

การวิเคราะห์ค่าความสูญเสียของแกนเหล็กในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยการใช้ชุดลวด
เหนี่ยวนำภายใต้การขับเคลื่อนด้วยแหล่งจ่ายที่เป็นไซน์และ PWM อินเวอร์เตอร์

ANALYSIS OF CORE LOSS IN AN INDUCTION MOTOR BASED ON SEARCH COIL
UNDER SINUSOIDAL AND INVERTER PWM SUPPLIES

ชวพร บำรุงพุกษ์
CHAVAPORN BUMROONGPHUCK

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2549

ISSN 074-15-2407-2

การวิเคราะห์ค่าความสูญเสียของแกนเหล็กในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยการใส่ขดลวด
เหนี่ยวนำภายใต้การขับเคลื่อนด้วยแหล่งจ่ายที่เป็นไซน์และ PWM อินเวอร์เตอร์

ANALYSIS OF CORE LOSS IN AN INDUCTION MOTOR BASED ON SEARCH COIL
UNDER SINUSOIDAL AND INVERTER PWM SUPPLIES

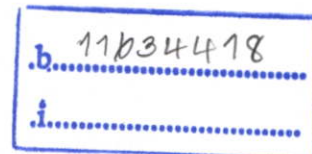


ชวพร บำรุงพฤกษ์

CHAVAPORN BUMROONGPHUCK

กพ.
๕๒๗๗
๒๕๔๙

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน **63308**
วัน,เดือน,ปี **25 ส.ค. 2549**



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2549

ISBN 974-15-2407-2

**ANALYSIS OF CORE LOSS IN AN INDUCTION MOTOR BASED ON SEARCH COIL
UNDER SINUSOIDAL AND INVERTER PWM SUPPLIES**

CHAVAPORN BUMROONGPHUCK

**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**

2006

ISBN 974-15-2407-2

COPYRIGHT 2006

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADGRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์ค่าความสูญเสียของแกนเหล็กในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยการใช้ขดลวดเหนี่ยวนำภายใต้การขับเคลื่อนด้วยแหล่งจ่ายที่ เป็นไซน์และ PWM อินเวอร์เตอร์
นักศึกษา	นายชวพร บำรุงพฤกษ์
รหัสนักศึกษา	45060103
ปริญญา	วศม.
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2549
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ. ดร. วิจิตร กิณเรศ

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์ค่าความสูญเสียในแกนเหล็กของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยอาศัยขดลวดเหนี่ยวนำตรวจจับเส้นแรงแม่เหล็กโดยตรงที่แกนเหล็กได้ทำการทดสอบภายใต้ความเร็วมอเตอร์เท่ากับความเร็วซิงโครนัสในขณะไร้โหลดเพื่อลดความสูญเสียในโรเตอร์ให้น้อยที่สุด เพื่อให้ได้ความแม่นยำและความถูกต้องมากกว่าการหาค่าความสูญเสียจากวงจรสมมูลมาตรฐานของมอเตอร์ โดยในตอนแรกทำการทดสอบด้วยการขับเคลื่อนด้วยการป้อนแหล่งจ่ายที่เป็นไซน์ เพื่อหาการสูญเสียฮีสเตอร์รีซิส (k_h , k_e) ของวัสดุที่นำมาใช้ทำเป็นแกนเหล็กเพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์ แล้วทำการทดสอบด้วยการขับเคลื่อนด้วย PWM อินเวอร์เตอร์ ทำการเปรียบเทียบ จากการคำนวณที่ได้จากเทคนิคกับการคำนวณจากวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำและผลที่วัดได้ ผลที่คำนวณจากเทคนิค ให้ค่าใกล้เคียงผลจากการทดสอบมากกว่าการคำนวณจากสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

Thesis Title Analysis of Core Loss in an Induction Motor Based on Search Coil under Sinusoidal and Inverter PWM Supplies

Student Mr. Chavaporn Bumroongphuck

Student ID. 45060103

Degree Master of Engineering

Programme Electrical Engineering

Year 2006

Thesis Advisor Assoc. Prof. Dr. Vijit Kinnares

ABSTRACT

This thesis proposes an analysis of core loss in an induction motor based on search coil flux detection technique. Testing with synchronous rotor speed in the case of a no-load test to minimized rotor loss is given in order to obtain more accurate and precise results than that from a standard equivalent circuit. In first stage, testing with sinusoidal supply was performed in order to achieve hysteresis and eddy current loss of iron material. These coefficients are used to analyze. Then , testing with PWM Inverter was performed. A comparison of calculation results between the proposed technique and the conventional has been made. These results are compared with experimental results as well. The calculation results from the proposed technique are close to actual results than the equivalent circuit.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาของอาจารย์ที่ปรึกษา คือ รศ. ดร.วิจิตร กิณเรศ ที่ให้ความรู้และคำแนะนำต่างๆ เพื่อทำให้เกิดแนวความคิดในการทำงานจนทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ ผู้เขียนรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่าน และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอบคุณนักศึกษาในห้องปฏิบัติการ Power Electronics and Machine Control ที่ให้ทั้งคำแนะนำ , กำลังใจ , ร่วมทุกข์ , ร่วมสุข และช่วยพยุงให้ก้าวเดินต่อมาเรื่อยในทุกๆสถานที่

ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงขอบคุณภรรยา และญาติพี่น้องทุกคน

ชวพร บำรุงพฤษ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 วิธีการวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
1.5 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์.....	3
1.6 ประโยชน์ที่ได้จากการวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีของมอเตอร์เหนี่ยวนำและการขับเคลื่อน.....	5
2.1 บทนำ.....	5
2.2 โครงสร้างและส่วนประกอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	5
2.2.1 แบบกรงกระรอก(Squirrel Cage rotor).....	5
2.2.2 แบบขดลวดพันรอบ โรเตอร์(Wound rotor).....	5
2.3 ทฤษฎีมอเตอร์เหนี่ยวนำ	6
2.3.1 หลักการทำงานมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส.....	6
2.3.2 วงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส.....	7
2.3.3 การวิเคราะห์วงจรสมมูล.....	8
2.4 หลักการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส.....	11
2.4.1 ช่วงการทำงานที่ความเร็วต่ำกว่าพิกัด (ค่าแรงบิดมีค่าคงที่).....	13
2.4.2 ช่วงการทำงานที่ความเร็วสูงกว่าพิกัด (ค่าแรงบิดมีค่าคงที่).....	13
2.4.3 ช่วงการทำงานที่ความเร็วสูงมาก (ค่าความถี่ที่โรเตอร์คงที่).....	14

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5 ชนิดอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ปรับความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส.....	14
2.5.1 PWM อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบแหล่งจ่ายแรงดัน.....	15
2.5.2 การมอดคูเลตเป็นเชิงเส้น ($m_a \leq 1.0$).....	17
2.5.3 การโอเวอร์มอดคูเลต ($m_a > 1.0$).....	18
2.5.4 การทำงานรูปคลื่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสในอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส.....	20
2.6 สรุป.....	22
บทที่ 3 การวิเคราะห์ค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก และทฤษฎีของ Search	23
3.1 บทนำ.....	23
3.2 ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก(Magnetic Flux Density).....	23
3.3 สนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้า(Magnetic field due to currents).....	25
3.4 เส้นโค้งก่าเนิคแม่เหล็ก(Magnetization Curve).....	27
3.5 แรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้า(Magnetomotive Force).....	28
3.6 การวิเคราะห์ค่าความสูญเสียของแกนเหล็ก.....	29
3.7 ทฤษฎีของSearch coil.....	32
3.8 สรุป.....	34
บทที่ 4 วิธีการวิเคราะห์หาค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก.....	35
4.1 บทนำ.....	35
4.2 การพันขดลวด Search coil.....	35
4.3 การจำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB.....	40
4.3.1 ทำการคำนวณหาค่า constant coefficients of materials k_h, k_e	40
4.3.2 การจำลองหาความสูญเสียในแกนเหล็ก.....	46
4.3.3 การหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส.....	53
4.4 สรุป.....	60
บทที่ 5 ผลการวิเคราะห์ค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก.....	61
5.1 บทนำ.....	61
5.2 ผลการวัดB-H Curve.....	61

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.3 ผลการเปรียบเทียบจากการขับเคลื่อนด้วยแหล่งจ่ายที่เป็นไซน์.....	68
5.4 ผลการเปรียบเทียบผลจากการขับเคลื่อนด้วยแหล่งจ่ายที่เป็น PWMอินเวอร์เตอร์....	70
5.5 สรุป.....	74
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	75
6.1 สรุปผลการวิจัย	75
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	76
เอกสารอ้างอิง.....	77
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก	80
ภาคผนวก ข	82
ภาคผนวก ค	84
ประวัติผู้เขียน	89

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ฮาร์มอนิกของ V_{LL} สำหรับ m_f เลขคี่ที่มีค่าสูง.....	19
4.1 พารามิเตอร์และค่าคงที่ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 Hp.....	38
4.2 พารามิเตอร์และค่าคงที่ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 2 Hp.....	39
4.3 ข้อกำหนดในการแบ่งโรเตอร์รีแอกแตนซ์และสเตเตอร์รีแอกแตนซ์.....	55
4.4 ผลของการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ในวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 HP.....	58
4.5 ผลของการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ในวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 2 HP.....	59

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โรเตอร์แบบกรงกระรอก(Squirrel Cage rotor).....	5
2.2 โรเตอร์แบบขดลวดพันรอบ โรเตอร์(Wound rotor).....	6
2.3 โครงสร้างและส่วนประกอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	6
2.4 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	8
2.5 การไหลของกำลังในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	9
2.6 วงจรสมมูลอย่างง่ายของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	10
2.7 การเปลี่ยนแปลงของแรงดัน,แรงบิด,กระแสมอเตอร์กับความถี่.....	13
2.8 โครงสร้างพื้นฐานของระบบเครื่องปรับอากาศรอบ.....	14
2.9 อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส.....	15
2.10 สัญญาณ PWM 3 เฟส และสเปกตรัมฮาร์มอนิก.....	17
2.11 อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส; $V_{LL1, rms} / V_d$ ด้วยฟังก์ชันของ m_a	20
2.12 อินเวอร์เตอร์แบบรูปคลื่นกึ่งสี่เหลี่ยมจัตุรัส 3 เฟส.....	21
3.1 ความสัมพันธ์ของเวกเตอร์ f, u, B และเส้นแรงแม่เหล็ก ϕ	24
3.2 แนวของสนามแม่เหล็ก.....	24
3.3 สนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้า.....	25
3.4 ความสัมพันธ์ของค่า $B-H$ ของสาร Ferromagnetic ชนิดต่างๆ.....	27
3.5 ขดลวดพันรอบแกนวงแหวนทอรอยด์.....	28
3.6 ขดลวดพันรอบแกนเหล็ก.....	29
3.7 ฮีสเตอร์รีซิสลูป(Hysteresis loop).....	29
3.8 การเกิดกระแสไหลวน (ก)ในแกน ferromagnetic ต้น (ข)ในแกน ferromagnetic ที่เป็นแผ่นลามิเนต.....	31
3.9 การวัดเส้นแรงแม่เหล็กโดยใช้ขดลวดเหนี่ยวนำ.....	32
4.1 ขดลวดภายในมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	35
4.2 การใส่ขดลวด Pole search coilและ Teeth search coil.....	36
4.3 การใส่ขดลวด Yoke search coil.....	36
4.4 การใส่ Teeth search coil ในมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	36
4.5 การใส่ Yoke search coil ในมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	37
4.6 การใส่ Pole search coil ในมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	37
4.7 ขนาดTeethของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 HP.....	38

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8 ขนาดTeethของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 2 HP.....	39
4.9 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำในขณะที่รักษาความเร็วโรเตอร์ขณะไร้โหลดเท่ากับความเร็วซิงโครนัส.....	41
4.10 วงจรที่ใช้ในการคำนวณหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็กภายใต้การขับเคลื่อนด้วยแหล่งจ่ายที่เป็นไซน์.....	42
4.11 แสดงคุณลักษณะความสัมพันธ์ค่าความสูญเสียในแกนเหล็กกับความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก.....	43
4.12 แสดงคุณลักษณะความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าเทียบกับแรงดันเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1HP.....	44
4.13 แสดงคุณลักษณะความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าเทียบกับแรงดันเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 2HP.....	44
4.14 แสดงคุณลักษณะความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าเทียบกับแรงดันเฟสยกกำลังสองของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1HP.....	45
4.15 แสดงคุณลักษณะความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าเทียบกับแรงดันเฟสยกกำลังสองของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 2HP.....	45
4.16 คำนวณที่ความถี่มูลฐาน 40 Hz.....	46
4.17 คำนวณที่ความถี่มูลฐาน 50 Hz.....	46
4.18 คำนวณที่ความถี่มูลฐาน 60 Hz.....	47
4.19 สเปกตรัมของแรงดันที่จ่ายออกมาจาก PWM อินเวอร์เตอร์.....	47
4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความถี่สวิตช์ และขนาดของแรงดันที่ความถี่มูลฐาน 30 Hz...	51
4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความถี่สวิตช์ และขนาดของแรงดันที่ความถี่มูลฐาน 40 Hz...	51
4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความถี่สวิตช์ และขนาดของแรงดันที่ความถี่มูลฐาน 50 Hz...	52
4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความถี่สวิตช์ และขนาดของแรงดันที่ความถี่มูลฐาน 60 Hz...	52
4.24 วงจรที่ใช้ในการทดสอบNo-Load Test และ Blocked-Rotor Test.....	53
4.25 การทดสอบ No-Load Test และ Blocked-Rotor Test.....	53
4.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วและลักษณะของตัวนำในโรเตอร์ในมอเตอร์ Design B , Design C และ Design D ตามมาตรฐานของ NEMA.....	56
4.27 วงจรที่ใช้ในการทดสอบหาความต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง โดยใช้ VI-method.....	56

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.28 พารามิเตอร์ของมอเตอร์ขนาด 1 HP ที่ได้จากการทดสอบ.....	60
4.29 พารามิเตอร์ของมอเตอร์ขนาด 2 HP ที่ได้จากการทดสอบ.....	60
5.1 วงจรที่ใช้ในการวัด B-H Curve.....	62
5.2 วงจรตรวจจับสัญญาณ.....	62
5.3 แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่ teeth และ สัญญาณเส้นแรงแม่เหล็กที่ teeth จับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยแหล่งจ่ายที่เป็น sinusoidal.....	63
5.4 แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่ Yoke และ สัญญาณเส้นแรงแม่เหล็กที่ Yoke จับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยแหล่งจ่ายที่เป็น sinusoidal.....	64
5.5 แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่ Pole search coil จับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยแหล่งจ่ายที่เป็น Sinusoidal.....	64
5.6 แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ teeth และแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ yoke ป้อนด้วย จับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยแหล่งจ่ายที่เป็น sinusoidal.....	65
5.7 แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ teeth1 และแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ teeth2 ต่างเฟสกัน 20° จับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยแหล่งจ่ายที่เป็น sinusoidal.....	65
5.8 B-H curve ของแกนเหล็กภายในมอเตอร์ที่ถูกจับเคลื่อนมอเตอร์ ด้วยแหล่งจ่ายที่เป็น sinusoidal.....	66
5.9 แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่ teeth และ สัญญาณเส้นแรงแม่เหล็กที่ teeth จับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยแหล่งจ่ายที่เป็น PWM อินเวอร์เตอร์.....	66
5.10 แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่ Yoke และ สัญญาณเส้นแรงแม่เหล็กที่ Yoke จับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยแหล่งจ่ายที่เป็น PWM อินเวอร์เตอร์.....	67
5.11 แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่ Pole search coil จับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยแหล่งจ่ายที่เป็น PWM อินเวอร์เตอร์.....	67
5.12 B-H curve ของแกนเหล็กภายในมอเตอร์ถูกจับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยแหล่งจ่าย ที่เป็น PWM อินเวอร์เตอร์.....	68
5.13 วงจรที่ใช้ในการทดสอบหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็กภายใต้การจับเคลื่อนด้วย แหล่งจ่ายที่เป็น ไซน์.....	68
5.14 เปรียบเทียบผลจากการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 HP.....	69
5.15 เปรียบเทียบผลจากการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ 2 HP.....	69

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.16 วงจรที่ใช้ในการทดสอบหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก ภายใต้การขับเคลื่อนด้วยแหล่งจ่ายอินเวอร์เตอร์.....	70
5.17 ทำการเปรียบเทียบผลของมอเตอร์ 1 HP ที่ถูกขับเคลื่อนด้วย PWM อินเวอร์เตอร์ ที่ความถี่มูลฐาน 40 Hz.....	71
5.18 ทำการเปรียบเทียบผลของมอเตอร์ 1 HP ที่ถูกขับเคลื่อนด้วย PWM อินเวอร์เตอร์ ที่ความถี่มูลฐาน 50 Hz.....	71
5.19 ทำการเปรียบเทียบผลของมอเตอร์ 1 HP ที่ถูกขับเคลื่อนด้วย PWM อินเวอร์เตอร์ ที่ความถี่มูลฐาน 60 Hz.....	72
5.20 ทำการเปรียบเทียบผลของมอเตอร์ 2 HP ที่ถูกขับเคลื่อนด้วย PWM อินเวอร์เตอร์ ที่ความถี่มูลฐาน 40 Hz.....	72
5.21 ทำการเปรียบเทียบผลของมอเตอร์ 2 HP ที่ถูกขับเคลื่อนด้วย PWM อินเวอร์เตอร์ ที่ความถี่มูลฐาน 50 Hz.....	73
5.22 ทำการเปรียบเทียบผลของมอเตอร์ 2 HP ที่ถูกขับเคลื่อนด้วย PWM อินเวอร์เตอร์ ที่ความถี่มูลฐาน 60 Hz.....	73

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ถูกนำมาใช้งาน อย่างแพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากมีโครงสร้างที่ได้เปรียบกว่าเครื่องจักรกลไฟฟ้าประเภทอื่นง่ายต่อการบำรุงรักษาในการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถทำได้สะดวกขึ้น โดยการใช้ PWM อินเวอร์เตอร์ป้อนแรงดันที่ใช้ในการขับเคลื่อน เพื่อปรับความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ผลที่ตามมาจะมีฮาร์มอนิกที่เกิดจากการสวิตช์เพื่อสร้างแรงดันไฟฟ้าของ PWM อินเวอร์เตอร์ถูกป้อนเข้ามอเตอร์ด้วยเป็นผลทำให้ประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้าต่ำลง เนื่องจากค่าความสูญเสียที่เพิ่มมากขึ้นจากกำลังการสูญเสียโหลดแฝง (Stray Load Loss) ปรากฏการณ์ทางผิว (Skin Effect) ค่าความสูญเสียของแกนเหล็ก(Core loss) ในงานวิจัยนี้ได้เน้นการวัดเพื่อทำการวิเคราะห์ค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนเหล็กที่เกิดจากการเปรียบเทียบการขับเคลื่อนด้วยแหล่งจ่ายที่เป็นไซน์กับแหล่งจ่ายจาก PWM อินเวอร์เตอร์ เนื่องจากการศึกษาการสูญเสียในแกนเหล็กของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ที่หาจากพารามิเตอร์ในวงจรสมมูล ยังขาดความแม่นยำและถูกต้องในการวัดค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นจึงจำเป็นต้องอาศัยขดลวดเหนี่ยวนำ (Search Coil) มาใช้วัดและวิเคราะห์ค่าความสูญเสียในแกนเหล็กที่เกิดขึ้นให้มีความแม่นยำ และถูกต้องมากยิ่งขึ้นและเข้าใจกลไกการเกิดค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อทำการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้วยแหล่งจ่ายที่เป็น PWM อินเวอร์เตอร์เมื่อมีการเปลี่ยนความถี่สวิตช์ และความถี่มูลฐาน

1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อใช้ขดลวดเหนี่ยวนำ (Search Coil) วัดความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กภายในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้โดยตรงเพื่อนำไปวิเคราะห์หาค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก

1.2.2 เพื่อใช้ขดลวดเหนี่ยวนำ (Search Coil) หา constant coefficients of materials k_h และ k_c เป็นค่าคงที่ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะเฉพาะของแกนเหล็กได้

1.2.3 เพื่อศึกษาความสูญเสียในแกนเหล็กของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส เมื่อทำการขับเคลื่อนด้วยแหล่งจ่ายที่เป็นไซน์กับแหล่งจ่ายจาก PWM อินเวอร์เตอร์

1.2.4 เพื่อศึกษาความสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนเหล็กที่เกิดจากการการคำนวณจากพารามิเตอร์ในวงจรสมมูลเปรียบเทียบกับวิธีการกึ่งคำนวณกึ่งทดลอง ที่ต้องอาศัยขดลวดเหนี่ยวนำ (Search Coil)

1.3 วิธีการวิจัย

1.3.1. ค้นคว้าทฤษฎีจากบทความวารสารต่างๆ เอกสารและตำราที่ใช้เป็นข้อมูลเกี่ยวกับ ความสูญเสียในแกนเหล็กของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟสและผลกระทบที่เกิดจากเครื่องปรับ ความเร็วรอบ PWM ต่อค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก

1.3.2 ทดสอบหาค่าหาค่าคงที่ k_h และ k_c ในแกนเหล็กของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยใช้ขดลวดเหนี่ยวนำ (Search Coil)

1.3.3 ศึกษาการสร้างแบบจำลองของเครื่องปรับความเร็วรอบ PWM อินเวอร์เตอร์และ มอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้โปรแกรม MATLAB / M-file เพื่อใช้ในการคำนวณหาความสูญเสียใน แกนเหล็ก

1.3.4. ทำการเปรียบเทียบผลจากการหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก ด้วยวิธีการคำนวณหา จากวงจรสมมูล , คำนวณหาจากทฤษฎีของ Search coil และผลการวัดจริง

1.3.5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

1.4 ขอบเขตของการศึกษา

จากผลของการใช้อินเวอร์เตอร์ขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำทำให้ค่าความสูญเสียในแกน เหล็กเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากฮาร์มอนิกที่เกิดจากการสวิตช์เพื่อสร้างแรงดันในการขับเคลื่อนถูก ป้อนเข้ามอเตอร์ด้วย ในการคำนวณหาความสูญเสียในแกนเหล็กจากวงจรสมมูลของมอเตอร์ยัง ขาดความแม่นยำและความถูกต้อง จึงนำทฤษฎี Search coil มาใช้ในการหาเพื่อให้ได้ค่าที่ใกล้เคียง ความถูกต้อง ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลภายใต้การขับเคลื่อนมอเตอร์ ด้วยไซน์วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลภายใต้การขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วย PWM อินเวอร์เตอร์และทำ การจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสขนาด 1 HP แรงดัน 220/380 V กระแส 3.0/2.0 A 4 pole 50 Hz ความเร็วรอบที่พิกัด 1,488 rpm และ 2 HP แรงดัน 220/380 V กระแส 6.0/3.5 A 4 pole 50 Hz ความเร็วรอบที่พิกัด 1,450 rpm

โดยทำการศึกษาจากแบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้ โปรแกรม MATLAB / M-file ทำการจำลองผลการทดสอบจากการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยไซน์และการขับเคลื่อนมอเตอร์ ด้วย PWM อินเวอร์เตอร์ เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์จากการคำนวณจากวงจรสมมูล เปรียบเทียบ กับ การหาจากทฤษฎี Search coil และผลการวัดจริง

1.5 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้การวิเคราะห์ค่าความสูญเสียของแกนเหล็กในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยการใช้ขดลวดเหนี่ยวนำภายใต้การขับเคลื่อนด้วยแหล่งจ่ายที่เป็นไซน์ และ PWM อินเวอร์เตอร์ซึ่งรายละเอียดที่กล่าวถึงในวิทยานิพนธ์แบ่งเป็นบทๆ ได้ดังนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ สมมุติฐานของการศึกษา วิธีการวิจัย ขอบเขตของการศึกษา เนื้อหาโดยย่อในแต่ละบท และ ประโยชน์ที่ได้จากการวิจัย

บทที่ 2 การวิเคราะห์ค่าความสูญเสียในแกนเหล็กของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โครงสร้าง และส่วนประกอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ทฤษฎีของอินเวอร์เตอร์

บทที่ 3 ทฤษฎีของ Search coil ที่ใช้มาวิเคราะห์หาค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก การใส่ Search coil เข้าไปในมอเตอร์ การวิเคราะห์ค่าความสูญเสียฮีสเตอร์รีซิส การวิเคราะห์ค่าความสูญเสียของกระแสไหลวน

บทที่ 4 การจำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB เพื่อวิเคราะห์หาค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก แบบจำลองสัญญาณที่ใช้ขับมอเตอร์ แบบจำลองการวิเคราะห์ภายใต้การขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยไซน์ การพัน Search coil การคำนวณหาค่า constant coefficients of materials k_h และ k_c การทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ในวงจรสมมูล ของมอเตอร์เหนี่ยวนำตามมาตรฐานของ IEEE Test Procedure

บทที่ 5 กล่าวถึง ผลการจำลองและการทดสอบวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลภายใต้การขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยไซน์วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลภายใต้การขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วย PWM อินเวอร์เตอร์

บทที่ 6 กล่าวถึงสรุปการวิเคราะห์ค่าความสูญเสียของแกนเหล็กในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยการใช้ขดลวดเหนี่ยวนำภายใต้การขับเคลื่อนด้วยแหล่งจ่ายที่เป็นไซน์ และ PWM อินเวอร์เตอร์รวมถึงข้อเสนอแนะที่จะใช้ในการวิจัยลำดับต่อไป

1.6 ประโยชน์ที่ได้จากการวิจัย

1.6.1 เป็นการศึกษาผลกระทบเนื่องจากฮาร์มอนิกที่เกิดจากการสวิตช์เพื่อสร้างแรงดันในการขับเคลื่อนของอินเวอร์เตอร์ซึ่งมีผลต่อค่าความสูญเสียในแกนเหล็กของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

1.6.2 เป็นการศึกษาการจำลองเครื่องปรับความเร็วรอบและแบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยใช้โปรแกรม MATLAB / M-file ทำการจำลองผลจากการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยไซน์และการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วย PWM อินเวอร์เตอร์

1.6.3 นำทฤษฎีของ Search coil มาวิเคราะห์หาค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก

1.6.4 มีการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์จากการคำนวณจากวงจรสมมูลเปรียบเทียบกับการหาจากทฤษฎี Search coil และผลการวัดจริง เพื่อหาวิธีการที่ให้ผลใกล้เคียงความถูกต้อง

บทที่ 2

ทฤษฎีของมอเตอร์เหนี่ยวนำและการขับเคลื่อน

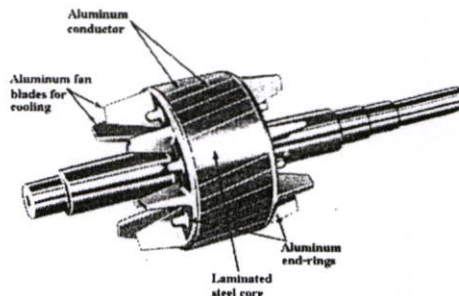
2.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ หลักการควบคุมความเร็วชนิดของอินเวอร์เตอร์ และ โครงสร้างส่วนประกอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำเพื่อใช้เป็นแนวทางในการวิเคราะห์ความสูญเสียในแกนเหล็ก

2.2 โครงสร้างและส่วนประกอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

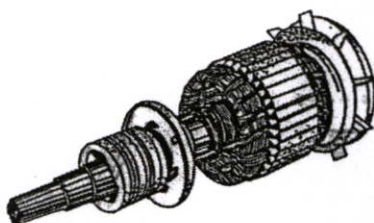
มอเตอร์เหนี่ยวนำ เป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับที่หมุนได้ด้วยการเหนี่ยวนำมีส่วนประกอบที่สำคัญคือ ส่วนที่อยู่กับที่(stator)มีขดลวดพันอยู่ 3 ชุด เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กหมุน(Rotating magnetic field) และส่วนที่หมุน(Rotor) แบ่งออกเป็น 2 แบบคือ

2.2.1 แบบกรงกระรอก(Squirrel Cage rotor) แกนโรเตอร์ทำด้วยแผ่นลามิเนตเซาะผิวด้านนอกให้เป็นร่องโดยรอบเรียกว่า สล็อต(Slot) ตรงกลางแผ่นจะเจาะรูสำหรับสอดเพลลา เมื่อนำแผ่นเหล็กมาอัดเข้าด้วยกันจะได้เป็นแกนโรเตอร์ นำแกนโรเตอร์ไปวางในพิมพ์เพื่อฉีดอลูมิเนียมเหลวเข้าไปจะได้อลูมิเนียมอัดแน่นอยู่ในร่องสล็อต และมีครีบยื่นออกไปสองข้างเพื่อใช้เป็นใบพัดระบายความร้อน



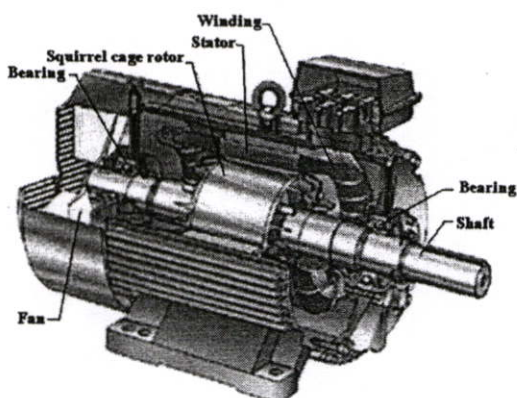
รูปที่ 2.1 โรเตอร์แบบกรงกระรอก(Squirrel Cage rotor)

2.2.2 แบบขดลวดพันรอบโรเตอร์(Wound rotor) โรเตอร์แบบนี้แตกต่างจากกรงกระรอกคือ มีขดลวดทองแดงพันรอบโรเตอร์ส่วนปลายของขดลวดนี้จะต่อกับสลีปริง(Slip ring) ที่ถูกสัมผัสกับแปรงถ่าน(Brush)

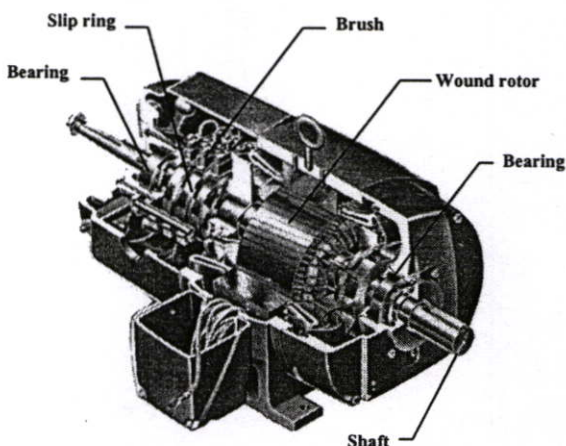


รูปที่ 2.2 โรเตอร์แบบขดลวดพันรอบ โรเตอร์(Wound rotor)

เนื่องจากโรเตอร์ถูกแบ่งออกเป็น 2 แบบมอเตอร์เหนี่ยวนำจึงถูกแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ สไลควเรลเจมมอเตอร์(Squirrel cage motor) และวาวด์โรเตอร์มอเตอร์(Wound rotor motor)



สไลควเรลเจมมอเตอร์(Squirrel cage motor)



วาวด์โรเตอร์มอเตอร์(Wound rotor motor)

รูปที่ 2.3 โครงสร้างและส่วนประกอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

2.3 ทฤษฎีมอเตอร์เหนี่ยวนำ

2.3.1 หลักการทำงานมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

เมื่อทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส จะทำให้เกิดกระแสไหลในขดลวดเกิดสนามแม่เหล็กขึ้นที่ขดลวดสเตเตอร์โดยสนามแม่เหล็กที่สเตเตอร์นี้จะขยับและพองตัวตามการเปลี่ยนแปลงของรูปคลื่นไซน์ของแหล่งจ่ายที่ป้อนให้กับมอเตอร์ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนที่เคลื่อนที่ไปตัดกับตัวนำในโรเตอร์เกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำไปสร้างสนามแม่เหล็กขึ้นที่โรเตอร์ สนามแม่เหล็กหมุนที่ขดลวดสเตเตอร์นี้จะไปดึงดูดกับสนามแม่เหล็กที่โรเตอร์ให้หมุนไปในทิศทางเดียวกัน โดยที่ความเร็วรอบของโรเตอร์จะหมุนต่ำกว่าความเร็วสนามแม่เหล็กหมุน (synchronous speed : ω_s, N_s) หรือที่เรียกว่าความเร็วซิงโครนัสซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.1 และสมการที่ 2.2

$$\omega_s = \frac{2\omega}{P} \quad \text{rad/s.} \quad (2.1)$$

จากสมการที่ 2.1 สามารถเขียนให้อยู่ในหน่วยของรอบต่อนาที (rpm) จะได้ดังสมการที่ 2.2

$$N_s = 60 \cdot \frac{\omega_s}{2\pi} = \frac{120f}{P} \quad \text{rpm} \quad (2.2)$$

N_s = ความเร็วซิงโครนัส (rpm)

ω_s = ความเร็วซิงโครนัส (rad/s)

ω = ความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้า (rad/s)

f = ความถี่ของแหล่งจ่ายที่จ่ายให้กับมอเตอร์ (Hz)

P = จำนวนขั้วแม่เหล็กของมอเตอร์

สลลิป (Slip, S) คืออัตราส่วนระหว่างส่วนต่างของความเร็วสลลิป (ω_{sl}) ต่อความเร็วซิงโครนัส (ω_s) เขียนดังสมการที่ 2.3 และ 2.4

$$\omega_{sl} = \omega_s - \omega_r \quad (2.3)$$

$$S = \frac{\omega_{sl}}{\omega_s} \quad (2.4)$$

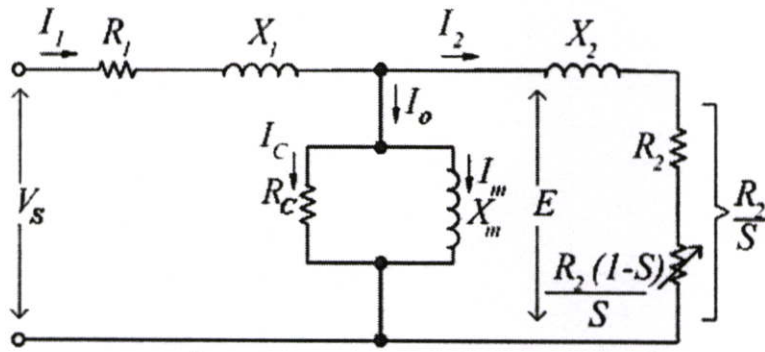
S = สลลิป

ω_{sl} = ความเร็วสลลิป

ω_r = ความเร็วโรเตอร์

2.3.2 วงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส นั้นจะเหมือนกับวงจรสมมูลของหม้อแปลงแต่จะต่างกันตรงขดลวดชุดขั้วภูมิ กล่าวคือ ขดลวดชุดขั้วภูมิของหม้อแปลงไม่มีส่วนที่เคลื่อนที่แต่กรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำนั้นขดลวดชุดขั้วภูมิจะเคลื่อนที่ซึ่งก็คือโรเตอร์ของมอเตอร์นั่นเอง



รูปที่ 2.4 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

จากรูปที่ 2.2 เป็นวงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำซึ่งประกอบด้วยพารามิเตอร์ต่างๆดังต่อไปนี้

V_s = ค่าแรงดันไฟฟ้าต่อเฟส

R_1 = ค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์

R_2 = ค่าความต้านทานของขดลวดโรเตอร์ที่โอนย้ายมาทางด้านสเตเตอร์

R_c = ค่าความต้านทานของแกนเหล็ก

X_m = ค่ารีแอกแตนซ์เหนี่ยวนำในการสร้างสนามแม่เหล็ก

X_1 = ค่ารีแอกแตนซ์รั่วไหลของขดลวดสเตเตอร์

X_2 = ค่ารีแอกแตนซ์รั่วไหลของขดลวดโรเตอร์ที่โอนย้ายมาทางด้านสเตเตอร์

I_1 = กระแสสเตเตอร์

I_2 = กระแสโรเตอร์

I_c = กระแสที่ทำให้เกิดการสูญเสียในแกนเหล็ก

I_m = กระแสไฟฟ้าที่สร้างสนามแม่เหล็ก

2.3.3 การวิเคราะห์ห้วงจรสมมูล

จากวงจรสมมูลที่ได้จะนำมาใช้ในการคำนวณหาค่าต่างๆดังต่อไปนี้

$$\text{กำลังไฟฟ้าอินพุท} \quad P_{in} = 3V_s I_1 \cos \theta \quad (2.5)$$

$$\text{กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ขดลวดสเตเตอร์} \quad P_{ls} = 3 I_1^2 R_1 \quad (2.6)$$

$$\text{กำลังไฟฟ้าที่ส่งผ่านช่องว่างอากาศ (air gap)} \quad P_g = 3 I_2^2 \frac{R_2}{S} \quad (2.7)$$

$$\text{กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ขดลวดโรเตอร์} \quad P_{lr} = 3 I_2^2 R_2 \quad (2.8)$$

$$\text{กำลังไฟฟ้าทางกล} \quad P_{em} = P_g - P_{lr}$$

$$= \frac{3 I_2^2 R_2 (1-s)}{s} \quad (2.9)$$

กำลังไฟฟ้าที่เพลา $P_{sh} = P_{em} - P_{fw}$ (2.10)

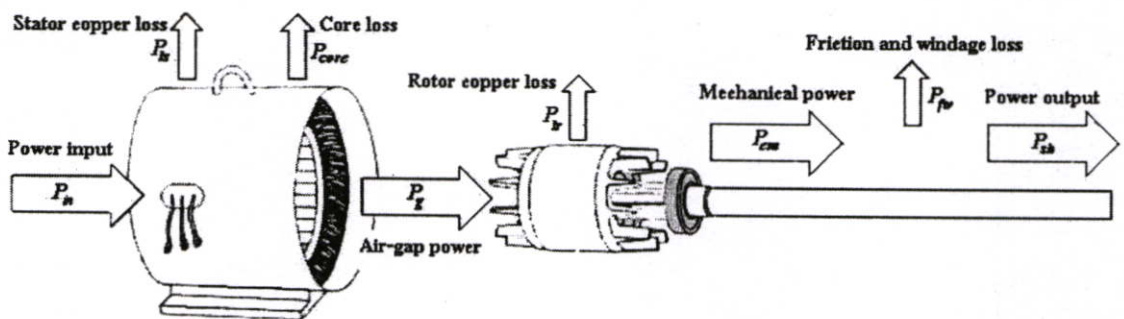
P_{fw} คือ กำลังสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานและแรงลม

แรงบิดของมอเตอร์ $T_{em} = \frac{P_{em}}{\omega_r} = \frac{3 I_2^2 R_2}{s \omega_s}$ (2.11)

ซึ่ง $\omega_s = \frac{2\pi N_s}{60} = \frac{4\pi f}{P}$ (2.12)

แทนค่าสมการที่ 2.12 ลงในสมการที่ 2.11 จะได้

แรงบิดของมอเตอร์ $T_{em} = \frac{3 I_2^2 R_2 P}{4\pi f s}$ (2.13)



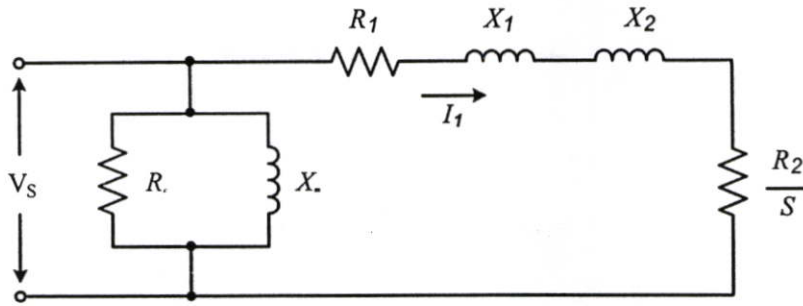
รูปที่ 2.5 การไหลของกำลังในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

จากรูปที่ 2.5 สามารถนำมาเขียนเป็นสมการความสัมพันธ์ของกำลังขาเข้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้ดังนี้

$$P_{in} = P_{ls} + P_{core} + P_g \quad (2.14)$$

และสามารถนำมาเขียนเป็นสมการความสัมพันธ์ของความสูญเสียในแกนเหล็กของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้ดังนี้

$$P_{core} = P_{in} - P_{ls} - P_g \quad (2.15)$$



รูปที่ 2.6 วงจรสมมูลอย่างง่ายของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

วงจรสมมูลดังรูปที่ 2.4 สามารถเขียนให้ง่ายขึ้นดังรูปที่ 2.6 ซึ่งค่ากระแส I_2 สามารถหาได้ดังนี้

$$I_2 = \frac{V_s}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2}{S}\right)^2 + (X_1 + X_2)^2}} \quad (2.16)$$

เมื่อค่าสลิปที่แรงบิดสูงสุดหาได้จากสมการที่ 2.17

$$S_m = \frac{R_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2)^2}} \quad (2.17)$$

เมื่อไม่คำนึงถึงผลของพารามิเตอร์ทางด้านสเตเตอร์ (R_1, X_1) ซึ่งไม่มีผลต่อกำลังทางด้านเอาต์พุทของมอเตอร์จะได้สมการดังนี้

$$I_2 = \frac{SV_s}{\sqrt{R_2^2 + S^2 X_2^2}} \quad (2.18)$$

$$S_m = \frac{R_2}{X_2} \quad (2.19)$$

แทนค่าสมการที่ 2.19 และ 2.18 ลงในสมการที่ 2.13 จะได้สมการแรงบิดสูงสุดดังสมการที่ 2.20

$$T_m = \frac{3PV_s^2}{8\pi fX_2} \quad (2.20)$$

โดยที่ $\omega = 2\pi f$ และ $X_2 = 2\pi fL_2$ เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ 2.20 จะได้

$$T_m = \frac{3P\left(\frac{V_s}{f}\right)^2}{16\pi^2 L_2} \quad (2.21)$$

จากสมการที่ 2.21 จะเห็นว่าแรงบิดสูงสุดจะมีค่าคงที่เมื่อ อัตราส่วน $\left(\frac{V_s}{f}\right)$ มีค่าคงที่ด้วย

2.4 หลักการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

จากวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ในรูปที่ 3.1 ฟลักซ์ในช่องว่างอากาศ (Air-gap Flux) ที่เกิดจากการกระจายความหนาแน่นของฟลักซ์ (B) จะหมุนด้วยความเร็วเชิงโคโรนัสรอบๆขดลวดสเตเตอร์ที่อยู่กับที่ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำระหว่างช่องว่างอากาศ (Air-gap Voltage : E) ซึ่งแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจะมีความถี่เท่ากับความถี่แหล่งจ่าย และเนื่องจากการกระจายความหนาแน่นของฟลักซ์เป็นไปตามลักษณะฟังก์ชันไซน์จากกฎของฟาราเดย์ทำให้สามารถหาแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำได้จาก

$$e = N_s \frac{d\phi}{dt} \quad (2.22)$$

e = แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในช่องว่างอากาศ

N_s = จำนวนรอบของขดลวด

ϕ = ฟลักซ์ในช่องว่างอากาศ

เมื่อกำหนดให้
$$\phi = \phi_m \sin \omega t \quad (2.23)$$

แทนค่าสมการที่ 2.23 ลงในสมการที่ 2.22 จะได้สมการแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำดังสมการที่ 2.23

$$e = N_s \phi_m \omega \cos \omega t \quad (2.24)$$

โดยที่ $\omega = 2\pi f$ เมื่อแทนค่า $\cos \omega t$ เท่ากับหนึ่งและทำสมการที่ 2.24 เป็นค่าอาร์เอ็มเอสจะได้

$$E = 4.44 N_s \phi f k_w \quad (2.25)$$

$k_w =$ winding factor

จากสมการที่ 2.2 จะเห็นว่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องในการปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ก็คือจำนวนขั้วของมอเตอร์ และความถี่ของแหล่งจ่ายที่จ่ายให้กับมอเตอร์ ในการเปลี่ยนความเร็วรอบของมอเตอร์โดยใช้การปรับเปลี่ยนจำนวนขั้วของมอเตอร์นั้นจะได้ช่วงความเร็วที่แตกต่างกันมาก จึงไม่ค่อยเป็นที่นิยมใช้ในงานอุตสาหกรรมทั่วไป แต่ในการปรับความเร็วของมอเตอร์นั้นจะได้ช่วงความเร็วที่ละเอียดมากกว่าจึงเป็นที่นิยมใช้ในการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ แต่ทั้งนี้ในการปรับความเร็วรอบของมอเตอร์โดยการเปลี่ยนความถี่ของแหล่งจ่ายนั้นจะต้องคำนึงถึงแรงบิดและฟลักซ์ที่ช่องว่างอากาศของมอเตอร์ด้วย ซึ่งจากรูปที่ 2.4 สมการที่ 2.21 และสมการที่ 2.25 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง V_s, E, ϕ และ T ดังนี้

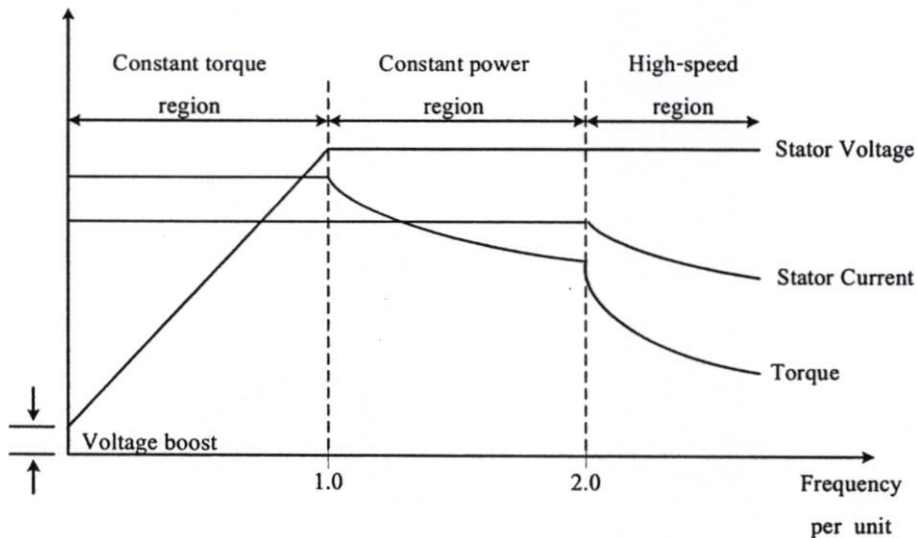
$$V_s \approx E \quad (2.26)$$

$$T \propto \left(\frac{V_s}{f}\right)^2 \left(\frac{E}{f}\right)^2 \quad (2.27)$$

$$\phi \propto \frac{E}{f} \quad (2.28)$$

ดังนั้นในการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะต้องควบคุมให้อัตราส่วนแรงดันต่อความถี่ $\left(\frac{V_s}{f}\right), \left(\frac{E}{f}\right)$ มีค่าคงที่ จึงจะทำให้แรงบิดของมอเตอร์มีค่าคงที่ตั้งแต่ที่ระดับความถี่ต่ำถึงความถี่ที่พิกัดเราเรียกการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์แบบนี้ว่า “การควบคุมด้วยการเปลี่ยนแรงดัน และความถี่ (Variable Voltage Variable Frequency : VVVF)” ซึ่งเป็นวิธีการที่ดีและเหมาะสมสำหรับการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งจะใช้อินเวอร์เตอร์เป็นตัวควบคุมแรงดันและความถี่ทางด้านเอาต์พุตให้เป็นไปตามหลักการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยสามารถแบ่งช่วงของการควบคุมความเร็วได้เป็น 3 ช่วง ดังต่อไปนี้

- ช่วงการทำงานที่ความเร็วต่ำกว่าพิกัด (ค่าแรงบิดคงที่)
- ช่วงการทำงานที่ความเร็วสูงกว่าพิกัด (ค่ากำลังงานคงที่)
- ช่วงการทำงานที่ความเร็วสูงมาก (ค่าความถี่ที่โรเตอร์คงที่)



รูปที่ 2.7 การเปลี่ยนแปลงของแรงดัน , แรงบิด , กระแสมอเตอร์กับความถี่

2.4.1 ช่วงการทำงานที่ความเร็วต่ำกว่าพิกัด (ค่าแรงบิดมีค่าคงที่)

ในช่วงที่ความเร็วของมอเตอร์ต่ำกว่าที่พิกัดจะต้องทำให้ ฟลักซ์ของมอเตอร์มีค่าคงที่โดยการควบคุมอัตราส่วนของแรงดันต่อความถี่ให้คงที่ ซึ่งจากรูปที่ 2.7 จะเห็นได้ว่าช่วงดังกล่าวขนาดของแรงดันสเตเตอร์จะลดลงในลักษณะเชิงเส้นตามความถี่ โดยเริ่มจากค่าที่พิกัดของมอเตอร์และลดลงมาจนถึงค่าต่ำสุดที่ตั้งไว้ยู่ค่าหนึ่งทั้งนี้เพราะที่ความถี่ต่ำๆค่าของกระแสที่สร้างสนามแม่เหล็กไม่ได้ขึ้นอยู่กับขดลวดสนามแม่เหล็กเพียงอย่างเดียว ทั้งนี้เนื่องจากค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์จะมีค่าใกล้เคียงกับขดลวดสนามแม่เหล็กดังนั้นจึงต้องเพิ่มแรงดันที่จ่ายให้กับสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเพื่อชดเชยแรงดันที่ตกคร่อมความต้านทานสเตเตอร์ และในช่วงการทำงานนี้ค่ากระแสมอเตอร์ที่ใช้งานจะเป็นค่าที่พิกัด การทำงานในช่วงนี้จะเรียกว่าช่วงแรงบิดคงที่ (Constant Torque Region)

2.4.2 ช่วงการทำงานที่ความเร็วสูงกว่าพิกัด (กำลังงานมีค่าคงที่)

การเพิ่มความถี่ของสเตเตอร์ให้สูงกว่าที่พิกัดจะทำให้ความเร็วของมอเตอร์มีค่าสูงกว่าความเร็วที่พิกัดได้แต่จะต้องรักษาค่าแรงดันให้มีค่าคงที่เท่ากับที่พิกัดของมอเตอร์ โดยเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นจะทำให้อัตราส่วนแรงดันต่อความถี่มีค่าลดลงจะเป็นผลทำให้ฟลักซ์ในช่องว่างอากาศลดลงด้วยและขีดจำกัดกระแส โรเตอร์จะเท่ากับที่พิกัดเหมือนกับในช่วงแรงบิดคงที่ แต่ช่วงนี้ค่าแรงบิดสูงสุดจะแปรผันกับความถี่ดังสมการที่ 2.28

$$T_{em,max} = \frac{f_{rated}}{f} \cdot T_{rated} \quad (2.29)$$

$$P_{em,max} = \omega_r \cdot T_{em,max} \quad (2.30)$$

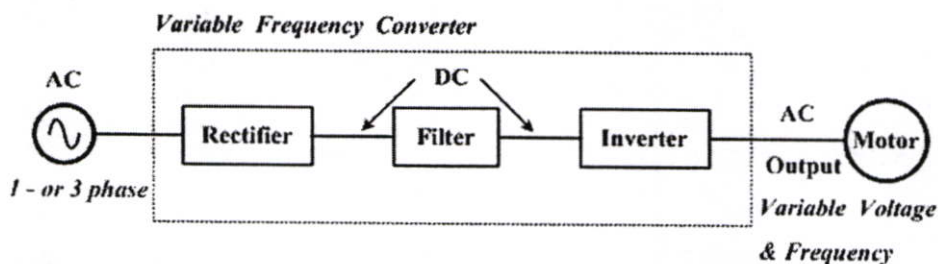
สมการที่ 2.30 จะแสดงถึงค่ากำลังไฟฟ้าทางกลซึ่งจะมีค่าลดลงเนื่องจากแรงบิดสูงสุดลดลงนั่นเอง เราเรียกช่วงการทำงานนี้ว่าช่วงกำลังคงที่ (Constant Power Region)

2.4.3 ช่วงการทำงานที่ความเร็วสูงมาก (ค่าความถี่ที่โรเตอร์คงที่)

ในช่วงนี้จะเป็นช่วงที่ความเร็วรอบของมอเตอร์จะสูงมากถ้าให้แรงดันอินพุตมีค่าที่พิกัดจะทำให้ค่าฟลักซ์ในช่องว่างอากาศลดลงมากทำให้แรงบิดของมอเตอร์ไม่ถึงค่าที่พิกัดในขณะที่ความถี่ที่โรเตอร์ของมอเตอร์จะมีค่าคงที่ ส่งผลให้สมรรถนะของแรงบิดลดลงเป็นอัตราส่วน $1/f^2$ ซึ่งทั้งแรงบิด และกระแสมอเตอร์จะลดลงในขณะที่ความเร็วเพิ่มขึ้น การรักษาค่าของแรงดันทางด้านเอาต์พุตให้คงที่นั่นค่าแรงบิดของมอเตอร์ในช่วงนี้จะไม่ถูกจำกัดโดยกระแสที่มอเตอร์ได้รับ ดังนั้นกระแสที่ขีดจำกัดจะมีค่าน้อยกว่าค่ากระแสที่พิกัดและจะลดลงตามความเร็วที่เพิ่มขึ้น

2.5 ชนิดอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ปรับความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

ระบบเครื่องปรับความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำนั้นสามารถแบ่งออกเป็น 5 ส่วน ดังรูปที่ 2.8 ซึ่งประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งอาจจะเป็น 1 เฟส หรือ 3 เฟส จ่ายไฟฟ้าเข้าเครื่องปรับความเร็วรอบโดยผ่านการแปลงผันสัญญาณจาก ไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรงเราเรียกวงจรในส่วนนี้ว่าวงจรแปลงผัน แต่สัญญาณไฟตรงที่ได้จากวงจรดังกล่าวยังมีการกระเพื่อมของสัญญาณ (Ripple) จึงต้องมีการกรองสัญญาณที่มีการกระเพื่อมให้เป็นไฟตรงที่เรียบขึ้นเรียกววงจรส่วนนี้ว่าวงจรกรอง (Filter) หลังจากนั้นจะเป็นหน้าที่ของวงจรที่แปลงผันสัญญาณจากไฟตรงเป็นไฟสลับซึ่งเรียกว่าอินเวอร์เตอร์ ซึ่งในส่วนนี้จะมีหลายเทคนิคที่ใช้ในการควบคุมการเปิด-ปิด สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป และในที่สุดท้ายจะเป็นมอเตอร์ที่ถูกควบคุม

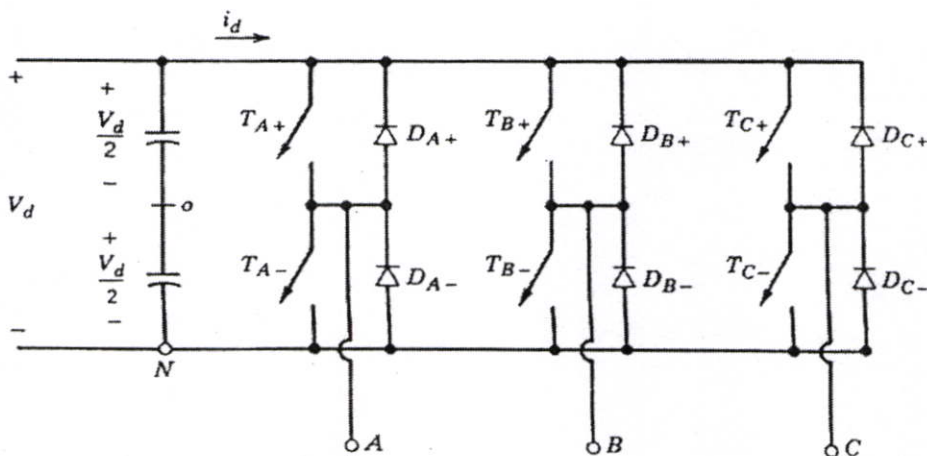


รูปที่ 2.8 โครงสร้างพื้นฐานของระบบเครื่องปรับความเร็วรอบ

เครื่องปรับความเร็วรอบมอเตอร์จะต้องมีความสามารถเปลี่ยนแปลงแรงดันและความถี่ ดังนั้นเครื่องปรับความเร็วรอบที่ดีต้องมีคุณสมบัติพื้นฐานที่สอดคล้องกับความต้องการของมอเตอร์ ดังต่อไปนี้

- สามารถปรับความถี่ได้เป็นสัดส่วนกับความเร็วรอบที่ต้องการ
- สามารถปรับแรงดันเอาต์พุตเพื่อรักษาอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่ให้คงที่ตลอดช่วงแรงบิดคงที่ตามต้องการ
- สามารถจ่ายกระแสได้ตามพิกัดที่ความถี่ใดๆซึ่งอยู่ในช่วงแรงบิดที่ต้องการ

การขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำส่วนใหญ่ มักใช้อินเวอร์เตอร์ 3 เฟสเป็นตัวจ่ายภาระไฟฟ้า 3 เฟส ซึ่งถ้านำอินเวอร์เตอร์เฟสเดียว 3 ตัวมาทำเป็นอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส โดยที่อินเวอร์เตอร์แต่ละตัวสามารถกำเนิดแรงดัน โดยมีมุมต่างเฟสกัน 120 องศาทางด้านเอาต์พุตนั้นต้องการหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อแยกแหว่งอินเวอร์เตอร์กับภาระทางไฟฟ้าในทางปฏิบัติงานจริงๆ แล้วจะไม่มีข้อยกเว้น ข้อเสียอีกประการหนึ่งก็คือต้องใช้อุปกรณ์การสวิตซ์ถึง 12 ตัว การใช้งานอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสส่วนใหญ่จะเป็นวงจรที่ประกอบด้วยวงจรสวิตซ์ 3 กิ่ง ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส

ดังนั้นแรงดันเอาต์พุตในแต่ละกิ่งวงจรจะขึ้นอยู่กับแรงดันดีซี V_d และสถานะการสวิตซ์แต่ละตัวเท่านั้น และแรงดันเอาต์พุตจะแยกอิสระออกจากกระแสไหลลัดเอาต์พุตตั้งแต่สวิตซ์หนึ่งตัวในสองตัวในกิ่งวงจรนั้นจะทำงานเสมอในทุกช่วงเวลาซึ่งถ้าไม่นำผลของช่วงเวลาเพื่อในการสวิตซ์มาพิจารณาแล้วจะเห็นว่าแรงดันทางด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์จะไม่ขึ้นอยู่กับทิศทางของกระแสไหลลัด

2.5.1 PWM อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบแหล่งจ่ายแรงดัน

PWM อินเวอร์เตอร์ 3 เฟสจะคล้ายกับ PWM อินเวอร์เตอร์ 1 เฟส รูปแบบในการมอดูเลตความกว้างของสัญญาณของ PWM อินเวอร์เตอร์ 3 เฟสต้องมีความคมชัดของสัญญาณ และการควบคุมขนาด และความถี่ ของแรงดันเอาต์พุตด้วยการคงที่ V_d เพื่อให้แรงดันเอาต์พุตทั้งสามเฟสมี

ความสัมพันธ์กัน โดยการนำสัญญาณสามเหลี่ยมมาเปรียบเทียบกับสัญญาณไซน์ที่ถูกความถี่ถูกควบคุมให้สัญญาณไซน์แต่ละตัวต่างเฟสกัน 120° ดังแสดงในรูปที่ 2.10 (ก) (ซึ่งค่า m_f มีค่าเท่ากับ 15) ผลของการเปรียบเทียบจะได้ดังในรูปที่ 2.10(ข) ซึ่งเป็นจำนวนขององค์ประกอบเฉลี่ยไฟตรงและแรงดันเอาต์พุต V_{AN} และ V_{BN} ซึ่งได้จากการวัดเมื่ออ้างอิงกับด้านลบของแรงดันเชื่อมโยงคิซี และจะสังเกตเห็นว่าแรงดันเอาต์พุต V_{AB} จะไม่มีองค์ประกอบของแรงดันคิซี เนื่องจากถูกหักลบกันหมดไป(ถ้าแรงดัน V_{AN} และ V_{BN} นั้นสมดุล) เนื่องจากแรงดัน V_{AB} นั้นเกิดจาก $V_{AN} - V_{BN}$ ซึ่งหลักการนี้เหมือนกับอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวที่ใช้เทคนิคการสวิตช์แบบ PWM

ในอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสนั้น ฮาร์มอนิกในแรงดันระหว่างไลน์นั้นเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณา และแรงดันฮาร์มอนิกในแต่ละกิ่งเช่น V_{AN} ในรูปที่ 2.10(ข) จะแสดงให้เห็นถึงฮาร์มอนิก V_{AO} ซึ่งถ้ากำหนดอัตราส่วนของความถี่มอดดูเลท เป็นจำนวนคี่แล้วจะเห็นว่าเฉพาะฮาร์มอนิกคี่เท่านั้นจะเกิดขึ้นในฮาร์มอนิกไซน์แบนด์ โดยศูนย์กลางของฮาร์มอนิกจะอยู่ที่จำนวนอัตราส่วนของความถี่มอดดูเลทชั้น m_f และจะเกิดเป็นจำนวนเท่าของ m_f และเมื่อพิจารณาฮาร์มอนิกที่ m_f ในแรงดัน V_{AN} และ V_{BN} คือ 120° เท่าของ m_f ($120^\circ m_f$) ซึ่งความต่างเฟสนี้จะมีค่าสมมูลเป็นศูนย์(เป็นจำนวนเท่าของ 360°)ถ้า m_f เป็นจำนวนคี่และเป็น 3 เท่าซึ่งสิ่งที่สอดคล้องกันก็คือฮาร์มอนิกที่ m_f จะปรากฏที่แรงดันไลน์เอาต์พุต V_{AB} ด้วยเหตุผลเดียวกันนี้การใช้งาน PWM อินเวอร์จึงเลือกค่าอัตราส่วนความถี่มอดดูเลทเป็นจำนวนคี่ 3 เท่า ($3m_f$) เพื่อกำจัดฮาร์มอนิกคู่ด้วย

การพิจารณา PWM พอสรุปได้ดังนี้

- 1) กรณีที่ค่า m_f มีค่าต่ำค่า m_f ควรจะเป็นจำนวนคี่ และเป็น PWM ชนิดซิงโครนัส PWM เพื่อจัดฮาร์มอนิกคู่ที่ จะเกิดขึ้นและมากไปกว่านั้นค่า m_f ควรเป็นค่าจำนวนเท่าของ 3 เพื่อที่ขจัดค่าฮาร์มอนิกในแรงดันระหว่างไลน์
- 2) กรณีที่ค่า m_f มีค่าสูง ค่าแอมพลิจูดของฮาร์มอนิกส้อยที่ เกิดจากอะซิงโครนัส PWM จะมีขนาดต่ำเมื่อค่า m_f สูงๆ ดังนั้นที่ค่า m_f สูงๆ สามารถใช้อะซิงโครนัส PWM ในขณะที่ความถี่ของรูปคลื่นสามเหลี่ยมคงที่ และความถี่ของแรงดันควบคุมเปลี่ยนแปลงได้ซึ่งผลของค่า m_f ในขณะที่อินเวอร์เตอร์จ่ายโหลด เช่น มอเตอร์ ผลของฮาร์มอนิกส้อยจะเกิดขึ้นกับ กระแสของมอเตอร์ ดังนั้นในกรณีของอะซิงโครนัส PWM ก็ควรหลีกเลี่ยงการใช้งานเมื่อความถี่สามเหลี่ยมนั้นมีค่าต่ำ
- 3) กรณีโอเวอร์มอดดูเลท ($m_a > 1.0$) จะไม่มีผลกับค่าของ m_f แต่ถ้าใน สภาวะที่สำคัญๆ ค่าของ m_f ที่มีค่าน้อยก็ควรจะพิจารณา

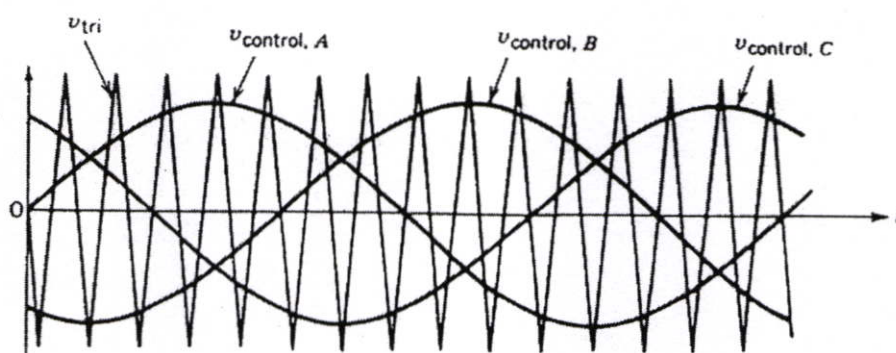
2.5.2 การมอดดูเลตเป็นเชิงเส้น ($m_a \leq 1.0$)

ในช่วงที่เป็นเชิงเส้น ($m_a \leq 1.0$) ในส่วนของความถี่ของแรงดันมูลฐานเอาท์พุทจะมีการเปลี่ยนแปลงเป็นเชิงเส้นกับขนาดของอัตราส่วนในการมอดดูเลต m_a รูปที่ 2.10(ข) แสดงค่าความสูงในส่วนของความถี่มูลฐานในกึ่งที่ 1 ของอินเวอร์เตอร์ขนาดของแรงดันมูลฐานคือ

$$\left(\hat{V}_{AN} \right)_1 = m_a \frac{V_d}{2} \tag{2.31}$$

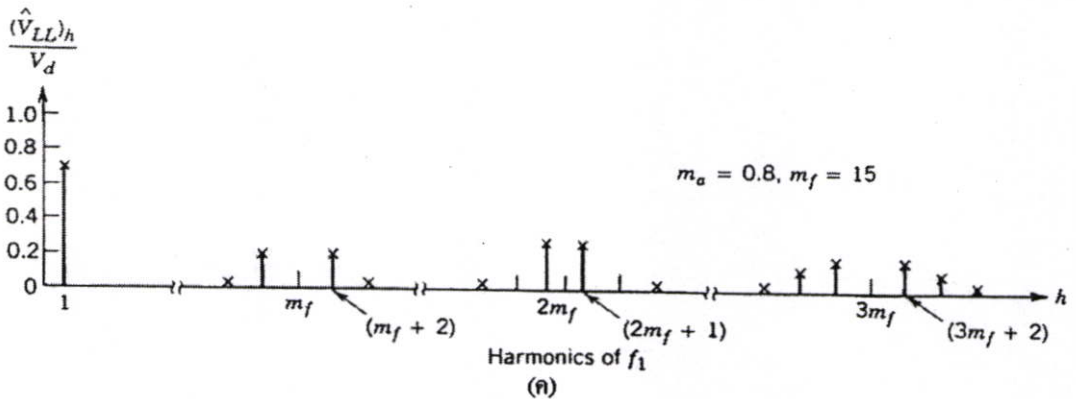
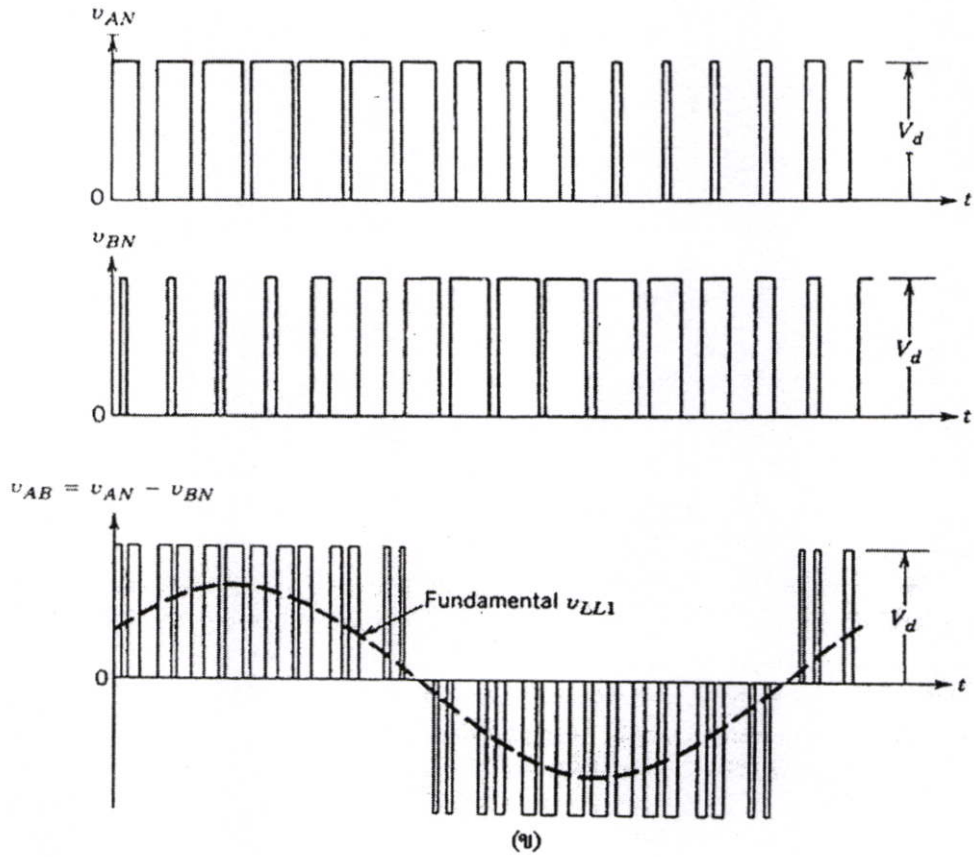
ดังนั้นแรงดันระหว่างไลน์ที่เป็นค่าอาร์เอ็มเอส ซึ่งต่างเฟสกัน 120° สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\begin{aligned} V_{LL1} &= \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \left(\hat{V}_{AN} \right)_1 \\ (\text{line-line rms}) & \\ &= \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} m_a V_d \\ &\cong 0.612 m_a V_d \quad (m_a \leq 1.0) \end{aligned} \tag{2.32}$$



(ข)

รูปที่ 2.10 สัญญาณ PWM 3 เฟส และสเปกตรัมฮาร์มอนิก



รูปที่ 2.10 (ต่อ)

2.5.3 การโอเวอร์มอดูเลต ($m_a > 1.0$)

ในการโอเวอร์มอดูเลต PWM ขนาดความสูงของสัญญาณแรงดันควบคุมเกินขนาดความสูงของสัญญาณสามเหลี่ยมอยู่ในช่วงที่ไม่เป็นเชิงเส้นในโหมคการทำงานนี้ความสูงของแรงดันมูลฐานมีการเพิ่มขึ้นไม่เป็นสัดส่วนกับ m_a แสดงไว้ในรูปที่ 2.11 ซึ่งค่าของแรงดันอาร์เอ็มเอสระหว่างไลน์ V_{LL1} ที่ความถี่มูลฐานถูกพล็อตเพื่อแสดงความสัมพันธ์กับฟังก์ชันดัชนีการมอดูเลต m_a คล้ายกับ PWM ในอินเวอร์เตอร์เฟสเดียว ถ้าค่าของ m_a สูงพอ PWM จะกลายเป็นสัญญาณของ

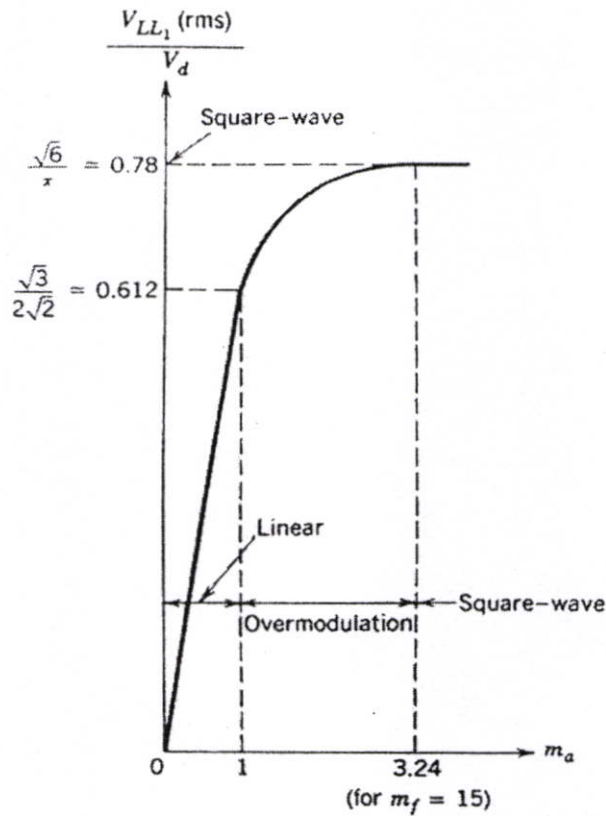
อินเวอร์เตอร์รูปคลื่นกึ่งสี่เหลี่ยมจัตุรัส ผลที่ได้ค่าแรงดันไลน์สูงสุดของ V_{LL} จะเท่ากับ $0.78V_d$ จะทำการอธิบายในหัวข้อต่อไป

ในย่านโอเวอร์มอดคูเลต ($m_a > 1.0$)เปรียบกับ ($m_a \leq 1.0$) จะมีฮาร์มอนิก ปรากฏรอบๆ (Harmonic side band)ความถี่ฮาร์มอนิก m_f และแต่ละเท่าของ m_f จะมีค่ามากกว่า อย่างไรก็ตามฮาร์มอนิกที่เป็นนัยสำคัญ จะไม่เกิดขึ้นมากนัก ดังนั้นกำลังการสูญเสียที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของฮาร์มอนิกด้านข้างไม่มากนัก แต่ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของโหลด และความถี่สวิตซ์ที่เลือกใช้ ซึ่งบางครั้งการสูญเสียฮาร์มอนิกในย่านโอเวอร์มอดคูเลต จะมีค่าต่ำกว่าการการสูญเสียฮาร์มอนิกในย่านมอดคูเลตเชิงเส้น

ตารางที่ 2.1 ฮาร์มอนิกของ V_{LL} สำหรับ m_f เลขคี่ที่มีค่าสูง

h \ m_a	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
1	0.122	0.245	0.367	0.490	0.612
$m_f \pm 2$	0.010	0.037	0.080	0.135	0.195
$m_f \pm 4$				0.005	0.011
$2m_f \pm 1$	0.116	0.200	0.227	0.192	0.111
$2m_f \pm 5$				0.008	0.020
$3m_f \pm 2$	0.027	0.085	0.124	0.108	0.038
$3m_f \pm 4$		0.007	0.029	0.064	0.096
$4m_f \pm 1$	0.100	0.096	0.005	0.064	0.042
$4m_f \pm 5$			0.021	0.051	0.073
$4m_f \pm 7$				0.010	0.030

Note: $(V_{LL})_h/V_d$ are tabulated as a function of m_a where $(V_{LL})_h$ are the rms values of the harmonic voltages.



รูปที่ 2.11 อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส; $V_{LL1,rms} / V_d$ ด้วยฟังก์ชันของ m_a

2.5.4 การทำงานรูปคลื่นกึ่งสี่เหลี่ยมจัตุรัสในอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส

ถ้าแรงดันไฟตรงอินพุต V_d ถูกควบคุม ทำให้อินเวอร์เตอร์ในรูปที่ 2.12 (ก) สามารถที่จะทำงานในโหมดที่เป็นรูปคลื่นกึ่งสี่เหลี่ยมจัตุรัส ด้วยค่า m_a ที่มีขนาดสูงพอที่ทำให้ PWM กลายเป็นรูปคลื่นกึ่งสี่เหลี่ยมจัตุรัส การทำงานและสัญญาณรูปคลื่นแรงดันได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.12 (ข) ดังนั้นจึงหะในการสวิตช์แต่ละตัวทำงานที่ 180° (อัตราส่วนการนิกระแส 50%) ดังนั้นในทุกช่วงเวลาจะมีสวิตช์ทำงานสามตัว

ในการทำงานโหมดที่เป็นรูปคลื่นกึ่งสี่เหลี่ยมจัตุรัสอินเวอร์เตอร์จะไม่สามารถควบคุมความสูงของแรงดันเอซีเอาต์พุตดังนั้นต้องทำการควบคุมดิซีอินพุต เพื่อควบคุมขนาดของแรงดันเอาต์พุตได้ แรงดันไลน์ที่ความถี่มูลฐานสามารถหาได้จากสมการที่ 2.32 เป็นการทำงานของอินเวอร์เตอร์ในกึ่งที่ 1 ในโหมดรูปคลื่นกึ่งสี่เหลี่ยมจัตุรัส

$$V_{LL1,rms} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \frac{4}{\pi} \frac{V_d}{2}$$

$$= \frac{\sqrt{6}}{\pi} V_d$$

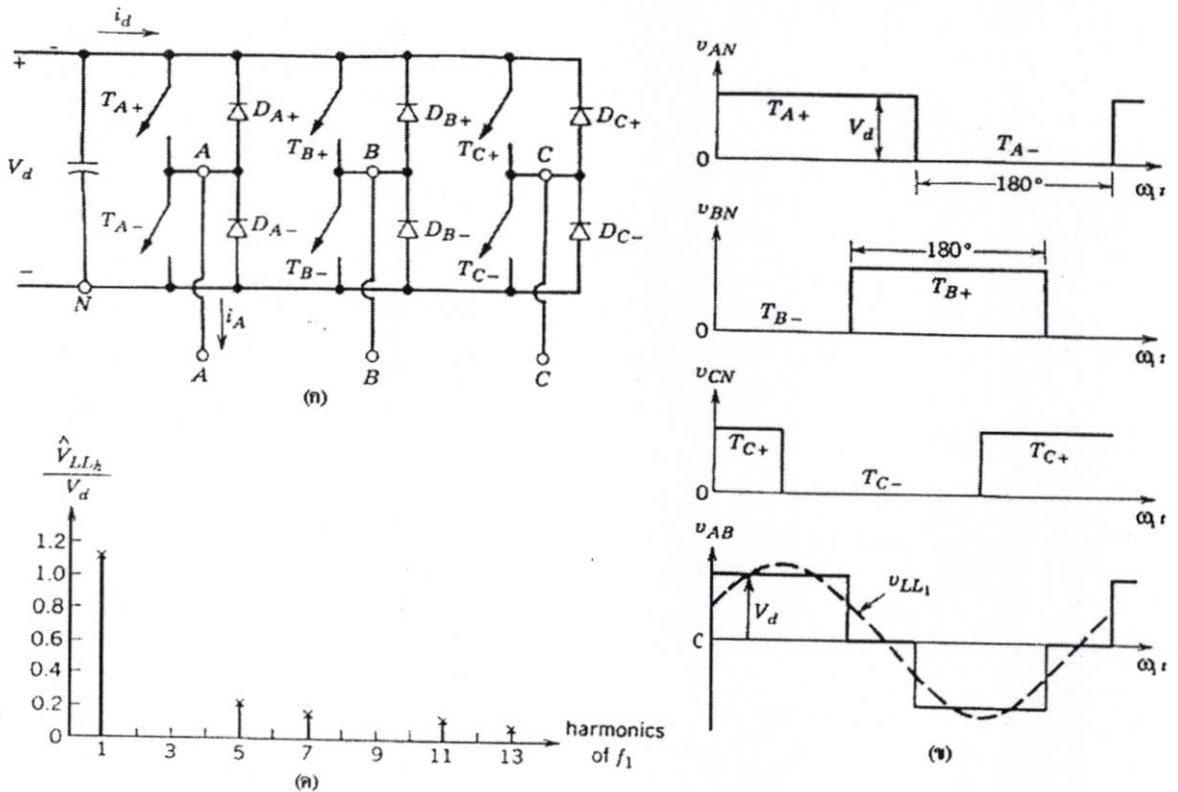
$$\cong 0.78 V_d \tag{2.33}$$

รูปสัญญาณแรงดันเอาต์พุตระหว่างไลน์ ไม่ขึ้นอยู่กับโหลด และประกอบด้วยฮาร์มอนิก ลำดับที่ $(6n \pm 1; n = 1, 2, \dots)$ ซึ่งแอมพลิจูดของฮาร์มอนิกลดส่วนกลับ กับลำดับฮาร์มอนิกแสดงใน รูปที่ 2.12 (ค)

$$V_{LL1} = \frac{0.78}{h} V_d \tag{2.34}$$

เมื่อ

$$h = 6n \pm 1 \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$



รูปที่ 2.12 อินเวอร์เตอร์แบบรูปคลื่นกึ่งตัวนำ 3 เฟส

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้เครื่องปรับความเร็วรอบที่มีใช้งานจริงในทางอุตสาหกรรมยี่ห้อ FRECON INVERTER รุ่น F 001 i-4 3 เฟส Source 3ϕ 380V 50/60 Hz Output 3.4 A 0-300 Hz ขับเคลื่อนมอเตอร์ 3 เฟส ยี่ห้อ MITSUBISHI ขนาด 1 HP แรงดัน 220/380 V กระแส 3.0/2.0 A 4 Pole , 50 Hz และความเร็วรอบที่พิกัด 1,488 rpm. และ ยี่ห้อ MITSUBISHI ขนาด 2 HP แรงดัน 220/380 V กระแส 6.0/3.5 A 4 Pole , 50 Hz และความเร็วรอบที่พิกัด 1,450 rpm.

2.6 สรุป

ในบทนี้เนื้อหาส่วนใหญ่จะเป็นทฤษฎีพื้นฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำและ ชนิดของ อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ปรับความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำซึ่งมีจุดประสงค์ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการ วิเคราะห์ค่าความสูญเสียในแกนเหล็กในบทต่อไป

บทที่ 3

การวิเคราะห์ค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก

และ ทฤษฎีของ Search coil

3.1 บทนำ

ในบทนี้จะเป็นการนำเสนอทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่าความสูญเสียในแกนเหล็กจากการวัดความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กโดยตรงที่แกนเหล็กของมอเตอร์เหนี่ยวนำเพื่อนำไปวิเคราะห์หาการสูญเสียฮิสเตอร์รีซิส และการสูญเสียจากกระแสไหลวนในเหล็กตามทฤษฎีของ Search coil

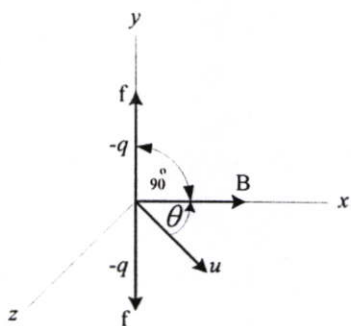
3.2 ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก(Magnetic Flux Density)

สนามแม่เหล็กเกิดขึ้นมาจากประจุไฟฟ้าที่มีการเคลื่อนที่ คุณสมบัติของการเกิดสนามแม่เหล็กในรูปของค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก B สามารถพิจารณาได้จากแรงที่กระทำต่อประจุที่เคลื่อนที่ในรูปสมการเวกเตอร์ดังนี้

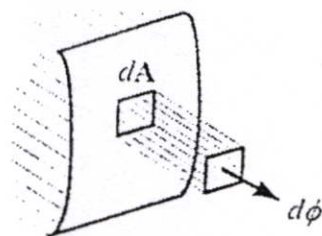
$$f = qu \times B \quad (3.1)$$

โดยกำหนดให้ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก B จะมีค่าเท่ากับ 1 tesla (Wb/m^2) เมื่อประจุไฟฟ้า q ขนาด 1 coulomb เคลื่อนที่ไปในทิศทางตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กด้วยความเร็ว u เท่ากับ 1 meter per second ทำให้เกิดค่าแรง f เท่ากับ 1 newton จากรูปที่ 3.1(ก) ถ้าเวกเตอร์ u มีมุม θ เมื่อเปรียบเทียบกับเวกเตอร์ B จะได้ทิศทางของเวกเตอร์ f อยู่ในแนวตั้งฉากกับระนาบของ u และ B โดยมีขนาดเท่ากับ $quB \sin \theta$ และจากนิยามของค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กจะได้ว่า ถ้าอินทิเกรตค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กบนพื้นที่หนึ่งๆ ดังรูป 3.1(ข) จะกำหนดให้เป็นค่าเส้นแรงแม่เหล็ก(magnetic flux) มีหน่วยเป็นwebers(Wb) ดังนี้

$$\phi = \int B \cdot dA = B \cdot A \quad (3.2)$$



(ก)



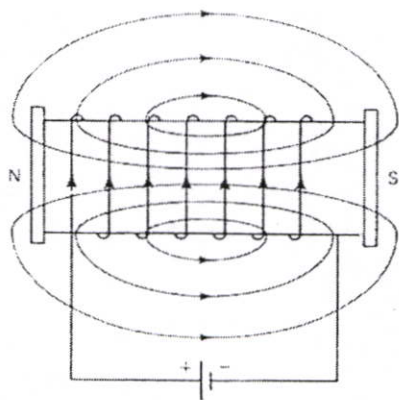
(ข)

รูปที่ 3.1 ความสัมพันธ์ของเวกเตอร์ f, u, B และเส้นแรงแม่เหล็ก ϕ

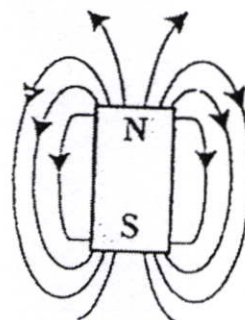
ในการอธิบายพฤติกรรมของสนามแม่เหล็ก เส้นแรงแม่เหล็กจะถูกแทนด้วยแนวเส้น(line) ซึ่งจะอยู่ในแนวเส้นสัมผัสกับเวกเตอร์ B ดังแสดงในรูปที่ 3.1(ก) แนวเส้นจะอยู่ชิดกันมากถ้าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูง สิ่งสำคัญอย่างหนึ่งที่ควรทราบก็คือ จะเห็นได้ว่าจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กที่พุ่งออกจากพื้นที่ผิวใดๆ จะต้องเท่ากับจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กที่พุ่งเข้าพื้นที่ผิวนั้นๆ ซึ่งหมายความว่าแนวของเส้นแรงแม่เหล็กต้องมีความต่อเนื่องกันเสมอและจากรูปที่ 3.1(ข) แสดงให้เห็นถึงแนวเส้นแรงแม่เหล็กเป็นวงรอบปิดอยู่ภายในขั้วแม่เหล็กโดยสามารถแสดงได้ดังสมการที่

3.3

$$\oint B \cdot dA = 0 \tag{3.3}$$



(ก) สนามแม่เหล็กจากขดโซลินอยด์



(ข) สนามแม่เหล็กจากขั้วแม่เหล็ก

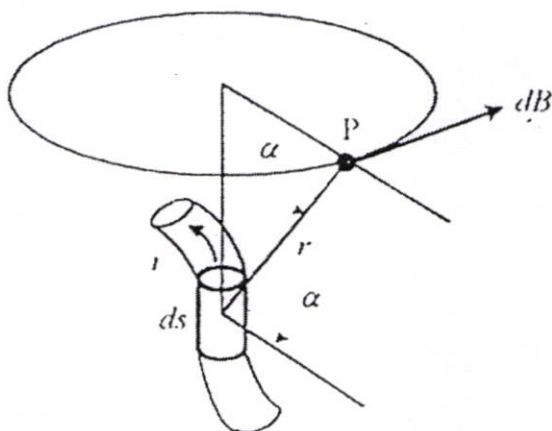
รูปที่ 3.2 แนวของสนามแม่เหล็ก

3.3 สนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้า(Magnetic field due to currents)

ในการสร้างสนามแม่เหล็กโดยใช้กระแสไฟฟ้าไหลในขดลวดทองแดงที่พันเป็นขดลวดสามารถอธิบายได้โดยการพิจารณาจากผลที่เกิดขึ้น เมื่อมีกระแส i ไหลผ่านชิ้นส่วนเล็กๆ ds ของตัวนำไฟฟ้างดรูปที่ 3.3 ถ้าประจุไฟฟ้า dq ทั้งหมดในชิ้นส่วนนั้นเคลื่อนที่ผ่านระยะทาง ds ในเวลา dt แล้ว ความเร็วของประจุ u จะเท่ากับ ds/dt ดังนั้น

$$ids = \frac{dq}{dt} (udt) = dq u \quad (3.4)$$

จากสมการจะเห็นได้ว่าค่ากระแส i ในชิ้นส่วน ds สามารถเปรียบเทียบกับประจุ dq ที่มีความเร็ว u และจากการทดลองของแอมแปร์ (Andre Ampere) ในปี ค.ศ. 1820 พบว่าการที่มีกระแส i ในชิ้นส่วน ds จะทำให้เกิดค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก dB ขึ้นที่จุด P ในสารตัวกลางเป็นไปตามสมการที่ 3.5



รูปที่ 3.3 สนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้า

$$dB = \mu \frac{ids \cos \alpha}{4\pi r^2} \quad (3.5)$$

ค่าตัวประกอบ μ แสดงถึงคุณสมบัติของสารตัวกลางรอบๆ ตัวนำไฟฟ้าซึ่งเรียกว่าค่าความซึมซาบแม่เหล็กของสารตัวกลางมีหน่วยเป็น Webers per ampere-meter หรือ Henrys per meter ทิศทางของเวกเตอร์ dB จะเป็นแนวเส้นสัมผัสกับวงกลมที่มีจุดศูนย์กลางอยู่ในแนว ds และลากผ่านจุด P ซึ่งสามารถกำหนดเป็นกฎพื้นฐานได้ว่า ถ้าใช้มือขวากำลวดตัวนำไว้โดยที่นิ้วชี้แสดง

ทิศทางของกระแส i นิ้วมือที่เลื้อยจะแสดงทิศทางของสนามแม่เหล็ก B ที่เกิดขึ้น สารตัวกลางชนิดต่างๆ จะสามารถแสดงพฤติกรรมของการเกิดสนามแม่เหล็กได้โดยการกำหนดให้สารแต่ละชนิดมีค่าความซึมซาบแม่เหล็ก μ ซึ่งแสดงได้ดังสมการ

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad (3.6)$$

โดยกำหนดให้ μ_0 เป็นค่าความซึมซาบแม่เหล็กของอากาศ (free space) ซึ่งเป็นค่าคงที่เท่ากับ $4\pi \times 10^{-7}$ henrys per meter และ μ_r เป็นค่าความซึมซาบสัมพัทธ์ (relative permeability) ของสารตัวกลางซึ่งไม่มีหน่วย จะเห็นได้ว่าสมการที่ 3.6 ค่า μ_r จะแสดงค่าที่เป็นจำนวนเท่าของค่า μ_0 หมายความว่าสารตัวกลางทุกชนิดจะกำหนดให้มีค่า μ_0 ที่เหมือนกัน แต่จะมีค่า μ_r ที่แตกต่างกัน และจากสมการที่ 3.6 แสดงให้เห็นว่าสารตัวกลางชนิดใดที่มีค่า μ_r สูงๆ จะสามารถทำให้เกิดค่าสนามแม่เหล็ก B ได้มาก สารตัวกลางส่วนใหญ่แล้วจะมีค่า μ_r ประมาณเท่ากับ 1 แต่สารตัวกลางบางชนิดจะมีค่า μ_r ที่มากกว่า 1 ดังนั้นจะเห็นได้ว่าค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากกระแสในขดลวดที่พันอยู่บนสารตัวกลางที่มีค่า μ_r มากๆ อาจจะมีค่าสูงกว่าที่เกิดขึ้นจากสารตัวกลางที่มีค่า μ_r ต่ำๆ ถึงแม้ว่าจะกำหนดให้ค่ากระแสไฟฟ้าและจำนวนรอบของขดลวดที่ใช้มีค่าเท่ากันก็ตาม ดังนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงผลของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากสารตัวกลางที่ต่างชนิดกันดังกล่าวจะกำหนดให้มีค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก H (Magnetic field intensity) ซึ่งมีหน่วยเป็น ampere-turns per meter โดยอยู่ในรูปสมการ

$$H = \frac{B}{\mu} \quad (3.7)$$

จากคุณลักษณะต่างๆ ของค่า μ_r ที่กล่าวมาข้างต้นจะสามารถกำหนดให้สารแม่เหล็กออกได้เป็น 3 ประเภทดังนี้

1. สาร Diamagnetic เป็นสารที่มีค่า μ_r น้อยกว่า 1 เช่น บิสมัท (bismuth) ตะกั่ว เป็นต้น สารประเภทนี้จะเกิดค่าสนามแม่เหล็กได้น้อยมาก หรือมีสภาพที่อาจจะเรียกว่าเป็นฉนวนแม่เหล็ก
2. สาร Paramagnetic เป็นสารที่มีค่า μ_r ประมาณเท่ากับ 1 หรือมากกว่า 1 เล็กน้อย เช่น อากาศ ทองแดง เป็นต้น ดังนั้นสารประเภทนี้จะกำหนดว่ามีค่า μ คงที่ประมาณเท่ากับ μ_0
3. สาร Ferromagnetic เป็นสารที่มีค่า μ_r ประมาณมากกว่า 1 ($10^2 \rightarrow 10^6$) เช่น เหล็ก นิกเกิล เป็นต้น ดังนั้นสารประเภทนี้จะเกิดค่าสนามแม่เหล็กได้มาก แต่อย่างไรก็ตาม พฤติกรรมค่า μ_r ของสารประเภทนี้จะมีความไม่คงที่เมื่อค่าความเข้มแม่เหล็ก H เปลี่ยนแปลงไป

จากสมการที่ 3.7 จะแสดงให้เห็นว่าการเกิดค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กชนิดต่างๆ จะขึ้นอยู่กับค่าความซึมซาบแม่เหล็ก และค่าความเข้มแม่เหล็กดังนี้

สาร Paramagnetic

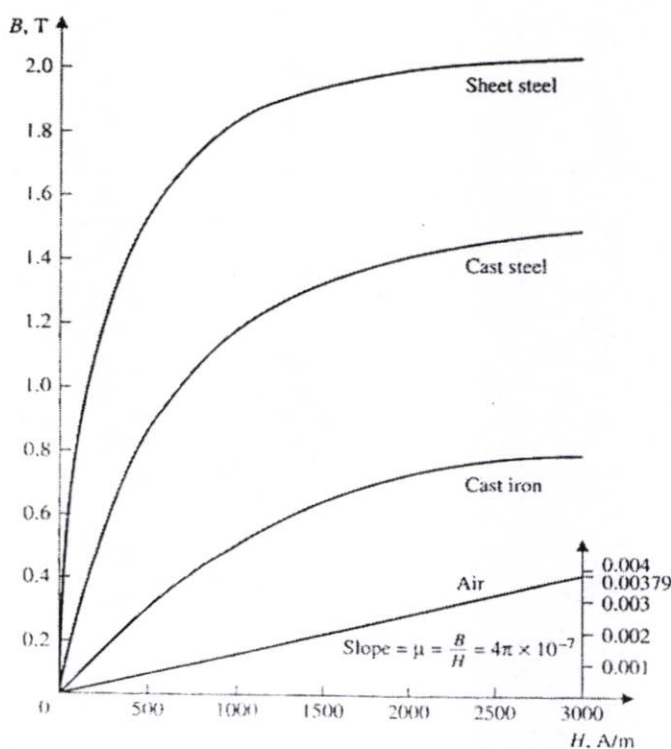
$$B = \mu H = \mu_0 H \quad (3.8)$$

สาร Ferromagnetic

$$B = \mu H = \mu_0 \mu_r H \quad (3.9)$$

3.4 เส้นโค้งกำเนิดแม่เหล็ก(Magnetization Curve)

พฤติกรรมของการเกิดสนามแม่เหล็กของสารแม่เหล็กจะพิจารณาได้จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่า B และ H ที่ได้จากสมการที่ 3.8 และ 3.9 ดังรูปที่ 3.4 จะเห็นได้ว่าสำหรับสาร Paramagnetic ความสัมพันธ์ของกราฟจะเป็นเชิงเส้น (linear) หมายความว่าเมื่อให้ค่า H ทำให้เกิดค่า B ที่เป็นสัดส่วนเดียวกัน แต่ค่า B ที่ได้จะมีค่าต่ำมากเมื่อเทียบกับสาร Ferromagnetic ซึ่งจะให้ค่า B ที่สูงกว่ามาก แต่อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์ของกราฟของสาร Ferromagnetic จะมีลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear)

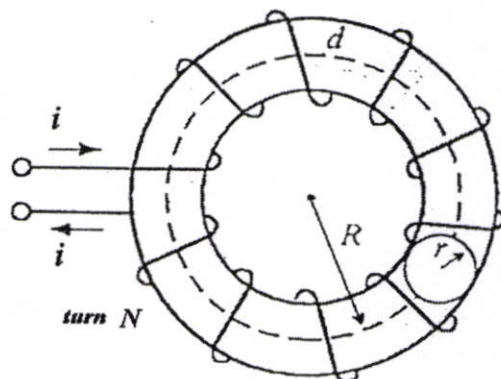


รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ของค่า B - H ของสาร Ferromagnetic ชนิดต่างๆ

จากกราฟในรูปที่ 3.4 จะเห็นได้ว่าพฤติกรรมการเกิดค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กของสาร Ferromagnetic ชนิดต่างๆ จะมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะที่เมื่อมีค่า H เพิ่มขึ้นในช่วงแรกจะเกิดค่า B ได้มาก (μ_r เมื่อมีค่ามาก) แต่เมื่อมีค่า H เพิ่มขึ้นในช่วงหลังค่า B ที่ได้จะมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก (μ_r มีค่าลดลงอย่างมาก) ซึ่งจะกำหนดให้เกิดสภาพที่เรียกว่าเกิดการอิ่มตัวของสนามแม่เหล็ก (Saturation) หมายความว่าสาร Ferromagnetic จะเกิดค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กได้สูงสุดที่ค่าๆหนึ่ง ซึ่งถ้ายังคงให้ค่า H เพิ่มขึ้นต่อไปอีกพลังงานส่วนใหญ่จะไม่สามารถเปลี่ยนแปลงเป็นสนามแม่เหล็กได้ ดังนั้นพลังงานเหล่านี้จะกลายเป็นค่าความสูญเสียซึ่งจะอยู่ในรูปของความร้อนอาจทำให้เกิดความเสียหายได้

3.5 แรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetomotive Force)

เมื่อมีขดลวดจำนวน N รอบ พันอยู่รอบแกนแบบวงแหวนทอรอยด์ซึ่งมีรูปร่างดังรูปที่ 3.5 ถ้ามีกระแส i ไหลผ่านขดลวด N รอบ จะเห็นได้ว่าค่าปริมาณกระแสทั้งหมดที่ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กในแนวรอบปิด (closed path) d มีค่าเท่ากับ Ni ซึ่งกำหนดให้เรียกชื่อว่าเป็นค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (magnetomotive force)



รูปที่ 3.5 ขดลวดพันรอบแกนวงแหวนทอรอยด์

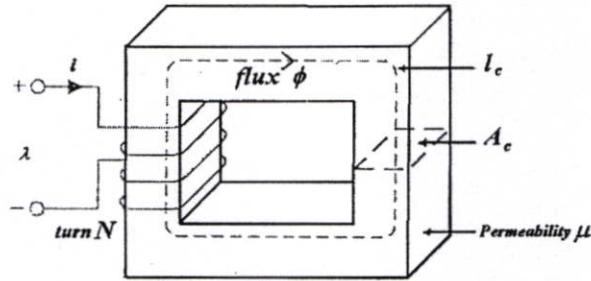
จากกฎของแอมแปร์ (Ampere's law) จะได้ว่า

$$Ni = \oint H \cdot dl = H(2\pi r) \quad (3.10)$$

$$B = \mu H = \frac{\mu}{2\pi r} Ni \quad (3.11)$$

$$\phi = BA = \frac{\mu}{2\pi r} Ni(\pi r^2) = \frac{\mu l r^2}{2R} Ni \quad (3.12)$$

โดยที่ R เป็นรัศมีเฉลี่ยของวงแหวน และ r เป็นรัศมีของพื้นที่หน้าตัดของแกน



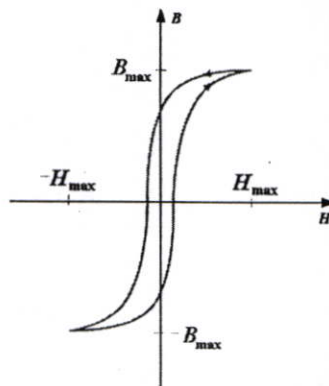
รูปที่ 3.6 ขดลวดพันรอบแกนเหล็ก

จากรูปที่ 3.6 แสดงวงจรแม่เหล็กที่มีขดลวด N รอบ พันรอบแกนเหล็กเมื่อกำหนดให้ H_c เป็นความเข้มสนามแม่เหล็กในส่วนที่เป็นแกนเหล็กจะได้ว่า

$$Ni = \oint H \cdot dl = H_c l_c \quad (3.13)$$

3.6 การวิเคราะห์ค่าความสูญเสียของแกนเหล็ก

การสูญเสียในแกนเหล็กโดยทั่วไป จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ การสูญเสียฮิสเตอร์รีซิส (Hysteresis loss) และ การสูญเสียกระแสไหลวนในแกนเหล็ก (Eddy-current loss) เป็นผลมาจากความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก $B(t)$ เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา นอกจากนี้ค่าความสูญเสียของแกนเหล็กยังขึ้นอยู่กับ ค่าความต้านทานรีลัคแตนซ์ และการออกแบบรูปทรงของวัสดุ ที่นำมาใช้ ผลของการสูญเสียฮิสเตอร์รีซิส



รูปที่ 3.7 ฮิสเตอร์รีซิสลูป (Hysteresis loop)

และการสูญเสียกระแสไหลวนในแกนเหล็กจะอยู่ในรูปของความร้อนที่ปรากฏขึ้นในแกนเหล็ก พื้นที่ของฮีสเตอร์รีซิสสูง จะแสดงให้เห็นพลังงานที่สูญเสียใน 1 ไซเคิล เกิดขึ้นในปริมาตร 1 หน่วยของวัสดุที่นำมาใช้เป็นแกนเหล็กการสูญเสียฮีสเตอร์รีซิสต่อ 1 ไซเคิลในแกนเหล็กที่มี ปริมาตร 1 หน่วย การสูญเสียฮีสเตอร์รีซิสจะขึ้นอยู่กับความสูง Peak-Peak ของความหนาแน่นของ เส้นแรงแม่เหล็ก อัตราการเปลี่ยนแปลงของ เส้นแรงแม่เหล็กในช่วง t_1 ถึง t_2 สามารถเขียนสมการ ของการสูญเสียฮีสเตอร์รีซิสได้ดังนี้

$$W = \int_{t_1}^{t_2} p dt \quad (3.14)$$

$$= \int_{t_1}^{t_2} ei \cdot dt \quad (3.15)$$

จาก Faraday'S Law

$$W = \int N \frac{d\phi}{dt} \cdot i dt \quad (3.16)$$

$$= \int_{\phi_1}^{\phi_2} Ni \cdot d\phi \quad (3.17)$$

จาก $\phi = BA$ และ $i = \frac{Hl}{N}$ ดังนั้น

$$W = \int_{B_1}^{B_2} N \frac{Hl}{N} \cdot dBA \quad (3.18)$$

$$W = Al \int_{B_1}^{B_2} H \cdot dB \quad (3.19)$$

เมื่อ $V_{CORE} = Al$ เป็นปริมาตรของแกนเหล็ก การอินทิเกรตเพื่อหาพื้นที่ในฮีสเตอร์รีซิสสูง คือพลังงานที่เกิดขึ้นมีการเปลี่ยนแปลงใน 1 ช่วงเวลา

$$W \text{ per cycle} = V_{CORE} \oint H dB \quad (3.20)$$

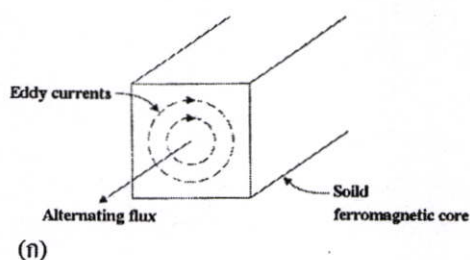
$$W \text{ per cycle} = V_{CORE} \times \text{area of } B\text{-}H \text{ Loop} \quad (3.21)$$

$$W \text{ per cycle} = V_{CORE} \times W_h \quad (3.22)$$

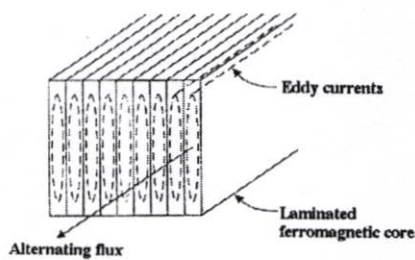
เมื่อทำการอินทิเกรตเส้นปิด (Closed line Integral) ในพื้นที่ของฮิสเตอร์รีซิส แสดงให้เห็นการสูญเสียฮิสเตอร์รีซิสในรูปแบบที่ใช้กันอยู่โดยทั่วไปดังนี้

$$P_{\text{hysteresis}} = k_h f \hat{B}^n \quad (3.23)$$

ค่าของ k_h เป็น สัมประสิทธิ์การสูญเสียฮิสเตอร์รีซิสที่ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของแกนเหล็ก และปริมาตรของเหล็ก เลขยกกำลัง n มีค่าอยู่ระหว่าง 1.5 ถึง 2.5 ในงานวิจัยนี้ค่า \hat{B} มีค่าอยู่ระหว่าง 0.1-1.2 wb/m² จึงใช้ค่า n เท่ากับ 2 f คือความถี่, \hat{B} เป็นค่าสูงสุดของความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก เมื่อความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลง เส้นแรงแม่เหล็กที่ไหลอยู่ในแกนเหล็กขุดตัวและขยายตัวตัดผ่านแกนเหล็กเหนี่ยวนำให้เกิด แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำไหลวนในแกนเหล็ก ซึ่งเรียกว่า "Eddy current" กระแสไหลวนนี้ จะทำให้เกิดการสูญเสียในรูปของความร้อน และการสูญเสียอำนาจแม่เหล็ก



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.8 การเกิดกระแสไหลวน (ก) ในแกน ferromagnetic ดัน
(ข) ในแกน ferromagnetic ที่เป็นแผ่นลามิเนต

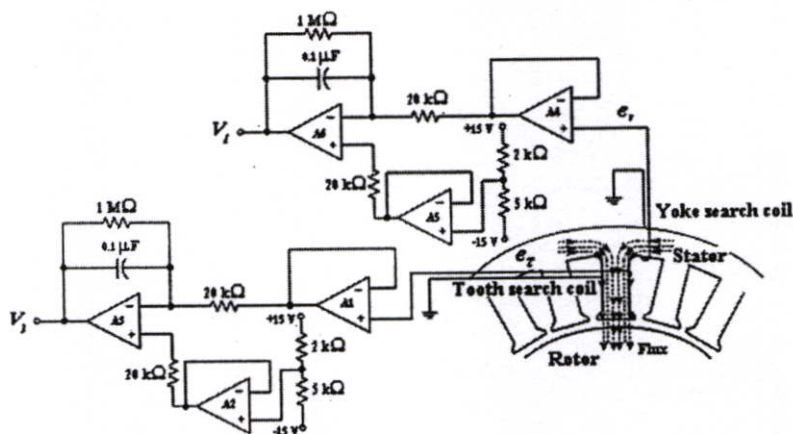
กระแสไหลวนสามารถที่จะลดด้วยการเพิ่มความต้านทานโดยการนำเหล็กแผ่นบางๆมาซ้อนกันเป็นแกน เหล็กแผ่นนี้เรียกว่า Laminated sheet ดังในรูปที่ 3.8(ข) ต้องทำการป้องกันกระแสไฟฟ้าไหลระหว่างแผ่นเหล็กจะต้องเคลือบฉนวนวานิชไว้ที่ผิว ค่าความสูญเสียของกระแสไหลวนแสดงไว้ดังนี้

$$\bar{P}_{eddy} = k_e f^2 B^2 \quad (3.24)$$

เมื่อ k_e เป็น สัมประสิทธิ์การสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่นำมาใช้เป็นแกนเหล็ก และความหนาของ Laminated sheet สามารถนำมาเขียนเป็นค่าความสูญเสียรวมที่เกิดขึ้นในแกนเหล็กได้ดังนี้

$$\bar{P}_{core} = \bar{P}_{hysteresis} + \bar{P}_{eddy} = k_h f B^n + k_e f^2 B^2 \quad (3.25)$$

3.7 ทฤษฎีของ Search coil



รูปที่ 3.9 การวัดเส้นแรงแม่เหล็กโดยใช้ขดลวดเหนี่ยวนำ

เมื่อทำการพันขดลวดเหนี่ยวนำ(Search Coil) 1 รอบ เข้าไปที่Yoke และTeethรอบพื้นที่หน้าตัด A_1 และ A_2 เหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า e_1 , e_2 ป้อนผ่านวงจรตรวจจับแบบอินทิเกรตเตอร์ จะเปลี่ยนให้เป็นสัญญาณของเส้นแรงแม่เหล็ก(V_1 , V_2) ดังรูปที่ 3.9

$$e_r = \frac{d\Phi_T}{dt} = A_T \cdot \frac{dB_T}{dt} \quad (3.26)$$

เมื่อ

$$B = \hat{B}_T \sin \omega t \quad (3.27)$$

\hat{B}_T เป็นความหนาแน่นสูงสุดของเส้นแรงแม่เหล็กที่ Stator Teeth จากนั้นทำการดิฟเฟอเรนเชียลสมการที่(3.27)

$$\left(\frac{dB}{dt} \right) = 2\pi f \hat{B}_T \cos \omega t \quad (3.28)$$

$$\left(\frac{dB}{dt} \right)_{rms} = \frac{2\pi f}{\sqrt{2}} \hat{B}_T \quad (3.29)$$

จากสมการที่(3.24) , (3.29) สามารถคำนวณหาค่าความสูญเสียที่เกิดจากกระแสไหลวนที่ Stator Teeth ได้ดังนี้

$$\bar{P}_{eddy} = k_e f^2 \hat{B}^2 = \frac{k_e}{2\pi^2} \left(\frac{dB}{dt} \right)_{rms}^2 = \frac{k_e}{2\pi^2 T} \int_0^T \left(\frac{dB}{dt} \right)^2 dt \quad (3.30)$$

ค่าความสูญเสียที่เกิดจากกระแสไหลวนในแกนเหล็กทั้งหมดจะได้จากผลรวมของค่าความสูญเสียจากกระแสไหลวนที่ Stator Teeth และ Stator Yoke จะได้ว่าเท่ากับ

$$P_e = \frac{k_e \delta}{2\pi^2 T} \left[\frac{V_T}{A_T} \int_0^T e_T^2 dt + \frac{V_Y}{A_Y} \int_0^T e_Y^2 dt \right] \quad (3.31)$$

δ คือความหนาแน่นของวัสดุที่นำมาใช้เป็นแกนเหล็ก(Core material mass density) มีหน่วยเป็น kg/m^3 , T เป็นเวลาของการเปลี่ยนแปลง $\left(\frac{dB}{dt}\right)$ ใน 1 ไซเคิล $T = \frac{2\pi}{P\omega_m}$, P คือจำนวนคู่ของขั้วแม่เหล็ก, ω_m คือความเร็วของมอเตอร์มีหน่วยเป็น(rad/s) ค่าความสูญเสียฮิสเทอรีซิสที่เช่นเดียวกัน สามารถหาได้จากสมการที่ (3.23), สมการที่ (3.26)

$$\bar{P}_{\text{hysteresis}} = k_h f \hat{B}^n = \frac{k_h}{T} \left(\int \frac{e}{A} dt \right)^n \quad (3.32)$$

$$P_h = \frac{k_h \delta}{T} \left[V_T \left(\left| \int \frac{e_T}{A_T} dt \right| \right)^n + V_Y \left(\left| \int \frac{e_Y}{A_Y} dt \right| \right)^n \right] \quad (3.33)$$

3.8 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงการหาความสูญเสียในแกนเหล็กโดยวิธีการวัดโดยตรงที่แกนเหล็ก ตามหลักการของทฤษฎี Search coil โดยสามารถที่จะหาความสูญเสียในแกนเหล็ก เพื่อนำใช้ในการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลในบทต่อไป

บทที่ 4

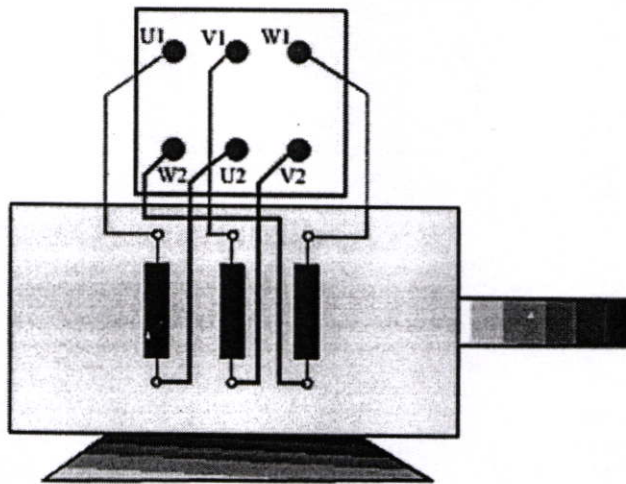
วิธีการวิเคราะห์หาค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก

4.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการวาง Search coil เข้าไปที่ตำแหน่งต่างๆ ในสเตเตอร์และการหาค่า constant coefficients of materials k_h , k_e จาก Core loss model โดยใช้วิธีการ Curve fitting ด้วยโปรแกรม MATLAB เพื่อนำค่าที่ได้ไปใช้ในทฤษฎีของ Search coil การทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ในวงจรสมมูล ของมอเตอร์เหนี่ยวนำตามมาตรฐานของ IEEE Test Procedure

4.2 การพันขดลวด Search coil

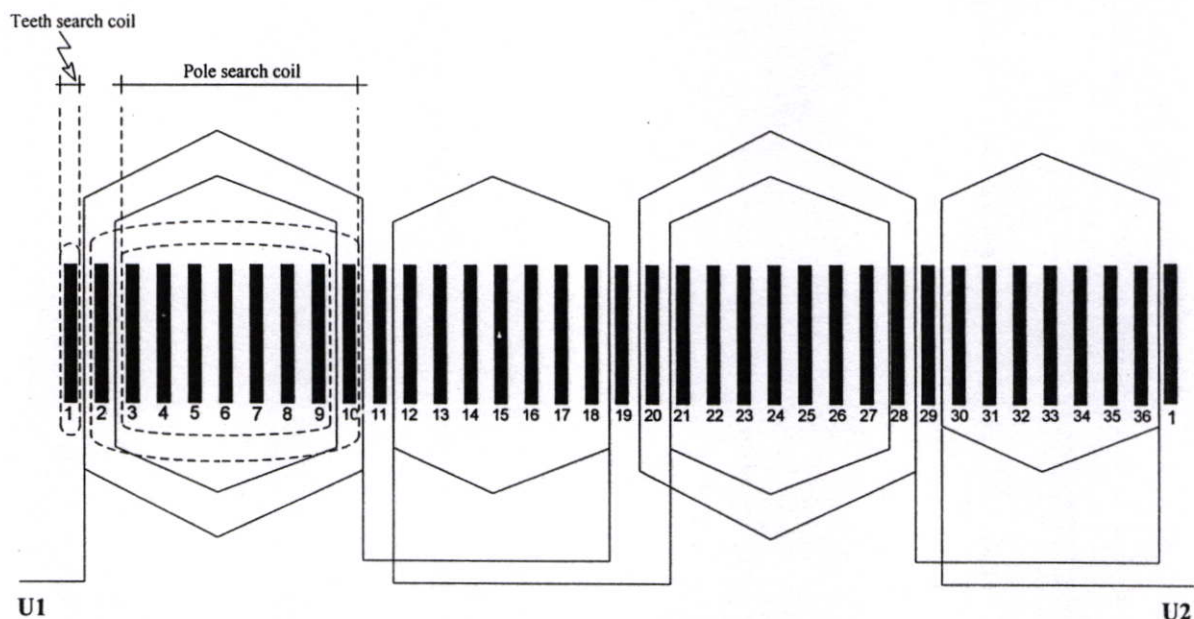
ในสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1 HP และ 2 HP จะประกอบด้วย ขดลวดทองแดง (ตัวนำ) 3 ชุด พันใส่ไว้ในร่องสล๊อตพันแบบขดลวดชั้นเดียว(Single layer winding) ขดลวด 3 ชุด แต่ละชุดมี ดัน(U1) ปลาย(U2) ดัน(V1) ปลาย(V2) และ ดัน(W1) ปลาย(W2)



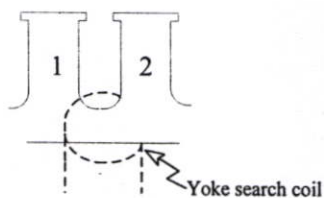
รูปที่ 4.1 ขดลวดภายในมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ขดลวด Search coil จะถูกพันใส่เข้าไปที่สเตเตอร์ ในขดลวดชุดเฟสที่ 1 (U1) - (U2) Pole search coil จะถูกใส่เข้าไปที่ขั้วแม่เหล็กที่ 1 ของขดลวดชุดเฟสที่ 1 (U1) - (U2) ใช้ลวดทองแดงอาน น้ำยาเบอร์ 27 SWG. พัน 5 รอบต่อชุด Teeth search coil จะถูกพันใส่เข้าไปที่ Teeth และ Yoke

search coil จะถูกพันไว้ระหว่าง Teeth ที่ 1 และ Teeth ที่ 2 5 รอบ และทำการใส่ Pole search coil ชั้นละ 5 รอบจำนวน 2 ชั้น เพื่อใช้ในการหาค่า Magnetic flux density แสดงในรูปที่ 4.2 รูปที่ 4.3

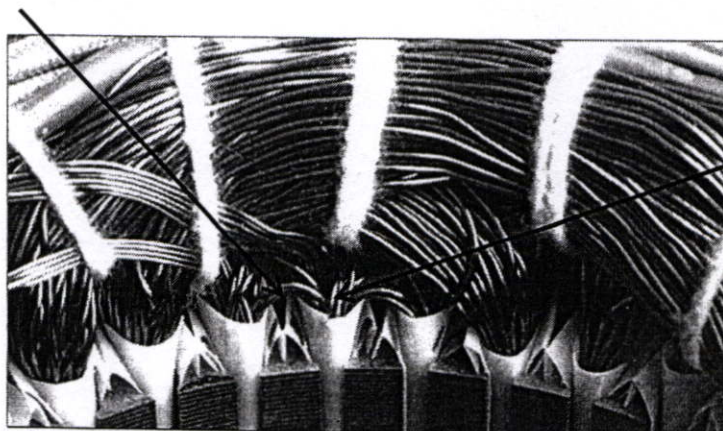


รูปที่ 4.2 การใส่ขดลวด Pole search coil และ Teeth search coil



รูปที่ 4.3 การใส่ขดลวด Yoke search coil

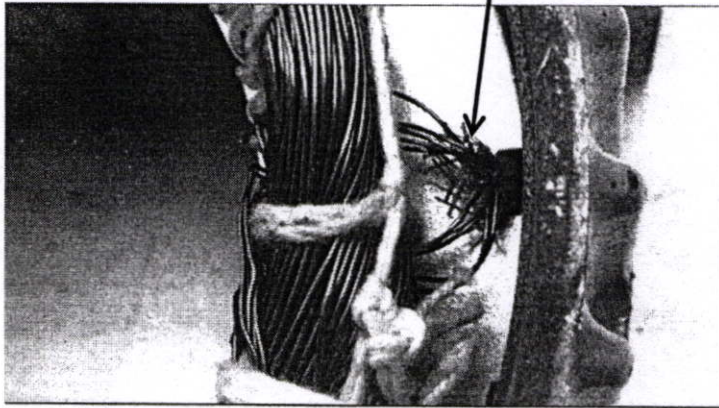
Teeth search coil



Yoke search coil

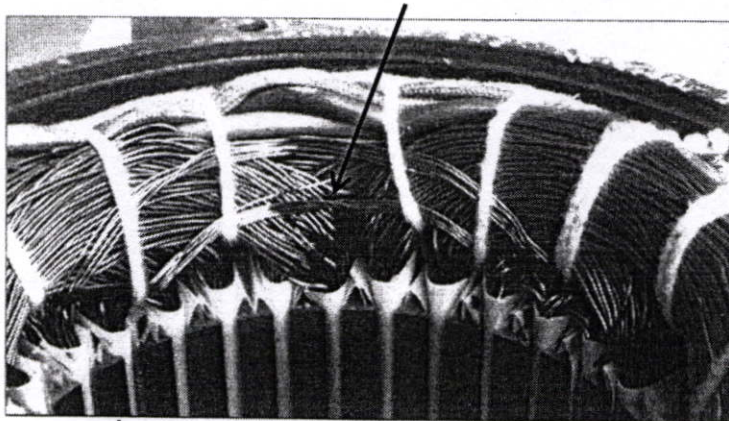
รูปที่ 4.4 การใส่ Teeth search coil ในมอเตอร์เหนี่ยวนำ

Yoke search coil



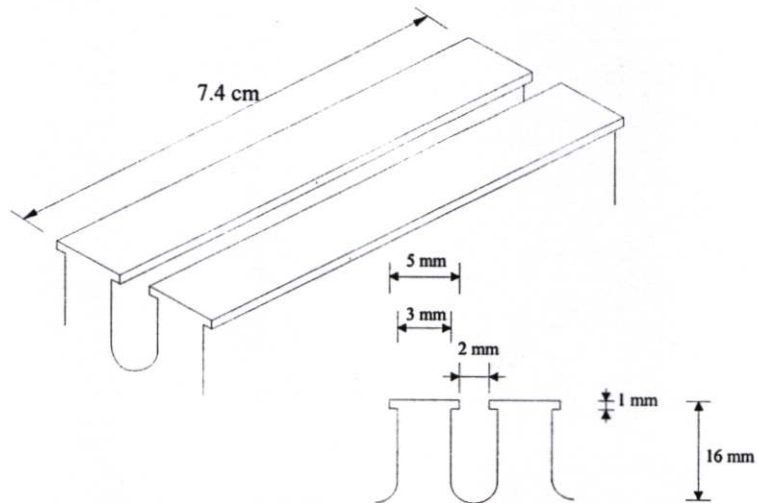
รูปที่ 4.5 การใส่ Yoke search coil ในมอเตอร์เหนี่ยวนำ

Pole search coil



รูปที่ 4.6 การใส่ Pole search coil ในมอเตอร์เหนี่ยวนำ

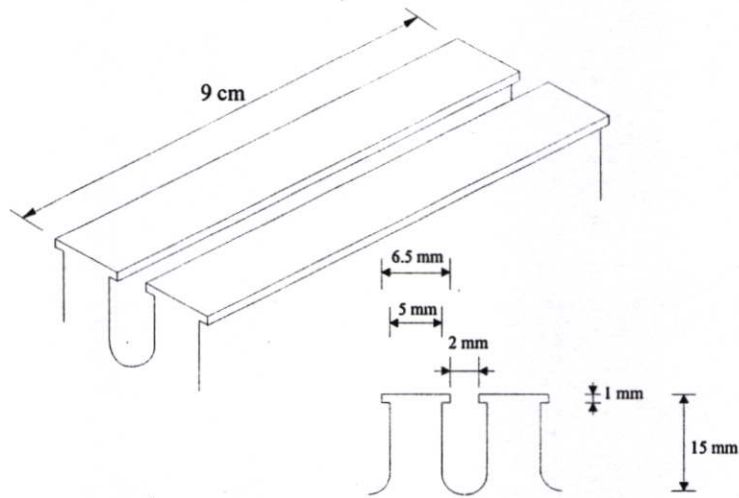
ที่ขดลวดTeeth search coil จะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า e_T ที่ขดลวดYoke search coil จะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า e_Y



รูปที่ 4.7 ขนาดTeethของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 HP

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์และค่าคงที่ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1HP

Parameter and constants	Value
Hysteresis loss Coefficient, k_h	5.85
Eddy-current loss Coefficient, k_e	8.7×10^{-3}
n constant of core material	2
Stator teeth volume, V_T	$3.922 \times 10^{-6} \text{ m}^3$
Stator yoke volume, V_Y	$247.996 \times 10^{-6} \text{ m}^3$
Teeth width, l_T	0.0175 m
Stator teeth area, A_T	$3.7 \times 10^{-4} \text{ m}^2$
Stator yoke area, A_Y	$9.25 \times 10^{-4} \text{ m}^2$
Core material mass density, δ	9950.5 kg/m^3



รูปที่ 4.8 ขนาดTeethของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 2 HP

ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์และค่าคงที่ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 2 HP

Parameter and constants	Value
Hysteresis loss Coefficient, k_h	12.6
Eddy-current loss Coefficient, k_e	17.5×10^{-3}
n constant of core material	2
Stator teeth volume, V_T	$6.885 \times 10^{-6} \text{ m}^3$
Stator yoke volume, V_y	$570 \times 10^{-6} \text{ m}^3$
Teeth width, l_T	0.015 m
Stator teeth area, A_T	$5.58 \times 10^{-4} \text{ m}^2$
Stator yoke area, A_y	$12.6 \times 10^{-4} \text{ m}^2$
Core material mass density, δ	9950.5 kg/m^3

4.3 การจำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB

4.3.1 ทำการคำนวณหาค่า constant coefficients of materials k_h, k_e

ทำการคำนวณหาโดยใช้วิธีการ Curve fitting เพื่อหา Core losses model ผลที่ได้จากการวัดค่าความสูญเสียในแกนเหล็กในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเพื่อนำมา เปรียบเทียบกับค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กแม่เหล็ก \hat{B} (magnetic Flux density) ที่เกิดขึ้นภายในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ได้จากการคำนวณหาโดยการใส่ Pole search coil เข้าไปที่ขั้วแม่เหล็กที่ 1 ของเฟสที่ 1 เพื่อเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า จากกฎของ Faraday's Law

$$e(t) = N \frac{d\phi}{dt} \quad (4.1)$$

แทนค่า $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$ ลงใน (4.1) จากนั้นทำการดิฟเฟอเรนเชียลสมการจะได้ (4.2)

$$e(t) = N \omega \phi_m \cos \omega t \quad (4.2)$$

$$e(t) = E_m \cos \omega t \quad (4.3)$$

จากนั้นทำการเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าจาก (4.2), (4.3) ให้เป็นค่าที่วัดได้ (root-mean-square)

$$E_{rms} = \frac{N \omega \phi_m}{\sqrt{2}} \quad (4.4)$$

$$E_{rms} = 4.44 N f \phi_m \quad (4.5)$$

จาก (4.5) E_{rms} คือแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ได้จาก Search coil, N คือจำนวนรอบของ Search coil, f คือความถี่ไฟฟ้า จากนั้นย้ายข้างสมการเพื่อหา ϕ_m จะได้

$$\phi_m = \frac{E_{rms}}{4.44 N f} \quad (4.6)$$

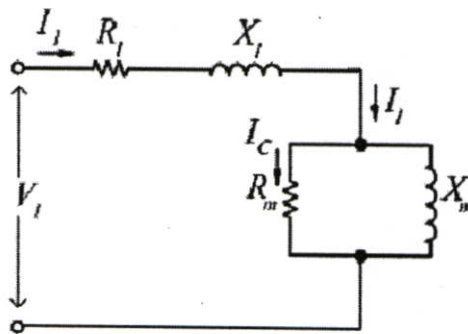
นำ ϕ_m จากสมการที่ 4.6 มาหารกับพื้นที่หน้าตัดของขั้วแม่เหล็กของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1 HP ซึ่งมีค่าเท่ากับ $46.69 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ จะได้เป็นค่า \hat{B} (magnetic Flux density) ดังสมการที่(4.7)

$$\hat{B} = \frac{E_{rms}}{2.073 \times 10^{-2} \times Nf} \quad (4.7)$$

และในมอเตอร์ขนาด 2 HP ที่มีพื้นที่หน้าตัดของขั้วแม่เหล็กเท่ากับ $91.35 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ ค่า \hat{B} (magnetic Flux density)สามารถหาได้ดังสมการที่ (4.8)

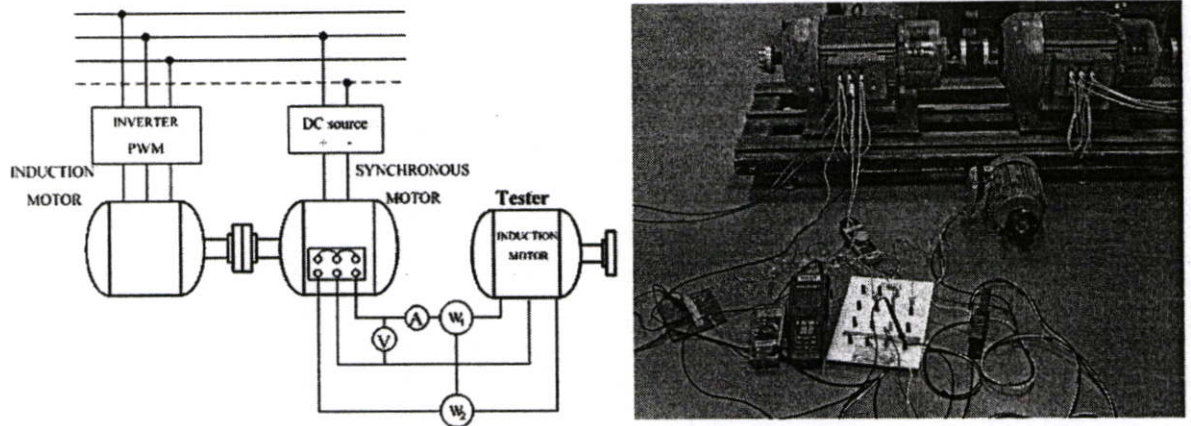
$$\hat{B} = \frac{E_{rms}}{4.056 \times 10^{-2} \times Nf} \quad (4.8)$$

ทำการทดลองตามวงจรในรูปที่ 4.10 ทำการจ่ายแรงดันไซน์ที่มีความถี่ 40 Hz , 50 Hz , 60 Hz เข้ามอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 HP และทำการจ่ายแรงดันไซน์ที่มีความถี่ 50 Hz เข้ามอเตอร์เหนี่ยวนำ 2 HP ปรับแรงดันเฟสเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 0-240 V ทำการคำนวณเพื่อหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก โดยทำการวัดกำลังไฟฟ้าในขณะไร้โหลด (P_m) โดยนำมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำทำการเชื่อมต่อ (Coupling) กับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อรักษาความเร็วโรเตอร์ ขณะไร้โหลดเท่ากับความเร็วซิงโครนัส ซึ่งสามารถที่จะทำการหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก $\text{Measured core loss} = P_m - 3 I_1^2 R_1$



รูปที่ 4.9 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำในขณะที่รักษาความเร็วโรเตอร์
ขณะไร้โหลดเท่ากับความเร็วซิงโครนัส

ทำการหาคุณลักษณะความสัมพันธ์ โดยนำค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก มาเปรียบเทียบกับ
ค่าของความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก \hat{B}



รูปที่ 4.10 วงจรที่ใช้ในการคำนวณหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก
ภายใต้การขับเคลื่อนด้วยแหล่งจ่ายที่เป็นไซน์

แทนค่าที่ได้ลงในสมการที่ 4.7 และ สมการที่ 4.8 นำมาพล็อตรวมกับ Core losses model จากสมการที่ 3.25 เพื่อทำการ Curve fitting โดยการเขียน M-file ในโปรแกรม MATLAB ซึ่งค่าของ constant coefficients of materials k_h , k_e ของมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1 HP จะได้ค่า $k_h=5.85$, $k_e=8.7 \times 10^{-3}$ และ $n=2$ แทนลงในสมการที่ 4.9

$$P_{CORE} = k_h f \hat{B}^n + k_e f^2 \hat{B}^2 \quad (4.9)$$

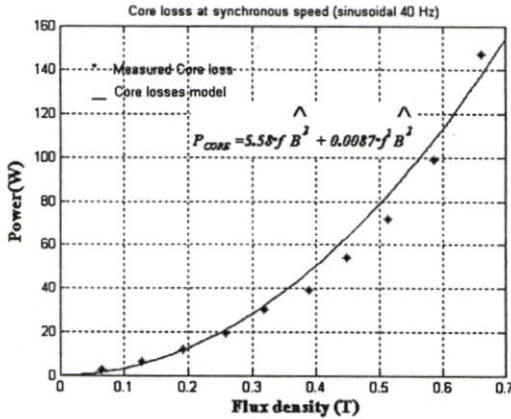
จะได้

$$P_{CORE} = 5.58 \cdot f \hat{B}^2 + 0.0087 \cdot f^2 \hat{B}^2 \quad (4.10)$$

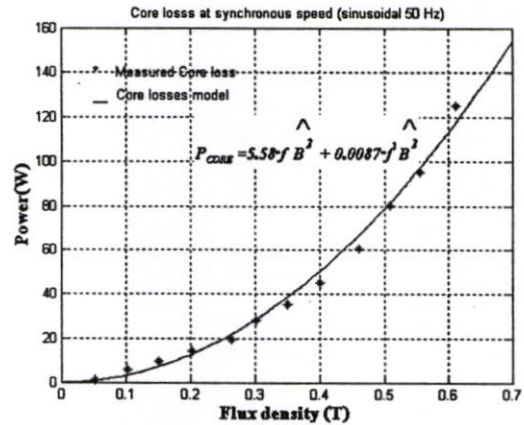
และมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 2 HP จะได้ค่า $k_h=12.6$, $k_e=17.5 \times 10^{-3}$ และ $n=2$ แทนลงในสมการที่ 4.9 จะได้

$$P_{CORE} = 12.6 \cdot f \cdot B^2 + 0.0175 \cdot f^2 \cdot B^2 \quad (4.11)$$

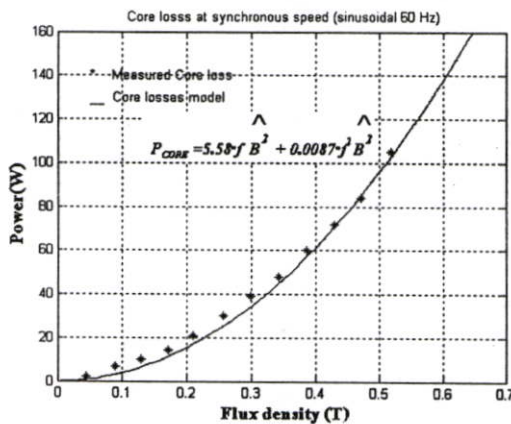
ในรูปที่ 4.11 จะแสดงให้เห็นคุณลักษณะความสัมพันธ์ของ Core loss model กับ Measured core loss



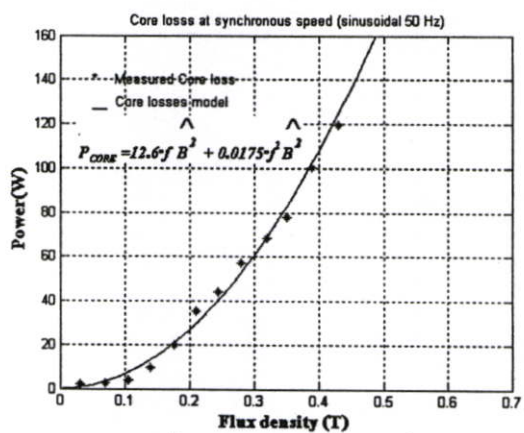
มอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 HP ที่ความถี่ 40 Hz



มอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 HP ที่ความถี่ 50 Hz



มอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 HP ที่ความถี่ 60 Hz



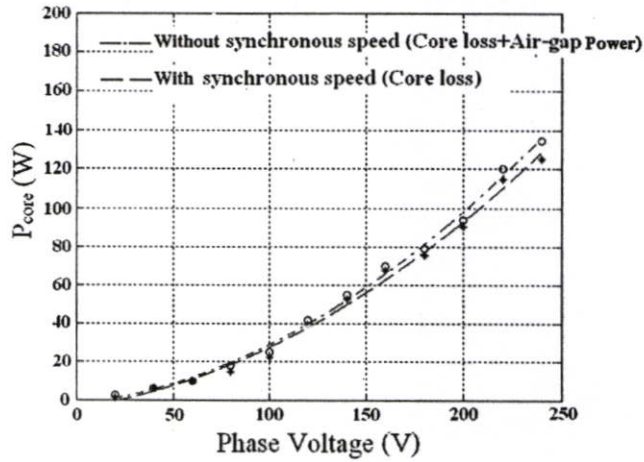
มอเตอร์เหนี่ยวนำ 2 HP ที่ความถี่ 50 Hz

รูปที่ 4.11 แสดงคุณลักษณะความสัมพันธ์ค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก

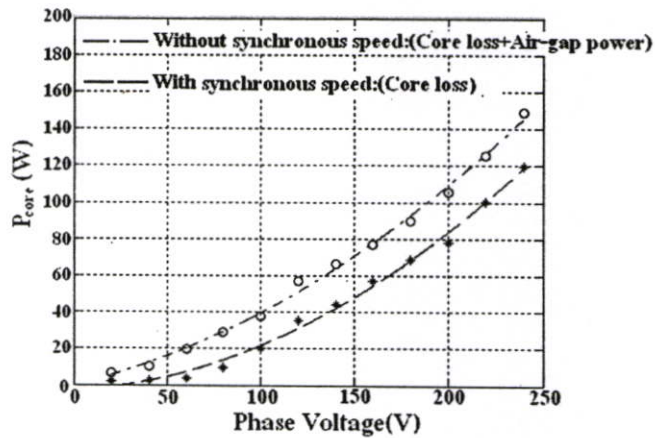
กับความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก

รูปที่ 4.12 และ รูปที่ 4.13 แสดงคุณลักษณะความสัมพันธ์ค่าความสูญเสียในแกนเหล็กที่วัดได้ (Measured core loss) ในขณะที่ทำการรักษาความเร็วโรเตอร์ขณะไร้อโหลดเท่ากับความเร็วซิงโครนัส กำลังไฟฟ้า ($P_{in} - 3 I_1^2 R_1 = \text{core loss}$) และในขณะที่ไม่ทำการรักษาความเร็วโร

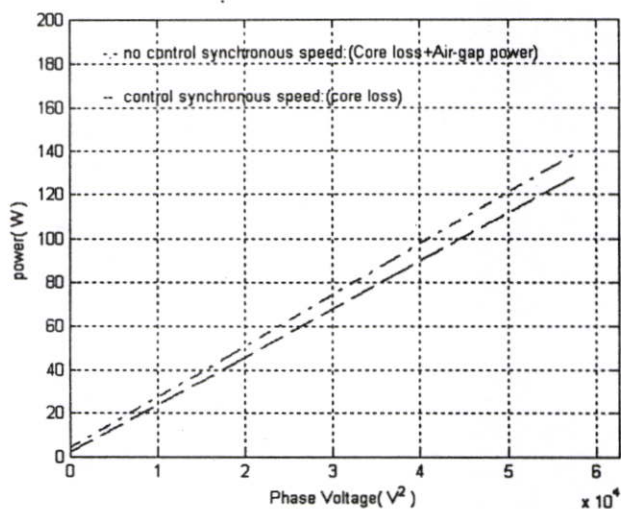
เตอร์ขณะไร้อโหลดให้เท่ากับความเร็วเชิงโรตัส ($P_{in} - 3I_1^2 R_l = \text{core loss} + \text{Air gap power}$) รูปที่ 4.14 และ รูปที่ 4.15 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของความสูญเสียในแกนเหล็กกับแรงดันเฟสยกกำลังสอง



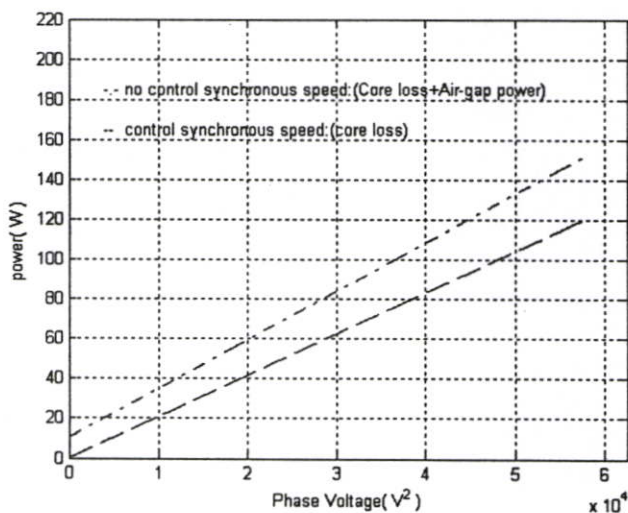
รูปที่ 4.12 แสดงคุณลักษณะความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าเทียบกับแรงดันเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 HP



รูปที่ 4.13 แสดงคุณลักษณะความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าเทียบกับแรงดันเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 2 HP



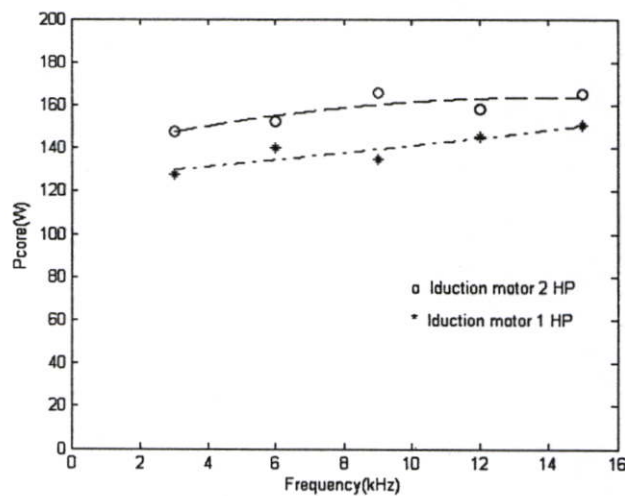
รูปที่ 4.14 แสดงคุณลักษณะความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้า
เทียบกับแรงดันเฟสยกกำลังสองของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 HP



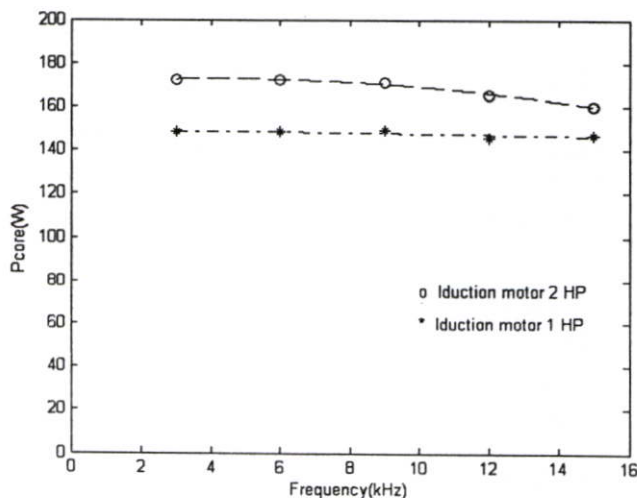
รูปที่ 4.15 แสดงคุณลักษณะความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้า
เทียบกับแรงดันเฟสยกกำลังสองของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 2 HP

4.3.2 การจำลองหาความสูญเสียในแกนเหล็ก

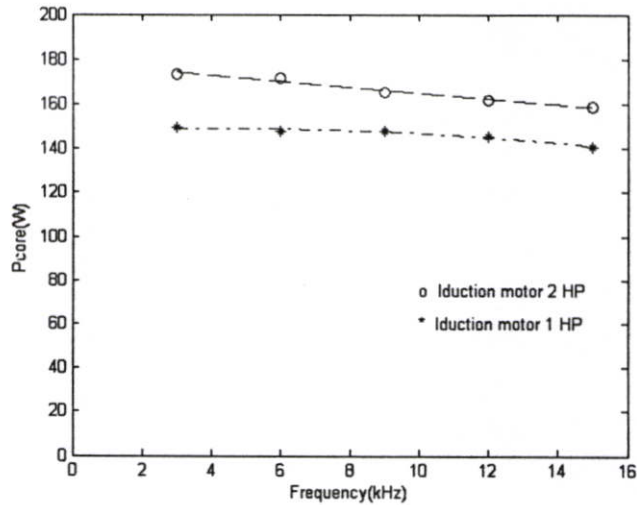
ในการจำลองเพื่อหาความสูญเสียในแกนเหล็ก P_{core} ทำการเก็บสัญญาณแรงดันที่จ่ายออกมาจาก PWM อินเวอร์เตอร์เข้ามาคำนวณในโปรแกรม MATLAB ทำการแยกสเปกตรัมแรงดันป้อนเข้าวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยโปรแกรมเพื่อทำการหา P_{core} ทุกความถี่ทำการรวม P_{core} ทุกๆความถี่เข้าด้วยกันเพื่อหาความสูญเสียในแกนเหล็กโดยการขับเคลื่อนด้วย PWM อินเวอร์เตอร์ โดยการปรับความถี่มูลฐาน 40 Hz , 50 Hz , 60 Hz ที่ความถี่สวิตซ์ 3 kHz , 6 kHz , 9 kHz , 12 kHz , 15 kHz เปรียบเทียบระหว่างมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1 HP และ 2 HP ผลการจำลองได้ถูกนำเสนอไว้ในรูปที่ 4.16 , รูปที่ 4.17 , รูปที่ 4.18



รูปที่ 4.16 จำนวนที่ความถี่มูลฐาน 40 Hz

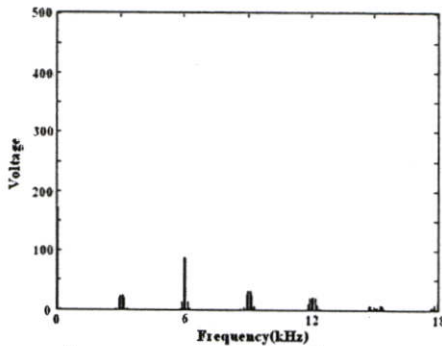


รูปที่ 4.17 จำนวนที่ความถี่มูลฐาน 50 Hz

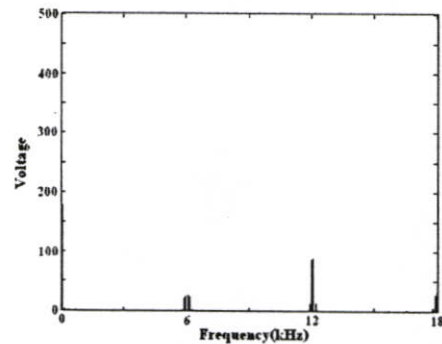


รูปที่ 4.18 จำนวนที่ความถี่มูลฐาน 60 Hz

จากผลการจำลองหาความสูญเสียในแกนเหล็กในรูปที่ 4.17 และรูปที่ 4.18 จะเห็นว่าในขณะที่เพิ่มความถี่สวิตช์ ในการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ความถี่มูลฐาน 50 Hz และ 60 Hz จะทำให้ความสูญเสียที่เกิดขึ้นมีค่าลดลง แต่ในขณะที่ขับเคลื่อนที่ความถี่มูลฐาน 40 Hz และทำการเพิ่มความถี่สวิตช์ความสูญเสียที่เกิดขึ้นกลับมีค่าสูงขึ้นเป็นเพราะ แรงดันที่จ่ายออกมาจาก PWM อินเวอร์เตอร์เมื่อนำมาแยกสเปกตรัม ขนาดของแรงดันมูลฐาน ไม่คงที่ ดังแสดงในรูปที่ 4.19

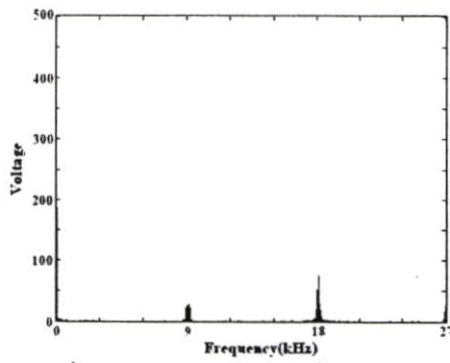


ความถี่มูลฐาน 30 Hz ความถี่สวิตช์ 3 kHz

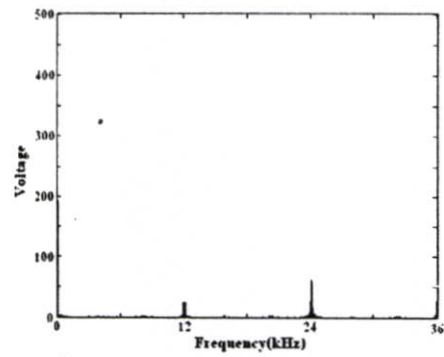


ความถี่มูลฐาน 30 Hz ความถี่สวิตช์ 6 kHz

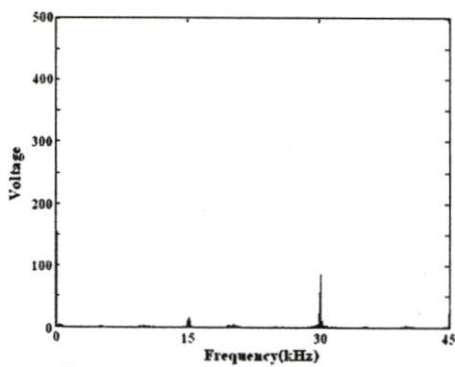
รูปที่ 4.19 สเปกตรัมของแรงดันที่จ่ายออกมาจาก PWM อินเวอร์เตอร์



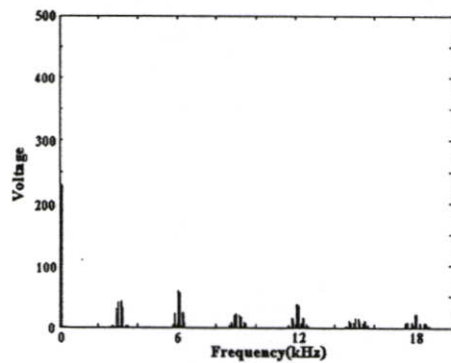
ความถี่มูลฐาน 30 Hz ความถี่สวิตช์ 9 kHz



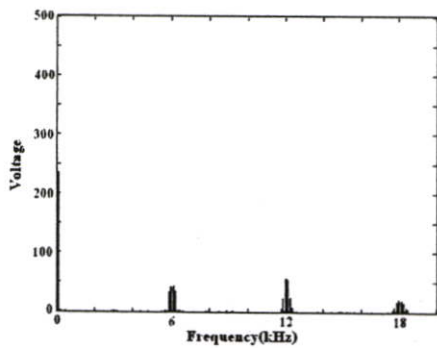
ความถี่มูลฐาน 30 Hz ความถี่สวิตช์ 12 kHz



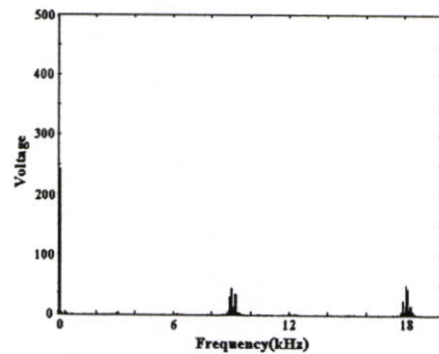
ความถี่มูลฐาน 30 Hz ความถี่สวิตช์ 15 kHz



ความถี่มูลฐาน 40 Hz ความถี่สวิตช์ 3 kHz

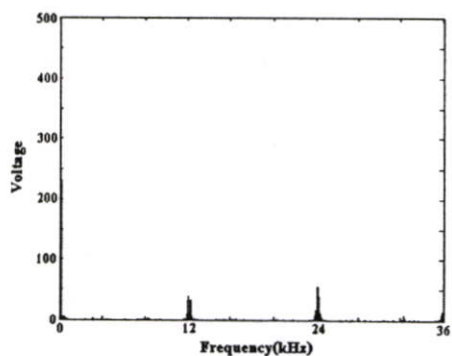


ความถี่มูลฐาน 40 Hz ความถี่สวิตช์ 6 kHz

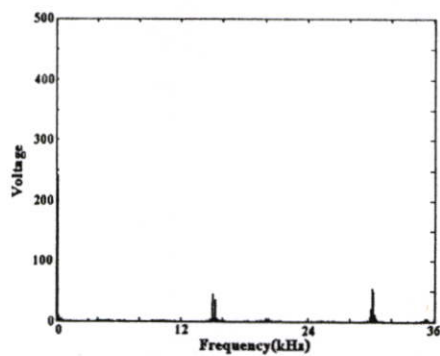


ความถี่มูลฐาน 40 Hz ความถี่สวิตช์ 9 kHz

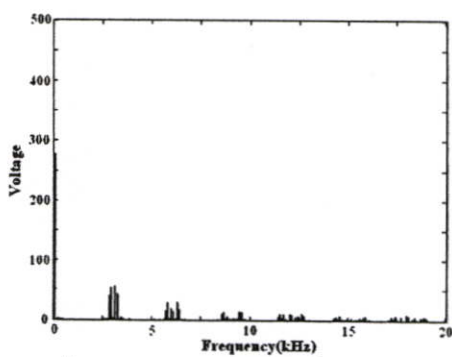
รูปที่ 4.19(ต่อ)



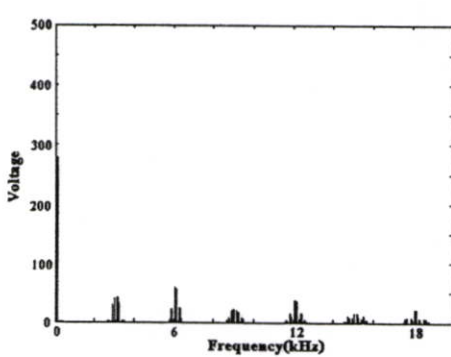
ความถี่มูลฐาน 40 Hz ความถี่สวิตช์ 12 kHz



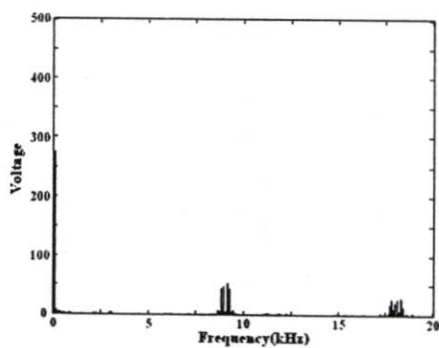
ความถี่มูลฐาน 40 Hz ความถี่สวิตช์ 15 kHz



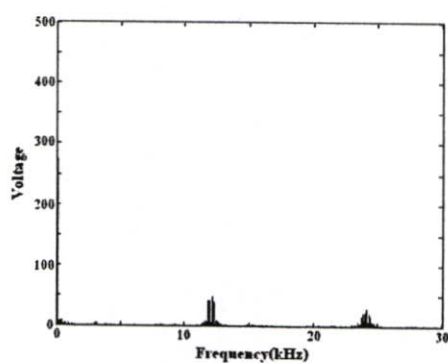
ความถี่มูลฐาน 50 Hz ความถี่สวิตช์ 3 kHz



ความถี่มูลฐาน 50 Hz ความถี่สวิตช์ 6 kHz

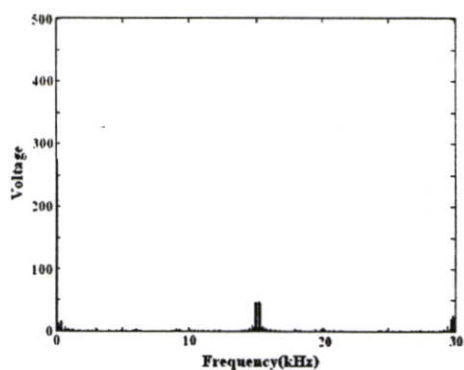


ความถี่มูลฐาน 50 Hz ความถี่สวิตช์ 9 kHz

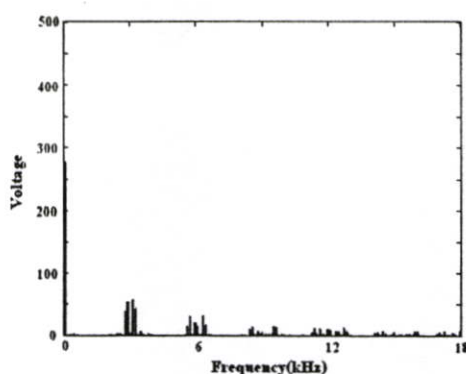


ความถี่มูลฐาน 50 Hz ความถี่สวิตช์ 12 kHz

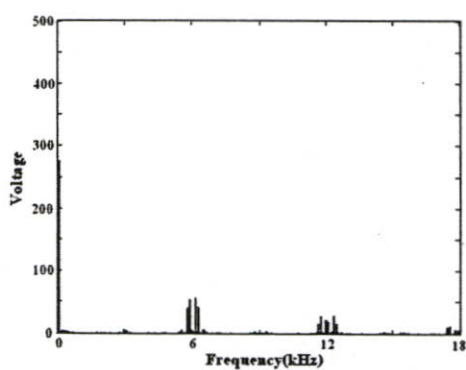
รูปที่ 4.19(ต่อ)



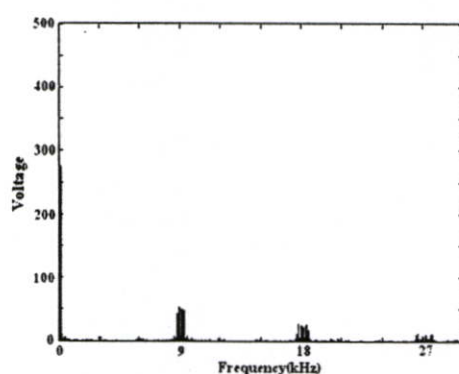
ความถี่มูลฐาน 50 Hz ความถี่สวิตช์ 15 kHz



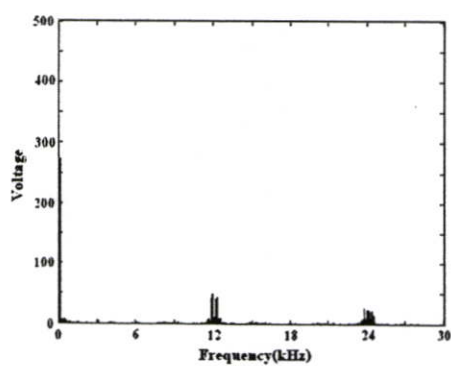
ความถี่มูลฐาน 60 Hz ความถี่สวิตช์ 3 kHz



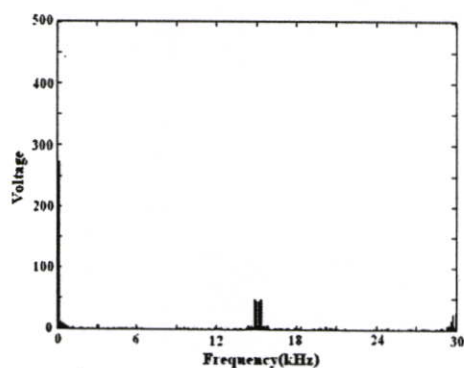
ความถี่มูลฐาน 60 Hz ความถี่สวิตช์ 6 kHz



ความถี่มูลฐาน 60 Hz ความถี่สวิตช์ 9 kHz



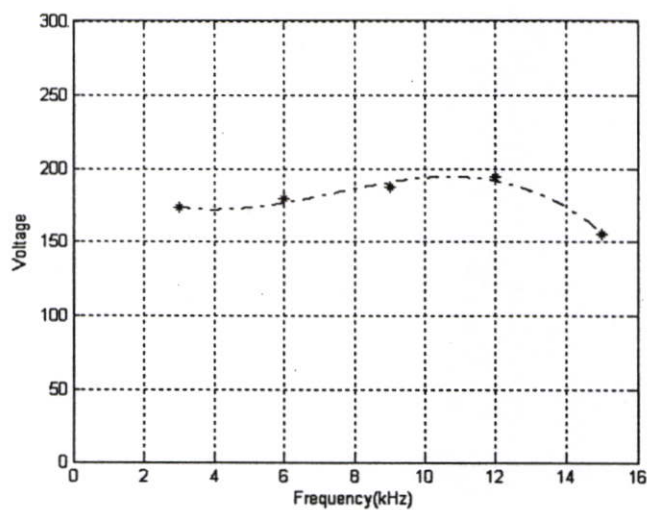
ความถี่มูลฐาน 60 Hz ความถี่สวิตช์ 12 kHz



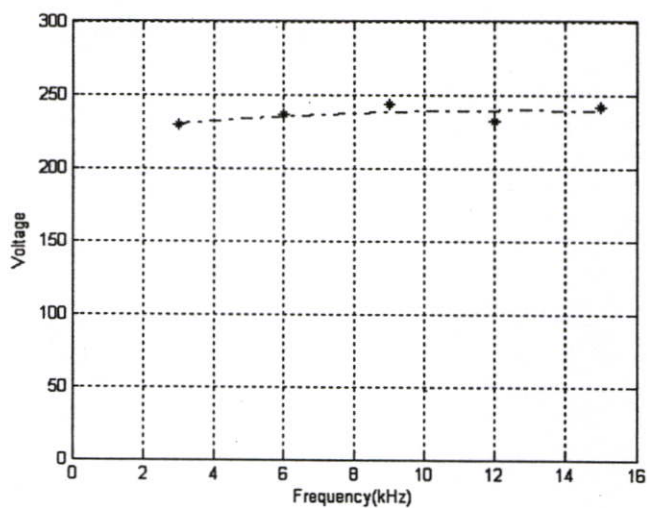
ความถี่มูลฐาน 40 Hz ความถี่สวิตช์ 9 kHz

รูปที่ 4.19 (ต่อ)

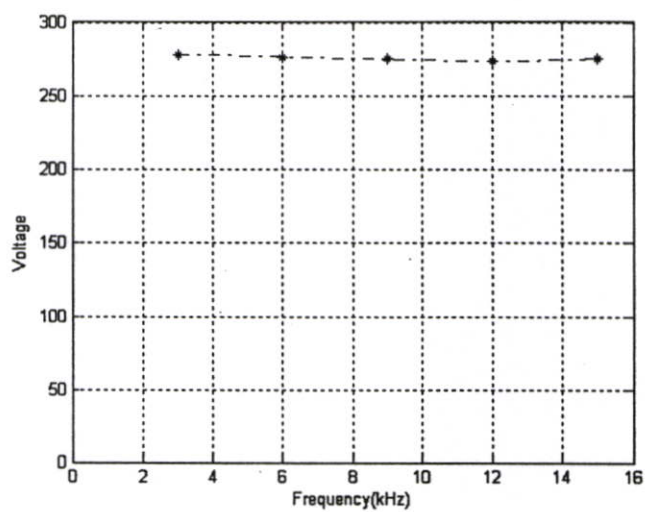
จากรูปที่ 4.19 สามารถที่จะนำมาแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความถี่สวิตช์ , ขนาดของแรงดันที่ความถี่มูลฐาน 30 Hz , 40 Hz , 50 Hz , 60 Hz



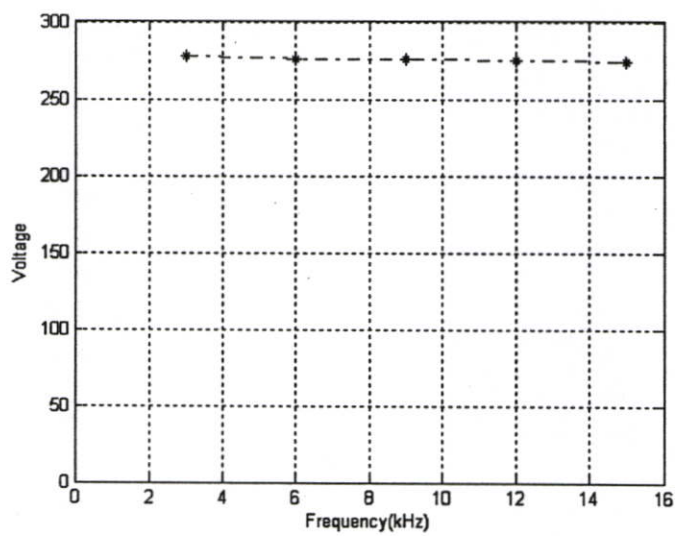
รูปที่ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความถี่สวิตช์ และขนาดของแรงดันที่ความถี่มูลฐาน 30 Hz



รูปที่ 4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความถี่สวิตช์ และขนาดของแรงดันที่ความถี่มูลฐาน 40 Hz



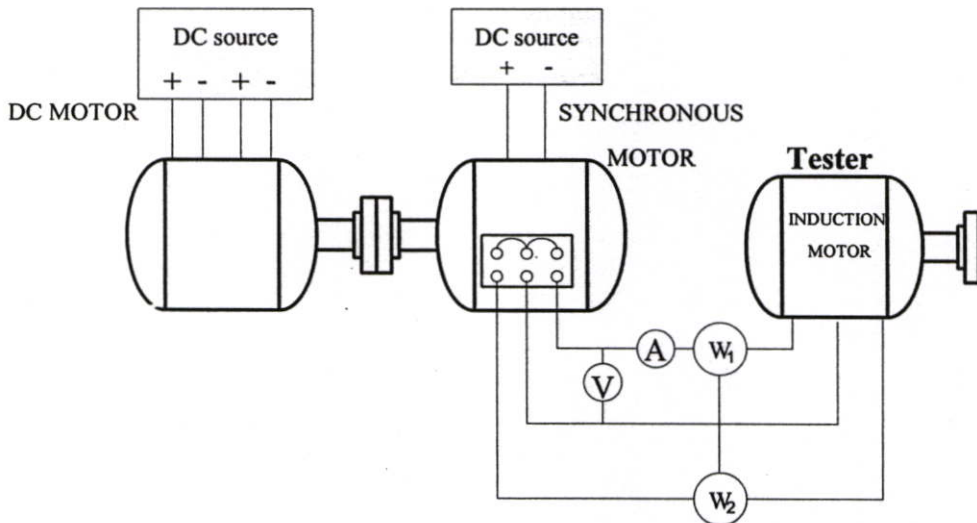
รูปที่ 4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความถี่สวิตช์ และขนาดของแรงดันที่ความถี่มูลฐาน 50 Hz



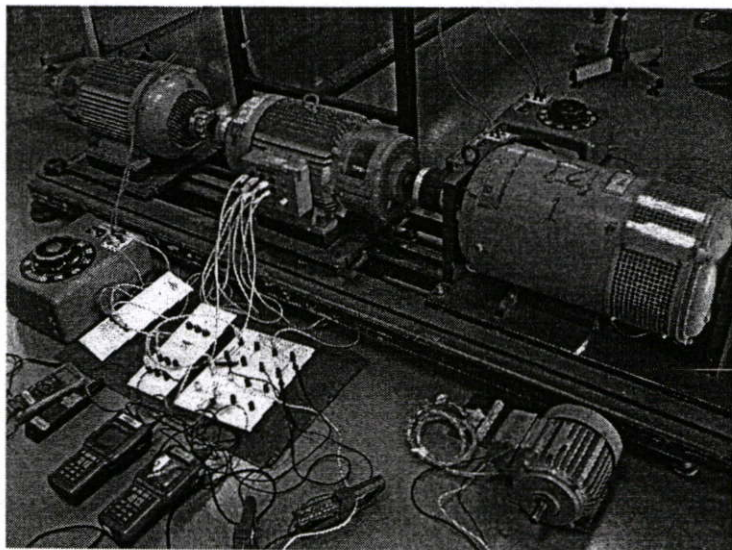
รูปที่ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความถี่สวิตช์ และขนาดของแรงดันที่ความถี่มูลฐาน 60 Hz

4.3.3 การหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่นำไปใช้ในการจำลองได้มาจากมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสที่คำนวณ No-Load Test , Blocked-Rotor Test , VI- method การทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ในวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ทำการต่อวงจรที่ใช้ทดสอบดังรูป 4.24



รูปที่ 4.24 วงจรที่ใช้ในการทดสอบ No-Load Test และ Blocked-Rotor Test



รูปที่ 4.25 การทดสอบ No-Load Test และ Blocked-Rotor Test

การทดสอบ No-Load Test ทำการทดสอบที่แรงดันพิกัดในขณะที่ไร้อโหลด ที่ปลายเพลามอเตอร์เหนี่ยวนำทำการ coupling กับ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อทำการรักษาความเร็ว โรเตอร์เท่ากับความเร็วเชิงโรตอร์ทำการวัดกำลังไฟฟ้าจริง(P_o) ; กระแส(I_o) และ เพาเวอร์แฟกเตอร์ ลงในสมการที่ 4.13 และสมการที่ 4.14 เพื่อหาค่า R_c และ X_m

$$\phi_o = \cos^{-1} \frac{P_o}{V_o I_o} \quad (4.12)$$

$$R_C = \frac{V_o^2}{P_o} \quad (4.13)$$

$$X_m = \frac{V_o}{I_o \sin \phi_o} \quad (4.14)$$

ทำการทดสอบแบบ Blocked-Rotor Test ทำการ Blocked-Rotor ของมอเตอร์เหนี่ยวนำจากนั้นทำการปรับแรงดันป้อนเข้าโดยการปรับ Variac 3 Phase ให้กระแสป้อนเข้ามอเตอร์เท่ากับกระแสพิกัดและความถี่ปกติ ทำการวัดกำลังไฟฟ้าจริง(P_b) , กระแส(I_b) และ เพาเวอร์แฟกเตอร์ ลงในสมการที่ 4.15 และสมการที่ 4.16 เพื่อหาค่า Z_b , R_b และ X_b

$$Z_b = \frac{V_b}{I_b} \quad (4.15)$$

$$R_b = \frac{P_b}{I_b^2} \quad (4.16)$$

$$X_b = \sqrt{(Z_b)^2 - (R_b)^2} = \frac{V_b \sin \phi_b}{I_b} \quad (4.17)$$

$$R_b = R_1 + R_2 \quad (4.18)$$

ในการทดสอบแบบ Blocked-Rotor test ควรจะทดสอบที่ค่าแรงดันไฟฟ้าลดต่ำลงซึ่งทำให้เกิดค่ากระแสได้เท่ากับประมาณพิกัด และค่าความถี่ก็ควรจะลดลงด้วยทั้งนี้เพราะค่า Leakage reactance ของโรเตอร์จะเป็นผลมาจากค่าความถี่ของโรเตอร์ที่ต่ำกว่าความถี่ปกติเนื่องจากค่าสลิปมีค่าต่ำ ตามมาตรฐานของ IEEE Test Procedure แนะนำให้ใช้ความถี่ที่ 25% ของความถี่ปกติค่า Leakage Reactance รวมที่ความถี่ปกติจะได้มาจากการทดสอบผลในลักษณะนี้โดยการพิจารณาว่าค่า reactance จะต้องเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความถี่ ที่มอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1 HP และ 2 HP ความถี่ปกติ 50 Hz จะต้องทำการทดสอบที่ความถี่ 12.5 Hz จะได้ค่า X'_b และมีความสัมพันธ์กับค่า X_b ดังนี้

$$X_b = \frac{50}{12.5} X'_b \quad (4.19)$$

มอเตอร์เหนี่ยวนำทั้งสองตัวเป็นชนิด Class D ซึ่งตามมาตรฐานของ NEMA จะมีคุณสมบัติดังนี้

- แรงบิดเริ่มสตาร์ทสูงส่วนใหญ่ใช้กับ เครื่องตัด , เครื่องรีด และรอกไฟฟ้า
- สตาร์ทที่แรงดันพิกัด
- แรงบิดขณะสตาร์ทสูง 250%-300% จากแรงบิดเต็มพิกัด
- กระแสขณะสตาร์ทที่แรงดันพิกัดเป็น 3-8 เท่าของกระแสเต็มพิกัด
- Speed Regulation สูงถึง 10%
- ประสิทธิภาพต่ำเมื่อเทียบกับ Class อื่น

ตารางที่ 4.3 ข้อกำหนดในการแบ่งโรเตอร์รีแอกแตนซ์และสเตเตอร์รีแอกแตนซ์

Rotor Design	X_1 and X_2 functions of X_b	
	X_1	X_2
Wound rotor	$0.5 X_b$	$0.5 X_b$
Design A	$0.5 X_b$	$0.5 X_b$
Design B	$0.4 X_b$	$0.6 X_b$
Design C	$0.3 X_b$	$0.7 X_b$
Design D	$0.5 X_b$	$0.5 X_b$

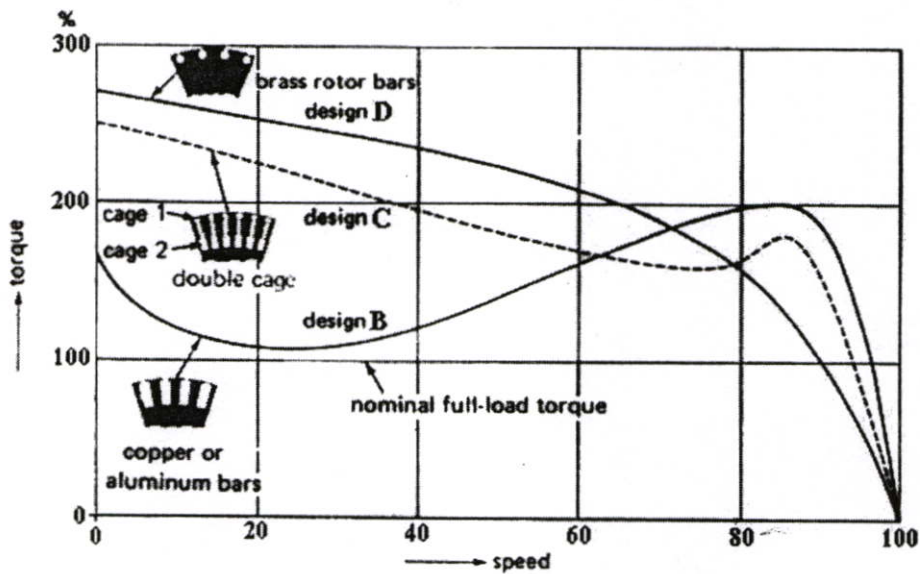
*ข้อกำหนดในการแบ่งโรเตอร์รีแอกแตนซ์และสเตเตอร์รีแอกแตนซ์ตามมาตรฐาน IEEE

std 112-2004

$$\left(\frac{X_1}{X_2}\right) = 1.0 \text{ สำหรับ Design A , Design D และ วาล์วโรเตอร์มอเตอร์}$$

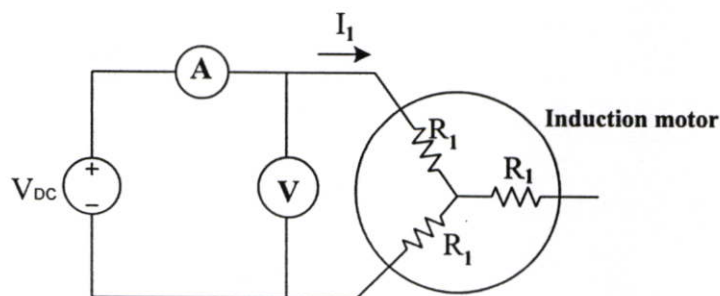
$$\left(\frac{X_1}{X_2}\right) = 0.67 \text{ สำหรับ Design B}$$

$$\left(\frac{X_1}{X_2}\right) = 0.43 \text{ สำหรับ Design C}$$



รูปที่ 4.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วจึงลักษณะของตัวนำในโรเตอร์
ในมอเตอร์ Design B , Design C และ Design D ตามมาตรฐานของ NEMA

ค่า R_1 (Armature winding resistance per phase) สามารถหาได้จากวิธีการ VI-method



รูปที่ 4.27 วงจรที่ใช้ในการทดสอบหาค่าความต้านทานไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้ VI-method

ตัวอย่างรูปที่ 4.27 ทำการเก็บผลของแรงดัน(V_{DC}) และกระแส(I_1) โดยการปรับเพิ่มแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง(V_{DC})ไปที่ละค่า แทนค่าแรงดันและกระแสลงในสมการที่ 4.20 เพื่อหาค่า R_i

$$2R_i = \frac{V_{DC}}{I_1} \quad (4.20)$$

$$R_i = \frac{V_{DC}}{2I_1} \quad (4.21)$$

ตารางที่ 4.4 ผลของการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ในวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 HP

IEEE STANDARD TEST PROCEDURE FOR

Test and equivalent circuit results

Machine: Three Phase Induction Motor Serial No. - Model No. -
 Type: SF-JR Rating: 1 HP Voltage: 220/380 Synchronous Speed: 1500 rpm. Frequency: 50 Hz Phase: 3

Summary of Tests

No-Load Test			Blocked-Rotor Test			
Line Voltage	Line Current	Stator Power	Frequency	Line Voltage	Line Current	Stator Power
V_o (V)	I_o (A)	P_o (W)	Hz	V_b (V)	I_b (A)	P_b (W)
220.1	1.08	45.82	50	57.96	2.15	91.452
			12.5	40.93	2.07	82.1

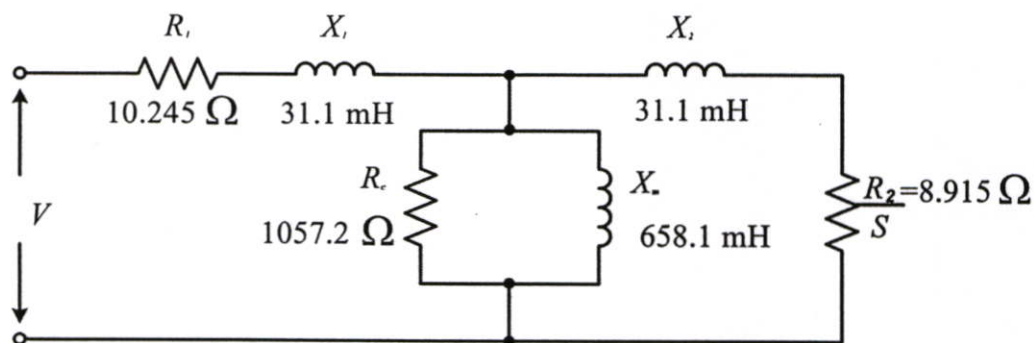
Constants and Summary of Equivalent Circuit Parameter

$R_1 =$	10.245	ohms		*Test from VI-method
$R_2 =$	9.539	ohms		
$R_2 =$	8.915	ohms		*test at 12.5 Hz : decrease 6.54%
$R_c =$	1057.2	ohms		
$X_m =$	206.75	ohms	685.2 mH	
$X_1 =$	9.157	ohms	29.1 mH	
$X_2 =$	9.157	ohms	29.1 mH	
$(X_1 + X_2) =$	18.315	ohms		
$X_1 =$	9.77	ohms	31 mH	* Test at 12.5 Hz
$X_2 =$	9.77	ohms	31 mH	* Test at 12.5 Hz
$(X_1 + X_2) =$	19.54	ohms	62 mH	* Test at 12.5 Hz : Increase 6.68 %

ตารางที่ 4.5 ผลของการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ในวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 2 HP

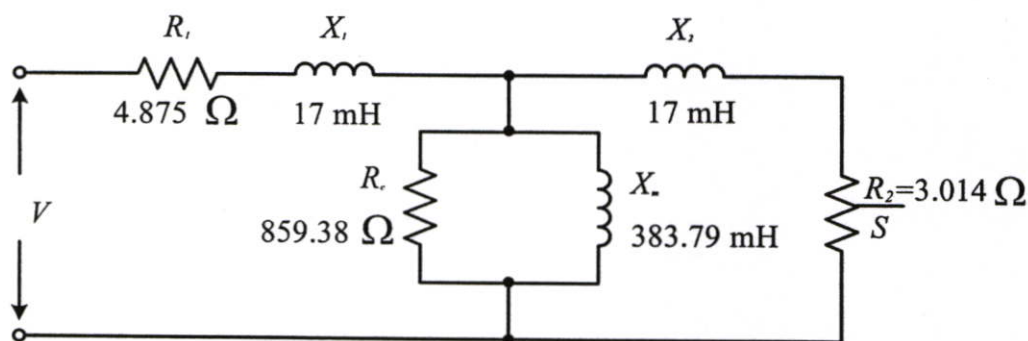
IEEE STANDARD TEST PROCEDURE FOR						
Test and equivalent circuit results						
Machine: Three Phase Induction Motor			Serial No.	-	Model No.	-
Type: SF-JR	Rating: 2 HP	Voltage: 220/380	Synchronous Speed: 1500 rpm.	Frequency: 50 Hz	Phase: 3	
Summary of Tests						
No-Load Test			Blocked-Rotor Test			
Line Voltage	Line Current	Stator Power	Frequency	Line Voltage	Line Current	Stator Power
V_o (V)	I_o (A)	P_o (W)	Hz	V_b (V)	I_b (A)	P_b (W)
224.41	1.88	58.6	50	45.55	3.492	100.9
			12.5	29.4	3.53	98.3
Constants and Summary of Equivalent Circuit Parameter						
$R_1 =$	4.875	ohms				*Test from VI-method
$R_2 =$	3.4	ohms				
$R_2 =$	3.014	ohms				* Test at 12.5 Hz : decrease 11.35 %
$R_c =$	859.38	ohms				
$X_m =$	120.57	ohms	383.79 mH			
$X_1 =$	5.03	ohms	16 mH			
$X_2 =$	5.03	ohms	16 mH			
$(X_1 + X_2) =$	10.095	ohms				
$X_1 =$	5.343	ohms	17 mH			* Test at 12.5 Hz
$X_2 =$	5.343	ohms	17 mH			* Test at 12.5 Hz
$(X_1 + X_2) =$	10.686	ohms	34 mH			* Test at 12.5 Hz : Increase 5.85 %

ขนาด 1 HP , 220/380 V , 3.0/2.0 A , 4 pole , 50 Hz และ 1,488 rpm ซึ่งจากการคำนวณที่ความถี่ 12.5 Hz ได้รับค่าพารามิเตอร์ดังนี้



รูปที่ 4.28 พารามิเตอร์ของมอเตอร์ขนาด 1 HP ที่ได้จากการทดสอบ

ขนาด 2 HP , 220/380 V ; 6.0/3.5 A , 4 pole , 50 Hz และ 1,450 rpm ซึ่งจากการคำนวณที่ความถี่ 12.5 Hz ได้รับค่าพารามิเตอร์ดังนี้



รูปที่ 4.29 พารามิเตอร์ของมอเตอร์ขนาด 2 HP ที่ได้จากการทดสอบ

4.4 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงการวาง Search coil ที่ตำแหน่งต่างๆในสเตเตอร์เพื่อให้นำไปวิเคราะห์หาความสูญเสียในแกนเหล็กตามทฤษฎีของ Search coil การทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ในวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำตามมาตรฐานของ IEEE Test Procedure ทำการคำนวณหาค่า constant coefficients of materials k_h , k_e และค่า k_h , k_e ที่นำมาสร้าง Core loss model ที่ความถี่ป้อนเข้ามอเตอร์เหนี่ยวนำ 50 Hz ยังสามารถนำไปใช้ที่ความถี่ป้อนเข้า 40 Hz , 60 Hz สังเกตว่าจากการทดสอบมอเตอร์ขนาด 1 HP Core loss model จะอยู่ในแนวเดียวกับ Measured core loss ค่า k_h , k_e จะนำไปใช้กับทฤษฎีของ Search coil เพื่อนำไปเปรียบเทียบผลของการหาความสูญเสียของแกนเหล็กในบทต่อไป

บทที่ 5

ผลการทดสอบหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก

5.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการเปรียบเทียบความสูญเสียในแกนเหล็กที่ได้จากการวิเคราะห์ตามทฤษฎีของ Search coil กับผลที่ได้จากการคำนวณจากวงจรสมมูลของมอเตอร์ และผลของการวัด Search coil ยังสามารถตรวจจับสัญญาณเพื่อมาแสดงให้เห็น B-H Curve ซึ่งเป็นผลมาจากความสูญเสียฮิสเตอร์รีซิสในแกนเหล็กของมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยแหล่งจ่ายที่เป็นไซน์และ PWM อินเวอร์เตอร์

5.2 ผลการวัด B-H Curve

ในการทำทดสอบตรวจวัดสัญญาณแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำจาก Search coil โดยผ่านวงจรอินทิเกรตเตอร์ และ ตรวจวัดกระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์ นำสัญญาณที่ได้ป้อนเข้าไปที่ Digital Oscilloscope (YOKOGAWA) โดยไว้ที่ X-Y โหมดซึ่งผลที่ได้เทียบเท่ากับการพล็อต B-H Curve ซึ่งเป็นความสูญเสียฮิสเตอร์รีซิสในแกนเหล็กเมื่อ H เป็นความเข้มแม่เหล็กเกิดจากความสัมพันธ์กับกระแส i ตามสมการที่ 5.1 และ B เป็นความหนาแน่นแม่เหล็กเกิดจากความสัมพันธ์ตามสมการที่ 5.2 , สมการที่ 5.3 , สมการที่ 5.4

จากกฎของแอมแปร์(Ampere 'S law) จะได้ว่า

$$Ni = \oint H \cdot dl \quad (5.1)$$

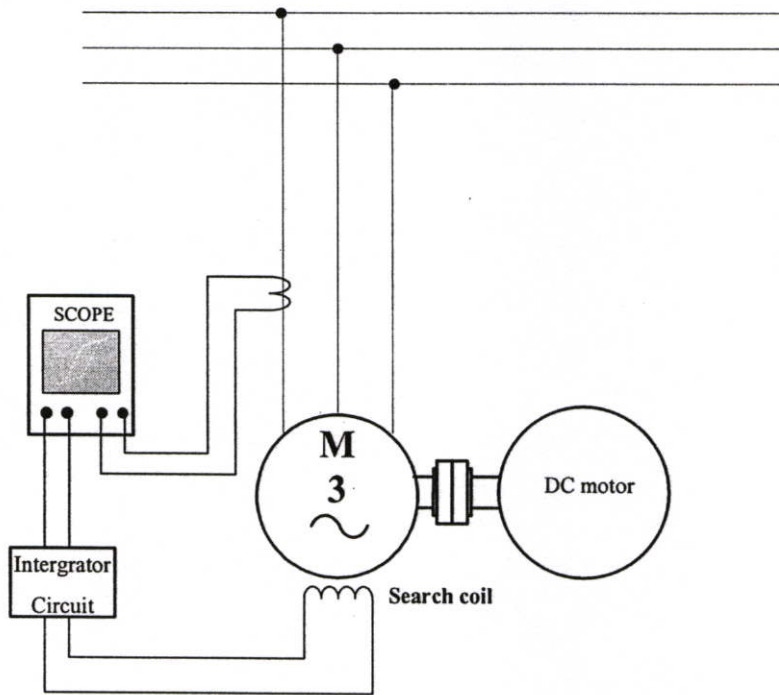
$$B = \frac{\phi}{A} \quad (5.2)$$

จากสมการแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำตามกฎของ Faraday's Law

$$e(t) = N \frac{d\phi}{dt} \quad (5.3)$$

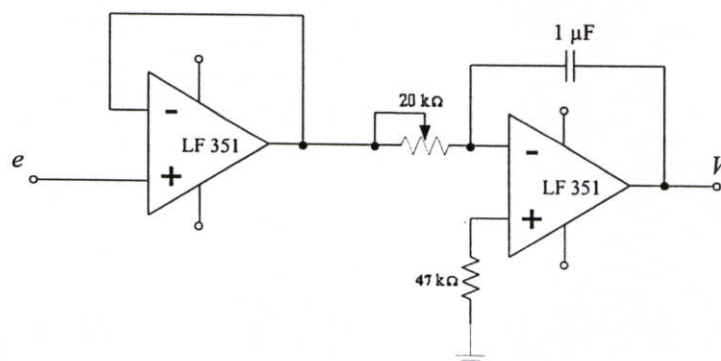
$$\phi = \int \frac{e(t)}{N} dt \quad (5.4)$$

จะเห็นว่าถ้าทำการอินทิเกรตสัญญาณแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ $e(t)$ ที่ได้จาก search coil จะกลายเป็นสัญญาณเส้นแรงแม่เหล็กและเมื่อนำมาหารกับพื้นที่หน้าตัด(A) ของแกนเหล็กจะเป็นความหนาแน่นแม่เหล็ก จึงต้องทำการสร้างวงจรตรวจจับสัญญาณที่เป็นอินทิเกรตเตอร์



รูปที่ 5.1 วงจรที่ใช้ในการวัด B-H Curve

วงจรที่ใช้ในการตรวจวัดสัญญาณใช้อุปกรณ์หลักคือ ออปแอมป์เบอร์ LF351 ประกอบขึ้นเป็นวงจร 3 ส่วนคือ วงจรบัฟเฟอร์ และวงจรอินทิเกรเตอร์

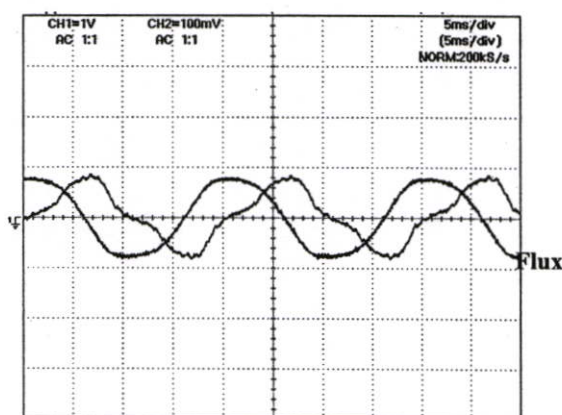


รูปที่ 5.2 วงจรตรวจจับสัญญาณ

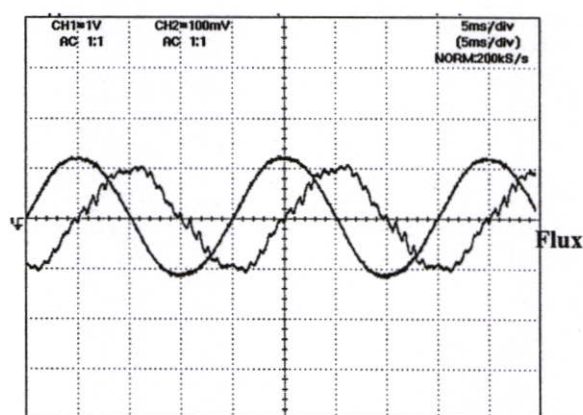
วงจรตรวจจับสัญญาณจะทำหน้าที่เลื่อนเฟสของสัญญาณขาเข้า e ที่ได้จาก Search coil เป็นมุม 90 องศา และส่งสัญญาณขาออก V ไปที่ ออสซิลอสโคปความสัมพันธ์ของแรงดันขาเข้าและออกเป็นดังสมการที่ 5.5

$$e = \frac{1}{RC} \int_0^t v dt \quad (5.5)$$

ผลจากการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1 HP และ 2 HP โดยทำการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยแหล่งจ่ายที่เป็น sinusoidal ตรวจจับสัญญาณ Teeth search coil และ Yoke search coil จะแสดงไว้ในรูปที่ 5.3 , 5.4 และ B-H curve จะแสดงไว้ในรูปที่ 5.8 โดยการตรวจจับสัญญาณกระแสที่ป้อนเข้ามอเตอร์เทียบกับ สัญญาณเส้นแรงแม่เหล็กที่ teeth



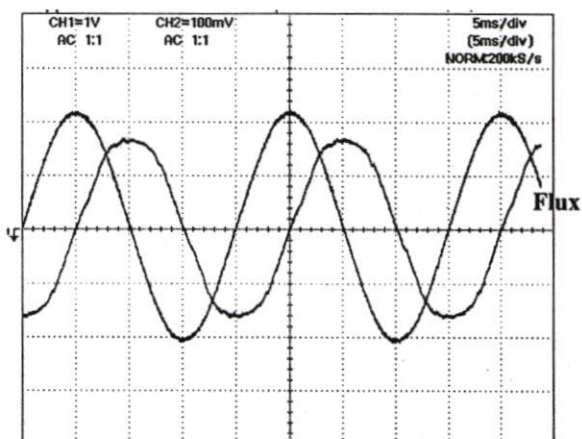
มอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1 HP



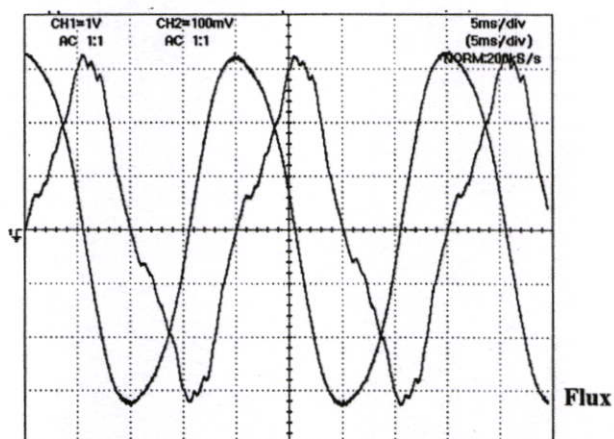
มอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 2 HP

รูปที่ 5.3 แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่ teeth และ สัญญาณเส้นแรงแม่เหล็กที่ teeth

ขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยแหล่งจ่ายที่เป็น sinusoidal



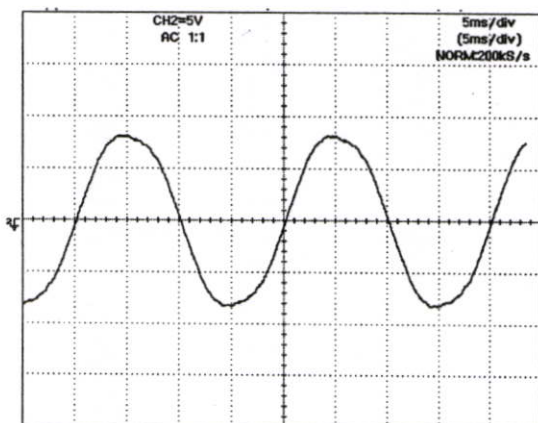
มอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1 HP



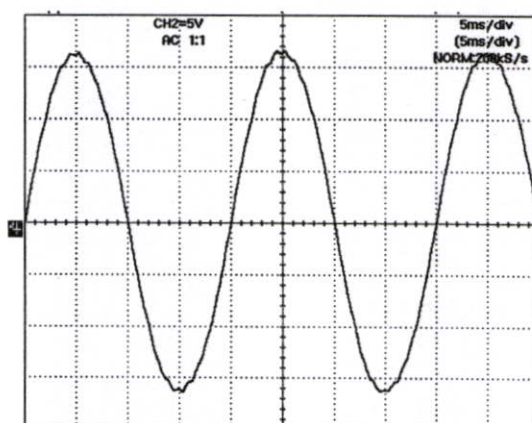
มอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 2 HP

รูปที่ 5.4 แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่ Yoke และ สัญญาณเส้นแรงแม่เหล็กที่ Yoke

ขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยแหล่งจ่ายที่เป็น sinusoidal

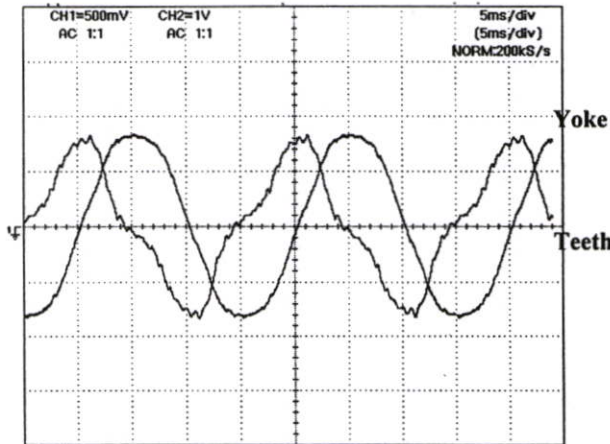


มอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1 HP

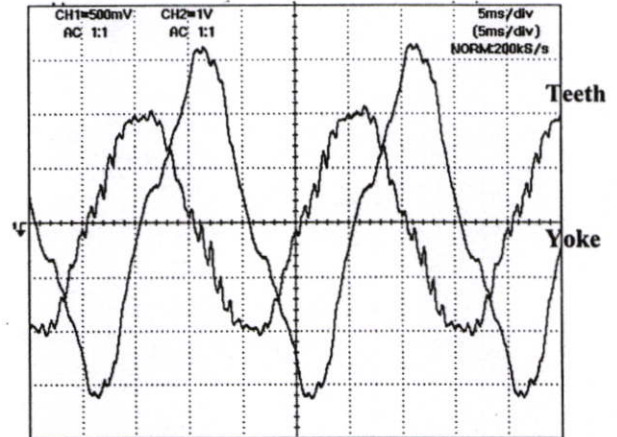


มอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 2 HP

รูปที่ 5.5 แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่ Pole search coil ขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยแหล่งจ่ายที่เป็น sinusoidal

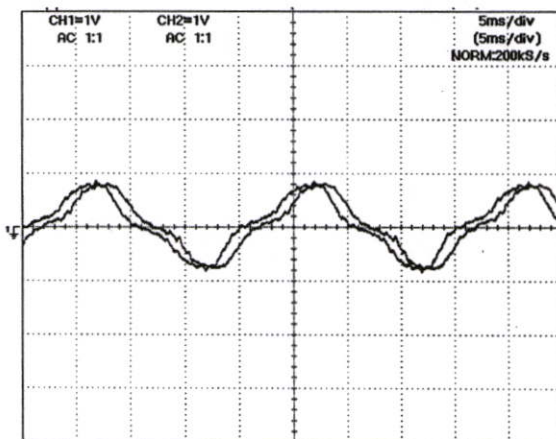


มอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1 HP

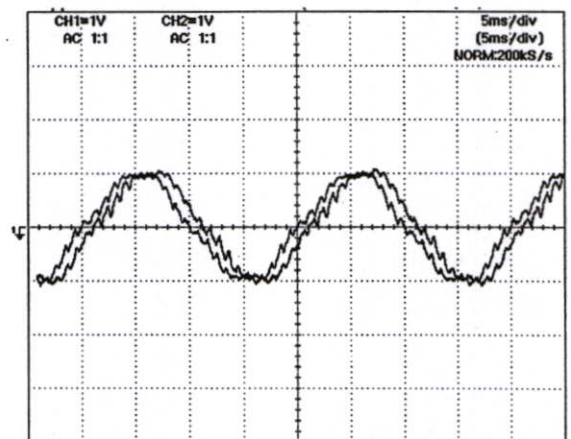


มอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 2 HP

รูปที่ 5.6 แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่teeth และแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ยoke ป้อนด้วย
 ขั้วเคลื่อนมอเตอร์ด้วยแหล่งจ่ายที่เป็นsinusoidal

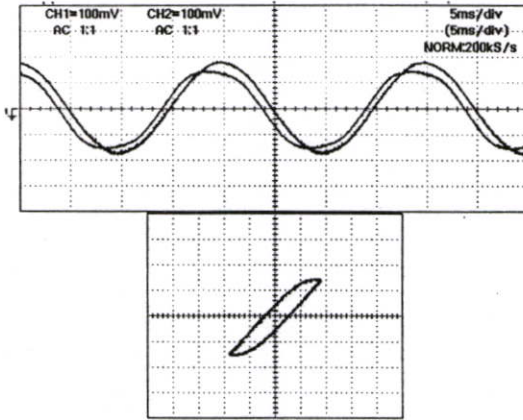


มอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1 HP

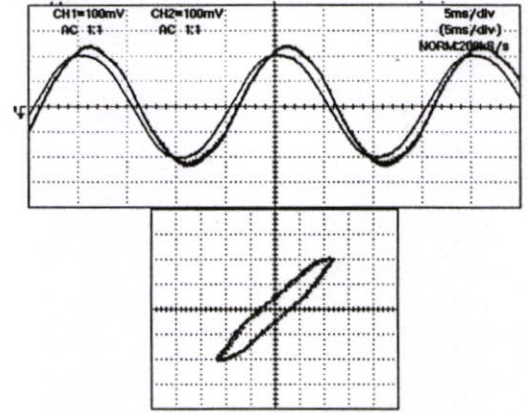


มอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 2 HP

รูปที่ 5.7 แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่teeth1 และแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่teeth2
 ต่างเฟสกัน 20 องศา ขั้วเคลื่อนมอเตอร์ด้วยแหล่งจ่ายที่เป็นsinusoidal



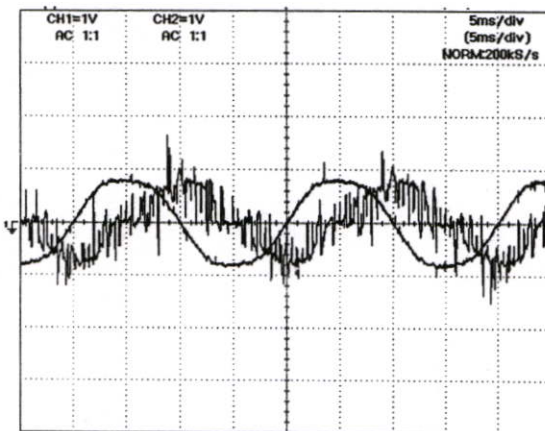
มอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1 HP



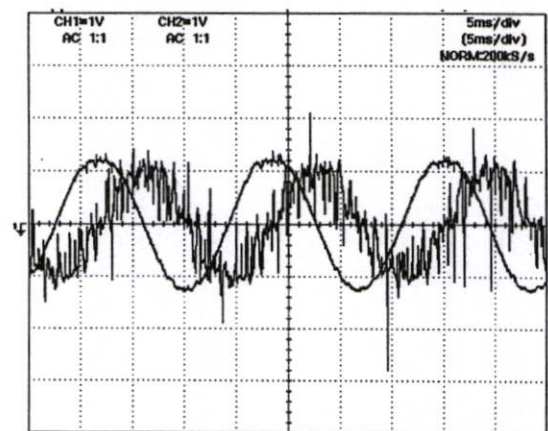
มอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 2 HP

รูปที่ 5.8 B-H curve ของแกนเหล็กภายในมอเตอร์ที่ถูกขับเคลื่อนมอเตอร์
ด้วยแหล่งจ่ายที่เป็น sinusoidal

ผลจากการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1 HP และ 2 HP โดยทำการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยแหล่งจ่ายที่เป็น PWM อินเวอร์เตอร์ ตรวจจับสัญญาณ Teeth search coil และ Yoke search coil จะแสดงไว้ในรูปที่ 5.9 , 5.10 และ B-H curve จะแสดงไว้ในรูปที่ 5.12 โดยการตรวจจับสัญญาณกระแสที่ป้อนเข้ามอเตอร์เทียบกับ สัญญาณเส้นแรงแม่เหล็กที่ teeth

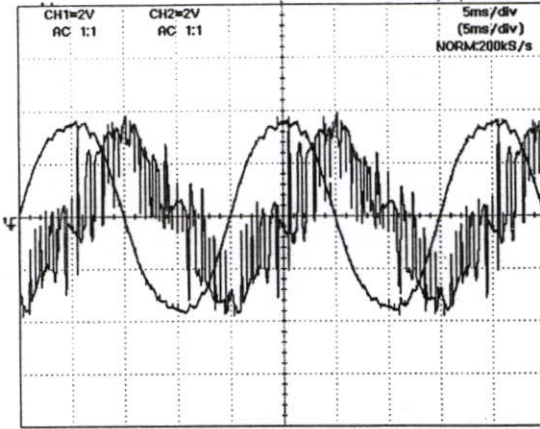


มอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1 HP

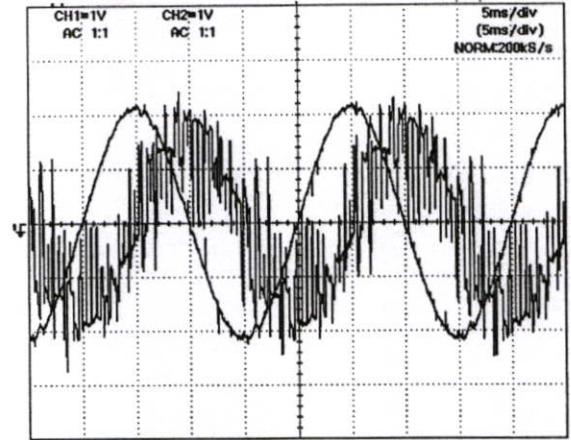


มอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 2 HP

รูปที่ 5.9 แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่ teeth และ สัญญาณเส้นแรงแม่เหล็กที่ teeth
ขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยแหล่งจ่ายที่เป็น PWM อินเวอร์เตอร์

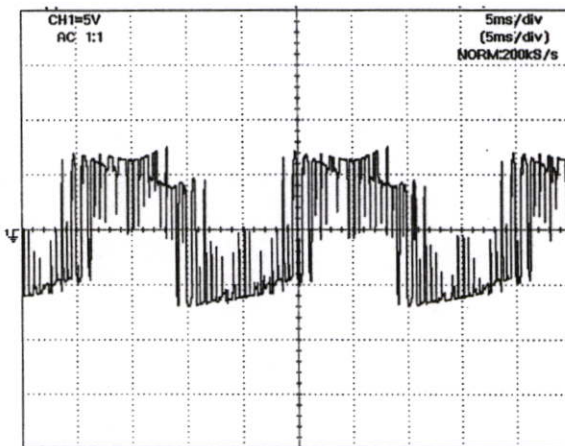


มอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1 HP

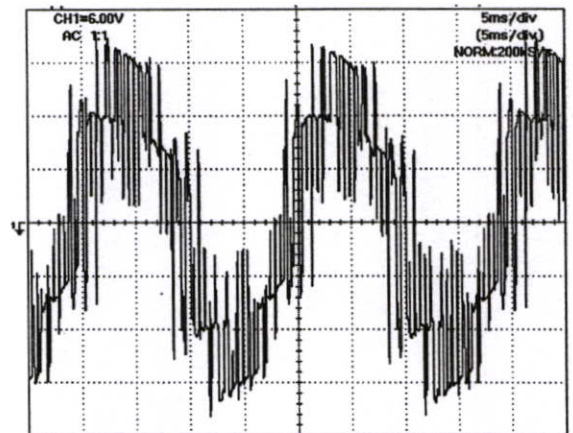


มอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 2 HP

รูปที่ 5.10 แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่ Yoke และ สัญญาณเส้นแรงแม่เหล็กที่ Yoke
ขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยแหล่งจ่ายที่เป็น PWM อินเวอร์เตอร์

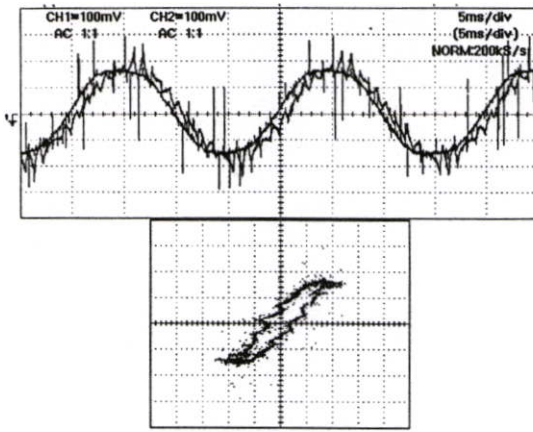


มอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1 HP

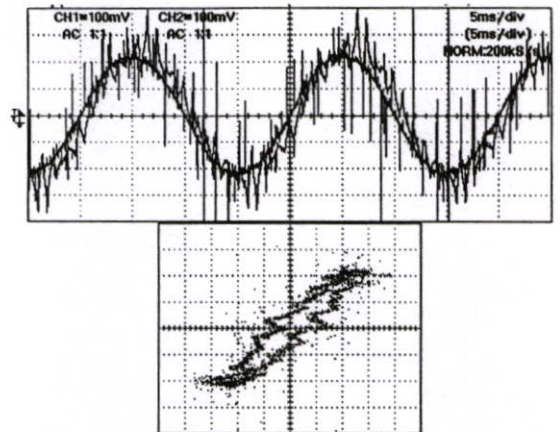


มอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 2 HP

รูปที่ 5.11 แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่ Pole search coil ขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยแหล่งจ่ายที่เป็น PWM
อินเวอร์เตอร์



มอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1 HP

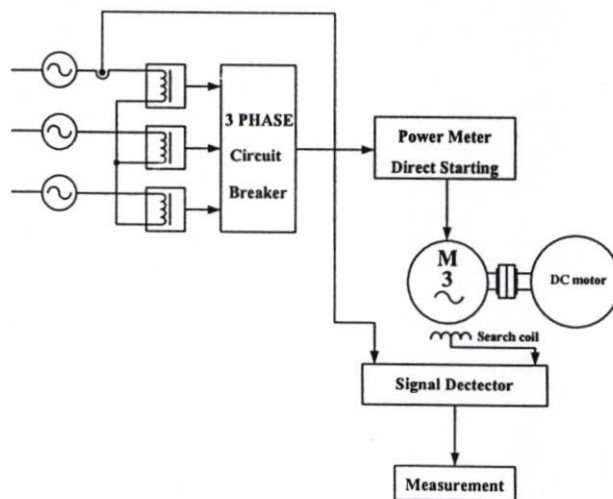


มอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 2 HP

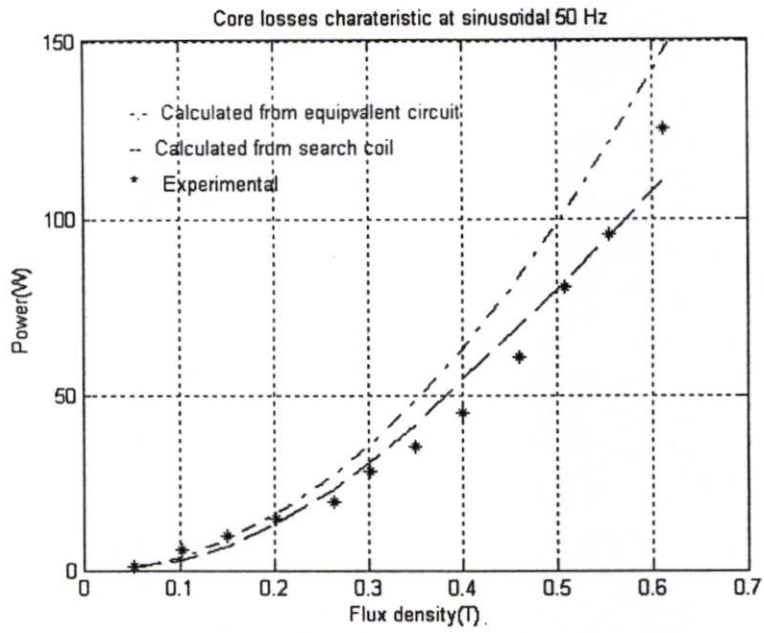
รูปที่ 5.12 B-H curve ของแกนเหล็กภายในมอเตอร์ถูกขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยแหล่งจ่ายที่เป็น PWM อินเวอร์เตอร์

5.3 ผลการเปรียบเทียบจากการขับเคลื่อนด้วยแหล่งจ่ายที่เป็นไซน์

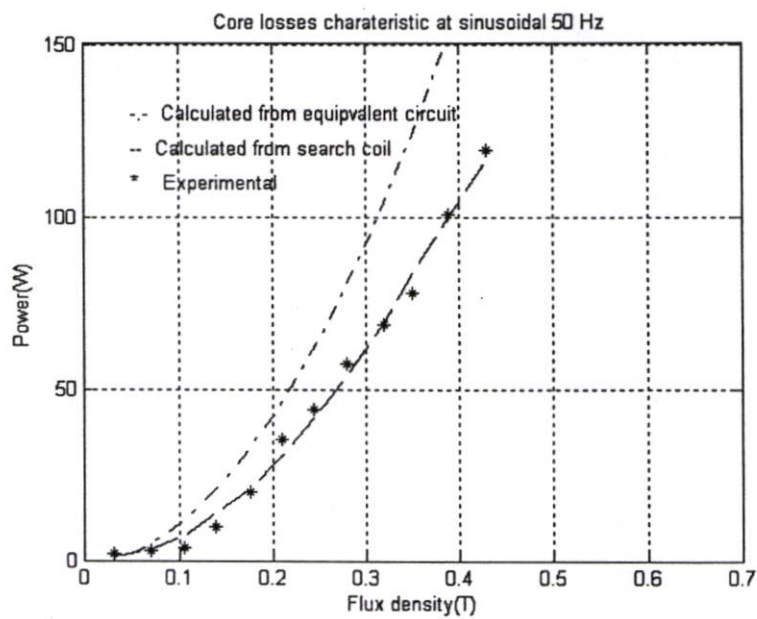
ทำการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นแม่เหล็ก \hat{B} โดยปรับแรงดันป้อนเข้ามอเตอร์ตั้งแต่ 0-240 Volt โดยการรักษาความเร็วโรเตอร์ให้เท่ากับความเร็วซิงโครนัส โดยการ Coupling กับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ดังแสดงการทดสอบดังรูปที่ 5.13 ที่ความถี่ไซน์ 50 Hz มาเปรียบเทียบกับผลของการหาการสูญเสียในแกนเหล็กที่เกิดขึ้นโดยหาจากการคำนวณพารามิเตอร์ในวงจรสมมูลโดยเขียน M-file ในโปรแกรม MATLAB , ทฤษฎีของ Search coil(ที่พันเข้าไปที่ Stator Yoke และ Stator Tooth) กับผลการทดสอบจากการวัดจริง ($P_{CORE} = P_{in} - 3I_1^2 R_1$)



รูปที่ 5.13 วงจรที่ใช้ในการทดสอบหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็กภายใต้การขับเคลื่อนด้วยแหล่งจ่ายที่เป็นไซน์



รูปที่ 5.14 เปรียบเทียบผลจากการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 HP

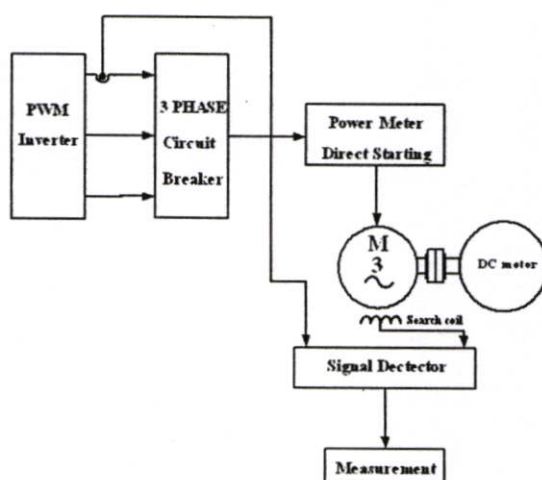


รูปที่ 5.15 เปรียบเทียบผลจากการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ 2 HP

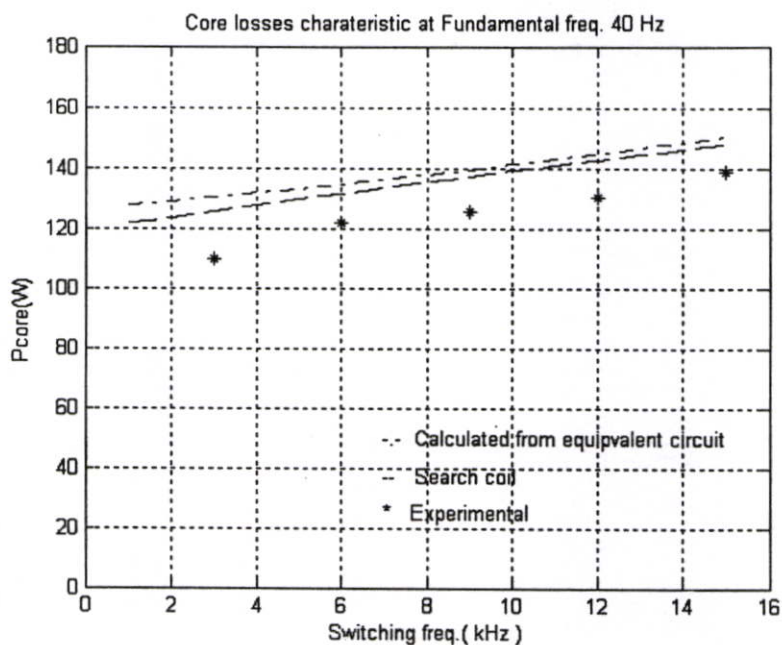
จากรูปที่ 5.14 , รูปที่ 5.15 ค่าที่คำนวณจาก Search coil มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่วัดจริง มากกว่าค่าที่คำนวณ มอเตอร์ขนาด 2 HP ที่ความหนาแน่นของแม่เหล็กในแกนเหล็กเท่ากับมอเตอร์ขนาด 1 HP จะมีความสูญเสียในแกนเหล็กสูงกว่า ในการออกแบบจะต้องหลีกเลี่ยงมิให้ค่า Flux density ใน Air gap สูงมากเกินไปเพราะจะทำให้ค่า Magnetic Current สูงส่งผลให้มอเตอร์มีอุณหภูมิสูงแต่อย่างไรก็ตามการเลือกค่า B ให้มีค่าสูงก็จะช่วยให้มอเตอร์มีค่า Over load capacity สูงซึ่งจะเป็นผลดีต่อตัวมอเตอร์ แต่ต้องไม่ให้ค่า B สูงจนเกิด Saturation ในส่วนของวงจรแม่เหล็กของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มี ขนาดพิกัดกำลังไม่เกิน 22 กิโลวัตต์โดยปกติแล้วจะมีค่า Air gap flux density ประมาณ 0.35 ถึง 0.6 T ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับผลการทดสอบ

5.4 ผลการเปรียบเทียบจากการขับเคลื่อนด้วยแหล่งจ่ายที่เป็น PWM อินเวอร์เตอร์

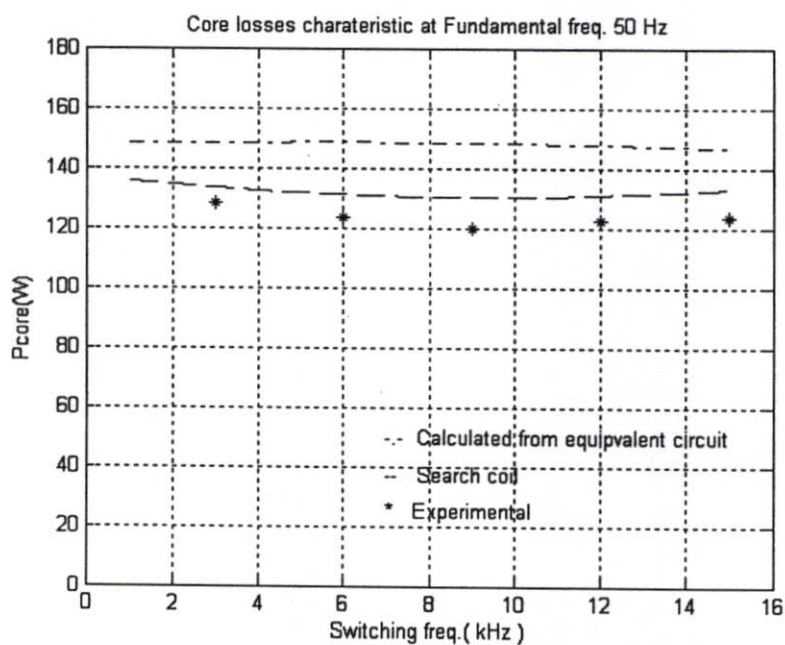
ทำการขับเคลื่อนมอเตอร์ขนาด 1 HP และ 2 HP ดังรูปที่ 5.16 โดยการปรับ PWM อินเวอร์เตอร์ที่ความถี่มูลฐาน 40 Hz , 50 Hz , 60 Hz และปรับความถี่สวิตช์ที่ 3 kHz , 6 kHz , 9 kHz , 12 kHz , 15 kHz ทำการวัดค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นเพื่อมาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณจากพารามิเตอร์ในวงจรสมมูลของมอเตอร์ผลที่ได้จากทฤษฎีของ Search coil และผลจากการวัดจริง ดังในรูปที่ 5.17 , รูปที่ 5.18 , รูปที่ 5.19 , รูปที่ 5.20 , รูปที่ 5.21 และ รูปที่ 5.22



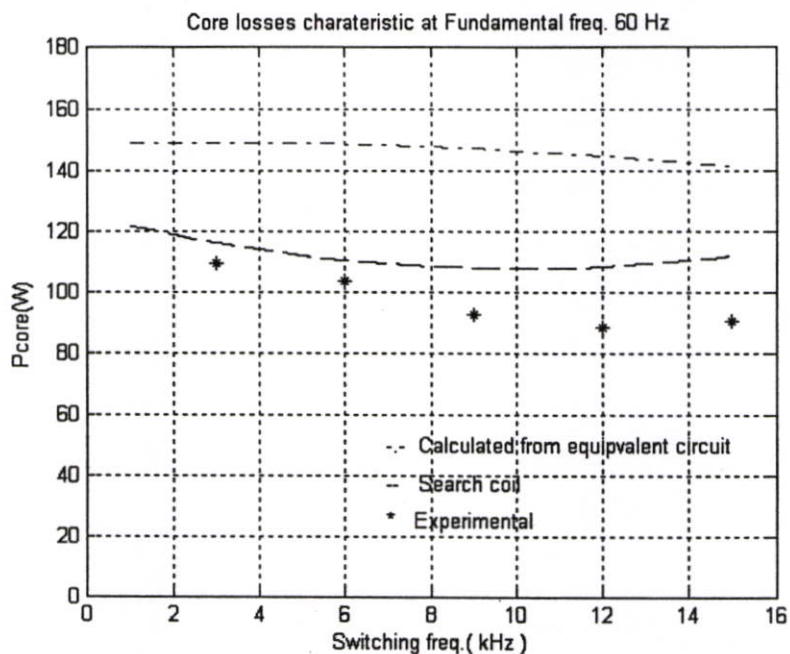
รูปที่ 5.16 วงจรที่ใช้ในการทดสอบหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็กภายใต้การขับเคลื่อนด้วยแหล่งจ่ายอินเวอร์เตอร์



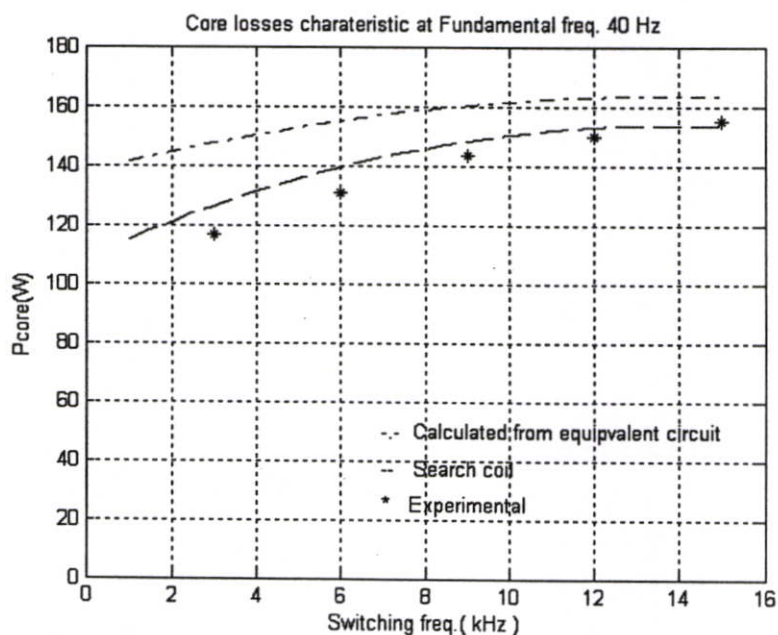
รูปที่ 5.17 ทำการเปรียบเทียบผลของมอเตอร์ 1 HP
ที่ถูกขับเคลื่อนด้วย PWM อินเวอร์เตอร์ที่ความถี่มูลฐาน 40 Hz



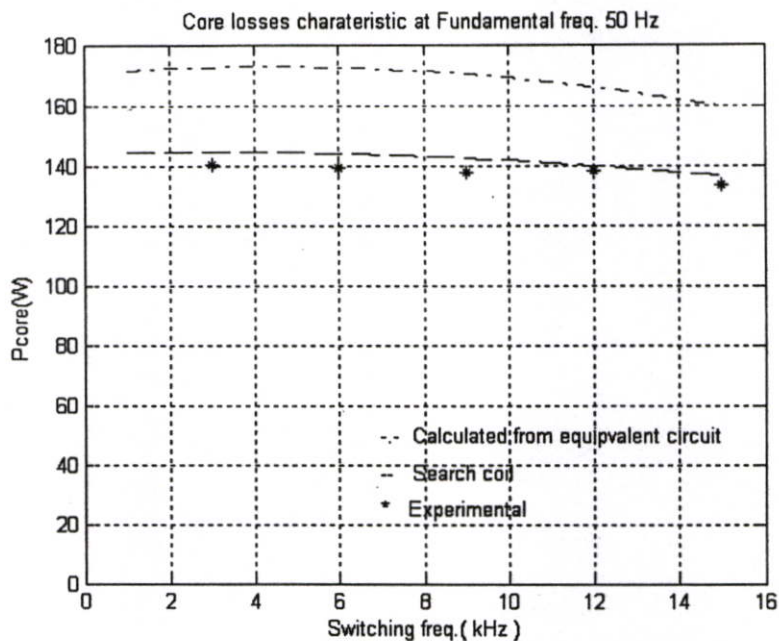
รูปที่ 5.18 ทำการเปรียบเทียบผลของมอเตอร์ 1 HP
ที่ถูกขับเคลื่อนด้วย PWM อินเวอร์เตอร์ที่ความถี่มูลฐาน 50 Hz



รูปที่ 5.19 ทำการเปรียบเทียบผลของมอเตอร์ 1 HP
ที่ถูกขับเคลื่อนด้วย PWM อินเวอร์เตอร์ที่ความถี่มูลฐาน 60 Hz

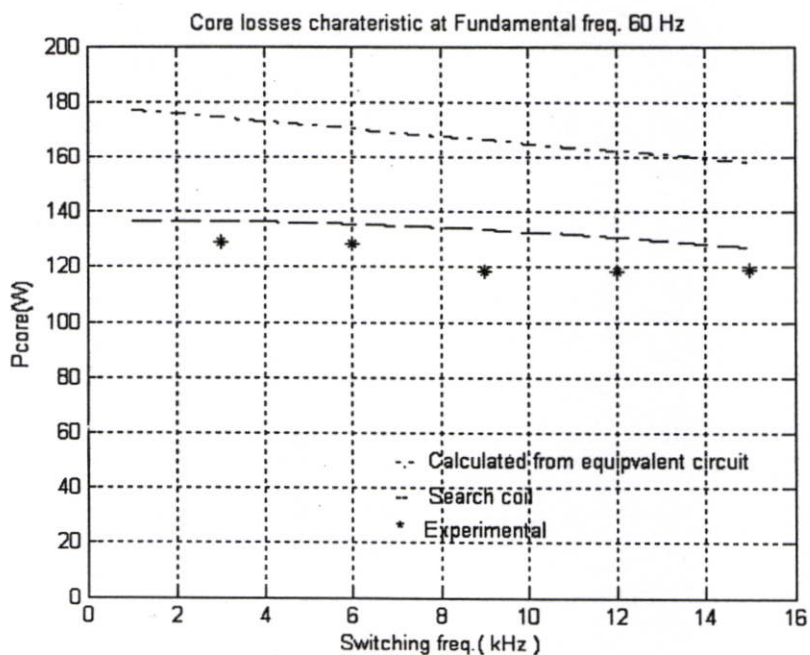


รูปที่ 5.20 ทำการเปรียบเทียบผลของมอเตอร์ 2 HP
ที่ถูกขับเคลื่อนด้วย PWM อินเวอร์เตอร์ที่ความถี่มูลฐาน 40 Hz



รูปที่ 5.21 ทำการเปรียบเทียบผลของมอเตอร์ 2 HP

ที่ถูกขับเคลื่อนด้วย PWM อินเวอร์เตอร์ที่มีความถี่มูลฐาน 50 Hz



รูปที่ 5.22 ทำการเปรียบเทียบผลของมอเตอร์ 2 HP

ที่ถูกขับเคลื่อนด้วย PWM อินเวอร์เตอร์ที่มีความถี่มูลฐาน 60 Hz

5.5 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงผลการเปรียบเทียบการหาความสูญเสียในแกนเหล็กจากการคำนวณโดยใช้วงจรมมูต การคำนวณจาก Search coil และการวัดจริงผลที่ได้จากการขับเคลื่อนมอเตอร์ขนาด 2 HP และ 1 HP ด้วยแรงดันไซน์ โดยการปรับเปลี่ยนความหนาแน่นแม่เหล็ก ที่ความหนาแน่นแม่เหล็กเท่ากันมอเตอร์ขนาด 2 HP จะมีความสูญเสียในแกนเหล็กสูงกว่า ผลจากการคำนวณโดยใช้ Search coil ค่าใกล้เคียงกับค่าจากการวัดแต่ค่าที่ได้จากการคำนวณโดยใช้วงจรมมูต จะมีค่าสูงกว่าการคำนวณโดยใช้ Search coil และการวัดจริง ส่วนในการขับเคลื่อนด้วย PWM อินเวอร์เตอร์ จะทำการปรับเปลี่ยนความถี่มูลฐาน และเปลี่ยนความถี่สวิตซ์ผลที่ได้ที่ความถี่มูลฐาน 50 Hz , 60 Hz เมื่อทำการเพิ่มความถี่สวิตซ์ความสูญเสียในแกนเหล็กมีค่าลดลงแต่ที่ความถี่สวิตซ์ 40 Hz เมื่อทำการเพิ่มความถี่สวิตซ์กลับมีความสูญเสียในแกนเหล็กเพิ่มมากขึ้นอันเป็นผลสืบเนื่องมาจากขนาดของแรงดันมูลฐานที่เอาท์พุทของ PWM อินเวอร์เตอร์ไม่คงที่

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลงานวิจัย

จากการวิจัยในเรื่องของการวิเคราะห์ค่าความสูญเสียในแกนเหล็กโดยใช้ Search coil ภายใต้การขับเคลื่อนด้วยแรงดันไซน์ และ PWM อินเวอร์เตอร์ ผู้วิจัยได้แบ่งขั้นตอนในการวิจัยเพื่อให้ใช้งานได้จริงและใกล้เคียงความถูกต้อง ค่าความสูญเสียในแกนเหล็กที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจาก Hysteresis loss และ Eddy current loss แปรผันตามความหนาแน่นแม่เหล็กและความถี่ การทดสอบยังต้องทำการรักษาความเร็วโรเตอร์ให้เท่ากับความเร็วเชิงโรตัสในขณะทดสอบแบบไร้อโหลด โดยการ Coupling มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงทำการรักษาความเร็วรักษาความเร็ว เพื่อลดค่าความสูญเสียที่ตัวโรเตอร์ซึ่งเกิดจากแรงเสียดทาน , การต้านของลม และกระแสที่ไหลในโรเตอร์ซึ่งเป็นตัวที่ทำให้เกิดค่าความสูญเสียในลวดทองแดงที่ โรเตอร์ให้น้อยที่สุดเพื่อให้ได้ค่าความสูญเสียในแกนเหล็กใกล้เคียงความถูกต้อง ทำให้ค่าความสูญเสียในแกนเหล็กมีค่า $P_{core} = P_{in} - 3I_1^2 R_1$ ซึ่งง่ายต่อการหาค่าความสูญเสีย การคำนวณหาด้วย Search coil จำเป็นต้องทำการวาง Search coil เข้าไปที่ตำแหน่งต่างๆใน สเตเตอร์ เช่น Teeth , Yoke , Pole จากนั้นทำการหาค่า constant coefficients of materials k_h, k_e ซึ่งเป็นคุณสมบัติของเหล็กและปริมาณของเหล็ก โดยทำการ Curve fitting จากความสัมพันธ์จากความหนาแน่นของแม่เหล็ก กับ ค่าความสูญเสียในแกนเหล็กโดยใช้โปรแกรม MATLAB เพื่อนำไปใช้ในทฤษฎี Search coil และยังสามารถที่จะนำ Search coil ไปใช้พล็อต B-H Curve ที่เกิดจากความสูญเสียฮิสเตอร์รีซิส ผลการเปรียบเทียบการหาความสูญเสียในแกนเหล็กจากการคำนวณโดยใช้วงจรสมมูล การคำนวณจาก Search coil และการวัดจริงผลที่ได้จากการขับเคลื่อนมอเตอร์ขนาด 2 HP และ 1 HP ด้วยแรงดันไซน์โดยการปรับเปลี่ยนความหนาแน่นแม่เหล็ก ที่ความหนาแน่นแม่เหล็กเท่ากันมอเตอร์ขนาด 2 HP จะมีความสูญเสียในแกนเหล็กสูงกว่า ผลจากการคำนวณโดยใช้ Search coil ค่าใกล้เคียงกับค่าจากการวัดแต่ค่าที่ได้จากการคำนวณโดยใช้วงจรสมมูล จะมีค่าสูงกว่าการคำนวณโดยใช้ Search coil และการวัดจริง ส่วนในการทดสอบโดยขับเคลื่อนด้วย PWM อินเวอร์เตอร์ จะทำการปรับเปลี่ยนความถี่มูลฐาน และเปลี่ยนความถี่สวิตช์ผลที่ได้ที่ความถี่มูลฐาน 50 Hz เมื่อทำการเพิ่มความถี่สวิตช์ความสูญเสียในแกนเหล็กมีค่าลดลง และที่ความถี่มูลฐาน 60 Hz จะถูกควบคุมให้แรงดันมูลฐานคงที่(ย่าน Field weakening)เป็นผลให้เส้นแรงแม่เหล็กลดลงการสูญเสียในแกนเหล็กลดลง เมื่อเพิ่มความถี่สวิตช์ก็ส่งผลให้ความสูญเสียในแกนเหล็กมีค่าลดลง แต่ที่ความถี่สวิตช์ 40 Hz เมื่อทำการเพิ่มความถี่สวิตช์กลับมีความสูญเสียในแกนเหล็กเพิ่มมากขึ้นอันเป็นผลสืบเนื่องมาจากขนาดของแรงดันมูลฐานที่สร้างจากอินเวอร์เตอร์เพื่อใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำไม่คงที่

6.2 ข้อเสนอแนะ

-ในงานวิจัยนี้ การที่จะใส่ Search coil เข้าไปในมอเตอร์เหนี่ยวนำได้นั้นจะต้องเป็นมอเตอร์ที่ไม่อาจคำนวณหาวิธีที่ขดลวดตัวนำในสเตเตอร์

-ผลกระทบจากความถี่ตามการทดสอบตามมาตรฐานของ IEEE Test Procedure ในบางครั้งไม่จำเป็นจะต้องพิจารณาก็ได้สำหรับมอเตอร์ทั่วไปที่มีพิกัดต่ำกว่า 18.5 kW (20 HP)

-ในการทดสอบหาค่า k_h , k_e ที่นำมาสร้าง Core loss model ที่ความถี่ 50 Hz ป้อนเข้ามอเตอร์เหนี่ยวนำ ยังสามารถนำไปใช้ที่ความถี่ป้อนเข้า 40 Hz, 60 Hz สังเกตว่าจากการทดสอบมอเตอร์ขนาด 1 HP Core loss model จะอยู่ในแนวเดียวกับ Measured core loss

-การเกิดความคลาดเคลื่อนของความสูญเสียในแกนเหล็กที่คำนวณได้จากพารามิเตอร์ในวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ เพราะไม่ได้คำนึงถึงผลของความร้อนในแกนเหล็กที่สูงขึ้นในขณะที่ทำการทดสอบ ซึ่งมีอิทธิพลต่อค่าความต้านทานในขดลวดของสเตเตอร์ และผลของฮาร์มอนิกที่มีอิทธิพลต่อพารามิเตอร์ในวงจรสมมูล ซึ่งอาจจะต้องทำการวิจัยต่อเพื่อที่จะค้นหาวงจรสมมูลใหม่ซึ่งเมื่อใช้ในการคำนวณให้ผลใกล้เคียงความถูกต้อง

เอกสารอ้างอิง

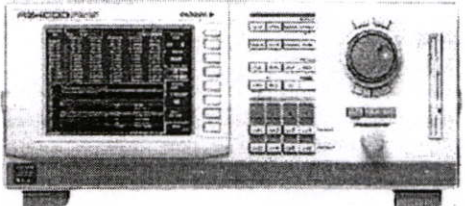
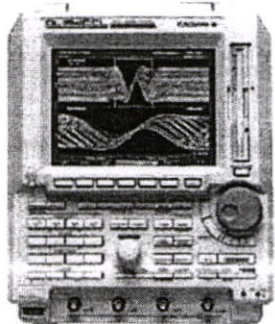

- [1] Ned Mohan, Tore M. Underland and William P. Robbins, "Power Electronic Converters, Applications and Design", John Wiley and sons, Inc., second edition, 1995
- [2] Rashid M.H., "Power Electronic : Circuits, Devices and Applications" Second Edition, Prentice-Hall Intern.Inc. New Jersey, 1993.
- [3] Mulukutla S. Sarma, "Electric Machines STADY-STATE THEORY AND DYNAMIC PERFORMANCE" Published in West Publishing Company, Inc. New York 1994
- [4] CHEE-MUN ONG, "Dynamic Simulation of Electric Machinery using MATLAB Simulink ", Prentice Hall PTR. 1998 ISBN 0-13-723785-5
- [5] P.C.SEN Professor of Electrical Engineering Queen's University, "ELECTRIC MACHINES AND POWER ELECTRONICS" Second Edition., Published simultaneously in Canada, Inc. Canada 1997.
- [6] Peter Vas "Parameter Estimation, Condition Monitoring, and Diagnosis of Electrical Machines" Published in the United States by Oxford University Press Inc. New York, 1993
- [7] A.Boglietti, P.Ferraris, M.Lazzari and F .Profumo, "Iron Losses in Magnetic Materials with Six-step and PWM Inverter Supply", IEEE Trans.on Magnetics, Vol.27, No.6, November 1991.
- [8] A.Boglietti, P.Ferraris, M.Lazzari and M.Pastorelli, "Change of the Iron Losses with the Switching Supply Frequency in Soft Magnetic Materials Supplied by PWM Inverter", IEEE Trans.on Magnetics, Vol.31, No.6, November 1995.
- [9] K.J. Tseng and S.B. Wee, "Analysis of Flux Distribution and Core Losses in Interior Permanent Magnet Motor", IEEE Trans.on Energy Conversion., Vol.14, No. 4, December 1999.
- [10] สุรินทร์ คำฝอย "การวัด และการวิเคราะห์คุณสมบัติของอินเวอร์เตอร์บนพื้นฐานของการสูญเสียในแกนเหล็กของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อถูกจ่ายโดยพีดีบีทวิเอ็มอินเวอร์เตอร์" วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2544

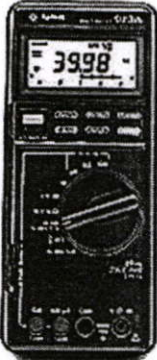
- [11] วิจิตร กิณเรศ “ สามเฟสเคลด้ามีอคคูเลต พี คับ บลิว เอ็ม อินเวอร์เตอร์สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า,สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ,2534
- [12] วรพงษ์ ตั้งศรีรัตน์. 2545. ออปแอมป์และการประมวลผลสัญญาณอะนาลอก. กรุงเทพฯ : บริษัท ว. เพ็ชรสกุล จำกัด.
- [13] ฤทธิรงค์ ตำแหน่งจีน และวิฑูร มลิวัลย์. ม.ป.ป. ออปแอมป์และลิเนียร์ไอซี. นนทบุรี : เจริญรุ่งเรืองการพิมพ์.
- [14] IEEE Std 112TM-2004 “IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators”, Revision of IEEE 112-1996


ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

อุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

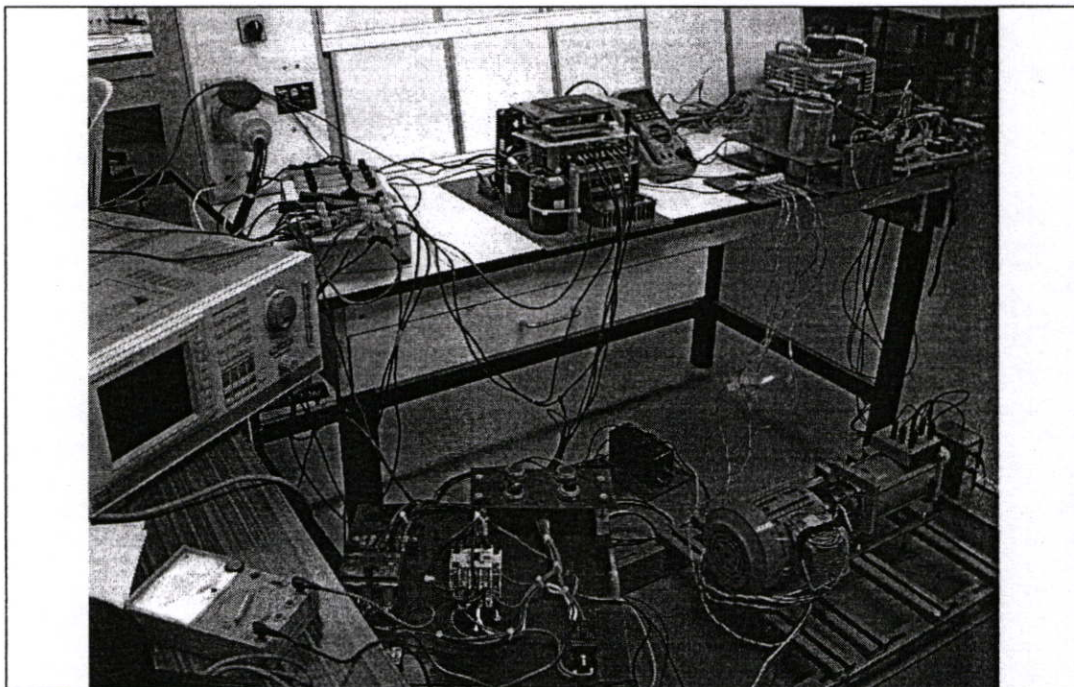
	<p>ผลิตภัณฑ์ Power Analyzer (YAKOGAWA) รุ่น PZ4000 รายละเอียด Wide Measurement Bandwidth (DC to 2 MHz) Accurately Sampling 5 MS/s Harmonic Analysis (up to 500th Order)</p>
	<p>ผลิตภัณฑ์ Digital Oscilloscope (YOKOGAWA) รุ่น DL1520/L (4 Channel) รายละเอียด 150 MHz bandwidth 200 MS/s sampling rate on one channel or 100 MS/s on two channels (DL1520/L) 8 bit vertical resolution DC to 30 MHz, 850V (DC + AC peak) 2% DC accuracy, Internal low pass filter</p>
	<p>ผลิตภัณฑ์ Current Probe (CHAUVIN ARNOUX) รุ่น E3N รายละเอียด Current Probe 10 – 100 Ampere / 1 Volt Input 100 A Peak Max Frequency: DC to 100 kHz. (@ 3 db) Output 10 mV/A, 100 mV/A CAT III</p>

	<p>ผลิตภัณฑ์ Multi Meter (Hewlett Packard)</p> <p>รุ่น 973A</p> <p>รายละเอียด True RMS 20 kHz Accuracy = 0.1%</p> <p>Vac or Vdc : 0 to 1000 Volts.</p> <p>Iac or Idc : 0 to 10 Amperes.</p>
---	---

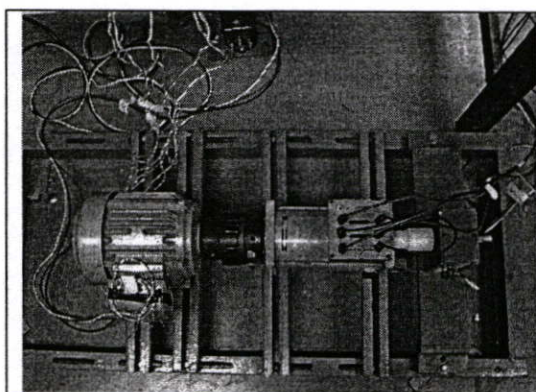
	<p>เครื่องวัดความเร็วรอบ</p>
--	------------------------------

ภาคผนวก ข

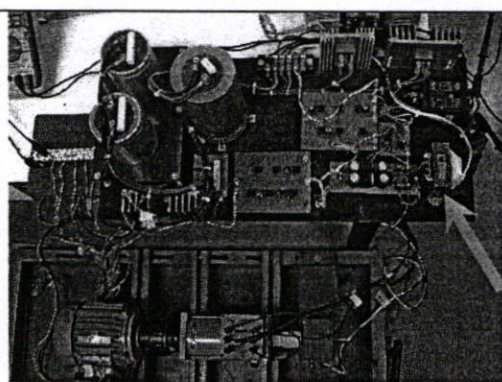
ภาพโดยรวมของโครงการวิจัย



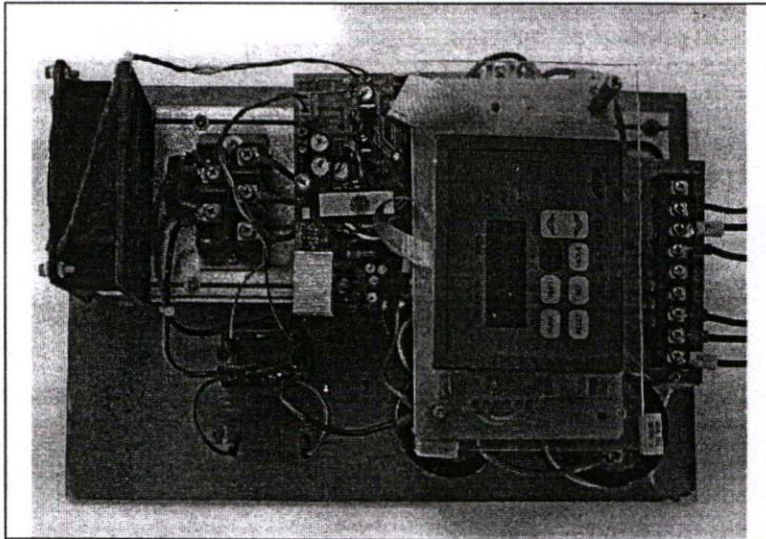
ภาพที่ ข.1 ภาพโดยรวมของวงจรทั้งหมด



ภาพที่ ข.2 การCoupling มอเตอร์เหนี่ยวนำ
เข้ากับ DC MOTOR



ภาพที่ ข.3 วงจรควบคุม DC MOTOR



ภาพที่ ข.4 ชุดควบคุมความเร็วรอบ PWM อินเวอร์เตอร์

ภาคผนวก ค

ผลงานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่ในงานประชุมวิชาการ



การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 28 28th Electrical Engineering Conference (EECON 28)



ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

	สารบัญบทความ
• สารบัญจากอธิการบดี/คณบดี/ประธาน	• ระบบควบคุมและการวัดคุม (CT)
• กรรมการการประชุม	• อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)
• บทความดีเด่น	• ไฟฟ้ากำลัง (PW)
• ครอบขีญ์เขียนบทความ	• ไฟฟ้าสื่อสาร (CM)
• Author Index	• คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (CP)
	• การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DS)
	• อิเล็กทรอนิกส์ (EL)
	• งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)



การวิเคราะห์ค่าความสูญเสียของแกนเหล็กในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยการใช้อุปกรณ์วัดเหนี่ยวนำภายใต้การขับเคลื่อนด้วย PWM อินเวอร์เตอร์

Analysis of Core Loss in an Induction Motor based on Search Coil Supplied from a PWM Inverter

ชวพร บำรุงพุกษ์ และวิจิตร กิมเรศ

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ถนนฉลองกรุง แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

โทร. 0-2737-3000 ต่อ 3519 E-mail:chavaponb@yahoo.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์ค่าความสูญเสียในแกนเหล็กของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เป็นผลมาจากการสูญเสียฮิสเทอรีซิส และการสูญเสียของกระแสไหลวนในแกนเหล็ก โดยใช้อุปกรณ์วัดเหนี่ยวนำตรวจจับเส้นแรงแม่เหล็กโดยตรงที่แกนเหล็ก ได้ทำการทดสอบภายใต้ความเร็วโรเตอร์เท่ากับความเร็วเชิงโครนัสและป้อนด้วยแหล่งจ่ายแรงดัน PWM การคำนวณโดยใช้อุปกรณ์วัดเหนี่ยวนำให้ผลใกล้เคียงค่าที่วัดจริงกว่าผลการคำนวณจากวงจรสมมูลของมอเตอร์แบบทั่วไป

Abstract

This paper presents the analysis of induction motor core loss due to hysteresis and eddy current losses by using search coil directly detecting magnetic flux. Testing with synchronous rotor speed and a PWM inverter voltage source has been performed. The loss calculation results are closer to measured results than a conventional equivalent circuit.

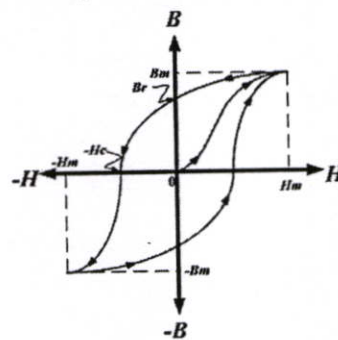
1. บทนำ

ในปัจจุบันการปรับความเร็ว มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถทำได้สะดวกขึ้น โดยการใช้อินเวอร์เตอร์ PWM ป้อนแรงดันเข้าที่ขดลวดมอเตอร์ผลที่ตามมา สามอนิกซ์ ที่เกิดจากการสวิตช์ ทำให้ ประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำต่ำลง เนื่องจากค่าความสูญเสียที่เพิ่มมากขึ้นจากกำลังงานสูญเสียโหลดแฝง(Stray Load Losses) ปรากฏการณ์ทางผิว(Skin effect) และค่าความสูญเสียของแกนเหล็ก(Core Losses) จากงานวิจัย [1]A.Boglietti ได้ชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของค่าความสูญเสียในแกนเหล็กทำการทดสอบภายใต้การป้อน Sinusoidal, Non-Sinusoidal และแรงดัน PWM อินเวอร์เตอร์โดยการปรับดัชนีการมอดูเลชัน, ความถี่สวิตช์ [1][2] แต่อย่างไรก็ตามงานของ A.Boglietti ยังไม่ได้แสดงถึงโมเดลของการสูญเสียที่ชัดเจน ในงานวิจัยนี้ได้เน้นการวัด และวิเคราะห์ค่าความ

สูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนเหล็กของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส โดย การคำนวณจากพารามิเตอร์ในวงจรสมมูล เปรียบเทียบกับวิธีการ กึ่งคำนวณกึ่งทดลองที่อาศัย ขดลวดเหนี่ยวนำ(Search Coil)

2. การวิเคราะห์ค่าความสูญเสียของแกนเหล็ก

การสูญเสียในแกนเหล็กโดยทั่วไป จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การสูญเสียฮิสเทอรีซิส(Hysteresis loss) และการสูญเสียกระแสไหลวนในแกนเหล็ก(Eddy-current loss) เป็นผลมาจากความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก $B(t)$ เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา นอกจากนี้ค่าความสูญเสียของแกนเหล็กยังขึ้นอยู่กับ ค่าความต้านทานรีล็กแตนซ์ และการออกแบบรูปทรงของวัสดุ ที่นำมาใช้ ผลของการสูญเสียฮิสเทอรีซิส



รูปที่ 1 ฮิสเทอรีซิสลูป(Hysteresis loop)

และการสูญเสียกระแสไหลวนในแกนเหล็ก[4] จะอยู่ในรูปของความร้อนที่ปรากฏขึ้นในแกนเหล็กพื้นที่ของฮิสเทอรีซิสลูป จะแสดงให้เห็นพลังงานที่สูญเสียใน 1 ไซเคิล เกิดขึ้นในปริมาตร 1 หน่วยของวัสดุที่นำมาใช้เป็นแกนเหล็กการสูญเสียฮิสเทอรีซิสต่อ 1 ไซเคิลในแกนเหล็กที่มีปริมาตร 1 หน่วย

$$P_h \text{ per cycle} = \text{Vol} \oint H dB \quad (1)$$

เมื่อทำการอินทิเกรตเส้นปิด(Closed line Integral)ในพื้นที่ของฮิสเตอร์รีซิส แสดงให้เห็นการสูญเสียฮิสเตอร์รีซิส[3]ในรูปแบบที่ใช้กันอยู่ โดยทั่วไปดังนี้

$$\bar{P}_{hysteresis} = k_h f \hat{B}^n \quad (2)$$

ค่าของ k_h เป็น สัมประสิทธิ์การสูญเสียฮิสเตอร์รีซิสที่ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของแกนเหล็กและปริมาตรของเหล็ก เลขยกกำลัง n มีค่าอยู่ระหว่าง 1.5 ถึง 2.5[4] ในงานวิจัยนี้ค่า \hat{B} มีค่าอยู่ระหว่าง 0.1-1.2 wb/m²[4] จึงใช้ค่า n เท่ากับ 2[4] f คือความถี่, \hat{B} เป็นค่าสูงสุดของความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก เมื่อความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลง เส้นแรงแม่เหล็กที่ไหลอยู่ในแกนเหล็กขุดตัวและขยายตัวตัดผ่านแกนเหล็กเหนี่ยวนำให้เกิด แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำไหลวนในแกนเหล็ก ซึ่งเรียกว่า "Eddy current" กระแสไหลวนนี้ จะทำให้เกิดความสูญเสียในรูปของความร้อน และการสูญเสียอำนาจแม่เหล็กค่าความสูญเสียของ กระแสไหลวน[3]แสดงไว้ดังนี้

$$\bar{P}_{eddy} = k_e f^2 \hat{B}^2 \quad (3)$$

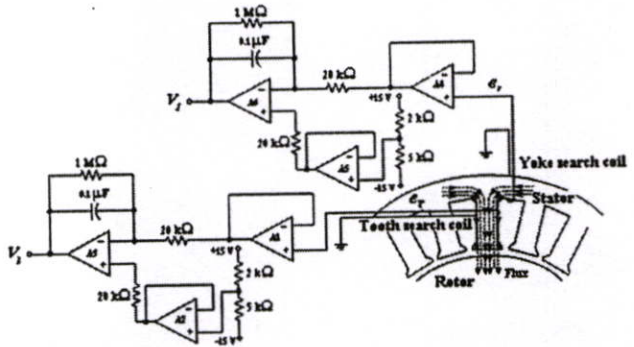
เมื่อ k_e เป็น สัมประสิทธิ์การสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่นำมาใช้เป็นแกนเหล็ก และความหนาของแผ่นลามิเนทสามารถนำมาเขียนเป็นค่าความสูญเสียรวมที่เกิดขึ้นในแกนเหล็กได้ดังนี้

$$\bar{P}_{core} = \bar{P}_{hysteresis} + \bar{P}_{eddy} = k_h f \hat{B}^n + k_e f^2 \hat{B}^2 \quad (4)$$

3. ทฤษฎีการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าของขดลวดเหนี่ยวนำ (Search Coil Induce Voltage Method)

เมื่อทำการพันขดลวดเหนี่ยวนำ(Search Coil) 1 รอบ เข้าไปที่ Yoke และTeethเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า e_y, e_r ป้อนผ่านวงจรตรวจจับแบบอินทิเกรตเตอร์จะเปลี่ยนให้เป็นสัญญาณของเส้นแรงแม่เหล็ก(V_p, V_s) ดังรูปที่ 2 สามารถคำนวณหาค่าความสูญเสียที่เกิดจากกระแสไหลวนที่Stator Teeth และStator Yoke [3] ดังสมการที่ 6 และการสูญเสียฮิสเตอร์รีซิส[3] สามารถหาคำนวณหาจากสมการที่ 8 δ คือความหนาแน่นของวัสดุ ที่นำมาใช้เป็นแกนเหล็ก(Core material mass density) มีหน่วยเป็น kg/m³, T เป็นเวลาของการเปลี่ยนแปลง $\left(\frac{dB}{dt}\right)$ ใน

1 ไซเคิล $T = \frac{2\pi}{P\omega_m}$ [2], P คือจำนวนขั้วของขั้วแม่เหล็ก, ω_m คือความเร็วของมอเตอร์ทางกลมีหน่วยเป็น(rad/s)



รูปที่ 2 การวัดเส้นแรงแม่เหล็กโดยใช้ขดลวดเหนี่ยวนำ

$$\bar{P}_{eddy} = k_e f^2 \hat{B}^2 = \frac{k_e}{2\pi^2} \left(\frac{dB}{dt}\right)_{rms}^2 = \frac{k_e}{2\pi^2 T} \int_0^T \left(\frac{dB}{dt}\right)^2 dt \quad (5)$$

$$\bar{P}_{eddy} = \frac{k_e \delta}{2\pi^2 T} \left[\frac{V_T}{A_T^2} \int_0^T e_T^2 dt + \frac{V_y}{A_r^2} \int_0^T e_r^2 dt \right] \quad (6)$$

$$\bar{P}_{hysteresis} = k_h f \hat{B}^n = \frac{k_h}{T} \left(\int \frac{e}{A} dt \right)^n \quad (7)$$

$$\bar{P}_{hysteresis} = \frac{k_h \delta}{T} \left[V_T \left(\left| \int \frac{e_T}{A_T} dt \right|_{peak} \right)^n + V_y \left(\left| \int \frac{e_y}{A_y} dt \right|_{peak} \right)^n \right] \quad (8)$$

**Motor dimensions จะเป็นข้อมูลของมอเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณมีดังนี้
 Stator tooth volume, $V_T = 3.922 \times 10^{-4} \text{ m}^3$; Stator yoke volume, $V_y = 247.996 \times 10^{-6} \text{ m}^3$; Tooth width, $l_T = 0.0175 \text{ m}$; Stator tooth area, $A_T = 3.7 \times 10^{-4} \text{ m}^2$; Stator yoke area, $A_y = 9.25 \times 10^{-4} \text{ m}^2$; Core material mass density, $\delta = 14885.796 \text{ kg/m}^3, R_r = 10.244 \Omega$

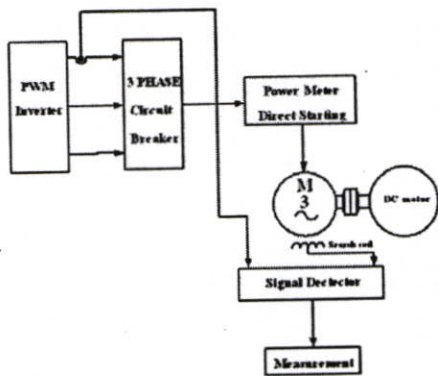
4. ผลการทดสอบ

เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์ k_h, k_e ที่นำมาใช้ในการคำนวณไม่มีข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิตมอเตอร์ จึงจำเป็นต้องทำการหาโดยการ Curve fitting จากการสูญเสียที่วัดได้โดยอาศัยโปรแกรม MATLAB ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก \hat{B} สามารถหาได้โดยการใส่ Search coil จำนวน 10 รอบ เข้าไปที่ขั้วแม่เหล็กที่ 1 ของเฟสที่ 1 เพื่อเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า แทนค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำลงในสมการที่ (9),(10)[1] ทำการทดสอบความจรรูปที่ 3 โดยใช้แรงดันไซน์แทน PWM อินเวอร์เตอร์ เพื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่า \hat{B} โดยปรับแรงดันเฟสที่ป้อนเข้ามอเตอร์ตั้งแต่ 0-240 V

$$\Phi_m = \frac{E_{rms}}{4.44 Nf} \tag{9}$$

N คือจำนวนรอบของ Search coil, f คือความถี่ไฟฟ้าเมื่อนำ Φ_m จากสมการที่(9)มาหารกับพื้นที่หน้าตัดของขั้วแม่เหล็กซึ่งพื้นที่หน้าตัดมีค่าเท่ากับ $46.69 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ จะได้เป็นค่า \hat{B} ดังสมการที่(10)

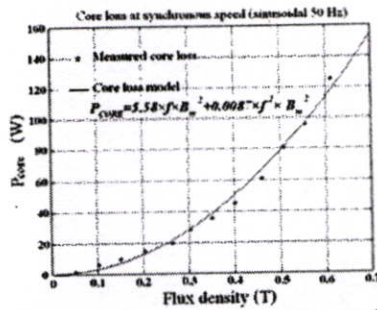
$$\hat{B} = \frac{E_{rms}}{2.073 \times 10^{-12} \times Nf} \tag{10}$$



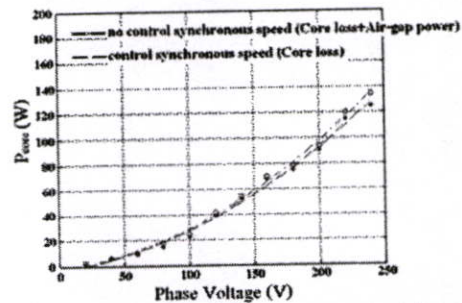
รูปที่ 3 วงจรที่ใช้ในการทดสอบหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็กภายใต้การขับเคลื่อนด้วยแหล่งจ่ายอินเวอร์เตอร์

ทำการวัดกำลังไฟฟ้าในขณะไร้โหลด (P_m) โดยนำมอเตอร์เหนี่ยวนำ ทำการเชื่อมต่อปลายเฟลา(Coupling) กับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อรักษาความเร็วให้เท่ากับความเร็วซิงโครนัส การสูญเสียในแกนเหล็กที่วัดได้จะหาได้จากสมการที่ 11 ผลของการ Curve fitting จะได้ค่า $k_h=5.85, k_e=8.7 \times 10^{-3}$ และ $n=2$ นำมาเขียนเป็น Core loss model ดังแสดงในรูปที่ 4 จากรูปที่5 แสดงความแตกต่างของ P_m ถ้าไม่ทำการควบคุมความเร็วในขณะไร้โหลดให้เท่ากับความเร็วซิงโครนัส จะเกิดค่าความสูญเสียที่เพิ่มขึ้น จาก Air-gap power

$$\text{Measured core losses} = P_{in} - 3 I_1^2 R_l \tag{11}$$

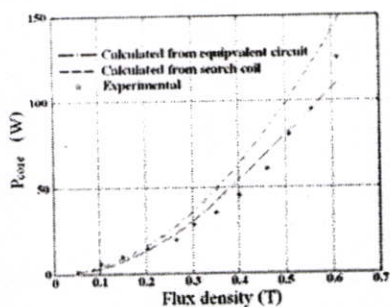


รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ของความเร็วสูญเสียในแกนเหล็กที่ได้จากโมเดลกับค่าที่วัดได้

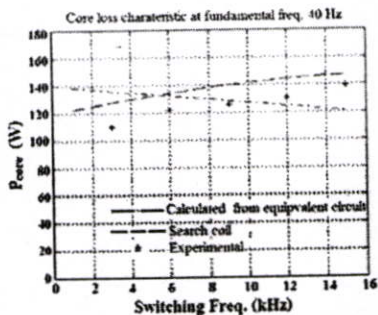


รูปที่ 5 แสดงความแตกต่างของกำลังไฟฟ้าในขณะไร้โหลดเมื่อทำการชดเชยความเร็วโรเตอร์กับไม่ได้ทำการชดเชยความเร็วโรเตอร์ให้เท่ากับความเร็วซิงโครนัส

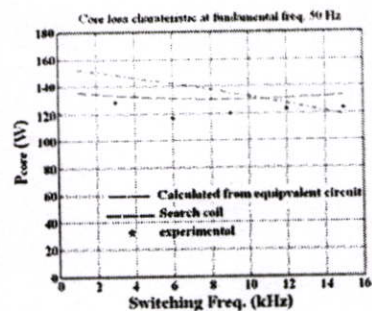
รูปที่ 6,รูปที่ 7,รูปที่ 8 และรูปที่ 9 จะเป็นการเปรียบเทียบหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็กจากการคำนวณจากวงจรสมมูล,ค่าความจากร Search coil จากการวัดจริง รูปที่ 6 จะทำการป้อนด้วยไซน์จะเห็นได้ว่าค่าความจากร Search coil จะมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดสอบจากการวัดจริง จากรูปที่ 7 ทำการทดสอบโดยการป้อน PWM อินเวอร์เตอร์ ใช้เทคนิคการควบคุมแบบ V/f เมื่อเพิ่มความถี่อินเตอร์จาก 40 Hz เป็น 50 Hz ดังรูปที่ 8 จะทำให้แรงดันมูลฐานที่ป้อนให้มอเตอร์เพิ่มขึ้น เป็นผลทำให้ ค่าความสูญเสียในแกนเหล็กมีค่าสูงขึ้น รูปที่9 ทำการเปลี่ยนความถี่อินเตอร์เป็น 60 Hz จะถูกควบคุมให้แรงดันมูลฐานคงที่(ย่าน Field weakening) เป็นผลให้เส้นแรงแม่เหล็กลดลงส่งผลให้ การสูญเสียในแกนเหล็กลดลงเมื่อเพิ่มความถี่สวิตซ์ก็ส่งผลให้ความสูญเสียในแกนเหล็กลดลงเช่นกัน ให้ผลสอดคล้องกับ[2]ตามรูปที่ 8 และรูปที่ 9 ส่วนในรูปที่ 7 เป็นผลมาจากเส้นแรงแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากแรงดันมูลฐานไม่คงที่ จากวงจรตรวจจับที่สร้างขึ้นนำสัญญาณ ในรูปที่ 10 โดยดึงออสซิลโลสโคปไว้ที่ X-Y โหมดซึ่งเทียบเท่ากับการพล็อต B-H curve ที่ความถี่สวิตซ์ 3 kHz ความถี่อินเวอร์เตอร์ 50 Hz ดังแสดงในรูปที่ 11 จะสังเกตเห็นว่ามี minor loop เกิดขึ้นเป็นผลมาจากฮาร์มอนิกส์



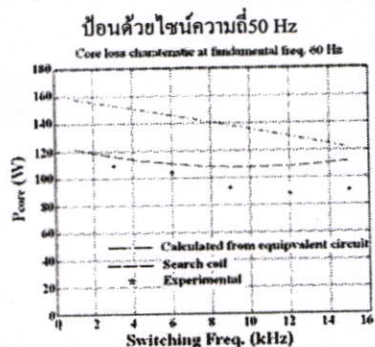
รูปที่ 6 ค่าความสูญเสียของแกนเหล็กที่ได้จากการเปลี่ยนความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (B_m)



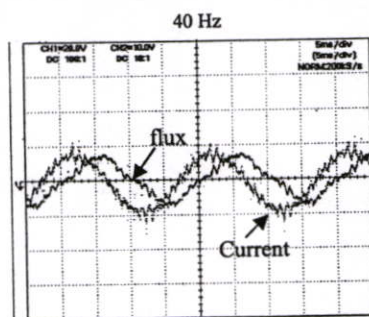
รูปที่ 7 ค่าความสูญเสียของแกนเหล็กที่ได้จากการเปลี่ยนความถี่สวิตช์, ความถี่อินเวอร์เตอร์



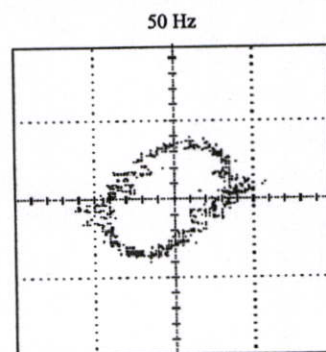
รูปที่ 8 ค่าความสูญเสียของแกนเหล็กที่ได้จากการเปลี่ยนความถี่สวิตช์, ความถี่อินเวอร์เตอร์



รูปที่ 9 ค่าความสูญเสียของแกนเหล็กที่ได้จากการเปลี่ยนความถี่สวิตช์, ความถี่อินเวอร์เตอร์ 60 Hz



รูปที่ 10 กระแสไฟฟ้าในเฟสที่ 1 และเส้นแรงแม่เหล็กที่ไหลใน teeth ในมอเตอร์



รูปที่ 11 B-H curve ที่ได้จากการป้อนแหล่งจ่ายที่เป็น PWM อินเวอร์เตอร์ที่ความถี่สวิตช์ 3 kHz ความถี่อินเวอร์เตอร์ 50 Hz

5. บทสรุป

บทความนี้ได้นำเสนอวิธีการคำนวณหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็กภายใต้การขับเคลื่อนด้วย PWM อินเวอร์เตอร์อยู่ในย่าน ω_f คงที่และพัลส์ช่อนตัว โดยอาศัยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมาควบคุมความเร็วโรเตอร์ให้เท่ากับความเร็วเชิงโรตัสเพื่อให้ค่าการสูญเสียที่วัดได้ใกล้เคียงความถูกต้องผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าความถี่อินเวอร์เตอร์สูงขึ้น ค่าการสูญเสียในแกนเหล็กมีค่าเพิ่มขึ้นสำหรับย่าน ω_f คงที่ค่า การสูญเสียในแกนเหล็ก มีค่าลดลง การคำนวณจาก Search coil จะมีค่าใกล้เคียงผลจากการทดลองมากกว่าคำนวณจากวงจรสมมูลของมอเตอร์แบบทั่วไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Boglietti, P. Ferraris, M. Lazzari and F. Profumo, "Iron Losses in Magnetic Materials with Six-step and PWM Inverter Supply", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 27, No. 6, November 1991.
- [2] A. Boglietti, P. Ferraris, M. Lazzari and M. Pastorelli, "Change of the Iron Losses with the Switching Supply Frequency in Soft Magnetic Materials Supplied by PWM Inverter", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 31, No. 6, November 1995.

[3] K.J. Tseng and S.B. Wee, "Analysis of Flux Distribution and Core Losses in Interior Permanent Magnet Motor", IEEE Trans. on Energy Conversion., Vol. 14, No. 4, December 1999.

[4] Mulukutla S. Sarma, "Electric Machines STADY-STATE THEORY AND DYNAMIC PERFORMANCE" Published in West Publishing Company, Inc. New York 1994.



คุณทหารลาดกระบัง



วิจิตร กิณเรศ สำเร็จการศึกษาระดับ วศบ. (เกียรตินิยมอันดับ 2) วศม. จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และ Ph.D. จาก University of Nottingham, UK.

ปัจจุบันดำรงตำแหน่งรองศาสตราจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง งานวิจัยที่สนใจในด้าน Power Electronic and Electric Drives.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายชวพร บำรุงพฤกษ์
วัน เดือน ปีเกิด	17 พฤษภาคม 2514 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร
ที่อยู่	406 ต.แสนสุข อ.เมือง จ.ชลบุรี 20130
ประวัติการศึกษา	2539 อดุสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า-ไฟฟ้ากำลัง มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
ประสบการณ์การทำงาน	
พ.ศ.2537-พ.ศ.2538	ตำแหน่ง ครูจ้างสอน แผนกไฟฟ้า วิทยาลัยการอาชีพนครปฐม
พ.ศ.2540-พ.ศ.2542	Project Engineer SIAM PAPER CO., LTD
พ.ศ.2542-พ.ศ.2543	ตำแหน่ง อาจารย์ แผนกไฟฟ้ากำลัง โรงเรียนเทคโนโลยีทีพีไอ
พ.ศ.2543-ปัจจุบัน	ตำแหน่ง อาจารย์ แผนกไฟฟ้ากำลัง โรงเรียนเทคโนโลยีภาคตะวันออก(อีเทค)