การศึกษาความผิดพร่องของแกนเหล็กสเตเตอร์ในสเตเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส

THE IMPERFECT STUDY OF STATOR CORES IN THREE-PHASE INDUCTION MOTOR

สุขสาคร เจริญสุข

SUKSAKORN CHARCENSUK

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2551

KMITL-2008-EN-M-020-127

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาความบกพร่องของแกนเหล็กสเตเตอร์ใน มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส

THE IMPERFECT STUDY OF STATOR CORES IN THREE-PHASE INDUCTION MOTOR



สุขสาคร เจริญสุข

SUKSAKORN CHAROENSUK

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 82656
วัน,เดือน,ปี 21 ก.ค. 2551

b 11950286
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2551

KMITL-2008-EN-M-020-127

THE IMPERFECT STUDY OF STATOR CORES IN THREE-PHASE INDUCTION MOTOR

SUKSAKORN CHAROENSUK

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
2008

KMITL-2008-EN-M-020-127

COPYRIGHT 2008

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาความบกพร่องของแกนเหล็กสเตเตอร์ในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส
นักศึกษา	นางสาวสุขสาคร เจริญสุข
รหัสประจำตัว	48060252
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2551
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ. พิชิต ลำยอง

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แสดงการศึกษาความบกพร่องของแกนเหล็กสเตเตอร์ในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส ใช้หลักการแม่เหล็กไฟฟ้าในการทดสอบแกนเหล็ก เพื่อนำเสนอการหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็กสเตเตอร์ ด้วยการพันสายไฟจำนวน 1 รอบกระตุ้นกระแสเข้าแกนเหล็กสเตเตอร์ที่พิกัดความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก วัดค่ากำลังไฟฟ้าป้อนเข้า, แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำและกระแสไฟฟ้า นำมาคำนวณค่าความสูญเสียในแกนเหล็กต่อกิโลกรัม (W/kg) ค่าความสูญเสียเสียในแกนเหล็กถูกนำมาประเมินค่า เพื่อเปรียบเทียบผลระหว่างการออกแบบและการทำงานตามความเป็นจริง ได้แก่ แบบวางเรียงซ้อน, แบบเชื่อมปกติ และแบบฉนวนเคลือบแกนเหล็กเสื่อมสภาพ สุดท้ายได้ค่าความสูญเสียในแกนเหล็กและค่ากระแสกระตุ้นป้อนเข้าแกนสเตเตอร์มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 1 แรงม้า และ2แรงม้า เพื่อแสดงให้เห็นและพิจารณาตัดสินใจ

Thesis Title	The imperfect study of stator cores in Three-phase induction motor
Student	Ms. Suksakorn Charoensuk
Student ID.	48060252
Degree	Master of Engineering in Electrical Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2008
Thesis Advisor	Asst. Prof Pichit Lumpyong

ABSTRACT

This thesis presents the imperfect study of stator cores in three-phase induction motor by using electromagnetic principle in iron core testing. The proposed method to determine core losses of stator core is excited by single turn wire at rated magnetic flux density. The input power, induced voltage and electric current are measured and calculated in core losses per kilogram (W/kg). The losses of stacking core, normal welding core and the electric insulator coats stator core deteriorates are evaluated for comparison between designs and actual working. Finally, the core losses and excited current of stator core are illustrated and discussed for 1Hp and 2Hp three-phase induction motor.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้อย่างดี ด้วยคำแนะนำ และคำปรึกษาจาก รศ. พิชิต ลำยอง ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้เขียนขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณบริษัทมิตซูบิชิ อีเล็คทริค ออโตเมชั่น (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้การสนับสนุนวัสดุ เครื่องมือ และการทดสอบ ที่ใช้ในการทำวิจัย

ขอขอบคุณอาจารย์ เปี่ยมภูมิ สฤกพกษ์ สำหรับการแนะนำการใช้เครื่องมือต่าง ๆ

สุดท้ายนี้ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนในทุกเรื่องๆ ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้เขียนขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

สุขสาคร เจริญสุข

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....II

กิตติกรรมประกาศ.....III

สารบัญ.....IV

สารบัญตาราง.....VII

สารบัญรูป.....VIII

บทที่ 1 บทนำ.....1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....1

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....2

1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....2

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....3

1.5 ขอบเขตการวิจัย.....3

1.6 ขั้นตอนการศึกษา.....3

บทที่ 2 ทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้า.....4

2.1 สนามแม่เหล็ก.....4

2.2 สนามแม่เหล็กรอบขดลวดตัวนำ.....8

2.3 แรงเคลื่อนทางแม่เหล็ก.....8

2.4 การเหนี่ยวนำของแม่เหล็กไฟฟ้า.....9

2.5 ความเข้มสนามแม่เหล็ก.....10

2.6 ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก.....11

2.7 ความซึบซาบได้.....13

2.8 ความซึบซาบได้สัมพัทธ์.....13

2.9 วัสดุแม่เหล็ก.....14

2.10 ความต้านทานแม่เหล็ก.....15

2.11 เส้นโค้งแสดงความเป็นแม่เหล็ก.....16

2.12 การสูญเสียในแกนเหล็ก.....19

2.13 กฎของแอมแปร์.....21

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.14 เส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล.....23
2.15 การกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้า.....25

บทที่ 3 ทฤษฎีมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....27
3.1 โครงสร้างของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส.....27
3.2 หลักการทำงานของมอเตอร์.....29
3.3 ความเร็วและค่าต่างๆ ที่สัมพันธ์กับความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 30
3.4 การสูญเสียในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....32
3.5 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำและการหาค่าพารามิเตอร์.....35

บทที่ 4 การเสื่อมสภาพของฉนวนที่เป็นสารเคลือบผิวบนแกนเหล็ก.....40
4.1 สเตเตอร์หลวมคลอน.....40
4.2 แกนเหล็กเกิดการเสียหายขณะที่พันขดลวดที่แกนสเตเตอร์.....41
4.3 ฉนวนเคลือบแกนเหล็กเกิดการหลุดล่อนออกเมื่อทำการทดสอบขดลวดสเตเตอร์...42
4.4 ความเสียหายของแกนสเตเตอร์เนื่องจากไฟไหม้.....42
4.5 ความเสียหายเชิงกลโดยเกิดจากการกระแทก.....42
4.6 สาเหตุอื่นๆ.....42

บทที่ 5 การหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก.....43
5.1 หลักการป้อนกระแสสูงกระตุ้นเข้าแกนสเตเตอร์.....43
5.2 การคำนวณหาค่ารายละเอียดต่างๆของแกนเหล็ก.....43
5.3 การคำนวณหาค่าแรงดัน.....45
5.4 การคำนวณหาค่ากระแส.....46
5.5 การคำนวณค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก.....46
5.6 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ.....47
5.7 ขั้นตอนการทดสอบค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก.....49

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 6 การทดสอบค่าความสูญเสียในแกนเหล็กมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....52

6.1 การหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก สภาวะไร้โหลด..... 52

6.2 ผลการทดสอบหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก.....54

บทที่ 7 ผลการทดสอบค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก.....61

7.1 ผลการทดสอบแกนเหล็กปกติ 1Hp, 2Hp แบบไม่มีเฟรมหุ้ม.....61

7.2 ผลการทดสอบแกนเหล็กแบบวางเรียงคั่นฉนวน 1Hp, 2Hp.....62

7.3 ผลการทดสอบแกนเหล็กแบบวางเรียงซ้อน 1Hp, 2Hp.....65

7.4 ผลการทดสอบค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก แบบไม่มีเฟรม 1Hp, 2Hp.....67

7.5 ผลการทดสอบค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก แบบมีเฟรม 1Hp, 2Hp.....71

7.6 การเปรียบเทียบค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก ที่สภาพแกนเหล็กต่างๆของมอเตอร์....74

7.7 การเปรียบเทียบค่าความสูญเสียในแกนเหล็กด้วยวิธีป้อนกระแสกระตุ้น.....76
กับการทดสอบมอเตอร์ สภาวะไร้โหลด

บทที่ 8 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....78

8.1 สรุปผลวิจัย.....78

8.2 ข้อเสนอแนะ.....79

เอกสารอ้างอิง.....80

ภาคผนวก ก. ระบบหน่วยสำหรับวงจรแม่เหล็ก.....81

ภาคผนวก ข. ตารางผลการทดสอบ.....82

ภาคผนวก ค. กราฟคุณสมบัติทางแม่เหล็กของ 50A1300.....99

ภาคผนวก ง. เครื่องมือที่ใช้ในกาทดสอบ.....104

ภาคผนวก จ. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....107

ประวัติผู้เขียน.....113

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 การเปรียบเทียบค่าวงจรไฟฟ้ากับวงจรแม่เหล็ก.....16

6.1 ผลการทดสอบมอเตอร์ สภาวะไร้โหลด 380V 50Hz.....54

7.1 ขนาดและคุณสมบัติของแกนเหล็กที่นำมาทดสอบ.....60

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 การทดลองของเออสเตด.....4

2.2 การเกิดเส้นแรงแม่เหล็กรอบตัวนำ.....5

2.3 กฎมือขวาของเส้นแรงแม่เหล็ก.....5

2.4 ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าและทิศทางการไหลของเส้นแรงแม่เหล็กรอบตัว.....6

2.5 เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในขดลวด.....6

2.6 ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าในทิศทางตรงกันข้ามในตัวนำที่วางขนานกัน.....7

2.7 ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าในทิศทางเดียวกันในตัวนำที่วางขนานกัน.....7

2.8 สนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไหลผ่านขดลวด.....8

2.9 ปรากฏการณ์ Fringing.....11

2.10 การหาค่าความต้านทานวงจรแม่เหล็ก.....15

2.11 ลักษณะของทอรอยด์.....16

2.12 เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กกับ.....18
ความเข้มสนามแม่เหล็ก ($B-H$ Curve) เมื่อ $H<400$ แอมแปร์ต่อเมตร

2.13 เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กกับ.....18
ความเข้มสนามแม่เหล็ก($B-H$ Curve) เมื่อ $H>400$ แอมแปร์ต่อเมตร

2.14 เส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างความซึมซาบได้กับความเข้มสนามแม่เหล็ก.....19

2.15 การเกิดกระแสไหลวนในแกนเหล็ก.....21

2.16 วงจรแม่เหล็กขดลวดพันรอบแกนเหล็กแบบทอรอยด์.....22

2.17 วงจรแม่เหล็กที่ช่องอากาศ.....23

2.18 เส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล.....24

3.1 โครงสร้างของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส.....27

3.2 ส่วนที่อยู่กับที่สเตเตอร์ (Stator) ของมอเตอร์.....28

3.3 แบบกรงกระรอก (Squirrel Cage Rotor).....28

3.4 แบบขดลวดพันรอบโรเตอร์ (Wound Rotor).....29

3.5 หลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส.....30

3.6 Block diagram การส่งผ่านกำลังงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....32

3.7 วงจรสมมูลของสเตเตอร์ต่อเฟส.....36

3.8 วงจรสมมูลของโรเตอร์ที่ slip-frequency.....38

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

3.9 วงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำซึ่งมีหลายเฟส.....39
4.1 การเกิดกระแสไหลวนเนื่องมาจากการเสื่อมสภาพของฉนวน.....41
4.2 โครงสร้างของแกนสเตเตอร์ที่เกิดการเสียหายจาก wedge และกระแสไหลวนที่เกิดขึ้น..... 41
4.2 ความเสียหายของแกนสเตเตอร์เนื่องจากไฟไหม้..... 42
5.1 วงจรแม่เหล็กของแกนเหล็กสเตเตอร์.....43
5.2 รายละเอียดของแกนเหล็ก.....43
5.3 การหาพื้นที่เส้นแรงแม่เหล็ก.....44
5.4 วงจรของการทดสอบค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก.....47
5.5 หม้อแปลงขนาด 220V/6V 500Amp 3kVA.....48
5.6 การจัดตั้งชุดทดสอบการหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก..... 49
5.7 การพันขดลวดกระตุ้นแกนเหล็ก 1 รอบ.....49
5.8 Ossiloscope รุ่น Yogokawa DL1640.....50
5.9 Current Probe วัดที่ Shunt Amp.....50
5.10 Digital Low Resistance Ohm Meter.....50
6.1 วงจรสมมูล ขณะ No-load.....52
6.2 วงจรการทดสอบ No-load.....53
6.3 Mechanical losses ของมอเตอร์ 1 แรงม้า 4 ขั้ว.....55
6.3 Mechanical losses ของมอเตอร์ 2 แรงม้า 4 ขั้ว.....55
6.5 กราฟเปรียบเทียบค่าความสูญเสียในแกนเหล็กมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า.....56
6.6 กราฟเปรียบเทียบค่าความสูญเสียในแกนเหล็กมอเตอร์ขนาด 2 แรงม้า.....56
7.1 แผ่นสเตเตอร์.....58
7.2 แผ่นสเตเตอร์แบบเรียงคั่นฉนวน.....58
7.3 แกนเหล็กปกติแบบไม่มีเฟรมหุ้ม.....59
7.4 แกนเหล็กผิดปกติแบบไม่มีเฟรมหุ้ม.....59
7.5 แกนเหล็กปกติแบบมีเฟรมหุ้ม.....59
7.6 แกนเหล็กผิดปกติแบบมีเฟรมหุ้ม.....60
7.7 แกนเหล็กปกติแบบไม่มีเฟรมหุ้ม 1Hp, 2Hp.....61
7.8 ค่าความสูญเสียในแกนเหล็กปกติ 1Hp, 2Hp.....61

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

7.9 กระแสกระตุ้นเมื่อเปรียบเทียบกับค่า *B* ที่จุดต่างๆ ของแกนเหล็กปกติ.....62
ของมอเตอร์ 1Hp, 2Hp
7.10 ค่าความสูญเสียในแกนเหล็กแบบเรียงคั่นฉนวน.....63
7.11 กระแสกระตุ้นเมื่อเปรียบเทียบกับค่า *B* ที่จุดต่างๆ ของแกนเหล็กแบบเรียงคั่นฉนวน.....63
ของมอเตอร์ 1Hp, 2Hp
7.12 ค่าความสูญเสียในแกนเหล็กแบบเรียงคั่นฉนวน, แกนเหล็กปกติ ขนาด 1Hp.....64
7.13 ค่าความสูญเสียในแกนเหล็กแบบเรียงคั่นฉนวน, แกนเหล็กปกติ ขนาด 2Hp.....64
7.14 แผ่นสเตเตอร์ขนาด1Hp และ2Hp.....65
7.15 ค่าความสูญเสียในแกนเหล็กแบบเรียงซ้อนแผ่น.....65
7.16 กระแสกระตุ้นเมื่อเปรียบเทียบกับค่า *B* ที่จุดต่างๆ ของแกนเหล็กแบบเรียงซ้อนแผ่น.....66
ของมอเตอร์ 1Hp, 2Hp
7.17 ค่าความสูญเสียในแกนเหล็กแบบเรียงซ้อนแผ่น, แกนเหล็กปกติ ขนาด 1Hp.....66
7.18 ค่าความสูญเสียในแกนเหล็กแบบเรียงซ้อนแผ่น, แกนเหล็กปกติ ขนาด 2Hp.....67
7.19 แกนเหล็กปกติและผิดปกติ แบบไม่มีเฟรมหุ้มของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า.....68
7.20 ค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก ของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า แบบไม่มีเฟรม.....68
7.21 กระแสกระตุ้นเมื่อเปรียบเทียบกับค่า *B* ที่จุดต่างๆ ของแกนเหล็ก 1 แรงม้า แบบไม่มีเฟรม....69
7.22 แกนเหล็กปกติและผิดปกติ แบบไม่มีเฟรมหุ้มของมอเตอร์ขนาด 2 แรงม้า.....69
7.23 ค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก ของมอเตอร์ขนาด 2 แรงม้า แบบไม่มีเฟรม.....70
7.24 กระแสกระตุ้นเมื่อเปรียบเทียบกับค่า *B* ที่จุดต่างๆ ของแกนเหล็ก 2 แรงม้า แบบไม่มีเฟรม....70
7.25 แกนเหล็กมอเตอร์ปกติและผิดปกติ ขนาด 1 แรงม้า.....71
7.26 ค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก ของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า แบบมีเฟรม..... 72
7.27 กระแสกระตุ้นเมื่อเปรียบเทียบกับค่า *B* ที่จุดต่างๆ ของแกนเหล็ก 1 แรงม้า แบบมีเฟรม.....72
7.28 แกนเหล็กมอเตอร์ปกติและผิดปกติ ขนาด 2 แรงม้า.....73
7.29 ค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก ของมอเตอร์ขนาด 2 แรงม้า แบบมีเฟรม..... 73
7.30 กระแสกระตุ้นเมื่อเปรียบเทียบกับค่า *B* ที่จุดต่างๆ ของแกนเหล็ก 2 แรงม้า แบบมีเฟรม.....74
7.31 ค่าความสูญเสียของแกนเหล็กในสภาพต่างๆ ของมอเตอร์ 1Hp ที่ *B*= 2.0 T.....75
7.32 ค่าความสูญเสียของแกนเหล็กในสภาพต่างๆ ของมอเตอร์ 2Hp ที่ *B*= 2.0 T.....75

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

7.33 ค่าความสูญเสียของแกนเหล็กในมอเตอร์ 1Hp 4P 380V 50Hz ที่ B=2.0T 76

7.34 ค่าความสูญเสียของแกนเหล็กในมอเตอร์ 2Hp 4P 380V 50Hz ที่ B=2.0T 76

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าถูกพัฒนาขึ้นมา เพื่อใช้ในงานอุตสาหกรรมมากมาย ในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีส่วนประกอบที่สำคัญ เช่น แกนเหล็ก, ขดลวด, โครงสร้าง ฯลฯ ซึ่งแกนเหล็กถือเป็นปัจจัยที่สำคัญในการกำหนดค่าประสิทธิภาพมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ การวัดค่าคุณสมบัติทางแม่เหล็กของแกนเหล็กสามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่ การทดสอบแบบแอปสทีน (Epstein method) [1], การทดสอบแบบวงแหวน (Ring specimen method) และการทดสอบแบบแผ่นเดี่ยว (Single sheet method) [2], [3] ดังนั้นในการออกแบบต้องพิจารณาคุณสมบัติของแกนเหล็ก [4] ยกตัวอย่างเช่น กราฟแสดงความเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กกับค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก และกราฟค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้น ณ ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กต่างๆ ดังนั้นจึงถือว่าเป็นเรื่องที่สำคัญต่อการพัฒนา และออกแบบมอเตอร์ไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพสูง และการศึกษาการเกิดความบกพร่องในแกนเหล็กมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ที่จะกล่าวในวิทยานิพนธ์นี้คือค่าความสูญเสียในแกนเหล็กที่เพิ่มมากขึ้นเนื่องจากฉนวนเสื่อมสภาพ แบ่งเป็น 2 ส่วน คือความสูญเสียเนื่องจากฮีสเตอรีซีส [5] และความสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน ผลของการเสื่อมสภาพของแกนเหล็ก ทำให้มอเตอร์เกิดค่าความสูญเสียเพิ่มขึ้นและทำงานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ ดังนั้นค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งค่าความเข้มสนามแม่เหล็กต่างๆ เป็นเรื่องสำคัญต่อการศึกษาและออกแบบวิธีการตรวจสอบสร้างเครื่องจักรกลไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

การตรวจสอบความผิดปกติต่างๆในมอเตอร์สามารถทำได้หลายวิธี การวิเคราะห์จากความถี่กระแสไฟฟ้า เส้นแรงแม่เหล็ก และอุณหภูมิ วิธีการที่กล่าวข้างต้น ยกเว้นอุณหภูมิ อาศัยการแยกความถี่จากสัญญาณที่วัดจากเซ็นเซอร์ เพื่อนำมาหาสาเหตุของความผิดปกติ การวัดอุณหภูมิเป็นการประเมินสภาพความผิดปกติต่างๆ ที่ให้ผลออกมาในรูปของความร้อน เพื่อหลีกเลี่ยงการใช้งานในสภาวะอุณหภูมิสูงเกิน (Over heat) ซึ่งอาจนำไปสู่การเสื่อมไหม้ของฉนวน ซึ่งในปัจจุบันมีหลายบทความเกี่ยวกับการตรวจสอบความผิดปกติ เช่น การหาค่าความผิดปกติในเครื่องจักรขนาดใหญ่แบบ Low Flux Density Excitation [6], การหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก ด้วยแอปสทีน [7] และการหาค่าความสูญเสียของแกนเหล็กในมอเตอร์ โดยใช้ขดลวดเหนี่ยวนำตรวจจับเส้นแรงแม่เหล็กด้วยแหล่งจ่าย PWM อินเวอร์เตอร์ [8] เป็นต้น

ในวิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการศึกษาความบกพร่องของแกนเหล็กสเตเตอร์ในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส ด้วยวิธีการป้อนกระแสกระตุ้น [9] เข้าที่แกนเหล็ก และนำมาเปรียบเทียบกับวิธีการทดสอบมอเตอร์สภาวะไร้โหลด (No-load) ตามมาตรฐาน IEEE 112-1996 Method B

[10] เพื่อหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็กในมอเตอร์ ขนาด 1Hp 4P 380V 50Hz และ 2Hp 4P 380V 50Hz โครงสร้างแกนสเตเตอร์ทำจากเหล็กซิลิคอน (Silicon electric steel) ชนิด 50A1300 [11]

การผลิตนำแผ่นเหล็กสเตเตอร์อัดแน่นเข้าด้วยกันเป็นแกนเหล็กในมอเตอร์ ต้องผ่านกระบวนนำแผ่นเหล็กขึ้นรูป ทำให้ค่าความสูญเสียในแกนเหล็กมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากกระแสไหลวน ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ใช้วิธีการป้อนกระแสกระตุ้น เพื่อศึกษาค่าความสูญเสียในแกนเหล็กที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากความผิดปกติของแกนเหล็กและนำผลทดสอบมอเตอร์กับบริษัทผู้ผลิตมอเตอร์เพื่อยืนยันความถูกต้อง โดยทำการทดสอบเปรียบเทียบแกนเหล็กในสภาพต่างๆ ดังนี้ แบบเรียงคั่นฉนวนระหว่างแผ่น, แบบวางเรียงซ้อนแผ่น, แบบเชื่อมปกติ และแบบฉนวนเคลือบแกนเหล็กเสื่อมสภาพ ผลการทดสอบหากราฟค่าความสูญเสียในแกนเหล็กและกราฟกระแสกระตุ้นเมื่อเปรียบเทียบกับค่า B ที่จุดต่างๆ เพื่อแสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติทางแม่เหล็กของแกนเหล็ก [11], [12], [13] ดังนั้นนำวิทยานิพนธ์นี้ไปประยุกต์ใช้งานอุตสาหกรรมได้ เพื่อนำไปสู่พิจารณาและตรวจสอบคุณภาพของแกนเหล็กสเตเตอร์ในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวสามเฟส, ตรวจสอบคุณภาพชิ้นงานในกระบวนการผลิต ออกแบบมอเตอร์ให้เหมาะสม และการเลือกวัสดุทำแกนสเตเตอร์ในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้ในอนาคต

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ในการศึกษา

1.2.1 การหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็กสเตเตอร์ในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส เนื่องจากความบกพร่องของแกนเหล็กด้วยวิธีการป้อนกระตุ้นเข้าแกนเหล็ก ผลการทดสอบจะช่วยในการตัดสินใจเกี่ยวกับคุณภาพของแกนเหล็กว่าสามารถนำไปใช้งานได้หรือไม่ โดยดูจากค่าความสูญเสียในแกนเหล็กที่เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับผู้ผลิตมอเตอร์

1.2.2 วิธีการป้อนกระแสกระตุ้นเข้าแกนเหล็กสเตเตอร์ มีค่าสอดคล้องกับค่าความสูญเสียในแกนเหล็กมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เมื่อทำการทดสอบมอเตอร์ในสภาวะไร้โหลด

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

การศึกษาความบกพร่องของแกนเหล็กสเตเตอร์ในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยทำการจำลองชุดทดสอบวิธีการป้อนกระแสกระตุ้นเข้าแกนสเตเตอร์ เพื่อหาค่าคุณบัติทางแม่เหล็กของแกนเหล็ก เพื่อให้เกิดการเหนี่ยวนำค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก โดยการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำและกระแสไฟฟ้า จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าป้อนเข้ามาลบกับค่าความสูญเสียในสายไฟ ผลสุดท้ายจะได้ค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก (W/kg) ดังนั้นการหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก สามารถยืนยันผลการทดสอบแกนเหล็กวิธีป้อนกระตุ้นกระแสมีค่าสอดคล้อง

กับค่าความสูญเสียในแกนเหล็กในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส เมื่อทำการทดสอบสภาวะไร้โหลด และเป็นวิธีที่สะดวกและง่ายต่อการทดสอบ

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

วิทยานิพนธ์นำเสนอแนวคิดที่ใช้ตรวจสอบความบกพร่องของแกนเหล็กสเตเตอร์ในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้วยเทคนิคการป้อนกระแสกระตุ้นเข้าแกนสเตเตอร์ ตามทฤษฎีเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กของฟาราเดย์ คือ จ่ายแรงดันผ่านขดลวดที่พันรอบแกนเหล็กสเตเตอร์จำนวน 1 รอบ ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กไหลในวงจรแม่เหล็ก ทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า นำค่าที่ได้คำนวณค่ากำลังไฟฟ้าป้อนเข้า จากนั้นนำมาหักลบกับค่าความสูญเสียในสายไฟ สุดท้ายได้ค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก (W/kg)

1.5 ขอบเขตการวิจัย

ขอบเขตของการวิจัยวิทยานิพนธ์คือ การหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็กด้วยวิธีการป้อนกระแสกระตุ้นเข้าแกนเหล็ก นำผลที่ได้นำมาเปรียบเทียบกับการทดสอบมอเตอร์สภาวะไร้โหลดเพื่อหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็กสเตเตอร์ในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส 2 ขนาด คือ 1 แรงม้า และ 2แรงม้า 380 โวลต์ 50 เฮิร์ทซ์

1.6 ขั้นตอนการศึกษา

ขั้นตอนการศึกษาวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยแบ่งขั้นตอนและรายละเอียดตามลำดับจะประกอบอยู่ในแต่ละบทของวิทยานิพนธ์

1.6.1 ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสามเฟส, แม่เหล็กไฟฟ้าและวงจรแม่เหล็ก

1.6.2 ออกแบบและจำลองชุดทดสอบหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก

1.6.3 จัดเตรียมอุปกรณ์และแกนเหล็กแบบต่างๆ เพื่อใช้ในการทดสอบ

1.6.4 ศึกษาข้อมูลค่าความสูญเสียของแผ่นเหล็กจากโรงงานอุตสาหกรรมผู้ผลิตเหล็ก

1.6.5 ทดสอบค่าความสูญเสียในแกนเหล็กมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสสภาวะไร้โหลด

1.6.6 ทดสอบค่าความสูญเสียในแกนเหล็กปกติ

1.6.7 ทดสอบค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก แบบแผ่นสเตเตอร์เรียงคั่นฉนวน

1.6.8 ทดสอบค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก แบบแผ่นสเตเตอร์เรียงซ้อนแผ่น

1.6.9 ทดสอบค่าความสูญเสียในแกนเหล็กผิดปกติ

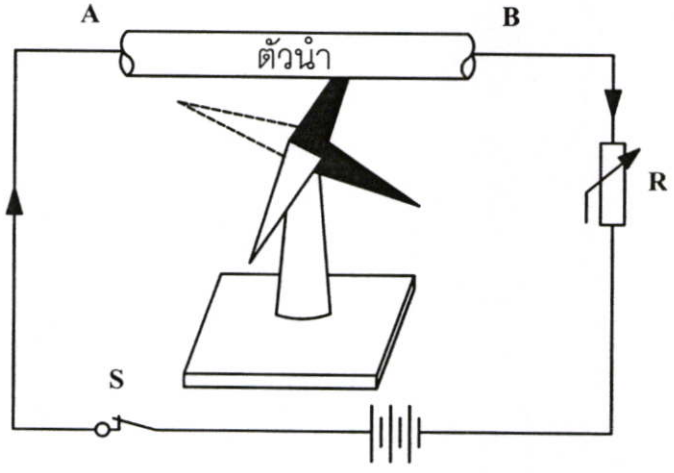
บทที่ 2

ทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้า

2.1 สนามแม่เหล็ก (Magnetic filed)

ในปี ค.ศ. 1819 แฮนด์ คริสเตียน เออสเตด (Hans Christian Oersted) นักฟิสิกส์ชาวเดนมาร์กได้ทำการทดลองเกี่ยวกับการไหลของกระแสไฟฟ้า และพบว่าเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านในตัวนำจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นเสมอ

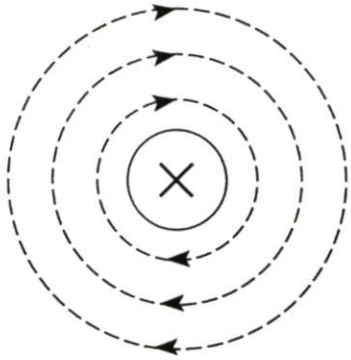
การทดลองของเออสเตดนั้นแสดงได้ดังรูปที่ 2.1 โดยการนำเอาลวดตัวนำไฟฟ้า AB ต่อเข้ากับเซลล์ไฟฟ้า และให้ตัวนำนั้นวางขนานกับเข็มทิศที่วางอยู่ใต้ตัวนำนั้น เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าไหลผ่านลวดตัวนำจะทำให้เข็มทิศเกิดการเบี่ยงเบนไปจากแนวขนานเดิม โดยเข็มทิศจะตั้งฉากกับตัวนำ AB แต่เมื่อให้กระแสไฟฟ้าไหลกลับทาง เข็มทิศจะเกิดการเบี่ยงเบนกลับทางไปอีกทางหนึ่งซึ่งทำมุมกับตำแหน่งเดิม 180 องศา และยังพบอีกว่าถ้าให้ลวดตัวนำทำมุม 90 องศากับเข็มทิศแล้วเข็มทิศจะไม่เบี่ยงเบนไปในทิศทางใดๆ เลย



รูปที่ 2.1 การทดลองของเออสเตด

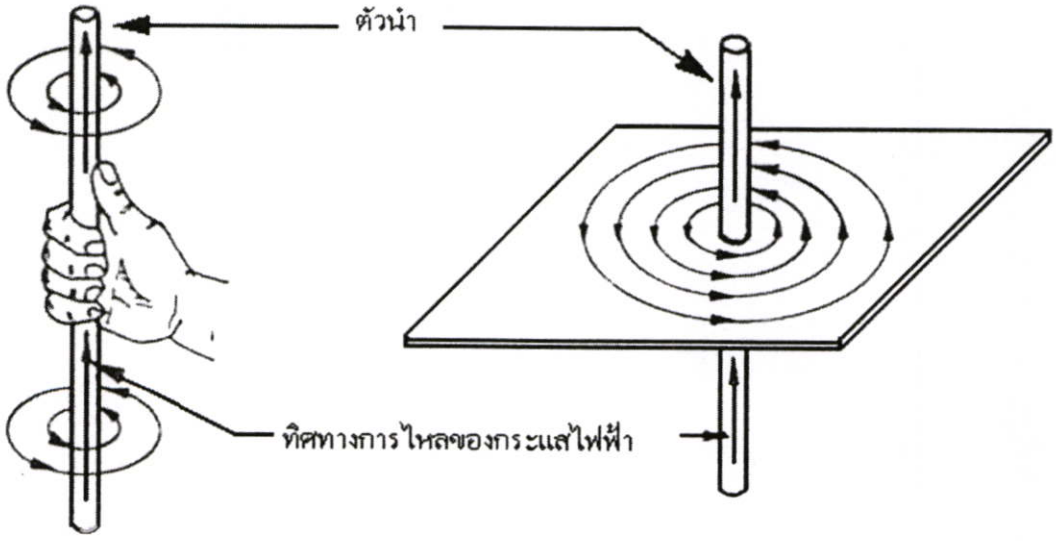
เออสเตดยังได้ค้นพบอีกว่าสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น เนื่องจากการไหลของกระแสไฟฟ้านั้นประกอบไปด้วยเส้นแรงแม่เหล็กจำนวนหนึ่งจัดเรียงเป็นวงรอบๆ ตัวนำที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านนั้น โดยตัวนำจะเป็นจุดศูนย์กลางของวงกลมเหล่านั้นเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบๆตัวนำนี้ถ้ายิ่งอยู่ห่างตัวนำมากอำนาจแม่เหล็กก็ยิ่งน้อย การเกิดสนามแม่เหล็กนี้สามารถแสดงดังรูปที่ 2.2

โดยให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำไฟฟ้าที่อยู่ในแนวตั้งทะลุผ่านกระดาษแข็ง แล้วนำเข็มทิศวางไว้บนกระดาษแข็งตามตำแหน่งต่างๆ จะสังเกตเห็นว่าทิศทางจะหันเหเรียงตามกันไปเป็นวงกลมรอบตัวนำ โดยให้สีดำแทนด้วยขั้วเหนือ และสีขาวแทนด้วยขั้วใต้ หรืออาจใช้ผงเหล็กโรย โดยจะสังเกตเห็นว่าผงเหล็กเรียงตัวเป็นวงกลม



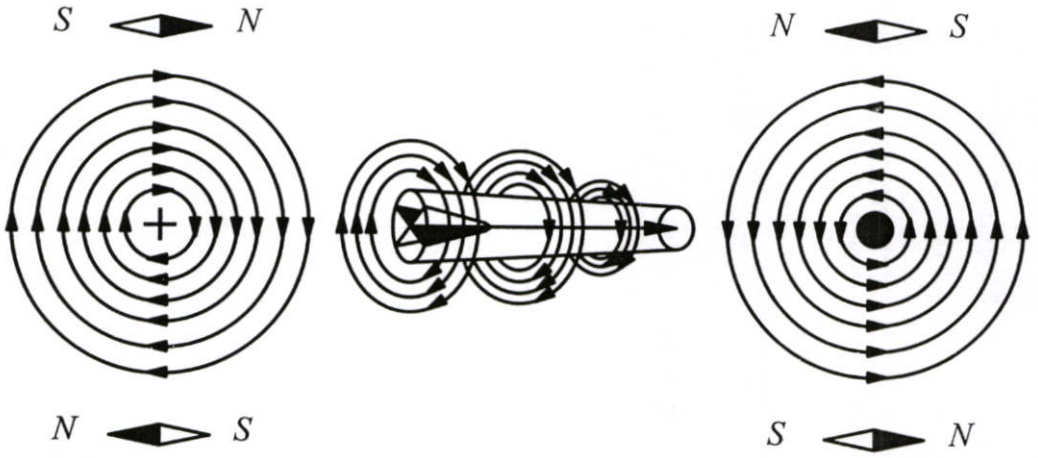
รูปที่ 2.2 การเกิดเส้นแรงแม่เหล็กรอบตัวนำ

ความสัมพันธ์ระหว่างทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กรอบตัวนำไฟฟ้ากับทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าที่ไหลในตัวนำ สามารถหาได้โดยการใช้กฎมือขวาของเส้นแรงแม่เหล็ก คือให้ใช้มือขวากำรอบตัวนำไฟฟ้า โดยให้หัวแม่มือชี้ไปตามความยาวของตัวนำ แทนทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า และให้นิ้วทั้งสี่ที่เหลือกำรอบตัวนำ โดยนิ้วทั้งสี่นั้นจะแทนทิศทางการไหลของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบๆ ตัวนำนั้นดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 กฎมือขวาของเส้นแรงแม่เหล็ก

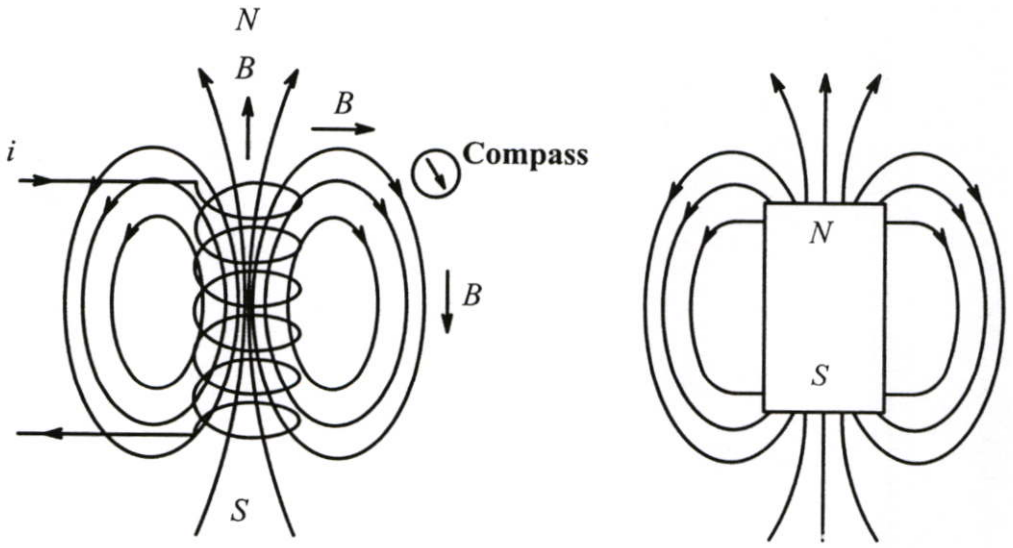
ลูกศรที่ใช้ในวงจรไฟฟ้าจะใช้แสดงทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าไปตามความยาวของตัวนำไฟฟ้า โดยจะกำหนดให้ที่กระแสไฟฟ้าไหลเข้าซึ่งเห็นก้นลูกศรนั้นแทนด้วยเครื่องหมายกากบาท (+) ส่วนด้านที่กระแสไฟฟ้าไหลออกซึ่งเห็นเป็นหัวลูกศรแทนด้วยเครื่องหมายจุด (·) และเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบตัวนำดังแสดงในรูปที่ 2.4 และทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในขดลวดแสดงได้ดังรูป 2.5



กระแสไหลเข้า
เส้นแรงแม่เหล็กมีทิศทางตามเข็มนาฬิกา

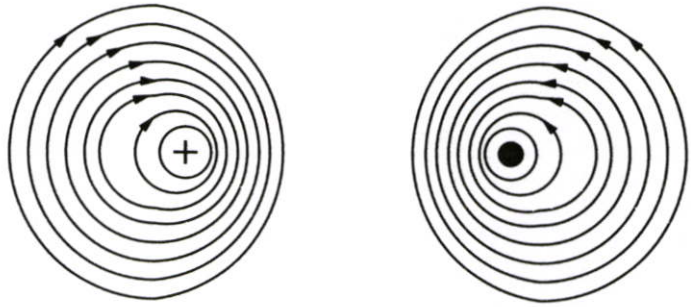
กระแสไหลออก
เส้นแรงแม่เหล็กมีทิศทางทวนเข็มนาฬิกา

รูปที่ 2.4 ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าและทิศทางการไหลของเส้นแรงแม่เหล็กรอบตัวนำ

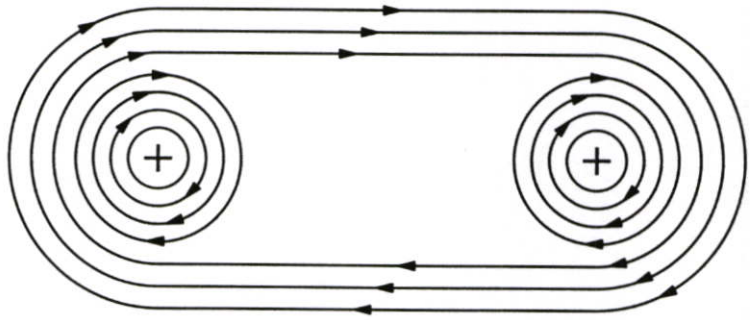


รูปที่ 2.5 เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในขดลวด

เมื่อนำตัวนำ 2 ตัวมาวางขนานกัน และมีกระแสไฟฟ้าไหลไปในทิศทางตรงกันข้ามกัน แสดงในรูปที่ 2.6 สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบๆ ตัวนำทั้งสองสามารถหาได้จากกฎมือขวา โดยกระแสไฟฟ้าไหลออกแสดงด้วยจุด คือตัวนำด้านซ้ายมือ และตัวนำด้านขวาให้กระแสไฟฟ้าไหลเข้าแสดงด้วยเครื่องหมายกากบาท ทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบ ๆ ตัวนำด้านซ้ายมือจะมีทิศทางทวนเข็มนาฬิกา ส่วนตัวนำทางด้านขวาที่กระแสไหลเข้าเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะมีทิศทางตามเข็มนาฬิกา ดังนั้นจะเห็นว่าเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบ ๆ ตัวนำทั้งสองนั้นมีทิศทางไปในทางเดียวกันทำให้เกิดขั้วแม่เหล็กเหมือนกัน จึงเกิดแรงผลักกันขึ้นระหว่างตัวนำทั้งสองที่วางขนานกันนั้น



รูปที่ 2.6 ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าในทิศทางตรงกันข้ามในตัวนำที่วางขนานกัน

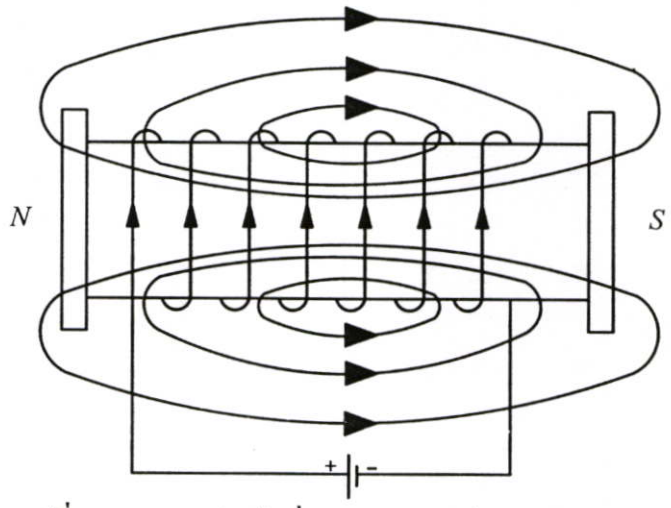


รูปที่ 2.7 ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าในทิศทางเดียวกันในตัวนำที่วางขนานกัน

แต่ถ้าตัวนำทั้งสองที่วางขนานกันมีกระแสไฟฟ้าไหลไปในทิศทางเดียวกัน แสดงในรูปที่ 2.7 โดยสมมุติให้กระแสไหลเข้ามีทิศทางตามเข็มนาฬิกาและเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบๆ ตัวนำทางด้านขวาก็จะมีทิศทางตามเข็มนาฬิกาเช่นเดียวกัน ทำให้เกิดขั้วแม่เหล็กต่างกันเป็นเหตุให้เกิดแรงดูดกันขึ้น ตัวนำทั้งสองถูกดึงเข้ามาใกล้กัน

2.2 สนามแม่เหล็กรอบขดลวดตัวนำ (Magnetic field around a coil)

ถ้าเราพันขดลวดรอบแกนเหล็กดังรูปที่ 2.8 ต่อปลายขดลวดเข้ากับขั้วแบตเตอรี่ แกนเหล็กจะกลายเป็นแม่เหล็ก และคุณสมบัติคล้ายกับแม่เหล็กถาวร ทิศทางของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นแทนด้วยหัวลูกศร



รูปที่ 2.8 สนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไหลผ่านขดลวด

โดยปลายของแกนเหล็กด้านซ้ายจะเป็น ขั้วเหนือและปลายด้านขวาจะเป็นขั้วใต้ ถ้ากลับทิศทางกระแสในขดลวดหรือกลับขั้วแบตเตอรี่ จะทำให้ทิศทางของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นเปลี่ยนแปลงไปหรือขั้วแม่เหล็กด้านซ้ายจะเปลี่ยนเป็นขั้วใต้ และด้านขวาจะเปลี่ยนเป็นขั้วเหนือนั่นเอง

เมื่อทิศทางกระแสไหลในขดลวด เราสามารถหาขั้วแม่เหล็กที่เกิดขึ้นได้โดยใช้กฎมือขวา (Right-hand rule) ของขดลวด ซึ่งกล่าวว่า ให้กำขดลวดด้วยมือขวาโดยให้นิ้วทั้งสี่กำขดลวดชี้ทิศทางกระแสในขดลวด นิ้วหัวแม่มือซึ่งยื่นออกไปขนานกับแกนของขดจะชี้ไปทางขั้วเหนือ (ทิศทางแม่เหล็กภายในขดลวด)

2.3 แรงเคลื่อนทางแม่เหล็ก (Magnetizing Force)

หมายถึง การสร้างเส้นแรงแม่เหล็กของขดลวดที่พันอยู่รอบแกนเหล็ก และทำหน้าที่ส่งเส้นแรงแม่เหล็กให้เคลื่อนที่ผ่านไปในวงจรแม่เหล็ก ซึ่งคล้ายกับแรงดันไฟฟ้าที่ทำหน้าที่ส่งกำลังให้กระแสไฟฟ้าไหลเข้าไปในโหลดหรือส่วนต่างๆของวงจร โดยแรงเคลื่อนทางแม่เหล็กเป็นงาน (work done) มีหน่วยวัดเป็นจูล (Joules) ซึ่งได้จากการนำเอาขั้วเหนือเดี่ยวส่งผ่านเข้าไปในสนามแม่เหล็ก ในหน่วยของงานคิดเป็นจูล แต่หน่วยของแรงเคลื่อนทางแม่เหล็กใช้แอมแปร์เทิร์น

(Ampere-turn) ซึ่งได้จากการเอากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดคูณกับจำนวนรอบของขดลวดที่พันไว้เพื่อให้เกิดสนามเส้นแรงแม่เหล็ก แรงเคลื่อนทางแม่เหล็กสามารถหาได้จากสมการคือ

$$\Im = mmf = Ni \tag{2.1}$$

เมื่อ $\Im$ คือ แรงเคลื่อนทางแม่เหล็ก แอมแปร์เทิร์น (Ampere-turn)

i คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวด แอมแปร์ (Ampere)

N คือ จำนวนรอบขดลวด รอบ (Turn)

2.4 การเหนี่ยวนำของแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic induction)

ในปี ค.ศ. 1831 นักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษ คือ ไมเคิล ฟาราเดย์ (Michael Faraday) ได้ค้นพบหลักฐานสำคัญเกี่ยวกับการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า คือ ถ้ามีขดลวด C ปลายของขดลวดต่อกับกัลวานอมิเตอร์ G (แอมมิเตอร์ที่มีความไวสูง) แล้วนำแม่เหล็กถาวรเคลื่อนที่เข้าไปในขดลวด เข็มของกัลวานอมิเตอร์ จะบ่ายเบนไปทิศทางหนึ่งแสดงว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดขึ้นในขดลวด C หลังจากการเคลื่อนที่ของแม่เหล็กถาวรหยุดลง เข็มของกัลวานอมิเตอร์ จะกลับมาชี้ที่ ศูนย์ตามเดิมผลการทดลองพิสูจน์ได้ว่ามีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อแม่เหล็กถาวรเคลื่อนที่ เมื่อเทียบกับขดลวด C

ถ้าเจาจับขั้วแม่เหล็กถาวรเคลื่อนที่ ออกห่างจากขดลวด C เข็มของกัลวานอมิเตอร์จะบ่ายเบนไปทิศทางตรงข้ามกับครั้งแรกแสดงว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในขดลวด C มีทิศทางตรงข้ามกับครั้งแรกเช่นกัน ถ้าเราจับแม่เหล็กถาวรเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่างกัน จะพบว่ายิ่งมีความเร็วมากเข็มของกัลป์วานอมิเตอร์ก็ยิ่งบ่ายเบนมาก ดังนั้นแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดขึ้นในขดลวด ก็ต้องมากขึ้นด้วย

ผลที่ได้รับจากการทดลองเกี่ยวกับการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า สรุปได้ดังนี้

ก. เมื่อลวดตัวนำเคลื่อนที่ตัดเส้นแรงแม่เหล็ก หรือ เส้นแรงแม่เหล็ก เคลื่อนที่ตัดลวดตัวนำจะมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดขึ้นในขดลวด

ข. ทิศทางของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ขึ้นอยู่กับทิศทางของสนามแม่เหล็ก และขึ้นอยู่กับทิศทางของลวดตัวนำที่เคลื่อนที่สัมพัทธ์กับสนามแม่เหล็ก

ค. ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราความเร็วที่ลวดตัวนำเคลื่อนที่ตัด หรือถูกตัดโดยเส้นแรงแม่เหล็ก

กฎของ Faraday's law คือ "แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในวงจรหนึ่ง มีค่าเป็นอัตราส่วนกับการเปลี่ยนแปลงเส้นแรงแม่เหล็กในวงจรนั้น" สามารถหาการเหนี่ยวนำศักดาไฟฟ้า (Voltage induced)

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

$$= \omega N\phi_{\max} \cos\ (\omega t)$$

$$= E_{\max} \cos \omega t$$

$$E_{\max} = 2\pi fNA_c B_{\max} \tag{2.3}$$

หาค่า Root-mean-square or rms induced voltage (E_{rms})

$$E_{\text{rms}} = \frac{E_{\max}}{\sqrt{2}}$$

$$= \frac{2\pi}{\sqrt{2}} fNA_c B_{\max}$$

$$E_{\text{rms}} = 4.44 fNA_c B_{\max} \tag{2.4}$$

เมื่อ

$\phi_{\max}$	คือ เป็นค่าสูงสุดของเส้นแรงแม่เหล็ก	มีหน่วยเป็น Wb
$B_{\max}$	คือ เป็นค่าสูงสุดของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก	มีหน่วยเป็น T
$\omega = 2\pi f$	คือ เป็นค่าความเร็วเชิงมุม	มีหน่วยเป็น rad/s
f	คือ เป็นความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับ	มีหน่วยเป็น Hz

2.5 ความเข้มสนามแม่เหล็ก (Magnetic field intensity) H

คือ แรงเคลื่อนทางแม่เหล็กต่อหนึ่งหน่วยความยาวของวงจรแม่เหล็ก วงจรแม่เหล็กที่มีเส้นแรงแม่เหล็กสม่ำเสมอ จะมีค่าแรงเคลื่อนทางแม่เหล็กต่อหนึ่งหน่วยความยาวคงที่ตลอดแนวของเส้นแรงแม่เหล็ก หมายความว่าความเข้มสนามแม่เหล็กจะมีค่าคงที่ตลอดแนวความเข้มสนามแม่เหล็กนั้นด้วย ความเข้มสนามแม่เหล็กหาได้จากการนำเอาขั้วเหนือเดี่ยว (N) ที่มีแรงแม่เหล็ก 1 หน่วยขั้วไปวางไว้ ณ จุดใดจุดหนึ่งในสนามแม่เหล็ก ค่าของแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการกระทำของขั้วเหนือเดี่ยวกับสนามแม่เหล็กก็จะเป็นค่า ความเข้มสนามแม่เหล็กนั้นๆ

ความเข้มสนามแม่เหล็ก สามารถหาได้จากสมการคือ

$$H_c = \frac{\Im}{l_c} = \frac{Ni}{l_c} \tag{2.5}$$

เมื่อ H_c คือ ความเข้มสนามแม่เหล็ก มีหน่วยเป็นแอมแปร์/เมตร (A / m)

l_c คือ ความยาวเฉลี่ยของวงจรแม่เหล็ก มีหน่วยเมตร (m)

2.6 ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic flux density)

เส้นแรงแม่เหล็กเป็นปริมาณสเกลาร์ ไม่มีทิศทาง สามารถหาขนาดของเส้นแรงแม่เหล็กได้จากนิยามของเส้นแรงแม่เหล็กเป็น Surface Integral ของความหนาแน่นแม่เหล็ก กับพื้นที่ผิวซึ่งตั้งฉากกัน

$$\phi = \int_s \mathrm{B} \bullet \mathrm{dA} \tag{2.6}$$

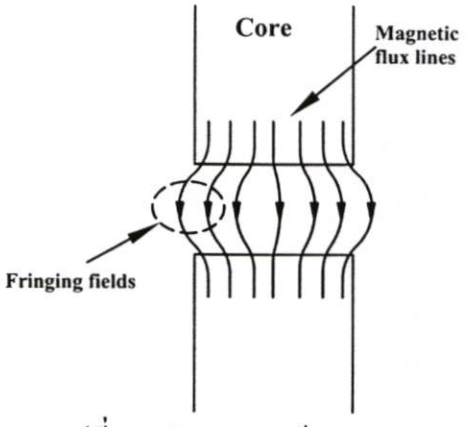
ถ้าค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กมีค่าสม่ำเสมอโดยตลอดแล้ว เราสามารถหาค่าของเส้นแรงแม่เหล็ก (ϕ_c) ดังสมการ (2.7)

$$\phi_c = B_c A_c \tag{2.7}$$

เมื่อ ϕ_c คือ เส้นแรงแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น เวเบอร์ Wb

B_c คือ ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น (Wb/m^2)

A_c คือ พื้นที่หน้าตัดของวงจรแม่เหล็ก



รูปที่ 2.9 ปรากฏการณ์ Fringing

วงจรแม่เหล็กรูปที่ 2.9 เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสทั้งหมดอาจไม่ผ่านตลอดวงจร บางส่วนอาจกระโดดข้ามวงจรแม่เหล็กด้านบนไปสู่วงจรทางด้านล่างโดยผ่านอากาศรอบข้าง เส้นแรงแม่เหล็กเหล่านี้เรียกว่า เส้นแรงแม่เหล็กรั่ว (leakage flux) และปรากฏการณ์อีกชนิดหนึ่งในวงจรแม่เหล็กที่มีช่องอากาศคือ เส้นแรงแม่เหล็กระหว่างช่องอากาศจะไม่สม่ำเสมอตามไปด้วย และมีแนวโน้มที่จะลดลงกว่าในส่วนที่เป็นสารแม่เหล็ก ทั้งนี้เพราะพื้นที่หน้าตัดจริงของช่องอากาศจะมีขนาดใหญ่ขึ้นกว่าธรรมดา ปรากฏการณ์นี้เราเรียกว่า fringing

กรณีไม่คิดปรากฏการณ์ Fringing

$$B_g = B_c = \frac{\phi}{A_c} \tag{2.8}$$

$$\Im = Ni = \frac{B_c}{\mu} l_c + \frac{B_g}{\mu_0} g \tag{2.9}$$

$$\Im = Ni = \phi \left(\frac{l_c}{\mu A_c} + \frac{g}{\mu_0 A_g} \right) \tag{2.10}$$

กำหนดให้ Reluctance $\Re$ (A•turns/Wb)

$$\Re_c = \frac{l_c}{\mu A_c} \tag{2.11}$$

$$\Re_g = \frac{g}{\mu_0 A_g} \tag{2.12}$$

$$\Im = Ni = \phi(\Re_c + \Re_g) \tag{2.13}$$

ถ้า $\mu >> \mu_0$ แล้ว $\Re_c \ll \Re_g$

$$\phi \approx \frac{Ni}{\Re_g} = \frac{\Im \mu_0 A_g}{g} = Ni \frac{\mu_0 A_g}{g} \tag{2.14}$$

2.7 ความซึมซาบได้ (Permeability) ใช้สัญลักษณ์ μ

จำนวนเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับโมเลกุลของแกนเหล็ก ว่าจะสามารถวางตัวในแนวเดียวกันได้ง่ายเพียงใด เรียกว่าความซึมซาบได้ เป็นอัตราส่วนของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กต่อความเข้มสนามแม่เหล็ก ดังนั้นจะได้ว่า

$$\mu = \frac{B}{H} = \mu_0 \mu_r \quad ; \quad (\ \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \ ) \tag{2.15}$$

ความซึมซาบได้ คือ ความยินยอมให้เส้นแรงแม่เหล็กผ่าน โดยความซึมซาบของสุญญากาศเป็น 1 ซึ่งปกติทั่วไปแล้ว จะกล่าวถึงเฉพาะความซึมซาบได้สัมพัทธ์ ซึ่งหมายถึงตัวกลาง เช่น เหล็ก ยอมให้เส้นแรงแม่เหล็กผ่านได้เป็นกี่เท่าของอากาศ เมื่อมีความเข้มของสนามแม่เหล็กเท่ากัน

2.8 ความซึมซาบได้สัมพัทธ์ (Relative permeability) ใช้สัญลักษณ์ μ_r

คือ อัตราส่วนของความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่ผลิตได้ในวัสดุสารแม่เหล็กต่อความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่ผลิตได้ในสุญญากาศ (หรือในแกนที่ไม่ใช่สารแม่เหล็ก) โดยใช้ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กค่าเดียวกัน เช่น ในอากาศ $\mu_r = 1$ แต่ในโลหะผสม เช่น นิเกิล – เหล็ก (nickel - ion alloys) มี μ_r สูงถึง 100000

ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (B) และความเข้มของสนามแม่เหล็ก (H) สามารถหาค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กภายในวงจรแม่เหล็ก ได้ดังนี้

$$B = \mu H \tag{2.16}$$

$$\mu = \mu_r \mu_0 \tag{2.17}$$

$$B = \mu H = \mu_r \mu_0 H \tag{2.18}$$

เมื่อ B คือ Magnetic flux density (Tesla, Weber/m^2)

H คือ Magnetic field intensity (AT/m, A/m)

μ คือ ค่าความซึมซาบแม่เหล็ก Permeability (H/m)

μ_0 คือ Free-space Permeability ($4\pi \times 10^{-7}$) (H/m)

μ_r คือ Relative Permeability

1) พาราแมกเนติก (μ_r =1.0)

2) ไดอาแมกเนติก (μ_r <1.0)

3) เฟอร์โรแมกเนติก (μ_r >>1.0)

ความสัมพันธ์ระหว่าง B กับ H เรียกว่า เส้นโค้งกำเนิด สามารถเขียนสมการ (2.19) แสดงลักษณะความสัมพันธ์ของสารแม่เหล็กค่า μ_r ที่มีค่าสูงสุดของสารใดๆ หาได้จากการลากเส้นตรงสัมผัสกับเส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง B กับ H ของสารนั้น

$$\mu_r = \frac{B}{\mu_0 H} \tag{2.19}$$

2.9 วัสดุแม่เหล็ก

2.9.1 ไดอาแมกเนติก หมายถึง การที่สารแม่เหล็กมีการต่อต้านกับสนามแม่เหล็กจากภายนอกสารแม่เหล็ก เรียกว่า สารแม่เหล็กไดอาแมกเนติก (Diamagnetic substances) โดยผู้ที่ค้นพบคือ ไมเคิลฟาราเดย์ เมื่อปี ค.ศ.1846

2.9.2 พาราแมกเนติก หมายถึง การที่สนามแม่เหล็กจากภายนอกทำให้อะตอมเกิดแรงคู่ควบจัดเรียงขั้วคู่ให้หันไปในทิศทางที่เรียงตัวกันตามสนามแม่เหล็กจากภายนอกนั้น คุณสมบัติที่สำคัญของความเป็นแม่เหล็กคือ ค่าความเป็นแม่เหล็กของสารเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก และเป็นสัดส่วนกลับกันกับอุณหภูมิ ผู้ที่ค้นพบ คือ ปีแอร์คูรี (Pierre Curie) เมื่อปี ค.ศ. 1895

2.9.3 เฟอร์โรแมกเนติก อะตอมของสารแม่เหล็กเฟอร์โร มีการจัดโมเลกุลขั้วคู่เหนี่ยวนำซึ่งกันและกันให้มีทิศทางไปทางเดียวกันภายใต้แรงกระทำซึ่งกันและกัน คุณสมบัติที่สำคัญของสารแม่เหล็กเฟอร์โรคือ ค่าความเป็นแม่เหล็กของสารไม่เป็นปฏิภาคโดยตรง กับความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก และสารอาจแสดงคุณสมบัติทางแม่เหล็กได้ถึงแม้ว่าจะไม่มีสนามแม่เหล็ก สารแม่เหล็กเฟอร์โรมีอยู่ 5 ธาตุ ได้แก่ เหล็ก โคบอลต์ นิกเกิล กาโดลิเนียม และดีสโปรเซียน โดยสารทั้ง 5 นี้จะยังคงสภาพเป็นสารแม่เหล็กเฟอร์โร ตามที่อุณหภูมิยังไม่เกินค่าอุณหภูมิของคูรี (Curie temperature) แต่ถ้าอุณหภูมิสูงกว่านี้จะเปลี่ยนเป็นสารแม่เหล็ก พาราแมกเนติกทันที โดยเหล็กนั้นมีอุณหภูมิของคูรี 1043K คุณสมบัตินี้จะเกิดได้แม้ว่าอะตอมของธาตุทั้ง 5 นี้จะอยู่ในโครงสร้างของผลึก ซึ่งไม่ใช่มีแต่ธาตุทั้ง 5 นี้อย่างเดียว

2.10 ความต้านทานแม่เหล็ก (Reluctance) ใช้สัญลักษณ์ $\Re$

ความต้านทานแม่เหล็ก คือ ค่าความต้านทานแสดงความสามารถการยอมให้เส้นแรงแม่เหล็กเดินผ่านได้ในวงจรแม่เหล็ก ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางกายภาพของสารที่นำมาเป็นทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็ก สารนี้อาจเป็น Magnetic หรือ Nonmagnetic Materials ก็ได้ พวกสารที่ไม่มีอำนวจแม่เหล็ก (Nonmagnetic Materials) ได้แก่ อากาศ ฉนวน ไม้ พลาสติก เป็นต้น และพวกสารที่มีอำนาจแม่เหล็ก ได้แก่ เหล็ก, Cast Iron, Ferrous Iron, Nickel, Alloy เป็นต้น ความต้านทานแม่เหล็กจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความยาวของแกนเหล็ก หรือวัตถุคือ l ที่เส้นแรงแม่เหล็กผ่านไปเพื่อให้ครบวงจรของตัวมันเอง เป็นส่วนกลับกับพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก คือ A ความต้านทานแม่เหล็กเป็นการแสดงคุณสมบัติของวัตถุที่มีการต้านต่อการไหลของเส้นแรงแม่เหล็กซึ่งคล้าย ๆ กับคุณสมบัติของวัตถุที่มีการต้านต่อการไหลของกระแสไฟฟ้า ซึ่งเรียกว่า ความต้านทาน โดยความต้านทานแม่เหล็ก มีหน่วยวัดเป็น (Ampere●turns / Wb)

ถ้าพิจารณาแกนแม่เหล็กที่มีพื้นที่หน้าตัด A_c ตารางเมตร และมีความยาวของเส้นรอบแกนโดยเฉลี่ย l_c เมตร พันด้วยขดลวดจำนวน N รอบ มีกระแสไหลผ่าน i แอมแปร์ ดังนั้น

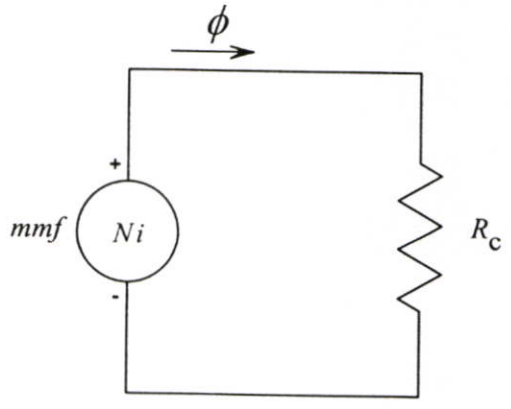
$$\Re = \frac{l_c}{\mu A_c} \tag{2.20}$$

เมื่อ $\Re$ คือ ค่าความต้านทานวงจรแม่เหล็ก

A_c คือ พื้นที่หน้าตัดบริเวณที่เส้นแรงแม่เหล็กเคลื่อนที่ผ่าน

μ คือ ค่าความซึมซาบ

ℓ_c คือ ความยาวโดยเฉลี่ยที่เส้นแรงแม่เหล็กเคลื่อน



รูปที่ 2.10 การหาค่าความต้านทานวงจรแม่เหล็ก

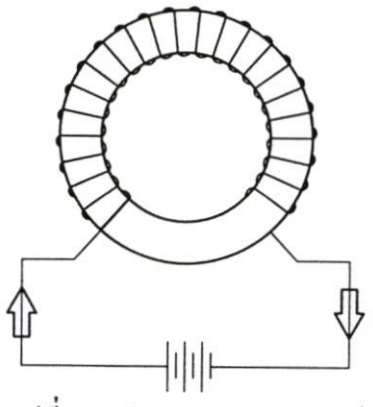
ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบค่าวงจรไฟฟ้ากับวงจรแม่เหล็ก

วงจรไฟฟ้า	หน่วย	วงจรแม่เหล็ก	หน่วย
แรงเคลื่อนไฟฟ้า (V)	V	แรงเคลื่อนแม่เหล็ก ($\Im$)	A•t
กระแสไฟฟ้า (I)	A	เส้นแรงแม่เหล็ก (ϕ)	Wb
ความต้านทานไฟฟ้า (R)	Ω	ความต้านทานเหล็ก ($\Re$)	At/Wb
ค่าความต้านทานจำเพาะ (ρ)	$\Omega \cdot m$	ค่าความซึมซาบแม่เหล็ก (μ)	H/m
ความหนาแน่นของกระแส (J)	A/m^2	ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (B)	T

2.11 เส้นโค้งแสดงความเป็นแม่เหล็ก (*B-H* Curve)

เพื่อให้เกิดความเข้าใจเกี่ยวกับ ความซึมซาบได้ ขอยกตัวอย่างของสนามแม่เหล็กที่เกิดกับขดลวดที่เป็นวงกลมเรียกว่า ทอรอยด์ (toroid)

ขดลวดโซลีนอยด์เป็นวงกลมมีความยาวเฉลี่ย 1 หน่วยความยาว สนามแม่เหล็กภายในไม่เปลี่ยนค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก ถ้านำแกนเหล็กมาใส่ภายในขดลวดโซลีนอยด์ทำให้ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเปลี่ยนไป และค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กนี้จะมีค่าเพิ่มเป็นหลายร้อยเท่าของความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเดิม ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กจะมีค่าเท่ากับ μ_r ซึ่งหมายความว่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับก่าของ μ_r หรือ μ/μ_r ของสารนั้นๆ



รูปที่ 2.11 ลักษณะของทอรอยด์

เส้นโค้งแสดงความเป็นแม่เหล็ก แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (B) กับความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) จากรูปที่ 2.11 ขดลวดทอรอยด์ ถ้าเพิ่มกระแสไฟฟ้าเข้าไปจะทำให้ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่า

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเพิ่มขึ้นตาม ถ้าเราเริ่มต้นจากกระแสเป็นศูนย์ และมีเครื่องมือวัดค่า เส้นแรงแม่เหล็กในแกนทอรอยด์ เราจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (B) กับความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) จากรูปที่ 2.11 ถ้าเป็นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีแกนเหล็ก เช่น ทอรอยด์ เราจะได้เส้นโค้งดังแสดงในรูปที่ 2.12 และรูปที่ 2.13 แต่ความซึมซาบได้ จะไม่คงที่ เมื่อมีค่า ความเข้มสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้น ค่า μ จะเพิ่มจนถึงค่าสูงสุด เมื่อค่า μ เพิ่มจนถึงค่าสูงสุดแล้ว การเพิ่มขึ้นของความเข้มสนามแม่เหล็ก ก็จะไม่ทำให้ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเพิ่มขึ้นมากนักจนกระทั่งเกิดการอิ่มตัว จะทำให้ค่า μ ลดลงเมื่อความเข้มสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นอีกดังแสดงในรูปที่ 2.14 เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (B) กับ ความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) บางครั้งเรียกว่า (B-H curve) หรือเส้นโค้งการอิ่มตัวของเส้นแรงแม่เหล็ก หรือเส้นโค้งกำเนิดแม่เหล็ก

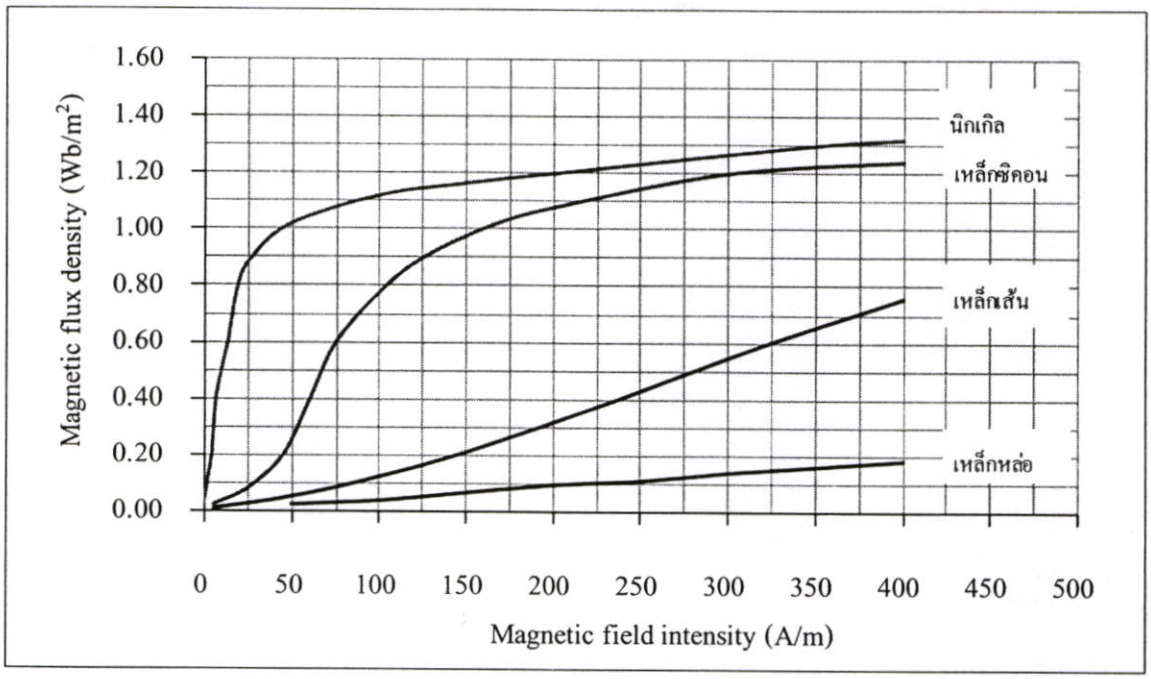
สารใดมีค่า μ_r มากกว่า 1 เล็กน้อยสารนั้นจัดเป็นชนิดพาราแมกเนติก (Paramagnetic) เช่น อากาศ, ไม้

สารใดมีค่า μ_r น้อยกว่า 1 สารนั้นจัดเป็นชนิด ไดอาแมกเนติก (Diamagnetic) เช่นพวกอะลูมิเนียม หรือสารตัวนำสมบูรณ์ ซึ่งมี $\mu_r = 0$

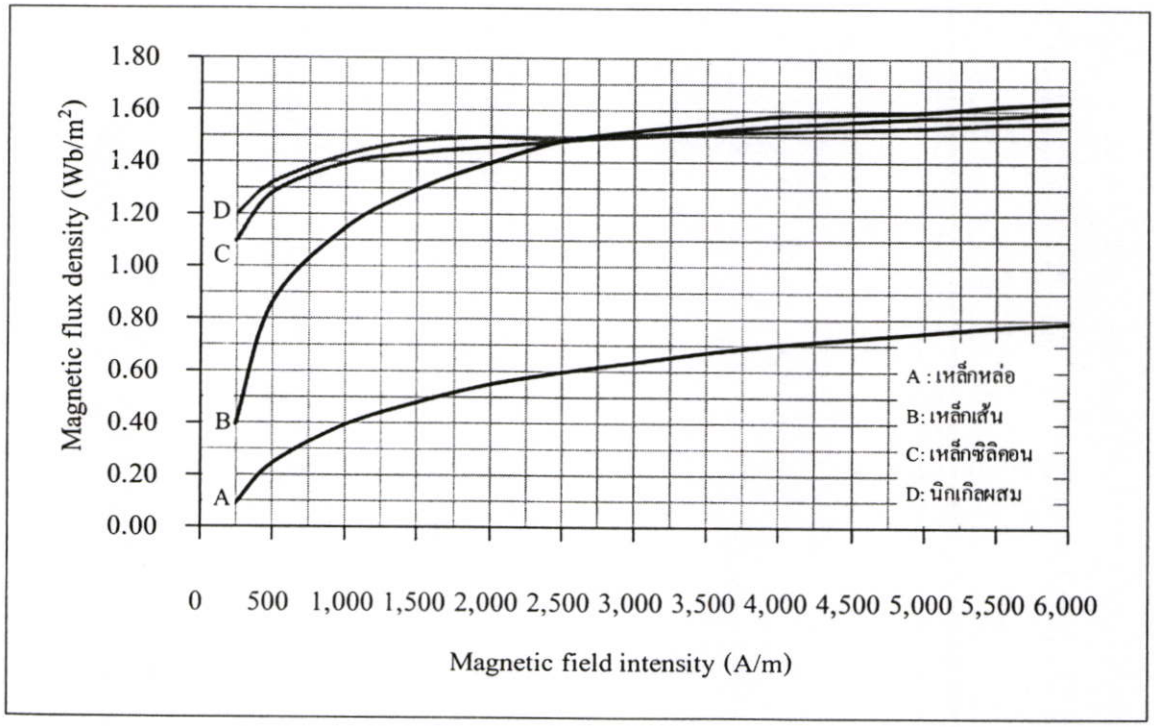
สารใดมีค่า μ_r สูงมากๆ จัดเป็นพวกเฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic) โดยทั่วไปค่า μ_r จะอยู่ระหว่าง 1,000-1,000,000 โดยขึ้นอยู่กับชนิดของสารแม่เหล็ก และแม้แต่ในสารชนิดเดียวกันที่ค่าของความเข้มสนามแม่เหล็กต่างกัน ค่าของ μ_r จะไม่เท่ากัน

ค่าความสัมพันธ์จะไม่เป็นเส้นตรงและจะมีระดับหนึ่ง แม้ว่าเพิ่มความเข้มสนามแม่เหล็กให้มากขึ้นไปอีกแต่ ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก จะไม่เปลี่ยนแปลงจุดที่ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กไม่เปลี่ยนแปลง เรียกว่า จุดอิ่มตัวของความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กของสารนั้นและค่าของ μ_r ที่มีขนาดสูงที่สุดของสารใดๆ สามารถหาจากการลากเส้นตรงไปสัมผัสกับเส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง B กับ H เรียกว่า เส้นโค้งกำเนิดแม่เหล็กหรือเส้นโค้งการอิ่มตัวของเส้นแรงแม่เหล็ก ณ จุดสัมผัสระหว่างเส้นตรงที่ลากจากจุดเริ่มต้นของเส้นโค้งและเส้นสัมผัสกับเส้นโค้งทำให้อ่านค่า B กับ H ได้ และนำค่า B และ H ที่อ่านได้ในแต่ละจุดนั้นไปแทนค่าในสมการ

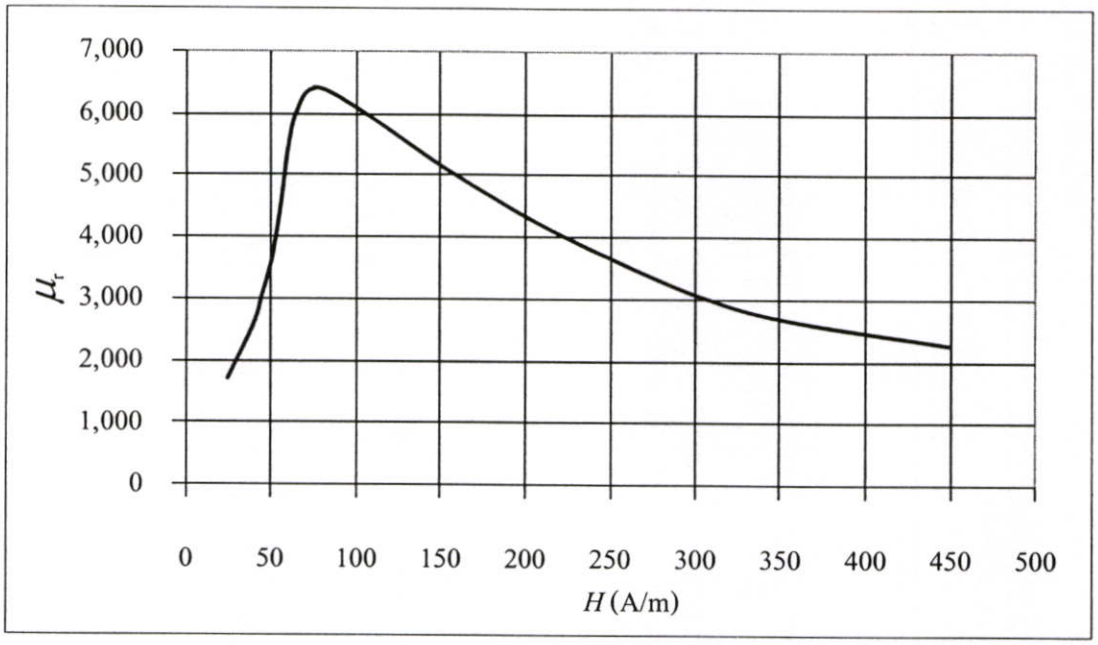
82656



รูปที่ 2.12 แสดงเส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กกับความเข้มสนามแม่เหล็ก (*B-H* Curve) เมื่อ $H < 400$ แอมแปร์ต่อเมตร



รูปที่ 2.13 เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กกับความเข้มสนามแม่เหล็ก (*B-H* Curve) เมื่อ $H > 400$ แอมแปร์ต่อเมตร



รูปที่ 2.14 เส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างความซึมซาบได้กับความเข้มสนามแม่เหล็ก

2.12 การสูญเสียในแกนเหล็ก

การสูญเสียในแกนเหล็กของวงจรแม่เหล็กทุกชนิดจะถูกจ่ายทิ้งออกมาเป็นรูปพลังงานความร้อน ซึ่งเป็นการสูญเสียที่เกิดขึ้นระหว่างการเปลี่ยนแปลงความเข้มสนามแม่เหล็กภายในเวลาแต่ละรอบ ประกอบไปด้วย การสูญเสียเนื่องจากฮีสเตอรีซีส และการสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนในแกนเหล็ก การสูญเสียนี้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสารแม่เหล็ก องค์ประกอบที่มีผลต่อค่าความสูญเสียของแกนเหล็กมีดังนี้ คือ

1. วิธีการอัดแผ่นเหล็กเข้าด้วยกัน
2. องค์ประกอบทางเคมีของสารซิลิคอน
3. ความหนาของแผ่นเหล็ก
4. ชนิดของฉนวนที่ใช้เคลือบแผ่นเหล็ก

2.12.1 การสูญเสียเนื่องจากฮีสเตอรีซีส (Hysteresis loss)

การใช้ไฟฟ้ากระแสสลับเหนี่ยวนำวงจรขดลวดที่พันรอบแกนเหล็ก ให้เกิดอำนาจแม่เหล็กในแต่ละรอบ (Cycle) การสูญเสียภายในแกนเหล็ก อันเกิดจากฮีสเตอรีซีส จะเท่ากับพื้นที่ภายในวงฮีสเตอรีซีสนั้น ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก และ ชนิดของสารแม่เหล็กที่ใช้ทำแกน ดังนั้นค่าโดยประมาณของการสูญเสียจากฮีสเตอรีซีสของสารแม่เหล็กที่ความถี่ f หาได้จาก

$$P_h = K_h f B_m^{\,n} \tag{2.21}$$

เมื่อ P_h คือ การสูญเสียจากฮีสเตอรีซีส มีหน่วยเป็น W

K_h คือ ค่าคงที่ของวงจรแม่เหล็กที่ทำการทดลอง

f คือ ค่าความถี่ไฟฟ้าของแหล่งจ่าย มีหน่วยเป็น Hz

n คือ สไตน์เมทซ์เอกซ์โพเนนท์ (Steinmetz exponent)

จะมีค่าอยู่ระหว่าง 1.5 – 2.0 แต่โดยทั่วไปใช้ $n = 1.6$

2.12.2 การสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน (Eddy Current Loss)

กระแสไหลวนเกิดเนื่องจากผลของกระแสไหลวนอยู่ในความหนาของแผ่นเหล็ก โดยถ้าทำให้สนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ผ่านตัวนำ จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นภายในตัวนำนั้น แต่ถ้าเราใส่แกนเหล็กเข้าไปในขดลวดที่มีกระแสสลับไหลอยู่ ทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงเป็นลักษณะของรูปคลื่นไซน์ด้วย การเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กจะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นภายในแกนเหล็ก ทำให้เกิดมีกระแสไหลวนภายในแกนเหล็กนั้น เรียกว่า กระแสไหลวน จะเกิดขึ้นในแกนเหล็กทุกๆชนิดของสารที่เป็นตัวนำไฟฟ้า กระแสนี้จะไหลผ่านความต้านทานไฟฟ้าของสารแม่เหล็กทำให้เกิดความร้อนขึ้น ความร้อนเกิดขึ้นนี้เกิดจากกำลังสูญเสียซึ่งมีค่า I^2R และเนื่องจากความต้านทานของเหล็กมีค่าค้อนข้างสูงเมื่อเทียบกับสารชนิดอื่นๆ ดังนั้นกำลังสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนในแกนเหล็กจึงมีค่าค้อนข้างสูง และขนาดของกระแสไหลวนจะขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงของแกนเหล็ก การสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนเมื่อเส้นแรงแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงแบบรูปคลื่นไซน์สามารถหาได้จากสมการข้างล่างดังนี้

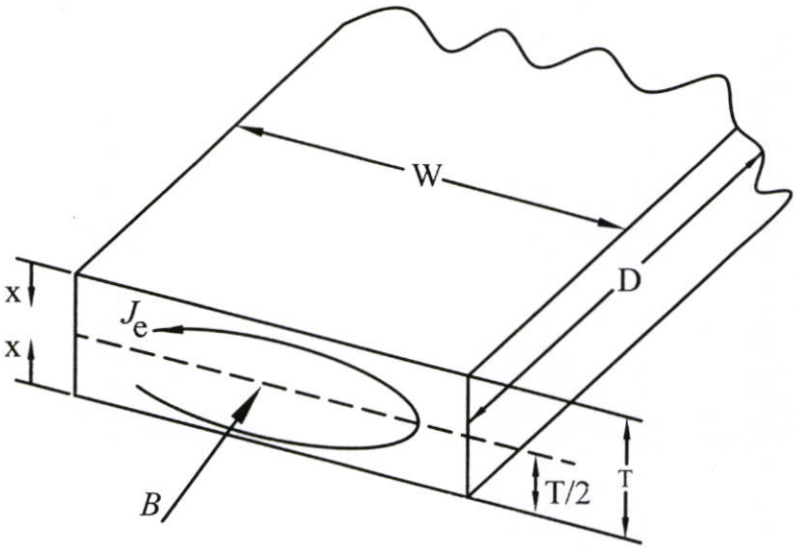
$$P_e = K_e f^2 B_m^{\,2} \tag{2.22}$$

เมื่อ P_e คือ การสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน

K_e คือ ค่าคงที่ของวงจรแม่เหล็ก

ขนาดของกระแสไหลวนขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็ก ความถี่ และค่าความต้านทานไฟฟ้าของแกนเหล็ก การลดการสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนทำได้โดยการใช้แกนเหล็กที่เป็นแผ่นเหล็กบางๆ (Laminated sheet steel) อัดซ้อนเข้าด้วยกัน โดยในแต่ละแผ่นจะใช้สารเคลือบผิวที่มีค่าความต้านทานสูง เช่น ฉาบด้วยน้ำมันวานิช ซึ่งจะทำให้กระแสไหลวนที่เกิดขึ้นในแกนเหล็ก ที่ใช้แผ่นเหล็กบางๆอัดซ้อนกันมีค่าลดลงอย่างมาก ดังนั้นจึงทำให้การกำลังการสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนมีค่าลดลงหรือมีค่าน้อยลงตามไปด้วยกระแสไหลวนที่เกิดขึ้น

ในแกนเหล็กที่มีเนื้อเดียวกันตลอด ดังนั้นเราจึงไม่นำเอาแกนเหล็กที่มีเนื้อเดียวกันตลอดหรือแกนเหล็กตันมาใช้กับ แรงดันแม่เหล็กไฟฟ้ากระแสสลับ และในแกนเหล็กที่ใช้แผ่นเหล็กบางๆอัดซ้อนกันแสดงดังรูป 2.15



รูปที่ 2.15 การเกิดกระแสไหลวนในแกนเหล็ก

การสูญเสียเนื่องจากฮีสเตอรีซีส และกระแสไหลวน รวมกันเรียกว่า การสูญเสียในแกนเหล็ก (Core loss) การสูญเสียในแกนเหล็กของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ทำงานโดยมีแรงดันและความถี่หรือความเร็วคงที่ เช่น หม้อแปลง, มอเตอร์ และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะมีค่าโดยประมาณคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามโหลด

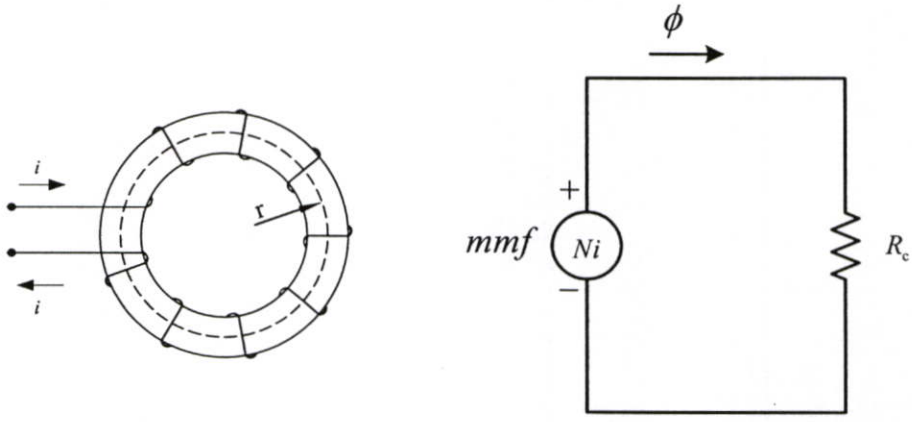
2.13 กฎของแอมแปร์

เป็นกฎแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็ก (**H**) กับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (**J**) ดังสมการที่ (2.23)

$$\oint_s \mathbf{H}d\mathbf{l} = \int_s \mathbf{J} \cdot d\mathbf{A} \qquad (2.23)$$

เมื่อ **J** คือ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า มีหน่วยเป็นแอมแปร์ต่อตารางเมตร

ดังนั้น $\int_S J \cdot dA$ แสดงถึงปริมาณของกระแสทั้งหมดที่เหนี่ยวนำให้เกิดอำนาจแม่เหล็ก (ซึ่งอยู่ภายใน closed curve ของวงจรแม่เหล็ก) และทิศทางของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นมีทิศทางตามกฎมือขวา โดยนำมาประยุกต์ใช้กับวงจรแม่เหล็กรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 วงจรแม่เหล็กขดลวดพันรอบแกนเหล็กแบบทอรอยด์

จากรูปที่ 2.16 เป็นวงแหวนทอรอยด์ที่มีขนาดสม่ำเสมอ เมื่อมีขดลวด N พันอยู่ภายนอก และมีกระแสไฟฟ้า i ไหลอยู่ในขดลวด เพราะฉะนั้นทางด้านซ้ายของสมการทางด้านขวาจะมีค่าเป็น Ni คือ จำนวนกระแสทั้งหมดที่ทำให้เกิดอำนาจแม่เหล็ก และสมการ (2.23) จะกลายเป็นสมการ (2.25)

$$Ni = \oint \mathbf{H} \cdot \mathbf{dl} \tag{2.24}$$

$$\Im = Ni = \oint \mathbf{Hdl} \tag{2.25}$$

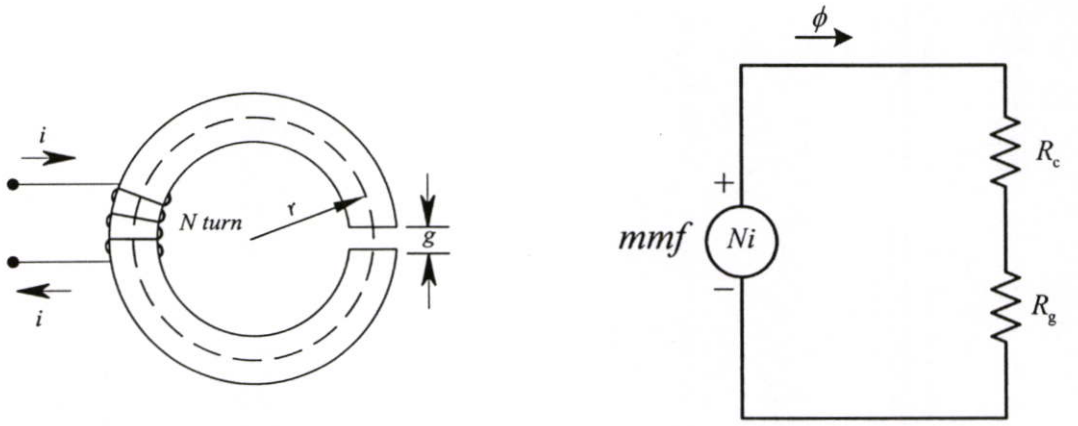
ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กภายในวงแหวนทอรอยด์ สามารถคำนวณได้จากสมการ (2.26)

$$Ni = H(2\pi r) \tag{2.26}$$

เมื่อ l คือ ความยาวเฉลี่ยของวงจรแม่เหล็ก

r คือ รัศมีโดยเฉลี่ยของวงแหวนทอรอยด์

จากรูปที่ 2.17 จะเห็นว่าวงจรแม่เหล็กมีตัวกลาง 2 ชนิด คือ วงจรเหล็ก และวงจรช่องอากาศ สามารถเขียนสมการ (2.27)



รูปที่ 2.17 วงจรแม่เหล็กที่มีช่องอากาศ

$$\Im = Ni = H_c l_c + H_g l_g \tag{2.27}$$

$$Ni = \frac{B_c}{\mu_0 \mu_r} l_c + \frac{B_g}{\mu_0 \mu_r} l_g \tag{2.28}$$

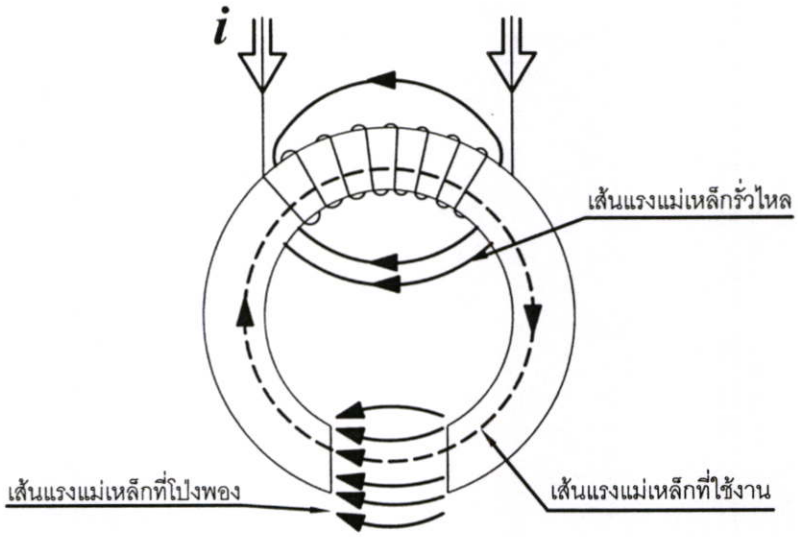
$$\phi_c = B_c A_c, \quad B_c = \frac{\phi}{A_c} \quad : \text{Core} \tag{2.29}$$

$$\phi_g = B_g A_g, B_g = \frac{\phi}{A_g} \quad : \text{Air gap} \tag{2.30}$$

2.14 เส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล (Magnetic Leakage or Leakage Flux)

เส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลเป็นเส้นแรงแม่เหล็กจำนวนหนึ่งที่ไม่ไหลไปตามความต้องการ ดังแสดงในรูป 2.18 เส้นแรงแม่เหล็กที่ต้องการและใช้ประโยชน์จริงๆได้ก็คือเส้นแรงแม่เหล็กที่ผ่านช่องอากาศเท่านั้น

ส่วนเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลที่ไม่ไหลผ่านช่องว่างตามต้องการเรียกเส้นแรงแม่เหล็กนี้ว่าเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล ถ้าต้องการให้เส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลน้อยที่สุดนั้นต้องให้ขดลวดชุดที่สร้างเส้นแรงแม่เหล็กอยู่ใกล้ช่องว่างหรือจุดที่ต้องการใช้เส้นแรงแม่เหล็กนั้นๆ ซึ่งเราจะสามารถทราบได้ว่ามีการรั่วไหลของเส้นแรงแม่เหล็ก ได้จากการเอาเข็มทิศไปวางไว้ในบริเวณที่มีเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล และก็จะเป็นการยากมากที่จะไม่ให้มีการรั่วไหลของเส้นแรงแม่เหล็ก เครื่องใช้ไฟฟ้าชนิดที่อาศัยอำนาจแม่เหล็ก เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้า มอเตอร์อย่างดี จะมีเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลประมาณ 15 – 20 %



รูปที่ 2.18 เส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล

จากการทดลองของฮอปคินสัน (Hopkinson) พบว่าสัมประสิทธิ์ของเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลจะมีค่าเท่ากับอัตราส่วนของเส้นแรงแม่เหล็กที่สร้างขึ้นมา ต่อ เส้นแรงแม่เหล็กที่สามารถใช้งานได้จริงๆ โดยสัมประสิทธิ์ของเส้นแรงแม่เหล็กที่รั่วนี้ จะใช้สัญลักษณ์ λ และสามารถหาได้จากสมการดังนี้

สัมประสิทธิ์ของเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล = จำนวนเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลทั้งหมด / จำนวนเส้นแรงแม่เหล็กที่ใช้งาน

$$Leakage\ coefficient\ (\lambda) = \frac{\phi_t}{\phi} \tag{2.31}$$

เมื่อ ϕ_t คือ เส้นแรงแม่เหล็กที่สร้างขึ้น หรือเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นทั้งหมด

ϕ คือ เส้นแรงแม่เหล็กที่สามารถใช้งานได้จริงๆ

ค่าสัมประสิทธิ์ของเส้นแรงแม่เหล็กที่รั่วไหลนี้เรียกว่า สัมประสิทธิ์ของฮอปคินสัน ถ้าค่าสัมประสิทธิ์ของเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลมาก นั่นแสดงว่าการออกแบบเครื่องใช้ไฟฟ้านั่นไม่ดี แต่ในทางตรงกันข้ามถ้าสัมประสิทธิ์ของเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลต่ำ แสดงว่าการออกแบบไฟฟ้านั้นดี โดยเครื่องใช้ไฟฟ้าในปัจจุบันจะมีค่าสัมประสิทธิ์ของเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลประมาณ 1.1 ถึง 1.25

นอกจากจะมีเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลแล้ว จากรูปจะเห็นว่าเส้นแรงแม่เหล็กบางส่วนกระจายออกนอกช่องอากาศ เส้นแรงแม่เหล็กนี้เรียกว่า เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากการโป่งออก

(Fringing flux) เส้นแรงแม่เหล็กส่วนนี้ไม่เกิดประโยชน์เช่นเดียวกับเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล เนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กได้แพร่กระจายออกไปบนพื้นที่ที่เกี่ยวข้องที่โตกว่า ดังนั้นจึงมีผลทำให้ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในช่องว่างอากาศมีค่าลดลง

2.15 การกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้า (AC Excitation)

วงจรแม่เหล็กเมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับเข้าไปในขดลวดที่พันอยู่บนแกนเหล็กที่ไม่มีช่องอากาศ โดยความยาวของวงจรแม่เหล็ก (l_c) และพื้นที่หน้าตัดของวงจรแม่เหล็กเป็น (A_c) ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลงตามแรงเคลื่อนสนามแม่เหล็ก (mmf) ที่ป้อนให้กับวงจรแม่เหล็ก

ในระบบการจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับลักษณะของรูปสัญญาณ (waveform) ของศักดาไฟฟ้าจะมีรูปสัญญาณตามแบบของ Sinusoidal function ที่แปรเปลี่ยนกับเวลา t ซึ่งจะมีผลให้เส้นแรงแม่เหล็ก (ϕ) มีการเปลี่ยนแปลงตาม Sinusoidal function ด้วย ดังนั้นเราจะสามารถแสดงลักษณะของ Exciting current และแสดงถึงความสูญเสียในสนามแม่เหล็กมาใช้เป็นวงจรแม่เหล็ก เมื่ออยู่ในสภาวะคงตัวของไฟฟ้ากระแสสลับ (Steady state AC operation)

กำหนดให้การเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็ก $\phi(t)$ เป็นแบบ Sinusoidal

$$\varphi(t) = \phi_{\max} \sin \omega t = A_c B_{\max} \sin \omega t \tag{2.32}$$

เมื่อ $\phi_{\max}$ คือ ค่าสูงสุดของเส้นแรงแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น Wb

$B_{\max}$ คือ ค่าสูงสุดของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น T

$\omega = 2\pi f$ คือ ความเร็วเชิงมุม (Angular velocity) มีหน่วยเป็น rad/sec

f คือ ความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับ มีหน่วยเป็น Hz

จาก Faraday's Law สามารถหาการเหนี่ยวนำศักดาไฟฟ้า (Induced voltage) เมื่อจำนวนรอบขดลวดที่พันอยู่เท่ากับ N รอบ โดยกำหนดให้ว่า ในวงจรแม่เหล็กเส้นแรงแม่เหล็กที่คล้องขดลวดที่พันอยู่รอบแกนเหล็ก มีค่าเท่ากันทุกรอบ

การทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็ก จะต้องมีกระแสไฟฟ้าป้อนให้กับขดลวด เราเรียกกระแสนี้ว่า กระแสกระตุ้น (Exciting current, i_φ) สำหรับสารแม่เหล็กที่มีคุณสมบัติเป็นแบบ non-linear เพื่อเส้นแรงแม่เหล็กใน Sinusoidal จะมีผลทำให้กระแสกระตุ้นมีรูปร่างแตกต่างไปจากรูปสัญญาณของเส้นแรงแม่เหล็กตามสภาพความสัมพันธ์ระหว่าง B กับ H

เมื่อป้อนศักดาไฟฟ้าเข้าไปในขดลวดที่พันอยู่บนแกนเหล็ก ที่มีความสัมพันธ์ระหว่าง B กับ H ในลักษณะของ Hysteresis loop ผลที่ออกมาเมื่อเราป้อนศักดาไฟฟ้าเป็น Sinusoidal wave

form ผลจะทำให้ ϕ หรือ B ในแกนเหล็กจะมีรูปของสัญญาณเป็นแบบ Sinusoidal กระแสที่จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กเป็นแบบ Sinusoidal จะมีรูปร่างความสัมพันธ์ตาม Hysteresis loop คือไม่เป็น Sinusoidal

การป้อนกระแสสลับทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็กเปลี่ยนแปลงตาม Sinusoidal function จะได้ค่า E_{rms} และค่า I_{φ} ซึ่งเป็น rms exciting current จาก

$$I_{\varphi,\text{rms}} = \frac{l_c H_{c,\text{rms}}}{N} \tag{2.33}$$

ดังนั้นสามารถหาค่า rms voltage (VA) ที่ต้องการสำหรับกระตุ้นแกนเหล็กให้ได้เส้นแรงแม่เหล็ก (ϕ) ตามที่ต้องการ

$$E_{\text{rms}} I_{\varphi,\text{rms}} = \sqrt{2}\pi f N A_c B_{\text{max}} \frac{l_c H_{\text{rms}}}{N}$$

$$= \sqrt{2}\pi f B_{\text{max}} H_{\text{rms}} (A_c l_c) \tag{2.34}$$

การหาค่ากำลังไฟฟ้ากระตุ้น P_a *Exciting rms voltampers per unit mass* มีหน่วยเป็น (VA/kg) ได้จากสมการ (3.35) ที่ค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กสูงสุด B_{max} และน้ำหนักเหล็ก (mass) คำนวณจากสูตรจาก $\rho_c A_c l_c$ มีหน่วยเป็น kg

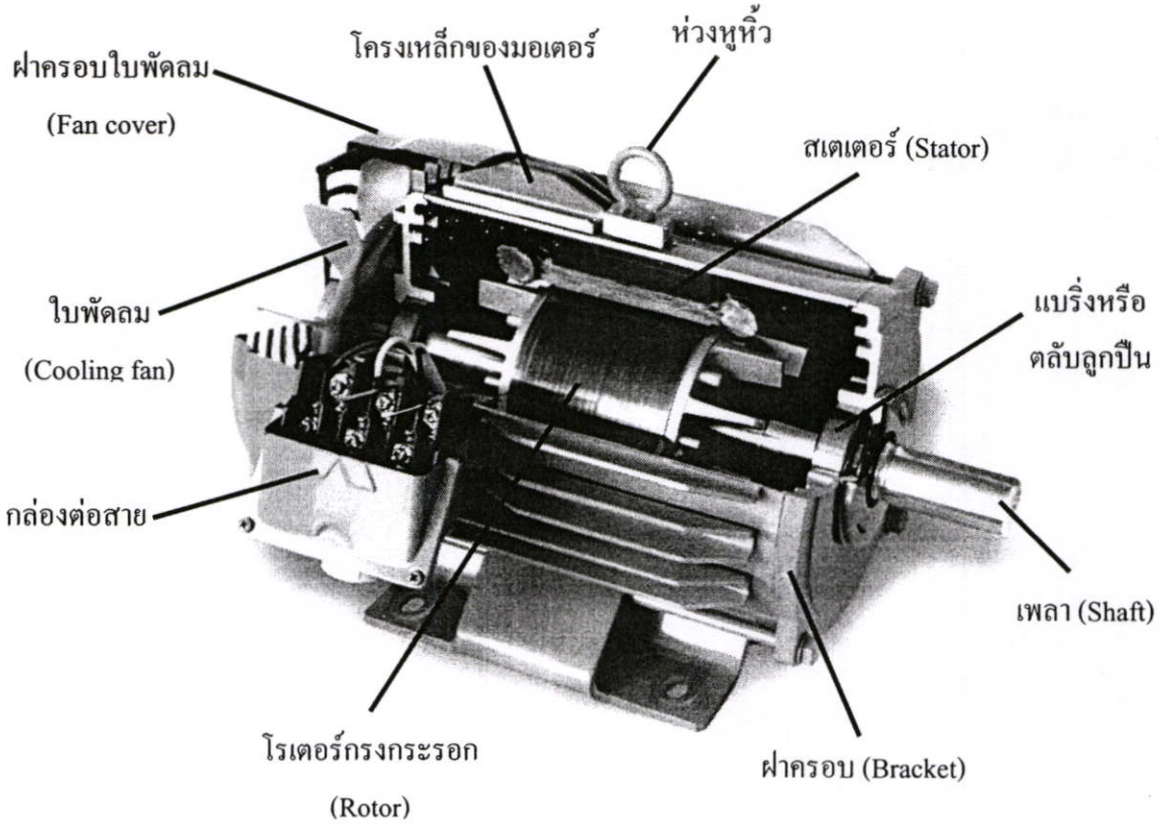
$$P_a = \frac{E_{\text{rms}} I_{\varphi,\text{rms}}}{mass} = \frac{\sqrt{2}\pi f}{\rho_c} B_{\text{max}} H_{\text{rms}} \tag{2.35}$$

เมื่อ ρ_c คือ ค่าความหนาแน่นของวัสดุแกนเหล็ก มีหน่วยเป็น kg/m^3

บทที่ 3
ทฤษฎีมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

3.1 โครงสร้างของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส

มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำนิยมใช้งานกันอย่างแพร่หลาย ตั้งแต่โรงงานอุตสาหกรรมขนาดเล็กจนถึงขนาดใหญ่ เพราะมอเตอร์ชนิดนี้ราคาไม่แพง และดูแลรักษาง่าย

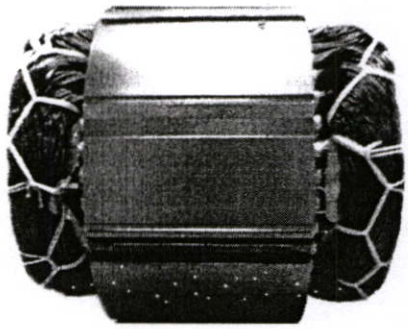


รูปที่ 3.1 โครงสร้างของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส

มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสมีส่วนประกอบที่สำคัญ 2 ส่วน คือ ส่วนที่อยู่กับที่ (Stator) และส่วนที่หมุนหรือส่วนที่เคลื่อนที่ (Rotor)

สเตเตอร์หรือส่วนที่อยู่กับที่ (Stator) ประกอบด้วยแกนแผ่นเหล็ก (Laminated core) บาง ๆ อัดซ้อนเข้าด้วยกัน ทำจากแผ่นเหล็กไฟฟ้าชนิดไม่เรียงแนวรีด (Non-Oriented Electrical Steels) มีค่าซิลิคอนอยู่ระหว่าง 0~3 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าของความซาบซึมได้ (Permeability) สูง ซึ่งมีค่าความ

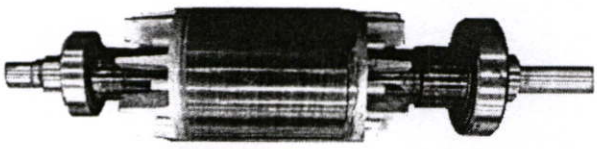
สูญเสียจากฮีสเตอริซีส (Hysteresis loss) ต่ำ และค่าการสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน (Eddy- current loss) ต่ำด้วย สำหรับแกนสเตเตอร์มีร่องสล๊อตสำหรับการลงขดลวด ซึ่งมีจำนวนขั้วแม่เหล็กเป็นตัวกำหนดความเร็วรอบของมอเตอร์ เมื่อเราจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับให้กับขดลวดที่สเตเตอร์ จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่ค่าคงที่ค่าหนึ่ง และสนามแม่เหล็กนี้จะหมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส สนามแม่เหล็กที่หมุนจะเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้าขึ้นในโรเตอร์



รูปที่ 3.2 ส่วนที่อยู่กับที่สเตเตอร์ (Stator) ของมอเตอร์

โรเตอร์หรือส่วนที่หมุน (Rotor) แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือแบบกรงกระรอก (Squirrel Cage Rotor) และขดลวดพันรอบโรเตอร์ (Wound Rotor)

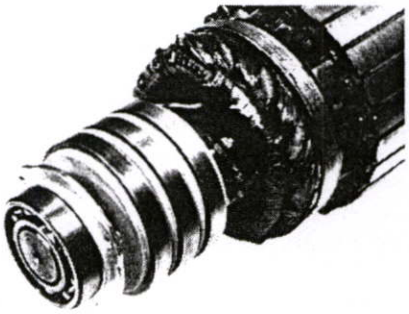
ตัวหมุนแบบกรงกระรอก (Squirrel Cage Rotor) ประกอบด้วย แกนโรเตอร์ทำด้วยแผ่นเหล็กบางๆ (Laminated core) อัดซ้อนกัน ฉีดน้ำอลูมิเนียมเหลวเข้าร่องสล๊อทในโรเตอร์ และปลายทั้งสองด้านของตัวนำ (โดยปกติเป็นอลูมิเนียม) ถูกลัดวงจรเข้าด้วยกัน ดังนั้นจึงมีรูปร่างคล้ายกรงกระรอก และแท่งอลูมิเนียมที่ฝังอยู่กับโรเตอร์นี้จะวางเฉียงกับแนวแกนเพลา เพื่อให้เส้นแรงแม่เหล็กข้ามช่องว่างอากาศ (Air Gap) จากสเตเตอร์ไปยังโรเตอร์สม่ำเสมอ



รูปที่ 3.3 แบบกรงกระรอก (Squirrel Cage Rotor)

แบบขดลวดพันรอบโรเตอร์ (Wound Rotor) ประกอบขดลวดทองแดงพันลงในร่องโรเตอร์ ส่วนปลายด้านหนึ่งของขดลวดโรตอร์จะต่อร่วมกันเป็นจุดสตาร์ และปลายที่เหลือทั้งสามจะนำไปต่อ

เข้ากับวงแหวนลื่น (Slip Ring) ทั้งสามที่ยึดติดอยู่กับเพลาของตัวโรเตอร์ ซึ่งแปรงถ่านมีข้อจำกัด คือ โรเตอร์ต้องมีจำนวนขั้วเท่ากับจำนวนขั้วที่เกิดที่สเตเตอร์ แปรงถ่านทั้งหมดที่ต่ออยู่กับวงแหวนลื่นจะถูกต่อไปยังตัวต้านทานแปรค่าสามตัวที่ต่อร่วมกันเป็นแบบสตาร์ เพื่อปรับความต้านทานในวงจรโรเตอร์ให้เพิ่มขึ้นในตอนเริ่มหมุน ทำให้กระแสในตอนเริ่มหมุนต่ำลง ทำให้แรงบิดเริ่มหมุนสูงขึ้นในสภาวะมอเตอร์ทำงาน



รูปที่ 3.4 แบบขดลวดพันรอบโรเตอร์ (Wound Rotor)

3.2 หลักการทำงานของมอเตอร์

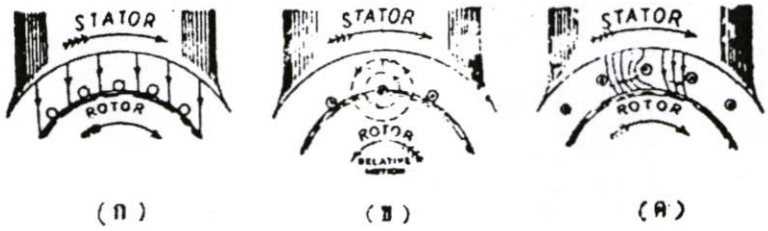
เมื่อป้อนแรงดันไฟสามเฟสให้กับขดลวดสเตเตอร์ ทำให้เกิดกระแสไหลในขดลวด และเป็นผลให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนขึ้นที่สเตเตอร์ เรียกว่า ความเร็วซิงโครนัส ตัดผ่านตัวนำที่โรเตอร์ด้วยความเร็วสัมพัทธ์ และเหนี่ยวนำทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ มีผลให้มีกระแสขึ้นที่โรเตอร์ สนามแม่เหล็กหมุนจากสเตเตอร์จะดึงดูดให้สนามแม่เหล็กหมุนจากโรเตอร์ ซึ่งความเร็วของโรเตอร์จะต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัส

$$e=(v\times B)\times l \tag{3.1}$$

โดยที่ v คือ ความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างขดลวดบนโรเตอร์กับสนามแม่เหล็กหมุนที่เกิดจากสเตเตอร์

B คือ ความหนาแน่นฟลักซ์ที่เกิดจากสเตเตอร์

l คือ ความยาวของขดลวดบนโรเตอร์



รูปที่ 3.5 หลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส

รูปที่ ก. แสดงทิศทางของสนามแม่เหล็กหมุนบนสเตเตอร์ จะตัดผ่านตัวนำบนโรเตอร์ไปในทิศทางตามเข็มนาฬิกา

รูปที่ ข. แสดงทิศทางของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และกระแสที่ไหลอยู่ในตัวนำที่โรเตอร์ (หาได้โดยใช้กฎมือขวาของเฟลมมิ่ง) และทิศทางของสนามแม่เหล็กรอบๆ ตัวนำ หาได้โดยใช้กฎของสกรูหรือกฎมือขวาของตัวนำ

รูปที่ ค. แสดงทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กรวม ของรูป ก. และ ข. ทำให้แรงบิดเกิดขึ้นบนตัวโรเตอร์ ซึ่งมีทิศทางการหมุนไปทางเดียวกับสนามแม่เหล็กหมุน

3.3 ความเร็วและค่าต่าง ๆ ที่สัมพันธ์กับความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

ความเร็วซิงโครนัส เกิดเมื่อป้อนไฟฟ้าให้กับขดลวดสเตเตอร์แล้ว จะเกิดสนามแม่เหล็กหมุน ความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุนนี้ขึ้นอยู่กับจำนวนแม่เหล็กที่สเตเตอร์ และความถี่ของระบบไฟฟ้าที่ป้อนให้ขดลวดมอเตอร์ โดยที่ความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุนนี้จะแปรผันโดยตรงกับความถี่ของระบบไฟฟ้าที่ป้อนให้มอเตอร์ แต่จะแปรผันเป็นส่วนกลับกับจำนวนขั้วแม่เหล็กของมอเตอร์ตัวนั้น ความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุนนี้เรียกว่า ความเร็วซิงโครนัส (Synchronous Speed, n_s)

$$n_s = \frac{120f}{p} \tag{3.2}$$

เมื่อ n_s คือ ความเร็วซิงโครนัสของสนามแม่เหล็ก (rpm; รอบต่อนาที)

f คือ ความถี่ของระบบไฟฟ้า (Hz; ไซเคิลต่อวินาที)

p คือ จำนวนขั้วแม่เหล็กของขดลวดสเตเตอร์ (Pole; ขั้ว)

สลิป (Slip) คือ ค่าความแตกต่างระหว่างความเร็วซิงโครนัส n_s กับความเร็วของโรเตอร์ n เรียกว่าความเร็วสลิป (Slip Speed) ในทางปฏิบัติความเร็วของตัวโรเตอร์จะช้ากว่าความเร็วแม่เหล็กหมุน ถ้าไม่มีความเร็วสัมพัทธ์ (Relative Speed) ก็จะไม่เกิดการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นที่โรเตอร์ และไม่มีกระแสไหลในวงจรโรเตอร์ ทำให้ไม่มีแรงบิดที่เกิดจากการดูดและผลักทางขั้วแม่เหล็กที่จะเร่งให้ตัวโรเตอร์หมุนไปได้ จึงเป็นเหตุให้ความเร็วของโรเตอร์ต้องน้อยกว่าความเร็วของสนามแม่เหล็กบนตัวสเตเตอร์ ดังนั้น

$$Slip\ speed = n_s - n \tag{3.3}$$

ให้ Slip speed อยู่ในเทอม per unit

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \tag{3.4}$$

ขณะที่โรเตอร์อยู่กับที่ ($n = 0$) ความถี่ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในลวดตัวนำในโรเตอร์กรณีสลิปเท่ากับ 1 ความถี่ในวงจรโรเตอร์ (Rotor Frequency) จะมีค่าเท่ากับความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์ เมื่อโรเตอร์หมุนด้วยความเร็ว n อัตราการตัดสนามแม่เหล็กจะมีค่าเท่ากับรอบต่อนาที $n_s - n$ ความถี่ในวงจรโรเตอร์จะขึ้นอยู่กับสลิป speed โดยมีสมการในรูปเดียวกันกับสมการของความเร็วซิงโครนัส

$$n_s - n = \frac{120 f_r}{p} \tag{3.5}$$

เมื่อ f_r คือ ความถี่ในลวดตัวนำในโรเตอร์

$$\frac{n_s - n}{n_s} = \frac{120 f_r}{p} \times \frac{p}{120 f_e} \tag{3.6}$$

เอาสมการที่ (3.5) หารด้วยสมการที่ (3.2) จะได้

$$f_r = s f_e \tag{3.7}$$

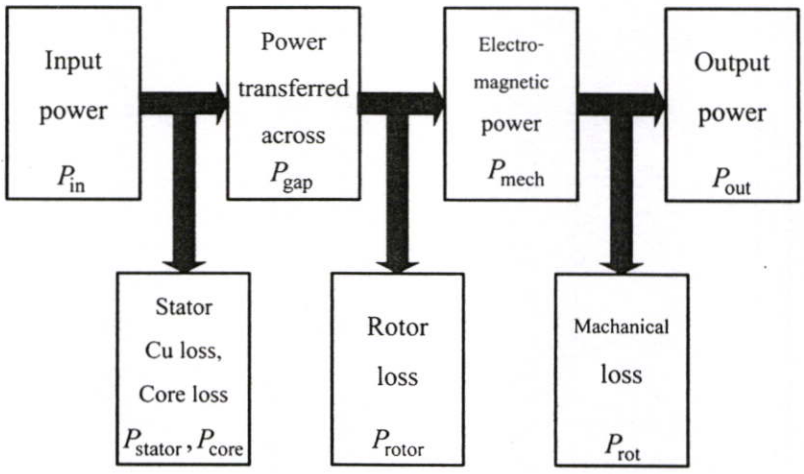
จะเห็นว่าความถี่ในวงจรโรเตอร์ จะเปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าตัวมอเตอร์คูณด้วยค่าสลิป

3.4 การสูญเสียในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

การเปลี่ยนกำลังงานไฟฟ้าให้เป็นกำลังงานกลของมอเตอร์นั้น จะเกิดขึ้นที่โรเตอร์ในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ กำลังอินพุทไม่ได้เกิดจากการป้อนไฟฟ้าให้กับโรเตอร์โดยตรง แต่เป็นการถ่ายทอดผ่านทางช่องว่างอากาศด้วยการเหนี่ยวนำ แรงดันไฟฟ้า กรแสสลับที่ป้อนให้กับขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์จะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และความถี่ขึ้นที่โรเตอร์

ดังนั้นกำลังไฟฟ้าที่จ่ายเข้ามอเตอร์ จะเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานชนิดอื่นที่กระจายอยู่ตามส่วนต่างๆ ของมอเตอร์ ได้แก่กำลังสูญเสียในรูปความร้อนในขดลวดสเตเตอร์ และโรเตอร์ กำลังสูญเสียในแกนเหล็ก ส่วนที่เหลือจะเป็นกำลังงานกลที่ขับโหลด

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่มอเตอร์แบบสามเฟส และกำลังงานกลที่มอเตอร์จ่ายแก่โหลด สามารถแสดงได้ด้วย Block diagram ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 Block diagram การส่งผ่านกำลังงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

จาก Block diagram กำลังไฟฟ้าที่ป้อน(Input power) ให้กับมอเตอร์ในรูปแรงดัน และกระแสไฟฟ้าเข้าที่ขดลวดสเตเตอร์ ซึ่งส่วนหนึ่งจะสูญเสียเนื่องจากความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ (Stator copper loss) และการสูญเสียในแกนเหล็ก (Core loss) ในรูปความร้อนกำลังส่วนที่เหลือจะถูกส่งผ่านช่องว่างอากาศให้กับโรเตอร์ เรียกว่ากำลังงานในช่องว่างอากาศ (Power transferred across the

air gap) ถ่ายเทกำลังงานให้กับโรเตอร์ ส่วนหนึ่งจะเกิดกำลังสูญเสียจากความต้านทาน (Rotor copper loss) ส่วนที่เหลือจะเป็นกำลังงานที่ส่งออกจากโรเตอร์ (Electromagnetic power) ซึ่งเป็นกำลังงานทางกล ในส่วนนี้จะสูญเสียกำลังงานไปเนื่องจากแรงเสียดทานและแรงต้านลมขณะมอเตอร์หมุน (Friction and windage loss) จากนั้นกำลังงานที่เหลือจะเป็นกำลังงานกลที่จะไปขับภาระโหลด (Output power)

การสูญเสียในแกนเหล็กเกิดขึ้นได้ที่สเตเตอร์และโรเตอร์ แต่ในขณะที่มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วใกล้ความเร็วซิงโครนัส s เข้าใกล้ศูนย์ ทำให้ความต้านทาน $R_2\frac{1-s}{s}$ มีค่าสูงเป็นผลให้กระแส I_2 มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ดังนั้นค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นที่โรเตอร์มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ด้วยเหตุนี้จึงไม่นำมาคิดในสภาวะไร้โหลด

ในขณะที่มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วเพิ่มขึ้นทำให้การสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานและแรงต้านลมมากขึ้น แต่จะทำให้การสูญเสียในแกนลดลง จึงได้รวมการสูญเสียเหล่านี้เข้าด้วยกันเรียกว่า Rotational losses และพิจารณาให้เป็นค่าคงที่ไม่ขึ้นอยู่กับความเร็วรอบที่เปลี่ยนแปลง

กำลังไฟฟ้าอินพุทที่ป้อนให้กับมอเตอร์ (Input power)

$$P_{\text{in}} = 3V_1 I_1 \cos\varphi \tag{3.8}$$

กำลังสูญเสียเนื่องจากความต้านทานในขดลวดสเตเตอร์ (Stator copper loss)

$$P_{\text{stator}} = 3I_1^2 R_1 \tag{3.9}$$

กำลังในช่องว่างอากาศ (Power transferred across the air gap)

$$P_{\text{gap}} = 3I_2{}^2 \frac{R_2}{s} \tag{3.10}$$

กำลังสูญเสียเนื่องจากลวดตัวนำในโรเตอร์

$$P_{\text{rotor}} = 3I_2{}^2 R_2 = sP_{\text{gap}} = P_{\text{gap}} - P_{\text{mech}} \tag{3.11}$$

กำลังที่ออกจากโรเตอร์ (Electromagnetic power)

$$P_{\text{mech}} = P_{\text{gap}} - P_{\text{rotor}} = 3I_2^2 R_2 \left(\frac{1-s}{s} \right) = (1-s)P_{\text{gap}} \tag{3.12}$$

กำลังไฟฟ้าที่ได้จากการเหนี่ยวนำในโรเตอร์ (Electromagnetic power)

$$P_{\text{mech}} = \omega_{\text{m}} T_{\text{mech}} = (1-s)\omega_{\text{s}} T_{\text{mech}} \tag{3.13}$$

กำลังที่ไปขับโหลด (Output power)

$$P_{\text{out}} = P_{\text{mech}} - P_{\text{rotor}} = T_{\text{out}} \omega_{\text{m}} \tag{3.14}$$

แรงบิดทางกล (Output torque)

$$T_{\text{out}} = \frac{P_{\text{out}}}{\omega_{\text{m}}} \tag{3.15}$$

$$\omega_{\text{s}} = \frac{2\pi n_{\text{s}}}{60} = \frac{4\pi f_{\text{e}}}{p} \tag{3.16}$$

$$\omega_{\text{m}} = \frac{2\pi n}{60} = (1-s)\omega_{\text{s}} \tag{3.17}$$

โดยที่ ω_{s} คือ ความเร็วซิงโครนัสเชิงมุม rad/sec

ω_{m} คือ ความเร็วโรเตอร์เชิงมุม rad/sec

กำลังส่วนที่สูญเสียเนื่องจากความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ในสมการที่ 3.9 กำลังส่วนที่สูญเสียจากความต้านทานลวดตัวนำในโรเตอร์ในสมการที่ 3.11 และกำลังสูญเสียในส่วนของ Rotational loss เมื่อนำกำลังสูญเสียทั้งสามส่วนมารวมกันจะเป็นกำลังสูญเสียทั้งหมดที่เกิดขึ้นในมอเตอร์ (Power loss)

$$P_{\text{loss}} = P_{\text{in}} - P_{\text{out}} \tag{3.18}$$

ประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์ (η) นิยมคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\%\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \times 100 \tag{3.19}$$

$$\%\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{out}} + P_{\text{loss}}} \times 100 \tag{3.20}$$

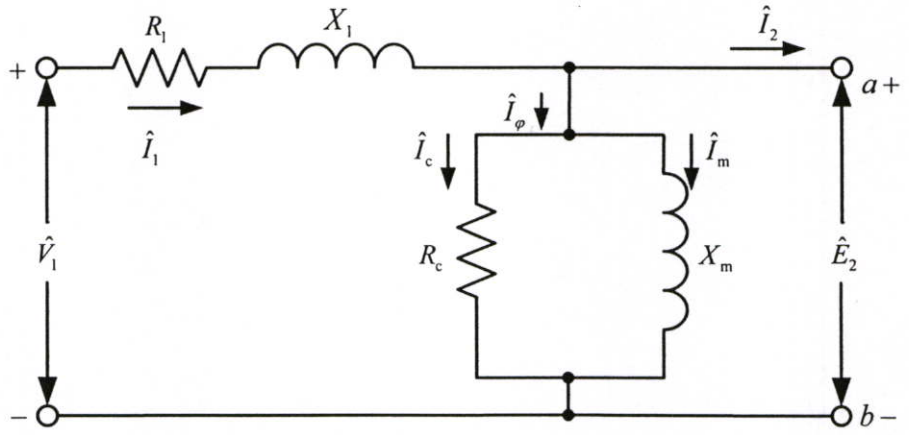
3.5 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำและการหาค่าพารามิเตอร์

มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่สเตเตอร์มีขดลวด 3 เฟส ที่สมมาตรและต่ออยู่กับแหล่งจ่ายแรงดันสามเฟสสมดุลอยู่ในสภาวะคงที่ เพื่อความง่ายในการพิจารณามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส ถูกต่ออยู่ในลักษณะสตาร์ (Y-connection) โดยที่กระแสและแรงดันที่จะพิจารณาเป็นปริมาณใน 1 เฟส (จาก 3 เฟสที่สเตเตอร์) เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าเข้ากับขดลวดบนสเตเตอร์ จะทำให้เกิดคลื่นฟลักซ์ หมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส

$$\hat{V}_1 = \hat{E}_2 + \hat{I}_1(R_1 + jX_1) \tag{3.21}$$

จากสมการที่ 3.21 แสดงถึงความสัมพันธ์ของแรงดันที่ป้อนเข้าให้ขดลวด 1 เฟสบนสเตเตอร์ และผลลัพธ์ของฟลักซ์ต่อเฟสในช่องอากาศเป็นผลมา *mmf* ซึ่งเกิดจากระแสวงจรสเตเตอร์และโรเตอร์ กระแสในวงจรสเตเตอร์จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือกระแสโหลด (load component), $\hat{I}_2$ และกระแสกระตุ้น (exciting component), $\hat{I}_\varphi$

เมื่อกระแสโหลด เกิดจากกระแสในวงจรโรเตอร์ และกระแสกระตุ้น เป็นกระแสที่ทำให้เกิดฟลักซ์ลัพธ์ในช่องอากาศ และกระแสกระตุ้นนี้จะถูกแยกได้เป็น 2 ส่วน คือ core loss current $\hat{I}_c$ ซึ่งมีเฟสเดียวกับ $\hat{E}_1$ และ magnetizing $\hat{I}_m$ ซึ่งมีเฟสล้าหลังกับ $\hat{E}_1$ เป็นมุม 90° ในวงจรสมมูลกระแสกระตุ้น สามารถแสดงไว้ในวงจรขนานที่ประกอบด้วย core loss resistance R_c และ magnetizing reactance X_m ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 วงจรสมมูลของสเตเตอร์ต่อเฟส

ปริมาณ R_c และ X_m ตามปกติถูกคำนวณที่ความถี่พิกัดของวงจรสเตเตอร์ และ $\hat{E}_1$ ที่ใกล้เคียงกับค่าในขณะที่มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำทำงานในเงื่อนไขปกติดังนั้น R_c และ X_m จึงถูกสมมุติให้มีค่าคงเดิม (คงที่) ในขณะที่มอเตอร์ทำงานในเงื่อนไขที่ผิดเล็กน้อยไปจากปกติ การเปลี่ยนแปลงของคลื่น *mmf* ที่เกิดจากโรเตอร์มีผลจะทำให้กระแสโหลด $\hat{I}_2$ ในวงจรสเตเตอร์เกิดการเปลี่ยนแปลง ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงของทั้งสองปริมาณนี้เกิดขึ้นได้โดยผ่านตัวกลางคือฟลักซ์ในช่องอากาศนั่นคือ ถ้ามีสิ่งหนึ่ง (เช่นโรเตอร์สมมูล) ถูกใส่ลงไปในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแทนที่โรเตอร์จริง โดยที่สิ่งนั้น *mmf* , power factor และความเร็วการเคลื่อนที่เช่นเดียวกับสิ่งที่เกิดขึ้นในวงจรสเตเตอร์ ก็จะไม่ทำให้เกิดผลใดๆต่อวงจรสเตเตอร์

การแทนที่โรเตอร์ตามทฤษฎีข้างต้นนั้นเป็นแนวความคิดไปสู่การโอนย้าย (transfer) ปริมาณซึ่งอยู่บนโรเตอร์ไปไว้ที่สเตเตอร์ และในที่สุดการใช้วงจรสมมูลเพื่อแสดงมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำในแบบคงตัว (Steady state) เมื่อพิจารณาขดลวดบนโรเตอร์ซึ่งถูกพันให้เกิดจำนวนขั้วและเฟสเท่ากับขดลวดสเตเตอร์ โดยที่ขดลวดบนสเตเตอร์มีจำนวนรอบประสิทธิผลเป็น N_{eff} เท่าของขดลวดบนโรเตอร์ ดังนั้นเมื่อพิจารณาผลทางแม่เหล็กของโรเตอร์จริงเทียบกับโรเตอร์สมมูล ซึ่งขดลวดมีจำนวนรอบเท่ากับขดลวดบนสเตเตอร์โดยที่มีฟลักซ์ความเร็วรอบเท่ากัน จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำ $\hat{E}_{rotor}$ ที่เกิดขึ้นในโรเตอร์จริงกับที่เกิดขึ้นในโรเตอร์สมมูล ($\hat{E}_{2s}$) คือ

$$E_{2s} = N_{eff} E_{rotor} \tag{3.22}$$

โดยที่ N_{eff} คือ Turn ratio ระหว่างขดลวดสเตเตอร์กับขดลวดโรเตอร์

ถ้าโรเตอร์จริงกับโรเตอร์สมมูลมีความเท่ากันทางแม่เหล็กก็แสดงให้เห็นว่าโรเตอร์ทั้งสองมีปริมาณ Amp turns เท่ากัน และความสัมพันธ์ระหว่างกระแสในโรเตอร์จริง $\hat{I}_{\text{rotor}}$ กับใน โรเตอร์สมมูลจะต้องเป็น

$$\hat{I}_{2s} = \frac{\hat{I}_{\text{rotor}}}{N_{\text{eff}}} \tag{3.23}$$

ผลที่ตามมาคือความสัมพันธ์ระหว่าง Leakage impedances ที่ slip frequency Z_{2s} ของโรเตอร์สมมูลกับของโรเตอร์จริง (Z_{rotor}) จะต้องเป็น

$$Z_{2s} = \frac{\hat{E}_{2s}}{\hat{I}_{2s}} = N_{\text{eff}}^2 \left(\frac{\hat{E}_{\text{rotor}}}{\hat{I}_{\text{rotor}}} \right) = N_{\text{eff}}^2 Z_{\text{rotor}} \tag{3.24}$$

แรงดัน, กระแสและอิมพีแดนซ์ในโรเตอร์สมมูล ถูกกำหนดจากปริมาณที่เทียบกับสเตเตอร์ ดังนั้นแนวความคิดที่อธิบายผ่านมานั้น จึงเป็นเหมือนกับการโอนย้ายปริมาณทางด้านทุติยภูมิไปยังด้านปฐมภูมิ (เทียบกับหม้อแปลงไฟฟ้าโดยมีอัตราส่วนของจำนวนรอบประสิทธิผลเป็นแฟคเตอร์ในการโอนย้าย และจากโรเตอร์ถูกลัดวงจร ดังนั้น

$$\frac{\hat{E}_{2s}}{\hat{I}_{2s}} = Z_{2s} = R_2 + jsX_2 \tag{3.25}$$

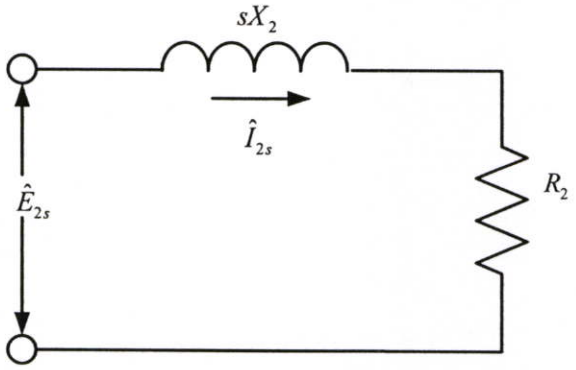
โดยที่ Z_{2s} คือ leakage impedance ที่ slip frequency ของโรเตอร์ซึ่งโอนย้ายไปที่สเตเตอร์ (referred to stator)

R_2 คือ ความต้านทานประสิทธิผลซึ่งโอนย้ายไปที่สเตเตอร์

sX_2 คือ Leakage reactance ที่ slip frequency ซึ่งโอนย้ายไปที่สเตเตอร์

เนื่องจาก Reactance มีค่าขึ้นอยู่กับความถี่ในวงจรโรเตอร์ซึ่งขึ้นอยู่กับสลิป (slip) ดังนั้นจึงถูกกำหนดอยู่ในรูป sX_2 ดังนั้น X_2 ก็คือ leakage reactance ของวงจรโรเตอร์ซึ่งโอนย้ายไปที่สเตเตอร์

ที่ความถี่ของวงจรสเตเตอร์วงจรสมมูลที่ slip-frequency ต่อเฟสของโรเตอร์ซึ่งโอนย้ายที่สเตเตอร์แสดงได้ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 วงจรสมมูลของโรเตอร์ที่ slip-frequency

ความเร็วของคลื่นฟลั๊กซ์ในอากาศเมื่อเทียบกับโรเตอร์มีค่าเป็น s เท่าเมื่อเทียบกับสเตเตอร์ ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่าง *emf* ของโรเตอร์และสเตเตอร์คือ

$$\hat{I}_{2s} = \hat{I}_2 \tag{3.26}$$

$$\hat{E}_{2s} = s\hat{E}_2 \tag{3.27}$$

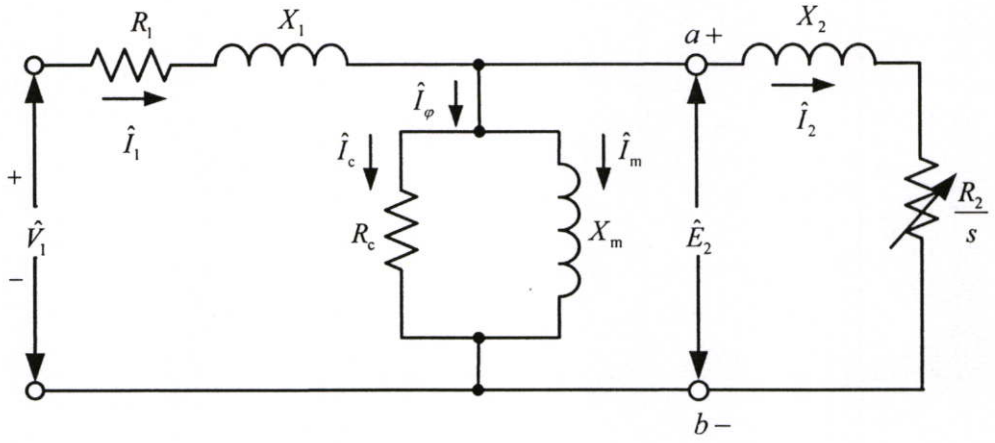
สมการที่ 3.27 หารสมการที่ 3.26

$$\frac{\hat{E}_{2s}}{\hat{I}_{2s}} = \frac{s\hat{E}_1}{\hat{I}_2} = Z_{2s} = R_2 + jsX_2 \tag{3.28}$$

$$Z_2 = \frac{\hat{E}_2}{\hat{I}_2} = \frac{R_2}{s} + jX_2 \tag{3.29}$$

สมการที่ 3.29 แสดงค่าที่เกิดขึ้นสเตเตอร์โดยเป็นผลมาจากเงื่อนไขทางแม่เหล็กในช่องอากาศ ทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำ $\hat{E}_2$ และกระแสโหลด เงื่อนไขนี้มีลักษณะเช่นเดียวกันกับการต่ออิมพีแดนซ์

$\frac{R_2}{s} + jX_2$ เท่ากับแรงดัน $\hat{E}_2$ โดยเหตุนี้ผลจากโรเตอร์จึงสามารถถูกรวมเข้าไว้ในวงจรสมมูลรูปที่ 3.9 ได้ในที่สุด



รูปที่ 3.9 วงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำซึ่งมีหลายเฟส

การเปรียบเทียบวงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำกับวงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า จะเห็นได้ว่ามีความคล้ายคลึงกัน ขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเปรียบเสมือนขดลวดปฐมภูมิ และทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าตามลำดับดังนั้นอาจจะมองมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีช่องอากาศ โดยที่ด้านทุติยภูมิมีความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงค่าได้ (เนื่องจากด้านทุติยภูมิเคลื่อนที่ได้) ต่ออยู่ คือ R_2/s โดยสามารถแยกออกได้เป็น $R_2 + \frac{(1-s)}{s}R_2$

เมื่อ R_2 คือ ความต้านทานขดลวดโรเตอร์

$\frac{(1-s)}{s}R_2$ คือ โหลดทางกลเมื่อเปรียบเทียบให้เป็นโหลดทางไฟฟ้าซึ่งปรับค่าได้ตามสลิป

บทที่ 4
การเสื่อมสภาพของฉนวนที่เป็นสารเคลือบผิวบนแกนเหล็ก

มอเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญในเครื่องจักรต่างๆ ทำหน้าที่ เป็นตัวต้นกำลังแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลเพื่อขับโหลดต่างๆ ความเสื่อมสภาพจากการใช้งานหรือความผิดปกติต่างๆที่เกิดขึ้น เนื่องจากความเสียหายที่เกิดขึ้นทางกล จากความร้อนและทางไฟฟ้า ซึ่งมีผลกระทบโดยตรงกับการทำงานและอายุการใช้งานของมอเตอร์ ทำให้ประสิทธิภาพมอเตอร์ลดลง

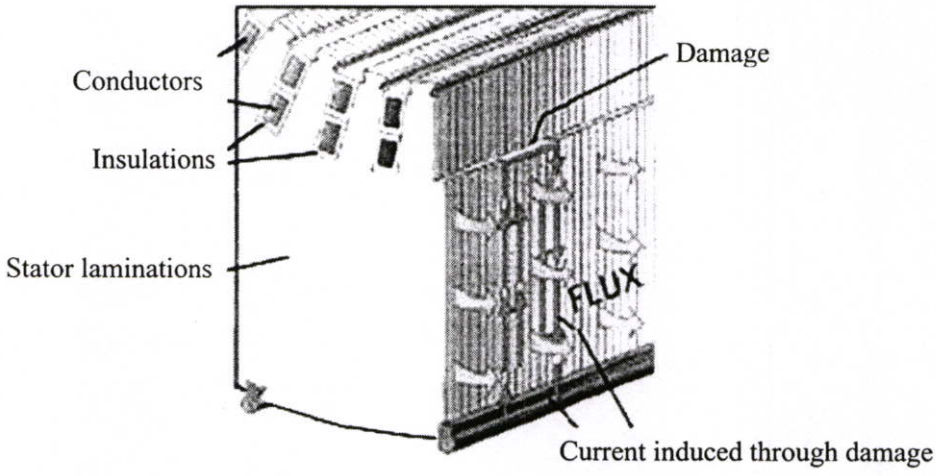
องค์ประกอบหลักของแกนเหล็กสเตเตอร์ในมอเตอร์ ทำขึ้นจากแผ่นเหล็กบางๆหลายๆแผ่นมาเรียงซ้อนกันอัดเป็นแกนเหล็ก โดยแต่ละแผ่นจะใช้สารเคลือบผิวเป็นฉนวน ซึ่งสารนี้มีคุณสมบัติในการต้านทานไฟฟ้าสูง เพื่อป้องกันกระแสไหลถึงกันระหว่างแผ่นเพื่อลดค่าความสูญเสีย เนื่องมาจากกระแสไหลวนในวงจรแม่เหล็ก ถ้าหากฉนวนถูกทำลาย หรือเกิดการเสื่อมสภาพไป เส้นแรงแม่เหล็กที่ไหลในแกนสเตเตอร์นั้นสามารถทำให้เกิดกระแสไหลวนระหว่างแผ่นเหล็กที่เสียหาย ส่งผลให้เกิดความร้อนขึ้นในแกนสเตเตอร์และอาจทำให้เกิดการเบรกดาวน์ได้ สาเหตุที่ทำให้เกิดความบกพร่องของแกนเหล็ก เนื่องมาจากการเสื่อมสภาพของฉนวนที่เป็นสารเคลือบผิวในแกนเหล็กมีดังนี้

4.1 สเตเตอร์หลวมคลอน (Loose Stator Core/Laminations)

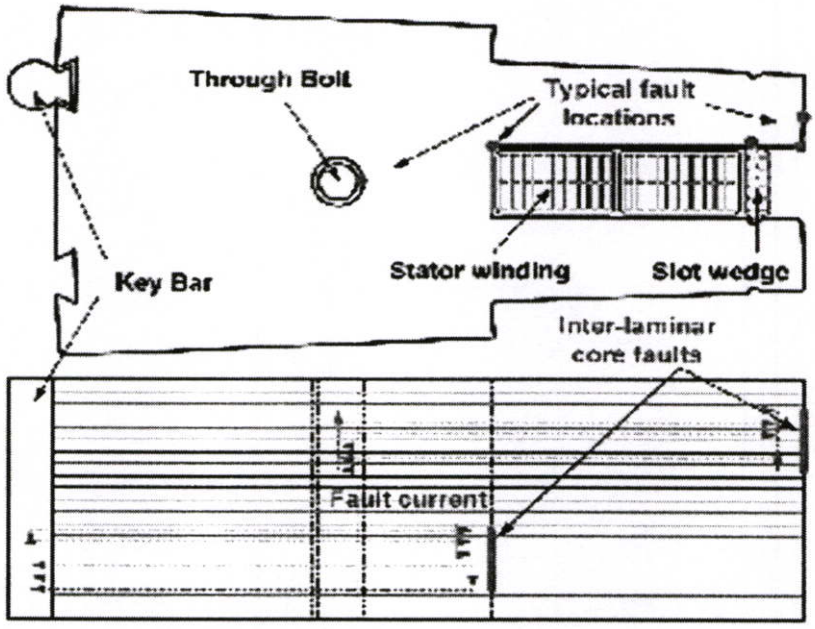
การเผาขดลวดเพื่อรื้อขดลวดมาพันใหม่ที่ไม่มีการควบคุมอุณหภูมิ อาจทำให้แผ่นโลหะบาง Laminate ที่ประกอบเป็นแกนเหล็กสเตเตอร์เกิดการผิดรูปไป หรืออาจทำให้ฉนวนเคลือบแผ่น Laminate ชำรุดเสียหาย หรือการนำเอาขดลวดที่เผาออกจากร่องสล็อตที่ไม่เหมาะสมอาจทำให้ร่องสล็อตบิดหรือแยกออก และการเผาอาจทำให้โครงเหล็กสเตเตอร์บิดและขยายตัว กระแสไหลวน (Eddy current) ที่เกิดขึ้นจากการเหนี่ยวนำบนแผ่น laminate ที่วางชิดกันอาจลัดวงจรหากัน เกิดประกายไฟและความร้อนขึ้น การผิดรูปของแกนเหล็กจะทำให้เกิดปัญหาช่องอากาศไม่สมมาตรตามมา

ปกติแกนสเตเตอร์ต้องถูกยึดอย่างแน่นหนา เพื่อป้องกันการสั่นสะเทือนอย่างรุนแรงภายใต้แรงแม่เหล็กที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็ก การยึดแกนเหล็กไม่ใช่เรื่องง่าย เนื่องจากแกนเหล็กและเฟรมมีโครงสร้างที่ซับซ้อน แม้ว่าในกระบวนการผลิตเริ่มต้นนั้นมีระดับของความแน่นหนาของการยึดติดกันตามความต้องการแล้ว แต่ในหลายๆ แกนก็มีปัญหาการหย่อนสมรรถภาพลงเมื่ออยู่ในสภาวะการทำงาน ทำให้แผ่นเหล็กที่เรียงซ้อนกันจะได้รับผลจากการสั่นสะเทือน และทำให้ฉนวนหลุดออกจากแผ่นเหล็กได้ หรืออาจเกิดจากตัวจับยึดของซี่แกนสเตเตอร์ทำให้แผ่นเหล็กที่ติดกันนั้นเกิดการแยกออกจากกัน จากสาเหตุอย่างใดอย่าง

หนึ่งนั้นจะทำให้มีแนวโน้มที่จะทำให้เกิดการ Short กันระหว่างแผ่นเหล็กที่อยู่ติดกันและทำให้เกิดกระแสไหลวนในแกนเหล็ก



รูปที่ 4.1 โครงสร้างของแกนสเตเตอร์ที่เกิดการเสียหายจาก wedge และกระแสไหลวนที่เกิดขึ้น



รูปที่ 4.2 โครงสร้างของแกนสเตเตอร์ที่เกิดการเสียหายจาก wedge และกระแสไหลวนที่เกิดขึ้น

4.2 แกนเหล็กเกิดการเสียหายขณะที่พันขดลวดที่แกนสเตเตอร์

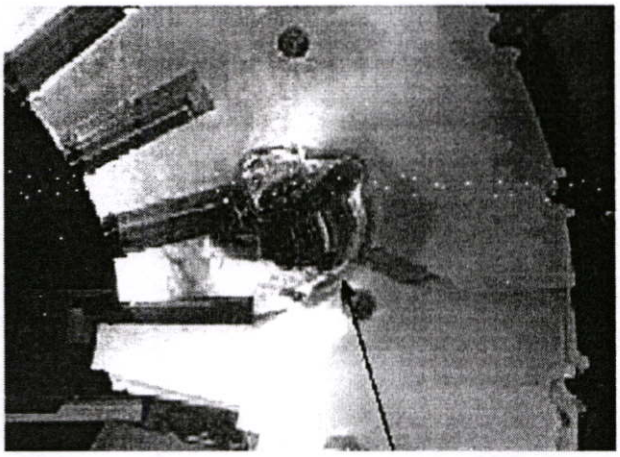
เนื่องจากต้องการรั้งขดลวดในร่องสเตเตอร์ให้แน่นหนาจึงต้องมีลิ่ม (wedge) ดันขดลวดไว้ในร่องสล๊อตที่ผิวบริเวณใกล้ๆปากร่อง ดังนั้นการใส่ลิ่มนี้ต้องใช้ทักษะและประสบการณ์อย่างสูง อย่างไรก็ตามแกนเหล็กเคลือบฉนวนสามารถเกิดการเสียหายจากลิ่ม อาจทำให้เกิดกระแสไหลวนระหว่างแผ่นเหล็กที่ติดกันได้ ตามรูปที่ 4.2

4.3 ฉนวนเคลือบแกนเหล็กเกิดการหลุดล่อนออกเมื่อทำการทดสอบขดลวดสเตเตอร์

ขดลวดที่พันบนแกนสเตเตอร์ในเครื่องกลไฟฟ้าบางชนิด ต้องมีการทดสอบที่แรงดันสูง และอาจทำให้เกิดความเค้นทางไฟฟ้าที่ทำต่อฉนวนมากเกินไป อาจทำให้ฉนวนเกิดหลุดออก

4.4 ความเสียหายของแกนสเตเตอร์เนื่องจากไฟไหม้

สภาวะที่ขดลวดพันผิดปกติ อาจทำให้เกิดไฟไหม้ในร่องสล๊อต ทำให้ที่ด้านข้างของแผ่นเหล็กเกิดฉนวนหลุดออกจากตัวแผ่นได้ ทำให้เกิดกระแสไหลวน (Eddy current) ขึ้นเหนี่ยวนำบนแผ่น laminate ที่วางชิดกันอาจลัดวงจรหากัน เกิดประกายไฟและความร้อนขึ้น



รูปที่ 4.3 ความเสียหายของแกนสเตเตอร์เนื่องจากไฟไหม้

4.5 ความเสียหายเชิงกลโดยเกิดจากการกระแทก

บางครั้งความเสียหายที่เกิดบริเวณผิวของซี่แกนเหล็ก เกิดเนื่องมาจากการขนส่งและการเคลื่อนที่ ทำให้ส่วนประกอบบางอย่างที่หลวมอยู่แล้วเกิดหล่นหายไป ตัวอย่างเช่น การถอดโรเตอร์ไปกระทบบริเวณซี่ของแกนสเตเตอร์ ไม่ว่ากรณีใดก็ทำให้ผิวของสเตเตอร์ได้รับแรงกระแทก และทำให้เกิดอันตรายต่อแกนเหล็กได้

4.6 สาเหตุอื่นๆ

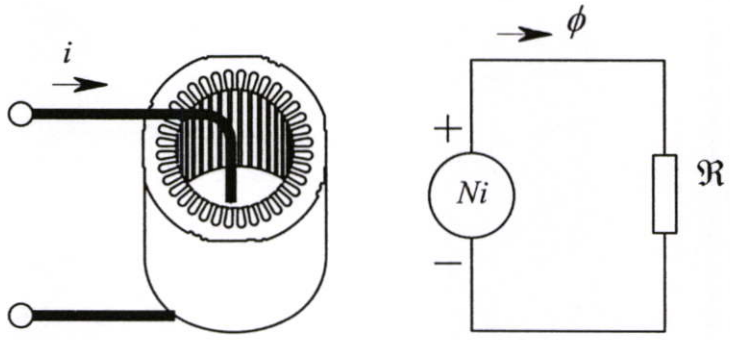
สาเหตุอื่นๆ ที่สามารถทำให้เกิดความเสียหายต่อแกนเหล็กเคลือบฉนวนได้หลายสาเหตุ เช่น ฉนวนที่ปุ่มของแกนเหล็กเกิดความเสียหาย ความเสียหายของฉนวนจากท่อน้ำหล่อเย็น (Water cooling tubes) ที่ติดตั้งบนแกนสเตเตอร์ และสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดความผิดปกติ แต่สาเหตุเหล่านี้โดยทั่วไปนั้นเกิดได้ค่อนข้างยาก

บทที่ 5
การหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก

การหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก ด้วยวิธีการป้อนกระแสกระตุ้นเข้าแกนสเตเตอร์ โดยใช้หลักการทฤษฎีเกี่ยวกับวงจรแม่เหล็ก บทนี้กล่าวถึงขั้นตอนการหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็กและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ โดยมีสมการเพื่อใช้ในการหาค่าต่างๆ ดังนี้

5.1 หลักการป้อนกระแสกระตุ้นเข้าแกนสเตเตอร์

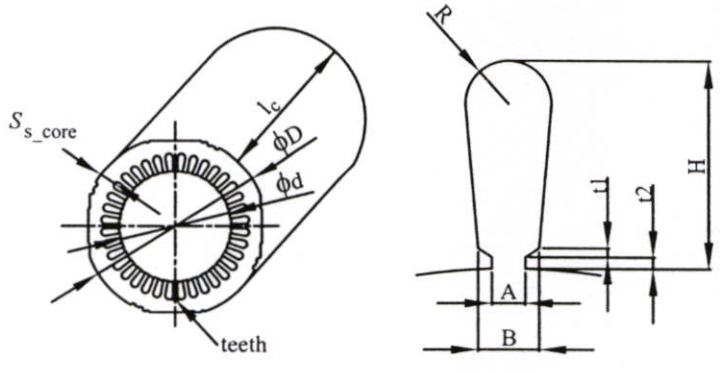
การป้อนกระแสกระตุ้นเข้าที่แกนสเตเตอร์ เพื่อทำให้เกิดการเหนี่ยวนำค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่พิกัด เพื่อหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็กที่เกิดขึ้น โดยการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และกระแสไฟฟ้า เพื่อนำมาคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าป้อนเข้า



รูปที่ 5.1 วงจรแม่เหล็กของแกนเหล็กสเตเตอร์

5.2 การคำนวณหาค่ารายละเอียดต่างๆของแกนเหล็ก

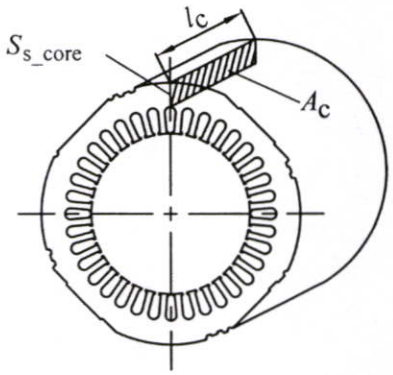
การคำนวณหาค่ารายละเอียดของแกนเหล็กสเตเตอร์จะแบ่งเป็น 2 คือ ส่วน S_{s_core} และส่วน teeth ดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 รายละเอียดของแกนเหล็ก

5.2.1 การคำนวณค่า S_{s_core} (m)

คำนวณจากสมการ (5.1)



รูปที่ 5.3 การหาพื้นที่เส้นแรงแม่เหล็ก

$$S_{s_core} = \frac{(D-d)}{2} - H \tag{5.1}$$

เมื่อ S_{s_core} คือ ขนาดของสเตเตอร์ มีหน่วยเป็นเมตร

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางวงนอกของสเตเตอร์ มีหน่วยเป็นเมตร

d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางวงในของสเตเตอร์ มีหน่วยเป็นเมตร

H คือ ความสูงของสล๊อต (Slot) มีหน่วยเป็นเมตร

5.2.2 พื้นที่ของเส้นแรงแม่เหล็ก (m^2)

คำนวณจากสมการ (5.2)

$$A_c = S_{s_core} \times l_c \tag{5.2}$$

เมื่อ A_c คือ พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก มีหน่วยเป็นตารางเมตร (m^2)

l_c คือ ความยาวของเส้นทางเดินแม่เหล็ก

5.2.3 น้ำหนักของ teeth (W/kg)

คำนวณจากสมการ (5.3)

$$W_t = N_t \times A_t \times \rho_c \times l_c \tag{5.3}$$

เมื่อ W_t คือ น้ำหนักของ teeth

N_t คือ จำนวน teeth

A_t คือ พื้นที่ของ teeth

ρ_c คือ ความหนาแน่นของวัสดุเหล็ก

5.2.4 น้ำหนักของ S_{s_core} (W/kg)

คำนวณจากสมการ (5.4)

$$W_{s_core} = W_{total} - W_t \tag{5.4}$$

เมื่อ W_{s_core} คือ น้ำหนักของแกน Stator

W_{total} คือ น้ำหนักรวมทั้งหมด

5.3 การคำนวณหาค่าแรงดัน

การทดสอบหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก ดังนั้นต้องทำการคำนวณหาค่าแรงดันที่ป้อนให้แก่สายเคเบิลที่คล้องแกนเหล็ก เพื่อเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กในแกนเหล็กนั้น ดังนั้นทำให้เกิดค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (B) ค่าแรงดันไฟฟ้ามีความสัมพันธ์กับค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก ดังนี้คือ

$$E_{rms} = \frac{E_{max}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi f N A_c B_{max}}{\sqrt{2}}$$

$$E_{rms} = 4.44 f N A_c B_{max} \tag{5.5}$$

เมื่อ E_{rms} คือ แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนสายเคเบิล มีหน่วยเป็นโวลท์ (V)

f คือ ความถี่ มีหน่วยเป็นเฮิทซ์ (Hz)

N คือ จำนวนรอบของสายเคเบิลที่คล้องแกนเหล็ก (1 รอบ)

A_c คือ พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กที่นำมาทดสอบ มีหน่วยเป็นตารางเมตร (m^2)

B คือ ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กของแกนเหล็ก มีหน่วยเป็นเทสลา

นำผลการคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้า ณ ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กตั้งแต่ 0.2 ~ 2.0 เทสลา ป้อนให้กับแกนเหล็ก ที่นำมาทดสอบในสภาพต่างๆ

5.4 การคำนวณหาค่ากระแส

ค่ากระแสที่ป้อนให้กับแกนเหล็กที่นำมาทดสอบ สามารถคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่เหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กกับค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก ดังสมการ

$$Ni = H_c l_c$$

$$H_c = \frac{Ni}{l_c} \tag{5.6}$$

เมื่อ H_c คือ ค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น แอมแปร์เทอร์น/ เมตร

N คือ จำนวนรอบของสายเคเบิลที่คล้องแกนเหล็ก (1 รอบ)

i คือ กระแสที่ป้อนสายเคเบิล มีหน่วยเป็น แอมแปร์

l_c คือ ความยาวของทางเดินเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็กที่นำมาทดสอบ มีหน่วยเป็น เมตร

5.5 การคำนวณค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก

จากสมการที่ (5.8) ที่ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กต่างๆ กำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าแกนเหล็ก Exciting coil (P_{in}) แบ่งการสูญเสียเป็น 2 ส่วนใหญ่ คือ

5.5.1 ค่าสูญเสียของสายไฟ (P_{cu}) ได้จากสมการ (5.7)

$$P_{cu} = I^2 R \tag{5.7}$$

5.5.2 ค่าสูญเสียของแกนเหล็ก (P_{core}) ได้จากสมการ (5.9)

$$P_{in} = P_{cu} + P_{core} \tag{5.8}$$

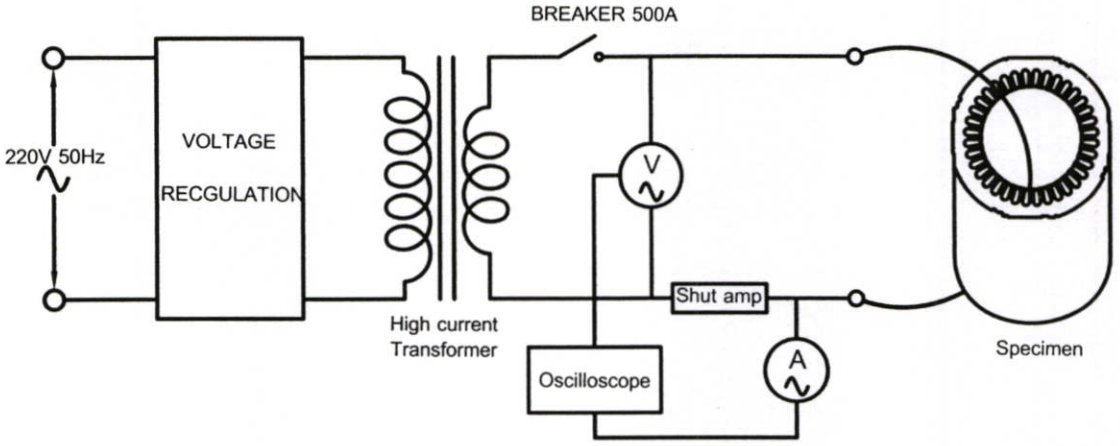
$$P_{core} = P_{in} - P_{cu} \tag{5.9}$$

เมื่อ P_{in} คือ กำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไป Excited

P_{cu} คือ กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในสายไฟ

P_{core} คือ กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในแกนเหล็ก

R คือ ความต้านทานของสายไฟ



รูปที่ 5.4 วงจรของการทดสอบค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก

วิทยานิพนธ์นี้ใช้เทคนิคการป้อนกระแสกระตุ้นเข้าแกนสเตเตอร์ เพื่อหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก และช่วยพิจารณาผลของแกนเหล็กที่ทดสอบนั้นอยู่ในสภาพ

ก. ดี นำไปใช้งานได้ต่อ

ข. ปานกลาง พอใช้งานได้

ค. เสีย ไม่เหมาะสมที่จะใช้งาน

ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบถูกนำมาเปรียบเทียบกับผู้ผลิตอุตสาหกรรมแผ่นเหล็ก ซึ่งมีประโยชน์ในการบอกคุณสมบัติของแกนเหล็ก ได้แก่

1. ค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก มีหน่วยเป็นวัตต์ / กิโลกรัม
2. ค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น แอมแปร์เทอร์น / เมตร

5.6 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบมีดังนี้

5.6.1 การเลือกหม้อแปลงแรงดันมาใช้ในการทดสอบ

ต้องคำนวณพื้นที่ของแกนเหล็ก

$$emf = 4.44\,fNBA \tag{5.10}$$

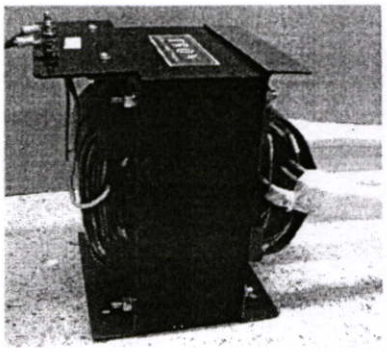
$$emf = 4.44 \times 50 \times 1 \times 2.0 \times (0.123 \times 0.085)$$

$$= 4.642\text{V} \approx 5.0\text{V}$$

แทนค่า N คือ จำนวนรอบที่คล้องแกนเหล็ก มีค่าเท่ากับ 1 รอบ

B คือ ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก มีค่าเท่ากับ 2 Tesla

จากผลการคำนวณขนาดของหม้อแปลงที่ใช้ในการทดสอบ เราจะเผื่อค่าแรงดันเป็น 1.2 เท่าของค่าคำนวณได้ ดังนั้นจึงเลือกใช้หม้อแปลงขนาด 220V/6V 500Amp 3kVA เพื่อสามารถนำไปใช้ทดสอบกับแกนเหล็กที่มีขนาดใหญ่ได้



รูปที่ 5.5 หม้อแปลงขนาด 220V/6V 500Amp 3kVA

5.6.2 ข้อมูลของแกนเหล็ก 50A1300 สามารถดูรายละเอียดเพิ่มเติมได้ที่ ภาคผนวก ค

แผ่นเหล็กชนิด 50A1300 หนา 0.50 มม.

ค่าความหนาแน่นของเหล็ก 7.85 kg/cm^3

ค่าความสูญเสีย $W_{15/50}$ = 8.06 W/kg (25cm x 25 cm Epstein Test Pieces)

Magnetic induction B_{50}= 1.76 T

Coercive force H_{c15} =128.8 A/m

Resistivity $17\,\Omega \cdot m \times 10^{-8}$

Stacking factor 96%

5.6.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

แผ่นเหล็กสเตเตอร์ ชนิด 50A1300

เฟรมหุ้มแกนเหล็ก

หม้อแปลงขนาด 220V/6V 500Amp 3kVA

สายไฟ THW 750V 70^{0}C PVC ขนาด 120 mm^2 จำนวน 1 เส้น

เบรกเกอร์ S-600S 3P 500Amp

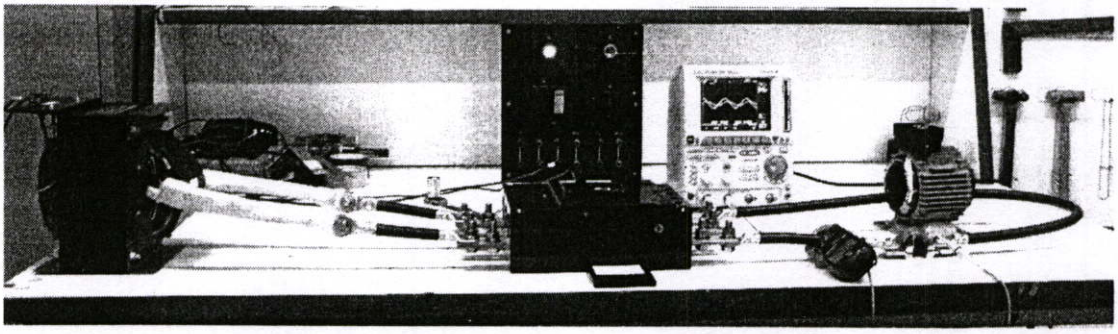
หม้อแปลงปรับค่าได้ 0-260V 50/60Hz 60 Amp13.2 kVA

Oscilloscope รุ่น Yogokawa DL1640

Shunt Amp 500Amp 50mV

Digital Low Resistance Ohm Meter

เครื่องชั่งน้ำหนักแบบละเอียด

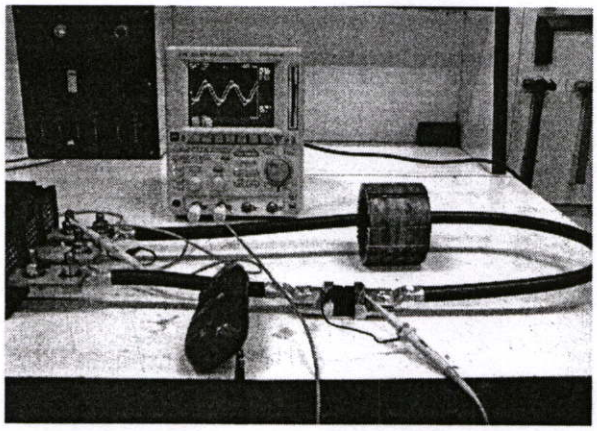


รูปที่ 5.6 การจัดตั้งชุดทดสอบการหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก

5.7 ขั้นตอนการทดสอบค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก

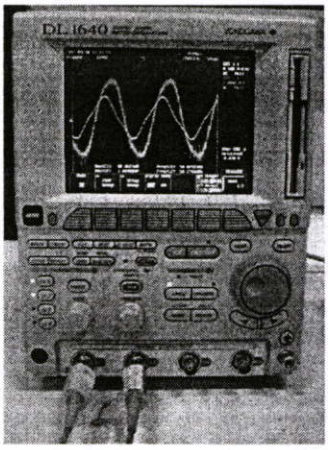
เริ่มจากคำนวณค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก เพื่อจะได้นำมาหาค่าความสูญเสียต่อน้ำหนักแกนเหล็ก (W/kg) และหา *B-H* Curve เพื่อนำมาเปรียบเทียบและหาแนวโน้มของแกนเหล็กสภาพต่างๆ

5.7.1 ใช้หม้อแปลงปรับแรงดันป้อนแรงดัน เพื่อให้เกิดกระแสไฟฟ้ากระตุ้นแกนเหล็กสร้างเส้นแรงแม่เหล็กขึ้นมา และวัดค่าแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดจากฟลักซ์แม่เหล็กในแกนเหล็ก มีค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้ามีค่าตั้งแต่ 0.2-2.0 เทสลา โดยนำสายไฟคล้องแกนเหล็กเพื่อวัดค่าแรงดันเหนี่ยวนำ



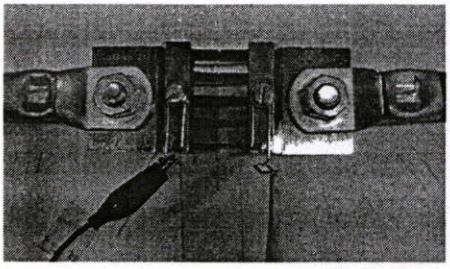
รูปที่ 5.7 การพันขดลวดกระตุ้นแกนเหล็ก 1 รอบ

5.7.2 บันทึกค่ากระแสและแรงดันขาเข้า ด้วยเครื่อง Oscilloscope รุ่น Yogokawa DL1640 เพื่อจะนำไปคำนวณกำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไป



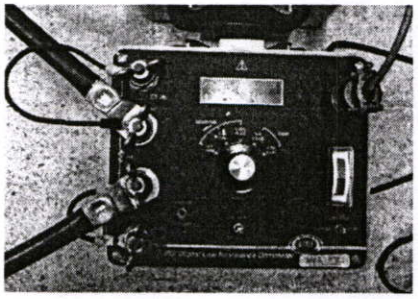
รูปที่ 5.8 Oscilloscope รุ่น Yogokawa DL1640

เนื่องจากกระแสในการทดสอบมีค่ามากกว่า 100 A จึงทำให้เกินพิกัดของ Current Probe ดังนั้นจึงต่อ Shunt amp 500Amp 50mV เพื่อช่วยให้สามารถอ่านได้โดยตรง



รูปที่ 5.9 Current Probe วัดที่ Shunt Amp

5.7.3 ใช้เครื่อง Digital Low Resistance Ohm Meter วัดค่าความต้านทานในสายไฟ มีค่าเท่ากับ 0.164 mΩ เพื่อคำนวณค่า P_{cu} ในการทดสอบใช้กระแสไฟสูงประมาณ 300 Amp เพื่อความสะดวกในการทดสอบ และลดค่าความสูญเสียในสายไฟ ดังนั้นจึงเลือกใช้สายไฟ THW ขนาด 120 mm^2 ยาว 1 เมตร ทนกระแสได้ 320 A คล้องแกนเหล็กจำนวน 1 รอบ



รูปที่ 5.10 Digital Low Resistance Ohm Meter

ในวิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาความบกพร่องของแกนเหล็กในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส ที่เกิดจากการเพิ่มขึ้นของค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก เนื่องจากความบกพร่องของฉนวนเคลือบแกนเหล็ก โดยจำลองสภาพแกนเหล็กต่างๆ ดังนี้ คือ แกนเหล็กแบบเรียงซ้อนแผ่น, แกนเหล็กแบบเรียงคั่นฉนวน, แกนเหล็กปกติและผิดปกติแบบไม่มีเฟรมหุ้ม, และแกนเหล็กปกติและแกนเหล็กผิดปกติแบบมีเฟรมหุ้ม

หลังจากคำนวณขนาดหม้อแปลงไฟฟ้า เพื่อป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับแกนเหล็กและทดสอบความแม่นยำของเครื่องวัด และวัดค่าความต้านทานของสายไฟที่ใช้ในป้อนกระแสกระตุ้น โดยการป้อนค่าแรงดันกระตุ้นเข้าที่แกนเหล็กที่ค่า B ต่างๆ จากนั้นหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก โดยแบ่งเป็นค่าความสูญเสียในแกนเหล็กปกติที่มาจากโรงงานผลิต, แกนเหล็กที่นำแผ่นสเตเตอร์เรียงคั่นฉนวนระหว่างแผ่น, แกนเหล็กที่เสียหายเนื่องมาจากฉนวนของแผ่นเหล็กเสื่อมสภาพ โดยทำการ short turn ระหว่างแผ่น ที่ 50% ตามความยาวของแกนเหล็กใน 1 ซี่, แกนเหล็กที่ใช้งานจริง (แกนเหล็กมีเฟรม) และนำผลการทดสอบวิธีกระตุ้นกระแสเปรียบเทียบกับผลการทดสอบการหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็กมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้วยวิธีสภาวะไร้โหลด เพื่อดูแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก

ในการทดสอบแกนเหล็กสภาพต่างๆนั้นโดยจ่ายแรงดันกระตุ้นผ่านเข้าที่หม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อให้เกิดกระแสไฟฟ้ากระตุ้นในตัวแกนเหล็ก โดยผ่านอุปกรณ์ Shunt Amp ช่วยในการวัดกระแสป้อนตามค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำต่างๆ ที่มาจากขดลวดเหนี่ยวนำ เพื่อให้ได้ค่า B ของแกนเหล็กที่ต้องการ ทำให้ได้กราฟ B-H curve

กราฟค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก Core loss ที่ได้นั้นมาจากการบันทึกผลของ $V_{excited}$ และ $A_{excited}$ จาก oscilloscope เป็นไฟล์ ASCII เพื่อนำมาหาค่าคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าป้อนเข้า (Input power) ในการ excited ในแต่ละค่าของ B ตั้งแต่ 0.2-2.0 T จากนั้นหาค่าความสูญเสียของสายไฟมาหักลบกับกำลังไฟฟ้าป้อนเข้า ผลลัพธ์ที่ได้คือค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก (Core loss) จากนั้นนำแกนเหล็กมาชั่งน้ำหนัก และนำที่ได้ไปพล็อตกราฟค่าความสูญเสียของแกนเหล็ก (W/kg) กับค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก (B)

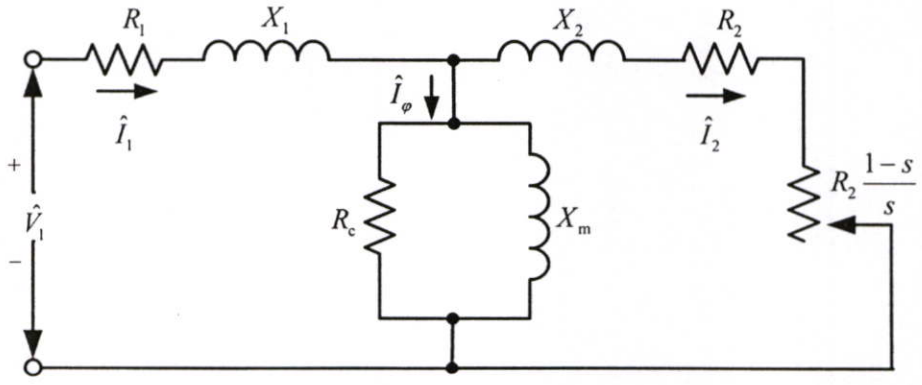
บทที่ 6
การหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็กมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

การหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก ด้วยการทดสอบมอเตอร์ในสภาวะไร้โหลดอ้างอิงการทดสอบตามมาตรฐาน IEEE 112-1996 Method B เป็นวิธีด้านโหลด "ด้านเข้า- ด้านออก โดยแยกกำลังสูญเสีย" [10] วิธีนี้มีหลายขั้นตอนในการหากำลังสูญเสียที่ปรากฏทั้งหมดถูกแยกเป็นหลายส่วนคือกำลังสูญเสีย I^2R ของสเตเตอร์และโรเตอร์, กำลังสูญเสียในแกน, กำลังสูญเสียจากความเสียดทานและลมนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับวิธีการป้อนกระแสกระตุ้นต่อในบทที่ 7

6.1 การหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก สภาวะไร้โหลด

6.1.1 การทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ สภาวะไร้โหลด (No-load test)

จ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับและความถี่ตามพิกัดให้มอเตอร์ โดยไม่ต่อเชื่อมโหลด ให้มอเตอร์ทำงานจนกระทั่งกำลังไฟฟ้าป้อนเข้าคงที่ เพื่อที่ค่ากำลังสูญเสียเนื่องจากความเสียดทานถูกต้อง ขณะไม่มีภาระโหลดจะทำให้ความเร็วรอบของมอเตอร์ใกล้เคียงความเร็วซิงโครนัส ซึ่งมอเตอร์จะมีค่าสลิปเข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งเปรียบเสมือนเปิดวงจรสมมูลของมอเตอร์ พลังงานที่ป้อนให้มอเตอร์สามารถแยกการสูญเสียเป็น 3 ส่วน คือ การสูญเสียของแกนเหล็ก (Iron losses) การสูญเสียในขดลวดสเตเตอร์ (Copper losses) และการสูญเสียเนื่องจากการหมุน (Rotational loss) ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบนี้คือ R_c และ X_m โดยค่าที่ได้เป็นค่าต่อเฟส



รูปที่ 6.1 วงจรสมมูล ขณะ No-load

การหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็กมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส ที่ทำงานภายใต้สภาวะไร้โหลด สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$P_{nl} = P_{core} + P_{stator} + P_{rotor} + P_{rot} \quad (6.1)$$

เมื่อ P_{nl} คือ กำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุททั้งหมดในสภาวะไร้โหลด

P_{core} คือ กำลังสูญเสียของแกนเหล็ก

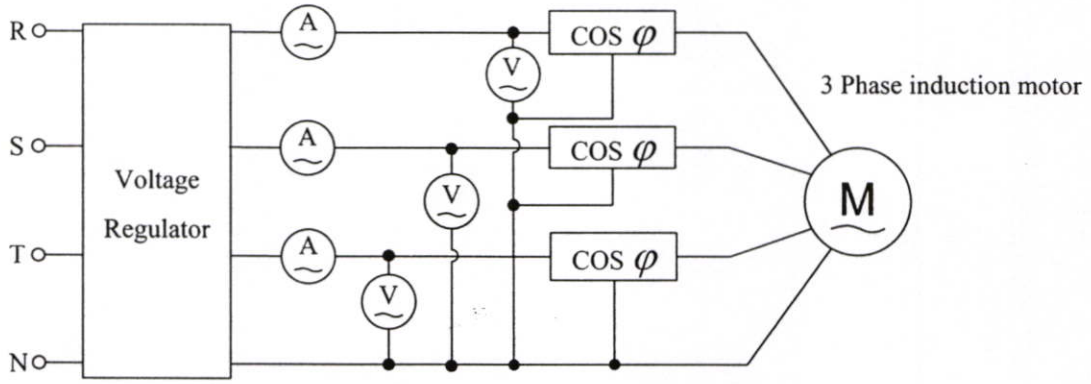
P_{stator} คือ กำลังสูญเสียในขดลวดสเตเตอร์

P_{rotor} คือ กำลังสูญเสียในโรเตอร์

P_{rot} คือ กำลังสูญเสียเนื่องจากการหมุน

เมื่อแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าเป็นแบบไซน์ (Sinusoidal supply) ให้มอเตอร์สภาวะไร้โหลด Slip เข้าใกล้ศูนย์ จะไม่สามารถวัดค่ากระแสโรเตอร์ได้ เนื่องจากค่าความต้านทาน $R_2\left(\frac{1-s}{s}\right)$ มีค่าสูง และค่าความสูญเสียในโรเตอร์ $\left(I_2^2 R_2\right)$ เข้าใกล้ศูนย์ ดังนั้นค่าความสูญเสียในตัวนำโรเตอร์จะไม่นำมาพิจารณา สามารถเขียนสมการใหม่ (6.2)

$$P_{nl} = P_{core} + P_{stator} + P_{rot} \quad (6.2)$$



รูปที่ 6.2 วงจรการทดสอบ No-load

ขั้นตอนการทดสอบ

1. ต่อวงจรตามรูปที่ 6.2
2. ป้อนแรงดันไฟฟ้าสมดุล โดยใช้ Voltage regulation ปรับให้ได้พิกัดแรงดันของมอเตอร์ คือ 380 โวลท์ 50 เฮิทซ์
3. วัดและบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้า $(V_{1,nl})$ กระแสไฟฟ้า $(I_{1,nl})$ และ Power factor $(\cos\varphi)$

6.1.2 การทดสอบหาค่า Mechanical losses

การทดสอบโดยการจ่ายแรงดันไฟฟ้าสมดุลให้กับมอเตอร์ขณะไม่มีโหลด เริ่มจากแรงดันน้อยๆ จนกระทั่งถึงแรงดันพิกัดของมอเตอร์ สาเหตุการหาค่าของ Mechanical losses ที่แรงดันน้อยๆ เพราะว่าค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก (Core loss) มีค่าต่ำมาก โดยนำค่ากำลังไฟฟ้าอินพุทลบกับค่าความสูญเสียของขดลวด (Copper loss) แล้วนำค่าที่ได้มาพล๊อตกราฟเทียบกับแรงดันไฟฟ้ายกกำลังสอง โดยจะใช้วงจรการทดสอบรูปที่ 6.2

$$P_{\text{rot}} = P_{\text{nl}} - P_{\text{Stator}} \tag{6.2}$$

ขั้นตอนการทดสอบ

1. ต่อวงจรตามรูปที่ 6.2
2. ป้อนแรงดันไฟฟ้าสมดุล โดยใช้ Voltage regulation ปรับแรงดันน้อยๆ จนกระทั่งถึงแรงดันพิกัดของมอเตอร์ 380 โวลท์ 50 เฮิทซ์
3. วัดและบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้า ($V_{1,\text{nl}}$) กระแสไฟฟ้า ($I_{1,\text{nl}}$) และ กำลังไฟฟ้าอินพุท (P_{nl})

6.2 ผลการทดสอบหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก

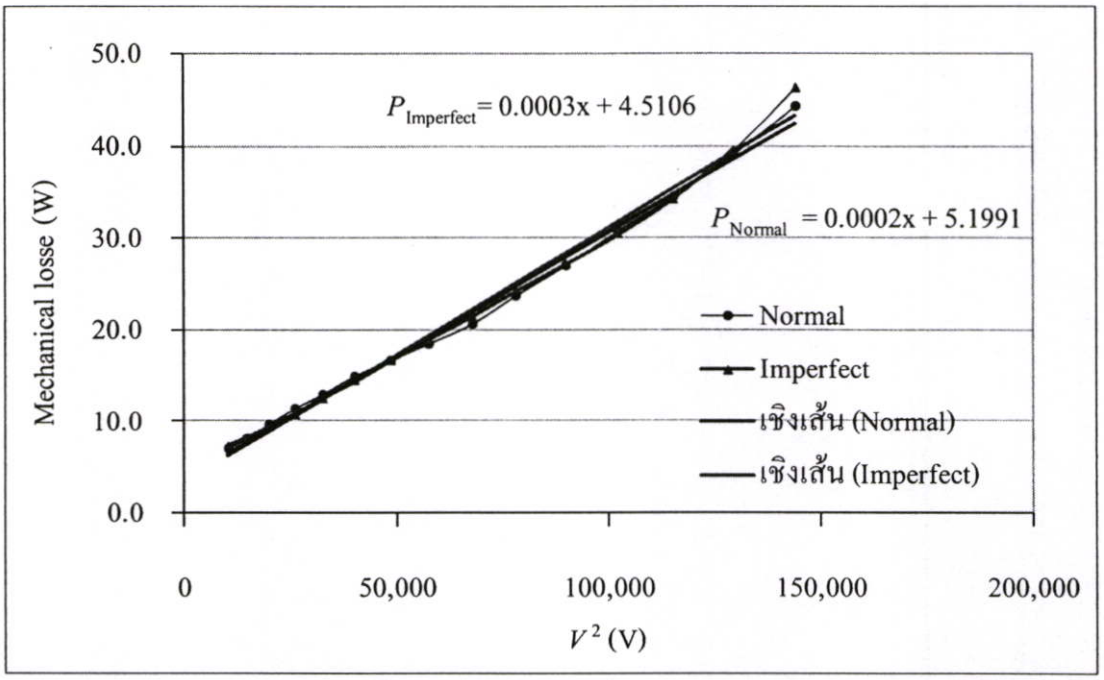
มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส โรเตอร์แบบกรงกระรอก ที่นำมาทดสอบมี 2 รุ่น คือ ขนาด 1 แรงม้า 4 ขั้ว 380 โวลท์ 50 เฮิทซ์ และ 2 แรงม้า 4 ขั้ว 380 โวลท์ 50 เฮิทซ์ ตามลำดับ

ตารางที่ 6.1 ผลการทดสอบมอเตอร์ สภาวะไร้โหลด 380V 50Hz

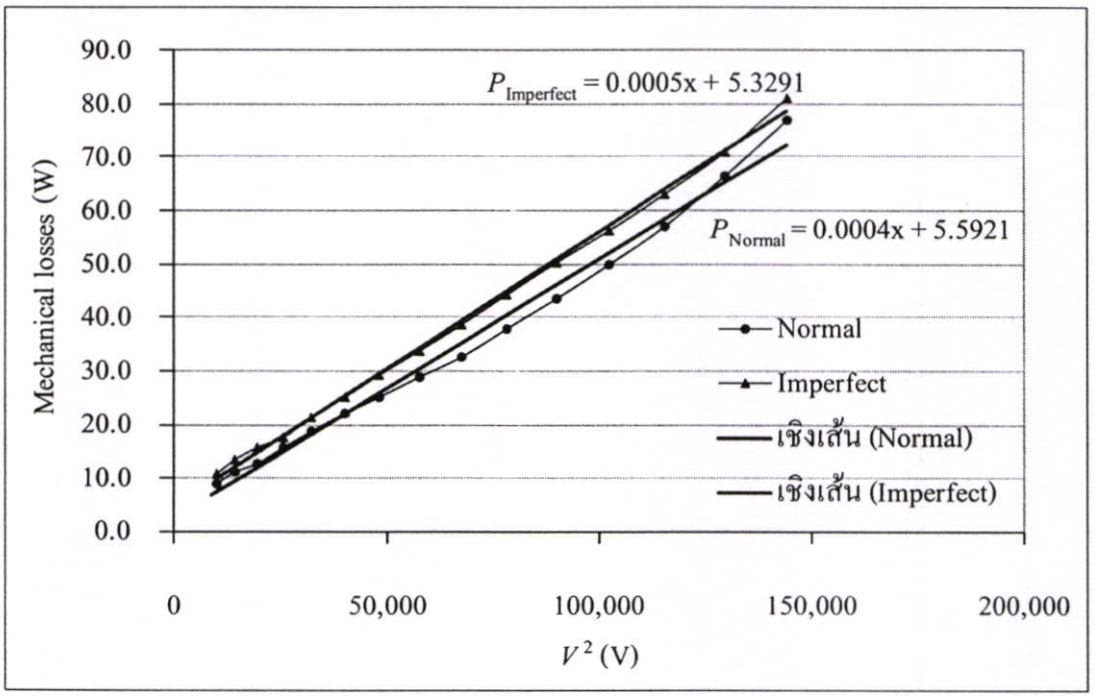
Model	Stator core	ความต้านทาน Ohm	$V_{1,\text{nl}}$ (V)	$I_{1,\text{nl}}$ (A)	P_{nl} (W)	P_{rot} (W)
Motor 1Hp	Normal	10.05	380	1.287	99.3	5.20
	Imperfect	10.05	380	1.298	102	4.51
Motor 2Hp	Normal	5.495	380	2.347	166	5.59
	Imperfect	5.495	380	2.410	175	5.33

อุณหภูมิทดสอบความต้านทานที่ 31.3 $^{\circ}$C

จากผลการทดสอบมอเตอร์ขนาด 1แรงม้า และ 2 แรงม้า ในสภาวะไร้โหลด ของแกนเหล็กสภาพปกติและผิดปกติ โดยการปรับแรงดันจนกระทั่งถึงแรงดันไฟฟ้าพิกัด ส่วนมากค่าความสูญเสียเนื่องจากการหมุนที่เกิดเนื่องจากแรงเสียดทานและแรงลม ส่วนใหญ่พิจารณาให้เป็นค่าคงที่ นำมาพล๊อตกราฟรูปที่ 6.3 และ 6.4 จากนั้นคำนวณหาค่า Mechanical losses ได้ดังตารางที่ 6.1



รูปที่ 6.3 Mechanical losses มอเตอร์ 1 แรงม้า 4 ขั้ว

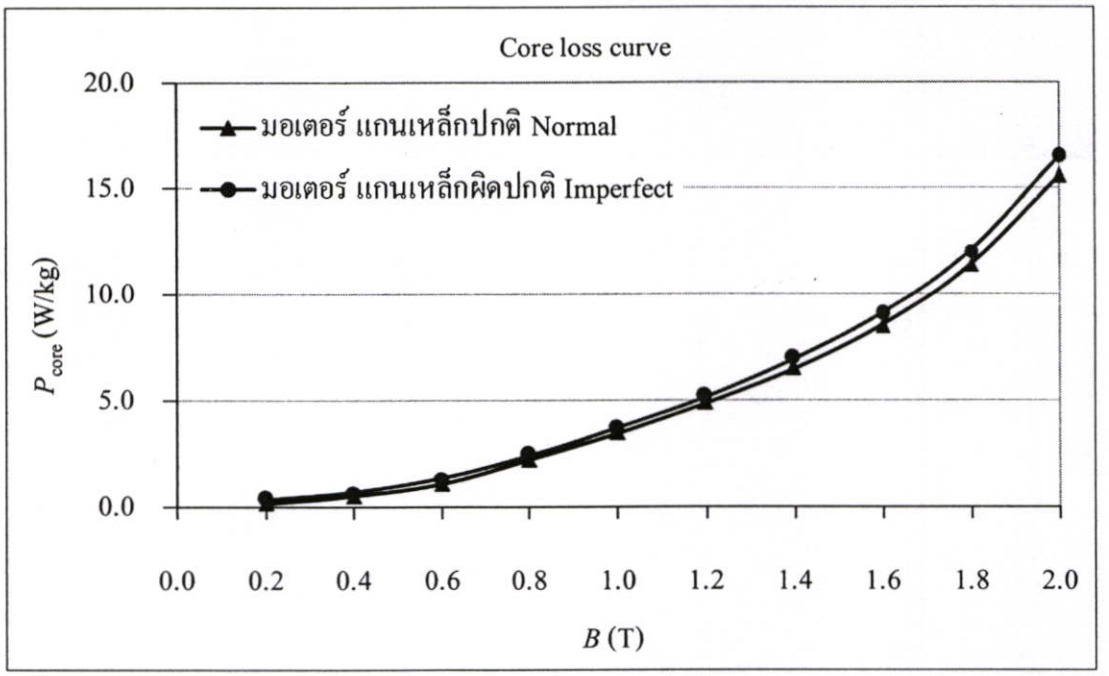


รูปที่ 6.4 Mechanical losses มอเตอร์ 2 แรงม้า 4 ขั้ว

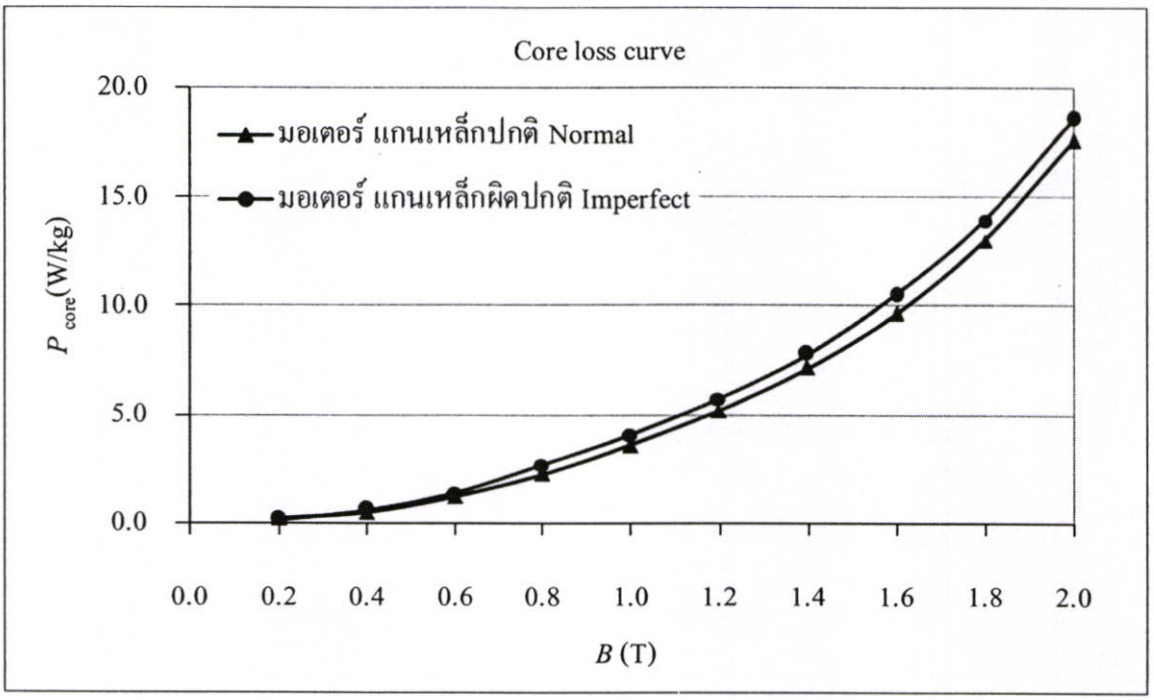
จากกราฟรูปที่ 6.3 และ รูปที่ 6.4 ถูกนำมาวิเคราะห์หาค่าความสูญเสียเนื่องจากการหมุนด้วยสมการเชิงเส้น ส่วนใหญ่เกิดจากลมและแรงเสียดทาน ซึ่งขึ้นอยู่กับความเร็วของก้าน (shaft)

มอเตอร์ และการสูญเสียจากแรงเสียดทานจะมีค่าคงที่ เมื่อจาระบีในตลับลูกปืนมีอุณภูมิอุ่นขึ้น ส่วนการสูญเสียเนื่องจากลมขึ้นอยู่กับความเร็ว ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย จากผลการทดสอบค่าความสูญเสียในแกนเหล็กมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวขนาด 1แรงม้า และ 2 แรงม้า สภาวะไร้โหลด พบว่าเมื่อเปรียบเทียบค่า Mechanical losses ระหว่างแกนเหล็กปกติกับแกนเหล็กผิดปกติมีค่าใกล้เคียงกัน

ผลทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 1Hp และ 2Hp 4ขั้ว 380V 50Hz สภาวะไร้โหลด สภาพแกนเหล็กทดสอบคือแกนเหล็กปกติและผิดปกติชนิดมีเฟรมหุ้ม ผลที่ได้จากการทดสอบมอเตอร์ดูได้จากภาคผนวก ข ซึ่งถูกนำมาคำนวณหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็กที่ค่า B ต่างๆ จากนั้นนำมาพล๊อตกราฟ Core loss ดังรูปที่ 6.5 และรูปที่ 6.6



รูปที่ 6.5 กราฟเปรียบเทียบค่าความสูญเสียในแกนเหล็กมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า



รูปที่ 6.6 กราฟเปรียบเทียบค่าความสูญเสียในแกนเหล็กมอเตอร์ขนาด 2 แรงม้า

จากกราฟรูปที่ 6.5 และรูปที่ 6.6 แสดงการเปรียบเทียบให้เห็นว่าค่าความสูญเสียในแกนเหล็กมอเตอร์ขนาด 1Hp และ 2Hp แบบแกนเหล็กปกติกับผิดปกติที่มีการ short 50% ของความยาว teeth ด้วยวิธีการทดสอบมอเตอร์สภาวะไร้โหลด โดยการแยกค่าความสูญเสียต่างๆ เพื่อหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก จะเห็นได้ว่าค่าความสูญเสียในแกนเหล็กผิดปกติมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับแกนเหล็กปกติ ชนิดมีเฟรมหุ้ม เนื่องจากบริเวณที่ถูก Short มีผลทำให้ฉนวนเคลือบแผ่นเสื่อมสภาพและถูกลัดวงจรทำให้เกิดกระแสไหลวน

ผลการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสด้วยวิธีสภาวะไร้โหลด โดยแยกค่าความความสูญเสียต่างๆ เพื่อหาคำนวณค่าความสูญเสียในแกนเหล็กที่ได้นำมาเปรียบกับวิธีการป้อนกระแสกระตุ้นเข้าแกนเหล็กสภาพต่างๆ เพื่อให้เห็นค่าการเพิ่มขึ้นของค่าความสูญเสียในแกนเหล็กในบทที่ 7 ต่อไป

บทที่ 7

ผลการทดสอบค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก

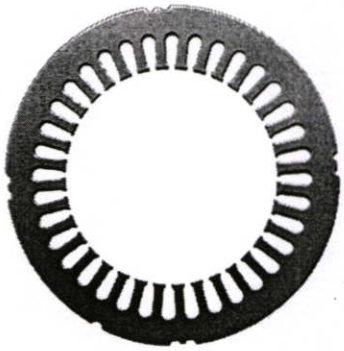
การทดสอบหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็กชนิด 50Ax1300 [11] ด้วยวิธีการป้อนกระแสกระตุ้นเข้าแกนเหล็กสภาพต่างๆ มีดังนี้ คือ แกนเหล็กแบบแบบเรียงซ้อนแผ่น, แกนเหล็กแบบเรียงคั่นแผ่นฉนวน, แกนเหล็กปกติและแกนเหล็กผิดปกติแบบไม่มีเฟรม, แกนเหล็กปกติและแกนเหล็กผิดปกติแบบมีเฟรม เพื่อหาค่า

1) กราฟค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก (Core loss curve) W/kg

2) กราฟของกระแสกระตุ้น เมื่อเทียบกับค่าความหนาแน่นที่จุดต่างๆ

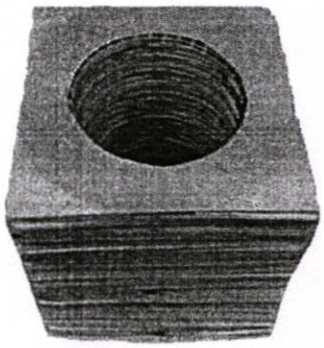
คำนิยามของแกนเหล็กทดสอบ มีดังนี้

1. แกนเหล็กแบบเรียงซ้อนแผ่น หมายถึง นำแผ่นสเตเตอร์หลายๆ แผ่นมาเรียงซ้อนกันตามจำนวนที่กำหนด เช่น แกนเหล็กขนาด 1Hp ใช้แผ่นสเตเตอร์เรียงจำนวน 160 แผ่น เป็นต้น



รูปที่ 7.1 แผ่นสเตเตอร์ (stator core)

2. แกนเหล็กแบบเรียงคั่นฉนวน หมายถึง นำแผ่นสเตเตอร์มาเรียงคั่นฉนวนระหว่างแผ่นตามจำนวนที่กำหนด และใช้กระดาษเป็นฉนวน



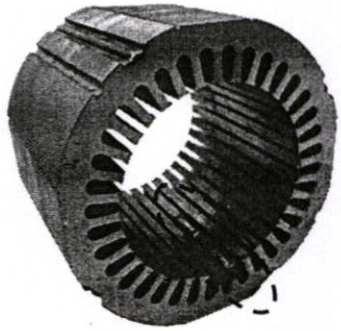
รูปที่ 7.2 แผ่นสเตเตอร์แบบเรียงคั่นฉนวน

3. แกนเหล็กปกติแบบไม่มีเฟรม หมายถึง นำแผ่นสเตเตอร์มาเรียงซ้อนแผ่นตามจำนวนที่กำหนด และอัดแน่นเข้าด้วยกันด้วยวิธีการเชื่อม



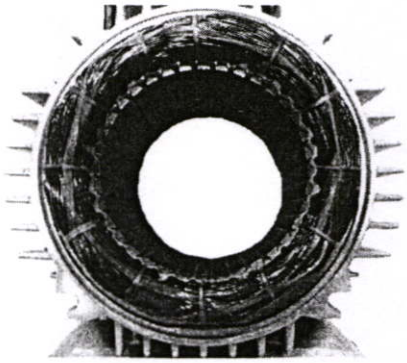
รูปที่ 7.3 แกนเหล็กปกติแบบไม่มีเฟรมหุ้ม

4. แกนเหล็กผิดปกติแบบไม่มีเฟรม หมายถึง นำแผ่นสเตเตอร์มาเรียงซ้อนแผ่นตามจำนวนที่กำหนดและอัดแน่นเข้าด้วยกันด้วยวิธีการเชื่อม จำลองการลัดวงจรของแกนเหล็กด้วยการเชื่อมซี่ (Teeth) ของสเตเตอร์ 50% ของความยาวในแกนเหล็กใน 1 teeth



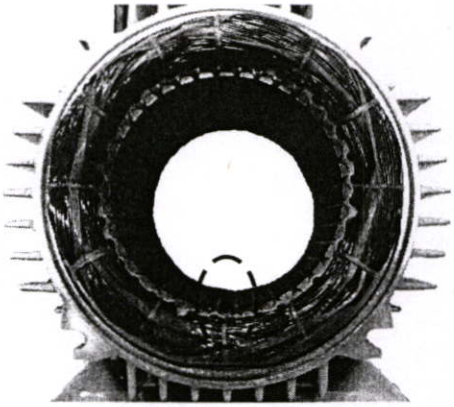
รูปที่ 7.4 แกนเหล็กผิดปกติแบบไม่มีเฟรมหุ้ม

5. แกนเหล็กปกติแบบมีเฟรม หมายถึง การนำแกนเหล็กข้อ 3 อัดเข้าเฟรม



รูปที่ 7.5 แกนเหล็กปกติแบบมีเฟรมหุ้ม

6. แกนเหล็กผิดปกติแบบมีเฟรม หมายถึง การนำแกนเหล็กข้อ 4 อัดเข้าเฟรม จำลองการลัดวงจรของแกนเหล็กด้วยการเชื่อมซี่ (Teeth) ของสเตเตอร์ 50% ของความยาวในแกนเหล็กใน 1 teeth



รูปที่ 7.6 แกนเหล็กผิดปกติแบบมีเฟรมหุ้ม

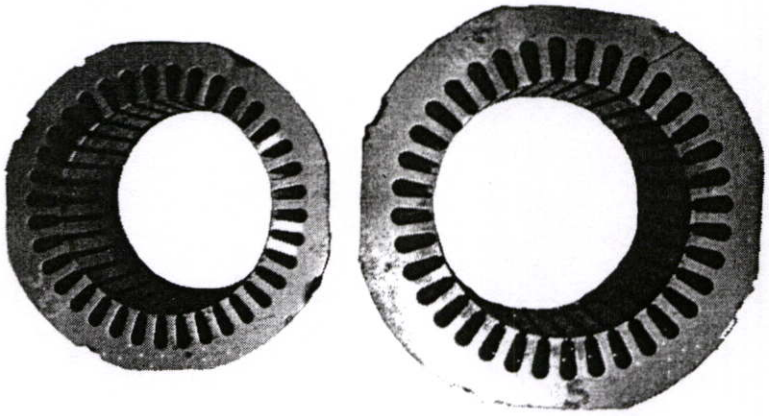
ทั่วไปบริษัทผู้ผลิตมอเตอร์ จะใช้แผ่นเหล็กชนิด Magnetic steel sheet มาผลิตเป็นแกนเหล็กสเตเตอร์ สำหรับในวิทยานิพนธ์นี้ใช้แผ่นเหล็กชนิด 50Ax1300 มีค่าความสูญเสียในแกนเหล็กเท่ากับ$W_{15/50}$=8.06 W/kg ด้วยวิธีการทดสอบด้วยแอปสทีน แต่ในทางปฏิบัติแผ่นเหล็กต้องผ่านกระบวนการขึ้นรูปแผ่นสเตเตอร์ (Stator core), การอัดแผ่นสเตเตอร์เข้าด้วยกันให้แน่นด้วยวิธีการเชื่อม และการอัดแกนเหล็กเข้าเฟรม ดังนั้นในวิทยานิพนธ์เล่นนี้ได้ทำการศึกษาค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก โดยมีรายละเอียดของแกนเหล็กทดสอบดังตารางที่ 7.1

ตารางที่ 7.1 ขนาดและคุณสมบัติของแกนเหล็กที่นำมาทดสอบ

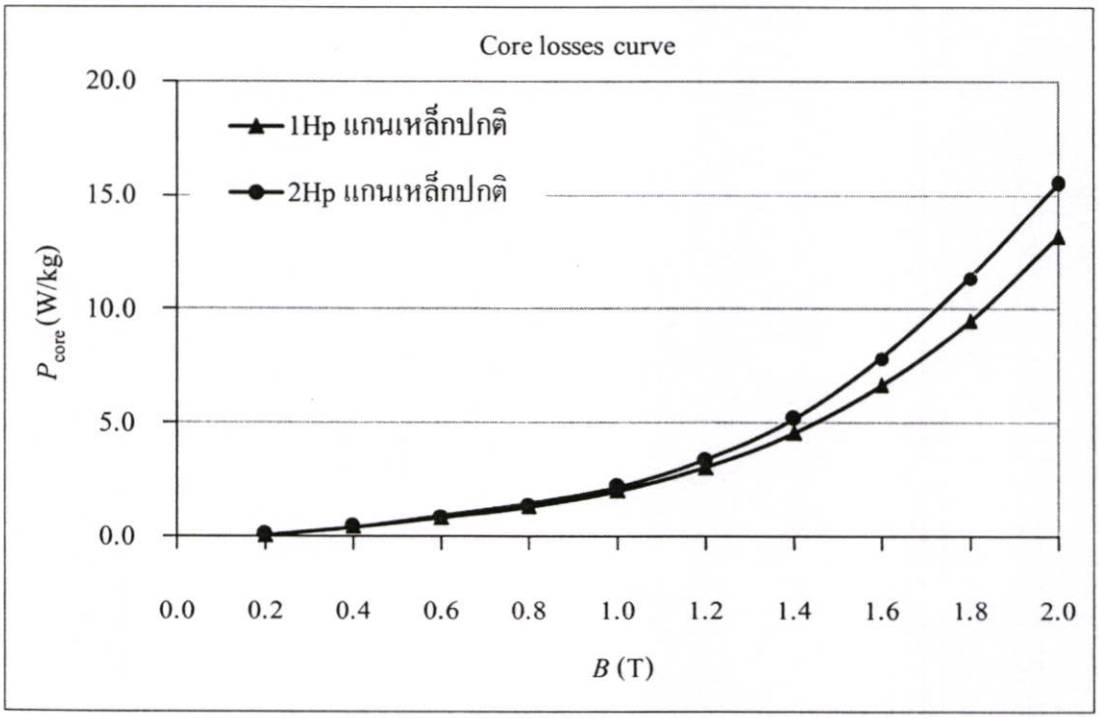
Size	Core length (mm)	Sheet (Pcs)	S_{s_core} (mm)	l_c (mm)	Weight (kg)		
					S_{s_core}	teeth	Total
1HP	80	160	8.60	318.6	1.814	0.718	2.532
2HP	85	170	13.70	381.4	3.186	0.896	4.082

7.1 ผลการทดสอบแกนเหล็กปกติ 1Hp, 2Hp แบบไม่มีเฟรมหุ้ม

แกนเหล็กปกติแบบไม่มีเฟรมหุ้ม เป็นขั้นตอนการยึดติดแผ่นสเตเตอร์อัดแน่นเข้าด้วยกันด้วยวิธีการเชื่อม เพื่อลดกระแสไหลวน (Eddy current) ที่เกิดขึ้นจากการเหนี่ยวนำบนแผ่น laminate ที่วางชิดกัน

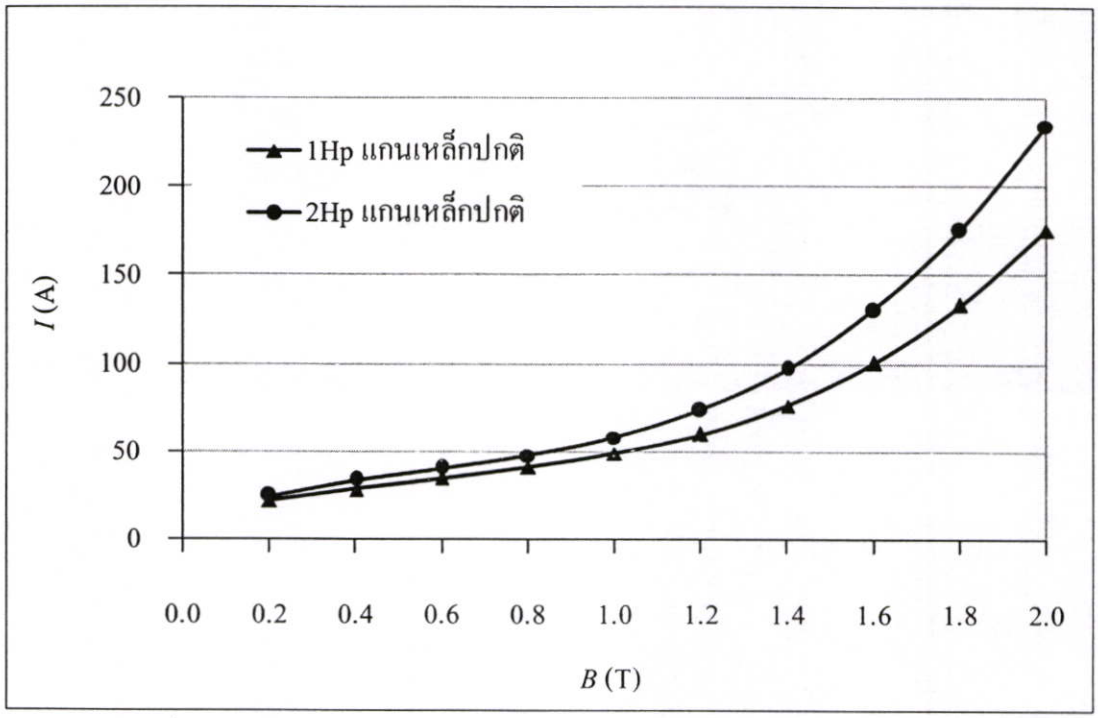


รูปที่ 7.7 แกนเหล็กปกติ แบบไม่มีเฟรมหุ้ม 1Hp, 2Hp



รูปที่ 7.8 ค่าความสูญเสียในแกนเหล็กปกติ 1Hp, 2Hp

รูปที่ 7.8 แสดงการเปรียบเทียบค่าความสูญเสียในแกนเหล็กปกติแบบไม่มีเฟรมหุ้ม ขนาด 1Hp และ 2Hp พบว่าแกนเหล็กขนาด 2Hp มีค่าความสูญเสียในแกนเหล็กมากกว่าแกนเหล็ก 1Hp เนื่องจากแกนเหล็กขนาด 2Hp มีค่ากระแสกระตุ้นเข้าแกนเหล็กมากกว่าแกนเหล็ก 1Hp จากกราฟรูปที่ 7.9



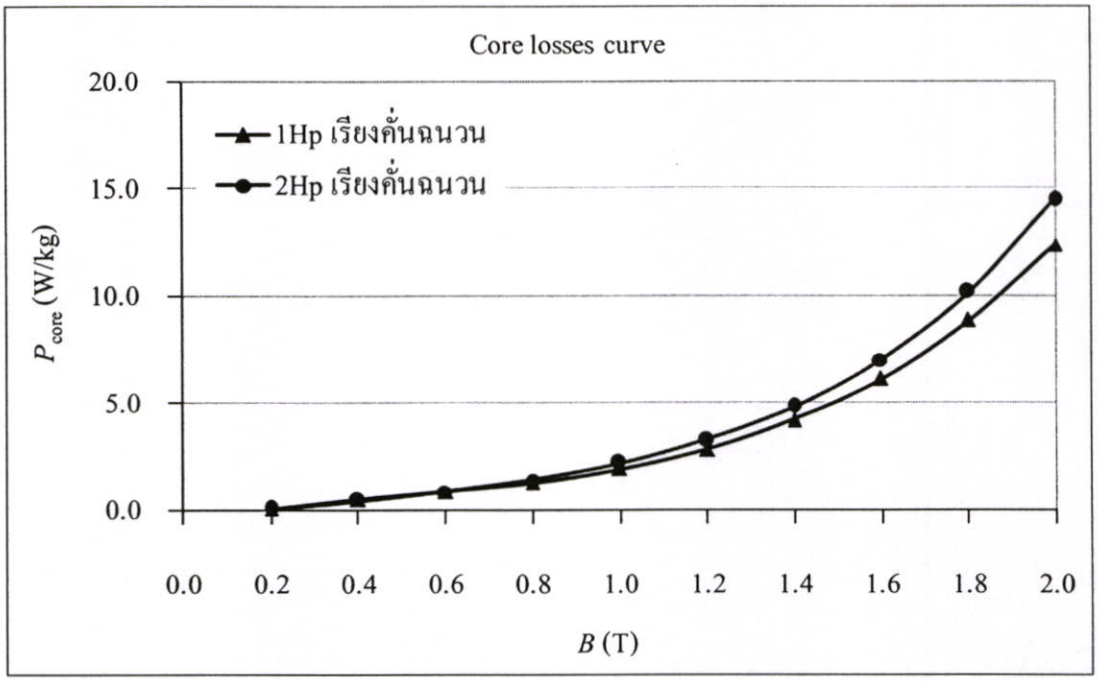
รูปที่ 7.9 กระแสกระตุ้นเมื่อเปรียบเทียบกับค่า B ที่จุดต่างๆ ของแกนเหล็กปกติ 1Hp, 2Hp

จากกราฟรูปที่ 7.9 พบว่าแกนเหล็ก 2Hp มีค่ากระแสกระตุ้นสูงกว่าแกนเหล็ก 1Hp ซึ่งเกิดจากกระแสไหลวน (Eddy current) ที่เกิดขึ้นจากการเหนี่ยวนำบนแผ่น laminate ที่วางชิดกัน

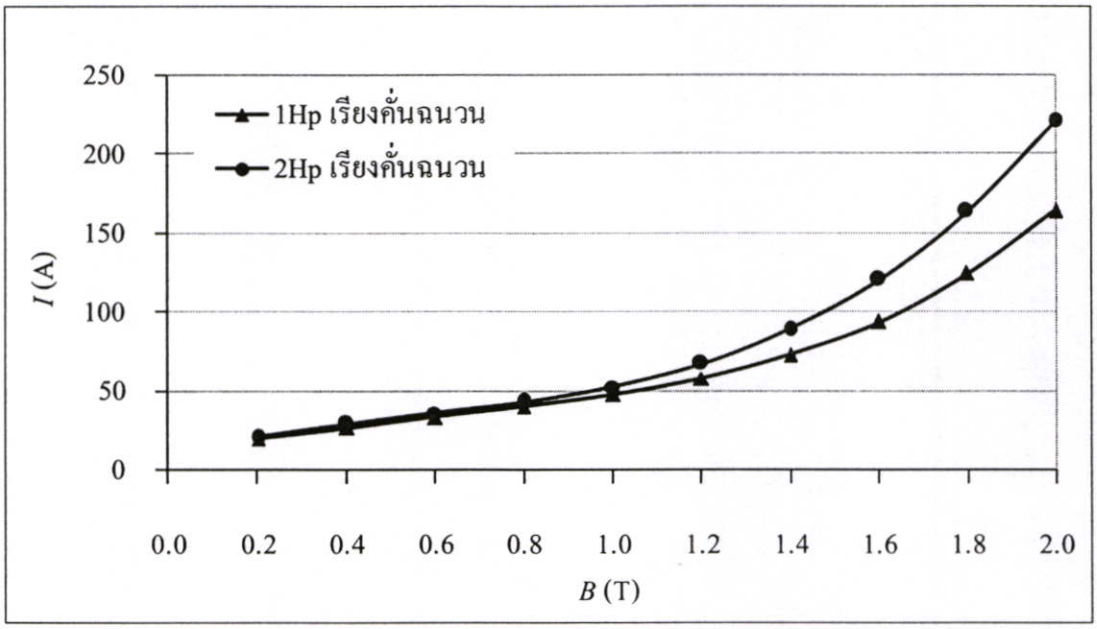
7.2 ผลการทดสอบแกนเหล็กแบบวางเรียงคั่นฉนวน 1Hp, 2Hp

การนำแกนเหล็กแบบวางเรียงคั่นฉนวนมาทดสอบ เพื่อดูค่าความสูญเสียในแกนเหล็กเมื่อมีฉนวนคั่นระหว่างแผ่น เพื่อป้องกันการเกิดค่ากระแสไหลวนที่เกิดขึ้นระหว่างแผ่น

จากรูปที่ 7.10 พบว่าแกนเหล็กแบบเรียงคั่นฉนวน ขนาด 1Hp และ 2Hp มีค่าความสูญเสียในแกนเหล็กน้อย และมีค่ากระแสกระตุ้นต่ำในรูปที่ 7.11 เนื่องจากฉนวนที่คั่นระหว่างแผ่นทำหน้าที่ป้องกันการเกิดกระแสไหลวนที่เกิดขึ้นระหว่างแผ่นได้



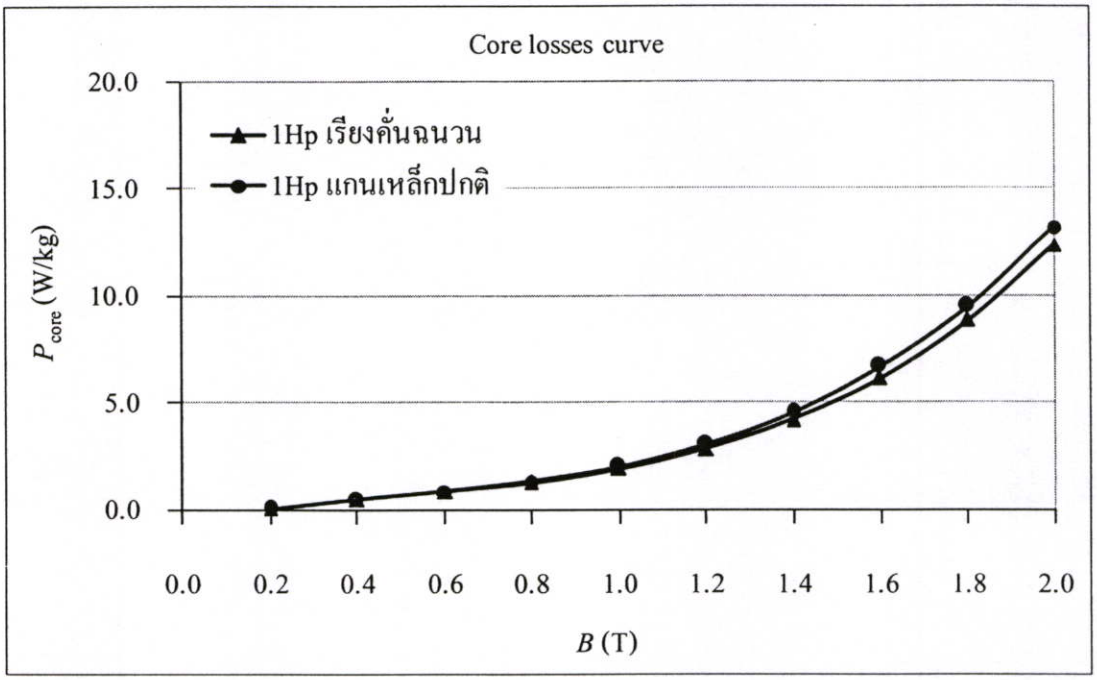
รูปที่ 7.10 ค่าความสูญเสียในแกนเหล็กแบบเรียงคั่นฉนวน



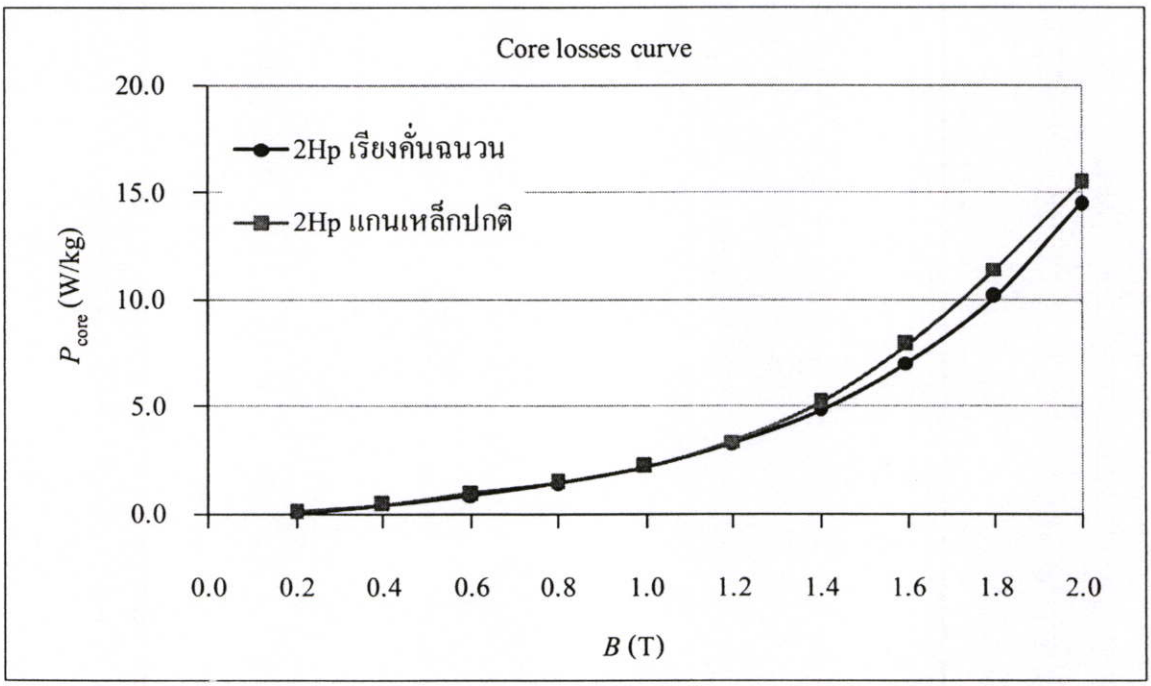
รูปที่ 7.11 กระแสกระตุ้นเมื่อเปรียบเทียบกับค่า B ที่จุดต่างๆ ของแกนเหล็กแบบเรียงคั่นฉนวน

จากนั้นนำแกนเหล็กฉนวนขนาด 1Hp และ 2Hp เปรียบเทียบกับแกนเหล็กปกติ แบบไม่มีเฟรมหุ้ม ตามลำดับ เพื่อแสดงให้เห็นว่ากราฟรูปที่ 7.12 และ รูปที่ 7.13 มีค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก แบบเรียงคั่นฉนวนของแกนเหล็กขนาด 1Hp และ 2Hp มีค่าความสูญเสียในแกนเหล็กมีค่า

น้อยกว่าแกนเหล็กปกติ แบบไม่มีเฟรมหุ้ม เนื่องจากฉนวนที่คั่นระหว่างแผ่นสามารถป้องกันการเกิดกระแสไหลวนบนแผ่น laminate ที่วางชิดกันไม่สามารถลัดวงจรได้



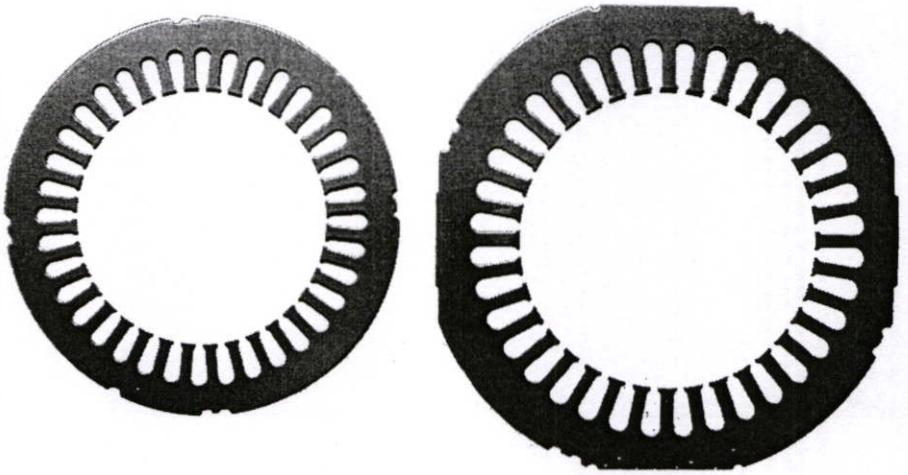
รูปที่ 7.12 ค่าความสูญเสียในแกนเหล็กแบบเรียงคั่นฉนวน, แกนเหล็กปกติ ขนาด 1Hp



รูปที่ 7.13 ค่าความสูญเสียในแกนเหล็กแบบเรียงคั่นฉนวน, แกนเหล็กปกติ ขนาด 2Hp

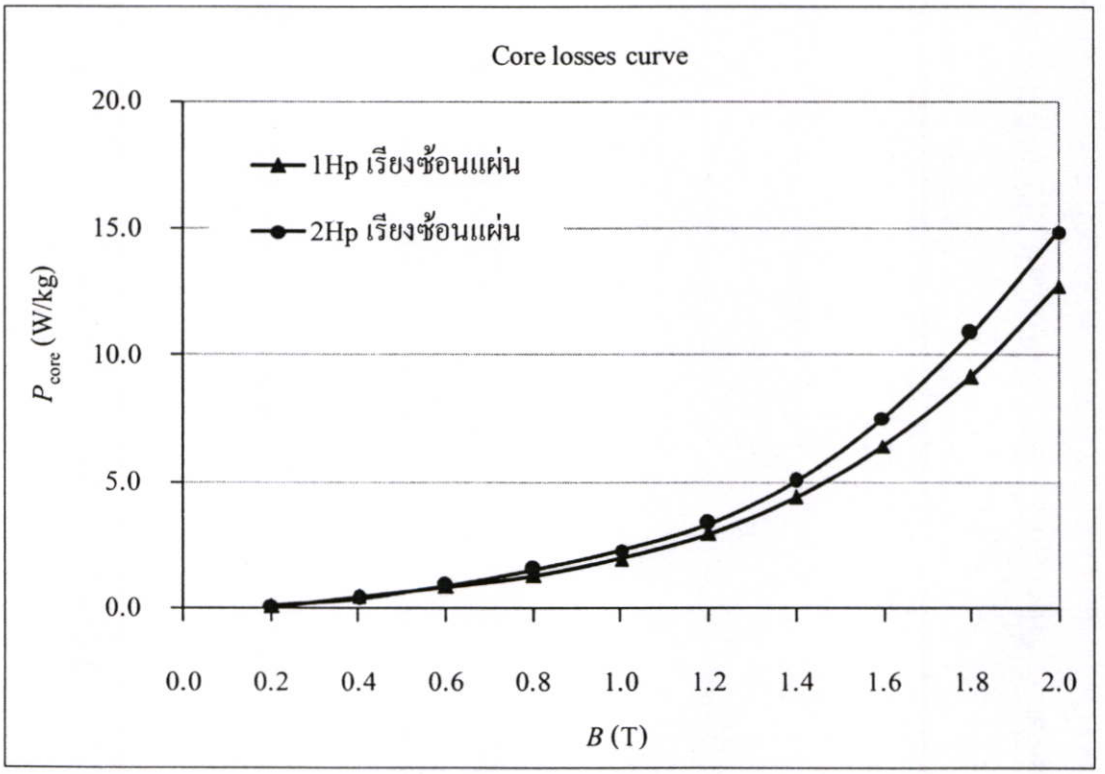
7.3 ผลการทดสอบแกนเหล็กแบบวางเรียงซ้อนแผ่น 1Hp, 2Hp

โดยปกติแผ่นเหล็ก Laminate มีการเคลือบฉนวนที่แผ่น ดังนั้นการนำแผ่นสเตเตอร์วางเรียงซ้อนแผ่น จะเห็นว่ากระแสไหลวน (Eddy current) ที่เกิดขึ้นจากการเหนี่ยวนำบนแผ่น laminate ที่วางชิดกันอาจลัดวงจรถึงกัน ทำให้เกิดความสูญเสียในแกนเหล็ก

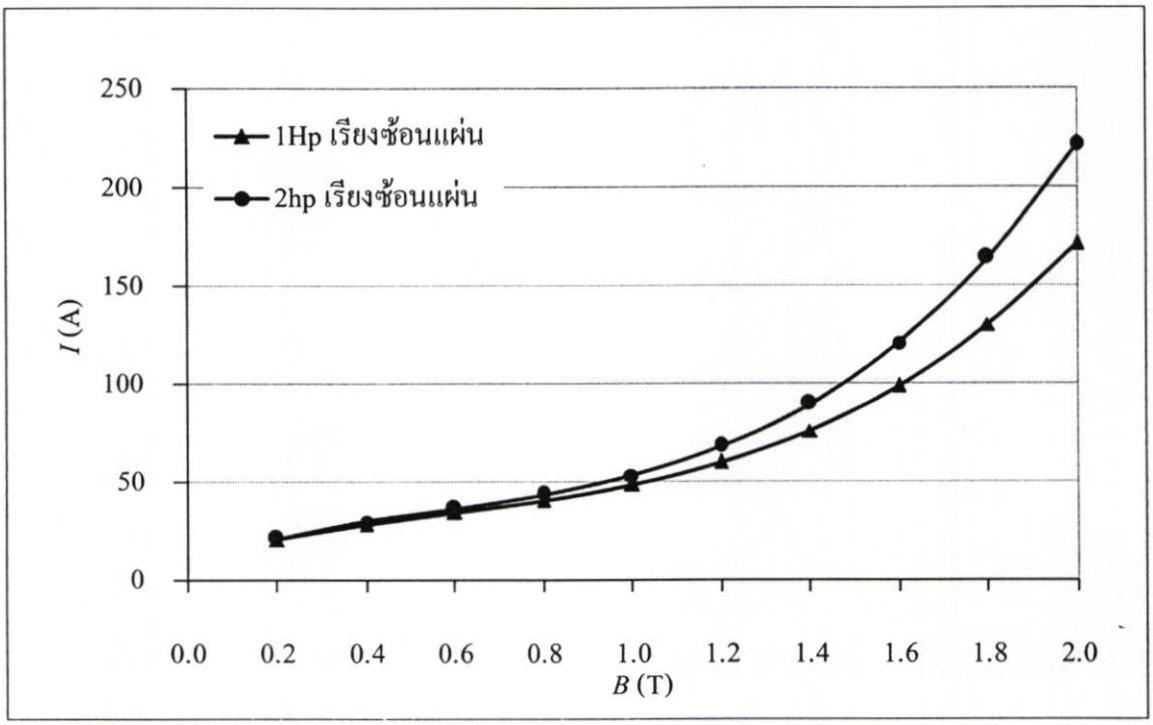


แผ่นสเตเตอร์ขนาด 1Hp แผ่นสเตเตอร์ขนาด 2Hp

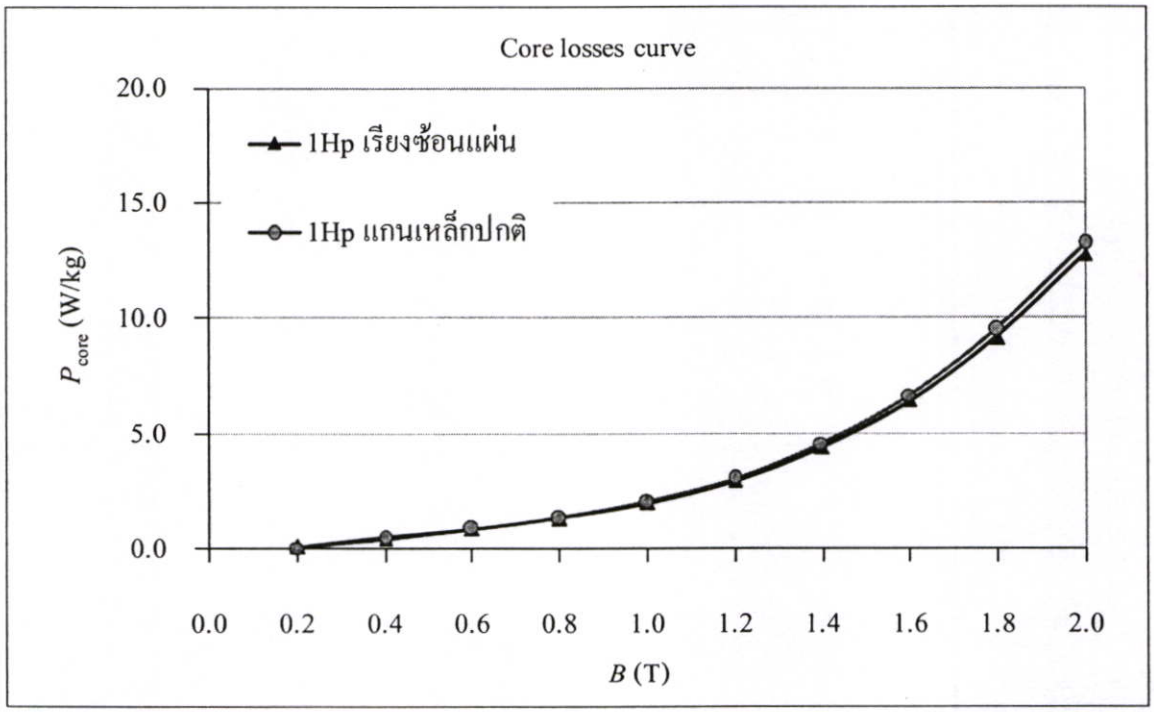
รูปที่ 7.14 แผ่นสเตเตอร์ขนาด 1Hp และ 2Hp



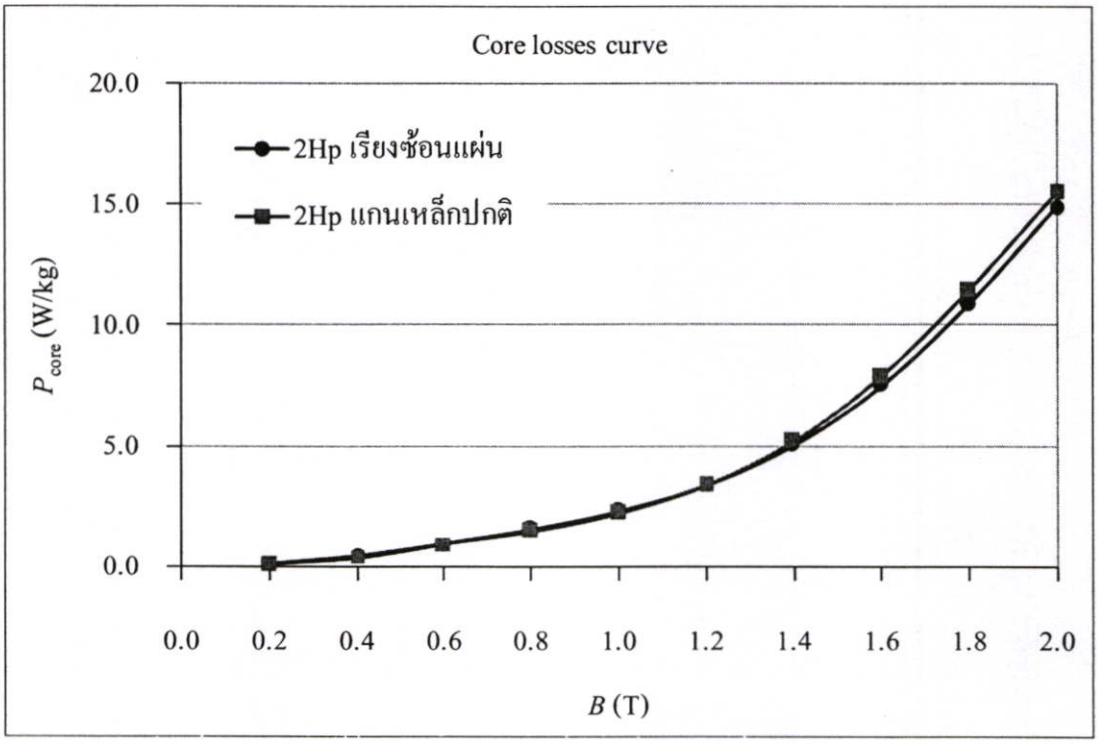
รูปที่ 7.15 ค่าความสูญเสียในแกนเหล็กแบบเรียงซ้อนแผ่น



รูปที่ 7.16 กระแสกระตุ้นเมื่อเปรียบเทียบกับค่า B ที่จุดต่างๆ ของแกนเหล็กปกติแบบเรียงซ้อนแผ่น



รูปที่ 7.17 ค่าความสูญเสียในแกนเหล็กแบบเรียงซ้อนแผ่น, แกนเหล็กปกติ ขนาด 1Hp



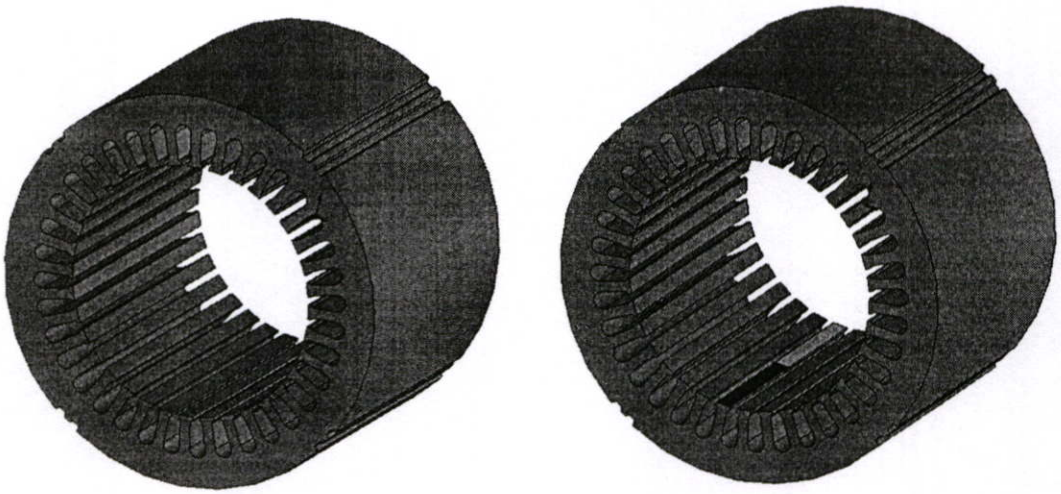
รูปที่ 7.18 ค่าความสูญเสียในแกนเหล็กแบบเรียงซ้อนแผ่น, แกนเหล็กปกติ ขนาด 2Hp

จากนั้นนำแกนเหล็กแบบเรียงซ้อนแผ่นโดยที่ไม่มีฉนวนคั่นระหว่างแผ่น 1Hp และ 2Hp เปรียบเทียบกับแกนเหล็กปกติ แบบไม่มีเฟรมหุ้ม ดังแสดงในกราฟรูปที่ 7.17 และ รูปที่ 7.18 พบว่าค่าความสูญเสียในแกนเหล็กแบบเรียงซ้อนแผ่นมีค่าต่ำกว่าแกนเหล็กปกติ เนื่องจากฉนวนที่เคลือบแผ่น laminate ไม่สามารถป้องกันการเกิดกระแสไหลวนได้ 100% เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับแกนเหล็กแบบคั่นฉนวน สามารถป้องกันการเกิดกระแสไหลวนบนแผ่น laminate ที่วางชิดกันไม่สามารถลัดวงจร

7.4 ผลการทดสอบค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก แบบไม่มีเฟรม 1Hp, 2Hp

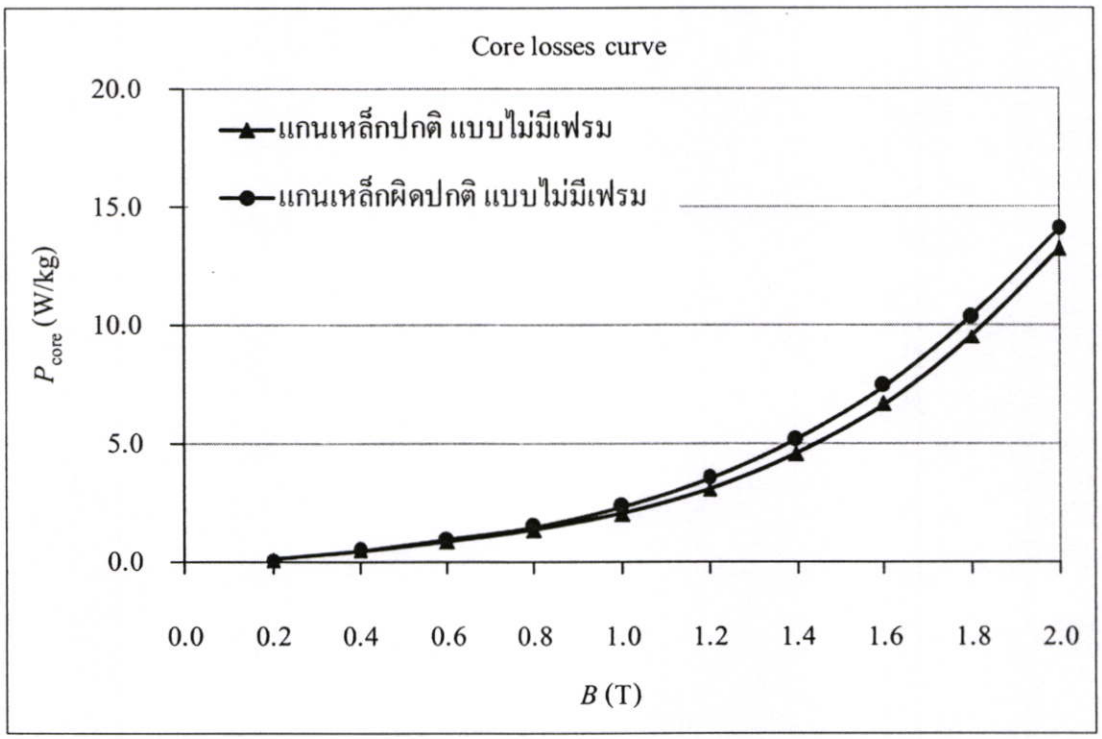
7.4.1 การเปรียบเทียบค่าความสูญเสียในแกนเหล็กปกติ กับผิดปกติ ของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า

การนำแกนเหล็กปกติมาเปรียบเทียบกับแกนเหล็กผิดปกติ เนื่องจากฉนวนเคลือบแผ่นผิดปกติ โดยการนำแกนเหล็กปกติให้เกิดการลัดวงจรด้วยการ Short 50% ของความยาวของ teeth เพื่อศึกษาค่าความสูญเสียในแกนเหล็กที่เพิ่ม

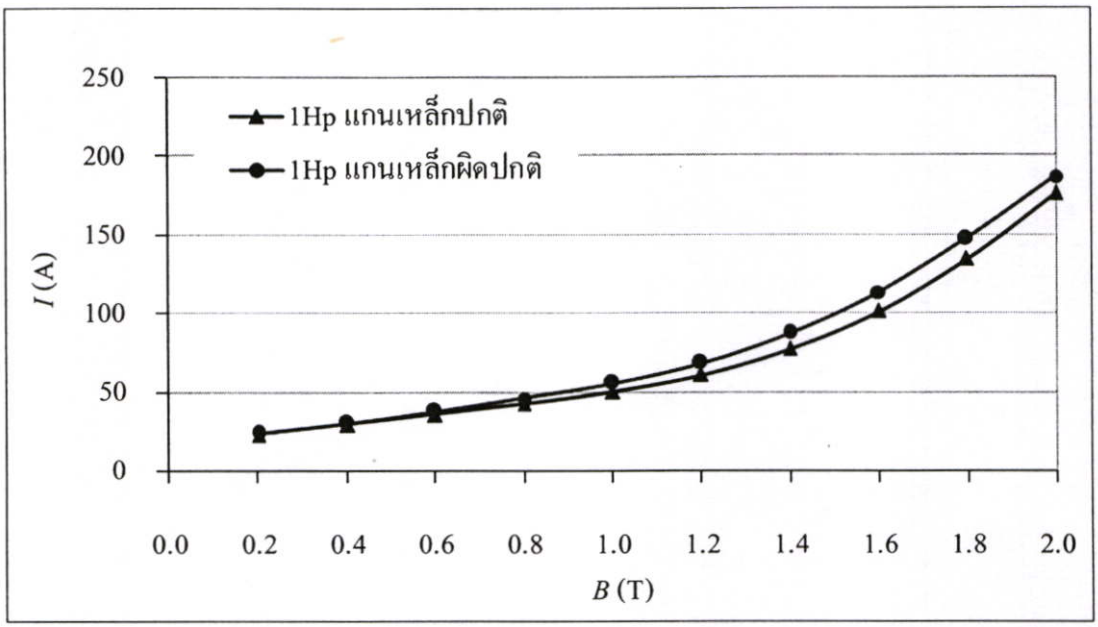


แกนเหล็กปกติ แกนเหล็กผิดปกติ

รูปที่ 7.19 แกนเหล็กปกติและผิดปกติ แบบไม่มีเฟรมหุ้ม ของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า



รูปที่ 7.20 ค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก ของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า แบบไม่มีเฟรม

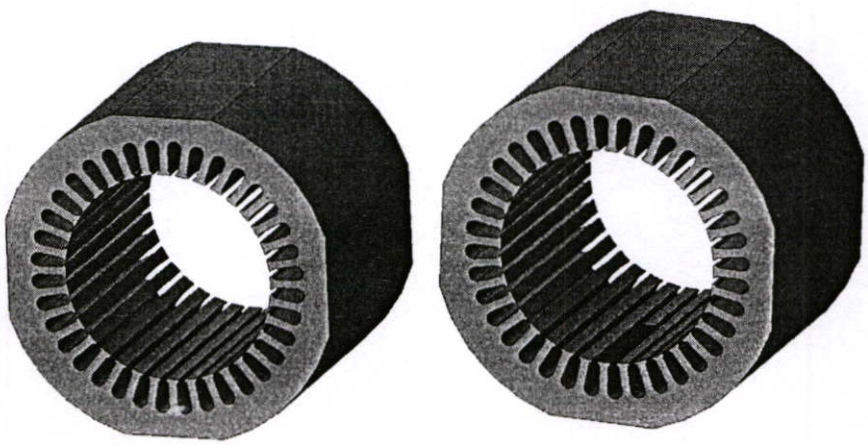


รูปที่ 7.21 กระแสกระตุ้นเมื่อเปรียบเทียบกับค่า B ที่จุดต่างๆ ของแกนเหล็ก 1Hp แบบไม่มีเฟรม

สรุปได้ว่าแกนเหล็กผิดปกติเนื่องจากฉนวนเสื่อม มีผลทำให้เกิดค่ากระแสไหลวนสูงกว่าแกนเหล็กปกติและกราฟรูปที่ 7.21 ค่ากระแสกระตุ้นของแกนเหล็กผิดปกติมีค่าสูงกว่าแกนเหล็กปกติ ส่งผลให้ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กสูงตามด้วย

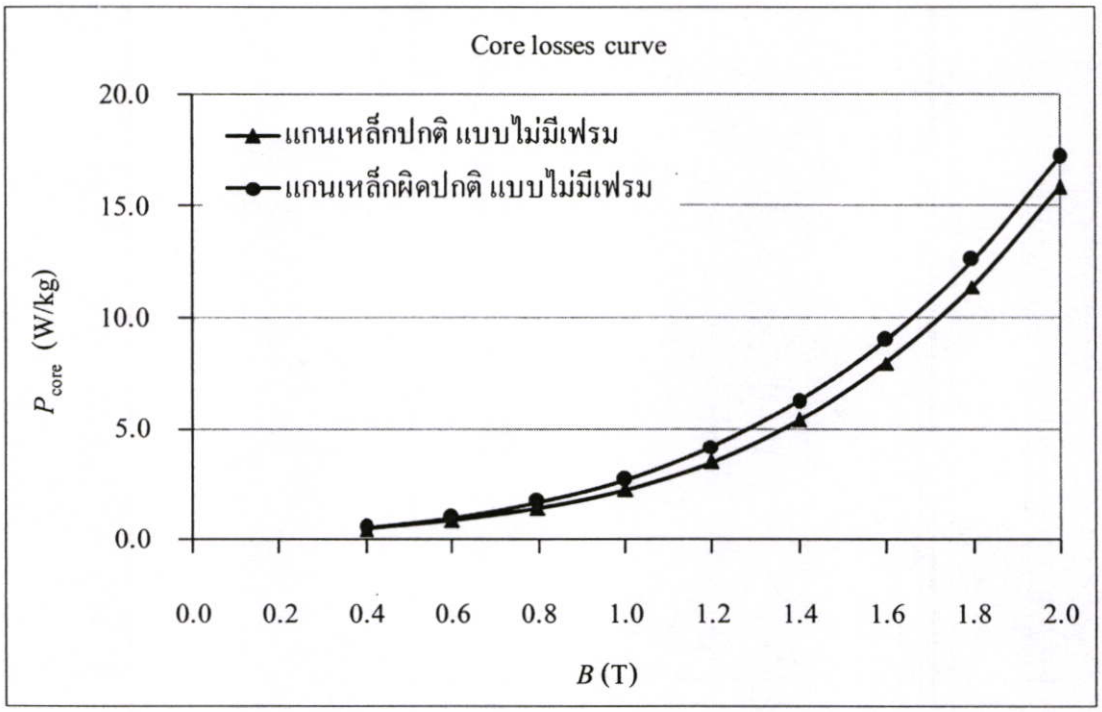
7.4.2 การเปรียบเทียบค่าความสูญเสียในแกนเหล็กปกติ กับผิดปกติ ของมอเตอร์ขนาด 2 แรงม้า

การนำแกนเหล็กปกติมาเปรียบเทียบกับแกนเหล็กผิดปกติ เนื่องจากฉนวนเคลือบแผ่นผิดปกติ โดยการนำแกนเหล็กปกติให้เกิดการลัดวงจรด้วยการ Short 50% ของความยาวของ teeth เพื่อศึกษาค่าความสูญเสียในแกนเหล็กที่เพิ่ม

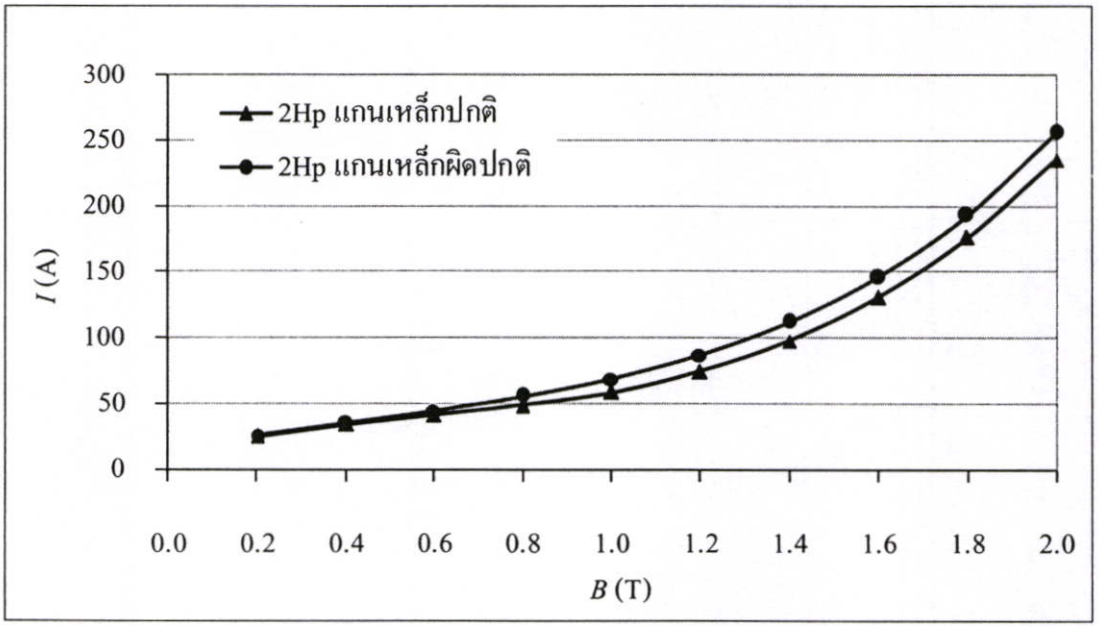


แกนเหล็กปกติ แกนเหล็กผิดปกติ

รูปที่ 7.22 แกนเหล็กปกติและผิดปกติ แบบไม่มีเฟรมหุ้ม ของมอเตอร์ขนาด 2 แรงม้า



รูปที่ 7.23 ค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก ของมอเตอร์ขนาด 2 แรงม้า แบบไม่มีเฟรม



รูปที่ 7.24 กระแสกระตุ้นเมื่อเปรียบเทียบกับค่า B ที่จุดต่างๆ ของแกนเหล็ก 2Hp แบบไม่มีเฟรม

จากกราฟรูปที่ 7.23 แกนเหล็กผิดปกติมีค่าความสูญเสียในแกนเหล็กมากกว่าแกนเหล็กปกติ เนื่องจากฉนวนเสื่อมส่งผลทำให้เกิดค่ากระแสไหลวนสูงกว่าแกนเหล็กปกติ และในกราฟรูป

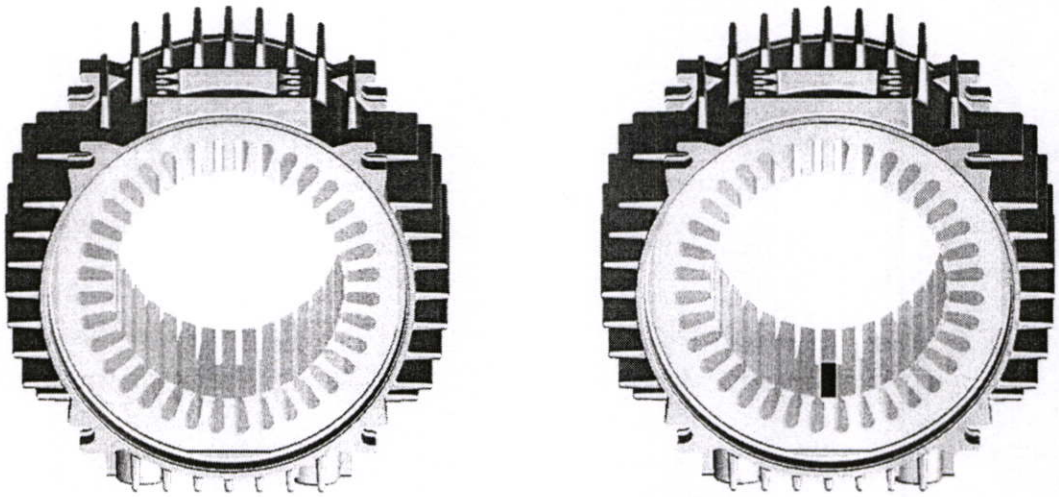
ที่ 7.24 แสดงค่ากระแสกระตุ้นของแกนเหล็กผิดปกติมีค่าสูงกว่าแกนเหล็กปกติ ส่งผลให้ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กสูงด้วย

สรุปได้ว่าทั้งแกนเหล็กขนาด 1Hp และ 2Hp แบบผิดปกติมีค่าความสูญเสียในแกนเหล็กและกระแสกระตุ้นสูงกว่าแกนเหล็กปกติ ทำให้เกิดกระแสไหลวนสูงที่เกิดจากการเหนี่ยวนำเนื่องจากแกนเหล็กที่ถูกลัดวงจรเนื่องจากฉนวนเคลือบแผ่น laminate เกิดความเสียหายบริเวณจุด short teeth

7.5 ผลการทดสอบค่าความสูญเสียในแกนเหล็กแบบมีเฟรม 1Hp, 2Hp

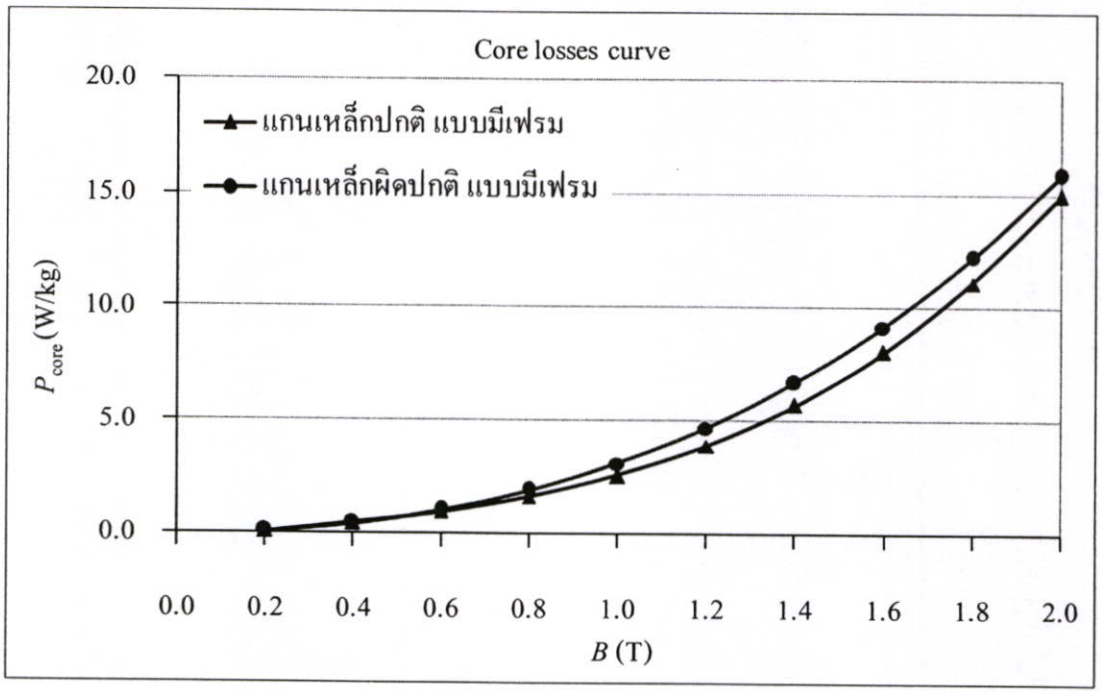
ทั่วไปแกนเหล็กสเตเตอร์จะมีโครงสร้างของเฟรมหุ้มอยู่เสมอ เพื่อความแข็งแรง ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงทำการหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก ตามสภาพการใช้งานจริง ดังนั้นจึงทำการเปรียบเทียบค่าความสูญเสียในแกนเหล็กระหว่างแกนเหล็กปกติกับแกนเหล็กผิดปกติ แบบมีเฟรมหุ้ม เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับวิธีการทดสอบมอเตอร์ สภาวะไร้โหลด

7.5.1 การเปรียบเทียบค่าความสูญเสียในแกนเหล็กปกติ กับผิดปกติ ของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า

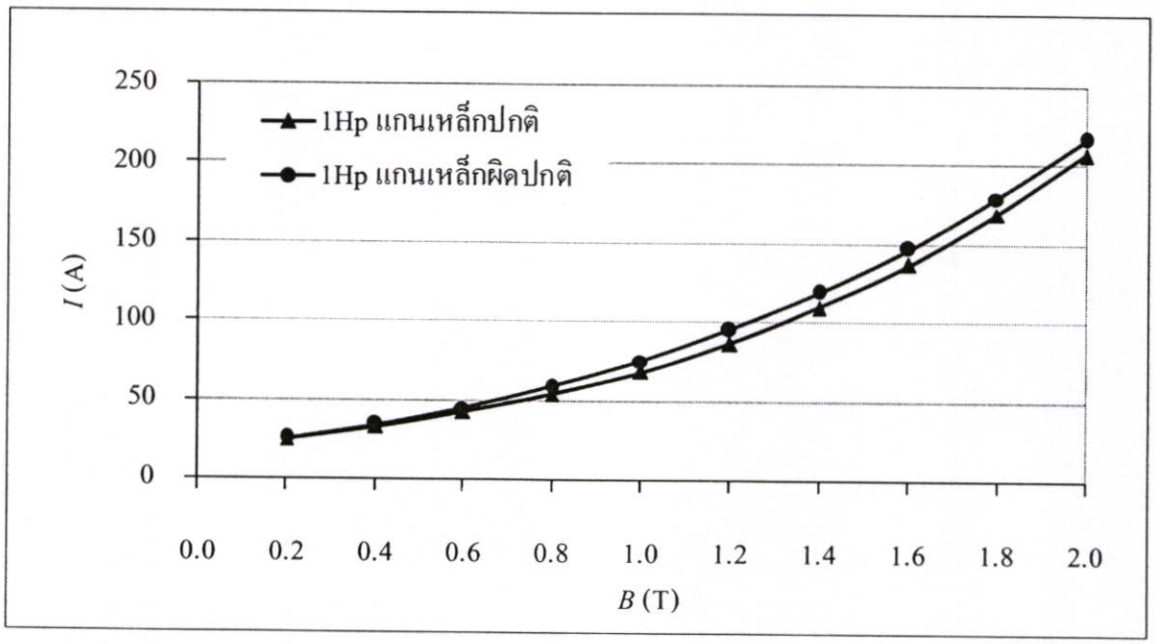


แกนเหล็กปกติ แกนเหล็กผิดปกติ

รูปที่ 7.25 แกนเหล็กมอเตอร์ปกติและผิดปกติ ขนาด 1Hp



รูปที่ 7.26 ค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก ของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า แบบมีเฟรม

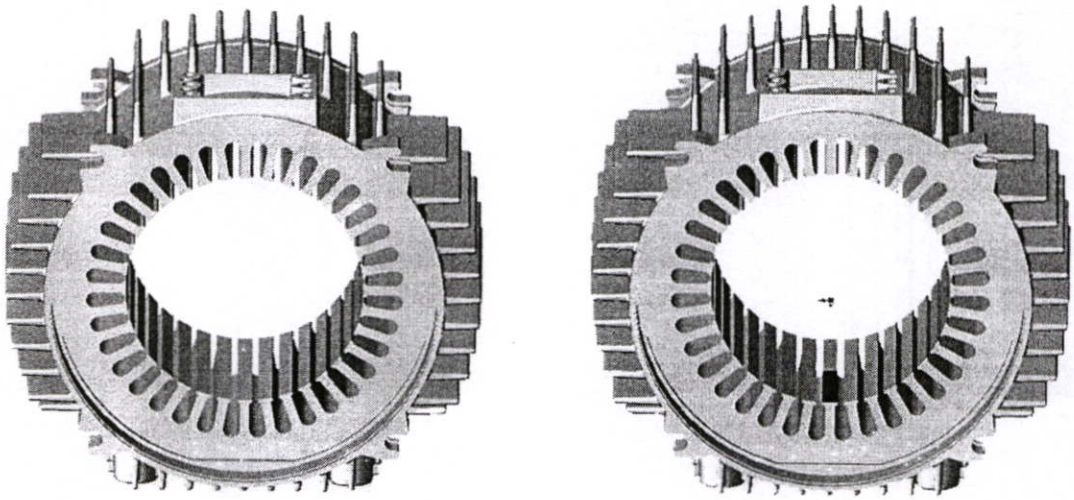


รูปที่ 7.27 กระแสกระตุ้นเมื่อเปรียบเทียบกับค่า B ที่จุดต่างๆ ของแกนเหล็ก 1Hp แบบมีเฟรม

จากกราฟรูปที่ 7.26 แกนเหล็กผิดปกติแบบมีเฟรมหุ้มมีค่าความสูญเสียในแกนเหล็กมากกว่าแกนเหล็กปกติแบบมีเฟรมหุ้ม เนื่องจากฉนวนเสื่อมส่งผลทำให้เกิดค่ากระแสไหลวนสูง

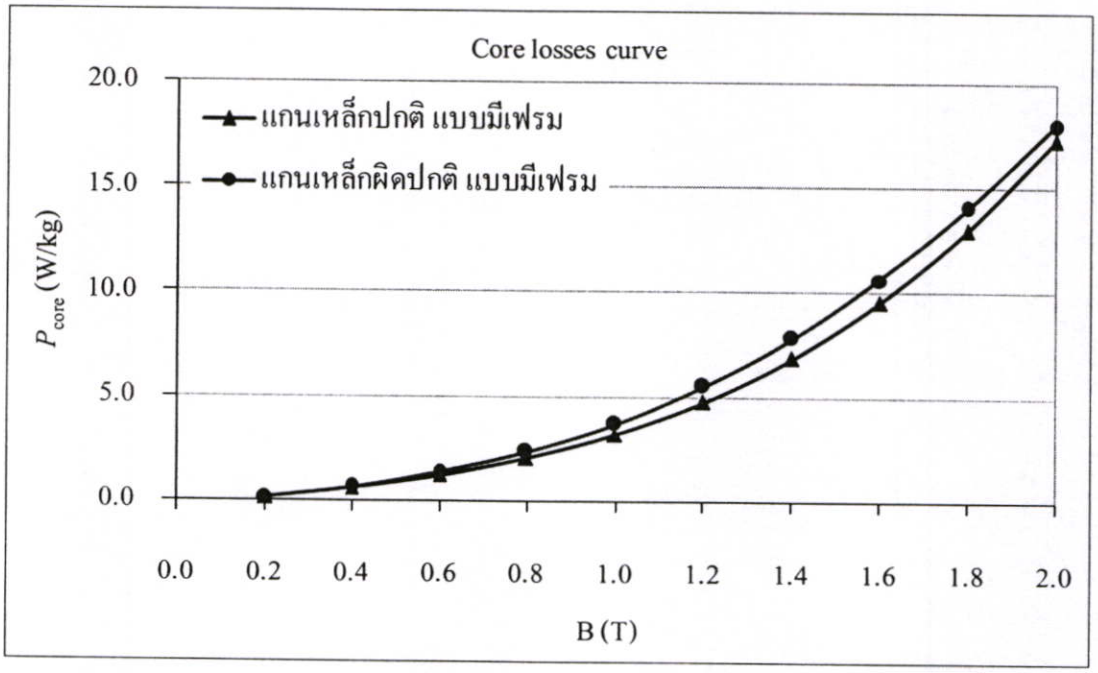
กว่าแกนเหล็กปกติ และในกราฟรูปที่ 7.27 แสดงค่ากระแสกระตุ้นของแกนเหล็กผิดปกติมีค่าสูงกว่าแกนเหล็กปกติ ส่งผลให้ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กสูงด้วย

7.5.2 การเปรียบเทียบค่าความสูญเสียในแกนเหล็กปกติ กับผิดปกติ ของมอเตอร์ขนาด 2 แรงม้า

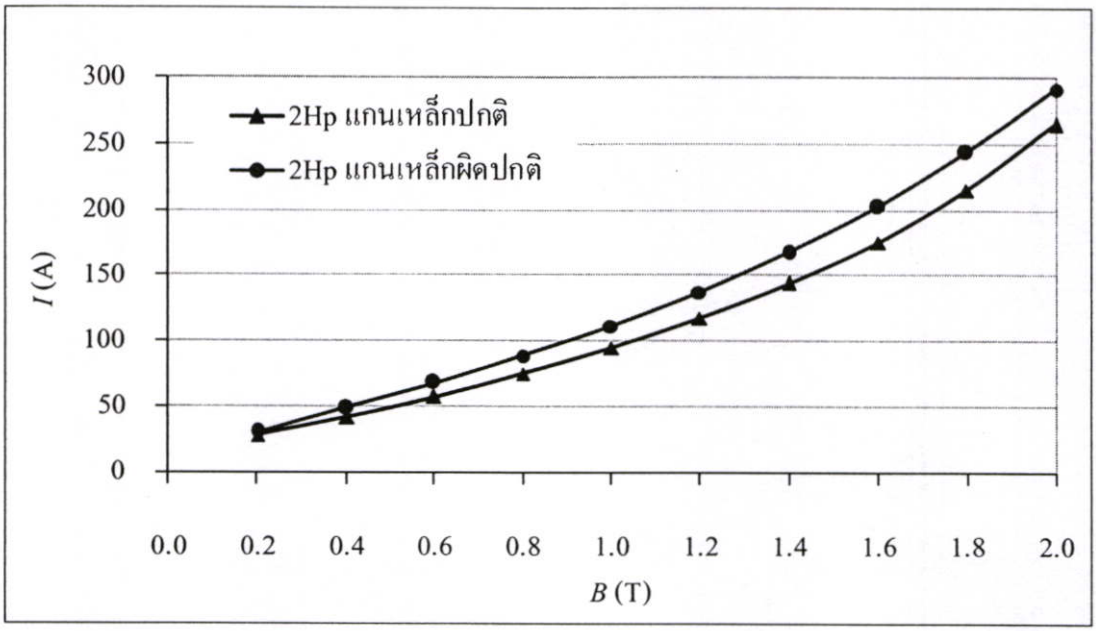


แกนเหล็กปกติ แกนเหล็กผิดปกติ

รูปที่ 7.28 แกนเหล็กมอเตอร์ปกติและผิดปกติ ขนาด 2Hp



รูปที่ 7.29 ค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก ของมอเตอร์ขนาด 2 แรงม้า แบบมีเฟรม

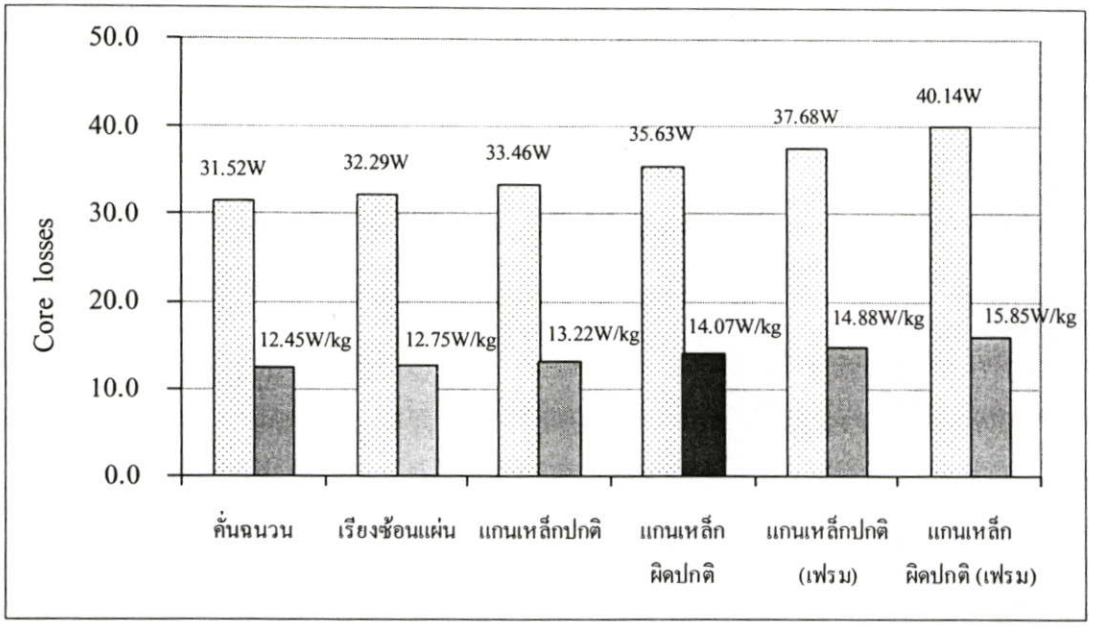


รูปที่ 7.30 กระแสกระตุ้นเมื่อเปรียบเทียบกับค่า B ที่จุดต่างๆ ของแกนเหล็ก 2Hp แบบมีเฟรม

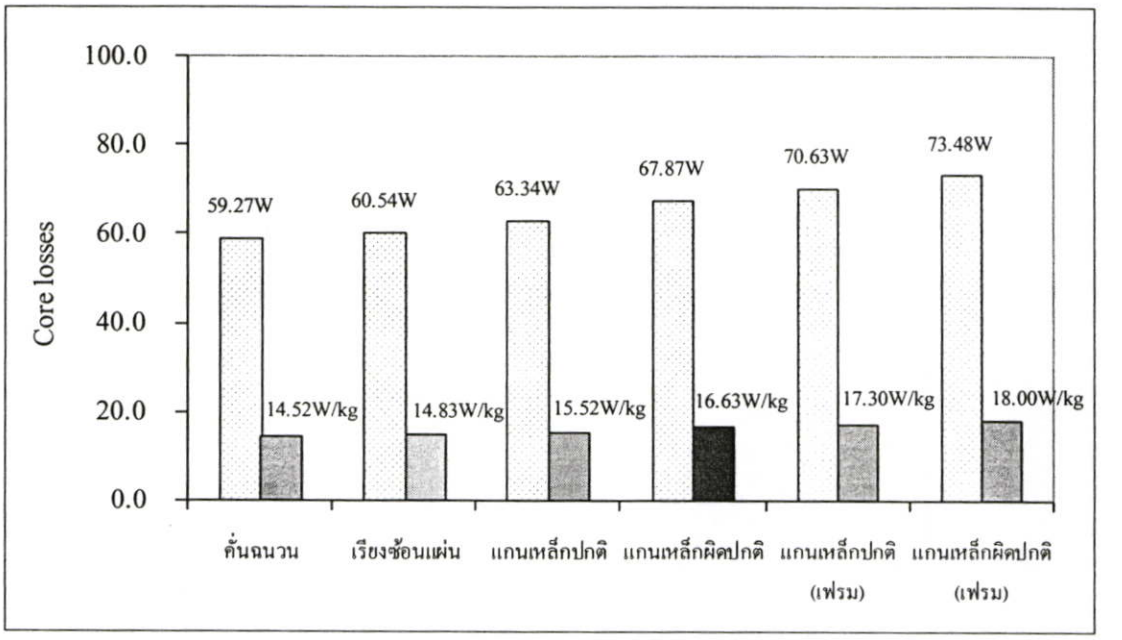
สรุปว่ามอเตอร์ขนาด 1Hp และ 2Hp ที่มีแกนเหล็กผิดปกติมีค่าความสูญเสียในแกนเหล็กสูงกว่าแกนเหล็กปกติ ดูจากกราฟรูปที่ 7.20 และ รูปที่ 7.23 ส่วนกราฟ รูปที่ 7.26 และรูปที่ 7.29 แสดงค่ากระแสกระตุ้นที่ป้อนเข้าแกนเหล็กผิดปกติมีค่าสูงกว่าแกนเหล็กปกติอย่างชัดเจน เนื่องจากกระแสไหลวนบริเวณที่เกิดการลัดวงจรของ 50% ความยาว teeth มาก

7.6 การเปรียบเทียบค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก ที่สภาพแกนเหล็กต่างๆ ของมอเตอร์

การเปรียบเทียบค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก สภาพแกนเหล็กต่างๆ เพื่อแสดงให้เห็นว่าในแต่ละสภาพแกนเหล็กมีผลให้ค่าความสูญเสียในแกนเหล็กมีค่าเพิ่มขึ้น สำหรับแกนเหล็กแบบคั่นฉนวนและแกนเหล็กแบบวางเรียงซ้อนแผ่น ทดสอบเพื่อค่าความสูญเสียในแกนเหล็กก่อนที่จะอัดเข้าเฟรม หรือแกนเหล็กปกติ แบบไม่มีเฟรมหุ้ม ในทางปฏิบัติแกนเหล็กจะต้องมีกระบวนยึดแผ่นสเตเตอร์ให้แน่นติดกันด้วยวิธีต่างๆ เช่น การเชื่อม



รูปที่ 7.31 ค่าความสูญเสียในแกนเหล็กสภาพต่างๆ ของมอเตอร์ 1Hp ที่ B= 2.0 T



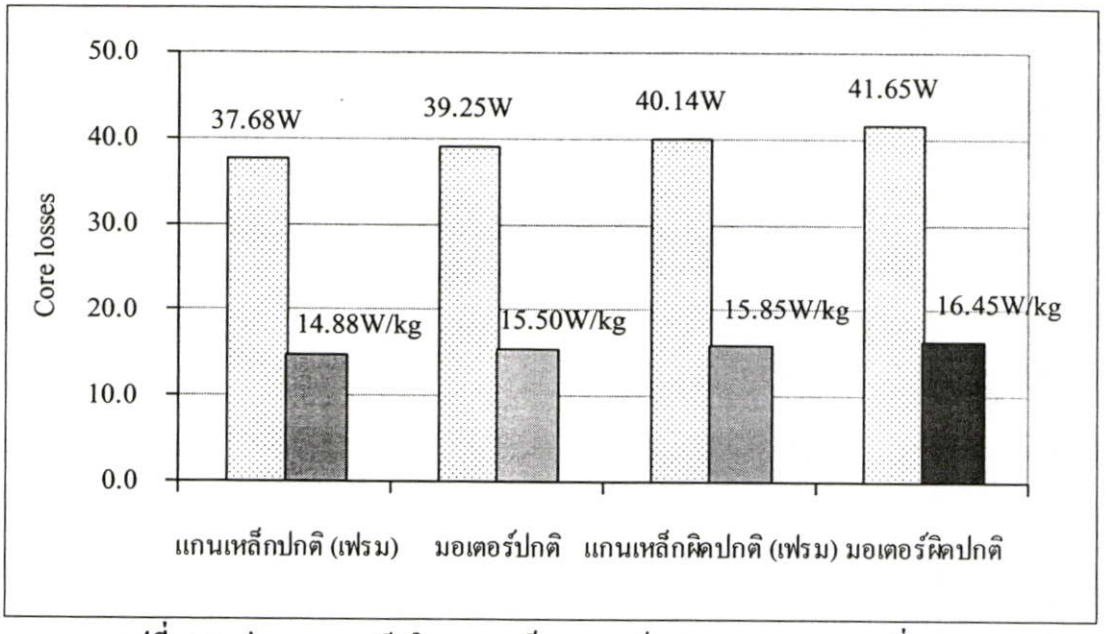
รูปที่ 7.32 ค่าความสูญเสียในแกนเหล็กสภาพต่างๆ ของมอเตอร์ 2Hp ที่ B= 2.0 T

จากรูปที่ 7.31 และ 7.32 จะเห็นว่าฉนวนเคลือบแผ่น laminate มีผลทำให้เกิดกระแสไหลวน เนื่องจากฉนวนเคลือบแผ่นไม่สามารถป้องกันการเกิดกระแสไหลวนได้เต็มที่ จะเห็นว่าเมื่อนำฉนวนมาวางคั่นระหว่างแผ่นเหล็ก ทำให้ค่า Eddy current ที่เกิดขึ้นระหว่างแผ่นลดลงอย่างเห็น

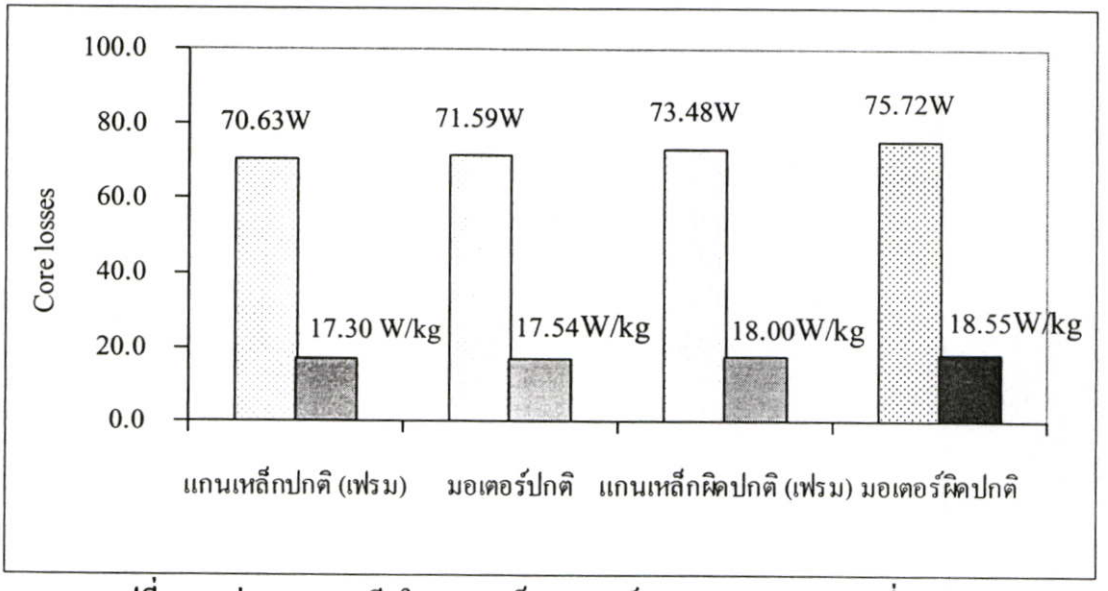
ได้ชัด ส่วนแกนเหล็กปกติมีค่าความสูญเสียในแกนเหล็กมากกว่าเนื่องจากค่า Eddy current ที่เกิดขึ้นระหว่างแผ่นมีค่ามากกว่า

7.7 การเปรียบเทียบค่าความสูญเสียของแกนเหล็กด้วยวิธีป้อนกระแสกระตุ้น กับการทดสอบมอเตอร์ สภาวะไร้โหลด

การเปรียบเทียบผลการทดสอบด้วยวิธีป้อนกระแสกระตุ้น เพื่อให้เกิดการเหนี่ยวนำ แล้วนำค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก เปรียบเทียบกับผลการทดสอบมอเตอร์ขนาด 1Hp และ 2Hp สภาวะไร้โหลด แสดงในรูปที่ 7.33 และรูปที่ 7.34 ตามลำดับ



รูปที่ 7.33 ค่าความสูญเสียในแกนเหล็กมอเตอร์ 1Hp 4P 380V 50Hz ที่ B=2.0T



รูปที่ 7.34 ค่าความสูญเสียในแกนเหล็กมอเตอร์ 2Hp 4P 380V 50Hz ที่ B=2.0T

นำผลค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก ด้วยวิธีการป้อนกระแสกระตุ้นเข้าแกนเหล็ก เพื่อให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กเหนี่ยวนำ แล้วนำมาหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก จากนั้นนำค่ามาเปรียบเทียบกับวิธีการทดสอบมอเตอร์สภาวะไร้โหลดขนาด 1แรงม้า และ 2แรงม้า 380 โวลต์ 50 เฮิทซ์ ตามลำดับ สรุปว่าผลค่าความสูญเสียในแกนเหล็กทั้ง 2 วิธีมีความสอดคล้องและใกล้เคียงกัน ดังนั้นวิธีการป้อนกระแสกระตุ้น ทำให้ช่วยในพิจารณาและตัดสินใจคุณภาพของแกนเหล็กได้ และวิธีที่สะดวกและง่ายต่อการทดสอบ

บทที่ 8
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็กมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้วิธีป้อนกระแสกระตุ้นเข้าแกนเหล็ก เพื่อให้เกิดการเหนี่ยวนำและความหนาแน่นสนามแม่เหล็กขึ้น จากนั้นวัดค่าแรงดันและกระแสกระตุ้น แล้วคำนวณค่ากำลังไฟฟ้านำมาลบค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นที่สายไฟที่คล้องแกนเหล็ก สุดท้ายจะได้ค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก เพื่อยืนยันผลการทดสอบดังกล่าว โดยนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบมอเตอร์สภาวะไร้โหลด 2 ขนาด คือ 1 แรงม้า และ 2แรงม้า 4ขั้ว ตามลำดับ

8.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษาความบกพร่องของแกนเหล็กสเตเตอร์ในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ พบว่าส่วนใหญ่เกิดจากการเสื่อมสภาพของฉนวนที่เคลือบแผ่นแกนเหล็ก ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็กที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการเสื่อมสภาพของฉนวน ทั่วไปบริษัทผู้ผลิตมอเตอร์มีขั้นตอนการเตรียมแกนเหล็ก ซึ่งในแต่ละขั้นตอนมีผลต่อค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก แกนเหล็กที่ใช้ในการทดสอบมีดังนี้คือ แกนเหล็กแบบเรียงซ้อนแผ่น, แกนเหล็กแบบเรียงคั่นฉนวน , แกนเหล็กปกติแบบไม่มีเฟรม, แกนเหล็กผิดปกติแบบไม่มีเฟรม, แกนเหล็กปกติแบบมีเฟรม และแกนเหล็กผิดปกติแบบมีเฟรม

ผลจากการทดสอบด้วยวิธีป้อนกระแสกระตุ้นเข้าแกนเหล็กในสภาพๆต่างๆ สรุปค่าความสูญเสียในแกนดังนี้ ผลค่าความสูญเสียในแกนเหล็กแบบเรียงคั่นฉนวนระหว่างแผ่นมีค่าต่ำกว่าแผ่นสเตเตอร์แบบเรียงซ้อนแผ่นโดยไม่แผ่นฉนวนคั่น เนื่องจากแผ่นฉนวนสามารถป้องกันการเกิดกระแสไหลวนได้ ส่วนแกนเหล็กแบบเรียงซ้อนแผ่นเกิดกระแสไหลวนมากกว่าเนื่องจากการเคลือบฉนวนของแผ่นเหล็กไม่สามารถป้องกันการเกิดกระแสไหลวนได้เต็มประสิทธิภาพ 100% และเมื่อเปรียบเทียบกับแกนเหล็กปกติแบบไม่มีเฟรมหุ้ม ก่อนที่จะอัดเข้าเฟรมพบว่ามีค่าความสูญเสียในแกนเหล็กต่ำกว่า เนื่องมาจากแกนเหล็กปกติจะต้องนำแผ่นสเตเตอร์เรียงอัดแน่นเข้าด้วยกัน ด้วยวิธีการเชื่อมแผ่นเหล็กติดกัน ซึ่งเป็นผลให้เกิดกระแสไหลวนในตัวแกนเหล็กมากขึ้น สำหรับแกนเหล็กแบบมีเฟรมที่ใช้ผลิตมอเตอร์จะมีค่าความสูญเสียในแกนเหล็กมากกว่าแกนเหล็กปกติเล็กน้อย เนื่องจากผลของเฟรมที่ใช้หุ้มแกนเหล็กปกติมีค่าน้อยมาก

วิธีป้อนกระแสกระตุ้นเข้าแกนเหล็กผิดปกติ โดยการจำลองแกนเหล็กผิดปกติโดยการ Short turn ระหว่างแผ่นที่ 50% ของความยาวของแกนเหล็กใน 1 teeth เพื่อให้เกิดการเสื่อมสภาพของฉนวนที่เคลือบแผ่นแกนเหล็ก นำผลที่ได้เปรียบเทียบกับแกนเหล็กปกติแบบไม่มีเฟรมหุ้ม

พบว่าค่าความสูญเสียในแกนเหล็กมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ผลทดสอบที่ได้เป็นไปตามทฤษฎีจากการหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก และกราฟ core losses ควรทำในย่านความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่ B=0.5–2.0 T เพื่อที่จะได้เห็นค่าความสูญเสียในแกนเหล็กที่เพิ่มขึ้นได้ชัดเจน และเป็นย่านที่ชุดทดสอบสามารถวัดได้โดยที่ค่าความผิดพลาดน้อย และหลีกเลี่ยงผลของสนามแม่เหล็กเมื่อเข้าสู่ช่วงอิ่มตัว เนื่องจากค่าที่วัดได้จะมีการแกว่งสูง

นำผลการทดสอบด้วยวิธีป้อนกระแสกระตุ้นมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบมอเตอร์ในสภาวะไร้โหลดตามมาตรฐาน IEEE 112-1996 วิธี B แบบแยกค่าความสูญเสีย เพื่อหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็กที่เกิดในมอเตอร์ ทั้ง 2 แบบ ในมอเตอร์ 2 ขนาดคือ 1 แรงม้าและ 2 แรงม้า แบบแกนเหล็กปกติและแกนเหล็กผิดปกติ แบบมีเฟรมหุ้ม พบว่าผลจากการทดสอบค่าความสูญเสียในแกนเหล็กมีค่าสูงกว่าวิธีการป้อนกระแสกระตุ้นเข้าแกนเหล็ก และมีแนวโน้มในทางเดียวกัน

สรุปผลการทดสอบหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็กทั้ง 2 วิธี คือ การป้อนกระแสกระตุ้นเข้าแกนเหล็ก และการทดสอบมอเตอร์สภาวะไร้โหลด เพื่อเปรียบเทียบค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก พบว่าผลที่ได้จากการทดสอบมีความสอดคล้องกับผลทดสอบมอเตอร์ใช้งานจริง และถือได้ว่าเป็นวิธีการสามารถนำไปใช้งานจริง เช่นการตรวจสอบชิ้นงานก่อนการผลิต และง่ายสะดวกต่อการทดสอบ

8.2 ข้อเสนอแนะ

การหาวิธีตรวจสอบความความบกพร่องของแกนเหล็ก ด้วยการหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็กมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ วิธีการป้อนกระแสกระตุ้นที่กล่าวในวิทยานิพนธ์ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัยอื่นๆได้ เช่น การนำชุดทดสอบนี้ไปศึกษาหาตำแหน่งผิดปกติในแกนเหล็กบกพร่องที่แกนเหล็กสเตเตอร์ในมอเตอร์

เอกสารอ้างอิง

[1] IEEE – ASTM A343, standard test method for alternation-current magnetic properties of material at frequencies using wattmeter-ammeter-voltmeter method and 25-cm Epstein test frame, IEEE, 1992.

[2] JIS C 2556 "Methods of measurement of the magnetic properties of magnetic steel sheet and strip by means of a single sheet tester"

[3] ธนาพันธุ์ แสนสุข, วีระศักดิ์ วงวิวัฒน์ และ พิชิต ลำยอง "การศึกษาการทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดี่ยว" การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 28

[4] IEEE Power Electronics Society, "IEEE Standard for Test Procedures for Magnetic Cores", IEEE Std. 393-1991

[5] Willam H.Yeadon, P.E. and Alan W. Yeadon, P.E. "Hand book of small electric motor" The Mcgraw-Hill , 2001

[6] Sang Bin Lee, Gerald B. Kliman, Manoj R. Shah, N.Nutty Nair and r. Mark Lusted "An Iron Core Probe Based inter-Laminar Core Fault Detection Technique for Generator Stator cores" IEEE Transactions on Energy Conversion Vol.20, No.2, June 005, Page 344-351.

[7] Andr'e G. Torres, Braz J.Cardoso Filho, Renato O. C. Lyra, Marco A. Cunha and Sebasstiao C. P aolinelli"Determination of the Magnetic Losses in Induction motors based on the Generalized Epstein Test" IEEE 2004 , Page 1-8.

[8] ชวพร บำรุงพฤกษ์ และวิจิตร กิณเรศ "การวิเคราะห์ค่าความสูญเสียของแกนเหล็กในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยการใช้ขดลวดเหนี่ยวนำภายใต้การขับเคลื่อนด้วย PWM อินเวอร์เตอร์" การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 28 หน้า 561-564

[9] สุขสาคร เจริญสุข, ธนาพันธุ์ แสนสุข และ พิชิต ลำยอง "เทคนิคการทดสอบหาค่าความสูญเสียของแกนเหล็ก" การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 29 หน้า 113-116.

[10] IEEE Power Engineering Society, "IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motor and Generator", IEEE Std 112-1996

[11] JIS C 2552 Non-Oriented Magnetic Steel Sheet and Strip

[12] A.E. Fitzgerald, Charles Kingsley, JR. and Stephen D. Umans. Electric machinery. The Magraw-Hill Companies, inc., 2003.

[13] พิชิต ลำยอง. "Electrical Machine 1 เครื่องจักรกลไฟฟ้า 1." ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนลียพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ระบบหน่วยวงจรแม่เหล็ก

ปริมาณ	สัญลักษณ์	หน่วย CGS		หน่วย SI			หน่วย English	
		Unit	Relation	Unit	Symbol	Relation	Unit	Relation
แรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้า *(mmf)*	$\Im$	gilberts	$\Im = 0.4Ni$	Ampere-turn	A-t	$\Im = Ni$	A-t	$\Im = Ni$
ความซึมซาบได้ (Permeability) Free space Abs. norm Permeability	μ_0 μ		$\mu_0 = 1$ $\mu = \mu_0\mu_r = \mu_r$			$\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ $\mu = 4\pi 10^{-7}\mu_r$		$\mu_0 = 3.19$ $\mu = 3.19\mu_r$
Length	l	cm		meter	m		inch	
พื้นที่ (Area)	A		$\Re = \frac{l}{\mu_r A}$			$\Re = \frac{l}{4\pi 10^{-7}\mu_r A}$		$\Re = \frac{l}{3.19\mu_r A}$
เส้นแรงแม่เหล็ก (Flux)	Φ	maxwell=lines	$\Phi = \frac{0.4\pi Ni}{\frac{l}{\mu_r A}}$	weber	Wb	$\Phi = \frac{Ni}{\frac{l}{\mu_r 4\pi^{-7} A}}$	maxwell=lines	$\Phi = \frac{Ni}{\frac{l}{3.19\mu_r A}}$
ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (Flux density)	B	1 gass=1 maxwell/cm^2	$B = \mu_r H$	$\frac{\text{weber}}{\text{meter}^2}$	T	$B = \mu_0\mu_r H$	lines/inch^2	$B = 3.19\mu_r H$
ความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetic field intensity)	H	gilb/cm=oersteds	$H = \frac{0.4\pi Ni}{l}$	$\frac{\text{A-t}}{\text{meter}}$	$\frac{\text{A-t}}{\text{m}}$	$H = \frac{N\Phi}{l}$	$\frac{\text{A-t}}{\text{inch}}$	$H = \frac{N\Phi}{l}$
ความต้านทานแม่เหล็ก (Reluctance)	$\Re$		$\Re = \frac{l}{\mu_r A}$			$\Re = \frac{l}{4\pi 10^{-7}\mu_r A}$		$\Re = \frac{l}{3.19\mu_r A}$

ภาคผนวกที่ ๒

ตัวอย่างแบบฟอร์ม

ผลการทดสอบแกนเหล็ก แบบเรียงคั่นฉนวนระหว่างแผ่น (1Hp)

V_{in} *(V)*	I_{in} *(A)*	P_{in} *(W)*	B *(T)*	P_{cu} *(W)*	P_{s_core} *(W)*	$H = Ni/l$ *(A/m)*	P_{core} *(W/kg)*
0.0305	19.7	0.25	0.20	0.06	0.18	61.8	0.07
0.0606	26.7	1.05	0.40	0.12	0.93	83.9	0.37
0.0925	33.7	2.14	0.61	0.19	1.95	105.7	0.77
0.1197	39.5	3.50	0.78	0.26	3.24	124.0	1.28
0.1508	47.1	5.39	0.99	0.36	5.03	147.9	1.99
0.1830	57.8	7.93	1.20	0.55	7.38	181.5	2.92
0.2161	74.1	11.71	1.41	0.90	10.81	232.7	4.27
0.2479	97.2	17.65	1.62	1.55	16.10	305.3	6.36
0.2732	122.2	24.31	1.79	2.45	21.86	383.8	8.63
0.3055	164.1	35.93	2.00	4.42	31.52	515.1	12.45

ผลการทดสอบแกนเหล็กแบบเรียงแผ่นสเตเตอร์ (1Hp)

V_{in} *(V)*	I_{in} *(A)*	P_{in} *(W)*	B *(T)*	P_{cu} *(W)*	P_{s_core} *(W)*	$H = Ni/l$ *(A/m)*	P_{core} *(W/kg)*
0.0303	20.4	0.26	0.20	0.07	0.19	64.1	0.08
0.0696	29.4	1.25	0.46	0.14	1.11	92.3	0.44
0.0916	34.0	2.33	0.60	0.19	2.14	106.6	0.84
0.1239	41.0	3.80	0.81	0.28	3.53	128.7	1.39
0.1545	49.2	5.75	1.01	0.40	5.36	154.4	2.12
0.1916	63.3	9.37	1.25	0.66	8.71	198.7	3.44
0.2173	77.2	12.54	1.42	0.98	11.56	242.4	4.57
0.2445	98.0	17.57	1.60	1.58	15.99	307.6	6.32
0.2788	135.0	27.27	1.83	2.99	24.28	423.8	9.59
0.3071	173.0	37.86	2.01	4.91	32.95	543.1	13.01

ผลการทดสอบแกนเหล็กปกติ แบบไม่มีเฟรม (1Hp)

V_{in} *(V)*	I_{in} *(A)*	P_{in} *(W)*	B *(T)*	P_{cu} *(W)*	P_{s_core} *(W)*	$H = Ni/l$ *(A/m)*	P_{core} *(W/kg)*
0.0310	22.5	0.27	0.20	0.08	0.18	70.7	0.07
0.0664	29.9	1.19	0.43	0.15	1.04	93.8	0.41
0.0918	35.3	2.39	0.60	0.20	2.19	110.7	0.86
0.1263	42.7	4.14	0.83	0.30	3.84	133.9	1.52
0.1528	49.4	5.58	1.00	0.40	5.18	155.1	2.05
0.1841	60.6	8.41	1.21	0.60	7.81	190.2	3.09
0.2199	80.8	13.44	1.44	1.07	12.37	253.6	4.89
0.2424	98.9	18.15	1.59	1.60	16.55	310.4	6.53
0.2787	138.6	28.32	1.82	3.15	25.18	434.9	9.94
0.3132	188.0	42.02	2.05	5.80	36.22	590.2	14.31

ผลการทดสอบแกนเหล็กผิดปกติ แบบไม่มีเฟรม (1Hp)

V_{in} (V)	I_{in} (A)	P_{in} (W)	B (T)	P_{cu} (W)	P_{s_core} (W)	$H = Ni/l$ (A/m)	P_{core} (W/kg)
0.0285	22.9	0.40	0.19	0.09	0.31	71.7	0.12
0.0615	29.5	1.12	0.40	0.14	0.98	92.7	0.39
0.0935	37.9	2.54	0.61	0.24	2.31	118.9	0.91
0.1206	45.3	4.25	0.79	0.34	3.91	142.1	1.54
0.1540	55.7	6.74	1.01	0.51	6.23	174.9	2.46
0.1876	70.4	10.24	1.23	0.81	9.43	221.0	3.72
0.2166	88.9	14.39	1.42	1.30	13.09	279.2	5.17
0.2482	117.4	22.03	1.63	2.26	19.77	368.4	7.81
0.2770	150.4	30.54	1.81	3.71	26.83	472.1	10.60
0.3141	199.2	45.21	2.06	6.51	38.70	625.4	15.29

ผลการทดสอบแกนเหล็กปกติ แบบมีเฟรม (1Hp)

V_{in} (V)	I_{in} (A)	P_{in} (W)	B (T)	P_{cu} (W)	P_{s_core} (W)	$H = Ni/l$ (A/m)	P_{core} (W/kg)
0.0305	23.6	0.33	0.20	0.09	0.24	74.1	0.09
0.0616	33.0	1.32	0.40	0.18	1.14	103.6	0.45
0.0913	42.0	2.56	0.60	0.29	2.28	131.8	0.90
0.1215	53.0	4.86	0.80	0.46	4.40	166.4	1.74
0.1515	66.0	7.31	0.99	0.71	6.60	207.2	2.61
0.1846	87.5	10.80	1.21	1.25	9.55	274.6	3.77
0.2218	116.4	18.25	1.45	2.22	16.03	365.4	6.33
0.2422	134.8	23.09	1.59	2.98	20.11	423.2	7.94
0.2751	168.2	33.30	1.80	4.64	28.66	528.2	11.32
0.3052	207.2	44.72	2.00	7.04	37.68	650.4	14.88

ผลการทดสอบแกนเหล็กผิดปกติ แบบมีเฟรม (1Hp)

V_{in} *(V)*	I_{in} *(A)*	P_{in} *(W)*	B *(T)*	P_{cu} *(W)*	P_{s_core} *(W)*	$H = Ni/l$ *(A/m)*	P_{core} *(W/kg)*
0.0309	24.4	0.33	0.20	0.10	0.23	76.6	0.09
0.0624	34.2	1.32	0.41	0.19	1.13	107.4	0.44
0.0916	44.7	2.94	0.60	0.33	2.61	140.3	1.03
0.1232	58.5	5.60	0.81	0.56	5.04	183.6	1.99
0.1526	74.4	8.91	1.00	0.91	8.01	233.6	3.16
0.1837	94.9	13.52	1.20	1.48	12.04	297.9	4.75
0.2151	119.9	19.27	1.41	2.36	16.91	376.4	6.68
0.2462	149.0	27.74	1.61	3.64	24.10	467.7	9.52
0.2749	179.6	36.20	1.80	5.29	30.91	563.8	12.21
0.3098	221.9	49.66	2.03	8.08	41.58	696.6	16.42

ตารางผลการทดสอบ 1Hp 4P 380V 50Hz สภาพแกนเหล็กปกติ

V_o	I_o	P_o	R Ohm	Temp. (°C)	$3I_0^2R$ W	$P_o - 3I_0^2R$	V^2	B	P_{core}	
									W	W/kg
380	1.287	99.3	11.04	57.50	54.86	44.44	144,400	2.00	39.24	15.50
360	1.090	78.0	10.94	54.97	39.01	38.99	129,600	1.89	33.79	13.35
340	0.953	64.0	10.88	53.21	29.64	33.36	115,600	1.79	28.16	11.12
320	0.850	54.3	10.83	51.88	23.47	28.83	102,400	1.68	23.63	9.33
300	0.763	45.8	10.79	50.76	18.84	25.96	90,000	1.58	20.76	8.20
280	0.697	39.3	10.75	49.91	15.67	23.63	78,400	1.47	18.43	7.28
260	0.633	33.5	10.72	49.09	12.89	20.59	67,600	1.37	15.39	6.08
240	0.573	29.1	10.69	48.32	10.53	18.56	57,600	1.26	13.36	5.28
220	0.520	25.4	10.67	47.63	8.65	16.71	48,400	1.16	11.51	4.55
200	0.470	22.0	10.64	46.99	7.05	14.96	40,000	1.05	9.76	3.85
180	0.420	18.5	10.62	46.35	5.62	12.88	32,400	0.95	7.68	3.03
160	0.370	15.7	10.59	45.70	4.35	11.37	25,600	0.84	6.17	2.44
140	0.323	13.0	10.57	45.10	3.31	9.67	19,600	0.74	4.47	1.77
120	0.300	11.0	10.56	44.80	2.85	8.15	14,400	0.63	2.95	1.16
100	0.250	9.0	10.54	44.16	1.98	7.02	10,000	0.53	1.83	0.72

ตารางผลการทดสอบ 1Hp 4P 380V 50Hz สภาพแกนเหล็กผิดปกติ

V_o	I_o	P_o	R Ohm	Temp. (°C)	$3I_0^2R$ W	$P_o - 3I_0^2R$	V^2	B	P_{core}	
									W	W/kg
380	1.298	102.0	11.05	57.65	55.83	46.21	144,400	2.00	41.69	16.47
360	1.138	82.19	10.97	55.59	42.61	39.57	129,600	1.89	35.06	13.85
340	0.993	66.56	10.90	53.72	32.24	34.32	115,600	1.79	29.81	11.77
320	0.887	56.05	10.85	52.36	25.60	30.45	102,400	1.68	25.94	10.24
300	0.800	47.88	10.80	51.24	20.74	27.13	90,000	1.58	22.62	8.94
280	0.728	41.40	10.77	50.31	17.12	24.28	78,400	1.47	19.77	7.81
260	0.658	35.37	10.73	49.41	13.94	21.43	67,600	1.37	16.92	6.68
240	0.599	30.53	10.71	48.65	11.52	19.00	57,600	1.26	14.49	5.72
220	0.542	26.09	10.68	47.92	9.41	16.68	48,400	1.16	12.17	4.81
200	0.487	22.08	10.65	47.21	7.58	14.50	40,000	1.05	9.99	3.95
180	0.436	18.65	10.63	46.55	6.06	12.59	32,400	0.95	8.08	3.19
160	0.387	15.65	10.60	45.92	4.76	10.89	25,600	0.84	6.38	2.52
140	0.339	13.06	10.58	45.31	3.65	9.41	19,600	0.74	4.90	1.93
120	0.292	10.89	10.56	44.70	2.70	8.19	14,400	0.63	3.68	1.45
100	0.248	9.24	10.54	44.13	1.94	7.29	10,000	0.53	2.78	1.10

ผลการทดสอบแกนเหล็ก แบบเรียงคั่นฉนวนระหว่างแผ่น (2Hp)

V_{in} (V)	I_{in} (A)	P_{in} (W)	B (T)	P_{cu} (W)	P_{s_core} (W)	$H = Ni/l$ (A/m)	P_{core} (W/kg)
0.0470	20.7	0.49	0.20	0.07	0.42	54.1	0.10
0.0930	29.6	1.70	0.40	0.14	1.55	77.4	0.38
0.1321	35.3	3.57	0.57	0.20	3.36	92.3	0.82
0.1892	44.0	6.43	0.82	0.32	6.12	115.1	1.50
0.2321	53.7	9.39	1.00	0.47	8.91	140.4	2.18
0.2741	64.7	13.58	1.18	0.69	12.89	169.3	3.16
0.3299	91.9	21.55	1.42	1.39	20.17	240.4	4.94
0.3746	123.0	32.29	1.61	2.48	29.81	321.7	7.30
0.4233	171.2	48.02	1.82	4.81	43.22	447.8	10.59
0.4643	220.0	67.21	2.00	7.94	59.27	575.4	14.52

ผลการทดสอบแกนเหล็กแบบเรียงแผ่นสเตเตอร์ (2Hp)

V_{in} *(V)*	I_{in} *(A)*	P_{in} *(W)*	B *(T)*	P_{cu} *(W)*	P_{s_core} *(W)*	$H = Ni/l$ *(A/m)*	P_{core} *(W/kg)*
0.0453	24.1	0.51	0.20	0.10	0.41	63.1	0.10
0.0913	32.0	1.81	0.39	0.17	1.64	83.7	0.40
0.1386	40.0	3.96	0.60	0.26	3.70	104.6	0.91
0.1892	46.9	6.71	0.82	0.36	6.35	122.8	1.56
0.2339	58.0	10.27	1.01	0.55	9.72	151.7	2.38
0.2811	73.0	15.50	1.21	0.87	14.62	190.9	3.58
0.3284	94.0	22.56	1.41	1.45	21.11	245.9	5.17
0.3712	124.0	33.26	1.60	2.52	30.74	324.3	7.53
0.4215	177.0	51.35	1.82	5.14	46.21	462.9	11.32
0.4640	232.0	69.35	2.00	8.83	60.53	606.8	14.83

ผลการทดสอบแกนเหล็กปกติ แบบไม่มีเฟรม (2Hp)

V_{in} (V)	I_{in} (A)	P_{in} (W)	B (T)	P_{cu} (W)	P_{s_core} (W)	$H = Ni/l$ (A/m)	P_{core} (W/kg)
0.0457	25.2	0.50	0.20	0.10	0.40	65.8	0.10
0.0941	33.7	1.96	0.41	0.19	1.77	88.3	0.43
0.1391	40.8	4.05	0.60	0.27	3.78	106.7	0.93
0.1844	48.7	6.77	0.79	0.39	6.38	127.2	1.56
0.2369	60.4	10.46	1.02	0.60	9.86	157.9	2.42
0.2800	74.5	15.40	1.21	0.91	14.49	194.8	3.55
0.3257	96.4	23.66	1.40	1.52	22.13	252.1	5.42
0.3703	131.4	34.99	1.60	2.83	32.16	343.7	7.88
0.4233	182.0	53.95	1.82	5.43	48.51	476.0	11.89
0.4678	240.3	74.53	2.02	9.47	65.05	628.6	15.94

ผลการทดสอบแกนเหล็กผิดปกติ แบบไม่มีเฟรม (2Hp)

V_{in} (V)	I_{in} (A)	P_{in} (W)	B (T)	P_{cu} (W)	P_{s_core} (W)	$H = Ni/l$ (A/m)	P_{core} (W/kg)
0.0471	25.7	0.56	0.20	0.11	0.46	67.1	0.11
0.0928	34.7	2.13	0.40	0.20	1.93	90.8	0.47
0.1401	44.5	4.45	0.60	0.32	4.13	116.3	1.01
0.1945	57.4	8.45	0.84	0.54	7.90	150.2	1.94
0.2353	69.8	12.42	1.01	0.80	11.63	182.5	2.85
0.2800	87.6	18.24	1.21	1.26	16.98	229.1	4.16
0.3257	112.7	26.84	1.40	2.08	24.75	294.8	6.06
0.3721	146.0	39.26	1.60	3.50	35.76	381.9	8.76
0.4170	192.0	55.67	1.80	6.05	49.63	502.2	12.16
0.4609	250.0	76.73	1.99	10.25	66.48	653.9	16.29

ผลการทดสอบแกนเหล็กปกติ แบบมีเฟรม (2Hp)

V_{in} (V)	I_{in} (A)	P_{in} (W)	B (T)	P_{cu} (W)	P_{s_core} (W)	$H = Ni/l$ (A/m)	P_{core} (W/kg)
0.0470	26.7	0.59	0.20	0.12	0.47	69.8	0.12
0.0933	42.4	2.46	0.40	0.30	2.17	110.9	0.53
0.1334	57.0	5.07	0.57	0.53	4.54	149.1	1.11
0.1852	70.0	8.60	0.80	0.80	7.80	183.1	1.91
0.2355	96.0	15.29	1.01	1.51	13.78	251.1	3.38
0.2807	120.0	22.47	1.21	2.36	20.10	313.9	4.93
0.3158	140.0	28.87	1.36	3.21	25.66	366.2	6.29
0.3790	180.0	46.70	1.63	5.31	41.39	470.8	10.14
0.4180	215.0	60.19	1.80	7.58	52.61	562.3	12.89
0.4677	270.0	84.33	2.01	11.96	72.37	706.2	17.73

ผลการทดสอบแกนเหล็กผิดปกติ แบบมีเฟรม (2Hp)

V_{in} *(V)*	I_{in} *(A)*	P_{in} *(W)*	B *(T)*	P_{cu} *(W)*	P_{s_core} *(W)*	$H = Ni/l$ *(A/m)*	P_{core} *(W/kg)*
0.0462	29.2	0.57	0.20	0.14	0.43	76.3	0.11
0.0928	48.4	2.60	0.40	0.38	2.22	126.5	0.54
0.1409	68.4	6.36	0.61	0.77	5.59	179.0	1.37
0.1860	88.4	10.86	0.80	1.28	9.57	231.3	2.35
0.2315	110.8	17.46	1.00	2.01	15.45	289.7	3.79
0.2715	132.9	24.12	1.17	2.90	21.22	347.7	5.20
0.3298	170.7	37.29	1.42	4.78	32.51	446.4	7.96
0.3749	205.6	51.07	1.62	6.93	44.14	537.6	10.81
0.4140	240.5	66.20	1.78	9.48	56.72	629.0	13.90
0.4673	295.0	88.76	2.01	14.27	74.49	771.6	18.25

ตารางผลการทดสอบ 2Hp 4P 380V 50Hz สภาพแกนเหล็กปกติ

V_o	I_o	P_o	R Ohm	Temp. (°C)	$3I_0^2R$ W	$P_o - 3I_0^2R$	V^2	B	P_{core}	
									W	W/kg
380	2.347	166.0	5.39	52.69	89.02	76.98	144,400	2.00	71.65	17.55
360	2.021	132.0	5.35	50.80	65.55	66.45	129,600	1.89	61.12	14.97
340	1.785	108.0	5.32	49.43	50.92	57.08	115,600	1.79	51.75	12.68
320	1.609	91.0	5.31	48.41	41.19	49.81	102,400	1.68	44.48	10.90
300	1.452	77.0	5.29	47.49	33.44	43.56	90,000	1.58	38.23	9.37
280	1.334	66.0	5.28	46.81	28.17	37.83	78,400	1.47	32.50	7.96
260	1.216	56.0	5.26	46.13	23.36	32.64	67,600	1.37	27.31	6.69
240	1.187	51.0	5.26	45.96	22.23	28.77	57,600	1.26	23.44	5.74
220	1.010	41.0	5.24	44.93	16.05	24.95	48,400	1.16	19.62	4.81
200	0.912	35.0	5.23	44.36	13.06	21.94	40,000	1.05	16.61	4.07
180	0.814	29.0	5.22	43.79	10.38	18.62	32,400	0.95	13.29	3.26
160	0.736	24.0	5.21	43.33	8.46	15.54	25,600	0.84	10.21	2.50
140	0.730	21.0	5.21	43.30	8.33	12.67	19,600	0.74	7.34	1.80
120	0.620	17.0	5.20	42.66	5.99	11.01	14,400	0.63	5.68	1.39
100	0.436	12.0	5.18	41.59	2.95	9.05	10,000	0.53	3.72	0.91

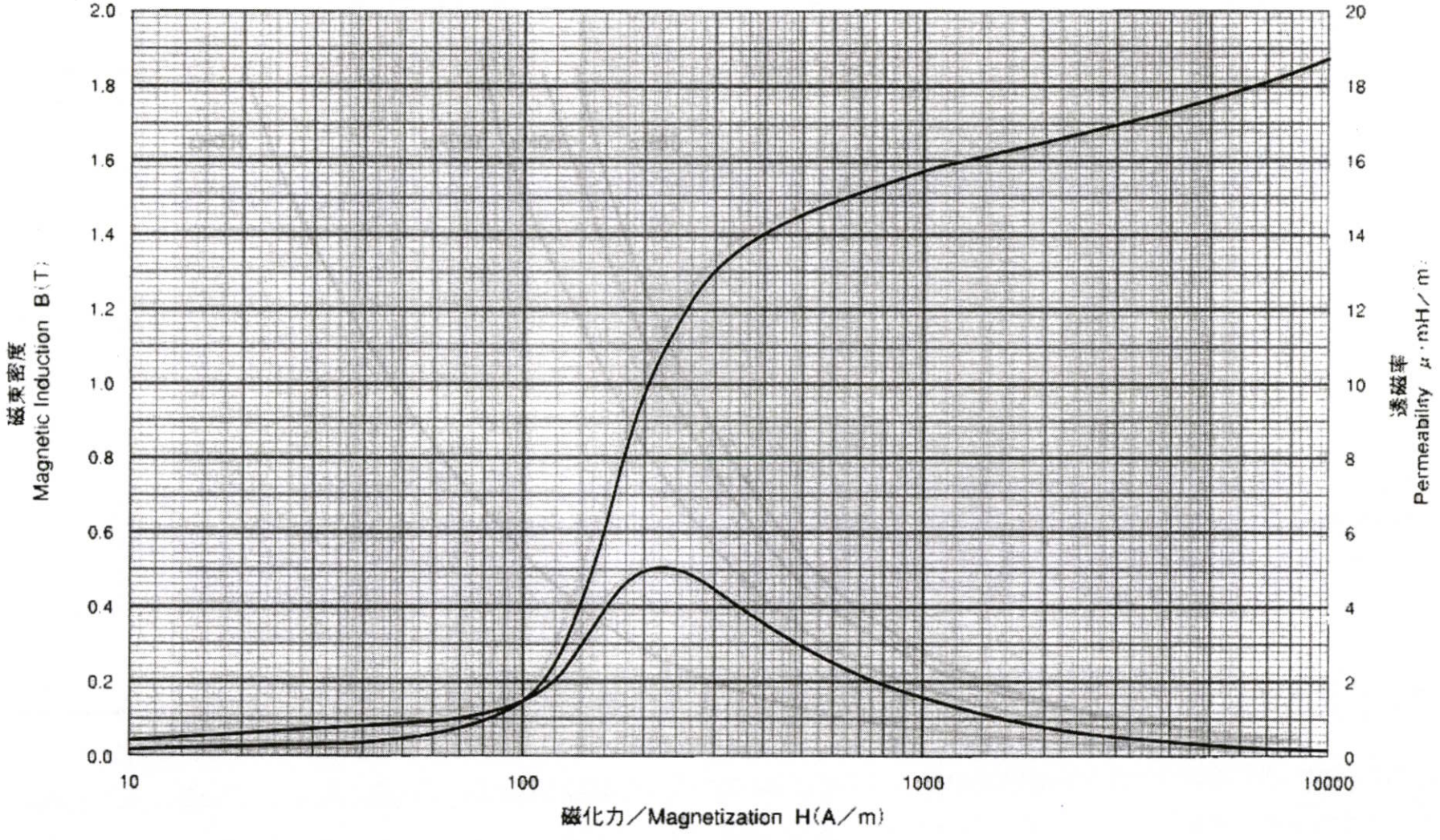
ตารางผลการทดสอบ 2Hp 4P 380V 50Hz สภาพแกนเหล็กผิดปกติ

V_o	I_o	P_o	R Ohm	Temp. (°C)	$3I_0^2R$ W	$P_o - 3I_0^2R$	V^2	B	P_{core}	
									W	W/kg
380	2.410	175.0	5.39	53.06	93.96	81.04	144,400	2.00	75.71	18.55
360	2.060	139.0	5.35	51.03	68.16	70.84	129,600	1.89	65.51	16.05
340	1.820	116.0	5.33	49.63	52.95	63.05	115,600	1.79	57.72	14.14
320	1.640	99.0	5.31	48.59	42.83	56.17	102,400	1.68	50.84	12.45
300	1.480	85.0	5.29	47.66	34.77	50.23	90,000	1.58	44.90	11.00
280	1.360	73.5	5.28	46.96	29.29	44.21	78,400	1.47	38.88	9.53
260	1.240	63.0	5.26	46.26	24.29	38.71	67,600	1.37	33.38	8.18
240	1.210	57.0	5.26	46.09	23.11	33.89	57,600	1.26	28.56	7.00
220	1.030	46.0	5.24	45.04	16.68	29.32	48,400	1.16	23.99	5.88
200	0.930	38.5	5.23	44.46	13.57	24.93	40,000	1.05	19.60	4.80
180	0.830	32.0	5.22	43.88	10.79	21.21	32,400	0.95	15.88	3.89
160	0.750	26.5	5.21	43.42	8.79	17.71	25,600	0.84	12.38	3.03
140	0.660	22.5	5.20	42.89	6.80	15.70	19,600	0.74	10.37	2.54
120	0.570	18.5	5.19	42.37	5.06	13.44	14,400	0.63	8.11	1.99
100	0.490	14.5	5.18	41.91	3.73	10.77	10,000	0.53	5.44	1.33

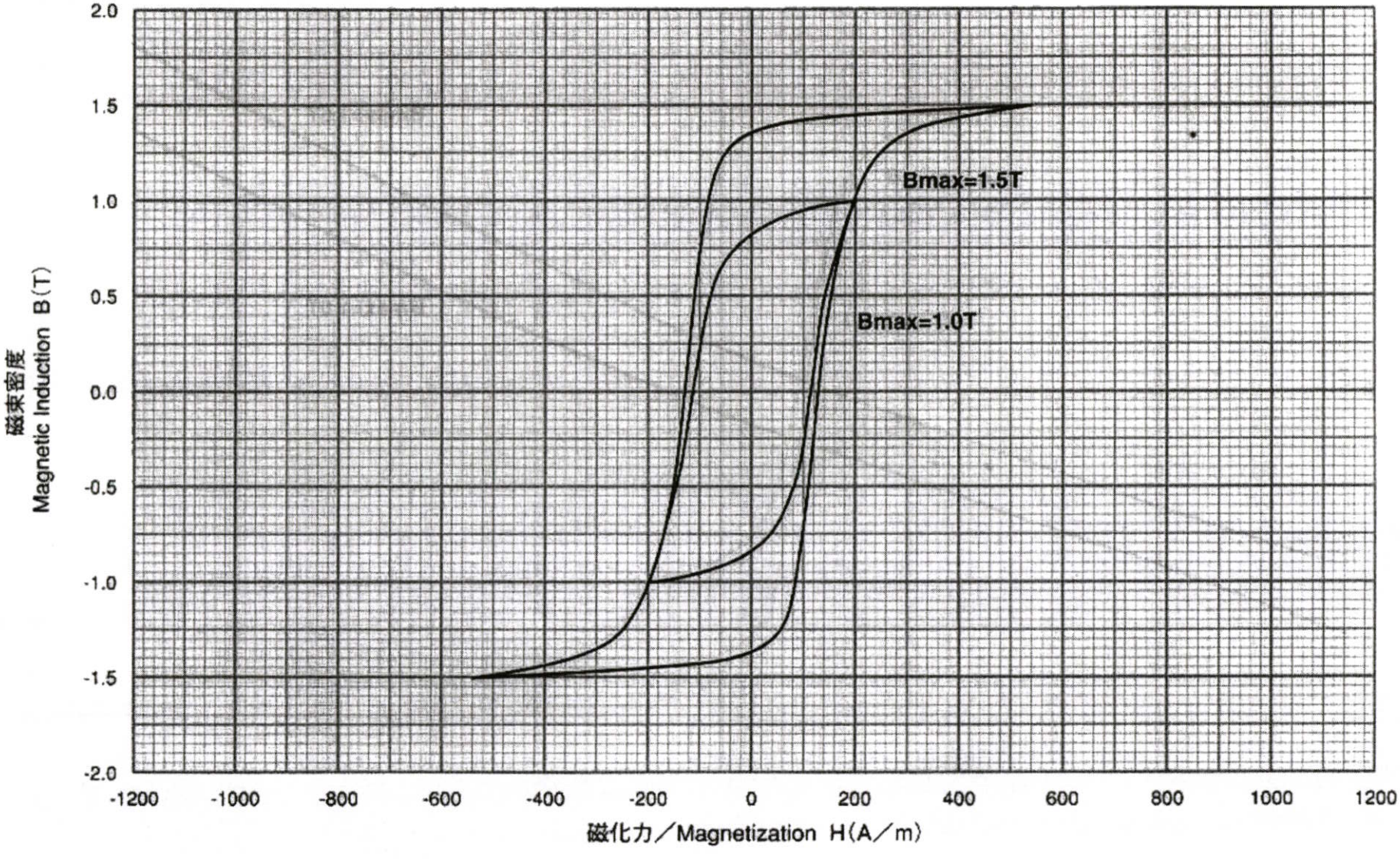
ภาคผนวก ค.

กราฟคุณสมบัติทางแม่เหล็กของเหล็ก 50A1300

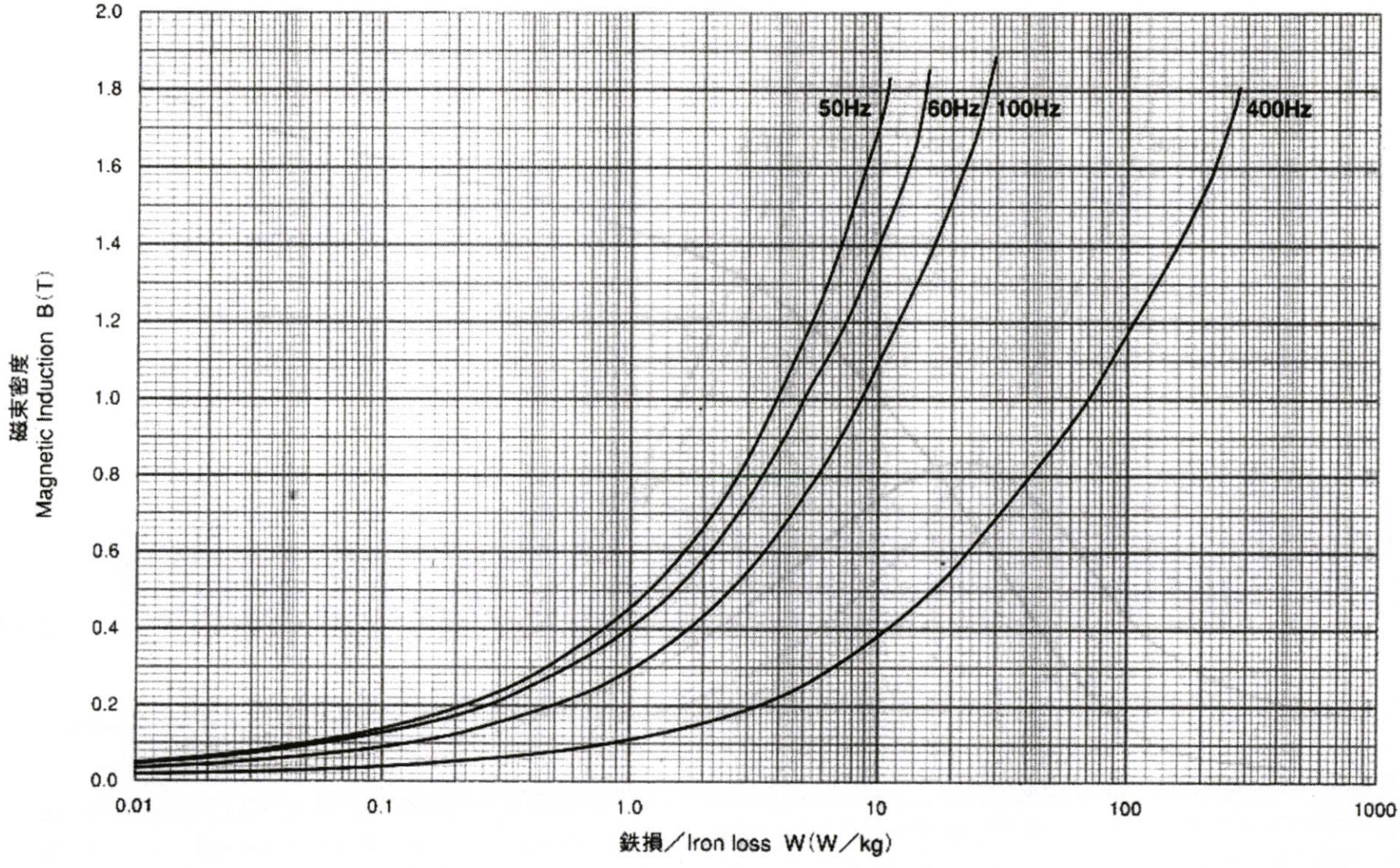
■直流磁化曲線／DC Magnetization Curve



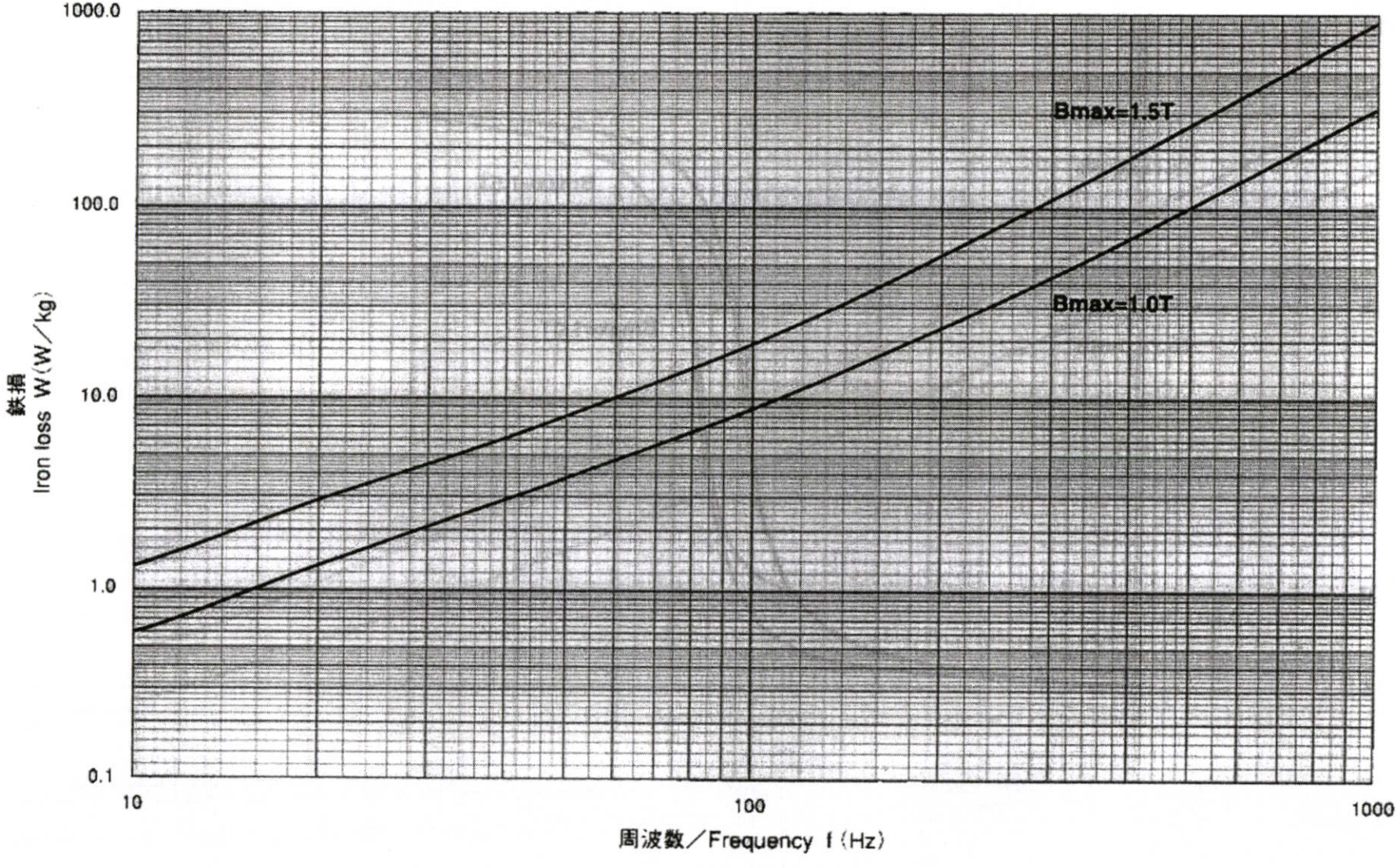
■直流ヒステリシス曲線／DC Hysteresis Curve



■交流鉄損曲線／Iron Loss Curve

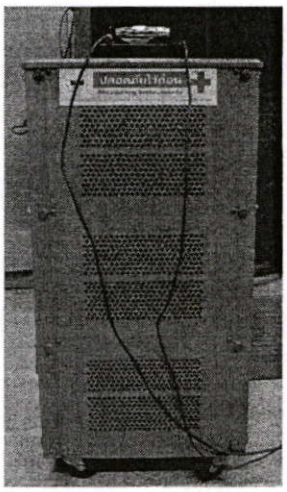
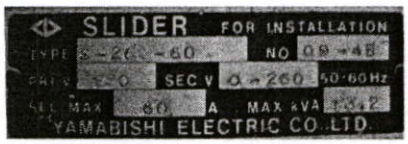
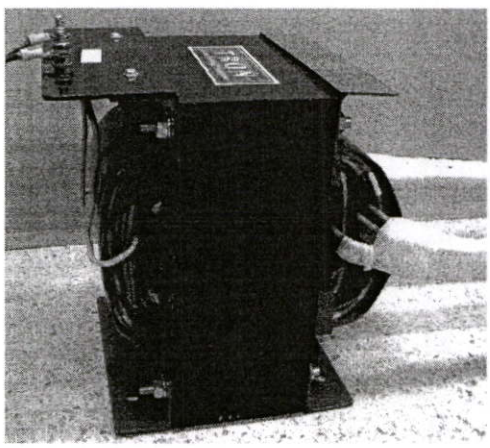
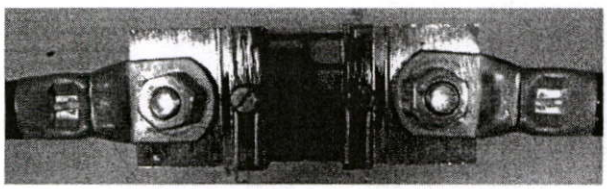


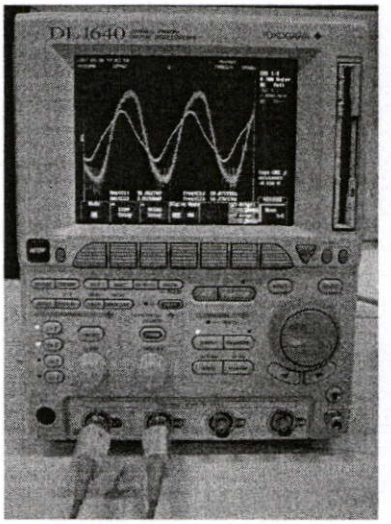
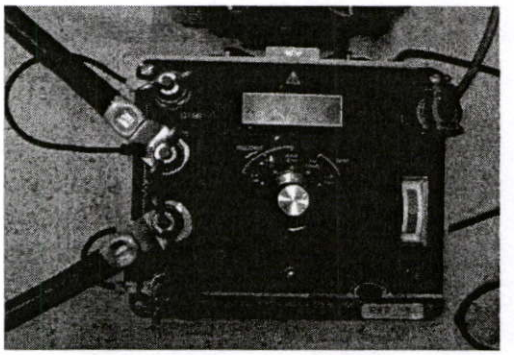
■交流周波数特性曲線／Frequency Dependance Curve

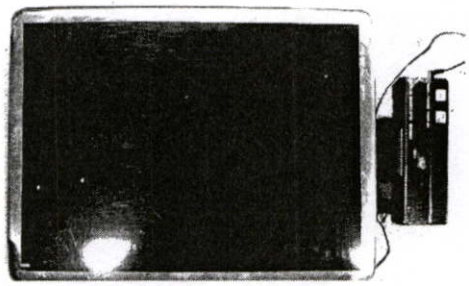


ภาคผนวก ง.

เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ	รูป
หม้อแปลงปรับค่าได้ 0-260V 50/60Hz 60 Amp13.2 kVA	 
หม้อแปลงแรงดัน 220V/6V 50/60Hz 500Amp 3kVA	
Shunt Amp 500Amp 50mV	

เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ	รูป
Breaker S-600S 3P 500Amp	 
Digital Oscilloscope (DL1640 YOKOGAWA)	
Digital Low Resitance Ohmmeter	

เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ	รูป
เครื่องชั่งน้ำหนักละเอียด	
สายไฟ THW 120 mm^2 จำนวน 1 เส้น ยาว 1 เมตร	

ภาคผนวก จ.

ผลงานที่ได้รับการเผยแพร่ในงานประชุมวิชาการ

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

29th Electrical Engineering Conference

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ ๒๙

Volume I

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



๙-๑๐ พฤศจิกายน ๒๕๔๙
ณ โรงแรมแอมบาสซาเดอร์ ซิตี้ จอมเทียน พัทยา จังหวัดชลบุรี

ดำเนินการโดย ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

เทคนิคการทดสอบหาค่าความสูญเสียของแกนเหล็กในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

Core Losses Identification in Induction motor Using Testing Technique

สุขสาคร เจริญสุข* ธนาพันธุ์ แสนสุข** และ พิชิต ลำยอง*

ศูนย์บริการและพัฒนาวิศวกรรม** ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า* คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

โทร. 0-2517-1326 Ext. 523 E-mail: suksakorn41@yahoo.com

PW29

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอเทคนิคการทดสอบค่าความสูญเสียของแกนเหล็กในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบค่าความสูญเสียของแกนเหล็กระหว่างการออกแบบกับการใช้งานจริง โดยวิธีการป้อนกระแสสูงกระตุ้นเข้าที่สเตเตอร์ เพื่อให้เกิดการเหนี่ยวนำค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก และทำการวัดค่า กำลังไฟฟ้าป้อนเข้า, แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และกระแสไฟฟ้า สุดท้ายผลของการทดสอบจะนำมาคำนวณเป็นค่าความสูญเสียต่อกิโลกรัม และนำผลมาทำการเปรียบเทียบระหว่างการแกนสเตเตอร์แบบวางเรียงซ้อน และแบบเชื่อม

คำสำคัญ : ค่าความสูญเสียของแกนเหล็ก, แผ่นสเตเตอร์แบบวางเรียงซ้อน, แผ่นสแตเตอร์แบบเชื่อม

Abstract

This paper presents the testing technique of core loss in induction motor to compare the result of core loss between design with the actual working. Stator core is excited by supplying high current to create induced of magnetic flux density. The input power, induced voltage and current are measured. The result will be calculated to find power loss per kilogram (W/kg) and comparison between stacking and welding stator core is illustrated.

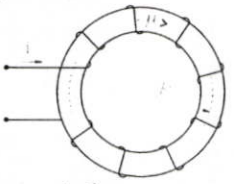
Keywords: Core loss, Stacking core, Welding core

1. บทนำ

ปัจจุบันมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้า ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในงานอุตสาหกรรม ในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีส่วนประกอบที่สำคัญ เช่น แกนเหล็ก, ขดลวด, โครงสร้าง ฯลฯ ซึ่งแกนเหล็กถือเป็นปัจจัยที่สำคัญในการกำหนดค่าประสิทธิภาพมอเตอร์ ในการออกแบบต้องพิจารณาคุณสมบัติของแกนเหล็ก [1] ดังนั้นในบทความนี้นำเสนอเทคนิคการทดสอบหาค่าความสูญเสียของแกนเหล็กในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสภาวะไร้โหลด (No-load) ขนาด 1HP 4P 380V 50Hz ใช้เหล็กซิลิคอน (Silicon electric steel) ชนิด 50A1300 [2] โดยนำผลการทดสอบค่าความสูญเสียของแกนเหล็กที่ได้มาเปรียบเทียบกับกระบวนการผลิตแผ่นสเตเตอร์ ดังนี้ แผ่นเหล็กแบบแผ่นเดี่ยว (Single sheet) [3], แผ่นเหล็กสเตเตอร์วางเรียงซ้อน (Stacking core), และแผ่นสเตเตอร์แบบเชื่อม (Welding core) การทดสอบดังกล่าวสามารถหากราฟค่าความสูญเสียของแกนเหล็ก เพื่อแสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติของแกนเหล็ก และสามารถนำบทความความนี้ไปประยุกต์ใช้งานอุตสาหกรรมได้

2. ทฤษฎีวงจรแม่เหล็ก (Magnetic circuits)

วงจรแม่เหล็ก (Magnetic circuits) [4] คือ เส้นทางหรือแนวที่เส้นแรงแม่เหล็กส่วนใหญ่ไหลผ่าน



รูปที่ 1 วงจรแม่เหล็กแบบวงแหวน (Toriod)

จากรูปที่ 1 จะเห็นว่า

$$\Im = Ni = \oint H \bullet dl = H(2\pi r) = Hl_c \qquad (1)$$

เมื่อ $\Im$: แรงเคลื่อนแม่เหล็ก mmf , N : จำนวนรอบของขดลวดที่พันขด Excited, H : ความเข้มของสนามแม่เหล็ก, และ l_c : ความยาวของแกนเหล็กเฉลี่ย

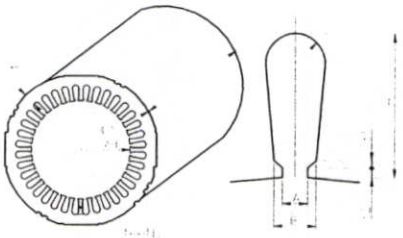
และสามารถนำมาเขียนสมการใหม่

$$B = \mu H \qquad (2)$$

เมื่อ B : ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก, และ μ : ค่าความซึมซาบของตัวกลาง (permeability)

3. การคำนวณคุณสมบัติต่างๆของแกนเหล็ก

3.1 รายละเอียดต่างๆ ของแกนเหล็ก (m)



รูปที่ 2 Dimension ของแกนเหล็ก

3.1.1 การคำนวณค่า Stator core (m)

คำนวณจากสมการ ดังนี้

$$S_{s_core} = \frac{(D-d)}{2} - H \quad (3)$$

เมื่อ S_{s_core} : ขนาดของ stator core, D : เส้นผ่านศูนย์กลางวงนอกของ stator core, d : เส้นผ่านศูนย์กลางวงในของ stator core , และ H : ความสูงของ slot

3.1.2 พื้นที่ของเส้นแรงแม่เหล็ก (m^2)

$$A_c = S_{s_core} \times L_c \quad (4)$$

เมื่อ A_c : พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก, และ L_c : ความยาวของเส้นทางเดินแม่เหล็ก

3.1.3 น้ำหนักของ teeth (W/kg)

การคำนวณหาน้ำหนักของ teeth จากสมการที่ (5)

$$W_t = N_t \times A_t \times \rho_c \times L_c \quad (5)$$

เมื่อ W_t : น้ำหนักของ teeth , N_t : จำนวน teeth , A_t : พื้นที่ของ teeth , และ ρ_c : ความหนาแน่นของวัสดุเหล็ก

3.1.4 น้ำหนักของ Stator core (W/kg)

$$W_{s_core} = W_{total} - W_t \quad (6)$$

เมื่อ W_{s_core} : น้ำหนักของแกน Stator, W_{total} : น้ำหนักรวมทั้งหมด

3.2 การวัดหาค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก B

จากสมการที่ (7) ใช้ในการคำนวณหาค่า induced voltage ที่ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่ต้องการ และทำการทดสอบโดยการป้อนแรงดันให้ได้ค่า induced voltage

$$B_{\max} = \frac{E_{rms}}{4.44NfA_c} \quad (7)$$

เมื่อ E_{rms} : ค่าแรงดันเหนี่ยวนำจากแกนเหล็ก, N : จำนวนรอบในการพันขดลวด induced, A_c : พื้นที่ของแกนเหล็ก, และ $B_{\max}$: ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กของแกนเหล็ก

3.3 การคำนวณค่าความสูญเสียของแกนเหล็ก

จากสมการที่ (8) ที่ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กต่างๆ กำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าขดลวด Exciting coil (P_{in}) แบ่งการสูญเสียเป็น 3 ส่วน คือ ค่าสูญเสียของหม้อแปลง (P_{trans}), ค่าสูญเสียของสายไฟ (P_{wire}), และค่าสูญเสียที่ในแกนเหล็ก (P_{core}) ดังนั้นสามารถหาค่าความสูญเสียของแกนเหล็กได้จากสมการ

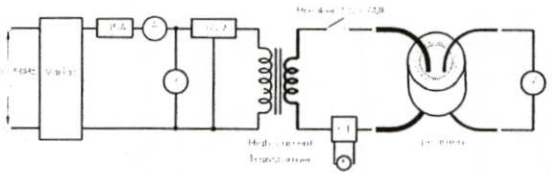
$$P_{core} = P_{in} - P_{trans} - P_{wire} \quad (8)$$

เมื่อ P_{in} : กำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไป excited, P_{wire} : กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียสายไฟ, P_{core} : กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียของแกนเหล็ก

4. การทดสอบและผลการทดสอบ

4.1 การทดสอบเพื่อหาค่าการสูญเสียต่างๆ

จากสมการที่ (8) สามารถนำไปหาค่าความสูญเสียของแกนเหล็ก จะต้องทราบค่า P_{trans} และ P_{wire} แล้วคำนวณหาค่า P_{core}



รูปที่ 3 วงจรของการทดสอบหาค่าความสูญเสียของแกนเหล็ก

4.1.1 การหาค่าความสูญเสียของหม้อแปลง (P_{trans})

ทำการทดสอบโดยการเปิดวงจรทางด้านทุติยภูมิ แล้วจ่ายแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้า โดยให้มีค่าเท่ากับแรงดันขณะที่ใช้ในการทดสอบแกนสเตเตอร์เพื่อวัดค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนเหล็กของหม้อแปลง

4.1.2 การหาค่าความสูญเสียของสายไฟ (P_{wire})

การคำนวณหาค่าสูญเสียที่สายไฟ ต้องทราบค่ากำลังไฟฟ้าป้อนเข้าและค่าสูญเสียของหม้อแปลง โดยการลัดวงจรด้านทุติยภูมิ และป้อนกระแสกระตุ้น ให้มีค่าเท่ากับ กระแสกระตุ้นที่ใช้ในการทดสอบแกนสเตเตอร์ เพื่อวัดค่าความสูญเสียของสายไฟที่ใช้ในการทดสอบ แต่ในการทดสอบค่าความสูญเสียของสายไฟที่วัดได้นั้น จะมีค่าความสูญเสียของแกนเหล็กของหม้อแปลงรวมอยู่ด้วย จึงจำเป็นต้องทำการทดสอบการเปิดวงจรดังการทดสอบ 4.1.1 อีกครั้ง แต่ปรับแรงดันป้อนเข้าให้เท่ากับแรงดันที่จ่ายขณะลัดวงจร จากนั้นคำนวณค่าดังสมการ (9) ซึ่งค่าที่ได้จะเป็นค่าความสูญเสียของสายไฟเพียงอย่างเดียว

$$P_{wire} = P_{in_1} - P_{trans_1} \quad (9)$$

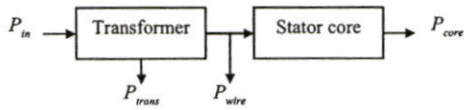
เมื่อ P_{in_1} : กำลังไฟฟ้าที่เกิดจากกระแสกระตุ้น, และ P_{trans_1} : ค่าสูญเสียของหม้อแปลงที่เกิดจากกระแสกระตุ้น

4.1.3 การหาค่าความสูญเสียของแกนเหล็ก (P_{core})

จากสมการที่ (8) สามารถคำนวณหาค่าความสูญเสียของแกนเหล็กได้ในส่วน stator core แต่ค่าความสูญเสียของแกนเหล็กส่วน teeth ให้คำนวณจากน้ำหนักของ teeth เทียบกับค่าความสูญเสียของแกนเหล็กส่วน stator core โดยคิดที่ค่า B เท่ากัน สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$P_{core} = P_{s_core} + P_{teeth} \quad (10)$$

เมื่อ P_{s_core} : ค่าสูญเสียของแกนเหล็กส่วน stator, P_{teeth} : ค่าสูญเสียของแกนเหล็กส่วน teeth



รูปที่ 4 Block diagram การหาค่าความสูญเสียของแกนเหล็ก

4.2 การหาค่าความสูญเสียของแกนเหล็กในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสภาวะไร้โหลด

การหาค่าความสูญเสียของแกนเหล็กในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสภาวะไร้โหลด สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$P_{no_load} = P_{core} + P_{cu_s} + P_{cu_r} + P_{rot} \qquad (11)$$

เมื่อ P_{no_load} : กำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุททั้งหมดสภาวะไร้โหลด P_{core} : กำลังงานสูญเสียของแกนเหล็ก, P_{cu_s} : กำลังงานสูญเสียในขดลวดของสเตเตอร์, P_{cu_r} : กำลังงานสูญเสียในขดลวดของโรเตอร์ P_{rot} : กำลังงานสูญเสียเนื่องจากการหมุน

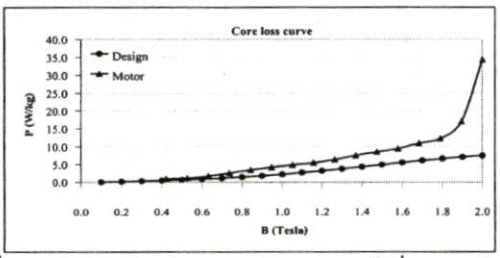
4.3 ผลทดสอบการหาค่าความสูญเสียของแกนเหล็กในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

การการทดสอบหาค่าความสูญเสียของแกนเหล็กในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำตามมาตรฐาน IEEE 112-1996 [5] ในตารางที่ 1 การทดสอบมอเตอร์ 1HP 4P 380V 50Hz 63C ในสภาวะไร้โหลด(No-load) นำค่าที่ได้ คำนวณค่าการสูญเสียของแกนเหล็กเท่ากับ 83.40 วัตต์ (34.46 W/kg) โดยนำค่าที่ได้จากการทดสอบของมอเตอร์เปรียบเทียบกับผลการทดสอบของการออกแบบ

ตารางที่1 ผลทดสอบมอเตอร์ 1HP 4P 380V 50Hz สภาวะไร้โหลด

Model	Resistance (Ohm) at 30°C	Volt (V)	Current (A)	$P_{no\text{-}load}$ (W)	P_{rot} (W)
1HP	9.99	380	1.37	143	3.35

จากการทดสอบมอเตอร์ที่สภาวะไร้โหลด ที่ระดับแรงดันต่างๆ เพื่อหาค่าความสูญเสียของแกนเหล็ก และค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก ดังรูปที่5



รูปที่ 5 กราฟเปรียบเทียบค่าความสูญเสียของแกนเหล็กที่ออกแบบกับการใช้งานจริง

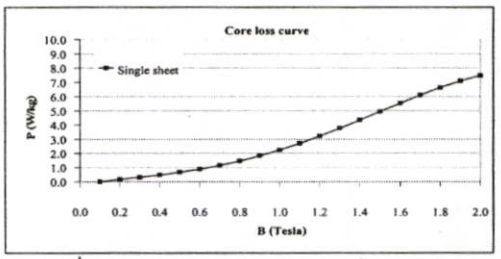
4.4 ผลการทดสอบแกนเหล็ก 50A1300

ในการทดสอบใช้แผ่นเหล็กชนิด 50A1300 หนา 0.50 มม. , มีค่าความสูญเสียของแกนเหล็ก ($W_{15/50}$) = 6.60 W/kg และมีค่าความหนาแน่นของเหล็ก = 7.85 kg/cm^3

ตารางที่ 2 ตารางของแกนเหล็กที่นำมาทดสอบ

Size	Core length (mm)	Sheet (Pcs)	S_{s_core} (mm)	Weight (kg)	
				S_{s_core}	teeth
63A	45	90	15.10	1.61	0.22
63C	80	160	8.60	1.58	0.84
80B	100	200	12.30	3.17	1.61

เมื่อนำแผ่นเหล็กที่ใช้ในการทดสอบมาทำการทดสอบแบบ แผ่นเดียว ได้ผลดังรูปที่ 6



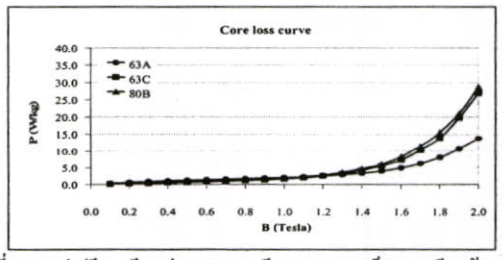
รูปที่ 6 กราฟค่าความสูญเสียของแกนเหล็ก 50A1300

4.5 ผลการทดสอบแบบวางเรียงซ้อน

นำแผ่นสเตเตอร์มาวางเรียงซ้อนกัน แล้วทำการทดสอบหาค่าความสูญเสียของแกนเหล็ก

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบค่าความสูญเสียของแกนเหล็กแบบเรียงซ้อน 63A, 63C และ 80B

B (Tesla)	Core loss (W/kg)		
	63A	63C	80B
0.20	0.62	0.23	0.21
0.40	1.05	0.48	0.50
0.60	1.40	0.78	0.83
0.80	1.73	1.17	1.32
1.00	2.07	1.65	1.78
1.20	2.51	2.53	2.78
1.40	3.31	4.16	4.73
1.60	4.92	7.34	8.31
1.80	8.07	13.92	15.64
2.00	13.88	26.91	28.75



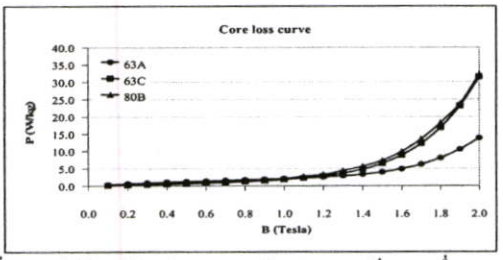
รูปที่ 7 กราฟเปรียบเทียบค่าความสูญเสียของแกนเหล็กแบบเรียงซ้อน 63A, 63C และ 80B

4.6 ผลการทดสอบแบบเชื่อม

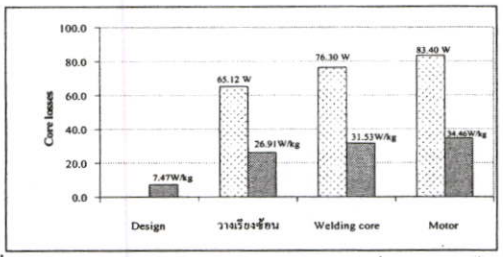
นำแผ่นสเตเตอร์มาวางเรียงซ้อนกันแล้วทำการเชื่อมระหว่างแผ่นสเตเตอร์ แล้วทำการทดสอบหาค่าความสูญเสียของแกนเหล็ก

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบค่าความสูญเสียของแกนเหล็กแบบเชื่อม 63A, 63C และ 80B

B (Tesla)	Core loss (W/kg)		
	63A	63C	80B
0.20	0.70	0.23	0.22
0.40	1.11	0.48	0.55
0.60	1.47	0.79	0.92
0.80	1.92	1.22	1.48
1.00	2.48	1.83	2.06
1.20	3.29	2.83	3.34
1.40	4.47	4.80	5.70
1.60	6.46	8.87	9.91
1.80	10.38	16.86	18.24
2.00	13.95	31.53	32.26



รูปที่ 8 กราฟเปรียบเทียบค่าความสูญเสียของแกนเหล็กแบบเชื่อม 63A, 63C และ 80B



รูปที่ 9 กราฟเปรียบเทียบค่าความสูญเสียของแกนเหล็กในมอเตอร์ 1HP 4P 380V 50Hz ชนิด 63C ที่ B = 2.0T

5. สรุป

จากการวิเคราะห์การหาค่าความสูญเสียของแกนเหล็กในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เพิ่มขึ้น ด้วยเทคนิควิธีการป้อนกระแสกระตุ้นเข้าแกนเหล็ก พบว่ามีสาเหตุมาจากระบวนการผลิตแผ่นสเตเตอร์ ดังนั้นเทคนิคการหาค่าความสูญเสียของแกนเหล็กสามารถยืนยันได้ว่าค่าที่ได้จากการทดสอบแกนเหล็กโดยวิธีการกระตุ้นด้วยกระแสสูงมีค่าสอดคล้องกับ ค่าความสูญเสียของแกนเหล็กในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อทำการทดสอบที่สภาวะไร้โหลด จากกราฟรูปที่ 9

เอกสารอ้างอิง

[1] Willam H.Yeadon, P.E. and Alan W. Yeadon, P.E. "Hand book of small electric motor" The Mcgraw-Hill , 2001

[2] JIS C 2552 Non-Oriented Magnetic Steel Sheet and Strip

[3] ธนาพันธุ์ แสนสุข, วีระศักดิ์ วงวิวัฒน์ และ พิชิต ลำยอง "การศึกษาการทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดี่ยว" การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 28

[4] A.E. Fitzgerald, Charles Kingsley, JR. and Stephen D. Umans. Electric machinery. The Magraw-Hill Companies, inc., 2003

[5] IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motor and Generator

PW29

ประวัติผู้เขียนบทความ



สุขสาคร เจริญสุข สำเร็จการศึกษาระดับ วศบ. สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ปัจจุบันกำลังศึกษาต่อ วศม.ไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยทำงานวิจัยด้านการทดสอบแกนเหล็ก และมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ



ธนาพันธุ์ แสนสุข สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สจล. ปีการศึกษา 2549 ปัจจุบันเป็นเจ้าหน้าที่วิจัย คณะวิศกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยทำงานวิจัยทางด้าน การหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก



พิชิต ลำยอง สำเร็จการศึกษา วศบ. และ วศม.ไฟฟ้า สจล. ปัจจุบันดำรงตำแหน่งรองศาสตราจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล. โดยทำงานวิจัยด้านการแปรรูปพลังงาน, การทดสอบแกนเหล็ก, ฉนวนเครื่องจักรกลไฟฟ้า, มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ, เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

ประวัติผู้เขียน

นางสาว สุขสาคร เจริญสุข	เกิดวันที่ 28 สิงหาคม 2521 อำเภอบางบ่อ ที่จังหวัดสมุทรปราการ
ปีพ.ศ. 2539	สำเร็จการศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ จากวิทยาลัยเทคนิคสมุทรปราการ สาขาไฟฟ้ากำลัง
ปีพ.ศ. 2541	สำเร็จการศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง จากสถาบันเทคโนโลยี-ราชมงคล วิทยาเขตเทคนิคกรุงเทพ ฯ สาขาไฟฟ้ากำลัง
ปีพ.ศ. 2544	สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร สาขาไฟฟ้ากำลัง
ปีพ.ศ. 2551	จบการศึกษาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีพ.ศ. 2544 ~ ปัจจุบัน	ทำงานตำแหน่งวิศวกรออกแบบอาวุโส แผนกออกแบบมอเตอร์ บริษัทมิตซูบิชิ อีเล็คทริค ออโตเมชั่น (ประเทศไทย) จำกัด