

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ



248242

**การออกแบบระบบขับเรือดึงหนวดเพชรปิโตรเคมีชนิดแม่เหล็กถาวรไร้แปะแม่เหล็กด้วยวิธีกัดด้วย
หัวกัดแยกแยะอันค้ำแบบปรับหัวเพื่อการปรับรูปร่างผิวสภาพ การกำหนดขนาดของขนาดของหัว
และความทนต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์**

นายธนากร ไชยงาม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2553
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

6 00253139

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ



248242

การออกแบบระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งโดยอิง
ตัวสังเกตเต็มอันดับแบบปรับตัวเพื่อการปรับปรุงเสถียรภาพ การกำหนดผลตอบสนองทางพลวัต
และความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์



นาย สาคร โพธิ์งาม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2553
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



4 8 7 1 8 7 7 6 2 1

DESIGN OF A POSITION-SENSORLESS PMSM DRIVE SYSTEM BASED ON
AN ADAPTIVE FULL-ORDER OBSERVER FOR STABILITY IMPROVEMENT, SPECIFIED
DYNAMIC RESPONSE AND ROBUSTNESS AGAINST PARAMETER VARIATIONS

Mr. Sakorn Po-ngam

A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Doctor of Philosophy Program in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic year 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การออกแบบระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เชิงโรนัสชนิดแม่เหล็ก
ถาวรไร้เซ็นเซอร์วัดตำแหน่งโดยอิงตัวสังเกตเต็มอันดับแบบ
ปรับตัว เพื่อการปรับปรุงเสถียรภาพ การกำหนดผลตอบสนอง
ทางพลวัต และความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงของ
ค่าพารามิเตอร์

โดย

นาย สาคร โพธิ์งาม

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

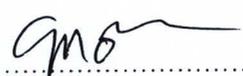
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

อาจารย์ ดร. สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์

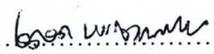
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาตรีบัณฑิต

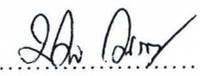

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

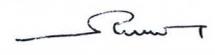
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ยุทธนา กุลวิฑิต)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร. สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์)


..... กรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. เดวิด บรรเจิดพงศ์ชัย)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มงคล กงศ์หิรัญ)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. กนกเวทย์ ตั้งพิมลรัตน์)

สาคร โพธิ์งาม: การออกแบบระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งโดยอิงตัวสังเกตเต็มอันดับแบบปรับตัวเพื่อการปรับปรุงเสถียรภาพ การกำหนดผลตอบสนองทางพลวัต และความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์. (DESIGN OF A POSITION-SENSORLESS PMSM DRIVE SYSTEM BASED ON AN ADAPTIVE FULL-ORDER OBSERVER FOR STABILITY IMPROVEMENT, SPECIFIED DYNAMIC RESPONSE AND ROBUSTNESS AGAINST PARAMETER VARIATIONS) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : อ. ดร. สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์, 106 หน้า.

248242

เสถียรภาพและสมรรถนะเชิงพลวัตที่ดีของตัวสังเกตเต็มอันดับแบบปรับตัวเป็นสิ่งที่สำคัญอย่างมากของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง วิทยานิพนธ์นี้จึงมีเป้าหมายที่จะนำเสนอวิธีออกแบบตัวสังเกตเต็มอันดับแบบปรับตัวเพื่อให้ระบบขับเคลื่อนมีคุณสมบัติดังกล่าว ในอันดับแรกวิทยานิพนธ์จะนำเสนอการวิเคราะห์เงื่อนไขจำเป็นและเพียงพอของการมีเสถียรภาพของตัวสังเกตเต็มอันดับแบบปรับตัว เพื่อให้ได้กรอบทั่วไปสำหรับการออกแบบอัตราขยายป้อนกลับของตัวสังเกต จากนั้นวิทยานิพนธ์จะนำเสนอรูปสมการทั่วไปของอัตราขยายป้อนกลับที่ทำให้ตัวสังเกตมีเสถียรภาพซึ่งอัตราขยายป้อนกลับในรูปสมการทั่วไปนี้จะถูกนำไปใช้ในการวางตำแหน่งศูนย์และชั่วเพื่อให้ระบบมีค่าตัวประกอบการหน่วงที่พอเพียงและคงที่ ณ ทุกความถี่การทำงาน นอกจากนี้แล้ววิทยานิพนธ์นี้ยังนำเสนอแนวทางการออกแบบอัตราขยายการปรับตัวเพื่อให้ได้สมรรถนะดังกล่าวข้างต้นและวิเคราะห์ให้เห็นด้วยว่า ตัวสังเกตที่ออกแบบนี้มีความคงทนต่อการเปลี่ยนของค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำด้วย ผลการจำลองการทำงานและผลการทดลองยืนยันถึงความเป็นไปได้ของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งที่ได้ทำการออกแบบ

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อนิสิต.....
 สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา.....2553.....

4871877621: MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS: PERMANENT-MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR/ SENSORLESS CONTROL/ ADAPTIVE FULL-ORDER OBSERVER/ STABILITY/ ZERO AND POLE PLACEMENT/ ROBUSTNESS

SAKORN PO-NGAM: DESIGN OF A POSITION-SENSORLESS PMSM DRIVE SYSTEM BASED ON AN ADAPTIVE FULL-ORDER OBSERVER FOR STABILITY IMPROVEMENT, SPECIFIED DYNAMIC RESPONSE AND ROBUSTNESS AGAINST PARAMETER VARIATIONS. THESIS ADVISOR : SOMBOON SANGWONGWANICH, D.Eng., 106 pp.

248242

Stability and good dynamic performances of adaptive full-order observers are of utmost importance for the position-sensorless permanent-magnet synchronous motor (PMSM) drive. In this dissertation, to accomplish both requirements, the analytical stability conditions are firstly derived to provide a general framework for the feedback gain design. Closed-form solutions of the stabilizing feedback gains are consequently given, and are used in the zero and pole placement design to obtain an adequate and constant damping factor along with the stability at all operating frequencies. New design rules for the adaptation PI gains to satisfy the required performances are also proposed. The designed observer is shown to be robust against stator resistance and inductance variations. The feasibility of the designed sensorless control is confirmed by simulation and experiment.

Department : Electrical Engineering.....

Student's Signature

Field of Study : Electrical Engineering.....

Advisor's Signature

Academic Year : 2010.....




กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วง ด้วยความช่วยเหลือและเอาใจใส่เป็นอย่างดีของ อาจารย์ ดร.สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ซึ่งให้โอกาสในการศึกษา และคำแนะนำในด้านต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัยและการดำเนินชีวิต ตั้งแต่ระดับปริญญาโทจนถึงระดับปริญญาเอกในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยแห่งนี้ ตลอดมา

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบไปด้วย

- 1) รองศาสตราจารย์ ดร. ยุทธนา กุลวิฑิต (จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
- 2) ศาสตราจารย์ ดร. เดวิด บรรรเจ็ดพงศ์ชัย (จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
- 3) ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มงคล กงศ์ศิริบุญ (มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี)
- 4) ดร. กนกเวทย์ ตั้งพิมลรัตน์ (NECTEC)

ผู้ซึ่งให้คำแนะนำในการแก้ไขและปรับปรุงเพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความถูกต้องและสมบูรณ์ อันนำไปสู่ประโยชน์ต่อผู้อ่านและผู้วิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้

ทุนพัฒนาอาจารย์จากสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ) ที่ทำให้ข้าพเจ้าได้เข้าศึกษาในสถาบันแห่งนี้ บริษัท โนวเมเอ็นจิเนียริ่ง จำกัด และ บริษัท เอพีวาย เอ็นจิเนียริ่ง จำกัด ที่ได้เอื้อเฟื้ออุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรพงศ์ สุวรรณกวิน ผู้ซึ่งเป็นรุ่นพี่และอาจารย์ ที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกต่าง ๆ ในการทำงานวิจัยในห้องปฏิบัติการและวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power electronics research and laboratory : PERL)

ท้ายสุด บิดา มารดา ผู้ซึ่งให้ชีวิต และญาติพี่น้องของข้าพเจ้า ผู้ซึ่งเป็นกำลังใจและสนับสนุนทางการศึกษาตลอดมา

ข้าพเจ้าจึงขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

สารบัญ

| | หน้า |
|---|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | ง |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | จ |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ฉ |
| สารบัญ..... | ช |
| สารบัญภาพ..... | ญ |
| รายการสัญลักษณ์..... | ฒ |
| บทที่ | |
| 1. บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย..... | 6 |
| 1.3 ขอบเขตของการวิจัย..... | 7 |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ-ด้านวิชาการและด้านการประยุกต์..... | 7 |
| 1.5 ขั้นตอนในการดำเนินการวิจัย..... | 7 |
| 2. ตัวสังเกตเต็มอันดับแบบปรับตัว..... | 8 |
| 2.1 แบบจำลองทางพลวัตของ PMSM..... | 8 |
| 2.2 ตัวสังเกตเต็มอันดับแบบปรับตัวของ PMSM..... | 11 |
| 2.3 ตัวสังเกตเต็มอันดับแบบปรับตัวบนแกนหมุนของฟลักซ์ประมาณและการควบคุมแบบแยกการเชื่อมร่วม..... | 12 |
| 3. เสถียรภาพของตัวสังเกตเต็มอันดับแบบปรับตัว..... | 19 |
| 3.1 สมการค่าความผิดพลาดของการประมาณ..... | 19 |
| 3.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎี Hyperstability..... | 21 |
| 3.2.1 เงื่อนไขการประมาณค่าได้..... | 22 |
| 3.2.2 คุณสมบัติของส่วนไม่เชิงเส้นป้อนกลับ..... | 24 |
| 3.2.3 คุณสมบัติจริงบวกโดยแท้ของฟังก์ชันอินย่าย $G(s)$ | 25 |
| 3.3 วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบประมาณโดยใช้วิธีการของเลียปูนอฟ..... | 26 |
| 3.2.3 คุณสมบัติจริงบวกของฟังก์ชันอินย่าย $G(s)$ | 26 |
| 4. การกำหนดผลตอบสนองทางพลวัตของตัวสังเกต..... | 30 |

| | |
|---|----|
| 4.1 ผลกระทบจากการใช้ตัวสังเกตที่มีสัมประสิทธิ์การหน่วงต่ำต่อระบบควบคุม เวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์..... | 30 |
| 4.2 ตำแหน่งศูนย์และขั้ววงรอบเปิด..... | 32 |
| 4.2.1 ตำแหน่งของศูนย์..... | 32 |
| 4.2.2 ตำแหน่งของขั้ววงรอบเปิด..... | 33 |
| 4.3 การวางตำแหน่งศูนย์และขั้วของตัวสังเกตเพื่อกำหนดสัมประสิทธิ์การหน่วงของ ตัวสังเกต..... | 34 |
| 4.3.1 แนวทางในการออกแบบอัตราขยายการปรับตัว..... | 36 |
| 4.4 ตัวอย่างการออกแบบ..... | 38 |
| 5. ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์..... | 44 |
| 5.1 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทาน..... | 44 |
| 5.1.1 ผลกระทบต่อการประมาณค่าความเร็วจากค่าความผิดพลาดของค่า ความต้านทาน..... | 45 |
| 5.1.2 ผลกระทบต่อการประมาณค่าตำแหน่งจากค่าความผิดพลาดของค่า ความต้านทาน..... | 46 |
| 5.2 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของค่าความเหนี่ยวนำ..... | 52 |
| 5.2.1 ผลกระทบต่อการประมาณค่าความเร็วจากค่าความผิดพลาดของค่า ความเหนี่ยวนำ..... | 52 |
| 5.2.2 ผลกระทบต่อการประมาณค่าตำแหน่งจากค่าความผิดพลาดของค่า ความเหนี่ยวนำ..... | 53 |
| 5.3 แนวทางในการแก้ปัญหาค่าความผิดพลาดจากขนาดของฟลักซ์ในย่านความเร็ว ต่ำ..... | 56 |
| 6. ผลการทดลอง..... | 61 |
| 6.1 โครงสร้างของระบบที่ใช้ในการทดลอง..... | 61 |
| 6.2 ผลการทดลองเกี่ยวกับเสถียรภาพ..... | 62 |
| 6.2.1 เงื่อนไขความมีเสถียรภาพ..... | 62 |
| 6.2.2 การใช้อัตราขยายป้อนกลับที่ให้สัมประสิทธิ์การหน่วงต่ำและการขาด เสถียรภาพ..... | 63 |
| 6.3 ผลการทดลองเกี่ยวกับสมรรถนะโดยรวมของระบบที่ได้ทำการออกแบบ..... | 65 |

บทที่

หน้า

| | |
|--|-----|
| 6.3.1 ผลการทดลองในสภาวะอยู่ตัวที่ความเร็วต่าง ๆ..... | 65 |
| 6.3.2 ผลการทดลองในย่านความเร็วต่ำมาก..... | 67 |
| 6.3.3 ผลตอบสนองในขณะเกิดโหลดแบบขั้น..... | 73 |
| 6.3.4 ผลการทดลองในขณะเร่งลดความเร็ว..... | 78 |
| 6.3.5 ผลการทดลองในขณะกลับทิศทางการหมุน..... | 78 |
| 6.3.6 ผลการทดลองในขณะเปลี่ยนแปลงความเร็วคำสั่งในช่วงแคบ..... | 78 |
| 6.3.7 ผลการทดลองในขณะเปลี่ยนแปลงความเร็วคำสั่งในช่วงกว้างอย่างช้า ๆ..... | 79 |
| 6.4 ผลการทดลองเมื่อมีค่าความผิดพลาดของค่าพารามิเตอร์..... | 87 |
| 7. บทสรุปและข้อเสนอแนะ..... | 90 |
| 7.1 บทสรุปของการวิจัย..... | 90 |
| 7.2 ข้อเสนอแนะ..... | 90 |
| รายการอ้างอิง..... | 91 |
| ภาคผนวก..... | 94 |
| ภาคผนวก ก..... | 95 |
| ภาคผนวก ข..... | 98 |
| ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... | 106 |

สารบัญภาพ

| ภาพที่ | หน้า |
|---|------|
| 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแกนอ้างอิงทั้งสามแกนที่ใช้ในการควบคุมแบบไร้เซนเซอร์ ตำแหน่งของ PMSM..... | 8 |
| 2.2 แผนภาพรวมของตัวสังเกตเต็มอันดับแบบปรับตัว..... | 12 |
| 2.3 แผนภาพบล็อกโดยรวมของตัวสังเกตแบบปรับตัวกับระบบควบคุมเวกเตอร์แบบ แยกการเชื่อมร่วม..... | 15 |
| 2.4 ระบบควบคุมความเร็วที่ใช้ระบบควบคุมเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วมที่มีการ ประมาณค่าตำแหน่งและความเร็วด้วยตัวสังเกตเต็มอันดับแบบปรับตัว..... | 16 |
| 2.5 ผลการจำลองการทำงานที่ความเร็วคำสั่ง 200 rpm ขณะขับโหลดพิกัดเมื่อใช้ อัตราขยายป้อนกลับ $G_1 = 0, G_2 = -60, H_1 = 3, H_2 = 1$ | 17 |
| 2.6 ผลการจำลองการทำงานขณะกลับทิศทางหมุนจาก $200 \rightarrow -200 \text{ rpm}$ เมื่อใช้อัตราขยายป้อนกลับ $G_1 = 0, G_2 = -60, H_1 = 3, H_2 = 1$ | 18 |
| 3.1 แผนภาพบล็อกของค่าผิดพลาดในระบบประมาณค่าความเร็วบนแกนอ้างอิง สเตเตอร์..... | 20 |
| 3.2 แผนภาพบล็อกของค่าผิดพลาดในระบบประมาณค่าความเร็วบนแกนอ้างอิง ฟลักซ์ประมาณ..... | 21 |
| 3.3 ผลการจำลองการทำงานในกรณีที่อัตราขยายป้อนกลับสอดคล้องกับไม่สอดคล้อง กับเงื่อนไขการมีเสถียรภาพที่ความเร็วคำสั่ง 200 rpm ในกรณี $y = 0, k_2 = 0.001$ (x เปลี่ยนจาก +5 เป็น -5)..... | 29 |
| 3.4 ผลการจำลองการทำงานในกรณีที่อัตราขยายป้อนกลับสอดคล้องกับไม่สอดคล้อง กับเงื่อนไขการมีเสถียรภาพที่ความเร็วคำสั่ง 200 rpm ในกรณี $y = 0, x = \frac{R}{L}$ (k_2 เปลี่ยนจาก +0.5 เป็น -0.5)..... | 29 |
| 4.1 ผลการจำลองการทำงานในขณะเริ่มหมุนของตัวสังเกตโดยใช้ระบบควบคุมแบบ เวกเตอร์..... | 31 |
| 4.2 การแกว่งของค่าความผิดพลาดของความเร็วและตำแหน่ง (ภาพขยายในรูปที่ 4.1)..... | 31 |
| 4.3 ผลการจำลองการทำงานขณะเกิดการขาดเสถียรภาพของระบบควบคุมเวกเตอร์ แบบไร้เซนเซอร์ที่มีการใช้ตัวสังเกตที่มีสัมประสิทธิ์การหน่วงต่ำ..... | 31 |

| ภาพที่ | หน้า | |
|--------|--|----|
| 4.4 | ตำแหน่งศูนย์และซี่วงรอบเปิดจากการใช้อัตราขยายป้อนกลับที่นำเสนอ..... | 36 |
| 4.5 | ทางเดินของซี่วงรอบปิดจากการออกแบบอัตราขยายการปรับตัวที่นำเสนอ..... | 40 |
| 4.6 | ผลการจำลองการทำงานของระบบขับเคลื่อนแบบไร้เซนเซอร์ที่ความเร็วคำสั่ง 200 rpm ขณะขับโหลดพิกัด เมื่อใช้แนวทางการออกแบบอัตราขยายตามที่นำเสนอ.... | 41 |
| 4.7 | ผลการจำลองการทำงานของระบบขับเคลื่อนแบบไร้เซนเซอร์ขณะกลับทิศทางหมุนจาก 200 → -200 rpm เมื่อใช้แนวทางการออกแบบอัตราขยายป้อนกลับตามที่นำเสนอ..... | 42 |
| 4.8 | ผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์ที่ความเร็วคำสั่ง 3000 rpm เมื่อใช้แนวทางการออกแบบอัตราขยายป้อนกลับตามที่นำเสนอ. | 43 |
| 5.1 | แผนภาพพล็อตการประมาณค่าความเร็วบนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ที่รวมผลกระทบจากค่าความผิดพลาดของค่าความต้านทาน (ΔR)..... | 45 |
| 5.2 | แผนภาพเวกเตอร์ในสภาวะอยู่ตัวของมอเตอร์และตัวสังเกตในกรณีมีค่าความผิดพลาดของค่าความต้านทาน..... | 47 |
| 5.3 | ผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์ที่ความเร็วคำสั่ง 200 rpm ในกรณี $\Delta R = -20\%$ | 48 |
| 5.4 | ผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์ที่ความเร็วคำสั่ง 3000 rpm ในกรณี $\Delta R = -20\%$ | 50 |
| 5.5 | แผนภาพเวกเตอร์ในสภาวะอยู่ตัวกรณีมีค่าความผิดพลาดจากค่าความเหนี่ยวนำ..... | 53 |
| 5.6 | แกนอ้างอิงของมอเตอร์และตัวสังเกตเมื่อเกิดค่าผิดพลาดของการประมาณตำแหน่ง e_p จากความผิดพลาด ΔL | 54 |
| 5.7 | ผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์ที่ความเร็วคำสั่ง 200 rpm ในกรณี $\Delta L = -20\%$ | 55 |
| 5.8 | ผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์ที่ความเร็วคำสั่ง 3000 rpm ในกรณี $\Delta L = -20\%$ | 56 |
| 5.9 | ผลตอบสนองของการควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์เมื่อใช้แนวทางแก้ปัญหาจากค่าความผิดพลาดทางขนาดของฟลักซ์ในย่านความเร็วต่ำที่นำเสนอ โดยมี $ \Delta R = 20\%$ | 60 |

| ภาพที่ | หน้า |
|--------|--|
| 6.1 | โครงสร้างของระบบที่ใช้ในการทดลอง..... 61 |
| 6.2 | ผลการทดลองในกรณีที่ใช้อัตราขยายป้อนกลับสอดคล้องและไม่สอดคล้องกับ เงื่อนไขความถี่เสถียรภาพ (k_2 เปลี่ยนจาก +0.01 เป็น -0.01) โดยที่ $y = -\hat{\omega}$, $x = R/L$ 62 |
| 6.3 | ผลการทดลองในกรณีที่ใช้อัตราขยายป้อนกลับสอดคล้องและไม่สอดคล้องกับ เงื่อนไขความถี่เสถียรภาพ (x เปลี่ยนจาก +20 เป็น -20) โดยที่ $y = -\hat{\omega}$, $k_2 = L$ 63 |
| 6.4 | ผลการทดลองในกรณีที่ใช้อัตราขยายป้อนกลับที่ให้สัมประสิทธิ์การหน่วงที่ เพียงพอหรือต่ำ (k_2 เปลี่ยนจาก 0.002 เป็น 0.0001) ที่ความเร็วคำสั่ง 1000 rpm โดยที่ $y = -\hat{\omega}$, $x = R/L$ 64 |
| 6.5 | ผลการจำลองการทำงานในกรณีที่ใช้อัตราขยายป้อนกลับที่ให้สัมประสิทธิ์การ หน่วงที่เพียงพอหรือต่ำ (k_2 เปลี่ยนจาก 0.002 เป็น 0.0001) ที่ความเร็วคำสั่ง 1000 rpm โดยที่ $y = -\hat{\omega}$, $x = R/L$ 64 |
| 6.6 | ผลการทดลองในสภาวะอยู่ตัวที่แรงบิดพิกัดและความเร็วคำสั่ง 300 rpm..... 66 |
| 6.7 | ผลการจำลองการทำงานในสภาวะอยู่ตัวที่แรงบิดพิกัดและความเร็วคำสั่ง 300 rpm..... 66 |
| 6.8 | ผลการทดลองในสภาวะอยู่ตัวที่แรงบิดพิกัดและความเร็วคำสั่ง 2000 rpm..... 67 |
| 6.9 | ผลการจำลองการทำงานในสภาวะอยู่ตัวที่แรงบิดพิกัดและความเร็วคำสั่ง 2000 rpm..... 67 |
| 6.10 | ผลการทดลองในขณะไร้โหลดที่ความเร็วคำสั่ง 200 rpm..... 68 |
| 6.11 | ผลการทดลองในขณะขับโหลดที่พิกัดที่ความเร็วคำสั่ง 200 rpm..... 69 |
| 6.12 | ผลการทดลองในขณะไร้โหลดที่ความเร็วคำสั่ง 100 rpm..... 69 |
| 6.13 | ผลการทดลองในขณะขับโหลดที่พิกัดที่ความเร็วคำสั่ง 100 rpm..... 70 |
| 6.14 | ผลการทดลองในขณะไร้โหลดที่ความเร็วคำสั่ง 75 rpm..... 70 |
| 6.15 | ผลการทดลองในขณะขับโหลดที่พิกัดที่ความเร็วคำสั่ง 75 rpm..... 71 |
| 6.16 | ผลการทดลองในขณะไร้โหลดที่ความเร็วคำสั่ง 50 rpm..... 71 |
| 6.17 | ผลการทดลองในขณะขับโหลดที่พิกัดที่ความเร็วคำสั่ง 50 rpm..... 72 |

| ภาพที่ | หน้า |
|--|------|
| 6.18 ผลการทดลองในขณะที่ระบบโดยรวมขาดเสถียรภาพจากการขับโหลดที่ 25% ของพิกัดที่ความเร็วคำสั่ง 25 rpm (ข้อมูลความเร็วและตำแหน่ง)..... | 72 |
| 6.19 ผลการทดลองในขณะที่ระบบโดยรวมขาดเสถียรภาพจากการขับโหลดที่ 25% ของพิกัดที่ความเร็วคำสั่ง 25 rpm (ข้อมูลกระแสและตำแหน่ง)..... | 73 |
| 6.20 ผลการทดลองในขณะที่เกิดโหลดแบบขั้นที่แรงบิดพิกัดและความเร็วคำสั่ง 300 rpm (ข้อมูลความเร็ว ตำแหน่ง และกระแสสร้างแรงบิด)..... | 74 |
| 6.21 ผลการจำลองการทำงานในขณะที่เกิดโหลดแบบขั้นที่แรงบิดพิกัดและความเร็วคำสั่ง 300 rpm (ข้อมูลความเร็ว ตำแหน่ง และกระแสสร้างแรงบิด)..... | 74 |
| 6.22 ผลการทดลองในขณะที่เกิดโหลดแบบขั้นที่แรงบิดพิกัดและความเร็วคำสั่ง 300 rpm (ข้อมูลความเร็ว ตำแหน่ง และฟลักซ์แม่เหล็ก)..... | 75 |
| 6.23 ผลการจำลองการทำงานในขณะที่เกิดโหลดแบบขั้นที่แรงบิดพิกัดและความเร็วคำสั่ง 300 rpm (ข้อมูลความเร็ว ตำแหน่ง และฟลักซ์แม่เหล็ก)..... | 75 |
| 6.24 ผลการทดลองในขณะที่เกิดโหลดแบบขั้นที่แรงบิดพิกัดและความเร็วคำสั่ง 2000 rpm (ข้อมูลความเร็ว ตำแหน่ง และกระแสสร้างแรงบิด)..... | 76 |
| 6.25 ผลการจำลองการทำงานในขณะที่เกิดโหลดแบบขั้นที่แรงบิดพิกัดและความเร็วคำสั่ง 2000 rpm (ข้อมูลความเร็ว ตำแหน่ง และกระแสสร้างแรงบิด)..... | 76 |
| 6.26 ผลการทดลองในขณะที่เกิดโหลดแบบขั้นที่แรงบิดพิกัดและความเร็วคำสั่ง 2000 rpm (ข้อมูลความเร็ว ตำแหน่ง และฟลักซ์แม่เหล็ก)..... | 77 |
| 6.27 ผลการจำลองการทำงานในขณะที่เกิดโหลดแบบขั้นที่แรงบิดพิกัดและความเร็วคำสั่ง 2000 rpm (ข้อมูลความเร็ว ตำแหน่ง และฟลักซ์แม่เหล็ก)..... | 77 |
| 6.28 ผลการทดลองขณะเร่งลดความเร็วระหว่าง 1000 rpm และ 2000 rpm..... | 80 |
| 6.29 ผลการจำลองการทำงานขณะเร่งลดความเร็วระหว่าง 1000 rpm และ 2000 rpm | 80 |
| 6.30 ผลการทดลองในขณะที่กลับทิศทางการหมุนระหว่าง 2000 rpm และ -2000 rpm | 81 |
| 6.31 ผลการจำลองการทำงานในขณะที่กลับทิศทางการหมุนระหว่าง 2000 rpm และ -2000 rpm..... | 81 |
| 6.32 ผลการทดลองในขณะที่เปลี่ยนแปลงความเร็วในช่วงแคบระหว่าง 2000 rpm และ 2100 rpm..... | 82 |
| 6.33 ผลการจำลองการทำงานในขณะที่เปลี่ยนแปลงความเร็วในช่วงแคบระหว่าง 2000 rpm และ 2100 rpm..... | 82 |

| ภาพที่ | หน้า |
|---|------|
| 6.34 ผลการทดลองในขณะที่เปลี่ยนแปลงความเร็วช้า ๆ ในช่วงกว้างจาก 2000 rpm ไป 200 rpm ที่โหลดพิกัด (ข้อมูลความเร็วและกระแส) | 83 |
| 6.35 ผลการทดลองในขณะที่เปลี่ยนแปลงความเร็วช้า ๆ ในช่วงกว้างจาก 2000 rpm ไป 200 rpm ที่โหลดพิกัด (ข้อมูลความเร็ว กระแส และฟลักซ์แม่เหล็ก)..... | 83 |
| 6.36 ผลการจำลองการทำงานในขณะที่เปลี่ยนแปลงความเร็วช้า ๆ ในช่วงกว้างจาก 2000 rpm ไป 200 rpm ที่โหลดพิกัด (ข้อมูลความเร็วและกระแส)..... | 84 |
| 6.37 ผลการจำลองการทำงานในขณะที่เปลี่ยนแปลงความเร็วช้า ๆ ในช่วงกว้างจาก 2000 rpm ไป 200 rpm ที่โหลดพิกัด (ข้อมูลความเร็ว กระแส และฟลักซ์แม่เหล็ก)..... | 84 |
| 6.38 ผลการทดลองในขณะที่เปลี่ยนแปลงความเร็วช้า ๆ ในช่วงกว้างจาก 200 rpm ไป 2000 rpm ที่โหลดพิกัด (ข้อมูลความเร็วและกระแส)..... | 85 |
| 6.39 ผลการทดลองในขณะที่เปลี่ยนแปลงความเร็วช้า ๆ ในช่วงกว้างจาก 200 rpm ไป 2000 rpm ที่โหลดพิกัด (ข้อมูลความเร็ว กระแส และฟลักซ์แม่เหล็ก)..... | 85 |
| 6.40 ผลการจำลองการทำงานในขณะที่เปลี่ยนแปลงความเร็วช้า ๆ ในช่วงกว้างจาก 200 rpm ไป 2000 rpm ที่โหลดพิกัด (ข้อมูลความเร็วและกระแส)..... | 86 |
| 6.41 ผลการจำลองการทำงานในขณะที่เปลี่ยนแปลงความเร็วช้า ๆ ในช่วงกว้างจาก 200 rpm ไป 2000 rpm ที่โหลดพิกัด (ข้อมูลความเร็ว กระแส และฟลักซ์แม่เหล็ก)..... | 86 |
| 6.42 ผลการทดลองในขณะที่เกิดโหลดแบบขั้นที่แรงบิดพิกัดและความเร็วคำสั่ง 300 rpm โดยมี $ \Delta R = 50\%$ | 88 |
| 6.43 ผลการจำลองการทำงานในขณะที่เกิดโหลดแบบขั้นที่แรงบิดพิกัดและความเร็วคำสั่ง 300 rpm โดยมี $ \Delta R = 50\%$ | 88 |
| 6.44 ผลการทดลองในขณะที่เกิดโหลดแบบขั้นที่แรงบิดพิกัดและความเร็วคำสั่ง 300 rpm โดยมี $ \Delta L = 20\%$ | 89 |
| 6.45 ผลการจำลองการทำงานในขณะที่เกิดโหลดแบบขั้นที่แรงบิดพิกัดและความเร็วคำสั่ง 300 rpm โดยมี $ \Delta L = 20\%$ | 89 |
| ก.1 ไดอะแกรมเวลาของซอฟต์แวร์โมดูล..... | 97 |

รายการสัญลักษณ์

แกนอ้างอิง :

$d-q$: แกนอ้างอิงโรเตอร์

$\hat{d}-\hat{q}$: แกนอ้างอิงฟลักซ์ประมาณ

$x-y$: แกนอ้างอิงสเตเตอร์

$u-v-w$: แกนของขดลวด (coil axis) สามเฟส u, v, w ตามลำดับ

กระแส :

\vec{i} : สเปซเวกเตอร์ของกระแสสเตเตอร์

\hat{i} : ค่าประมาณของสเปซเวกเตอร์ของกระแสสเตเตอร์

i_x, i_y : กระแสสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ x, y ตามลำดับ

\hat{i}_x, \hat{i}_y : ค่าประมาณของกระแสสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ x, y ตามลำดับ

i_d, i_q : กระแสสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงโรเตอร์ d, q ตามลำดับ

\hat{i}_d, \hat{i}_q : กระแสสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงฟลักซ์ประมาณ \hat{d}, \hat{q} ตามลำดับ

\hat{i}_d^*, \hat{i}_q^* : ค่าประมาณของกระแสสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงฟลักซ์ประมาณ \hat{d}, \hat{q} ตามลำดับ

i_d^*, i_q^* : กระแสสเตเตอร์คำสั่งบนแกนอ้างอิงฟลักซ์ประมาณ \hat{d}, \hat{q} ตามลำดับ

i_{su}, i_u : กระแสของขดลวดสเตเตอร์เฟส u

i_{sv} : กระแสของขดลวดสเตเตอร์เฟส v

i_{sw} : กระแสของขดลวดสเตเตอร์เฟส w

$\vec{e} = \hat{i} - \vec{i}$: สเปซเวกเตอร์ของค่าผิดพลาดของกระแส

$e_d = \hat{i}_d - i_d$: ค่าผิดพลาดของกระแสสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงฟลักซ์ประมาณ \hat{d}

$e_q = \hat{i}_q - i_q$: ค่าผิดพลาดของกระแสสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงฟลักซ์ประมาณ \hat{q}

แรงดัน:

\vec{u} : สเปซเวกเตอร์ของแรงดันสเตเตอร์

\vec{u}^* : สเปซเวกเตอร์ของแรงดันสเตเตอร์คำสั่ง

u_x, u_y : แรงดันสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ x, y ตามลำดับ

u_x^*, u_y^* : แรงดันสเตเตอร์คำสั่งบนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ x, y ตามลำดับ

u_d, u_q : แรงดันสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงโรเตอร์ d, q ตามลำดับ

u_d^*, u_q^* : แรงดันสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงฟลักซ์ประมาณ \hat{d}, \hat{q} ตามลำดับ

$u_{\hat{d}}, u_{\hat{q}}$: แรงดันสแตเตอร์คำสั่งบนแกนอ้างอิงฟลักซ์ประมาณ \hat{d}, \hat{q} ตามลำดับ

u_{su}^* : แรงดันสแตเตอร์คำสั่งเฟส u

u_{sv}^* : แรงดันสแตเตอร์คำสั่งเฟส v

u_{sw}^* : แรงดันสแตเตอร์คำสั่งเฟส w

ฟลักซ์ ตำแหน่ง และความเร็ว :

$\vec{\lambda}$: สเปซเวกเตอร์ของฟลักซ์แม่เหล็กจากแม่เหล็กถาวร

$\hat{\lambda}$: ค่าประมาณของสเปซเวกเตอร์ของฟลักซ์แม่เหล็กจากแม่เหล็กถาวร

λ : ฟลักซ์แม่เหล็กจากแม่เหล็กถาวร

$\hat{\lambda}$: ค่าประมาณของฟลักซ์แม่เหล็กจากแม่เหล็กถาวร

$\vec{e}_{\lambda} = \hat{\lambda} - \vec{\lambda}$: สเปซเวกเตอร์ของค่าผิดพลาดของฟลักซ์แม่เหล็กประมาณ

$e_{\lambda} = \hat{\lambda} - \lambda$: ค่าผิดพลาดของฟลักซ์แม่เหล็กประมาณ

ρ : ตำแหน่งโรเตอร์หรือตำแหน่งของฟลักซ์แม่เหล็ก

$\hat{\rho}$: ค่าประมาณตำแหน่งโรเตอร์หรือตำแหน่งของฟลักซ์แม่เหล็ก

$\omega = \frac{d\rho}{dt}$: ความเร็วหรือความถี่ของโรเตอร์

$\hat{\omega}$: ค่าประมาณของความเร็วหรือความถี่ของโรเตอร์

$\omega_0 = \frac{d\hat{\rho}}{dt}$: ค่าประมาณของความเร็วหรือความถี่ของฟลักซ์ประมาณ

$e_{\rho} = \hat{\rho} - \rho$: ค่าผิดพลาดของตำแหน่งประมาณ

$e_{\omega} = \Delta_{\omega} = \hat{\omega} - \omega$: ค่าผิดพลาดของความเร็วประมาณ

พารามิเตอร์และแรงบิดของมอเตอร์ :

R : ค่าความต้านทานของขดลวดสแตเตอร์

\hat{R} : ค่าความต้านทานของขดลวดสแตเตอร์ที่ใช้คำนวณในตัวสังเกต

L : ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดสแตเตอร์

\hat{L} : ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดสแตเตอร์ที่ใช้คำนวณในตัวสังเกต

$\Delta R = \hat{R} - R$: ค่าผิดพลาดของความต้านทาน

$\Delta L = \hat{L} - L$: ค่าผิดพลาดของค่าความเหนี่ยวนำ

p : จำนวนขั้วแม่เหล็ก

J : ค่าความเฉื่อยของระบบขับเคลื่อน

T_m : แรงบิดของมอเตอร์

T_{rated} : แรงบิดพิกัดของมอเตอร์

T_{est} : ค่าประมาณของแรงบิดของมอเตอร์

$T_{error} = T_{est} - T_m$: ค่าผิดพลาดของแรงบิดประมาณ

อัตรายาย :

G_1, G_2, H_1, H_2 : อัตรายายป้อนกลับของตัวสังเกตในกรณีที่ใช้แบบจำลองเชิงเส้น

h_1, h_2, h_3, h_4 : อัตรายายป้อนกลับของตัวสังเกตในกรณีที่ใช้แบบจำลองไม่เชิงเส้น

$\mathbf{G} = G_1\mathbf{I} + G_2\mathbf{J}$, $\mathbf{H} = H_1\mathbf{I} + H_2\mathbf{J}$: เมทริกซ์ของอัตรายายป้อนกลับของตัวสังเกตในกรณีที่ใช้แบบจำลองเชิงเส้น

k_i : อัตรายายการปรับตัวแบบอินทิเกรต

k_p : อัตรายายการปรับตัวแบบสัดส่วน

p_i : ขั้ววงรอบเปิดของตัวสังเกต

z_i : ศูนย์ของตัวสังเกต

ฟังก์ชันโอนย้ายและเมทริกซ์ :

$\mathbf{G}(s)$: ฟังก์ชันโอนย้ายของระบบประมาณค่าความเร็วบนแกนอ้างอิงสเตเตอร์

$\mathbf{G}'(s) = e^{-J\hat{p}}\mathbf{G}(s)e^{-J\hat{p}} = \begin{bmatrix} G'_{22}(s) & G'_{12}(s) \\ -G'_{12}(s) & G'_{22}(s) \end{bmatrix}$: ฟังก์ชันโอนย้ายของระบบประมาณค่าความเร็ว

บนแกนอ้างอิงของฟลักซ์ประมาณ

$\mathbf{R}(s)$: ฟังก์ชันโอนย้ายจากผลของ ΔR

$\vec{e} = \begin{bmatrix} \vec{e}_1 \\ \vec{e}_2 \end{bmatrix}$: สเปซเวกเตอร์ของค่าผิดพลาดของสัญญาณ

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{J} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{0} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$