

การทำนายอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส 10 กิโลโวลต์แอมป์  
แบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น

TEMPERATURE PREDICTION OF 10 kVA THREE-PHASE  
TRANSFORMER SUPPLYING NONLINEAR LOAD CURRENT

อัฐวุฒิ วงศ์ใหญ่  
ATTHAWUT WONGYAI

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของสารนิพนธ์ที่ศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
บัณฑิตวิทยาลัย  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2545  
ISBN 974-648-819-8

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การทำนายอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส 10 กิโลโวลต์แอมป์ แบบกระแส  
ไม่เป็นเชิงเส้น

TEMPERATURE PREDICTION OF 10 kVA THREE - PHASE  
TRANSFORMER SUPPLYING NONLINEAR LOAD CURRENT

อัฐวุฒิ วงศ์ใหญ่

ATTHAWUT WONGYAI

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน 47935  
วัน, เดือน, ปี 24 ส.ค. 2546

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2545

ISBN 974-648-819-8

**TEMPERATURE PREDICTION OF 10 kVA THREE-PHASE  
TRANSFORMER SUPPLYING NONLINEAR LOAD CURRENT**

**ATTHAWUT WONGYAI**

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

**2002**

**ISBN 974-648-819-8**

**COPYRIGHT 2002**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การทำนายอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส 10 กิโลโวลต์ แอมป์แบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น
นักศึกษา	นายอัฐวุฒิ วงศ์ใหญ่
รหัสประจำตัว	42061195
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2545
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ. ศุติ บรรจงจิตร

### บทคัดย่อ

การทำงานของหม้อแปลงซึ่งอาจจะมีทั้งลักษณะโหลดแบบเป็นเชิงเส้นและแบบไม่เป็นเชิงเส้น โดยเฉพาะในกรณีโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นจะมีความร้อนเกิดขึ้นในตัวของหม้อแปลงสูงกว่าการดำเนินการแบบปกติ เป็นผลทำให้ฉนวนของตัวนำมีอายุการใช้งานสั้นลง ดังนั้นการทำนายอุณหภูมิของหม้อแปลงเมื่อกระแสโหลดไม่เป็นเชิงเส้นจึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการนำเสนอผลการทดสอบทางความร้อนของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแช่น้ำมันขนาด 10 kVA, 380/220 V, 3 เฟส,  $\Delta/Y$  และ การระบายความร้อนแบบ ONAN การทดสอบอุณหภูมินี้เป็นการทดสอบโดยใช้วิธีการต่อโหลดแบบเป็นเชิงเส้นร่วมกับไม่เป็นเชิงเส้นตามวัฏจักรโหลด อุณหภูมิของหม้อแปลงจะถูกวัดโดยการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล เพื่อให้เห็นพฤติกรรมทางความร้อนได้จริงและพิจารณาความร้อนที่เกิดขึ้นจากการทดสอบและนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทำนายโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้น

<b>Thesis Title</b>	Temperature Prediction of 10 kVA Three-Phase Transformer Supplying Nonlinear Load Current
<b>Student</b>	Mr. Atthawut Wongyai
<b>Student ID.</b>	42061195
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Programme</b>	Electrical Engineering
<b>Year</b>	2002
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc.Prof. Sulee Bunjongjit

### **ABSTRACT**

Transformers normally operate with either at linear or nonlinear load current. When a transformer is operated with nonlinear load, excessive heat can be developed in the transformer. This causes the reduction of the life expectancy of winding insulation. The prediction of temperature of transformer is essential, when the transformer supplies the nonlinear load current. This thesis presents results of thermal testing for an oil-immersed transformer with a rate of 10 kVA, 380/220 V, 3 phase,  $\Delta/Y$ , with an ONAN ventilation. The temperature tests are performed on mixed loads which are a combination between linear loads and nonlinear loads. Load cycles are used in order to study thermal characteristics of the transformer. Thermocouples are installed in the prototype transformer to measure the temperature. The thermal characteristics form tests are compared with the results obtained when predicting by mathematical models.

## กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี ด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาต่าง ๆ จากท่าน รองศาสตราจารย์ ศุภี บรรจงจิตร ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่าน และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์ ดร.อานันท์วัฒน์ คุณากร ดร.สมชาติ จิรวิภากร ผู้ช่วยศาสตราจารย์ จงรักษ์ บุญเส็ง และอาจารย์ภาควิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่าน ที่ให้คำแนะนำ และให้คำปรึกษาที่เป็นประโยชน์ในการทำวิทยานิพนธ์อย่างดี ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ บุญเลิศ สี่เฉย อาจารย์ ปัญญา มาลีวัตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ช่วยเหลือเรื่องหม้อแปลง เครื่องมือวัดทางไฟฟ้า กำลัง และให้คำแนะนำในเรื่องการทดสอบอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอย่างดี ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ สิริวิช ทัดสวน สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า วิทยาลัยเทคโนโลยีชนบุรี ที่ให้คำแนะนำในเรื่องการทดสอบอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอย่างดี ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ วันชาติ ทรัพย์เฮง สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเซนต์จอห์น ที่ให้ความอนุเคราะห์ช่วยเหลือเรื่องเครื่องมือวัดอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าและคำแนะนำในการใช้เครื่องมือเป็นอย่างดี ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ บริษัทพณิชย์พิมาณการไฟฟ้า จำกัด เป็นอย่างสูงที่ได้กรุณาเอื้อเฟื้อสถานที่ วัสดุ อุปกรณ์ รวมไปถึงให้คำแนะนำ และฐานข้อมูลต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ คุณธิดิ เอื้อมงคล คุณพงษ์ศักดิ์ มากมิ่ง คุณสิทธิโชค กิตติรักษ์ตระกูล คุณสุทัศน์ พิลา คุณชลธิชา สิริเวช และเพื่อน ๆ ที่ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่าน ที่ช่วยเหลือให้คำแนะนำในเรื่องการเขียนวิทยานิพนธ์ และ การเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เป็นอย่างดี

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่ออำนาจ คุณแม่ชिरาภรณ์ และ คุณพงษ์ศรินทร์ วงศ์ใหญ่ เป็นอย่างสูง ที่คอยให้แรงบัลดาลใจ ทำให้ผู้วิจัยสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงเป็น อย่างดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

อัฐวุฒิ วงศ์ใหญ่

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	X
สารบัญรูป.....	XI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 กล่าวนำ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	1
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	2
1.4 วิธีการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้จากวิทยานิพนธ์.....	2
1.6 หลักการใหม่ในวิทยานิพนธ์.....	3
1.7 รายละเอียดในวิทยานิพนธ์.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 กล่าวนำ.....	4
2.2 ศัพท์และความหมาย.....	4
2.2.1 ฮาร์โมนิกส์.....	4
2.2.2 กระแสฮาร์โมนิกส์.....	4
2.2.3 แรงดันฮาร์โมนิกส์.....	4
2.2.4 ความเพี้ยนของฮาร์โมนิกส์รวม.....	5
2.2.5 ลำดับฮาร์โมนิกส์.....	6
2.3 แหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกส์.....	6
2.3.1 แหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกส์ที่สร้างเฉพาะกระแสฮาร์โมนิกส์ที่มี ความถี่เป็นจำนวนเท่าของความถี่หลักมูล.....	6
2.3.2 แหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกส์ที่สร้างกระแสฮาร์โมนิกส์ทั้งที่มีความถี่ เป็นจำนวนเท่าและไม่เป็นจำนวนเท่าของความถี่หลักมูล.....	7

# สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.4 แหล่งกำเนิดความร้อน.....	7
2.4.1 ค่าความสูญเสียขณะไม่มีโหลด.....	8
2.4.2 ค่าความสูญเสียขณะมีโหลด.....	11
2.5 คุณลักษณะทางความร้อนของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	15
2.5.1 ขีดจำกัดของอุณหภูมิเพิ่ม.....	15
2.5.2 วิธีการระบายความร้อนของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	16
2.5.3 สัญลักษณ์ที่ใช้เรียกตามวิธีการระบายความร้อน.....	16
2.5.4 ขีดจำกัดความร้อนเกินและผลที่มีต่อความเป็นฉนวน.....	17
2.5.5 ระดับชั้นอุณหภูมิของฉนวน.....	18
2.6 การแก้ปัญหาด้านความร้อนของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อต้องจ่าย โหลดแบบ กระแสไม่เป็นเชิงเส้น.....	18
2.6.1 การลดพิกัด โหลดของหม้อแปลง.....	19
2.6.2 การเลือกใช้หม้อแปลงแบบเฟกเตอร์ K.....	21
บทที่ 3 ผลการทำนายทางทฤษฎี.....	22
3.1 แบบจำลองทางความร้อนของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	22
3.1.1 แบบจำลองทางความร้อนของหม้อแปลงไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE C57.110-1998.....	22
3.1.2 แบบจำลองทางความร้อนของหม้อแปลงไฟฟ้าอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC.....	26
3.2 การออกแบบซอฟต์แวร์สำหรับทำนายอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า เมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น.....	30
3.3 การพัฒนาโปรแกรมสำหรับทำนายอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่าย โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น.....	38
3.4 ตัวอย่างการทดสอบโปรแกรม.....	48
3.5 ผลการทดสอบทำนายอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	54
3.5.1 ผลการทดสอบทำนายอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดแบบ กระแสเป็นเชิงเส้นเพียงอย่างเดียว 100%.....	54
3.5.2 ผลการทำนายอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแส	

# สารบัญ(ต่อ)

หน้า

ไม่เป็นเชิงเส้นเพียงอย่างเดียวที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์ รวม 30%,42.7% และ49% ทั้งมาตรฐาน IEEE และมาตรฐานIEC.....	56
3.5.3 ผลการทดสอบทำนายอุณหภูมิเมื่อจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบ กระแสเป็นเชิงเส้น และแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นที่มีความเพี้ยนของ ฮาร์มอนิกส์รวม 30%,42.7% และ49% ทั้งมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC.....	63
3.5.3.1 กรณีจ่ายโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 10% ร่วมกับโหลดแบบ กระแสไม่เป็นเชิงเส้น 90% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์ รวม30%,42.7% และ49%.....	63
3.5.3.2 กรณีจ่ายโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% ร่วมกับโหลดแบบ กระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์ รวม30%,42.7% และ49%.....	69
3.5.3.3 กรณีจ่ายโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 30% ร่วมกับ โหลดแบบ กระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์ รวม30%,42.7% และ49%.....	76
3.5.3.4 กรณีจ่ายโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% ร่วมกับ โหลดแบบ กระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์ รวม30%,42.7% และ49%.....	82
3.5.4 ผลการทำนายความสามารถในการรับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น ของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	89
3.5.5 ผลการทำนายอายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแส ที่มีความเพี้ยนของฮาร์มอนิกส์รวม 30%,42.7% และ49% ทั้งมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC.....	102
บทที่ 4 ผลการทดสอบ.....	106
4.1 กล่าวนำ.....	106
4.2 ตำแหน่งติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ล.....	106
4.3 วงจรการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น.....	108

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.4 วงจรการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น.....	109
4.5 วงจรการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบกระแส เป็นเชิงเส้นร่วมกับแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น.....	109
4.6 วิธีการทดสอบและผลการทดสอบอุณหภูมิตามเงื่อนไขต่าง ๆ .....	110
4.6.1 การทดสอบอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสเป็น เชิงเส้น.....	110
4.6.2 การทดสอบอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็น เชิงเส้นเพียงอย่างเดียว.....	110
4.6.3 การทดสอบอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดร่วมกันระหว่าง แบบกระแสเป็นเชิงเส้นร่วมกับแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น.....	113
4.6.3.1 หม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 10% ของกระแสที่พิกัดร่วมกับแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 90% ของกระแสที่พิกัด ซึ่งมีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD <sub>r</sub> ) 30%,42.7% และ49% .....	114
4.6.3.2 หม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% ของกระแสที่พิกัดร่วมกับแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ของกระแสที่พิกัด ซึ่งมีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD <sub>r</sub> ) 30%,42.7% และ49% .....	120
4.6.3.3 หม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 30% ของกระแสที่พิกัดร่วมกับแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ของกระแสที่พิกัด ซึ่งมีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD <sub>r</sub> ) 30%,42.7% และ49% .....	127
4.6.3.4 หม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% ของกระแสที่พิกัดร่วมกับแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ของกระแสที่พิกัด ซึ่งมีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD <sub>r</sub> ) 30%,42.7% และ49% .....	133
4.7 ผลการทดสอบอุณหภูมิที่ส่วนต่าง ๆ ของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	140
4.7.1 ผลการทดสอบทำนายอุณหภูมิที่ส่วนต่าง ๆ ของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่าย	

# สารบัญ(ต่อ)

หน้า

โหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้นเพียงอย่างเดียวตามเงื่อนไขข้อ 4.1.....	140
4.7.2 ผลการทดสอบทำนายอุณหภูมิที่ส่วนต่าง ๆ ของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่าย โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นเพียงอย่างเดียวตามเงื่อนไขข้อ 4.2.....	145
4.7.3 ผลการทดสอบทำนายอุณหภูมิที่ส่วนต่าง ๆ ของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่าย โหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้นร่วมกับโหลดแบบ กระแสไม่เป็นเชิงเส้นตามเงื่อนไขข้อ 4.6.3.....	160
4.7.3.1 หม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างโหลดแบบกระแสเป็น เชิงเส้น 10% ของกระแสที่พิกัดร่วมกับแบบกระแสไม่เป็น เชิงเส้น 90% ของกระแสที่พิกัด ซึ่งมีความเพี้ยนของกระแส ฮาร์โมนิกส์รวม (THD <sub>r</sub> ) 30%,42.7% และ49% .....	160
4.7.3.2 หม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างโหลดแบบกระแสเป็น เชิงเส้น 20% ของกระแสที่พิกัดร่วมกับแบบกระแสไม่เป็น เชิงเส้น 80% ของกระแสที่พิกัด ซึ่งมีความเพี้ยนของกระแส ฮาร์โมนิกส์รวม (THD <sub>r</sub> ) 30%,42.7% และ49% .....	176
4.7.3.3 หม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างโหลดแบบกระแสเป็น เชิงเส้น 30% ของกระแสที่พิกัดร่วมกับแบบกระแสไม่เป็น เชิงเส้น 70% ของกระแสที่พิกัด ซึ่งมีความเพี้ยนของกระแส ฮาร์โมนิกส์รวม (THD <sub>r</sub> ) 30%,42.7% และ49% .....	191
4.7.3.4 หม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างโหลดแบบกระแสเป็น เชิงเส้น 40% ของกระแสที่พิกัดร่วมกับแบบกระแสไม่เป็น เชิงเส้น 60% ของกระแสที่พิกัด ซึ่งมีความเพี้ยนของกระแส ฮาร์โมนิกส์รวม (THD <sub>r</sub> ) 30%,42.7% และ49% .....	206
บทที่ 5 วิเคราะห์ผลการทำนายและผลการทดสอบ.....	221
5.1 วิเคราะห์ผลการทำนายและผลการทดสอบอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	221
5.1.1 วิเคราะห์ผลการทำนายและผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่าย โหลด แบบกระแสเป็นเชิงเส้นเพียงอย่างเดียว 100%.....	221
5.1.2 วิเคราะห์ผลการทำนายและผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่าย โหลด	

## สารบัญ(ต่อ)

หน้า

แบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นเพียงอย่างเดียว 100%ที่มีความเพี้ยนของกระแส ฮาร์มอนิกส์รวม (THD,) 30%,42.7% และ49%.....	223
5.1.3 วิเคราะห์ผลการทำนายและผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลด แบบกระแสเป็นเชิงเส้นร่วมกับแลตกระแสไม่เป็นเชิงเส้นที่มีความเพี้ยน ของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD,) 30%,42.7% และ49%.....	224
5.2 วิเคราะห์ผลการทำนายค่าความสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	227
5.3 วิเคราะห์ผลการทำนายความสามารถในการรับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น เส้นของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	229
5.4 วิเคราะห์ผลการทำนายอายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	231
บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	233
6.1 สรุปผลการทดสอบ.....	233
6.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ.....	235
เอกสารอ้างอิง.....	236
ภาคผนวก.....	239
ภาคผนวก ก รายละเอียดของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	240
ภาคผนวก ข รูปโครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้า การติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ล รูปเครื่องมือที่ใช้ ในการทดสอบ.....	242
ภาคผนวก ค ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ และได้รับการตีพิมพ์.....	247
ประวัติผู้เขียน.....	255

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงค่าคงที่ของการสูญเสียในแกนเหล็ก.....	11
2.2 แสดงขีดจำกัดอุณหภูมิเพิ่มสำหรับหม้อแปลงแบบจุ่มน้ำมัน.....	15
3.1 แสดงความสัมพันธ์ของพิกัดการเสื่อมอายุสัมพัทธ์, พิกัดอายุการใช้งานสัมพัทธ์ กับอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด.....	29
3.2 แสดงข้อมูลของกระแสแบบไม่เป็นเชิงเส้นที่ได้จากการทดสอบที่ป้อนให้กับโปรแกรม.....	57
3.3 แสดงผลการทำนาย Harmonic loss factor, K-factor และค่าความสูญเสียของหม้อแปลง ไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น.....	97
3.4 แสดงผลการทำนายค่าความสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็น เชิงเส้นที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม(THD <sub>i</sub> ) 49%.....	99
3.5 แสดงผลการทำนายค่าความสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็น เชิงเส้นที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม(THD <sub>i</sub> ) 42.7%.....	99
3.6 แสดงผลการทำนายค่าความสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็น เชิงเส้นที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม(THD <sub>i</sub> ) 30%.....	100
3.7 แสดงการเปรียบเทียบผลการคำนวณอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน และอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ที่มากกว่าอุณหภูมิน้ำมันด้านบนระหว่างมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC.....	101

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
3.1 แสดงการถ่ายเทความร้อนของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแช่น้ำมัน.....	23
3.2 แสดงแผนผังความร้อนตามมาตรฐาน IEC.....	26
3.3 แสดง Load Cycle แบบโหลดคงที่.....	30
3.4 แผนภูมิแสดงขั้นตอนในการคำนวณอุณหภูมิ และค่าความสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้า แบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น ของโปรแกรมทั้งหมด.....	33
3.5 แสดง Load Cycle แบบ 2 Step.....	33
3.6 แสดง Load Cycle แบบ 3 Step.....	34
3.7 แสดง Load Cycle แบบ 4 Step.....	34
3.8 แสดง Load Cycle แบบ 5 Step.....	35
3.9 แสดง Load Cycle แบบ 6 Step.....	35
3.10 แสดง Load Cycle แบบ 7 Step.....	36
3.11 แสดงหน้าค่าสำหรับป้อนข้อมูลเบื้องต้นของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	39
3.12 แสดงหน้าค่าสำหรับป้อนข้อมูลของกระแสแบบไม่เป็นเชิงเส้น.....	40
3.13 หน้าค่าสำหรับป้อนข้อมูล Load cycle สำหรับทำนายอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	41
3.14 แสดงหน้าค่าผลการทำนายค่า Harmonic และค่าความสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	45
3.15 แสดงหน้าค่าผลการทำนายค่า Transformer capability ของหม้อแปลงเมื่อจ่าย โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น.....	46
3.16 แสดงหน้าค่าผลการทำนายค่าอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน ของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	46
3.17 แสดงหน้าค่าผลการทำนายค่าอุณหภูมิเพิ่ม ณ จุดร้อนสุด ของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	46
3.18 แสดงหน้าค่าผลการทำนายค่าอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	47
3.19 แสดงหน้าค่าผลการทำนายค่า การสูญเสียอายุการใช้งาน ของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	47
3.20 แสดงหน้าค่าผลการทำนายค่า อุณหภูมิ และ อายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	47
3.21 แสดงการป้อนข้อมูลเบื้องต้นของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	49
3.22 แสดงการป้อนข้อมูลของกระแสฮาร์มอนิกส์ใน โหลดของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	50
3.23 แสดงการป้อนข้อมูล Load Cycle ของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ต้องการทำนายอุณหภูมิ.....	50
3.24 แสดงหน้าค่าที่แสดงผลการทำนายผลของฮาร์มอนิกส์และค่าความสูญเสียของหม้อแปลง ไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น.....	51
3.25 แสดงหน้าค่าที่แสดงผลการทำนายอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนของหม้อแปลงไฟฟ้า	

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
เมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น ตามมาตรฐาน IEEE.....	51
3.26 แสดงหน้าค่าที่แสดงผลการทำนายอุณหภูมิเพิ่ม ณ จุดร้อนสุด ของหม้อแปลงไฟฟ้า เมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น ตามมาตรฐาน IEEE.....	52
3.27 แสดงหน้าค่าที่แสดงผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ของหม้อแปลงไฟฟ้า เมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นตามมาตรฐาน IEEE.....	52
3.28 แสดงหน้าค่าที่แสดงผลการทำนาย การสูญเสียอายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้า เมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น ตามมาตรฐาน IEEE.....	53
3.29 แสดงหน้าค่าแสดงผลการทำนาย สรุพอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในหม้อแปลง และอายุการใช้งาน ของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นตามมาตรฐาน IEEE.....	53
3.30 แสดงหน้าค่าแสดงผลการทำนาย ความสามารถในการรับโหลดแบบกระแส ไม่เป็นเชิงเส้นของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	54
3.31 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าระหว่างการทำนายด้วย มาตรฐาน IEEE กับมาตรฐาน IEC เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้นเพียง อย่างเดียว 100% เป็นเวลา 10 ชั่วโมง.....	55
3.32 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ของหม้อแปลงไฟฟ้าระหว่าง การทำนายด้วยมาตรฐาน IEEE กับมาตรฐาน IEC เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบกระแส เป็นเชิงเส้นเพียงอย่างเดียว 100% เป็นเวลา 10 ชั่วโมง.....	56
3.33 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนของหม้อแปลงไฟฟ้า ระหว่างการทำนายด้วยมาตรฐาน IEEE กับมาตรฐาน IEC เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบ กระแสไม่เป็นเชิงเส้นเพียงอย่างเดียว 100% ที่มีความชื้นของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 49% เป็นเวลา 10 ชั่วโมง.....	58
3.34 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนของหม้อแปลงไฟฟ้า ระหว่างการทำนายด้วยมาตรฐาน IEEE กับมาตรฐาน IEC เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบ กระแสไม่เป็นเชิงเส้นเพียงอย่างเดียว 100% ที่มีความชื้นของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 42.7% เป็นเวลา 10 ชั่วโมง.....	58
3.35 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนของหม้อแปลงไฟฟ้า ระหว่างการทำนายด้วยมาตรฐาน IEEE กับมาตรฐาน IEC เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบ กระแสไม่เป็นเชิงเส้นเพียงอย่างเดียว 100% ที่มีความชื้นของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม	

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
30% เป็นเวลา 10 ชั่วโมง.....	59
3.36 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนของหม้อแปลงไฟฟ้า ระหว่างการทำนายด้วยมาตรฐาน IEEE เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น เพียงอย่างเดียว 100% และแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นเพียงอย่างเดียว 100% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 30%,42.7% และ 49% เป็นเวลา 10 ชั่วโมง.....	59
3.37 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนของหม้อแปลงไฟฟ้า ระหว่างการทำนายด้วยมาตรฐาน IEC เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น เพียงอย่างเดียว 100% และแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นเพียงอย่างเดียว 100% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 30%,42.7% และ 49% เป็นเวลา 10 ชั่วโมง.....	60
3.38 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ของหม้อแปลงไฟฟ้าระหว่าง การทำนายด้วยมาตรฐาน IEEE กับมาตรฐาน IEC เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบกระแส ไม่เป็นเชิงเส้นเพียงอย่างเดียว 100%ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 49% เป็นเวลา 10 ชั่วโมง.....	60
3.39 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ของหม้อแปลงไฟฟ้าระหว่าง การทำนายด้วยมาตรฐาน IEEE กับมาตรฐาน IEC เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบกระแส ไม่เป็นเชิงเส้นเพียงอย่างเดียว 100%ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 42.7% เป็นเวลา 10 ชั่วโมง.....	61
3.40 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ของหม้อแปลงไฟฟ้าระหว่าง การทำนายด้วยมาตรฐาน IEEE กับมาตรฐาน IEC เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบกระแส ไม่เป็นเชิงเส้นเพียงอย่างเดียว 100%ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 30% เป็นเวลา 10 ชั่วโมง.....	61
3.41 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ของหม้อแปลงไฟฟ้า ระหว่างการทำนายด้วยมาตรฐาน IEEE เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น เพียงอย่างเดียว 100% และแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นเพียงอย่างเดียว 100% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 30%,42.7% และ 49% เป็นเวลา 10 ชั่วโมง.....	62
3.42 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ของหม้อแปลงไฟฟ้า ระหว่างการทำนายด้วยมาตรฐาน IEC เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น เพียงอย่างเดียว 100% และแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นเพียงอย่างเดียว 100% ที่มีความ	



## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม42.7% เป็นเวลา 10ชั่วโมง.....	67
3.50 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ของหม้อแปลงไฟฟ้า ระหว่างการทำนายด้วยมาตรฐาน IEEE กับมาตรฐาน IEC เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลด ร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 10% กับ แบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 90% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 30% เป็นเวลา 10ชั่วโมง.....	67
3.51 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ของหม้อแปลงไฟฟ้า ระหว่างการทำนายด้วยมาตรฐาน IEEE เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบ กระแสเป็นเชิงเส้นเพียง10% กับแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น90% ที่มีความเพี้ยนของกระแส ฮาร์มอนิกส์รวม 30%,42.7% และ49% เป็นเวลา 10ชั่วโมง.....	68
3.52 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ของหม้อแปลงไฟฟ้า ระหว่างการทำนายด้วยมาตรฐาน IEC เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบ กระแสเป็นเชิงเส้นเพียง10% กับแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 90% ที่มีความเพี้ยนของกระแส ฮาร์มอนิกส์รวม 30%,42.7% และ49% เป็นเวลา 10ชั่วโมง.....	68
3.53 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนของหม้อแปลงไฟฟ้า ระหว่างการทำนายด้วยมาตรฐาน IEEE กับมาตรฐาน IEC เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลด ร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% กับ แบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม49% เป็นเวลา 10ชั่วโมง.....	70
3.54 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนของหม้อแปลงไฟฟ้า ระหว่างการทำนายด้วยมาตรฐาน IEEE กับมาตรฐาน IEC เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลด ร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% กับ แบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม42.7% เป็นเวลา 10ชั่วโมง.....	71
3.55 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนของหม้อแปลง ไฟฟ้า ระหว่างการทำนายด้วยมาตรฐาน IEEE กับมาตรฐาน IEC เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลด ร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% กับ แบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม30% เป็นเวลา 10ชั่วโมง.....	71
3.56 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนของหม้อแปลงไฟฟ้า ระหว่างการทำนายด้วยมาตรฐาน IEEE เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบ กระแสเป็นเชิงเส้น 20% กับ แบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ที่มีความเพี้ยนของกระแส	

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
ฮาร์มอนิกส์รวม 30%,42.7% และ49% เป็นเวลา 10 ชั่วโมง.....	72
3.57 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนของหม้อแปลงไฟฟ้า ระหว่างการทำนายด้วยมาตรฐาน IEC เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบ กระแสเป็นเชิงเส้น 20% กับ แบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ที่มีความเพี้ยนของกระแส ฮาร์มอนิกส์รวม 30%,42.7% และ49% เป็นเวลา 10 ชั่วโมง.....	72
3.58 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ของหม้อแปลงไฟฟ้า ระหว่างการทำนายด้วยมาตรฐาน IEEE กับมาตรฐาน IEC เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลด ร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% กับ แบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม49% เป็นเวลา 10 ชั่วโมง.....	73
3.59 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ของหม้อแปลงไฟฟ้า ระหว่างการทำนายด้วยมาตรฐาน IEEE กับมาตรฐาน IEC เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลด ร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% กับ แบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม42.7% เป็นเวลา 10 ชั่วโมง.....	73
3.60 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ของหม้อแปลงไฟฟ้า ระหว่างการทำนายด้วยมาตรฐาน IEEE กับมาตรฐาน IEC เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลด ร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% กับ แบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 30% เป็นเวลา 10 ชั่วโมง.....	74
3.61 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ของหม้อแปลงไฟฟ้า ระหว่างการทำนายด้วยมาตรฐาน IEEE เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบ กระแสเป็นเชิงเส้นเพียง20% กับแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น80% ที่มีความเพี้ยนของกระแส ฮาร์มอนิกส์รวม 30%,42.7% และ49% เป็นเวลา 10 ชั่วโมง.....	74
3.62 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ของหม้อแปลงไฟฟ้า ระหว่างการทำนายด้วยมาตรฐาน IEC เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบ กระแสเป็นเชิงเส้นเพียง20% กับแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ที่มีความเพี้ยนของกระแส ฮาร์มอนิกส์รวม 30%,42.7% และ49% เป็นเวลา 10 ชั่วโมง.....	75
3.63 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนของหม้อแปลงไฟฟ้า ระหว่างการทำนายด้วยมาตรฐาน IEEE กับมาตรฐาน IEC เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลด ร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 30% กับ แบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70%	



## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 30% เป็นเวลา 10 ชั่วโมง.....	80
3.71 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ของหม้อแปลงไฟฟ้า ระหว่างการทำนายด้วยมาตรฐาน IEEE เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบ กระแสเป็นเชิงเส้นเพียง30% กับแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น70% ที่มีความเพี้ยนของกระแส ฮาร์มอนิกส์รวม 30%,42.7% และ49% เป็นเวลา 10 ชั่วโมง.....	81
3.72 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ของหม้อแปลงไฟฟ้า ระหว่างการทำนายด้วยมาตรฐาน IEC เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบ กระแสเป็นเชิงเส้นเพียง30% กับแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ที่มีความเพี้ยนของกระแส ฮาร์มอนิกส์รวม 30%,42.7% และ49% เป็นเวลา 10 ชั่วโมง.....	81
3.73 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนของหม้อแปลงไฟฟ้า ระหว่างการทำนายด้วยมาตรฐาน IEEE กับมาตรฐาน IEC เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลด ร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% กับ แบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม49% เป็นเวลา 10 ชั่วโมง.....	83
3.74 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนของหม้อแปลงไฟฟ้า ระหว่างการทำนายด้วยมาตรฐาน IEEE กับมาตรฐาน IEC เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลด ร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% กับ แบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม42.7% เป็นเวลา 10 ชั่วโมง.....	84
3.75 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนของหม้อแปลงไฟฟ้า ระหว่างการทำนายด้วยมาตรฐาน IEEE กับมาตรฐาน IEC เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลด ร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% กับ แบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม30% เป็นเวลา 10 ชั่วโมง.....	84
3.76 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนของหม้อแปลงไฟฟ้า ระหว่างการทำนายด้วยมาตรฐาน IEEE เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบ กระแสเป็นเชิงเส้น 40% กับ แบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ที่มีความเพี้ยนของกระแส ฮาร์มอนิกส์รวม 30%,42.7% และ49% เป็นเวลา 10 ชั่วโมง.....	85
3.77 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนของหม้อแปลงไฟฟ้า ระหว่างการทำนายด้วยมาตรฐาน IEC เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบ กระแสเป็นเชิงเส้น 40% กับ แบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ที่มีความเพี้ยนของกระแส	

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
ฮาร์มอนิกส์รวม 30%,42.7% และ49% เป็นเวลา 10ชั่วโมง.....	85
3.78 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ของหม้อแปลงไฟฟ้า ระหว่างการทำนายด้วยมาตรฐาน IEEE กับมาตรฐาน IEC เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลด ร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% กับ แบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม49% เป็นเวลา 10ชั่วโมง.....	86
3.79 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ของหม้อแปลงไฟฟ้า ระหว่างการทำนายด้วยมาตรฐาน IEEE กับมาตรฐาน IEC เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลด ร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% กับ แบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม42.7% เป็นเวลา 10ชั่วโมง.....	86
3.80 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ของหม้อแปลงไฟฟ้า ระหว่างการทำนายด้วยมาตรฐาน IEEE กับมาตรฐาน IEC เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลด ร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% กับ แบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 30% เป็นเวลา 10ชั่วโมง.....	87
3.81 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ของหม้อแปลงไฟฟ้า ระหว่างการทำนายด้วยมาตรฐาน IEEE เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบ กระแสเป็นเชิงเส้นเพียง40% กับแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น60% ที่มีความเพี้ยนของกระแส ฮาร์มอนิกส์รวม 30%,42.7% และ49% เป็นเวลา 10ชั่วโมง.....	87
3.82 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ของหม้อแปลงไฟฟ้า ระหว่างการทำนายด้วยมาตรฐาน IEC เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบ กระแสเป็นเชิงเส้นเพียง40% กับแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ที่มีความเพี้ยนของกระแส ฮาร์มอนิกส์รวม 30%,42.7% และ49% เป็นเวลา 10ชั่วโมง.....	88
3.83 แสดงการเปรียบเทียบผลการทำนายการลัดพิกัด โหลดของหม้อแปลงไฟฟ้าโดยการ คำนวณความสามารถในการรับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น โดยการใช้ข้อมูลที่ ออกแบบความสูญเสียของกระแสไหลวน เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบกระแส ไม่เป็นเชิงเส้น 100%ที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 30%,42.7% และ 49%.....	89
3.84 แสดงการเปรียบเทียบผลการทำนายการลัดพิกัด โหลดของหม้อแปลงไฟฟ้าโดยการ คำนวณความสามารถในการรับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น โดยการใช้ข้อมูลที่ ได้จากการทดสอบ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 100%ที่ความ	

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
	เพ็ญของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม 30%,42.7% และ 49%.....90
3.85	แสดงการเปรียบเทียบผลการทำนายการลดพิกัดโหนดของหม้อแปลงไฟฟ้าโดยการ คำนวณความสามารถในการรับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น โดยการใช้ข้อมูลที่ ออกแบบความสูญเสียของกระแสไหลวน เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบกระแส เป็นเชิงเส้น 10% ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 90%ที่มีความเพี้ยนของ กระแสฮาร์โมนิกส์รวม 30%,42.7% และ 49%.....91
3.86	แสดงการเปรียบเทียบผลการทำนายการลดพิกัดโหนดของหม้อแปลงไฟฟ้าโดยการ คำนวณความสามารถในการรับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น โดยการใช้ข้อมูลที่ ได้จากการทดสอบ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบกระแส เป็นเชิงเส้น 10% ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 90%ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม 30%,42.7% และ 49%.....91
3.87	แสดงการเปรียบเทียบผลการทำนายการลดพิกัดโหนดของหม้อแปลงไฟฟ้าโดยการ คำนวณความสามารถในการรับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น โดยการใช้ข้อมูลที่ ออกแบบความสูญเสียของกระแสไหลวน เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบกระแส เป็นเชิงเส้น 20% ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80%ที่มีความเพี้ยนของ กระแสฮาร์โมนิกส์รวม 30%,42.7% และ 49%.....92
3.88	แสดงการเปรียบเทียบผลการทำนายการลดพิกัดโหนดของหม้อแปลงไฟฟ้าโดยการ คำนวณความสามารถในการรับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น โดยการใช้ข้อมูลที่ ได้จากการทดสอบ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบกระแส เป็นเชิงเส้น 20% ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80%ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม 30%,42.7% และ 49%.....93
3.89	แสดงการเปรียบเทียบผลการทำนายการลดพิกัดโหนดของหม้อแปลงไฟฟ้าโดยการ คำนวณความสามารถในการรับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น โดยการใช้ข้อมูลที่ ออกแบบความสูญเสียของกระแสไหลวน เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบกระแส เป็นเชิงเส้น 30% ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70%ที่มีความเพี้ยนของ กระแสฮาร์โมนิกส์รวม 30%,42.7% และ 49%.....94

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.90 แสดงการเปรียบเทียบผลการทำนายการลัดพิกัดโหนดของหม้อแปลงไฟฟ้าโดยการคำนวณความสามารถในการรับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น โดยการใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบกระแส เป็นเชิงเส้น 30% ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70%ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 30%,42.7% และ 49%.....	94
3.91 แสดงการเปรียบเทียบผลการทำนายการลัดพิกัดโหนดของหม้อแปลงไฟฟ้าโดยการคำนวณความสามารถในการรับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น โดยการใช้ข้อมูลที่ออกแบบความสูญเสียของกระแสไหลวน เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบกระแส เป็นเชิงเส้น 40% ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60%ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 30%,42.7% และ 49%.....	95
3.92 แสดงการเปรียบเทียบผลการทำนายการลัดพิกัดโหนดของหม้อแปลงไฟฟ้าโดยการคำนวณความสามารถในการรับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น โดยการใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบกระแส เป็นเชิงเส้น 40% ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60%ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 30%,42.7% และ 49%.....	96
3.93 แสดงการเปรียบเทียบผลการทำนายอายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 49% ระหว่างมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC.....	102
3.94 แสดงการเปรียบเทียบผลการทำนายอายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 42.7% ระหว่างมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC.....	103
3.95 แสดงการเปรียบเทียบผลการทำนายอายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 30 % ระหว่างมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC.....	104
4.1 แสดงการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ลที่ส่วนต่าง ๆ ของเฟส A.....	107
4.2 แสดงการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ล ณ ตำแหน่งด้านบนสุดของชุดขดลวด.....	108
4.3 แสดงวงจรการทดสอบเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น.....	108
4.4 แสดงวงจรการทดสอบเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น.....	109

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5 แสดงวงจรการทดสอบเมื่อหม้อแปลงจ่าย โหลดร่วมกันระหว่าง โหลดแบบกระแส เป็นเชิงเส้นร่วมกับแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น.....	109
4.6 แสดงรูปคลื่นของกระแสทางด้านแรงดันเมื่อหม้อแปลงจ่าย โหลดแบบเป็นเชิงเส้นที่พิกัด....	110
4.7 แสดงปริมาณฮาร์มอนิกส์ใน โหลดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD <sub>i</sub> ) 49%ที่ได้จากการทดสอบ.....	111
4.8 แสดงปริมาณฮาร์มอนิกส์ใน โหลดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD <sub>i</sub> ) 42.7%ที่ได้จากการทดสอบ.....	111
4.9 แสดงปริมาณฮาร์มอนิกส์ใน โหลดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD <sub>i</sub> ) 30%ที่ได้จากการทดสอบ.....	112
4.10 แสดงรูปคลื่นของกระแส โหลดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวมรวม (THD <sub>i</sub> ) 49%ที่ได้จากการทดสอบ.....	112
4.11 แสดงรูปคลื่นของกระแส โหลดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวมรวม (THD <sub>i</sub> ) 42.7%ที่ได้จากการทดสอบ.....	113
4.12 แสดงรูปคลื่นของกระแส โหลดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวมรวม (THD <sub>i</sub> ) 30%ที่ได้จากการทดสอบ.....	113
4.13 แสดงรูปคลื่นของกระแส โหลดแบบเป็นเชิงเส้น 10 % ของกระแสที่พิกัด.....	114
4.14 แสดงปริมาณของกระแสฮาร์มอนิกส์เมื่อจ่าย โหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น 90% ของกระแส ที่พิกัด เมื่อมีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม(THD <sub>i</sub> ) 49% ที่ ได้จากการทดสอบ.....	115
4.15 แสดงปริมาณของกระแสเมื่อจ่าย โหลดร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 10% ของ กระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 90% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม(THD <sub>i</sub> )49% ที่ ได้จากการทดสอบ.....	115
4.16 แสดงรูปคลื่นของกระแส โหลด 90% ของกระแสที่พิกัด เมื่อมีความเพี้ยนของกระแส ฮาร์มอนิกส์รวม (THD <sub>i</sub> )49% ที่ ได้จากการทดสอบ.....	116
4.17 แสดงรูปคลื่นของกระแสเมื่อจ่าย โหลดร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 10% ของ กระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 90% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม(THD <sub>i</sub> )49% ที่ ได้จากการทดสอบ.....	116
4.18 แสดงปริมาณของกระแสฮาร์มอนิกส์เมื่อจ่าย โหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น 90% ของกระแส ที่พิกัด เมื่อมีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม(THD <sub>i</sub> ) 42.7% ที่ ได้จากการทดสอบ...	117









## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
กระแสเป็นเชิงเส้นเพียงอย่างเดียว.....	140
4.66 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน และ อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านล่าง.....	141
4.67 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิด้านบนสุด กลาง และด้านล่างสุด ของชุดขดลวดแรงสูง เฟส A.....	141
4.68 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิด้านบนสุด กลาง และด้านล่างสุด ของชุดขดลวดแรงต่ำ เฟส A.....	142
4.69 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิด้านบนสุดของชุดขดลวดแรงสูง เฟส A, B และ C.....	142
4.70 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิด้านบนสุดของชุดขดลวดแรงต่ำ เฟส A, B และ C.....	143
4.71 แสดงการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนตามมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC เมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น กับผลการทดสอบ.....	143
4.72 แสดงการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ตามมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC เมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น กับผลการทดสอบ (ตำแหน่งที่ 2).....	144
4.73 แสดงผลการทดสอบอุณหภูมิแวดล้อมของหม้อแปลง ขณะจ่ายโหลดแบบ กระแสไม่เป็นเชิงเส้นที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD <sub>i</sub> ) 49%.....	145
4.74 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน และ อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านล่างเมื่อกระแสมีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD <sub>i</sub> ) 49%.....	146
4.75 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิด้านบนสุด กลาง และด้านล่างสุด ของชุดขดลวดแรงสูง เฟส A เมื่อกระแสมีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD <sub>i</sub> ) 49%.....	146
4.76 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิด้านบนสุด กลาง และด้านล่างสุด ของชุดขดลวดแรงต่ำ เฟส A เมื่อกระแสมีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD <sub>i</sub> ) 49%.....	147
4.77 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิด้านบนสุดของชุดขดลวดแรงสูง	

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
เฟส A, B และ C เมื่อกระแสมีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD <sub>i</sub> ) 49%.....	147
4.78 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิด้านบนสุดของชุดขดลวดแรงต่ำ เฟส A, B และ C เมื่อกระแสมีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม(THD <sub>i</sub> ) 49%.....	148
4.79 แสดงการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนตามมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC เมื่อกระแสมีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD <sub>i</sub> ) 49% กับผลการทดสอบ.....	148
4.80 แสดงการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ตามมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC เมื่อกระแสมีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม(THD <sub>i</sub> ) 49% กับผลการทดสอบ(ตำแหน่งที่ 2) .....	149
4.81 แสดงผลการทดสอบอุณหภูมิแวดล้อมของหม้อแปลง ขณะจ่ายโหลดแบบ กระแสไม่เป็นเชิงเส้นที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD <sub>i</sub> ) 42.7%.....	149
4.82 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน และ อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านล่างเมื่อกระแสมีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD <sub>i</sub> ) 42.7%.....	150
4.83 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิด้านบนสุด กลาง และด้านล่างสุด ของชุดขดลวดแรงสูง เฟส A เมื่อกระแสมีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD <sub>i</sub> ) 42.7%.....	150
4.84 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิด้านบนสุด กลาง และด้านล่างสุด ของชุดขดลวดแรงต่ำ เฟส A เมื่อกระแสมีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD <sub>i</sub> ) 42.7%.....	151
4.85 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิด้านบนสุดของชุดขดลวดแรงสูง เฟส A, B และ C เมื่อกระแสมีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD <sub>i</sub> ) 42.7%.....	151
4.86 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิด้านบนสุดของชุดขดลวดแรงต่ำ เฟส A, B และ C เมื่อกระแสมีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม(THD <sub>i</sub> ) 42.7%.....	152
4.87 แสดงการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนตามมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC เมื่อกระแสมีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD <sub>i</sub> ) 42.7% กับผลการทดสอบ.....	152
4.88 แสดงการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ตามมาตรฐาน IEEE	

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
และมาตรฐาน IEC เมื่อกระแสมีความถี่ของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม(THD <sub>i</sub> ) 42.7% กับผลการทดสอบ(ตำแหน่งที่ 2) .....	153
4.89 แสดงผลการทดสอบอุณหภูมิแวดล้อมของหม้อแปลง ขณะจ่ายโหลดแบบ กระแสไม่เป็นเชิงเส้นที่มีความถี่ของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD <sub>i</sub> ) 30%.....	153
4.90 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน และ อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านล่างเมื่อกระแสมีความถี่ของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD <sub>i</sub> ) 30%.....	154
4.91 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิด้านบนสุด กลาง และด้านล่างสุด ของชุดขดลวดแรงสูง เฟส Aเมื่อกระแสมีความถี่ของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD <sub>i</sub> ) 30%.....	154
4.92 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิด้านบนสุด กลาง และด้านล่างสุด ของชุดขดลวดแรงต่ำ เฟส Aเมื่อกระแสมีความถี่ของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD <sub>i</sub> ) 30%.....	155
4.93 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิด้านบนสุดของชุดขดลวดแรงสูง เฟส A, B และ Cเมื่อกระแสมีความถี่ของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD <sub>i</sub> ) 30%.....	155
4.94 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิด้านบนสุดของชุดขดลวดแรงต่ำ เฟส A, B และ Cเมื่อกระแสมีความถี่ของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม(THD <sub>i</sub> ) 30%.....	156
4.95 แสดงการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนตามมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IECเมื่อกระแสมีความถี่ของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD <sub>i</sub> ) 30% กับผลการทดสอบ.....	156
4.96 แสดงการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ตามมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC เมื่อกระแสมีความถี่ของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม(THD <sub>i</sub> ) 30% กับผลการทดสอบ(ตำแหน่งที่ 2) .....	157
4.97 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนเมื่อจ่ายโหลดแบบ กระแสเป็นเชิงเส้น และแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นที่มีความถี่ของกระแส ฮาร์มอนิกส์รวม 30%, 42.7% และ 49%.....	157
4.98 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ของหม้อแปลงไฟฟ้า	

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
	เมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น และแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 30%, 42.7% และ 49%.....158
4.99	แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบวัดค่า THDF (The transformer harmonic derating factor ) เมื่อหม้อแปลงจ่าย โหลดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 30%, 42.7% และ 49%.....158
4.100	แสดงผลการทดสอบอุณหภูมิแวดล้อม ของหม้อแปลงเมื่อจ่าย โหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 10% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 90% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 49%.....161
4.101	แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน และอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านล่าง เมื่อหม้อแปลงจ่าย โหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 10% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 90% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD <sub>i</sub> )49%.....161
4.102	แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด กลาง และล่างสุด ของชุดขดลวดด้านแรงสูง เฟส A เมื่อ หม้อแปลงจ่าย โหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น10% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 90% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD <sub>i</sub> ) 49%.....162
4.103	แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด กลาง และล่างสุด ของชุดขดลวดด้านแรงต่ำ เฟส A เมื่อหม้อแปลงจ่าย โหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น10% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 90% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD <sub>i</sub> ) 49%.....162
4.104	แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด ของชุดขดลวดด้านแรงสูง เฟส A เฟส B และ เฟส C เมื่อหม้อแปลงจ่าย โหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น10% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 90% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD <sub>i</sub> ) 49%..... 163
4.105	แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด ของชุดขดลวดด้านแรงต่ำ เฟส A เฟส B และ เฟส C เมื่อหม้อแปลงจ่าย โหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็น

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
	เชิงเส้น 10% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 90% ของกระแส ที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD <sub>r</sub> ) 49% .....163
4.106	แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนตามมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC กับผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 10% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 90% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD <sub>r</sub> ) 49%.....164
4.107	แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ตามมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC กับผลการทดสอบอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด(ตำแหน่งที่ 2)เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลด แบบกระแสเป็นเชิงเส้น 10% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 90% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD <sub>r</sub> ) 49%.....164
4.108	แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทำนาย Derating ด้วยวิธีใช้ข้อมูลที่ออกแบบกระแสไหลวน และวิธีใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ กับผลการทดสอบวัด Transformer harmonic derating factor (THDF) เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 10% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 90% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD <sub>r</sub> ) 49%.....165
4.109	แสดงผลการทดสอบอุณหภูมิแวดล้อม ของหม้อแปลงเมื่อจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 10% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 90% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 42.7%...165
4.110	แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน และอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านล่าง เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 10% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 90% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD <sub>r</sub> )42.7%.....166
4.111	แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด กลาง และล่างสุด ของชุดขดลวดด้านแรงสูง เฟส A เมื่อ หม้อแปลงจ่าย โหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 10% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 90% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
(THD <sub>i</sub> ) 42.7 %.....	166
4.112 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด กลาง และล่างสุด ของชุดขดลวดด้านแรงต่ำ เฟส A เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่าง แบบกระแสเป็นเชิงเส้น10% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแส ไม่เป็นเชิงเส้น 90% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสร่วม (THD <sub>i</sub> ) 42.7 %.....	167
4.113 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด ของชุดขดลวดด้านแรงสูง เฟส A เฟส B และ เฟส C เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็น เชิงเส้น10% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 90% ของ กระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสร่วม (THD <sub>i</sub> ) 42.7 %.....	167
4.114 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด ของชุดขดลวดด้านแรงต่ำ เฟส A เฟส B และ เฟส C เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็น เชิงเส้น10% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 90% ของ กระแส ที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสร่วม (THD <sub>i</sub> ) 42.7 % .....	168
4.115 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนตามมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC กับผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน เมื่อหม้อ แปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็น เชิงเส้น10% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลด แบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 90% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยน ของกระแสฮาร์มอนิกสร่วม (THD <sub>i</sub> ) 42.7 %.....	168
4.116 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ตามมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC กับผลการทดสอบอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด(ตำแหน่งที่ 2)เมื่อหม้อ แปลงจ่ายโหลด แบบกระแสเป็นเชิงเส้น10% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบ กระแสไม่เป็นเชิงเส้น 90% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสร่วม (THD <sub>i</sub> ) 42.7 %.....	169
4.117 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทำนาย Derating ด้วยวิธีใช้ข้อมูลที่ออกแบบกระแส ไหลวน และวิธีใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ กับผลการทดสอบวัด Transformer harmonic derating factor(THDF) เมื่อหม้อแปลงจ่าย โหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 10% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 90% ของกระแส	

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
ที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสนอร์มอลิกส์รวม (THD) 42.7 %.....	169
4.118 แสดงผลการทดสอบอุณหภูมิแวดล้อม ของหม้อแปลงเมื่อจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 10% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแส ไม่เป็นเชิงเส้น 90% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสนอร์มอลิกส์รวม 30%.....	170
4.119 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน และอุณหภูมิ เพิ่มน้ำมันด้านล่าง เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 10% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 90% ของกระแส ที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสนอร์มอลิกส์รวม (THD) 30%.....	170
4.120 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด กลาง และล่างสุด ของชุดขดลวดด้านแรงสูง เฟส A เมื่อ หม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่าง แบบกระแสเป็นเชิงเส้น 10% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแส ไม่เป็นเชิงเส้น 90% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสนอร์มอลิกส์รวม (THD) 30%.....	171
4.121 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด กลาง และล่างสุด ของชุดขดลวดด้านแรงต่ำ เฟส A เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่าง แบบกระแสเป็นเชิงเส้น 10% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแส ไม่เป็นเชิงเส้น 90% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสนอร์มอลิกส์รวม (THD) 30%.....	171
4.122 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด ของชุดขดลวดด้านแรงสูง เฟส A เฟส B และ เฟส C เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็น เชิงเส้น 10% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 90% ของ กระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสนอร์มอลิกส์รวม (THD) 30%.....	172
4.123 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด ของชุดขดลวดด้านแรงต่ำ เฟส A เฟส B และ เฟส C เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็น เชิงเส้น 10% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 90% ของ กระแส ที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสนอร์มอลิกส์รวม (THD) 30% .....	172

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.124	แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนตามมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC กับผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 10% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลด แบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 90% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD <sub>r</sub> ) 30%.....173
4.125	แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ตามมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC กับผลการทดสอบอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด(ตำแหน่งที่ 2)เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลด แบบกระแสเป็นเชิงเส้น 10% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 90% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD <sub>r</sub> ) 30%.....173
4.126	แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทำนาย Derating ด้วยวิธีใช้ข้อมูลที่ออกแบบกระแส โหลดวน และวิธีใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ กับผลการทดสอบวัด Transformer harmonic derating factor(THDF) เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 10% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 90% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD <sub>r</sub> ) 30%.....174
4.127	แสดงผลการทดสอบอุณหภูมิแวดล้อม ของหม้อแปลงเมื่อจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 49%.....176
4.128	แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน และอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านล่าง เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD <sub>r</sub> )49%.....176
4.129	แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด กลาง และล่างสุด ของชุดขดลวดด้านแรงสูง เฟส A เมื่อ หม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD <sub>r</sub> ) 49%.....177

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.130	แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด กลาง และล่างสุด ของชุดขดลวดด้านแรงต่ำ เฟส A เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD <sub>i</sub> ) 49%.....177
4.131	แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด ของชุดขดลวดด้านแรงสูง เฟส A เฟส B และ เฟส C เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD <sub>i</sub> ) 49%..... 178
4.132	แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด ของชุดขดลวดด้านแรงต่ำ เฟส A เฟส B และ เฟส C เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ของกระแส ที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD <sub>i</sub> ) 49% .....178
4.133	แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนตามมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC กับผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลด แบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD <sub>i</sub> ) 49%.....179
4.134	แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ตามมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC กับผลการทดสอบอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด(ตำแหน่งที่ 2)เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลด แบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD <sub>i</sub> ) 49%.....179
4.135	แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทำนาย Derating ด้วยวิธีใช้ข้อมูลที่ออกแบบกระแสไหลวน และวิธีใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ กับผลการทดสอบวัด Transformer harmonic derating factor(THDF) เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD <sub>i</sub> ) 49%.....180

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.136 แสดงผลการทดสอบอุณหภูมิแวดล้อม ของหม้อแปลงเมื่อจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 42.7%...180	
4.137 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน และอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านล่าง เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD <sub>i</sub> )42.7%.....181	
4.138 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด กลาง และล่างสุด ของชุดขดลวดด้านแรงสูง เฟส A เมื่อ หม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น20% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD <sub>i</sub> ) 42.7 %.....181	
4.139 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด กลาง และล่างสุด ของชุดขดลวดด้านแรงต่ำ เฟส A เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น20% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD <sub>i</sub> ) 42.7 %.....182	
4.140 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด ของชุดขดลวดด้านแรงสูง เฟส A เฟส B และ เฟส C เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น20% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD <sub>i</sub> ) 42.7 %..... 182	
4.141 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด ของชุดขดลวดด้านแรงต่ำ เฟส A เฟส B และ เฟส C เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น20% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ของกระแส ที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD <sub>i</sub> ) 42.7 % .....183	

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.142	แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนตามมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC กับผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลด แบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD <sub>i</sub> ) 42.7 %.....183
4.143	แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ตามมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC กับผลการทดสอบอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด(ตำแหน่งที่ 2)เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลด แบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD <sub>i</sub> ) 42.7 %.....184
4.144	แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทำนาย Derating ด้วยวิธีใช้ข้อมูลที่ออกแบบกระแสไหลวน และวิธีใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ กับผลการทดสอบวัด Transformer harmonic derating factor(THDF) เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD <sub>i</sub> ) 42.7 %.....184
4.145	แสดงผลการทดสอบอุณหภูมิแวดล้อม ของหม้อแปลงเมื่อจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 30%.....185
4.146	แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน และอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านล่าง เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD <sub>i</sub> )30%.....185
4.147	แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด กลาง และล่างสุด ของชุดขดลวดด้านแรงสูง เฟส A เมื่อ หม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD <sub>i</sub> ) 30%.....186

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.148	แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด กลาง และล่างสุด ของชุดขดลวดด้านแรงต่ำ เฟส A เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD <sub>i</sub> ) 30%.....186
4.149	แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด ของชุดขดลวดด้านแรงสูง เฟส A เฟส B และ เฟส C เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD <sub>i</sub> ) 30%..... 187
4.150	แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด ของชุดขดลวดด้านแรงต่ำ เฟส A เฟส B และ เฟส C เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ของกระแส ที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD <sub>i</sub> ) 30% .....187
4.151	แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนตามมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC กับผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็น เชิงเส้น 20% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลด แบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD <sub>i</sub> ) 30%.....188
4.152	แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ตามมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC กับผลการทดสอบอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด(ตำแหน่งที่ 2)เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลด แบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD <sub>i</sub> ) 30%.....188
4.153	แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทำนาย Derating ด้วยวิธีใช้ข้อมูลที่ออกแบบกระแสไหลวน และวิธีใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ กับผลการทดสอบวัด Transformer harmonic derating factor(THDF) เมื่อหม้อแปลงจ่าย โหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ของกระแส ที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD <sub>i</sub> ) 30%.....189

# สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่

หน้า

- 4.154 แสดงผลการทดสอบอุณหภูมิแวดล้อม ของหม้อแปลงเมื่อจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 30% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 49%.....191
- 4.155 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน และอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านล่าง เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 30% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD<sub>i</sub>)49%.....191
- 4.156 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด กลาง และล่างสุด ของชุดขดลวดด้านแรงสูง เฟส A เมื่อ หม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น30% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD<sub>i</sub>) 49%.....192
- 4.157 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด กลาง และล่างสุด ของชุดขดลวดด้านแรงต่ำ เฟส A เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น30% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD<sub>i</sub>) 49%.....192
- 4.158 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด ของชุดขดลวดด้านแรงสูง เฟส A เฟส B และ เฟส C เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น30% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD<sub>i</sub>) 49%..... 193
- 4.159 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด ของชุดขดลวดด้านแรงต่ำ เฟส A เฟส B และ เฟส C เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น30% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ของกระแส ที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD<sub>i</sub>) 49% .....193

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.160	แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนตามมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC กับผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 30% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลด แบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD) 49%.....194
4.161	แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ตามมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC กับผลการทดสอบอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด(ตำแหน่งที่ 2)เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลด แบบกระแสเป็นเชิงเส้น 30% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD) 49%.....194
4.162	แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทำนาย Derating ด้วยวิธีใช้ข้อมูลที่ออกแบบกระแส โหลดวน และวิธีใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ กับผลการทดสอบวัด Transformer harmonic derating factor (THDF) เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 30% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD) 49%.....195
4.163	แสดงผลการทดสอบอุณหภูมิแวดล้อม ของหม้อแปลงเมื่อจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 30% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 42.7%...195
4.164	แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน และอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านล่าง เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 30% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD) 42.7%.....196
4.165	แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด กลาง และล่างสุด ของชุดขดลวดด้านแรงสูง เฟส A เมื่อ หม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 30% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD) 42.7 %.....196

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.166 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด กลาง และล่างสุด ของชุดขดลวดด้านแรงต่ำ เฟส A เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น30% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD <sub>i</sub> ) 42.7 %.....	197
4.167 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด ของชุดขดลวดด้านแรงสูง เฟส A เฟส B และ เฟส C เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น30% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD <sub>i</sub> ) 42.7 %.....	197
4.168 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด ของชุดขดลวดด้านแรงต่ำ เฟส A เฟส B และ เฟส C เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น30% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ของกระแส ที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD <sub>i</sub> ) 42.7 % .....	198
4.169 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนตามมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC กับผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็น เชิงเส้น30% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลด แบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD <sub>i</sub> ) 42.7 %.....	198
4.170 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ตามมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC กับผลการทดสอบอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด(ตำแหน่งที่ 2)เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลด แบบกระแสเป็นเชิงเส้น30% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD <sub>i</sub> ) 42.7 %.....	199
4.171 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทำนาย Derating ด้วยวิธีใช้ข้อมูลที่ออกแบบกระแสไหลวน และวิธีใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ กับผลการทดสอบวัด Transformer harmonic derating factor(THDF) เมื่อหม้อแปลงจ่าย โหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 30% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ของกระแส ที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD <sub>i</sub> ) 42.7 %.....	199

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.172 แสดงผลการทดสอบอุณหภูมิแวดล้อม ของหม้อแปลงเมื่อจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 30% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 30%.....	200
4.173 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน และอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านล่าง เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 30% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD <sub>i</sub> )30%.....	200
4.174 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด กลาง และล่างสุด ของชุดขดลวดด้านแรงสูง เฟส A เมื่อ หม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น30% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD <sub>i</sub> ) 30%.....	201
4.175 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด กลาง และล่างสุด ของชุดขดลวดด้านแรงต่ำ เฟส A เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น30% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD <sub>i</sub> ) 30%.....	201
4.176 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด ของชุดขดลวดด้านแรงสูง เฟส A เฟส B และ เฟส C เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น30% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD <sub>i</sub> ) 30%.....	202
4.177 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด ของชุดขดลวดด้านแรงต่ำ เฟส A เฟส B และ เฟส C เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น30% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ของกระแส ที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD <sub>i</sub> ) 30% .....	202

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.178 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนตามมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC กับผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 30% ของกระแสที่พิกัดร่วมกับโหลด แบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD <sub>i</sub> ) 30%.....	203
4.179 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ตามมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC กับผลการทดสอบอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด(ตำแหน่งที่ 2)เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลด แบบกระแสเป็นเชิงเส้น 30% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD <sub>i</sub> ) 30%.....	203
4.180 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทำนาย Derating ด้วยวิธีใช้ข้อมูลที่ออกแบบกระแสไหลวน และวิธีใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ กับผลการทดสอบวัด Transformer harmonic derating factor(THDF) เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 30% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD <sub>i</sub> ) 30%.....	204
4.181 แสดงผลการทดสอบอุณหภูมิแวดล้อม ของหม้อแปลงเมื่อจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 49%.....	206
4.182 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน และอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านล่าง เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD <sub>i</sub> )49%.....	206
4.183 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด กลาง และล่างสุด ของชุดขดลวดด้านแรงสูง เฟส A เมื่อ หม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD <sub>i</sub> ) 49%.....	207

# สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.184	
แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด กลาง และล่างสุด ของชุดขดลวดด้านแรงต่ำ เฟส A เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น40% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD <sub>i</sub> ) 49%.....207	
4.185	
แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด ของชุดขดลวดด้านแรงสูง เฟส A เฟส B และ เฟส C เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น40% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD <sub>i</sub> ) 49%..... 208	
4.186	
แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด ของชุดขดลวดด้านแรงต่ำ เฟส A เฟส B และ เฟส C เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น40% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ของกระแส ที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD <sub>i</sub> ) 49% .....208	
4.187	
แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนตามมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC กับผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็น เชิงเส้น40% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลด แบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD <sub>i</sub> ) 49%.....209	
4.188	
แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ตามมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC กับผลการทดสอบอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด(ตำแหน่งที่ 2)เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลด แบบกระแสเป็นเชิงเส้น40% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD <sub>i</sub> ) 49%.....209	
4.189	
แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทำนาย Derating ด้วยวิธีใช้ข้อมูลที่ออกแบบกระแสไหลวน และวิธีใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ กับผลการทดสอบวัด Transformer harmonic derating factor(THDF) เมื่อหม้อแปลงจ่าย โหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ของกระแส ที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD <sub>i</sub> ) 49%.....210	

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.190 แสดงผลการทดสอบอุณหภูมิแวดล้อม ของหม้อแปลงเมื่อจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 42.7%...210	
4.191 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน และอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านล่าง เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD)42.7%.....211	
4.192 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด กลาง และล่างสุด ของชุดขดลวดด้านแรงสูง เฟส A เมื่อ หม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น40% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD,) 42.7 %.....211	
4.193 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด กลาง และล่างสุด ของชุดขดลวดด้านแรงต่ำ เฟส A เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น40% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD,) 42.7 %.....212	
4.194 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด ของชุดขดลวดด้านแรงสูง เฟส A เฟส B และ เฟส C เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น40% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD,) 42.7 %..... 212	
4.195 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด ของชุดขดลวดด้านแรงต่ำ เฟส A เฟส B และ เฟส C เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น40% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ของกระแส ที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD,) 42.7 % .....213	

## สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.196 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนตามมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC กับผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลด แบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสักรวม (THD <sub>i</sub> ) 42.7 %.....	213
4.197 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ตามมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC กับผลการทดสอบอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด(ตำแหน่งที่ 2)เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลด แบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสักรวม (THD <sub>i</sub> ) 42.7 %.....	214
4.198 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทำนาย Derating ด้วยวิธีใช้ข้อมูลที่ออกแบบกระแสไหลวน และวิธีใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ กับผลการทดสอบวัด Transformer harmonic derating factor(THDF) เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสักรวม (THD <sub>i</sub> ) 42.7 %.....	214
4.199 แสดงผลการทดสอบอุณหภูมิแวดล้อม ของหม้อแปลงเมื่อจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสักรวม 30%.....	215
4.200 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน และอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านล่าง เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสักรวม (THD <sub>i</sub> )30%.....	215
4.201 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด กลาง และล่างสุด ของชุดขดลวดด้านแรงสูง เฟส A เมื่อ หม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสักรวม (THD <sub>i</sub> ) 30%.....	216

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.202	แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิค้ำบนบนสุด กลาง และล่างสุด ของชุดขดลวดค้ำแรงต่ำ เฟส A เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น40% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสร่วม (THD) 30%.....216
4.203	แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิค้ำบนบนสุด ของชุดขดลวดค้ำแรงสูง เฟส A เฟส B และ เฟส C เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น40% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสร่วม (THD) 30%..... 217
4.204	แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิค้ำบนบนสุด ของชุดขดลวดค้ำแรงต่ำ เฟส A เฟส B และ เฟส C เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น40% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ของกระแส ที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสร่วม (THD) 30% .....217
4.205	แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันค้ำบนตามมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC กับผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันค้ำบน เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็น เชิงเส้น40% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลด แบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสร่วม (THD) 30%.....218
4.206	แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ตามมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC กับผลการทดสอบอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด(ตำแหน่งที่ 2)เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลด แบบกระแสเป็นเชิงเส้น40% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสร่วม (THD) 30%.....218
4.207	แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทำนาย Derating ด้วยวิธีใช้ข้อมูลที่ออกแบบกระแสไหลวน และวิธีใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ กับผลการทดสอบวัด Transformer harmonic derating factor(THDF) เมื่อหม้อแปลงจ่าย โหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสร่วม (THD) 30%.....219

# สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่

หน้า

- 5.1 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนเมื่อจ่ายโหลดแบบ  
กระแสเป็นเชิงเส้น 100% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 49%, จ่ายโหลด  
ร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% ร่วมกับแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80%  
ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 49% และจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลด  
แบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% ร่วมกับแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ที่มีความเพี้ยน  
ของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 49%.....225
- 5.2 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุดของหม้อแปลงไฟฟ้า  
เมื่อจ่ายโหลดแบบ กระแสเป็นเชิงเส้น 100% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์  
รวม 49%, จ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% ร่วมกับแบบกระแส  
ไม่เป็นเชิงเส้น 80%ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 49% และจ่ายโหลดร่วม  
กันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% ร่วมกับแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60%  
ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 49%.....225
- 5.3 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนเมื่อจ่ายโหลดแบบ  
กระแสเป็นเชิงเส้น 100% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 49%, จ่ายโหลด  
ร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% ร่วมกับแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80%  
ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 49% และจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลด  
แบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% ร่วมกับแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ที่มีความเพี้ยน  
ของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 49%.....226
- 5.4 แสดงการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุดของหม้อแปลงไฟฟ้า  
เมื่อจ่ายโหลดแบบ กระแสเป็นเชิงเส้น 100% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์  
รวม 49%, จ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% ร่วมกับแบบกระแส  
ไม่เป็นเชิงเส้น 80%ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 49% และจ่ายโหลดร่วม  
กันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% ร่วมกับแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60%  
ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 49%.....226
- 5.5 แสดงการเปรียบเทียบค่าความสูญเสียรวมของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดแบบ  
กระแสไม่เป็นเชิงเส้นที่มีความเพี้ยนของกระแสรวมต่างกัน.....228
- 5.6 แสดงการเปรียบเทียบผลการทำนายค่าความสูญเสียรวมของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อ  
จ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวมเท่ากัน

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
คือ 30% แต่ค่า Harmonic loss factor for winding eddy current ( $F_{HL}$ ) ต่างกัน.....	228
5.7 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการทำนายความสามารถในการรับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นของหม้อแปลงเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็น เชิงเส้นที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวมต่าง ๆ กัน.....	229
5.8 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการทำนายความสามารถในการรับโหลด แบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นของหม้อแปลงเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวมเท่ากันคือ THD <sub>i</sub> 30% แต่ค่า Harmonic loss factor for winding eddy current ( $F_{HL}$ ) ต่างกัน.....	230
5.9 แสดงการเปรียบเทียบผลการทำนายอายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลด แบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวมต่าง ๆ กัน.....	231

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 กล่าวนำ

การทำงานของหม้อแปลงซึ่งอาจจะมีการดำเนินการในลักษณะแบบเป็นเชิงเส้นและแบบไม่เป็นเชิงเส้น โดยเฉพาะแบบไม่เป็นเชิงเส้นจะทำให้เกิดความร้อนในตัวหม้อแปลงสูงกว่าการดำเนินการแบบปกติหรือแบบเป็นเชิงเส้น และในระบบอุตสาหกรรมในปัจจุบันได้มีการนำเอาเทคโนโลยีขั้นสูงมาใช้ซึ่งอุปกรณ์ของเทคโนโลยีขั้นสูงเหล่านี้ส่วนใหญ่จะเป็นอุปกรณ์ประเภทอิเล็กทรอนิกส์และการนำเอาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังไปใช้ในการควบคุมเครื่องจักรกลในโรงงานอุตสาหกรรมเป็นที่นิยมอย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีประสิทธิภาพที่ค่อนข้างดี แต่อุปกรณ์ดังกล่าวจะทำให้ระบบไฟฟ้าเกิดมลภาวะ (Pollution) เพิ่มมากขึ้น และมลภาวะดังกล่าวก็คือ ฮาร์มอนิกส์ (Harmonic) ที่เกิดขึ้นในระบบอุตสาหกรรมและเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดที่มีฮาร์มอนิกส์หรือโหลดประเภทไม่เป็นเชิงเส้นจะส่งผลทำให้อุณหภูมิของหม้อแปลงสูงกว่าปกติซึ่งจะเป็นผลทำให้อายุการใช้งานของหม้อแปลงสั้นลงตามไปด้วย ดังนั้นการพิจารณาอุณหภูมิของหม้อแปลงเมื่อมีการจ่ายโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นจึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง ฉะนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงนำเสนอการทำนายและทดสอบหาอุณหภูมิหรือความร้อนในส่วนของน้ำมันด้านบนและในส่วนของชุดขดลวดของหม้อแปลงแบบแช่น้ำมันเมื่อมีการจ่ายโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (Total harmonic current distortion : THD<sub>i</sub>) ในลักษณะต่าง ๆ กัน

### 1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1.2.1 เพื่อศึกษาและวิจัยถึงความร้อนหรืออุณหภูมิในส่วนต่าง ๆ ของหม้อแปลงที่ได้จากการทดสอบขณะมีการต่อ โหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้นและกระแสไม่เป็นเชิงเส้นที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD<sub>i</sub>) 30%, 42.7% และ 49%

1.2.2 เพื่อศึกษาและค้นคว้าวิจัยทางทฤษฎีตามข้อกำหนดใน มาตรฐาน ของ IEEE และ IEC และจากบทความวิชาการต่าง ๆ แล้วนำหลักการนี้ไปทำนายอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะจ่าย โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น และแบบเป็นเชิงเส้นต่อไป

1.2.3 เพื่อศึกษาถึง อุณหภูมิ ที่ได้จากการทำนาย แล้ว นำไปเปรียบเทียบกับ ผลที่ได้จากการทดสอบว่ามีความแตกต่างกันมากน้อยเพียงใด

### 1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1.3.1 วิเคราะห์อุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุดของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแช่น้ำมันขณะจ่ายโหลดแบบ กระแสเป็นเชิงเส้น, แบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นและ จ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิง เส้นร่วมกับกระแสแบบไม่เป็นเชิงเส้นในรูปของสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการทำนาย อุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด และอายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแช่น้ำมัน

1.3.2 ทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแช่น้ำมันขนาด 10 kVA, การต่อขดลวดแบบ  $\Delta$ -Y, 3  $\phi$  การระบายความร้อนแบบ ONAN ขณะจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นที่มีความเพี้ยนของ กระแสฮาร์มอนิกส์รวม ( THD<sub>r</sub> ) 30%, 42.7% และ 49% ตามวัฏจักรโหลดที่จำลองขึ้นและติดตั้ง เทอร์โมคัปเปิ้ลเพื่อวัดค่าของอุณหภูมิในส่วนต่าง ๆ ของหม้อแปลง

1.3.3 ทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแช่น้ำมันขนาด 10 kVA, การต่อขดลวดแบบ  $\Delta$ -Y, 3  $\phi$  การระบายความร้อนแบบ ONAN ขณะจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้นร่วมกับ แบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม ( THD<sub>r</sub> ) ในลักษณะต่าง ๆ กัน และติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ลเพื่อวัดค่าของอุณหภูมิในส่วนต่าง ๆ ของหม้อแปลง

### 1.4 วิธีการวิจัย

1.4.1 ค้นคว้าทฤษฎีจากบทความทางวิชาการต่าง ๆ และ จากข้อกำหนดของ มาตรฐาน IEEE และ IEC ที่ให้ข้อมูลเกี่ยวกับฮาร์มอนิกส์ และ อุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแช่น้ำมัน

1.4.2 ทำการติดต่อบริษัท พงษ์พิมาณการไฟฟ้า จำกัด ที่จังหวัด สมุทรสาคร พร้อมทั้งเตรียม เครื่องมืออุปกรณ์ ในการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแช่น้ำมัน

1.4.3 กำหนดวันและเวลาในการทดสอบหาอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแช่น้ำมัน

1.4.4 ศึกษาการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ด้วย โปรแกรม Visual Basic 6.0

1.4.5 นำผลการทำนายด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ มาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบ

1.4.6 สรุปผลการทดสอบและวิจารณ์

### 1.5 ประโยชน์ที่ได้จากวิทยานิพนธ์

1.5.1 สามารถนำหลักการของทฤษฎีตามบทความวิชาการต่าง ๆ และ จากข้อกำหนดในมาตรฐาน IEEE และ IEC มาใช้ประโยชน์ในการทำนายอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแช่น้ำมันขณะ จ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นได้

1.5.2 สามารถทำนายอายุการใช้งานของหม้อแปลงได้

1.5.3 ประหยัดค่าใช้จ่ายและอันตรายจากการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแช่น้ำมันได้

## 1.6 หลักการใหม่ในวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการทำนายอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแช่น้ำมัน ขนาด 10 kVA การต่อขดลวดแบบ  $\Delta$ -Y, 3  $\emptyset$  การระบายความร้อนแบบ ONAN โดยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขึ้นมาเพื่อทำนายอุณหภูมิเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะอ้างอิงตามมาตรฐานของ IEEE C57.110-1998 ซึ่ง ทาง IEEE ได้มีการปรับปรุงการคำนวณต่าง ๆ ให้มีความถูกต้องและสะดวกในการใช้งานมากขึ้นกว่ามาตรฐานเดิม ( IEEE C57.110- 1986 ) และมาตรฐาน IEC 354 และในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อมีการจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นที่สภาวะต่าง ๆ โดยใช้โหลดจริงในการทดสอบ และ ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ลเพื่อวัดค่าของอุณหภูมิที่ส่วนต่าง ๆ ของหม้อแปลงขณะต่อ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นตามวัฏจักร โหลดที่จำลองขึ้นและนำผลที่ได้จากการทดสอบมาเปรียบเทียบกับผลการทำนายทางทฤษฎีว่ามีความใกล้เคียงกันมากน้อยเพียงใด

## 1.7 รายละเอียดในวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้ศึกษาและวิจัยเพื่อทดสอบหาอุณหภูมิในส่วนต่าง ๆ ของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแช่น้ำมัน ขนาด 10 kVA การต่อขดลวดแบบ  $\Delta$ -Y, 3  $\emptyset$  การระบายความร้อนแบบ ONAN เมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น โดยใช้โหลดจริงในการทดสอบ ซึ่งรายละเอียดที่กล่าวถึงในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งออกเป็น บท ๆ ได้ดังนี้คือ

บทที่ 1 บทนำ กล่าวถึงแนวทางทั่วไปที่นำมาสู่การทำวิทยานิพนธ์ วัตถุประสงค์ ขอบเขตวิธีการวิจัย ประโยชน์ที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์ หลักการใหม่ที่ได้นำเสนอ และ รายละเอียดในแต่ละบทอย่างคร่าว ๆ

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 ผลการทำนายความร้อนทางทฤษฎี

บทที่ 4 ผลการทดสอบ

บทที่ 5 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ

## บทที่ 2

# ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 กล่าวนำ

สำหรับบทนี้จะกล่าวถึง ศัพท์และความหมาย แหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกส์ แหล่งกำเนิดความร้อน ผลกระทบของกระแสไม่เป็นเชิงเส้นต่อค่าความสูญเสียขณะมีโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้ค่าความสูญเสียขณะมีโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้ามีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อหม้อแปลงต้องมีการจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น คุณลักษณะทางความร้อนของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแช่น้ำมัน สัญลักษณ์ที่ใช้เรียกการระบายความร้อนของหม้อแปลงแบบแช่น้ำมัน และ การแก้ปัญหาทางความร้อนของหม้อแปลงเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น โดยการใช้หม้อแปลงแบบแฟกเตอร์ K และ การลดพิกัดโหลด ( Derating ) ของหม้อแปลงลง ซึ่งจะทำให้ความร้อน หรือ อุณหภูมิของหม้อแปลงลดลง ซึ่งจะเป็นผลทำให้อายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้ายาวนานมากขึ้นตามไปด้วย

### 2.2 ศัพท์และความหมาย[6,12]

#### 2.2.1 ฮาร์โมนิกส์ (Harmonic)

ฮาร์โมนิกส์(Harmonic) คือ สัญญาณที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าของความถี่หลักมูล เช่น ความถี่หลักมูล คือ 50 เฮิร์ตซ์ ฮาร์โมนิกส์ คือ 100, 150, 200 เฮิร์ตซ์ เป็นต้น ความถี่หลักมูลเรียกว่า ฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 1 ส่วนฮาร์โมนิกส์ลำดับอื่น ๆ ก็หาได้จากการเอาเลขจำนวนเต็มบวกคูณกับความถี่หลักมูล การวัดความเพี้ยนฮาร์โมนิกส์สามารถทำได้หลายวิธีที่แตกต่างกันออกไป แต่ส่วนมากจะใช้การวัดความเพี้ยนของฮาร์โมนิกส์รวม (Total harmonic distortion) ที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์ต่าง ๆ กัน ปริมาณของขนาดจะแสดงด้วยจำนวนเปอร์เซ็นต์ของขนาดที่ความถี่หลักมูลและเครื่องวัดฮาร์โมนิกส์ทั้งหลายจะแสดงผลของความเพี้ยนฮาร์โมนิกส์รวมและความเพี้ยนของฮาร์โมนิกส์แต่ละส่วนด้วยค่าเปอร์เซ็นต์ของขนาดที่ความถี่หลักมูลเช่นกัน

#### 2.2.2 กระแสฮาร์โมนิกส์ (Harmonic Current)

ฮาร์โมนิกส์ที่อยู่ในรูปของกระแสในไลน์ในระบบไฟฟ้าเกิดขึ้นจากอุปกรณ์ประเภทไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Devices) ซึ่งอาจจะเป็น โหลดหรือแหล่งกำเนิดก็ได้ ในอดีตที่ไม่มีการศึกษาฮาร์โมนิกส์อย่างจริงจัง เนื่องจากอุปกรณ์ประเภทไม่เป็นเชิงเส้นมีจำนวนน้อย ทำให้ผลของฮาร์ม

นิกส์ต่อระบบไฟฟ้ากำลังมีค่าน้อย แต่ในช่วงสิบปีที่ผ่านมาอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับเครื่องแปลงผัน (Converter) ได้ขยายตัวอย่างมากเป็นผลทำให้เกิดกระแสฮาร์โมนิกส์ขึ้นอย่างมากมาย

### 2.2.3 แรงดันฮาร์โมนิกส์ (Harmonic voltage)

แรงดันฮาร์โมนิกส์เกิดจากกระแสฮาร์โมนิกส์ไหลผ่านค่า รีแอกแตนซ์ (Reactance) ของระบบ (รีแอกแตนซ์ของแหล่งจ่ายของสายส่ง หรือรีแอกแตนซ์ของคาปาซิเตอร์ที่ต่อขนานเข้าไปในระบบเพื่อปรับปรุงตัวประกอบกำลัง (Power factor) และแรงดันให้ดีขึ้น) ทำให้เกิดความเพี้ยนของรูปคลื่นแรงดัน อันเนื่องมาจากรีแอกแตนซ์มีค่าเปลี่ยนแปลงตามความถี่ ส่วนค่าความต้านทานไม่เปลี่ยนแปลง

กระแสฮาร์โมนิกส์ที่ไหลในระบบไฟฟ้ากำลังนั้นจะเป็นตัวสร้างทำให้เกิดความผิดเพี้ยนของแรงดันฮาร์โมนิกส์ (Harmonic Voltage Distortion) ซึ่งหาได้ดังสมการที่ 2.1

$$V_h = Z_h I_h \quad (2.1)$$

โดยที่

$V_h$  คือ แรงดันฮาร์โมนิกส์ลำดับที่  $h$

$I_h$  คือ กระแสฮาร์โมนิกส์ลำดับที่  $h$

$Z_h$  คือ ค่าอิมพีแดนซ์ลำดับที่  $h$  ของระบบ

### 2.2.4 ความเพี้ยนของฮาร์โมนิกส์รวม (Total harmonic distortion ; THD)

ความเพี้ยนของฮาร์โมนิกส์รวม (Total harmonic distortion ; THD) คือ ค่าที่บอกถึงปริมาณของฮาร์โมนิกส์ที่มีอยู่ทั้งหมดโดยเปรียบเทียบกับค่าที่ความถี่หลักมูล ดังแสดงในสมการที่ 2.2 และ สมการที่ 2.3

$$\%THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h=h_{\max}} V_h^2}}{V_1} \times 100\% \quad (2.2)$$

$$\%THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h=h_{\max}} I_h^2}}{I_1} \times 100\% \quad (2.3)$$

โดยที่

$\%THD_v$  คือ เปอร์เซนต์ความเพี้ยนของแรงดันฮาร์โมนิกส์รวม

$\%THD_i$  คือ เปอร์เซนต์ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม

### 2.2.5 ลำดับฮาร์โมนิกส์ (Harmonic order)

ลำดับฮาร์โมนิกส์ คือ อัตราส่วนของความถี่ฮาร์โมนิกส์ และความถี่หลักมูล เช่น เมื่อกล่าวถึงฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 3 และหากว่าความถี่หลักมูลมีค่าเป็น 50 Hz จะ ได้ความถี่ของฮาร์โมนิกส์ที่ 3 คือ 150 Hz เป็นต้น

## 2.3 แหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกส์

แหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกส์ในระบบไฟฟ้ากำลังมีอยู่มากมาย และในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะแบ่งแหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกส์เป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ[4] คือ

### 2.3.1 แหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกส์ที่สร้างเฉพาะกระแสฮาร์โมนิกส์ที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าของความถี่หลักมูลได้แก่

1. เครื่องแปลงผันกำลังแบบสถิต (Static power converter : SPC) ใช้แปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง เพื่อใช้แยกสารละลาย ใช้ในกระบวนการชุบโลหะ เป็นแหล่งจ่ายไฟให้กับมอเตอร์กระแสตรง หรือใช้แปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรงแล้วแปลงกลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับอีกทอดหนึ่ง เพื่อใช้ควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์กระแสสลับ ฯลฯ SPC จะมีฮาร์โมนิกส์เฉพาะตัว หาได้จากสมการที่ 2.4

$$h = kP \pm 1 \quad (2.4)$$

โดยที่

$h$  คือ ลำดับที่ของฮาร์โมนิกส์

$k$  คือ จำนวนเต็ม 1, 2, 3, 4,...

$P$  คือ จำนวนพัลส์ของเรกติไฟเออร์

2. เครื่องกลไฟฟ้า ส่วนใหญ่ก็คือ มอเตอร์กระแสสลับ

3. หม้อแปลงไฟฟ้า เกิดจากความไม่เป็นเชิงเส้นของแกนเหล็ก กระแสสร้างสนามแม่เหล็กจะมีความเพี้ยนมากขึ้น หากหม้อแปลงไฟฟ้าได้รับแรงดันเกิน และ/หรือ มีกระแสตรงปนอยู่ด้วย จะทำให้รูปคลื่นไม่สมมาตร

4. หลอดปล่อยประจุก๊าซ โดยทั่วไปแล้ว กระแสจะเพี้ยนมากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับบาลาสต์ที่ต่อรวมอยู่กับหลอด เช่น หลอดฟลูออเรสเซนต์ ขนาด 36 วัตต์ หากใช้บาลาสต์แบบแกนเหล็ก จะมีค่า THD<sub>r</sub> ประมาณ 5% ถึง 12% ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกรอกแบบ

5. แหล่งจ่ายกำลังแบบสวิตซิง (Switching mode power supply : SMPS) และ UPS (Uninterruptible power supply) หากไม่มีวงจรกรองฮาร์มอนิกส์กระแสที่ดึงจากแหล่งจ่ายไฟจะมีลักษณะเป็นพัลส์ เกิดฮาร์มอนิกส์มาก โดยเฉพาะฮาร์มอนิกส์ลำดับต่ำ ๆ และอุปกรณ์ประเภทนี้มีอัตราการใช้งานเพิ่มขึ้นสูงมาก

2.3.2 แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์ที่สร้างกระแสฮาร์มอนิกส์ทั้งที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่า และไม่เป็นจำนวนเท่าของความถี่หลักมูลที่เรียกว่ามีทั้ง Harmonic และ Interharmonic ได้แก่

1. Cycloconverter ประยุกต์ใช้กับ Rolling - Mill ขนาดใหญ่ในโรงรีดโลหะ ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เชิงเส้นจนถึง Static-VAR generator กระแสที่ดึงจากแหล่งจ่ายไฟจะมีความถี่ต่าง ๆ มากมาย โดยมี Characteristic frequency หาได้จาก  $f_i = (p_1 \times m \pm 1) f \pm p_2 \times n \times f_0$  เมื่อ  $p_1$  คือจำนวนพัลส์ของภาคแปลงไฟฟ้าเข้า  $p_2$  คือจำนวนพัลส์ของภาคขาออก  $m$  และ  $n$  คือเลขจำนวนเต็มบวกใด ๆ และ  $f_0$  คือ ความถี่ขาออกของ cycloconverter หากโหลดไม่สมดุล แรงดันระหว่างเฟสไม่สมดุล และมุมจุดชนวนไม่สมดุลจะมี non-characteristic frequency  $f_i = (p_1 \times m \pm 1) f \pm p_2 \times n \times f_0$  ปนออกมาด้วย

2. ชุดปรับความเร็วรอบของมอเตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแส ( Current source inverter adjustable speed drive : CSI-ASD) จะสร้างกระแสอินเตอร์ฮาร์มอนิกส์จากการบีต (Beat) กันของความถี่ 2 ชุด คือ ความถี่ไฟฟ้ากระแสสลับ 50 Hz และความถี่ที่ใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์

3. เตาลอมนแบบอาร์ก เกิดกระแสอินเตอร์ฮาร์มอนิกส์ เพราะการลอมโลหะมีลักษณะเป็นพลวัต(Dynamic) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงเริ่มต้นลอม

4. เครื่องเชื่อมไฟฟ้าแบบอาร์ก จะมีลักษณะคล้ายกับเตาลอมแบบอาร์ก

5. ชุดควบคุมการทำงานแบบ Integral cycle หรือ Pulse burst modulation (PBM) เป็นอุปกรณ์ที่กำลังได้รับความนิยมในการใช้งานมากขึ้น เช่น ใช้ควบคุมการทำงานของเตาอบ เตาเผา เครื่องเชื่อมไฟฟ้าแบบ สปอต สำหรับชุดที่ควบคุมการทำงานของเตาเผา นั้น มีหลายบริษัทที่ผลิตได้ถึง 2 MW การควบคุมทำโดยการลดแรงดันที่จ่ายให้โหลด โดยการหยุดการทำงานเป็น cycle เช่น จ่ายไฟเพียง 4 cycle ใน 5 cycle จะทำให้เตาอบหรือเตาเผาสร้างความร้อนได้เพียง 80% ของค่าพิกัด เป็นต้น

## 2.4 แหล่งกำเนิดความร้อน

ฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังจะเป็นผลทำให้ค่าความสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น ทั้งในแกนเหล็ก และ ในชุดขดลวด ซึ่งจาก[18] ได้แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่าง

ความผิดเพี้ยนกระแส และความผิดเพี้ยนของแรงดันที่มีต่อค่าความสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าดังนี้ คือ ความผิดเพี้ยนของแรงดันจะทำให้ค่าความสูญเสียของแกนเหล็กมีค่าเพิ่มมากขึ้น และ ความผิดเพี้ยนของกระแสจะทำให้ค่าความสูญเสียในชุดขดลวดมีค่าเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นจาก [18] จะสามารถแยกพิจารณาได้ดังนี้

#### 2.4.1 ค่าความสูญเสียขณะไม่มีโหลด

ค่าความสูญเสียขณะไม่มีโหลด หรือเรียกว่า ค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก (Core Loss) เกิดจากการไหลเวียนของฟลักซ์แม่เหล็กภายในแกนเหล็ก ซึ่งกำลังสูญเสียนี้จะขึ้นอยู่กับคุณภาพของแกนเหล็ก, ความถี่, ความหนาแน่นของฟลักซ์, ชนิดและน้ำหนักของแกนเหล็ก รวมทั้งเทคนิคในการผลิตของบริษัทผู้ผลิตหม้อแปลงไฟฟ้า ปัจจุบันแกนเหล็กที่ใช้กันอยู่จะมีลักษณะการจัดเรียงตัวของสนามแม่เหล็กแตกต่างกัน ซึ่งในการออกแบบจุดประสงค์ต้องการให้การไหลเวียนของฟลักซ์แม่เหล็กเป็นไปในทิศทางเดียวกันตามความยาวของแกนเหล็ก แต่ในบางจุด เช่น จุดที่มีการต่อกันของแกนเหล็กจะทำให้สนามแม่เหล็ก เกิดการเบี่ยงเบนไป ซึ่งจุดที่มีลักษณะเช่นนี้จะทำให้มีกำลังสูญเสียเพิ่มขึ้น และ ในการคำนวณค่าความสูญเสียขณะไม่มีโหลดทางทฤษฎีจะประกอบไปด้วยค่าความสูญเสียดังนี้

##### 1. ค่าความสูญเสียอันเนื่องมาจากฮิสเตอร์รีซิสในแกนเหล็ก

เป็นกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียไปในการกลับทิศทางของแม่เหล็ก การลดการสูญเสียอันเนื่องมาจากฮิสเตอร์รีซิส สามารถทำได้โดยการใช้แกนเหล็กที่มีส่วนผสมของซิลิคอน(Silicon)ซึ่งมีคุณสมบัติในการซึมซาบแม่เหล็กสูงมาทำแกนเหล็ก และการสูญเสียนี้จะขึ้นอยู่กับคุณภาพหรือเกรดของแกนเหล็ก และความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่เลือกใช้ และเป็นสัดส่วนกันกับความถี่ของแรงดันไฟฟ้า ซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.5

$$W_{H\_R} = K_h B_{max}^n f \quad (2.5)$$

โดยที่

$W_{H\_R}$  คือ ค่าความสูญเสียเนื่องจากฮิสเตอร์รีซิสที่พิกัดโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น (W/kg)

$K_h$  คือ ค่าคงที่ของวงจรแม่เหล็ก ซึ่งมีค่าแสดงให้เป็นตัวอย่าง ในตารางที่ 2.1

$n$  คือ ค่า Steinmetz's empirical index ซึ่งจะมีค่าตั้งแต่ 1 – 3 แต่โดยทั่วไปจะกำหนดให้ค่า  $n$  มีค่าประมาณ 1.6

$B_{max}$  คือ ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (Wb/m<sup>2</sup>)

$f$  คือ ความถี่ของการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กอันเนื่องมาจากความถี่ของระบบไฟฟ้า (Hz)

จาก[18] ค่าความสูญเสียเนื่องมาจากฮิสเตอร์รีซิสในแกนเหล็กภายใต้สภาวะไม่เป็นไซน์ (Nonsinusoidal) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.6

$$W_H = W_{H-R} \left( \sum_{h=1}^{\infty} \frac{V_h}{b \times V_1} \cos \phi_h \right) \quad (2.6)$$

โดยที่

$W_H$  คือ ค่าความสูญเสียเนื่องมาจากฮิสเตอร์รีซิสในแกนเหล็กภายใต้สภาวะไม่เป็นไซน์ (W/kg)

$\phi_h$  คือ ค่ามุมเฟสของแรงดัน (เรเดียน)

## 2. ค่าความสูญเสียอันเนื่องมาจากกระแสไหลวนในแกนเหล็ก

ค่าความสูญเสียอันเนื่องมาจากกระแสไหลวนในแกนเหล็กจะเกิดขึ้นเมื่อป้อนไฟกระแสสลับเข้าสู่วงจรนั้นจะเกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดอำนาจแม่เหล็กและทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กโดยเส้นแรงแม่เหล็กจะเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาตามค่าความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าทางด้านปฐมภูมิและตัดกับแกนเหล็กด้วย และจะเป็นผลทำให้เกิดแรงเคลื่อนและกระแสเหนี่ยวนำในแกนเหล็ก เนื่องจากแกนเหล็กก็มีความต้านทานแม่เหล็ก(Reluctance)อยู่ด้วย ดังนั้นจะเกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียซึ่งแสดงออกมาในรูปของความร้อนมีค่าเท่ากับ  $I^2R$  จากการทดลองว่าจะลดค่าการสูญเสียนี้ได้โดยการใช้แกนเหล็กแผ่นบาง ๆ แล้วเรียงซ้อนกันโดยในแต่ละแผ่นจะใช้สารเคลือบผิวที่มีความต้านทานไฟฟ้าสูง เช่น ฉาบด้วยวานิช และค่าความสูญเสียนี้จะเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่สูงขึ้น ดังสมการที่ 2.7

$$W_{e-R} = K_e B_{\max}^2 f^2 \quad (2.7)$$

โดยที่

$W_{e-R}$  คือ ค่าความสูญเสียอันเนื่องมาจากกระแสไหลวนในแกนเหล็กที่พิกัดโหลดแบบเป็นเชิงเส้น (W/kg)

$K_e$  คือ ค่าคงที่ของวงจรแม่เหล็กซึ่งแสดงเป็นตัวอย่างได้ดังตารางที่ 2.1

จาก[18] ค่าความสูญเสียอันเนื่องมาจากกระแสไหลวนในแกนเหล็กเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.8

$$W_c = W_{c\_R} \left( \frac{V_1}{V} \right)^2 \left[ 1 + \sum_{h=1} \left( \frac{V_h}{V_1} \right)^2 C_{ch} C_{Th} \right] \quad (2.8)$$

โดยที่

V คือ nameplate voltage (V)

$C_{ch}$  คือ ค่า penetration depth หาได้จาก [18]

$C_{Th}$  คือ ค่า Correction factor ขึ้นอยู่กับชนิดและขนาดของหม้อแปลงซึ่งหาได้จาก [18]

เนื่องจากในสภาพความเป็นจริงความผิดเพี้ยนของแรงดันที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าจะมีค่าได้ไม่เกิน 5% [8,9,10,11,12] ซึ่งจะเป็นค่าสูงสุดที่ยอมรับได้ และ โดยทั่วไปแรงดันในระบบไฟฟ้าค่อนข้างคงที่ ดังนั้นผลกระทบของฮาร์มอนิกส์ที่ทำให้รูปคลื่นของแรงดันผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์จึงมีน้อย ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงประมาณว่าความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าไม่เกิน 5% ดังนั้น ค่าความสูญเสียเนื่องจากฮีสเตอร์รีซิส และค่าความสูญเสียอันเนื่องมาจากกระแสไหลวนของแกนเหล็ก จึงเปลี่ยนไม่ไปจากค่าความสูญเสียฮีสเตอร์รีซิสและค่าความสูญเสียอันเนื่องมาจากกระแสไหลวนที่ความถี่หลักมูล ซึ่งสามารถคำนวณหาความสูญเสียขณะไม่มีโหลดได้ดังสมการที่ 2.9

$$W_{NL} = W_{H\_R} + W_{c\_R} \quad (2.9)$$

โดยที่

$W_{NL}$  คือ ค่าความสูญเสียขณะไม่มีโหลด (W/kg)

แต่สมการที่ 2.5, 2.7 และสมการที่ 2.9 เมื่อนำมาคำนวณค่าความสูญเสียขณะไม่มีโหลดในทางปฏิบัติทำได้ค่อนข้างยาก ดังนั้นในทางปฏิบัติ[5,10]จะสามารถกำหนดค่าความสูญเสียขณะไม่มีโหลดได้จากน้ำหนักรวมของแกนเหล็ก และข้อมูลของค่าความสูญเสียในแกนเหล็กต่อน้ำหนักโดยนำมาจากเส้นโค้งแสดงคุณลักษณะของค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก (Core loss curve) ของบริษัทผู้ผลิตแกนเหล็ก ดังนั้นพารามิเตอร์ดังกล่าวสามารถคำนวณค่าความสูญเสียขณะไม่มีโหลดได้ดังสมการที่ 2.10

$$W_{NL} = K_3 W_c W_m \quad (2.10)$$

โดยที่

$K_3$  คือ แฟกเตอร์ที่ทำให้ค่าความสูญเสียขณะไม่มีโหลดเพิ่มขึ้น

$W_c$  คือ น้ำหนักรวมของแกนเหล็ก

$W_m$  คือ ค่าความสูญเสียในแกนเหล็กต่อน้ำหนักของแกนเหล็ก 1 กก.

แฟกเตอร์  $K_3$  หาได้จากการปฏิบัติในการทดลอง ซึ่งจะเป็นค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากสาเหตุดังต่อไปนี้

- พื้นที่หน้าตัดของขาแกนเหล็กและโยค มีการกระจายของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กไม่เท่ากัน
- แรงกลที่มีผลทำให้แผ่นเหล็กมีความบอบซ้ำ
- ผลจากรอยต่อ (Joints) ในเส้นทางของเส้นแรงแม่เหล็ก
- ทักษะ (Skill) และความสามารถของแรงงานในการจัดเรียงแผ่นเหล็ก

สำหรับความถูกต้องแม่นยำของการคำนวณนั้น นอกจากจะคำนวณน้ำหนักรวมของแกนเหล็กได้อย่างถูกต้อง และกำหนดแฟกเตอร์ค่าความสูญเสียเพิ่ม ( $K_s$ ) ได้อย่างเหมาะสมแล้ว การใช้ค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักก็มีความสำคัญเช่นกัน

เส้นโค้งแสดงลักษณะค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก เป็นเส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก และกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนัก ซึ่งวิศวกรผู้ออกแบบมักจะกำหนดค่าประมาณค่าคงที่ค่าหนึ่ง ไม่ว่าจะความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กจะเปลี่ยนแปลงอย่างไรก็ตาม ดังนั้นจะมีผลทำให้ผลการทดลองค่าความสูญเสียขณะไม่มีโหลดกับผลการคำนวณจากการออกแบบมีค่าไม่ตรงกัน และอาจมีความผิดพลาดมากกว่าความคลาดเคลื่อน (Tolerance) ที่กำหนดไว้ในมาตรฐานอ้างอิง

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าคงที่ของการสูญเสียในแกนเหล็ก

ชนิด	ค่าคงที่	
	$K_h$	$K_c$
แกนเหล็กใช้งานทั่วไป	4.8	19.2
แกนเหล็กชนิดผสมซิลิคอนเล็กน้อย	4.7	10.4
แกนเหล็กชนิดผสมซิลิคอนปานกลาง	3.8	6.4
แกนเหล็กชนิดผสมซิลิคอนมาก	2.85	4.4

#### 2.4.2 ค่าความสูญเสียขณะมีโหลด

ค่าความสูญเสียขณะมีโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้าอาจเรียกว่า ค่าความสูญเสียในขดลวดทองแดง (Copper Loss) ซึ่งเกิดขึ้นจากกระแสที่ไหลในขดลวดของหม้อแปลงขณะจ่ายโหลด ซึ่งจาก [9] พบว่าเมื่อหม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น จะส่งผลทำให้ค่าความสูญเสียขณะมีโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเท่านั้น และ ค่าความสูญเสียขณะมีโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้าจะประกอบไปด้วยค่าความสูญเสียต่าง ๆ ดังนี้

- ค่าความสูญเสียในชุดขดลวด
- ค่าความสูญเสียปลีกล้วยในชุดขดลวด

### 1. ค่าความสูญเสียในชุดขดลวด

การคำนวณหาค่าความสูญเสียในชุดขดลวดที่พิกัดโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น[5,8]โดย ใช้ข้อมูลที่ได้จากโรงงานผู้ผลิตหม้อแปลง สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.11

$$P_{C\_R} = K [(I_{1\_R})^2 R_1 + (I_{2\_R})^2 R_2] \quad (2.11)$$

โดยที่

$P_{C\_R}$  คือ ค่าความสูญเสียในชุดขดลวดที่พิกัดโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น (W)

$K$  คือ ค่าคงที่มีค่าเท่ากับ 1.5 สำหรับหม้อแปลง 3 เฟส และ 1 สำหรับหม้อแปลงแบบ 1 เฟส

$I_{1\_R}$  คือ กระแสทางด้านแรงสูงที่พิกัด (A)

$I_{2\_R}$  คือ กระแสทางด้านแรงต่ำที่พิกัด (A)

$R_1$  คือ ค่าความต้านทานทางด้านแรงสูง ( $\Omega$ )

$R_2$  คือ ค่าความต้านทานทางด้านแรงต่ำ ( $\Omega$ )

จาก [9] เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นจะสามารถคำนวณค่าความสูญเสียในชุดขดลวดได้ดังสมการที่ 2.12

$$P_c = P_{C\_R} \times \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left( \frac{I_h}{I_1} \right)^2 \quad (2.12)$$

โดยที่

$I_h$  คือ กระแสฮาร์มอนิกลำดับที่  $h$  (A)

$I_1$  คือ กระแสฮาร์มอนิกที่ความถี่หลักมูล (A)

### 2. ค่าความสูญเสียปลีกล้วยในชุดขดลวด

จาก [9] สามารถคำนวณค่าความสูญเสียปลีกล้วยทั้งหมดในชุดขดลวด (Total winding stray loss) ที่พิกัดโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น ได้จากการนำเอาค่าความสูญเสียขณะมีโหลดลบบอกจากค่าความสูญเสียในชุดขดลวด ซึ่งจะสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.13

$$P_{TSL\_R} = P_{LL\_R} - P_{C\_R} \quad (2.13)$$

โดยที่

$P_{TSL\_R}$  คือ ค่าความสูญเสียปลิกย่อยทั้งหมดในชุดขดลวดที่พิกัดโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น (W)

$P_{LL\_R}$  คือ ค่าความสูญเสียที่มีโหลดที่พิกัดโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น (W)

$P_{C\_R}$  คือ ค่าความสูญเสียในชุดขดลวดที่พิกัดโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น (W)

จาก [9,28] พบว่าค่าความสูญเสียปลิกย่อยทั้งหมดในชุดขดลวด สามารถแยกออกได้เป็น ค่าความสูญเสียอันเนื่องมาจากกระแสไหลวนในชุดขดลวด ( Winding eddy current loss) และ ค่าความสูญเสียปลิกย่อยอื่น ๆ ในที่นอกเหนือจากชุดขดลวด (Other stray loss) จะคำนวณได้จากสมการที่ 2.14 และ 2.15

1. ค่าความสูญเสียอันเนื่องมาจากกระแสไหลวนในชุดขดลวด

ค่าความสูญเสียอันเนื่องมาจากกระแสไหลวนในชุดขดลวดที่พิกัดโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น สามารถหาได้จากสมการที่ 2.14 โดยการแยกออกมาจากค่าความสูญเสียปลิกย่อยทั้งหมด โดยที่ 33 % ของค่าความสูญเสียปลิกย่อยทั้งหมดที่พิกัดโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้นจะเป็นค่าความสูญเสียอันเนื่องมาจากกระแสไหลวนที่พิกัดโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น ดังนี้

$$P_{EC\_R} = 0.33 \times P_{TSL\_R} \quad (2.14)$$

โดยที่

$P_{EC\_R}$  คือ ค่าความสูญเสียอันเนื่องมาจากกระแสไหลวนในชุดขดลวดที่พิกัดโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น (W)

จาก[9] เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นสามารถคำนวณค่าความสูญเสียอันเนื่องมาจากกระแสไหลวนในชุดขดลวดได้ดังสมการที่ 2.15 ดังนี้

$$P_{EC} = P_{EC\_R} \times F_{HL} \quad (2.15)$$

โดยที่

$P_{EC}$  คือ ค่าความสูญเสียอันเนื่องมาจากกระแสไหลวนในชุดขดลวดของหม้อแปลง เมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น (W)

$F_{HL}$  คือ Harmonic loss factor for winding eddy current loss ซึ่งหาได้จากสมการที่ 2.16

$$F_{HL} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left( \frac{I_h}{I_1} \right)^2 .b^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left( \frac{I_h}{I_1} \right)^2} \quad (2.16)$$

2. ค่าความสูญเสียปลิกย่อยอื่น ๆ ที่นอกเหนือจากชุดขดลวด

ค่าความสูญเสียปลิกย่อยอื่น ๆ ที่นอกเหนือจากชุดขดลวดเมื่อจ่ายโหลดที่พิกัดโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น สามารถคำนวณได้จากการนำเอาค่าความสูญเสียปลิกย่อยทั้งหมดลบด้วยค่าความสูญเสียอันเนื่องมาจากกระแสไหลวนในชุดขดลวดดังสมการที่ 2.17

$$P_{OSL\_R} = P_{TSL\_R} - P_{EC\_R} \quad (2.17)$$

โดยที่

$P_{OSL\_R}$  คือ ค่าความสูญเสียปลิกย่อยอื่น ๆ ที่นอกเหนือจากชุดขดลวดที่พิกัดโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น (W)

จาก[9]เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นสามารถหาค่าความสูญเสียปลิกย่อยอื่น ๆ ที่นอกเหนือจากชุดขดลวดได้ดังสมการที่ 2.18

$$P_{OSL} = P_{OSL\_R} \times F_{HL\_STR} \quad (2.18)$$

โดยที่

$P_{OSL}$  คือ ค่าความสูญเสียปลิกย่อยอื่น ๆ ที่นอกเหนือจากชุดขดลวดเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น (W)

$F_{HL\_STR}$  คือ Harmonic loss factor for other stray losses ซึ่งหาได้จากสมการที่ 2.19

$$F_{HL\_STR} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left( \frac{I_h}{I_1} \right)^2 .b^{0.8}}{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left( \frac{I_h}{I_1} \right)^2} \quad (2.19)$$

ดังนั้น ค่าความสูญเสียขณะมีโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้นที่พิกัด สามารถหาได้ดังสมการที่ 2.20

$$P_{LL\_R} = P_{C\_R} + P_{EC\_R} + P_{OSL\_R} \quad (2.20)$$

จาก[9] เมื่อหม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นจะสามารถคำนวณค่าความสูญเสียขณะมีโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้า ได้ดังสมการที่ 2.21

$$P_{LJ.} = P_C + P_{EC} + P_{OSL} \quad (2.21)$$

## 2.5 คุณลักษณะทางความร้อนของหม้อแปลงไฟฟ้า

จาก [5,7,8] กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่แกนเหล็ก และ ขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดความร้อนขึ้น และ ความร้อนนี้ต้องมีการระบายออกไปจากหม้อแปลง เพื่อให้หม้อแปลงมีอุณหภูมิในระดับที่ไม่ทำให้ฉนวนเสื่อมสภาพ ดังนั้นอุณหภูมิภายในหม้อแปลงจึงมีความสำคัญที่มีผลต่อพิคัดเควี่ที่กำหนด และอายุการใช้งานของหม้อแปลง

### 2.5.1 ขีดจำกัดของอุณหภูมิเพิ่ม

ตามมาตรฐาน[7,8] ได้กำหนดขีดจำกัดของอุณหภูมิเพิ่มสำหรับหม้อแปลงที่มีการระบายความร้อนด้วยน้ำมัน โดยอากาศธรรมชาติ ( Oil-Immersed Self-Cooled Transformer ) หรือตัวย่อว่า ONAN โดยกำหนดให้อุณหภูมิแวดล้อม ( Ambient Temperature ) สูงสุดมีค่าเท่ากับ 40 องศาเซลเซียส สถานที่ติดตั้งใช้งานไม่เกิน 1000 เมตรเหนือระดับน้ำทะเล กรณีที่สถานที่ติดตั้งใช้งานสูงเกินกว่า 1000 เมตรเหนือระดับน้ำทะเล อุณหภูมิเพิ่มเฉลี่ยจะลดลง 1 องศาเซลเซียสต่อระยะความสูงทุก ๆ 400 เมตร

ตารางที่ 2.2 แสดงขีดจำกัดอุณหภูมิเพิ่มสำหรับหม้อแปลงแบบจุ่มน้ำมัน

ตำแหน่ง	อุณหภูมิเพิ่ม
น้ำมันด้านบน(Top oil)	ไม่เกิน 60 °C
ขดลวด	ไม่เกิน 65 °C

## 2.5.2 วิธีการระบายความร้อนของหม้อแปลงไฟฟ้า

การสูญเสีย (Losses) พลังงานต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลงเช่น ค่าความสูญเสียขณะไม่มีโหลด (No load loss) ค่าความสูญเสียขณะมีโหลด (Load loss) และค่าความสูญเสียในส่วนต่าง ๆ ของหม้อแปลงในขณะจ่ายโหลดอยู่ ค่าความสูญเสียทั้งหมดจะแปรรูปเป็นพลังงานความร้อน ทำให้อุณหภูมิของวัสดุมีโอกาสเลยจุดสูงสุดที่วัสดุนั้นจะทนได้ และทำลายฉนวนของหม้อแปลงในที่สุดก็ทำให้หม้อแปลงใช้งานไม่ได้ (Failure) ดังนั้นการระบายความร้อนของหม้อแปลงจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง

การระบายความร้อน ถ้าทำถูกวิธีจะสามารถเพิ่มอัตรากำลัง (Rating) ของหม้อแปลงได้โดยขนาดเท่าเดิม หรืออาจจะลดขนาด (กว้าง, ยาว, สูง) ของหม้อแปลงได้โดยที่ขนาดกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงยังคงเท่าเดิม

โดยธรรมชาติแล้ว ความร้อนจะระบายออกตามผิวของวัตถุด้วยวิธีการแผ่รังสี (Radiation) และ วิธีการพาความร้อน (Convection) ในหม้อแปลงนั้นการระบายความร้อนจะใช้วิธีการใดนั้นจะขึ้นอยู่กับขนาดทั้งรูปร่าง และ อัตรากำลังของหม้อแปลงที่ใช้

หม้อแปลงก่อนที่จะถูกนำไปใช้งานนั้นอุณหภูมิภายในหม้อแปลงเท่ากับ อุณหภูมิ รอบ ๆ ภายนอก (Ambient Temperature) หลังจากที่หม้อแปลงจ่ายโหลด อุณหภูมิภายในของหม้อแปลง โดยเฉพาะส่วนที่มีกระแสไหลจะถีบตัวขึ้นอย่างรวดเร็ว และจะถ่ายเทความร้อนให้แก่วัสดุ หรือ อากาศรอบ ๆ ทำให้มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนถึงจุด ๆ หนึ่งก็จะไม่มีการเพิ่มขึ้นอีก แสดงว่าความร้อนที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากมีกระแสไหลผ่าน จะเท่ากับความร้อนที่ระบายออกผลก็คือ อุณหภูมิคงที่

## 2.5.3 สัญลักษณ์ที่ใช้เรียกตามวิธีการระบายความร้อน

### 1. ตัวกลางระบายความร้อน

O คือ น้ำมันแร่ (Mineral Oil) หรือฉนวนเหลวสังเคราะห์ที่มีจุดติดไฟ  
(Fire Point)  $\leq 300\text{ }^{\circ}\text{C}$

K คือ ฉนวนเหลวที่มีจุดติดไฟ  $> 300\text{ }^{\circ}\text{C}$

L คือ ฉนวนเหลวที่ไม่สามารถวัดจุดติดไฟได้ เช่น askarel

G คือ ก๊าซ

W คือ น้ำ

A คือ อากาศ

S คือ ฉนวนแข็ง

2. กลไกการหมุนเวียนของตัวกลางสำหรับระบายความร้อน

- N คือ การหมุนเวียนโดยธรรมชาติโดยการลัดความร้อน(Thermosiphon) ไหลผ่านอุปกรณ์ระบายความร้อนและไหลผ่านขดลวด
- F คือ การหมุนเวียนโดยการขับให้ไหลผ่านอุปกรณ์ระบายความร้อน โดยการลัดความร้อนไหลผ่านในชุดขดลวด เช่น พัดลม, ปั๊ม
- D คือ การหมุนเวียนโดยการขับให้ไหลผ่านอุปกรณ์ระบายความร้อน และบังคับทิศทางจากอุปกรณ์ระบายความร้อนให้ไหลไปที่ขดลวดหลัก(Main Winding)

วิธีการระบายความร้อนของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแช่น้ำมัน มีหลายวิธีการดังนี้

1. การระบายความร้อน โดยอากาศธรรมชาติ ตัวย่อคือ ONAN
2. การระบายความร้อน โดยเพิ่มอัตราการกำกับการหมุนเวียนอากาศ ตัวย่อคือ ONAF
3. การระบายความร้อน โดยเพิ่มกำกับการหมุนเวียนน้ำมันด้วยปั๊มขับโดยการเพิ่มกำกับการหมุนเวียนของอากาศ ตัวย่อคือ OFAF
4. การระบายความร้อน โดยเพิ่มกำกับการหมุนเวียนของน้ำมันด้วยปั๊มขับ โดยอากาศธรรมชาติ ตัวย่อคือ OFAN
5. การระบายความร้อน โดยเพิ่มกำกับการหมุนเวียนให้แก่น้ำ และน้ำมัน ตัวย่อคือ OFWF โดยที่

อักษรตัวที่หนึ่ง : แสดงชนิดของตัวกลางระบายความร้อนภายในที่สัมผัสกับขดลวด

อักษรตัวที่สอง : แสดงกลไกการหมุนเวียนของตัวกลางระบายความร้อนภายใน

อักษรตัวที่สาม : แสดงชนิดของตัวกลางระบายความร้อนภายนอก

อักษรตัวที่สี่ : แสดงกลไกการหมุนเวียนของตัวกลางระบายความร้อนภายนอก

2.5.4 ขีดจำกัดความร้อนเกินและผลที่มีต่อความเป็นฉนวน

ขีดจำกัดอุณหภูมิของหม้อแปลงนั้นจะขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ ฉนวนที่พันขดลวดส่วนใหญ่มีสารอินทรีย์ (Organic Materials) และ เส้นใย (Fibrous) ผสมอยู่ เช่น กระดาษหนาสีน้ำตาล (Kraft Board) และ กระดาษอัด (Press Board) เป็นต้น สารดังกล่าวเมื่อความร้อนสูง ๆ จะทำให้คาร์บอนออกมา และ เพราะ อุณหภูมิจึงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อกำเนิดคาร์บอน ทำลายความแข็งแรงของฉนวน และ ความแข็งแรงเชิงกลและยังทำลายอายุการใช้งานของฉนวนให้สั้นลงด้วย ปัจจัยอื่น ๆ

นอกจากความร้อนที่ทำลายอายุการใช้งานของฉนวนได้แก่ การพับ การฉีก ดึง หรือ รอยแตกของฉนวน เป็นต้น

### 2.5.5 ระดับชั้นอุณหภูมิของฉนวน

ข้อกำหนดของอุณหภูมิสำหรับวัสดุที่ใช้ทำฉนวนสามารถแบ่งเป็นระดับชั้นอุณหภูมิฉนวนได้ดังนี้

1. Class Y ผลิตจากเส้นใย (Fibers) ของไม้, ฝ้าย และผ้าไหม มีลักษณะการใช้งานในอากาศ (ไม่แช่ในฉนวนเหลว) ข้อกำหนดของอุณหภูมิสำหรับฉนวนระดับชั้นนี้มีอุณหภูมิ 90 °C
2. Class A มีลักษณะคล้ายกับ Class Y แต่มีลักษณะการใช้งานร่วมกับฉนวนเหลว(แช่ในฉนวนเหลว) ข้อกำหนดของอุณหภูมิสำหรับฉนวนระดับชั้นนี้มีอุณหภูมิ 105 °C
3. Class E มีลักษณะเป็นแผ่นฟิล์มสังเคราะห์ หรือ ผลิตจากวัสดุอื่นที่มีค่าความร้อนในลักษณะคล้ายกัน ข้อกำหนดของอุณหภูมิสำหรับฉนวนระดับชั้นนี้มีอุณหภูมิ 120 °C
4. Class B ผลิตจากไมก้า (Mica), แร่ใยหิน (Asbestors) หรือไฟเบอร์กลาส ข้อกำหนดของอุณหภูมิสำหรับฉนวนระดับชั้นนี้มีอุณหภูมิ 130 °C
5. Class F ผลิตจากไมก้า (Mica) , แร่ใยหิน (Asbestors) หรือไฟเบอร์กลาสโดยรวมกับวัสดุสังเคราะห์ที่เหมาะสมและสามารถใช้ร่วมกับฉนวนเหลวได้ ข้อกำหนดของอุณหภูมิสำหรับฉนวนระดับชั้นนี้มีอุณหภูมิ 155 °C
6. Class H ผลิตจากไมก้า (Mica), แร่ใยหิน (Asbestors) หรือไฟเบอร์กลาสโดยใช้ร่วมกับฉนวนเหลวชนิดซิลิโคน (Silicone) ข้อกำหนดของอุณหภูมิสำหรับฉนวนระดับชั้นนี้มีอุณหภูมิ 180°C
7. Class C ผลิตจากวัสดุประเภทไมก้า, แก้ว และควอตซ์ (Quartz) ข้อกำหนดของอุณหภูมิสำหรับฉนวนระดับชั้นนี้มีอุณหภูมิ 180 °C แต่การใช้งานจะต้องพิจารณาถึงคุณสมบัติของฉนวนในทางเคมีและทางไฟฟ้าว่าสามารถใช้งานได้หรือไม่

## 2.6 การแก้ปัญหาทางความร้อนของหม้อแปลงเมื่อต้องจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เชิงเส้น

การแก้ปัญหาทางความร้อนของหม้อแปลงไฟฟ้า หรือการป้องกันการจ่ายโหลดเกินพิกัดอันเนื่องมาจากกระแสแบบไม่เชิงเส้น สามารถทำได้ 2 วิธีการดังนี้

### 2.6.1 การลดพิกัดโหลดของหม้อแปลง

การลดพิกัดโหลดของหม้อแปลง ( Derating ) ของหม้อแปลงไฟฟ้า [9,20] จะเป็นการป้องกัน การจ่ายโหลดเกินพิกัดอันเนื่องมาจากกระแสแบบไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งสามารถทำได้ 2 วิธีการดังนี้

1. การคำนวณความสามารถในการรับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น ของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยการใช้ข้อมูลที่ออกแบบความสูญเสียของกระแสไหลวน

การคำนวณความสามารถในการรับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยการใช้ข้อมูลที่ออกแบบความสูญเสียของกระแสไหลวน โดยจะกำหนดให้ค่าความสูญเสียปลิกย่อยอื่น ๆ ที่นอกเหนือจากชุดขดลวด ( $P_{OSL,R}$ ) มีค่าเท่ากับศูนย์ และ กำหนดให้ค่าความสูญเสียของกระแสไหลวนในชุดขดลวด ( $P_{EC}$ ) มีค่าเป็น 15 % ของค่าความสูญเสียของค่าความสูญเสียในชุดขดลวดที่กระแสที่พิกัด และ เพื่อความสะดวกในการคำนวณจะคำนวณเป็นค่าเปอร์เซ็นต์ โดยใช้ค่าความสูญเสียในชุดขดลวด ( $I^2R_{loss}$ ) และกระแสที่พิกัดเป็นค่าฐาน ดังนั้นจะสามารถคำนวณความสามารถในการรับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น ได้ดังสมการที่ 2.22

$$I_{\max}(pH) = \sqrt{\frac{1.15}{1 + (F_{HL} \times 0.15)}} \quad (2.22)$$

2. การคำนวณความสามารถในการรับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น ของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ

การคำนวณความสามารถในการรับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบของผู้ผลิต จะมีการตั้งสมมติฐานได้ดังต่อไปนี้ ซึ่งอาจจะมีการเปลี่ยนแปลงได้ตามคำแนะนำของผู้ผลิตในแต่ละราย ดังนี้

1. ค่าความสูญเสียในชุดขดลวด ( $I^2R_{loss}$ ) มีค่าสม่ำเสมอในแต่ละขด
2. ค่าความสูญเสียปลิกย่อยในชุดขดลวดทั้งหมด จะสามารถแยกออกได้เป็น ค่า

ความสูญเสียอันเนื่องมาจากกระแสไหลวนในชุดขดลวด และ ค่าความสูญเสียปลิกย่อยอื่น ๆ ที่นอกเหนือจากชุดขดลวด โดยที่ 33 % ของค่าความสูญเสียปลิกย่อยในชุดขดลวดทั้งหมดจะเป็นค่าความสูญเสียของกระแสไหลวนในชุดขดลวด ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.14 ในหัวข้อ 2.4.2 และ ค่าความสูญเสียปลิกย่อยอื่น ๆ ที่นอกเหนือจากชุดขดลวด สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.15 ในหัวข้อที่ 2.4.2

3. ค่าความสูญเสียอันเนื่องมาจากกระแสไหลวน ( $P_{EC}$ ) ที่เกิดขึ้นในชุดขดลวดแต่ละขดเป็นดังนี้

3.1 60 % ในชุดขดลวดด้านใน และ 40 % ในชุดขดลวดด้านนอก กรณีที่กระแส *Self-Cooled* น้อยกว่า 1000 A และ จำนวนรอบน้อยกว่า 4 : 1

3.2 70 % ในชุดขดลวดด้านใน และ 30 % ในชุดขดลวดด้านนอก กรณีที่กระแส *Self-Cooled* มากกว่า 1000 A และ จำนวนรอบมากกว่า 4 : 1

4. ค่าความสูญเสียอันเนื่องมาจากกระแสไหลวนมีการกระจายไม่สม่ำเสมอในแต่ละขด โดยจุดที่มีความร้อนสูญเสียสูงที่สุดจะมีค่าความสูญเสียเท่ากับ 400 % ของค่าความสูญเสียเฉลี่ยในแต่ละขด

จากสมมุติฐานข้อที่ 3.1 ค่าความสูญเสียอันเนื่องมาจากกระแสไหลวนด้านแรงต่ำ (ด้านใน) ต่อหน่วยค่าความสูญเสียในชุดขดลวด สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.23 และ สมการที่ 2.24

$$P_{EC\_R}(pu) = \frac{0.6P_{EC\_R}}{K(I_{2\_R})^2 R_2} \quad (2.23)$$

หรือ

$$P_{EC\_R}(pu) = \frac{0.7P_{EC\_R}}{K(I_{2\_R})^2 R_2} \quad (2.24)$$

จากสมมุติฐานข้อ 4 สามารถหาค่าความสูญเสียอันเนื่องมาจากกระแสไหลวนจุดที่มีความร้อนสูญเสียสูงสุด ซึ่งจะมีค่าเป็น 400 % ของค่าความสูญเสียเฉลี่ยในแต่ละชุดขดลวดได้ดังสมการที่ 2.20 และ สมการที่ 2.21

$$MaxP_{EC\_R}(pu) = \frac{2.4P_{EC\_R}}{K(I_{2\_R})^2 R_2} \quad (2.25)$$

หรือ

$$MaxP_{EC\_R}(pu) = \frac{2.8P_{EC\_R}}{K(I_{2\_R})^2 R_2} \quad (2.26)$$

ดังนั้นจะสามารถคำนวณความสามารถในการรับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น เป็นค่าเปอร์ยูนิต ได้ดังสมการที่ 2.27 โดยที่ค่าเปอร์ยูนิตจะใช้ค่าความสูญเสียในชุดขดลวดที่กระแสพิกัดเป็นค่าฐาน

$$I_{\max}(pu) = \sqrt{\frac{1 + MaxP_{EC\_R}(pu)}{1 + F_{HL} \times MaxP_{EC\_R}(pu)}} \quad (2.27)$$

## 2.6.2 การเลือกใช้หม้อแปลงแบบแฟกเตอร์ K

ปัจจุบันได้มีการออกแบบหม้อแปลงสำหรับรับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นโดยเฉพาะ หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า หม้อแปลงแบบ แฟกเตอร์ K ซึ่งค่าแฟกเตอร์ K (K-factor) จะเป็นค่าที่บอกความสามารถของหม้อแปลงที่จะทนต่อกำลังสูญเสียอันเนื่องมาจากกระแสไหลวนในชุดขดลวดที่เพิ่มขึ้นเป็นจำนวนเท่าของความถี่หลักมูล [2,9] เช่นหม้อแปลงแบบแฟกเตอร์ K ที่มีค่า K-factor เท่ากับ 9 นั้นจะหมายความว่า หม้อแปลงตัวนี้ได้ถูกออกแบบให้สามารถใช้งานได้อย่างปกติขณะจ่ายโหลดที่มีกำลังสูญเสียอันเนื่องมาจากกระแสไหลวนในชุดขดลวดเป็น 9 เท่าของความถี่หลักมูล เป็นต้น และพิกัดมาตรฐานของหม้อแปลงแบบแฟกเตอร์ K คือ 1,4,9,13,20,30,40 และ 50 แต่โดยทั่วไปแล้วอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากผลของกระแสไม่เป็นเชิงเส้น จะเกิดกับหม้อแปลงแบบแห้ง มากกว่าหม้อแปลงแบบแช่น้ำมัน ทั้งนี้เนื่องจากค่าความร้อนจำเพาะของขดลวดมีค่าสูงกว่าน้ำมัน และการระบายความร้อนของหม้อแปลงแบบน้ำมันระบายความร้อนได้ดีกว่าหม้อแปลงแบบแห้ง ดังนั้น ค่า K-factor จึงนิยมใช้กับหม้อแปลงแบบแห้งมากกว่าแบบแช่น้ำมัน และค่า K-factor สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.28

$$K \text{ -factor} = \left[ \frac{\sum_{b=1}^{b=b_{\max}} I_b^2}{I_R^2} \right] \times F_{III} \quad (2.28)$$

โดยที่

$I_R$  คือ กระแสแบบเป็นเชิงเส้นที่โหลดพิกัด

## บทที่ 3

# ผลการทำนายอุณหภูมิทางทฤษฎี

ในการใช้งานหม้อแปลงในภาวะปัจจุบัน ได้มีการนำเอาอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์มาใช้กันอย่างแพร่หลาย ซึ่งโหลดที่เป็นอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์เหล่านี้ล้วนเป็นโหลดประเภทไม่เป็นเชิงเส้น และโหลดประเภทไม่เป็นเชิงเส้นนี้จะมีผลทำให้หม้อแปลงเกิดความร้อนมากกว่าการใช้โหลดแบบเป็นเชิงเส้นเป็นอย่างมาก ดังนั้นจึงต้องหาวิธีการอย่างไรที่จะทำให้หม้อแปลงใช้งานได้ อย่างคุ้มค่า และ เป็นการป้องกันอันตรายจากความร้อนเกินพิกัดอันเนื่องมาจากการจ่ายโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สร้างโปรแกรมสำเร็จรูปขึ้นมาเพื่อใช้ในการคำนวณค่าอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน อุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแช่น้ำมัน 3 เฟส 10 กิโลโวลต์แอมป์ เมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น มาใช้แทนการวัดจากอุปกรณ์จริง เช่น เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouples) ซึ่งเป็นวิธีที่ไม่สะดวก และ จะเป็นอันตรายอย่างยิ่งถ้าผู้ทำการทดสอบขาดความระมัดระวัง และไม่มีประสบการณ์ในการใช้อุปกรณ์ทางด้านแรงสูงต่าง ๆ และ ประโยชน์อีกอย่างหนึ่งของโปรแกรมนี้อีก จะช่วยให้ผู้ประกอบการให้ตัดสินใจในการพิจารณาเลือกใช้หม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อต้องมีการจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น เพื่อให้มีต้นทุนที่ต่ำที่สุดเนื่องจากการที่ได้ทราบอุณหภูมิ และ จากการคาดการณ์อายุการใช้งานของหม้อแปลง

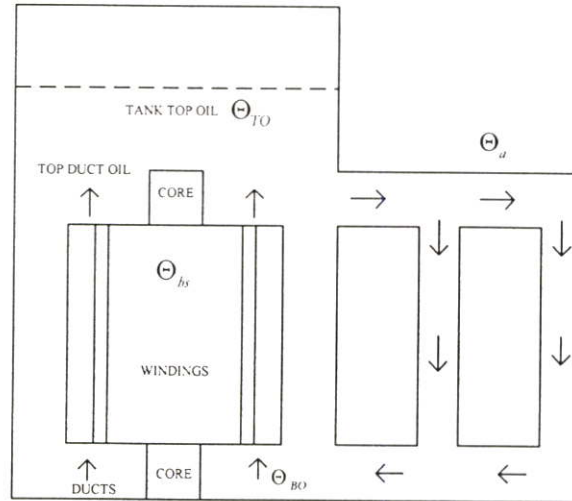
โปรแกรมสำเร็จรูปในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นโปรแกรมต้นแบบที่สามารถนำไปใช้งานได้กับเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลธรรมดาได้ เพียงแต่ป้อนค่าอินพุตตามที่ผู้ผลิตให้มากับตัวหม้อแปลง และ ป้อนค่าอินพุตของกระแสฮาร์มอนิกส์ ที่ต้องการวิเคราะห์ และเมื่อป้อนค่าตัวแปรต่าง ๆ เข้าไปโปรแกรมก็จะแสดง ค่าอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน (Top oil rise temperature) อุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด (Hot spot temperature) ความสามารถในการรับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นของหม้อแปลงไฟฟ้า ( $I_{max}$ ) และ เปอร์เซ็นต์การลดอายุการใช้งานของหม้อแปลง (% Loss of life) และ หลักการและค่าตัวแปรต่าง ๆ จะสามารถแสดงให้เห็นในหัวข้อที่ 3.1

### 3.1 แบบจำลองทางความร้อนของหม้อแปลงไฟฟ้า

#### 3.1.1 แบบจำลองทางความร้อนของหม้อแปลงไฟฟ้า ตามมาตรฐาน IEEE C57.110-1998[9]

ในการออกแบบแบบจำลองทางความร้อนจำเป็นต้องมีความเข้าใจถึงวิธีการระบายความร้อนของหม้อแปลงไฟฟ้าก่อน เพราะค่าความสูญเสียต่าง ๆ ของหม้อแปลงไฟฟ้าจะเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานความร้อน ซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นในตัวของหม้อแปลงจะเป็นสาเหตุที่ทำให้ฉนวนของ

ของชุดขดลวดเกิดความเสียหาย และเมื่อฉนวนของหม้อแปลงเกิดความเสียหายแล้ว จะทำให้หม้อแปลงใช้งานไม่ได้ในที่สุด ดังนั้นการระบายความร้อนของหม้อแปลงจึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง และในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงหลักการพื้นฐานในการระบายความร้อนของหม้อแปลงไฟฟ้าซึ่งสามารถแสดงให้เห็นในรูปที่ 3.1 ซึ่งแสดงการถ่ายเทความร้อนของหม้อแปลงไฟฟ้า



รูปที่ 3.1 แสดงการถ่ายเทความร้อนของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแช่น้ำมัน

จากรูปที่ 3.1 จะเห็นว่าความร้อนของหม้อแปลงไฟฟ้าจะถ่ายเทจากผิวของชุดขดลวดไปยังน้ำมันที่อยู่รอบ ๆ ชุดขดลวด เมื่อน้ำมันได้รับความร้อน น้ำมันจะหมุนเวียนไปด้วยผลต่างระหว่างความหนาแน่นของน้ำมันเย็นและน้ำมันที่ร้อนจะถ่ายเทความร้อนด้วยการพาความร้อน ความเร็วและลักษณะการไหลของน้ำมันรอบ ๆ ผิวขดลวดนี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของขดลวด ขนาดของท่อที่ใช้ในการระบายความร้อน และ ระบบที่ใช้ในการระบายความร้อน และ การพาความร้อนในลักษณะนี้ น้ำมันร้อนรอบ ๆ ผิวของขดลวดจะลอยตัวขึ้นสู่ด้านบนและไหลขึ้นไปสู่ส่วนบนของท่อที่ติดอยู่กับถัง และไหลตามท่อลงมาสู่ส่วนล่างของท่อหม้อแปลงไฟฟ้าไปยังขดลวดแทนที่ส่วนที่ลอยตัวขึ้นไป และความร้อนที่ติดมากับน้ำมันจะถ่ายเทให้กับผนังถังของหม้อแปลงไฟฟ้า หรืออากาศรอบ ๆ ทำให้มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึงจุด ๆ หนึ่งก็จะไม่มีการเพิ่มขึ้นอีก แสดงว่าความร้อนที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากมีกระแสไหลผ่านจะเท่ากับความร้อนที่ระบายออก ซึ่งจะเป็นผลทำให้อุณหภูมิจึงที่

จากการถ่ายเทความร้อนของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแช่น้ำมันที่แสดงในรูปที่ 3.1 จะเห็นว่า อุณหภูมิน้ำมันด้านบนจะมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิน้ำมันด้านล่างอันเนื่องมาจากการถ่ายเทความร้อน ซึ่งจะทำให้จุดที่มีอุณหภูมิสูงที่สุดเกิดขึ้นที่บริเวณชุดขดลวดตอนบน และจากลักษณะเช่นนี้ทำให้ อุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ( $\Theta_{hs}$ ) ของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแช่น้ำมันแยกออกได้เป็น 3 ส่วนดังสมการที่ 3.1

$$\Theta_{hr} = \Theta_{TO} + \Theta_g + \Theta_a \quad (3.1)$$

โดยที่

$\Theta_{hs}$  คือ อุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด

$\Theta_{TO}$  คือ อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนหาได้ดังสมการที่ 3.2 และ สมการที่ 3.3

$\Theta_g$  คือ อุณหภูมิเพิ่ม ณ จุดร้อนสุดที่มากกว่าอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนหาได้ดังสมการที่ 3.4

$\Theta_a$  คือ อุณหภูมิแวดล้อม

### 1. อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน ณ สภาวะคงตัว

จากสมการที่ 2.5, 2.13 และ 2.14 เมื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการหาอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนของหม้อแปลงแบบแช่น้ำมัน สามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการที่ 3.2

$$\Theta_{TO} = \Theta_{TO-R} \times \left( \frac{P_{LL} + P_{NL}}{P_{LL-R} + P_{NL}} \right)^{0.8} \quad (3.2)$$

โดยที่

$\Theta_{TO-R}$  คือ อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนที่พิกัดโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น ( $^{\circ}\text{C}$ )

### 2. อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน ณ สภาวะชั่วขณะ

จากสมการที่ 3.2 เมื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการหาอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันในสภาวะชั่วขณะ สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 3.3

$$\Theta_{TO}(t) = (\Theta_{TO} - \Theta_{oi})(1 - e^{-t/\tau}) + \Theta_{oi} \quad (3.3)$$

โดยที่

$\Theta_{oi}$  คือ อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน ณ เวลาเริ่มต้น ( $^{\circ}\text{C}$ )

$\tau$  คือ ค่าเวลาดังตัวทางความร้อนของน้ำมัน (ชั่วโมง)

### 3. อุณหภูมิเพิ่ม ณ จุดร้อนสุด ที่มากกว่าอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน

จากสมการที่ 2.18 และ สมการที่ 2.20 เมื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการหาอุณหภูมิเพิ่ม ณ จุดร้อนสุดที่มากกว่าอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 3.4

$$\Theta_g = \Theta_{s-R} \times \left( \frac{P_{C2} + 2.4 \times P_{EC}}{P_{C2-R} + 2.4 \times P_{EC-R}} \right)^{0.8} \quad (3.4)$$

โดยที่

$\Theta_{gR}$  คือ อุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ที่มากกว่าอุณหภูมิน้ำมันด้านบนที่พิกัดโหลดแบบเป็นเชิงเส้น ( $^{\circ}\text{C}$ )

$P_{C2R}$  คือ ค่าความสูญเสียในชุดขดลวด (I<sup>2</sup>R Loss) ทางด้านแรงดันเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้นที่พิกัด (W) สามารถหาได้ดังสมการที่ 3.5

$P_{C2}$  คือ ค่าความสูญเสียในชุดขดลวด (I<sup>2</sup>R Loss) ทางด้านแรงดันเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น (W) สามารถหาได้ดังสมการที่ 3.6

$$P_{C2R} = K \times I_{2R}^2 \times R_2 \quad (3.5)$$

$$P_{C2} = P_{C2R} \times \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left( \frac{I_h}{I_1} \right)^2 \quad (3.6)$$

### 5. เปอร์เซ็นต์การลดอายุการใช้งาน

จากสมการที่ 3.1 สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการหาค่าเปอร์เซ็นต์การลดอายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแช่น้ำมันได้ดังสมการที่ 3.7

$$\% L(t) = \frac{100}{10 \left( \frac{6328.8}{273 + \Theta_{hs}(t)} - 11.269 \right)} \quad (3.7)$$

โดยที่

$\Theta_{hs}(t)$  คือ อุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ณ เวลา  $t$  ( $^{\circ}\text{C}$ )

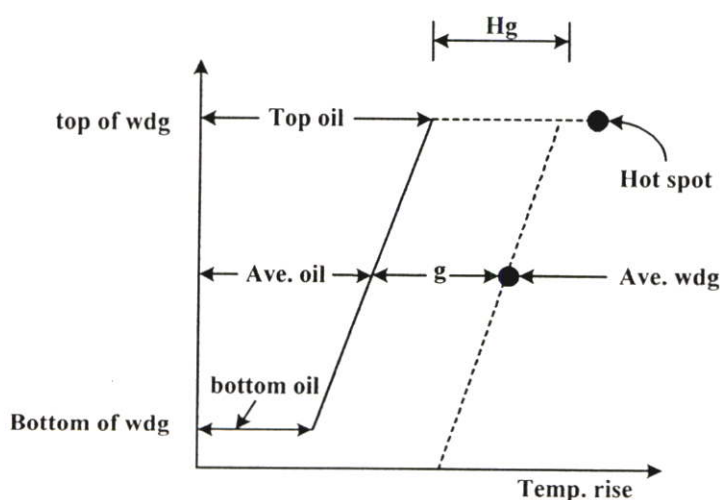
จากสมการที่ 3.7 จะได้ค่าเปอร์เซ็นต์การลดอายุการใช้งานเพียงค่าเดียว คือ ได้เฉพาะค่าเปอร์เซ็นต์การลดอายุการใช้งานที่ อุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุดที่เวลา  $t$  เท่านั้น แต่ในความเป็นจริง อุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุดในหนึ่งวัน จะมีหลายค่า ดังนั้นจะสามารถแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การลดอายุการใช้งานรวมในหนึ่งวันได้ดังสมการ

$$\text{Total } \%L = \sum_{t=1}^{24} \%L(t) \quad (3.8)$$

### 3.1.2 แบบจำลองทางความร้อนอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC

ในการต่อโหลดของหม้อแปลงในสภาวะกระแสไม่เป็นเชิงเส้น ในหัวข้อนี้เป็นการประยุกต์ใช้สมการการคำนวณตามมาตรฐานของ IEC 354 [14] เพื่อใช้คำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น เนื่องจาก IEC ยังไม่มีการกำหนดมาตรฐานสำหรับการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นโดยตรง แต่หลักการของ IEC 354 [14] และ จากบทความ[18,19,28] ก็จะเป็นแนวทางที่ดีในการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น และ มาตรฐาน IEC [13,14] ได้ตั้งสมมติฐานเกี่ยวกับความร้อนของหม้อแปลงไฟฟ้าดังรูปที่ 3.2 ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

1. อุณหภูมิของน้ำมันภายในตัวของหม้อแปลงจะเพิ่มขึ้นจากด้านล่างขึ้นด้านบนอย่างเป็นเชิงเส้น
2. อุณหภูมิของตัวนำที่ทุก ๆ ตำแหน่งในชุดขดลวด จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้น และขนานกับเส้นอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมัน โดยมีค่าความแตกต่างคงที่ ( $g$ ) ระหว่างเส้นทั้งสอง
3. อุณหภูมิเพิ่มจุดร้อนสุดจะสูงกว่าอุณหภูมิของตัวนำที่ด้านบน เนื่องจากค่าความสูญเสียปลิกย่อยในชุดขดลวด(winding stray loss) ที่เพิ่มขึ้น ค่าของอุณหภูมิที่แตกต่างระหว่างที่จุดร้อนสุด กับที่ขดลวดด้านบนของน้ำมันหาได้จากค่า  $H$  คูณกับ  $g$  โดยที่  $H$  เป็นค่าตัวประกอบที่มีค่าจาก 1.1 ถึง 1.5 ซึ่งจะขึ้นอยู่กับขนาดและ ชนิดของหม้อแปลง และสำหรับหม้อแปลงในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะกำหนดให้ค่า  $H$  มีค่าเป็น 1.1



รูปที่ 3.2 แสดงแผนผังความร้อนตามมาตรฐาน IEC

จากแผนผังความร้อนตามมาตรฐาน IEC จะสามารถแสดงสมการการหาค่าอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุดของหม้อแปลงได้ดังสมการที่ 3.9 ถึง 3.16

1. อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน ณ สภาวะคงตัว สำหรับโหลดคงที่

จาก[13,14,18,19,28] สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการหาอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแช่น้ำมันได้ดังสมการที่ 3.9

$$\Delta\Theta_{OK} = \Delta\Theta_{OR} \left[ \frac{K^2 R + 1}{R + 1} \right]^{0.8} \quad (3.9)$$

โดยที่

$\Delta\Theta_{OR}$  คือ อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนที่พิกัดโหลดแบบเป็นเชิงเส้น ( $^{\circ}\text{C}$ )

$R$  คือ อัตราส่วนของ Load Loss / No Load Loss

$K$  คือ Load factor หาได้ดังสมการที่ 3.10

$$K = \frac{\sqrt{(I_L^2 + \delta \sum_{h=2}^{h=h_{\max}} ((1+x)(b^2-1)) \times I_b^2)}}{I_R} \quad (3.10)$$

โดยที่

$I_L$  คือ กระแสแบบเป็นเชิงเส้น (A)

$\delta$  คือ กระแสแบบไม่เป็นเชิงเส้นต่อกระแสแบบเป็นเชิงเส้นที่พิกัด

$x$  คือ ค่าคงที่มีค่าเท่ากับ 0.01 สำหรับหม้อแปลงในทางการค้า[28]

$h$  คือ ฮาร์โมนิกลำดับที่  $h$

$I_h$  คือ กระแสฮาร์โมนิกลำดับที่  $h$  (A)

$I_R$  คือ กระแสแบบเป็นเชิงเส้นที่พิกัด (A)

2. อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน ณ สภาวะชั่วขณะ

จากสมการที่ 3.9 สามารถนำมาประยุกต์ในการหาอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน ณ สภาวะชั่วขณะได้ดังสมการที่ 3.11

$$\Delta\Theta_{OK}(t) = \Delta\Theta_{OKi} + (\Delta\Theta_{OK} - \Delta\Theta_{OKi}) \times (1 - e^{-t/\tau}) \quad (3.11)$$

โดยที่

$\Delta\Theta_{OK}$  คือ อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน ณ เวลาเริ่มต้น

$\tau$  คือ ค่าเวลาคงตัวทางความร้อนของน้ำมัน (ชั่วโมง)

3. อุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ที่มากกว่าอุณหภูมิแวดล้อม

จากสมการที่ 3.9 สามารถหาค่าอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุดที่มากกว่าอุณหภูมิแวดล้อมได้ดังสมการที่ 3.12

$$\Delta\Theta_b = \Delta\Theta_{OK}(t) + \Delta\Theta_{hR}(K)^{1.6} \quad (3.12)$$

โดยที่

$\Delta\Theta_{hR}$  คือ อุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุดที่มากกว่าอุณหภูมิน้ำมันด้านบน สามารถหาได้ดังสมการที่ 3.13

$$\Delta\Theta_{hR} = H \times g_r \quad (3.13)$$

โดยที่

$H$  คือ ตัวประกอบจุดร้อนสุด

$g_r$  คือ อุณหภูมิที่แตกต่างระหว่างน้ำมันกับขดลวดที่พิกัดโหลด ( $^{\circ}\text{C}$ )

4. อุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด

จาก[13,14,18,19] อุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุดจะเป็นตัวชี้ถึงอายุการใช้งานของหม้อแปลง ซึ่งถ้าหม้อแปลงมีอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุดสูงจะส่งผลทำให้อายุการใช้งานของหม้อแปลงสั้นลง โดยจะสามารถกล่าวได้ว่าอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด จะแปรผันโดยตรงกับอายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งจะสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 3.14

$$\Theta_{hs} = \Delta\Theta_b + \Theta_a \quad (3.14)$$

โดยที่

$\Theta_a$  คือ อุณหภูมิแวดล้อม ( $^{\circ}\text{C}$ )

### 5. การคาดการณ์อายุการใช้งานของหม้อแปลง

จาก Montsinger [13,14,16] ได้พบว่าช่วงอุณหภูมิระหว่าง 80 °C–140 °C ค่าของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น 6 °C จากอุณหภูมิ 98 °C จะทำให้อายุการใช้งานลดลงครึ่งหนึ่ง และ ทุก ๆ 6 °C ที่ลดลงจากอุณหภูมิ 98 °C จะมีผลทำให้อายุการใช้งานของหม้อแปลงเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าของอายุการใช้งานที่ 98 °C ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 3.15

$$V = \frac{\text{ageing rate at } \Theta_{bs}}{\text{ageing rate at } 98^{\circ}\text{C}} = 2^{(\Theta_{bs} - 98)/6} \quad (3.15)$$

จากสมการของMontsinger[13,14,16] ที่แสดงในสมการที่ 3.13 จะสามารถคำนวณหาอายุการใช้งานที่ลดลงในแต่ละช่วงได้ดังสมการที่ 3.16

$$L = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M V_m \quad (3.16)$$

จากสมการที่ 3.15 และ 3.16 สามารถแสดงความสัมพันธ์ของพิกัดการเสื่อมอายุสัมพัทธ์, พิกัดอายุการใช้งานสัมพัทธ์ กับ อุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุดได้ดังตารางที่ 3.1 [14]

ตารางที่ 3.1 แสดงความสัมพันธ์ของพิกัดการเสื่อมอายุสัมพัทธ์, พิกัดอายุการใช้งานสัมพัทธ์ กับ อุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด

อุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด (°C)	พิกัดการเสื่อมอายุสัมพัทธ์	พิกัดอายุการใช้งานสัมพัทธ์ ( pu )
74	0.0625	16.000
80	0.1250	8.0000
86	0.2500	4.0000
92	0.5000	2.0000
98	1.0000	1.0000
104	2.0000	0.5000
110	4.0000	0.2500
116	8.0000	0.1250
122	16.000	0.0625

### 3.2 การออกแบบซอฟต์แวร์สำหรับทำนายอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เชิงเส้น

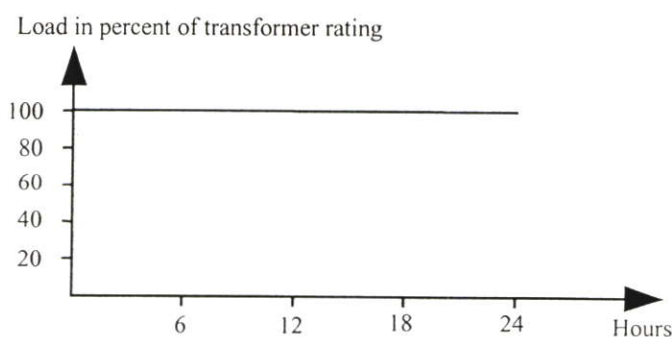
วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการออกแบบซอฟต์แวร์สำหรับทำนายอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เชิงเส้น โดยใช้โปรแกรม Visual Basic 6.0 เป็นเครื่องมือในการออกแบบ ซึ่งสามารถนำเสนอได้ดังรูปที่ 3.4 และสามารถอธิบายถึงการออกแบบซอฟต์แวร์สำหรับทำนายอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เชิงเส้นได้ดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 เป็นการกำหนดข้อมูลเบื้องต้นของหม้อแปลงที่ต้องการทำนายอุณหภูมิ ซึ่งจะได้แก่ ขนาดของหม้อแปลง (kVA), แรงดันทางด้านแรงสูง, แรงดันทางด้านแรงต่ำ, ความต้านทาน  $\theta$  อุณหภูมิอ้างอิง  $75^{\circ}\text{C}$  ของชุดขดลวดทางด้านแรงสูง, ความต้านทาน  $\theta$  อุณหภูมิอ้างอิง  $75^{\circ}\text{C}$  ของชุดขดลวดทางด้านแรงต่ำ, ค่าความสูญเสียขณะไม่มีโหลด, ค่าความสูญเสียขณะมีโหลด  $\theta$  อุณหภูมิอ้างอิง  $75^{\circ}\text{C}$ , กำหนดมาตรฐานที่ต้องการทำนายอุณหภูมิ, จำนวนเฟสของหม้อแปลง, อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน, อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน  $\theta$  เวลาเริ่มต้น, อุณหภูมิเพิ่ม  $\theta$  จุดร้อนสุด, ค่าเวลาคงตัวทางความร้อนของน้ำมัน และ อุณหภูมิแวดล้อม

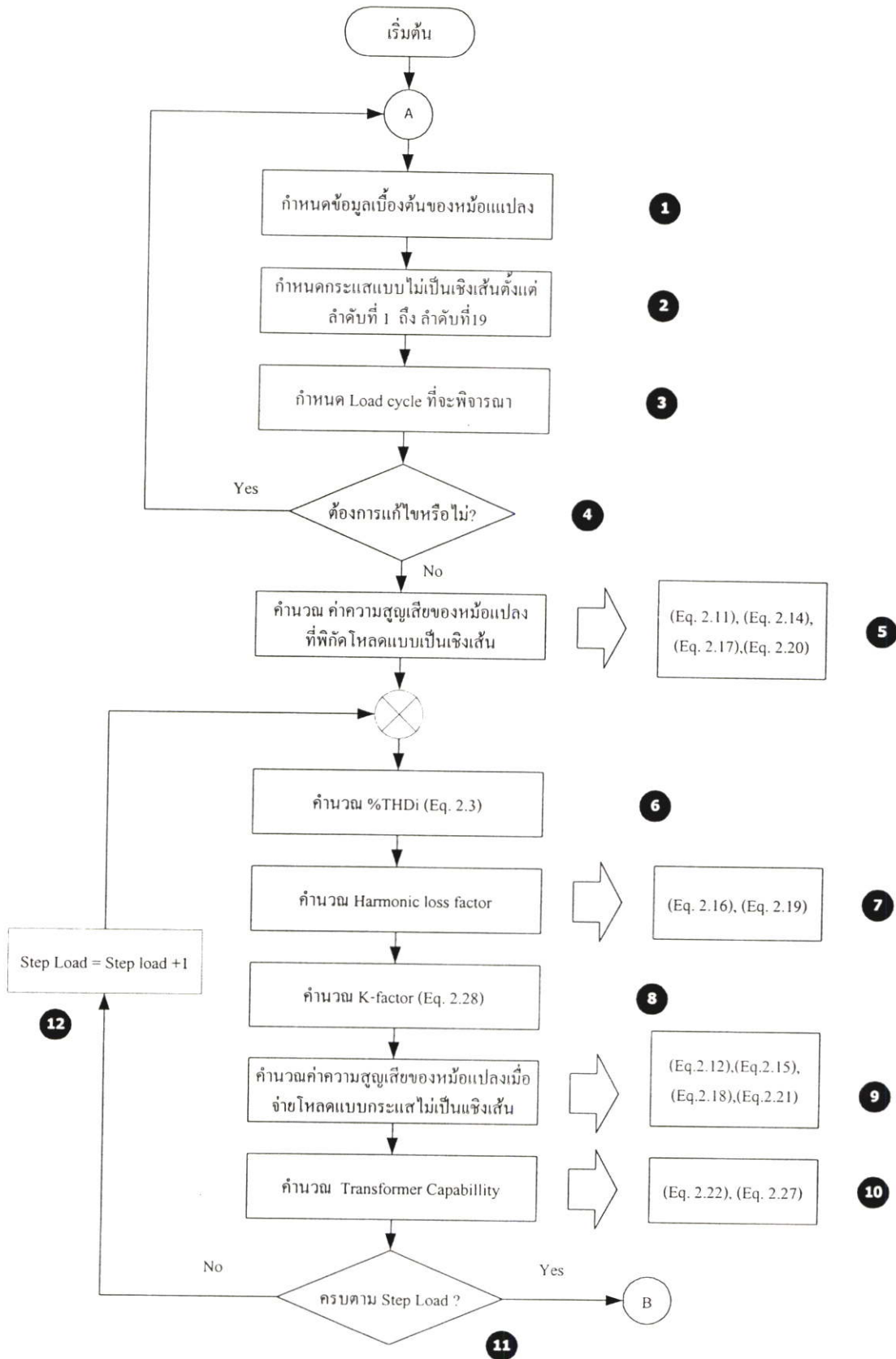
ขั้นตอนที่ 2 เป็นการกำหนดข้อมูลของกระแสแบบไม่เชิงเส้น (Harmonic Current, A) ตั้งแต่ กระแสแบบไม่เชิงเส้นลำดับที่ 1 ถึง ลำดับที่ 19

ขั้นตอนที่ 3 กำหนด Load Cycle ที่ต้องการพิจารณา ซึ่ง Load Cycle ที่กำหนดไว้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะกำหนดมีด้วยกัน 7 รูปแบบ ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

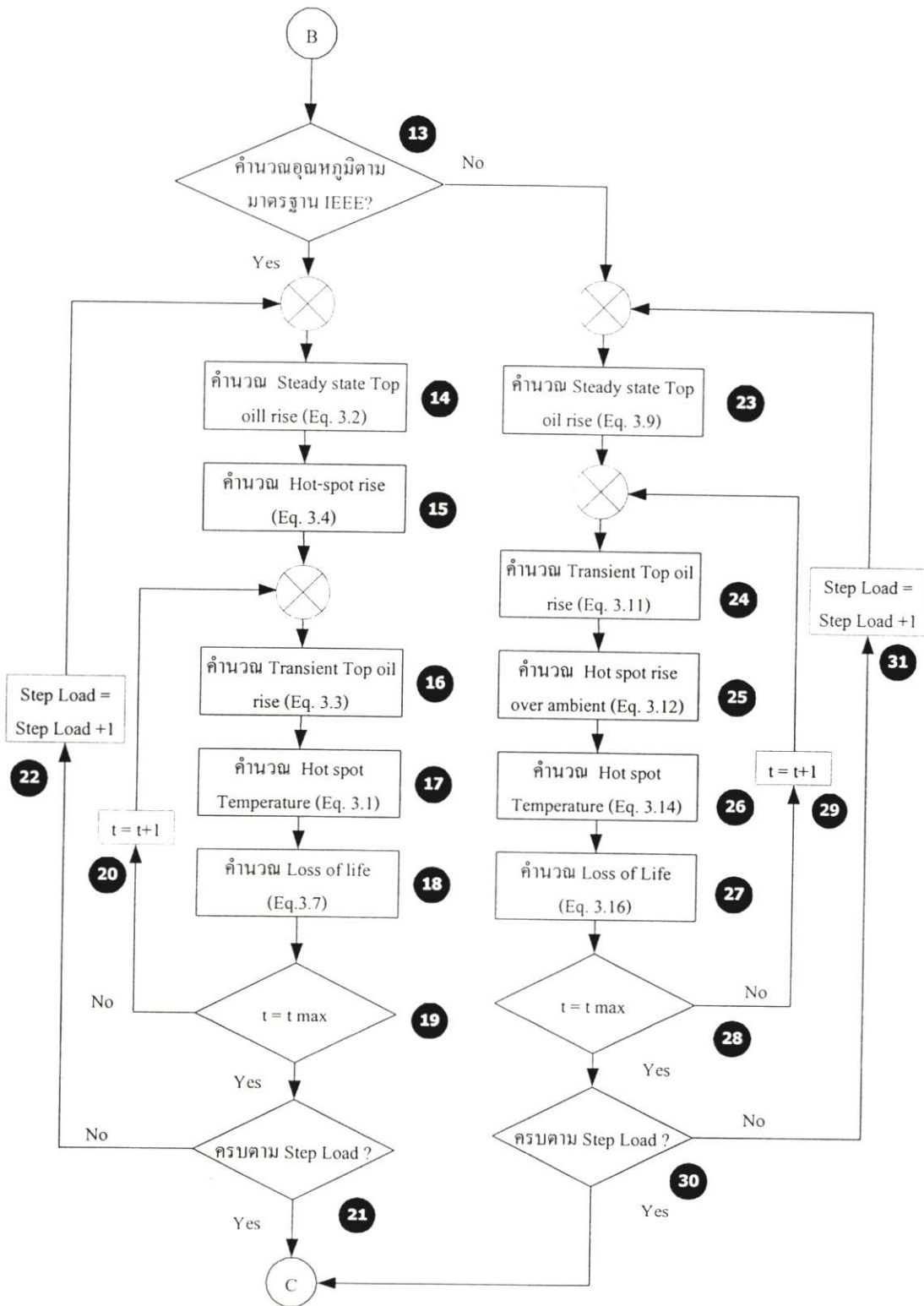
รูปแบบที่ 1 เป็นการจ่ายโหลดคงที่ (Constant Load) ซึ่งจะเป็นการจ่ายโหลดที่มีความคงที่ตลอดเวลาทั้งวัน ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นเป็นตัวอย่างได้ดังรูปที่ 3.3 ซึ่งในแต่ละ Step จะสามารถกำหนดโหลดได้ดังนี้ Linear Load มีค่าเป็น เปอร์เซนต์ของโหลดที่พิกัด, Nonlinear Load มีค่าเป็น เปอร์เซนต์ ของโหลดที่พิกัด และ แต่ละ Step มีเวลาดำเนินการเป็น ชั่วโมง



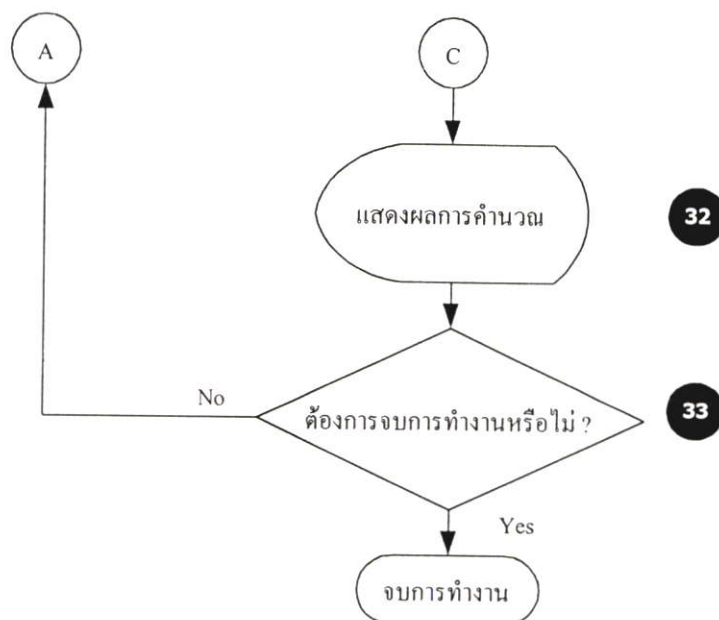
รูปที่ 3.3 แสดง Load cycle แบบ โหลดคงที่



รูปที่ 3.4 แผนภูมิแสดงขั้นตอนในการคำนวณอุณหภูมิ และค่าความสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบกระแสไม่เชิงเส้น ของโปรแกรมทั้งหมด



รูปที่ 3.4(ต่อ) แผนภูมิแสดงขั้นตอนในการคำนวณอุณหภูมิ และค่าความสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบกระแสไม่เชิงเส้น ของโปรแกรมทั้งหมด



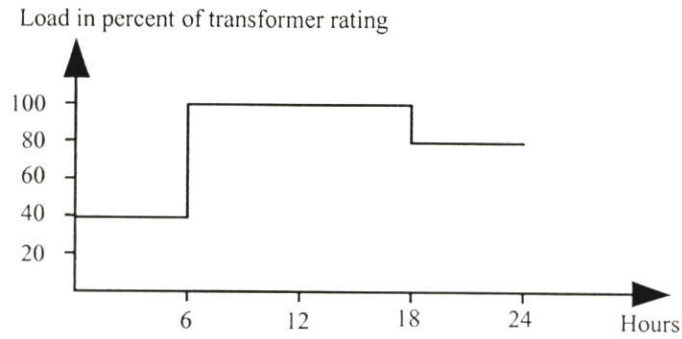
รูปที่ 3.4(ต่อ) แผนภูมิแสดงขั้นตอนในการคำนวณอุณหภูมิ และค่าความสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบกระแสไม่เชิงเส้น ของโปรแกรมทั้งหมด

รูปแบบที่ 2 เป็นการจ่ายโหลดแบบ 2 Step ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นเป็นตัวอย่างได้ดังรูปที่ 3.5 ซึ่งในแต่ละ Step จะสามารถกำหนดโหลดได้ดังนี้ Linear Load มีค่าเป็น เปอร์เซ็นต์ของโหลดที่พิกัด, Nonlinear Load มีค่าเป็น เปอร์เซ็นต์ ของโหลดที่พิกัด และ แต่ละ Step มีเวลาดำเนินการเป็น ชั่วโมง



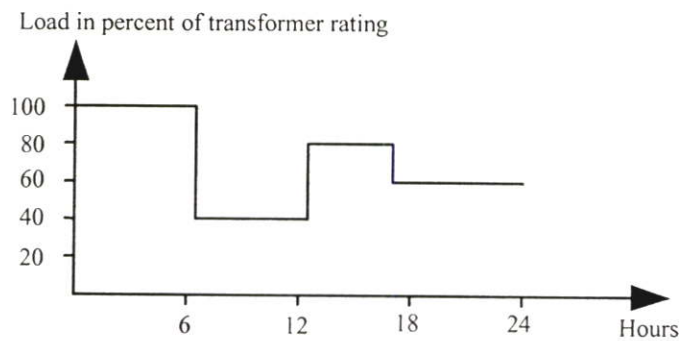
รูปที่ 3.5 แสดง Load cycle แบบ 2 Step

รูปแบบที่ 3 เป็นการจ่ายโหลดแบบ 3 Step ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นเป็นตัวอย่างได้ดังรูปที่ 3.6 ซึ่งในแต่ละ Step จะสามารถกำหนดโหลดได้ดังนี้ Linear Load มีค่าเป็น เปอร์เซ็นต์ของโหลดที่พิกัด, Nonlinear Load มีค่าเป็น เปอร์เซ็นต์ ของโหลดที่พิกัด และ แต่ละ Step มีเวลาดำเนินการเป็น ชั่วโมง



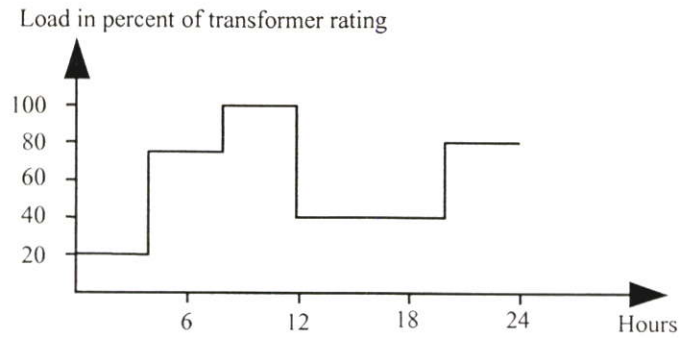
รูปที่ 3.6 แสดง Load cycle แบบ 3 Step

รูปแบบที่ 4 เป็นการจ่ายโหลดแบบ 4 Step ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นเป็นตัวอย่างได้ดังรูปที่ 3.7 ซึ่งในแต่ละ Step จะสามารถกำหนดโหลดได้ดังนี้ Linear Load มีค่าเป็น เปอร์เซ็นต์ของโหลดที่พิกัด, Nonlinear Load มีค่าเป็น เปอร์เซ็นต์ ของโหลดที่พิกัด และ แต่ละ Step มีเวลาดำเนินการเป็น ชั่วโมง



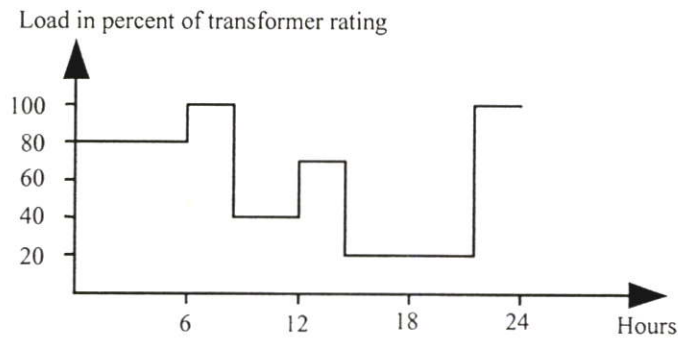
รูปที่ 3.7 แสดง Load cycle แบบ 4 Step

รูปแบบที่ 5 เป็นการจ่ายโหลดแบบ 5 Step ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นเป็นตัวอย่างได้ดังรูปที่ 3.8 ซึ่งในแต่ละ Step จะสามารถกำหนดโหลดได้ดังนี้ Linear Load มีค่าเป็น เปอร์เซ็นต์ของโหลดที่พิกัด, Nonlinear Load มีค่าเป็น เปอร์เซ็นต์ ของโหลดที่พิกัด และ แต่ละ Step มีเวลาดำเนินการเป็น ชั่วโมง



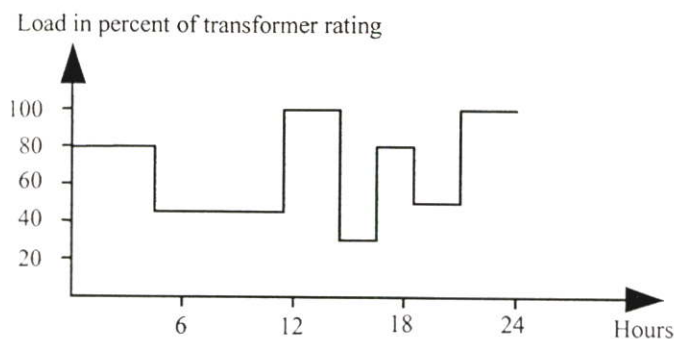
รูปที่ 3.8 แสดง Load cycle แบบ 5 Step

รูปแบบที่ 6 เป็นการจ่ายโหลดแบบ 6 Step ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นเป็นตัวอย่างได้ดังรูปที่ 3.9 ซึ่งในแต่ละ Step จะสามารถกำหนดโหลดได้ดังนี้ Linear Load มีค่าเป็น เปอร์เซ็นต์ของโหลดที่พิกัด, Nonlinear Load มีค่าเป็น เปอร์เซ็นต์ ของโหลดที่พิกัด และ แต่ละ Step มีเวลาดำเนินการเป็น ชั่วโมง



รูปที่ 3.9 แสดง Load cycle แบบ 6 Step

รูปแบบที่ 7 เป็นการจ่ายโหลดแบบ 7 Step ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นเป็นตัวอย่างได้ดังรูปที่ 3.10 ซึ่งในแต่ละ Step จะสามารถกำหนดโหลดได้ดังนี้ Linear Load มีค่าเป็น เปอร์เซ็นต์ของโหลดที่พิกัด, Nonlinear Load มีค่าเป็น เปอร์เซ็นต์ ของโหลดที่พิกัด และ แต่ละ Step มีเวลาดำเนินการเป็น ชั่วโมง



รูปที่ 3.10 แสดง Load cycle แบบ 7 Step

ขั้นตอนที่ 4 เป็นการยืนยัน การป้อนข้อมูล ตั้งแต่ขั้นตอนที่ 1 ถึง ขั้นตอนที่ 3 ซึ่งถ้าต้องการแก้ไขข้อมูลสามารถ กลับไปทำขั้นตอนที่ 1 ถึงขั้นตอนที่ 3 ใหม่ แต่ถ้าไม่ต้องการแก้ไขข้อมูลให้ไปทำต่อในขั้นตอนที่ 5

ขั้นตอนที่ 5 เป็นการคำนวณค่าความสูญเสียของหม้อแปลงที่พิกัดโหลดแบบเป็นเชิงเส้น ตามสมการที่ 2.11, 2.14, 2.17 และ สมการที่ 2.20 เมื่อทำขั้นตอนที่ 5 เสร็จเรียบร้อยแล้วก็ไปทำต่อในขั้นตอนที่ 6

ขั้นตอนที่ 6 เป็นการคำนวณ ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (Total harmonic current distortion ; THD<sub>i</sub>) ตามสมการที่ 2.3 จากนั้นให้ไปทำต่อในขั้นตอนที่ 7

ขั้นตอนที่ 7 เป็นการคำนวณค่า Harmonic loss factor for winding eddy current loss และ Harmonic loss factor for other stray loss ตามสมการที่ 2.16 และ สมการที่ 2.19 จากนั้นให้ไปทำต่อในขั้นตอนที่ 8

ขั้นตอนที่ 8 เป็นการคำนวณค่า K- factor ตามสมการที่ 2.28 จากนั้นให้ไปทำต่อในขั้นตอนที่ 9

ขั้นตอนที่ 9 เป็นการคำนวณค่าความสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้า เมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งจะสามารถแสดงรายละเอียดการคำนวณในหัวข้อที่ 2.4.2 และสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.12, 2.15, 2.18 และ 2.21 จากนั้นให้ไปทำต่อในขั้นตอนที่ 10

ขั้นตอนที่ 10 เป็นการคำนวณความสามารถในการรับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นของหม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer capability when supplying nonlinear load) ซึ่งได้แสดงรายละเอียดในการคำนวณไว้ในหัวข้อที่ 2.6 และสามารถคำนวณได้โดยการใช้สมการที่ 2.22 และสมการที่ 2.27

ขั้นตอนที่ 11 เป็นการเปรียบเทียบค่า Step Load ที่ป้อนให้กับโปรแกรมมีการคำนวณครบแล้วหรือไม่ ถ้าไม่ให้ไปคำนวณในขั้นตอนที่ 12 และถ้าคำนวณครบตาม Step Load ที่ป้อนให้กับโปรแกรมแล้วให้ไปทำต่อในขั้นตอนที่ 13

ขั้นตอนที่ 12 เป็นการเพิ่ม Step Load ให้กับโปรแกรม โดยจะสั่งให้โปรแกรมไปคำนวณใน Step Load ในลำดับถัดไป

ขั้นตอนที่ 13 เป็นการเปรียบเทียบ ค่ามาตรฐานที่ป้อนให้กับหม้อแปลงเพื่อที่จะคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งถ้าเป็นมาตรฐาน IEEE ให้ไปคำนวณต่อในขั้นตอนที่ 14 แต่ถ้าไม่ใช่มาตรฐาน IEEE ให้ไปคำนวณต่อในขั้นตอนที่ 23

ขั้นตอนที่ 14 เป็นการคำนวณค่าอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน ณ สภาวะคงตัว ตามมาตรฐาน IEEE สำหรับ Step Load ที่ป้อนให้กับโปรแกรม ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.2 จากนั้นก็ให้ไปคำนวณต่อในขั้นตอนที่ 15

ขั้นตอนที่ 15 เป็นการคำนวณอุณหภูมิเพิ่ม ณ จุดร้อนสุด ที่มากกว่าอุณหภูมิน้ำมันด้านบน ตามมาตรฐาน IEEE สำหรับ Step Load ที่ป้อนให้กับโปรแกรม ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.4 จากนั้นให้ไปคำนวณต่อในขั้นตอนที่ 16

ขั้นตอนที่ 16 เป็นการคำนวณอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้าน ณ สภาวะชั่วขณะ ตามมาตรฐาน IEEE ในแต่ละชั่วโมง สำหรับ Step Load ที่ป้อนให้กับโปรแกรม ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 3.3 จากนั้นให้ไปคำนวณต่อในขั้นตอนที่ 17

ขั้นตอนที่ 17 เป็นการคำนวณอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ของหม้อแปลงไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE ในแต่ละชั่วโมง ของแต่ละ Step Load ที่ป้อนให้กับโปรแกรม ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 3.1 จากนั้นให้ไปคำนวณต่อในขั้นตอนที่ 18

ขั้นตอนที่ 18 เป็นการคำนวณ การสูญเสียอายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้า ตามมาตรฐาน IEEE ในแต่ละชั่วโมง ของแต่ละ Step Load ที่ป้อนให้กับโปรแกรม ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 3.7 จากนั้นให้ไปเปรียบเทียบจำนวนชั่วโมงที่คำนวณในขั้นตอนที่ 19 ซึ่งถ้าจำนวนชั่วโมงที่คำนวณยังไม่เท่ากับชั่วโมงที่ป้อนให้กับโปรแกรม ให้ไปทำต่อในขั้นตอนที่ 20 แต่ถ้าจำนวนชั่วโมงที่คำนวณมีค่าเท่ากับจำนวนชั่วโมงที่ป้อนให้กับโปรแกรมในแต่ละ Step Load ให้ไปทำต่อในขั้นตอนที่ 32

ขั้นตอนที่ 19 เป็นการเปรียบเทียบ จำนวนชั่วโมงที่คำนวณ กับจำนวนชั่วโมงที่ป้อนให้กับโปรแกรม ว่ามีค่าเท่ากันหรือยัง ซึ่งถ้ายังไม่เท่ากับจำนวนชั่วโมงที่ป้อนให้กับโปรแกรม ให้ไปทำในขั้นตอนที่ 20 ถ้าเท่ากับจำนวนชั่วโมงที่ป้อนให้กับโปรแกรมแล้วให้ไปทำในขั้นตอนที่ 21

ขั้นตอนที่ 20 เป็นการเพิ่มจำนวนชั่วโมงให้โปรแกรม โดยจะเพิ่มจำนวนชั่วโมงอีก 1 ชั่วโมง จากนั้นให้ไปทำต่อในขั้นตอนที่ 16 อีกครั้ง

ขั้นตอนที่ 21 เป็นการเปรียบเทียบการคำนวณว่าครบตาม Step Load ที่ป้อนให้กับโปรแกรมหรือไม่ ถ้าไม่ ให้ไปทำในขั้นตอนที่ 22 และถ้าครบแล้วให้ไปทำต่อในขั้นตอนที่ 32

ขั้นตอนที่ 22 เป็นการเพิ่ม Step Load ให้กับโปรแกรม โดยจะเพิ่ม Step Load ขึ้น ทีละ 1 ค่า จากนั้นให้กลับไปทำการคำนวณในขั้นตอนที่ 14 อีกครั้ง

ขั้นตอนที่ 23 เป็นการคำนวณอุณหภูมิ ณ สภาวะคงตัว สำหรับ Step Load ที่ป้อนให้กับโปรแกรม ตามมาตรฐาน IEC ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 3.9 จากนั้นให้ไปคำนวณต่อในขั้นตอนที่ 24

ขั้นตอนที่ 24 เป็นการคำนวณอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน ณ สภาวะชั่วขณะ ตามมาตรฐาน IEC ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 3.11 จากนั้นให้ไปคำนวณต่อในขั้นตอนที่ 25

ขั้นตอนที่ 25 เป็นการคำนวณ อุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ที่มากกว่าอุณหภูมิแวดล้อม ตามมาตรฐาน IEC ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 3.12 จากนั้นให้ไปคำนวณต่อในขั้นตอนที่ 26

ขั้นตอนที่ 26 เป็นการคำนวณอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ในแต่ละชั่วโมงตามมาตรฐาน IEC ตามสมการที่ 3.14 จากนั้นให้ไปคำนวณต่อในขั้นตอนที่ 27

ขั้นตอนที่ 27 เป็นการคำนวณ การสูญเสียอายุการใช้งาน ตามมาตรฐาน IEC ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 3.16 จากนั้นให้ไปเปรียบเทียบจำนวนชั่วโมงดำเนินการในขั้นตอนที่ 28

ขั้นตอนที่ 28 เป็นการเปรียบเทียบเวลาดำเนินการ กับเวลาดำเนินการที่ป้อนให้กับโปรแกรม ซึ่งถ้าเวลาดำเนินการยังไม่เท่ากับเวลาดำเนินการที่ป้อนให้กับโปรแกรมให้ไปทำต่อในขั้นตอนที่ 29 แต่ถ้าเวลาดำเนินการเท่ากับเวลาดำเนินการที่ป้อนให้กับโปรแกรมให้ไปทำต่อในขั้นตอนที่ 30

ขั้นตอนที่ 29 เป็นการเพิ่มเวลาดำเนินการให้กับโปรแกรม โดยจะเพิ่มขึ้นทีละ 1 ชั่วโมง จากนั้นให้ไปทำต่อในขั้นตอนที่ 24 อีกครั้ง

ขั้นตอนที่ 30 เป็นการเปรียบเทียบ การคำนวณว่าครบตาม Step Load ที่ป้อนให้กับโปรแกรมแล้วหรือไม่ ซึ่งถ้าไม่ให้ไปทำต่อในขั้นตอนที่ 31 และถ้า ครบตาม Step Load ที่ป้อนให้กับโปรแกรมแล้ว ให้ไปทำต่อในขั้นตอนที่ 32

ขั้นตอนที่ 31 เป็นการเพิ่ม Step Load ให้กับโปรแกรม โดยจะเพิ่ม Step Load ขึ้น ทีละ 1 ค่า จากนั้นให้กลับไปทำการคำนวณในขั้นตอนที่ 23 อีกครั้ง

ขั้นตอนที่ 32 แสดงผลการคำนวณ ของโปรแกรมทั้งหมด

ขั้นตอนที่ 33 ต้องการจบการทำงานหรือไม่ ถ้าไม่ให้กลับไป A แล้วทำตามขั้นตอนที่ 1 อีกครั้ง และถ้า ใช่ ก็จบการทำงาน

### 3.3 การพัฒนาโปรแกรมสำหรับทำนายอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า เมื่อจ่ายโหลดแบบกระแฉับไม่เป็นเชิงเส้น

จากแผนภูมิที่แสดงขั้นตอนในการคำนวณของโปรแกรมทั้งหมดที่แสดงในรูปที่ 3.4 นั้น วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำมาพัฒนาเป็น โปรแกรมเพื่อช่วยในการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟ

ฟ้าเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น เพื่อให้เกิดความสะดวกรวดเร็ว และอีกทั้งเป็นการลดอันตรายอันเนื่องมาจากการทดสอบได้ด้วย ซึ่งจะนำเสนอการใช้งานโปรแกรมได้ดังต่อไปนี้

### 1. หน้าต่างสำหรับกำหนดข้อมูลเบื้องต้น

หน้าต่างสำหรับกำหนดข้อมูลเบื้องต้น สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.11, 3.12 และรูปที่ 3.13

รูปที่ 3.11 แสดงหน้าต่างสำหรับป้อนข้อมูลเบื้องต้นของหม้อแปลงไฟฟ้า

จากรูปที่ 3.11 จะมีองค์ประกอบดังนี้

- |           |  |
|-----------|--|
| Accept    | คือ ปุ่มที่คลิกเพื่อสั่งให้โปรแกรมรับข้อมูลที่ป้อนในหน้าต่างสำหรับกำหนดข้อมูลเบื้องต้น |
| Cancel    | คือ ปุ่มที่คลิกเพื่อใช้แก้ไขข้อมูลเบื้องต้นที่ป้อนให้กับโปรแกรม                        |
| Calculate | คือ ปุ่มที่คลิกให้โปรแกรมคำนวณอุณหภูมิ และค่าความสูญเสียของหม้อแปลง                    |
| Reset     | คือ ปุ่มที่คลิกเพื่อต้องการลบข้อมูลที่ป้อนให้กับโปรแกรมในหน้าต่างกำหนดข้อมูลเบื้องต้น  |

**Show result**

คือ ปุ่มที่ใช้สำหรับให้โปรแกรมแสดงผลการทำนายอุณหภูมิ และค่า  
ความสูญเสียทั้งหมด

ภายในหน้าต่างกำหนดข้อมูลเบื้องต้นของหม้อแปลงนี้ผู้ใช้งานจะต้องป้อนข้อมูลเบื้องต้น  
สำหรับทำนายอุณหภูมิและค่าความสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าดังนี้

1. ขนาดของหม้อแปลงไฟฟ้า (Rated Capacity, kVA)
2. แรงดันไฟฟ้าทางด้านแรงสูง (High Voltage, V)
3. แรงดันไฟฟ้าทางด้านแรงต่ำ (Low Voltage, V)
4. ค่าความสูญเสียขณะไม่มีโหลด (No Load Loss, W)
5. ค่าความสูญเสียขณะมีโหลด ณ อุณหภูมิอ้างอิงที่ 75 °C (Load Loss @ 75 °C, W)
6. ค่าความต้านทานของชุดขดลวดทางด้านแรงสูง ต่อ เฟส ณ อุณหภูมิอ้างอิงที่ 75 °C  
(High Voltage winding Resistance per phase @ 75 °C ,  $\Omega$ )
7. เลือกมาตรฐานสำหรับทำนาย (Standard, IEEE or IEC)
8. เลือกเฟสของหม้อแปลง (3  $\emptyset$  or 1  $\emptyset$ )
9. ค่าความต้านทานของชุดขดลวดทางด้านแรงต่ำ ต่อ เฟส ณ อุณหภูมิอ้างอิงที่ 75 °C  
(Low Voltage winding Resistance per phase @ 75 °C ,  $\Omega$ )
10. อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน (Top oil Temperature rise, °C)
11. อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนเริ่มต้น (Initial Top oil Temperature rise, °C)
12. อุณหภูมิเพิ่ม ณ จุดร้อนสุด ที่มากกว่าอุณหภูมิน้ำมันด้านบน (Hot spot temperature  
rise, °C)
13. อุณหภูมิแวดล้อม (Ambient temperature, °C)
14. ค่าเวลาคงตัวทางความร้อน (Thermal time constant, hour)

ข้อมูลของกระแสขาเข้าเป็นเชิงเส้น			ข้อมูลหม้อแปลง		
11	Text1	A	111	Text5	A
13	Text1	A	113	Text1	A
15	Text1	A	115	Text1	A
17	Text2	A	117	Text9	A
19	Text4	A	119	Text9	A

Buttons: Accept, Cancel, Calculate, Reset, Show result

รูปที่ 3.12 แสดงหน้าต่างสำหรับป้อนข้อมูลของกระแสแบบไม่เป็นเชิงเส้น

ภายในหน้าต่างนี้ผู้ใช้งานจะต้องป้อนข้อมูลของกระแสแบบไม่เป็นเชิงเส้นดังนี้

1. กระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ 1 (Current harmonic order 1, A)
2. กระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 (Current harmonic order 3, A)
3. กระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ 5 (Current harmonic order 5, A)
4. กระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ 7 (Current harmonic order 7, A)
5. กระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ 9 (Current harmonic order 9, A)
6. กระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ 11 (Current harmonic order 11, A)
7. กระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ 13 (Current harmonic order 13, A)
8. กระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ 15 (Current harmonic order 15, A)
9. กระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ 17 (Current harmonic order 17, A)
10. กระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ 19 (Current harmonic order 19, A)

รูปที่ 3.13 หน้าต่างสำหรับป้อนข้อมูล Load Cycle สำหรับทำนายอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า

ภายในหน้าต่างนี้ผู้ใช้งานจะต้องทำการป้อนค่าข้อมูลของ Load Cycle ดังต่อไปนี้

1. เลือก Step Load ที่จะทำการพิจารณา ดังนี้
  - 1.1 เลือก Step Load = Constant โปรแกรมจะสั่งให้ป้อน เฉพาะค่า K1 ดังนี้
    - 1.1.1 โหลดแบบเป็นเชิงเส้น (Linear Load, %)
    - 1.1.2 โหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Load, %)
    - 1.1.3 เวลาดำเนินการ (Time, hour)
  - 1.2 เลือก Step Load = 2 โปรแกรมจะสั่งให้ป้อน ค่า K1 และ K2 ดังนี้
    - 1.2.1 ภายใน โหลด K1

- 1.2.1.1 โหลดแบบเป็นเชิงเส้น (Linear Load, %)
- 1.2.1.2 โหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Load, %)
- 1.2.1.3 เวลาดำเนินการ (Time, hour)
- 1.2.2 ภายใน โหลด K2
  - 1.2.2.1 โหลดแบบเป็นเชิงเส้น (Linear Load, %)
  - 1.2.2.2 โหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Load, %)
  - 1.2.2.3 เวลาดำเนินการ (Time, hour)
- 1.3 เลือก Step Load = 3 โปรแกรมจะสั่งให้ป้อน ค่า K1, K2 และ K3 ดังนี้
  - 1.3.1 ภายใน โหลด K1
    - 1.3.1.1 โหลดแบบเป็นเชิงเส้น (Linear Load, %)
    - 1.3.1.2 โหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Load, %)
    - 1.3.1.3 เวลาดำเนินการ (Time, hour)
  - 1.3.2 ภายใน โหลด K2
    - 1.3.2.1 โหลดแบบเป็นเชิงเส้น (Linear Load, %)
    - 1.3.2.2 โหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Load, %)
    - 1.3.2.3 เวลาดำเนินการ (Time, hour)
  - 1.3.3 ภายใน โหลด K3
    - 1.3.3.1 โหลดแบบเป็นเชิงเส้น (Linear Load, %)
    - 1.3.3.2 โหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Load, %)
    - 1.3.3.3 เวลาดำเนินการ (Time, hour)
- 1.4 เลือก Step Load = 4 โปรแกรมจะสั่งให้ป้อน ค่า K1, K2, K3 และ K4 ดังนี้
  - 1.4.1 ภายใน โหลด K1
    - 1.4.1.1 โหลดแบบเป็นเชิงเส้น (Linear Load, %)
    - 1.4.1.2 โหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Load, %)
    - 1.4.1.3 เวลาดำเนินการ (Time, hour)
  - 1.4.2 ภายใน โหลด K2
    - 1.4.2.1 โหลดแบบเป็นเชิงเส้น (Linear Load, %)
    - 1.4.2.2 โหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Load, %)
    - 1.4.2.3 เวลาดำเนินการ (Time, hour)
  - 1.4.3 ภายใน โหลด K3
    - 1.4.3.1 โหลดแบบเป็นเชิงเส้น (Linear Load, %)
    - 1.4.3.2 โหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Load, %)

1.4.3.3 เวลาดำเนินการ (Time, hour)

1.4.4 ภายใน โหลด K4

1.4.4.1 โหลดแบบเป็นเชิงเส้น (Linear Load, %)

1.4.4.2 โหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Load, %)

1.4.4.3 เวลาดำเนินการ (Time, hour)

1.5 เลือก Step Load = 5 โปรแกรมจะสั่งให้ป้อน ค่า K1, K2, K3 ,K4 และ K5 ดังนี้

1.5.1 ภายใน โหลด K1

1.5.1.1 โหลดแบบเป็นเชิงเส้น (Linear Load, %)

1.5.1.2 โหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Load, %)

1.5.1.3 เวลาดำเนินการ (Time, hour)

1.5.2 ภายใน โหลด K2

1.5.2.1 โหลดแบบเป็นเชิงเส้น (Linear Load, %)

1.5.2.2 โหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Load, %)

1.5.2.3 เวลาดำเนินการ (Time, hour)

1.5.3 ภายใน โหลด K3

1.5.3.1 โหลดแบบเป็นเชิงเส้น (Linear Load, %)

1.5.3.2 โหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Load, %)

1.5.3.3 เวลาดำเนินการ (Time, hour)

1.5.4 ภายใน โหลด K4

1.5.4.1 โหลดแบบเป็นเชิงเส้น (Linear Load, %)

1.5.4.2 โหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Load, %)

1.5.4.3 เวลาดำเนินการ (Time, hour)

1.5.5 ภายใน โหลด K5

1.5.5.1 โหลดแบบเป็นเชิงเส้น (Linear Load, %)

1.5.5.2 โหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Load, %)

1.5.5.3 เวลาดำเนินการ (Time, hour)

1.6 เลือก Step Load = 6 โปรแกรมจะสั่งให้ป้อน ค่า K1, K2, K3 ,K4, K5 และK6 ดังนี้

1.6.1 ภายใน โหลด K1

1.6.1.1 โหลดแบบเป็นเชิงเส้น (Linear Load, %)

1.6.1.2 โหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Load, %)

1.6.1.3 เวลาดำเนินการ (Time, hour)

1.6.2 ภายใน โหลด K2

- 1.6.2.1 โหลดแบบเป็นเชิงเส้น (Linear Load, %)
- 1.6.2.2 โหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Load, %)
- 1.6.2.3 เวลาดำเนินการ (Time, hour)
- 1.6.3 ภายใน โหลด K3
  - 1.6.3.1 โหลดแบบเป็นเชิงเส้น (Linear Load, %)
  - 1.6.3.2 โหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Load, %)
  - 1.6.3.3 เวลาดำเนินการ (Time, hour)
- 1.6.4 ภายใน โหลด K4
  - 1.6.4.1 โหลดแบบเป็นเชิงเส้น (Linear Load, %)
  - 1.6.4.2 โหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Load, %)
  - 1.6.4.3 เวลาดำเนินการ (Time, hour)
- 1.6.5 ภายใน โหลด K5
  - 1.6.5.1 โหลดแบบเป็นเชิงเส้น (Linear Load, %)
  - 1.6.5.2 โหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Load, %)
  - 1.6.5.3 เวลาดำเนินการ (Time, hour)
- 1.6.6 ภายใน โหลด K6
  - 1.6.6.1 โหลดแบบเป็นเชิงเส้น (Linear Load, %)
  - 1.6.6.2 โหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Load, %)
  - 1.6.6.3 เวลาดำเนินการ (Time, hour)
- 1.7 เลือก Step Load = 7 โปรแกรมจะสั่งให้ป้อน ค่า K1, K2, K3 , K4, K5,K6 และ K7 ดังนี้
  - 1.7.1 ภายใน โหลด K1
    - 1.7.1.1 โหลดแบบเป็นเชิงเส้น (Linear Load, %)
    - 1.7.1.2 โหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Load, %)
    - 1.7.1.3 เวลาดำเนินการ (Time, hour)
  - 1.7.2 ภายใน โหลด K2
    - 1.7.2.1 โหลดแบบเป็นเชิงเส้น (Linear Load, %)
    - 1.7.2.2 โหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Load, %)
    - 1.7.2.3 เวลาดำเนินการ (Time, hour)
  - 1.7.3 ภายใน โหลด K3
    - 1.7.3.1 โหลดแบบเป็นเชิงเส้น (Linear Load, %)
    - 1.7.3.2 โหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Load, %)

## 1.7.3.3 เวลาดำเนินการ (Time, hour)

## 1.7.4 ภายใน โหลด K4

## 1.7.4.1 โหลดแบบเป็นเชิงเส้น (Linear Load, %)

## 1.7.4.2 โหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Load, %)

## 1.7.4.3 เวลาดำเนินการ (Time, hour)

## 1.7.5 ภายใน โหลด K5

## 1.7.5.1 โหลดแบบเป็นเชิงเส้น (Linear Load, %)

## 1.7.5.2 โหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Load, %)

## 1.7.5.3 เวลาดำเนินการ (Time, hour)

## 1.7.6 ภายใน โหลด K6

## 1.7.6.1 โหลดแบบเป็นเชิงเส้น (Linear Load, %)

## 1.7.6.2 โหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Load, %)

## 1.7.6.3 เวลาดำเนินการ (Time, hour)

## 1.7.7 ภายใน โหลด K7

## 1.7.7.1 โหลดแบบเป็นเชิงเส้น (Linear Load, %)

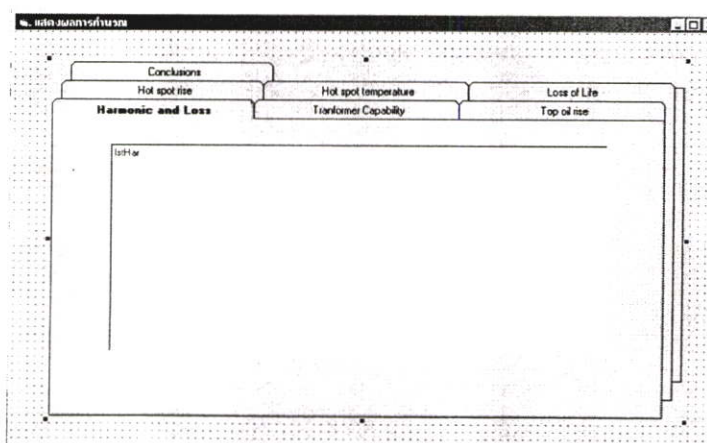
## 1.7.7.2 โหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Load, %)

## 1.7.7.3 เวลาดำเนินการ (Time, hour)

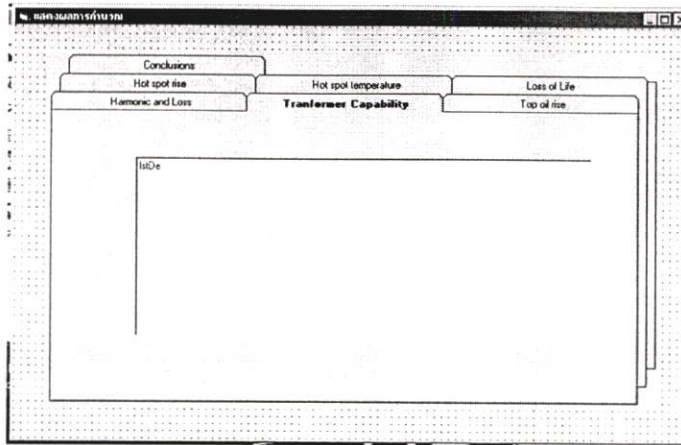
ค่า Linear Load และ ค่า Nonlinear Load ที่ป้อนให้กับ Load Cycle จะต้องป้อนค่าเปอร์เซ็นต์ของโหลดที่พิกัดเท่านั้น

## 2. หน้าต่างสำหรับแสดงผลการทำนาย

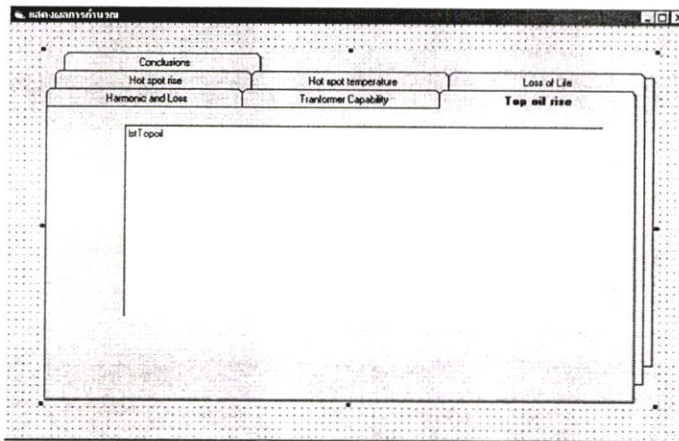
หน้าต่างสำหรับแสดงผลการทำนาย สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.14 ถึง รูปที่ 3.20 ดังนี้



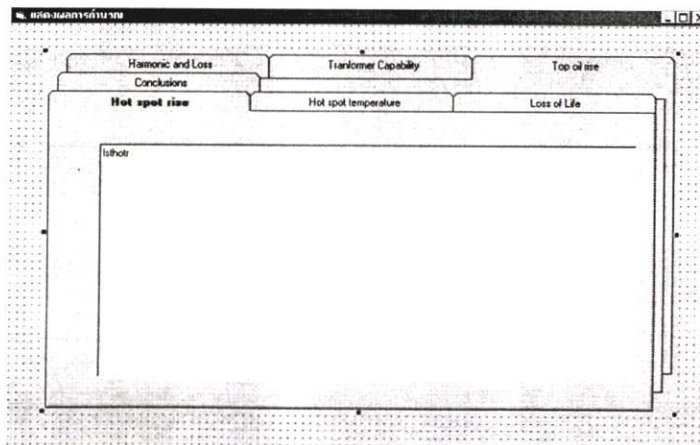
รูปที่ 3.14 แสดงหน้าต่างผลการทำนายค่า Harmonic และ ค่าความสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้า



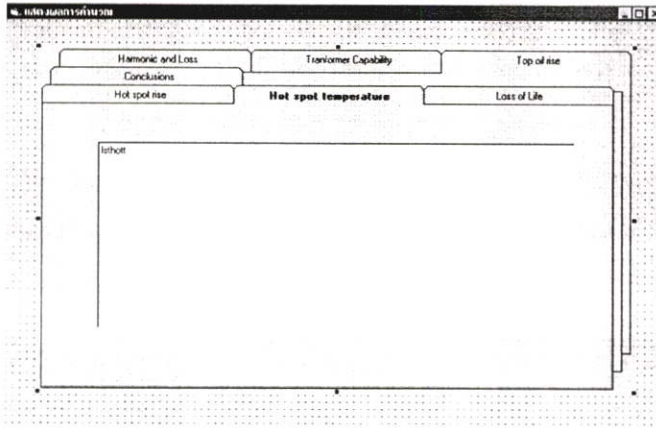
รูปที่ 3.15 แสดงหน้าต่างผลการทำนายค่า Transformer Capability ของหม้อแปลงเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น



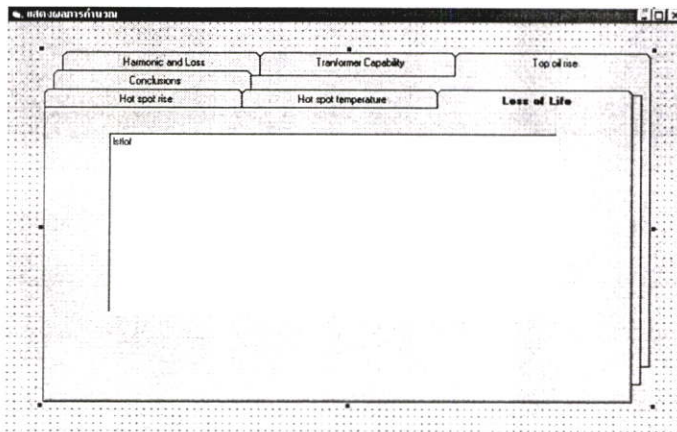
รูปที่ 3.16 แสดงหน้าต่างผลการทำนายค่าอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน ของหม้อแปลงไฟฟ้า



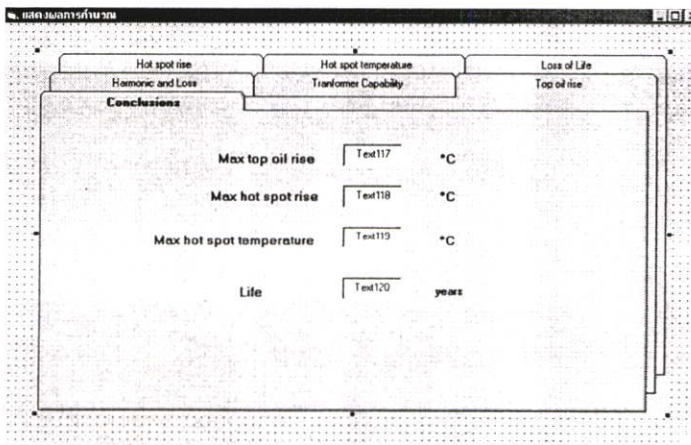
รูปที่ 3.17 แสดงหน้าต่างผลการทำนายค่าอุณหภูมิเพิ่ม ณ จุดร้อนสุด ของหม้อแปลงไฟฟ้า



รูปที่ 3.18 แสดงหน้าต่างผลการทำนายค่าอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ของหม้อแปลงไฟฟ้า



รูปที่ 3.19 แสดงหน้าต่างผลการทำนายค่า การสูญเสียอายุการใช้งาน ของหม้อแปลงไฟฟ้า



รูปที่ 3.20 แสดงหน้าต่างผลการทำนายค่า อุณหภูมิ และอายุการใช้งาน ของหม้อแปลงไฟฟ้า

### 3.4 ตัวอย่างการทดสอบโปรแกรม

หลังจากเขียนโปรแกรมเสร็จแล้วได้ทำการทดสอบโปรแกรมด้วยการนำโปรแกรมมาทำนายอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส 10 กิโลโวลต์แอมป์เมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 100% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 49% และสามารถป้อนค่าข้อมูลสำหรับการทำนายอุณหภูมิและค่าความสูญเสียของหม้อแปลงได้ดังต่อไปนี้

#### 1. ข้อมูลเบื้องต้นที่ป้อนให้กับโปรแกรม

ข้อมูลเบื้องต้นนี้เป็นข้อมูลที่ได้จากการทดสอบที่ทำการทดสอบโดยบริษัทผู้ผลิตหม้อแปลงไฟฟ้าก่อนการส่งมอบหม้อแปลงให้กับลูกค้ามีดังต่อไปนี้

1. Rated capacity = 10 kVA, 3  $\emptyset$
2. High voltage winding
  - Voltage = 380 V
  - Resistance per phase = 0.778  $\Omega$  @ 75 ° C
3. Low voltage winding
  - Voltage = 220 V
  - Resistance per phase = 0.071  $\Omega$  @ 75 ° C
4. No load losses = 77 W
5. Load losses = 350 W @ 75 ° C
6. Top oil temperature rise = 31 ° C
7. Initial top oil temperature = 0 ° C
8. Hot spot temperature rise = 13.5 ° C
9. Ambient temperature = 30 ° C
10. Thermal time constant = 3 Hours

รูปที่ 3.21 แสดงการป้อนข้อมูลเบื้องต้นของหม้อแปลงไฟฟ้า

รูปที่ 3.21 แสดงการป้อนข้อมูลเบื้องต้นของหม้อแปลงไฟฟ้า

## 2. ข้อมูลกระแสฮาร์มอนิกส์ ที่ป้อนให้กับโปรแกรม

ข้อมูลของกระแสฮาร์มอนิกส์ ที่ป้อนให้กับโปรแกรม จะประกอบไปด้วยข้อมูลของกระแสฮาร์มอนิกส์ ที่ได้จากการวัด กระแสฮาร์มอนิกส์ดังนี้

กระแสฮาร์มอนิกส์ ลำดับที่ 1 = 26.24 A

กระแสฮาร์มอนิกส์ ลำดับที่ 3 = 1.12 A

กระแสฮาร์มอนิกส์ ลำดับที่ 5 = 11.86 A

กระแสฮาร์มอนิกส์ ลำดับที่ 7 = 4.19 A

กระแสฮาร์มอนิกส์ ลำดับที่ 9 = 0.23 A

กระแสฮาร์มอนิกส์ ลำดับที่ 11 = 2.17 A

กระแสฮาร์มอนิกส์ ลำดับที่ 13 = 0.81 A

กระแสฮาร์มอนิกส์ ลำดับที่ 15 = 0.10 A

กระแสฮาร์มอนิกส์ ลำดับที่ 17 = 0.97 A

กระแสฮาร์มอนิกส์ ลำดับที่ 19 = 0.34 A

ขั้นตอน	โหลดเชิงเส้น	โหลดไม่เชิงเส้น
11	26.24	A
13	1.12	A
15	11.86	A
17	4.19	A
19	0.73	A
111	2.17	A
113	0.81	A
115	0.10	A
117	0.97	A
119	0.34	A

รูปที่ 3.22 แสดงการป้อนข้อมูลของกระแสฮาร์โมนิกส์ในโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้า

### 3. ข้อมูล Load Cycle ที่ป้อนให้กับโปรแกรม

ข้อมูล Load Cycle ที่ป้อนให้กับโปรแกรมสำหรับกรณีโหลดแบบกระแสไม่เชิงเส้นเพียงอย่างเดียวนี้ จะประกอบไปด้วย

#### 1. Linear Load

โดยที่ Linear Load คือ โหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น = 0 %

#### 2. Nonlinear Load

โดยที่ Nonlinear Load คือ โหลดแบบกระแสไม่เชิงเส้น  
= 100%

#### 3. Time

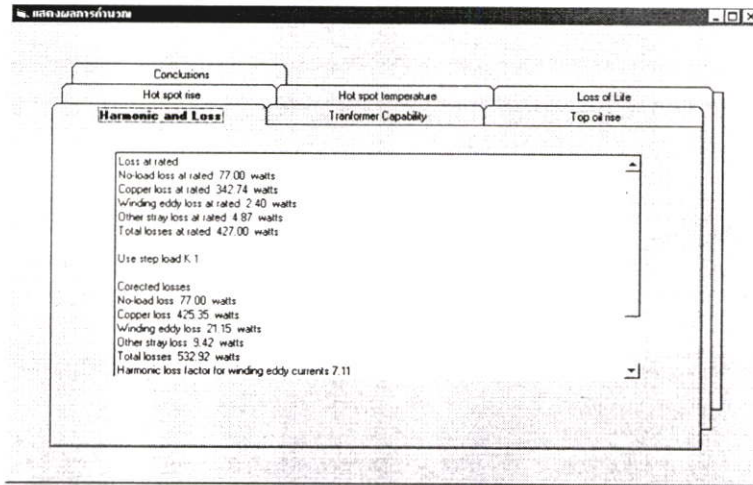
โดยที่ time คือ เวลาดำเนินการ = 10 ชั่วโมง

ขั้นตอน	โหลดเชิงเส้น	โหลดไม่เชิงเส้น	เวลาดำเนินการ (ชั่วโมง)
K1	0	100	10
K2			
K3			
K4			
K5			
K6			
K7			

รูปที่ 3.23 แสดงการป้อนข้อมูล Load Cycle ของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ต้องการทำนายอุณหภูมิ

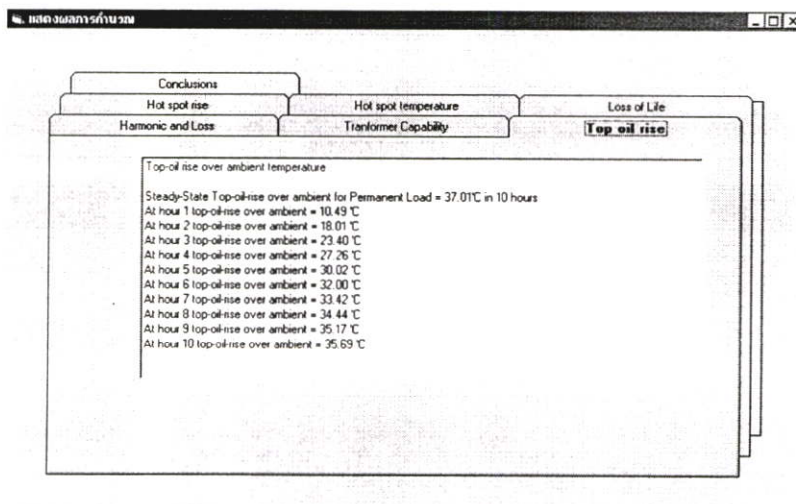
### 3.4.2 แสดงผลการทำนายอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เชิงเส้น

1. แสดงหน้าต่างแสดง ผลการทำนาย ผลของฮาร์มอนิกส์ และ ค่าความสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เชิงเส้น



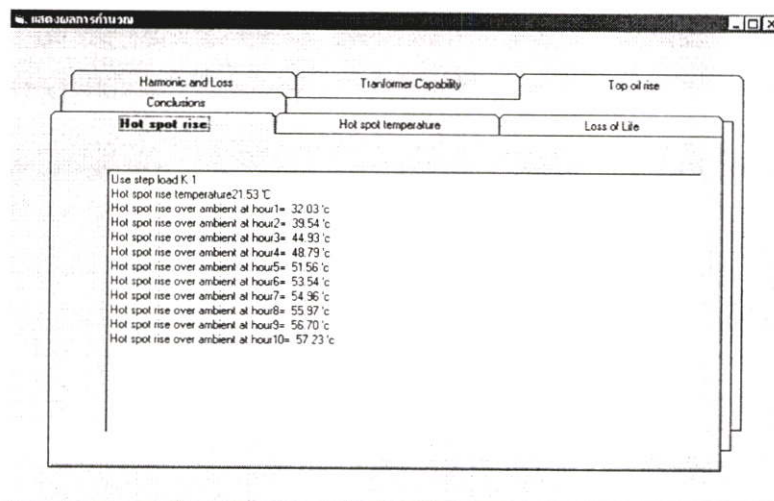
รูปที่ 3.24 แสดงหน้าต่างที่แสดงผลการทำนายผลของฮาร์มอนิกส์และค่าความสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่าย โหลดแบบกระแสไม่เชิงเส้น

2. แสดงหน้าต่างแสดงผลการทำนายอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เชิงเส้น ตามมาตรฐาน IEEE



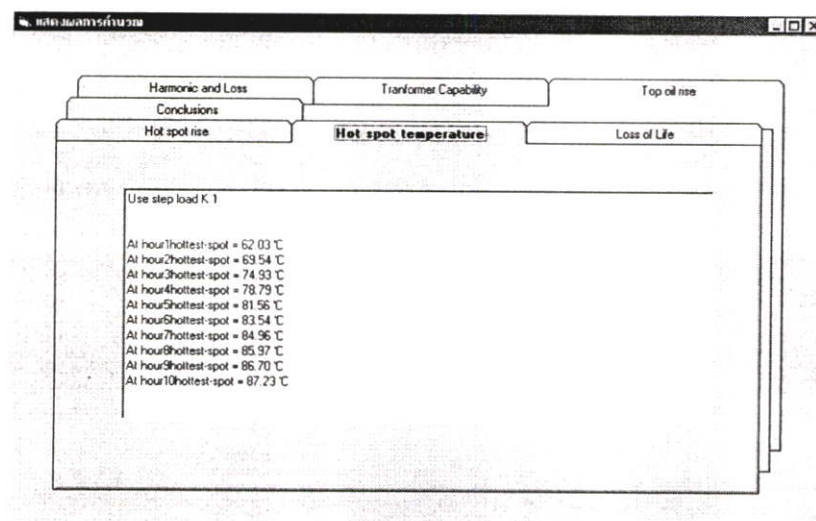
รูปที่ 3.25 แสดงหน้าต่างที่แสดงผลการทำนายอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เชิงเส้น ตามมาตรฐาน IEEE

3. แสดงหน้าต่างแสดงผลการทำนายอุณหภูมิเพิ่ม ณ จุดร้อนสุด ของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น ตามมาตรฐาน IEEE



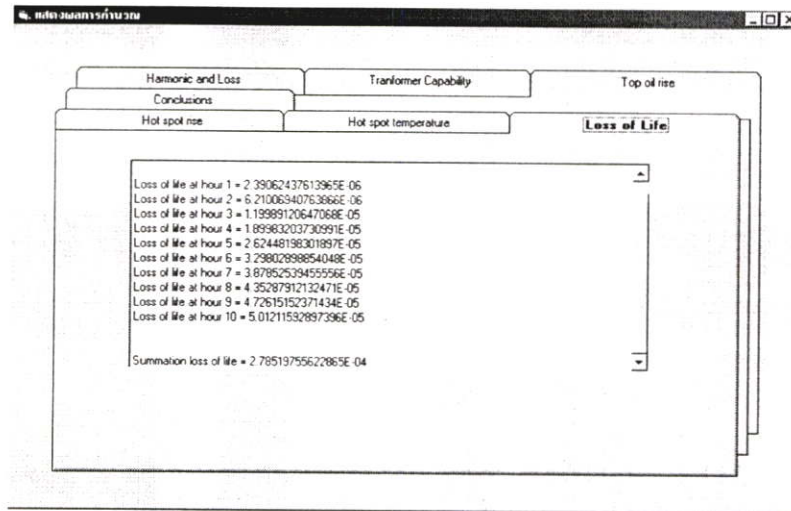
รูปที่ 3.26 แสดงหน้าต่างที่แสดงผลการทำนายอุณหภูมิเพิ่ม ณ จุดร้อนสุด ของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น ตามมาตรฐาน IEEE

4. แสดงหน้าต่างแสดงผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น ตามมาตรฐาน IEEE



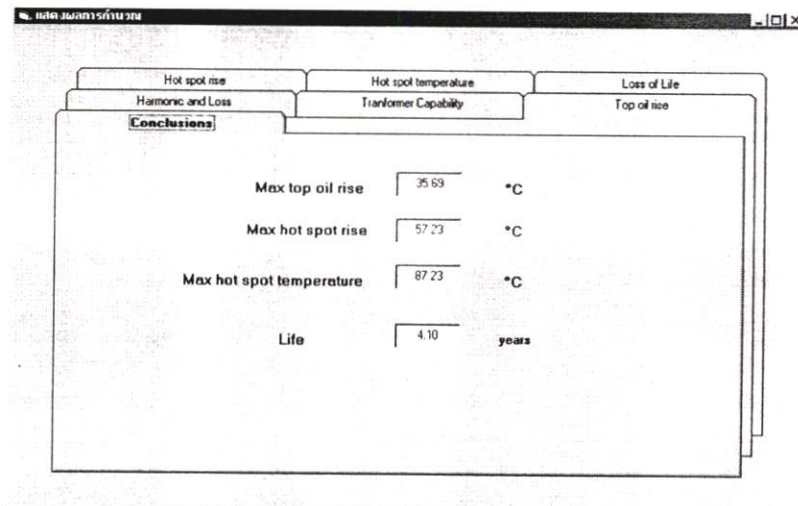
รูปที่ 3.27 แสดงหน้าต่างที่แสดงผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น ตามมาตรฐาน IEEE

5. แสดงหน้าต่างแสดงผลการทำนาย การสูญเสียอายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เชิงเส้น ตามมาตรฐาน IEEE



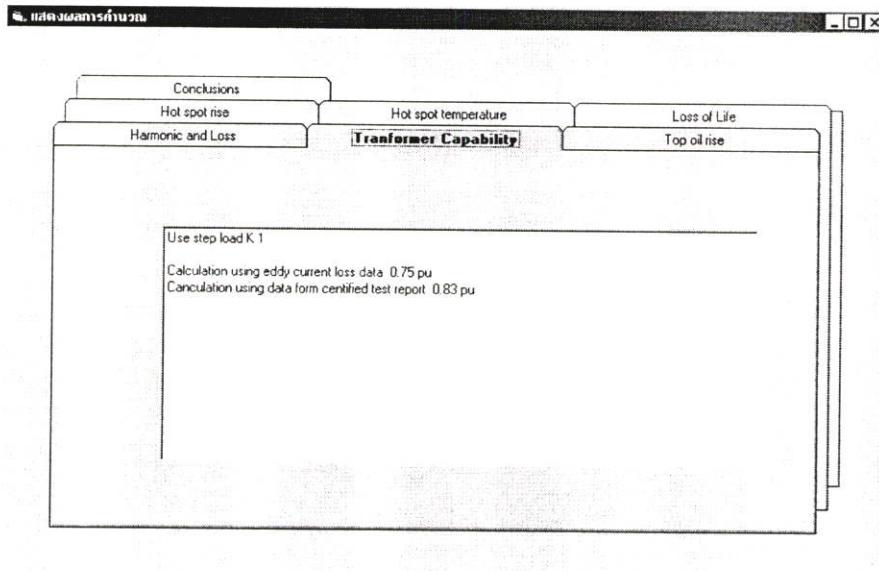
รูปที่ 3.28 แสดงหน้าต่างที่แสดงผลการทำนาย การสูญเสียอายุการใช้งาน ของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เชิงเส้น ตามมาตรฐาน IEEE

6. แสดงหน้าต่างแสดงผลการทำนาย สรุปลมอดหมุุมิที่เกิดขึ้นในหม้อแปลง และ อายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เชิงเส้น ตามมาตรฐาน IEEE



รูปที่ 3.29 แสดงหน้าต่างแสดงผลการทำนาย สรุปลมอดหมุุมิที่เกิดขึ้นในหม้อแปลง และ อายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เชิงเส้น ตามมาตรฐาน IEEE

## 7. หน้าต่างแสดงผลการทำนาย ความสามารถในการรับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นของหม้อแปลงไฟฟ้า



รูปที่ 3.30 แสดงหน้าต่างแสดงผลการทำนาย ความสามารถในการรับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นของหม้อแปลงไฟฟ้า

### 3.5 ผลการทดสอบทำนายอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า

ในหัวข้อนี้ได้นำเสนอการทดลอง ทำนายอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส 10 กิโลโวลต์แอมป์ เมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น แบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส้รวม (THD) 30%, 42.7% และ 49% ที่ได้จากการทดสอบ และ แบบกระแสแบบเป็นเชิงเส้นร่วมกับแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส้รวม (THD) 30%, 42.7% และ 49% ที่ได้จากการทดสอบ ตามลำดับ ดังต่อไปนี้

3.5.1 ผลการทดสอบทำนายอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้นเพียงอย่างเดียว 100%

#### 1. ข้อมูลเบื้องต้นของหม้อแปลงที่ป้อนให้กับโปรแกรม

ข้อมูลเบื้องต้นของหม้อแปลงที่ป้อนให้กับโปรแกรมจะแสดงในหัวข้อที่ 3.4

## 2. ข้อมูลของกระแสฮาร์มอนิกที่ป้อนให้กับโปรแกรม

ข้อมูลเบื้องต้นของกระแสฮาร์มอนิกจะป้อนเฉพาะกระแส  $I_1$  ที่พิกัดเท่านั้น

## 3. ข้อมูล Load Cycle ที่ป้อนให้กับโปรแกรม

ข้อมูล Load Cycle ที่ป้อนให้กับโปรแกรมสำหรับกรณีโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้นเพียงอย่างเดียวนี้ จะประกอบไปด้วย

### 3.1 Linear Load

โดยที่ Linear Load คือ โหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น = 100 %

### 3.2 Nonlinear Load

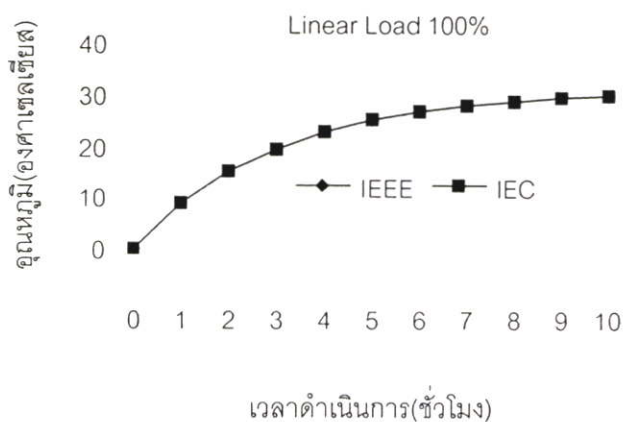
โดยที่ Nonlinear Load คือ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น = 0 %

### 3.3 Time

โดยที่ time คือ เวลาดำเนินการ = 10 ชั่วโมง

## 4. ผลการทำนาย อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน

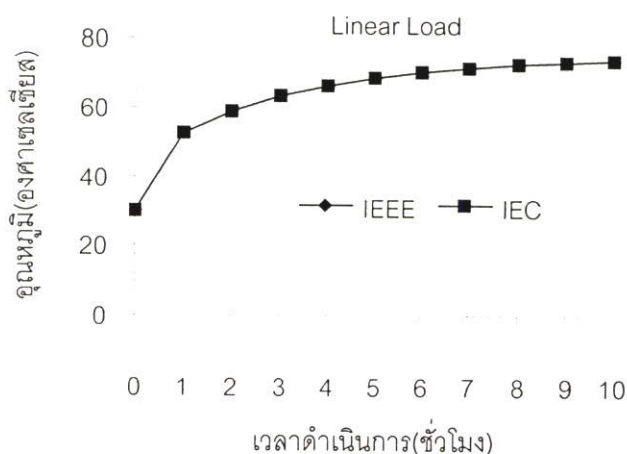
อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนที่ได้จากการทำนาย สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.31 ดังนี้



**รูปที่ 3.31** เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าระหว่างการทำนายด้วยมาตรฐาน IEEE กับ มาตรฐาน IEC เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้นเพียงอย่างเดียว 100% เป็นเวลา 10 ชั่วโมง

## 5. ผลการทำนาย อุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด

อุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ที่ได้จากการทำนาย สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.32 ดังนี้



รูปที่ 3.32 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุดของหม้อแปลงไฟฟ้าระหว่างการทำนายด้วยมาตรฐาน IEEE กับ มาตรฐาน IEC เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้นเพียงอย่างเดียว 100% เป็นเวลา 10 ชั่วโมง

จากรูปที่ 3.31 จะเป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนระหว่างผลการทำนายด้วยมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC พบว่ามีค่าทับกันพอดี ซึ่งจะทำให้สามารถใช้มาตรฐานใดก็ได้ในการทำนายอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน และจากรูปที่ 3.32 จะเป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ระหว่างผลการทำนายด้วยมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC พบว่ามีค่าทับกันพอดี ซึ่งจะทำให้สามารถใช้มาตรฐานใดก็ได้ในการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุดของหม้อแปลงไฟฟ้า

3.5.2 ทดสอบทำนายอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เชิงเส้นเพียงอย่างเดียว 100 % ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 30%, 42.7% และ 49% ทั้งมาตรฐาน IEEE และ มาตรฐาน IEC

1. ข้อมูลกระแสแบบไม่เป็นเชิงเส้นที่ป้อนให้กับ โปรแกรม

ตารางที่ 3.2 แสดงข้อมูลของกระแสแบบไม่เป็นเชิงเส้นที่ได้จากการทดสอบ ที่ป้อนให้กับโปรแกรม

	THD <sub>i</sub> 30%	THD <sub>i</sub> 42.7%	THD <sub>i</sub> 49%
I1(A)	26.24	26.22	26.24
I3(A)	0.07	0.06	1.12
I5(A)	6.12	9.63	11.86
I7(A)	3.17	4.78	4.19
I9(A)	0.1	0.18	0.23
I11(A)	2.99	2.86	2.17
I13(A)	1.67	0.12	0.81
I15(A)	0.05	0.02	0.1
I17(A)	1.62	0.81	0.97
I19(A)	0.31	0.34	0.34

## 2. ข้อมูล Load Cycle ที่ป้อนให้กับโปรแกรม

ข้อมูล Load Cycle ที่ป้อนให้กับโปรแกรมสำหรับกรณีโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้นเพียงอย่างเดียว จะประกอบไปด้วย

### 2.1 Linear Load

โดยที่ Linear Load คือ โหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น = 0 %

### 2.2 Nonlinear Load

โดยที่ Nonlinear Load คือ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น = 100 %

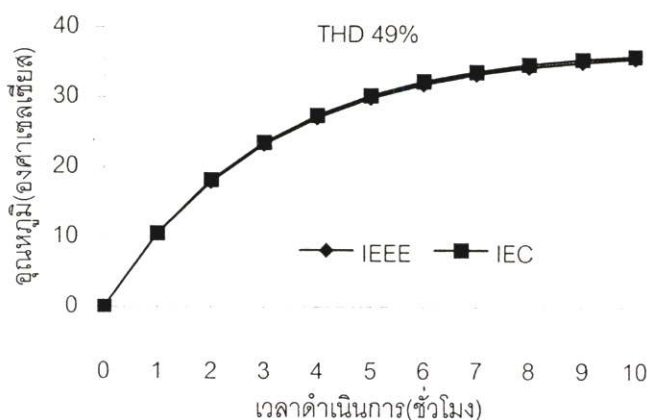
### 3.3 Time

โดยที่ time คือ เวลาดำเนินการ = 10 ชั่วโมง

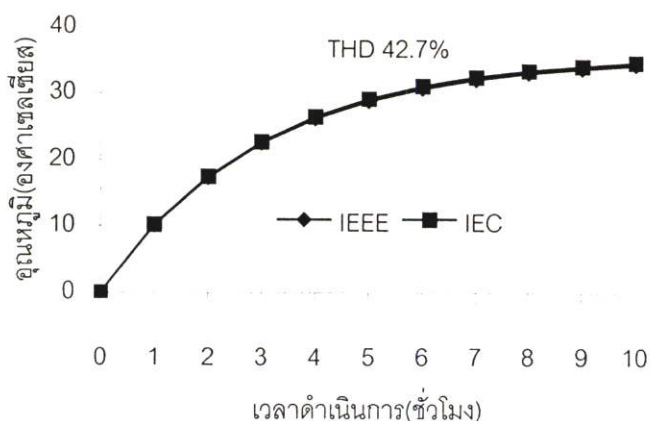
## 3. ผลการทำนาย อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน

อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนที่ได้จากการทำนาย สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.33 ถึง รูปที่ 3.37

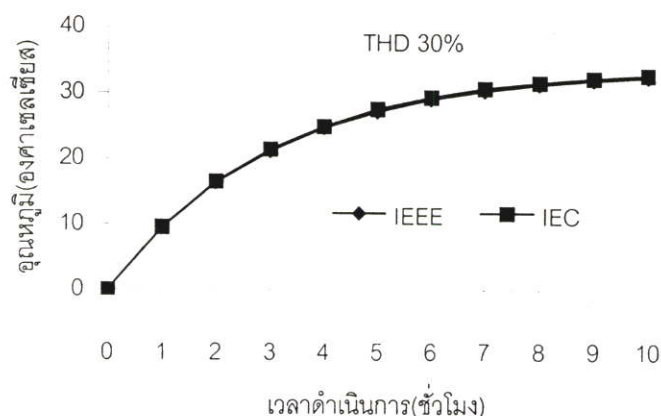
ดังนี้



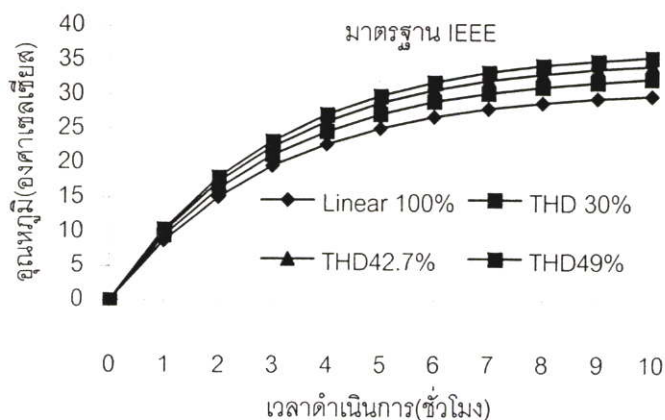
รูปที่ 3.33 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าระหว่างการทำนายด้วยมาตรฐาน IEEE กับ มาตรฐาน IEC เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นเพียงอย่างเดียว 100% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 49 % เป็นเวลา 10 ชั่วโมง



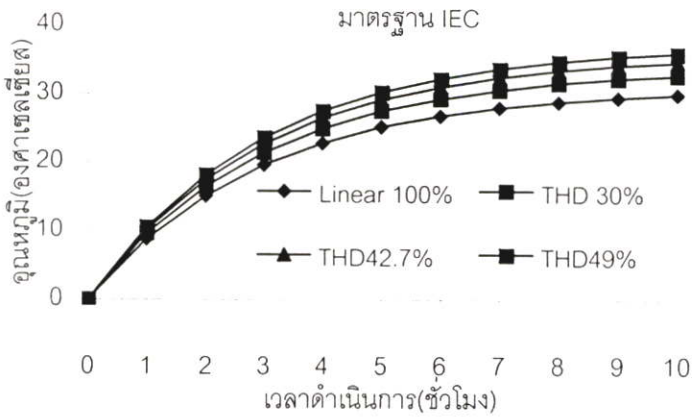
รูปที่ 3.34 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าระหว่างการทำนายด้วยมาตรฐาน IEEE กับ มาตรฐาน IEC เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นเพียงอย่างเดียว 100% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 42.7 % เป็นเวลา 10 ชั่วโมง



รูปที่ 3.35 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าระหว่างการทำนายด้วยมาตรฐาน IEEE กับ มาตรฐาน IEC เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เชิงเส้นเพียงอย่างเดียว 100% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 30 % เป็นเวลา 10 ชั่วโมง



รูปที่ 3.36 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าระหว่างการทำนายด้วยมาตรฐาน IEEE เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้นเพียงอย่างเดียว 100% และแบบกระแสไม่เชิงเส้นเพียงอย่างเดียว 100% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 30% 42.7% และ 49% เป็นเวลา 10 ชั่วโมง

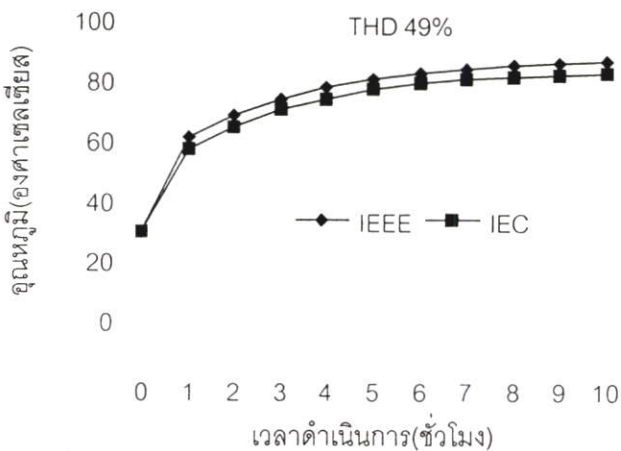


รูปที่ 3.37 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอณุมุมของหม้อแปลงไฟฟ้าระหว่างการทำนายด้วยมาตรฐาน IEC เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้นเพียงอย่างเดียว 100% และแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นเพียงอย่างเดียว 100% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม 30% 42.7% และ 49% เป็นเวลา 10 ชั่วโมง

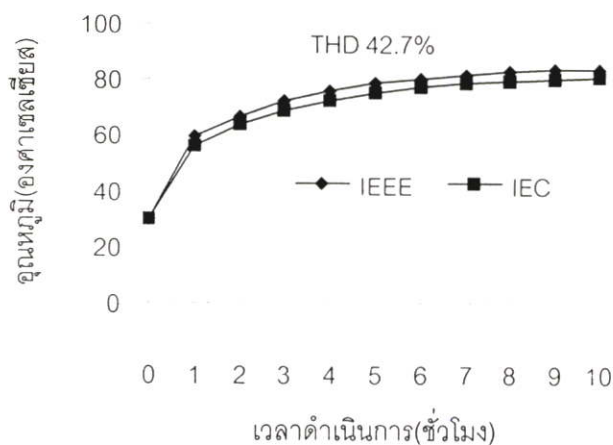
#### 4. ผลการทำนาย อณุมุม ณ จุดร้อนสุด

อณุมุม ณ จุดร้อนสุด ที่ได้จากการทำนาย สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.38 ถึง รูปที่ 3.42 ดัง

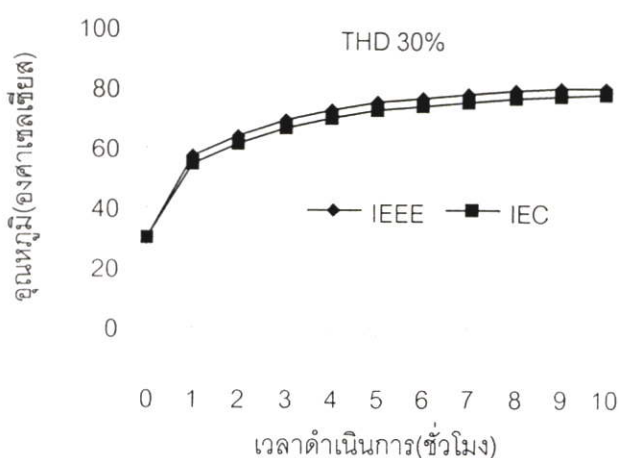
น



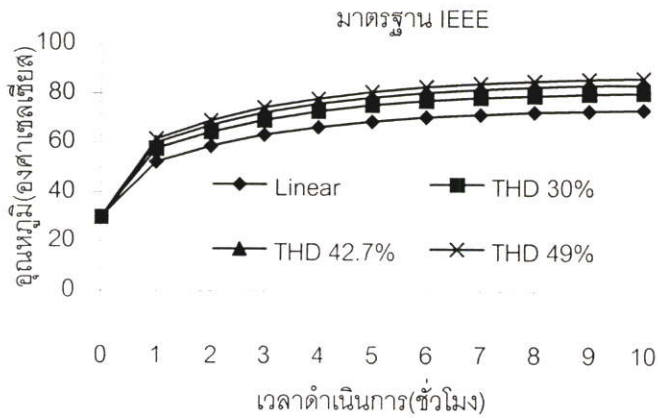
รูปที่ 3.38 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอณุมุม ณ จุดร้อนสุด ของหม้อแปลงไฟฟ้าระหว่างการทำนายด้วยมาตรฐาน IEEE กับ มาตรฐาน IEC เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นเพียงอย่างเดียว 100% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม 49% เป็นเวลา 10 ชั่วโมง



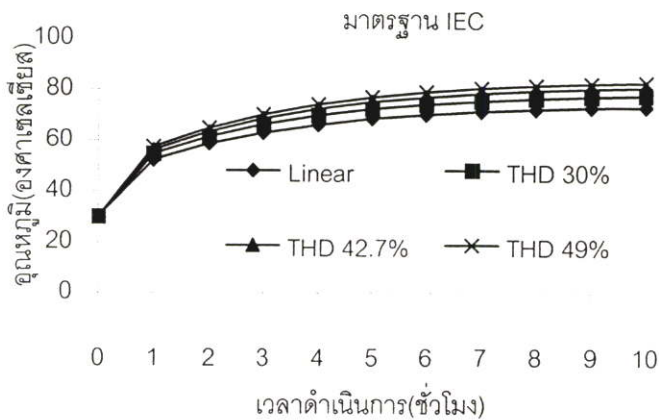
รูปที่ 3.39 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ของหม้อแปลงไฟฟ้าระหว่างการทำนายด้วยมาตรฐาน IEEE กับ มาตรฐาน IEC เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบกระแสไม่ เป็นเชิงเส้นเพียงอย่างเดียว 100% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 42.7% เป็น เวลา 10 ชั่วโมง



รูปที่ 3.40 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ของหม้อแปลงไฟฟ้าระหว่างการทำนายด้วยมาตรฐาน IEEE กับ มาตรฐาน IEC เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบกระแสไม่ เป็นเชิงเส้นเพียงอย่างเดียว 100 % ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 30 % เป็น เวลา 10 ชั่วโมง



รูปที่ 3.41 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ของหม้อแปลงไฟฟ้าระหว่างการทำนายด้วย มาตรฐาน IEEE เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นเพียงอย่างเดียว 100% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม 30% 42.7% และ 49% เป็นเวลา 10 ชั่วโมง



รูปที่ 3.42 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ของหม้อแปลงไฟฟ้าระหว่างการทำนายด้วย มาตรฐาน IEC เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นเพียงอย่างเดียว 100% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม 30% 42.7% และ 49% เป็นเวลา 10 ชั่วโมง

จากรูปที่ 3.33 ,3.34 และรูปที่ 3.35 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน ระหว่างมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันมาก ซึ่งจะทำให้พบว่าสามารถประยุกต์ใช้มาตรฐาน IEC ในการทำนายอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนได้

จากรูปที่ 3.36 และ รูปที่ 3.37 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวมแตกต่างกัน ซึ่งจะพบว่าเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม มากที่สุด (THD<sub>i</sub> 49%) จะส่งผลทำให้อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนสูงที่สุด และจะเป็นทำให้อายุการใช้งานของหม้อแปลงสั้นลงตามไปด้วย

จากรูปที่ 3.38,3.39และรูปที่ 3.40 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุดของหม้อแปลงไฟฟ้า พบว่ามาตรฐาน IEC มีค่ามากกว่ามาตรฐาน IEEE เพียงเล็กน้อยอันเนื่องมาจากการคำนวณ อุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุดที่มากกว่าอุณหภูมิน้ำมันด้านบน ของมาตรฐาน IEC มีค่าน้อยกว่ามาตรฐาน IEEE ดังแสดงในตารางที่ 3.7 ซึ่งจะเป็นผลทำให้อุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุดมีค่าน้อยกว่ามาตรฐาน IEEE ซึ่งการคำนวณ อุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด จะเป็นผลรวมของ อุณหภูมิแวดล้อม อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน และอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุดที่มากกว่าอุณหภูมิน้ำมันด้านบน และจากการที่มาตรฐาน IEC มีค่าอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุดน้อยกว่ามาตรฐาน IEEE จะเป็นผลทำให้การทำนายอายุการใช้งาน ของมาตรฐาน IEC มีค่ามากกว่ามาตรฐาน IEEE ด้วยดังแสดงได้ในรูปที่ 3.93, 3.94 และรูปที่ 3.95

**3.5.3 ผลการทดสอบทำนายเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น และแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 30%, 42.7% และ 49% ทั้งตามมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC**

**3.5.3.1 กรณีจ่ายโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 10% ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 90% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 30%, 42.7% และ 49%**

#### **1. ข้อมูล Load Cycle ที่ป้อนให้กับโปรแกรม**

ข้อมูล Load Cycle ที่ป้อนให้กับโปรแกรมสำหรับกรณีโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้นเพียงอย่างเดียวนี้ จะประกอบไปด้วย

##### 1.1 Linear Load

โดยที่ Linear Load คือ โหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น = 10 %

##### 1.2 Nonlinear Load

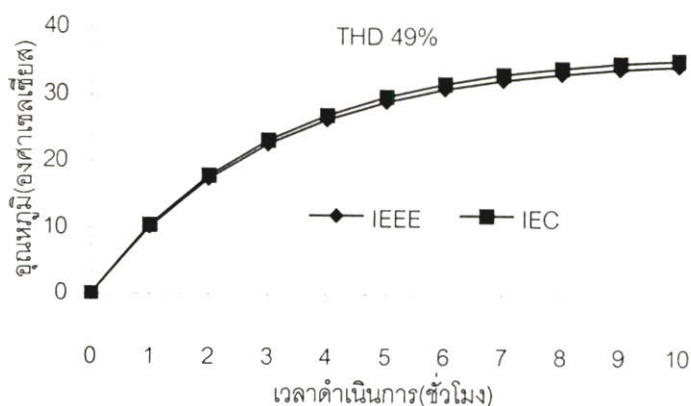
โดยที่ Nonlinear Load คือ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น = 90 %

## 1.3 Time

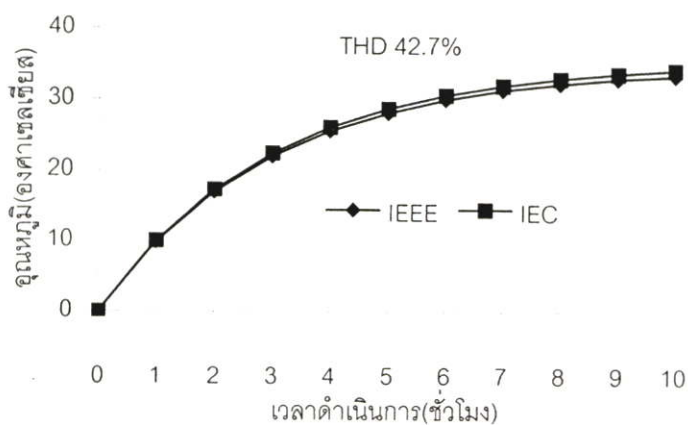
โดยที่ time คือ เวลาดำเนินการ = 10 ชั่วโมง

## 2. ผลการทำนาย อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน

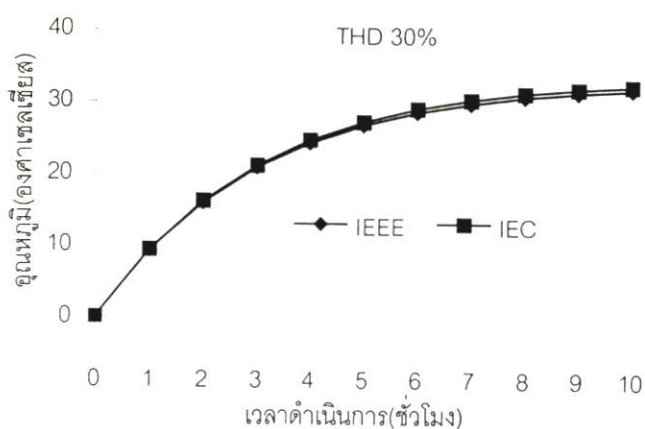
อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนที่ได้จากการทำนาย สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.43 ถึงรูปที่ 3.47 ดังนี้



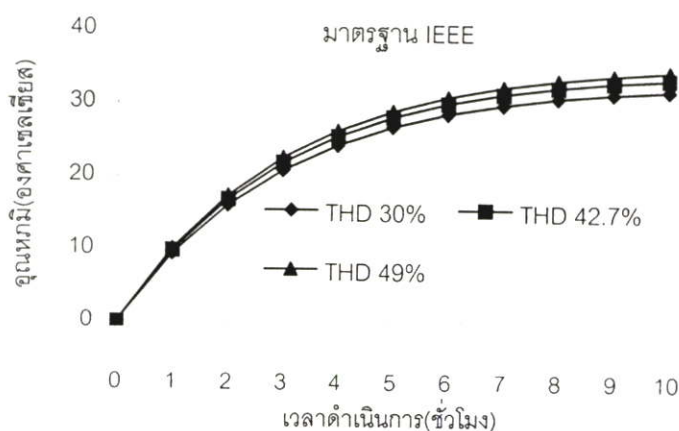
รูปที่ 3.43 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าระหว่างการทำนายด้วยมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC มีหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 10% กับ แบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 90% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 49%เป็นเวลา 10 ชั่วโมง



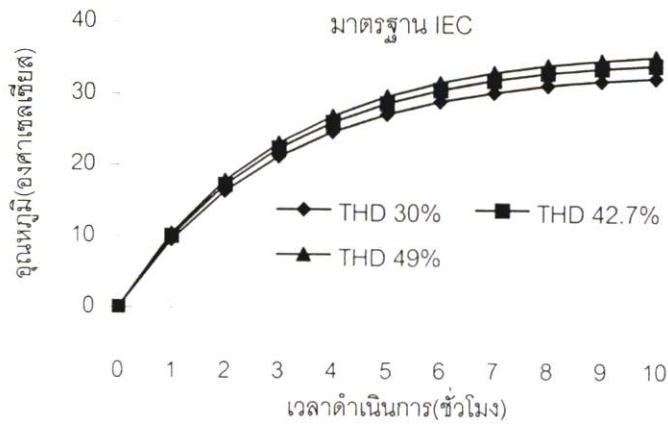
รูปที่ 3.44 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าระหว่างการทำนายด้วยมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC มีหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 10% กับ แบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 90% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 42.7%เป็นเวลา 10 ชั่วโมง



**รูปที่ 3.45** เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าระหว่างการทำนายด้วยมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 10% กับ แบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 90% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 30% เป็นเวลา 10 ชั่วโมง



**รูปที่ 3.46** เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าระหว่างการทำนายด้วยมาตรฐาน IEEE เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้นเพียง 10% และ แบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 90% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 30% 42.7% และ 49% เป็นเวลา 10 ชั่วโมง

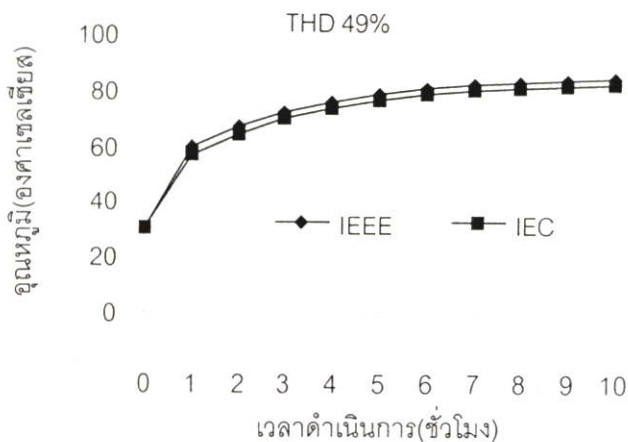


รูปที่ 3.47 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าระหว่างการทำนายด้วยมาตรฐาน IEC เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้นเพียง 10% และ แบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 90% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 30% 42.7% และ 49% เป็นเวลา 10 ชั่วโมง

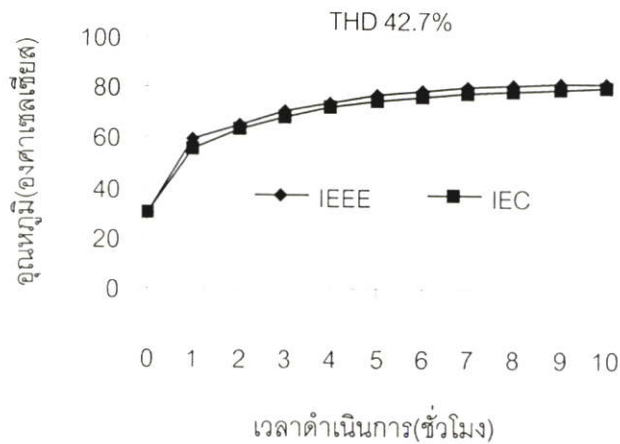
### 3. ผลการทำนาย อุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด

อุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ที่ได้จากการทำนาย สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.48 ถึง รูปที่ 3.52 ดัง

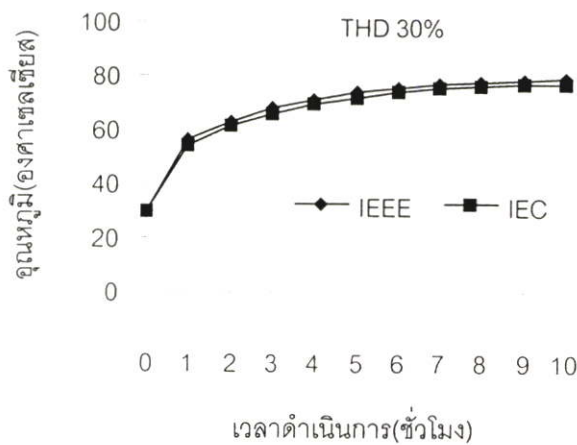
นี้



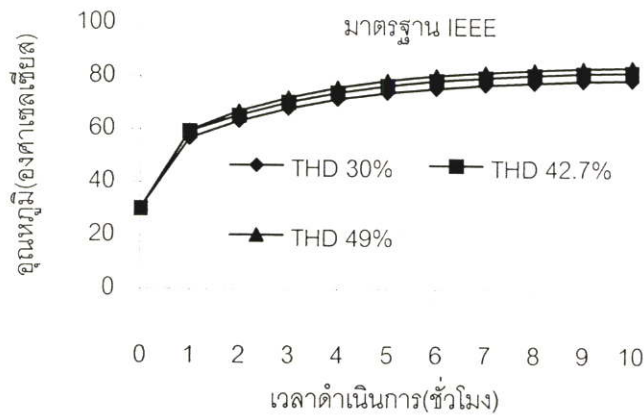
รูปที่ 3.48 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ของหม้อแปลงไฟฟ้าระหว่างการทำนายด้วย มาตรฐาน IEEE และ มาตรฐาน IEC เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 10% กับ แบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 90% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 49% เป็นเวลา 10 ชั่วโมง



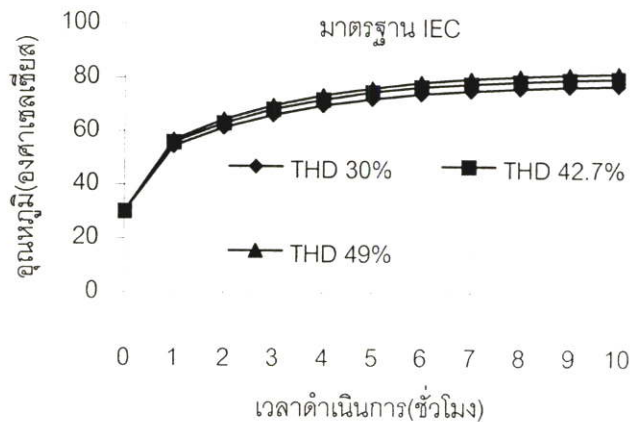
**รูปที่ 3.49** เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ของหม้อแปลงไฟฟ้าระหว่างการทำนายด้วย มาตรฐาน IEEE และ มาตรฐาน IEC เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่าง โหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 10% กับ แบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 90% ที่มีความเพี้ยนของ กระแสฮาร์มอนิกสักรวม 42.7%เป็นเวลา 10 ชั่วโมง



**รูปที่ 3.50** เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ของหม้อแปลงไฟฟ้าระหว่างการทำนายด้วย มาตรฐาน IEEE และ มาตรฐาน IEC เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่าง โหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 10% กับ แบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 90% ที่มีความเพี้ยนของ กระแสฮาร์มอนิกสักรวม 30%เป็นเวลา 10 ชั่วโมง



รูปที่ 3.51 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ของหม้อแปลงไฟฟ้าระหว่างการทำนายด้วย มาตรฐาน IEE เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้นเพียง 10% และแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 90% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 30% 42.7% และ 49% เป็นเวลา 10 ชั่วโมง



รูปที่ 3.52 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ของหม้อแปลงไฟฟ้าระหว่างการทำนายด้วย มาตรฐาน IEC เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้นเพียง 10% และแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 90% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 30% 42.7% และ 49% เป็นเวลา 10 ชั่วโมง

จากรูปที่ 3.43, 3.44 และรูปที่ 3.45 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน ระหว่างมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันมาก ซึ่งจะทำให้พบว่าสามารถประยุกต์ใช้มาตรฐาน IEC ในการทำนายอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนได้

จากรูปที่ 3.46 และ รูปที่ 3.47 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดที่มีความเย็นของกระแสฮาร์มอนิกส์รวมแตกต่างกัน ซึ่งจะพบว่าเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดที่มีความเย็นของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม มากที่สุด (THD<sub>i</sub> 49%) จะส่งผลทำให้ อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนสูงที่สุด และจะเป็นทำให้อายุการใช้งานของหม้อแปลงสั้นลงตามไปด้วย

จากรูปที่ 3.48, 3.49 และรูปที่ 3.50 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุดของหม้อแปลงไฟฟ้า พบว่ามาตรฐาน IEC มีค่ามากกว่ามาตรฐาน IEEE เพียงเล็กน้อยอันเนื่องมาจากการคำนวณ อุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุดที่มากกว่าอุณหภูมิน้ำมันด้านบน ของมาตรฐาน IEC มีค่าน้อยกว่ามาตรฐาน IEEE ดังแสดงในตารางที่ 3.7 ซึ่งจะเป็นผลทำให้อุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุดมีค่าน้อยกว่ามาตรฐาน IEEE ซึ่งการคำนวณ อุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด จะเป็นผลรวมของ อุณหภูมิแวดล้อม อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน และอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุดที่มากกว่าอุณหภูมิน้ำมันด้านบน และจากการที่มาตรฐาน IEC มีค่าอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุดน้อยกว่ามาตรฐาน IEEE จะเป็นผลทำให้การทำนายอายุการใช้งาน ของมาตรฐาน IEC มีค่ามากกว่ามาตรฐาน IEEE ด้วยดังแสดงได้ในรูปที่ 3.93, 3.94 และรูปที่ 3.95

จากรูปที่ 3.51 และรูปที่ 3.52 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุดของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดที่มีความเย็นของกระแสในลักษณะต่าง ๆ กัน ซึ่งจากรูปพบว่าเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดที่มีความเย็นของกระแสฮาร์มอนิกส์รวมสูง ๆ จะส่งผลทำให้อุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุดของหม้อแปลงไฟฟ้าสูงขึ้น และจะเป็นผลทำให้อายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้ามีค่าลดลงตามไปด้วย

**3.5.3.2 กรณีจ่ายโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ที่มีความเย็นของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 30%, 42.7% และ 49%**

### 1. ข้อมูล Load Cycle ที่ป้อนให้กับโปรแกรม

ข้อมูล Load Cycle ที่ป้อนให้กับโปรแกรมสำหรับกรณีโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้นเพียงอย่างเดียวนี้ จะประกอบไปด้วย

### 1.1 Linear Load

โดยที่ Linear Load คือ โหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น = 20 %

### 1.2 Nonlinear Load

โดยที่ Nonlinear Load คือ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น = 80 %

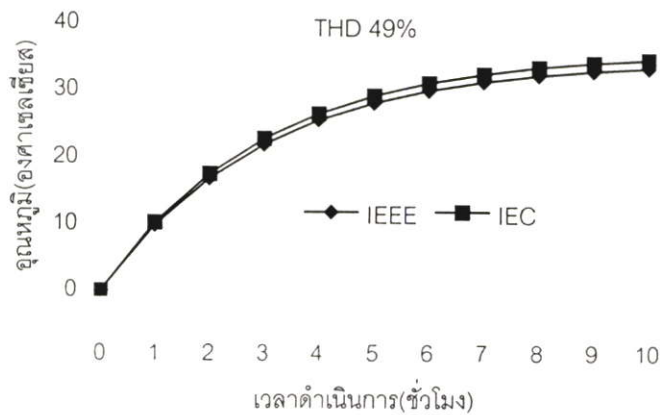
### 1.3 Time

โดยที่ time คือ เวลาดำเนินการ = 10 ชั่วโมง

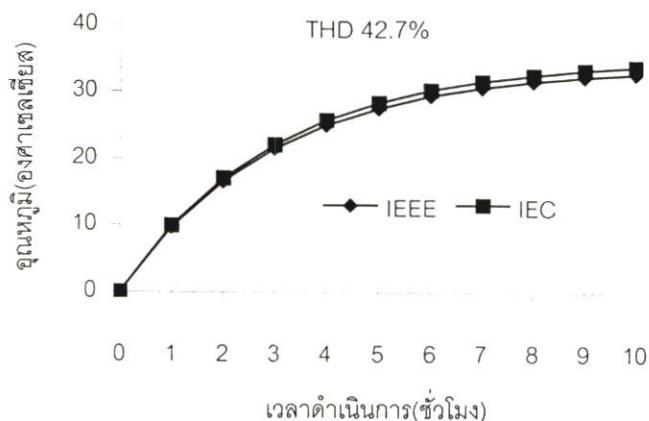
## 2. ผลการทำนาย อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน

อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนที่ได้จากการทำนาย สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.53 ถึง รูปที่

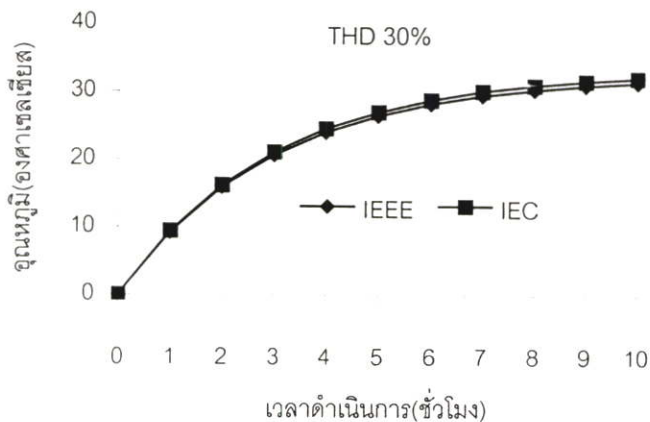
3.57 ดังนี้



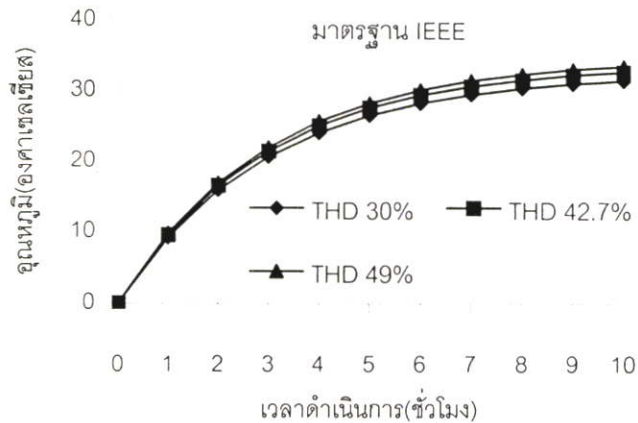
**รูปที่ 3.53** เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า ระหว่างการทำนายด้วยมาตรฐาน IEEE และ มาตรฐาน IEC เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% กับ แบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม 49%เป็นเวลา 10 ชั่วโมง



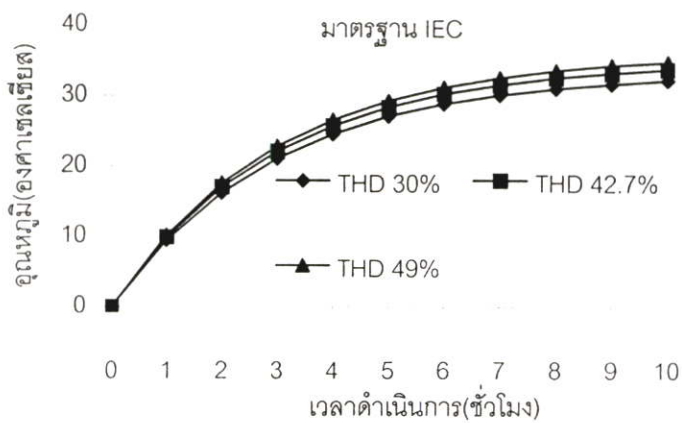
รูปที่ 3.54 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า ระหว่าง การทำนายด้วยมาตรฐาน IEEE และ มาตรฐาน IEC เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดคร่อมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% กับแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม 42.7%เป็นเวลา 10 ชั่วโมง



รูปที่ 3.55 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า ระหว่างการทำนายด้วยมาตรฐาน IEEE และ มาตรฐาน IEC เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดคร่อมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% กับ แบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม 30%เป็นเวลา 10 ชั่วโมง



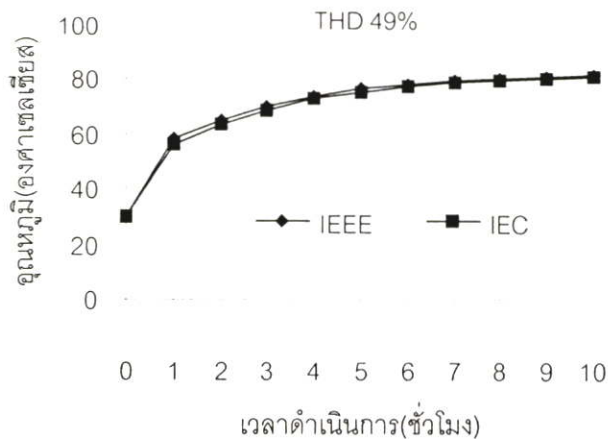
รูปที่ 3.56 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า ระหว่างการทำนายด้วยมาตรฐาน IEEE เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดคร่อมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้นเพียง 20% และแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 30% 42.7% และ 49% เป็นเวลา 10 ชั่วโมง



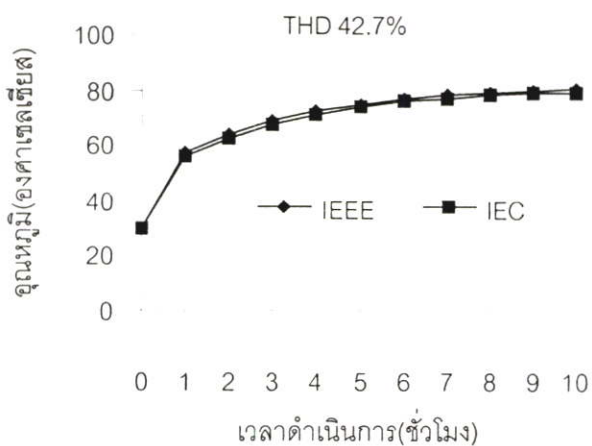
รูปที่ 3.57 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า ระหว่างการทำนายด้วยมาตรฐาน IEC เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดคร่อมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้นเพียง 20% และแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 30% 42.7% และ 49% เป็นเวลา 10 ชั่วโมง

### 3 อุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ที่ได้จากการทำนาย

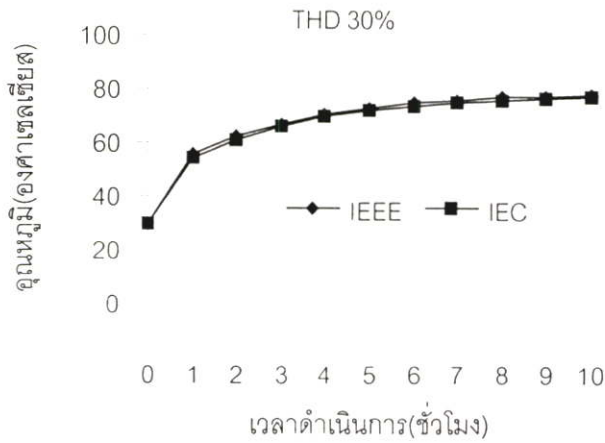
อุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ที่ได้จากการทำนาย สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.58 ถึง รูปที่ 3.62



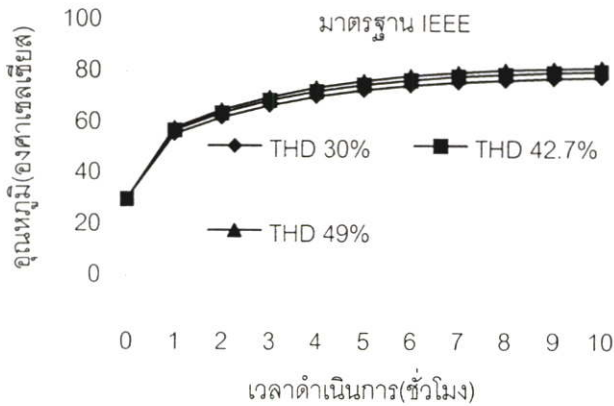
รูปที่ 3.58 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ของหม้อแปลงไฟฟ้าระหว่างการทำนายด้วย มาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่าง โหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% กับ แบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ที่มีความเพี้ยนของ กระแสฮาร์มอนิกส์รวม 49%เป็นเวลา 10 ชั่วโมง



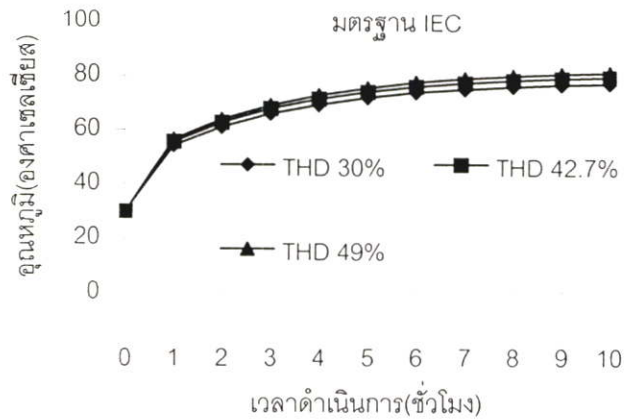
รูปที่ 3.59 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ของหม้อแปลงไฟฟ้าระหว่างการทำนายด้วย มาตรฐาน IEEE และ มาตรฐาน IEC เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่าง โหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% กับ แบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ที่มีความเพี้ยนของ กระแสฮาร์มอนิกส์รวม 42.7%เป็นเวลา 10 ชั่วโมง



**รูปที่ 3.60** เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ของหม้อแปลงไฟฟ้าระหว่างการทำนายด้วย มาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่าง โหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% กับ แบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ที่มีความเพี้ยนของ กระแสฮาร์มอนิกสักรวม 30%เป็นเวลา 10 ชั่วโมง



**รูปที่ 3.61** เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ของหม้อแปลงไฟฟ้าระหว่างการทำนายด้วย มาตรฐาน IEEE เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิง เส้นเพียง 20% และแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสักรวม 30% 42.7% และ 49% เป็นเวลา 10 ชั่วโมง



**รูปที่ 3.62** เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ของหม้อแปลงไฟฟ้าระหว่างการทำนายด้วย มาตรฐาน IEC เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้นเพียง 20% และแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 30% 42.7% และ 49% เป็นเวลา 10 ชั่วโมง

จากรูปที่ 3.53 ,3.54 และรูปที่ 3.55 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน ระหว่างมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันมาก ซึ่งจะทำให้พบว่าสามารถประยุกต์ใช้มาตรฐาน IEC ในการทำนายอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนได้

จากรูปที่ 3.56 และ รูปที่ 3.57 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวมแตกต่างกัน ซึ่งจะพบว่าเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม มากที่สุด (THD<sub>i</sub> 49%) จะส่งผลทำให้ อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนสูงที่สุด และจะเป็นทำให้อายุการใช้งานของหม้อแปลงสั้นลงตามไปด้วย

จากรูปที่ 3.58,3.59และรูปที่ 3.60 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ของหม้อแปลงไฟฟ้า พบว่ามาตรฐาน IEC มีค่ามากกว่ามาตรฐาน IEEE เพียงเล็กน้อยอันเนื่องมาจากการคำนวณ อุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุดที่มากกว่าอุณหภูมิน้ำมันด้านบน ของมาตรฐาน IEC มีค่าน้อยกว่ามาตรฐาน IEEE ดังแสดงในตารางที่ 3.7 ซึ่งจะเป็นผลทำให้อุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุดมีค่าน้อยกว่ามาตรฐาน IEEE ซึ่งการคำนวณ อุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด จะเป็นผลรวมของ อุณหภูมิแวดล้อม อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน และอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุดที่มากกว่าอุณหภูมิน้ำมันด้านบน และจากการที่มาตรฐาน IEC มีค่าอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสตน้อยกว่ามาตรฐาน IEEE จะเป็นผลทำให้การทำนายอายุการใช้งาน ของมาตรฐาน IEC มีค่ามากกว่ามาตรฐาน IEEE ด้วยดังแสดงได้ในรูปที่ 3.93, 3.94 และรูปที่ 3.95

จากรูปที่ 3.61 และรูปที่ 3.62 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุดของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดที่มีความเพี้ยนของกระแสในลักษณะต่าง ๆ กัน ซึ่งจากรูปพบว่าเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวมสูง ๆ จะส่งผลทำให้อุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุดของหม้อแปลงไฟฟ้าสูงขึ้น และจะเป็นผลทำให้อายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้ามีค่าลดลงตามไปด้วย

**3.5.3.3 กรณีจ่ายโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 30% ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 30%, 42.7% และ 49%**

### 1. ข้อมูล Load Cycle ที่ป้อนให้กับโปรแกรม

ข้อมูล Load Cycle ที่ป้อนให้กับโปรแกรมสำหรับกรณีโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้นเพียงอย่างเดียวนี้ จะประกอบไปด้วย

#### 1.1 Linear Load

โดยที่ Linear Load คือ โหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น = 30 %

#### 1.2 Nonlinear Load

โดยที่ Nonlinear Load คือ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น = 70 %

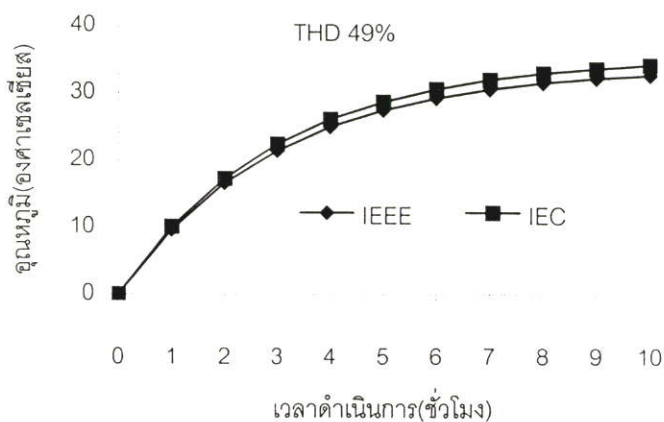
#### 1.3 Time

โดยที่ time คือ เวลาดำเนินการ = 10 ชั่วโมง

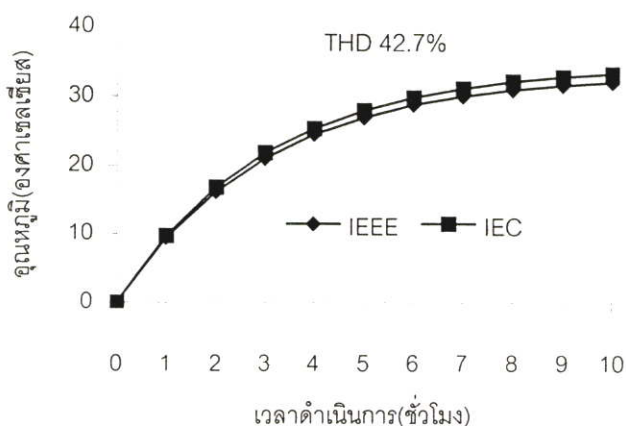
### 2 อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนที่ได้จากการทำนาย

อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนที่ได้จากการทำนาย สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.63 ถึง รูปที่

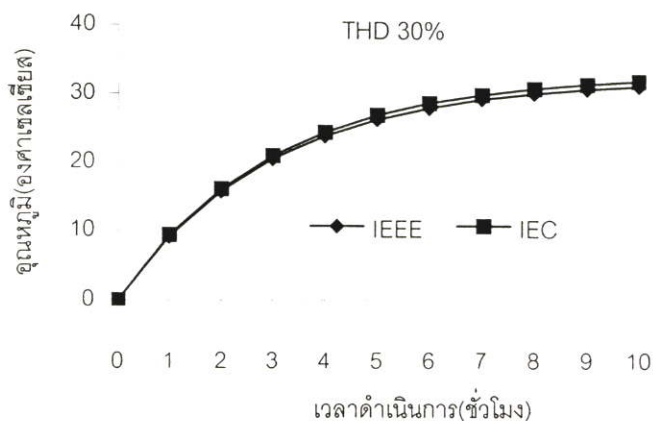
3.67 ดังนี้



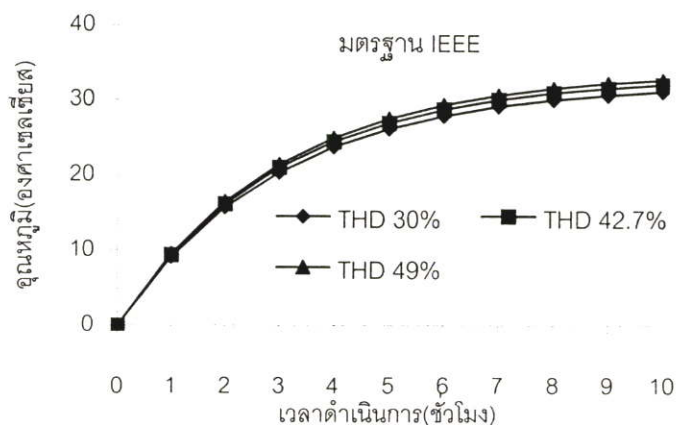
รูปที่ 3.63 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า ระหว่างการทำนายด้วยมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 30% กับ แบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม 49%เป็นเวลา 10 ชั่วโมง



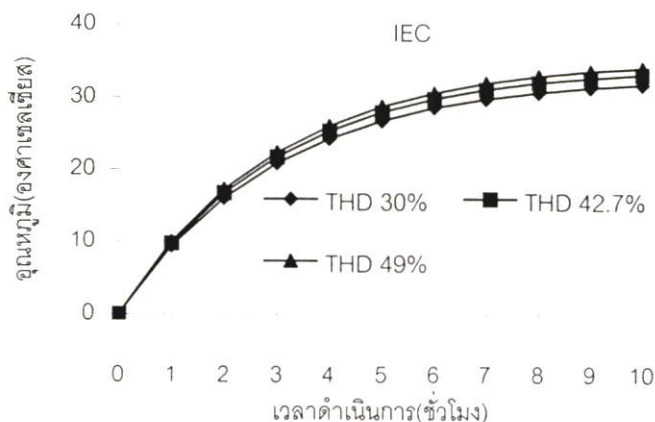
รูปที่ 3.64 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า ระหว่างการทำนายด้วยมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 30% กับ แบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม 42.7%เป็นเวลา 10 ชั่วโมง



**รูปที่ 3.65** เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า ระหว่างการทำนายด้วยมาตรฐาน IEEE และ มาตรฐาน IEC เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 30% กับ แบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม 30% เป็นเวลา 10 ชั่วโมง



**รูปที่ 3.66** เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า ระหว่างการทำนายด้วยมาตรฐาน IEEE เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้นเพียง 30% และแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม 30% 42.7% และ 49% เป็นเวลา 10 ชั่วโมง

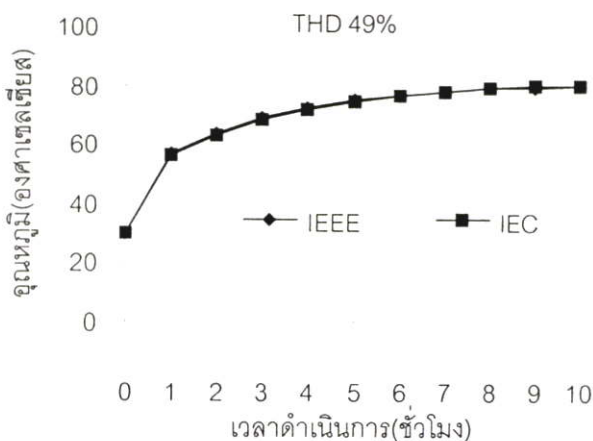


รูปที่ 3.67 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า ระหว่างการทำนายด้วยมาตรฐาน IEC เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้นเพียง 30% และแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 30% 42.7% และ 49% เป็นเวลา 10 ชั่วโมง

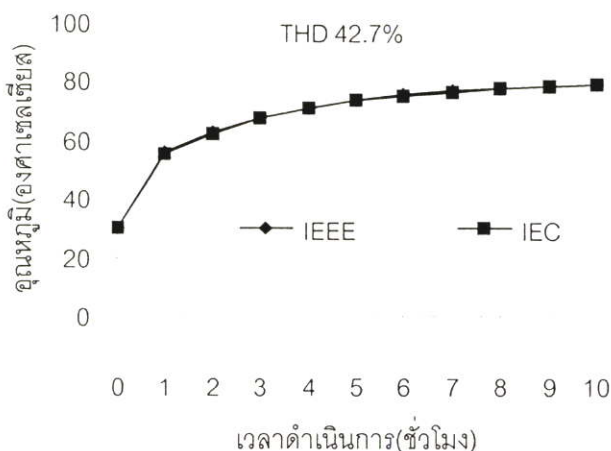
### 3. ผลการทำนาย อุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด

อุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ที่ได้จากการทำนาย สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.68 ถึง รูปที่

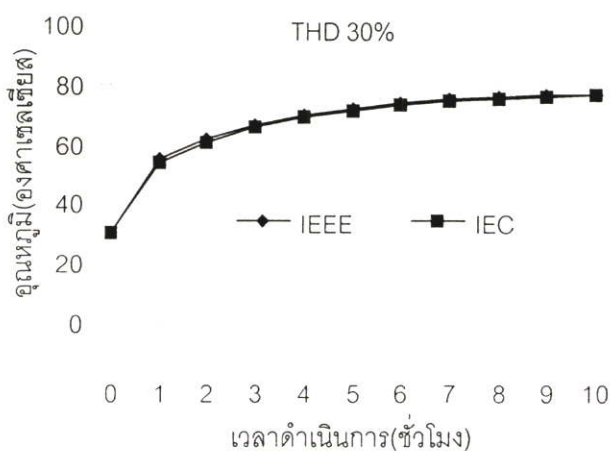
3.72



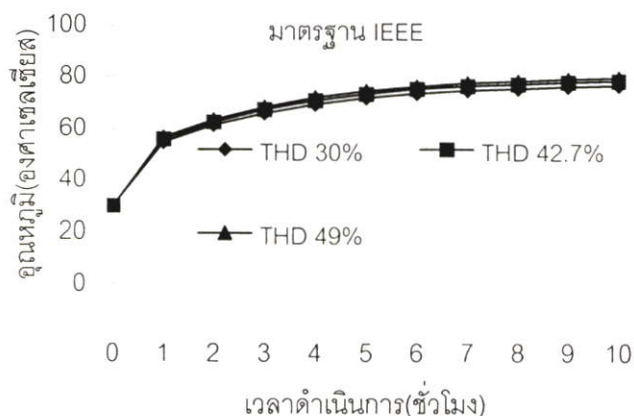
รูปที่ 3.68 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ของหม้อแปลงไฟฟ้า ระหว่างการทำนายด้วย มาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 30% กับ แบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 49%เป็นเวลา 10 ชั่วโมง



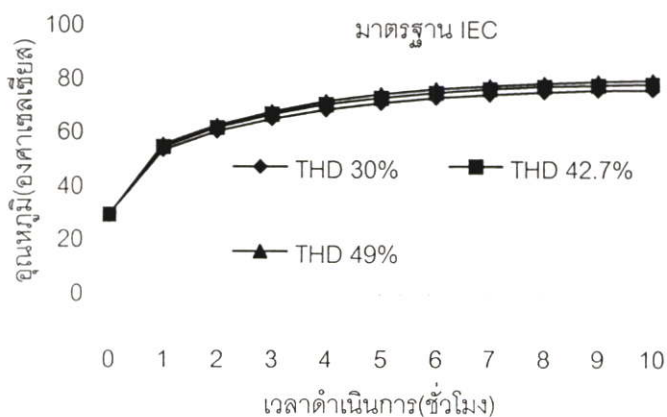
รูปที่ 3.69 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ของหม้อแปลงไฟฟ้า ระหว่างการทำนายด้วย มาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่าง โหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 30% กับ แบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ที่มีความเพี้ยนของ กระแสฮาร์มอนิกส์รวม 42.7% เป็นเวลา 10 ชั่วโมง



รูปที่ 3.70 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ของหม้อแปลงไฟฟ้าระหว่างการทำนายด้วย มาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่าง โหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 30% กับ แบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ที่มีความเพี้ยนของ กระแสฮาร์มอนิกส์รวม 30% เป็นเวลา 10 ชั่วโมง



รูปที่ 3.71 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ของหม้อแปลงไฟฟ้าระหว่างการทำนายด้วย มาตรฐาน IEEE เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้นเพียง 30% และแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 30% 42.7% และ 49% เป็นเวลา 10 ชั่วโมง



รูปที่ 3.72 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ของหม้อแปลงไฟฟ้าระหว่างการทำนายด้วย มาตรฐาน IEC เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้นเพียง 30% และแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 30% 42.7% และ 49% เป็นเวลา 10 ชั่วโมง

รูปที่ 3.63 ,3.64 และรูปที่ 3.65 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนระหว่างมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันมาก ซึ่งจะทำให้พบว่าสามารถประยุกต์ใช้มาตรฐาน IEC ในการทำนายอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนได้

รูปที่ 3.66 และ รูปที่ 3.67 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวมแตกต่างกัน ซึ่งจะพบว่าเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม มากที่สุด (THD<sub>i</sub> 49%) จะส่งผลทำให้อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนสูงที่สุด และจะเป็นทำให้อายุการใช้งานของหม้อแปลงสั้นลงตามไปด้วย

รูปที่ 3.68,3.69และรูปที่ 3.70 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุดของหม้อแปลงไฟฟ้า พบว่ามาตรฐาน IEC มีค่ามากกว่ามาตรฐาน IEEE เพียงเล็กน้อยอันเนื่องมาจากการคำนวณ อุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุดที่มากกว่าอุณหภูมิน้ำมันด้านบน ของมาตรฐาน IEC มีค่าน้อยกว่ามาตรฐาน IEEE ดังแสดงในตารางที่ 3.7 ซึ่งจะเป็นผลทำให้อุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุดมีค่าน้อยกว่ามาตรฐาน IEEE ซึ่งการคำนวณ อุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด จะเป็นผลรวมของ อุณหภูมิแวดล้อม อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน และอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุดที่มากกว่าอุณหภูมิน้ำมันด้านบน และจากการที่มาตรฐาน IEC มีค่าอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสูदन้อยกว่ามาตรฐาน IEEE จะเป็นผลทำให้การทำนายอายุการใช้งาน ของมาตรฐาน IEC มีค่ามากกว่ามาตรฐาน IEEE ด้วยดังแสดงได้ในรูปที่ 3.93, 3.94 และรูปที่ 3.95

รูปที่ 3.71 และรูปที่ 3.72 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุดของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดที่มีความเพี้ยนของกระแสในลักษณะต่าง ๆ กัน ซึ่งจากรูปพบว่าเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวมสูง ๆ จะส่งผลทำให้อุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุดของหม้อแปลงไฟฟ้าสูงขึ้น และจะเป็นผลทำให้อายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้ามีค่าลดลงตามไปด้วย

**3.5.3.4 กรณีจ่ายโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม 30%, 42.7% และ 49%**

#### 1. ข้อมูล Load Cycle ที่ป้อนให้กับโปรแกรม

ข้อมูล Load Cycle ที่ป้อนให้กับโปรแกรมสำหรับกรณี โหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้นเพียงอย่างเดียวนี้ จะประกอบไปด้วย

### 1.1 Linear Load

โดยที่ Linear Load คือ โหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น = 40 %

### 1.2 Nonlinear Load

โดยที่ Nonlinear Load คือ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น = 60 %

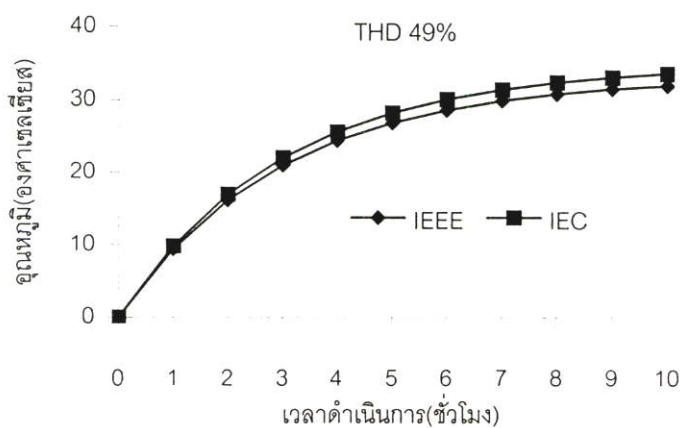
### 1.3 Time

โดยที่ time คือ เวลาดำเนินการ = 10 ชั่วโมง

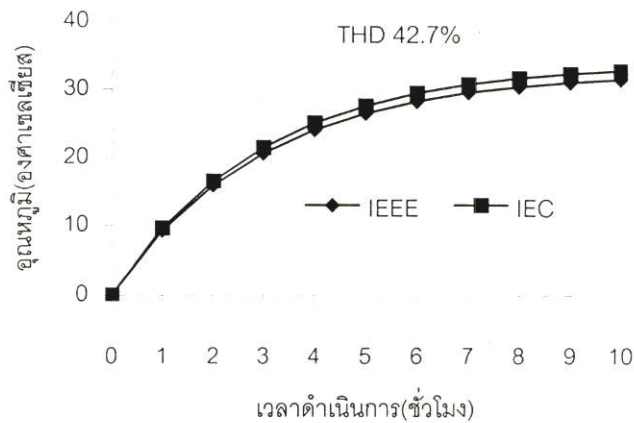
## 2. ผลการทำนาย อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน

อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนที่ได้จากการทำนาย สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.73 ถึง รูปที่

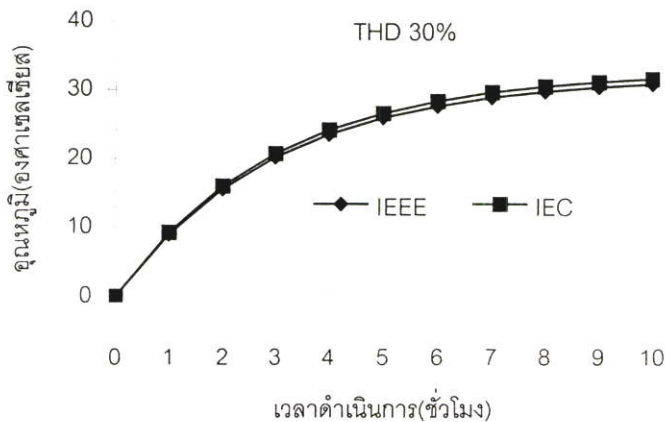
3.77 ดังนี้



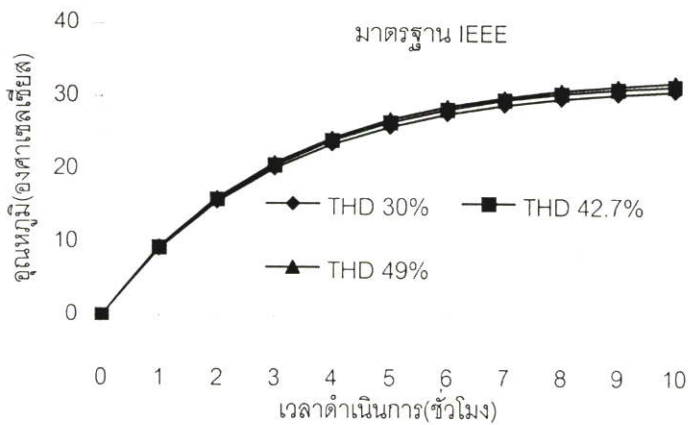
รูปที่ 3.73 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า ระหว่างการทำนายด้วยมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% กับ แบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม 49%เป็นเวลา 10 ชั่วโมง



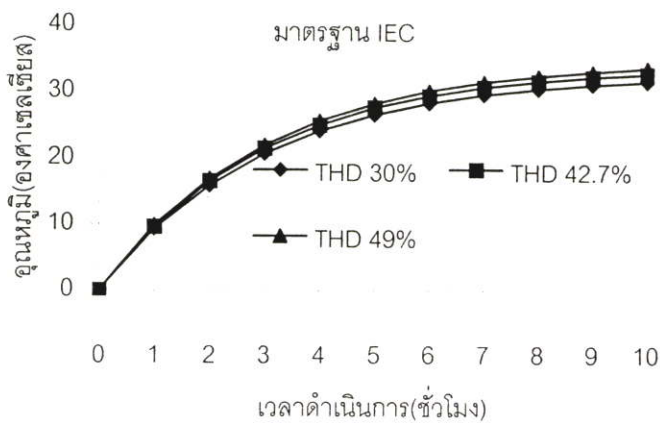
รูปที่ 3.74 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า ระหว่างการทำนายด้วยมาตรฐาน IEEE และ มาตรฐาน IEC เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% กับ แบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม 42.7%เป็นเวลา 10 ชั่วโมง



รูปที่ 3.75 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า ระหว่างการทำนายด้วยมาตรฐาน IEEE และ มาตรฐาน IEC เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% กับ แบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม 30%เป็นเวลา 10 ชั่วโมง



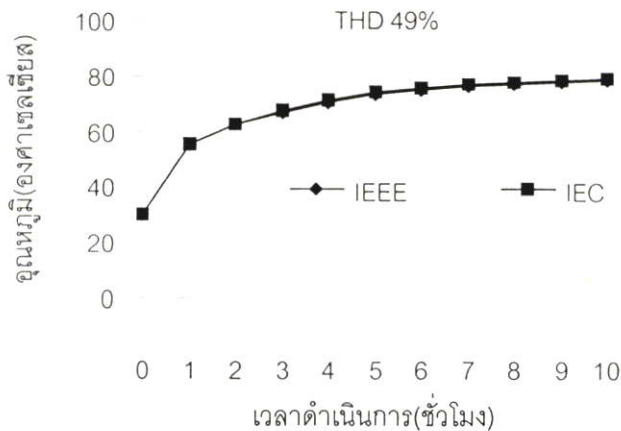
รูปที่ 3.76 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า ระหว่างการทำนายด้วยมาตรฐาน IEEE เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้นเพียง 40% และแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสักรวม 30% 42.7% และ 49% เป็นเวลา 10 ชั่วโมง



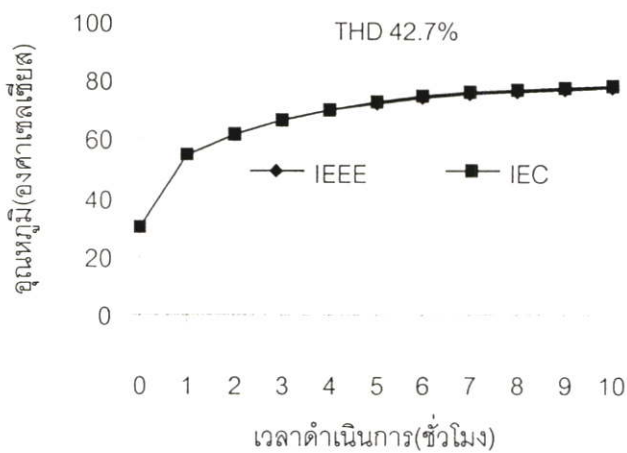
รูปที่ 3.77 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า ระหว่างการทำนายด้วยมาตรฐาน IEC เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้นเพียง 40% และแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสักรวม 30% 42.7% และ 49% เป็นเวลา 10 ชั่วโมง

### 3. ผลการทำนาย อุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด

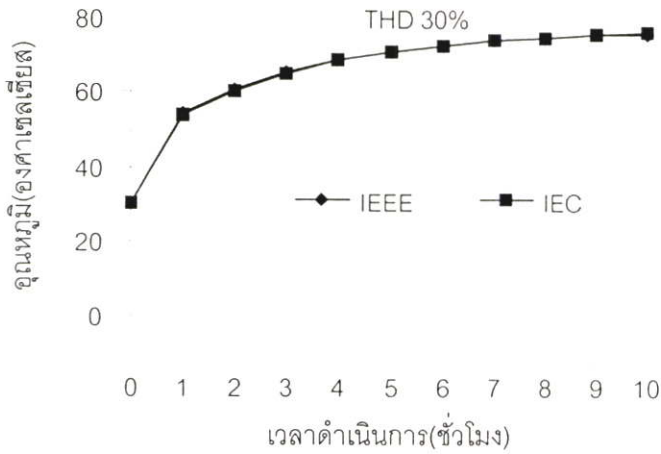
อุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ที่ได้จากการทำนาย สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.78 ถึง รูปที่ 3.82



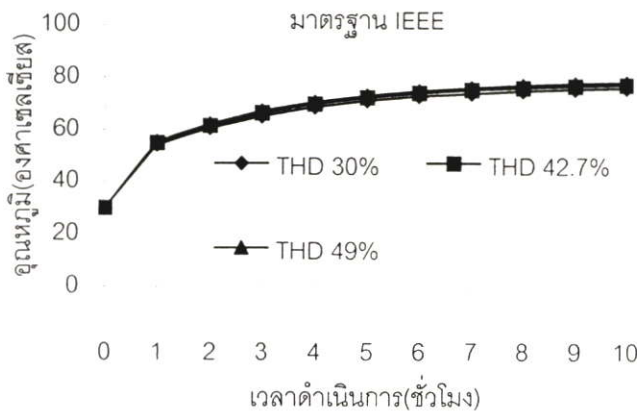
**รูปที่ 3.78** เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ของหม้อแปลงไฟฟ้าระหว่างการทำนายด้วย มาตรฐาน IEEE และ มาตรฐาน IEC เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่าง โหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% กับ แบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ที่มีความเพี้ยนของ กระแสฮาร์โมนิกส์รวม 49%เป็นเวลา 10 ชั่วโมง



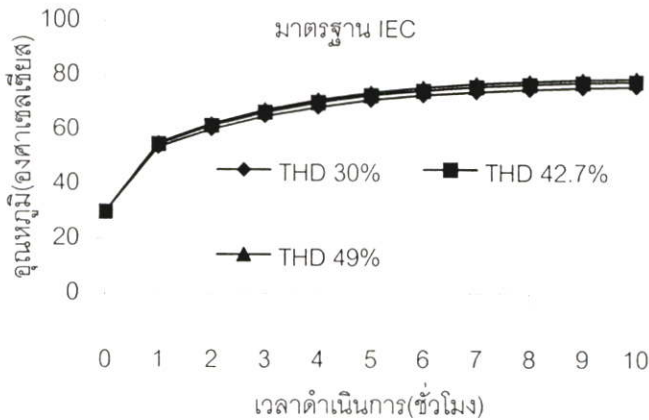
**รูปที่ 3.79** เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ของหม้อแปลงไฟฟ้าระหว่างการทำนายด้วย มาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่าง โหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% กับ แบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ที่มีความเพี้ยนของ กระแสฮาร์โมนิกส์รวม 42.7%เป็นเวลา 10 ชั่วโมง



**รูปที่ 3.80** เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ของหม้อแปลงไฟฟ้าระหว่างการทำนายด้วย มาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดคร่อมกันระหว่าง โหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% กับ แบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ที่มีความเพี้ยนของ กระแสฮาร์มอนิกส์รวม 30%เป็นเวลา 10 ชั่วโมง



**รูปที่ 3.81** เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ของหม้อแปลงไฟฟ้า ระหว่างการทำนายด้วย มาตรฐาน IEEE เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดคร่อมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้นเพียง 40% และแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 30% 42.7% และ 49% เป็นเวลา 10 ชั่วโมง



**รูปที่ 3.82** เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ของหม้อแปลงไฟฟ้าระหว่างการทำนายด้วย มาตรฐาน IEC เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้นเพียง 40% และแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม 30% 42.7% และ 49% เป็นเวลา 10 ชั่วโมง

จากรูปที่ 3.73, 3.74 และรูปที่ 3.75 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน ระหว่างมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันมาก ซึ่งจะช่วยให้พบว่าสามารถประยุกต์ใช้มาตรฐาน IEC ในการทำนายอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนได้

จากรูปที่ 3.76 และ รูปที่ 3.77 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวมแตกต่างกัน ซึ่งจะพบว่าเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม มากที่สุด (THD, 49%) จะส่งผลทำให้ อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนสูงที่สุด และจะเป็นทำให้อายุการใช้งานของหม้อแปลงสั้นลงตามไปด้วย

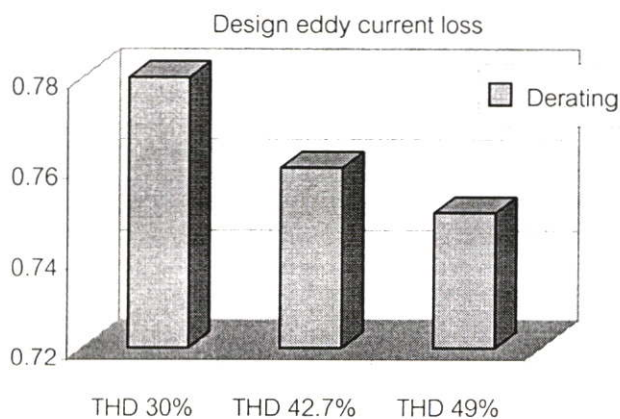
จากรูปที่ 3.78, 3.79 และรูปที่ 3.80 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ของหม้อแปลงไฟฟ้า พบว่ามาตรฐาน IEC มีค่ามากกว่ามาตรฐาน IEEE เพียงเล็กน้อยอันเนื่องมาจากการคำนวณ อุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุดที่มากกว่าอุณหภูมิน้ำมันด้านบน ของมาตรฐาน IEC มีค่าน้อยกว่ามาตรฐาน IEEE ดังแสดงในตารางที่ 3.7 ซึ่งจะเป็ผลทำให้อุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุดมีค่าน้อยกว่ามาตรฐาน IEEE ซึ่งการคำนวณ อุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด จะเป็นผลรวมของ อุณหภูมิแวดล้อม อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน และอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุดที่มากกว่าอุณหภูมิน้ำมันด้านบน และจากการที่มาตรฐาน IEC มี

ค่าอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุดน้อยกว่ามาตรฐาน IEEE จะเป็นผลทำให้การทำนายอายุการใช้งาน ของมาตรฐาน IEC มีค่ามากกว่ามาตรฐาน IEEE ดังแสดงได้ในรูปที่ 3.93, 3.94 และรูปที่ 3.95

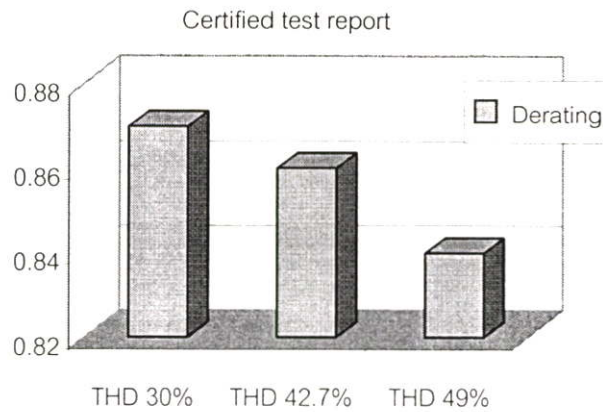
จากรูปที่ 3.81 และรูปที่ 3.82 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุดของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดที่มีความเพี้ยนของกระแสในลักษณะต่าง ๆ กัน ซึ่งจากรูปพบว่าเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวมสูง ๆ จะส่งผลทำให้อุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุดของหม้อแปลงไฟฟ้าสูงขึ้น และจะเป็นผลทำให้อายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้ามีค่าลดลงตามไปด้วย

### 3.5.4 ผลการทำนายความสามารถในการรับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นของหม้อแปลงไฟฟ้า

1. ผลการทำนายความสามารถของหม้อแปลงไฟฟ้า เมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นเพียงอย่างเดียว 100 % ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 30%, 42.7% และ 49% สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.83 และ รูปที่ 3.84



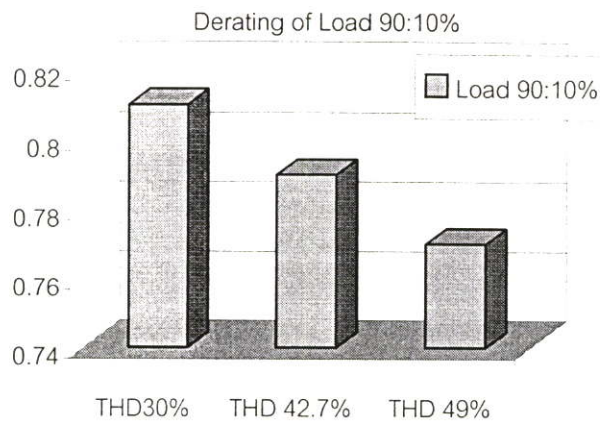
รูปที่ 3.83 แสดงการเปรียบเทียบผลการทำนายการลดพิกัดโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้าโดยการคำนวณความสามารถในการรับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น โดยการใช้ข้อมูลที่ออกแบบความสูญเสียของกระแสไหลวน เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 100% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 30%, 42.7% และ 49%



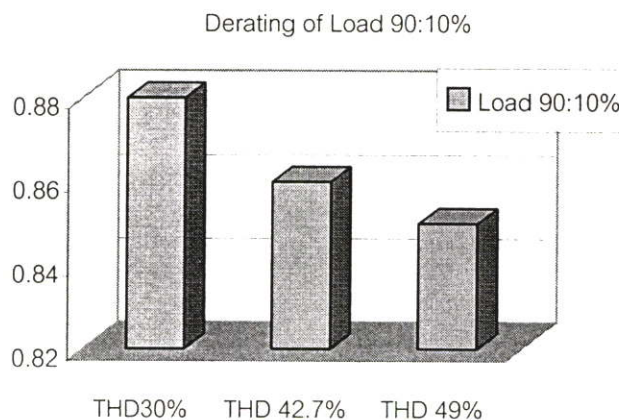
**รูปที่ 3.84** แสดงการเปรียบเทียบผลการทำนายการลดพิคก์โหลดของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยการคำนวณความสามารถในการรับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น โดยการใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 100% ที่มีความเพ็ญนของกระแสฮาร์โมนิกสร้รวม 30%, 42.7% และ 49%

จากรูปที่ 3.83 และรูปที่ 3.84 จะพบว่าเมื่อหม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นที่มีความเพ็ญนของกระแสฮาร์โมนิกสร้รวมสูง ๆ จะส่งผลทำให้ความสามารถในการรับโหลดของหม้อแปลงลดลง ซึ่งจะส่งผลทำให้ต้องมีการลดพิคก์โหลดของหม้อแปลงลงมากขึ้นตามไปด้วย และจากการทำนายด้วยทั้งสองแบบ จะเห็นว่าแนวโน้มในการลดพิคก์โหลดของหม้อแปลงจะลดลงไปในแนวเดียวกัน จะจึงสามารถสรุปได้ว่าการคำนวณความสามารถในการรับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นทั้งสองแบบสามารถนำไปใช้งานได้จริง แต่ในทางปฏิบัติผู้วิจัยของแนะนำให้ใช้การคำนวณความสามารถในการรับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นด้วยวิธีการออกแบบกระแสไหลวน เพราะว่ในทางการปฏิบัติจริงนั้น วิธีการออกแบบกระแสไหลวนจะใช้ข้อมูลในการคำนวณน้อย และเมื่อเปรียบเท็ยกับการคำนวณจริงมีค่าต่ำกว่าการทดสอบ ซึ่งการคำนวณที่ได้ต่ำกว่าการทดสอบนั้นจะเป็นหลักที่ปฏิบัติได้ที่ดีสำหรับการทำนายความสามารถในการรับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นของหม้อแปลงไฟฟ้า เพราะเมื่อนำเอาผลการทำนายไปใช้งานจริงแล้วหม้อแปลงก็จะไม่เกิดความเสียหายอันเนื่องมาจากการจ่ายโหลดเกินพิคก์ได้

2. ผลการทำนายความสามารถของหม้อแปลงไฟฟ้า เมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 10 % ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 90% ที่มีความเพ็ญนของกระแสฮาร์โมนิกสร้รวม 30%, 42.7% และ 49% สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.85 และ รูปที่ 3.86



**รูปที่ 3.85** แสดงการเปรียบเทียบผลการทำนายการลดพิกัดโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยการคำนวณความสามารถในการรับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น โดยการใช้ข้อมูลที่ออกแบบความสูญเสียของกระแสไหลวน เมื่อหม้อแปลงจ่าย โหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 10% ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 90% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 30%, 42.7% และ 49%

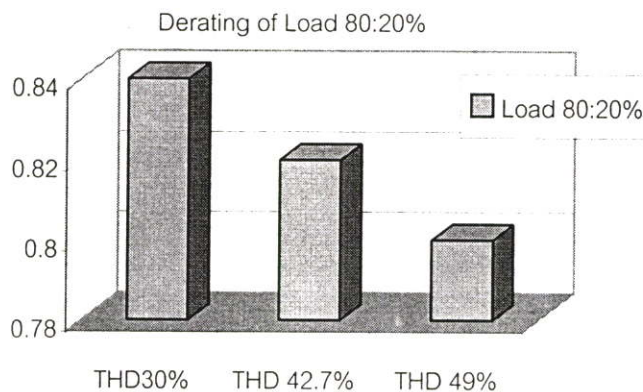


**รูปที่ 3.86** แสดงการเปรียบเทียบผลการทำนายการลดพิกัดโหลดของ หม้อแปลงไฟฟ้าโดยการคำนวณความสามารถในการรับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น โดยการใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบเมื่อหม้อแปลงจ่าย โหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 10% ร่วมกับโหลดแบบ กระแสไม่เป็นเชิงเส้น 90% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 30%, 42.7% และ 49%

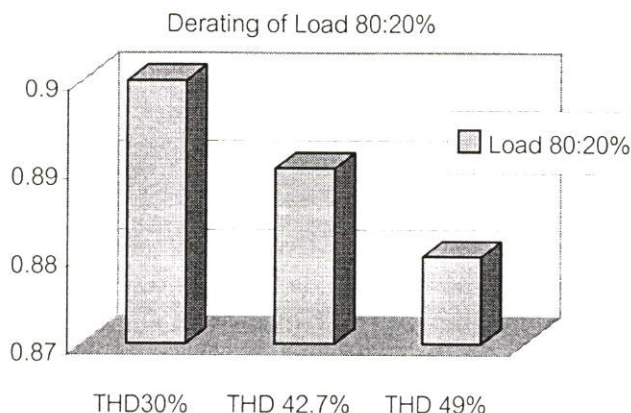
จากรูปที่ 3.85 และรูปที่ 3.86 จะพบว่าเมื่อหม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวมสูง ๆ จะส่งผลทำให้ความสามารถในการรับโหลดของหม้อแปลงลดลง ซึ่งจะส่งผลทำให้ต้องมีการลดพิกัดโหลดของหม้อแปลงลงมากขึ้นตาม

ไปด้วย และจากการทำนายด้วยทั้งสองแบบ จะเห็นว่าแนวโน้มในการลดพิกัดโหลดของหม้อแปลง จะลดลงไปในแนวเดียวกัน จะจึงสามารถสรุปได้ว่าการคำนวณความสามารถในการรับโหลดแบบ กระแสไม่เป็นเชิงเส้นทั้งสองแบบสามารถนำไปใช้งานได้จริง แต่ในทางปฏิบัติผู้วิจัยของแนะนำให้ ใช้การคำนวณความสามารถในการรับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นด้วยวิธีการออกแบบกระแส โหลดวน เพราะว่าในทางการปฏิบัติจริงนั้น วิธีการออกแบบกระแสโหลดวนจะใช้ข้อมูลในการ คำนวณน้อย และเมื่อเปรียบเทียบกับผลการคำนวณจริงมีค่าต่ำกว่าการทดสอบ ซึ่งการคำนวณที่ได้ต่ำ กว่าการทดสอบนั้นจะเป็นหลักที่ปฏิบัติได้ที่ดีสำหรับการทำนายความสามารถในการรับโหลดแบบ กระแสไม่เป็นเชิงเส้นของหม้อแปลงไฟฟ้า เพราะเมื่อนำเอาผลการทำนายไปใช้งานจริงแล้วหม้อ แปลงก็จะไม่เกิดความเสียหายอันเนื่องมาจากการจ่ายโหลดเกินพิกัดได้

3. ผลการทำนายความสามารถของหม้อแปลงไฟฟ้า เมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20 % ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 30%, 42.7% และ 49% สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.87 และ รูปที่ 3.88



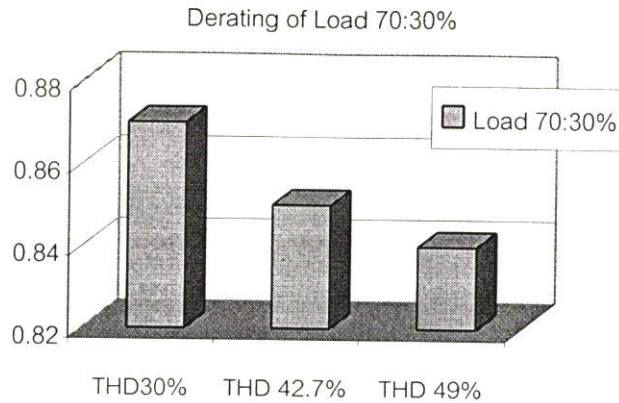
รูปที่ 3.87 แสดงการเปรียบเทียบผลการทำนายการลดพิกัดโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยการ คำนวณความสามารถในการรับโหลดแบบกระแส ไม่เป็นเชิงเส้น โดยการ ใช้ข้อมูลที่ออกแบบ แบบความสูญเสียของกระแสโหลดวนเมื่อหม้อแปลงจ่าย โหลดแบบกระแส เป็นเชิงเส้น 20% ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์ รวม 30%, 42.7% และ 49%



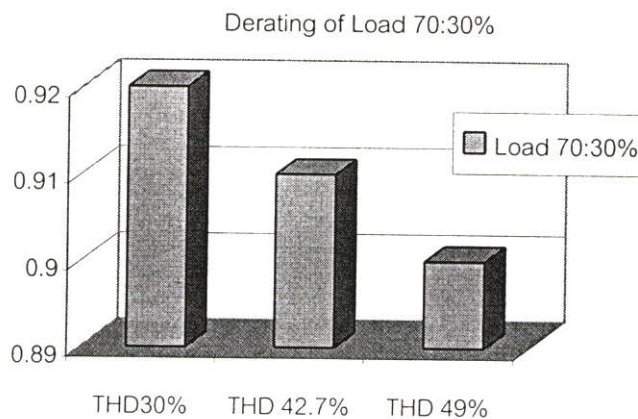
**รูปที่ 3.88** แสดงการเปรียบเทียบผลการ ทำนายการลดพิกัด โหลดของหม้อแปลงไฟฟ้าโดยการ คำนวณความสามารถในการรับโหลด แบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น โดยการใช้ข้อมูลที่ได้ จากการทดสอบเมื่อหม้อแปลงจ่าย โหลด แบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% ร่วมกับโหลด แบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 30%, 42.7% และ 49%

จากรูปที่ 3.87 และรูปที่ 3.88 จะพบว่าเมื่อหม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวมสูง ๆ จะส่งผลทำให้ความสามารถในการรับ โหลดของหม้อแปลงลดลง ซึ่งจะส่งผลทำให้ต้องมีการลดพิกัด โหลดของหม้อแปลงลงมากขึ้นตาม ไปด้วย และจากการทำนายด้วยทั้งสองแบบ จะเห็นว่าแนวโน้มในการลดพิกัด โหลดของหม้อแปลง จะลดลงไปในแนวเดียวกัน จะจึงสามารถสรุปได้ว่าการคำนวณความสามารถในการรับ โหลดแบบ กระแสไม่เป็นเชิงเส้นทั้งสองแบบสามารถนำไปใช้งานได้จริง แต่ในทางปฏิบัติผู้วิจัยของแนะนำ ให้ใช้การคำนวณความสามารถในการรับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นด้วยวิธีการออกแบบกระแส โหลดวน เพราะว่าเป็นทางการปฏิบัติจริงนั้น วิธีการออกแบบกระแสไหลวนจะใช้ข้อมูลในการ คำนวณน้อย และเมื่อเปรียบเทียบกับ การคำนวณจริงมีค่าต่ำกว่าการทดสอบ ซึ่งการคำนวณที่ได้ต่ำ กว่าการทดสอบนั้นจะเป็นหลักที่ปฏิบัติได้ที่ดีสำหรับการทำนายความสามารถในการรับ โหลดแบบ กระแสไม่เป็นเชิงเส้นของหม้อแปลงไฟฟ้า เพราะเมื่อนำเอาผลการทำนายไปใช้งานจริงแล้วหม้อ แปลงก็จะไม่เกิดความเสียหายอันเนื่องมาจากการจ่าย โหลดเกินพิกัดได้

4. ผลการทำนายความสามารถของหม้อแปลงไฟฟ้า เมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 30 % ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 30%, 42.7% และ 49% สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.89 และ รูปที่ 3.90



**รูปที่ 3.89** แสดงการเปรียบเทียบผลการ ทำนายการลดพิกัดโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้าโดยการ คำนวณความสามารถในการรับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น โดยการใช้ข้อมูลที่ออกแบบ ความสูญเสียของกระแสไหลวน เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 30% ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิก สรรวม 30%, 42.7% และ 49%

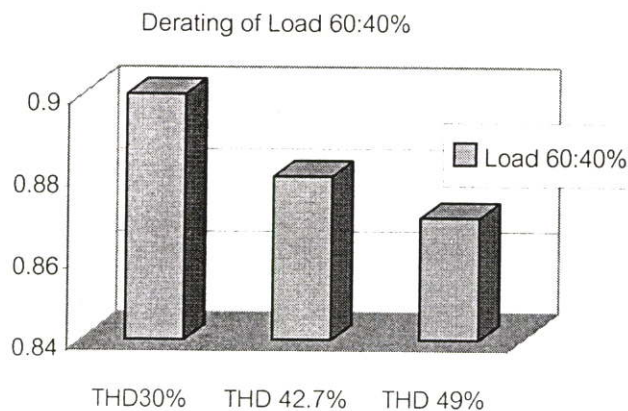


**รูปที่ 3.90** แสดงการเปรียบเทียบผลการ ทำนายการลดพิกัดโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้าโดยการ คำนวณความสามารถในการรับโหลด แบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น โดยการใช้ข้อมูลที่ ได้จากการทดสอบ เมื่อหม้อแปลงจ่าย โหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 30% ร่วมกับโหลด แบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิก สรรวม 30%, 42.7% และ 49%

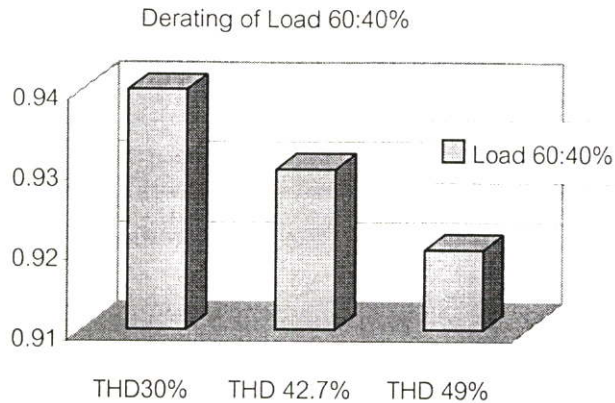
จากรูปที่ 3.89 และรูปที่ 3.90 จะพบว่าเมื่อหม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิก สรรวมสูง ๆ จะส่งผลทำให้ความสามารถในการรับ โหลดของหม้อแปลงลดลง ซึ่งจะส่งผลทำให้ต้องมีการลดพิกัดโหลดของหม้อแปลงลงมากขึ้นตาม

ไปด้วย และจากการทำนายด้วยทั้งสองแบบ จะเห็นว่าแนวโน้มในการลดพิกัดโหลดของหม้อแปลง จะลดลงไปในแนวเดียวกัน จะจึงสามารถสรุปได้ว่าการคำนวณความสามารถในการรับโหลดแบบ กระแสไม่เป็นเชิงเส้นทั้งสองแบบสามารถนำไปใช้งานได้จริง แต่ในทางปฏิบัติผู้วิจัยของแนะนำให้ ใช้การคำนวณความสามารถในการรับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นด้วยวิธีการออกแบบกระแส โหลดวน เพราะว่าในทางการปฏิบัติจริงนั้น วิธีการออกแบบกระแสโหลดวนจะใช้ข้อมูลในการ คำนวณน้อย และเมื่อเปรียบเทียบกับกรคำนวณจริงมีค่าต่ำกว่าการทดสอบ ซึ่งการคำนวณที่ได้ต่ำ กว่าการทดสอบนั้นจะเป็นหลักที่ปฏิบัติได้ที่ดีสำหรับการทำนายความสามารถในการรับโหลดแบบ กระแสไม่เป็นเชิงเส้นของหม้อแปลงไฟฟ้า เพราะเมื่อนำเอาผลการทำนายไปใช้งานจริงแล้วหม้อ แปลงก็จะไม่เกิดความเสียหายอันเนื่องมาจากการจ่ายโหลดเกินพิกัดได้

5. ผลการทำนายความสามารถของหม้อแปลงไฟฟ้า เมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40 % ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 30%, 42.7% และ 49% สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.91 และ รูปที่ 3.92



รูปที่ 3.91 แสดงการเปรียบเทียบผลการ ทำนายการลดพิกัดโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้าโดยการ คำนวณความสามารถในการรับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น โดยการใช้ข้อมูลที่ออกแบบ ความสูญเสียของกระแสโหลดวน เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 30%, 42.7% และ 49%



**รูปที่ 3.92** แสดงการเปรียบเทียบผลการ ทำนายการลดพิกัดโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้าโดยการคำนวณความสามารถในการรับโหลด แบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น โดยการใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ เมื่อหม้อแปลงจ่าย โหลด แบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 30%, 42.7% และ 49%

จากรูปที่ 3.91 และรูปที่ 3.92 จะพบว่าเมื่อหม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวมสูง ๆ จะส่งผลทำให้ความสามารถในการรับโหลดของหม้อแปลงลดลง ซึ่งจะส่งผลทำให้ต้องมีการลดพิกัดโหลดของหม้อแปลงลงมากขึ้นตามไปด้วย และจากการทำนายด้วยทั้งสองแบบ จะเห็นว่าแนวโน้มในการลดพิกัดโหลดของหม้อแปลงจะลดลงไปในแนวเดียวกัน จะจึงสามารถสรุปได้ว่าการคำนวณความสามารถในการรับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นทั้งสองแบบสามารถนำไปใช้งานได้จริง แต่ในทางปฏิบัติผู้วิจัยของแนะนำให้ใช้การคำนวณความสามารถในการรับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นด้วยวิธีการออกแบบกระแสไหลวน เพราะว่าในทางการปฏิบัติจริงนั้น วิธีการออกแบบกระแสไหลวนจะใช้ข้อมูลในการคำนวณน้อย และเมื่อเปรียบเทียบกับค่าจริงมีค่าต่ำกว่าการทดสอบ ซึ่งการคำนวณที่ได้ต่ำกว่าการทดสอบนั้นจะเป็นหลักที่ปฏิบัติได้ที่ดีสำหรับการทำนายความสามารถในการรับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นของหม้อแปลงไฟฟ้า เพราะเมื่อนำเอาผลการทำนายไปใช้งานจริงแล้วหม้อแปลงก็จะไม่เกิดความเสียหายอันเนื่องมาจากการจ่ายโหลดเกินพิกัดได้

ตารางที่ 3.3 แสดงผลการทำนาย Harmonic loss factor, K-factor และค่าความสูญเสียรวมของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น

Load	$\sum(I_h/I_1)^2$	$F_{HL}$	$F_{HL\_OSL}$	K-factor	Total Losses (W)
THD <sub>i</sub> 49%					
Non 100%	1.24	7.11	1.56	8.83	532.92
Lin.10% Non 90%	1.20	6.14	1.47	7.34	512.79
Lin.20% Non 80%	1.15	5.21	1.38	6.01	494.79
Lin.30% Non 70%	1.12	4.32	1.30	4.84	478.90
Lin.40% Non 60%	1.09	3.51	1.23	3.82	465.13
THD <sub>i</sub> 42.7%					
Non 100%	1.18	6.59	1.47	7.78	508.97
Lin.10% Non 90%	1.15	5.66	1.39	6.49	493.39
Lin.20% Non 80%	1.12	4.79	1.32	5.34	479.46
Lin.30% Non 70%	1.09	3.97	1.25	4.32	467.16
Lin.40% Non 60%	1.07	3.23	1.19	3.44	456.51
THD <sub>i</sub> 30%					
Non 100%	1.09	5.95	1.31	6.48	473.06
Lin.10% Non 90%	1.07	5.07	1.25	5.44	464.31
Lin.20% Non 80%	1.06	4.26	1.20	4.51	456.48
Lin.30% Non 70%	1.04	3.53	1.16	3.69	449.57
Lin.40% Non 60%	1.03	2.88	1.12	2.97	443.58

หมายเหตุ Lin. คือ Linear Load, Non คือ Nonlinear Load และ หน่วย % คือ โหลดที่ใช้งานจริงหารด้วยโหลดที่พิกัด

จากตารางที่ 3.3 จะเห็นว่าเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นเพียงอย่างเดียว 100% จะทำให้ค่า  $\sum(I_h/I_1)^2$  มีค่าเพิ่มมากขึ้น และเมื่อนำค่า  $\sum(I_h/I_1)^2$  มาแยกออกด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ แล้วค่า  $\sum(I_h/I_1)^2$  ก็คือส่วนประกอบหนึ่งของค่าความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวมดังแสดงให้เห็นดังนี้

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=1}^{h=\max} I_h^2}}{I_1} = \sqrt{\sum_{h=1}^{h=\max} (I_h / I_1)^2 - (I_1 / I_1)^2} \quad (3.17)$$

$$= \sqrt{\frac{\sum_{h=1}^{h=\max} I_h^2}{I_1^2} - \frac{I_1^2}{I_1^2}} \quad (3.18)$$

$$= \frac{\sqrt{\sum_{h=1}^{h=\max} I_h^2 - I_1^2}}{I_1} \quad (3.19)$$

ดังนั้นจากสมการที่ 3.19 จะเห็นว่าเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวมสูง ๆ จะส่งผลทำให้ค่าความสูญเสียของหม้อแปลงเพิ่มสูงขึ้น ดังเช่นเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม 49% จะส่งผลทำให้ค่าความสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าสูงกว่าการจ่ายโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น ถึงประมาณ 25% และเมื่อหม้อแปลงมีค่าความสูญเสียรวมเพิ่มมากขึ้นก็จะเป็นผลทำให้อายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้าลดลงตามไปด้วย และในทำนองเดียวกัน ถ้าพิจารณา เมื่อหม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นที่มีค่าความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวมเท่ากัน ดังแสดงให้เห็นในตารางที่ 3.3 คือ กรณีหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างกระแสแบบเป็นเชิงเส้น 40% ร่วมกับแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม 49%, กรณีหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างกระแสแบบเป็นเชิงเส้น 30% ร่วมกับแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม 42.7% และ กรณีหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 100% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม 30% ซึ่งเมื่อนำค่า  $\sum (I_h/I_1)^2$  มาคำนวณค่าความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวมด้วยสมการที่ 3.19 จะเห็นว่ามีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวมประมาณ 30% และในกรณีนี้ จะต้องพิจารณาด้วยค่า  $F_{HL}$  เพราะว่า ค่า  $F_{HL}$  คือค่าเปอร์เซ็นต์ ของกระแสฮาร์โมนิกส์ คือ ถ้าค่า  $F_{HL}$  มีค่าสูงก็จะส่งผลทำให้ค่าความสูญเสียของหม้อแปลงสูงขึ้นตามไปด้วย จึงสามารถสรุปได้ว่า เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น สิ่งแรกที่จะต้องพิจารณาคือ ค่าความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวมอันเนื่องมาจากค่าความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวมจะส่งผลกระทบทำให้ค่าความสูญเสียในจุดขดลวดของหม้อแปลงเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดให้เห็นในตารางที่ 3.4, 3.5 และ ตารางที่ 3.6 ซึ่งค่าความสูญเสียในจุดขดลวดจะเป็นค่าความสูญเสียส่วนใหญ่ของค่าความสูญเสียขณะมีโหลด แต่ในกรณีที่ค่าความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวมมีค่าเท่ากัน สิ่งแรกที่จะต้องพิจารณาคือ ค่า Harmonic Loss factor for winding eddy current

loss ( $F_{HL}$ ) ซึ่งถ้าค่า Harmonic Loss factor for winding eddy current loss ( $F_{HL}$ ) มีค่าสูงก็จะส่งผลทำให้ค่าความสูญเสียของหม้อแปลงสูงขึ้นตามไปด้วย และจะเป็นผลทำให้อุณหภูมิของหม้อแปลงสูงขึ้น และทำให้อายุการใช้งานของหม้อแปลงลดลงตามไปด้วย

ตารางที่ 3.4 แสดงผลการทำนายค่าความสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลด แบบกระแสเป็นเชิงเส้น และ เมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD<sub>i</sub>) 49%

Loss (W)	Sin 100%	Non 100%	10%:90%	20%:80%	30%:70%	40%:60%
No load	77	77	77	77	77	77
Copper	342.74	425.35	409.65	395.61	383.22	372.48
Winding eddy	2.40	21.15	17.59	14.40	11.59	9.15
Other stray	4.87	9.42	8.55	7.78	7.10	6.50
Total	427	532.92	512.79	494.79	478.90	465.13

ตารางที่ 3.5 แสดงผลการทำนายค่าความสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดแบบ กระแสเป็นเชิงเส้น และ เมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD<sub>i</sub>) 42.7%

Loss (W)	Sin 100%	Non 100%	10%:90%	20%:80%	30%:70%	40%:60%
No load	77	77	77	77	77	77
Copper	342.74	404.85	393.05	382.49	373.17	365.10
Winding eddy	2.40	18.66	15.57	12.80	10.36	8.25
Other stray	4.87	8.46	7.78	7.17	6.63	6.16
Total	427	508.97	493.39	479.46	467.16	456.51

**ตารางที่ 3.6** แสดงผลการทำนายค่าความสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดแบบ กระแส เป็นเชิงเส้น และ เมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นที่มีความเพี้ยนของกระแส ฮาร์โมนิกสักรวม (THD) 30%

Loss (W)	Sin 100%	Non 100%	10%:90%	20%:80%	30%:70%	40%:60%
No load	77	77	77	77	77	77
Copper	342.74	373.58	367.72	462.48	357.85	353.84
Winding eddy	2.40	15.54	13.04	10.81	8.84	7.13
Other stray	4.87	6.93	6.54	6.19	5.88	5.61
Total	427	473.06	464.31	456.48	449.57	443.58

จากตารางที่ 3.4, 3.5 และตารางที่ 3.6 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายค่าความสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น แบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นเพียงอย่างเดียว 100% และเมื่อจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้นร่วมกับแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกสักรวมต่าง ๆ กัน จากตารางสามารถสรุปได้ว่า เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกสักรวมสูง ๆ จะทำให้ค่าความสูญเสียของหม้อแปลงมีค่าสูงกว่าเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกต่ำ ๆ และ ในกรณีที่หม้อแปลงจ่ายโหลดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกสักรวมเท่ากัน ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นดังต่อไปนี้ คือ กรณีหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างกระแสแบบเป็นเชิงเส้น 40% ร่วมกับแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกสักรวม 49%, กรณีหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างกระแสแบบเป็นเชิงเส้น 30% ร่วมกับแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกสักรวม 42.7% และ กรณีหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 100% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกสักรวม 30% ซึ่งเมื่อนำค่า  $\sum(I_n/I_1)^2$  มาคำนวณค่าความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกสักรวมด้วยสมการที่ 3.19 จะเห็นว่ามีค่าความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกสักรวมประมาณ 30% และเมื่อนำทั้งสามกรณีมาเปรียบเทียบค่าความสูญเสียกันจะเห็นว่า ค่าความสูญเสียในชุดขดลวดจะมีค่าใกล้เคียงกันอันเนื่องมาจากค่า  $\sum(I_n/I_1)^2$  ซึ่งค่า  $\sum(I_n/I_1)^2$  จะทำให้ค่าความสูญเสียในชุดขดลวดเพิ่มขึ้นเท่านั้น แต่สิ่งที่มีความแตกต่างกันคือ ค่า Harmonic Loss factor for winding eddy current loss ( $F_{HL}$ ) ซึ่งจากตารางที่ 3.3 จะเห็นว่าเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 100% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกสักรวม 30% มีค่า Harmonic Loss factor for winding eddy current loss ( $F_{HL}$ ) มากที่สุด ซึ่งจะเป็นผลทำให้กรณีหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 100% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกสักรวม 30% นี้มีค่าความสูญเสียมากที่สุด ซึ่งจะส่งผลทำให้มีอุณหภูมิมากกว่า ในอีก 2 กรณี

ตารางที่ 3.7 แสดงการเปรียบเทียบผลการคำนวณ อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน และอุณหภูมิเพิ่ม ณ จุดร้อนสุดที่มากกว่าอุณหภูมิน้ำมันด้านบน ระหว่างมาตรฐาน IEEE และ มาตรฐาน IEC

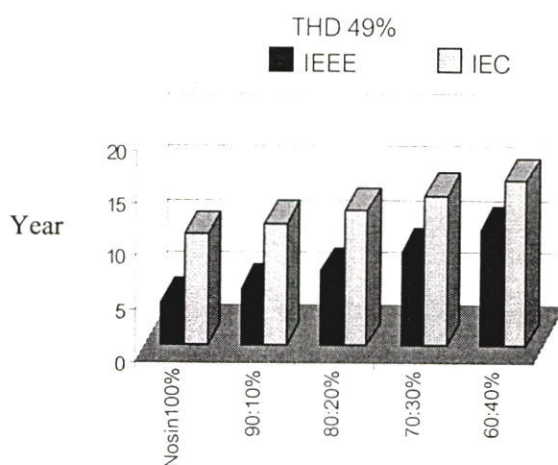
Load	อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน ( °C)		อุณหภูมิ ณ จุดร้อน ที่มากกว่า อุณหภูมิน้ำมันด้านบน ( °C)	
	IEEE	IEC	IEEE	IEC
THD <sub>i</sub> 49%				
Non 100%	37.01	37.28	21.53	16.82
Lin.10% Non 90%	35.89	36.67	20.07	16.50
Lin.20% Non 80%	34.88	36.05	18.75	16.17
Lin.30% Non 70%	33.98	35.43	17.55	15.84
Lin.40% Non 60%	33.20	34.80	16.50	15.51
THD <sub>i</sub> 42.7%				
Non 100%	35.68	35.93	20.26	16.11
Lin.10% Non 90%	34.80	35.44	19.03	15.85
Lin.20% Non 80%	34.01	34.95	17.90	15.59
Lin.30% Non 70%	33.31	34.47	16.90	15.33
Lin.40% Non 60%	32.70	33.98	16.02	15.07
THD <sub>i</sub> 30%				
Non 100%	33.65	33.89	18.50	15.03
Lin.10% Non 90%	33.15	33.60	17.58	14.88
Lin.20% Non 80%	32.70	33.32	16.74	14.73
Lin.30% Non 70%	32.30	33.03	16.00	14.58
Lin.40% Non 60%	31.96	32.74	15.34	14.43

หมายเหตุ Lin. คือ Linear Load, Non คือ Nonlinear Load และ หน่วย % คือ โหลดที่ใช้งานจริง หารด้วยโหลดที่พิกัด

ตารางที่ 3.7 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน ณ สภาวะคงตัว และอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุดที่มากกว่าอุณหภูมิน้ำมันด้านบน จากตารางสามารถสรุปได้ว่า เมื่อหม้อ

แปลงจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เชิงเส้นที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสักรวมสูง ๆ จะทำให้หม้อแปลงมีอุณหภูมิสูงกว่าเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสักรวมต่ำ ๆ แต่ในทำนองเดียวกันเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสักรวมเท่ากันสิ่งที่จะต้องพิจารณาคือ ค่า Harmonic Loss factor for winding eddy current loss ( $F_{HL}$ ) ซึ่งถ้าค่า Harmonic Loss factor for winding eddy current loss ( $F_{HL}$ ) มีค่ามากก็จะทำให้อุณหภูมิเพิ่ม ณ จุดร้อนสุดที่มากกว่าอุณหภูมิน้ำมันด้านบน ของหม้อแปลงมาก และจะทำให้อุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุดของหม้อแปลงมีค่ามากขึ้น ซึ่งจะส่งผลทำให้อายุการใช้งานของหม้อแปลงลดลงตามไปด้วย

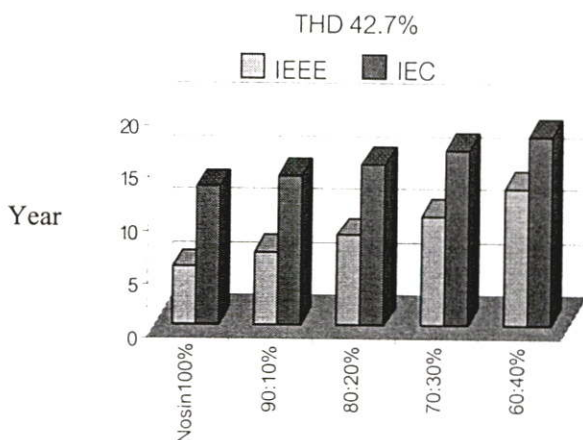
### 3.5.5 ผลการทำนายอายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เชิงเส้นที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสักรวม 30%, 42.7% และ 49%



รูปที่ 3.93 แสดงการเปรียบเทียบผลการทำนายอายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เชิงเส้น ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสักรวม 49% ระหว่างมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC

รูปที่ 3.93 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เชิงเส้นที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสักรวม 49% ระหว่างมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC พบว่าเมื่อการทำนายอายุการใช้งานตามมาตรฐาน IEC มีค่าที่สูงกว่ามาตรฐาน IEEE อันเนื่องมาจากการทำนายอุณหภูมิตามมาตรฐาน IEC นั้นได้ค่าของอุณหภูมิเพิ่ม ณ จุดร้อนสุดที่มากกว่าอุณหภูมิน้ำมันด้านบน ต่ำกว่ามาตรฐาน IEEE และโดยเฉลี่ยแล้วการคำนวณอุณหภูมิเพิ่ม ณ จุดร้อนสุดที่มากกว่าอุณหภูมิน้ำมันด้านตามมาตรฐาน IEC จะต่ำกว่ามาตรฐาน IEEE ประมาณ 21 % ดังแสดงให้เห็นในตารางที่ 3.7 ซึ่งจะเป็นผลทำให้อุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุดตามมาตรฐาน IEC มีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน IEEE และจะเป็นผลทำให้การทำนายอายุการใช้งานของหม้อแปลงมีความแตกต่างกันไปบ้าง แต่ถ้าเปรียบเทียบแนวโน้มการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของอายุการใช้

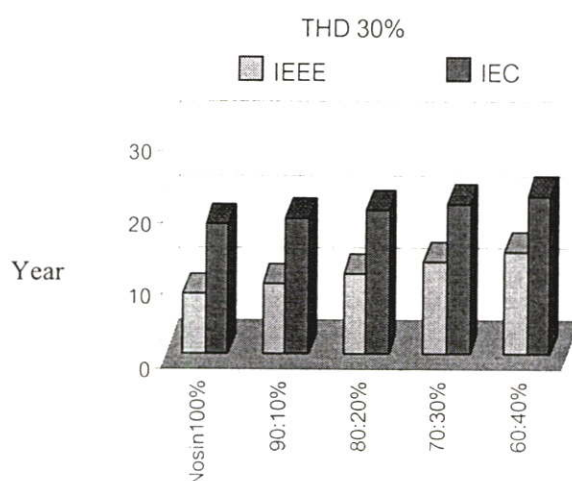
งานของทั้งสองมาตรฐานจะเห็นว่าเป็นไปในทิศทางเดียวกัน ดังนั้นจะสรุปได้ว่าทั้งสองมาตรฐานสามารถที่จะนำไปใช้งานได้จริงแต่ผู้วิจัยขอแนะนำให้ใช้มาตรฐาน IEEE มากกว่าเพราะว่ามาตรฐาน IEEE ได้มีการกำหนดสมการสำหรับคำนวณอุณหภูมิเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เชิงเส้นไว้อย่างชัดเจน แต่ในมาตรฐาน IEC ยังไม่มีการกำหนดเป็นมาตรฐานอย่างชัดเจนเป็นเพียงการนำเอาบทความที่ได้รับการยอมรับตีพิมพ์จากบทความที่มาตรฐานมาเป็นแนวทางในการออกแบบโปรแกรมสำหรับคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เชิงเส้นเท่านั้น และจากการเปรียบเทียบผลการจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้นร่วมกับแบบกระแสไม่เชิงเส้นพบว่า เมื่อทำการจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบกระแสไม่เชิงเส้นร่วมกับแบบกระแสไม่เชิงเส้น มีอายุการใช้งานที่สูงกว่าการจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เชิงเส้นเพียงอย่างเดียว ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ถ้าสามารถที่จะกำหนดโหลดใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้าให้เหมาะสมก็จะทำให้อายุการใช้งานของหม้อแปลงยาวนานขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 3.94 แสดงการเปรียบเทียบผลการทำนายอายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เชิงเส้น ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 42.7% ระหว่างมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC

รูปที่ 3.94 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เชิงเส้นที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 42.7% ระหว่างมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC พบว่าเมื่อการทำนายอายุการใช้งานตามมาตรฐาน IEC มีค่าที่สูงกว่ามาตรฐาน IEEE อันเนื่องมาจากการทำนายอุณหภูมิตามมาตรฐาน IEC นั้นได้ค่าของอุณหภูมิเพิ่ม ณ จุดร้อนสุดที่มากกว่าอุณหภูมิน้ำมันด้านบน ต่ำกว่ามาตรฐาน IEEE และโดยเฉลี่ยแล้วการคำนวณอุณหภูมิเพิ่ม ณ จุดร้อนสุดที่มากกว่าอุณหภูมิน้ำมันด้านตามมาตรฐาน IEC จะต่ำกว่ามาตรฐาน IEEE ประมาณ 20 % ดังแสดงให้เห็นในตารางที่ 3.7 ซึ่งจะเป็นผลทำให้การคำนวณอายุการใช้งานของหม้อ

แปลงมีความแตกต่างกันไปบ้าง แต่ถ้าเปรียบเทียบแนวโน้มการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของอายุการใช้งานของทั้งสองมาตรฐานจะเห็นว่าไปในทิศทางเดียวกัน ดังนั้นจะสรุปได้ว่าทั้งสองมาตรฐานสามารถที่จะนำไปใช้งานได้จริงแต่ผู้วิจัยขอแนะนำให้ใช้มาตรฐาน IEEE มากกว่าเพราะว่ามาตรฐาน IEEE ได้มีการกำหนดสมการสำหรับคำนวณอุณหภูมิเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เชิงเส้นไว้อย่างชัดเจน แต่ในมาตรฐาน IEC ยังไม่มีการกำหนดเป็นมาตรฐานอย่างชัดเจนเป็นเพียงการนำเอาบทความที่ได้รับการยอมรับตีพิมพ์จากบทความที่มาตรฐานมาเป็นแนวทางในการออกแบบโปรแกรมสำหรับคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เชิงเส้นเท่านั้น และจากการเปรียบเทียบผลการจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบกระแสไม่เชิงเส้นร่วมกับแบบกระแสไม่เชิงเส้นพบว่า เมื่อทำการจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบกระแสไม่เชิงเส้นร่วมกับแบบกระแสไม่เชิงเส้น มีอายุการใช้งานที่สูงกว่าการจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เชิงเส้นเพียงอย่างเดียว ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ถ้าสามารถที่จะกำหนดโหลดใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้าให้เหมาะสมก็จะทำให้อายุการใช้งานของหม้อแปลงยาวนานขึ้นตามไปด้วย



**รูปที่ 3.95** แสดงการเปรียบเทียบผลการทำนายอายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เชิงเส้น ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 30% ระหว่างมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC

รูปที่ 3.95 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เชิงเส้นที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 30% ระหว่างมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC พบว่าเมื่อการทำนายอายุการใช้งานตามมาตรฐาน IEC มีค่าที่สูงกว่ามาตรฐาน IEEE อันเนื่องมาจากการทำนายอุณหภูมิตามมาตรฐาน IEC นั้นได้ค่าของอุณหภูมิเพิ่ม ณ จุดร้อนสุดที่มากกว่าอุณหภูมิน้ำมันด้านบน ต่ำกว่ามาตรฐาน IEEE และโดยเฉลี่ยแล้วการคำนวณ

อุณหภูมิเพิ่ม ณ จุดร้อนสุดที่มากกว่าอุณหภูมิน้ำมันด้านตามมาตรฐาน IEC จะต่ำกว่ามาตรฐาน IEEE ประมาณ 19 % ดังแสดงให้เห็นในตารางที่ 3.7 ซึ่งจะเป็นผลทำให้อุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุดตามมาตรฐาน IEC มีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน IEEE และจะเป็นผลทำให้การทำนายอายุการใช้งานของหม้อแปลงมีความแตกต่างกันไปบ้าง แต่ถ้าเปรียบเทียบแนวโน้มการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของอายุการใช้งานของทั้งสองมาตรฐานจะเห็นว่าไปในทิศทางเดียวกัน ดังนั้นจะสรุปได้ว่าทั้งสองมาตรฐานสามารถที่จะนำไปใช้งานได้จริงแต่ผู้วิจัยขอแนะนำให้ใช้มาตรฐาน IEEE มากกว่าเพราะว่ามาตรฐาน IEEE ได้มีการกำหนดสมการสำหรับคำนวณอุณหภูมิเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เชิงเส้นไว้อย่างชัดเจน แต่ในมาตรฐาน IEC ยังไม่มีการกำหนดเป็นมาตรฐานอย่างชัดเจนเป็นเพียงการนำเอาบทความที่ได้รับการยอมรับตีพิมพ์จากบทความที่มาตรฐานมาเป็นแนวทางในการออกแบบโปรแกรมสำหรับคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เชิงเส้นเท่านั้น และจากการเปรียบเทียบผลการจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้นร่วมกับแบบกระแสไม่เชิงเส้นพบว่า เมื่อทำการจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบกระแสไม่เชิงเส้นร่วมกับแบบกระแสไม่เชิงเส้นพบว่ามีอายุการใช้งานที่สูงกว่าการจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เชิงเส้นเพียงอย่างเดียว ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ถ้าสมการที่จะกำหนดโหลดใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้าให้เหมาะสมก็จะทำให้อายุการใช้งานของหม้อแปลงยาวนานขึ้นตามไปด้วย

## บทที่ 4

### ผลการทดสอบ

#### 4.1 กล่าวนำ

สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้ทำการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแช่น้ำมันขนาด 10 kVA , 380/220 V การต่อขดลวดแบบ  $\Delta$ -Y, 3Ø การระบายความร้อนแบบ ONAN เมื่อจ่ายโหลดแบบ กระแสเป็นเชิงเส้น, แบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น และ จ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น และ แบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น ทดสอบโดยใช้โหลดจริงในการการทดสอบ

การทดสอบเพื่อหาค่าของอุณหภูมิของหม้อแปลงเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ใช้หม้อแปลงไฟฟ้าแบบแช่น้ำมัน ที่เป็นผลิตภัณฑ์ของ บริษัท พงษ์ พیمانการ ไฟฟ้า จำกัด ซึ่งมีเนมเพลต (Name Plate) แสดงในภาคผนวก ก

#### 4.2 ตำแหน่งติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ล

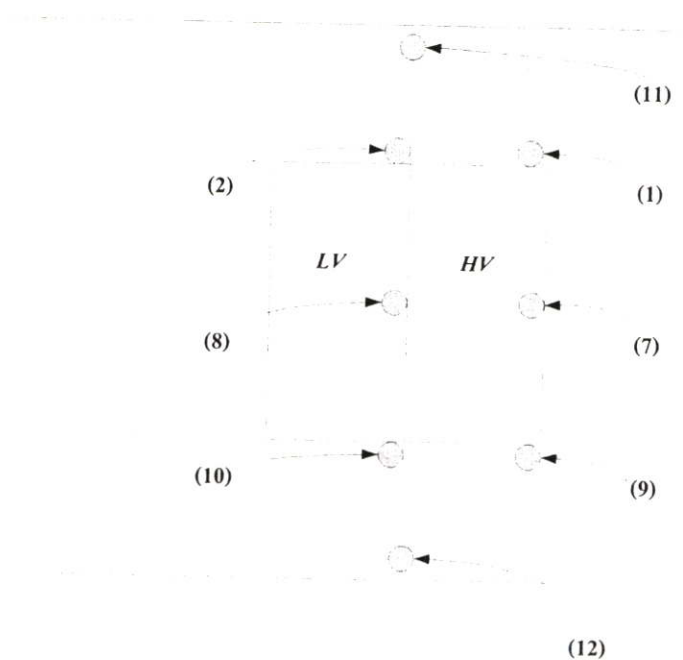
ตำแหน่งติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ล ที่บริเวณ เฟส A มีทั้งหมด 6 ตำแหน่ง ที่แสดงในรูปที่ 4.1 ประกอบไปด้วย

- ตำแหน่งที่ 1 บริเวณด้านบนสุดของชุดขดลวดแรงสูง
- ตำแหน่งที่ 2 บริเวณด้านบนสุดของชุดขดลวดแรงต่ำ
- ตำแหน่งที่ 7 บริเวณกลางชุดขดลวดแรงสูง
- ตำแหน่งที่ 8 บริเวณกลางชุดขดลวดแรงต่ำ
- ตำแหน่งที่ 9 บริเวณด้านล่างสุดของชุดขดลวดแรงสูง
- ตำแหน่งที่ 10 บริเวณด้านล่างสุดของชุดขดลวดแรงต่ำ
- ตำแหน่งที่ 11 บริเวณน้ำมันด้านบน
- ตำแหน่งที่ 12 บริเวณน้ำมันด้านล่าง

ตำแหน่งติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ล ที่บริเวณเฟส A,B และ C มีทั้งหมด 6 ตำแหน่งที่แสดงในรูปที่ 4.2 ประกอบไปด้วย

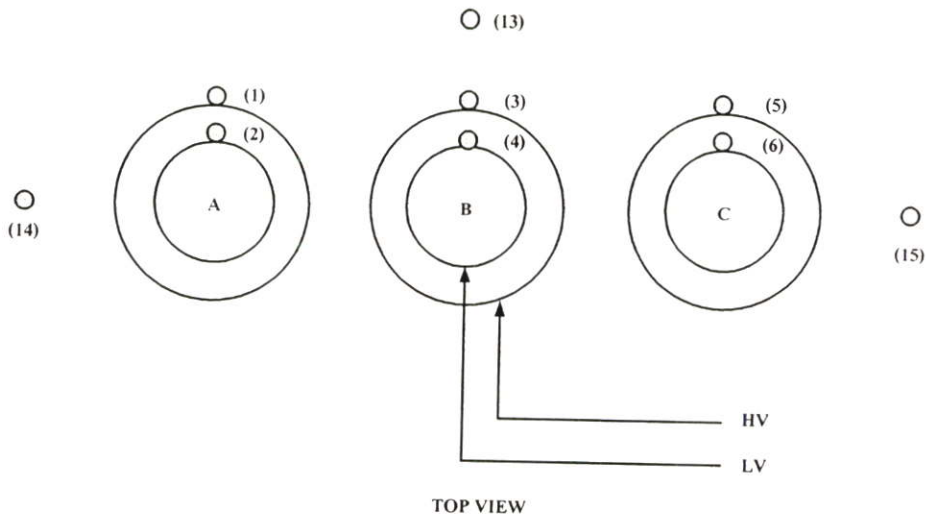
- ตำแหน่งที่ 1 บริเวณด้านบนสุดของชุดขดลวดแรงสูง เฟส A
- ตำแหน่งที่ 2 บริเวณด้านบนสุดของชุดขดลวดแรงต่ำ เฟส A
- ตำแหน่งที่ 3 บริเวณด้านบนสุดของชุดขดลวดแรงสูง เฟส B
- ตำแหน่งที่ 4 บริเวณด้านบนสุดของชุดขดลวดแรงต่ำ เฟส B
- ตำแหน่งที่ 5 บริเวณด้านบนสุดของชุดขดลวดแรงสูง เฟส C
- ตำแหน่งที่ 6 บริเวณด้านบนสุดของชุดขดลวดแรงต่ำ เฟส C

ตำแหน่งที่ 13,14 และ 15 เป็นตำแหน่งของ อุนทภูมิเวดล้อม ซึ่งจะวางเทอร์โมคัปเปิ้ลห่างจากหม้อแปลงประมาณ 1 เมตร ซึ่งแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.2



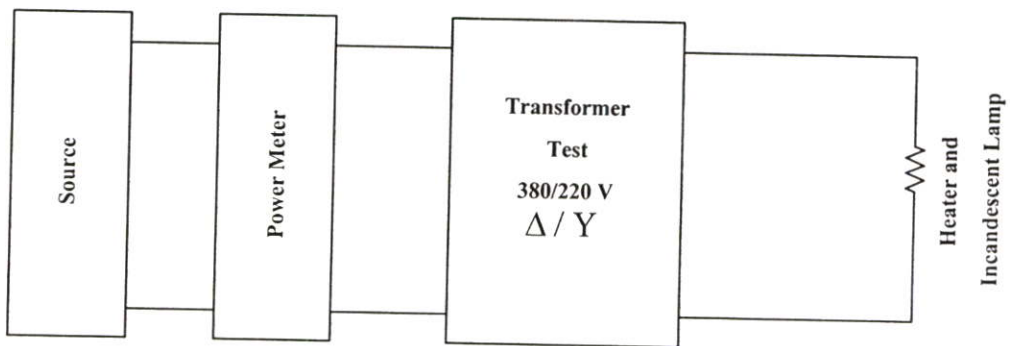
**SIDE VIEW**

รูปที่ 4.1 แสดงการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ลที่ส่วนต่างๆ ของเฟส A



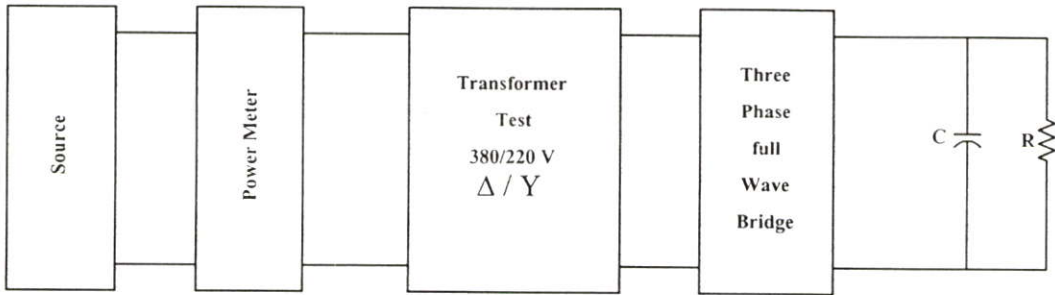
รูปที่ 4.2 แสดงการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ล ณ ตำแหน่งด้านบนสุดของชุดขดลวด

#### 4.3 วงจรการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น



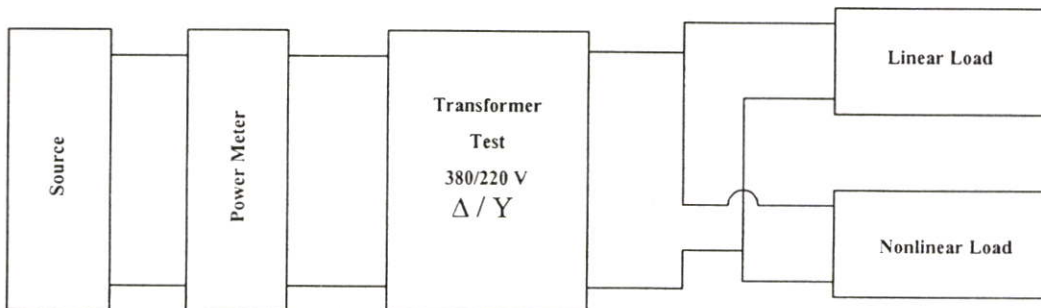
รูปที่ 4.3 แสดงวงจรการทดสอบเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น

#### 4.4 วงจรการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น



รูปที่ 4.4 แสดงวงจรการทดสอบเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น

#### 4.5 วงจรการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้นร่วมกับแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น

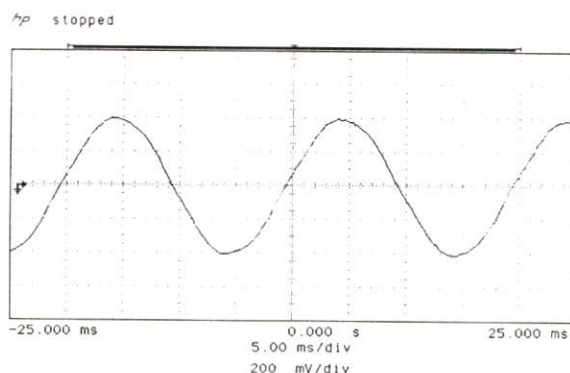


รูปที่ 4.5 แสดงวงจรการทดสอบเมื่อหม้อแปลงจ่ายร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้นร่วมกับแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น

## 4.6 วิธีการทดสอบและผลการทดสอบหาอุณหภูมิตามเงื่อนไขต่าง ๆ

### 4.6.1 การทดสอบอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น

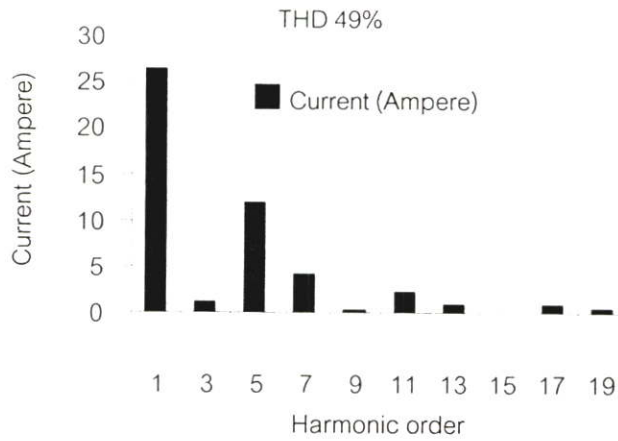
จากวงจรดังรูปที่ 4.3 โหลดของหม้อแปลงในเงื่อนไขข้อ 4.5.1 ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะประกอบไปด้วยหลอดไส้ 200 W และ ลวดความร้อน เป็น โหลด R และเมื่อต่อวงจรดังรูปที่ 4.3 จากนั้นทำการป้อนแรงดันทางด้านแรงสูงจนได้แรงดัน 380 V และ วัดกระแสทางด้านแรงต่ำให้ได้ กระแสที่พิกัด ซึ่งรูปคลื่นของกระแสทั้งทางแรงต่ำจะสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.6



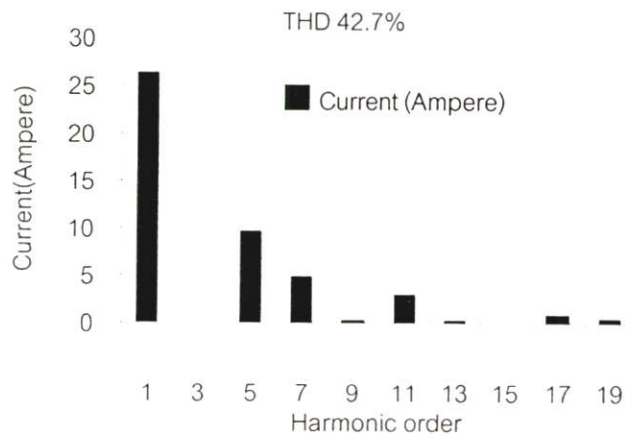
รูปที่ 4.6 แสดงรูปคลื่นของกระแสทางด้านแรงต่ำเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบเป็นเชิงเส้นที่พิกัด

### 4.6.2 การทดสอบอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า เมื่อจ่ายโหลด แบบกระแสไม่เชิงเส้นเพียงอย่างเดียว

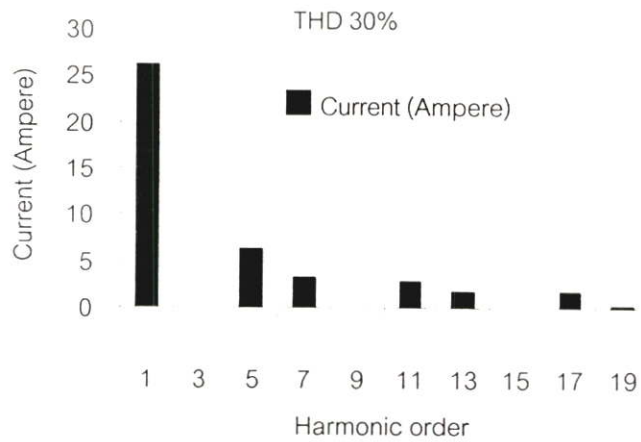
จากวงจรดังรูปที่ 4.4 โหลดของหม้อแปลงในเงื่อนไขข้อ 4.6.2 ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะประกอบไปด้วยเร็กติไฟเออร์ซึ่งจะเป็นแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกส์ หลอดไส้ 200 W และ ลวดความร้อนเป็นโหลด R และ การนำคาปาซิเตอร์ 32  $\mu\text{F}$ มาต่อขนานกับโหลด R เพื่อทำให้แรงดันไฟตรงเรียบขึ้นและทำให้กระแสสลับของแหล่งจ่ายไฟมีความผิดเพี้ยนของกระแสไปจากรูปคลื่น Sinusoidal มากขึ้น และ เมื่อต่อวงจรได้ดังรูปที่ 4.4 จากนั้นก็ทำการป้อนแรงดันทางด้านแรงสูงจนได้แรงดัน 380 V และ วัดกระแสทางด้านแรงต่ำให้ได้กระแสที่พิกัด จากนั้นทำการวัดความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวมซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้กระแสที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม ( THD<sub>i</sub> ) เท่ากับ 30 % , 42.7% และ 49% ซึ่งรูปคลื่นสัญญาณของกระแสและปริมาณของกระแสฮาร์มอนิกส์ในโหลดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวมต่าง ๆ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.7 ถึง 4.12



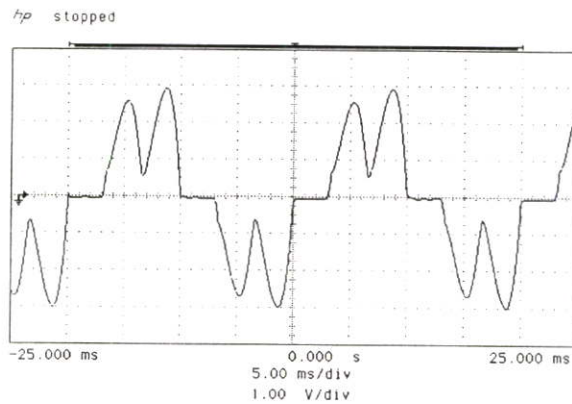
รูปที่ 4.7 แสดงปริมาณฮาร์มอนิกส์ในโหลดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (  $THD_i$  ) 49 % ที่ได้จากการทดสอบ



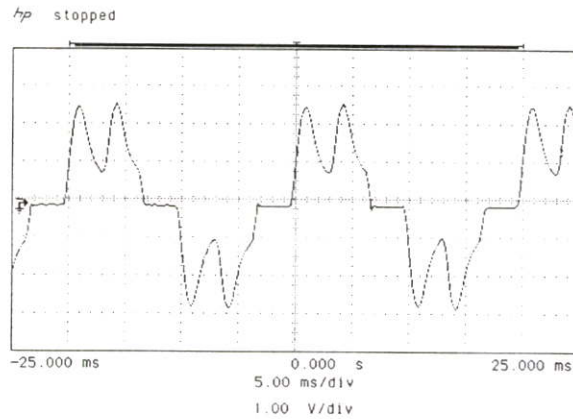
รูปที่ 4.8 แสดงปริมาณฮาร์มอนิกส์ในโหลดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (  $THD_i$  ) 42.7 % ที่ได้จากการทดสอบ



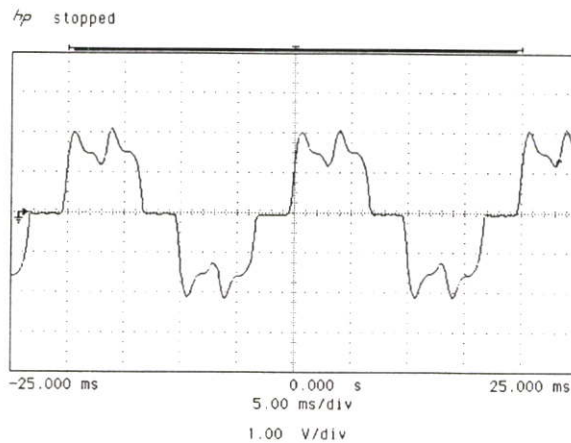
รูปที่ 4.9 แสดงปริมาณฮาร์มอนิกในโหลดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกทั้งหมด ( $THD_i$ ) 30% ที่ได้จากการทดสอบ



รูปที่ 4.10 แสดงรูปคลื่นของกระแสโหลดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกทั้งหมด ( $THD_i$ ) 49% ที่ได้จากการทดสอบ



รูปที่ 4.11 แสดง รูปคลื่นของกระแสโหลดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส้รวม (THD<sub>i</sub>) 42.7% ที่ได้จากการทดสอบ



รูปที่ 4.12 แสดงรูปคลื่นของกระแสโหลดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส้รวม (THD<sub>i</sub>) 30% ที่ได้จากการทดสอบ

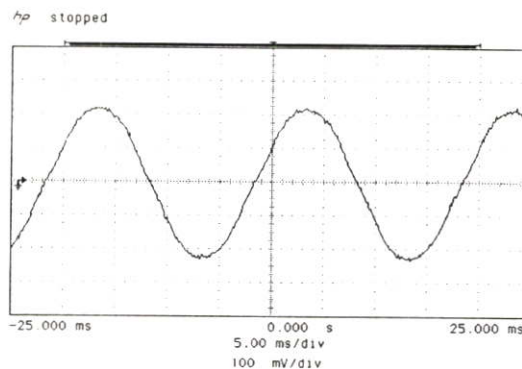
#### 4.6.3 การทดสอบอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้นร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น

จากวงจรดังรูปที่ 4.5 โหลดของหม้อแปลงในเงื่อนไขข้อ 4.6.3 ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะมีด้วยกันสองส่วน คือ 1) ส่วนของโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น ซึ่งประกอบไปด้วยโหลด R คือ ลวดความร้อน และ 2) ส่วนของโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งจะประกอบไปด้วย เร็กติไฟเออร์ซึ่ง

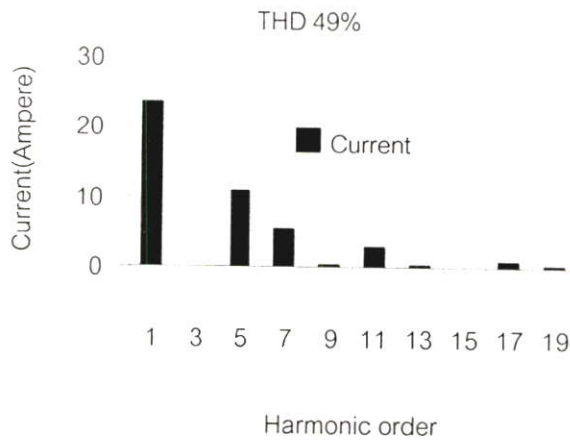
จะเป็นแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์โมนิกส์ หลอดไส้ 200 W และ ลวดความร้อนเป็นโหลด R และ การนำคาปาซิเตอร์ 32  $\mu\text{F}$  มาต่อขนานกับโหลด R เพื่อให้แรงดันไฟตรงเรียบขึ้นและทำให้กระแสสลับของแหล่งจ่ายไฟมีค่าความผิดเพี้ยนของกระแสไปจากรูปคลื่น Sinusoidal มากขึ้น และ เมื่อต่อวงจรได้ดังรูปที่ 4.5 จากนั้นก็ทำการป้อนแรงดันทางด้านแรงสูงจนได้แรงดัน 380 V และ วัดกระแสทางด้านแรงต่ำซึ่งต้องแยกวัดเป็นสองส่วน คือ 1) วัดกระแสแบบเป็นเชิงเส้นให้ได้กระแสตามเงื่อนไขที่ตั้งไว้ และ 2) วัดกระแสแบบไม่เป็นเชิงเส้นให้ได้กระแสตามเงื่อนไขที่ตั้งไว้ จากนั้นทำการวัดความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวมซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้กระแสที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม ( THD<sub>i</sub> ) เท่ากับ 30 % , 42.7% และ 49% ซึ่งรูปคลื่นสัญญาณของกระแสและปริมาณของกระแสฮาร์โมนิกส์ในโหลดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวมที่เงื่อนไขต่าง ๆ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.13 ถึง 4.25

**4.6.3.1** หม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 10% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 90% ของกระแสที่พิกัด ซึ่งมีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม ( THD<sub>i</sub> ) 30% , 42.7% และ 49%

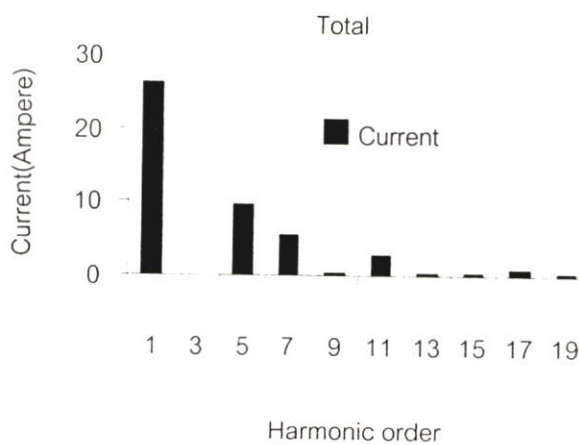
จากเงื่อนไขข้อ 4.6.3.1 สามารถแสดงรูปคลื่นสัญญาณของกระแสและปริมาณของกระแสฮาร์โมนิกส์ได้ดังรูปที่ 4.13 ถึง 4.25



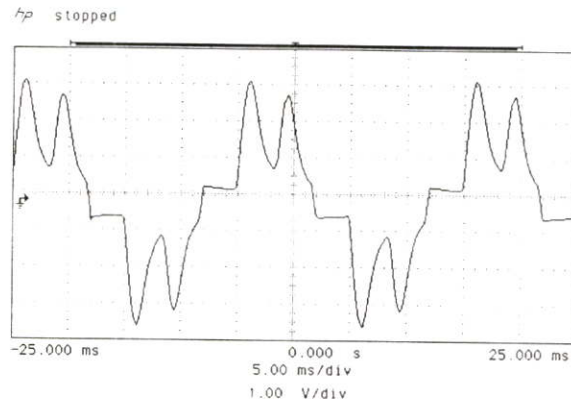
รูปที่ 4.13 แสดงรูปคลื่นของกระแสโหลดแบบเป็นเชิงเส้น 10% ของกระแสที่พิกัด



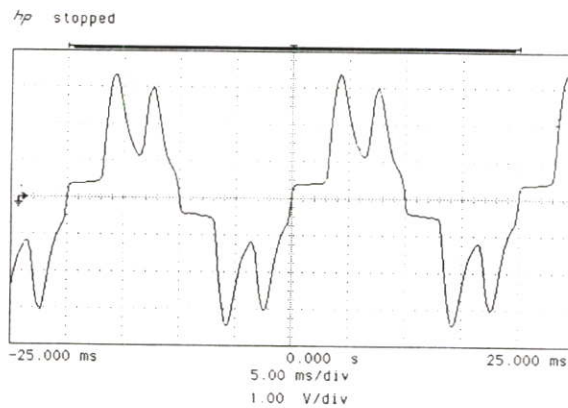
รูปที่ 4.14 แสดงปริมาณของกระแสฮาร์มอนิกส์เมื่อจ่ายโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น 90% ของกระแสที่พิกัด เมื่อมีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม(THD,) 49% ที่ได้จากการทดสอบ



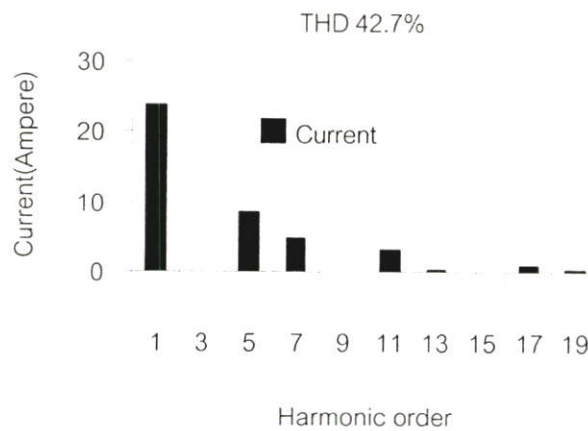
รูปที่ 4.15 แสดงปริมาณของกระแสเมื่อจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 10% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 90 % ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม(THD,) 49% ที่ได้จากการทดสอบ



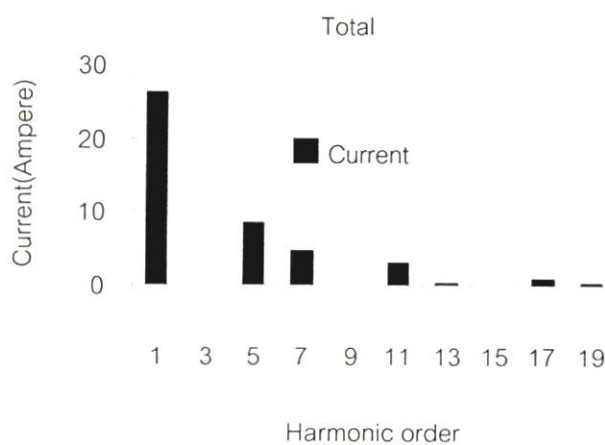
รูปที่ 4.16 แสดงรูปคลื่นของกระแสโหลด 90% ของกระแสที่พิกัด เมื่อมีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD<sub>i</sub>) 49 % ที่ได้จากการทดสอบ



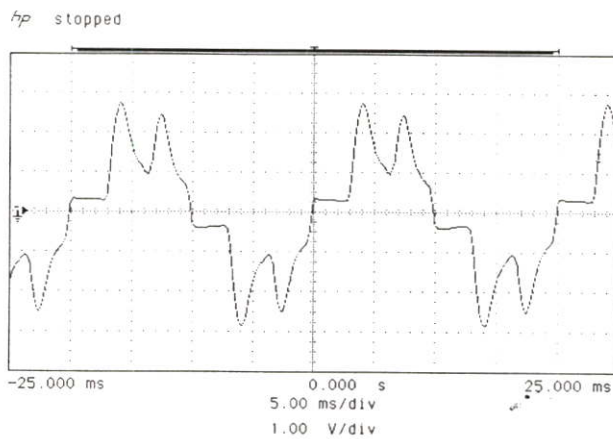
รูปที่ 4.17 แสดงรูปคลื่นของกระแสเมื่อจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 10% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 90 % ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม(THD<sub>i</sub>) 49% ที่ได้จากการทดสอบ



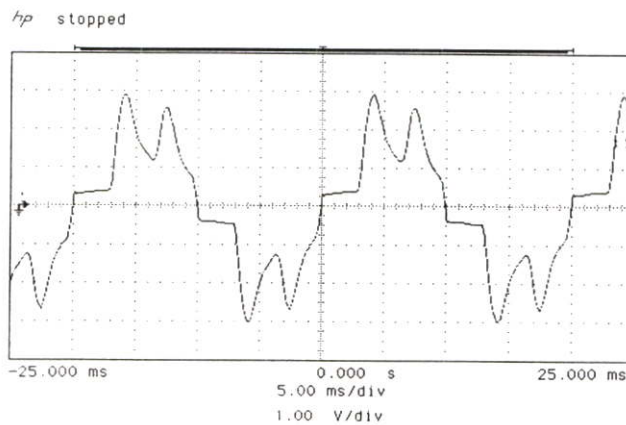
รูปที่ 4.18 แสดงปริมาณของกระแสฮาร์โมนิกส์เมื่อจ่ายโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น 90% ของกระแสที่พิกัด เมื่อมีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม(THD<sub>i</sub>) 42.7% ที่ได้จากการทดสอบ



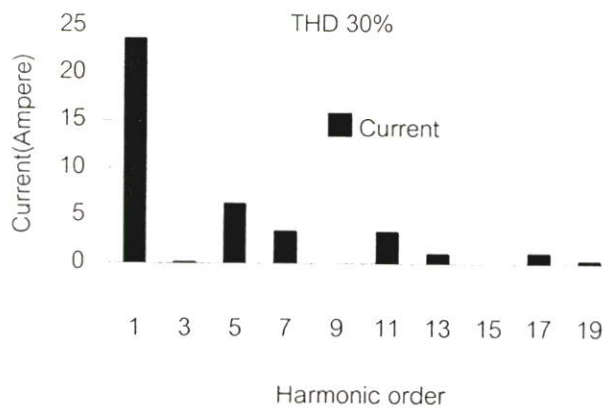
รูปที่ 4.19 แสดงปริมาณของกระแสเมื่อจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 10% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 90 % ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม(THD<sub>i</sub>) 42.7% ที่ได้จากการทดสอบ



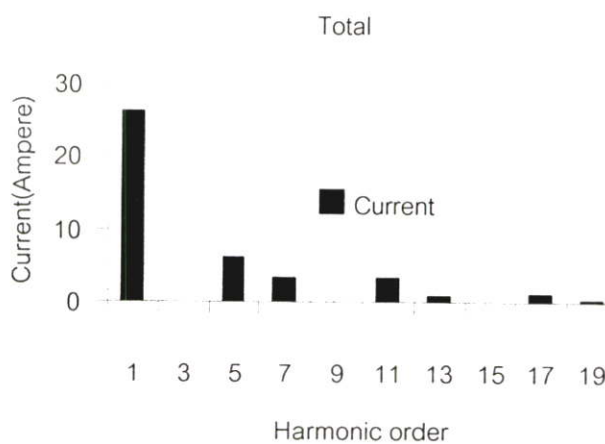
รูปที่ 4.20 แสดงรูปคลื่นของกระแสโหลด 90% ของกระแสที่พิกัด เมื่อมีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD<sub>i</sub>) 42.7 % ที่ได้จากการทดสอบ



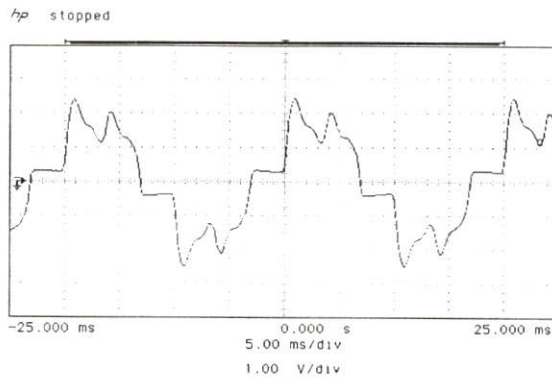
รูปที่ 4.21 แสดงรูปคลื่นของกระแสเมื่อจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 10% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 90 % ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม(THD<sub>i</sub>) 42.7% ที่ได้จากการทดสอบ



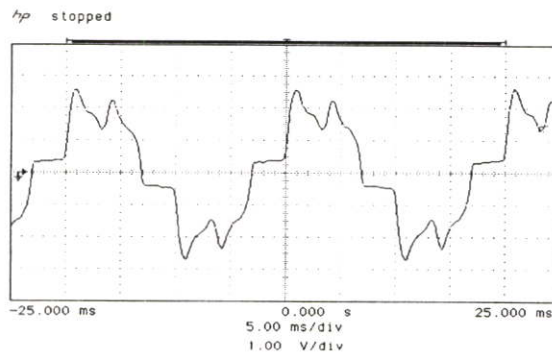
รูปที่ 4.22 แสดงปริมาณของกระแสฮาร์มอนิกส์เมื่อจ่ายโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น 90% ของกระแสที่พิกัด เมื่อมีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม(THD<sub>r</sub>) 30% ที่ได้จากการทดสอบ



รูปที่ 4.23 แสดงปริมาณของกระแสเมื่อจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 10% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 90 % ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม(THD<sub>r</sub>) 30% ที่ได้จากการทดสอบ



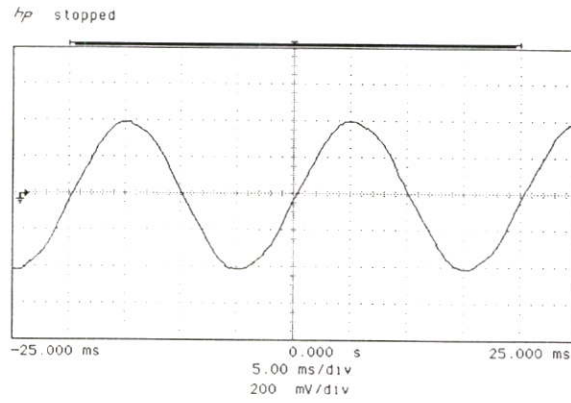
รูปที่ 4.24 แสดงรูปคลื่นของกระแสโหลด 90% ของกระแสที่พิกัด เมื่อมีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD<sub>i</sub>) 30 % ที่ได้จากการทดสอบ



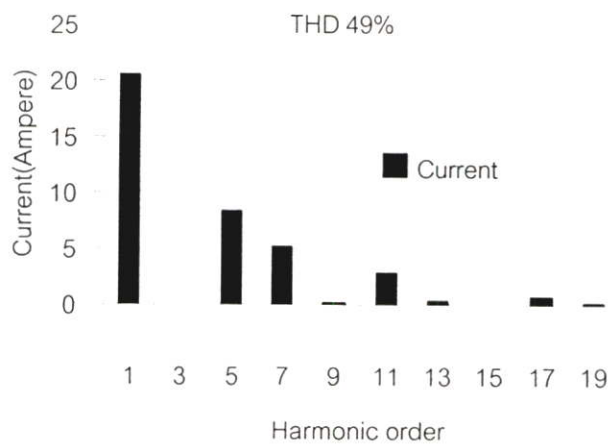
รูปที่ 4.25 แสดงรูปคลื่นของกระแสเมื่อจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 10% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 90 % ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม(THD<sub>i</sub>) 30% ที่ได้จากการทดสอบ

4.6.3.2 หม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ของกระแสที่พิกัด ซึ่งมีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD<sub>i</sub>) 30%, 42.7% และ 49%

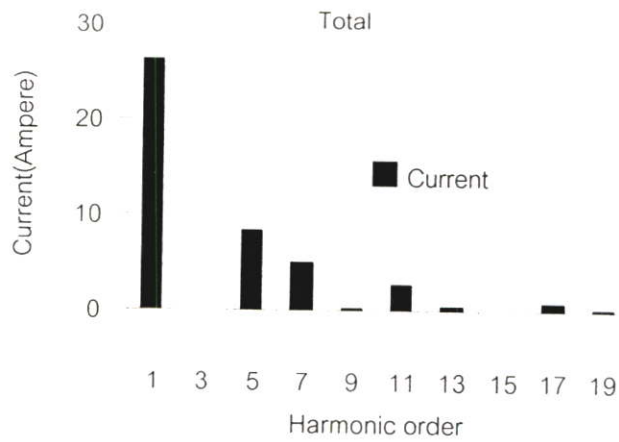
จากเงื่อนไขข้อ 4.6.3.2 สามารถแสดงรูปคลื่นสัญญาณของกระแสและปริมาณของกระแสฮาร์มอนิกส์ได้ดังรูปที่ 4.26 ถึง 4.38



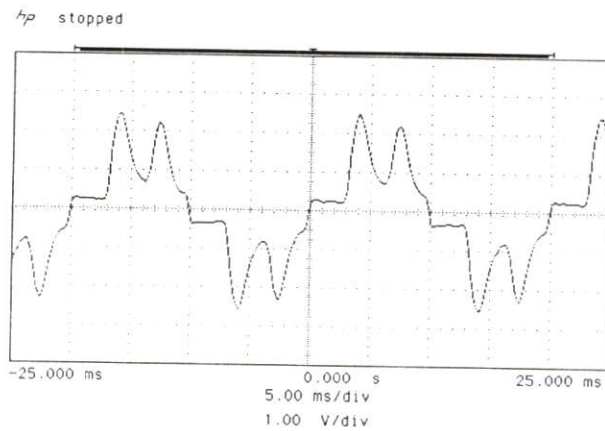
รูปที่ 4.26 แสดงรูปคลื่นของกระแสโหลดแบบเป็นเชิงเส้น 20% ของกระแสที่พิกัด



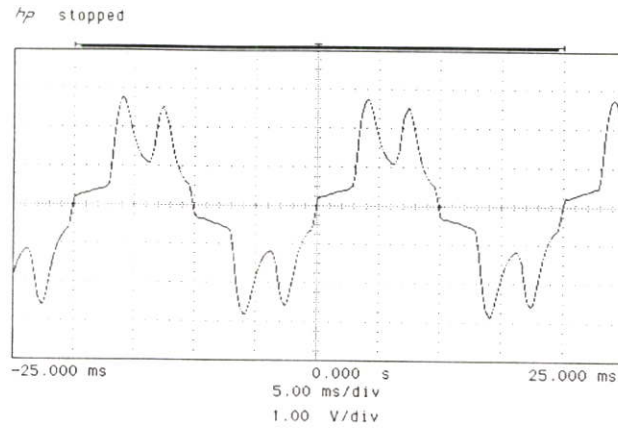
รูปที่ 4.27 แสดงปริมาณของกระแสฮาร์โมนิกส์เมื่อจ่ายโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น 80% ของกระแสที่พิกัด เมื่อมีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม(THD) 49% ที่ได้จากการทดสอบ



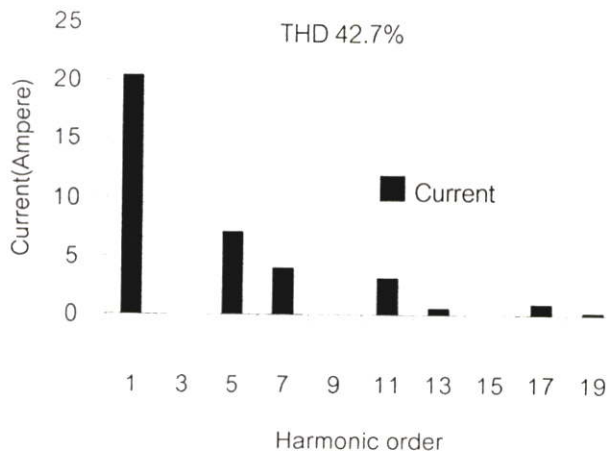
รูปที่ 4.28 แสดงปริมาณของกระแสเมื่อจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80 % ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม (THD) 49% ที่ได้จากการทดสอบ



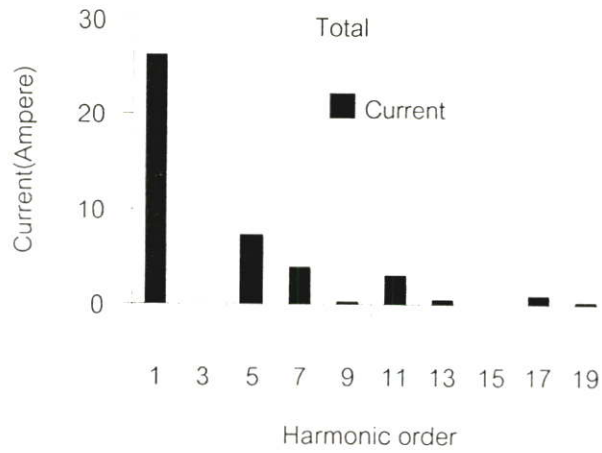
รูปที่ 4.29 แสดงรูปคลื่นของกระแสโหลด 80% ของกระแสที่พิกัด เมื่อมีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม ( THD<sub>i</sub> ) 49 % ที่ได้จากการทดสอบ



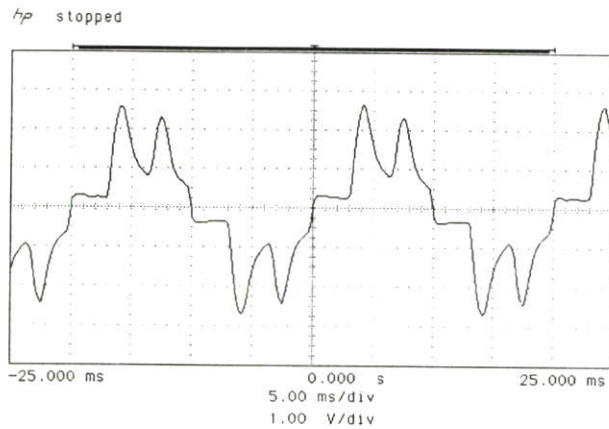
รูปที่ 4.30 แสดงรูปคลื่นของกระแสเมื่อจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80 % ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD) 49% ที่ได้จากการทดสอบ



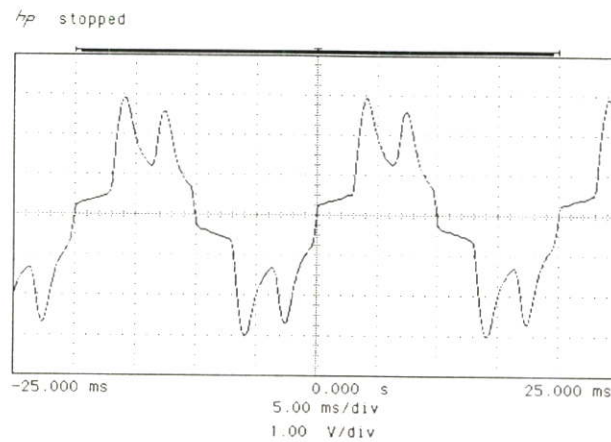
รูปที่ 4.31 แสดงปริมาณของกระแสฮาร์มอนิกส์เมื่อจ่ายโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น 80% ของกระแสที่พิกัด เมื่อมีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD) 42.7% ที่ได้จากการทดสอบ



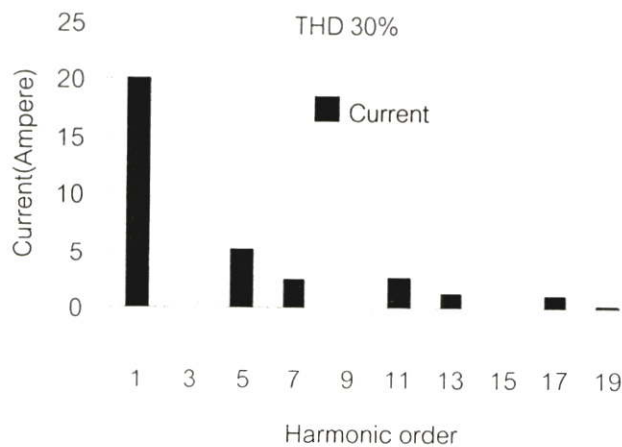
รูปที่ 4.32 แสดงปริมาณของกระแสเมื่อจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80 % ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD) 42.7% ที่ได้จากการทดสอบ



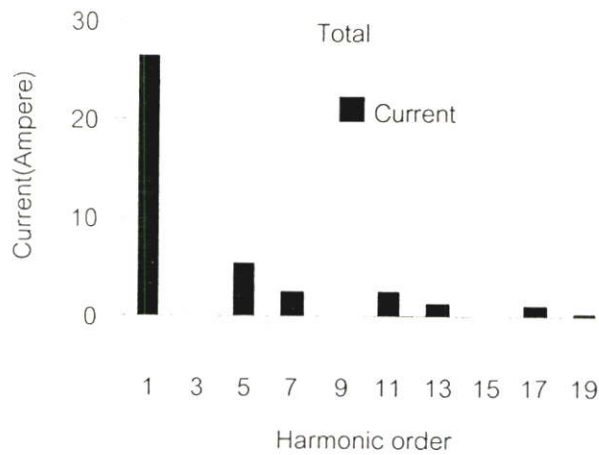
รูปที่ 4.33 แสดงรูปคลื่นของกระแสโหลด 80% ของกระแสที่พิกัด เมื่อมีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD) 42.7 % ที่ได้จากการทดสอบ



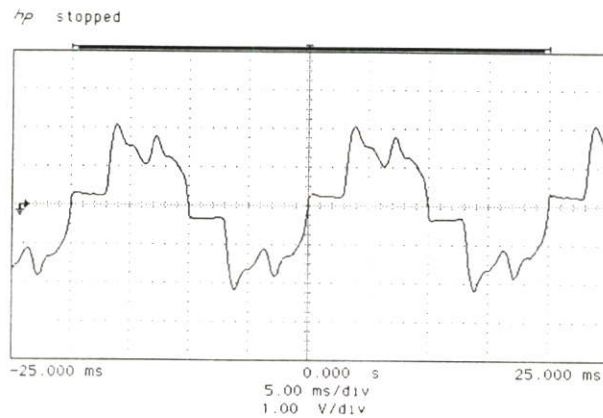
รูปที่ 4.34 แสดงรูปคลื่นของกระแสเมื่อจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม(THD<sub>i</sub>) 42.7% ที่ได้จากการทดสอบ



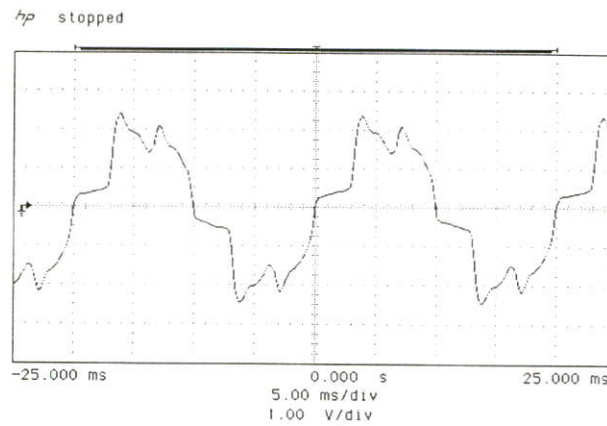
รูปที่ 4.35 แสดงปริมาณของกระแสฮาร์มอนิกส์เมื่อจ่ายโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น 80% ของกระแสที่พิกัด เมื่อมีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม(THD<sub>i</sub>) 30% ที่ได้จากการทดสอบ



รูปที่ 4.36 แสดงปริมาณของกระแสเมื่อจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80 % ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม (THD) 30% ที่ได้จากการทดสอบ



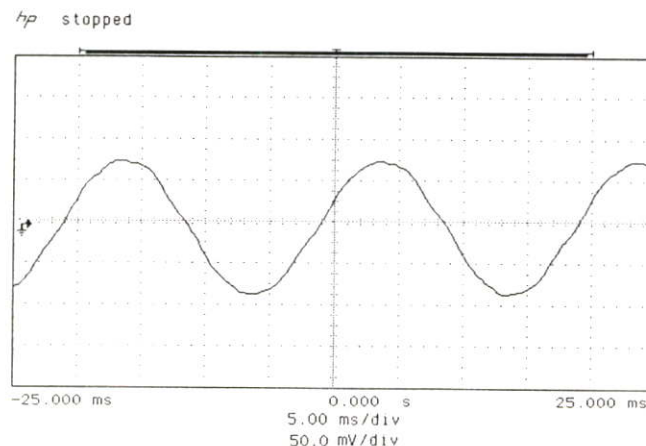
รูปที่ 4.37 แสดงรูปคลื่นของกระแสโหลด 80% ของกระแสที่พิกัด เมื่อมีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม ( THD<sub>i</sub> ) 30 % ที่ได้จากการทดสอบ



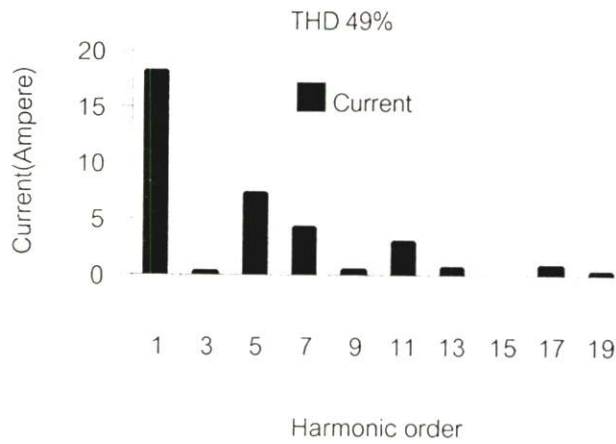
รูปที่ 4.38 แสดงรูปคลื่นของกระแสเมื่อจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80 % ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD<sub>r</sub>) 30% ที่ได้จากการทดสอบ

4.6.3.3 หม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 30% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ของกระแสที่พิกัด ซึ่งมีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD<sub>r</sub>) 30%, 42.7% และ 49%

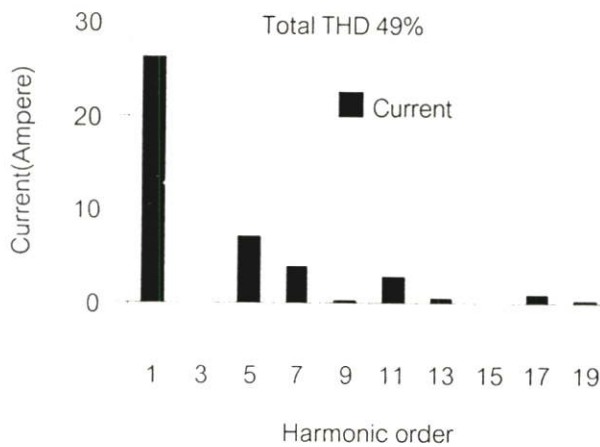
จากเงื่อนไขข้อ 4.6.3.3 สามารถแสดงรูปคลื่นสัญญาณของกระแสและปริมาณของกระแสฮาร์โมนิกส์ได้ดังรูปที่ 4.39 ถึง 4.51



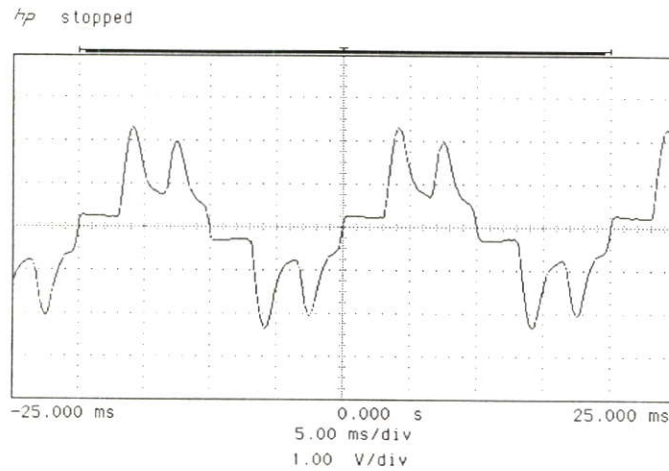
รูปที่ 4.39 แสดงรูปคลื่นของกระแสโหลดแบบเป็นเชิงเส้น 30% ของกระแสที่พิกัด



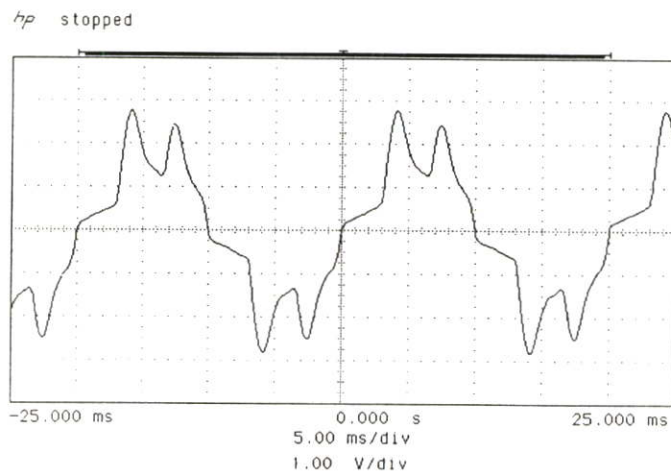
**รูปที่ 4.40** แสดงปริมาณของกระแสฮาร์มอนิกส์เมื่อจ่ายโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น 70% ของกระแสที่พิกัด เมื่อมีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม(THD<sub>i</sub>) 49% ที่ได้จากการทดสอบ



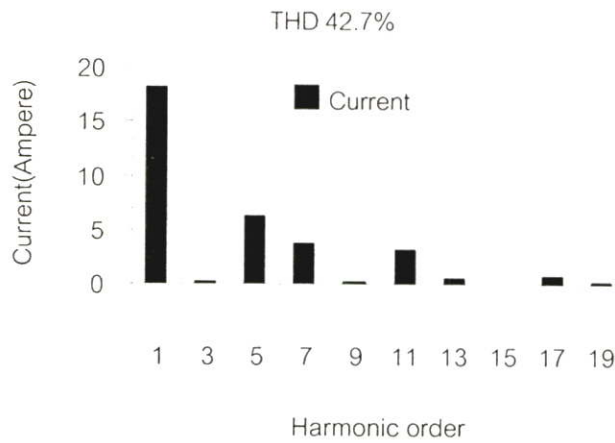
**รูปที่ 4.41** แสดงปริมาณของกระแสเมื่อจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 30% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70 % ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม(THD<sub>i</sub>) 49% ที่ได้จากการทดสอบ



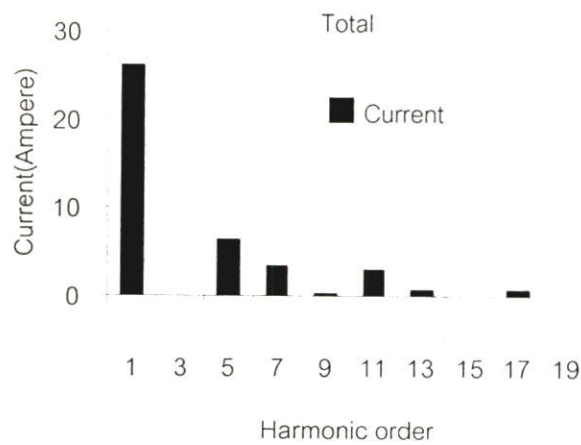
รูปที่ 4.42 แสดงรูปคลื่นของกระแสโหลด 70% ของกระแสที่พิกัด เมื่อมีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD<sub>i</sub>) 49 % ที่ได้จากการทดสอบ



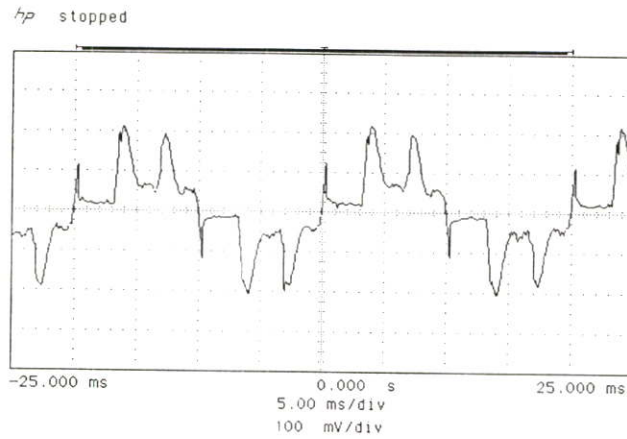
รูปที่ 4.43 แสดงรูปคลื่นของกระแสเมื่อจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 30% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70 % ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม(THD<sub>i</sub>) 49% ที่ได้จากการทดสอบ



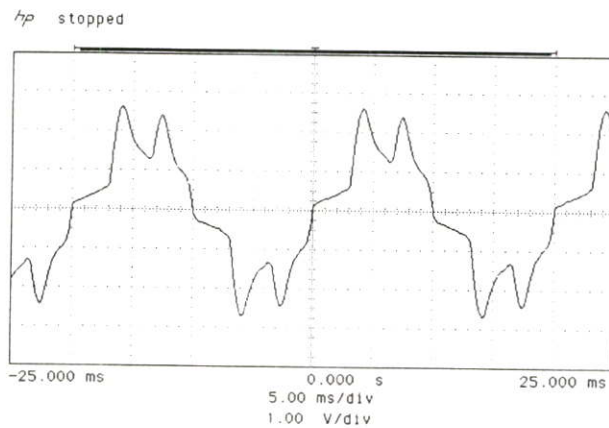
รูปที่ 4.44 แสดงปริมาณของกระแสฮาร์มอนิกส์เมื่อจ่ายโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น 70% ของกระแสที่พิกัด เมื่อมีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม(THD<sub>i</sub>) 42.7% ที่ได้จากการทดสอบ



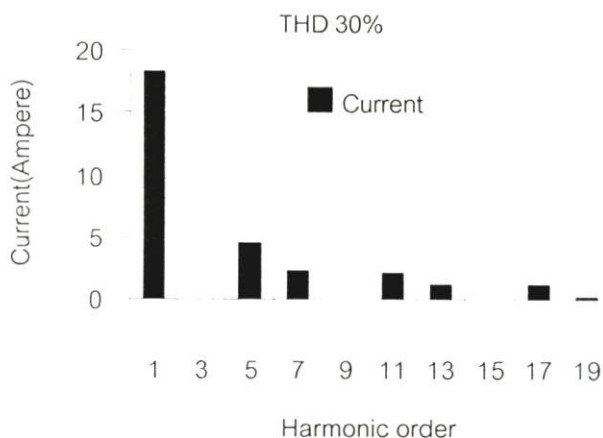
รูปที่ 4.45 แสดงปริมาณของกระแสเมื่อจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 30% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70 % ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม(THD<sub>i</sub>) 42.7% ที่ได้จากการทดสอบ



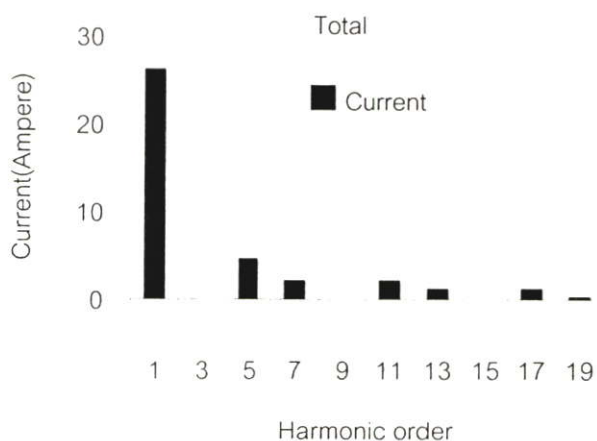
รูปที่ 4.46 แสดงรูปคลื่นของกระแสโหลด 70% ของกระแสที่พิกัด เมื่อมีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD<sub>i</sub>) 42.7 % ที่ได้จากการทดสอบ



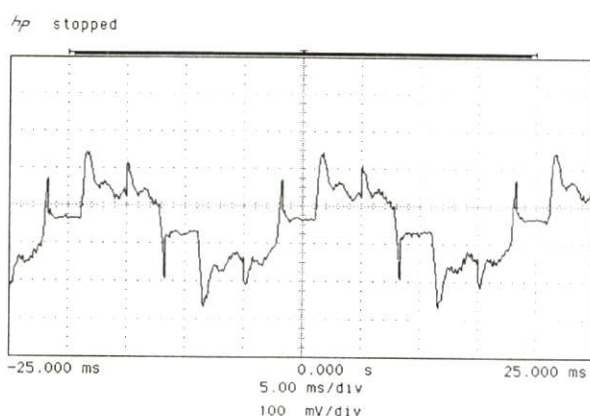
รูปที่ 4.47 แสดงรูปคลื่นของกระแสเมื่อจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 30% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70 % ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม(THD<sub>i</sub>) 42.7% ที่ได้จากการทดสอบ



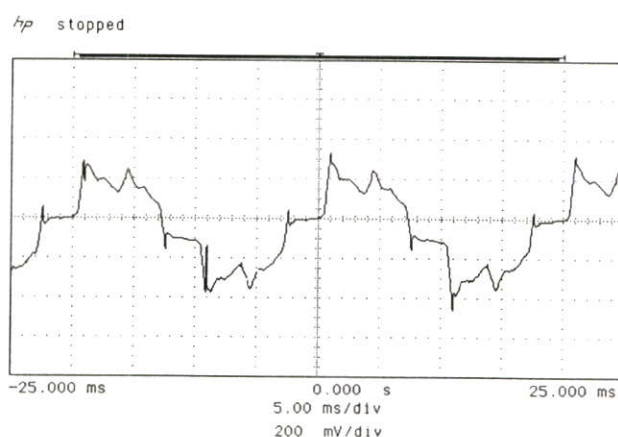
รูปที่ 4.48 แสดงปริมาณของกระแสฮาร์มอนิกส์เมื่อจ่ายโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น 70% ของกระแสที่พิกัด เมื่อมีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม(THD,) 30% ที่ได้จากการทดสอบ



รูปที่ 4.49 แสดงปริมาณของกระแสเมื่อจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 30% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70 % ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม(THD,) 30% ที่ได้จากการทดสอบ



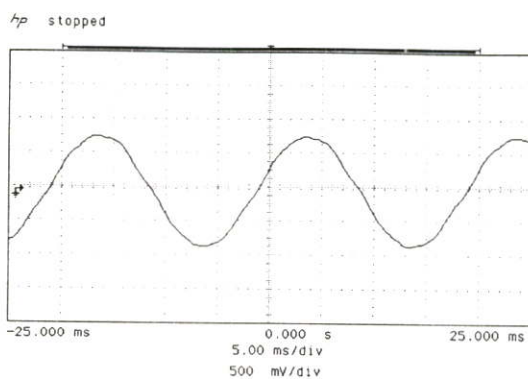
รูปที่ 4.50 แสดงรูปคลื่นของกระแสโหลด 70% ของกระแสที่พิกัด เมื่อมีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD<sub>i</sub>) 30% ที่ได้จากการทดสอบ



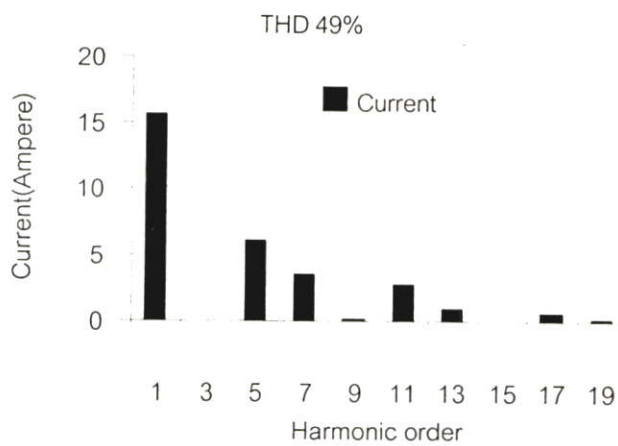
รูปที่ 4.51 แสดงรูปคลื่นของกระแสเมื่อจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 30% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70 % ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม(THD<sub>i</sub>) 30% ที่ได้จากการทดสอบ

4.6.3.4 หม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ของกระแสที่พิกัด ซึ่งมีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD<sub>i</sub>) 30%, 42.7% และ 49%

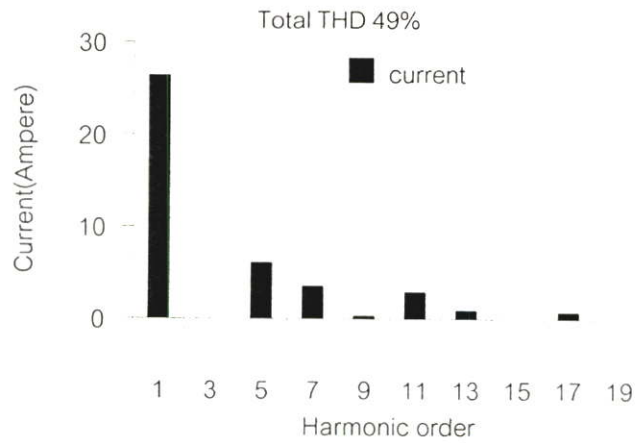
จากเงื่อนไขข้อ 4.6.3.4 สามารถแสดงรูปคลื่นสัญญาณของกระแสและปริมาณของกระแสฮาร์มอนิกส์ได้ดังรูปที่ 4.52 ถึง 4.64



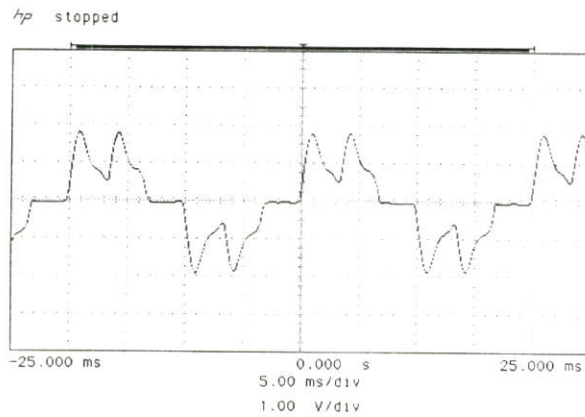
รูปที่ 4.52 แสดงรูปคลื่นของกระแสโหลดแบบเป็นเชิงเส้น 40% ของกระแสที่พิกัด



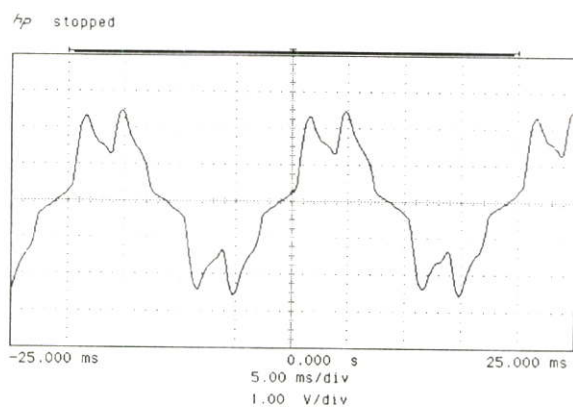
รูปที่ 4.53 แสดงปริมาณของกระแสฮาร์มอนิกส์เมื่อจ่ายโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น 60% ของกระแสที่พิกัด เมื่อมีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม(THD) 49% ที่ได้จากการทดสอบ



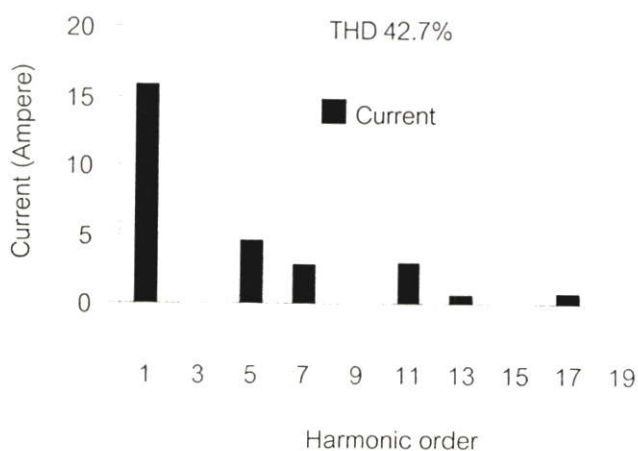
รูปที่ 4.54 แสดงปริมาณของกระแสเมื่อจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60 % ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD<sub>i</sub>) 49% ที่ได้จากการทดสอบ



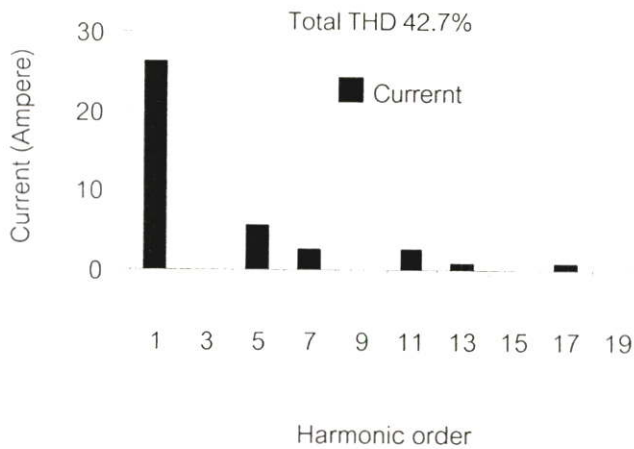
รูปที่ 4.55 แสดงรูปคลื่นของกระแสโหลด 60% ของกระแสที่พิกัด เมื่อมีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD<sub>i</sub>) 49% ที่ได้จากการทดสอบ



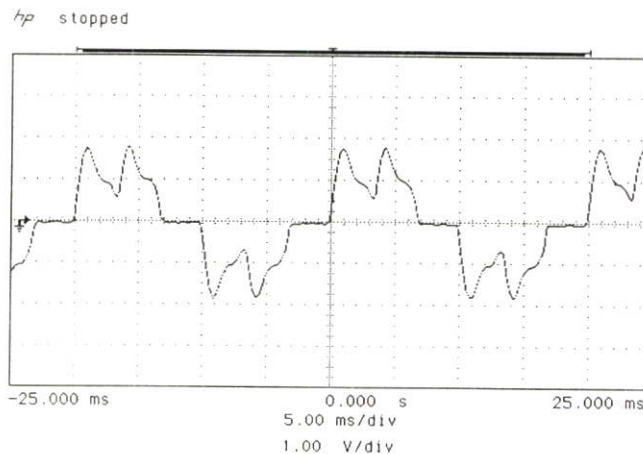
รูปที่ 4.56 แสดงรูปคลื่นของกระแสเมื่อจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60 % ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม(THD) 49% ที่ได้จากการทดสอบ



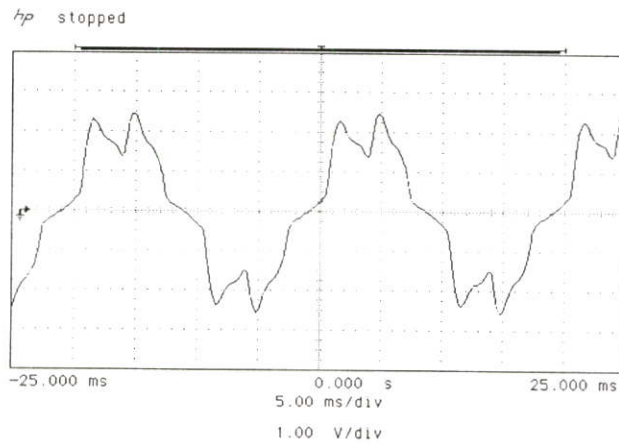
รูปที่ 4.57 แสดงปริมาณของกระแสฮาร์มอนิกส์เมื่อจ่ายโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น 60% ของกระแสที่พิกัด เมื่อมีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม(THD) 42.7% ที่ได้จากการทดสอบ



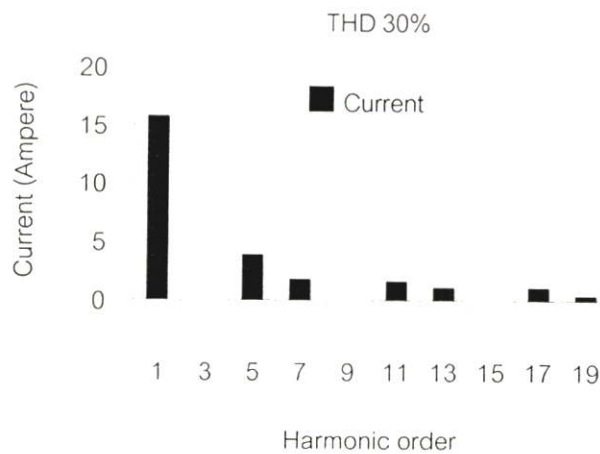
รูปที่ 4.58 แสดงปริมาณของกระแส เมื่อจ่ายโหลดร่วมกันระหว่าง โหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60 % ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม(THD) 42.7% ที่ได้จากการทดสอบ



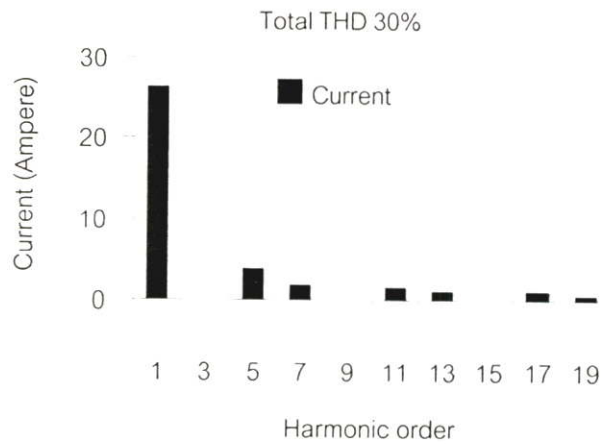
รูปที่ 4.59 แสดงรูปคลื่นของกระแสโหลด 60% ของกระแสที่พิกัด เมื่อมีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม ( THD<sub>i</sub> ) 42.7% ที่ได้จากการทดสอบ



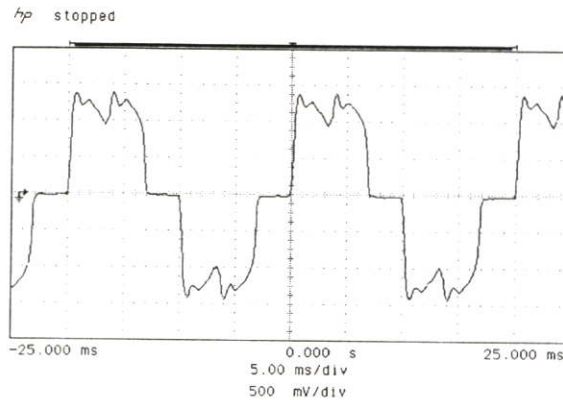
รูปที่ 4.60 แสดงรูปคลื่นของกระแสเมื่อจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60 % ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม(THD,) 42.7% ที่ได้จากการทดสอบ



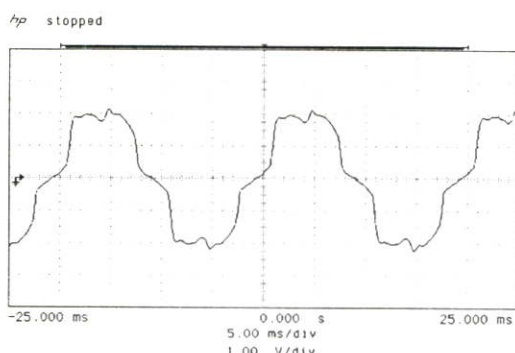
รูปที่ 4.61 แสดงปริมาณของกระแสฮาร์มอนิกส์เมื่อจ่ายโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น 60% ของกระแสที่พิกัด เมื่อมีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม(THD,) 30% ที่ได้จากการทดสอบ



รูปที่ 4.62 แสดงปริมาณของกระแส เมื่อจ่ายโหลดร่วมกันระหว่าง โหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสร่วม (THD<sub>i</sub>) 30% ที่ได้จากการทดสอบ



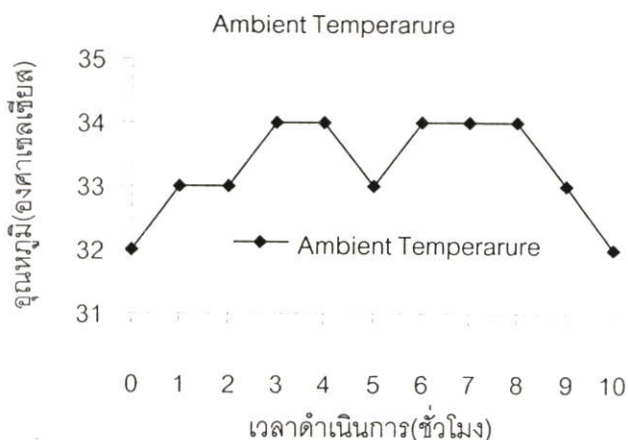
รูปที่ 4.63 แสดงรูปคลื่นของกระแสโหลด 60% ของกระแสที่พิกัด เมื่อมีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสร่วม (THD<sub>i</sub>) 30% ที่ได้จากการทดสอบ



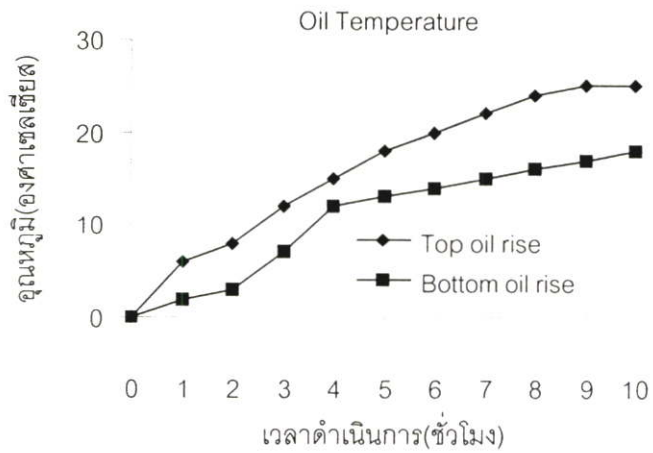
รูปที่ 4.64 แสดงรูปคลื่นของกระแสเมื่อจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60 % ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม(THD) 30% ที่ได้จากการทดสอบ

#### 4.7 ผลการทดสอบอุณหภูมิที่ส่วนต่าง ๆ ของหม้อแปลงไฟฟ้า

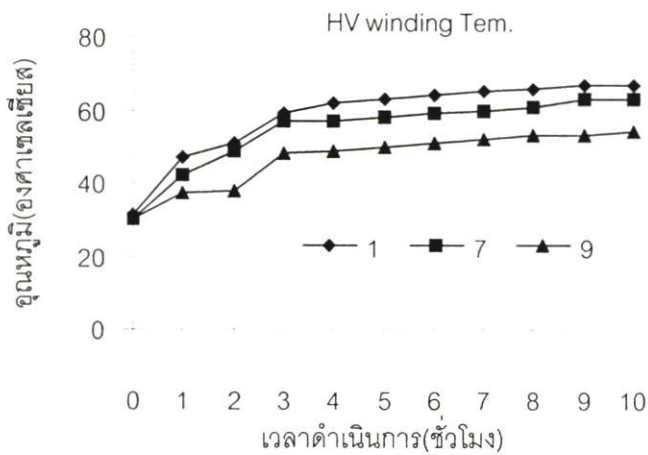
4.7.1 ผลการทดสอบอุณหภูมิที่ส่วนต่าง ๆ ของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้นเพียงอย่างเดียว ตามเงื่อนไขข้อ 4.1



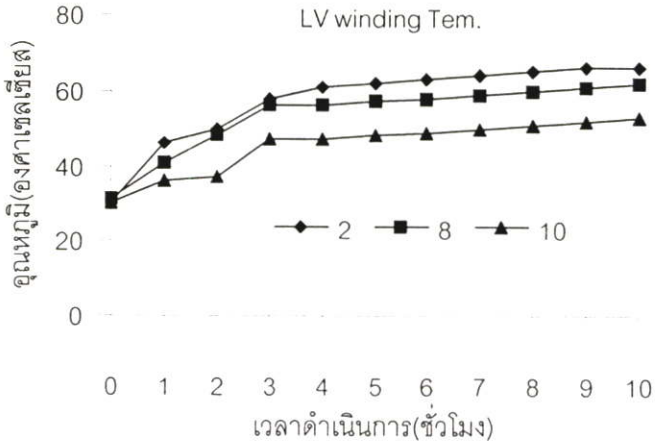
รูปที่ 4.65 แสดงผลการทดสอบอุณหภูมิแวดล้อมของหม้อแปลง ขณะจ่ายโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้นเพียงอย่างเดียว



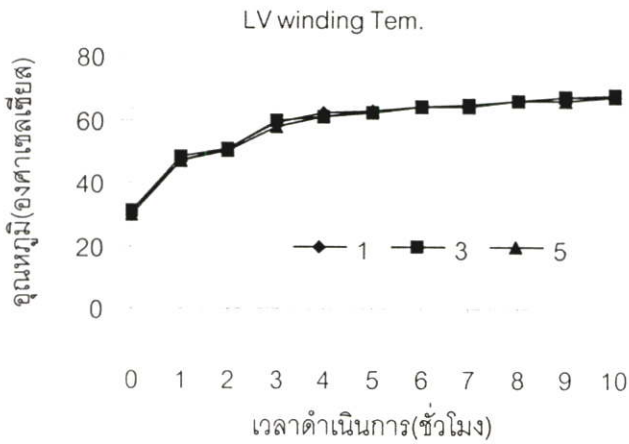
รูปที่ 4.66 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน และอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านล่าง



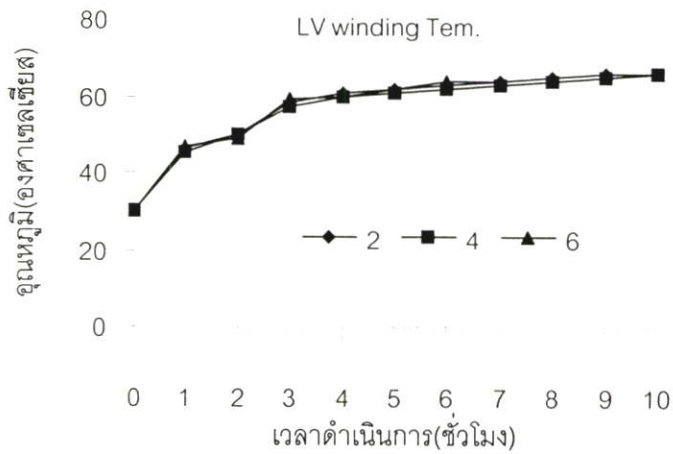
รูปที่ 4.67 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิด้านบนสุด กลาง และ ด้านล่างสุด ของชุดขดลวดแรงสูง เฟส A



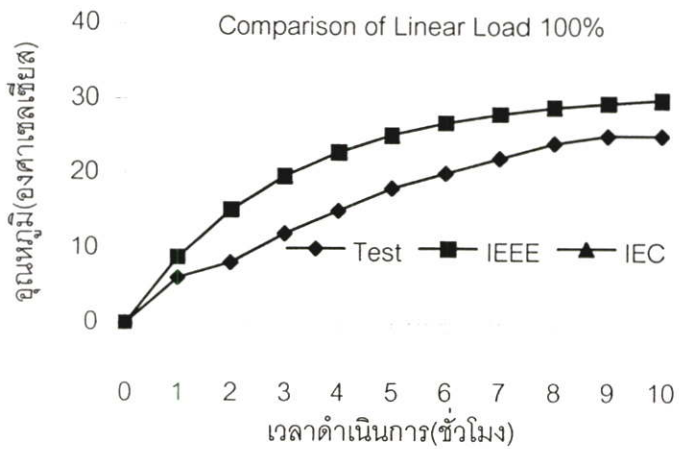
รูปที่ 4.68 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิด้านบนสุด กลาง และ ด้านล่างสุด ของชุดขดลวดแรงต่ำ เฟส A



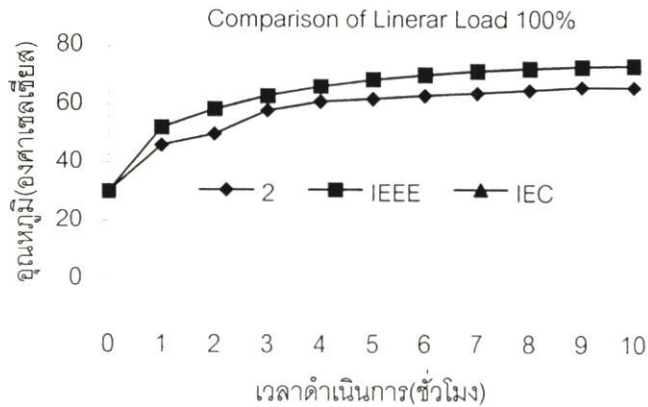
รูปที่ 4.69 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิด้านบนสุดของชุดขดลวดแรงสูง เฟส A, เฟส B และ เฟส C



รูปที่ 4.70 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิต้านบนสุดของชุดขดลวดแรงต่ำ เฟส A, เฟส B และ เฟส C



รูปที่ 4.71 แสดงการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันต้านบนตามมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC เมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น กับ ผลการทดสอบ



รูปที่ 4.72 แสดงการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ตามมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC เมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น กับ ผลการทดสอบ (ตำแหน่งที่ 2)

รูปที่ 4.65 เป็นการทดสอบวัดอุณหภูมิแวดล้อม ขณะจ่ายโหลดแบบเป็นเชิงเส้นเพียงอย่างเดียว พบว่า อุณหภูมิของโรงงานที่ใช้ทดสอบมีการเปลี่ยนแปลงตลอดทั้งวัน ซึ่งจะมีผลอย่างมากต่อการทำนายอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้ผลการทำนายเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบมีความคลาดเคลื่อนออกไปบ้าง เพราะในการทำนายจะกำหนดให้อุณหภูมิแวดล้อมมีค่าคงที่ตลอดเวลา

รูปที่ 4.66 เป็นการเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิน้ำมันด้านบน, อุณหภูมิน้ำมันด้านล่าง และอุณหภูมิแวดล้อม พบว่าอุณหภูมิน้ำมันด้านบนของหม้อแปลงจะสูงกว่าอุณหภูมิน้ำมันด้านล่าง เพราะว่า การระบายอากาศจะระบายความร้อนจากด้านล่างขึ้นไปข้างบนซึ่งจะทำให้อุณหภูมิน้ำมันด้านบนสูงกว่าอุณหภูมิน้ำมันด้านล่าง ดังการอธิบายในหัวข้อที่ 2.5.2 หัวข้อที่ 3.1 รูปที่ 3.1 และรูปที่ 3.2 และจะส่งผลทำให้อุณหภูมิของชุดขดลวดเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วยดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.65 จากรูปพบว่าอุณหภูมิแวดล้อมของหม้อแปลงเปลี่ยนแปลงตลอดทั้งวัน ซึ่งจะเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า

รูปที่ 4.67 เป็นการเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิเฟส A ณ ตำแหน่งบนสุดของชุดขดลวดทางด้านแรงสูง (ตำแหน่งที่ 1) กลางชุดขดลวดทางด้านแรงสูง (ตำแหน่งที่ 7) และด้านล่างสุดของชุดขดลวด ( ตำแหน่งที่ 9) จากผลการทดสอบพบว่าตำแหน่งที่ร้อนที่สุดของชุดขดลวดทางด้านแรงสูงคือตำแหน่งที่ 1 เพราะฉะนั้นฉนวน ณ ตำแหน่งที่ 1 จะเสื่อมสภาพเร็วกว่าตำแหน่งอื่น ๆ

รูปที่ 4.68 เป็นการเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิของเฟส A ณ ตำแหน่งบนสุดของชุดขดลวดทางด้านแรงต่ำ (ตำแหน่งที่ 2) กลางชุดขดลวดทางด้านแรงต่ำ ( ตำแหน่งที่ 8) และด้านล่างสุดของชุดขดลวด ( ตำแหน่งที่ 10) จากผลการทดสอบพบว่าตำแหน่งที่ร้อนที่สุดของชุดขดลวดทางด้านแรงต่ำคือตำแหน่งที่ 2 ซึ่งจะสัมพันธ์กันกับตำแหน่งที่ร้อนที่สุดของชุดขดลวดทางด้าน

แรงสูง ซึ่งก็คือตำแหน่งที่ 1 ฉะนั้นจำนวนของชุดขดลวดเฟส A ณ ตำแหน่งบนสุดของชุดขดลวดทั้งทางด้านแรงสูง และ ทางด้านแรงต่ำจะเสื่อมสภาพเร็วกว่าตำแหน่งอื่น ๆ

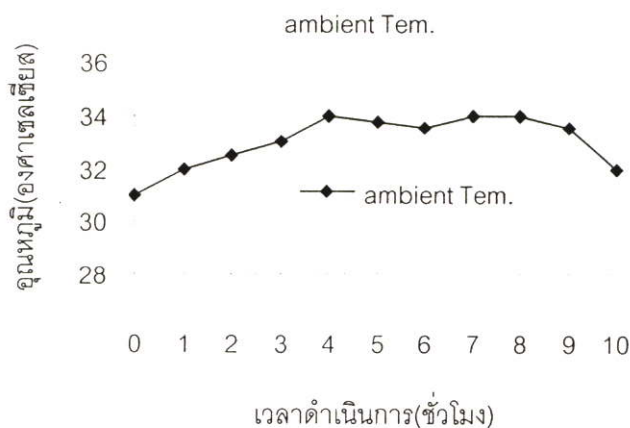
รูปที่ 4.69 เป็นการเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งบนสุดของชุดขดลวดทางด้านแรงสูงของ เฟส A, B และ C พบว่ามีอุณหภูมิใกล้เคียงกัน ฉะนั้นจำนวนของชุดขดลวดด้านบนของทั้งสามเฟสจะเสื่อมสภาพเร็วกว่าตำแหน่งอื่น ๆ

รูปที่ 4.70 เป็นการเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งบนสุดของชุดขดลวดทางด้านแรงต่ำของเฟส A, B และ C พบว่ามีอุณหภูมิใกล้เคียงกัน ฉะนั้นจำนวนของชุดขดลวดทางด้านแรงต่ำของทั้งสามเฟส จะเสื่อมสภาพเร็วกว่าตำแหน่งอื่น ๆ

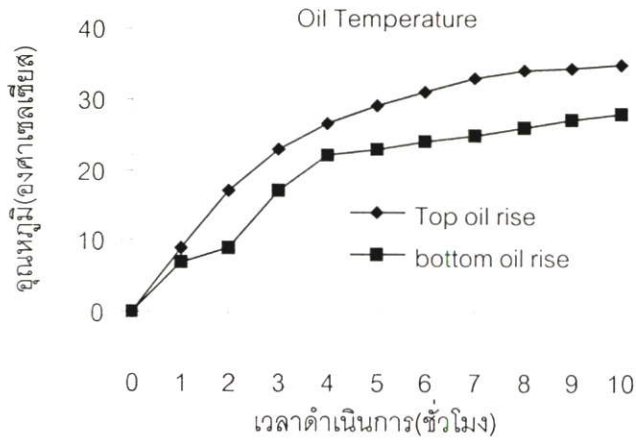
รูปที่ 4.71 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายและผลการทดสอบ อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน พบว่าผลการทำนายและผลการทดสอบมีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกัน และค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างผลการทำนายและผลการทดสอบอาจจะมาจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิแวดล้อม และมาจากการระบายความร้อนของน้ำมันเป็นต้น

รูปที่ 4.72 เป็นการเปรียบเทียบระหว่างผลการทำนายและผลการทดสอบ อุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 100% พบว่า ผลการทดสอบที่ตำแหน่งที่ 2 ซึ่งเป็นตำแหน่งมีอุณหภูมิสูงที่สุดขณะจ่ายโหลด มีค่าต่ำกว่าการทำนายเพียงเล็กน้อย ซึ่งจะถือว่ามีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกัน และความแตกต่างระหว่างการผลการทำนายและผลการทดสอบอาจจะมาจากการระบายความร้อนของน้ำมัน และ แรงดันที่จ่ายให้กับหม้อแปลงระหว่างการทดสอบอาจจะมีค่าไม่คงที่ และ อุณหภูมิแวดล้อมมีค่าไม่คงที่ และสิ่งที่กล่าวมาเหล่านี้จะเป็นสาเหตุที่ทำให้อุณหภูมิ ที่ได้จากการทำนายคลาดเคลื่อนออกไปจากการทดสอบได้เป็นต้น

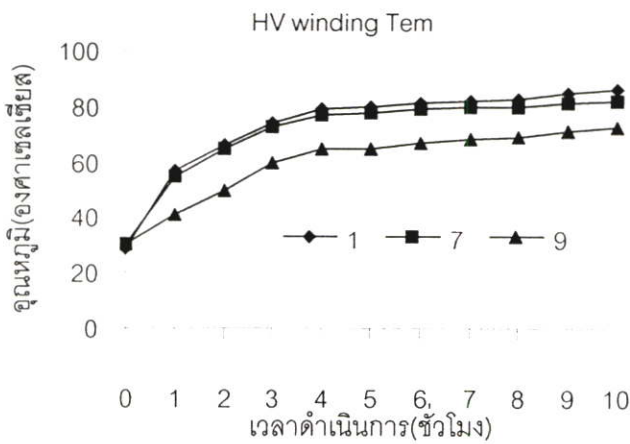
#### 4.7.2 ผลการทดสอบอุณหภูมิที่ส่วนต่าง ๆ ของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นเพียงอย่างเดียวตามเงื่อนไขข้อ 4.2



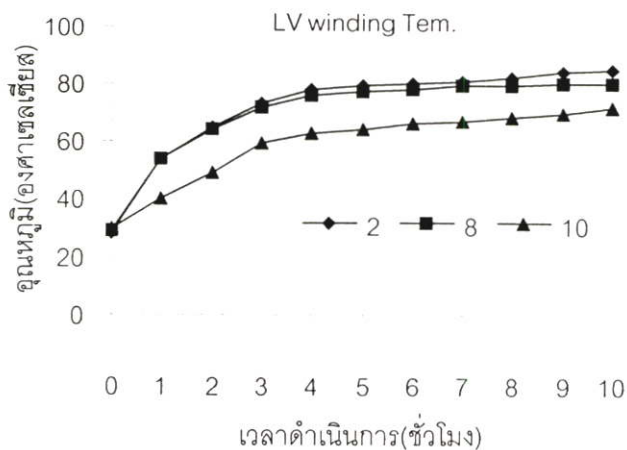
รูปที่ 4.73 แสดงผลการผลการวัดอุณหภูมิแวดล้อม เมื่อกระแสมีความถี่ของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD) 49%



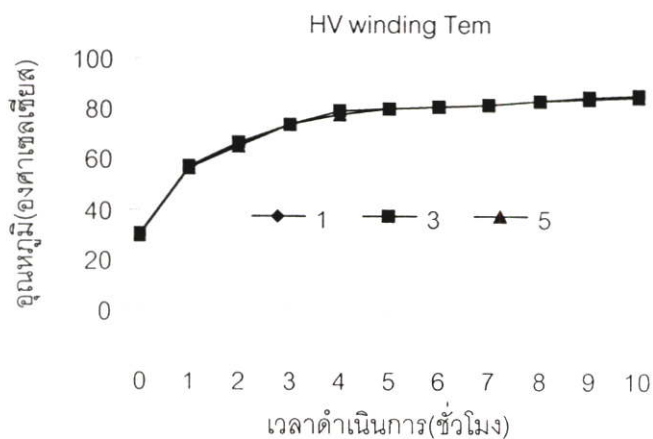
รูปที่ 4.74 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน และอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านล่างเมื่อกระแสมีความเพิ่มขึ้นของกระแสฮาร์มอนิกสรวม (THD,) 49%



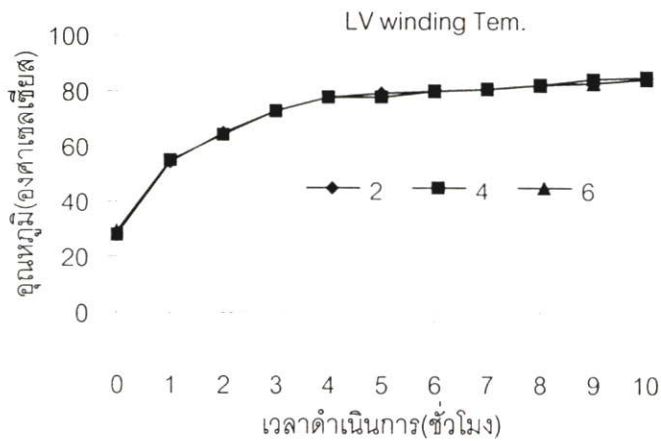
รูปที่ 4.75 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิค้ำบนสุด กลาง และ ด้านล่างสุด ของชุดขดลวดแรงสูง เฟส A เมื่อกระแสมีความเพิ่มขึ้นของกระแสฮาร์มอนิกสรวม(THD,) 49%



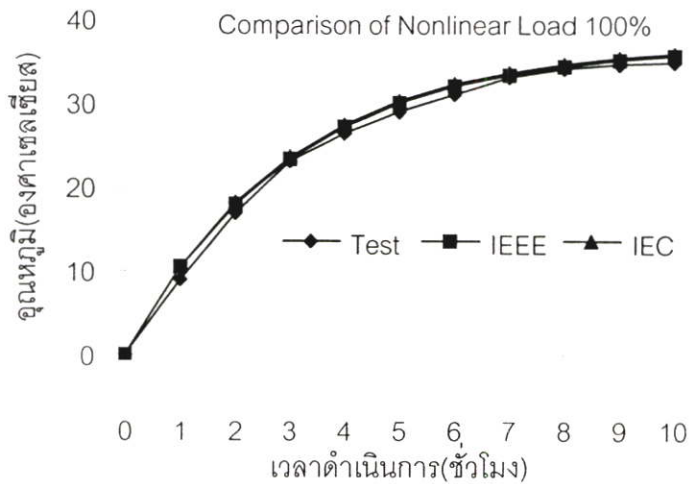
รูปที่ 4.76 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิด้านบนสุด กลาง และ ด้านล่างสุด ของชุดขดลวดแรงต่ำ เฟส A เมื่อกระแสมีความถี่ของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม(THD<sub>i</sub>) 49%



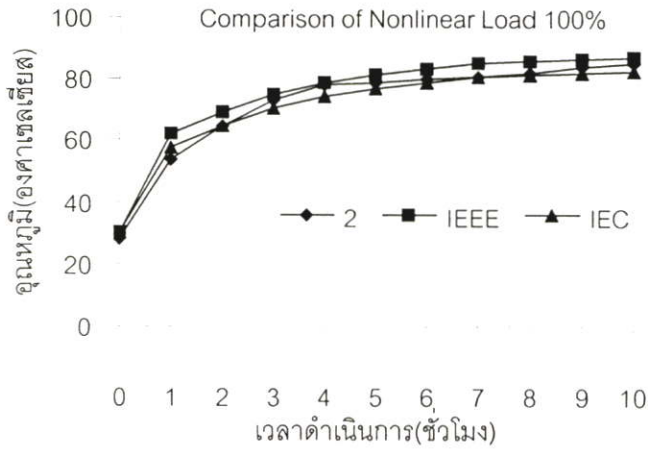
รูปที่ 4.77 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิด้านบนสุดของชุดขดลวดแรงสูง เฟส A, เฟส B และ เฟส C เมื่อกระแสมีความถี่ของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม(THD<sub>i</sub>) 49%



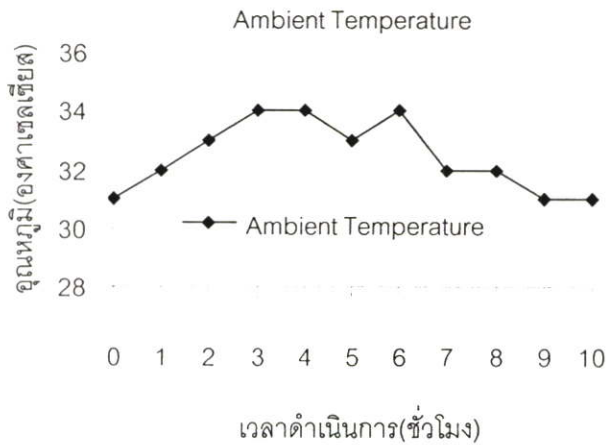
รูปที่ 4.78 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิด้านบนสุดของชุดขดลวดแรงต่ำ เฟส A, เฟส B และ เฟส C เมื่อกระแสมีความเพิ่มขึ้นของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม(THD) 49%



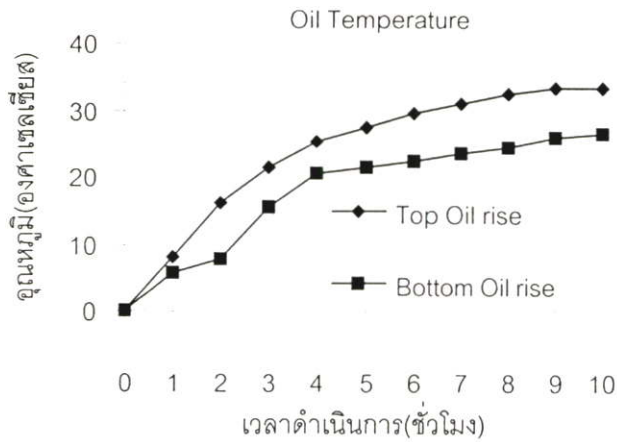
รูปที่ 4.79 แสดงการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนตามมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC เมื่อกระแสมีความเพิ่มขึ้นของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม(THD) 49% กับ ผลการทดสอบ



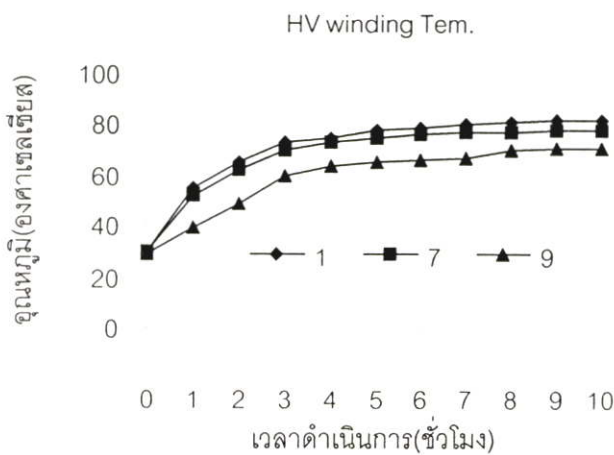
รูปที่ 4.80 แสดงการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ตามมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC เมื่อกระแสมีความถี่ของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD<sub>i</sub>) 49% กับ ผลการทดสอบ (ตำแหน่งที่ 2)



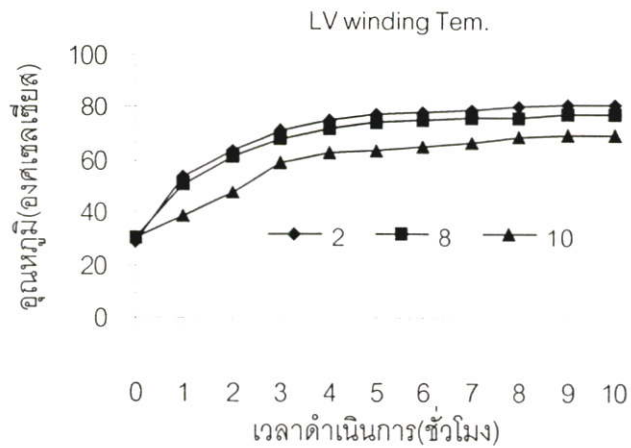
รูปที่ 4.81 แสดงผลการทดสอบอุณหภูมิแวดล้อม เมื่อกระแสมีความถี่ของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD<sub>i</sub>) 42.7%



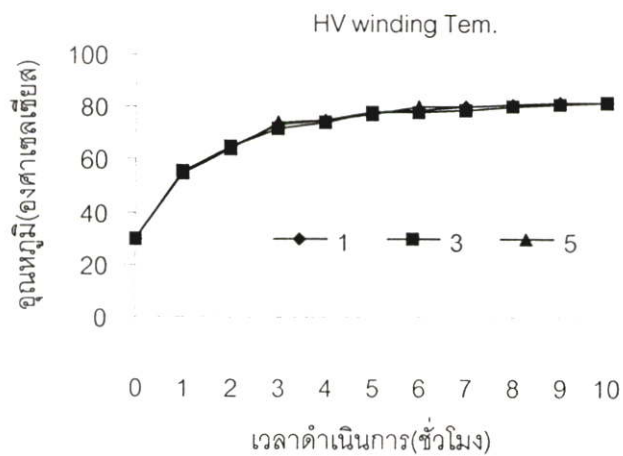
รูปที่ 4.82 แสดงผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านล่าง และ อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน เมื่อ กระแสมีความเพิ่มขึ้นของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD,) 42.7%



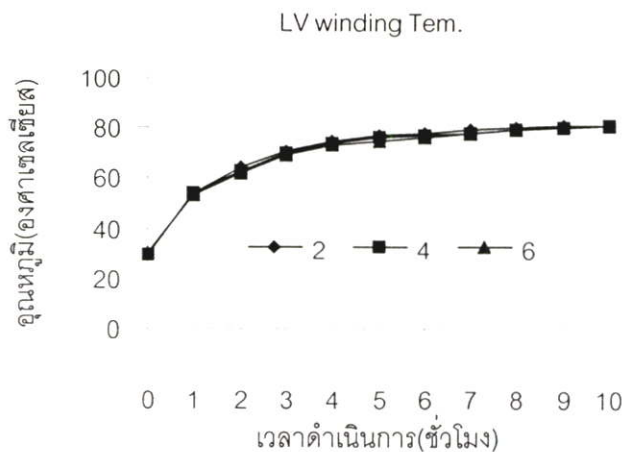
รูปที่ 4.83 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิด้านบนสุด กลาง และ ด้านล่างสุด ของชุด ขดลวดแรงสูง เฟส A เมื่อกระแสมีความเพิ่มขึ้นของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD,) 42.7%



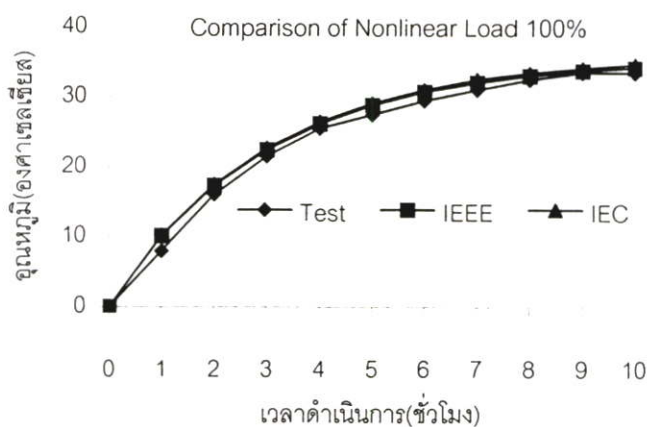
รูปที่ 4.84 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิด้านบนสุด กลาง และ ด้านล่างสุด ของชุดขดลวดแรงต่ำ เฟส A เมื่อกระแสมีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม(THD<sub>i</sub>) 42.7%



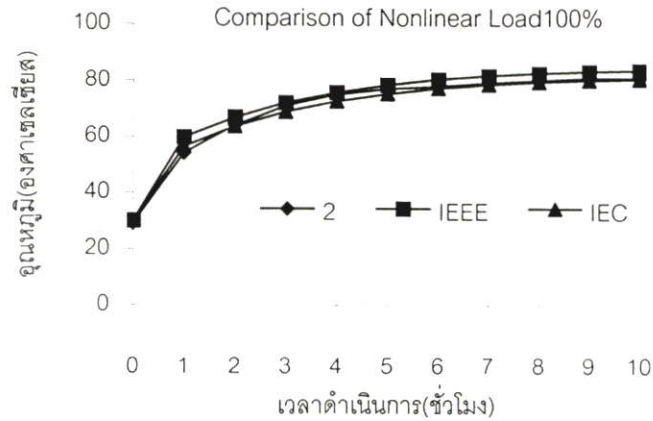
รูปที่ 4.85 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิด้านบนสุดของชุดขดลวดแรงสูง เฟส A, เฟส B และ เฟส C เมื่อกระแสมีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม(THD<sub>i</sub>) 42.7%



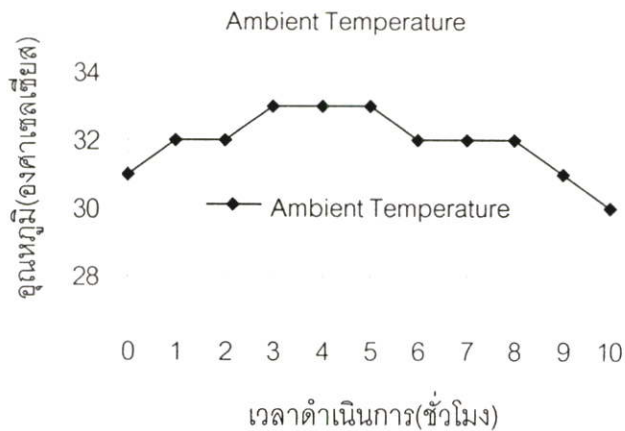
รูปที่ 4.86 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิด้านบนสุดของชุดขดลวดแรงต่ำ เฟส A, เฟส B และ เฟส C เมื่อกระแสมีความเพิ่มขึ้นของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD) 42.7%



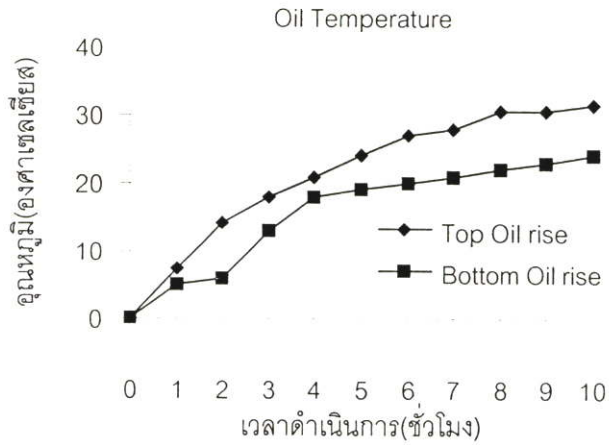
รูปที่ 4.87 แสดงการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนตามมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC เมื่อกระแสมีความเพิ่มขึ้นของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD) 42.7% กับผลการทดสอบ



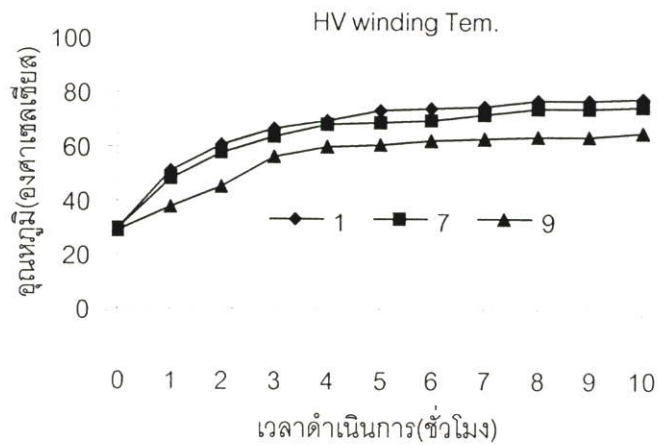
รูปที่ 4.88 แสดงการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ตามมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC เมื่อกระแสมีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD<sub>i</sub>) 42.7% กับผลการทดสอบ (ตำแหน่งที่ 2)



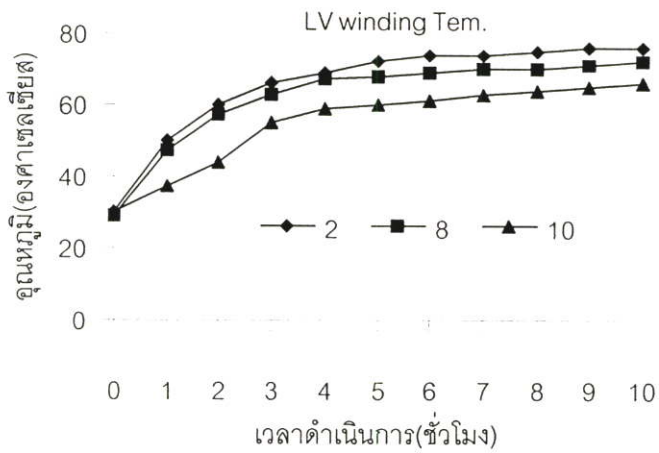
รูปที่ 4.89 แสดงผลการทดสอบ อุณหภูมิแวดล้อม เมื่อกระแสมีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม(THD<sub>i</sub>) 30%



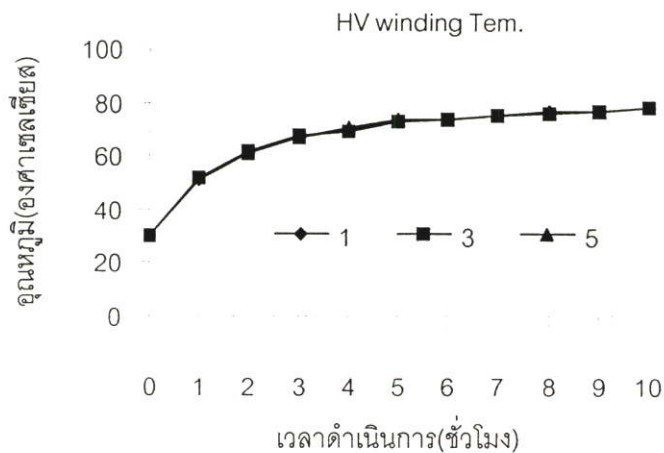
รูปที่ 4.90 แสดงผลการทดสอบ อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน และ อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านล่าง เมื่อ กระแสมีความเพิ่มขึ้นของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD<sub>r</sub>) 30%



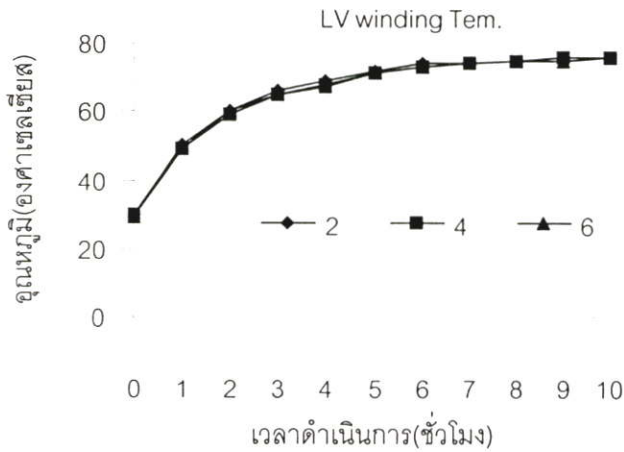
รูปที่ 4.91 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิด้านบนสุด กลาง และ ด้านล่างสุด ของชุด ขดลวดแรงสูง เฟส A เมื่อกระแสมีความเพิ่มขึ้นของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม(THD<sub>r</sub>) 30%



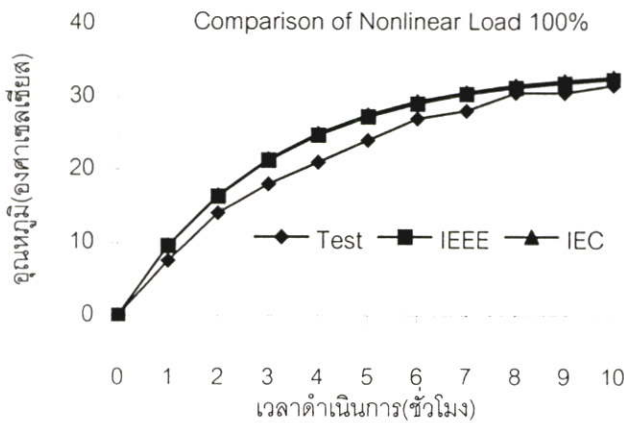
รูปที่ 4.92 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิด้านบนสุด กลาง และ ด้านล่างสุด ของชุดขดลวดแรงต่ำ เฟส A เมื่อกระแสมีความเพิ่มขึ้นของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม(THD) 30%



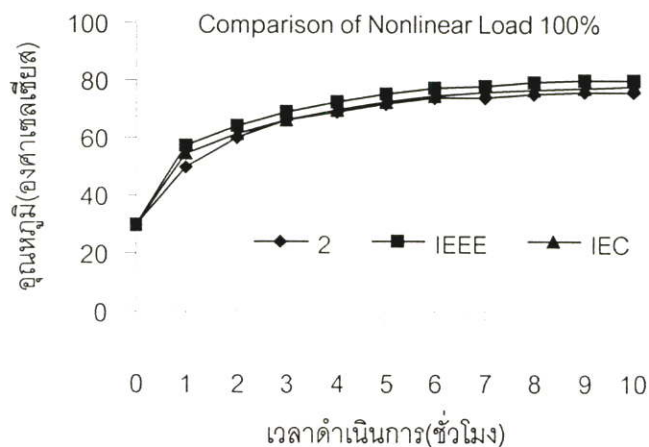
รูปที่ 4.93 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิด้านบนสุดของชุดขดลวดแรงสูง เฟส A, เฟส B และ เฟส C เมื่อกระแสมีความเพิ่มขึ้นของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม(THD) 30%



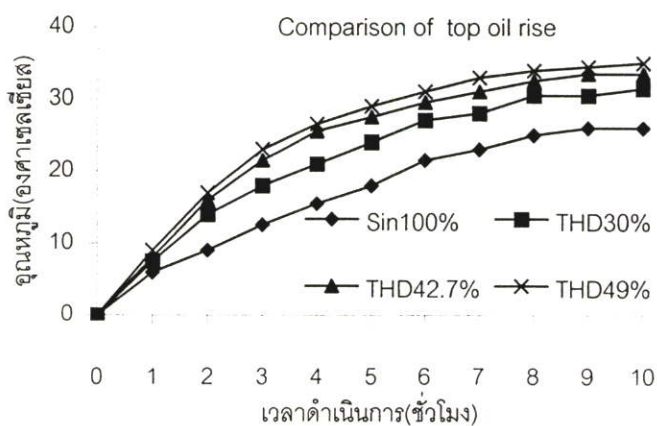
รูปที่ 4.94 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิด้านบนสุดของชุดขดลวดแรงต่ำ เฟส A, เฟส B และ เฟส C เมื่อกระแสมีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม(THD<sub>i</sub>) 30%



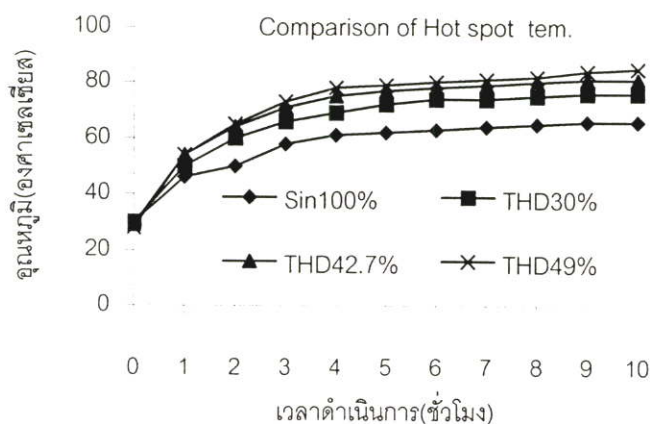
รูปที่ 4.95 แสดงการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนตามมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC เมื่อกระแสมีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม(THD<sub>i</sub>) 30% กับ ผลการทดสอบ



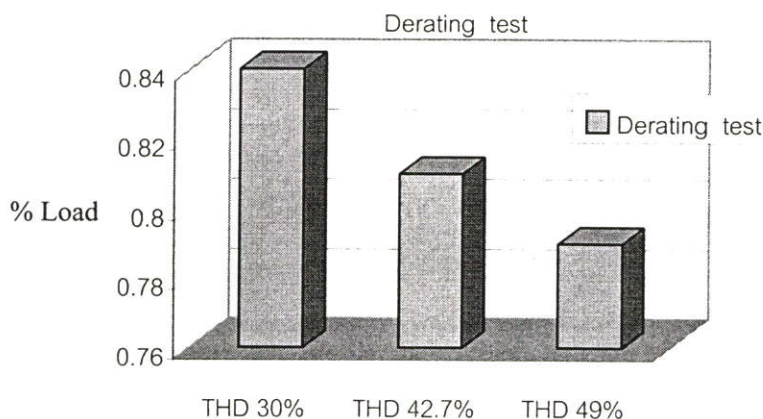
รูปที่ 4.96 แสดงการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ตามมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC เมื่อกระแสมีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสัรวม (THD<sub>i</sub>) 30% กับ ผลการทดสอบ (ตำแหน่งที่ 2)



รูปที่ 4.97 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนเมื่อจ่าย โหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น และแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสัรวม 30%, 42.7% และ 49%



รูปที่ 4.98 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุดของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น และ แบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสักรวม 30%, 42.7% และ 49%



รูปที่ 4.99 แสดงการเปรียบเทียบการทดสอบวัดค่า THDF ( The transformer harmonic derating factor) เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสักรวม 30%, 42.7% และ 49%

รูปที่ 4.73, 4.81 และ 4.89 เป็นการทดสอบวัดอุณหภูมิแวดล้อมสำหรับทดสอบอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสักรวม 49%, 42.7% และ 30% พบว่าอุณหภูมิแวดล้อมขณะทำการทดสอบมีการเปลี่ยนแปลง

ตลอดทั้งวัน ซึ่งจะเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้การทำนายอุณหภูมิของหม้อแปลงมีความคลาดเคลื่อนออกไปบ้าง

รูปที่ 4.74, 4.82 และ 4.90 เป็นการเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิน้ำมันด้านบน, อุณหภูมิน้ำมันด้านล่าง และอุณหภูมิแวดล้อม พบว่าอุณหภูมิน้ำมันด้านบนของหม้อแปลงจะสูงกว่าอุณหภูมิน้ำมันด้านล่าง เพราะว่า การระบายอากาศจะระบายความร้อนจากด้านล่างขึ้นไปข้างบนซึ่งจะทำให้อุณหภูมิน้ำมันด้านบนสูงกว่าอุณหภูมิน้ำมันด้านล่าง ดังการอธิบายในหัวข้อที่ 2.5.2 หัวข้อที่ 3.1 รูปที่ 3.1 และรูปที่ 3.2 และจะส่งผลทำให้อุณหภูมิของชุดขดลวดเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วยดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.65 จากรูปพบว่าอุณหภูมิแวดล้อมของหม้อแปลงเปลี่ยนแปลงตลอดทั้งวัน ซึ่งจะเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า

รูปที่ 4.75, 4.83 และ 4.91 เป็นการเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิเฟส A ณ ตำแหน่งบนสุดของชุดขดลวดทางด้านแรงสูง (ตำแหน่งที่ 1) กลางชุดขดลวดทางด้านแรงสูง (ตำแหน่งที่ 7) และด้านล่างสุดของชุดขดลวด (ตำแหน่งที่ 9) จากผลการทดสอบพบว่าตำแหน่งที่ร้อนที่สุดของชุดขดลวดทางด้านแรงสูงคือตำแหน่งที่ 1 เพราะฉะนั้นฉนวน ณ ตำแหน่งที่ 1 จะเสื่อมสภาพเร็วกว่าตำแหน่งอื่น ๆ

รูปที่ 4.76, 4.84 และ 4.92 เป็นการเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิของเฟส A ณ ตำแหน่งบนสุดของชุดขดลวดทางด้านแรงต่ำ (ตำแหน่งที่ 2) กลางชุดขดลวดทางด้านแรงต่ำ (ตำแหน่งที่ 8) และด้านล่างสุดของชุดขดลวด (ตำแหน่งที่ 10) จากผลการทดสอบพบว่าตำแหน่งที่ร้อนที่สุดของชุดขดลวดทางด้านแรงต่ำคือตำแหน่งที่ 2 ซึ่งจะสัมพันธ์กันกับตำแหน่งที่ร้อนที่สุดของชุดขดลวดทางด้านแรงสูง ซึ่งก็คือตำแหน่งที่ 1 ฉะนั้นฉนวนของชุดขดลวดเฟส A ณ ตำแหน่งบนสุดของชุดขดลวดทั้งทางด้านแรงสูง และ ทางด้านแรงต่ำจะเสื่อมสภาพเร็วกว่าตำแหน่งอื่น ๆ

รูปที่ 4.77, 4.85 และ 4.93 เป็นการเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิ ณ ด้านบนสุดของชุดขดลวดทางด้านแรงสูงของ เฟส A (ตำแหน่งที่ 1), B (ตำแหน่งที่ 3) และ C (ตำแหน่งที่ 5) พบว่ามีอุณหภูมิใกล้เคียงกัน ดังนั้นฉนวนของชุดขดลวดด้านบนสุดของชุดขดลวดทางด้านแรงสูง ของทั้งสามเฟสจะเสื่อมสภาพเร็วกว่าตำแหน่งอื่น ๆ

รูปที่ 4.78, 4.86 และ 4.94 เป็นการเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิ ณ ด้านบนสุดของชุดขดลวดทางด้านแรงต่ำ ของ เฟส A (ตำแหน่งที่ 2), B (ตำแหน่งที่ 4) และ C (ตำแหน่งที่ 6) พบว่ามีอุณหภูมิใกล้เคียงกัน ดังนั้นฉนวนของชุดขดลวดด้านบนสุดของชุดขดลวดทางด้านแรงต่ำ ของทั้งสามเฟสจะเสื่อมสภาพเร็วกว่าตำแหน่งอื่น ๆ

รูปที่ 4.79, 4.87 และ 4.95 เป็นการเปรียบเทียบ อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน ระหว่างผลการทดสอบ กับผลการทำนายด้วยมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC พบว่าผลการทดสอบและผลการทำนายมีความใกล้เคียงกันมาก ซึ่งจะเป็นผลทำให้การทำนายอายุการใช้งานของหม้อแปลงมีความถูกต้องและใกล้เคียงความเป็นจริงมากยิ่งขึ้น

รูปที่ 4.80, 4.88 และ 4.96 เป็นการเปรียบเทียบ อุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด (ตำแหน่งที่ 2) ระหว่างผลการทดสอบ กับผลการทำนาย ด้วยมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC พบว่าผลการทดสอบและผลการทำนายมีความใกล้เคียงกันมาก ซึ่งจะเป็นผลทำให้การทำนายอายุการใช้งานของหม้อแปลงมีความถูกต้องและใกล้เคียงความเป็นจริงมากยิ่งขึ้น

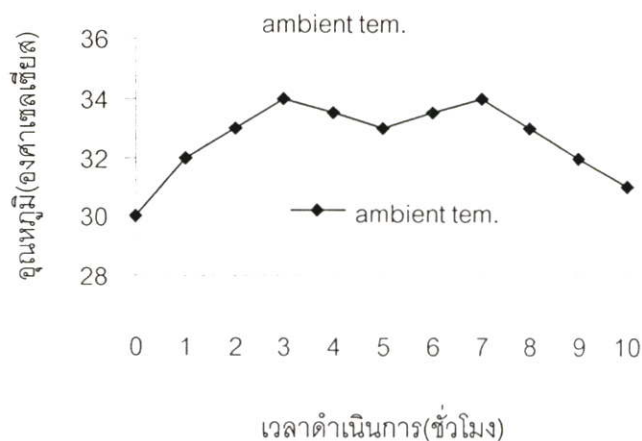
รูปที่ 4.97 เป็นการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น และแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 30%, 42.7% และ 49% พบว่าเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวมสูง ๆ จะมีผลทำให้อุณหภูมิของหม้อแปลงสูงมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งจะส่งผลทำให้อายุการใช้งานของหม้อแปลงสั้นลงตามไปด้วย

รูปที่ 4.98 เป็นการเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ของหม้อแปลงเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น และแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 30%, 42.7% และ 49% พบว่าเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวมสูง ๆ จะมีผลทำให้อุณหภูมิของหม้อแปลงสูงมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งจะส่งผลทำให้อายุการใช้งานของหม้อแปลงสั้นลงตามไปด้วย

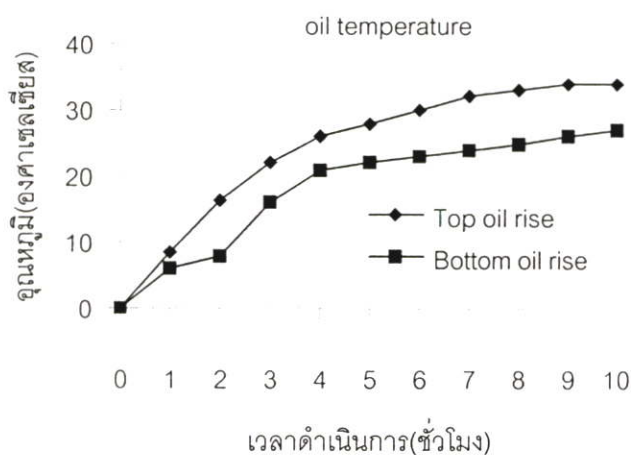
รูปที่ 4.99 เป็นการเปรียบเทียบการทดสอบวัดค่า THDF (The Transformer harmonic derating) พบว่าเมื่อหม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายโหลดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวมสูง ๆ จะส่งผลทำให้ความสามารถในการรับโหลดของหม้อแปลงลดลงตามไปด้วย ซึ่งจะส่งผลทำให้ต้องมีการลดพิคกโหลดของหม้อแปลงลงไปมากยิ่งขึ้น จึงจะไม่ทำให้หม้อแปลงเกิดความเสียหายอันเนื่องมาจากความร้อนเกินพิคกขณะจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น

#### 4.7.3 ผลการทดสอบอุณหภูมิที่ส่วนต่าง ๆ ของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้นร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น ตามเงื่อนไขข้อ 4.6.3

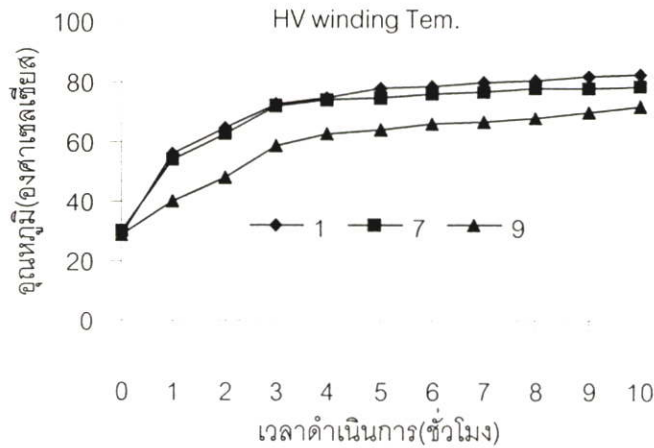
4.7.3.1 หม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 10 % ของกระแสที่พิคก ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 90% ของกระแสที่พิคก ซึ่งมีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD<sub>r</sub>) 30%, 42.7% และ 49%



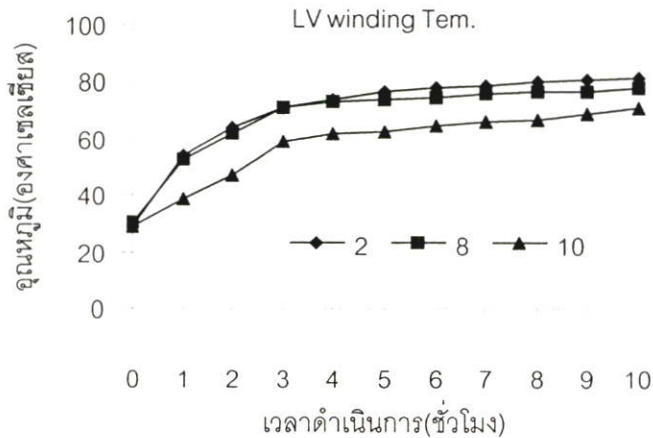
**รูปที่ 4.100** แสดงผลการทดสอบอุณหภูมิแวดล้อม ของหม้อแปลงเมื่อจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 10%ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 90% ของกระแสที่พิกัดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 49%



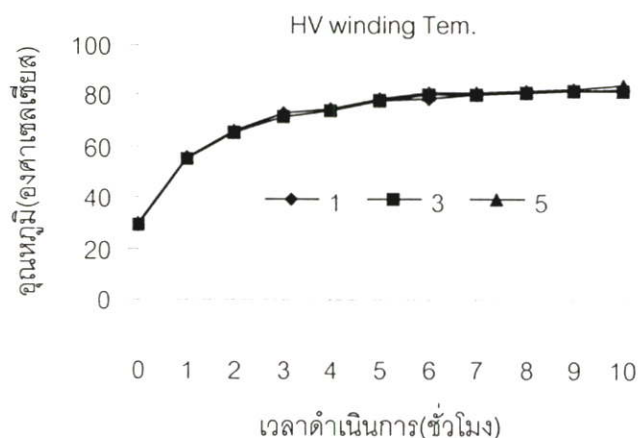
**รูปที่ 4.101** แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน และ อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านล่าง เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่าง โหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 10% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 90% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD<sub>i</sub>) 49%



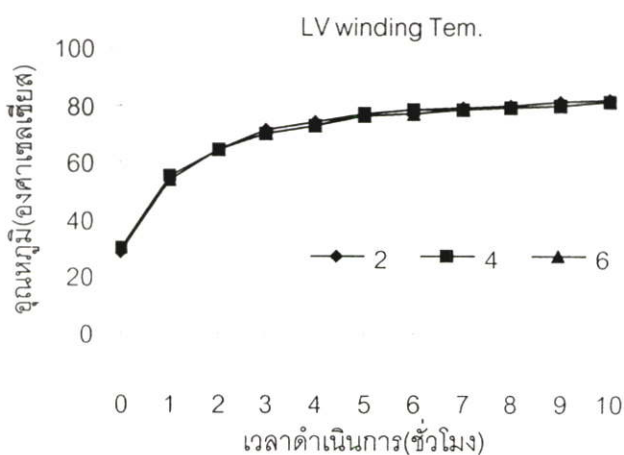
รูปที่ 4.102 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิต้านบนสุด กลาง และ ล่างสุด ของชุดขดลวดด้านแรงสูง เฟส A เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบ กระแสเป็นเชิงเส้น 10% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 90% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD) 49%



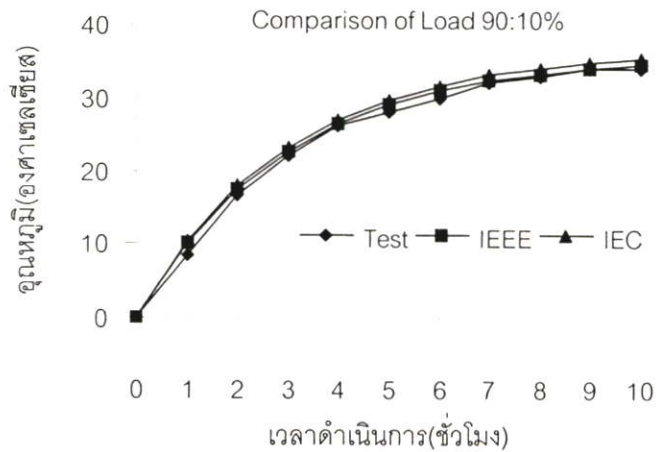
รูปที่ 4.103 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิต้านบนสุด กลาง และ ต่ำสุด ของชุดขดลวดด้านแรงต่ำ เฟส A เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 10 % ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 90% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD) 49%



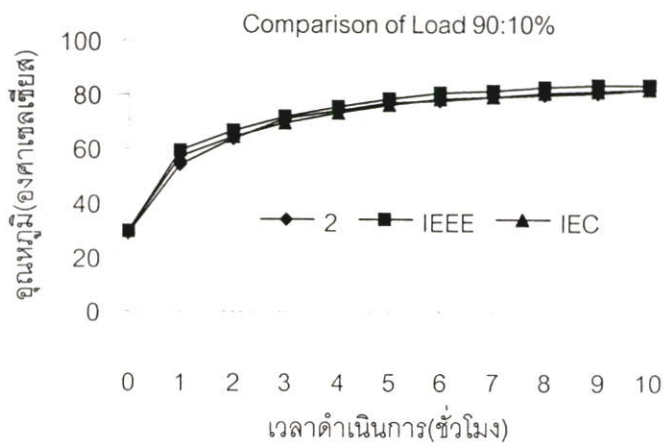
รูปที่ 4.104 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด ของชุดขดลวดด้านแรงสูง เฟส A เฟส B และ เฟส C เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่าง โหลดแบบกระแส เป็นเชิงเส้น 10 % ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 90% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD) 49%



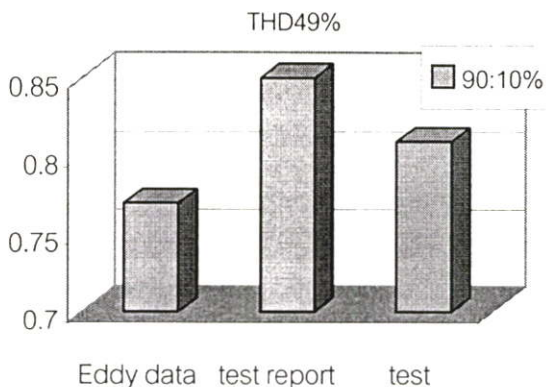
รูปที่ 4.105 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด ของชุดขดลวดด้านแรงต่ำ เฟส A เฟส B และ เฟส C เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่าง โหลดแบบกระแส เป็นเชิงเส้น 10% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 90% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD) 49%



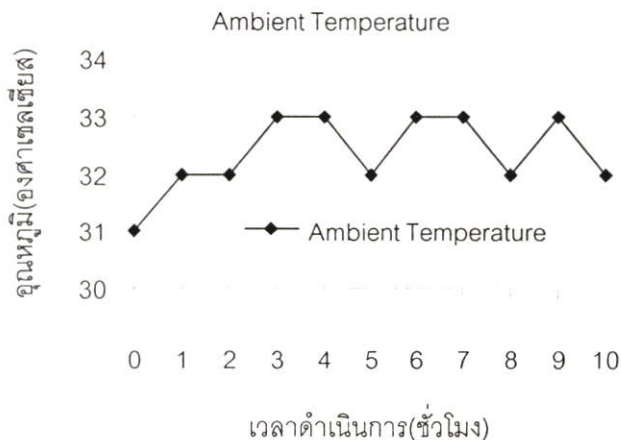
รูปที่ 4.106 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนตามมาตรฐาน IEEE และ มาตรฐาน IEC กับ ผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน เมื่อหม้อแปลงจ่าย โหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 10% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 90% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์ มอนิกส์รวม (THD<sub>r</sub>) 49%



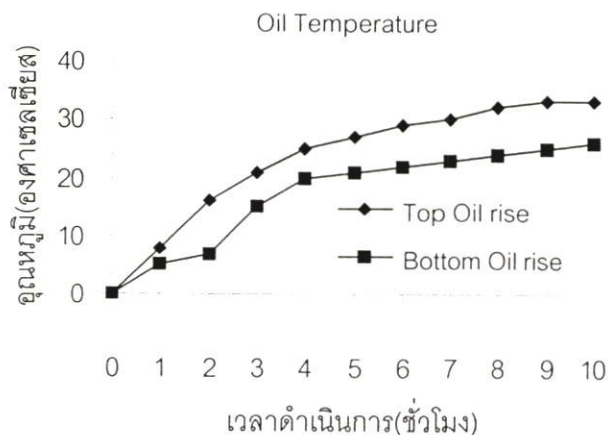
รูปที่ 4.107 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ตามมาตรฐาน IEEE และ มาตรฐาน IEC กับ ผลการทดสอบอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด (ตำแหน่งที่ 2) เมื่อหม้อแปลงจ่าย โหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 10% ของกระแสที่พิกัดร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 90% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์ มอนิกส์รวม (THD<sub>r</sub>) 49%



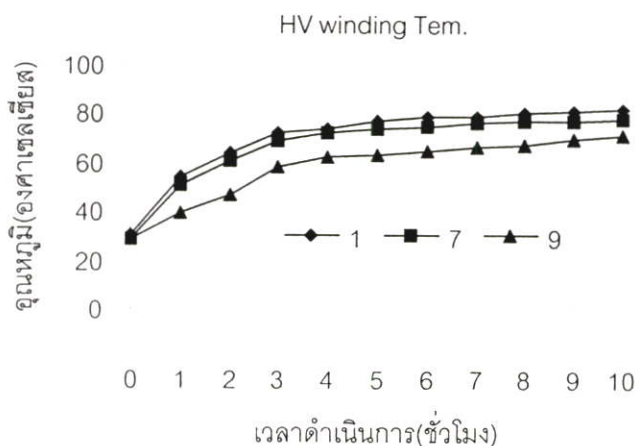
**รูปที่ 4.108** แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทำนาย Derating ด้วยวิธีใช้ข้อมูลที่ออกแบบกระแสไหลวน และ วิธีใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ กับ ผลการทดสอบวัด Transformer harmonic derating factor (THDF) เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 10% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 90% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD<sub>i</sub>) 49%



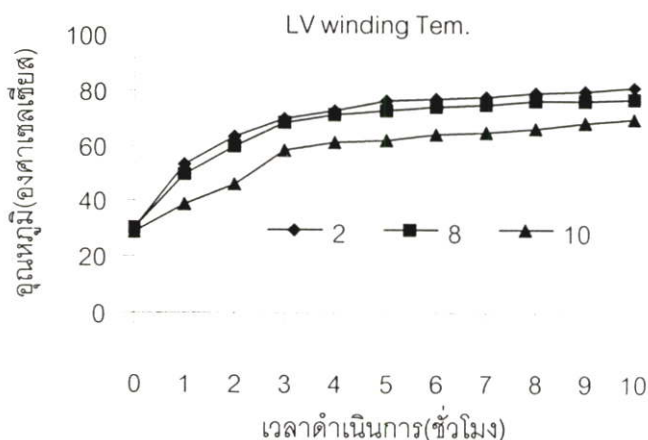
**รูปที่ 4.109** แสดงผลการวัดอุณหภูมิแวดล้อมของหม้อแปลงไฟฟ้า เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 10% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 90% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD<sub>i</sub>) 42.7%



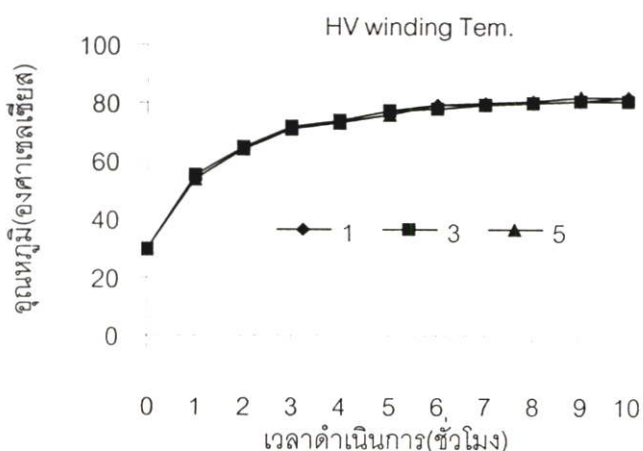
รูปที่ 4.110 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน และ อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านล่าง เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 10% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 90% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD<sub>i</sub>) 42.7%



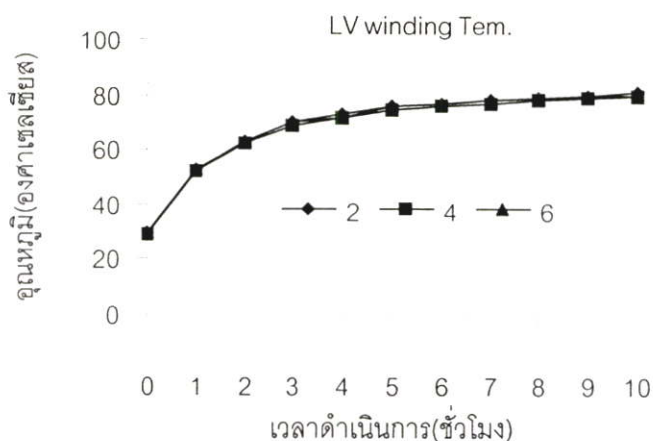
รูปที่ 4.111 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด กลาง และ ล่างสุด ของชุดขดลวดด้านแรงสูง เฟส A เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 10% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 90% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD<sub>i</sub>) 42.7%



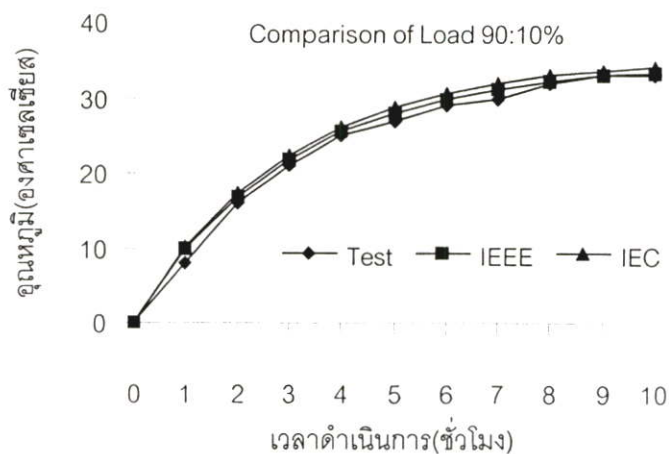
รูปที่ 4.112 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด กลาง และ ล่างสุด ของชุดขดลวดด้านแรงต่ำ เฟส A เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 10% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 90% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD) 42.7%



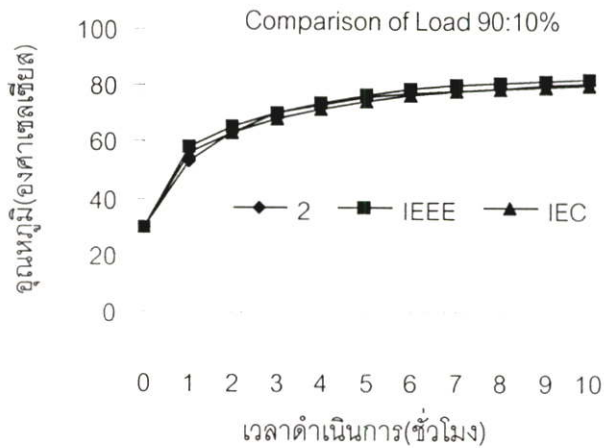
รูปที่ 4.113 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด ของชุดขดลวดด้านแรงสูง เฟส A เฟส B และ เฟส C เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 10% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 90% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD) 42.7%



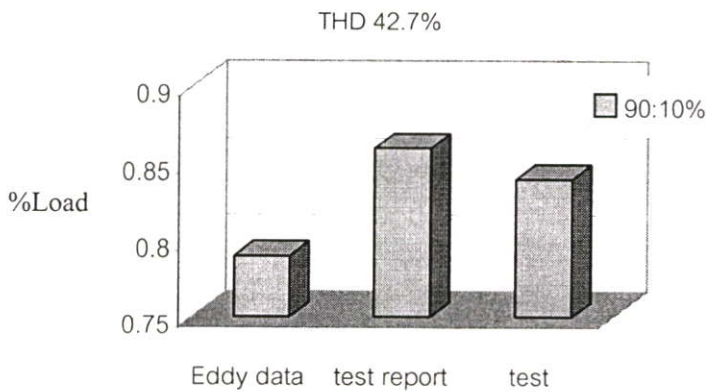
รูปที่ 4.114 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิค้ำบนบนสุด ของชุดขดลวดด้านแรงต่ำ เฟส A เฟส B และ เฟส C เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 10% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 90% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD<sub>i</sub>) 42.7%



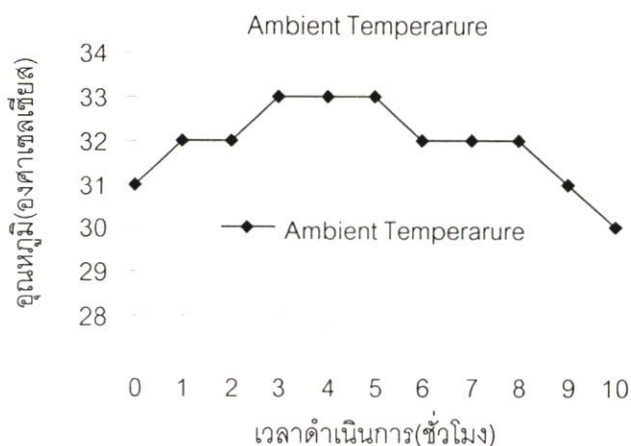
รูปที่ 4.115 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันค้ำบน ตามมาตรฐาน IEEE และ มาตรฐาน IEC กับ ผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันค้ำบน เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 10% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 90% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD<sub>i</sub>) 42.7%



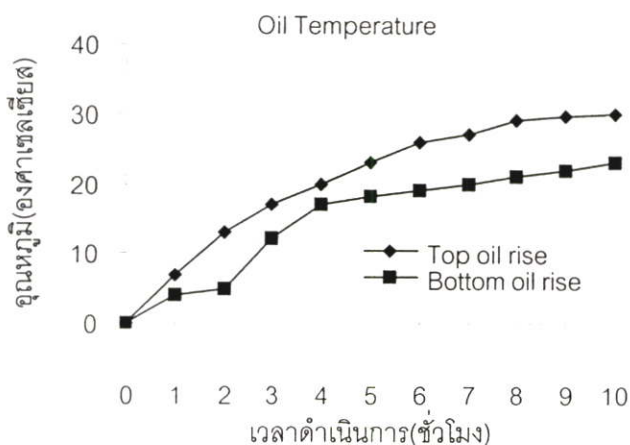
รูปที่ 4.116 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ตามมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC กับ ผลการทดสอบอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด (ตำแหน่งที่ 2) เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 10% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 90% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD<sub>i</sub>) 42.7%



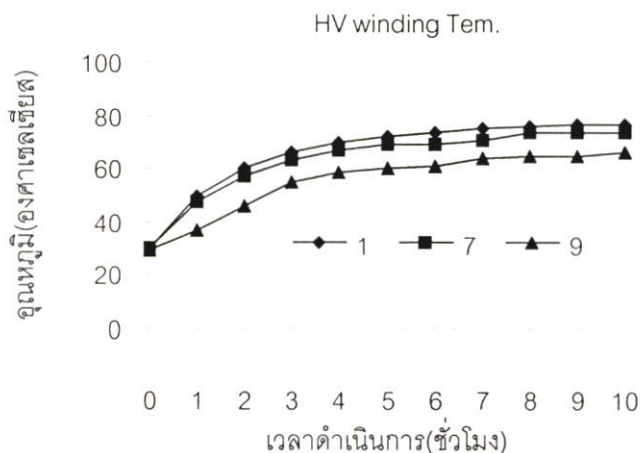
รูปที่ 4.117 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทำนาย Derating ด้วยวิธีใช้ข้อมูลที่ออกแบบกระแสไหลวน และ วิธีใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ กับ ผลการทดสอบวัด Transformer harmonic derating factor (THDF) เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 10% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 90% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD<sub>i</sub>) 42.7%



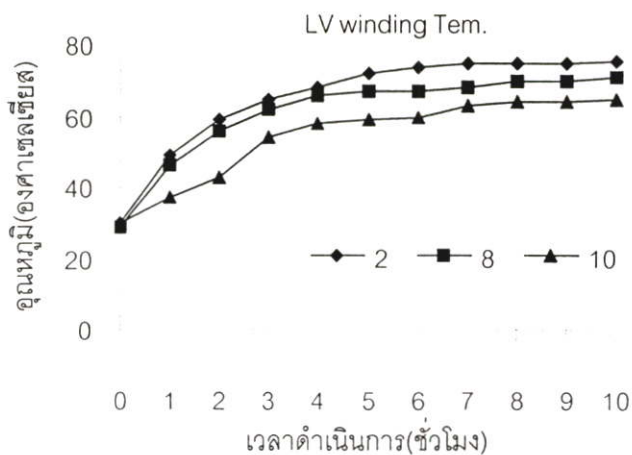
**รูปที่ 4.118** แสดงผลการวัดอุณหภูมิแวดล้อมของหม้อแปลงไฟฟ้า เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 10% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 90% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD) 30%



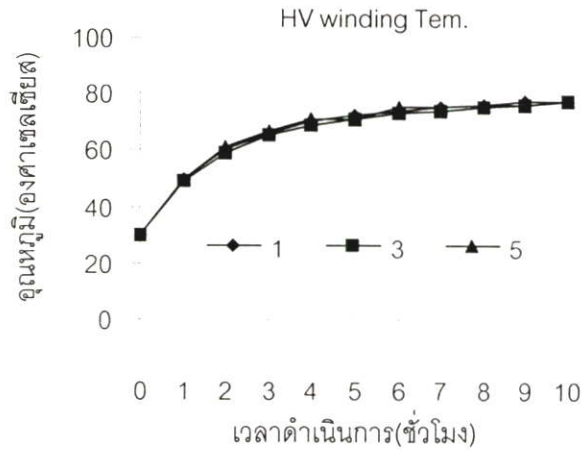
**รูปที่ 4.119** แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน และ อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านล่าง เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 10% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 90% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD) 30%



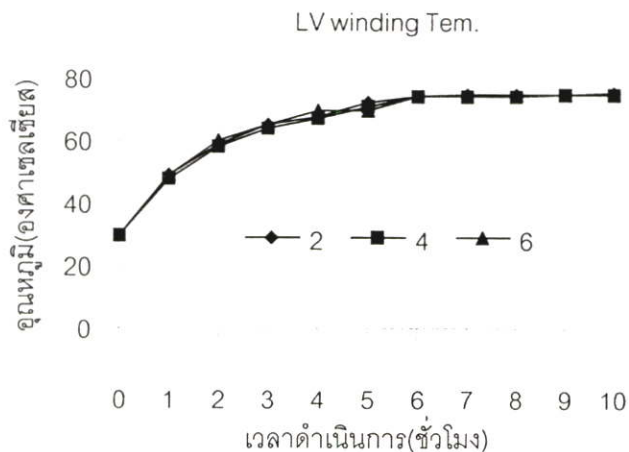
รูปที่ 4.120 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด กลาง และ ต่ำสุด ของชุดขดลวดด้านแรงสูง เฟส A เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 10% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 90% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสักรวม (THD<sub>i</sub>) 30%



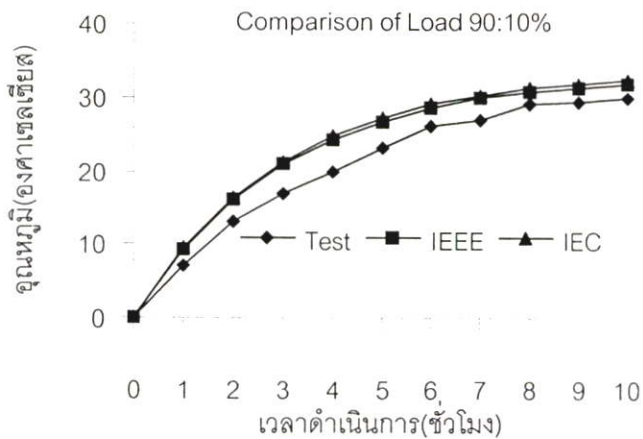
รูปที่ 4.121 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด กลาง และ ต่ำสุด ของชุดขดลวดด้านแรงต่ำ เฟส A เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 10% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 90% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสักรวม (THD<sub>i</sub>) 30%



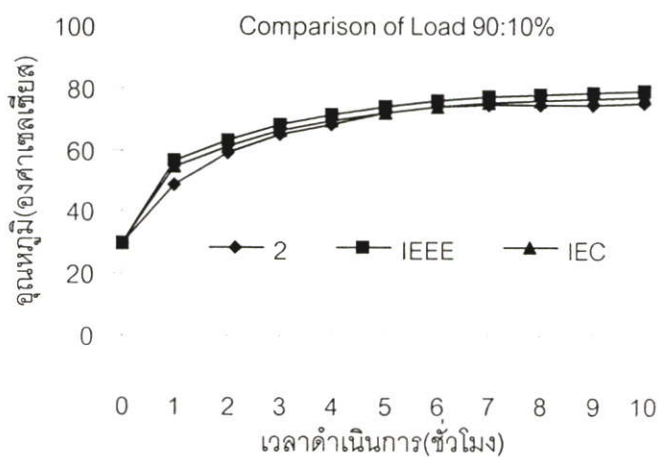
รูปที่ 4.122 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด ของชุดขดลวดด้านแรงสูง เฟส A เฟส B และ เฟส C เมื่อหม้อแปลงจ่ายโวลตร่วมกันระหว่างโวลตแบบกระแส เป็นเชิงเส้น 10% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโวลตแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 90% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD) 30%



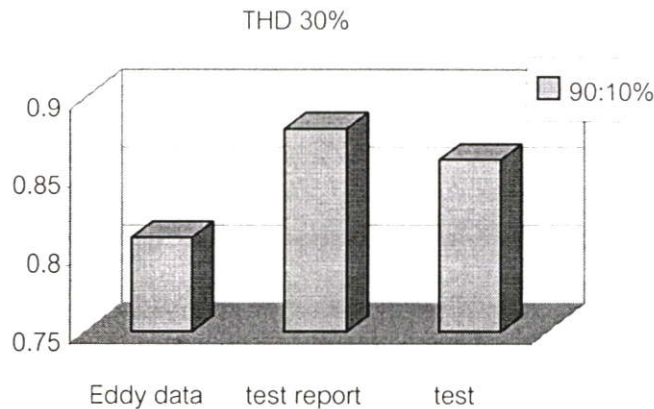
รูปที่ 4.123 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด ของชุดขดลวดด้านแรงต่ำ เฟส A เฟส B และ เฟส C เมื่อหม้อแปลงจ่ายโวลตร่วมกันระหว่างโวลตแบบกระแส เป็นเชิงเส้น 10% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโวลตแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 90% ของ กระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD) 30%



**รูปที่ 4.124** แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนตามมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC กับ ผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน เมื่อหม้อแปลงจ่าย โหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 10% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 90% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์ มอนิกส์รวม (THD<sub>r</sub>) 30%



**รูปที่ 4.125** แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ตามมาตรฐาน IEEE และ มาตรฐาน IEC กับ ผลการทดสอบอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด (ตำแหน่งที่ 2) เมื่อหม้อแปลงจ่าย โหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 10% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 90% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแส ฮาร์โมนิกส์รวม (THD<sub>r</sub>) 30%



**รูปที่ 4.126** แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทำนาย Derating ด้วยวิธีใช้ข้อมูลที่ออกแบบกระแสไหลวน และ วิธีใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ กับ ผลการทดสอบวัด Transformer harmonic derating factor (THDF) เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 10% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 90% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม (THD) 30%

รูปที่ 4.100, 4.109 และ 4.118 เป็นการทดสอบวัดอุณหภูมิแวดล้อมสำหรับทดสอบอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม 49%, 42.7% และ 30% พบว่าอุณหภูมิแวดล้อมขณะทำการทดสอบมีการเปลี่ยนแปลงตลอดทั้งวัน ซึ่งจะเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้การทำนายอุณหภูมิของหม้อแปลงมีความคลาดเคลื่อนออกไปบ้าง

รูปที่ 4.101, 4.110 และ 4.119 เป็นการเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิน้ำมันด้านบน, อุณหภูมิน้ำมันด้านล่าง และอุณหภูมิแวดล้อม พบว่าอุณหภูมิน้ำมันด้านบนของหม้อแปลงจะสูงกว่าอุณหภูมิน้ำมันด้านล่าง เพราะว่า การระบายอากาศจะระบายความร้อนจากด้านล่างขึ้นไปข้างบนซึ่งจะทำให้อุณหภูมิน้ำมันด้านบนสูงกว่าอุณหภูมิน้ำมันด้านล่าง ดังการอธิบายในหัวข้อที่ 2.5.2 หัวข้อที่ 3.1 รูปที่ 3.1 และรูปที่ 3.2 และจะส่งผลทำให้อุณหภูมิของชุดขดลวดเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วยดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.100, 4.109 และ 4.119 จากรูปพบว่าอุณหภูมิแวดล้อมของหม้อแปลงเปลี่ยนแปลงตลอดทั้งวัน ซึ่งจะเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า

รูปที่ 4.102, 4.111 และ 4.120 เป็นการเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิเฟส A ณ ตำแหน่งบนสุดของชุดขดลวดทางด้านแรงสูง (ตำแหน่งที่ 1) กลางชุดขดลวดทางด้านแรงสูง

(ตำแหน่งที่ 7) และด้านล่างสุดของชุดขดลวด ( ตำแหน่งที่ 9) จากผลการทดสอบพบว่าตำแหน่งที่ร้อนที่สุดของชุดขดลวดทางด้านแรงสูงคือตำแหน่งที่ 1 เพราะฉะนั้นฉนวน ณ ตำแหน่งที่ 1 จะเสื่อมสภาพเร็วกว่าตำแหน่งอื่น ๆ

รูปที่ 4.103, 4.112 และ 4.121 เป็นการเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิของเฟส A ณ ตำแหน่งบนสุดของชุดขดลวดทางด้านแรงต่ำ (ตำแหน่งที่ 2) กลางชุดขดลวดทางด้านแรงต่ำ (ตำแหน่งที่ 8) และด้านล่างสุดของชุดขดลวด ( ตำแหน่งที่ 10) จากผลการทดสอบพบว่าตำแหน่งที่ร้อนที่สุดของชุดขดลวดทางด้านแรงต่ำคือตำแหน่งที่ 2 ซึ่งจะสัมพันธ์กันกับตำแหน่งที่ร้อนที่สุดของชุดขดลวดทางด้านแรงสูง ซึ่งก็คือตำแหน่งที่ 1 ฉะนั้นฉนวนของชุดขดลวดเฟส A ณ ตำแหน่งบนสุดของชุดขดลวดทั้งทางด้านแรงสูง และ ทางด้านแรงต่ำจะเสื่อมสภาพเร็วกว่าตำแหน่งอื่น ๆ

รูปที่ 4.104, 4.113 และ 4.122 เป็นการเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิ ณ ด้านบนสุดของชุดขดลวดทางด้านแรงสูงของ เฟส A (ตำแหน่งที่ 1), B (ตำแหน่งที่ 3) และ C (ตำแหน่งที่ 5) พบว่ามีอุณหภูมิใกล้เคียงกัน ดังนั้นฉนวนของชุดขดลวดด้านบนสุดของชุดขดลวดทางด้านแรงสูงของทั้งสามเฟสจะเสื่อมสภาพเร็วกว่าตำแหน่งอื่น ๆ

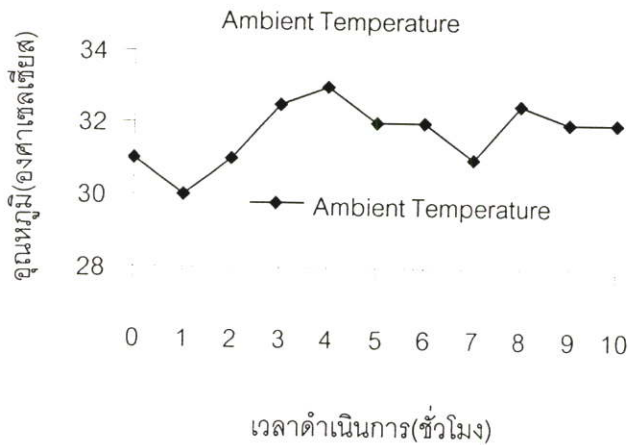
รูปที่ 4.105, 4.114 และ 4.123 เป็นการเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิ ณ ด้านบนสุดของชุดขดลวดทางด้านแรงต่ำ ของ เฟส A (ตำแหน่งที่ 2), B (ตำแหน่งที่ 4) และ C (ตำแหน่งที่ 6) พบว่ามีอุณหภูมิใกล้เคียงกัน ดังนั้นฉนวนของชุดขดลวดด้านบนสุดของชุดขดลวดทางด้านแรงต่ำของทั้งสามเฟสจะเสื่อมสภาพเร็วกว่าตำแหน่งอื่น ๆ

รูปที่ 4.106, 4.115 และ 4.124 เป็นการเปรียบเทียบ อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน ระหว่างผลการทดสอบ กับผลการทำนายด้วยมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC พบว่าผลการทดสอบและผลการทำนายมีความใกล้เคียงกันมาก ซึ่งจะส่งผลทำให้การทำนายอายุการใช้งานของหม้อแปลงมีความถูกต้องและใกล้เคียงความเป็นจริงมากยิ่งขึ้น

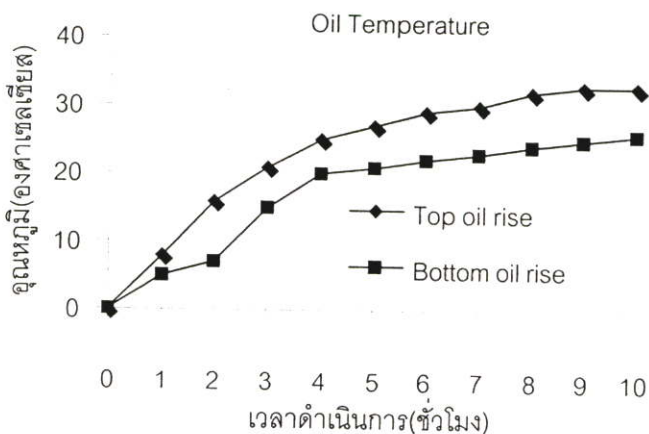
รูปที่ 4.107, 4.116 และ 4.125 เป็นการเปรียบเทียบ อุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด (ตำแหน่งที่ 2) ระหว่างผลการทดสอบ กับผลการทำนาย ด้วยมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC พบว่าผลการทดสอบและผลการทำนายมีความใกล้เคียงกันมาก ซึ่งจะส่งผลทำให้การทำนายอายุการใช้งานของหม้อแปลงมีความถูกต้องและใกล้เคียงความเป็นจริงมากยิ่งขึ้น

รูปที่ 4.108, 4.117 และ 4.126 เป็นการเปรียบเทียบ THDF ระหว่างผลการทดสอบและผลการทำนาย พบว่าระหว่างผลการทดสอบและผลการทำนายมีค่าที่ใกล้เคียงกัน แต่ค่าที่ได้จากการทำนายด้วย วิธี การออกแบบค่าความสูญเสียของกระแสไหลวนจะมีค่าที่ต่ำกว่าการทดสอบ เล็กน้อย แต่ในทางปฏิบัติแล้ว ผู้วิจัยขอแนะนำให้ใช้ค่า THDF ที่ได้จากการทำนาย ด้วยการออกแบบกระแสไหลวน เพราะว่าจะเป็นผลดีในการเพิ่มโหลด ในกรณีที่ผู้ใช้งานไม่ทราบว่ามีภาระลัดพิกัด โหลดของหม้อแปลงอยู่ ซึ่งจะไม่ทำให้หม้อแปลงเกิดความเสียหายอันเนื่องมาจากความร้อนเกิน พิกัดขณะจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เชิงเส้น

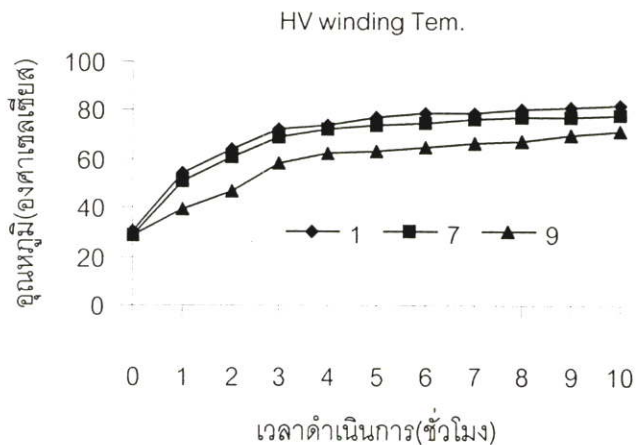
4.7.3.2 หม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20 % ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ของกระแสที่พิกัด ซึ่งมีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD<sub>i</sub>) 30%, 42.7% และ 49%



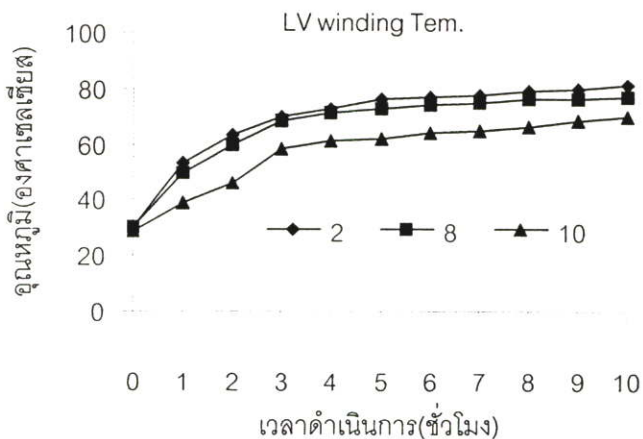
รูปที่ 4.127 แสดงผลการวัดอุณหภูมิแวดล้อมของหม้อแปลงไฟฟ้า เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD<sub>i</sub>) 49%



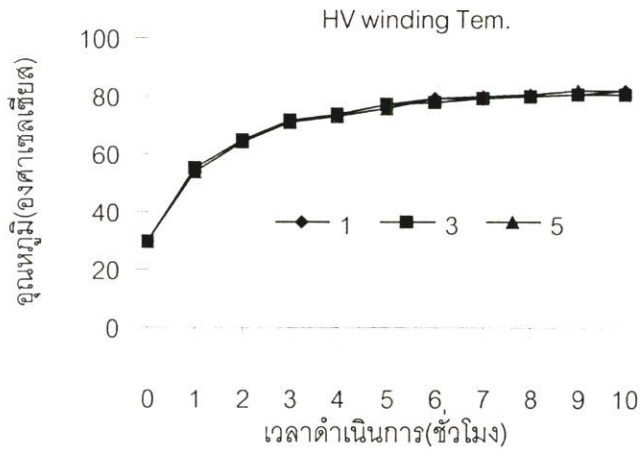
รูปที่ 4.128 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน และ อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านล่าง เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD<sub>i</sub>) 49%



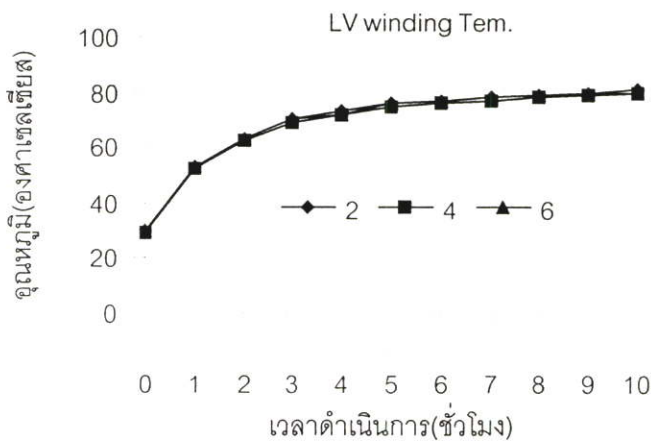
รูปที่ 4.129 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด กลาง และ ล่างสุด ของชุดขดลวดด้านแรงสูง เฟส A เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD) 49%



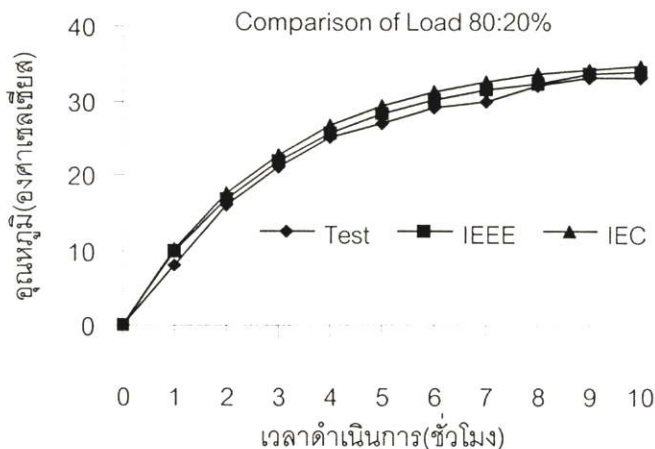
รูปที่ 4.130 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด กลาง และ ล่างสุด ของชุดขดลวดด้านแรงต่ำ เฟส A เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD) 49%



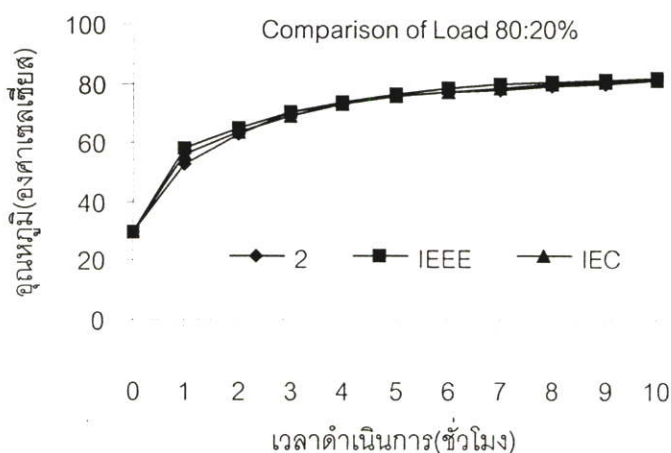
รูปที่ 4.131 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด ของชุดขดลวดด้านแรงสูง เฟส A เฟส B และ เฟส C เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแส เป็นเชิงเส้น 20% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD) 49%



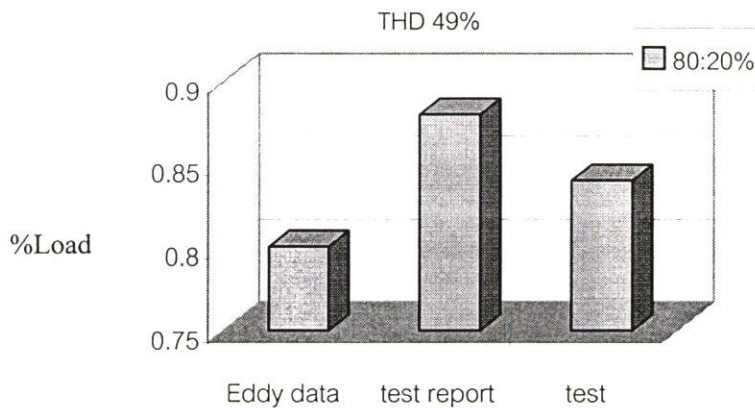
รูปที่ 4.132 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด ของชุดขดลวดด้านแรงต่ำ เฟส A เฟส B และ เฟส C เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแส เป็นเชิงเส้น 20 % ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD) 49%



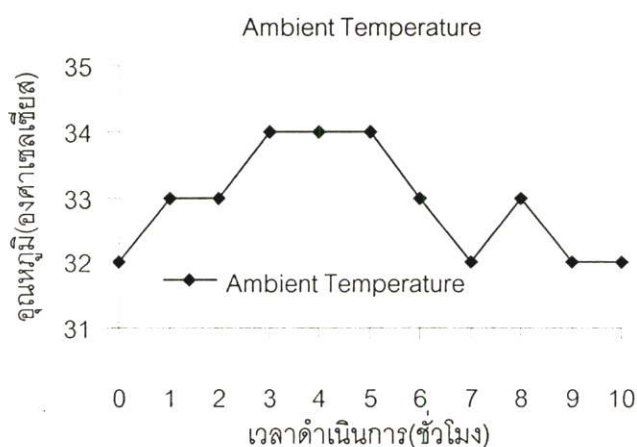
รูปที่ 4.133 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนตามมาตรฐาน IEEE และ มาตรฐาน IEC กับ ผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน เมื่อหม้อแปลงจ่าย โหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20 % ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์ มอนิกส์รวม (THD) 49%



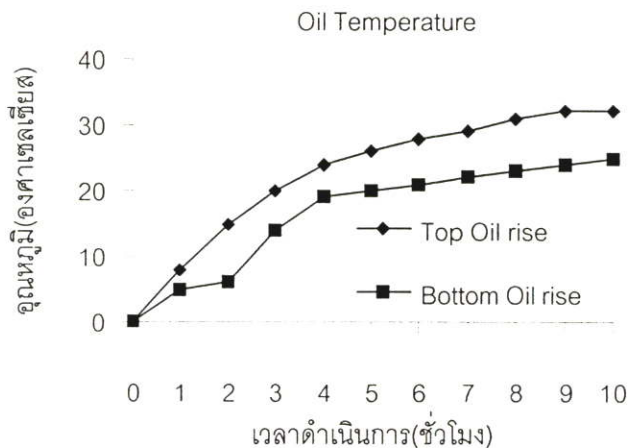
รูปที่ 4.134 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ตามมาตรฐาน IEEE และ มาตรฐาน IEC กับ ผลการทดสอบอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด (ตำแหน่งที่ 2) เมื่อหม้อแปลงจ่าย โหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแส ฮาร์โมนิกส์รวม (THD) 49%



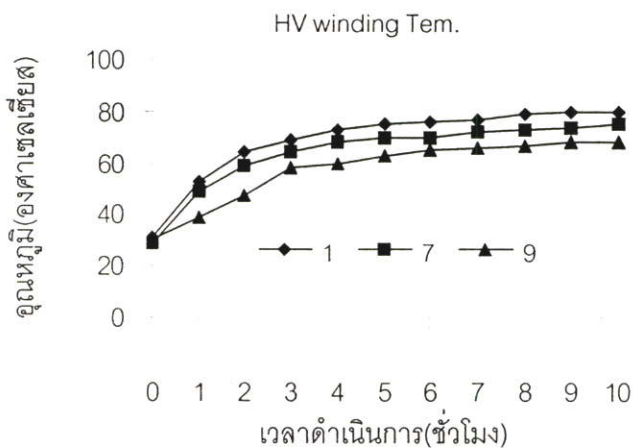
รูปที่ 4.135 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทำนาย Derating ด้วยวิธีใช้ข้อมูลที่ออกแบบกระแสไหลวน และ วิธีใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ กับ ผลการทดสอบวัด Transformer harmonic derating factor (THDF) เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20 % ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD<sub>r</sub>) 49%



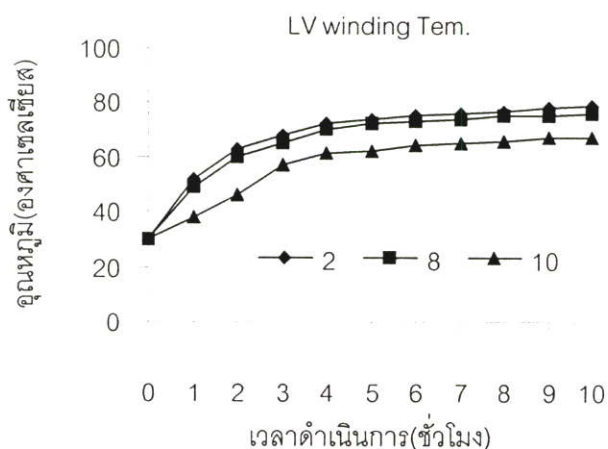
รูปที่ 4.136 แสดงผลการวัดอุณหภูมิแวดล้อมของหม้อแปลงไฟฟ้า เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD<sub>r</sub>) 42.7%



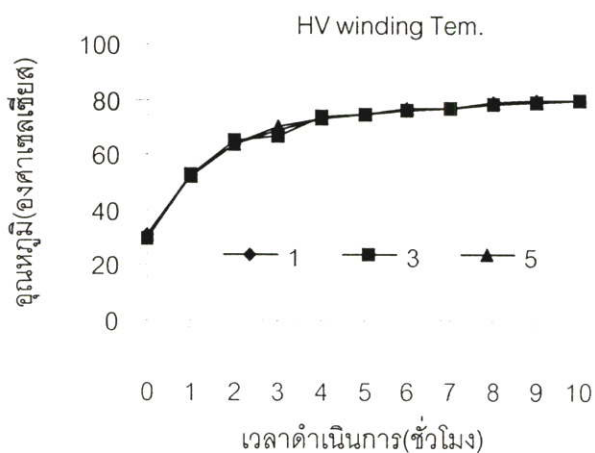
รูปที่ 4.137 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน และ อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านล่าง เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20 % ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD) 42.7%



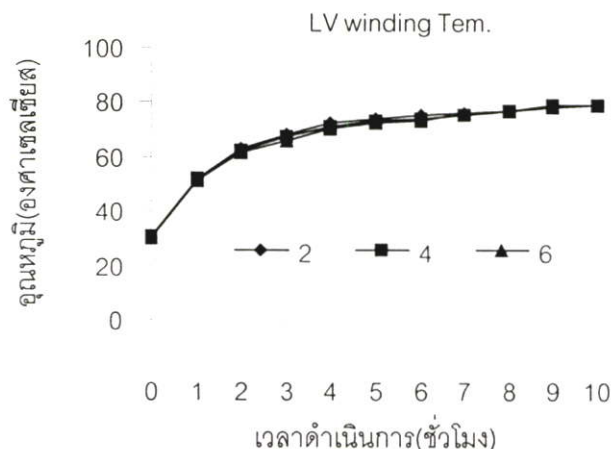
รูปที่ 4.138 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด กลาง และ ล่างสุด ของชุดขดลวดด้านแรงสูง เฟส A เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD) 42.7%



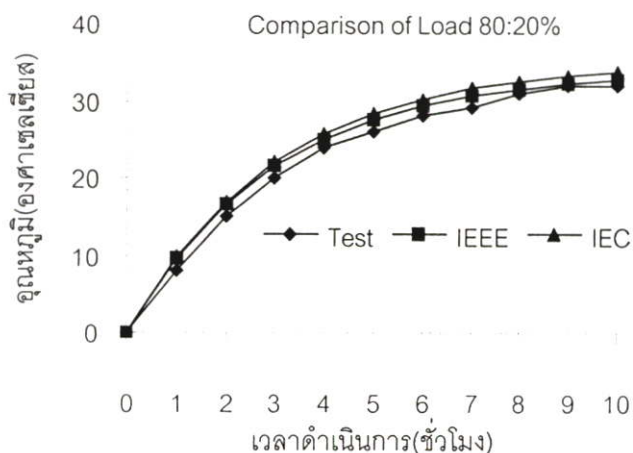
รูปที่ 4.139 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด กลาง และ ล่างสุด ของชุดขดลวดด้านแรงต่ำ เฟส A เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD) 42.7%



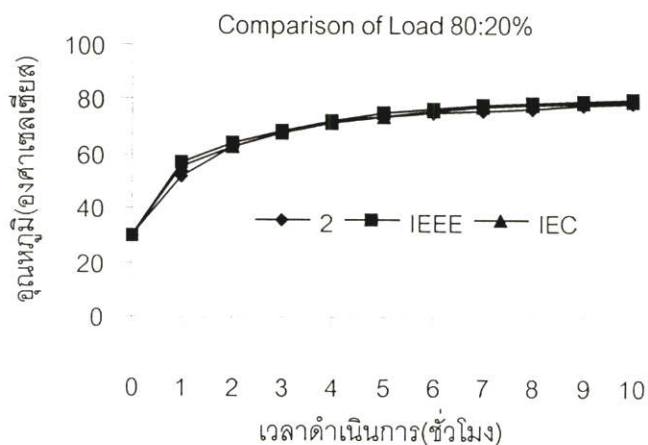
รูปที่ 4.140 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด ของชุดขดลวดด้านแรงสูง เฟส A เฟส B และ เฟส C เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD) 42.7%



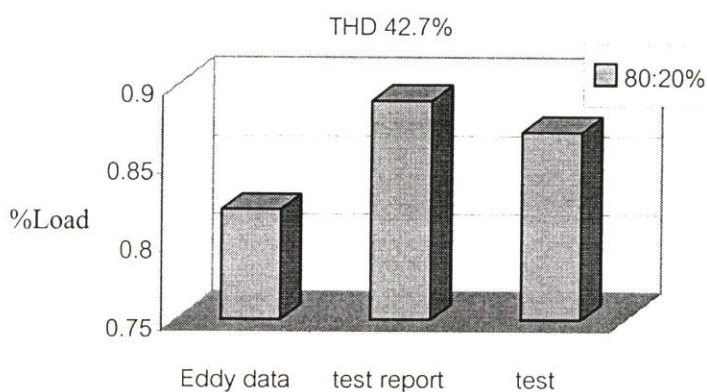
รูปที่ 4.141 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด ของชุดขดลวดด้านแรงต่ำ เฟส A เฟส B และ เฟส C เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD) 42.7%



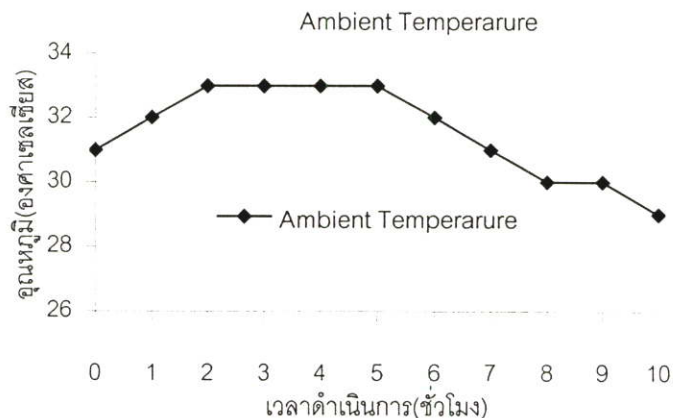
รูปที่ 4.142 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนตามมาตรฐาน IEEE และ มาตรฐาน IEC กับ ผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน เมื่อหม้อแปลงจ่าย โหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD) 42.7%



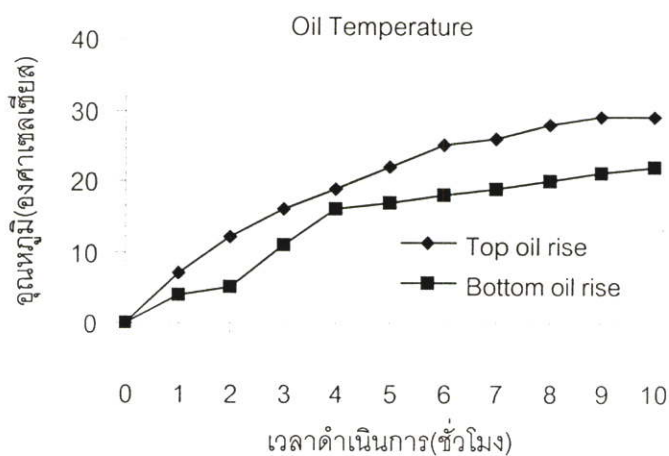
รูปที่ 4.143 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ตามมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC กับ ผลการทดสอบอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด (ตำแหน่งที่ 2) เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20 % ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD<sub>i</sub>) 42.7%



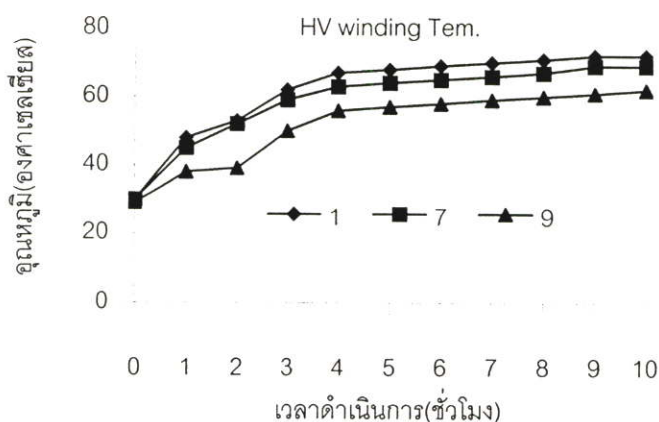
รูปที่ 4.144 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทำนาย Derating ด้วยวิธีใช้ข้อมูลที่ออกแบบกระแสไหลวน และ วิธีใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ กับ ผลการทดสอบวัด Transformer harmonic derating factor (THDF) เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD<sub>i</sub>) 42.7%



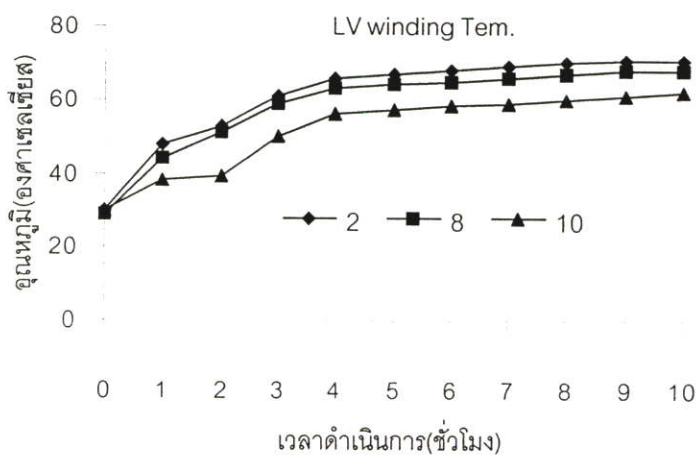
รูปที่ 4.145 แสดงผลการวัดอุณหภูมิแวดล้อมของหม้อแปลงไฟฟ้า เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เชิงเส้น 80% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD<sub>i</sub>) 30%



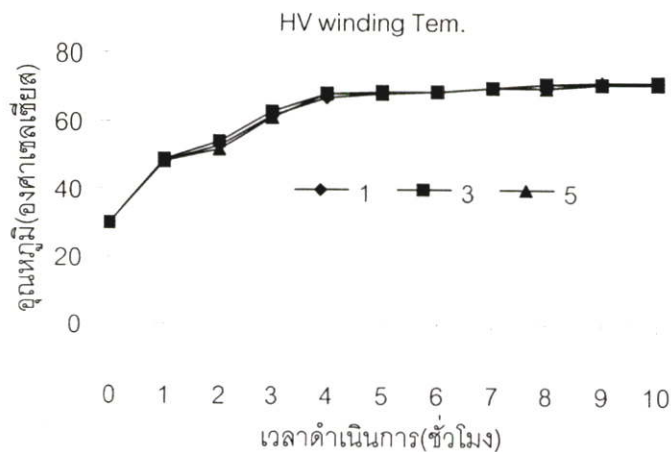
รูปที่ 4.146 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน และ อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านล่าง เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เชิงเส้น 80% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD<sub>i</sub>) 30%



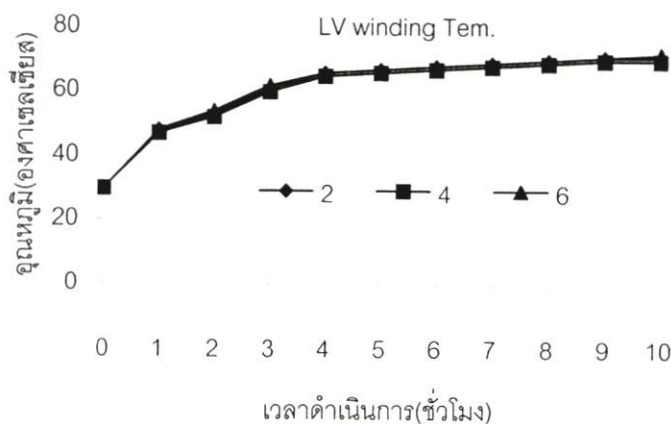
รูปที่ 4.147 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด กลาง และ ล่างสุด ของชุดขดลวดด้านแรงสูง เฟส A เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่าง โหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD<sub>i</sub>) 30%



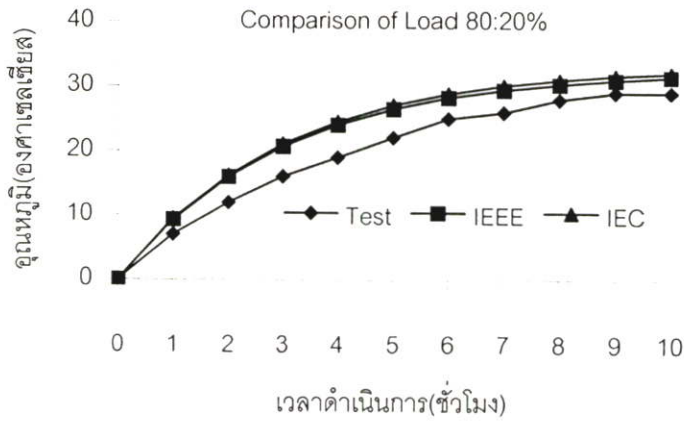
รูปที่ 4.148 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด กลาง และ ล่างสุด ของชุดขดลวดด้านแรงต่ำ เฟส A เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่าง โหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD<sub>i</sub>) 30%



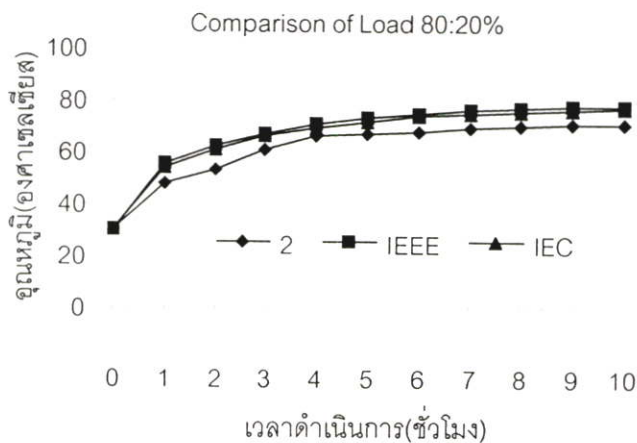
รูปที่ 4.149 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิค้ำบนบนสุด ของชุดขดลวดด้านแรงสูง เฟส A เฟส B และ เฟส C เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแส เป็นเชิงเส้น 20% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ของ กระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD<sub>i</sub>) 30%



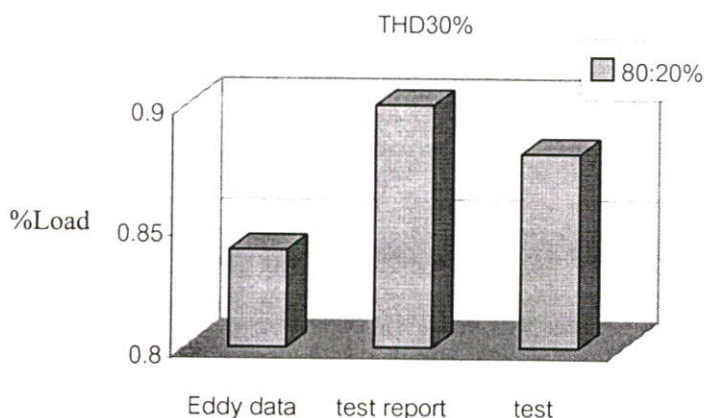
รูปที่ 4.150 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิค้ำบนบนสุด ของชุดขดลวดด้านแรงต่ำ เฟส A เฟส B และ เฟส C เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแส เป็นเชิงเส้น 20% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ของ กระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD<sub>i</sub>) 30%



**รูปที่ 4.151** แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนตามมาตรฐาน IEEE และ มาตรฐาน IEC กับ ผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน เมื่อหม้อแปลงจ่าย โหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์ มอนิกส์รวม (THD<sub>i</sub>) 30%



**รูปที่ 4.152** แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ตามมาตรฐาน IEEE และ มาตรฐาน IEC กับ ผลการทดสอบอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด (ตำแหน่งที่ 2) เมื่อหม้อแปลงจ่าย โหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแส ฮาร์โมนิกส์รวม (THD<sub>i</sub>) 30%



**รูปที่ 4.153** แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทำนาย Derating ด้วยวิธีใช้ข้อมูลที่ออกแบบกระแสไหลวน และ วิธีใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ กับ ผลการทดสอบวัด Transformer harmonic derating factor (THDF) เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20 % ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD<sub>r</sub>) 30%

รูปที่ 4.127, 4.136 และ 4.145 เป็นการทดสอบวัดอุณหภูมิแวดล้อมสำหรับทดสอบอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 49% ,42.7% และ30% พบว่าอุณหภูมิแวดล้อมขณะทำการทดสอบมีการเปลี่ยนแปลงตลอดทั้งวัน ซึ่งจะเป็สาเหตุหนึ่งที่ทำให้การทำนายอุณหภูมิของหม้อแปลงมีความคลาดเคลื่อนออกไปบ้าง

รูปที่ 4.128, 4.137 และ 4.146 เป็นการเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิน้ำมันด้านบน, อุณหภูมิน้ำมันด้านล่าง และอุณหภูมิแวดล้อม พบว่าอุณหภูมิน้ำมันด้านบนของหม้อแปลงจะสูงกว่าอุณหภูมิน้ำมันด้านล่าง เพราะว่า การระบายอากาศจะระบายความร้อนจากด้านล่างขึ้นไปข้างบนซึ่งจะทำให้อุณหภูมิน้ำมันด้านบนสูงกว่าอุณหภูมิน้ำมันด้านล่าง ดังการอธิบายในหัวข้อที่ 2.5.2 หัวข้อที่ 3.1 รูปที่ 3.1 และรูปที่ 3.2 และจะส่งผลทำให้อุณหภูมิของชุดขดลวดเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วยดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.127,4.136 และ4.145 จากรูปพบว่าอุณหภูมิแวดล้อมของหม้อแปลงเปลี่ยนแปลงตลอดทั้งวัน ซึ่งจะเป็ปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า

รูปที่ 4.129, 4.138 และ 4.147 เป็นการเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิเฟส A ณ ตำแหน่งบนสุดของชุดขดลวดทางด้านแรงสูง (ตำแหน่งที่ 1) กลางชุดขดลวดทางด้านแรงสูง

(ตำแหน่งที่ 7) และด้านล่างสุดของชุดขดลวด ( ตำแหน่งที่ 9) จากผลการทดสอบพบว่าตำแหน่งที่ร้อนที่สุดของชุดขดลวดทางด้านแรงสูงคือตำแหน่งที่ 1 เพราะฉะนั้นฉนวน ณ ตำแหน่งที่ 1 จะเสื่อมสภาพเร็วกว่าตำแหน่งอื่น ๆ

รูปที่ 4.130, 4.139 และ 4.148 เป็นการเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิของเฟส A ณ ตำแหน่งบนสุดของชุดขดลวดทางด้านแรงต่ำ (ตำแหน่งที่ 2) กลางชุดขดลวดทางด้านแรงต่ำ (ตำแหน่งที่ 8) และด้านล่างสุดของชุดขดลวด ( ตำแหน่งที่ 10) จากผลการทดสอบพบว่าตำแหน่งที่ร้อนที่สุดของชุดขดลวดทางด้านแรงต่ำคือตำแหน่งที่ 2 ซึ่งจะสัมพันธ์กันกับตำแหน่งที่ร้อนที่สุดของชุดขดลวดทางด้านแรงสูง ซึ่งก็คือตำแหน่งที่ 1 ฉะนั้นฉนวนของชุดขดลวดเฟส A ณ ตำแหน่งบนสุดของชุดขดลวดทั้งทางด้านแรงสูง และ ทางด้านแรงต่ำจะเสื่อมสภาพเร็วกว่าตำแหน่งอื่น ๆ

รูปที่ 4.131, 4.140 และ 4.149 เป็นการเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิ ณ ด้านบนสุดของชุดขดลวดทางด้านแรงสูงของ เฟส A (ตำแหน่งที่ 1), B (ตำแหน่งที่ 3) และ C (ตำแหน่งที่ 5) พบว่ามีอุณหภูมิใกล้เคียงกัน ดังนั้นฉนวนของชุดขดลวดด้านบนสุดของชุดขดลวดทางด้านแรงสูงของทั้งสามเฟสจะเสื่อมสภาพเร็วกว่าตำแหน่งอื่น ๆ

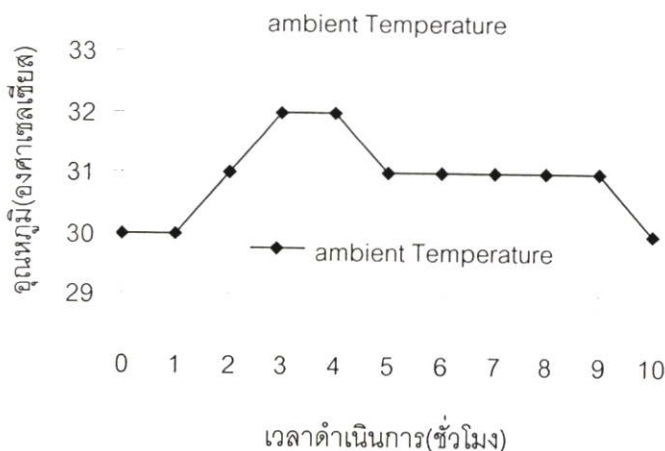
รูปที่ 4.132, 4.141 และ 4.150 เป็นการเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิ ณ ด้านบนสุดของชุดขดลวดทางด้านแรงต่ำ ของ เฟส A (ตำแหน่งที่ 2), B (ตำแหน่งที่ 4) และ C (ตำแหน่งที่ 6) พบว่ามีอุณหภูมิใกล้เคียงกัน ดังนั้นฉนวนของชุดขดลวดด้านบนสุดของชุดขดลวดทางด้านแรงต่ำของทั้งสามเฟสจะเสื่อมสภาพเร็วกว่าตำแหน่งอื่น ๆ

รูปที่ 4.133, 4.142 และ 4.151 เป็นการเปรียบเทียบ อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน ระหว่างผลการทดสอบ กับผลการทำนายด้วยมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC พบว่าผลการทดสอบและผลการทำนายมีความใกล้เคียงกันมาก ซึ่งจะเป็นผลทำให้การทำนายอายุการใช้งานของหม้อแปลงมีความถูกต้องและใกล้เคียงความเป็นจริงมากยิ่งขึ้น

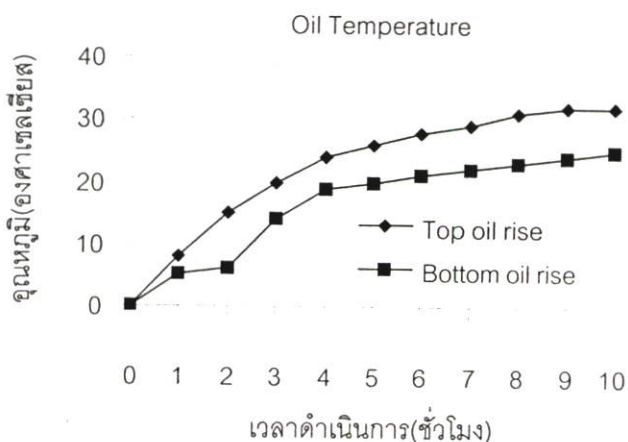
รูปที่ 4.134, 4.143 และ 4.152 เป็นการเปรียบเทียบ อุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด (ตำแหน่งที่ 2) ระหว่างผลการทดสอบ กับผลการทำนาย ด้วยมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC พบว่าผลการทดสอบและผลการทำนายมีความใกล้เคียงกันมาก ซึ่งจะเป็นผลทำให้การทำนายอายุการใช้งานของหม้อแปลงมีความถูกต้องและใกล้เคียงความเป็นจริงมากยิ่งขึ้น

รูปที่ 4.135, 4.144 และ 4.153 เป็นการเปรียบเทียบ THDF ระหว่างผลการทดสอบและผลการทำนาย พบว่าระหว่างผลการทดสอบและผลการทำนายมีค่าที่ใกล้เคียงกัน แต่ค่าที่ได้จากการทำนายด้วย วิธี การออกแบบค่าความสูญเสียของกระแสไหลวนจะมีค่าที่ต่ำกว่าการทดสอบ เล็กน้อย แต่ในทางปฏิบัติแล้ว ผู้วิจัยขอแนะนำให้ใช้ค่า THDF ที่ได้จากการทำนาย ด้วยการออกแบบกระแสไหลวน เพราะว่าจะเป็นผลดีในการเพิ่มโหลด ในกรณีที่ผู้ใช้งานไม่ทราบว่ามีกรลดพิักัด โหลดของหม้อแปลงอยู่ ซึ่งจะไม่ทำให้หม้อแปลงเกิดความเสียหายอันเนื่องมาจากความร้อนเกิน พิกัดขณะจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น

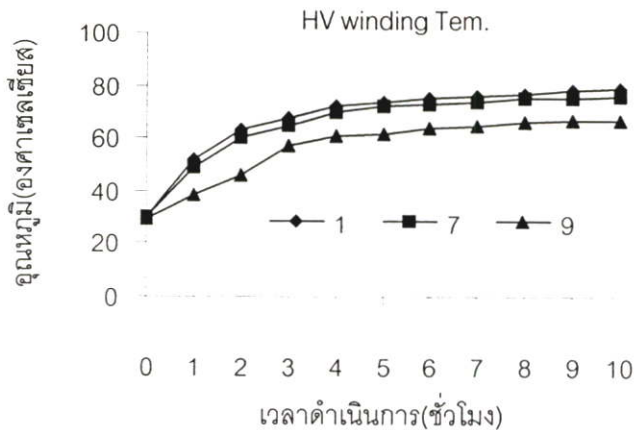
4.7.3.3 หม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 30 % ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ของกระแสที่พิกัด ซึ่งมีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD<sub>i</sub>) 30%, 42.7% และ 49%



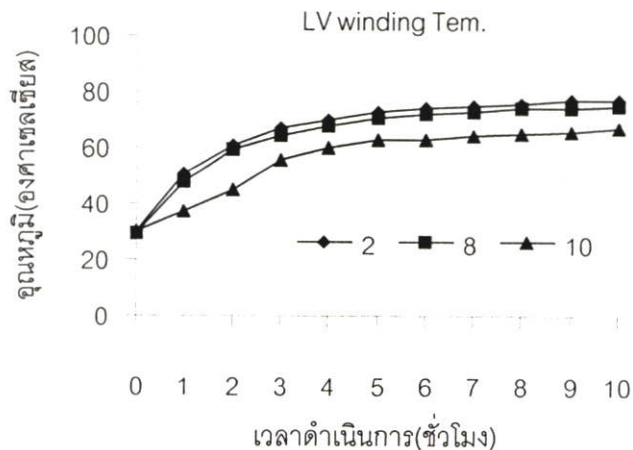
รูปที่ 4.154 แสดงผลการวัดอุณหภูมิแวดล้อมของหม้อแปลงไฟฟ้า เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 30% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD<sub>i</sub>) 49%



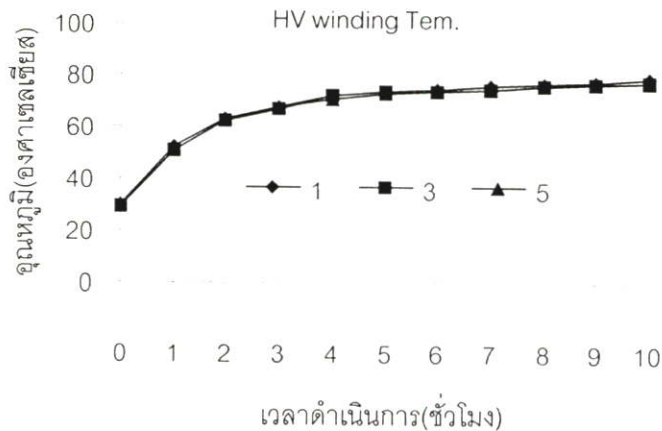
รูปที่ 4.155 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน และ อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านล่าง เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 30% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70 % ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD<sub>i</sub>) 49%



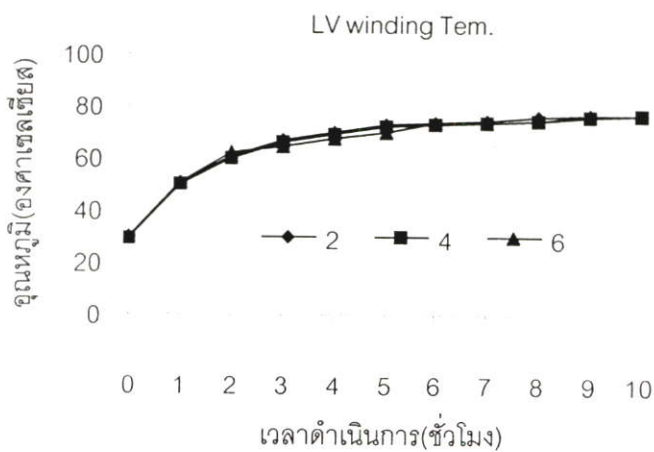
รูปที่ 4.156 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด กลาง และ ล่างสุด ของชุดขดลวดด้านแรงสูง เฟส A เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 30% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD<sub>i</sub>) 49%



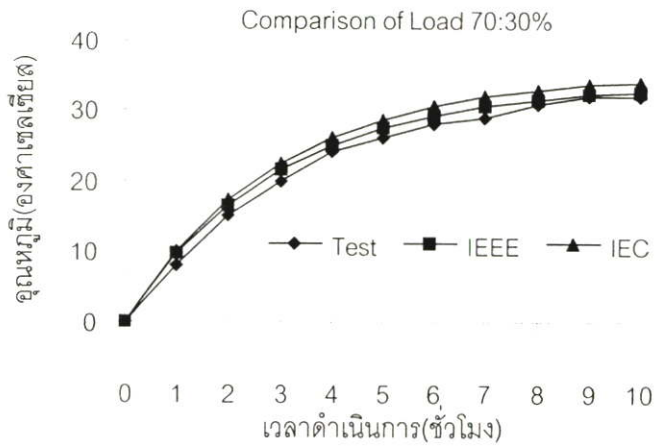
รูปที่ 4.157 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด กลาง และ ล่างสุด ของชุดขดลวดด้านแรงต่ำ เฟส A เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 30% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD<sub>i</sub>) 49%



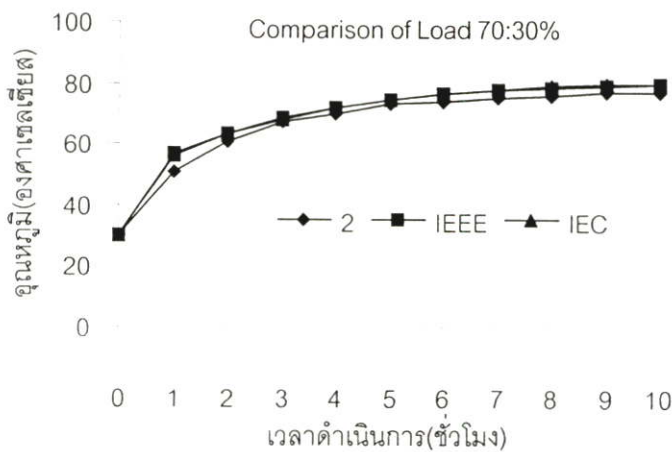
รูปที่ 4.158 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด ของชุดขดลวดด้านแรงสูง เฟส A เฟส B และ เฟส C เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแส เป็นเชิงเส้น 30% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD) 49%



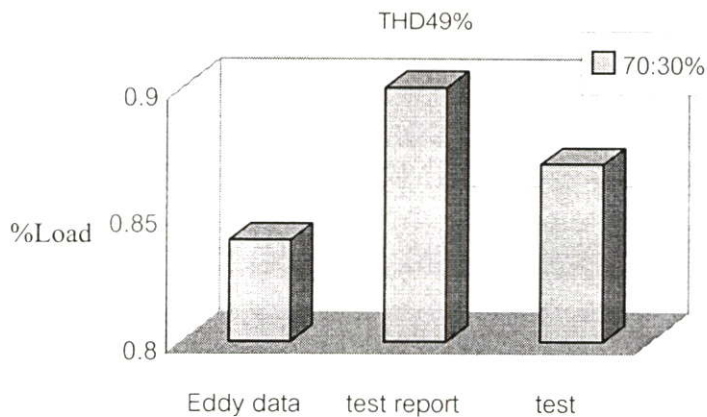
รูปที่ 4.159 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด ของชุดขดลวดด้านแรงต่ำ เฟส A เฟส B และ เฟส C เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแส เป็นเชิงเส้น 30% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD) 49%



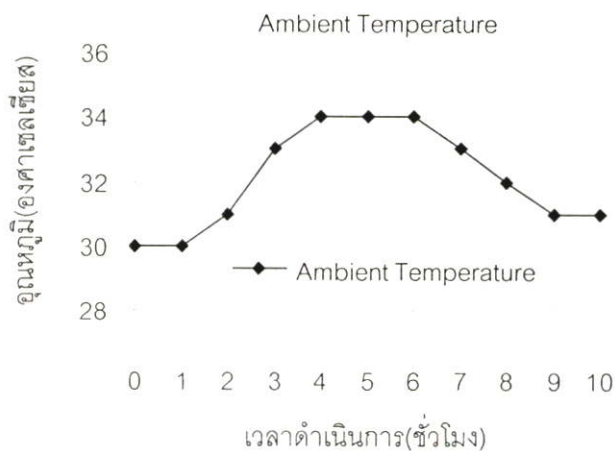
รูปที่ 4.160 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนตามมาตรฐาน IEEE และ มาตรฐาน IEC กับ ผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน เมื่อหม้อแปลงจ่าย โหลดร่วมกันระหว่าง โหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 30% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD) 49%



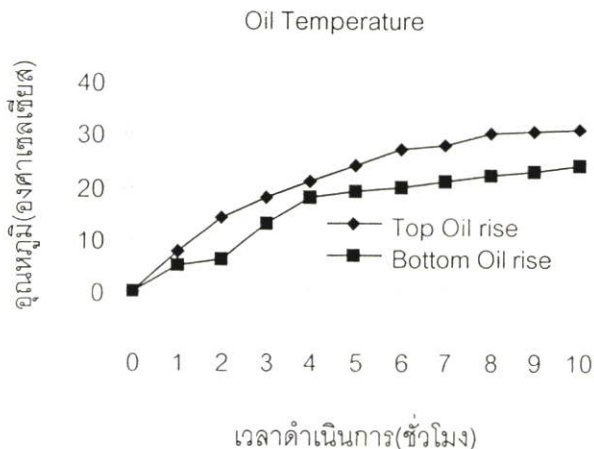
รูปที่ 4.161 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ตามมาตรฐาน IEEE และ มาตรฐาน IEC กับ ผลการทดสอบอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด (ตำแหน่งที่ 2) เมื่อหม้อแปลงจ่าย โหลดร่วมกันระหว่าง โหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 30% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD) 49%



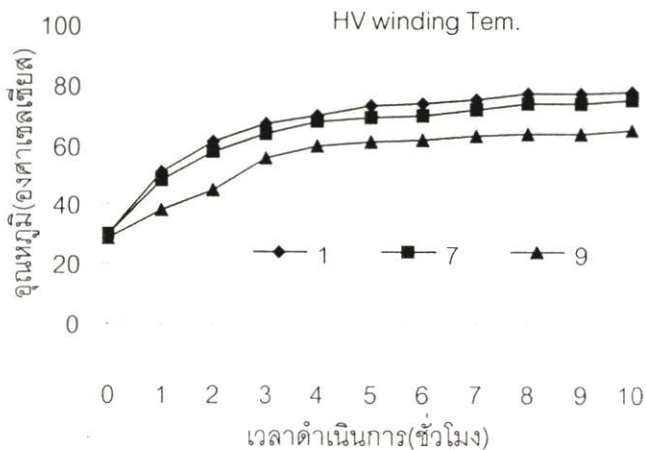
รูปที่ 4.162 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทำนาย Derating ด้วยวิธีใช้ข้อมูลที่ออกแบบกระแสไหลวน และ วิธีใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ กับ ผลการทดสอบวัด Transformer harmonic derating factor (THDF) เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 30% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD<sub>r</sub>) 49%



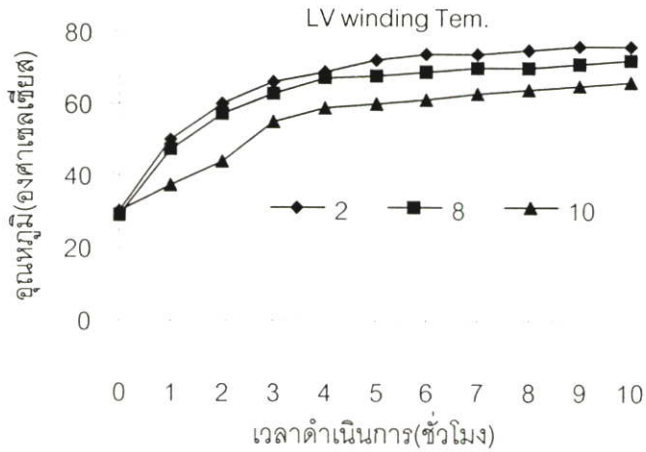
รูปที่ 4.163 แสดงผลการวัดอุณหภูมิแวดล้อมของหม้อแปลงไฟฟ้า เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 30% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD<sub>r</sub>) 42.7%



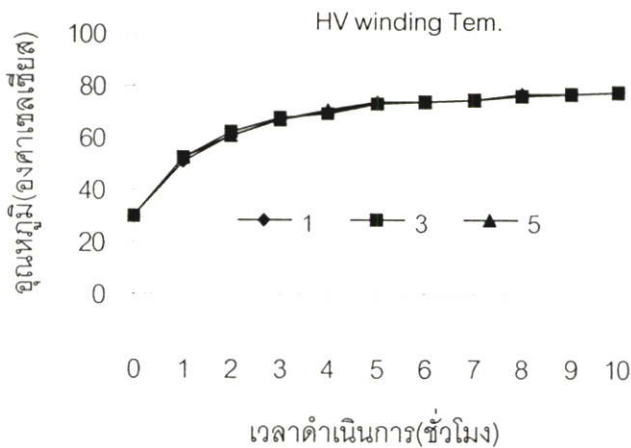
รูปที่ 4.164 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน และ อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านล่าง เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 30% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD<sub>i</sub>) 42.7%



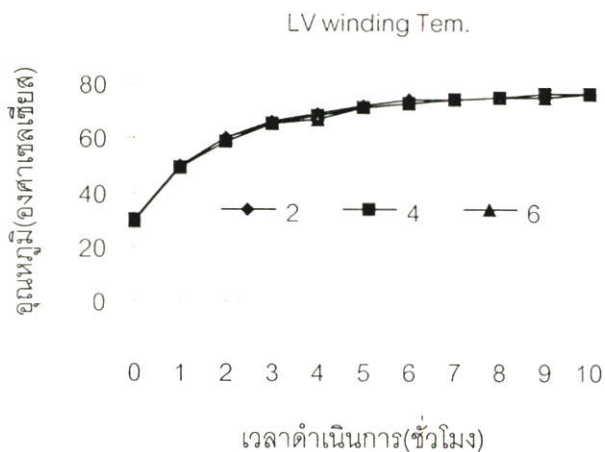
รูปที่ 4.165 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด กลาง และ ต่ำสุด ของชุดขดลวดด้านแรงสูง เฟส A เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 30% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD<sub>i</sub>) 42.7%



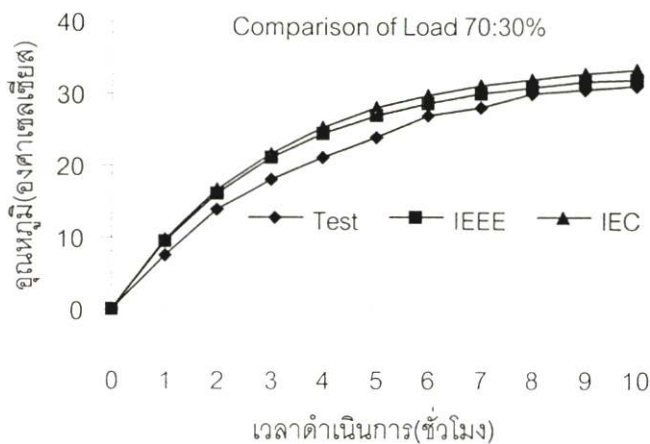
รูปที่ 4.166 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด กลาง และ ล่างสุด ของชุดขดลวดด้านแรงต่ำ เฟส A เมื่อหม้อแปลงจ่ายโวลตร่วมกันระหว่างโวลตแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 30% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโวลตแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD<sub>i</sub>) 42.7%



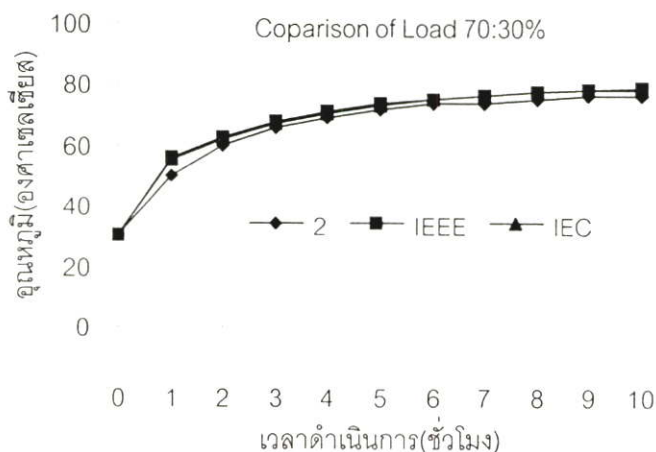
รูปที่ 4.167 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด ของชุดขดลวดด้านแรงสูง เฟส A เฟส B และ เฟส C เมื่อหม้อแปลงจ่ายโวลตร่วมกันระหว่างโวลตแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 30% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโวลตแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD<sub>i</sub>) 42.7%



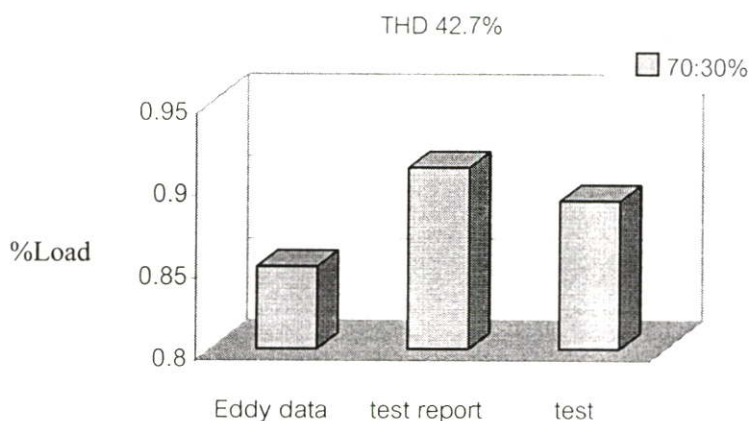
รูปที่ 4.168 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด ของชุดขดลวดด้านแรงต่ำ เฟส A เฟส B และ เฟส C เมื่อหม้อแปลงจ่ายโวลตร่วมกันระหว่างโวลตแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 30% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโวลตแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD<sub>r</sub>) 42.7%



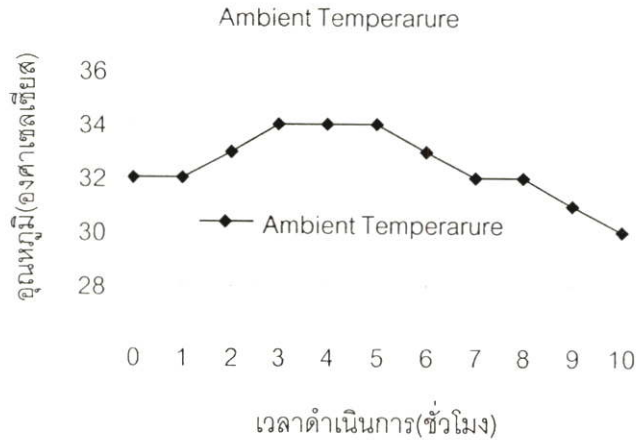
รูปที่ 4.169 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนตามมาตรฐาน IEEE และ มาตรฐาน IEC กับ ผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน เมื่อหม้อแปลงจ่ายโวลตร่วมกันระหว่างโวลตแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 30% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโวลตแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD<sub>r</sub>) 42.7%



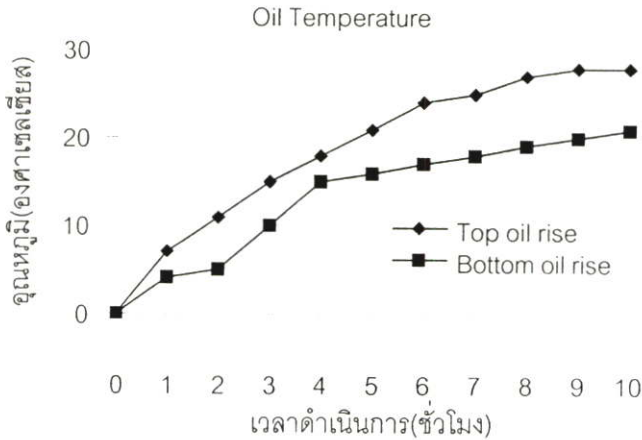
รูปที่ 4.170 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ตามมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC กับ ผลการทดสอบอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด (ตำแหน่งที่ 2) เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 30% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD<sub>i</sub>) 42.7%



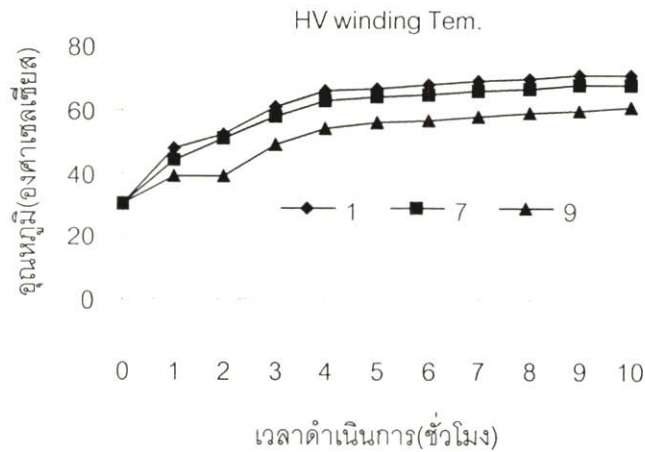
รูปที่ 4.171 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทำนาย Derating ด้วยวิธีใช้ข้อมูลที่ออกแบบกระแสไหลวน และ วิธีใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ กับ ผลการทดสอบวัด Transformer harmonic derating factor (THDF) เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 30% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD<sub>i</sub>) 42.7%



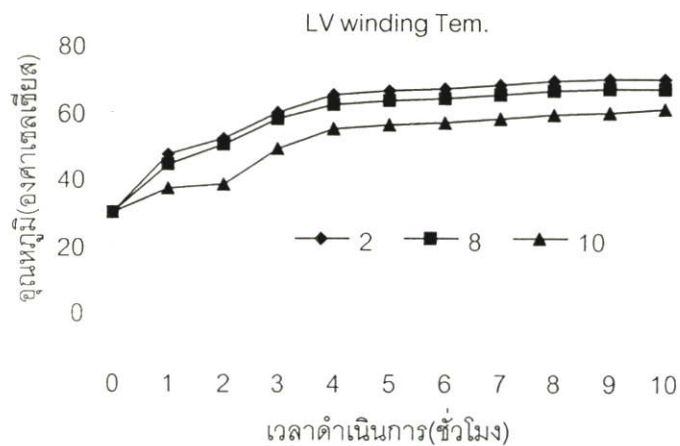
รูปที่ 4.172 แสดงผลการวัดอุณหภูมิแวดล้อมของหม้อแปลงไฟฟ้า เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 30% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD<sub>i</sub>) 30%



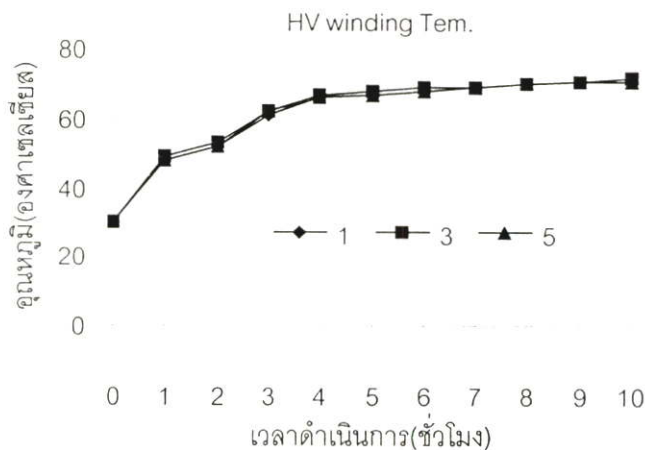
รูปที่ 4.173 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน และ อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านล่าง เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 30% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD<sub>i</sub>) 30%



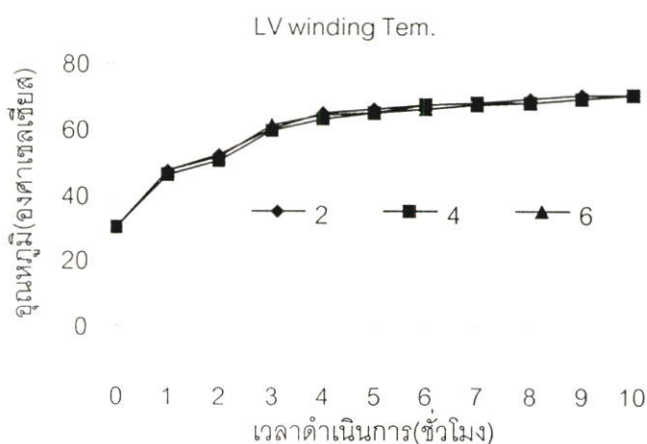
รูปที่ 4.174 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด กลาง และ ล่างสุด ของชุดขดลวดด้านแรงสูง เฟส A เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 30% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD) 30%



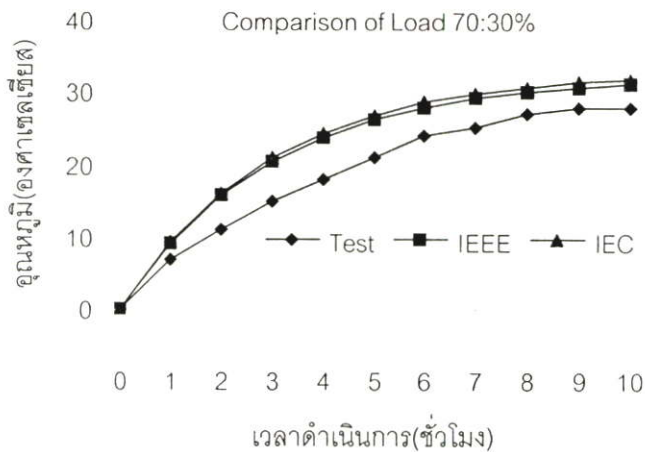
รูปที่ 4.175 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด กลาง และ ล่างสุด ของชุดขดลวดด้านแรงต่ำ เฟส A เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 30% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD) 30%



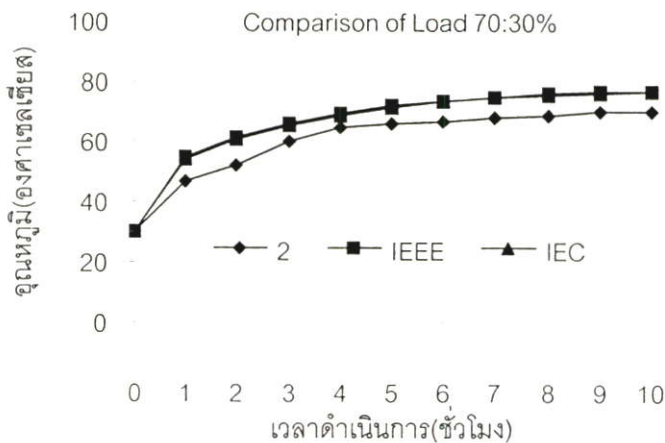
รูปที่ 4.176 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด ของชุดขดลวดด้านแรงสูง เฟส A เฟส B และ เฟส C เมื่อหม้อแปลงจ่ายโวลตร่วมกันระหว่างโวลตแบบกระแส เป็นเชิงเส้น 30% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโวลตแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ของ กระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD<sub>i</sub>) 30%



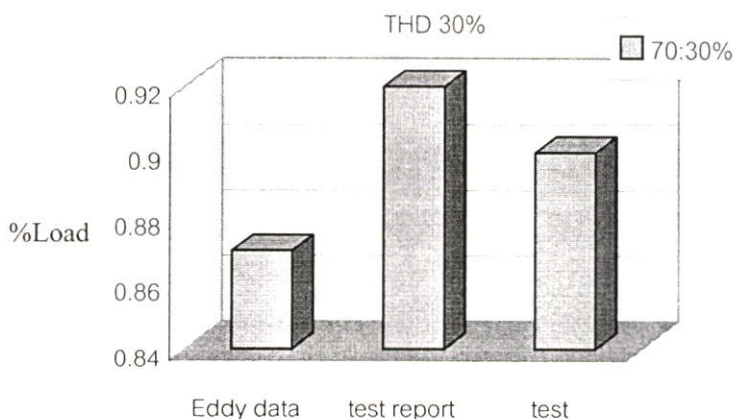
รูปที่ 4.177 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด ของชุดขดลวดด้านแรงต่ำ เฟส A เฟส B และ เฟส C เมื่อหม้อแปลงจ่ายโวลตร่วมกันระหว่างโวลตแบบกระแส เป็นเชิงเส้น 30% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโวลตแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ของ กระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD<sub>i</sub>) 30%



รูปที่ 4.178 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนตามมาตรฐาน IEEE และ มาตรฐาน IEC กับ ผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน เมื่อหม้อแปลงจ่าย โหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 30% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกสัรวม (THD) 30%



รูปที่ 4.179 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ตามมาตรฐาน IEEE และ มาตรฐาน IEC กับ ผลการทดสอบอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด (ตำแหน่งที่ 2) เมื่อหม้อแปลงจ่าย โหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 30% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกสัรวม (THD) 30%



**รูปที่ 4.180** แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทำนาย Derating ด้วยวิธีใช้ข้อมูลที่ออกแบบกระแสไหลวน และ วิธีใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ กับ ผลการทดสอบวัด Transformer harmonic derating factor (THDF) เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 30% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD) 30%

รูปที่ 4.154, 4.163 และ 4.172 เป็นการทดสอบวัดอุณหภูมิแวดล้อมสำหรับทดสอบอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 49%, 42.7% และ 30% พบว่าอุณหภูมิแวดล้อมขณะทำการทดสอบมีการเปลี่ยนแปลงตลอดทั้งวัน ซึ่งจะเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้การทำนายอุณหภูมิของหม้อแปลงมีความคลาดเคลื่อนออกไปบ้าง

รูปที่ 4.155, 4.164 และ 4.173 เป็นการเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิน้ำมันด้านบน, อุณหภูมิน้ำมันด้านล่าง และอุณหภูมิแวดล้อม พบว่าอุณหภูมิน้ำมันด้านบนของหม้อแปลงจะสูงกว่าอุณหภูมิน้ำมันด้านล่าง เพราะว่า การระบายอากาศจะระบายความร้อนจากด้านล่างขึ้นไปข้างบนซึ่งจะทำให้อุณหภูมิน้ำมันด้านบนสูงกว่าอุณหภูมิน้ำมันด้านล่าง ดังการอธิบายในหัวข้อที่ 2.5.2 หัวข้อที่ 3.1 รูปที่ 3.1 และรูปที่ 3.2 และจะส่งผลทำให้อุณหภูมิของชุดขดลวดเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วยดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.154, 4.163 และ 4.172 จากรูปพบว่าอุณหภูมิแวดล้อมของหม้อแปลงเปลี่ยนแปลงตลอดทั้งวัน ซึ่งจะเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า

รูปที่ 4.156, 4.165 และ 4.174 เป็นการเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิเฟส A ณ ตำแหน่งบนสุดของชุดขดลวดทางด้านแรงสูง (ตำแหน่งที่ 1) กลางชุดขดลวดทางด้านแรงสูง (ตำแหน่งที่ 7) และด้านล่างสุดของชุดขดลวด (ตำแหน่งที่ 9) จากผลการทดสอบพบว่าตำแหน่งที่

ร้อนที่สุดของชุดขดลวดทางด้านแรงสูงคือตำแหน่งที่ 1 เพราะฉะนั้นฉนวน ณ ตำแหน่งที่ 1 จะเสื่อมสภาพเร็วกว่าตำแหน่งอื่น ๆ

รูปที่ 4.157, 4.166 และ 4.175 เป็นการเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิของเฟส A ณ ตำแหน่งบนสุดของชุดขดลวดทางด้านแรงต่ำ (ตำแหน่งที่ 2) กลางชุดขดลวดทางด้านแรงต่ำ (ตำแหน่งที่ 8) และด้านล่างสุดของชุดขดลวด (ตำแหน่งที่ 10) จากผลการทดสอบพบว่าตำแหน่งที่ร้อนที่สุดของชุดขดลวดทางด้านแรงต่ำคือตำแหน่งที่ 2 ซึ่งจะสัมพันธ์กันกับตำแหน่งที่ร้อนที่สุดของชุดขดลวดทางด้านแรงสูง ซึ่งก็คือตำแหน่งที่ 1 ฉะนั้นฉนวนของชุดขดลวดเฟส A ณ ตำแหน่งบนสุดของชุดขดลวดทั้งทางด้านแรงสูง และ ทางด้านแรงต่ำจะเสื่อมสภาพเร็วกว่าตำแหน่งอื่น ๆ

รูปที่ 4.158, 4.167 และ 4.176 เป็นการเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิ ณ ด้านบนสุดของชุดขดลวดทางด้านแรงสูงของ เฟส A (ตำแหน่งที่ 1), B (ตำแหน่งที่ 3) และ C (ตำแหน่งที่ 5) พบว่ามีอุณหภูมิใกล้เคียงกัน ดังนั้นฉนวนของชุดขดลวดด้านบนสุดของชุดขดลวดทางด้านแรงสูงของทั้งสามเฟสจะเสื่อมสภาพเร็วกว่าตำแหน่งอื่น ๆ

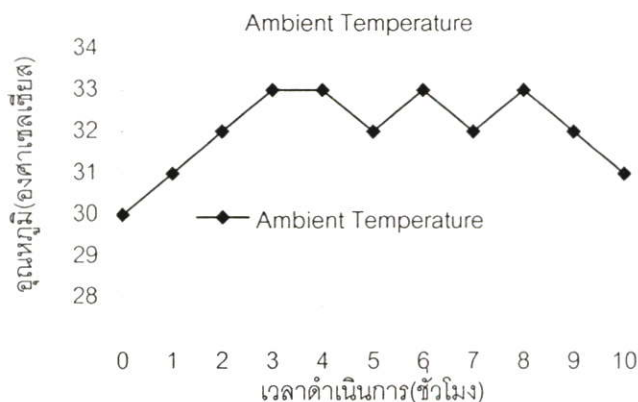
รูปที่ 4.159, 4.168 และ 4.177 เป็นการเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิ ณ ด้านบนสุดของชุดขดลวดทางด้านแรงต่ำ ของ เฟส A (ตำแหน่งที่ 2), B (ตำแหน่งที่ 4) และ C (ตำแหน่งที่ 6) พบว่ามีอุณหภูมิใกล้เคียงกัน ดังนั้นฉนวนของชุดขดลวดด้านบนสุดของชุดขดลวดทางด้านแรงต่ำของทั้งสามเฟสจะเสื่อมสภาพเร็วกว่าตำแหน่งอื่น ๆ

รูปที่ 4.160, 4.161 และ 4.178 เป็นการเปรียบเทียบ อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน ระหว่างผลการทดสอบ กับผลการทำนายด้วยมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC พบว่าผลการทดสอบและผลการทำนายมีความใกล้เคียงกันมาก ซึ่งจะเป็นผลทำให้การทำนายอายุการใช้งานของหม้อแปลงมีความถูกต้องและใกล้เคียงความเป็นจริงมากยิ่งขึ้น

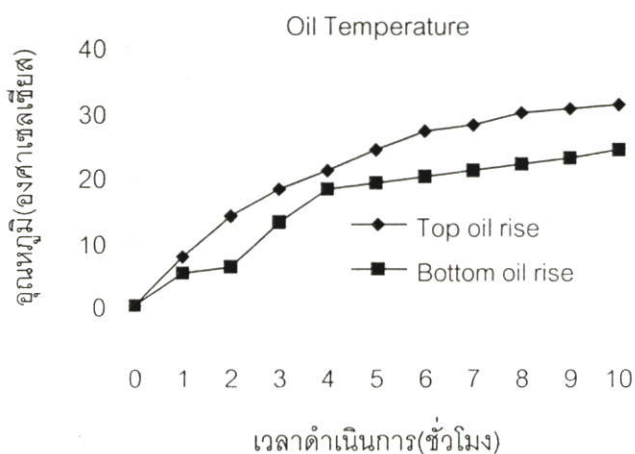
รูปที่ 4.161, 4.170 และ 4.179 เป็นการเปรียบเทียบ อุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด (ตำแหน่งที่ 2) ระหว่างผลการทดสอบ กับผลการทำนาย ด้วยมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC พบว่าผลการทดสอบและผลการทำนายมีความใกล้เคียงกันมาก ซึ่งจะเป็นผลทำให้การทำนายอายุการใช้งานของหม้อแปลงมีความถูกต้องและใกล้เคียงความเป็นจริงมากยิ่งขึ้น

รูปที่ 4.162, 4.171 และ 4.180 เป็นการเปรียบเทียบ THDF ระหว่างผลการทดสอบและผลการทำนาย พบว่าระหว่างผลการทดสอบและผลการทำนายมีค่าที่ใกล้เคียงกัน แต่ค่าที่ได้จากการทำนายด้วย วิธี การออกแบบค่าความสูญเสียของกระแสไหลวนจะมีค่าที่ต่ำกว่าการทดสอบ เล็กน้อย แต่ในทางปฏิบัติแล้ว ผู้วิจัยขอแนะนำให้ใช้ค่า THDF ที่ได้จากการทำนาย ด้วยการออกแบบกระแสไหลวน เพราะว่าจะเป็นผลดีในการเพิ่มโหลด ในกรณีที่ผู้ใช้งานไม่ทราบว่ามีภาระลัดพิกัด โหลดของหม้อแปลงอยู่ ซึ่งจะไม่ทำให้หม้อแปลงเกิดความเสียหายอันเนื่องมาจากความร้อนเกิน พิกัดขณะจ่าย โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น

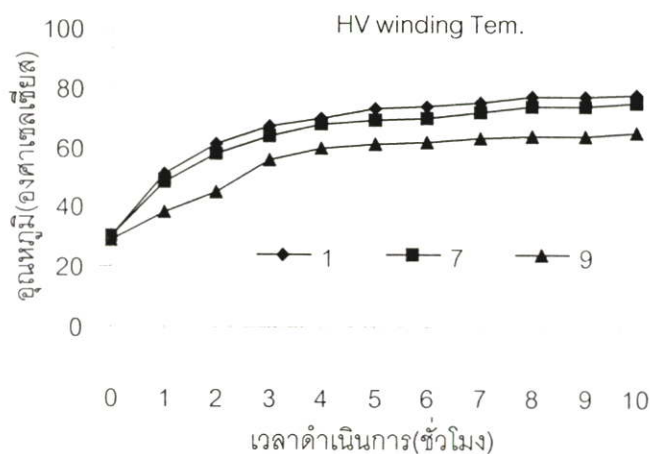
4.7.3.4 หม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกัน ระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40 % ของ กระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ของกระแสที่พิกัด ซึ่งมีความเพี้ยนของ กระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD<sub>i</sub>) 30%, 42.7% และ 49%



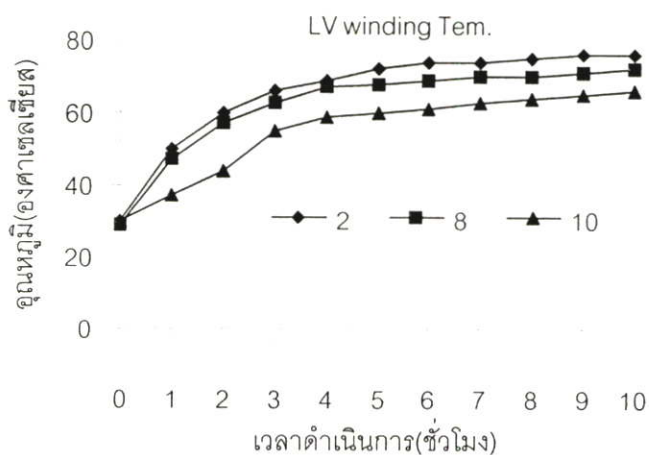
รูปที่ 4.181 แสดงผลการวัดอุณหภูมิแวดล้อมของหม้อแปลงไฟฟ้า เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบ กระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD<sub>i</sub>) 49%



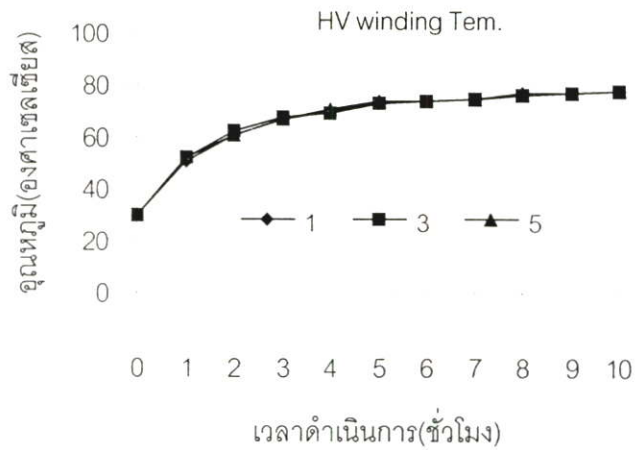
รูปที่ 4.182 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน และ อุณหภูมิเพิ่ม น้ำมันด้านล่าง เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ของกระแสที่ พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD<sub>i</sub>) 49%



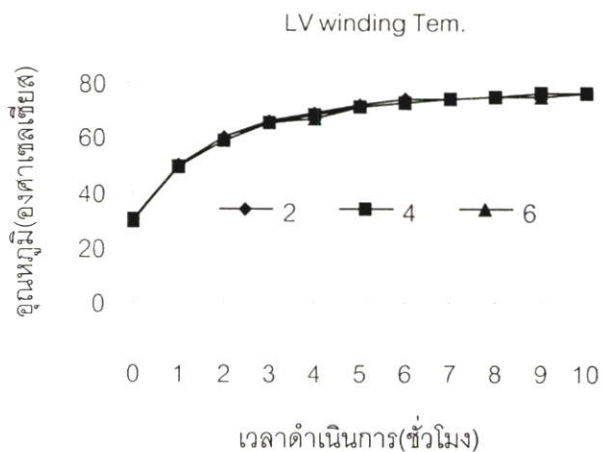
รูปที่ 4.183 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด กลาง และ ต่ำสุด ของชุดขดลวดด้านแรงสูง เฟส A เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD<sub>i</sub>) 49%



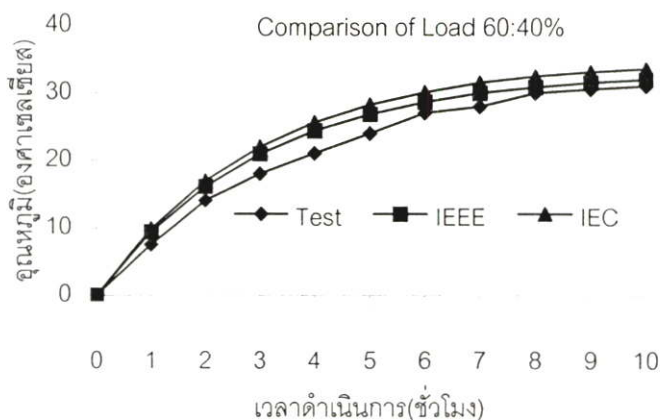
รูปที่ 4.184 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด กลาง และ ต่ำสุด ของชุดขดลวดด้านแรงต่ำ เฟส A เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD<sub>i</sub>) 49%



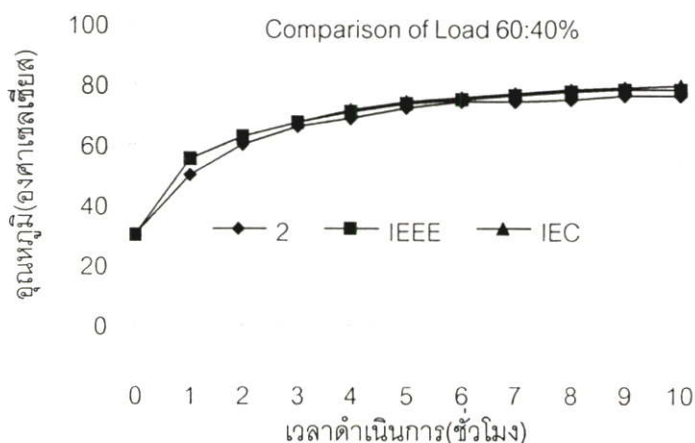
**รูปที่ 4.185** แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด ของชุดขดลวดด้านแรงสูง เฟส A เฟส B และ เฟส C เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแส เป็นเชิงเส้น 40% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD) 49%



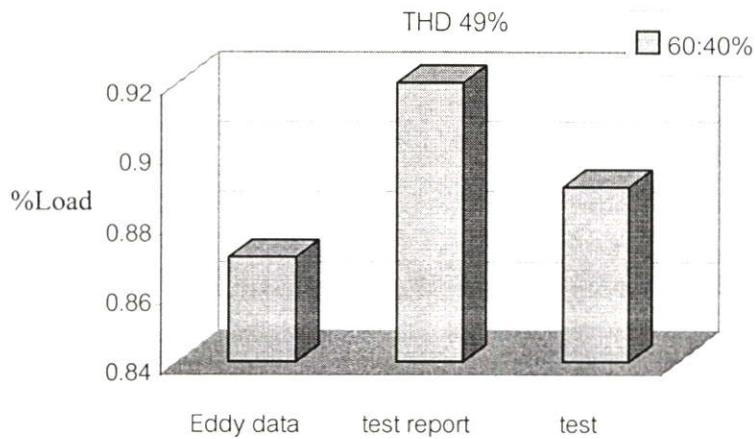
**รูปที่ 4.186** แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด ของชุดขดลวดด้านแรงต่ำ เฟส A เฟส B และ เฟส C เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแส เป็นเชิงเส้น 40% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ของ กระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD) 49%



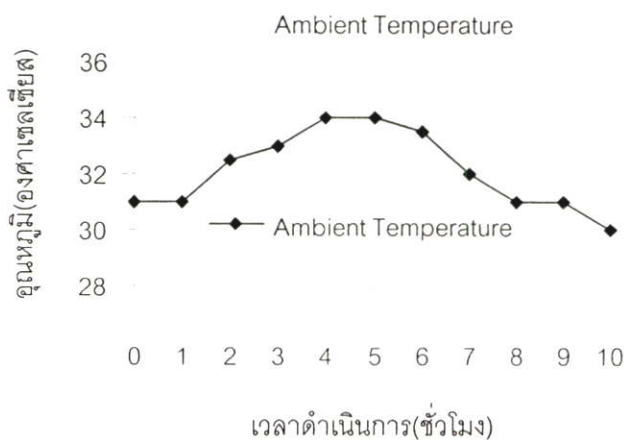
รูปที่ 4.187 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนตามมาตรฐาน IEEE และ มาตรฐาน IEC กับ ผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน เมื่อหม้อแปลงจ่าย โหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์ มอนิกส์รวม (THD<sub>r</sub>) 49%



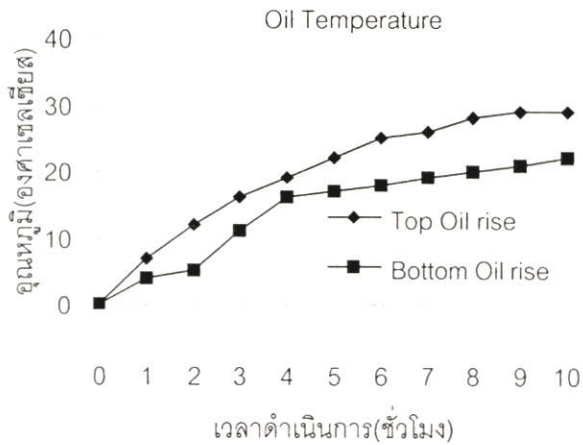
รูปที่ 4.188 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ตามมาตรฐาน IEEE และ มาตรฐาน IEC กับ ผลการทดสอบอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด (ตำแหน่งที่ 2) เมื่อหม้อ แปลงจ่าย โหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของ กระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD<sub>r</sub>) 49%



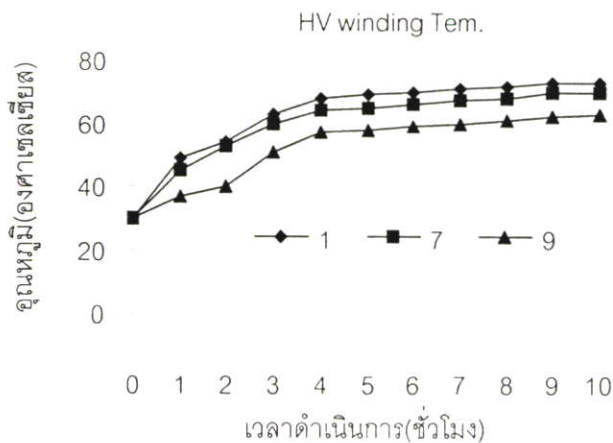
รูปที่ 4.189 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทำนาย Derating ด้วยวิธีใช้ข้อมูลที่ออกแบบกระแสไหลวน และ วิธีใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ กับ ผลการทดสอบวัด Transformer harmonic derating factor (THDF) เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เชิงเส้น 60% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD<sub>i</sub>) 49%



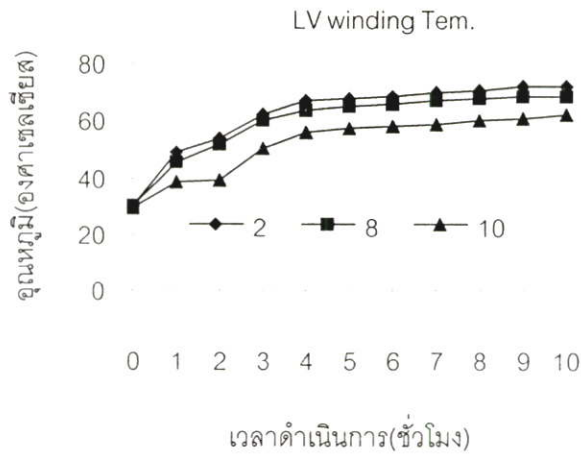
รูปที่ 4.190 แสดงผลการวัดอุณหภูมิแวดล้อมของหม้อแปลงไฟฟ้า เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เชิงเส้น 60% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD<sub>i</sub>) 42.7%



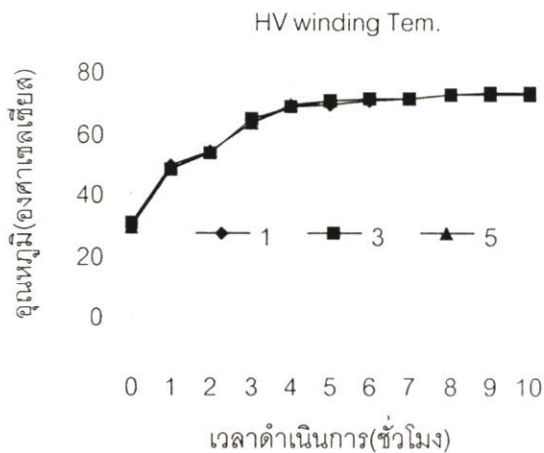
รูปที่ 4.191 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน และ อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านล่าง เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD,) 42.7%



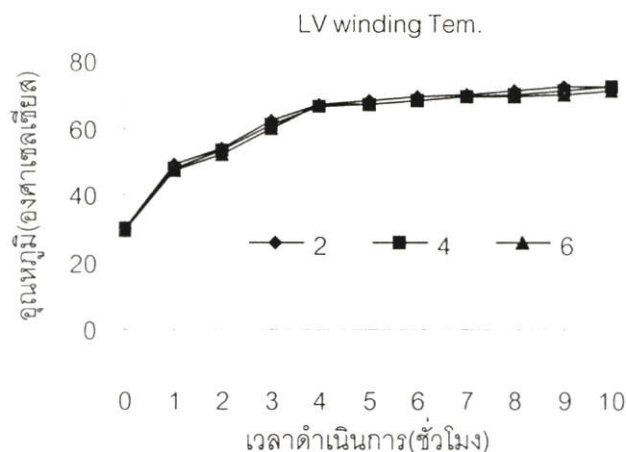
รูปที่ 4.192 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด กลาง และ ล่างสุด ของชุดขดลวดด้านแรงสูง เฟส A เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD,) 42.7%



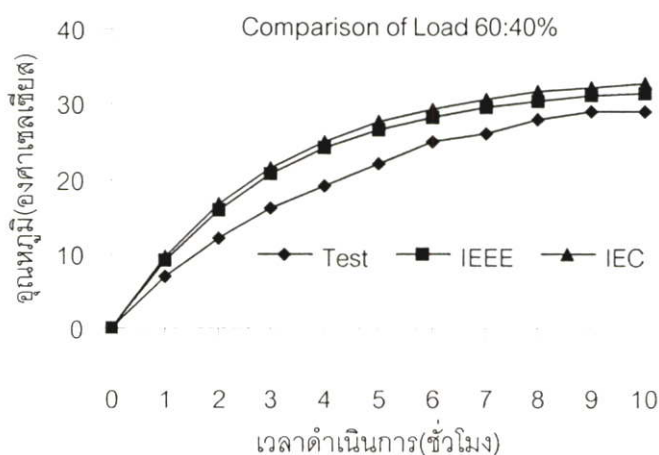
รูปที่ 4.193 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด กลาง และ ต่ำสุด ของชุดขดลวดด้านแรงต่ำ เฟส A เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD<sub>i</sub>) 42.7%



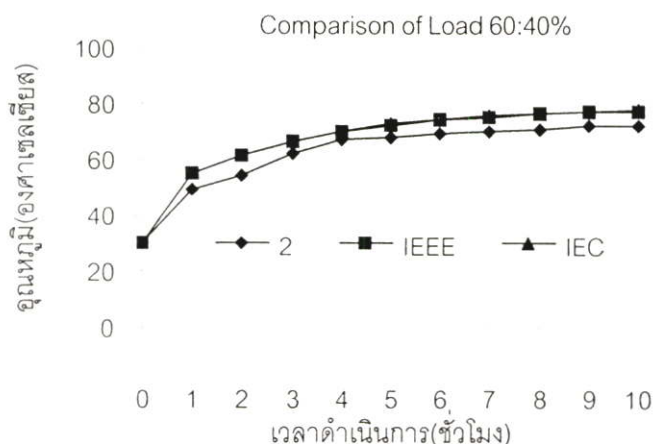
รูปที่ 4.194 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด ของชุดขดลวดด้านแรงสูง เฟส A เฟส B และ เฟส C เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD<sub>i</sub>) 42.7%



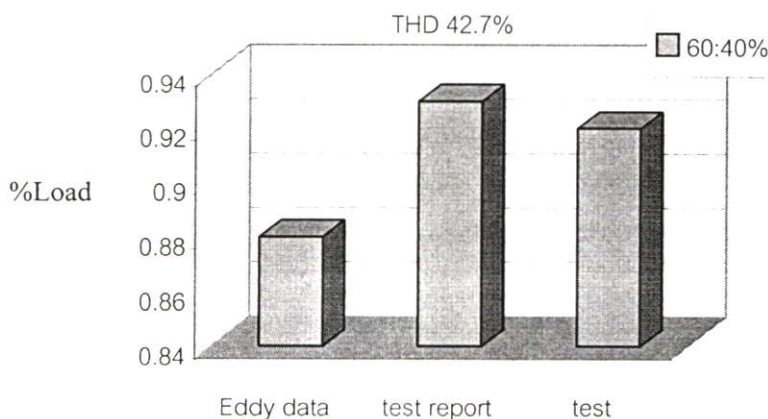
รูปที่ 4.195 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด ของชุดขดลวดด้านแรงต่ำ เฟส A เฟส B และ เฟส C เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD<sub>i</sub>) 42.7%



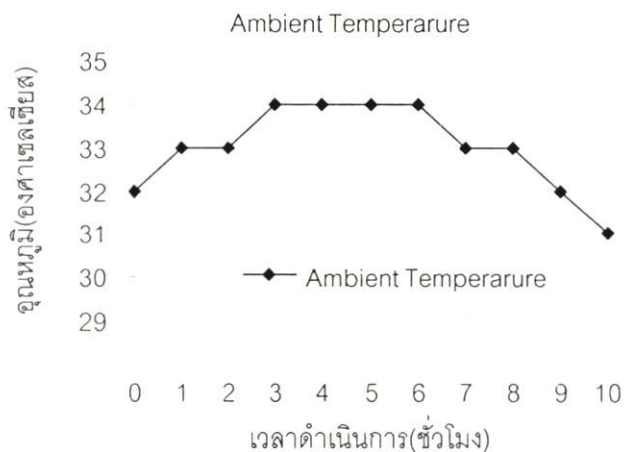
รูปที่ 4.196 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนตามมาตรฐาน IEEE และ มาตรฐาน IEC กับ ผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD<sub>i</sub>) 42.7%



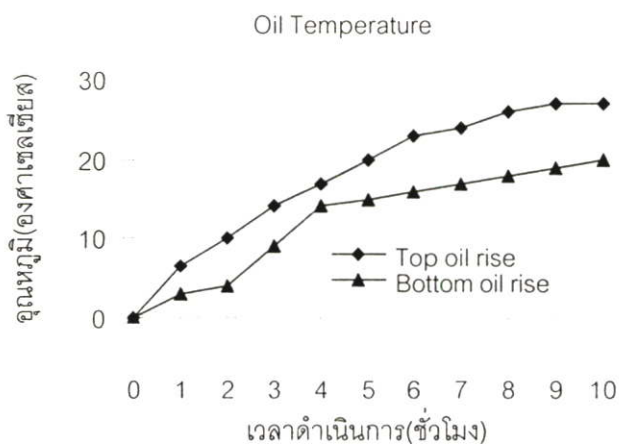
รูปที่ 4.197 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ตามมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC กับ ผลการทดสอบอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด (ตำแหน่งที่ 2) เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสักรวม (THD) 42.7%



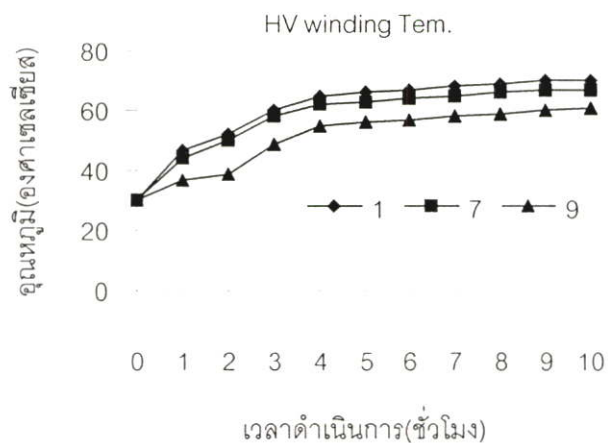
รูปที่ 4.198 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทำนาย Derating ด้วยวิธีใช้ข้อมูลที่ออกแบบกระแสไหลวน และ วิธีใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ กับ ผลการทดสอบวัด Transformer harmonic derating factor (THDF) เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสักรวม (THD) 42.7%



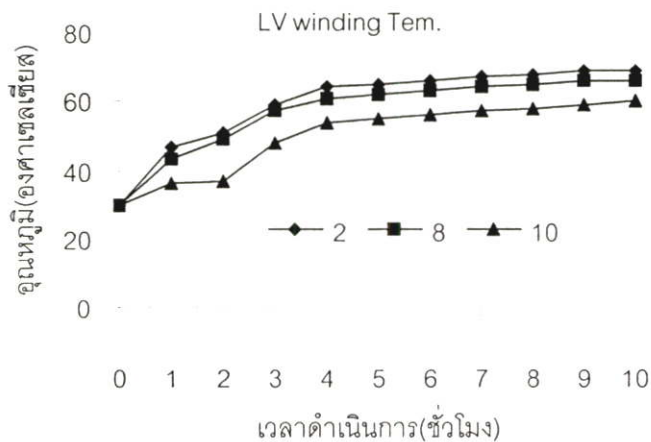
รูปที่ 4.199 แสดงผลการวัดอุณหภูมิแวดล้อมของหม้อแปลงไฟฟ้า เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD) 30%



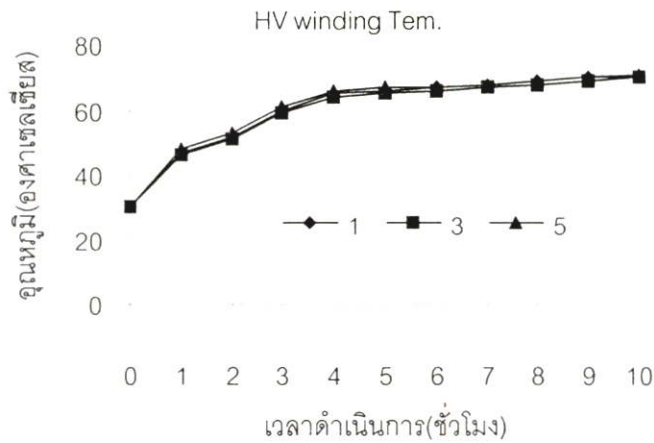
รูปที่ 4.200 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน และ อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านล่าง เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD) 30%



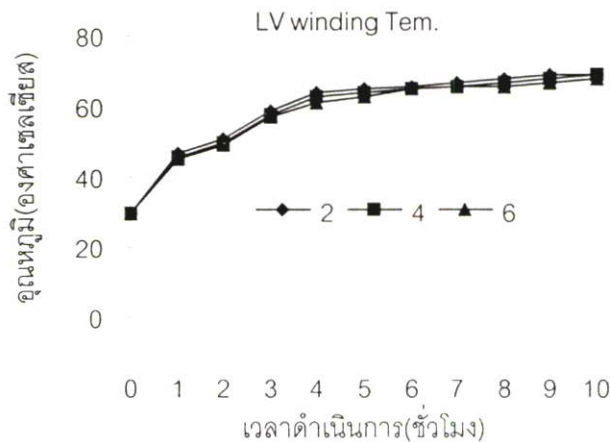
รูปที่ 4.201 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด กลาง และ ต่ำสุด ของชุดขดลวดด้านแรงสูง เฟส A เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD) 30%



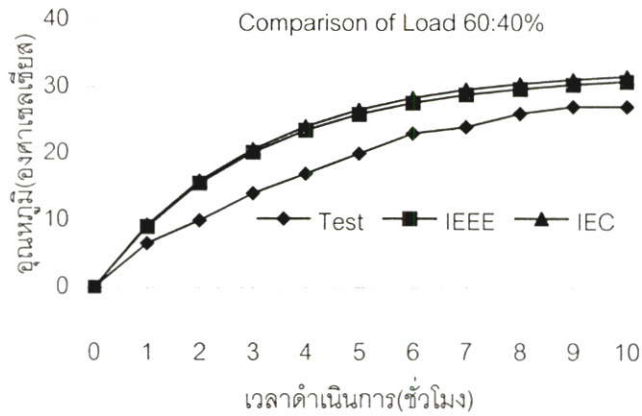
รูปที่ 4.202 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด กลาง และ ต่ำสุด ของชุดขดลวดด้านแรงต่ำ เฟส A เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD) 30%



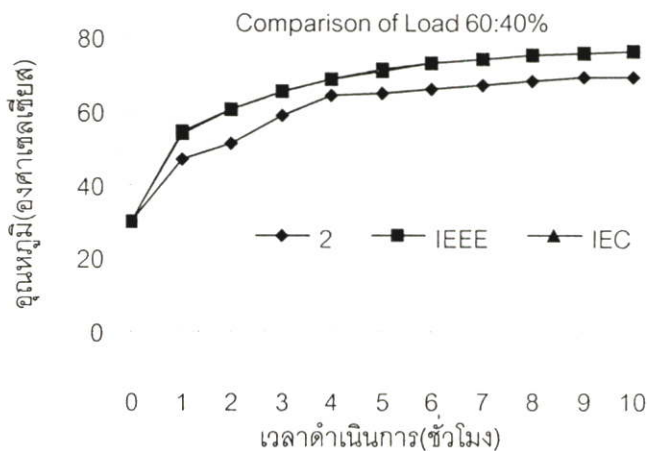
รูปที่ 4.203 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด ของชุดขดลวดด้านแรงสูง เฟส A เฟส B และ เฟส C เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD) 30%



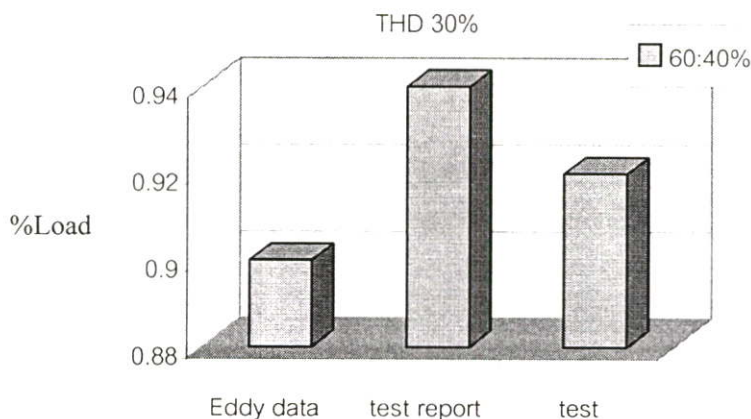
รูปที่ 4.204 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิด้านบนสุด ของชุดขดลวดด้านแรงต่ำ เฟส A เฟส B และ เฟส C เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD) 30%



รูปที่ 4.205 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนตามมาตรฐาน IEEE และ มาตรฐาน IEC กับ ผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน เมื่อหม้อแปลงจ่าย โหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40 % ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์ มอนิกส์รวม (THD<sub>i</sub>) 30%



รูปที่ 4.206 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ตามมาตรฐาน IEEE และ มาตรฐาน IEC กับ ผลการทดสอบอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด (ตำแหน่งที่ 2) เมื่อ หม้อแปลงจ่าย โหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% ของกระแส ที่พิกัด ร่วมกับ โหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความ เพี้ยนของกระแสฮาร์ มอนิกส์รวม (THD<sub>i</sub>) 30%



รูปที่ 4.207 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทำนาย Derating ด้วยวิธีใช้ข้อมูลที่ออกแบบกระแสไหลวน และ วิธีใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ กับ ผลการทดสอบวัด Transformer harmonic derating factor (THDF) เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% ของกระแสที่พิกัด ร่วมกับโหลดแบบกระแสไม่เชิงเส้น 60% ของกระแสที่พิกัด ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสร่วม (THD<sub>r</sub>) 30%

รูปที่ 4.181, 4.190 และ 4.199 เป็นการทดสอบวัดอุณหภูมิแวดล้อมสำหรับทดสอบอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เชิงเส้น ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสร่วม 49%, 42.7% และ 30% พบว่าอุณหภูมิแวดล้อมขณะทำการทดสอบมีการเปลี่ยนแปลงตลอดทั้งวัน ซึ่งจะเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้การทำนายอุณหภูมิของหม้อแปลงมีความคลาดเคลื่อนออกไปบ้าง

รูปที่ 4.182, 4.191 และ 4.200 เป็นการเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิน้ำมันด้านบน, อุณหภูมิน้ำมันด้านล่าง และอุณหภูมิแวดล้อม พบว่าอุณหภูมิน้ำมันด้านบนของหม้อแปลงจะสูงกว่าอุณหภูมิน้ำมันด้านล่าง เพราะว่า การระบายอากาศจะระบายความร้อนจากด้านล่างขึ้นไปข้างบนซึ่งจะทำให้อุณหภูมิน้ำมันด้านบนสูงกว่าอุณหภูมิน้ำมันด้านล่าง ดังการอธิบายในหัวข้อที่ 2.5.2 หัวข้อที่ 3.1 รูปที่ 3.1 และรูปที่ 3.2 และจะส่งผลทำให้อุณหภูมิของชุดขดลวดเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วยดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.181, 4.190 และ 4.199 จากรูปพบว่าอุณหภูมิแวดล้อมของหม้อแปลงเปลี่ยนแปลงตลอดทั้งวัน ซึ่งจะเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า

รูปที่ 4.183, 4.192 และ 4.201 เป็นการเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิเฟส A ณ ตำแหน่งบนสุดของชุดขดลวดทางด้านแรงสูง (ตำแหน่งที่ 1) กลางชุดขดลวดทางด้านแรงสูง (ตำแหน่งที่ 7) และด้านล่างสุดของชุดขดลวด (ตำแหน่งที่ 9) จากผลการทดสอบพบว่าตำแหน่งที่

ร้อนที่สุดของชุดขดลวดทางด้านแรงสูงคือตำแหน่งที่ 1 เพราะฉะนั้นฉนวน ณ ตำแหน่งที่ 1 จะเสื่อมสภาพเร็วกว่าตำแหน่งอื่น ๆ

รูปที่ 4.184, 4.193 และ 4.202 เป็นการเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิของเฟส A ณ ตำแหน่งบนสุดของชุดขดลวดทางด้านแรงต่ำ (ตำแหน่งที่ 2) กลางชุดขดลวดทางด้านแรงต่ำ (ตำแหน่งที่ 8) และด้านล่างสุดของชุดขดลวด (ตำแหน่งที่ 10) จากผลการทดสอบพบว่าตำแหน่งที่ร้อนที่สุดของชุดขดลวดทางด้านแรงต่ำคือตำแหน่งที่ 2 ซึ่งจะสัมพันธ์กันกับตำแหน่งที่ร้อนที่สุดของชุดขดลวดทางด้านแรงสูง ซึ่งก็คือตำแหน่งที่ 1 ฉะนั้นฉนวนของชุดขดลวดเฟส A ณ ตำแหน่งบนสุดของชุดขดลวดทั้งทางด้านแรงสูง และ ทางด้านแรงต่ำจะเสื่อมสภาพเร็วกว่าตำแหน่งอื่น ๆ

รูปที่ 4.185, 4.194 และ 4.203 เป็นการเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิ ณ ด้านบนสุดของชุดขดลวดทางด้านแรงสูงของ เฟส A (ตำแหน่งที่ 1), B (ตำแหน่งที่ 3) และ C (ตำแหน่งที่ 5) พบว่ามีอุณหภูมิใกล้เคียงกัน ดังนั้นฉนวนของชุดขดลวดด้านบนสุดของชุดขดลวดทางด้านแรงสูงของทั้งสามเฟสจะเสื่อมสภาพเร็วกว่าตำแหน่งอื่น ๆ

รูปที่ 4.186, 4.195 และ 4.204 เป็นการเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิ ณ ด้านบนสุดของชุดขดลวดทางด้านแรงต่ำ ของ เฟส A (ตำแหน่งที่ 2), B (ตำแหน่งที่ 4) และ C (ตำแหน่งที่ 6) พบว่ามีอุณหภูมิใกล้เคียงกัน ดังนั้นฉนวนของชุดขดลวดด้านบนสุดของชุดขดลวดทางด้านแรงต่ำของทั้งสามเฟสจะเสื่อมสภาพเร็วกว่าตำแหน่งอื่น ๆ

รูปที่ 4.187, 4.196 และ 4.205 เป็นการเปรียบเทียบ อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน ระหว่างผลการทดสอบ กับผลการทำนายด้วยมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC พบว่าผลการทดสอบและผลการทำนายมีความใกล้เคียงกันมาก ซึ่งจะเป็นผลทำให้การทำนายอายุการใช้งานของหม้อแปลงมีความถูกต้องและใกล้เคียงความเป็นจริงมากยิ่งขึ้น

รูปที่ 4.188, 4.197 และ 4.206 เป็นการเปรียบเทียบ อุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด (ตำแหน่งที่ 2) ระหว่างผลการทดสอบ กับผลการทำนาย ด้วยมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC พบว่าผลการทดสอบและผลการทำนายมีความใกล้เคียงกันมาก ซึ่งจะเป็นผลทำให้การทำนายอายุการใช้งานของหม้อแปลงมีความถูกต้องและใกล้เคียงความเป็นจริงมากยิ่งขึ้น

รูปที่ 4.189, 4.198 และ 4.207 เป็นการเปรียบเทียบ THDF ระหว่างผลการทดสอบและผลการทำนาย พบว่าระหว่างผลการทดสอบและผลการทำนายมีค่าที่ใกล้เคียงกัน แต่ค่าที่ได้จากการทำนายด้วย วิธี การออกแบบค่าความสูญเสียของกระแสไหลวนจะมีค่าที่ต่ำกว่าการทดสอบ เล็กน้อย แต่ในทางปฏิบัติแล้ว ผู้วิจัยขอแนะนำให้ใช้ค่า THDF ที่ได้จากการทำนาย ด้วยการออกแบบกระแสไหลวน เพราะว่าจะจะเป็นผลดีในการเพิ่มโหลด ในกรณีที่ผู้ใช้งานไม่ทราบว่ามีภาระลัดพิกัดโหลดของหม้อแปลงอยู่ ซึ่งจะไม่ทำให้หม้อแปลงเกิดความเสียหายอันเนื่องมาจากความร้อนเกินพิกัดขณะจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น

## บทที่ 5

# วิเคราะห์ผลการทำนายและผลการทดสอบ

### 5.1 วิเคราะห์ผลการทำนายและผลการทดสอบอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า

5.1.1 วิเคราะห์ผลการทำนายและผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้นเพียงอย่างเดียว 100%

หลังจากที่ทำการทดสอบทำนายอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้นเพียงอย่างเดียวสามารถแยกทำการวิเคราะห์ได้ดังนี้

1. อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน เมื่อทำการทดสอบทำนายด้วยมาตรฐาน IEEE และทำนายด้วยมาตรฐาน IEC ผลปรากฏว่ามีค่าเท่ากัน ซึ่งในเบื้องต้นนี้สามารถสรุปได้ว่าโปรแกรมที่ใช้ในการทำนายอุณหภูมิทั้งของมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC สามารถที่จะนำไปใช้งานได้จริง และเมื่อนำผลการทดสอบที่แสดงในบทที่ 4 รูปที่ 4.66 มาเปรียบเทียบกับผลการทำนายดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.67 จะเห็นว่าผลการทำนายมีค่ามากกว่าผลการทดสอบ และเมื่อเปรียบเทียบผลการทำนายและผลการทดสอบในชั่วโมงสุดท้ายที่ทำการทดสอบ (ชั่วโมงที่ 10) จะเห็นว่าผลการทำนายมีค่าสูงกว่าผลการทดสอบอยู่ประมาณ  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$  ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วถือว่าเป็นค่าที่ยอมรับได้ และเมื่อทำการพิจารณา ค่าความแตกต่างระหว่างผลการทำนายและผลการทดสอบ จะมาจาก 1) ในการทำนายอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้กำหนดให้ค่าอุณหภูมิแวดล้อมมีค่าเท่ากันในทุกชั่วโมงที่ทำนาย แต่เมื่อทำการทดสอบจริงแล้วอุณหภูมิแวดล้อมภายในโรงงานที่ทำการทดสอบมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาที่ทำการทดสอบและเมื่อนำเอาอุณหภูมิแวดล้อมทุกชั่วโมงมาหาค่าเฉลี่ยแล้วพบว่า ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิแวดล้อมคือ ประมาณ  $33\text{ }^{\circ}\text{C}$  ซึ่งอาจจะเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ผลการทำนายมีความคลาดเคลื่อนออกไปจากผลการทดสอบจริงอยู่บ้าง 2) มาจากแหล่งจ่ายที่จ่ายให้กับหม้อแปลงไม่ค่อยคงที่ ซึ่งในการทดสอบในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งต่อไปต้องทำการแยกแหล่งจ่ายสำหรับทดสอบให้เป็นอิสระจากโหลดอื่น ๆ ในโรงงานซึ่งจะทำให้ค่าของอุณหภูมิที่ได้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น 3) อาจจะมาจากการหมุนเวียน ระบายความร้อนของน้ำมัน ซึ่งอาจจะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนได้ แต่เมื่อทำการพิจารณาแนวโน้มของการเพิ่มขึ้น ของอุณหภูมิจะการทำนายเปรียบเทียบกับผลการทดสอบใน รูปที่ 4.71 จะเห็นว่าอุณหภูมিরะหว่างการทำนายมีการเพิ่มขึ้นและขนานกับเส้นกราฟที่ได้จากการทดสอบ และเส้นกราฟของอุณหภูมิที่ได้จากการทำนายด้วยมาตรฐาน IEEE และ มาตรฐาน IEC มีเส้นกราฟที่ทับกันพอดี ดังนั้นจึงสรุปว่าผลที่ได้จากการทำนายนั้นสามารถนำไปใช้งานได้จริง

2. อุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุดของหม้อแปลงไฟฟ้า พบว่าเมื่อทำการทดลองทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุดของหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC ปรากฏว่ามีค่าเท่ากันพอดี ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.32 ซึ่งจะสามารถยืนยันได้ว่าผลที่ได้จากการทำนายถูกต้อง และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด โดยที่ในการทดสอบจะกำหนดให้ตำแหน่งที่ร้อนที่สุดของหม้อแปลงคือตำแหน่งสำหรับการวัดอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ใช้ตำแหน่งที่ 2 เป็นตำแหน่งที่ใช้สำหรับการวัดอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด ดังนั้นเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างผลการทำนายและผลการทดสอบ (ตำแหน่งที่ 2) ดังแสดงในรูปที่ 4.72 จะเห็นว่าผลการทดสอบมีค่าต่ำกว่าผลการทำนายอยู่เพียงเล็กน้อย และเมื่อนำค่าที่ได้จากการทดสอบในชั่วโมงที่ 10 มาเปรียบเทียบกับผลการทำนายในชั่วโมงที่ 10 พบว่าผลการทดสอบมีค่าต่ำกว่าผลการทำนายประมาณ  $7^{\circ}\text{C}$  ซึ่งในทางปฏิบัติถือว่าเป็นค่าที่ยอมรับได้ และเมื่อนำเอาผลของค่าความแตกต่างระหว่างผลการทำนายและผลการทดสอบมาวิเคราะห์จะเห็นว่า ค่าความคลาดเคลื่อนอาจจะมาจาก 1) ในการทำนายอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้กำหนดให้ค่าอุณหภูมิแวดล้อมมีค่าเท่ากันในทุกชั่วโมงที่ทำกรทำนาย แต่เมื่อทำการทดสอบจริงแล้วอุณหภูมิแวดล้อมภายในโรงงานที่ทำการทดสอบมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาที่ทำการทดสอบและเมื่อนำเอาอุณหภูมิแวดล้อมทุกชั่วโมงมาหาค่าเฉลี่ยแล้วพบว่า ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิแวดล้อมคือประมาณ  $33^{\circ}\text{C}$  ซึ่งอาจจะเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ผลการทำนายมีความคลาดเคลื่อนออกไปจากผลการทดสอบจริงอยู่บ้าง 2) มาจากแหล่งจ่ายที่จ่ายให้กับหม้อแปลงไม่บ่อยครั้งที่ ซึ่งในการทดสอบในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งต่อไปต้องทำการแยกแหล่งจ่ายสำหรับทดสอบให้เป็นอิสระจากโหลดอื่น ๆ ในโรงงานซึ่งจะทำให้ค่าของอุณหภูมิที่ได้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น 3) อาจจะมาจากการหมุนเวียนระบายความร้อนของน้ำมัน ซึ่งอาจจะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนได้ 4) มาจากการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลที่ใช้ในการวัดค่าอุณหภูมิ ซึ่งสายเทอร์โมคัปเปิลไม่ได้ติดที่ลวดทองแดงโดยตรงแต่จะติดที่ผิวของชุดขดลวดเท่านั้น ซึ่งจะเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ผลการทำนายและผลการทดสอบมีความคลาดเคลื่อนออกไปบ้าง แต่เมื่อนำเส้นกราฟที่ได้จากการทำนายมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบที่แสดงในรูปที่ 4.72 แล้วจะเห็นว่าเส้นกราฟที่ได้จากการทำนายมีแนวโน้มที่ไปในทิศทางเดียวกันกับการทดสอบ และเมื่อเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิแล้วมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าโปรแกรมที่ใช้สำหรับทำนายอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถนำไปใช้งานได้จริง

### 5.1.2 วิเคราะห์ผลการทำนายและผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดแบบ กระแสไม่เป็นเชิงเส้นเพียงอย่างเดียว 100% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD<sub>r</sub>) 30%, 42.7% และ 49%

หลังจากที่ทำการทดสอบทำนายอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นเพียงอย่างเดียว 100% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม (THD<sub>r</sub>) 30%, 42.7% และ 49% สามารถแยกทำการวิเคราะห์ได้ดังนี้

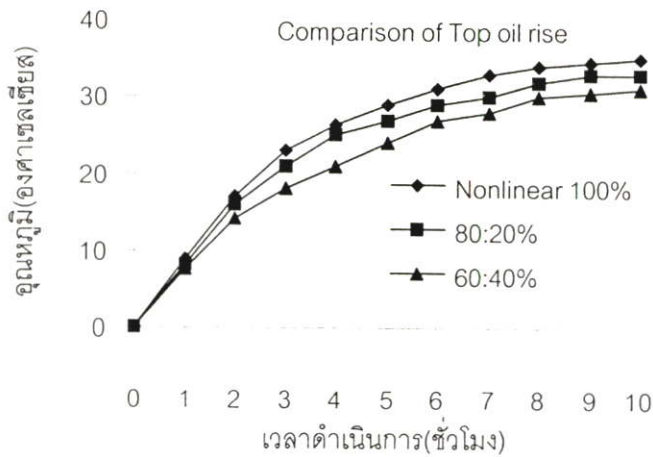
1. ผลการทำนายอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน จากการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน เมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม 30%, 42.7% และ 49% พบว่าเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวมของกระแสมากที่สุด 49% จะส่งผลทำให้หม้อแปลงมีอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนสูงที่สุดดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.97 และเมื่อทำการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนที่ชั่วโมงที่ 10 ระหว่างจ่ายโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น กับแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม 49% จะพบว่าเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม 49% จะมีอุณหภูมิสูงกว่าการจ่ายโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้นเพียงอย่างเดียว ถึงประมาณ 35% และเมื่อลดค่าความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวมลงมาเป็น 30% จะเห็นว่าอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าลดลงตามไปด้วย และเมื่อนำผลการทำนายมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4.79, 4.87 และ 4.95 ปรากฏว่าผลการทำนายและผลการทดสอบมีความใกล้เคียงกัน และ เมื่อนำผลการทำนายเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวมต่าง ๆ กันปรากฏว่าเมื่อจ่ายโหลดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวมสูง ๆ ก็จะทำให้ผลทำนายอุณหภูมิของหม้อแปลงสูงกว่าการจ่ายโหลดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวมต่ำ ๆ และเมื่อนำเส้นกราฟการทำนายดังรูปที่ 3.36 และ 3.37 มาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4.97 ปรากฏว่าเส้นกราฟมีแนวโน้มที่จะไปในลักษณะเดียวกัน ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวมสูงก็จะส่งผลทำให้อุณหภูมิของหม้อแปลงสูงขึ้นตามไปด้วย และเมื่อเปรียบเทียบแนวโน้มของเส้นกราฟไปในแนวเดียวกันดังนั้น โปรแกรมที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงสามารถนำไปใช้งานในการทำนายอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นได้จริง

2. อุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุดของหม้อแปลงไฟฟ้า จากการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุดของหม้อแปลงไฟฟ้า เมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวม 30%, 42.7% และ 49% พบว่าเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวมของกระแสมากที่สุด 49% จะส่งผลทำให้อุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด มีค่ามากที่สุด ดังนั้นถ้าสามารถที่จะลดค่าความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวมลงมาได้ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 3.81 และ รูปที่ 3.82 ก็จะทำให้อุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุดของหม้อแปลงลดลงตามไปด้วย และเมื่อ

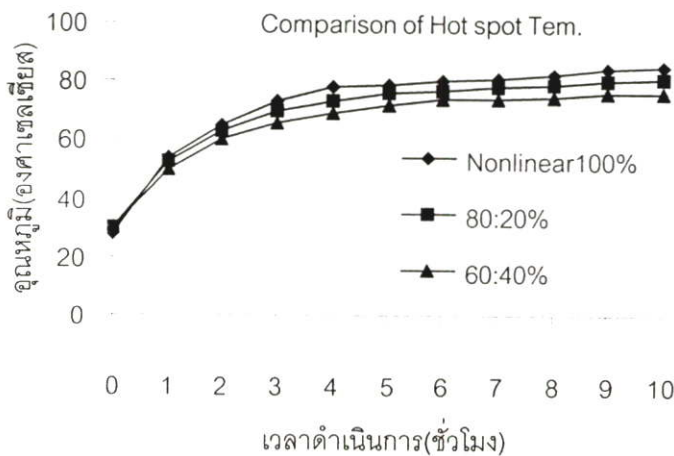
หม้อแปลงมีอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุดลดลง ก็จะเป็นผลทำให้อายุการใช้งานของหม้อแปลงเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย อันเนื่องมาจาก อายุการใช้งานของหม้อแปลงจะแปรผันแบบผกผันกับอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างการทำนายด้วยมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC พบว่ามาตรฐาน IEEE ที่ค่ามากกว่าเล็กน้อย และเมื่อนำเอาผลการทำนายมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.80, 4.88 และ รูปที่ 4.96 ปรากฏว่า ผลการทำนายและผลการทดสอบมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า โปรแกรมที่ใช้สำหรับทำนายอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถนำไปใช้งานได้จริง

### 5.1.3 วิเคราะห์ผลการทำนายและผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น ร่วมกับแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD<sub>r</sub>) 30%, 42.7% และ 49%

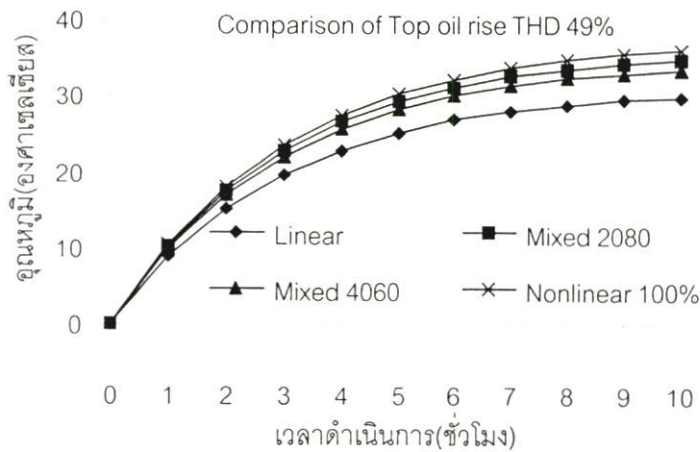
จากผลการทดสอบและผลการทำนายเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น ร่วมกับแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นพบว่า เมื่อหม้อแปลงต้องมีการจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นเพียงอย่างเดียวนั้นจะทำให้อุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าสูงกว่าการจ่ายโหลดแบบปกติ(โหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น) อย่างมากดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 3.81 และรูปที่ 3.82 ดังนั้นอีกวิธีหนึ่งที่จะลดอุณหภูมิของหม้อแปลงลงมาคือการจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้นและแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น ดังเช่นการจ่ายโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% ร่วมกับการจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 49% จะเห็นว่าเมื่อทำการรวมโหลด และทำการวัดโหลดรวมแล้วความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม จะลดลงมาเป็น 29.46% ดังนั้นเมื่อความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวมลดลงก็จะส่งผลทำให้อุณหภูมิของหม้อแปลงลดลงตามไปด้วยดังแสดงการเปรียบเทียบให้เห็นในรูปที่ 5.1 ซึ่งจะแสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 100% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 49%, จ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% ร่วมกับกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 49% และ จ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% ร่วมกับกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 49% และรูปที่ 5.2 ซึ่งจะแสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุดของหม้อแปลงไฟฟ้า เมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 100% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 49%, จ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% ร่วมกับกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 49% และ จ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% ร่วมกับกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 49%



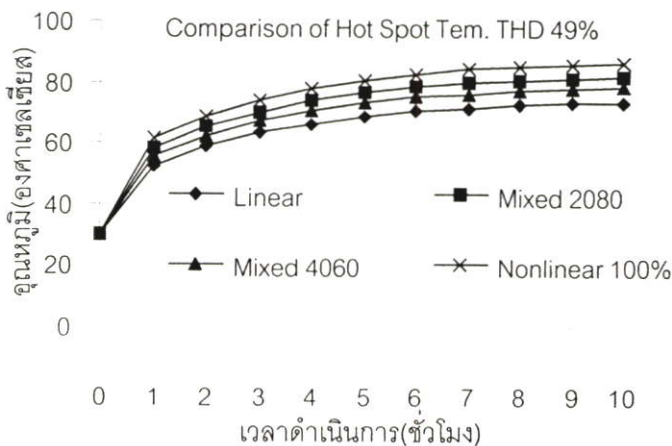
รูปที่ 5.1 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบ อุณหภูมิเพิ่ม น้ำมันด้านบน เมื่อจ่ายโหลดแบบ กระแสเป็นเชิงเส้น 100% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 49%, จ่ายโหลด ร่วมกันระหว่าง โหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% ร่วมกับกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ที่ มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 49% และ จ่ายโหลดร่วมกันระหว่าง โหลด แบบ กระแสเป็นเชิงเส้น 40% ร่วมกับกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ที่มีความเพี้ยนของกระแส ฮาร์มอนิกส์รวม 49%



รูปที่ 5.2 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุดของหม้อแปลงไฟฟ้า เมื่อจ่าย โหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 100% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 49%, จ่าย โหลดร่วมกันระหว่าง โหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% ร่วมกับกระแสไม่เป็นเชิง เส้น 80% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 49% และ จ่ายโหลดร่วมกันระหว่าง โหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% ร่วมกับกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ที่มีความเพี้ยน ของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 49%



รูปที่ 5.3 แสดงการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 100% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 49%, จ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% ร่วมกับกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 49% , จ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% ร่วมกับกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 49% และจ่ายโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้นเพียงอย่างเดียว 100%



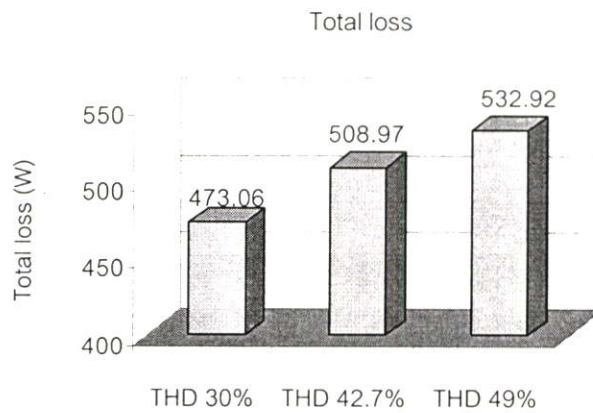
รูปที่ 5.4 แสดงการเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด เมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 100% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 49%, จ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 20% ร่วมกับกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 80% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 49% , จ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น 40% ร่วมกับกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 49% และจ่ายโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้นเพียงอย่างเดียว 100%

จากรูปที่ 5.1 และรูปที่ 5.2 จะเห็นว่าเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นร่วมกับแบบกระแสเป็นเชิงเส้นแล้วจะทำให้อุณหภูมิของหม้อแปลงลดลง ดังนั้นถ้าสามารถกำหนดโหลดกระแสไม่เป็นเชิงเส้น ให้เหมาะสมกับการใช้งานก็จะสามารถทำให้หม้อแปลงมีอุณหภูมิลดลงดังรูปที่ 5.1 และจะส่งผลทำให้อายุการใช้งานของหม้อแปลงยาวนานขึ้นด้วยดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 3.93, 3.94 และรูปที่ 3.95 และเมื่อนำเส้นกราฟที่ได้จากการทดสอบดังรูปที่ 5.1 และเส้นกราฟรูปที่ 5.2 มาเปรียบเทียบกับเส้นกราฟที่ได้จากการทำนายในรูปที่ 5.3 และรูปที่ 5.4 จะเห็นว่าเส้นกราฟมีแนวโน้มที่ไปลักษณะเดียวกัน ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า โปรแกรมที่ใช้ในการทำนายอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าสามารถนำไปใช้งานจริงได้

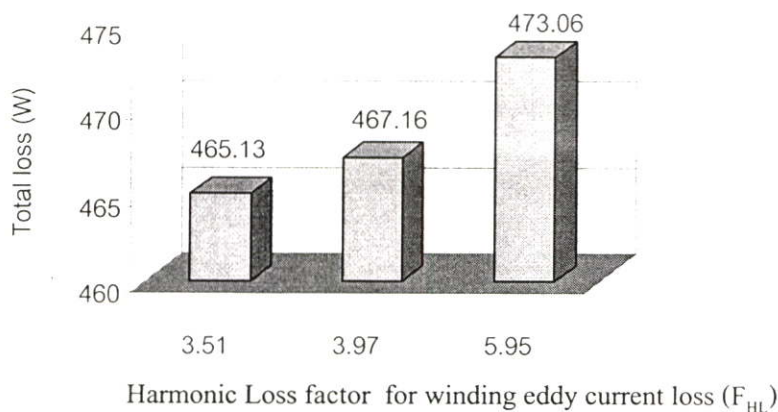
## 5.2 วิเคราะห์ผลการทำนายค่าความสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้า

จากตารางที่ 3.4, 3.5 และตารางที่ 3.6 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายค่าความสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น แบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นเพียงอย่างเดียว 100% และเมื่อจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้นร่วมกับแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวมต่าง ๆ กัน จากตารางสามารถสรุปได้ว่า เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวมสูง ๆ จะทำให้ค่าความสูญเสียของหม้อแปลงมีค่าสูงกว่าเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์ต่ำ ๆ ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนในรูปที่ 5.5 และ ในกรณีที่หม้อแปลงจ่ายโหลดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวมเท่ากัน ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นดังต่อไปนี้ คือ กรณีหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างกระแสแบบเป็นเชิงเส้น 40% ร่วมกับแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 60% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 49%, กรณีหม้อแปลงจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างกระแสแบบเป็นเชิงเส้น 30% ร่วมกับแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 70% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 42.7% และ กรณีหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 100% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 30% ซึ่งเมื่อนำค่าผลรวมของกระแสฮาร์มอนิกส์กำลังสอง ( $\sum (I_n/I_1)^2$ ) มาคำนวณค่าความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวมด้วยสมการที่ 3.19 จะเห็นว่ามีค่าความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวมประมาณ 30% และเมื่อนำทั้งสามกรณีมาเปรียบเทียบค่าความสูญเสียกันจะเห็นว่า ค่าความสูญเสียในชุดขดลวดจะมีค่าใกล้เคียงกันอันเนื่องมาจากค่าผลรวมของกระแสฮาร์มอนิกส์กำลังสอง ( $\sum (I_n/I_1)^2$ ) มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งค่าผลรวมของกระแสฮาร์มอนิกส์กำลังสอง ( $\sum (I_n/I_1)^2$ ) จะทำให้ค่าความสูญเสียในชุดขดลวดเพิ่มขึ้นเท่านั้น แต่สิ่งที่มีความแตกต่างกันคือ ค่า Harmonic Loss factor for winding eddy current loss ( $F_{HL}$ ) ซึ่งจากตารางที่ 3.3 จะเห็นว่าเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น 100% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 30% มีค่า Harmonic Loss factor for winding eddy current loss ( $F_{HL}$ ) มากที่สุด ซึ่งจะเป็นผลทำให้

กรณีหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เชิงเส้น 100% ที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม 30% นี้มีค่าความสูญเสียมากที่สุด ซึ่งจะส่งผลทำให้มีอุณหภูมิมากกว่า ในอีก 2 กรณี และทำให้สามารถสรุปในอีกกรณีหนึ่งได้ว่า สำหรับกรณีที่หม้อแปลงจ่ายโหลดที่ค่าความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวมเท่ากัน สิ่งแรกที่ต้องพิจารณาคือค่า Harmonic Loss factor for winding eddy current loss ( $F_{HL}$ ) และเมื่อหม้อแปลงมีค่า Harmonic Loss factor for winding eddy current loss ( $F_{HL}$ ) สูงจะส่งผลทำให้ค่าความสูญเสียของหม้อแปลงสูงขึ้นตามไปด้วยดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 5.6 และเมื่อค่าความสูญเสียของหม้อแปลงเพิ่มมากขึ้นก็จะเป็นผลทำให้อุณหภูมิของหม้อแปลงสูงขึ้น และทำให้อายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้าสั้นลงในที่สุด



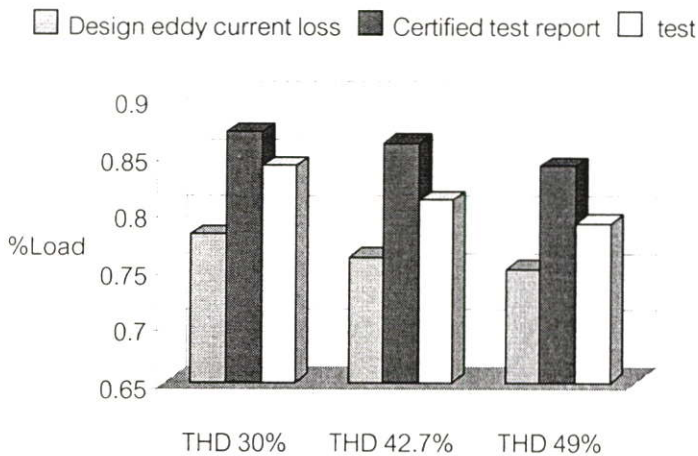
รูปที่ 5.5 แสดงการเปรียบเทียบค่าความสูญเสียรวมของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เชิงเส้นที่มีความสเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม ต่างกัน



รูปที่ 5.6 แสดงการเปรียบเทียบผลการทำนายค่าความสูญเสียรวมของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เชิงเส้นที่มีความเพี้ยนของกระแสรวมเท่ากันคือ 30% แต่ค่า Harmonic Loss factor for winding eddy current loss ( $F_{HL}$ ) ต่างกัน

### 5.3 วิเคราะห์ผลการทำนายความสามารถในการรับโหลดแบบกระแสไม่เชิงเส้นของหม้อแปลงไฟฟ้า

1. เมื่อนำค่าผลกาทดสอบมาเปรียบเทียบกับผลการทำนายความสามารถในการรับโหลดแบบกระแสไม่เชิงเส้นของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อหม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายโหลดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์แตกต่างกันดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 5.7

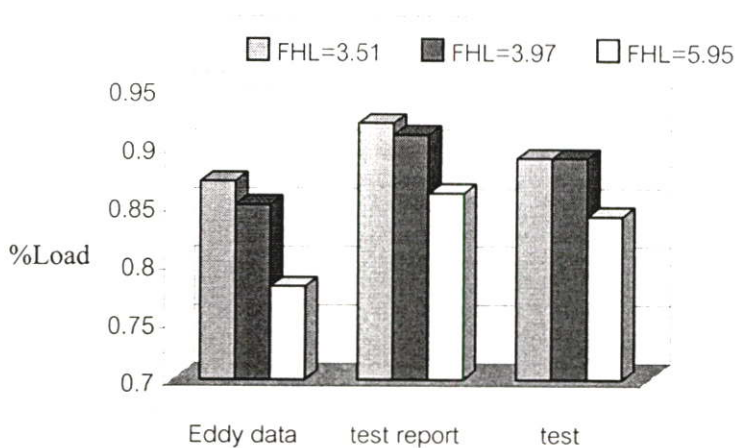


รูปที่ 5.7 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการทำนายความสามารถในการรับโหลดแบบกระแสไม่เชิงเส้นของหม้อแปลงเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแส ไม่เป็นเชิงเส้นที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวมต่าง ๆ กัน

จากรูปที่ 5.7 จะเห็นว่าเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวมที่มีค่าสูง ๆ จะส่งผลทำให้ความสามารถในการรับโหลดแบบกระแสไม่เชิงเส้นของหม้อแปลงมีค่าต่ำลง ซึ่งจะเป็นผลทำให้ต้องมีการลดพิกัดโหลดของหม้อแปลงลงมากกว่าการจ่ายโหลดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวมที่มีค่าต่ำ ๆ จึงจะไม่ทำให้หม้อแปลงเกิดความเสียหายอันเนื่องมาจากความร้อนพิกัดอันเนื่องมาจากการจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เชิงเส้น และ จากการเปรียบเทียบ ความสามารถในการรับโหลดแบบกระแสไม่เชิงเส้นระหว่างการทำนายและการทดสอบพบว่า ในการทำนายความสามารถในการรับโหลดแบบกระแสไม่เชิงเส้นด้วยวิธีการออกแบบค่าความสูญเสียของกระแสไหลวนจะมีค่าต่ำกว่าการทดสอบอยู่ประมาณ 5% และเมื่อพิจารณาการทำนายความสามารถในการรับโหลดแบบกระแสไม่เชิงเส้นด้วยวิธีใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ จะมีค่ามากกว่าการทดสอบจริงอยู่ประมาณ 5% ดังนั้นในทางปฏิบัติแล้วผู้วิจัยจึงขอแนะนำให้ใช้การทำนายความสามารถในการรับโหลดแบบกระแสไม่เชิงเส้น โดยการออกแบบค่าความสูญเสียของกระแสไหลวน เพราะค่าที่ได้จากการทำนายมีค่าต่ำกว่าการทดสอบจริงซึ่งจะ

เป็นผลดีในการเพิ่มโหลด ในกรณีที่มิผู้ไม่ทราบว่ามีข้อผิดพลาดที่ใช้อยู่ทำการลดพิกัดโหลดเพื่อป้องกันความร้อนเกินพิกัด เมื่อต้องจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เชิงเส้นอยู่ ซึ่งจะไม่ได้ทำให้หม้อแปลงเกิดความเสียหายได้ และค่าที่ได้จากการทำนาย เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจริง จะเห็นว่ามีความต่ำกว่าการทดสอบจริง ประมาณ 5% ซึ่งในทางปฏิบัติถือว่ายอมรับได้ และเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 5.7 จะเห็นว่าการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของการทำนายความสามารถในการรับโหลดแบบกระแสไม่เชิงเส้นของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบแล้วมีแนวโน้มที่ไปในทางเดียวกัน ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า การทำนายสามารถนำไปใช้งานได้จริง

2. เมื่อนำค่าผลการทดสอบมาเปรียบเทียบกับผลการทำนายความสามารถในการรับโหลดแบบกระแสไม่เชิงเส้นของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อหม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายโหลดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์เท่ากัน คือ THD<sub>i</sub> 30% แต่มีค่าค่า Harmonic Loss factor for winding eddy current loss ( $F_{HL}$ ) แตกต่างกัน ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 5.8

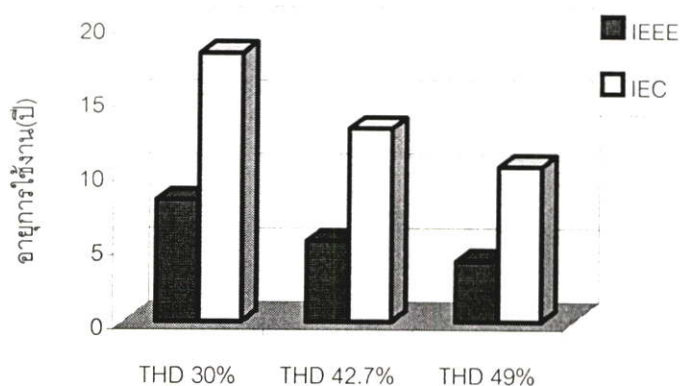


**รูปที่ 5.8** แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการทำนายความสามารถในการรับโหลดแบบกระแสไม่เชิงเส้นของหม้อแปลงเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแส ไม่เชิงเส้นที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวมเท่ากันคือ THD<sub>i</sub> 30% แต่ค่า Harmonic Loss factor for winding eddy current loss ( $F_{HL}$ ) ต่างกัน

จากรูปที่ 5.8 จะเป็นการเปรียบเทียบผลการทดสอบ กับผลการทำนายความสามารถในการรับโหลดแบบกระแสไม่เชิงเส้นของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบที่ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์รวมเท่ากันคือ THD<sub>i</sub> 30% แต่ค่า Harmonic Loss factor for winding eddy current loss ( $F_{HL}$ ) ต่างกัน จะเห็นว่าเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดที่มีค่า Harmonic Loss factor for winding eddy current loss ( $F_{HL}$ ) สูง ๆ จะมีผลทำให้ความสามารถในการรับโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้าต่ำลงไป ซึ่งจะทำได้ต้องมีการลดพิกัดโหลดของหม้อแปลงมากขึ้นตามไปด้วย และเมื่อ

พิจารณาจากรูปที่ 5.7 จะเห็นว่า การเพิ่มขึ้นหรือลดลงของการทำนายความสามารถในการรับโหลดแบบกระแสไม่เชิงเส้นของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อเปรียบเทียบกับ การทดสอบแล้วมีแนวโน้มที่ไปในทางเดียวกัน ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า การทำนายสามารถนำไปใช้งานได้จริง

#### 5.4 วิเคราะห์ผลการทำนายอายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้า



รูปที่ 5.9 แสดงการเปรียบเทียบผลการทำนายอายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เชิงเส้นที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวมต่าง ๆ กัน

รูปที่ 5.9 เป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายอายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เชิงเส้นที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวม 30% ระหว่างมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC พบว่าเมื่อการทำนายอายุการใช้งานตามมาตรฐาน IEC มีค่าที่สูงกว่ามาตรฐาน IEEE อันเนื่องมาจากการทำนายอุณหภูมิตามมาตรฐาน IEC นั้นได้ค่าของอุณหภูมิเพิ่ม ณ จุดร้อนสุดที่มากกว่าอุณหภูมิน้ำมันด้านบน ต่ำกว่ามาตรฐาน IEEE และโดยเฉลี่ยแล้วการคำนวณอุณหภูมิเพิ่ม ณ จุดร้อนสุดที่มากกว่าอุณหภูมิน้ำมันด้านตามมาตรฐาน IEC จะต่ำกว่ามาตรฐาน IEEE ประมาณ 19 % ดังแสดงให้เห็นในตารางที่ 3.7 ซึ่งจะเป็นผลทำให้อุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุดตามมาตรฐาน IEC มีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน IEEE และจะเป็นผลทำให้การทำนายอายุการใช้งานของหม้อแปลงมีความแตกต่างกันไปบ้าง แต่ถ้าเปรียบเทียบแนวโน้มการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของอายุการใช้งานของทั้งสองมาตรฐานจะเห็นว่าไปในทิศทางเดียวกัน ดังนั้นจะสรุปได้ว่าทั้งสองมาตรฐานสามารถที่จะนำไปใช้งานได้จริงแต่ผู้วิจัยขอแนะนำให้ใช้มาตรฐาน IEEE มากกว่าเพราะว่ามาตรฐาน IEEE ได้มีการกำหนดสมการสำหรับคำนวณอุณหภูมิเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เชิงเส้นไว้อย่างชัดเจน แต่ในมาตรฐาน IEC ยังไม่มีการกำหนดเป็นมาตรฐานอย่างชัดเจนเป็นเพียงการนำเอาบทความที่ได้รับการยอมรับตีพิมพ์จากวารสารที่ได้มาตรฐานมาเป็นแนวทางในการ

ออกแบบโปรแกรมสำหรับคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นเท่านั้น และจากการเปรียบเทียบผลการจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบกระแสเป็นเชิงเส้นร่วมกับแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นพบว่า เมื่อทำการจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นร่วมกับแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น มีอายุการใช้งานที่สูงกว่าการจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นเพียงอย่างเดียว ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ถ้าสามารถที่จะกำหนดโหลดใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้าให้เหมาะสมก็จะทำให้อายุการใช้งานของหม้อแปลงยาวนานขึ้นตามไปด้วย

## บทที่ 6

# บทสรุปและข้อเสนอแนะ

### 6.1 สรุปผลการทดสอบ

จากการทำนายอุณหภูมิและทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า แบบ 3 เฟส 10 กิโลโวลต์แอมป์ ทั้งแบบกระแสเป็นเชิงเส้น และแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสักรวม (THD) ต่าง ๆ กัน ที่นำเสนอในบทที่ 3 และบทที่ 4 สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. จากการทดสอบอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งแบบกระแสเป็นเชิงเส้นและแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นจะเห็นว่าจุดที่มีอุณหภูมิสูงที่สุดจะอยู่ที่ด้านบนสุดของชุดขดลวดทั้งทางด้านแรงสูงและทางด้านแรงต่ำ และเมื่อทำการเปรียบเทียบการทดสอบอุณหภูมิ ของน้ำมัน และ ชุดขดลวด จะเห็นว่าที่บริเวณชุดขดลวดจะมีอุณหภูมิที่สูงที่สุด ดังนั้นในการออกแบบหม้อแปลงควรที่จะให้ความสำคัญกับ ฉนวนของชุดลวดเป็นอันดับแรก ซึ่งควรที่จะเลือกฉนวนที่สามารถทนความร้อนได้สูง ซึ่งจะส่งผลทำให้หม้อแปลงมีอายุการใช้งานยาวนานขึ้นด้วย และจากการเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิของชุดขดลวดที่บริเวณ บน กลาง และล่างสุด จะเห็นว่า อุณหภูมิของชุดขดลวดบริเวณด้านบนสุดจะห่างจากบริเวณกลางชุดขดลวดเพียงเล็กน้อย ซึ่งจะมีสาเหตุมาจากการออกแบบร่องน้ำมัน เพราะร่องน้ำมันจะช่วยในการระบายความร้อน ดังนั้นในการออกแบบครั้งต่อไป ควรที่จะออกแบบร่องน้ำมันให้กว้างกว่าที่เป็นอยู่ ซึ่งจะทำให้การระบายความร้อนของหม้อแปลงดีขึ้น และจะส่งผลทำให้อายุการใช้งานของหม้อแปลงยาวนานมากขึ้นด้วย

2. จากการทำนายและทดสอบจะสรุปได้ว่า เมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสักรวมสูง ๆ จะส่งผลทำให้อุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าสูงขึ้น มากกว่าการจ่ายโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้น ซึ่งจะเป็นผลทำให้อายุการใช้งานของหม้อแปลงเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นต่ำกว่าการจ่ายโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้นเป็นอย่างมาก

3. จากการเปรียบเทียบผลการทำนายด้วยมาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC จะเห็นว่าเมื่อใช้มาตรฐาน IEEE และมาตรฐาน IEC ทำนายอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนของหม้อแปลงไฟฟ้า จะเห็นว่า มีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นในการทำนายอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน จะสามารถใช้มาตรฐาน IEEE หรือ มาตรฐาน IEC ก็ได้ซึ่งจะให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกัน และเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบปรากฏว่ามีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุดจะเห็นว่า มาตรฐาน IEC มีค่าต่ำกว่าการทดสอบเล็กน้อย ซึ่งสาเหตุมาจากมาตรฐาน IEC ยังไม่ได้มีการกำหนดวิธีการวิเคราะห์อุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นอย่าง

ชัดเจน ดังนั้นผู้วิจัยจึงขอแนะนำให้ใช้มาตรฐาน IEEE ในการวิเคราะห์อุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าแทน และเมื่อทำการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบแล้วปรากฏว่ามาตรฐาน IEEE มีค่าใกล้เคียงกับการทดสอบมากกว่ามาตรฐาน IEC และที่สำคัญคือมาตรฐานของ IEEE ได้กำหนดสมการสำหรับคำนวณอุณหภูมิหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นไว้อย่างชัดเจน

4. จากการเปรียบเทียบผลการทำนาย และผลการทดสอบวัดค่าความสามารถในการรับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นของหม้อแปลงไฟฟ้า จะเห็นว่าผลการทดสอบจะอยู่ประมาณกึ่งกลางพอดี ของการคำนวณด้วยการใช้ข้อมูลที่ออกแบบกระแสไหลวน และการคำนวณด้วยการใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ ดังนั้นผู้วิจัยจึงขอแนะนำให้ใช้การคำนวณความสามารถในการรับโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นของหม้อแปลงไฟฟ้า ด้วยการใช้ออกแบบกระแสไหลวน เพราะเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นจะทำให้ค่าความสูญเสียของกระแสไหลวนสูงกว่าการจ่ายโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้นอย่างมากดังแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนในตารางที่ 3.4, 3.5 และ 3.6 และจากการเปรียบเทียบแล้วจะเห็นว่าเมื่อคำนวณด้วยการใช้ออกแบบกระแสไหลวนจะได้ค่าที่ต่ำกว่าการทดสอบจริงประมาณ 5% ซึ่งจะเป็นค่าที่สามารถยอมรับได้ และโดยธรรมชาติของแนวความคิดในการออกแบบจะต้องออกแบบหม้อแปลงให้มีความปลอดภัยมากที่สุด ดังนั้นการใช้ออกแบบกระแสไหลวนจึงจะเป็นแนวทางที่ดี และยังใช้ข้อมูลในการคำนวณค่อนข้างน้อย จึงสะดวกมากกว่าการใช้ออกแบบที่ได้จากการทดสอบ และอีกเหตุผลหนึ่งก็จะเป็นผลดีกับการเพิ่มโหลดในอนาคตสำหรับกรณีที่มีผู้มาเพิ่มโหลดโดยที่ไม่ทราบว่ามีหม้อแปลงกำลังลัดพิกัดโหลดอันเนื่องมาจากการจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นอยู่ซึ่งจะไม่ทำให้หม้อแปลงเกิดความร้อนเกินพิกัดอันเนื่องมาจากการจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นได้

5. จากการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ทั้งหมดในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเห็นว่าอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้านั้นจะเพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากการจ่ายโหลดที่มีค่า ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม ต่างกัน จะมีค่าที่ต่างกัน ซึ่งในกรณีที่ค่าความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม สูง จะให้ค่าของอุณหภูมิทั้งของชุดขดลวด และน้ำมัน สูงกว่าการจ่ายโหลดที่มีค่าความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวม ต่ำ และจากการทดสอบและทำนายการจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น จะเห็นว่า เมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นร่วมกับแบบกระแสเป็นเชิงเส้นจะมีค่าอุณหภูมิ ที่ต่ำกว่าการดำเนินการแบบกระแสเป็นเชิงเส้นเพียงอย่างเดียว และในกรณีที่หม้อแปลงจ่ายโหลดที่มีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกสรวมเท่ากัน สิ่งที่จะต้องพิจารณาคือ ค่า Harmonic loss factor for winding eddy current ( $F_{HL}$ ) โดยที่ในกรณีที่ค่า Harmonic loss factor for winding eddy current ( $F_{HL}$ ) สูงจะทำให้ค่าอุณหภูมิของหม้อแปลงสูงมากกว่ากรณีที่ Harmonic loss factor for winding eddy current ( $F_{HL}$ ) ต่ำ เพราะว่าเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดที่มีค่า Harmonic loss factor for winding eddy current ( $F_{HL}$ ) สูงจะทำให้ค่าความสูญเสียของกระแสไหลวนสูงกว่าเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้นเป็นอย่างมาก และจากการทดสอบจะสามารถสรุปได้ว่าเมื่อหม้อ

แปลงจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นเพียงอย่างเดียวที่มีค่าความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวมสูง ๆ จะทำให้อุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าสูงขึ้นมากกว่าเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดที่มีค่าความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์รวมต่ำ ๆ ดังนั้นแนวทางในการแก้ไขปัญหาทางความร้อนของหม้อแปลงจะสามารถทำได้โดยการจ่ายโหลดร่วมกันระหว่างกระแสแบบเป็นเชิงเส้นร่วมกับแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิของหม้อแปลงลดลงมาได้อย่างชัดเจน ในรูปที่ 5.1 ถึงรูปที่ 5.4 และจากการทดสอบและทำนายนี้จะเป็นผลดีกับการออกแบบหม้อแปลงให้มีความปลอดภัยเมื่อต้องจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น และแบบจำลองที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ยังมีประโยชน์ที่จะสามารถนำไปเป็นเครื่องมือในการตัดสินใจเลือกใช้หม้อแปลงให้เกิดประโยชน์สูงสุด เมื่อต้องมีการจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นได้อันเนื่องมาจากการที่ได้ทราบค่าของอุณหภูมิที่สภาวะต่าง ๆ ซึ่งจะเป็แนวทางในการพิจารณาออกแบบหม้อแปลงให้มีต้นทุนต่ำที่สุด และอีกประการหนึ่งคือจะเป็นการลดอันตรายอันเนื่องมาจากการทดสอบจริงได้ด้วย เพราะในการทดสอบหม้อแปลงจะมีความเสี่ยงสูงต่อการที่หม้อแปลงเสียหาย และอาจจะเป็นอันตรายถ้าผู้ที่ทำการทดสอบขาดทักษะในการทดสอบ

## 6.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

การทดสอบที่แสดงในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะเป็นการวัดอุณหภูมิที่ส่วนต่าง ๆ ของหม้อแปลงตามที่เสนอในบทที่ 4 เท่านั้น ซึ่งมีได้นำเสนอการทดสอบวัดค่าความสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งในการพัฒนาต่อไปควรที่จะมีการวัดค่าความสูญเสียของหม้อแปลงเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นร่วมด้วย ซึ่งจะทำให้ผลการวิเคราะห์มีค่าความถูกต้องมากยิ่งขึ้น และจะเป็นแนวทางในการพัฒนาหม้อแปลงแบบเช่นำมันให้จ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น และ การทดสอบที่จะสามารถพัฒนาต่อไปควรที่จะมีการเปรียบเทียบข้อแตกต่างของอุณหภูมิกับหม้อแปลงในหลาย ๆ ขนาด ซึ่งจะทำการวิเคราะห์ที่มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น และจะทำให้เห็นข้อแตกต่างที่ชัดเจนมากยิ่งขึ้น

## เอกสารอ้างอิง

- [1] อัฐวุฒิ วงศ์ใหญ่, ศุติ บรรจงจิตร, นิทัศน์ กฤษณจินดา และ บุญเลิศ สือเฉย. “การทำนายอุณหภูมิของหม้อแปลงจำหน่ายเมื่อกระแสโหลดไม่เป็นเชิงเส้น.” วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 18, ฉบับที่ 1, มีนาคม 2544. หน้า 86 - 91.
- [2] อัฐวุฒิ วงศ์ใหญ่, ศุติ บรรจงจิตร, นิทัศน์ กฤษณจินดา, ปัญญา มาลีวัตร และ บุญเลิศ สือเฉย. “การทดสอบอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น.” วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 18, ฉบับที่ 3, กันยายน 2544. หน้า 19 - 24.
- [3] อัฐวุฒิ วงศ์ใหญ่, ศุติ บรรจงจิตร, อานันท์วัฒน์ คุณากร, ปัญญา มาลีวัตร, บุญเลิศ สือเฉย และ สิริวิช ทัดสวน. “การลดพิกัดโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น.” วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 18, ฉบับที่ 4, ธันวาคม 2544. หน้า 91 - 95.
- [4] ไชยะ แซ่มซ้อย. 2540. “สถานการณ์ทางด้านฮาร์โมนิกของประเทศไทย.” หน้า 32 – 50. ในการประชุมใหญ่ทางวิชาการประจำปี. กรุงเทพฯ : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์.
- [5] บุญเลิศ สือเฉย. “การพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายชนิดจุ่มในน้ำมัน.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2543
- [6] ชีรภัทร พัฒนานิธิ, บรรดิษฐ์ อินทร์ใหญ่ และ ฤทธิชัย ภูภิรมย์. “การวิเคราะห์ และ แก้ปัญหาฮาร์โมนิก.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2538.
- [7] มอก.384-2543. “หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง.” สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม.
- [8] ANSI/IEEE C57.12.00 – 1987. “General requirements for liquid - immersed distribution, power, regulating transformer.”
- [9] ANSI/IEEE C57.110 –1998.(Revision of IEEE Std. C57.110-1986) “Recommended practice for establishing transformer capability when supplying nonsinusoidal load current.”
- [10] IEEE Std. C57.90-1993. “IEEE Standard test code for liquid-immersed distribution, power and regulating transformers and IEEE Guide for short circuit testing of distribution and power transformer.”
- [11] IEEE Std. C57.91-1995. (Revision of IEEE Std. C57.91-1981, IEEE Std. C57.92-1981 and IEEE Std. C57.115-1991) “IEEE guide for loading mineral-oil-immersed transformers.”

- [12] IEEE Std. 519 –1992. (Revision of IEEE Std. 519 - 1981) “ IEEE Recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems.”
- [13] IEC 76-2. “Power transformers part 2: Temperature rise.” 1993.
- [14] IEC 354. “Loading guide for oil-immersed power transformer.”, Second edition 1991.
- [15] CENELEC. “Three-phase oil immersed distribution transformer, 50Hz,from 50-2500kVA, with higher voltage for equipment not exceeding 36 kV. Part 4: Determination of the power rating of a transformer loaded with non-sinusoidal currents.” CENELEC,HD 428-4-S1,1994.
- [16] V.M. Montsinger. “ Loading transformer by temperature.” AIEE Trans., Vol.49, April 1930. pp.776-792.
- [17] E.F Fuchs,D.J.Roesler and K.P.Kovacs. “Aging of electrical appliances due to harmonics of the power system's voltage.” IEEE Trans. Power Delivery, Vol. PWRD-1, No.3, July 1986. pp.301-307.
- [18] A. C. Delaiba, J. C. Oliveira, A. L. Vilaca and J. R. Cardoso. “The effect of harmonics on power transformer loss of life.” IEEE 1996. pp. 933 – 936.
- [19] L.Pierrat,M.Joseresende and J.Santana. “Power transformer life expectancy under distorting power electronic loads.” IEEE 1996. pp. 578-583.
- [20] D.W.Egolf and A.J.Flechisig. “Harmonics-transformer derating.” IEEE 1994. pp. 79-84.
- [21] D.E.Rice. “A detailed analysis of six-pulse converter harmonic currents.” IEEE 1992. pp. 153-163.
- [22] A.W. Galli and M.D. Cox. “ Temperature rise of small oil-filled distribution transformer supplying nonsinusoidal load current.” IEEE Trans. Power Delivery, Vol.11, No. 1, January 1996. pp. 283-291.
- [23] L.W. Pierce. “ Transformer design and application considerations for nonsinusoidal load currents.” IEEE Trans. Industry Application, Vol. IA-32, No. 3. pp. 485-489, May/June 1996.
- [24] M.T. Bishop, J.F. Baranowski, D. Heath and S.J. Benna. “ Evaluation harmonic - induced transformer heating.” IEEE Trans. Power Delivery, Vol.11, No. 1, January 1996 pp. 305 - 311.
- [25] M.T.Bishop and C.Gilker. “Harmonic caused transformer heating evaluated by a portable PC-Controlled meter.” IEEE Conference paper , pp. B5-1 - B5-6, 1993.

- [26] A.E.Emanuel. "On the assessment of harmonic pollution." IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 10, No. 3, July 1995. pp. 1693-1698.
- [27] A. Mceachern, W.M. Grady, W.A. Moncrief, G.T. Heydt and M.Meghanagran. "Revenue and Harmonic : An evaluation of some proposed rate structures." IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 10, No. 1, January 1995. pp. 474 -482.
- [28] D.E. Rice. "Adjustable speed drive and power rectifier harmonic - Their effect on power systems components." IEEE Trans. Industry Applications, Vol. IA-22, No. 1, January/February 1986. pp. 161-177.
- [29] L.F. Blume, A. Boyajian, G. Camilli, T.C. Lennox, S. Minnecl and V.M. Montsinger. "Transformer engineering: A Treatise on the theory, Operation, and Application of transformers." John Wiley & Son, INC., New York. 1951.
- [30] J.Arrillaga, D.A. Braley and P.S. Bodger. "Power system harmonics." John Wiley & Sons Ltd., New York, 1988.

## ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

รายละเอียดของหม้อแปลงไฟฟ้า



บริษัท พงษ์พิมานการไฟฟ้า จำกัด  
PHONGPIMARN ELECTRIC CO., LTD.



42/1 หมู่ 3 ต. อ้อมน้อย อ. กระทุ่มแบน จ. สมุทรสาคร 74130 โทรศัพท์. 420-8038-9 , 811-0091-4 โทรสาร. 420-0356  
42/1 Moo 3 Omnoi , Kratumban , Samutsakorn 74130 Tel. 420-8038-9 , 811-0091-4 Fax. 420-0356

### SPECIFICATION

Transformer	10 kVA	3 Phase	50 Hz
Rate Voltage	HV Voltage	380 V	
	LV Voltage	220 V	
Vector Group	Dyn 11		
Insulation Class	A		
Cooling Type	ONAN		

#### 1. Winding Data

Description	HV winding	LV winding
1 Diameter of conductor (mm.)	1.8	3.2
2 Current density (A/sq.mm.)	3.45	3.26
3 Turn	239	80
4 Winding resistance (ohms)		
Terminal		
A-B	0.441	0.121
B-C	0.441	0.122
C-A	0.443	0.121
Average	0.4417	0.1213
Ambient temp.	29 deg C	

#### 2. Core Data

1 Core area	40.904 sq.mm.	4 Flux density	1.7485 Tesla
2 Core material	M 5	5 Total weight	43.00 kg.
3 Sheet thick	0.30 mm.		

#### 3. Tank Dimension

1 Internal width	220 mm.	4 Tank & fitting	49 kg.
2 Internal length	530 mm.	5 Volume of oil	35 litre
3 Internal height	425 mm		

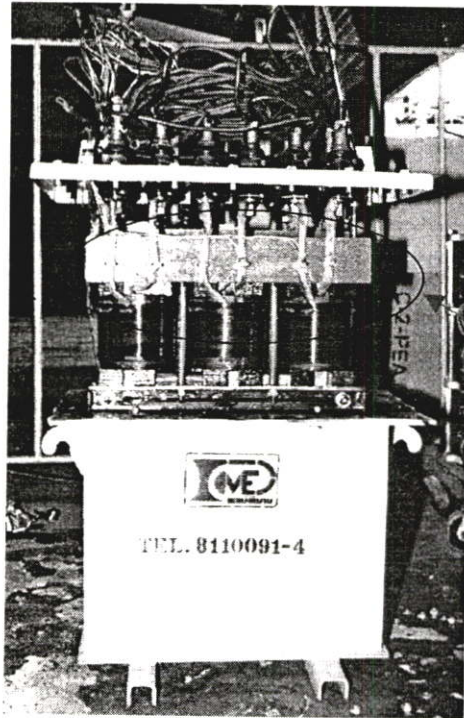
#### 4. Characteristic

1 No load loss	77.0 W	4 Efficiency	95.73 %
2 Load loss	350.0 W	5 Voltage regulation	3.31 %
3 Short circuit imp.	4.17 %		

รูปที่ 1 ภาคผนวก ก แสดงรายละเอียดของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบ

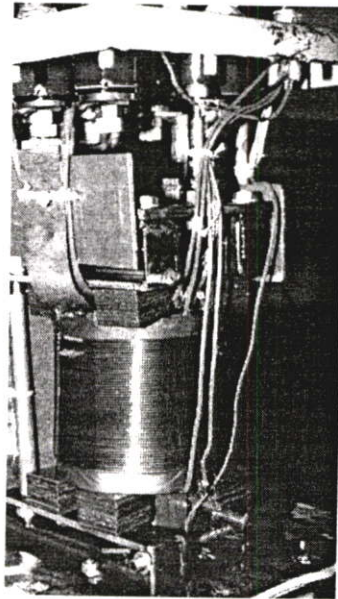
## ภาคผนวก ข

**รูปโครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้า การติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ล  
รูปเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ และรูปแสดงการทดสอบ**

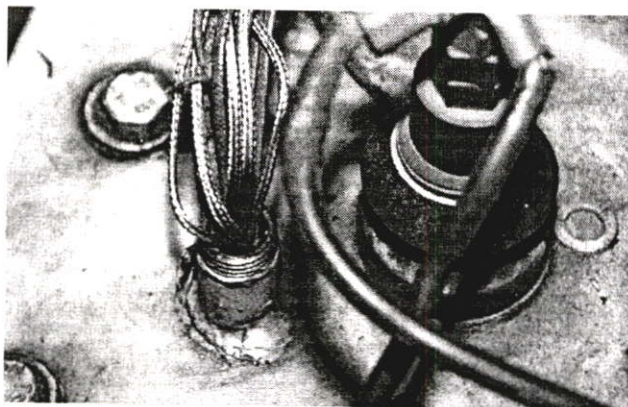


- 1) คือ ตำแหน่งติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ลที่บริเวณด้านบนสุดของชุดขดลวด เฟส A, B และ C

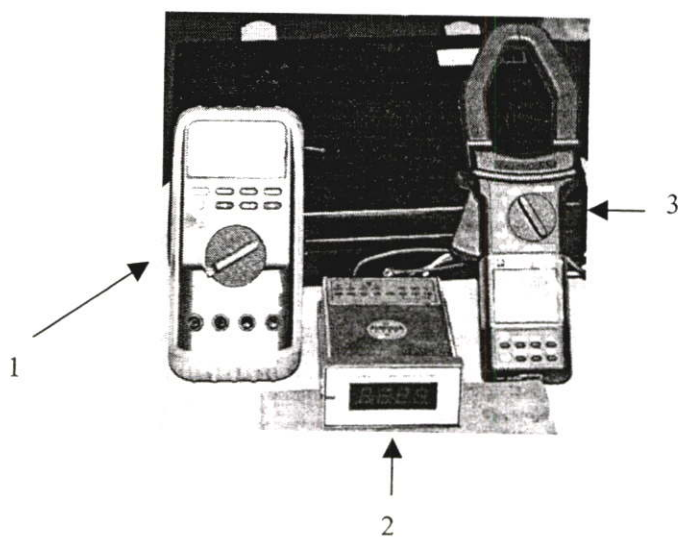
รูปที่ 1 ภาคผนวก ข แสดงโครงสร้าง และ ตำแหน่งติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ล ทั้งหมดของหม้อแปลง



รูปที่ 2 ภาคผนวก ข แสดงตำแหน่งติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ลที่บริเวณ ด้านบน กลาง ล่าง น้ำมันด้าน บน น้ำมันด้านล่าง ที่ เฟส A

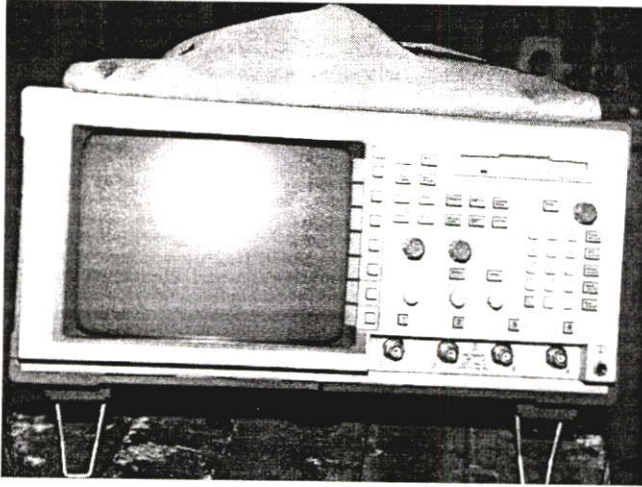


รูปที่ 3 ภาคผนวก ข แสดงตำแหน่งที่นำสายเทอร์โมคัปเปิลเปิดออกมาจากตัวของหม้อแปลง

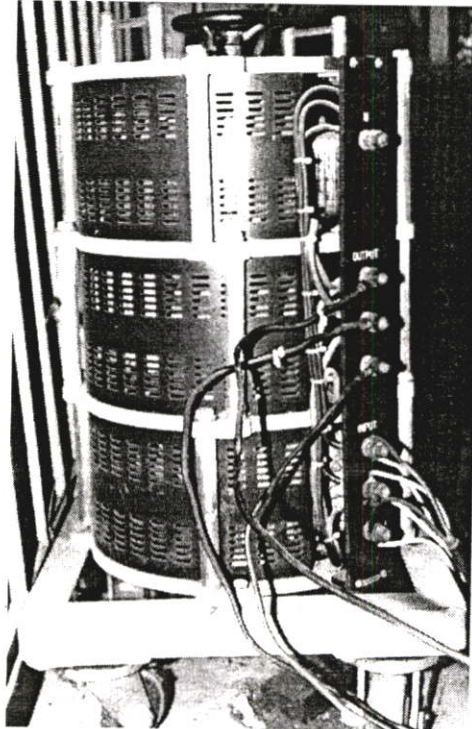


- 1 คือ True RMS Multimeter FLUKE 87
- 2 คือ Temperature indicator DIGICON ID-8
- 3 คือ Harmonic & Power Meter CHAUVIN ARNOUX F27

รูปที่ 4 ภาคผนวก ข แสดงเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดสอบ



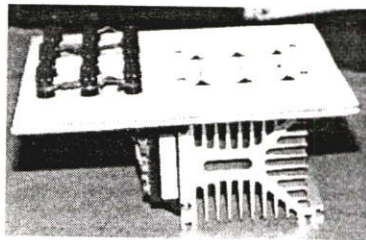
รูปที่ 5 ภาคนวท ข แสดง Oscilloscope Hewlett Packard 54540A



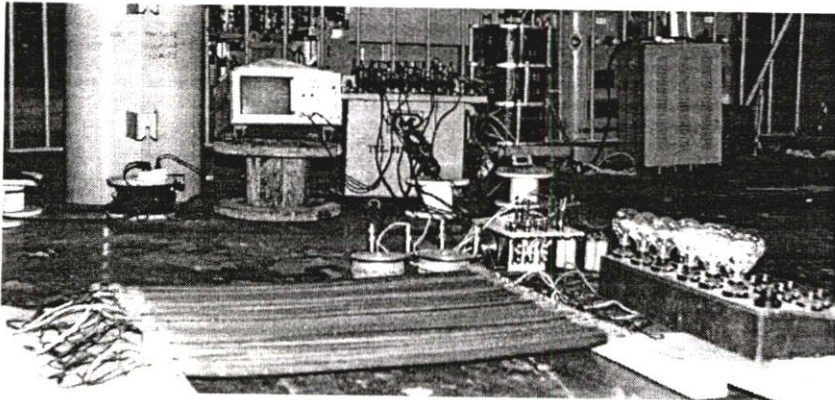
รูปที่ 6 ภาคนวท ข แสดง Variac 3 phase, 50 kVA



รูปที่ 7 ภาคผนวก ข แสดงรูปขยายของ Capacitor ขนาด  $32 \mu\text{F}$  600 V



รูปที่ 8 ภาคผนวก ข แสดงรูปเรกติไฟเออร์แบบเต็มคลื่น 3 เฟส (Three-phase Full Wave Bridge)



รูปที่ 9 ภาคผนวก ข แสดง ภาพรวมการทดสอบอุณหภูมิของหม้อแปลงทั้งหมด

ภาคผนวก ค

ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์และได้รับการตีพิมพ์



ISSN 0125-1724

วิศวกรรม

# ลาดกระบัง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

## LADKRABANG ENGINEERING JOURNAL

ปีที่ 18 ฉบับที่ 3

กันยายน 2544

1. การระบุประเภทของฟอลต์บนสายส่งด้วยการแปลงเฟสได้: ตอนที่ 1 ขั้นตอนการวิเคราะห์	1
พงษ์ศักดิ์ นภามิ่ง อธิโชค กิตติรัชชตระกูล สุธี บรรจงจิตร นันทน์ กฤษณจินดา สมชาติ จิวิวิภากร	
2. การระบุประเภทของฟอลต์บนสายส่งด้วยการแปลงเฟสได้: ตอนที่ 2 กรณีศึกษา	7
พงษ์ศักดิ์ นภามิ่ง อธิโชค กิตติรัชชตระกูล สุธี บรรจงจิตร นันทน์ กฤษณจินดา สมชาติ จิวิวิภากร	
3. การปรับปรุงเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังแบบหลายเครื่องจักรด้วยตัวตัดพลาสมาพลังงานไฟฟ้าแบบชนิดที่ควบคุมด้วยฟิสิกส์	13
อฉกริช นิตยพัฒน์	
กิตติ ไพรวรรณ มณฑล สิวจินดาไกรฤกษ์	
4. การทดสอบคุณสมบัติของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดแบบกระจายไม่เป็นเชิงเส้น	19
อัฐภูมิ วงศ์ใหญ่ สุธี บรรจงจิตร นันทน์ กฤษณจินดา ปิยะญา มาสวัสดิ์ บุญเลิศ สี่แสง	
5. การศึกษาอุปกรณ์หัวสายในระบบ 24 kV โดยใช้ EMFT และ ATPDraw	26
พิเชษฐ นวมินทร์ มณฑล สิวจินดาไกรฤกษ์	
6. เครื่องกำเนิดคลื่นตกัวโลยีโซน่าเป็นตัวอย่างร่วมกับระบบไฟฟ้า	31
ศุภโรจน์ เกตุแก้ว ประภาส ไพรสุวรรณ	
7. การให้ข้อเสนอแนะในการหาความน่าเชื่อถือของเครื่องจักร	37
คุณชัย กายวงษา เข็ม นกขัฏ์ กอบชัย เตชะหาญ	
8. การศึกษาเปรียบเทียบการหาเส้นโคจรร่วมภาพสองระดับโดยการแยกส่วนภาพ	43
หรรษชัย วีระทวีมาศ เพิ่มพล กุดจอมศรี	
9. การเพิ่มประสิทธิภาพของไปป์ไลน์คำสั่งด้วยการปรับปรุงวิธีการทำนองทางแยก	49
จักรพันธ์ วัชรานานท์ พิชรินทร์ กลิ่นซ้อน บรรจง ปิยะธำรง	
10. การหาผลสัมฤทธิ์การคัดคำภาษาไทยแบบ Left Search Matching ด้วยวิธี N-gram	55
ไพฑูริย์ บุณนิจ ชุม กัมปยาน	
11. การออกแบบโครงข่าย ATM โดยใช้เงินตัดอัลกอริทึม	61
ชนาวดี อารุณ สุวิมล สิทธิสีมาศ เกียรติกร วงศ์โรจน์นารถ	
12. การออกแบบโปรแกรมเพื่อการควบคุมระดับน้ำในเขื่อนโดยใช้ระบบ SCADA	66
กฤษณ์ กุณพิบูล กอบชัย เตชะหาญ	
13. การปรับปรุงโครงข่ายวิทยุส่งการเฉพาะกิจ	72
วิภาภย์ อัครสมบูรณ์ กอบชัย เตชะหาญ	
14. ระบบแสดงสถานะสัญญาณในพื้นที่บริการระบบโทรศัพท์พื้นฐานพหุศาสตร์บุคคล	77
กักรพงษ์ ฉายสุโขทัย พิเชฐ ม่วงนวล สมยศ จุณณะปิยะ	
15. การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบ MT-CDMA โดยใช้ข้อสัญญาณการจางแบบนคาตามิ	82
เจริญเกียรติ โพธิ์ชัยยะ กอบชัย เตชะหาญ	
16. การวิเคราะห์สมรรถนะของการไม่เข้ารหัสและการเข้ารหัส R-S ในระบบ DS-SS-CDMA ชนิดโคโรนกับแบบพิเศษโดยวิธี	88
ช่องสัญญาณพิเศษแบบนคาตามิ	
ณรงค์ศักดิ์ วีระจวนิช กอบชัย เตชะหาญ	
17. การออกแบบติดตั้งสถานีฐานสำหรับระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ภาคพื้นดินในอบนต	94
ฉษย์ วุฒิกุล พิเชฐ ม่วงนวล สมศักดิ์ นิตยา	
18. การศึกษาการสูญเสียในการแพร่กระจายคลื่นของสถานีฐานแบบไมโครเซลล์ของระบบ GSM ในเขตพื้นที่เมืองโดยพิจารณา	99
จากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยและค่าคงที่ของนคาตามิ	
พิเชฐ ม่วงนวล อธิ พงษ์มา เจษฎา เพชรประเสริฐ ปราโมทย์ อนันต์วราพงษ์	
19. การวิเคราะห์ควมบิดเบือนสัญญาณของระบบเซลล์คู่แบบโคโรนที่เชื่อมระบบสื่อสารด้วยสัญญาณที่มีงานจางแบบนคาตามิ	105
สมยศ จุณณะปิยะ พิเชฐ ม่วงนวล ปราโมทย์ อนันต์วราพงษ์	
20. วงจรบูตสแตรป ไซมอส นอนอินเวอร์เตอร์ ที่ตัดไฟเลี้ยง 1 โวลต์	111
ศิริวัฒน์ อิมไพบูลย์ ชนิษฐา เสมะกนิษฐ กอบชัย เตชะหาญ	
21. วงจรควบคุมสถานะแบบใหม่ตวงระดับและกระแสด้วยโวลต์จางจ่ายแรงดัน ±1 โวลต์ด้วยเทคโนโลยี FGMS	117
ไพศาล มหบุญพาชัย กอบชัย เตชะหาญ	
22. มงกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ห้าชนิด Elliptic ที่ใช้กำลังงานต่ำ	123
มนตรี คำเรณู สมยศ หรรษาสุชิน กอบชัย เตชะหาญ สมยศ จุณณะปิยะ	
23. วงจากรองความถี่ชนิดบาคอดใหม่ตวงระดับโดยใช้ CCI	129
อฉกริช นิตยพัฒน์ เมืองนิตต์ แสงระวี ดังกอบบุรินทร์ วิจิตร เพ็ชรกิจ วิวัฒน์ กิรณนพ	
24. การขยายช่วงคุณสมบัติของวงจรวางจางเฟสและความถี่ในช่วง ±2π เรเดียน ด้วยวงจางไขเคล็ดสลับได้เทคโนโลยี	134
ณา พาวินบูลย์ จงลต รณวิทย์โยธิน ปรมปรมวิชัย	

# การทดสอบอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดแบบ กระแสไม่เป็นเชิงเส้น

## Temperature Tests of a Transformer Supplying Nonlinear Load Current

อัฐวุฒิ วงษ์ใหญ่                      สุภัทน์ บรรจงจิตร                      นันทน์ กฤษณจินดา  
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปริญญามาถิวิตร                      บุญเลิศ สร้อยฉาย  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

### บทคัดย่อ

บทความนี้จะเป็นการนำเสนอการทดสอบอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแช่น้ำมันขนาด 10 kVA 380/220 V, 3 เฟส,  $\Delta/Y$  เมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสเป็นเชิงเส้นและแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นที่มีความถี่ของความถี่ของระบบรวม (THD) 30 % และ 49 % จุดประสงค์เพื่อเป็นการป้องกันอันตรายจากความร้อนเกินที่กีดกันเนื่องมาจากการจ่ายโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งถ้าหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นจะทำให้ค่า K-factor มีค่าสูงขึ้นและจะส่งผลให้หม้อแปลงมีอุณหภูมิสูงขึ้นเป็นผลทำให้ความสามารถในการรับโหลดของหม้อแปลงลดลงและอายุการใช้งานของหม้อแปลงจะสั้นลงตามไปด้วย การทดสอบในบทความนี้เป็นการทดสอบโดยใช้โหลดจริงและทำการวัดอุณหภูมิของน้ำมันด้านบน, ค่าอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด และ อายุการใช้งานของหม้อแปลง เมื่อหม้อแปลงดำเนินการทั้งแบบกระแสเป็นเชิงเส้นและแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นที่กระแสที่กีดกันเป็นเวลา 10 ชั่วโมง ซึ่งจะทำให้สามารถเห็นพฤติกรรมทางความร้อนได้จริง

### Abstract

This paper presents the temperature testing of a three-phase oil-immersed transformer with a rate of 10 kVA, 380/220 V connected in  $\Delta/Y$  when supplying the linear and nonlinear load current by the total harmonic distortion (THD) of 30% and 49%. The main purpose is to protect an overload situation due to the high temperature form supplying nonlinear loads. Normally, when the transformer supplies the nonlinear loads, the K-factor of transformer and the temperature of the transformer is increased. This can decrease the capability and the life of the transformer. The tests stated in this paper are performed with real loads. The temperature of the oil at the top part is measured, and the hottest spot temperature is calculated. The life of transformer when it is supplying linear and nonlinear load current at the rated current for 10 hour is predicted. These can be used to illustrate thermal characteristics of the transformer.

**1. บทนำ**

จากภาวะปัจจุบันได้มีการใช้โหลดแบบไม่เป็นเชิงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วซึ่งโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นนี้จะส่งผลทำให้ค่าความสูญเสียของหม้อแปลงเพิ่มสูงขึ้น และเมื่อค่าความสูญเสียของหม้อแปลงเพิ่มสูงขึ้นก็จะส่งผลทำให้อุณหภูมิของหม้อแปลงเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย และจากที่ทอม ฌอง [2] ได้มีการปรับปรุงมาตรฐานสำหรับการคำนวณค่าความสูญเสียใหม่ซึ่งจะทำให้การคำนวณค่าความสูญเสียมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น ดังนั้นการคำนวณค่าความสูญเสียจึงมีความสำคัญมากและถ้ามีการคำนวณค่าความสูญเสียถูกต้องก็จะส่งผลให้การคำนวณอุณหภูมิและการคำนวณอายุการใช้งานของหม้อแปลงมีความใกล้เคียงความเป็นจริงตามไปด้วย

**2. ทฤษฎี**

**2.1 ค่าความสูญเสียของหม้อแปลงเมื่อมีการจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น**

จาก [1,2] ค่าความสูญเสียปลิกย่อยทั้งหมดสามารถหาได้ดังสมการที่ 1

$$P_{TSLR} = P_{LLR} - K[I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2] \quad [W] \quad (1)$$

โดยที่

$P_{TSLR}$  = ค่าความสูญเสียปลิกย่อยทั้งหมดที่เกิดโหลดแบบเป็นเชิงเส้น [W]

$P_{LLR}$  = ค่าความสูญเสียขณะมีโหลด ที่เกิดโหลดแบบเป็นเชิงเส้น [W]

$K = 1.5$  สำหรับหม้อแปลงแบบ 3 เฟส

1 สำหรับหม้อแปลงแบบ 1 เฟส

ค่าความสูญเสียอันเนื่องมาจากกระแสไหลวนและค่าความสูญเสียปลิกย่อยอื่น ๆ ที่นอกเหนือจากชุดคลวดสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแท่นน้ำมันสามารถหาได้ดังสมการที่ 2 และ 3

$$P_{ECR} = P_{TSLR} \times 0.33 \quad [W] \quad (2)$$

$$P_{OSLR} = P_{TSLR} - P_{ECR} \quad [W] \quad (3)$$

โดยที่

$P_{ECR}$  = ค่าความสูญเสียอันเนื่องมาจากกระแสไหลวนที่เกิดโหลดแบบเป็นเชิงเส้น [W]

$P_{OSLR}$  = ค่าความสูญเสียปลิกย่อยอื่น ๆ ที่นอกเหนือจากชุดคลวดที่เกิดโหลดแบบเป็นเชิงเส้น [W]

ดังนั้นค่าความสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อมีการจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้นจะสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 4

$$P_{LL} = P + F_{HL} \times P_{ECR} + F_{HLSTR} < P_{OSLR} \quad (4)$$

โดยที่

$P_{HL}$  = ค่าความสูญเสียขณะมีโหลด [W]

$P$  = ค่าความสูญเสียในชุดคลวดที่เกิดโหลด [W]

$$F_{HL} = \frac{\sum_{h=1}^{h_{max}} I_h^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h_{max}} I_h^2} \quad (5)$$

โดยที่

$F_{HL}$  = Harmonic loss factor สำหรับค่าความสูญเสียอันเนื่องมาจากกระแสไหลวน

$I_h$  = กระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ h

h = ลำดับฮาร์โมนิก

$$F_{HLSTR} = \frac{\sum_{h=1}^{h_{max}} I_h^2 h^{0.8}}{\sum_{h=1}^{h_{max}} I_h^2} \quad (6)$$

โดยที่

$F_{HLSTR}$  = Harmonic loss factor สำหรับค่าความสูญเสียปลิกย่อยอื่น ๆ ที่นอกเหนือจากชุดคลวด

**2.2 การคำนวณค่า K-factor**

K-factor จะเป็นตัวชี้ถึงความสามารถในการรับโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นของหม้อแปลงและถ้า K-factor มีค่ามากขึ้นจะทำให้ความสามารถในการรับโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นลดลง ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 7

$$K - factor = \left[ \frac{\sum_{h=1}^{h_{max}} I_h^2}{I_r^2} \right] F_{HL} \quad (7)$$

โดยที่

$I_x$  = กระแส RMS หลักมูลที่โหลดและความถี่ที่คิด  
 ใ้ใจจุ่มน้ำได้มีการออกแบบหม้อแปลงสำหรับ  
 วัันโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นที่เรียกว่าหม้อแปลงแบบ  
 แบบเฟกเตอร์ K และค่า K-factor ของหม้อแปลงแบบเฟก  
 เทอร์ K จะเป็นค่าที่บอกถึงความสามารถของหม้อแปลง  
 ที่จะทนต่อกำลังสูญเสียของกระแสไหลวนในชุดขดลวด  
 ที่เพิ่มขึ้นเป็นจำนวนเท่าจากค่าสูญเสียของกระแสไหล  
 วนที่ความถี่หลักมูลและที่ทัศนมาตรฐานของหม้อแปลง  
 แบบเฟกเตอร์ K คือ 1,4,9,13,20,30,40และ 50 [6]

2.3 การคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีมีการ  
 จำโหลดแบบกระแสไม่เชิงเส้น

2.3.1 อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นด้านบน  $\Theta$  สภาวะคง  
 ตัว สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 8

$$\Theta_{TO} = \Theta_{TO-R} \times \left( \frac{P_{LL} + P_{NL}}{P_{LL-R} + P_{NL}} \right)^{0.8} \quad (8)$$

2.3.2 อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นด้านบน  $\Theta$  สภาวะชั่ว  
 ขณะสามารถหาได้ดังสมการที่ 9

$$\Theta_{TO}(t) = (\Theta_{TO} - \Theta_{O1})(1 - e^{-t/\tau}) + \Theta_{O1} \quad (9)$$

2.3.3 อุณหภูมิเพิ่ม  $\Theta$  จุดร้อนสุดที่มากกว่า  
 อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นด้านบนสามารถหาได้ดังสมการที่ 10

$$\Theta_x = \Theta_{x-R} \times \left( \frac{1 + F_{HL} \times P_{EC-R}(pu)}{1 + P_{EC-R}(pu)} \right)^{0.8} \quad (10)$$

2.3.4 อุณหภูมิ  $\Theta$  จุดร้อนสุดสามารถแสดงได้  
 ดังสมการที่ 11

$$\Theta_{ht} = \Theta_{TO} + \Theta_x + \Theta_a \quad (11)$$

2.4 อายุการใช้งานของหม้อแปลง

อายุการใช้งานของหม้อแปลงจะเป็นส่วนกลับ  
 ของอายุการใช้งานที่ลดลงที่คาดการณ์ในแต่ละช่วงซึ่ง  
 สามารถแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างอายุการใช้งานที่

ลดลงกับอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุดได้ดังสมการที่ 12 และ  
 สมการที่ 13

$$L = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_i \quad (12)$$

โดยที่Monsinger[4,5]ได้พบว่าในช่วงอุณหภูมิ  
 ระหว่าง 80 - 140 °C ค่าของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นทุก 6 °C  
 จะทำให้อายุการใช้งานลดลงครึ่งหนึ่งและทุก ๆ 6°Cที่  
 ลดลงจากอุณหภูมิ 98 °Cจะมีผลทำให้อายุการใช้งานเพิ่ม  
 ขึ้นเป็น 2 เท่าของอายุการใช้งานที่ 98 °C ซึ่งสามารถ  
 แสดงได้ดังตารางที่ 1 และสมการที่ 13

$$V = \frac{\text{ageing rate at } \Theta_{ht}}{\text{ageing rate at } 98^\circ\text{C}} = 2^{(\Theta_{ht}-98)/6} \quad (13)$$

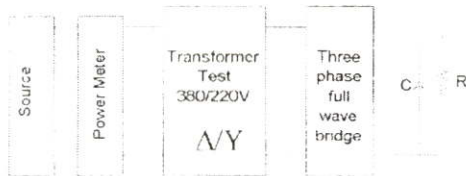
โดยที่

- $V$  = พิกัดการเสื่อมอายุสัมพัทธ์
- $L$  = อายุการใช้งานที่ลดลง
- $N$  = จำนวนช่วงเวลาที่ทั้งหมด (ชั่วโมง)
- $n$  = ช่วงเวลาที่พิจารณา (ชั่วโมง)
- $\tau$  = ค่าเวลาที่ความร้อนคงตัว (ชั่วโมง)
- $\Theta_{TO}$  = อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นด้านบนที่มากกว่าอุณหภูมิ  
 แวดล้อม  $\Theta$  สภาวะคงตัว (°C)
- $\Theta_{O1}$  = อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นด้านบนที่มากกว่าอุณหภูมิ  
 แวดล้อม  $\Theta$  ช่วงเวลาเริ่มต้น (°C)
- $\Theta_{TO-R}$  = อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นด้านบนที่มากกว่าอุณหภูมิ  
 แวดล้อม ที่พิกัดโหลดแบบเป็นเชิงเส้น (°C)
- $\Theta_x$  = อุณหภูมิเพิ่ม ณ จุดร้อนสุดที่มากกว่าอุณหภูมิ  
 ที่เพิ่มขึ้นด้านบน (°C)
- $\Theta_a$  = อุณหภูมิแวดล้อม (°C)
- $\Theta_{x-h}$  = อุณหภูมิเพิ่ม ณ จุดร้อนสุดที่มากกว่าอุณหภูมิ  
 ที่เพิ่มขึ้นด้านบน ที่พิกัดโหลดแบบเป็นเชิงเส้น (°C)
- $\Theta_{ht}$  = อุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุด (°C)

3. การทดสอบและผลการทดสอบ

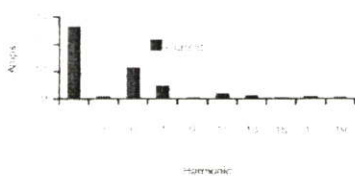
จากหลักการและทฤษฎีข้างต้น ได้ทำการ  
 ทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเซ่น้ำมันขนาด  
 10kVA,3Ø,380/220V,Δ/Y,การระบายความร้อนแบบ

ONAN และการทดสอบจะใช้โพลควงจิง[3,7] ซึ่งจะทำให้สามารถเห็นพฤติกรรมทางความร้อนได้จริง วงจรการทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 1

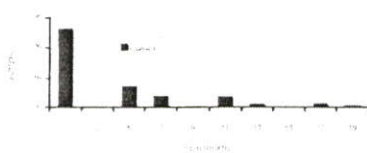


รูปที่ 1 แสดงวงจรการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแช่น้ำมันเมื่อจ่ายโพลควงจิงเป็นเชิงเส้น

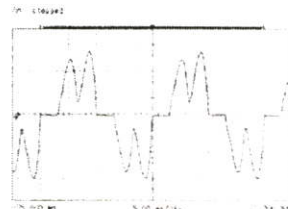
จากวงจรในรูปที่ 1 โหลดของหม้อแปลงในบทความนี้จะประกอบไปด้วยเรกติฟายเออร์ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดกระแสอาร์มอนิกส์ โหลดใช้ 200 W และ สวดความร้อนเป็นโพล R และ การนำค่าคาปาซิเตอร์ 32  $\mu$ F มาต่อขนานกับโพล R เพื่อให้แรงดันไฟตรงเรียบขึ้น และจะทำให้กระแสสลับของแหล่งจ่ายไม่มีค่าความผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่น Sinusoidal มากขึ้นด้วย เมื่อต่อวงจรได้ดังรูปที่ 1 จากนั้นก็ทำการป้อนแรงดันทางด้านแรงสูงจนได้แรงดัน 380 V และ วัดกระแสทางด้านแรงต่ำให้ได้กระแสที่พิกัด จากนั้นทำการวัดความถี่ของกระแสซึ่งในบทความนี้จะใช้กระแสที่มีความถี่ 30% และ 49%



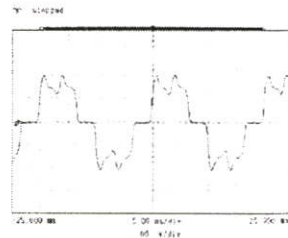
รูปที่ 2 แสดงปริมาณกระแสอาร์มอนิกส์ในโพลที่มี THD 49% ที่ได้จาการทดสอบ



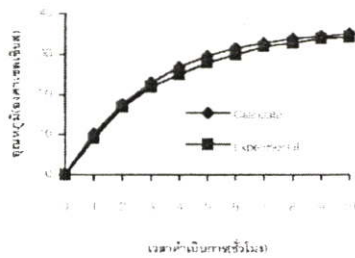
รูปที่ 3 แสดงปริมาณกระแสอาร์มอนิกส์ในโพลที่มี THD 30% ที่ได้จาการทดสอบ



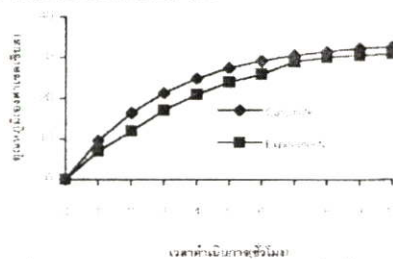
รูปที่ 4 แสดงรูปคลื่นของกระแสโพลที่มีความถี่ของกระแส 49% ที่ได้จาการทดสอบ



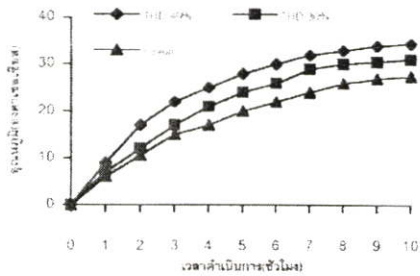
รูปที่ 5 แสดงรูปคลื่นของกระแสโพลที่มีความถี่ของกระแส 30% ที่ได้จาการทดสอบ



รูปที่ 6 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิเพิ่มขึ้นด้านบนระหว่างผลการคำนวณกับผลการทดสอบเมื่อหม้อแปลงจ่าย โพลควงจิงแบบกระแสไม่เชิงเส้นต่อเนื่อง 100%ที่มีความถี่ของกระแส 49%



รูปที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิเพิ่มขึ้นด้านบนระหว่างผลการคำนวณกับผลการทดสอบเมื่อหม้อแปลงจ่าย โพลควงจิงแบบกระแสไม่เชิงเส้นต่อเนื่อง 100%ที่มีความถี่ของกระแส 30%



รูปที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในด้านบนจากการทดสอบเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เชิงเส้นและเป็นเชิงเส้นและแบบกระแสเป็นเชิงเส้นค่อเนื่อง 100%

ตารางที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ของพิกัดการเชื่อมต่ออุณหภูมิ, พิกัดอุณหภูมิใช้งานสัมพันธ์กับอุณหภูมิ ณ จุดร้อนสุดตามมาตรฐาน IEC 354 [4]

$\Theta_{hs}$ (°C)	พิกัดการเชื่อมต่ออายุสัมพัทธ์	พิกัดอุณหภูมิใช้งานสัมพัทธ์
86	0.25	4
92	0.5	2
98	1	1
104	2	0.5
110	4	0.25

ตารางที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบผลการคำนวณค่าความสูญเสียของหม้อแปลงเมื่อจ่ายโหลดแบบเป็นเชิงเส้นและแบบไม่เป็นเชิงเส้นภายใต้การดำเนินการที่กระแสพิค

-	Linear	THD <sub>i</sub> 30%	THD <sub>i</sub> 49%
$P_{Rloss}$ (W)	343	380.9	422.37
$P_{br}$ (W)	2.05	13.28	17.24
$P_{cst}$ (W)	4.20	6.189	7.87
$P_{Ld}$ (W)	349.25	400.369	447.48
K-factor	1	6.43	8.40
$F_{th}$	1	5.83	6.83
$\%I_{max}$	100	79	75

$$* [2] \%I_{max} = (\sqrt{1.15 / (1 + (0.15 \times F_{th}^2))}) \times 100$$

ตารางที่ 3 แสดงผลการคำนวณอุณหภูมิและอายุการใช้งานเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เชิงเส้นและเป็นเชิงเส้นค่อเนื่อง 100%

-	Linear	THD <sub>i</sub> 30%	THD <sub>i</sub> 49%
$\Theta_{10}$ (°C)	31	33.8	36.54
$\Theta_g$ (°C)	13.5	18.72	21.21
$\Theta_{hs}$ (°C)	74.5	82.52	87.75
$\%L$	5.22	13.16	23.55

หมายเหตุ เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบมีดังนี้

1. True RMS Multimeter Fluke 87
2. Oscilloscope Hewlett Packard 54540A
3. Temperature Indicator Digicon HD-8
4. Harmonic & Power Meter Chauvin Amoux F27.

รูปที่ 6 และ 7 เป็นการเปรียบเทียบผลกรคำนวณและผลการทดลองพบว่าผลใกล้เคียงกัน ส่วนค่าความแตกต่างของการคำนวณกับการทดลองจริงเกิดจากองค์ประกอบต่าง ๆ เช่น ผลของอุณหภูมิแวดล้อม เพราะในการทดลองอุณหภูมิจะเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา แต่ในการคำนวณจะให้อุณหภูมิแวดล้อมคงที่ตลอดเวลา และ มาจากการระบายความร้อนของน้ำมัน เป็นต้น

จากรูปที่ 8 พบว่าเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นที่มีความเพี้ยน(THD<sub>i</sub>)ของกระแสสูง ๆ จะส่งผลให้อุณหภูมิของหม้อแปลงสูงขึ้นและเมื่อหม้อแปลงมีอุณหภูมิสูงขึ้นจะเป็นผลทำให้อายุการใช้งานของหม้อแปลงลดลงตามไปด้วย

ตารางที่ 2 เป็นการเปรียบเทียบผลการคำนวณค่าความสูญเสียของหม้อแปลงเมื่อมีการจ่ายโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นและแบบเป็นเชิงเส้น พบว่าเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นจะมีความสูญเสียอันเนื่องมาจากกระแสไหลวน( $P_{Ld}$ )สูงกว่าการจ่ายโหลดแบบเป็นเชิงเส้นอย่างมากเพราะ  $P_{Ld}$  จะแปรผัน โดยตรงกับกระแสไหลวนกำลังสองและค่าตัวสารวามอนิคส์กำลังสองซึ่งจะเป็นคุณลักษณะที่ทำให้เกิดความสูญเสียในชุดขดลวดเป็นอย่างมาก และจะส่งผลทำให้ค่าความ

สูญเสียขณะมีโหลดเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ส่วนค่า K-factor พบว่าเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดที่มีความถี่ของกระแสสูงก็จะทำให้ ค่า K-factor สูงขึ้นและทำให้ความสามารถในการรับโหลดแบบไม่เต็มเชิงเส้นของหม้อแปลงลดลง อันเนื่องมาจากค่าความสูญเสียของหม้อแปลงมีค่าเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 3 พบว่าเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เต็มเชิงเส้นที่มีความถี่ของกระแส 49% จะมียุณหภูมิ ณ จุดร้อนสูงสุดสูงกว่าแบบเป็นเชิงเส้นถึง 13.25 °C หรือ 17.78 % และเป็นผลทำให้เปอร์เซ็นต์อายุการใช้งานลดลงเพิ่มขึ้นเป็น 23.55 % ดังนั้นถ้าสามารถลดความถี่ของกระแสลงได้ก็จะทำให้อุณหภูมิของหม้อแปลงลดลงและทำให้อายุการใช้งานของหม้อแปลงยาวนานขึ้นด้วย

#### 4. สรุป

จากผลการทดสอบหม้อแปลงเมื่อมีการจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เต็มเชิงเส้นพบว่าเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดที่มีความถี่ของกระแสสูง ๆ จะส่งผลทำให้หม้อแปลงมีอุณหภูมิสูงมากกว่าการจ่ายโหลดแบบเป็นเชิงเส้นอย่างมากดังแสดงการเปรียบเทียบให้เห็นในรูปที่ 8 ซึ่งจะส่งผลให้อายุการใช้งานของหม้อแปลงสั้นลงตามไปด้วยดังตารางที่ 1 และตารางที่ 2 และจากการเปรียบเทียบผลการคำนวณกับการทดลองปรากฏว่ามีความใกล้เคียงกัน ดังนั้นหลักการที่นำเสนอจึงน่าจะเป็นแนวทางในการพัฒนาใช้กับหม้อแปลงที่มีขนาดใหม่และแรงดันไฟฟ้าสูง ๆ ได้เป็นอย่างดีและในการเลือกใช้หม้อแปลงสำหรับโหลดแบบไม่เต็มเชิงเส้นเพื่อที่จะไม่ทำให้หม้อแปลงเกิดความเสียหายอันเนื่องมาจากความร้อนเกินพิกัดจะสามารถทำได้ 2 การวิธีดังนี้(1) การลดพิกัดโหลดของหม้อแปลง(2)สามารถพิจารณาได้จาก  $I_{max}$  ในตารางที่ 2 ซึ่งสำหรับหม้อแปลงที่ใช้ในบทความนี้เมื่อจ่ายโหลดที่มี THD 30% และ 49% จะต้องลดพิกัดโหลดลงเหลือ 79% หรือ 20.72 A และ 75% หรือ 19.6 A ตามลำดับ, และ (2) เลือกใช้หม้อแปลงแบบ แฟคเตอร์ K [6] จากตารางที่ 2 คำนวณค่า K-factor ได้เท่ากับ 6.43 และ 8.40 ดังนั้นควรจะเลือกใช้หม้อแปลงที่มีแฟคเตอร์ K เท่ากับ 9

สำหรับแนวทางในการพัฒนาต่อไปสามารถทำได้โดยการให้หม้อแปลงจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เต็มเชิงเส้นร่วมกับแบบกระแสเป็นเชิงเส้นและให้หม้อแปลงจ่ายโหลดตามวัฏจักร โหลดที่มีความถี่ของกระแสในลักษณะต่าง ๆ กันที่นอกเหนือจากบทความนี้ ซึ่งจะทำให้เห็นพฤติกรรมทางความร้อนที่ใกล้เคียงความเป็นจริงมากยิ่งขึ้น

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ วิทยุพหุศึกษานการไฟฟ้าจำกัด และ ผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านที่สนับสนุนผลงานวิจัยนี้จนสำเร็จดู่ง่างไปด้วยดี

#### 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] อัฐวุฒิ วงศ์ใหญ่,สุภัท บวรจงจิตร, นิธิศน์ กฤตพจน์เดา และ บุญเลิศ สีเอเดช, " การทำนายอุณหภูมิของหม้อแปลงจำหน่ายเมื่อกระแสโหลดไม่เต็มเชิงเส้น", วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 18, ฉบับที่ 1, หน้า 86 - 91, มีนาคม, 2544.
- [2] IEEE Std.C57.110-1998, " Recommended practice for establishing transformer capability when supplying nonsinusoidal load current,".
- [3] IEEE Std. C57.91-1995," IEEE Guide for loading mineral-oil-immersed transformer,".
- [4] IEC 354 -1991," Loading guide for oil - immersed power transformer,".
- [5] V.M. Montsinger, " Loading transformer by temperature," AIEE Trans., Vol. 49, pp. 793 - 797, April, 1930.
- [6] L.W.Pierce," Transformer design and application consideration for nonsinusoidal load current," IEEE Trans. Industry Application, Vol. IA-32, No. 3., pp. 485-489, May/June, 1996.
- [7] I.F. Blume, A. Boyajian, G. amilli, F.C. Lemox, S. Minnecl and V.M. Montsinger , " Transformer Engineering," John Wiley & Son, INC., New York, 1951.

## ประวัติผู้เขียน

นายอัฐวุฒิ วงศ์ใหญ่ เกิดเมื่อวันที่ 23 มกราคม 2519 ที่จังหวัดศรีสะเกษ สำเร็จการศึกษา  
อุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ปีการศึกษา 2541

เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโทในปีการศึกษา 2542 สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง ณ สถาบัน  
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง มีผลงานวิจัยทางวิชาการตีพิมพ์ทางด้านวิศวกรรม  
ไฟฟ้าระหว่างศึกษาปริญญาโท จำนวน 4 เรื่องดังนี้

1. “การวิเคราะห์และเลือกใช้หม้อแปลงจำหน่ายเพื่อลดค่าพลังงานสูญเสีย.” วิศวกรรมลาด  
กระบัง ปีที่ 16 ฉบับที่ 4 ธันวาคม 2542 หน้า 1 - 5.
2. “การทำนายอุณหภูมิของหม้อแปลงจำหน่ายเมื่อกระแสไหลดไม่เป็นเชิงเส้น.” วิศวกรรม  
ลาดกระบัง ปีที่ 18 ฉบับที่ 1 มีนาคม 2544 หน้า 86 - 91.
3. “การทดสอบอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น.”  
วิศวกรรมลาดกระบัง ปีที่ 18 ฉบับที่ 3 กันยายน 2544 หน้า 19 - 24.
4. “การลดพิกัดโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดแบบกระแสไม่เป็นเชิงเส้น.”  
วิศวกรรมลาดกระบัง ปีที่ 18 ฉบับที่ 4 ธันวาคม 2544 หน้า 91 - 95.