

การควบคุมมอเตอร์เชิงโรตารีชนิดแม่เหล็กถาวรภายในแบบไร้เซ็นเซอร์วัดตำแหน่งที่อาศัย
แนวคิดฟลักซ์ขยาย

นางสาว สุรัสวดี กุลบุญ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-5061-7

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**A POSITION-SENSORLESS CONTROL OF INTERIOR PERMANENT MAGNET
SYNCHRONOUS MOTORS BASED ON EXTENDED FLUX CONCEPT**

Miss Suratsavadee Koonlaboon

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

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2003

ISBN 974-17-5061-7

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การควบคุมมอเตอร์เชิงโรตารีชนิดแม่เหล็กถาวรภายในแบบไร้เซ็นเซอร์
วัดตำแหน่งที่อาศัยแนวคิดฟลักซ์ขยาย

โดย

นางสาว สุรัสวดี กุลบุญ

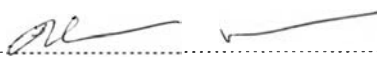
สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษา


อาจารย์ ดร. สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ยุทธนา กุลวิต)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร. สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เดวิด บรรเจิดพงศ์ชัย)

สุรัสวดี กุลบุญ : การควบคุมมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรภายในแบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งที่อาศัยแนวคิดฟลักซ์ขยาย (A POSITION-SENSORLESS CONTROL OF INTERIOR PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTORS BASED ON EXTENDED FLUX CONCEPT) อ. ที่ปรึกษา : อ. ดร. สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์ , 89 หน้า. ISBN 974-17-5061-7

เนื่องจากแบบจำลองทางพลวัตของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรภายในที่ใช้กันโดยทั่วไปมีความไม่เชิงเส้นจึงทำให้เกิดปัญหาในการสร้างระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรภายในไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง ดังนั้นจุดมุ่งหมายหลักของวิทยานิพนธ์นี้คือ การนำเสนอแบบจำลองทางพลวัตของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรภายในแบบใหม่ที่มีลักษณะเป็นเชิงเส้น โดยการนิยามฟลักซ์ขยายขึ้นเป็นตัวแปรสถานะแทนฟลักซ์จากแม่เหล็กถาวร และสร้างระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรภายในไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งรูปแบบใหม่โดยใช้ตัวสังเกตเต็มอันดับแบบปรับตัวในการประมาณค่าตำแหน่งโรเตอร์ เนื่องจากระบบที่นำเสนอเป็นแบบเชิงเส้นจึงง่ายต่อการวิเคราะห์เสถียรภาพและการออกแบบอัตราขยายป้อนกลับของตัวสังเกต นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้นำเสนอการควบคุมเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วม และบูรณาการตัวสังเกตเต็มอันดับแบบปรับตัวเข้ากับการควบคุมเวกเตอร์ จะทำให้ลดความซับซ้อนของแบบจำลองได้ ในการวิเคราะห์เสถียรภาพและสมรรถนะของระบบประมาณนั้น ผู้วิจัยได้ใช้วิธีเชิงพารามิเตอร์ในการวิเคราะห์โดยแปลงระบบประมาณไปบนแกนอ้างอิงหมุนของฟลักซ์ประมาณ ทำให้ได้บล็อกไดอะแกรมในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบประมาณเป็นลักษณะเข้าเดี่ยวออกเดี่ยว ซึ่งสามารถใช้ Routh-Hurwitz Criterion ในการระบุเสถียรภาพของระบบประมาณได้โดยง่าย ผลการจำลองการทำงานและผลการทดลองยืนยันความถูกต้องของผลทางทฤษฎีทั้งหมดที่พัฒนาขึ้น

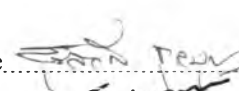
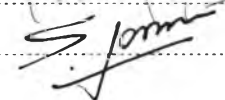
ภาควิชา..... วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อนิสิต.....
 สาขาวิชา..... วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
 ปีการศึกษา..... 2546.....

4470618921 : MAJOR POWER ELECTRONICS

KEY WORD : POSITION-SENSORLESS / INTERIOR PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS
MOTOR / EXTENDED FLUX

SURATSAVADEE KOONLABOON : A POSITION-SENSORLESS CONTROL OF INTERIOR
PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTORS BASED ON EXTENDED FLUX
CONCEPT. THESIS ADVISOR : SOMBOON SANGWONGWANICH, D.Eng. 89 pp. ISBN 974-
17-5061-7.

Since the conventional dynamic model of the interior permanent magnet synchronous motor (IPMSM) is nonlinear, it leads to difficulties in the development of position-sensorless IPMSM drives. In this thesis, a new linear dynamic model of IPMSM is proposed based on an extended flux concept which is newly introduced as a state variable in place of the conventional flux of the permanent magnet. The extended flux as well as the rotor speed are then estimated by an adaptive full-order observer. Owing to the linearity of the new model, stability analysis of the proposed system and feedback gain design of the observer become simple and straight forward. Additionally, a decoupling vector control for the IPMSM is developed and integrated with the adaptive observer to eliminate the model redundancy and reduce the controller complexity. The parametric approach is adopted in the analysis of stability and tracking performance of the adaptive observer by transforming the estimation system onto the estimated flux reference frame to be a single-input-single-output system whose stability can be analyzed using the Routh-Hurwitz criterion. Simulation and experimental results are given to show the validity of the proposed sensorless control system.

Department ELECTRICAL ENGINEERING Student's signature 
Field of study ELECTRICAL ENGINEERING Advisor's signature 
Academic year 2003



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความช่วยเหลือและเอาใจใส่อย่างดียิ่งของ อาจารย์ ดร. สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือด้านต่างๆที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัยและการดำเนินชีวิตตลอดมา ท่านอาจารย์ทั้งหลายที่ให้วิชาความรู้ตั้งแต่อดีตจนกระทั่งปัจจุบัน มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ ที่ได้มอบทุนโครงการพัฒนาอาจารย์ ทำให้ข้าพเจ้าได้ศึกษาในสถาบันแห่งนี้ ตลอดจนถึงบริษัท เอ.พี.วาย เอ็นจิเนียริ่ง จำกัด ที่ได้ให้ความช่วยเหลือทางด้านอุปกรณ์และเครื่องมือในการทำวิจัย รวมทั้งพี่สาคร โพธิ์งาม ที่ได้คำแนะนำและวิธีแก้ปัญหาต่างๆในงานวิจัย จึงขอกราบขอบพระคุณทุกท่านอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และญาติพี่น้องของข้าพเจ้า ผู้ซึ่งให้โอกาสทางการศึกษาและเป็นกำลังใจด้วยดีเสมอมา

สารบัญเรื่อง

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญเรื่อง.....	ช
สารบัญภาพ.....	ฅ
สารบัญตาราง.....	ฉ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเบื้องต้น.....	2
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตวิทยานิพนธ์.....	2
1.4 ขั้นตอนในการดำเนินงาน.....	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	3
2 แบบจำลองพลวัตของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรภายในที่เป็นเชิงเส้น.....	4
2.1 แบบจำลองพลวัตของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรภายในที่ไม่เป็นเชิงเส้น.....	4
2.2 แบบจำลองพลวัตของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรภายในที่เป็นเชิงเส้น.....	7
3 การควบคุมเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วม.....	11
3.1 ทฤษฎีการควบคุมเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วม.....	11
3.2 ผลการจำลองการทำงานและผลการทดสอบสมรรถนะของระบบควบคุมแบบแยกการเชื่อมร่วม.....	16
4 ตัวสังเกตเต็มอันดับสำหรับมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรภายใน.....	23
4.1 ตัวสังเกตเต็มอันดับ.....	23
4.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพของตัวสังเกตเต็มอันดับ.....	25
4.3 การบูรณาการตัวสังเกตกับการควบคุมแบบแยกการเชื่อมร่วม.....	25
4.4 ผลจำลองการทำงานและผลการทดสอบสมรรถนะของระบบประมาณค่าฟลักซ์และตำแหน่งด้วยตัวสังเกตเต็มอันดับ.....	30
5 ทฤษฎีการควบคุมมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรภายในแบบเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง.....	38
5.1 ตัวสังเกตเต็มอันดับแบบปรับตัว.....	38

สารบัญเรื่อง(ต่อ)

บทที่	หน้า
5.2 การบูรณาการตัวสังเกตแบบปรับตัวกับการควบคุมเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วม.....	39
5.3 เสถียรภาพและการออกแบบระบบประมาณค่าความเร็ว.....	42
5.3.1 สมการค่าผิดพลาดในการประมาณ.....	42
5.3.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพบนแกนอ้างอิงพ्लักซ์ประมาณด้วยวิธีเชิงพารามิเตอร์.....	44
5.3.3 การออกแบบอัตราขยายป้อนกลับ(H_2).....	47
5.3.4 การออกแบบอัตราขยายการปรับตัว.....	48
5.4 ผลจำลองการทำงานและผลการทดสอบสมรรถนะของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบ ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งและความเร็ว.....	51
6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	62
รายการอ้างอิง.....	65
ภาคผนวก.....	66
ภาคผนวก ก โครงสร้างฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ของระบบ.....	67
ภาคผนวก ข ฟังก์ชันโอนย้าย $G(s)$ บนแกนอ้างอิงหมุนของพ्लักซ์ประมาณ.....	72
ภาคผนวก ค เงื่อนไขที่จำเป็นและเพียงพอสำหรับขั้วของตัวสังเกตที่มีเสถียรภาพ.....	75
ภาคผนวก ง วิธีการตรวจจับตำแหน่งเชิงมุมของแม่เหล็กถาวร.....	78
ภาคผนวก จ วิธีการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ซึ่งโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร ภายใน.....	81
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	89

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรภายใน.....	4
2.2 การอ้างอิงสเปซเวกเตอร์กระแสและแรงดันบนแกนอ้างอิงสเตเตอร์และแกนอ้างอิงโรเตอร์.....	7
3.1 หลักการควบคุมแรงบิดของการควบคุมแบบเวกเตอร์.....	11
3.2 ระบบควบคุมเวกเตอร์โดยทั่วไปที่ใช้วงรอบควบคุมกระแสที่มีแบนด์วิดธ์สูง.....	12
3.3 โครงสร้างของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบแรงดันโดยอาศัยการควบคุมแยกการเชื่อมร่วม..	15
3.4 ระบบควบคุมความเร็วด้วยตัวควบคุมเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วม.....	16
3.5 ผลการจำลองการทำงานขณะกลับทิศความเร็วจาก -1000 ไป 1000 rpm เมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วม.....	18
3.6 ผลการจำลองการทำงานเมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วมในกรณีเปลี่ยนแปลงความเร็วคำสั่งในช่วงแคบ (รูปคลื่นความเร็วและกระแสสร้างแรงบิด).....	18
3.7 ผลการจำลองการทำงานเมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วมในกรณีเปลี่ยนแปลงความเร็วคำสั่งในช่วงแคบจาก 500 ไป 600 rpm (รูปคลื่นตำแหน่งและกระแส).....	19
3.8 ผลการทดลองในสภาวะอยู่ตัวเมื่อความเร็วคำสั่งมีค่าเท่ากับ 1000 rpm เมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วม (รูปคลื่นกระแสและตำแหน่ง).....	20
3.9 ผลการทดลองในสภาวะอยู่ตัวเมื่อความเร็วคำสั่งมีค่าเท่ากับ 100 rpm เมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วม (รูปคลื่นกระแสและตำแหน่ง).....	20
3.10 ผลการทดลองขณะกลับทิศความเร็วจาก -1000 ไป 1000 rpm เมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วม (รูปคลื่นความเร็วและกระแสสร้างแรงบิด).....	21
3.11 ผลการทดลองเมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วมในกรณีเปลี่ยนแปลงความเร็วคำสั่งในช่วงแคบ (รูปคลื่นความเร็วและกระแสสร้างแรงบิด).....	21
3.12 ผลการทดลองเมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วมในกรณีเปลี่ยนแปลงความเร็วคำสั่งในช่วงแคบจาก 500 ไป 600 rpm (รูปคลื่นตำแหน่งและกระแส).....	22
4.1 แบบจำลองของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรภายใน เมื่อแกน d ชี้ในแนว \hat{p} ...	24
4.2 ภาพรวมการทำงานของตัวสังเกตแบบเต็มอันดับ.....	24
4.3 บล็อกไดอะแกรมโดยรวมหลังบูรณาการตัวสังเกตเข้ากับระบบควบคุมเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วม.....	29

สารบัญญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4 ระบบควบคุมความเร็วที่ใช้ระบบใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วมที่มีการประมาณค่าฟลักซ์และตำแหน่งด้วยตัวสังเกตเต็มอันดับ.....	30
4.5 ผลการจำลองการทำงานขณะกลับทิศความเร็วจาก -1000 ไป 1000 rpm เมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วมและตัวสังเกต.....	32
4.6 ผลการจำลองการทำงานเมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วมและตัวสังเกตในกรณีเปลี่ยนแปลงความเร็วคำสั่งในช่วงแคบ (รูปคลื่นความเร็วและกระแสสร้างแรงบิด).....	32
4.7 ผลการจำลองการทำงานเมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วมและตัวสังเกตในกรณีเปลี่ยนแปลงความเร็วคำสั่งในช่วงแคบจาก 500 ไป 600 rpm (รูปคลื่นตำแหน่งและกระแส).....	33
4.8 ผลการทดลองในสภาวะอยู่ตัวเมื่อความเร็วคำสั่งมีค่าเท่ากับ 1000 rpm เมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วมและตัวสังเกต (รูปคลื่นกระแสและตำแหน่ง).....	34
4.9 ผลการทดลองในสภาวะอยู่ตัวเมื่อความเร็วคำสั่งมีค่าเท่ากับ 1000 rpm เมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วมและตัวสังเกต (รูปคลื่นกระแสและฟลักซ์แม่เหล็ก).....	34
4.10 ผลการทดลองในสภาวะอยู่ตัวเมื่อความเร็วคำสั่งมีค่าเท่ากับ 100 rpm เมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วมและตัวสังเกต (รูปคลื่นกระแสและตำแหน่ง).....	35
4.11 ผลการทดลองในสภาวะอยู่ตัวเมื่อความเร็วคำสั่งมีค่าเท่ากับ 100 rpm เมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วมและตัวสังเกต (รูปคลื่นกระแสและฟลักซ์แม่เหล็ก).....	35
4.12 ผลการทดลองขณะกลับทิศความเร็วจาก -1000 ไป 1000 rpm เมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วมและตัวสังเกต (รูปคลื่นความเร็วและกระแสสร้างแรงบิด).....	36
4.13 ผลการทดลองขณะกลับทิศความเร็วจาก -1000 ไป 1000 rpm เมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วมและตัวสังเกต (รูปคลื่นกระแส, ความเร็วและตำแหน่ง).....	36
4.14 ผลการทดลองเมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วมและตัวสังเกตในกรณีเปลี่ยนแปลงความเร็วคำสั่งในช่วงแคบ (รูปคลื่นความเร็วและกระแสสร้างบิด).....	37
4.15 ผลการทดลองเมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วมและตัวสังเกตในกรณีเปลี่ยนแปลงความเร็วคำสั่งในช่วงแคบ จาก 500 ไป 600 rpm (รูปคลื่นตำแหน่งและกระแส).....	37
5.1 แผนภาพรวมการทำงานของตัวสังเกตเต็มอันดับแบบปรับตัว.....	39
5.2 บล็อกไดอะแกรมโดยรวมหลังบูรณาการตัวสังเกตแบบปรับตัวเข้ากับระบบควบคุมเวกเตอร์แยกการเชื่อมร่วม.....	41

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.3 บล็อกไดอะแกรมของค่าผิดพลาดในระบบประมาณค่าความเร็วบนแกนอ้างอิงสเตเตอร์...	43
5.4 บล็อกไดอะแกรมของค่าผิดพลาดในระบบประมาณค่าความเร็วบนแกนหมุนของ ฟลักซ์ประมาณ.....	44
5.5 วงรอบปิดของระบบประมาณค่าความเร็วแบบสัญญาณเข้าออกเดี่ยว (SISO) บนแกน อ้างอิงฟลักซ์ประมาณ.....	45
5.6 เส้นทางเดินรากของระบบประมาณค่าความเร็ว เมื่อความเร็ว ω เปลี่ยนแปลงในช่วง 0 ถึง 300 rad/sec.....	48
5.7 ผลการตอบสนองแบบแรมปีของการประมาณค่าความเร็ว.....	49
5.8 แผนภาพโบเดของ $\Psi'^2 G'_{22}(s)$	50
5.9 แผนภาพโบเดของฟังก์ชันโอนย้ายวงรอบเปิดของระบบประมาณค่าความเร็ว.....	51
5.10 ระบบควบคุมความเร็วที่ใช้ระบบใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วมที่มีการประมาณ ค่าตำแหน่งและความเร็วด้วยตัวสังเกตเพิ่มอันดับแบบปรับตัว.....	52
5.11 ผลการจำลองขณะกลับทิศความเร็วจาก -1000 ไป 1000 rpm เมื่อใช้ระบบการควบคุม เวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง.....	53
5.12 ผลการจำลองเมื่อใช้ระบบการควบคุมเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งในกรณีเปลี่ยนแปลง ความเร็วคำสั่งในช่วงแคบ (รูปคลื่นความเร็วและกระแสสร้างแรงบิด).....	53
5.13 ผลการจำลองเมื่อใช้ระบบการควบคุมเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งในกรณีเปลี่ยนแปลง ความเร็วคำสั่งในช่วงแคบ จาก 500 ไป 600 rpm (รูปคลื่นตำแหน่งและกระแส).....	54
5.14 ผลการทดลองในสภาวะอยู่ตัวเมื่อความเร็วคำสั่งมีค่าเท่ากับ 1000 rpm เมื่อใช้ระบบ การควบคุมเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง (รูปคลื่นกระแสและความเร็ว).....	55
5.15 ผลการทดลองในสภาวะอยู่ตัวเมื่อความเร็วคำสั่งมีค่าเท่ากับ 1000 rpm เมื่อใช้ระบบ การควบคุมเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง (รูปคลื่นกระแสและตำแหน่ง).....	55
5.16 ผลการทดลองในสภาวะอยู่ตัวเมื่อความเร็วคำสั่งมีค่าเท่ากับ 1000 rpm เมื่อใช้ระบบ การควบคุมเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง (รูปคลื่นกระแสและฟลักซ์แม่เหล็ก).....	56
5.17 ผลการทดลองในสภาวะอยู่ตัวเมื่อความเร็วคำสั่งมีค่าเท่ากับ 100 rpm เมื่อใช้ระบบ การควบคุมเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง (รูปคลื่นกระแสและความเร็ว).....	56
5.18 ผลการทดลองในสภาวะอยู่ตัวเมื่อความเร็วคำสั่งมีค่าเท่ากับ 100 rpm เมื่อใช้ระบบ การควบคุมเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง (รูปคลื่นกระแสและตำแหน่ง).....	57

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.19 ผลการทดลองในสภาวะอยู่ตัวเมื่อความเร็วคำสั่งมีค่าเท่ากับ 100 rpm เมื่อใช้ระบบการควบคุมเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง (รูปคลื่นกระแสและฟลักซ์แม่เหล็ก).....	58
5.20 ผลการทดลองขณะกลับทิศความเร็วจาก -1000 ไป 1000 rpm เมื่อใช้ระบบการควบคุมเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง (รูปคลื่นความเร็วและกระแสสร้างแรงบิด).....	59
5.21 ผลการทดลองขณะกลับทิศความเร็วจาก -1000 ไป 1000 rpm เมื่อใช้ระบบการควบคุมเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง (รูปคลื่นกระแส, ความเร็วและตำแหน่ง).....	59
5.22 ผลการทดลองขณะกลับทิศความเร็วจาก -1000 ไป 1000 rpm เมื่อใช้ระบบการควบคุมเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง(รูปคลื่นความเร็ว, ค่าผิดพลาดของความเร็วและตำแหน่ง)	60
5.23 ผลการทดลองขณะกลับทิศความเร็วจาก -1000 ไป 1000 rpm เมื่อใช้ระบบการควบคุมเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง(รูปฟลักซ์แม่เหล็ก,ค่าผิดพลาดของความเร็วและตำแหน่ง)	60
5.24 ผลการทดลองเมื่อใช้ระบบการควบคุมเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งในกรณีเปลี่ยนแปลงความเร็วคำสั่งในช่วงแคบ (รูปคลื่นความเร็วและกระแสสร้างแรงบิด).....	61
5.25 ผลการทดลองเมื่อใช้ระบบการควบคุมเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งในกรณีเปลี่ยนแปลงความเร็วคำสั่งในช่วงแคบ จาก 500 ไป 600 rpm (รูปคลื่นตำแหน่งและกระแส).....	61
ก.1 โครงสร้างฮาร์ดแวร์ของระบบที่ใช้ในการทดสอบ.....	68
ก.2 ไดอะแกรมเวลาของซอฟต์แวร์โมดูล.....	71

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ก.1 พิกัดและพารามิเตอร์ของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรภายในที่ใช้ในงานวิจัย.....	67