

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาการตรวจจับความบกพร่องของแท่งตัวนำโรเตอร์แตกหัก
ในมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม

A STUDY OF INDUCTION MOTOR BROKEN ROTOR BAR
FAULTS DETECTION USING NEURAL NETWORKS



ปพน สะอาดยวง
PAPOL SARDYOUNG

วพ.
ป/บ/ก
๒๕๔๙

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 63660
วัน,เดือน,ปี..... 30 ส.ค. 2549

b..... 11๖3๙3๗๔
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ISBN 974-15-2695-4
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**A STUDY OF INDUCTION MOTOR BROKEN ROTOR BAR
FAULTS DETECTION USING NEURAL NETWORKS**



**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 TNECHOLOGY LADKRABANG**

2006

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่ระบุไว้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ISBN 974-15-2695-4
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2006

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

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

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาความบกพร่องของแท่งตัวนำโรเตอร์แตกหัก
ในมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม

นักศึกษา

นายปพน สะอาดวง

รหัสนักศึกษา

44061048

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

พ.ศ.

2549

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์

รศ.ดร.วิจิตร กิมเรศ

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการตรวจจับความบกพร่องของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ที่มีสาเหตุมาจากแท่งตัวนำโรเตอร์แตกหักและการลัดรอบขดลวดสเตเตอร์ การวินิจฉัยความผิดปกติดังกล่าวจะวิเคราะห์สเปกตรัมองค์ประกอบความถี่จากกระแสสเตเตอร์ โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมคุณสมบัติของฟอลต์ดังกล่าวจะสร้างฮาร์มอนิกส์ปะปนกับองค์ประกอบความถี่มูลฐานของกระแสสเตเตอร์ การวิเคราะห์ดังกล่าวจะอาศัยการแปลงสัญญาณกระแสสเตเตอร์เพียง 1 เฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ในการวิเคราะห์ในโดเมนความถี่ของกระแสสเตเตอร์ โดยใช้การแปลงสัญญาณฟูเรียร์แบบรวดเร็วเพื่อพิจารณาฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นปะปนรวมอยู่ในสัญญาณกระแสสเตเตอร์ แล้วข้อมูลสัญญาณดังกล่าวจะถูกเก็บ และนำไปประมวลผลด้วยเทคนิคออฟไลน์ โดยใช้โปรแกรมประยุกต์ที่สร้างขึ้นจากโปรแกรม MATLAB แล้วทำการวิเคราะห์สเปกตรัมฮาร์มอนิกในหน่วยเดซิเบล ข้อมูลที่ได้นี้จะถูกนำไปทำการฝึกสอนกับโครงข่ายประสาทเทียมให้มีการเรียนรู้ และสามารถระบุปัญหาที่เกิดขึ้นได้ ตามลักษณะการแตกชำรุดของแท่งตัวนำโรเตอร์และการลัดรอบขดลวดได้ถูกต้อง

Thesis Title	A Study Of Induction Motor Broken Rotor Bar Faults Detection Using Neural Networks
Student	Mr. Papol Sardyoung
Student ID.	44061048
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2006
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Vijit Kinnares

ABSTRACT

This thesis presents fault diagnostic in three phase squirrel cage induction motors due to rotor broken bars and short turn winding. The diagnostic is based on Artificial Neural Network (ANN) of spectrum frequency components of the stator current. The fault characteristics generate harmonic components contaminated with fundamental frequency of stator current. The diagnostics use only one phase stator current from three phase currents. The analysis is based on frequency domain using a Fast Fourier Transform (FFT) to determine harmonic component of stator current. The data is captured and processed by an off-line technique using MATLAB. Then, harmonic spectra is analyzed in dB. This analyzed data will be used for training neural networks. The proposed neural network is capable of identifying problems associated with rotor broken bars and short-turn winding.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ รศ.ดร.วิจิตร กิมเรศ อาจารย์ที่ปรึกษาเป็นอย่างสูงที่สุดที่ได้ให้โอกาสและคำปรึกษาแนะนำต่าง ๆ จนวิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลงได้

ขอขอบพระคุณอาจารย์ เฉลิมชาติ มานพ อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่มีส่วนช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์และให้คำแนะนำ เทคนิคการวิเคราะห์สเปกตรัม การสนับสนุนทางด้านเอกสารอ้างอิง รวมทั้งเครื่องมือและอุปกรณ์การทำงานที่เกี่ยวกับการวิจัย และสถานที่ห้องปฏิบัติการ ECC. 305 เป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณอาจารย์ ชัยทัต มณีอินทร์ อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่ให้ความรู้คำแนะนำ เกี่ยวกับการควบคุม D.C. DRIVE SIEMENS ที่ห้อง ECC 405

ขอขอบคุณทิวา แก้วจันทรานนท์ ที่ได้ช่วยเหลือแนะนำในเรื่องโปรแกรม และน้อง ๆ ทุกคนประจำห้อง ECC 405 ห้องปฏิบัติการ Power Electronics and Machine Control ของภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่มีส่วนช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์นี้

และขอกราบขอบพระคุณ บิคา มารดา และพี่ชายของข้าพเจ้า ที่ให้ความสนับสนุนช่วยเหลือเงินทุนและเป็นกำลังใจด้วยดีเสมอมา และขอขอบพระคุณทุก ๆ ท่านที่ให้ความช่วยเหลือให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ปพน สะอาดขวง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญภาพ.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ทฤษฎีและแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.5 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์.....	3
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	5
2.1 บทนำ.....	5
2.2 โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	5
2.3 หลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	7
2.4 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	13
2.5 กำลังส่งผ่านมอเตอร์.....	15
2.6 การวิเคราะห์วงจรสมมูล.....	16
2.7 เส้นโค้งความสัมพันธ์แรงบิด-ความเร็วรอบ.....	19
2.8 การหาค่าพารามิเตอร์วงจรสมมูลของมอเตอร์.....	21
2.9 ระบบองค์ประกอบสมมาตร.....	24
2.10 การเกิดการลัดรอบในมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	24
2.11 สรุป.....	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา แะ IV ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 ทฤษฎีโครงข่ายประสาทเทียม.....	28
3.1 บทนำ.....	28
3.2 ลักษณะโครงสร้างเซลล์ประสาททางชีววิทยา.....	28
3.3 สถาปัตยกรรมโครงข่ายประสาทเทียม.....	29
3.3.1 โครงข่ายประสาทเทียมชนิดชั้นเดียว.....	30
3.3.2 โครงข่ายประสาทเทียมชนิดหลายชั้น.....	30
3.3.3 โครงข่ายประสาทเทียมชนิดหลายชั้น.....	31
3.4 ฟังก์ชันการถ่ายโอน.....	36
3.5 การฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม.....	41
3.6 การกำหนดค่าถ่วงน้ำหนัก.....	43
3.7 สรุป.....	43
บทที่ 4 ความเสียหายที่ตัวนำโรเตอร์.....	44
4.1 บทนำ.....	44
4.2 รูปร่างของแท่งตัวนำโรเตอร์.....	47
4.3 วัสดุที่ใช้ทำแท่งตัวนำโรเตอร์.....	49
4.4 กำลังของโรเตอร์และการรับโหลด.....	50
4.5 ช่องอากาศ.....	52
4.6 ความล้มเหลวของโรเตอร์.....	53
4.7 ปัจจัยที่มีผลทำให้เกิดความเสียหายที่โรเตอร์.....	54
4.8 ประเภทของการวินิจฉัยความผิดปกติของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	54
4.9 วิธีการวินิจฉัยความผิดปกติของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	55
4.10 สเปคตรัมฟอลต์ที่เกิดขึ้นจากการลัดรอบขดลวด.....	55
4.11 สเปคตรัมฟอลต์ที่เกิดขึ้นจากแท่งตัวนำโรเตอร์.....	56
4.12 สรุป.....	56
บทที่ 5 วิธีการทดสอบและผลการทดสอบ.....	57
5.1 บทนำ.....	57
5.2 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ V ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.3 วิธีการทดสอบ.....	59
5.4 วิธีการตรวจจับสัญญาณ.....	59
5.5 ผลการทดลอง.....	60
5.5.1 สภาวะแท่งตัวนำโรเตอร์ปกติ.....	60
5.5.2 สภาวะแท่งตัวนำโรเตอร์แตกหัก.....	61
5.6 สรุปผลจากสัญญาณสเปกตรัม.....	79
5.7 เงื่อนไขข้อมูลในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม.....	87
5.8 ขบวนการวิเคราะห์จากโครงข่ายประสาทเทียม.....	100
5.9 สรุปผลการวิเคราะห์จากกลุ่มข้อมูลการทดสอบ.....	102
5.9.1 สรุปผลการวิเคราะห์จากข้อมูลชุดที่ 1.....	102
5.9.2 สรุปผลการวิเคราะห์จากข้อมูลชุดที่ 2.....	102
5.9.3 สรุปผลการวิเคราะห์จากข้อมูลชุดที่ 3.....	103
5.10 ผลการทดลองขนาดมอเตอร์ 3 แรงม้า 6 โพล.....	105
5.10.1 สรุปผลการวิเคราะห์จากข้อมูลมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า 6 โพล.....	109
บทที่ 6 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	114
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	114
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	115
เอกสารอ้างอิง.....	116
ภาคผนวก.....	118
ภาคผนวก ก. รายการอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	118
ภาคผนวก ข. โปรแกรมการวิเคราะห์.....	121
ภาคผนวก ค. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์.....	128
ประวัติผู้เขียน.....	136

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1	ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันแบบต่าง ๆ..... 37
3.2	ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันที่ถูกเลื่อนในแนวนอนตามค่าไบอัส..... 38
4.1	สรุปความเค้นที่มีผลทำให้เกิดความล้มเหลวกับส่วนต่าง ๆ ของมอเตอร์..... 54
5.1	แสดงพิกัดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 2 แรงม้า 4 โพล และ 3 แรงม้า 6 โพล..... 57
5.2	แสดงผลสเปคตรัมของโรเตอร์ปกติที่ภาระโหลดต่าง ๆ..... 79
5.3	แสดงผลสเปคตรัมของโรเตอร์ปกติทดสอบในสภาวะแรงดันไม่สมมาตรที่ภาระโหลดต่าง ๆ..... 81
5.4	แสดงผลสเปคตรัมของโรเตอร์แตกหัก ทดสอบที่ภาระโหลดต่าง ๆ 82
5.5	แสดงผลสเปคตรัมของโรเตอร์แตกหัก ทดสอบในสภาวะแรงดันไม่สมมาตร ที่ภาระโหลดต่าง ๆ 84
5.6	แสดงผลสเปคตรัมของโรเตอร์แตกหัก ทดสอบในสภาวะลัดรอบขดลวดสเตเตอร์ที่ภาระโหลดต่าง ๆ..... 85
5.7	แสดงการกำหนดเอาต์พุตและความหมายของโครงข่ายประสาทเทียม..... 88
5.8	แสดงผลค่าความคลาดเคลื่อน(Error) ของโรเตอร์ปกติที่ภาระโหลดต่าง ๆ..... 88
5.9	แสดงผลค่าความคลาดเคลื่อน (Error) ของโรเตอร์ปกติ ทดสอบในสภาวะแรงดันไม่สมมาตร ที่ภาระโหลดต่าง ๆ..... 89
5.10	แสดงผลค่าความคลาดเคลื่อน (Error) ของโรเตอร์แตกหัก ที่ภาระโหลดต่าง ๆ..... 90
5.11	แสดงผลค่าความคลาดเคลื่อน (Error) ของโรเตอร์แตกหัก ทดสอบในสภาวะแรงดันไม่สมมาตร ที่ภาระโหลดต่าง ๆ..... 91
5.12	แสดงผลค่าความคลาดเคลื่อน (Error) ของโรเตอร์แตกหัก ทดสอบในสภาวะลัดรอบขดลวดสเตเตอร์ ที่ภาระโหลดต่าง ๆ..... 92
5.13	แสดงผลค่าความคลาดเคลื่อน (Error) ของโรเตอร์ปกติกับโรเตอร์แตกหัก ที่ภาระโหลดต่าง ๆ..... 93
5.14	แสดงผลค่าความคลาดเคลื่อน (Error) ของโรเตอร์ปกติกับโรเตอร์แตกหัก ทดสอบในสภาวะแรงดันไม่สมมาตร ที่ภาระโหลดต่าง ๆ..... 94
5.15	แสดงผลค่าความคลาดเคลื่อน (Error) ของโรเตอร์ปกติขณะลัดรอบขดลวดกับโรเตอร์แตกหักขณะลัดรอบขดลวด ที่ภาระโหลดต่าง ๆ..... 96

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.16 แสดงผลค่าความคลาดเคลื่อน (Error) ของโรเตอร์แตกหักกับโรเตอร์แตกหักในขณะ ลัดรอบขดลวดที่ภาระโหลดต่าง ๆ.....	98
5.17 แสดงการสรุปผลการวิเคราะห์จากโครงข่ายประสาทเทียม.....	100
5.18 แสดงการสรุปผลการวิเคราะห์จากกลุ่มข้อมูลชุดที่ 1	102
5.19 แสดงการสรุปผลการวิเคราะห์จากกลุ่มข้อมูลชุดที่ 2	103
5.20 แสดงการสรุปผลการวิเคราะห์จากกลุ่มข้อมูลชุดที่ 3	104
5.21 แสดงการสรุปผลสเปคตรัมของโรเตอร์ปกติ ที่ภาระโหลดต่าง ๆ ของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า 6 โพล.....	109
5.22 แสดงการสรุปผลสเปคตรัมของโรเตอร์แตกหัก ที่ภาระโหลดต่าง ๆ ของมอเตอร์ 3 แรงม้า 6 โพล.....	110
5.23 แสดงผลค่าความคลาดเคลื่อน (Error) ของโรเตอร์ปกติกับโรเตอร์แตกหัก ที่ภาระโหลด ต่าง ๆ ของมอเตอร์ 3 แรงม้า 6 โพล.....	111
5.24 สรุปผลการวิเคราะห์ของโรเตอร์ปกติกับโรเตอร์แตกหักของมอเตอร์ 3 แรงม้า 6 โพล.....	113

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 สเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส.....	5
2.2 โรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก.....	6
2.3 ส่วนประกอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีโรเตอร์เป็นแบบกรงกระรอก.....	6
2.4 ลักษณะการวางขดลวดของมอเตอร์ 3 เฟส 2 ขั้วแม่เหล็ก.....	7
2.5 การเกิดสนามแม่เหล็กหมุน.....	8
2.6 โรเตอร์ภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็กหมุน.....	9
2.7 หลักการเกิดกระแสเหนี่ยวนำและแรงบิดบน โรเตอร์.....	9
2.8 การเกิดแรงบิดเนื่องจากสนามแม่เหล็กในช่องอากาศและแรงเคลื่อนแม่เหล็กจากโรเตอร์.....	11
2.9 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	13
2.10 วงจรสมมูลที่ย้ายค่าต่างๆ จากด้าน โรเตอร์ไปด้านสเตเตอร์.....	14
2.11 วงจรสมมูลอย่างง่ายของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	15
2.12 แผนผังการส่งผ่านกำลังของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	16
2.13 การคิดองศาทางไฟฟ้าและองศาทางกล.....	18
2.14 กราฟความสัมพันธ์แรงบิด-ความเร็วขณะแรงดันและความถี่.....	19
2.15 วงจรการทดสอบ No Load Test.....	21
2.16 วงจรการทดสอบ Block Rotor Test.....	23
2.17 วงจรการทดสอบ V-I Method.....	24
2.18 ความเสียหายของขดลวดสเตเตอร์ในมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยต่อแบบสตาร์.....	25
3.1 ส่วนประกอบของเซลล์ประสาท.....	29
3.2 โครงข่ายประสาทเทียมชนิดชั้นเดียว.....	30
3.3 โครงข่ายประสาทเทียมชนิดหลายชั้น.....	31
3.4 แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมชนิด BP ชนิด 2 ชั้นซ่อน.....	31
3.5 โครงสร้างในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม.....	41
3.6 Flow Chart ขั้นตอนการคำนวณโครงข่ายประสาทเทียมชนิด BP	42
4.1 โครงสร้างของโรเตอร์กรงกระรอก.....	44
4.2 โรเตอร์ทั่วไปที่ทำจากอลูมิเนียมที่ได้จากการหล่อขึ้น.....	45
4.3 โรเตอร์ทั่วไปที่ทำจากอลูมิเนียมแบบมีช่องระบายอากาศที่ได้จากการหล่อขึ้น.....	45
4.4 โรเตอร์ทั่วไปที่ทำจากอลูมิเนียมแบบมีช่องระบายอากาศที่ได้จากการประดิษฐ์ขึ้นสำหรับ มอเตอร์ขนาดใหญ่.....	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ IX ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5 โรเตอร์ทั่วไปที่ทำจากอลูมิเนียมแบบมีช่องระบายอากาศที่ได้จากการประดิษฐ์ขึ้นสำหรับมอเตอร์ขนาดใหญ่ความเร็วสูง.....	46
4.6 เพลลาของมอเตอร์ต่าง ๆ	46
4.7 รูปร่างของแท่งตัวนำโรเตอร์แบบต่าง ๆ	47
4.8 แผ่นฉนวนอัดสำหรับมอเตอร์ประสิทธิภาพสูง.....	48
4.9 แท่งตัวนำโรเตอร์ที่ทำมาจากอลูมิเนียม.....	49
4.10 แรงที่เกิดขึ้นที่กระทำกับ โรเตอร์.....	51
4.11 ความเสียหายเนื่องจากการคดงอของเพลลา.....	52
4.12 ความเสียหายของรองลื่น.....	52
4.13 ความเสียหายเชิงแรงบิด.....	52
4.14 เปอร์เซ็นต์ความเสียหายในมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	53
5.1 แสดงการจำลองการแตกหักที่แท่งตัวนำโรเตอร์.....	58
5.2 วงจรการทดลองและวิเคราะห์.....	59
5.3 กระแส i_a ของมอเตอร์ขนาด 2 แรงม้าที่ภาระไว้โหลด.....	61
5.4 กระแส i_a ของมอเตอร์ขนาด 2 แรงม้าที่ภาระ 75%.....	62
5.5 กระแส i_a ของมอเตอร์ขนาด 2 แรงม้าที่ภาระ 100%.....	63
5.6 กระแส i_a ของมอเตอร์ขนาด 2 แรงม้าที่ภาระไว้โหลด (กรณีแรงดันไม่สมดุล $V_a = V_b = 213V. V_c = 220V.$).....	64
5.7 กระแส i_a ของมอเตอร์ขนาด 2 แรงม้าที่ภาระ 75% (กรณีแรงดันไม่สมดุล $V_a = V_b = 213V. V_c = 220V.$).....	65
5.8 กระแส i_a ของมอเตอร์ขนาด 2 แรงม้าที่ภาระ 100% (กรณีแรงดันไม่สมดุล $V_a = V_b = 213V. V_c = 220V.$).....	66
5.9 กระแส i_a ของมอเตอร์ขนาด 2 แรงม้าที่ไว้โหลด (กรณีลัดรอบขดลวดสเตเตอร์).....	67
5.10 กระแส i_a ของมอเตอร์ขนาด 2 แรงม้าที่ 75% (กรณีลัดรอบขดลวดสเตเตอร์).....	68
5.11 กระแส i_a ของมอเตอร์ขนาด 2 แรงม้าที่ 100% (กรณีลัดรอบขดลวดสเตเตอร์).....	69
5.12 กระแส i_a ของมอเตอร์ขนาด 2 แรงม้าที่ภาระไว้โหลด (สภาวะแท่งตัวนำโรเตอร์แตกหัก).....	70
5.13 กระแส i_a ของมอเตอร์ขนาด 2 แรงม้าที่ภาระ 75% (สภาวะแท่งตัวนำโรเตอร์แตกหัก) ...	71

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.14 กระแส i_a ของมอเตอร์ขนาด 2 แรงม้าที่ภาระ 100% (สภาวะแท่งตัวนำโรเตอร์แตกหัก)	72
5.15 กระแส i_a ของมอเตอร์ขนาด 2 แรงม้าที่ภาระไว้โหลด (แท่งตัวนำโรเตอร์แตกหัก ทดสอบกรณีแรงดันไม่สมดุล $V_a = V_b = 213V$. $V_c = 220V$.).....	73
5.16 กระแส i_a ของมอเตอร์ขนาด 2 แรงม้าที่ภาระ 75% (แท่งตัวนำโรเตอร์แตกหักทดสอบ กรณีแรงดันไม่สมดุล $V_a = V_b = 213V$. $V_c = 220V$.).....	74
5.17 กระแส i_a ของมอเตอร์ขนาด 2 แรงม้าที่ภาระ 100% (แท่งตัวนำโรเตอร์แตกหักทดสอบ กรณีแรงดันไม่สมดุล $V_a = V_b = 213V$. $V_c = 220V$.).....	75
5.18 กระแส i_a ของมอเตอร์ขนาด 2 แรงม้าที่ภาระไว้โหลด (แท่งตัวนำโรเตอร์แตกหัก ทดสอบกรณีลัดรอบขดลวดสเตเตอร์ $V_a = V_b = 213V$. $V_c = 220V$.).....	76
5.19 กระแส i_a ของมอเตอร์ขนาด 2 แรงม้าที่ภาระ 75% (แท่งตัวนำโรเตอร์แตกหักทดสอบ กรณีลัดรอบขดลวดสเตเตอร์ $V_a = V_b = 213V$. $V_c = 220V$.).....	77
5.20 กระแส i_a ของมอเตอร์ขนาด 2 แรงม้าที่ภาระ 100% (แท่งตัวนำโรเตอร์แตกหักทดสอบ กรณีลัดรอบขดลวดสเตเตอร์ $V_a = V_b = 213V$. $V_c = 220V$.).....	78
5.22 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลชุดที่ 2	103
5.23 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลชุดที่ 3	104
5.24 กระแส i_a ของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า 6 โพล ที่ภาระไว้โหลด (โรเตอร์ปกติ).....	105
5.25 กระแส i_a ของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า 6 โพล ที่ภาระ 100% (โรเตอร์ปกติ).....	106
5.26 กระแส i_a ของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า 6 โพล ที่ภาระไว้โหลด (แท่งตัวนำโรเตอร์ แตกหัก).....	107
5.27 กระแส i_a ของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า 6 โพล ที่ภาระ 100% (แท่งตัวนำโรเตอร์ แตกหักทดสอบในสภาวะไว้โหลด).....	108
5.28 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ค่าความคลาดเคลื่อนของโรเตอร์ปกติกับโรเตอร์แตกหัก ของมอเตอร์ ขนาด 3 แรงม้า 6 โพล.....	113

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานต่าง ๆ ในโรงงานอุตสาหกรรมเนื่องจากมีข้อดีกว่ามอเตอร์แบบดีซี เช่น ราคาถูกกว่า, การดูแลรักษาที่ง่ายกว่า และ ความทนทานที่มากกว่า เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามการดูแลรักษาเพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิด กับตัวมอเตอร์เหนี่ยวนำก็มีความสำคัญอย่างยิ่งขาด โดยเฉพาะกับมอเตอร์ที่มีกำลังสูง ๆ การดูแลรักษา ก็ยังมีความสำคัญเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นการวิเคราะห์เพื่อให้ทราบถึงความผิดปกติ เพื่อนำไปสู่การ แก้ปัญหาที่อาจก่อให้เกิดความเสียหายแก่ตัวมอเตอร์ได้ก่อน จึงมีความจำเป็นเพื่อช่วยลดการเกิด ความผิดปกติที่รุนแรง และเป็นการยืดอายุการใช้งานของมอเตอร์ ทำให้มอเตอร์สามารถทำงาน ได้อย่างต่อเนื่องอย่างมีประสิทธิภาพ ความผิดปกติของมอเตอร์มีสาเหตุของปัญหาจากหลาย ประการ เช่น การเกิดการลัดวงจรที่ขดลวดสเตเตอร์, ร่องดิน (Bearing) , การเกิดการหนีศูนย์ ของมอเตอร์และการเกิดการแตกหักของโรเตอร์ [1-3] อุปกรณ์ภายนอกและเพลาตามลำดับ ส่งผล ให้มอเตอร์ที่ทำงานเกิดสภาวะร้อนผิดปกติ ส่งผลให้มอเตอร์ใช้กำลังไฟฟ้าสูงเกินความจำเป็นการเกิด สัญญาณฮาร์มอนิกส์สูงผิดปกติ [4] ซึ่งสาเหตุของการทำให้เกิดการแตกหักที่โรเตอร์ซึ่งมีสาเหตุ เนื่องมาจากการเกิดฟอลต์ของโรเตอร์[5] ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการวิเคราะห์ ความผิดปกติที่เกิดขึ้น ในระยะเริ่มแรก เพื่อจะได้มีการวางแผนซ่อมบำรุงที่เหมาะสม ก่อนที่จะมีการลุกลามและขยาย ความรุนแรงของปัญหาต่อไป

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอถึงการวิเคราะห์ความผิดปกติของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ที่มี สาเหตุมาจากแท่งตัวนำโรเตอร์แตกหัก (Broken rotor bars) ที่ใช้การตรวจจับกระแสโดยวิเคราะห์ผล ของความผิดปกติด้วยการวิเคราะห์แบบ โครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ย้อนกลับ [6-7] โดยพิจารณา จากสัญญาณกระแสสเตเตอร์ [8] (Motor Current Signature Analysis, MCSA) การวิจัยดังกล่าว จะอาศัยการแปลงสัญญาณกระแสสเตเตอร์ที่ได้จากการทดสอบให้อยู่ในโดเมนความถี่ โดยการใช้การ แปลงสัญญาณฟูเรียร์แบบรวดเร็ว (Fast Fourier Transform) เปรียบเทียบกับการแปลงฮิวเบิร์ต [9-10] เพื่อพิจารณาฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นปะปนรวมอยู่ในสัญญาณกระแสสเตเตอร์ ข้อดีของการ วิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้ สามารถทำการตรวจจับสัญญาณ ตามลักษณะการแตกชำรุดของแท่งตัวนำ โรเตอร์ที่แตกหักได้ถูกต้อง อย่างแม่นยำและรวดเร็ว ข้อมูลกระแสสเตเตอร์ที่ได้จากการทดสอบจริง ถูกตรวจจับ และประมวลผลด้วยเทคนิคออฟไลน์ (Off-line) โดยใช้โปรแกรม Matlab

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

ในงานวิจัยนี้ต้องการนำเสนอการตรวจสอบความผิดปกติของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยการวิเคราะห์สเปกตรัมของกระแสเดเตอร์ โดยใช้การแปลงฟูเรียร์แบบรวดเร็ว (FFT) ผ่านการวิเคราะห์ด้วยวิธีการโครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่ย้อนกลับ ข้อดีคือเป็นวิธีการตรวจสอบความสมบูรณ์ของมอเตอร์แบบไร้การสัมผัส และเป็นวิธีการทดสอบแบบ ไม่มีผลต่อการสึกหรอของมอเตอร์ในอนาคต (Noninvasive) อีกทั้งมีความน่าเชื่อถือสูง โดยพิจารณาในโดเมนความถี่ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างคุณลักษณะ ตำแหน่งการเกิดสเปกตรัมฮาร์มอนิกส์ กับลักษณะของการเกิดการแตกหักที่โรเตอร์บาร์ โดยพิจารณาเมื่อแหล่งจ่ายเป็นสัญญาณไซน์

1.3 ทฤษฎีและแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

ในปี ค.ศ. 1993 F. Filippetti จากบทความที่ [7] ได้มีการนำเสนอการวิเคราะห์การเกิดความบกพร่อง ของแท่งตัวนำโรเตอร์แตกหักในมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการวิเคราะห์ โดยได้ทำการศึกษาดังองค์ประกอบสเปกตรัมฟอลต์ และพารามิเตอร์ที่นำมาฝึกสอนกับโครงข่ายประสาทเทียม คือ ค่าสลิป (S), กระแสอินพุท (I), กระแสแอมพลิจูด (\bar{I}), จำนวนโพล (P), กระแสพิค ($I_r; rated$) โดยใช้โปรแกรม Matlab ในการวิเคราะห์

ในปี ค.ศ. 1995 A. J. Marques Cardoso, S. M. A. Cruz, J.F.S. Carvalho, E. S. Saraiva. จากบทความที่ [10] ได้มีการนำเสนอการวิเคราะห์การเกิดความบกพร่อง โดยใช้วิธีการประมาณค่ากระแสโดยใช้วิธีของ Park's Vector. สำหรับการวิเคราะห์โดยพิจารณาจาก กระแส i_A, i_B, i_C โดยพิจารณาองค์ประกอบกระแสเดเตอร์ หรือเราเรียกว่า องค์ประกอบกระแสของ Park's Vector. จะได้สมการกระแส i_D, i_Q โดยการพิจารณาตรวจจับชนิดการเกิดฟอลต์ของมอเตอร์ ในขณะที่มอเตอร์หมุนอยู่

ในปี ค.ศ. 1996 F. Filippetti, A. Uncini and P. Campolucci. จากบทความที่ [13] ได้มีการนำเสนอการวิเคราะห์การเกิดความบกพร่องของแท่งโรเตอร์แตกหัก โดยใช้วิธีการตรวจจับสเปกตรัมของสัญญาณกระแสเดเตอร์ ในตำแหน่งความถี่ไซน์แบนด์ $(1-2sf1)$ และที่องค์ประกอบความถี่ $(1 \pm 2ks)f$ และใช้เทคนิคการแปลงฟูเรียร์แบบรวดเร็ว (FFT) ในการวิเคราะห์

ในปี ค.ศ. 1999 Subhasis Nandi, Rajmohan Bharadwaj, Hamid A. Toliyat and Alexander G. Parlos จากบทความที่ [5] ได้มีการนำเสนอการวิเคราะห์การเกิดความบกพร่องของแท่งโรเตอร์แตกหัก ภายใต้สภาวะแรงดันไม่สมดุล ในการทดสอบภายใต้เงื่อนไขจำนวนสล็อตสเตเตอร์ เท่ากับ 36 สล็อต 4 โพล 3 แรงม้า

ในวิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำหลักการวิเคราะห์ สมการทางคณิตศาสตร์ ในการวิเคราะห์ สเปกตรัม ของสัญญาณกระแสสแตเตอร์ ในสภาวะมอเตอร์จ่ายโหลดตามพิกัด และนำผลการ ทดลองมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้มาจาก [7]

1.4 ขอบเขตการวิจัยของงานวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์ในการตรวจสอบ หากความผิดปกติของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ที่เกิดจากการแตกหักของโรเตอร์บาร์ ด้วยการประมวลผลแบบออฟไลน์โดยใช้โปรแกรม Matlab ขณะมอเตอร์รับไฟจากแหล่งจ่ายเป็นสัญญาณไซน์ที่ความถี่ 50 Hz เพื่อศึกษาการตรวจ วิเคราะห์ห่มอเตอร์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียม โดยทำการทดสอบมอเตอร์ที่สภาวะที่มอเตอร์ปกติ มอเตอร์เกิดการแตกหักที่โรเตอร์บาร์ 1 บาร์, 2 บาร์และ 3 บาร์ โดยรับภาระโหลดที่ 0 %, 25%, 50%, 75% และ 100 % ตามลำดับ มอเตอร์ที่นำมาทำการทดสอบมีขนาด 2 แรงม้า 4 โพล และ ขนาด 3 แรงม้า 6 โพล 380 v. ผลการทดลองที่ได้ ถูกนำมาใช้เพื่อทดสอบการตรวจจับด้วยโครงข่าย ประสาทเทียมชนิดแพร่กลับ

1.5 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับความผิดปกติอันเนื่องมาจากการแตกหักของโรเตอร์บาร์ โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมมาใช้ในการวิเคราะห์ และตรวจจับความผิดปกติที่เกิดขึ้นโดยอาศัย การวิเคราะห์สเปกตรัมของฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้น เพื่อบ่งชี้ถึงสาเหตุของความผิดปกติที่เกิดขึ้น รายละเอียด ที่จะกล่าวถึงในวิทยานิพนธ์แบ่งออกเป็น 6 บท ดังต่อไปนี้

บทที่ 1 เป็นการกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา จุดมุ่งหมายวัตถุประสงค์ ของการศึกษา ทฤษฎีและแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย ขอบเขตการวิจัย โครงสร้างของวิทยานิพนธ์ ประโยชน์ ที่ได้จากวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 เป็นการกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ประกอบด้วยโครงสร้างของ มอเตอร์ หลักการทำงาน การกำเนิดแรงบิด การวิเคราะห์วงจรมุม และการหาค่าพารามิเตอร์ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ระบบองค์ประกอบสมมาตร การเกิดการลัดรอบในขดลวดมอเตอร์

บทที่ 3 เป็นการกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของการวิเคราะห์โครงข่ายประสาทเทียม การฝึกสอน โครงข่ายประสาทเทียม และการเรียนรู้แบบแพร่กลับ

บทที่ 4 เป็นการกล่าวถึงความเสียหายที่เกิดการแตกหักที่ตัวโรเตอร์บาร์ ซึ่งจะกล่าวถึง สาเหตุที่เกิดความเสียหาย ปัจจัยที่ทำให้เกิดความเสียหาย ตลอดจนวิธีวินิจฉัยความผิดปกติของ มอเตอร์

บทที่ 5 เป็นการกล่าวถึงวิธีการทดสอบ และผลการวิเคราะห์ด้วยโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการพิจารณา การเปรียบเทียบผลการคำนวณของโปรแกรม โดยพิจารณาจากเปอร์เซ็นต์ค่าความคลาดเคลื่อน (Error) ของเอาต์พุตที่ต้องการกับผลของเอาต์พุตจริง

บทที่ 6 เป็นการสรุปผลการวิจัยที่พบขณะมอดอร์มีความผิดปกติในลักษณะต่างๆ โดยพิจารณาค่าแชนจ์และขนาดของฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นเป็นหลัก รวมทั้งข้อเสนอแนะต่างๆ เพื่อที่จะทำการพัฒนางานวิจัยในลำดับต่อไป

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์

1. เป็นแนวทางในการศึกษาพฤติกรรมของมอดอร์ เมื่อเกิดความผิดปกติอันเนื่องมาจากการแตกหักของโรเตอร์บาร์ เพื่อเป็นทฤษฎีและแนวทางในการศึกษาวิจัยต่อไป
2. เพื่อให้ทราบถึงสาเหตุการผิดปกติที่เกิดขึ้น ตลอดจนแนวทางในการป้องกัน ปัญหาของมอดอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส
3. สามารถที่จะนำการวิเคราะห์แบบ โครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่กลับ มาทำการประยุกต์ในการวินิจฉัยความผิดปกติอื่น ๆ เช่น การตรวจสอบการลัดวงจรที่ขดลวดสเตเตอร์ ความไม่สมดุลของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า และความบกพร่องที่แบร์ริง เป็นต้น
4. เป็นพื้นฐานในการตรวจสอบหาความผิดปกติของมอดอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์หาความผิดปกติของเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนชนิดอื่นๆ ได้

บทที่ 2

ทฤษฎีพื้นฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

2.1 บทนำ

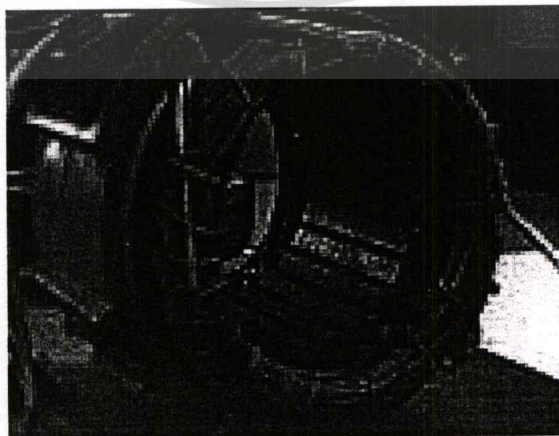
เป็นที่ทราบกันดีว่าในปัจจุบันได้มีการนำมอเตอร์เหนี่ยวนำมาใช้กันเป็นจำนวนมากในโรงงานอุตสาหกรรมเนื่องจากมีข้อดีทั้งด้านโครงสร้าง และการทำงานในวิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาความผิดปกติของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ดังนั้นก่อนที่จะนำไปสู่การวินิจฉัยความผิดปกติจำเป็นต้องศึกษาถึงทฤษฎีพื้นฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของมอเตอร์ ได้แก่ โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำ หลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยรวมไปถึงการกำเนิดแรงบิด การวิเคราะห์ห้วงจรสมมูล และการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆของมอเตอร์

2.2 โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนคือ ส่วนของสเตเตอร์ (Stator) ซึ่งเป็นส่วนที่อยู่กับที่ และ ส่วนของโรเตอร์ (Rotor) ซึ่งเป็นส่วนที่มีการหมุน โดยแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.2.1 สเตเตอร์

สเตเตอร์เป็นส่วนที่อยู่นิ่งมีแกนเป็นแผ่นลามีเนทประกบกันซึ่งทำมาจากเหล็กกล้าซิลิกอน (Silicon steel) และมีขดลวดอาร์เมเจอร์ (Armature) ฝังตัวอยู่ในร่องสลิตของแกนเหล็ก โดยขดลวดอาร์เมเจอร์จะมีการพันขดลวดแบบกระจายเพื่อทำให้เกิดการกระจายสนามแม่เหล็กแบบไซนูซoidal (Sinusoidal) ซึ่งรูปร่างของสเตเตอร์แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 สเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

2.2.2 โรเตอร์

โรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นโรเตอร์ชนิดไม่มีขั้วยื่น (Non-salient-pole) หรือทรงกระบอก (Cylindrical rotor) สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทดังนี้

2.2.2.1 โรเตอร์แบบกรงกระรอก (Squirrel cage rotor)

โรเตอร์ประเภทนี้ที่แกนของโรเตอร์จะทำด้วยเหล็กลามิเนต (laminated sheet steel) เซาะผิวด้านนอกให้เป็นร่อง ตรงกลางแผ่นจะเจาะรูสำหรับสอดเพลลา เมื่อนำแผ่นลามิเนตเหล่านี้มาอัดเข้าด้วยกันจะได้แกนโรเตอร์ เมื่อนำแกนโรเตอร์เข้าไปวางในแบบพิมพ์ (mold) แล้วฉีดอลูมิเนียมเหลวเข้าไปจะได้อลูมิเนียมอัดแน่นอยู่ในร่องสลอต และมีครีบยื่นออกไปทั้งสองข้างเพื่อใช้เป็นใบพัดสำหรับระบายความร้อน และเมื่ออัดเพลลาเข้าไปที่รูกลางแกนโรเตอร์จะได้โรเตอร์ กรงกระรอก รูปร่างของโรเตอร์แบบกรงกระรอกแสดงดังรูปที่ 2.2 และส่วนประกอบของมอเตอร์ที่มีโรเตอร์เป็นแบบกรงกระรอกแสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.2 โรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก



รูปที่ 2.3 ส่วนประกอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีโรเตอร์เป็นแบบกรงกระรอก

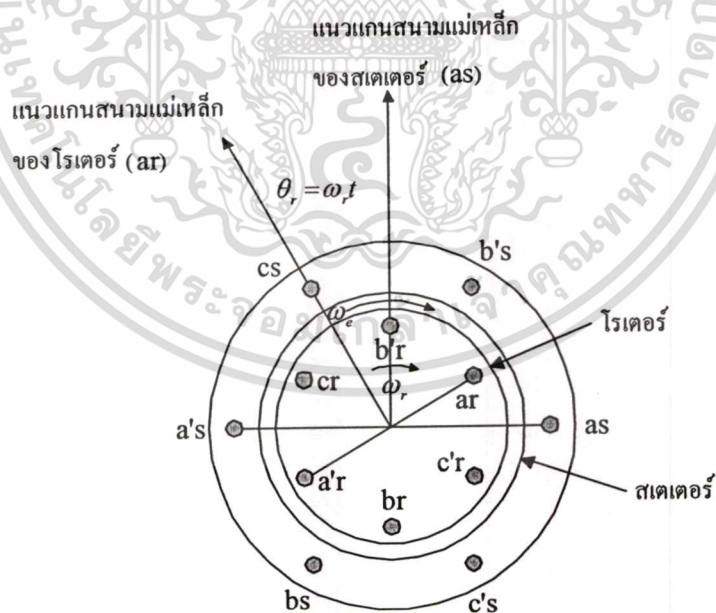
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2.2 โรเตอร์แบบขดลวดพันรอบโรเตอร์ (Wound rotor)

โรเตอร์ประเภทนี้มีขดลวดพันอยู่ในร่องสลิตเช่นเดียวกับสเตเตอร์ โดยส่วนปลายของขดลวดจะต่ออยู่กับแหวนลื่น (Slip ring) และมีแปรงถ่านสัมผัสอยู่ โดยแปรงถ่านจะต่ออยู่กับวงจรภายนอกเพื่อทำการต่อวงจรแบบสตาร์ หรือเดลต้า มอเตอร์ที่มีโรเตอร์ประเภทนี้มีข้อจำกัดคือจะต้องมีจำนวนขั้วเท่ากับจำนวนขั้วของสเตเตอร์ และไม่สามารถหมุนเร็วมากได้เนื่องจากความแข็งแรงทางกลต่ำ นอกจากนี้ยังมีราคาสูงเมื่อเปรียบเทียบกับโรเตอร์แบบกรงกระรอก แต่ข้อดีของโรเตอร์ประเภทนี้คือสามารถกำหนดแรงบิดขณะสตาร์ทได้โดยอาศัยการต่อความต้านทานภายนอก

2.3 หลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ในรูปที่ 2.4 แสดงมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบ 3 เฟส 2 ขั้วแม่เหล็กในอุดมคติ [8] เมื่อต่อไฟให้ขดลวดบนสเตเตอร์จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนตัดผ่านโรเตอร์ส่งผลให้เกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำและแรงบิดที่ทำให้โรเตอร์หมุน ด้วยเหตุผลที่มีการเหนี่ยวนำเกิดขึ้นระหว่างสเตเตอร์กับโรเตอร์เราจึงเรียกเครื่องจักรกลไฟฟ้าประเภทนี้ว่า เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับแบบเหนี่ยวนำ



รูปที่ 2.4 ลักษณะการวางขดลวดของมอเตอร์ 3 เฟส 2 ขั้วแม่เหล็ก

2.3.1 การกำเนิดแรงบิด

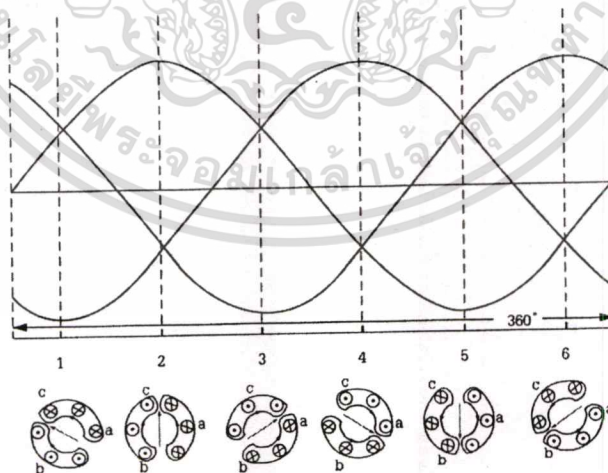
มอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อมีการจ่ายไฟ 3 เฟสเข้าไปที่สเตเตอร์จะก่อให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนขึ้นในช่องว่างอากาศระหว่างสเตเตอร์และโรเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งสนามแม่เหล็กนี้จะหมุนรอบสเตเตอร์ด้วยความเร็วซิงโครนัส (Synchronous speed) ตามสมการดังนี้

$$N_s = \frac{120 f}{P} \quad (2.1)$$

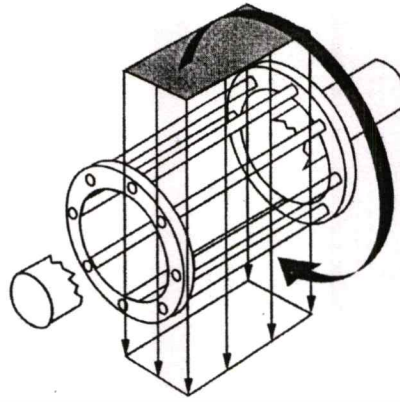
โดยที่

- N_s คือ ความเร็วซิงโครนัสมีหน่วยเป็น rpm
- f คือ ความถี่ของคลื่นไฟฟ้าที่จ่ายเข้าไปมีหน่วยเป็น Hz
- P คือ จำนวนขั้วแม่เหล็ก

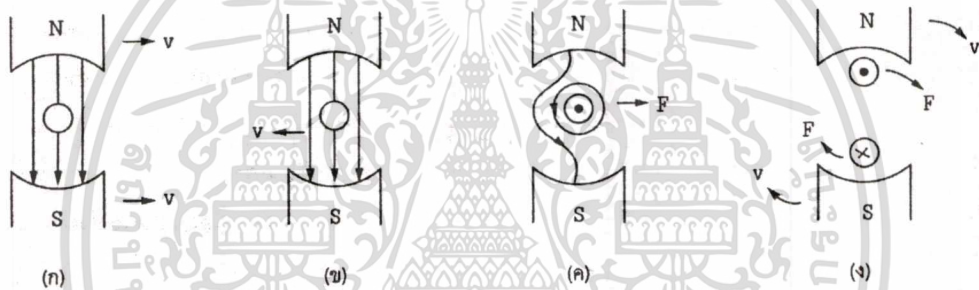
ทันทีที่เกิดสนามแม่เหล็กหมุนรอบสเตเตอร์ โรเตอร์ ซึ่งวางอยู่ในสเตเตอร์ก็จะตกอยู่ภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็กหมุนนี้ ส่งผลให้เกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำและกระแสไฟฟ้าไหลภายในวงจรของโรเตอร์ ซึ่งมีลักษณะดังวงจร ดังรูปที่ 2.6 ทิศทางของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำบนโรเตอร์ที่เกิดขึ้นจะเป็นไปในลักษณะที่ทำให้กระแสเหนี่ยวนำเกิดขึ้นในทิศทางที่ต่อต้านกับการเปลี่ยนแปลงที่ทำให้เกิดขึ้นมา หลักการกำเนิดแรงเคลื่อนและกระแสเหนี่ยวนำนี้ก็คือ กฎของเลนซ์



รูปที่ 2.5 การเกิดสนามแม่เหล็กหมุน



รูปที่ 2.6 โรเตอร์ภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็กหมุน



รูปที่ 2.7 หลักการเกิดกระแสเหนี่ยวนำและแรงบิดบน โรเตอร์

จากรูปที่ 2.7 (ก) มอเตอร์ประกอบด้วย จำนวนขั้วแม่เหล็ก 2 ขั้ว เมื่อมีกระแสไหลผ่านตัวนำ ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และทำให้เสริมกันและหักล้างกันกับสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นบริเวณรอบตัวนำ ที่ฝังในแท่งตัวนำโรเตอร์ ด้วยความเร็ว v จากหลักการความเร็วสัมพันธ์ อาจกล่าวได้และมีผลเหมือนกับว่าสนามแม่เหล็กอยู่กับที่ และตัวนำถูกทำให้วิ่งไปทางซ้ายด้วยความเร็ว v แทน ดังแสดงในรูปที่ 2.7 (ข) ใช้กฎของเลนซ์จะได้ว่า กระแสเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจะต้องมีทิศทางที่ทำให้เกิดแรงผลักรตัวนำไปทางขวาทั้งนี้เพื่อต่อต้านการเคลื่อนที่ไปทางซ้าย ซึ่งทิศทางดังกล่าวในกรณีนี้ก็คือ กระแสต้องมีทิศชี้ออกจากหน้ากระดาษ ดังรูปที่ 2.7 (ค) เมื่อพิจารณาแท่งตัวนำ 2 ตัวที่ประกอบกันเป็นโรเตอร์ที่มีสนามแม่เหล็กหมุนของสเตเตอร์หมุนตัดผ่าน จะทำให้ได้แรงบิดเกิดขึ้นบนโรเตอร์ตามรูปที่ 2.7 (ง) และนี่คือหลักการกำเนิดแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

หากพิจารณาให้ถ่องแท้แล้วจะพบว่าแท้จริงแล้วในเครื่องจักรกลไฟฟ้าประเภทหมุนทุกประเภททั้งกระแสตรง และกระแสสลับจะมีปรากฏการณ์และพฤติกรรมของเครื่องกำเนิดและมอเตอร์

ในเวลาเดียวกัน ยกตัวอย่างเช่น ในกรณีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่ว่าจะเป็นกระแสตรงหรือกระแสสลับ สมมุติว่าให้เครื่องต้นกำลังหมุนเครื่องกำเนิดไปทางขวาเมื่อเครื่องกำเนิดจ่ายกระแสให้โหลดก็จะมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงต้านการหมุนของเครื่องต้นกำลัง ซึ่งแรงนี้ก็คือปฏิกิริยาแบบมอเตอร์เนื่องจากกระแสที่จ่ายให้ โหลด (Motor action) เช่นเดียวกับในกรณีของมอเตอร์ไม่ว่าจะเป็นกระแสตรงหรือกระแสสลับ เมื่อจ่ายไฟให้มอเตอร์หมุนแล้วก็จะเกิดมีแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำด้านกลับ (Back emf) ขึ้นมาตัวหนึ่งเสมอ และแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำด้านกลับนี้ก็คือปฏิกิริยาแบบเครื่องกำเนิดเมื่อมีสนามแม่เหล็กหมุนตัดผ่านขดลวด (Generating action)

อย่างไรก็ดีในกรณีของมอเตอร์เหนี่ยวนำนี้หากขาดซึ่งความเร็วที่แตกต่างระหว่าง สนามแม่เหล็กบนสเตเตอร์กับความเร็วของตัวโรเตอร์เองแล้วการเหนี่ยวนำย่อมไม่เกิดขึ้น แต่เมื่อใดก็ตามที่มอเตอร์มี โหลดแม้แต่เพียงแต่แรงเสียดทานต่อการหมุนของโรเตอร์เองก็จะทำให้โรเตอร์หมุนช้ากว่าสนามแม่เหล็กหมุนบนสเตเตอร์ทันที การที่โหลดทำให้โรเตอร์หมุนช้ากว่าสนามแม่เหล็กนี้ เรียกว่าเกิดการไถลและมักเรียกค่าไถลด้วยการเรียกทับศัพท์ว่า ค่าสลิป (Slip) โดยให้นิยามของค่าสลิปตามปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นว่าสลิป หมายถึง ค่าความแตกต่างระหว่างความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนบนสเตเตอร์กับความเร็วของโรเตอร์ $N_s - N_r$ และสามารถเขียนเป็นค่าสลิปต่อหนึ่งหน่วย (Per Unit Slip) ได้ดังนี้

$$s = \frac{N_s - N_r}{N_s} = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} = \frac{\omega_{sl}}{\omega_s} \quad (2.2)$$

- เมื่อ N_r คือ ความเร็วโรเตอร์ (rpm)
 ω_s คือ ความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้าของสนามแม่เหล็กหมุนบนสเตเตอร์ (rad/s)
 ω_r คือ ความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้าของโรเตอร์ (rad/s)
 ω_{sl} คือ ความเร็วเชิงมุมของสลิป (rad/s)

โดยปกติมักเรียกค่าสลิปต่อหนึ่งหน่วยว่าสลิปเฉยๆ แต่เป็นที่เข้าใจว่าหมายถึง สลิปต่อหนึ่งหน่วย เช่น สลิป = 0 หมายความว่าไม่มีสลิปคือความเร็วโรเตอร์เท่ากับความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนบนโรเตอร์ ในขณะที่ สลิป = 1 หมายความว่ามอเตอร์หยุดนิ่งไม่มีการหมุน การที่โรเตอร์ถูกสนามแม่เหล็กบนสเตเตอร์หมุนตัดผ่านด้วยความเร็วเชิงมุมของสลิปนี้ทำให้แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำบนโรเตอร์มีความเร็วเชิงมุมเท่ากับความเร็วเชิงมุมของสลิปเช่นกัน ค่าความเร็วเชิงมุมของสลิปนี้จะขึ้นอยู่กับโหลดเพราะเมื่อโหลดมากขึ้นก็จะมีผลทำให้โรเตอร์หมุนช้าลงและส่งผลต่อเนื่องทำให้ค่าความแตกต่างระหว่างความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้าของสนามแม่เหล็กหมุนบนสเตเตอร์กับความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้าของโรเตอร์มีค่ามากขึ้น กล่าวคือ โรเตอร์จะถูกสนามแม่เหล็กลัดขังหมุนตัดด้วยความเร็วมากขึ้น ตามกฎของฟาราเดย์เมื่อการหมุนตัดมีความเร็วมากขึ้นแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำก็ยิ่งมากขึ้นตามสมการ $e = -N \frac{d\phi_B}{dt}$ ผลก็คือกระแสในตัวโรเตอร์มากขึ้น และด้วยหลักการเดียวกับหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อกระแสในด้านทุติยภูมิมากขึ้นก็ส่งผลให้กระแสในสเตเตอร์ซึ่งเป็นกระแส

สเตเตอร์หมุนด้วยความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้าของสนามแม่เหล็กหมุนบนสเตเตอร์ตัดผ่านโรเตอร์ ซึ่งหมุนด้วยความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้าของโรเตอร์ ทำให้โรเตอร์รู้สึกว่ามีสนามแม่เหล็กหมุนตัดผ่านด้วยความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้าของโรเตอร์ทำให้โรเตอร์รู้สึกว่ามีสนามแม่เหล็กหมุนตัดผ่านด้วยความเร็วเชิงมุมของสลิป ผลลัพธ์นี้เองที่ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ความถี่ความเร็วเชิงมุมของสลิป โดยเส้นตรงแนวตั้งแสดงขนาดของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนแท่งตัวนำแต่ละแท่งที่ฝังอยู่บนตัวโรเตอร์ รูปที่ 2.8 (ข) แสดงกระแสเหนี่ยวนำบนโรเตอร์ ซึ่งจะล้าหลังแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำอยู่ด้วยมุม θ โดยกระแสเหนี่ยวนำนี้จะมีค่าเท่ากับแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำเพราะเป็นผลตอบสนองของอิมพีแดนซ์ (Impedance) บนโรเตอร์ต่อแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้น รูปที่ 2.8 (ค) แสดงแรงเคลื่อนแม่เหล็กเหนี่ยวนำซึ่งเกิดขึ้นบนโรเตอร์ แรงเคลื่อนแม่เหล็กนี้เกิดจากกระแสไฟฟ้า i ที่ไหลผ่านแท่งตัวนำแต่ละแท่งในทิศทางดังรูป ทำให้เกิดการเสริมกันของสนามแม่เหล็กของแต่ละคู่ ขดลวดจากวงในถึงวงนอกเกิดเป็นสนามแม่เหล็กที่มีลักษณะเป็นขั้นบันได และมีความถี่มูลฐานคงเส้นประ จากรูปจะเห็นว่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กของโรเตอร์นี้ล้าหลังแรงเคลื่อนแม่เหล็กของสเตเตอร์อยู่ถึง $90+\theta$ ซึ่งนิยามให้ค่ามุมนี้คือมุม δ และมีความเร็วเชิงมุมเท่ากับความเร็วเชิงมุมของสลิปเทียบกับโรเตอร์ แต่เนื่องจากว่าตัวโรเตอร์เองก็หมุนด้วยความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้าของโรเตอร์อยู่แล้ว ดังนั้นแรงเคลื่อนแม่เหล็กบนโรเตอร์จึงหมุนด้วยความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้าของโรเตอร์รวมกับความเร็วเชิงมุมของสลิปเท่ากับความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้าของสนามแม่เหล็กหมุนบนสเตเตอร์ เทียบกับจุดหยุดนิ่งบนสเตเตอร์ ซึ่งความเร็วเชิงมุมนี้ก็เป็นความเร็วเชิงมุมเดียวกับสนามแม่เหล็กบนสเตเตอร์ ดังนั้นแรงบิดจึงเกิดจากสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสนามแม่เหล็กทั้ง 2 ตัวนี้รวมกันทางเวกเตอร์และหาได้จากสมการที่ 2.3

$$T_e = \pi \left(\frac{P}{2} \right) l r B_p F_p \sin \delta \quad (2.3)$$

โดยที่ T_e	คือ	แรงบิดแม่เหล็ก
l	คือ	ความยาวตามแนวแกนของตัวนำที่อยู่ภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็ก
r	คือ	รัศมีของโรเตอร์
B_p	คือ	ค่าสูงสุดของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กในช่องว่างอากาศ (Air gap flux density)
F_p	คือ	ค่าสูงสุดของแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เกิดขึ้นบนโรเตอร์ (Rotor mmf)

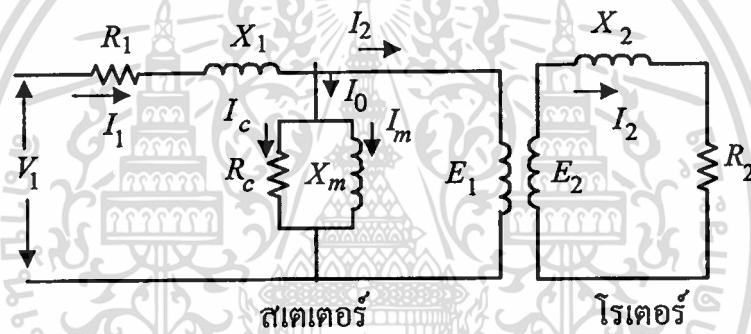
สมการ (2.3) นี้สามารถเขียนได้อีกกรุปหนึ่งคือ

$$T_e = \frac{3}{2} \left(\frac{P}{2} \right) |\psi_m| |I_r| \sin \delta \quad (2.4)$$

โดยที่ $|\psi_m|$ คือ ค่าสูงสุดของสนามแม่เหล็กต่อขั้วแม่เหล็ก
 $|I_r|$ คือ กระแสไฟฟ้าสูงสุดบนโรเตอร์

2.4 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

เนื่องจากว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำนี้อาศัยหลักการทำงานเช่นเดียวกับหม้อแปลงจึงสามารถเขียนวงจรสมมูลเช่นเดียวกับหม้อแปลงแต่แตกต่างกันที่ขดลวดขั้วของหม้อแปลงนั้น ไม่เคลื่อนที่เหมือนกับโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ



รูปที่ 2.9 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ซึ่งประกอบด้วยพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

- R_1 คือ ค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์
- R_2 คือ ค่าความต้านทานของขดลวดโรเตอร์
- R_c คือ ค่าความต้านทานความสูญเสียของแกนเหล็ก
- X_1 คือ ค่ารีแอกแตนซ์รั่วไหลของขดลวดสเตเตอร์
- X_2 คือ ค่ารีแอกแตนซ์รั่วไหลของขดลวดโรเตอร์
- X_m คือ ค่ารีแอกแตนซ์ที่เกิดจากสนามแม่เหล็ก
- I_c คือ กระแสไฟฟ้าที่ทำให้เกิดกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก
- I_m คือ กระแสไฟฟ้าที่สร้างสนามแม่เหล็ก

จากรูปที่ 2.9 นี้สามารถเขียนวงจรสมมูลได้ใหม่โดยการย้ายค่าต่างๆ ที่เกิดขึ้นทางโรเตอร์

ไปไว้ทางด้านสเตเตอร์เพื่อความสะดวกในการคำนวณและวิเคราะห์ดังรูปที่ 2.10 ซึ่งการย้ายไปนี้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ได้ทำให้ค่าต่างๆ ผิดพลาดไปจากความเป็นจริงมากนัก โดยจะต้องทราบค่าอัตราส่วนระหว่างไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำนวนรอบของขดลวดที่สเตเตอร์กับ โรเตอร์ (Turns Ratio : a) ซึ่งจะหาค่าต่างๆ ของวงจรสมมูล ได้ดังนี้คือ

$$E'_2 = aE_2 = E_1 \quad (2.5)$$

เมื่อ E'_2 คือ แรงดันไฟฟ้าขณะโรเตอร์อยู่กับที่ที่ย้ายค่ามายังด้านสเตเตอร์

$$I'_2 = \frac{I_2}{a} \quad (2.6)$$

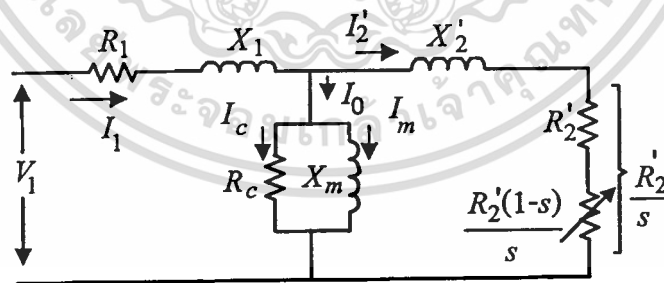
เมื่อ I'_2 คือ กระแสของโรเตอร์ที่ย้ายค่ามายังด้านสเตเตอร์

$$R'_2 = a^2 R_2 \quad (2.7)$$

$$X'_2 = a^2 X_2 \quad (2.8)$$

เมื่อ R'_2 คือ ความต้านทานของโรเตอร์ที่ย้ายค่ามายังด้านสเตเตอร์

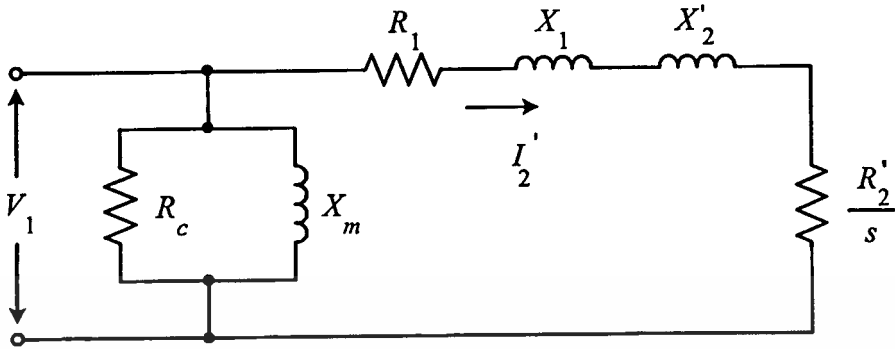
X'_2 คือ รีแอกแตนซ์ของโรเตอร์ที่ย้ายค่ามายังด้านสเตเตอร์



รูปที่ 2.10 วงจรสมมูลที่ย้ายค่าต่างๆ จากด้านโรเตอร์ไปด้านสเตเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยวงจรสมมูลในรูปที่ 2.10 สามารถทำให้เป็นวงจรสมมูลอย่างง่ายดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 วงจรสมมูลอย่างง่ายของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ซึ่งสามารถหากระแส I_2' ได้ดังนี้

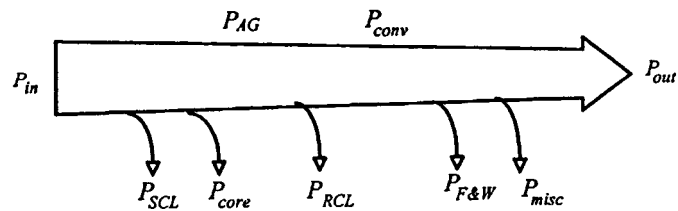
$$I_2' = \frac{V_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_1 + X_2')^2}} \quad (2.9)$$

2.5 กำลังส่งผ่านมอเตอร์

มอเตอร์เหนี่ยวนำมีพื้นฐานการทำงานคล้ายกับหม้อแปลงซึ่งมีกำลังงานด้านเข้าเป็นกำลังไฟฟ้า 3 เฟสของแรงดันและกระแสไฟฟ้า และสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังด้านออกซึ่งได้จากผลคูณทศนิยมของหม้อแปลงเป็นกำลังไฟฟ้าด้วยแต่สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำด้านทศนิยมของมอเตอร์ถูกทำให้ลัดวงจรจึงไม่มีกำลังไฟฟ้านอกแต่จะมีกำลังกลออกมาแทน ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าด้านเข้าและกำลังกลด้านออกของมอเตอร์แสดงดังรูปที่ 2.12 [9] กำลังไฟฟ้าด้านเข้าของมอเตอร์ (P_m) ที่ได้จากระบบแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสเมื่อจ่ายเข้าที่สเตเตอร์จะสูญเสียให้กับกำลังสูญเสียที่ขดลวดของสเตเตอร์ (P_{scl}) เป็นค่าแรกส่วนที่เหลือจะสูญเสียให้กับ Hysteresis loss และ Eddy current loss ซึ่งรวมเรียกว่าความสูญเสียที่แกนเหล็ก (Core losses : P_{core}) กำลังไฟฟ้าที่เหลือมาถึงจุดนี้จะถูกส่งข้ามช่องว่างอากาศเรียกกำลังไฟฟ้าส่วนนี้ว่ากำลังที่ข้ามช่องว่างอากาศไปโรเตอร์ (Air-gap power : P_{AG}) เป็นกำลังด้านเข้าของโรเตอร์ เมื่อส่งเข้ามาที่โรเตอร์จะพบกับกำลังสูญเสียที่ขดลวดของโรเตอร์ (P_{RCL}) และเปลี่ยนจากกำลังไฟฟ้าเป็นกำลังกล (P_{conv}) ที่จุดนี้ สุดท้ายก่อนจะเป็นกำลังด้านออกจะต้องสูญเสียกำลังกลให้กับแรงต้านลมของโรเตอร์และความฝืดของแบร์ริงของมอเตอร์ หรือเรียกว่า Friction and windage losses ($P_{F&W}$) และ Stray losses (P_{misc}) ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 แผนผังการส่งผ่านกำลังของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ความสูญเสียที่แกนเหล็กของโรเตอร์จะไม่นำมาแสดงในแผนผังการส่งผ่านกำลังของมอเตอร์เหนี่ยวนำเนื่องจากความสูญเสียที่แกนเหล็กมาจากส่วนหนึ่งของวงจรทางด้านสเตเตอร์ และวงจรโรเตอร์ ในขณะที่มอเตอร์ทำงาน โรเตอร์จะมีความเร็วใกล้เคียงความเร็วซิงโครนัสทำให้ความสูญเสียที่แกนเหล็กส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นที่วงจรสเตเตอร์ และความสูญเสียที่แกนเหล็กทั้งหมดจะนำมารวมกันและไว้ในตำแหน่งตามแผนผังการส่งผ่านกำลังของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ความสูญเสียที่แกนเหล็กจะถูกแสดงไว้ในวงจรสมมูลของมอเตอร์ด้วยการแทนค่าด้วยตัวแปร R_c หรือถ้ามีการกำหนดเป็นค่าคงที่แสดงว่าเป็นการรวมเอากำลังสูญเสียทางกลเข้าไว้ด้วยคั้งนั้นในวงจรสมมูลจะไม่มีค่า R_c ต่ออยู่ โดยปกติแล้วถ้ามอเตอร์ทำงานที่ความเร็วสูงจะมีความสูญเสียแรงต้านลมของโรเตอร์และความฝืดของแบร์ริงของมอเตอร์มาก แต่ในทางกลับกันที่ความเร็วสูงจะมีความสูญเสียที่แกนเหล็กต่ำ

2.6 การวิเคราะห์ห้วงจรสมมูล

กำลังไฟฟ้าด้านเข้าของมอเตอร์ : P_{in}

$$P_{in} = 3V_1 I_1 \cos\theta \quad (2.10)$$

เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำจะเกิดกำลังสูญเสียที่ขดลวดบนสเตเตอร์

$$P_{SCL} = 3I_1^2 R_1 \quad (2.11)$$

จากแผนผังการส่งผ่านกำลังของมอเตอร์กำลังสูญเสียต่างๆ ที่มีค่าคงที่รวมเรียกว่า Rotational losses (P_{rot}) คั้งนั้นจึงสามารถตัด R_c ออกจากวงจรได้

$$P_{rot} = P_{conv} + P_{F\&W} + P_{misc} \quad (2.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถหาค่ากำลังส่งผ่านช่องว่างอากาศได้จาก

$$P_{AG} = P_m - P_{scl} \tag{2.13}$$

หรือ

$$P_{AG} = 3I_2'^2 \frac{R_2'}{s} \tag{2.14}$$

กำลังไฟฟ้าที่ส่งผ่านช่องว่างอากาศของมอเตอร์หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่ากำลังไฟฟ้าด้านเข้าของโรเตอร์ กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่โรเตอร์ ได้แก่ กำลังสูญเสียที่ขดลวดบน โรเตอร์ส่วนกำลังสูญเสียที่แกนเหล็กของโรเตอร์จะถูกรวมอยู่กับ Rotational losses แล้ว

$$P_{RCL} = 3I_2'^2 R_2' \tag{2.15}$$

กำลังไฟฟ้าที่ออกมาจากโรเตอร์จะถูกเปลี่ยนเป็นกำลังกล

$$P_{conv} = P_{AG} - P_{RCL} \tag{2.16}$$

สามารถหาค่ากำลังกลด้านออกได้จาก

$$P_{out} = P_{conv} - P_{rot} \tag{2.17}$$

เนื่องจาก

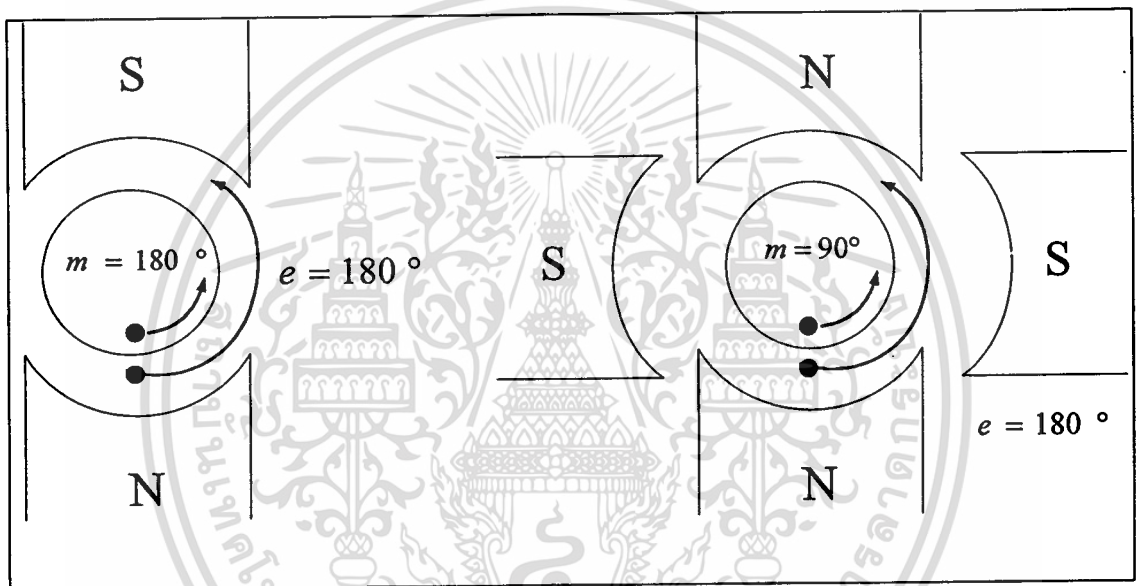
$$P = T\omega$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} T_e &= \frac{P_{conv}}{\omega_m} \\ &= \frac{3}{\omega_m} I_2'^2 R_2' \frac{1-s}{s} \end{aligned} \tag{2.18}$$

ω_m คือ ความเร็วเชิงมุมทางกลของโรเตอร์มีค่าเท่ากับ $\left(\frac{2}{P}\right)\omega_s$

สำหรับค่า $\omega_m = \left(\frac{2}{P}\right)\omega_r$ นั้นในกรณีนี้จะต้องระลึกเสมอว่า ω_r คือความเร็วเชิงมุมของสนามแม่เหล็กบนโรเตอร์เป็นความเร็วเชิงมุมในทางไฟฟ้า [8] ซึ่งจะมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับความเร็วเชิงมุมทางกลของตัวโรเตอร์เองเสมอ ถ้าเป็นมอเตอร์ 2 ขั้วความเร็วของ ω_r และ ω_m ก็จะเท่ากันเนื่องเพราะว่าในขณะที่สนามแม่เหล็กเดินทางจากขั้วหนึ่งซึ่งถือเป็น 180° ไฟฟ้า ตัวโรเตอร์จริงๆ ก็จะเดินทางได้ระยะ 180° ทางกลเช่นกัน แต่ถ้าเป็นมอเตอร์ 4 ขั้ว ในขณะที่สนามแม่เหล็กเดินทางจากขั้วหนึ่งไปอีกขั้วหนึ่งซึ่งถือเป็น 180° ไฟฟ้าตัวโรเตอร์จะหมุนไปได้เพียง 90° ทางกลเท่านั้น ด้วยเหตุผลนี้จึงทำให้ $\omega_m = \left(\frac{2}{P}\right)\omega_r$ ซึ่งสามารถอธิบายให้เห็นได้ชัดเจนขึ้นดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 การคิดองศาทางไฟฟ้าและองศาทางกล

จากสมการ (2.2)

$$s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s}$$

จะได้

$$\omega_r = \omega_s - s\omega_s = (1-s)\omega_s \quad (2.19)$$

$$\therefore \omega_m = \left(\frac{2}{P}\right)(1-s)\omega_s \quad (2.20)$$

แทนใน (2.18) จะได้

$$T_e = 3\left(\frac{P}{2}\right)I_2'^2 \frac{R_2'}{s\omega_s} \quad (2.21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนสมการ (2.14) ลงในสมการ (2.21) จะได้

$$T_e = \left(\frac{P}{2}\right) \frac{P_{AG}}{\omega_s} \tag{2.22}$$

เนื่องจาก สมการ (2.9)

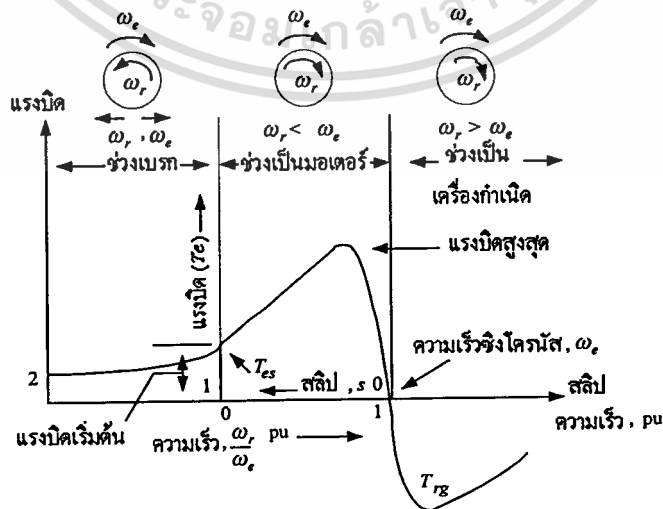
$$I_2' = \frac{V_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_1 + X_2')^2}}$$

แทนลงในสมการ (2.22) จะได้

$$T_e = 3 \left(\frac{P}{2}\right) \frac{R_2'}{s \omega_s} \frac{V_1^2}{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_1 + X_2')^2} \tag{2.23}$$

2.7 เส้นโค้งความสัมพันธ์แรงบิด – ความเร็วรอบ (Torque-Speed Curve)

จากสมการ (2.23) สามารถนำมาเขียนกราฟได้ดังรูปที่ 2.14 โดยกำหนดให้แรงดันและความถี่คงที่ จากค่าของสลิปในช่วงต่างๆ ทำให้เราสามารถแบ่งการทำงานของมอเตอร์ได้เป็น 3 ช่วง คือ ช่วงปกติ (Motoring Mode) คือช่วงที่ $0 \leq s \leq 1$, ช่วงเบรก (Plugging Mode) คือช่วงที่ $1 \leq s \leq 2$ และช่วงเครื่องกำเนิดเหนี่ยวนำ (Regeneration Mode) คือช่วงที่ $s < 0$ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.14



เอกสารนี้เป็นเอกสารรูปที่ 2.14 กราฟความสัมพันธ์แรงบิด – ความเร็ว ขณะแรงดันและความถี่คงที่
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปเราสามารถหาแรงบิดเริ่มแรก (Starting Torque) ได้โดยแทน $s = 1$ ในสมการ (2.23) จะได้

$$T_{es} = 3 \left(\frac{P}{2} \right) \frac{R'_2}{\omega_s (R_1 + R'_2)^2 + (X_1 + X'_2)^2} \frac{V_1^2}{\omega_s} \quad (2.24)$$

ในช่วงปกติมอเตอร์จะทำงานตามปกติ คือรับไฟ 3 เฟสมาสร้างสนามแม่เหล็กหมุนและทำให้โรเตอร์หมุนตาม สำหรับช่วงเบรกจะเกิดขึ้นได้ในตัวอย่าง เช่น การกลับลำดับเฟสของระบบไฟฟ้า 3 เฟสที่จ่ายให้มอเตอร์แบบทันทีทันใดมีผลทำให้สนามแม่เหล็กบนสเตเตอร์หมุนทวนกับการหมุนของโรเตอร์ส่งผลให้เกิดการเบรกของโรเตอร์แต่ผลที่ตามมาอีกอย่างหนึ่งก็คือ กระแสจะสูงมากๆ ทำให้มอเตอร์ร้อนจนเกิดความเสียหายได้ ส่วนในช่วงการคืนพลังงานจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อเราหาเครื่องจักรกลอีกตัวหนึ่งมาหมุน โรเตอร์ในทิศทางเดิมที่หมุนอยู่แต่เร่งความเร็วของโรเตอร์ไปจนเกินความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนบนสเตเตอร์ ผลก็คือ โรเตอร์จะมองว่าสนามแม่เหล็กที่หมุนตัดผ่านตัวมันถูกกับทิศทางตามหลักการความเร็วสัมพันธ์กระแสเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนโรเตอร์ จึงกลับทิศทางไปด้วย ส่งผลให้กระแสในสเตเตอร์กลับทิศทางทำให้กำลังเป็นลบ และมอเตอร์จะกลายเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยแปลงพลังงานกลจากเครื่องต้นกำลังที่นำมาหมุนตัวมันให้กลายเป็นพลังงานไฟฟ้าไหลกลับเข้าระบบปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นในระบบควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์อยู่เสมอ เพราะเมื่อใดก็ตามที่เราลดความเร็วลงเพื่อปรับให้มอเตอร์หมุนช้าด้วยเหตุผลของความถี่ที่โหลดมีอยู่จะทำให้โรเตอร์หมุนเร็วกว่าสนามแม่เหล็กหมุนบนสเตเตอร์ ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามความถี่ที่เรากำหนดปรากฏการณ์คืนพลังงานสู่ระบบก็จะเกิดขึ้น

ถ้าเราหาอนุพันธ์ของสมการ (2.23) เทียบกับสลิป s แล้วจับเท่ากับ 0 จะสามารถหาค่า s_m และ T_{em} ได้ดังนี้

$$s_m = \pm \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_2)^2}} \quad (2.25)$$

แทน $+s_m$ ในสมการ (2.23) จะได้แรงบิดสูงสุดของช่วงทำงานเป็นมอเตอร์

$$T_{em} = \frac{3}{4} \frac{P}{\omega_s} \frac{V_1^2}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_2)^2} + R_1} \quad (2.26)$$

เพื่อให้การพิจารณาสมการ (2.26) เป็นไปอย่างง่ายขึ้นเราอาจจะละเลขพารามิเตอร์ทางด้าน

ปฐมภูมิ คือ R_1 และ X_1 จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T_e = 3 \left(\frac{P}{2} \right) \frac{R'_2}{s \omega_s} \frac{V_1^2}{\left(\frac{R'_2}{s} \right)^2 + X_2'^2} \quad (2.27)$$

$$= 3 \left(\frac{P}{2} \right) \frac{R'_2}{\omega_s} \frac{s V_1^2}{R_2'^2 + s^2 X_2'^2}$$

แทน $-s_2$ ในสมการ (2.23) จะได้แรงบิดสูงสุดของช่วงที่ทำงานเป็นเครื่องกำเนิด

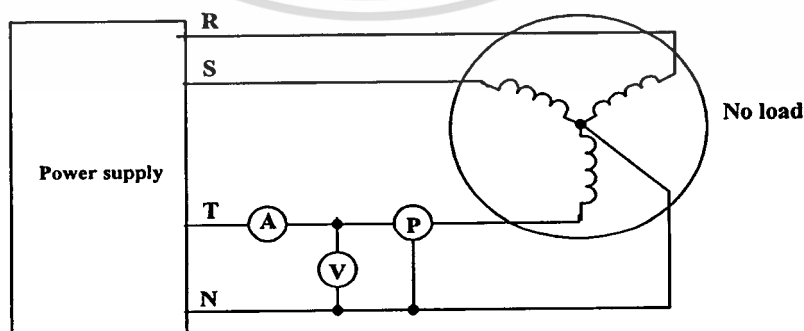
$$T_{eg} = -\frac{3}{4} \frac{P}{\omega_s} \frac{V_1^2}{\sqrt{R_1^2 + X_2'^2} - R_1} \quad (2.28)$$

2.8 การหาค่าพารามิเตอร์วงจรสมมูลของมอเตอร์

มอเตอร์เหนี่ยวนำมีการทำงานเช่นเดียวกับหม้อแปลงไฟฟ้า ดังนั้นการหาวงจรสมมูล จึงใช้วิธีการหาวงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นพื้นฐานสามารถหาได้จากการทำการทดสอบ No Load Test , Blocked Rotor Test และ V-I Method โดยในการทำการทดสอบจำเป็นต้องมีการควบคุมสภาวะแวดล้อมเพราะความต้านทานด้านสเตเตอร์แปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ และความต้านทานด้านโรเตอร์แปรเปลี่ยนตามความถี่ของแรงดันไฟฟ้าบนโรเตอร์

2.8.1 No Load Test

No Load Test เปรียบเทียบได้กับ Open Circuit Test ของหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นการทดสอบเพื่อหา Exciting Current และ Rotational loss ทดสอบโดยการป้อนแรงดันไฟฟ้าสมดุลและความถี่ที่พิกัดให้กับขดลวดสเตเตอร์ ต่อวงจรดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 วงจรการทดสอบ Block Rotor Test

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในขณะที่มอเตอร์เหนี่ยวนำไม่มีภาระทางกลกระแสทางด้านโรเตอร์จะมีค่าน้อยมาก จึงสามารถตัดกำลังสูญเสียทางด้านโรเตอร์ออกได้ ดังนั้นพิจารณากำลังสูญเสียทางด้านสเตเตอร์เพียงอย่างเดียวกำลังไฟฟ้าด้านเข้ามอเตอร์ขณะทำการทดสอบแบบไม่มีภาระทางกลต้องการหาค่า x_s และ x_r สามารถหาค่า Rotational loss ได้จาก

$$P_{rot} = P_{nl,3-\phi} - 3I_{nl}^2 R_l \quad (2.29)$$

เมื่อ $P_{nl,3-\phi}$ คือกำลังไฟฟ้าด้านเข้า 3 เฟส ขณะไม่มีภาระทางกล และ I_{nl} คือกระแสไฟฟ้าต่อเฟสเข้ามอเตอร์ ค่า R_l คือความต้านทานของขดลวดด้านสเตเตอร์ต่อเฟสหาได้จากการทดสอบด้วย V-I Method ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อที่ 2.7.3 หาค่ามุมระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าได้โดย

$$\theta_{nl} = \cos^{-1} \left(\frac{P_{nl}}{V_{nl} I_{nl}} \right) \quad (2.30)$$

สามารถหาค่า Magnetizing Current (I_m) ได้จาก

$$I_m = I_{nl} \sin \theta_{nl} \quad (2.31)$$

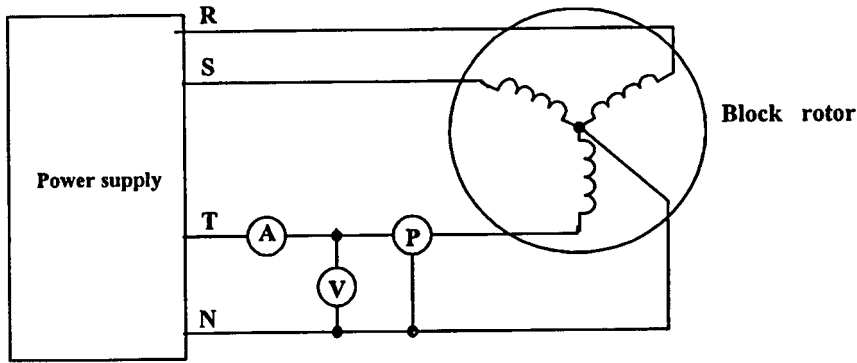
กระแสขณะไม่มีภาระทางกลน้อยมากจึงสามารถละทิ้งแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม x_s ได้ ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม x_r และ x_m จะเท่ากับแรงดันไฟฟ้าที่มาจากแหล่งจ่าย

$$X_m + X_l = \frac{V_{nl}}{I_m} \quad (2.32)$$

ซึ่งค่า x_s จะหาได้จากการทดสอบแบบ Blocked Rotor Test

2.8.2 Blocked Rotor Test

Blocked Rotor Test เปรียบเทียบได้กับ Short Circuit Test ของหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นการทดสอบเพื่อหาค่า Leakage Impedances ทำการทดสอบโดยจับโรเตอร์ให้หยุดนิ่งอยู่กับที่และป้อนแรงดันไฟฟ้าสมดุลให้กับขดลวดสเตเตอร์จนถึงพิกัดกระแสแสดงรูปที่ 2.16 เนื่องจาก Exciting Current มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับกระแสพิกัดสามารถละทิ้งได้



รูปที่ 2.16 วงจรการทดสอบ Blocked Rotor Test

ทำการหามุมระหว่างกระแสกับแรงดันในขณะ Blocked Rotor

$$\theta_{bl} = \cos^{-1} \left(\frac{P_{bl}}{V_{bl} I_{bl}} \right) \quad (2.33)$$

โดยปกติแล้วแรงดันไฟฟ้าขณะ Blocked Rotor จะมีค่าน้อยมากจึงมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน x_b น้อยมากจึงละทิ้งได้ นำค่ามุมที่ได้มาหาค่าอิมพีแดนซ์ได้

$$Z_b = \frac{V_b \angle \theta_w}{I_b} = R_b + jX_b \quad (2.34)$$

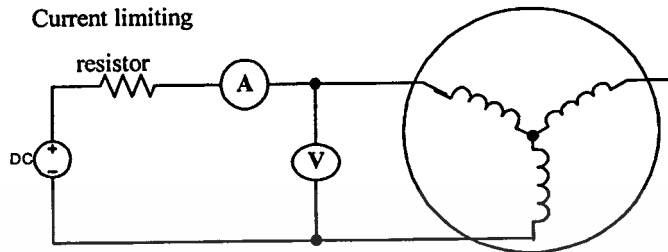
$$X_b = X_1 + X_2 \quad (2.35)$$

$$R_b = R_1 + R_2 \quad (3.36)$$

2.8.3 V-I Method

เป็นการใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงในการทดสอบเพื่อไม่ให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำและกระแสจັນในวงจรของโรเตอร์ ซึ่งค่ารีแอกแตนซ์จะเข้าใกล้ศูนย์ ในการทดสอบต้องปรับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อให้ค่าของกระแสไฟฟ้า I , มีค่าใกล้เคียงกับกระแสพิกัดแล้วบันทึกค่า V_{dc} และ I_{dc} ซึ่งการทดสอบแสดงดังรูปที่ 2.17 โดยค่า R , หาได้จาก

$$R_l = \frac{V_{dc}}{2I_{dc}} \quad (2.37)$$



รูปที่ 2.17 วงจรการทดสอบ V-I Method

2.9 ระบบองค์ประกอบสมมาตร

สถานะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลที่ใช้ในการทดสอบ สามารถแบ่งได้ 2 สถานะได้แก่ แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลสูงกว่าพิกัด และแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลต่ำกว่าพิกัด ซึ่งเป็นแรงดันระหว่าง Line to Line แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลที่ใช้ในการทดสอบได้แก่ 1%, 2% และ 3% แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล และการคำนวณได้จากสมการที่ 3.37

$$\%PVUR = \frac{\text{MAX} \{ |V_a - V_{avg}|, |V_b - V_{avg}|, |V_c - V_{avg}| \}}{V_{avg}} \quad (3.37)$$

โดยที่

$$V_{avg} = \frac{V_a + V_b + V_c}{3}$$

เมื่อ $\%PVUR$ คือ แรงดันเฟสไม่สมดุลในหน่วยของเปอร์เซ็นต์
 V_{avg} คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยของสามเฟส

2.10 การเกิดการลัดรอบในมอเตอร์เหนี่ยวนำ

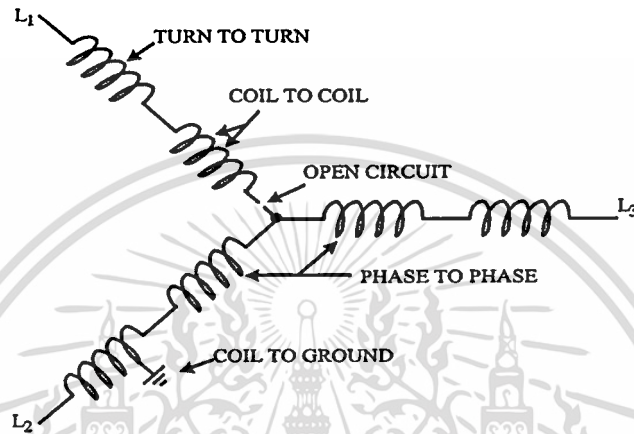
2.10.1 ความเสียหายที่เกิดขึ้นที่ขดลวดสเตเตอร์

การเกิดการลัดรอบที่ขดลวดสเตเตอร์ จะพิจารณาตามชนิดของการนำไปสู่การลัดวงจร

โดยสามารถแบ่งได้ 5 ประเภท แสดงดังรูปที่ 2.17 ได้แก่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การลัดวงจรระหว่างรอบถึงรอบ (Turn to turn)
- การลัดวงจรระหว่างขดถึงขด (Coil to coil)
- การลัดวงจรระหว่างเฟสถึงเฟส (Phase to phase)
- การลัดวงจรระหว่างขดถึงกราวด์ (Coil to ground)
- และกรณีเปิดวงจร (Open circuit)



รูปที่ 2.18 ความเสียหายของขดลวดสเตเตอร์ในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส เมื่อขดลวดต่อแบบสตาร์

มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ที่มีการพันเป็นแบบสุมักจะถูกนำมาใช้กับงานที่มีการเริ่มเดินบ่อยครั้ง ลวดตัวนำในแต่ละขดขดลวดที่มีอยู่อย่างมากมายจะเป็นสาเหตุทำให้มีบางส่วนเกิดการเคลื่อนที่ (สั่น) ในขณะที่มอเตอร์ทำงาน ซึ่งสาเหตุนี้จะเป็นจุดเริ่มต้นของการลัดวงจรแบบรอบถึงรอบ ภายใน 1 ขดขดลวดการลัดวงจรดังกล่าวจะนำไปสู่ความร้อนที่เกิดขึ้นภายในขดของขดลวดที่ลัดวงจรนั้น ส่งผลทำให้ฉนวนของขดลวดตัวนำเสื่อมสภาพลง และสุดท้ายจะทำให้เกิดสภาวะลัดวงจรโดยรวมไปถึงการลัดวงจรลงกราวด์โดยผ่านสลอตสเตเตอร์ เมื่อสภาวะดังกล่าวนี้เกิดขึ้นแล้วมอเตอร์อาจจะทำงานต่อหรือหยุดทำงานก็จะขึ้นอยู่กับความสามารถของอุปกรณ์ป้องกันมอเตอร์ แต่ส่วนใหญ่แล้วสาเหตุของการลัดวงจรระหว่างรอบถึงรอบจะอยู่เหนือความสามารถของเครื่องป้องกันมอเตอร์ทำให้ไม่สามารถตรวจพบสิ่งผิดปกติที่เกิดขึ้นได้ เนื่องจากเป็นความเสียหายที่มีผลน้อยมาก ความร้อนที่เกิดขึ้นดังกล่าวจะค่อยๆ มีอุณหภูมิสูงขึ้น รวมถึงจะมีการขยายพื้นที่ออกไปด้วย จนกระทั่งเกิดความเสียหายที่ตามมา คือฉนวนเฟสหรือกราวด์ถูกทำลายและจุดนี้จะเป็นสาเหตุโดยตรงที่ทำให้เกิดฟอลต์เนื่องจากเฟสถึงเฟส หรือกราวด์ฟอลต์ (Ground fault)

จากที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่าปัญหาเริ่มแรกจะมาจากการลัดวงจรเพียงจุดเล็กๆ เท่านั้น คือรอบถึงรอบ แล้วก็จะถูกลามทำให้เกิดอีกสี่สถานะตามมา [2] ดังนั้นถ้าสามารถตรวจจับการลัดวงจรของขดลวดสเตเตอร์ลัดรอบกรณีรอบถึงรอบได้ก็จะสามารถแก้ไข ปรับปรุง หรือวางแผนการซ่อม

บำรุงได้ล่วงหน้าทำให้สามารถช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายให้น้อยลงได้ทั้งนี้เนื่องจากอีกสี่สภาวะที่มีอันตรายสูงกว่ามีอัตราเสี่ยงที่จะเกิดขึ้นลดลงไปด้วยเช่นกัน

2.10.2 ปัจจัยที่มีผลทำให้เกิดความเสียหายที่สเตรเตอร์

ปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดความล้มเหลวที่สเตรเตอร์ ได้แก่ ความเค้น (Stress) ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภทด้วยกันได้แก่

2.10.2.1 ทางกล

2.10.2.1.1 การเคลื่อนตัวของขดลวด

จากกระแสที่ไหลในขดลวดที่สเตรเตอร์จะสร้างแรงบนขดลวดโดยเป็นส่วนร่วมกับกระแสไฟฟ้กำลังสอง ($F \propto I^2$) แรงที่เกิดขึ้นสูงสุดระหว่างการสตาร์ทจะเป็นเหตุให้ขดลวดเกิดการสั่นสะเทือนขึ้น การเคลื่อนในที่นี่จะส่งผลทำให้เกิดความเสียหายรุนแรงที่ฉนวนของขดลวด และเป็นเหตุให้ตัวนำทองแดงเสียหาย

2.10.2.1.2 โรเตอร์กระทบกับสเตรเตอร์

การที่โรเตอร์กระทบกับสเตรเตอร์มีหลายสาเหตุด้วยกันคือ ลูกปืนเสีย ,เพลลาบิดเบี้ยวไป และการวางแนวระหว่างสเตรเตอร์และโรเตอร์ไม่ดี การที่โรเตอร์ไปกระทบถูกสเตรเตอร์แรงที่เกิดขึ้นทำให้ฉนวนที่ขดลวดถูกเจาะเป็นรูผลที่ตามมาคือเกิดการรั่วลงดิน ส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับความถี่ของการสตาร์ท และจำนวนครั้งของการกระทบกันระหว่างโรเตอร์กับสเตรเตอร์ถ้ามีการกระทบกันระหว่างโรเตอร์และสเตรเตอร์ขณะที่มอเตอร์กำลังทำงานอยู่ที่ความเร็วเต็มพิกัดผล ก็คือทำให้เกิดความร้อนขึ้นที่จุดสัมผัสกันนั้น และจะทำให้อายุการใช้งานของขดลวดที่สเตรเตอร์เสื่อมเร็วกว่ากำหนด

ความเสียหายที่เกิดขึ้นที่ขดลวดสเตรเตอร์นั้นมักเกิดขึ้นเป็นรองจากความเสียหายที่เกิดขึ้นจากรองคลื่น ซึ่งปัญหาที่สำคัญและเกิดขึ้นเป็นอันดับต้นๆ ที่สเตรเตอร์คือการลัดรอบของขดลวด สเตรเตอร์ซึ่งอาจถูกลามขยายความรุนแรงต่อไปได้ โดยปัจจัยสำคัญคือความเค้นได้แก่ ทางกล ทางไฟฟ้า ความร้อน และจากสภาวะแวดล้อม ซึ่งในการวินิจฉัยความผิดปกติของมอเตอร์เหนี่ยวนำนั้นก็มียหลายวิธีด้วยกันซึ่งในปัจจุบันที่นิยมใช้ได้แก่ การวิเคราะห์สัญญาณต่างๆ ที่เกิดขึ้นในมอเตอร์ เช่น กระแสสเตรเตอร์ แรงดัน ฟลักซ์ หรือ แรงบิดช่องอากาศ โดยในวิทยานิพนธ์นี้จะทำการศึกษาความผิดปกติของมอเตอร์โดยใช้แรงบิดช่องอากาศ ซึ่งจะได้กล่าวถึงในบทต่อไปเกี่ยวกับสมการของแรงบิดช่องอากาศ การวิเคราะห์สเปคตรัม รวมถึงการจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำ

2.11 สรุป

ในบทนี้เนื้อหาส่วนใหญ่จะเป็นการกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยได้อธิบายถึงโครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำ หลักการทำงาน นอกจากนี้ยังได้อธิบายถึงวงจรสมมูล และการหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ เพื่อให้มีความเข้าใจและเป็นพื้นฐานนำไปสู่การตรวจสอบ และวิเคราะห์พฤติกรรมของมอเตอร์เมื่อเกิดความผิดปกติในขั้นต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ทฤษฎีพื้นฐานโครงข่ายประสาทเทียม

3.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและความเป็นมาของโครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network) หรือที่เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า “นิวรอนเน็ตเวิร์ค” ซึ่งบทนี้จะกล่าวถึงโครงข่ายประสาทของสิ่งมีชีวิตและโครงข่ายประสาทเทียม รวมทั้งข้อดีที่ได้จากการเรียนรู้และจดจำโดยโครงข่ายประสาท ซึ่งเป็นวิธีการที่เลียนแบบโครงสร้างภายในให้คล้ายคลึงกับเซลล์สมองของมนุษย์ ถึงแม้จะไม่ได้เท่าสมองของมนุษย์ ความแตกต่างระหว่างคอมพิวเตอร์ธรรมดา กับ โครงข่ายประสาทเทียมอย่างหนึ่งคือ ในคอมพิวเตอร์ธรรมดา เมื่อต้องการให้การทำงานอย่างใดอย่างหนึ่งสามารถทำได้โดยการสร้างโปรแกรม แต่ในทางตรงข้าม โครงข่ายประสาทเทียมเมื่อต้องการให้ทำงานอย่างใดสามารถทำได้โดยการสอน (Training) ซึ่งการฝึกสอนนี้จะทำให้โครงข่ายประสาทเทียมนำบทเรียนที่ได้เข้าไปเก็บในโครงสร้างของประสาทเทียม และจากนั้นจะถูกเรียกกลับขึ้นมาใช้เมื่ออยู่ในระหว่างประมวลผล โดยคุณสมบัติและความสามารถที่เป็นประโยชน์ของโครงข่ายประสาทเทียม

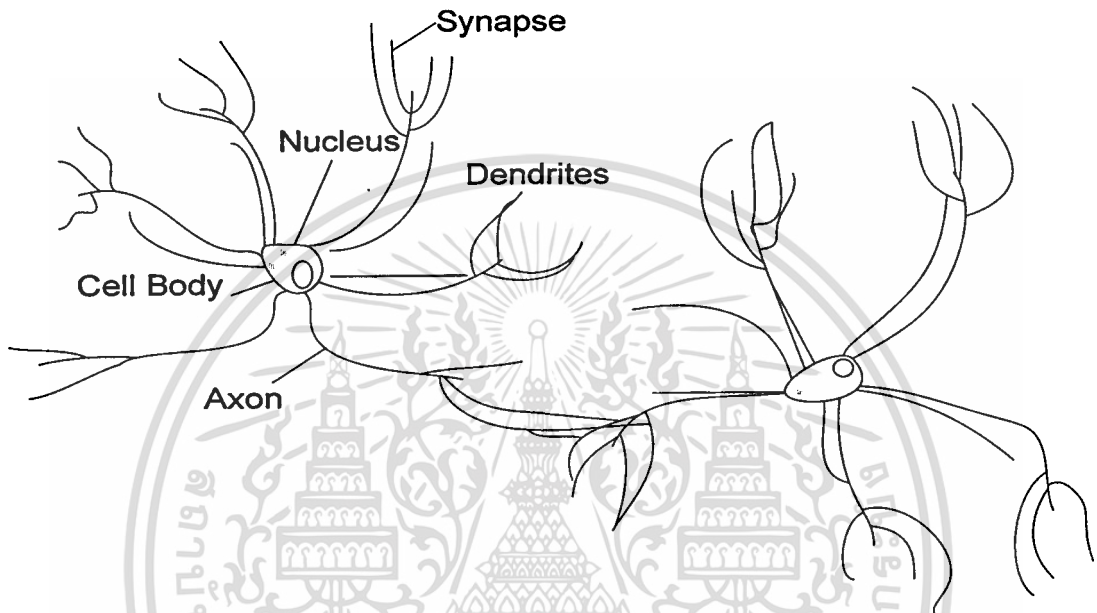
1. มีความยืดหยุ่นสูงจนสามารถจำลองขบวนการของปัญหาใด ๆ ก็ได้
2. มีความสามารถในการจำชุดของคู่อินพุทและเอาต์พุทที่มีความซับซ้อนมากจนสามารถจำลองแบบในเชิงความน่าจะเป็นได้
3. มีความสามารถในการปรับตัวเข้ากับสิ่งแวดล้อมได้ดี
4. มีความสามารถในการตอบสนองข้อมูลที่ไม่เคยเห็น

3.2 ลักษณะโครงสร้างเซลล์ประสาททางชีววิทยา

ระบบประสาทของมนุษย์ประกอบด้วยเซลล์ประสาทประมาณ 10^{11} เซลล์ โดยแต่ละเซลล์จะประกอบด้วย 3 ส่วนใหญ่ ๆ คือ เซลล์ประสาทหรือโซมา (Cell body or Soma) เดนไดรต์ (Dendrite) และแอกซอน (Axon) แสดงได้ดังรูปที่ 3.1(ก) เซลล์ประสาทหรือโซมาจะประกอบด้วยนิวเคลียส (Nucleus) ส่วนเดนไดรต์ (Dendrite) จะเป็นแขนต่อออกจากเซลล์ประสาทที่มีหลายจุด และเมื่อออกจากเซลล์ประสาทก็จะแยกแขนงออกไปอีก สำหรับแอกซอนเป็นส่วนที่หนาและยาวต่อออกจากเซลล์ประสาทไปหาเซลล์ประสาทอื่น ๆ ที่ทำงานร่วมกัน เซลล์ประสาทหนึ่งเซลล์จะมีแอกซอนเพียงอันเดียวเท่านั้น แต่จะมีเดนไดรต์มาก สำหรับระบบการทำงานสัญญาณจะเข้ามาหาเซลล์ประสาททางเดนไดรต์ ด้วยจุดเชื่อมที่เรียกว่า Synapse จะถูกนำมารวมกันโดยจะมีค่า Threshold ค่าหนึ่ง หากผลรวมของสัญญาณนั้นมีค่ามากกว่า Threshold

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แล้วเซลล์ประสาทก็จะส่งสัญญาณขนาดหนึ่ง โดยผ่านทางแอกซอนออกไปหาเซลล์ประสาทตัวอื่น ๆ แสดงดังรูปที่ 3.1(ข) ลักษณะการจัดเรียงชั้นและการเชื่อมโยงระหว่างเซลล์ประสาทในสมองของมนุษย์เน้นมีการจัดเรียงที่ซับซ้อนนอกนั้นยังมีการเรียนรู้ตลอดเวลา ฉะนั้นจึงยากที่จะสร้าง โมเดลขึ้นมาเพื่อทำการเลียนแบบการทำงานของเซลล์ประสาทในสมองมนุษย์ให้ได้อย่างสมบูรณ์ครบถ้วน



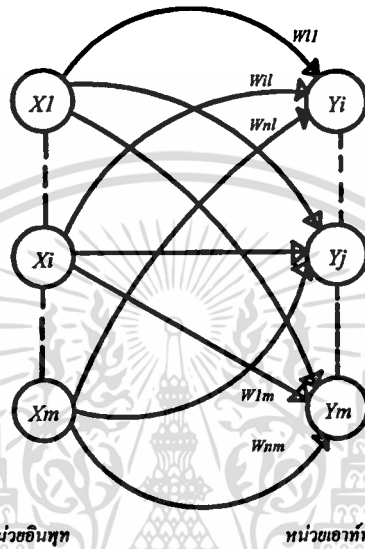
รูปที่ 3.1 (ก) ส่วนประกอบของเซลล์ประสาท (ข) แสดงจุดถ่ายสัญญาณ (Signal Transmission) จากเซลล์ประสาทหนึ่งไปยังเซลล์ประสาทเซลล์อื่น ๆ

3.3 สถาปัตยกรรมโครงข่ายประสาทเทียม

การจัดการของโครงข่ายประสาทเทียมภายในชั้น รูปแบบการเชื่อมต่อภายในและระหว่างชั้น เราเรียกว่า “สถาปัตยกรรมโครงข่าย” โดยทั่วไปโครงข่ายประสาทเทียมทั้งหลายประกอบด้วยชั้นอินพุท ซึ่งภายในแต่ละหน่วย (Unit) จะได้รับการเร่งเร้าเท่ากับสัญญาณอินพุทภายนอกโครงข่ายประสาทเทียมมักจะถูกจัดแบ่งเป็นโครงข่ายชั้นเดียวหรือหลายชั้น การกำหนดจำนวนของชั้นส่วนที่เป็นหน่วยอินพุทจะไม่ถูกนับว่าเป็นหนึ่งชั้น ทั้งนี้เพราะว่าในส่วนนี้จะไม่มีการคำนวณสำหรับจำนวนของชั้นในโครงข่ายสามารถแบ่งได้เป็นจำนวนของชั้นนำหนักที่เชื่อมต่อระหว่างโครงข่ายประสาทเทียม โดยสถาปัตยกรรมของโครงข่ายประสาทเทียม สามารถจัดแบ่งได้ตามลักษณะโครงสร้างของโครงข่าย หรือจัดแบ่งตามกระบวนการเรียนรู้ ซึ่งในหัวข้อนี้สามารถจำแนกตามลักษณะโครงสร้างที่ประกอบกันเป็นโครงข่ายประสาทเทียมได้เป็น 3 ประเภท ดังนี้

3.3.1 โครงข่ายประสาทเทียมชนิดชั้นเดียว (Single Layer)

สถาปัตยกรรมของโครงข่ายประสาทเทียมชนิดนี้จะมีน้ำหนักเชื่อมต่อนิ่งชั้นแสดงได้ ดังรูปที่ 3.3 ประกอบด้วยหน่วยอินพุต ($X_1, \dots, X_2, \dots, X_n$) เชื่อมต่ออยู่กับหน่วยเอาต์พุต (Y_1, \dots, Y_m) โดยที่น้ำหนักหนึ่งชั้น เป็นส่วนที่ปรับระดับสัญญาณอินพุต ค่าน้ำหนักที่ได้จะเป็นอิสระต่อกันไม่ส่งผลกระทบต่อค่าปรับค่าน้ำหนักตัวอื่น มักใช้กับการประมวลผลข้อมูลไม่ซับซ้อนมากนัก



รูปที่ 3.2 โครงข่ายประสาทเทียมชนิดชั้นเดียว

3.3.2 โครงข่ายประสาทเทียมชนิดหลายชั้น (Multi Layer)

สถาปัตยกรรมของโครงข่ายประสาทเทียมชนิดนี้เป็นโครงข่ายที่มีโหนดหลายชั้นเชื่อมต่อกันอยู่ระหว่างหน่วยอินพุตกับหน่วยเอาต์พุต ดังแสดงในรูปที่ 3.4 โดยมีชั้นซ่อนเป็นตัวเชื่อมระหว่างสองหน่วย โครงข่ายชนิดหลายชั้นสามารถใช้วิเคราะห์ปัญหาที่ซับซ้อนได้ดีกว่าโครงข่ายชนิดชั้นเดียว แต่การฝึกสอนอาจจะยุ่งยากกว่า ถึงอย่างไรก็ตามในการฝึกสอนอาจได้รับผลสำเร็จมากกว่า เป็นเพราะว่าในบางครั้งการแก้ปัญหาของโครงข่ายชนิดชั้นเดียว ไม่สามารถรับการฝึกสอนได้อย่างถูกต้องทุกปัญหา

$$o/p_{ANN} = f^3(LW^{3,2} * f^2(LW^{2,1} * f^1(IW^{1,1} * p + b^1) + b^2) + b^3) \quad (3.1)$$

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

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

$LW^{3,2}$ คือ ค่าถ่วงน้ำหนักที่เชื่อมระหว่างชั้นซ่อนที่ 2 กับชั้นเอาต์พุต

b^1, b^2 คือ ค่าไบแอสในชั้นซ่อนที่ 1 และ 2

b^3 คือ ค่าไบแอสในชั้นเอาต์พุต

f^1, f^2 , คือ ฟังก์ชันกระตุ้นชนิดลอจิสติกมอยด์(Log-sigmoid)

f^3 คือ ฟังก์ชันกระตุ้นชนิดเชิงเส้น(purelin)

$P = [P_1, P_2, \dots, P_R]$ คือเวกเตอร์อินพุตของโครงข่าย

รูปที่ 3.4 แสดงโครงข่ายประสาทเทียมที่มี 2 ชั้นซ่อน มีอินพุต R จุด, นิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1 และ 2 เท่ากับ S^1 และ S^2 และมีเอาต์พุต S^3 จุด สมาชิกของอินพุตเวกเตอร์ P แต่ละตัวจะถูกเชื่อมเข้ากับนิวรอนในแต่ละนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1 ด้วยค่าถ่วงน้ำหนัก W^1 (เรียกว่า Input weight, $IW^{1,1}$) ซึ่งเป็นเมทริกซ์ขนาด $S^1 \times R$ และเวกเตอร์ a^1 ซึ่งเป็นผลลัพธ์ของชั้นซ่อนที่ 1 และมีขนาด S^1 จะเป็นอินพุตของชั้นซ่อนที่ 2 สมาชิกแต่ละตัวของเวกเตอร์ a^1 ก็จะถูกเชื่อมเข้ากับนิวรอนแต่ละนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 2 ด้วยค่าถ่วงน้ำหนัก W^2 (เรียกว่า Layer weight, $LW^{2,1}$) ซึ่งเป็นเมทริกซ์ขนาด $S^2 \times S^1$ เช่นเดียวกันกับชั้นซ่อนที่ 1 เวกเตอร์ a^2 ซึ่งเป็นผลลัพธ์ของชั้นซ่อนที่ 2 และมีขนาด S^2 จะเป็นอินพุตของชั้นข้อมูลเอาต์พุต สมาชิกแต่ละตัวของเวกเตอร์ a^2 จะถูกเชื่อมเข้ากับนิวรอนแต่ละตัวในชั้นข้อมูลเอาต์พุตด้วยค่าถ่วงน้ำหนัก W^3 ($LW^{3,2}$) ซึ่งเป็นเมทริกซ์ขนาด $S^3 \times S^2$ โดยที่เวกเตอร์ a^3 ซึ่งเป็นเมทริกซ์ขนาด S^3 จะเป็นผลลัพธ์ของโครงข่ายประสาทเทียม

แนวคิด

ขั้นตอนการฝึกสอน โครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ สามารถแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนด้วยกัน คือ ป้อนข้อมูลอินพุตไปข้างหน้า, แพร่ค่าย้อนกลับของค่าผิดพลาดที่เกี่ยวข้องและปรับค่าถ่วงน้ำหนัก ระหว่างป้อนไปข้างหน้า จะเริ่มต้นด้วยการนำค่าอินพุตที่ได้รับจากชั้นอินพุตมาคำนวณหาผลรวมที่ได้รับในแต่ละนิวรอน แล้วจึงส่งผลลัพธ์ที่ได้ส่งต่อไปยังชั้นซ่อนที่ 1 แต่ละนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1 จะทำการคำนวณด้วยฟังก์ชันกระตุ้นในชั้นนั้น แล้วจึงส่งผลลัพธ์ที่ได้ส่งต่อไปยังชั้นซ่อนที่อยู่ถัดไป ในชั้นซ่อนที่ 2 แต่ละนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 2 จะทำการคำนวณด้วยฟังก์ชันกระตุ้นในชั้นนั้น จากนั้นส่งผลลัพธ์ที่ได้ส่งต่อไปยังชั้นถัดไป สุดท้ายแต่ละนิวรอนในชั้นเอาต์พุตจะทำการคำนวณด้วยฟังก์ชันกระตุ้นในชั้นเอาต์พุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อหาคำตอบหรือผลตอบสนองโครงข่ายสำหรับ แต่ละรูปแบบที่ป้อนให้ ทิศทางการไหลของข้อมูลเหล่านี้จะเป็นลักษณะเคลื่อนไปข้างหน้าจากชั้นของอินพุต ผ่านชั้นของนิวรอนเซลล์ภายในไปสู่ชั้นเอาต์พุต วิธีการคำนวณของโครงข่ายลักษณะนี้ จึงมีชื่อเรียกว่า forward-propagation

ขั้นต่อไปจะเป็นการคำนวณแบบ back-propagation สำหรับขั้นตอนนี้จะเป็นการนำผลลัพธ์ที่ได้จากเอาต์พุตของโครงข่ายมาเปรียบเทียบกับเอาต์พุตเป้าหมายเพื่อคำนวณค่าผิดพลาดที่เกี่ยวข้อง แล้วค่าผลต่างระหว่างเอาต์พุตของโครงข่ายกับเอาต์พุตเป้าหมายที่ได้จากโครงข่ายจะส่งถูกถอยหลังมายังชั้นที่ 2 และส่งต่อไปยังนิวรอนต่าง ๆ ภายในชั้นซ่อนที่ 2 แต่ละโหนดจะได้รับค่าผิดพลาดเพียงบางส่วนขึ้นอยู่กับว่า นิวรอนเซลล์นั้นเป็นตัวที่ส่งผลมากหรือน้อยไปเอาต์พุตนั้น เพื่อปรับค่าถ่วงน้ำหนักระหว่างชั้นเอาต์พุตกับชั้นซ่อนที่ 2 กระบวนการของการส่งค่าความผิดพลาดกลับมานั้นจะทำซ้ำกับชั้นถัดลงมาอีก จนกระทั่งทุกโหนดในโครงข่ายได้รับส่วนแบ่งค่าความผิดพลาดนั้น

ขั้นตอนสุดท้ายจะนำค่าผิดพลาดที่ได้มาใช้ในการปรับค่าถ่วงน้ำหนัก ซึ่งค่าถ่วงน้ำหนักจะเปลี่ยนแปลงไปมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณค่าความผิดพลาดที่ได้รับ กระบวนการจะกลับไปทำซ้ำในขั้นตอนแรกจนกระทั่งค่าความผิดพลาดที่ได้มีค่าน้อยกว่าค่าผิดพลาดค่าสุดท้ายที่กำหนดไว้ ต่อไปเป็นรายละเอียดของการทำงานในแต่ละขั้นดังนี้

1. แพร่ค่าป้อนไปข้างหน้า (Forward-propagation)

เมื่อข้อมูลอินพุตปรากฏบนชั้นอินพุต ($P_R, R=1, \dots, R$) สัญญาณจากชั้นอินพุตทั้งหมดจะถูกส่งมาตามสายเชื่อมโยงไปยังนิวรอนเซลล์ในชั้นถัดไป แต่ละนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1 ถูกเชื่อมโยงด้วยค่าถ่วงน้ำหนัก ($iw_{s^1,R}^{1,1} = S^1 = 1, \dots, S^1$) จะทำการคำนวณสัญญาณอินพุตของนิวรอนเซลล์ในชั้นซ่อนที่ 1 ได้จากสมการ

$$net_{s^1} = b_{s^1} + \sum_{s^1,R} iw_{s^1,R}^{1,1} P_R \quad (3.2)$$

ใช้ฟังก์ชันกระตุ้นเพื่อคำนวณสัญญาณเอาต์พุต (a^1) ในชั้นซ่อนที่ 1

$$a^1 = f\left(net_{s^1}\right) \quad (3.3)$$

เมื่อสัญญาณเอาต์พุต (a^1) ในชั้นซ่อนที่ 1 เอาต์พุตที่ได้ส่งต่อไปยังชั้นซ่อนที่ 2 โดยแต่ละนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 2 ถูกเชื่อมโยงด้วยค่าถ่วงน้ำหนัก ($iw_{s^2,s^1}^{2,1} = S^2 = 1, \dots, S^2$) จะทำการคำนวณสัญญาณอินพุตของนิวรอนเซลล์ในชั้นซ่อนที่ 2 ได้จากสมการ

ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม การนำเอาต์พุตไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณจะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\left(net_{S^1} \right) = b_{S^2}^2 + \sum_{S^1=1}^{S^1} lw_{S^2, S^1}^{2,1} a^1 \quad (3.4)$$

ใช้ฟังก์ชันกระตุ้นเพื่อคำนวณสัญญาณเอาต์พุต (a^2) ในชั้นซ่อนที่ 2

$$a^2 = f \left(net_{S^2} \right) \quad (3.5)$$

เมื่อสัญญาณเอาต์พุต (a^2) ในชั้นซ่อนที่ 2 เอาต์พุตที่ได้ส่งต่อไปยังชั้นเอาต์พุต โดยแต่ละนิวรอนในชั้นเอาต์พุต ถูกเชื่อมโยงด้วยค่าถ่วงน้ำหนัก ($lw_{S^3, S^2}^{3,2} = S^3 = 1, \dots, S^3$) จะทำการคำนวณสัญญาณอินพุตของนิวรอนเซลล์ในชั้นเอาต์พุต ได้จากสมการ

$$\left(net_{S^3} \right) = b_{S^3}^3 + \sum_{S^2=1}^{S^2} lw_{S^3, S^2}^{3,2} a^2 \quad (3.6)$$

ใช้ฟังก์ชันกระตุ้นเพื่อคำนวณสัญญาณเอาต์พุต (a^3) ในชั้นเอาต์พุต

$$a^3 = f \left(net_{S^3} \right) \quad (3.7)$$

2. แพร่ค่าย้อนกลับของค่าผิดพลาด (Back-propagation of error)

ในแต่ละนิวรอนของชั้นเอาต์พุต ค่าผิดพลาดของโครงข่ายจะเป็นผลต่างระหว่างเอาต์พุตเป้าหมายกับเอาต์พุตของโครงข่าย ($t^3 - a^3$) ค่าผิดพลาดที่ได้จะถูกส่งกลับเข้ามายังโครงข่ายในรูปของสัญญาณค่าผิดพลาด (error signal) สัญญาณค่าผิดพลาดที่ชั้นเอาต์พุต หาได้จากสมการ

$$\delta^3 = (t^3 - a^3) f' \left(net_{S^3} \right) \quad (3.8)$$

คำนวณค่าถ่วงน้ำหนักที่เกี่ยวข้อง (ใช้เพื่อปรับปรุ้งค่าถ่วงน้ำหนัก $lw_{S^3, S^2}^{3,2}$ หลังจากนี้) โดยที่

α คือ อัตราการเรียนรู้ (Learning rate)

$$\Delta lw_{S^3, S^2}^{3,2} = \alpha \delta^3 a^2 \quad (3.9)$$

คำนวณค่าไบอัส (bias) ที่เกี่ยวข้อง (ใช้เพื่อปรับปรุ้ง $b_{S^3}^3$ หลังจากนี้)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ (3.10) คร่ำ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และส่ง δ^3 ไปที่ชั้นชอนที่ 2

ในแต่ละนิเวศของชั้นชอนที่ 2 สัญญาค่าผิดที่ชั้นชอนที่ 2 หาได้จากสมการ

$$\delta^2 = \sum_{S^3=1}^{S^3} \delta^3 lw_{S^3, S^2}^{3,2} f'(net_{S^2}) \quad (3.11)$$

คำนวณค่าถ่วงน้ำหนักที่เกี่ยวข้อง(ใช้เพื่อปรับปรุ่ค่าถ่วงน้ำหนัก $lw_{S^2, S^1}^{2,1}$ หลังจากนี้)

$$\Delta lw_{S^2, S^1}^{2,1} = \alpha \delta^2 a^1 \quad (3.12)$$

คำนวณค่าถ่วงน้ำหนักที่เกี่ยวข้อง(ใช้เพื่อปรับปรุ่ค่าถ่วงน้ำหนัก b^2 หลังจากนี้)

$$\Delta b_{S^2}^2 = \alpha \delta^2 \quad (3.13)$$

และส่ง δ^2 ไปที่ชั้นชอนที่ 1

ในแต่ละนิเวศของชั้นชอนที่ 1 สัญญาค่าผิดพลาดที่ชั้นชอนที่ 1 หาได้จากสมการ

$$\delta^1 = \sum_{S^2=1}^{S^2} \delta^2 lw_{S^2, S^1}^{2,1} f'(net_{S^1}) \quad (3.14)$$

คำนวณค่าถ่วงน้ำหนักที่เกี่ยวข้อง(ใช้เพื่อปรับปรุ่ค่าถ่วงน้ำหนัก $lw_{S^1, R}^{1,1}$ หลังจากนี้)

$$\Delta lw_{S^1, R}^{1,1} = \alpha \delta^1 P_R \quad (3.15)$$

คำนวณค่าไบอัส (bias) ที่เกี่ยวข้อง(ใช้เพื่อปรับปรุ่ค่าถ่วงน้ำหนัก b^1 หลังจากนี้)

$$\Delta b_{S^1}^1 = \alpha \delta^1 \quad (3.16)$$

3. ขั้นตอนการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบอัส

ถ้าหากมีข้อผิดพลาดเกิดขึ้น ค่าผิดพลาดที่คำนวณได้จะถูกนำมาใช้ในการปรับน้ำหนัก เพื่อให้โครงข่ายได้ผลลัพธ์ที่ถูกต้อง การปรับน้ำหนักในแต่ละนิเวศในชั้นเอาท์พุท คำนวณได้จาก

$$lw_{S^3, S^2}^{3,2} = lw_{S^3, S^2}^{3,2} + \Delta lw_{S^3, S^2}^{3,2} \quad (3.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนการปรับน้ำหนักของชั้นช่อนที่ 2 การทำงานจะเป็นเช่นเดียวกับสมการที่ 3.16 แต่ตัวแปรต่าง ๆ จะเป็นของชั้นช่อนอยู่ สำหรับแต่ละนิวรอนในชั้นช่อนที่ 2 ซึ่งสามารถหาได้จาก

$$Iw_{s^2, s^1}^{2,1} = Iw_{s^2, s^1}^{2,1} + \Delta Iw_{s^2, s^1}^{2,1} \quad (3.18)$$

สำหรับแต่ละนิวรอนในชั้นช่อนที่ 1

$$Iw_{s^1, R}^{1,1} = Iw_{s^1, R}^{1,1} + \Delta Iw_{s^1, R}^{1,1} \quad (3.19)$$

การปรับค่าถ่วงน้ำหนักจะปรับทีละชั้นจากชั้นเอาต์พุตกลับไปยังชั้นอินพุต เมื่อเสร็จสิ้นก็จะกลับสู่ส่วนของการป้อนไปข้างหน้าอีกครั้ง เพื่อหาค่าเอาต์พุตของโครงข่ายใหม่มาเปรียบเทียบกับเป้าหมาย และดำเนินการปรับค่าถ่วงน้ำหนักในส่วนของแพร่ค่าย้อนกลับเช่นนี้ สลับกันไป โดยวัฏจักรของการคำนวณค่าผิดพลาดและการปรับน้ำหนักจะยังคงดำเนินต่อไปจนกระทั่งค่าความผิดพลาดต่ำกว่าที่กำหนดไว้ค่าหนึ่งแล้วจึงหยุดกระบวนการ ค่าถ่วงน้ำหนักที่ได้จะเป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับทุกคู่ของอินพุตและค่าเป้าหมาย ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ การคำนวณหาค่าความผิดพลาดรวมของตัวอย่าง หาได้จากผลรวมค่าความผิดพลาดทั้งหมด (Total Error) ระหว่างคำตอบที่แท้จริง (t^3) กับผลลัพธ์ของโครงข่ายประสาทเทียม (a^3) แล้วหารด้วยจำนวนข้อมูลทั้งหมดของข้อมูลทดสอบ ดังสมการ (3.20)

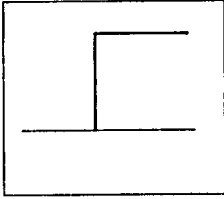
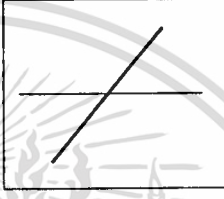

$$Total \ Error = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (t^3 - a^3) \quad (3.20)$$

โดย N = จำนวนชุดข้อมูลทดสอบ

3.4 ฟังก์ชันการถ่ายโอน (Transfer function)

การเลือกใช้ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันในการตัดสินใจนั้น ต้องพิจารณาลักษณะของข้อมูลอินพุต และเอาต์พุตที่ต้องการเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งาน ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันนั้นๆ มีอยู่ด้วยกันหลายแบบ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3.1

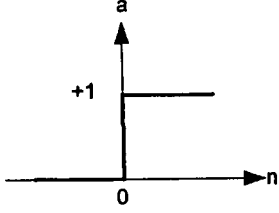
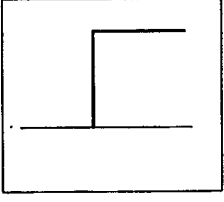
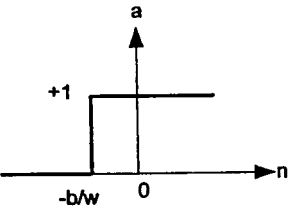
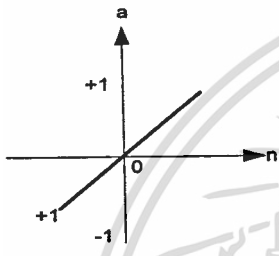
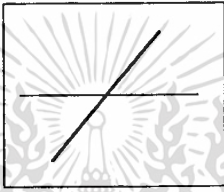
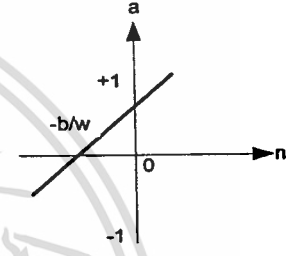
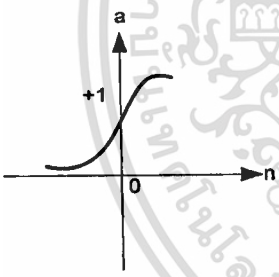
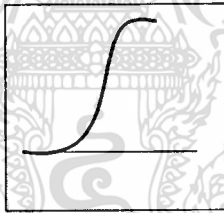
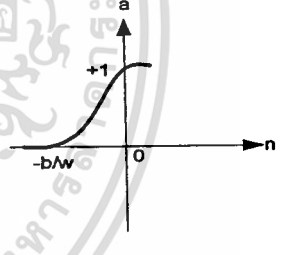
ตารางที่ 3.1 ทราานส์เฟอร์ฟังก์ชันแบบต่างๆ

ชื่อฟังก์ชัน	อินพุต / เอาต์พุต	สัญลักษณ์	MATLAB Function
Hard Limit	$a = 0, n < 0$ $a = 1, n \geq 0$		hardlim
Linear	$a = n$		purelin
Log - Sigmoid	$a = \frac{1}{1 + e^{-n}}$		Logsig

3.4.1 ฟังก์ชันการถ่ายโอนเมื่อถูกไบอัส

ทราานส์เฟอร์ฟังก์ชันที่ใช้ในโครงข่ายประสาทเทียมมีอยู่ด้วยกันหลายแบบ ทั้งฟังก์ชันที่เป็นเชิงเส้น (Linear Function) และไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Function) การเลือกใช้ขึ้นอยู่กับลักษณะของงาน ค่าที่มีผลต่อทราานส์เฟอร์ฟังก์ชันที่สำคัญอีกค่าหนึ่งคือค่าไบอัส (bias) หรือค่าออฟเซต(offset) ค่านี้จะทำให้ทราานส์เฟอร์ฟังก์ชันเลื่อนตำแหน่งได้ทางแกนนอน (Horizontal Shift) เมื่อถูกไบอัส ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันที่ถูกเลื่อนในแนวนอนตามค่าไบอัส

		
$a = \text{hardlim}(n)$		$a = \text{hardlim}(wp+b)$
		
$a = \text{purelin}(n)$		$a = \text{purelin}(wp+b)$
		
$a = \text{logsig}(n)$		$a = \text{logsig}(wp+b)$

ฟังก์ชันการถ่ายโอน (Transfer function) หรือฟังก์ชันกระตุ้น (Activation Function) ฟังก์ชันถ่ายโอนที่ใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมแบบ BP เป็นชนิด Log-sigmoid ในชั้นซ่อนที่ 1, 2 ดังแสดงในสมการที่ 3.19 และ Linear transfer function ในชั้นเอาต์พุต ดังแสดงในสมการที่ 3.20

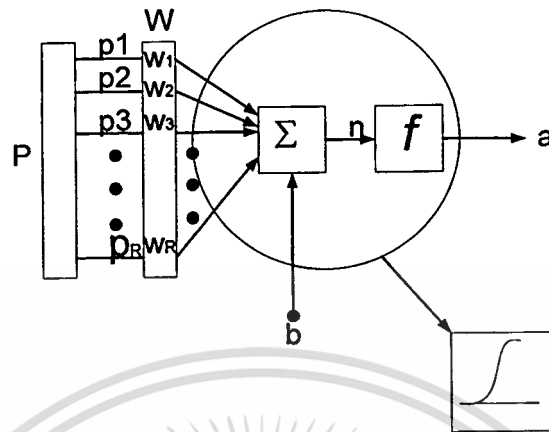
$$a(n) = \frac{1}{1 + e^{-kn}} \quad (3.25)$$

$$a(n) = n \quad (3.26)$$

โดยที่ k คือ ค่าคงที่ แสดงถึงความชัน (Slope) ของฟังก์ชันถ่ายโอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างที่ 1 จงหาค่า a ของเซลล์ประสาทเทียมแบบเซลล์เดียวหลายอินพุต กำหนดให้ค่า ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันเป็นแบบลือก-ซิกมอยด์



กำหนดให้

$$P = [1 \ 0 \ 2 \ 3]$$

$$W = [2 \ 0.5 \ 0.5 \ 1]$$

$$b = 2$$

ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันแบบลือก-ซิกมอยด์ $a = \frac{1}{1 + e^{-n}}$

จากสูตร

$$P = [p_1 \ p_2 \ p_3 \ \dots \ p_R]$$

$$W = [w_1 \ w_2 \ w_3 \ \dots \ w_R]$$

$$n = p_1 w_1 + p_2 w_2 + p_3 w_3 + \dots + p_R w_R + b$$

หรือเขียนในรูปเวกเตอร์

$$n = W_p + b$$

ดังนั้น

$$a = f(W_p + b)$$

จะได้

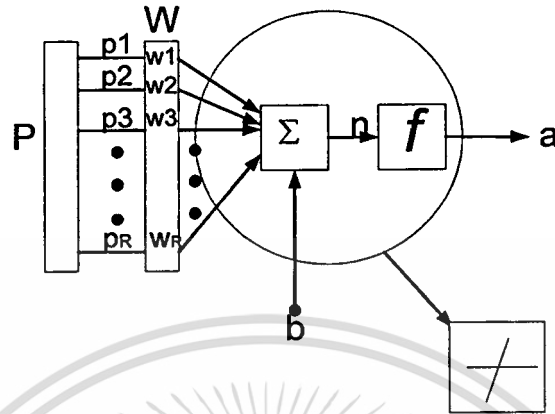
$$n = 2 + 0 + 1 + 3$$

$$n = 6$$

$$a = f(6) \quad a = \frac{1}{1 + e^{-6}}$$

คำตอบที่ได้คือ $a = 0.99752$

ตัวอย่างที่ 2 จงหาค่า a ของเซลล์ประสาทเทียมแบบเซลล์เดียวหลายอินพุท กำหนดให้ค่า ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันเป็นแบบเชิงเส้น (purelin)



กำหนดให้

$$P = [2 \ 4 \ 0 \ 1 \ 5 \ 3]$$

$$W = [1 \ 0.5 \ 0 \ 0.1 \ 1]$$

$$b = 2$$

ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันแบบล็อก-ซิกมอยด์ $a = f(n)$ เมื่อ $a = n$

จากสูตร

$$P = [p_1 \ p_2 \ p_3 \ \dots \ p_R]$$

$$W = [w_1 \ w_2 \ w_3 \ \dots \ w_R]$$

$$n = p_1 w_1 + p_2 w_2 + p_3 w_3 + \dots + p_R w_R + b$$

หรือเขียนในรูปเวกเตอร์

$$n = W_p + b$$

ดังนั้น

$$a = f(W_p + b)$$

จะได้ $n = 2 + 2 + 0 + 0.5 + 3$

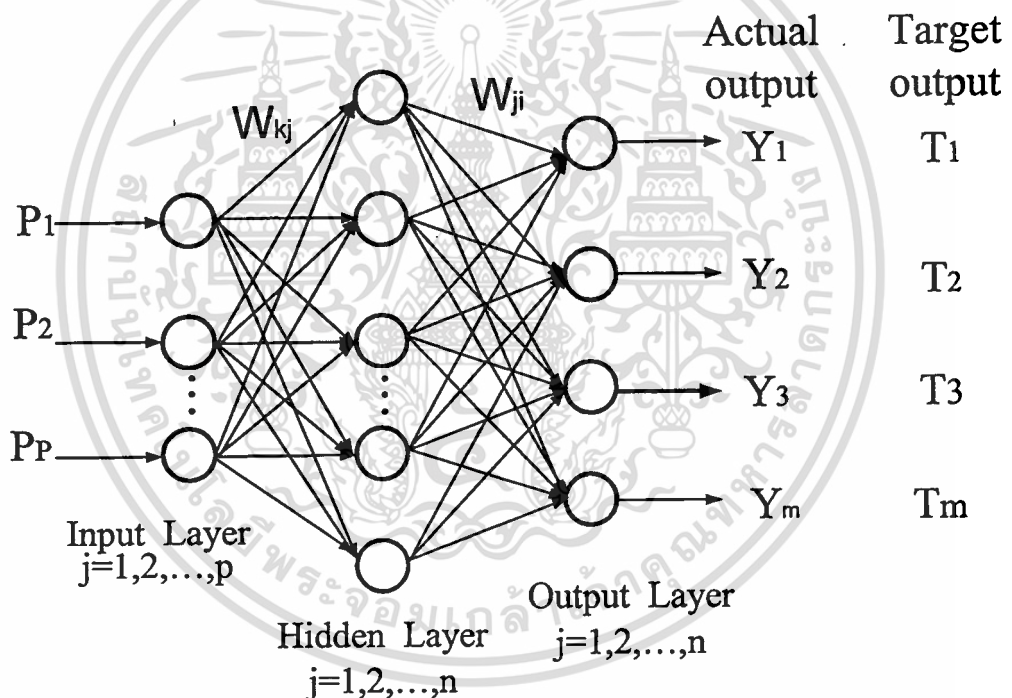
$$n = 8.5$$

$$a = f(8.5)$$

คำตอบที่ได้คือ $a = 8.5$

3.5 การฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม

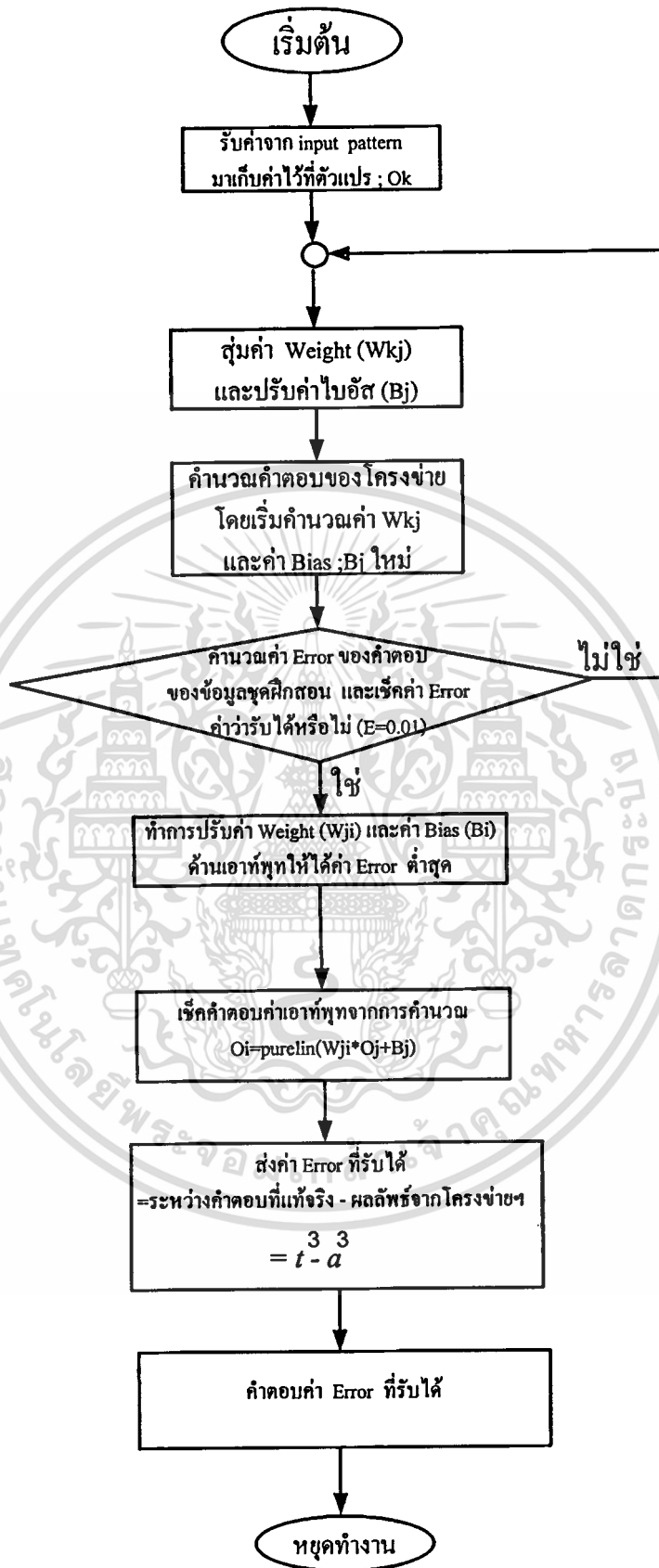
การนำโครงข่ายประสาทเทียมมาใช้งาน จะประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการเรียนรู้ (Learning) และขั้นตอนการทดสอบ (Testing) ซึ่งในการเรียนรู้นั้นมี 2 ลักษณะ คือ การคำนวณไปข้างหน้า (Forward propagation) และการคำนวณแพร่กระจายกลับ (Backward propagation) ส่วนแรก จะเป็นการป้อนข้อมูลอินพุตให้กับโครงข่ายประสาทเทียม จากนั้นโครงข่ายจะคำนวณจากชั้นอินพุตไปยังชั้นเอาต์พุต โดยให้ $P_n = (P_{n1}, P_{n2}, \dots, P_{nn})$ เป็นข้อมูลขององค์ประกอบสเปกตรัม (dB.) ของมอเตอร์ปกติ, มอเตอร์แท่งตัวนำแตกหัก (rotor broken bars) โดยจะทำการทดสอบในสภาวะ ขณะมีการลัดรอบขดลวดสเตเตอร์ (short turns) และขณะเกิดความไม่สมมาตรของแรงดันไฟฟ้า (unbalance voltage)



รูปที่ 3.5 โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม

จากรูปที่ 3.5 ชุดข้อมูลเอาต์พุตที่ได้จากชั้นหนึ่งจะถูกส่งให้เป็นข้อมูลอินพุตสำหรับชั้นต่อไปโดยค่าเอาต์พุตในชั้นสุดท้ายซึ่งก็คือ เอาต์พุตโครงข่ายประสาทเทียมจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าความผิดพลาดกับเอาต์พุตที่ต้องการ (Target Output) ค่าความผิดพลาดที่คำนวณได้จะนำไปใช้ในการปรับค่าถ่วงน้ำหนักของโครงข่ายประสาทเทียมให้เปลี่ยนไปในทางถูกต้องมากยิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 Flow Chart ขั้นตอนการคำนวณของ Back - propagation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 การกำหนดค่าถ่วงน้ำหนัก (Setting the Weights)

โครงข่ายประสาทเทียมที่สร้างขึ้น เมื่อสร้างเสร็จแต่ละเซลล์ประสาทที่สร้างขึ้นมานั้น จะไม่มีคุณลักษณะใดเลย เนื่องจากยังไม่มีกำหนดค่าซินแนปติกส์เวกที่เหมาะสมกับงานที่ต้องการ ให้กับโครงข่ายประสาทเทียม จึงต้องมีการฝึกสอนให้กับโครงข่ายประสาทเทียมที่สร้างขึ้นมีคุณลักษณะตามที่ต้องการ การฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม จะกระทำโดยการปรับเปลี่ยนค่าซินแนปติกส์เวกให้โครงข่ายประสาทเทียมจดจำรูปแบบ ความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตกับเอาต์พุตได้ โดยในขั้นตอนแรกจะกำหนดเป็นค่าสุ่มใด ๆ (Random Weight) ก่อนแล้วจึงจะมีการปรับเปลี่ยนค่าถ่วงน้ำหนักไปตามอัลกอริทึมสมมติฐาน หลาย ๆ รอบ จนกว่าจะได้เอาต์พุตของโครงข่ายประสาทเทียม เหมือนกับโครงข่ายประสาทเทียมที่ต้องการ ในเงื่อนไขความผิดพลาดที่ยอมรับได้

ในการกำหนดน้ำหนักที่เป็นค่าสุ่มใด ๆ โครงข่ายประสาทเทียมจึงไม่สามารถแสดงคุณลักษณะได้ออกมา การฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม ก็คือการปรับค่าถ่วงน้ำหนักทุก ๆ จุดให้สอดคล้องกับอินพุตหลาย ๆ แบบ เพื่อได้เอาต์พุตตามต้องการนั่นเอง การฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมจะต้องเข้าใจกระบวนการพื้นฐานเสียก่อน คือ การเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียมนั้นก็มีขีดจำกัดเช่นกัน ปัญหาต่าง ๆ ผู้ใช้จะต้องแก้ไขให้กับโครงข่ายประสาทเทียมก่อน แล้วนำผลนั้นไปอ้างอิงในการปรับปรุงค่าถ่วงน้ำหนัก หลังจากปรับจนได้ค่าผิดพลาดที่เอาต์พุตกับเอาต์พุตเป้าหมายน้อยลงเป็นที่น่าพอใจแล้ว โครงข่ายประสาทเทียมก็พร้อมจะวิเคราะห์อินพุตและให้เอาต์พุตตามลักษณะที่เคยเรียนรู้มา การเรียนรู้จะมีการปรับค่าถ่วงน้ำหนักหลาย ๆ รอบ จนค่าถ่วงน้ำหนักสอดคล้องกับตัวอย่างหลายๆ ตัวอย่างแล้วจะสามารถให้เอาต์พุตได้ตามต้องการ พบว่าโครงข่ายประสาทเทียมที่ได้มีการปรับสอนมาก ๆ ก็จะมีความแม่นยำสูงขึ้น แต่ก็ใช้เวลาในการปรับสอนเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

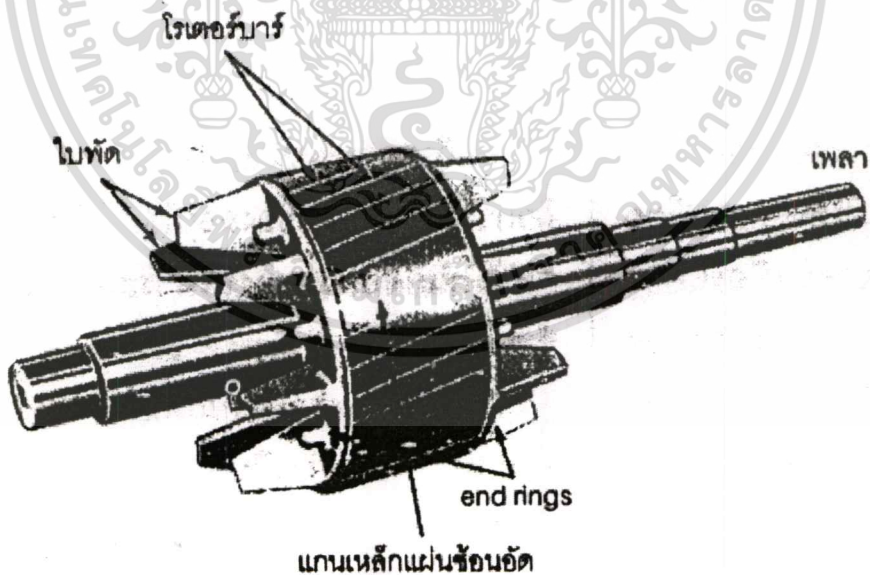
3.7 สรุป

โครงข่ายประสาทเทียมที่ฝึกสอนด้วยกฎการเรียนรู้แบบแพร่ค่าย้อนกลับนั้น จะมีจำนวนนิวรอนในชั้นข้อมูลอินพุต และชั้นข้อมูลเอาต์พุตคงที่ซึ่งเท่ากับจำนวนของอินพุต และเอาต์พุตของปัญหานั้นเอง ส่วนจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนนั้นสามารถปรับเปลี่ยนได้ตามความเหมาะสม โดยไม่มีจำนวนสูตรสำเร็จ ดังนั้นในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมจึงต้องมีการปรับเปลี่ยนจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อน เพื่อหาโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่ให้ค่าผิดพลาดระหว่างคำตอบที่แท้จริง กับผลลัพธ์ของโครงข่ายประสาทเทียมต่ำที่สุด (มีประสิทธิภาพสูงที่สุด) จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนนอกจากจะมีผลต่อประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมแล้ว ยังมีผลต่อระยะเวลาในการฝึกสอนด้วย โครงข่ายที่มีจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนน้อย จะใช้เวลาในการฝึกสอนน้อยกว่าโครงข่ายที่มีจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนมาก เมื่อฝึกสอนในเงื่อนไขเดียวกัน แต่อย่างไรก็ตามไม่สามารถสรุปได้ว่าโครงข่ายประสาทเทียมที่มี จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนมาก จะมีประสิทธิภาพสูงกว่าจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนน้อย

ความเสียหายที่ตัวนำโรเตอร์

4.1 บทนำ

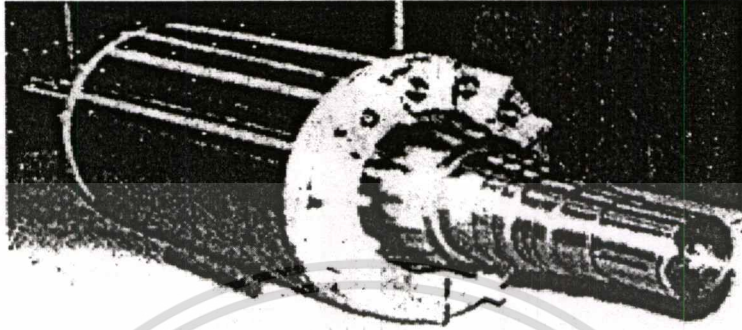
ในปัจจุบันมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับชนิดเหนี่ยวนำ (induction motor) ที่มีโรเตอร์แบบกรงกระลอก ซึ่งมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ดีหลายประการ เช่น ความแข็งแรง ทนทาน โดยเฉพาะโรเตอร์จะแข็งแรงกว่าสเตเตอร์ จากส่วนประกอบหลัก ๆ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีสองส่วน คือ ส่วนที่อยู่กับที่ (stator) และส่วนที่เคลื่อนที่ (rotor) ทำให้การออกแบบสามารถกระทำได้ด้วยสองส่วนนี้เท่านั้น แต่ส่วนที่อยู่กับที่หรือที่เรียกว่า สเตเตอร์ จะต้องถูกออกแบบเพื่อให้เป็นไปตามกฎข้อบังคับ ซึ่งการออกแบบโรเตอร์จะมีทางเลือกที่มากกว่า ตัวอย่างเช่น จำนวนของแท่งตัวนำ, การเรียงของสลีต, รูปร่างของสลีต, ช่องว่างอากาศ, วัสดุที่ใช้ทำแท่งตัวนำ, ผนวมนของแท่งตัวนำ, และกระบวนการในการสร้างจะเป็นตัวแปร ซึ่งผู้ออกแบบจะกำหนดตามคุณลักษณะที่ต้องการ จากรูปที่ 4.1 เป็นรูปโครงสร้างของโรเตอร์กรงกระลอกของมอเตอร์เหนี่ยวนำ



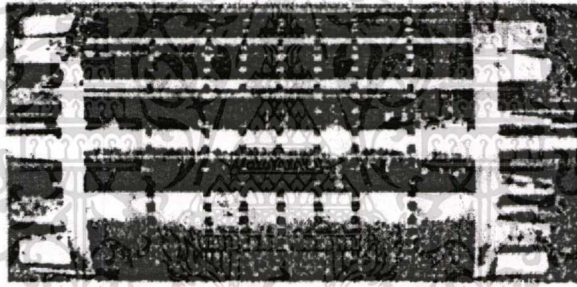
รูปที่ 4.1 โครงสร้างของโรเตอร์กรงกระลอกของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

โรเตอร์กรงกระลอกประกอบด้วยเหล็กแผ่นซ้อนอัด (laminated steel) เพื่อนำพาฟลักแม่เหล็ก, การส่งผ่านความร้อน, และโครงสร้างของกรง ส่วนแท่งตัวนำโรเตอร์ (rotor bars) มีเอกสารหน้าที่นำพากระแสไฟฟ้าและสร้างแรงบิด รองลื่น (bearing) จะติดอยู่กับเพลา (shaft) เพื่อไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

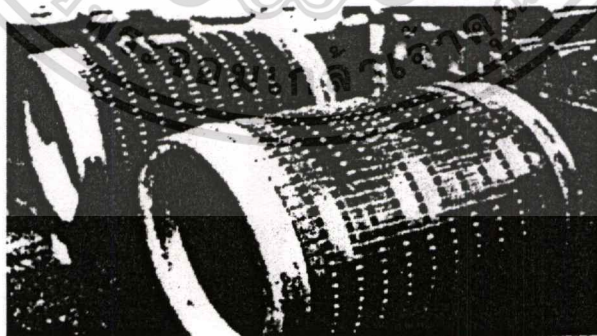
กำหนดตำแหน่งของโรเตอร์ ใบพัด (fan) โดยปกติจะถูกติดตั้งไว้ที่โรเตอร์ เพื่อระบายความร้อนให้แก่มอเตอร์ โรเตอร์อาจจะประกอบด้วยรูระบายอากาศ (air duct) โดยเฉพาะโรเตอร์แบบสไปเดอร์ (spider) ดังรูปที่ 4.2 ถึงรูปที่ 4.5 แสดงรูปโรเตอร์ทั่วไป



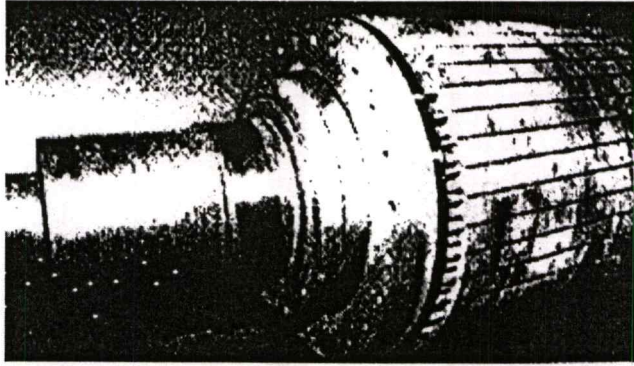
รูปที่ 4.2 โรเตอร์ทั่วไปที่ทำจากอะลูมิเนียมที่ได้จากการหล่อขึ้น



รูปที่ 4.3 โรเตอร์ทั่วไปที่ทำจากอะลูมิเนียมแบบมีช่องระบายอากาศที่ได้จากการหล่อขึ้น

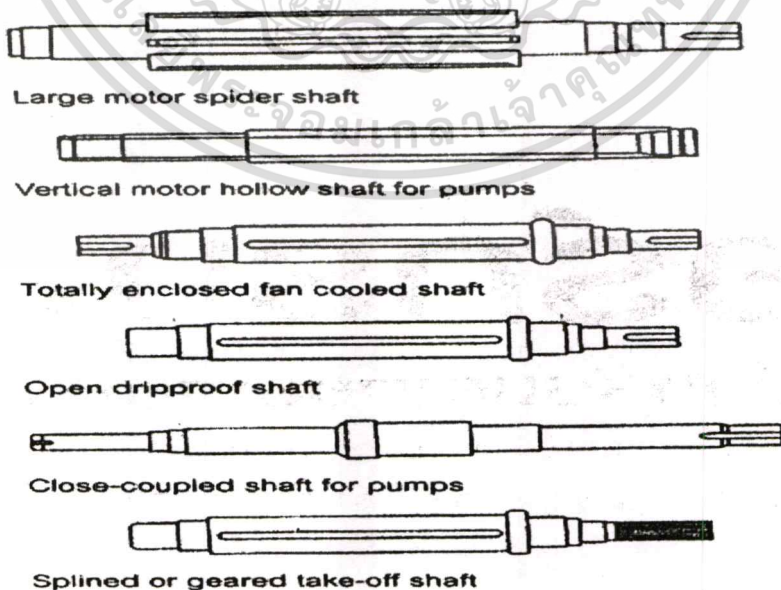


รูปที่ 4.4 โรเตอร์ทั่วไปที่ทำจากอะลูมิเนียมแบบมีช่องระบายอากาศที่ได้จากการประดิษฐ์ขึ้น สำหรับมอเตอร์ขนาดใหญ่ความเร็วต่ำ



รูปที่ 4.5 โรเตอร์ทั่วไปที่ทำจากอะลูมิเนียมแบบมีช่องระบายอากาศที่ได้จากการประดิษฐ์ขึ้น สำหรับมอเตอร์ขนาดใหญ่ความเร็วสูง

เหล็กแผ่นที่นำมาซ้อนอัดกันอาจจะเป็นได้ทั้งเหล็กคาร์บอนหรือเหล็กซิลิกอน ซึ่งเกรดของเหล็กที่นำมาใช้และค่าใช้จ่ายรวมถึงสมรรถนะของมอเตอร์ จะเป็นตัวกำหนดชนิดของเหล็ก เหล็กคาร์บอนและเหล็กที่มีซิลิกอนต่ำ โดยทั่วไปแล้วจะต้องผ่านกระบวนการ (กระบวนการย่อย) หนึ่งก่อนที่จะทำในกระบวนการต่อไป หลังจากนั้นจะทำให้อ่อนตัวลงโดยการเผาให้ความร้อน เพื่อเป็นการลดความเค้น (stress) จะทำให้คุณสมบัติของการเป็นแม่เหล็ก (magnetization) และการสูญเสียเนื่องจากการซ้อนอัดดีขึ้น ความร้อนและบรรยากาศที่เกิดขึ้นในกระบวนการเผาให้อ่อนตัวจะเป็นตัวทำให้เกิดการรวมกับก๊าซออกซิเจน (oxidation) ของพื้นผิวการซ้อนอัด ชั้นของออกไซด์ที่เกิดขึ้นนี้ จะทำให้เกิดฉนวนทางไฟฟ้าระหว่างแผ่นซ้อนอัดกัน



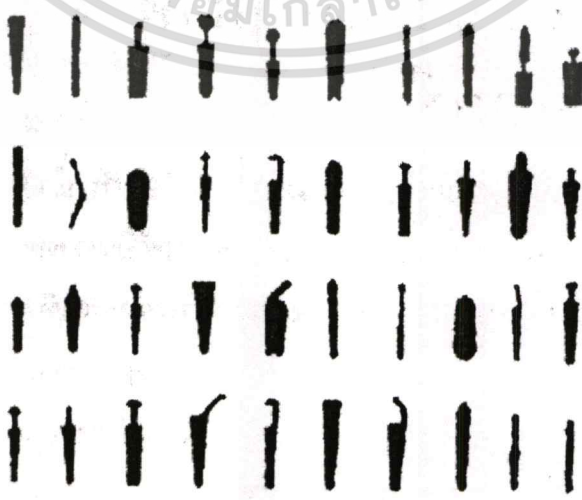
รูปที่ 4.6 เฟลาของมอเตอร์แบบต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อวัตถุประสงค์เฉพาะเท่านั้น มิใช่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพลารอเตอร์โดยปกติแล้วจะทำมาจากเหล็ก 1045 ซึ่งเป็นเกรดที่มีความแข็งแรงสูงหรือเหล็กที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกัน วัสดุอื่น ๆ สำหรับการนำมาประยุกต์ใช้ที่พิเศษ ตัวอย่างเช่น CR-MO 1442, สแตนเลส 416 และคาร์บอน 1144 ขนาดของเพลางจะออกแบบโดยพิจารณาจากแรงบิดทั้งในสภาวะปกติและสภาวะชั่วคราว (transient) โรเตอร์จะต้องไม่เอียง และจะต้องไม่สัมผัสกับสเตเตอร์ขณะเริ่มเดินและขณะเดิน (startup or running) ดังรูปที่ 4.6 แสดงรูปของเพลามากหลายรูปแบบ

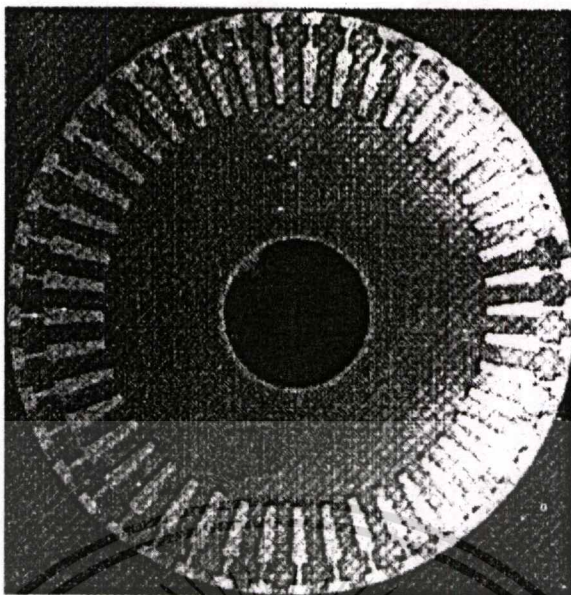
4.2 รูปร่างของแท่งตัวนำโรเตอร์

รูปร่างของแท่งตัวนำโรเตอร์จะมีผลอย่างมากต่อสมรรถนะของโรเตอร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระหว่างการเร่ง (acceleration) ปรากฏการณ์หนึ่งเป็นที่รู้จักกันดี คือ ปรากฏการณ์ทางผิว (skin effect) ซึ่งมีสาเหตุมาจากกระแสที่แท่งตัวนำโรเตอร์ไหลไปรวมที่ส่วนบนของแท่งตัวนำในระหว่างที่เริ่มเดิน ซึ่งผลที่เกิดขึ้นนี้ทำให้มีความแตกต่างระหว่างการเริ่มเดิน กับขณะที่ความเร็วเต็มพิกัด ลักษณะในข้อนี้จะถูกนำไปพิจารณาสำหรับการสร้างแรงบิดเริ่มต้น และกระแสเริ่มต้นตามต้องการ ในการเริ่มเดินของมอเตอร์ความเร็วที่เพิ่มขึ้นจากศูนย์ไปสู่ความเร็วพิกัด กระแสที่เพิ่มขึ้นจะเป็นสัดส่วนกับแท่งตัวนำจนกระทั่งถึงความเร็วที่พิกัด กระแสที่ไหลผ่านแท่งตัวนำจะเท่ากันทั้งหมด ที่ความเร็วเป็นศูนย์ ปรากฏการณ์ทางผิวบังคับให้กระแสไหลเฉพาะที่ส่วนบนของแท่งตัวนำซึ่งส่วนบนของแท่งตัวนำนี้จะถูกออกแบบ เพื่อให้ได้ค่าความต้านทานและค่ารีแอกแตนซ์ที่สูง ความต้านทานและค่ารีแอกแตนซ์ที่ค่าสูงนี้จะทำงานร่วมกัน เพื่อให้ได้แรงบิดที่สูงและลดกระแสพุ่งเข้า (inrush current) ดังรูปที่ 4.7 แสดงรูปร่างของแท่งตัวนำแบบต่าง ๆ และรูปที่ 4.8 เป็นรูปแบบของเหล็กแผ่นอัดสำหรับมอเตอร์ประสิทธิภาพสูงที่จะนำมาใช้ในอนาคต



รูปที่ 4.7 รูปร่างของแท่งตัวนำโรเตอร์แบบต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใช้งานนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 แผ่นซ้อนอัดสำหรับมอเตอร์ประสิทธิภาพสูงในอากาศยาน

แท่งตัวนำซึ่งมีรูปร่างค้อย ๆ แคบลง จากบนสู่ล่าง (tapered bar) จะนิยมนำมาใช้กับมอเตอร์ที่มี 4 ขั้วแม่เหล็กขึ้นไป ซึ่งเป็นรูปร่างที่สามารถถูกกำหนดจากแม่พิมพ์ให้มีขนาดที่แน่นอนและบังคับได้ง่าย รวมถึงในโรเตอร์ที่เฉียงด้วย แท่งตัวนำที่มีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยม (wedge bar) จะนำมาใช้กับมอเตอร์ที่มี 2 ขั้วแม่เหล็ก ซึ่งเป็นรูปร่างที่สามารถถูกกำหนดจากแม่พิมพ์ให้มีขนาดที่แน่นอนได้ง่าย และรูปร่างแบบนี้จะลดการเคลื่อนไหวของแท่งตัวนำ เนื่องจากความหลวมหรือแรงเหวี่ยงหรือการขยายตัวเนื่องจากความร้อน ซึ่งแท่งตัวนำที่มีรูปร่างค้อย ๆ แคบลง จากบนสู่ล่าง (tapered bar) จะนิยมนำมาใช้กับมอเตอร์ที่มี 4 ขั้วแม่เหล็กขึ้นไป ซึ่งเป็นรูปร่างที่สามารถถูกกำหนดจากแม่พิมพ์ให้มีขนาดที่แน่นอนและบังคับได้ง่าย รวมถึงในโรเตอร์ที่เฉียงด้วยแท่งตัวนำที่มีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยม (wedge bar) จะนำมาใช้กับมอเตอร์ที่มี 2 ขั้วแม่เหล็กซึ่งเป็นรูปร่างที่สามารถถูกกำหนดจากแม่พิมพ์ให้มีขนาดที่แน่นอนได้ง่าย และรูปร่างแบบนี้จะลดการเคลื่อนไหวของแท่งตัวนำ เนื่องจากความหลวมหรือแรงเหวี่ยงหรือการขยายตัว เนื่องจากความร้อน ซึ่งแท่งตัวนำที่มีรูปร่างค้อย ๆ แคบลงจากบนสู่ล่างจะมีการสูญเสียที่โรเตอร์ต่ำที่สุด โรเตอร์ที่ถูกประดิษฐ์ขึ้นรูปร่างของสล๊อตจะถูกออกแบบขึ้นเพื่อให้ได้คุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางกลแท่งตัวนำโรเตอร์จะต้องถูกทำให้เกาะยึดแน่นอยู่ในสล๊อตเพื่อป้องกันการขยับตัว เพราะถ้าหลวมจะทำให้แท่งตัวนำโคลงเคลงไปมาส่งเสียงรบกวนและเกิดประกายไฟ (sparking) โดยเฉพาะที่ความเร็วสูง การเคลื่อนไหวของแท่งตัวนำโรเตอร์สามารถทำให้โรเตอร์ไม่สมดุลได้

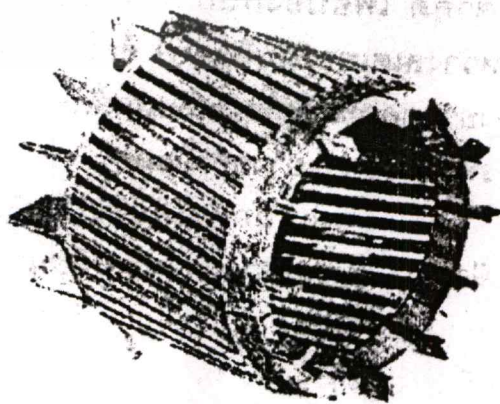
สล๊อตเปิดเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าจะนำมาพิจารณาสำหรับรูปร่างของสล๊อตโดยปกติ สล๊อตแบบปิดจะมีค่าการสูญเสียที่พื้นผิวต่ำ เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงในส่วนที่เป็นแม่เหล็กที่พื้นผิวของโรเตอร์ไม่มากนัก อย่างไรก็ตาม สล๊อตแบบปิดจะมีค่ารีแอกแตนซ์สูง ซึ่งมีผลทำให้แรงบิดลดลง สำหรับสล๊อตแบบเปิดที่มีลักษณะที่แคบและลึก จะทำให้มีค่ารีแอกแตนซ์ที่สูงด้วย

เช่นกัน ซึ่งสล็อตแบบเปิดที่มีค่ารีแอกแตนซ์สูง จะมีผลทำให้เกิดการอิมตัวทางแม่เหล็กได้มากกว่า สล็อตแบบเปิดจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งของผู้ออกแบบซึ่งอยู่บนพื้นฐานความสมดุลของการ ออกแบบคุณสมบัติสมรรถนะที่ต้องการ

สำหรับโรเตอร์ที่หล่อขึ้น การใช้สล็อตแบบปิดช่วยป้องกันอะลูมิเนียมเข้าถึงพื้นผิวของ โรเตอร์ในระหว่างที่มีการหล่อ ส่วนโรเตอร์ที่หล่อขึ้นแบบสล็อตเปิด อะลูมิเนียมอาจจะเลอะ พื้นผิวโรเตอร์ได้ในระหว่างกระบวนการหล่อ ซึ่งจำเป็นจะต้องมีอีกกระบวนการหนึ่งเพื่อกัดเซาะ อะลูมิเนียมที่เลอะนี้ออกไป หรือกระบวนการอื่นๆ ที่มีความจำเป็น จากสิ่งเหล่านี้ทำให้เห็นได้ ว่ากระบวนการหล่อ โรเตอร์แบบสล็อตเปิด จะมีต้นทุนที่สูงกว่ากระบวนการหล่อโรเตอร์แบบ สล็อตปิด

4.3 วัสดุที่ใช้ทำแท่งตัวนำโรเตอร์

วัสดุที่นิยมใช้ทำแท่งตัวนำโรเตอร์โดยทั่วไปมีสองชนิด คือ ทองแดงกับอะลูมิเนียม โดยปกติแล้วโรเตอร์ที่หล่อขึ้นแท่งตัวนำโรเตอร์จะทำมาจากอะลูมิเนียม และ โรเตอร์ที่ถูกประดิษฐ์ ขึ้นจะเป็นอะลูมิเนียมหรือทองแดง แท่งตัวนำโรเตอร์ที่ทำมาจากโลหะผสมอะลูมิเนียม และ โรเตอร์ที่ ถูกประดิษฐ์ขึ้นจะเป็นอะลูมิเนียมหรือทองแดง แท่งตัวนำโรเตอร์ที่ทำมาจากโลหะผสมอะลูมิเนียม และโลหะผสมทองแดง มักจะนำมาใช้กับลักษณะงานที่พิเศษ เช่น ต้องการค่าสลิปสูง (NEMA Design D) ในไม่กี่ปีมานี้ได้มีการเปลี่ยนจากทองแดงมาเป็นอะลูมิเนียมสำหรับใช้ทำโรเตอร์ ถึงแม้ว่า ทองแดงจะมีค่าความนำไฟฟ้าที่ดีกว่าอะลูมิเนียม แต่แม่พิมพ์ของแท่งตัวนำที่ทำมาจากอะลูมิเนียม จะมีราคาที่ถูกกว่าแม่พิมพ์ของแท่งตัวนำที่ทำมาจากทองแดง และราคาที่ถูกกว่าทองแดง ในเรื่อง ของน้ำหนัก ทำให้โรเตอร์เบากว่าด้วย รูปที่ 4.9 แสดงรูปของแท่งตัวนำโรเตอร์ ที่ทำมาจาก อะลูมิเนียม มอเตอร์ชั้น (Class) C และ D ตามมาตรฐานของ NEMA



รูปที่ 4.9 แท่งตัวนำโรเตอร์ที่ทำมาจากอะลูมิเนียม

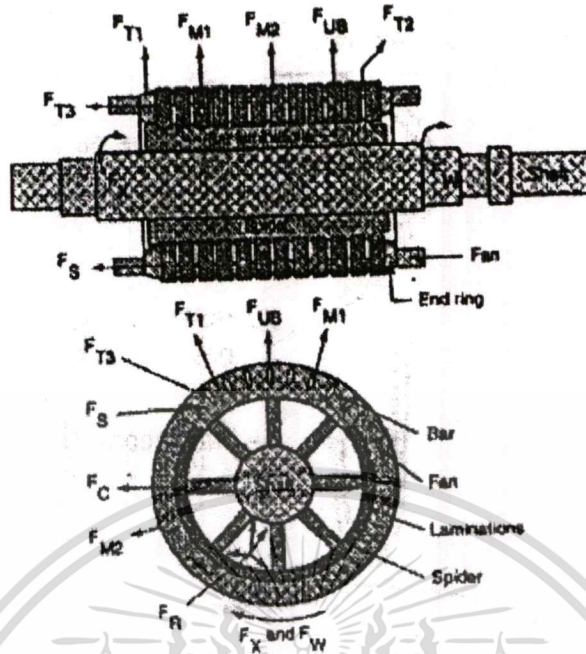
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไปแล้ววัสดุที่นำมาใช้ทำแท่งตัวนำจะเป็นโลหะผสมทองแดงซึ่งมีค่าความต้านทานสูง ส่วนกรงแบบคู่นั้นจะเป็นโลหะผสมที่มีค่าความนำไฟฟ้าประมาณ 10% - 25% เมื่อเทียบกับทองแดงมอเตอร์ชั้น D (แรงบิดสูง สลิปสูง และกระแสพุ่งเข้าต่ำ) จะถูกออกแบบสำหรับค่าสลิปที่โหลดเต็มพิกัดซึ่งจะมีค่าความนำไฟฟ้าในช่วง 8%-13% หรืออาจจะมีความนำไฟฟ้าต่ำได้ถึง 6% โดยปกติแล้วโลหะผสมที่นำมาใช้ทำแท่งตัวนำสามารถกำหนดได้จากการตรวจสอบค่าความนำไฟฟ้า ซึ่งทองแดงจะเป็น 100% อะลูมิเนียม 53%-55% และโลหะผสมทองแดงจะเป็นอีกหนึ่งทางเลือก สำหรับการนำมาทำแท่งตัวนำ แต่โดยทั่วไปแล้วนั้นเป็นการยากที่จะซื้อ ให้ได้ขนาดและรูปร่างตามต้องการและยังมีราคาแพงอีกด้วย

4.4 กำลังของโรเตอร์และการรับโหลด

โดยปกติแล้วขดลวดของโรเตอร์จะถูกพิจารณาเป็นด้านทุติยภูมิ ซึ่งไม่ต่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้า แต่จะได้รับกำลังไฟฟ้าจากการเหนี่ยวนำของฟลักซ์ที่ขดลวดสเตเตอร์ ฟลักซ์ในช่องอากาศจะถูกสมมุติให้เป็นการกระจายแบบไซนูซอยด์ แรงแเคลื่อนไฟฟ้า EMF. จะถูกเหนี่ยวนำเข้ามาในแต่ละแท่งตัวนำของโรเตอร์ ขนาดของมันจะถูกกำหนด โดยจำนวนและอัตราส่วนของความหนาแน่นของฟลักซ์ที่ตัดกับแท่งตัวนำโรเตอร์ สำหรับสลิปปกติกระแส ที่แท่งตัวนำเกือบมีเฟสทับ (inphase) กับแรงแเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ EMF. กระแสที่ไหลผ่านแท่งตัวนำก็จะเป็นไซนูซอยด์ ด้วยเหมือนกัน กระแสนี้ จะทำให้เกิดแรงที่แท่งตัวนำ ซึ่งทำให้เกิดแรงบิด และทำให้โรเตอร์หมุนที่ความเร็วค่าหนึ่ง ซึ่งจะน้อยกว่าความเร็วซิงโครนัสของขดลวดสเตเตอร์ ในขณะที่เริ่มเดินความถี่ของกระแสในขดลวดโรเตอร์ จะเปลี่ยนจากความถี่ไลน์ ที่ความเร็วศูนย์เป็นความถี่ สลิปที่ความเร็วซิงโครนัส (ความถี่โรเตอร์โดยประมาณมีค่าเท่ากับศูนย์) แรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากกระแสนี้จะขับแท่งตัวนำที่ความถี่โรเตอร์ต่าง ๆ ถ้ามอเตอร์ถูกออกแบบ สร้าง นำไปใช้ ติดตั้ง ทำงาน และบำรุงรักษาอย่างเหมาะสมแล้ว ก็จะเป็นการดูแลรักษาความเค้นเหล่านี้ไม่ให้เกิดขึ้นโดยง่าย ซึ่งจะทำให้สามารถใช้งานมอเตอร์ได้หลายปี แต่ถึงอย่างไรก็ตาม การนำมอเตอร์ไปประยุกต์ใช้รวมถึงระบบการขับเคลื่อนต่าง ๆ (drives) ก็เป็นสาเหตุหนึ่งที่จะทำให้ความเค้นสามารถเกิดขึ้นได้ ดังรูปที่

4.10

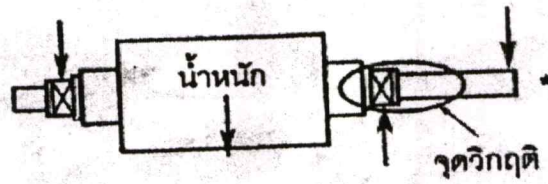


รูปที่ 4.10 แรงที่เกิดขึ้นที่กระทำกับโรเตอร์

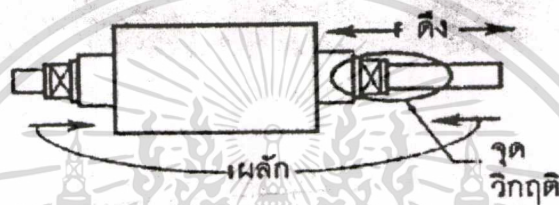
- F_w แรงบิดใช้งาน
- F_U แรงในสภาวะพลวัตที่ไม่สมดุล ($F_{UB} = W_{r\omega^2} / g$)
- F_X การสั่นเนื่องจากการบิดและแรงบิดชั่วครู่
- F_R แรงสนามแม่เหล็กตกค้างจากการหล่อ การเชื่อม ทางกล ฯลฯ
- F_{M1} แรงแม่เหล็กที่มีสาเหตุจากการรั่วไหลของสล็อต ฟลักซ์ และการสั่นที่ 2 เท่า ของความถี่ของกระแสที่ไหลในโรเตอร์
- F_{M2} แรงแม่เหล็กที่มีสาเหตุมาจากความผิดปกติของช่องอากาศ
- F_C แรงของแรงเหวี่ยง ($F_C = W_{r\omega^2} / g$)
- F_{T1} ความเค้นจากความร้อนที่มีสาเหตุมาจากวงแหวนลัดวงจร
- F_{T2} ความเค้นจากความร้อนที่มีสาเหตุมาจาก Δt ในแท่งตัวนำระหว่างเริ่มเดิน (ผลจากปรากฏการณ์ทางผิว)
- F_{T3} ความเค้นจากความร้อนที่มีสาเหตุมาจากแท่งตัวนำ
- F_S แรงที่มีสาเหตุมาจากการเฉียงของแท่งตัวนำ
- ω ความเร็วเชิงมุม
- Ω น้ำหนักของโรเตอร์
- r รัศมีของโรเตอร์
- g ค่าเปรียบเทียบต่างของการแบ่งชั้น (Gradual contrast)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

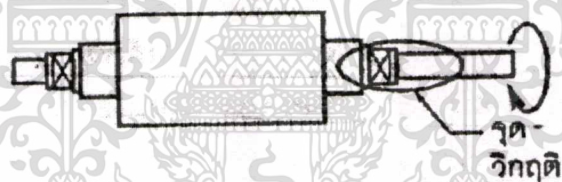
รูปที่ 4.11 ถึงรูปที่ 4.13 แสดงความเสียหายสามกรณี ซึ่งพบบ่อยที่สุดที่เกิดขึ้น เนื่องจากการต่อไหลคเข้ากับเพลลาของมอเตอร์



รูปที่ 4.11 ความเสียหายเนื่องจากการคดงอของเพลลา



รูปที่ 4.12 ความเสียหายของรองเดิน



รูปที่ 4.13 ความเสียหายเชิงแรงบิด

4.5 ช่องอากาศ

ช่องอากาศ (air gap) ของมอเตอร์เหนี่ยวนำนั้น หมายถึง ช่องว่างที่อยู่ระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลางอันในของสเตเตอร์กับเส้นผ่าศูนย์กลางอันนอก ของโรเตอร์ ความยาวของช่องอากาศ จะต้องถูกคงที่ไว้ค่าต่ำสุด เพื่อป้องกันการถึงกันทางกลระหว่างสเตเตอร์ ซึ่งขนาดของช่องอากาศจะมีอิทธิพลต่อคุณลักษณะในการทำงานบางอย่างของโรเตอร์

สนามแม่เหล็กที่สเตเตอร์ส่งกำลังไฟฟ้าข้ามผ่านช่องอากาศ และเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าเป็นกำลังกลช่องอากาศที่ยาวกว่า จำเป็นจะต้องใช้แรงแม่เหล็ก (magnetic force) มากกว่า เพื่อสร้างสนามแม่เหล็ก (magnetic field) ถ้ากระแสแม่เหล็ก (magnetic current) มากขึ้น ค่าตัวประกอบกำลังจะต่ำลง ดังนั้นสำหรับค่าตัวประกอบกำลังที่ดีที่สุดช่องอากาศควรจะมีขนาดเล็กที่สุด

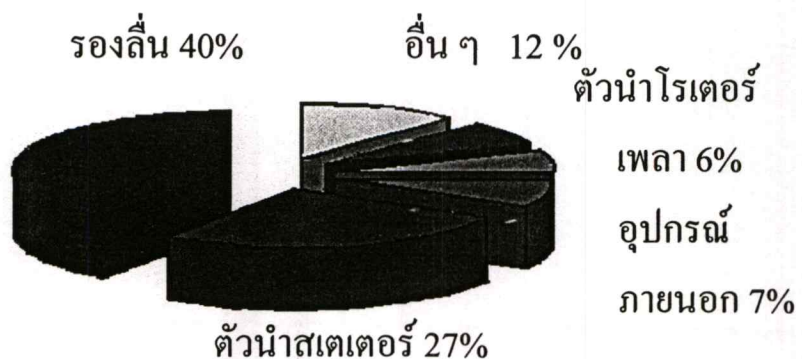
อย่างไรก็ตาม ในเรื่องของประสิทธิภาพที่เหมาะสมที่สุด ช่องอากาศควรจะมีขนาดใหญ่ (กว้าง) เนื่องจากสามารถลดฟลักซ์ซิกแซก (zigzag flux) ลงได้ รวมทั้งความสูญเสียปลีกย่อย (stray loss) ก็จะถูกทำให้ลดลงด้วย ความกว้างของช่องอากาศที่ดีที่สุดที่จะนำไปใช้ จะเป็นการตัดสินใจ

สำหรับการออกแบบที่ต้องคำนึงถึงปัจจัยแต่ละปัจจัยต่าง ๆ เหล่านี้ ได้แก่ ความเยื้องศูนย์กลาง (eccentricities), ความผิดปกติ (irregularities) ในช่องอากาศ ซึ่งสิ่งเหล่านี้มีส่วนทำให้เกิดเสียงรบกวนขึ้นที่มอเตอร์ (motor noise) การสูญเสียที่เพิ่มขึ้น และการดึงด้านข้างทางแม่เหล็กของโรเตอร์ (magnetic side pull) ในการกำหนดตำแหน่งของโรเตอร์สำหรับมอเตอร์ที่มีขนาดใหญ่ จะใช้ร่องลื่นที่สามารถปรับได้ เพื่อที่จะหาตำแหน่งของโรเตอร์ที่เหมาะสมหลังจากที่โรเตอร์ถูกกำหนดตำแหน่งอย่างเหมาะสมแล้วจึงยึดตายให้อยู่กับที่

แฟกเตอร์อื่นซึ่งไม่เกี่ยวข้องกับช่องอากาศ แต่มีผลที่คล้ายคลึงกัน คือ ตัวประกอบการรวมกันของแผ่นซ้อนอัด (lamination stacking factor) ค่าตัวประกอบการรวมกันที่มีค่าต่ำกว่าที่กำหนด นั้นหมายความว่า แผ่นซ้อนอัดน้อยเกินไปที่จะนำพาฟลักซ์แม่เหล็กได้ ส่วนค่าความหนาแน่นฟลักซ์ที่สูงนั้นจะต้องการแอมแปร์ของการทำให้เป็นแม่เหล็ก (magnetizing ampere) เพิ่มขึ้น ซึ่งจะเป็นการลดตัวประกอบกำลัง (power factor) ของมอเตอร์ลง การซ้อนอัดที่หลวมนั้นสามารถทำให้เกิดการสั่นภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็กสลับ (alternating magnetic field) โดยทั่วไปโรงงานอุตสาหกรรมจะใช้ค่าตัวประกอบการรวมกันเท่ากับ 95% ซึ่งจะทำให้มอเตอร์มีประสิทธิภาพที่ดี

4.6 ความล้มเหลวของโรเตอร์

ความเสียหายทั้งหมดที่เกิดขึ้นกับมอเตอร์เหี่ยวมาแสดงดังรูปที่ 4.10 ซึ่งจากรูปแสดงให้เห็นว่าความเสียหายที่ร่องลื่นสูงถึง 40 เปอร์เซ็นต์ของการเกิดคิดเป็นร้อยละ 27 [1] ปัจจัยสำคัญของปัญหาดังกล่าวคือปัญหาการเยื้องศูนย์กลาง ของแท่งโรเตอร์ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญในโรงงานอุตสาหกรรม ที่พบกับปัญหานี้มากคือ มอเตอร์โบว์เวอร์, มอเตอร์ไซโคลน ที่ใช้ขนาดมอเตอร์สูงกว่า 10 กิโลวัตต์ เนื่องจากในวิทยานิพนธ์นี้เน้นพิจารณาวิเคราะห์ ถึงความผิดปกติของมอเตอร์ที่มีสาเหตุจากแท่งตัวนำโรเตอร์แตกหักเป็นหลัก ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึง ความเสียหายที่เกิดขึ้นที่โรเตอร์เป็นสำคัญ โดยสามารถสรุปเป็นเปอร์เซ็นต์ความเสียหาย ของมอเตอร์เหี่ยวมาดังรูปที่ 4.14



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ส่วนตัวเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 4.14 เปอร์เซ็นต์ความเสียหายในมอเตอร์เหี่ยวมา
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7 ปัจจัยที่มีผลทำให้เกิดความเสียหายที่โรเตอร์

ปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดความบกพร่องที่โรเตอร์และส่วนประกอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำส่วนใหญ่แล้วมีผลมาจากความเค้น (Stress) ความเค้น [4] ที่เกิดขึ้นสามารถแบ่งได้ดังตารางที่ 4.1 เครื่องหมาย (X) จะมีผลกระทบกับส่วนประกอบนั้น ๆ ของมอเตอร์

ตารางที่ 4.1 สรุปความเค้นที่มีผลทำให้เกิดความล้มเหลวกับส่วนประกอบต่าง ๆ ของมอเตอร์

ชนิดของความเค้น	รองลั่น	ขดลวดสเตเตอร์	โรเตอร์	เฟลา
ความร้อน	X	X	X	X
ไฟฟ้า/ไดอิเล็กตริก	X	X	X	
ทางกล	X	X	X	X
ไดนามิกส์	X		X	X
แรงกด				X
การสั่น/การกระตุก	X	X	X	X
การตกค้าง			X	X
แม่เหล็กไฟฟ้า	X	X	X	X
สิ่งแวดล้อม	X	X	X	X

4.8 ประเภทของการวินิจฉัยความผิดปกติของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

สามารถแบ่งออกอย่างกว้างๆ ได้เป็นหลายประเภท [12] ดังต่อไปนี้

1. ความผิดปกติที่เกิดจากขดลวดสเตเตอร์ ได้แก่ วงจรเปิดหรือลัดวงจรของขดลวด 1 เฟส หรือมากกว่า
2. การต่อวงจรที่ผิดปกติของขดลวดมอเตอร์
3. แท่งตัวนำโรเตอร์แตกหัก หรือโรเตอร์และวงแหวนลัดวงจรหรือร้าว
4. ความผิดปกติของอากาศแบบสแตติก (Static eccentricity) และไดนามิกส์ (Dynamic air gap eccentricity)
5. เฟลาไม่อยู่ในแนวเส้นตรง
6. ขดลวดสนามโรเตอร์ลัดวงจร
7. ความผิดปกติของรองลั่นและชุดเฟือง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งความผิดปกติดังกล่าวที่เกิดขึ้นนี้จะป็นสาเหตุทำให้เกิดอีกเหตุการณ์หนึ่งหรือมากกว่าดังต่อไปนี้

1. ช่องอากาศแรงดันและกระแสไม่สมดุล
2. การกระเพื่อมของแรงบิดเพิ่มขึ้น
3. แรงบิดเฉลี่ยลดลง
4. ค่าการสูญเสียเพิ่มขึ้นทำให้ประสิทธิภาพลดลง
5. ความร้อนเพิ่มขึ้น

4.9 วิธีการวินิจฉัยความผิดปกติของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ทำได้โดยอาศัยเครื่องมือหรือหลักการดังต่อไปนี้

1. เครื่องแสดงสนามแม่เหล็กไฟฟ้าขดลวดหา (Search coils)
2. การวัดอุณหภูมิที่เกิดขึ้น
3. การใช้อินฟราเรด
4. เครื่องแพร่ความถี่วิทยุ
5. เครื่องวัดการสั่นและสัญญาณรบกวน
6. การวิเคราะห์ทางเคมี
7. การวัดสัญญาณรบกวนเสียง
8. โดยใช้ไมเคิลและเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียม
9. การวิเคราะห์สัญญาณต่างๆที่เกิดขึ้นในมอเตอร์เหนี่ยวนำ ได้แก่ กระแสเดเตอร์ , แรงดัน , แรงบิดช่องอากาศ , กำลังไฟฟ้าชั่วขณะ หรือสัญญาณเส้นแรงแม่เหล็ก

4.10 สเปกตรัมฟอลต์ที่เกิดขึ้นจากการลัดรอบขดลวด

การวิเคราะห์องค์ประกอบสเปกตรัมความถี่ ที่เกิดขึ้นจากการลัดรอบขดลวดสเตเตอร์สำหรับมอเตอร์ที่อยู่ในสถานะใช้งานที่ปกติ พบว่าโดยความถี่ความเร็วโรเตอร์หาได้จาก สเปกตรัม ฟอลต์ เนื่องจากการลัดรอบขดลวดสเตเตอร์ จะมีค่าความถี่สัมพันธ์กับความถี่มูลฐาน (f_1) และมีค่าคงที่ $k = 1, 2, 3, \dots$ เขียนความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (4.1)

เกิดที่องค์ประกอบความถี่

$$2f_1 + kf_r \quad (4.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากองค์ประกอบของขดลวดอาจมีผลไปลด หรือกำจัดองค์ประกอบฮาร์มอนิกบางความถี่ของสนามแม่เหล็กซึ่งจะส่งผลให้แอมพลิจูดของสเปกตรัม บางองค์ประกอบจะมีค่าน้อยลง หรือไม่แสดงให้เห็น องค์ประกอบความถี่ดังกล่าว ที่ใช้ศึกษาในการตรวจจับความผิดปกติของมอเตอร์ที่เกิดจากการลัดรอบของขดลวดสเตเตอร์ คือองค์ประกอบความถี่ที่ไซด์แบนด์ (Sidebands) ของความถี่ที่เป็นตัวคูณของความเร็วโรเตอร์

4.11 สเปกตรัมฟอลต์ที่เกิดขึ้นจากแท่งตัวนำโรเตอร์แตกหัก

แท่งตัวนำโรเตอร์แตกหัก (Broken rotor bars) จะส่งผลให้เกิดความถี่ฮาร์มอนิก (f_{br}) สลิป (s) m เป็นจำนวนเต็มบวก $1, 2, 3, \dots$ f_r คือความถี่ของความเร็วโรเตอร์ และมีความถี่ไซด์แบนด์ เท่ากับ $\pm 2sf_1$ ดังสมการที่ (4.3) ปกติด้านข้างความถี่มูลฐาน (f_1) เขียนความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (4.3) และจะเกิดองค์ประกอบความถี่ (f_{ecc}) ในลำดับฮาร์มอนิกส์ที่มีอันดับสูง ๆ ขึ้นไป เขียนความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (4.3) และ (4.4)

$$f_r = (1 \pm 2s)f_1 \quad (4.3)$$

และเกิดที่องค์ประกอบความถี่

$$f_{ecc} = mf_r \quad (4.4)$$

4.12 สรุป

สรุปจากโครงสร้างของโรเตอร์กรงกระลอกสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ เหตุผลหลักที่ต้องศึกษาถึงโครงสร้างของโรเตอร์ ก็เพื่อที่จะได้นำไปเป็นพื้นฐานสำหรับการตรวจสอบวินิจฉัย (diagnostic) ความสมบูรณ์ของมอเตอร์โดยการวิเคราะห์ทางสัญญาณ (signature analysis) ได้แก่ สัญญาณของกระแสสเตเตอร์ แรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์ รวมถึงกำลังไฟฟ้าชั่วขณะ (instantaneous power) เนื่องจากความเสียหายที่เกิดขึ้นกับมอเตอร์ส่วนใหญ่แล้ว จะมาจากโครงสร้างของโรเตอร์ เช่น แท่งตัวนำแตกร้าว, ร่องลื่นชำรุด, ไขพัดหัก เป็นต้น

โดยในวิทยานิพนธ์นี้จะทำการศึกษาความผิดปกติของมอเตอร์โดยการตรวจจับสัญญาณกระแสสเตเตอร์เฟส a เฟสเดียว และพิจารณาองค์ประกอบสเปกตรัมที่เกิดขึ้นจากแท่งตัวนำโรเตอร์ปกติ และแท่งตัวนำแตกหัก (broken bars) ทำการทดสอบในสภาวะเกิดการลัดรอบขดลวดสเตเตอร์ ทดสอบในสภาวะแรงดันไม่สมมาตร (un balance voltage) โดยรายละเอียดจะ

บทที่ 5

วิธีการทดสอบและผลการทดสอบ

5.1 บทนำ

ในการวิเคราะห์ใช้โปรแกรม Matlab ประมวลผลแบบออฟไลน์ภายใต้เงื่อนไข 3 ประการด้วยกันคือ ในสภาวะมอเตอร์ปกติ แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล และเมื่อเกิดการลัดรอบของขดลวดสเตเตอร์ ซึ่งมีแหล่งจ่ายเป็นคลื่นไซน์ 50 เฮิร์ต โดยทำการทดสอบด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำ ขนาด 2 แรงม้า 4 โพล และ 3 แรงม้า 6 โพล 380 โวลต์ 50 เฮิร์ต ซึ่งจะทำการทดสอบที่สภาวะโหลดต่าง ๆ กัน นำผลของสเปกตรัมความถี่ที่เกิดขึ้น ในแต่ละกรณีมาทำการฝึกสอนกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแบบแพร่ค่าย้อนกลับ

5.2 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ตารางที่ 5.1 พิกัดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 2 แรงม้า 4 โพล และ 3 แรงม้า 6 โพล

พิกัดกำลัง (HP)	พิกัดแรงดัน (V)	พิกัดกระแส (A)	พิกัดความเร็วรอบ (rpm)
2	220/380	3.51/2.03	1,390
3	220/380	9.69/5.60	935

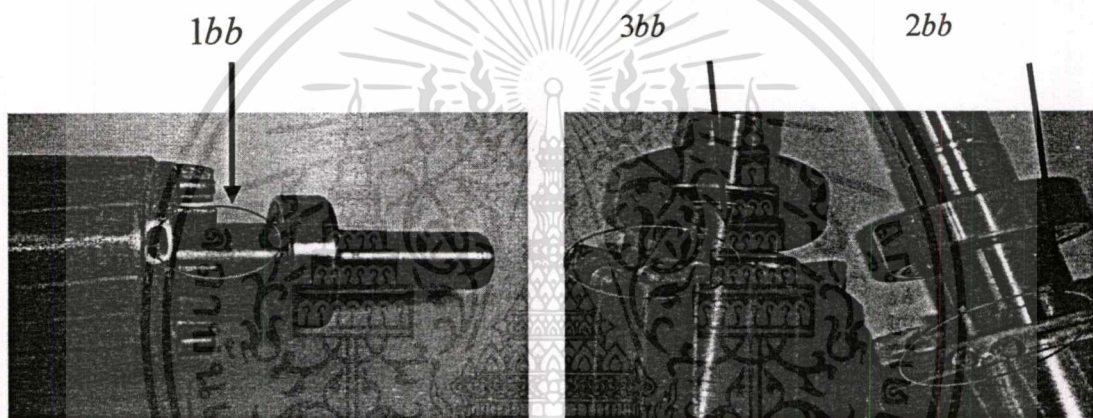
5.2.1 การพิจารณาองค์ประกอบสเปกตรัมฟอลต์

กรณีที่ 1 มอเตอร์ปกติ

จากการตรวจจับสัญญาณกระแสสเตเตอร์ เพื่อนำสัญญาณที่ได้ไปทำการแตกสเปกตรัมของมอเตอร์ปกติจะพิจารณาค่าแอมพลิจูดของสเปกตรัม (dB) ในตำแหน่งที่เกิดขึ้นคือที่ตำแหน่ง f_r (25Hz.) ตำแหน่ง f_1 (50Hz), และในตำแหน่งองค์ประกอบความถี่ mf_1 ในลำดับฮาร์มอนิกส์ที่สูงขึ้น คือ ตำแหน่ง $3f_r$ (75Hz.), $4f_r$ (100Hz.), $5f_r$ (125Hz.), $6f_r$ (150Hz.) และ $10f_r$ (250Hz.) โดยค่าแอมพลิจูดของสเปกตรัม (dB) ที่ตำแหน่ง f_1 (50Hz) จะมีการเปลี่ยนแปลงตามปริมาณโหลดที่สูงขึ้น คือที่ภาระโหลด 100% ค่าแอมพลิจูดของสเปกตรัม (dB) มีค่าเท่ากับ 8.60 dB.

กรณีที่ 2 มอเตอร์ที่เกิดแท่งตัวนำแตกหัก

ในการทดสอบมอเตอร์ดังกล่าวเราจะกำหนดให้เป็นมอเตอร์ในอุดมคติ จากการตรวจจับสัญญาณกระแสสแตเตอร์ เพื่อนำสัญญาณที่ได้ไปทำการแตกสเปกตรัม ของมอเตอร์ในกรณีแท่งตัวนำแตกหักจะพิจารณาค่าแอมพลิจูดของสเปกตรัม (dB.) ในตำแหน่ง $f_r(25\text{Hz})$ ความถี่ไซน์แบนด์ของความถี่มูลฐาน $1 \pm 2sf_1$, ตำแหน่ง $f_1(50\text{Hz})$, และในตำแหน่งที่มีองค์ประกอบความถี่ mf_r หรือในลำดับฮาร์มอนิกที่สูงขึ้น คือ ตำแหน่ง $3f_r(75\text{Hz.})$, $4f_r(100\text{Hz.})$, $5f_r(125\text{Hz.})$, $6f_r(150\text{Hz.})$ และ $10f_r(250\text{Hz.})$ โดยค่าแอมพลิจูดของสเปกตรัม (dB.) ที่ตำแหน่ง $f_1(50\text{Hz})$ จะมีการเปลี่ยนแปลงตามปริมาณโหลดที่สูงขึ้น คือที่ภาระโหลด 100% ค่าแอมพลิจูดของสเปกตรัม (dB.) มีค่าเท่ากับ 5.50 dB.



โรเตอร์แตกหัก 1 บาร์

โรเตอร์แตกหัก 2 และ 3 บาร์

รูปที่ 5.1 แสดงการจำลองการแตกหักที่แท่งตัวนำโรเตอร์

กรณีที่ 3 มอเตอร์ที่เกิดการลัดรอบที่ขดลวดสเตเตอร์

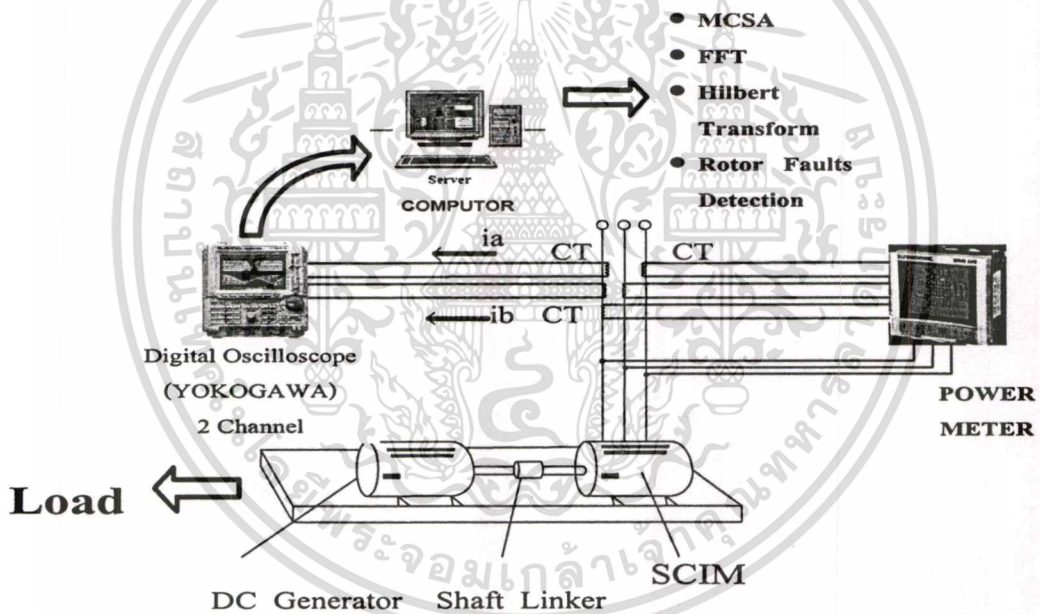
ในการทดสอบมอเตอร์ดังกล่าวเราจะกำหนดให้เป็นมอเตอร์ในอุดมคติ จากการตรวจจับสัญญาณกระแสสแตเตอร์ เพื่อนำสัญญาณที่ได้ไปทำการแตกสเปกตรัม ของมอเตอร์ในกรณีเกิดการลัดรอบขดลวดสเตเตอร์นั้น จะพิจารณาค่าแอมพลิจูดของสเปกตรัม (dB.) ในตำแหน่ง $f_r(25\text{Hz})$ ความถี่ไซน์แบนด์ที่ตำแหน่งความถี่ $f_r \pm 2sf_1$ หรือความถี่ไซน์แบนด์ด้านข้างในตำแหน่ง $f_r(25\text{Hz})$ และในตำแหน่ง $6f_r(150\text{Hz})$ ตำแหน่งการเกิดสเปกตรัมฟอลต์นั้นถ้าหากเกิดฟอลต์หรือการลัดรอบที่รุนแรง จะส่งผลให้เห็นความถี่ไซน์แบนด์ในตำแหน่งดังกล่าวที่ชัดเจนมากยิ่งขึ้น

ส่วนค่าแอมพลิจูดของสเปกตรัม (dB.) ที่ตำแหน่ง $f_1(50\text{Hz})$ ที่ภาระโหลด 100% ค่าแอมพลิจูดของสเปกตรัม (dB.) มีค่าเท่ากับ 5.25 dB. ซึ่งจะมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองการเกิดแท่งตัวนำโรเตอร์แตกหัก (broken bars)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 วิธีการทดสอบ

การทดสอบของวิทยานิพนธ์นี้จะทำการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำในสถานะไม่มีภาระทางกล และสถานะมีภาระทางกล โดยการทดสอบในสถานะมีภาระทางกลจะทำการทดสอบที่ 5%, 10%, 15%, 18%, 20%, 25%, 30%, 35%, 40%, 45%, 50%, 55%, 60%, 63%, 65%, 70%, 75%, 80%, 85%, 90%, 92%, 95% และที่ 100% ของกำลังเอาต์พุตตามลำดับ มอเตอร์ที่ใช้ทดสอบสำหรับการลัดรอบของขดลวดสเตเตอร์จะต่อแบบสตาร์ ซึ่งจำนวนของขดลวดสเตเตอร์ขนาด 2 แรงม้าจะเท่ากับ 280 รอบต่อ 1 โพล และมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้าเท่ากับ 280 รอบต่อ 1 โพล โดยลักษณะของการลัดรอบจะเริ่มจาก 1% , 2% และ 3% และ 4% ของจำนวนรอบทั้งหมด ในกรณีแรงดันไม่สมดุลที่ 3% ของแรงดันปกติ โดยจะพิจารณาความไม่สมดุลระหว่างเฟส a กับเฟส c โดยมีไดอะแกรมขั้นตอนการทดลองและการวิเคราะห์ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.2 วงจรการทดลองและวิเคราะห์

5.4 วิธีการตรวจจับสัญญาณ

ในการตรวจจับสัญญาณกระแสไฟฟ้านี้ จะทำการตรวจวัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านมอเตอร์ โดยแบ่งออกเป็นสองส่วน คือ การตรวจจับกระแสไฟฟ้าเฟส a และการตรวจจับกระแสไฟฟ้าเฟส c ข้อมูลของกระแสไฟฟ้าจะถูกบันทึกโดยใช้สโคปแบบดิจิทัล 2 Channel ซึ่งมีอัตราการสุ่มเอกซารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Sampling) 10 kHz ค่าความละเอียดความถี่ (Frequency resolution) เท่ากับ 0.5 Hz ซึ่งหาได้จาก [15]

$$\text{ความละเอียดความถี่} = \frac{f_s}{N} \quad (5.1)$$

โดย f_s คือ ความถี่แซมปลิง
 N คือ จำนวนข้อมูล

ขนาดของความละเอียดความถี่เท่ากับ 0.5 Hz นี้เพียงพอที่จะค้นพบฮาร์มอนิกส์ที่แสดงให้เห็นถึงความผิดปกติของมอเตอร์เหนี่ยวนำ จากนั้นทำการประมวลผลด้วยโปรแกรม Matlab และแปลงให้อยู่ในโดเมนความถี่ โดยใช้การแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform : FFT) เพื่อวิเคราะห์สเปกตรัมหาความผิดปกติของมอเตอร์ ในการวิเคราะห์สเปกตรัมจะใช้หน่วยเป็น เดซิเบล (dB.) และวิเคราะห์ในช่วงความถี่ 0-250 Hz โดยมีรายละเอียดจะได้กล่าวในหัวข้อต่อไป

5.5 ผลการทดลอง

ผลการทดลองจะแสดงสเปกตรัมของกระแสเตอร์เฟส a เพียงเฟสเดียว ในการทดลอง โดยจะแบ่งออกเป็น 3 สถานะคือ สถานะแท่งตัวนำโรเตอร์ปกติ, สถานะแท่งตัวนำโรเตอร์แตกหัก (broken bar) ทำการทดสอบในสถานะแรงดันไม่สมดุล และมีการลัดรอบขดลวดสเตเตอร์และทำการตรวจจับสัญญาณและทำการเก็บผลของสัญญาณ เพื่อนำไปทำการวิเคราะห์ หาความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้น และนำฝึกสอนให้กับโครงข่ายประสาทเทียมให้มีการเรียนรู้ และสามารถวิเคราะห์ถึงความผิดปกติที่เกิดขึ้นในมอเตอร์ เจื่อนใจในการทดลองโดยมีรายละเอียดดังนี้

5.5.1 สถานะแท่งตัวนำโรเตอร์ปกติ

5.5.1.1 แสดงผลสเปกตรัมของสัญญาณกระแสเตอร์เฟส a ที่ภาระโหลด 0%, 75% และ 100% แสดงดังรูปที่ 5.3 - รูปที่ 5.5

5.5.1.2 แสดงผลสเปกตรัมของสัญญาณกระแสเตอร์เฟส a ที่ภาระโหลด 0%, 75% และ 100% ขณะแรงดันไม่สมดุล แสดงดังรูปที่ 5.6 - รูปที่ 5.8

5.5.1.3 แสดงผลสเปกตรัมของสัญญาณกระแสเตอร์เฟส a ที่ภาระโหลด 0%, 75% และ 100% ขณะมีการลัดรอบขดลวดสเตเตอร์ แสดงดังรูปที่ 5.9 - รูปที่ 5.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.5.2 สถานะแท่งตัวนำโรเตอร์แตกหัก

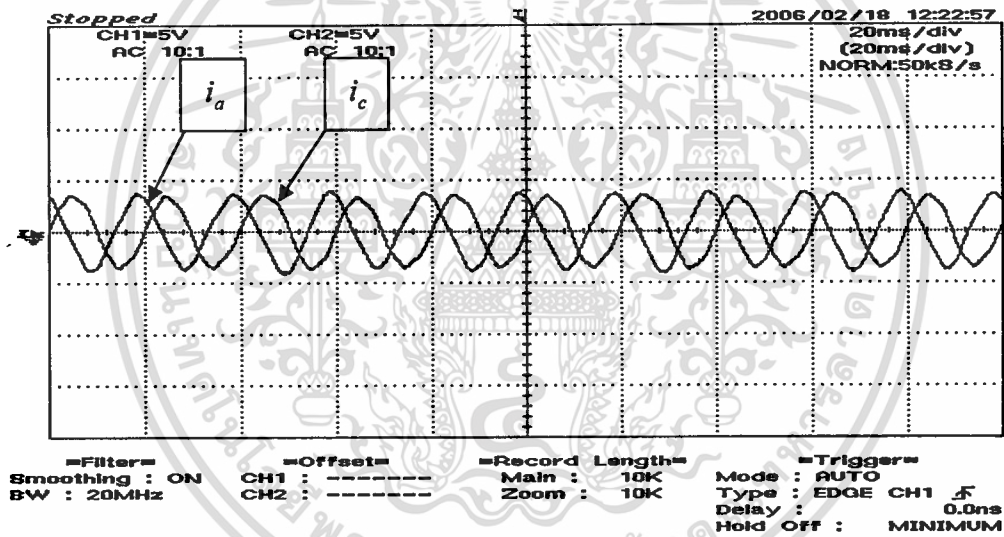
5.5.2.1 แสดงผลสเปกตรัมของสัญญาณกระแสเตอร์เฟส a ที่ภาระโหลด 0%, 75% และ 100% แสดงดังรูปที่ 5.12 - รูปที่ 5.14

5.5.2.2 แสดงผลสเปกตรัมของสัญญาณกระแสเตอร์เฟส a ที่ภาระโหลด 0%, 75% และ 100% ขณะแรงคั้นไม่สมดุล แสดงดังรูปที่ 5.15 - รูปที่ 5.17

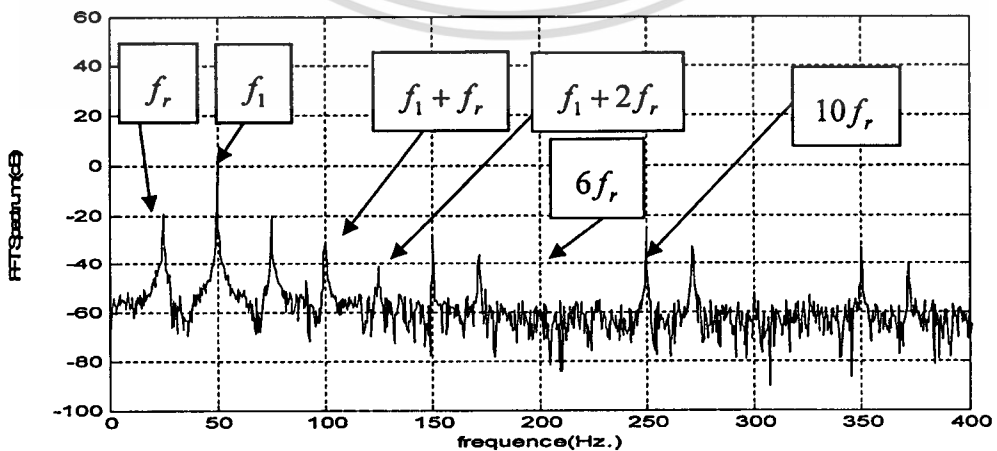
5.5.2.3 แสดงผลสเปกตรัมของสัญญาณกระแสเตอร์เฟส a ที่ภาระโหลด 0%, 75% และ 100% ขณะมีการลัดรอบขดลวดสเตเตอร์ แสดงดังรูปที่ 5.18 - รูปที่ 5.20

5.5.1 สถานะแท่งตัวนำโรเตอร์ปกติ

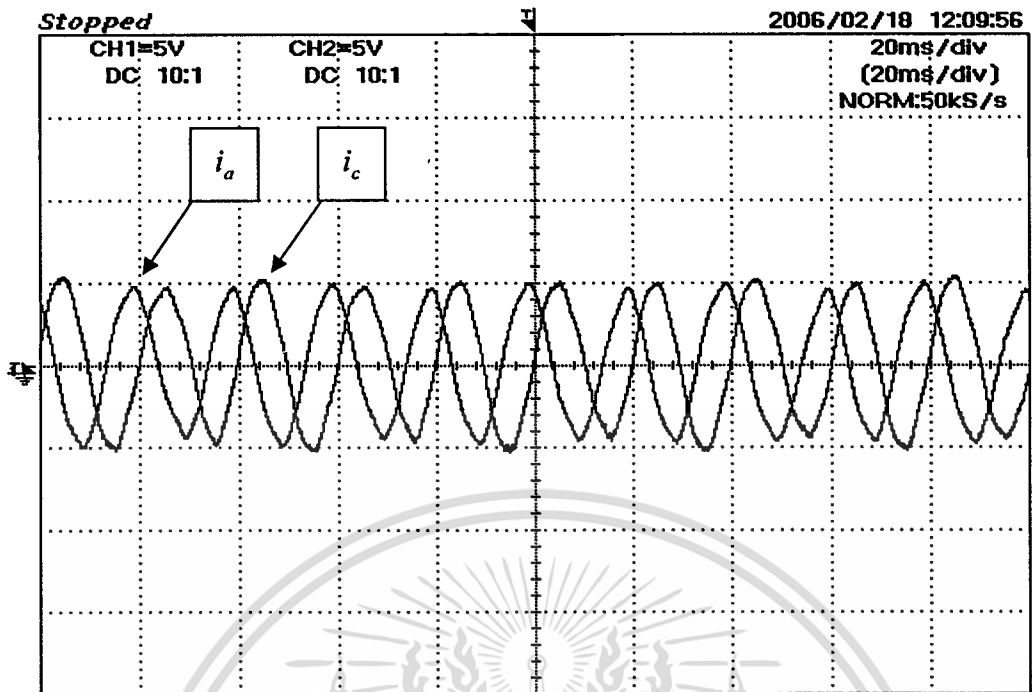
5.5.1.1 แสดงผลสเปกตรัมของสัญญาณกระแสเตอร์เฟส a ที่ภาระโหลด 0%, 75% และ 100%



(ก) กระแส i_a และกระแส i_c (i_a เท่ากับ $1.48 A/div$)



ข) สเปกตรัมของกระแสเตอร์เฟส i_a



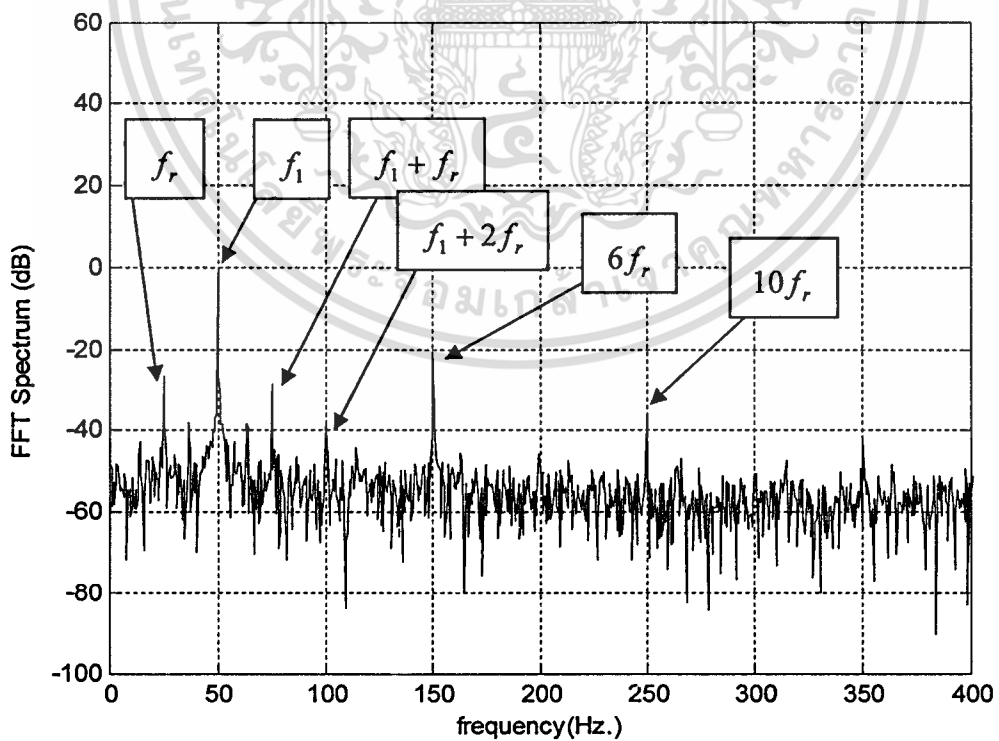
=Filter= Smoothing : ON BW : FULL

=Offset= CH1 : 0.00V CH2 : 0.00V

=Record Length= Main : 10K Zoom : 10K

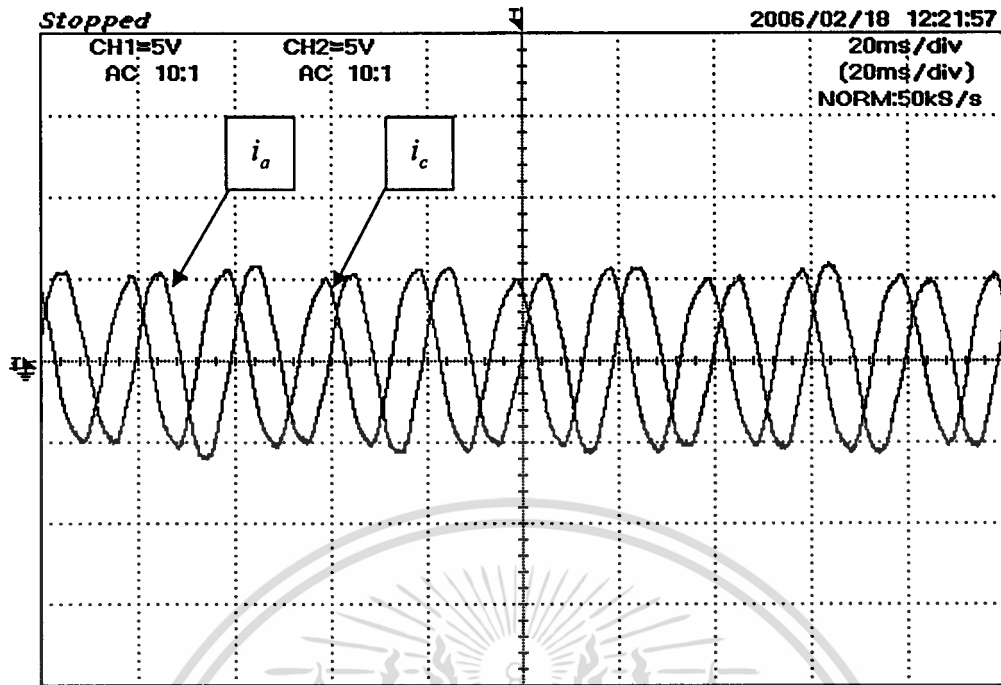
=Trigger= Mode : AUTO Type : EDGE CH1 \neq Delay : 0.0ns Hold Off : MINIMUM

(ก) กระแส i_a และกระแส i_c (i_a เท่ากับ 2.57 A/div)



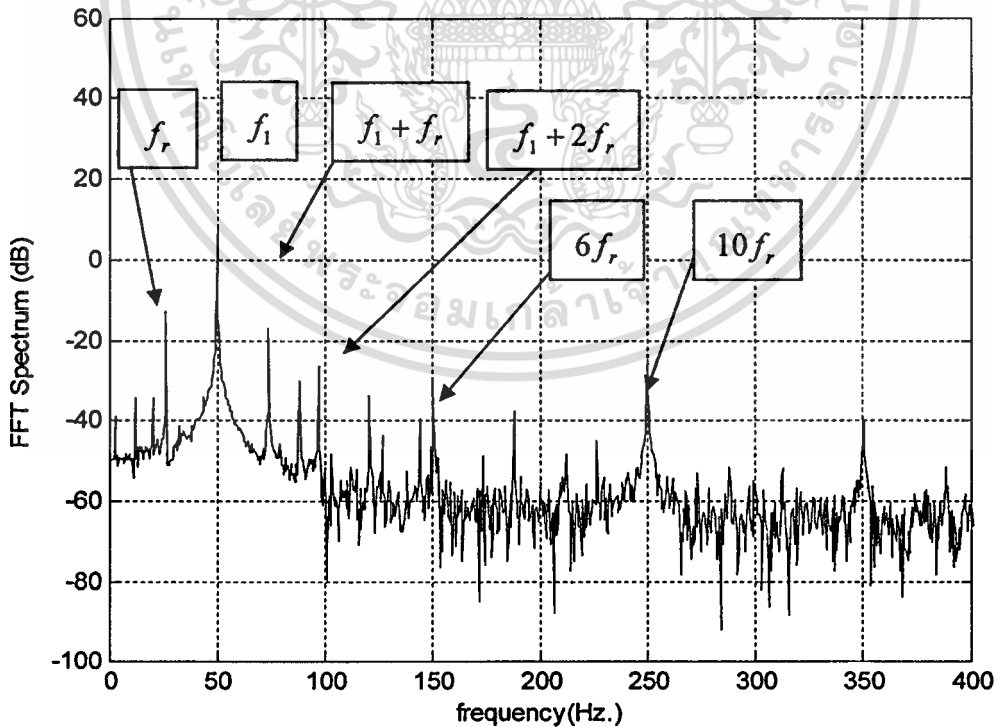
(ข) สเปกตรัมของกระแสสเตเตอร์ i_a

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณีใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



=Filter= Smoothing : ON BW : 20MHz
 =Offset= CH1 : ----- CH2 : -----
 =Record Length= Main : 10K Zoom : 10K
 =Trigger= Mode : AUTO Type : EDGE CH1 \neq Delay : 0.0ns Hold Off : MINIMUM

(ก) กระแส i_a และกระแส i_c (i_a เท่ากับ $2.65 A/div$)

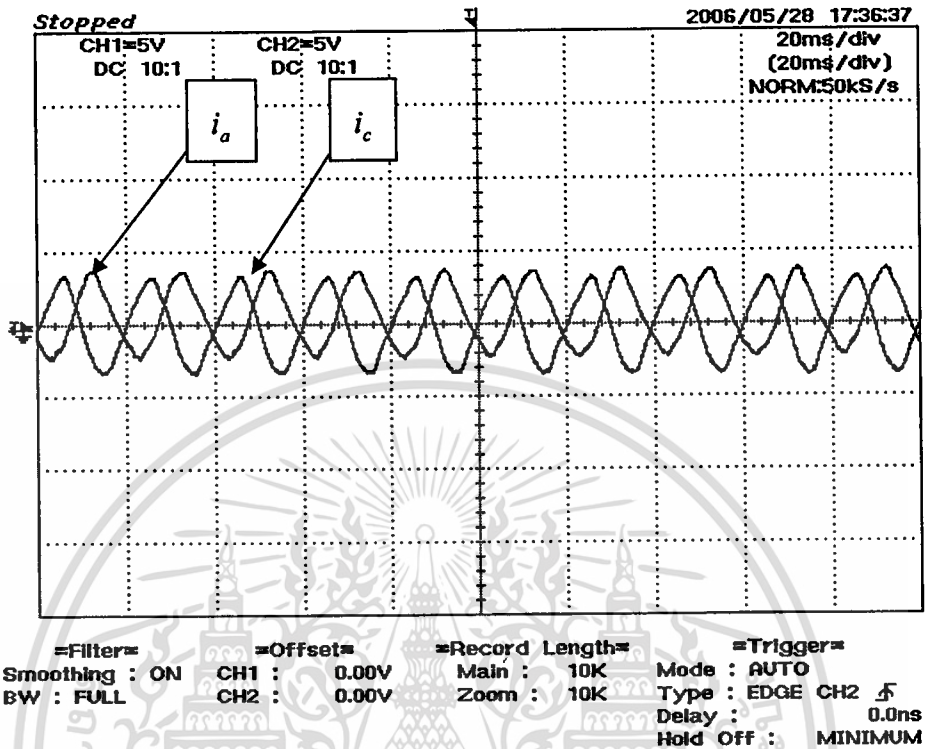


(ข) สเปกตรัมของกระแสสเตเตอร์ i_a

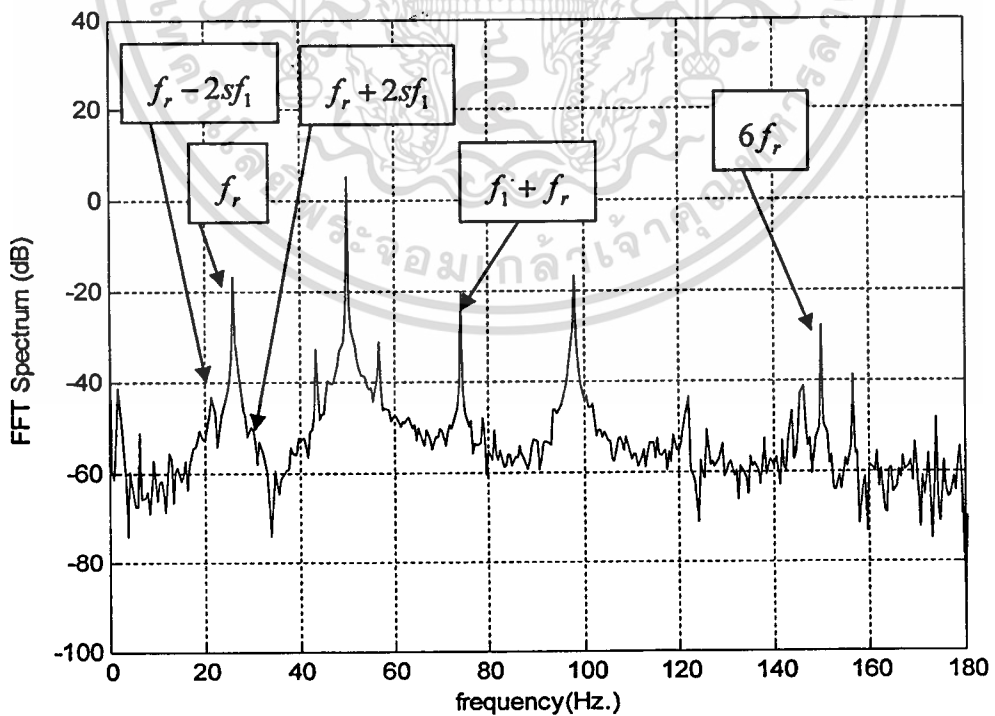
รูปที่ 5.5 กระแส i_a ของมอเตอร์ขนาด 2 แรงม้าที่ภาระ 100%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.5.1.3 แสดงผลสเปกตรัมของสัญญาณกระแสแอสเตอร์เฟส a ที่ภาระโหลด 0%, 75% และ 100% ขณะมีการลัดรอบขดลวดสเตเตอร์

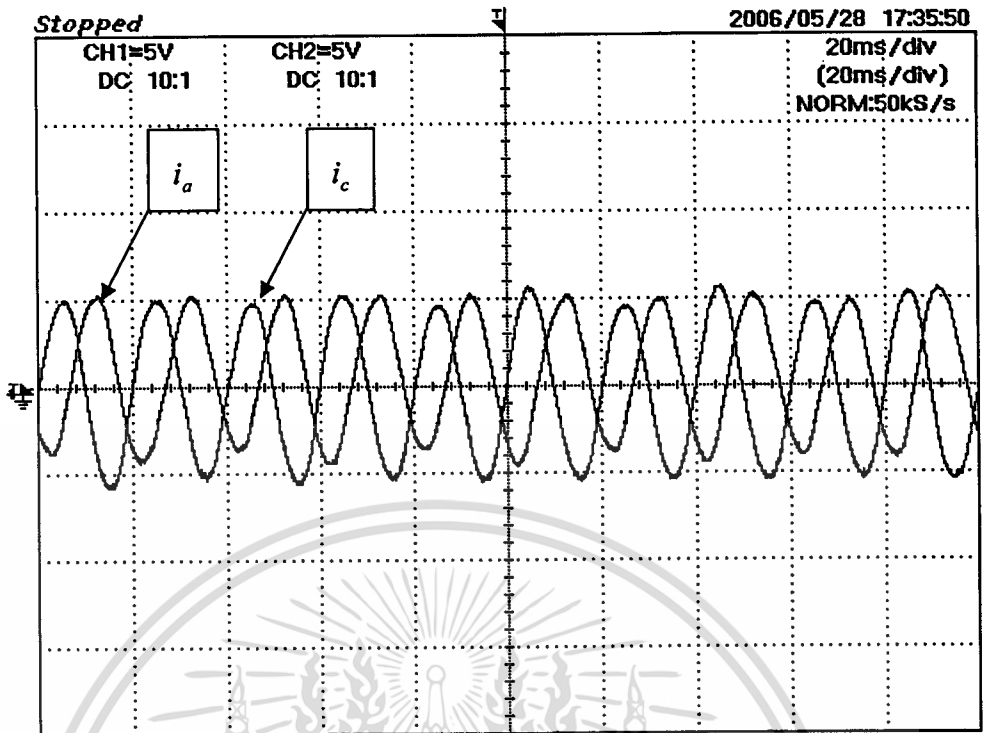


(ก) กระแส i_a และกระแส i_c (i_a เท่ากับ $1.55 A/div$)



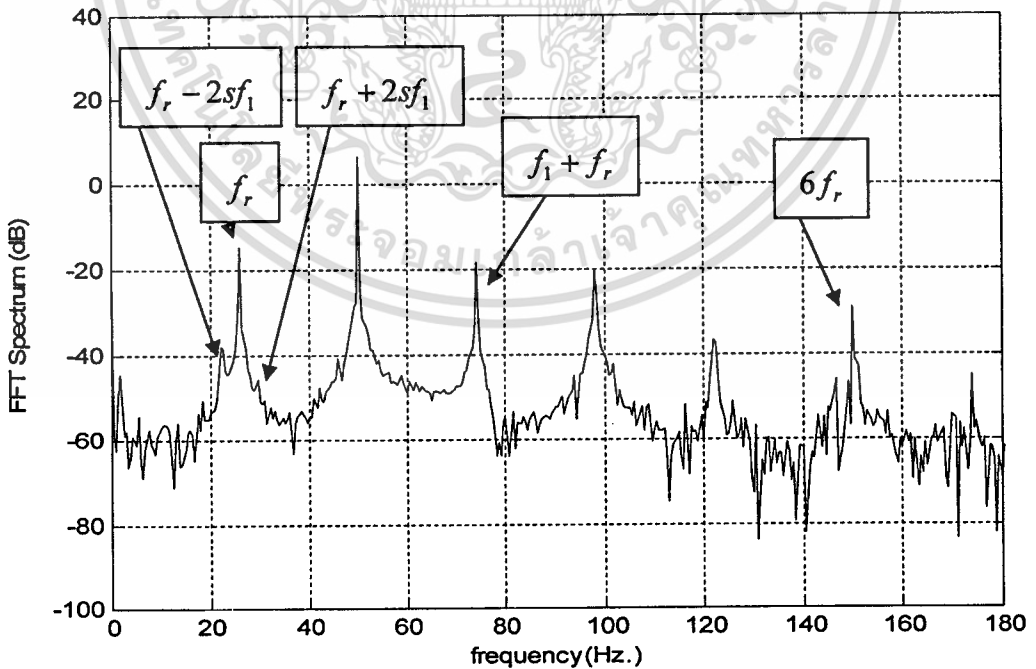
(ข) สเปกตรัมของกระแสแอสเตอร์ i_a

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไปขอสงวนไว้เพื่อใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 รูปที่ 5.9 กระแส i_a ของมอเตอร์ขนาด 2 แรงม้าที่ภาระไร้โหลด
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



=Filter= Smoothing : ON BW : FULL
 =Offset= CH1 : 0.00V CH2 : 0.00V
 =Record Length= Main : 10K Zoom : 10K
 =Trigger= Mode : AUTO Type : EDGE CH2 δ Delay : 0.0ns Hold Off : MINIMUM

(ก) กระแส i_a และกระแส i_c (i_a เท่ากับ $2.60 A/div$)

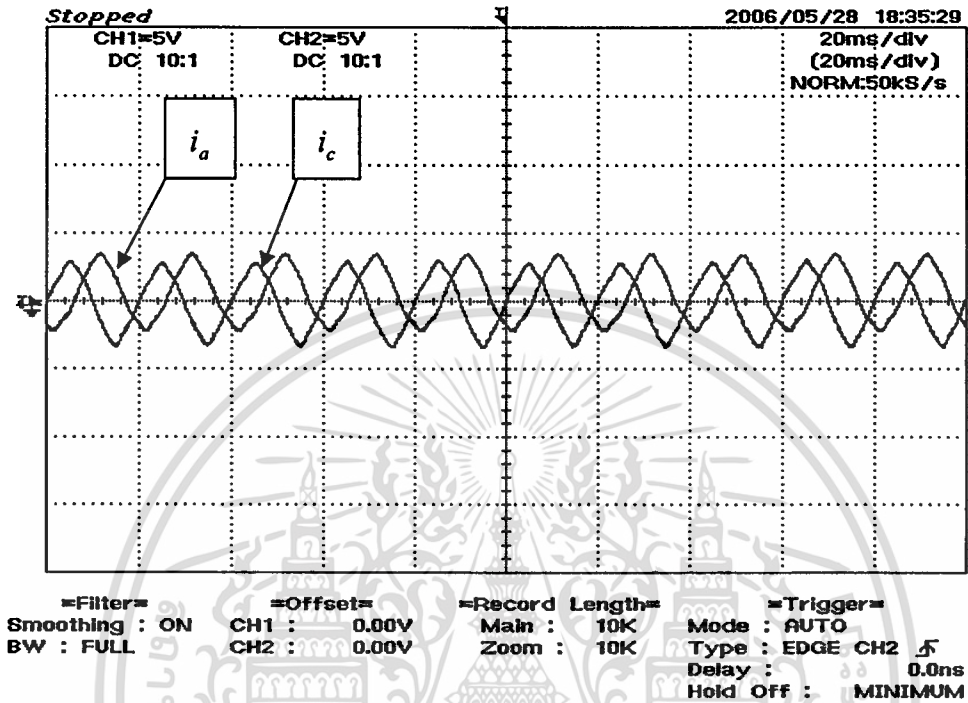


(ข) สเปกตรัมของกระแสเดเตอร์ i_a

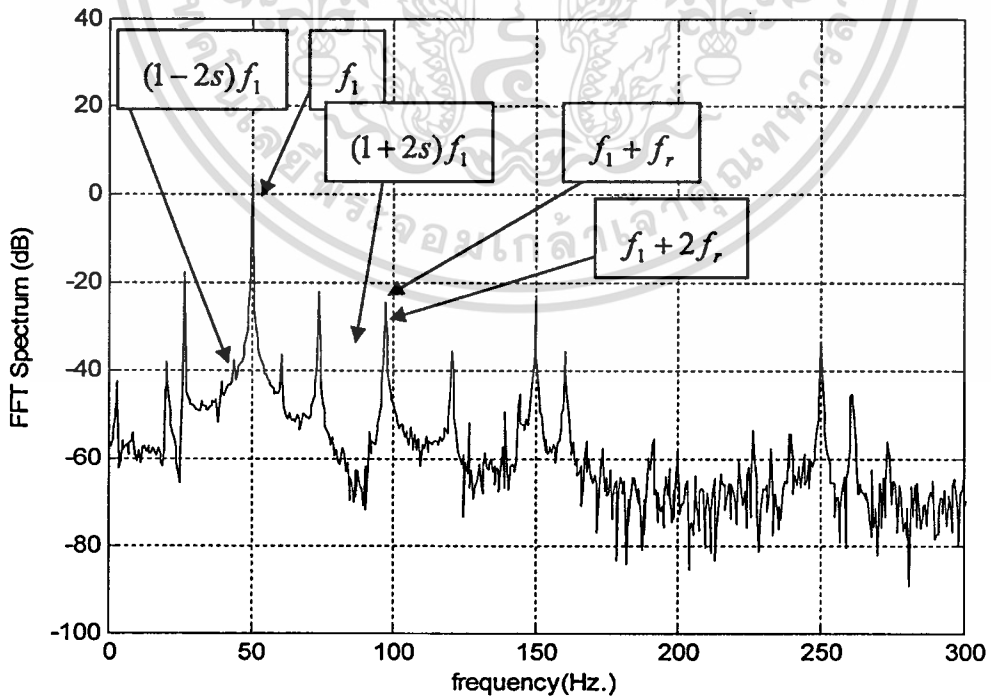
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่อาคารเรียนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ใช้เพื่อวัตถุประสงค์ด้านการค้า
 รูปที่ 5.10 กระแส i_a ของมอเตอร์ขนาด 2 แรงม้าที่ภาระ 75%
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.5.2 สภาวะแก่งตัวนำโรเตอร์แตกหัก

5.5.2.1 แสดงผลสเปกตรัมของสัญญาณกระแสสเตเตอร์เฟส a ที่ภาระโหลด 0%, 75% และที่ 100%

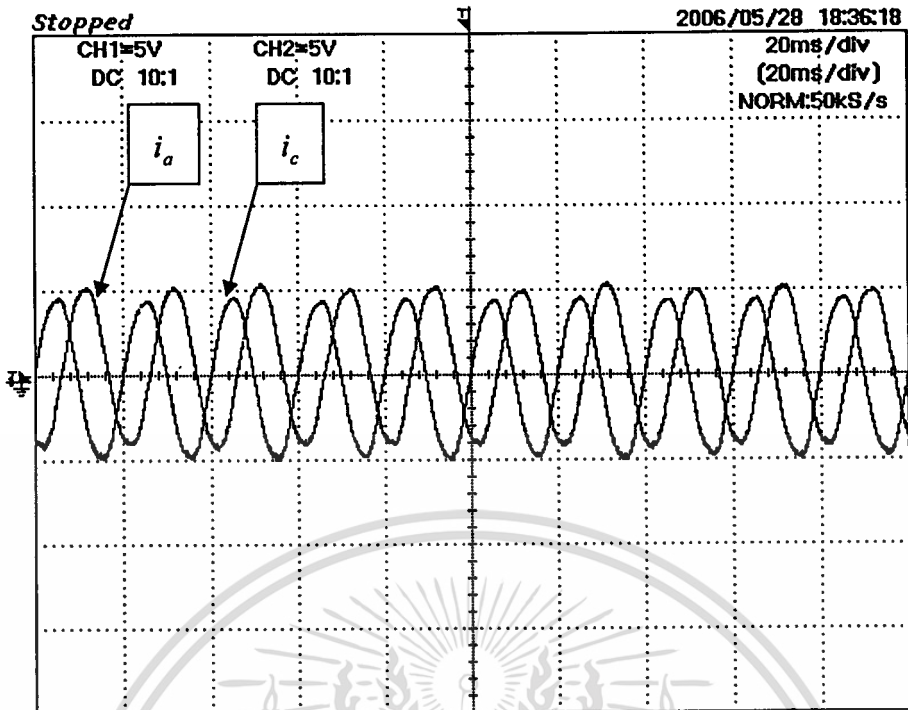


(ก) กระแส i_a และกระแส i_c (i_a เท่ากับ $1.53 A/div$)



(ข) สเปกตรัมของกระแสสเตเตอร์ i_a

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 รูปที่ 5.12 กระแส i_a ของมอเตอร์ขนาด 2 แรงม้าที่ภาระไร้โหลด
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



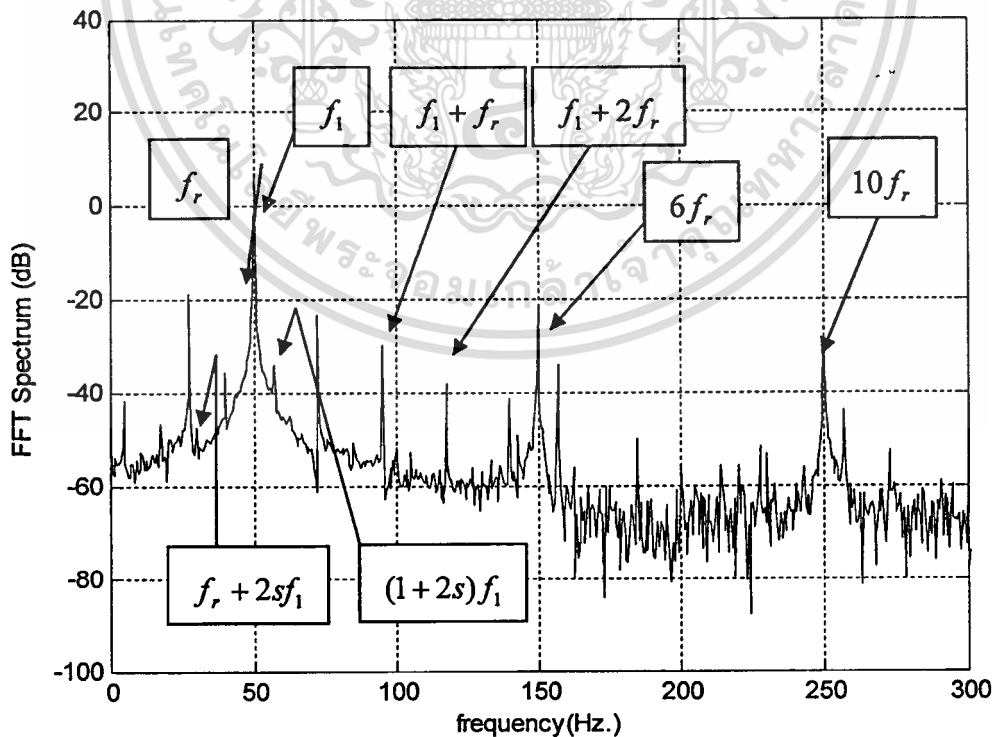
=Filter= Smoothing : ON BW : FULL

=Offset= CH1 : 0.00V CH2 : 0.00V

=Record Length= Main : 10K Zoom : 10K

=Trigger= Mode : AUTO Type : EDGE CH2 ∇ Delay : 0.0ns Hold Off : MINIMUM

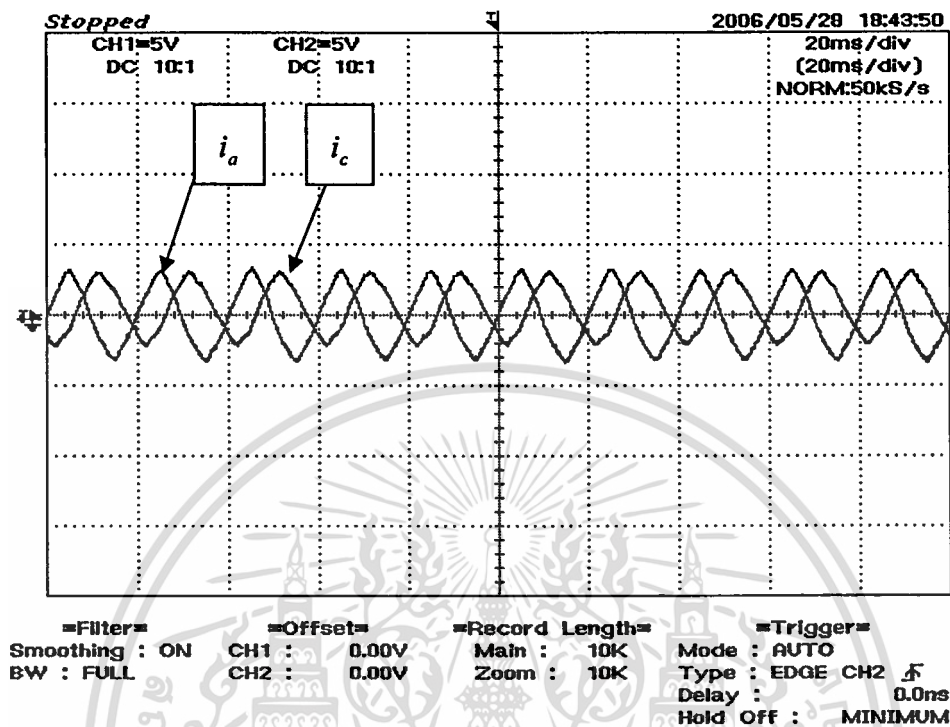
(ก) กระแส i_a และกระแส i_c (i_a เท่ากับ $2.58 A/div$)



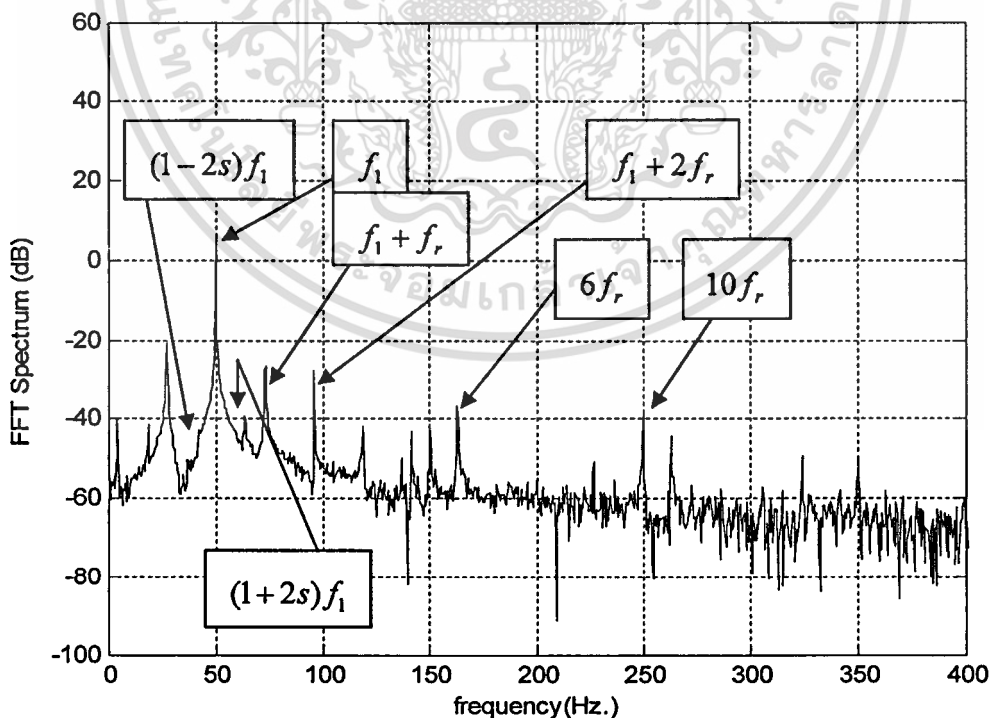
(ข) สเปกตรัมของกระแสตัวตรวจจับ i_a

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอาจารย์ภาควิชาเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไปสอนที่ไหนบ้างไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 5.13 กระแส i_a ของมอเตอร์ขนาด 2 แรงม้าที่ภาระ 75%
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.5.2.2 แสดงผลสเปกตรัมของสัญญาณกระแสเตอร์เฟส a ที่ภาระโหลด 0%, 75% และ 100% ขณะแรงดันไม่สมดุล ($V_a = V_b = 213V$; $V_c = 220V$.)

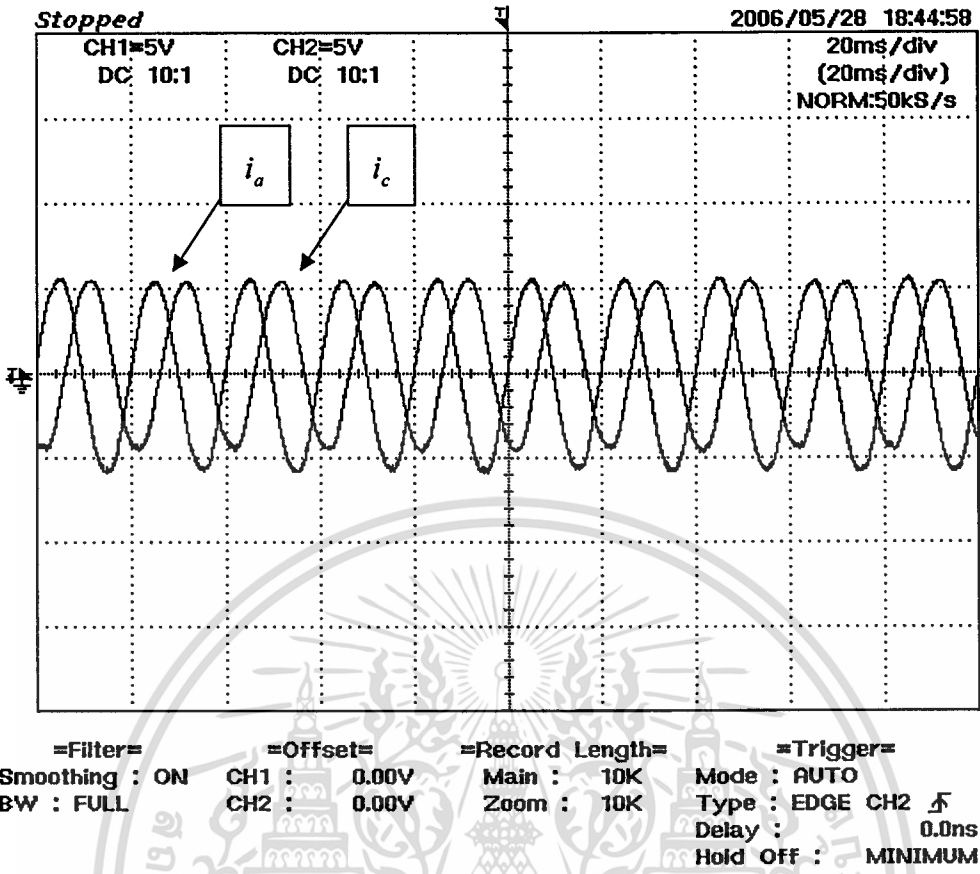


(ก) กระแส i_a และกระแส i_c (i_a เท่ากับ $1.48 A/div$)

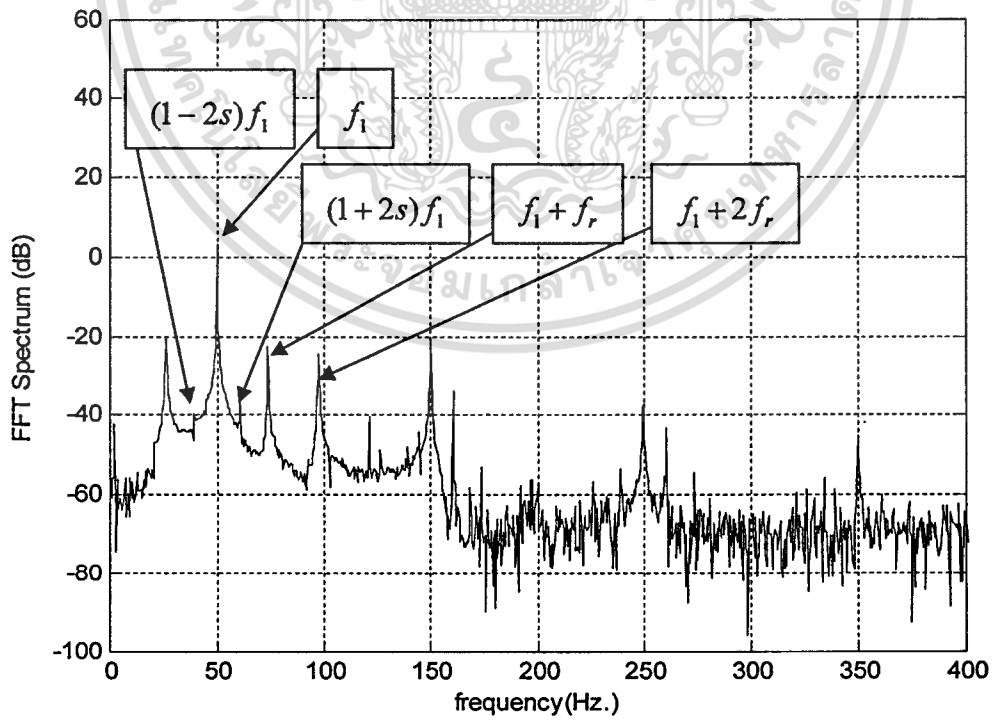


(ข) สเปกตรัมของกระแสเตอร์ i_a

เอกสารนี้เป็นเอกสารรูปที่ 5.15 กระแส i_a ของมอเตอร์ขนาด 2 แรงม้าที่ภาระไร้โหลดระยะโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



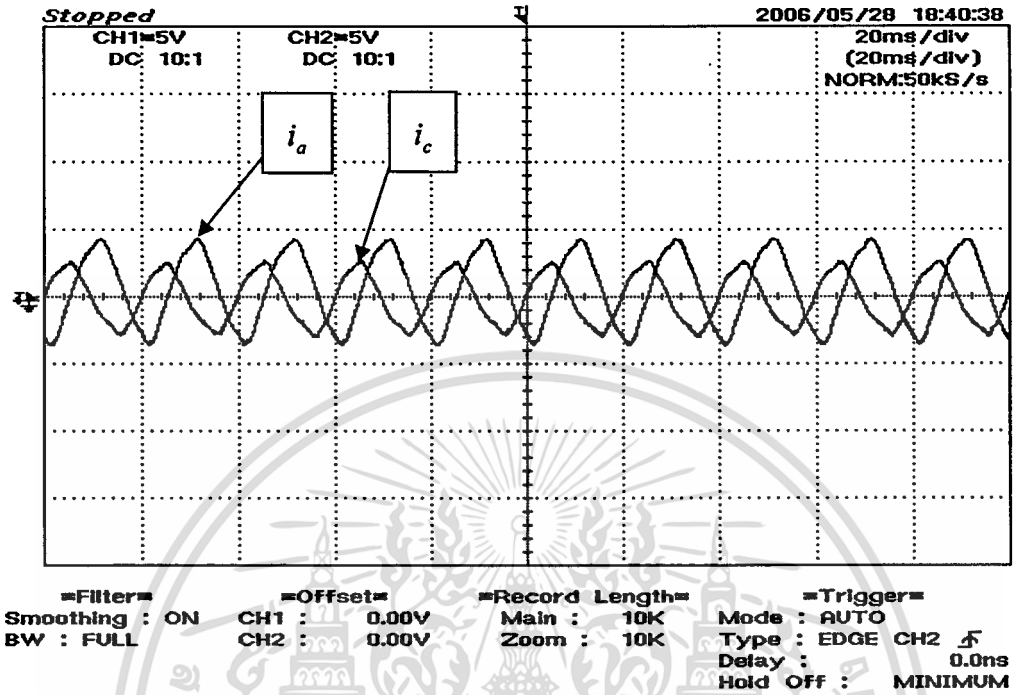
(ก) กระแส i_a และกระแส i_c (i_a เท่ากับ $2.65 A/div$)



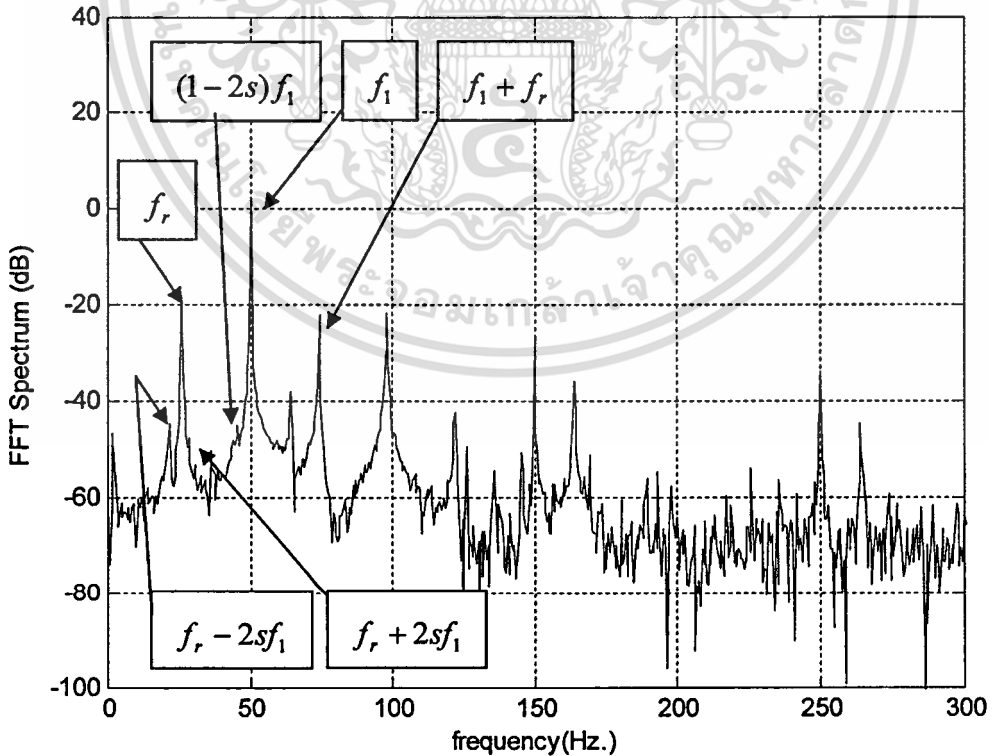
(ข) สเปกตรัมของกระแสเดเตอร์ i_a

เอกสารนี้เป็นเอกสาร รูปที่ 5.17 กระแส i_a ของมอเตอร์ขนาด 2 แรงม้าที่ภาระ 100% ระเบียบด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.5.2.3 แสดงผลสเปกตรัมของสัญญาณกระแสเตอร์เฟส α ที่ภาระโหลด 0%, 75% และ 100% ขณะมีการลัดรอบขดลวดสเตเตอร์



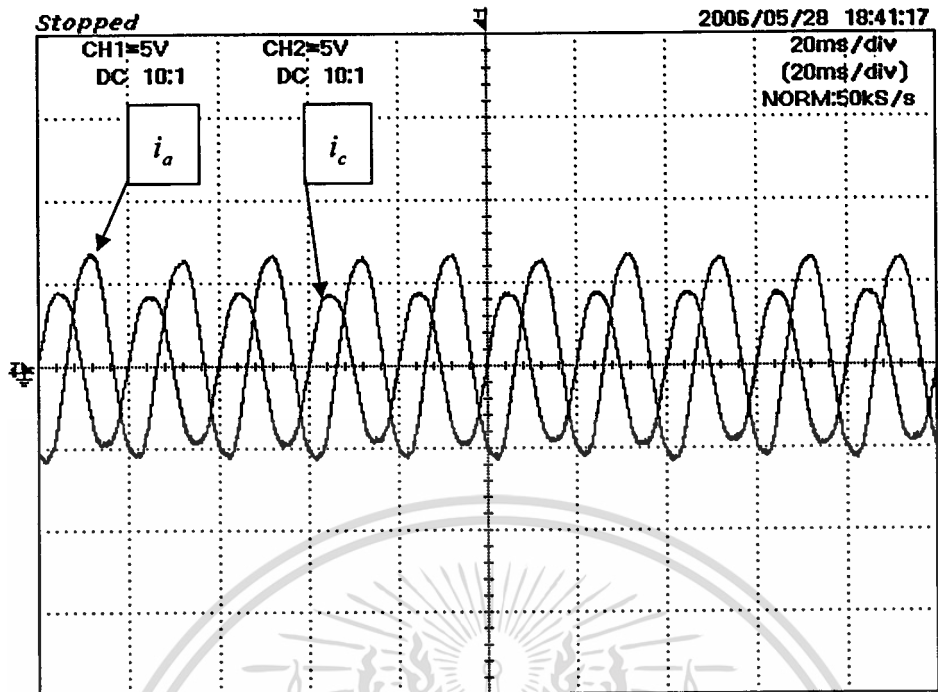
(ก) กระแส i_a และกระแส i_c (i_a เท่ากับ $1.56 A/div$)



(ข) สเปกตรัมของกระแสเตอร์ i_a

รูปที่ 5.18 กระแส i_a ของมอเตอร์ขนาด 2 แรงม้าที่ภาระไร้โหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันวิจัยเทคโนโลยีพลังงาน เพื่อผู้ดูแลระบบใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



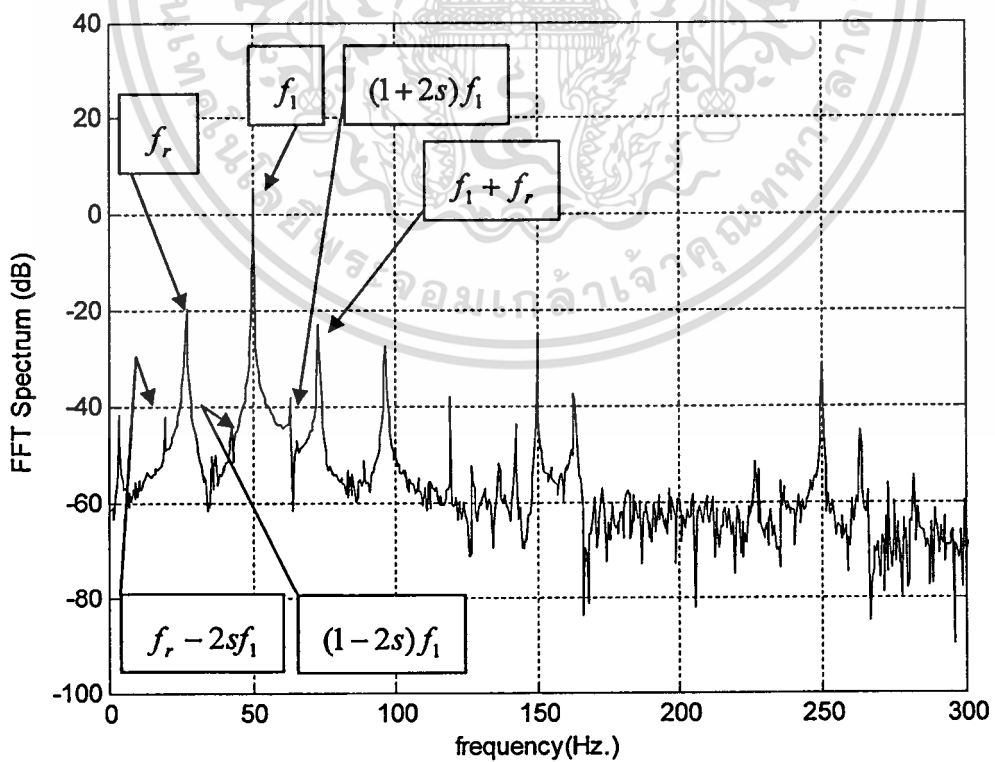
=Filter= Smoothing : ON BW : FULL

=Offset= CH1 : 0.00V CH2 : 0.00V

=Record Length= Main : 10K Zoom : 10K

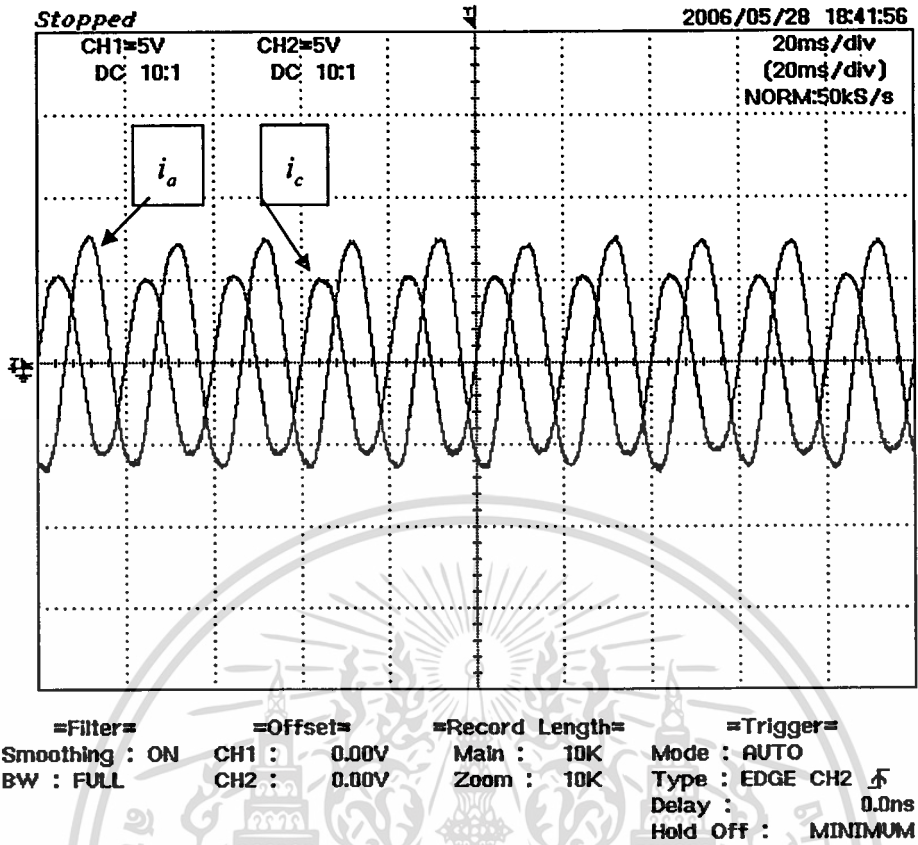
=Trigger= Mode : AUTO Type : EDGE CH2 f Delay : 0.0ns Hold Off : MINIMUM

(ก) กระแส i_a และกระแส i_c (i_a เท่ากับ $2.61 A/div$)

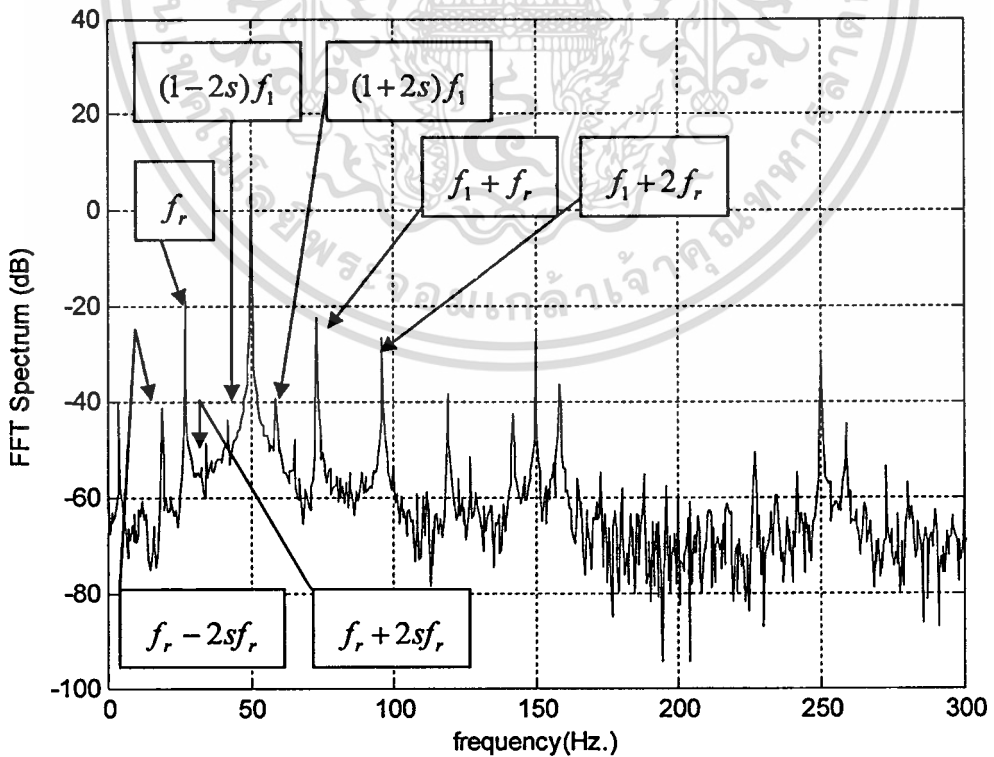


(ข) สเปกตรัมของกระแสสเตเตอร์ i_a

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่รูปที่ 5.19 กระแส i_a ของมอเตอร์ขนาด 2 แรงม้าที่ภาระ 75% ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) กระแส i_a และกระแส i_c (i_a เท่ากับ $2.92 A/div$)



(ข) สเปกตรัมของกระแสสเตเตอร์ i_a

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่รูปที่ 5.20 กระแส i_a ของมอเตอร์ขนาด 2 แรงม้าที่ภาระ 100% ระเบียบงานด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.6 สรุปผลจากสัญญาณสเปคตรัม

ผลที่ได้จากการทดลองพบว่าสัญญาณกระแสเตเตอร์ที่มีผลมาจากแท่งตัวนำโรเตอร์แตกหัก และสเปคตรัมฟอลต์ ที่เกิดจากการลัดรอบขดลวดสเตเตอร์ จะมีองค์ประกอบความถี่ไซน์แบนด์ที่ชัดเจนมากขึ้นตามการกระแสที่สูงขึ้นตามเปอร์เซ็นต์โหลดที่สูงขึ้นด้วย และเมื่อเทียบกับแท่งตัวนำโรเตอร์ปกติ จากผลของแหล่งจ่ายไม่สมดุลสเปคตรัมจะมีแอมพลิจูดที่สูงขึ้นเช่นกัน ทดลองการพิจารณาในโดเมนความถี่ผลที่ได้จากการทดลองนั้นจะเกิดไม่ครบทุกความถี่

สำหรับการสอนโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้วิธีการแพร่ค่าย้อนกลับในนี้ได้ใช้โปรแกรม Matlab เข้ามาช่วยในการสอนเพื่อหาค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบอัส ซึ่งใช้รูปแบบในการสอนโครงข่ายประสาทเทียมโดยมีรูปแบบอินพุตและสัญญาณที่ต้องการ จากการทดลองกับขนาดมอเตอร์ขนาด 2 แรงม้า 4 โพล 1390 รอบ/นาที ดังตารางที่ 5.1-5.5 และเขียนโปรแกรมไว้ดังภาคผนวก ข. จากการสอนฝึกโครงข่ายประสาทเทียมด้วยโปรแกรม Matlab โดยกำหนดค่าความผิดพลาด (Error) ของเอาต์พุตสำหรับการฝึกสอนให้มีค่าไม่เกิน 0.01 และค่าอัตราการเรียนรู้ (α) ไว้เท่ากับ 0.001 โดยฟังก์ชันการเร่งเร้าที่ใช้คือ “ ล็อกซิกมอยด์ ”

ตารางที่ 5.2 ผลสเปคตรัมของโรเตอร์ปกติที่ภาระโหลดต่าง ๆ ($V_a = V_b = V_c = 220V$.)

ลำดับที่	เปอร์เซ็นต์ โหลด	สเปคตรัมฟอลต์ (dB.)							
		fr	(1-2s)f1	f1	(1+2s)f1	f1+fr	f1+2fr	6fr	10fr
1	0	-19.30	0.00	5.00	0.00	-19.30	-27.10	-28.00	-28.70
2	5	-17.50	0.00	5.12	0.00	-19.10	-22.00	-26.58	-27.60
3	10	-15.30	0.00	5.23	0.00	-17.60	-20.36	-26.65	-27.40
4	15	-14.20	0.00	5.34	0.00	-15.00	-18.95	-26.81	-27.34
5	18	-13.16	0.00	5.50	0.00	-14.50	-19.00	-26.30	-27.00
6	20	-13.15	0.00	5.67	0.00	-14.61	-19.00	-26.00	-26.65
7	25	-13.13	0.00	5.81	0.00	-14.70	-19.10	-25.70	-26.82
8	30	-13.30	0.00	6.62	0.00	-14.71	-19.70	-25.50	-26.48
9	35	-13.17	0.00	6.71	0.00	-14.73	-19.90	-25.50	-26.31
10	40	-12.80	0.00	6.83	0.00	-15.61	-20.60	-25.53	-26.48

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.2 (ต่อ)

ลำดับที่	เปอร์เซ็นต์ โหลด	สเปกตรัมพอลต์ (dB.)							
		fr	(1-2s)f1	f1	(1+2s)f1	f1+fr	f1+2fr	6fr	10fr
11	45	-13.19	0.00	7.21	0.00	-15.73	-21.00	-25.55	-26.14
12	50	-13.20	0.00	7.33	0.00	-15.80	-21.50	-25.70	-26.57
13	55	-13.10	0.00	7.37	0.00	-15.92	-22.50	-25.70	-26.40
13	60	-12.80	0.00	7.41	0.00	-16.12	-23.00	-26.80	-27.76
15	63	-12.70	0.00	7.44	0.00	-16.56	-24.30	-27.50	-28.53
16	65	-13.13	0.00	7.49	0.00	-16.60	-25.42	-27.35	-28.53
17	70	-14.20	0.00	7.53	0.00	-16.69	-26.10	-28.00	-29.38
18	75	-14.40	0.00	7.65	0.00	-16.50	-26.72	-28.32	-29.12
19	80	-14.33	0.00	7.80	0.00	-16.72	-27.24	-28.50	-29.46
20	85	-13.80	0.00	8.10	0.00	-17.05	-27.64	-29.00	-29.98
21	90	-13.91	0.00	8.21	0.00	-17.13	-27.64	-30.05	-31.42
22	92	-13.48	0.00	8.40	0.00	-17.39	-27.70	-31.02	-32.45
23	95	-13.65	0.00	8.47	0.00	-17.92	-28.20	-31.50	-32.79
24	100	-14.02	0.00	8.51	0.00	-18.50	-29.00	-32.50	-33.39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.3 ผลสเปกตรัมของโรเตอร์ปกติทดสอบในสภาวะแรงดันไม่สมมาตร ที่ภาระโหลดต่าง ๆ

$$(V_a = V_b = 213V, V_c = 220V.)$$

ลำดับที่	เปอร์เซ็นต์ โหลด	สเปกตรัมพอลต์ (dB.)							
		fr	(1-2s)f1	f1	(1+2s)f1	f1+fr	f1+2fr	6fr	10fr
1	0	-29.80	0.00	5.34	0.00	-30.35	-33.50	-28.00	-25.66
2	5	-27.90	0.00	5.54	0.00	-29.60	-32.70	-28.47	-25.82
3	10	-26.30	0.00	5.76	0.00	-29.40	-32.40	-28.82	-25.99
4	15	-23.90	0.00	5.90	0.00	-28.90	-32.10	-29.00	-26.09
5	18	-23.20	0.00	6.20	0.00	-28.20	-31.50	-29.50	-26.30
6	20	-23.20	0.00	6.40	0.00	-27.20	-31.10	-29.62	-26.31
7	25	-22.50	0.00	6.80	0.00	-26.90	-30.80	-30.16	-26.44
8	30	-22.80	0.00	6.91	0.00	-26.50	-30.35	-30.86	-26.63
9	35	-22.30	0.00	7.05	0.00	-26.30	-30.12	-31.93	-26.74
10	40	-21.50	0.00	7.20	0.00	-26.10	-30.05	-31.96	-26.95
11	45	-22.10	0.00	7.34	0.00	-26.10	-29.85	-33.26	-27.05
12	50	-20.80	0.00	7.45	0.00	-26.20	-29.72	-32.82	-27.22
13	55	-20.10	0.00	7.55	0.00	-25.80	-29.45	-33.26	-27.38
13	60	-19.40	0.00	7.70	0.00	-25.83	-29.25	-33.26	-27.54
15	63	-18.80	0.00	7.73	0.00	-25.60	-29.08	-33.28	-27.68
16	65	-18.40	0.00	7.77	0.00	-25.10	-29.91	-34.24	-27.87
17	70	-18.10	0.00	7.84	0.00	-24.70	-28.70	-34.41	-28.04
18	75	-17.80	0.00	8.00	0.00	-24.40	-28.58	-35.30	-28.19
19	80	-17.40	0.00	8.00	0.00	-24.00	-28.40	-35.39	-28.29
20	85	-16.70	0.00	8.03	0.00	-24.10	-28.50	-35.74	-28.46
21	90	-16.43	0.00	8.04	0.00	-23.78	-28.40	-36.00	-28.61

ตารางที่ 5.3 (ต่อ)

ลำดับที่	เปอร์เซ็นต์ โหลด	สเปกตรัมพอลต์ (dB.)							
		fr	(1-2s)f1	f1	(1+2s)f1	f1+fr	f1+2fr	6fr	10fr
22	92	-16.20	0.00	8.11	0.00	-23.80	-28.58	-36.72	-28.65
23	95	-16.70	0.00	8.27	0.00	-23.57	-28.65	-37.50	-28.82
24	100	-16.60	0.00	8.79	0.00	-23.50	-28.75	-38.00	-29.00

ตารางที่ 5.4 ผลสเปกตรัมของโรเตอร์แตกหัก (broken bars) ที่ภาระโหลดต่าง ๆ

$$(V_a = V_b = V_c = 220V.)$$

ลำดับที่	เปอร์เซ็นต์ โหลด	สเปกตรัมพอลต์ (dB.)							
		fr	(1-2s)f1	f1	(1+2s)f1	f1+fr	f1+2fr	6fr	10fr
1	0	-17.35	-33.90	3.50	-35.50	-22.00	-50.00	-24.50	-37.00
2	5	-17.38	-33.90	3.80	-35.21	-22.23	-47.56	-24.30	-35.70
3	10	-17.39	-33.93	3.89	-35.08	-22.23	-46.50	-24.20	-35.00
4	15	-17.40	-34.18	4.11	-35.11	-22.28	-45.50	-24.10	-34.60
5	18	-17.42	-34.28	4.26	-35.16	-22.30	-44.60	-23.98	-33.80
6	20	-17.44	-34.35	4.43	-35.27	-22.40	-44.20	-23.77	-33.64
7	25	-17.45	-34.44	4.50	-35.43	-22.42	-42.30	-23.50	-33.60
8	30	-17.48	-34.50	4.63	-35.48	-22.56	-41.60	-23.32	-33.50
9	35	-17.49	-34.44	4.71	-35.52	-22.80	-41.33	-23.14	-33.35
10	40	-18.11	-34.50	4.84	-35.61	-22.42	-41.20	-23.02	-33.20
11	45	-18.46	-34.52	4.89	-35.74	-23.55	-40.86	-22.90	-33.20
12	50	-18.57	-34.42	4.92	-35.82	-23.75	-40.30	-22.78	-32.90
13	55	-19.13	-34.33	5.10	-35.85	-23.83	-39.60	-22.70	-32.70
14	60	-19.28	-34.42	5.28	-35.86	-24.20	-39.30	-22.65	-31.92

ตารางที่ 5.4 (ต่อ)

ลำดับที่	เปอร์เซ็นต์ โหลด	สเปกตรัมฟอลด์ (dB.)							
		fr	(1-2s)f1	f1	(1+2s)f1	f1+fr	f1+2fr	6fr	10fr
15	63	-19.35	-34.60	5.50	-35.89	-24.72	-38.40	-22.64	-31.52
16	65	-19.28	-34.60	5.71	-35.91	-24.84	-37.80	-22.66	-31.58
17	70	-19.43	-34.80	5.84	-35.91	-24.98	-36.40	-22.65	-31.40
18	75	-19.65	-35.20	6.03	-35.93	-25.00	-35.50	-22.67	-31.31
19	80	-19.72	-35.51	6.23	-35.94	-25.17	-35.51	-22.68	-31.34
20	85	-19.50	-36.00	6.38	-35.98	-25.21	-34.60	-22.67	-31.26
21	90	-19.57	-36.50	6.62	-36.00	-25.36	-34.90	-22.67	-31.09
22	92	-19.72	-37.00	6.85	-36.04	-25.38	-33.60	-22.65	-31.00
23	95	-20.14	-37.60	7.00	-36.10	-25.50	-33.10	-22.71	-31.09
24	100	-21.05	-39.10	7.13	-36.28	-26.00	-31.50	-22.76	-31.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.5 ผลสเปคตรัมของโรเตอร์แตกหัก (3 broken bars) ทดสอบในสภาวะแรงดันไม่สมมาตร (unbalance voltage) ที่ภาระโหลดต่าง ๆ ($V_a = V_b = 213V, V_c = 220V$.)

ลำดับที่	เปอร์เซ็นต์ โหลด	สเปคตรัมฟอลต์ (dB.)							
		fr	(1-2s)f1	f1	(1+2s)f1	f1+fr	f1+2fr	6fr	10fr
1	0	-25.56	-44.94	2.03	-43.50	-29.00	-53.00	-37.83	-45.40
2	5	-24.50	-42.60	2.24	-43.10	-27.90	-51.00	-38.70	-44.80
3	10	-23.45	-42.00	2.43	-43.10	-27.50	-49.50	-39.34	-44.35
4	15	-22.61	-41.20	2.61	-42.20	-27.10	-48.50	-39.83	-44.10
5	18	-22.26	-40.30	2.68	-41.10	-26.70	-47.00	-40.26	-43.60
6	20	-22.26	-39.40	2.95	-43.13	-26.00	-46.20	-40.49	-43.63
7	25	-22.09	-39.50	3.16	-40.70	-25.40	-45.70	-40.53	-43.66
8	30	-22.23	-39.10	3.53	-40.31	-25.00	-45.20	-40.68	-42.75
9	35	-22.27	-39.12	3.84	-40.71	-24.30	-44.70	-40.78	-43.77
10	40	-22.09	-38.60	4.01	-39.90	-23.90	-43.50	-40.94	-40.80
11	45	-21.74	-38.60	4.26	-39.50	-23.30	-43.20	-41.01	-40.79
12	50	-21.13	-38.40	4.37	-39.10	-22.75	-41.80	-41.20	-41.00
13	55	-20.70	-38.30	4.39	-39.10	-22.75	-41.10	-22.75	-38.80
13	60	-20.35	-20.35	4.41	-39.11	-22.78	-40.90	-22.74	-38.00
15	63	-20.00	-37.10	4.68	-38.90	-22.63	-39.60	-22.75	-36.75
16	65	-19.65	-36.50	5.09	-38.11	-22.50	-39.20	-22.50	-36.60
17	70	-19.65	-36.20	5.20	-38.00	-22.10	-39.23	-22.10	-36.20
18	75	-19.77	-36.50	5.60	-37.50	-21.90	-38.30	-21.90	-35.50
19	80	-19.48	-36.51	5.92	-36.30	-21.50	-37.00	-21.50	-35.10
20	85	-19.65	-36.80	6.56	-36.30	-21.10	-36.00	-21.10	-34.90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากสำนักพิมพ์
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.5 (ต่อ)

ลำดับที่	เปอร์เซ็นต์ โหลด	สเปกตรัมฟอลต์ (dB.)							
		fr	(1-2s)f1	f1	(1+2s)f1	f1+fr	f1+2fr	6fr	10fr
21	90	-19.48	-37.40	6.86	-36.00	-20.70	-33.90	-20.70	-34.10
22	92	-19.74	-37.10	7.20	-35.50	-20.10	-32.68	-41.68	-34.10
23	95	-19.91	-36.80	7.43	-35.10	-19.50	-32.40	-41.71	-33.90
24	100	-21.25	-36.50	7.60	-35.00	-19.30	-30.90	-41.68	-33.30

ตารางที่ 5.6 ผลสเปกตรัมของโรเตอร์แตกหัก (broken bars) ทดสอบในสภาวะลัดรอบขดลวดสเตเตอร์ (short turn winding) ที่ภาระโหลดต่าง ๆ

ลำดับที่	เปอร์เซ็นต์ โหลด	สเปกตรัมฟอลต์ (dB.)							
		เกิดจากการลัดรอบขดลวดสเตเตอร์ (short turn winding)				เกิดจากแท่งโรเตอร์แตกหัก (broken bar)			
		fr	fr-2sf1	fr+2sf1	6fr	(1-2s)f1	f1	(1+2s)f1	f1+fr
1	0	-25.50	-44.50	-48.50	-48.50	-47.50	-1.34	-40.15	-28.12
2	5	-24.40	-44.08	-48.23	-28.13	-46.20	-0.40	-41.00	-27.75
3	10	-23.70	-43.50	-48.08	-27.83	-44.90	0.44	-39.60	-28.03
4	15	-22.90	-43.00	-47.95	-27.73	-44.50	0.97	-40.40	-27.57
5	18	-23.10	-42.50	-47.81	-27.61	-42.70	1.95	-39.80	-27.75
6	20	-22.70	-42.50	-47.75	-27.40	-40.00	2.62	-38.40	-27.92
7	25	-22.80	-42.42	-47.62	-27.21	-39.40	3.32	-37.60	-27.66
8	30	-22.20	-42.39	-47.48	-27.23	-38.30	3.64	-36.60	-27.64
9	35	-21.80	-42.44	-47.46	-27.03	-37.30	4.10	-36.20	-27.23
10	40	-21.83	-42.43	-47.31	-26.74	-37.00	4.45	-35.70	-27.20
11	45	-21.60	-42.37	-47.16	-26.53	-37.50	4.83	-35.40	-27.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.6 (ต่อ)

ลำดับที่	เปอร์เซ็นต์ โหลด	สเปกตรัมฟอลต์ (dB.)							
		เกิดจากการลัดรอบขดลวดสเตเตอร์ (short turn winding)				เกิดจากแท่งโรเตอร์แตกหัก (broken bar)			
		fr	fr-2sf1	fr+2sf1	6fr	(1-2s)f1	f1	(1+2s)f1	f1+fr
12	50	-21.50	-42.35	-47.01	-26.43	-38.45	4.92	-33.65	-26.50
13	55	-20.70	-42.33	-46.96	-26.40	-46.20	5.15	-44.15	-26.50
13	60	-20.90	-42.20	-46.93	-26.29	-47.90	5.25	-41.00	-26.53
15	63	-20.30	-42.14	-46.89	-26.11	-46.20	5.50	-40.60	-25.84
16	65	-20.70	-42.20	-46.81	-26.04	-47.45	5.62	-40.40	-25.32
17	70	-20.50	-42.23	-46.76	-25.77	-44.50	5.76	-39.80	-25.00
18	75	-20.30	-42.18	-46.67	-25.66	-46.70	6.00	-39.75	-24.28
19	80	-19.90	-42.15	-46.56	-25.56	-47.00	6.21	-38.60	-24.28
20	85	-19.70	-42.15	-46.41	-25.45	-46.41	6.50	-39.60	-23.84
21	90	-19.70	-42.20	-46.30	-25.38	-46.30	6.90	-38.65	-23.15
22	92	-19.00	-42.19	-46.13	-25.35	-45.60	7.12	-38.70	-22.63
23	95	-18.40	-42.22	-46.00	-25.17	-43.70	7.22	-39.40	-21.59
24	100	-17.50	-42.20	-45.05	-24.98	-42.50	7.49	-33.65	-19.35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.7 เงื่อนไขข้อมูลในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม

- 5.7.1 ทดสอบข้อมูลของโรเตอร์ปกติจ่ายโหลดที่สภาวะต่าง ๆ ดังตารางที่ 5.7
- 5.7.2 ทดสอบข้อมูลของโรเตอร์ปกติ ทดสอบในสภาวะแรงดันแหล่งจ่ายไม่สมมาตร (unbalance voltage) ที่ภาระโหลดต่าง ๆ ดังตารางที่ 5.8
- 5.7.3 ทดสอบข้อมูลของข้อมูลจากแท่งตัวนำโรเตอร์แตกหัก (broken bar) ที่ภาระโหลดต่าง ๆ ดังตารางที่ 5.9
- 5.7.4 ทดสอบข้อมูลของข้อมูลจากแท่งตัวนำโรเตอร์แตกหัก (broken bar) โดยทดสอบในสภาวะ แรงดันแหล่งจ่ายไม่สมมาตร(unbalance voltage) ที่ภาระโหลดต่าง ๆ ดังตารางที่ 5.10
- 5.7.5 ทดสอบข้อมูลจากแท่งตัวนำโรเตอร์แตกหัก (broken bar) โดยทดสอบในขณะที่มีการลัดรอบขดลวดสเตเตอร์ (short turn) ที่ภาระโหลดต่าง ๆ ดังตารางที่ 5.11
- 5.7.6 ทดสอบข้อมูลของโรเตอร์ปกติกับข้อมูลจากแท่งตัวนำโรเตอร์แตกหัก (broken bar) ที่ภาระโหลดต่าง ๆ ดังตารางที่ 5.12
- 5.7.7 ทดสอบข้อมูลของโรเตอร์ปกติ กับข้อมูลจากแท่งตัวนำโรเตอร์แตกหัก (broken bar) โดยทดสอบ ในสภาวะแรงดันแหล่งจ่ายไม่สมมาตร (unbalance voltage) ที่ภาระโหลดต่าง ๆ ดังตารางที่ 5.13
- 5.7.8 ทดสอบข้อมูลของโรเตอร์ปกติกับข้อมูลจากแท่งตัวนำโรเตอร์แตกหัก (broken bar) โดยทดสอบในขณะที่มีการลัดรอบขดลวดสเตเตอร์ (short turn) ที่ภาระโหลดต่าง ๆ ดังตารางที่ 5.14
- 5.7.9 ทดสอบข้อมูลของแท่งตัวนำโรเตอร์แตกหัก (broken bar) ; ข้อมูลของจากแท่งตัวนำโรเตอร์แตกหัก (broken bar) ในขณะที่มีการลัดรอบขดลวดสเตเตอร์ (short turn) ; ข้อมูลของแท่งตัวนำโรเตอร์แตกหัก (broken bar) ในขณะแรงดันแหล่งจ่ายไม่สมมาตร (unbalance voltage) ที่ภาระโหลดต่าง ๆ ดังตารางที่ 5.15

กำหนดสัญลักษณ์

ให้ m = ตัวนำโรเตอร์ปกติ (normal bar)

m_{uv} = ตัวนำโรเตอร์ปกติ (normal bar) ทดสอบในสภาวะ แรงดันแหล่งจ่ายไม่สมมาตร(unbalance voltage)

bb = แท่งตัวนำโรเตอร์แตกหัก (broken bar)

bb_{uv} = แท่งตัวนำโรเตอร์แตกหัก (broken bar) ทดสอบในสภาวะ แรงดันแหล่งจ่ายไม่สมมาตร(unbalance voltage)

$bbst$ = แท่งตัวนำโรเตอร์แตกหัก (broken bar) ทดสอบในในขณะที่มีการลัดรอบขดลวดสเตเตอร์ (short turn)

ตารางที่ 5.7 การกำหนดเอาต์พุตและความหมายของโครงข่ายประสาทเทียม

สถานะของแท่งตัวนำโรเตอร์	Target Output
1. m, rnuv, mst	0.400
2. bb	0.300
3. bbst	1.300
4. bbuv	3.300

5.7.1 ทดสอบข้อมูลของโรเตอร์ปกติจ่ายโหลดที่ภาระโหลดต่าง ๆ

ตารางที่ 5.8 เปรียบเทียบผลระหว่าง Target Output กับ Actual Output และค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (Error)

ลำดับ	ข้อมูลด้านเอาต์พุต	Target Output	Actual Output	% Error
1	m_5	0.400	0.390	2.511
2	m_15	0.400	0.390	2.511
3	m_18	0.400	0.390	2.485
4	m_25	0.400	0.398	0.477
5	m_35	0.400	0.417	4.168
6	m_45	0.400	0.361	*10.588
7	m_55	0.400	0.386	3.439
8	m_63	0.400	0.403	0.818
9	m_65	0.400	0.404	1.161
10	m_75	0.400	0.407	1.864
11	m_85	0.400	0.408	1.912
12	m_92	0.400	0.408	2.104
13	m_95	0.400	0.409	2.200

หมายเหตุ เนื่องจากค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน = *10.588 เนื่องจาก pattern ที่นำมาทดสอบไม่ได้มีการ Add. ไว้ใน Training Pattern และ Pattern มีความแตกต่างจาก Pattern ที่ใช้ Training มากทำให้เกิดค่าความผิดพลาดสูง

จำนวนข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม = 11 ชุด

จำนวนข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบโครงข่ายประสาทเทียม = 13 ชุด

จำนวนรอบในการคำนวณ = 34,452 รอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ระยะเวลาในการฝึกสอน = 14.449 นาที

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Max. Error	=	10.588	เปอร์เซ็นต์
Min. Error	=	0.477	เปอร์เซ็นต์
Avg. Error	=	2.788	เปอร์เซ็นต์

5.7.2 ทดสอบข้อมูลของโรเตอร์ปกติ ทดสอบในสภาวะแรงดันแหล่งจ่ายไม่สมมาตร (unbalance voltage) ที่ภาระโหลดต่าง ๆ ($V_a = V_b = 213V., V_c = 220V.$)

ตารางที่ 5.9 เปรียบเทียบผลระหว่าง Target Output กับ Actual Output และค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (Error)

ลำดับ	ข้อมูลด้านเอาต์พุต	Target Output	Actual Output	% Error
1	rmuv_5	0.400	0.407	1.768
2	rmuv_15	0.400	0.407	1.768
3	rmuv_18	0.400	0.407	1.768
4	rmuv_25	0.400	0.407	1.864
5	rmuv_35	0.400	0.435	*8.193
6	rmuv_45	0.400	0.391	2.301
7	rmuv_55	0.400	0.393	1.781
8	rmuv_63	0.400	0.422	5.235
9	rmuv_65	0.400	0.390	2.354
10	rmuv_75	0.400	0.390	2.537
11	rmuv_85	0.400	0.394	1.368
12	rmuv_92	0.400	0.401	0.274
13	rmuv_95	0.400	0.401	0.398

หมายเหตุ เนื่องจากค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน = *8.1937 เนื่องจาก pattern ที่นำมาทดสอบไม่ได้มีการ Add. ไว้ใน Training Pattern และ Pattern มีความแตกต่างจาก Pattern ที่ใช้ Training มากทำให้เกิดค่าความผิดพลาดสูง

จำนวนข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม	=	11	ชุด
จำนวนข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบโครงข่ายประสาทเทียม	=	13	ชุด
จำนวนรอบในการคำนวณ	=	33,672	รอบ
ระยะเวลาในการฝึกสอน	=	13.759	นาที
Max. Error	=	8.193	เปอร์เซ็นต์
Min. Error	=	0.273	เปอร์เซ็นต์
Avg. Error	=	2.439	เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ในเชิงพาณิชย์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.7.3 ทดสอบข้อมูลของข้อมูลจากแท่งตัวนำโรเตอร์แตกหัก (broken bar) โดยทดสอบในสถานะจ่ายโหลดที่ภาระโหลดต่าง ๆ

ตารางที่ 5.10 เปรียบเทียบผลระหว่าง Target Output กับ Actual Output และค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (Error)

ลำดับ	ข้อมูลด้านเอาท์พุท	Target Output	Actual Output	% Error
1	bb_5	0.300	0.290	3.434
2	bb_15	0.300	0.290	3.434
3	bb_18	0.300	0.290	3.434
4	bb_25	0.300	0.290	3.434
5	bb_35	0.300	0.307	2.569
6	bb_45	0.300	0.307	2.569
7	bb_55	0.300	0.307	2.569
8	bb_63	0.300	0.307	2.569
9	bb_65	0.300	0.307	2.569
10	bb_75	0.300	0.307	2.569
11	bb_85	0.300	0.307	2.569
12	bb_92	0.300	0.307	2.569
13	bb_95	0.300	0.307	2.569

จำนวนข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม	= 11	ชุด
จำนวนข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบโครงข่ายประสาทเทียม	= 13	ชุด
จำนวนรอบในการคำนวณ	= 35,103	รอบ
ระยะเวลาในการฝึกสอน	= 12.430	นาที
Max. Error	= 3.434	เปอร์เซ็นต์
Min. Error	= 2.569	เปอร์เซ็นต์
Avg. Error	= 2.835	เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.7.4 ทดสอบข้อมูลของข้อมูลจากแท่งตัวนำโรเตอร์แตกหัก (broken bar) โดยทดสอบในสภาวะ แรงดันแหล่งจ่ายไม่สมมาตร(unbalance voltage) ที่ภาระโหลดต่าง ๆ

ตารางที่ 5.11 เปรียบเทียบผลระหว่าง Target Output กับ Actual Output และค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (Error)

ลำดับ	ข้อมูลด้านเอาท์พุท	Target Output	Actual Output	% Error
1	bbuv_5	3.300	3.495	5.579
2	bbuv_15	3.300	3.166	4.232
3	bbuv_18	3.300	3.175	3.937
4	bbuv_25	3.300	3.180	3.773
5	bbuv_35	3.300	3.180	3.773
6	bbuv_45	3.300	3.136	5.229
7	bbuv_55	3.300	3.133	5.330
8	bbuv_63	3.300	3.133	5.330
9	bbuv_65	3.300	3.134	5.297
10	bbuv_75	3.300	3.581	*7.862
11	bbuv_85	3.300	3.185	3.604
12	bbuv_92	3.300	3.178	3.816
13	bbuv_95	3.300	3.178	3.816

หมายเหตุ เนื่องจากค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน = *7.862 เนื่องจาก pattern ที่นำมาทดสอบไม่ได้มีการ Add. ไว้ใน Training Pattern และ Pattern มีความแตกต่างจาก Pattern ที่ใช้ Training มากทำให้เกิดค่าความผิดพลาดสูง

จำนวนข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอน โครงข่ายประสาทเทียม	= 11	ชุด
จำนวนข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบ โครงข่ายประสาทเทียม	= 13	ชุด
จำนวนรอบในการคำนวณ	= 36,572	รอบ
ระยะเวลาในการฝึกสอน	= 16.193	นาที
Max. Error	= 7.862	เปอร์เซ็นต์
Min. Error	= 3.604	เปอร์เซ็นต์
Avg. Error	= 4.737	เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.7.5 ทดสอบข้อมูลจากแท่งตัวนำโรเตอร์แตกหัก (broken bar) โดยทดสอบในขณะที่การลัดรอบขดลวดสเตเตอร์ (short turn) ที่ภาระโหลดต่าง ๆ ดังตารางที่ 5.12

ตารางที่ 5.12 เปรียบเทียบผลระหว่าง Target Output กับ Actual Output และค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (Error)

ลำดับ	ข้อมูลด้านเอาท์พุท	Target Output	Actual Output	% Error
1	bbst_5	1.300	1.290	0.767
2	bbst_15	1.300	1.290	0.279
3	bbst_18	1.300	1.296	0.277
4	bbst_25	1.300	1.279	1.633
5	bbst_35	1.300	1.304	0.490
6	bbst_45	1.300	1.304	0.375
7	bbst_55	1.300	1.304	0.375
8	bbst_63	1.300	1.304	0.375
9	bbst_65	1.300	1.304	0.375
10	bbst_75	1.300	1.304	0.375
11	bbst_85	1.300	1.484	*12.410
12	bbst_92	1.300	1.313	0.990
13	bbst_95	1.300	1.316	1.216

หมายเหตุ เนื่องจากค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน = *12.410 เนื่องจาก pattern ที่นำมาทดสอบไม่ได้มีการ Add. ไว้ใน Training Pattern และ Pattern มีความแตกต่างจาก Pattern ที่ใช้ Training มากทำให้เกิดค่าความผิดพลาดสูง

จำนวนข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม	=	11	ชุด
จำนวนข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบโครงข่ายประสาทเทียม	=	13	ชุด
จำนวนรอบในการคำนวณ	=	34,214	รอบ
ระยะเวลาในการฝึกสอน	=	9.095	นาที
Max. Error	=	12.410	เปอร์เซ็นต์
Min. Error	=	0.277	เปอร์เซ็นต์
Avg. Error	=	1.534	เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.7.6 ทดสอบข้อมูลของโรเตอร์ปกติกับข้อมูลจากแท่งตัวนำโรเตอร์แตกหัก (broken bar) ที่ภาระโหลดต่าง ๆ ดังตารางที่ 5.13

ตารางที่ 5.13 เปรียบเทียบผลระหว่าง Target Output กับ Actual Output และค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (Error)

ลำดับ	ข้อมูลด้านเอาท์พุท	Target Output	Actual output	% Error
1	m_5	0.400	0.390	2.511
2	m_15	0.400	0.390	2.511
3	m_18	0.400	0.390	2.511
4	m_25	0.400	0.390	2.511
5	m_35	0.400	0.391	2.275
6	m_45	0.400	0.383	4.438
7	m_55	0.400	0.381	4.766
8	m_63	0.400	0.426	6.169
9	m_65	0.400	0.426	6.169
10	m_75	0.400	0.426	6.169
11	m_85	0.400	0.407	1.719
12	m_92	0.400	0.407	1.768
13	m_95	0.400	0.407	1.792
14	bb_5	0.300	0.319	5.956
15	bb_15	0.300	0.307	2.407
16	bb_18	0.300	0.307	2.534
17	bb_25	0.300	0.302	0.793
18	bb_35	0.300	0.294	1.763
19	bb_45	0.300	0.294	1.763
20	bb_55	0.300	0.294	1.763
21	bb_63	0.300	0.295	1.454
22	bb_65	0.300	0.297	1.010
23	bb_75	0.300	0.275	8.774
24	bb_85	0.300	0.340	11.920
25	bb_92	0.300	0.265	13.036
26	bb_95	0.300	0.281	6.647

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการใช้งานเพื่อวัตถุประสงค์อื่นใดโดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำนวนข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม	=	22	ชุด
จำนวนข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบโครงข่ายประสาทเทียม	=	26	ชุด
จำนวนรอบในการคำนวณ	=	419,739	รอบ
ระยะเวลาในการฝึกสอน	=	69.401	นาที
Max. Error	=	13.036	เปอร์เซ็นต์
Min. Error	=	0.793	เปอร์เซ็นต์
Avg. Error	=	4.043	เปอร์เซ็นต์

5.7.7 ทดสอบข้อมูลของโรเตอร์ปกติกับข้อมูลจากแท่งตัวนำโรเตอร์แตกหัก (broken bar) โดยทดสอบในสภาวะแรงดันแหล่งจ่ายไม่สมมาตร (unbalance voltage) ที่ภาระโหลดต่าง ๆ ดังตารางที่ 5.14

ตารางที่ 5.14 เปรียบเทียบผลระหว่าง Target Output กับ Actual Output และค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (Error)

ลำดับ	ข้อมูลด้านเอาต์พุต	Target Output	Actual Output	% Error
1	rnuv_5	0.400	0.404	1.088
2	rnuv_15	0.400	0.404	1.088
3	rnuv_18	0.400	0.404	1.088
4	rnuv_25	0.400	0.404	1.088
5	rnuv_35	0.400	0.404	1.088
6	rnuv_45	0.400	0.390	2.511
7	rnuv_55	0.400	0.390	2.511
8	rnuv_63	0.400	0.391	2.511
9	rnuv_65	0.400	0.391	2.118
10	rnuv_75	0.400	0.463	*13.644
11	rnuv_85	0.400	0.404	1.088
12	rnuv_92	0.400	0.394	1.291
13	rnuv_95	0.400	0.387	3.145
14	bbuv_5	3.300	3.297	0.081
15	bbuv_15	3.300	3.307	0.214
16	bbuv_18	3.300	3.305	0.175
17	bbuv_25	3.300	3.306	0.190

เอกสารนี้สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.14 (ต่อ)

ลำดับ	ข้อมูลด้านเอาต์พุต	Target Output	Actual Output	% Error
18	bbuv_35	3.300	3.287	0.368
19	bbuv_45	3.300	3.313	0.395
20	bbuv_55	3.300	3.276	0.717
21	bbuv_63	3.300	3.295	0.127
22	bbuv_65	3.300	3.295	0.145
23	bbuv_75	3.300	3.296	0.106
24	bbuv_85	3.300	3.298	0.057
25	bbuv_92	3.300	3.190	3.419
26	bbuv_95	3.300	3.247	1.629

หมายเหตุ เนื่องจากค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน *13.644 เนื่องจาก pattern ที่นำมาทดสอบไม่ได้มีการ Add. ไว้ใน Training Pattern และ Pattern มีความแตกต่างจาก Pattern ที่ใช้ Training มากทำให้เกิดค่าความผิดพลาดสูง

จำนวนข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม	=	22	ชุด
จำนวนข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบโครงข่ายประสาทเทียม	=	26	ชุด
จำนวนรอบในการคำนวณ	=	382,744	รอบ
ระยะเวลาในการฝึกสอน	=	55.499	นาที
Max. Error	=	13.644	เปอร์เซ็นต์
Min. Error	=	0.057	เปอร์เซ็นต์
Avg. Error	=	1.611	เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.7.8 ทดสอบข้อมูลของโรเตอร์ปกคิขณะมีการลัดรอบ กับข้อมูลจากแท่งตัวนำโรเตอร์แตกหัก (broken bar) โดยทดสอบในในขณะที่มีการลัดรอบขดลวดสเตเตอร์(short turn) ที่ภาวะโหลดต่าง ๆ ดังตารางที่ 5.15

ตารางที่ 5.15 เปรียบเทียบผลระหว่าง Target Output กับ Actual Output และค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (Error)

ลำดับ	ข้อมูลด้านเอาท์พุท	Target Output	Actual Output	% Error
1	rnst_5	0.400	0.392	2.041
2	rnst_15	0.400	0.405	1.235
3	rnst_18	0.400	0.409	2.204
4	rnst_25	0.400	0.421	0.249
5	rnst_35	0.400	0.380	5.263
6	rnst_45	0.400	0.353	*13.314
7	rnst_55	0.400	0.391	2.302
8	rnst_63	0.400	0.390	2.301
9	rnst_65	0.400	0.390	2.301
10	rnst_75	0.400	0.390	2.301
11	rnst_85	0.400	0.390	2.301
12	rnst_92	0.400	0.390	2.301
13	rnst_95	0.400	0.390	2.301
14	bbst_5	1.300	1.311	0.839
15	bbst_15	1.300	1.409	7.735
16	bbst_18	1.300	1.332	2.402
17	bbst_25	1.300	1.308	0.611
18	bbst_35	1.300	1.308	0.611
19	bbst_45	1.300	1.308	0.611
20	bbst_55	1.300	1.308	0.611
21	bbst_63	1.300	1.308	0.611

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.15 (ต่อ)

ลำดับ	ข้อมูลด้านเอาต์พุต	Target Output	Actual Output	% Error
22	bbst_65	1.300	1.308	0.611
23	bbst_75	1.300	1.308	0.611
24	bbst_85	1.300	1.206	*7.784
25	bbst_92	1.300	1.302	0.207
26	bbst_95	1.300	1.325	1.887

หมายเหตุ เนื่องจากค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน *13.314 เนื่องจาก pattern ที่นำมาทดสอบ ไม่ได้มีการ Add. ไว้ใน Training Pattern และ Pattern มีความแตกต่างจาก Pattern ที่ใช้ Training มากทำให้เกิดค่าความผิดพลาดสูง

จำนวนข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม	=	22	ชุด
จำนวนข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบโครงข่ายประสาทเทียม	=	26	ชุด
จำนวนรอบในการคำนวณ	=	392,269	รอบ
ระยะเวลาในการฝึกสอน	=	64.916	นาที
Max. Error	=	13.314	เปอร์เซ็นต์
Min. Error	=	0.207	เปอร์เซ็นต์
Avg. Error	=	2.521	เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.7.9 ทดสอบข้อมูลของแท่งตัวนำโรเตอร์แตกหัก (broken bar) ข้อมูลของจากแท่งตัวนำโรเตอร์แตกหัก (broken bar) ในขณะที่การลัดรอบขดลวดสเตเตอร์ (short turn) ข้อมูลของแท่งตัวนำโรเตอร์แตกหัก (broken bar) ในขณะที่แรงดันแหล่งจ่ายไม่สมมาตร (unbalance voltage) ที่ภาระโหลดต่าง ๆ ดังตารางที่ 5.16

ตารางที่ 5.16 เปรียบเทียบผลระหว่าง Target Output กับ Actual Output และค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (Error)

ลำดับ	ข้อมูลด้านเอาต์พุต	Target Output	Actual Output	% Error
1	bb_5	0.300	0.290	3.444
2	bb_15	0.3000	0.290	3.444
3	bb_18	0.3000	0.290	3.434
4	bb_25	0.3000	0.290	3.438
5	bb_35	0.3000	0.306	2.098
6	bb_45	0.3000	0.306	2.098
7	bb_55	0.3000	0.306	2.098
8	bb_63	0.3000	0.306	2.098
9	bb_65	0.3000	0.306	2.098
10	bb_75	0.3000	0.306	2.098
11	bb_85	0.3000	0.306	2.098
12	bb_92	0.3000	0.307	2.480
13	bb_95	0.3000	0.307	2.489
14	bbst_5	1.3000	1.290	0.775
15	bbst_15	1.3000	1.290	0.767
16	bbst_18	1.3000	1.290	0.752
17	bbst_25	1.3000	1.290	0.752
18	bbst_35	1.3000	1.290	0.752
19	bbst_45	1.3000	1.290	0.744
20	bbst_55	1.3000	1.304	0.337
21	bbst_63	1.3000	1.304	0.367
22	bbst_65	1.3000	1.304	0.367
23	bbst_75	1.3000	1.304	0.367
24	bbst_85	1.3000	1.303	0.284

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.16 (ต่อ)

ลำดับ	ข้อมูลด้านเอาท์พุท	Target Output	Actual Output	% Error
25	bbst_92	1.300	1.303	0.261
26	bbst_95	1.300	1.303	0.238
27	bbuv_5	3.300	3.166	4.209
28	bbuv_15	3.300	3.166	4.213
29	bbuv_18	3.300	3.166	4.213
30	bbuv_25	3.300	3.166	4.213
31	bbuv_35	3.300	3.166	4.211
32	bbuv_45	3.300	3.166	4.201
33	bbuv_55	3.300	3.166	*4.216
34	bbuv_63	3.300	3.185	3.581
35	bbuv_65	3.300	3.189	3.481
36	bbuv_75	3.300	3.194	3.300
37	bbuv_85	3.300	3.194	3.312
38	bbuv_92	3.300	3.195	3.263
39	bbuv_95	3.300	3.195	3.260

จำนวนข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม	=	33	ชุด
จำนวนข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบโครงข่ายประสาทเทียม	=	39	ชุด
จำนวนรอบในการคำนวณ	=	692,211	รอบ
ระยะเวลาในการฝึกสอน	=	138.210	นาที
Max. Error	=	4.216	เปอร์เซ็นต์
Min. Error	=	0.238	เปอร์เซ็นต์
Avg. Error	=	2.303	เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.8 สรุปผลการวิเคราะห์จากโครงข่ายประสาทเทียม

จากเงื่อนไขในการทดสอบกับแท่งตัวนำโรเตอร์ ประกอบด้วยโรเตอร์ปกติ (rotor normal) กับโรเตอร์แตกหัก (broken bar) ขอสรุปผลจากการคำนวณจากโครงข่ายประสาทเทียม โดยกำหนดให้ อัตราการเรียนรู้ (α) เท่ากับ 0.001 และค่าความความคลาดเคลื่อน (Error เท่ากับ 0.01)

ตารางที่ 5.17 สรุปผลการวิเคราะห์โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม

เงื่อนไข	จำนวนข้อมูลการฝึกสอน	จำนวนข้อมูลในการทดสอบ	เวลาการฝึกสอน (นาที)	Min. Error (%)	Max. Error (%)	Avg. Error (%)	จำนวนรอบคำนวณ
1. rn	11	13	14.449	0.477	10.588	2.788	34,452
2. rnuv	11	13	13.759	0.273	8.193	2.439	33,672
3. bb	11	13	12.430	2.569	3.434	2.835	35,103
4. bbuv	11	13	24.193	3.604	7.862	4.737	35,572
5. bbst	11	13	9.095	0.277	12.410	1.534	34,214
6. rn + bb	22	26	69.401	0.793	13.036	4.043	419,739
7. rnuv + bbuv	22	26	55.499	0.057	13.644	1.611	382,744
8. rnst + bbst	22	26	64.916	0.207	13.314	2.521	392,269
9. bb+bbst +bbuv	39	33	138.210	0.238	4.216	2.303	692,211

โครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนโดยใช้ข้อมูลการฝึกสอนสามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

5.8.1 ข้อมูลของโรเตอร์ปกติ (normal bar) รวมทั้งหมด 24 ข้อมูล แบ่งออกเป็นข้อมูลในการฝึกสอน 11 ข้อมูล และข้อมูลในการทดสอบ 13 ข้อมูล สามารถคำนวณได้ค่าผิดพลาดต่ำสุด (Min Error) เท่ากับ 0.477% ค่าผิดพลาดสูงสุด 10.588% และค่าผิดพลาดเฉลี่ย 2.788%

5.8.2 ข้อมูลของโรเตอร์ปกติ (normal bar) ทดสอบในสภาวะแรงดันแหล่งจ่ายไม่สมดุล (unbalance voltage) รวมทั้งหมด 24 ข้อมูล แบ่งออกเป็นข้อมูลในการฝึกสอน 11 ข้อมูล ค่าผิดพลาดเฉลี่ย 2.303% ค่าผิดพลาดสูงสุด 4.216% และค่าผิดพลาดต่ำสุด 0.238% อย่างไรก็ตาม ค่าผิดพลาดที่ต่ำเกินไปอาจบ่งชี้ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูล และข้อมูลในการทดสอบ 13 ข้อมูล สามารถคำนวณได้ค่าผิดพลาดต่ำสุด (Min Error) เท่ากับ 0.273 % ค่าผิดพลาดสูงสุด 8.193 % และค่าผิดพลาดเฉลี่ย 2.439 %

5.8.3 ข้อมูลของโรเตอร์แตกหัก (broken bar) ทดสอบในสภาวะจ่ายโหลดตามพิกัด รวมทั้งหมด 24 ข้อมูล แบ่งออกเป็นข้อมูลในการฝึกสอน 11 ข้อมูล และข้อมูลในการทดสอบ 13 ข้อมูล สามารถคำนวณได้ค่าผิดพลาดต่ำสุด (Min Error) เท่ากับ 2.569 % ค่าผิดพลาดสูงสุด 3.434 % และค่าผิดพลาดเฉลี่ย 2.835 %

5.8.4 ข้อมูลของโรเตอร์แตกหัก (broken bar) ทดสอบในสภาวะแรงดันแหล่งจ่ายไม่ สมมาตร (unbalance voltage) โดยจ่ายโหลดตามพิกัด รวมทั้งหมด 24 ข้อมูล แบ่งออกเป็น ข้อมูลในการฝึกสอน 11 ข้อมูล และข้อมูลในการทดสอบ 13 ข้อมูล สามารถคำนวณได้ค่า ผิดพลาดต่ำสุด (Min Error) เท่ากับ 3.604 % ค่าผิดพลาดสูงสุด 7.862 % และค่าผิดพลาดเฉลี่ย 4.737 %

5.8.5 ข้อมูลของโรเตอร์แตกหัก (broken bar) ทดสอบในสภาวะมีการลัดรอบขดลวดส เตเตอร์เฟส a โดยจ่ายโหลดตามพิกัด รวมทั้งหมด 24 ข้อมูล แบ่งออกเป็นข้อมูลในการฝึกสอน 11 ข้อมูล และข้อมูลในการทดสอบ 13 ข้อมูล สามารถคำนวณได้ค่าผิดพลาดต่ำสุด (Min Error) เท่ากับ 0.277 % ค่าผิดพลาดสูงสุด 12.410 % และค่าผิดพลาดเฉลี่ย 1.534 %

5.8.6 ข้อมูลของโรเตอร์ปกติ (normal bar) และข้อมูลของแท่งตัวนำโรเตอร์แตกหัก (broken bar) รวมทั้งหมด 24 ข้อมูล แบ่งออกเป็นข้อมูลในการฝึกสอน 22 ข้อมูล และ ข้อมูลในการทดสอบ 26 ข้อมูล สามารถคำนวณได้ค่าผิดพลาดต่ำสุด (Min Error) เท่ากับ 0.793 % ค่าผิดพลาดสูงสุด 13.036 % และค่าผิดพลาดเฉลี่ย 4.043 %

5.8.7 ข้อมูลของโรเตอร์ปกติ (normal bar) ทดสอบขณะแรงดันไม่สมมาตร และ ข้อมูลของแท่งตัวนำโรเตอร์แตกหัก (broken bar) ทดสอบขณะแรงดันไม่สมมาตร เช่นกัน รวมทั้งหมด 24 ข้อมูล แบ่งออกเป็นข้อมูลในการฝึกสอน 22 ข้อมูล และข้อมูลในการทดสอบ 26 ข้อมูล สามารถคำนวณได้ค่าผิดพลาดต่ำสุด (Min Error) เท่ากับ 0.057 % ค่าผิดพลาดสูงสุด 13.644 % และค่าผิดพลาดเฉลี่ย 1.611 %

5.8.8 ข้อมูลของโรเตอร์ปกติ (normal bar) ทดสอบขณะมีการลัดรอบขดลวดสเตเตอร์ (short turn) และข้อมูลของแท่งตัวนำโรเตอร์แตกหัก (broken bar) ทดสอบขณะมีการลัดรอบ ขดลวดสเตเตอร์ (short turn) เช่นกัน รวมทั้งหมด 24 ข้อมูล แบ่งออกเป็นข้อมูลในการ ฝึกสอน 22 ข้อมูล และข้อมูลในการทดสอบ 26 ข้อมูล สามารถคำนวณได้ค่าผิดพลาดต่ำสุด (Min Error) เท่ากับ 0.057 % ค่าผิดพลาดสูงสุด 4.784 % และค่าผิดพลาดเฉลี่ย 1.611 %

5.8.9 ข้อมูลของโรเตอร์ปกติ (normal bar) ทดสอบขณะมีการลัดรอบขดลวดสเตเตอร์ (short turn) และข้อมูลของแท่งตัวนำโรเตอร์แตกหัก (broken bar) ทดสอบขณะมีการลัดรอบ ขดลวดสเตเตอร์ (short turn) เช่นกัน รวมทั้งหมด 24 ข้อมูล แบ่งออกเป็นข้อมูลในการ

ฝึกสอน 22 ข้อมูล และข้อมูลในการทดสอบ 26 ข้อมูล สามารถคำนวณได้ค่าผิดพลาดต่ำสุด (Min Error) เท่ากับ 0.207 % ค่าผิดพลาดสูงสุด 4.216 % และค่าผิดพลาดเฉลี่ย 2.303 %

5.9 สรุปผลการวิเคราะห์จากกลุ่มข้อมูลการทดสอบ

โดยสามารถสรุปผลจากประเภทของกลุ่มข้อมูลที่ฝึกสอนกับ โครงข่ายประสาทเทียม โดยจะแบ่งออกเป็น 3 กรณีคือ

5.9.1 กลุ่มข้อมูลชุดที่ 1

- ข้อมูลสเปคตรัมจากการจ่ายโหลดของโรเตอร์ปกติ (rotor normal :m) ที่พิกัดโหลดต่าง ๆ
- ข้อมูลสเปคตรัมจากการจ่ายโหลดของโรเตอร์ปกติ(rotor normal :m) ขณะเกิดแรงดันไม่สมมาตร(unbalance voltage) ที่พิกัดโหลดต่าง ๆ :muv
- ข้อมูลสเปคตรัมจากการจ่ายโหลดของตัวนำโรเตอร์แตกหัก (broken bar:bb) ที่พิกัดโหลดต่าง ๆ
- ข้อมูลสเปคตรัมจากการจ่ายโหลดของตัวนำโรเตอร์แตกหัก (broken bar:bb) ในขณะที่เกิดการลัดรอบขดลวดสเตเตอร์ (short turn:st) ที่พิกัดโหลดต่าง ๆ :bbst

ตารางที่ 5.18 สรุปผลการวิเคราะห์ข้อมูลชุดที่ 1

Case	Min. Error (%)	Max. Error (%)
1. m	0.477	10.588
2. muv	0.273	0.8193
3. bb	2.569	3.434
4. bbuv	3.604	7.862
5. bbst	0.277	12.410

5.9.2 กลุ่มข้อมูลชุดที่ 2

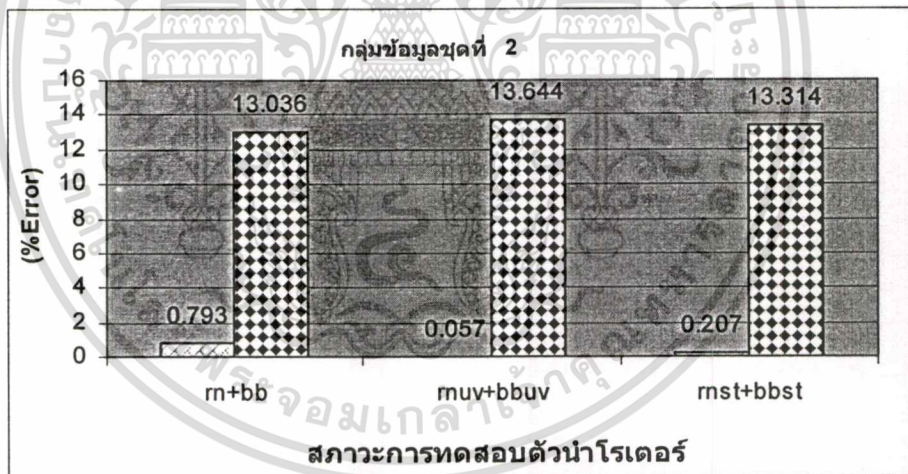
- ข้อมูลสเปคตรัมจากการจ่ายโหลดของโรเตอร์ปกติ (rotor normal :m) ที่พิกัดโหลดต่าง ๆ กับข้อมูลสเปคตรัมจากการจ่ายโหลดของตัวนำโรเตอร์แตกหัก (broken bar:bb) ที่พิกัดโหลดต่าง ๆ :m+bb
- ข้อมูลสเปคตรัมจากการจ่ายโหลดของโรเตอร์ปกติ(rotor normal :m) ขณะเกิดแรงดันไม่สมมาตร(unbalance voltage) กับข้อมูลสเปคตรัมจากการจ่ายโหลดของตัวนำโรเตอร์

แตกหัก (broken bar:bb) ขณะเกิดแรงดันไม่สมมาตร(unbalance voltage) ที่พิกัดโหลดต่าง ๆ :rnuv+bbuv

- ข้อมูลสเปคตรัมจากการจ่ายโหลดของโรเตอร์ปกติ(rotor normal :rn) ในขณะที่เกิดการลัดรอบขดลวดสเตเตอร์ (short turn:st) ที่พิกัดโหลดต่าง ๆ ข้อมูลสเปคตรัมจากการจ่ายโหลดของตัวนำโรเตอร์แตกหัก (broken bar:bb) ในขณะที่เกิดการลัดรอบขดลวดสเตเตอร์ (short turn:st) ที่พิกัดโหลดต่าง ๆ :rnst + bbst

ตารางที่ 5.19 สรุปผลการวิเคราะห์ข้อมูลชุดที่ 2

case	Min. Error (%)	Max. Error (%)
6. rn+bb	0.793	13.036
7. rnuv+bbuv	0.057	13.644
8. rnst+bbst	0.207	13.314



รูปที่ 5.22 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลชุดที่ 2

5.9.3 กลุ่มข้อมูลชุดที่ 3

- ข้อมูลของ ตัวนำโรเตอร์แตกหัก (broken bar:bb) ในขณะที่เกิดการลัดรอบขดลวดสเตเตอร์ (short turn:st) ที่ภาระโหลดต่าง ๆ ข้อมูลสเปคตรัมจากการจ่ายโหลดของตัวนำโรเตอร์แตกหัก (broken bar:bb) ที่ภาระโหลดต่าง ๆ และข้อมูลสเปคตรัมจากการจ่ายโหลดของตัวนำโรเตอร์แตกหัก (broken bar:bb) ขณะเกิดแรงดันไม่สมมาตร (unbalance voltage) ที่ภาระโหลดต่าง ๆ :bbst+bb+bbuv

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.20 สรุปผลการวิเคราะห์ข้อมูลชุดที่ 3

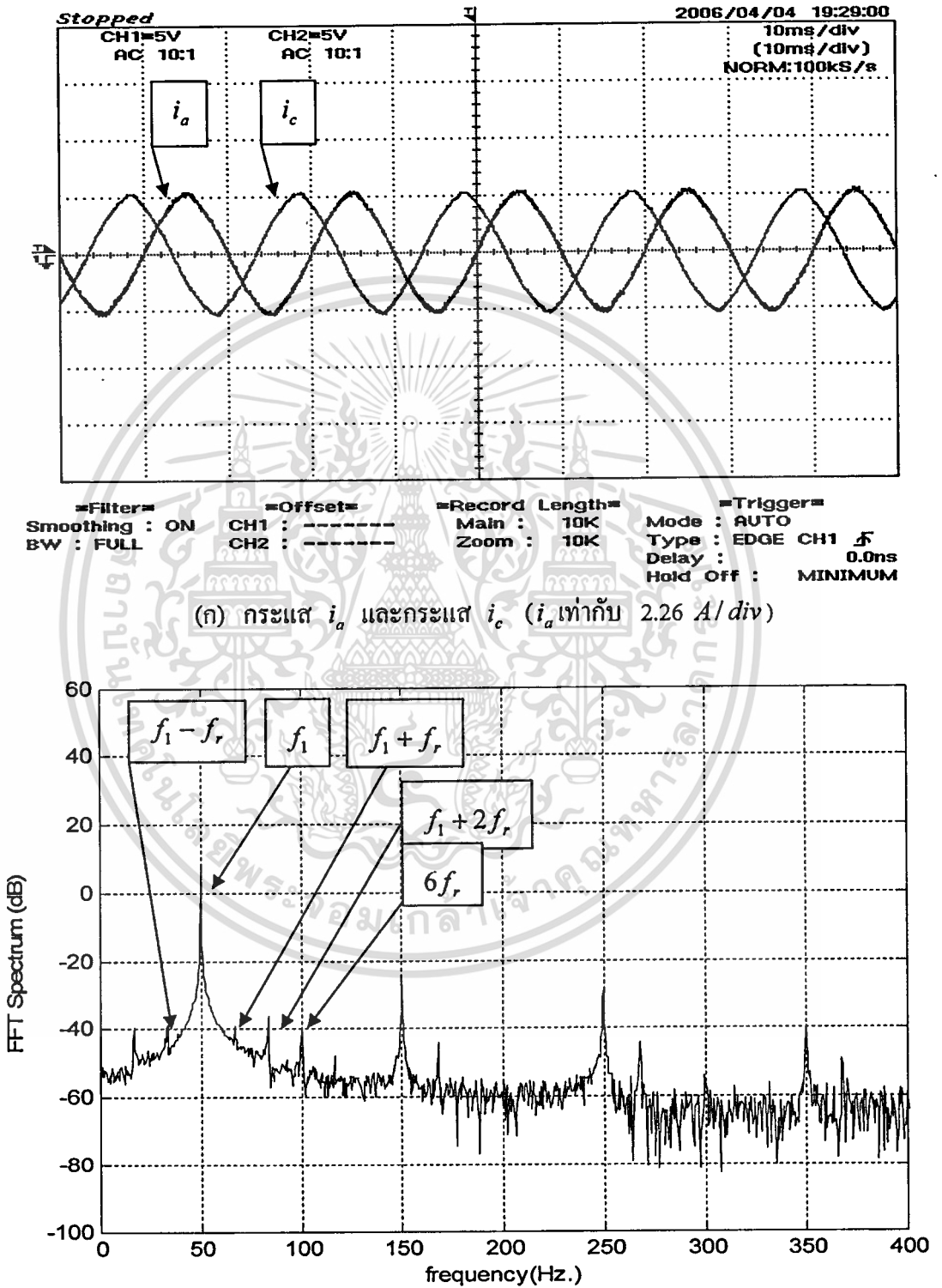
case	Min. Error(%)	Max. Error(%)
bbst+bb+bbuv	0.238	4.216



รูปที่ 5.23 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลชุดที่ 3

5.10 ผลการทดลองขนาดมอเตอร์ 3 แรงม้า 6 โพล

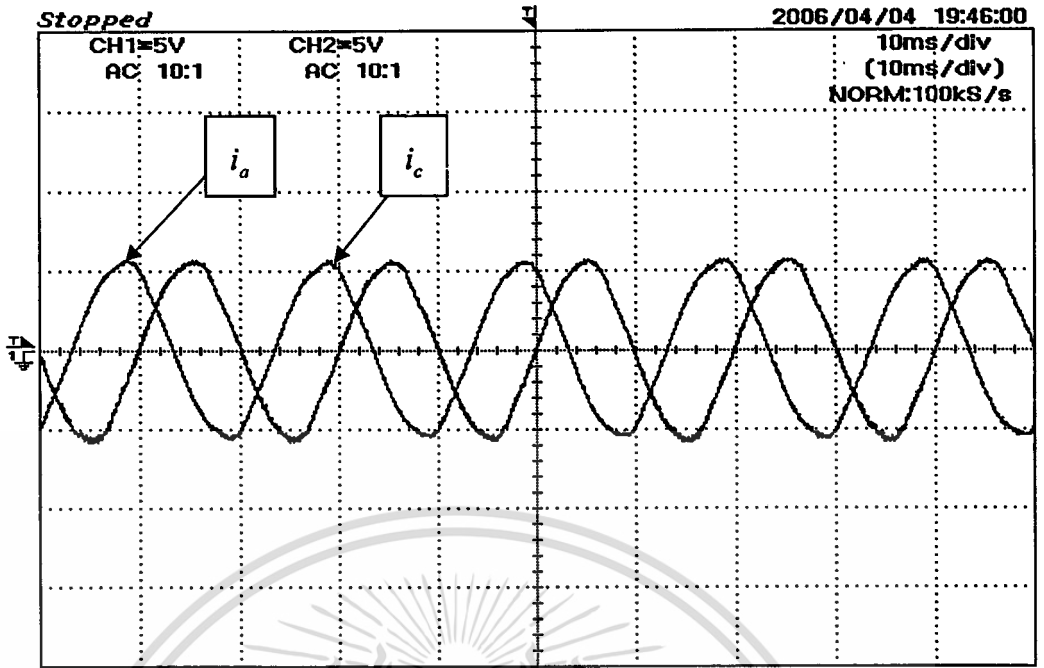
โรเตอร์ปกติ



(ก) กระแส i_a และกระแส i_c (i_a เท่ากับ 2.26 A/div)

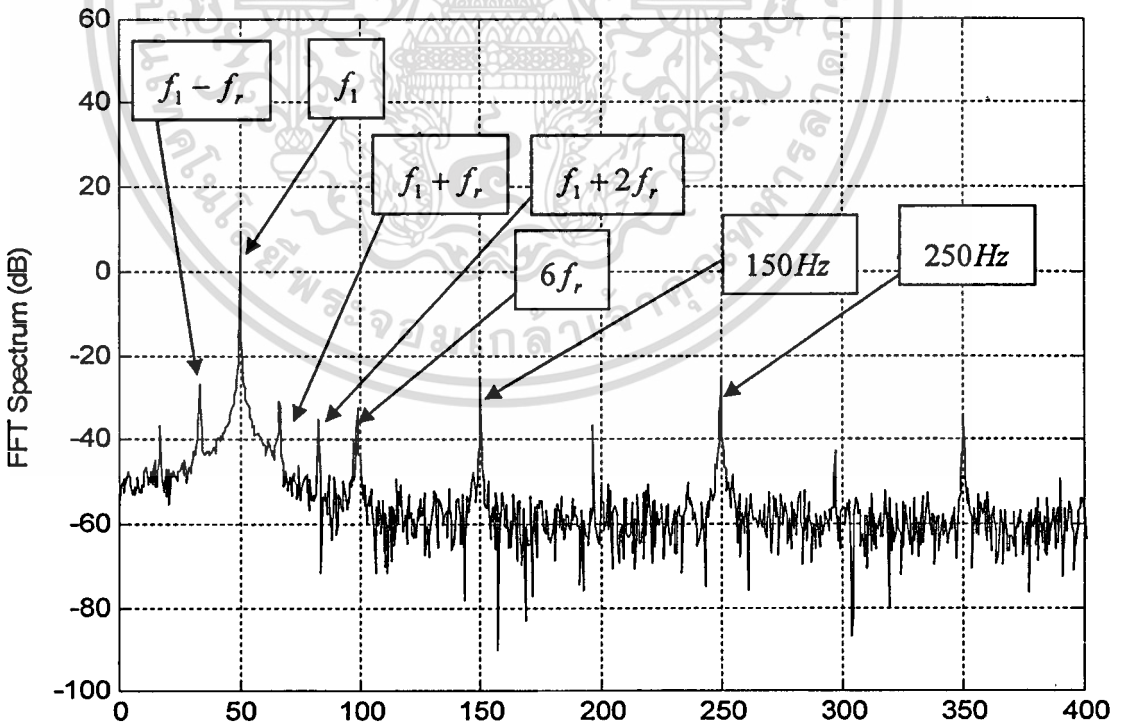
รูปที่ 5.24 กระแส i_o ของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้าที่ภาระไร้อโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



=Filter= Smoothing : ON BW : FULL
 =Offset= CH1 : ----- CH2 : -----
 =Record Length= Main : 10K Zoom : 10K
 =Trigger= Mode : AUTO Type : EDGE CH1 ∇ Delay : 0.0ns Hold OFF : MINIMUM

(ก) กระแส i_a และกระแส i_c (i_a เท่ากับ 3.25 A/div)



รูปที่ 5.25 กระแส i_a ของมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้าที่ภาระโหลด 100%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.10.1 สรุปผลการวิเคราะห์จากข้อมูลมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า 6 โทขนาดมอเตอร์ 3 แรงม้า 6 โทล

ตารางที่ 5.21 ผลสเปกตรัมของโรเตอร์ปกติจ่ายโหลดที่ภาระโหลดต่าง ๆ

ลำดับที่	เปอร์เซ็นต์ โหลด	สเปกตรัมฟอลต์ (dB.)							
		f1-fr	f1	(1+2s)f1	f1+fr	f1+2fr	6fr	150Hz	250Hz
1	0	-38.05	8.89	0.00	-38.75	-37.55	-39.16	-23.50	-31.40
2	5	-37.10	8.89	0.00	-38.75	-37.47	-38.00	-23.63	-30.40
3	10	-37.04	8.71	0.00	-38.75	-37.36	-37.50	-23.72	-30.80
4	15	-37.01	8.76	0.00	-38.00	-37.34	-37.21	-23.77	-30.40
5	18	-36.00	8.65	0.00	-38.00	-37.34	-36.75	-23.81	-30.40
6	20	-35.60	8.60	0.00	-37.70	-37.34	-36.61	-23.87	-30.00
7	25	-35.40	8.48	0.00	-37.50	-37.32	-36.30	-23.92	-29.90
8	30	-35.30	8.40	0.00	-37.50	-37.32	-35.36	-24.01	-29.90
9	35	-34.70	8.37	0.00	-37.70	-37.28	-34.71	-24.02	-29.70
10	40	-33.90	8.26	0.00	-37.50	-37.27	-34.30	-24.05	-29.90
11	45	-33.87	8.20	0.00	-37.70	-37.26	-33.60	-24.08	-29.70
12	50	-33.50	8.15	0.00	-37.70	-37.19	-32.91	-24.13	-29.20
13	55	-33.41	8.00	0.00	-38.00	-37.19	-32.70	-24.15	-29.00
13	60	-33.21	8.03	0.00	-37.70	-37.15	-32.41	-24.18	-28.80
15	63	-32.80	7.87	0.00	-37.30	-37.11	-31.80	-24.18	-29.20
16	65	-32.10	7.75	0.00	-36.80	-37.11	-31.50	-24.20	-28.50
17	70	-32.00	7.64	0.00	-36.40	-37.07	-31.56	-24.20	-28.50
18	75	-31.70	7.53	0.00	-35.70	-37.03	-30.70	-24.24	-28.30
19	80	-31.10	7.47	0.00	-35.20	-37.02	-29.70	-24.26	-28.10
20	85	-30.70	7.30	0.00	-35.00	-36.96	-29.00	-24.29	-27.60
21	90	-30.61	7.20	0.00	-35.00	-36.90	-28.20	-24.35	-27.20

ตารางที่ 5.21 (ต่อ)

ลำดับที่	เปอร์เซ็นต์ โหลด	สเปกตรัมฟอลด์ (dB.)							
		f1-fr	f1	(1+2s)f1	f1+fr	f1+2fr	6fr	150Hz	250Hz
22	92	-29.90	7.00	0.00	-33.60	-36.86	-27.32	-24.42	-26.90
23	95	-29.31	6.91	0.00	-33.20	-36.82	-26.20	-24.52	-25.60
24	100	-27.35	6.54	0.00	-31.75	-36.65	-23.64	-24.63	-22.68

ตารางที่ 5.22 ผลสเปกตรัมของโรเตอร์แตกหัก (broken bars) ที่ภาระโหลดต่าง ๆ

ลำดับที่	เปอร์เซ็นต์ โหลด	สเปกตรัมฟอลด์ (dB.)							
		f1-fr	f1	(1+2s)f1	f1+fr	f1+2fr	6fr	150Hz	250Hz
1	0	-31.50	9.89	-39.50	-37.50	-41.55	-33.03	-34.40	-24.45
2	5	-31.14	9.89	-39.00	-37.50	-41.55	-33.13	-34.40	-24.45
3	10	-31.22	9.72	-38.72	-36.70	-40.70	-33.19	-34.76	-24.71
4	15	-31.11	9.65	-38.54	-36.60	-40.50	-33.21	-34.94	-24.77
5	18	-31.08	9.68	-38.30	-36.50	-40.40	-33.26	-35.26	-24.77
6	20	-31.07	9.68	-38.23	-36.30	-40.70	-33.31	-35.26	-24.64
7	25	-31.04	9.60	-38.17	-36.40	-40.70	-33.35	-35.32	-24.90
8	30	-31.22	9.65	-37.78	-36.30	-40.50	-33.38	-35.13	-24.77
9	35	-31.19	9.60	-37.50	-36.40	-40.70	-33.40	-35.39	-24.77
10	40	-31.07	9.51	-37.00	-36.00	-41.00	-33.43	-35.26	-24.71
11	45	-30.61	9.41	-36.65	-36.20	-40.70	-33.45	-35.32	-24.83
12	50	-30.30	9.51	-36.56	-35.50	-40.50	-33.50	-35.39	-24.83
13	55	-30.25	9.51	-36.47	-35.10	-40.10	-33.54	-35.32	-24.96
14	60	-30.00	9.38	-36.23	-34.60	-39.60	-33.59	-35.39	-25.09

ตารางที่ 5.22 (ต่อ)

ลำดับที่	เปอร์เซ็นต์ โหลด	สเปกตรัมฟอลต์ (dB.)							
		f1-fr	f1	(1+2s)f1	f1+fr	f1+2fr	6fr	150Hz	250Hz
15	63	-29.90	9.17	-36.22	-34.50	-38.70	-33.63	-35.32	-25.40
16	65	-29.66	8.86	-36.45	-34.00	-39.00	-33.68	-35.45	-25.40
17	70	-29.17	8.66	-36.34	-34.00	-39.20	-33.74	-35.39	-25.47
18	75	-28.76	8.42	-36.35	-33.70	-38.60	-33.79	-35.51	-25.78
19	80	-28.35	8.22	-36.34	-33.40	-38.40	-33.84	-35.45	-25.78
20	85	-28.10	7.91	-36.30	-33.30	-38.30	-33.88	-35.58	-26.16
21	90	-27.61	7.57	-36.31	-32.80	-38.30	-33.95	-35.45	-26.60
22	92	-27.00	9.89	-35.53	-37.50	-37.70	-34.06	-34.40	-24.45
23	95	-26.54	7.20	-36.31	-32.00	-37.70	-34.09	-35.83	-26.86
24	100	-26.05	6.65	-34.45	-30.05	-37.50	-34.23	-36.36	-27.55

ตารางที่ 5.23 เปรียบเทียบผลระหว่าง Target Output กับ Actual Output และค่าเปอร์เซ็นต์
ความคลาดเคลื่อน (Error)

ลำดับ	ข้อมูลด้านเอาท์พุท	Target Output	Actual Output	% Error
1	m_5	0.400	0.390	2.564
2	m_15	0.400	0.406	1.478
3	m_18	0.400	0.426	6.103
4	m_25	0.400	0.392	2.041
5	m_35	0.400	0.409	2.200
6	m_45	0.400	0.406	1.478
7	m_55	0.400	0.419	4.534
8	m_63	0.400	0.409	2.200

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.23 (ต่อ)

ลำดับ	ข้อมูลด้านเอาต์พุต	Target Output	Actual Output	% Error
9	rn_65	0.400	0.409	2.200
10	rn_75	0.400	0.393	1.891
11	rn_85	0.400	0.408	1.961
12	rn_92	0.400	0.409	2.200
13	rn_95	0.400	0.409	2.200
14	bb_5	0.300	0.307	2.280
15	bb_15	0.300	0.307	2.280
16	bb_18	0.300	0.307	2.280
17	bb_25	0.300	0.307	2.280
18	bb_35	0.300	0.308	2.592
19	bb_45	0.300	0.319	5.953
20	bb_55	0.300	0.268	*11.940
21	bb_63	0.300	0.309	2.913
22	bb_65	0.300	0.295	1.695
23	bb_75	0.300	0.289	3.806
24	bb_85	0.300	0.290	3.448
25	bb_92	0.300	0.290	3.448
26	bb_95	0.300	0.290	3.448

หมายเหตุ เนื่องจากค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน *11.940 เนื่องจาก pattern ที่นำมาทดสอบ ไม่ได้มีการ Add. ไว้ใน Training Pattern และ Pattern มีความแตกต่างจาก Pattern ที่ใช้ Training มากทำให้เกิดค่าความผิดพลาดสูง

จำนวนข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม	=	22	ชุด
จำนวนข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบโครงข่ายประสาทเทียม	=	26	ชุด
จำนวนรอบในการคำนวณ	=	592,841	รอบ
ระยะเวลาในการฝึกสอน	=	64.284	นาที
Max. Error	=	11.940	เปอร์เซ็นต์
Min. Error	=	1.478	เปอร์เซ็นต์
Avg. Error	=	3.131	เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.24 เปรียบเทียบผลระหว่าง Target Output กับ Actual Output และค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (Error)

case	Min. Error(%)	Max. Error(%)
rn+bb	1.478	11.940



รูปที่ 5.28 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ค่าความคลาดเคลื่อนของโรเตอร์ปกติกับโรเตอร์แตกหัก

บทที่ 6

สรุปและข้อเสนอแนะ

เมื่อทำการศึกษาในการหาความผิดปกติของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสโดยพิจารณาจากองค์ประกอบการเกิดสเปกตรัมพอลต์ ในตำแหน่งต่าง ๆ ทั้งในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ของแต่ละชนิดที่เกิดขึ้นกับมอเตอร์ซึ่งประมวลผลด้วยเทคนิคออฟไลน์โดยใช้โปรแกรม Matlab ให้ผลเป็นที่น่าพอใจในการทดสอบ ได้แก่ ในกรณีมอเตอร์ปกติ เมื่อแรงดันที่แหล่งจ่ายไม่สมดุล และเมื่อเกิดการลัดรอบของขดลวดสเตเตอร์และตัวโรเตอร์ที่เกิดความบกพร่อง (broken bar) และทำการทดสอบเมื่อแรงดันที่แหล่งจ่ายไม่สมดุล และเมื่อเกิดการลัดรอบของขดลวดสเตเตอร์ ในการทดลองโดยการตรวจจับสัญญาณกระแสสเตเตอร์เพียงเฟส α เฟสเดียว และนำสัญญาณมาแตกสเปกตรัม (เดซิเบล) เพื่อหาความสัมพันธ์ และนำข้อมูลมาทำการฝึกสอนให้กับโครงข่ายประสาทเทียม โดยกำหนดให้มีอัลกอริทึมเป็นแบบ Backpropagation ในโปรแกรม Matlab ในการใช้โปรแกรมนั้นสะดวกในการวิเคราะห์ กล่าวคือ การพิจารณาคุณลักษณะการเกิดสเปกตรัมพอลต์แต่ละชนิด เพื่อให้ผลการวิเคราะห์แม่นยำขึ้นจึงทำการทดลองกับมอเตอร์ 2 ขนาด คือ มอเตอร์เหนี่ยวนำ 2 แรงม้า 4 โพล และ 3 แรงม้า 6 โพล ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวสามารถสรุป และมีข้อเสนอแนะดังต่อไปนี้

6.1 สรุปผลการวิจัย

6.1.1 ในสภาวะมอเตอร์ปกติพบว่า องค์ประกอบสเปกตรัมพอลต์เมื่อพิจารณาจากรูปคลื่นจะมีลักษณะของการกระเพื่อมที่ไม่มากนัก ที่ภาระโหลดต่ำ ๆ และภาระที่โหลด 100 เปอร์เซ็นต์ ที่ตำแหน่งความถี่มูลฐานเท่ากับ 8.60 dB. (ส่วนค่า สลิปมีค่าเท่ากับ 6 เปอร์เซ็นต์)

6.1.2 ที่สภาวะแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายไม่สมดุลพบว่า รูปคลื่นของกระแสอาร์เอ็มเอส มีการกระเพื่อมมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับแหล่งจ่ายแบบสมดุล ส่วนขนาดนั้นจะเพิ่มขึ้นเมื่อมอเตอร์มีภาระมากขึ้นเช่นเดียวกับกรณีของมอเตอร์ปกติ ส่วนค่าแอมพลิจูดที่ตำแหน่งความถี่มูลฐาน ที่โหลด 100 เปอร์เซ็นต์ โรเตอร์ปกติเท่ากับ 8.76 dB. และแท่งตัวนำโรเตอร์แตกหักเท่ากับ 7.60 dB. (ส่วนค่า สลิปมีค่าเท่ากับ 6 เปอร์เซ็นต์)

6.1.3 การทดสอบที่สภาวะการลัดรอบของขดลวดสเตเตอร์พบว่า ค่าแอมพลิจูดสเปกตรัมพอลต์ (dB.) จะมีการกระเพื่อมมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับมอเตอร์ปกติ ส่วนขนาดนั้นจะเพิ่มขึ้นเมื่อมอเตอร์มีภาระมากขึ้นเช่นเดียวกับมอเตอร์ปกติ

ในการพิจารณาสเปกตรัมของการลัดรอบ พบว่า จะเพิ่มขึ้นตามจำนวนการลัดรอบของขดลวดสเตเตอร์ซึ่งมี 2 ลักษณะด้วยกันคือ พิจารณาจาก สเปกตรัมที่เกิดในโรเตอร์ปกติ และ

โดยสเปคตรัมลักษณะนี้จะเห็นเด่นชัดในกรณีมอเตอร์มีภาระ อย่างไรก็ตาม ตำแหน่งการเกิดสเปคตรัม นั้น บางความถี่จะไม่เกิดให้เห็นเด่นชัด ทั้งนี้เนื่องจากเฟคเตอร์ของขดลวดอาจมีผลไปลดหรือกำจัด ฮาร์โมนิกส์บางตัวของสนามแม่เหล็กซึ่งส่งผลให้แอมพลิจูดของสเปคตรัมนั้นมีความผิดเพี้ยนไป

6.1.4 การทดสอบกับมอเตอร์ 2 ขนาดคือ 2 แรงม้า 4 โพล และ 3 แรงม้า 6 โพล การ พิจารณาจากสเปคตรัมนั้นมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้าจะเห็นเด่นชัดมากกว่ามอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า ซึ่งในบางความถี่ สเปคตรัมฟอลต์ของมอเตอร์ขนาด 2 แรงม้าจะมีขนาดน้อยมากทำให้ยากแก่ การตรวจจับ คือการวิเคราะห์สเปคตรัมการเกิดแท่งตัวนำโรเตอร์แตกหัก (broken bar) เป็นต้น

6.2 ข้อเสนอแนะ

6.2.1 สำหรับงานวิจัยต่อไปควรจะใช้ Digital Signal Processor (DSP.) เพื่อพัฒนาการ วิเคราะห์ในลักษณะออนไลน์ (On-line) เพื่อตรวจสอบความผิดปกติของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

6.2.2 ใช้เทคนิคอื่นในการแปลงไปยังโดเมนความถี่เพื่อลดข้อจำกัดของเทคนิค FFT เช่น ในเรื่องของจำนวนข้อมูลที่จำเป็นต้องพิจารณาให้ครบถ้วนเวลา และการรู้ไหลของสเปคตรัม



เอกสารอ้างอิง

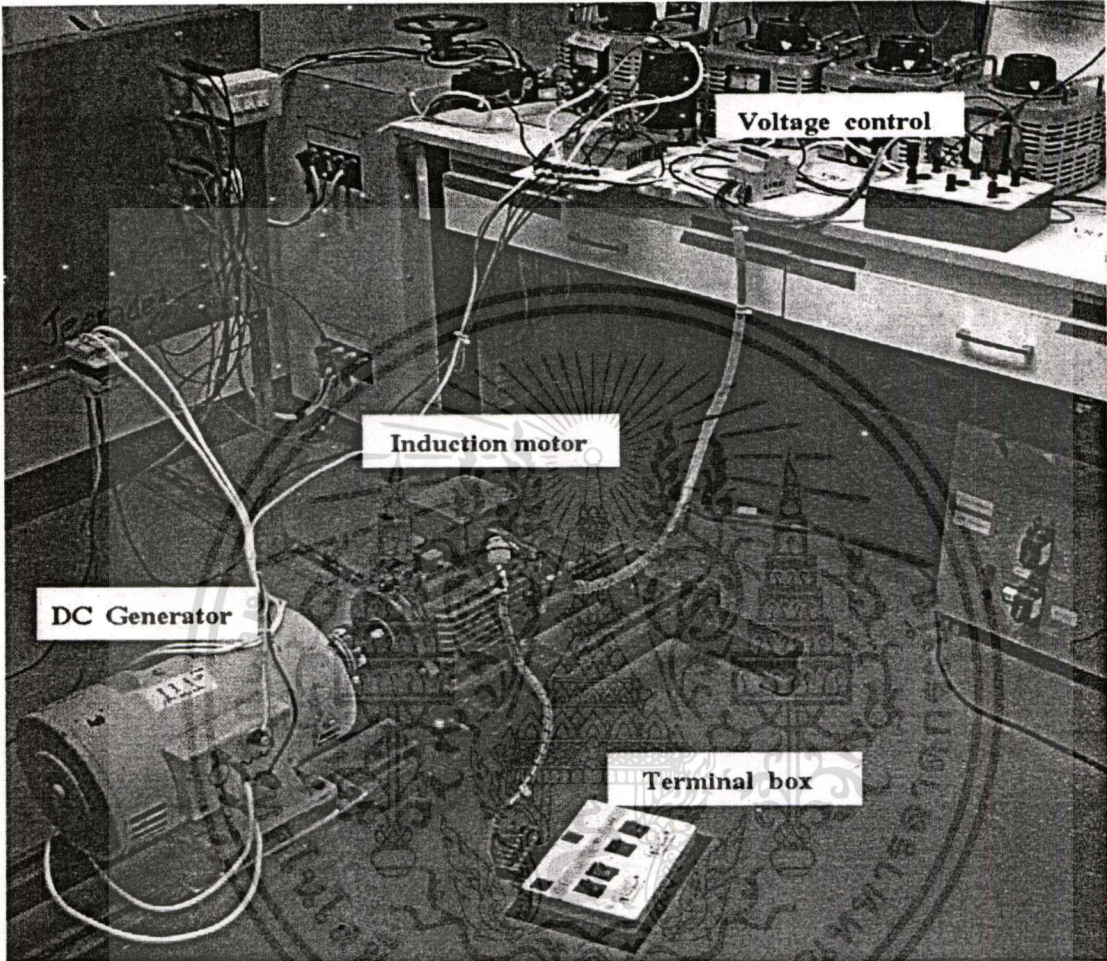
- [1] Guillermo Bossio, Cristian De Angelo, Jorge Solsona, Maria Ines Valla “Effects of Rotor Bar and End-Ring Faults Over the Signals of a Position Estimation Strategy for Induction Motors.” IEEE 2003., 2-Mar. 3, pp. 151-155.
- [2] เฉลิมชาติ มานพ, ชาญวิทย์ ตั้งศิริวรกุล “ตรวจสอบสุขภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำจาก “วารสาร E & C , ฉบับที่ 17, ประจำเดือนมกราคม-กุมภาพันธ์ 2548, หน้า 32-44.
- [3] Xu Boqiang, Heming and Sun Liling “Sensitive and Reliable Detection of Broken Rotor Bar Fault in Induction Motors.” IEEE 2004., 5-April. 4, pp. 714-719.
- [4] เฉลิมชาติ มานพ, ชาญวิทย์ ตั้งศิริวรกุล “โรเตอร์กรงกระรอกสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ (2) (จบ)” วารสารเทคนิค, ปีที่ 19, ฉบับที่ 215, ประจำเดือนตุลาคม 2545, หน้า 137-143.
- [5] Subhasis Nandi, RajMohand Bharadwaj, Hamid A.Toliyat, Alexander G.Parlos “study of Three Phase Induction Motors with Incipient Rotor Cage Faults under different Supply Conditions.” IEEE 1999., Electrical Lab Machine Research., November 1999, pp.714-719.
- [6] Thomas G. Habetler, Ronald G. Harley, Rangarajan M. Tallam, Sang -Bin Lee, Ramzy Obaid and Jason Stack “Complete Current Based Induction Motor Condition Monitoring Stator, Rotor, Bearings and Load.” IEEE 2002., Electrical Lab Mchine and Computer Research., Georgia, USA., pp. 3-8.
- [7] F.Filippetti “Neural Networks Approach To Electric Machine On Line Diagnostics.” Electrical Lab Machine Research., IEEE 1993., University degli stydi di Parma, Italy, pp. 213-218.
- [8] Masoud Haji, Hamid A. Toliyat “Pattern Recognition A Technique for Induction Machines Rotor Fault Detection Broken Bar Fault.” IEEE 2001., Jan. 1,2001, pp. 899-904.
- [9] Zhenxing Liu, Xiaolong Zhang, Xianggen Yin and Zhe Zhang. “Rotor Cage Fault Diagnosis in Induction Motors Based on Spectral Analysis of Current Hilbert Modulus.” Electrical Lab Machine Research., IEEE Trans. September,

เอกสารนี้เป็นเอกสาร 1999, pp. 595-598. การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [10] A. J. Marques Cardoso, S.M.A. Cruz, J. F. S. Carvalho and E.S. Saraiva. “Rotor Cage Fault Diagnostic in Three Phase Induction Motors by Park ’s Vector Approach” IEEE Trans. 1998., 20-March 3, 1988, pp.231-236.
- [11] Ahmed I. Zayed “Hilbert Transform Associated with the Fractional Fourier Transform” IEEE Trans. 1998., March 1998, pp. 3084-3091.
- [12] F. Filippetti, A. Uncini, Piazza and P. Campolucci “Neural Network Architectures for fault Diagnosis and Parameter Recognition in Induction machines” IEEE-IAS Trans 4 July 1995, pp. 289-293.
- [13] ไร่ต มั่งมีชัย, พิชิต ล้ำยอง. “ การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อใช้งานในสภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล.” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 25, พฤศจิกายน 2545 .หน้า 11-15.
- [14] Claudia Martis, Dobai Barna and Biro Karoly “Analytical Approach of The Rotor Broken bars Effects on The Induction Machine Behavior” IEEE Trans. Vol. 3, no. 4 Feb.1998, pp.873-879.

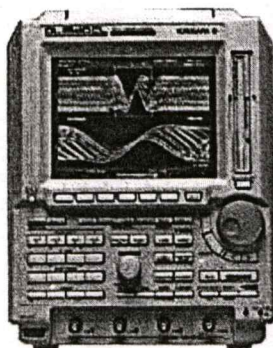


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



อุปกรณ์การทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Digital Oscilloscope (YOKOGAWA)

DL1520/L (2 Channel)



Digital Tachometers (YOKOGAWA)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

โปรแกรม NEURAL NETWORK ใน Matlab®
สำหรับวิเคราะห์การศึกษการตรวจจับความบกพร่องของ
แท่งตัวนำโรเตอร์แตกหักในมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้โครงข่าย
ประสาทเทียม

%%%%%%%%%% Program Test Rotor Broken Bars %%%%%%%%%% *

* %%%%%%%%%% Alpha=0.001, E=0.01 %%%%%%%%%%*

P = [0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	0
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	0
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	;
-25.50	-23.70	-22.70	-22.20	-21.80	-21.50	-20.90	-20.50	-19.90	-19.70	-18.75	-
18.66	-18.78	-18.88	-19	-18.81	-18.62	-18.43	-18.24	-18.18	-17.92	-17.61	-
17.35	-17.39	-17.44	-17.48	-17.42	-17.28	-17.23	-17.28	-17.23	-17.09	-17.04	;
-44.50	-43.50	-41.95	-41.57	-41.00	-40.73	-40.64	-39.70	-39.23	-38.95	-38.67	-
38.58	-38.3	-38.3	-38.2	-37.92	-37.45	-37.4	-36.2	-36.2	-35.21	-35	-
34.55	-34.09	-33.43	-33.24	-32.87	-32.77	-32.40	-31.84	-31.93	-31.84	-31.46	;
-27.50	-26.90	-25.40	-25.40	-24.31	-24.00	-23.34	-22.96	-22.47	-22.37	-21.89	-
22.08	-22.08	-21.79	-21.31	-20.92	-20.63	-20.92	-20.34	-20.05	-20.05	-20.24	-
20.34	-20.05	-20.03	-19.75	-20.03	-20.03	-20.20	-19.80	-19.90	-19.60	-19.52	;
-28.50	-27.81	-26.30	-25.93	-25.28	-25.00	-24.44	-24.00	-23.88	-23.42	-23.23	-
23.33	-23.14	-22.4	-22.3	-21.93	-21.84	-21.75	-21.75	-21.47	-21.28	-21.28	-
21.38	-20.91	-21.00	-21.00	-20.91	-21.10	-20.82	-20.82	-20.82	-20.63	-20.91	;
-27.10	-25.50	-23.90	-23.50	-22.80	-22.60	-21.90	-21.20	-20.60	-20.50	-20.00	-
19.85	-19.6	-20.1	-20.1	-20	-20	-19.66	-19.7	-19.4	-19.3	-19.3	-
19.50	-19.10	-19.40	-19.20	-19.10	-19.20	-19.40	-19.30	-18.90	-18.60	-18.60	;
-45.90	-44.57	-43.16	-42.32	-42.13	-41.95	-41.95	-41.70	-41.70	-41.20	-41.10	-
41.29	-41.1	-40.7	-40.64	-40.26	-39.89	-39.79	-39.33	-39.23	-38.39	-37.55	-
37.73	-37.00	-36.05	-35.77	-35.11	-34.64	-34.27	-33.61	-33.15	-32.87	-32.40	;
-29.46	-28.81	-27.42	-27.00	-26.39	-26.21	-25.46	-24.91	-24.72	-24.16	-24.07	-
24.07	-24.07	-23.42	-23.23	-23.14	-22.58	-22.49	-22.49	-22.3	-22.3	-22	-
22.00	-21.84	-21.65	-21.47	-21.47	-21.93	-21.75	-21.75	-21.93	-21.93	-21.84;	-
41.26	-41.10	-39.90	-39.70	-39.70	-39.50	-39.30	-38.60	-37.70	-37.36	-37.45	-
37.17	-37.27	-36.89	-36.89	-36.8	-36.24	-36.14	-35.3	-34.74	-34.18	-33.43	-
33.43	-33.05	-32.58	-32.30	-32.12	-31.93	-32.12	-31.52	-31.31	-31.26	-31.00];

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


```

Bj= [ randn();randn();randn();randn();randn();randn();randn();randn();randn();randn()
;randn();randn();randn();randn();randn();randn();randn() ];

Wji= [ randn() randn() randn() randn() randn() randn() randn() randn() randn() randn()
randn() randn() randn() randn() randn() randn() randn()];

Bi=[randn()];

[n,m] = size(p);
Is2 = ones(1,1);
Is1 = ones(18,1);
%I = ones(18,18);
alpha = 0.001;
rep = 0;
i = 0;
while i~=m
i = i+1;
j = i
rep = rep + 1
Ok = p(:,i)
Di = t(:,i);
Oj = logsig(Wkj*Ok+Bj);
Oi = purelin(Wji*Oj+Bi);
E = Di - Oi
if (E(1) < 0.01) && (E(1) > -0.01)
E(1) = 0;
end
while (E(1) ~= 0)
rep = rep + 1
i=0;
clc
Fn1 = zeros(18,18);
for j = 1:18
for k = 1:18

```

```

if(j == k)
Fn1(j,k) = (1-Oj(j,1))*Oj(j,1);
end
end
end
Sensitive2 = -2*(Di-Oi);
Sensitive1 = Fn1*(Wji')*Sensitive2;
% adapt weight and bias
Wji = Wji - alpha*Sensitive2*Oj';
Wkj = Wkj - alpha*Sensitive1*Ok';
Bj = Bj - alpha*Sensitive1;
Bi = Bi - alpha*Sensitive2;
%check result
Oj = logsig(Wkj*Ok+Bj);
Oi = purelin(Wji*Oj+Bi);
E = Di-Oi
if (E(1) < 0.01) && (E(1) > -0.01)
E(1) = 0;
end
end
usetime = etime(clock,to)/60
save Wnbb+bbst+bbuv;

function kst1
to = clock;
load Wnbb1;
Is2 = ones(1,1);
Is1 = ones(18,1);
%I = ones(18,18);
alpha = 0.001;
rep = 0;
i = 0;

```

```

while i~=m
i = i+1;
j = i
rep = rep + 1
Ok = p(:,i)
Di = t(:,i);
Oj = logsig(Wkj*Ok+Bj);
Oi = purelin(Wji*Oj+Bi);
E = Di - Oi
if (E(1) < 0.01) && (E(1) > -0.01)
E(1) = 0;
end
while (E(1) ~= 0)
rep = rep + 1
i=0;
clc
Fn1 = zeros(18,18);
for j = 1:18
for k = 1:18
if(j == k)
Fn1(j,k) = (1-Oj(j,1))*Oj(j,1);
end
end
Sensitive2 = -2*(Di-Oi);
Sensitive1 = Fn1*(Wji')*Sensitive2;
% adapt weight and bias
Wji = Wji - alpha*Sensitive2*Oj';
Wkj = Wkj - alpha*Sensitive1*Ok';
Bj = Bj - alpha*Sensitive1;
Bi = Bi - alpha*Sensitive2;
%check result

```

```
Oj = logsig(Wkj*Ok+Bj);  
Oi = purelin(Wji*Oj+Bi);  
E = Di-Oi  
if (E(1) < 0.01) && (E(1) > -0.01)  
E(1) = 0;  
end  
end  
end  
usetime = etime(clock,to)/60  
save Wnbb1;
```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ISSN 0125-1724

วิศวกรรม

ลาดกระบัง

คณาจารย์และบุคลากร สำนักวิชา วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง

LADKRABANG ENGINEERING JOURNAL

ปีที่ 23 ฉบับที่ 1

มีนาคม 2549

1.	Direction Sequence Construction for Offline Thai Handwriting <i>Kor Kittikom Boonlee Kruatrachue</i>	1
2.	การสังเคราะห์วัสดุประกอบคล้ายไม้จากพืชมังหนังและเยื่อขาน้อย <i>ไพศาล นาคพิพัฒน์ เดือนพร บุญศิริคำชัย</i>	7
3.	การออกแบบวงจรขยายป้องกันกระแสแรงดันต่ำ <i>มนตรี สุขเลื่อง สมบ่อง วิเศษพานิชกิจ กอบชัย เศรษฐาญ</i>	14
4.	วงจรกรองความถี่ใต้วงจร OTA-C ที่โปรแกรมได้ทางดิจิทัล <i>สุวิทย์ สุภรณ์ระ มนตรี คำเงิน พิพัฒน์ พรหมมี กอบชัย เศรษฐาญ กฤษณ์ อ่างแก้ว จริยะศักดิ์ ชาญวุฒิธรรม</i>	20
5.	การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าและผลตอบสนองทางแสงของฟิล์มเพชร <i>ทรงเกียรติ กิตติสินธิรักษ์ วิสุทธิ วุฒิจูรุ่งเรือง</i>	26
6.	โฟโตไดโอดแบบรอยต่อเนื้อสารชนิดเดียวกันของฟิล์มเพชรชนิดเอ็นและฟิล์มเพชรชนิดพี <i>ทรงเกียรติ กิตติสินธิรักษ์ วิสุทธิ วุฒิจูรุ่งเรือง</i>	32
7.	คอนเวอร์เตอร์พี-เอชซี เชื่อมต่อการไฟฟ้าโดยมีการแก้ไขตัวประกอบกำลังด้วยตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัล <i>วิวัฒน์ ชูรักษ์ วิจิตร กิณเวศ</i>	38
8.	การศึกษาการตรวจจําแนกตัวนำโรเตอร์แยกกันในมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม <i>กมล สะอาดวง เอลิมชาติ มานพ วิจิตร กิณเวศ สุรชาติ สรีราภิมล</i>	44
9.	รถไฟฟ้าขับเคลื่อนสี่ล้อ <i>ไถกณ สวัสดิ์นาวิน ประภาส ไพรสุวรรณ</i>	50
10.	การใช้วิธีควบคุมแบบฟิวลิวีเรียลเคสสำหรับควบคุมการเปลี่ยนความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลม <i>ยุวลักษณ์ พัฒนาศิลัย มณฑล สีสัจจินดาไกรฤกษ์</i>	56
11.	การวิเคราะห์การสูญเสียที่เพิ่มขึ้นของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่เกิดจากแรงดันฮาร์มอนิกสลับที่ป้องกันด้วยตัวควบคุม <i>โดยอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเซมิคอนดักเตอร์</i> <i>อัครชัย เอ็มสะอาด วิจิตร กิณเวศ</i>	62
12.	การวิเคราะห์ความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังโดยพิจารณาการทำงานผิดพลาดของระบบป้องกันโซน 3 <i>ไพโรจน์ เทียนทอง มณฑล สีสัจจินดาไกรฤกษ์</i>	68
13.	วงจรสวิตช์โหมดฮอสท์บริดจ์คอนเวอร์เตอร์ที่มีการปรับแรงดันตกคร่อมระหว่างคาปาซิเตอร์ไม่สมดุล <i>จากรุวัตต์ จันทร์โร วิจิตร กิณเวศ</i>	74
14.	การออกแบบและวิเคราะห์ตัวพีชไอเอ็มซีคอนเวอร์เตอร์ทางด้านอินพุตสำหรับเครื่องเชื่อมไฟฟ้ากระแสตรงที่มีการควบคุมกระแสป้อนของหม้อแปลงความถี่สูง <i>พูนศรี วรรณการ ประภาส ไพรสุวรรณ วิจิตร กิณเวศ</i>	80

การศึกษาการตรวจจับแท่งตัวนำโรเตอร์แตกหักในมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม

A Study Of Broken Rotor Bar Detection in Induction Motors Using Neural Network

กมล สะอาดขวง เถลิงชาติ มานพ และ วิจิตร กิมเรศ

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ถนนฉลองกรุง แขวงลำปลาทิว
สุราษฏร์ธานี ลีรากริมผล

กองบำรุงรักษาโรงไฟฟ้า 2 ฝ่ายบำรุงรักษาโรงไฟฟ้าพระนครใต้ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์ความผิดปกติของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ซึ่งมีสาเหตุมาจากแท่งตัวนำโรเตอร์แตกหัก (broken rotor bars) การวิเคราะห์ผลของความผิดปกติด้วยการวิเคราะห์แบบโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ย้อนกลับทำโดยการตรวจจับกระแสโดยพิจารณาจากสัญญาณกระแสสเตเตอร์ (Motor Current Signature Analysis: MCSA) การวิจัยดังกล่าวจะทำการเปรียบเทียบผลของสเปกตรัมที่ได้จากมอเตอร์แบบปกติเปรียบเทียบกับมอเตอร์ที่เกิดความผิดปกติเนื่องจากแท่งตัวนำโรเตอร์แตกหักผลของการทดลองที่ได้ถูกนำไปใช้สร้างแบบจำลองมอเตอร์ที่สมบูรณ์เพื่อใช้ในการพิจารณามอเตอร์ ข้อมูลกระแสสเตเตอร์ที่ได้จากการทดสอบจริงถูกตรวจจับและประมวลผลด้วยเทคนิคออฟไลน์ (off-line) โดยใช้โปรแกรม Matlab ในการวิเคราะห์ ผลการทดสอบสามารถตรวจสอบหาความผิดปกติโดยใช้วิธีที่นำเสนอได้เป็นที่น่าพอใจ

Abstract

This paper presents a fault diagnosis in a 3 ϕ induction motor due to broken rotor bars. The faults diagnosis is analyzed by Back propagation method of Artificial Neuron Network (ANN) The stator current is detected by motor current signature analysis (MCSA), which analyzes the spectrum between normal induction motor and the n broken rotor bar motor. The results from test are used to create the complete model of the n broken rotor bar induction motor. Voltage and current data are detected and processed with an off-line technique using Matlab. According to testing results, motor faults can be satisfactorily identified based on the proposed method.

1. บทนำ

ในปัจจุบันมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส เป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรม

เนื่องจากมีความทนทาน และราคาที่ถูกกว่ามอเตอร์กระแสตรงอย่างมาก จากเหตุผลดังกล่าวจึงมีการนำมอเตอร์เหนี่ยวนำมาใช้ในกระบวนการผลิตเป็นจำนวนมาก

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นเมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ ไม่เฉพาะค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงรักษาที่สูงเท่านั้น แต่ยังส่งผลกระทบต่อไปถึงกระบวนการผลิต ที่ทำให้ต้องหยุดชะงัก ซึ่งนำมาซึ่งความสูญเสียทางเศรษฐศาสตร์ ที่ยากต่อการประมาณค่าได้ ความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ มีอยู่หลายกรณี [1] การเกิดความผิดปกติที่แหวนรองลื่น การเกิดการลัดวงจรที่ขดลวดสเตเตอร์ และการแตกหักที่ตัวโรเตอร์เป็นต้น เพื่อที่จะลดปัญหาดังกล่าวจึงจำเป็นต้องมีการวิเคราะห์ถึงความผิดปกติที่เกิดขึ้น ในบทความนี้จึงได้ทำการนำเสนอการวิเคราะห์ความผิดปกติ ที่เกิดจากการแตกหักของโรเตอร์ ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญประการหนึ่งของความผิดปกติที่เกิดขึ้น เพื่อที่จะทำการวิเคราะห์ความผิดปกติที่เกิดขึ้น จากองค์ประกอบสเปคตรัมของสัญญาณกระแสมอเตอร์ที่ปกติ และมอเตอร์ที่ผิดปกติ เนื่องจากการแตกหักของแท่งตัวนำโรเตอร์ จึงถูกนำมาพิจารณาเปรียบเทียบ เพื่อสร้างแบบจำลองโดยการนำโครงข่ายประสาทเทียมมาใช้ในการประมวลผล เพื่อหาความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับแท่งตัวนำ วิธีการดังกล่าว ช่วยให้วิศวกรไฟฟ้าสามารถที่จะคาดการณ์และหาทางแก้ไขเพื่อลดความสูญเสียที่จะเกิดขึ้นได้

2. ทฤษฎีพื้นฐานโครงข่ายประสาทเทียม

โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks : ANN) [2] เป็นระบบการแก้ปัญหาแบบหนึ่งที่ใช้หาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและไม่อิสระ การแก้ปัญหาจะกระทำ โดยนำรูปแบบของสัญญาณมาผ่านฟังก์ชันกระตุ้น (Activate function) ผลที่ได้จะถูกนำไปคำนวณเพื่อหาค่าน้ำหนัก (weight) เพื่อปรับให้ได้ค่าผลลัพธ์ที่ต้องการ โครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้มีอยู่หลายชนิด เช่น Hopfield Network, Adeline Network และ Back propagation เป็นต้น [3]

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้โครงข่ายประสาทเทียมชนิด Back propagation [4] ในการแก้ปัญหา โดยฟังก์ชันกระตุ้นที่เลือกใช้ได้แก่ Sigmoid function ซึ่งเขียนในรูปสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$f(x) = 1/[1 + \exp(-x)] \quad (1)$$

2.1 การประมาณของโครงข่ายประสาทเทียม

เพื่อที่จะหาความสัมพันธ์ระหว่างเอาต์พุต O_j ของนิวรอนที่เกิดจากชั้นซ่อนและผลลัพธ์ O_k ที่เป็นชั้นอินพุต [5] คือ

$$O_i = f(\sum_k W_{kj} O_k) \quad (2)$$

โดยที่นิวรอนในชั้นเอาต์พุตที่ i ก่อให้เกิดเอาต์พุตดังสมการต่อไปนี้

$$O_i = f(\sum_j W_{ji} f(\sum_k W_{kj} O_k)) \quad (3)$$

จากสมการที่ (2) และ (3) ได้ทำการรวบรวมค่า bias ของแต่ละโหนด ซึ่งมีฟังก์ชัน $f(\cdot)$ เป็น activation function เป็น transfer function ของแต่ละโหนด การนำค่าของตัวอย่างไปทำการสอนให้ back propagation ได้เรียนรู้ถึงผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจะได้ค่าเอาต์พุตเกิดความผิดพลาดที่เกิดจากการสอนของรูปแบบสัญญาณตัวอย่างโดยรวมเรียกว่า Total Error (E) มีค่าเท่ากับ

$$E = 1/2 \sum_i (D_i - O_i)^2 \quad (4)$$

เพื่อให้ได้ค่าเอาต์พุตที่ถูกต้องตามต้องการ มากที่สุด จำเป็นที่จะต้องทำการ minimize จำกัดค่าความผิดพลาดที่เอาต์พุตให้น้อยที่สุด การที่จะนำค่า E ให้น้อยได้ จำเป็นต้องทำการปรับค่าน้ำหนัก Weight ที่เชื่อมต่อระหว่าง hidden output เมื่อมี E เป็นอัตราการเรียนรู้ คือ

$$\Delta W_{ji} = \epsilon \delta_i O_j \quad (5)$$

$$\delta_i = (D_i - O_i)(1 - O_i)O_i \quad (6)$$

เพื่อที่จะทำการปรับค่าน้ำหนักให้ได้ค่าเอาต์พุตให้มีความผิดพลาดน้อยที่สุด สามารถทำการปรับปรุงค่าน้ำหนักที่เชื่อมต่อ ระหว่างชั้นที่ทำการเชื่อมต่อได้โดย ที่ชั้นซ่อนจะทำการปรับค่าน้ำหนักจากสมการดังต่อไปนี้

$$\Delta W_{ji}(n+1) = \epsilon \delta_i O_j + \alpha \Delta W_{ji}(n) \quad (7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการปรับปรุงค่าน้ำหนักถ่วงที่ชั้นอินพุทสามารถทำการปรับปรุงค่าน้ำหนักได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\Delta W_{kj}(n+1) = \varepsilon \delta_j O_k + \alpha \Delta W_{kj}(n) \quad (8)$$

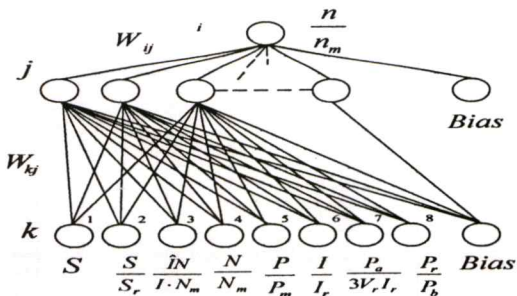
การปรับปรุงค่าน้ำหนัก ที่ต้องปรับปรุงค่าให้ได้ค่าที่ทำให้ค่าเอาต์พุตถูกต้องตามอินพุท ในการกำหนดค่าอินพุทที่ป้อนให้กับนิวรอนเน็ตเวิร์ค จำเป็นที่จะต้องทำการหาโมเดลของระบบ เพื่อให้ได้เอาต์พุตที่ต้องการมีความถูกต้อง เมื่อระบบที่ศึกษามีค่าพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลงไป ค่าอินพุทในโมเดลที่ใช้ ในโครงข่ายประสาทเทียมที่ได้จากการทดลอง มีค่าดังต่อไปนี้

ค่าอินพุทของโครงข่ายประสาทเทียม

1. สลิป(s)
2. สลิป(s) อ้างอิงจากพิกัดโหลดมอเตอร์
3. อัตราส่วนของกระแส $I/I \cdot N$ อ้างอิงจากโหลด N_m
4. จำนวน bar อ้างอิงจากโหลด N_m
5. จำนวนขั้วแม่เหล็ก P อ้างอิงจากโหลด P_m
6. พิกัดกระแสมอเตอร์ I อ้างอิงกับกระแสพิกัดมอเตอร์ I_r
7. กำลังไฟฟ้าอินพุท P_a อ้างอิงกับพิกัดกำลังไฟฟ้า $3V_r \cdot I_r$ ของมอเตอร์
8. พิกัดการจ่ายโหลดของมอเตอร์ P_r อ้างอิงกับพิกัดกำลังไฟฟ้า P_b จากพิกัด Name Plate

เอาต์พุต

1. จำนวน broken bar (n) ที่เกิดการแตกหัก อ้างอิงกับโหลด (n_m)



รูปที่ 1 โครงข่ายประสาทเทียม

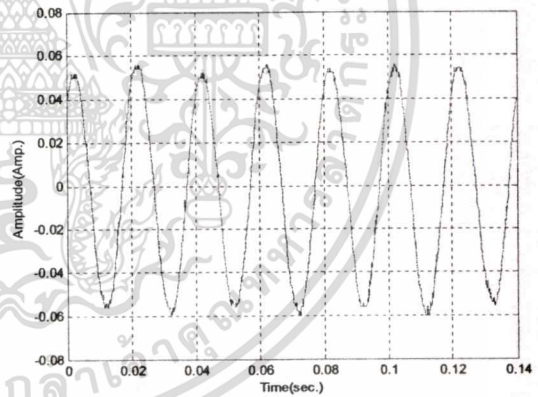
โมเดลของของโครงข่ายประสาทเทียมที่ได้มีรูปแบบดังแสดงในรูปที่ 1

3.ผลการทดลอง

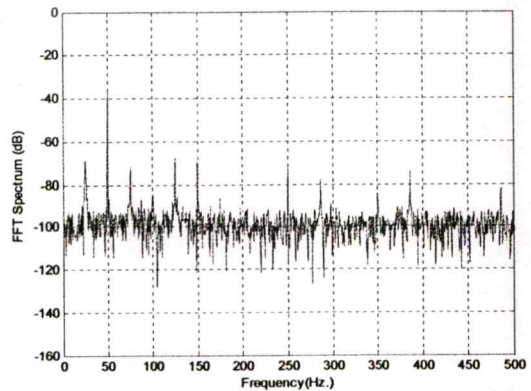
เพื่อที่จะวิเคราะห์หาความผิดปกติ ของโรเตอร์แตกหักภายในมอเตอร์เหนี่ยวนำ ในการทดลองโดยใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 2 HP, 4 Pole และได้สร้างรูปแบบของสัญญาณ โดยสัญญาณที่สร้างขึ้นประกอบด้วย สัญญาณกระแสสเตเตอร์ของมอเตอร์แบบปกติ และมอเตอร์ที่แท่งโรเตอร์เกิดการแตกหัก 1, 2 และ 3 บาร์ เพื่อนำมาใช้สร้างรูปแบบสัญญาณการเรียนรู้ให้กับโครงข่ายประสาทเทียม

3.1 มอเตอร์ปกติ

สัญญาณกระแสสเตเตอร์ของมอเตอร์ปกติถูกทำการทดสอบ ณ ที่สภาวะโหลดที่แตกต่างกัน เพื่อสร้างสัญญาณในการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม ตัวอย่างสัญญาณกระแสสเตเตอร์ของมอเตอร์ที่สภาวะโหลดเต็มพิกัดสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2 (ก) และ (ข) ตามลำดับ



(ก) สัญญาณกระแสสเตเตอร์มอเตอร์ปกติ(100 / div)



(ข) สเปกตรัมของสัญญาณกระแสสเตเตอร์มอเตอร์ปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา รูปที่ 2 นี้ สัญญาณกระแสสเตเตอร์และสเปกตรัม การค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 มอเตอร์ผิดปกติ

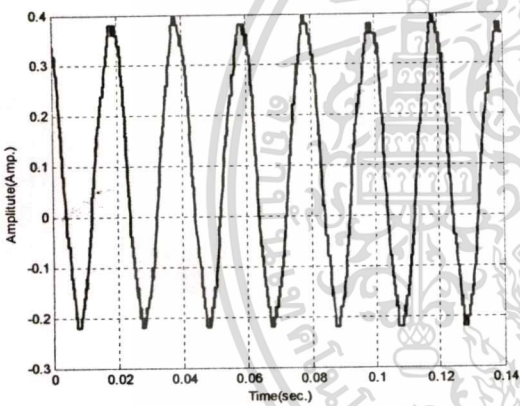
มอเตอร์ผิดปกติที่ได้ทำการทดลอง ในกรณีของการเกิดการแตกหักที่แท่งตัวนำโรเตอร์ ที่ได้ทำการทดลองแบ่งเป็น 4 กรณีด้วยกัน ประกอบด้วยกรณีของการเกิดการแตกหักที่โรเตอร์แบบ 1, 2 และ 3 บาร์ ในที่นี้แสดงผลสัญญาณกระแสสเตเตอร์ที่เกิดจากการแตกหักที่โรเตอร์แบบ 1 และ 2 บาร์เท่านั้น สำหรับกรณีอื่นๆ สัญญาณที่ได้มีลักษณะคล้ายกัน แต่จะแตกต่างกันที่ขนาดของฮาร์โมนิกส์ที่จะเด่นชัดขึ้นตามจำนวนบาร์ที่เพิ่มขึ้น ตัวอย่างของสัญญาณกระแสสเตเตอร์ และสเปกตรัมในกรณีของการเกิดการแตกหักที่โรเตอร์ แสดงได้ดังรูปที่ 3 (ก) และ (ข) ตามลำดับสำหรับกรณีของโรเตอร์ที่เกิดการแตกหัก 1 บาร์ สำหรับตัวอย่างของสัญญาณกระแสสเตเตอร์และสเปกตรัม

ในกรณีของโรเตอร์ที่เกิดการแตกหักที่ 2 บาร์ แสดงได้ดังรูปที่ 4 (ก) และ (ข) ตามลำดับ จากผลของสเปกตรัมที่ได้จากการทดลองจะได้ค่าความถี่ไซด์แบนด์ขององค์ประกอบฮาร์โมนิกส์ที่ความถี่ของการเกิดบาร์แตกหัก f_{br} มีค่าดังสมการที่ (8) และความถี่ของความผิดเพี้ยน f_{ecc} ดังสมการที่ (9) ตามลำดับ

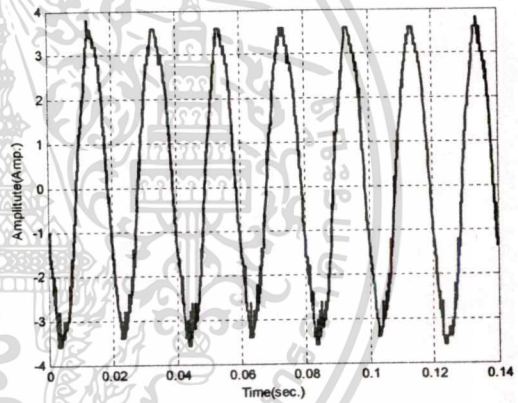
$$f_{br} = (1 \pm 2s)f_1 \tag{8}$$

$$f_{ecc} = (f_1 \pm mf_r) \tag{9}$$

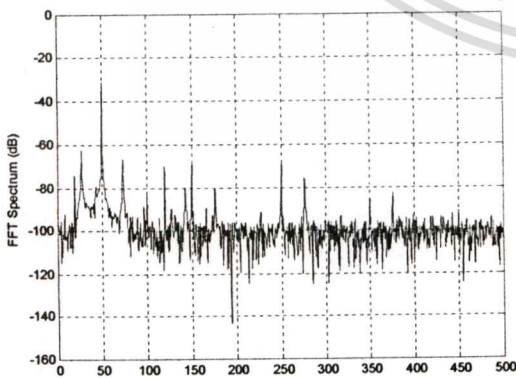
เมื่อ f_1 คือ ความถี่มูลฐาน s คือ ค่าสลิปของมอเตอร์ k และ m เป็นค่าจำนวนเต็มบวก 1, 2, และ 3 f_r คือ ความถี่ของความเร็วของโรเตอร์



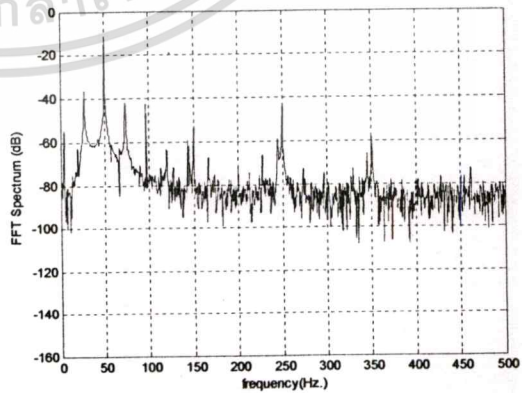
(ก) สัญญาณกระแสสเตเตอร์มอเตอร์ของ โรเตอร์ที่เกิดการแตกหัก 1 บาร์ (10/div)



(ข) สัญญาณกระแสสเตเตอร์มอเตอร์ของ โรเตอร์ที่เกิดการแตกหัก 2 บาร์ (10/div)



(ข) สเปกตรัมของสัญญาณกระแสสเตเตอร์ของโรเตอร์ที่เกิดการแตกหัก 1 บาร์



(ข) สเปกตรัมของสัญญาณกระแสสเตเตอร์ ของโรเตอร์ที่เกิดการแตกหัก 2 บาร์

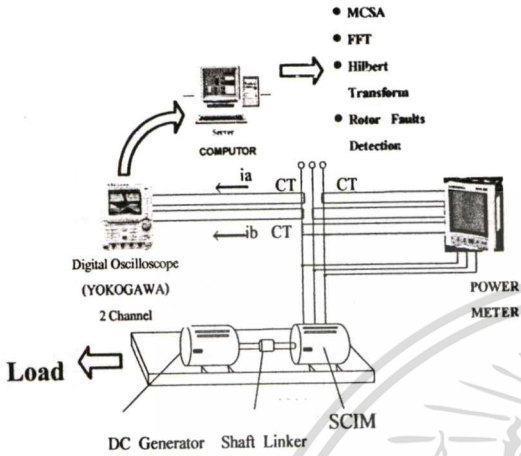
รูปที่ 3 สัญญาณกระแสสเตเตอร์และสเปกตรัม

รูปที่ 4 สัญญาณกระแสสเตเตอร์และสเปกตรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

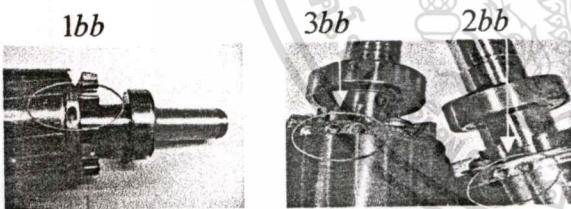
3.3 โมเดลของระบบที่ทำการศึกษ

เพื่อที่จะวิเคราะห์โมเดลของการเกิดการแตกหักที่แท่งตัวนำโรเตอร์ ในที่นี้ได้ออกแบบวงจรที่ใช้ในการเก็บรูปแบบของสัญญาณดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 วงจรการทดลองการแตกหักที่แท่งตัวนำโรเตอร์

มอเตอร์ที่นำมาใช้เป็นต้นแบบในการทดสอบ ประกอบด้วยมอเตอร์ปกติ มอเตอร์ที่เกิดการแตกหักที่แท่งตัวนำ 1, 2, และ 3 บาร์ตามลำดับ ตัวอย่างของการทำมอเตอร์ต้นแบบที่เกิดการแตกหักที่แท่งตัวนำ 1, 2 และ 3 บาร์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 แสดงการจำลองการแตกหักที่แท่งตัวนำโรเตอร์

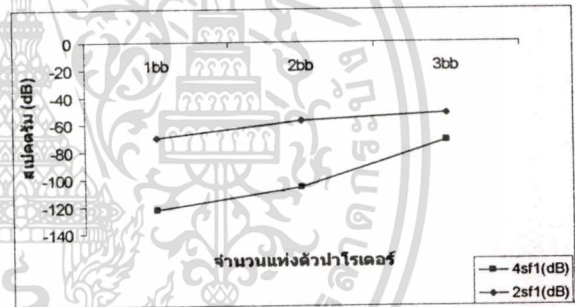
เพื่อที่จะกำหนดอินพุตที่ใช้ทำการป้อนให้กับโครงข่ายประสาทเทียม จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องศึกษาถึงโมเดลความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตกับเอาต์พุตที่สนใจ ซึ่งในที่นี้เอาต์พุตที่สนใจคือ จำนวนแท่งตัวนำโรเตอร์แตกหัก การหาโมเดลความสัมพันธ์ระหว่างสเปกตรัมความถี่ กับจำนวนแท่งตัวนำโรเตอร์แตกหัก ผลลัพธ์ที่ได้สามารถนำมาเขียนความสัมพันธ์ระหว่างความถี่สลิปที่ 2 และ 4 เท่ากับจำนวนแท่งตัวนำโรเตอร์แตกหักได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ความถี่สลิปที่ 2 เท่า และ 4 เท่ากับจำนวนแท่งตัวนำโรเตอร์แตกหัก

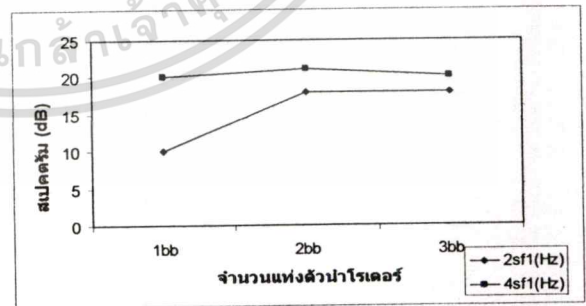
ความถี่	จำนวนแท่งตัวนำโรเตอร์แตกหัก		
	1bb	2bb	3bb
2sf1(dB)	-70	-58	-52
4sf1(dB)	-52	-48	-20
2sf1(Hz)	10	18	19.5
4sf1(Hz)	20	39	36

หมายเหตุ 1bb, 2bb และ 3bb คือ จำนวนแท่งตัวนำโรเตอร์แตกหัก 1, 2 และ 3 บาร์ตามลำดับ

จากตารางที่ 1 สามารถนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์เพื่อใช้ในการพิจารณาแนวโน้มของความสัมพันธ์ ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างสเปกตรัมในหน่วย dB กับจำนวนแท่งตัวนำโรเตอร์แตกหักได้ดังกราฟในรูปที่ 7 สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างสเปกตรัมในหน่วย Hz กับจำนวนแท่งตัวนำโรเตอร์แตกหัก สามารถแสดงได้ดังกราฟรูปที่ 8



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์สเปกตรัม (dB) กับจำนวนแท่งตัวนำโรเตอร์แตกหัก



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์สเปกตรัมความถี่ (Hz) กับจำนวนแท่งตัวนำโรเตอร์แตกหัก

จากรูปกราฟแสดงให้เห็นว่า เมื่อที่จำนวนแท่งตัวนำโรเตอร์แตกหักที่มากขึ้น สเปกตรัมที่ความถี่สลิป 2 และ 4 เท่า มีค่าเพิ่มขึ้นตามจำนวนแท่งตัวนำโรเตอร์ที่แตกหักเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการสนับสนุนคือสิ่งที่ส่งผลกระทบต่อความถี่สลิป มีความจำเป็นต่อ... ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อินพุทของโครงข่ายประสาทเทียมที่สร้างขึ้น เพื่อให้ได้เอาท์พุทตามต้องการ อินพุทของโครงข่ายประสาทเทียมในงานวิจัยนี้แสดงไว้ในหัวข้อ 2

4. ผลการวิเคราะห์โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม

เพื่อที่จะทำให้โครงข่ายประสาทเทียมที่ออกแบบไว้สามารถวิเคราะห์สัญญาณได้อย่างถูกต้อง และแม่นยำ จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องมีการนำรูปแบบสัญญาณที่ครอบคลุมกับอินพุทที่เกิดขึ้นมาใช้เป็นสัญญาณอินพุท สัญญาณอินพุทที่ถูกนำมาฝึกสอนจะต้องทำการฝึกสอนจนกระทั่งค่าน้ำหนัก และค่าชดเชย (bias) ที่ได้ทำให้ค่าความผิดพลาดที่เอาท์พุทมีค่าต่ำที่สุด ในงานวิจัยนี้กำหนดค่าความผิดพลาดมีค่าเท่ากับ 0.001 บาร์ ตัวอย่างของรูปแบบที่ใช้ในการสอนโครงข่ายประสาทเทียมสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ตัวอย่างรูปแบบสัญญาณที่ทำการฝึกสอนให้กับโครงข่ายประสาทเทียมที่โหลด 25%, 50%, 75% และ 100%

input						output	
S	S/Sr	P/Pm	I/Ir	Pa/3Vr	Pr/Pb	N/Nm(Acuat.)	N/Nm(Cal.)
0.039	1.152	0.50	0.855	0.654	2.849	1	1
0.048	1.233	0.50	0.962	0.842	2.932	2	2
0.058	1.363	0.50	1.064	0.902	2.953	3	3
0.085	1.563	0.50	1.189	1.018	2.966	4	4

เมื่อทำการสอนโครงข่ายประสาทเทียม ด้วยรูปแบบสัญญาณอินพุทจากข้อมูลที่แสดงในตารางที่ 2 เรียบร้อยแล้ว โครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนจะถูกนำมาทดสอบกับสัญญาณอินพุทตัวอย่างดังที่แสดงในตารางที่ 3 ตารางที่ 3 ตัวอย่างรูปแบบสัญญาณที่ใช้ทำการทดสอบกับโครงข่ายประสาทเทียมที่โหลด 18%, 65%, 85% และ 92%

input						output	
S	S/Sr	P/Pm	I/Ir	Pa / 3Vr	IrPr/Pb	N/Nm(Acuat.)	N/Nm(Cal.)
0.033	1.137	0.50	1.018	0.676	2.812	1	1
0.055	1.192	0.50	1.078	0.873	2.422	2	2
0.069	1.219	0.50	1.088	0.932	2.447	3	3
0.048	1.274	0.50	1.189	0.986	2.812	4	4

จากผลการทดสอบรูปแบบสัญญาณในตารางที่ 3 โครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนสามารถแยกแยะเอาท์พุทที่

เกิดขึ้นได้ ในการที่จะทำให้โครงข่ายประสาทเทียมครอบคลุมอินพุทที่เกิดขึ้น

5. สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลอง การนำรูปแบบของสัญญาณที่ทราบจำนวนโรเตอร์แตกหักในตารางที่ 3 นำไปทดสอบกับโครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอน กับรูปแบบของสัญญาณในตารางที่ 2 ผลลัพธ์ที่ได้สามารถบ่งบอกถึงจำนวนโรเตอร์แตกหักจริงในการทดสอบ ซึ่งนั่นแสดงให้เห็นว่าโมเดลความสัมพันธ์ที่ได้สร้างขึ้น เพื่อกำหนดอินพุทให้โครงข่ายประสาทเทียมมีความถูกต้องเพียงพอ เพื่อให้สามารถพิจารณาเอาท์พุทที่ต้องการทราบได้

6. เอกสารอ้างอิง

[1] G. Bossio, C. De Angelo, J. Solsona, G. Garcia and M. I. Valla, "A2D- Model of the Induction Motor an extension of the modified winding function approach," 28th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society IECON, pp. 62-67, 2002

[2] X. Boqiang and S. Liling, "Sensitive and Reliable Detection of Broken Rotor Bar Faults in Induction Motors" IEEE-IAS, pp.714-719, 2004.

[3] F.Filippetti, G. Franceschini, C. Tassoni, " Neural networks approach to electric machine on-line diagnostics ," Trans. on IEEE-IAS, pp.213-218, 4 June 1995.

[4] W. Deleroi, " Broken bar in squirrel cage rotor of an induction motor, Part 1: Description by superimposed fault current," Arch. fur Elektrotechnik, vol. 67, pp. 91-99, 1982.

[5] F.Filippetti, G. Franceschini, C. Tassoni, " Neural networks aided on-line diagnostics of induction machine motor rotor faults," Trans on IEEE-IAS, pp. 289-293, June 1995.

ประวัติผู้เขียน

นายปพน สะอาดขวง เกิดเมื่อวันที่ 2 กันยายน 2511 ที่จังหวัดสิงห์บุรี สำเร็จ การศึกษาระดับ ปวช.- ปวส. แผนกช่างไฟฟ้า จากวิทยาลัยเทคนิคสิงห์บุรี ระหว่าง ปี พ.ศ. 2527- 2532 และจบการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า (ไฟฟ้ากำลัง) จากสถาบัน เทคโนโลยีราชมงคลวิทยาเขตเทเวศร์ ปีการศึกษา 2538



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้