การวิเคราะห์คุณสมบัติแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า

THE PROPERTY ANALYSIS OF TRANSFORMER CORE DUE TO HARMONIC VOLTAGE

ปัญญา มาลีวัตร

PANYA MALEEWAT

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 41493
วัน, เดือน, ปี 19 ก.พ. 2545

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2544

ISBN 974 - 648 - 523 - 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE PROPERTY ANALYSIS OF TRANSFORMER CORE DUE TO HARMONIC VOLTAGE

PANYA MALEEWAT

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2001

ISBN 974 - 648 - 523 - 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

/

COPYRIGHT 2001

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์คุณสมบัติแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า
ชื่อนักศึกษา	นาย ปัญญา มาลีวัตร
รหัสประจำตัว	38621209
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2544
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ. มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม	รศ. ศุลี บรรจงจิตร

บทคัดย่อ

ในการออกแบบแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า ต้องคำนึงถึงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของแกนเหล็กที่ใช้ เพื่อที่จะทำให้ผลการออกแบบแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าถูกต้องและเหมาะสม อันจะส่งผลให้หม้อแปลงไฟฟ้า มีคุณสมบัติเป็นไปตามข้อกำหนด การออกแบบโดยทั่วไป มักไม่ได้คำนึงถึงคุณสมบัติของแกนเหล็กเมื่อพบกับสภาวะรูปคลื่นที่ไม่เป็นซายน์ ซึ่งจะส่งผลให้คุณสมบัติของหม้อแปลงเปลี่ยนแปลงไป และหม้อแปลงไฟฟ้าอาจเกิดการเสียหายได้ ดังนั้นเพื่อการแก้ปัญหาดังกล่าว วิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำเสนอผลการศึกษาคุณสมบัติของแกนเหล็ก ในสภาวะที่รูปคลื่นซายน์และไม่เป็นซายน์ เพื่อที่จะได้นำผลที่ได้จากการวิเคราะห์นี้เป็นข้อมูลอ้างอิงในการออกแบบแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า ให้สามารถใช้งานได้ในสภาวะต่างๆ ให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis title	The Property Analysis of Transformer core due to Harmonic Voltage
Student	Mr. Panya Maleewat
Student ID.	38621209
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2001
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Monthon Leelajindakrailerk
Thesis Co-Advisor	Assoc. Prof. Sulee Bunjongitr

ABSTRACT

The design of the transformer core depends on electrical properties of the core to obtain proper operations of the transformer in accordance with the standard specifications. Normally, the transformer design does not take into account the characteristic of the core under non-sinusoidal waveform. This results in a change in characteristics of the core, and the transformer may face the damage when working with non-sinusoidal waveforms. This thesis presents an analysis of the transformer core's characteristics under in sinusoidal and non-sinusoidal waveforms. The obtained results will enable the transformer to be better designed in order to reach its highest performance characteristics.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาจากท่าน รองศาสตราจารย์มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์ และ รองศาสตราจารย์ศุลี บรรจงจิตร ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ บริษัทพงษ์พิมานการไฟฟ้า จำกัด เป็นอย่างสูงที่ได้กรุณาเอื้อเฟื้อสถานที่ วัสดุอุปกรณ์คำแนะนำและข้อมูลต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ในการจัดทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านเป็นอย่างสูงที่กรุณาตรวจสอบและให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ต่อการจัดทำวิทยานิพนธ์ นอกจากนี้ขอขอบคุณเพื่อนๆทุกคนและผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องที่มีส่วนช่วยเหลือให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ปัญญา มาลีวัตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....II

กิตติกรรมประกาศ.....III

สารบัญ.....IV

สารบัญตาราง.....VII

สารบัญภาพ.....IX

บทที่ 1 บทนำ.....1

1.1 แนวคิดของวิทยานิพนธ์.....1

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....1

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์.....2

1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....2

บทที่2 ทฤษฎีการทำงาน.....3

2.1 วงจรแม่เหล็ก.....3

2.2 โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้า.....4

2.2.1 ขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า.....4

2.2.2 แกนของหม้อแปลงไฟฟ้า.....5

2.2.2.1 แบบคอร์.....5

2.2.2.2 แบบเชลล์.....6

2.3 สมการแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ.....6

2.4 การออกแบบแกนเหล็ก.....7

2.5 การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าขณะไม่มีโหลด.....11

2.5.1 ค่าความสูญเสียเนื่องจากฮีสเตอร์รีซีส.....11

2.5.2 ค่าความสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน.....12

2.6 ฮาร์โมนิกส์.....13

บทที่ 3 แหล่งจ่ายแรงดันและการออกแบบแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า
ที่ใช้ในการทดสอบ.....15

3.1 แหล่งจ่ายแรงดันเป็นรูปคลื่นซายน์.....15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2 แหล่งจ่ายแรงดันไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ 15
3.3 การออกแบบแกนเหล็กหม้อแปลงไฟฟ้า 16

บทที่ 4 วิธีการทดสอบและผลการทดสอบ.....19
4.1 วิธีการทดสอบ.....19
4.1.1 วิธีการทดสอบในกรณีที่แหล่งจ่ายแรงดันเป็นรูปคลื่นซายน์.....19
4.1.2 วิธีการทดสอบในกรณีที่แหล่งจ่ายแรงดันไม่เป็นรูปคลื่นซายน์.....20
4.2 ผลการทดสอบ.....21
4.2.1 ผลการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบเป็นรูปคลื่นซายน์.....21
4.2.2 ผลการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 10 เปอร์เซ็นต์ 25
4.2.3 ผลการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 15 เปอร์เซ็นต์ 29
4.2.4 ผลการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 20 เปอร์เซ็นต์ 33
4.2.5 ผลการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 25 เปอร์เซ็นต์ 37
4.2.6 ผลการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 30 เปอร์เซ็นต์ 41
4.2.7 ผลการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 35 เปอร์เซ็นต์ 45
4.2.8 ผลการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 40 เปอร์เซ็นต์ 49
4.2.9 ผลการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 45 เปอร์เซ็นต์ 53
4.2.10 ผลการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 50 เปอร์เซ็นต์ 57
4.3 วิเคราะห์ผลการทดสอบ.....52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อแสนอแนะ 64
5.1 สรุปผลการวิจัย.....64
5.2 ข้อเสนอแนะ.....64

บรรณานุกรม 65

ภาคผนวก 66
ก. กราฟค่าความสูญเสียของแกนเหล็ก.....66
ข. ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์.....71

ประวัติผู้เขียน 78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

3.1 ค่าความต้านทานของขดลวดที่ใช้ในการทดสอบ.....18

4.1 ผลการทดสอบที่แหล่งจ่ายแรงดันทดสอบเป็นรูปคลื่นซายน์.....23

4.2 เปรียบเทียบค่าความสูญเสียระหว่างข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิตกับข้อมูลจากการทดสอบที่แหล่งจ่ายแรงดันทดสอบเป็นรูปคลื่นซายน์.....25

4.3 ผลการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 10 เปอร์เซ็นต์ 27

4.4 เปอร์เซ็นต์เปรียบเทียบค่าความสูญเสียระหว่างข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิตกับข้อมูลจากการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 10 เปอร์เซ็นต์.....29

4.5 ผลการทดสอบที่แหล่งจ่ายแรงดันทดสอบไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 15 เปอร์เซ็นต์ 31

4.6 เปอร์เซ็นต์เปรียบเทียบค่าความสูญเสียระหว่างข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิตกับข้อมูลจากการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 15 เปอร์เซ็นต์.....33

4.7 ผลการทดสอบที่แหล่งจ่ายแรงดันทดสอบไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 20 เปอร์เซ็นต์ 35

4.8 เปอร์เซ็นต์เปรียบเทียบค่าความสูญเสียระหว่างข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิตกับข้อมูลจากการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 20 เปอร์เซ็นต์.....37

4.9 ผลการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 25 เปอร์เซ็นต์ 39

4.10 เปอร์เซ็นต์เปรียบเทียบค่าความสูญเสียระหว่างข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิตกับข้อมูลจากการทดสอบ เมื่อแหล่งจ่ายแรงดันไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 25 เปอร์เซ็นต์.....41

4.11 บันทึกผลการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 30 เปอร์เซ็นต์.....43

4.12 เปอร์เซ็นต์เปรียบเทียบค่าความสูญเสียระหว่างข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิตกับข้อมูลจากการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 30 เปอร์เซ็นต์.....45

4.13 ผลการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 35 เปอร์เซ็นต์ 47

4.14 เปอร์เซ็นต์เปรียบเทียบค่าความสูญเสียระหว่างข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิตกับข้อมูลจากการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 35 เปอร์เซ็นต์.....49

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ห้ามนำไปใช้เพื่อการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่ หน้า

4.15 ผลการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 40 เปอร์เซ็นต์ 51

4.16 เปอร์เซ็นต์เปรียบเทียบค่าความสูญเสียระหว่างข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิตกับข้อมูลจากการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 40 เปอร์เซ็นต์ 53

4.17 ผลการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 45 เปอร์เซ็นต์ 55

4.18 เปอร์เซ็นต์เปรียบเทียบค่าความสูญเสียระหว่างข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิตกับข้อมูลจากการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 45 เปอร์เซ็นต์ 57

4.19 ผลการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 50 เปอร์เซ็นต์ 59

4.20 ตารางเปอร์เซ็นต์เปรียบเทียบค่าความสูญเสียระหว่างข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิตกับข้อมูลจากการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 50 เปอร์เซ็นต์ 61

4.21 ค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นเมื่อสร้างหม้อแปลงเสร็จสมบูรณ์.....63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

ภาพที่ หน้า

2.1 วงจรแม่เหล็กแบบ Core Type.....3
2.2 ส่วนประกอบของหม้อแปลงไฟฟ้า.....5
2.3 ภาพแกนเหล็กแบบคอร์.....6
2.4 ภาพแกนเหล็กแบบเชลล์.....6
2.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง W/kg กับ B_{max} 8
2.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง VA/kg กับ B_{max} 9
2.7 การจัดเรียงแกนเหล็กในพื้นที่วงกลม 10
2.8 วงจรการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าขณะไม่มีโหลด 11
2.9 ภาพ Hysteresis Loop.....11
2.10 ภาพคลื่นซายน์ 13
2.11 ภาพคลื่นความผิดเพี้ยนของสัญญาณซายน์.....13
3.1 แหล่งจ่ายแรงดันทดสอบเป็นรูปคลื่นซายน์.....15
3.2 แหล่งจ่ายแรงดันทดสอบไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ 15
3.3 วงจรทริกเกอร์ 16
3.4 การเรียงแผ่นเหล็กเป็นขั้นของแกนเหล็กที่ใช้ในการทดสอบ.....17
3.5 ขนาดของแกนเหล็กที่ใช้ในการทดสอบ.....17
3.6 ขนาดของแผ่นเหล็กในแต่ละขั้นของ YOKE A.....17
3.7 ขนาดของแผ่นเหล็กในแต่ละขั้นของ OUTER B.....18
4.1 วงจรที่ใช้ทดสอบในวิทยานิพนธ์.....19
4.2 วงจรที่ใช้การทดสอบในกรณีที่แหล่งจ่ายแรงดันเป็นรูปคลื่นซายน์.....19
4.3 วงจรที่ใช้การทดสอบในกรณีที่แหล่งจ่ายแรงดันไม่เป็นรูปคลื่นซายน์.....20
4.4 การต่อวงจรที่ใช้ในการทดสอบจริง.....21
4.5 สัญญาณแรงดันทดสอบรูปคลื่นซายน์.....22
4.6 สเปกตรัมแรงดันฮาร์โมนิกส์ของสัญญาณแรงดันทดสอบรูปคลื่นซายน์.....22
4.7 สัญญาณกระแสในวงจรการทดสอบรูปคลื่นซายน์ ที่ความหนาแน่นฟลั๊กซ์ 0.99 เทสลา.....23
4.8 การเปรียบเทียบค่าความสูญเสียของแกนเหล็ก (W/kg) ระหว่างค่าที่ได้จากการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันเป็นรูปคลื่นซายน์กับค่าที่ได้จากบริษัทผู้ผลิต.....24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่ หน้า

4.9 ค่าความสัมพันธ์ระหว่าง W/kg และ Flux density ในรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบเป็นรูปคลื่นซายน์.....24
4.10 สัญญาณแรงดันทดสอบไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 10 เปอร์เซ็นต์ 26
4.11 สเปกตรัมแรงดันฮาร์โมนิกส์ของสัญญาณแรงดันทดสอบไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 10 เปอร์เซ็นต์ 26
4.12 สัญญาณกระแสในวงจรทดสอบ ความผิดเพี้ยนของสัญญาณแรงดัน 10 เปอร์เซ็นต์ ที่ความหนาแน่นฟลั๊กซ์ 0.99 เทสลา.....27
4.13 การเปรียบเทียบค่าความสูญเสียของแกนเหล็ก (W/kg) ระหว่างค่าที่ได้จากการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 10 เปอร์เซ็นต์ กับค่าที่ได้จากบริษัทผู้ผลิตรูปคลื่นซายน์.....28
4.14 ค่าความสัมพันธ์ระหว่าง W/kg และ Flux density ในรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 10 เปอร์เซ็นต์.....28
4.15 สัญญาณแรงดันทดสอบไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 15 เปอร์เซ็นต์ 30
4.16 สเปกตรัมแรงดันฮาร์โมนิกส์ของสัญญาณแรงดันทดสอบไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 15 เปอร์เซ็นต์ 30
4.17 สัญญาณกระแสในวงจรทดสอบ ความผิดเพี้ยนของสัญญาณแรงดัน 15 เปอร์เซ็นต์ ที่ความหนาแน่นฟลั๊กซ์ 0.99 เทสลา.....31
4.18 การเปรียบเทียบค่าความสูญเสียของแกนเหล็ก (W/kg) ระหว่างค่าที่ได้จากการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 15 เปอร์เซ็นต์ กับค่าที่ได้จากบริษัทผู้ผลิตรูปคลื่นซายน์ 32
4.19 ค่าความสัมพันธ์ระหว่าง W/kg และ Flux density ในรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 15 เปอร์เซ็นต์.....32
4.20 สัญญาณแรงดันทดสอบไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 20 เปอร์เซ็นต์ 34
4.21 สเปกตรัมแรงดันฮาร์โมนิกส์ของสัญญาณแรงดันทดสอบไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน20เปอร์เซ็นต์.....34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่ หน้า

4.22 สัญญาณกระแสในวงจรทดสอบ ความผิดเพี้ยนของสัญญาณแรงดัน 20 เปอร์เซ็นต์ ที่ความหนาแน่นฟลั๊กซ์ 0.99 เทสลา.....35
4.23 การเปรียบเทียบค่าความสูญเสียของแกนเหล็ก (W/kg) ระหว่างค่าที่ได้จากการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 20 เปอร์เซ็นต์ กับค่าที่ได้จากบริษัทผู้ผลิตรูปคลื่นซายน์ 36
4.24 ค่าความสัมพันธ์ระหว่าง W/kg และ Flux density ในรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 20 เปอร์เซ็นต์.....36
4.25 สัญญาณแรงดันทดสอบไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 25 เปอร์เซ็นต์ 38
4.26 สเปกตรัมแรงดันฮาร์โมนิกส์ของสัญญาณแรงดันทดสอบไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 25 เปอร์เซ็นต์ 38
4.27 สัญญาณกระแสในวงจรทดสอบ ความผิดเพี้ยนของสัญญาณแรงดัน 25 เปอร์เซ็นต์.....39
4.28 การเปรียบเทียบค่าความสูญเสียของแกนเหล็ก (W/kg) ระหว่างค่าที่ได้จากการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 25 เปอร์เซ็นต์ กับค่าที่ได้จากบริษัทผู้ผลิตรูปคลื่นซายน์ 40
4.29 ค่าความสัมพันธ์ระหว่าง W/kg และ Flux density ในรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการทดสอบ เมื่อแหล่งจ่ายแรงดันไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 25 เปอร์เซ็นต์.....40
4.30 แสดงภาพสัญญาณแรงดันทดสอบไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 30 เปอร์เซ็นต์ 42
4.31 สเปกตรัมแรงดันฮาร์โมนิกส์ของสัญญาณแรงดันทดสอบไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 30 เปอร์เซ็นต์ 42
4.32 สัญญาณกระแสในวงจรทดสอบ ความผิดเพี้ยนของสัญญาณแรงดัน 30 เปอร์เซ็นต์ ที่ความหนาแน่นฟลั๊กซ์ 0.99 เทสลา.....43
4.33 แสดงการเปรียบเทียบค่าความสูญเสียของแกนเหล็ก (W/kg) ระหว่างค่าที่ได้จากการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 30 เปอร์เซ็นต์ กับค่าที่ได้จากบริษัทผู้ผลิตรูปคลื่นซายน์.....44
4.34 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่าง W/kg และ Flux density ในรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 30 เปอร์เซ็นต์.....44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่ หน้า

4.48 แสดงการเปรียบเทียบค่าความสูญเสียของแกนเหล็ก (W/kg) ระหว่างค่าที่ได้จากการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 45 เปอร์เซ็นต์ กับค่าที่ได้จากบริษัทผู้ผลิตรูปคลื่นซายน์.....56

4.49 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่าง W/kg และ Flux density ในรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 45 เปอร์เซ็นต์.....56

4.50 แสดงภาพสัญญาณแรงดันทดสอบไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 50 เปอร์เซ็นต์ 58

4.51 สเปกตรัมแรงดันฮาร์โมนิกส์ของสัญญาณแรงดันทดสอบไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 50 เปอร์เซ็นต์ 58

4.52 สัญญาณกระแสในวงจรทดสอบ ความผิดเพี้ยนของสัญญาณแรงดัน 50 เปอร์เซ็นต์ ที่ความหนาแน่นฟลั๊กซ์ 0.99 เทสลา.....59

4.53 แสดงการเปรียบเทียบค่าความสูญเสียของแกนเหล็ก (W/kg) ระหว่างค่าที่ได้จากการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 50 เปอร์เซ็นต์ กับค่าที่ได้จากบริษัทผู้ผลิตรูปคลื่นซายน์.....60

4.54 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่าง W/kg และ Flux density ในรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 50 เปอร์เซ็นต์.....60

4.55 แสดงการเปรียบเทียบค่าความสูญเสียของแกนเหล็ก (W/kg) ระหว่างค่าที่ได้จากทดสอบ กับ ค่าที่ได้จากบริษัทผู้ผลิตรูปคลื่นซายน์.....52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 แนวคิดของวิทยานิพนธ์

การใช้พลังงานในโรงงานอุตสาหกรรม ควรมีการใช้พลังงานให้มีประสิทธิภาพมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เพราะเป็นการประหยัดพลังงาน หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าชิ้นหนึ่งที่มีใช้อยู่อย่างแพร่หลายและหม้อแปลงไฟฟ้าก็มีค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นที่ตัวของหม้อแปลงไฟฟ้าเอง แม้จะไม่มีการจ่ายโหลดให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าก็ตาม การลดค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้น เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งานอีกวิธีหนึ่ง ในการออกแบบแกนเหล็กของหม้อแปลงนั้น ผู้ออกแบบสามารถออกแบบแกนเหล็กได้ตามข้อมูลอ้างอิงของบริษัทผู้ผลิตแผ่นเหล็ก ซึ่งได้ให้คุณสมบัติของแผ่นเหล็กที่นำมาใช้เป็นแกนเหล็กของหม้อแปลงในสภาวะที่ในการทดสอบเป็นรูปคลื่นซายน์เท่านั้น ซึ่งค่าที่ได้จากบริษัทผู้ผลิตนั้น มีความคลาดเคลื่อนจากการผลิตและออกแบบจริง เนื่องมาจากสาเหตุต่างๆ เช่น ค่าตัวประกอบการผลิต (Building Factor) และ ในลักษณะการใช้งานจริงของหม้อแปลงอาจจะพบกับสภาวะที่แหล่งจ่ายไฟไม่เป็นรูปคลื่นซายน์หรือไม่เป็นเชิงเส้นได้ อันเนื่องมาจากมีการใช้งานของอุปกรณ์ประเภทอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ชุดควบคุมความเร็วมอเตอร์ โดยสภาวะแหล่งจ่ายไม่เป็นรูปคลื่นซายน์นี้จะส่งผลให้คุณสมบัติของแกนเหล็กเปลี่ยนแปลงไป

ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์ถึงคุณสมบัติของแกนเหล็กหม้อแปลงทั้งในสภาวะแหล่งจ่ายไฟทดสอบเป็นรูปคลื่นซายน์ และไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ เพื่อที่จะนำข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์และทดสอบไปใช้อ้างอิงในการออกแบบแกนเหล็กของหม้อแปลง เพื่อให้ผลของการออกแบบมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น หม้อแปลงที่ผลิตจริงสามารถใช้งานในสภาวะต่างๆที่เกิดขึ้น ลดต้นทุนการผลิต ลดค่าใช้จ่ายในการซ่อมและบำรุงรักษา ยืดอายุการใช้งานของหม้อแปลงให้ยาวนานยิ่งขึ้น และยังส่งผลให้ระบบไฟฟ้ามีเสถียรภาพมากยิ่งขึ้นอีกด้วย

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1. ศึกษาวิธีการและขั้นตอนในการทดสอบหม้อแปลงเพื่อหาค่าความสูญเสียของแกนเหล็กในสภาวะแหล่งจายไฟทดสอบเป็นรูปคลื่นซายน์และไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ทั้งในทางทฤษฎีและในทางปฏิบัติ
2. นำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบหม้อแปลงทางปฏิบัติ ทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่าความสูญเสียของแกนเหล็กที่ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กต่างๆกันทั้งในสภาวะแหล่งจ่ายไฟทดสอบเป็นรูปคลื่นซายน์และไม่เป็นรูปคลื่นซายน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เพื่อใช้เป็นข้อมูลอ้างอิง ในการออกแบบแกนเหล็กของหม้อแปลงให้มีค่าความถูกต้อง และมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น
4. เพื่อทำให้หม้อแปลงสามารถใช้งานได้ในสภาวะต่างๆได้อย่างปลอดภัยมากยิ่งขึ้น
5. เพื่อทำให้หม้อแปลงมีอายุการใช้งานยาวนานยิ่งขึ้น
6. ทำให้ระบบไฟฟ้ามีเสถียรภาพมากยิ่งขึ้น

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์

1. สามารถทำการทดสอบหม้อแปลงเพื่อหาค่าความสูญเสียของแกนเหล็กได้อย่างถูกต้องมากยิ่งขึ้นผู้ออกแบบสามารถออกแบบหม้อแปลงให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น
2. ผู้ออกแบบหรือผู้ผลิต สามารถนำข้อมูลจากการวิเคราะห์มาใช้อ้างอิงในการออกแบบแกนเหล็กของหม้อแปลงให้มีความถูกต้องและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น
3. ผู้ออกแบบหรือผู้ผลิต สามารถนำข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ มาทำการวิเคราะห์และออกแบบให้หม้อแปลงมีค่าพลังงานสูญเสียต่ำลงได้อันจะส่งผลให้เกิดการประหยัดพลังงานและค่าใช้จ่าย
4. สามารถทำให้หม้อแปลงใช้งานได้ในสภาวะต่างๆได้อย่างปลอดภัยมากยิ่งขึ้น
5. การออกแบบที่ถูกต้องจะทำให้หม้อแปลงสามารถถูกใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพ และยังส่งผลให้ลดค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงลดต้นทุนการผลิตและยังส่งผลให้ระบบไฟฟ้ามีความมั่นคงมากยิ่งขึ้น

1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ทำการวิจัยและศึกษาคุณสมบัติของแกนเหล็กหม้อแปลงในส่วนของค่าความสูญเสียทางไฟฟ้าของแกนเหล็ก โดยศึกษาข้อมูลจากทฤษฎีและจากการทดลองในทางปฏิบัติ แล้วทำการทดสอบแกนเหล็กในทางปฏิบัติกับแหล่งจ่ายไฟทดสอบที่เป็นรูปคลื่นซายน์และไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ แล้วนำผลข้อมูลที่ได้จากทางปฏิบัติมาทำการวิเคราะห์ เพื่อหาค่าความสูญเสียของแกนเหล็กที่ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กต่างๆกัน ทั้งสภาวะที่รูปคลื่นของแรงดันเป็นซายน์และไม่เป็นซายน์ โดยศึกษาและวิจัยแกนเหล็กที่ใช้สร้างหม้อแปลงจำหน่าย โดยเป็นแกนเหล็กซิลิคอน ชนิด cold rolled coated grain oriented magnetic steel ความหนาของแผ่นเหล็ก 0.27 มม. (M4) ที่มีใช้อยู่ทั่วไป

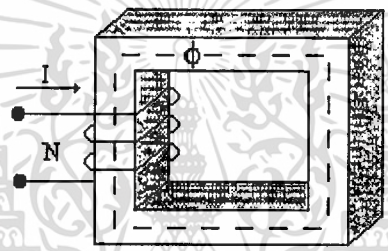
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่2
ทฤษฎีการทำงาน

หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับชนิดหนึ่งที่ใช้ในการเพิ่มหรือลดละดับแรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสสลับจากค่าหนึ่งไปสู่อีกค่าหนึ่ง ส่วนประกอบที่สำคัญของหม้อแปลงไฟฟ้า คือวงจรแม่เหล็กและวงจรไฟฟ้า วงจรแม่เหล็กประกอบด้วยแผ่นเหล็กซิลิคอน ส่วนวงจรไฟฟ้าประกอบด้วยขอลวดปฐมภูมิ และขดลวดทุติยภูมิที่พันอยู่รอบแกนเหล็กซิลิคอน[2][4]

2.1 วงจรแม่เหล็ก (Magnetic Circuit)

เส้นแรงแม่เหล็ก (Flux) และ แรงเคลื่อนแม่เหล็ก(Magnetomotive Force)



ภาพที่ 2.1 วงจรแม่เหล็กแบบ Core Type

จากรูป เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้ขดลวดตัวนำที่พันอยู่รอบแกนตัวนำแม่เหล็ก ทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็ก และแรงเคลื่อนแม่เหล็ก การหาค่าแรงดันแม่เหล็ก สามารถหาได้โดยสมการดังนี้[4]

$$MMF = NI \tag{2.1}$$

โดยที่

MMF = แรงเคลื่อนแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น แอมแปร์-รอบ (A-Turn)

N = จำนวนรอบของขดลวดที่พันบนตัวนำแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น รอบ (Turn)

I = กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวด มีหน่วยเป็น แอมแปร์ (A)

ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก(Flux Density) ที่เกิดขึ้นสามารถหาได้โดยสมการ[4]

$$B = \phi/A \tag{2.2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

B = ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น เวเบอร์ / ตารางเมตร (Wb / m^2)

ϕ = ค่าของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้น มีหน่วยเป็น เวเบอร์ (Wb)

A = พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก มีหน่วยเป็น ตารางเมตร (m^2)

ค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก (Field Intensity) สามารถหาได้จากสมการ[4]

$$H = NI / L \qquad (2.3)$$

โดยที่

H = ความเข้มของสนามแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น เป็น แอมแปร์/ ตารางเมตร (A/m^2)

N = จำนวนรอบของขดลวดที่พันบนตัวนำแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น รอบ (Turn)

I = กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวด มีหน่วยเป็น แอมแปร์ (A)

L = ความยาวของแกนเหล็กโดยเฉลี่ย มีหน่วยเป็น เมตร (m)

ความสัมพันธ์ระหว่าง B และH สามารถเขียนเป็นสมการความสัมพันธ์ โดยมีค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวกลางของสนามแม่เหล็ก ได้ดังนี้[4]

$$B = \mu H = \mu_0 \mu_r H \qquad (2.4)$$

โดยที่

B = ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น เวเบอร์ / ตารางเมตร (Wb / m^2)

$\mu = \mu_0 \mu_r$ = ความซึมซาบของตัวกลาง (permeability) มีหน่วยเป็น $\frac{Wb/m^2}{A/m}$

μ_0 = ความซึมซาบในห้วงอวกาศ(permeability of free-space) มีหน่วยเป็น $\frac{Wb/m^2}{A/m}$

μ_r = ความซึมซาบสัมพัทธ์ (relative permeability) ไม่มีหน่วย

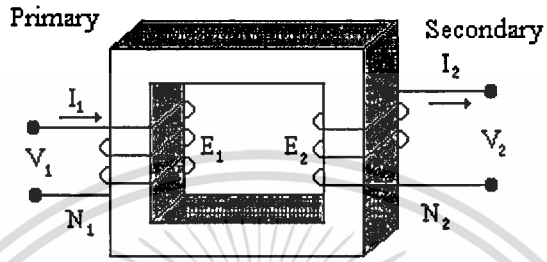
2.2 โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้า

ส่วนประกอบที่สำคัญของหม้อแปลงไฟฟ้ามีดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 ขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า(Transformer winding)

ขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ขดลวดปฐมภูมิ และ ขดลวดทุติยภูมิ ตามภาพที่ 2.2 หม้อแปลงที่มีขดลวดปฐมภูมิมากกว่าขดลวดทุติยภูมิ เรียกว่า หม้อแปลงชนิดแปลงแรงดันลง (Step down Transformer) ส่วนหม้อแปลงที่มีขดลวดปฐมภูมิน้อยกว่าขดลวดทุติยภูมิ เรียกว่า หม้อแปลงชนิดแปลงแรงดันลง (Step up Transformer)[4]



ภาพที่ 2.2 ส่วนประกอบของหม้อแปลงไฟฟ้า

โดยที่

V_1 = แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้ขดลวดปฐมภูมิ

I_1 = กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้ขดลวดปฐมภูมิ

N_1 = จำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิ

V_2 = แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายออกจากขดลวดทุติยภูมิ

I_2 = กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้ขดลวดทุติยภูมิ

N_2 = จำนวนรอบของขดลวดทุติยภูมิ

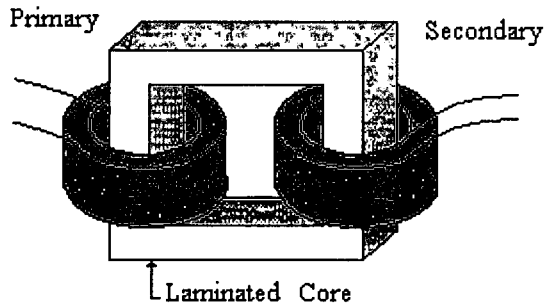
2.2.2 แกนของหม้อแปลงไฟฟ้า

แกนของหม้อแปลงไฟฟ้ามักทำจากแผ่นลามิเนทบางๆ เพื่อลดค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นเนื่องจากกระแสไฟฟ้าไหลวน (Eddy Current) ที่ทำหน้าที่เป็นตัวนำหรือทางเดินของฟลั๊กซ์แม่เหล็กที่นิยมใช้มี 2 ประเภท คือ

2.2.2.1 แบบคอร์ (core type)

ลักษณะการพันของขดลวดบนแกนชนิดนี้มักพันขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิแยกกันดังแสดงในภาพที่ 2.3

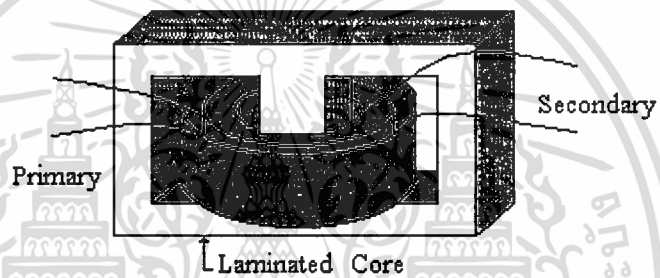
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.3 ภาพแกนเหล็กแบบคอร์

2.2.2.2 แบบเชลล์ (Shell type)

ลักษณะการพันขดลวดชนิดนี้มักพันขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิอยู่ที่แกนเดียวกัน ดังแสดงในภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 ภาพแกนเหล็กแบบเชลล์

2.3 สมการแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ (Emf Equation of a Transformer)

กำหนดให้

ϕ_m = จำนวนเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด (webers)

B_m = ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด (Tesla)

A = พื้นที่หน้าตัดสุทธิของแกนเหล็ก (sq.m)

N = จำนวนรอบของขดลวด (turn)

f = ความถี่ (Hz)

ค่าของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำตามกฎของฟาราเดย์เมื่อจำนวนรอบของขดลวดเท่ากับ N รอบโดยกำหนดว่าเส้นแรงแม่เหล็กที่คล้องขดลวดที่พันอยู่รอบแกนเหล็กมีค่าเท่ากันทุกรอบดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์เป็นดังสมการ[1]

$$e(t) = \pm N \frac{d\phi(t)}{dt} \qquad (2.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

$e(t)$ คือ แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ

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

กำหนดให้การเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็ก $\phi(t)$ เป็นแบบ sinusoidal ดังนั้นจะได้

$$\phi(t) = \phi_m.\sin\omega t \tag{2.6}$$

$$\phi(t) = A.B_m.\sin\omega t \tag{2.7}$$

และจากสมการที่ 2.5 จะได้

$$e(t) = \omega.N.A.B_m.\cos\omega t \tag{2.8}$$

$$e(t) = E_{max}.\cos\omega t \tag{2.9}$$

เมื่อ

$$E_{max} = 2\pi f.N.A.B_m \tag{2.10}$$

แต่ในทางปฏิบัติจะใช้ค่า rms ดังนั้นจะได้

$$E_{rms} = 0.707E_{max} \tag{2.11}$$

$$E_{rms} = 0.707 \times 2\pi f.N.A.B_m \tag{2.12}$$

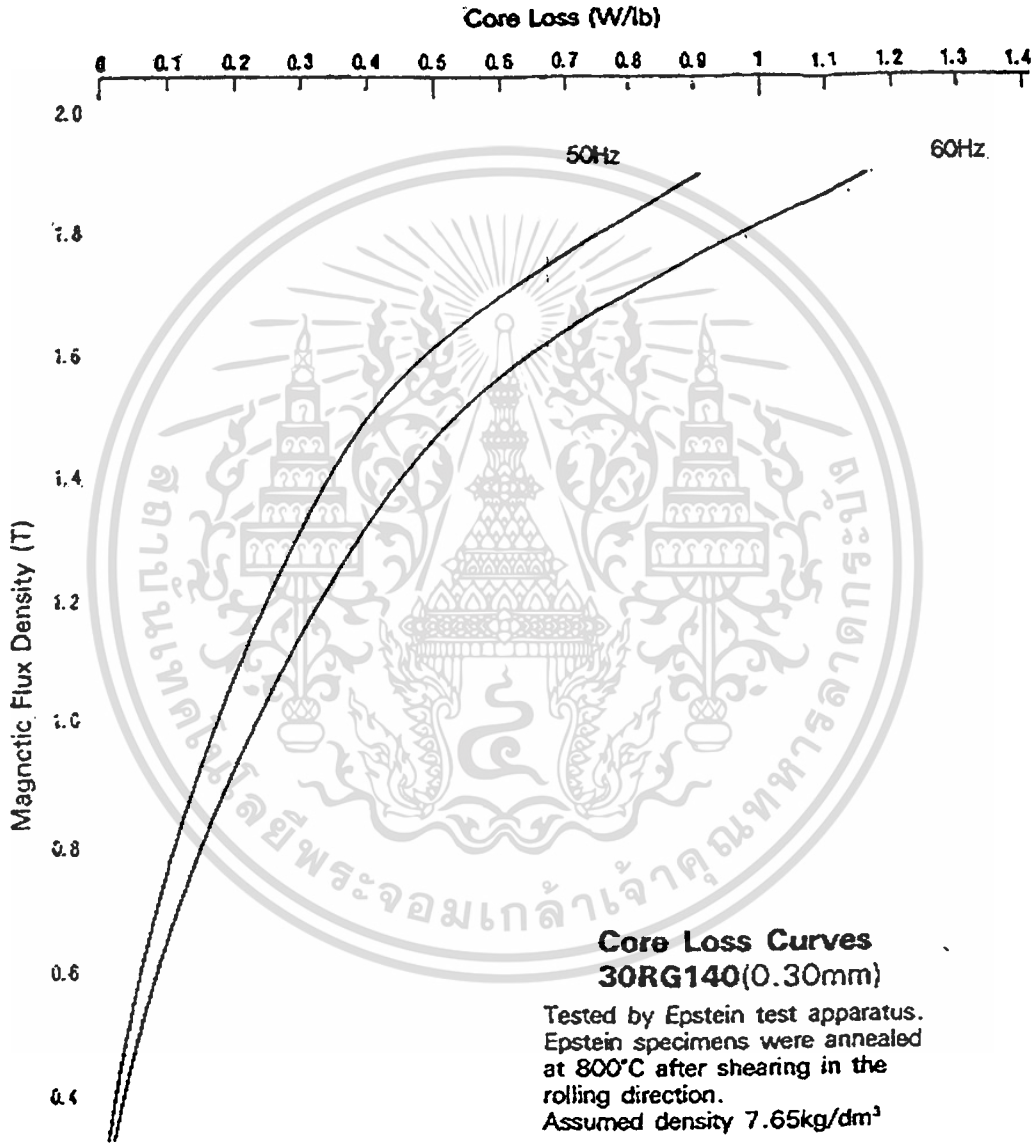
$$E_{rms} = 4.44f.N.A.B_m \tag{2.13}$$

2.4 การออกแบบแกนเหล็ก

แกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าประกอบด้วยแผ่นเหล็กซิลิคอนบาง ๆ นำมาวางเรียงกันแต่ละแผ่นฉาบด้วยฉนวนเพื่อลดการเกิดกระแสไหลวนในแกนเหล็ก ทำให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กลดลง ความหนาของแผ่นเหล็กซิลิคอนมีผลต่อการเกิดกระแสไหลวนในแกนเหล็ก จำนวนเปอร์เซ็นต์ของซิลิคอนในเหล็กรวมทั้งขั้นตอนในการทำแผ่นเหล็กซิลิคอนมีผลต่อการเกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากฮิสเตอริซิส กำลังไฟฟ้าสูญเสียทั้งสองเกิดเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ในแกนเหล็ก การเพิ่มจำนวนซิลิคอนทำให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียลดลง แต่จะทำให้เหล็กนั้นแข็งและเปราะ เหล็กซิลิคอนที่ใช้โดยทั่วไปในการประกอบสร้างหม้อแปลงจำหน่ายนี้เป็นเกรด M-3, M-4 และ M-5 [5] ความหนา 0.3, 0.27 และ 0.30 มม. ค่าแฟคเตอร์ของแผ่นเหล็กแผ่นมีค่า 0.97 และมีความหนาแน่น 7.65 kg/dm^3

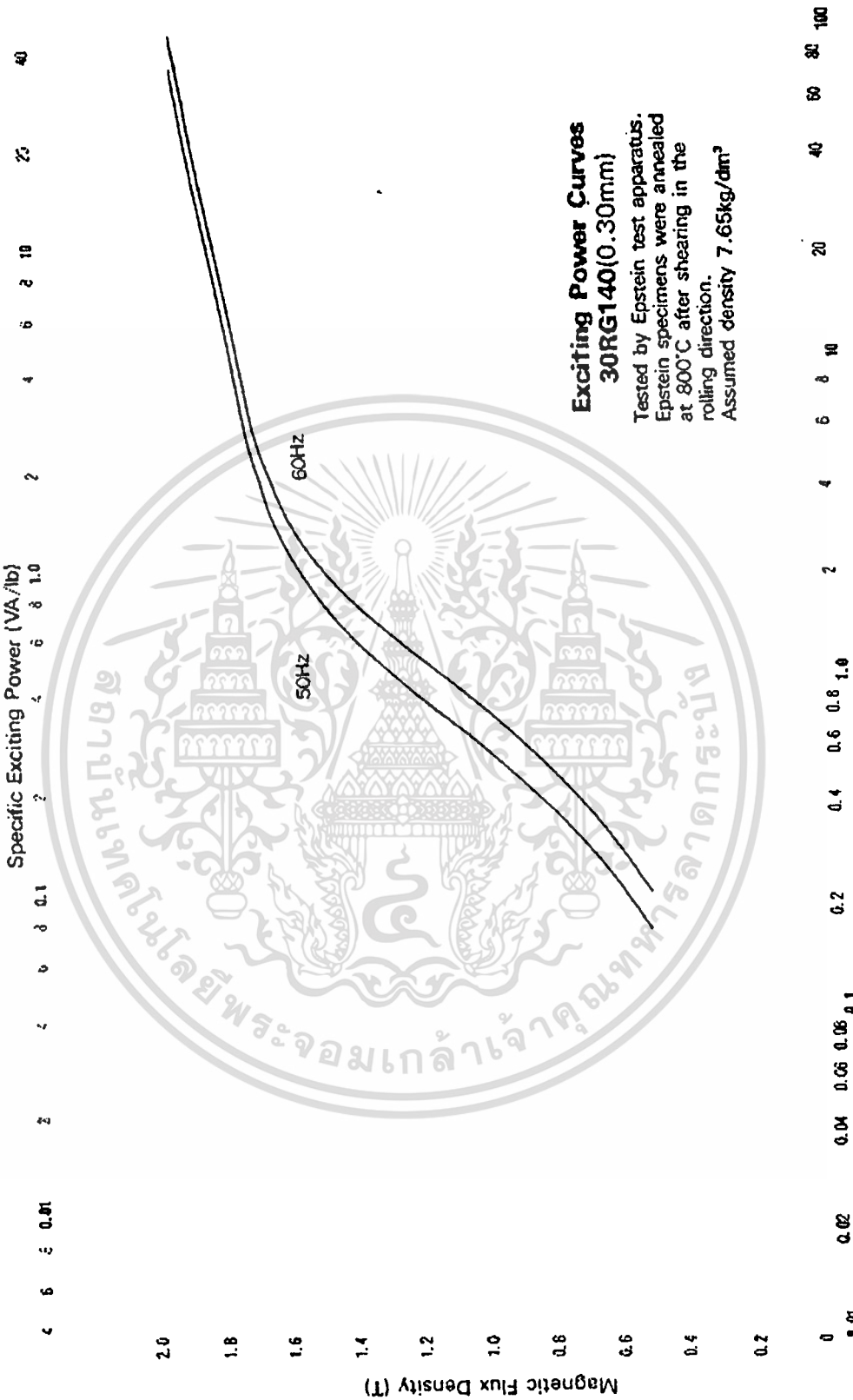
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการออกแบบหม้อแปลงที่กำหนดขนาดมาให้นั้นสามารถที่จะออกแบบได้หลายวิธี เช่น ออกแบบให้ต้นทุนน้อยที่สุดโดยไม่คำนึงถึงกำลังไฟฟ้าสูญเสีย หรือ ในทางกลับกันอาจจะออกแบบให้มีกำลังไฟฟ้าสูญเสียน้อยที่สุด การออกแบบหม้อแปลงโดยให้ประหยัดที่สุดสามารถกระทำได้ถึงค่าหนึ่งเท่านั้น เพราะจะถูกจำกัดด้วยความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากกำลังไฟฟ้าสูญเสียในหม้อแปลงและถูกจำกัดด้วยค่าความหนาแน่นฟลักซ์อิ่มตัวในแกนเหล็กหม้อแปลงที่ผลิต โดยทั่วไปจะทำการออกแบบโดยประมาณให้มีราคาของแกนเหล็กเท่ากับราคาของขดลวดทองแดง



ภาพที่ 2.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง W/kg กับ B_{max}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

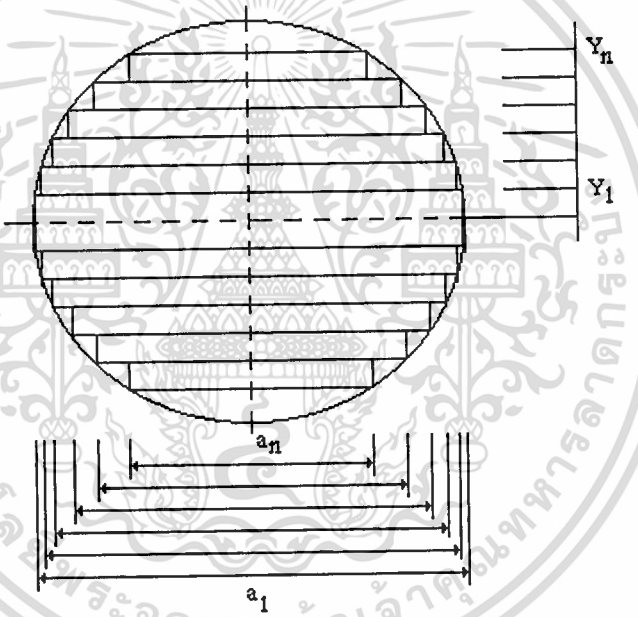


ภาพที่ 2.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง VA/kg กับ B_{max}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในด้านประสิทธิภาพของหม้อแปลงนั้นสามารถออกแบบให้มีประสิทธิภาพสูงสุดที่โหลดที่กำหนดได้โดยการออกแบบให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กมีค่าเท่ากับกำลังไฟฟ้าสูญเสียในทองแดง แต่กรณีเป็นหม้อแปลงในระบบจำหน่ายมีแนวโน้มว่าวันหนึ่ง ๆ จะใช้งานที่โหลดน้อยกว่าที่กำหนดเป็นเวลานานมากกว่าการใช้โหลดที่กำหนด การออกแบบจึงมักจะให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กมีค่าน้อยเท่าที่จะเป็นไปได้ ดังนั้นพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กจะหาได้จากการเลือกค่าความหนาแน่นฟลักซ์(B) ซึ่งกำหนดด้วยค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก

แกนเหล็กของหม้อแปลงแบบคอร์ พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กเป็นรูปเหลี่ยมอัดในวงกลม จำนวนขั้น(Step)ของแกนเหล็กขึ้นอยู่กับการออกแบบ ถ้าจำนวนขั้นของแกนเหล็กมากก็จะได้พื้นที่หน้าตัดมาก เมื่อเรียงแกนเหล็กเสร็จแล้วก่อนจะประกอบเหล็กแคลมป์จะใช้กระดาษฉนวนกั้นระหว่างเหล็กซิลิคอนกับเหล็กแคลมป์เสียก่อน เพื่อป้องกันการเหนี่ยวนำในเหล็กแคลมป์ทำให้เกิดความร้อนสูง[1]



ภาพที่ 2.7 การจัดเรียงแกนเหล็กในพื้นที่วงกลม

การคำนวณหาขนาดของแกนเหล็กที่นำมาจัดเรียงในวงกลมในแต่ละขั้นสามารถคำนวณได้จากสมการ[1]

$$F(Y) = 2\left(\sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - Y^2}\right) \qquad (2.14)$$

โดยที่

F(Y) = ความกว้างของแผ่นเหล็กในแต่ละขั้น(มม.)

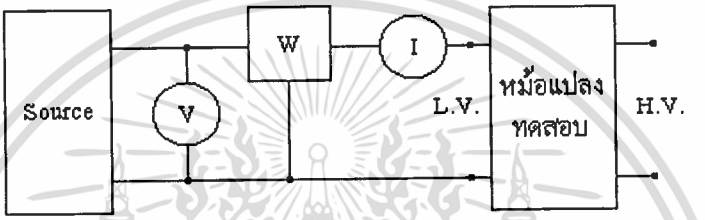
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

D = เส้นผ่าศูนย์กลางของแกนเหล็ก(มม.)

Y = ความหนาของแกนเหล็กในแต่ละขั้น(มม.)

2.5 การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าขณะไม่มีโหลด (Transformer No Load Test)

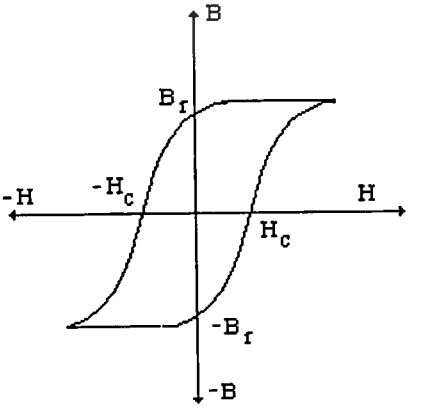
การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าขณะไม่มีโหลดเป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็กหม้อแปลงไฟฟ้าโดยมีลักษณะการทดสอบตามภาพที่ 2.8 ซึ่งค่าความสูญเสียที่ทดสอบได้ประกอบด้วยค่าความสูญเสีย 2 ส่วน คือ ค่าความสูญเสียเนื่องจากฮีสเตอร์รีซีส (Hysteresis loss) และ ค่าความสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน



ภาพที่ 2.8 วงจรการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าขณะไม่มีโหลด

2.5.1 ค่าความสูญเสียเนื่องจากฮีสเตอร์รีซีส (Hysteresis loss)

ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างง B กับ H ในแกนเหล็กเป็นไปอย่างไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งเมื่อ H เป็นศูนย์ แต่ B ยังไม่เป็นศูนย์ซึ่งจะมีค่าเท่ากับความหนาแน่นแม่เหล็กตกค้าง (residual flux density , Br) และเมื่อเพิ่มค่า H ในทิศทางตรงกันข้ามจนถึงค่าหนึ่งเรียกว่าแรงคืนตัว(coercirve force) H_c ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กจะมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งจะมีผลให้ความสัมพันธ์ระหว่าง B กับ H เป็น loop เรียกว่า Hysteresis Loop ดังแสดงในภาพที่ 2.9 การเกิดLoop ที่คงที่จะต้องป้อนไฟฟ้ากระแสสลับซ้ำๆกัน หลายคาบถึงจะได้loop ที่ซ้ำกันและที่ค่า B_m แต่ละค่าจะได้ค่า B_r และ H_cที่แตกต่างกัน พลังงานที่สะสมเพิ่มขึ้นในวงจรแม่เหล็กหาได้จาก



ภาพที่ 2.9 ภาพ Hysteresis Loop

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 ค่าความสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน

เป็นค่าความสูญเสียอันเนื่องมาจากกระแสไหลวน(eddy current) โดยเหตุที่ทำให้เกิดกระแสไหลวนเพราะมีสนามแม่เหล็กที่มีการเปลี่ยนแปลงกับเวลา ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำศักดาไฟฟ้า เมื่อแกนเหล็กเป็นตัวนำก็จะเกิดกระแสไหลเป็นผลทำให้เกิดความสูญเสียในแกนเหล็ก เรียกว่า eddy current loss

ค่าของ Hysteresis Loss (P_h) และ eddy current loss (P_e) ต่างก็เกิดขึ้นในแกนเหล็กที่ใช้เป็นวงจรแม่เหล็ก ค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันเป็นรูปคลื่นซายน์สามารถคำนวณได้ตามสมการ[9]

$$P_{core} = \left(k_1 f + k_2 f^2 \right) V^2 \tag{2.15}$$

โดยที่

P_{core} = กำลังสูญเสียในแกนเหล็ก
$k_1 f$ = กำลังสูญเสียฮีสเตอร์รีซีส
$k_2 f^2$ = กำลังสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน
V = แรงดันรูปคลื่นซายน์ของแหล่งจ่าย
k = ค่าคงที่ (กำหนดโดยคุณสมบัติของสาร)
f = ความถี่

แต่ในทางปฏิบัติการคำนวนค่าความสูญเสียของแกนเหล็ก สามารถหาได้จากน้ำหนักทั้งหมดของแกนเหล็ก และข้อมูลกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กต่อน้ำหนักของบริษัทผู้ผลิต มาทำการคำนวณโดยพิจารณาจากสมการที่ 2.16 [1] การพิจารณา ค่าความสูญเสียในทางปฏิบัติ

$$W_C = K_3 W_t W_m \tag{2.16}$$

โดยที่

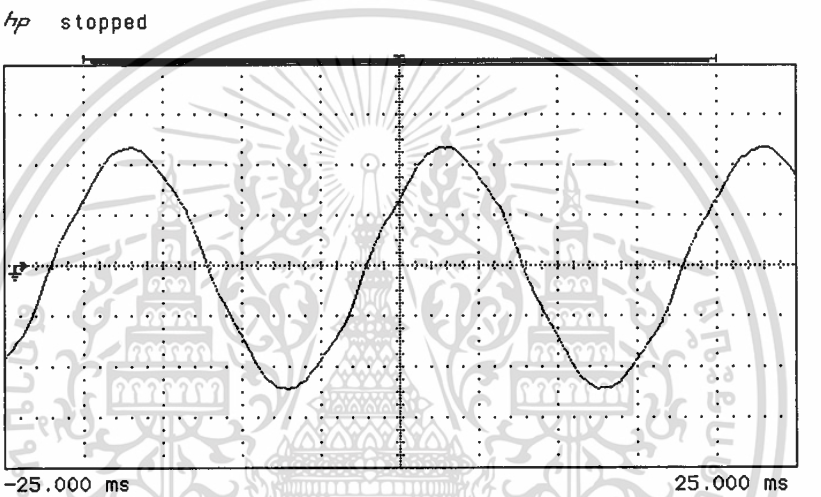
W_C = ค่าความสูญเสียของแกนเหล็ก
K_3 = แฟกเตอร์ที่ทำให้การสูญเสียขณะไม่มีโหลดเพิ่มขึ้น
W_t = น้ำหนักรวมของแกนเหล็ก
W_m = กำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กต่อน้ำหนัก (W/kg)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

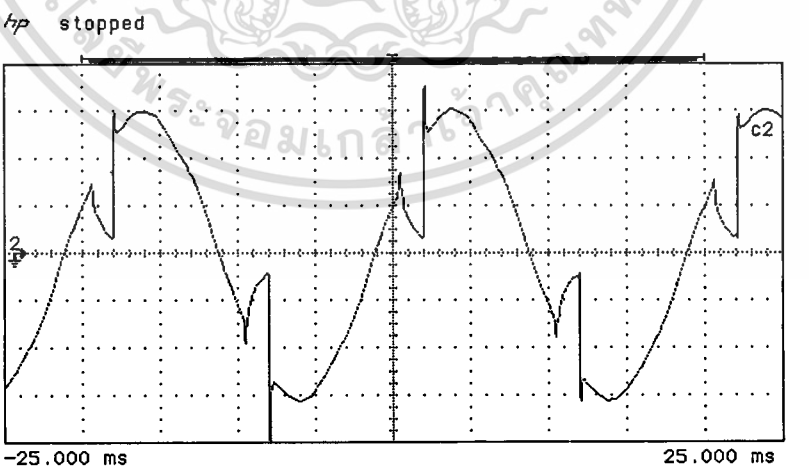
2.6 ฮาร์โมนิกส์

ฮาร์โมนิกส์เป็นคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสที่เป็นอันดับเท่าของคลื่นความถี่เดิม โดยคลื่นเดิมถูกเรียกว่า คลื่นฟันดาเมนทอล (Fundament wave form) เช่นความถี่เดิม 50 เฮิรตซ์ ฮาร์โมนิกส์ที่สองมีความถี่ 100 เฮิรตซ์

ฮาร์โมนิกส์เกิดจากอุปกรณต่างๆส่วนพหญ่เป็นเป็นอุปกรณ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear) ที่ต้องการกระแสที่เป็นช่วงๆ มากกว่าการใช้แบบต่อเนื่อง และสามารถเห็นรูปคลื่นของสัญญาณได้จากเครื่องออสซิโลสโคป ในกรณีรูปคลื่นซายน์เป็นดังภาพที่ 2.10 และเมื่อมีความผิดเพี้ยนของสัญญาณซายน์เป็นดังภาพที่ 2.11 เป็นต้น



ภาพที่ 2.10 ภาพรูปคลื่นซายน์



ภาพที่ 2.11 ภาพรูปคลื่นความผิดเพี้ยนของสัญญาณซายน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความผิดเพี้ยนของสัญญาณแรงดันสามารถหาได้จากสมการที่2.17 [13]

$$\%THDV = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\alpha} (v_n)^2}}{v_1} x100 \qquad (2.17)$$

โดยที่

V_n = ค่าแรงดันในแต่ละฮาร์โมนิกส์

V_1 = ค่าแรงดันที่ความถี่ฟันดาเมนทอล

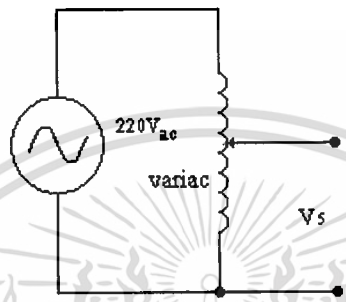
n = ลำดับฮาร์โมนิกส์

α = ลำดับสูงสุดฮาร์โมนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
แหล่งจ่ายแรงดันและการออกแบบแกนเหล็กหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบ

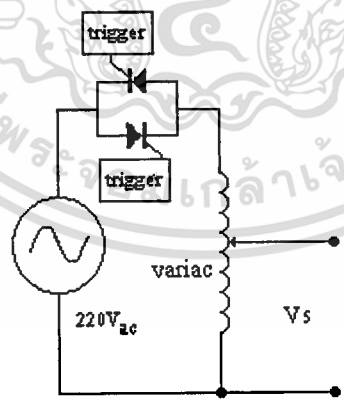
3.1 แหล่งจ่ายแรงดันเป็นรูปคลื่นซายน์



ภาพที่ 3.1 แหล่งจ่ายแรงดันเป็นรูปคลื่นซายน์

การปรับค่าแรงดันสามารถปรับที่วาริแอค (Variac) เพื่อให้ได้แรงดัน 80 โวลต์ ตามที่ได้ออกแบบไว้

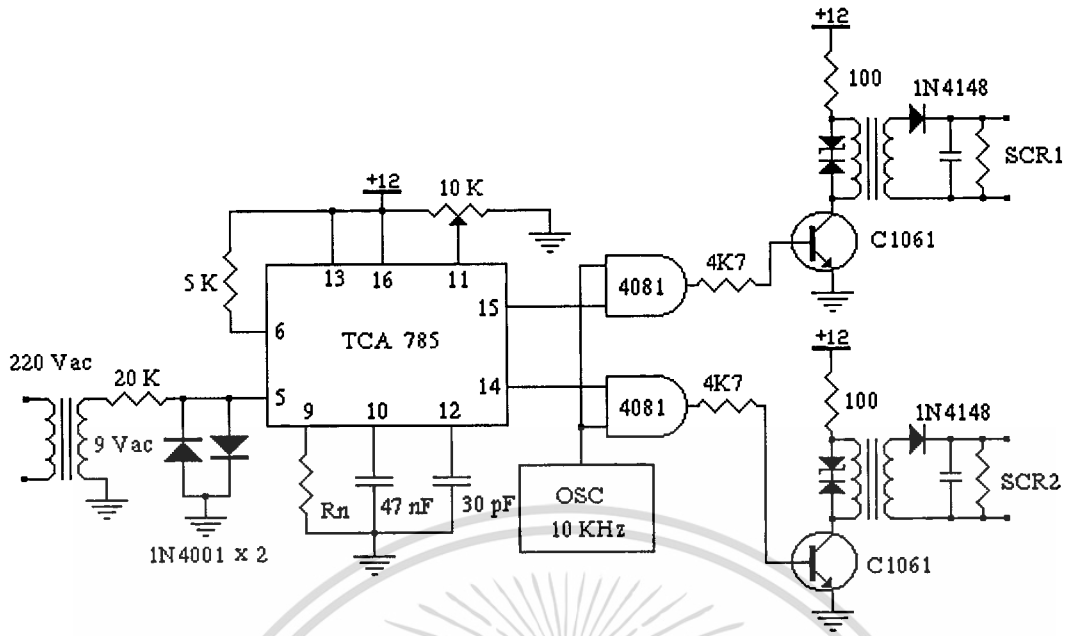
3.2 แหล่งจ่ายแรงดันไม่เป็นรูปคลื่นซายน์



ภาพที่ 3.2 แหล่งจ่ายแรงดันไม่เป็นรูปคลื่นซายน์

การปรับค่าแรงดันสามารถปรับที่วาริแอค (Variac) เพื่อให้ได้แรงดัน 80 โวลต์ เช่นเดียวกับในกรณีของรูปคลื่นซายน์ และในขณะเดียวกันสามารถปรับค่าความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นซายน์ได้ด้วยการปรับมุมนำกระแสของเอสซีอาร์ ให้ได้ความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นให้อยู่ในค่าที่ต้องการ[12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.3 วงจรทริกเกอร์

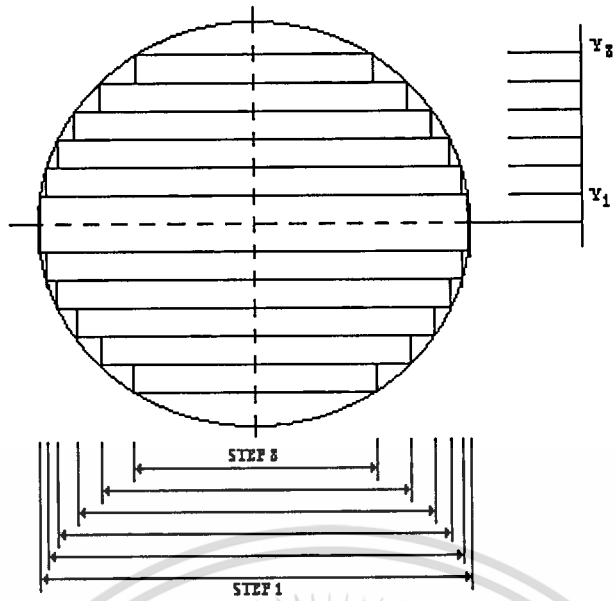
การปรับค่าความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นแรงดันสามารถกระทำได้ด้วยการปรับมุมนำกระแสของเอสซีอาร์ ที่ขึ้นอยู่กับวงจรควบคุมการนำกระแสตามภาพที่ 3.3 โดยมีไอซีเบอร์ TCA 785 ควบคุมเฟสของสัญญาณรงดันในช่วงบวกและลบ ตามการปรับค่าความต้านทาน ทำให้สามารถควบคุมมุมการนำกระแสของเอสซีอาร์ ที่ค่าต่างๆได้ และทำให้เกิดความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นแรงดันตามที่ต้องการ ส่วนการปรับขนาดของรูปคลื่นแรงดันสามารถปรับที่วาริแอค (Variac) เช่นเดียวกับรูปคลื่นที่เป็นซายน์

3.3 แกนเหล็กที่ใช้ในการทดสอบ

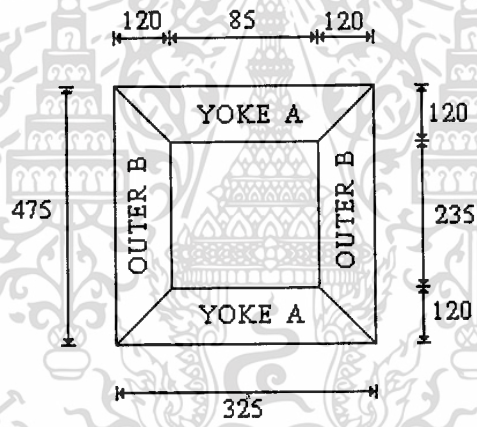
พิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้าที่สร้างขึ้นใช้ในการทดสอบมีดังนี้

1. ขนาด 30 kVA 1ph 50Hz 22kV-160/80V
2. เหล็กซิลิคอนชนิด M4 และ ความหนา 0.27 มิลลิเมตร
3. ความหนาแน่นของแผ่นเหล็ก 7.65 kg/dm^3
4. น้ำหนัก 102.5 กิโลกรัม
5. มีขนาดพื้นที่หน้าตัดแกน 116.24 ตารางเซ็นติเมตร
6. ความกว้าง 325 มิลลิเมตร
7. ความยาว 475 มิลลิเมตร
8. จำนวนรอบ 31 รอบ
9. จำนวนขั้นของการเรียงแผ่นเหล็ก 8 ขั้น

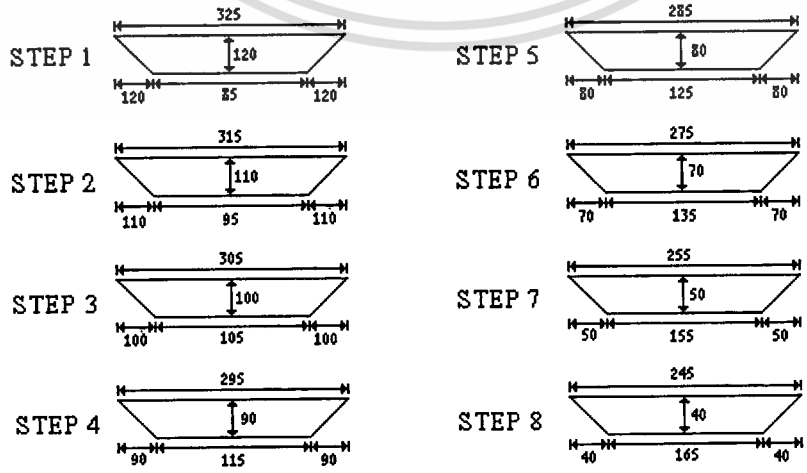
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.4 การเรียงแผ่นเหล็กเป็นขั้นของแกนเหล็กที่ใช้ในการทดสอบ

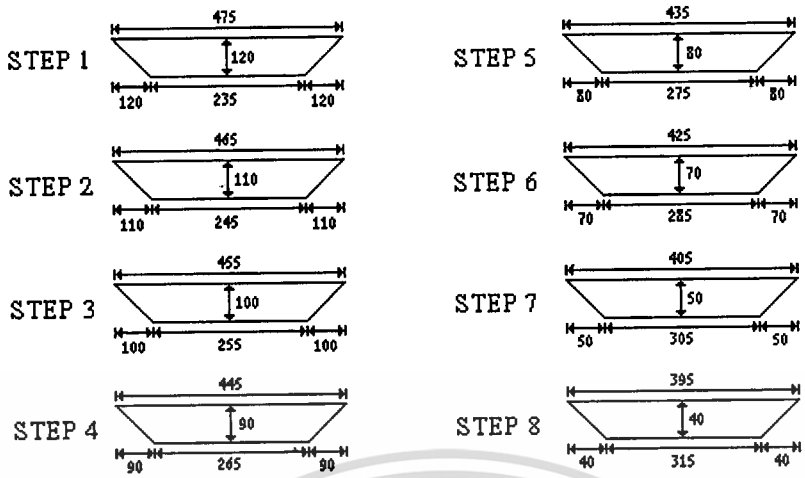


ภาพที่ 3.5 ขนาดของแกนเหล็กที่ใช้ในการทดสอบ



ภาพที่ 3.6 ขนาดของแผ่นเหล็กในแต่ละขั้นของ YOKE A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.7 ขนาดของแผ่นเหล็กในแต่ละขั้นของ OUTER B

ตารางที่ 3.1 ค่าความต้านทานของขดลวดที่ใช้ในการทดสอบ

Flux density (Tesla)	ค่าความต้านทานของขดลวด(Ohm)
0.99	0.115
1.03	0.111
1.06	0.107
1.10	0.103
1.14	0.099
1.19	0.095
1.23	0.091
1.29	0.087
1.34	0.083
1.40	0.079
1.47	0.075
1.54	0.071
1.63	0.067
1.72	0.063

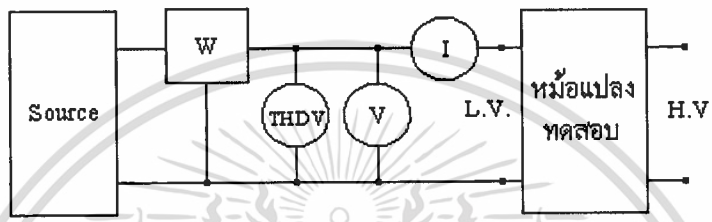
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

วิธีการทดสอบและผลการทดสอบ

4.1 วิธีการทดสอบ

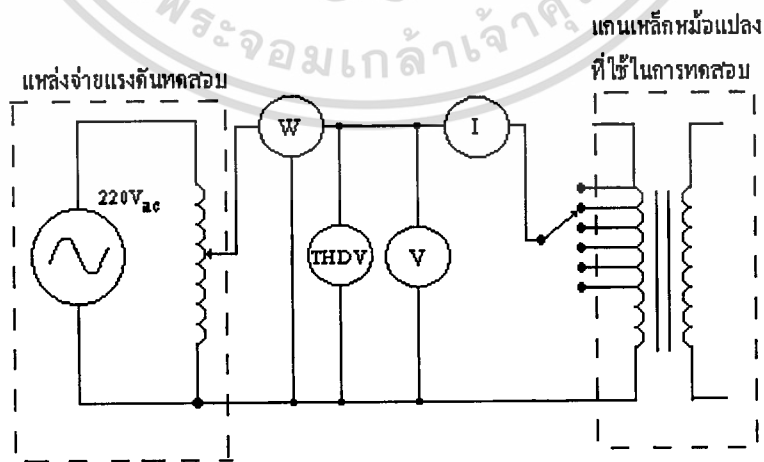
วิธีการทดสอบในวิทยานิพนธ์มีการทดสอบ 2 กรณี คือ การทดสอบในกรณีที่แหล่งจ่ายแรงดันเป็นรูปคลื่นซายน์ และ การทดสอบในกรณีที่แหล่งจ่ายแรงดันไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ซึ่งทั้ง 2 กรณีมีวงจรการทดสอบดังภาพที่ 4.1



ภาพที่ 4.1 วงจรที่ใช้ทดสอบในวิทยานิพนธ์

พิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้าที่สร้างขึ้นใช้ในการทดสอบขนาด 30 kVA 1ph 50Hz 22kV-160/80V เหล็กซิลิคอนชนิด M4 ความหนา 0.27 ม.ม. ความหนาแน่น 7.65 kg/dm^3 น้ำหนัก 102.5 กิโลกรัม

4.1.1 วิธีการทดสอบในกรณีที่แหล่งจ่ายแรงดันเป็นรูปคลื่นซายน์

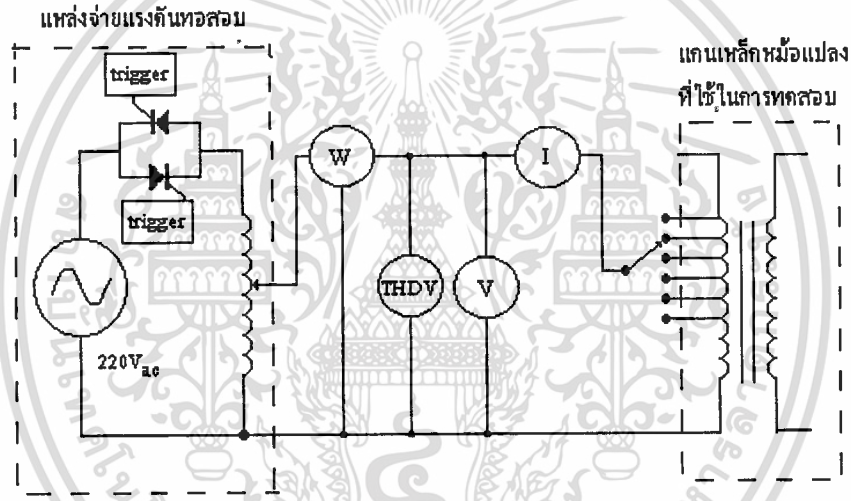


ภาพที่ 4.2 วงจรที่ใช้การทดสอบในกรณีที่แหล่งจ่ายแรงดันเป็นรูปคลื่นซายน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทดสอบวิธีนี้เป็นการทดสอบหาค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นในหม้อแปลง โดยการกำหนดค่าของความหนาแน่นฟลั๊กซ์ให้มีค่าต่างๆตามการเปลี่ยนแปลงตามมาตรฐานของบริษัทผู้ผลิต สามารถทำได้โดยการกำหนดให้ขนาดของแรงดันที่ความถี่หลักมีค่าเท่ากับ 80 โวลต์ ตลอดช่วงการทดสอบ และปรับเปลี่ยนจำนวนรอบของหม้อแปลงเพื่อให้ได้ความหนาแน่นฟลั๊กซ์ต่างๆ ให้มีค่าอยู่ในช่วง 1.00 เทสลา ถึง 1.72 เทสลา บันทึกค่า แรงดันประสิทธิผล (V_{RMS}) กระแสประสิทธิผล (I_{RMS}) กำลังไฟฟ้า (W) และ เมื่อได้ค่าต่างๆ นำไปคำนวณเพื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานของบริษัทผู้ผลิตแผ่นเหล็ก และ หาสมการความสัมพันธ์ที่นำไปใช้หาค่ากำลังสูญเสียของหม้อแปลงเครื่องต่อๆไป

4.1.2 วิธีการทดสอบในกรณีที่แหล่งจ่ายแรงดันไม่เป็นรูปคลื่นซายน์



ภาพที่ 4.3 วงจรที่ใช้การทดสอบในกรณีที่แหล่งจ่ายแรงดันไม่เป็นรูปคลื่นซายน์

ในการทดสอบได้ทำการทดสอบเช่นเดียวกับการทดสอบในกรณีที่แหล่งจ่ายแรงดันเป็นรูปคลื่นซายน์ มีสิ่งที่แตกต่างคือแหล่งจ่ายแรงดันต้องปรับค่าความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นซายน์ให้มีค่าต่างๆ จนถึงค่าความผิดเพี้ยน 50 เปอร์เซ็นต์ (THDV = 50%) โดยการปรับมุมนำกระแสของ SCR เพื่อให้เกิดความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นซายน์ เป็นแหล่งจ่ายแรงดันเพื่อใช้ในการทดสอบ

ในการบันทึกค่ากำลังไฟฟ้าทั้งสองกรณีลงในตารางบันทึกผลการทดสอบได้ทำการนำค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดขึ้นบนขดลวดลบออกจากค่าที่ได้จากเครื่องมือทดสอบเรียบร้อยแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 4.4 การต่อวงจรที่ใช้ในการทดสอบจริง

เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

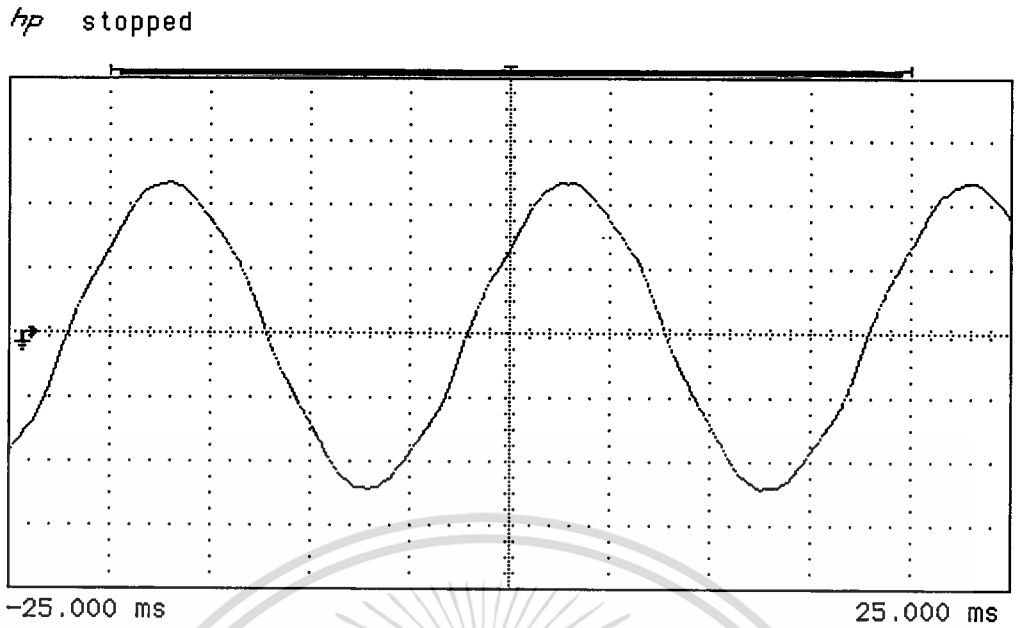
1. ออสซิลโลสโคปรุ่น Hewlett Packard 54540A ใช้บันทึกภาพสัญญาณแรงดันที่ใช้ในการทดสอบ
2. ออสซิลโลสโคปรุ่น Analyzing Recorder Yokogawa AR1100A ใช้บันทึกภาพสเปกตรัมของสัญญาณแรงดันที่ใช้ในการทดสอบ
3. แคลมป์มิเตอร์รุ่น Harmonic Power Meter (F27) ของบริษัท Chauvin Arnoux ใช้บันทึกค่าต่างๆที่ทดสอบ

4.2 ผลการทดสอบ

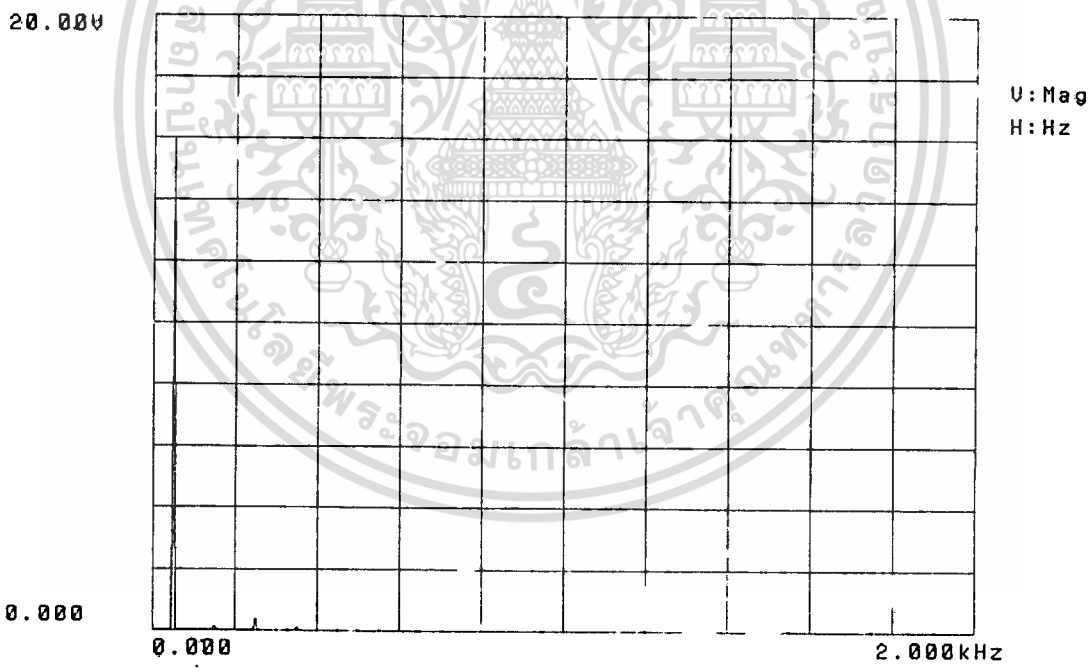
4.2.1 ผลการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบเป็นรูปคลื่นซายน์

พิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้าที่สร้างขึ้นใช้ในการทดสอบขนาด 30 kVA 1ph 50Hz 22kV-160/80V เหล็กซิลิคอนชนิด M4 ความหนา 0.27 ม.ม. ความหนาแน่น 7.65 kg/dm^3 น้ำหนัก 102.5 กิโลกรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

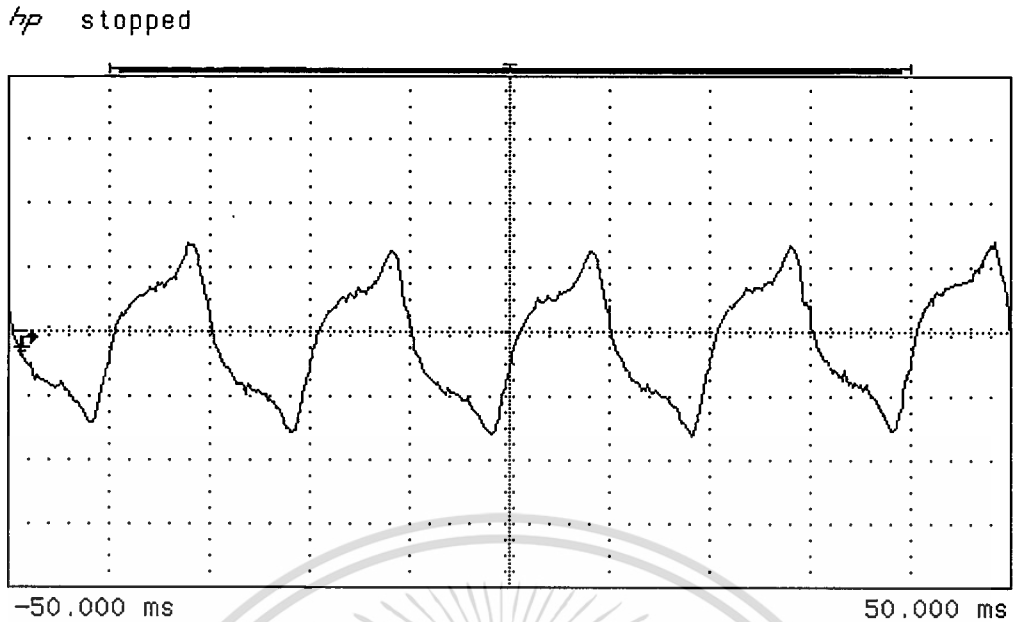


ภาพที่ 4.5 สัญญาณแรงดันทดสอบรูปคลื่นซายน์



ภาพที่ 4.6 สเปกตรัมแรงดันฮาร์โมนิกส์ของสัญญาณแรงดันทดสอบรูปคลื่นซายน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

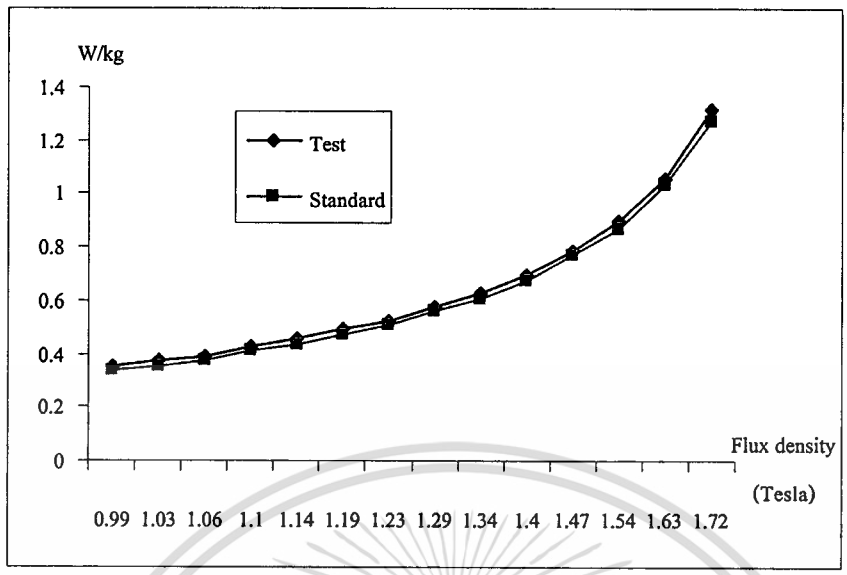


ภาพที่ 4.7 สัญญาณกระแสในวงจรการทดสอบรูปคลื่นซายน์ ที่ความหนาแน่นฟลักซ์ 0.99 เทสลา

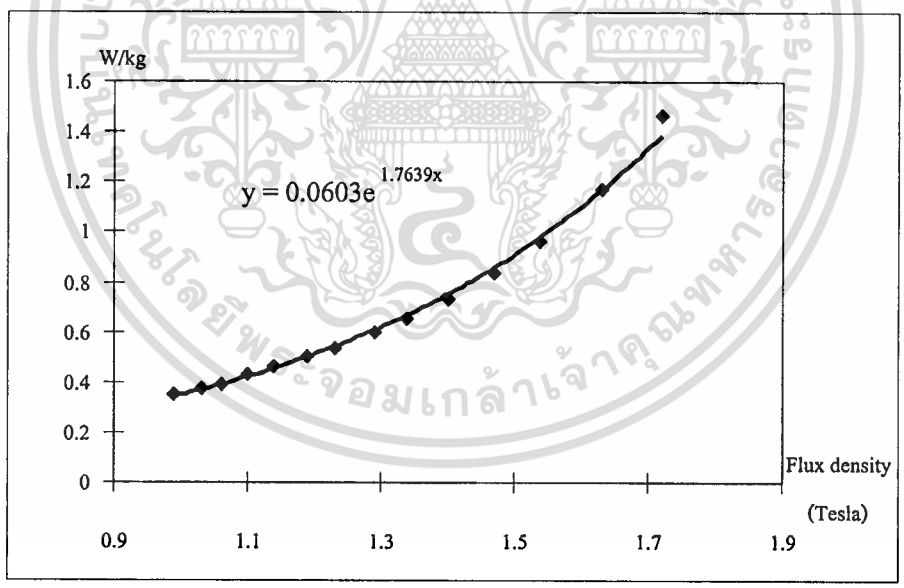
ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบที่แหล่งจ่ายแรงดันทดสอบเป็นรูปคลื่นซายน์

Flux density (Tesla)	แรงดัน (V)	กระแส (A)	กำลังไฟฟ้า (W)
0.99	79.9	1.04	35.85
1.03	79.9	1.15	38.01
1.06	80.0	1.36	39.81
1.10	80.0	1.59	43.88
1.14	79.8	1.86	46.91
1.19	79.8	2.28	50.71
1.23	80.0	2.79	54.00
1.29	80.0	3.45	59.22
1.34	79.8	4.13	64.69
1.40	79.8	5.26	71.55
1.47	79.9	6.64	80.87
1.54	79.9	8.40	92.04
1.63	80.4	12.72	108.14
1.72	80.3	22.65	134.91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.8 การเปรียบเทียบค่าความสูญเสียของแกนเหล็ก (W/kg) ระหว่างค่าที่ได้จากการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันเป็นรูปคลื่นซายน์กับค่าที่ได้จากบริษัทผู้ผลิต



ภาพที่ 4.9 ค่าความสัมพันธ์ระหว่าง W/kg และ Flux density ในรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบเป็นรูปคลื่นซายน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

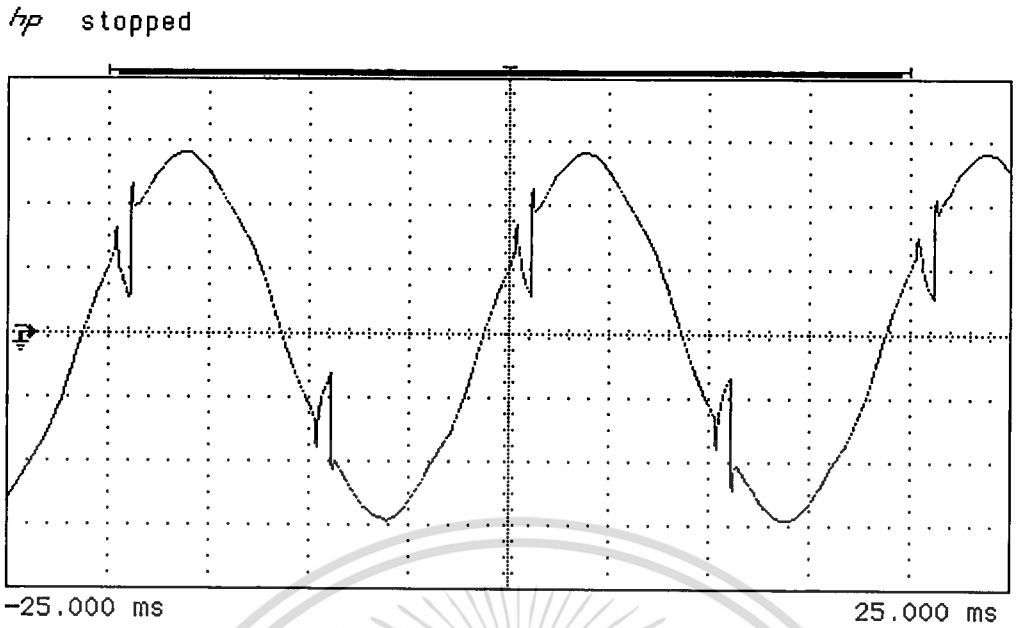
ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบค่าความสูญเสียระหว่างข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิตกับข้อมูลจากการทดสอบที่แหล่งจ่ายแรงดันทดสอบเป็นรูปคลื่นซายน์

Flux density (Tesla)	W/kg (%)
0.99	4.22
1.03	4.27
1.06	3.45
1.10	4.23
1.14	4.95
1.19	5.00
1.23	3.19
1.29	3.07
1.34	3.34
1.40	3.30
1.47	2.40
1.54	3.12
1.63	2.37
1.72	3.51

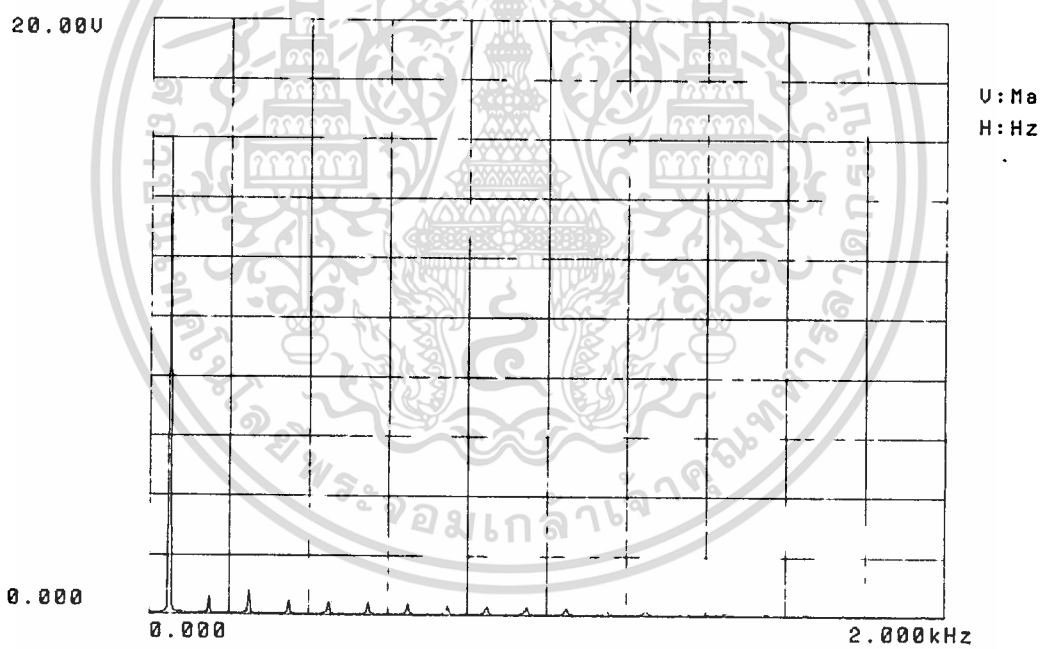
4.2.2 ผลการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 10 เปอร์เซ็นต์

พิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้าที่สร้างขึ้นใช้ในการทดสอบขนาด 30 kVA 1ph 50Hz 22kV-160/80V เหล็กซิลิคอนชนิด M4 ความหนา 0.27 ม.ม. ความหนาแน่น 7.65 kg/dm^3 น้ำหนัก 102.5 กิโลกรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

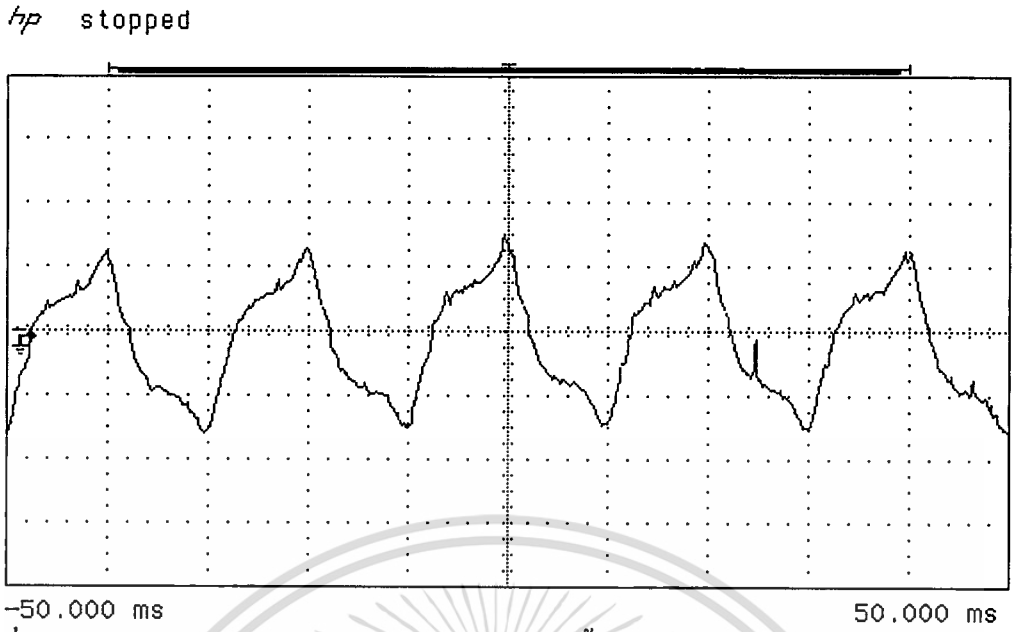


ภาพที่ 4.10 สัญญาณแรงดันทดสอบไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 10 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 4.11 สเปกตรัมแรงดันฮาร์โมนิกส์ของสัญญาณแรงดันทดสอบไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 10 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

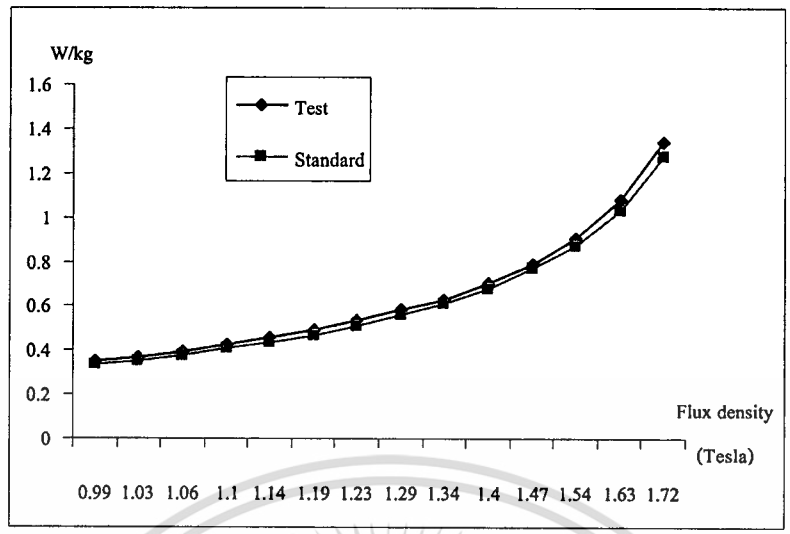


ภาพที่ 4.12 สัญญาณกระแสในวงจรทดสอบ ความผิดเพี้ยนของสัญญาณแรงดัน 10 เปอร์เซ็นต์ ที่ความหนาแน่นฟลั๊กซ์ 0.99 เทสลา

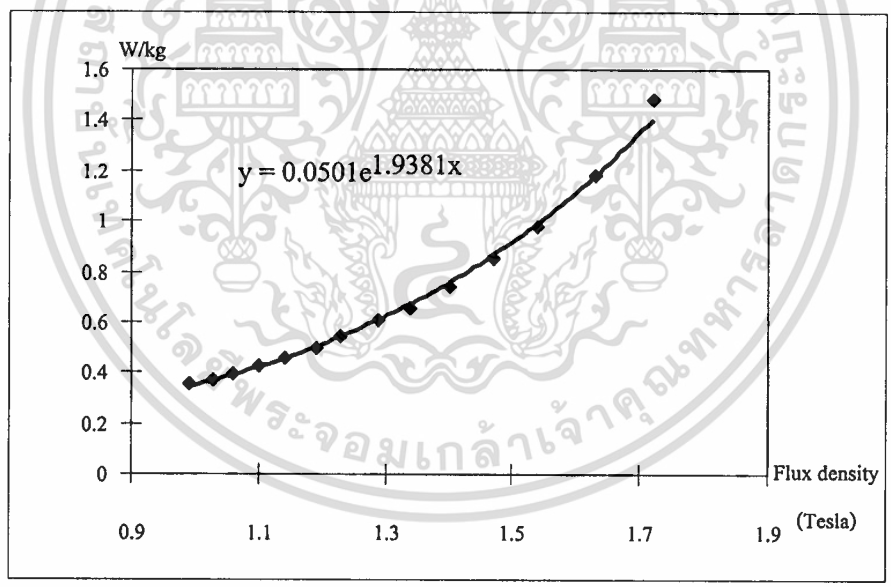
ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 10 เปอร์เซ็นต์

Flux density (Tesla)	แรงดัน (V)	กระแส (A)	กำลังไฟฟ้า (W)
0.99	80.8	1.02	36.06
1.03	80.9	1.15	38.11
1.06	81.0	1.37	40.21
1.10	80.7	1.59	43.98
1.14	81.2	1.95	46.84
1.19	80.8	2.30	50.29
1.23	80.7	2.82	54.67
1.29	80.7	3.42	59.75
1.34	80.7	4.30	64.65
1.40	80.7	5.40	71.73
1.47	80.7	6.86	80.78
1.54	81.2	8.93	92.33
1.63	80.8	12.91	111.10
1.72	80.9	22.81	136.99

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.13 การเปรียบเทียบค่าความสูญเสียของแกนเหล็ก (W/kg) ระหว่างค่าที่ได้จากการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 10 เปอร์เซ็นต์ กับค่าที่ได้จากบริษัทผู้ผลิตรูปคลื่นซายน์



ภาพที่ 4.14 ค่าความสัมพันธ์ระหว่าง W/kg และ Flux density ในรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 10 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

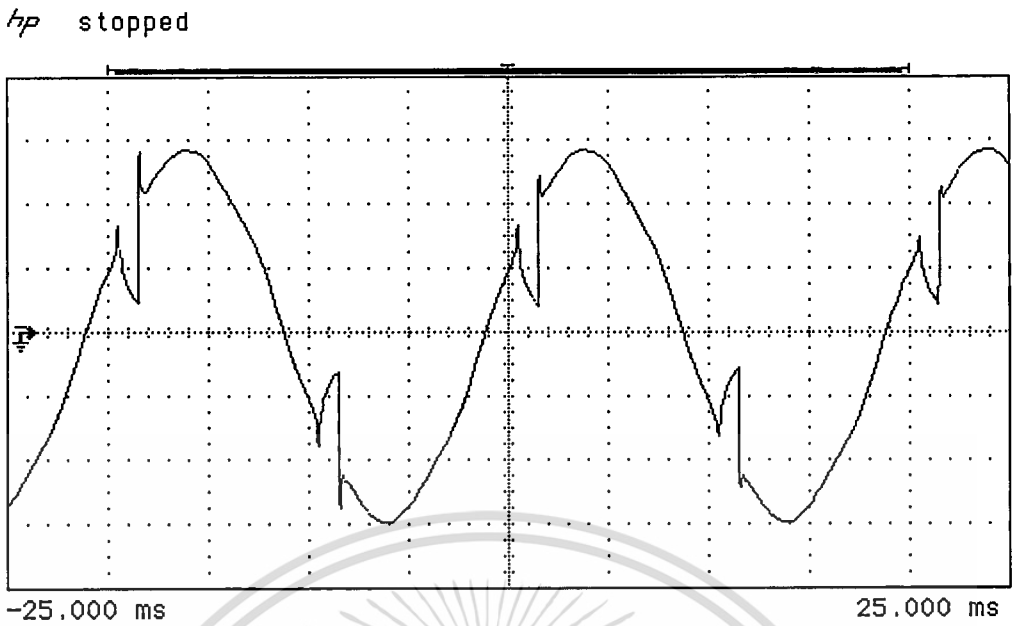
ตารางที่ 4.4 เปอร์เซ็นต์เปรียบเทียบค่าความสูญเสียระหว่างข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิตกับข้อมูลจากการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 10 เปอร์เซ็นต์

Flux density (Tesla)	W/kg (%)
0.99	4.78
1.03	4.52
1.06	4.40
1.10	4.45
1.14	4.81
1.19	4.21
1.23	4.38
1.29	3.94
1.34	3.29
1.40	3.54
1.47	2.30
1.54	3.41
1.63	4.97
1.72	4.98

4.2.3 ผลการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 15 เปอร์เซ็นต์

พิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้าที่สร้างขึ้นใช้ในการทดสอบขนาด 30 kVA 1ph 50Hz 22kV-160/80V เหล็กซิลิคอนชนิด M4 ความหนา 0.27 ม.ม. ความหนาแน่น 7.65 kg/dm^3 น้ำหนัก 102.5 กิโลกรัม

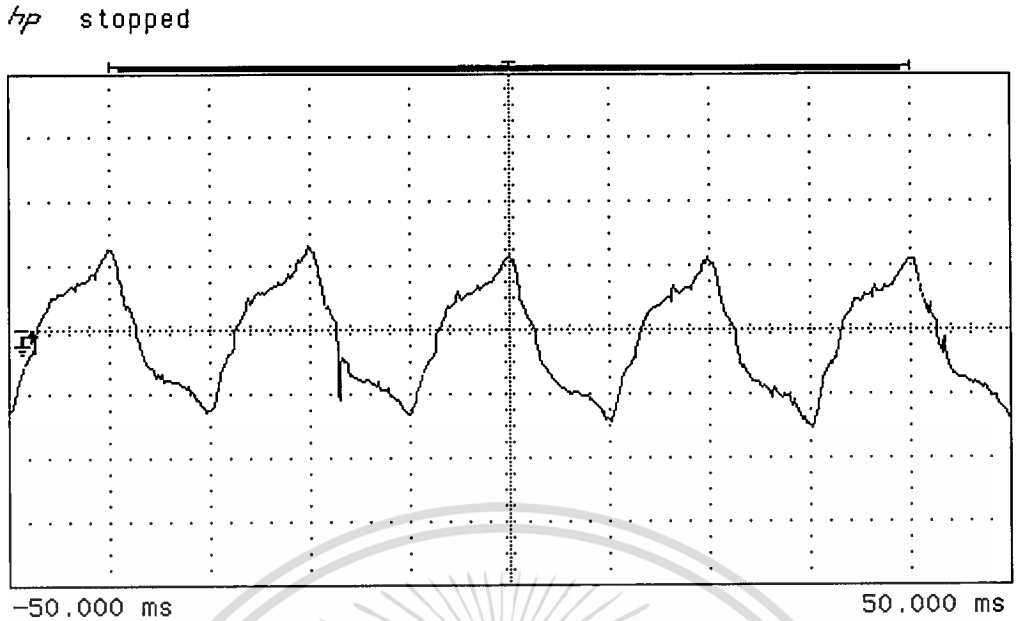
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.15 สัญญาณแรงดันทดสอบไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 15 เปอร์เซ็นต์

ภาพที่ 4.16 สเปกตรัมแรงดันฮาร์โมนิกส์ของสัญญาณแรงดันทดสอบไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 15 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

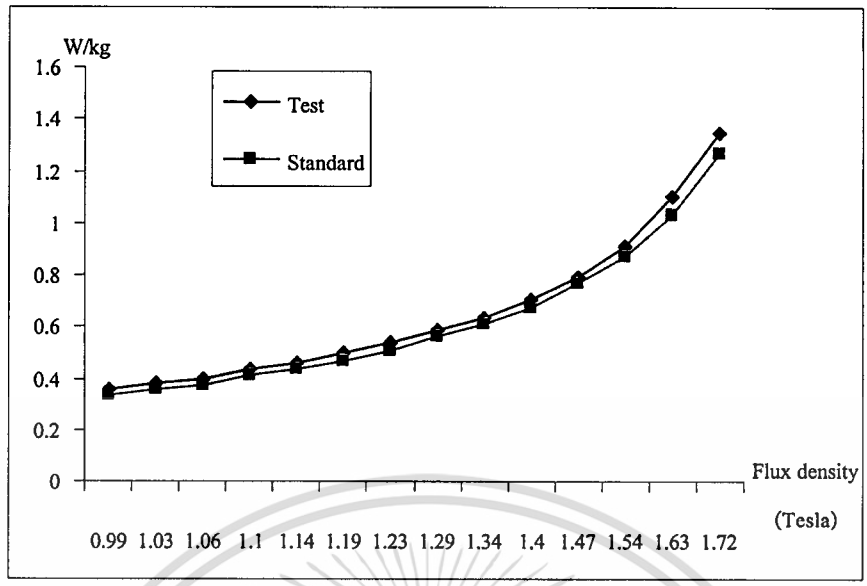


ภาพที่ 4.17 สัญญาณกระแสในวงจรทดสอบ ความผิดเพี้ยนของสัญญาณแรงดัน 15 เปอร์เซ็นต์ ที่ความหนาแน่นฟลั๊กซ์ 0.99 เทสลา

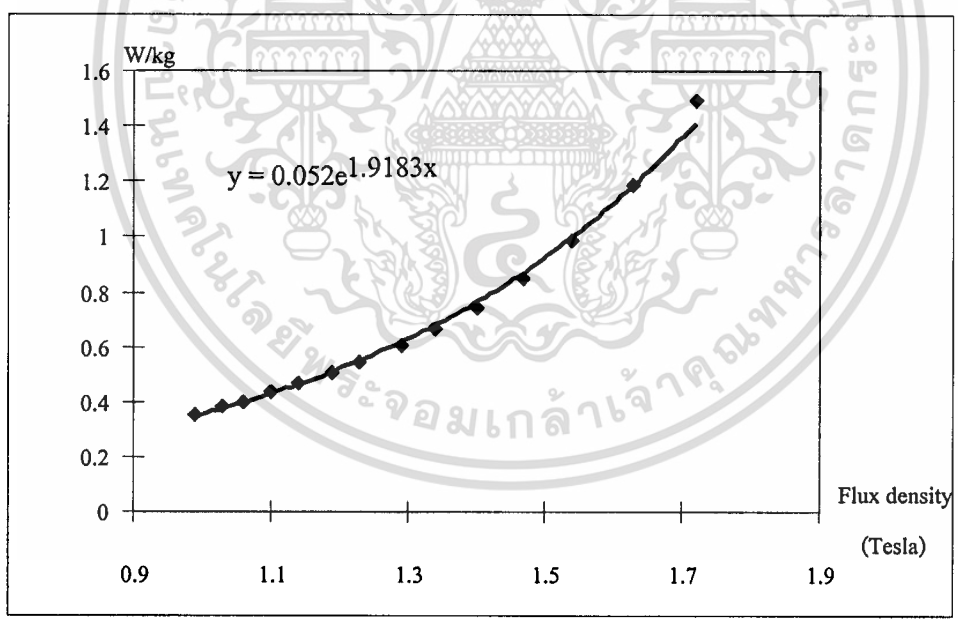
ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบที่แหล่งจ่ายแรงดันทดสอบไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 15 เปอร์เซ็นต์

Flux density (Tesla)	แรงดัน (V)	กระแส (A)	กำลังไฟฟ้า (W)
0.99	81.4	1.04	36.25
1.03	81.5	1.19	38.79
1.06	81.5	1.35	40.72
1.10	81.3	1.58	44.69
1.14	81.7	1.88	47.39
1.19	81.8	2.32	51.18
1.23	81.5	2.73	55.16
1.29	81.5	3.49	60.17
1.34	81.7	4.31	65.23
1.40	81.5	5.43	72.18
1.47	81.4	6.70	81.56
1.54	81.5	8.88	93.61
1.63	81.3	12.87	112.76
1.72	81.4	22.76	137.86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.18 การเปรียบเทียบค่าความสูญเสียของแกนเหล็ก (W/kg) ระหว่างค่าที่ได้จากการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 15 เปอร์เซ็นต์ กับค่าที่ได้จากบริษัทผู้ผลิตรูปคลื่นซายน์



ภาพที่ 4.19 ค่าความสัมพันธ์ระหว่าง W/kg และ Flux density ในรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 15 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

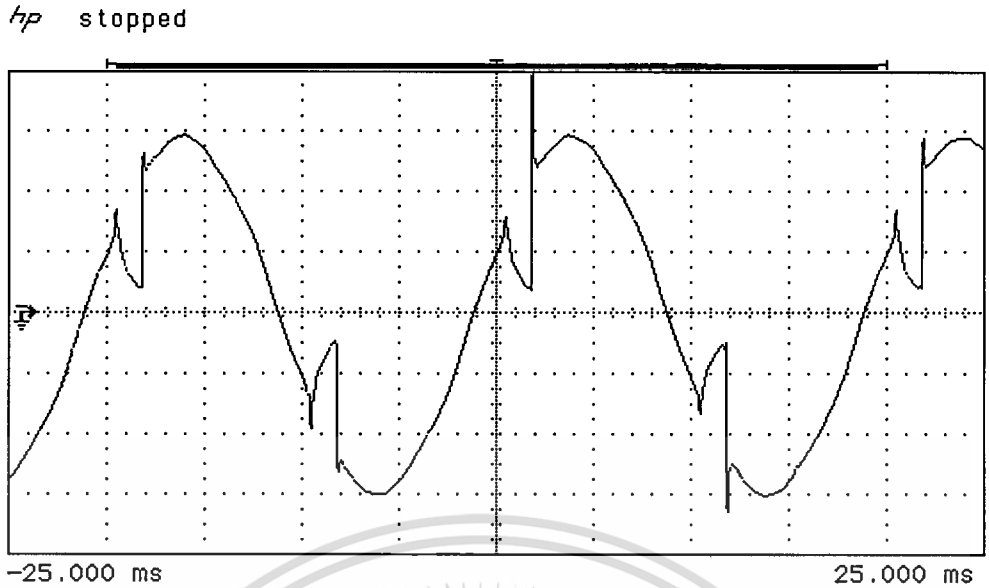
ตารางที่ 4.6 เปอร์เซ็นต์เปรียบเทียบค่าความสูญเสียระหว่างข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิตกับข้อมูลจากการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 15 เปอร์เซ็นต์

Flux density (Tesla)	W/kg (%)
0.99	5.28
1.03	6.19
1.06	5.60
1.10	5.96
1.14	5.92
1.19	5.87
1.23	5.23
1.29	4.60
1.34	4.15
1.40	4.14
1.47	3.24
1.54	4.74
1.63	6.37
1.72	5.57

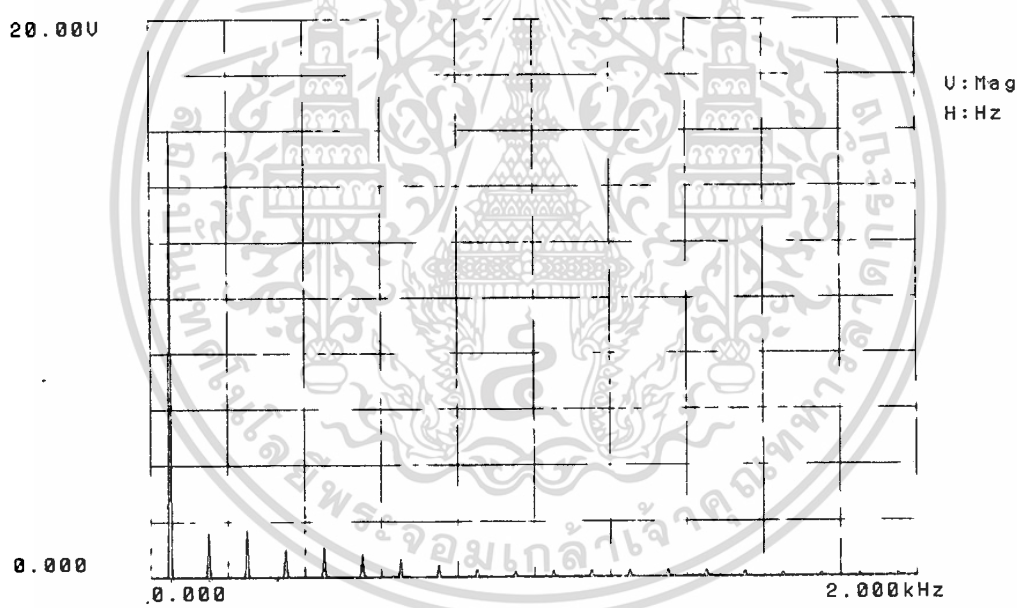
4.2.4 ผลการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 20 เปอร์เซ็นต์

พิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้าที่สร้างขึ้นใช้ในการทดสอบขนาด 30 kVA 1ph 50Hz 22kV-160/80V เหล็กซิลิคอนชนิด M4 ความหนา 0.27 ม.ม. ความหนาแน่น 7.65 kg/dm^3 น้ำหนัก 102.5 กิโลกรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

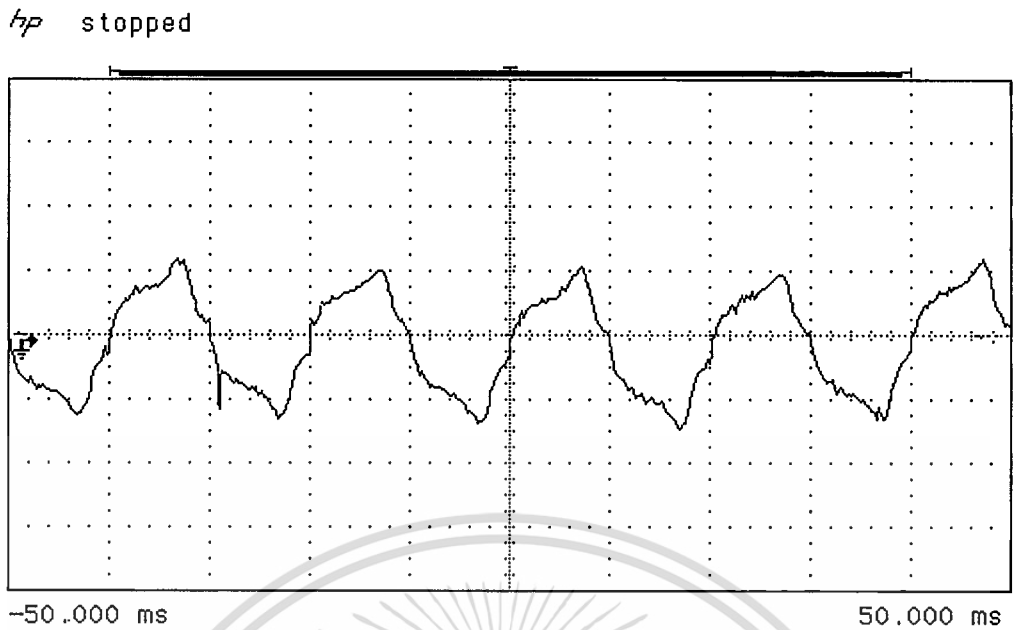


ภาพที่ 4.20 สัญญาณแรงดันทดสอบไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 20 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 4.21 สเปกตรัมแรงดันฮาร์โมนิกส์ของสัญญาณแรงดันทดสอบไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 20 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

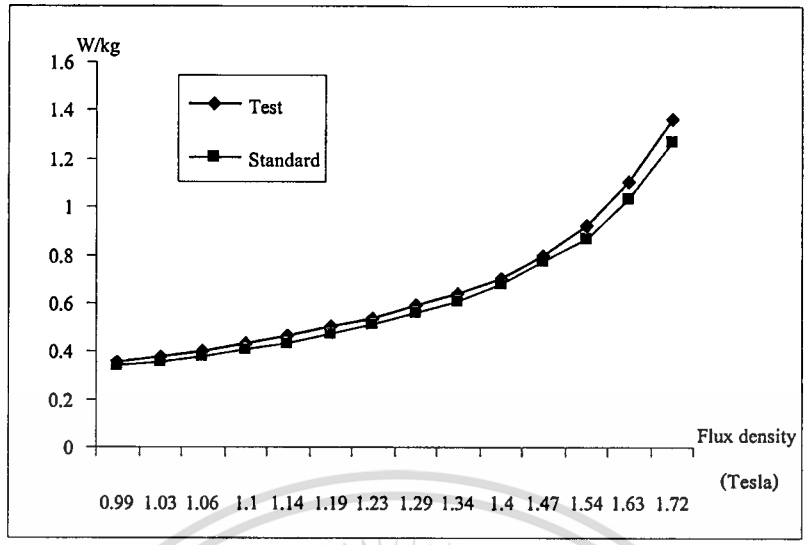


ภาพที่ 4.22 สัญญาณกระแสในวงจรทดสอบ ความผิดเพี้ยนของสัญญาณแรงดัน 20 เปอร์เซ็นต์ ที่ความหนาแน่นฟลั๊กซ์ 0.99 เทสลา

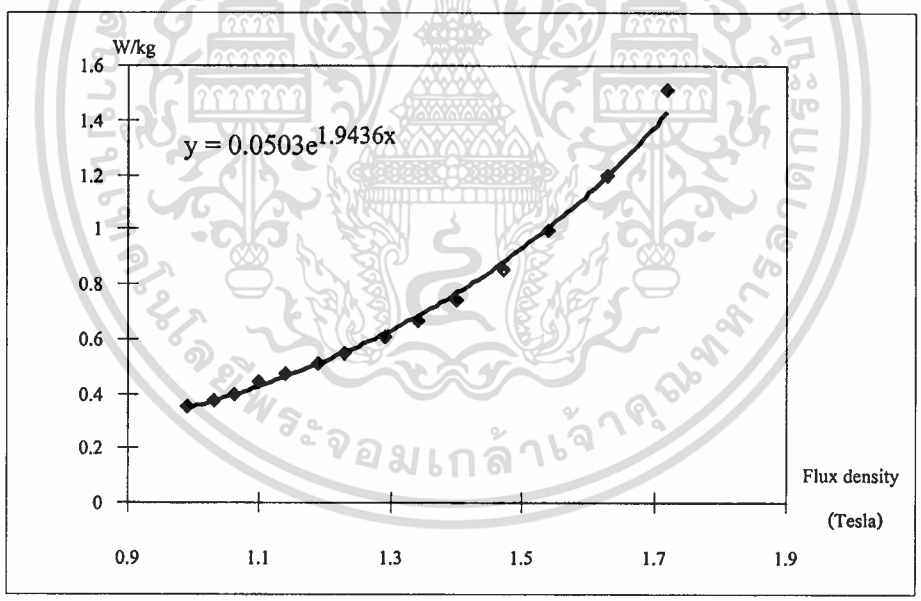
ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบที่แหล่งจ่ายแรงดันทดสอบไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 20 เปอร์เซ็นต์

Flux density (Tesla)	แรงดัน (V)	กระแส (A)	กำลังไฟฟ้า (W)
0.99	82.2	1.04	36.35
1.03	82.1	1.18	38.59
1.06	82.2	1.35	41.12
1.10	82.3	1.58	44.79
1.14	82.3	1.86	47.81
1.19	82.2	2.25	51.64
1.23	82.4	2.77	55.22
1.29	82.3	3.50	60.56
1.34	82.2	4.31	65.73
1.40	82.0	5.37	72.17
1.47	82.2	6.81	82.66
1.54	82.1	8.81	94.74
1.63	82.1	13.01	113.34
1.72	82.2	22.78	139.53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.23 การเปรียบเทียบค่าความสูญเสียของแกนเหล็ก (W/kg) ระหว่างค่าที่ได้จากการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 20 เปอร์เซ็นต์ กับค่าที่ได้จากบริษัทผู้ผลิตรูปคลื่นซายน์



ภาพที่ 4.24 ค่าความสัมพันธ์ระหว่าง W/kg และ Flux density ในรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 20 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

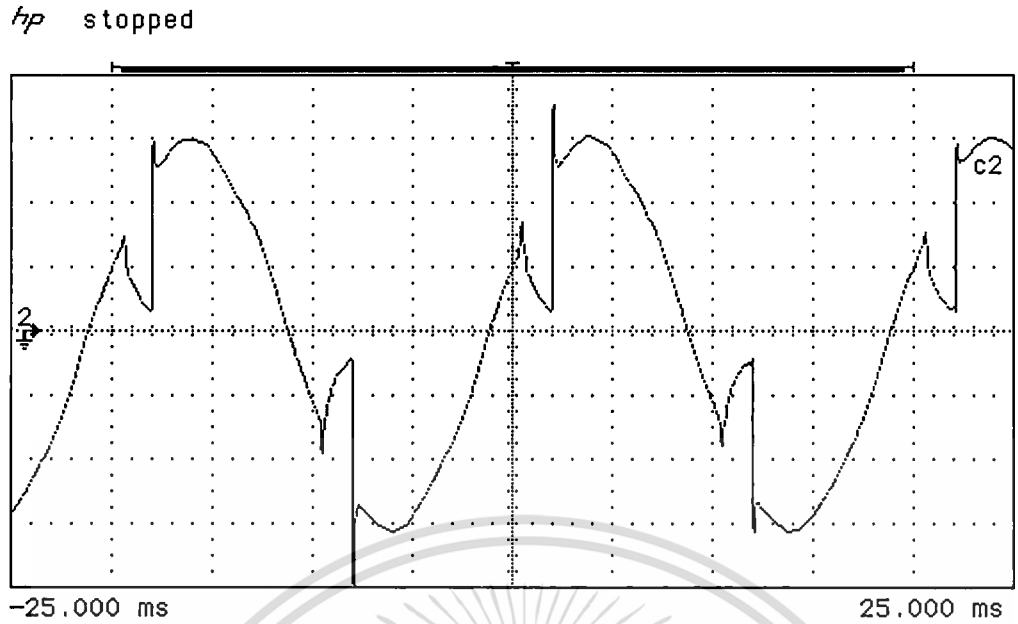
ตารางที่ 4.8 เปอร์เซ็นต์เปรียบเทียบค่าความสูญเสียระหว่างข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิตกับข้อมูลจากการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 20 เปอร์เซ็นต์

Flux density (Tesla)	W/kg (%)
0.99	5.54
1.03	5.72
1.06	6.52
1.10	6.17
1.14	6.74
1.19	6.71
1.23	5.33
1.29	5.21
1.34	4.88
1.40	4.14
1.47	4.52
1.54	5.87
1.63	6.85
1.72	6.71

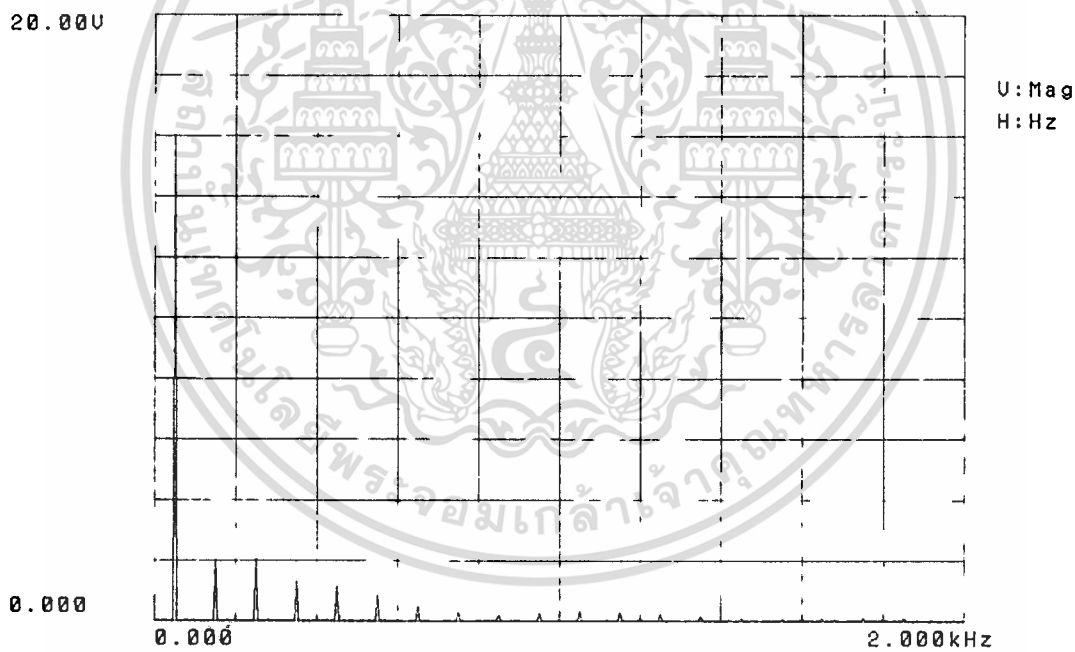
4.2.5 ผลการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 25 เปอร์เซ็นต์

พิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้าที่สร้างขึ้นใช้ในการทดสอบขนาด 30 kVA 1ph 50Hz 22kV-160/80V เหล็กซิลิคอนชนิด M4 ความหนา 0.27 ม.ม. ความหนาแน่น 7.65 kg/dm^3 น้ำหนัก 102.5 กิโลกรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

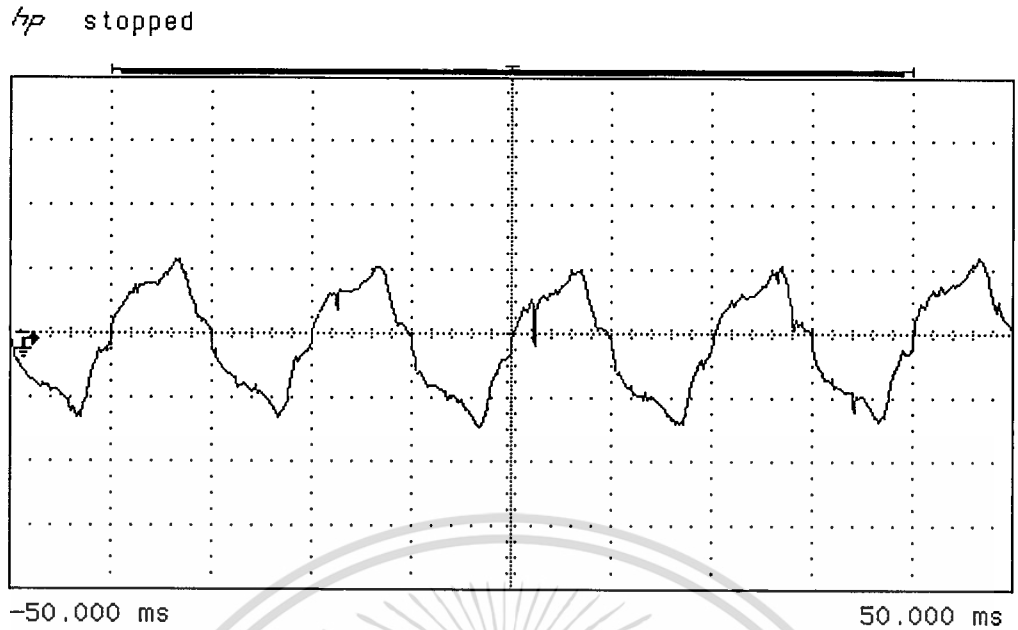


ภาพที่ 4.25 สัญญาณแรงดันทดสอบไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 25 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 4.26 สเปกตรัมแรงดันฮาร์โมนิกส์ของสัญญาณแรงดันทดสอบไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 25 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

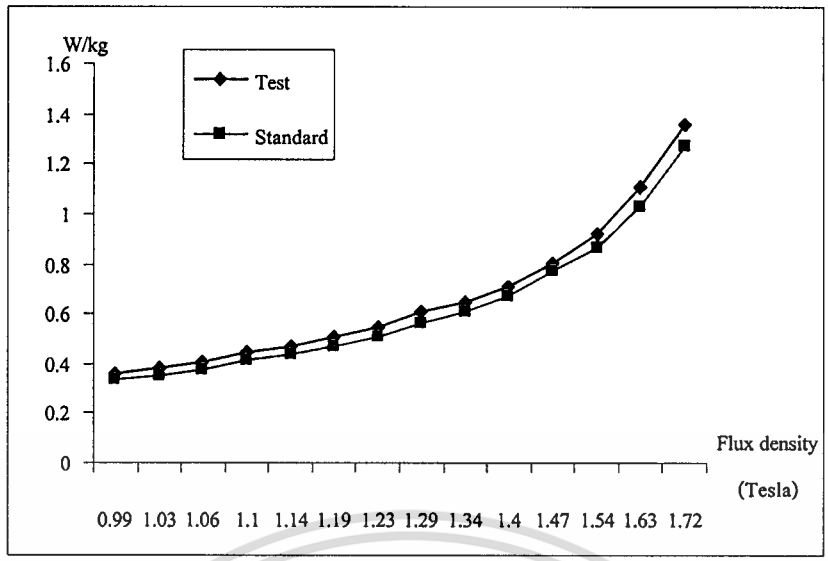


ภาพที่ 4.27 สัญญาณกระแสในวงจรทดสอบ ความผิดเพี้ยนของสัญญาณแรงดัน 25 เปอร์เซ็นต์

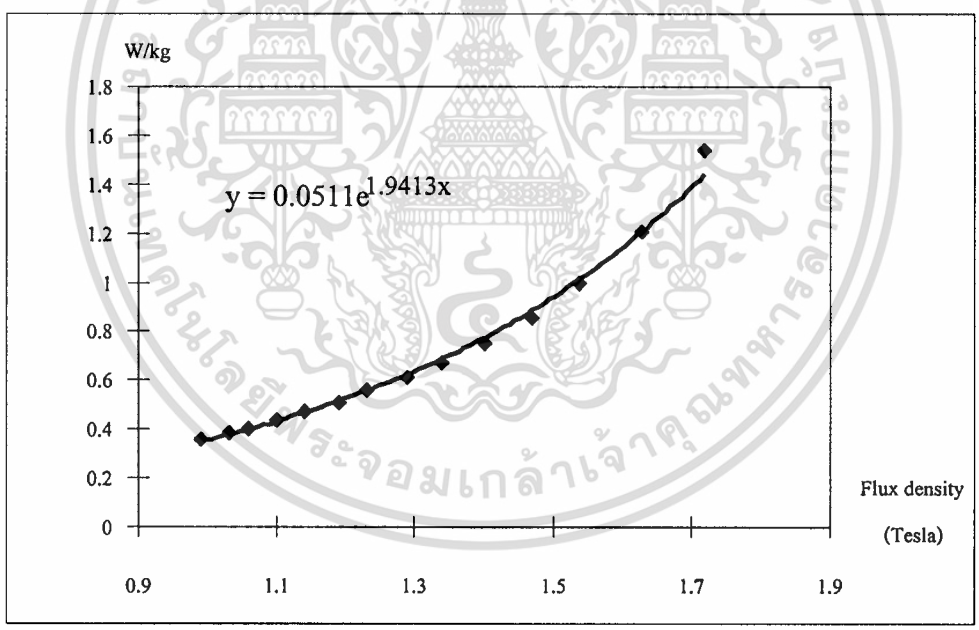
ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 25 เปอร์เซ็นต์

Flux density (Tesla)	แรงดัน (V)	กระแส (A)	กำลังไฟฟ้า (W)
0.99	82.9	1.09	36.83
1.03	82.9	1.19	38.89
1.06	83.1	1.35	41.22
1.10	83.1	1.53	45.32
1.14	83.1	1.84	48.02
1.19	83.1	2.28	51.91
1.23	83.0	2.76	55.83
1.29	83.1	2.43	62.07
1.34	83.0	4.23	66.35
1.40	83.1	5.24	73.08
1.47	83.1	6.85	82.30
1.54	83.1	8.82	94.72
1.63	83.1	13.07	113.50
1.72	83.1	23.27	139.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.28 การเปรียบเทียบค่าความสูญเสียของแกนเหล็ก (W/kg) ระหว่างค่าที่ได้จากการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 25 เปอร์เซ็นต์ กับค่าที่ได้จากบริษัทผู้ผลิตรูปคลื่นซายน์



ภาพที่ 4.29 ค่าความสัมพันธ์ระหว่าง W/kg และ Flux density ในรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการทดสอบ เมื่อแหล่งจ่ายแรงดันไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 25 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

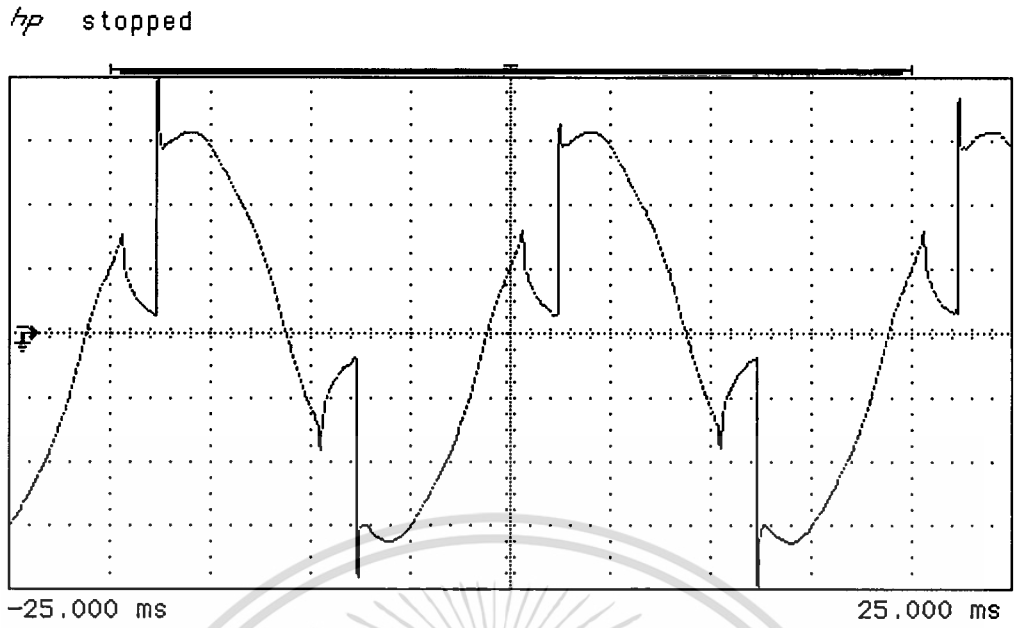
ตารางที่ 4.10 เปอร์เซ็นต์เปรียบเทียบค่าความสูญเสียระหว่างข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิตกับข้อมูลจากการทดสอบ เมื่อแหล่งจ่ายแรงดันไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 25เปอร์เซ็นต์

Flux density (Tesla)	W/kg (%)
0.99	6.76
1.03	6.43
1.06	6.74
1.10	7.27
1.14	7.15
1.19	7.20
1.23	6.37
1.29	7.52
1.34	5.76
1.40	5.33
1.47	4.10
1.54	5.85
1.63	6.98
1.72	6.52

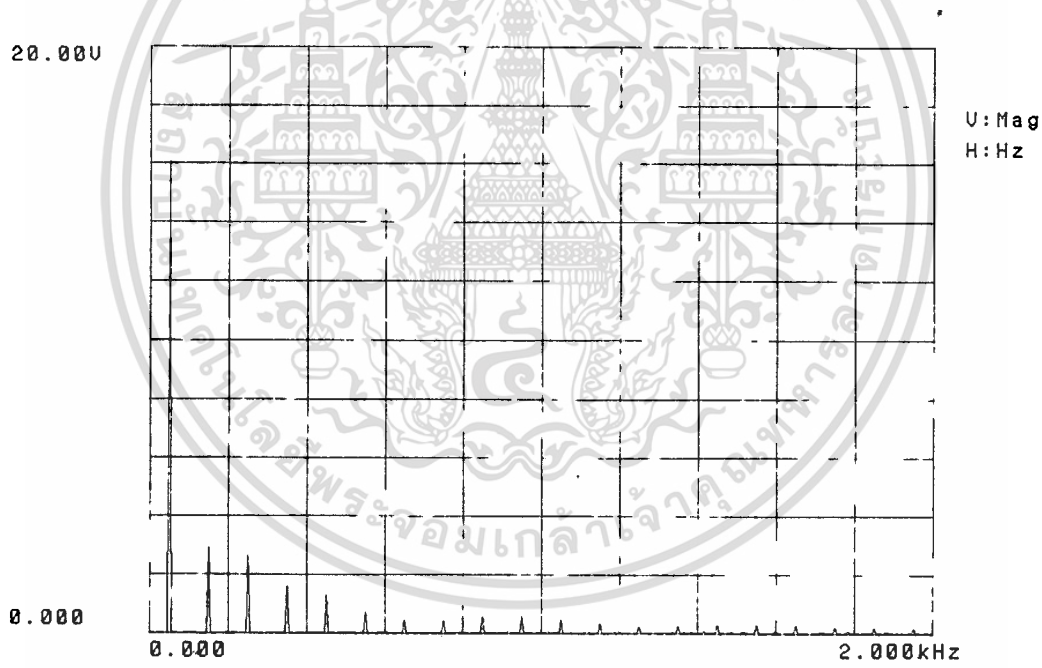
4.2.6 ผลการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 30 เปอร์เซ็นต์

พิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้าที่สร้างขึ้นใช้ในการทดสอบขนาด 30 kVA 1ph 50Hz 22kV-160/80V เหล็กซิลิคอนชนิด M4 ความหนา 0.27 ม.ม. ความหนาแน่น 7.65 kg/dm^3 น้ำหนัก 102.5 กิโลกรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

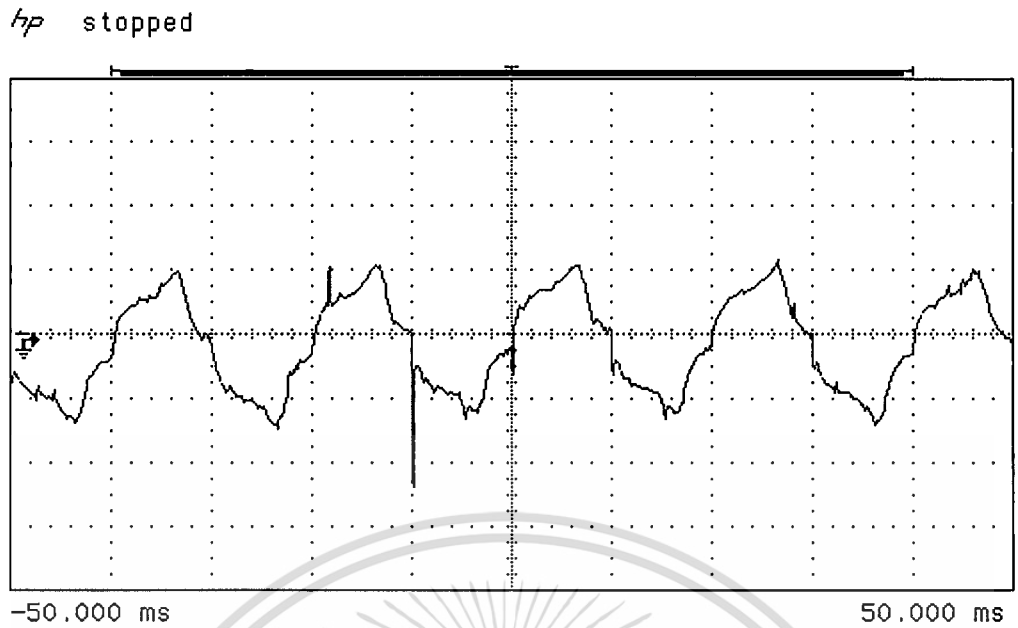


ภาพที่ 4.30 แสดงภาพสัญญาณแรงดันทดสอบไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 30 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 4.31 สเปกตรัมแรงดันฮาร์โมนิกส์ของสัญญาณแรงดันทดสอบไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 30 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

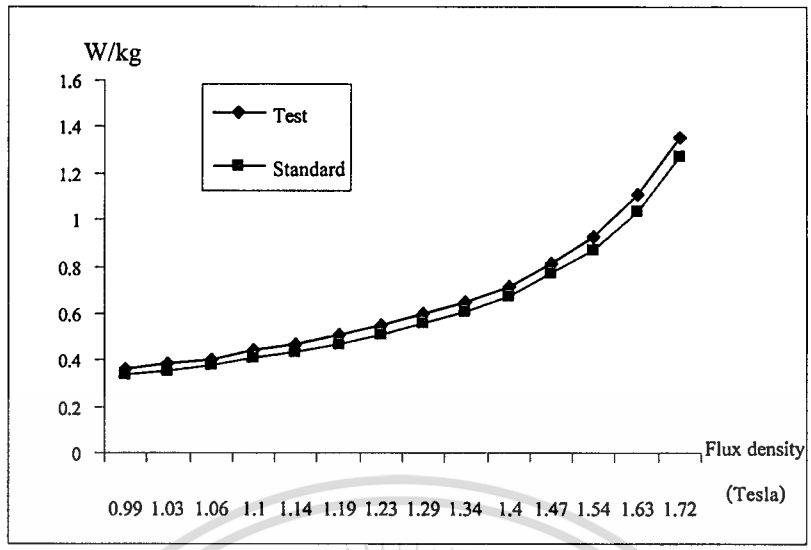


ภาพที่ 4.32 สัญญาณกระแสในวงจรทดสอบ ความผิดเพี้ยนของสัญญาณแรงดัน 30 เปอร์เซ็นต์ ที่ความหนาแน่นฟลั๊กซ์ 0.99 เทสลา

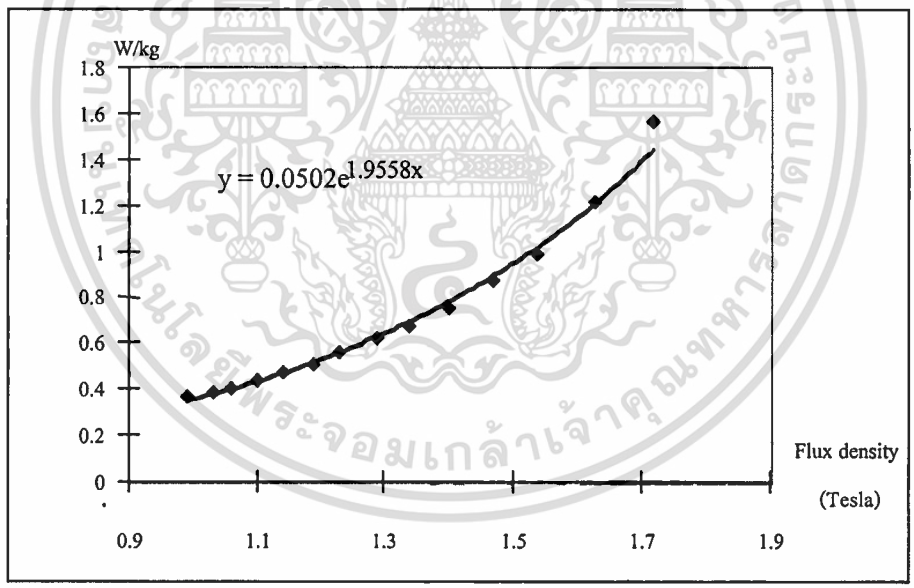
ตารางที่ 4.11 บันทึกผลการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 30 เปอร์เซ็นต์

Flux density (Tesla)	แรงดัน (V)	กระแส (A)	กำลังไฟฟ้า (W)
0.99	84.1	1.10	37.12
1.03	84.2	1.22	39.27
1.06	84.1	1.32	41.53
1.10	84.2	1.60	45.38
1.14	84.1	1.86	48.01
1.19	84.1	2.23	51.86
1.23	84.2	2.73	56.16
1.29	84.2	3.39	61.39
1.34	84.1	4.22	66.66
1.40	84.1	5.32	73.35
1.47	84.1	6.58	83.47
1.54	84.3	8.93	94.63
1.63	84.1	13.00	113.37
1.72	84.2	23.10	139.04

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.33 แสดงการเปรียบเทียบค่าความสูญเสียของแกนเหล็ก (W/kg) ระหว่างค่าที่ได้จากการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 30 เปอร์เซ็นต์ กับค่าที่ได้จากบริษัทผู้ผลิตรูปคลื่นซายน์



ภาพที่ 4.34 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่าง W/kg และ Flux density ในรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 30 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

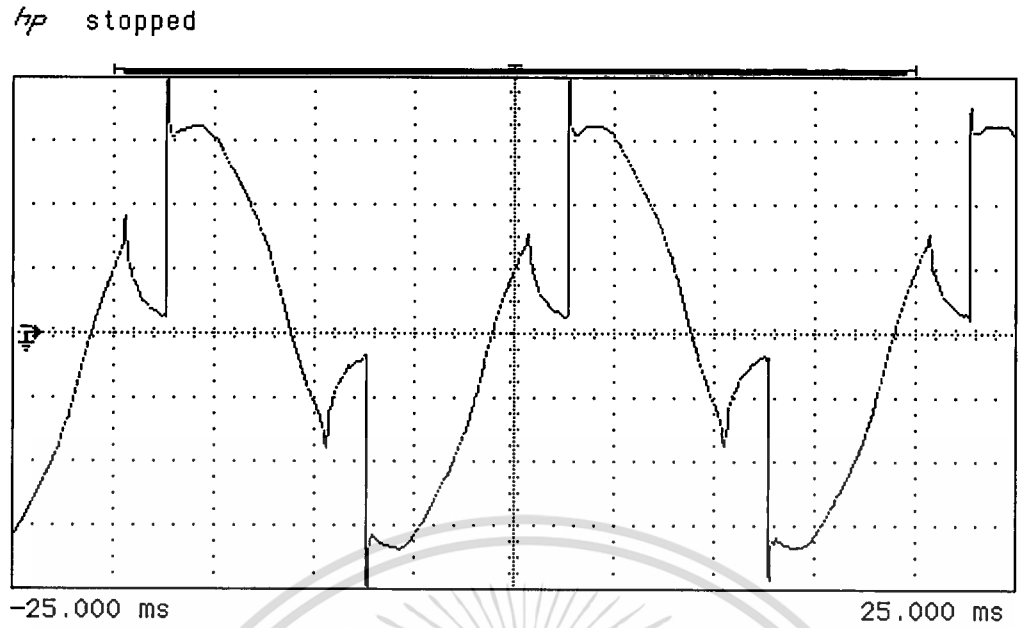
ตารางที่ 4.12 เปอร์เซ็นต์เปรียบเทียบค่าความสูญเสียระหว่างข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิตกับข้อมูลจากการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 30 เปอร์เซ็นต์

Flux density (Tesla)	W/kg (%)
0.99	7.50
1.03	7.35
1.06	7.46
1.10	7.38
1.14	7.13
1.19	7.10
1.23	6.92
1.29	6.50
1.34	6.21
1.40	5.68
1.47	5.45
1.54	5.76
1.63	6.88
1.72	6.37

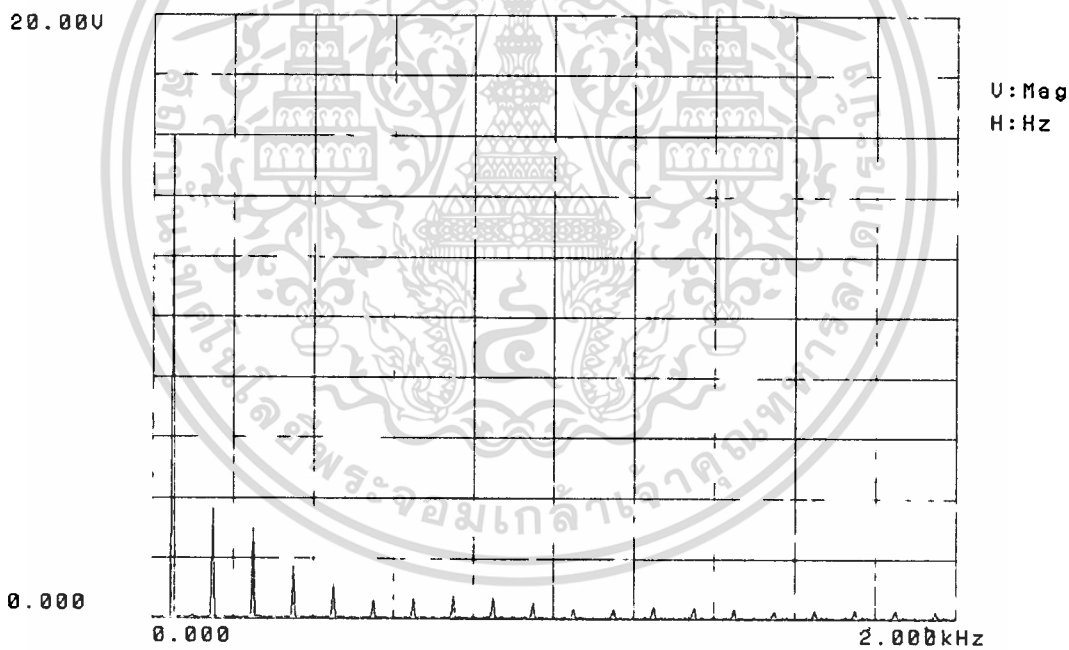
4.2.7 ผลการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 35 เปอร์เซ็นต์

พิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้าที่สร้างขึ้นใช้ในการทดสอบขนาด 30 kVA 1ph 50Hz 22kV-160/80V เหล็กซิลิคอนชนิด M4 ความหนา 0.27 ม.ม. ความหนาแน่น 7.65 kg/dm^3 น้ำหนัก 102.5 กิโลกรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

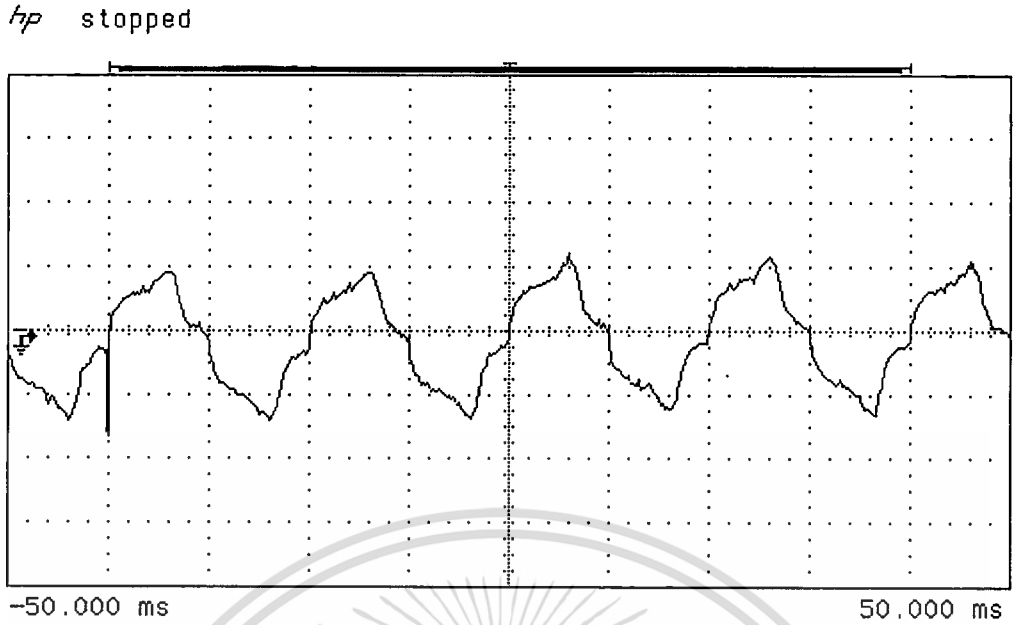


ภาพที่ 4.35 แสดงภาพสัญญาณแรงดันทดสอบไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 35 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 4.36 สเปกตรัมแรงดันฮาร์โมนิกส์ของสัญญาณแรงดันทดสอบไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 35 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

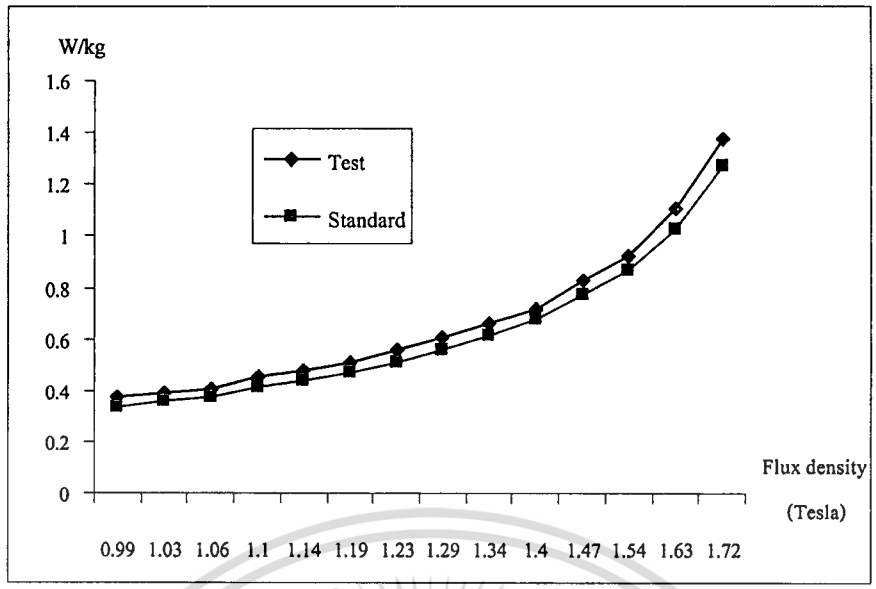


ภาพที่ 4.37 สัญญาณกระแสในวงจรทดสอบ ความผิดเพี้ยนของสัญญาณแรงดัน 35 เปอร์เซ็นต์ ที่ความหนาแน่นฟลั๊กซ์ 0.99 เทสลา

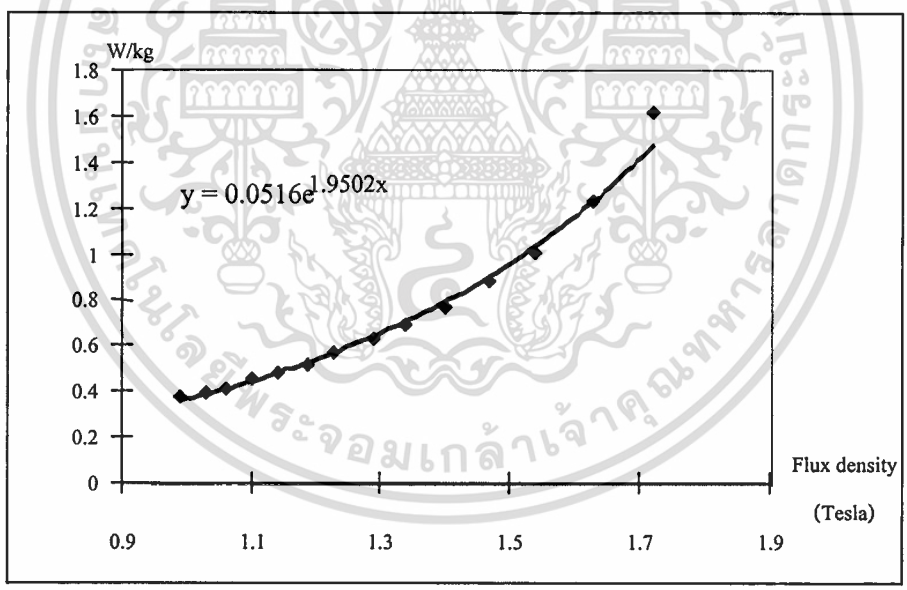
ตารางที่ 4.13 ผลการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 35 เปอร์เซ็นต์

Flux density (Tesla)	แรงดัน (V)	กระแส (A)	กำลังไฟฟ้า (W)
0.99	85.4	1.06	37.71
1.03	85.3	1.22	39.97
1.06	85.4	1.38	42.00
1.10	85.1	1.55	46.11
1.14	85.4	1.87	48.70
1.19	85.4	2.31	52.09
1.23	85.3	2.79	56.90
1.29	85.4	3.43	62.14
1.34	85.4	4.31	67.53
1.40	85.5	5.42	73.79
1.47	85.5	6.90	84.61
1.54	85.4	9.07	94.87
1.63	85.5	13.41	113.01
1.72	85.5	23.98	140.82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.38 แสดงการเปรียบเทียบค่าความสูญเสียของแกนเหล็ก (W/kg) ระหว่างค่าที่ได้จากการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 35 เปอร์เซ็นต์ กับค่าที่ได้จากบริษัทผู้ผลิตรูปคลื่นซายน์



ภาพที่ 4.39 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่าง W/kg และ Flux density ในรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 35 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

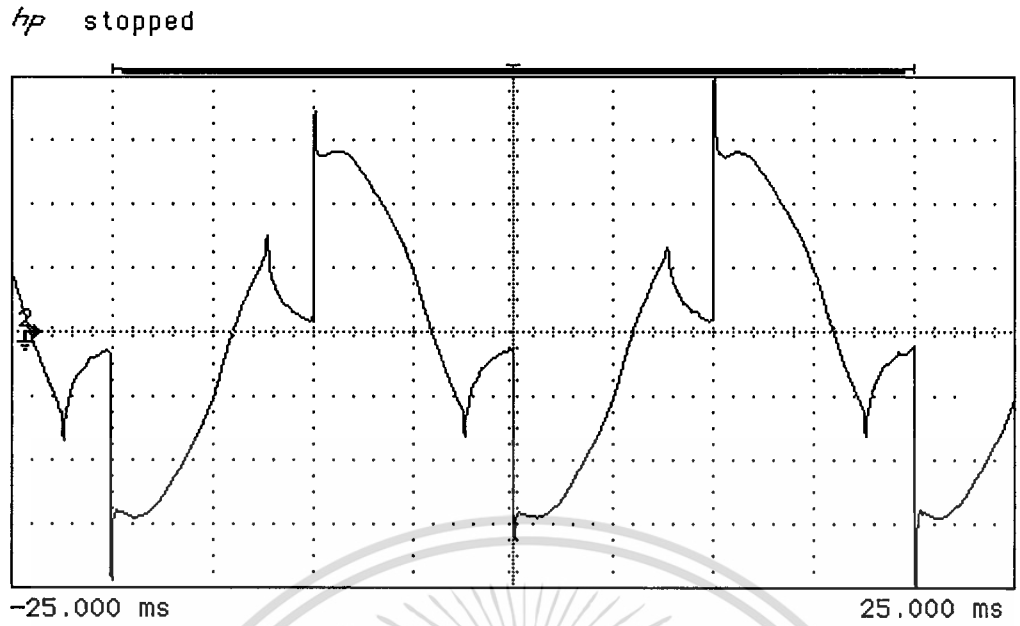
ตารางที่ 4.14 เปอร์เซ็นต์เปรียบเทียบค่าความสูญเสียระหว่างข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิตกับข้อมูลจากการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 35 เปอร์เซ็นต์

Flux density (Tesla)	W/kg (%)
0.99	8.95
1.03	8.97
1.06	8.48
1.10	8.85
1.14	8.45
1.19	7.51
1.23	8.13
1.29	7.63
1.34	7.42
1.40	6.24
1.47	6.72
1.54	6.01
1.63	6.58
1.72	7.56

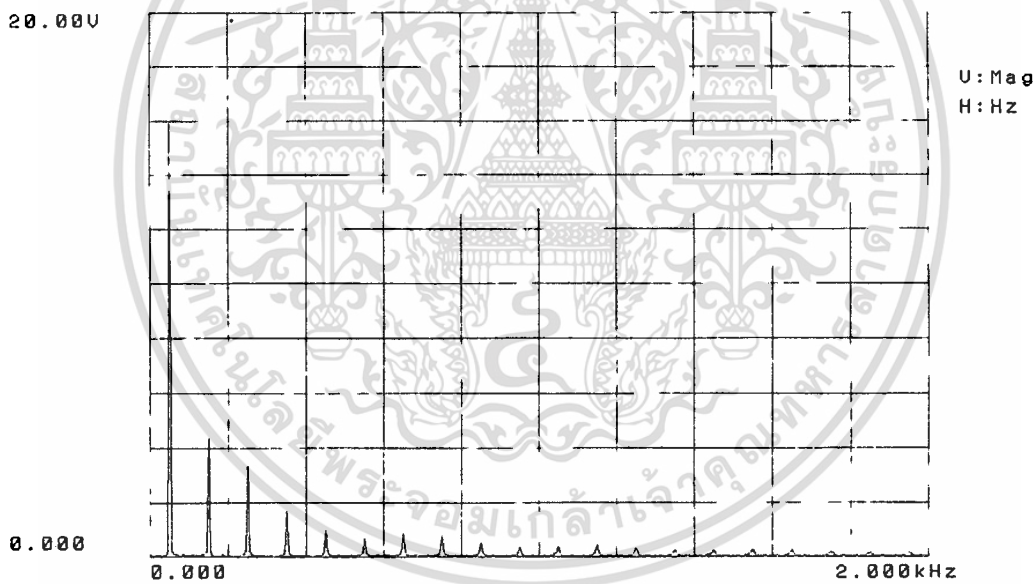
4.2.8 ผลการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 40 เปอร์เซ็นต์

พิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้าที่สร้างขึ้นใช้ในการทดสอบขนาด 30 kVA 1ph 50Hz 22kV-160/80V เหล็กซิลิคอนชนิด M4 ความหนา 0.27 ม.ม. ความหนาแน่น 7.65 kg/dm^3 น้ำหนัก 102.5 กิโลกรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

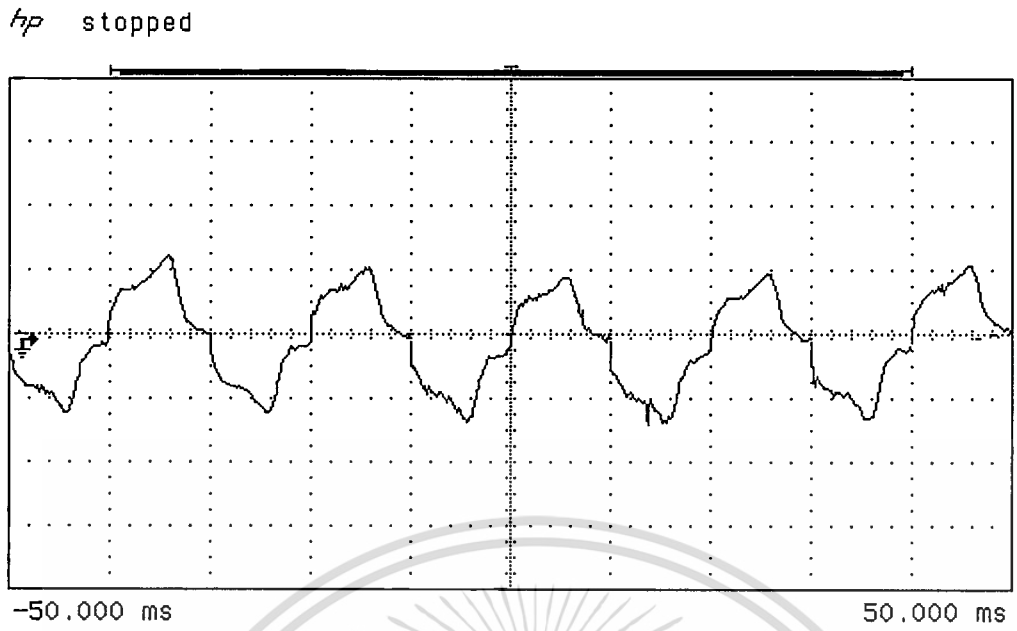


ภาพที่ 4.40 แสดงภาพสัญญาณแรงดันทดสอบไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 40 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 4.41 สเปกตรัมแรงดันฮาร์โมนิกส์ของสัญญาณแรงดันทดสอบไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 40 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

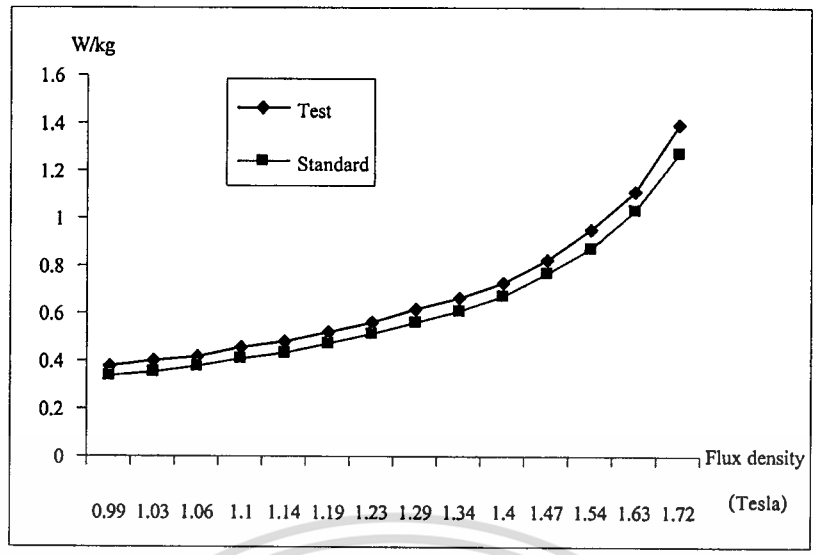


ภาพที่ 4.42 สัญญาณกระแสในวงจรทดสอบ ความผิดเพี้ยนของสัญญาณแรงดัน 40 เปอร์เซ็นต์ ที่ความหนาแน่นฟลั๊กซ์ 0.99 เทสลา

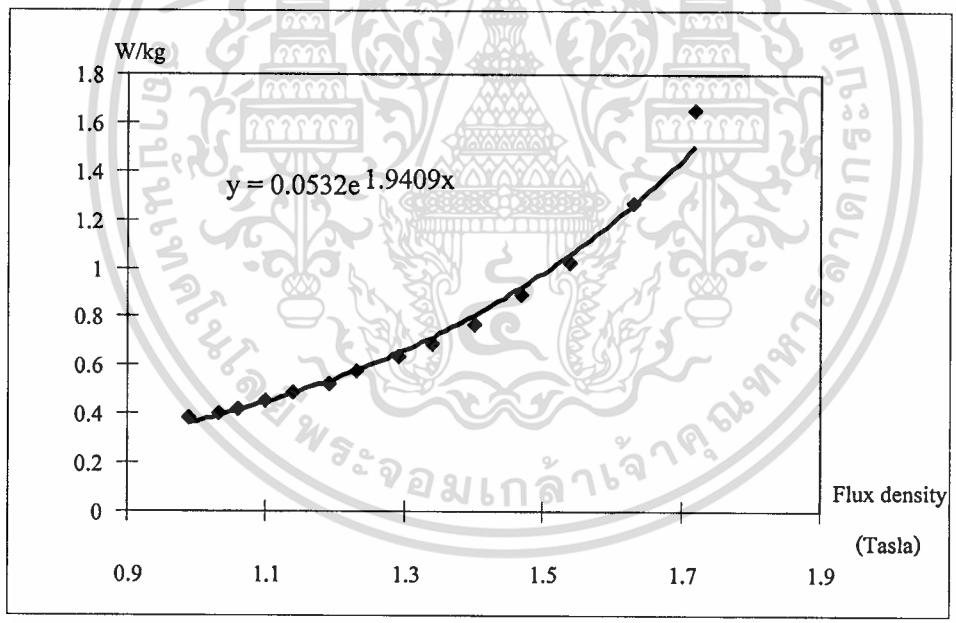
ตารางที่ 4.15 ผลการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 40 เปอร์เซ็นต์

Flux density (Tesla)	แรงดัน (V)	กระแส (A)	กำลังไฟฟ้า (W)
0.99	86.8	1.07	38.53
1.03	87.1	1.17	40.90
1.06	68.9	1.33	43.03
1.10	86.9	1.55	46.51
1.14	87.0	1.89	49.59
1.19	87.0	2.22	52.96
1.23	87.0	2.80	57.79
1.29	87.0	3.46	62.90
1.34	86.8	4.33	68.11
1.40	86.9	5.45	74.65
1.47	86.8	7.00	84.83
1.54	86.9	9.15	97.23
1.63	86.8	13.54	114.30
1.72	86.9	24.39	142.33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.43 แสดงการเปรียบเทียบค่าความสูญเสียของแกนเหล็ก (W/kg) ระหว่างค่าที่ได้จากการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 40 เปอร์เซ็นต์ กับค่าที่ได้จากบริษัทผู้ผลิตรูปคลื่นซายน์



ภาพที่ 4.44 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่าง W/kg และ Flux density ในรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 40 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

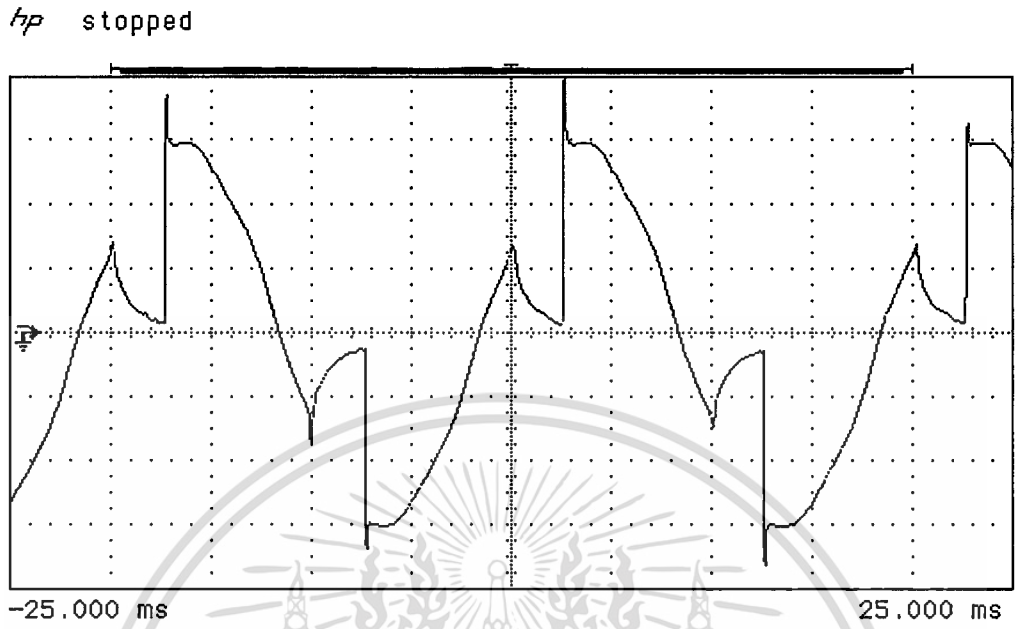
ตารางที่ 4.16 เปอร์เซ็นต์เปรียบเทียบค่าความสูญเสียระหว่างข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิตกับข้อมูลจากการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 40 เปอร์เซ็นต์

Flux density (Tesla)	W/kg (%)
0.99	10.88
1.03	11.03
1.06	10.67
1.10	9.64
1.14	10.08
1.19	9.04
1.23	9.54
1.29	8.75
1.34	8.20
1.40	7.32
1.47	6.96
1.54	8.28
1.63	7.63
1.72	8.54

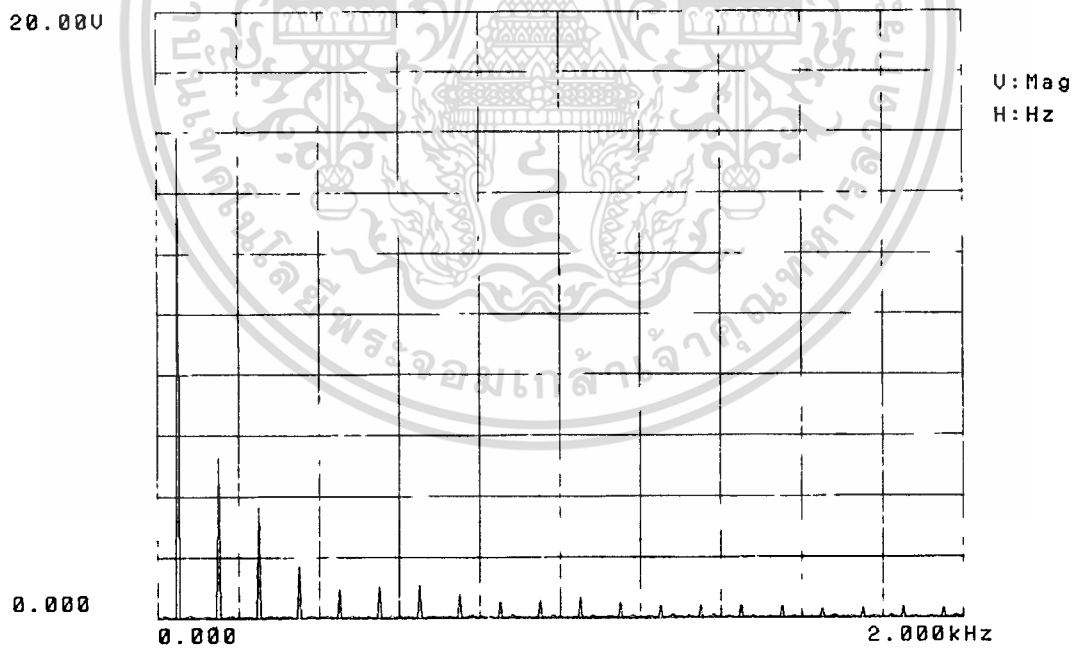
4.2.9 ผลการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 45 เปอร์เซ็นต์

พิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้าที่สร้างขึ้นใช้ในการทดสอบขนาด 30 kVA 1ph 50Hz 22kV-160/80V เหล็กซิลิคอนชนิด M4 ความหนา 0.27 ม.ม. ความหนาแน่น 7.65 kg/dm^3 น้ำหนัก 102.5 กิโลกรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

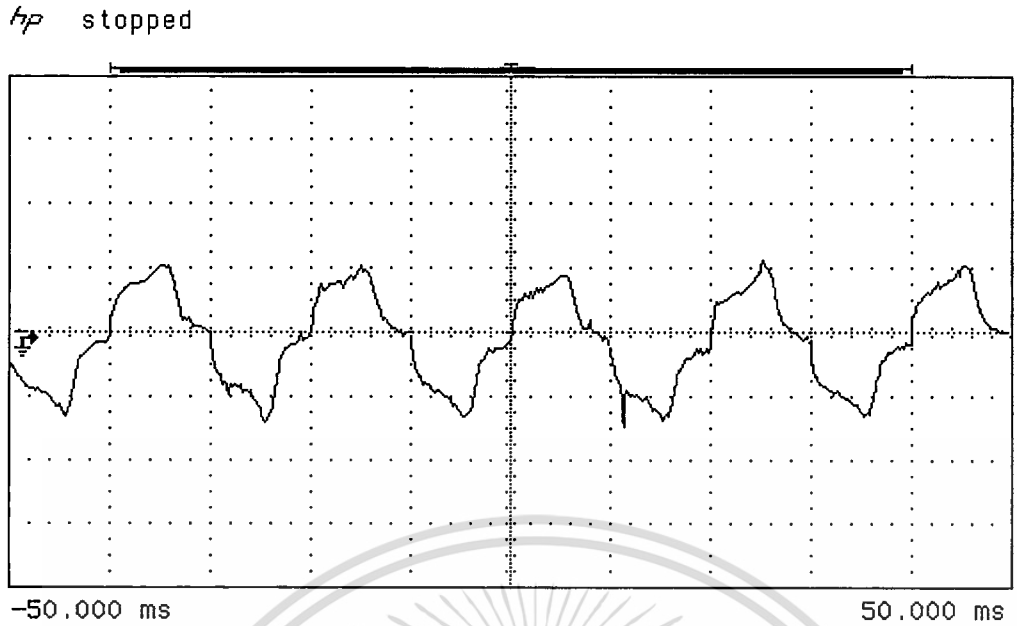


ภาพที่ 4.45 แสดงภาพสัญญาณแรงดันทดสอบไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 45 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 4.46 สเปกตรัมแรงดันฮาร์โมนิกส์ของสัญญาณแรงดันทดสอบไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 45 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

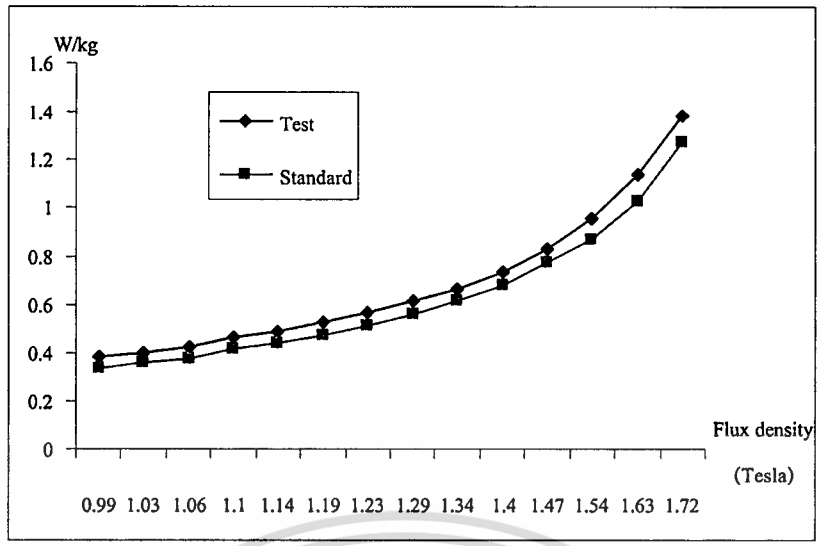


ภาพที่ 4.47 สัญญาณกระแสในวงจรทดสอบ ความผิดเพี้ยนของสัญญาณแรงดัน 45 เปอร์เซ็นต์ ที่ความหนาแน่นฟลั๊กซ์ 0.99 เทสลา

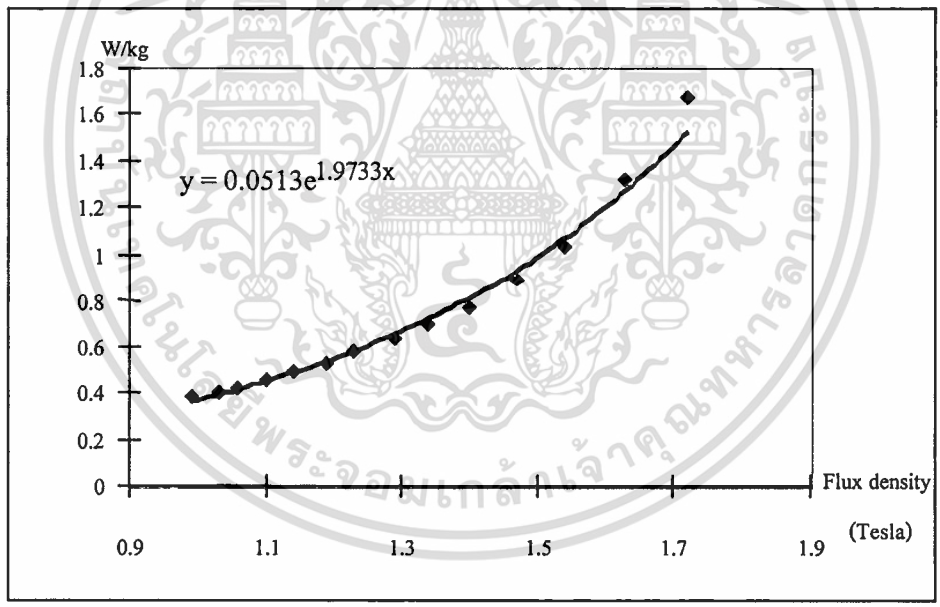
ตารางที่ 4.17 ผลการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 45 เปอร์เซ็นต์

Flux density (Tesla)	แรงดัน (V)	กระแส (A)	กำลังไฟฟ้า (W)
0.99	88.5	1.06	38.73
1.03	88.7	1.18	40.99
1.06	88.7	1.38	43.20
1.10	88.8	1.61	46.97
1.14	88.7	1.85	49.92
1.19	88.6	2.31	53.79
1.23	88.6	2.80	58.29
1.29	88.6	3.54	63.11
1.34	88.7	4.41	67.99
1.40	88.7	5.51	75.05
1.47	88.7	6.95	85.02
1.54	88.8	9.43	97.51
1.63	88.9	13.89	116.51
1.72	88.4	24.97	141.62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.48 แสดงการเปรียบเทียบค่าความสูญเสียของแกนเหล็ก (W/kg) ระหว่างค่าที่ได้จากการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 45 เปอร์เซ็นต์ กับค่าที่ได้จากบริษัทผู้ผลิตรูปคลื่นซายน์



ภาพที่ 4.49 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่าง W/kg และ Flux density ในรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 45 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

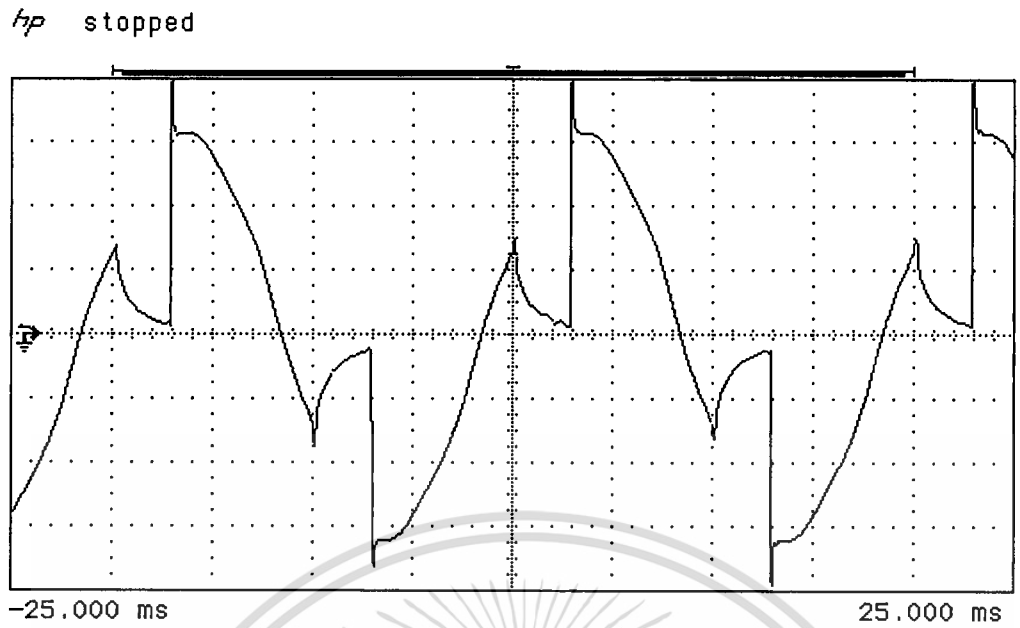
ตารางที่ 4.18 เปอร์เซ็นต์เปรียบเทียบค่าความสูญเสียระหว่างข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิตกับข้อมูลจากการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 45 เปอร์เซ็นต์

Flux density (Tesla)	W/kg (%)
0.99	11.33
1.03	11.24
1.06	11.02
1.10	10.53
1.14	10.67
1.19	10.43
1.23	10.32
1.29	9.04
1.34	8.04
1.40	7.81
1.47	7.17
1.54	8.55
1.63	9.38
1.72	8.08

4.2.10 ผลการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 50 เปอร์เซ็นต์

พิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้าที่สร้างขึ้นใช้ในการทดสอบขนาด 30 kVA 1ph 50Hz 22kV-160/80V เหล็กซิลิคอนชนิด M4 ความหนา 0.27 ม.ม. ความหนาแน่น 7.65 kg/dm^3 น้ำหนัก 102.5 กิโลกรัม

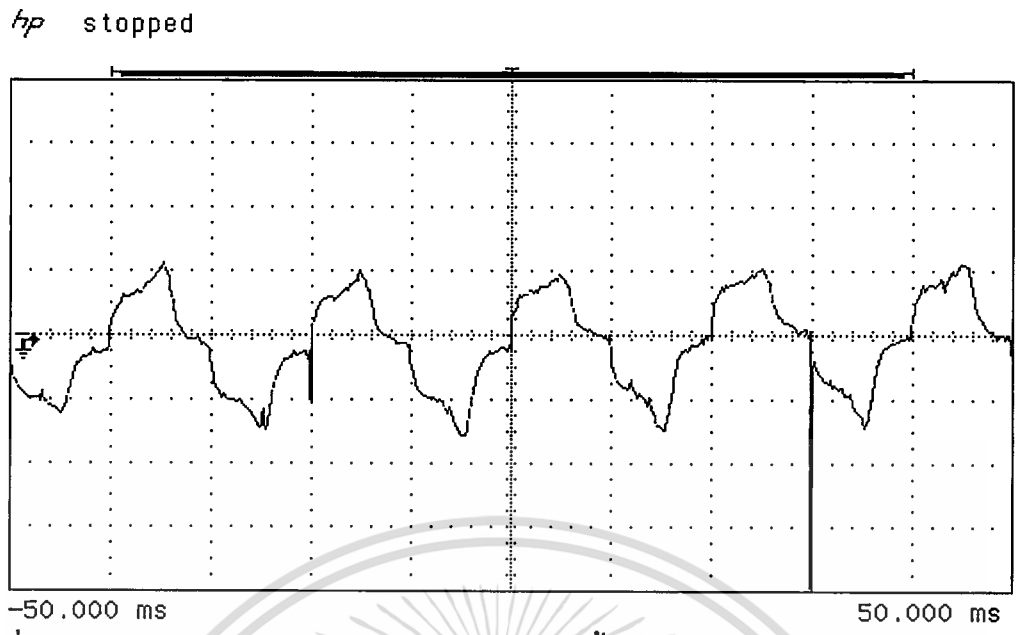
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.50 แสดงภาพสัญญาณแรงดันทดสอบไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 50 เปอร์เซ็นต์

ภาพที่ 4.51 สเปกตรัมแรงดันฮาร์โมนิกส์ของสัญญาณแรงดันทดสอบไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 50 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

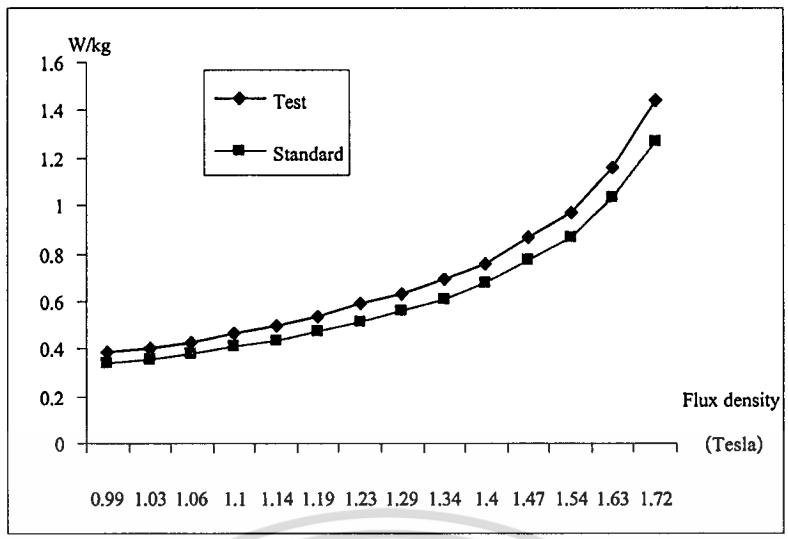


ภาพที่ 4.52 สัญญาณกระแสในวงจรทดสอบ ความผิดเพี้ยนของสัญญาณแรงดัน 50 เปอร์เซ็นต์ ที่ความหนาแน่นฟลั๊กซ์ 0.99 เทสลา

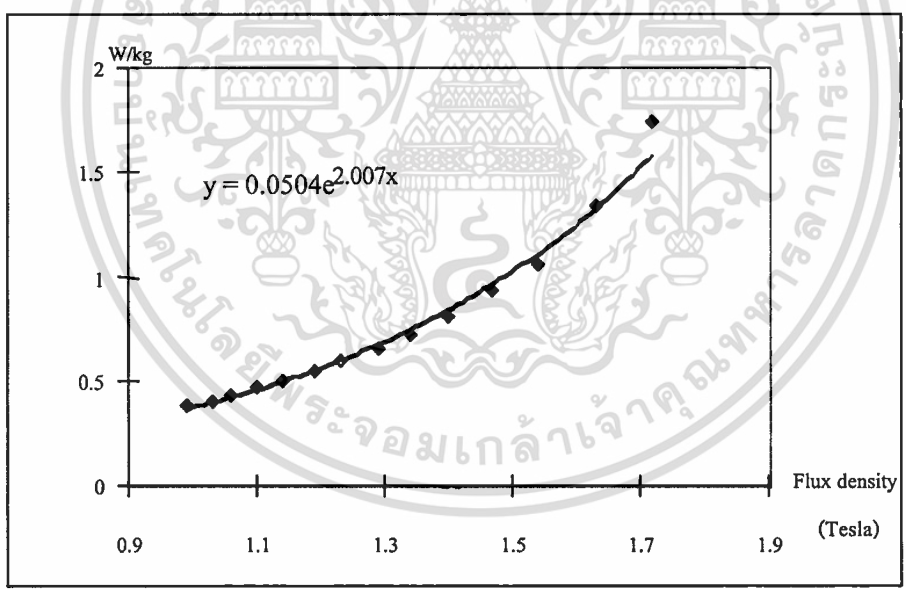
ตารางที่ 4.19 ผลการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 50 เปอร์เซ็นต์

Flux density (Tesla)	แรงดัน (V)	กระแส (A)	กำลังไฟฟ้า (W)
0.99	90.3	1.06	39.04
1.03	90.5	1.17	41.40
1.06	90.4	1.36	43.81
1.10	90.7	1.65	47.74
1.14	90.5	1.95	50.74
1.19	90.5	2.32	55.18
1.23	90.4	2.83	60.26
1.29	90.4	3.51	64.94
1.34	90.4	4.48	70.99
1.40	90.4	5.62	77.86
1.47	90.5	7.27	88.53
1.54	90.6	9.69	99.71
1.63	90.8	14.35	119.07
1.72	90.1	25.43	147.47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.53 แสดงการเปรียบเทียบค่าความสูญเสียของแกนเหล็ก (W/kg) ระหว่างค่าที่ได้จากการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 50 เปอร์เซ็นต์ กับค่าที่ได้จากบริษัทผู้ผลิตรูปคลื่นซายน์



ภาพที่ 4.54 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่าง W/kg และ Flux density ในรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 50 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

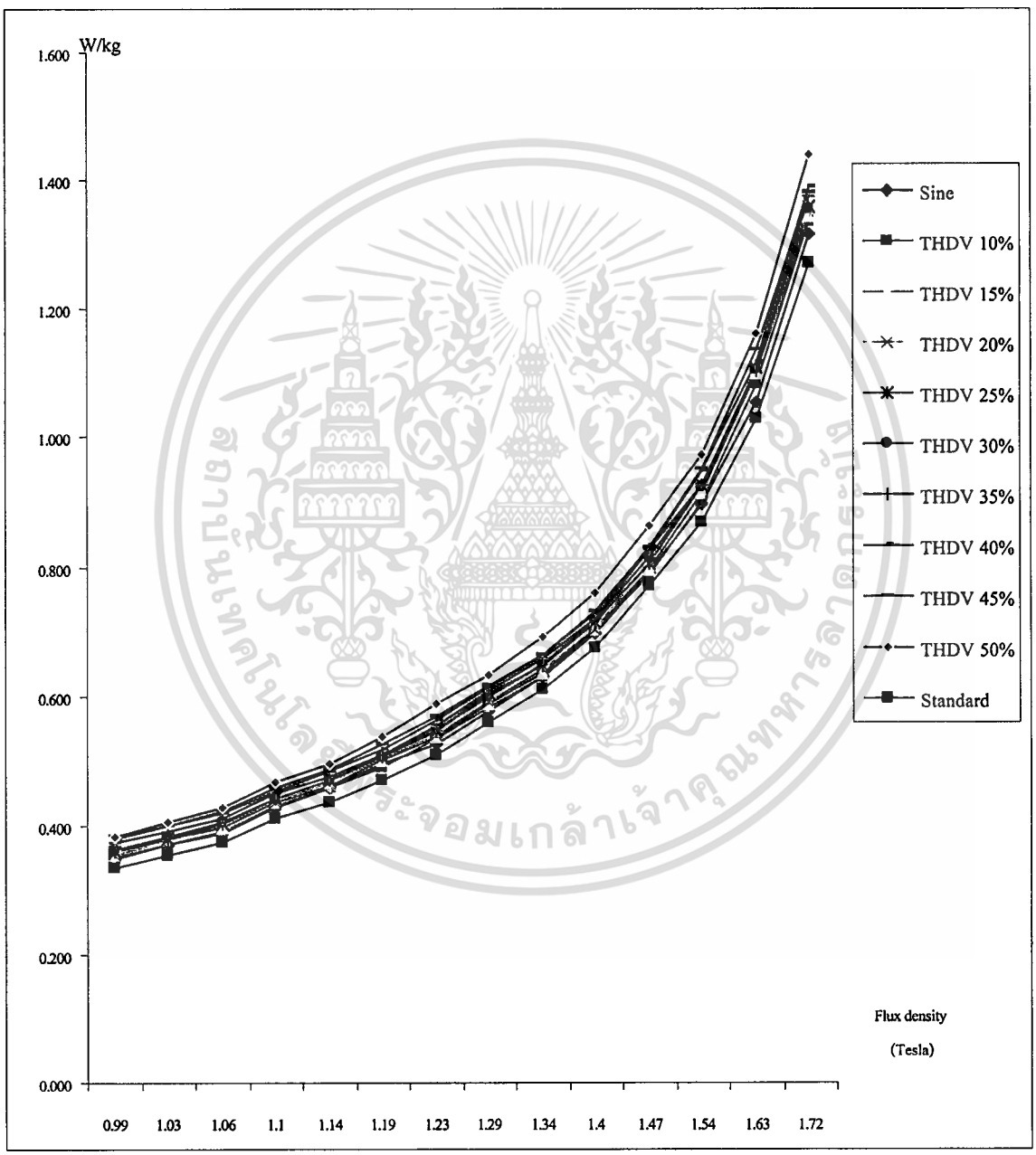
ตารางที่ 4.20 ตารางเปอร์เซ็นต์เปรียบเทียบค่าความสูญเสียระหว่างข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิตกับข้อมูลจากการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ความผิดเพี้ยน 50 เปอร์เซ็นต์

Flux density (Tesla)	W/kg (%)
0.99	12.04
1.03	12.11
1.06	12.27
1.10	11.97
1.14	12.12
1.19	12.69
1.23	13.25
1.29	11.62
1.34	11.92
1.40	11.14
1.47	10.85
1.54	10.57
1.63	11.33
1.72	11.73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 วิเคราะห์การทดสอบ

จากการทดสอบ ค่าของแรงดันและกระแส มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเป็นลำดับเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันมีปรับความผิดเพี้ยนของสัญญาณแรงดันทดสอบเพิ่มมากขึ้น ส่งผลทำให้ค่ากำลังไฟฟ้า (W) เพิ่มขึ้นตามเช่นกัน ในทุกลำดับของการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นฟลั๊กซ์ ซึ่งเห็นได้เมื่อนำค่ากำลังไฟฟ้า ทำการเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ ดังภาพที่ 4.45



ภาพที่ 4.55 แสดงการเปรียบเทียบค่าความสูญเสียของแกนเหล็ก (W/kg) ระหว่างค่าที่ได้จากทดสอบ กับ ค่าที่ได้จากบริษัทผู้ผลิตรูปคลื่นซายน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสีย มีค่าเพิ่มมากขึ้นตามการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นฟลั๊กซ์ที่เพิ่มมากขึ้น ในการทดสอบโดยใช้แรงดันทดสอบเป็นรูปคลื่นซายน์เช่นเดียวกับของบริษัทผู้ผลิตแผ่นเหล็ก ได้พบว่าค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการทดสอบมีค่ามากกว่า ซึ่งอาจเนื่องมาจากค่าตัวประกอบทางการผลิต (Building Factor) เป็นค่าที่แต่ละบริษัทผู้ผลิตหม้อแปลงมีค่าแตกต่างกันไป และ เมื่อแรงดันทดสอบที่มีค่าความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นแรงดัน ได้พบว่าค่าความสูยเสียที่เกิดขึ้นมีค่ามากกว่าในการทดสอบเมื่อรูปคลื่นแรงดันทดสอบเป็นซายน์ เนื่องมาจากมีแรงดันที่ฮาร์โมนิกส์ต่างๆเกิดขึ้น เมื่อมีการปรับค่าความผิดเพี้ยนของคลื่นแรงดันทดสอบ จึงเป็นผลทำให้เกิดค่าความสูญเสียเพิ่มขึ้นตามขนาดของสัญญาณที่ฮาร์โมนิกส์ต่างๆด้วย

จากสมการที่ได้จากการทดสอบรูปคลื่นซายน์ เมื่อนำมาคำนวนหาค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นเมื่อสร้างหม้อแปลงเสร็จสมบูรณ์สามารถเปรียบเทียบได้ตามตารางที่ 4.21 ค่าที่คำนวนได้มีค่าใกล้เคียงกันทั้งค่าที่ได้จากสมการการทดสอบและค่าที่ได้หลังจากสร้างหม้อแปลงเสร็จ

ตารางที่ 4.21 ค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นเมื่อสร้างหม้อแปลงเสร็จสมบูรณ์

ขนาดหม้อแปลง	ความหนาแน่นฟลักซ์(Tesla)	น้ำหนัก (Kg)	ค่าความสูญเสียจากสมการที่ได้จากการทดสอบ(W)	ค่าความสูญเสียเมื่อสร้างเสร็จ(W)
1 เฟส 10 kVA	1.6304	49.76	53.23	52.7
1 เฟส 20 kVA	1.6703	77.69	89.17	87.8
1 เฟส 30 kVA	1.7462	82.19	107.84	109.6
1 เฟส 50 kVA	1.5825	140.15	137.78	138.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการทดสอบแกนเหล็กของหม้อแปลง ที่ใช้แกนเหล็กซิลิคอน ชนิด cold rolled coated grain oriented magnetic steel ความหนาของแผ่นเหล็ก 0.27 มม. (M4) และ ได้ทำการทดสอบที่ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กประมาณ 1.1-1.72 เทสลา ซึ่งเป็นค่าที่บริษัทผู้ผลิตหม้อแปลงทำการเลือกสำหรับการออกแบบ ผลการทดสอบที่ได้ในบทที่ 4 ในสภาวะแหล่งจ่ายแรงดันเป็นรูปคลื่นซายน์ และไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ เมื่อเทียบกับบริษัทผู้ผลิตพบว่ามีค่าความสูญเสีย (W/kg) สูงกว่าข้อมูลของบริษัทผู้ผลิต สาเหตุอันเนื่องจากการผลิตในแต่ละขั้นตอนของการผลิต หรือเรียกว่าค่าตัวประกอบการผลิต(Building Factor) เช่น แผ่นเหล็กได้รับการกระแทกจากการตัด การเรียงแผ่นเหล็ก เป็นต้น และ ค่าความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นแรงดันที่ใช้ในการทดสอบ ดังนั้นผู้ออกแบบสามารถที่จะนำข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ เพื่อหาผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการเพิ่มขึ้นของค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียของแกนเหล็ก อย่างเช่น การพิจารณาการเพิ่มขึ้นของการระบายความร้อนที่เพิ่มขึ้น และผลการทดสอบนี้ไปใช้อ้างอิงในการออกแบบหม้อแปลงที่ความหนาแน่นฟลั๊กซ์ในช่วงการทดสอบ ได้ให้ผลของค่าความสูญเสียใกล้เคียงกับการผลิตจริงมากกว่าที่ได้จากบริษัทผลิตแผ่นเหล็ก ทำให้การผลิตหม้อแปลงมีค่าความสูญเสียอยู่ในขอบเขตที่กำหนดและประหยัดต้นทุนในการผลิต เพิ่มประสิทธิภาพของการใช้งานและมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น ทำให้หม้อแปลงสามารถใช้งานในสภาวะต่างๆได้โดยไม่เกิดความเสียหายทำให้มีอายุการใช้งานยาวนานยิ่งขึ้น ลดค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงรักษาและยังส่งผลให้เกิดเสถียรภาพต่อระบบไฟฟ้า

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการหาค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนเหล็กนั้น แต่ละบริษัทผู้ผลิตอาจมีค่าไม่เท่ากับในวิทยานิพนธ์แต่มีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นแต่ละบริษัทควรทดสอบหาค่าความสูญเสียเนื่องจากค่าตัวประกอบการผลิตที่ไม่เท่ากัน และค่าอื่นๆ จึงควรทดสอบสร้างกราฟขึ้น เพื่อใช้เทียบหาค่าความสูญเสียในการสร้างหม้อแปลงไฟฟ้า

ในการผลิตหม้อแปลงไฟฟ้าในแต่ละขนาดมีค่าตัวประกอบการผลิตที่แตกต่างกัน ดังนั้น จึงควรทดสอบหาค่าตัวประกอบนี้ เพื่อให้ทราบค่าแนวโน้ม ทำให้สามารถคำนวนหาค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นใกล้เคียงกับค่าที่ผลิตใช้งานจริงมากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

[1] บุญเลิศ สื่อเฉย. " การพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายแบบจุ่มน้ำมัน. " วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย , สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2543.

[2] พิชิต ลำยอง. เครื่องจักรกลไฟฟ้า 1. กรุงเทพ : ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2539.

[3] สำนักมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง มอก. 384-2525. พิมพ์เพิ่มเติมครั้งที่ 2 กรุงเทพฯ : กระทรวงอุตสาหกรรม. 2538.

[4] Bharat Heavy Electricals Limited , Bhopal " Transformer " Tata MeGraw-Hill Publishing company Limited , 1987

[5] C. E. Lin , C. L. Cheng and C. L. Huang " Hysteresis Characteristic Analysis of Transformer Under Different Excitations Using Read Time Measurement " IEEE Transaction on Power Delivery Vol.6,No2, April 1991

[6] D.C. Jiles , J.B. Thoelke, " Theory of Ferromagnetic Hysteresis : Determination of Model Parameters From Experimental Hysteresis Loops "IEEE Transactions on Magnetics , Vol.25 , No.5,September 1989

[7] D.Slomovitz, ''Correction of Power Transformer no-load loss , measured under non-sinusoidal Voltage waveforms ," IEE Proc. Vol.136, pt.c,No.1, Janurry, 1989

[8] D.S. Takach and R.L.Boggavarapu , " Distribution Transformer no-load Losses ", IEEE Trans. Power Apparatus and systems , Vol. PAS- 504 , no.1, January,1985

[9] E.E. Steff M.I.T. Magnetic Circuit and Transformers . 5th Ed. Massachusetts:The Massachusetts institute of Technology, Inc 1964

[10] Gregory W. Massey , " Estimation Methodes for Power System Harmonic Effects on Power Distribution Transformers " IEEE Transections on Industry Applications , Vol.30, No. 2 , March/April 1994

[11] Legnona Teknoelectric Company , ''Technical Data on Electrical Steel Sheet," Italy, 1998

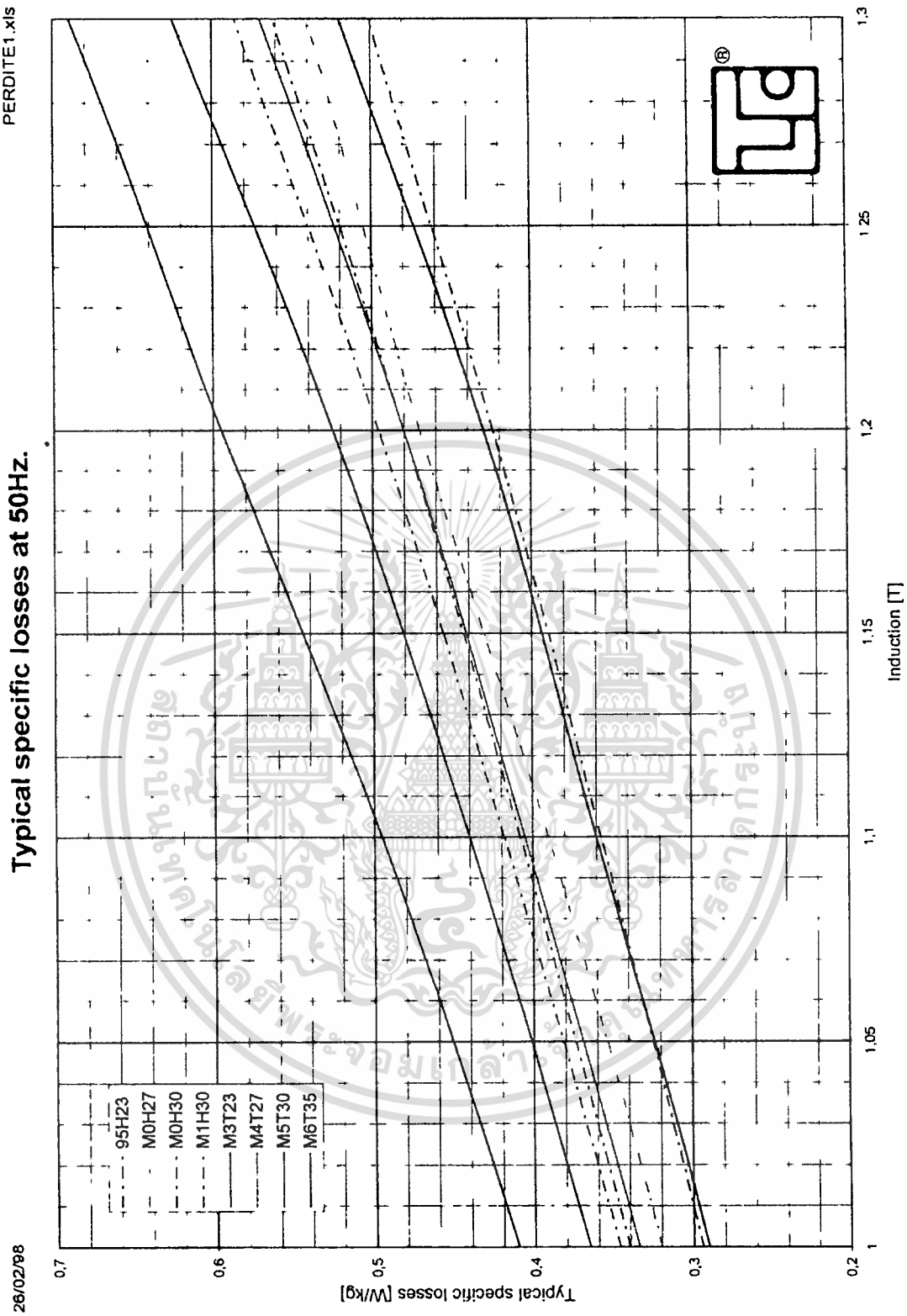
[12] Linden W. Pierce " Transformer Design and Application Considerations for Nonsinusoidal Load Currents; IEEE transaction on industry Applications . Vol 32 , No 3, May-/June 1996

[13] M.H.Rashid . Power Electronics. 2nd ed. Prentice-hall. 1988.

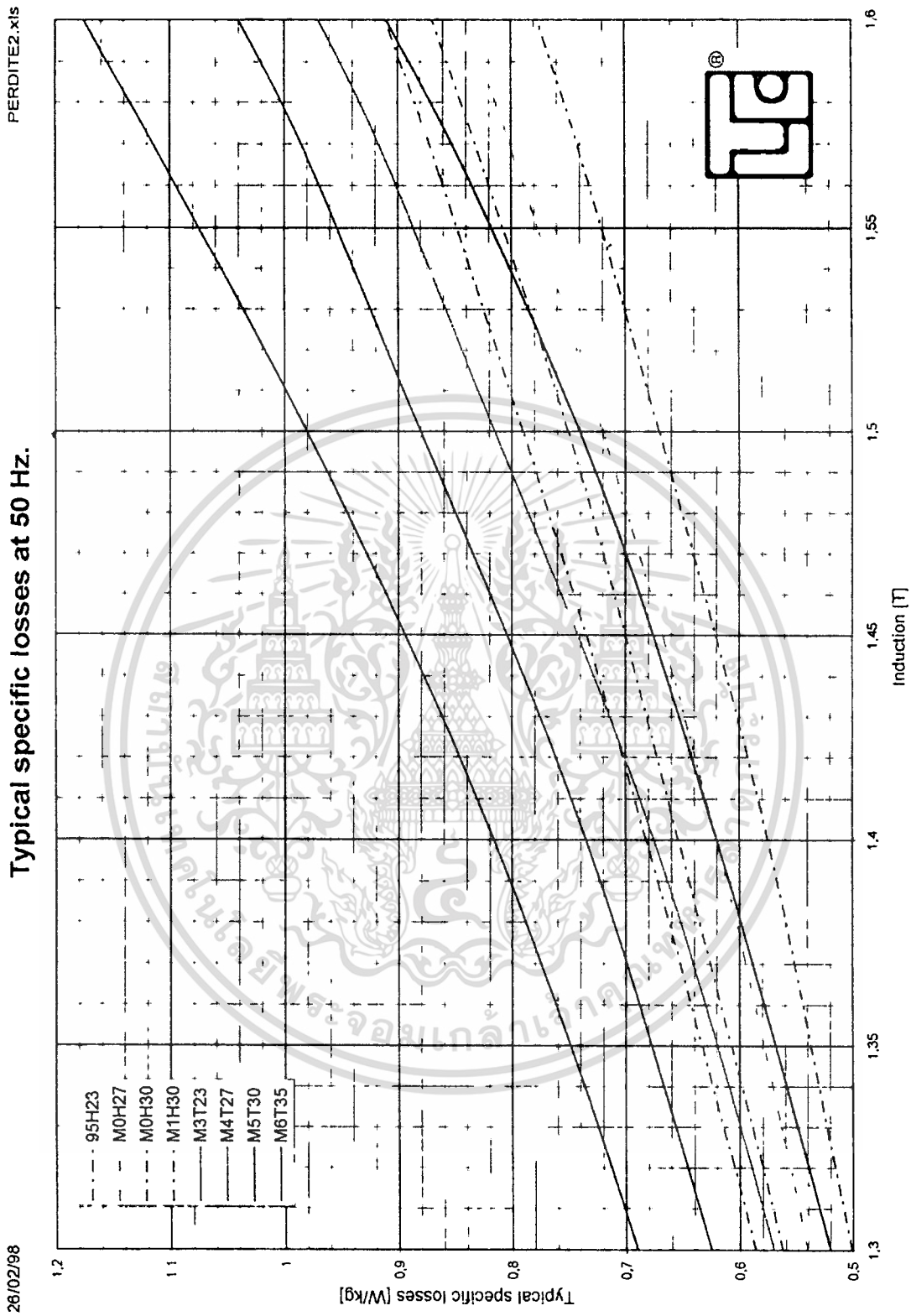
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก
ค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก

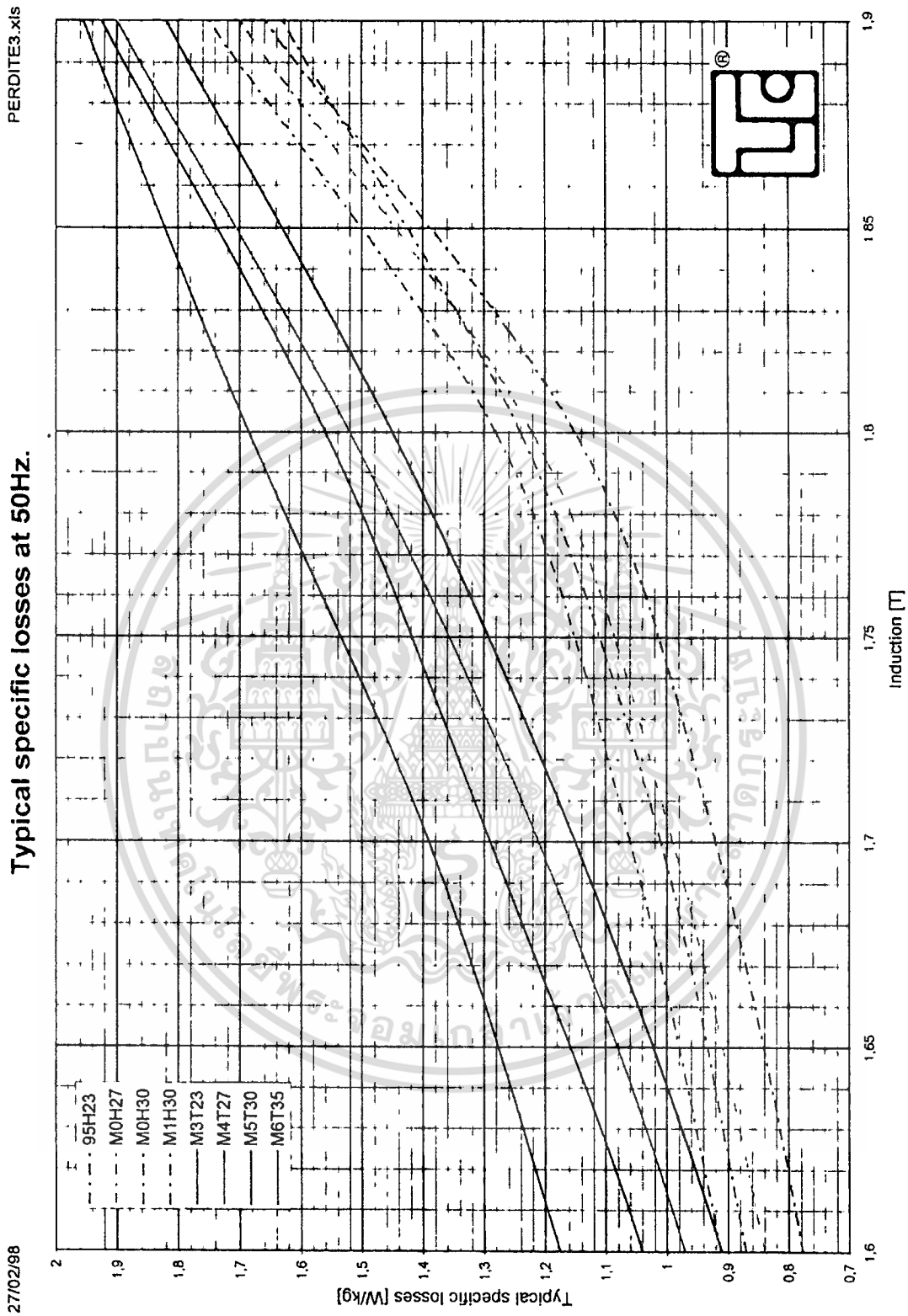
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



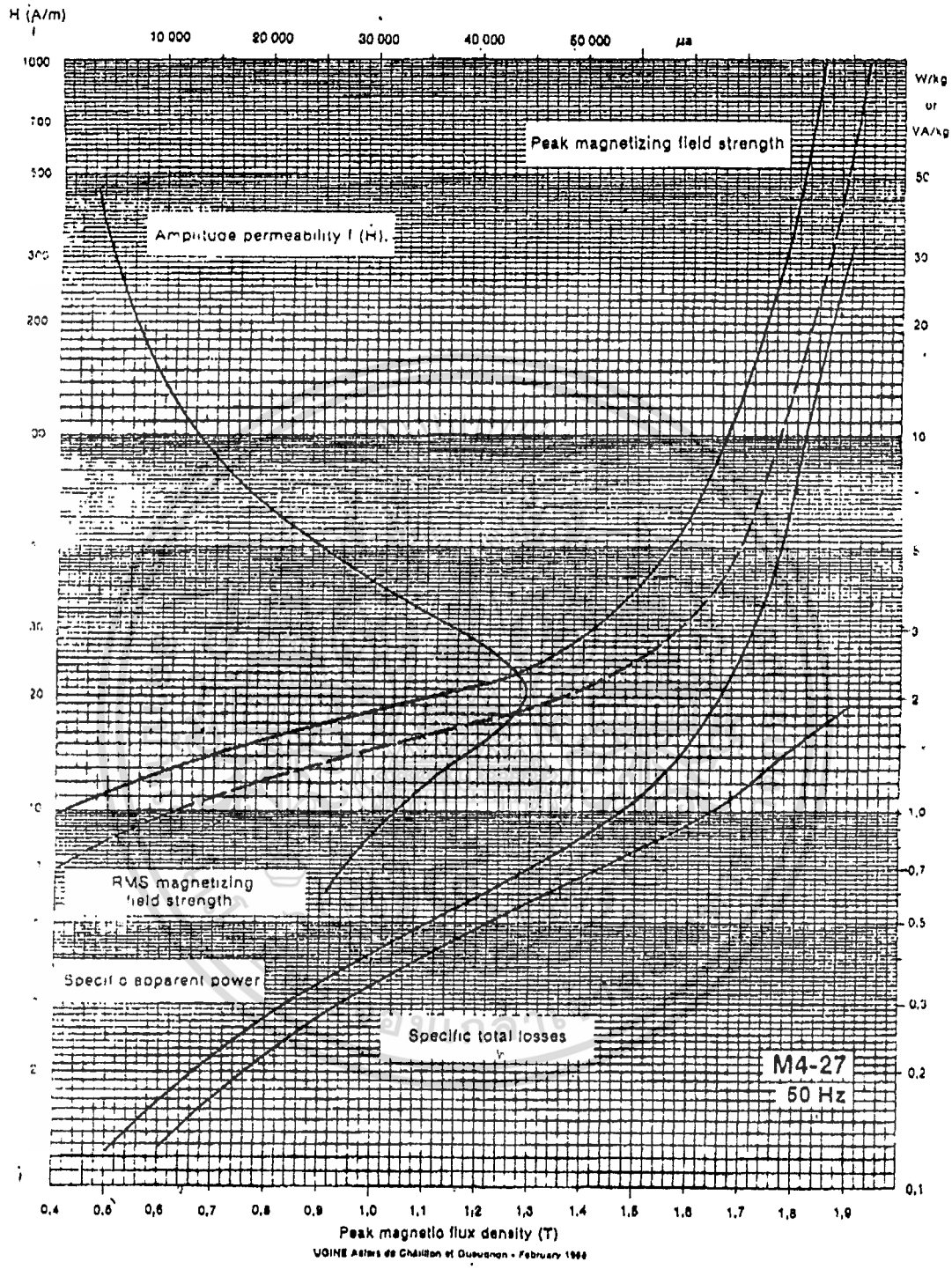
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข
ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์คุณสมบัติแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า

Property Analysis of Transformer Core

ปัญญา มาลีวัตร มณฑล ถีลาจินดาไกรฤกษ์ ศุลี บรรจงจิตร นิทัศน์ กฤษณจินดา บุญเลิศ สื่อเฉย *
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
* สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์

บทคัดย่อ

ในการออกแบบแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า ต้องคำนึงถึงคุณสมบัติของแกนเหล็กที่ใช้ เพื่อที่จะทำให้ผลการออกแบบแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าถูกต้องและเหมาะสม ซึ่งจะส่งผลให้หม้อแปลงไฟฟ้า มีคุณสมบัติเป็นไปตามข้อกำหนด การออกแบบโดยทั่วไป มักไม่ได้คำนึงถึงคุณสมบัติของแกนเหล็ก เมื่อพบกับสภาวะรูปคลื่นที่ไม่เป็นซายน์ ก็จะส่งผลให้คุณสมบัติของหม้อแปลงเปลี่ยนแปลงไป และหม้อแปลงไฟฟ้าอาจเกิดการเสียหายได้ ดังนั้นเพื่อการแก้ปัญหาดังกล่าว บทความนี้จึงได้นำเสนอผลการวิจัยและศึกษาคุณสมบัติของแกนเหล็ก ในสภาวะที่รูปคลื่นซายน์และไม่เป็นซายน์ เพื่อที่จะได้นำผลที่ได้จากการวิเคราะห์นี้ เป็นข้อมูลในการออกแบบแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าให้สามารถใช้งานได้ในสภาวะต่างๆให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

Abstract

The design of the transformer core depends on the properties of the employed core to create its great potential in accordance with the standard specifications. Conversely, the transformer design in general is still neglected to fulfil the demanding requirements, resulting in a transformer's characteristic distortion and damage when confronted with non-sinusoidal waveform. To solve this problem, this research paper therefore presents an analysis of the transformer's characteristic core in sinusoidal and non-sinusoidal waveforms. The obtained results will enable the transformer to be better designed in order to reach its highest performance characteristic.

1.บทนำ

หม้อแปลงจำหน่ายที่มีขนาดต่างๆกันนั้น เมื่อนำไปใช้งานจะเกิดค่าความสูญเสียขึ้นถึงแม้ว่าไม่ได้มีการต่อโหลดให้กับหม้อแปลงไฟฟ้าก็ตาม สิ่งนั้นคือค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นภายในตัวของหม้อแปลงไฟฟ้า ค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นนี้เกิดจากหลายสาเหตุด้วยกัน สาเหตุหนึ่งคือการสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือ เนื่องจากฮิสเตอร์รีซิส (P_h) และ กระแสไหลวน (P_e) ดังนั้นในการออกแบบแกนเหล็กจึงพิจารณาในกรณีที่แหล่งจ่ายไฟฟ้า (Source) เป็นรูปคลื่นซายน์ แล้วทำการคำนวณค่าความสูญเสียให้เป็นไปตามข้อกำหนด แต่ในการใช้งานจริงแหล่งจ่ายไฟอาจไม่ได้เป็นรูปคลื่นซายน์ ซึ่งส่งผลให้คุณสมบัติของหม้อแปลงไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปจากที่ออกแบบไว้และอาจส่งผลให้หม้อแปลงเกิดความเสียหายได้ ดังนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษา และวิเคราะห์คุณสมบัติแกนเหล็กของหม้อแปลง ทั้งสภาวะแหล่งจ่ายไฟเป็นสัญญาณรูปคลื่นซายน์ และไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ เพื่อที่จะนำผลจากการวิเคราะห์นี้ มาเป็นข้อมูลในการออกแบบแกนเหล็กหม้อแปลงให้มีค่าความถูกต้องมากยิ่งขึ้น อันจะส่งผลให้หม้อแปลงมีอายุการใช้งานยาวนานยิ่งขึ้น ลดค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงและยังช่วยให้ระบบจำหน่ายมีความมั่นคงมากยิ่งขึ้น

2.ทฤษฎี

คุณสมบัติของแผ่นเหล็กที่นำมาใช้เป็นแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า ทางบริษัทผู้ผลิตได้ให้คุณสมบัติของแผ่นเหล็กในลักษณะกราฟแสดงความสัมพันธ์ต่างๆ เฉพาะแหล่งจ่ายไฟที่เป็นรูปคลื่นซายน์เท่านั้น ในลักษณะของแหล่งจ่ายไฟที่ไม่เป็นรูปซายน์นั้นไม่มี ดังนั้นเพื่อให้การออกแบบแกนเหล็กมีประสิทธิภาพสูงขึ้นและถูกต้องมากยิ่งขึ้น จึงต้องทำการหาคุณสมบัติของแกนเหล็กให้ใกล้เคียงกับสภาวะของการใช้งานมากที่สุด ดังนั้นค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนเหล็กในกรณีรูปคลื่นซายน์สามารถหาได้จากสมการที่ 1

$$P_L = P_h + P_e \qquad (1)$$

โดยที่ P_L = ค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก

P_h = ความสูญเสียเนื่องจากฮิสเตอรีซิส

P_e = ความสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน

ความสูญเสียเนื่องจากฮิสเตอรีซิสหาได้จากสมการที่ 2 [1]

$$P_h = K_h v f B_{max}^{x} \qquad (2)$$

K_h = สัมประสิทธิ์ Steummetz

v = ปริมาตรของแกนเหล็ก (m^3)

f = ความถี่ (Hz)

B_{max} = ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (Tesla)

x = เป็นค่าคงที่ มีค่าระหว่าง 1.5 ถึง 2.5

ความสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนหาได้จากสมการที่ 3 [1]

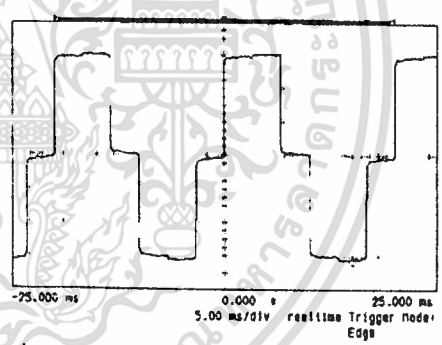
$$P_e = K_e v f^2 \tau^2 B_{max}^2 \qquad (3)$$

โดยที่ $K_e = \frac{\tau^2}{6\rho}$ เป็นค่าคงที่ขึ้นอยู่กับเนื้อสารที่นำมาทำแกนเหล็ก

τ = ความหนาของแผ่นเหล็กแต่ละแผ่น

ρ = ค่าความต้านทานจำเพาะ

กรณีแหล่งจ่ายไฟที่ไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ในงานวิจัยได้ใช้อินเวอร์เตอร์ 6 สเตป ซึ่งตามมาตรฐาน IEEE 519 กำหนดช่วงการยอมรับค่าความผิดเพี้ยนได้ไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ โดยแหล่งจ่ายกำลังมีการผิดเพี้ยนของสัญญาณประมาณ 28 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมากกว่ามาตรฐานกำหนด รูปคลื่นของสัญญาณทดสอบแสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แสดงสัญญาณแรงดันของแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่ไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ที่ใช้ในการทดสอบ

จากรูปที่ 1 ค่าแรงดันสามารถหาได้โดยใช้อนุกรมฟูเรียร์ (Fourier series) ดังสมการที่ 4 [2]

$$v_{L\text{-}L} = \sum_{n=1,3,5,..}^{\alpha} \frac{4Vs}{n\pi} \cos\frac{n\pi}{6} \sin n(\omega t + \frac{\pi}{6}) \quad \text{Volt} \qquad (4)$$

เมื่อ n= ลำดับฮาร์โมนิคส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความผิดเพี้ยนของสัญญาณทางแรงดันสามารถหาได้จากสมการที่ 5 [3]

$$\%THDV = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\alpha}(V_n)^2}}{V_1} \times 100 \qquad (5)$$

V_n = ค่าแรงดันในแต่ละฮาร์โมนิคส์

V_1 = ค่าแรงดันที่ความถี่พื้นตามแบบทอด

n = ลำดับฮาร์โมนิคส์

α = ลำดับสูงสุดฮาร์โมนิคส์

แต่ในทางปฏิบัติการคำนวนค่าความสูญเสียของแกนเหล็ก สามารถหาได้จากน้ำหนักทั้งหมดของแกนเหล็กและข้อมูลกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กต่อน้ำหนักของบริษัทผู้ผลิตมาทำการคำนวนโดยพิจารณาจากสมการที่ 6 [4]

$$W_c = K_1 W_t W_m \qquad (6)$$

โดยที่ W_c = ค่าความสูญเสียของแกนเหล็ก

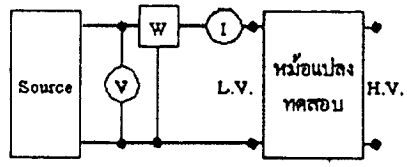
K_1 = แฟกเตอร์ที่ทำให้การสูญเสียขณะไม่มีโหลดเพิ่มขึ้น

W_t = น้ำหนักรวมของแกนเหล็ก

W_m = กำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กต่อน้ำหนัก (W/kg)

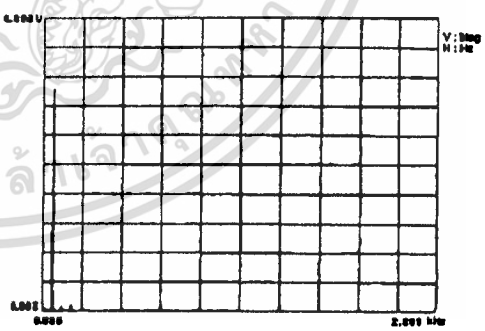
3.การทดสอบและผลการทดสอบ

ในการทดสอบหาคุณสมบัติของแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้านั้น ได้ทำการทดสอบแกนเหล็กของหม้อแปลงจำหน่าย พิกัด 30 kVA, 1ph, 50Hz, 22kV - 460/230V โดยใช้แกนเหล็กซิลิคอนชนิด M4 ความหนา 0.27 มม. และมีความหนาแน่น 7.65 kg/dm^3 การทดสอบทำโดยวิธีเปิดวงจร (open circuit test) โดยใช้แหล่งจ่ายไฟที่เป็นรูปคลื่นซายน์และไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ วงจรที่ใช้ในการทดสอบแสดงดังรูปที่ 2



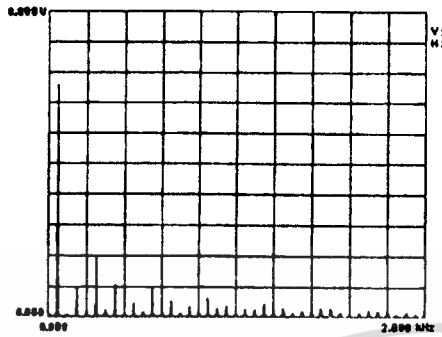
รูปที่ 2 วงจรการทดสอบหาคุณสมบัติแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า

เมื่อต่อวงจรดังรูปที่ 2 ได้ทำการป้อนแรงดันที่ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic Flux Density) ต่างๆกัน โดยกำหนดค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กให้มีค่าประมาณ 1.1-1.62 เทสลา ซึ่งเป็นค่าที่บริษัทผู้ผลิตหม้อแปลงทำการเลือกสำหรับการออกแบบและการใช้งานของแกนเหล็กซิลิคอน แล้วทำการคำนวณหาค่าแรงดัน จากนั้นทำการปรับแหล่งจ่าย (Source) ให้มีค่าแรงดันที่ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กต่างๆกันตามที่คำนวณไว้ ในส่วนของแหล่งจ่ายที่ไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ ได้ทำการในลักษณะเดียวกันกับแหล่งจ่ายที่เป็นรูปคลื่นซายน์ โดยกำหนดให้ค่าของความผิดเพี้ยนของสัญญาณทางแรงดัน(THDV) ที่ใช้ในการทดสอบ มีค่าประมาณ 28 เปอร์เซ็นต์ และมีความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่ความถี่พื้นตามแบบทอด (Fundamental) เท่ากันทั้งสองกรณี ดังรูปที่ 3 และ 4 โดยทำการทดสอบแกนเหล็กหม้อแปลง จำนวน 5 เครื่อง แล้วนำผลการทดสอบมาหาค่าเฉลี่ย ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 5, 6 และตารางที่ 1, 2, 3, 4 และ 5

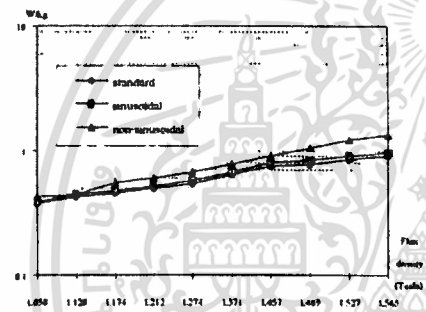


รูปที่ 3 สเปคตรัมแรงดันฮาร์โมนิคส์ของแหล่งจ่ายเป็นรูปคลื่นซายน์

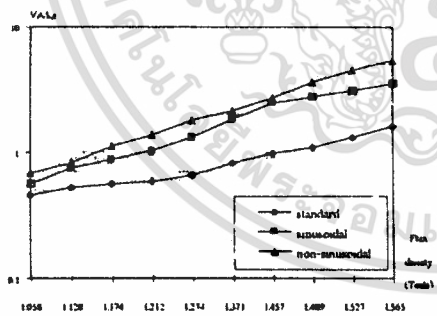
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4 สเปคตรัมแรงดันฮาร์โมนิคส์ของแหล่งจ่ายที่ไม่เป็นรูปคลื่นซายน์



รูปที่ 5 ค่าความสูญเสียของแกนเหล็ก (W/kg)



รูปที่ 6 ค่ากำลังไฟฟ้ากระตุ้น (Exciting Power) (VA/kg)

หมายเหตุ การคำนวณค่า W/kg และ VA/kg สามารถหาได้โดยการนำค่า W และ VA ที่ได้จากการทดสอบมาทำการเปรียบเทียบกับค่าของน้ำหนักของแกนเหล็กที่ใช้ทดสอบ

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก เมื่อค่าแรงดันฟันตาแมนทอลเท่ากัน

Flux density ที่แรงดันฟันตาแมนทอล (Tesla)	ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (Tesla)	
	รูปคลื่นซายน์	ไม่เป็นรูปคลื่นซายน์
1.024	1.058	1.107
1.093	1.128	1.171
1.139	1.174	1.255
1.173	1.212	1.316
1.241	1.274	1.396
1.329	1.371	1.449
1.421	1.457	1.521
1.453	1.489	1.619
1.490	1.527	1.686
1.525	1.565	1.722

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบค่าแรงดันประสิทธิผล (Vrms) ในสภาวะที่แหล่งจ่ายเป็นรูปคลื่นซายน์และไม่เป็นรูปคลื่นซายน์

Flux density ที่แรงดันฟันตาแมนทอล (Tesla)	แรงดันประสิทธิผล (Vrms)	
	รูปคลื่นซายน์	ไม่เป็นรูปคลื่นซายน์
1.024	32.16	33.66
1.093	34.30	35.60
1.139	35.68	38.16
1.173	36.84	40.01
1.241	38.73	42.43
1.329	41.69	44.05
1.421	44.30	46.25
1.453	45.27	49.21
1.490	46.41	51.25
1.525	47.56	52.35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบค่า Exciting current ในสภาวะที่แหล่งจ่ายเป็นรูปคลื่นซายน์และไม่เป็นรูปคลื่นซายน์

Flux density ที่แรงดันฟันตา เมนทอล (Tesla)	Exciting current (A)	
	รูปคลื่นซายน์	ไม่เป็นรูปคลื่นซายน์
1.024	1.44	1.66
1.093	1.77	1.90
1 139	2.02	2.38
1.173	2.30	2.78
1 241	2.75	3.45
1 329	3.59	4.02
1.421	4.57	4.78
1.453	4.96	6.03
1.490	5.44	7.22
1.525	6.07	7.99

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบผลต่างของค่าความสูญเสียของแกนเหล็ก (W/kg) ระหว่างข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิตกับข้อมูลจากการทดสอบ

Flux density ที่แรงดันฟันตา เมนทอล (Tesla)	ค่าผลต่างของความสูญเสียของแกนเหล็ก (W/kg)	
	รูปคลื่นซายน์	ไม่เป็นรูปคลื่นซายน์
1 024	0.015	0.049
1.093	0.016	0.051
1.139	0.019	0.094
1 173	0.021	0 117
1.241	0.025	0.126
1 329	0.030	0.134
1.421	0.037	0.164
1.453	0.042	0.262
1.490	0.047	0.375
1.525	0.053	0.438

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบผลต่างของค่า Exciting Power (VA/kg) ระหว่างข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิตกับข้อมูลจากการทดสอบ

Flux density ที่แรงดันฟันตา เมนทอล (Tesla)	ค่าผลต่างของ Exciting Power (VA/kg)	
	รูปคลื่นซายน์	ไม่เป็นรูปคลื่นซายน์
1.024	0.105	0.219
1.093	0.220	0.304
1.139	0.320	0.547
1.173	0.443	0 776
1.241	0.640	1.123
1.329	1.014	1.344
1.421	1.483	1.709
1 453	1.632	2.510
1 490	1.772	3.204
1.525	1.912	3.689

หมายเหตุ เครื่องมือที่ใช้ในการวัดค่าต่างๆ มีรายละเอียดดังนี้ 1. True RMS Multimeter Fluke 87

2. Oscilloscope Hewlett Packard 54540A

3. Analyzing Recorder Yokogawa AR1100A

4.สรุป

จากการทดสอบแกนเหล็กของหม้อแปลง ผลการทดสอบที่ได้ดังรูปที่ 5 และ 6 และ ตารางที่ 1, 2, 3, 4 และ 5 ในสภาวะแหล่งจ่ายที่เป็นรูปคลื่นซายน์ เมื่อเทียบกับบริษัทผู้ผลิตพบว่ามีค่าความสูญเสีย (W/kg และ VA/kg) สูงกว่าข้อมูลของบริษัทผู้ผลิต สาเหตุอันเนื่องจากการผลิตในแต่ละขั้นตอนของการผลิต หรือเรียกว่าค่าตัวประกอบการผลิต (Building Factor) เช่น แผ่นเหล็กได้รับการกระแทกจากการตัด การเรียงแผ่นเหล็ก เป็นต้น และเมื่อพิจารณาผลการทดสอบในสภาวะแหล่งจ่ายไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ พบว่ามีค่ามากกว่าผลการทดสอบในสภาวะแหล่งจ่ายเป็นรูปคลื่นซายน์ เนื่องจากมีฮาร์โมนิคส์ต่างๆ เพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้ค่าแรงดันประสิทธิผลเพิ่มขึ้น ดังนั้นผู้ออกแบบสามารถที่จะนำข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ และทดสอบนี้ไปใช้อ้างอิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการออกแบบหม้อแปลงให้มีค่าความสูญเสียใกล้เคียงกับความต้องการมากที่สุด เพื่อประหยัดต้นทุนในการผลิต เพิ่มประสิทธิภาพของการใช้งานและมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น ทำให้หม้อแปลงสามารถใช้งานในสภาวะต่างๆได้โดยไม่เกิดความเสียหายทำให้มีอายุการใช้งานยาวนานยิ่งขึ้น ลดค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงรักษาและยังส่งผลให้เกิดเสถียรภาพต่อระบบไฟฟ้า จากการทดสอบได้ทำการทดสอบที่ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กประมาณ 1.1-1.62 เทสลา ซึ่งเป็นค่าที่บริษัทผู้ผลิตหม้อแปลงทำการเลือกสำหรับการออกแบบและการใช้งานของแกนเหล็กซิลิคอน

สำหรับแนวทางการพัฒนาต่อไปสามารถทำได้โดยใช้แหล่งจ่ายไฟที่ไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ในลักษณะต่างๆกันที่นอกเหนือจากงานวิจัยนี้ ก็จะทำให้ได้ข้อมูลคุณสมบัติของแกนเหล็กไว้สำหรับใช้อ้างอิงในการออกแบบและการศึกษาค้นคว้าได้ต่อไปในอนาคต

5.กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ บริษัทพงษ์พิมานการไฟฟ้า จำกัด และผู้มีส่วนเกี่ยวข้องที่สนับสนุนการวิจัยนี้จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

6.เอกสารอ้างอิง

[1] พิชิต ลำยอง , "เครื่องจักรกลไฟฟ้า 1," ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2539

[2] M.H. Rashid , " Power Electronics," Prentice-Hall, 1988.

[3] ศิริวิช ทัดสวน , "การทดสอบคุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแช่น้ำมันที่สภาวะเป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้น ," วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , 2543.

[4] บุญเลิศ สืบนนท , "การพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายแบบจุ่มน้ำมัน," วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2543.

[5] Legnona Teknoelectric Company , " Technical Data on Electrical Steel Sheet," Italy, 1998.

[6] D.Slonovitz, "Correction of Power Transformer no-load loss , measured under non-sinusoidal Voltage waveforms ," Proc IEE Vol.136, Pt.c,No.1, pp. 42-47, January, 1989

[7] D.S Takach and R.L.Boggavarapu , " Distribution Transformer no-load Losses ," IEEE Trans. Power Apparatus and systems , Vol. PAS- 504 , no.1, pp.181-193, January, 1985

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นาย ปัญญา มาลีวัตร เกิดเมื่อวันที่ 10 ธันวาคม 2513 ที่ จังหวัดอ่างทอง สำเร็จการศึกษาหลักสูตร อุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีการวัดคุมอุตสาหกรรม จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2536

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้