

การทำนายค่าความสูญเสียในหม้อแปลงจำหน่าย
โดยวิธีโครงข่ายประสาทเทียม

PREDICTION OF DISTRIBUTION TRANSFORMERS LOSSES USING
ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

นชิตา สุตธิสินทอง
NUCHITTA SUTTISINTHONG

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาค้นคว้าตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2550

การทำนายค่าความสูญเสียในหม้อแปลงจำหน่าย
โดยวิธีโครงข่ายประสาทเทียม

PREDICTION OF DISTRIBUTION TRANSFORMERS LOSSES USING
ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

นุชทิตา สุตติสินทอง

NUCHTITA SUTTISINTHONG

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2550

**PREDICTION OF DISTRIBUTION TRANSFORMERS LOSSES
USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS**

NUCHTITA SUTTISINTHONG

**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**

2007

COPYRIGHT 2007

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การทำนายค่าความสูญเสียในหม้อแปลงจำหน่ายโดยวิธี โครงข่ายประสาทเทียม
นักศึกษา	น. ส. นุชทิศา สุทธิสินทอง
รหัสนักศึกษา	45061016
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2550
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ. มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการทำนายค่าความสูญเสียรวมในหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 1 เฟส 30 kVA และ 50 kVA โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ ข้อมูลการทดสอบจริงของหม้อแปลงในโรงงานผลิตได้ถูกนำมาเป็นข้อมูลสำหรับฝึกสอนและตรวจสอบโครงข่ายประสาทเทียม ในขณะที่ข้อมูลทดสอบจำนวน 400 ชุด ที่อุณหภูมิ และพิกัดกระแสต่างๆของหม้อแปลง จากผลสรุปที่ได้ทำให้สามารถหาค่าความสูญเสียรวมได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ โดยค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสูงสุดประมาณ 1.3% ซึ่งจากวิธีที่ได้นำเสนอแสดงให้เห็นประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมเป็นที่น่าพอใจ

Thesis Title	Prediction of Distribution Transformers Losses Using Artificial Neural Networks
Student	Ms. Nuchtita Suttisinthong
Student ID.	45061016
Degree	Mater of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2007
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Monthon Leelajindakrairerk

ABSTRACT

The thesis presents the methodology for the prediction of total losses in the single-phase distribution transformers with rated power of 30 kVA and 50 kVA using back-propagation neural networks. Experimental data of transformers in manufacturer are employed for training and validation sets for back-propagation neural networks while numbers of test set are 400 at various temperatures and rating currents of the transformers. The results show that a maximum percent of error is 1.3%. The proposed technique, therefore, gives satisfactory accuracy.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ. มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์ ที่คอยให้คำแนะนำ ตลอดจนแนวทางการแก้ไขปัญหาต่างๆ เกี่ยวกับวิทยานิพนธ์อย่างดียิ่ง ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ ผศ. บุญเลิศ สี่เฉย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประจำสาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ ที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับหม้อแปลงจำหน่าย และ ข้อมูลต่างๆที่เป็นประโยชน์แก่วิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ บริษัท พงษ์พิमानการไฟฟ้า จำกัด ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทดสอบค่าความสูญเสียในหม้อแปลงจำหน่าย รวมถึงคำแนะนำต่างๆด้วย

ขอขอบคุณ คุณ อรรถพล เก่าพิทักษ์กุล สำหรับคำแนะนำดีๆเกี่ยวกับโครงข่ายประสาทดัดเทียม และแนวทางการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น

ขอขอบคุณ คุณ จูติพงษ์ นิยมสัจย์ สำหรับน้ำใจที่ดีที่มีให้เพื่อนเสมอมา รวมถึงเพื่อนคนอื่นๆที่ให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างดีด้วย

สุดท้าย ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้ชีวิต ให้การศึกษา ให้กำลังใจ และสิ่งที่ดีที่สุด ในชีวิตลูกเสมอมา ขอขอบพระคุณจากใจจริง

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้ บิดา มารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูบาอาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และประสบการณ์ต่างๆให้แก่ข้าพเจ้า ขอขอบพระคุณไว้ ณ. ที่นี้ด้วย

นุชทิศา สุทธิสินทอง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
1.5 ขั้นตอนของการศึกษา.....	2
1.6 ข้อตกลงเบื้องต้นของการศึกษา.....	3
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีหม้อแปลงจำหน่าย.....	4
2.1 บทนำ.....	4
2.2 โครงสร้างของหม้อแปลงจำหน่าย.....	6
2.2.1 ถังหม้อแปลง (Transformer Tank).....	7
2.2.2 น้ำมันหม้อแปลง (Transformer Oil).....	8
2.2.3 ถังรองรับน้ำมัน (Conservator Tank).....	9
2.2.4 ท่อหายใจกรองความชื้น (Dehydrating Breather).....	9
2.2.5 เครื่องวัดระดับน้ำมัน (Oil Level Gauge).....	10
2.2.6 เครื่องวัดอุณหภูมิ (Thermometer).....	10
2.2.7 ลิ้นระบายความดัน (Pressure Relief Device).....	10
2.2.8 แท็ปเชนเจอร์ (Tap Changer).....	10
2.2.9 อุปกรณ์ล่อฟ้า (Arcing Horns).....	11
2.2.10 บุษโฮลตรีเลย์ (Buchhol Relay).....	12

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3.1	โครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ (Back-propagation :BP)...	95
4.3.1.1	ค่าเริ่มต้นของค่าถ่วงน้ำหนัก (Weight) และค่าไบแอส (Bias).....	96
4.3.1.2	ลำดับขั้นตอนการปรับค่าถ่วงน้ำหนัก (Weight) และค่าไบแอส (Bias).....	96
4.3.1.3	จำนวนครั้งและจำนวนรอบของการปรับค่าถ่วงน้ำหนัก (Weight) และค่าไบแอส (Bias).....	97
4.3.1.4	จำนวนโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม.....	98
4.3.1.5	ชนิดของฟังก์ชันถ่ายโอน.....	98
4.3.1.6	เงื่อนไขที่เป็นพื้นฐานของ Neural Networks Toolbox.....	100
4.3.1.7	ขั้นตอนการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ (Back-propagation :BP NN).....	102
4.4	ผลการทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ (Back-propagation : BP NN) ในหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 1 เฟส 30 kVA.....	105
4.5	ผลการทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ (Back-propagation : BP NN) ในหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 1 เฟส 50 kVA.....	123
บทที่ 5	ผลการทดลอง.....	141
บทที่ 6	บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	152
	เอกสารอ้างอิง.....	154
	ภาคผนวก ก. : การเลือกอินพุตของโครงข่ายประสาทเทียม.....	156
	ภาคผนวก ข. : ผลงานวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์.....	160
	ประวัติผู้เขียน.....	173

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	
ข้อเปรียบเทียบของหม้อแปลงไฟฟ้าติดตั้งระบายความร้อนแบบแผ่นกับ แบบติดตั้งระบายความร้อนแบบลอนลูกฟูก.....	8
3.1	
ผลการทดสอบหาค่าความสูญเสียในหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 30 kVA Ambient Temp 30 °c (Measurement).....	22
3.2	
ผลการทดสอบหาค่าความสูญเสียในหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 30 kVA Temp 35 °c (Calculation).....	28
3.3	
ผลการทดสอบหาค่าความสูญเสียในหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 30 kVA Temp 40 °c (Calculation).....	32
3.4	
ผลการทดสอบหาค่าความสูญเสียในหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 30 kVA Temp 45 °c (Calculation).....	36
3.5	
ผลการทดสอบหาค่าความสูญเสียในหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 30 kVA Temp 50 °c (Calculation).....	40
3.6	
ผลการทดสอบหาค่าความสูญเสียในหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 30 kVA Temp 55 °c (Calculation).....	44
3.7	
ผลการทดสอบหาค่าความสูญเสียในหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 30 kVA Temp 60 °c (Calculation).....	48
3.8	
ผลการทดสอบหาค่าความสูญเสียในหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 30 kVA Temp 65 °c (Calculation).....	52
3.9	
ผลการทดสอบหาค่าความสูญเสียในหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 50 kVA Ambient Temp 30 °c (Measurement).....	59
3.10	
ผลการทดสอบหาค่าความสูญเสียในหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 50 kVA Temp 35 °c (Calculation).....	65
3.11	
ผลการทดสอบหาค่าความสูญเสียในหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 50 kVA Temp 40 °c (Calculation).....	69
3.12	
ผลการทดสอบหาค่าความสูญเสียในหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 50 kVA Temp 45 °c (Calculation).....	73
3.13	
ผลการทดสอบหาค่าความสูญเสียในหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 50 kVA Temp 50 °c (Calculation).....	77

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
3.14 ผลการทดสอบหาค่าความสูญเสียในหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 50 kVA Temp 55 °c (Calculation).....	81
3.15 ผลการทดสอบหาค่าความสูญเสียในหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 50 kVA Temp 60 °c (Calculation).....	85
3.16 ผลการทดสอบหาค่าความสูญเสียในหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 50 kVA Temp 65 °c (Calculation).....	89
4.1 เงื่อนไขการฝึกสอนที่ควบคุม.....	101
4.2 ผลสรุปการฝึกสอนหม้อแปลงขนาด 30 kVA.....	105
4.3 แสดงผลเปรียบเทียบค่ากำลังสูญเสียรวมของหม้อแปลงจำหน่าย 30 kVA ที่อุณหภูมิ 35 °c	106
4.4 แสดงผลเปรียบเทียบค่ากำลังสูญเสียรวมของหม้อแปลงจำหน่าย 30 kVA ที่อุณหภูมิ 45 °c	110
4.5 แสดงผลเปรียบเทียบค่ากำลังสูญเสียรวมของหม้อแปลงจำหน่าย 30 kVA ที่อุณหภูมิ 55 °c	114
4.6 แสดงผลเปรียบเทียบค่ากำลังสูญเสียรวมของหม้อแปลงจำหน่าย 30 kVA ที่อุณหภูมิ 65 °c	118
4.7 ผลสรุปการฝึกสอนหม้อแปลงขนาด 50 kVA.....	123
4.8 แสดงผลเปรียบเทียบค่ากำลังสูญเสียรวมของหม้อแปลงจำหน่าย 50 kVA ที่อุณหภูมิ 35 °c	124
4.9 แสดงผลเปรียบเทียบค่ากำลังสูญเสียรวมของหม้อแปลงจำหน่าย 50 kVA ที่อุณหภูมิ 45 °c	128
4.10 แสดงผลเปรียบเทียบค่ากำลังสูญเสียรวมของหม้อแปลงจำหน่าย 50 kVA ที่อุณหภูมิ 55 °c	132
4.11 แสดงผลเปรียบเทียบค่ากำลังสูญเสียรวมของหม้อแปลงจำหน่าย 50 kVA ที่อุณหภูมิ 65 °c	136
5.1 แสดงผลการทำนายค่ากำลังสูญเสียรวมของหม้อแปลงจำหน่าย 30 kVA. ที่อุณหภูมิ 75 °c	142

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.2 แสดงผลการทำนายค่ากำลังสูญเสียรวมของหม้อแปลงจำหน่าย 50 kVA. ที่อุณหภูมิ 75 °c	146

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	แบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้า.....4
2.2	โครงสร้างของหม้อแปลงจำหน่าย.....6
2.3	ตัวถังหม้อแปลงติดครีบบระบายความร้อนแบบแผ่น.....7
2.4	ตัวถังหม้อแปลงติดครีบบระบายความร้อนแบบลอนลูกฟูก.....7
3.1	วงจรการทดสอบหม้อแปลงแบบเปิดวงจร.....17
3.2	วงจรการทดสอบหม้อแปลงแบบลัดวงจร.....18
3.3	แสดงการวัดค่าความต้านทานด้านขดลวดแรงสูง (High Voltage Winding).....18
3.4	แสดงการวัดค่าความต้านทานด้านขดลวดแรงต่ำ (Low Voltage Winding) Coil 1.....19
3.5	แสดงการวัดค่าความต้านทานด้านขดลวดแรงต่ำ (Low Voltage Winding) Coil 2.....19
3.6	แสดงการทดสอบแบบเปิดวงจร (Open Circuit Test).....20
3.7	แสดงการทดสอบแบบลัดวงจร (Short Circuit Test).....20
3.8	แสดงชุดเครื่องวัดในการทดสอบค่าความสูญเสีย.....21
3.9	แสดงการวัดค่าความต้านทานด้านขดลวดแรงสูง (High Voltage Winding) ของหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 50 kVA.....56
3.10	แสดงการวัดค่าความต้านทานด้านขดลวดแรงต่ำ (Low Voltage Winding) Coil 1 ของหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 50 kVA.....57
3.11	แสดงการวัดค่าความต้านทานด้านขดลวดแรงต่ำ (Low Voltage Winding) Coil 2 ของหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 50 kVA.....57
3.12	แสดงการทดสอบแบบเปิดวงจร (Open Circuit Test) ของหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 50 kVA.....58
3.13	แสดงการทดสอบแบบลัดวงจร (Short Circuit Test) ของหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 50 kVA.....58
4.1	แสดงแบบจำลองของโครงข่ายประสาทเทียมที่มี 1 ชั้นซ่อน.....95
4.2	แสดง Linear Transfer Function.....98
4.3	แสดง Tangent Sigmoid Transfer Function.....99
4.4	แสดง Log Sigmoid Transfer Function.....99
4.5	แสดงขั้นตอนการหาค่าความสูญเสียและเตรียมข้อมูลสำหรับโครงข่ายประสาทเทียม.....103
4.6	ขั้นตอนการฝึกสอน.....104

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 ค่าเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดสัมบูรณ์ของหม้อแปลง 30 kVA ที่พิกัดกระแส 1-100%.....	122
4.8 ค่าเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดสัมบูรณ์ของหม้อแปลง 50 kVA ที่พิกัดกระแส 1-100%.....	140
5.1 ค่าความสูญเสียรวม (Pt) ของหม้อแปลงจำหน่ายที่ได้จากการทำนายที่อุณหภูมิ 75°C	150
5.2 ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสัมบูรณ์ของหม้อแปลงจำหน่ายที่ได้จากการทำนายที่ อุณหภูมิ 75°C	150

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อุปกรณ์หลักที่ถือว่าเป็นหัวใจสำคัญในระบบจำหน่ายไฟฟ้า ก็คือ หม้อแปลงจำหน่าย ซึ่งทำหน้าที่ส่งผ่านพลังงานไฟฟ้า โดยการแปลงแรงดันขึ้นหรือลงในระดับต่างๆ เพื่อความเหมาะสมต่อระบบส่งจ่ายให้กับผู้บริโภคตามบ้านเรือนหรือโรงงานอุตสาหกรรม ในปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตหม้อแปลงจำหน่ายในโรงงานผลิต ได้มีการพัฒนาให้หม้อแปลงมีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น กล่าวคือ ต้องมีความเข้าใจถึงผลกระทบต่างๆที่มีผลต่อประสิทธิภาพและการใช้งานของหม้อแปลง หนึ่งในความสำคัญที่จำเป็นต้องคำนึงถึง คือ ค่าความสูญเสียของหม้อแปลง ซึ่งเกิดจากผลกระทบต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นแรงดัน กระแส อุณหภูมิ หรือ วัสดุที่ใช้ทำหม้อแปลง ล้วนแต่ส่งผลเสียต่อประสิทธิภาพของหม้อแปลงทั้งสิ้น ดังนั้น ควรศึกษาและทำความเข้าใจเกี่ยวกับค่าความสูญเสียที่ส่งผลกระทบต่อหม้อแปลงจำหน่าย เพื่อจะได้นำมาปรับใช้ทำให้เกิดประโยชน์ที่ดี หรืออาจจะนำวิธีการอื่นๆมาช่วยในการวิเคราะห์ค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้น เพื่อเป็นทางเลือกอีกทางหนึ่งที่มีประสิทธิภาพเป็นที่น่าพอใจ ดังนั้น วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้เสนอวิธีในการวิเคราะห์ค่าความสูญเสียในหม้อแปลงจำหน่ายที่ได้ค่าผลลัพธ์ที่มีความแม่นยำ รวดเร็ว ซึ่งถ้าหม้อแปลงจำหน่ายมีประสิทธิภาพสูงก็จะส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบจำหน่ายอีกด้วย

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นการนำเสนอการใช้โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks : ANNs) ซึ่งมีความสามารถในการเรียนรู้ฟังก์ชันต่อเนื่องแบบไม่เป็นเชิงเส้นหลายชนิด ได้อย่างแม่นยำภายในขอบเขตข้อมูลที่เรียนรู้ ซึ่งใช้ในการทำนายค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมของหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 1 เฟส 30 kVA และ 50 kVA โดยใช้ข้อมูลที่ได้ทำการทดสอบหาค่าความสูญเสียของหม้อแปลงในโรงงานผลิต มาเป็นข้อมูลอินพุตให้กับโครงข่ายประสาทเทียม เพื่อให้โครงข่ายประสาทเทียมใช้ในการฝึกสอนและทดสอบประสิทธิภาพ โดยการนำโครงข่ายประสาทเทียมมาช่วยในการวิเคราะห์หาค่าคำตอบของเอาต์พุตเป้าหมาย เพื่อลดขั้นตอนในการคำนวณ ซึ่งสมการมีความสอดคล้องทำให้สามารถทำนายค่าที่อุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ นอกจากนี้ยังสามารถลดความผิดพลาดที่อาจเกิดจากการคำนวณค่าที่มีข้อมูลมาก

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ตั้งสมมติฐานของการศึกษา โดยพิจารณาจากการที่โครงข่ายประสาทเทียมมีความสามารถในการเรียนรู้ฟังก์ชันต่อเนื่อง แบบไม่เป็นเชิงเส้นหลายชนิดได้อย่างแม่นยำภายในขอบเขตการเรียนรู้ โดยโครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนแล้วจะใช้เวลาในการหาคำตอบน้อยมาก การนำเอาโครงข่ายประสาทเทียมมาใช้ในการหาคำตอบที่พิจารณา คือ ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียรวม (Total Losses) ที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงจำหน่าย โดยมีรูปแบบการฝึกสอน (Training Pattern) ซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้โครงข่ายประสาทเทียมเรียนรู้ และข้อมูลทดสอบ (Unseen Test Pattern) ซึ่งใช้ในการหาประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมในการหาคำตอบจากข้อมูลที่ไม่เคยเรียนรู้มาก่อน จากนั้น จึงทำการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมแล้วนำโครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนที่มีประสิทธิภาพสูงสุดไปใช้งาน ซึ่งคำตอบที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมจะมีความถูกต้องแม่นยำดี หากข้อมูลของค่าอินพุตที่นำมาให้โครงข่ายประสาทเทียมเรียนรู้มีปริมาณและคุณภาพเพียงพอ

1.4 ขอบเขตของการศึกษา

1. ทำการศึกษาและทดสอบหาค่าความสูญเสียในขดลวดทองแดง และค่าความสูญเสียในแกนเหล็กของหม้อแปลงจำหน่ายภายในโรงงานผลิตหม้อแปลง เพื่อนำมาใช้สำหรับเป็นข้อมูลอินพุตให้กับโครงข่ายประสาทเทียม
2. ทำการฝึกสอนและทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ (Back-Propagation Neural Networks) ด้วยข้อมูลอินพุตที่ได้จากการทดสอบและการคำนวณทางคณิตศาสตร์ โดยใช้ Neural Network Toolbox ของโปรแกรม MATLAB เป็นเครื่องมือในการฝึกสอนและวิเคราะห์หาคำตอบ
3. แสดงผลคำตอบที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมในหม้อแปลงจำหน่าย รวมทั้งค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่ได้โดยเปรียบเทียบกับค่าที่ทำการทดสอบจริงและค่าที่ได้จากการคำนวณ

1.5 ขั้นตอนของการศึกษา

ขั้นตอนการศึกษาของวิทยานิพนธ์นี้จะประกอบไปด้วยขั้นตอนต่างๆดังนี้

1. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับค่าความสูญเสียในหม้อแปลงจำหน่าย
2. ศึกษาคุณสมบัติของโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ
3. ศึกษาและทำการทดสอบการวัดค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงจำหน่ายที่ค่ากระแสพิคัดต่างๆของหม้อแปลง

4. เก็บผลการทดสอบหม้อแปลงจำหน่ายทั้งขนาด 30 kVA และ 50 kVA รวมถึงผลการทดสอบที่ได้จากการคำนวณ
5. ศึกษาการใช้งาน Neural Networks Toolbox ของโปรแกรม MATLAB
6. นำข้อมูลที่ได้ไปฝึกสอนและทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ
7. แสดงผลคำตอบที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริงและคำนวณ โดยแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่เกิดขึ้น
8. วิเคราะห์และสรุปผลการทดลองและเสนอแนะแนวทางการพัฒนาและศึกษาต่อไป

1.6 ข้อตกลงเบื้องต้นของการศึกษา

ในการศึกษาวิจัยนี้เป็นการศึกษาการทำนายค่าความสูญเสียรวมในหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 30 kVA และ 50 kVA โดยใช้ข้อมูลการทดสอบจริงในโรงงานผลิตหม้อแปลงมาเป็นข้อมูลอินพุตสำหรับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ (Back-propagation Neural Networks) เนื่องจากวิทยานิพนธ์นี้จะมุ่งเน้นในการจ่ายโหลดที่กระแสฟลักต์ต่างๆของหม้อแปลง เพื่อทำการวัดค่าความสูญเสียในขดลวดทองแดง และการแสดงประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมที่สามารถทำนายค่าได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถเข้าใจหลักการทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียของหม้อแปลงจำหน่ายในโรงงานผลิต
2. สามารถนำโครงข่ายประสาทเทียมไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ และทำนายค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในหม้อแปลงจำหน่ายได้
3. สามารถนำหลักการมาศึกษาถึงผลกระทบอื่นๆ และเป็นแนวทางในการวางแผนการทำนายต่อไปในอนาคต

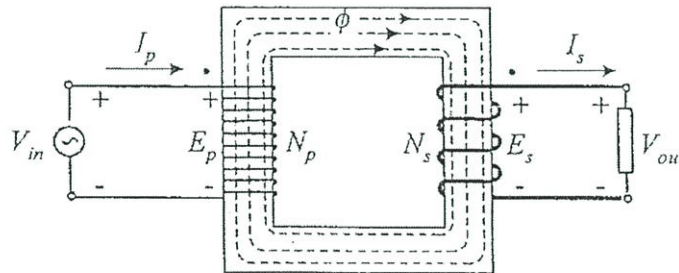
บทที่ 2

ทฤษฎีหม้อแปลงจำหน่าย

2.1 บทนำ

หม้อแปลงไฟฟ้า เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ส่งผ่านกำลังไฟฟ้า จากแรงดันระดับหนึ่ง ไปสู่อีก ระดับแรงดันหนึ่ง โดยอาศัยวงจรแม่เหล็กที่ประกอบขึ้นจากแผ่นเหล็กซิลิกอน ทำเป็นแกนให้ เส้นแรงแม่เหล็กไหลผ่าน และมีขดลวดพันรอบแกนเหล็ก ทำหน้าที่สร้างเส้นแรงแม่เหล็กและ แปลงระดับแรงดัน นอกจากนี้ ยังต้องมีฉนวน ซึ่งอาจจะเป็นฉนวนแข็ง ฉนวนเหลว หรือฉนวนก๊าซ

หลักการทางเบื้องต้นของหม้อแปลงไฟฟ้าในการสร้างแรงดัน โดยพิจารณาหม้อแปลง เฟสเดียว เพื่อง่ายต่อความเข้าใจ สำหรับหม้อแปลงแบบหลายเฟส ก็มีหลักการทางเช่นเดียวกัน โดยทั่วไป หม้อแปลงไฟฟ้าจะประกอบด้วย ขดลวดอย่างน้อย 2 ชุด พันอยู่บนแกนเหล็กเดียวกัน โดยจ่ายแรงดันไฟฟ้าเข้าที่ขดลวดด้านปฐมภูมิ มีจำนวนรอบ N_p รอบ และต่อโหลดที่ขดลวดด้าน ทติภูมิ มีจำนวนรอบ N_s รอบ แสดงดังรูปที่ 2.1 ในระบบไฟฟ้ากระแสสลับ รูปคลื่นแรงดันและ เส้นแรงแม่เหล็ก $\phi(t)$ สามารถประมาณได้ด้วยฟังก์ชันไซน์ในเทอมของเวลา ดังสมการที่ 2.1 [1]



รูปที่ 2.1 แบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้า

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

- โดยที่ ϕ_m คือ ขนาดของเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็ก (Wb)
 B_m คือ ขนาดของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (T)
 A_{Fe} คือ พื้นที่หน้าตัดสุทธิของแกนเหล็ก (mm^2)
 ω คือ ความถี่เชิงมุม เท่ากับ $2\pi f$ (rad/sec)
 f คือ ความถี่ของระบบไฟฟ้ากำลัง (Hz)

จากกฎแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำของฟาราเดย์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กตัดผ่านขดลวด จะทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นในขดลวดตามสมการที่ 2.2 โดยกำหนดให้ว่า เส้นแรงแม่เหล็กที่คล้องขดลวดที่พันอยู่รอบแกนเหล็กมีค่าเท่ากันทุกรอบ สามารถหาสมการแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำในขดลวดได้ตามสมการที่ 2.3

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

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

โดยที่ $e(t)$ คือ แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา
 N คือ จำนวนรอบของขดลวด

ในการใช้งานจะพิจารณาแรงดันและกระแสเป็นค่ารากกำลังสองเฉลี่ย มากกว่าค่าขณะใดขณะหนึ่ง หรือค่าสูงสุด และค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของรูปคลื่นไซน์ใดๆ มีค่าเท่ากับ $1/\sqrt{2}$ เท่าของค่ายอด ดังนั้น ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของแรงดันเหนี่ยวนำจะมีค่าเท่ากับ

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

จากสมการที่ 2.4 จะได้ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนแรงดันเหนี่ยวนำที่ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ ในเทอมของจำนวนรอบตามสมการที่ 2.5 ฉะนั้น หม้อแปลงจึงสามารถแปลงระดับแรงดันให้สูงขึ้นหรือต่ำลงได้ โดยการพันขดลวดให้มีจำนวนรอบสัมพันธ์กับระดับของแรงดันเหนี่ยวนำตามสมการ

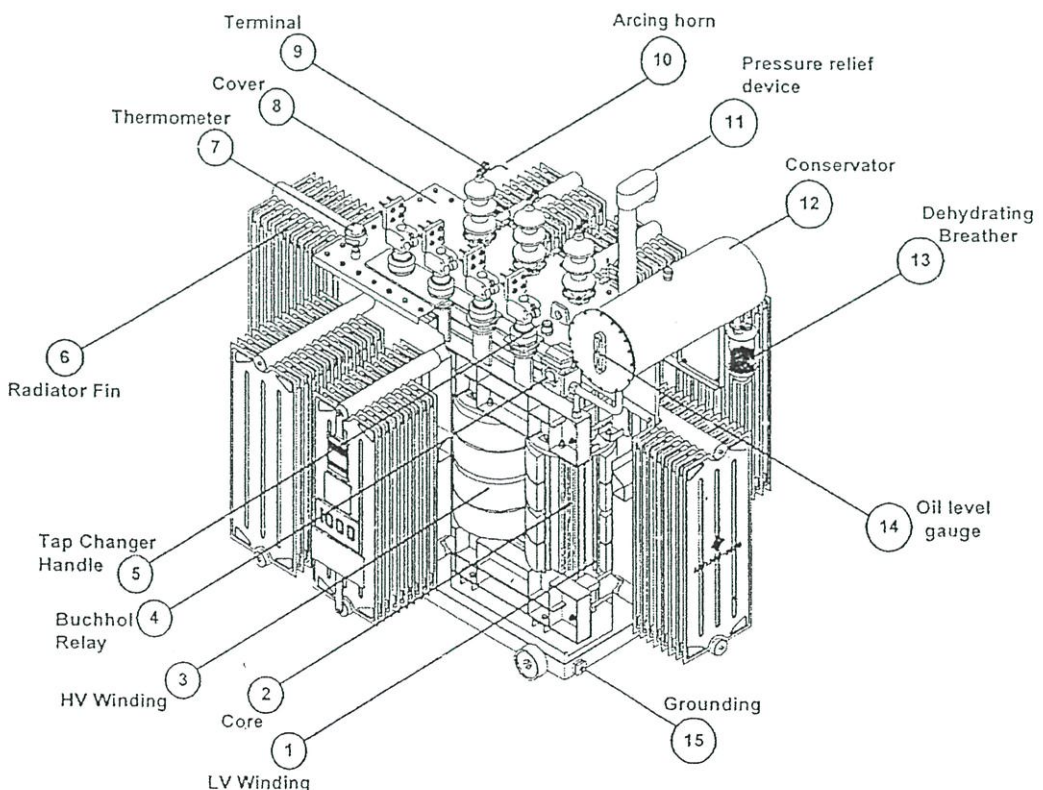
$$\frac{E_p}{E_s} = \frac{N_p}{N_s} \quad (2.5)$$

โดยที่ E_p คือ แรงดันเหนี่ยวนำที่ขดลวดด้านปฐมภูมิ
 E_s คือ แรงดันเหนี่ยวนำที่ขดลวดด้านทุติยภูมิ
 N_p คือ จำนวนรอบของขดลวดด้านปฐมภูมิ
 N_s คือ จำนวนรอบของขดลวดด้านทุติยภูมิ

2.2 โครงสร้างของหม้อแปลงจำหน่าย [2]

โครงสร้างของหม้อแปลงจำหน่าย แสดงได้ดังรูปที่ 2.2 สามารถแบ่งโครงสร้างและส่วนประกอบที่สำคัญได้ดังต่อไปนี้

1. ส่วนประกอบภายนอก ได้แก่ ถังหม้อแปลง (Transformer Tank), อุปกรณ์กระจายความร้อน (Radiator Fin), ขั้วต่อสาย(Terminal), น้ำมันหม้อแปลง (Transformer Oil), ห้องรองรับน้ำมัน (Conservator), ห้องหายใจและห้องกรองความชื้น (Breather and Silica gel), เครื่องวัดระดับน้ำมัน (Oil Gauge), เครื่องวัดอุณหภูมิ , บุคโฮลรีเลย์(Buchhol Relay), และ บุชชิ่ง (Bushing) เป็นต้น
2. ส่วนต่อภายในและภายนอก ได้แก่ สายตัวนำ, แท็ปเชนเจอร์ (Tap changer), ฉนวนปลายขั้ว (Terminal Insulator) เป็นต้น
3. ส่วนที่เป็นวงจรมแม่เหล็ก ได้แก่ แกนเหล็กซิลิกอน และส่วนที่จับยึดโครงสร้างของแกนเหล็ก (Clamping) เป็นต้น
4. ส่วนที่เป็นวงจรไฟฟ้า ได้แก่ ขดลวดด้านปฐมภูมิ, ขดลวดด้านทุติยภูมิ และเครื่องรัด (Bracing Device) เป็นต้น
5. ฉนวน (Insulation) เป็นฉนวนในลักษณะต่างๆที่ใช้ในส่วนต่างๆของหม้อแปลง เช่น ฉนวนระหว่างขดลวดแรงต่ำ กับขดลวดแรงสูง เป็นต้น

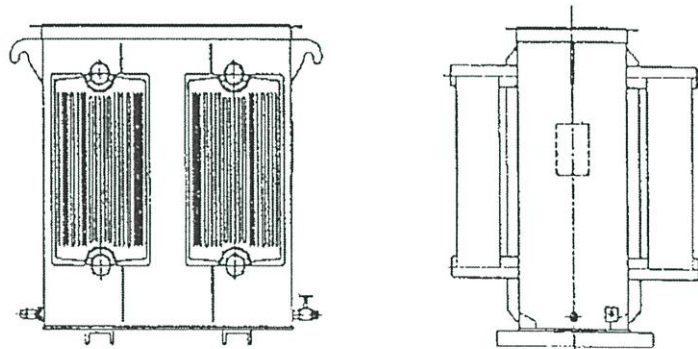


รูปที่ 2.2 โครงสร้างของหม้อแปลงจำหน่าย

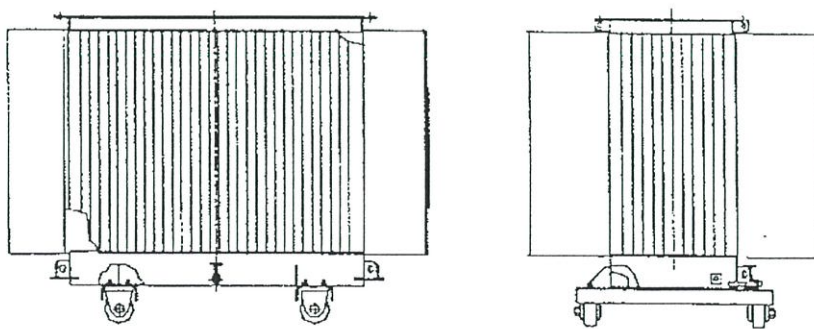
โครงสร้างและส่วนประกอบดังที่กล่าวมาแล้วนั้น หม้อแปลงทุกเครื่องไม่จำเป็นต้องมีครบทุกชิ้น ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานของหม้อแปลงและขนาดพิกัดของหม้อแปลงด้วย เช่น แท็ปเชนเจอร์ (Tap changer), บุคโฮลตรีเล็ลและเทอร์โมมิเตอร์ เป็นต้น อาจจะมีหรือไม่มีก็ได้

2.2.1 ถังหม้อแปลง (Transformer Tank)

ถังหม้อแปลงเป็นอุปกรณ์สำหรับห่อหุ้มฉนวนเหลว หรือก๊าซของหม้อแปลง โครงสร้างของถังหม้อแปลง มีอยู่หลายลักษณะตามความเหมาะสมของผู้ผลิตหม้อแปลง หรือขึ้นอยู่กับผู้ใช้ โดยปกติแล้วผู้ใช้งานจะต้องการหม้อแปลงที่มีน้ำหนักเบา, ราคาถูก, สิ้นสละเทือนน้อย, ระดับความดังของเสียงต่ำ, มีความเชื่อถือสูง และอายุการใช้งานนาน สามารถแบ่งลักษณะของถังหม้อแปลงตามชุดระบายความร้อนได้ 2 ชนิดใหญ่ๆ ดังรูปที่ 2.3 และ รูปที่ 2.4



รูปที่ 2.3 ตัวถังหม้อแปลงติดครีระบายความร้อนแบบแผ่น



รูปที่ 2.4 ตัวถังหม้อแปลงติดครีระบายความร้อนแบบลอนลูกฟูก

ตัวถังหม้อแปลงติดครีระบายความร้อนแบบแผ่น (Radiator fin) ตามรูปที่ 2.3 เป็นตัวถังที่มีความแข็งแรง ทนต่อการสั่นสะเทือน เหมาะสำหรับหม้อแปลงที่มีถังรองรับน้ำมัน (Conservator)

ทำให้น้ำมันสัมผัสกับอากาศได้โดยตรง (Open Type) สำหรับตัวถังหม้อแปลงติดครีบบระบายความร้อนแบบลอนลูกฟูก (Corrugate fin) ตามรูปที่ 2.4 ครีบนอกจากจะทำหน้าที่ระบายความร้อนแล้วยังสามารถรองรับต่อการขยายตัวของน้ำมันเมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้น ดังนั้น จึงไม่จำเป็นต้องมีถังรองรับน้ำมัน อากาศภายนอกไม่สามารถสัมผัสกับน้ำมันได้โดยตรง(Hermetically Sealed) ข้อเปรียบเทียบระหว่างครีบบระบายความร้อนแบบแผ่นกับแบบลอนลูกฟูก แสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ข้อเปรียบเทียบของหม้อแปลงไฟฟ้าติดครีบบระบายความร้อนแบบแผ่นกับแบบติดครีบบระบายความร้อนแบบลอนลูกฟูก

รายการ	ครีบบแบบแผ่น	ครีบบแบบลอนลูกฟูก
โครงสร้าง	ตัวถังและครีบบระบายความร้อน ทำจากแผ่นเหล็กหนา โครงสร้างของหม้อแปลงมีความแข็งแรง	ผนังของถังทำจากแผ่นเหล็กบาง ทำเป็นลอนเพื่อช่วยระบายความร้อน มีความกะทัดรัด
การหมุนเวียนของน้ำมัน	หมุนเวียนได้สะดวก น้ำมันที่ร้อนจะรอบตัวตู้ด้านบน เข้าสู่ขั้วระบายความร้อน เมื่อเย็นตัวจะต่ำลงสู่ด้านล่าง หมุนเวียนโดยตลอด	การหมุนเวียนกระจัดกระจายไม่แน่นอน
การเพิ่มโหลด	ทำได้ง่าย โดยการติดตั้งพัดลมช่วยระบายความร้อนที่ขั้วระบายความร้อน	ทำได้ยากกว่า ต้องใช้พัดลมสำหรับเฉพาะงานเท่านั้น
การทนต่อความดัน	สามารถทนต่อความดันที่เกิดขึ้นภายในได้ 10 PSIG	สามารถทนต่อความดันที่เกิดขึ้นภายในได้ 3.5 PSIG
การบำรุงรักษา	ควรทำการตรวจสอบอย่างน้อยปีละ 1 ครั้ง สังเกตการณ์เปลี่ยนแปลงของสีสารกรองความชื้น (Silica gel)	ไม่ต้องทำการบำรุงรักษามากนัก เพราะ น้ำมันไม่สัมผัสอากาศภายนอกโดยตรง

2.2.2 น้ำมันหม้อแปลง (Transformer Oil)

น้ำมันที่ใช้ในหม้อแปลง นอกจากจะทำหน้าที่เป็นฉนวนแล้วยังมีหน้าที่พาความร้อนที่เกิดจากกำลังสูญเสียออกจากขดลวดและแกนเหล็ก คุณสมบัติที่สำคัญของน้ำมันหม้อแปลงเพื่อที่จะทำหน้าที่เป็นฉนวนได้อย่างสมบูรณ์ มีดังนี้

1. มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี มีค่าความเป็นฉนวน (Dielectric Strength) สูง
2. ระบายความร้อนได้ดี มีความหนืด (Viscosity)
3. มีจุดไหล (Pour Point) ต่ำ ไม่แข็งตัวในฤดูหนาว

4. ระเหยได้น้อย มีจุดวาบไฟ (Flash Point) สูง
5. คงทนต่อปฏิกิริยาทางเคมี ไม่มีสารไปกัดกร่อนส่วนที่เป็นโลหะ
6. มีค่าความเป็นกรด (Acidity) ต่ำ
7. สะอาดปราศจากความชื้น หรือสิ่งเจือปนต่างๆ

2.2.3 ถังรองรับน้ำมัน (Conservator Tank)

ถังรองรับน้ำมัน (Conservator Tank) มีลักษณะเป็นถังอยู่สูงเหนือหม้อแปลง ภายในบรรจุ น้ำมันหม้อแปลงไว้ ทำหน้าที่รองรับการขยายหรือหดตัวของน้ำมันหม้อแปลง เมื่ออุณหภูมิของ น้ำมันสูงขึ้น น้ำมันจะขยายตัวผ่านเข้าไปในท่อหรือลิ้นบังคับ (Valve) เข้าสู่ถังรองรับน้ำมัน อากาศที่สัมผัสกับน้ำมันจะถูกกรองความชื้น โดยเครื่องหายใจกรองความชื้น (Dehydrating Breather)

ขนาดของถังรองรับน้ำมันนี้จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ซึ่งต้องสามารถรองรับน้ำมัน ส่วนที่จะขยายตัวได้ จากการทดลอง น้ำมันจะขยายตัวได้ประมาณ 7% ของน้ำมันภายในตัวถังของ หม้อแปลงในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 0-100 °C ฉะนั้น เวลาทำการออกแบบถังรองรับน้ำมัน ขนาด ของถังรองรับน้ำมันจะต้องสามารถรองรับน้ำมันในส่วนที่จะขยายตัวได้ประมาณ 11-12% ของ น้ำมันทั้งหมดที่อยู่ในตัวถังของหม้อแปลง

2.2.4 ท่อหายใจกรองความชื้น (Dehydrating Breather)

ความชื้นมีความสำคัญต่อความเป็นฉนวนของน้ำมัน ท่อหายใจกรองความชื้นหรือเครื่อง ทำให้แห้ง มีหน้าที่ปรับแรงดันภายในและภายนอกถังให้เท่ากัน และป้องกันความชื้นของอากาศ และฝุ่นเข้าไปในหม้อแปลงได้ ฝุ่นจะถูกกรองด้วยน้ำมันที่อยู่ก้นด้วยท่อหายใจ (Breather) นี้ ส่วน ความชื้นจะถูกดูดโดยสารเคมี (Silica Gel) สารนี้มีหน้าที่ดูดความชื้นในสภาพที่ใช้งานได้ สารเคมี นี้จะมีสีน้ำเงิน แต่จะเปลี่ยนเป็นสีชมพูเมื่อเสื่อมคุณภาพแล้ว จึงควรเปลี่ยนสารใหม่ หรือทำให้แห้ง แล้วค่อยนำกลับเข้าใช้งานอีก

ความชื้นในหม้อแปลงไม่เพียงแต่ลดค่าความเป็นฉนวน (Dielectric Strength) ของน้ำมันลง เท่านั้น แต่ยังสร้างมูลน้ำมัน (Sludge) ให้อีกด้วย อากาศจะทำปฏิกิริยา (Oxidation) กับน้ำมัน สร้าง มูลน้ำมันทำให้น้ำมันเป็นสีดำ มูลน้ำมันนี้จะรวมตัวเป็นตะกอนเกาะติดตามร่องของขดลวด และ แกนเหล็ก (Core Loss) เป็นผลให้ฉนวนไฟฟ้า (Insulation) ของขดลวด (Winding) เสื่อมคุณภาพลง

อย่างไรก็ตาม ถังรองรับน้ำมันและท่อหายใจกรองความชื้นอาจจะไม่มีก็ได้ ถ้าเป็นหม้อ แปลงชนิดที่มีก๊าซไนโตรเจนอัดอยู่ในถังหม้อแปลง หรือเรียกว่า หม้อแปลงแบบปิดผนึก (Sealed Tank)

2.2.5 เครื่องวัดระดับน้ำมัน (Oil Level Gauge)

โดยทั่วไป เครื่องวัดระดับน้ำมัน (Oil Level Gauge) จะติดตั้งอยู่ข้างๆห้องรองรับน้ำมัน (Conservator) แบ่งได้เป็น 2 ชนิดด้วยกัน คือ ชนิดที่ใช้หลอดแก้ว (Rod Type Oil Gauge) และ ชนิดที่มีหน้าปัดเข็มชี้ (Dial Type Oil Gauge) เครื่องวัดชนิดนี้ ยังสามารถเพิ่มจุดสัมผัสที่เข็ม เพื่อติดตั้งเครื่องเตือน (Alarm) โดยให้มีเสียงดังไปยังห้องควบคุม เมื่อน้ำมันตกถึงระดับต่ำสุด

2.2.6 เครื่องวัดอุณหภูมิ (Thermometer)

เครื่องวัดอุณหภูมิ (Thermometer) เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับบอกอุณหภูมิของหม้อแปลง การบอกอุณหภูมิส่วนบนของน้ำมันหม้อแปลง (Top Oil Temperature) จะติดตั้งรับความร้อน บนฝาถังหม้อแปลงเป็นบริเวณที่น้ำมันร้อนที่สุด และอุณหภูมิของขดลวด (Winding Temperature) ต้องอาศัยวิธีวัดทางอ้อม โดยขดลวดจะร้อนมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับกระแสที่ไหลผ่าน ฉะนั้น จากค่าของกระแสที่ไหลผ่าน สามารถเปรียบได้กับความร้อน โดยการนำเอากระแสที่ได้จากหม้อแปลง กระแสที่ขั้วต่อสายไฟ (BCT) ไหลผ่านขดลวดความร้อน เพื่อส่งค่าอุณหภูมิให้แก่เทอร์โมมิเตอร์ และส่งไปที่หน้าปัดแสดงผล

2.2.7 ลิ้นระบายความดัน (Pressure Relief Device)

ลิ้นระบายความดัน (Pressure Relief Device) ความผิดปกติที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลง เช่น เกิดประกายไฟ (Arcing) อันเป็นผลทำให้เกิดแรงดันของก๊าซสูงขึ้น แรงดันของก๊าซที่สูงมากนี้ จะผ่านท่อระบายความดันไปกระแทกแผ่นระบายความดัน (Busting Plate) ที่ส่วนบนเพื่อออกสู่ภายนอก

2.2.8 แท็ปเชนเจอร์ (Tap changer)

แท็ปเชนเจอร์หรือตัวเปลี่ยนระดับแรงดัน เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนอัตราส่วนจำนวนรอบของขดลวดหม้อแปลง เพื่อรักษาระดับแรงดันของผู้ใช้ไฟฟ้าให้คงที่ แท็ปเชนเจอร์มีสองลักษณะคือ

1. ตัวเป็นแท็ปขณะปิดวงจร (Off-Circuit Tap changer) เป็นตัวเปลี่ยนแท็ปที่ง่ายไม่ซับซ้อนและมีราคาถูก เหมาะสำหรับหม้อแปลงที่ใช้ในระบบจำหน่าย มีขั้น (Step) ของการเปลี่ยนแรงดันประมาณ 3-5 ขั้น ก่อนจะทำการเปลี่ยนแท็ปจะต้องปิดวงจรเสียก่อน

2. ตัวเปลี่ยนแท็ปขณะจ่ายโหลด (On-Load Tap changer) เป็นตัวเปลี่ยนแท็ปที่สามารถทำการปรับขึ้นของการเปลี่ยนแรงดันได้ในขณะที่หม้อแปลงจ่ายโหลดอยู่ แต่ละมีวงจรการต่อซับซ้อนยุ่งยากและมีราคาแพงมากกว่าชนิดปิดวงจร มีขั้นของการเปลี่ยนแรงดันละเอียดและมากกว่าตัวเปลี่ยนแท็ปขณะปิดวงจร เหมาะสำหรับหม้อแปลงที่มีขนาดแรงดันไฟฟ้าสูง

การเลือกใช้แท็บจะต้องพิจารณาดังนี้

1. ระดับแรงดันที่พิกัดของหม้อแปลง
2. เปอร์เซนต์การเปลี่ยนแรงดันในแต่ละชั้น
3. อัตราทนกระแสสูงสุด
4. ระดับแรงดันระหว่างหน้าสัมผัส (Contact) ที่อยู่ใกล้กัน
5. จำนวนชั้นของการเปลี่ยนแรงดัน

สำหรับตัวเปลี่ยนแท็บที่ใช้ในหม้อแปลงจำหน่ายตามมาตรฐานการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค จะเป็นตัวเปลี่ยนแท็บขณะปิดวงจร มีชั้นของการเปลี่ยนแรงดัน $\pm 2 \times 2.5\%$ ของพิกัดแรงดันทางด้านแรงสูง ส่วนตามมาตรฐานการไฟฟ้านครหลวงนั้นจะมีชั้นของการเปลี่ยนแรงดันเป็น $-4 \times 2.5\%$ ของพิกัดแรงดันทางด้านแรงสูง

2.2.9 อุปกรณ์ล่อฟ้า (Arcing Horns)

โดยปกติอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงนั้น บริษัทผู้ผลิตจะผลิตอุปกรณ์ให้มีค่าจำนวนอุปกรณ์ไฟฟ้าสูงกว่าระบบแรงดันที่ใช้งาน ตัวอย่างเช่น หม้อแปลงระบบ 11 กิโลวัตต์ ตามมาตรฐานโรงงานจะผลิตหม้อแปลงให้มีค่าจำนวนไฟฟ้าสูงประมาณ 75 กิโลวัตต์ ค่าจำนวนไฟฟ้าสูงๆ นี้ก็เพื่อป้องกันอันตรายจากแรงดันเกินพิกัด 11 กิโลวัตต์ เช่น จากฟ้าผ่าหรือเกิดจากการสับสวิทช์ใบมีด แต่ถ้าหากเกิดฟ้าผ่าแรงดันสูงกว่านี้หม้อแปลงก็ทนไม่ได้และจะชำรุด และเวลาฟ้าผ่า แรงดันฟ้าผ่าจะเข้าทางบุชชิ่งแรงสูงเข้าสู่ขดลวดแรงสูงภายในและจะหาทางทะลุสู่ตัวถังและแกนเหล็กเพื่อจะลงสู่กราวด์ ถ้าทะลุสู่ตัวถังหรือแกนเหล็กได้ทางนี้ ก็แสดงว่าขดลวดแรงสูงต้องชำรุดขดลวดแรงต่ำอาจทะลุด้วย ดังนั้น จึงจำเป็นต้องมีอุปกรณ์ป้องกัน เช่น ล่อฟ้า (Arcing Horns) โดยจะประกอบอยู่กับบุชชิ่งแรงดันสูง

ระยะห่าง (Airgap) ของ Arcing Horns จะมีส่วนช่วยป้องกันการชำรุดของหม้อแปลง เพราะแรงดันจะกระโดดผ่านทาง Arcing Horns (ซึ่งมีค่า breakdown airgap ต่ำกว่าค่าจำนวน) แทนที่จะหาทางทะลุผ่านฉนวนและน้ำมันลงตัวถัง สมมุติว่า breakdown airgap ของ Arcing Horns มีค่า 55 กิโลวัตต์ พอเกิดฟ้าผ่าแรงดันส่วนที่เกิน 55 กิโลวัตต์ จะกระโดดผ่านลงตัวถังทาง Arcing Horns ส่วนที่ต่ำกว่า 55 กิโลวัตต์ ไม่สามารถผ่าน Airgap ได้ หม้อแปลงก็จะรับไว้ได้ เพราะสามารถทนได้ถึง 55 กิโลวัตต์ ค่าพลังงานต่ำกว่า 55 กิโลวัตต์ จะสูญหายไปในรูปแบบพลังงานความร้อนที่จะพยายามลงสู่กราวด์ โดยหม้อแปลงรับไว้เฉลี่ยไปตามขดลวดแรงสูง และเหนี่ยวนำไปขดลวดแรงต่ำและหาทางลงผ่านล่อฟ้าแรงต่ำ หรือแพร่กระจายไปในระบบจำหน่ายแรงต่ำ เป็นต้น

ระยะ Airgap ของ Arcing Horns ควรเป็นดังนี้

ระดับแรงดัน 11 kV ระยะควรเป็น 8.6 ซม.

ระดับแรงดัน 22 kV ระยะควรเป็น 15.5 ซม.

ระดับแรงดัน 33 kV ระยะควรเป็น 22 ซม.
การจี้ดวง Arcing Horns ต้องเอียงกันเล็กน้อย เพื่อกันสายน้ำไหล

2.2.10 บุชโฮลทีรีเลย์ (Buchhol Relay)

บุชโฮลทีรีเลย์ (Buchhol Relay) ทำการติดตั้งเฉพาะหม้อแปลงที่มีถังรองรับน้ำมันเท่านั้น และจะต่ออยู่ระหว่างตัวถังหม้อแปลงกับถังรองรับน้ำมัน ทำหน้าที่ตรวจความผิดปกติในหม้อแปลง เช่น จากก๊าซที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลงแจ้งสัญญาณเตือนให้ทราบ ถ้าก๊าซเกินระดับก็จะส่งสัญญาณตัดไฟ เข้า-ออก จากหม้อแปลง และถ้าน้ำมันภายในหม้อแปลงเกิดไหลย้อนกลับเข้าไปยังถังรองรับน้ำมัน โดยผ่านบุชโฮลทีรีเลย์ด้วยความเร็วเกิน 100 cm/sec. เนื่องจากเกิดการลัดวงจรภายในหม้อแปลง ทำให้แผ่นกั้นในบุชโฮลทีรีเลย์พลิกก็จะส่งสัญญาณตัดไฟเข้า-ออกจากหม้อแปลง เช่นเดียวกัน

2.3 การเลือกวัสดุที่ใช้ในการสร้างหม้อแปลงจำหน่าย

2.3.1 การเลือกวัสดุที่ใช้เป็นแกนเหล็กหม้อแปลง

แกนเหล็กเป็นโครงสร้างของหม้อแปลงดังที่ได้กล่าวไปแล้ว แกนเหล็กมีอิทธิพลต่อน้ำหนัก, ขนาด, ราคาและคุณสมบัติอื่นๆของหม้อแปลง นอกจากนี้ แกนเหล็กยังใช้เป็นวงจรรองเส้นแรงแม่เหล็กเพื่อเหนี่ยวนำวงจรไฟฟ้าระหว่างขดลวดแรงสูง และขดลวดแรงต่ำ และใช้เป็นที่ยึดของขดลวดด้วย ในการสร้างหม้อแปลงจำหน่ายจะใช้เหล็กรีดเย็นประเภทเกรนโอเรียนเตด (Cold Rolled Grain Oriented Sheet Steel Lamination) มีความหนาของแผ่นเหล็กเท่ากับ 0.23, 0.27 หรือ 0.30 มม. และมีความกว้างตั้งแต่ 40 มม. ขึ้นไป มาประกอบเป็นโครงสร้างของแกนเหล็ก โดยเหล็กประเภทนี้จะมีคุณสมบัติต้านทานไฟฟ้าและความซึมซาบทางแม่เหล็กได้สูง และมีกำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะไม่มีโหลดต่ำ ที่ผิวของแกนเหล็กแต่ละแผ่น จะเคลือบด้วยน้ำยาฉนวน เพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียอันเนื่องมาจากกระแสไหลวน (eddy current losses) เกรดและความหนาของแผ่นเหล็กที่ต่างกันจะมีผลทำให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะไม่มีโหลดไม่เท่ากัน โดยแผ่นเหล็กที่มีความหนามากจะมีกำลังไฟฟ้าสูญเสียต่อน้ำหนัก (W/kg) มากกว่าแผ่นเหล็กที่มีความหนาน้อย

2.3.2 การเลือกวัสดุที่ใช้เป็นขดลวดหม้อแปลง

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

โดยทั่วไป ตัวนำที่นิยมนำมาใช้พันเป็นขดลวดนี้ จะเป็นทองแดงหุ้มฉนวน 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. ขนาดและชนิดของตัวนำที่ใช้จะขึ้นอยู่กับพิกัดของแรงดันไฟฟ้าและพิกัดกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลง ตัวนำชนิดกลมเหมาะสำหรับหม้อแปลงขนาดเล็ก ส่วนตัวนำชนิดแบนเหมาะสำหรับหม้อแปลงที่ต้องรับโหลดสูงๆ

2.4 อุปกรณ์ประกอบหม้อแปลงจำหน่ายตามมาตรฐาน กฟภ.

1. บุชชิงแรงดันสูงและแรงดันต่ำพร้อมแคล้มป์รัดสายตัวนำ
2. ฉนวนครอบบุชชิงแรงดันสูง (Bird guard cap)
3. อุปกรณ์ล่อฟ้า (Arching horns) ตามมาตรฐาน DIN 42531
4. แท้ปเซนเจอร์
5. กระจาปะเทอร์โมมิเตอร์
6. แผ่นป้ายรายละเอียด (Nameplate)
7. วาล์วระบายน้ำมัน (ติดตั้งด้านล่างของตัวถัง)
8. ขั้วต่อลงดิน
9. หุยกตัวถังหม้อแปลง
10. หูหิ้วบนฝาครอบตัวถัง
11. วาล์วระบายอากาศ (สำหรับหม้อแปลงขนาดตั้งแต่ 50 kVA-250 kVA)

2.5 ข้อกำหนดรายละเอียดของหม้อแปลงจำหน่าย

- พิกัดกำลังไฟฟ้า 30 kVA , 50 kVA
- จำนวนเฟส 1 เฟส
- ความถี่ใช้งาน 50 Hz
- แรงดันด้านแรงสูงและแรงต่ำ 22 kV-460/230 V.
- ชนิดของการระบายความร้อน ONAN (Oil-Immersion Self-Cooled Transformer)
- เปอร์เซนต์อิมพีแดนซ์ 2%
- แกนเหล็ก เป็นแบบคอร์ จะใช้เหล็กกรีดเย็นประเภทเกรนโอเรียนเต็ล มีความหนาของแผ่นเหล็กเท่ากับ 0.27 มม.
- ชนิดของขดลวด ขดลวดชนิดสไปรัล (Spiral Type) ใช้พันเป็นขดลวดแรง

ต่ำ และขดลวดชนิดครอสโอเวอร์ (Crossover Type) จะใช้เป็นขดลวดแรงดันสูงของหม้อแปลงจำหน่าย

2.6 กำลังไฟฟ้าสูญเสียในหม้อแปลง

2.6.1 กำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก (core loss)

กำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก หรือ เรียกว่า กำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะไม่มีโหลด (no load loss) จะประกอบด้วยการสูญเสียดังต่อไปนี้

2.6.1.1 การสูญเสียเนื่องจากฮิสเทอรีซิสในแกนเหล็ก (hysteresis loss)

เป็นกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียไปในการกลับทิศทางของแม่เหล็ก การลดความสูญเสียเนื่องจากฮิสเทอรีซิส สามารถทำได้โดย การใช้แกนเหล็กที่มีส่วนผสมของซิลิกอน การสูญเสียนี้ขึ้นอยู่กับคุณภาพหรือเกรดของแกนเหล็ก และความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่เลือกใช้ และเป็นสัดส่วนกับความถี่ของแรงดันไฟฟ้า

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

โดยที่ k_1 คือ ค่าคงที่

n มีค่าเท่ากับ 1.6-2.5

2.6.1.2 การสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนในแกนเหล็ก (eddy current loss)

แกนเหล็กเป็นตัวนำไฟฟ้า และในทำนองเดียวกันก็เป็นตัวนำเส้นแรงแม่เหล็กด้วย การเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในแกนเหล็ก จากการเกิดการเปลี่ยนแปลงเส้นแรงแม่เหล็ก เป็นเหตุให้เกิดการไหลของกระแสในแกนเหล็ก กระแสนี้เรียกว่า “ กระแสไหลวน” ซึ่งจะทำให้เกิดการสูญเสียกำลังไฟฟ้า และเกิดความร้อนขึ้นติดตามมา การลดการสูญเสียจากกระแสไหลวน สามารถทำได้โดยการใช้แกนเหล็กประกอบจากแผ่นเหล็กบางๆ และแผ่นเหล็กแต่ละแผ่นจะต้องเคลือบด้วยฉนวน กำลังไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน จะเป็นสัดส่วนกับกำลังสองของความหนาของแผ่นเหล็กแต่ละแผ่น และกำลังสองของความถี่แรงดันไฟฟ้า

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

โดยที่ k_2 คือ ค่าคงที่

b_s^2 คือ ความหนาของแผ่นเหล็ก

ดังนั้น

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

โดยที่ P_{core} คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก

2.6.1.3 การคำนวณกำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะไม่มีโหลดในทางปฏิบัติ

ในทางปฏิบัติ สามารถกำหนดหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะไม่มีโหลดได้จากน้ำหนักรวมของแกนเหล็ก และข้อมูลกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กต่อน้ำหนัก โดยนำมาจากเส้นโค้งแสดงคุณลักษณะกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก (Core Loss Curve) ของผู้ผลิตแกนเหล็ก ดังนั้น จากพารามิเตอร์ดังกล่าว สามารถคำนวณกำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะไม่มีโหลดได้ตามสมการ

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

โดยที่ K_3 คือ แฟกเตอร์ที่ทำให้การสูญเสียขณะไม่มีโหลดเพิ่มขึ้น

W_t คือ น้ำหนักรวมของแกนเหล็ก

W_m คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กต่อน้ำหนักของแกนเหล็ก 1 กก.

2.6.2 กำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดทองแดง (copper loss)

กำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดทองแดง หรืออาจเรียกว่า กำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะมีโหลด (load loss) ซึ่งเกิดขึ้นจากกระแสที่ไหลในขดลวดของหม้อแปลงขณะจ่ายโหลด ซึ่งจะประกอบด้วยการสูญเสียจากส่วนต่างๆดังนี้

- การสูญเสียในขดลวด เนื่องจากกระแสขณะจ่ายโหลด
- การสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน ในขดลวดเนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล (Leakage Flux) และการสูญเสียปลีกย่อย (Stray Losses) ในขดลวดแกนเหล็กและอุปกรณ์ที่จับยึดโครงสร้างของหม้อแปลง

ในการคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียของขดลวดสามารถคำนวณได้ดังสมการ(2.10)

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

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

2.6.2.1 การวัดความต้านทานของขดลวด

การวัดค่าความต้านทานของขดลวด ทำการวัดด้วยบริดจ์ที่มีความแม่นยำสูง เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดทองแดง และใช้พิจารณาอุณหภูมิของขดลวดในการทดสอบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของหม้อแปลง การวัดค่าความต้านทานจะต้องระบุอุณหภูมิของขดลวดขณะวัด ถ้าอุณหภูมิของบรรยากาศโดยรอบหม้อแปลงมีค่าคงที่เป็นเวลานาน ประมาณได้ว่าอุณหภูมิของขดลวดมีค่าเท่ากับอุณหภูมิของบรรยากาศโดยรอบหม้อแปลง

ค่าความต้านทานที่วัดได้จะแปลงค่าความต้านทานไปที่อุณหภูมิอ้างอิง $75^{\circ}c$ สำหรับขดลวดทองแดงคำนวณได้ ตามสมการดังนี้

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

- เมื่อ R_a คือ ความต้านทานของขดลวดที่อุณหภูมิ θ_a ในสถานะคงตัว
 R_r คือ ความต้านทานของขดลวดที่อุณหภูมิอ้างอิง θ_r ($75^{\circ}c$)
 θ_a คือ อุณหภูมิในสถานะคงตัว
 θ_r คือ อุณหภูมิที่อ้างอิง

2.6.3 กำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมในหม้อแปลง (total loss)

กำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมในหม้อแปลงจำหน่าย คือ ผลรวมของค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดทองแดง และค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก สามารถคำนวณได้ตามสมการ

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

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

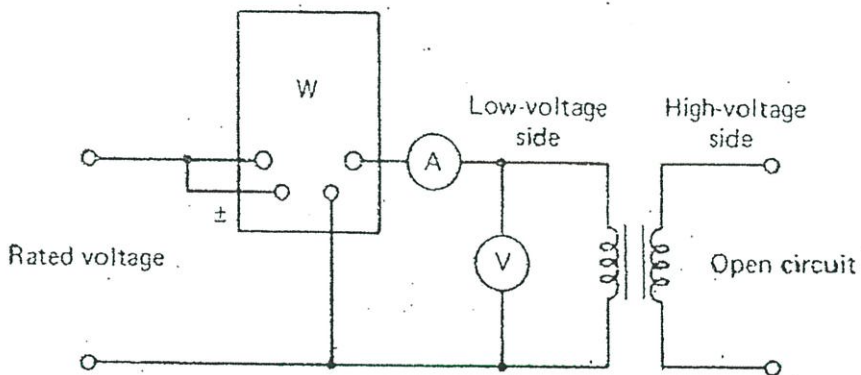
บทที่ 3

การทดสอบค่าความสูญเสียในหม้อแปลงจำหน่าย

3.1 การทดสอบแบบเปิดวงจร (Open Circuit Test) [6-7]

การทดสอบแบบเปิดวงจร เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก (core loss) โดยจ่ายแรงดันไฟฟ้าด้านขดลวดทุติยภูมิ (secondary winding) และเปิดวงจรด้านขดลวดปฐมภูมิ (primary winding) ค่าพลังงานที่จ่ายให้กับหม้อแปลง ก็คือ ค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนเหล็ก ซึ่งจะมีค่าคงที่ในทุกๆสถานะของโหลด

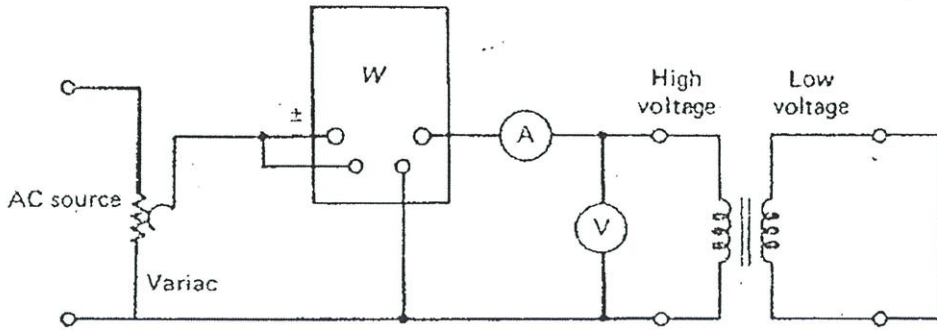
จากรูปที่ 3.1 วงจรการทดสอบค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนเหล็ก สามารถอ่านค่าได้จากวัตต์มิเตอร์ ส่วนโวลต์มิเตอร์ต่อไว้เพื่ออ่านค่าแรงดันไฟฟ้าขณะทำการทดสอบว่าเท่ากับค่าที่พิกัดหรือไม่ และค่าของกระแสขณะไม่มีภาระอ่านได้จากแอมป์มิเตอร์ ซึ่งกระแสนี้มีค่าน้อยมาก จึงทำให้ในขณะที่ทำการทดสอบ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมอิมพีแดนซ์ของขดลวดจึงมีค่าน้อยตามไปด้วย ด้วยเหตุนี้จึงอาจตัดค่านี้ออกไปได้



รูปที่ 3.1 วงจรการทดสอบหม้อแปลงแบบเปิดวงจร

3.2 การทดสอบแบบลัดวงจร (Short Circuit Test)

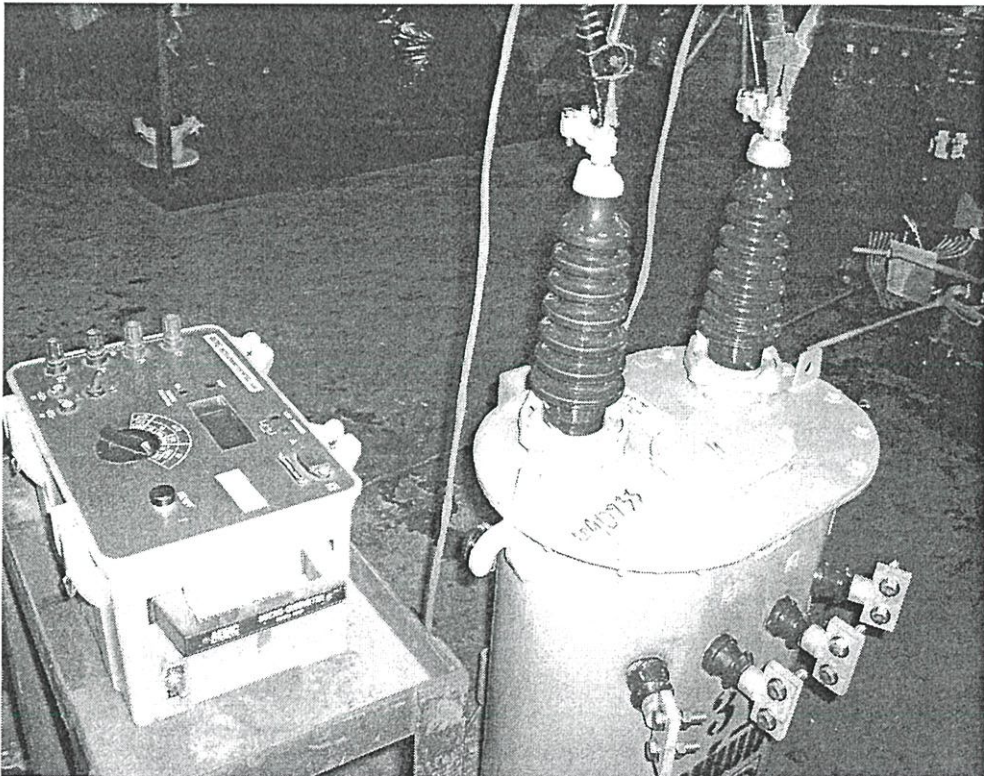
การทดสอบแบบลัดวงจร เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความสูญเสียในขดลวดทองแดง (copper loss) โดยการลัดวงจรทางด้านแรงดันไฟฟ้าต่ำ และจ่ายแรงดันไฟฟ้าเข้าที่ด้านแรงดันไฟฟ้าสูง การทดสอบทำได้โดย ปรับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดแรงสูงขึ้น จนกระทั่งแอมป์มิเตอร์สามารถอ่านค่ากระแสได้เต็มพิกัด แล้วทำการอ่านค่าจากโวลต์มิเตอร์และวัตต์มิเตอร์



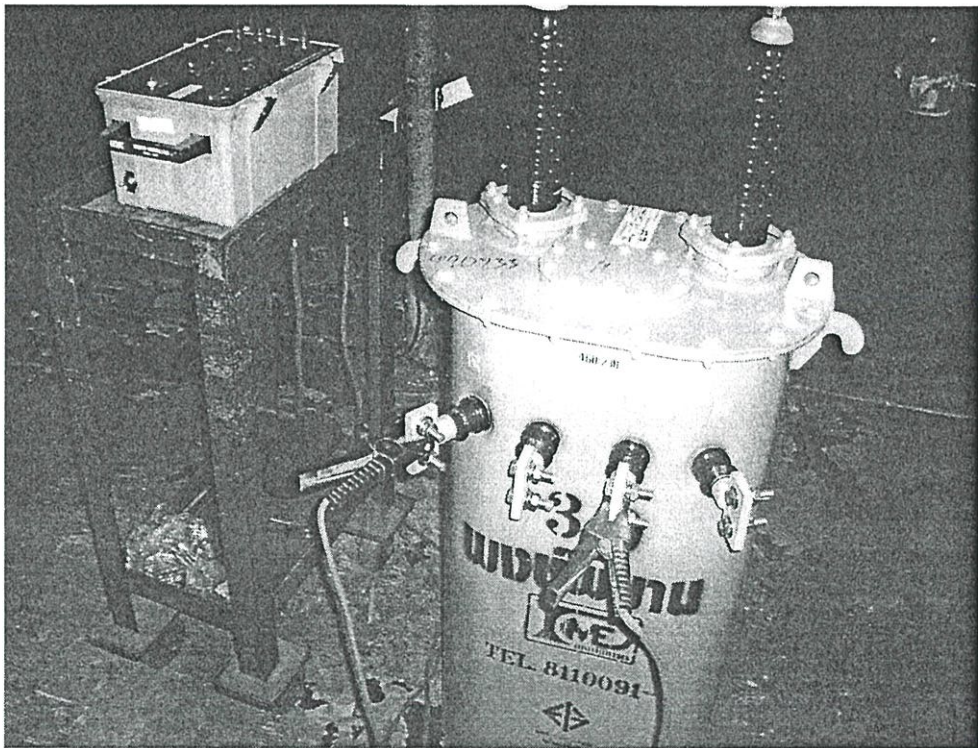
รูปที่ 3.2 วงจรการทดสอบหม้อแปลงแบบลัดวงจร

3.3 การทดสอบหาค่าความสูญเสียในหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 30 kVA

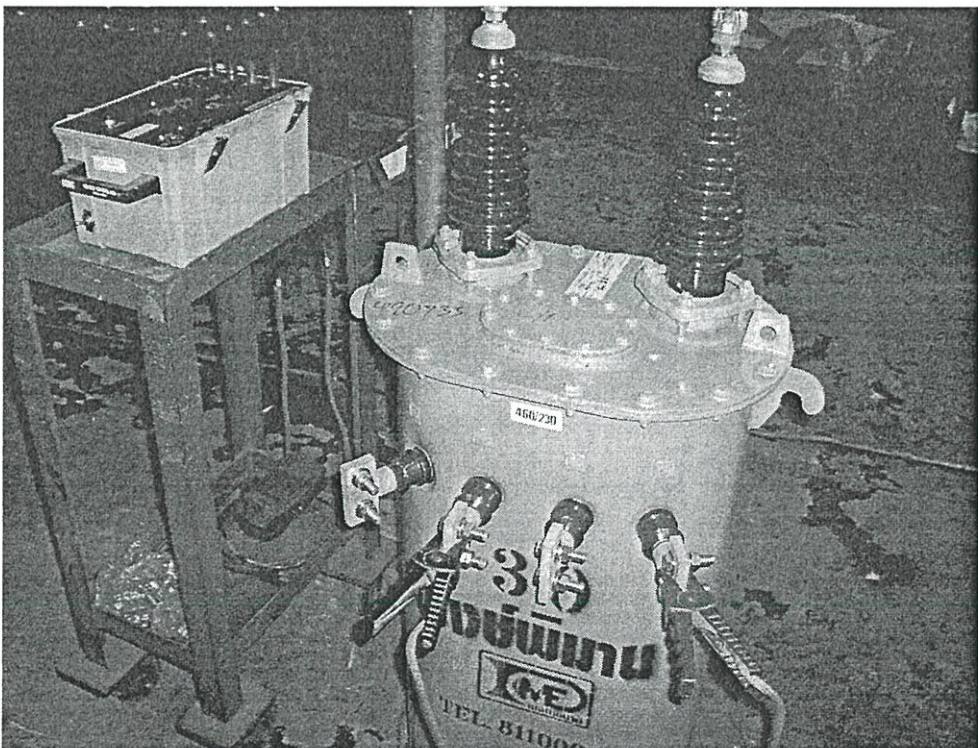
ในหัวข้อที่ 3.3 แสดงรูปการทดสอบค่าความสูญเสียของหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 30 kVA ภายในโรงงานผลิต กล่าวคือ การทดสอบหาค่าความสูญเสียในขดลวดทองแดง และค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก รวมทั้ง การวัดค่าความต้านทานในขดลวดทองแดงด้านปฐมภูมิ และด้านทุติยภูมิด้วย ดังแสดงในรูปต่อไปนี้



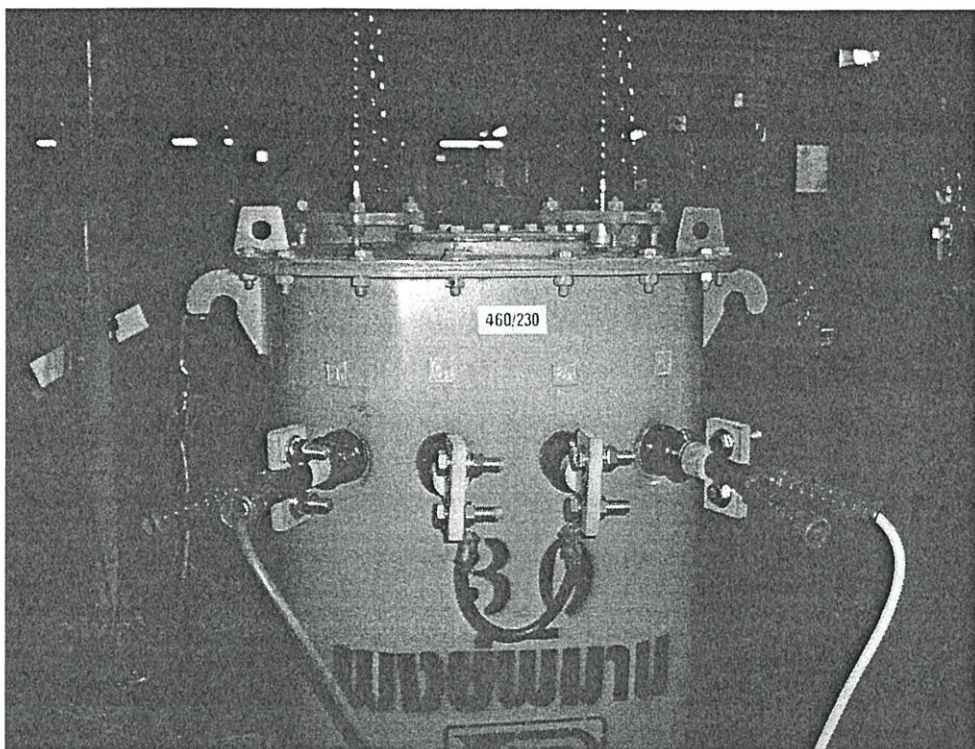
รูปที่ 3.3 แสดงการวัดค่าความต้านทานด้านขดลวดแรงสูง (High Voltage Winding)



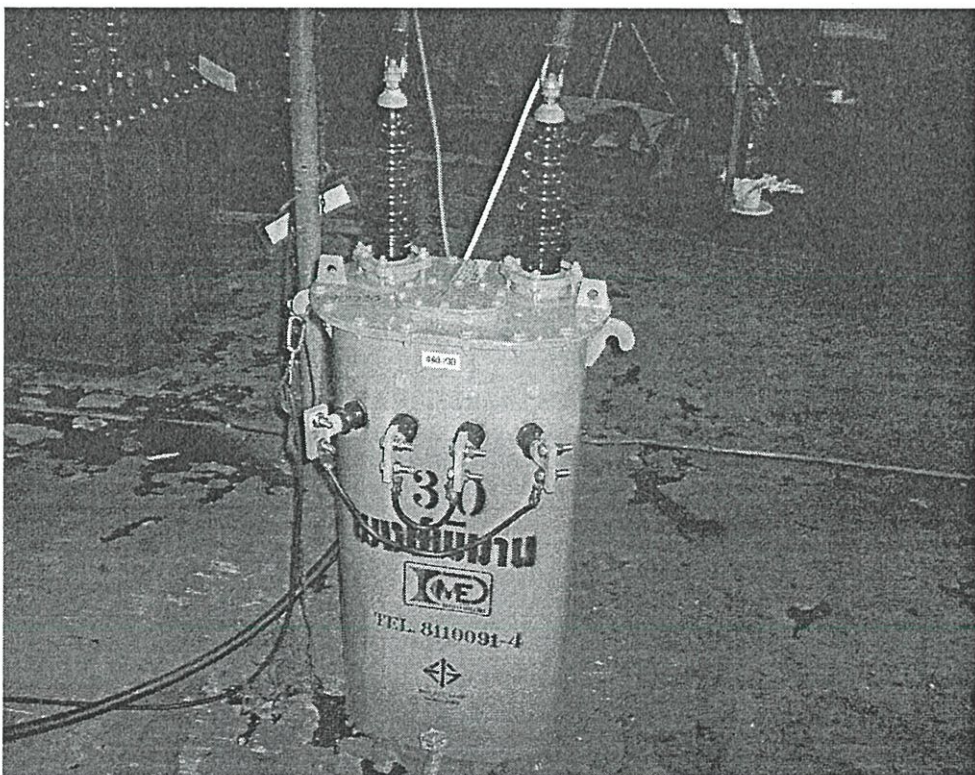
รูปที่ 3.4 แสดงการวัดค่าความต้านทานด้านขดลวดแรงต่ำ (Low Voltage Winding) Coil 1



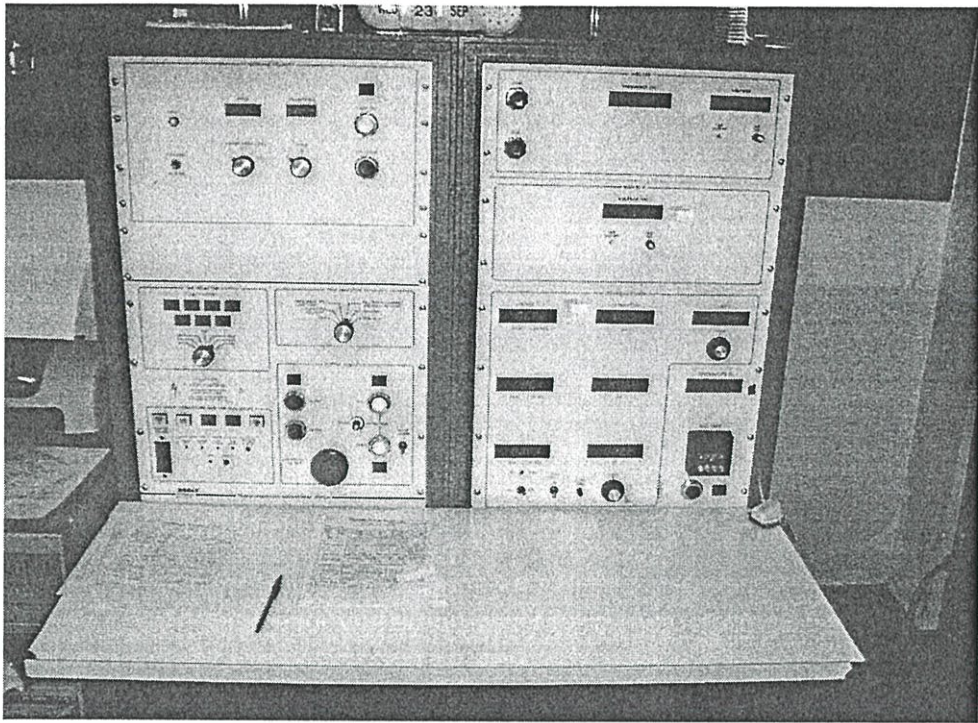
รูปที่ 3.5 แสดงการวัดค่าความต้านทานด้านขดลวดแรงต่ำ (Low Voltage Winding) Coil 2



รูปที่ 3.6 แสดงการทดสอบแบบเปิดวงจร (Open Circuit Test)



รูปที่ 3.7 แสดงการทดสอบแบบลัดวงจร (Short Circuit Test)



รูปที่ 3.8 แสดงชุดเครื่องวัดในการทดสอบค่าความสูญเสีย

ตารางที่ 3.1 ผลการทดสอบหาค่าความสูญเสียในหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 30 kVA

Ambient Temp 30 °c (Measurement)

I_{test} (%)	P_{cu} (W)	P_{core} (W)	R_{hv} (Ω)	R_{lv} (mΩ)	P_t (W)
1	0.034	108.6	106.9	33.4	108.634
2	0.137	107.9	106.5	33.8	108.037
3	0.308	108.5	106.5	33.2	108.808
4	0.547	108.9	105.8	32.9	109.447
5	0.855	108.7	105.6	33.4	109.555
6	1.230	108.3	105.5	33.3	109.530
7	1.675	108.6	106.2	33.6	110.275
8	2.188	108.8	106.5	33.4	110.988
9	2.769	108.8	106.8	33.9	111.569
10	3.418	109.1	106.9	33.6	111.518
11	4.136	108.6	106.6	33.4	112.736
12	4.922	108.7	106.0	33.4	113.622
13	5.776	108.8	106.0	33.5	114.576
14	6.699	107.9	106.3	33.2	114.599
15	7.691	107.9	106.4	33.1	115.591
16	8.750	108.3	106.2	33.0	117.050
17	9.878	108.2	106.7	33.0	118.078
18	11.074	108.2	106.9	33.2	119.274
19	12.339	108.0	106.8	33.5	120.339
20	13.672	108.0	106.5	33.0	121.672
21	15.073	108.6	106.3	33.2	123.673
22	16.543	108.5	106.5	33.3	125.043
23	18.081	108.5	106.8	33.6	126.581
24	19.688	108.4	106.7	33.6	128.088
25	21.363	108.2	106.0	33.9	129.563

ตารางที่ 3.1 (ต่อ)

Itest (%)	Pcu (W)	Pcore (W)	Rhv (Ω)	Rlv (mΩ)	Pt (W)
26	23.106	108.1	106.1	33.4	131.206
27	24.917	108.8	106.1	33.4	133.717
28	26.797	108.9	105.9	33.5	135.697
29	28.745	108.3	105.9	33.0	137.045
30	30.762	107.9	106.7	33.1	138.673
31	32.847	108.1	106.0	33.1	140.947
32	35.000	108.0	106.5	33.4	143.000
33	37.222	108.2	106.9	33.4	145.422
34	39.512	108.6	106.8	33.4	148.112
35	41.871	108.0	106.9	32.9	149.871
36	44.297	108.0	106.9	33.1	152.297
37	46.792	108.6	106.1	33.5	155.392
38	49.356	108.4	106.2	33.5	157.756
39	51.988	108.3	106.2	33.6	160.288
40	54.688	108.9	106.8	33.4	163.588
41	57.457	109.0	106.7	33.4	166.457
42	60.294	109.1	106.6	33.4	169.394
43	63.199	108.7	106.0	33.4	171.899
44	66.172	108.2	106.8	33.6	174.372
45	69.215	108.6	106.8	33.6	177.815
46	72.325	108.8	106.2	33.4	181.125
47	75.504	108.8	106.2	33.3	184.304
48	78.751	107.9	106.7	33.3	186.651
49	82.066	108.1	106.3	33.0	190.166
50	85.450	108.2	106.5	33.1	193.650

ตารางที่ 3.1 (ต่อ)

Itest (%)	Pcu (W)	Pcore (W)	Rhv (Ω)	Rlv (mΩ)	Pt (W)
51	88.902	108.6	106.9	33.4	197.502
52	92.423	107.9	106.5	33.8	200.323
53	96.012	108.5	106.5	33.2	204.512
54	99.669	108.9	105.8	32.9	208.569
55	103.395	108.7	105.6	33.4	212.095
56	107.188	108.3	105.5	33.3	215.488
57	111.051	108.6	106.2	33.6	219.651
58	114.982	108.8	106.5	33.4	223.782
59	118.981	108.8	106.8	33.9	227.781
60	123.048	108.1	106.9	33.6	231.148
61	127.184	108.6	106.6	33.4	235.784
62	131.388	108.7	106.0	33.4	240.088
63	135.660	108.8	106.0	33.5	244.460
64	140.001	107.9	106.3	33.2	247.901
65	144.411	107.9	106.4	33.1	252.311
66	148.888	108.3	106.2	33.0	257.188
67	153.434	108.2	106.7	33.0	261.634
68	158.048	108.2	106.9	33.2	266.248
69	162.731	108.0	106.8	33.5	270.731
70	167.482	108.0	106.5	33.0	275.482
71	172.301	108.6	106.3	33.2	280.901
72	177.189	108.5	106.5	33.3	285.689
73	182.145	108.5	106.8	33.6	290.645
74	187.170	108.4	106.7	33.6	295.570
75	192.263	108.2	106.0	33.9	300.463

ตารางที่ 3.1 (ต่อ)

Itest (%)	Pcu (W)	Pcore (W)	Rhv (Ω)	Rlv (mΩ)	Pt (W)
76	197.424	108.1	106.1	33.4	305.524
77	202.653	108.8	106.1	33.4	311.453
78	207.951	108.9	105.9	33.5	316.851
79	213.317	108.3	105.9	33.0	321.617
80	218.752	107.9	106.7	33.1	326.663
81	224.255	108.1	106.0	33.1	332.355
82	229.826	108.0	106.5	33.4	337.826
83	235.466	108.2	106.9	33.4	343.666
84	241.174	108.6	106.8	33.4	349.774
85	246.951	108.0	106.9	32.9	354.951
86	252.795	108.0	106.9	33.1	360.795
87	258.708	108.6	106.1	33.5	367.308
88	264.690	108.4	106.2	33.5	373.090
89	270.740	108.3	106.2	33.6	379.040
90	276.858	108.9	106.8	33.4	385.758
91	283.045	109.0	106.7	33.4	392.045
92	289.300	109.1	106.6	33.4	398.400
93	295.623	108.7	106.0	33.4	404.323
94	302.014	108.2	106.8	33.6	410.214
95	308.475	108.6	106.8	33.6	417.075
96	315.003	108.8	106.2	33.4	423.803
97	321.600	108.8	106.2	33.3	430.400
98	328.265	107.9	106.7	33.3	436.165
99	334.998	108.1	106.3	33.0	443.098
100	341.800	108.2	106.5	33.1	450.000

3.4 การคำนวณค่าพารามิเตอร์ที่อุณหภูมิอื่นๆ ของหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 30 kVA

หม้อแปลงจำหน่ายขนาด 30 kVA แรงดันด้านแรงสูงและแรงต่ำ 22 kV-460/230 V

คิดด้านแรงสูง

$$\text{กระแสที่พิกัด, } I_{hv} = \frac{30kVA}{22kV} = 1.3636A$$

คิดด้านแรงต่ำ

$$\text{กระแสที่พิกัด, } I_{lv} = \frac{30kVA}{460V} = 65.2173A$$

ตัวอย่าง การคำนวณค่าพารามิเตอร์ที่อุณหภูมิ (T) = 35 °c , ที่พิกัดกระแส (Itest) = 20%

ค่าความต้านทานด้านขดลวดปฐมภูมิ (R_{hv}) ที่ 30 °c , Itest 20% = 106.5 Ω

ค่าความต้านทานด้านขดลวดทุติยภูมิ (R_{lv}) ที่ 30 °c , Itest 20% = 33 mΩ

การคำนวณค่าความต้านทาน โดยใช้สมการ

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

เมื่อ R_a คือ ความต้านทานของขดลวดที่อุณหภูมิ θ_a ในสถานะคงตัว

R_r คือ ความต้านทานของขดลวดที่อุณหภูมิอ้างอิง θ_r

θ_a คือ อุณหภูมิในสถานะคงตัว

θ_r คือ อุณหภูมิที่อ้างอิง

$$\text{ดังนั้น } R_{hv35^\circ c, 20\%} = \frac{235 + 35}{235 + 30} \times 106.5 \Omega = 108.5094 \Omega$$

$$R_{lv35^\circ c, 20\%} = \frac{235 + 35}{235 + 30} \times 33 m\Omega = 33.6226 m\Omega$$

การคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดทองแดง (Copper Losses) โดยใช้สมการ

$$P_{cu} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2$$

โดยที่ P_{cu} คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดทองแดง

- I_1 คือ กระแสของขดลวดแรงสูง
 R_1 คือ ความต้านทานของขดลวดแรงสูง
 I_2 คือ กระแสของขดลวดแรงต่ำ
 R_2 คือ ความต้านทานของขดลวดแรงต่ำ

$$\text{คิดค่ากระแส 20\% ของกระแสที่พิกัดด้านแรงสูง, } I_{hv20\%} = \frac{20 \times 1.3636}{100} = 0.2727A$$

$$\text{คิดค่ากระแส 20\% ของกระแสที่พิกัดด้านแรงต่ำ, } I_{lv20\%} = \frac{20 \times 65.2173}{100} = 13.0434A$$

ดังนั้น สามารถคำนวณค่า

$$P_{cu35^\circ c, I_{test}20\%} = (0.2727^2 \times 108.5094) + (13.0434^2 \times 33.6226 \times 10^{-3}) = 13.7895W$$

ซึ่งกำลังไฟฟ้าขณะมีโหลด ($LoadLoss$) = $P_{cu} + StrayLoss$

โดยที่ $StrayLoss$ คือ การสูญเสียปลิกย่อย ซึ่งจะมีค่าประมาณ 2-5% ของค่าความสูญเสียในขดลวดทองแดง (P_{cu}) โดยรวมอยู่ในการทดสอบค่าความสูญเสียในขดลวดทองแดง ดังนั้น ค่าที่ได้จากการทดสอบในโรงงานผลิต จึงมีค่ามากกว่าการคำนวณค่าความสูญเสียในขดลวดทองแดงเพียงอย่างเดียว แต่เนื่องจาก $StrayLoss$ มีค่าน้อยสามารถตัดทิ้งไปได้

P_{core} คือ กำลังสูญเสียในแกนเหล็กหรือกำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลด

$$P_{core35^\circ c, I_{test}20\%} = 108W$$

ดังนั้น

$$P_{t35^\circ c, I_{test}20\%} = P_{cu35^\circ c, I_{test}20\%} + P_{core35^\circ c, I_{test}20\%}$$

$$= 13.7895 + 108 = 121.7895W \quad \text{Ans.}$$

P_t คือ ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมในหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 30 kVA

การคำนวณค่าพารามิเตอร์ที่อุณหภูมิ และค่าพิกัดกระแสอื่นๆ ก็จะคำนวณในลักษณะเดียวกัน

ตารางที่ 3.2 ผลการทดสอบหาค่าความสูญเสียในหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 30 kVA

Temp 35 °c (Calculation)

Itest (%)	Pcu (W)	Pcore (W)	Rhv (Ω)	Rlv (mΩ)	Pt (W)
1	0.035	108.6	109.7	34.3	108.635
2	0.140	107.9	109.3	34.7	108.040
3	0.316	108.5	109.3	34.1	108.816
4	0.561	108.9	108.6	33.8	109.461
5	0.877	108.7	108.4	34.3	109.577
6	1.263	108.3	108.3	34.2	109.563
7	1.719	108.6	109.0	34.5	110.319
8	2.246	108.8	109.3	34.3	111.046
9	2.842	108.8	109.6	34.8	111.642
10	3.509	109.1	109.7	34.5	111.609
11	4.246	108.6	109.4	34.3	112.846
12	5.053	108.7	108.8	34.3	113.753
13	5.930	108.8	108.8	34.4	114.730
14	6.877	107.9	109.1	34.1	114.777
15	7.895	107.9	109.2	34.0	115.795
16	8.983	108.3	109.0	33.9	117.283
17	10.141	108.2	109.5	33.9	118.341
18	11.369	108.2	109.7	34.1	119.569
19	12.667	108.0	109.6	34.4	120.667
20	14.036	108.0	109.3	33.9	122.036
21	15.474	108.6	109.1	34.1	124.074
22	16.983	108.5	109.3	34.2	125.483
23	18.562	108.5	109.6	34.5	127.062
24	20.211	108.4	109.5	34.5	128.611
25	21.931	108.2	108.8	34.8	130.131

ตารางที่ 3.2 (ต่อ)

Itest (%)	Pcu (W)	Pcore (W)	Rhv (Ω)	Rlv (mΩ)	Pt (W)
26	23.720	108.1	108.9	34.3	131.820
27	25.580	108.8	108.9	34.3	134.380
28	27.510	108.9	108.7	34.4	136.410
29	29.510	108.3	108.7	33.9	137.810
30	31.580	107.9	109.5	34.0	139.491
31	33.721	108.1	108.8	34.0	141.821
32	35.931	108.0	109.3	34.3	143.931
33	38.212	108.2	109.7	34.3	146.412
34	40.563	108.6	109.6	34.3	149.163
35	42.984	108.0	109.7	33.8	150.984
36	45.476	108.0	109.7	34.0	153.476
37	48.037	108.6	108.9	34.4	156.637
38	50.669	108.4	109.0	34.4	159.069
39	53.371	108.3	109.0	34.5	161.671
40	56.143	108.9	109.6	34.3	165.043
41	58.985	109.0	109.5	34.3	167.985
42	61.897	109.1	109.4	34.3	170.997
43	64.880	108.7	108.8	34.3	173.580
44	67.933	108.2	109.6	34.5	176.133
45	71.056	108.6	109.6	34.5	179.656
46	74.249	108.8	109.0	34.3	183.049
47	77.512	108.8	109.0	34.2	186.312
48	80.845	107.9	109.5	34.2	188.745
49	84.249	108.1	109.1	33.9	192.349
50	87.723	108.2	109.3	34.0	195.923

ตารางที่ 3.2 (ต่อ)

Itest (%)	Pcu (W)	Pcore (W)	Rhv (Ω)	Rlv (mΩ)	Pt (W)
51	91.267	108.6	109.7	34.3	199.867
52	94.881	107.9	109.3	34.7	202.781
53	98.566	108.5	109.3	34.1	207.066
54	102.320	108.9	108.6	33.8	211.220
55	106.145	108.7	108.4	34.3	214.845
56	110.040	108.3	108.3	34.2	218.340
57	114.005	108.6	109.0	34.5	222.605
58	118.040	108.8	109.3	34.3	226.840
59	122.145	108.8	109.6	34.8	230.945
60	126.321	108.1	109.7	34.5	234.421
61	130.567	108.6	109.4	34.3	239.167
62	134.883	108.7	108.8	34.3	243.583
63	139.269	108.8	108.8	34.4	248.069
64	143.725	107.9	109.1	34.1	251.625
65	148.252	107.9	109.2	34.0	256.152
66	152.849	108.3	109.0	33.9	261.149
67	157.515	108.2	109.5	33.9	265.715
68	162.252	108.2	109.7	34.1	270.452
69	167.060	108.0	109.6	34.4	275.060
70	171.937	108.0	109.3	33.9	279.937
71	176.885	108.6	109.1	34.1	285.485
72	181.902	108.5	109.3	34.2	290.402
73	186.990	108.5	109.6	34.5	295.490
74	192.148	108.4	109.5	34.5	300.548
75	197.377	108.2	108.8	34.8	305.577

ตารางที่ 3.2 (ต่อ)

Itest (%)	Pcu (W)	Pcore (W)	Rhv (Ω)	Rlv (mΩ)	Pt (W)
76	202.675	108.1	108.9	34.3	310.775
77	208.044	108.8	108.9	34.3	316.844
78	213.483	108.9	108.7	34.4	322.383
79	218.992	108.3	108.7	33.9	327.292
80	224.571	107.9	109.5	34.0	332.482
81	230.220	108.1	108.8	34.0	338.320
82	235.940	108.0	109.3	34.3	343.940
83	241.729	108.2	109.7	34.3	349.929
84	247.589	108.6	109.6	34.3	356.189
85	253.519	108.0	109.7	33.8	361.519
86	259.520	108.0	109.7	34.0	367.520
87	265.590	108.6	108.9	34.4	374.190
88	271.731	108.4	109.0	34.4	380.131
89	277.941	108.3	109.0	34.5	386.241
90	284.222	108.9	109.6	34.3	393.122
91	290.574	109.0	109.5	34.3	399.574
92	296.995	109.1	109.4	34.3	406.095
93	303.486	108.7	108.8	34.3	412.186
94	310.048	108.2	109.6	34.5	418.248
95	316.680	108.6	109.6	34.5	425.280
96	323.382	108.8	109.0	34.3	432.182
97	330.154	108.8	109.0	34.2	438.954
98	336.997	107.9	109.5	34.2	444.897
99	343.909	108.1	109.1	33.9	452.009
100	350.892	108.2	109.3	34.0	459.092

ตารางที่ 3.3 ผลการทดสอบหาค่าความสูญเสียในหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 30 kVA

Temp 40 °c (Calculation)

Itest (%)	Pcu (W)	Pcore (W)	Rhv (Ω)	Rlv (mΩ)	Pt (W)
1	0.036	108.7	111.8	34.9	108.736
2	0.143	107.9	111.4	35.3	108.043
3	0.322	108.5	111.4	34.7	108.822
4	0.572	108.9	110.6	34.4	109.472
5	0.894	108.7	110.4	34.9	109.594
6	1.287	108.3	110.3	34.8	109.587
7	1.751	108.6	111.1	35.1	110.351
8	2.287	108.8	111.4	34.9	111.087
9	2.895	108.8	111.7	35.4	111.695
10	3.574	109.1	111.8	35.1	111.674
11	4.325	108.6	111.5	34.9	112.925
12	5.147	108.7	110.8	34.9	113.847
13	6.040	108.8	110.8	35.0	114.840
14	7.005	107.9	111.2	34.7	114.905
15	8.042	107.9	111.3	34.6	115.942
16	9.150	108.3	111.1	34.5	117.450
17	10.329	108.2	111.6	34.5	118.529
18	11.580	108.2	111.8	34.7	119.780
19	12.903	108.0	111.7	35.0	120.903
20	14.297	108.0	111.4	34.5	122.297
21	15.762	108.6	111.2	34.7	124.362
22	17.299	108.5	111.4	34.8	125.799
23	18.908	108.5	111.7	35.1	127.408
24	20.587	108.4	111.6	35.1	128.987
25	22.339	108.2	110.8	35.4	130.539

ตารางที่ 3.3 (ต่อ)

Itest (%)	Pcu (W)	Pcore (W)	Rhv (Ω)	Rlv (mΩ)	Pt (W)
26	24.162	108.1	110.9	34.9	132.262
27	26.056	108.8	110.9	34.9	134.856
28	28.022	108.9	110.7	35.0	136.922
29	30.059	108.3	110.7	34.5	138.359
30	32.168	107.9	111.6	34.6	140.079
31	34.348	108.1	110.8	34.6	142.448
32	36.600	108.0	111.4	34.9	144.600
33	38.923	108.2	111.8	34.9	147.123
34	41.318	108.6	111.7	34.9	149.918
35	43.784	108.0	111.8	34.4	151.784
36	46.322	108.0	111.8	34.6	154.322
37	48.931	108.6	110.9	35.0	157.531
38	51.611	108.4	111.1	35.0	160.011
39	54.364	108.3	111.1	35.1	162.664
40	57.187	108.9	111.7	34.9	166.087
41	60.082	109.0	111.6	34.9	169.082
42	63.049	109.1	111.5	34.9	172.149
43	66.087	108.7	110.8	34.9	174.787
44	69.197	108.2	111.7	35.1	177.397
45	72.378	108.6	111.7	35.1	180.978
46	75.630	108.8	111.1	34.9	184.430
47	78.954	108.8	111.1	34.8	187.754
48	82.350	107.9	111.6	34.8	190.250
49	85.817	108.1	111.2	34.5	193.917
50	89.355	108.2	111.4	34.6	197.555

ตารางที่ 3.3 (ต่อ)

Itest (%)	Pcu (W)	Pcore (W)	Rhv (Ω)	Rlv (mΩ)	Pt (W)
51	92.965	108.6	111.8	34.9	201.565
52	96.646	107.9	111.4	35.3	204.546
53	100.399	108.5	111.4	34.7	208.899
54	104.224	108.9	110.6	34.4	213.124
55	108.120	108.7	110.4	34.9	216.820
56	112.087	108.3	110.3	34.8	220.387
57	116.126	108.6	111.1	35.1	224.726
58	120.236	108.8	111.4	34.9	229.036
59	124.418	108.8	111.7	35.4	233.218
60	128.671	108.1	111.8	35.1	236.771
61	132.996	108.6	111.5	34.9	241.596
62	137.392	108.7	110.8	34.9	246.092
63	141.860	108.8	110.8	35.0	250.660
64	146.399	107.9	111.2	34.7	254.299
65	151.010	107.9	111.3	34.6	258.910
66	155.692	108.3	111.1	34.5	263.992
67	160.446	108.2	111.6	34.5	268.646
68	165.271	108.2	111.8	34.7	273.471
69	170.168	108.0	111.7	35.0	278.168
70	175.136	108.0	111.4	34.5	283.136
71	180.176	108.6	111.2	34.7	288.776
72	185.287	108.5	111.4	34.8	293.787
73	190.469	108.5	111.7	35.1	298.969
74	195.723	108.4	111.6	35.1	304.123
75	201.049	108.2	110.8	35.4	309.249

ตารางที่ 3.3 (ต่อ)

Itest (%)	Pcu (W)	Pcore (W)	Rhv (Ω)	Rlv (mΩ)	Pt (W)
76	206.446	108.1	110.9	34.9	314.546
77	211.914	108.8	110.9	34.9	320.714
78	217.454	108.9	110.7	35.0	326.354
79	223.066	108.3	110.7	34.5	331.366
80	228.749	107.9	111.6	34.6	336.660
81	234.503	108.1	110.8	34.6	342.603
82	240.329	108.0	111.4	34.9	348.329
83	246.227	108.2	111.8	34.9	354.427
84	252.196	108.6	111.7	34.9	360.796
85	258.236	108.0	111.8	34.4	366.236
86	264.348	108.0	111.8	34.6	372.348
87	270.531	108.6	110.9	35.0	379.131
88	276.786	108.4	111.1	35.0	385.186
89	283.113	108.3	111.1	35.1	391.413
90	289.510	108.9	111.7	34.9	398.410
91	295.980	109.0	111.6	34.9	404.980
92	302.521	109.1	111.5	34.9	411.621
93	309.133	108.7	110.8	34.9	417.833
94	315.817	108.2	111.7	35.1	424.017
95	322.572	108.6	111.7	35.1	431.172
96	329.399	108.8	111.1	34.9	438.199
97	336.297	108.8	111.1	34.8	445.097
98	343.266	107.9	111.6	34.8	451.166
99	350.308	108.1	111.2	34.5	458.408
100	357.420	108.2	111.4	34.6	465.620

ตารางที่ 3.4 ผลการทดสอบหาค่าความสูญเสียในหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 30 kVA

Temp 45 °c (Calculation)

Itest (%)	Pcu (W)	Pcore (W)	Rhv (Ω)	Rlv (mΩ)	Pt (W)
1	0.036	108.7	113.8	35.6	108.736
2	0.146	107.9	113.4	36.0	108.046
3	0.328	108.5	113.4	35.3	108.828
4	0.582	108.9	112.6	35.0	109.482
5	0.910	108.7	112.4	35.6	109.610
6	1.310	108.3	112.3	35.5	109.610
7	1.783	108.6	113.1	35.8	110.383
8	2.329	108.8	113.4	35.6	111.129
9	2.948	108.8	113.7	36.1	111.748
10	3.639	109.1	113.8	35.8	111.739
11	4.403	108.6	113.5	35.6	113.003
12	5.240	108.7	112.9	35.6	113.940
13	6.150	108.8	112.9	35.7	114.950
14	7.133	107.9	113.2	35.3	115.033
15	8.188	107.9	113.3	35.2	116.088
16	9.316	108.3	113.1	35.1	117.616
17	10.517	108.2	113.6	35.1	118.717
18	11.791	108.2	113.8	35.3	119.991
19	13.137	108.0	113.7	35.7	121.137
20	14.557	108.0	113.4	35.1	122.557
21	16.049	108.6	113.2	35.3	124.649
22	17.613	108.5	113.4	35.5	126.113
23	19.251	108.5	113.7	35.8	127.751
24	20.961	108.4	113.6	35.8	129.361
25	22.745	108.2	112.9	36.1	130.945

ตารางที่ 3.4 (ต่อ)

Itest (%)	Pcu (W)	Pcore (W)	Rhv (Ω)	Rlv (m Ω)	Pt (W)
26	24.601	108.1	113.0	35.6	132.701
27	26.529	108.8	113.0	35.6	135.329
28	28.531	108.9	112.8	35.7	137.431
29	30.605	108.3	112.8	35.1	138.905
30	32.752	107.9	113.6	35.2	140.663
31	34.972	108.1	112.9	35.2	143.072
32	37.265	108.0	113.4	35.6	145.265
33	39.630	108.2	113.8	35.6	147.830
34	42.069	108.6	113.7	35.6	150.669
35	44.580	108.0	113.8	35.0	152.580
36	47.163	108.0	113.8	35.2	155.163
37	49.820	108.6	113.0	35.7	158.420
38	52.549	108.4	113.1	35.7	160.949
39	55.351	108.3	113.1	35.8	163.651
40	58.226	108.9	113.7	35.6	167.126
41	61.174	109.0	113.6	35.6	170.174
42	64.195	109.1	113.5	35.6	173.295
43	67.288	108.7	112.9	35.6	175.988
44	70.454	108.2	113.7	35.8	178.654
45	73.693	108.6	113.7	35.8	182.293
46	77.004	108.8	113.1	35.6	185.804
47	80.389	108.8	113.1	35.5	189.189
48	83.846	107.9	113.6	35.5	191.746
49	87.376	108.1	113.2	35.1	195.476
50	90.979	108.2	113.4	35.2	199.179

ตารางที่ 3.4 (ต่อ)

Itest (%)	Pcu (W)	Pcore (W)	Rhv (Ω)	Rlv (mΩ)	Pt (W)
51	94.654	108.6	113.8	35.6	203.254
52	98.402	107.9	113.4	36.0	206.302
53	102.224	108.5	113.4	35.3	210.724
54	106.117	108.9	112.6	35.0	215.017
55	110.084	108.7	112.4	35.6	218.784
56	114.124	108.3	112.3	35.5	222.424
57	118.236	108.6	113.1	35.8	226.836
58	122.421	108.8	113.4	35.6	231.221
59	126.679	108.8	113.7	36.1	235.479
60	131.009	108.1	113.8	35.8	239.109
61	135.413	108.6	113.5	35.6	244.013
62	139.889	108.7	112.9	35.6	248.589
63	144.438	108.8	112.9	35.7	253.238
64	149.059	107.9	113.2	35.3	256.959
65	153.754	107.9	113.3	35.2	261.654
66	158.521	108.3	113.1	35.1	266.821
67	163.361	108.2	113.6	35.1	271.561
68	168.274	108.2	113.8	35.3	276.474
69	173.260	108.0	113.7	35.7	281.260
70	178.318	108.0	113.4	35.1	286.318
71	183.449	108.6	113.2	35.3	292.049
72	188.653	108.5	113.4	35.5	297.153
73	193.930	108.5	113.7	35.8	302.430
74	199.280	108.4	113.6	35.8	307.680
75	204.702	108.2	112.9	36.1	312.902

ตารางที่ 3.4 (ต่อ)

Itest (%)	Pcu (W)	Pcore (W)	Rhv (Ω)	Rlv (mΩ)	Pt (W)
76	210.197	108.1	113.0	35.6	318.297
77	215.765	108.8	113.0	35.6	324.565
78	221.406	108.9	112.8	35.7	330.306
79	227.119	108.3	112.8	35.1	335.419
80	232.905	107.9	113.6	35.2	340.816
81	238.764	108.1	112.9	35.2	346.864
82	244.696	108.0	113.4	35.6	352.696
83	250.701	108.2	113.8	35.6	358.901
84	256.778	108.6	113.7	35.6	365.378
85	262.928	108.0	113.8	35.0	370.928
86	269.151	108.0	113.8	35.2	377.151
87	275.447	108.6	113.0	35.7	384.047
88	281.815	108.4	113.1	35.7	390.215
89	288.257	108.3	113.1	35.8	396.557
90	294.771	108.9	113.7	35.6	403.671
91	301.358	109.0	113.6	35.6	410.358
92	308.017	109.1	113.5	35.6	417.117
93	314.750	108.7	112.9	35.6	423.450
94	321.555	108.2	113.7	35.8	429.755
95	328.433	108.6	113.7	35.8	437.033
96	335.384	108.8	113.1	35.6	444.184
97	342.407	108.8	113.1	35.5	451.207
98	349.503	107.9	113.6	35.5	457.403
99	356.673	108.1	113.2	35.1	464.773
100	363.914	108.2	113.4	35.2	472.114

ตารางที่ 3.5 ผลการทดสอบหาค่าความสูญเสียในหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 30 kVA

Temp 50 °c (Calculation)

Itest (%)	Pcu (W)	Pcore (W)	Rhv (Ω)	Rlv (mΩ)	Pt (W)
1	0.037	108.7	115.8	36.2	108.737
2	0.148	107.9	115.3	36.6	108.048
3	0.333	108.5	115.3	36.0	108.833
4	0.592	108.9	114.6	35.6	109.492
5	0.925	108.7	114.4	36.2	109.625
6	1.333	108.3	114.3	36.1	109.633
7	1.814	108.6	115.0	36.4	110.414
8	2.369	108.8	115.3	36.2	111.169
9	2.998	108.8	115.7	36.7	111.798
10	3.702	109.1	115.8	36.4	111.802
11	4.479	108.6	115.4	36.2	113.079
12	5.330	108.7	114.8	36.2	114.030
13	6.256	108.8	114.8	36.3	115.056
14	7.255	107.9	115.1	36.0	115.155
15	8.329	107.9	115.2	35.8	116.229
16	9.476	108.3	115.0	35.7	117.776
17	10.698	108.2	115.6	35.7	118.898
18	11.993	108.2	115.8	36.0	120.193
19	13.363	108.0	115.7	36.3	121.363
20	14.807	108.0	115.3	35.7	122.807
21	16.324	108.6	115.1	36.0	124.924
22	17.916	108.5	115.3	36.1	126.416
23	19.582	108.5	115.7	36.4	128.082
24	21.322	108.4	115.6	36.4	129.722
25	23.136	108.2	114.8	36.7	131.336

ตารางที่ 3.5 (ต่อ)

Itest (%)	Pcu (W)	Pcore (W)	Rhv (Ω)	Rlv (mΩ)	Pt (W)
26	25.023	108.1	114.9	36.2	133.123
27	26.985	108.8	114.9	36.2	135.785
28	29.021	108.9	114.7	36.3	137.921
29	31.131	108.3	114.7	35.7	139.431
30	33.315	107.9	115.6	35.8	141.226
31	35.573	108.1	114.8	35.8	143.673
32	37.905	108.0	115.3	36.2	145.905
33	40.311	108.2	115.8	36.2	148.511
34	42.792	108.6	115.7	36.2	151.392
35	45.346	108.0	115.8	35.6	153.346
36	47.974	108.0	115.8	35.8	155.974
37	50.676	108.6	114.9	36.3	159.276
38	53.452	108.4	115.0	36.3	161.852
39	56.303	108.3	115.0	36.4	164.603
40	59.227	108.9	115.7	36.2	168.127
41	62.225	109.0	115.6	36.2	171.225
42	65.298	109.1	115.4	36.2	174.398
43	68.444	108.7	114.8	36.2	177.144
44	71.665	108.2	115.7	36.4	179.865
45	74.959	108.6	115.7	36.4	183.559
46	78.328	108.8	115.0	36.2	187.128
47	81.770	108.8	115.0	36.1	190.570
48	85.287	107.9	115.6	36.1	193.187
49	88.878	108.1	115.1	35.7	196.978
50	92.542	108.2	115.3	35.8	200.742

ตารางที่ 3.5 (ต่อ)

Itest (%)	Pcu (W)	Pcore (W)	Rhv (Ω)	Rlv (mΩ)	Pt (W)
51	96.281	108.6	115.8	36.2	204.881
52	100.094	107.9	115.3	36.6	207.994
53	103.981	108.5	115.3	36.0	212.481
54	107.941	108.9	114.6	35.6	216.841
55	111.976	108.7	114.4	36.2	220.676
56	116.085	108.3	114.3	36.1	224.385
57	120.268	108.6	115.0	36.4	228.868
58	124.525	108.8	115.3	36.2	233.325
59	128.856	108.8	115.7	36.7	237.656
60	133.261	108.1	115.8	36.4	241.361
61	137.740	108.6	115.4	36.2	246.340
62	142.293	108.7	114.8	36.2	250.993
63	146.920	108.8	114.8	36.3	255.720
64	151.621	107.9	115.1	36.0	259.521
65	156.397	107.9	115.2	35.8	264.297
66	161.246	108.3	115.0	35.7	269.546
67	166.169	108.2	115.6	35.7	274.369
68	171.166	108.2	115.8	36.0	279.366
69	176.238	108.0	115.7	36.3	284.238
70	181.383	108.0	115.3	35.7	289.383
71	186.602	108.6	115.1	36.0	295.202
72	191.896	108.5	115.3	36.1	300.396
73	197.263	108.5	115.7	36.4	305.763
74	202.705	108.4	115.6	36.4	311.105
75	208.220	108.2	114.8	36.7	316.420

ตารางที่ 3.5 (ต่อ)

Itest (%)	Pcu (W)	Pcore (W)	Rhv (Ω)	Rlv (mΩ)	Pt (W)
76	213.810	108.1	114.9	36.2	321.910
77	219.473	108.8	114.9	36.2	328.273
78	225.211	108.9	114.7	36.3	334.111
79	231.023	108.3	114.7	35.7	339.323
80	236.908	107.9	115.6	35.8	344.819
81	242.868	108.1	114.8	35.8	350.968
82	248.902	108.0	115.3	36.2	356.902
83	255.010	108.2	115.8	36.2	363.210
84	261.192	108.6	115.7	36.2	369.792
85	267.447	108.0	115.8	35.6	375.447
86	273.777	108.0	115.8	35.8	381.777
87	280.181	108.6	114.9	36.3	388.781
88	286.659	108.4	115.0	36.3	395.059
89	293.211	108.3	115.0	36.4	401.511
90	299.837	108.9	115.7	36.2	408.737
91	306.537	109.0	115.6	36.2	415.537
92	313.311	109.1	115.4	36.2	422.411
93	320.160	108.7	114.8	36.2	428.860
94	327.082	108.2	115.7	36.4	435.282
95	334.078	108.6	115.7	36.4	442.678
96	341.148	108.8	115.0	36.2	449.948
97	348.292	108.8	115.0	36.1	457.092
98	355.511	107.9	115.6	36.1	463.411
99	362.803	108.1	115.1	35.7	470.903
100	370.169	108.2	115.3	35.8	478.369

ตารางที่ 3.6 ผลการทดสอบหาค่าความสูญเสียในหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 30 kVA

Temp 55 °c (Calculation)

Itest (%)	Pcu (W)	Pcore (W)	Rhv (Ω)	Rlv (mΩ)	Pt (W)
1	0.038	108.7	117.9	36.8	108.738
2	0.151	107.9	117.4	37.3	108.051
3	0.339	108.5	117.4	36.6	108.839
4	0.603	108.9	116.7	36.3	109.503
5	0.942	108.7	116.5	36.8	109.642
6	1.357	108.3	116.3	36.7	109.657
7	1.847	108.6	117.1	37.1	110.447
8	2.412	108.8	117.4	36.8	111.212
9	3.053	108.8	117.8	37.4	111.853
10	3.769	109.1	117.9	37.1	111.869
11	4.561	108.6	117.6	36.8	113.161
12	5.428	108.7	116.9	36.8	114.128
13	6.370	108.8	116.9	36.9	115.170
14	7.388	107.9	117.2	36.6	115.288
15	8.481	107.9	117.3	36.5	116.381
16	9.650	108.3	117.1	36.4	117.950
17	10.893	108.2	117.7	36.4	119.093
18	12.213	108.2	117.9	36.6	120.413
19	13.607	108.0	117.8	36.9	121.607
20	15.077	108.0	117.4	36.4	123.077
21	16.623	108.6	117.2	36.6	125.223
22	18.244	108.5	117.4	36.7	126.744
23	19.940	108.5	117.8	37.1	128.440
24	21.712	108.4	117.7	37.1	130.112
25	23.559	108.2	116.9	37.4	131.759

ตารางที่ 3.6 (ต่อ)

Itest (%)	Pcu (W)	Pcore (W)	Rhv (Ω)	Rlv (mΩ)	Pt (W)
26	25.481	108.1	117.0	36.8	133.581
27	27.479	108.8	117.0	36.8	136.279
28	29.552	108.9	116.8	36.9	138.452
29	31.700	108.3	116.8	36.4	140.000
30	33.924	107.9	117.7	36.5	141.835
31	36.224	108.1	116.9	36.5	144.324
32	38.598	108.0	117.4	36.8	146.598
33	41.048	108.2	117.9	36.8	149.248
34	43.574	108.6	117.8	36.8	152.174
35	46.175	108.0	117.9	36.3	154.175
36	48.851	108.0	117.9	36.5	156.851
37	51.603	108.6	117.0	36.9	160.203
38	54.430	108.4	117.1	36.9	162.830
39	57.332	108.3	117.1	37.1	165.632
40	60.310	108.9	117.8	36.8	169.210
41	63.363	109.0	117.7	36.8	172.363
42	66.492	109.1	117.6	36.8	175.592
43	69.696	108.7	116.9	36.8	178.396
44	72.975	108.2	117.8	37.1	181.175
45	76.330	108.6	117.8	37.1	184.930
46	79.760	108.8	117.1	36.8	188.560
47	83.265	108.8	117.1	36.7	192.065
48	86.846	107.9	117.7	36.7	194.746
49	90.503	108.1	117.2	36.4	198.603
50	94.234	108.2	117.4	36.5	202.434

ตารางที่ 3.6 (ต่อ)

Itest (%)	Pcu (W)	Pcore (W)	Rhv (Ω)	Rlv (mΩ)	Pt (W)
51	98.041	108.6	117.9	36.8	206.641
52	101.924	107.9	117.4	37.3	209.824
53	105.882	108.5	117.4	36.6	214.382
54	109.915	108.9	116.7	36.3	218.815
55	114.023	108.7	116.5	36.8	222.723
56	118.207	108.3	116.3	36.7	226.507
57	122.467	108.6	117.1	37.1	231.067
58	126.802	108.8	117.4	36.8	235.602
59	131.212	108.8	117.8	37.4	240.012
60	135.697	108.1	117.9	37.1	243.797
61	140.258	108.6	117.6	36.8	248.858
62	144.895	108.7	116.9	36.8	253.595
63	149.606	108.8	116.9	36.9	258.406
64	154.393	107.9	117.2	36.6	262.293
65	159.256	107.9	117.3	36.5	267.156
66	164.194	108.3	117.1	36.4	272.494
67	169.207	108.2	117.7	36.4	277.407
68	174.296	108.2	117.9	36.6	282.496
69	179.460	108.0	117.8	36.9	287.460
70	184.699	108.0	117.4	36.4	292.699
71	190.014	108.6	117.2	36.6	298.614
72	195.404	108.5	117.4	36.7	303.904
73	200.870	108.5	117.8	37.1	309.370
74	206.411	108.4	117.7	37.1	314.811
75	212.027	108.2	116.9	37.4	320.227

ตารางที่ 3.6 (ต่อ)

Itest (%)	Pcu (W)	Pcore (W)	Rhv (Ω)	Rlv (m Ω)	Pt (W)
76	217.719	108.1	117.0	36.8	325.819
77	223.486	108.8	117.0	36.8	332.286
78	229.328	108.9	116.8	36.9	338.228
79	235.246	108.3	116.8	36.4	343.546
80	241.240	107.9	117.7	36.5	349.151
81	247.308	108.1	116.9	36.5	355.408
82	253.452	108.0	117.4	36.8	361.452
83	259.672	108.2	117.9	36.8	367.872
84	265.967	108.6	117.8	36.8	374.567
85	272.337	108.0	117.9	36.3	380.337
86	278.783	108.0	117.9	36.5	386.783
87	285.304	108.6	117.0	36.9	393.904
88	291.900	108.4	117.1	36.9	400.300
89	298.572	108.3	117.1	37.1	406.872
90	305.319	108.9	117.8	36.8	414.219
91	312.142	109.0	117.7	36.8	421.142
92	319.040	109.1	117.6	36.8	428.140
93	326.013	108.7	116.9	36.8	434.713
94	333.062	108.2	117.8	37.1	441.262
95	340.186	108.6	117.8	37.1	448.786
96	347.385	108.8	117.1	36.8	456.185
97	354.660	108.8	117.1	36.7	463.460
98	362.010	107.9	117.7	36.7	469.910
99	369.436	108.1	117.2	36.4	477.536
100	376.937	108.2	117.4	36.5	485.137

ตารางที่ 3.7 ผลการทดสอบหาค่าความสูญเสียในหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 30 kVA

Temp 60 °c (Calculation)

I_{test} (%)	P_{cu} (W)	P_{core} (W)	R_{hv} (Ω)	R_{lv} (mΩ)	P_t (W)
1	0.038	108.7	119.9	37.5	108.738
2	0.153	107.9	119.5	37.9	108.053
3	0.345	108.5	119.5	37.2	108.845
4	0.614	108.9	118.7	36.9	109.514
5	0.959	108.7	118.5	37.5	109.659
6	1.380	108.3	118.4	37.4	109.680
7	1.879	108.6	119.1	37.7	110.479
8	2.454	108.8	119.5	37.5	111.254
9	3.106	108.8	119.8	38.0	111.906
10	3.835	109.1	119.9	37.7	111.935
11	4.640	108.6	119.6	37.5	113.240
12	5.522	108.7	118.9	37.5	114.222
13	6.481	108.8	118.9	37.6	115.281
14	7.516	107.9	119.3	37.2	115.416
15	8.628	107.9	119.4	37.1	116.528
16	9.817	108.3	119.1	37.0	118.117
17	11.082	108.2	119.7	37.0	119.282
18	12.424	108.2	119.9	37.2	120.624
19	13.843	108.0	119.8	37.6	121.843
20	15.339	108.0	119.5	37.0	123.339
21	16.911	108.6	119.3	37.2	125.511
22	18.560	108.5	119.5	37.4	127.060
23	20.285	108.5	119.8	37.7	128.785
24	22.088	108.4	119.7	37.7	130.488
25	23.967	108.2	118.9	38.0	132.167

ตารางที่ 3.7 (ต่อ)

Itest (%)	Pcu (W)	Pcore (W)	Rhv (Ω)	Rlv (mΩ)	Pt (W)
26	25.922	108.1	119.0	37.5	134.022
27	27.955	108.8	119.0	37.5	136.755
28	30.064	108.9	118.8	37.6	138.964
29	32.249	108.3	118.8	37.0	140.549
30	34.512	107.9	119.7	37.1	142.423
31	36.851	108.1	118.9	37.1	144.951
32	39.267	108.0	119.5	37.5	147.267
33	41.759	108.2	119.9	37.5	149.959
34	44.329	108.6	119.8	37.5	152.929
35	46.975	108.0	119.9	36.9	154.975
36	49.697	108.0	119.9	37.1	157.697
37	52.496	108.6	119.0	37.6	161.096
38	55.372	108.4	119.1	37.6	163.772
39	58.325	108.3	119.1	37.7	166.625
40	61.354	108.9	119.8	37.5	170.254
41	64.461	109.0	119.7	37.5	173.461
42	67.643	109.1	119.6	37.5	176.743
43	70.903	108.7	118.9	37.5	179.603
44	74.239	108.2	119.8	37.7	182.439
45	77.652	108.6	119.8	37.7	186.252
46	81.141	108.8	119.1	37.5	189.941
47	84.708	108.8	119.1	37.4	193.508
48	88.350	107.9	119.7	37.4	196.250
49	92.070	108.1	119.3	37.0	200.170
50	95.866	108.2	119.5	37.1	204.066

ตารางที่ 3.7 (ต่อ)

Itest (%)	Pcu (W)	Pcore (W)	Rhv (Ω)	Rlv (mΩ)	Pt (W)
51	99.739	108.6	119.9	37.5	208.339
52	103.689	107.9	119.5	37.9	211.589
53	107.715	108.5	119.5	37.2	216.215
54	111.819	108.9	118.7	36.9	220.719
55	115.998	108.7	118.5	37.5	224.698
56	120.255	108.3	118.4	37.4	228.555
57	124.588	108.6	119.1	37.7	233.188
58	128.998	108.8	119.5	37.5	237.798
59	133.484	108.8	119.8	38.0	242.284
60	138.048	108.1	119.9	37.7	246.148
61	142.687	108.6	119.6	37.5	251.287
62	147.404	108.7	118.9	37.5	256.104
63	152.197	108.8	118.9	37.6	260.997
64	157.067	107.9	119.3	37.2	264.967
65	162.014	107.9	119.4	37.1	269.914
66	167.038	108.3	119.1	37.0	275.338
67	172.138	108.2	119.7	37.0	280.338
68	177.314	108.2	119.9	37.2	285.514
69	182.568	108.0	119.8	37.6	290.568
70	187.898	108.0	119.5	37.0	295.898
71	193.305	108.6	119.3	37.2	301.905
72	198.788	108.5	119.5	37.4	307.288
73	204.349	108.5	119.8	37.7	312.849
74	209.986	108.4	119.7	37.7	318.386
75	215.699	108.2	118.9	38.0	323.899

ตารางที่ 3.7 (ต่อ)

Itest (%)	Pcu (W)	Pcore (W)	Rhv (Ω)	Rlv (mΩ)	Pt (W)
76	221.490	108.1	119.0	37.5	329.590
77	227.357	108.8	119.0	37.5	336.157
78	233.300	108.9	118.8	37.6	342.200
79	239.321	108.3	118.8	37.0	347.621
80	245.418	107.9	119.7	37.1	353.329
81	251.592	108.1	118.9	37.1	359.692
82	257.842	108.0	119.5	37.5	365.842
83	264.169	108.2	119.9	37.5	372.369
84	270.573	108.6	119.8	37.5	379.173
85	277.054	108.0	119.9	36.9	385.054
86	283.611	108.0	119.9	37.1	391.611
87	290.245	108.6	119.0	37.6	398.845
88	296.956	108.4	119.1	37.6	405.356
89	303.743	108.3	119.1	37.7	412.043
90	310.607	108.9	119.8	37.5	419.507
91	317.548	109.0	119.7	37.5	426.548
92	324.565	109.1	119.6	37.5	433.665
93	331.659	108.7	118.9	37.5	440.359
94	338.830	108.2	119.8	37.7	447.030
95	346.078	108.6	119.8	37.7	454.678
96	353.402	108.8	119.1	37.5	462.202
97	360.803	108.8	119.1	37.4	469.603
98	368.280	107.9	119.7	37.4	476.180
99	375.834	108.1	119.3	37.0	483.934
100	383.465	108.2	119.5	37.1	491.665

ตารางที่ 3.8 ผลการทดสอบหาค่าความสูญเสียในหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 30 kVA

Temp 65 °c (Calculation)

Itest (%)	Pcu (W)	Pcore (W)	Rhv (Ω)	Rlv (mΩ)	Pt (W)
1	0.039	108.7	122.0	38.1	108.739
2	0.156	107.9	121.5	38.6	108.056
3	0.351	108.5	121.5	37.9	108.851
4	0.624	108.9	120.7	37.5	109.524
5	0.975	108.7	120.5	38.1	109.675
6	1.404	108.3	120.4	38.0	109.704
7	1.911	108.6	121.2	38.3	110.511
8	2.496	108.8	121.5	38.1	111.296
9	3.159	108.8	121.8	38.7	111.959
10	3.900	109.1	122.0	38.3	112.000
11	4.719	108.6	121.6	38.1	113.319
12	5.615	108.7	120.9	38.1	114.315
13	6.590	108.8	120.9	38.2	115.390
14	7.643	107.9	121.3	37.9	115.543
15	8.774	107.9	121.4	37.8	116.674
16	9.983	108.3	121.2	37.6	118.283
17	11.270	108.2	121.7	37.6	119.470
18	12.635	108.2	122.0	37.9	120.835
19	14.078	108.0	121.8	38.2	122.078
20	15.598	108.0	121.5	37.6	123.598
21	17.197	108.6	121.3	37.9	125.797
22	18.874	108.5	121.5	38.0	127.374
23	20.629	108.5	121.8	38.3	129.129
24	22.462	108.4	121.7	38.3	130.862
25	24.372	108.2	120.9	38.7	132.572

ตารางที่ 3.8 (ต่อ)

Itest (%)	Pcu (W)	Pcore (W)	Rhv (Ω)	Rlv (mΩ)	Pt (W)
26	26.361	108.1	121.0	38.1	134.461
27	28.428	108.8	121.0	38.1	137.228
28	30.573	108.9	120.8	38.2	139.473
29	32.796	108.3	120.8	37.6	141.096
30	35.096	107.9	121.7	37.8	143.007
31	37.475	108.1	120.9	37.8	145.575
32	39.932	108.0	121.5	38.1	147.932
33	42.467	108.2	122.0	38.1	150.667
34	45.079	108.6	121.8	38.1	153.679
35	47.770	108.0	122.0	37.5	155.770
36	50.539	108.0	122.0	37.8	158.539
37	53.385	108.6	121.0	38.2	161.985
38	56.310	108.4	121.2	38.2	164.710
39	59.313	108.3	121.2	38.3	167.613
40	62.394	108.9	121.8	38.1	171.294
41	65.552	109.0	121.7	38.1	174.552
42	68.789	109.1	121.6	38.1	177.889
43	72.104	108.7	120.9	38.1	180.804
44	75.496	108.2	121.8	38.3	183.696
45	78.967	108.6	121.8	38.3	187.567
46	82.515	108.8	121.2	38.1	191.315
47	86.142	108.8	121.2	38.0	194.942
48	89.847	107.9	121.7	38.0	197.747
49	93.629	108.1	121.3	37.6	201.729
50	97.490	108.2	121.5	37.8	205.690

ตารางที่ 3.8 (ต่อ)

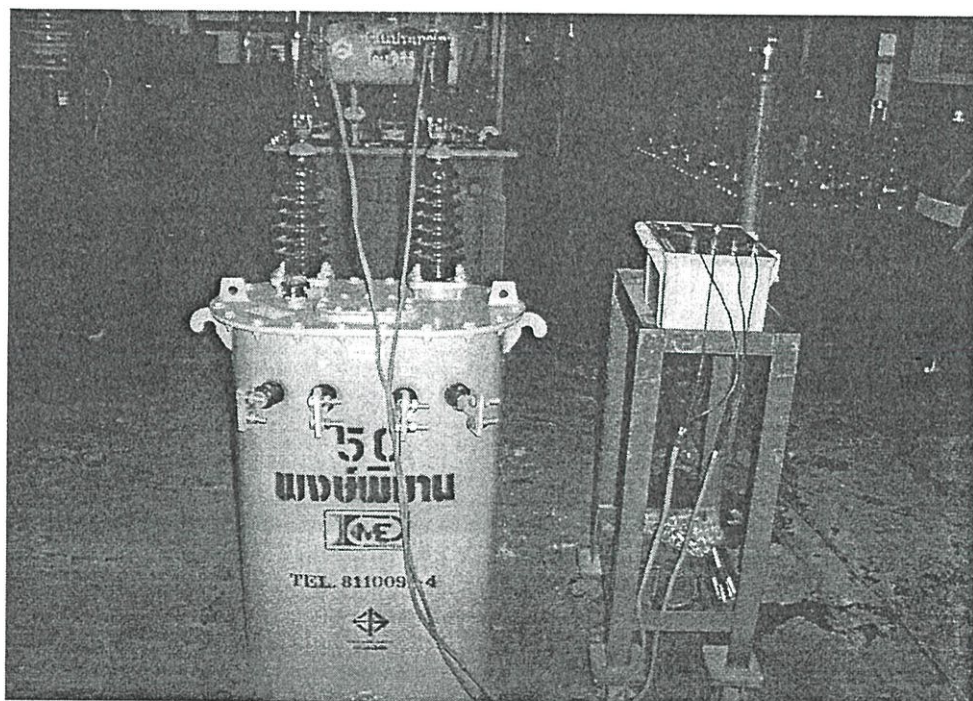
Itest (%)	Pcu (W)	Pcore (W)	Rhv (Ω)	Rlv (mΩ)	Pt (W)
51	101.428	108.6	122.0	38.1	210.028
52	105.445	107.9	121.5	38.6	213.345
53	109.540	108.5	121.5	37.9	218.040
54	113.712	108.9	120.7	37.5	222.612
55	117.963	108.7	120.5	38.1	226.663
56	122.291	108.3	120.4	38.0	230.591
57	126.698	108.6	121.2	38.3	235.298
58	131.182	108.8	121.5	38.1	239.982
59	135.745	108.8	121.8	38.7	244.545
60	140.385	108.1	122.0	38.3	248.485
61	145.104	108.6	121.6	38.1	253.704
62	149.900	108.7	120.9	38.1	258.600
63	154.775	108.8	120.9	38.2	263.575
64	159.727	107.9	121.3	37.9	267.627
65	164.758	107.9	121.4	37.8	272.658
66	169.866	108.3	121.2	37.6	278.166
67	175.053	108.2	121.7	37.6	283.253
68	180.317	108.2	122.0	37.9	288.517
69	185.660	108.0	121.8	38.2	293.660
70	191.080	108.0	121.5	37.6	299.080
71	196.579	108.6	121.3	37.9	305.179
72	202.155	108.5	121.5	38.0	310.655
73	207.809	108.5	121.8	38.3	316.309
74	213.542	108.4	121.7	38.3	321.942
75	219.352	108.2	120.9	38.7	327.552

ตารางที่ 3.8 (ต่อ)

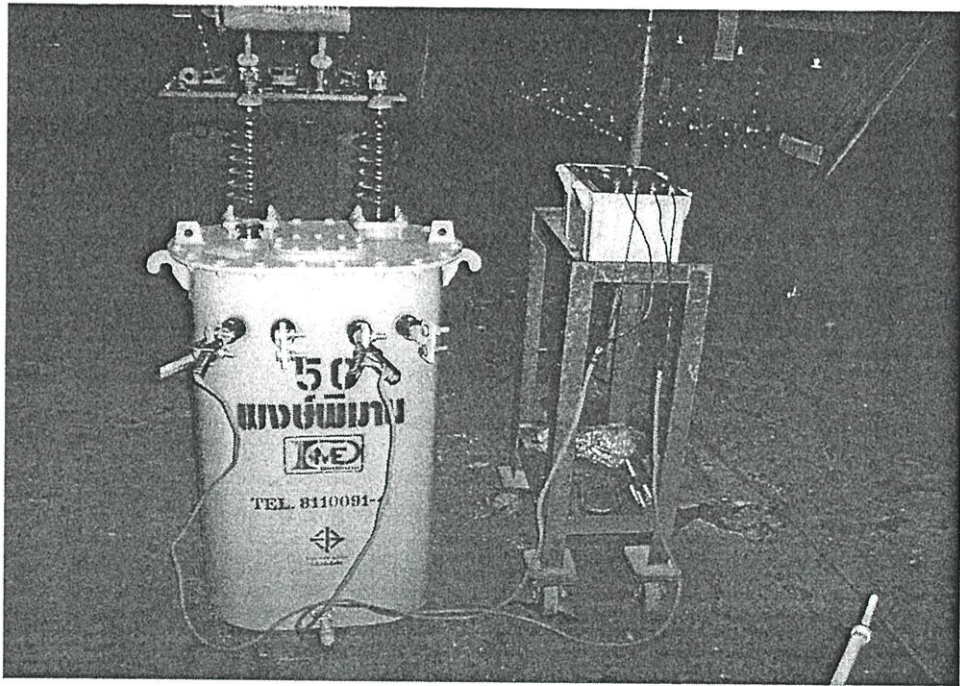
Itest (%)	Pcu (W)	Pcore (W)	Rhv (Ω)	Rlv (mΩ)	Pt (W)
76	225.241	108.1	121.0	38.1	333.341
77	231.207	108.8	121.0	38.1	340.007
78	237.251	108.9	120.8	38.2	346.151
79	243.374	108.3	120.8	37.6	351.674
80	249.574	107.9	121.7	37.8	357.485
81	255.853	108.1	120.9	37.8	363.953
82	262.209	108.0	121.5	38.1	370.209
83	268.643	108.2	122.0	38.1	376.843
84	275.156	108.6	121.8	38.1	383.756
85	281.746	108.0	122.0	37.5	389.746
86	288.414	108.0	122.0	37.8	396.414
87	295.160	108.6	121.0	38.2	403.760
88	301.985	108.4	121.2	38.2	410.385
89	308.887	108.3	121.2	38.3	417.187
90	315.867	108.9	121.8	38.1	424.767
91	322.926	109.0	121.7	38.1	431.926
92	330.062	109.1	121.6	38.1	439.162
93	337.276	108.7	120.9	38.1	445.976
94	344.568	108.2	121.8	38.3	452.768
95	351.939	108.6	121.8	38.3	460.539
96	359.387	108.8	121.2	38.1	468.187
97	366.913	108.8	121.2	38.0	475.713
98	374.517	107.9	121.7	38.0	482.417
99	382.199	108.1	121.3	37.6	490.299
100	389.960	108.2	121.5	37.8	498.160

3.5 การทดสอบหาค่าความสูญเสียในหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 50 kVA

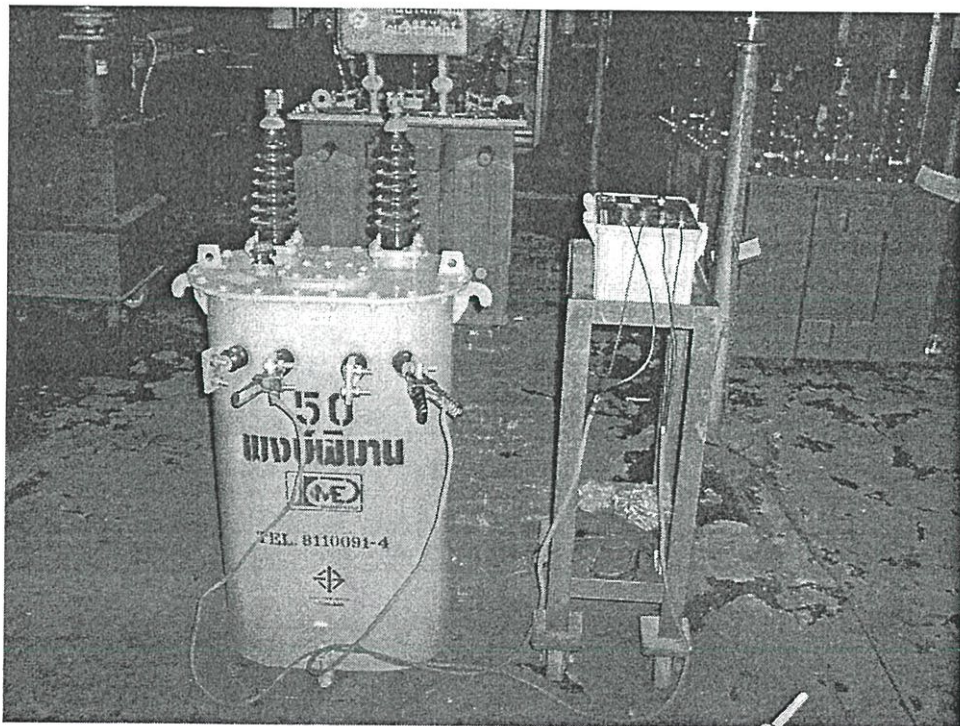
ในหัวข้อที่ 3.5 แสดงรูปการทดสอบหาค่าความสูญเสียของหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 50 kVA ภายในโรงงานผลิต กล่าวคือ การทดสอบหาค่าความสูญเสียในขดลวดทองแดง และค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก รวมทั้ง การวัดค่าความต้านทานในขดลวดทองแดงด้านปฐมภูมิ และด้านทุติยภูมิด้วย ดังแสดงในรูปต่อไปนี้



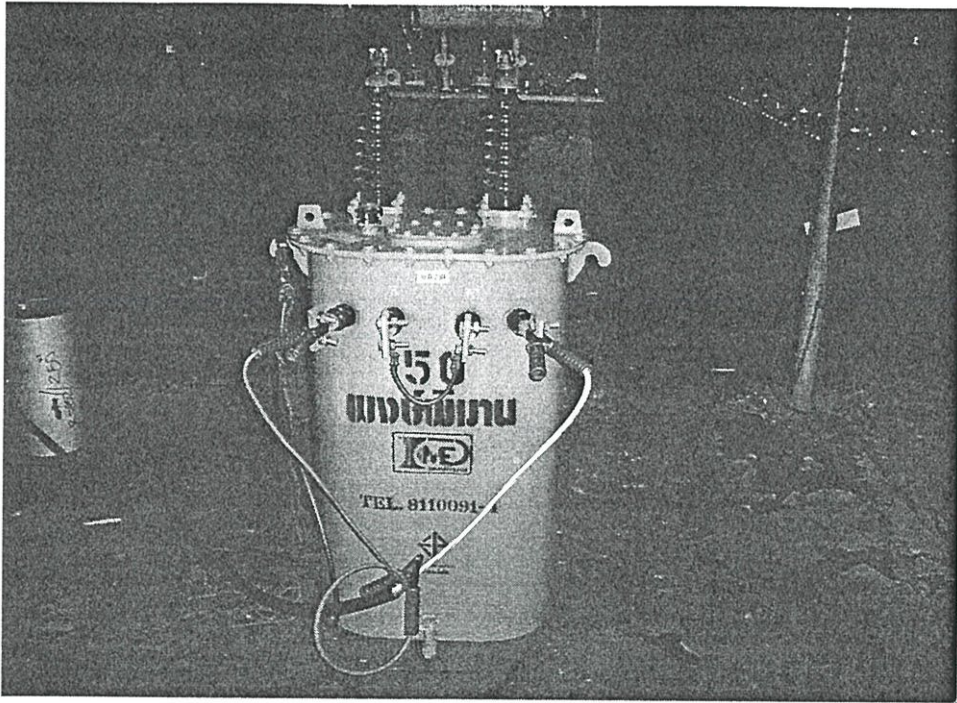
รูปที่ 3.9 แสดงการวัดค่าความต้านทานด้านขดลวดแรงสูง (High Voltage Winding) ของหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 50 kVA



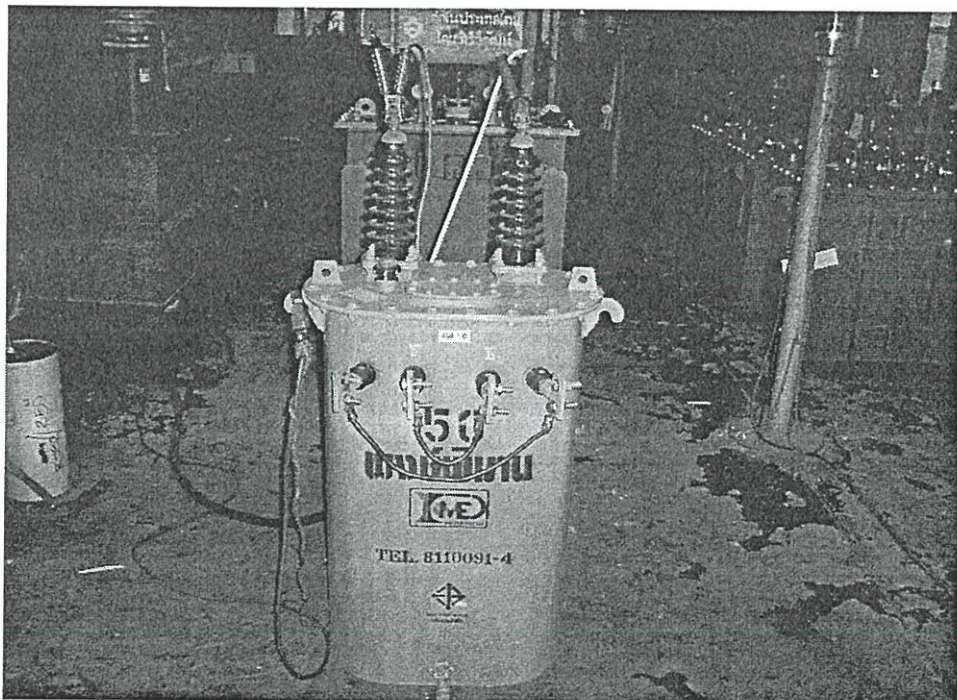
รูปที่ 3.10 แสดงการวัดค่าความต้านทานด้านขดลวดแรงต่ำ (Low Voltage Winding) Coil 1 ของหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 50 kVA



รูปที่ 3.11 แสดงการวัดค่าความต้านทานด้านขดลวดแรงต่ำ (Low Voltage Winding) Coil 2 ของหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 50 kVA



รูปที่ 3.12 แสดงการทดสอบแบบเปิดวงจร (Open Circuit Test) ของหม้อแปลงจำหน่าย
ขนาด 50 kVA



รูปที่ 3.13 แสดงการทดสอบแบบลัดวงจร (Short Circuit Test) ของหม้อแปลงจำหน่าย
ขนาด 50 kVA

ตารางที่ 3.9 ผลการทดสอบหาค่าความสูญเสียในหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 50 kVA

Ambient Temp 30 °c (Measurement)

Itest (%)	Pcu (W)	Pcore (W)	Rhv (Ω)	Rlv (mΩ)	Pt (W)
1	0.056	123.0	62.9	17.9	123.056
2	0.223	125.0	62.5	17.8	125.223
3	0.502	122.0	62.0	17.6	122.502
4	0.893	122.3	62.6	17.6	123.193
5	1.395	123.0	62.3	17.5	124.395
6	2.009	124.2	62.8	17.8	126.209
7	2.734	122.3	62.9	17.2	125.034
8	3.571	123.6	62.6	17.3	127.171
9	4.520	123.4	62.3	17.5	127.920
10	5.580	122.8	62.1	17.6	128.380
11	6.752	122.5	62.5	17.6	129.252
12	8.035	122.9	62.4	17.8	130.935
13	9.430	123.1	62.5	17.9	132.530
14	10.937	123.6	62.8	17.9	134.537
15	12.555	122.8	62.7	17.6	135.355
16	14.285	123.9	62.7	17.5	138.185
17	16.126	123.4	62.8	17.5	139.526
18	18.079	123.3	62.3	17.2	141.379
19	20.144	123.1	62.1	17.4	143.244
20	22.320	122.9	62.0	17.3	145.220
21	24.608	122.7	62.0	17.8	147.308
22	27.007	123.0	62.5	17.6	150.007
23	29.518	123.0	62.6	17.5	152.518
24	32.141	123.5	62.4	17.8	155.641
25	34.875	123.1	62.3	17.8	157.975

ตารางที่ 3.9 (ต่อ)

Itest (%)	Pcu (W)	Pcore (W)	Rhv (Ω)	Rlv (m Ω)	Pt (W)
26	37.721	123.7	62.3	17.6	161.421
27	40.678	124.0	62.3	17.6	164.678
28	43.747	123.8	62.9	17.5	167.547
29	46.928	123.4	62.8	17.1	170.328
30	50.220	122.5	62.8	17.2	172.720
31	53.624	123.8	62.1	17.8	177.424
32	57.139	123.9	62.9	17.8	181.039
33	60.766	124.0	62.4	17.6	184.766
34	64.505	123.7	62.5	17.0	188.205
35	68.355	122.9	62.6	17.1	191.255
36	72.317	122.7	62.4	17.3	195.017
37	76.390	123.6	62.6	17.6	199.990
38	80.575	123.4	62.3	17.5	203.975
39	84.872	123.1	62.1	17.4	207.972
40	89.280	124.0	62.1	17.3	213.280
41	93.800	123.2	62.0	17.8	217.000
42	98.431	122.9	62.8	17.8	221.331
43	103.174	122.5	62.8	17.9	225.674
44	108.029	123.1	62.3	17.6	231.129
45	112.995	123.6	62.7	17.5	236.595
46	118.073	123.5	62.9	17.2	241.573
47	123.262	123.4	62.9	17.4	246.662
48	128.563	123.0	62.1	17.4	251.563
49	133.976	122.5	62.6	17.6	256.476
50	139.500	123.0	62.6	17.5	262.500

ตารางที่ 3.9 (ต่อ)

Itest (%)	Pcu (W)	Pcore (W)	Rhv (Ω)	Rlv (mΩ)	Pt (W)
51	145.136	123.0	62.9	17.9	268.136
52	150.883	125.0	62.5	17.8	275.883
53	156.742	122.0	62.0	17.6	278.742
54	162.713	122.3	62.6	17.6	285.013
55	168.795	123.0	62.3	17.5	291.795
56	174.989	124.2	62.8	17.8	299.189
57	181.294	122.3	62.9	17.2	303.594
58	187.711	123.6	62.6	17.3	311.311
59	194.240	123.4	62.3	17.5	317.640
60	200.880	122.8	62.1	17.6	323.680
61	207.632	122.5	62.5	17.6	330.132
62	214.495	122.9	62.4	17.8	337.395
63	221.470	123.1	62.5	17.9	344.570
64	228.557	123.6	62.8	17.9	352.157
65	235.755	122.8	62.7	17.6	358.555
66	243.065	123.9	62.7	17.5	366.965
67	250.486	123.4	62.8	17.5	373.886
68	258.019	123.3	62.3	17.2	381.319
69	265.664	123.1	62.1	17.4	388.764
70	273.420	122.9	62.0	17.3	396.320
71	281.288	122.7	62.0	17.8	403.988
72	289.267	123.0	62.5	17.6	412.267
73	297.358	123.0	62.6	17.5	420.358
74	305.561	123.5	62.4	17.8	429.061
75	313.875	123.1	62.3	17.8	436.975

ตารางที่ 3.9 (ต่อ)

Itest (%)	Pcu (W)	Pcore (W)	Rhv (Ω)	Rlv (mΩ)	Pt (W)
76	322.301	123.7	62.3	17.6	446.001
77	330.838	124.0	62.3	17.6	454.838
78	339.487	123.8	62.9	17.5	463.287
79	348.248	123.4	62.8	17.1	471.648
80	357.120	122.5	62.8	17.2	479.620
81	366.104	123.8	62.1	17.8	489.904
82	375.199	123.9	62.9	17.8	499.099
83	384.406	124.0	62.4	17.6	508.406
84	393.725	123.7	62.5	17.0	517.425
85	403.155	122.9	62.6	17.1	526.055
86	412.697	122.7	62.4	17.3	535.397
87	422.350	123.6	62.6	17.6	545.950
88	432.115	123.4	62.3	17.5	555.515
89	441.992	123.1	62.1	17.4	565.092
90	451.980	124.0	62.1	17.3	575.980
91	462.080	123.2	62.0	17.8	585.280
92	472.291	122.9	62.8	17.8	595.191
93	482.614	122.5	62.8	17.9	605.114
94	493.049	123.1	62.3	17.6	616.149
95	503.595	123.6	62.7	17.5	627.195
96	514.253	123.5	62.9	17.2	637.753
97	525.022	123.4	62.9	17.4	648.422
98	535.903	123.0	62.1	17.4	658.903
99	546.896	122.5	62.6	17.6	669.396
100	558.000	123.0	62.6	17.5	681.000

3.6 การคำนวณค่าพารามิเตอร์ที่อุณหภูมิอื่นๆ ของหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 50 kVA

หม้อแปลงจำหน่ายขนาด 50 kVA แรงดันด้านแรงสูงและแรงต่ำ 22 kV-460/230 V

คิดด้านแรงสูง

$$\text{กระแสที่พิกัด, } I_{hv} = \frac{50kVA}{22kV} = 2.2727A$$

คิดด้านแรงต่ำ

$$\text{กระแสที่พิกัด, } I_{lv} = \frac{50kVA}{460V} = 108.6956A$$

ตัวอย่าง การคำนวณค่าพารามิเตอร์ที่อุณหภูมิ (T) = 35 °C , ที่พิกัดกระแส (I_{test}) = 20%

ค่าความต้านทานด้านขดลวดปฐมภูมิ (R_{hv}) ที่ 30 °C , I_{test} 20% = 62 Ω

ค่าความต้านทานด้านขดลวดทุติยภูมิ (R_{lv}) ที่ 30 °C , I_{test} 20% = 17.3 mΩ

การคำนวณค่าความต้านทานโดยใช้สมการ

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

เมื่อ R_a คือ ความต้านทานของขดลวดที่อุณหภูมิ θ_a ในสถานะคงตัว

R_r คือ ความต้านทานของขดลวดที่อุณหภูมิอ้างอิง θ_r

θ_a คือ อุณหภูมิในสถานะคงตัว

θ_r คือ อุณหภูมิที่อ้างอิง

ดังนั้น

$$R_{hv35^{\circ}C, 20\%} = \frac{235 + 35}{235 + 30} \times 62\Omega = 63.1698\Omega$$

$$R_{lv35^{\circ}C, 20\%} = \frac{235 + 35}{235 + 30} \times 17.3m\Omega = 17.6264m\Omega$$

การคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดทองแดง (Copper Losses) โดยใช้สมการ

$$P_{cu} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2$$

โดยที่ P_{cu} คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดทองแดง

- I_1 คือ กระแสของขดลวดแรงสูง
 R_1 คือ ความต้านทานของขดลวดแรงสูง
 I_2 คือ กระแสของขดลวดแรงต่ำ
 R_2 คือ ความต้านทานของขดลวดแรงต่ำ

$$\text{คิดค่ากระแส 20\% ของกระแสที่พิกัดด้านแรงสูง, } I_{lv20\%} = \frac{20 \times 2.2727}{100} = 0.4545 A$$

$$\text{คิดค่ากระแส 20\% ของกระแสที่พิกัดด้านแรงต่ำ, } I_{lv20\%} = \frac{20 \times 108.6956}{100} = 21.7391 A$$

ดังนั้น สามารถคำนวณค่า

$$P_{cu35^\circ c, I_{test}20\%} = (0.4545^2 \times 63.1698) + (21.7391^2 \times 17.6264 \times 10^{-3}) = 21.379 W$$

ซึ่งการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าขณะมีโหลด ($LoadLoss$) = $P_{cu} + StrayLoss$

โดยที่ $StrayLoss$ คือ การสูญเสียปลิกย่อย ซึ่งจะมีค่าประมาณ 2-5% ของค่าความสูญเสียในขดลวดทองแดง (P_{cu}) โดยรวมอยู่ในการทดสอบค่าความสูญเสียในขดลวดทองแดง ดังนั้น ค่าที่ได้จากการทดสอบในโรงงานผลิต จึงมีค่ามากกว่าการคำนวณค่าความสูญเสียในขดลวดทองแดงเพียงอย่างเดียว แต่เนื่องจาก $StrayLoss$ มีค่าน้อยสามารถตัดทิ้งไปได้

P_{core} คือ กำลังสูญเสียในแกนเหล็กหรือกำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลด

$$P_{core35^\circ c, I_{test}20\%} = 122.9 W$$

ดังนั้น

$$P_{t35^\circ c, I_{test}20\%} = P_{cu35^\circ c, I_{test}20\%} + P_{core35^\circ c, I_{test}20\%}$$

$$= 21.379 + 122.9 = 144.279 W \quad Ans.$$

P_t คือ ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมในหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 50 kVA

การคำนวณค่าพารามิเตอร์ที่อุณหภูมิ และค่าพิกัดกระแสอื่นๆ ก็จะคำนวณในลักษณะเดียวกัน

ตารางที่ 3.10 ผลการทดสอบหาค่าความสูญเสียในหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 50 kVA

Temp 35 °c (Calculation)

Itest (%)	Pcu (W)	Pcore (W)	Rhv (Ω)	Rlv (m Ω)	Pt (W)
1	0.057	123.0	64.1	18.2	123.057
2	0.227	125.0	63.7	18.1	125.227
3	0.512	122.0	63.2	17.9	122.512
4	0.910	122.3	63.8	17.9	123.210
5	1.421	123.0	63.5	17.8	124.421
6	2.047	124.2	64.0	18.1	126.247
7	2.786	122.3	64.1	17.5	125.086
8	3.639	123.6	63.8	17.6	127.239
9	4.605	123.4	63.5	17.8	128.005
10	5.685	122.8	63.3	17.9	128.485
11	6.879	122.5	63.7	17.9	129.379
12	8.187	122.9	63.6	18.1	131.087
13	9.608	123.1	63.7	18.2	132.708
14	11.144	123.6	64.0	18.2	134.744
15	12.792	122.8	63.9	17.9	135.592
16	14.555	123.9	63.9	17.8	138.455
17	16.431	123.4	64.0	17.8	139.831
18	18.421	123.3	63.5	17.5	141.721
19	20.525	123.1	63.3	17.7	143.625
20	22.742	122.9	63.2	17.6	145.642
21	25.073	122.7	63.2	18.1	147.773
22	27.518	123.0	63.7	17.9	150.518
23	30.076	123.0	63.8	17.8	153.076
24	32.748	123.5	63.6	18.1	156.248
25	35.534	123.1	63.5	18.1	158.634

ตารางที่ 3.10 (ต่อ)

Itest (%)	Pcu (W)	Pcore (W)	Rhv (Ω)	Rlv (m Ω)	Pt (W)
26	38.434	123.7	63.5	17.9	162.134
27	41.447	124.0	63.5	17.9	165.447
28	44.574	123.8	64.1	17.8	168.374
29	47.815	123.4	64.0	17.4	171.215
30	51.169	122.5	64.0	17.5	173.669
31	54.637	123.8	63.3	18.1	178.437
32	58.219	123.9	64.1	18.1	182.119
33	61.915	124.0	63.6	17.9	185.915
34	65.724	123.7	63.7	17.3	189.424
35	69.647	122.9	63.8	17.4	192.547
36	73.684	122.7	63.6	17.6	196.384
37	77.834	123.6	63.8	17.9	201.434
38	82.098	123.4	63.5	17.8	205.498
39	86.476	123.1	63.3	17.7	209.576
40	90.967	124.0	63.3	17.6	214.967
41	95.573	123.2	63.2	18.1	218.773
42	100.292	122.9	64.0	18.1	223.192
43	105.124	122.5	64.0	18.2	227.624
44	110.071	123.1	63.5	17.9	233.171
45	115.131	123.6	63.9	17.8	238.731
46	120.304	123.5	64.1	17.5	243.804
47	125.592	123.4	64.1	17.7	248.992
48	130.993	123.0	63.3	17.7	253.993
49	136.508	122.5	63.8	17.9	259.008
50	142.137	123.0	63.8	17.8	265.137

ตารางที่ 3.10 (ต่อ)

Itest (%)	Pcu (W)	Pcore (W)	Rhv (Ω)	Rlv (m Ω)	Pt (W)
51	147.879	123.0	64.1	18.2	270.879
52	153.735	125.0	63.7	18.1	278.735
53	159.705	122.0	63.2	17.9	281.705
54	165.788	122.3	63.8	17.9	288.088
55	171.985	123.0	63.5	17.8	294.985
56	178.296	124.2	64.0	18.1	302.496
57	184.721	122.3	64.1	17.5	307.021
58	191.259	123.6	63.8	17.6	314.859
59	197.911	123.4	63.5	17.8	321.311
60	204.677	122.8	63.3	17.9	327.477
61	211.556	122.5	63.7	17.9	334.056
62	218.549	122.9	63.6	18.1	341.449
63	225.656	123.1	63.7	18.2	348.756
64	232.877	123.6	64.0	18.2	356.477
65	240.211	122.8	63.9	17.9	363.011
66	247.659	123.9	63.9	17.8	371.559
67	255.220	123.4	64.0	17.8	378.620
68	262.896	123.3	63.5	17.5	386.196
69	270.685	123.1	63.3	17.7	393.785
70	278.588	122.9	63.2	17.6	401.488
71	286.604	122.7	63.2	18.1	409.304
72	294.734	123.0	63.7	17.9	417.734
73	302.978	123.0	63.8	17.8	425.978
74	311.336	123.5	63.6	18.1	434.836
75	319.807	123.1	63.5	18.1	442.907

ตารางที่ 3.10 (ต่อ)

Itest (%)	Pcu (W)	Pcore (W)	Rhv (Ω)	Rlv (m Ω)	Pt (W)
76	328.392	123.7	63.5	17.9	452.092
77	337.091	124.0	63.5	17.9	461.091
78	345.904	123.8	64.1	17.8	469.704
79	354.830	123.4	64.0	17.4	478.230
80	363.870	122.5	64.0	17.5	486.370
81	373.023	123.8	63.3	18.1	496.823
82	382.290	123.9	64.1	18.1	506.190
83	391.671	124.0	63.6	17.9	515.671
84	401.166	123.7	63.7	17.3	524.866
85	410.775	122.9	63.8	17.4	533.675
86	420.497	122.7	63.6	17.6	543.197
87	430.333	123.6	63.8	17.9	553.933
88	440.282	123.4	63.5	17.8	563.682
89	450.345	123.1	63.3	17.7	573.445
90	460.522	124.0	63.3	17.6	584.522
91	470.813	123.2	63.2	18.1	594.013
92	481.218	122.9	64.0	18.1	604.118
93	491.736	122.5	64.0	18.2	614.236
94	502.367	123.1	63.5	17.9	625.467
95	513.113	123.6	63.9	17.8	636.713
96	523.972	123.5	64.1	17.5	647.472
97	534.945	123.4	64.1	17.7	658.345
98	546.032	123.0	63.3	17.7	669.032
99	557.232	122.5	63.8	17.9	679.732
100	568.546	123.0	63.8	17.8	691.546

ตารางที่ 3.11 ผลการทดสอบหาค่าความสูญเสียในหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 50 kVA

Temp 40 °c (Calculation)

Itest (%)	Pcu (W)	Pcore (W)	Rhv (Ω)	Rlv (m Ω)	Pt (W)
1	0.058	123.0	65.3	18.6	123.058
2	0.232	125.0	64.9	18.5	125.232
3	0.521	122.0	64.3	18.3	122.521
4	0.927	122.3	65.0	18.3	123.227
5	1.448	123.0	64.7	18.2	124.448
6	2.085	124.2	65.2	18.5	126.285
7	2.838	122.3	65.3	17.9	125.138
8	3.706	123.6	65.0	18.0	127.306
9	4.691	123.4	64.7	18.2	128.091
10	5.791	122.8	64.4	18.3	128.591
11	7.007	122.5	64.9	18.3	129.507
12	8.339	122.9	64.8	18.5	131.239
13	9.787	123.1	64.9	18.6	132.887
14	11.350	123.6	65.2	18.6	134.950
15	13.030	122.8	65.1	18.3	135.830
16	14.825	123.9	65.1	18.2	138.725
17	16.736	123.4	65.2	18.2	140.136
18	18.763	123.3	64.7	17.9	142.063
19	20.905	123.1	64.4	18.1	144.005
20	23.164	122.9	64.3	18.0	146.064
21	25.538	122.7	64.3	18.5	148.238
22	28.028	123.0	64.9	18.3	151.028
23	30.634	123.0	65.0	18.2	153.634
24	33.356	123.5	64.8	18.5	156.856
25	36.193	123.1	64.7	18.5	159.293

ตารางที่ 3.11 (ต่อ)

Itest (%)	Pcu (W)	Pcore (W)	Rhv (Ω)	Rlv (m Ω)	Pt (W)
26	39.147	123.7	64.7	18.3	162.847
27	42.216	124.0	64.7	18.3	166.216
28	45.401	123.8	65.3	18.2	169.201
29	48.702	123.4	65.2	17.7	172.102
30	52.118	122.5	65.2	17.9	174.618
31	55.651	123.8	64.4	18.5	179.451
32	59.299	123.9	65.3	18.5	183.199
33	63.063	124.0	64.8	18.3	187.063
34	66.943	123.7	64.9	17.6	190.643
35	70.939	122.9	65.0	17.7	193.839
36	75.050	122.7	64.8	18.0	197.750
37	79.278	123.6	65.0	18.3	202.878
38	83.621	123.4	64.7	18.2	207.021
39	88.080	123.1	64.4	18.1	211.180
40	92.655	124.0	64.4	18.0	216.655
41	97.345	123.2	64.3	18.5	220.545
42	102.152	122.9	65.2	18.5	225.052
43	107.074	122.5	65.2	18.6	229.574
44	112.112	123.1	64.7	18.3	235.212
45	117.266	123.6	65.1	18.2	240.866
46	122.536	123.5	65.3	17.9	246.036
47	127.922	123.4	65.3	18.1	251.322
48	133.423	123.0	64.4	18.1	256.423
49	139.040	122.5	65.0	18.3	261.540
50	144.773	123.0	65.0	18.2	267.773

ตารางที่ 3.11 (ต่อ)

Itest (%)	Pcu (W)	Pcore (W)	Rhv (Ω)	Rlv (mΩ)	Pt (W)
51	150.622	123.0	65.3	18.6	273.622
52	156.587	125.0	64.9	18.5	281.587
53	162.667	122.0	64.3	18.3	284.667
54	168.863	122.3	65.0	18.3	291.163
55	175.175	123.0	64.7	18.2	298.175
56	181.603	124.2	65.2	18.5	305.803
57	188.147	122.3	65.3	17.9	310.447
58	194.807	123.6	65.0	18.0	318.407
59	201.582	123.4	64.7	18.2	324.982
60	208.473	122.8	64.4	18.3	331.273
61	215.480	122.5	64.9	18.3	337.980
62	222.603	122.9	64.8	18.5	345.503
63	229.842	123.1	64.9	18.6	352.942
64	237.196	123.6	65.2	18.6	360.796
65	244.667	122.8	65.1	18.3	367.467
66	252.253	123.9	65.1	18.2	376.153
67	259.955	123.4	65.2	18.2	383.355
68	267.772	123.3	64.7	17.9	391.072
69	275.706	123.1	64.4	18.1	398.806
70	283.755	122.9	64.3	18.0	406.655
71	291.920	122.7	64.3	18.5	414.620
72	300.202	123.0	64.9	18.3	423.202
73	308.598	123.0	65.0	18.2	431.598
74	317.111	123.5	64.8	18.5	440.611
75	325.739	123.1	64.7	18.5	448.839

ตารางที่ 3.11 (ต่อ)

Itest (%)	Pcu (W)	Pcore (W)	Rhv (Ω)	Rlv (mΩ)	Pt (W)
76	334.484	123.7	64.7	18.3	458.184
77	343.344	124.0	64.7	18.3	467.344
78	352.320	123.8	65.3	18.2	476.120
79	361.412	123.4	65.2	17.7	484.812
80	370.619	122.5	65.2	17.9	493.119
81	379.943	123.8	64.4	18.5	503.743
82	389.382	123.9	65.3	18.5	513.282
83	398.937	124.0	64.8	18.3	522.937
84	408.608	123.7	64.9	17.6	532.308
85	418.394	122.9	65.0	17.7	541.294
86	428.297	122.7	64.8	18.0	550.997
87	438.315	123.6	65.0	18.3	561.915
88	448.449	123.4	64.7	18.2	571.849
89	458.699	123.1	64.4	18.1	581.799
90	469.065	124.0	64.4	18.0	593.065
91	479.546	123.2	64.3	18.5	602.746
92	490.144	122.9	65.2	18.5	613.044
93	500.857	122.5	65.2	18.6	623.357
94	511.686	123.1	64.7	18.3	634.786
95	522.631	123.6	65.1	18.2	646.231
96	533.692	123.5	65.3	17.9	657.192
97	544.868	123.4	65.3	18.1	668.268
98	556.160	123.0	64.4	18.1	679.160
99	567.568	122.5	65.0	18.3	690.068
100	579.092	123.0	65.0	18.2	702.092

ตารางที่ 3.12 ผลการทดสอบหาค่าความสูญเสียในหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 50 kVA

Temp 45 °c (Calculation)

Itest (%)	Pcu (W)	Pcore (W)	Rhv (Ω)	Rlv (mΩ)	Pt (W)
1	0.059	123.0	66.5	18.9	123.059
2	0.236	125.0	66.0	18.8	125.236
3	0.531	122.0	65.5	18.6	122.531
4	0.943	122.3	66.1	18.6	123.243
5	1.474	123.0	65.8	18.5	124.474
6	2.123	124.2	66.4	18.8	126.323
7	2.889	122.3	66.5	18.2	125.189
8	3.774	123.6	66.1	18.3	127.374
9	4.776	123.4	65.8	18.5	128.176
10	5.896	122.8	65.6	18.6	128.696
11	7.135	122.5	66.0	18.6	129.635
12	8.491	122.9	65.9	18.8	131.391
13	9.965	123.1	66.0	18.9	133.065
14	11.557	123.6	66.4	18.9	135.157
15	13.267	122.8	66.3	18.6	136.067
16	15.095	123.9	66.3	18.5	138.995
17	17.041	123.4	66.4	18.5	140.441
18	19.104	123.3	65.8	18.2	142.404
19	21.286	123.1	65.6	18.4	144.386
20	23.586	122.9	65.5	18.3	146.486
21	26.003	122.7	65.5	18.8	148.703
22	28.539	123.0	66.0	18.6	151.539
23	31.192	123.0	66.1	18.5	154.192
24	33.963	123.5	65.9	18.8	157.463
25	36.852	123.1	65.8	18.8	159.952

ตารางที่ 3.12 (ต่อ)

Itest (%)	Pcu (W)	Pcore (W)	Rhv (Ω)	Rlv (mΩ)	Pt (W)
26	39.860	123.7	65.8	18.6	163.560
27	42.985	124.0	65.8	18.6	166.985
28	46.228	123.8	66.5	18.5	170.028
29	49.589	123.4	66.4	18.1	172.989
30	53.067	122.5	66.4	18.2	175.567
31	56.664	123.8	65.6	18.8	180.464
32	60.379	123.9	66.5	18.8	184.279
33	64.212	124.0	65.9	18.6	188.212
34	68.162	123.7	66.0	18.0	191.862
35	72.231	122.9	66.1	18.1	195.131
36	76.417	122.7	65.9	18.3	199.117
37	80.722	123.6	66.1	18.6	204.322
38	85.144	123.4	65.8	18.5	208.544
39	89.684	123.1	65.6	18.4	212.784
40	94.342	124.0	65.6	18.3	218.342
41	99.118	123.2	65.5	18.8	222.318
42	104.012	122.9	66.4	18.8	226.912
43	109.024	122.5	66.4	18.9	231.524
44	114.154	123.1	65.8	18.6	237.254
45	119.402	123.6	66.3	18.5	243.002
46	124.768	123.5	66.5	18.2	248.268
47	130.251	123.4	66.5	18.4	253.651
48	135.853	123.0	65.6	18.4	258.853
49	141.572	122.5	66.1	18.6	264.072
50	147.410	123.0	66.1	18.5	270.410

ตารางที่ 3.12 (ต่อ)

Itest (%)	Pcu (W)	Pcore (W)	Rhv (Ω)	Rlv (mΩ)	Pt (W)
51	153.365	123.0	66.5	18.9	276.365
52	159.438	125.0	66.0	18.8	284.438
53	165.629	122.0	65.5	18.6	287.629
54	171.939	122.3	66.1	18.6	294.239
55	178.366	123.0	65.8	18.5	301.366
56	184.911	124.2	66.4	18.8	309.111
57	191.574	122.3	66.5	18.2	313.874
58	198.354	123.6	66.1	18.3	321.954
59	205.253	123.4	65.8	18.5	328.653
60	212.270	122.8	65.6	18.6	335.070
61	219.405	122.5	66.0	18.6	341.905
62	226.657	122.9	65.9	18.8	349.557
63	234.028	123.1	66.0	18.9	357.128
64	241.516	123.6	66.4	18.9	365.116
65	249.122	122.8	66.3	18.6	371.922
66	256.847	123.9	66.3	18.5	380.747
67	264.689	123.4	66.4	18.5	388.089
68	272.649	123.3	65.8	18.2	395.949
69	280.727	123.1	65.6	18.4	403.827
70	288.923	122.9	65.5	18.3	411.823
71	297.237	122.7	65.5	18.8	419.937
72	305.669	123.0	66.0	18.6	428.669
73	314.218	123.0	66.1	18.5	437.218
74	322.886	123.5	65.9	18.8	446.386
75	331.672	123.1	65.8	18.8	454.772

ตารางที่ 3.12 (ต่อ)

Itest (%)	Pcu (W)	Pcore (W)	Rhv (Ω)	Rlv (mΩ)	Pt (W)
76	340.575	123.7	65.8	18.6	464.275
77	349.597	124.0	65.8	18.6	473.597
78	358.736	123.8	66.5	18.5	482.536
79	367.993	123.4	66.4	18.1	491.393
80	377.369	122.5	66.4	18.2	499.869
81	386.862	123.8	65.6	18.8	510.662
82	396.473	123.9	66.5	18.8	520.373
83	406.202	124.0	65.9	18.6	530.202
84	416.049	123.7	66.0	18.0	539.749
85	426.014	122.9	66.1	18.1	548.914
86	436.097	122.7	65.9	18.3	558.797
87	446.297	123.6	66.1	18.6	569.897
88	456.616	123.4	65.8	18.5	580.016
89	467.053	123.1	65.6	18.4	590.153
90	477.607	124.0	65.6	18.3	601.607
91	488.280	123.2	65.5	18.8	611.480
92	499.070	122.9	66.4	18.8	621.970
93	509.978	122.5	66.4	18.9	632.478
94	521.005	123.1	65.8	18.6	644.105
95	532.149	123.6	66.3	18.5	655.749
96	543.411	123.5	66.5	18.2	666.911
97	554.791	123.4	66.5	18.4	678.191
98	566.289	123.0	65.6	18.4	689.289
99	577.905	122.5	66.1	18.6	700.405
100	589.639	123.0	66.1	18.5	712.639

ตารางที่ 3.13 ผลการทดสอบหาค่าความสูญเสียในหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 50 kVA

Temp 50 °c (Calculation)

Itest (%)	Pcu (W)	Pcore (W)	Rhv (Ω)	Rlv (mΩ)	Pt (W)
1	0.060	123.0	67.6	19.3	123.060
2	0.240	125.0	67.2	19.1	125.240
3	0.540	122.0	66.7	18.9	122.540
4	0.960	122.3	67.3	18.9	123.260
5	1.500	123.0	67.0	18.8	124.500
6	0.000	124.2	67.5	19.1	124.200
7	2.941	122.3	67.7	18.5	125.241
8	3.841	123.6	67.3	18.6	127.441
9	4.861	123.4	67.0	18.8	128.261
10	6.002	122.8	66.8	18.9	128.802
11	7.262	122.5	67.2	18.9	129.762
12	8.643	122.9	67.1	19.1	131.543
13	10.143	123.1	67.2	19.3	133.243
14	11.764	123.6	67.5	19.3	135.364
15	13.504	122.8	67.4	18.9	136.304
16	15.365	123.9	67.4	18.8	139.265
17	17.345	123.4	67.5	18.8	140.745
18	19.446	123.3	67.0	18.5	142.746
19	21.667	123.1	66.8	18.7	144.767
20	24.007	122.9	66.7	18.6	146.907
21	26.468	122.7	66.7	19.1	149.168
22	29.049	123.0	67.2	18.9	152.049
23	31.750	123.0	67.3	18.8	154.750
24	34.571	123.5	67.1	19.1	158.071
25	37.512	123.1	67.0	19.1	160.612

ตารางที่ 3.13 (ต่อ)

Itest (%)	Pcu (W)	Pcore (W)	Rhv (Ω)	Rlv (mΩ)	Pt (W)
26	40.572	123.7	67.0	18.9	164.272
27	43.753	124.0	67.0	18.9	167.753
28	47.054	123.8	67.7	18.8	170.854
29	50.476	123.4	67.5	18.4	173.876
30	54.017	122.5	67.5	18.5	176.517
31	57.678	123.8	66.8	19.1	181.478
32	61.459	123.9	67.7	19.1	185.359
33	65.360	124.0	67.1	18.9	189.360
34	69.381	123.7	67.2	18.3	193.081
35	73.523	122.9	67.3	18.4	196.423
36	77.784	122.7	67.1	18.6	200.484
37	82.165	123.6	67.3	18.9	205.765
38	86.667	123.4	67.0	18.8	210.067
39	91.288	123.1	66.8	18.7	214.388
40	96.030	124.0	66.8	18.6	220.030
41	100.891	123.2	66.7	19.1	224.091
42	105.873	122.9	67.5	19.1	228.773
43	110.974	122.5	67.5	19.3	233.474
44	116.196	123.1	67.0	18.9	239.296
45	121.537	123.6	67.4	18.8	245.137
46	126.999	123.5	67.7	18.5	250.499
47	132.581	123.4	67.7	18.7	255.981
48	138.283	123.0	66.8	18.7	261.283
49	144.104	122.5	67.3	18.9	266.604
50	150.046	123.0	67.3	18.8	273.046

ตารางที่ 3.13 (ต่อ)

Itest (%)	Pcu (W)	Pcore (W)	Rhv (Ω)	Rlv (m Ω)	Pt (W)
51	156.108	123.0	67.6	19.3	279.108
52	162.290	125.0	67.2	19.1	287.290
53	168.592	122.0	66.7	18.9	290.592
54	175.014	122.3	67.3	18.9	297.314
55	181.556	123.0	67.0	18.8	304.556
56	188.218	124.2	67.5	19.1	312.418
57	195.000	122.3	67.7	18.5	317.300
58	201.902	123.6	67.3	18.6	325.502
59	208.924	123.4	67.0	18.8	332.324
60	216.067	122.8	66.8	18.9	338.867
61	223.329	122.5	67.2	18.9	345.829
62	230.711	122.9	67.1	19.1	353.611
63	238.213	123.1	67.2	19.3	361.313
64	245.836	123.6	67.5	19.3	369.436
65	253.578	122.8	67.4	18.9	376.378
66	261.440	123.9	67.4	18.8	385.340
67	269.423	123.4	67.5	18.8	392.823
68	277.525	123.3	67.0	18.5	400.825
69	285.748	123.1	66.8	18.7	408.848
70	294.091	122.9	66.7	18.6	416.991
71	302.553	122.7	66.7	19.1	425.253
72	311.136	123.0	67.2	18.9	434.136
73	319.838	123.0	67.3	18.8	442.838
74	328.661	123.5	67.1	19.1	452.161
75	337.604	123.1	67.0	19.1	460.704

ตารางที่ 3.13 (ต่อ)

Itest (%)	Pcu (W)	Pcore (W)	Rhv (Ω)	Rlv (mΩ)	Pt (W)
76	346.667	123.7	67.0	18.9	470.367
77	355.850	124.0	67.0	18.9	479.850
78	365.152	123.8	67.7	18.8	488.952
79	374.575	123.4	67.5	18.4	497.975
80	384.118	122.5	67.5	18.5	506.618
81	393.781	123.8	66.8	19.1	517.581
82	403.564	123.9	67.7	19.1	527.464
83	413.467	124.0	67.1	18.9	537.467
84	423.490	123.7	67.2	18.3	547.190
85	433.634	122.9	67.3	18.4	556.534
86	443.897	122.7	67.1	18.6	566.597
87	454.280	123.6	67.3	18.9	577.880
88	464.783	123.4	67.0	18.8	588.183
89	475.406	123.1	66.8	18.7	598.506
90	486.150	124.0	66.8	18.6	610.150
91	497.013	123.2	66.7	19.1	620.213
92	507.996	122.9	67.5	19.1	630.896
93	519.100	122.5	67.5	19.3	641.600
94	530.323	123.1	67.0	18.9	653.423
95	541.667	123.6	67.4	18.8	665.267
96	553.130	123.5	67.7	18.5	676.630
97	564.714	123.4	67.7	18.7	688.114
98	576.417	123.0	66.8	18.7	699.417
99	588.241	122.5	67.3	18.9	710.741
100	600.185	123.0	67.3	18.8	723.185

ตารางที่ 3.14 ผลการทดสอบหาค่าความสูญเสียในหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 50 kVA

Temp 55 °c (Calculation)

Itest (%)	Pcu (W)	Pcore (W)	Rhv (Ω)	Rlv (mΩ)	Pt (W)
1	0.061	123.0	68.8	19.6	123.061
2	0.244	125.0	68.4	19.5	125.244
3	0.550	122.0	67.9	19.3	122.550
4	0.977	122.3	68.5	19.3	123.277
5	1.527	123.0	68.2	19.2	124.527
6	2.199	124.2	68.7	19.5	126.399
7	2.993	122.3	68.8	18.8	125.293
8	3.909	123.6	68.5	18.9	127.509
9	4.947	123.4	68.2	19.2	128.347
10	6.107	122.8	68.0	19.3	128.907
11	7.390	122.5	68.4	19.3	129.890
12	8.795	122.9	68.3	19.5	131.695
13	10.321	123.1	68.4	19.6	133.421
14	11.970	123.6	68.7	19.6	135.570
15	13.741	122.8	68.6	19.3	136.541
16	15.635	123.9	68.6	19.2	139.535
17	17.650	123.4	68.7	19.2	141.050
18	19.788	123.3	68.2	18.8	143.088
19	22.047	123.1	68.0	19.0	145.147
20	24.429	122.9	67.9	18.9	147.329
21	26.933	122.7	67.9	19.5	149.633
22	29.559	123.0	68.4	19.3	152.559
23	32.308	123.0	68.5	19.2	155.308
24	35.178	123.5	68.3	19.5	158.678
25	38.171	123.1	68.2	19.5	161.271

ตารางที่ 3.14 (ต่อ)

Itest (%)	Pcu (W)	Pcore (W)	Rhv (Ω)	Rlv (mΩ)	Pt (W)
26	41.285	123.7	68.2	19.3	164.985
27	44.522	124.0	68.2	19.3	168.522
28	47.881	123.8	68.8	19.2	171.681
29	51.362	123.4	68.7	18.7	174.762
30	54.966	122.5	68.7	18.8	177.466
31	58.691	123.8	68.0	19.5	182.491
32	62.539	123.9	68.8	19.5	186.439
33	66.509	124.0	68.3	19.3	190.509
34	70.601	123.7	68.4	18.6	194.301
35	74.815	122.9	68.5	18.7	197.715
36	79.151	122.7	68.3	18.9	201.851
37	83.609	123.6	68.5	19.3	207.209
38	88.190	123.4	68.2	19.2	211.590
39	92.892	123.1	68.0	19.0	215.992
40	97.717	124.0	68.0	18.9	221.717
41	102.664	123.2	67.9	19.5	225.864
42	107.733	122.9	68.7	19.5	230.633
43	112.924	122.5	68.7	19.6	235.424
44	118.238	123.1	68.2	19.3	241.338
45	123.673	123.6	68.6	19.2	247.273
46	129.231	123.5	68.8	18.8	252.731
47	134.910	123.4	68.8	19.0	258.310
48	140.712	123.0	68.0	19.0	263.712
49	146.637	122.5	68.5	19.3	269.137
50	152.683	123.0	68.5	19.2	275.683

ตารางที่ 3.14 (ต่อ)

Itest (%)	Pcu (W)	Pcore (W)	Rhv (Ω)	Rlv (m Ω)	Pt (W)
51	158.851	123.0	68.8	19.6	281.851
52	165.142	125.0	68.4	19.5	290.142
53	171.554	122.0	67.9	19.3	293.554
54	178.089	122.3	68.5	19.3	300.389
55	184.746	123.0	68.2	19.2	307.746
56	191.525	124.2	68.7	19.5	315.725
57	198.427	122.3	68.8	18.8	320.727
58	205.450	123.6	68.5	18.9	329.050
59	212.595	123.4	68.2	19.2	335.995
60	219.863	122.8	68.0	19.3	342.663
61	227.253	122.5	68.4	19.3	349.753
62	234.765	122.9	68.3	19.5	357.665
63	242.399	123.1	68.4	19.6	365.499
64	250.155	123.6	68.7	19.6	373.755
65	258.034	122.8	68.6	19.3	380.834
66	266.034	123.9	68.6	19.2	389.934
67	274.157	123.4	68.7	19.2	397.557
68	282.402	123.3	68.2	18.8	405.702
69	290.769	123.1	68.0	19.0	413.869
70	299.258	122.9	67.9	18.9	422.158
71	307.869	122.7	67.9	19.5	430.569
72	316.603	123.0	68.4	19.3	439.603
73	325.459	123.0	68.5	19.2	448.459
74	334.436	123.5	68.3	19.5	457.936
75	343.536	123.1	68.2	19.5	466.636

ตารางที่ 3.14 (ต่อ)

Itest (%)	Pcu (W)	Pcore (W)	Rhv (Ω)	Rlv (mΩ)	Pt (W)
76	352.758	123.7	68.2	19.3	476.458
77	362.102	124.0	68.2	19.3	486.102
78	371.569	123.8	68.8	19.2	495.369
79	381.157	123.4	68.7	18.7	504.557
80	390.868	122.5	68.7	18.8	513.368
81	400.701	123.8	68.0	19.5	524.501
82	410.656	123.9	68.8	19.5	534.556
83	420.733	124.0	68.3	19.3	544.733
84	430.932	123.7	68.4	18.6	554.632
85	441.253	122.9	68.5	18.7	564.153
86	451.697	122.7	68.3	18.9	574.397
87	462.262	123.6	68.5	19.3	585.862
88	472.950	123.4	68.2	19.2	596.350
89	483.760	123.1	68.0	19.0	606.860
90	494.692	124.0	68.0	18.9	618.692
91	505.746	123.2	67.9	19.5	628.946
92	516.923	122.9	68.7	19.5	639.823
93	528.221	122.5	68.7	19.6	650.721
94	539.642	123.1	68.2	19.3	662.742
95	551.185	123.6	68.6	19.2	674.785
96	562.850	123.5	68.8	18.8	686.350
97	574.637	123.4	68.8	19.0	698.037
98	586.546	123.0	68.0	19.0	709.546
99	598.577	122.5	68.5	19.3	721.077
100	610.731	123.0	68.5	19.2	733.731

ตารางที่ 3.15 ผลการทดสอบหาค่าความสูญเสียในหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 50 kVA

Temp 60 °c (Calculation)

I_{test} (%)	P_{cu} (W)	P_{core} (W)	R_{hv} (Ω)	R_{lv} (mΩ)	P_t (W)
1	0.062	123.0	70.0	19.9	123.062
2	0.249	125.0	69.6	19.8	125.249
3	0.559	122.0	69.0	19.6	122.559
4	0.994	122.3	69.7	19.6	123.294
5	1.553	123.0	69.4	19.5	124.553
6	2.237	124.2	69.9	19.8	126.437
7	3.044	122.3	70.0	19.2	125.344
8	3.976	123.6	69.7	19.3	127.576
9	5.032	123.4	69.4	19.5	128.432
10	6.213	122.8	69.1	19.6	129.013
11	7.517	122.5	69.6	19.6	130.017
12	8.946	122.9	69.5	19.8	131.846
13	10.500	123.1	69.6	19.9	133.600
14	12.177	123.6	69.9	19.9	135.777
15	13.979	122.8	69.8	19.6	136.779
16	15.905	123.9	69.8	19.5	139.805
17	17.955	123.4	69.9	19.5	141.355
18	20.129	123.3	69.4	19.2	143.429
19	22.428	123.1	69.1	19.4	145.528
20	24.851	122.9	69.0	19.3	147.751
21	27.398	122.7	69.0	19.8	150.098
22	30.070	123.0	69.6	19.6	153.070
23	32.866	123.0	69.7	19.5	155.866
24	35.786	123.5	69.5	19.8	159.286
25	38.830	123.1	69.4	19.8	161.930

ตารางที่ 3.15 (ต่อ)

Itest (%)	Pcu (W)	Pcore (W)	Rhv (Ω)	Rlv (mΩ)	Pt (W)
26	41.998	123.7	69.4	19.6	165.698
27	45.291	124.0	69.4	19.6	169.291
28	48.708	123.8	70.0	19.5	172.508
29	52.249	123.4	69.9	19.0	175.649
30	55.915	122.5	69.9	19.2	178.415
31	59.705	123.8	69.1	19.8	183.505
32	63.619	123.9	70.0	19.8	187.519
33	67.657	124.0	69.5	19.6	191.657
34	71.820	123.7	69.6	18.9	195.520
35	76.106	122.9	69.7	19.0	199.006
36	80.518	122.7	69.5	19.3	203.218
37	85.053	123.6	69.7	19.6	208.653
38	89.712	123.4	69.4	19.5	213.112
39	94.496	123.1	69.1	19.4	217.596
40	99.404	124.0	69.1	19.3	223.404
41	104.437	123.2	69.0	19.8	227.637
42	109.593	122.9	69.9	19.8	232.493
43	114.874	122.5	69.9	19.9	237.374
44	120.279	123.1	69.4	19.6	243.379
45	125.809	123.6	69.8	19.5	249.409
46	131.462	123.5	70.0	19.2	254.962
47	137.240	123.4	70.0	19.4	260.640
48	143.142	123.0	69.1	19.4	266.142
49	149.169	122.5	69.7	19.6	271.669
50	155.319	123.0	69.7	19.5	278.319

ตารางที่ 3.15 (ต่อ)

Itest (%)	Pcu (W)	Pcore (W)	Rhv (Ω)	Rlv (mΩ)	Pt (W)
51	161.594	123.0	70.0	19.9	284.594
52	167.993	125.0	69.6	19.8	292.993
53	174.517	122.0	69.0	19.6	296.517
54	181.164	122.3	69.7	19.6	303.464
55	187.936	123.0	69.4	19.5	310.936
56	194.833	124.2	69.9	19.8	319.033
57	201.853	122.3	70.0	19.2	324.153
58	208.998	123.6	69.7	19.3	332.598
59	216.267	123.4	69.4	19.5	339.667
60	223.660	122.8	69.1	19.6	346.460
61	231.177	122.5	69.6	19.6	353.677
62	238.819	122.9	69.5	19.8	361.719
63	246.585	123.1	69.6	19.9	369.685
64	254.475	123.6	69.9	19.9	378.075
65	262.490	122.8	69.8	19.6	385.290
66	270.628	123.9	69.8	19.5	394.528
67	278.891	123.4	69.9	19.5	402.291
68	287.279	123.3	69.4	19.2	410.579
69	295.790	123.1	69.1	19.4	418.890
70	304.426	122.9	69.0	19.3	427.326
71	313.186	122.7	69.0	19.8	435.886
72	322.070	123.0	69.6	19.6	445.070
73	331.079	123.0	69.7	19.5	454.079
74	340.211	123.5	69.5	19.8	463.711
75	349.468	123.1	69.4	19.8	472.568

ตารางที่ 3.15 (ต่อ)

Itest (%)	Pcu (W)	Pcore (W)	Rhv (Ω)	Rlv (m Ω)	Pt (W)
76	358.850	123.7	69.4	19.6	482.550
77	368.355	124.0	69.4	19.6	492.355
78	377.985	123.8	70.0	19.5	501.785
79	387.739	123.4	69.9	19.0	511.139
80	397.617	122.5	69.9	19.2	520.117
81	407.620	123.8	69.1	19.8	531.420
82	417.747	123.9	70.0	19.8	541.647
83	427.998	124.0	69.5	19.6	551.998
84	438.373	123.7	69.6	18.9	562.073
85	448.873	122.9	69.7	19.0	571.773
86	459.497	122.7	69.5	19.3	582.197
87	470.245	123.6	69.7	19.6	593.845
88	481.117	123.4	69.4	19.5	604.517
89	492.114	123.1	69.1	19.4	615.214
90	503.235	124.0	69.1	19.3	627.235
91	514.480	123.2	69.0	19.8	637.680
92	525.849	122.9	69.9	19.8	648.749
93	537.343	122.5	69.9	19.9	659.843
94	548.961	123.1	69.4	19.6	672.061
95	560.703	123.6	69.8	19.5	684.303
96	572.569	123.5	70.0	19.2	696.069
97	584.560	123.4	70.0	19.4	707.960
98	596.675	123.0	69.1	19.4	719.675
99	608.914	122.5	69.7	19.6	731.414
100	621.277	123.0	69.7	19.5	744.277

ตารางที่ 3.16 ผลการทดสอบหาค่าความสูญเสียในหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 50 kVA

Temp 65 °c (Calculation)

Itest (%)	Pcu (W)	Pcore (W)	Rhv (Ω)	Rlv (mΩ)	Pt (W)
1	0.063	123.0	71.2	20.3	123.063
2	0.253	125.0	70.8	20.2	125.253
3	0.569	122.0	70.2	19.9	122.569
4	1.011	122.3	70.9	19.9	123.311
5	1.580	123.0	70.5	19.8	124.580
6	2.275	124.2	71.1	20.2	126.475
7	3.096	122.3	71.2	19.5	125.396
8	4.044	123.6	70.9	19.6	127.644
9	5.118	123.4	70.5	19.8	128.518
10	6.318	122.8	70.3	19.9	129.118
11	7.645	122.5	70.8	19.9	130.145
12	9.098	122.9	70.7	20.2	131.998
13	10.678	123.1	70.8	20.3	133.778
14	12.384	123.6	71.1	20.3	135.984
15	14.216	122.8	71.0	19.9	137.016
16	16.175	123.9	71.0	19.8	140.075
17	18.260	123.4	71.1	19.8	141.660
18	20.471	123.3	70.5	19.5	143.771
19	22.809	123.1	70.3	19.7	145.909
20	25.273	122.9	70.2	19.6	148.173
21	27.863	122.7	70.2	20.2	150.563
22	30.580	123.0	70.8	19.9	153.580
23	33.423	123.0	70.9	19.8	156.423
24	36.393	123.5	70.7	20.2	159.893
25	39.489	123.1	70.5	20.2	162.589

ตารางที่ 3.16 (ต่อ)

Itest (%)	Pcu (W)	Pcore (W)	Rhv (Ω)	Rlv (mΩ)	Pt (W)
26	42.711	123.7	70.5	19.9	166.411
27	46.060	124.0	70.5	19.9	170.060
28	49.535	123.8	71.2	19.8	173.335
29	53.136	123.4	71.1	19.4	176.536
30	56.864	122.5	71.1	19.5	179.364
31	60.718	123.8	70.3	20.2	184.518
32	64.699	123.9	71.2	20.2	188.599
33	68.806	124.0	70.7	19.9	192.806
34	73.039	123.7	70.8	19.2	196.739
35	77.398	122.9	70.9	19.4	200.298
36	81.884	122.7	70.7	19.6	204.584
37	86.497	123.6	70.9	19.9	210.097
38	91.235	123.4	70.5	19.8	214.635
39	96.100	123.1	70.3	19.7	219.200
40	101.092	124.0	70.3	19.6	225.092
41	106.210	123.2	70.2	20.2	229.410
42	111.454	122.9	71.1	20.2	234.354
43	116.824	122.5	71.1	20.3	239.324
44	122.321	123.1	70.5	19.9	245.421
45	127.944	123.6	71.0	19.8	251.544
46	133.694	123.5	71.2	19.5	257.194
47	139.570	123.4	71.2	19.7	262.970
48	145.572	123.0	70.3	19.7	268.572
49	151.701	122.5	70.9	19.9	274.201
50	157.956	123.0	70.9	19.8	280.956

ตารางที่ 3.16 (ต่อ)

Itest (%)	Pcu (W)	Pcore (W)	Rhv (Ω)	Rlv (m Ω)	Pt (W)
51	164.337	123.0	71.2	20.3	287.337
52	170.845	125.0	70.8	20.2	295.845
53	177.479	122.0	70.2	19.9	299.479
54	184.240	122.3	70.9	19.9	306.540
55	191.127	123.0	70.5	19.8	314.127
56	198.140	124.2	71.1	20.2	322.340
57	205.279	122.3	71.2	19.5	327.579
58	212.545	123.6	70.9	19.6	336.145
59	219.938	123.4	70.5	19.8	343.338
60	227.456	122.8	70.3	19.9	350.256
61	235.101	122.5	70.8	19.9	357.601
62	242.873	122.9	70.7	20.2	365.773
63	250.771	123.1	70.8	20.3	373.871
64	258.795	123.6	71.1	20.3	382.395
65	266.945	122.8	71.0	19.9	389.745
66	275.222	123.9	71.0	19.8	399.122
67	283.626	123.4	71.1	19.8	407.026
68	292.155	123.3	70.5	19.5	415.455
69	300.811	123.1	70.3	19.7	423.911
70	309.593	122.9	70.2	19.6	432.493
71	318.502	122.7	70.2	20.2	441.202
72	327.537	123.0	70.8	19.9	450.537
73	336.699	123.0	70.9	19.8	459.699
74	345.986	123.5	70.7	20.2	469.486
75	355.401	123.1	70.5	20.2	478.501

ตารางที่ 3.16 (ต่อ)

Itest (%)	Pcu (W)	Pcore (W)	Rhv (Ω)	Rlv (mΩ)	Pt (W)
76	364.941	123.7	70.5	19.9	488.641
77	374.608	124.0	70.5	19.9	498.608
78	384.401	123.8	71.2	19.8	508.201
79	394.321	123.4	71.1	19.4	517.721
80	404.367	122.5	71.1	19.5	526.867
81	414.539	123.8	70.3	20.2	538.339
82	424.838	123.9	71.2	20.2	548.738
83	435.263	124.0	70.7	19.9	559.263
84	445.815	123.7	70.8	19.2	569.515
85	456.492	122.9	70.9	19.4	579.392
86	467.297	122.7	70.7	19.6	589.997
87	478.227	123.6	70.9	19.9	601.827
88	489.284	123.4	70.5	19.8	612.684
89	500.467	123.1	70.3	19.7	623.567
90	511.777	124.0	70.3	19.6	635.777
91	523.213	123.2	70.2	20.2	646.413
92	534.775	122.9	71.1	20.2	657.675
93	546.464	122.5	71.1	20.3	668.964
94	558.279	123.1	70.5	19.9	681.379
95	570.221	123.6	71.0	19.8	693.821
96	582.288	123.5	71.2	19.5	705.788
97	594.483	123.4	71.2	19.7	717.883
98	606.803	123.0	70.3	19.7	729.803
99	619.250	122.5	70.9	19.9	741.750
100	631.823	123.0	70.9	19.8	754.823

บทที่ 4

การทำนายค่าความสูญเสียในหม้อแปลงจำหน่ายโดยวิธี โครงข่ายประสาทเทียม

ในปัจจุบันได้มีการศึกษาและพัฒนาระบบที่ใช้โครงข่ายประสาทเทียมเพื่อนำมาใช้ในการทำนายหรือการพยากรณ์ เช่น การทำนายการจ่ายโหลดอย่างประหยัดโดยวิธีโครงข่ายประสาทเทียม การพยากรณ์ความต้องการไฟฟ้า เป็นต้น โครงข่ายประสาทเทียมสามารถคำนวณหาคำตอบของเอาต์พุตได้อย่างแม่นยำ ในวิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำเสนอการประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการศึกษาค่าความสูญเสียในหม้อแปลงจำหน่าย โดยการทำนายหรือการพยากรณ์เปรียบเทียบกับค่าความสูญเสียที่ได้ทำการทดสอบจริงในโรงงานผลิตหม้อแปลง รวมถึงค่าที่ได้จากการคำนวณโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ (Back-propagation Neural Networks ; BP) ดังนั้น ก่อนที่จะทำการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมซึ่งจะประกอบไปด้วย การเลือกตัวแปรที่เป็นตัวแปรในการฝึกสอน, การกระจายข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอน, ปริมาณของข้อมูลฝึกสอนและข้อมูลทดสอบ, เงื่อนไขของการฝึกสอน และขั้นตอนในการฝึกสอน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

4.1 การเลือกตัวแปรในการฝึกสอน

องค์ประกอบที่มีผลต่อประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมนั้น การเลือกตัวแปรในการฝึกสอนเป็นองค์ประกอบที่มีผลต่อประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมมากที่สุด ตัวแปรที่ใช้ในการฝึกสอนจะประกอบไปด้วยตัวแปรอินพุต และตัวแปรเอาต์พุต ซึ่งตัวแปรอินพุตก็คือตัวแปรที่แสดงถึงผลกระทบต่อค่าความสูญเสียรวมในหม้อแปลงจำหน่าย ซึ่งป้อนให้กับชั้นข้อมูลอินพุตของโครงข่ายประสาทเทียม ส่วนตัวแปรเอาต์พุต คือ คำคำตอบที่กำลังพิจารณา ซึ่งได้จากชั้นข้อมูลเอาต์พุตของโครงข่ายประสาทเทียม การเลือกตัวแปรอินพุตจะต้องพิจารณาอย่างละเอียดเนื่องจากไม่สามารถนำพารามิเตอร์ทั้งหมดของหม้อแปลงมาใช้เป็นตัวแปรอินพุตของโครงข่ายประสาทเทียมได้ เพราะนอกจากจะทำให้เสียเวลา และหน่วยความจำในการฝึกสอนมากขึ้นแล้วยังทำให้ประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมไม่ดีขึ้นอีกด้วย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการเลือกตัวแปรอินพุตจำนวน 3 ตัวแปร คือ ค่าความสูญเสียในขดลวดทองแดง (P_{cu}), ค่าพิกัดกระแส (I_{test}) และ อุณหภูมิ (T) ส่วนตัวแปรเอาต์พุต คือ กำลังสูญเสียรวมในหม้อแปลงจำหน่าย (P_l) [9]

4.2 ปริมาณของข้อมูลฝึกสอนและข้อมูลทดสอบ [12-14]

ปริมาณของข้อมูลที่น่ามาใช้ในการฝึกสอนและทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมนั้น โดยส่วนมากจะมีข้อจำกัดจากวิธีการเตรียมข้อมูล ถ้าข้อมูลดังกล่าวได้มาโดยการเก็บบันทึกตามช่วงเวลา ปริมาณของข้อมูลก็จะขึ้นอยู่กับช่วงเวลาและความถี่ในการเก็บบันทึก ส่วนในกรณีที่ข้อมูลดังกล่าวเกิดจากการจำลองเหตุการณ์ (Simulation) ปริมาณของข้อมูลก็จะขึ้นกับความซับซ้อนของการจำลองเหตุการณ์, เวลาที่ใช้ในการจำลองเหตุการณ์ และประสิทธิภาพของอุปกรณ์ที่ใช้ ดังนั้น การเลือกปริมาณของข้อมูลฝึกสอนจึงต้องพิจารณาตามวิธีการเตรียมข้อมูล

ข้อมูลทดสอบ คือ ข้อมูลที่นำมาทดสอบประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนแล้ว โดยเป็นข้อมูลที่ประกอบไปด้วยตัวแปรอินพุต และตัวแปรเอาต์พุต เช่นเดียวกันกับข้อมูลฝึกสอน หากแต่ค่าของตัวแปรดังกล่าวในชุดข้อมูลทดสอบจะเป็นค่าที่ไม่ถูกใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม กล่าวคือ เป็นค่าที่โครงข่ายประสาทเทียมไม่เคยเรียนรู้มาก่อน การวัดประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมนั้น จะใช้วัดค่าผิดพลาดของคำตอบของข้อมูลทดสอบที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนแล้วเป็นเกณฑ์ ซึ่งจะนำเสนอในรูปแบบของค่าเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (Mean Absolute Percentage Error : MAPE) และค่าเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดสัมบูรณ์ (Absolute Percentage Error : ape) ดังสมการที่ (4.1) และ (4.2)

$$MAPE = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left| \frac{P_{ANN_i} - P_{real_i}}{P_{real_i}} \right| \times 100 \quad (4.1)$$

$$ape = \left| \frac{P_{ANN_i} - P_{real_i}}{P_{real_i}} \right| \times 100 \quad (4.2)$$

โดยที่ P_{ANN} คือ ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมที่เป็นคำตอบของโครงข่ายประสาทเทียม

P_{real} คือ ค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบและคำนวณ

m คือ จำนวนข้อมูลทดสอบ

ปริมาณของข้อมูลฝึกสอนและข้อมูลทดสอบสำหรับการทดลองในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะใช้จำนวนข้อมูลฝึกสอน 400 ชุด โดยแบ่งเป็นข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอนจำนวน 266 ชุด และข้อมูลตรวจสอบจำนวน 134 ชุด ส่วนข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบจำนวน 400 ชุด

4.3 เงื่อนไขการฝึกสอน

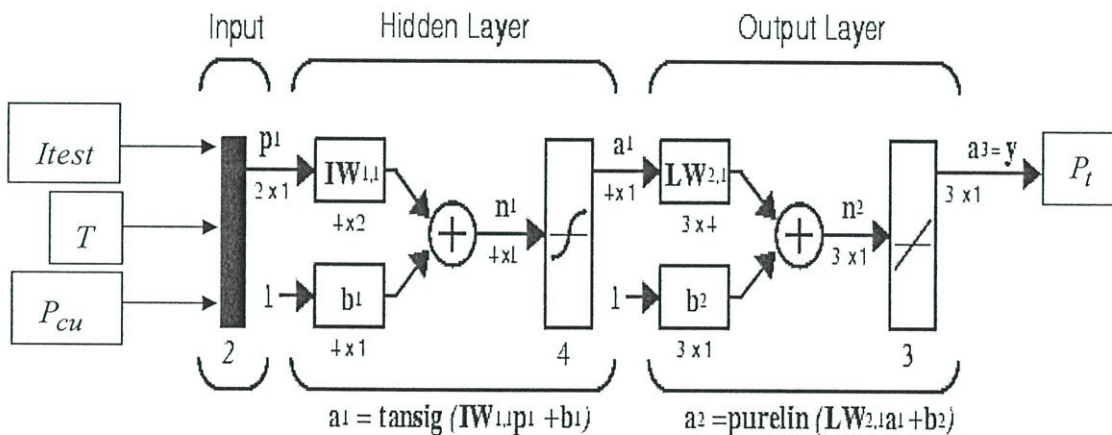
หัวข้อนี้จะกล่าวถึง เงื่อนไขทั้งหมดที่กำหนดขอบเขตการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม

ซึ่งมีผลต่อการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้ Neural Networks Toolbox ของโปรแกรม MATLAB ฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม ดังนั้น องค์ประกอบบางชนิดที่มีผลต่อการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียมที่โปรแกรม MATLAB ได้ทำการกำหนดไว้แล้ว ยกเว้น องค์ประกอบบางชนิด เช่น กลุ่มของรูปแบบอินพุตและเอาต์พุต , จำนวนของข้อมูลฝึกสอน และข้อมูลทดสอบ เป็นต้น ซึ่งตัวผู้วิจัยจะเป็นผู้กำหนดเอง

จุดมุ่งหมายของการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ คือ ฝึกสอนเพื่อให้ได้เอาต์พุตที่ต้องการ คือ ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียรวม (Total Losses) ในหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 1 เฟส 30 kVA และ 50 kVA โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.3.1 โครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ (Back-Propagation : BP)

โครงข่ายประสาทเทียมในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นโครงข่ายประสาทเทียมที่มีอยู่ในโปรแกรม MATLAB / Neural Networks Toolbox ซึ่งได้แสดงในรูปที่ 4.1 โดยเอาต์พุตของโครงข่ายประสาทเทียมสามารถหาได้ตามสมการ (4.3)



รูปที่ 4.1 แสดงแบบจำลองของโครงข่ายประสาทเทียมที่มี 1 ชั้นซ่อน[15]

$$\frac{O}{P_{ANN}} = x^2 [LW^{2,1} \times x^1 (IW^{1,1} \times P + b^1) + b^2] \quad (4.3)$$

โดยที่ $IW^{1,1}$ คือ ค่าถ่วงน้ำหนักที่เชื่อมระหว่างชั้นของข้อมูลอินพุตกับชั้นซ่อนที่ 1

$LW^{2,1}$ คือ ค่าถ่วงน้ำหนักที่เชื่อมระหว่างชั้น ซ่อนที่ 1 กับชั้นเอาต์พุต

b^1 คือ ค่าไบแอสในชั้นซ่อนที่ 1

b^2 คือ ค่าไบแอสในชั้นเอาต์พุต

x^1 คือ ฟังก์ชันกระตุ้นชนิดแทนเจนท์ซิกมอยด์ (tan – sigmoid)

x^2 คือ ฟังก์ชันกระตุ้นชนิดเชิงเส้น (linear)

$P = [P_1, P_2 \dots P_R]$ คือ เวกเตอร์อินพุตของโครงข่ายประสาทเทียม

4.3.1.1 ค่าเริ่มต้นของค่าถ่วงน้ำหนัก (Weight) และค่าไบแอส (Bias)

การเลือกค่าเริ่มต้นของค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสสำหรับการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมนั้น ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะเริ่มต้นด้วยการสุ่มค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอส (Random Initial Weight and Biases) ให้กับโครงสร้างเริ่มต้นของโครงข่ายประสาทเทียม โดยมีคำสั่ง

“net.inputWeights{1,1}.initFcn = ‘rands’;” และ “net.biases{1}.initFcn = ‘rands’;” เพื่อให้การฝึกสอนในแต่ละรอบมีทิศทางการรู้เข้าหาคำตอบแตกต่างกันออกไป โดยหนึ่งรอบการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมจะแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน คือ ป้อนค่าอินพุตที่ได้รับจากชั้นอินพุตมาทำการคำนวณหาคำตอบหรือเอาต์พุตของโครงข่ายประสาทเทียม ตามสมการที่ (4.3) สำหรับแต่ละรูปแบบข้อมูลที่ป้อนให้ จากนั้นจะแพร่ค่าย้อนกลับของค่าผิดพลาดระหว่างเอาต์พุตของโครงข่ายประสาทเทียมกับเอาต์พุตเป้าหมาย และทำการปรับเปลี่ยนค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสด้วย Levenberg-Maquard Algorithm (trainlm)

4.3.1.2 ลำดับขั้นตอนการปรับค่าถ่วงน้ำหนัก (Weight) และค่าไบแอส (Bias) [16]

ลำดับขั้นตอนในการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมชนิด Feed-Forward Neural Networks โดยใช้ Neural Networks Toolbox มีหลายวิธีดังได้กล่าวมาแล้ว ซึ่งแต่ละวิธีก็จะมีประสิทธิภาพและความรวดเร็วในการฝึกสอนที่แตกต่างกัน ตามที่ระบุใน Neural Networks Toolbox User’s Guide ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำวิธี Levenberg-Maquard Algorithm ซึ่งเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพและความรวดเร็วในการฝึกสอนสูงสุด โดยมีลำดับขั้นตอนการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสดังสมการ

$$X_{k+1} = X_k + \Delta X = X_k + [J^T \cdot J + \mu I]^{-1} \cdot g \quad (4.4)$$

$$g = J^T \cdot e \quad (4.5)$$

โดยที่ X คือ ค่าถ่วงน้ำหนัก (w) และค่าไบแอส (b)

J คือ จาโคเบียนเมตริกซ์ (Jacobian Matrix) ของอนุพันธ์ของค่าผิดพลาด (แต่ละค่า) ต่อค่า X (แต่ละค่า)

g คือ Performance Gradient

J^T คือ Transpose Matrix ของ J

- e คือ เมตริกซ์ของค่าผิดพลาด (Error) ระหว่างคำตอบ (Target , t) กับค่าที่โครงข่ายประสาทเทียมคำนวณได้ (Answer , a)
- μ คือ ค่าคงที่
- I คือ Identity Matrix

$$\text{จาโคเบียนเมตริกซ์ของ } (w) \quad J(w) = \begin{bmatrix} \frac{\partial e_1}{\partial w_{1,1}} & \frac{\partial e_1}{\partial w_{1,2}} & \dots & \frac{\partial e_1}{\partial w_{1,S^1}} \\ \frac{\partial e_2}{\partial w_{2,1}} & \frac{\partial e_2}{\partial w_{2,2}} & \dots & \frac{\partial e_2}{\partial w_{2,S^1}} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial e_{S^2}}{\partial w_{S^2,1}} & \frac{\partial e_{S^2}}{\partial w_{S^2,2}} & \dots & \frac{\partial e_{S^2}}{\partial w_{S^2,S^1}} \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

$$\text{จาโคเบียนเมตริกซ์ของค่า } (b) \quad J(b) = \begin{bmatrix} \frac{\partial e_1}{\partial b_1} \\ \frac{\partial e_2}{\partial b_2} \\ \vdots \\ \frac{\partial e_{S^2}}{\partial b_{S^2}} \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

$$\text{เมตริกซ์ของค่าผิดพลาด} \quad \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_{S^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_1^2 - a_1^2 \\ t_2^2 - a_2^2 \\ \vdots \\ t_{S^2}^2 - a_{S^2}^2 \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

4.3.1.3 จำนวนครั้งและจำนวนรอบของการปรับค่าถ่วงน้ำหนัก (Weight) และค่าไบแอส (Bias)

การฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมแต่ละรอบจะกำหนดให้มีการปรับค่าถ่วงน้ำหนัก และค่าไบแอส เป็นจำนวน 1000 ครั้ง(ในที่นี้จะเรียกว่า Epoch)เพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการเปรียบเทียบระยะเวลาในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมในแต่ละเงื่อนไข แล้วเลือกค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสที่ทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (MAPE) ของชุดข้อมูลทดสอบ (เป็นชุดข้อมูล Validation ในการฝึกสอน) หรือ Validation Performance ที่มีค่าต่ำที่สุดใน 1000 Epoch

สำหรับจำนวนรอบการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม ในแต่ละโครงสร้างของโครงข่าย

นั้น จะกำหนดไว้ที่ 20 รอบต่อโครงสร้าง เพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการเปรียบเทียบเวลาในการฝึกสอน โครงข่ายประสาทเทียมในแต่ละเงื่อนไข การเลือกกรอบการฝึกสอนที่มีค่าเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (MAPE) ของชุดข้อมูลทดสอบต่ำที่สุดใน 20 รอบไปใช้งาน

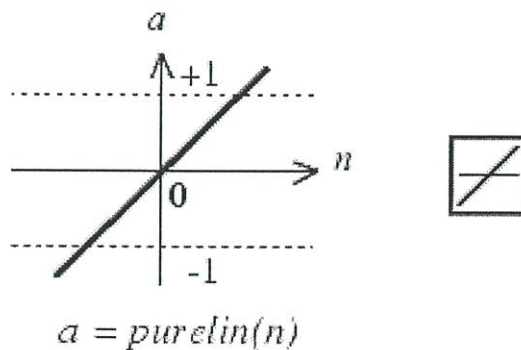
4.3.1.4 จำนวนโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม

โครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นชนิด Feed-Forward Neural Networks ที่มีชั้นซ่อน (Hidden Layer) 1 ชั้น โดยเริ่มฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมที่มีจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1 และเพิ่มนิวรอนในชั้นซ่อนขึ้นทีละ 1 นิวรอนจนถึงที่กำหนด (15 นิวรอน) และเลือกเอาโครงสร้างที่มีค่าเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (MAPE) ของชุดข้อมูลทดสอบต่ำที่สุดไปใช้งาน

4.3.1.5 ชนิดของฟังก์ชันถ่ายโอน [15]

ฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function) เป็นองค์ประกอบหนึ่งที่มีผลต่อการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม ฟังก์ชันถ่ายโอนที่ใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมชนิด Feed-Forward Neural Networks มีอยู่หลายชนิด เช่น Linear , Log-Sigmoid และ Tan-Sigmoid Transfer Function การนำโครงข่ายประสาทเทียมมาใช้แก้ปัญหาฟังก์ชันต่อเนื่องแบบเชิงเส้นและมีความซับซ้อนไม่มากนัก โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมชนิด Feed-Forward Neural Networks ที่มี 1 ชั้นซ่อน โดยใช้ฟังก์ชันถ่ายโอน Tan-Sigmoid ในชั้นซ่อน และฟังก์ชันถ่ายโอน Linear ในชั้นข้อมูลเอาต์พุต ก็เพียงพอกับการแก้ไขปัญหา หากปัญหาที่พิจารณามีความซับซ้อนมากก็ต้องพิจารณาเพิ่มจำนวนชั้นซ่อนขึ้นอีก 1 ชั้น และอาจจะเปลี่ยนมาใช้ฟังก์ชันถ่ายโอน Log-Sigmoid ในชั้นซ่อนแทน โดยฟังก์ชันถ่ายโอนในชั้นข้อมูลเอาต์พุตยังคงเป็นฟังก์ชันถ่ายโอน Linear เช่นเดิม

1. Linear Transfer Function

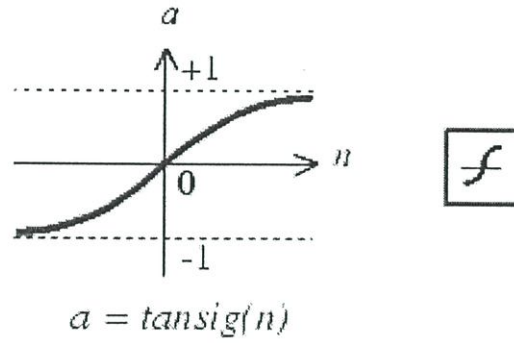


รูปที่ 4.2 แสดง Linear Transfer Function

สมการฟังก์ชันกระตุ้น คือ

$$a(n) = n \quad (4.9)$$

2. Tangent Sigmoid Transfer Function



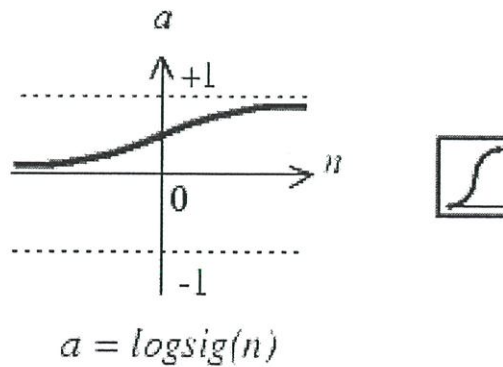
รูปที่ 4.3 แสดง Tangent Sigmoid Transfer Function

สมการฟังก์ชันกระตุ้น คือ

$$a(n) = \frac{1 - e^{-kn}}{1 + e^{-kn}} \quad (4.10)$$

โดยที่ k คือ ค่าคงที่ที่แสดงถึงความชันของฟังก์ชันถ่ายโอน

3. Log Sigmoid Transfer Function



รูปที่ 4.4 แสดง Log Sigmoid Transfer Function

สมการฟังก์ชันกระตุ้น คือ

$$a(n) = \frac{1}{1 + e^{(-kn)}} \quad (4.10)$$

โดยที่ k คือ ค่าคงที่ที่แสดงถึงความชันของฟังก์ชันถ่ายโอน

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ถือว่าเป็นปัญหาชนิดที่เป็นฟังก์ชันต่อเนื่องแบบไม่เป็นเชิงเส้นและมีความซับซ้อนไม่มากนัก จึงสามารถเลือกใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนแทนเจนซิกมอยด์ ในชั้นซ่อน และใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนเชิงเส้น ในชั้นข้อมูลเอาต์พุต และความชันของฟังก์ชันถ่ายโอนในการศึกษานี้ จึงทำการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนในชั้นซ่อนที่มีความชันเท่ากับ 1 ซึ่งเป็นค่าพื้นฐานของ Neural Networks Toolbox

4.3.1.6 เงื่อนไขที่เป็นพื้นฐานของ Neural Networks Toolbox

ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมชนิด Feed-Forward Neural Networks ด้วย Levenberg-Maquard Algorithm (trainlm) โดยใช้ Neural Networks Toolbox จะมีเงื่อนไขพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการสิ้นสุดของการฝึกสอนดังนี้

1. ค่า Performance Gradient ซึ่งเป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่ใช้ในการพิจารณาถึงการสิ้นสุดการฝึกสอน โดยในการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสแต่ละรอบนั้น ค่า Performance Gradient จะเปลี่ยนแปลงไปขึ้นอยู่กับค่าผิดพลาด (e) ที่เกิดขึ้นใน Epoch นั้นๆ โดยการฝึกสอนจะสิ้นสุดลงเมื่อ Performance Gradient มีค่าน้อยกว่า $1e^{-10}$

2. ค่า μ เป็นค่าคงที่ที่ใช้เร่งการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสให้ลู่เข้าหาคำตอบ ในการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสในแต่ละรอบนั้น หากค่า Performance Gradient มีค่าเพิ่มขึ้น จะมีการปรับค่า μ ให้เพิ่มขึ้น จนกระทั่ง Performance Gradient มีแนวโน้มที่จะลดลง จากนั้นค่า μ จะถูกปรับลดลงเรื่อยๆ และมีการปรับเพิ่มขึ้นอีกครั้ง เมื่อค่า Performance Gradient มีค่าเพิ่มขึ้น โดยค่า μ เริ่มต้นจะมีค่าเท่ากับ 0.001 การปรับค่า μ เพิ่มขึ้นนั้น จะทำโดยการคูณด้วย Increased Factor ซึ่งมีค่าเท่ากับ 10 และการปรับค่า μ ลดลงนั้น ทำได้โดยการคูณด้วย Decrease Factor ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.1 และการฝึกสอนจะสิ้นสุดลงเมื่อ μ มีค่ามากกว่า $1e^{10}$

จากที่กล่าวในข้างต้น เงื่อนไขการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ (Back-Propagation : BP) ทั้งหมดสามารถนำมาสรุปได้ตามตารางที่ 4.1

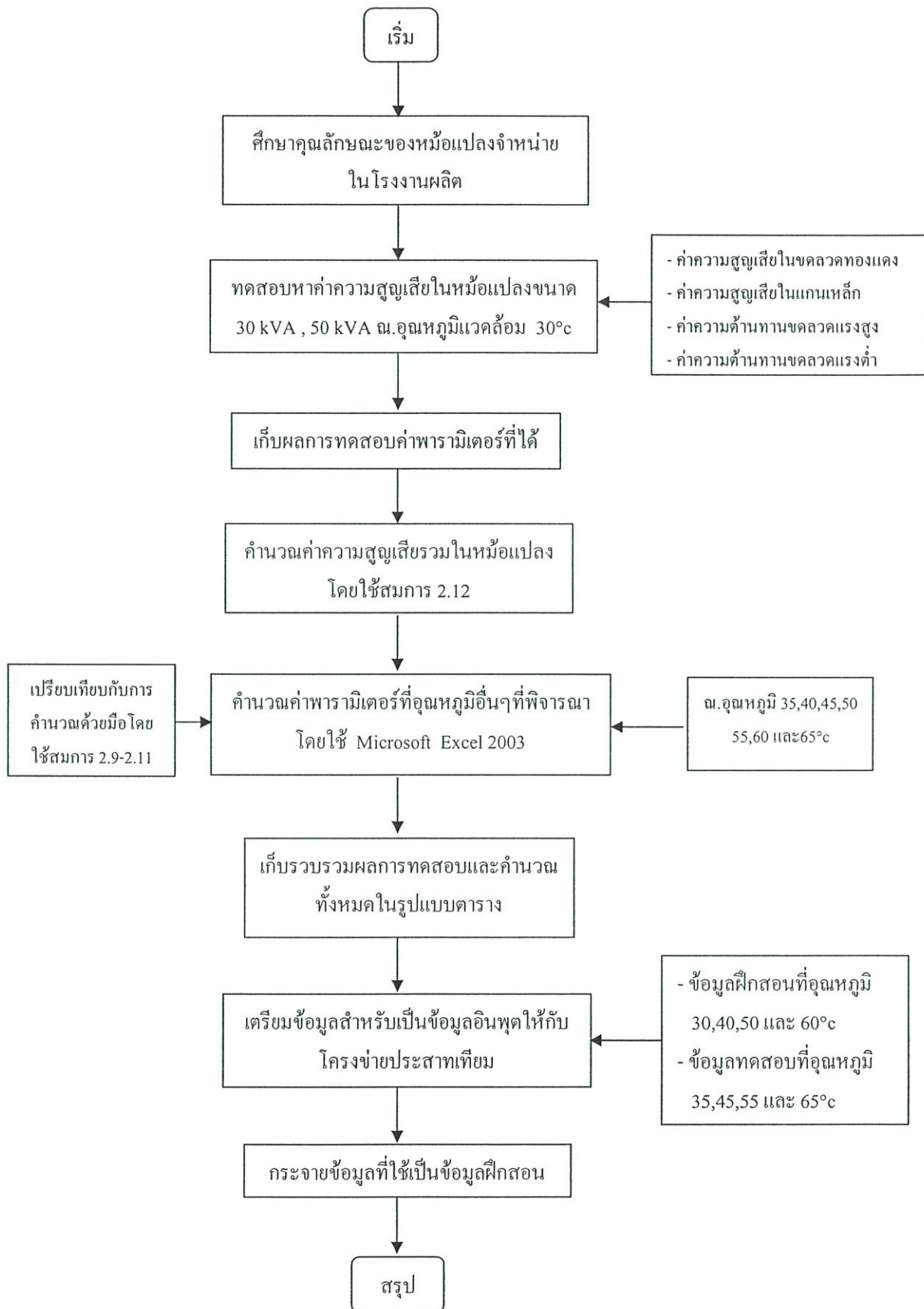
ตารางที่ 4.1 เงื่อนไขการฝึกสอนที่ควบคุม

เงื่อนไขที่ควบคุม	ค่าที่กำหนด	ผลต่อการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม
การเลือกค่าเริ่มต้นของค่าถ่วงน้ำหนัก , ค่าไบแอส	เลือกแบบสุ่ม (Random)	ประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมอาจจะแตกต่างกัน โดยขึ้นอยู่กับค่าเริ่มต้นของ Weight , Bias ที่สุ่มได้
ลำดับขั้นตอนการปรับ Weight , Bias	Levenberg-Maquardt Algorithm	ประสิทธิภาพและความรวดเร็วในการฝึกสอนสูงที่สุด
จำนวนครั้งในการปรับ Weight , Bias ในการฝึกสอนแต่ละรอบ	1000 ครั้ง	ใช้เปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการฝึกสอน
จำนวนรอบในการฝึกสอน	20 รอบ	ใช้เปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการฝึกสอน
จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อน	15 นิวรอน	ใช้เปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการฝึกสอน
ชนิดฟังก์ชันถ่ายโอน	Tan-Sigmoid ในชั้นซ่อน และ Linear ในชั้นข้อมูลเอาต์พุต	ไม่มีการปรับชนิดของฟังก์ชันถ่ายโอน
ความชันของฟังก์ชันถ่ายโอน	$k = 1.00$	ไม่มีการปรับความชันของฟังก์ชันถ่ายโอน
จำนวนข้อมูลฝึกสอนและข้อมูลทดสอบ	หม้อแปลง 30 kVA : ชุดฝึกสอน จำนวน 400 ชุด (จำนวนข้อมูลฝึกสอน 266 ชุด และข้อมูลตรวจสอบ 134 ชุด) และชุดทดสอบจำนวน 400 ชุด หม้อแปลง 50 kVA : ชุดฝึกสอน จำนวน 400 ชุด (จำนวนข้อมูลฝึกสอน 266 ชุด และข้อมูลตรวจสอบ 134 ชุด) และชุดทดสอบจำนวน 400 ชุด	ใช้เปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการฝึกสอน

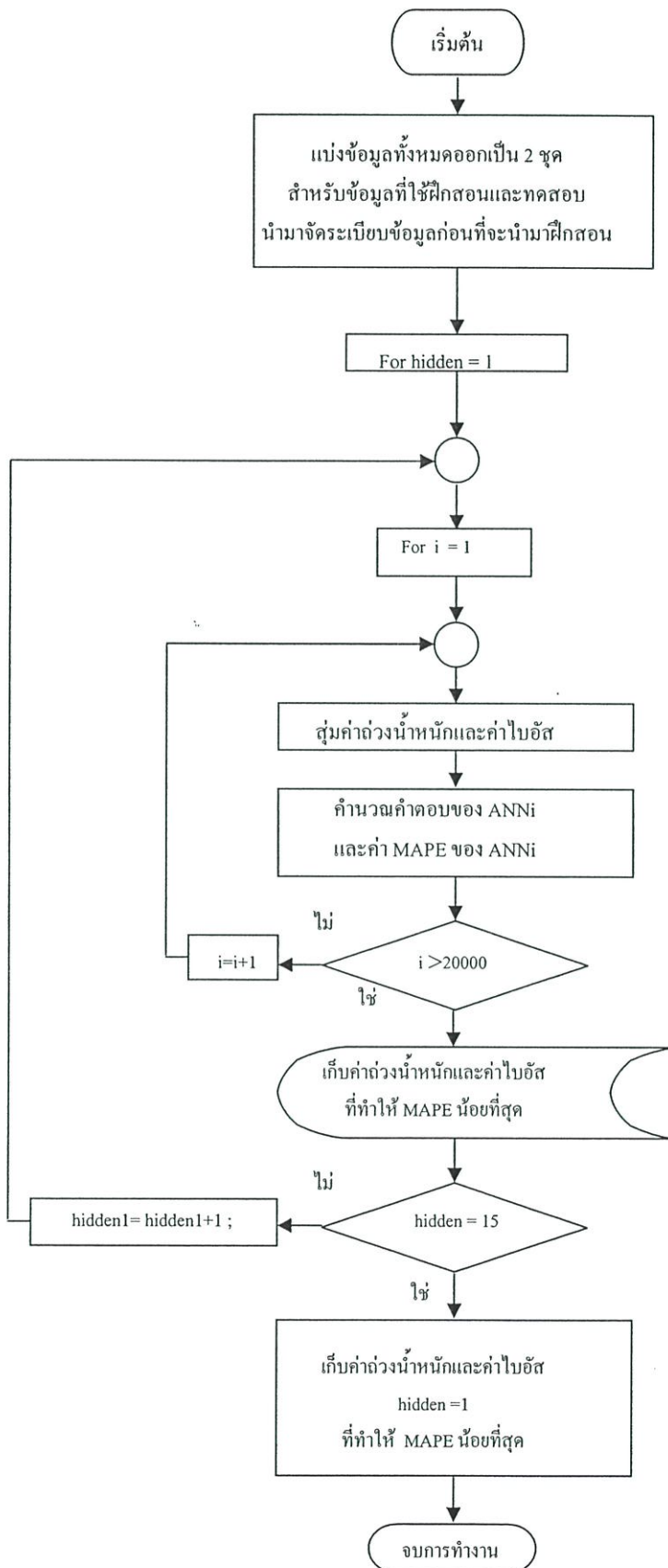
4.3.1.7 ขั้นตอนการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ (Back-Propagation : BP)

ในขั้นตอนแรกของการฝึกสอนจะเป็นการเตรียมข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอนและทดสอบ เมื่อได้ข้อมูลแล้วก็จะนำข้อมูลดังกล่าวมาจัดให้อยู่ในรูปเมตริกซ์ โดยเมตริกซ์ดังกล่าวจะมีจำนวนหลักเท่ากับ จำนวนตัวแปรอินพุตบวกกับจำนวนตัวแปรเอาต์พุต และมีจำนวนแถวเท่ากับ จำนวนชุดของข้อมูลฝึกสอนหรือข้อมูลทดสอบ จากนั้น นำเมตริกซ์ที่ได้มาจัดระเบียบข้อมูล (Normalization) ให้มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0 และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Variance) เท่ากับ 1 แล้วจึงนำเมตริกซ์ที่จัดระเบียบข้อมูลแล้วไปฝึกโครงข่ายประสาทเทียม

เมื่อทำการกำหนดเงื่อนไขต่างๆ ในการฝึกสอนตามที่กล่าวมาเรียบร้อยแล้ว ก็จะเริ่มทำการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งขั้นตอนแสดงดังรูปที่ 4.6 ซึ่งเป็นขั้นตอนการคำนวณแบบแพร่ค่าย้อนกลับ ซึ่งเป็นการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอส และคำนวณหาค่าผิดพลาดของคำตอบของข้อมูลทดสอบเป็นจำนวน 1000 Epoch และเลือกเอาค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสที่ทำให้คำตอบของข้อมูลทดสอบมีค่าผิดพลาดน้อยที่สุด



รูปที่ 4.5 แสดงขั้นตอนการหาค่าความสูญเสียและเตรียมข้อมูลสำหรับโครงข่ายประสาทเทียม



รูปที่ 4.6 ขั้นตอนการฝึกสอน

4.4 ผลการทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ (Back-Propagation :BP NN) ในหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 1 เฟส 30 kVA.

ตารางที่ 4.2 ผลสรุปการฝึกสอนหม้อแปลงขนาด 30 kVA

จำนวนนิเวรอนใน ชั้นซ่อนที่ 1	MAPE TEST (%)	เวลาการฝึกสอนใน แต่ละรอบ (นาที)	เวลาที่ใช้ในการฝึกสอน (นาที)
1	0.1583	1.1172	37.4288
2	0.1481	1.1728	
3	0.1471	1.2141	
4	0.1401	1.3042	
5	0.1416	1.4764	
6	0.1339	1.5883	
7	0.1309	2.1117	
8	0.1329	2.2195	
9	0.1327	2.3186	
10	0.1307	2.4730	
11	0.1352	3.0140	
12	0.1370	3.2848	
13	0.1339	3.4800	
14	0.1365	4.0564	
15	0.1377	4.1978	

ตารางที่ 4.3 แสดงผลเปรียบเทียบค่ากำลังสูญเสียรวมของหม้อแปลงจำหน่าย 30 kVA
ที่อุณหภูมิ 35 °c

ข้อมูลทดสอบ ชุดที่	ค่าผิดพลาด (%)	Method		ape (%)
		Pt Neural Network (w)	Pt Calculation (w)	
1	1	108.4987	108.6350	0.125466
2	2	108.6601	108.0400	0.573954
3	3	108.8901	108.8160	0.068097
4	4	109.1826	109.4610	0.254337
5	5	109.5359	109.5770	0.037508
6	6	109.9459	109.5630	0.349479
7	7	110.4103	110.3190	0.082760
8	8	110.9291	111.0460	0.105272
9	9	111.5001	111.6420	0.127103
10	10	112.1266	111.6090	0.463762
11	11	112.8101	112.8460	0.031813
12	12	113.5545	113.7530	0.174501
13	13	114.3643	114.7300	0.318748
14	14	115.2451	114.7770	0.407834
15	15	116.2038	115.7950	0.353038
16	16	117.2444	117.2830	0.032912
17	17	118.3717	118.3410	0.025942
18	18	119.5886	119.5690	0.016392
19	19	120.8965	120.6670	0.190193
20	20	122.2955	122.0360	0.212642
21	21	123.7797	124.0740	0.237197
22	22	125.3457	125.4830	0.109417
23	23	126.9848	127.0620	0.060758
24	24	128.6881	128.6110	0.059948
25	25	130.4479	130.1310	0.243524

ตารางที่ 4.3 (ต่อ)

ข้อมูลทดสอบ ชุดที่	ค่าพิสัยกระแส (%)	Method		ape (%)
		Pt Neural Network (w)	Pt Calculation (w)	
26	26	132.2548	131.8200	0.329844
27	27	134.1061	134.3800	0.203825
28	28	136.0000	136.4100	0.300564
29	29	137.9407	137.8100	0.094841
30	30	139.9368	139.4910	0.319591
31	31	142.0019	141.8210	0.127555
32	32	144.1486	143.9310	0.151184
33	33	146.3924	146.4120	0.013387
34	34	148.7431	149.1630	0.281504
35	35	151.2052	150.9840	0.146506
36	36	153.7773	153.4760	0.196317
37	37	156.4480	156.6370	0.120661
38	38	159.2030	159.0690	0.084240
39	39	162.0221	161.6710	0.217169
40	40	164.8860	165.0430	0.095127
41	41	167.7790	167.9850	0.122630
42	42	170.6928	170.9970	0.177898
43	43	173.6282	173.5800	0.027768
44	44	176.5936	176.1330	0.261507
45	45	179.6041	179.6560	0.028889
46	46	182.6772	183.0490	0.203115
47	47	185.8295	186.3120	0.258974
48	48	189.0739	188.7450	0.174256
49	49	192.4730	192.3490	0.064466
50	50	195.8700	195.9230	0.027051

ตารางที่ 4.3 (ต่อ)

ข้อมูลทดสอบ ชุดที่	ค่าพิสัยกระแส (%)	Method		ape (%)
		Pt Neural Network (w)	Pt Calculation (w)	
51	51	199.4245	199.8670	0.221397
52	52	203.0791	202.7810	0.147006
53	53	206.8269	207.0660	0.115470
54	54	210.6569	211.2200	0.266594
55	55	214.5586	214.8450	0.133305
56	56	218.5195	218.3400	0.082211
57	57	222.5287	222.6050	0.034276
58	58	226.5778	226.8400	0.115588
59	59	230.6625	230.9450	0.122323
60	60	234.7836	234.4210	0.154679
61	61	238.9462	239.1670	0.092320
62	62	243.1600	243.5830	0.173657
63	63	247.4380	248.0690	0.254365
64	64	251.7942	251.6250	0.067243
65	65	256.2419	256.1520	0.035096
66	66	260.7904	261.1490	0.137316
67	67	265.4440	265.7150	0.101989
68	68	270.2038	270.4520	0.091772
69	69	275.0643	275.0600	0.001563
70	70	280.0146	279.9370	0.027721
71	71	285.0439	285.4850	0.154509
72	72	290.1380	290.4020	0.090908
73	73	295.2869	295.4900	0.068733
74	74	300.4815	300.5480	0.022126
75	75	305.7184	305.5770	0.046273

ตารางที่ 4.3 (ต่อ)

ข้อมูลทดสอบ ชุดที่	ค่าพิกัดกระแส (%)	Method		ape (%)
		Pt Neural Network (w)	Pt Calculation (w)	
76	76	310.9964	310.7750	0.071241
77	77	316.3220	316.8440	0.164750
78	78	321.7027	322.3830	0.211022
79	79	327.1485	327.2920	0.043845
80	80	332.6701	332.4820	0.056574
81	81	338.2768	338.3200	0.012769
82	82	343.9765	343.9400	0.010612
83	83	349.7715	349.9290	0.045009
84	84	355.6644	356.1890	0.147281
85	85	361.6524	361.5190	0.036900
86	86	367.7320	367.5200	0.057684
87	87	373.8952	374.1900	0.078784
88	88	380.1368	380.1310	0.001526
89	89	386.4475	386.2410	0.053464
90	90	392.8217	393.1220	0.076389
91	91	399.2527	399.5740	0.080411
92	92	405.7322	406.0950	0.089339
93	93	412.2556	412.1860	0.016886
94	94	418.8193	418.2480	0.136594
95	95	425.4183	425.2800	0.032520
96	96	432.0494	432.1820	0.030682
97	97	438.7101	438.9540	0.055564
98	98	445.3994	444.8970	0.112925
99	99	452.1137	452.0090	0.023163
100	100	458.8539	459.0920	0.051863

ตารางที่ 4.4 แสดงผลเปรียบเทียบค่ากำลังสูญเสียรวมของหม้อแปลงจำหน่าย 30 kVA
ที่อุณหภูมิ 45 °c

ข้อมูลทดสอบ ชุดที่	ค่าพิกัดกระแส (%)	Method		ape (%)
		Pt Neural Network (w)	Pt Calculation (w)	
101	1	108.4061	108.7360	0.303395
102	2	108.5928	108.0460	0.506081
103	3	108.8443	108.8280	0.014978
104	4	109.1568	109.4820	0.297035
105	5	109.5286	109.6100	0.074263
106	6	109.9551	109.6100	0.314844
107	7	110.4355	110.3830	0.047562
108	8	110.9692	111.1290	0.143797
109	9	111.5571	111.7480	0.170831
110	10	112.2000	111.7390	0.412569
111	11	112.9025	113.0030	0.088936
112	12	113.6693	113.9400	0.237581
113	13	114.5058	114.9500	0.386429
114	14	115.4180	115.0330	0.334687
115	15	116.4109	116.0880	0.278151
116	16	117.4912	117.6160	0.106108
117	17	118.6634	118.7170	0.045149
118	18	119.9302	119.9910	0.050670
119	19	121.2911	121.1370	0.127211
120	20	122.7467	122.5570	0.154785
121	21	124.2903	124.6490	0.287768
122	22	125.9155	126.1130	0.156606
123	23	127.6161	127.7510	0.105596
124	24	129.3806	129.3610	0.015151
125	25	131.2024	130.9450	0.196571

ตารางที่ 4.4 (ต่อ)

ข้อมูลทดสอบ ชุดที่	ค่าผิดพลาด (%)	Method		ape (%)
		Pt Neural Network (w)	Pt Calculation (w)	
126	26	133.0721	132.7010	0.279651
127	27	134.9859	135.3290	0.253530
128	28	136.9460	137.4310	0.352904
129	29	138.9558	138.9050	0.036572
130	30	141.0266	140.6630	0.258490
131	31	143.1718	143.0720	0.069755
132	32	145.4068	145.2650	0.097615
133	33	147.7446	147.8300	0.057769
134	34	150.1966	150.6690	0.313535
135	35	152.7648	152.5800	0.121117
136	36	155.4450	155.1630	0.181744
137	37	158.2270	158.4200	0.121828
138	38	161.0920	160.9490	0.088848
139	39	164.0204	163.6510	0.225724
140	40	166.9930	167.1260	0.079581
141	41	169.9954	170.1740	0.104951
142	42	173.0211	173.2950	0.158054
143	43	176.0720	175.9880	0.047731
144	44	179.1589	178.6540	0.282613
145	45	182.2968	182.2930	0.002085
146	46	185.5016	185.8040	0.162752
147	47	188.7894	189.1890	0.211217
148	48	192.1704	191.7460	0.221334
149	49	195.6529	195.4760	0.090497
150	50	199.2408	199.1790	0.031027

ตารางที่ 4.4 (ต่อ)

ข้อมูลทดสอบ ชุดที่	ค่าผิดพลาด (%)	Method		ape (%)
		Pt Neural Network (w)	Pt Calculation (w)	
151	51	202.9339	203.2540	0.157488
152	52	206.7294	206.3020	0.207172
153	53	210.6199	210.7240	0.049401
154	54	214.5992	215.0170	0.194310
155	55	218.6526	218.7840	0.060059
156	56	222.7690	222.4240	0.155109
157	57	226.9361	226.8360	0.044129
158	58	231.1450	231.2210	0.032869
159	59	235.3905	235.4790	0.037583
160	60	239.6715	239.1090	0.235248
161	61	243.9943	244.0130	0.007664
162	62	248.3680	248.5890	0.088902
163	63	252.8065	253.2380	0.170393
164	64	257.3245	256.9590	0.142241
165	65	261.9370	261.6540	0.108158
166	66	266.6536	266.8210	0.062739
167	67	271.4806	271.5610	0.029607
168	68	276.4181	276.4740	0.020219
169	69	281.4602	281.2600	0.071180
170	70	286.5958	286.3180	0.097025
171	71	291.8125	292.0490	0.080980
172	72	297.0964	297.1530	0.019047
173	73	302.4352	302.4300	0.001719
174	74	307.8199	307.6800	0.045469
175	75	313.2454	312.9020	0.109747

ตารางที่ 4.4 (ต่อ)

ข้อมูลทดสอบ ชุดที่	ค่าพิสัยกระจาย (%)	Method		ape (%)
		Pt Neural Network (w)	Pt Calculation (w)	
176	76	318.7134	318.2970	0.130821
177	77	324.2293	324.5650	0.103431
178	78	329.8024	330.3060	0.152465
179	79	335.4431	335.4190	0.007185
180	80	341.1636	340.8160	0.101991
181	81	346.9737	346.8640	0.031626
182	82	352.8808	352.6960	0.052396
183	83	358.8885	358.9010	0.003483
184	84	364.9966	365.3780	0.104385
185	85	371.2031	370.9280	0.074165
186	86	377.5029	377.1510	0.093305
187	87	383.8895	384.0470	0.041011
188	88	390.3541	390.2150	0.035647
189	89	396.8908	396.5570	0.084175
190	90	403.4901	403.6710	0.044814
191	91	410.1458	410.3580	0.051711
192	92	416.8508	417.1170	0.063819
193	93	423.6014	423.4500	0.035754
194	94	430.3914	429.7550	0.148084
195	95	437.2178	437.0330	0.042285
196	96	444.0778	444.1840	0.023909
197	97	450.9682	451.2070	0.052925
198	98	457.8882	457.4030	0.106077
199	99	464.8375	464.7730	0.013878
200	100	471.8125	472.1140	0.063862

ตารางที่ 4.5 แสดงผลเปรียบเทียบค่ากำลังสูญเสียรวมของหม้อแปลงจำหน่าย 30 kVA
ที่อุณหภูมิ 55 °C

ข้อมูลทดสอบ ชุดที่	ค่าพิกัดกระแส (%)	Method		ape (%)
		Pt Neural Network (w)	Pt Calculation (w)	
201	1	108.2867	108.7380	0.415034
202	2	108.4981	108.0510	0.413786
203	3	108.7726	108.8390	0.061008
204	4	109.1073	109.5030	0.361360
205	5	109.4979	109.6420	0.131428
206	6	109.9433	109.6570	0.261087
207	7	110.4411	110.4470	0.005342
208	8	110.9916	111.2120	0.198180
209	9	111.5972	111.8530	0.228693
210	10	112.2599	111.8690	0.349427
211	11	112.9851	113.1610	0.155442
212	12	113.7771	114.1280	0.307462
213	13	114.6419	115.1700	0.458540
214	14	115.5875	115.2880	0.259784
215	15	116.6189	116.3810	0.204415
216	16	117.7428	117.9500	0.175668
217	17	118.9612	119.0930	0.110670
218	18	120.2799	120.4130	0.110536
219	19	121.6953	121.6070	0.072611
220	20	123.0770	123.0770	0.105787
221	21	124.8104	125.2230	0.329492
222	22	126.4963	126.7440	0.195433
223	23	128.2559	128.4400	0.143335
224	24	130.0807	130.1120	0.024056
225	25	131.9606	131.7590	0.153007

ตารางที่ 4.5 (ต่อ)

ข้อมูลทดสอบ ชุดที่	ค่าพิสัยกระแสม (%)	Method		ape (%)
		Pt Neural Network (w)	Pt Calculation (w)	
226	26	133.8888	133.5810	0.230422
227	27	135.8633	136.2790	0.305036
228	28	137.8844	138.4520	0.409962
229	29	139.9591	140.0000	0.029214
230	30	142.0996	141.8350	0.186555
231	31	144.3209	144.3240	0.002148
232	32	146.6371	146.5980	0.026672
233	33	149.0637	149.2480	0.123486
234	34	151.6099	152.1740	0.370694
235	35	154.2769	154.1750	0.066094
236	36	157.0589	156.8510	0.132546
237	37	159.9433	160.2030	0.162107
238	38	162.9106	162.8300	0.049499
239	39	165.9401	165.6320	0.186015
240	40	169.0141	169.2100	0.115773
241	41	172.1190	172.3630	0.141562
242	42	175.2509	175.5920	0.194257
243	43	178.4133	178.3960	0.009698
244	44	181.6169	181.1750	0.243908
245	45	184.8765	184.9300	0.028930
246	46	188.2065	188.5600	0.187473
247	47	191.6196	192.0650	0.231901
248	48	195.1268	194.7460	0.195537
249	49	198.7355	198.6030	0.066716
250	50	202.4489	202.4340	0.007360

ตารางที่ 4.5 (ต่อ)

ข้อมูลทดสอบ ชุดที่	ค่าพิสัยกระแสม (%)	Method		ape (%)
		Pt Neural Network (w)	Pt Calculation (w)	
251	51	206.2695	206.6410	0.179780
252	52	210.1955	209.8240	0.177053
253	53	214.2211	214.3820	0.075053
254	54	218.3377	218.8150	0.218129
255	55	222.5342	222.7230	0.084769
256	56	226.7984	226.5070	0.128649
257	57	231.1178	231.0670	0.021985
258	58	235.4815	235.6020	0.051146
259	59	239.8827	240.0120	0.053872
260	60	244.3204	243.7970	0.214687
261	61	248.7997	248.8580	0.023427
262	62	253.3307	253.5950	0.104221
263	63	257.9266	258.4060	0.185522
264	64	262.6046	262.2930	0.118798
265	65	267.3798	267.1560	0.083771
266	66	272.2635	272.4940	0.084589
267	67	277.2621	277.4070	0.052234
268	68	282.3764	282.4960	0.042337
269	69	287.5996	287.4600	0.048563
270	70	292.9205	292.6990	0.075675
271	71	298.3255	298.6140	0.096613
272	72	303.7989	303.9040	0.034583
273	73	309.3280	309.3700	0.013576
274	74	314.9026	314.8110	0.029097
275	75	320.5181	320.2270	0.090904

ตารางที่ 4.5 (ต่อ)

ข้อมูลทดสอบ ชุดที่	ค่าพิกัดกระแส (%)	Method		ape (%)
		Pt Neural Network (w)	Pt Calculation (w)	
276	76	326.1767	325.8190	0.109785
277	77	331.8837	332.2860	0.121070
278	78	337.6496	338.2280	0.171009
279	79	343.4873	343.5460	0.017087
280	80	349.4090	349.1510	0.073894
281	81	355.4236	355.4080	0.004389
282	82	361.5400	361.4520	0.024346
283	83	367.7618	367.8720	0.029956
284	84	374.0881	374.5670	0.127854
285	85	380.5155	380.3370	0.046932
286	86	387.0390	386.7830	0.066187
287	87	393.6506	393.9040	0.064330
288	88	400.3418	400.3000	0.010442
289	89	407.1056	406.8720	0.057414
290	90	413.9331	414.2190	0.069021
291	91	420.8181	421.1420	0.076910
292	92	427.7536	428.1400	0.090251
293	93	434.7342	434.7130	0.004877
294	94	441.7568	441.2620	0.112133
295	95	448.8168	448.7860	0.006863
296	96	455.9118	456.1850	0.059888
297	97	463.0409	463.4600	0.090429
298	98	470.2019	469.9100	0.062118
299	99	477.3948	477.5360	0.029568
300	100	484.6185	485.1370	0.106877

ตารางที่ 4.6 แสดงผลเปรียบเทียบค่ากำลังสูญเสียรวมของหม้อแปลงจำหน่าย 30 kVA
ที่อุณหภูมิ 65 °c

ข้อมูลทดสอบ ชุดที่	ค่าพิกัดกระแส (%)	Method		ape (%)
		Pt Neural Network (w)	Pt Calculation (w)	
301	1	108.5288	108.7390	0.193303
302	2	108.7671	108.0560	0.658100
303	3	109.0665	108.8510	0.198011
304	4	109.4234	109.5239	0.091793
305	5	109.8348	109.6749	0.145795
306	6	110.2989	109.7039	0.542411
307	7	110.8153	110.5108	0.275537
308	8	111.3849	111.2957	0.080109
309	9	112.0099	111.9587	0.045755
310	10	112.6942	111.9996	0.620184
311	11	113.4430	113.3185	0.109857
312	12	114.2625	114.3154	0.046292
313	13	115.1595	115.3903	0.200032
314	14	116.1408	115.5432	0.517202
315	15	117.2131	116.6741	0.461978
316	16	118.3817	118.2830	0.083472
317	17	119.6506	119.4698	0.151308
318	18	121.0214	120.8347	0.154515
319	19	122.4932	122.0775	0.340487
320	20	124.0626	123.5984	0.375584
321	21	125.7235	125.7972	0.058602
322	22	127.4676	127.3740	0.073449
323	23	129.2851	129.1289	0.120992
324	24	131.1662	130.8617	0.232708
325	25	133.1019	132.5725	0.399347

ตารางที่ 4.6 (ต่อ)

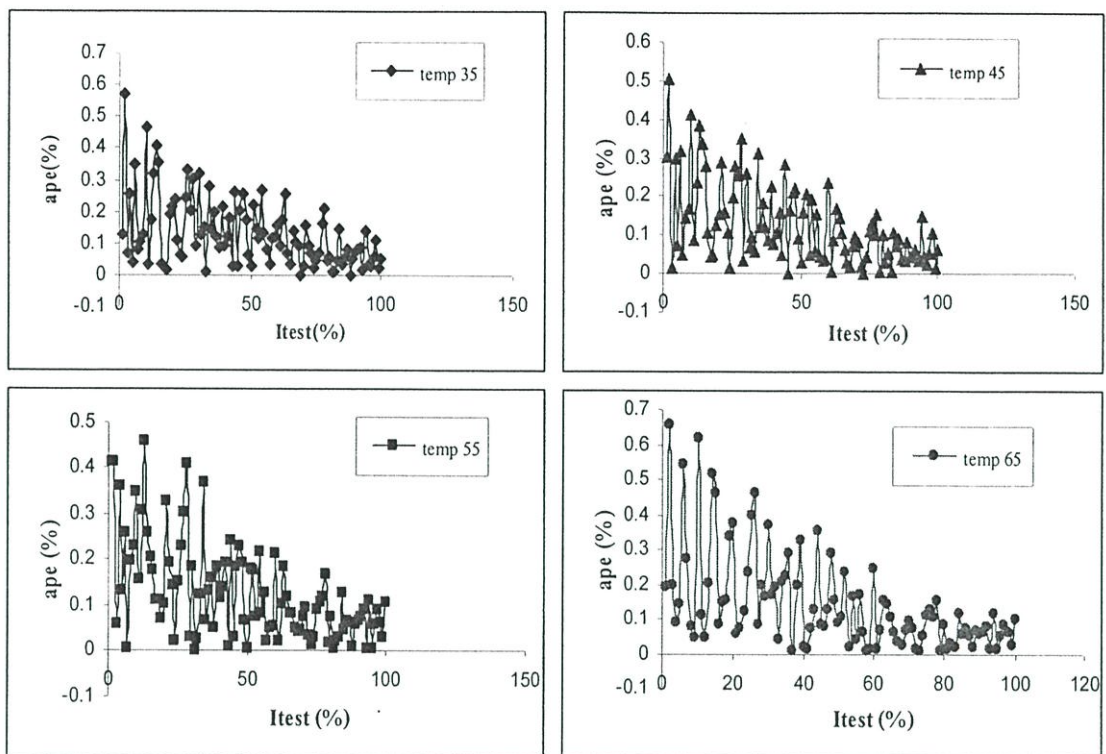
ข้อมูลทดสอบ ชุดที่	ค่าพิกัดกระแส (%)	Method		ape (%)
		Pt Neural Network (w)	Pt Calculation (w)	
326	26	135.0858	134.4613	0.464468
327	27	137.1157	137.2281	0.081876
328	28	139.1942	139.4728	0.199777
329	29	141.3296	141.0956	0.165842
330	30	143.5348	143.0072	0.368951
331	31	145.8257	145.5751	0.172131
332	32	148.2189	147.9319	0.194032
333	33	150.7279	150.6666	0.040684
334	34	153.3612	153.6793	0.207010
335	35	156.1195	155.7701	0.224335
336	36	158.9951	158.5388	0.287837
337	37	161.9733	161.9855	0.007514
338	38	165.0344	164.7102	0.196849
339	39	168.1579	167.6129	0.325179
340	40	171.3262	171.2935	0.019067
341	41	174.5283	174.5522	0.013699
342	42	177.7615	177.8889	0.071605
343	43	181.0306	180.8035	0.125587
344	44	184.3462	183.6962	0.353855
345	45	187.7210	187.5668	0.082198
346	46	191.1676	191.3155	0.077284
347	47	194.6974	194.9421	0.125514
348	48	198.3196	197.7467	0.289716
349	49	202.0418	201.7293	0.154908
350	50	205.8695	205.6899	0.087313

ตารางที่ 4.6 (ต่อ)

ข้อมูลทดสอบ ชุดที่	ค่าพิกัดกระแส (%)	Method		ape (%)
		Pt Neural Network (w)	Pt Calculation (w)	
351	51	209.8056	210.0285	0.106127
352	52	213.8501	213.3451	0.236715
353	53	217.9990	218.0397	0.018647
354	54	222.2449	222.6122	0.165007
355	55	226.5769	226.6628	0.037891
356	56	230.9818	230.5913	0.169331
357	57	235.4465	235.2979	0.063162
358	58	239.9591	239.9824	0.009716
359	59	244.5119	244.5449	0.013512
360	60	249.1025	248.4855	0.248319
361	61	253.7350	253.7040	0.012229
362	62	258.4196	258.6005	0.069945
363	63	263.1708	263.5750	0.153343
364	64	268.0060	267.6275	0.141443
365	65	272.9414	272.6579	0.103962
366	66	277.9901	278.1664	0.063383
367	67	283.1592	283.2529	0.033071
368	68	288.4491	288.5173	0.023648
369	69	293.8533	293.6598	0.065901
370	70	299.3596	299.0802	0.093415
371	71	304.9527	305.1786	0.074037
372	72	310.6161	310.6551	0.012543
373	73	316.3356	316.3095	0.008257
374	74	322.1009	321.9419	0.049392
375	75	327.9074	327.5523	0.108414

ตารางที่ 4.6 (ต่อ)

ข้อมูลทดสอบ ชุดที่	ค่าพิกัดกระแส (%)	Method		ape (%)
		Pt Neural Network (w)	Pt Calculation (w)	
376	76	333.7567	333.3407	0.124804
377	77	339.6561	340.0071	0.103221
378	78	345.6169	346.1514	0.154422
379	79	351.6524	351.6738	0.006085
380	80	357.7758	357.4850	0.081356
381	81	363.9980	363.9525	0.012500
382	82	370.3262	370.2088	0.031699
383	83	376.7639	376.8432	0.021039
384	84	383.3104	383.7555	0.115987
385	85	389.9616	389.7458	0.055363
386	86	396.7111	396.4141	0.074913
387	87	403.5509	403.7604	0.051896
388	88	410.4724	410.3847	0.021363
389	89	417.4672	417.1870	0.067161
390	90	424.5272	424.7673	0.056523
391	91	431.6456	431.9256	0.064817
392	92	438.8162	439.1618	0.078700
393	93	446.0342	445.9761	0.013033
394	94	453.2957	452.7683	0.116479
395	95	460.5977	460.5386	0.012842
396	96	467.9381	468.1868	0.053117
397	97	475.3157	475.7130	0.083518
398	98	482.7297	482.4172	0.064774
399	99	490.1798	490.2994	0.024398
400	100	497.6663	498.1596	0.099029



รูปที่ 4.7 ค่าเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดสัมบูรณ์ของหม้อแปลง 30 kVA. ที่พิกัดกระแส 1-100%

จากผลการทดสอบในตารางที่ 4.2 ถึง 4.6 และรูปที่ 4.7 สามารถสรุปได้ดังนี้

1. โครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนโดยมีชุดฝึกสอน 400 ชุด ที่อุณหภูมิ 30°C , 40°C , 50°C และ 60°C และชุดทดสอบ 400 ชุด ที่อุณหภูมิ 35°C , 45°C , 55°C และ 65°C สามารถหาค่าค่าตอบของกำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมของหม้อแปลงจำหน่าย โดยมีค่าเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (Mean Absolute Percentage Error : MAPE) เท่ากับ 0.13197% , ค่าผิดพลาดต่ำที่สุด (Min Error) เท่ากับ 0.001526% และค่าผิดพลาดสูงที่สุด (Max Error) เท่ากับ 0.6581%
2. เวลาที่ใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมที่ดีที่สุดประมาณ 37.4288 นาที ดังแสดงในตารางที่ 4.2 โดยจะได้จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1 และชั้นเอาต์พุตเท่ากับ 10 และ 1 ตามลำดับ
3. จากรูปที่ 4.7 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดสัมบูรณ์ของหม้อแปลง 30 kVA. เมื่อค่าพิกัดกระแสเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตั้งแต่ 1-100% จะเห็นว่าในช่วงกระแสพิกัด 1-20% นั้น จะมีค่าผิดพลาดเกิดขึ้นมากกว่าช่วงอื่นๆ ในช่วงพิกัดกระแส 80 - 100% จะมีค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นต่ำเป็นที่น่าพอใจ

4.5 ผลการทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ (Back-Propagation :BP NN) ในหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 1 เฟส 50 kVA.

ตารางที่ 4.7 ผลสรุปการฝึกสอนหม้อแปลงขนาด 50 kVA

จำนวนนิวรอนในชั้น ซ่อนที่ 1	MAPE TEST (%)	เวลาการฝึกสอนใน แต่ละรอบ (นาที)	เวลาที่ใช้ในการฝึกสอน (นาที)
1	0.1974	0.3488	37.3845
2	0.1937	1.1550	
3	0.1878	1.4164	
4	0.1929	1.2933	
5	0.1946	1.4428	
6	0.1933	1.5504	
7	0.1933	2.0778	
8	0.1941	2.1810	
9	0.1965	2.3067	
10	0.1955	2.5788	
11	0.1982	3.1142	
12	0.1958	3.3072	
13	0.1991	3.4450	
14	0.2037	4.0500	
15	0.2010	4.3172	

ตารางที่ 4.8 แสดงผลเปรียบเทียบค่ากำลังสูญเสียรวมของหม้อแปลงจำหน่าย 50 kVA
ที่อุณหภูมิ 35 °C

ข้อมูลทดสอบ ชุดที่	ค่าพิกัดกระแส (%)	Method		ape (%)
		Pt Neural Network (w)	Pt Calculation (w)	
1	1	123.4848	123.0569	0.347762
2	2	123.5585	125.2274	1.332710
3	3	123.7282	122.5117	0.992973
4	4	124.0368	123.2097	0.671316
5	5	124.4983	124.4214	0.061834
6	6	125.1031	126.2468	0.905898
7	7	125.8386	125.0859	0.601765
8	8	126.6958	127.2387	0.426675
9	9	127.6699	128.0052	0.261961
10	10	128.7584	128.4855	0.212427
11	11	129.9598	129.3794	0.448596
12	12	131.2736	131.0871	0.142298
13	13	132.6994	132.7084	0.006805
14	14	134.2371	134.7435	0.375829
15	15	135.8866	135.5923	0.217055
16	16	137.6482	138.4548	0.582560
17	17	139.5220	139.8310	0.220970
18	18	141.5084	141.7209	0.149940
19	19	143.6081	143.6245	0.011431
20	20	145.8225	145.6418	0.124039
21	21	148.1538	147.7729	0.257769
22	22	150.6064	150.5176	0.058972
23	23	153.1883	153.0761	0.073301
24	24	155.9118	156.2483	0.215338
25	25	158.7885	158.6341	0.097307

ตารางที่ 4.8 (ต่อ)

ข้อมูลทดสอบ ชุดที่	ค่าผิดพลาด (%)	Method		ape (%)
		Pt Neural Network (w)	Pt Calculation (w)	
26	26	161.8117	162.1337	0.198616
27	27	164.9429	165.4470	0.304701
28	28	168.1436	168.3740	0.136851
29	29	171.4107	171.2147	0.114455
30	30	174.7623	173.6692	0.629439
31	31	178.2138	178.4373	0.125248
32	32	181.7734	182.1191	0.189838
33	33	185.4444	185.9147	0.252955
34	34	189.2282	189.4239	0.103335
35	35	193.1253	192.5469	0.300389
36	36	197.1359	196.3836	0.383083
37	37	201.2601	201.4340	0.086318
38	38	205.4981	205.4981	0
39	39	209.8500	209.5759	0.130799
40	40	214.3160	214.9674	0.303019
41	41	218.8961	218.7726	0.056444
42	42	223.5905	223.1915	0.178748
43	43	228.3992	227.6242	0.340477
44	44	233.3225	233.1705	0.065169
45	45	238.3604	238.7306	0.155072
46	46	243.5130	243.8044	0.119512
47	47	248.7805	248.9919	0.084885
48	48	254.1629	253.9930	0.066874
49	49	259.6603	259.0079	0.251868
50	50	265.2729	265.1366	0.051426

ตารางที่ 4.8 (ต่อ)

ข้อมูลทดสอบ ชุดที่	ค่าพิกัดกระแส (%)	Method		ape (%)
		Pt Neural Network (w)	Pt Calculation (w)	
51	51	271.0008	270.8789	0.045014
52	52	276.8440	278.7349	0.678384
53	53	282.8026	281.7046	0.389760
54	54	288.8767	288.0881	0.273745
55	55	295.0663	294.9852	0.027484
56	56	301.3716	302.4961	0.371736
57	57	307.7927	307.0207	0.251462
58	58	314.3294	314.8589	0.168184
59	59	320.9820	321.3109	0.102372
60	60	327.7504	327.4766	0.083599
61	61	334.6347	334.0560	0.173222
62	62	341.6349	341.4492	0.054398
63	63	348.7509	348.7560	0.001459
64	64	355.9829	356.4765	0.138473
65	65	363.3308	363.0108	0.088160
66	66	370.7945	371.5587	0.205681
67	67	378.3741	378.6204	0.065049
68	68	386.0695	386.1958	0.032694
69	69	393.8807	393.7848	0.024342
70	70	401.8075	401.4876	0.079669
71	71	409.8499	409.3041	0.133339
72	72	418.0079	417.7344	0.065484
73	73	426.2812	425.9783	0.071114
74	74	434.6697	434.8359	0.038221
75	75	443.1734	442.9072	0.060094

ตารางที่ 4.8 (ต่อ)

ข้อมูลทดสอบ ชุดที่	ค่าพิกัดกระแส (%)	Method		ape (%)
		Pt Neural Network (w)	Pt Calculation (w)	
76	76	451.7921	452.0923	0.066399
77	77	460.5255	461.0910	0.122653
78	78	469.3735	469.7035	0.070259
79	79	478.3360	478.2297	0.022231
80	80	487.4125	486.3696	0.214432
81	81	496.6030	496.8232	0.044314
82	82	505.9067	506.1905	0.056059
83	83	515.3158	515.6715	0.068974
84	84	524.6842	524.8662	0.034675
85	85	533.8891	533.6746	0.040188
86	86	543.5797	543.1968	0.070496
87	87	553.4446	553.9326	0.088101
88	88	563.4236	563.6822	0.045873
89	89	573.5138	573.4454	0.011920
90	90	583.7147	584.5224	0.138185
91	91	594.0258	594.0131	0.002137
92	92	604.4467	604.1175	0.054492
93	93	614.9767	614.2356	0.120653
94	94	625.6154	625.4674	0.023659
95	95	636.3621	636.7129	0.055103
96	96	647.2163	647.4722	0.039520
97	97	658.1773	658.3451	0.025491
98	98	669.2444	669.0318	0.031782
99	99	680.4170	679.7321	0.100756
100	100	691.6942	691.5462	0.021401

ตารางที่ 4.9 แสดงผลเปรียบเทียบค่ากำลังสูญเสียรวมของหม้อแปลงจำหน่าย 50 kVA
ที่อุณหภูมิ 45 °c

ข้อมูลทดสอบ ชุดที่	ค่าพิกัดกระแส (%)	Method		ape (%)
		Pt Neural Network (w)	Pt Calculation (w)	
101	1	123.4900	123.0590	0.350268
102	2	123.5613	125.2359	1.337121
103	3	123.7428	122.5307	0.989242
104	4	124.0745	123.2434	0.674339
105	5	124.563	124.4741	0.071423
106	6	125.1962	126.3227	0.891763
107	7	125.9618	125.1892	0.617122
108	8	126.8517	127.3737	0.409808
109	9	127.8619	128.1761	0.245110
110	10	128.9901	128.6964	0.228222
111	11	130.2352	129.6346	0.463281
112	12	131.5967	131.3908	0.156711
113	13	133.0743	133.0649	0.00707
114	14	134.6679	135.1569	0.361814
115	15	136.3776	136.0669	0.228367
116	16	138.2036	138.9947	0.569193
117	17	140.1463	140.4406	0.209523
118	18	142.2061	142.4043	0.139175
119	19	144.3843	144.386	0.001145
120	20	146.6828	146.4855	0.134659
121	21	149.1056	148.7031	0.270699
122	22	151.6596	151.5385	0.079908
123	23	154.3565	154.1919	0.106762
124	24	157.2098	157.4632	0.160916
125	25	160.2187	159.9524	0.166479

ตารางที่ 4.9 (ต่อ)

ข้อมูลทดสอบ ชุดที่	ค่าพิกัดกระแส (%)	Method		ape (%)
		Pt Neural Network (w)	Pt Calculation (w)	
126	26	163.3499	163.5596	0.128191
127	27	166.5590	166.9847	0.254906
128	28	169.8357	170.0277	0.112903
129	29	173.1968	172.9886	0.120351
130	30	176.6596	175.5675	0.622055
131	31	180.2337	180.4643	0.127765
132	32	183.9231	184.2790	0.193127
133	33	187.7293	188.2116	0.256277
134	34	191.6529	191.8622	0.109100
135	35	195.6941	195.1307	0.288715
136	36	199.8532	199.1172	0.369650
137	37	204.1303	204.3215	0.093590
138	38	208.5254	208.5438	0.008830
139	39	213.0388	212.7840	0.119731
140	40	217.6705	218.3422	0.307625
141	41	222.4207	222.3182	0.046083
142	42	227.2895	226.9122	0.166254
143	43	232.2770	231.5242	0.325160
144	44	237.3834	237.2540	0.054527
145	45	242.6087	243.0018	0.161775
146	46	247.9531	248.2675	0.126649
147	47	253.4167	253.6512	0.092437
148	48	258.9996	258.8527	0.056737
149	49	264.7020	264.0722	0.238485
150	50	270.5238	270.4097	0.042214

ตารางที่ 4.9 (ต่อ)

ข้อมูลทดสอบ ชุดที่	ค่าผิดพลาด (%)	Method		ape (%)
		Pt Neural Network (w)	Pt Calculation (w)	
151	51	276.4652	276.3650	0.036256
152	52	282.5263	284.4383	0.672194
153	53	288.7072	287.6295	0.374689
154	54	295.0080	294.2386	0.261483
155	55	301.4287	301.3657	0.020913
156	56	307.9694	309.1107	0.369209
157	57	314.6301	313.8736	0.241027
158	58	321.4109	321.9544	0.168820
159	59	328.3119	328.6532	0.103847
160	60	335.3331	335.0699	0.078552
161	61	342.4744	341.9045	0.166677
162	62	349.7359	349.5571	0.051157
163	63	357.1177	357.1276	0.002761
164	64	364.6196	365.1160	0.135949
165	65	372.2417	371.9223	0.085876
166	66	379.9840	380.7466	0.200284
167	67	387.8463	388.0888	0.062477
168	68	395.8286	395.9489	0.030380
169	69	403.9310	403.8269	0.025769
170	70	412.1531	411.8229	0.080177
171	71	420.4950	419.9368	0.132920
172	72	428.9566	428.6687	0.067173
173	73	437.5376	437.2184	0.073005
174	74	446.2380	446.3861	0.033177
175	75	455.0575	454.7717	0.062842

ตารางที่ 4.9 (ต่อ)

ข้อมูลทดสอบ ชุดที่	ค่าพิกัดกระแส (%)	Method		ape (%)
		Pt Neural Network (w)	Pt Calculation (w)	
176	76	463.9960	464.2753	0.060149
177	77	473.0533	473.5967	0.114744
178	78	482.2291	482.5361	0.063627
179	79	491.5232	491.3935	0.026404
180	80	500.9353	499.8687	0.213375
181	81	510.4650	510.6619	0.038555
182	82	520.1120	520.3730	0.050155
183	83	529.8693	530.2020	0.062756
184	84	539.5979	539.7490	0.027994
185	85	549.1439	548.9139	0.041903
186	86	559.1934	558.7967	0.070990
187	87	569.4198	569.8975	0.083814
188	88	579.7633	580.0161	0.043590
189	89	590.2214	590.1527	0.011635
190	90	600.7935	601.6073	0.135265
191	91	611.4790	611.4797	0.000119
192	92	622.2774	621.9701	0.049406
193	93	633.1880	632.4784	0.112190
194	94	644.2102	644.1047	0.016384
195	95	655.3435	655.7488	0.061813
196	96	666.5869	666.9109	0.048587
197	97	677.9399	678.1910	0.037019
198	98	689.4017	689.2889	0.016363
199	99	700.9715	700.4048	0.080912
200	100	712.6484	712.6386	0.001375

ตารางที่ 4.10 แสดงผลเปรียบเทียบค่ากำลังสูญเสียรวมของหม้อแปลงจำหน่าย 50 kVA
ที่อุณหภูมิ 55 °C

ข้อมูลทดสอบ ชุดที่	ค่าพิกัดกระแส (%)	Method		ape (%)
		Pt Neural Network (w)	Pt Calculation (w)	
201	1	123.4928	123.0611	0.350823
202	2	123.5632	125.2443	1.342251
203	3	123.7588	122.5497	0.986655
204	4	124.1141	123.2772	0.678901
205	5	124.6292	124.5268	0.082209
206	6	125.2902	126.3986	0.876933
207	7	126.0854	125.2926	0.632773
208	8	127.0079	127.5087	0.392741
209	9	128.0540	128.3469	0.228226
210	10	129.2219	128.9073	0.244044
211	11	130.5107	129.8898	0.477986
212	12	131.9198	131.6945	0.171058
213	13	133.4492	133.4214	0.020871
214	14	135.0988	135.5703	0.347810
215	15	136.8688	136.5414	0.239746
216	16	138.7593	139.5347	0.555714
217	17	140.7710	141.0501	0.197891
218	18	142.9046	143.0877	0.127953
219	19	145.1620	145.1474	0.010066
220	20	147.5463	147.3292	0.147330
221	21	150.0634	149.6332	0.287478
222	22	152.7239	152.5594	0.107840
223	23	155.5421	155.3077	0.150946
224	24	158.5242	158.6781	0.096992
225	25	161.6458	161.2707	0.232598

ตารางที่ 4.10 (ต่อ)

ข้อมูลทดสอบ ชุดที่	ค่าพิกัดกระแส (%)	Method		ape (%)
		Pt Neural Network (w)	Pt Calculation (w)	
226	26	164.8587	164.9854	0.076804
227	27	168.1408	168.5223	0.226374
228	28	171.5056	171.6813	0.102347
229	29	174.9724	174.7625	0.120119
230	30	178.5531	177.4658	0.612687
231	31	182.2526	182.4912	0.130773
232	32	186.0728	186.4389	0.196340
233	33	190.0146	190.5086	0.259309
234	34	194.0782	194.3005	0.114412
235	35	198.2637	197.7145	0.277750
236	36	202.5714	201.8507	0.357027
237	37	207.0013	207.2091	0.100273
238	38	211.5537	211.5896	0.016946
239	39	216.2286	215.9922	0.109455
240	40	221.0262	221.7170	0.311550
241	41	225.9465	225.8639	0.036579
242	42	230.9899	230.6329	0.154770
243	43	236.1562	235.4242	0.310944
244	44	241.4458	241.3375	0.044866
245	45	246.8587	247.2730	0.167559
246	46	252.3950	252.7307	0.132821
247	47	258.0549	258.3105	0.098942
248	48	263.8384	263.7124	0.047771
249	49	269.7457	269.1365	0.226349
250	50	275.7768	275.6828	0.034115

ตารางที่ 4.10 (ต่อ)

ข้อมูลทดสอบ ชุดที่	ค่าพิกัดกระแส (%)	Method		ape (%)
		Pt Neural Network (w)	Pt Calculation (w)	
251	51	281.9320	281.8511	0.028691
252	52	288.2111	290.1417	0.665386
253	53	294.6145	293.5543	0.361147
254	54	301.1420	300.3892	0.250622
255	55	307.7938	307.7461	0.015491
256	56	314.5700	315.7252	0.365901
257	57	321.4705	320.7265	0.231973
258	58	328.4955	329.0499	0.168488
259	59	335.6450	335.9955	0.104305
260	60	342.9190	342.6632	0.074662
261	61	350.3174	349.7530	0.161370
262	62	357.8404	357.6650	0.049041
263	63	365.4878	365.4991	0.003101
264	64	373.2597	373.7554	0.132632
265	65	381.1561	380.8338	0.084618
266	66	389.1768	389.9344	0.194295
267	67	397.3218	397.5571	0.059198
268	68	405.5911	405.7020	0.027339
269	69	413.9844	413.8690	0.027876
270	70	422.5018	422.1582	0.081394
271	71	431.1431	430.5695	0.133220
272	72	439.9081	439.6030	0.069415
273	73	448.7966	448.4585	0.075380
274	74	457.8085	457.9363	0.027907
275	75	466.9436	466.6362	0.065878

ตารางที่ 4.10 (ต่อ)

ข้อมูลทดสอบ ชุดที่	ค่าผิดพลาด (%)	Method		ape (%)
		Pt Neural Network (w)	Pt Calculation (w)	
276	76	476.2016	476.4582	0.053861
277	77	485.5823	486.1024	0.106996
278	78	495.0854	495.3687	0.057198
279	79	504.7106	504.5572	0.030400
280	80	514.4576	513.3678	0.212277
281	81	524.3261	524.5006	0.033271
282	82	534.3154	534.5555	0.044920
283	83	544.4200	544.7326	0.057383
284	84	554.5076	554.6318	0.022392
285	85	564.3944	564.1531	0.042764
286	86	574.8017	574.3966	0.070518
287	87	585.3882	585.8623	0.080922
288	88	596.0950	596.3501	0.042775
289	89	606.9196	606.8600	0.009817
290	90	617.8614	618.6921	0.134269
291	91	628.9196	628.9463	0.004252
292	92	640.0938	639.8227	0.042368
293	93	651.3831	650.7212	0.101711
294	94	662.7869	662.7419	0.006788
295	95	674.3044	674.7847	0.071182
296	96	685.9348	686.3497	0.060449
297	97	697.6774	698.0368	0.051487
298	98	709.5311	709.5461	0.002107
299	99	721.4952	721.0775	0.057934
300	100	733.5687	733.7310	0.022120

ตารางที่ 4.11 แสดงผลเปรียบเทียบค่ากำลังสูญเสียรวมของหม้อแปลงจำหน่าย 50 kVA
ที่อุณหภูมิ 65 °c

ข้อมูลทดสอบ ชุดที่	ค่าพิกัดกระแส (%)	Method		ape (%)
		Pt Neural Network (w)	Pt Calculation (w)	
301	1	123.4933	123.0630	0.349510
302	2	123.5649	125.2530	1.347539
303	3	123.7765	122.5690	0.985455
304	4	124.1557	123.3110	0.685083
305	5	124.6967	124.5800	0.094029
306	6	125.3849	126.4750	0.861568
307	7	126.2094	125.3960	0.648717
308	8	127.1642	127.6440	0.375631
309	9	128.2462	128.5180	0.211309
310	10	129.4538	129.1180	0.259890
311	11	130.7861	130.1450	0.492556
312	12	132.2430	131.9980	0.185414
313	13	133.8242	133.7780	0.034673
314	14	135.5298	135.9840	0.333818
315	15	137.3600	137.0160	0.251046
316	16	139.3152	140.0750	0.542196
317	17	141.3962	141.6600	0.186007
318	18	143.6041	143.7710	0.116142
319	19	145.9417	145.9090	0.022531
320	20	148.4136	148.1730	0.162421
321	21	151.0289	150.5630	0.309164
322	22	153.8014	153.5800	0.143995
323	23	156.7433	156.4230	0.204472
324	24	159.8424	159.8930	0.031664
325	25	163.0523	162.5890	0.284975

ตารางที่ 4.11 (ต่อ)

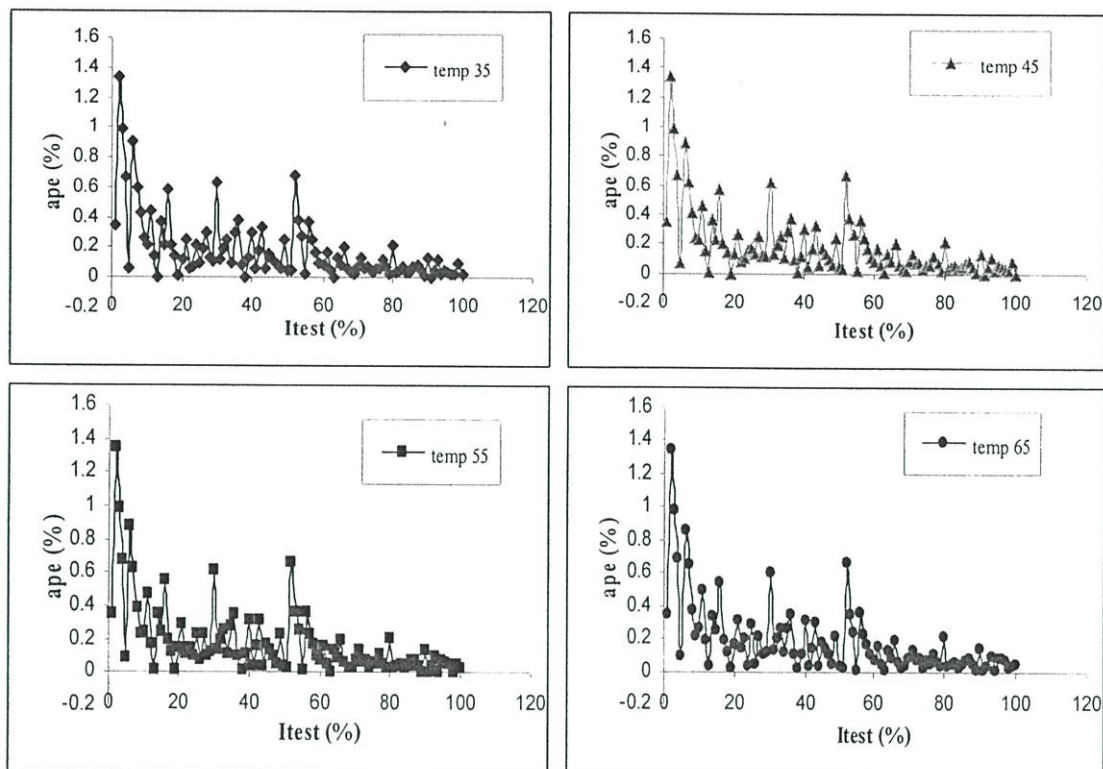
ข้อมูลทดสอบ ชุดที่	ค่าพิกัดกระแส (%)	Method		ape (%)
		Pt Neural Network (w)	Pt Calculation (w)	
326	26	166.3366	166.4110	0.044866
327	27	169.7003	170.0600	0.211470
328	28	173.1645	173.3350	0.098338
329	29	176.7439	176.5360	0.117569
330	30	180.4454	179.3640	0.602849
331	31	184.2714	184.5180	0.133769
332	32	188.2229	188.5990	0.199268
333	33	192.3004	192.8060	0.262009
334	34	196.5041	196.7390	0.119288
335	35	200.8340	200.2980	0.267418
336	36	205.2903	204.5840	0.345084
337	37	209.8732	210.0970	0.106343
338	38	214.5829	214.6350	0.024413
339	39	219.4194	219.2000	0.099936
340	40	224.3829	225.0920	0.314913
341	41	229.4736	229.4100	0.027935
342	42	234.6915	234.3540	0.144163
343	43	240.0368	239.3240	0.297777
344	44	245.5097	245.4210	0.036138
345	45	251.1102	251.5440	0.172550
346	46	256.8386	257.1940	0.138118
347	47	262.6948	262.9700	0.104571
348	48	268.6790	268.5720	0.039799
349	49	274.7914	274.2010	0.215390
350	50	281.0320	280.9560	0.027104

ตารางที่ 4.11 (ต่อ)

ข้อมูลทดสอบ ชุดที่	ค่าพิกัดกระแส (%)	Method		ape (%)
		Pt Neural Network (w)	Pt Calculation (w)	
351	51	287.4010	287.3370	0.022181
352	52	293.8983	295.8450	0.658029
353	53	300.5242	299.4790	0.348941
354	54	307.2786	306.5400	0.241044
355	55	314.1616	314.1270	0.011149
356	56	321.1734	322.3400	0.361860
357	57	328.3138	327.5790	0.224183
358	58	335.5831	336.1450	0.167276
359	59	342.9811	343.3380	0.103870
360	60	350.5079	350.2560	0.071798
361	61	358.1636	357.6010	0.157190
362	62	365.9480	365.7730	0.047867
363	63	373.8612	373.8710	0.002543
364	64	381.9031	382.3950	0.128601
365	65	390.0736	389.7450	0.084212
366	66	398.3728	399.1220	0.187780
367	67	406.8005	407.0260	0.055285
368	68	415.3565	415.4550	0.023743
369	69	424.0408	423.9110	0.030591
370	70	432.8533	432.4930	0.083200
371	71	441.7937	441.2020	0.134071
372	72	450.8619	450.5370	0.072058
373	73	460.0577	459.6990	0.078097
374	74	469.3808	469.4860	0.022513
375	75	478.8311	478.5010	0.069057

ตารางที่ 4.11 (ต่อ)

ข้อมูลทดสอบ ชุดที่	ค่าพิสัยกระจาย (%)	Method		ape (%)
		Pt Neural Network (w)	Pt Calculation (w)	
376	76	488.4082	488.6410	0.047682
377	77	498.1118	498.6080	0.099536
378	78	507.9417	508.2010	0.051093
379	79	517.8975	517.7210	0.034095
380	80	527.9788	526.8670	0.211026
381	81	538.1852	538.3390	0.028631
382	82	548.5161	548.7380	0.040448
383	83	558.9668	559.2630	0.052988
384	84	569.4121	569.5150	0.017996
385	85	579.6391	579.3920	0.042578
386	86	590.4031	589.9970	0.068901
387	87	601.3486	601.8270	0.079513
388	88	612.4172	612.6840	0.043553
389	89	623.6068	623.5670	0.006332
390	90	634.9166	635.7770	0.135323
391	91	646.3459	646.4130	0.010374
392	92	657.8939	657.6750	0.033234
393	93	669.5599	668.9640	0.089069
394	94	681.3431	681.3790	0.005292
395	95	693.2426	693.8210	0.083310
396	96	705.2575	705.7880	0.075227
397	97	717.3868	717.8830	0.069069
398	98	729.6297	729.8030	0.023773
399	99	741.9851	741.7500	0.031680
400	100	754.4519	754.8230	0.049217



รูปที่ 4.8 ค่าเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดสัมบูรณ์ของหม้อแปลง 50 kVA. ที่พิกัดกระแส 1-100%

จากผลการทดสอบในตารางที่ 4.7 ถึง 4.11 และรูปที่ 4.8 สามารถสรุปได้ดังนี้

1. โครงข่ายประสาทดัดเทียมที่ผ่านการฝึกสอนโดยมีชุดฝึกสอน 400 ชุด ที่อุณหภูมิ 30°C , 40°C , 50°C และ 60°C และชุดทดสอบ 400 ชุด ที่อุณหภูมิ 35°C , 45°C , 55°C และ 65°C สามารถหาค่าค่าตอบของกำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมของหม้อแปลงจำหน่าย โดยมีค่าเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (Mean Absolute Percentage Error : MAPE) เท่ากับ 0.18285% , ค่าผิดพลาดต่ำที่สุด (Min Error) เท่ากับ 0% และค่าผิดพลาดสูงที่สุด (Max Error) เท่ากับ 1.34754%
2. เวลาที่ใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทดัดเทียมที่ดีที่สุดประมาณ 37.3845 นาที ดังแสดงในตารางที่ 4.7 โดยจะได้จำนวนนิรอนในชั้นซ่อนที่ 1 และชั้นเอาต์พุตเท่ากับ 3 และ 1 ตามลำดับ
3. จากรูปที่ 4.8 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดสัมบูรณ์ของหม้อแปลง 50 kVA. เมื่อค่าพิกัดกระแสเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตั้งแต่ 1-100% จะเห็นว่าในช่วงกระแสพิกัด 1-10% นั้น จะมีค่าผิดพลาดเกิดขึ้นมากกว่าช่วงอื่นๆ อย่างไรก็ตามยังเป็นค่าที่ยอมรับได้ เมื่อเปรียบเทียบกับหม้อแปลงขนาด 30 kVA. จะเห็นว่า หม้อแปลง 50 kVA. จะเกิดค่าผิดพลาดของข้อมูลชุดทดสอบสูงกว่า

บทที่ 5

ผลการทดลอง

บทนี้เป็นการนำเสนอผลการทดลองซึ่งได้จากการทำนายค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียรวม (Pt) ในหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 30 kVA และ 50 kVA โดยวิธีโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ (Back-propagation Neural Networks) ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดทองแดงของหม้อแปลงจำหน่ายซึ่งตามข้อกำหนดจะอ้างอิงที่อุณหภูมิ 75°C โดยทำการฝึกสอนด้วย Neural Networks Toolbox ตามรูปแบบและวิธีการที่ได้นำเสนอในบทที่ 4 โดยมีรายละเอียดและผลการทดลองที่ได้จากการทำนายดังต่อไปนี้

ตารางที่ 5.1 แสดงผลการทำนายค่ากำลังสูญเสียรวมของหม้อแปลงจำหน่าย 30 kVA.
ที่อุณหภูมิ 75 °c

ข้อมูลทดสอบ ชุดที่	ค่าพิกัดกระแส (%)	Method		ape (%)
		Pt Neural Network (w)	Pt Calculation (w)	
401	1	109.3570	108.4403	0.845352
402	2	109.6212	108.5612	0.976415
403	3	109.9441	108.7627	1.086235
404	4	110.3223	109.0448	1.171567
405	5	110.7533	109.4074	1.230127
406	6	111.2360	109.8507	1.261050
407	7	111.7705	110.3746	1.264691
408	8	112.3586	110.9791	1.243053
409	9	113.0034	111.6641	1.199366
410	10	113.7098	112.4298	1.138488
411	11	114.4836	113.2761	1.066017
412	12	115.3318	114.2029	0.988494
413	13	116.2618	115.2104	0.912625
414	14	117.2807	116.2984	0.844631
415	15	118.3950	117.4670	0.789967
416	16	119.6101	118.7163	0.752898
417	17	120.9292	120.0461	0.735616
418	18	122.3532	121.4566	0.738247
419	19	123.8805	122.9476	0.758797
420	20	125.5065	124.5192	0.792891
421	21	127.2241	126.1714	0.834328
422	22	129.0243	127.9042	0.875709
423	23	130.8968	129.7176	0.909020
424	24	132.8312	131.6116	0.926630
425	25	134.8188	133.5862	0.922664

ตารางที่ 5.1 (ต่อ)

ข้อมูลทดสอบ ชุดที่	ค่าพิกัดกระแส (%)	Method		ape (%)
		Pt Neural Network (w)	Pt Calculation (w)	
426	26	136.8536	135.6414	0.893646
427	27	138.9344	137.7772	0.839877
428	28	141.0654	139.9936	0.765585
429	29	143.2560	142.2906	0.678459
430	30	145.5206	144.6682	0.589212
431	31	147.8763	147.1264	0.509714
432	32	150.3400	149.6651	0.450907
433	33	152.9251	152.2845	0.420647
434	34	155.6391	154.9845	0.422374
435	35	158.4812	157.7650	0.453936
436	36	161.4425	160.6262	0.508196
437	37	164.5068	163.5680	0.573976
438	38	167.6542	166.5903	0.638628
439	39	170.8644	169.6933	0.690155
440	40	174.1214	172.8768	0.719937
441	41	177.4160	176.1409	0.723890
442	42	180.7466	179.4857	0.702525
443	43	184.1185	182.9110	0.660159
444	44	187.5409	186.4169	0.602937
445	45	191.0244	190.0034	0.537335
446	46	194.5795	193.6706	0.469321
447	47	198.2159	197.4183	0.404027
448	48	201.9425	201.2466	0.345802
449	49	205.7674	205.1555	0.298266
450	50	209.6978	209.1450	0.264317

ตารางที่ 5.1 (ต่อ)

ข้อมูลทดสอบ ชุดที่	ค่าพิกัดกระแส (%)	Method		ape (%)
		Pt Neural Network (w)	Pt Calculation (w)	
451	51	213.7384	213.2151	0.245437
452	52	217.8912	217.3658	0.241719
453	53	222.1541	221.5971	0.251368
454	54	226.5206	225.9090	0.270746
455	55	230.9801	230.3014	0.294682
456	56	235.5195	234.7745	0.317317
457	57	240.1244	239.3282	0.332684
458	58	244.7819	243.9625	0.335886
459	59	249.4828	248.6773	0.323902
460	60	254.2234	253.4728	0.296130
461	61	259.0071	258.3488	0.254792
462	62	263.8438	263.3055	0.204438
463	63	268.7487	268.3428	0.151280
464	64	273.7401	273.4606	0.102209
465	65	278.8356	278.6590	0.063361
466	66	284.0493	283.9381	0.039172
467	67	289.3892	289.2977	0.031625
468	68	294.8559	294.7379	0.040022
469	69	300.4424	300.2588	0.061159
470	70	306.1358	305.8602	0.090111
471	71	311.9193	311.5422	0.121041
472	72	317.7752	317.3048	0.148243
473	73	323.6880	323.1480	0.167097
474	74	329.6469	329.0718	0.174754
475	75	335.6470	335.0762	0.170339

ตารางที่ 5.1 (ต่อ)

ข้อมูลทดสอบ ชุดที่	ค่าพิสัยกระแส (%)	Method		ape (%)
		Pt Neural Network (w)	Pt Calculation (w)	
476	76	341.6906	341.1612	0.155166
477	77	347.7857	347.3268	0.132116
478	78	353.9449	353.5730	0.105179
479	79	360.1826	359.8998	0.078577
480	80	366.5127	366.3072	0.056105
481	81	372.9468	372.7952	0.040676
482	82	379.4922	379.3637	0.033863
483	83	386.1520	386.0129	0.036034
484	84	392.9247	392.7427	0.046348
485	85	399.8058	399.5530	0.063263
486	86	406.7881	406.4440	0.084664
487	87	413.8631	413.4155	0.108258
488	88	421.0219	420.4677	0.131807
489	89	428.2559	427.6004	0.153288
490	90	435.5570	434.8138	0.170928
491	91	442.9185	442.1077	0.183390
492	92	450.3347	449.4823	0.189651
493	93	457.8011	456.9374	0.189024
494	94	465.3142	464.4731	0.181086
495	95	472.8718	472.0894	0.165726
496	96	480.4722	479.7863	0.142950
497	97	488.1147	487.5639	0.112978
498	98	495.7991	495.4220	0.076123
499	99	503.5257	503.3607	0.032785
500	100	511.2953	511.3800	0.016558

ตารางที่ 5.2 แสดงผลการทำนายค่ากำลังสูญเสียรวมของหม้อแปลงจำหน่าย 50 kVA.
ที่อุณหภูมิ 75 °c

ข้อมูลทดสอบ ชุดที่	ค่าพิกัดกระแส (%)	Method		ape (%)
		Pt Neural Network (w)	Pt Calculation (w)	
401	1	123.4919	123.0653	0.346652
402	2	123.5668	125.2612	1.352668
403	3	123.7961	122.5876	0.985803
404	4	124.1991	123.3447	0.692717
405	5	124.7654	124.6323	0.106795
406	6	125.4803	126.5505	0.845678
407	7	126.3338	125.4993	0.664940
408	8	127.3208	127.7787	0.358341
409	9	128.4385	128.6886	0.194381
410	10	129.6857	129.3292	0.275658
411	11	131.0617	130.4003	0.507189
412	12	132.5662	132.3020	0.199665
413	13	134.1992	134.1343	0.048357
414	14	135.9609	136.3972	0.319889
415	15	137.8515	137.4907	0.262429
416	16	139.8715	140.6147	0.528561
417	17	142.0220	142.2694	0.173874
418	18	144.3049	144.4546	0.103622
419	19	146.7239	146.6704	0.036484
420	20	149.2862	149.0168	0.180803
421	21	152.0040	151.4937	0.336817
422	22	154.8926	154.6013	0.188423
423	23	157.9534	157.5394	0.262770
424	24	161.1498	161.1082	0.025850
425	25	164.4327	163.9075	0.320450

ตารางที่ 5.2 (ต่อ)

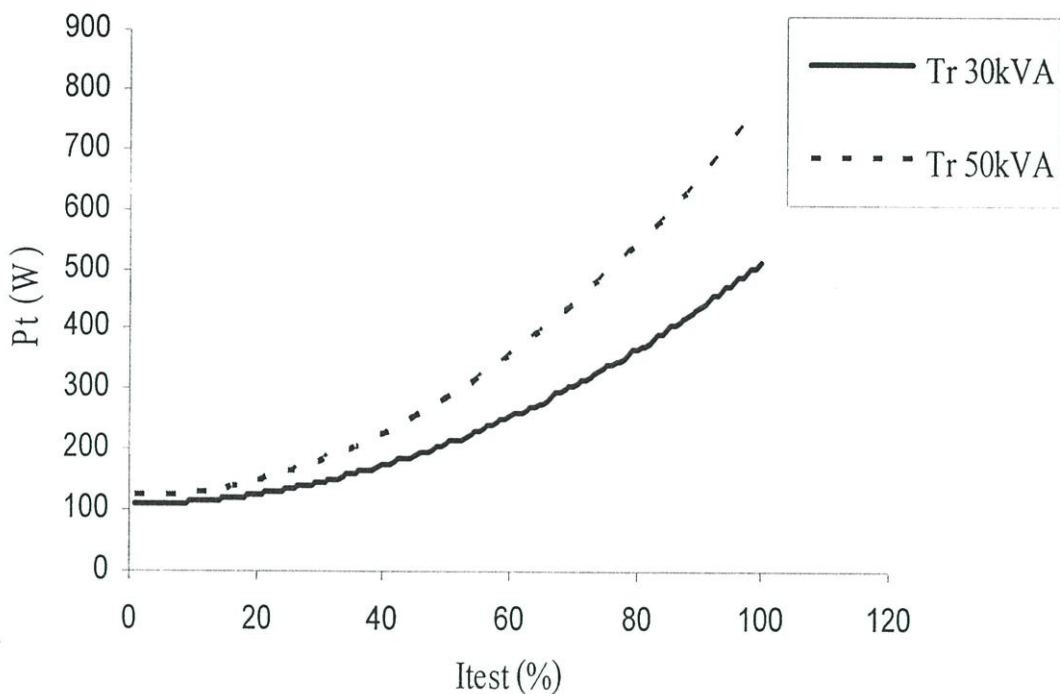
ข้อมูลทดสอบ ชุดที่	ค่าพิภักดิ์กระแส (%)	Method		ape (%)
		Pt Neural Network (w)	Pt Calculation (w)	
426	26	167.7920	167.8373	0.027019
427	27	171.2479	171.5978	0.203919
428	28	174.8188	174.9889	0.097193
429	29	178.5142	178.3105	0.114230
430	30	182.3377	181.2627	0.593039
431	31	186.2908	186.5455	0.136561
432	32	190.3739	190.7589	0.201847
433	33	194.5872	195.1029	0.264330
434	34	198.9310	199.1775	0.123747
435	35	203.4053	202.8826	0.257627
436	36	208.0105	207.3183	0.333860
437	37	212.7465	212.9847	0.111819
438	38	217.6135	217.6816	0.031262
439	39	222.6117	222.4090	0.091124
440	40	227.7413	228.4671	0.317680
441	41	233.0023	232.9557	0.019986
442	42	238.3950	238.0750	0.134423
443	43	243.9194	243.2248	0.285585
444	44	249.5757	249.5052	0.028262
445	45	255.3641	255.8162	0.176715
446	46	261.2845	261.6577	0.142641
447	47	267.3373	267.6299	0.109323
448	48	273.5224	273.4326	0.032836
449	49	279.8400	279.2659	0.205563
450	50	286.2902	286.2298	0.021090

ตารางที่ 5.2 (ต่อ)

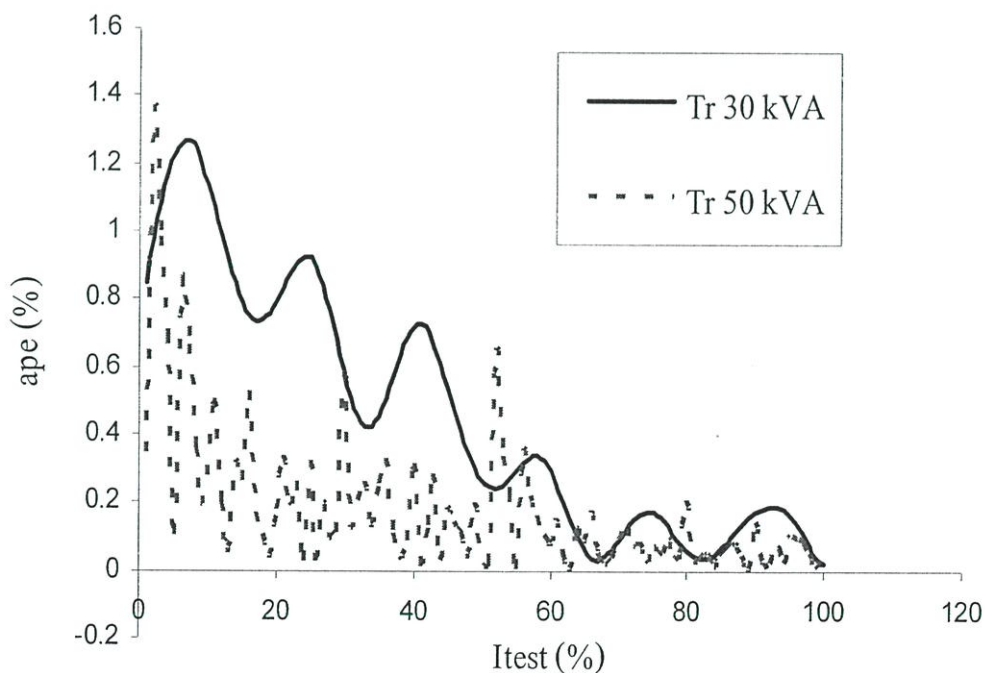
ข้อมูลทดสอบ ชุดที่	ค่าพิกัดกระแส (%)	Method		ape (%)
		Pt Neural Network (w)	Pt Calculation (w)	
451	51	292.8731	292.8243	0.016658
452	52	299.5887	301.5494	0.650205
453	53	306.4373	305.4050	0.337996
454	54	313.4187	312.6913	0.232632
455	55	320.5331	320.5081	0.007800
456	56	327.7805	328.9555	0.357193
457	57	335.1610	334.4335	0.217534
458	58	342.6746	343.2421	0.165325
459	59	350.3213	350.6812	0.102635
460	60	358.1011	357.8510	0.069900
461	61	366.0140	365.4513	0.153978
462	62	374.0599	373.8822	0.047530
463	63	382.2389	382.2437	0.001252
464	64	390.5508	391.0358	0.124020
465	65	398.9956	398.6584	0.084578
466	66	407.5732	408.3117	0.180858
467	67	416.2834	416.4955	0.050923
468	68	425.1262	425.2099	0.019685
469	69	434.1014	433.9549	0.03376
470	70	443.2088	442.8305	0.085433
471	71	452.4482	451.8366	0.135350
472	72	461.8194	461.4734	0.074980
473	73	471.3222	470.9407	0.081005
474	74	480.9563	481.0386	0.017115
475	75	490.7214	490.3671	0.072246

ตารางที่ 5.2 (ต่อ)

ข้อมูลทดสอบ ชุดที่	ค่าผิดพลาด (%)	Method		ape (%)
		Pt Neural Network (w)	Pt Calculation (w)	
476	76	500.6172	500.8262	0.041733
477	77	510.6433	511.1159	0.092460
478	78	520.7994	521.0361	0.045434
479	79	531.0852	530.8870	0.037341
480	80	541.5000	540.3684	0.209417
481	81	552.0436	552.1804	0.024771
482	82	562.7154	562.9230	0.036873
483	83	573.5111	573.7961	0.049675
484	84	584.3127	584.3999	0.014919
485	85	594.8794	594.6342	0.041232
486	86	605.9990	605.5991	0.066027
487	87	617.3020	617.7946	0.079743
488	88	628.7311	629.0207	0.046046
489	89	640.2842	640.2774	0.001061
490	90	651.9603	652.8647	0.138523
491	91	663.7588	663.8825	0.018634
492	92	675.6788	675.5309	0.021890
493	93	687.7194	687.2099	0.074135
494	94	699.8797	700.0195	0.019975
495	95	712.1588	712.8597	0.098323
496	96	724.5555	725.2305	0.093069
497	97	737.0690	737.7318	0.089844
498	98	749.6981	750.0637	0.048747
499	99	762.4416	762.4262	0.002014
500	100	775.2985	775.9193	0.080013



รูปที่ 5.1 ค่าความสูญเสียรวม (Pt) ของหม้อแปลงจำหน่ายที่ได้จากการทำนายที่อุณหภูมิ 75°C



รูปที่ 5.2 ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสัมบูรณ์ของหม้อแปลงจำหน่ายที่ได้จากการทำนายที่อุณหภูมิ 75°C

จากผลการทดลองในตารางที่ 5.1 และ 5.2 รูปที่ 5.1 และ 5.2 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

1. จากตารางที่ 5.1 แสดงผลการทดลองที่ได้จากการทำนายค่าความสูญเสียรวม (Pt) ในหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 30 kVA โดยจำนวนชุดทดสอบ 100 ชุด (ชุดทดสอบที่ 401-500) จากผลการทดลองที่ได้แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (Mean Absolute Percentage Error :MAPE) เท่ากับ 0.458448 % , ค่าผิดพลาดต่ำที่สุด (Min Error) เท่ากับ 0.16558 % และค่าผิดพลาดสูงสุด (Max Error) เท่ากับ 1.264691 %

2. จากตารางที่ 5.2 แสดงผลการทดลองที่ได้จากการทำนายค่าความสูญเสียรวม (Pt) ในหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 50 kVA โดยจำนวนชุดทดสอบ 100 ชุด (ชุดทดสอบที่ 401-500) จากผลการทดลองที่ได้แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (Mean Absolute Percentage Error :MAPE) เท่ากับ 0.18173 % , ค่าผิดพลาดต่ำที่สุด (Min Error) เท่ากับ 0.001061 % และค่าผิดพลาดสูงสุด (Max Error) เท่ากับ 1.352668 %

3. จากผลการทดลองในตารางที่ 5.1 และ 5.2 สามารถแสดงได้ในรูปที่ 5.1 และ 5.2 ซึ่งเป็นกราฟแสดงค่ากำลังสูญเสียรวมที่ได้จากการทำนาย ณ อุณหภูมิ 75°C และแสดงค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณ แสดงให้เห็นประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายค่าความสูญเสียรวม (Pt) ในหม้อแปลงจำหน่าย สามารถให้ผลลัพธ์ได้อย่างถูกต้อง แม่นยำ โดยดูจากค่าผิดพลาดสัมบูรณ์ที่เกิดขึ้น

บทที่ 6

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอวิธีการทำนายค่าความสูญเสียรวมในหม้อแปลงจำหน่าย โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งผู้วิจัยได้ศึกษาการใช้งานของหม้อแปลงจำหน่ายภายในโรงงานผลิต ตามมาตรฐานของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) รวมทั้งการนำโครงข่ายประสาทเทียมมาใช้ในการทำนายค่ากำลังสูญเสียรวมในหม้อแปลงจำหน่ายให้สามารถได้ค่าคำตอบที่ถูกต้องแม่นยำที่สุด และเป็นค่าที่ยอมรับได้ ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการทดสอบหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 1 เฟส 30 kVA และ 50 kVA โดยพิจารณาถึงอุณหภูมิ (T) และพิกัดกระแสของหม้อแปลง (I_{test}) สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. ทำการทดสอบหม้อแปลงจำหน่ายในโรงงานผลิต โดยทดสอบแบบลัดวงจร (Short Circuit) เพื่อหาค่าความสูญเสียในขดลวดทองแดง ซึ่งพิจารณาที่อุณหภูมิและพิกัดกระแสของหม้อแปลง และทดสอบแบบเปิดวงจร (Open Circuit) เพื่อหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก ซึ่งจะมีค่าคงที่ในทุกๆสภาวะของโหลด บันทึกผลการทดสอบที่ได้ทั้งหมด ณ. อุณหภูมิแวดล้อม ($(30^{\circ}C)$)
2. พิจารณาที่อุณหภูมิอื่นๆ ที่จะส่งผลต่อค่ากำลังสูญเสียในขดลวดทองแดง (P_{cu}) โดยการคำนวณค่าที่อุณหภูมิอื่นๆ โดยใช้สมการที่เกี่ยวข้อง ตามที่กล่าวมาในบทที่ 2 ซึ่งจะเป็นสามการในการหาค่าความต้านทานขดลวดทางด้านปฐมภูมิ และทุติยภูมิ
3. เตรียมข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาวิจัย ซึ่งเป็นข้อมูลในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมประกอบไปด้วย ชุดข้อมูลฝึกสอนจำนวน 400 ชุด และชุดข้อมูลทดสอบจำนวน 400 ชุด ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้พิจารณาเลือกตัวแปรในชุดข้อมูลดังกล่าวที่มีผลต่อการทำนายค่าความสูญเสียรวมในหม้อแปลงจำหน่าย
4. ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เลือกใช้โครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ (Back-Propagation Neural Networks) ในการเรียนรู้ผลกระทบที่มีผลต่อค่าความสูญเสียรวม และพิจารณาหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมของหม้อแปลง ซึ่งเป็นคำตอบของโครงข่ายประสาทเทียม
5. การฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมในแต่ละเงื่อนไข จะใช้ฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function) คือ ในชั้นซ่อนจะใช้ tan-sigmoid และ purelin ในชั้นเอาต์พุต ซึ่งผู้วิจัยได้ทำการศึกษาวิจัยเลือกชุดฟังก์ชันถ่ายโอนที่ทำให้ประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมมีประสิทธิภาพมากที่สุด
6. จากผลการทดลองที่ได้นำเสนอ แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์และทำนายค่ากำลังสูญเสียรวม (P_t) ใน

หม้อแปลงจำหน่ายได้อย่างถูกต้อง แม่นยำ เป็นที่ยอมรับได้ โดยแสดงค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์ที่เกิดขึ้นจากการเปรียบเทียบผลคำตอบของค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียรวม (P_L) ที่ได้จากการทำนายโดยโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ โครงข่ายประสาทเทียมสามารถทำนายค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมค่อนข้างใกล้เคียงกับค่าที่ได้คำนวณ เป็นไปตามทฤษฎีที่อ้างถึง

7. สิ่งที่ควรนำไปพัฒนาต่อไป คือ

7.1 การนำโครงข่ายประสาทเทียมมาใช้ในการทำนายค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียรวม (P_L) ในหม้อแปลงจำหน่าย โดยการเลือกพิจารณาค่าอินพุตที่ให้โครงข่ายประสาทเทียม 2 อินพุต คือ ค่า 8 ค่าพิกัดกระแส (Itest) และ อุณหภูมิ (T) หรืออาจจะพิจารณาที่ตัวแปรอื่นๆ เช่น ค่าความต้านทาน เป็นต้น และพิจารณาผลการทำนายค่าคำตอบที่ได้ว่า ค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์ที่เกิดขึ้น ให้ค่าที่ยอมรับได้หรือไม่

7.2 อาจจะนำไปใช้กับหม้อแปลงขนาดใหญ่ขึ้น หรือ ในหม้อแปลง 3 เฟส เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] ชวรัตน์ เก่งธรรมกิจ. “การออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายให้มีราคาที่เหมาะสมโดยใช้
จีเน็ติกอัลกอริธึม.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2546.
- [2] บุญเลิศ สือเฉย. การออกแบบและการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในระบบจำหน่าย. พิมพ์ครั้งที่
ที่ 2. กรุงเทพมหานคร. ธันวาคม พ.ศ. 2548.
- [3] กองฝึกอบรมการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. หม้อแปลงไฟฟ้า. กรุงเทพมหานคร. 2522.
- [4] ไสว ฐานิพานิชสกุล. หม้อแปลง. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : หจก. ฟันนี่ พับบลิชซิ่ง.
2525.
- [5] สัมพันธ์ หาญชเล. เครื่องกลไฟฟ้า 1. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร. 2535.
- [6] มงคล ทองสงคราม. หม้อแปลงไฟฟ้า. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร : บริษัทรามากการ
พิมพ์ จำกัด.
- [7] S. A. Stigant and A. C. Franklin. **The J & P Transformer Book London.** U. K.
Butterworth., 1973.
- [8] S.V. Kulkarni,S. A. Khaparde. **Transformer Engineering Design and Practice.** New York
Marcel Dekker, Inc., 2004.
- [9] Andra Nunes de Souza., Ivan Nunes da Silva., Claudia F. L. N. de Souza. And Maria
Goretti Zago. “Using Artificial Neural Networks for Identification of Electrical
Losses in Transformers During the Manufacturing Phase.” **Nueral Networks.,**
2002. IJCNN’02 Proceedings of the 2002 International Joint Conference,Vol.2
12-17 May 2002. pp. 1346-1350
- [10] M. T. Hagan. “Training Feedforward Networks with the Marquardt Algorithm.” **IEEE
Transactionson Neural Networks.,** Vol. 6, 1994. pp. 989-993
- [11] B. W. McConnell. “Increasing Distribution Transformer Efficiency : Potential for Energy
Savings.” **IEEE Power Eng.** Vol. 18, 1998. pp. 8-10
- [12] ภูริสัมพันธ์ ลักขมร. “การทำนายการจ่ายโหลดอย่างประหยัดโดยวิธีโครงข่ายประสาทเทียม.”
วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย,
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2548.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [13] อรรถพล เก้าพิทักษ์กุล. “การแปลงเวฟเล็ตและโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับวิเคราะห์ฟอลต์ในสายส่ง.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2547.
- [14] จูติพงษ์ นิยมศักดิ์. “ การแปลงเวฟเล็ตและโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับวิเคราะห์ฟอลต์ในสายส่งวงจรคู่.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2549.
- [15] H. Demuth and M. Beale. **Neural Network Toolbox User’s Guide**. The Mathworks Inc., January 1998.
- [16] Laurene Fausett. **Fundamentals of Neural Networks**. New Jersey : Prentice-Hall , Inc., 1994.
- [17] Christopher M. Bishop. **Neural Networks for Pattern Recognition**. New York : Oxford University Press Inc., 1995.
- [18] มนัส สังวรศิลป์, วรรัตน์ ภัทรอมรกุล. คู่มือการใช้งาน MATLAB ฉบับสมบูรณ์. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์อินโฟเพรส. เมษายน 2543.

ภาคผนวก ก.

การเลือกอินพุตของโครงข่ายประสาทเทียม

ในปัจจุบันมีชนิดของโครงข่ายประสาทเทียมเป็นจำนวนมาก บางโครงข่ายประสาทเป็นแบบจำลองของชีวโครงข่ายประสาทเทียมและบางชนิดก็ไม่ใช่ อย่างไรก็ตาม โครงข่ายประสาทเทียมอาจพิจารณาให้เป็นขั้นตอนวิธีทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Algorithm) ของโครงข่ายประสาทชีวภาพ โดยตั้งบนพื้นฐานองค์ประกอบทั้ง 3 ส่วน คือ

1. เป็นรูปแบบการเชื่อมโยงระหว่างนิวรอน เรียกส่วนนี้ว่า โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม
2. เป็นการกำหนดค่าของการเชื่อมโยง เรียกส่วนนี้ว่า ขั้นตอนวิธีการฝึกสอนหรือการเรียนรู้
3. เกี่ยวกับการกำหนดข้อมูลเอาต์พุตโดยฟังก์ชันกระตุ้น (Activation Function)

การประยุกต์ใช้งานจึงควรคำนึงถึงองค์ประกอบทั้ง 3 ส่วนนี้เป็นสำคัญและประยุกต์ให้เหมาะสม เนื่องจากการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับในวิทยานิพนธ์จะใช้ Neural Networks Toolbox [15] ของโปรแกรม MATLAB ดังนั้น ผู้ฝึกสอนจำเป็นต้องกำหนดองค์ประกอบเอง โดยในวิทยานิพนธ์ได้กำหนดจำนวนครั้งในการสุ่มค่าเริ่มต้นของค่าถ่วงน้ำหนักเพียงครั้งเดียว และใช้ Levenberg – Marquardt Algorithm สำหรับฝึกสอนเพื่อปรับเปลี่ยนค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอส ดังที่ได้กล่าวมา ในส่วนของการพิจารณาเลือกโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมและฟังก์ชันกระตุ้นนั้น ผู้วิจัยเองได้ทำการปรับเปลี่ยนโครงสร้างและฟังก์ชันกระตุ้นเพื่อเลือกโครงสร้างและฟังก์ชันกระตุ้นที่ดีที่สุด ในภาคผนวกได้แสดงผลสรุปการฝึกสอน ในการปรับเปลี่ยนโครงสร้างและฟังก์ชันกระตุ้นสำหรับหาค่ากำลังสูญเสียรวมในหม้อแปลงจำหน่ายรวมไปถึงการกำหนดจำนวนครั้งที่สุ่มค่าเริ่มต้นของค่าถ่วงน้ำหนัก และค่าไบแอส เพื่อแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมและฟังก์ชันกระตุ้น และจำนวนครั้งที่สุ่มค่าเริ่มต้นที่ได้เลือกใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ มีประสิทธิภาพดีที่สุด จึงได้เลือกนำมาใช้ในงานวิจัย โดยมีขั้นตอนการปรับเปลี่ยนโครงสร้างและฟังก์ชันกระตุ้นดังต่อไปนี้

1. ตัวแปรอินพุตจำนวน 2 ตัวแปร เปรียบเทียบกับแบบ 3 ตัวแปร
2. ฟังก์ชันกระตุ้นในชั้นซ่อนใช้ Logsigmoi เปรียบเทียบกับ Tansigmoi

ตาราง ก1 แสดงผลสรุปการเลือกตัวแปรอินพุตของโครงข่ายประสาทเทียมในหม้อแปลง 30 kVA

ตัวแปรอินพุต	MAPE (%)	MAX Error (%)	MIN Error (%)
2 ตัวแปร คือ - ค่าพิกัดกระแส (Itest) - อุณหภูมิ (T)	1.054937	10.94925	0.001966
3 ตัวแปร คือ - ค่าพิกัดกระแส (Itest) - อุณหภูมิ (T) - ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดทองแดง (Pcu)	0.13197	0.6581	0.001526

ตาราง ก2 แสดงผลเปรียบเทียบการเลือกใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนของโครงข่ายประสาทเทียมในหม้อแปลง 30 kVA

ฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function)	ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด (Error)
Logsigmoi ในชั้นซ่อน Purelin ในชั้นเอาต์พุต	MAPE = 0.914078 % MAX = 2.805163 % MIN = 0.00649 %
Tansigmoi ในชั้นซ่อน Purelin ในชั้นเอาต์พุต	MAPE = 0.131973 % MIN = 0.001526 % MAX = 0.6581 %

จากตาราง ก1 และ ก2 แสดงให้เห็นผลสรุปของการเลือกตัวแปรอินพุตและการเลือกใช้ฟังก์ชันถ่ายโอน คือ ในวิทยานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยได้ทำการเลือก ตัวแปรอินพุตจำนวน 3 ตัวแปร คือ ค่าพิกัดกระแส (Itest) , อุณหภูมิ (T) และค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดทองแดง (Pcu) รวมถึงการเลือกใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนชนิด Tansigmoi โดยผลสรุปแสดงให้เห็นประสิทธิภาพที่ดี ซึ่งค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยกว่า การเลือกใช้ตัวแปรอินพุต 2 ตัวแปร และการเลือกฟังก์ชันถ่ายโอนชนิด Logsigmoi

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ พิจารณาเลือกตัวแปรอินพุต 3 ตัวแปร คือ ค่าพิกัดกระแสของหม้อแปลง (Itest) , อุณหภูมิ (T) และ ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดทองแดง (Pcu) ส่วนตัวแปร

อินพุต 1 ตัวแปร คือ ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมในหม้อแปลง (Pt) เนื่องจาก ตัวแปรอินพุต และตัวแปรเอาต์พุตนั้นมีความสัมพันธ์กัน ตามตารางและกราฟดังต่อไปนี้

หม้อแปลงจำหน่ายขนาด 30 kVA (พิจารณาที่ค่าพิกัดกระแส 50%)

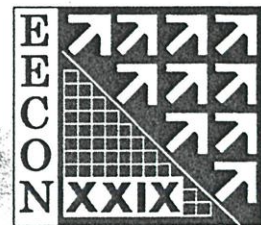
Itest (%) ของ Rated	Temp (°c)	Pcu (W)	Pt (Calculation) (W)
50	35	87.723	195.923
	45	90.979	199.179
	55	94.234	202.434
	65	97.490	205.690
	75	100.745	209.145

หม้อแปลงจำหน่ายขนาด 50 kVA (พิจารณาที่ค่าพิกัดกระแส 50%)

Itest (%) ของ Rated	Temp (°c)	Pcu (W)	Pt (Calculation) (W)
50	35	142.137	265.137
	45	147.410	270.410
	55	152.683	275.683
	65	157.956	280.956
	75	163.2298	286.2298

ภาคผนวก ข.

ผลงานวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์



The EECON-29 Conference Joins the Sixtieth Anniversary Celebration of His Majesty's Accession to the Throne

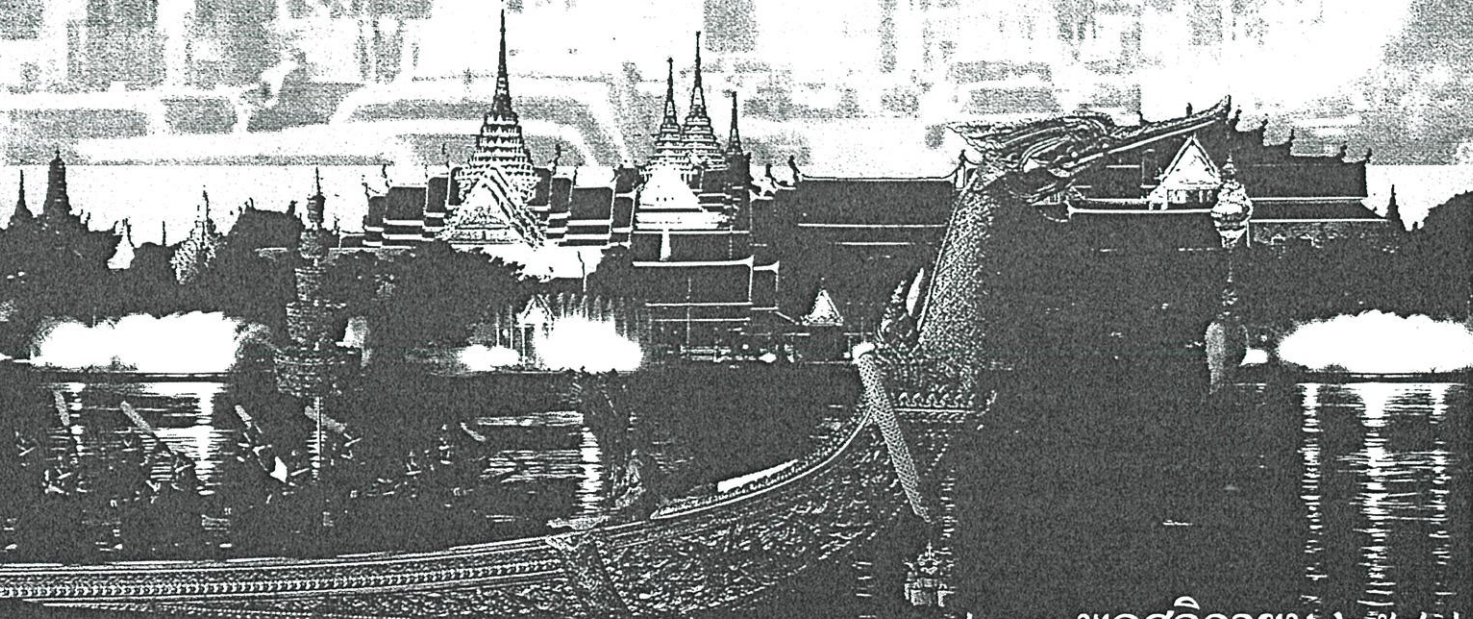
29th Electrical Engineering Conference

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ ๒๙

Volume I



- ไฟฟ้ากำลัง (PW)
- อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)
- คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (CP)



๙-๑๐ พฤศจิกายน ๒๕๕๙

ณ โรงแรมแอมบาสซาเดอร์ ซิตี้ จอมเทียน พัทยา จังหวัดชลบุรี



ดำเนินการโดย
SIC
SIC MEDIA & MARKETING

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การใช้โครงข่ายประสาทเทียมสำหรับวิเคราะห์ค่ากำลังสูญเสียทางไฟฟ้าในหม้อแปลง

Using Artificial Neural Networks for Analysis of Electrical Losses in Transformers

นุชติกา สุทธิสินทอง มณฑล สีสัจจินดาไกรฤกษ์

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ถนนฉลองกรุง แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

โทรศัพท์ / โทรสาร 0-2326-4550 E-mail : nuchtita_nst@yahoo.com

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้เสนอวิธีการวิเคราะห์ค่าความสูญเสียทางไฟฟ้าของหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 1 เฟส 30 kVA โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ ข้อมูลการทดสอบ ณ อุณหภูมิต่างๆ ของหม้อแปลงจากโรงงานผลิตหม้อแปลง ถูกนำมาเป็นข้อมูลอินพุตสำหรับโครงข่ายประสาทเทียม ในขณะที่ค่าคอบของโครงข่ายประสาทเทียมมีค่าสัมพันธ์กับค่าความสูญเสียรวมในหม้อแปลง ข้อมูลทดสอบจำนวน 150 ชุด ถูกนำมาเพื่อตรวจสอบวิธีการที่ได้เสนอ ผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่า สามารถทำให้เกิดประสิทธิภาพเป็นที่น่าพอใจ

คำสำคัญ: โครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ, ความสูญเสียทางไฟฟ้า, ความสูญเสียในขดลวดทองแดง

Abstract

The paper proposes a technique to analysis electrical losses in distribution transformers 1 – phase 30 kVA using of back – propagation (BP) neural networks. Experimental data at various temperature of transformers obtained from manufacturer , are employed as an input pattern for BP neural networks while output pattern which corresponding to total losses in transformers. The total number of test set are 150 sets in order to verify the validity of the proposes technique. The results show that average accuracy obtained from the proposes technique gives satisfactory accuracy.

Keywords : back – propagation neural networks , electrical losses copper losses

1. บทนำ

อุปกรณ์หลักที่ถือว่าเป็นหัวใจสำคัญของระบบจำหน่ายไฟฟ้าก็คือหม้อแปลงจำหน่าย ซึ่งทำหน้าที่ ส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าโดยการแปลงแรงดันขึ้นหรือลงในระดับต่างๆ เพื่อความเหมาะสมต่อระบบส่งจ่ายให้กับผู้บริโภคตามบ้านเรือนหรือโรงงานอุตสาหกรรม ในหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้งานจริงนั้น ย่อมมีค่าความต้านทานของขดลวดอยู่เสมอ (แม้ว่า

จะไม่มีโหลด) ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดค่าความสูญเสียในขดลวดทองแดง (copper losses) ทำให้มีผลกระทบต่อหม้อแปลง ความสำคัญอย่างหนึ่งของการออกแบบหม้อแปลง ก็คือ ต้องมีการรับรองว่ากำลังซึ่งกระจายอยู่ภายในหม้อแปลงอยู่ในระดับที่น่าพอใจ มันคือ ส่วนประกอบที่สำคัญของค่ากำลังสูญเสียรวม (total losses) ในหม้อแปลง ในการวิเคราะห์ค่ากำลังสูญเสียรวม จะมีความสัมพันธ์กับค่าความสูญเสียของขดลวดทองแดง ขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น อุณหภูมิ ค่าความต้านทาน , กระแส , แรงดัน , โหลด และคุณภาพของขดลวดทองแดง เป็นต้น อย่างไรก็ตาม มันเป็นไปได้ที่จะพิจารณาค่าแฟลคเตอร์เหล่านั้นทั้งหมดถึงผลกระทบต่อหม้อแปลง เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงโหลดในระบบไฟฟ้ากำลัง ในการพิจารณาค่าความสูญเสียรวมในหม้อแปลงผ่านโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks) สามารถทำให้เกิดประสิทธิภาพตามหลักการและวิธีปฏิบัติในการคำนวณค่ากำลังสูญเสียทางไฟฟ้าในหม้อแปลง

2. ความสูญเสียทางไฟฟ้า (Electrical Losses)

ค่าความสูญเสียทางไฟฟ้า ก็คือ ค่าความสูญเสียรวมที่เกิดขึ้นในหม้อแปลง ค่าความสูญเสียนี้แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

2.1 ความสูญเสียในขดลวดทองแดง (Copper losses)

การทดสอบด้วงจร เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความสูญเสียในขดลวดทองแดง โดยการด้วงจรทางด้านแรงดันไฟฟ้าต่ำ (low voltage side) และจ่ายแรงดันไฟฟ้าเข้าที่ด้านแรงดันไฟฟ้าสูง (high voltage side) ค่าความสูญเสียในขดลวดทองแดง หาได้จาก [1]

$$P_{CU} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 \quad (1)$$

เมื่อ P_{CU} คือ ค่าความสูญเสียในขดลวดทองแดง (Watt)
 R_1 คือ ค่าความต้านทานขดลวดปฐมภูมิ (Ω)
 R_2 คือ ค่าความต้านทานขดลวดทุติยภูมิ (Ω)
 I_1 คือ กระแสขดลวดปฐมภูมิ (A)
 I_2 คือ กระแสขดลวดทุติยภูมิ (A)

การวัดค่าความต้านทานของขดลวด ทำการวัดด้วยบริดจ์ที่มีความแม่นยำสูง เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดทองแดง และใช้พิจารณาอุณหภูมิของขดลวดในการทดสอบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของหม้อแปลง ค่าความต้านทานที่วัดได้จะแปลงค่าความต้านทานไปที่อุณหภูมิอ้างอิง 75°C สำหรับขดลวดทองแดงคำนวณได้ตามสมการดังนี้

$$R_r = R_a \frac{235 + \theta_r}{235 + \theta_a} \quad (2)$$

เมื่อ R_a คือ ความต้านทานของขดลวดที่อุณหภูมิ θ_a ในสภาวะคงตัว
 R_r คือ ความต้านทานของขดลวดที่อุณหภูมิอ้างอิง θ_r (75°C)

2.2 ความสูญเสียในแกนเหล็ก (Core losses)

การทดสอบเปิดวงจร เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก ค่าความสูญเสียในแกนเหล็กมีผลกระทบเนื่องจาก ความสูญเสียจากฮิสเตอรีซิส (hysteresis loss) และความสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน (eddy - current loss) ค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนเหล็กซึ่งจะมีค่าคงที่ในทุกๆสภาวะของโหลด

ความสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน สามารถคำนวณโดย[1]

$$P_E = 2.2 \cdot f^2 \cdot B^2 \cdot d^2 \cdot 10^{-3} \quad (3)$$

เมื่อ P_E คือ ค่าความสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน
 f คือ ความถี่
 B คือ ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด
 d คือ ความหนาของแกนเหล็กลามิเนต

ส่วนการคำนวณความสูญเสียจากฮิสเตอรีซิส สามารถคำนวณได้โดย

$$P_H = K_S \cdot B^{1.6} \cdot f \quad (4)$$

เมื่อ P_H คือ ค่าความสูญเสียเนื่องจากฮิสเตอรีซิส
 K_S คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของ Steimmetz
 B คือ ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด
 f คือ ความถี่

ดังนั้น ค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก (Core losses) สามารถคำนวณโดย

$$P_{core} = P_E + P_H \quad (5)$$

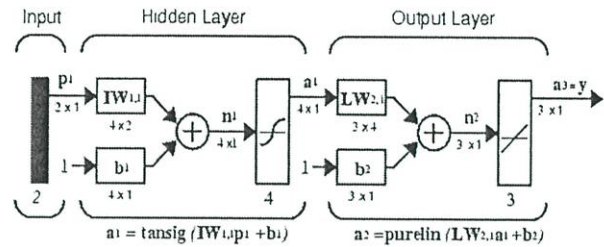
3. โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks)

โครงข่ายประสาทเทียมนับเป็นสาขาหนึ่งของปัญญาประดิษฐ์ ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นมาในยุคคอมพิวเตอร์ โครงข่ายประสาทเทียม คือระบบการคำนวณที่สร้างเลียนแบบการทำงานของระบบสมองมนุษย์ เพื่อใช้ประโยชน์ในการคาดคะเนเหตุการณ์จากข้อมูลที่มีอยู่

3.1 ทฤษฎีโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ

(Back-Propagation Neural Networks)

โครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับนั้นจะประกอบไปด้วยชั้นทั้งหมด 3 ประเภท คือ ชั้นอินพุต (Input Layer), ชั้นซ่อน (Hidden Layer) และ ชั้นเอาต์พุต (Output Layer) โดยในชั้นซ่อนจะมีจำนวนมากกว่าหรือเท่ากับ 1 ชั้นก็ได้



รูปที่ 1 โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ [5]

สมการเอาต์พุตของโครงข่ายประสาทเทียม สามารถหาได้จาก

$$O/P_{ANN} = f^2 [LW^{2,1} \times f^1 (IW^{1,1} \times P + b^1) + b^2] \quad (6)$$

โดยที่ $IW^{1,1}$ คือ ค่าถ่วงน้ำหนักที่เชื่อมระหว่างชั้นของข้อมูลอินพุตกับชั้นซ่อนที่ 1

$LW^{2,1}$ คือ ค่าถ่วงน้ำหนักที่เชื่อมระหว่างชั้นซ่อนที่ 1 กับชั้นเอาต์พุต

b^1 คือ ค่าไบแอสในชั้นซ่อนที่ 1

b^2 คือ ค่าไบแอสในชั้นเอาต์พุต

f^1 คือ ฟังก์ชันกระตุ้นชนิดแทนเจนต์ซิกมอยด์ (tan - sigmoid)

f^2 คือ ฟังก์ชันกระตุ้นชนิดเชิงเส้น (linear)

$P = [P_1, P_2 \dots P_R]$ คือ เวกเตอร์อินพุตของโครงข่าย

โดยโครงข่ายประสาทเทียมจะทำการคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดสัมบูรณ์ (Mean Absolute Percentage Error : MAPE) ของชุดข้อมูลทดสอบ ซึ่งสมการที่ใช้ในการคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดสัมบูรณ์ (MAPE) ได้แสดงในสมการ (7)

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{Real\ Result_i - Obtained\ Result_i}{Real\ Result_i} \right| \times 100\% \quad (7)$$

โดยที่ Real Result คือ ค่าที่ได้จากการทดสอบจริง

Obtained Result คือ ค่าที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม

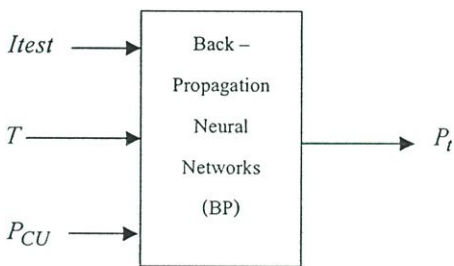
n คือ จำนวนชุดทดสอบ



3.2 การจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

การฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม จะใช้ Neural Network Toolbox [5] ของโปรแกรม MATLAB ฝึกสอนโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม ในกรณีนี้ประกอบด้วย 3 อินพุต และ 1 เอาต์พุต โดยค่าอินพุตได้มาจาก การทดสอบหม้อแปลงในโรงงานผลิต ส่วนตัวแปรเอาต์พุต คือ ค่าความเปลี่ยนแปลงที่แสดงค่าความสูญเสียรวมในหม้อแปลง ดังแสดงในรูปที่ 2 การจำลองโครงข่ายประสาทเทียม (ANN) แบบชนิดหลายชั้น สำหรับแสดงค่าความสูญเสียทางไฟฟ้าของหม้อแปลง การเปลี่ยนแปลงของอินพุตแต่ละค่าของโครงข่ายประสาทเทียม เป็นการนิยามค่าความเปลี่ยนแปลง ที่แสดงค่าความสูญเสียรวมในหม้อแปลง ค่าอินพุตและเอาต์พุตที่ใช้ในโครงข่ายประสาทเทียมมีดังนี้

- I_{test} คือ ค่าทดสอบที่พิกัดกระแสหม้อแปลง 2-100 %
- T คือ อุณหภูมิ ($^{\circ}C$)
- P_{CU} คือ ค่าความสูญเสียในขดลวดทองแดง (W)
- P_t คือ ค่าความสูญเสียรวมของหม้อแปลง (W)



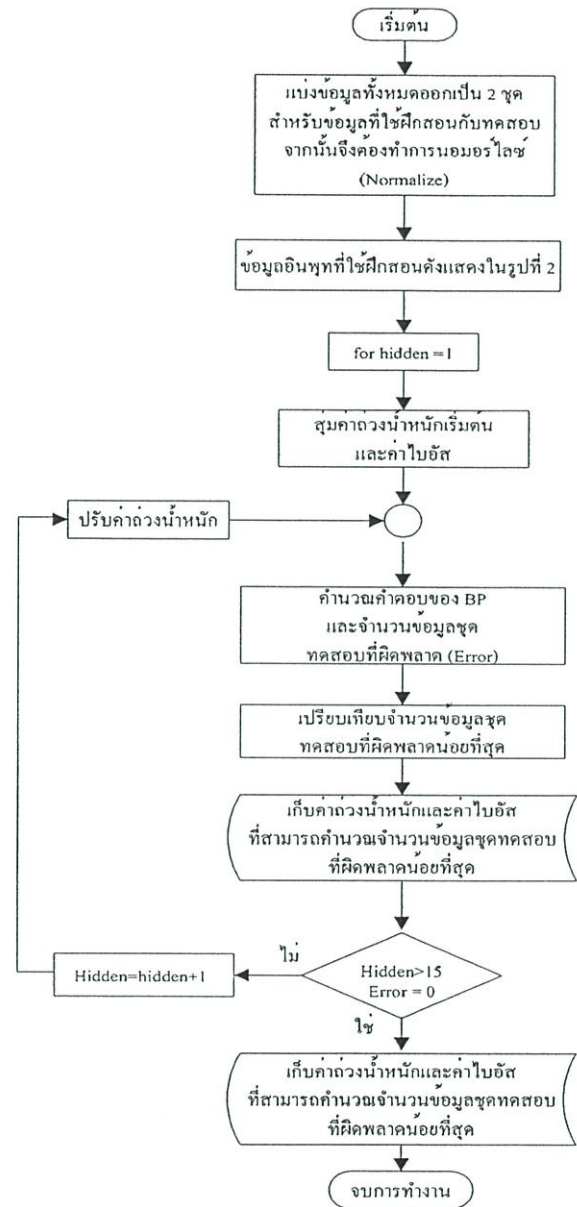
รูปที่ 2 แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

จำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน กับจำนวนชุดข้อมูลตรวจสอบจะมีจำนวน 100 ชุด และ 50 ชุด ตามลำดับ ซึ่งเป็นข้อมูลทดสอบหม้อแปลงในโรงงานผลิตที่ อุณหภูมิ 30 , 40 และ 50 องศาเซลเซียส การฝึกสอนเริ่มต้น โดยการนอร์มอลไลซ์ (Normalize) ชุดข้อมูลฝึกสอนและทดสอบ จากนั้นจึงเริ่มหาค่าตัวน้ำหนักและค่าไบแอสให้กับโครงสร้างเริ่มต้น ที่มีจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1 ตั้งแต่ 1 และเพิ่มขึ้นครั้งละ 1 ไปจนถึง 15 นิวรอน (เพื่อหาโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่มีประสิทธิภาพสูงสุด) โดยแต่ละโครงสร้างจะทำการฝึกสอน 20 รอบ (การฝึกสอน 1รอบ กำหนดให้มีการปรับค่าตัวน้ำหนักและค่าไบแอสเป็นจำนวน 1000 iteration) หลังจากฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมเสร็จสิ้น จะใช้เวลาในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมที่ดีที่สุด

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบค่าความสูญเสียด้วยโครงข่ายประสาทเทียม

จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
MAPE TEST (%)	0.1866	0.149	0.1341	0.1315	0.1321	0.1344	0.1317	0.1316	0.1386	0.1361	0.1373	0.1429	0.1404	0.1454	0.1412
เวลาฝึกสอนแต่ละรอบ	19	45	57	67	74	81	87	91	98	110	117	128	135	142	154
เวลาที่ใช้ในการฝึกสอน	23														

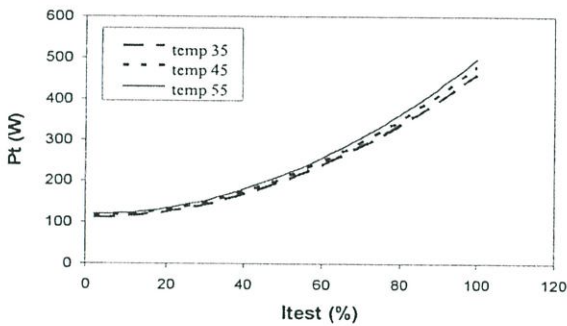
ประมาณ 67 วินาที ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยจะได้จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1 และเอาต์พุต เป็น 4 และ 1 ตามลำดับ



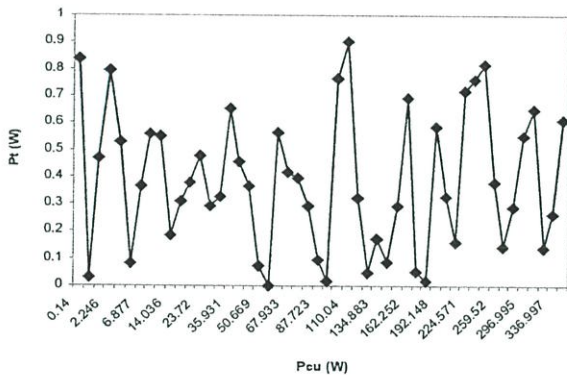
รูปที่ 3 ขั้นตอนการฝึกสอน

4. ผลการทดลอง

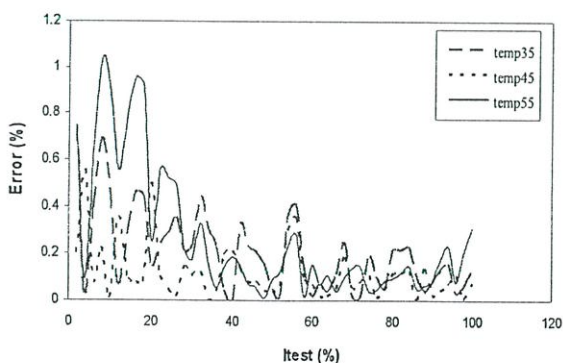
หลังจากทำการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม เพื่อหาค่าความสูญเสียทางไฟฟ้าในหม้อแปลง นำโครงข่ายประสาทเทียมที่ทำการฝึกสอนมาทดสอบกับข้อมูลที่ไม่เคยเห็น (Unseen Test set) จำนวน 150 ชุด ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามผลการทดสอบที่อุณหภูมิ 35 , 45 และ 55 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ค่าความสูญเสียรวม (total losses) จากโครงข่ายประสาทเทียม



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสูญเสียรวมกับค่าความสูญเสียในขดลวดทองแดงที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส



รูปที่ 6 ค่าความผิดพลาด (Error) ของข้อมูลชุดทดสอบจำนวน 150 ชุด

จากรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่า เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสพิคก (Itest) ที่ อุณหภูมิ 35 , 45 และ 55 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ค่าความสูญเสียทางไฟฟ้าที่ได้จะมีค่าใกล้เคียงกัน จากรูปที่ 5 แสดงค่าผิดพลาดที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าความสูญเสียในขดลวดทองแดง จะเห็นได้ว่ามีค่าผิดพลาดต่ำกว่า 1 W และเมื่อพิจารณาในรูปที่ 6 ซึ่งแสดงค่าผิดพลาดในรูปแบบเปอร์เซ็นต์ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสพิคกต่างๆ จะเห็นได้ว่า ค่ากระแสพิคกในช่วง 2%-20% จะมีค่าผิดพลาดสูงกว่าค่ากระแสพิคกในช่วงต่างๆ แต่อย่างไรก็ดี ค่าเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดที่เกิดขึ้นต่ำกว่า 1% ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้

5. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอวิธีการวิเคราะห์หาค่าความสูญเสียทางไฟฟ้าของหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 1 เฟส 30 kVA โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ จากการวิเคราะห์ได้ใช้ข้อมูลทดสอบหม้อแปลงในโรงงานผลิตมาเป็นข้อมูลฝึกสอนจำนวน 100 ชุด และข้อมูลตรวจสอบจำนวน 50 ชุด และทำการทดสอบ (Test) โดยใช้ข้อมูล 150 ชุด ที่อุณหภูมิ 35 , 45 และ 55 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4-6 จะเห็นได้ว่า ให้ความถูกต้องเป็นที่น่าพอใจ โดยที่มีค่าผิดพลาดสูงสุดเป็น 1.2% ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้

เมื่อพิจารณาโดยภาพรวมในงานวิจัยนี้ ผลการศึกษาที่ได้แสดงให้เห็นว่าโครงข่ายประสาทเทียมสามารถให้ประสิทธิภาพที่ดี และมีความแม่นยำสูง ด้วยเหตุนี้เอง โครงข่ายประสาทเทียมสามารถเป็นตัวช่วยในการวิเคราะห์หาค่าความสูญเสียรวมในหม้อแปลงได้ พร้อมทั้งสามารถประยุกต์วิธีการที่ได้นำเสนอเข้าไปใช้กับหม้อแปลงขนาดใหญ่ขึ้นได้ซึ่งจะนำไปพัฒนาต่อไปในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

- [1] Andra Nunes de Souza , Ivan Nunes da Silva , Claudia F. L. N. deSouza and Maria Goretti Zago , “ Using Artificial Neural Networks for Identification of Electrical Losses in Transformers During the Manufacturing Phase ” , Nueral Networks , 2002 IJCNN'02 Proceedings of the 2002 International Joint Conference , Vol. 2 , 12-17 May 2002 , pp. 1346 – 1350.
- [2] S. A. Stigant and A. C. Franklin , The J & P Transformer Book London , U. K. Butterworth., 1973.
- [3] มงคล ทองสงคราม, หม้อแปลงไฟฟ้า, พิมพ์ครั้งที่ 2 , บริษัท รามาการพิมพ์ จำกัด.
- [4] บุญเลิศ สื่อเชย, การออกแบบและการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในระบบจำหน่าย, พิมพ์ครั้งที่ 2, กรุงเทพมหานคร. ธันวาคม 2548.
- [5] Neural Network Toolbox , User's Guide , The Mathworks Inc.,January 1998.



ลาดกระบัง

ตบวงศกรรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ENGINEERING

ปีที่ 23 ฉบับที่ 3

กันยายน 2549

- | | | |
|----|--|----|
| 1. | ข้อมูลสมมูลของการสกัดน้ำมันงาโดยใช้เอนไซม์ลิกนินเป็นตัวทำละลาย
รีนฤดี เบญจางคประเสริฐ | 1 |
| 2. | การกำจัดสีย้อมฟาสต์บลูในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยวิธีไอโซเนนชัน
สุธาสิณี เนรมิตตกพงศ์ อาทิตย์ เนรมิตตกพงศ์ | 7 |
| 3. | การศึกษาพื้นที่ไวแสงประสิทธิผลของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด p-n แบบพลาแนร์
คงศักดิ์ อิมอุไร สมเกียรติ ศุภเดช | 13 |
| 4. | แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับแบบจำลองแหล่งจ่ายไฟจากเซลล์แสงอาทิตย์
ที่ถูกต้อง
เอก เอื้อตระการวิวัฒน์ วิเศษชัย ชูรักษ์ วิจิตร กิณเรศ | 18 |
| 5. | วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์หลายเฟสแบบปรับค่าด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์โดยใช้ไอทีเอแบบหลาย
เอาต์พุต
สศดี จินตนาปัญญา กอบชัย เดชหาญ | 24 |
| 6. | การพยากรณ์ความต้องการใช้พลังไฟฟ้าสูงสุดระยะยาวของระบบ กฟน. โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม
จตุพร ธรรมเจริญ สมชาติ จีวิภากร | 30 |
| 7. | การทำนายค่าความสูญเสียในหม้อแปลงจำหน่ายโดยวิธีโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ
บุษทิศา สุทธิสินทอง มณฑล สีสัจจินดาไกรฤกษ์ | 36 |
| 8. | อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดแคสเคดแหล่งจ่ายที่มีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสมดุลโดยใช้เทคนิคการกำจัด
ฮาร์มอนิกส์ที่เหมาะสม
สิทธิพร เจียรนันท์พิสุทธิ์ วิจิตร กิณเรศ | 42 |
| 9. | การศึกษาเชิงตัวเลขของผลของการปรับแต่งพื้นผิวโดยตรงโดยวิธีเจือปนหน้าพื้นต่อการหล่อขึ้นแบบ
อีลาสโตไฮโดรไดนามิกส์
อานันท์พล แสนคำ มนต์ศักดิ์ พิมसार | 48 |

การทำนายค่าความสูญเสียในหม้อแปลงจำหน่ายโดยวิธี โครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ

Prediction of Distribution Transformer Losses Using Back- Propagation Neural Networks

นุชทิศา สุทธิสินทอง มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้ได้นำเสนอการทำนายค่าความสูญเสียรวมในหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 1 เฟส 30kVA และ 50 kVA โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ ข้อมูลการทดสอบจริงของหม้อแปลงในโรงงานผลิตได้ถูกนำมาเป็นข้อมูลสำหรับฝึกสอนและตรวจสอบโครงข่ายประสาทเทียม ในขณะที่ข้อมูลทดสอบจำนวน 400 ชุดที่อุณหภูมิและพิกัดกระแสของหม้อแปลงต่างๆ จากผลสรุปที่ได้ทำให้สามารถหาค่าความสูญเสียรวมได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ โดยค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสูงสุดประมาณ 1.3% ซึ่งจากวิธีที่ได้นำเสนอแสดงให้เห็นประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมเป็นที่น่าพอใจและสามารถนำไปพัฒนาเกี่ยวกับการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายได้

Abstract

The paper presents the methodology for the prediction of total losses in the single-phase distribution transformers with rated power of 30 kVA and 50 kVA using back-propagation neural networks. Experimental data of transformers in manufacturer are employed for training and validation sets for back-propagation neural networks while numbers of test set are 400 at various temperatures and rating currents of the transformers. The results show that a maximum percent of error is 1.3%. The proposed technique, therefore, gives satisfactory accuracy, and it can be used in development of the distribution transformer design.

1. บทนำ

อุปกรณ์หลักที่ถือว่าเป็นหัวใจสำคัญของระบบจำหน่ายไฟฟ้า ก็คือ หม้อแปลงจำหน่าย ซึ่งทำหน้าที่ส่งผ่านพลังงานโดยการเพิ่ม หรือลดระดับแรงเคลื่อนไฟสลับจากระดับหนึ่งไปสู่อีกระดับหนึ่ง เพื่อความเหมาะสมกับระบบส่งจ่ายให้กับผู้บริโภคตามบ้านเรือนหรือโรงงานอุตสาหกรรม และยังนำไปใช้ประโยชน์ในระบบสายส่ง (transmission line) เพื่อส่งกำลังไฟฟ้า

จำนวนมากไปสู่อุปกรณ์ที่ซึ่งอยู่ไกลมากได้ หม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้งานจริง จะแตกต่างกับหม้อแปลงไฟฟ้าในอุดมคติ เนื่องจากในหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้งานจริงนั้น ย่อมมีค่าความต้านทานขดลวดอยู่เสมอ (แม้ว่าจะไม่มีไหลด) ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดค่าความสูญเสียในขดลวดทองแดง(copper loss) และที่บริเวณขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ ยังเกิดความสูญเสียในรูปของฟลักซ์แม่เหล็กรั่วไหลนอก จากนี้ การเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์

แม่เหล็กในแกนตัวนำแม่เหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า ยังทำให้เกิดค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก (core loss) ซึ่งส่งผลกระทบต่อโดยตรงกับหม้อแปลงทั้งสิ้น ในการวิเคราะห์ค่าความสูญเสียจะมีความสัมพันธ์กับ ค่าความสูญเสียของขดลวดทองแดงซึ่งขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น อุณหภูมิ (temperature) , ค่าความต้านทาน (resistance) กระแส (current) , แรงดัน (voltage) , โหลด (load) และคุณภาพของขดลวดทองแดง อย่างไรก็ตาม เป็นไปไม่ได้ที่จะพิจารณาค่าแพคเตอร์เหล่านั้นทั้งหมดถึงผล กระทบในหม้อแปลง เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงโหลดในระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งโดยส่วนใหญ่ วิธีการกำหนดค่าความสูญเสียในหม้อแปลงนั้น จะใช้พื้นฐานของกราฟกระแสบนการวัดค่าในหม้อแปลง ซึ่งวิธีการนี้ยากและซับซ้อน สำหรับหาความสัมพันธ์ของค่าพารามิเตอร์ตามกระบวนการวิเคราะห์

ในบทความฉบับนี้ ได้นำเสนอวิธี โครงข่ายประสาทเทียมมาใช้ในการทำนายค่าความสูญเสียรวม (Pt) ในหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 1 - phase 30 kVA และ 50 kVA โดยได้นำข้อมูลการทดสอบหม้อแปลงในโรงงานผลิต มาใช้เป็นข้อมูลอินพุตให้กับ โครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งจะพิจารณาที่อุณหภูมิ และค่ากระแสพิคคต่าง ๆ ของหม้อแปลง เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลกระทบต่ออย่างไรกับค่ากำลังสูญเสียในหม้อแปลง โดยทำการฝึกสอนและทดสอบโครงข่ายประสาทเทียม ทำให้สามารถรู้ผลของค่ากำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นกับหม้อแปลงได้อย่างถูกต้องแม่นยำ และรวดเร็ว แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของ โครงข่ายประสาทเทียมและเป็นทางเลือกในการหาค่าผลลัพธ์ได้

2. ทฤษฎีและหลักการ

2.1 ความสูญเสียในขดลวดทองแดง (copper losses)

ความสูญเสียในขดลวดทองแดง (copper losses) ซึ่งเกิดขึ้นจากกระแสที่ไหลในขดลวดของหม้อแปลงขณะจ่ายโหลด การทดสอบแบบลัดวงจร (short circuit test) เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความสูญเสียในขดลวดทองแดง โดยการลัดวงจรทางด้านแรงดันไฟฟ้าต่ำ (low

voltage side) และจ่ายแรงดันไฟฟ้าเข้าที่ด้านแรงดันไฟฟ้าสูง (high voltage side) ค่าความสูญเสียในขดลวดทองแดงหาได้จากสมการ[3]

$$P_{CU} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 \quad (1)$$

โดยที่ P_{CU} คือ ค่ากำลังสูญเสียของขดลวดทองแดง
 I_1 คือ กระแสของขดลวดแรงสูง
 R_1 คือ ความต้านทานของขดลวดแรงสูง
 I_2 คือ กระแสของขดลวดแรงต่ำ
 R_2 คือ ความต้านทานของขดลวดแรงต่ำ

2.2 ความสูญเสียในแกนเหล็ก (core losses)

ความสูญเสียในแกนเหล็ก (core losses) ของหม้อแปลงนั้น ขึ้นอยู่กับความถี่ของไฟฟ้าจ่ายให้กับหม้อแปลง และยังขึ้นอยู่กับความหนาแน่นสูงสุดของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในแกนเหล็กนั้นๆ การทดสอบแบบเปิดวงจร (open circuit test) เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก ซึ่งมีผลกระทบต่อเนื่องมาจาก

2.2.1 ความสูญเสียเนื่องจากฮิสเตอร์รีซิสในแกนเหล็ก

(hysteresis losses)

เป็นกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียไปในการกลับทิศทางของแม่เหล็ก การสูญเสียนี้ขึ้นอยู่กับคุณภาพหรือเกรดของแกนเหล็ก และความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่เลือกใช้ และเป็นสัดส่วนกับความถี่ของแรงดันไฟฟ้าสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้[3]

$$W_h = K_1 f B^n \quad (2)$$

โดยที่ W_h คือ ค่าความสูญเสียเนื่องจากฮิสเตอร์รีซิส
 K_1 คือ ค่าคงที่
 f คือ ความถี่
 n มีค่าเท่ากับ 1.6 – 2.5

2.2.2 ความสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนในแกนเหล็ก

(eddy current losses)

แกนเหล็กเป็นตัวนำไฟฟ้า และในทำนองเดียวกัน

ก็เป็นตัวนำเส้นแรงแม่เหล็กด้วย การเกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในแกนเหล็ก จากการเกิดการเปลี่ยนแปลงเส้นแรงแม่เหล็ก เป็นเหตุทำให้เกิดการไหลของกระแสในแกนเหล็ก กระแสนี้เรียกว่า กระแสไหลวน ซึ่งจะทำให้เกิดการสูญเสียกำลังไฟฟ้า และเกิดความร้อนขึ้นติดตามมา กำลังไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน จะเป็นสัดส่วนกับกำลังสองของความหนาของแผ่นเหล็กแต่ละแผ่น และกำลังสองของความถี่แรงดันไฟฟ้า ซึ่งสามารถเขียนสมการได้ดังนี้[3]

$$W_e = K_2 f^2 B^2 b_s^2 \quad (3)$$

โดยที่ W_e คือ ค่าความสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนในแกนเหล็ก

K_2 คือ ค่าคงที่

b_s คือ ความหนาแน่นของแผ่นเหล็ก

f คือ ความถี่

ดังนั้น ค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก (core losses) สามารถคำนวณได้โดย

$$P_{core} = W_h + W_e \quad (4)$$

โดยที่ P_{core} คือ ค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก

3. การวิเคราะห์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียม

โครงข่ายประสาทเทียม ชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ นั้นจะประกอบไปด้วย ชั้นทั้งหมด 3 ประเภท คือ ชั้นอินพุต (Input Layer), ชั้นซ่อน (Hidden Layer) และชั้นเอาต์พุต (Output Layer) โดยในชั้นซ่อนจะมีจำนวนมากกว่าหรือเท่ากับ 1 ชั้นก็ได้ ดังนั้น ในบทความนี้จะใช้ Neural Networks Toolbox ของโปรแกรม MATLAB ฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมด้วย Levenberg–Maquardt Algorithm สมการเอาต์พุตของโครงข่ายประสาทเทียมสามารถหาได้ดังนี้[4]

$$\frac{O}{P_{ANN}} = x^2 [LW^{2,1} \times x^1 (IW^{1,1} \times P + b^1) + b^2] \quad (5)$$

โดยที่ $IW^{1,1}$ คือ ค่าถ่วงน้ำหนักที่เชื่อมระหว่างชั้นของข้อมูลอินพุตกับชั้นซ่อนที่ 1

$LW^{2,1}$ คือ ค่าถ่วงน้ำหนักที่เชื่อมระหว่างชั้นซ่อนที่ 1 กับชั้นเอาต์พุต

b^1 คือ ค่าไบแอสในชั้นซ่อนที่ 1

b^2 คือ ค่าไบแอสในชั้นเอาต์พุต

x^1 คือ ฟังก์ชันกระตุ้นชนิดแทนเจนท์ซิกมอยด์ (tan – sigmoid)

x^2 คือ ฟังก์ชันกระตุ้นชนิดเชิงเส้น (linear)

$P = [P_1, P_2 \dots P_R]$ คือ เวกเตอร์อินพุต

การทดสอบประสิทธิภาพ ของโครงข่ายประสาทเทียมนั้น จะวัดประสิทธิภาพโดยใช้เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (Mean Absolute Percentage Error : MAPE) ของข้อมูลทดสอบเป็นเกณฑ์ หาได้จากสมการที่ (6) คือ

$$MAPE = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left| \frac{P_{real, i} - P_{ANN, i}}{P_{real, i}} \right| \times 100 \quad (6)$$

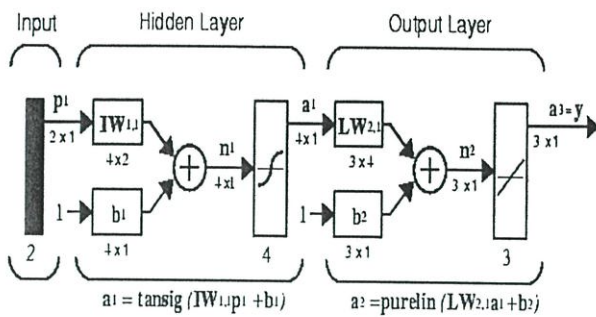
โดยที่ P_{real} คือ ค่ากำลังสูญเสียรวมที่ได้จากการทดสอบและคำนวณ

P_{ANN} คือ ค่ากำลังสูญเสียรวมที่เป็นค่าตอบของโครงข่ายประสาทเทียม

m คือ จำนวนข้อมูลทดสอบ

3.1 การเตรียมข้อมูลฝึกสอนและทดสอบ

ชุดข้อมูลฝึกสอน จะใช้ข้อมูลการทดสอบหม้อแปลงขนาด 1 เฟส 30 kVA และ 50 kVA ในโรงงานผลิตประกอบด้วยตัวแปรอินพุต 3 ตัวแปรดังนี้ พิกัดกระแสหม้อแปลง (Itest), อุณหภูมิ (temperature) และค่ากำลังสูญเสียของขดลวดทองแดง (Pcu) ในขณะที่ตัวแปรเอาต์พุตเป็นค่ากำลังสูญเสียรวมในหม้อแปลง (Pi) ดังแสดงในรูปที่ 1

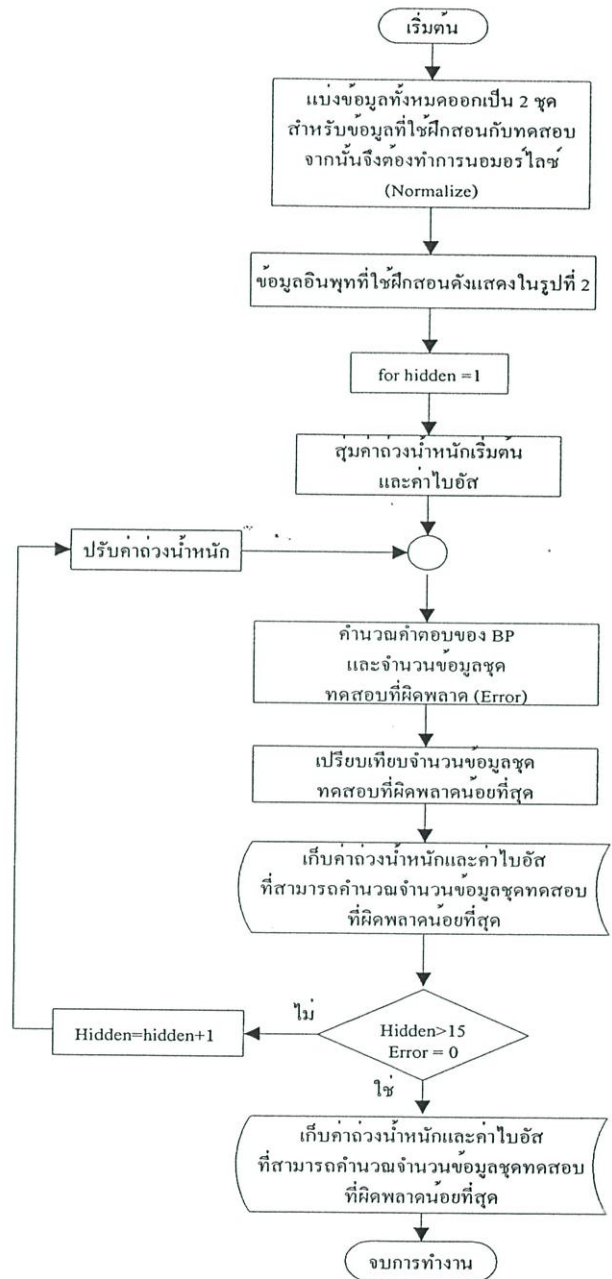


รูปที่ 1 แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

ในการฝึกสอนจะใช้จำนวนชุดข้อมูลฝึกสอน กับจำนวนชุดข้อมูลตรวจสอบจะมีจำนวน 266 ชุด และ 134 ชุด ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 30, 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส และใช้ข้อมูลทดสอบ (test patterns) 400 ชุด ที่อุณหภูมิ 35, 45, 55 และ 65 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นข้อมูลที่ไม่อยู่ในชุดข้อมูลฝึกสอน

การฝึกสอนเริ่มต้น โดยการนอร์มัลไลซ์ (Normalize) ของข้อมูลฝึกสอนและทดสอบ จากนั้นจึงเริ่มสุ่มค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสให้กับโครงสร้างเริ่มต้น ที่มีจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1 ตั้งแต่ 1 และเพิ่มขึ้นครั้งละ 1 ไปจนถึง 15 นิวรอน (เพื่อหาโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่มีประสิทธิภาพสูงสุด) โดยแต่ละโครงสร้างจะทำการฝึกสอน 20 รอบ (การฝึกสอน 1 รอบกำหนดให้มีการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสเป็นจำนวน 1000 iteration) ดังแสดงรูปที่ 2 หลังจากฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมเสร็จสิ้น จะใช้เวลาในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมที่ดีที่สุดสำหรับ 30 kVA ประมาณ 2.7883 นาที ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยจะได้จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1 และเอาต์พุต เป็น 10 และ 1 ตามลำดับ ส่วนเวลาในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมที่ดีที่สุดสำหรับ 50 kVA ประมาณ 1.694 นาที ดังแสดงในตารางที่ 2 โดยจะได้

จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1 และเอาต์พุต เป็น 3 และ 1 ตามลำดับ



รูปที่ 2 ขั้นตอนการฝึกสอน

ตารางที่ 1 ผลสรุปการฝึกสอนหม้อแปลงขนาด 30 kVA

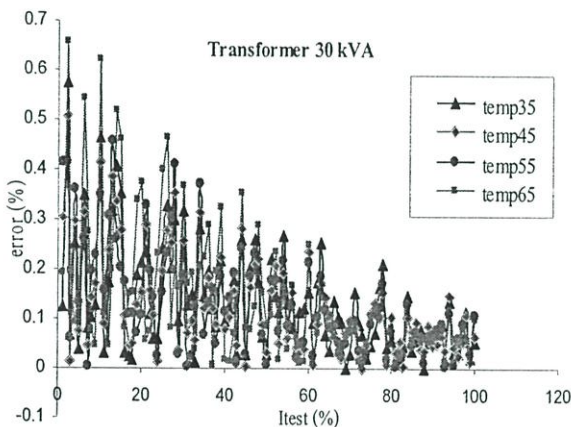
จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
MAPE TEST (%)	0.16	0.15	0.15	0.14	0.14	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.14	0.14	0.13	0.14	0.14
เวลาฝึกสอนแต่ละรอบ(นาที)	1.20	1.29	1.36	1.51	1.79	1.98	2.19	2.37	2.53	2.79	3.02	3.47	3.80	4.09	4.33
เวลาที่ใช้ในการฝึกสอน (นาที)	37.71														

ตารางที่ 2 ผลสรุปการฝึกสอนหม้อแปลงขนาด 50 kVA

จำนวนนิเวรอนในชั้นซ่อนที่ 1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
MAPE TEST (%)	0.20	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
เวลาฝึกสอนแต่ละรอบ(นาท)	0.58	1.26	1.69	1.49	1.74	1.92	2.13	2.30	2.51	2.96	3.19	3.51	3.74	4.08	4.53
เวลาที่ใช้ในการฝึกสอน (นาท)	37.64														

4. ผลการทดลอง

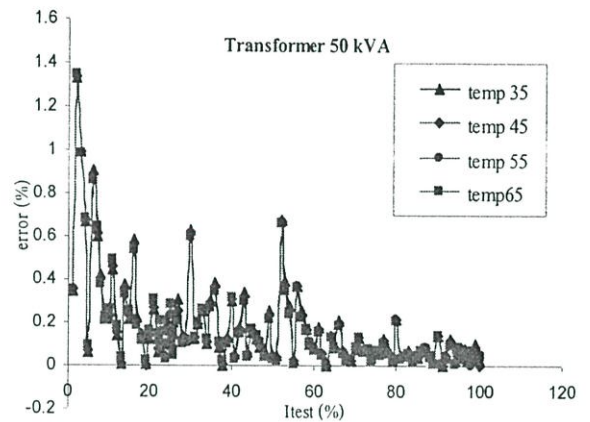
หลังจากทำการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม เพื่อหาค่าความสูญเสียรวมในหม้อแปลง นำโครงข่ายประสาทเทียมที่ทำการฝึกสอนมาทดสอบกับข้อมูลที่ไม่เคยเห็น (Unseen Test set) จำนวน 400 ชุด ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามผลการทดสอบที่อุณหภูมิ 35, 45, 55 และ 65 องศาเซลเซียส ตามลำดับ



รูปที่ 3 ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของข้อมูลชุดทดสอบ

จากรูปที่ 3 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของข้อมูลชุดทดสอบในหม้อแปลงขนาด 30kVA เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสฟลักต์ต่างๆ จะเห็นได้ว่าค่ากระแสฟลักต์ในช่วง 1-20% นั้น จะมีค่าผิดพลาดสูงกว่าค่ากระแสฟลักต์ในช่วงอื่นๆ แต่อย่างไรก็ตาม ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นต่ำกว่า 1% ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้ และในทำนองเดียวกัน ในรูปที่ 4 จะแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของข้อมูลชุดทดสอบ ในหม้อแปลงขนาด 50 kVA ซึ่งจะมีค่าสูงกว่าในหม้อแปลงขนาด 30 kVA โดยค่าผิดพลาดสูงสุดประมาณ 1.3% ซึ่งเกิดขึ้นในช่วง

กระแสฟลักต์ 1 – 10%

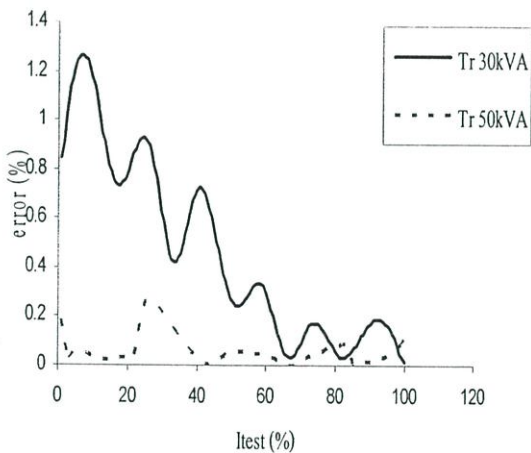


รูปที่ 4 ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของข้อมูลชุดทดสอบ

ตารางที่ 3 ค่าความสูญเสียรวม (Pt) ที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียสที่ได้จากการทำนาย

Itest (%)	Transformer 30 kVA		Transformer 50 kVA	
	BPNN	Calculate	BPNN	Calculate
10	113.7098	112.4298	129.6857	129.7292
20	125.5065	124.5192	149.2862	149.3168
30	145.5206	144.6682	182.3377	181.9627
40	174.1214	172.8768	227.7413	227.6671
50	209.6978	209.1450	286.2902	286.4298
60	254.2234	253.4728	358.1011	358.251
70	306.1358	305.8602	443.2088	443.1305
80	366.5127	366.3072	541.5000	541.0684
90	435.5570	434.8138	651.9603	652.0647
100	511.2953	511.3800	775.2985	776.1193

จากตารางที่ 3 จะแสดงค่าความสูญเสียรวม (PI) ที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส ที่ได้จากการทำนายโดยวิธีโครงข่ายประสาทเทียม และทำการเปรียบเทียบกับค่าการคำนวณในหม้อแปลงขนาด 30 kVA และ 50 kVA แสดงให้เห็นว่า ค่าที่ได้นั้น ใกล้เคียงกันมาก ต่อจากนั้นในรูปที่ 5 จะเป็นค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดจากการทำนายค่าความสูญเสียรวมในชุดทดสอบ โดยเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณ จาก ค่าคำตอบที่ได้แสดงให้เห็นว่าค่าความผิดพลาดในหม้อแปลงขนาด 50 kVA มีค่าต่ำกว่าในขนาด 30 kVA แต่อย่างไรก็ตาม โครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ ก็สามารถแสดงประสิทธิภาพที่ดี ในการนำมาใช้วิเคราะห์ค่าความสูญเสียในหม้อแปลงจำหน่าย



รูปที่ 5 ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียสที่ได้จากการทำนาย

5. บทสรุป

บทความฉบับนี้ ได้นำเสนอวิธีการทำนายค่าความสูญเสียรวมในหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 30 kVA และ 50 kVA ซึ่งพิจารณา ณ. อุณหภูมิและพิกัดกระแสต่างๆ โดยนำโครงข่ายประสาทเทียมมาช่วยในการทำนายค่าคำตอบซึ่งจะทำการฝึกสอนและทดสอบประสิทธิภาพ โดยอ้างอิงที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองที่ได้ จะเห็นว่าค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสูงสุดในหม้อแปลงขนาด 30 kVA มีค่าประมาณ 1.3% และในหม้อแปลงขนาด 50 kVA มีค่าประมาณ 0.3% แสดงให้

เห็นว่า โครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ สามารถแสดงประสิทธิภาพที่ดีและแม่นยำ สามารถใช้เป็นตัวช่วยในการวิเคราะห์ค่าความสูญเสียในหม้อแปลงได้เป็นอย่างดี อีกทั้งยังสามารถประยุกต์วิธีการที่ได้นำเสนอ นำไปใช้กับหม้อแปลงขนาดใหญ่ขึ้น หรือหม้อแปลงขนาด 3 เฟส ได้ ซึ่งจะนำไปพัฒนาต่อไปในอนาคต

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รศ. มณฑล ลีลาจินดา ไกรฤกษ์ อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์เป็นอย่างสูง ที่คอยให้คำปรึกษาแนะนำ และแก้ไขเกี่ยวกับงานวิจัยเป็นอย่างดี ขอบพระคุณ บริษัท พงษ์พิमानการไฟฟ้า จำกัด และ ผศ. บุญเลิศ สือเฉย อาจารย์ประจำคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ ที่เอื้อเฟื้อข้อมูล และคำแนะนำเกี่ยวกับการทดสอบค่าความสูญเสียในหม้อแปลงจำหน่ายภายในโรงงานผลิต ขอขอบคุณ คุณ อรรถพล เก้าพิทักษ์กุล สำหรับคำแนะนำเกี่ยวกับโครงข่ายประสาทเทียม และทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือในงานวิจัยนี้ ขอขอบพระคุณ มา ณ. ที่นี้ด้วย

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. N.de Souza, I. N. da Silva, C. F. L. N.de Souza and M.G. Zago, "Using Artificial Neural Networks for Identification of Electrical Losses in Transformer During the Manufacturing Phase," Proceedings of International Joint Conference Neural Networks 2002, Vol. 2, May 2002, pp. 1346 – 1350.
- [2] S. A. Stigant and A. C. Franklin, "The J&P Transformer book," U.K. Butterworth., 1973.
- [3] บุญเลิศ สือเฉย, "การออกแบบและการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในระบบจำหน่าย," พิมพ์ครั้งที่ 2, มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์, ธันวาคม 2548.
- [4] H. Demuth and M. Beale, "Neural Network Toolbox User's Guide," The Mathworks Inc., January 1998.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – นามสกุล	น.ส. นุชทิตา สุทธิสินทอง
วัน เดือน ปีเกิด	22 กันยายน พ.ศ. 2522 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร
ที่อยู่	81 ซอยเพชรเกษม 79 แยก 15 แขวงหนองแขม เขตหนองแขม กรุงเทพฯ 10160 โทร 08-1559-0400
ประวัติการศึกษา	2544 สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ 2545 เข้าศึกษาต่อระดับบัณฑิตศึกษา สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ผลงานทางวิชาการ

1. นุชทิตา สุทธิสินทอง , มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์, “ การทำนายค่าความสูญเสียในหม้อแปลง
จำหน่ายโดยวิธีโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ ” , วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 23
ฉบับที่ 3
2. นุชทิตา สุทธิสินทอง , มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์, “ การใช้โครงข่ายประสาทเทียมสำหรับ
วิเคราะห์ค่ากำลังสูญเสียทางไฟฟ้าในหม้อแปลง”,