

ตัวประมาณค่าแรงบิดโหลดสถานะอยู่ตัวสำหรับมอเตอร์ซิงโครนัสชนิด
จั่วแม่เหล็กยื่น



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2555

**A STEADY-STATE LOAD-TORQUE ESTIMATOR FOR
SYNCHRONOUS MOTORS WITH SALIENT POLES**



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering**

Suranaree University of Technology

Academic Year 2012

ตัวประมาณค่าแรงบิดโหลดสถานะอยู่ตัวสำหรับมอเตอร์เชิงโรตารีชนิด
จั่วแม่เหล็กยื่น

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.อนันต์ อุ่นศิริไสย)

ประธานกรรมการ

(อ. ดร.วิโรจน์ แสงทอง)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(อ. ดร.สุภารัตน์ ขวัญอ่อน)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

อำภา สารศิริ : ตัวประมาณค่าแรงบิดโพลสถานะอยู่ตัวสำหรับมอเตอร์ซิงโครนัส
ชนิดขั้วแม่เหล็กยื่น (A STEADY-STATE LOAD-TORQUE ESTIMATOR FOR
SYNCHRONOUS MOTORS WITH SALIENT POLES) อาจารย์ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร.
วิโรจน์ แสงทอง, 133 หน้า.

ในปัจจุบันมีการใช้งานมอเตอร์ซิงโครนัสตามโรงงานอุตสาหกรรมขนาดเล็กและขนาด
กลางเป็นจำนวนมาก เนื่องจากเป็นมอเตอร์ที่ให้ความเร็วไม่สูงมาก มีน้ำหนักเบา ขนาดเล็ก และม
ีความเหนียวต่ำกว่ามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ค่าพิกัดเดียวกัน ในการขับมอเตอร์ซิงโครนัสมีความ
จำเป็นต้องทราบแรงบิดโพล เพื่อตรวจสอบว่า มอเตอร์มีการทำงานได้ตามต้องการหรือทำงานเกิน
พิกัดหรือไม่ การใช้เครื่องมือวัดทางกลถึงแม้มีความแม่นยำและความน่าเชื่อถือสูงแต่มีราคาแพง
และต้องการการบำรุงรักษาอย่างสม่ำเสมอ ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำเสนอการสร้างอุปกรณ์
ต้นทุนต่ำ ประมาณค่าแรงบิดโพลในสถานะอยู่ตัวที่มีความแม่นยำ ซึ่งได้ดำเนินงานกับมอเตอร์
ซิงโครนัสแบบตัวหมุนพันขดลวดชนิดขั้วแม่เหล็กยื่น เพื่อใช้แทนเครื่องมือวัดที่มีราคาแพง
วิทยานิพนธ์นี้ได้พิจารณาการประมาณค่าแรงบิดโพลในสถานะอยู่ตัว โดยใช้แบบจำลองทาง
คณิตศาสตร์ในสถานะอยู่ตัวประกอบกับการวิเคราะห์แผนภาพเฟสเซอร์เป็นฐานการพัฒนา
โปรแกรมภาษาซีสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ และการปรับลดความผิดพลาดได้ใช้เทคนิคการ
เรียนรู้ทางปัญญาประดิษฐ์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียม

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา 2555

ลายมือชื่อนักศึกษา _____
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

AUMPA SARASIRI : A STEADY-STATE LOAD-TORQUE ESTIMATOR
FOR SYNCHRONOUS MOTORS WITH SALIENT POLES. THESIS
ADVISOR : WIROTE SANGTUNGTONG, Ph.D.,133 PP.

SALIENT-POLE SYNCHRONOUS MOTORS (SPSM) /LOAD-TORQUE
ESTIMATOR /NEURAL NETWORK

Torque measuring instrument is very important in industry due to intensely using electrical motors. With no matter what types the motor are, the torque instrument is quite costly. To replace this costly instrument, a load-torque estimator is proposed for salient-pole synchronous motors (SPSM) widely used in small and medium industries. The proposed estimator provides very accurate and low-cost steady-state load-torque estimation. The estimation procedure utilizes steady-state model of the SPSM together with a two-layer neural network for error minimization. The estimator is coded in C for 32-bit ARM Cortex CPU, and interfaced with MATLAB run on a PC. Experimental results confirm the practicality of the proposed estimator.

School of Electrical Engineering

Academic Year 2012

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิจัย จากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

ศาสตราจารย์นาวาอากาศโท ดร.สราวุฒิ สุจิตจร ที่ได้ให้คำปรึกษาแนะนำ และแนะแนวทางอันเป็นประโยชน์ยิ่งต่องานวิจัย รวมถึงได้ช่วยตรวจทาน และแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนทำให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น อีกทั้งเป็นกำลังใจ และเป็นแบบอย่างที่ดีในการดำเนินชีวิตหลาย ๆ ด้านให้กับผู้วิจัยเสมอมา

อาจารย์วิโรจน์ แสงชงทอง อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้ให้การสนับสนุนงานวิจัยให้สามารถดำเนินงานต่อไปได้เป็นอย่างดี และอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่กรุณาให้คำปรึกษาด้านวิชาการอย่างดียิ่งมาโดยตลอด

ขอขอบคุณบุคลากรศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวกในการทำงาน ขอขอบคุณพี่น้องบัณฑิตศึกษาทุกท่าน ที่ให้คำปรึกษาด้านวิชาการ และให้กำลังใจมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ทางด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่าน ที่ให้ความรัก กำลังใจ การอบรมเลี้ยงดู และให้การสนับสนุนทางด้านการศึกษาย่างดียิ่งมาโดยตลอด

อำภา สาระศิริ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฒ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของเบื้องต้น.....	1
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	1
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย	2
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.7 ทัศนวิสัยวรรณกรรม.....	3
1.8 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์.....	6
2 หลักการทำงานมอเตอร์ซิงโครนัสขั้วแม่เหล็กยื่น.....	8
2.1 บทนำ.....	8
2.2 หลักการทำงานของมอเตอร์ซิงโครนัส	8
2.2.1 การขับเคลื่อนโหลดของมอเตอร์ซิงโครนัส.....	9
2.2.2 การปรับกระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็ก.....	11
2.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดขั้วแม่เหล็กยื่น ในสถานะอยู่ตัว.....	13
2.4 สรุป	17

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3 การหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์	18
3.1 บทนำ	18
3.2 การเริ่มเดินเครื่องมอเตอร์ซิงโครนัส	18
3.3 การหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์	20
3.3.1 การทดสอบสลลิป (slip test) หาค่ารีแอกแตนซ์ X_d และ X_q	20
3.3.2 ขั้นตอนการทดสอบสลลิปเพื่อหาค่ารีแอกแตนซ์ X_d และ X_q	22
3.3.3 การหาค่าความต้านทานอาร์เมเจอร์	23
3.4 สรุป	24
4 การออกแบบและสร้างตัวประมาณค่าแรงบิดโหลด	25
4.1 บทนำ	25
4.2 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์เมเบิล	26
4.3 การวัดกระแสไฟฟ้าด้วยตัวตรวจรู้กระแส ACS 712	27
4.4 การวัดแรงดันด้วยวงจรแบ่งแรงดัน	30
4.5 การวัดความเร็วด้วยตัวตรวจรู้ ZX-21	33
4.6 การเขียนโปรแกรมภาษาซีประมาณค่าแรงบิดโหลด	35
4.7 สรุป	45
5 การทดสอบตัวประมาณค่าแรงบิดโหลด	46
5.1 บทนำ	46
5.2 การออกแบบการทดสอบและรายละเอียดการทดสอบ	46
5.3 ผลการทดสอบตัวประมาณค่าแรงบิดโหลดที่ 80%-120% ของแรงดันพิกัด	49
5.3.1 ผลการทดสอบตัวประมาณค่าแรงบิดโหลดที่ 80% ของแรงดันพิกัด	49
5.3.2 ผลการทดสอบตัวประมาณค่าแรงบิดโหลดที่ 90% ของแรงดันพิกัด	51
5.3.3 ผลการทดสอบตัวประมาณค่าแรงบิดโหลดที่ 100% ของแรงดันพิกัด	53
5.3.4 ผลการทดสอบตัวประมาณค่าแรงบิดโหลดที่ 110% ของแรงดันพิกัด	54
5.3.5 ผลการทดสอบตัวประมาณค่าแรงบิดโหลดที่ 120% ของแรงดันพิกัด	56
5.4 การวิเคราะห์ความผิดพลาดของตัวประมาณแรงบิดโหลด	57
5.5 สรุป	58

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

6	การปรับปรุงแก้ไขความผิดพลาดในการประมาณแรงบิดโหลดด้วย	
	โครงข่ายประสาทเทียม	59
6.1	บทนำ.....	59
6.2	ความรู้พื้นฐานโครงข่ายประสาทเทียม	59
6.2.1	องค์ประกอบของโครงข่ายประสาทเทียม	60
6.2.2	ฟังก์ชันการแปลง.....	62
6.2.3	โครงข่ายแบบไปหน้า (feedforward network)	64
6.2.4	การเรียนรู้แบบมีผู้ฝึกสอน (learning with supervisor)	67
6.3	คำสั่ง MATLAB ในการฝึกสอน	68
6.3.1	โปรแกรมฝึกสอน.....	68
6.3.2	โปรแกรมทดสอบ.....	74
6.4	ผลการทดสอบปรับปรุงค่าความผิดพลาดแรงบิดโหลดโดย	
	โครงข่ายประสาทเทียม.....	77
6.4.1	ผลการทดสอบตัวประมาณค่าแรงบิดโหลดที่ 80% ของแรงดันพิกัด.....	77
6.4.2	ผลการทดสอบตัวประมาณค่าแรงบิดโหลดที่ 90% ของแรงดันพิกัด.....	79
6.4.3	ผลการทดสอบตัวประมาณค่าแรงบิดโหลดที่ 100% ของแรงดันพิกัด.....	81
6.4.4	ผลการทดสอบตัวประมาณค่าแรงบิดโหลดที่ 110% ของแรงดันพิกัด.....	82
6.4.5	ผลการทดสอบตัวประมาณค่าแรงบิดโหลดที่ 120% ของแรงดันพิกัด.....	84
6.4.6	ผลการทดสอบตัวประมาณค่าแรงบิดโหลดที่แรงดันพิกัดอื่น ๆ	85
6.5	สรุป.....	88
7	สรุปและข้อเสนอแนะ	89
7.1	สรุป	89
7.2	ข้อเสนอแนะ	90
	รายการอ้างอิง.....	92
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. ผลการทดสอบตัวประมาณแรงบิดโหลดที่ 80%-120% ของแรงดันพิกัด	94

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ข. การพิสูจน์มุมแรงบิดและแรงไฟฟ้าต้านกลับ	110
ภาคผนวก ค. การปรับลดค่าผิดพลาดแรงบิด โหลด โดยการปรับคุณภาพ 0.85.....	115
ภาคผนวก ง. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่	120
ประวัติผู้เขียน.....	133



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประมาณแรงบิดโหลดของมอเตอร์ซิงโครนัส3
1.2	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดขั้วแม่เหล็กขึ้น6
4.1	ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบตัวตรวจรู้กระแส (ACS 712)29
4.2	ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบตัวตรวจรู้แรงดัน32
6.1	ฟังก์ชันการแปลงแบบต่างๆ62
6.2	ผลการทดสอบจำนวนนิวรอลและชนิดของฟังก์ชันที่เหมาะสม71
6.3	แสดงค่าแรงบิด โหลดจากเครื่องมือวัด และที่ได้จากการคำนวณที่แรงดันพิกัด 80%78
6.4	แสดงค่าแรงบิด โหลดจากเครื่องมือวัด และที่ได้จากการคำนวณที่แรงดันพิกัด 90%80
6.5	แสดงค่าแรงบิด โหลดจากเครื่องมือวัด และที่ได้จากการคำนวณที่แรงดันพิกัด 100%81
6.6	แสดงค่าแรงบิด โหลดจากเครื่องมือวัด และที่ได้จากการคำนวณที่แรงดันพิกัด 110%83
6.7	แสดงค่าแรงบิด โหลดจากเครื่องมือวัด และที่ได้จากการคำนวณที่แรงดันพิกัด 120%84
ก.1	แสดงค่าที่ได้จากเครื่องมือวัดที่ 80% ของแรงดันพิกัด (pf leading)95
ก.2	แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณที่ 80% ของแรงดันพิกัด (pf leading)95
ก.3	เปรียบเทียบค่าความผิดพลาด (%error) ของตัวประมาณแรงบิด โหลดที่ 80% ของแรงดันพิกัด (pf leading)96
ก.4	แสดงค่าที่ได้จากเครื่องมือวัดที่ 80% ของแรงดันพิกัด (pf lagging)96
ก.5	แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณที่ 80% ของแรงดันพิกัด (pf lagging)97
ก.6	เปรียบเทียบค่าความผิดพลาด (%error) ของตัวประมาณแรงบิด โหลดที่ 80% ของแรงดันพิกัด (pf lagging)97
ก.7	แสดงค่าที่ได้จากเครื่องมือวัดที่ 90% ของแรงดันพิกัด (pf leading)98
ก.8	แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณที่ 90% ของแรงดันพิกัด (pf leading)98
ก.9	เปรียบเทียบค่าความผิดพลาด (%error) ของตัวประมาณแรงบิด โหลดที่ 90% ของแรงดันพิกัด (pf leading)99
ก.10	แสดงค่าที่ได้จากเครื่องมือวัดที่ 90% ของแรงดันพิกัด (pf lagging)99
ก.11	แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณที่ 90% ของแรงดันพิกัด (pf lagging)100

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก.12 เปรียบเทียบค่าความผิดพลาด (%error) ของตัวประมาณแรงบิด โหลดที่ 90% ของแรงดันพิกัด (pf lagging).....	100
ก.13 แสดงค่าที่ได้จากเครื่องมือวัดที่ 100% ของแรงดันพิกัด (pf leading)	101
ก.14 แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณที่ 100% ของแรงดันพิกัด (pf leading)	101
ก.15 เปรียบเทียบค่าความผิดพลาด (%error) ของตัวประมาณแรงบิด โหลดที่ 100% ของแรงดันพิกัด (pf leading).....	102
ก.16 แสดงค่าที่ได้จากเครื่องมือวัดที่ 100% ของแรงดันพิกัด (pf lagging)	102
ก.17 แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณที่ 100% ของแรงดันพิกัด (pf lagging)	103
ก.18 เปรียบเทียบค่าความผิดพลาด (%error) ของตัวประมาณแรงบิด โหลดที่ 100% ของแรงดันพิกัด (pf lagging)	103
ก.19 แสดงค่าที่ได้จากเครื่องมือวัดที่ 110% ของแรงดันพิกัด (pf leading)	104
ก.20 แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณที่ 110% ของแรงดันพิกัด (pf leading)	104
ก.21 เปรียบเทียบค่าความผิดพลาด (%error) ของตัวประมาณแรงบิด โหลดที่ 110% ของแรงดันพิกัด (pf leading).....	105
ก.22 แสดงค่าที่ได้จากเครื่องมือวัดที่ 110% ของแรงดันพิกัด (pf lagging)	105
ก.23 แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณที่ 110% ของแรงดันพิกัด (pf lagging)	106
ก.24 เปรียบเทียบค่าความผิดพลาด (%error) ของตัวประมาณแรงบิด โหลดที่ 110% ของแรงดันพิกัด (pf lagging)	106
ก.25 แสดงค่าที่ได้จากเครื่องมือวัดที่ 120% ของแรงดันพิกัด (pf leading)	107
ก.26 แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณที่ 120% ของแรงดันพิกัด (pf leading)	107
ก.27 เปรียบเทียบค่าความผิดพลาด (%error) ของตัวประมาณแรงบิด โหลดที่ 120% ของแรงดันพิกัด (pf leading).....	108
ก.28 แสดงค่าที่ได้จากเครื่องมือวัดที่ 120% ของแรงดันพิกัด (pf lagging)	108
ก.29 แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณที่ 120% ของแรงดันพิกัด (pf lagging)	109
ก.30 เปรียบเทียบค่าความผิดพลาด (%error) ของตัวประมาณแรงบิด โหลดที่ 120% ของแรงดันพิกัด (pf lagging)	109
ค.1 เปรียบเทียบค่าความผิดพลาดจากการปรับคูน 0.85 และไม่ปรับคูน 0.85	116

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	การจ่ายกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์ซิงโครนัส.....9
2.2	การเปลี่ยนแปลงของมุมแรงบิดขณะไม่มีโหลดและมีโหลด.....10
2.3	รูปคลื่นไซน์ค่ากระแสและแรงดันของมอเตอร์ซิงโครนัส11
2.4	แผนภาพเฟสเซอร์กระแสนำหน้าแรงดัน (leading) เมื่อมอเตอร์ซิงโครนัสได้รับการกระตุ้นมากเกินไป12
2.5	แผนภาพเฟสเซอร์กระแสล่าหลังแรงดัน (lagging) เมื่อมอเตอร์ซิงโครนัสได้รับการกระตุ้นน้อยเกินไป12
2.6	แผนภาพสมมูลกำลังของมอเตอร์ซิงโครนัส15
2.7	กำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า ที่เปอร์เซ็นต์โหลดที่แตกต่างกัน16
3.1	การต่อฟิลด์คิสซาร์จรีซิสเตอร์.....19
3.2	การต่อวงจรการเริ่มเดินเครื่องของมอเตอร์ซิงโครนัส19
3.3	วงจรที่ใช้ในการทดสอบสลีป20
3.4	การหมุนที่ความเร็วซิงโครนัสที่ทำให้เกิดแรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้า21
3.5	การเชื่อมต่อชุดการทดสอบสลีปเพื่อหาค่ารีแอกแตนซ์ X_d และ X_q22
3.6	รูปคลื่นแรงดันชั่วต่อสเตเตอร์ และกระแสอาร์เมเจอร์ที่ได้จากผลการทดสอบสลีป.....23
4.1	แผนภาพการเชื่อมต่อส่วนต่าง ๆ ที่ทำหน้าที่วัดประมาณค่าแรงบิดโหลด25
4.2	บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์เมเปิล STM32F103RB27
4.3	ตัวตรวจรู้กระแส ACS71228
4.4	วงจรทดสอบตัวตรวจรู้กระแส.....28
4.5	ผลการทดสอบตัวตรวจรู้กระแส29
4.6	การถดถอยเชิงเส้นระหว่างกระแสอินพุตและแรงดันเอาต์พุต30
4.7	วงจรแบ่งแรงดันตรวจรู้แรงดัน31
4.8	วงจรทดสอบตัวตรวจรู้แรงดัน31
4.9	ผลการทดสอบตัวตรวจรู้แรงดัน32
4.10	การถดถอยเชิงเส้นระหว่างแรงดันอินพุตและแรงดันเอาต์พุต.....33

สารบัญรูป (ต่อ)

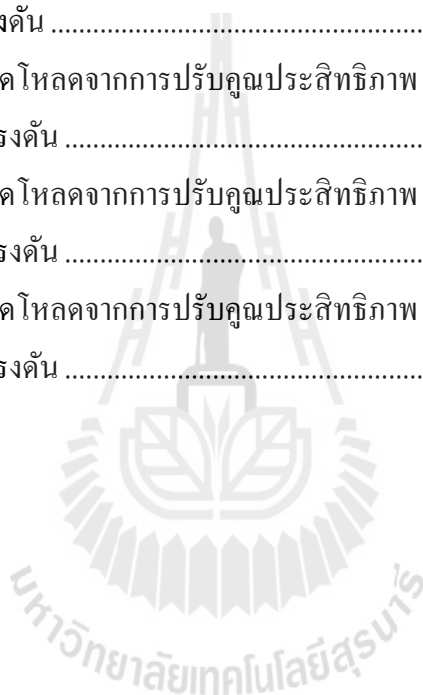
รูปที่	หน้า
4.11	ตัวตรวจรู้ความเร็ว ZX-2134
4.12	วงจรตัวตรวจรู้ ZX-21.....35
4.13	ความเร็วในการหมุนของมอเตอร์และสัญญาณเอาต์พุตดิจิทัลของตัวตรวจรู้ความเร็ว.....35
4.14	ส่วนต่าง ๆ และลำดับการทำงานของโปรแกรม.....36
4.15	ฟังก์ชันการคำนวณค่าแรงบิดโหลด.....38
4.16	โปรแกรมตัวประมาณค่าแรงบิดโหลด.....45
5.1	การติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบตัวประมาณค่าแรงบิดโหลด.....49
5.2	การเปรียบเทียบระหว่างค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดและการคำนวณที่ได้จากตัวประมาณค่าแรงบิดโหลด เมื่อแรงดันสเตเตอร์มีค่าเท่ากับ 80% ของแรงดันพิกัด.....50
5.3	ความผิดพลาดเฉลี่ยระหว่างผลการคำนวณและค่าที่อ่านได้ เมื่อแรงดันสเตเตอร์มีค่าเท่ากับ 80% ของแรงดันพิกัด.....51
5.4	การเปรียบเทียบระหว่างค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดและการคำนวณที่ได้จากตัวประมาณค่าแรงบิดโหลด เมื่อแรงดันสเตเตอร์มีค่าเท่ากับ 90% ของแรงดันพิกัด.....52
5.5	ความผิดพลาดเฉลี่ยระหว่างผลการคำนวณและค่าที่อ่านได้ เมื่อแรงดันสเตเตอร์มีค่าเท่ากับ 90% ของแรงดันพิกัด.....52
5.6	การเปรียบเทียบระหว่างค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดและการคำนวณที่ได้จากตัวประมาณค่าแรงบิดโหลด เมื่อแรงดันสเตเตอร์มีค่าเท่ากับ 100% ของแรงดันพิกัด.....53
5.7	ความผิดพลาดเฉลี่ยระหว่างผลการคำนวณและค่าที่อ่านได้ เมื่อแรงดันสเตเตอร์มีค่าเท่ากับ 100% ของแรงดันพิกัด.....54
5.8	การเปรียบเทียบระหว่างค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดและการคำนวณที่ได้จากตัวประมาณค่าแรงบิดโหลด เมื่อแรงดันสเตเตอร์มีค่าเท่ากับ 110% ของแรงดันพิกัด.....55
5.9	ความผิดพลาดเฉลี่ยระหว่างผลการคำนวณและค่าที่อ่านได้ เมื่อแรงดันสเตเตอร์มีค่าเท่ากับ 110% ของแรงดันพิกัด.....55
5.10	การเปรียบเทียบระหว่างค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดและการคำนวณที่ได้จากตัวประมาณค่าแรงบิดโหลด เมื่อแรงดันสเตเตอร์มีค่าเท่ากับ 120% ของแรงดันพิกัด.....56
5.11	ความผิดพลาดเฉลี่ยระหว่างผลการคำนวณและค่าที่อ่านได้ เมื่อแรงดันสเตเตอร์มีค่าเท่ากับ 120% ของแรงดันพิกัด.....57

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.12 ความผิดพลาดการคำนวณแรงบิดโหลดเปรียบเทียบในกรณีกระแสนำหน้าและล่าหลัง	58
6.1 โครงสร้างระบบประสาท	61
6.2 กระบวนการประมวลผลของโครงข่ายประสาทเทียม	62
6.3 โครงข่ายแบบไปหน้าชั้นเดียวที่มี S นิวรอน	65
6.4 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของโครงข่ายชั้นเดียวในรูปของเมตริกซ์	66
6.5 โครงข่ายหลายชั้นในรูปของเมตริกซ์	67
6.6 ขั้นตอนการเรียนรู้แบบมีผู้ฝึกสอน	68
6.7 โครงข่ายประสาทเทียมแบบไปหน้าสองชั้น	74
6.8 การเขียนโปรแกรมคำนวณค่าภาษาซีและเพิ่มในส่วนปรับลดค่าผิดพลาด	76
6.9 การติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบตัวประมาณค่าแรงบิดโหลด	77
6.10 การเปรียบเทียบระหว่างค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดและการคำนวณที่ได้จากตัวประมาณ ค่าแรงบิดโหลด เมื่อแรงดันสเตเตอร์มีค่าเท่ากับ 80% ของแรงดันพิกัด	79
6.11 การเปรียบเทียบระหว่างค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดและการคำนวณที่ได้จากตัวประมาณ ค่าแรงบิดโหลด เมื่อแรงดันสเตเตอร์มีค่าเท่ากับ 90% ของแรงดันพิกัด	80
6.12 การเปรียบเทียบระหว่างค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดและการคำนวณที่ได้จากตัวประมาณ ค่าแรงบิดโหลด เมื่อแรงดันสเตเตอร์มีค่าเท่ากับ 100% ของแรงดันพิกัด	82
6.13 การเปรียบเทียบระหว่างค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดและการคำนวณที่ได้จากตัวประมาณ ค่าแรงบิดโหลด เมื่อแรงดันสเตเตอร์มีค่าเท่ากับ 110% ของแรงดันพิกัด	83
6.14 การเปรียบเทียบระหว่างค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดและการคำนวณที่ได้จากตัวประมาณ ค่าแรงบิดโหลด เมื่อแรงดันสเตเตอร์มีค่าเท่ากับ 120% ของแรงดันพิกัด	85
6.15 การเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากเครื่องมือวัดและการคำนวณที่ได้จากตัวประมาณค่า แรงบิดโหลด เมื่อแรงดันสเตเตอร์มีค่าเท่ากับ 85% และ 95% ของแรงดันพิกัด	86
6.16 การเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากเครื่องมือวัดและการคำนวณที่ได้จากตัวประมาณค่า แรงบิดโหลด เมื่อแรงดันสเตเตอร์มีค่าเท่ากับ 105% และ 115% ของแรงดันพิกัด	87
6.17 สรุปค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นก่อนใช้ ANN และหลังใช้ ANN	87
ค.1 เปรียบเทียบค่าผิดพลาดจากการปรับคูน 0.85 และไม่ปรับคูน 0.85 แต่ละพิกัดแรงดัน	116

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ค.2	เปรียบเทียบค่าแรงบิด โหลดจากการปรับคุณภาพประสิทธิภาพ 0.85 และไม่มีการปรับคุณภาพ ที่ 80% ของพิกัดแรงดัน117
ค.3	เปรียบเทียบค่าแรงบิด โหลดจากการปรับคุณภาพประสิทธิภาพ 0.85 และไม่มีการปรับคุณภาพ ที่ 90% ของพิกัดแรงดัน117
ค.4	เปรียบเทียบค่าแรงบิด โหลดจากการปรับคุณภาพประสิทธิภาพ 0.85 และไม่มีการปรับคุณภาพ ที่ 100% ของพิกัดแรงดัน118
ค.5	เปรียบเทียบค่าแรงบิด โหลดจากการปรับคุณภาพประสิทธิภาพ 0.85 และไม่มีการปรับคุณภาพ ที่ 110% ของพิกัดแรงดัน118
ค.6	เปรียบเทียบค่าแรงบิด โหลดจากการปรับคุณภาพประสิทธิภาพ 0.85 และไม่มีการปรับคุณภาพ ที่ 120% ของพิกัดแรงดัน119



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

- θ คือ มุมต่างเฟสระหว่าง \vec{E}_0 และ \vec{V} หรือ มุมแรงบิด มีหน่วยองศา
- ε คือ มุมต่างเฟสระหว่าง \vec{E}_0 และ \vec{I} มีหน่วยองศา
- φ คือ มุมต่างเฟสระหว่าง \vec{I} และ \vec{V} หรือมุมตัวประกอบกำลัง มีหน่วยองศา
- ω คือ อัตราเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้า มีหน่วยเรเดียนต่อวินาที (rad/sec) เท่ากับ $2\pi f$
- ω_m คือ อัตราเร็วเชิงมุมทางกล มีหน่วยเรเดียนต่อวินาที (rad/sec) เท่ากับ $\omega_m = \frac{2\pi n}{60}$
- ψ_d คือ ฟลักซ์สเตเตอร์บนแกน d มีหน่วยเวเบอร์ (Wb)
- ψ_f คือ ฟลักซ์สนามแม่เหล็ก มีหน่วยเวเบอร์ (Wb)
- ψ_s คือ ฟลักซ์สเตเตอร์ มีหน่วยเวเบอร์ (Wb)
- ψ_q คือ ฟลักซ์สเตเตอร์บนแกน q มีหน่วยเวเบอร์ (Wb)
- f คือ ความถี่ไฟฟ้า มีหน่วยเฮิรตซ์ (Hz)
- i_a คือ กระแสเฟส a มีหน่วยแอมแปร์ (A)
- i_b คือ กระแสเฟส b มีหน่วยแอมแปร์ (A)
- i_c คือ กระแสเฟส c มีหน่วยแอมแปร์ (A)
- n คือ ความเร็วเชิงโรตารี มีหน่วยรอบ/นาที (rpm)
- p คือ จำนวนขั้วไฟฟ้า
- v_{ab} คือ แรงดันระหว่างเฟส a และ b มีหน่วยโวลต์ (V)
- v_{ca} คือ แรงดันระหว่างเฟส c และ a มีหน่วยโวลต์ (V)
- \vec{E}_0 คือ เวกเตอร์ของแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ มีหน่วยโวลต์ (V_{rms})
- E_0 คือ แรงดันต้านกลับ มีหน่วยเป็นโวลต์ (V_{rms})
- E'_0 คือ แรงดันต้านกลับโดยประมาณ มีหน่วยโวลต์ (V_{rms})
- \vec{I} คือ เวกเตอร์ของกระแสอาร์เมเจอร์ มีหน่วยแอมแปร์ (A_{rms})
- I_{rms} คือ กระแสอาร์เมเจอร์ มีหน่วยแอมแปร์ (A_{rms})
- I_a คือ กระแสอาร์เมเจอร์ มีหน่วยแอมแปร์ (A)
- I_d คือ กระแสตามแนวแกนตรง มีหน่วยแอมแปร์ (A_{rms})
- \vec{I}_d คือ เวกเตอร์ของกระแสตามแนวแกนตรง มีหน่วยแอมแปร์ (A_{rms})
- I_f คือ กระแสกระตุ้นขดลวดสนาม มีหน่วยแอมแปร์ (A) หรือกระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็ก
- I_q คือ กระแสตามแนวแกนขวาง มีหน่วยแอมแปร์ (A_{rms})

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

- \bar{I}_q คือ เวกเตอร์ของกระแสตามแนวแกนขวาง มีหน่วยแอมแปร์ (A_{rms})
- J คือ ความเฉื่อยของโรเตอร์ มีหน่วยเมตร⁴ (m^4)
- L_{md} คือ ความเหนี่ยวนำรวม มีหน่วยเฮนรี่ (H)
- L_{sd} คือ ความเหนี่ยวนำบนแกน d มีหน่วยเฮนรี่ (H)
- L_{sq} คือ ความเหนี่ยวนำบนแกน q มีหน่วยเฮนรี่ (H)
- n คือ ความเร็วเชิงโคโรนา มีหน่วยรอบ/นาที (rpm)
- M_e คือ แรงบิดแอกทีฟหรือแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าในสถานะอยู่ตัว มีหน่วยนิวตัน-เมตร (N-m)
- M_m คือ แรงบิดเสียดทานเชิงกลในสถานะอยู่ตัว มีหน่วยนิวตัน-เมตร (N-m)
- M_r คือ แรงบิดโหลดในสถานะอยู่ตัว มีหน่วยนิวตัน-เมตร (N-m)
- P คือ กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยสเตเตอร์ 3 เฟส มีหน่วยวัตต์ (W)
- P_d คือ กำลังไฟฟ้าจากกระแสตามแนวแกนตรง มีหน่วยวัตต์ (W)
- P_q คือ กำลังไฟฟ้าจากกระแสตามแนวแกนขวาง มีหน่วยวัตต์ (W)
- P_E คือ กำลังกระตุ้นกระแสสนาม มีหน่วยวัตต์ (W)
- P_{Fe} คือ กำลังสูญเสียในแกนเหล็ก มีหน่วยวัตต์ (W)
- P_{JA} คือ กำลังสูญเสียที่เกิดจากขดลวดสเตเตอร์ มีหน่วยวัตต์ (W)
- P_{JE} คือ กำลังสูญเสียที่เกิดจากขดลวดสนามแม่เหล็ก มีหน่วยวัตต์ (W)
- P_m คือ กำลังสูญเสียทางกล (ที่เกิดจากแรงต้านอากาศและแรงเสียดทาน) มีหน่วยวัตต์ (W)
- R คือ ความต้านทานอาร์เมเจอร์ มีหน่วยโอห์ม (Ω)
- S คือ กำลังไฟฟ้าเชิงซ้อน มีหน่วยโวลต์แอมแปร์ (VA)
- \bar{V} คือ เวกเตอร์ของแรงดันที่จ่ายที่สเตเตอร์ มีหน่วยโวลต์ (V_{rms})
- V_{rms} คือ แรงดันที่จ่ายที่สเตเตอร์ มีหน่วยโวลต์ (V_{rms})
- V_t คือ แรงดันขั้วต่อสเตเตอร์ มีหน่วยโวลต์ (V)
- X_d คือ รีแอกแตนซ์ตามแนวตรง มีหน่วยโอห์ม (Ω)
- X_q คือ รีแอกแตนซ์ตามแนวขวาง มีหน่วยโอห์ม (Ω)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันมีการใช้งานมอเตอร์ซิงโครนัสตามโรงงานอุตสาหกรรมขนาดเล็กและขนาดกลางเป็นจำนวนมาก เนื่องจากเป็นมอเตอร์ที่ให้ความเร็วไม่สูงนัก มีน้ำหนักเบา ขนาดเล็ก และมีความถี่ต่ำกว่ามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ค่าพิกัดเดียวกัน ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ซิงโครนัสมีความจำเป็นต้องทราบแรงบิดโหลด เพื่อสามารถประเมินได้ว่า มอเตอร์มีการทำงานได้ตามต้องการหรือทำงานเกินพิกัดหรือไม่ ในการใช้เครื่องมือวัดทางกลถึงแม้มีความแม่นยำและความน่าเชื่อถือสูงแต่ก็มีราคาแพง และต้องการการบำรุงรักษาอย่างสม่ำเสมอ วิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำเสนอการประดิษฐ์ อุปกรณ์ประมาณค่าแรงบิดโหลดในสถานะอยู่ตัวที่มีความแม่นยำ ซึ่งได้ดำเนินงานกับมอเตอร์ซิงโครนัสแบบตัวหมุนพันขดลวดชนิดขั้วแม่เหล็กยื่น เพื่อใช้แทนเครื่องมือวัดที่มีราคาแพง ในวิทยานิพนธ์นี้ ได้พิจารณาการประมาณค่าแรงบิดโหลดในสถานะอยู่ตัว โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสถานะอยู่ตัวประกอบกับการวิเคราะห์แผนภาพเฟสเซอร์เป็นฐาน การพัฒนาโปรแกรมภาษาซีสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ ในการปรับลดค่าความผิดพลาดได้ใช้เทคนิคการเรียนรู้ทางปัญญาประดิษฐ์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียม

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อพัฒนาตัวประมาณค่าแรงบิดโหลดในสถานะอยู่ตัวให้ใช้งานได้กับมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดขั้วแม่เหล็กยื่น

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

- 1.3.1 ดำเนินงานในสถานะอยู่ตัว (อัตราเร็วรอบการหมุนของมอเตอร์คงที่)
- 1.3.2 ปรับปรุงสมรรถนะของตัวประมาณค่าด้วยโครงข่ายประสาทเทียม

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 ออกแบบ สร้างและทดสอบตัวประมาณค่าแรงบิดโหลดของมอเตอร์ เพื่อประมาณแรงบิดในย่าน 80%-120% ของแรงดันแรงดันพิกัด

1.4.2 ปรับปรุงความผิดพลาดการทำงานของตัวประมาณค่าให้มีค่าน้อยจนยอมรับได้ (ไม่เกิน $\pm 5\%$)

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

1.5.1 แนวทางการดำเนินงาน

1. ศึกษาการทำงานของมอเตอร์ซิงโครนัส
 2. สืบค้นปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการหาค่าแรงบิดโพลดของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดขั้วแม่เหล็กยื่น
 3. ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดขั้วแม่เหล็กยื่น
- ในสถานะอยู่ตัว
4. ทดสอบมอเตอร์เพื่อเก็บข้อมูลค่าพารามิเตอร์ต่างๆ
 5. ออกแบบการทดสอบให้สามารถหาค่าแรงบิดโพลดโดยการเรียนรู้แบบออนไลน์
 6. พัฒนาโปรแกรมภาษาซีเพื่อคำนวณแรงบิดโพลด
 7. คิดตั้งอุปกรณ์ตัวประมาณค่าแรงบิดโพลด ทดสอบและวิเคราะห์ความผิดพลาด
 8. ปรับปรุงแก้ไขตัวประมาณค่าเพื่อลดความผิดพลาด

1.5.2 ระเบียบวิธีวิจัย

ดำเนินงานตามระเบียบวิธีวิจัยทางวิศวกรรมที่ประกอบด้วย การจำลองสถานการณ์ การวิเคราะห์ ออกแบบ สร้างและทดสอบอุปกรณ์ต้นแบบ

1.5.3 สถานที่ทำการวิจัย

อาคารศูนย์เครื่องมือฯ 3 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.5.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยที่มีอยู่

1. มอเตอร์ซิงโครนัสชนิดขั้วแม่เหล็กยื่นขนาด 1 kW รุ่น SE2662-5M
2. ออสซิลโลสโคป
3. เครื่องมือวัดทางวิศวกรรมพื้นฐาน
4. คอมพิวเตอร์

1.5.5 การเก็บรวบรวมข้อมูล

เก็บรวบรวมข้อมูลการจำลองสถานการณ์ การทำงานของมอเตอร์ และการทดสอบอุปกรณ์ต้นแบบ

1.5.6 การวิเคราะห์ข้อมูล

วิเคราะห์ข้อมูลจากการค้นคว้าวรรณกรรมและจากตำราทางวิชาการ จากนั้นพิจารณาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสถานะอยู่ตัวของมอเตอร์ที่เหมาะสม เพื่อพัฒนาเป็น โปรแกรมคำนวณค่าแรงบิดโหลดของมอเตอร์ ออกแบบและทดสอบตัวประมาณแรงบิดโหลด จากนั้นวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเฉพาะทางวิศวกรรม

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.6.1 มีความรู้เกี่ยวกับการทำงานของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดขั้วแม่เหล็กยื่น
- 1.6.2 มีทักษะในการเขียน โปรแกรมภาษาซี
- 1.6.3 มีทักษะในการใช้เครื่องมือวัดทางไฟฟ้า
- 1.6.4 ได้อุปกรณ์ต้นแบบราคาถูกใช้งานทดแทนชุดวัดแรงบิดโหลดในสถานะอยู่ตัวของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดขั้วแม่เหล็กยื่น

1.7 ปรัชญ์วรรณกรรม

จากการทำปรัชญ์วรรณกรรมสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ การประมาณแรงบิดโหลดของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดขั้วแม่เหล็กยื่น และแบบจำลองมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดขั้วแม่เหล็กยื่น แสดงรายละเอียดไว้ในตารางที่ 1.1 และ 1.2 ตามลำดับ

ตารางที่ 1.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประมาณแรงบิดโหลดของมอเตอร์ซิงโครนัส

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1968	C.J. Henricus and D. Jong	ได้ทำการศึกษาการเริ่มเดินเครื่องของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดขั้วแม่เหล็กยื่น โดยพยายามออกแบบวิธีการคำนวณสำหรับผลของสมรรถนะมอเตอร์ในขณะที่เริ่มเดินเครื่อง ทำการหาค่าแรงบิดฐาน $base\ torque = \frac{apparent\ power}{synchronous\ speed}$ แสดงผลในรูปต่อหน่วยแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าสถานะอยู่ตัวได้จาก $M_e = \frac{1}{2}V(I_d - I_q)$ ได้จากการคูณแรงดันเข้ากับกระแสบนแกน d-q หารสอง ในช่วงเริ่มต้นสามารถปรับเปลี่ยนสมรรถนะได้ตามต้องการ ส่วนในช่วงท้ายจะเกิดปฏิกิริยาฟลักซ์รั่วไหล ซึ่งทำให้ผลการประมาณแรงบิดคลาดเคลื่อน

ตารางที่ 1.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประมาณแรงบิดโหลดของมอเตอร์ซิงโครนัส (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1989	O.O. Joseph and A.L. Thomas	<p>ได้ศึกษาแบบจำลองในสถานะอิมิตัวของมอเตอร์ซิงโครนัส ขั้วแม่เหล็กยื่น โดยใช้การคำนวณสมรรถนะเริ่มเดินเครื่องไปถึงการเกิดสภาวะชั่วคราวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลด ค่าแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า</p> <p>คำนวณได้จาก $M_e = \frac{3}{2} \frac{P}{(2\omega_m)} (\psi_d I_q - \psi_q I_d)$ ทำการหาค่าแรงบิดโหลดจากการ $M_r = M_e - J \frac{d\omega_m}{dt}$ ผลการจำลองและการทดสอบได้แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองมีความถูกต้องสำหรับมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดขั้วแม่เหล็กยื่นสถานะอิมิตัว แต่ไม่สามารถนำมาใช้ได้ ในสถานะอยู่ตัวได้ตลอด ให้ผลการทดสอบที่ดีเฉพาะในช่วงแรงดันไฟฟ้าต่ำเริ่มต้น เนื่องจาก ผลกระทบที่เกิดจากฟลักซ์สนามแม่เหล็กในแกน สเตเตอร์</p>
1990	J.O. Ojo, V. Ostovic, T.A. Lipo And J.C. White	<p>ได้นำเสนอวิธีการคำนวณหาค่าแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า โดยใช้มอเตอร์ซิงโครนัสชนิดขั้วแม่เหล็กยื่นขนาด 25 hp ซึ่งหาค่าแรงบิดด้วยการอินทิเกรตแรงดันแล้วคูณด้วยกระแสในแต่ละเฟส เรียกวิธีการนี้ว่า volt-second ampere (MVSA) ได้ตามสมการข้างล่างนี้</p> $M_e = \frac{\sqrt{3}p}{6} \left\{ (i_a - i_b) \int v_{ca} - R(i_c - i_a) dt - (i_c - i_a) \int v_{ab} - R(i_a - i_b) dt \right\}$ <p>วิธีการวัดแบบนี้ใช้ได้เฉพาะแรงดันระหว่างสาย และกระแสระหว่างสาย เป็นวิธีการหนึ่งที่ทำให้ผลทดสอบไม่ผิดนัก เมื่อเปรียบเทียบกับผลการคำนวณ</p>

ตารางที่ 1.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประมาณแรงบิดโหลดของมอเตอร์ซิงโครนัส (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1998	O. Pyrhonen, M. Niemela, J. Pyrhonen and J. Kaukonen	<p>ได้นำเสนอการหาแรงบิดสูงสุดระหว่างการกระตุ้นแรงบิดหยุดนิ่งและแรงบิดพลวัตของการขับเคลื่อนมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดขั้วแม่เหล็กยื่นในช่วงการกระตุ้นแรงบิดหยุดนิ่งจะมีแรงบิดสูงสุด สามารถหาได้ดังสมการ</p> $M_{e,max} = \sqrt{1 - \cos^2(\theta)} \left(\psi_s ^2 \left(\frac{1}{L_{sq}} - \frac{1}{L_{sd}} \right) + \cos(\theta) \psi_s \psi_f \right)$ <p>การเปลี่ยนแปลงแรงบิดอ่อนตัวลงในช่วงที่มีแรงดันไฟฟ้าสำรองขนาดเล็ก ซึ่งในการทดสอบต่อไปควรจะทดสอบที่ความเร็วที่สูงขึ้นเมื่อมุมโหลดอยู่ที่ใกล้ขีดจำกัดของเสถียรภาพ</p>
2004	M.I. Masoud, J.E. Fletcher, and B.W. William	<p>ได้นำเสนอการควบคุมแรงบิดมอเตอร์ซิงโครนัสขั้วแม่เหล็กยื่นโดยใช้ระบบวงปิดจำลองบนแกน d และแกน q การคำนวณแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า ตามสมการ</p> $M_e = \frac{3p}{2} I_q \{ (L_{sd} - L_{sq}) I_d - L_{md} I_f \}$ <p>ซึ่งพบว่า ถ้าแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจะทำให้กำลังไฟฟ้าที่โรเตอร์สูงขึ้นด้วย แต่ค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดลดลง จากผลการจำลองสถานการณ์และการทดสอบ พลังงานไฟฟ้าที่โรเตอร์สามารถเพิ่มขึ้น โดยการเพิ่มฟลักซ์รอบกวนความถี่ แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถเพิ่มค่าพลังงานไฟฟ้าที่โรเตอร์สูงสุด และสามารถทำให้โรเตอร์ที่สภาวะมีโหลดใช้พลังงานลดลง</p>

ตารางที่ 1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดขั้วแม่เหล็กยื่น

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2007	B. Sergelen	นำเสนอแบบจำลองมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดขั้วแม่เหล็กยื่นสองตัวต่อขนานกันบนแกนอ้างอิง d และ q เป็นแบบจำลองระบบต่อเฟส โดยทำการคำนวณค่ามุมโหลดแรงบิดตามสมการ $\theta = \int (1 - \omega_m) dt + \theta(0)$ สำหรับการจำลองสถานการณ์ของมอเตอร์ซิงโครนัสสองตัวอยู่ภายใต้เงื่อนไขเริ่มต้นเดียวกัน คือ จ่ายกระแสให้คงที่ จากผลการจำลองสถานการณ์เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองพบว่า ได้ผลอย่างมีประสิทธิภาพ และนอกจากนี้ยังได้แสดงการหาค่าแรงบิดโหลดจาก $M_r = M_e - M_m$

1.8 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย 7 บท ซึ่งในแต่ละบทได้นำเสนอไว้ดังนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำ กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ รวมทั้งขอบเขตของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ และการปรีทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับการประมาณค่าแรงบิดของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดขั้วแม่เหล็กยื่น และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์

บทที่ 2 กล่าวถึงหลักการการทำงานของมอเตอร์ซิงโครนัส การจ่ายโหลดของมอเตอร์ การปรับค่ากระตุ้นสนามแม่เหล็ก แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดขั้วแม่เหล็กยื่นในสถานะอยู่ตัว

บทที่ 3 การทดสอบมอเตอร์ซิงโครนัสขณะเริ่มเดินเครื่องในสถานะอยู่ตัว และการทดสอบมอเตอร์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ซิงโครนัส

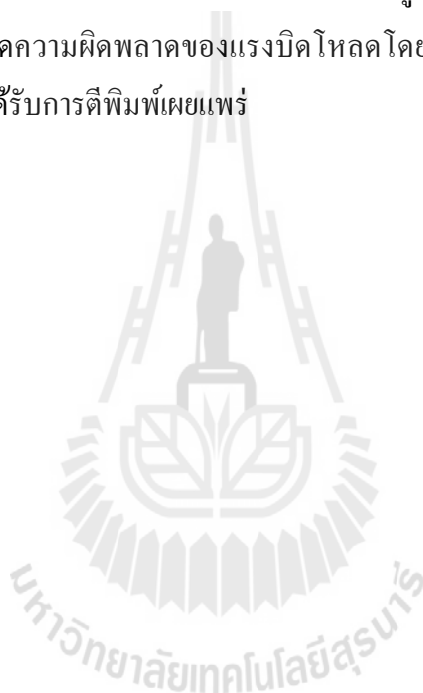
บทที่ 4 การออกแบบและสร้างตัวประมาณค่าแรงบิดโหลด การติดตั้งและทดสอบตัวตรวจรู้กระแส แรงดันและความเร็ว ออกแบบการเชื่อมต่อบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ โปรแกรมภาษาซี และออกแบบการทดลองคำนวณหาค่าแรงบิด

บทที่ 5 นำเสนอผลการทดสอบตัวประมาณค่าแรงบิดโหลด การวิเคราะห์ความผิดพลาดในการประมาณค่าแรงบิดโหลด

บทที่ 6 นำเสนอการปรับปรุงแก้ไขความผิดพลาดในการประมาณค่าแรงบิดโหลดด้วยโครงข่ายประสาทเทียม และผลการทดสอบตัวประมาณค่าแรงบิดโหลดที่ได้ปรับปรุงแล้วจากการใช้โครงข่ายประสาทเทียม

บทที่ 7 เป็นบทสรุปและข้อเสนอแนะ

ภาคผนวกมีอยู่ด้วยกัน 4 ส่วน คือ ภาคผนวก ก. ผลการทดสอบตัวประมาณแรงบิดโหลดที่แรงดันสเตเตอร์เท่ากับ 80% - 120% ของพิกัด ข. แสดงการพิสูจน์มุมแรงบิดและแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ ค. แสดงการปรับลดความผิดพลาดของแรงบิดโหลดโดยการปรับตัวคูณประสิทธิภาพ 0.85 และ ง. แสดงบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่



บทที่ 2

หลักการทํางานมอเตอร์ซิงโครนัสขั้วแม่เหล็กยื่น

2.1 บทนำ

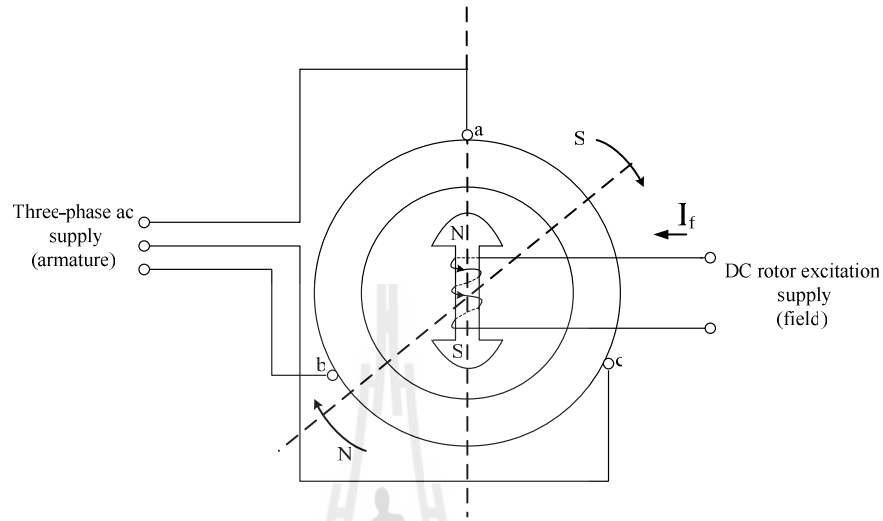
บทนี้กล่าวถึงหลักการพื้นฐานและเนื้อหาสำคัญต่าง ๆ ที่ได้จากปริทัศน์วรรณกรรม ซึ่งเป็นประโยชน์ในการทำวิจัยวิทยานิพนธ์ ทำให้สามารถเข้าใจถึงหลักการทํางานของมอเตอร์ การขับเคลื่อนโหลดของมอเตอร์ให้เกิดการหมุน การปรับกระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็ก แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งเป็นความรู้พื้นฐานที่ใช้ในการสร้างตัวประมาณค่าแรงบิดโหลด

2.2 หลักการทํางานของมอเตอร์ซิงโครนัส

มอเตอร์ซิงโครนัสสามารถแบ่งตามประเภทของโรเตอร์ ที่เป็นตัวสร้างสนามแม่เหล็กซึ่งมีลักษณะของขั้วแม่เหล็กอยู่ 2 แบบ คือแบบขั้วแม่เหล็กไม่ยื่น (non-salient pole หรือ cylindrical rotor) และแบบขั้วแม่เหล็กยื่น (salient pole) ในงานวิจัยนี้พิจารณามอเตอร์ไฟฟ้าชนิดขั้วแม่เหล็กยื่น มอเตอร์ชนิดนี้มีฟลักซ์ในช่องอากาศของโรเตอร์กระจายตัวไม่สม่ำเสมอ การพิจารณาในทางทฤษฎีจึงค่อนข้างยุ่งยากและซับซ้อน แต่เนื่องจากมอเตอร์ชนิดนี้ให้ความเร็วในการใช้งานไม่สูงนัก สร้างได้ง่าย และมีราคาไม่แพง จึงเป็นที่นิยมใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมขนาดเล็กและขนาดกลาง ถึงแม้ว่าโครงสร้างทางกายภาพจะไม่แน่นอนเท่ากับแบบขั้วแม่เหล็กไม่ยื่น รูปที่ 2.1 แสดงมอเตอร์ซิงโครนัส 2 ขั้ว มีแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าสลับ 3 เฟสจ่ายให้ขดลวดอาร์เมเจอร์ (สเตเตอร์) และแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจ่ายให้ขดลวดสนาม (โรเตอร์)

เครื่องกำเนิดซิงโครนัสสามารถทํางานเป็นมอเตอร์ซิงโครนัสได้ถ้าหากปลดตัวขับเคลื่อนกำลังออกจากเครื่องกำเนิดแล้วจ่ายกระแสไฟฟ้าสลับให้ขดลวดอาร์เมเจอร์ (สเตเตอร์) และจ่ายกระแสไฟฟ้าตรงให้ขดลวดสนาม (โรเตอร์) ในปริมาณที่เหมาะสม จะเกิดแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าทำให้โรเตอร์ หมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส ข้อดีของมอเตอร์ซิงโครนัส คือมีความเร็วคงที่ไม่ว่าจะมีโหลดหรือไม่มีก็ตาม และยังสามารถปรับความเร็วได้โดยการเปลี่ยนแปลงความถี่ นอกจากนี้มอเตอร์ซิงโครนัสสามารถทํางานได้ที่ตัวประกอบกำลังค่าต่าง ๆ โดยทํางานได้ทั้งตัวประกอบกำลังล่าช้าและตัวประกอบกำลังนำหน้า ดังนั้นจึงเหมาะสมกับงานทางอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น โรงโม่หิน ยานยนต์ไฟฟ้า เป็นต้น แต่การเริ่มเดินเครื่องมอเตอร์ซิงโครนัสค่อนข้างยุ่งยาก การป้อนแรงดันกระแสสลับแบบปรับเปลี่ยนความถี่จากต่ำไปสูง จะทำเพื่อให้อัตรา

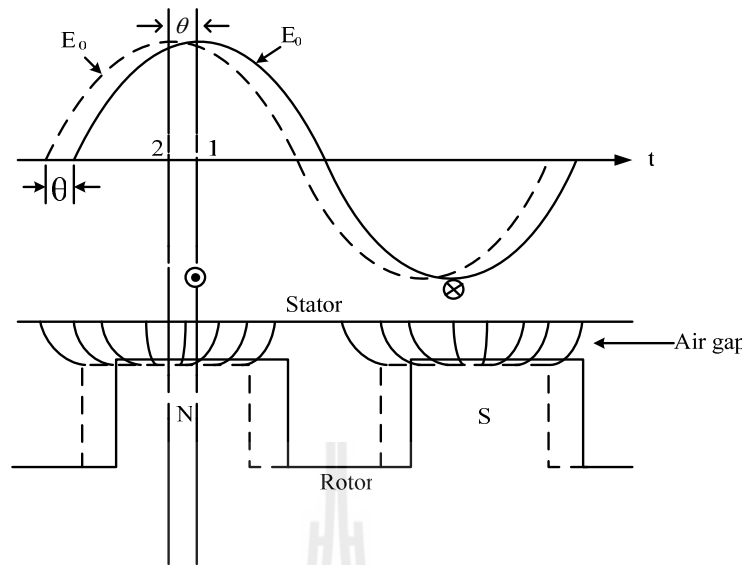
หมุนได้ การใช้งานมอเตอร์ซิงโครนัสมีความแตกต่างจากมอเตอร์อื่น คือ ต้องใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้า 2 แหล่งจ่าย และแรงบิดจะเกิดขึ้นที่ความเร็วซิงโครนัสเท่านั้น แต่ที่ความเร็วอื่นแรงบิดเฉลี่ยจะเป็นศูนย์



รูปที่ 2.1 การจ่ายกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์ซิงโครนัส (มงคลทอง สงคราม, 1992)

2.2.1 การขับเคลื่อนโหลดของมอเตอร์ซิงโครนัส

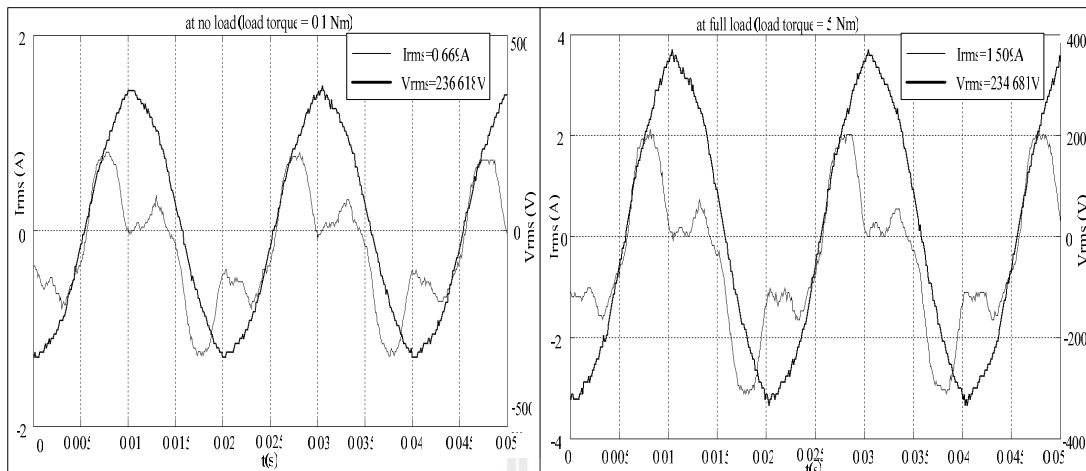
เมื่อจ่ายแรงดันให้ขดลวดอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ จะเกิดแรงบิด ทำให้มอเตอร์หมุนขณะที่มอเตอร์หมุนนั้นมีแรงดันที่อาร์เมเจอร์ส่วนหนึ่ง ซึ่งมีทิศทางตรงกันข้ามกับแรงดันที่จ่ายให้มอเตอร์เรียกว่า แรงดันต้านกลับ E_0 (back emf หรือ counter emf) ในกรณีที่โหลดเพิ่มขึ้น แรงดันต้านกลับจะทำให้กระแสไฟฟ้าอาร์เมเจอร์และความเร็วลดลง การทำงานของมอเตอร์ซิงโครนัสนั้นจะมีความเร็วเฉลี่ยคงที่ แม้ว่าโหลดจะเปลี่ยนแปลงไป โดยมีวิธีการปรับสภาพให้เข้ากับโหลด ซึ่งอาจทำความเข้าใจได้โดยใช้แผนภาพในรูปที่ 2.2 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ขณะไม่มีโหลด ตัวนำอยู่ที่กลางขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์ พิจารณาได้จากรูปคลื่นไซน์เส้นทึบ E_0 ที่เกิดขึ้นมีค่าสูงสุดอยู่ที่ตำแหน่ง 1 เมื่อขับเคลื่อนโหลด มอเตอร์ซิงโครนัสสามารถปรับสภาพได้โดยแกนของมอเตอร์จะหมุนช้าลงชั่วคราว เนื่องจากต้องใช้เวลาเพื่อให้โรเตอร์รับกำลังไฟฟ้าสำหรับชดเชยปริมาณของโหลดที่เพิ่มขึ้น หรืออีกนัยหนึ่งแม้ว่าโรเตอร์จะยังหมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส แต่ยังช้ากว่าความเร็วขั้วแม่เหล็กจากสเตเตอร์เล็กน้อย ทำให้ค่าสูงสุด E_0 ย้ายไปอยู่ที่ตำแหน่ง 2 ซึ่งแสดงด้วย E'_0 คิดเป็นระยะห่างเชิงมุม θ ซึ่งเรียกว่า มุมแรงบิด (torque angle)



รูปที่ 2.2 การเปลี่ยนแปลงของมุมแรงบิดขณะไม่มีโหลดและมีโหลด

การทดสอบมอเตอร์ในงานวิจัยนี้ จะใช้แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าสลับ 3 เฟส จ่ายแรงดันพิกัด $230 \text{ V}_{\text{rms}}$ (100% ของแรงดันพิกัด) และแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง บ้อนกระแสไฟฟ้า 0.4 A และจ่ายแรงดัน $100 \text{ V}_{\text{DC}}$ ถึงขดลวดสนาม เมื่อขั้วแม่เหล็กที่เกิดจากการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงและขั้วแม่เหล็กหมุนสเตเตอร์ที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าสลับ โรเตอร์ของมอเตอร์ซึ่งโครนัสจะหมุนด้วยความเร็วคงที่ เมื่อพิจารณามอเตอร์ที่ไม่มีภาระสูญเสีย และมอเตอร์กำลังหมุนจะมีแรงดันต้านกลับเกิดขึ้นและ $E_0 = V_{\text{rms}}$ สภาพไร้โหลดแสดงในรูปที่ 2.3(ก) กระแสอาร์เมเจอร์เท่ากับ $0.669 \text{ A}_{\text{rms}}$ กระแสไฟฟ้าไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ เนื่องจากธรรมชาติของระบบไฟฟ้าสามเฟสต่อจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่มีการต่อหม้อแปลงไฟฟ้าต่อแบบวาย โดยไม่ต่อกราวด์จากแหล่งจ่ายจะทำให้กระแสไฟฟ้าในสายมีสัญญาณไซน์ผสมกับฮาร์มอนิกส์ลำดับสาม และแรงดัน สเตเตอร์เท่ากับ $236.618 \text{ V}_{\text{rms}}$ ในขณะที่มอเตอร์อยู่ในสภาพไร้โหลดจะเกิดแรงบิดโหลดภายในมอเตอร์ $0.1 \text{ N}\cdot\text{m}$ ทำให้เกิดมุมแรงบิด (θ) โหลดเบาจึงทำให้มุมแรงบิดเล็ก

รูปที่ 2.3(ข) แสดงกระแสและแรงดันในขณะที่มอเตอร์ขับเคลื่อนโหลดเต็ม แรงบิดโหลดเท่ากับ $5 \text{ N}\cdot\text{m}$ กระแสอาร์เมเจอร์เท่ากับ $1.519 \text{ A}_{\text{rms}}$ เส้นกราฟกระแสไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ซึ่งเกิดจากฮาร์มอนิกส์อันดับ 3 และแรงดันสเตเตอร์เท่ากับ $234.681 \text{ V}_{\text{rms}}$ แรงดันสเตเตอร์มีค่าอาร์เอ็มเอสต่ำกว่าสภาพไร้โหลด เมื่อมอเตอร์ขับเคลื่อนโหลดเชิงกล จะทำให้เกิดมุมต่างเฟสระหว่าง E_0 กับ V_{rms} ที่ไม่เท่ากับ 180 องศา และมุมแรงบิดเพิ่มขึ้น



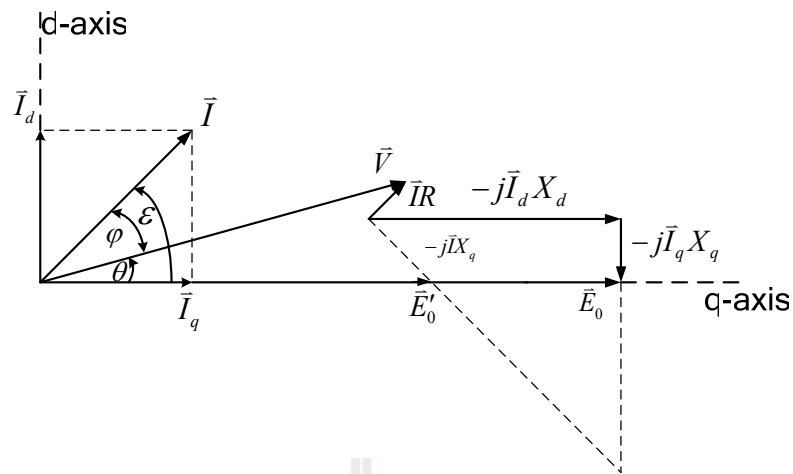
(ก) สภาพไร้โหลด

(ข) สภาพจ่ายโหลดเต็ม

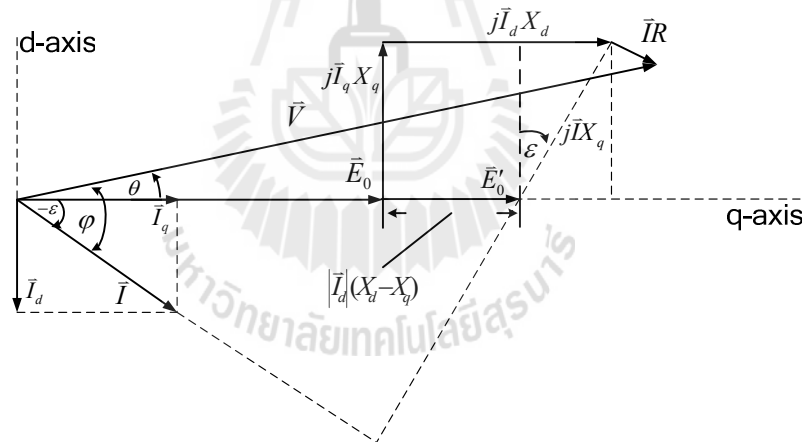
รูปที่ 2.3 รูปคลื่นไอซันค่ากระแสและแรงดันของมอเตอร์ซิงโครนัส

2.2.2 การปรับกระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็ก

การปรับกระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็ก I_f จะทำให้ความเข้มสนามแม่เหล็กโรเตอร์เกิดการเปลี่ยนแปลง เป็นผลให้ตัวประกอบกำลังของมอเตอร์ซิงโครนัสเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย สมมุติว่า ขดลวดสนามของมอเตอร์ซิงโครนัสได้รับกระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็ก I_f จนทำให้เกิดตัวประกอบกำลัง เท่ากับ 1 นั่นคือ กระแสไฟฟ้าอาร์เมเจอร์ \bar{I} และแรงดันสายหรือแรงดันที่จ่ายให้มอเตอร์ \bar{V} มีมุมเฟสตรงกัน ถ้าปรับกระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็ก I_f ให้เพิ่มขึ้น ความเข้มสนามแม่เหล็กของขดลวดสนามจะเพิ่มขึ้น และแรงดันต้านกลับ \bar{E}_o จะมีขนาดมากกว่าแรงดันที่จ่ายให้มอเตอร์ เป็นผลให้มอเตอร์มีตัวประกอบกำลังนำหน้า หรือ \bar{I} นำหน้า \bar{V} ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.4 กล่าวคือ มอเตอร์ซิงโครนัสได้รับการกระตุ้นมากเกินไป (over excitation) แต่ถ้าปรับกระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็ก I_f ให้มีค่าลดลง ความเข้มสนามแม่เหล็กและแรงดันต้านกลับ \bar{E}_o จะมีขนาดลดลงแรงดันต้านกลับ \bar{E}_o จึงมีขนาดน้อยกว่าแรงดันที่จ่ายให้มอเตอร์ เป็นผลให้มอเตอร์มีตัวประกอบกำลังล่าหลัง หรือ \bar{I} ล่าหลัง \bar{V} ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.5 กล่าวคือ มอเตอร์ได้รับการกระตุ้นน้อยเกินไป (under excitation)



รูปที่ 2.4 แผนภาพเฟสเซอร์กระแสหน้าแรงดัน (leading) เมื่อมอเตอร์ซิงโครนัสได้รับการกระตุ้นมากเกินไป (H.A. Toliyat and G.B. Kliman, 2004)



รูปที่ 2.5 แผนภาพเฟสเซอร์กระแสล่าหลังแรงดัน (lagging) เมื่อมอเตอร์ซิงโครนัสได้รับการกระตุ้นน้อยเกินไป (D.P. Kothari and I.J. Nagrath, 1985)

รูปที่ 2.4 แสดงกระแสหน้าแรงดันและรูปที่ 2.5 แสดงกระแสล่าหลังแรงดันตัวแปรต่าง ๆ มีความหมายดังนี้

\bar{I} คือ เวกเตอร์ของกระแสอาร์เมเจอร์ มีหน่วย แอมแปร์ (A_{rms})

\bar{I}_d คือ เวกเตอร์ของกระแสตามแนวแกนตรง มีหน่วย แอมแปร์ (A_{rms})

- \bar{I}_q คือ เวกเตอร์ของกระแสตามแนวแกนขวาง มีหน่วย แอมแปร์ (A_{rms})
- \bar{V} คือ เวกเตอร์ของแรงดันชั่วต่อสเตเตอร์ มีหน่วย โวลต์ (V_{rms})
- \bar{E}_0 คือ เวกเตอร์ของแรงดันต้านกลับ มีหน่วย โวลต์ (V_{rms})
- R คือ ความต้านทานอาร์เมเจอร์ มีหน่วย โอห์ม (Ω)
- X_d คือ รีแอกแตนซ์ตามแนวตรงมีหน่วย โอห์ม (Ω)
- X_q คือ รีแอกแตนซ์ตามแนวขวางมีหน่วย โอห์ม (Ω)
- θ คือ มุมต่างเฟสระหว่าง \bar{E}_0 และ \bar{V} หรือ มุมแรงบิด มีหน่วยองศา
- ε คือ มุมต่างเฟสระหว่าง \bar{E}_0 และ \bar{I} มีหน่วยองศา
- φ คือ มุมต่างเฟสระหว่าง \bar{I} และ \bar{V} หรือ มุมตัวประกอบกำลัง มีหน่วยองศา

2.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดขั้วแม่เหล็กยื่น ในสถานะอยู่ตัว

มอเตอร์ซิงโครนัสชนิดขั้วแม่เหล็กยื่นไม่สามารถสร้างแรงบิดเริ่มต้นด้วยตัวเองได้ จึงต้องจ่ายกระแสไฟฟ้าสลับ 3 เฟส ที่มีอัตราเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้า ω ให้กับขดลวดสเตเตอร์ ระบบสามเฟสสมดุลของมอเตอร์จะมีกระแสไฟฟ้าสลับไหลผ่าน และทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนภายในในเวลาที่โรเตอร์หมุนด้วยอัตราเร็วเชิงมุมทางกล (ω_m) ที่คำนวณได้จาก (A. Fransua and R. Magureanu, 1984)

$$\omega_m = \frac{2\omega}{p} \quad (2.1)$$

จากสมการการเปลี่ยนแปลงความถี่

$$p = \frac{120f}{n} \quad (2.2)$$

เมื่อนำสมการที่ (2.2) แทนในสมการที่ (2.1) จะได้

$$\omega_m = \frac{2\pi n}{60} \quad (2.3)$$

เมื่อมอเตอร์ขับเคลื่อนโหลดเชิงกลให้เกิดการหมุน สมดุลระหว่างแรงบิดต่าง ๆ ในสถานะอยู่ตัว จะเขียนได้ดังนี้

$$\begin{aligned} M_e - M_r - M_m &= 0 \\ M_r &= M_e - M_m \end{aligned} \quad (2.4)$$

โดย ω คือ อัตราเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้า มีหน่วย เรเดียนต่อวินาที (rad/sec) เท่ากับ $2\pi f$

ω_m คือ อัตราเร็วเชิงมุมทางกล มีหน่วย เรเดียนต่อวินาที (rad/sec) เท่ากับ $\omega_m = \frac{2\pi n}{60}$

f คือ ความถี่ไฟฟ้ามี่หน่วย เฮิรตซ์ (Hz)

p คือ จำนวนขั้วไฟฟ้า

n คือ ความเร็วเชิงโคโรนัสมีหน่วย รอบ/นาที (rpm)

M_e คือ แรงบิดแอกทีพหรือแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าในสถานะอยู่ตัว มีหน่วย นิวตัน-เมตร (N-m)

M_r คือ แรงบิดโหลดในสถานะอยู่ตัว มีหน่วย นิวตัน-เมตร (N-m)

M_m คือ แรงบิดเสียดทานเชิงกลในสถานะอยู่ตัว มีหน่วย นิวตัน-เมตร (N-m)

เมื่อพิจารณามอเตอร์ซึ่งโคโรนัสที่มีโรเตอร์ชนิดขั้วแม่เหล็กยื่น กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยสเตเตอร์ (P) เกิดจากผลรวมของกำลังไฟฟ้าจากกระแสตามแนวแกนตรง (P_d) และกำลังไฟฟ้าจากกระแสตามแนวแกนขวาง (P_q)

$$P = P_d + P_q \quad (2.5)$$

กระแสตามแนวแกนตรง $|\bar{I}_d|$ และกระแสตามแนวแกนขวาง $|\bar{I}_q|$ จะคำนวณได้จากแผนภาพเฟสเซอร์ในรูปที่ 2.4 และ 2.5 ดังนี้

$$|\bar{I}_d| = \frac{|\bar{E}_0| - V_{rms} \cos(\theta)}{X_d} \quad (2.6)$$

$$|\bar{I}_q| = \frac{V_{rms} \sin(\theta)}{X_q} \quad (2.7)$$

โดยที่ $|\bar{V}| = V_{rms}$ และกำลังเฉลี่ย 3 เฟสจะคำนวณได้จาก

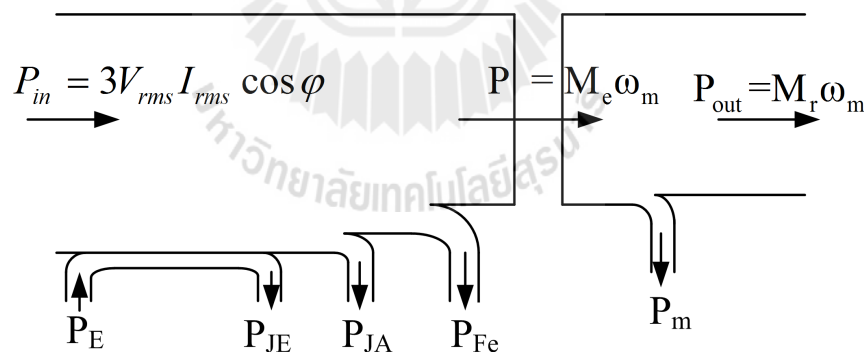
$$P = \pm 3V_{rms} |\bar{I}_d| \sin(\theta) + 3V_{rms} |\bar{I}_q| \cos(\theta) \quad (2.8)$$

ถ้า \bar{I} ล้าหลัง \bar{V} จะได้ว่า $P_d = -3V_{rms} |\bar{I}_d| \sin(\theta)$ แต่ถ้า \bar{I} นำหน้า \bar{V} จะได้ว่า $P_d = 3V_{rms} |\bar{I}_d| \sin(\theta)$ เมื่อนำสมการที่ (2.6) และ (2.7) แทนค่าลงใน (2.8) และจัดรูปสมการใหม่จะได้ว่า

$$\begin{aligned} P &= 3V_{rms} \left(\frac{|\bar{E}_0| - V_{rms} \cos(\theta)}{X_d} \right) \sin(\theta) + 3V_{rms} \left(\frac{V_{rms} \sin(\theta)}{X_q} \right) \cos(\theta) \\ &= \frac{3V_{rms} |\bar{E}_0|}{X_d} \sin(\theta) + 3V_{rms}^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin(\theta) \cos(\theta) \end{aligned} \quad (2.9)$$

จากคุณสมบัติทางตรีโกณมิติ $\sin(\theta) \cos(\theta) = \frac{1}{2} \sin(2\theta)$ จะสามารถลดรูปสมการ (2.9) จะลดรูปได้ดังนี้

$$P = 3 \left[\frac{|\bar{E}_0| V_{rms}}{X_d} \sin(\theta) + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) V_{rms}^2 \sin(2\theta) \right] \quad (2.10)$$



รูปที่ 2.6 แผนภาพสมดุลกำลังของมอเตอร์ซิงโครนัส (A. Fransua and R. Magureanu, 1984)

กำลังต่าง ๆ ในรูปที่ 2.6 มีความหมายดังนี้

P_E คือ กำลังกระตุ้นสนามแม่เหล็ก มีหน่วย วัตต์ (W)

P_{JE} คือ กำลังสูญเสียที่เกิดจากขดลวดสนาม มีหน่วย วัตต์ (W)

P_{JA} คือ กำลังสูญเสียที่เกิดจากขดลวดสเตเตอร์ มีหน่วย วัตต์ (W)

P_{Fe} คือ กำลังสูญเสียในแกนเหล็ก มีหน่วย วัตต์ (W)

P_m คือ กำลังสูญเสียทางกล (ที่เกิดจาก แรงต้านอากาศ และแรงเสียดทาน) มีหน่วยวัตต์ (W)

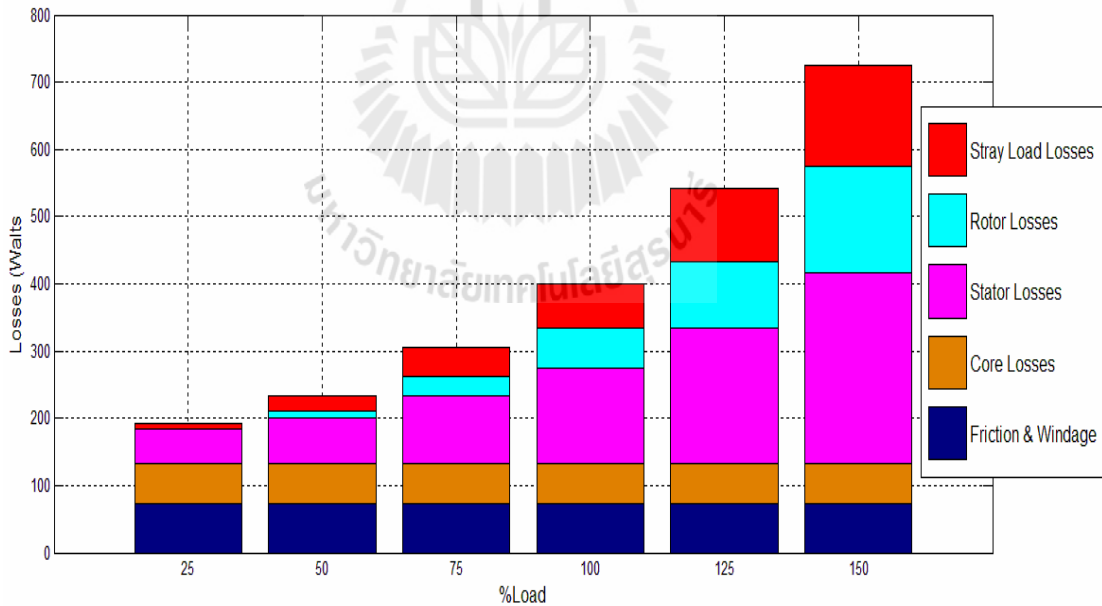
นอกจากนี้กำลังเฉลี่ยสเตเตอร์ จะคำนวณได้จาก $P = M_e \omega_m$ ดังนั้นแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าคือ

$$M_e = \frac{P}{\omega_m} \quad (2.11)$$

เมื่อนำสมการที่ (2.10) แทนค่าลงในสมการที่ (2.11) จะได้แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าในสถานะอยู่ตัวคือ

$$M_e = \frac{3}{\omega_m} \left[\frac{|\bar{E}_0| V_{rms}}{X_d} \sin(\theta) + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) V_{rms}^2 \sin(2\theta) \right] \quad (2.12)$$

การหาประมาณค่าแรงบิดเสียดทานเชิงกล M_m สามารถประมาณค่าได้จากรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 กำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า ที่เปอร์เซ็นต์โหลดที่แตกต่างกัน (สำเร็จอายุพงศ์, 2552)

ในรูปที่ 2.7 มอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า มีกำลังสูญเสียทางกล (ที่เกิดจาก แรงต้านอากาศ และ แรงเสียดทาน) 72.24 วัตต์ แต่ในงานวิจัยนี้ใช้มอเตอร์ขนาด 1.34 แรงม้า จะได้ว่ามีกำลังสูญเสียทางกล (P_m) เกิดขึ้นเท่ากับ 19.40 วัตต์ และประมาณค่าแรงบิดเสียดทานเชิงกลได้จากสมการ

$$M_m = \frac{P_m}{\omega_m} \quad (2.13)$$

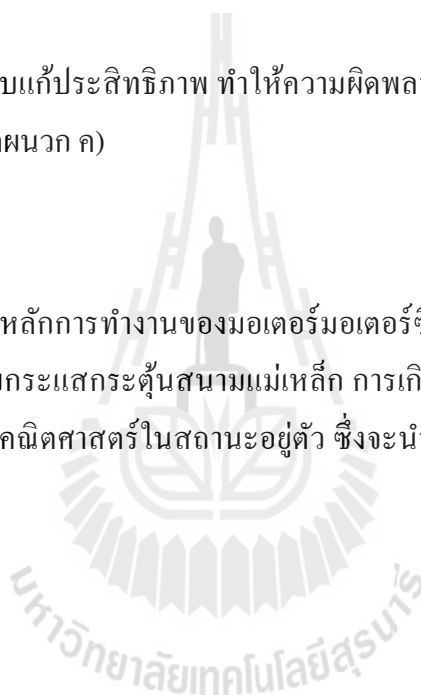
ต่อมาคำนวณแรงบิดโหลดได้จากสมการ

$$M_r = 0.85(M_e - M_m) \quad (2.14)$$

โดยที่ 0.85 คือค่าคงที่ปรับแก้ประสิทธิภาพ ทำให้ความผิดพลาด การคำนวณแรงบิดโหลดลดลง 12.201% (ซึ่งแสดงในภาคผนวก ก)

2.4 สรุป

บทนี้ได้กล่าวถึง หลักการทำงานของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดขั้วแม่เหล็กยื่น การขับเคลื่อนโหลด การปรับกระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็ก การเกิดตัวประกอบกำลังนำหน้าและล่าหลัง และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสถานะอยู่ตัว ซึ่งจะนำมาใช้สร้างตัวประมาณค่าแรงบิดโหลดของมอเตอร์ต่อไป



บทที่ 3

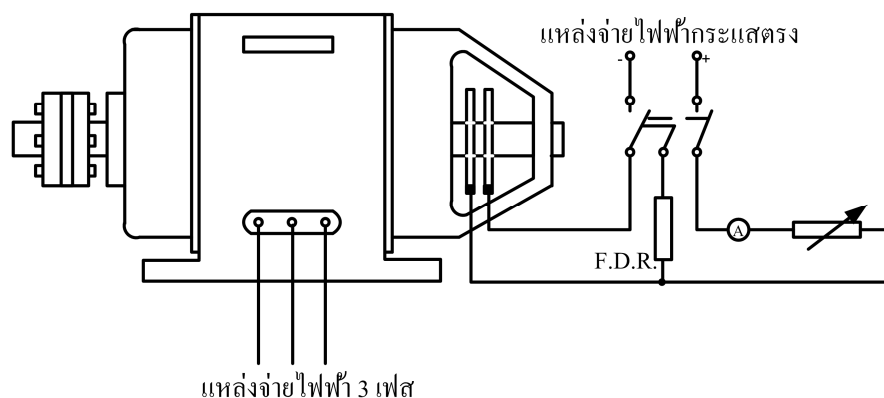
การหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ซิงโครนัส

3.1 บทนำ

บทนี้กล่าวถึง วิธีการเริ่มเดินเครื่อง การทดสอบมอเตอร์ซิงโครนัสในขณะที่เริ่มเดินเครื่อง และในสถานะอยู่ตัว และการทดสอบมอเตอร์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์มอเตอร์ ซึ่งประกอบด้วย ค่าความต้านทาน (R) ค่ารีแอกแตนซ์ตามแนวแกนตรง (X_d) และค่ารีแอกแตนซ์ตามแนวแกนขวาง (X_q) โดยค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์มีความสำคัญมาที่จะนำไปใช้คำนวณหาแรงบิดโหลด

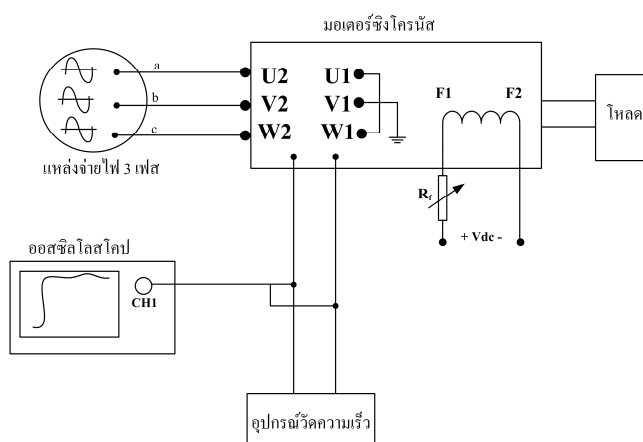
3.2 การเริ่มเดินเครื่องมอเตอร์ซิงโครนัส

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ใช้มอเตอร์ซิงโครนัสชนิดตัวหมุนขั้วยื่น (salient pole) ขั้วแม่เหล็กจะถูกพันโดยรอบเป็นขดลวดสนามที่ต่ออนุกรมกัน เมื่อขดลวดสนามมีกระแสไฟฟ้าตรงไหลผ่าน จะทำให้เกิดขั้วแม่เหล็กที่ไม่เปลี่ยนขั้ว ปลายขั้วต่อของขดลวดสนามที่พันรอบตัวหมุน จะเชื่อมต่อเข้ากับวงแหวน หรือสลีปริง 2 วง แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าตรงคือ แหล่งจ่ายแรงดันภายนอก ผิวหน้าของตัวหมุนมีแท่งตัวนำฝังไว้โดยรอบการเริ่มหมุนของมอเตอร์ซิงโครนัสใช้หลักการเหนี่ยวนำ เหมือนกับการเริ่มหมุนของมอเตอร์เหนี่ยวนำ โรเตอร์จะมีขดลวดกรงกระบอกหรือขดลวดแคมเปเปอร์ ฝังอยู่บนผิวหน้าของขั้วแม่เหล็ก เพื่อให้เกิดแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าตามต้องการ ก่อนที่จะจ่ายกระแสไฟฟ้าสลับ 3 เฟส ให้กับมอเตอร์ ขดลวดสนามจะต้องเชื่อมต่อกับตัวต้านทานที่เรียกว่าฟิลด์ดีสชาร์จเรซิสเตอร์ (Field Discharge Resistor, F.D.R.) ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.1 และเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าสลับ 3 เฟส ให้กับมอเตอร์ จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนสเตเตอร์ และเกิดการเหนี่ยวนำแรงดันโรเตอร์ เป็นผลให้มีกระแสไฟฟ้าไหลวนในขดลวดแคมเปเปอร์ ปฏิกริยาระหว่างกระแสไฟฟ้า และสนามแม่เหล็ก จะเหนี่ยวนำให้เกิด แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า กระทำกับโรเตอร์ ให้เกิดการหมุน ทิศทางการหมุนของโรเตอร์มีทิศทางเดียวกับสนามแม่เหล็กหมุนสเตเตอร์



รูปที่ 3.1 การต่อฟิวส์คิซาร์จิสเตอร์ (มงคลทอง สงคราม, 1992)

เมื่อโรเตอร์หมุนด้วยความเร็วประมาณ 95% ของความเร็วสนามแม่เหล็กหมุน แหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรง เชื่อมต่อเข้ากับขดลวดสนามโดยตรงทำให้ขดลวดสนามมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน และโรเตอร์มีขั้วแม่เหล็กที่ไม่เปลี่ยนขั้ว ขั้วแม่เหล็กโรเตอร์จะหมุนเกาะติดกับขั้วแม่เหล็กสเตเตอร์ที่มีการเปลี่ยนขั้วตลอดเวลา ทำให้โรเตอร์หมุนด้วยความเร็วเดียวกับสนามแม่เหล็กหมุนสเตเตอร์ หรือหมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.1 การนำ ตัวต้านทานต่อคร่อมเข้ากับขดลวดสนามก่อนการเริ่มหมุนหรือเริ่มเดินเครื่องมีสาเหตุคือ ในขณะที่เริ่มต้นการหมุนแรงดันสูงมากที่ได้จากการเหนี่ยวนำตกคร่อม ขดลวดสนาม แรงดันดังกล่าวอาจจะมีค่ามากถึง 1,500 โวลต์ เป็นผลให้ฉนวนที่ห่อหุ้ม หรือ เคลือบผิวของขดลวดสนามเกิดความเสียหายได้ ตัวต้านทานที่เชื่อมต่อเข้ากับโรเตอร์จึงต้องมีค่าความต้านทานสูงมาก เพื่อจำกัดแรงดันที่ตกคร่อมขดลวดสนามในโรเตอร์ให้มีค่าน้อยลง ซึ่งป้องกันอันตรายที่เกิดขึ้นกับผู้ใช้งาน



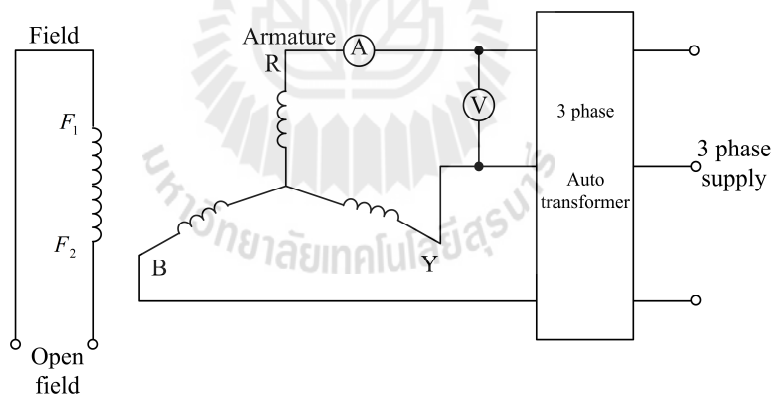
รูปที่ 3.2 การต่อวงจรการเริ่มเดินเครื่องของมอเตอร์ซิงโครนัส

มอเตอร์ที่ใช้งานคือมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดขั้วแม่เหล็กยื่นของบริษัท LUCAS-NULLE รุ่น SE2662-5M ขนาด 1 kW ความเร็วรอบพิกัด 1500 rpm 50 Hz แรงดันพิกัด 230 V กระแสพิกัด 1.6 A การต่อวงจรทดสอบแสดงได้ในรูปที่ 3.2 ในการเริ่มเดินเครื่องมอเตอร์ซิงโครนัส แรงดันสเตเตอร์ต้องมีค่าอาร์เอ็มเอสเท่ากับหรือมากกว่า 80% ของแรงดันพิกัด จึงจะทำให้มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส

3.3 การหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์

3.3.1 การทดสอบสลลิป (slip test) หาค่ารีแอกแตนซ์ X_d และ X_q

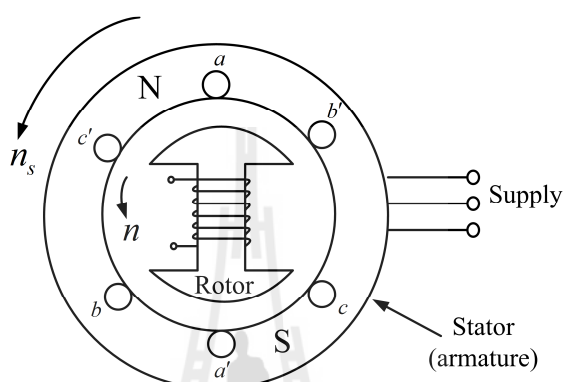
การหาค่ารีแอกแตนซ์ตามแนวแกนตรงและแนวแกนขวางของมอเตอร์ซิงโครนัส ขั้วชนิดแม่เหล็ก จะใช้วิธีที่เรียกว่าการทดสอบสลลิป ซึ่งดำเนินการได้โดยการนำแหล่งจ่ายแรงดัน กระแสสลับสามเฟส เชื่อมต่อเข้ากับขดลวดอาร์เมเจอร์ (สเตเตอร์) ต่อมาปรับค่าอาร์เอ็มเอสของแรงดันแหล่งจ่ายให้มีค่าน้อยกว่าแรงดันพิกัดของมอเตอร์ซิงโครนัส ในขณะที่ขดลวดสนามถูกเปิดวงจร ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.3 มอเตอร์ซิงโครนัสจะหมุนด้วยความเร็วที่น้อยกว่าความเร็วซิงโครนัสเล็กน้อย (D.P. Kothari and I.J. Nagrath, 1985)



รูปที่ 3.3 วงจรที่ใช้ในการทดสอบสลลิป

กระแสไฟฟ้า 3 เฟส ที่ไหลผ่านขดลวดอาร์เมเจอร์ จะเหนี่ยวนำให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็กหมุน และทำให้เกิดแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (magneto-motive force : mmf) ที่การหมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส ซึ่งแสดงในตามรูปที่ 3.4 เมื่อกระแสอาร์เมเจอร์มีค่าอาร์เอ็มเอสคงที่ แต่ฟลักซ์และแรงเคลื่อนแม่เหล็ก เมื่อกระแสอาร์เมเจอร์มีค่าอาร์เอ็มเอสคงที่ ฟลักซ์แม่เหล็กและแรงเคลื่อนแม่เหล็ก จะมีรูปคลื่นคล้ายกับสนามแม่เหล็กหมุนที่เกิดขึ้นในมอเตอร์เหนี่ยวนำ เมื่อโรเตอร์หมุนด้วยความเร็วที่น้อยกว่าความเร็วซิงโครนัส แรงเคลื่อนแม่เหล็ก และขั้วแม่เหล็ก โรเตอร์หมุนด้วย

ความเร็วที่แตกต่างกันเท่ากับความเร็วสลิป (แรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส และ หมุนเร็วกว่าขั้วแม่เหล็กโรเตอร์) ในทางปฏิบัตินั้น โรเตอร์หมุนด้วยความเร็วที่น้อยกว่าความเร็ว ของสนามแม่เหล็กหมุนสเตเตอร์ ความแตกต่างของความเร็วจะขึ้นอยู่กับโหลดที่ต่อเข้ากับเพลา หมุนของมอเตอร์ เป็นผลให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้า (electro-motive force : emf) ตก ครอบอมขดลวดสนาม



รูปที่ 3.4 การหมุนที่ความเร็วซิงโครนัสที่ทำให้เกิดแรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้า (D.P. Kothari and I.J. Nagrath, 1985)

กระแสอาร์เมเจอร์ที่มีค่าต่ำสุดสามารถนำไปคำนวณหาค่ารีแอกแตนซ์ X_d และกระแสอาร์เมเจอร์ที่มีให้ค่าสูงสุดสามารถนำไปคำนวณหาค่ารีแอกแตนซ์ X_q วิธีประมาณค่ารีแอกแตนซ์ที่แตกต่างกันไปนั้นเป็นผลมาจากช่องอากาศกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ จะทำให้ค่ารีแอกแตนซ์ที่ได้จากการประมาณค่ามีค่าที่แตกต่างกัน แรงดันขั้วต่อสเตเตอร์สูงสุด จะเกิดขึ้นในขณะที่กระแสอาร์เมเจอร์ต่ำสุด และในทางตรงกันข้าม แรงดันขั้วต่อสเตเตอร์ต่ำสุดจะเกิดขึ้นในขณะที่กระแสอาร์เมเจอร์มีค่าสูงสุด

แรงเคลื่อนแม่เหล็ก และฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุด แต่อัตราการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์เท่ากับศูนย์ ดังนั้นแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ตกครอบอมขดลวดสนามเป็นศูนย์

ค่ารีแอกแตนซ์จะคำนวณได้จากในสมการ

$$X_d = \frac{V_t(\text{at } I_a(\text{min}))(\text{line})}{\sqrt{3}I_a(\text{min})} \quad (3.1)$$

$$X_q = \frac{V_t(\text{at } I_a(\text{max}))(\text{line})}{\sqrt{3}I_a(\text{max})} \quad (3.2)$$

โดยที่ $I_a(\min)$ คือ กระแสอาร์เมเจอร์ต่ำสุด

$I_a(\max)$ คือ กระแสอาร์เมเจอร์สูงสุด

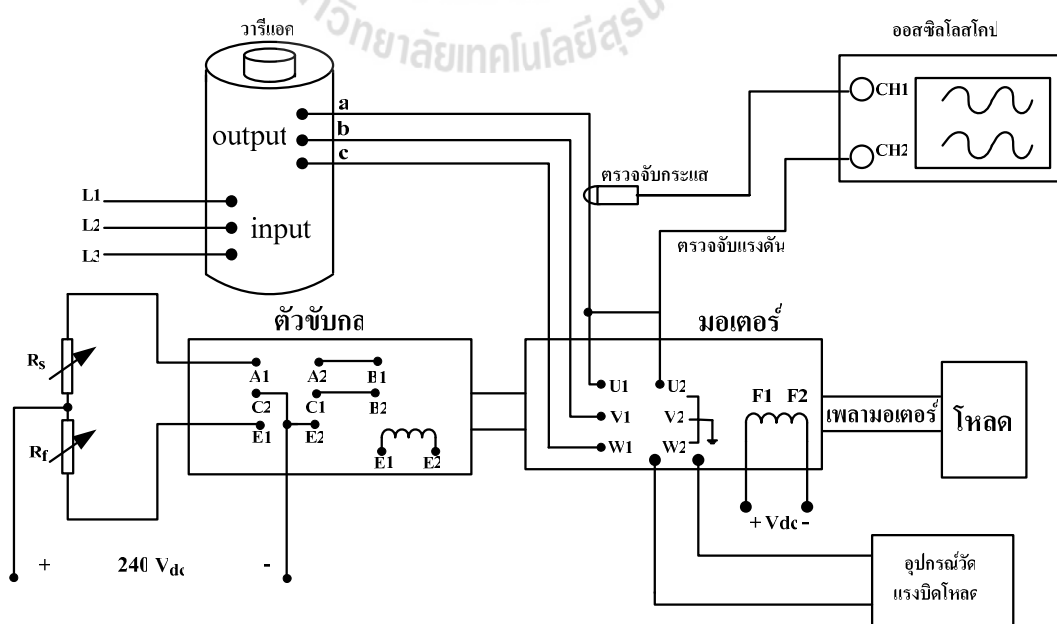
V_t (at $I_a(\min)$) คือ แรงดันขั้วต่อสเตเตอร์ที่เกิดขึ้นในขณะที่กระแสอาร์เมเจอร์มีค่าต่ำสุด

V_t (at $I_a(\max)$) คือ แรงดันขั้วต่อสเตเตอร์ที่เกิดขึ้นในขณะที่กระแสอาร์เมเจอร์มีค่าสูงสุด

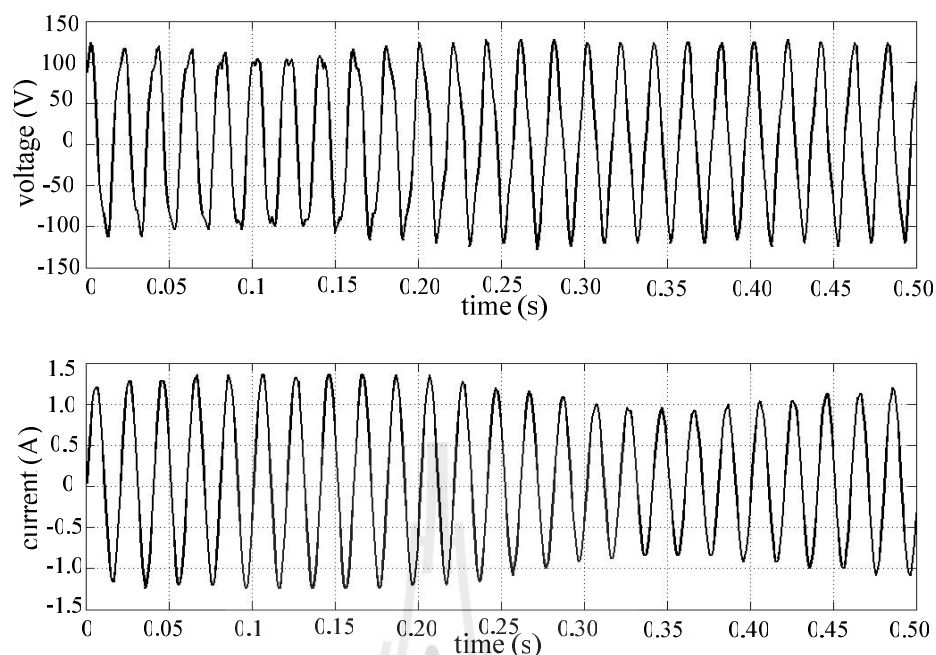
3.3.2 ขั้นตอนการทดสอบสลิปเพื่อหาค่ารีแอกแตนซ์ X_d และ X_q

การทดสอบสลิปของมอเตอร์ซิงโครนัสนี้มีขั้นตอนการดังนี้ (หน้าช้อย กุลวานิชพงษ์ และ ประพันธ์ คัทวี, 2547)

1. ต่อดวงจรในรูปที่ 3.5
2. ลัดวงจรขดลวดสนาม ปรับวารีแอก ค่อย ๆ เพิ่ม แรงดันให้กับมอเตอร์เริ่มหมุน และปิดแหล่งจ่ายแรงดัน
3. เปิดวงจรขดลวดสนาม หมุนตัวขั้วทางกล เพื่อให้โรเตอร์ของมอเตอร์หมุนในทิศทางเดียวกับการหมุนในขั้นตอนที่ 2 ด้วยความเร็วสูงกว่าหรือต่ำกว่าค่าพิกัด (1500 rpm) เล็กน้อย
4. ปรับวารีแอก จ่ายแรงดันให้กับขดลวดสเตเตอร์ ค่อย ๆ เพิ่มแรงดันจนเห็นการเปลี่ยนแปลงของรูปคลื่น แรงดันขั้วต่อสเตเตอร์ และกระแสอาร์เมเจอร์ ปรับวารีแอก จนเห็นการแกว่งของรูปคลื่นทั้งสองอย่างชัดเจน
5. บันทึกรูปคลื่นกระแสและแรงดันซึ่งแสดงได้ในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.5 การเชื่อมต่อชุดการทดสอบสลิปเพื่อหาค่ารีแอกแตนซ์ X_d และ X_q



รูปที่ 3.6 รูปคลื่นแรงดันขั้วต่อสเตเตอร์ และกระแสอาร์เมเจอร์ที่ได้จากการทดสอบสลิป

จากผลการทดสอบในรูปที่ 3.6 เมื่อแทนค่ากระแสและแรงดันลงในสมการที่ (3.1) และ (3.2) จะคำนวณค่ารีแอกแตนซ์ X_d และ X_q ได้ดังนี้

$$X_d = \frac{128}{\sqrt{3}(0.92)} = 80.327 \, \Omega \quad (3.3)$$

$$X_q = \frac{104}{\sqrt{3}(1.36)} = 44.150 \, \Omega \quad (3.4)$$

3.3.3 การหาค่าความต้านทานอาร์เมเจอร์

ค่าความต้านทานอาร์เมเจอร์ $R(dc)$ ได้จากการวัดแบบแยกเฟสมีค่าเท่ากับ $2.96 \, \Omega$ ต่อมาคำนวณค่าความต้านทาน $R(ac)$ ได้จาก

$$\begin{aligned} R(ac) &= 1.6 \times R(dc) \\ &= 1.6 \times 2.96 \, \Omega \\ &= 4.736 \, \Omega \end{aligned} \quad (3.5)$$

โดยที่ตัวเลข 1.6 คือค่าปรับแก้ (ชนิดขั้ว กุลวานิชพวงษ์ และ ประพันธ์ คัทวี, 2547)

3.4 สรุป

การทดสอบมอเตอร์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ ประกอบด้วย การหาค่าความต้านทานอาร์เมเจอร์ (สเตเตอร์) (R) ค่ารีแอกแตนซ์ตามแนวแกนตรง (X_d) และค่ารีแอกแตนซ์ตามแนวแกนขวาง (X_q) การทดสอบสลลิป (slip test) ใช้หาค่ารีแอกแตนซ์ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์นี้จะนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าแรงบิดไหลคของมอเตอร์ต่อไป

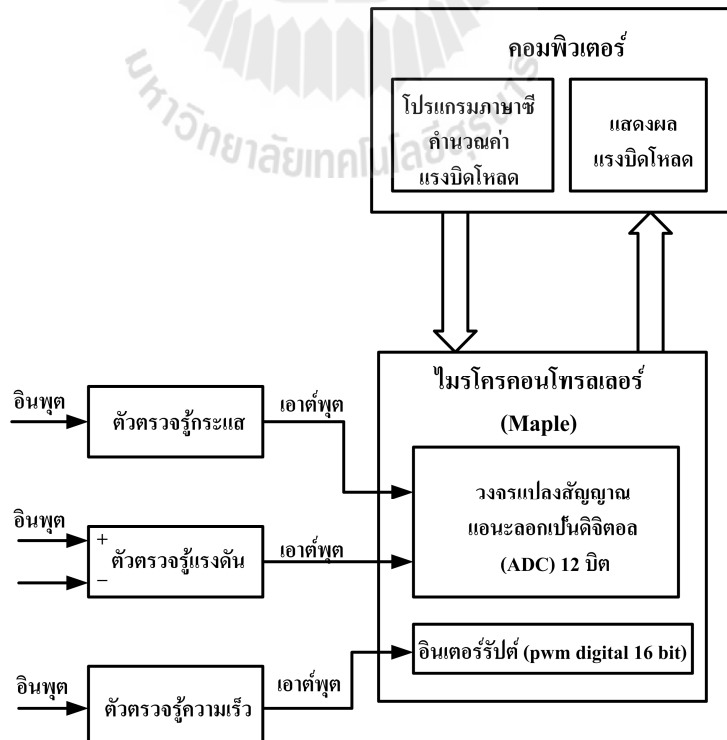


บทที่ 4

การออกแบบและสร้างตัวประมาณค่าแรงบิดไหลด

4.1 บทนำ

บทนี้กล่าวถึงการสร้างตัวประมาณค่าแรงบิดไหลดที่ประกอบด้วย การเลือกใช้ตัวตรวจรู้กระแส แรงดัน และความเร็ว การใช้งานบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ และการเขียนโปรแกรมภาษาซีเพื่อคำนวณค่าแรงบิดไหลด เนื่องจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ซึ่งโครนส์ที่ได้กล่าวถึงในบทที่ 2 ต้องการกระแส แรงดัน และความเร็วรอบเป็นข้อมูลในการคำนวณหาแรงบิดไหลด การเชื่อมต่อส่วนต่างๆ ของตัวประมาณค่าแรงบิดไหลดแสดงได้ในรูปที่ 4.1 งานวิจัยนี้ใช้ตัวตรวจรู้กระแส ACS712 ตัวตรวจรู้แรงดันที่เป็นวงจรแบ่งแรงดัน ซึ่งเอาต์พุตของตัวตรวจรู้ทั้งสองนี้จะเชื่อมต่อกับขาอินพุตของวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลที่อยู่ภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ และใช้ตัวตรวจรู้ความเร็ว ZX-21 ซึ่งมีเอาต์พุตเชื่อมต่อกับขาอินเตอร์รัปต์ของไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ทำหน้าที่คำนวณค่าแรงบิดไหลดและแสดงผลการคำนวณออกทางหน้าจอคอมพิวเตอร์



รูปที่ 4.1 แผนภาพการเชื่อมต่อส่วนต่างๆ ที่ทำหน้าที่ตัวประมาณค่าแรงบิดไหลด

4.2 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์เมเปิล

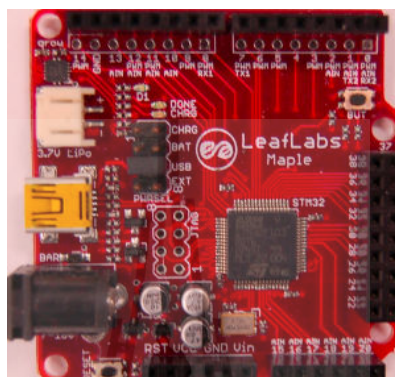
ไมโครคอนโทรลเลอร์ (microcontroller เรียกย่อว่า μC , uC หรือ MCU) คือไมโครคอมพิวเตอร์หรือไอซีควบคุมขนาดเล็กที่มีขีดความสามารถการทำงานคล้ายคลึงกับระบบคอมพิวเตอร์ขนาดใหญ่ โครงสร้างทั่วไปของไมโครคอนโทรลเลอร์แบ่งออกได้เป็น 5 ส่วนสำคัญ ดังนี้

1. หน่วยประมวลผลกลางหรือซีพียู (CPU, central processing unit)
2. หน่วยความจำ (memory) แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือหน่วยความจำเก็บโปรแกรมหลัก (program memory) และหน่วยความจำข้อมูล (data memory)
3. ส่วนติดต่อกับอุปกรณ์ภายนอกหรือพอร์ต (port) มี 2 แบบ คือพอร์ตรับสัญญาณหรือพอร์ตอินพุต (input port) และพอร์ตส่งสัญญาณหรือพอร์ตเอาต์พุต (output port)
4. ช่องทางเดินของสัญญาณหรือบัส (bus) คือเส้นทางการแลกเปลี่ยนสัญญาณข้อมูลไปมาระหว่างซีพียู หน่วยความจำและพอร์ต
5. วงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกา เป็นส่วนประกอบที่สำคัญอีกส่วนหนึ่ง เพราะการทำงานที่เกิดขึ้นในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีความรวดเร็วหรือช้า จะขึ้นอยู่กับวงจรถูกกำหนดจังหวะของสัญญาณนาฬิกา

งานวิจัยนี้เลือกใช้ภาษาซีและคอมไพเลอร์ maple-ide ภาษาซีคือภาษาระดับกลาง ซึ่งเป็นภาษาที่รวมลักษณะที่ดีของภาษาระดับสูงและภาษาระดับล่างไว้ด้วยกัน ทำให้ภาษาซีมีความยืดหยุ่น มีสมรรถนะสูง มีโครงสร้างที่ดี และสนับสนุนการเขียนโปรแกรมเป็นส่วนย่อยที่มีขนาดเล็กและทำงานได้เร็ว รวมถึงมีฟังก์ชันสำเร็จรูปต่าง ๆ ให้เลือกใช้อย่างหลากหลายตามความต้องการ

บอร์ดเมเปิลคือบอร์ดที่มีไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F103RB เป็นส่วนประกอบหลัก ไมโครคอนโทรลเลอร์ดังกล่าวมีขนาด 32 บิต ตระกูล ARM Cortex M3 มีสัญญาณนาฬิกา 72 MHz มีหน่วยความจำแฟลช 128 กิโลไบต์ และแรม 20 กิโลไบต์ มีขาพอร์ตอินพุตเอาต์พุต 39 ขา โดยมี 15 ขาเป็นขาเอาต์พุตสัญญาณ PWM (pulse width modulation) ที่ให้ความละเอียด 16 บิต วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล (ADC) 16 วงจร ที่มีความละเอียด 12 บิต ไทมเมอร์ 4 ชุด โมดูลเชื่อมต่อบัส I2C 2 วงจร โมดูลเชื่อมต่อบัส SPI 2 วงจร โมดูลสื่อสารข้อมูลพอร์ตอนุกรม USART 3 วงจร บอร์ดเมเปิลมีขนาด 2.05 x 2.1 ตารางนิ้วหรือ 5.21 x 5.33 ตารางเซนติเมตร มีหัวเสียบไฟและปุ่มรีเซ็ต ผู้ใช้งานสามารถโปรแกรมบอร์ดเมเปิลผ่านพอร์ต USB และ bootloader DFU และสามารถโปรแกรมแฟลช onboard ผ่านการอินเตอร์เฟสภายนอก JTAG บอร์ดเมเปิลมี

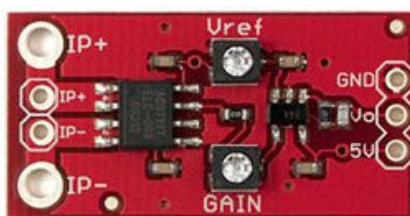
การประมวลผลที่รวดเร็วและมีอุปกรณ์ต่อพ่วงจากไมโครคอนโทรลเลอร์ ทำให้เพิ่มความสามารถในการคำนวณ การเขียนโปรแกรมมีลักษณะเดียวกับ Arduino ทำให้บอร์ดเมเปิลมีรูปแบบที่เข้ากันได้กับ Arduino บอร์ดเมเปิลใช้แรงดัน 3.3 โวลต์ในการทำงาน และแปลงแรงดันอินพุตในช่วง 3.0 โวลต์ ถึง 12 โวลต์ เป็นแรงดัน 3.3 โวลต์ กระแส 0.8 แอมแปร์ บอร์ดเมเปิลแสดงได้ในผังรูปที่ 4.2



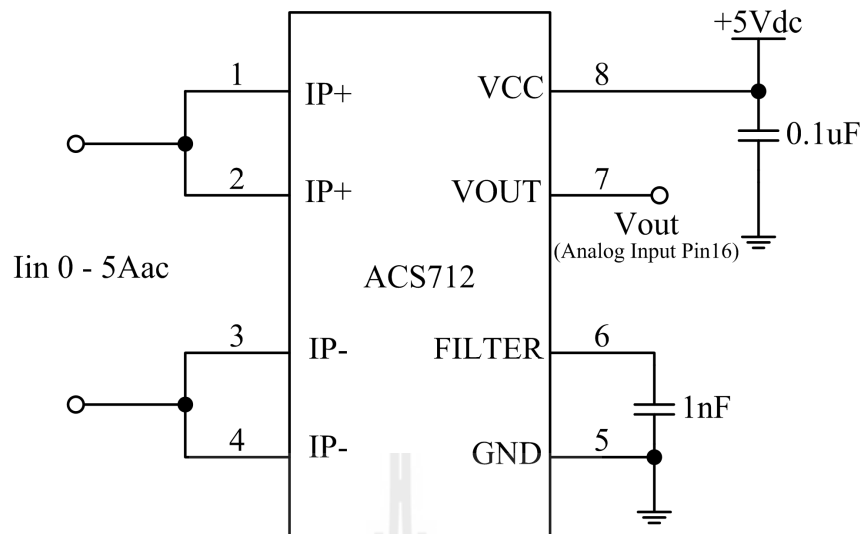
รูปที่ 4.2 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์เมเปิล STM32F103RB

4.3 การวัดกระแสไฟฟ้าด้วยตัวตรวจจับกระแส ACS 712

ตัวตรวจจับกระแส ACS 712 ที่แสดงในรูปที่ 4.3 เป็นตัวตรวจจับที่มีสัญญาณรบกวนต่ำ ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากความร้อนเกือบเป็นศูนย์ และแทบไม่มีฮิสเทรีซิส สามารถวัดกระแส AC และ DC ในช่วง 0 ถึง 5 แอมแปร์ ต้องการไฟเลี้ยง 5 โวลต์ดีซี ป้อนที่ขา V_{CC} ขา 7 คือ แรงดันเอาต์พุตที่ป้อนถึงขาแอนะล็อกอินพุตของไมโครคอนโทรลเลอร์ การทดสอบวงจรตัวตรวจจับกระแสแสดงในรูปที่ 4.4

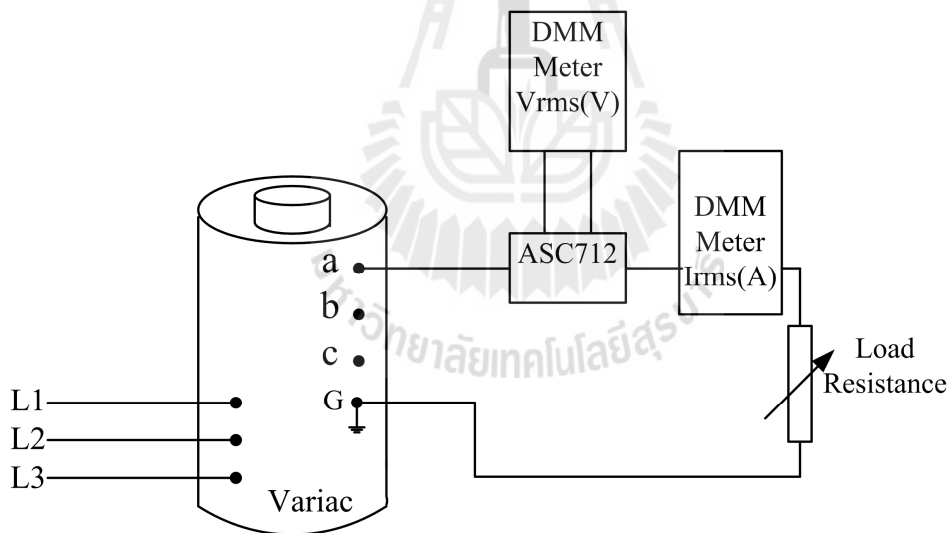


(ก) แผ่วงจรตัวตรวจจับกระแส ACS712



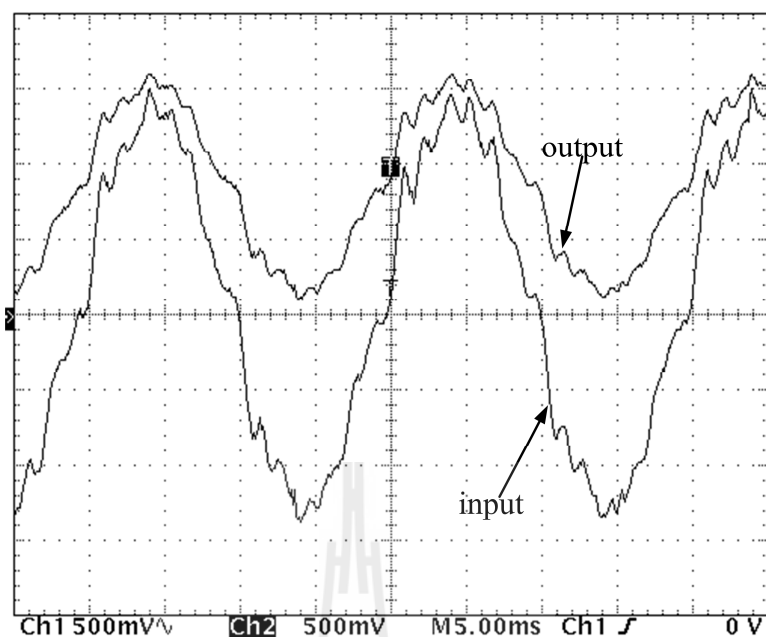
(ข) ไอซีตัวตรวจรู้กระแส ACS712

รูปที่ 4.3 ตัวตรวจรู้กระแส ACS712



รูปที่ 4.4 วงจรทดสอบตัวตรวจรู้กระแส

ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 4.5 กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านมอเตอร์แลไหลผ่านตัวตรวจรู้กระแสมีรูปคลื่นไซน์ที่ประกอบด้วยรูปคลื่นซีกบวกและซีกลบ แต่เนื่องจากไมโครคอนโทรลเลอร์รับแรงดันเอาต์พุตที่มีค่าบวกได้เท่านั้น แรงดันเอาต์พุตจึงต้องผ่านวงจรระดับแรงดัน ทำให้แรงดันเอาต์พุตที่มีค่าลบเพิ่มระดับขึ้นเป็นค่าบวก ไมโครคอนโทรลเลอร์จึงได้รับแรงดันบวกเท่านั้น

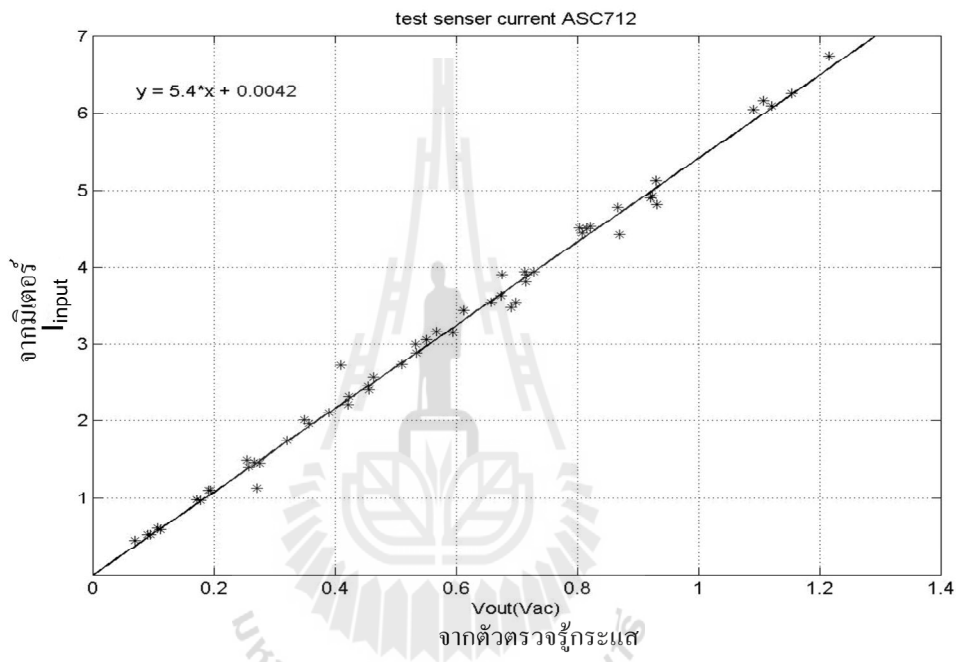


รูปที่ 4.5 ผลการทดสอบตัวตรวจรู้กระแส

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบตัวตรวจรู้กระแส (ACS 712)

ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 4		ครั้งที่ 5	
I_{input} (A_{rms})	V_{out} (V_{rms})	I_{input} (A_{rms})	V_{out} (V_{rms})	I_{input} (A_{rms})	V_{out} (V_{rms})	I_{input} (A_{rms})	V_{out} (V_{rms})	I_{input} (A_{rms})	V_{out} (V_{rms})
0.516	0.094	0.590	0.110	0.610	0.106	0.520	0.089	0.440	0.068
0.967	0.177	1.100	0.194	1.100	0.191	0.980	0.171	1.130	0.270
1.740	0.320	1.490	0.254	1.460	0.274	1.470	0.265	1.410	0.256
2.102	0.389	2.010	0.348	2.320	0.423	1.960	0.356	2.210	0.421
2.456	0.454	2.400	0.455	2.740	0.510	2.730	0.409	2.570	0.463
2.890	0.534	3.170	0.567	3.160	0.594	3.060	0.550	3.00	0.532
3.538	0.657	3.620	0.673	3.540	0.697	3.430	0.612	3.470	0.690
3.900	0.716	3.940	0.713	3.940	0.728	3.810	0.714	3.900	0.675
4.500	0.815	4.510	0.803	4.530	0.821	4.450	0.807	4.430	0.870
4.930	0.924	4.780	0.867	5.120	0.930	4.900	0.920	4.820	0.931
6.260	1.154	6.100	1.120	6.050	1.090	6.740	1.215	6.160	1.107

เมื่อนำข้อมูลจากตารางที่ 4.1 มาพล็อตกราฟระหว่างกระแสอินพุต (กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวตรวจรู้กระแสและเป็นค่าที่อ่านได้จากมาตรวัดกระแสไฟฟ้าหรือมิเตอร์) และแรงดันเอาต์พุตของตัวตรวจรู้กระแส จะได้กราฟในรูปที่ 4.6 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์หรือการถดถอยเชิงเส้นระหว่างกระแสอินพุตและแรงดันเอาต์พุต ค่าเฉลี่ยของข้อมูลจะนำมาใช้หาสมการเส้นตรง $y = ax + b$ คำสั่ง polyfit ในโปรแกรม MATLAB จะคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ a และ b y คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวตรวจรู้กระแส (I_{input}) และ x คือ แรงดันเอาต์พุตของตัวตรวจรู้กระแส (V_{out})



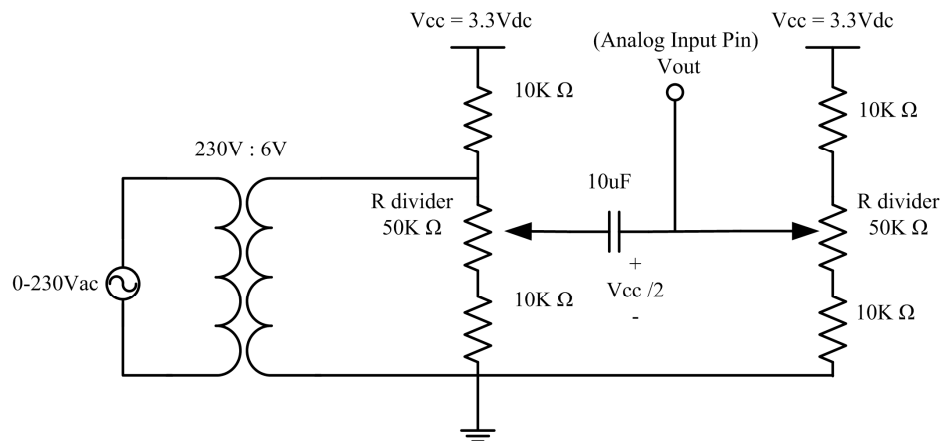
รูปที่ 4.6 การถดถอยเชิงเส้นระหว่างกระแสอินพุตและแรงดันเอาต์พุต

ความสัมพันธ์ระหว่าง I_{input} และ V_{out} คือสมการเส้นตรง

$$y = 5.4x + 0.0042 \quad \text{หรือ} \quad I_{input} = 5.4V_{out} + 0.0042 \quad (4.1)$$

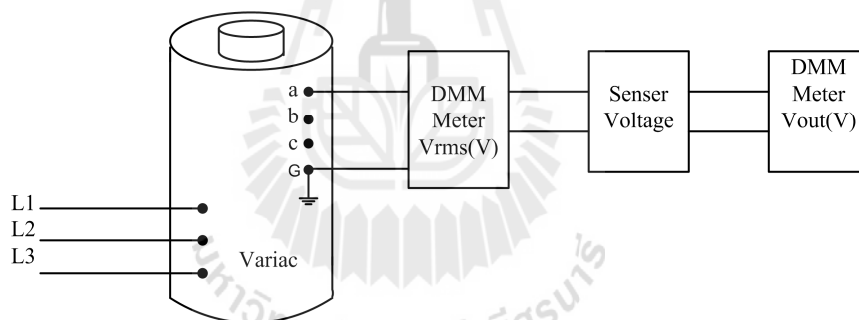
4.4 การวัดแรงดันด้วยวงจรแบ่งแรงดัน

วิทยานิพนธ์นี้ใช้หม้อแปลงและวงจรแบ่งแรงดันทำหน้าที่ตรวจรู้แรงดัน หม้อแปลงจะลดแรงดัน 230 โวลต์เอซี ให้เหลือแรงดัน 6 โวลต์เอซี แรงดัน 3.3 โวลต์ดีซีจะยกระดับแรงดันที่มีค่าลบให้เป็นค่าบวก วงจรแบ่งแรงดันป้อนแรงดันเอาต์พุตถึงขาอินพุตของวงจรแปลงสัญญาณ แอนะลอกเป็นดิจิทัลซึ่งแสดงในรูปที่ 4.7



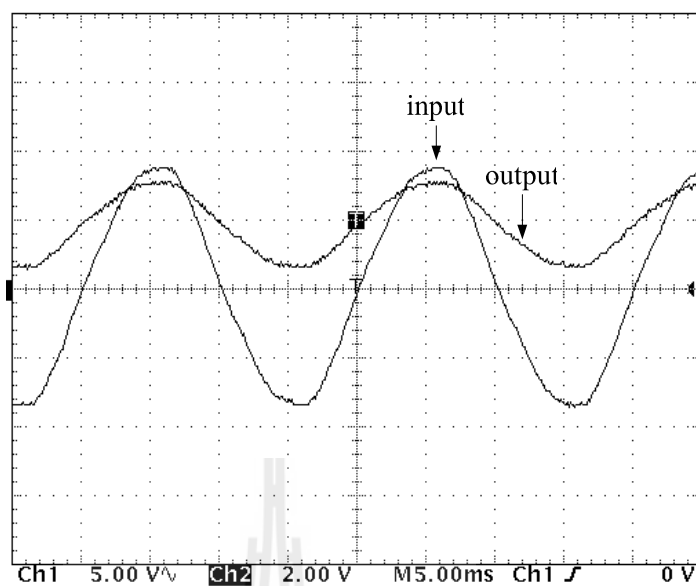
รูปที่ 4.7 วงจรแบ่งแรงดันตรวจรู้แรงดัน

การเชื่อมต่ออุปกรณ์เพื่อทดสอบวงจรแบ่งแรงดันและการยกระดับแรงดันแสดงในรูปที่ 4.8 วารีแอกจ่ายแรงดันเพิ่มขึ้นทีละ 25 โวลต์ ไปจนถึง 250 โวลต์



รูปที่ 4.8 วงจรทดสอบตัวตรวจรู้แรงดัน

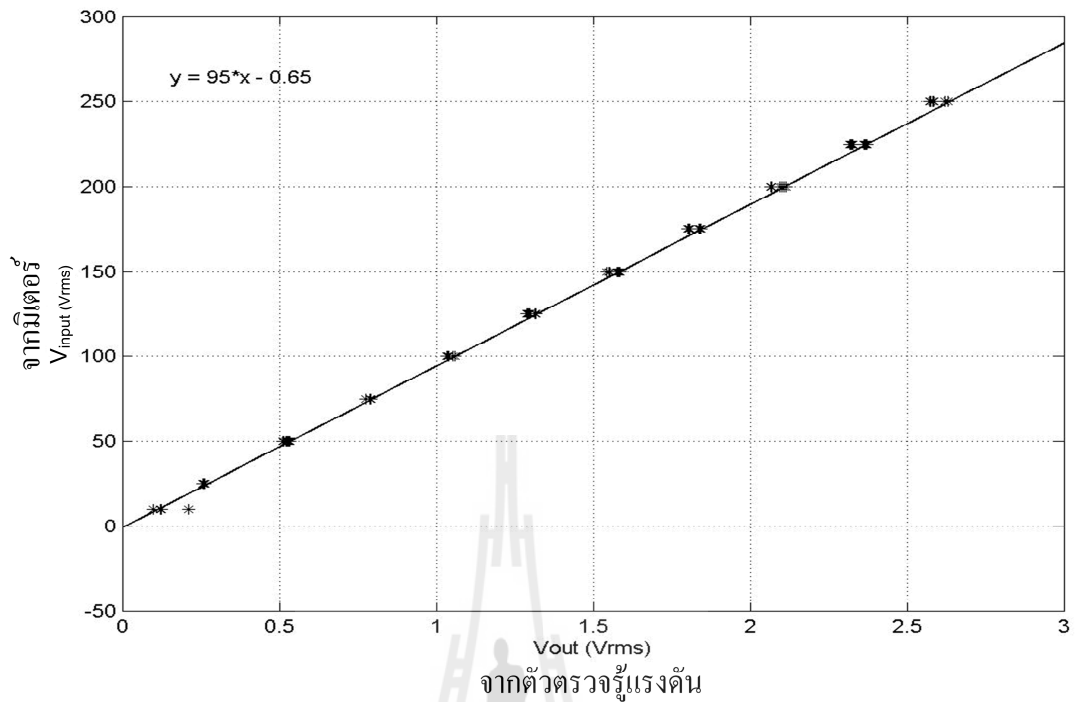
ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 4.9 แรงดันที่ตกคร่อมมอเตอร์และตัวตรวจรู้แรงดันมีรูปคลื่นไซน์ที่ประกอบด้วยรูปคลื่นซิกบวกละและซิกลบ แต่เนื่องจากไมโครคอนโทรลเลอร์รับแรงดันที่มีค่าบวกได้เท่านั้น แรงดันเอซีด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงจึงต้องผ่านวงจรยกระดับแรงดัน ทำให้แรงดันเอซีที่มีค่าลบเพิ่มระดับขึ้นเป็นแรงดันบวก เป็นผลให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ได้รับแรงดันบวกเท่านั้น



รูปที่ 4.9 ผลการทดสอบตัวตรวจรู้แรงดัน

ตารางที่ 4.2 ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบตัวตรวจรู้แรงดัน

แรงดันที่อ่าน ได้จากมิเตอร์ (V_{rms})	แรงดันเอาต์พุต (V_{rms})				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
10	0.102	0.103	0.103	0.109	0.103
25	0.257	0.254	0.257	0.255	0.256
50	0.512	0.51	0.512	0.514	0.512
75	0.767	0.767	0.768	0.764	0.768
100	1.025	1.021	1.023	1.02	1.033
125	1.284	1.277	1.282	1.277	1.281
150	1.541	1.54	1.539	1.538	1.542
175	1.798	1.792	1.798	1.795	1.796
200	2.062	2.05	2.051	2.052	2.055
225	2.309	2.305	2.31	2.3	2.314
250	2.568	2.57	2.565	2.567	2.567



รูปที่ 4.10 การถดถอยเชิงเส้นระหว่างแรงดันอินพุตและแรงดันเอาต์พุต

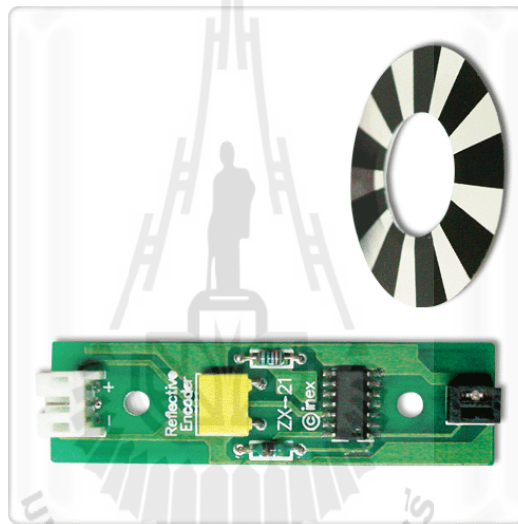
กราฟในรูปที่ 4.10 แสดงการถดถอยเชิงเส้นระหว่างแรงดันอินพุต (แรงดันที่ตกคร่อมตัวตรวจรู้แรงดันด้านปริมณิกของหม้อแปลงและเป็นค่าที่อ่านได้จากมาตรวัดแรงดันหรือมิเตอร์) และแรงดันเอาต์พุตของตัวตรวจรู้แรงดัน สมการเส้นตรงที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุตและแรงดันเอาต์พุตคือ

$$y = 95x - 0.65 \quad \text{หรือ} \quad V_{\text{input}} = 95V_{\text{out}} - 0.65 \quad (4.2)$$

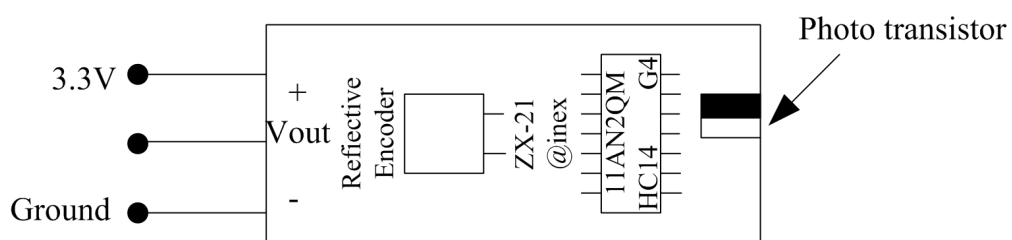
4.5 การวัดความเร็วด้วยตัวตรวจรู้ ZX-21

ตัวตรวจรู้ ZX-21 ที่แสดงในรูปที่ 4.11 ต้องการไฟเลี้ยง 3.3 โวลต์ดีซี ไดโอดเปล่งแสงในตัวตรวจรู้ส่งแสงอินฟราเรดออกมา เมื่อแถบวงกลมที่มีสีขาวดำสลับกันได้รับแสงอินฟราเรดตกกระทบในขณะที่กำลังหมุน แถบสีขาวและดำจะสะท้อนแสงอินฟราเรดกลับได้แตกต่างกัน แถบวงกลมมีสีขาวและดำสลับกันอย่างละ 9 แถบซึ่งแสดงในรูปที่ 4.11 (ก) แถบวงกลมจะยึดติดเข้ากับเพลหมุนของมอเตอร์ เมื่อแสงอินฟราเรดตกกระทบแถบสีดำ โฟโตรีสซิสเตอร์ IC1 QRD1114 ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.12 จะได้รับแสงสะท้อนกลับในปริมาณน้อย ทำให้เอาต์พุตมีลอจิก "1" แต่ถ้าแสงอินฟราเรดตกกระทบแถบสีขาว โฟโตรีสซิสเตอร์จะได้รับแสงสะท้อนกลับในปริมาณมาก ทำให้เอาต์พุตมีลอจิก "0" เมื่อมอเตอร์หมุนอย่างต่อเนื่อง แถบวงกลมจะหมุนตาม

ทำให้แสงอินฟราเรดตกกระทบแถบสีขาวและดำสลับกัน โฟโตทรานซิสเตอร์จะได้รับแสงสะท้อนกลับในปริมาณมากและน้อยสลับกัน ทำให้เอาต์พุตมีลอจิก “0” และลอจิก “1” สลับกันอย่างต่อเนื่องในลักษณะขบวนสัญญาณพัลส์ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.13 สัญญาณเอาต์พุตดิจิทัลจะส่งไปถึงไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ทำหน้าที่นับสัญญาณพัลส์และแปลงเป็นจำนวนรอบของการหมุนใน 1 นาที (รอบต่อนาที) เนื่องจากการหมุนของแถบวงกลมในหนึ่งรอบสร้างสัญญาณเอาต์พุตดิจิทัลที่มีลอจิก “1” จำนวน 9 พัลส์ จำนวนสัญญาณพัลส์ที่นับได้ใน 1 นาทีที่หารด้วย 9 คือความเร็วของการหมุนในหน่วยรอบต่อนาที รูปบนในรูปที่ 4.13 คือความเร็วของมอเตอร์และรูปล่างคือขบวนสัญญาณพัลส์ที่ได้จากตัวตรวจรู้ ZX-21

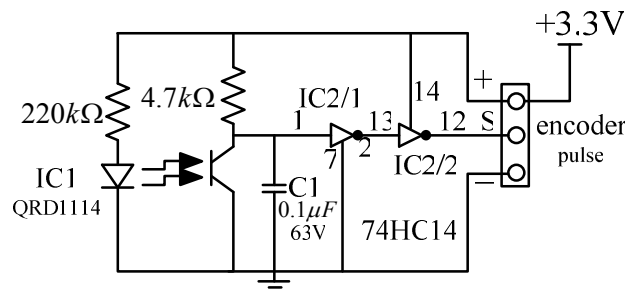


(ก) แผ่นวงจรตัวตรวจรู้ความเร็ว ZX-21 และแถบวงกลมที่มีสีขาวดำสลับกัน

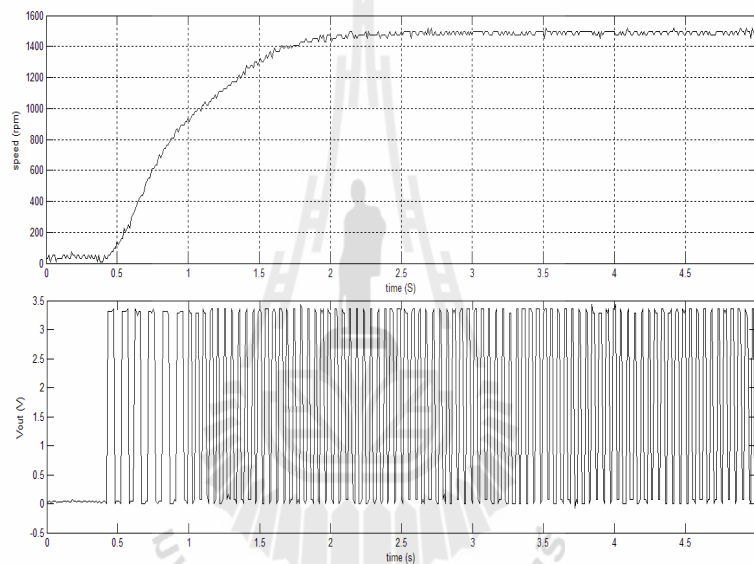


(ข) ส่วนประกอบในตัวตรวจรู้ความเร็ว ZX-21

รูปที่ 4.11 ตัวตรวจรู้ความเร็ว ZX-21



รูปที่ 4.12 วงจรตัวตรวจรู้ความเร็ว ZX-21



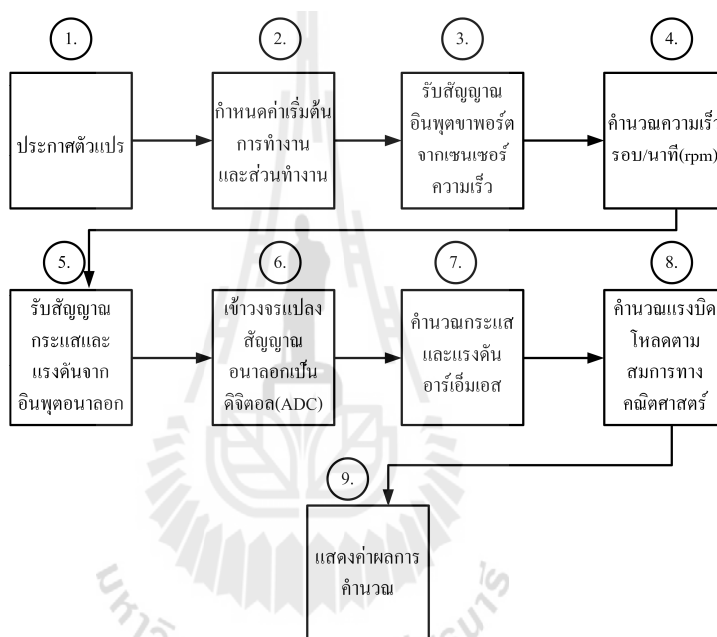
รูปที่ 4.13 ความเร็วในการหมุนของมอเตอร์และสัญญาณเอาต์พุตดิจิทัลของตัวตรวจรู้ความเร็ว

4.6 การเขียนโปรแกรมภาษาซีประมาณค่าแรงบิดโหลด

ไมโครคอนโทรลเลอร์ได้รับสัญญาณ 3 สัญญาณ คือสัญญาณที่ส่งมาจากตัวตรวจรู้ความเร็วป้อนเข้าที่ขาพอร์ตอินพุตหมายเลข 1 สัญญาณที่ส่งมาจากตัวตรวจรู้กระแสและตัวตรวจรู้แรงดันป้อนเข้าที่ขาอินพุตของวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล ส่วนต่าง ๆ ของโปรแกรมประกอบด้วย การประกาศตัวแปร การกำหนดค่าเริ่มต้นทำงาน การเข้าถึงสัญญาณหรือข้อมูล การคำนวณปริมาณต่าง ๆ และการแสดงผล ส่วนต่าง ๆ ของโปรแกรมซึ่งแสดงในรูปที่ 4.14 มีรายละเอียดดังนี้

ส่วนที่ 1. การประกาศตัวแปร ตัวแปรที่กำหนดขึ้นมาใช้ในการเก็บค่าข้อมูลต่าง ๆ ตัวแปรที่ใช้ในงานมี 3 แบบ คือแบบ int (แบบตัวเลขจำนวนเต็ม 16 บิต) แบบ float (แบบเลขทศนิยม) และแบบ unsigned long (แบบเลขจำนวนเต็ม 32 บิตที่ไม่พิจารณาเครื่องหมาย)

ส่วนที่ 2. การกำหนดค่าเริ่มต้น ไมโครคอนโทรลเลอร์จะปฏิบัติงานตามชุดคำสั่งในฟังก์ชัน void setup() เพียงครั้งเดียว เพื่อกำหนดค่าของตัวแปรในโหมดการทำงานต่าง ๆ และเรียกไลบรารี ฯลฯ และไมโครคอนโทรลเลอร์จะปฏิบัติงานตามชุดคำสั่งใน void loop() ต่อเนื่องตลอดเวลา เพื่อเข้าถึงข้อมูลพอร์ตที่ได้รับ นำมาประมวลผลและเอาต์พุตค่าออก



รูปที่ 4.14 ส่วนต่าง ๆ และลำดับการทำงานของโปรแกรม

ส่วนที่ 3. การเข้าถึงข้อมูลที่ได้รับจากตัวตรวจรู้ความเร็ว ฟังก์ชัน attachInterrupt (1,capture_plue.RISING) และ pinMode(1, INPUT) จะสร้างโหมดการกระตุ้นอินเทอร์รัปต์ภายนอก เมื่อขาอินพุตพอร์ตหมายเลข 1 เปลี่ยนลอจิกจาก “0” เป็น “1” (RISING) ไมโครคอนโทรลเลอร์จะนับสัญญาณพัลส์หนึ่งครั้ง

ส่วนที่ 4. การคำนวณความเร็วในหน่วยรอบต่อนาที (rpm) ไมโครคอนโทรลเลอร์นับสัญญาณพัลส์แบบวนลูปใน 1000 มิลลิวินาที และคูณตัวเลขที่นับได้ด้วย 60 ผลคูณคือความเร็ว

ส่วนที่ 5. การได้รับแรงดันแอนะลอกจากตัวตรวจรู้กระแสและตัวตรวจรู้แรงดัน ไมโครคอนโทรลเลอร์ได้รับแรงดันแอนะลอกที่ป้อนถึงขาอินพุตของวงจรแปลงสัญญาณแอนะลอกเป็นดิจิตอล

ส่วนที่ 6. การแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล การแปลงสัญญาณมีความละเอียด 12 บิตและใช้เวลา 8 ไมโครวินาทีในการแปลงสัญญาณแต่ละครั้ง หลังจากการแปลงสัญญาณ ไมโครคอนโทรลเลอร์จะหน่วงเวลาการทำงาน 2 ไมโครวินาที ทำให้เกิดการคาบการสุ่ม 10 ไมโครวินาที เนื่องจากแรงดันเอชซีและกระแสไฟฟ้าเอชซีมีความถี่ 50 Hz จะได้ว่ามีคาบเวลา 20 มิลลิวินาที นั่นคือไมโครคอนโทรลเลอร์จะต้องสุ่มวัดและเข้าถึงข้อมูลแรงดันและกระแสไฟฟ้า อย่างละ 2000 ข้อมูล เพื่อให้ได้รับข้อมูลภายใน 1 คาบเวลา ทำให้การเก็บรวบรวมข้อมูลแรงดัน และกระแสไฟฟ้าใช้เวลา 40 มิลลิวินาที

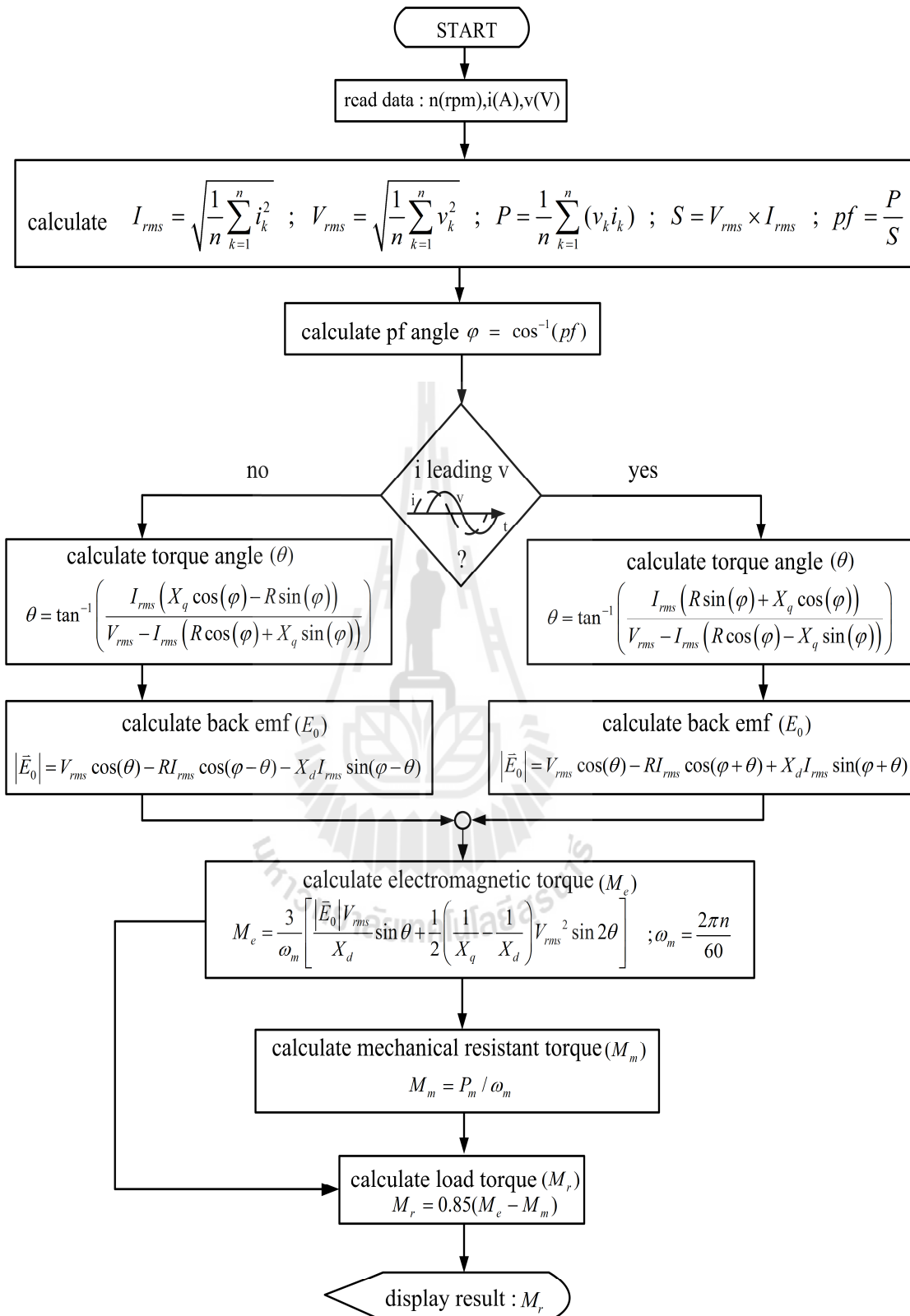
ส่วนที่ 7. การคำนวณค่ากระแสและแรงดันอาร์เอ็มเอส (H. Xuenong, 2009) สมการ

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n i_k^2} \quad \text{และ} \quad V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n v_k^2}$$

จะคำนวณค่าอาร์เอ็มเอสของกระแสเอชซีและแรงดันเอชซีตามลำดับ โดยที่ $n = 2000$ คือจำนวนข้อมูลที่ได้รับภายใน 1 คาบเวลา 20 มิลลิวินาที i_k และ v_k คือ ค่ากระแสและแรงดันที่เวลาการสุ่มวัด

ส่วนที่ 8. การใช้สมการทางคณิตศาสตร์คำนวณแรงบิดโหลดซึ่งเป็นขั้นตอนที่แสดงในรูปที่ 4.15 การคำนวณแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือในกรณีกระแสนำหน้าแรงดันและในกรณีกระแสล่าหลังแรงดัน รายละเอียดของโปรแกรมภาษาซีแสดงในรูปที่ 4.16(ก)-(ง)

ส่วนที่ 9. การแสดงผลการคำนวณ ไมโครคอนโทรลเลอร์ปฏิบัติตามคำสั่ง SerialUSB.print เพื่อส่งตัวเลขของผลการคำนวณออกมาผ่านทางพอร์ต USB และแสดงผลบนหน้าจอ



รูปที่ 4.15 ฟังก์ชันการคำนวณค่าแรงบิดโหลด


```

float Irms=0,Vrms=0,pf=0,Prms=0, // ประกาศตัวแปรประเภทเลขทศนิยม
    S=0,y=0,od=0,oq=0,to=0, // ใช้การคำนวณพร้อมทั้งกำหนดค่าเริ่มต้นของ
    lead=0,lag=0,E0_real=0, // พารามิเตอร์มอเตอร์
    E0_Img=0,Ereal=0,Wi=0,
    Q=0,Iq=0,Id=0,M=0,E=0,
    n=0, EImg=0,R=4.736,
    Xq=44.15,Xd=80.327,
    Pin=0,Ma=0,Mm=0, Mr=0,
    Vrms0, Irms0,Prms0;
int Pf_lead=0; // ประกาศตัวแปรประเภทตัวเลขจำนวนเต็ม
unsigned long previousTime=0; // ประกาศตัวแปรประเภทเลขจำนวนเต็ม
volatile unsigned long encoder = 0; // 32บิต ไม่คิดเครื่องหมาย
void capture_pulse() // ลูปการจับสัญญาณแบบวนซ้ำไปเรื่อยๆ
{
    ++encoder; // คำสั่งทำงานต่อเนื่องต่อไป
}

```

(ก) โปรแกรมการประกาศตัวแปร

```

void setup() // ลูปกำหนดค่าเริ่มต้นการทำงาน
{
    pinMode(1, INPUT); // กำหนดหมายเลขของช่องอินพุตอินเทอร์รัปต์
    attachInterrupt(1,capture_pulse,RISING); // ฟังก์ชันที่กระโดดไปทำงานเมื่อเกิด
} // อินเทอร์รัปต์ฟังก์ชันนี้ต้องไม่รับค่าพารามิเตอร์และ
// ไม่มีการคืนค่า , โหมด RISING
void loop() // เกิดอินเทอร์รัปต์เมื่อมีการเปลี่ยนลอจิก "0" เป็น "1"
{ if(millis()-previousTime>1000 ) { // ลูปการทำงานจะทำงานต่อเนื่องตลอดเวลา
    previousTime = millis(); // อัตราการสุ่มสัญญาณ 1 วินาที
    Call_RMS(); // กำหนดรอบคำนวณในแต่ละรอบคือ 1 วินาที
    Call_Display(); // ลูปย่อยสำหรับทำการคำนวณหาค่า rms
    encoder = 0; // ของกระแสและแรงดัน และ
} // ลูปย่อยสำหรับแสดงค่าการคำนวณ
}
void Call_Display(void) { // ลูปย่อยสำหรับแสดงค่าการคำนวณ
}

```

(ข) โปรแกรมการเข้าถึงข้อมูลที่ได้รับจากตัวตรวจรู้ความเร็ว

```

float RPM=0,Freq; // ประกาศตัวแปรประเภทเลขทศนิยม
Freq=encoder; // จับสัญญาณที่พัลส์ที่เกิดการอินเทอร์รัปต์
RPM=(Freq/9)*60; // ทำการคำนวณค่า rpm
n=RPM; // ในตัวตรวจรู้ความเร็วในเป็นรอบต่ออนาที // ให้ตัวแปร n
Wi=(0.1047*n); // เท่ากับตัวแปร RPM อัตราเร็วเชิงมุมทางกล  $2\pi n / 60$ 
SerialUSB.print(n,0); // ฟังก์ชันสั่งพิมพ์หรือส่งข้อมูลออกทางพอร์ตอนุกรม
// เรียกตัวแปร และ กำหนดตำแหน่งทศนิยมศูนย์ตำแหน่ง

SerialUSB.print("\t n "); // กำหนดรูปแบบที่แสดงค่าที่หน้าจอ“เว้นวรรค n”
SerialUSB.print(Vrms,3); // เรียกตัวแปรแรงดัน ใช้ทศนิยม 3 ตำแหน่ง
SerialUSB.print("\tVrms"); // แสดงค่าแรงดันอาร์เอ็มเอส
SerialUSB.print(Irms,3); // เรียกตัวแปรกระแส ใช้ทศนิยม 3 ตำแหน่ง
SerialUSB.print("\t Irms"); // แสดงค่ากระแสอาร์เอ็มเอส

```

(ค) โปรแกรมการแสดงค่าอาร์เอ็มเอสของแรงดันและกระแส

```

if(Pf_lead== 1) {SerialUSB.print("1");} // ถ้าตัวประกอบกำลังเป็น leading แสดงค่า 1
else{SerialUSB.print("0");} // ถ้า Pf_Lead ไม่เท่ากับ 1 ตัวประกอบกำลังเป็น
// lagging ให้แสดงค่า 0

SerialUSB.print("\t lead lag "); // แสดงค่า leading หรือ lagging
SerialUSB.print(pf,2); // เรียกตัวแปรกระแสทศนิยม 2 ตำแหน่ง
SerialUSB.print("\t pf"); // แสดงค่าตัวประกอบกำลัง
SerialUSB.print(E,3); // เรียกตัวแปรแรงดันไฟฟ้าด้านกลับทศนิยม 3
SerialUSB.print("\t E"); // ตำแหน่ง
// แสดงแรงดันไฟฟ้าด้านกลับ
SerialUSB.print(to,3); // เรียกตัวแปรมุมแรงบิดทศนิยม 3 ตำแหน่ง
SerialUSB.print("\t torque angle"); // แสดงค่ามุมแรงบิด
SerialUSB.print(Mr,3); // เรียกตัวแปรแรงบิดโหลดทศนิยม 3 ตำแหน่ง
SerialUSB.print("\t Mr"); // แสดงค่าแรงบิดโหลด
SerialUSB.print(M,3); // เรียกตัวแปรแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าทศนิยม 3
SerialUSB.print("\t Me "); // ตำแหน่ง // แสดงค่าแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า

```

(ง) โปรแกรมการแสดงผลการคำนวณแรงบิดโหลด

```

SerialUSB.print(Mm,3);           // เรียกตัวแปรแรงบิดด้านโหลดใช้ทศนิยม 3 ตำแหน่ง
SerialUSB.print("\t Mm")        // แสดงค่าแรงบิดเสียดทานเชิงกล
SerialUSB.println("");          // ขึ้นบรรทัดใหม่ในแต่ละบรรทัด

}                                 // จบรูป Call_Display()
void Call_RMS(void)              // เรียกกลยุทธ์ที่ใช้คำนวณค่ากระแสและแรงดันอาร์เอ็มเอส
{
float VoltSampling,SumVolt=0,    // ประกาศตัวแปรประเภทเลขทศนิยม
    SumI=0, PO=0, VO=0,
    VO1=0,RatV=0;
double SumP=0;                  // ประกาศตัวแปรประเภทเลขทศนิยมความละเอียดสองเท่า
unsigned int lenght=2000;       // กำหนดค่า 1 คาบ ของรูปคลื่นกระแสและแรงดัน
for(int j =0;j<lenght;j++)      // ทำการคำนวณวนรอบจนถึง 2000 รอบ
{

```

(จ) โปรแกรมการกำหนดจำนวนข้อมูลของแรงดันและกระแสที่ได้จากการสุ่มวัด

```

//==== Sampling Input Voltage =====//
VoltSampling = analogRead(15);    // รับค่าอนาลอกอินพุตที่ขา 15
VoltSampling = VoltSampling*3.3/4095- // คำนวณจากการแบ่งแรงดัน 3.3 V หารด้วย
1.65;                             // (212 - 1) ลบด้วยแรงดันที่แบ่งมา 1.65 V
VO1 = VO;                          // ส่วนนี้สำหรับตรวจว่าเป็น lead หรือ lag
VO = VoltSampling;                 // ทำการคำนวณส่งค่า sampling
SumVolt = SumVolt                 // ในแต่ละจุดให้ VO
+VoltSampling*VoltSampling;      // ทำการรวมค่าแรงดันทั้งหมดใน 2000 ชุด
                                  // ข้อมูล

//==== Sampling Input Current =====//
VoltSampling = analogRead(16);    // รับค่าอนาลอกอินพุตที่ขา 16
VoltSampling = VoltSampling*3.3/4095- // คำนวณจากการแบ่งแรงดัน 3.3 V หารด้วย
1.65;                             // (212 - 1) ลบด้วยแรงดันที่แบ่งมา 1.65 V
SumI = SumI +                     // ทำการรวมค่าแรงดันทั้งหมดใน 2000 ชุด
VoltSampling*VoltSampling;      // ข้อมูล

```

(ฉ) โปรแกรมการเข้าถึงแรงดันและกระแสที่ได้จากการสุ่มวัด

```

//==== Sampling Input Power====//
PO=VO*VoltSampling;
SumP=SumP+PO;

//===== Phase Detector =====//
if(j > 1)
{
RatV = VO-VO1;
if(RatV > 0)
{
if(VO > -0.001)
{
if(VO < 0.001)
{
if(VoltSampling > 0) {Pf_lead = 1;}
else{Pf_lead = 0;}
}
}
}
}

//=====//
delayMicroseconds(2);
}

```

// หมายถึง VO = แรงดัน, VoltSampling =
กระแส นั่นคือ กำลังไฟฟ้า
เท่ากับแรงดันคูณกับกระแส
// ทำการรวมค่ากำลังไฟฟ้าทั้งหมดใน 2000
ชุดข้อมูล

// พิจารณาในรอบการทำงาน ที่ 1 ถึง 2000
// แรงดันรอบก่อนลบด้วยแรงดันรอบต่อมา
// ถ้า RatV มากกว่า 0
// ถ้า VO มากกว่า -0.001
// ถ้า VO น้อยกว่า -0.001
// ในช่วงแรงดันอยู่ที่ -0.001 ถึง 0.001
ถ้ากระแสมากกว่า 0 หมายความว่า pf เป็น
leading
// ถ้าเป็นอย่างอื่นแสดงว่าเป็น lagging

// หน่วงเวลาของโปรแกรม 2 ไมโครวินาที

(ข) โปรแกรมการคำนวณกำลังไฟฟ้าที่เวลาการสุ่มวัด

```
//=====Calculate RMS =====//
Prms0 = SumP/lenght; // หาค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ย
Prms0 = (513*Prms0)+7.5; // เป็นการปรับค่านอกจากการปรับคูณกระแสและแรงดัน
Vrms0 = sqrt(SumVolt/lenght); // ทำการหาค่าอาร์เอ็มเอสของแรงดัน
Vrms0 = (95*Vrms0)-0.65; // การปรับคูณแรงดันตามอัตราส่วนตัวตรวจรู้
Irms0 = sqrt(SumI/lenght); // ทำการหาค่าอาร์เอ็มเอสของกระแส
Irms0=5.4*Irms0+0.0042; // การปรับคูณกระแสตามอัตราส่วนตัวตรวจรู้
S= Vrms*Irms; // หาค่ากำลังไฟฟ้าเชิงซ้อน
//=====Average Value =====// // V(n+1) = 0.3*V(n) + 0.7*V(n-1)
Vrms = Vrms*0.7 + Vrms0*0.3; //เป็นการใส่ฟิลเตอร์ให้ค่าที่ออกมามีความเรียบขึ้น
Irms = Irms*0.7 + Irms0*0.3; //โดยเทคนิค linear constant coefficient difference equation
Prms = Prms*0.7 + Prms0*0.3; //กระแส แรงดัน กำลังไฟฟ้า
```

(๗) โปรแกรมการคำนวณกำลังเฉลี่ย กำลังเชิงซ้อน ค่าอาร์เอ็มเอสของแรงดันและกระแส

```
//===== Calculate Leading=====//
if(Pf_lead == 1) // ถ้า Pf_lead เท่ากับ 1
{
pf=Prms/S; // คำนวณตัวประกอบกำลัง
if (pf>1){pf=1;} //หากเกิดการคำนวณผิดพลาดในกรณีที่มี pf
// คำนวณแล้วมากกว่า 1 จะให้ค่า pf เท่ากับ 1
y=acos(pf) ; // หามุมตัวประกอบกำลัง
E0_real=Vrms-(R*Irms*cos(y)) // การคำนวณประมาณแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ
+(Xq*Irms*sin(y)); // ส่วนของจำนวนจริง
E0_Img=(R*Irms*sin(y))+ // การคำนวณประมาณแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ
(Xq*Irms*cos(y)); // ส่วนของจำนวนเชิงซ้อน
Q=atan(E0_Img/E0_real); // คำนวณมุมแรงบิด แบบเรเดียน
to=atan(E0_Img/E0_real)*57.2958; // เปลี่ยนเรเดียนเป็นดีกรีโดยการ  $\times 180 / \pi$ 
Iq = (Irms*cos(y+Q)); // คำนวณค่ากระแสตามแนวแกนขวาง
Id = (Irms*sin(y+Q)); // คำนวณค่ากระแสตามแนวแกนตรง
od = 1.5707962-Q; // มุมกระแสตามแนวแกนตรง
oq= Q; // มุมกระแสตามแนวแกนขวาง
Ereal=Vrms-(R*Irms*cos(y)) //การคำนวณแรงดันไฟฟ้าต้านกลับส่วน
-(Xq*Iq*sin(oq)) // ของจำนวนจริง
+(Xd*Id*sin(od));
```

(๘) โปรแกรมการคำนวณปริมาณต่าง ๆ ในกรณีกระแสนำหน้าแรงดัน

```

EImg = -(R*Irms*sin(y)) //การคำนวณแรงดันไฟฟ้าต้านกลับส่วนของ
      -(Xd*Id*cos(od))   จำนวนเชิงซ้อน
      -(Xq*Iq*cos(oq));
E = sqrt((Ereal*Ereal)+(EImg*EImg)); // คำนวณแรงดันไฟฟ้าต้านกลับเฉพาะส่วนจริง
M = (3/Wi)*((E/Xd*Vrms*sin(Q)) // คำนวณแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า
      +(0.5*((1/Xq)
      -(1/Xd))*Vrms*Vrms*sin(2*Q)));
} // จบการทำงานใน Calculate Leading

```

(ง) โปรแกรมการคำนวณแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าในกรณีกระแสหน้าแรงดัน

```

//===== Calculate Lagging=====//
else // ถ้า Pf_lead ไม่เท่ากับ 1
{
  pf=Prms/S; // คำนวณตัวประกอบกำลัง
  if(pf>1){pf=1; // หากเกิดการคำนวณผิดพลาดในกรณีที่ pf
  // คำนวณแล้วมากกว่า 1 จะให้ค่า pf เท่ากับ 1
  y=acos(pf); // หามุมตัวประกอบกำลัง
  E0_real = Vrms-(R*Irms*cos // การคำนวณประมาณแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ
    (-y))+Xq*Irms*sin(-y); ส่วนของจำนวนจริง
  E0_Img = (R*Irms*sin(-y) // การคำนวณประมาณแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ
    +(Xq*Irms*cos(-y)); ส่วนของจำนวนเชิงซ้อน
  Q = (atan(E0_Img/E0_real)); // คำนวณมุมแรงบิด แบบเรเดียน
  to = (atan(E0_Img/E0_real)*57.2958); // เปลี่ยนเรเดียนเป็นดีกรีโดยการ ×180/π
  Iq=(Irms*cos(y-Q)); // คำนวณค่ากระแสตามแนวแกนขวาง
  Id=(Irms*sin(y-Q)); // คำนวณค่ากระแสตามแนวแกนตรง
  od=-1.5707962-Q; // มุมกระแสตามแนวแกนตรง
  oq=Q; // มุมกระแสตามแนวแกนขวาง
  Ereal=Vrms-(R*Irms*cos(-y)) //การคำนวณแรงดันไฟฟ้าต้านกลับส่วน
    -(Xq*Iq*sin(oq)) ของจำนวนจริง
    +(Xd*Id*sin(od));

```

(จ) โปรแกรมการคำนวณปริมาณต่าง ๆ ในกรณีกระแสล่าหลังแรงดัน

```

EImg = -(R*Irms*sin(-y)) //การคำนวณแรงดันไฟฟ้าต้านกลับส่วนของ
      -(Xd*Id*cos(od))-(Xq*Iq*cos(oq)); จำนวนเชิงซ้อน
E=sqrt((Ereal*Ereal)+(EImg*EImg)); // คำนวณแรงดันไฟฟ้าต้านกลับเฉพาะส่วนจริง
M = (3/Wi)*((E/Xd*Vrms*sin(Q)) // คำนวณแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า
      +(0.5*((1/Xq)
      - (1/Xd))*Vrms*Vrms*sin(2*Q)));
      } // จบการทำงานใน Calculate Lagging

//=====Load Torque =====//
Mm= 19.40/Wi; // คำนวณแรงบิดเสียดทานเชิงกล
Mr=(M-Mm)*0.85; // คำนวณแรงบิดโหลด
      } // จบการทำงานในรูป Call_RMS
      จบการทำงานของโปรแกรม

```

(ฎ) โปรแกรมการคำนวณแรงบิด โหลดและแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าในกรณีกระแสล้าหลังแรงดัน

รูปที่ 4.16 โปรแกรมตัวประมาณค่าแรงบิดโหลด

4.7 บทสรุป

บทนี้ได้อธิบายบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์เมเปิล ตัวตรวจรู้แรงดัน ตัวตรวจรู้กระแส ตัวตรวจรู้ความเร็ว การเขียนโปรแกรมภาษาซีที่กำหนดให้ไมโครคอนโทรลเลอร์เข้าถึงข้อมูลแรงดัน กระแสไฟฟ้า และความเร็ว และทำหน้าที่เป็นตัวประมาณค่าแรงบิดโหลด การนำข้อมูลหรือปริมาณที่ได้จากการสุ่มวัดป้อนถึงแบบจำลองของมอเตอร์ซิงโครนัส เพื่อคำนวณแรงบิดโหลด และการแสดงผลกระแส แรงดัน ความเร็ว กำลังไฟฟ้า ตัวประกอบกำลัง มุมแรงบิด แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า และแรงบิดโหลด

บทที่ 5

การทดสอบตัวประมาณค่าแรงบิดโหลด

5.1 บทนำ

บทนี้อธิบายถึงการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบตัวประมาณค่าแรงบิดโหลด ขั้นตอนการทดสอบ ผลการทดสอบตัวประมาณค่าแรงบิดโหลด และการวิเคราะห์ความผิดพลาดของผลการทดสอบ มอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบมีแรงดันขั้วต่อสเตเตอร์ตกคร่อมเท่ากับ 80% ถึง 120% ของแรงดันพิกัด การทดสอบแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือกรณีที่กระแสหน้าแรงดัน และกรณีที่กระแสล่าหลังแรงดัน แรงบิดโหลดที่ได้จากการประมาณค่าจะเปรียบเทียบกับค่าแรงบิดโหลดที่อ่านได้จากเครื่องมือวัด ผลการทดสอบที่เป็นตัวเลขจะกล่าวถึงในภาคผนวก ก

5.2 การติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบและขั้นตอนการทดสอบ

การติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบตัวประมาณค่าแรงบิดโหลดแสดงในรูปที่ 5.1 แหล่งจ่ายแรงดันปรับค่าได้จ่ายกระแสไฟฟ้าสลับถึงขั้วต่อของมอเตอร์ซึ่ง โครนัส เพื่อเพิ่มหรือลดค่าอาร์เอ็มเอสของแรงดันเอซีได้ตามต้องการ แหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรงป้อนกระแสไฟฟ้าถึงขดลวดสนามของมอเตอร์ ตัวตรวจรู้กระแสวัดกระแสอาร์เมเจอร์ (กระแสสาย) และตัวตรวจรู้แรงดันวัดแรงดันตกคร่อมขั้วต่อสเตเตอร์ (แรงดันเฟส) ในเฟสใดเฟสหนึ่งของมอเตอร์ และตัวตรวจรู้ความเร็ววัดความเร็วรอบเพลลาหมุนของมอเตอร์ ตัวตรวจรู้ทั้งสามส่งข้อมูลหรือปริมาณที่ได้จากการวัดถึงบอร์ดเมเบิลซึ่งเชื่อมต่อกับพอร์ต USB ของคอมพิวเตอร์ มาตรวัดกำลัง (power meter : PX 120) วัดกำลังเฉลี่ยต่อเฟสที่เกิดขึ้นกับมอเตอร์ ค่าที่อ่านได้จากมาตรวัดกำลังใช้ตรวจสอบความถูกต้องของการคำนวณค่าอาร์เอ็มเอสกระแส ค่าอาร์เอ็มเอสของแรงดัน กำลังเฉลี่ย และตัวประกอบกำลัง และค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดแรงบิดโหลดที่เชื่อมต่อกับเพลลาหมุนของมอเตอร์ ใช้ตรวจสอบความถูกต้องของการคำนวณแรงบิดโหลด

การทดสอบตัวประมาณแรงบิดโหลดมีขั้นตอนดังนี้

1. ต่อบางจรในรูปที่ 5.1

2. ลัดวงจรขดลวดสนามของมอเตอร์เพื่อเริ่มเดินเครื่อง ป้อนกระแสไฟฟ้าสลับสามเฟสให้กับขั้วต่อสเตเตอร์ของมอเตอร์ เมื่อมอเตอร์หมุนด้วยความเร็วรอบเข้าใกล้ความเร็วซิงโครนัส และแหล่งจ่ายมีค่าอาร์เอ็มเอสของแรงดันเอซีเท่ากับแรงดันพิกัด ($230 \text{ V}_{\text{rms}}$) เชื่อมต่อแหล่งจ่าย

แรงดันกระแสตรง 220 โวลต์ ถึงขดลวดสนาม และจ่ายกระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็กเท่ากับค่าพิกัด 0.6 แอมแปร์

3. เปิดคอมพิวเตอร์ของบอร์ดเมเปิด และรันโปรแกรมคำนวณแรงบิดโหลด เพื่อ กำหนดให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ประมาณค่าแรงบิดโหลด

4. ปรับแรงดันกระแสสลับสามเฟสของแหล่งจ่ายให้มีค่าอาร์เอ็มเอสเท่ากับ 80% ของแรงดันพิกัด ($184 V_{rms}$) ตกร่วมขั้วต่อสเตเตอร์ ปรับแรงดันกระแสตรงของแหล่งจ่ายให้มีค่าเท่ากับ 120 โวลต์ตกร่วมขดลวดสนาม และป้อนกระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็ก 0.3 แอมแปร์ เพื่อทดสอบในกรณีที่กระแสน้ำหนักแรงดัน

5. สร้างโหลดทางกล 0.5 นิวตัน-เมตร บันทึกผลการทดสอบหรือผลการคำนวณ เปรียบเทียบกับค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัด เพิ่มโหลดทางกลขึ้นครั้งละประมาณ 0.5 นิวตัน-เมตร และบันทึกผลการทดสอบไปจนถึงโหลดทางกลเท่ากับ 4.0 นิวตัน-เมตร ต้องไม่ให้กระแสอาร์เอ็มเอส (กระแสสาย) มากกว่า 1.6 แอมแปร์ เพราะมอเตอร์จะขับเคลื่อนโหลดมากเกินไปและ อาจเกิดความเสียหายได้ และต้องตรวจสอบอุณหภูมิของมอเตอร์ตลอดเวลา ถ้ามอเตอร์มีอุณหภูมิสูง (ร้อนเกินไป) ต้องลดโหลดทางกลลง ไม่จ่ายกระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็ก (เปิดวงจร) และไม่ป้อนกระแสสลับสามเฟสถึงขั้วต่อสเตเตอร์ เพื่อให้มอเตอร์หยุดหมุนและมีอุณหภูมิลดลง เมื่อมอเตอร์มีอุณหภูมิลดลงเท่ากับอุณหภูมิห้อง จึงเริ่มเดินเครื่องใหม่

6. ปรับแรงดันกระแสตรงของแหล่งจ่ายให้มีค่าเท่ากับ 60 โวลต์ตกร่วมขดลวดสนาม และป้อนกระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็ก 0.2 แอมแปร์ เพื่อทดสอบในกรณีที่กระแสล้าหลังแรงดัน และดำเนินการเหมือนในขั้นตอนที่ 5

7. เพิ่มแรงดันกระแสสลับสามเฟสของแหล่งจ่ายให้มีค่าอาร์เอ็มเอสเท่ากับ 90% ของแรงดันพิกัด ($207 V_{rms}$) ตกร่วมขั้วต่อสเตเตอร์ ปรับแรงดันกระแสตรงของแหล่งจ่ายให้มีค่าเท่ากับ 115 โวลต์ตกร่วมขดลวดสนาม และป้อนกระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็ก 0.39 แอมแปร์ เพื่อทดสอบในกรณีที่กระแสน้ำหนักแรงดัน และดำเนินการเหมือนในขั้นตอนที่ 5 ปรับแรงดันกระแสตรงของแหล่งจ่ายให้มีค่าเท่ากับ 60 โวลต์ตกร่วมขดลวดสนาม และป้อนกระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็ก 0.2 แอมแปร์ เพื่อทดสอบในกรณีที่กระแสล้าหลังแรงดัน และดำเนินการเหมือนในขั้นตอนที่ 5

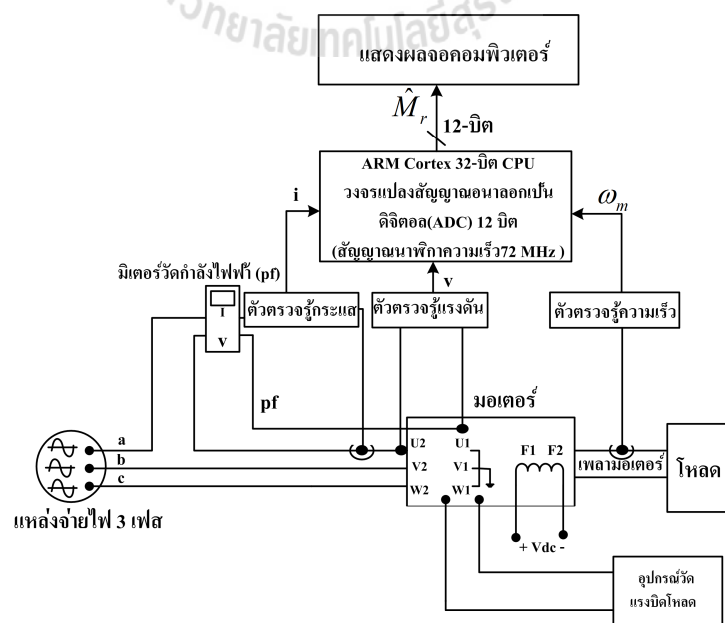
8. เพิ่มแรงดันกระแสสลับสามเฟสของแหล่งจ่ายให้มีค่าอาร์เอ็มเอสเท่ากับ 100% ของแรงดันพิกัด ($230 V_{rms}$) ตกร่วมขั้วต่อสเตเตอร์ ปรับแรงดันกระแสตรงของแหล่งจ่ายให้มีค่าเท่ากับ 120 โวลต์ตกร่วมขดลวดสนาม และป้อนกระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็ก 0.35 แอมแปร์ เพื่อทดสอบในกรณีที่กระแสน้ำหนักแรงดัน และดำเนินการเหมือนในขั้นตอนที่ 5 ปรับแรงดันกระแสตรงของแหล่งจ่ายให้มีค่าเท่ากับ 60 โวลต์ตกร่วมขดลวดสนาม และป้อนกระแสกระตุ้น

สนามแม่เหล็ก 0.2 แอมแปร์ เพื่อทดสอบในกรณีที่กระแสล้าหลังแรงดัน และดำเนินการเหมือนในขั้นตอนที่ 5

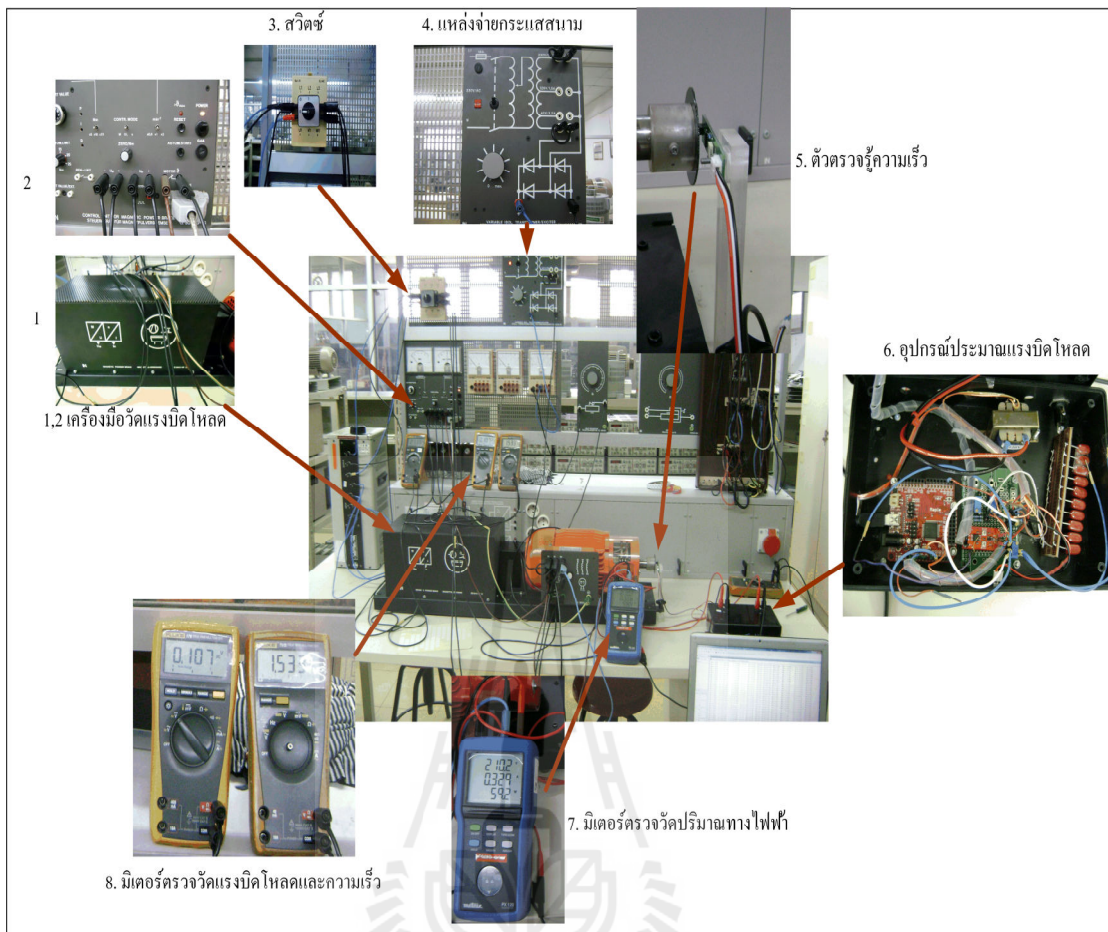
9. เพิ่มแรงดันกระแสสลับสามเฟสของแหล่งจ่ายให้มีค่าอาร์เอ็มเอสเท่ากับ 110% ของแรงดันพิกัด ($253 V_{rms}$) ตกร่อมขั้วต่อสเตเตอร์ ปรับแรงดันกระแสตรงของแหล่งจ่ายให้มีค่าเท่ากับ 180 โวลต์ตกร่อมขดลวดสนาม และป้อนกระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็ก 0.42 แอมแปร์ เพื่อทดสอบในกรณีที่กระแสนำหน้าแรงดัน และดำเนินการเหมือนในขั้นตอนที่ 5 ปรับแรงดันกระแสตรงของแหล่งจ่ายให้มีค่าเท่ากับ 120 โวลต์ตกร่อมขดลวดสนาม และป้อนกระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็ก 0.31 แอมแปร์ เพื่อทดสอบในกรณีที่กระแสล้าหลังแรงดัน และดำเนินการเหมือนในขั้นตอนที่ 5

10. เพิ่มแรงดันกระแสสลับสามเฟสของแหล่งจ่ายให้มีค่าอาร์เอ็มเอสเท่ากับ 120% ของแรงดันพิกัด ($276 V_{rms}$) ตกร่อมขั้วต่อสเตเตอร์ ปรับแรงดันกระแสตรงของแหล่งจ่ายให้มีค่าเท่ากับ 210 โวลต์ตกร่อมขดลวดสนาม และป้อนกระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็ก 0.6 แอมแปร์ เพื่อทดสอบในกรณีที่กระแสนำหน้าแรงดัน และดำเนินการเหมือนในขั้นตอนที่ 5 ปรับแรงดันกระแสตรงของแหล่งจ่ายให้มีค่าเท่ากับ 100 โวลต์ตกร่อมขดลวดสนาม และป้อนกระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็ก 0.31 แอมแปร์ เพื่อทดสอบในกรณีที่กระแสล้าหลังแรงดัน และดำเนินการเหมือนในขั้นตอนที่ 5

11. บันทึกผลการทดสอบ ลดโหลดทางกลลง หยุดการจ่ายกระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็ก และกระแสอาร์เมเจอร์



(ก) แผนภาพการเชื่อมต่อส่วนต่างๆ ของอุปกรณ์ทดสอบตัวประมาณค่าแรงบิด โหลด



(จ) การติดตั้งอุปกรณ์ทดลองของตัวประมาณค่าแรงบิดโพล

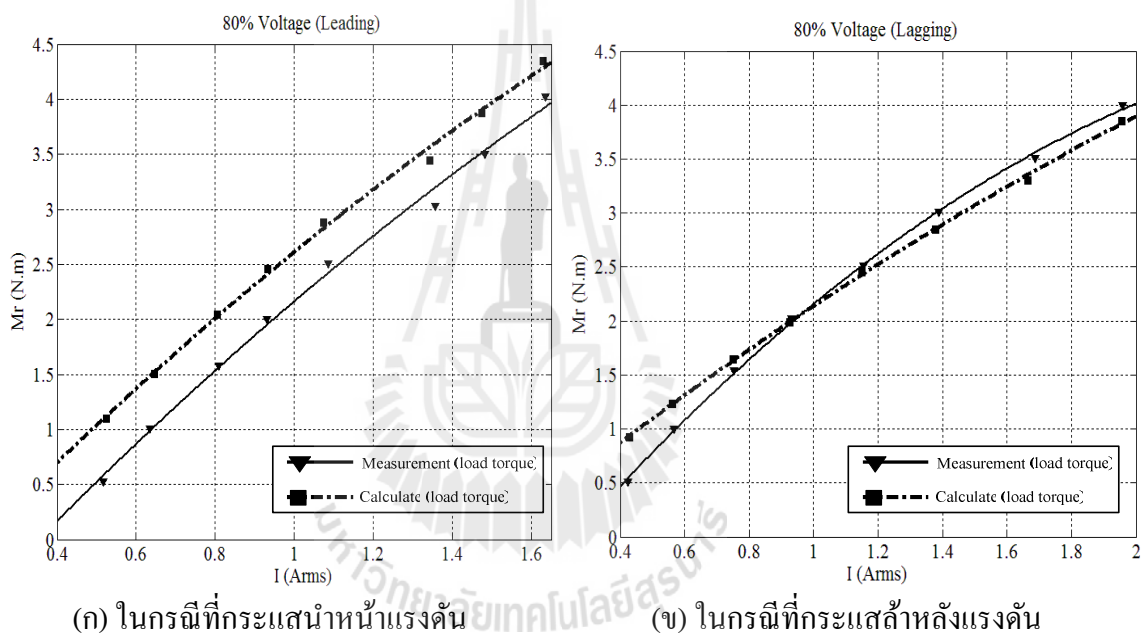
รูปที่ 5.1 การติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบตัวประมาณค่าแรงบิดโพล

5.3 ผลการทดสอบตัวประมาณค่าแรงบิดโพลที่ 80% ถึง 120% ของแรงดันพิกัด

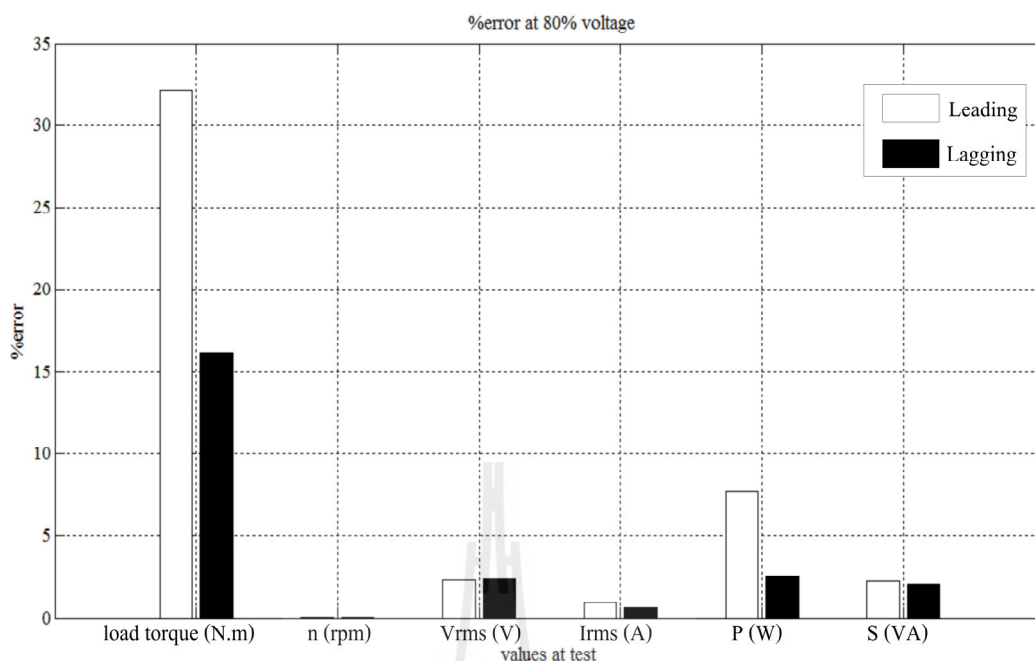
5.3.1 ผลการทดสอบตัวประมาณค่าแรงบิดโพลที่ 80% ของแรงดันพิกัด

ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ ก.1-ก.6 ในภาคผนวก ก และการเปรียบเทียบระหว่างค่าแรงบิดโพลที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดและผลการคำนวณที่ได้จากตัวประมาณค่าแรงบิดโพลแสดงในรูปที่ 5.2 กราฟเส้นทึบคือค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัด และกราฟเส้นประคือผลการคำนวณ การเปรียบเทียบในกรณีที่กระแสน้ำแรงดันแสดงในรูปที่ 5.2(ก) แรงบิดโพลที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่าค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดตลอดทุกค่าของโพลดทางกลที่ใช้ทดสอบ ผลการคำนวณและค่าที่อ่านได้มีความผิดพลาดเกือบคงที่ การเปรียบเทียบในกรณีที่กระแสล้าหลังแรงดันแสดงในรูปที่ 5.2(ข) ผลการคำนวณและค่าที่อ่านได้มีความผิดพลาดน้อยกว่าและมีค่าเท่ากันเมื่อโพลดทางกลเท่ากับ 2 นิวตัน-เมตรโดยประมาณ เมื่อโพลดทางกลน้อยกว่า 2 นิวตัน-เมตร แรงบิดโพลที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่าค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัด แต่เมื่อโพลดทาง

กลมากกว่า 2 นิวตัน-เมตร ผลการคำนวณมีค่าน้อยกว่าค่าที่อ่านได้ ความผิดพลาดเฉลี่ยระหว่างผลการคำนวณและค่าที่อ่านได้แสดงในรูปที่ 5.3 การคำนวณแรงบิดโพลคในกรณีที่กระแสนำหน้าแรงดัน (กราฟแท่งสีขาว) มีความผิดพลาดเฉลี่ย 32.107% ซึ่งมากกว่าในกรณีที่กระแสล่าหลังแรงดัน (กราฟแท่งสีดำ) ที่มีความผิดพลาดเฉลี่ย 16.163% เพราะการคำนวณกำลังเฉลี่ย (P) ในกรณีที่กระแสนำหน้าแรงดันมีความผิดพลาดเฉลี่ยมากกว่าในกรณีที่กระแสล่าหลังแรงดัน เมื่อนำกำลังเฉลี่ยมาคำนวณตัวประกอบกำลังและแรงบิดโพลค จะทำให้เกิดความผิดพลาดมากกว่า การคำนวณค่าอาร์เอ็มเอสของแรงดัน ค่าอาร์เอ็มเอสของกระแส และกำลังเชิงซ้อน (S) มีความผิดพลาดเฉลี่ยน้อยกว่า 2% ทำให้มีผลกระทบต่อความผิดพลาดในการคำนวณแรงบิดโพลคน้อยกว่า



รูปที่ 5.2 การเปรียบเทียบระหว่างค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดและการคำนวณที่ได้จากตัวประมาณค่าแรงบิดโพลค เมื่อแรงดันสเตเตอร์มีค่าเท่ากับ 80% ของแรงดันพิกัด

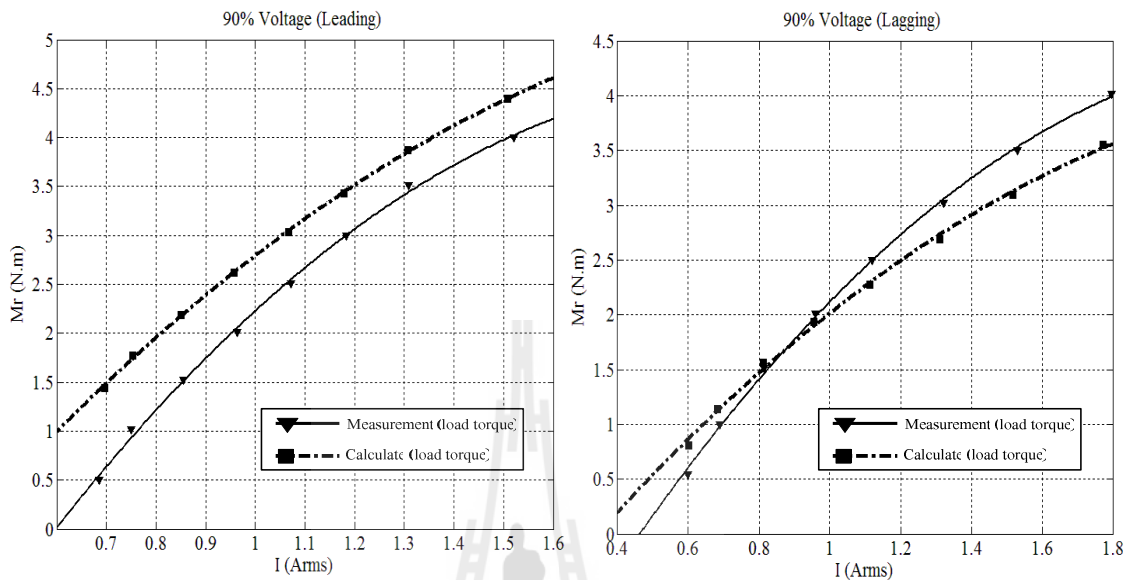


รูปที่ 5.3 ความผิดพลาดเฉลี่ยระหว่างผลการคำนวณและค่าที่อ่านได้ เมื่อแรงดันสเตเตอร์มีค่าเท่ากับ 80% ของแรงดันพิกัด

5.3.2 ผลการทดสอบตัวประมาณค่าแรงบิดโหลดที่ 90% ของแรงดันพิกัด

ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ ก7-ก.12 ในภาคผนวก ก และการเปรียบเทียบระหว่างค่าแรงบิดโหลดที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดและผลการคำนวณที่ได้จากตัวประมาณค่าแรงบิดโหลดแสดงในรูปที่ 5.4 กราฟเส้นทึบคือค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัด และกราฟเส้นประคือผลการคำนวณ การเปรียบเทียบในกรณีที่กระแสหน้าแรงดันแสดงในรูปที่ 5.4(ก) ค่าแรงบิดโหลดที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่าค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัด โดยเส้นกราฟทั้งสองเส้นเป็นเส้นโค้งขนานกัน การเปรียบเทียบในกรณีที่กระแสหลังแรงดันแสดงในรูปที่ 5.4(ข) ผลการคำนวณและค่าที่อ่านได้มีความผิดพลาดน้อยกว่าและมีค่าเท่ากันเมื่อโหลดทางกลเท่ากับ 1.5 นิวตัน-เมตร โดยประมาณ เมื่อโหลดทางกลน้อยกว่า 1.5 นิวตัน-เมตร แรงบิดโหลดที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่าค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัด แต่เมื่อโหลดทางกลมากกว่า 1.5 นิวตัน-เมตร ผลการคำนวณมีค่าน้อยกว่าค่าที่อ่านได้ ความผิดพลาดเฉลี่ยระหว่างผลการคำนวณและค่าที่อ่านได้แสดงในรูปที่ 5.5 การคำนวณแรงบิดโหลดในกรณีกระแสหน้าแรงดัน (กราฟแท่งสีขาว) มีความผิดพลาดเฉลี่ย 48.681% ซึ่งมากกว่าในกรณีกระแสหลังแรงดัน (กราฟแท่งสีดำ) ที่มีความผิดพลาดเฉลี่ย 14.092% เพราะการคำนวณกำลังเฉลี่ย (P) ในกรณีที่กระแสหน้าแรงดันมีความผิดพลาดเฉลี่ยมากกว่าในกรณีที่กระแสหลังแรงดัน เมื่อนำกำลังเฉลี่ยมาคำนวณตัวประกอบกำลังและแรงบิดโหลด จะทำให้เกิดความผิดพลาดมากกว่า การคำนวณค่าอาร์เอ็มเอสของแรงดัน ค่าอาร์เอ็มเอส

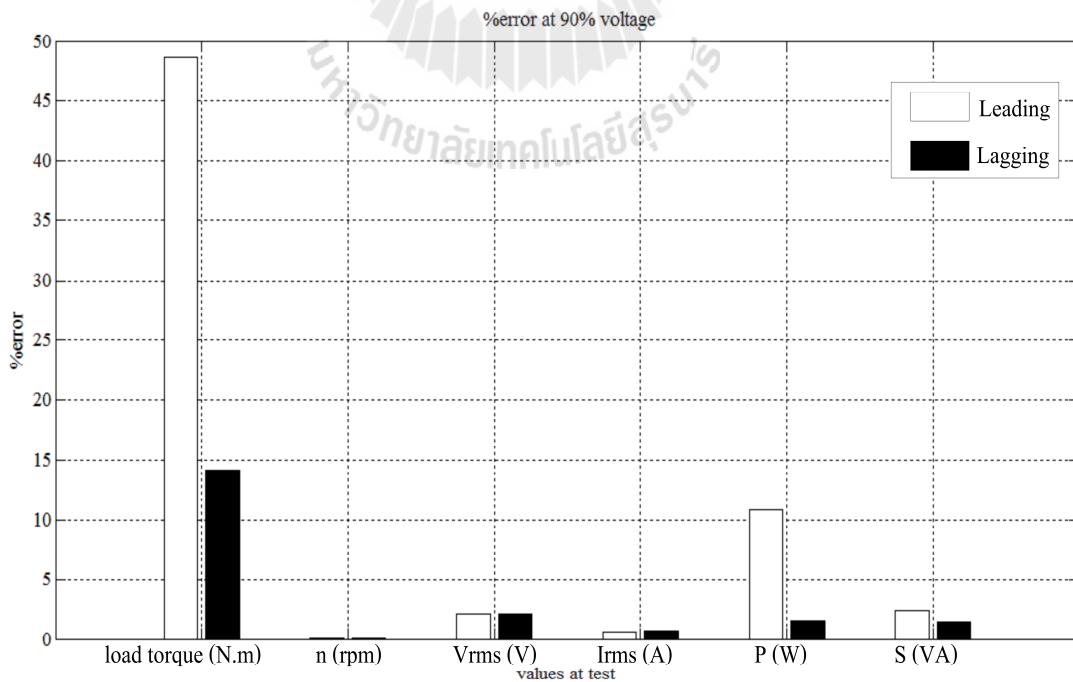
ของกระแส และกำลังเชิงซ้อน (S) มีความผิดพลาดเฉลี่ยน้อยกว่า 1.5% ทำให้มีผลกระทบต่อความผิดพลาดในการคำนวณแรงบิดโหลดน้อยกว่า



(ก) การทดสอบที่กระแสหน้าแรงดัน

(ข) การทดสอบที่กระแสล่าหลังแรงดัน

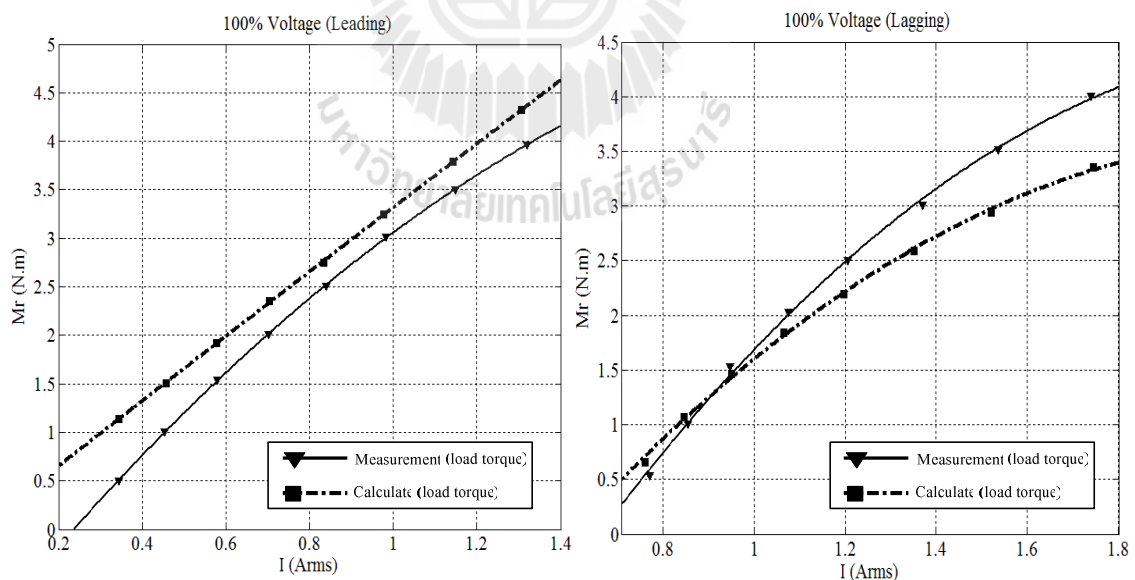
รูปที่ 5.4 การเปรียบเทียบระหว่างค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดและการคำนวณที่ได้จากตัวประมาณค่าแรงบิดโหลด เมื่อแรงดันสเตเตอร์มีค่าเท่ากับ 90% ของแรงดันพิกัด



รูปที่ 5.5 ความผิดพลาดเฉลี่ยระหว่างผลการคำนวณและค่าที่อ่านได้ เมื่อแรงดันสเตเตอร์มีค่าเท่ากับ 90% ของแรงดันพิกัด

5.3.3 ผลการทดสอบตัวประมาณค่าแรงบิดโหลดที่ 100% ของแรงดันพิกัด

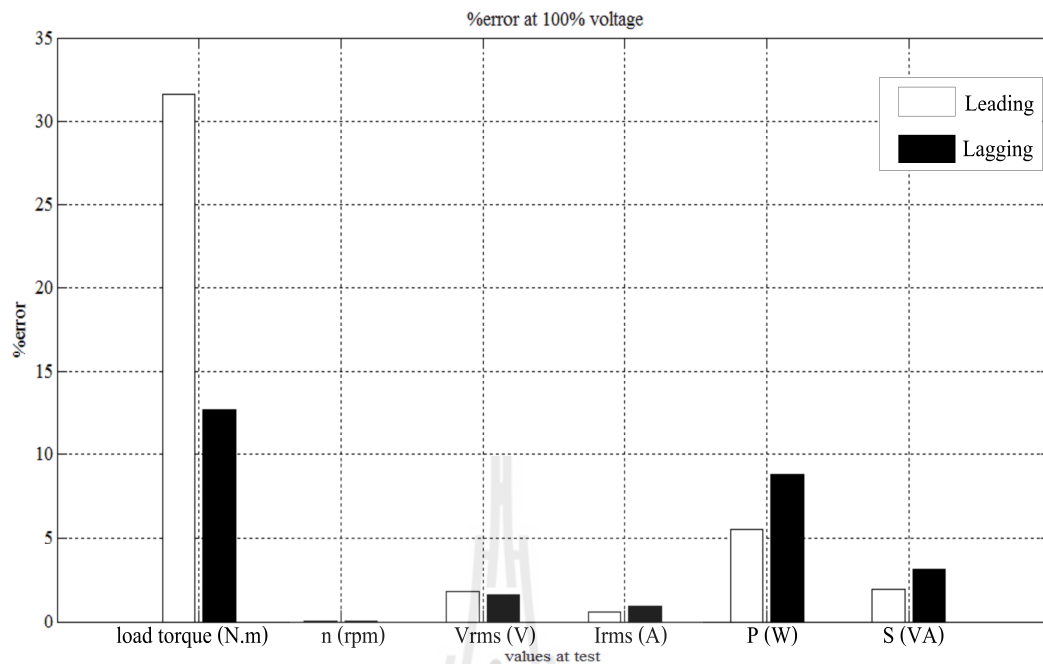
ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ ก13-ก.18 ในภาคผนวก ก และการเปรียบเทียบระหว่างค่าแรงบิดโหลดที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดและผลการคำนวณที่ได้จากตัวประมาณค่าแรงบิดโหลดแสดงในรูปที่ 5.6 กราฟเส้นทึบคือค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัด และกราฟเส้นประคือผลการคำนวณ การเปรียบเทียบในกรณีที่กระแสน้ำนำแรงดันแสดงในรูปที่ 5.6(ก) แรงบิดโหลดที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่าค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดตลอดทุกค่าของโหลดทางกลที่ใช้ทดสอบ การเปรียบเทียบในกรณีที่กระแสล้าหลังแรงดันแสดงในรูปที่ 5.6(ข) ผลการคำนวณและค่าที่อ่านได้มีความผิดพลาดน้อยกว่าและมีค่าเท่ากันเมื่อโหลดทางกลเท่ากับ 1.25 นิวตัน-เมตร โดยประมาณ เมื่อโหลดทางกลน้อยกว่า 1.25 นิวตัน-เมตร แรงบิดโหลดที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่าค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัด แต่เมื่อโหลดทางกลมากกว่า 1.25 นิวตัน-เมตร ผลการคำนวณมีค่าน้อยกว่าค่าที่อ่านได้ ความผิดพลาดเฉลี่ยระหว่างผลการคำนวณและค่าที่อ่านได้แสดงในรูปที่ 5.7 การคำนวณแรงบิดโหลดในกรณีที่กระแสน้ำนำแรงดัน (กราฟแท่งสีขาว) มีความผิดพลาดเฉลี่ย 31.647% ซึ่งมากกว่าในกรณีที่กระแสล้าหลังแรงดัน (กราฟแท่งสีดำ) ที่มีความผิดพลาดเฉลี่ย 12.657% การคำนวณค่าอาร์เอ็มเอสของแรงดัน ค่าอาร์เอ็มเอสของกระแส กำลังเฉลี่ย (P) และกำลังเชิงซ้อน (S) มีความผิดพลาดเฉลี่ยน้อยกว่า 3% จึงไม่มีผลต่อการคำนวณแรงบิดโหลด



(ก) การทดสอบที่กระแสน้ำนำแรงดัน

(ข) การทดสอบที่กระแสล้าหลังแรงดัน

รูปที่ 5.6 การเปรียบเทียบระหว่างค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดและการคำนวณที่ได้จากตัวประมาณค่าแรงบิดโหลด เมื่อแรงดันสแตเตอร์มีค่าเท่ากับ 100% ของแรงดันพิกัด

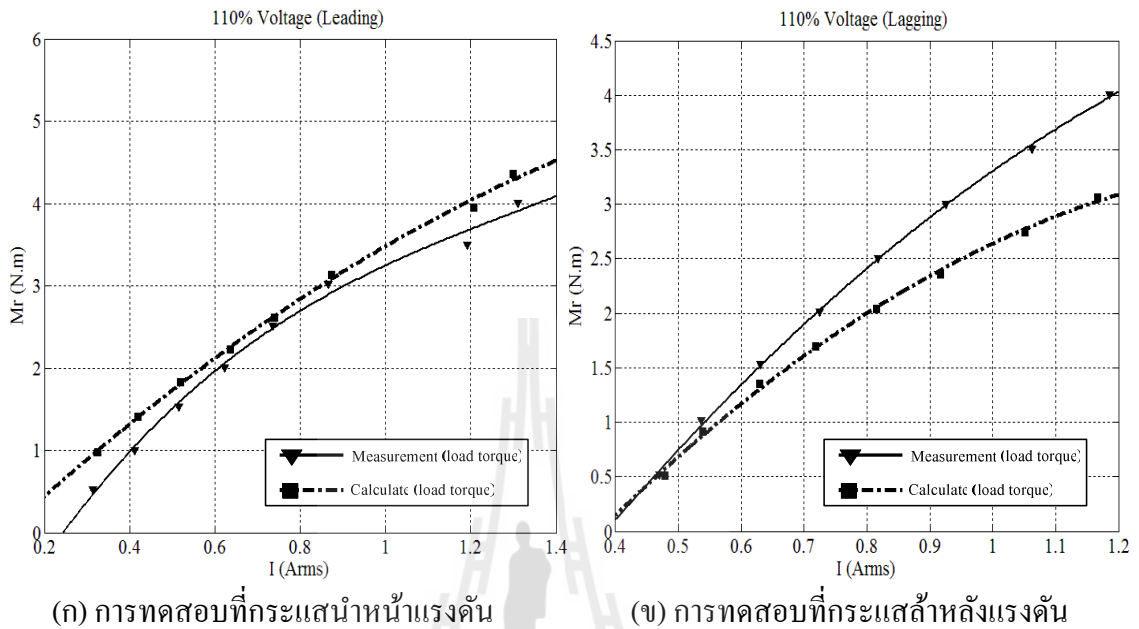


รูปที่ 5.7 ความผิดพลาดเฉลี่ยระหว่างผลการคำนวณและค่าที่อ่านได้ เมื่อแรงดันสเตเตอร์มีค่าเท่ากับ 100% ของแรงดันพิกัด

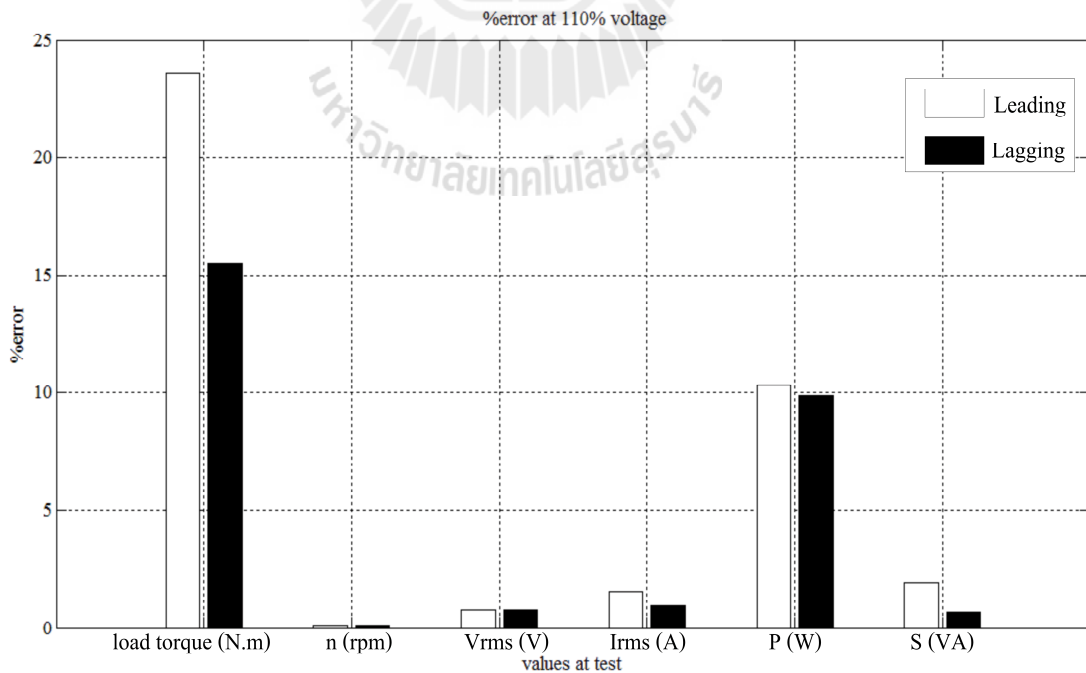
5.3.4 ผลการทดสอบตัวประมาณค่าแรงบิดโหลดที่ 110% ของแรงดันพิกัด

ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ ก.19-ก.24 ในภาคผนวก ก และการเปรียบเทียบระหว่างค่าแรงบิดโหลดที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดและผลการคำนวณที่ได้จากตัวประมาณค่าแรงบิดโหลดแสดงในรูปที่ 5.8 กราฟเส้นทึบคือค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัด และกราฟเส้นประคือผลการคำนวณ การเปรียบเทียบในกรณีที่กระแสน้ำหน้าแรงดันแสดงในรูปที่ 5.8(ก) ผลการคำนวณและค่าที่อ่านได้มีความผิดพลาดมากกว่าและมีค่าเกือบเท่ากันเมื่อโหลดทางกลเท่ากับ 2.5 นิวตัน-เมตรโดยประมาณ แรงบิดโหลดที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่าค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดตลอดทุกค่าของโหลดทางกลที่ใช้ทดสอบ การเปรียบเทียบในกรณีที่กระแสล้าหลังแรงดันแสดงในรูปที่ 5.8(ข) ค่าของโหลดทางกลเริ่มต้นเส้นกราฟทั้งสองเส้นมีค่าใกล้เคียงกัน โดยค่าของโหลดทางกลเพิ่มขึ้นเส้นกราฟทั้งสองเส้นแยกออกจากกันมากขึ้น แรงบิดโหลดที่ได้จากการคำนวณมีค่าน้อยกว่าค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดตลอดทุกค่าของโหลดทางกลที่ใช้ทดสอบ ความผิดพลาดเฉลี่ยระหว่างผลการคำนวณและค่าที่อ่านได้แสดงในรูปที่ 5.9 การคำนวณแรงบิดโหลดในกรณีกระแสน้ำหน้าแรงดัน (กราฟแท่งสีขาว) มีความผิดพลาดเฉลี่ย 23.604% ซึ่งมากกว่าในกรณีที่กระแสล้าหลังแรงดัน (กราฟแท่งสีดำ) ที่มีความผิดพลาดเฉลี่ย 15.505% เพราะการคำนวณกำลังเฉลี่ย (P) ในกรณีที่กระแสน้ำหน้าแรงดันมีความผิดพลาดเฉลี่ยมากกว่าในกรณีที่กระแสล้าหลังแรงดัน เมื่อนำกำลังเฉลี่ยมาคำนวณตัวประกอบกำลังและแรงบิดโหลด จะทำให้เกิดความผิดพลาดมากกว่า การ

คำนวณค่าอาร์เอ็มเอสของแรงดัน ค่าอาร์เอ็มเอสของกระแส และกำลังเชิงซ้อน (S) มีความผิดพลาดเล็กน้อยกว่า 1% ทำให้มีผลกระทบต่อความผิดพลาดในการคำนวณแรงบิดโหลดน้อยกว่า



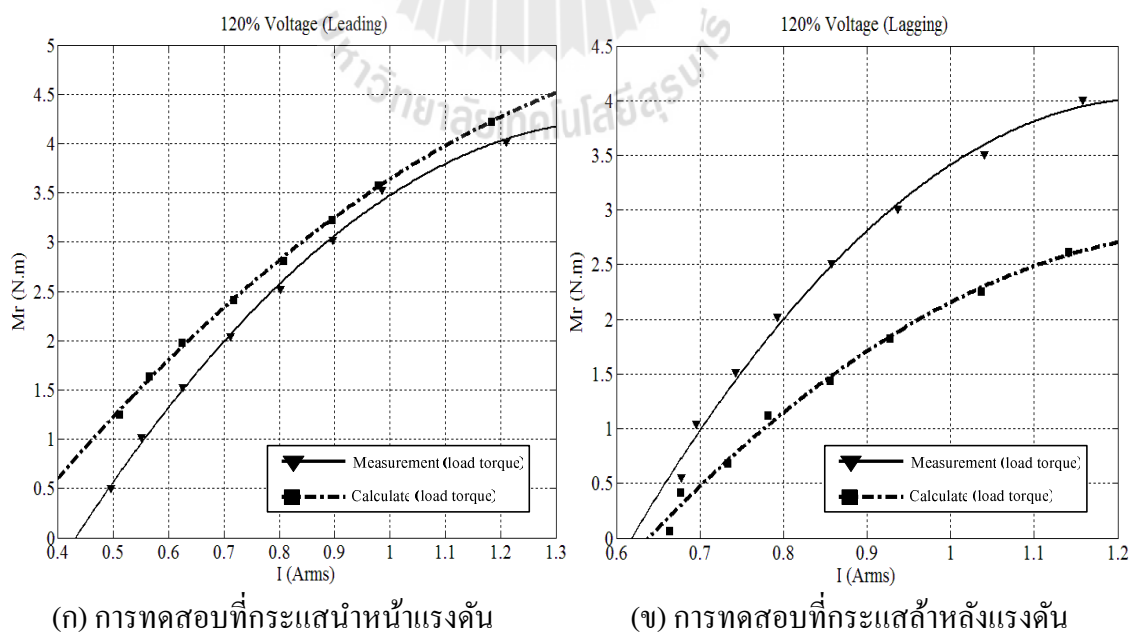
รูปที่ 5.8 การเปรียบเทียบระหว่างค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดและการคำนวณที่ได้จากตัวประมาณค่าแรงบิดโหลด เมื่อแรงดันสเตเตอร์มีค่าเท่ากับ 110% ของแรงดันพิกัด



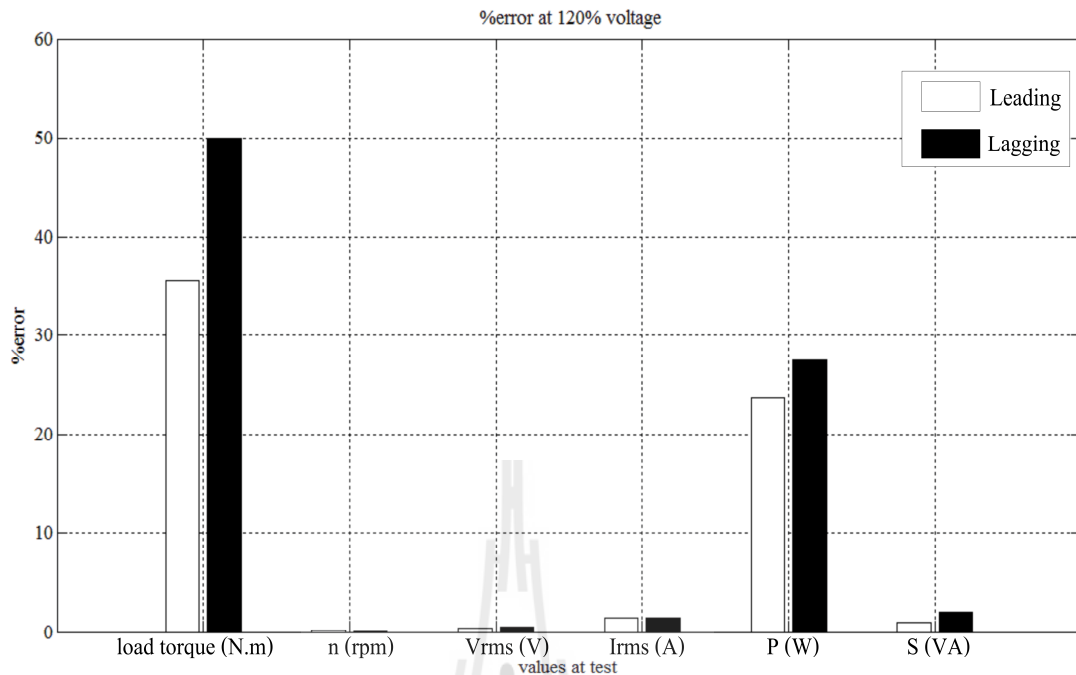
รูปที่ 5.9 ความผิดพลาดเฉลี่ยระหว่างผลการคำนวณและค่าที่อ่านได้ เมื่อแรงดันสเตเตอร์มีค่าเท่ากับ 110% ของแรงดันพิกัด

5.3.5 ผลการทดสอบตัวประมาณค่าแรงบิดโหลดที่ 120% ของแรงดันพิกัด

ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ ก.19-ก.24 ในภาคผนวก ก และการเปรียบเทียบระหว่างค่าแรงบิดโหลดที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดและผลการคำนวณที่ได้จากตัวประมาณค่าแรงบิดโหลดแสดงในรูปที่ 5.10 กราฟเส้นทึบคือค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัด และกราฟเส้นประคือผลการคำนวณ การเปรียบเทียบในกรณีที่กระแสน้ำหน้าแรงดันแสดงในรูปที่ 5.10(ก) แรงบิดโหลดที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่าค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดตลอดทุกค่าของโหลดทางกลที่ใช้ทดสอบ ผลการคำนวณ การเปรียบเทียบในกรณีที่กระแสล้าหลังแรงดันแสดงในรูปที่ 5.10(ข) ค่าของโหลดทางกลเริ่มต้นเส้นกราฟทั้งสองเส้นมีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อค่าของโหลดทางกลเพิ่มขึ้นเส้นกราฟทั้งสองเส้นแยกออกจากกันมากขึ้น แรงบิดโหลดที่ได้จากการคำนวณมีค่าน้อยกว่าค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดตลอดทุกค่าของโหลดทางกลที่ใช้ทดสอบ ความผิดพลาดเฉลี่ยระหว่างผลการคำนวณและค่าที่อ่านได้แสดงในรูปที่ 5.11 การคำนวณแรงบิดโหลดในกรณีกระแสน้ำหน้าแรงดัน (กราฟแท่งสีขาว) มีความผิดพลาดเฉลี่ย 35.491% ซึ่งน้อยกว่าในกรณีที่กระแสล้าหลังแรงดัน (กราฟแท่งสีดำ) ที่มีความผิดพลาดเฉลี่ย 50.018% เพราะการคำนวณกำลังเฉลี่ย (P) ในกรณีที่กระแสล้าหลังแรงดันมีความผิดพลาดเฉลี่ยมากกว่าในกรณีที่กระแสน้ำหน้าแรงดัน เมื่อนำกำลังเฉลี่ยมาคำนวณตัวประกอบกำลังและแรงบิดโหลด จะทำให้เกิดความผิดพลาดมากกว่า การคำนวณค่าอาร์เอ็มเอสของแรงดัน ค่าอาร์เอ็มเอสของกระแส และกำลังเชิงซ้อน (S) มีความผิดพลาดเฉลี่ยน้อยกว่า 1% ทำให้ผลกระทบต่อความผิดพลาดในการคำนวณแรงบิดโหลดน้อยกว่า



รูปที่ 5.10 การเปรียบเทียบระหว่างค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดและการคำนวณที่ได้จากตัวประมาณค่าแรงบิดโหลด เมื่อแรงดันสเตเตอร์มีค่าเท่ากับ 120% ของแรงดันพิกัด



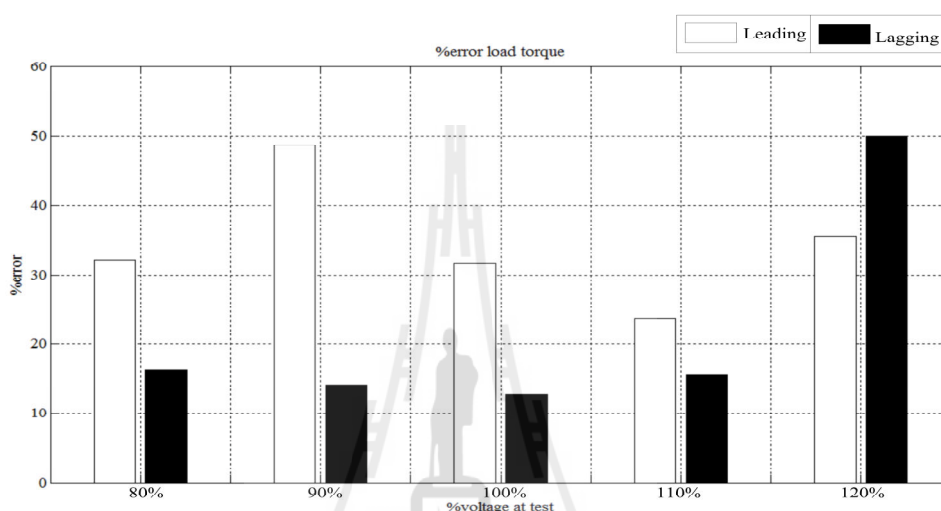
รูปที่ 5.11 ความผิดพลาดเฉลี่ยระหว่างผลการคำนวณและค่าที่อ่านได้ เมื่อแรงดันสเตเตอร์มีค่าเท่ากับ 120% ของแรงดันพิกัด

5.4 การวิเคราะห์ความผิดพลาดของตัวประมาณแรงบิดโหลด

จากผลการทดลองความผิดพลาดที่เกิดขึ้นของตัวประมาณแรงบิดที่สร้างได้พบว่า ความผิดพลาดของความเร็วเป็นศูนย์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวตรวจรู้ความเร็วสามารถทำงานได้อย่างแม่นยำ นอกจากนี้ยังพบว่า ตัวตรวจรู้กระแสและแรงดันสามารถทำงานได้อย่างแม่นยำ เช่นเดียวกัน ดังจะเห็นได้จากความผิดพลาดที่เกิดขึ้นน้อยกว่า 2.5% ในทุกๆ กรณีของแรงดันพิกัด สำหรับความผิดพลาดที่เกิดขึ้นกับกำลังไฟฟ้าจริง กำลังไฟฟ้าเชิงซ้อน และแรงบิดโหลดพบว่ามีความมากกว่า 5% โดยอาจพิจารณาได้ว่า เมื่อนำค่ากระแส แรงดัน กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย กำลังไฟฟ้าเชิงซ้อนที่ได้จากเครื่องมือวัด นำไปคำนวณตามสมการทางคณิตศาสตร์หาค่าแรงบิดโหลดพบว่า มีค่าไม่เท่ากับแรงบิดโหลดที่เครื่องมือวัด แต่กลับมีค่าใกล้เคียงกับตัวประมาณแรงบิดโหลดคำนวณออกมา อาจสรุปได้ว่า ความผิดพลาดของแรงบิดโหลดที่เกิดขึ้นมีผลมาจากกำลังสูญเสียภายในตัวมอเตอร์ และกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นจากกระแสไหลวนในขดลวดสเตเตอร์

แสดงผลสรุปความผิดพลาดของแรงบิดโหลดที่เกิดขึ้นในแต่ละค่าแรงดันพิกัดที่ทำการทดสอบในรูปที่ 5.12 ซึ่งพบว่าที่แรงดันพิกัดที่มีความผิดพลาดมากที่สุดอยู่ที่ 90% ของแรงดันพิกัดในกรณีของกระแสหน้าแรงดันมีความผิดพลาดสูงถึง 48.681% และ 120% ของแรงดันพิกัดในกรณีของกระแสหลังแรงดันมีความผิดพลาดสูงถึง 50.018% ส่วนความผิดพลาดที่น้อยที่สุดคือ ที่พิกัด

การทดสอบ 100% ของแรงดันในกรณีกระแสล้าหลังแรงดันมีความผิดพลาดเพียง 12.657% อาจสังเกตได้ว่า โดยส่วนใหญ่แล้วความผิดพลาดมีค่ามากในกรณีของกระแสนำหน้าแรงดันเสียเป็นส่วนใหญ่ ความผิดพลาดเฉลี่ยรวมในกรณีกระแสล้าหลังแรงดันและกระแสนำหน้าแรงดันทุกพิกัดการทดสอบของแรงดันมีค่าเท่ากับ 27.997% ซึ่งถือว่าเป็นความผิดพลาดที่เกิดขึ้นสูง ต้องดำเนินการปรับแก้ความผิดพลาดนี้ให้ลดลงต่อไป



รูปที่ 5.12 ความผิดพลาดของการคำนวณแรงบิดโหลดเปรียบเทียบในกรณีกระแสนำหน้าแรงดันและกระแสล้าหลังแรงดัน

5.5 สรุป

จากเนื้อหาที่กล่าวในบทนี้แสดงผลการทดสอบตัวประมาณแรงบิดโหลดที่สร้างขึ้น โดยได้ทำการทดสอบกับมอเตอร์ซิงโครนัสที่แรงดันพิกัดต่ำสุดที่มอเตอร์สามารถทำงานได้ที่ความเร็วซิงโครนัส 80% ของแรงดันพิกัด ไปจนถึงแรงดันพิกัดสูงสุดที่มอเตอร์สามารถรับแรงดันได้คือ 120% ของแรงดันพิกัด โดยทดสอบทั้งในกรณีกระแสนำหน้าแรงดันและกระแสล้าหลังแรงดัน ผลการทดสอบปรากฏว่ามีความผิดพลาดเกิดขึ้นถึง 27.997% อาจเป็นผลเนื่องมาจากค่าความสูญเสียภายในมอเตอร์ที่ไม่สามารถคำนวณได้ ดังนั้นจึงต้องทำการปรับลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในน้อยกว่า 5% ซึ่งเป็นค่าที่สามารถยอมรับได้ในเครื่องมือวัดทั่วไป ซึ่งแนวทางการดำเนินการปรับลดความผิดพลาดจะใช้กระบวนการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม ในรายละเอียดวิธีการจะถูกกล่าวถึงในบทที่ 6 ต่อไป

บทที่ 6

การปรับปรุงแก้ไขความผิดพลาดในการประมาณแรงบิดโหลดด้วยโครงข่ายประสาทเทียม

6.1 บทนำ

จากผลการทดสอบในบทที่ 5 ที่ผ่านมามีความผิดพลาดในการประมาณแรงบิดโหลดที่สูงมาก จึงจำเป็นต้องอาศัยเทคนิคการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียมเป็นตัวช่วยลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้น โดยโครงข่ายประสาทเทียมจะรับค่าอินพุตจากตัวประมาณแรงบิดโหลดจากตัวประมาณแรงบิดโหลดส่งค่าให้ชุดคำสั่งใน MATLAB® (MATLAB Neuron Network Toolbox) ภายใน MATLAB® ทำการสร้างโครงข่ายแบบไปหน้า ประกอบด้วย 2 โปรแกรมย่อย โปรแกรมฝึกสอน และโปรแกรมทดสอบ โปรแกรมฝึกสอนมีอินพุต 8 ตัวเป็นค่ากระแส แรงดัน ความเร็ว ตัวประกอบกำลัง แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า ฯลฯ และมีเอาต์พุต 1 ตัว คือ ค่าความแตกต่างของแรงบิดโหลดที่อ่านจากเครื่องมือวัดกับแรงบิดโหลดที่คำนวณ ทดสอบหาจำนวนนิวรอน และฟังก์ชันการแปลงที่เหมาะสมกับการเรียนรู้นี้ โดยให้ผลรวมค่าผิดพลาดสัมบูรณ์ ($|\text{sum error}|$) ของแรงบิดโหลดน้อยที่สุด จะได้ค่าน้ำหนัก ประสาทและไบอัสไปใช้ในโปรแกรมทดสอบ ทำการทดสอบตัวประมาณแรงบิดโหลดใหม่ที่แรงดันสเตเตอร์ 80% -120% ของแรงดันพิกัด จะได้ความผิดพลาดแรงบิดโหลดลดลงจากในบทที่ 5 มาก ทั้งนี้ก็ได้ทำการทดสอบผลการประมาณแรงบิดโหลดกับที่แรงดันสเตเตอร์ที่ย่านอื่น ๆ นอกเหนือจากย่านที่โครงข่ายประสาทเทียมได้ทำการเรียนรู้ได้ ก็สามารถแสดงค่าแรงบิดโหลดออกมาได้อย่างแม่นยำ

6.2 ความรู้พื้นฐานโครงข่ายประสาทเทียม (อาทิตย์ ศรีแก้ว, 2552)

โครงข่ายประสาทเทียม (artificial neuron network หรือ ANN) สามารถการแบ่งชนิดของโครงข่ายประสาทเทียมสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ โครงข่ายแบบไปหน้า (feed-forward network) และโครงข่ายแบบป้อนกลับ (recurrent network) เป็นโครงข่ายที่มีรูปแบบโครงสร้างและการทำงานของการทำงานของการประมวลผลคล้ายกับสมองในสิ่งมีชีวิต ที่การเปลี่ยนแปลงตัวเองต่อการตอบสนองของอินพุตตามกฎการเรียนรู้ (learning rule) หลังจากที่โครงข่ายได้เรียนรู้สิ่งที่ต้องการแล้ว โครงข่ายนั้นจะสามารถทำงานที่กำหนดไว้ได้ โครงข่ายประสาทเทียมได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อเลียนแบบการทำงานของสมองมนุษย์ มีองค์ประกอบสำคัญได้แก่ หน่วยประมวลผล เรียกว่า

นิวรอน (เซลล์ประสาท หรือ neuron) ทุก ๆ นิวรอนสามารถมีอินพุตได้หลายอินพุตแต่มีเอาต์พุตเพียงเอาต์พุตเดียว และทุก ๆ เอาต์พุตจะแยกไปยังอินพุตของนิวรอนอื่น ๆ ภายในโครงข่าย การติดต่อกันภายในระหว่างนิวรอนไม่ใช่ลักษณะการต่อแบบธรรมดาทุก ๆ อินพุตจะมีน้ำหนักเป็นตัวกำหนดกำลัง จุดเด่นของโครงข่ายประสาทเทียมมีหลายประการดังนี้

1. การเชื่อมต่อแบบขนานเป็นจำนวนมาก (massive parallel) โครงข่ายประสาทเทียมประกอบไปด้วยหน่วยประมวลผลย่อยๆ จำนวนมากมาย เชื่อมต่อกันแบบขนานหลายรูปแบบ

2. ข้อมูลและการคำนวณแบบกระจาย (distributed data and computation) ประสิทธิภาพการทำงานของโครงข่ายประสาทเทียมได้จากการทำงานร่วมกันแบบกระจาย ของหน่วยประมวลผลย่อย เหล่านี้เป็นจำนวนมาก

3. ความสามารถในการเรียนรู้ (learning) คุณสมบัติที่เด่นที่สุดของโครงข่ายประสาทเทียมคือ ความสามารถในการเรียนรู้ กระบวนการดังกล่าวทำให้การแก้ปัญหาหลายๆ อย่างเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

4. ความสามารถในการทำให้เป็นทั่วไป (generalization) เป็นผลพลอยได้จากความสามารถในการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม การเรียนรู้ด้วยข้อมูลอินพุต/เอาต์พุตตัวอย่างบางส่วน นำไปสู่ความสามารถในการตอบสนองต่อข้อมูลอินพุต ทั้งหมดได้

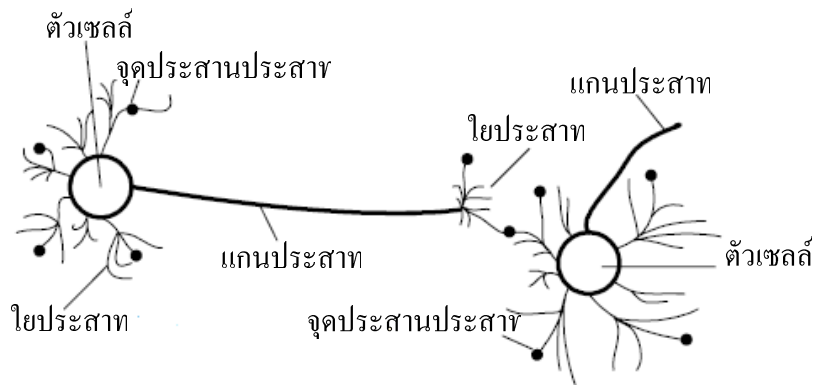
5. การปรับตัว (adaptation) การเรียนรู้ของโครงข่ายนำไปสู่ความสามารถในการปรับตัวได้ ในการนำไปประยุกต์ใช้กับปัญหาที่สภาพแวดล้อมมีการเปลี่ยนแปลงได้เป็นอย่างดี

6. การประมวลผลข้อมูลเชิงเนื้อหา (content-based processing) รูปแบบสามารถประมวลผลข้อมูลของโครงข่ายประสาทเทียมอยู่ในรูปเชิงเนื้อหาได้

7. การทนต่อความพร่อง (fault tolerance) การเชื่อมต่อหน่วยประมวลผลย่อย ๆ จำนวนมาก เมื่อส่วนใด ส่วนหนึ่งของโครงข่ายเสียหาย ระบบโดยรวมจะยังคงทำงานได้ต่อไป

6.2.1 องค์ประกอบของโครงข่ายประสาทเทียม

โครงข่ายประสาทเทียมได้ถูกพัฒนาขึ้นโดยอาศัยหลักการทำงานของสมองมนุษย์ ซึ่งสมองประกอบด้วยหน่วยประมวลผลพื้นฐานที่เรียกว่า นิวรอน (เซลล์ประสาท หรือ neuron) ภายในสมองประกอบด้วยนิวรอนจำนวนมหาศาล (ประมาณ 10^{11}) และมีจุดต่อจำนวนโครงข่ายประสาทประกอบขึ้นด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วน คือ โยประสาท (dendrite) ตัวเซลล์ (soma) และแกนประสาท (axon) ในแต่ละโครงข่ายประสาทจะเชื่อมต่อกันโดยจุดประสานประสาท (synapse) ซึ่งสามารถเปลี่ยนค่าความต้านทานได้ตามสัญญาณที่ส่งระหว่างกันของเซลล์ประสาท การส่งสัญญาณระหว่างเซลล์ประสาททำได้โดยการถ่ายทอดสารประกอบโซเดียมและโพแทสเซียม ภาพร่างของประสาทแสดงในรูปที่ 6.1



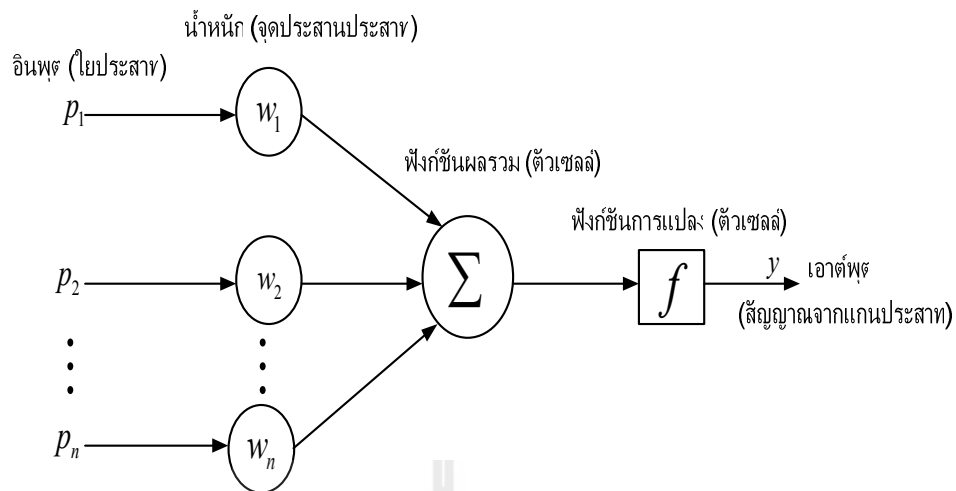
รูปที่ 6.1 โครงสร้างระบบประสาท

การประมวลผลต่าง ๆ เกิดขึ้นในหน่วยประมวลผลย่อย เรียกว่า โหนด (node) ซึ่งโหนดเป็นการจำลองลักษณะการทำงานมาจากเซลล์การส่งสัญญาณ ระหว่างโหนดที่เชื่อมต่อกัน จำลองมาจากการเชื่อมต่อของใยประสาท และแกนประสาทในระบบประสาทของสมองมนุษย์ ภายในโหนด จะมีฟังก์ชันกำหนดสัญญาณส่งออกที่เรียกว่า ฟังก์ชันการแปลง (transfer function) ซึ่งทำหน้าที่เปรียบเสมือนกระบวนการทำงานในเซลล์ แสดงในรูปที่ 6.2 โครงข่ายประสาทเทียมประกอบด้วย 5 องค์ประกอบ ดังนี้

1. ข้อมูลป้อนเข้า (input) เป็นข้อมูลที่เป็นตัวเลข หากเป็นข้อมูลเชิงคุณภาพ ต้องแปลงให้อยู่ในรูปเชิงปริมาณที่โครงข่ายประสาทเทียมยอมรับได้
2. ข้อมูลส่งออก (output) คือ ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจริง จากกระบวนการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม
3. ค่าน้ำหนัก (weights) คือ สิ่งที่ได้จากการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ค่าความรู้ (knowledge) ค่านี้จะถูกเก็บเป็นทักษะเพื่อใช้ในการจดจำข้อมูลอื่น ๆ ที่อยู่ในรูปแบบเดียวกัน
4. ฟังก์ชันผลรวม (Summation function: S) เป็นผลรวมของข้อมูลป้อนเข้า (p_i) และค่าน้ำหนัก (w_i)

$$S = \sum_{i=1}^n p_i w_i \quad (6.1)$$

5. ฟังก์ชันการแปลง (transfer function) เป็นการคำนวณการจำลองการทำงานของโครงข่ายประสาทเทียม เช่น ฟังก์ชันเส้นตรง (linear function) ฟังก์ชันซิกมอยแบบลอการิทึม (log-sigmoid function) ฟังก์ชันฮาร์ดลิมิต (hard limit function) เป็นต้น



รูปที่ 6.2 กระบวนการประมวลผลของโครงข่ายประสาทเทียม


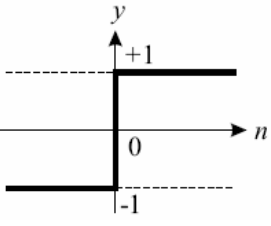

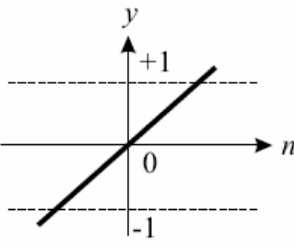

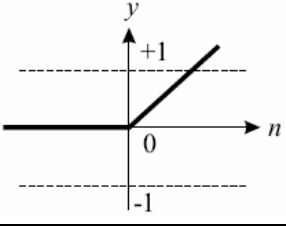

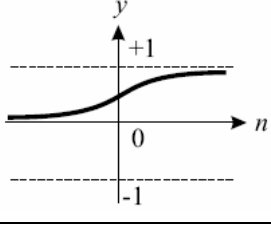

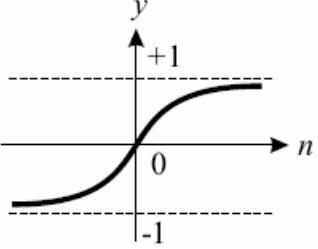
6.2.2 ฟังก์ชันการแปลง

ฟังก์ชันการแปลง เป็นส่วนที่ทำหน้าที่รวมค่าเชิงตัวเลขจากเอาต์พุตของนิวรอนแล้วทำการตัดสินใจว่าจะส่งสัญญาณเอาต์พุตออกไปในรูปใด ฟังก์ชันการแปลงสามารถเป็นได้ทั้งแบบเชิงเส้นหรือไม่เป็นเชิงเส้น การเลือกใช้ฟังก์ชันการแปลงจะขึ้นอยู่กับลักษณะของระบบที่นำเอาโครงข่ายประสาทเทียมไปประยุกต์ใช้ ฟังก์ชันการแปลงมีอยู่หลายรูปแบบ แบบที่ใช้งานทั่วไปมีรายละเอียดตามตารางที่ 6.1


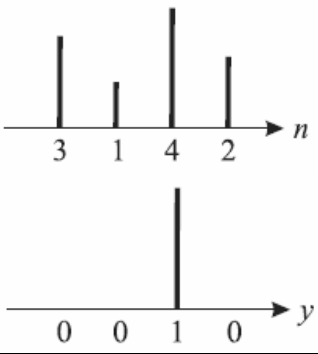

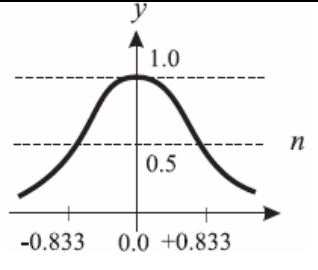
ตารางที่ 6.1 ฟังก์ชันการแปลงแบบต่างๆ

ชื่อฟังก์ชัน	สมการความสัมพันธ์	MATLAB ฟังก์ชัน	สัญลักษณ์	กราฟความสัมพันธ์
ฮาร์ดลิมิต (hard limit)	$y = 0$ ถ้า $n < 0$ $y = 1$ ถ้า $n \geq 0$	hardlim		

ตารางที่ 6.1 ฟังก์ชันการแปลงแบบต่างๆ (ต่อ)

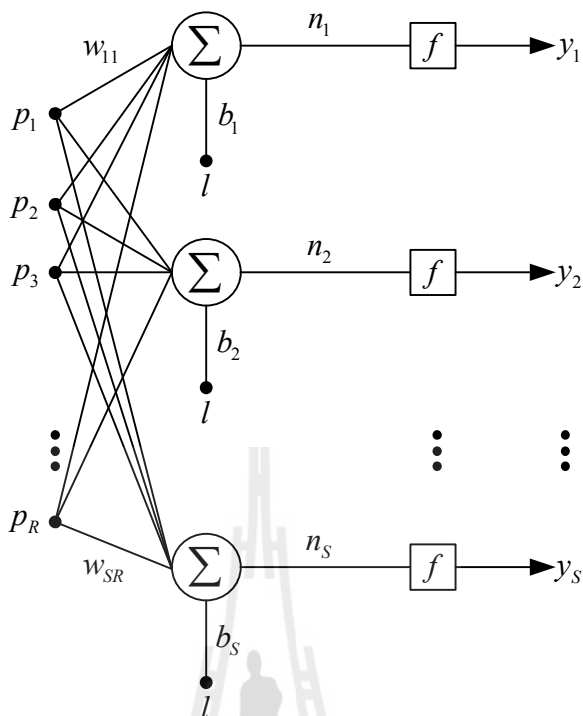
ชื่อฟังก์ชัน	สมการ ความสัมพันธ์	MATLAB ฟังก์ชัน	สัญลักษณ์	กราฟความสัมพันธ์
ฮาร์ดลิมิต แบบ สมมาตร (symmetrical hard limit)	$y = -1$ ถ้า $n < 0$ $y = +1$ ถ้า $n \geq 0$	hardlims		
เส้นตรง (linear)	$y = n$	purelin		
เส้นตรงบวก (positive linear)	$y = 0$ ถ้า $n < 0$ $y = n$ ถ้า $n \geq 0$	poslin		
ซิกมอยแบบ ลอการิทึม (log- sigmoid)	$y = \frac{1}{1+e^{-n}}$	logsig		
ซิกมอยแบบ เส้นสัมผัส ไฮเปอร์ โบลาร์ (hyperbolic tangent sigmoid)	$y = \frac{e^n - e^{-n}}{e^n + e^{-n}}$	tansig		

ตารางที่ 6.1 ฟังก์ชันการแปลงแบบต่างๆ (ต่อ)

ชื่อฟังก์ชัน	สมการ ความสัมพันธ์	MATLAB ฟังก์ชัน	สัญลักษณ์	กราฟความสัมพันธ์
แข่งขัน (competitive)	$y=1$ สำหรับ นิวรอนที่มีค่า n สูงสุด $y=0$ สำหรับ นิวรอนอื่น ๆ	compet		
ฐานรัศมี (radial basis function)	$y = e^{-n^2}$	radbas		

6.2.3 โครงข่ายแบบไปหน้า (feedforward network)

โครงข่ายประสาทเทียมแล้ว จะสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ โครงข่ายแบบไปหน้า และ โครงข่ายแบบป้อนกลับ ในงานวิทยานิพนธ์นี้จะใช้เฉพาะโครงข่ายแบบไปหน้า จึงนำเสนอเฉพาะโครงข่ายแบบไปหน้า โครงข่ายแบบไปหน้าโดยปกติแล้วโครงข่ายประสาทเทียมจะประกอบไปด้วยนิวรอนหลาย ๆ ตัวและเชื่อมต่อแบบขนานกันหลาย ๆ ชั้นหรือเรียกว่า layer โครงสร้างของโครงข่ายแบบชั้นเดียว (single layer) ดังแสดงในรูปที่ 6.3 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการไหลของอินพุตไปยังเอาต์พุตจะไม่มีการป้อนกลับแต่อย่างใด จึงเรียกโครงข่ายประเภทนี้ว่าแบบไปหน้า



รูปที่ 6.3 โครงข่ายแบบไปหน้าชั้นเดียวที่มี S นิวรอล

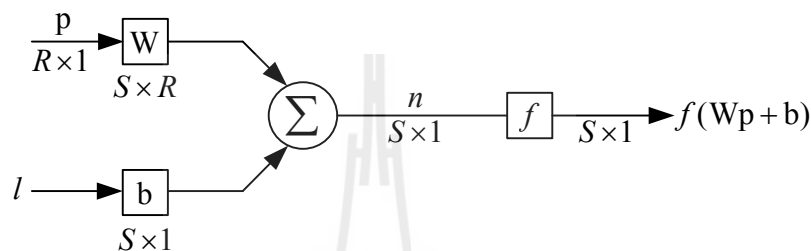
พิจารณาโครงข่ายชั้นเดียวมี R อินพุตและ S คำน้าหนักประสาทต่อเข้าสู่แต่ละนิวรอล ในแต่ละนิวรอลจะมีตัวรวมไบอัส (b) ฟังก์ชันการแปลงและเอาต์พุต ($y = f(Wp + b)$) โครงสร้างของโครงข่ายนี้สามารถแสดงในรูปเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$p = \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \vdots \\ p_R \end{bmatrix} \quad (6.2)$$

$$b = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_S \end{bmatrix} \quad (6.3)$$

$$W = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & \cdots & w_{1R} \\ w_{21} & w_{22} & \cdots & w_{2R} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ w_{S1} & w_{S2} & \cdots & w_{SR} \end{bmatrix} \quad (6.4)$$

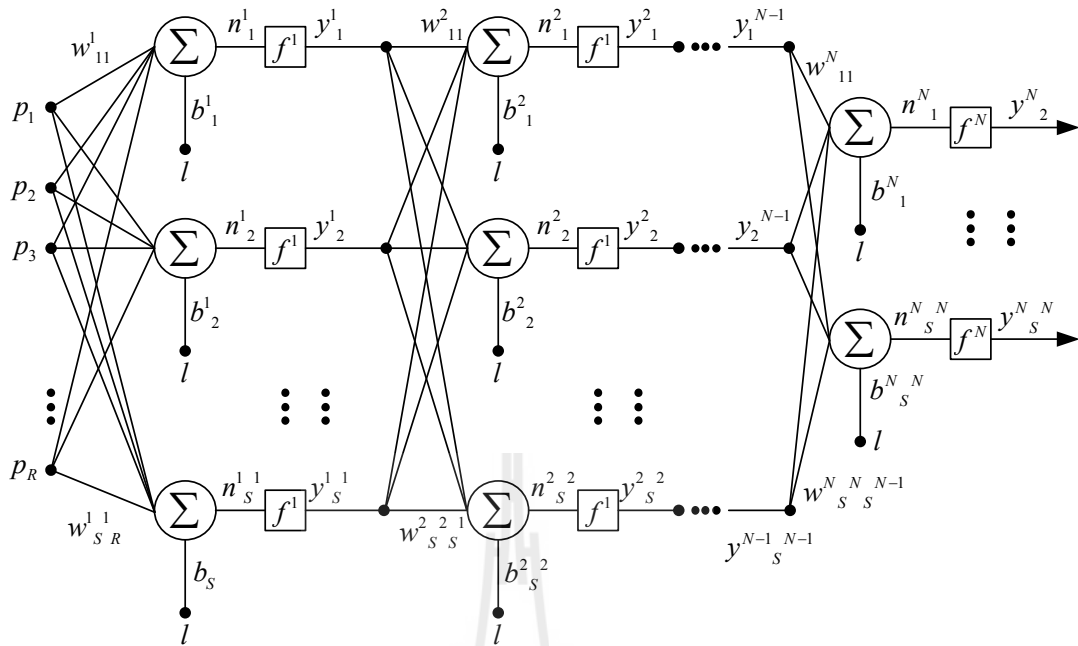
โดยปกติแล้ว จำนวนของอินพุตไม่จำเป็นต้องเท่ากับจำนวนของนิวรอนในชั้นนั้น ๆ ($R \neq S$) ในทำนองเดียวกันกับฟังก์ชันการแปลงที่ไม่จำเป็นจะต้องเป็นชนิดเดียวกันทั้งหมด พิจารณาเมตริกซ์ W จะเห็นได้ว่า ค่าน้ำหนักประสาทของแต่ละแฉวมิตัวห้อยแรกแสดงว่าเป็นของนิวรอนตัวไหน (มีทั้งหมด S แฉว สำหรับ S นิวรอน) และมีตัวห้อยที่สองแสดงว่ามาจากอินพุตไหน (มีทั้งหมด R อินพุต) โครงสร้างทั้งหมดของโครงข่ายแบบชั้นเดียวสามารถแสดงในรูปของเมตริกซ์ได้แสดงในรูปที่ 6.4



รูปที่ 6.4 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของโครงข่ายชั้นเดียวในรูปของเมตริกซ์

โดยปกติในทางปฏิบัติทั่วไปแล้ว โครงข่ายประสาทเทียมจะมีโครงสร้างหลายชั้น (multiple layers หรือ multi-layer network) ดังแสดงในรูปที่ 6.5 แต่ละชั้นมีเมตริกซ์น้ำหนักประสาท W ไบอัส b เน็ตเอาต์พุต n และเอาต์พุต y ของชั้นนั้น จากในรูปจะเห็นว่าแต่ละชั้นสามารถมีจำนวนนิวรอนที่แตกต่างกันได้ กล่าวคือ โครงข่ายชั้นแรก (เรียกว่าชั้นอินพุต) มี R อินพุตชั้นที่ 1 มี S^1 นิวรอน ไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งถึงชั้นสุดท้าย คือชั้นเอาต์พุต ซึ่งมี S^N นิวรอน เอาต์พุตของชั้นแรกจะเป็นอินพุตให้กับชั้นที่สอง ฯลฯ โครงข่ายที่ไม่ใช่ชั้นอินพุตและชั้นเอาต์พุต เรียกว่า เป็นชั้นซ่อนเร้น (hidden layer) เอาต์พุตของแต่ละชั้นมีค่าดังนี้

$$\begin{aligned}
 y^1 &= f^1(W^1 p + b^1) \\
 y^2 &= f^2(W^2 y^1 + b^2) \\
 &\vdots \\
 y^N &= f^N(W^N y^{N-1} + b^N)
 \end{aligned}
 \tag{6.5}$$



รูปที่ 6.5 โครงข่ายหลายชั้นในรูปของเมตริกซ์

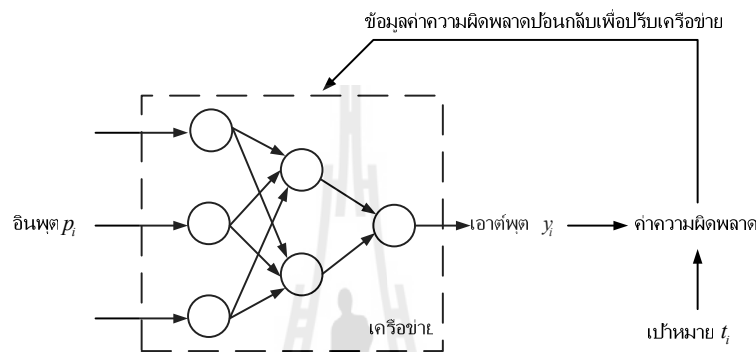
โครงข่ายหลายชั้นจะมีประสิทธิภาพเหนือกว่าโครงข่ายชั้นเดียวมาก เช่น โครงข่ายที่ชั้นแรกเป็นฟังก์ชันซิกมอย และชั้นที่สองเป็นฟังก์ชันเส้นตรงสามารถถูกฝึกสอนให้เป็นฟังก์ชันประมาณค่าได้เกือบทุกฟังก์ชัน ซึ่งโครงข่ายชั้นเดียวไม่สามารถทำได้ โครงข่ายหลายชั้นนี้มีพารามิเตอร์ค่อนข้างมาก ดังนั้นสิ่งแรกที่จะนำเอาโครงข่ายประสาทเทียมไปประยุกต์ใช้งานจึงต้องทำการออกแบบพารามิเตอร์ต่างๆ ยกตัวอย่างเช่นจำนวนชั้น จำนวนนิวรอนในแต่ละชั้น จำนวนอินพุต จำนวนเอาต์พุต ชนิดของฟังก์ชันการแปลง ฯลฯ อย่างไรก็ตามการกำหนดค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ไม่มีกฎเกณฑ์ที่แน่นอน ยกตัวอย่างเช่น จำนวนชั้นของโครงข่าย ซึ่งเพียงสองหรือสามชั้นก็เพียงพอต่อปัญหาต่างๆ ไป ถึงแม้ว่าโครงข่ายที่มากกว่าสามชั้นจะมีใช้บ้างแต่ก็ไม่มากนัก

6.2.4 การเรียนรู้แบบมีผู้ฝึกสอน (learning with supervisor)

การเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียมเปรียบได้โดยตรงกับการเรียนรู้ในระบบประสาทของมนุษย์ โดยทั่วไปแล้วการเรียนรู้มีอยู่มากมายหลายแบบ แต่สามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มใหญ่ๆ ได้ 3 กลุ่มคือ การเรียนรู้แบบมีผู้ฝึกสอน (supervised) การเรียนรู้แบบไม่มีผู้ฝึกสอน (unsupervised) และการเรียนรู้แบบเสริมความเข้มแข็ง (reinforcement) ในที่นี้ขอแนะนำเฉพาะการเรียนรู้แบบมีผู้ฝึกสอนเท่านั้น การเรียนรู้แบบมีผู้ฝึกสอนในการเรียนรู้แบบมีผู้ฝึกสอนจะมีการนำเสนอกลุ่มข้อมูลตัวอย่าง (examples หรือ training set) ให้กับโครงข่ายในรูปของอินพุตพร้อมกับเป้าหมาย (target) ที่ต้องการให้โครงข่ายตอบสนอง พิจารณาคู่อินพุตและเป้าหมายดังนี้

$$\{p_1, t_1\}, \{p_2, t_2\}, \dots, \{p_Q, t_Q\} \quad (6.6)$$

เมื่ออินพุตถูกป้อนให้กับระบบ เอาต์พุตของโครงข่ายจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับเป้าหมายของอินพุต แล้วโครงข่ายจะทำการปรับค่าน้ำหนักประสาท และไบอัสตามกฎการเรียนรู้ เพื่อให้เอาต์พุตของโครงข่ายให้ค่าผลลัพธ์ใกล้เคียงเป้าหมายมากที่สุด แสดงขั้นตอนการเรียนรู้แบบมีผู้ฝึกสอนในรูปที่ 6.6



รูปที่ 6.6 ขั้นตอนการเรียนรู้แบบมีผู้ฝึกสอน

6.3 คำสั่ง MATLAB ในการฝึกสอน

จากรายละเอียดที่กล่าวถึงโครงข่ายประสาทเทียมแบบไปหน้า จึงนำความรู้ที่ได้ต่างๆ มาประยุกต์ใช้กับ ชุดคำสั่งใน MATLAB[®] คือ newff ดังมีรายละเอียดดังต่อไปนี้ โครงข่ายประสาทเทียมได้ถูกสอนให้เรียนรู้การทำงานของมอเตอร์เชิงโรนส์ขั้วแม่เหล็กยี่ดัดนี้

- อินพุต มีค่าต่างๆ ดังนี้คือ ความเร็วรอบ n , ค่าตัวประกอบกำลัง pf , แรงดันสเตเตอร์ V_{rms} , แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า M_e , กระแสอาร์เมเจอร์ I_{rms} , แรงบิดเสียดทานเชิงกล M_m , กรณีกระแสน้ำแรงดัน หรือกระแสล้าหลังแรงดัน และแรงบิดโหลด M_r

- เอาต์พุตมีค่าต่างๆ ดังนี้คือ ค่าความแตกต่าง \hat{e} ของแรงบิดโหลด M_r ที่ได้จากเครื่องมือวัดกับแรงบิดโหลด M_r ที่คำนวณได้

6.3.1 โปรแกรมฝึกสอน

เมื่อ MATLAB ทำการรับค่าจากพอร์ตอนุกรมของไมโครคอนโทรลเลอร์แล้ว ในการคำนวณต้องมีโปรแกรมฝึกสอน และโปรแกรมทดสอบ ใน MATLAB Neural Network Toolbox คำสั่งที่ใช้ในการสร้างเครือข่ายคือ `net = newff` ซึ่งจะทำการสร้างโครงข่ายป้อนแบบไปหน้า เมื่อทำการสร้างโครงข่ายด้วยคำสั่งข้างต้นแล้ว จะสามารถทดสอบเครือข่ายได้ด้วยคำสั่ง `y = sim(net,p)` โดยที่ตัวแปร `net` เป็นตัวแปรที่ได้จากการสร้างเครือข่ายด้วยคำสั่ง `newff` ตัวแปร `p` เป็น

อินพุตที่ต้องการทดสอบ และตัวแปร y เป็นเอาต์พุตจากโครงข่าย พิจารณาค่าสั่ง `newff` ซึ่งจะสร้างโครงข่ายที่มีค่าเมตริกซ์น้ำหนักประสาทและไบอัสเริ่มต้นด้วยค่าสุ่ม ดังนั้นเมื่อทดสอบกับอินพุตในขณะนี้ เอาต์พุตที่ได้จึงสามารถคาดเดาได้ว่าจะไม่เป็นไปตามเป้าหมายหรือฟังก์ชันที่ต้องการในการฝึกสอนโครงข่ายนั้นจะใช้คำสั่ง `net = train(net,p,t)` โดยที่ตัวแปร p คือ อินพุต และ t คือ เป้าหมายที่ต้องการให้โครงข่ายเรียนรู้ โดยปกติแล้ว ตัวแปร `net` ซึ่งเป็นตัวแปรโครงข่ายที่เก็บรายละเอียดของเครือข่ายไว้ จะมีพารามิเตอร์ภายในที่สามารถใช้ปรับแต่งการฝึกสอนตามต้องการได้ แสดงรายละเอียดการเขียน โปรแกรมได้ดังนี้

```
clear all
clc;
pth = 'E:\MASTER_PA\AI\AI_Update\ANN\Test_ann\SumDATA\wb\'; //เรียกโปรแกรมExcel
pt = xlsread('Sum_Data.xls','sheet1','a1:a80:i1:i80'); // ชื่อข้อมูลExcel ระบุจำนวนหลักและแถว
                                ของข้อมูล
Nm=pt(1,[1:80])/1500;           // กำหนดค่าข้อมูลในส่วนของอินพุต แสดงหมายเลขคอลัมน์ใน
                                Excel
V=pt(2,[1:80])/230;           //ข้อมูลอินพุตมีทั้งสิ้น 8 ข้อมูล ประกอบด้วย ความเร็ว แรงดัน กระแส
Ia=pt(3,[1:80])/1.6;          //กรณีกระแสน้ำหรือลำหลัง ตัวประกอบกำลัง แรงบิดแม่เหล็ก
L=pt(4,[1:80]);               //ไฟฟ้า แรงบิดเสียดทานเชิงกล แรงบิดโหลด ตามลำดับ ให้นำค่า
PF=pt(5,[1:80]);              //สูงสุดอินพุตในแต่ละคอลัมน์มาหารข้อมูลเพื่อให้ข้อมูลมีค่าไม่
M=pt(6,[1:80])/4;             // เกิน 1 ให้ค่ามีความสัมพันธ์มีความกับฟังก์ชันการแปลง
Mm=pt(7,[1:80])/2;
Mr=pt(8,[1:80])/4;
delta=pt(9,[1:80]);           // เอาต์พุต คือ ค่าความแตกต่าง ( $\hat{e}$ ) ของแรงบิด โหลดที่ได้จากเครื่องมือวัด
                                เทียบกับที่คำนวณได้

p=[Nm;V;Ia;L;PF;M;Mm;Mr]; // ค่าของอินพุตฝึกสอน
t=delta;                       // ค่าของเอาต์พุตเป้าหมาย
tic                             // เริ่มจับเวลา

net = newff([0 1;0 1;0 1; 0 1;0 1;0 1;0 1;0 1],[30,1],{'logsig','purelin'},'trainlm')
// โครงข่ายแบบ 2 ชั้นฟังก์ชันการแปลงแบบ logsig และ purelin

net.trainParam.show=100; // จำนวนรอบที่จะแสดงผลการฝึกสอน คือ 100 รอบ
net.trainParam.epochs=1000; // จำนวนรอบสูงสุดในการฝึกสอน คือ 1000 รอบ
```

```

net.trainParam.goal=0;           // ค่าความผิดพลาดเป้าหมาย คือ 0
net.trainParam.min_grad=1e-30;  // ค่า error
net = train(net,p,t)             // คำสั่งในการฝึกสอนโครงข่าย
time=toc                         // พิมพ์เวลาที่ผ่านไปตั้งแต่ถูกเริ่มจับเวลา
pth_Train_Sum_Data='Sum_Data_logsig_purelin_30_1.mat'; // เก็บข้อมูลที่จะนำไปทดสอบ
pth_train_mat_Sum_Data=[pth pth_Train_Sum_Data];
save(pth_train_mat_Sum_Data);    // บันทึกค่าใน pth_train_mat_Sum_Data
disp('----- Trained -----') // แสดงผลการเรียนรู้
a=sim(net,p);                   // สั่งให้เรียนรู้อินพุต
delta_test=t;                   // เป้าหมาย
delta_train=a;                  // ตัวเรียนรู้
err_pt=[delta_test;delta_train];
Sum_error =sum(abs(delta_test-delta_train)) // รวมค่าผิดพลาดสัมบูรณ์
w1=net.IW{1};                   // น้ำหนักประสาทเทียมชั้นที่ 1
w2=net.LW{2};                   // น้ำหนักประสาทเทียมชั้นที่ 2
b1=net.b{1};                    // ค่าไบอัสชั้นที่ 1
b2=net.b{2};                    // ค่าไบอัสชั้นที่ 2

```

พิจารณาจากผลรวมค่าผิดพลาดสัมบูรณ์ของค่าความแตกต่างของแรงบิดโหนด M_r โดยใช้การเรียนรู้โครงข่ายประสาทเทียมแบบไปหน้าโครงข่าย 2 ชั้น และทดสอบกับฟังก์ชันการแปลง 4 แบบด้วยกันคือ ซิกมอยด์แบบลอการิทึม (logsig) ซิกมอยด์แบบเส้นสัมผัสไฮเปอร์โบลาร์ (tansig) เส้นตรง (purelin) และเส้นตรงบวก (positive linear, poslin) ใช้การฝึกสอนแบบ Levenberg-Marquardt algorithm, trainlm ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้เวลาในการฝึกสอนน้อยที่สุด ได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 6.2 ซึ่งประกอบไปด้วยฟังก์ชันการแปลงแบบซิกมอยด์แบบลอการิทึมในชั้นแรก และใช้ฟังก์ชันการแปลงแบบเส้นตรงในชั้นที่สอง ผลรวมค่าผิดพลาดสัมบูรณ์ ($|\text{sum error}|$) และจำนวนรอบการคำนวณ (counts)

ตารางที่ 6.2 ผลการทดสอบจำนวนนิวรอลและชนิดของฟังก์ชันที่เหมาะสม

Node	Function	sum error	time(sec)	counts
10:1	tansig, purelin	0.8161	19.8154	1000
20:1	tansig, purelin	2.1661×10^{-13}	7.6947	303
30:1	tansig, purelin	1.4072×10^{-13}	8.1085	192
10:1	tansig, poslin	18.4476	3.0322	68
20:1	tansig, poslin	33.2850	1.3335	1
30:1	tansig, poslin	33.2850	2.2909	3
10:1	tansig, logsig	18.7199	20.1939	1000
20:1	tansig, logsig	18.7170	38.1984	1000
30:1	tansig, logsig	18.7170	33.2688	1000
10:1	tansig, tansig	1.8834	20.6746	1000
20:1	tansig, tansig	0.8985	29.0166	1000
30:1	tansig, tansig	0.8980	45.0273	1000
10:1	purelin, tansig	13.5824	3.0395	119
20:1	purelin, tansig	13.5824	6.0424	108
30:1	purelin, tansig	13.5824	4.8108	92
10:1	purelin, poslin	21.3889	2.2954	74
20:1	purelin, poslin	21.4059	2.4618	58
30:1	purelin, poslin	21.4209	4.6950	91
10:1	purelin, logsig	21.7357	1.8459	51
20:1	purelin, logsig	21.7357	2.5205	31
30:1	purelin, logsig	21.7357	5.0458	90
10:1	purelin, purelin	13.9192	6.8039	73
20:1	purelin, purelin	13.9192	3.9870	75
30:1	purelin, purelin	13.9192	2.5900	24

ตารางที่ 6.2 ผลการทดสอบจำนวนนิวรอลและชนิดของฟังก์ชันที่เหมาะสม (ต่อ)

Node	Function	sum error	time(sec)	counts
10:1	poslin, tansig	13.5824	3.5110	96
20:1	poslin, tansig	13.5824	3.1130	101
30:1	poslin, tansig	13.5824	3.7426	90
10:1	poslin, purelin	4.8255	2.1587	53
20:1	poslin, purelin	4.3889	2.0047	39
30:1	poslin, purelin	2.1361	3.1314	55
10:1	poslin, logsig	21.2557	1.8629	46
20:1	poslin, logsig	33.2850	1.4385	11
30:1	poslin, logsig	33.2850	1.3231	2
10:1	poslin, poslin	21.4236	1.9039	47
20:1	poslin, poslin	20.9406	2.0161	39
30:1	poslin, poslin	33.2850	1.2172	5
10:1	logsig, tansig	1.3520	15.5456	1000
20:1	logsig, tansig	0.8980	26.3276	1000
30:1	logsig, tansig	0.8980	35.0662	1000
10:1	logsig, purelin	0.4152	14.6772	1000
20:1	logsig, purelin	2.6152×10^{-13}	15.4323	714
30:1	logsig, purelin	1.1568×10^{-13}	8.6928	239
10:1	logsig, poslin	18.3752	3.5151	155
20:1	logsig, poslin	18.0442	3.8392	123
30:1	logsig, poslin	18.4270	3.7753	59
10:1	logsig, logsig	18.7170	15.8395	1000
20:1	logsig, logsig	18.7170	23.2843	1000
30:1	logsig, logsig	18.7170	33.0394	1000

จากตารางที่ 6.2 ทำการเลือกฟังก์ชันทั้ง 4 แบบ โดยสลับฟังก์ชันในการเรียนรู้แต่ละชั้น โดยในชั้นแรกทำการปรับนิวรอลเป็น 10, 20 และ 30 ตัว ชั้นที่สองปรับนิวรอลเป็น 1 ตัว เพื่อสังเกตผลว่า โครงข่ายแบบใดให้ผลลัพธ์ตามที่ต้องการ ซึ่งต้องให้ผลรวมค่าผิดพลาดสัมบูรณ์ของ

แรงบิดน้อยที่สุด ซึ่งจากผลการทดสอบในตารางที่ 6.1 พบว่า หากยิ่งเพิ่มจำนวนนิวรอลให้มากขึ้น จะให้ผลของการเรียนรู้ใกล้เคียงกับความต้องการ ทำให้ค่าความแตกต่างของแรงบิดโหนดที่ได้ ใกล้เคียงกับข้อมูลที่เป็นเป้าหมาย ซึ่งทำให้ผลรวมค่าผิดพลาดสัมบูรณ์ของแรงบิดลดลง โดยเฉพาะ เมื่อทำการสร้างโครงข่ายที่มี 30 นิวรอล สำหรับชั้นแรกและมีฟังก์ชันการแปลงคือ logsig และชั้น เออต์พุต (ชั้นที่ 2) ซึ่งมี 1 เออต์พุตและฟังก์ชันการแปลง คือ purelin ดังแสดงในรูปที่ 6.7 อินพุตที่ ป้อนเข้าสู่ชั้นอินพุต (หรือชั้นที่ 1) มี 8 อินพุต แต่ละอินพุตมีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 ให้ผลรวมค่า ผิดพลาดสัมบูรณ์(|sum error|) ของแรงบิดน้อยที่สุด โดยมีค่าน้ำหนักประสาทและ ไบอัสของชั้น ที่ 1 และชั้นที่ 2 เป็นดังนี้

$$w1 = \text{net.iw}\{1\}$$

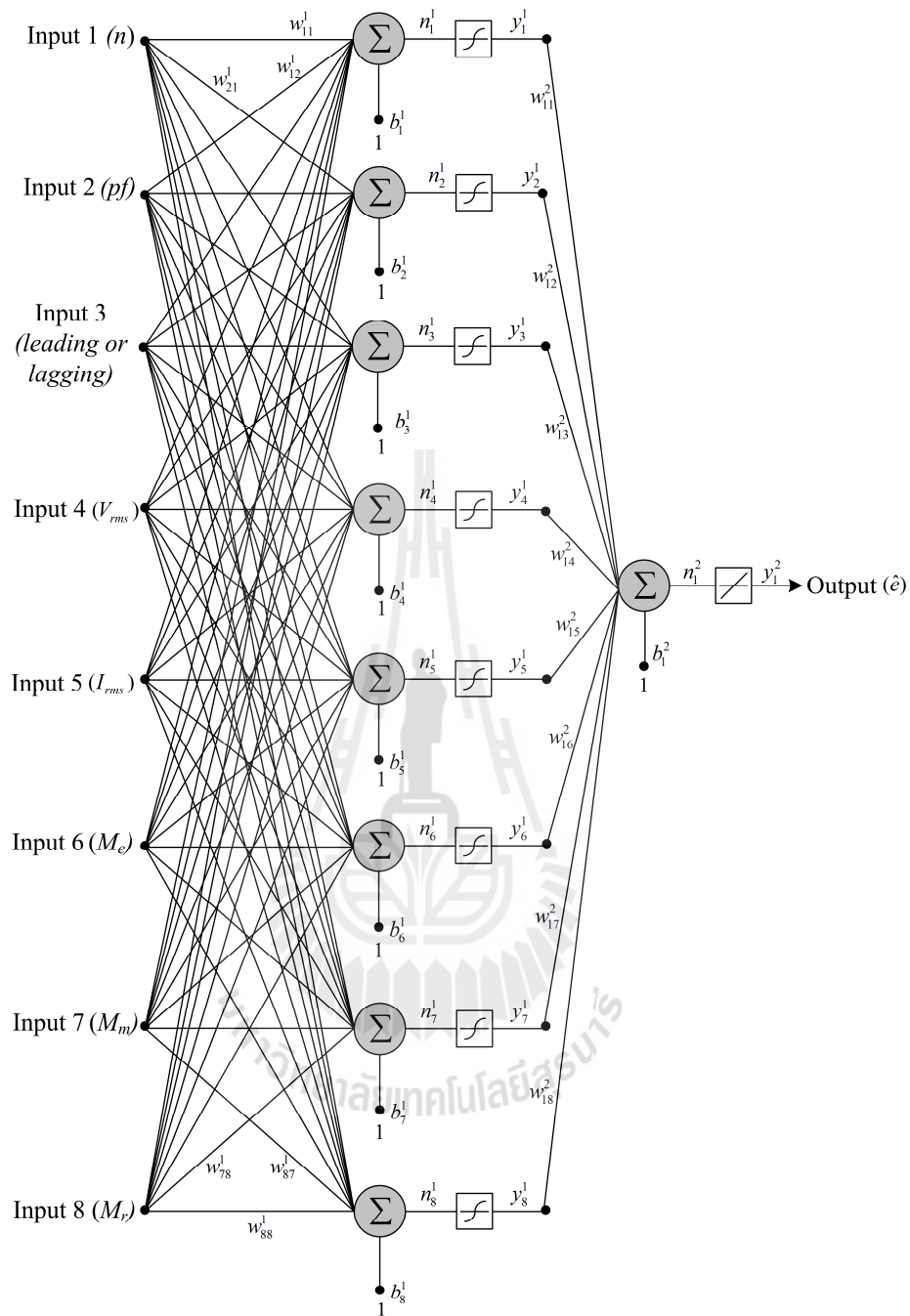
$$b1 = \text{net.b}\{1\}$$

$$w2 = \text{net.lw}\{2\}$$

$$b2 = \text{net.b}\{2\}$$

1.449	10.290	0.930	5.216	0.004	-2.884	-2.941	5.234	-12.399	6.687	}^T	{-1.224}
2.677	5.600	-2.329	-3.970	6.308	-5.260	1.796	3.408	-7.523	2.167		
-0.972	-7.624	5.571	3.673	6.547	-2.150	1.515	3.563	4.040	-4.835		
5.458	-8.567	-5.887	-6.830	1.284	0.854	4.942	4.987	4.011	4.895		
-0.608	-6.047	5.491	-6.320	0.312	4.380	4.768	-7.678	3.185	5.096		
-2.639	-7.383	3.008	3.957	-4.568	2.346	2.749	2.634	3.991	5.483		
-3.928	2.161	-2.631	-7.292	-0.652	2.363	5.149	10.290	2.606	-2.894		
3.855	-5.191	2.918	-2.706	-6.481	1.014	-7.486	5.600	4.757	4.986		
-1.411	2.970	-3.704	-6.641	4.483	0.434	11.592	-3.842	-5.103	4.008		
3.024	6.212	-6.529	-3.516	-3.842	3.931	-7.472	-5.763	-1.237	2.170		
-2.495	-1.872	7.449	1.537	-5.763	-1.836	-5.829	-7.274	7.392	1.519		
-0.972	0.679	4.026	5.224	-7.274	-0.338	-8.089	3.634	7.087	-1.592		
-3.957	6.697	4.284	-11.163	3.634	-3.763	6.010	7.892	-1.725	-4.255		
-0.966	-3.773	-2.827	6.078	2.550	3.913	8.551	4.008	-4.232	3.911		
7.157	-1.034	-8.438	4.309	-3.007	0.877	1.205	2.170	0.800	-3.224		
-4.641	4.383	-4.543	5.130	1.610	-1.715	-4.709	1.519	0.453	-3.659		
-5.523	0.377	-3.343	6.399	-0.896	2.607	-0.273	-1.592	-0.205	-2.795		
0.355	-2.987	10.588	-8.243	0.012	-4.816	1.374	-4.255	2.353	-4.669		
-5.784	3.663	3.514	-2.112	6.049	-5.179	-0.820	5.622	0.478	-2.372		
-4.863	-4.712	-1.927	3.757	4.305	1.192	-1.833	3.401	0.468	1.078		
2.113	6.110	4.477	2.241	3.779	2.304	3.254	4.766	-9.969	3.702		
-0.245	-4.006	5.060	9.348	5.674	1.042	2.284	-1.490	-4.726	-2.984		
0.602	-8.113	5.590	4.259	2.847	4.164	-1.392	2.988	-0.614	-2.937		
3.870	-3.474	5.278	4.801	1.568	1.519	-0.522	-3.675	-1.321	0.134		
4.360	3.970	1.449	-6.314	1.968	0.378	-1.482	8.454	0.975	-0.337		
1.025	4.918	-5.743	-1.905	-6.126	-2.984	0.113	7.234	9.005	3.884		
-0.321	-0.809	-5.050	-3.467	-2.978	-4.705	-5.354	-1.222	7.162	-3.913		
-7.057	5.523	7.664	-4.349	0.950	2.719	0.479	3.657	-7.699	3.451		
3.854	4.587	-0.845	-3.614	-1.932	-3.332	4.295	5.665	2.773	0.515		
5.455	-0.390	1.869	3.549	3.097	-2.547	-4.560	2.809	1.315	-0.599		

เมื่อได้ทราบ จำนวนนิวรอล ค่าน้ำหนักประสาท และ ไบอัสที่เหมาะสมกับการเรียนรู้โครงข่าย ประสาทเทียมจะได้นำค่าที่ได้ส่งไปยังส่วนของโปรแกรมทดสอบ



รูปที่ 6.7 โครงข่ายประสาทเทียมแบบไปหน้าสองชั้น

6.3.2 โปรแกรมทดสอบ

clc

clear all

pth = 'E:\MASTER_PA\AI\AI_Update\ANN\Test_ann\SumDATA\wb'; // เปิดไฟล์ที่ฝึกสอน

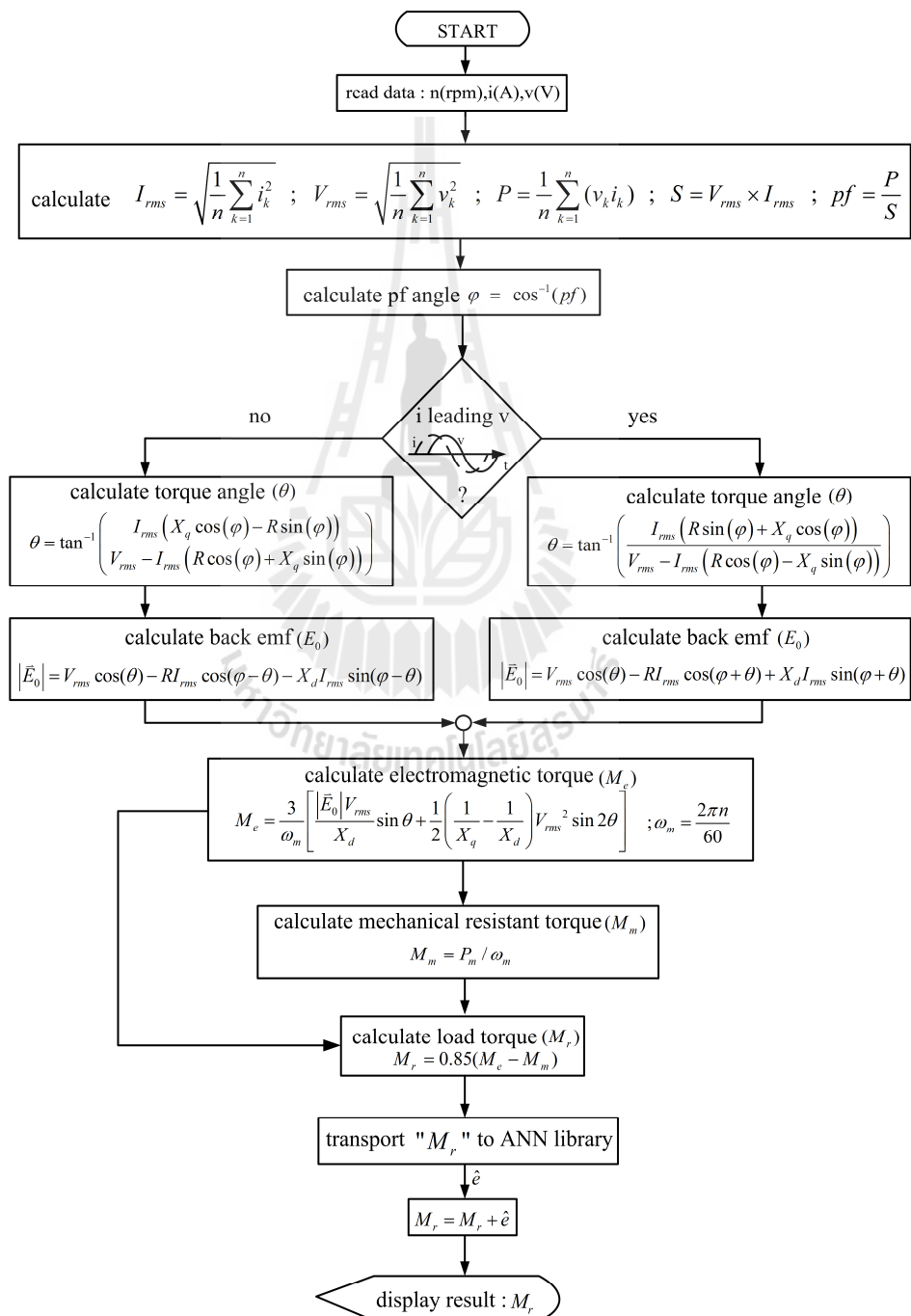
```

pth_Train_Sum_Data='Sum_Data_logsig_purelin_30_1.mat';           // เรียกค่าที่ทำการฝึกสอน
pth_train_mat_Sum_Data=[pth pth_Train_Sum_Data];               // เรียกข้อมูลโครงข่ายประสาทเทียม
load(pth_train_mat_Sum_Data);                                  // โหลดข้อมูลที่ฝึกสอน
name_capture=input('Input file name [Num of %] : ','s');      // ระบุชื่อไฟล์ที่เก็บค่าในการทดสอบ
dot_xls='.xls';                                                // เก็บค่าในไฟล์ Excel
pth_capture='E:\MASTER_PA\AI\AI_Update\ANN\Test_ann\SumDATA\Capture\'; // ที่เก็บค่า
                                                                    ทดสอบ
Filename_capture=fopen([pth_capture name_capture dot_xls],'a'); // เรียกเปิดไฟล์ที่เก็บข้อมูล
Test_port = serial('COM1','BaudRate',19200,'Terminator','LF','Timeout',10); //เปิดพอร์ตอนุกรม
fclose(Test_port);                                           // ปิดพอร์ตอนุกรม
fopen(Test_port);                                           // เปิดพอร์ตอนุกรม
i=0;                                                         // นับการวนรอบ
while(1)
    i=i+1;                                                  // เพิ่มจำนวนรอบทีละ 1
    Test_data = fscanf(Test_port);
    [Nm1,V1,Ia1,L1,PF1,Mr1,to,M1,E,Mm1]=strread
    (Test_data,'%d%f%f%d%f%f%f%f%f','delimiter',' '); // อ่านพอร์ตอนุกรมและจัดการ
    ข้อมูล p1=[Nm1/1500;V1/230;Ia1/1.6;L1;PF1;M1/4;Mm1/2;Mr1/4]; // นำค่าที่สูงสุดมาหาร
                                                                    เพื่อที่จะให้ที่ออกมาไม่เกิน
    l a1=sim(net,p1); // ส่งค่าให้ประสาทเทียมทำการประมวลผล
    Load1=V1*100; // หาเปอร์เซ็นต์แรงดันพิกัด
    Mrture=Mr1+a1; // คำนวณหาค่าแรงบิด โหลดจริง
    fprintf(' Nm = %d\t V = %.3f\t I = %.3f\t L = %d\t PF = %.2f\t @= %.2f\t E0= %.3f\t Me= %.3f\t
    Mm1 = %.3f\t a1 = %.3f\t Mr= %.3f\n',Nm1,V1,Ia1,L1,PF1,to,E,M1,Mm1,a1, Mrture)
                                                                    // สั่งแสดงค่าการคำนวณแรงบิด โหลดด้วยโครงข่ายประสาทเทียม
    fprintf(Filename_capture,'%d\t %.3f\t %.3f\t %.3f\t %.2f\t %.2f\t %.3f\t %.3f\t %.3f\t
    %.3f\n',Nm1,V1,Ia1,L1,PF1,to,E,M1,Mm1,a1,Mrture); // ลำดับการแสดงค่าที่บันทึกในไฟล์
                                                                    Excel
end // สิ้นสุดโปรแกรม
fclose(Filename_capture); // ปิดการบันทึกข้อมูลในไฟล์ Excel
fclose(Test_port); // ปิดพอร์ตอนุกรม

```

```
fclose all; // จบการทำงานทั้งหมด
disp('Finished') // จบการนำเสนอ
```

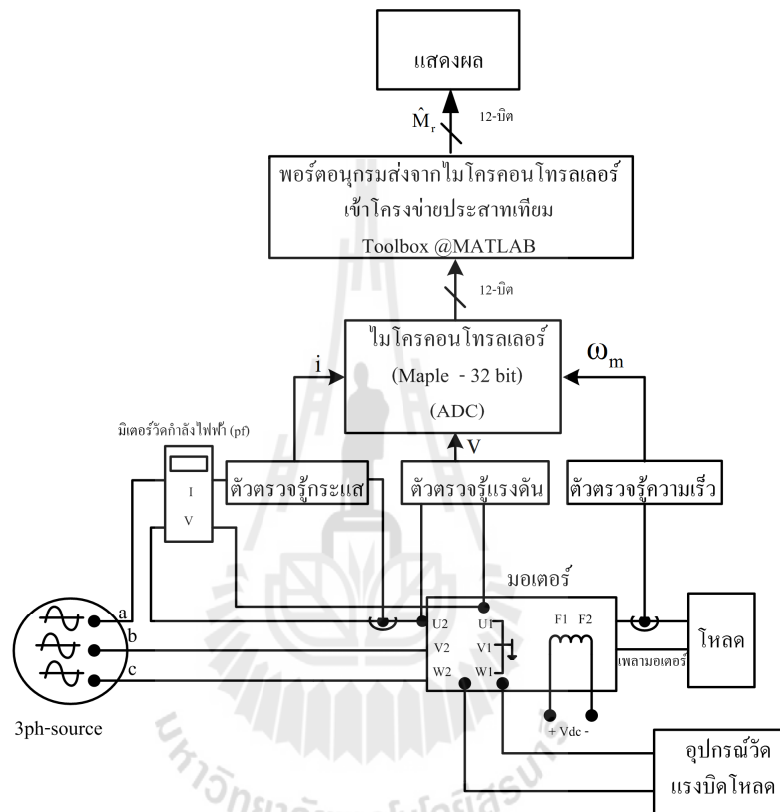
ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้เพิ่มการปรับลดความผิดพลาดโดยอาศัยโครงข่ายประสาทเทียม เพิ่มเข้ามาในส่วนของการคำนวณค่าในโปรแกรมที่ได้นำเสนอไว้แล้วในใบบทที่ 4 สามารถเขียนแผนภาพการคำนวณใหม่หลังจากได้เพิ่มส่วนของโครงข่ายประสาทเทียมแล้วได้ในรูปที่ 6.8



รูปที่ 6.8 การเขียนโปรแกรมคำนวณค่าภาษาซีและเพิ่มในส่วนปรับลดความผิดพลาด

6.4 ผลการทดสอบปรับปรุงค่าความผิดพลาดแรงบิดโหลดโดยโครงข่ายประสาทเทียม

การติดตั้งอุปกรณ์ต้องทำการเพิ่มโครงข่ายประสาทเทียมจากเดิมใน ของบทที่ 5 สามารถแสดงการติดตั้งอุปกรณ์ได้ใหม่ในรูปที่ 6.9



รูปที่ 6.9 การติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบตัวประมาณค่าแรงบิดโหลด

ทำการทดสอบตัวประมาณแรงบิดโหลด ในช่วงแรงดันสเตเตอร์ในย่าน 80% ถึง 120% ของแรงดันพิกัด (230 Vrms) ทำการทดสอบโดยจ่ายโหลดเพิ่มขึ้นครั้งละประมาณ 0.5 N-m จนถึง 4.0 N-m โดยทำการทดสอบเหมือนกับการทดสอบที่แสดงไว้ในบทที่ 5

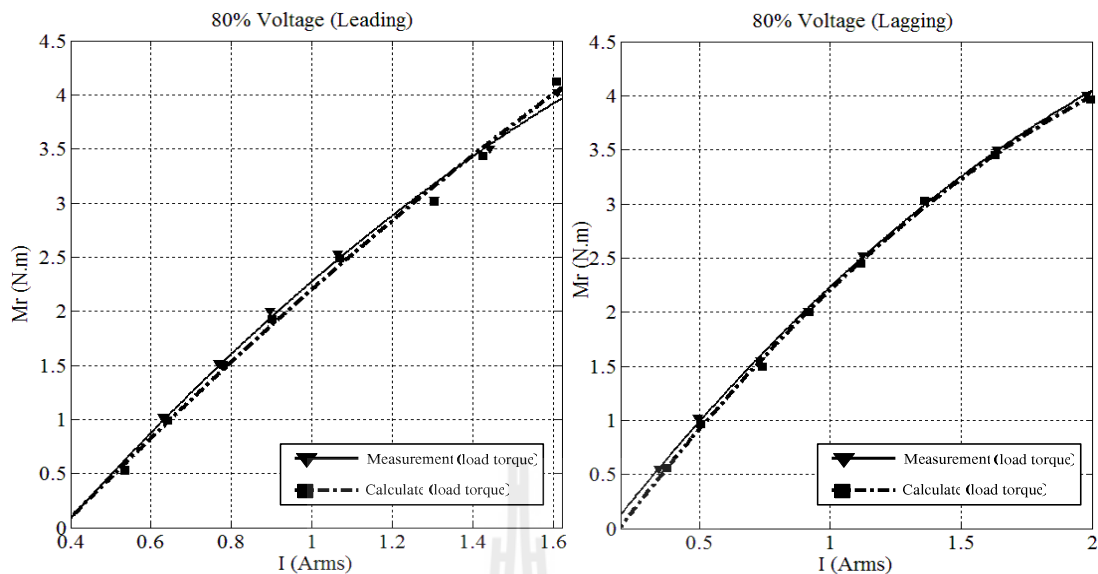
6.4.1 ผลการทดสอบตัวประมาณค่าแรงบิดโหลดที่ 80% ของแรงดันพิกัด

ทดสอบมอเตอร์ที่แรงดันสเตเตอร์มีค่าเท่ากับ 80% ของแรงดันพิกัด (184 V_{rms}) ปรับแรงดันกระแสตรงของแหล่งจ่ายให้มีค่าเท่ากับ 100 โวลต์ดัดคร่อมขดลวดสนาม และป้อนกระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็ก 0.3 แอมแปร์ เพื่อทดสอบในกรณีที่กระแสนำหน้าแรงดัน และปรับแรงดันกระแสตรงของแหล่งจ่ายให้มีค่าเท่ากับ 60 โวลต์ดัดคร่อมขดลวดสนาม และป้อนกระแส

กระตุ้นสนามแม่เหล็ก 0.2 แอมแปร์ เพื่อทดสอบในกรณีทีกระแสดำหลังแรงดัน แสดงผลการทดสอบในตารางที่ 6.3 ซึ่งประกอบด้วยค่าแรงบิดโหดจากเครื่องมือวัด และจากการคำนวณรวมถึงค่า $\hat{\epsilon}$ ที่ได้จากการบวนการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียมและความผิดพลาดที่เกิดขึ้นพบว่าในกรณีกระแสนำหน้าแรงบิดโหดจากการคำนวณส่วนใหญ่มีค่าน้อยกว่าแรงบิดโหดจากเครื่องมือวัดเล็กน้อย มีความผิดพลาดเฉลี่ยเท่ากับ 2.913% เช่นเดียวกับในกรณีกระแสดำหลังแรงบิดโหดจากการคำนวณส่วนใหญ่มีค่าน้อยกว่าแรงบิดโหดจากเครื่องมือวัดเล็กน้อย โดยได้ความผิดพลาดเฉลี่ยเท่ากับ 2.041% ซึ่งได้ว่าในกรณีกระแสนำหน้าแรงดันเกิดความผิดพลาดสูงกว่าในกรณีกระแสดำหลัง นำข้อมูลแรงบิดโหดในตารางที่ 6.3 มานำเสนอในรูปแบบของกราฟได้แสดงในรูปที่ 6.10 เปรียบเทียบค่าแรงบิดโหดจากการเครื่องมือวัด (เส้นทึบ) และคำนวณจากตัวประมาณค่าแรงบิดโหด (เส้นประ) ในกรณีกระแสนำหน้าแรงดัน (รูปที่ 6.10 ก) และกรณีกระแสดำหลังแรงดัน (รูปที่ 6.10 ข) เส้นกราฟทั้งสองเส้นถือได้ว่าเป็นเส้นเดียวกันตลอดช่วงแรงบิดโหดที่ทดสอบ

ตารางที่ 6.3 แสดงค่าแรงบิดโหดจากเครื่องมือวัด และจากการคำนวณที่แรงดันพิกัด 80%

กรณีกระแสนำหน้า (Leading)				กรณีกระแสดำหลัง (Lagging)			
แรงบิด โหด ที่วัด (N-m)	$\hat{\epsilon}$	แรงบิด โหดที่ คำนวณ (N-m)	%error	แรงบิด โหด ที่วัด (N-m)	$\hat{\epsilon}$	แรงบิด โหดที่ คำนวณ (N-m)	%error
0.540	-0.632	0.525	2.778	0.550	-0.341	0.557	1.273
1.020	-0.536	0.988	3.137	1.025	-0.244	0.968	5.561
1.520	-0.476	1.501	1.250	1.555	-0.095	1.499	3.601
2.000	-0.47	1.926	3.700	2.010	0.035	2.001	0.448
2.535	-0.375	2.49	1.775	2.520	0.079	2.446	2.937
3.025	-0.4	3.013	0.397	3.030	0.185	3.028	0.066
3.505	-0.379	3.436	1.969	3.505	0.2	3.451	1.541
4.020	-0.978	4.122	2.537	4.005	0.088	3.969	0.899
เฉลี่ยค่า %error			2.913	เฉลี่ยค่า %error			2.041



(ก) การทดสอบที่กระแสหน้าแรงดัน

(ข) การทดสอบที่กระแสล่าหลังแรงดัน

รูปที่ 6.10 การเปรียบเทียบระหว่างค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดและการคำนวณที่ได้จากตัวประมาณค่าแรงบิดโหลด เมื่อแรงดันสแตเตอร์มีค่าเท่ากับ 80% ของแรงดันพิกัด

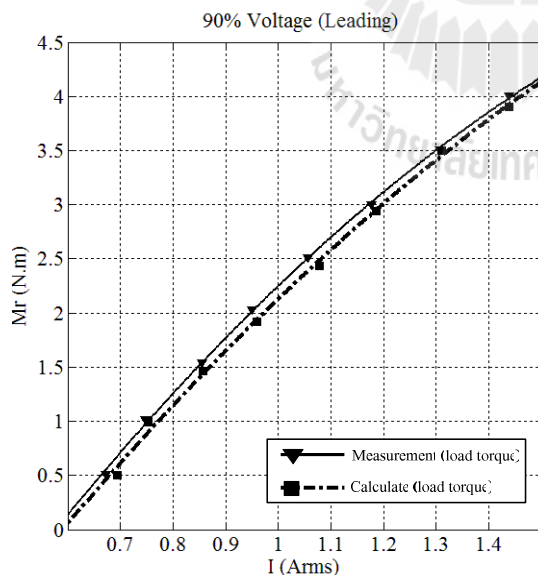
6.4.2 ผลการทดสอบตัวประมาณค่าแรงบิดโหลดที่ 90% ของแรงดันพิกัด

ทดสอบมอเตอร์ที่แรงดันสแตเตอร์มีค่าเท่ากับ 90% ของแรงดันพิกัด ($207 \text{ V}_{\text{rms}}$) ปรับแรงดันกระแสตรงของแหล่งจ่ายให้มีค่าเท่ากับ 120 โวลต์ดักคร่อมขดลวดสนาม และป้อนกระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็ก 0.4 แอมแปร์ เพื่อทดสอบในกรณีกระแสหน้าแรงดัน และปรับแรงดันกระแสตรงของแหล่งจ่ายให้มีค่าเท่ากับ 60 โวลต์ดักคร่อมขดลวดสนาม และป้อนกระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็ก 0.2 แอมแปร์ เพื่อทดสอบในกรณีกระแสล่าหลังแรงดัน แสดงผลการทดสอบในตารางที่ 6.4 ซึ่งประกอบด้วยค่าแรงบิดโหลดจากเครื่องมือวัด และจากการคำนวณรวมถึงค่า $\hat{\epsilon}$ ที่ได้จากการบวนการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียมและความผิดพลาดที่เกิดขึ้น พบว่าในกรณีกระแสหน้าค่าแรงบิดโหลดจากเครื่องมือวัดมากกว่าคำนวณจากตัวประมาณแรงบิดโหลด โดยความผิดพลาดเฉลี่ยอยู่ที่ 2.992% ส่วนในกรณีกระแสล่าหลัง มีความผิดพลาดเฉลี่ยอยู่ที่ 1.783% จะพบว่าความผิดพลาดแรงบิดโหลดที่ได้ในกรณีกระแสหน้ามีค่ามากกว่า และเมื่อนำข้อมูลแรงบิดโหลดใน ตารางที่ 6.4 มานำเสนอในรูปแบบของกราฟได้แสดงในรูปที่ 6.11 เปรียบเทียบค่าแรงบิดโหลดจากการเครื่องมือวัด (เส้นทึบ) และคำนวณจากตัวประมาณค่าแรงบิดโหลด (เส้นประ) ในกรณีกระแสหน้าแรงดัน (รูปที่ 6.11 ก) เส้นกราฟทั้งสองเส้นเป็น

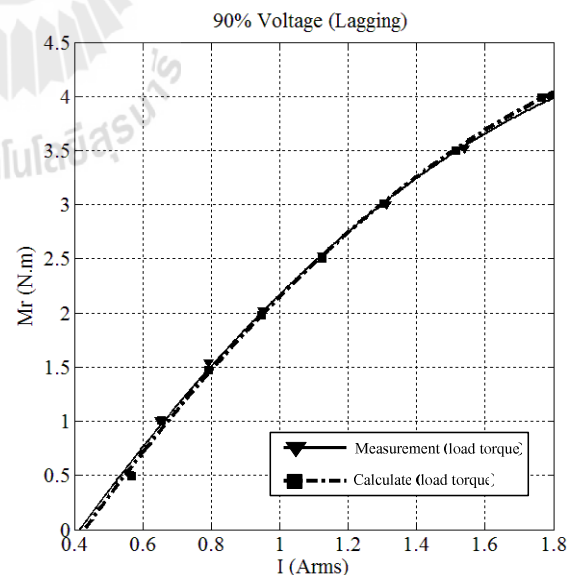
เส้นขนานห่างกันเล็กน้อย และในกรณีกระแสล้าหลังแรงดัน (รูปที่ 6.10 ข) เส้นกราฟทั้งสองเส้นเป็นเส้นโค้งใกล้เคียงกันมากจนถือได้ว่าเป็นเส้นเดียวกันตลอดช่วงแรงบิดโหลดที่ทดสอบ

ตารางที่ 6.4 แสดงค่าแรงบิดโหลดจากเครื่องมือวัด และที่ได้จากการคำนวณที่แรงดันพิกัด 90%

กรณีกระแสหน้า (Leading)				กรณีกระแสล้าหลัง (Lagging)			
แรงบิดโหลดที่วัด (N-m)	$\hat{\epsilon}$	แรงบิดโหลดที่คำนวณ (N-m)	%error	แรงบิดโหลดที่วัด (N-m)	$\hat{\epsilon}$	แรงบิดโหลดที่คำนวณ (N-m)	%error
0.515	-0.944	0.504	2.136	0.510	-0.271	0.49	5.922
1.020	-0.717	0.989	3.134	1.005	-0.132	1.005	0.000
1.545	-0.692	1.464	5.243	1.540	-0.064	1.469	4.610
2.030	-0.662	1.918	5.517	2.025	0.062	1.977	2.370
2.515	-0.581	2.436	3.141	2.525	0.226	2.505	0.792
3.005	-0.488	2.943	2.063	3.005	0.327	3.006	0.033
3.505	-0.346	3.497	0.228	3.520	0.421	3.503	0.483
4.005	-0.36	3.906	2.472	3.995	0.468	3.993	0.050
เฉลี่ยค่า %error			2.992	เฉลี่ยค่า %error			1.783



(ก) การทดสอบที่กระแสหน้าแรงดัน



(ข) การทดสอบที่กระแสล้าหลังแรงดัน

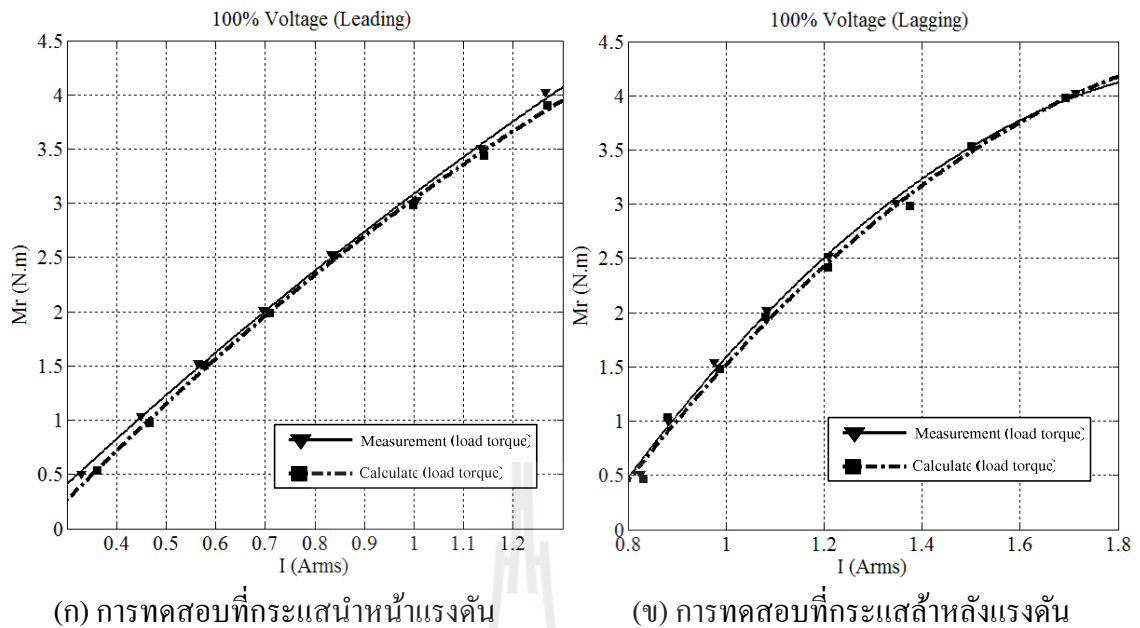
รูปที่ 6.11 การเปรียบเทียบระหว่างค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดและการคำนวณที่ได้จากตัวประมาณค่าแรงบิดโหลด เมื่อแรงดันสเตเตอร์มีค่าเท่ากับ 90% ของแรงดันพิกัด

6.4.3 ผลการทดสอบตัวประมาณค่าแรงบิดโหลดที่ 100% ของแรงดันพิกัด

ทดสอบมอเตอร์ที่แรงดันสเตเตอร์มีค่าเท่ากับ 100% ของแรงดันพิกัด ($230 V_{rms}$) ปรับแรงดันกระแสตรงของแหล่งจ่ายให้มีค่าเท่ากับ 120 โวลต์ตกคร่อมขดลวดสนาม และป้อนกระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็ก 0.35 แอมแปร์ เพื่อทดสอบในกรณีที่กระแสนำหน้าแรงดัน และปรับแรงดันกระแสตรงของแหล่งจ่ายให้มีค่าเท่ากับ 60 โวลต์ตกคร่อมขดลวดสนาม และป้อนกระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็ก 0.2 แอมแปร์ เพื่อทดสอบในกรณีที่กระแสล่าหลังแรงดัน แสดงผลการทดสอบในตารางที่ 6.5 ซึ่งประกอบด้วยค่าแรงบิดโหลดจากเครื่องมือวัด และจากการคำนวณรวมถึงค่า $\hat{\epsilon}$ ที่ได้จากการบวนการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียมและความผิดพลาดที่เกิดขึ้น พบว่าในกรณีที่กระแสนำหน้าแรงดันค่าแรงบิดโหลดจากเครื่องมือวัด มีค่ามากกว่าคำนวณเล็กน้อย โดยความผิดพลาดเฉลี่ยอยู่ที่ 2.618% เช่นเดียวกับกรณีกระแสล่าหลังแรงดันค่าแรงบิดโหลดจากเครื่องมือวัดมีค่ามากกว่าคำนวณเล็กน้อย มีความผิดพลาดเฉลี่ยอยู่ที่ 3.053% จะพบว่าความผิดพลาดแรงบิดโหลดที่ได้ในกรณีที่กระแสล่าหลังแรงดันมีค่ามากกว่า เมื่อนำข้อมูลแรงบิดโหลดในตารางที่ 6.5 มานำเสนอในรูปแบบของกราฟได้แสดงในรูปที่ 6.12 เปรียบเทียบค่าแรงบิดโหลดจากการเครื่องมือวัด (เส้นทึบ) และคำนวณจากตัวประมาณค่าแรงบิดโหลด (เส้นประ) ในกรณีที่กระแสนำหน้าแรงดัน (รูปที่ 6.12 ก) เส้นกราฟทั้งสองเป็นตรงเคียงขนานกันห่างกันเล็กน้อย และในกรณีที่กระแสล่าหลังแรงดัน (รูปที่ 6.12 ข) เส้นกราฟทั้งสองเส้นเป็นเส้นโค้งขนานโดยห่างกันเล็กน้อย จนเกือบเป็นเส้นเดียวกัน

ตารางที่ 6.5 แสดงค่าแรงบิดโหลดจากเครื่องมือวัด และที่ได้จากการคำนวณที่แรงดันพิกัด 100%

กรณีกระแสนำหน้า (Leading)				กรณีกระแสล่าหลัง (Lagging)			
แรงบิดโหลดที่วัด (N-m)	$\hat{\epsilon}$	แรงบิดโหลดที่คำนวณ (N-m)	%error	แรงบิดโหลดที่วัด (N-m)	$\hat{\epsilon}$	แรงบิดโหลดที่คำนวณ (N-m)	%error
0.500	-0.541	0.536	7.200	0.515	-0.007	0.472	8.350
1.035	-0.506	0.979	5.415	1.010	0.236	1.032	2.178
1.525	-0.390	1.51	0.984	1.540	0.123	1.478	4.026
2.010	-0.357	1.988	1.095	2.025	0.228	1.966	2.914
2.525	-0.239	2.521	0.158	2.520	0.312	2.414	4.206
3.025	-0.273	2.988	1.223	3.010	0.412	2.984	0.864
3.510	-0.256	3.443	1.909	3.505	0.851	3.531	0.742
4.020	-0.231	3.901	2.960	4.025	0.779	3.979	1.143
เฉลี่ยค่า %error			2.618	เฉลี่ยค่า %error			3.053



รูปที่ 6.12 การเปรียบเทียบระหว่างค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดและการคำนวณที่ได้จากตัวประมาณค่าแรงบิดโหลด เมื่อแรงดันสเตเตอร์มีค่าเท่ากับ 100% ของแรงดันพิกัด

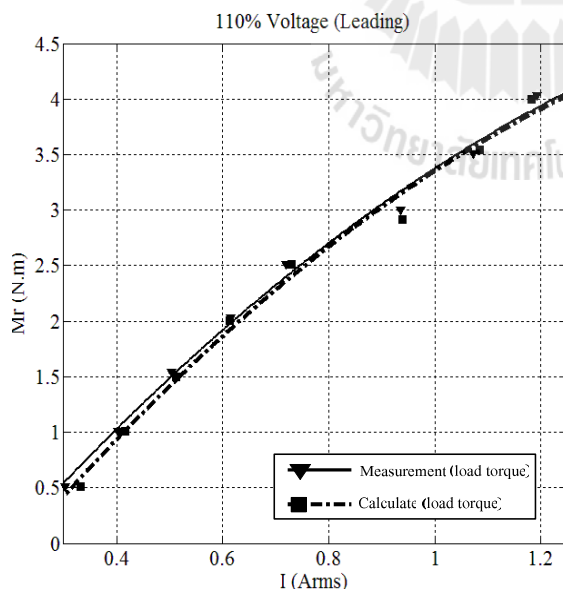
6.4.4 ผลการทดสอบตัวประมาณค่าแรงบิดโหลดที่ 110% ของแรงดันพิกัด

ทดสอบมอเตอร์ที่แรงดันสเตเตอร์มีค่าเท่ากับ 110% ของแรงดันพิกัด ($253 V_{rms}$) ปรับแรงดันกระแสตรงของแหล่งจ่ายให้มีค่าเท่ากับ 120 โวลต์ดัดคร่อมขดลวดสนาม และป้อนกระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็ก 0.42 แอมแปร์ เพื่อทดสอบในกรณีกระแสหน้าแรงดัน และปรับแรงดันกระแสตรงของแหล่งจ่ายให้มีค่าเท่ากับ 100 โวลต์ดัดคร่อมขดลวดสนาม และป้อนกระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็ก 0.31 แอมแปร์ เพื่อทดสอบในกรณีกระแสล่าหลังแรงดัน แสดงผลการทดสอบในตารางที่ 6.6 ซึ่งประกอบด้วยค่าแรงบิดโหลดจากเครื่องมือวัด และจากการคำนวณรวมถึงค่า $\hat{\epsilon}$ ที่ได้จากการบวนการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียมและความผิดพลาดที่เกิดขึ้น พบว่าในกรณีกระแสหน้าแรงดันค่าแรงบิดโหลดจากเครื่องมือวัด และคำนวณมีค่าใกล้เคียงกัน มีความผิดพลาดเฉลี่ยอยู่ที่ 1.324% เช่นเดียวกับในกรณีกระแสล่าหลังแรงดันค่าแรงบิดโหลดจากเครื่องมือวัดและคำนวณมีค่าใกล้เคียงกัน มีความผิดพลาดเฉลี่ยอยู่ที่ 2.831% จะพบว่าความผิดพลาดแรงบิดโหลดที่ได้ในกรณีกระแสล่าหลังแรงดันมีค่ามากกว่า เมื่อนำข้อมูล แรงบิดโหลดในตารางที่ 6.6 มานำเสนอในรูปแบบของกราฟได้ในรูปที่ 6.13 เปรียบเทียบค่าแรงบิดโหลดจากการเครื่องมือวัด (เส้นทึบ) และคำนวณจากตัวประมาณค่าแรงบิดโหลด (เส้นประ) ในกรณีกระแสหน้าแรงดัน (รูปที่ 6.13 ก) เส้นกราฟทั้งสองเส้นเป็นเส้นโค้งขนานโดยห่างกันเล็กน้อยในช่วงแรงบิดโหลดเริ่มต้น เส้นกราฟมีค่าใกล้เคียงกันจนถึงได้ว่าเป็นเส้นเดียวกันเมื่อแรงบิดโหลดสูงขึ้น และกรณี

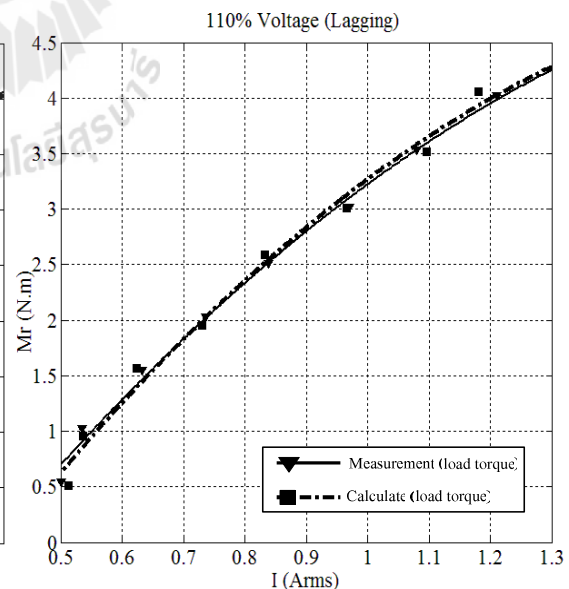
กระแสล้าหลังแรงดัน (รูปที่ 6.13 ข) เส้นกราฟทั้งสองเส้นเป็นเส้นโค้งทับกันสนิทตลอดช่วงการทดสอบแรงบิดโหลด

ตารางที่ 6.6 แสดงค่าแรงบิดโหลดจากเครื่องมือวัด และที่ได้จากการคำนวณที่แรงดันพิกัด 110%

กรณีกระแสนำหน้า (Leading)				กรณีกระแสล้าหลัง (Lagging)			
แรงบิดโหลดที่วัด (N-m)	\hat{e}	แรงบิดโหลดที่คำนวณ (N-m)	%error	แรงบิดโหลดที่วัด (N-m)	\hat{e}	แรงบิดโหลดที่คำนวณ (N-m)	%error
0.515	-0.483	0.507	1.553	0.545	0.002	0.508	6.789
1.010	-0.385	1.009	0.099	1.030	0.105	0.960	6.796
1.545	-0.296	1.502	2.783	1.550	-0.329	1.565	0.968
2.030	-0.198	2.005	1.232	2.030	-0.282	1.955	3.695
2.515	-0.091	2.512	0.119	2.515	0.027	2.588	2.903
3.005	-0.287	2.916	2.962	3.020	0.251	3.012	0.265
3.510	-0.234	3.54	0.855	3.530	0.286	3.520	0.283
4.035	-0.207	3.995	0.991	4.020	0.507	4.058	0.945
เฉลี่ยค่า %error			1.324	เฉลี่ยค่า %error			2.831



(ก) การทดสอบที่กระแสนำหน้าแรงดัน



(ข) การทดสอบที่กระแสล้าหลังแรงดัน

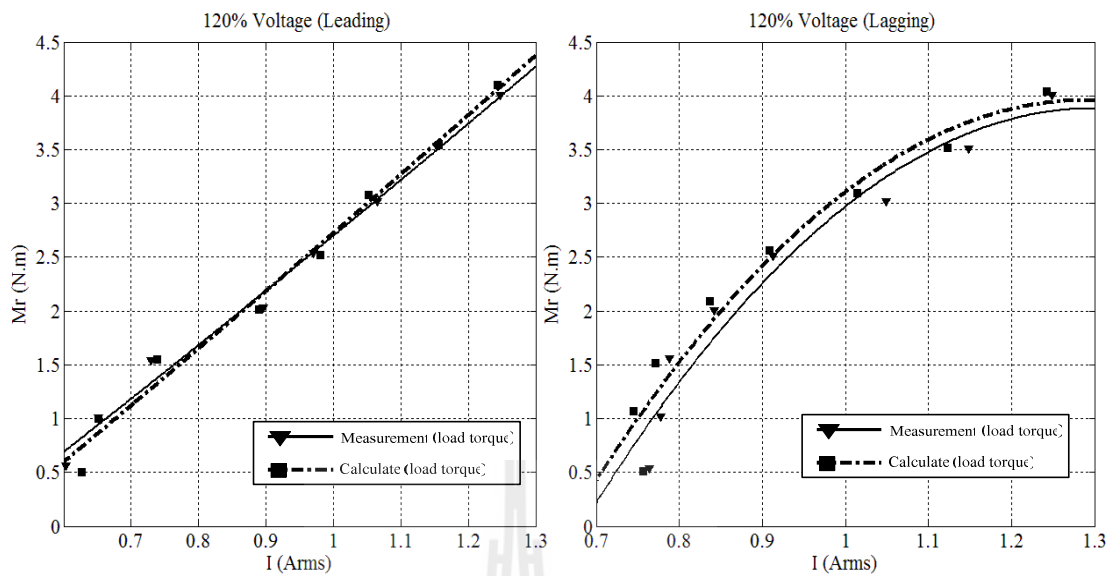
รูปที่ 6.13 การเปรียบเทียบระหว่างค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดและการคำนวณที่ได้จากตัวประมาณค่าแรงบิดโหลด เมื่อแรงดันสเตเตอร์มีค่าเท่ากับ 110% ของแรงดันพิกัด

6.4.5 ผลการทดสอบตัวประมาณค่าแรงบิดไหลดที่ 120% ของแรงดันพิกัด

ทดสอบมอเตอร์ที่แรงดันสเตเตอร์มีค่าเท่ากับ 120% ของแรงดันพิกัด ($276 V_{rms}$) ปรับแรงดันกระแสตรงของแหล่งจ่ายให้มีค่าเท่ากับ 180 โวลต์ตกคร่อมขดลวดสนาม และป้อนกระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็ก 0.6 แอมแปร์ เพื่อทดสอบในกรณีที่กระแสหน้าหน้าแรงดัน และปรับแรงดันกระแสตรงของแหล่งจ่ายให้มีค่าเท่ากับ 105 โวลต์ตกคร่อมขดลวดสนาม และป้อนกระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็ก 0.33 แอมแปร์ เพื่อทดสอบในกรณีที่กระแสล่าหลังแรงดัน แสดงผลการทดสอบในตารางที่ 6.7 ซึ่งประกอบด้วยค่าแรงบิดไหลดจากเครื่องมือวัด และที่ได้จากการคำนวณรวมถึงค่า $\hat{\epsilon}$ ที่ได้จากการบวนการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม และความผิดพลาดที่เกิดขึ้น พบว่าในกรณีที่กระแสหน้าหน้าแรงดันค่าแรงบิดไหลดจากเครื่องมือวัดและคำนวณมีค่าใกล้เคียงกัน มีความผิดพลาดเฉลี่ยอยู่ที่ 2.332% ส่วนในกรณีที่กระแสล่าหลังแรงดันค่าแรงบิดไหลดจากเครื่องมือวัดต่างกันเล็กน้อย โดยค่าแรงบิดไหลดที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่าจากการวัดเล็กน้อย มีความผิดพลาดเฉลี่ยคือ 2.794% จะพบว่าความผิดพลาดแรงบิดไหลดที่ได้ในกรณีที่กระแสล่าหลังแรงดันมีค่าผิดพลาดมากกว่า เมื่อนำข้อมูลแรงบิดไหลดในตารางที่ 6.7 มานำเสนอในรูปแบบของกราฟได้ในรูปที่ 6.14 เปรียบเทียบค่าแรงบิดไหลดจากการเครื่องมือวัด (เส้นทึบ) และคำนวณจากตัวประมาณค่าแรงบิดไหลด (เส้นประ) ในกรณีที่กระแสหน้าหน้าแรงดัน (รูปที่ 6.14 ก) ได้เส้นกราฟทั้งสองเส้นเป็นเส้นโค้งหงายโดยเส้นกราฟทั้งสองทับกันสนิทตลอดการทดสอบแรงบิดไหลด และกรณีกระแสล่าหลัง (รูปที่ 6.14 ข) เส้นกราฟทั้งสองเส้นเป็นเส้นโค้งคว่ำขนานกัน โดยค่าแรงบิดไหลดที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่าจากเครื่องมือวัดเล็กน้อย

ตารางที่ 6.7 แสดงค่าแรงบิดไหลดจากเครื่องมือวัด และที่ได้จากการคำนวณที่แรงดันพิกัด 120%

กรณีกระแสหน้าหน้า (Leading)				กรณีกระแสล่าหลัง (Lagging)			
แรงบิดไหลดที่วัด (N-m)	$\hat{\epsilon}$	แรงบิดไหลดที่คำนวณ (N-m)	%error	แรงบิดไหลดที่วัด (N-m)	$\hat{\epsilon}$	แรงบิดไหลดที่คำนวณ (N-m)	%error
0.560	-1.009	0.500	10.714	0.540	0.490	0.515	4.630
1.010	-0.753	1.000	0.990	1.015	0.744	1.066	5.025
1.540	-0.751	1.553	0.844	1.555	0.752	1.513	2.701
2.035	-0.788	2.018	0.835	2.005	0.967	2.092	4.339
2.535	-0.676	2.52	0.592	2.510	1.117	2.56	1.992
3.015	-0.459	3.076	2.023	3.020	1.316	3.099	2.616
3.530	-0.471	3.541	0.312	3.505	1.517	3.513	0.228
4.005	-0.294	4.099	2.347	4.005	1.637	4.038	0.824
เฉลี่ยค่า %error			2.332	เฉลี่ยค่า %error			2.794



(ก) การทดสอบที่กระแสนำหน้าแรงดัน

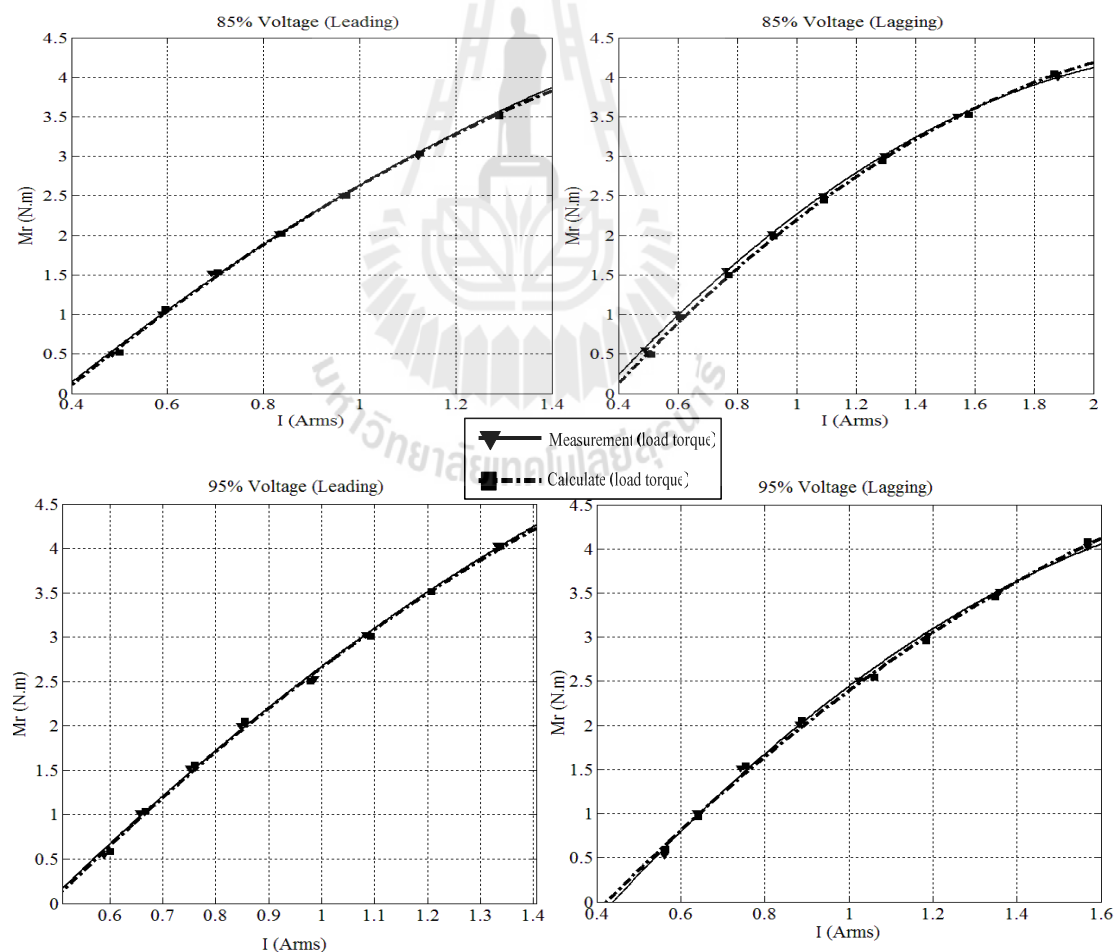
(ข) การทดสอบที่กระแสล่าหลังแรงดัน

รูปที่ 6.14 การเปรียบเทียบระหว่างค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดและการคำนวณที่ได้จากตัวประมาณค่าแรงบิด โหลด เมื่อแรงดันสเตเตอร์มีค่าเท่ากับ 120% ของแรงดันพิกัด

6.4.6 ผลการทดสอบตัวประมาณค่าแรงบิดโหลดที่แรงดันพิกัดอื่น ๆ

เมื่อทำการทดสอบที่แรงดันสเตเตอร์มีค่าเท่ากับ 85% ของแรงดันพิกัด ($195.5 V_{rms}$), 95% ของแรงดันพิกัด ($218.5 V_{rms}$), 105% ของแรงดันพิกัด ($241.5 V_{rms}$) และ 115% ของแรงดันพิกัด ($264.5 V_{rms}$) ซึ่งเป็นแรงดันพิกัดนอกเหนือย่านที่ให้โครงข่ายประสาทเทียมเรียนรู้ เพื่อยืนยันผลสร้างตัวประมาณค่าแรงบิดโหลดสามารถคำนวณค่าแรงบิดโหลดได้ผลดีในทุกแรงดันพิกัดที่จ่ายให้มอเตอร์ ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากความผิดพลาด แสดงผลการทดสอบเปรียบเทียบจากการใช้เครื่องมือวัด (เส้นทึบ) และจากการคำนวณ (เส้นประ) ในรูปที่ 6.15 และ 6.16 จากในรูปที่ 6.15(ก) ผลการทดสอบตัวประมาณค่าแรงบิดโหลดในกรณีกระแสนำหน้าแรงดันที่แรงดันสเตเตอร์มีค่าเท่ากับ 85% ของแรงดันพิกัด (รูปบนซ้าย) เส้นกราฟทั้งสองเส้นเป็นเส้นโค้งเฉียงทับกันสนิทตลอดช่วงการทดสอบแรงบิดโหลด มีความผิดพลาดแรงบิดเฉลี่ยอยู่ที่ 1.883% และที่การทดสอบที่แรงดันสเตเตอร์มีค่าเท่ากับ 95% ของแรงดันพิกัด (รูปล่างซ้าย) เส้นกราฟทั้งสองเส้นเป็นเส้นโค้งทับกันสนิทตลอดช่วงการทดสอบแรงบิดโหลด มีความผิดพลาดแรงบิดเฉลี่ยอยู่ที่ 2.060% ส่วนในกรณีกระแสล่าหลังแรงดันในรูปที่ 6.15(ข) ผลการทดสอบตัวประมาณค่าแรงบิดโหลดที่แรงดันสเตเตอร์มีค่าเท่ากับ 85% ของแรงดันพิกัด (รูปบนขวา) และที่แรงดันสเตเตอร์มีค่าเท่ากับ 95% ของแรงดันพิกัด (รูปล่างขวา) เส้นกราฟทั้งสองเส้นเป็นเส้นโค้งห่างกันเล็กน้อยจนถือว่าเกือบทับกันสนิทตลอดทั้งช่วงการทดสอบแรงบิดโหลด มีความผิดพลาดแรงบิดเฉลี่ยอยู่ที่ 3.334% และ 3.359% ตามลำดับ

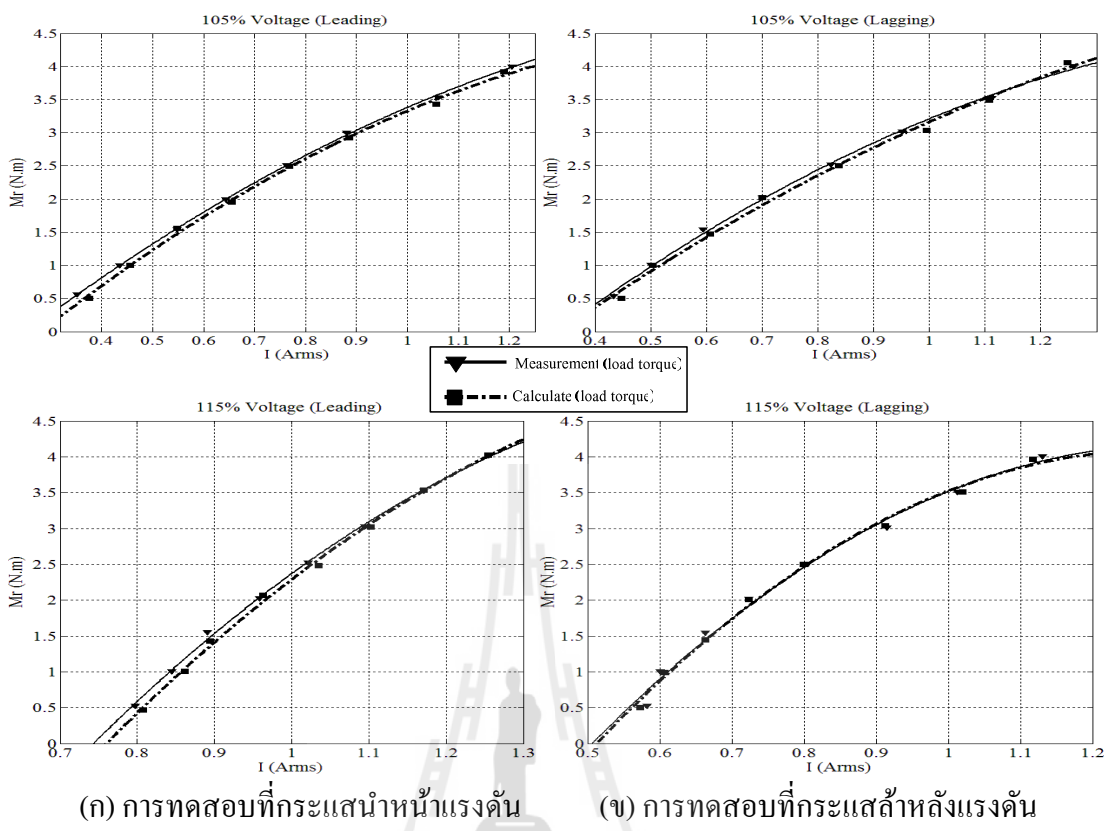
ผลการทดสอบที่แรงดันสเตเตอร์มีค่าเท่ากับ 105% ของแรงดันพิกัด และ 115% ของแรงดันพิกัดนำเสนอในรูปแบบที่ 6.16 แสดงผลการทดสอบเปรียบเทียบจากการใช้เครื่องมือวัด (เส้นทึบ) และจากการคำนวณ (เส้นประ) จากรูปที่ 6.16(ก) ผลการทดสอบตัวประมาณค่าแรงบิดโพลดในกรณีกระแสหน้าแรงดันที่แรงดันสเตเตอร์มีค่าเท่ากับ 105% ของแรงดันพิกัด (รูปบนซ้าย) และที่แรงดันสเตเตอร์มีค่าเท่ากับ 115% ของแรงดันพิกัด (รูปล่างซ้าย) เส้นกราฟทั้งสองเส้นเป็นเส้นโค้งห่างกันเล็กน้อยในช่วงแรงบิดโพลดเริ่มต้น มีความผิดพลาดแรงบิดโพลดเฉลี่ยอยู่ที่ 2.021% และ 2.091% ตามลำดับ ส่วนในกรณีกระแสล่าหลังในรูปแบบที่ 6.16(ข) ผลการทดสอบตัวประมาณค่าแรงบิดโพลดที่แรงดันสเตเตอร์มีค่าเท่ากับ 105% ของแรงดันพิกัด (รูปบนขวา) และที่แรงดันสเตเตอร์มีค่าเท่ากับ 115% ของแรงดันพิกัด (รูปล่างขวา) เส้นกราฟทั้งสองเส้นเป็นเส้นโค้งห่างกันเล็กน้อยจนถึงว่าทับสนิทตลอดทั้งช่วงการทดสอบแรงบิดโพลด มีความผิดพลาดแรงบิดโพลดเฉลี่ยอยู่ที่ 2.406% และ 2.489% ตามลำดับ



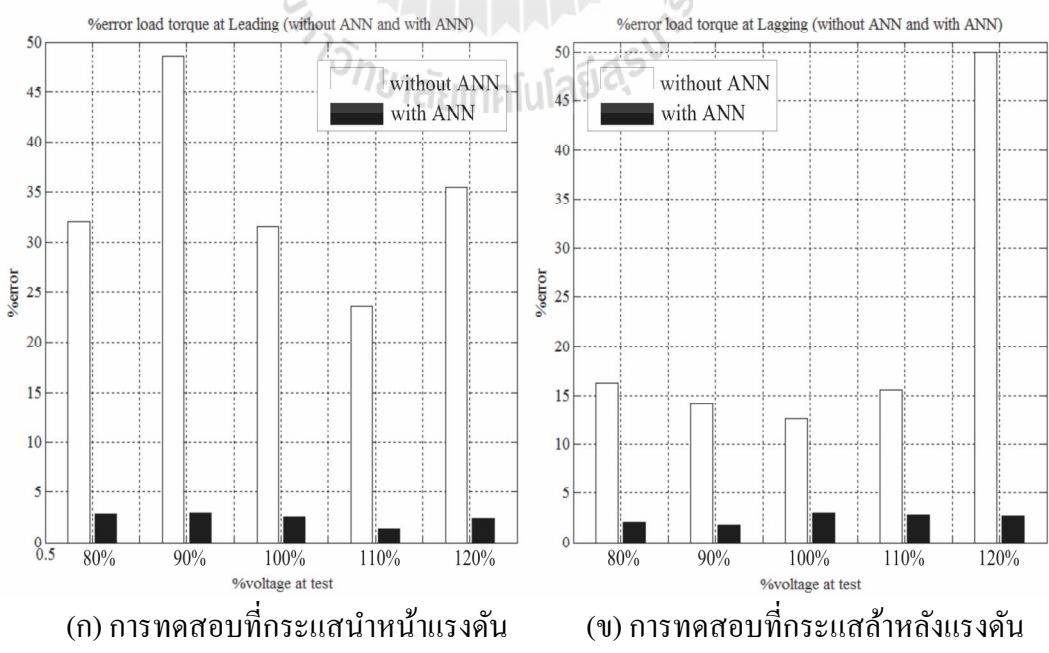
(ก) การทดสอบที่กระแสหน้าแรงดัน

(ข) การทดสอบที่กระแสล่าหลังแรงดัน

รูปที่ 6.15 การเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากเครื่องมือวัดและการคำนวณที่ได้จากตัวประมาณค่าแรงบิดโพลด เมื่อแรงดันสเตเตอร์มีค่าเท่ากับ 85% และ 95% ของแรงดันพิกัด



รูปที่ 6.16 การเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากเครื่องมือวัดและการคำนวณที่ได้จากตัวประมาณค่าแรงบิดโหลด เมื่อแรงดันสเตเตอร์มีค่าเท่ากับ 105% และ 115% ของแรงดันพิกัด



รูปที่ 6.17 สรุปความผิดพลาดที่เกิดขึ้นก่อนใช้ ANN และหลังใช้ ANN

แผนภูมิแท่งในรูปที่ 6.17 แสดงการเปรียบเทียบความผิดพลาดที่เกิดจากการประมาณค่าแรงบิดโพลดในสถานะอยู่ตัวระหว่างการใช้โครงข่ายประสาทเทียม (กราฟแท่งสีดำ) และการไม่ใช้โครงข่ายประสาทเทียม (กราฟแท่งสีขาว) ในกรณีกระแสไฟฟ้าแรงดัน (รูปที่ 6.17(ก)) และในกรณีกระแสไฟฟ้าหลังแรงดัน (รูปที่ 6.17(ข)) เมื่อแรงดันสเตเตอร์ที่ 80% ถึง 120% ของแรงดันพิกัด กราฟแท่งสีขาวให้ความผิดพลาดเฉลี่ย 27.997% และกราฟแท่งสีดำให้ความผิดพลาดเฉลี่ย 2.468% ดังนั้นการใช้โครงข่ายประสาทเทียมจะแก้ไขแรงบิดโพลดที่ได้จากการประมาณค่าให้มีความถูกต้องมากขึ้น เพราะความผิดพลาดเฉลี่ยมีค่าลดลงเหลือเพียง 2.468% ซึ่งเป็นความผิดพลาดที่ยอมรับได้ (ไม่เกิน $\pm 5\%$) ตามที่ตั้งเป้าหมายของงานวิจัยวิทยานิพนธ์

6.5 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึง การเรียนรู้ด้วยโครงข่ายประสาทเทียม การแบ่งชนิดของโครงข่ายประสาทเทียม จุดเด่นของโครงข่ายประสาทเทียม แบบจำลองของนิวรอล การเลือกใช้ฟังก์ชันการแปลงชนิดต่างๆ และผลการทดสอบหลังทำการปรับแก้ความผิดพลาดด้วยโครงข่ายประสาทเทียม ในการปรับแก้ความผิดพลาดของตัวประมาณแรงบิดโพลดใช้โครงข่ายประสาทเทียมด้วยโปรแกรม MATLAB Neuron Network Toolbox โดยใช้โครงข่ายไปหน้าแบบสองชั้น คือ ใช้ฟังก์ชันการแปลงแบบลอการิทึมในชั้นที่หนึ่งและฟังก์ชันเส้นตรงในชั้นที่สอง โดยการเขียนโปรแกรมประกอบด้วย โปรแกรมเรียนรู้ และ โปรแกรมทดสอบ จากการทดสอบนี้สามารถปรับลดความผิดพลาดลงได้ผลดีมากเป็นที่น่าพอใจ โดยความผิดพลาดในทุกแรงดันพิกัดมีความผิดพลาดของการคำนวณแรงบิดโพลดลดเหลือเพียง 2.468% ซึ่งน้อยกว่า 5% นอกจากนี้ยังทำการทดสอบนอกเหนือแรงดันพิกัดที่โครงข่ายประสาทเทียมเรียนรู้ ซึ่งผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าสามารถคำนวณค่าแรงบิดโพลดได้อย่างแม่นยำสามารถยอมรับได้ ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มีผลการทดสอบเป็นไปตามเป้าหมายที่ตั้งไว้

บทที่ 7

สรุปและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุป

ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้สร้างเครื่องมือวัดแรงบิดโหลดสำหรับมอเตอร์ซิงโครนัส ขั้วแม่เหล็กยื่น (SPSM) ในสถานะอยู่ตัว ขนาด 1 กิโลวัตต์ รุ่น SE2662-5M ของบริษัท LUCAS-NULLE แรงดันพิกัด 230 V กระแสพิกัด 1.6 A ทำการทดสอบมอเตอร์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์มอเตอร์ซิงโครนัส ทั้งค่าความต้านทาน (R) ค่ารีแอกแตนซ์ตามแนวแกนตรง (X_d) และค่ารีแอกแตนซ์ตามแนวแกนขวาง (X_q) โดยวิธีการหาค่ารีแอกแตนซ์ ใช้การทดสอบสลลิป (slip test) โดยได้ค่า $R=4.736 \Omega$, $X_d=80.327 \Omega$ และ $X_q=44.150 \Omega$ ค่าพารามิเตอร์เหล่านี้มีความสำคัญมาที่จะนำไปใช้ในการคำนวณหาแรงบิดโหลด การออกแบบการสร้างตัวประมาณค่าแรงบิดโหลด ใช้ตัวตรวจรู้กระแส ASC 712 การตรวจรู้แรงดันด้วยวงจรแบ่งแรงดัน นำสัญญาณของเอาต์พุตทั้งกระแสและแรงดันผ่านเข้ามายังวงจรแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัลของตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ และใช้ตัวตรวจรู้ความเร็ว ZX-21 นำเอาต์พุตความเร็วผ่านเข้าที่อินเตอร์รัปต์ของตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ หลังจากนั้นตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ทำการคำนวณค่าแรงบิดโหลดตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ซิงโครนัสขั้วแม่เหล็กยื่นภายในโปรแกรมภาษาซี และแสดงผลการคำนวณออกมาผ่านทางจอคอมพิวเตอร์ บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้เป็นบอร์ดเมเปิล 32 บิต (ARM Cortex M3) และโปรแกรมที่เป็นตัวคอมไพล์และอัปโหลดโปรแกรมยังไมโครคอนโทรลเลอร์ คือ Maple IDE ต้องทำการทดสอบตัวตรวจรู้กระแสและแรงดัน เพื่อหาสมการเส้นตรงในการปรับเทียบค่ากระแสและแรงดันจริง สำหรับใส่ในโปรแกรมคำนวณภาษาซี โดยมีขั้นตอนการเขียนโปรแกรมภาษาซีดังนี้คือ การประกาศตัวแปร กำหนดค่าเริ่มต้นการทำงาน รับสัญญาณอินพุตขาพอร์ตจากตัวตรวจรู้ความเร็ว คำนวณความเร็ว รับสัญญาณกระแสและแรงดันจากอินพุตแอนะล็อกนำค่าเข้าวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล นำไปคำนวณกระแสและแรงดันอาร์เอ็มเอส คำนวณหาค่าแรงบิดโหลดตามสมการทางคณิตศาสตร์ โดยการคำนวณแบ่งเป็นกรณีกระแสนำหน้าแรงดันและกระแสล่าหลังแรงดัน และในส่วนสุดท้าย นำเสนอผลการคำนวณผ่านทางหน้าจอคอมพิวเตอร์

สำหรับผลการทดสอบตัวประมาณแรงบิดโหลดได้ ซึ่งมีผลการทดสอบที่แรงดันสเตเตอร์ มีพิกัดต่ำสุด 80% ของแรงดันพิกัดที่มอเตอร์สามารถทำงานได้ด้วยความเร็วซิงโครนัส ถึงพิกัด

สูงสุด 120% ของแรงดันพิกัดที่มอเตอร์สามารถรับแรงดันได้ ผลการทดสอบตัวประมาณแรงบิดโพลต์ที่ได้ยังมีความผิดพลาดค่อนข้างสูง มีค่าเท่ากับ 27.997% ซึ่งจะต้องทำการปรับปรุงแก้ไขข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นโดยใช้กระบวนการทางโครงข่ายประสาทเทียม (MATLAB Neuron Network Toolbox) ใช้โครงข่ายประสาทเทียมใช้เครือข่ายแบบไปหน้าสองชั้น คือ ใช้ฟังก์ชันการแปลงแบบลอการิทึม(logsig) เป็นชั้นที่หนึ่งและฟังก์ชันเส้นตรง (purelin) เป็นชั้นที่สอง โดยมีการทดสอบเลือกใช้ฟังก์ชันการแปลงค่าผลรวมค่าผิดพลาดสัมบูรณ์น้อยที่สุดคือ 1.1568×10^{-13} ใช้โปรแกรมเรียนรู้ในการฝึกสอนมีอินพุต 8 ตัว คือ กระแส แรงดัน ความเร็ว ตัวประกอบกำลัง แรงบิด แม่เหล็กไฟฟ้า ฯลฯ และมีเอาต์พุต 1 ตัว เป็น ค่าความแตกต่างของแรงบิดโพลต์ที่เครื่องมีวัดกับแรงบิดโพลต์ที่คำนวณ (\hat{e}) ในโปรแกรมเรียนรู้จะได้ค่านำหนักประสาทและค่าไบอัสใช้ในโปรแกรมทดสอบต่อไป ภายในโปรแกรมทดสอบจะใช้ค่าเรียนรู้ที่ได้จากโปรแกรมเรียนรู้มาทำให้ได้ค่าที่เหมาะสมกับแรงบิดโพลต์ในแต่ละพิกัดการทดสอบ จะได้ค่า \hat{e} มาบวกเพิ่มกับค่าแรงบิดโพลต์ทำการคำนวณเดิม ซึ่งทำให้ได้ค่าแรงบิดโพลต์ใหม่ที่มีความผิดพลาดน้อยลง จากการคำนวณค่าแรงบิดโพลต์ความผิดพลาดเฉลี่ยรวมทั้งในกรณีกระแสนำหน้าแรงดันและลำหลังแรงดันเพียง 2.468% ซึ่งความผิดพลาดเดิมก่อนใช้โครงข่ายประสาทเทียมมีค่าเท่ากับ 27.997% ดังนั้นการใช้โครงข่ายประสาทเทียมสามารถลดความผิดพลาดแรงบิดโพลต์ได้มากกว่า 25%

7.2 ข้อเสนอแนะ

1. การจัดลำดับการเขียนภาษาซีสำหรับควบคุมบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ควรจัดเรียงลำดับย่อหน้าต่างกัน เพื่อให้เห็นลำดับการวนลูปอย่างชัดเจน จะได้ง่ายต่อการตรวจสอบและแก้ไข นอกจากนี้ควรที่จะมีคำอธิบายการทำงาน

2. การออกแบบจุดต่อสายไฟควรเป็นในลักษณะปลั๊กเสียบ จะได้มีความแน่นหนาป้องกันปัญหาจากสายหลุดในอนาคต ควรทำสัญลักษณ์ชื่อสัญญาณต่างๆเพื่อความสะดวกต่อการตรวจสอบในภายหลัง

3. การทดสอบมอเตอร์ในแต่ละครั้งควรมีการวัดอุณหภูมิของมอเตอร์ เพื่อให้การทดสอบในแต่ละครั้งมีสภาพแวดล้อมเหมือนกัน โดยนำค่าดังกล่าวมาทำการเปรียบเทียบหาความคลาดเคลื่อน เนื่องมาจากหลังทำการทดสอบมอเตอร์แล้วอุณหภูมิของมอเตอร์เปลี่ยนไป เมื่อการใช้งานที่พิกัดต่าง ๆ

4. การศึกษาเทคโนโลยีของตัวตรวจรู้รุ่นใหม่ ๆ ที่ใช้ในปัจจุบันที่มีความแม่นยำสูงและมีความไวสูง ทั้งนี้อาจลดความผิดพลาดของกระแส แรงดัน และความเร็ว ลงไปได้อีก

5. ค่าความผิดพลาดของแรงบิดโหลด อาจขึ้นอยู่กับจำนวนข้อมูลที่ป้อนให้โครงข่ายประสาทเทียม เพื่อใช้ในการเรียนรู้ นั่นคือ หากมีจำนวนข้อมูลในการเรียนรู้ที่มากขึ้น อาจส่งผลให้ความผิดพลาดของแรงบิดโหลดลดลง

6. หากต้องการสร้างตัวประมาณแรงบิดโหลดกับมอเตอร์ซึ่ง โครนส์ขั้วแม่เหล็กยื่นแรงดันพิกัดอื่น ๆ ต้องทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ภายในมอเตอร์ใหม่ และต้องทำการทดสอบข้อมูลชุดใหม่สำหรับป้อนให้โครงข่ายประสาทเทียมเรียนรู้

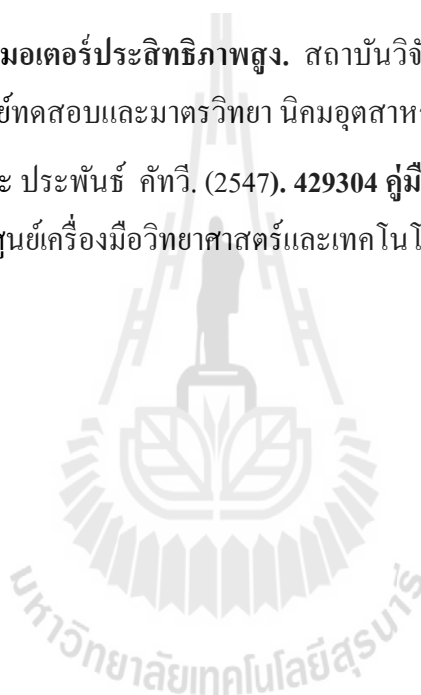
7. ควรแสดงผลอยู่กับอุปกรณ์โดยไม่ต้องใช้จอคอมพิวเตอร์ โดยเขียนโปรแกรมโครงข่ายประสาทเทียมลงในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์




รายการอ้างอิง

- C.J. Henricus and D. Jong. (1968). Starting Performance of Synchronous Motors with Laminated Salient Poles. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**. **87(4)**. pp: 1083-1098.
- O.O. Joseph and A.L. Thomas. (1989). An Improved Model for Saturated Salient Pole Synchronous Motors. **IEEE Transactions on Energy Conversion**. **4(1)**. pp:135-142.
- J.O. Ojo, V. Ostovic, T.A. Lipo and J.C. White. (1990). Measurement and Computation of Starting Torque Pulsations of Salient Pole Synchronous Motors. **IEEE Transactions on Energy Conversion**. **5(1)**. pp:176-182.
- O. Pyrhonen, M. Niemela, J. Pyrhonen and J. Kaukonen. (1998). Excitation Control of DTC Controlled Salient Pole Synchronous Motor in Field Weakening Range. **IEEE Conferences & International Workshop on Advanced Motion Control**. pp:294-298.
- M.I. Masoud, J.E. Fletcher, and B.W. William. (2004). Performance Evaluation of Decoupled Control of Rotor Torque and Rotor Electric Power in a Salient Pole Synchronous Machine. **IET Conferences & Second International Conference on Power Electronics Machines and Drives**. **2**. pp: 691-696.
- B. Sergelen. (2007). Mathematical Model of Salient Pole Synchronous Motors Supplied by a Frequency Converter. **IEEE Conferences International Forum on Strategic Technology**. pp: 390-393.
- A. Fransua and R. Magureanu. (1984). **Electrical Machines and Drive Systems**. Technical Press. Oxford, England.
- H.A. Toliyat and G.B. Kliman. (2004). **Handbook of Electric Motors**. Second edition. Marel Dekker Inc. United States of America.
- D.P. Kothari and I.J. Nagrath. (1985). **Electric Machines**. 3rd edition. Tata McGraw-Hill. Upper Saddle River.
- G.W. Irwin, K. Warwick and K. J. Hunt (1995). **Neural Network Applications in Control**. Short Run Press Ltd., England.

- H. Xuenong. (2009). **Modern Power Quality Measurement Technology**. Fluke Cor, USA.
- มงคลทอง สงคราม. (1992). **เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ**. พิมพ์ครั้งที่ 3. รามาการพิมพ์ กรุงเทพฯ.
- อาทิตย์ ศรีแก้ว. (2552). **ปัญญาเชิงคำนวณ**. เอกสารประกอบการสอน สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- โอภาส ศิริครรชิตถาวร, วรพจน์ กรแก้ววัฒนกุล และ ชัยวัฒน์ ลิ้มพรจิตรวิไล. (2554). **เรียนรู้ระบบควบคุมอย่างง่ายด้วยโปรแกรมภาษา C**.
- ลำเรียง อายุพงศ์. (2552). **มอเตอร์ประสิทธิภาพสูง**. สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย. ศูนย์ทดสอบและมาตรฐานวิชา นิคมอุตสาหกรรมบางปู.
- ธนัชชัย กุลวานิชพงษ์ และ ประพันธ์ คัทวี. (2547). **429304 คู่มือปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้า 2**. วิศวกรรมไฟฟ้า ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี





ภาคผนวก ก

ผลการทดสอบตัวประมาณแรงบิดโหลดที่แรงดันสเตเตอร์เท่ากับ
80% - 120% ของแรงดันพิกัด

ก.1 ผลการทดสอบตัวประมาณแรงบิดโหลดที่ 80% ของแรงดันพิกัด

ทำการทดสอบมอเตอร์กระแสเหนี่ยวนำที่แรงดันสเตเตอร์เท่ากับ 80% ของแรงดันพิกัด แรงดันเท่ากับ 184 Vrms กระแสสนาม 0.3 A แรงดันสนาม 120V

ตารางที่ ก.1 แสดงค่าที่ได้จากเครื่องมือวัดที่ 80% ของแรงดันพิกัด (pf leading)

load torque(N.m)	n(rpm)	Vrms(V)	Irms(A)	P(W)	S(VA)
0.530	1526	183.9	0.516	57.1	95.0
1.005	1526	183.9	0.634	81.4	117.8
1.575	1526	183.4	0.809	115.6	148.4
2.005	1527	183.2	0.930	139.9	171.9
2.505	1526	182.9	1.086	168.2	197.5
3.025	1525	182.9	1.357	194.5	246.0
3.500	1525	182.7	1.482	220.6	270.4
4.025	1526	182.4	1.635	250.6	300.0

ตารางที่ ก.2 แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณที่ 80% ของแรงดันพิกัด (pf leading)

load torque(N.m)	n(rpm)	Vrms(V)	Irms(A)	P(W)	S(VA)
1.098	1525.6	187.791	0.525	67.239	98.590
1.508	1525.4	187.104	0.646	91.861	120.869
2.041	1525.8	187.645	0.805	123.864	151.054
2.456	1525.2	187.733	0.933	149.232	175.155
2.879	1525.2	187.881	1.074	174.342	201.784
3.444	1525.4	187.388	1.343	204.350	251.662
3.878	1525.4	186.508	1.475	231.083	275.099
4.346	1525	186.648	1.630	260.426	304.236

ตารางที่ ก.3 เปรียบเทียบค่าผิดพลาด (%error) ของตัวประมาณแรงบิดโหลดที่ 80% ของพิกัดแรงดัน (pf leading)

		%error				
load torque(N.m)	n(rpm)	Vrms(V)	Irms(A)	P(W)	S(VA)	
107.170	0.026	2.116	1.744	17.757	3.779	
50.050	0.039	1.742	1.893	12.851	2.605	
29.587	0.013	2.315	0.494	7.149	1.788	
22.494	0.118	2.474	0.323	6.670	1.894	
14.930	0.052	2.723	1.105	3.652	2.169	
13.851	0.026	2.454	1.032	5.064	2.302	
10.800	0.026	2.084	0.472	4.752	1.738	
7.975	0.066	2.329	0.306	3.921	1.412	
เฉลี่ย%error	32.107	0.046	2.280	0.921	7.727	2.211

ทำการทดสอบมอเตอร์กระแสล้าหลังที่แรงดันสเตเตอร์เท่ากับ 80% ของแรงดันพิกัดแรงดันเท่ากับ 184 Vrms กระแสสนาม 0.2 A แรงดันสนาม 60 V

ตารางที่ ก.4 แสดงค่าที่ได้จากเครื่องมือวัดที่ 80% ของแรงดันพิกัด (pf lagging)

load torque(N.m)	n(rpm)	Vrms(V)	Irms(A)	P(W)	S(VA)
0.510	1526	183.3	0.425	63.0	78.0
1.000	1527	183.4	0.567	85.2	102.1
1.540	1527	183.2	0.752	114.0	141.0
2.020	1526	183.0	0.930	138.4	169.3
2.510	1526	183.0	1.156	170.0	210.8
3.010	1526	183.0	1.388	199.4	254.6
3.505	1526	183.1	1.688	234.4	308.1
4.000	1526	182.8	1.958	269.9	357.0

ตารางที่ ก.5 แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณที่ 80% ของแรงดันพิกัด (pf lagging)

load torque(N.m)	n(rpm)	Vrms(V)	Irms(A)	P(W)	S(VA)
0.921	1525.6	188.161	0.429	68.613	80.721
1.233	1525.4	187.596	0.562	89.193	105.429
1.647	1525.6	187.404	0.751	116.815	140.740
1.992	1525	186.931	0.926	140.209	173.098
2.448	1525.6	187.299	1.150	171.454	215.394
2.851	1525.2	187.252	1.379	199.346	258.221
3.306	1525.2	187.473	1.664	230.847	311.955
3.854	1525.6	186.944	1.956	267.665	365.662

ตารางที่ ก.6 เปรียบเทียบค่าผิดพลาด (%error) ของตัวประมาณแรงบิดโหลดที่ 80% ของแรงดันพิกัด (pf lagging)

%error						
load torque(N.m)	n(rpm)	Vrms(V)	Irms(A)	P(W)	S(VA)	
80.588	0.026	2.652	0.941	8.910	3.488	
23.300	0.105	2.288	0.882	4.687	3.261	
6.948	0.092	2.295	0.133	2.469	0.184	
1.386	0.066	2.148	0.430	1.307	2.243	
2.470	0.026	2.349	0.519	0.855	2.179	
5.282	0.052	2.323	0.648	0.027	1.422	
5.678	0.052	2.388	1.422	1.516	1.251	
3.650	0.026	2.267	0.102	0.828	2.426	
เฉลี่ย%error	16.163	0.056	2.339	0.635	2.575	2.057

ก.2 ผลการทดสอบตัวประมาณแรงบิดโหลดที่ 90% ของแรงดันพิกัด

ทำการทดสอบมอเตอร์กระแสเหนี่ยวนำที่แรงดันสแตเตอร์เท่ากับ 90% ของแรงดันพิกัด แรงดันเท่ากับ 207 Vrms กระแสสนาม 0.39 A แรงดันสนาม 115 V

ตารางที่ ก.7 แสดงค่าที่ได้จากเครื่องมือวัดที่ 90% ของแรงดันพิกัด (pf leading)

load torque(N.m)	n(rpm)	Vrms(V)	Irms(A)	P(W)	S(VA)
0.505	1526	206.5	0.686	64.7	139.1
1.015	1526	206.6	0.750	91.4	154.4
1.520	1526	206.1	0.855	116.0	175.9
2.015	1526	205.4	0.964	143.0	196.6
2.510	1527	205.3	1.071	169.6	220.6
3.000	1527	205.3	1.183	192.8	242.1
3.515	1525	205.0	1.309	220.0	267.6
4.000	1527	205.0	1.521	249.3	312.4

ตารางที่ ก.8 แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณที่ 90% ของแรงดันพิกัด (pf leading)

load torque(N.m)	n(rpm)	Vrms(V)	Irms(A)	P(W)	S(VA)
1.444	1525.2	210.963	0.697	83.519	147.041
1.771	1525.6	210.745	0.753	103.784	158.691
2.184	1525.8	210.233	0.850	129.020	178.698
2.624	1525.8	209.818	0.957	156.621	200.796
3.032	1525.4	209.600	1.067	181.151	223.643
3.427	1525.2	209.056	1.179	204.576	246.477
3.874	1525	209.449	1.307	232.687	273.750
4.395	1525.2	209.817	1.508	260.084	316.404

ตารางที่ ก.9 เปรียบเทียบค่าผิดพลาด (%error) ของตัวประมาณแรงบิดโหลดที่ 90% ของแรงดันพิกัด (pf leading)

		%error				
load torque(N.m)	n(rpm)	Vrms(V)	Irms(A)	P(W)	S(VA)	
185.941	0.052	2.161	1.603	29.087	5.709	
74.483	0.026	2.006	0.400	13.549	2.779	
43.684	0.013	2.005	0.585	11.224	1.591	
30.223	0.013	2.151	0.726	9.525	2.134	
20.797	0.105	2.094	0.373	6.811	1.379	
14.233	0.118	1.830	0.338	6.108	1.808	
10.213	0.000	2.170	0.153	5.767	2.298	
9.875	0.118	2.350	0.855	4.326	1.282	
เฉลี่ย%error	48.681	0.056	2.096	0.629	10.800	2.373

ทำการทดสอบมอเตอร์กระแสล้าหลังที่แรงดันสเตเตอร์เท่ากับ 90% ของแรงดันพิกัด แรงดันเท่ากับ 207 Vrms กระแสสนาม 0.2 A แรงดันสนาม 60 V

ตารางที่ ก.10 แสดงค่าที่ได้จากเครื่องมือวัดที่ 90% ของแรงดันพิกัด (pf lagging)

load torque(N.m)	n(rpm)	Vrms(V)	Irms(A)	P(W)	S(VA)
0.545	1526	206.9	0.599	67.7	125.9
1.000	1527	208.1	0.688	90.0	142.8
1.510	1527	207.5	0.814	117.6	168.4
2.010	1526	207.3	0.960	144.3	198.3
2.500	1527	206.8	1.120	170.6	232.3
3.020	1527	206.3	1.323	198.4	272.6
3.505	1527	206.1	1.531	228.4	313.8
4.015	1527	206.1	1.796	254.8	370.0

ตารางที่ ก.11 แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณที่ 90% ของแรงดันพิกัด (pf lagging)

load torque(N.m)	n(rpm)	Vrms(V)	Irms(A)	P(W)	S(VA)
0.810	1525.4	211.946	0.602	68.389	127.591
1.140	1525.6	212.431	0.682	89.824	144.878
1.564	1525.6	211.619	0.813	116.991	172.046
1.938	1525.6	211.295	0.955	142.058	201.787
2.279	1525.4	210.953	1.114	165.911	235.002
2.693	1525.4	210.518	1.311	193.192	275.989
3.094	1525.6	210.456	1.517	222.206	319.262
3.551	1525.2	210.502	1.772	253.646	373.010

ตารางที่ ก.12 เปรียบเทียบค่าผิดพลาด(%error) ของตัวประมาณแรงบิดโหลดที่ 90% ของแรงดันพิกัด (pf lagging)

%error						
load torque(N.m)	n(rpm)	Vrms(V)	Irms(A)	P(W)	S(VA)	
48.624	0.039	2.439	0.501	1.018	1.343	
14.000	0.092	2.081	0.872	0.196	1.455	
3.576	0.092	1.985	0.123	0.518	2.165	
3.582	0.026	1.927	0.521	1.554	1.758	
8.840	0.105	2.008	0.536	2.749	1.163	
10.828	0.105	2.045	0.907	2.625	1.243	
11.726	0.092	2.114	0.914	2.712	1.741	
11.557	0.118	2.136	1.336	0.453	0.814	
เฉลี่ย%error	14.092	0.084	2.092	0.714	1.478	1.460

ก.3 ผลการทดสอบตัวประมาณแรงบิดโหลดที่ 100% ของแรงดันพิกัด

ทำการทดสอบมอเตอร์นำหน้าที่แรงดันสเตเตอร์เท่ากับ 100% ของแรงดันพิกัด แรงดันเท่ากับ 230 Vrms กระแสสนาม 0.35 A แรงดันสนาม 120V

ตารางที่ ก.13 แสดงค่าที่ได้จากเครื่องมือวัดที่ 100% ของแรงดันพิกัด (pf leading)

load torque(N.m)	n(rpm)	Vrms(V)	Irms(A)	P(W)	S(VA)
0.500	1527	230.0	0.344	67.4	79.9
1.010	1527	230.3	0.453	89.7	103.4
1.540	1526	229.5	0.579	111.6	129.9
2.010	1525	229.3	0.702	135.5	161.4
2.510	1524	229.3	0.840	163.7	191.2
3.020	1525	229.9	0.983	192.8	225.3
3.505	1526	230.8	1.149	217.7	265.8
3.965	1526	230.1	1.319	247.1	303.6

ตารางที่ ก.14 ตารางแสดงค่าที่ได้จากการคำนวณที่ 100% ของแรงดันพิกัด (pf leading)

load torque(N.m)	n(rpm)	Vrms(V)	Irms(A)	P(W)	S(VA)
1.141	1525.2	234.424	0.345	74.244	80.876
1.510	1525.4	234.318	0.457	95.732	107.083
1.917	1525.8	233.814	0.578	118.927	135.144
2.352	1525.2	233.932	0.704	144.926	164.688
2.746	1525	231.604	0.834	168.047	193.158
3.247	1525.4	234.044	0.977	197.106	228.661
3.788	1525.2	234.590	1.142	227.181	267.902
4.321	1525.2	235.049	1.307	258.056	307.209

ตารางที่ ก.15 เปรียบเทียบค่าผิดพลาด (%error) ของตัวประมาณแรงบิดโหลดที่ 100% ของแรงดันพิกัด (pf leading)

		%error				
load torque(N.m)	n(rpm)	Vrms(V)	Irms(A)	P(W)	S(VA)	
128.200	0.118	1.923	0.291	10.154	1.222	
49.505	0.105	1.745	0.883	6.725	3.562	
24.481	0.013	1.880	0.173	6.565	4.037	
17.015	0.013	2.020	0.285	6.956	2.037	
9.402	0.066	1.005	0.714	2.655	1.024	
7.517	0.026	1.803	0.610	2.233	1.492	
8.074	0.052	1.642	0.609	4.355	0.791	
8.979	0.052	2.151	0.910	4.434	1.189	
เฉลี่ย%error	31.647	0.056	1.771	0.559	5.510	1.919

ทำการทดสอบมอเตอร์กระแสสลับที่แรงดันสเตเตอร์เท่ากับ 100% ของแรงดันพิกัด แรงดันเท่ากับ 230 Vrms กระแสสนาม 0.2 A แรงดันสนาม 60 V

ตารางที่ ก.16 แสดงค่าที่ได้จากเครื่องมือวัดที่ 100% ของแรงดันพิกัด (pf lagging)

load torque(N.m)	n(rpm)	Vrms(V)	Irms(A)	P(W)	S(VA)
0.540	1526	230.2	0.771	74.6	179.9
1.010	1527	230.1	0.854	102.1	194.8
1.535	1526	229.6	0.947	128.4	219.1
2.030	1526	229.9	1.075	155.2	245.8
2.505	1526	229.0	1.205	181.1	275.1
3.010	1526	229.1	1.370	210.1	313.4
3.515	1526	228.8	1.536	237.8	350.5
4.010	1526	228.6	1.740	267.3	497.2

ตารางที่ ก.17 แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณที่ 100% ของแรงดันพิกัด (pf lagging)

load torque(N.m)	n(rpm)	Vrms(V)	Irms(A)	P(W)	S(VA)
0.661	1525.2	234.177	0.760	65.495	177.975
1.070	1525.4	233.510	0.846	91.663	197.549
1.465	1525.4	232.827	0.950	118.113	221.186
1.842	1525.4	232.984	1.065	142.425	248.128
2.193	1525.2	232.828	1.198	166.241	278.928
2.591	1525.6	232.766	1.351	193.712	314.467
2.941	1525.2	232.085	1.521	217.449	353.001
3.353	1525.6	232.759	1.746	247.902	406.397

ตารางที่ ก.18 เปรียบเทียบค่าผิดพลาด (%error) ของตัวประมาณแรงบิดโหลดที่ 100% ของแรงดันพิกัด (pf lagging)

%error						
load torque(N.m)	n(rpm)	Vrms(V)	Irms(A)	P(W)	S(VA)	
22.407	0.052	1.728	1.427	12.205	1.070	
5.941	0.105	1.482	0.937	10.222	1.411	
4.560	0.039	1.405	0.317	8.012	0.952	
9.261	0.039	1.341	0.930	8.231	0.947	
12.455	0.052	1.672	0.581	8.205	1.391	
13.920	0.026	1.600	1.387	7.800	0.340	
16.330	0.052	1.436	0.977	8.558	0.714	
16.384	0.026	1.819	0.345	7.257	18.263	
เฉลี่ย%error	12.657	0.049	1.560	0.863	8.811	3.136

ก.4 ผลการทดสอบตัวประมาณแรงบิดโหลดที่ 110% ของแรงดันพิกัด

ทำการทดสอบมอเตอร์นำหน้าที่แรงดันสเตเตอร์เท่ากับ 110% ของแรงดันพิกัด แรงดันเท่ากับ 253 Vrms กระแสสนาม 0.42 A แรงดันสนาม 180V

ตารางที่ ก.19 แสดงค่าที่ได้จากเครื่องมือวัดที่ 110% ของแรงดันพิกัด (pf leading)

load torque(N.m)	n(rpm)	Vrms(V)	Irms(A)	P(W)	S(VA)
0.520	1527	253.2	0.314	50.1	79.3
1.005	1527	253.6	0.411	78.1	103.9
1.530	1527	253.8	0.515	103.0	130.0
2.010	1527	254.1	0.622	126.8	158.8
2.515	1527	251.7	0.736	151.3	185.4
3.025	1527	252.2	0.866	182.3	220.2
3.500	1527	248.6	1.192	207.0	299.0
4.005	1527	246.6	1.311	238.9	322.2

ตารางที่ ก.20 แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณที่ 110% ของแรงดันพิกัด (pf leading)

load torque(N.m)	n(rpm)	Vrms(V)	Irms(A)	P(W)	S(VA)
0.983	1525.4	255.395	0.326	61.945	83.259
1.408	1525.4	255.634	0.419	88.045	107.111
1.826	1525.4	255.859	0.520	113.090	133.047
2.232	1526	253.085	0.636	136.818	160.962
2.617	1525.6	253.858	0.739	159.086	187.601
3.129	1525.6	254.332	0.873	190.059	222.032
3.954	1525.4	249.883	1.206	232.046	301.359
4.359	1525.6	249.427	1.300	256.162	324.255

ตารางที่ ก.21 เปรียบเทียบค่าผิดพลาด (%error) ของตัวประมาณแรงบิดโหลดที่ 110% ของแรงดันพิกัด (pf leading)

		%error				
load torque(N.m)	n(rpm)	Vrms(V)	Irms(A)	P(W)	S(VA)	
89.038	0.105	0.867	3.822	23.643	4.992	
40.100	0.105	0.802	1.946	12.734	3.090	
19.346	0.105	0.811	0.971	9.796	2.344	
11.045	0.065	0.399	2.251	7.901	1.361	
4.056	0.092	0.857	0.408	5.146	1.187	
3.438	0.092	0.845	0.808	4.256	0.832	
12.971	0.105	0.516	1.174	12.100	0.789	
8.839	0.092	1.146	0.839	7.226	0.638	
เฉลี่ย%error	23.604	0.095	0.780	1.527	10.350	1.904

ทำการทดสอบมอเตอร์กระแสล้าหลังที่แรงดันสเตเตอร์เท่ากับ 110% ของแรงดันพิกัด แรงดันเท่ากับ 253 Vrms กระแสสนาม 0.31 A แรงดันสนาม 120 V

ตารางที่ ก.22 แสดงค่าที่ได้จากเครื่องมือวัดที่ 110% ของแรงดันพิกัด (pf lagging)

load torque(N.m)	n(rpm)	Vrms(V)	Irms(A)	P(W)	S(VA)
0.520	1526	253.3	0.470	60.5	120.8
1.015	1528	253.7	0.536	84.7	135.6
1.530	1527	253.3	0.631	113.2	160.9
2.015	1528	253.3	0.725	138.3	183.5
2.505	1527	253.2	0.817	163.5	209.2
3.000	1527	253.2	0.925	187.8	235.1
3.505	1527	253.4	1.062	215.7	270.4
4.005	1527	252.9	1.185	239.5	298.8

ตารางที่ ก.23 แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณที่ 110% ของแรงดันพิกัด (pf lagging)

load torque(N.m)	n(rpm)	Vrms(V)	Irms(A)	P(W)	S(VA)
0.512	1526	255.427	0.479	50.408	122.350
0.916	1525.6	255.534	0.539	76.304	137.733
1.352	1525.6	255.431	0.629	103.790	160.666
1.694	1525.8	255.484	0.718	126.572	183.438
2.043	1525.4	255.052	0.815	149.249	207.867
2.361	1525.6	255.076	0.917	170.750	233.905
2.741	1525.4	255.102	1.051	196.794	268.112
3.058	1525.4	254.816	1.167	217.675	297.370

ตารางที่ ก.24 เปรียบเทียบค่าผิดพลาด (%error) ของตัวประมาณแรงบิดโหลดที่ 110% ของแรงดันพิกัด (pf lagging)

%error						
load torque(N.m)	n(rpm)	Vrms(V)	Irms(A)	P(W)	S(VA)	
1.538	0.000	0.840	1.915	16.681	1.283	
9.754	0.157	0.723	0.560	9.913	1.573	
11.634	0.092	0.841	0.317	8.313	0.145	
15.931	0.144	0.862	0.966	8.480	0.034	
18.443	0.105	0.731	0.245	8.716	0.637	
21.300	0.092	0.741	0.865	9.079	0.508	
21.797	0.105	0.672	1.036	8.765	0.846	
23.645	0.105	0.758	1.519	9.113	0.479	
เฉลี่ย%error	15.505	0.100	0.771	0.928	9.883	0.688

ก.5 ผลการทดสอบตัวประมาณแรงบิดโหลดที่ 120% ของแรงดันพิกัด

ทำการทดสอบมอเตอร์กระแสเหนี่ยวนำที่แรงดันสเตเตอร์เท่ากับ 120% ของแรงดันพิกัด แรงดันเท่ากับ 277 Vrms กระแสสนาม 0.6 A แรงดันสนาม 210 V

ตารางที่ ก.25 แสดงค่าที่ได้จากเครื่องมือวัดที่ 120% ของแรงดันพิกัด (pf leading)

load torque(N.m)	n(rpm)	Vrms(V)	Irms(A)	P(W)	S(VA)
0.500	1526	270.6	0.495	44.5	134.5
1.015	1529	270.4	0.551	69.7	149.3
1.530	1529	270.2	0.626	93.7	167.0
2.040	1529	269.7	0.711	119.7	192.4
2.520	1528	270.1	0.802	143.6	217.2
3.020	1528	270.2	0.897	173.0	241.1
3.525	1528	269.5	0.986	195.5	266.3
4.020	1528	269.9	1.210	226.6	322.0

ตารางที่ ก.26 แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณที่ 120% ของแรงดันพิกัด (pf leading)

load torque(N.m)	n(rpm)	Vrms(V)	Irms(A)	P(W)	S(VA)
1.251	1525.8	269.446	0.511	71.873	137.687
1.636	1525.6	269.255	0.565	95.841	152.129
1.982	1525.4	269.240	0.624	117.604	168.006
2.414	1526	268.719	0.717	143.348	192.672
2.813	1525.6	268.914	0.807	167.100	217.014
3.221	1525.6	269.226	0.895	191.320	240.957
3.573	1525.2	269.157	0.978	212.694	263.236
4.222	1525.4	268.600	1.183	247.848	317.754

ตารางที่ ก.27 เปรียบเทียบค่าผิดพลาด (%error) ของตัวประมาณแรงบิดโหลดที่ 120% ของแรงดันพิกัด (pf leading)

		%error				
load torque(N.m)	n(rpm)	Vrms(V)	Irms(A)	P(W)	S(VA)	
150.200	0.013	0.426	3.232	61.512	2.370	
61.182	0.222	0.423	2.541	37.505	1.895	
29.542	0.235	0.355	0.319	25.511	0.602	
18.333	0.196	0.364	0.844	19.756	0.141	
11.627	0.157	0.439	0.623	16.365	0.086	
6.656	0.157	0.360	0.223	10.590	0.059	
1.362	0.183	0.127	0.811	8.795	1.151	
5.025	0.170	0.482	2.231	9.377	1.319	
เฉลี่ย%error	35.491	0.167	0.372	1.353	23.676	0.953

ทำการทดสอบมอเตอร์กระแสสลับที่แรงดันสเตเตอร์เท่ากับ 120% ของแรงดันพิกัดแรงดันเท่ากับ 277 Vrms กระแสสนาม 0.31 A แรงดันสนาม 100 V

ตารางที่ ก.28 แสดงค่าที่ได้จากเครื่องมือวัดที่ 120% ของแรงดันพิกัด (pf lagging)

load torque(N.m)	n(rpm)	Vrms(V)	Irms(A)	P(W)	S(VA)
0.555	1526	270.3	0.678	57.3	183.7
1.040	1526	268.9	0.696	79.0	185.6
1.515	1528	271.1	0.743	103.2	201.3
2.020	1527	271.1	0.793	130.4	215.2
2.510	1526	270.6	0.858	152.2	232.0
3.010	1527	269.8	0.937	177.4	254.1
3.505	1526	269.3	1.040	206.0	272.6
4.005	1526	268.2	1.158	232.1	309.1

ตารางที่ ก.29 แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณที่ 120% ของแรงดันพิกัด (pf lagging)

load torque(N.m)	n(rpm)	Vrms(V)	Irms(A)	P(W)	S(VA)
0.062	1525.2	268.997	0.664	29.293	178.614
0.420	1525.6	267.047	0.677	51.345	180.791
0.686	1525.8	269.229	0.733	69.071	197.345
1.121	1525.2	270.087	0.781	96.610	210.938
1.437	1525.2	267.536	0.856	117.254	229.011
1.825	1525.6	269.055	0.927	141.667	249.414
2.258	1525.6	267.594	1.037	169.827	277.495
2.612	1525	268.089	1.141	194.546	305.890

ตารางที่ ก.30 เปรียบเทียบค่าผิดพลาด (%error) ของตัวประมาณแรงบิดโหลดที่ 120% ของแรงดันพิกัด (pf lagging)

%error						
load torque(N.m)	n(rpm)	Vrms(V)	Irms(A)	P(W)	S(VA)	
88.829	0.052	0.482	2.065	48.878	2.769	
59.615	0.026	0.689	2.730	35.006	2.591	
54.719	0.144	0.690	1.346	33.071	1.965	
44.505	0.118	0.374	1.513	25.913	1.980	
42.749	0.052	1.132	0.233	22.961	1.288	
39.369	0.092	0.276	1.067	20.143	1.844	
35.578	0.026	0.633	0.288	17.560	1.796	
34.782	0.066	0.041	1.468	16.180	1.038	
เฉลี่ย%error	50.018	0.072	0.540	1.339	27.464	1.909



ภาคผนวก ข

การพิสูจน์มุมแรงบิดและแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ข.1 การพิสูจน์หาค่า θ ในกรณีกระแสต้านหลังแรงดัน

$$\vec{E}'_0 = \vec{V} - \vec{I}R - j\vec{I}X_q \quad \text{โดยที่} \quad \vec{E}'_0 = |\vec{E}'_0| \angle 0^\circ ; \quad \vec{I} = |\vec{I}| \angle -\varepsilon = I_{rms} \angle -\varepsilon$$

$$\vec{V} = |\vec{V}| \angle \theta = V_{rms} \angle \theta$$

$$\Rightarrow |\vec{E}'_0| \angle 0^\circ = |\vec{V}| \angle \theta - R(|\vec{I}| \angle -\varepsilon) - jX_q (|\vec{I}| \angle -\varepsilon)$$

$$\Rightarrow |\vec{E}'_0| \angle 0^\circ = V_{rms} \angle \theta - R(I_{rms} \angle -\varepsilon) - jX_q (I_{rms} \angle -\varepsilon)$$

$$\Rightarrow |\vec{E}'_0| \angle 0^\circ = V_{rms} (1 \angle \theta) - RI_{rms} (1 \angle -\varepsilon) - jX_q I_{rms} (1 \angle -\varepsilon)$$

จากความสัมพันธ์ของมุม

$$\varphi = \varepsilon + \theta \quad \text{ดังนั้น} \quad (1 \angle -\varepsilon)(1 \angle -\theta) = 1 \angle -(\varepsilon + \theta) = 1 \angle -\varphi$$

\Rightarrow

$$|\vec{E}'_0| \angle 0^\circ = V_{rms} (1 \angle \theta) - RI_{rms} (1 \angle -\varepsilon)(1 \angle -\theta) - jX_q I_{rms} (1 \angle -\varepsilon)(1 \angle -\theta)(1 \angle \theta)$$

$$\Rightarrow |\vec{E}'_0| \angle 0^\circ = (V_{rms} - RI_{rms} \angle -\varphi - jX_q I_{rms} \angle -\varphi)(1 \angle \theta)$$

$$\Rightarrow |\vec{E}'_0| \angle 0^\circ = (V_{rms} - RI_{rms} \angle -\varphi - jX_q I_{rms} \angle -\varphi) \angle \theta$$

$$V_{rms} - RI_{rms} \angle -\varphi - jX_q I_{rms} \angle -\varphi = |V_{rms} - RI_{rms} \angle -\varphi - jX_q I_{rms} \angle -\varphi| \angle -\theta$$

$$\Rightarrow |\vec{E}'_0| \angle 0^\circ = (|V_{rms} - RI_{rms} \angle -\varphi - jX_q I_{rms} \angle -\varphi| \angle -\theta)(1 \angle \theta) \quad \because -\theta + \theta = 0$$

$$\Rightarrow |\vec{E}'_0| = |V_{rms} - RI_{rms} \angle -\varphi - jX_q I_{rms} \angle -\varphi|$$

$$\tan(-\theta) = \frac{\text{Im}(V_{rms} - RI_{rms} \angle -\varphi - jX_q I_{rms} \angle -\varphi)}{\text{Re}(V_{rms} - RI_{rms} \angle -\varphi - jX_q I_{rms} \angle -\varphi)} = \frac{I_{rms} (R \sin(\varphi) - X_q \cos(\varphi))}{V_{rms} - I_{rms} (R \cos(\varphi) + X_q \sin(\varphi))}$$

$$\Rightarrow \theta = -\tan^{-1} \left(\frac{I_{rms} (R \sin(\varphi) - X_q \cos(\varphi))}{V_{rms} - I_{rms} (R \cos(\varphi) + X_q \sin(\varphi))} \right)$$

$$\Rightarrow \theta = \tan^{-1} \left(\frac{I_{rms} (X_q \cos(\varphi) - R \sin(\varphi))}{V_{rms} - I_{rms} (R \cos(\varphi) + X_q \sin(\varphi))} \right)$$

$$V_{rms} - RI_{rms} \angle -\varphi - jX_q I_{rms} \angle -\varphi = V_{rms} - RI_{rms} (\cos(\varphi) - j \sin(\varphi)) - jX_q I_{rms} (\cos(\varphi) - j \sin(\varphi))$$

$$= V_{rms} - RI_{rms} \cos(\varphi) + jRI_{rms} \sin(\varphi) - jX_q I_{rms} \cos(\varphi) - X_q I_{rms} \sin(\varphi)$$

$$\Rightarrow \text{Re}(z) = V_{rms} - RI_{rms} \cos(\varphi) - X_q I_{rms} \sin(\varphi)$$

$$= V_{rms} - I_{rms} (R \cos(\varphi) + X_q \sin(\varphi))$$

$$\Rightarrow \text{Im}(z) = RI_{rms} \sin(\varphi) - X_q I_{rms} \cos(\varphi)$$

$$= I_{rms} (R \sin(\varphi) - X_q \cos(\varphi))$$

ข.2 การพิสูจน์หาค่า θ ในกรณีกระแสหน้าแรงดัน

$$\vec{E}'_0 = \vec{V} - \vec{I}R - j\vec{I}X_q \quad \text{โดยที่} \quad \vec{E}'_0 = |\vec{E}'_0| \angle 0^\circ ; \quad \vec{I} = |\vec{I}| \angle \varepsilon = I_{rms} \angle \varepsilon$$

$$\vec{V} = |\vec{V}| \angle \theta = V_{rms} \angle \theta$$

$$\Rightarrow |\vec{E}'_0| \angle 0^\circ = |\vec{V}| \angle \theta - R(|\vec{I}| \angle \varepsilon) - jX_q (|\vec{I}| \angle \varepsilon)$$

$$\Rightarrow |\vec{E}'_0| \angle 0^\circ = V_{rms} \angle \theta - R(I_{rms} \angle \varepsilon) - jX_q (I_{rms} \angle \varepsilon)$$

$$\Rightarrow |\vec{E}'_0| \angle 0^\circ = V_{rms} (1 \angle \theta) - RI_{rms} (1 \angle \varepsilon) - jX_q I_{rms} (1 \angle \varepsilon)$$

จากความสัมพันธ์ของมุม

$$\varphi = \varepsilon - \theta \text{ ดังนั้น } (1 \angle \varepsilon)(1 \angle -\theta) = 1 \angle (\varepsilon + (-\theta)) = 1 \angle \varphi$$

$$\Rightarrow |\vec{E}'_0| \angle 0^\circ = V_{rms} (1 \angle \theta) - RI_{rms} (1 \angle \varepsilon)(1 \angle -\theta) - jX_q I_{rms} (1 \angle \varepsilon)(1 \angle -\theta)(1 \angle \theta)$$

$$\Rightarrow |\vec{E}'_0| \angle 0^\circ = (V_{rms} - RI_{rms} \angle \varphi - jX_q I_{rms} \angle \varphi)(1 \angle \theta)$$

$$\Rightarrow |\vec{E}'_0| \angle 0^\circ = (V_{rms} - RI_{rms} \angle \varphi - jX_q I_{rms} \angle \varphi) \angle \theta$$

$$V_{rms} - RI_{rms} \angle \varphi - jX_q I_{rms} \angle \varphi = |V_{rms} - RI_{rms} \angle \varphi - jX_q I_{rms} \angle \varphi| \angle -\theta$$

$$\Rightarrow |\vec{E}'_0| \angle 0^\circ = (|V_{rms} - RI_{rms} \angle \varphi - jX_q I_{rms} \angle \varphi| \angle -\theta)(1 \angle \theta) \quad \because -\theta + \theta = 0$$

$$\Rightarrow |\vec{E}'_0| = |V_{rms} - RI_{rms} \angle \varphi - jX_q I_{rms} \angle \varphi|$$

$$\tan(-\theta) = \frac{\text{Im}(V_{rms} - RI_{rms} \angle \varphi - jX_q I_{rms} \angle \varphi)}{\text{Re}(V_{rms} - RI_{rms} \angle \varphi - jX_q I_{rms} \angle \varphi)} = -\frac{I_{rms} (R \sin(\varphi) + X_q \cos(\varphi))}{V_{rms} - I_{rms} (R \cos(\varphi) - X_q \sin(\varphi))}$$

$$\Rightarrow \theta = -\tan^{-1} \left(-\frac{I_{rms} (R \sin(\varphi) + X_q \cos(\varphi))}{V_{rms} - I_{rms} (R \cos(\varphi) - X_q \sin(\varphi))} \right)$$

$$\Rightarrow \theta = \tan^{-1} \left(\frac{I_{rms} (R \sin(\varphi) + X_q \cos(\varphi))}{V_{rms} - I_{rms} (R \cos(\varphi) - X_q \sin(\varphi))} \right)$$

$$V_{rms} - RI_{rms} \angle \varphi - jX_q I_{rms} \angle \varphi = V_{rms} - RI_{rms} (\cos(\varphi) + j \sin(\varphi)) - jX_q I_{rms} (\cos(\varphi) + j \sin(\varphi))$$

$$= V_{rms} - RI_{rms} \cos(\varphi) - jRI_{rms} \sin(\varphi) - jX_q I_{rms} \cos(\varphi) + X_q I_{rms} \sin(\varphi)$$

$$\Rightarrow \text{Re}(z) = V_{rms} - RI_{rms} \cos(\varphi) + X_q I_{rms} \sin(\varphi)$$

$$= V_{rms} - I_{rms} (R \cos(\varphi) - X_q \sin(\varphi))$$

$$\Rightarrow \text{Im}(z) = -RI_{rms} \sin(\varphi) - X_q I_{rms} \cos(\varphi)$$

$$= -I_{rms} (R \sin(\varphi) + X_q \cos(\varphi))$$

ข.3 การพิสูจน์หาค่าแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ (E_0) ในกรณีกระแสล้าหลังแรงดัน

$$\vec{E}_0 = |\vec{E}_0| \angle 0^\circ$$

$$\vec{I} = |\vec{I}| \angle -\varepsilon \quad \Rightarrow \quad \vec{I} = I_{rms} \angle -\varepsilon$$

$$\vec{V} = |\vec{V}| \angle \theta \quad \Rightarrow \quad \vec{V} = V_{rms} \angle \theta$$

$$\vec{I}_d = j|\vec{I}| \sin(-\varepsilon) \quad \Rightarrow \quad \vec{I}_d = -jI_{rms} \sin(\varepsilon)$$

$$\vec{I}_q = |\vec{I}| \cos(-\varepsilon) \quad \Rightarrow \quad \vec{I}_q = I_{rms} \cos(\varepsilon)$$

$$\vec{E}_0 = \vec{V} - \vec{I}R - jX_d \vec{I}_d - jX_q \vec{I}_q$$

$$\Rightarrow \vec{E}_0 \angle 0^\circ = |\vec{V}| \angle \theta - R|\vec{I}| \angle -\varepsilon - jX_d \vec{I}_d - jX_q \vec{I}_q$$

$$\Rightarrow \vec{E}_0 \angle 0^\circ = V_{rms} \angle \theta - RI_{rms} \angle -\varepsilon - jX_d (-jI_{rms} \sin(\varepsilon)) - jX_q I_{rms} \cos(\varepsilon)$$

$$\Rightarrow \vec{E}_0 \angle 0^\circ = V_{rms} \angle \theta - RI_{rms} \angle -\varepsilon - X_d I_{rms} \sin(\varepsilon) - jX_q I_{rms} \cos(\varepsilon)$$

$$\Rightarrow \vec{E}_0 \angle 0^\circ = V_{rms} (\cos(\theta) + j \sin(\theta)) - RI_{rms} (\cos(\varepsilon) - j \sin(\varepsilon)) - X_d I_{rms} \sin(\varepsilon) - jX_q I_{rms} \cos(\varepsilon)$$

$$\Rightarrow$$

$$\vec{E}_0 \angle 0^\circ = V_{rms} \cos(\theta) + jV_{rms} \sin(\theta) - RI_{rms} \cos(\varepsilon) + jRI_{rms} \sin(\varepsilon) - X_d I_{rms} \sin(\varepsilon) - jX_q I_{rms} \cos(\varepsilon)$$

$$|\vec{E}_0| + j(0) = V_{rms} \cos(\theta) - RI_{rms} \cos(\varepsilon) - X_d I_{rms} \sin(\varepsilon) + j(V_{rms} \sin(\theta) + RI_{rms} \sin(\varepsilon) - X_q I_{rms} \cos(\varepsilon))$$

$$\Rightarrow |\vec{E}_0| = V_{rms} \cos(\theta) - RI_{rms} \cos(\varepsilon) - X_d I_{rms} \sin(\varepsilon) \quad ; \varepsilon = \varphi - \theta$$

$$\therefore |\vec{E}_0| = V_{rms} \cos(\theta) - RI_{rms} \cos(\varphi - \theta) - X_d I_{rms} \sin(\varphi - \theta)$$

ข.4 หาค่าแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ (E_0) ในกรณีกระแสหน้าหน้าแรงดัน

$$\vec{E}_0 = |\vec{E}_0| \angle 0^\circ$$

$$\vec{I} = |\vec{I}| \angle \varepsilon \quad \Rightarrow \quad \vec{I} = I_{rms} \angle \varepsilon$$

$$\vec{V} = |\vec{V}| \angle \theta \quad \Rightarrow \quad \vec{V} = V_{rms} \angle \theta$$

$$\vec{I}_d = j|\vec{I}| \sin(\varepsilon) \quad \Rightarrow \quad \vec{I}_d = jI_{rms} \sin(\varepsilon)$$

$$\vec{I}_q = |\vec{I}| \cos(\varepsilon) \quad \Rightarrow \quad \vec{I}_q = I_{rms} \cos(\varepsilon)$$

$$\vec{E}_0 = \vec{V} - \vec{I}R - jX_d \vec{I}_d - jX_q \vec{I}_q$$

$$\Rightarrow \vec{E}_0 \angle 0^\circ = |\vec{V}| \angle \theta - R|\vec{I}| \angle \varepsilon - jX_d \vec{I}_d - jX_q \vec{I}_q$$

$$\Rightarrow \vec{E}_0 \angle 0^\circ = V_{rms} \angle \theta - RI_{rms} \angle \varepsilon - jX_d (jI_{rms} \sin(\varepsilon)) - jX_q I_{rms} \cos(\varepsilon)$$

$$\Rightarrow \vec{E}_0 \angle 0^\circ = V_{rms} \angle \theta - RI_{rms} \angle \varepsilon + X_d I_{rms} \sin(\varepsilon) - jX_q I_{rms} \cos(\varepsilon)$$

$$\Rightarrow \vec{E}_0 \angle 0^\circ = V_{rms} (\cos(\theta) + j \sin(\theta)) - RI_{rms} (\cos(\varepsilon) + j \sin(\varepsilon)) + X_d I_{rms} \sin(\varepsilon) - jX_q I_{rms} \cos(\varepsilon)$$

\Rightarrow

$$\vec{E}_0 \angle 0^\circ = V_{rms} \cos(\theta) + jV_{rms} \sin(\theta) - RI_{rms} \cos(\varepsilon) - jRI_{rms} \sin(\varepsilon) + X_d I_{rms} \sin(\varepsilon) - jX_q I_{rms} \cos(\varepsilon)$$

$$|\vec{E}_0| + j(0) = V_{rms} \cos(\theta) - RI_{rms} \cos(\varepsilon) + X_d I_{rms} \sin(\varepsilon) + j(V_{rms} \sin(\theta) - RI_{rms} \sin(\varepsilon) - X_q I_{rms} \cos(\varepsilon))$$

$$\Rightarrow |\vec{E}_0| = V_{rms} \cos(\theta) - RI_{rms} \cos(\varepsilon) + X_d I_{rms} \sin(\varepsilon) \quad ; \varepsilon = \varphi + \theta$$

$$\therefore |\vec{E}_0| = V_{rms} \cos(\theta) - RI_{rms} \cos(\varphi + \theta) + X_d I_{rms} \sin(\varphi + \theta)$$

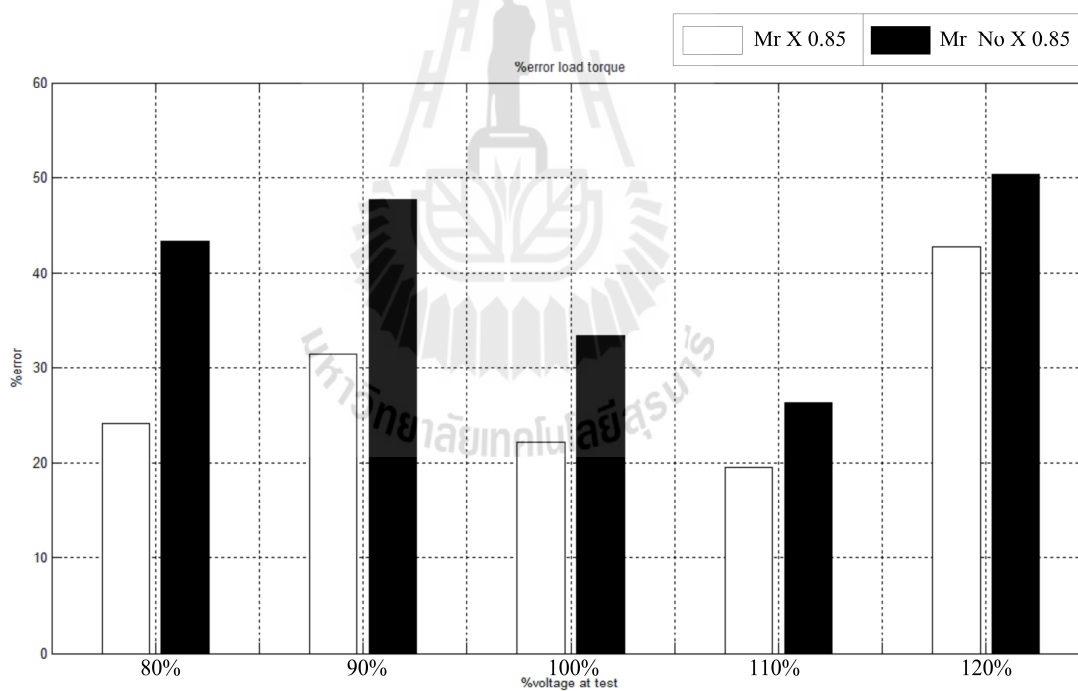


ภาคผนวก ค

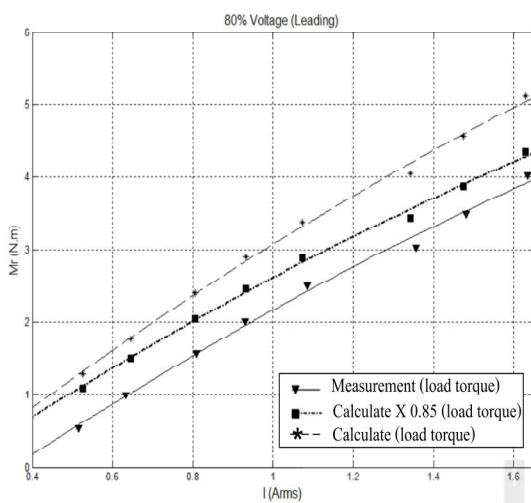
แสดงการปรับลดค่าผิดพลาดแรงบิดโหดโดยการปรับคุณภาพประสิทธิภาพ 0.85

ตารางที่ ค.1 เปรียบเทียบค่าค่าผิดพลาดจากการปรับคูน 0.85 และไม่ปรับคูน 0.85

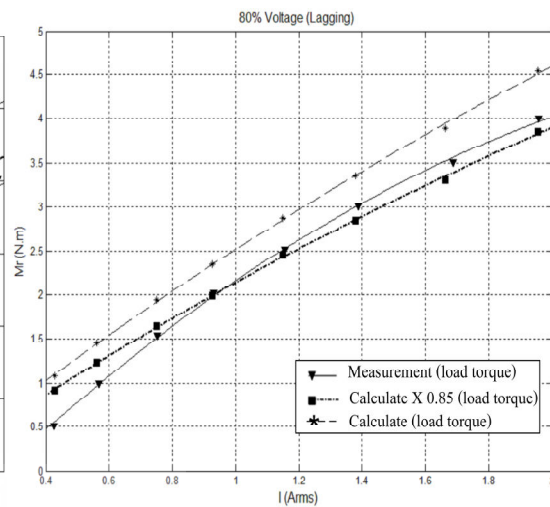
แรงดัน พิกัด	คูน 0.85			ไม่คูน 0.85		
	นำหน้า	ด้านหลัง	เฉลี่ย	นำหน้า	ด้านหลัง	เฉลี่ย
80%	32.107	16.163	24.135	55.420	31.231	43.326
90%	48.681	14.092	31.387	74.919	20.539	47.729
100%	31.647	12.657	22.152	54.878	11.892	33.385
110%	23.604	15.505	19.555	45.417	7.087	26.252
120%	35.491	50.018	42.755	59.401	41.198	50.300
	เฉลี่ย		27.997	เฉลี่ย		40.198



รูปที่ ค.1 เปรียบเทียบค่าผิดพลาดจากการปรับคูน 0.85 และไม่ปรับคูน 0.85 ในแต่ละแรงดันพิกัด

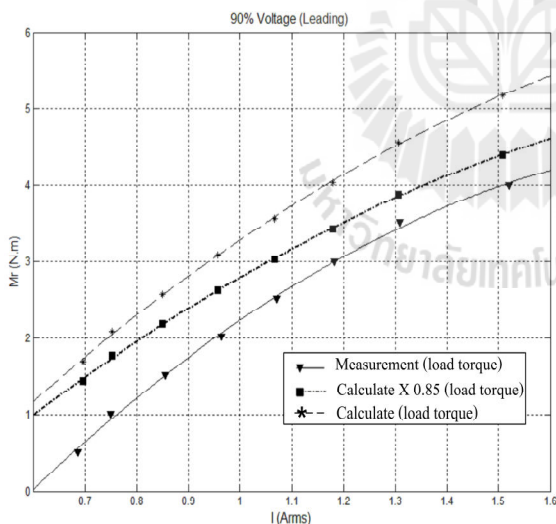


(ก) การทดสอบที่กระแสนำหน้าแรงดัน

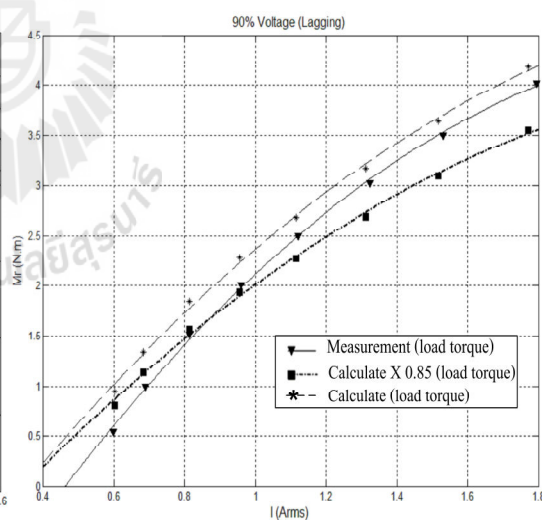


(ข) การทดสอบที่กระแสล่าหลังแรงดัน

รูปที่ ค.2 เปรียบเทียบค่าแรงบิดโหลดจากการปรับคุณภาพประสิทธิภาพ 0.85 และไม่มีการปรับคุณภาพที่ 80% ของแรงดันพิกัด

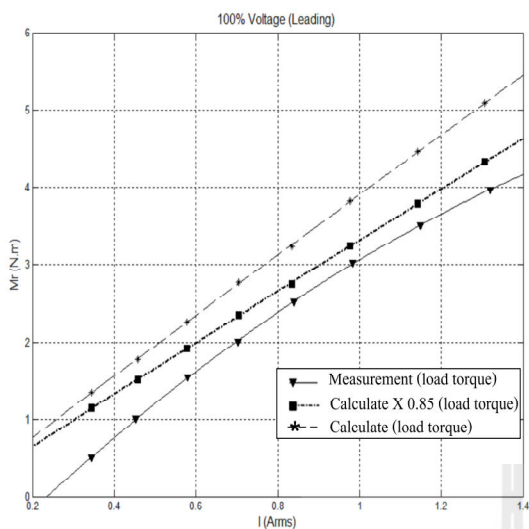


(ก) การทดสอบที่กระแสนำหน้าแรงดัน

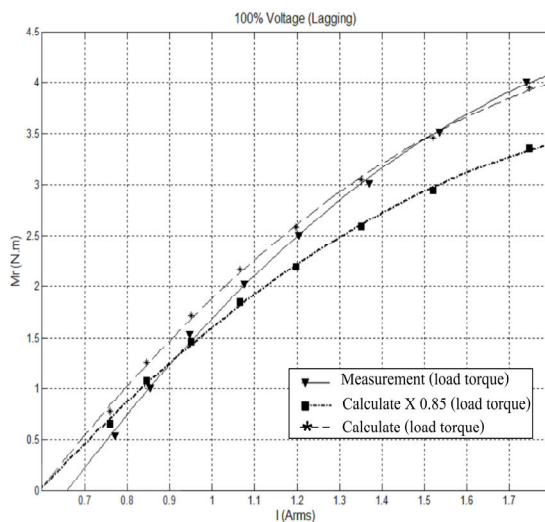


(ข) การทดสอบที่กระแสล่าหลังแรงดัน

รูปที่ ค.3 เปรียบเทียบค่าแรงบิดโหลดจากการปรับคุณภาพประสิทธิภาพ 0.85 และไม่มีการปรับคุณภาพที่ 90% ของแรงดันพิกัด

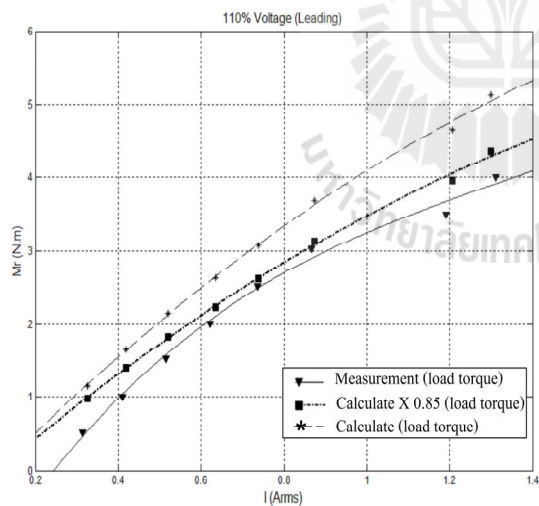


(ก) การทดสอบที่กระแสนำหน้าแรงดัน

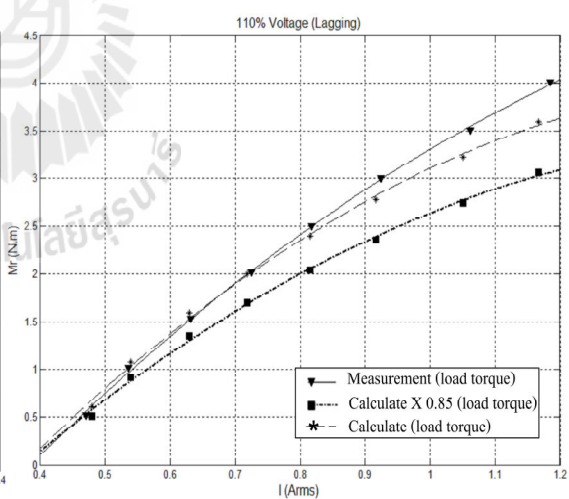


(ข) การทดสอบที่กระแสล่าหลังแรงดัน

รูปที่ ค.4 เปรียบเทียบค่าแรงบิดโหลดจากการปรับคุณภาพประสิทธิภาพ 0.85 และไม่มีการปรับคณที่ 100% ของแรงดันพิกัด

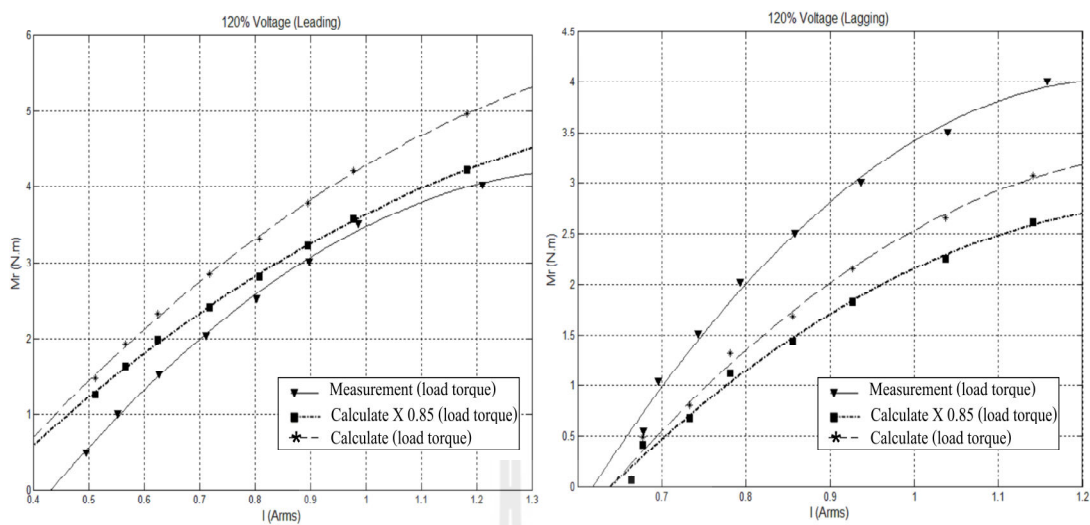


(ก) การทดสอบที่กระแสนำหน้าแรงดัน



(ข) การทดสอบที่กระแสล่าหลังแรงดัน

รูปที่ ค.5 เปรียบเทียบค่าแรงบิดโหลดจากการปรับคุณภาพประสิทธิภาพ 0.85 และไม่มีการปรับคณที่ 110% ของแรงดันพิกัด



(ก) การทดสอบที่กระแสหน้าแรงดัน

(ข) การทดสอบที่กระแสหลังแรงดัน

รูปที่ ๖.๖ เปรียบเทียบค่าแรงบิดไหลจากการปรับคุณภาพประสิทธิภาพ 0.85 และไม่มีการปรับคุณภาพที่ 120% ของแรงดันพิกัด



ภาคผนวก ง

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ขณะศึกษา

Aumpa Sarasiri, Sarawut Sujitjorn and Wirote Sangtungong. (2012). A Load-Torque Estimator for Synchronous Motors. **Archives Des Sciences**. 65(10). pp: 10-20.



A Load-Torque Estimator for Synchronous Motors

Aumpa Sarasiri¹, Sarawut Sujitjorn² and Wirote Sangtungong¹

¹School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology

²Synchrotron Light Research Institute (Public Organization)

111 University Avenue, Muang District, Nakhon Ratchasima, Thailand, 30000

E-mail: ¹aumpasa@hotmail.com, ¹cewirote@sut.ac.th and ²sarawut.sujitjorn@slri.or.th

The research is financed by Suranaree University of Technology.

Abstract

Torque measuring instrument is very important in industry due to intensed use of electrical motors. No matter the types of motors, the torque instrument is quite costly. To replace this costly instrument, a load-torque estimator is proposed for salient-pole synchronous motors (SPSM) widely used in small and medium industries. The proposed estimator provides very accurate steady-state load torque estimation. The estimation process utilizes steady-state models of the SPSM together with a two-layer neural network for error minimization. The estimator is coded in C for 32-bit ARM Cortex CPU, and interfaced with MATLAB run on a PC. Experimental results confirm the practicality of the proposed estimator.

Key-Words: salient-pole synchronous motors (SPSM), load-torque estimator, neural network.

Notation list:

I	armature current (A_{rms})	φ	phase difference between I and V or power factor angle
I_d	direct-axis current (A_{rms})	ω	electrical angular speed equal to $2\pi f$ (rad/sec)
I_q	quadrature-axis current (A_{rms})	Ω	mechanical angular speed equal to $2\pi n / 60$ (rad/sec)
I_f	field current (A)	f	frequency (Hz)
V	voltage (V_{rms})	ρ	pole pairs equal to $P/2$; when P is number poles
E_0	voltage back emf (V_{rms})	n	synchronous speed (rpm)
R	armature resistance (Ω)	M_e	electromagnetic torque (Nm)
X_d	d -axis reactance (Ω)	M_r	load torque (Nm)
X_q	q -axis reactance (Ω)	M_m	mechanical resistant torque (Nm)
θ	phase difference between E_0 and V or torque angle		
ε	phase difference between E_0 and I		

1. Introduction

Torque measurement is necessary for industrial drive in which force or torque control is aimed for. Unfortunately, torque measuring instrument is costly. This situation pushes engineering design and

development to seek for accurate and reliable torque observer or estimator. Such estimators have been developed widely for asynchronous and dc motors. While synchronous motors (SM) are also commonly used in industry, not many reports found in literature present the development of torque estimators for SMs. Although there are a few types of SMs available, this work considers salient-pole synchronous motor (SPSM) as it has been worldwide used in small and medium industries where high speed is not required. As early as 1968, Henricus and Jong attempted to formulate accurate models for SPSMs (Henricus & Jong, 1968). The models were computationally useful for estimating torque. However, due to flux leakage was not properly considered, torque estimation results were erroneous. Joseph and Thomas (Joseph & Thomas, 1989) proposed an improved model under saturation condition. The model was accurate for starting period, and not suitable for torque estimation during steady-state period. Volt-second-ampere method for estimating electromagnetic torque of a SPSM was proposed in (Ojo et al., 1990). Unfortunately, experimental results did not agree well with theoretical ones. Estimating maximum and dynamic torque of a SPSM was possible, while accuracy was limited to low speed (Pyrhonen et al., 1998). Later in 2004 (Masoud et al., 2004), motor models were shifted to ones based-on dq-axis framework. Noticeably, accuracy of torque estimation was improved (Masoud et al., 2004; Sergelen, 2007).

This work attempts to provide an alternative for steady-state load-torque estimation of a SPSM based-on dq models. Our proposed estimator will be particularly useful for sensorless drive and many other industrial applications. We review the motor models in Section 2. Section 3 presents identification of motor parameters. Implementation of our proposed technology is described in Section 4. We show by experiments that using model-based estimation alone results in a great amount of errors. Incorporating an artificial neural network (ANN) as an error corrector brings about very accurate estimation. Practical results are presented in Section 5. Section 6 provides conclusion.

2. Steady-State Models of a SPSM

A Salient-pole synchronous motor (SPSM) is considered by this work due to its widely use in small and medium-size enterprises. The SPSM provides a moderate speed, and operates in either leading or lagging power factor regimes. Figure 1 depicts a simplified diagram of this type of motors with two poles. To start the motor needs variable frequency ac excitation for armature (stator). It also needs another dc excitation for supplying field circuit (rotor). When the field current (I_f) is in phase with the armature current (I) and the motor input voltage (V), a SPSM operates with unity power factor. With an increase in I_f till the back emf (E_0) is greater than the voltage V , a SPSM operates with leading power factor, i.e. I leads V . On the other hand, I lags V or lagging power factor operation occurs when I_f is decreased till the back emf E_0 is less than the voltage V . Figures 2 and 3 depict the phasor diagrams for leading and lagging operational regimes, respectively. The former case is considered as "over" excitation, while "under" excitation for the latter (Fransua & Magureanu, 1984; Toliyat & Kliman, 2004; Kothari & Nagrath, 1985).

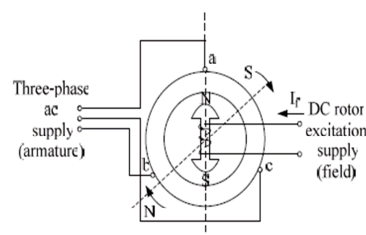


Figure 1. Simplified diagram of a SPSM.

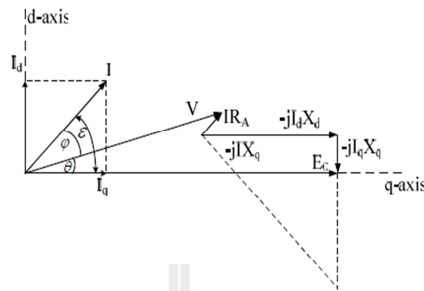


Figure 2. Phasor diagram (leading *pf* case).

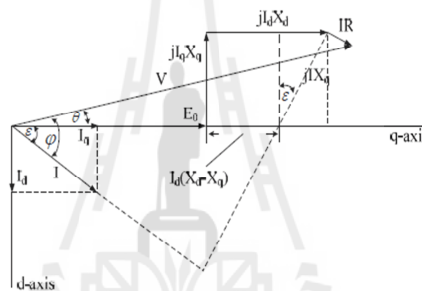


Figure 3. Phasor diagram (lagging *pf* case).

To estimate load torque of a SPSM requires accurate steady-state models of the motor with parameters. The corresponding model is reviewed as follows.

The mechanical speed and the load torque of a SPSM are expressed fundamentally as

$$\Omega = \frac{2\omega}{P} \tag{1}$$

and

$$M_r = M_e - M_m \tag{2}$$

, respectively. Such mechanical quantities correspond to the stator electrical power expressed as

$$P = P_d + P_q \tag{3}.$$

d and q in the above expression represent direct and quadrature components, respectively. Referring to the phasor diagrams in figures 2 and 3, one can obtain the d and q currents as

$$I_d = \frac{E_0 - V \cos \theta}{X_d} \quad (4)$$

$$I_q = \frac{V \sin \theta}{X_q} \quad (5)$$

Since 3-phase average power is

$$P = 3VI_d \sin \theta + 3VI_q \cos \theta \quad (6)$$

according to I_d and I_q in (4) and (5), one can rewrite the average power as

$$P = 3 \left[\frac{E_0 V}{X_d} \sin \theta + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) V^2 \sin 2\theta \right] \quad (7)$$

Actually, the power in (7) is $P = M_e \Omega$, i.e. $M_e = P / \Omega$. Therefore,

$$M_e = \frac{3}{\Omega} \left[\frac{E_0 V}{X_d} \sin \theta + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) V^2 \sin 2\theta \right] \quad (8) \text{ (Fransua \& Magureanu, 1984).}$$

The mechanical load torque can be expressed by

$$M_r = 0.85(M_e - M_m) \quad (9)$$

where the resistant torque (M_m) is

$$M_m = M_e - (3IV \cos \varphi) \quad (10)$$

The constant 0.85 in the above expression represents motor efficiency (motor power \leq 2-3 kw) (Toliat & Kliman, 2004).

The steady-state models reviewed so far will be used in estimation process for the load torque M_r . This will be described in section 4.

3. Motor parameters

To utilize the motor models presented in section 2 needs to know the motor armature resistance (R), and the d, q reactances (X_d and X_q). These parameters can be calculated from

$$R(ac) = 1.6 \times R(dc) \quad (11)$$

$$X_d = \frac{V_t(at I_a(\min))(line)}{\sqrt{3} I_a(\min)} \quad (12)$$

$$X_q = \frac{V_t(at I_a(\max))(line)}{\sqrt{3} I_a(\max)} \quad (13) \text{ (Kothari & Nagrath, 1985).}$$

We applied a conventional slip test for a SPSM of LUCAS-NULLE (1500 rpm, 1 kW, $1.6 A_{rms}$, $230 V_{rms}$ (stator), $220 V_{dc}$, $0.6 A_{dc}$ (field), type SE2662-5M). Figure 4 illustrates recorded voltage and current waveforms during 0.5 s.

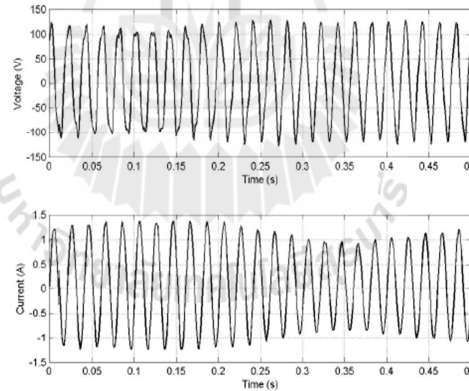


Figure 4. Tested results for obtaining motor's ohmic values.

We can obtain required values for the equations (11)-(13) from the recorded waveforms. Therefore, we obtain the following ohmic parameters of the motor: $R = 4.736 \Omega$, $X_d = 80.327 \Omega$ and $X_q = 40.150 \Omega$.

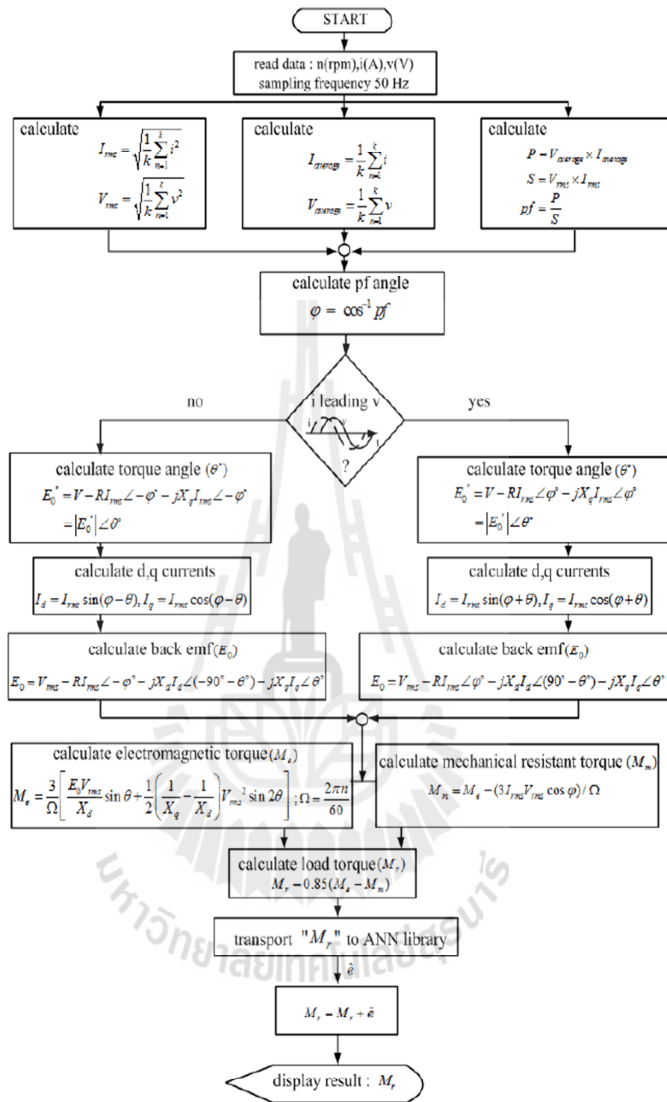


Figure 6. Flow diagram representation of the proposed estimator.

usefulness has been worldwide accepted (Irwin et al., 1995). Forward ANN applied by this work can be represented by the diagram in figure 7 for a multi-layer type. While weight and bias are set equal to 1, our ANN error corrector contains 2 layers and 8 inputs, i.e. motor speed, rms phase voltage, rms armature

current, leading or lagging phases, power factor, electromagnetic torque, mechanical resistant torque and first estimated load torque. The ANN has one output which is estimation error ($\hat{\theta}$) to be minimized. Its first layer employs 30 neurons with sigmoid transfer function. One neuron with linear transfer function appears in the second layer. Experimental results and discussions are presented next.

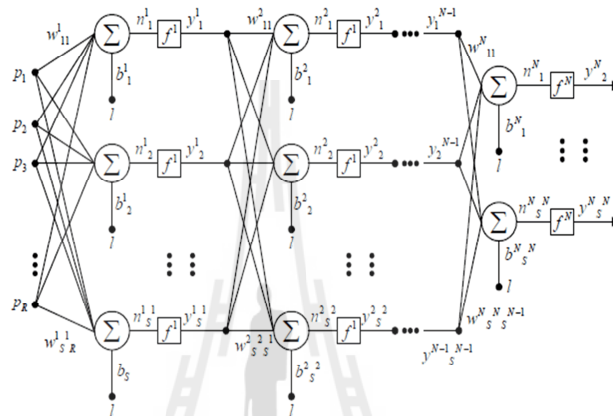
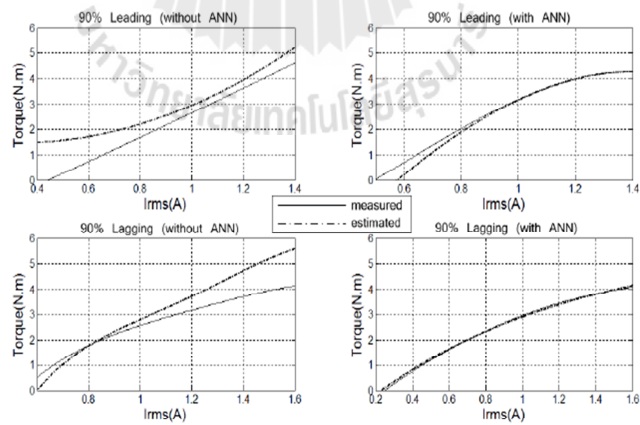
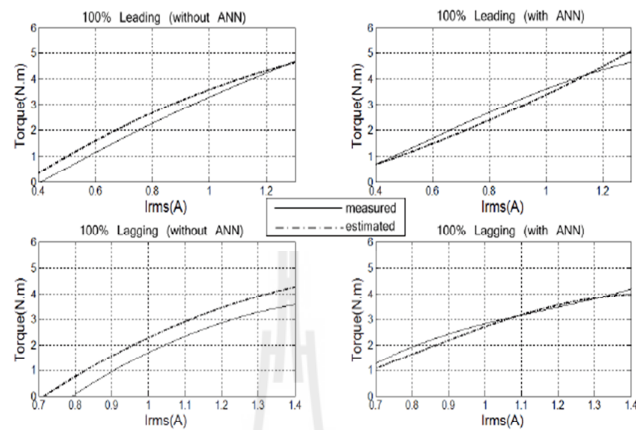


Figure 7. Multi-layer forward ANN.

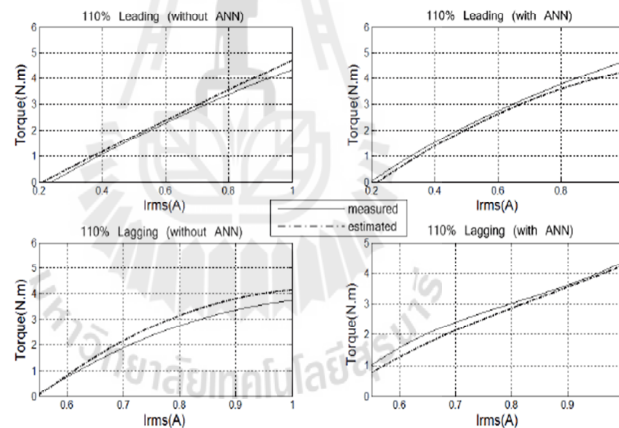
5. Results and Discussions



(a) motor input voltage = 90% rated voltage



(b) motor input voltage = 100% rated voltage



(c) motor input voltage = 110% rated voltage

Figure 8. Experimental results for different excitation voltages.

Some of experimental results are illustrated in figures 8(a)-(c). In each subplot, there are four insets. The upper two insets display the results of leading operations with and without ANN error corrector. Similar arrangement appears in the lower insets, but for lagging operations. The figure gathers the results for 90, 100 and 110 percent rated voltage excitations. The curves show similar trends in that very satisfactory results are obtained from our proposed estimator with ANN error corrector.

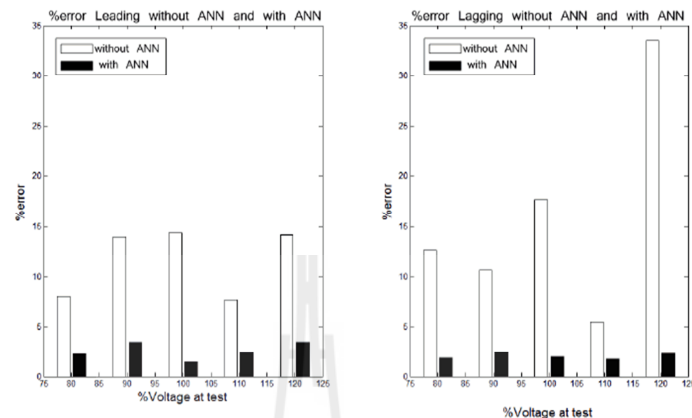


Figure 9. Comparisons of estimation errors.

Figure 9 shows bar graphs summarizing load-torque estimation errors for leading and lagging operations with and without ANN error correctors. The non-coloured bars indicate errors for the case without ANN. For percent excitation in the range of 80-120%, the average estimation error is 13.792% and 2.333% for the cases without and with ANN error correctors, respectively. This indicates that our proposed load-torque estimator is practically useful, and provides estimation errors within 2.5%

6. Conclusion

A load-torque estimator for salient-pole synchronous motor (SPSM) is proposed by this paper. Torque estimation errors are reduced by using an ANN. As a result, an accurate load-torque estimator is obtained. It provides very uniform estimation errors bounded within 2.5%. An actual estimator is implemented in C running on an ARM Cortex 32-bit CPU, 72 MHz. Estimation results can be obtained in real-time. Experiments based on a 1 kW SPSM with 80-120% excitation confirm the practicality of the proposed estimator.

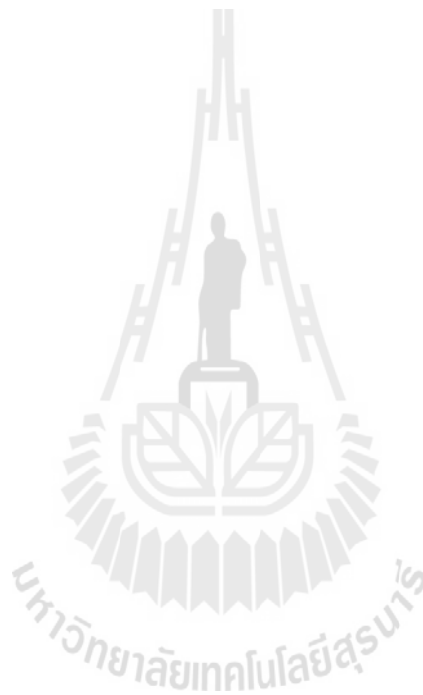
References

- Fransua A. and Magureanu R. (1984). *Electrical Machines and Drive Systems*. Technical Press. Oxford, England.
- Henricus C.J. and Jong D. (1968). Starting Performance of Synchronous Motors with Laminated Salient Poles. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. 87(4), 1083-1098.
- Irwin G.W., Warwick K. and Hunt K. J. (1995). *Neural Network Applications in Control*. Short Run Press Ltd., England.
- Joseph O.O. and Thomas A.L. (1989). An Improved Model for Saturated Salient Pole Synchronous Motors. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 4(1), 135-142.
- Kothari D.P. and Nagrath I.J. (1985). *Electric Machines*. (3rd ed). Tata McGraw-Hill, Upper Saddle River.
- Masoud M.I., Fletcher J.E., and William B.W. (2004). Performance Evaluation of Decoupled Control of Rotor Torque and Rotor Electric Power in a Salient Pole Synchronous Machine. *IET Conferences and Second International Conference on Power Electronics Machines and Drives*. 2, 691-696.
- Ojo J.O., Ostovic V., Lipo T.A. and White J.C. (1990). Measurement and Computation of Starting Torque Pulsations of Salient Pole Synchronous Motors. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 5(1), 176-182.

Pyrhonen O., Niemela M., Pyrhonen J. and Kaukonen J. (1998). Excitation Control of DTC Controlled Salient Pole Synchronous Motor in Field Weakening Range. *IEEE Conferences and International Workshop on Advanced Motion Control*, 294-298.

Sergelen B. (2007). Mathematical Model of Salient Pole Synchronous Motors Supplied by a Frequency Converter. *IEEE Conferences International Forum on Strategic Technology*, 390-393.

Toliyat H.A. and Kliman G.B.. (2004). *Handbook of Electric Motors*. (2nd ed). Marel Dekker Inc., United States of America.



ประวัติผู้เขียน

นางสาวอำภา สาระศิริ เกิดเมื่อวันที่ 10 กันยายน พ.ศ. 2529 เริ่มศึกษาระดับชั้นประถมศึกษาจากโรงเรียนวัดคู้เกษมสโมสร ชั้นมัธยมศึกษาจากโรงเรียนตักศิลา จังหวัดฉะเชิงเทราและสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปีการศึกษา พ.ศ. 2551 โดยหลังจากสำเร็จการศึกษาได้รับใบอนุญาตเป็นผู้ประกอบวิชาชีพวิศวกรรมควบคุม ระดับภาคีวิศวกร สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง

ปี พ.ศ.2552 เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยขณะศึกษาได้ทำหน้าที่เป็นผู้สอนปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จำนวน 3 รายวิชา ได้แก่ ปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้า 2 ปฏิบัติการระบบควบคุม และปฏิบัติการวงจรและอุปกรณ์ ในระหว่างการทำวิจัยวิทยานิพนธ์ผู้วิจัยมีความสนใจในงานด้าน มอเตอร์ไฟฟ้า ระบบควบคุม และการประยุกต์ทางด้านปัญญาประดิษฐ์

