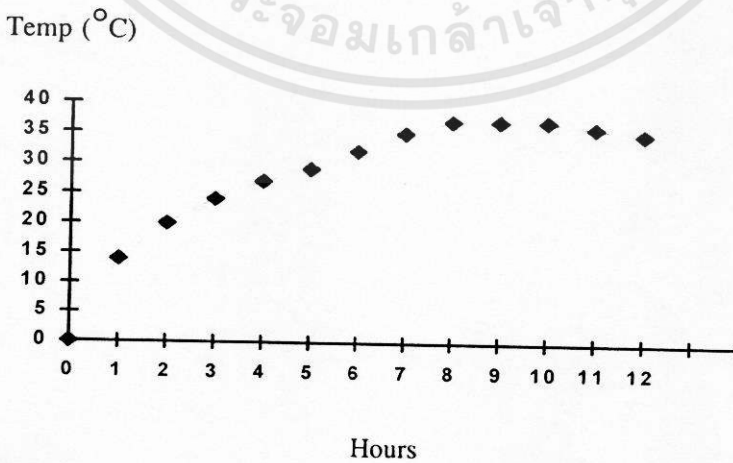
รายการวัสดุ	จากการออกแบบ	จากการสร้าง	ค่าคลาดเคลื่อน(%)
1.แกนเหล็ก	24869.19	24633.00	-0.95
2.ขดลวดแรงต่ำ	10046.93	10152.50	1.05
3.ขดลวดแรงสูง	17622.30	17765.00	0.81
4.น้ำมันหม้อแปลง	9498.69	9675.00	1.86
5.ต้นทุนวัสดุหลักรวม	62037.11	62225.50	0.30



ภาพที่ 7.1 แสดงอุณหภูมิแวดล้อม(Ambient Temp.)ขณะทดสอบตัวอย่างที่ 1



ภาพที่ 7.2 แสดงผลทดสอบอุณหภูมิน้ำมันด้านบน (Top Oil Temp.) ตัวอย่างที่ 1



ภาพที่ 7.3 แสดงผลทดสอบอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน (Top Oil Temp. Rise) ตัวอย่างที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.3.2 ผลการทดสอบหม้อแปลงตัวอย่างที่ 2 ขนาด 160 kVA 3 ph 50 Hz 33 kV-400/230 V เวกเตอร์กรุป Dyn 11

ตารางที่ 7.11 การเปรียบเทียบขนาดและน้ำหนักของแกนเหล็กระหว่างข้อมูลจากการออกแบบกับข้อมูลจากการสร้างหม้อแปลงตัวอย่างที่ 2

รายการ	ข้อมูลจากการออกแบบ	ข้อมูลจากการสร้าง	ค่าคลาดเคลื่อน (%)
1.ความสูง Outer limb(มม.)	805	805	0
2.ความสูง Center limb(มม.)	655	655	0
3.ความยาว Yoke(มม.)	684	684	0
4.น้ำหนัก Outer limb(กก.)	135.44	134.7	-0.54
5.น้ำหนัก Center limb(กก.)	61.10	59.8	-2.13
6.น้ำหนัก Yoke(กก.)	111.17	110.5	-0.60
7.น้ำหนักทั้งหมด(กก.)	307.71	305.00	-0.88

ตารางที่ 7.12 การเปรียบเทียบขนาดและน้ำหนักของขดลวดแรงดันต่ำระหว่างข้อมูลจากการออกแบบกับข้อมูลจากการสร้างหม้อแปลงตัวอย่างที่ 2

รายการ	ข้อมูลจากการออกแบบ	ข้อมูลจากการสร้าง	ค่าคลาดเคลื่อน (%)
1.ความสูงขดลวด(มม.)	490	490	0
2.ความหนาของขดลวด(มม.)	16.6	16	-3.61
3.เส้นผ่าศูนย์กลางด้านใน(มม.)	135	135	0
4.เส้นผ่าศูนย์กลางด้านนอก(มม.)	171	170	-0.58
5.น้ำหนักขดลวด(กก.)	66.50	67.50	1.50

ตารางที่ 7.13 การเปรียบเทียบขนาดและน้ำหนักของขดลวดแรงดันสูงระหว่างข้อมูลจากการออกแบบกับข้อมูลจากการสร้างหม้อแปลงตัวอย่างที่ 2

รายการ	ข้อมูลจากการออกแบบ	ข้อมูลจากการสร้าง	ค่าคลาดเคลื่อน(%)
1. ความสูงตอตอน(มม.)	109	109	0
2. ความสูงทั้งหมด(มม.)	466	465	-0.21
3. ความหนาของขดลวด(มม.)	28	28.5	1.78
4. เส้นผ่าศูนย์กลางคานใน(มม.)	204	205	0.49
5. เส้นผ่าศูนย์กลางคานนอก(มม.)	260	261	0.38
6. น้ำหนักขดลวด(กก.)	112.34	113.0	0.59

ตารางที่ 7.14 การเปรียบเทียบปริมาตรน้ำมันหม้อแปลงที่ไซระหว่างข้อมูลจากการออกแบบกับข้อมูลจากการสร้างหม้อแปลงตัวอย่างที่ 2

รายการ	ข้อมูลจากการออกแบบ	ข้อมูลจากการสร้าง	ค่าคลาดเคลื่อน(%)
ปริมาตรน้ำมัน(ลิตร)	269.66	265	-1.73

ตารางที่ 7.15 การเปรียบเทียบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของหม้อแปลงระหว่างข้อมูลจากการออกแบบกับข้อมูลจากการสร้างหม้อแปลงตัวอย่างที่ 2

รายการ	ข้อกำหนด (PEA.)	จากการออกแบบ	จากการสร้าง	ค่าคลาดเคลื่อน (%)
1.No load loss(w)	370	341.58	339.4	-0.64
2.Load loss(w)	2100	2034.23	2046.13	0.58
3.Short cct. imp.(%)	4.00	3.99	4.09	2.50
4.Regulation(%)	-	1.34	1.35	0.75
5.Efficiency(%)	-	98.54	98.53	-0.01

ตารางที่ 7.16 แสดงผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มของหม้อแปลงตัวอย่างที่ 2

รายการ	ข้อกำหนด(PEA.)	ผลการทดสอบ
1.Top oil rise(°C)	60	44.00
2.HV. winding temp. rise(°C)	65	48.15
3.LV. winding temp. rise(°C)	65	51.98

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7.17 แสดงผลการทดสอบค่าผิดพลาดของอัตราส่วนแรงดันของหม้อแปลงตัวอย่างที่ 2

	ค่าความผิดพลาด (%)				
	Tap 1	Tap 2	Tap 3	Tap 4	Tap 5
phase A	0.12	0.15	0.10	0.08	0.11
phase B	0.12	0.15	0.10	0.08	0.11
phase C	0.13	0.15	0.11	0.09	0.11

ตารางที่ 7.18 แสดงผลการวัดค่าความต้านทานขดลวดของหม้อแปลงตัวอย่างที่ 2

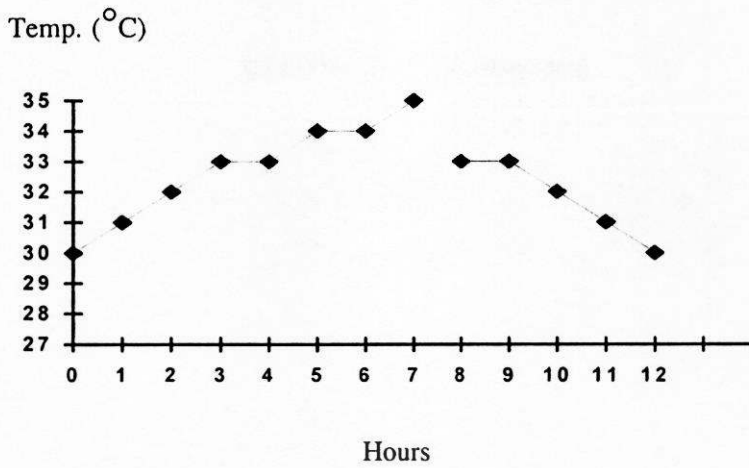
รายการ	ค่าความต้านทานขดลวด (Ω)			
	phase A	phase B	phase C	Average
ขดลวดแรงสูง	118.10	118.20	117.90	118.07
ขดลวดแรงต่ำ	0.00401	0.00401	0.00399	0.00400

ตารางที่ 7.19 แสดงผลการวัดค่าความต้านทานฉนวนของหม้อแปลงตัวอย่างที่ 2

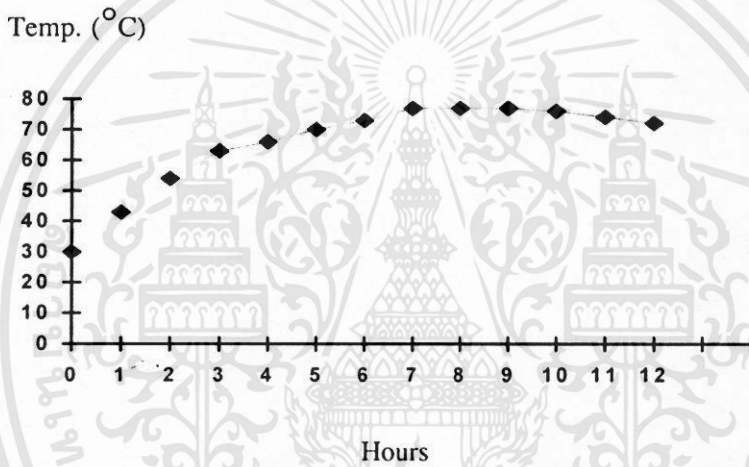
ตำแหน่งที่วัด	ค่าความต้านทานฉนวน(M Ω)
Pri. - Sec.	3500
Pri. - Earth	4000
Sec. - Earth	3500

ตารางที่ 7.20 การเปรียบเทียบต้นทุนวัสดุหลักระหว่างข้อมูลจากการออกแบบกับข้อมูลจากการสร้างหม้อแปลงตัวอย่างที่ 2

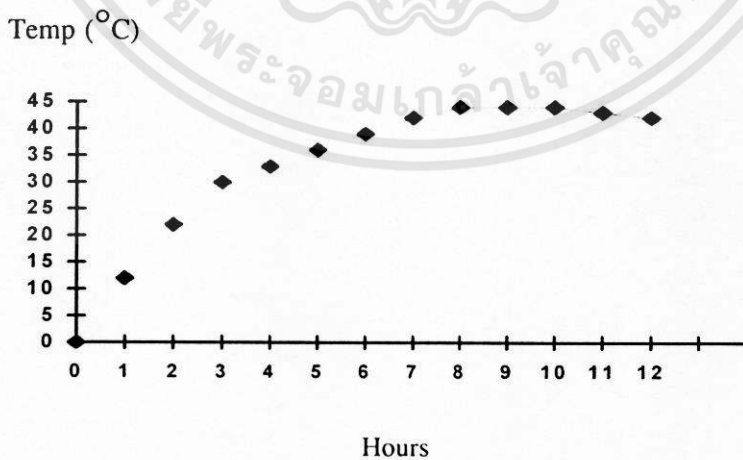
รายการวัสดุ	จากการออกแบบ	จากการสร้าง	ค่าคลาดเคลื่อน(%)
1.แกนเหล็ก	27695.68	27450.00	-0.89
2.ขดลวดแรงต่ำ	10307.32	10462.50	1.50
3.ขดลวดแรงสูง	19097.41	19210.00	0.59
4.น้ำมันหม้อแปลง	12134.49	11925.00	-1.73
5.ต้นทุนวัสดุหลักรวม	69234.91	69047.50	-0.27



ภาพที่ 7.4 แสดงอุณหภูมิแวดล้อม(Ambient Temp.)ขณะทดสอบตัวอย่างที่ 2



ภาพที่ 7.5 แสดงผลทดสอบอุณหภูมิน้ำมันด้านบน (Top Oil Temp.) ตัวอย่างที่ 2



ภาพที่ 7.6 แสดงผลทดสอบอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน (Top Oil Temp. Rise) ตัวอย่างที่ 2

7.3.3 ผลการทดสอบหม้อแปลงตัวอย่างที่ 3 ขนาด 100 kVA 3 ph 50 Hz 22 kV-400/230 V เวกเตอร์รูป Yzn 11

ตารางที่ 7.21 การเปรียบเทียบขนาดและน้ำหนักของแกนเหล็กระหว่างข้อมูลจากการออกแบบกับข้อมูลจากการสร้างหม้อแปลงตัวอย่างที่ 3

รายการ	ข้อมูลจากการออกแบบ	ข้อมูลจากการสร้าง	ค่าคลาดเคลื่อน (%)
1.ความสูง Outer limb(มม.)	640	640	0
2.ความสูง Center limb(มม.)	510	510	0
3.ความยาว Yoke(มม.)	650	650	0
4.น้ำหนัก Outer limb(กก.)	83.76	83	-0.91
5.น้ำหนัก Center limb(กก.)	37.26	36.90	-0.97
6.น้ำหนัก Yoke(กก.)	85.33	84.70	-0.74
7.น้ำหนักทั้งหมด(กก.)	206.35	204.60	-0.85

ตารางที่ 7.22 การเปรียบเทียบขนาดและน้ำหนักของขดลวดแรงดันต่ำระหว่างข้อมูลจากการออกแบบกับข้อมูลจากการสร้างหม้อแปลงตัวอย่างที่ 3

รายการ	ข้อมูลจากการออกแบบ	ข้อมูลจากการสร้าง	ค่าคลาดเคลื่อน (%)
1.ความสูงขดลวด(มม.)	375	374	-0.27
2.ความหนาของขดลวด(มม.)	25.2	25.5	1.19
3.เส้นผ่าศูนย์กลางดำนในคอยล์ ที่ 1(มม.)	123	123	0
4.เส้นผ่าศูนย์กลางดำนในคอยล์ ที่ 2(มม.)	152	153	0.66
5.เส้นผ่าศูนย์กลางดำนนอกคอยล์ที่ 1(มม.)	146	147	0.68
6.เส้นผ่าศูนย์กลางดำนนอกคอยล์ที่ 2(มม.)	175	176	0.57
7.น้ำหนักขดลวด(กก.)	74.80	75.80	1.34

ตารางที่ 7.23 การเปรียบเทียบขนาดและน้ำหนักของขดลวดแรงดันสูงระหว่างข้อมูลจากการออกแบบกับข้อมูลจากการสร้างหม้อแปลงตัวอย่างที่ 3

รายการ	ข้อมูลจากการออกแบบ	ข้อมูลจากการสร้าง	ค่าคลาดเคลื่อน (%)
1.ความสูงตอตอน(มม.)	80	81	1.25
2.ความสูงทั้งหมด(มม.)	349	351	0.57
3.ความหนาของขดลวด(มม.)	29	29	0
4.เส้นผ่าศูนย์กลางคานใน(มม.)	200	199	-0.50
5.เส้นผ่าศูนย์กลางคานนอก(มม.)	258	259	0.39
6.น้ำหนักขดลวด(กก.)	91.79	92.20	0.45

ตารางที่ 7.24 การเปรียบเทียบปริมาตรน้ำมันหม้อแปลงที่ใระหว่างข้อมูลจากการออกแบบกับข้อมูลจากการสร้างหม้อแปลงตัวอย่างที่ 3

รายการ	ข้อมูลจากการออกแบบ	ข้อมูลจากการสร้าง	ค่าคลาดเคลื่อน(%)
ปริมาตรน้ำมัน(ลิตร)	195.85	192	-1.96

ตารางที่ 7.25 การเปรียบเทียบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของหม้อแปลงระหว่างข้อมูลจากการออกแบบกับข้อมูลจากการสร้างหม้อแปลงตัวอย่างที่ 3

รายการ	ข้อกำหนด (PEA.)	จากการออกแบบ	จากการสร้าง	ค่าคลาดเคลื่อน (%)
1.No load loss(w)	250	233.19	235.3	0.90
2.Load loss(w)	1550	1490.64	1484.3	-0.42
3.Short cct. imp.(%)	4.00	4.02	4.08	1.49
4.Regulation(%)	-	1.56	1.55	-0.64
5.Efficiency(%)	-	98.31	98.31	0

ตารางที่ 7.26 แสดงผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มของหม้อแปลงตัวอย่างที่ 3

รายการ	ข้อกำหนด(PEA.)	ผลการทดสอบ
1.Top oil rise(°C)	60	39.00
2.HV. winding temp. rise(°C)	65	44.50
3.LV. winding temp. rise(°C)	65	49.78

ตารางที่ 7.27 แสดงผลการทดสอบค่าผิดพลาดของอัตราส่วนแรงดันของหม้อแปลงตัวอย่างที่ 3

	ค่าความผิดพลาด (%)				
	Tap 1	Tap 2	Tap 3	Tap 4	Tap 5
phase A	0.10	0.10	0.10	0.07	0.08
phase B	0.10	0.10	0.10	0.07	0.08
phase C	0.10	0.10	0.10	0.07	0.08

ตารางที่ 7.28 แสดงผลการวัดค่าความต้านทานขดลวดของหม้อแปลงตัวอย่างที่ 3

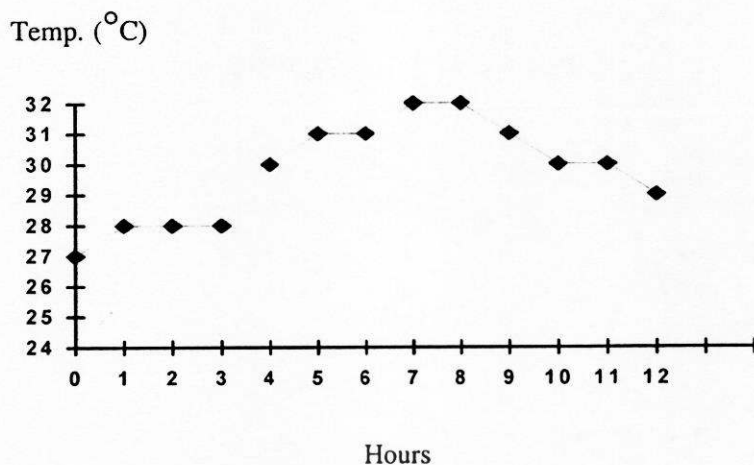
รายการ	ค่าความต้านทานขดลวด (Ω)			
	phase A	phase B	phase C	Average
ขดลวดแรงสูง	33.71	33.73	33.70	33.71
ขดลวดแรงต่ำ	0.00710	0.00710	0.00700	0.00707

ตารางที่ 7.29 แสดงผลการวัดค่าความต้านทานฉนวนของหม้อแปลงตัวอย่างที่ 3

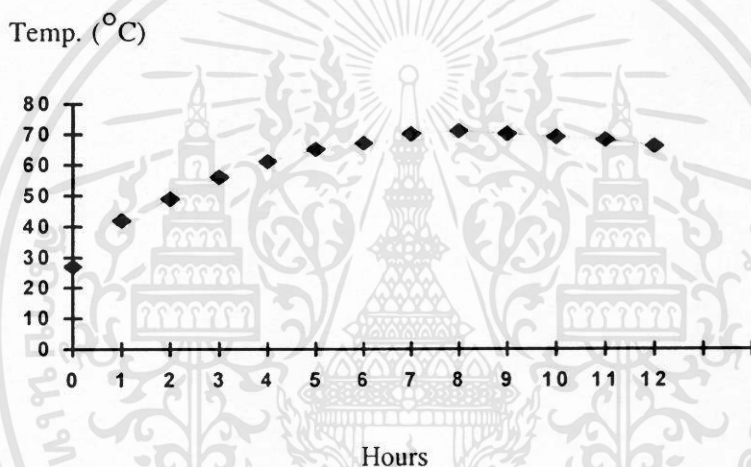
ตำแหน่งที่วัด	ค่าความต้านทานฉนวน(M Ω)
Pri. - Sec.	4000
Pri. - Earth	4500
Sec. - Earth	4000

ตารางที่ 7.30 การเปรียบเทียบต้นทุนวัสดุหลักระหว่างข้อมูลจากการออกแบบกับข้อมูลจากการสร้างหม้อแปลงตัวอย่างที่ 3

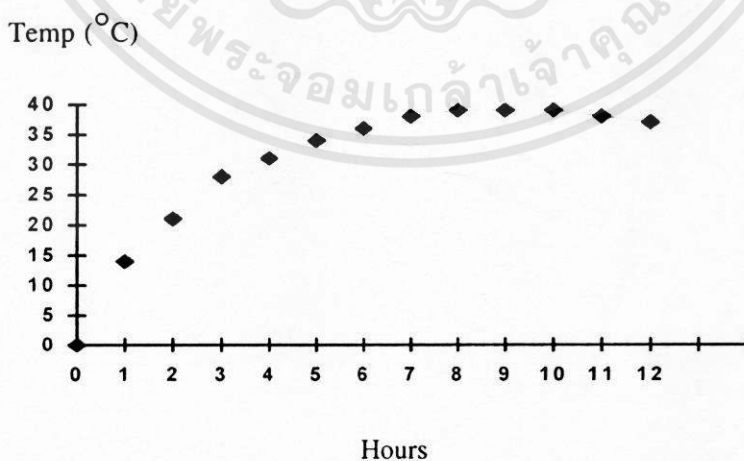
รายการวัสดุ	จากการออกแบบ	จากการสร้าง	ค่าคลาดเคลื่อน(%)
1.แกนเหล็ก	18572.70	18414.00	-0.85
2.ขดลวดแรงต่ำ	11594.61	11749.00	1.33
3.ขดลวดแรงสูง	15603.57	15674.00	0.45
4.น้ำมันหม้อแปลง	8813.05	8640.00	-1.96
5.ต้นทุนวัสดุหลักรวม	54583.93	54477.00	-0.19



ภาพที่ 7.7 แสดงอุณหภูมิแวดล้อม(Ambient Temp.)ขณะทดสอบตัวอย่างที่ 3



ภาพที่ 7.8 แสดงผลทดสอบอุณหภูมิน้ำมันด้านบน (Top Oil Temp.) ตัวอย่างที่ 3



ภาพที่ 7.9 แสดงผลทดสอบอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน (Top Oil Temp. Rise) ตัวอย่างที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.3.4 ผลการทดสอบหม้อแปลงตัวอย่างที่ 4 ขนาด 100 kVA 3 ph 50 Hz 33 kV-400/230 V เวกเตอร์รูป Yzn 11

ตารางที่ 7.31 การเปรียบเทียบขนาดและน้ำหนักของแกนเหล็กระหว่างข้อมูลจากการออกแบบกับข้อมูลจากการสร้างหม้อแปลงตัวอย่างที่ 4

รายการ	ข้อมูลจากการออกแบบ	ข้อมูลจากการสร้าง	ค่าคลาดเคลื่อน (%)
1.ความสูง Outer limb(มม.)	669	669	0
2.ความสูง Center limb(มม.)	539	539	0
3.ความยาว Yoke(มม.)	664	664	0
4.น้ำหนัก Outer limb(กก.)	88.35	88	-0.39
5.น้ำหนัก Center limb(กก.)	39.56	39.10	-1.16
6.น้ำหนัก Yoke(กก.)	87.55	87.20	-0.40
7.น้ำหนักทั้งหมด(กก.)	215.46	214.30	-0.54

ตารางที่ 7.32 การเปรียบเทียบขนาดและน้ำหนักของขดลวดแรงดันต่ำระหว่างข้อมูลจากการออกแบบกับข้อมูลจากการสร้างหม้อแปลงตัวอย่างที่ 4

รายการ	ข้อมูลจากการออกแบบ	ข้อมูลจากการสร้าง	ค่าคลาดเคลื่อน (%)
1.ความสูงขดลวด(มม.)	394	395	0.25
2.ความหนาของขดลวด(มม.)	21.2	22	3.77
3.เส้นผ่าศูนย์กลางด้านในคอยล์ที่ 1(มม.)	123	124	0.81
4.เส้นผ่าศูนย์กลางด้านในคอยล์ที่ 2(มม.)	148	149	0.67
5.เส้นผ่าศูนย์กลางด้านนอกคอยล์ที่ 1(มม.)	142	143	0.70
6.เส้นผ่าศูนย์กลางด้านนอกคอยล์ที่ 2(มม.)	167	168	0.60
7.น้ำหนักขดลวด(กก.)	59.60	60.30	1.17

ตารางที่ 7.33 การเปรียบเทียบขนาดและน้ำหนักของขดลวดแรงดันสูงระหว่างข้อมูลจากการออกแบบกับข้อมูลจากการสร้างหม้อแปลงตัวอย่างที่ 4

รายการ	ข้อมูลจากการออกแบบ	ข้อมูลจากการสร้าง	ค่าคลาดเคลื่อน (%)
1.ความสูงตอตอน(มม.)	85	85	0
2.ความสูงทั้งหมด(มม.)	369	370	0.27
3.ความหนาของขดลวด(มม.)	30	30.5	1.67
4.เส้นผ่าศูนย์กลางด้านใน(มม.)	200	200	0
5.เส้นผ่าศูนย์กลางด้านนอก(มม.)	260	261	0.38
6.น้ำหนักขดลวด(กก.)	99.01	99.85	0.85

ตารางที่ 7.34 การเปรียบเทียบปริมาตรน้ำมันหม้อแปลงที่ใช้ระหว่างข้อมูลจากการออกแบบกับข้อมูลจากการสร้างหม้อแปลงตัวอย่างที่ 4

รายการ	ข้อมูลจากการออกแบบ	ข้อมูลจากการสร้าง	ค่าคลาดเคลื่อน(%)
ปริมาตรน้ำมัน(ลิตร)	235.14	231	-1.76

ตารางที่ 7.35 การเปรียบเทียบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของหม้อแปลงระหว่างข้อมูลจากการออกแบบกับข้อมูลจากการสร้างหม้อแปลงตัวอย่างที่ 4

รายการ	ข้อกำหนด (PEA.)	จากการออกแบบ	จากการสร้าง	ค่าคลาดเคลื่อน(%)
1.No load loss(w)	260	243.46	241.60	-0.76
2.Load loss(w)	1550	1540.51	1537.75	-0.18
3.Short cct. imp.(%)	4.00	4.15	4.17	0.48
4.Regulation(%)	-	1.61	1.60	-0.62
5.Efficiency(%)	-	98.25	98.25	0

ตารางที่ 7.36 แสดงผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มของหม้อแปลงตัวอย่างที่ 4

รายการ	ข้อกำหนด(PEA.)	ผลการทดสอบ
1.Top oil rise(°C)	60	42.00
2.HV. winding temp. rise(°C)	65	45.29
3.LV. winding temp. rise(°C)	65	49.35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7.37 แสดงผลการทดสอบค่าผิดพลาดของอัตราส่วนแรงดันของหม้อแปลงตัวอย่างที่ 4

	ค่าความผิดพลาด (%)				
	Tap 1	Tap 2	Tap 3	Tap 4	Tap 5
phase A	0.14	0.16	0.19	0.09	0.11
phase B	0.14	0.16	0.19	0.08	0.11
phase C	0.14	0.16	0.19	0.10	0.12

ตารางที่ 7.38 แสดงผลการวัดค่าความต้านทานขดลวดของหม้อแปลงตัวอย่างที่ 4

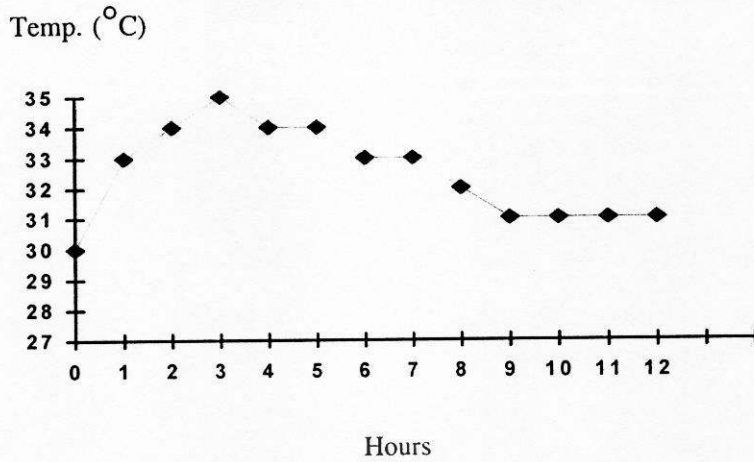
รายการ	ค่าความต้านทานขดลวด (Ω)			
	phase A	phase B	phase C	Average
ขดลวดแรงสูง	71.1	71.03	71.00	71.01
ขดลวดแรงต่ำ	0.00838	0.00839	0.00839	0.00838

ตารางที่ 7.39 แสดงผลการวัดค่าความต้านทานฉนวนของหม้อแปลงตัวอย่างที่ 4

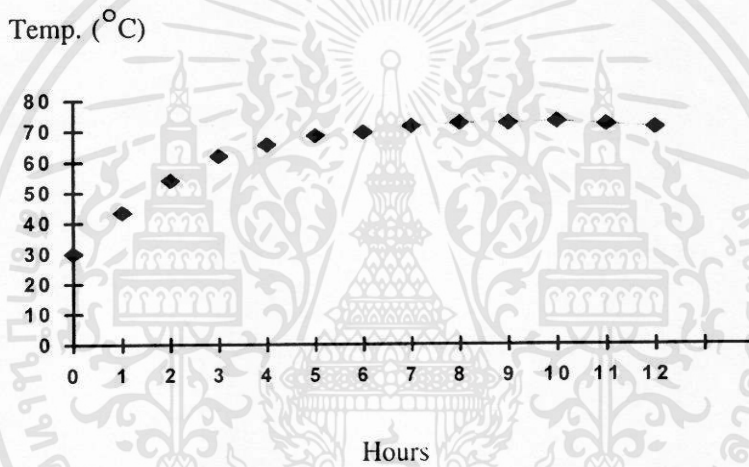
ตำแหน่งที่วัด	ค่าความต้านทานฉนวน(M Ω)
Pri. - Sec.	3500
Pri. - Earth	4000
Sec. - Earth	3500

ตารางที่ 7.40 การเปรียบเทียบต้นทุนวัสดุหลักระหว่างข้อมูลจากการออกแบบกับข้อมูลจากการสร้างหม้อแปลงตัวอย่างที่ 4

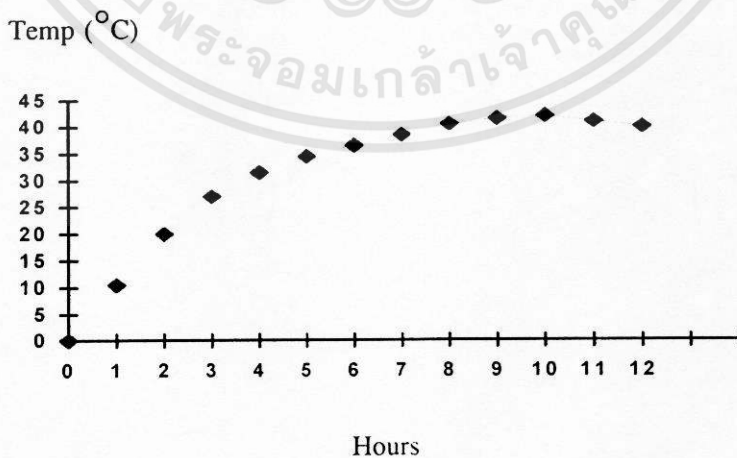
รายการวัสดุ	จากการออกแบบ	จากการสร้าง	ค่าคลาดเคลื่อน(%)
1.แกนเหล็ก	19390.55	19287.00	-0.53
2.ขดลวดแรงต่ำ	9238.68	9346.50	1.17
3.ขดลวดแรงสูง	16830.85	16974.5	0.85
4.น้ำมันหม้อแปลง	10581.46	10395.00	-1.76
5.ต้นทุนวัสดุหลักรวม	56041.54	56003.00	-0.07



ภาพที่ 7.10 แสดงอุณหภูมิแวดล้อม(Ambient Temp.)ขณะทดสอบตัวอย่างที่ 4



ภาพที่ 7.11 แสดงผลทดสอบอุณหภูมิน้ำมันด้านบน (Top Oil Temp.) ตัวอย่างที่ 4



ภาพที่ 7.12 แสดงผลทดสอบอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน (Top Oil Temp. Rise) ตัวอย่างที่ 4

7.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากการพิจารณาเปรียบเทียบผลที่ได้จากการออกแบบกับผลที่ได้จากการสร้างจริงจะเห็นว่ามีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าคลาดเคลื่อนบ้างเล็กน้อย ค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นนี้อาจเกิดได้จากค่าตัวประกอบในการผลิต (Building Factor) หรืออาจเกิดจากวัสดุที่ใช้ในการผลิตมีคุณสมบัติคลาดเคลื่อนจากข้อกำหนด (Specification)

เมื่อพิจารณาที่ความหนาของขดลวดที่พันจะเห็นว่าค่าผิดพลาดเมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์จะมีค่าสูง แต่ถ้าพิจารณาค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจะเห็นว่ามีความประมาณ 0.5-1.0 มม. ซึ่งถือว่าเป็นค่าผิดพลาดเพียงเล็กน้อย

ในส่วนของการทดสอบค่าไดอิเล็กตริกจะเห็นว่าค่าความต้านทานฉนวน (Insulation resistance) จะมีค่าสูงกว่าที่มาตรฐานกำหนดไว้ ถ้าการกำจัดความชื้นของฉนวนและขดลวดของหม้อแปลงเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพจะทำให้มีค่าความต้านทานฉนวนสูง ส่วนการทดสอบฉนวนสำหรับขดลวดและส่วนต่างๆ ที่ติดกับขดลวดและการทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันเกินตามที่มาตรฐานกำหนดผลการทดสอบเป็นที่น่าพอใจกล่าวคือฉนวนอยู่ในสภาพที่สามารถใช้งานได้ตามมาตรฐาน

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบค่าอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดและน้ำมันหม้อแปลงจะเห็นว่ามีความต่ำกว่าข้อกำหนด ค่าอุณหภูมิเพิ่มมีค่าต่ำจะทำให้ฉนวนของหม้อแปลงมีอายุการใช้งานยาวนานมากยิ่งขึ้นซึ่งเป็นผลทำให้หม้อแปลงมีอายุการใช้งานยาวนานมากยิ่งขึ้นตามไปด้วย

เมื่อพิจารณาจากกราฟแสดงผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันจะเห็นว่าที่ปลายของเส้นกราฟค่าของอุณหภูมิจะลดลงเล็กน้อยเนื่องจากวิธีการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มของหม้อแปลงจะทำการทดสอบที่ผลรวมของค่าความสูญเสียของหม้อแปลงจนกระทั่งผลของอุณหภูมิเพิ่มเปลี่ยนแปลงไม่เกิน 1 องศาเซลเซียส ติดต่อกันเป็นเวลา 3 ชั่วโมงจากนั้นก็ทำการลดค่ากระแสของการทดสอบให้มีค่าที่พิกัดกระแสของหม้อแปลงอีกประมาณ 2 ชั่วโมงจึงหยุดการทดสอบซึ่งทำให้อุณหภูมิของการทดสอบใน 2 ชั่วโมงสุดท้ายลดลงเล็กน้อย

จากการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลดังกล่าวย่อมแสดงให้เห็นว่าผลลัพธ์ที่ได้จากซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นมีความถูกต้องและแม่นยำ สามารถนำซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นนี้ไปใช้ในการวิเคราะห์ออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายและสามารถนำผลลัพธ์จากซอฟต์แวร์นี้ไปใช้ในการสร้างหม้อแปลงจำหน่ายให้มีคุณสมบัติเป็นไปตามข้อกำหนดได้จริงในทางปฏิบัติ

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากการวิจัยและพัฒนาสร้างซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ เพื่อวิเคราะห์และออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายแบบจุ่มในน้ำมัน (Oil-Immersed Distribution Transformer Analysis and Design Software ,OIDTS) ได้นำหลักการพื้นฐานของทฤษฎีหม้อแปลงมาประยุกต์กับข้อมูลจากการปฏิบัติการทดลอง ข้อมูลทางเทคนิคของวัสดุที่ใช้สร้างหม้อแปลงรวมทั้งมาตรฐานและข้อกำหนดต่างๆที่เกี่ยวข้องกับหม้อแปลงจำหน่ายมาทำการพัฒนาซอฟต์แวร์ OIDTS ขึ้นใช้สำหรับเป็นเครื่องมือช่วยในการวิเคราะห์ออกแบบหม้อแปลงจำหน่าย และยังได้ทำการปรับค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ออกแบบให้มีค่าถูกต้องมากยิ่งขึ้นกับทางปฏิบัติ

OIDS ที่พัฒนาขึ้นเป็นซอฟต์แวร์ที่สามารถใช้วิเคราะห์ออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายให้มีคุณสมบัติเป็นไปตามข้อกำหนดและยังใช้ในการวิเคราะห์ออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายที่มีแวลเตอร์กรุป Yzn 11 ตามข้อกำหนดใหม่ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคได้ โดยซอฟต์แวร์สามารถใช้งานได้โดยง่าย ช่วยแก้ปัญหาคงยากในการวิเคราะห์ออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายซึ่งเป็นผลทำให้ผู้ออกแบบ สามารถปฏิบัติงานได้รวดเร็วและถูกต้องมากยิ่งขึ้น และจากผลการวิจัยสามารถเป็นเครื่องยืนยันให้เห็นว่า ผลการวิเคราะห์ออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายจาก OIDS ที่พัฒนาขึ้น มีความแม่นยำ และน่าเชื่อถือ สามารถนำผลลัพธ์ที่ได้จาก OIDS ไปใช้ในการสร้างหม้อแปลงจำหน่ายได้จริง ซึ่งจะส่งผลให้ผู้ออกแบบสามารถลดความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นจากการคำนวณประหยัดเวลาในการวิเคราะห์ออกแบบ ประหยัดค่าใช้จ่ายทำให้มีต้นทุนในการผลิตต่ำลง และยังสามารถใช้ OIDS นี้ ทำการวิจัยและพัฒนาออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายให้มีค่าพลังงานสูญเสียต่ำลงจากเดิม มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น มีอายุการใช้งานยาวนานยิ่งขึ้น มีความทนทานและมีความปลอดภัยต่อการใช้งานสูงขึ้น การออกแบบที่ถูกต้องจะทำให้หม้อแปลงจำหน่ายสามารถใช้งานได้มีประสิทธิภาพ อันจะส่งผลทำให้เกิดความมั่นคงต่อระบบจำหน่ายมากยิ่งขึ้น และ OIDS ที่พัฒนาขึ้นนี้ ยังสามารถคำนวณราคาต้นทุนวัสดุหลักที่ใช้ในการผลิตหม้อแปลงจำหน่าย ทำให้ผู้ผลิตลดความเสี่ยงต่อการสิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย แรงงานและเวลาลงได้ ทำให้มีราคาต้นทุนในการผลิตต่ำและหม้อแปลงจำหน่าย มีคุณสมบัติเป็นไปตามข้อกำหนด

สำหรับแนวทางในการพัฒนา OIDS ที่ใช้ในการวิเคราะห์ออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายแบบจุ่มในน้ำมันให้มีขีดความสามารถมากขึ้นต่อไปในอนาคต มีแนวทางในการพัฒนาได้ดังนี้

1. พัฒนาให้เป็นซอฟต์แวร์ที่สามารถใช้ในการวิเคราะห์ออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายที่ใช้ในเขตพื้นที่บริการของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคชนิด 1 เฟส (แรงดันสูง 22 kV และ 19/33Y kV แรงดันต่ำ 460/230 V)

2.พัฒนาให้เป็นซอฟต์แวร์ที่สามารถใช้ในการวิเคราะห์ห่ออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายที่ใช้ในเขตพื้นที่บริการของการไฟฟ้านครหลวง(แรงดันสูง 12/24 kV แรงดันต่ำ 416/240 V ชนิด 3 เฟส และ 480/240 V ชนิด 1 เฟส)

3.พัฒนาให้เป็นซอฟต์แวร์ที่สามารถใช้ในการวิเคราะห์ห่ออกแบบหม้อแปลงที่พิกัดกำลังไฟฟ้า พิกัดแรงดันต่างๆ และมีเวกเตอร์กรุปต่างๆ ตามที่ต้องการในการใช้งาน

4.สามารถปรับปรุงพารามิเตอร์และเพิ่มเติมข้อมูลของวัสดุที่ใช้ในการผลิตหม้อแปลงที่มีจำหน่ายจริงในท้องตลาดได้

5.อาจพัฒนาให้ซอฟต์แวร์สามารถใช้ในการวิเคราะห์ห่ออกแบบหม้อแปลงให้สามารถใช้งานกับโหลดในสถานะที่โหลดไม่เป็นเชิงเส้นได้

6.อาจพัฒนาให้ซอฟต์แวร์สามารถทำการวิเคราะห์ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ห่ออกแบบแล้วทำการปรับพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อให้ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ห่ออกแบบที่ได้จากซอฟต์แวร์มีคุณสมบัติเป็นไปตามข้อกำหนดได้

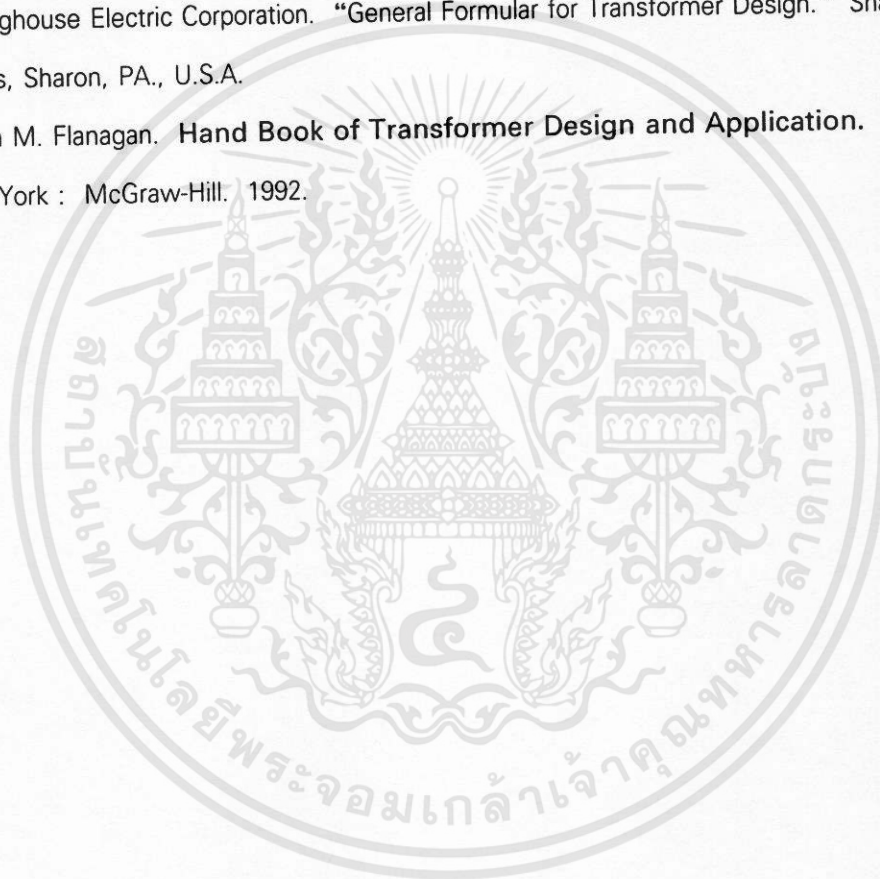


บรรณานุกรม

- [1] กองฝึกอบรมการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. หม้อแปลงไฟฟ้า. กรุงเทพฯ : 2522.
- [2] เจนศักดิ์ เอกบุรณะวัฒน์ และคณะ. “การพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับคำนวณหาอุณหภูมิของหม้อแปลงขณะลัดวงจร.” วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 15, ฉบับที่ 2, ธันวาคม 2541. หน้า 64-69.
- [3] บุญเลิศ สือเฉย และคณะ. “การพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายชนิดจุ่มในน้ำมันเวคเตอร์กรุป Yzn 11.” วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 15, ฉบับที่ 2, ธันวาคม 2541. หน้า 70-75.
- [4] บุญเลิศ เอี่ยมทัศนาศนา. Delphi. กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดดูเคชั่น. 2539.
- [5] พิเชิต ถ่ายอง. เครื่องจักรกลไฟฟ้า 1. กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2539.
- [6] ไสว สุวานิชสกุล. หม้อแปลง. กรุงเทพฯ : ฟีนี พับบลิชซิง. 2525.
- [7] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง มอก. 384-2525. พิมพ์เพิ่มเติมครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : กระทรวงอุตสาหกรรม. 2538.
- [8] Bharat Heavy Electrical Limited. Transformer. New Delhi : Tata McGraw-Hill. 1987.
- [9] Binns D.F., Crompton A.B. and Jaberansari A. “Economic Design of a 50 kVA Distribution Transformer.” IEE Proc., Vol. 133, Pt. C., No. 7, November 1986. pp. 445-456.
- [10] Blme L.F, Boyajian A., Camilli G., Lennox T.C., Minneci S. and Montsinger V.M. Transformer Engineering. New York : John Wiley. 1959.
- [11] Franklin A.C. and Franklin D.P. The J&P Transformer Book. 11th Ed. London. : Newnes-Butterworth. 1983.
- [12] Grady W.M., Chan R., Samotyj M.J., Ferraro R. J. and Bierschenk J. L. “A PC-Based Compute Program for Teaching the Design and Analysis of Dry-Type Transformer.” IEEE Tran. on Power Systems., vol. 7, No. 2, May 1992. pp 709-717.
- [13] IEEE Standard General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformer. ANSI/IEEE C57.12.00-1980.
- [14] Legnano Teknoelectric Company. “Technical Data on Electrical Steel Sheet.” Italy : 1998.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

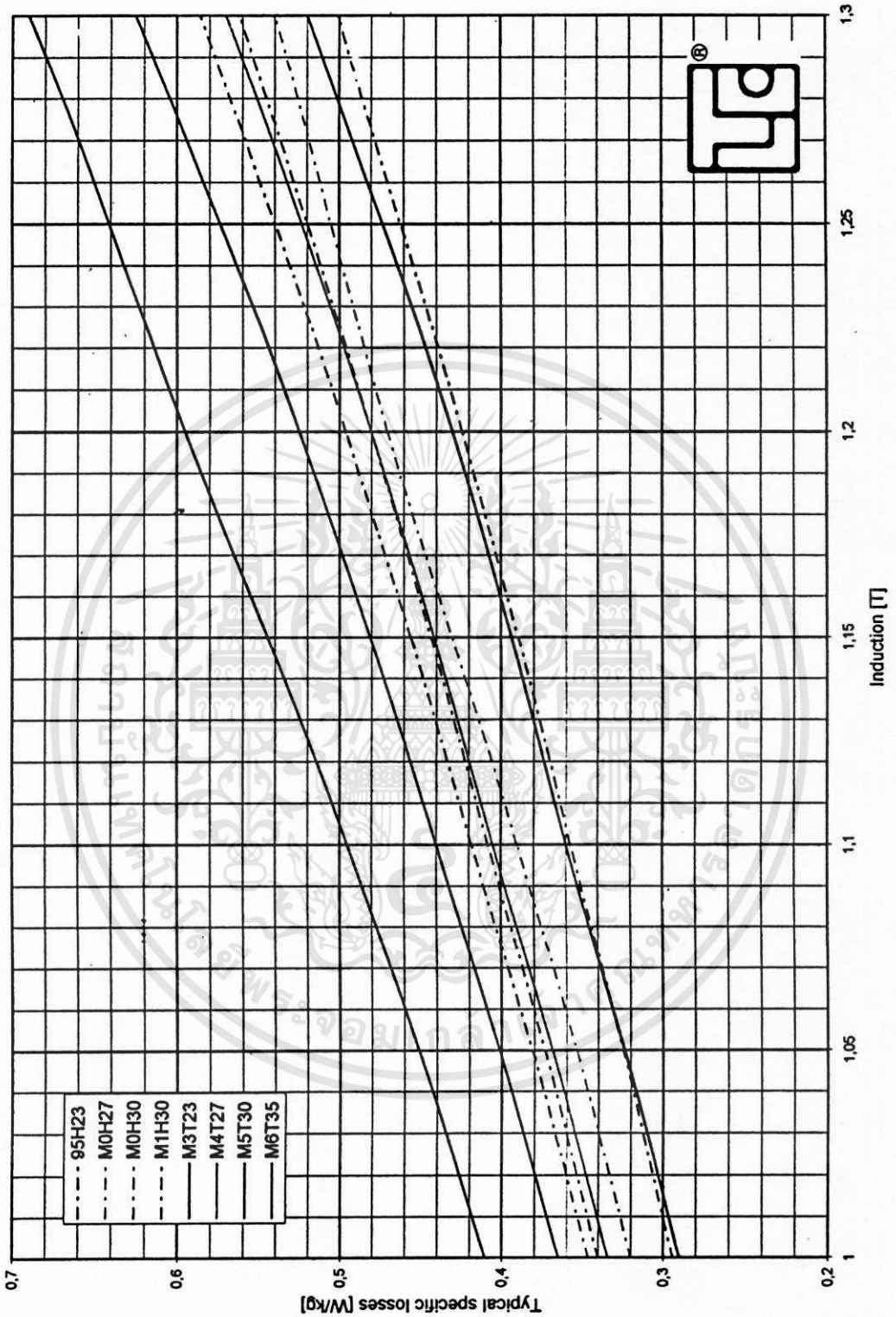
- [15] Loading Guide for Oil-Immersed Power Transformer. IEC 354. 1991.
- [16] Mitsubishi. "Technical Data on Insulation Pressboard." Japan
- [17] Nippon Steel Corporation. "Technical Data on Electrical Steel Sheet." Japan.
- [18] Power Transformer Part 1 : General. IEC 76-1. 1993.
- [19] Power Transformer Part 2 : Temperature Rise. IEC 76-2. 1993.
- [20] Power Transformer Part 3 : Insulation Level and Dielectric Test. IEC 76-3. 1980.
- [21] Provincial Electricity Authority. "Specification for Three Phase Distribution Transformer"
Spec. No. R-722/2540. Bangkok. 1999.
- [22] Westinghouse Electric Corporation. "General Formular for Transformer Design." Sharon
Works, Sharon, PA., U.S.A.
- [23] William M. Flanagan. **Hand Book of Transformer Design and Application.** 2nd Ed.
New York : McGraw-Hill. 1992.





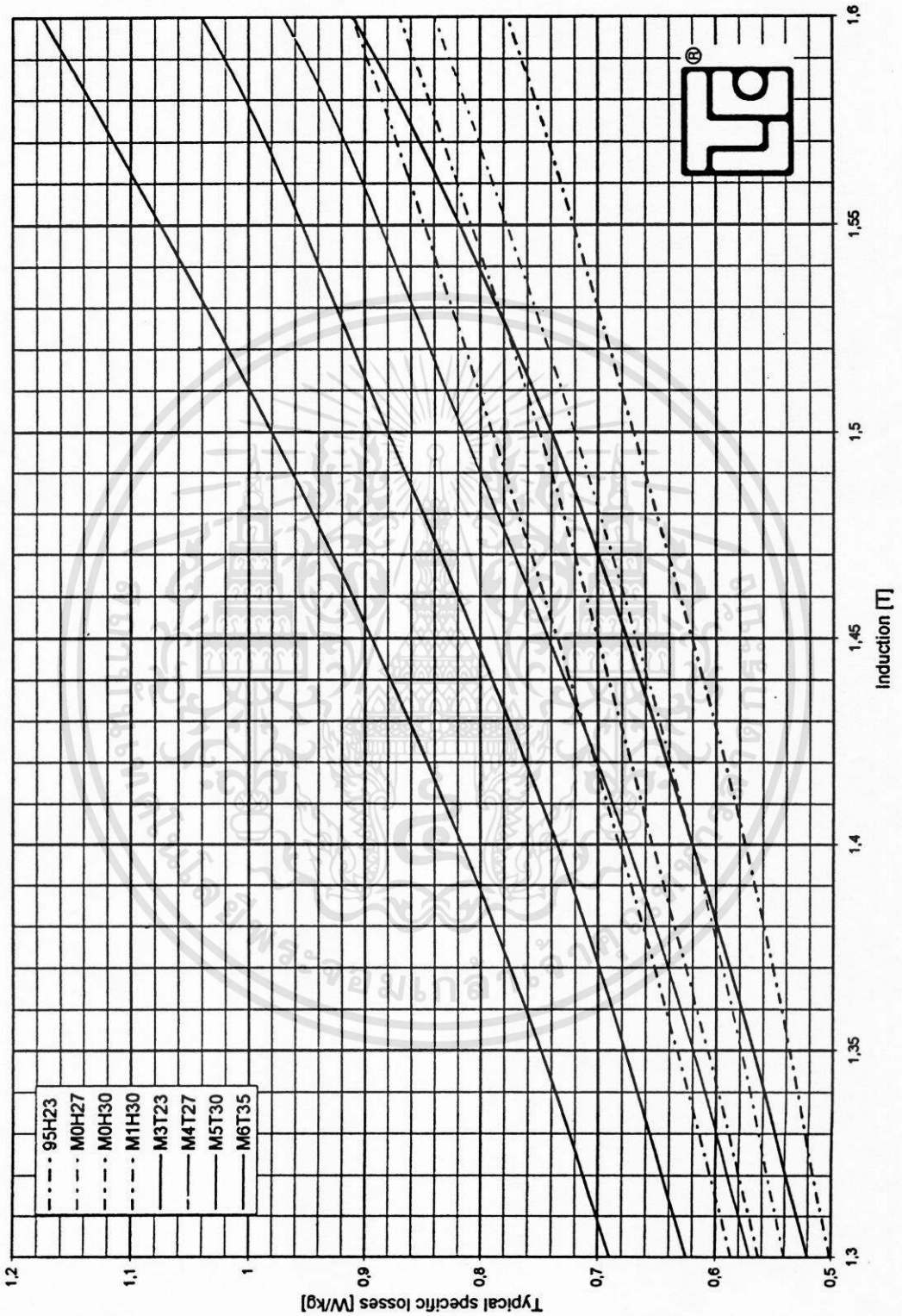
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Typical specific losses at 50Hz.



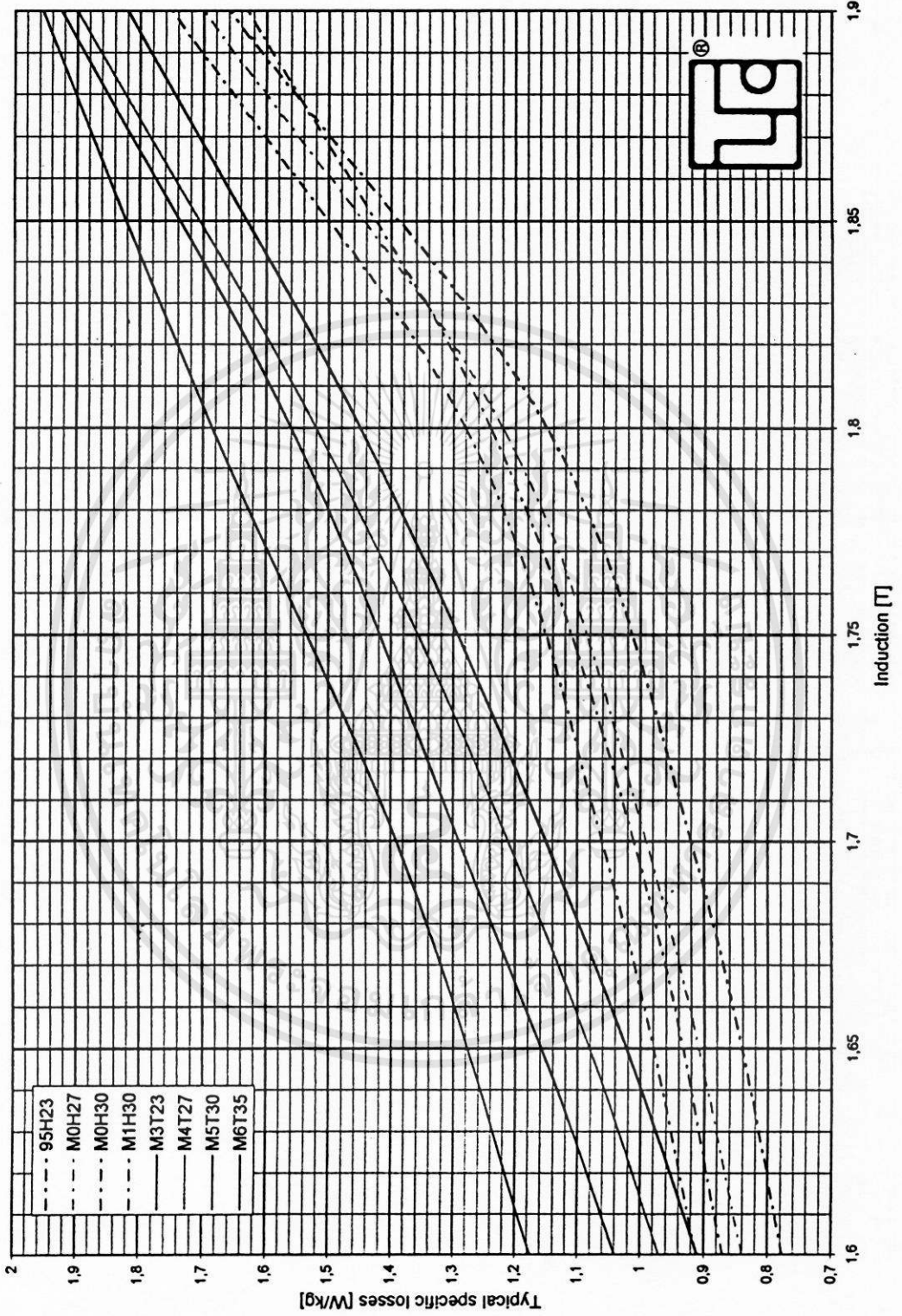
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Typical specific losses at 50 Hz.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Typical specific losses at 50Hz.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข
ตารางกำหนดคาสูญเสียของหม้อแปลง 3 เฟส ตามมาตรฐาน กฟผ.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 กำหนดค่าสูญเสียตามข้อกำหนดเดิมของหม้อแปลง 3 เฟส ตามมาตรฐาน กฟภ.

Transformer Rating kVA	Watt Losses			Percent Impedance Voltage at 75 °C
	No Load Losses		Load Losses at 75 °C	
	22 kV	33 kV		
315	750	800	3900	4
400	900	950	4600	4
500	1000	1050	5500	4
630	1200	1250	6500	4
800	1400	1500	10500	6
1000	1600	1700	13000	6
1250	1800	1900	16000	6
1500	2100	2200	19000	6
2000	2600	2700	23000	6

ตารางที่ ข.2 กำหนดค่าสูญเสียตามข้อกำหนดใหม่ของหม้อแปลง 3 เฟส ตามมาตรฐาน กฟภ.

Transformer Rating kVA	Watt Losses			Percent Impedance Voltage at 75 °C
	No Load Losses		Load Losses at 75 °C	
	22 kV	33 kV		
50	160	170	950	4
100	250	260	1550	4
160	360	370	2100	4
250	500	520	2950	4
315	600	630	3500	4
400	720	750	4150	4
500	860	900	4950	6.5 or more
630	1010	1050	5850	4
800	1200	1270	9900	6
1000	1270	1300	12150	6
1250	1500	1530	14750	6
1500	1820	1850	17850	6
2000	2110	2140	21600	6



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

1. ผลงานวิจัยเรื่อง “การทำนายอุณหภูมิหม้อแปลงจำหน่ายชนิดแช่น้ำมันขณะทำการต่อโหลดโดยซอฟต์แวร์ซึ่งเปรียบเทียบกับมาตรฐาน IEEE และ IEC” ได้รับการตีพิมพ์ลงในวารสารวิศวกรรมลาดกระบัง ปีที่ 14 ฉบับที่ 1(เมษายน 2541)
2. ผลงานวิจัยเรื่อง “การพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายชนิดจุ่มในน้ำมันเวคเตอร์กรุป Yzn 11” ได้รับการตีพิมพ์ลงในวารสารวิศวกรรมลาดกระบัง ปีที่ 15 ฉบับที่ 2(ธันวาคม 2541)
3. ผลงานวิจัยเรื่อง “การพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับคำนวณหาอุณหภูมิของหม้อแปลงขณะลัดวงจร” ได้รับการตีพิมพ์ลงในวารสารวิศวกรรมลาดกระบัง ปีที่ 15 ฉบับที่ 2(ธันวาคม 2541)



การทำนายอุณหภูมิของหม้อแปลงจำหน่ายชนิดแช่น้ำมัน ขณะทำการต่อโหลดโดยซอฟต์แวร์ ซึ่งเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน IEEE กับค่ามาตรฐาน IEC

**A Software for a transformer for prediction of
temperature in normal-loaded and over loaded Mineral-
Oil-Immersed Distribution Transformer, and its
comparison with the IEEE & IEC Standards**

สิริวิษ ทัศนวน บุญเลิศ สือเดช ศุทธิ บรรจงจิตร
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

บทความนี้เสนอการพัฒนาสร้างซอฟต์แวร์ เพื่อทำนายอุณหภูมิของน้ำมันหม้อแปลงจำหน่ายและอุณหภูมิจุดร้อนสุดของตัวนำในสภาวะปกติ และในสภาวะการจ่ายโหลดเกิน โดยโปรแกรมจะเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานของ IEEE และค่ามาตรฐาน IEC ในการทำนายสามารถที่จะแสดงให้เห็นข้อแตกต่างจากมาตรฐานทั้ง 2 แบบ โดยการเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงในการใช้งาน ซึ่งจะเป็ประโยชน์ในการกำหนดโหลดการใช้งานของหม้อแปลงให้เกิดประโยชน์สูงสุด และสามารถคาดคะเนช่วงอายุของฉนวนหม้อแปลง , เปอร์เซนต์อายุหม้อแปลงที่สูญเสีย

Abstract

This paper presents a software for the prediction of top oil temperature and hottest-spot conductor of a transformer under normal and overloaded conditions. The program is able to predict normal life expectancy and a percentage of deterioration of mineral-oil immersed transformer. It is possible to compare the prediction with IEEE & IEC standards, when the transformer is operated under real working condition. The software prediction is able to determine the effective transformer loading.

1. บทนำ

ในการต่อโหลดหม้อแปลงนั้นจะมีผลกับอายุหม้อแปลง โดยอายุของหม้อแปลงขึ้นอยู่กับเวลาและอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นการยากที่จะพิจารณาถึงอายุที่แท้จริงของหม้อแปลงได้อย่างถูกต้อง แต่ถ้าสามารถทำนายอุณหภูมิและอายุของหม้อแปลงได้ จะนำไปสู่การแก้ไขและออกแบบหม้อแปลงให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น

ดังนั้นจากปัญหาข้างต้นจึงขอเสนองานวิจัยและพัฒนาซอฟต์แวร์ ซึ่งเป็นการจำลองสถานะการณ์การต่อโหลดหม้อแปลงแบบแช่น้ำมัน ชนิด ONAN ขนาด 500 kVA และต่ำกว่า โดยพิจารณาอุณหภูมิแวดล้อมที่ 20°C , 30°C , 40°C , 50°C ซึ่งซอฟต์แวร์นี้สามารถทำนายอายุของหม้อแปลงน้ำมันหม้อแปลงค่านับจาก 2 มาตรฐานคือ IBBB กับ IBC เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองจริง ซึ่งจะช่วยให้เห็นข้อแตกต่างของการพิจารณาจากมาตรฐานทั้งสองได้ ซึ่งจะช่วยให้ผู้ผลิตสามารถวิจัยและพัฒนาหม้อแปลง ให้มีประสิทธิภาพได้อย่างรวดเร็วและถูกต้องมากยิ่งขึ้น ซึ่งจะเป็นการลดเวลาและความเสี่ยงต่อการเปลี่ยนแปลงค่าใช้จ่ายแรงงานได้ และช่วยในการศึกษาผลของการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ใดๆที่มีผลต่อคุณลักษณะและสมรรถนะของหม้อแปลงให้มากยิ่งขึ้น อีกทั้งยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ ในด้านการเรียนการสอนในสถาบันการศึกษาได้อีกด้วย

2. ทฤษฎี (Theory)

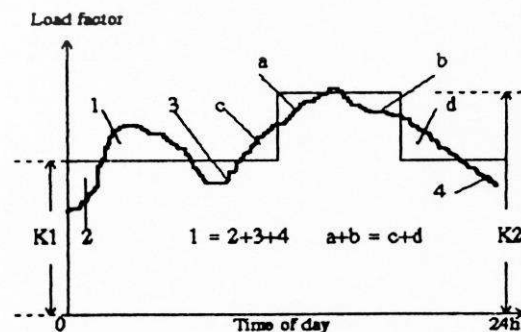
2.1 อายุของฉนวน (Aging of Insulation)

อายุของฉนวนหรือความเสื่อมสภาพของฉนวนจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและเวลา ซึ่งค่าความเสื่อมสภาพของฉนวนนี้จะเสื่อมสภาพมากที่สุดที่จุดร้อนสุด ซึ่ง IBBB จะพิจารณาดังสมการที่ (1) และการหาค่าเปอร์เซ็นต์อายุที่สูญเสีย ดังสมการที่ (2) โดยจะแยกพิจารณาค่าเฉลี่ยอุณหภูมิเพิ่มขึ้นของขดลวดที่ 65°C และ 55°C ส่วน IBC จะพิจารณาอุณหภูมิจุดร้อนสุดของตัวนำที่พิกัดโหลดเท่ากับ 98°C และที่อุณหภูมิแวดล้อม 20°C ให้เป็นค่าอ้างอิง ซึ่งจะทำได้ค่าพิกัดอายุสัมพัทธ์ ดังสมการที่(3) และค่าอายุสูญเสียสัมพัทธ์ ดังสมการที่ (4)

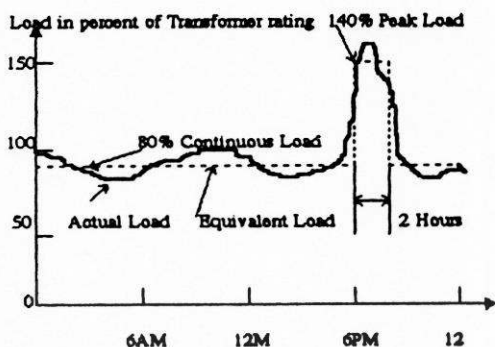
จะเห็นว่าอุณหภูมิจุดร้อนสุดของตัวนำจะเป็นตัวประกอบที่สำคัญในการกำหนดอายุฉนวนหม้อแปลง ซึ่งอุณหภูมิจุดร้อนสุดของตัวนำนี้ ไม่สามารถวัดได้โดยตรงเมื่อเป็นการออกแบบเชิงการค้า เพราะเป็นสิ่งที่ก่อให้เกิดอันตรายได้ชัดเจนกักในการต่อโหลดหม้อแปลง ที่มีค่ามากกว่าอัตราแผ่นป้ายชื่อนั้น จะต้องพิจารณาผลที่เกิดจากเปอร์เซ็นต์การขยายตัวของน้ำมัน , ความสามารถในการรับความร้อนของบุชชิ่งหรืออุปกรณ์ที่ต่อรวม เช่น เทเบิล,รีแอกเตอร์และหม้อแปลงกระแสไฟฟ้า ซึ่งสิ่งต่างๆเหล่านี้จะเป็นตัวจำกัดในการต่อโหลดหม้อแปลง และถ้าอุณหภูมิจุดร้อนสุดมีค่ามากกว่า 140°C อาจจะทำให้เกิดก๊าซในฉนวนแข็งและในน้ำมัน ก๊าซในฉนวนแข็งและในน้ำมันนี้อาจจะทำให้เกิดอันตรายกับความแข็งแรงของหม้อแปลงได้

2.2 วัฏจักรโหลด (Load Cycles)

ในสภาวะที่หม้อแปลงจ่ายโหลดลักษณะแกว่งขึ้นๆลงๆนั้น จะทำให้เกิดการสะสมความร้อนของวัสดุในหม้อแปลง ซึ่งเป็นค่าสูญเสียที่มีลักษณะขึ้นๆลงๆด้วย ผลกระทบของค่าสูญเสียที่เกิดขึ้นนี้ จะสามารถเปรียบเทียบกับภาระจ่ายโหลดของหม้อแปลงในลักษณะคงที่ ในการทำงานของหม้อแปลงบนวัฏจักรโหลด 24 ชั่วโมง โดยกำหนดให้เป็นวัฏจักรที่มีค่าโหลดสูงสุดเพียงค่าเดียว IBC จะหาค่าโหลดสมมูลโดยการเฉลี่ยค่าโหลดจริงดังรูปที่ 1 ซึ่งค่าที่ได้จะมีค่าเท่ากับการพิจารณาหาค่าโหลดสมมูลของ IBBB ดังสมการที่ (5) และยังเท่ากับการพิจารณาที่คาบเวลาจำนวน 12 ชั่วโมง ที่เกิดขึ้นก่อนหน้าที่จะเกิดค่าโหลดสูงสุด ดังรูปที่ 2 และสมการที่(6)



รูปที่ 1 แสดงวัฏจักรโหลด

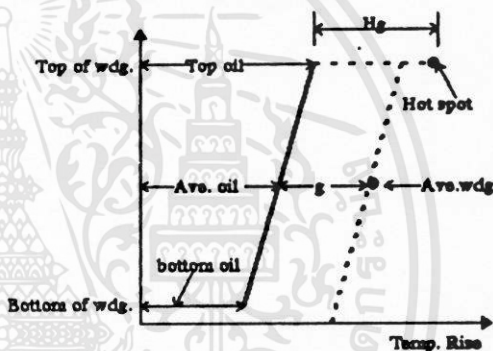


รูปที่ 2 แสดงลักษณะของวัฏจักรโหลดจริงและวัฏจักรโหลดสมมูล

2.3 การต่อโหลดหม้อแปลง (Loading of Transformers)

ในการต่อโหลดหม้อแปลง ซึ่งจะพิจารณาจากอุณหภูมิน้ำมันหม้อแปลง แต่อุณหภูมิน้ำมันหม้อแปลงโดยลำพังนั้น ไม่สามารถที่จะใช้ในการแนะนำการต่อโหลดของหม้อแปลงได้ แต่จะต้องพิจารณาจากอุณหภูมิเพิ่มร้อนสุดของขดลวดด้วย ซึ่งจะมีค่าสูงกว่าน้ำมันหม้อแปลงด้านบน ซึ่งข้อมูลนี้จะได้จากการทดสอบของโรงงานผู้ผลิต หรือจากสมการที่ (7) ใน IEBB และจะสามารถหาค่าต่างๆดังสมการที่ (8) ถึงสมการที่ (13) ซึ่ง IEBB ได้พิจารณาจากอุณหภูมิน้ำมันเฉพาะด้านบนเท่านั้น แต่จะแยกหัวข้อในการพิจารณาขนาดของหม้อแปลง ดัง ANSI/IEBB C57.91 จะพิจารณาขนาดของหม้อแปลงจำหน่าย 500 kVA และต่ำกว่า หรือ ANSI/IEBB C57.92 จะพิจารณาหม้อแปลงกำลังที่มีขนาดถึง 100 MVA ส่วน IEC จะพิจารณาอุณหภูมิน้ำมันด้านบนของหม้อแปลงจำหน่าย ชนิด ONAN และ ONAF ส่วนชนิด OF และ OD จะพิจารณา น้ำมันหม้อแปลงที่ด้านล่าง สาเหตุเพราะหม้อแปลงจำหน่ายชนิด ONAN และ ONAF มีขนาดเล็ก ดังนั้นอุณหภูมิน้ำมันหม้อแปลงบริเวณด้านบน ที่ทำการทดสอบจะมีค่าเท่ากันไม่แตกต่างกันมากนัก แต่หม้อแปลงกำลังชนิด OF และ OD ซึ่งมีขนาดใหญ่ อุณหภูมิน้ำมันบริเวณด้านบน จะมีความแตกต่างกับอุณหภูมิน้ำมันที่บริเวณขดลวด โดยเฉพาะเมื่อมีโหลดขนาดใหญ่ในช่วงเวลาสั้นๆ และที่คือน้ำมันด้านบน จะเกิดการไหลหมุนเวียนผสมกันของน้ำมัน ใน IEC ได้มีการตั้งสมมุติฐานเกี่ยวกับความร้อนที่หม้อแปลงดังรูปที่ 3 ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

1. อุณหภูมิน้ำมันภายในหม้อแปลงที่เพิ่มขึ้นจากด้านล่างขึ้นด้านบนจะเพิ่มเป็นเชิงเส้น
2. อุณหภูมิเพิ่มของตัวนำทุกตำแหน่งของขดลวด จะมีค่าเพิ่มเป็นเชิงเส้น และขนานกับเส้นอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมัน โดยมีค่าความแตกต่างคงที่ (ϵ) ระหว่างเส้นทั้งสอง
3. อุณหภูมิเพิ่มจุดร้อนสุดจะสูงกว่าอุณหภูมิเพิ่มของตัวนำที่ด้านบน เนื่องจากค่าสูญเสียปลิวลอย (Stray Loss) ที่เพิ่มขึ้นทำอุณหภูมิที่แตกต่างระหว่างที่จุดร้อนสุดกับที่ขดลวดด้านบนของน้ำมัน ได้จากค่า H คูณกับ ϵ โดยที่ H เป็นตัวประกอบมีค่าจาก 1.1 ถึง 1.5 โดยขึ้นอยู่กับชนิดของหม้อแปลง ซึ่งกำหนดให้หม้อแปลงจำหน่ายมีค่าเท่ากับ 1.1 และหม้อแปลงกำลังขนาดกลางและขนาดใหญ่มีค่าเท่ากับ 1.3



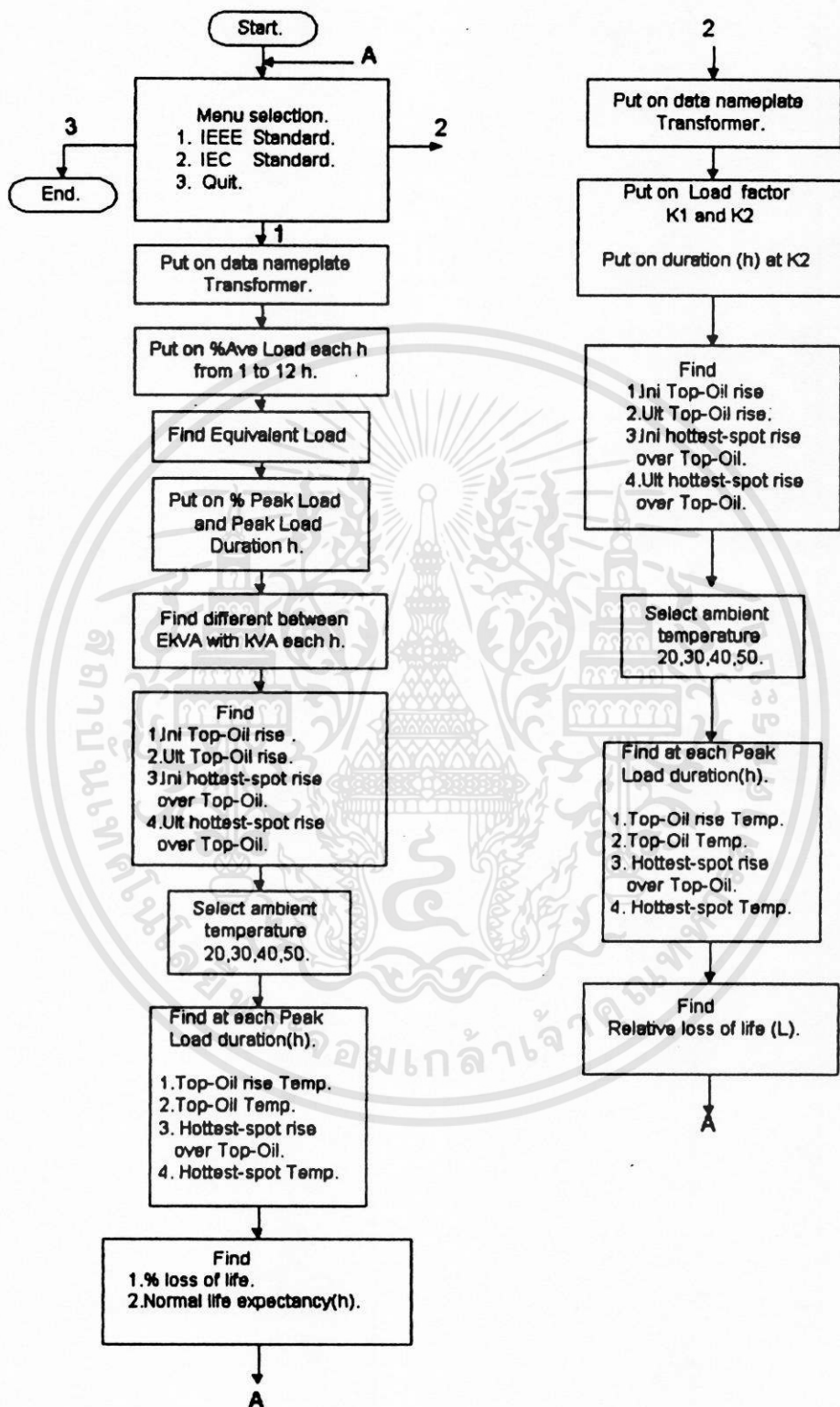
รูปที่ 3 แสดงแผนผังความร้อน

สมการการหาค่าอุณหภูมิจุดร้อนสุดของหม้อแปลงในสถานะปกติ เมื่อเป็นหม้อแปลงชนิด ON ดังสมการที่ (14) , ชนิด OF สมการที่ (15) และชนิด OD สมการที่ (16) สำหรับสมการหาค่าอุณหภูมิน้ำมันด้านล่าง ที่ค่าชั่วขณะเวลาใดๆ ดังสมการ (17) จะเห็นได้ว่า IEC มิได้นำค่าเวลาความร้อนคงที่ของขดลวดมาพิจารณา เพราะว่าเป็นช่วงเวลาที่สำคัญเพียงไม่กี่นาที

3. การทดลองและผลการทดลอง

จากผลการแสดงขั้นตอนการทำงานทั้งหมดของโปรแกรมซอฟต์แวร์ต่อโหลดหม้อแปลง ดังรูปที่ 4

ผลของอุณหภูมิต่างๆที่ทำนาย เป็นผลที่ได้จากมาตรฐาน IEBB และ IEC เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง โดยการพิจารณาหม้อแปลงจำหน่ายชนิด ONAN ขนาด 100 kVA โดยมีรายละเอียดของหม้อแปลงดังตารางที่ 1 จะเห็นว่าการทำนายอุณหภูมิน้ำมันด้านบน ของหม้อแปลงจากทั้ง 2



รูปที่ 4 แสดงแผนผังการทำงานโปรแกรมซอฟต์แวร์เพื่อหาค่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นเมื่อค้อไหลคหมี้อแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มาตรฐานกับผลการทดลองจริงจากตารางที่ 2,3 และรูปที่ 6,7 มีผลที่เท่ากัน และเมื่อเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิจุดร้อนสุดจากมาตรฐานทั้ง 2 จากรูปที่ 8 ก็มีค่าใกล้เคียงเช่นเดียวกัน ซึ่งก็แสดงว่าสามารถที่จะเลือกใช้มาตรฐานใดก็ได้ แสดงดังรูปกราฟต่างๆ ส่วนค่าความแตกต่างของการทำนายกับการทดลองจริง เกิดจากองค์ประกอบต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. ค่าคงที่ของเวลา(Time Constant)

เป็นช่วงความยาวของเวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำมันจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดสุดท้าย เมื่อกำหนดให้ $\alpha = 0.8$ และพิจารณาอุณหภูมิเพิ่มเริ่มต้นของโหลดไม่เท่ากับ 0 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะมีค่าประมาณ 63% ซึ่งสมการหาค่าเวลาคงที่ได้จากสมการที่(18)

เมื่อนำค่าจากการทำนายมาหาค่าเวลาคงที่จะได้ $T = 2.67$ ชั่วโมง จากรูปที่ 6 ค่าอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนที่ 2.67 ชั่วโมงมีค่า 28.465°C หรือที่ 67.63% และจากการทดลองจริงมีค่า 23°C หรือ 63.89%

2. ค่าสูญเสียโหลด(Load Loss)

ไรซ์ซึ่งมีค่าแปรตามกับความต้านทานและอุณหภูมิของขดลวด แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะชดเชยกับความหนืดของน้ำมันที่ลดลง ซึ่งสามารถหาค่าความต้านทานที่อุณหภูมิจุดร้อนสุด ω จุดตัดกระแสไฟฟ้าได้ดังสมการที่(19)

จากผลการทดลองจริง โดยเลือกพิจารณาค่านขดลวดแรงต่ำ ซึ่งเป็นขดลวดที่พันอยู่ด้านใน ที่ $\theta_{w1} = 29^{\circ}\text{C}$ โดยทดลองวัดค่า R_u ที่เวลา $t_1 = 16.40\Omega$ ส่วน R_u ที่เวลา t_2 ในทางปฏิบัติไม่สามารถวัดค่าได้ แต่ได้จากวิธีการเขียนกราฟมีค่า $= 19.60\Omega$ ซึ่งจะสามารถคำนวณหา $\theta_{w2} = 81.42^{\circ}\text{C}$ ซึ่งจุดนี้เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดค่าผิดพลาดได้

3. ค่าสูญเสียปลิกย่อย(Stray Loss)

ซึ่งจะเกิดขึ้นในแกนเหล็กที่มีสารแม่เหล็ก โดยจะมีค่ามากกว่าที่เกิดขึ้นในขดลวด ในทางปฏิบัติเป็นการยากที่จะแยกการทดสอบหาค่าสูญเสียที่แกนเหล็กกับที่ขดลวดนี้ ออกจากกัน ค่าสูญเสียปลิกย่อยนี้จะแปรตามเส้นแรงแม่เหล็กที่ผ่านแกนเหล็กและค่าความต้านทานของแกนเหล็ก ซึ่งจะขึ้นอยู่กับลักษณะเฉพาะของหม้อแปลงแต่ละตัว สำหรับสมมุติฐานของผลรวมค่าสูญเสียปลิกย่อยนั้น จะแปรผกผันกับค่าความต้านทานของขดลวด

4. ผลกระทบเนื่องจากอุณหภูมิแวดล้อม

จากรูปที่ 5 ค่าอุณหภูมิแวดล้อมที่กำหนดขึ้นเพื่อการทำนายนี้เป็นเพียงค่าที่ประมาณเท่านั้น แต่ที่จริงแล้วจะต้องนำอุณหภูมิแวดล้อมในแต่ละห้องดิน ที่ติดตั้งหม้อแปลงตัวที่ทำการทดสอบในปีที่ผ่านมาพิจารณา ซึ่งอุณหภูมิจะมีการเปลี่ยนแปลงตลอดวัน แต่อุณหภูมิที่ใช้ในการทำนายนี้เป็นเพียงค่าเฉลี่ยที่มีค่าคงที่ตลอดทั้งวันมาพิจารณา ซึ่งค่าอุณหภูมิแวดล้อมนี้ จะมีผลกับอุณหภูมิน้ำมันหม้อแปลงด้านบนและอุณหภูมิจุดร้อนสุดของตัวนำ

4. สรุป

ในการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิน้ำมันด้านบนหม้อแปลง ขณะต่อโหลดที่เวลาต่างๆของทั้ง 2 มาตรฐานกับผลการทดลองจริงมีค่าเท่ากัน ซึ่งก็หมายความว่าผลดีในการกำหนดโหลดในอนาคต, การคาดคะเนค่าสูญเสีย, การทำนายอายุของฉนวนของหม้อแปลง และรวมถึงการป้องกันหม้อแปลงมิให้เกิดความเสียหาย ดังเช่นหม้อแปลงขนาด 100 kVA ตัวที่ทำการทดลองนี้ ถ้ากำหนดโหลดต่อเนื่องตามเวลาที่ไร้ภาระ (no load) เป็นเวลา 12 ชั่วโมง แล้วเพิ่มโหลดที่ 150% เป็นเวลา 12 ชั่วโมง เมื่อเปรียบเทียบกับเมื่อต่อโหลดต่อเนื่องตามมูล 75% เป็นเวลา 12 ชั่วโมง แล้วเพิ่มโหลดที่ 150% เป็นเวลา 12 ชั่วโมง และต่อโหลดต่อเนื่องตามมูล 100% แล้วเพิ่มที่ 150% เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ดังรูปที่ 9 จะเห็นว่าจากช่วงเวลาเริ่มต้นของการเพิ่มโหลดที่ 150% อุณหภูมิน้ำมันหม้อแปลงด้านบนของโหลดต่อเนื่องตามมูล 100% , 75% และที่ไร้ภาระ จะมีค่าสูงเรียงตามลำดับ จากนั้นก็มีค่าใกล้เคียงกันที่เวลาผ่านไปประมาณ 10 ชั่วโมง ซึ่งแสดงให้เห็นว่า อายุการใช้งานของหม้อแปลงขณะที่ต่อโหลดต่อเนื่องตามมูล 100%, 75% และไร้ภาระ มีค่าอายุการใช้งานสั้นเรียงตามลำดับ

ที่ IBBB โหลดต่อเนื่องตามมูล 100%, 75% และที่ไร้ภาระ มีค่าเปอร์เซ็นต์อายุที่สูญเสียที่ช่วงเวลาโหลด 150% เท่ากับ 0.030 , 0.026 , 0.022 และมีอายุการใช้งาน 26,902 ชั่วโมง , 27,403 ชั่วโมง , 28,174 ชั่วโมง เรียงตามลำดับ

ที่ IBC โหลดต่อเนื่องตามมูล 100%, 75% และที่ไร้ภาระ มีค่าอายุสูญเสียสัมพัทธ์ที่ช่วงเวลาโหลด 150% เท่ากับ 1.61 , 1.41 , 1.28 เรียงตามลำดับ

ตารางที่ 1 แสดงคุณลักษณะสมบัติหม้อแปลง

Maximum Power (kVA) = 100 kVA		Frequency = 50 Hz		
High Volt = 22 kV	Low Volt = 400 V	Type ONAN	Class A	Vector Dyn11
No Load Loss = 250 W	Load Loss = 1,230 W	Total Loss = 1,480 W		
Average Winding Temp.rise Guarantee = 65 °C		Top-Oil Temp. rise Guarantee = 60 °C		
Hottest spot of HV. Wdg rise = 45.48 °C		Hottest spot of LV. Wdg rise = 55.42 °C		
Top-Oil Temp. rise = 37 °C		Top Oil Time Constant = 3 h		

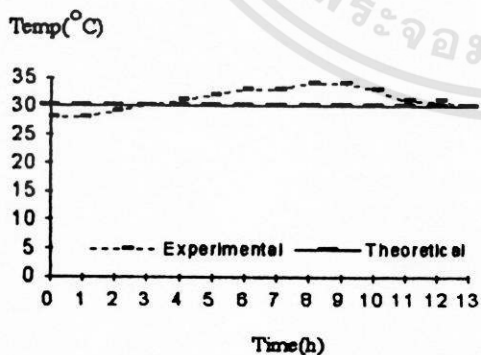
ตารางที่ 2 ผลของอุณหภูมิในช่วงเวลาต่างๆได้จากการทดลอง

	0h	1h	2h	3h	4h	5h	6h	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h
Ambient Temp,C.	28	28	29	30	31	32	33	33	34	34	33	31	31	30
Top Oil Temp.	28	42	50	55	59	62	64	65	67	68	68	67	67	66
Top Oil Rise.	0	14	21	25	28	30	31	32	33	34	35	36	36	36

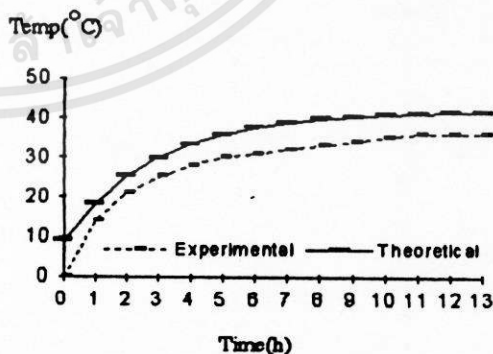
ตารางที่ 3 ผลของอุณหภูมิในช่วงเวลาต่างๆได้จากการทำนาย

	0h	1h	2h	3h	4h	5h	6h	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h
Ambient Temp, C	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
*Top Oil Temp	38.9	48.3	55.1	59.9	63.3	65.8	67.6	68.9	69.8	70.4	70.9	71.2	71.5	71.6
*Top Oil Rise	8.9	18.3	25.1	29.9	33.3	35.8	37.6	38.9	39.8	40.4	40.9	41.2	41.5	41.6
*Hottest-Spot Temp	38.9	69.8	76.5	81.3	84.8	87.3	89.0	90.9	91.2	91.9	92.4	92.7	92.9	93.1
**Top Oil Temp	38.8	48.2	55.0	59.8	63.3	65.8	67.5	68.8	69.7	70.4	70.9	71.2	71.5	71.6
**Top Oil Rise	8.8	18.2	25.0	29.8	33.3	35.8	37.5	38.8	39.7	40.4	40.9	41.2	41.5	41.6
**Hottest-Spot Temp	62.4	71.8	78.6	83.4	86.9	89.4	91.1	92.4	93.3	94.0	94.5	94.8	95.1	95.2

หมายเหตุ * = IBBB ** = IEC

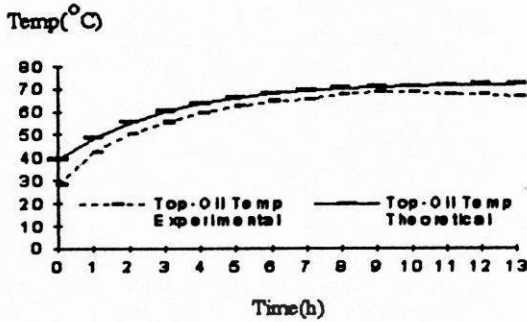


รูปที่ 5 แสดงผลของอุณหภูมิแฉกส้อม



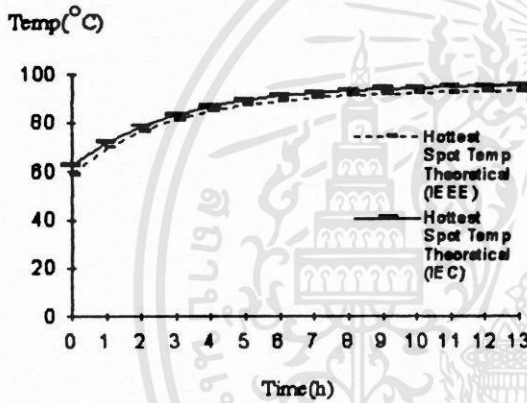
รูปที่ 6 แสดงผลของอุณหภูมิเพิ่ม ของน้ำมันด้านบน
หมายเหตุ กราฟ Theoretical ได้จาก IBBB และ IEC ที่ทับกันพอดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

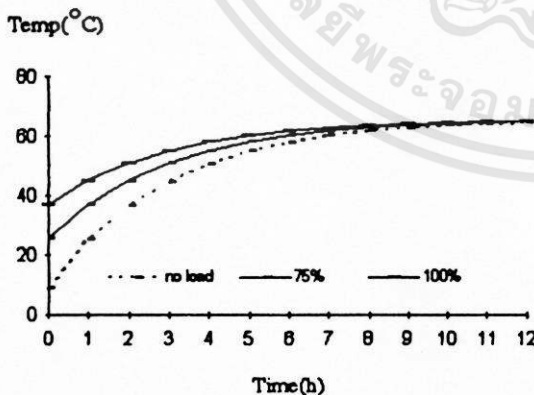


รูปที่ 7 แสดงผลของอุณหภูมิน้ำมันด้านบน

หมายเหตุ กราฟ Theoretical ได้จาก IBBB และ IBC ที่ทับกันพอดี



รูปที่ 8 แสดงผลการเปรียบเทียบ การทำนายอุณหภูมิจุดร้อนสุดของขดลวด ทางด้านขดลวดทุติยภูมิ



รูปที่ 9 แสดงผลอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้านบน ซึ่งได้จากการทำนายที่โหลดสูงสุด 150% เมื่อโหลดคือเบื่องสมมูลที่ no load, 75% และ 100%

5. ภาคผนวก (Appendix)

5.1 สมการคำนวณ (Calculation Equations)

$$\text{Log}_{10} \text{ life}(h) = A + \frac{B}{T} \quad \dots(1)$$

$$\% \text{ อายุที่สูญเสีย} = 100\alpha \cdot 10^{-\left(A + \frac{B}{T}\right)} \quad \dots(2)$$

$$V = \frac{\text{ageing rate at } \Theta_h}{\text{ageing rate at } 98^\circ \text{C}} = 2^{(\Theta_h - 98)/6} \quad \dots(3)$$

$$L = \frac{1}{t} \int_{t_1}^{t_2} V dt \quad \text{ou} \quad L = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N V \quad \dots(4)$$

โหลดสมมูลหรือค่าประสิทธิผล

$$= \sqrt{\frac{L_1^2 \cdot t_1 + L_2^2 \cdot t_2 + L_3^2 \cdot t_3 + \dots + L_n^2 \cdot t_n}{t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_n}} \quad \dots(5)$$

โหลดคือเบื่องสมมูล

$$= 0.29 \sqrt{L_1^2 + L_2^2 + \dots + L_n^2} \quad \dots(6)$$

$$\Theta_{gr} = \Theta_{wr} - \Theta_{or} + 15(10) \quad \dots(7)$$

$$\Theta_{gu} = K^{2n} \cdot \Theta_{gr} \quad \dots(8)$$

$$\Theta_{ou} = \left(\frac{K^2 R + 1}{R + 1} \right)^n \cdot \Theta_{or} \quad \dots(9)$$

$$\Theta_o = \left(\Theta_{ou} - \Theta_a \right) \left(1 - e^{-t/T_r} \right) + \Theta_a \quad \dots(10)$$

$$\Theta_g = \left(\Theta_{gu} - \Theta_g \right) \left(1 - e^{-t/T_{hs}} \right) + \Theta_g \quad \dots(11)$$

$$\text{อุณหภูมิน้ำมันด้านบน} = \Theta_o + \Theta_a \quad \dots(12)$$

$$\Theta_{hr} = \Theta_a + \Theta_o + \Theta_g \quad \dots(13)$$

$$\Theta_h = \Theta_a + \Delta\Theta_{or} \left[\frac{1 + RK^2}{1 + R} \right]^x + H_{gr} K^y \quad \dots(14)$$

$$\Theta_h = \Theta_a + \Delta\Theta_{br} \left[\frac{1 + RK^2}{1 + R} \right]^x + 2[\Delta\Theta_{bmr} + \Delta\Theta_{br}] K^y + H_{gr} K^y \quad \dots(15)$$

$$\Theta'_h = \Theta_h + 0.15(\Theta_h - \Theta_{hr}) \quad (\text{for } k=1) \quad \dots(16)$$

เมื่อ Θ_h ได้จากสมการที่ 15

$$\Delta\Theta_{bt} = \Delta\Theta_{bt} + (\Delta\Theta_{bu} - \Delta\Theta_{bt}) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_0}} \right) \quad \dots(17)$$

$$T = T_r \frac{\left(\frac{\Theta_{or}}{\Theta_{or}} - \left(\frac{\Theta_{or}}{\Theta_{or}} \right)^{\frac{1}{n}} \right)}{\left(\frac{\Theta_{or}}{\Theta_{or}} \right)^{\frac{1}{n}} - \left(\frac{\Theta_{or}}{\Theta_{or}} \right)^{\frac{1}{n}}} \quad \dots(18)$$

$$R_{f2} = R_{f1} \left(\frac{\Theta_1 + \Theta_{w2}}{\Theta_1 + \Theta_{w1}} \right) \quad \dots(19)$$

5.2 สัญลักษณ์ (Symbols)

5.2.1 สัญลักษณ์ มาตรฐาน IBBB

- T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์,เคลวิน ($\Theta_{s} +273$)
- Θ_{hs} คือ อุณหภูมิจุดร้อนสูงสุดของขดลวด °C
- A และ B คือ ค่าคงที่ สำหรับการทำนายชีวิตที่ เหมาะสม สำหรับที่ระบบจนวน 65 °C
- A = -11.269 , B = 6328.8
- สำหรับที่ระบบจนวน 55 °C
- A = -11.968 , B = 6328.8
- $L_1, L_2, L_3 \dots L_n$ คือ ชั้นโหนดต่างๆ ที่เปลี่ยนแปลง เป็น เปอร์เซ็นต์ต่อหน่วย , kVA
- $t_1, t_2, \dots t_n$ คือ ช่วงเวลาที่เกิดโหนด โดยพิจารณาเรียงตาม ลำดับ.
- K คือ โหนดที่แสดง ที่พิกัดแผ่นป้ายชื่อหม้อแปลง ซึ่งจะ พิจารณาแสดงต่อหน่วย
- Θ_{wr} คือ อุณหภูมิเพิ่มเฉลี่ยของขดลวดที่มากกว่าอุณหภูมิ แวกส์อม ที่พิกัดโหนด, °C
- Θ_{gr} คือ อุณหภูมิเพิ่มจุดร้อนสุดของตัวนำที่มากกว่าอุณหภูมิ น้ำมันด้านบน ที่พิกัดโหนด, °C
- Θ_{or} คือ อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน ที่มากกว่าอุณหภูมิแวกส์ ออม ที่พิกัดโหนด, °C
- Θ_{α} คือ อุณหภูมิเพิ่มเริ่มต้นน้ำมันด้านบน ที่มากกว่าอุณหภูมิ แวกส์อมที่ช่วงเวลาเริ่มต้น, °C
- Θ_{om} คือ อุณหภูมิเพิ่มสุดท้ายน้ำมันด้านบนที่ทุกๆโหนด K , °C
- Θ_{β} คืออุณหภูมิเพิ่มเริ่มต้นจุดร้อนสุดของตัวนำ ที่มากกว่า อุณหภูมิ น้ำมันด้านบน ที่ช่วงระหว่างเวลาเริ่มต้น, °C

- Θ_{gm} คือ อุณหภูมิเพิ่ม สุดท้ายจุดร้อนสุดของตัวนำ ที่มากกว่าอุณหภูมิของน้ำมันด้านบนที่ทุกๆโหนด, °C
- Θ_o คือ อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน ที่มากกว่าอุณหภูมิแวกส์ ออมที่ตอนปลายของเวลา t... , °C
- Θ_g คือ อุณหภูมิเพิ่มจุดร้อนสุดของตัวนำ ซึ่งมากกว่าอุณหภูมิ น้ำมันด้านบน ที่ตอนปลายของ t... , °C
- Θ_{α} คือ อุณหภูมิแวกส์อม , °C
- Θ_{w1} คือ ค่าอุณหภูมิขดลวดเฉลี่ย ที่เวลา t_1 , °C
- Θ_{w2} คือ ค่าอุณหภูมิขดลวดเฉลี่ย ที่เวลา t_2 , °C
- Θ_1 ทองแดง มีค่า 234.5 °C ,อลูมิเนียม มีค่า 225 °C
- T_{hs} คือ ค่าเวลาความร้อนของตัวนำคงที่ ที่จุดร้อนสูงสุด , ชั่วโมง
- T_r คือ ค่าเวลาที่ความร้อนของน้ำมันคงที่ ที่พิกัดโหนดหม้อ แปลง, ชั่วโมง
- R คือ อัตราส่วนค่าสูญเสียโหนดที่พิกัด ค่อค่าสูญเสียที่ไว้ ภาระ
- n คือ ค่ากำลังคงที่ โดยปกติกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.8

5.2.2 สัญลักษณ์ มาตรฐาน IBC

- Θ_{α} คือ อุณหภูมิแวกส์อม , °C
- Θ_h คือ อุณหภูมิจุดร้อนสูงสุดของขดลวด, °C
- Θ_h^* คือ อุณหภูมิจุดร้อนสูงสุดของขดลวดที่รวมถึงการ พิจารณา ความสัมพันธ์ ความต้านทาน-อุณหภูมิ ของตัวนำ, °C
- Θ_{hr} คืออุณหภูมิจุดร้อนสูงสุดของขดลวดที่พิกัดโหนด, °C
- $\Delta\Theta_{or}$ คือ อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน ที่พิกัดโหนด, K
- $\Delta\Theta_{br}$ คือ ค่าอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้านล่างที่พิกัดโหนด, K
- $\Delta\Theta_{\alpha}$ คือ ค่าอุณหภูมิเพิ่มเริ่มต้นของน้ำมันด้านล่าง ที่เวลา เริ่มต้น , K
- $\Delta\Theta_{\beta}$ คืออุณหภูมิเพิ่มสุดท้ายน้ำมันด้านบนที่ทุกๆโหนด K , K
- $\Delta\Theta_{\beta}$ คือ ค่าอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้านล่าง , K
- $\Delta\Theta_{br}$ คือ ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมัน , K
- β_r คือ อุณหภูมิเพิ่มจุดร้อนสุดของตัวนำที่มากกว่าอุณหภูมิ น้ำมันด้านบน ที่พิกัดโหนด , K
- β คือ ตัวประกอบโหนด(โหนดกระแส/พิกัดกระแส)
- R คือ อัตราส่วนค่าสูญเสียโหนดที่พิกัดค่อค่าสูญเสีย ที่ไว้ ภาระ เมื่อหม้อแปลงชนิด ONAN กำหนดให้เท่ากับ 5

- x คือ ค่ากำลังคงที่ ที่ผลรวมค่าสูญเสียต่ออุณหภูมิเพิ่มของน้ำมัน เมื่อหม้อแปลงชนิด ONAN กำหนดให้เท่ากับ 0.8
- y คือ ค่ากำลังคงที่ ที่กระแส ต่ออุณหภูมิเพิ่มของขดลวดเมื่อหม้อแปลงชนิด ONAN กำหนดให้เท่ากับ 1.6
- r_0 คือ ค่าเวลาที่ความร้อนของน้ำมันคงที่ ที่พิกัดโหลดหม้อแปลง , ชั่วโมง
- H คือ ตัวประกอบอุณหภูมิจุดร้อนสุด
- g คือ ค่าอุณหภูมิแตกต่างของขดลวดกับอุณหภูมิน้ำมัน
- n คือ จำนวนแต่ละช่วงเวลา
- N คือจำนวนผลรวมของช่วงเวลาเท่ากัน

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ บริษัท พงษ์พัฒนาการไฟฟ้า จำกัด ที่สนับสนุนผลงานวิจัยนี้ จนสามารถลงสู่ลงไปด้วยดี

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] IEBE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Overhead and Pad- Mounted Distribution Transformers Rated 500 kVA and Less with 65°C or 55°C Average Winding Rise , ANSI/IEBE C57.91 -1981.
- [2] Bharat Heavy Electricals Limited. " Transformer " Tata McOrew-Hill Publishing Company Limited, New Delhi , 1987.
- [3] Loading Guide for oil-Immersed Power Transformer , IEC 354-1991.
- [4] M.V.Thaden, S.P. Mehta , R.L.Grubb " Temperature Rise Tests on a Forced-Oil-Air cooled (FOA) (OFAF) Core - Form Transformer , Including Loading Beyond Nameplate", IEBE Trans. on Power Delivery , Vol. 10 No 2 April 1995, pp. 913-923.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายชนิดจุ่ม ในน้ำมันเวคเตอร์กรุป Yzn 11

Development of Design Software for Oil Immersed Distribution Transformer with Vector Group Yzn 11

บุญเลิศ สือเลข เจนศักดิ์ เอกบูรณะวัฒน์ ศุภี บรรจงจิตร
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการนำเสนอผลการวิจัยและพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายชนิดจุ่มในน้ำมันที่มีเวคเตอร์กรุป Yzn 11 ตามข้อกำหนดใหม่ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค(กฟภ.) โดยซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถใช้ในการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายที่ใช้ในพื้นที่บริการของ กฟภ. ขั้นตอนการออกแบบโดยซอฟต์แวร์มีดังนี้ ออกแบบแกนเหล็ก, ออกแบบขดลวด, ออกแบบระบบฉนวน, ออกแบบขนาดตัวถังและคำนวณราคาค้นทุนวัสดุหลัก จากการออกแบบโดยซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นนี้ ได้ทำการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 50 kVA 3 เฟส 50 Hz 22kV-400/230 V แล้วนำผลที่ได้จากการออกแบบไปทำการทดลองสร้างจริง แล้วทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากซอฟต์แวร์กับผลทดสอบในทางปฏิบัติ เพื่อเป็นการแสดงให้เห็นว่าซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นนี้ สามารถใช้ในการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายชนิดจุ่มน้ำมัน ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Abstract

This paper describes the research and development of design software for oil immersed distribution transformer with vector group Yzn 11 according to the new specifications of Provincial Electricity Authority(PEA). Software was developed and was applied for distribution transformer design for PEA area. The design software include core design, coil design, insulation system design, dimension tank design and cost calculation of main materials. The distribution transformer is 50kVA, 3phase, 50Hz, 22kV-400/230V. The results from the design were compared with the test results and it was determined that the software works effectively.

1. บทนำ

ในการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายนั้นผู้ออกแบบจะต้องอาศัยความรู้ทั้งทางทฤษฎีและปฏิบัติในการออกแบบและผลิตหม้อแปลงจำหน่ายเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ของการออกแบบเป็นไปตามข้อกำหนดรายละเอียด

(Specification) และสามารถออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายให้มีคุณภาพดี และมีต้นทุนในการผลิตต่ำ ปัญหาในการออกแบบและผลิตหม้อแปลงจำหน่ายที่พบบ่อยๆคือ การเลือกค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เหมาะสม ความคลาดเคลื่อน

จากการคำนวณ ความคลาดเคลื่อนในการผลิตและรวมถึงคุณสมบัติของวัสดุและอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการผลิตด้วย ดังนั้นบทความนี้จึงขอเสนอผลการวิจัยและพัฒนาซอฟต์แวร์ เพื่อช่วยในการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายชนิดจุ่มในน้ำมัน (Oil Immersed Distribution Transformer) หรือ OI DT ให้เป็นไปตามข้อกำหนดใหม่ของ กฟภ. และมีเวกเตอร์รูป Yzn 11 โดยซอฟต์แวร์นี้จะเป็นเครื่องมือช่วยให้ผู้ออกแบบสามารถทำการวิเคราะห์และออกแบบ OI DT ได้อย่างถูกต้อง รวดเร็ว และแม่นยำลดการเสียเวลาและข้อผิดพลาดที่อาจจะเกิดขึ้นจากการคำนวณได้ การออกแบบที่ถูกต้องจะทำให้ OI DT ใช้งานได้อย่างปลอดภัยและมีประสิทธิภาพ มีอายุการใช้งานยาวนานขึ้น เพิ่มความมีเสถียรภาพให้กับระบบจำหน่าย และซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นนี้ยังสามารถคำนวณต้นทุนวัสดุหลักที่ใช้ในการสร้าง OI DT ซึ่งทำให้ผู้ออกแบบสามารถออกแบบให้มีต้นทุนวัสดุต่ำ

2. ทฤษฎีและขั้นตอนการคำนวณออกแบบ

ขั้นตอนในการออกแบบ OI DT สามารถแบ่งเป็นขั้นตอนหลักได้ดังนี้คือ ออกแบบแกนเหล็ก, ออกแบบขดลวด, ออกแบบระบบฉนวน และออกแบบขนาดตัวถังหม้อแปลง

2.1 การออกแบบแกนเหล็ก

เป็นการคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก โดยนำขนาดของแกนเหล็กในแต่ละชั้น(Step)มาจัดเรียงลงในวงกลมดังรูปที่ 1 จำนวนชั้นของแกนเหล็กนั้นขึ้นอยู่กับผู้ออกแบบเป็นผู้กำหนดเพื่อให้ได้พื้นที่หน้าตัดตามที่ต้องการ แกนเหล็กที่นำมาใช้นี้เป็นแผ่นเหล็กซิลิกอนเกรด M-4 ความหนา 0.27 มม. การคำนวณหาแกนเหล็กที่นำมาจัดเรียงในแต่ละชั้นสามารถคำนวณได้จากสมการ

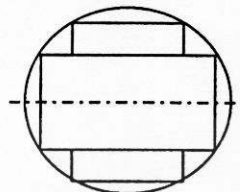
$$F(Y) = 2 \left[\sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - Y^2} \right] \quad (1)$$

โดยที่

F(Y) คือ ความกว้างของหน้าเหล็กในแต่ละชั้น(มม.)

D คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของแกนเหล็ก(มม.)

Y คือ ความหนาของแกนเหล็กในแต่ละชั้น(มม.)



รูปที่ 1 การจัดเรียงแกนเหล็กในแต่ละชั้น

2.2 การออกแบบขดลวด

เป็นการคำนวณหาจำนวนรอบของขดลวดที่พื้นที่หน้าตัดของขดลวดทองแดงที่ใช้ และขนาด(Dimension)ต่างๆ ของขดลวดที่พันเสร็จแล้วทั้งด้านแรงสูงและด้านแรงต่ำ โดยขดลวดด้านแรงต่ำจะมี 2 ชุดต่อหนึ่งเฟส สมการพื้นฐานของแรงดันเหนี่ยวนำในขดขดลวดของหม้อแปลงเป็นดังนี้

$$E = 4.44fNAB_m \quad (2)$$

2.3 การออกแบบระบบฉนวน

เป็นการออกแบบเพื่อหาความหนาฉนวนของขดลวดกับส่วนต่างๆ ฉนวนที่ใช้คือกระดาษและกระดาษอัด (paper and pressboard) ซึ่งมีคุณสมบัติทนต่อโคอีเล็กทริกสูง(Dielectric Strength) ทนต่อความชื้น(Moisture) ความร้อนและปฏิกิริยาเคมี ฉนวนของขดลวดแบ่งได้ดังนี้

2.3.1 ฉนวนหลัก(Major Insulation) ประกอบด้วยฉนวนของขดลวดแรงต่ำกับแกนเหล็ก ฉนวนระหว่างขดลวดแรงสูงกับแรงต่ำ

2.3.2 ฉนวนรอง(Minor Insulation) ประกอบด้วยฉนวนระหว่างรอบและระหว่างชั้นของขดลวดแรงสูงและแรงต่ำ

2.4 การคำนวณหาระยะต่างๆ ของแกนเหล็ก

เป็นการคำนวณหาขนาด (Dimension) ต่างๆ ของแกนเหล็ก จำนวนแผ่นแกนเหล็กที่ใช้รวมทั้งความหนาหน้าเหล็กของแกนเหล็กที่ใช้ทั้งหมด ค่าความหนาแน่นของแผ่นแกนเหล็กที่ใช้จะมีค่าเท่ากับ 7.65 kg/dm^3

2.5 ค่าแรงคุณสมบัติต่างๆ ของ OI DT

เป็นการคำนวณหาคุณสมบัติต่างๆ ของ OIDT โดยแบ่งเป็นข้อๆ ได้ดังนี้

2.5.1 คำนวณหาค่าความสูญเสียขณะไม่มีโหลด โดยคำนวณได้จากสมการ

$$W_c = K_3 W_l W_m \quad (3)$$

โดยที่

W_c = กำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะไม่มีโหลด (วัตต์)

K_3 = แฟกเตอร์ที่ทำให้การสูญเสียขณะไม่มี

โหลดเพิ่มขึ้น

W_l = น้ำหนักของแกนเหล็กที่ใช้ทั้งหมด (กก.)

W_m = กำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กค่อน้ำหนักแกนเหล็ก 1 กก.

2.5.2 คำนวณหาค่าความสูญเสียขณะมีโหลด โดยคำนวณได้จากสมการ

$$P_c = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 \quad (4)$$

โดยที่

P_c คือ ค่าความสูญเสียเนื่องจากขดลวด (วัตต์)

R_1, R_2 คือ ความต้านทานด้านแรงสูงและแรงต่ำ

(โอห์ม) ซึ่งคำนวณจากสมการ

$$R = \rho L N / A \quad (5)$$

โดยที่

ρ คือ ความต้านทานจำเพาะของตัวนำ (Specific Resistive of Conductor) ($\Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$)

ส่วนค่าความสูญเสียของกระแสไหลวน (Eddy Current Loss) และค่าความสูญเสียปลิกย่อย (Stray Loss) นั้นสามารถหาได้จากผลการทดสอบในทางปฏิบัติ ซึ่งจะมีค่าโดยประมาณ 8 % ของค่าความสูญเสียเนื่องจากขดลวดทองแดง (Copper Loss) โดยค่าความสูญเสียทั้งหมดนี้จะต้องคำนวณที่อุณหภูมิอ้างอิง 75 องศาเซลเซียส

2.5.3 คำนวณค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจร (Short Circuit Impedance) โดยคำนวณได้จากสมการ

$$\%Z = \sqrt{\%R^2 + \%X^2} \quad (6)$$

โดยที่

$\%R$ คือ Percentage Resistance

$\%X$ คือ Percentage Reactance โดยสามารถ

คำนวณได้จากสมการ

$$X = [2\pi f \mu_0 L_m AT / (L_c E_r)] x [a + (b_1 + b_2)/3] x 100 \quad (7)$$

โดยที่

L_m คือ ความยาวรอบเฉลี่ยของขดลวดแรงสูงและแรงต่ำ (เมตร)

AT คือ แอมแปร์ - รอบ (Ampere-Turn) ของขดลวดแรงสูงหรือแรงต่ำ

L_c คือ ความยาวตามแนวแกน (axial) ขดลวด (เมตร)

E_r คือ แรงดันต่อรอบ

a คือ ระยะห่างระหว่างขดลวดแรงสูงและแรงต่ำ

(เมตร)

b_1 คือ ความกว้างตามแนวรัศมีของขดลวดแรงต่ำ

(เมตร)

b_2 คือ ความกว้างตามแนวรัศมีของขดลวดแรงสูง

(เมตร)

2.5.4 คำนวณค่าโวลต์เตจเรกูเลชัน (Voltage Regulation) โดยคำนวณได้จากสมการ

$$\% \text{ Reg.} = (R \cos \theta + X \sin \theta) + [(X \cos \theta - R \sin \theta)^2 / 200] \quad (8)$$

โดยที่

R คือ Percentage Resistive Drop

X คือ Percentage Reactive Drop

2.5.5 คำนวณหาประสิทธิภาพ (Efficiency) โดยคำนวณได้จากสมการ

$$\% \eta = [1 - (\text{Total Loss}/\text{Input Power})] x 100 \quad (9)$$

2.6 การออกแบบตัวถังและครีบริบายความร้อน

เป็นการหาขนาดของตัวถังและจำนวนครีบริบายความร้อนเพื่อให้ OIDT มีพื้นที่ผิวในการระบายความร้อนเพียงพอ ซึ่งจะช่วยให้อุณหภูมิของ OIDT ขณะใช้งานมีค่าเป็นไปตามข้อกำหนด (Specification)

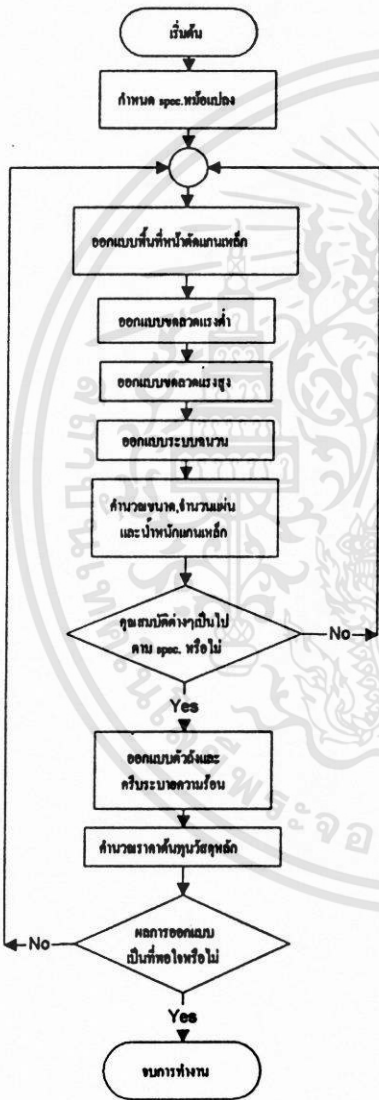
2.7 คำนวณต้นทุนวัสดุหลักที่ใช้ในการผลิต

เป็นการคำนวณหาจำนวนและปริมาณของวัสดุหลักที่ใช้ในการผลิต OIDT โดยพิจารณาวัสดุหลักคือ

แกนเหล็ก, ขดลวดทองแดงทางค้ำแรงสูงและแรงต่ำและน้ำมันหม้อแปลง

3. ขั้นตอนการทำงานของซอฟต์แวร์

ขั้นตอนการทำงานของซอฟต์แวร์แสดงได้ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ขั้นตอนการทำงานของซอฟต์แวร์

รูปที่ 2 แสดงขั้นตอนการทำงานทั้งหมดของซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้น โดยผลที่ได้จากการคำนวณจะแสดงทางหน้าจอคอมพิวเตอร์หรือเครื่องพิมพ์ โดยผู้ออกแบบจะต้องทำการพิจารณาผลที่ได้จากการออกแบบว่าเป็นไปตามข้อกำหนด (Specification) หรือไม่ ถ้าไม่เป็นไปตามข้อกำหนดผู้ออกแบบก็สามารถที่จะกลับไปแก้ไขพารามิเตอร์ต่างๆ ได้โดยง่าย และยังสามารถเช็คราคาคำนวณวัสดุหลักที่ใช้ในการผลิตได้ โดยถ้ายังไม่เป็นที่พอใจผู้ออกแบบก็สามารถทำการแก้ไขพารามิเตอร์ต่างๆ ได้ การคำนวณออกแบบก็จะเริ่มใหม่อีกครั้ง เป็นลักษณะการวนรอบของการทำงานไปเรื่อยๆ จนกว่าผู้ออกแบบจะพอใจผลที่ได้จากการวิเคราะห์ออกแบบ

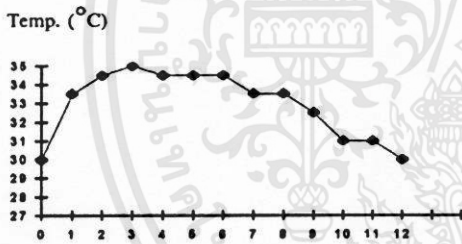
4. ผลการออกแบบ และผลการทดสอบในทางปฏิบัติ

ตัวอย่างผลของ OIDT ที่ได้ออกแบบโดยซอฟต์แวร์มีพิกัดดังนี้คือ ขนาด 50 kVA 3 phase 50Hz 22kV - 400/230 V เวกเตอร์กรุป Yzn 11 โดยนำผลที่ได้จากการออกแบบมาทำการสร้าง OIDT ตามที่ได้ออกแบบไว้ แล้วนำ OIDT ที่สร้างขึ้นนี้มาทำการทดสอบได้ผลดังตารางที่ 1

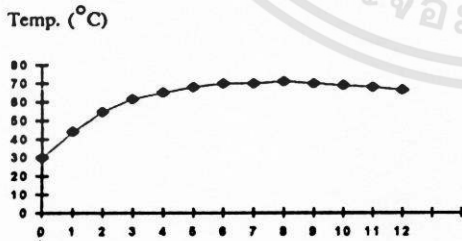
จากการพิจารณาเปรียบเทียบผลที่ได้จากการออกแบบกับผลที่ได้จากการสร้างจริงดังตารางที่ 1 และ 2 จะเห็นว่าค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าคลาดเคลื่อนบ้างเล็กน้อยจากตารางที่ 1 เมื่อพิจารณาที่ค่า Voltage Regulation จะเห็นว่ามีค่าคลาดเคลื่อน -9.31% ซึ่งมีค่าคลาดเคลื่อนจากการออกแบบสูง แต่ในความเป็นจริงนั้น Voltage Regulation ต่ำๆจะทำให้มีประสิทธิภาพสูง ดังนั้นผลทดสอบจริงมีค่าต่ำกว่าค่าจากการออกแบบจึงถือว่าเป็นผลดี และจากตารางที่ 2 เมื่อพิจารณาขดลวดแรงต่ำและแรงสูงมีค่าคลาดเคลื่อน 1.76% และ -0.98% ตามลำดับ และแกนเหล็กมีค่าคลาดเคลื่อน 1.85% ค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นนี้อาจเกิดได้จากค่าตัวประกอบในการผลิต(Building Factor) หรืออาจเกิดจากวัสดุที่ใช้ในการผลิตมีคุณสมบัติคลาดเคลื่อนจากข้อกำหนด(Specification)

จากตารางที่ 3 และรูปกราฟที่ 3,4 และ 5 แสดงผลการทดสอบหาค่าอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดและน้ำมันหม้อแปลง จะเห็นว่ามิต่ำค่ากว่าคุณสมบัติตามข้อกำหนด (Specification) ค่าอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดและน้ำมันหม้อแปลงมีค่าต่ำจะทำให้จำนวนของหม้อแปลงมีอายุยาวนานขึ้นซึ่งทำให้หม้อแปลงมีอายุการใช้งานยาวนานขึ้นตามไปด้วย นอกจากนี้ยังได้ทำการทดสอบระดับความทนต่อแรงดันเกินตามมาตรฐานอุตสาหกรรม มอก. 384-2525 ผลที่ได้เป็นที่น่าพอใจ

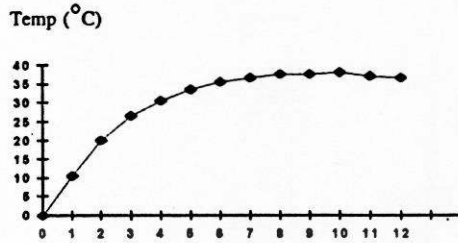
จากการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลดังกล่าวมาแล้ว ข้อมแสดงให้เห็นว่า ผลที่ได้จากซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นนี้มีความถูกต้องและแม่นยำ สามารถนำไปใช้ในทางปฏิบัติได้จริง โดยสามารถทำการวิเคราะห์ห้ออกแบบ OI DT ที่เกิดกำลังไฟฟ้าต่างๆ ได้ตามข้อกำหนด (Specification) ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค



รูปที่ 3 อุณหภูมิแวดล้อม(Ambient Temp.) ขณะทำการทดสอบ



รูปที่ 4 ผลทดสอบอุณหภูมิน้ำมันด้านบน (Top Oil Temp.)



รูปที่ 5 ผลทดสอบอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน (Top Oil Temp. Rise)

5. สรุป

จากผลการวิจัยและพัฒนาซอฟต์แวร์เพื่อช่วยในการออกแบบ OI DT นี้จะเห็นว่าซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นนี้ใช้งานง่าย มีความแม่นยำ ผลที่ได้เป็นที่น่าเชื่อถือ ซึ่งผลจากการทดลองดังกล่าวข้างต้น เป็นเครื่องยืนยันให้เห็นว่าสามารถนำไปใช้ในการออกแบบและนำผลที่ได้จากการออกแบบไปใช้งานได้จริง ทำให้ผู้ออกแบบสามารถใช้ซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นนี้ทำการวิเคราะห์ห้ออกแบบ OI DT ให้มีค่าความสูญเสียต่ำ และมีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น และยังเป็นเครื่องมือสำหรับช่วยให้ผู้ออกแบบสามารถปฏิบัติงานได้รวดเร็วขึ้น ลดความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นจากการคำนวณ ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่าย มีต้นทุนในการผลิตต่ำลง และยังเป็นการสนองนโยบายการประหยัดพลังงานของรัฐบาล นอกจากนี้ยังสามารถที่จะนำซอฟต์แวร์นี้ไปทำการพัฒนาต่อเพื่อให้สามารถทำการวิเคราะห์ห้ออกแบบ OI DT ที่มีเวกเตอร์รูป Dyn 11 และวิเคราะห์ห้ออกแบบ OI DT ที่ใช้ในพื้นที่บริการของการไฟฟ้านครหลวง(แรงดันสูง 12/24 kV แรงดันต่ำ 416/240 V) ได้อีกด้วย

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบริษัท พงษ์พิมานการไฟฟ้า จำกัด และผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านที่สนับสนุนผลการวิจัยนี้จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] เอกสารข้อกำหนดรายละเอียด(Specification)ของหม้อแปลงจำหน่าย 3 เฟส 50 Hz, การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค(กฟภ.)
- [2] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, กระทรวงอุตสาหกรรม “มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง” มอก.384-2525 กรุงเทพมหานคร, พิมพ์ครั้งที่ 2, 2538
- [3] บุญเลิศ เอี่ยมทัศนาศนา “Delphi”, ซีเอ็ดบุ๊คเซ็นเตอร์, กรุงเทพฯ, 2539
- [4] Bharat Heavy Electricals Limited “Transformer” Tata McGrew-Hill Publishing Company Limited, New Delhi, 1987
- [5] William M. Flanagan “Hand Book of Transformer Design and Application”, McGrew-Hill, New York, Second Edition, 1993
- [6] Power Transformer Part 1: General, IEC76-1, 1993
- [7] Power Transformer Part 2 : Temperature Rise,

IEC76-2, 1993

- [8] Power Transformer Part 3: Insulation Level and Dielectric Tests, IEC76-3, 1980
- [9] Loading Guide for Oil-Immersed Power Transformer, IEC 354-1991

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการออกแบบกับผลที่ได้จากการทดสอบ

คุณสมบัติ OIDT	ข้อกำหนด กฟภ.	ผลจากการ ออกแบบ	ผลจากการ ทดสอบ
No load loss	160	155.2	150.1
Load loss	950	917.6	904.2
Short cct. imp.	4($\pm 10\%$)	3.91	3.78
% reg.	-	2.04	1.85
Efficiency	-	97.76	97.88

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบวัสดุหลักที่ได้จากการออกแบบกับการสร้างจริง

วัสดุหลัก	ผลจากการออกแบบ	ผลจากการสร้างจริง
แกนเหล็ก (กก.)	145.60	148.30
ขดลวดแรงต่ำ (กก.)	27.81	28.30
ขดลวดแรงสูง (กก.)	33.63	33.30
น้ำมันหม้อแปลง (ลิตร)	126.70	120.00

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันและขดลวดของหม้อแปลงที่สร้าง

	Guarantee	Test Result
HV. Winding Temp. Rise (°C)	65	40.49
LV. Winding Temp. Rise (°C)	65	44.90
Top Oil Temp. Rise (°C)	60	38.00

การพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับคำนวณหาอุณหภูมิของหม้อแปลง ขณะลัดวงจร

Development of Calculation Software for Transformer Temperature on Short Circuit

เจนศักดิ์ เอกบูรณะวัฒน์ บุญเลิศ สือเฉย ศุภี บรรจงจิตร นิทัศน์ กฤษณจินดา
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการนำเสนอผลการวิจัยและพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับใช้ในการคำนวณหาอุณหภูมิของหม้อแปลงขณะเกิดการลัดวงจรอุณหภูมิของหม้อแปลงจะเกิดขึ้นเมื่อหม้อแปลงจ่ายกระแสซึ่งในกรณีการจ่ายกระแสโอเวอร์โวลต์จะสามารถพิจารณาได้[5] ในกรณีของการเกิดลัดวงจรกระแสจะสูงมากอุณหภูมิของหม้อแปลงจะเพิ่มขึ้นตามขนาดของกระแส โดยซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถคำนวณและวิเคราะห์หาอุณหภูมิสุดท้ายของขดลวดหลังจากการลัดวงจร, กระแสลัดวงจรและเวลาในการลัดวงจรได้ การพัฒนาซอฟต์แวร์นี้ได้มาข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 100 และ 400 kVA 3 ph 50 Hz 22kV-400/230V เวกเตอร์กรุป Dyn 11 ที่ได้ทำการออกแบบและทำการผลิตแล้วมาวิเคราะห์และบันทึกผลที่ได้ลงในฐานข้อมูลและข้อมูลนี้จะถูกเลือกนำมาใช้ ทำให้ผู้ออกแบบสามารถค้นหาจุดบกพร่องในการออกแบบและการเลือกใช้วัสดุในการผลิต เช่น ขนาดของลวดตัวนำ, ความหนาของฉนวนและคุณสมบัติของแกนเหล็กที่ใช้ในการผลิตได้อย่างเหมาะสม อันจะทำให้หม้อแปลงที่ได้ทำการวิเคราะห์ออกแบบด้วยซอฟต์แวร์นี้มีประสิทธิภาพที่ดีและความน่าเชื่อถือมากขึ้น ผลที่ได้จากซอฟต์แวร์จะแสดงเป็นรูปภาพของอุณหภูมิของขดลวดที่เกิดขึ้นหลังจากการลัดวงจรเปรียบเทียบกับเวลาในการลัดวงจร ข้อมูลต่างๆที่ได้จากการวิเคราะห์สามารถบันทึกลงในฐานข้อมูลเพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการวิเคราะห์และออกแบบต่อไปในอนาคต

Abstract

This paper describes the research and development of calculation software for transformer temperature on short circuit. The temperature generated when supplied load. In case of over load consideration[5] if short circuit have high current and temperature increase follow to current. Software was developed to calculate and analyse final winding temperature at the end of short circuit, short circuit current and short circuit duration. The software developed employed the database from design and produce transformer 100 and 400 kVA, 3 ph, 50 Hz, 22kV-400/230V vector group Dyn 11 in order to record in database of software and selected use. The designer can find the faults for design and suitable material selection according to the conductor size, insulation thick and property of core steel. Transformer analysed and designed by this software was able to increase stability and efficiency. The result from the developed software showed display of graph final winding temperature at the end of short

circuit and the short circuit duration. The data from analysis were recorded in database in order to be used for analysis and design in the future.

1. บทนำ

ในการออกแบบระบบไฟฟ้ากำลังนั้นผู้ออกแบบจะต้องคำนึงถึงความมีเสถียรภาพและความปลอดภัยของระบบไฟฟ้า หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญต่อระบบไฟฟ้า ดังนั้นถ้าผู้ผลิตสามารถออกแบบและผลิตหม้อแปลงไฟฟ้าให้มีคุณสมบัติที่ติดทนต่อสภาวะการใช้งานตามมาตรฐานที่กำหนดก็จะสามารถช่วยให้ระบบไฟฟ้ามีเสถียรภาพและเกิดความมั่นคงต่อระบบไฟฟ้ามากขึ้น

ดังนั้นบทความนี้จึงนำเสนอผลการวิจัยและพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับคำนวณหากระแสลัดวงจร, เวลาที่เกิดการลัดวงจรและอุณหภูมิสุดท้ายของหม้อแปลงเมื่อเกิดการลัดวงจรเมื่อหม้อแปลงเกิดการลัดวงจรขึ้นจะทำให้กระแสในขดลวดสูงกว่ากระแสปกติหลายเท่าซึ่งจะมีผลทำให้อุณหภูมิของขดลวดสูงขึ้นตามไปด้วย ผลของอุณหภูมิที่สูงขึ้นนี้จะส่งผลให้ฉนวนได้รับความเสียหาย ถ้าหม้อแปลงได้รับการออกแบบที่เหมาะสมก็จะทำให้หม้อแปลงสามารถทนต่อสภาวะนี้ได้ตามข้อกำหนด

2. ขั้นตอนการคำนวณ

ในการวิเคราะห์สภาวะลัดวงจรของหม้อแปลงต้องทำการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆดังสมการต่อไปนี้

2.1 การคำนวณระยะเวลาการลัดวงจร (Short-Circuit Current Duration) สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$t = \frac{1250}{I^2} \quad (1)$$

โดยที่

t = ระยะเวลาการลัดวงจร (วินาที)

$I = \frac{I_{sc}}{I_R}$ = กระแสลัดวงจรสมมาตรซึ่งเป็นค่าที่วิกฤตของกระแสปกติ

หมายเหตุ

สมการที่ (1) ใช้กับหม้อแปลงที่มีขนาดไม่เกิน 500 kVA ส่วนหม้อแปลงที่มีขนาดใหญ่กว่านั้นระยะเวลาในการลัดวงจรจะไม่เกิน 2 วินาที ตามค่ามาตรฐาน

2.2 การคำนวณกระแสลัดวงจร (Short circuit current calculation) สามารถแบ่งการคำนวณได้ดังนี้

2.2.1 กระแสสมมาตร (Symmetrical Current)

สามารถหาได้จากสมการ

$$I_{SC} = \frac{I_R}{Z_T + Z_S} \quad (2)$$

โดยที่

I_R = กระแสที่ติด (A)

Z_T = อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงเป็นค่าเปอร์ยูนิต

Z_S = อิมพีแดนซ์ของระบบเป็นค่าเปอร์ยูนิต

หมายเหตุ

ในบทความนี้จะกล่าวถึงการลัดวงจรที่ขั้วของหม้อแปลงโดยไม่คิดค่าอิมพีแดนซ์ของระบบ (กระแสลัดวงจรมีค่าสูงสุด)

2.2.2 กระแสไม่สมมาตร (Asymmetrical current)

สามารถหาได้จากสมการ

$$I_{SC(pk asym)} = KI_{SC} \quad (3)$$

โดยที่

$$K = [1 + (e^{-(\phi + \pi/2)r/x}) \sin \phi] \sqrt{2}$$

และ

e = base of nature logarithm

ϕ = arctan x/r , in radian

x/r = อัตราส่วนของผลของกระแสลัดต่อค่ารีแอกแตนซ์และค่าความต้านทาน

2.3 การคำนวณอุณหภูมิของขดลวดขณะลัดวงจร
อุณหภูมิสุดท้ายของขดลวดขณะที่การลัดวงจรสิ้นสุด
(T_f) สามารถหาได้จากสมการ

$$T_f = (T_k + T_s) \cdot m(1 + E + 0.6m) + T_s \quad (4)$$

โดยที่

$$m = \frac{(w_s) t}{C(T_k + T_s)}$$

สมการนี้จะเป็นสูตรโดยประมาณที่ใช้ในกรณีที่ค่า
 $m = 0.6$ และน้อยกว่า สำหรับค่า m ที่มีค่ามากกว่า 0.6 ค่า T_f
สามารถหาได้จากสมการ

$$T_f = (T_k + T_s) \left[\sqrt{e^{2m} + E(e^{2m} - 1)} - 1 \right] + T_s \quad (5)$$

โดยที่

t = ระยะเวลาการลัดวงจร (วินาที)

$T_k = 234.5$ สำหรับทองแดง

$= 225$ สำหรับอลูมิเนียม

T_s = อุณหภูมิขณะเริ่มต้น ($^{\circ}\text{C}$) โดยจะมีค่าดังนี้

(1) 30°C ค่าอุณหภูมิแวดล้อม (Ambient Temp.)

บวกกับค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของขดลวดบวกกับอุณหภูมิจุดร้อน
สุดท้ายของ (จาก spec. ของโรงงาน) หรือ

(2) 30°C ค่าอุณหภูมิแวดล้อม (Ambient Temp.)

บวกกับค่าอุณหภูมิจุดร้อนสุดท้ายที่เพิ่มขึ้นของขดลวดตามข้อ
กำหนด (specification) ของหม้อแปลงแต่ละชนิด

e = base of natural logarithm ≈ 2.718

$$E = E_r \left[\frac{T_k + T_r}{T_k + T_s} \right]^2$$

E_r = per-unit eddy current loss ที่อุณหภูมิอ้างอิง

T_r = อุณหภูมิอ้างอิง

= อุณหภูมิแวดล้อม 20°C บวกกับอุณหภูมิเฉลี่ยของขด
ลวดที่พิกัด

W_s = Short-Circuit resistance loss ของขดลวดที่อุณหภูมิ
เริ่มต้น; วัตต์/ปอนด์ ของวัสดุตัวนำ

$$W_s = \frac{W_r N^2}{M} \times \left(\frac{T_k + T_s}{T_k + T_r} \right)$$

W_r = resistance loss ของขดลวดที่พิกัดกระแสและอุณหภูมิ
อ้างอิง; วัตต์

N = ขนาดของกระแสลัดวงจรสมมาตร; แอมป์

M = น้ำหนักของขดลวดตัวนำ; ปอนด์

C = ค่าความจุความร้อนเฉลี่ยต่อปอนด์ของวัสดุตัวนำ
สามารถหาได้จากสมการ

$C = 174 + 0.0225(T_s + T_r) + 110(A_i/A_c)$ สำหรับทองแดง

$C = 405 + 0.1(T_s + T_r) + 360(A_i/A_c)$ สำหรับอลูมิเนียม

A_i = พื้นที่หน้าตัดของฉนวน

A_c = พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ

3. ขั้นตอนการทำงานของซอฟต์แวร์

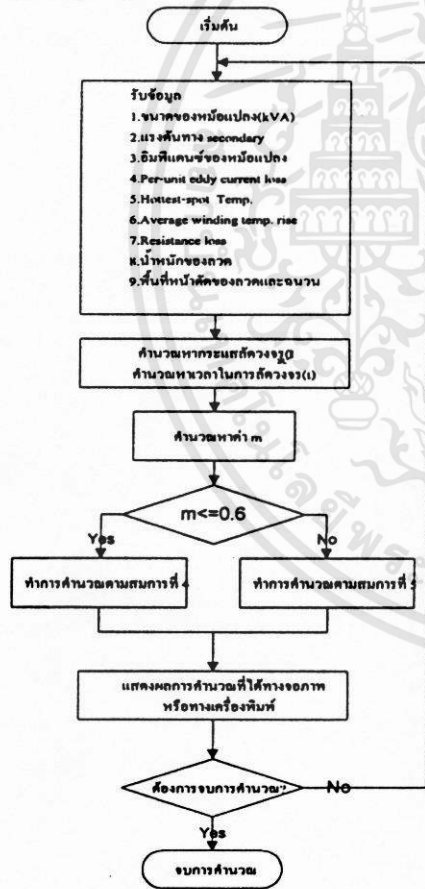
ซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นนี้ใช้ชื่อว่า Transformer

Temperature on Short circuit Calculation (TTSC) ถูกพัฒนา
ขึ้นด้วย Boland Delphi 1.0 ซึ่งจะทำงานบนระบบปฏิบัติการ
Microsoft Windows 3.11 หรือ Windows 95 ก็ได้ จึงทำให้
สามารถใช้งานได้ง่ายเพราะการติดต่อกับผู้ใช้โปรแกรมจะอยู่
ในรูปของกราฟฟิค (Graphic User Inter- face; GUI)

ผังงานแสดงขั้นตอนการทำงานทั้งหมดของ TTSC
แสดงดังรูปที่ 1 และรูปที่ 2 แสดงรูปแบบของ TTSC จากผัง
งานเมื่อป้อนอินพุตเป็นข้อมูลต่างๆของหม้อแปลงที่จะทำการ
วิเคราะห์อุณหภูมิแล้ว TTSC จะทำการคำนวณหาค่ากระแสลัด
วงจรที่เกิดขึ้นแล้วนำค่ากระแสลัดวงจรที่ได้นั้นคำนวณหา
เวลาที่เกิดการลัดวงจรและค่า m จากนั้นพิจารณาว่าค่า m ที่
คำนวณได้ว่ามีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่า 0.6 เพื่อเลือกสมการที่
ใช้ในการคำนวณอุณหภูมิสุดท้ายหลังการลัดวงจรได้ถูกต้อง
หลังจากการคำนวณวิเคราะห์เรียบร้อยแล้วจะแสดงผลที่ได้
ทางจอภาพเป็นค่ากระแสลัดวงจร, เวลาที่เกิดการลัดวงจรและ
อุณหภูมิสุดท้ายหลังเกิดการลัดวงจร และยังสามารถบันทึกผล
ลงในฐานข้อมูลเพื่อนำข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ที่พารา
มิเตอร์ต่างๆกันมาพล็อตเป็นกราฟเพื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบหา
พารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการออกแบบให้เกิดความเหมาะสม
อีกด้วย

4. ผลการวิเคราะห์

หม้อแปลงตัวอย่างที่นำผลของการออกแบบมาวิเคราะห์ด้วย TTSC ได้เลือกใช้หม้อแปลงขนาดพิกัดดังนี้ 100 และ 400 kVA 3 ph 50 Hz 22kV 400/230V เวกเตอร์กรุป Dyn 11 โดยการคุมตัวอย่างจากหม้อแปลงที่ได้ทำการออกแบบผลิตและทำการทดสอบแล้วจริงในพิกัดเดียวกันแต่มีค่าพารามิเตอร์ต่างๆในการออกแบบแตกต่างกัน จำนวน 5 เครื่อง แล้วนำค่าพารามิเตอร์ต่างๆของหม้อแปลงแต่ละตัวทำการวิเคราะห์ด้วย TTSC โดยใช้พารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากการทดสอบเป็นข้อมูลพื้นฐานในการวิเคราะห์ ตัวอย่างข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์และตัวอย่างผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 1, 2 และรูปที่ 3, 4



รูปที่ 1 ผังการทำงานของ TTSC

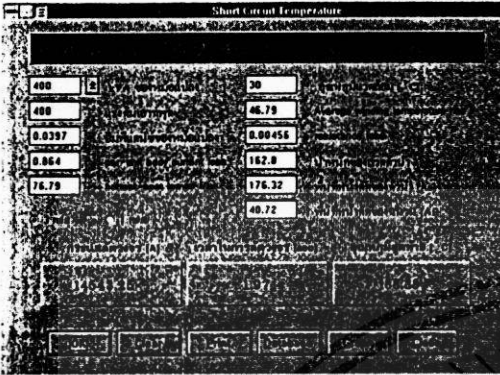
หม้อแปลงจำหน่ายที่ใช้ในการวิเคราะห์ใช้ฉนวน Class A ซึ่งสามารถทนอุณหภูมิได้ 105 °C ตามมาตรฐาน จากรูปที่ 5 ถ้าเราสามารถเลือกขนาดของลวดให้มีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดของลวดตัวนำกับพื้นที่หน้าตัดของฉนวนได้เหมาะสมแล้วจะทำให้อุณหภูมิที่เกิดขึ้นขณะลัดวงจรมีค่าลดลง ส่งผลให้อายุการใช้งานของฉนวนยาวนานขึ้น รูปที่ 6 แสดงถึงผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิขณะลัดวงจรของหม้อแปลงกับค่า eddy current loss อุณหภูมิขณะลัดวงจรของหม้อแปลงมีค่าลดลงเมื่อ eddy current loss ลดลง การลดค่า eddy current loss ลงทำได้โดยการลดค่า flux density ของหม้อแปลงลงด้วยการเพิ่มพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กส่งผลให้อุณหภูมิขณะลัดวงจรลดลงตามไปด้วย ทั้งนี้การเลือกขนาดของขดลวดและพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กนั้นต้องคำนึงถึงความเหมาะสมในเรื่องของขนาดและต้นทุนที่ใช้ในการผลิตที่อาจจะสูงขึ้นตามไปด้วย

ตารางที่ 1 ตัวอย่างข้อมูลพื้นฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์ได้จากการทดสอบ

Capacity (kVA)	100	400
Impedance (pu.)	0.0385	0.0397
eddy current loss	0.864	0.864
hottest-spot temp. (°C)	72.89	76.79
average wdg. temp rise. (°C)	42.89	46.79
resistance(mΩ)	8.915	4.56
Weight of copper (lb)	92.17	162.8
cross-section area of turn insulation	13.66	40.72
cross-section area of conductor	55.42	176.32

ตารางที่ 2 ตัวอย่างผลการคำนวณของ TTSC

Capacity (kVA)	100	400
Rate current (A)	144.34	577.37
Short circuit current (A)	3749.14	14543.25
m	0.0368	0.2063
Short circuit current duration (sec.)	1.85	1.97
Final winding temperature (°C)	95.79	188.88



รูปที่ 2 รูปแบบการใช้งานของ TTSC

5. สรุป

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอผลการพัฒนาซอฟต์แวร์เพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาระยะและตัดวงจร, เวลาในการตัดวงจรและอุณหภูมิสุดท้ายของหม้อแปลงเมื่อเกิดการลัดวงจร ซึ่งใช้งานง่ายสะดวกรวดเร็วและมีความน่าเชื่อถือ โดยผลของการวิเคราะห์ตามตัวอย่างข้างต้นจะเป็นเครื่องมือช่วยให้ผู้ออกแบบสามารถวิเคราะห์ออกแบบและตัดสินใจเลือกวัตถุดิบที่ใช้ในการออกแบบหม้อแปลง เช่น ขนาดของลวดตัวนำ, ความหนาของฉนวน, ชนิดและความหนาของเหล็กที่ใช้ทำแกนเหล็กของหม้อแปลงเพราะปัจจัยต่างๆที่กล่าวมานี้เป็นผลโดยตรงของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นหลังจากเกิดการลัดวงจรของหม้อแปลง จากผลของ TTSC ทำให้มั่นใจได้ว่านำมาข้อมูลของหม้อแปลงที่พิกัดกำลังไฟฟ้าต่างๆ มาทำการวิเคราะห์โดย TTSC แล้วนำผลที่ได้ไปใช้ในการผลิตจริงก็จะได้หม้อแปลงที่มีประสิทธิภาพดี สามารถทนต่อสภาวะการใช้งานได้ตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งเอาไว้

และจากการบรรจวดูจุดประสงค์ในการพัฒนา TTSC นี้เอง จึงคาดหมายว่าในอนาคตจะได้เห็นผลการวิจัยและพัฒนาการออกแบบและวิเคราะห์หม้อแปลงโดยใช้ TTSC ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น(ในแง่ของการวิเคราะห์ความดันที่เกิดขึ้นในตัวถังของหม้อแปลงขณะเกิดการลัดวงจร)ต่อไปซึ่งก็เป็นวัตถุประสงค์ต่อไปในงานวิจัยที่มุ่งพัฒนาการผลิตอุปกรณ์

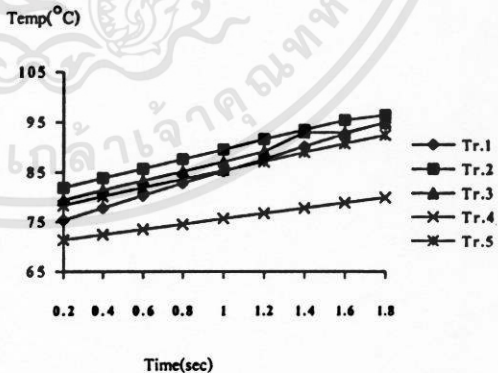
ไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพที่ดีและมีความปลอดภัยในการใช้งานสูง

6. กิตติกรรมประกาศ

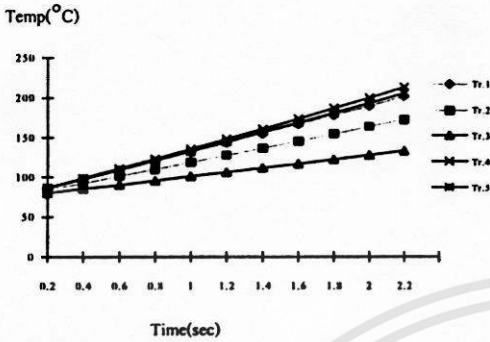
ผู้วิจัยขอขอบคุณบริษัททงษ์ทิมานการ ไฟฟ้าจำกัด และผู้มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านที่สนับสนุนผลการวิจัยนี้จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

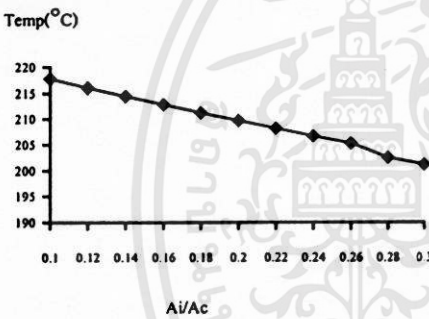
- [1] An American National Standard IEEE Standard General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers, ANSI/IEEE, C57.12.00-1980
- [2] Power Transformer Part 5 : Ability to withstand Short circuit, IEC 76-5, 1976
- [3] Bharat Heavy Electrical Limited, "Transformer" Tata McGrew-Hill Publishing Company Limited, New Delhi, 1987
- [4] บุญเลิศ เข็มทัศนาศนา, "Delphi", ซีเอ็ดดูเคชั่น, กรุงเทพฯ, 2539
- [5] สิริวิช ทัดสวน, บุญเลิศ สื่อเฉยและ รศ.สุลธิ บรรจงจิตร, "การคำนวณอุณหภูมิหม้อแปลงจำหน่ายชนิดน้ำมันขณะทำการต่อโหลดโดยซอฟต์แวร์ซึ่งเปรียบเทียบกับมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC", วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 14, ฉบับที่ 1, หน้า 52-60, เมษายน, 2541



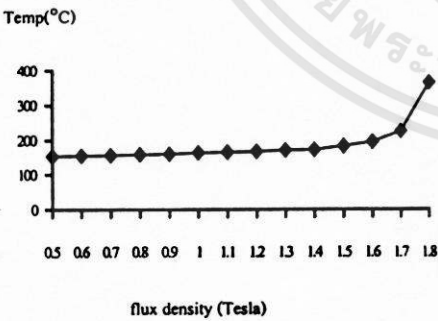
รูปที่ 3 การเปรียบเทียบอุณหภูมิที่เกิดขึ้นขณะลัดวงจรของหม้อแปลงขนาด 100 kVA กับเวลาในการลัดวงจร ที่วิเคราะห์จำนวน 5 เครื่องได้จาก TTSC



รูปที่ 4 การเปรียบเทียบอุณหภูมิที่เกิดขึ้นขณะลัดวงจรของหม้อแปลงขนาด 400 kVA กับเวลาในการลัดวงจรที่วิเคราะห์จำนวน 5 เครื่องได้จาก TTSC



รูปที่ 5 การเปรียบเทียบอุณหภูมิที่เกิดขึ้นขณะลัดวงจรของหม้อแปลงขนาด 400 kVA กับอัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดของลวดตัวนำและพื้นที่หน้าตัดของฉนวน



รูปที่ 6 การเปรียบเทียบอุณหภูมิขณะลัดวงจรของหม้อแปลงขนาด 400 kVA กับค่า flux density ที่ใช้ออกแบบ

ประวัติผู้เขียน

นายบุญเลิศ สือเฉย เกิดเมื่อวันที่ 16 พฤศจิกายน 2511 ที่กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเอเซียอาคเนย์ ปีการศึกษา 2537 มีผลงานวิจัยทางวิชาการที่เกี่ยวข้องกับหม้อแปลงไฟฟ้าที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่และเข้าร่วมนำเสนอผลงานในการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าทั้งในและต่างประเทศ ผลงานวิจัยทางวิชาการขณะกำลังศึกษามีดังนี้

1. “ การทำนายอุณหภูมิหม้อแปลงจำหน่ายชนิดแช่น้ำมันขณะทำการต่อโหลดโดยซอฟต์แวร์ซึ่งเปรียบเทียบกับมาตรฐาน IEEE และ IEC ” วิศวกรรมลาดกระบัง ปีที่ 14 ฉบับที่ 1 เมษายน 2541 หน้า 52-60
2. “ การพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายชนิดจุ่มในน้ำมันเวคเตอร์กรุป Yzn 11 ” วิศวกรรมลาดกระบัง ปีที่ 15 ฉบับที่ 2 ธันวาคม 2541 หน้า 70-75
3. “ การพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับคำนวณหาอุณหภูมิของหม้อแปลงขณะลัดวงจร ” วิศวกรรมลาดกระบัง ปีที่ 15 ฉบับที่ 2 ธันวาคม 2541 หน้า 64-69