

การขับเคลื่อนมอเตอร์ซึ่งโครนัสแม่เหล็กถาวรไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งแบบใหม่  
โดยอิงแบบจำลองเชิงเส้น



นาย ศาคร โปธิ์งาม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2546

ISBN 947-17-3583-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**A NOVEL POSITION-SENSORLESS PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR  
DRIVE BASED ON A LINEAR MODEL**



Mr. Sakorn Po-ngam

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 947-17-3583-9

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การขับเคลื่อนมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรไร้เซ็นเซอร์วัดตำแหน่ง  
แบบใหม่โดยอิงแบบจำลองเชิงเส้น

โดย

นายสาคร โพธิ์งาม

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ ดร. สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. ยุทธนา กุลวิฑิต)

อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์ ดร. สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อุดมศักดิ์ ยั่งยืน)

สาคร โพธิ์งาม : การขับเคลื่อนมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งแบบใหม่ โดยอิงแบบจำลองเชิงเส้น (A NOVEL POSITION-SENSORLESS PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR DRIVE BASED ON A LINEAR MODEL) อ. ที่ปรึกษา: อ. ดร. สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์, 114 หน้า. ISBN 974-17-3583-9

เนื่องจากแบบจำลองทางพลวัตของมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรที่ใช้กันโดยทั่วไปมีความไม่เชิงเส้น จึงทำให้เกิดปัญหาในการสร้างระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง ดังนั้น จุดมุ่งหมายหลักของวิทยานิพนธ์นี้คือ การนำเสนอแบบจำลองทางพลวัตของมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร แบบใหม่ที่มีลักษณะเป็นเชิงเส้นและสร้างระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรไร้เซนเซอร์วัด ตำแหน่งรูปแบบใหม่โดยใช้ตัวสังเกตเต็มอันดับแบบปรับตัวในการประมาณค่าตำแหน่งโรเตอร์ เนื่องจากระบบ ที่นำเสนอเป็นแบบเชิงเส้นจึงง่ายต่อการวิเคราะห์เสถียรภาพและการออกแบบอัตราขยายป้อนกลับของตัวสังเกต นอกจากนี้ผู้วิจัยได้นำเสนอการควบคุมเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วม ซึ่งเมื่อนำมาใช้ในการสังเกตเต็มอันดับ แบบปรับตัวเข้ากับการควบคุมเวกเตอร์ จะทำให้ลดความซับซ้อนของแบบจำลองลงได้ ในการวิเคราะห์ เสถียรภาพและสมรรถนะของระบบประมาณนั้น ผู้วิจัยได้ใช้วิธีเชิงพารามิเตอร์ในการวิเคราะห์ โดยจะแปลง ระบบประมาณไปอ้างอิงบนแกนหมุนของฟลักซ์ประมาณ ทำให้ได้บล็อกไดอะแกรมในการวิเคราะห์เสถียรภาพ ของระบบประมาณเป็นลักษณะเข้าเดี่ยวออกเดี่ยว ซึ่งสามารถใช้ Routh-Hurwitz Criterion ในการหาเงื่อนไขการมี เสถียรภาพของระบบประมาณได้โดยง่าย ผลการจำลองการทำงานและผลการทดลองยืนยันความถูกต้องของผล ทางทฤษฎีทั้งหมดที่พัฒนาขึ้น

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

# # 4470594421 : MAJOR POWER ELECTRONICS

KEY WORD : POSITION-SENSORLESS / STABILITY / PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS  
MOTOR

SAKORN PO-NGAM : A NOVEL POSITION-SENSORLESS PERMANENT MAGNET  
SYNCHRONOUS MOTOR DRIVE BASED ON A LINEAR MODEL. THESIS ADVISSOR :  
SOMBOON SANGWONGWANICH, Ph.D. 114 pp. ISBN 974-17-3583-9.

Since the conventional dynamic model of the permanent magnet synchronous motor (PMSM) is nonlinear, it causes problems in the development of position-sensorless PMSM drives. The main objective of this thesis is, therefore, to introduce a novel linear dynamic model for the PMSM based on which an adaptive full-order observer for position estimation is proposed. Owing to the linearity of the new model, the stability analysis and the feedback gain design of the observer become simple. In addition, the author also develops a decoupling vector control for the PMSM and integrates it with the adaptive observer to eliminate the model redundancy and thus reduce the complexity of the controller. A parametric approach is adopted in the analysis of the stability and tracking performance of the adaptive observer by transforming the estimation system onto the estimated flux reference frame and making it a single-input-single-output system which can be analyzed by the Routh-Hurwitz criterion. The validity of all the theoretical results is verified by simulation and experiments.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department ..... ELECTRICAL ENGINEERING ..... Student's signature.....

Field of study ..... ELECTRICAL ENGINEERING ..... Advisor's signature.....

Academic year ..... 2003

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วง ด้วยความช่วยเหลือและเอาใจใส่อย่างดียิ่งของ อาจารย์ ดร. สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ที่ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือด้านต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัยและการดำเนินชีวิตตลอดมา รวมทั้งท่านอาจารย์ทั้งหลายที่ให้ความรู้ตั้งแต่อดีตจนกระทั่งปัจจุบัน ตลอดจนจนถึงบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้มอบทุนเฉลิมฉลองในวโรกาสที่พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวทรงเจริญพระชนมายุครบรอบ 72 พรรษา ซึ่งทำให้ข้าพเจ้าได้ศึกษาในสถาบันแห่งนี้ รวมทั้งบริษัท เอ.พี.วาย เอ็นจิเนียริง จำกัด ที่ได้ให้ความช่วยเหลือทางด้านอุปกรณ์และเครื่องมือในการทำวิจัย จึงขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และญาติพี่น้องของข้าพเจ้า ผู้ซึ่งให้โอกาสทางการศึกษาและเป็นกำลังใจด้วยดีเสมอมา



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญเรื่อง

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญเรื่อง.....	ช
สารบัญภาพ.....	ฅ
สารบัญตาราง.....	ฉ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
2 แบบจำลองลักษณะทางพลวัตของมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรที่เป็นเชิงเส้น.....	4
3 การควบคุมเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วม.....	10
4 ตัวสังเกตเต็มอันดับสำหรับมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร.....	29
5 ทฤษฎีการควบคุมมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรแบบเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง.....	56
6 เสถียรภาพและการออกแบบระบบประมาณค่าความเร็ว.....	84
7 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	98
รายการอ้างอิง.....	101
ภาคผนวก.....	102
ประวัติผู้เขียนผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	114

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 การอ้างอิงสเปซเวกเตอร์กระแสและแรงดันบนแกนอ้างอิงสเตเตอร์และแกนอ้างอิง โรเตอร์.....	8
3.1 หลักการควบคุมแรงบิดของการควบคุมแบบเวกเตอร์.....	10
3.2 ระบบควบคุมเวกเตอร์ โดยทั่วไปที่ใช้วงรอบควบคุมกระแสที่มีแบนด์วิดธ์สูง.....	11
3.3 โครงสร้างของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบแรงดันโดยอาศัยการควบคุมแยกการเชื่อมร่วม...	14
3.4 ระบบควบคุมความเร็วด้วยตัวควบคุมเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วม.....	15
3.5 ผลการจำลองการทำงานขณะกลับทิศความเร็วจาก 1000 ไป -1000 rpm เมื่อใช้การควบคุม แยกการเชื่อมร่วม.....	17
3.6 ผลการจำลองการทำงานขณะกลับทิศความเร็วจาก -1000 ไป 1000 rpm เมื่อใช้การควบคุม แยกการเชื่อมร่วม.....	17
3.7 ผลการจำลองการทำงานเมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วมในกรณีเปลี่ยนแปลง ความเร็วคำสั่งในช่วงแคบ (รูปคลื่นความเร็วและกระแสสร้างแรงบิด).....	18
3.8 ผลการจำลองการทำงานเมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วมในกรณีเปลี่ยนแปลง ความเร็วคำสั่งในช่วงแคบจาก 1100 ไป 1000 rpm (รูปคลื่นตำแหน่งและกระแสเฟส u)....	18
3.9 ผลการจำลองการทำงานเมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วมในกรณีเปลี่ยนแปลง ความเร็วคำสั่งในช่วงแคบจาก 1000 ไป 1100 rpm (รูปคลื่นตำแหน่งและกระแสเฟส u)....	19
3.10 ผลการจำลองการทำงานในกรณีเปลี่ยนแปลง โหลดแบบขั้นที่ความเร็ว 1000 rpm เมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วม.....	20
3.11 ผลการจำลองการทำงานในกรณีเปลี่ยนแปลง โหลดแบบขั้นที่ความเร็ว 500 rpm เมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วม.....	21
3.12 ผลการจำลองการทำงานในกรณีเปลี่ยนแปลง โหลดแบบขั้นที่ความเร็ว 200 rpm เมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วม.....	22
3.13 ผลการทดลองในสภาวะอยู่ตัวเมื่อความเร็วคำสั่งมีค่าเท่ากับ 1000 rpm เมื่อใช้การควบคุม แยกการเชื่อมร่วม (รูปคลื่นกระแสและตำแหน่ง).....	23
3.14 ผลการทดลองในสภาวะอยู่ตัวเมื่อความเร็วคำสั่งมีค่าเท่ากับ 500 rpm เมื่อใช้การควบคุม แยกการเชื่อมร่วม (รูปคลื่นกระแสและตำแหน่ง).....	23
3.15 ผลการทดลองในสภาวะอยู่ตัวเมื่อความเร็วคำสั่งมีค่าเท่ากับ 200 rpm เมื่อใช้การควบคุม แยกการเชื่อมร่วม (รูปคลื่นกระแสและตำแหน่ง).....	24



สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.16 ผลการทดลองขณะกลับทิศความเร็วจาก 1000 ไป -1000 rpm เมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วม (รูปคลื่นความเร็วและกระแสสร้างแรงบิด).....	25
3.17 ผลการทดลองขณะกลับทิศความเร็วจาก -1000 ไป 1000 rpm เมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วม (รูปคลื่นความเร็วและกระแสสร้างแรงบิด).....	25
3.18 ผลการทดลองเมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วมในกรณีเปลี่ยนแปลงความเร็วคำสั่งในช่วงแคบ (รูปคลื่นความเร็วและกระแสสร้างแรงบิด).....	26
3.19 ผลการทดลองเมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วมในกรณีเปลี่ยนแปลงความเร็วคำสั่งในช่วงแคบจาก 1000 ไป 1100 rpm (รูปคลื่นตำแหน่งและกระแสเฟส u).....	26
3.20 ผลการทดลองเมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วมในกรณีเปลี่ยนแปลงความเร็วคำสั่งในช่วงแคบจาก 1100 ไป 1000 rpm (รูปคลื่นตำแหน่งและกระแสเฟส u).....	27
3.21 ผลการทดลองในกรณีเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้นที่ความเร็ว 1000 rpm เมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วม.....	27
3.22 ผลการทดลองในกรณีเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้นที่ความเร็ว 500 rpm เมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วม.....	28
3.23 ผลการทดลองในกรณีเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้นที่ความเร็ว 200 rpm เมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วม.....	28
4.1 ภาพรวมการทำงานของตัวสังเกตแบบเต็มอันดับ.....	30
4.2 บล็อกไดอะแกรมโดยรวมหลังบูรณาการตัวสังเกตเข้ากับระบบควบคุมเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วม.....	36
4.3 ระบบควบคุมความเร็วที่ใช้ระบบใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วมที่มีการประมาณค่าตำแหน่งด้วยตัวสังเกตเต็มอันดับ.....	37
4.4 ผลการจำลองการทำงานขณะกลับทิศความเร็วจาก 1000 ไป -1000 rpm เมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วมและตัวสังเกต.....	39
4.5 ผลการจำลองการทำงานขณะกลับทิศความเร็วจาก -1000 ไป 1000 rpm เมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วมและตัวสังเกต.....	40
4.6 ผลการจำลองการทำงานเมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วมและตัวสังเกตในกรณีเปลี่ยนแปลงความเร็วคำสั่งในช่วงแคบ (รูปคลื่นความเร็วและกระแสสร้างแรงบิด).....	41

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 ผลการจำลองการทำงานเมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วมและตัวสังเกตในกรณี เปลี่ยนแปลงความเร็วคำสั่งในช่วงแคบ (รูปคลื่นความเร็วและกระแสเฟส u) .....	41
4.8 ภาพขยายของข้อมูลตำแหน่งและกระแสเฟส u ของรูปที่ 4.7 ในขณะที่เปลี่ยนแปลง ความเร็วคำสั่งในช่วงแคบจาก 1000 ไป 1100 rpm เมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วม และตัวสังเกต.....	42
4.9 ภาพขยายของข้อมูลตำแหน่งและกระแสเฟส u ของรูปที่ 4.7 ในขณะที่เปลี่ยนแปลง ความเร็วคำสั่งในช่วงแคบจาก 1100 ไป 1000 rpm เมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วม และตัวสังเกต .....	42
4.10 ผลการจำลองในกรณีเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้นที่ความเร็ว 1000 rpm เมื่อใช้การควบคุม แยกการเชื่อมร่วมและตัวสังเกต.....	43
4.11 ผลการจำลองในกรณีเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้นที่ความเร็ว 500 rpm เมื่อใช้การควบคุม แยกการเชื่อมร่วมและตัวสังเกต.....	44
4.12 ผลการจำลองในกรณีเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้นที่ความเร็ว 200 rpm เมื่อใช้การควบคุม แยกการเชื่อมร่วมและตัวสังเกต .....	45
4.13 ผลการทดลองในสภาวะอยู่ตัวเมื่อความเร็วคำสั่งมีค่าเท่ากับ 1000 rpm เมื่อใช้การควบคุม แยกการเชื่อมร่วมและตัวสังเกต (รูปคลื่นกระแสและตำแหน่ง).....	46
4.14 ผลการทดลองในสภาวะอยู่ตัวเมื่อความเร็วคำสั่งมีค่าเท่ากับ 1000 rpm เมื่อใช้การควบคุม แยกการเชื่อมร่วมและตัวสังเกต (รูปคลื่นกระแสและฟลักซ์แม่เหล็ก).....	46
4.15 ผลการทดลองในสภาวะอยู่ตัวเมื่อความเร็วคำสั่งมีค่าเท่ากับ 500 rpm เมื่อใช้การควบคุม แยกการเชื่อมร่วมและตัวสังเกต (รูปคลื่นกระแสและตำแหน่ง).....	47
4.16 ผลการทดลองในสภาวะอยู่ตัวเมื่อความเร็วคำสั่งมีค่าเท่ากับ 500 rpm เมื่อใช้การควบคุม แยกการเชื่อมร่วมและตัวสังเกต (รูปคลื่นกระแสและฟลักซ์แม่เหล็ก).....	47
4.17 ผลการทดลองในสภาวะอยู่ตัวเมื่อความเร็วคำสั่งมีค่าเท่ากับ 200 rpm เมื่อใช้การควบคุม แยกการเชื่อมร่วมและตัวสังเกต (รูปคลื่นกระแสและตำแหน่ง).....	48
4.18 ผลการทดลองในสภาวะอยู่ตัวเมื่อความเร็วคำสั่งมีค่าเท่ากับ 200 rpm เมื่อใช้การควบคุม แยกการเชื่อมร่วมและตัวสังเกต (รูปคลื่นกระแสและฟลักซ์แม่เหล็ก).....	48
4.19 ผลการทดลองขณะกลับทิศความเร็วจาก 1000 ไป -1000 rpm เมื่อใช้การควบคุม แยกการเชื่อมร่วมและตัวสังเกต (รูปคลื่นความเร็วและกระแสสร้างแรงบิด).....	49

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.20 ผลการทดลองขณะกลับทิศความเร็วจาก -1000 ไป 1000 rpm เมื่อใช้การควบคุม แยกการเชื่อมร่วมและตัวสังเกต (รูปคลื่นความเร็วและกระแสสร้างแรงบิด).....	49
4.21 ผลการทดลองขณะกลับทิศความเร็วจาก -1000 ไป 1000 rpm เมื่อใช้การควบคุม แยกการเชื่อมร่วมและตัวสังเกต (รูปคลื่นกระแส, ความเร็วและตำแหน่ง).....	50
4.22 ผลการทดลองขณะกลับทิศความเร็วจาก 1000 ไป -1000 rpm เมื่อใช้การควบคุม แยกการเชื่อมร่วมและตัวสังเกต (รูปคลื่นกระแส, ความเร็วและตำแหน่ง).....	50
4.23 ผลการทดลองเมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วมและตัวสังเกตในกรณีเปลี่ยนแปลง ความเร็วคำสั่งในช่วงแคบ (รูปคลื่นความเร็วและกระแสสร้างแรงบิด).....	51
4.24 ผลการทดลองเมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วมและตัวสังเกตในกรณีเปลี่ยนแปลง ความเร็วคำสั่งในช่วงแคบ (รูปคลื่นตำแหน่งและกระแสเฟส u).....	51
4.25 ภาพขยายของข้อมูลตำแหน่งและกระแสเฟส u ของรูปที่ 4.24 ในขณะที่เปลี่ยนแปลง ความเร็วคำสั่งในช่วงแคบจาก 1000 ไป 1100 rpm เมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วม และตัวสังเกต .....	52
4.26 ภาพขยายของข้อมูลตำแหน่งและกระแสเฟส u ของรูปที่ 4.24 ในขณะที่เปลี่ยนแปลง ความเร็วคำสั่งในช่วงแคบจาก 1100 ไป 1000 rpm เมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วม และตัวสังเกต.....	52
4.27 ผลการทดลองในกรณีเปลี่ยนแปลง โหลดแบบขั้นที่ความเร็ว 1000 rpm เมื่อใช้การควบคุม แยกการเชื่อมร่วมและตัวสังเกต (รูปคลื่นความเร็วและกระแสสร้างแรงบิด).....	53
4.28 ผลการทดลองในกรณีเปลี่ยนแปลง โหลดแบบขั้นที่ความเร็ว 1000 rpm เมื่อใช้การควบคุม แยกการเชื่อมร่วมและตัวสังเกต (รูปคลื่นกระแสและตำแหน่ง).....	53
4.29 ผลการทดลองในกรณีเปลี่ยนแปลง โหลดแบบขั้นที่ความเร็ว 500 rpm เมื่อใช้การควบคุม แยกการเชื่อมร่วมและตัวสังเกต (รูปคลื่นความเร็วและกระแสสร้างแรงบิด).....	54
4.30 ผลการทดลองในกรณีเปลี่ยนแปลง โหลดแบบขั้นที่ความเร็ว 500 rpm เมื่อใช้การควบคุม แยกการเชื่อมร่วมและตัวสังเกต (รูปคลื่นกระแสและตำแหน่ง).....	54
4.31 ผลการทดลองในกรณีเปลี่ยนแปลง โหลดแบบขั้นที่ความเร็ว 200 rpm เมื่อใช้การควบคุม แยกการเชื่อมร่วมและตัวสังเกต (รูปคลื่นความเร็วและกระแสสร้างแรงบิด).....	55
4.32 ผลการทดลองในกรณีเปลี่ยนแปลง โหลดแบบขั้นที่ความเร็ว 200 rpm เมื่อใช้การควบคุม แยกการเชื่อมร่วมและตัวสังเกต (รูปคลื่นกระแสและตำแหน่ง).....	55

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.1 แผนภาพรวมการทำงานของตัวสังเกตเต็มอันดับแบบปรับตัว.....	57
5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าผิดพลาดของกระแสเตเตอร์และค่าผิดพลาดของความเร็ว ประมาณ.....	58
5.3 บล็อกไดอะแกรมรวมหลังบูรณาการตัวสังเกตแบบปรับตัวเข้ากับระบบควบคุมเวกเตอร์ แยกการเชื่อมร่วม.....	60
5.4 ระบบควบคุมความเร็วที่ใช้ระบบเวกเตอร์แยกการเชื่อมร่วมที่มีการประมาณค่าตำแหน่ง และความเร็วด้วยตัวสังเกตเต็มอันดับแบบปรับตัว .....	61
5.5 ผลการจำลองในสถานะอยู่ตัวเมื่อความเร็วคำสั่งมีค่าเท่ากับ 1000 rpm เมื่อใช้ระบบ การควบคุมเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง (รูปคลื่นกระแสและตำแหน่ง).....	63
5.6 ผลการจำลองในสถานะอยู่ตัวเมื่อความเร็วคำสั่งมีค่าเท่ากับ 500 rpm เมื่อใช้ระบบ การควบคุมเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง (รูปคลื่นกระแสและตำแหน่ง).....	63
5.7 ผลการจำลองในสถานะอยู่ตัวเมื่อความเร็วคำสั่งมีค่าเท่ากับ 200 rpm เมื่อใช้ระบบ การควบคุมเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง (รูปคลื่นกระแสและตำแหน่ง).....	64
5.8 ผลการจำลองขณะกลับทิศความเร็วจาก 1000 ไป -1000 rpm เมื่อใช้ระบบการควบคุม เวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง.....	65
5.9 ผลการจำลองขณะกลับทิศความเร็วจาก -1000 ไป 1000 rpm เมื่อใช้ระบบการควบคุม เวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง.....	66
5.10 ผลการจำลองเมื่อใช้ระบบการควบคุมเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งในกรณี เปลี่ยนแปลงความเร็วคำสั่งในช่วงแคบ (รูปคลื่นความเร็วและกระแสสร้างแรงบิด).....	67
5.11 ผลการจำลองเมื่อใช้ระบบการควบคุมเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งในกรณี เปลี่ยนแปลงความเร็วคำสั่งในช่วงแคบ (รูปคลื่นตำแหน่งและกระแสเฟส u).....	67
5.12 ภาพขยายของข้อมูลตำแหน่งและกระแสเฟส u ของรูปที่ 5.11 ในขณะที่เปลี่ยนแปลง ความเร็วคำสั่งในช่วงแคบจาก 1000 ไป 1100 rpm เมื่อใช้ระบบการควบคุมเวกเตอร์ ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง.....	68
5.13 ภาพขยายของข้อมูลตำแหน่งและกระแสเฟส u ของรูปที่ 5.11 ในขณะที่เปลี่ยนแปลง ความเร็วคำสั่งในช่วงแคบจาก 1100 ไป 1000 rpm เมื่อใช้ระบบการควบคุมเวกเตอร์ ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง.....	68



## สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.28 ผลการทดลองขณะกลับทิศความเร็วจาก -1000 ไป 1000 rpm เมื่อใช้ระบบการควบคุม เวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง (รูปคลื่นความเร็วและกระแสสร้างแรงบิด) .....	78
5.29 ผลการทดลองขณะกลับทิศความเร็วจาก -1000 ไป 1000 rpm เมื่อใช้ระบบการควบคุม เวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง (รูปคลื่นกระแส, ความเร็วและตำแหน่ง).....	78
5.30 ผลการทดลองเมื่อใช้ระบบการควบคุมเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งในกรณี เปลี่ยนแปลงความเร็วคำสั่งในช่วงแคบ (รูปคลื่นความเร็วและกระแสสร้างแรงบิด).....	79
5.31 ผลการทดลองเมื่อใช้ระบบการควบคุมเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งในกรณี เปลี่ยนแปลงความเร็วคำสั่งในช่วงแคบ (รูปคลื่นตำแหน่งและกระแสเฟส u).....	79
5.32 ภาพขยายของข้อมูลตำแหน่งและกระแสเฟส u ของรูปที่ 4.24 ในขณะที่เปลี่ยนแปลง ความเร็วคำสั่งในช่วงแคบจาก 1000 ไป 1100 rpm เมื่อใช้ระบบการควบคุมเวกเตอร์ ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง .....	80
5.33 ภาพขยายของข้อมูลตำแหน่งและกระแสเฟส u ของรูปที่ 4.24 ในขณะที่เปลี่ยนแปลง ความเร็วคำสั่งในช่วงแคบจาก 1100 ไป 1000 rpm เมื่อใช้ระบบการควบคุมเวกเตอร์ ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง .....	80
5.34 ผลการทดลองในกรณีเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้นที่ความเร็ว 1000 rpm เมื่อใช้ระบบการ ควบคุมเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง (รูปคลื่นความเร็วและกระแสสร้างแรงบิด).....	81
5.35 ผลการทดลองในกรณีเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้นที่ความเร็ว 1000 rpm เมื่อใช้ระบบการ ควบคุมเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง (รูปคลื่นกระแสและตำแหน่ง).....	81
5.36 ผลการทดลองในกรณีเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้นที่ความเร็ว 500 rpm เมื่อใช้ระบบการ ควบคุมเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง (รูปคลื่นความเร็วและกระแสสร้างแรงบิด).....	82
5.37 ผลการทดลองในกรณีเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้นที่ความเร็ว 500 rpm เมื่อใช้ระบบการ ควบคุมเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง (รูปคลื่นกระแสและตำแหน่ง).....	82
5.38 ผลการทดลองในกรณีเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้นที่ความเร็ว 200 rpm เมื่อใช้ระบบการ ควบคุมเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง (รูปคลื่นความเร็วและกระแสสร้างแรงบิด) .....	83
5.39 ผลการทดลองในกรณีเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้นที่ความเร็ว 200 rpm เมื่อใช้ระบบการ ควบคุมเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง (รูปคลื่นกระแสและตำแหน่ง) .....	83
6.1 บล็อกไดอะแกรมของค่าผิดพลาดในระบบประมาณค่าความเร็วบนแกนอ้างอิงสเตเตอร์....	86

## สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.2 บล็อกไดอะแกรมของค่าผิดพลาดในระบบประมาณค่าความเร็วบนแกนหมุนของ ฟลักซ์ประมาณ.....	87
6.3 วงรอบปิดของระบบประมาณค่าความเร็วแบบสัญญาณเข้าออกเดี่ยว (SISO) บนแกน อ้างอิงฟลักซ์ประมาณ.....	88
6.4 บล็อกไดอะแกรมของระบบประมาณค่าความเร็วที่ใช้ในการพิจารณาค่าอัตราขยาย การปรับตัว.....	91
6.5 ผลการตอบสนองแบบแรมปีของการประมาณค่าความเร็ว.....	92
6.6 แผนภาพโบลของ $C^2G'_{22}(s)$ .....	93
6.7 แผนภาพโบลของฟังก์ชันโอนย้ายวงรอบเปิดของระบบประมาณค่าความเร็ว.....	94
6.8 ผลการทดลองการเร่งความเร็วเพื่อดูผลตอบสนองแบบแรมปีของระบบประมาณค่า ความเร็ว (รูปคลื่นความเร็ว, กระแสสร้างแรงบิดคำสั่งและกระแสเฟส u).....	95
6.9 ผลการทดลองการเร่งความเร็วเพื่อดูผลตอบสนองแบบแรมปีของระบบประมาณค่า ความเร็ว (รูปคลื่นความเร็ว, ค่าความผิดพลาดของความเร็วและกระแสเฟส u).....	95
6.10 ผลการทดลองการเร่งความเร็วเพื่อดูผลตอบสนองแบบแรมปีของระบบประมาณค่าความ เร็ว (รูปคลื่นความเร็ว, ค่าความผิดพลาดของความเร็วและกระแสสร้างแรงบิดคำสั่ง).....	96
6.11 ผลการทดลองการเร่งความเร็วเพื่อดูผลตอบสนองแบบแรมปีของระบบประมาณค่าความ เร็ว (รูปคลื่นตำแหน่ง, ค่าความผิดพลาดตำแหน่งและกระแสสร้างแรงบิดคำสั่ง).....	96
6.12 ผลการทดลองการเร่งความเร็วเพื่อดูผลตอบสนองแบบแรมปีของระบบประมาณค่าความ เร็ว (รูปคลื่นตำแหน่งประมาณ, ค่าความผิดพลาดตำแหน่ง, กระแสสร้างแรงบิดคำสั่ง และกระแสเฟส u).....	97
ก.1 โครงสร้างฮาร์ดแวร์ของระบบที่ใช้ในการทดสอบ.....	104
ก.2 ไดอะแกรมเวลาของซอฟต์แวร์โมดูล.....	107

สารบัญตาราง

ตารางที่

หน้า

ก.1	พิกัดและพารามิเตอร์ของมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรที่ใช้ในงานวิจัย.....	103
-----	---	-----



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเบื้องต้น

ในปัจจุบันมีการนำเอามอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร(Permanent Magnet Synchronous Motor: PMSM) มาใช้งานอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม ทั้งนี้เนื่องจาก มอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร มีตัวประกอบกำลังและประสิทธิภาพสูงรวมทั้งอัตราส่วนระหว่างแรงบิดต่อแรงเฉื่อยและอัตราส่วนระหว่างกำลังพิกัดต่อน้ำหนักของตัวมอเตอร์ก็มีค่าสูงด้วย ในการควบคุมแรงบิดของมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรนั้น เราจะต้องรู้ตำแหน่งของโรเตอร์ซึ่งต้องใช้ Encoder หรือ Resolver เป็นตัวเซนเซอร์ แต่เนื่องจากตัวเซนเซอร์เองมีขีดจำกัดในการติดตั้งและการใช้งานดังนั้นเพื่อแก้ปัญหาการใช้งาน รวมทั้งเพื่อลดค่าใช้จ่ายในการติดตั้งเซนเซอร์เหล่านั้น จึงมีงานวิจัยเพื่อพัฒนาวิธีการประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งของโรเตอร์แทนการวัดด้วยเซนเซอร์เกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก อาทิเช่น การคำนวณหาตำแหน่งและความเร็วจากข้อมูลของฟลักซ์แม่เหล็กซึ่งคำนวณจากการอินทิเกรตแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำภายในของมอเตอร์ [1] ซึ่งมีข้อเสียที่ระบบประมาณค่าความเร็วเป็นแบบวงรอบเปิด (Open-loop estimator) และมีปัญหาเรื่อง การขยับเลื่อน (Drift) และการอิ่มตัว (Saturation) ที่เกิดขึ้นจากการใช้ตัวอินทิเกรตด้วย, นอกจากนี้แล้วการใช้แบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear model) [2] ในการสร้างตัวสังเกต(Observer)เพื่อประมาณค่าตัวแปรสถานะ ทำให้การวิเคราะห์เสถียรภาพและการออกแบบตัวสังเกตนั้นต้องอาศัยการประมาณสมการให้เป็นเชิงเส้นรอบจุดทำงานก่อนจึงไม่สามารถยืนยันได้ว่าระบบจะมีเสถียรภาพตลอดย่านการทำงาน ซึ่งปัญหาของงานวิจัยต่างๆในอดีตสามารถสรุปได้ดังนี้คือ

- 1) แบบจำลองของมอเตอร์ที่ใช้มีความไม่เชิงเส้น
- 2) การวิเคราะห์เสถียรภาพทำโดยวิธีการประมาณเชิงเส้น (Linearization) ซึ่งผลสรุปที่ได้จะใช้กับการทำงานในช่วงกว้างไม่ได้
- 3) ไม่มีหลักเกณฑ์ที่ชัดเจนในการออกแบบระบบประมาณค่าความเร็วและตำแหน่ง

ในงานวิจัยนี้เราจะแก้ปัญหาดังกล่าวโดยการพัฒนาแบบจำลองมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งด้วยตัวสังเกตเต็มอันดับแบบปรับตัวซึ่งใช้แบบจำลองที่เป็น

เชิงเส้นที่นำเสนอขึ้นมาใหม่ เพื่อให้การวิเคราะห์เสถียรภาพมีความชัดเจน และนำเสนอแนวทางในการออกแบบอัตราขยายป้อนกลับของตัวสังเกตเพื่อให้ระบบโดยรวมมีเสถียรภาพตลอดย่านการทำงานด้วย

### 1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อพัฒนาระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งแบบใหม่โดยการนำเสนอแบบจำลองทางพลวัตของมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรแบบใหม่ที่เป็นเชิงเส้น และใช้ตัวสังเกตในการประมาณค่าความเร็ว, ตำแหน่ง และฟลักซ์แม่เหล็ก พร้อมทั้งทำการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบประมาณค่าความเร็วในทางทฤษฎี เพื่อให้ได้มาซึ่งหลักการออกแบบอัตราขยายป้อนกลับของตัวสังเกตที่ทำให้ระบบโดยรวมมีเสถียรภาพตลอดย่านการทำงาน

### 1.3 ขอบเขตวิทยานิพนธ์

1. พัฒนาวิธีการสร้างระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งที่ใช้แบบจำลองที่เป็นเชิงเส้น
2. วิเคราะห์เสถียรภาพของระบบประมาณค่าตำแหน่งและความเร็ว
3. ออกแบบอัตราขยายแบบปรับตัวที่เหมาะสมเพื่อให้ระบบประมาณค่าตำแหน่งและความเร็วมีผลตอบสนองที่ดี

### 1.4 ขั้นตอนในการดำเนินงาน

1. ศึกษาและพัฒนาทฤษฎีการสร้างระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง ที่ใช้แบบจำลองเชิงเส้น
2. ศึกษาและวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบประมาณค่าตำแหน่ง
3. ศึกษาและออกแบบอัตราขยายป้อนกลับของตัวสังเกตที่ทำให้ระบบประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งมีเสถียรภาพตลอดย่านการทำงาน
4. จำลองการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อทดสอบแนวความคิด
5. ออกแบบระบบในส่วนซอฟต์แวร์ พร้อมทดสอบการทำงาน
6. ปรับปรุงแก้ไขระบบในส่วนซอฟต์แวร์ที่ได้พัฒนาขึ้น
7. เก็บข้อมูล ประเมินผล และสรุปผล

## 8. เขียนวิทยานิพนธ์

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถนำทฤษฎีที่พัฒนาขึ้นไปใช้ในงานอุตสาหกรรมจริงเพื่อทำให้ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรไร้เซนเซอร์วัดความเร็วและตำแหน่งมีเสถียรภาพตลอดย่านการทำงาน และมีสมรรถนะที่ดีขึ้น
2. ช่วยให้เกิดทักษะในการวิจัยและพัฒนา อันเป็นพื้นฐานสำคัญในการพัฒนาอุตสาหกรรมแบบพึ่งพาตัวเองในประเทศ



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### แบบจำลองลักษณะทางพลวัตของมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรที่เป็นเชิงเส้น

ในบทนี้เราจะกล่าวถึงประเด็นหลักของงานวิจัยนี้คือ การนำเสนอแบบจำลองลักษณะทางพลวัตของมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรแบบใหม่ที่เป็นเชิงเส้น โดยอันดับแรกจะกล่าวถึงแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งจะทำให้เกิดปัญหาเมื่อนำมาสร้างตัวสังเกตเพื่อเปรียบเทียบให้เห็นความแตกต่างของแบบจำลอง

#### 2.1 แบบจำลองลักษณะทางพลวัตของมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรที่ไม่เป็นเชิงเส้น

โดยทั่วไปแบบจำลองของมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรที่อ้างอิงบนแกนอ้างอิงสเตเตอร์แสดงได้ดังสมการที่ (2.1)

$$\vec{u} = R * \vec{i} + L \frac{d\vec{i}}{dt} + J\omega * \Psi e^{J\rho} \quad (2.1)$$

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

โดยที่

$\vec{u}$  : สเปซเวกเตอร์ของแรงดันสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์

$\vec{i}$  : สเปซเวกเตอร์ของกระแสสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์

$R$  : ความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์

$L$  : ความเหนี่ยวนำของขดลวดสเตเตอร์

$\Psi$  : ฟลักซ์แม่เหล็กจากแม่เหล็กถาวร

$\omega, \rho$  : ความเร็วและตำแหน่งของโรเตอร์คิดเป็นปริมาณทางไฟฟ้า

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

เมื่อกำหนดให้ตัวแปรสถานะคือ  $[\vec{i} \ \rho]^T$  เราสามารถเขียนสมการที่ (2.1) ในรูปแบบสมการสถานะอันดับ 3 ได้ดังสมการที่ (2.2)

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_x \\ i_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R/L & 0 \\ 0 & -R/L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_x \\ i_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega\Psi/L & 0 \\ 0 & \omega\Psi/L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin(\rho) \\ \cos(\rho) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/L & 0 \\ 0 & 1/L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

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

โดยที่ตัวห้อย  $x, y$  แสดงถึงองค์ประกอบในแกนอ้างอิงสเตเตอร์  $x, y$  ตามลำดับ สมการสถานะ(2.2) เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ซึ่งโครนส์แม่เหล็กถาวรที่ใช้ในงานวิจัยทั่วไป แต่เนื่องจากสมการสถานะ(2.2) มีเทอม  $\cos(\rho), \sin(\rho)$  ปะปนอยู่จึงทำให้สมการสถานะมีลักษณะไม่เชิงเส้น ซึ่งเป็นจุดค้อยของแบบจำลองนี้ ถ้าเรานำแบบจำลองนี้มาสร้างตัวสังเกต เพื่อประมาณค่าตัวแปรสถานะจะได้ดังสมการที่ (2.3)

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{i}_x \\ \hat{i}_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R/L & 0 \\ 0 & -R/L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_x \\ \hat{i}_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \hat{\omega}\Psi/L & 0 \\ 0 & \hat{\omega}\Psi/L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin(\hat{\rho}) \\ \cos(\hat{\rho}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} h_1 & -h_2 \\ h_2 & h_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_x - i_x \\ \hat{i}_y - i_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/L & 0 \\ 0 & 1/L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \end{bmatrix}$$

$$\frac{d\hat{\rho}}{dt} = \hat{\omega} + \begin{bmatrix} h_3 & h_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_x - i_x \\ \hat{i}_y - i_y \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

โดยที่ “^” หมายถึงค่าประมาณ

$h_1, h_2, h_3, h_4$  คืออัตราขยายป้อนกลับ (Feedback gains) ของตัวสังเกต

ซึ่งในสมการที่ (2.3) ก็จะมีเทอม  $\cos(\hat{\rho}), \sin(\hat{\rho})$  ซึ่งเป็นส่วนที่ไม่เป็นเชิงเส้น เช่นเดียวกับสมการสถานะ (2.2) ทำให้เราไม่สามารถใช้ทฤษฎีของระบบควบคุมแบบเชิงเส้น (Linear Control System) ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของตัวสังเกตและการออกแบบอัตราขยายป้อนกลับได้โดยตรง โดยทั่วไปเราจะต้องทำการประมาณสมการให้เป็นเชิงเส้นรอบจุดทำงานก่อนแล้วจึงค่อยทำการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการของระบบเชิงเส้น ดังนั้นแม้ผลการวิเคราะห์ระบบประมาณจะบ่งชี้ว่าระบบประมาณค่าความเร็วมีเสถียรภาพรอบๆจุดทำงานแต่เราก็ไม่สามารถยืนยันได้ว่าระบบจะมีเสถียรภาพตลอดย่านการทำงานในช่วงกว้าง เพื่อแก้ปัญหาค่าความไม่เชิงเส้นดังกล่าวในงานวิจัยนี้เรานำเสนอแบบจำลองแบบใหม่ดังแสดงในหัวข้อต่อไป

## 2.2 แบบจำลองลักษณะทางพลวัตของมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรที่เป็นเชิงเส้น

เนื่องจากการที่เรามองเพียงแค่ตำแหน่งของฟลักซ์แม่เหล็กเป็นตัวแปรสถานะเพียงอย่างเดียวโดยไม่คำนึงถึงขนาดเหมือนหัวข้อที่ผ่านมา จะส่งผลให้แบบจำลองลักษณะทางพลวัตของมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นเราจึงนำเสนอแบบจำลองลักษณะทางพลวัตของมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรโดยพิจารณาว่าฟลักซ์แม่เหล็กของมอเตอร์นั้นเป็นสเปซเวกเตอร์ตัวหนึ่ง ซึ่งมีทั้งขนาดและมุมแต่มีเงื่อนไขว่าขนาดของฟลักซ์แม่เหล็กมีค่าคงที่ ( $\frac{d\Psi}{dt} = 0$ ) ส่งผลให้แบบจำลองลักษณะทางพลวัตของมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรที่นำเสนอเป็นเชิงเส้น ดังสมการที่ (2.4) และ (2.5) นี้

$$\begin{aligned}\bar{u} &= R * \bar{i} + L \frac{d\bar{i}}{dt} + J\omega * \Psi e^{j\rho} \\ \frac{d}{dt} [\Psi e^{j\rho}] &= J\omega * \Psi e^{j\rho}\end{aligned}\tag{2.4}$$

โดยมีตัวแปรสถานะคือ  $[\bar{i} \ \Psi e^{j\rho}]^T$  สมการที่ (2.4) สามารถเขียนในรูปแบบสมการสถานะได้เป็น

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \bar{i} \\ \bar{\lambda} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} I & -J \frac{\omega}{L} \\ 0 & J\omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{i} \\ \bar{\lambda} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/L \\ 0 \end{bmatrix} \bar{u}\tag{2.5}$$

โดยที่เวกเตอร์ฟลักซ์แม่เหล็ก  $\bar{\lambda} = \Psi e^{j\rho}$  ในที่นี้ถ้าพิจารณาว่า  $\omega$  มีค่าคงที่แล้วจะเห็นว่าแบบจำลองที่นำเสนอจะเป็นเชิงเส้น และเราสามารถเขียนแบบจำลองสมการที่ (2.5) ในรูปแบบจำนวนเชิงซ้อน (Complex number notation) ได้ดังสมการที่ (2.6)- (2.7)

$$\frac{d\bar{i}}{dt} = -\frac{R}{L} \bar{i} - j \frac{\omega}{L} \bar{\lambda} + \frac{\bar{u}}{L}\tag{2.6}$$

$$\frac{d\bar{\lambda}}{dt} = j\omega \bar{\lambda}\tag{2.7}$$

สมการแบบจำลอง (2.6) เป็นแบบจำลองอ้างอิงบนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ซึ่งสามารถเขียนเป็นแบบจำลองอ้างอิงบนแกนอ้างอิงโรเตอร์ได้โดยการนำเอา  $e^{-j\rho}$  มาคูณทั้งสองข้างของสมการที่ (2.6) จะได้

$$e^{-j\rho} \frac{d\vec{i}}{dt} = -\frac{R}{L} \vec{i} e^{-j\rho} - j \frac{\omega}{L} \vec{\lambda} e^{-j\rho} + \frac{\vec{u}}{L} e^{-j\rho}$$

$$\frac{d}{dt} [\vec{i} e^{-j\rho}] + j \frac{d\rho}{dt} \vec{i} e^{-j\rho} = -\frac{R}{L} \vec{i} e^{-j\rho} - j \frac{\omega}{L} \Psi + \frac{\vec{u}}{L} e^{-j\rho} \quad (2.8)$$

นิยาม:

$\vec{i} e^{-j\rho} = i_d + j i_q$  : สเปซเวกเตอร์ของกระแสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงโรเตอร์  $d, q$

$\vec{u} e^{-j\rho} = u_d + j u_q$  : สเปซเวกเตอร์ของแรงดันสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงโรเตอร์  $d, q$

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

เมื่อแทนค่าในสมการที่ (2.8) จะได้

$$\frac{d}{dt} [i_d + j i_q] + j \omega [i_d + j i_q] = -\frac{R}{L} [i_d + j i_q] - j \frac{\omega}{L} \Psi + \frac{1}{L} [u_d + j u_q] \quad (2.9)$$

เมื่อทำการแยกส่วนจริง (Real part) กับส่วนจินตภาพ (Imaginary part) ของสมการที่ (2.9) เราจะได้สมการทางด้านสเตเตอร์ที่อ้างอิงบนแกนอ้างอิงโรเตอร์ในรูปแบบเวกเตอร์ (Vector notation) ดังสมการที่ (2.10)

สมการทางด้านสเตเตอร์ที่อ้างอิงบนแกนโรเตอร์:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\omega L i_q \\ \omega L i_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \Psi \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

สำหรับสมการที่ (2.7) สามารถย้ายมาอ้างอิงบนแกนอ้างอิงโรเตอร์ได้เช่นกันดังนี้

$$e^{-j\rho} \frac{d\bar{\lambda}}{dt} = j\omega\bar{\lambda}e^{-j\rho}$$

$$\frac{d}{dt}[\bar{\lambda}e^{-j\rho}] + j\Psi \frac{d\rho}{dt} = j\omega\Psi$$

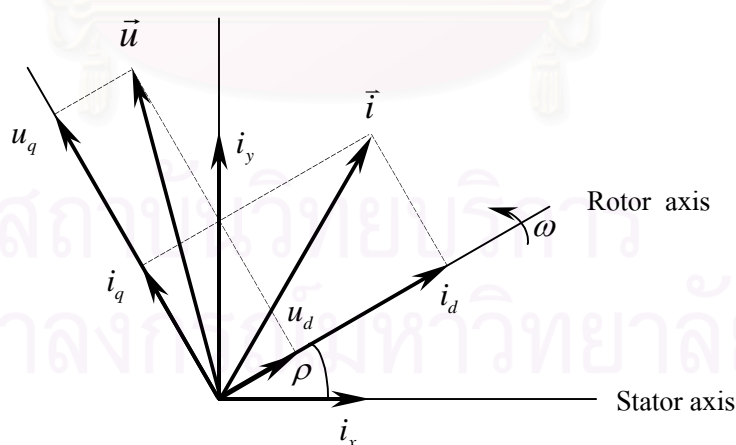
$$\frac{d\Psi}{dt} + j\omega\Psi = j\omega\Psi \quad (2.11)$$

ซึ่งส่วนจริงของสมการที่ (2.11) และสมการความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์ ( $\omega$ ) ก็คือสมการทางด้านโรเตอร์ที่อ้างอิงบนแกนโรเตอร์ แสดงดังสมการที่ (2.12) และสมการที่ (2.13) คือสมการแรงบิดของมอเตอร์ และรูปที่ 2.1 แสดงให้เห็นถึงการอ้างอิงปริมาณสเปซเวกเตอร์กระแสและแรงดันบนแกนอ้างอิงสเตเตอร์และแกนอ้างอิงโรเตอร์

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \rho \\ \Psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

$$T_m = \frac{p}{2} \Psi i_q \quad (2.13)$$

โดยที่  $p$  คือจำนวนขั้วแม่เหล็กของมอเตอร์



รูปที่ 2.1 การอ้างอิงสเปซเวกเตอร์กระแสและแรงดันบนแกนอ้างอิงสเตเตอร์และแกนอ้างอิงโรเตอร์



เราจะนำแบบจำลองนี้ไปสร้างระบบควบคุมแรงบิดในบทที่ 3 และสร้างตัวสังเกตเพื่อประมาณค่าตำแหน่งฟลักซ์แม่เหล็กในบทที่ 4 และบทที่ 5 ตามลำดับ อย่างไรก็ตามเราพบว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมาใหม่นี้จะตรงกับแบบจำลองที่นำเสนอในงานวิจัย [3] แต่ใน [3] ไม่มีการแสดงที่มาของสมการฟลักซ์แม่เหล็กรวมทั้งไม่ได้แสดงแบบจำลองบนแกนอ้างอิงโรเตอร์ด้วย และระบบควบคุมแรงบิด, การวิเคราะห์เสถียรภาพและการออกแบบอัตราขยายป้อนกลับของระบบประมาณที่จะกล่าวในบทต่อไปก็มีความแตกต่างกัน



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

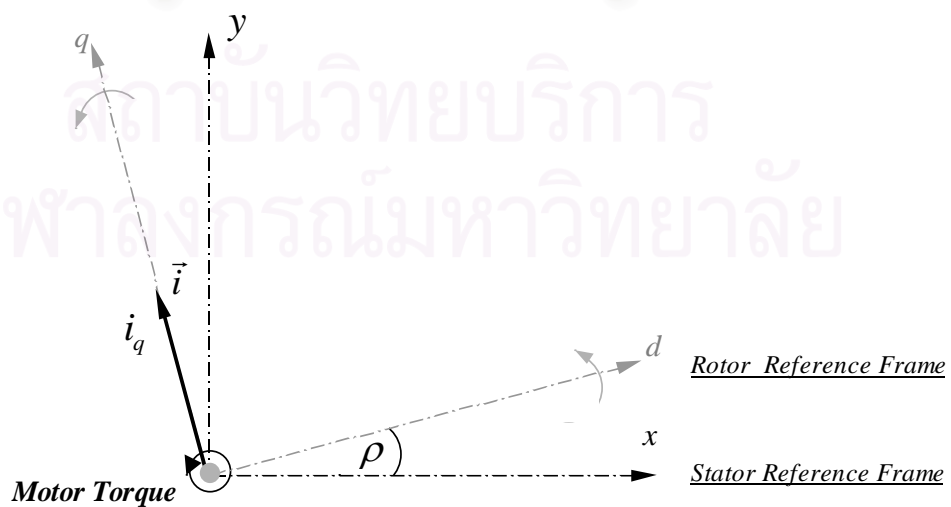
### บทที่ 3

#### การควบคุมเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วม

ในบทนี้เราจะกล่าวถึงการควบคุมแรงบิดของมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร โดยใช้หลักการควบคุมเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วม (Decoupling Control) ซึ่งเป็นการควบคุมแรงบิดที่มีสมรรถนะสูงในปัจจุบัน โดยอันดับแรกจะกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการของการควบคุมก่อน หลังจากนั้นจะเสนอผลการจำลองการทำงานและผลการทดสอบกับระบบจริง

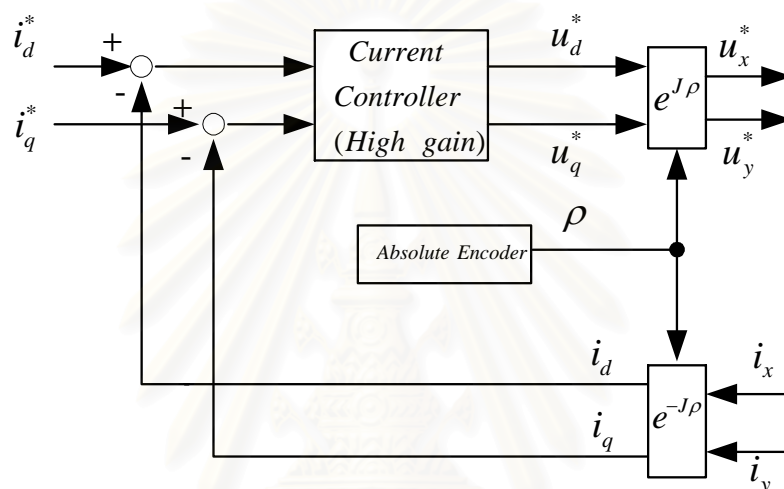
#### 3.1 ทฤษฎีการควบคุมเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วม

การควบคุมแบบเวกเตอร์เป็นการควบคุมแรงบิดของมอเตอร์โดยตรง ซึ่งจะทำการควบคุมแรงบิดผ่านทางกระแสเดเตอร์ ( $i_q$ ) (ดูรูปที่ 3.1 และสมการที่ (2.13) ประกอบ) แต่เนื่องจากในกรณีของมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรนี้ เราจำเป็นต้องรู้ตำแหน่งของฟลักซ์แม่เหล็กถึงสามารถจ่ายกระแสเดเตอร์ ( $i$ : บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์) ได้อย่างถูกต้องทั้งขนาด ( $i_q$ ) และมุม ( $\frac{\pi}{2} + \rho$ ) ดังนั้นเซนเซอร์วัดตำแหน่งต้องเป็นแบบสมบูรณ์ (Absolute Encoder) เท่านั้น และไม่สามารถใช้เซนเซอร์ตรวจจับความเร็ว เช่น แทโคเจนเนอเรเตอร์ เหมือนกับระบบควบคุมเวกเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้



รูปที่ 3.1 หลักการควบคุมแรงบิดของการควบคุมแบบเวกเตอร์

ระบบควบคุมเวกเตอร์โดยทั่วไปมีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 3.2 วิธีการควบคุมกระแสสเตเตอร์ที่นิยมใช้ในระบบควบคุมแบบเวกเตอร์โดยทั่วไป ก็คือการใช้วงรอบควบคุมกระแสที่มีแบนด์วิดธ์สูง เพื่อให้อินเวอร์เตอร์ทำงานเหมือนกับแหล่งจ่ายกระแสและควบคุมกระแสในแต่ละแกน ( $i_d$ ,  $i_q$ ) ได้อย่างอิสระ ด้วยวิธีการควบคุมนี้ทำให้เราต้องใช้ตัวประมวลผลที่มีความเร็วสูง นอกจากนี้การใช้อัตราขยายค่าสูงสำหรับตัวควบคุมกระแสยังจะทำให้เกิดปัญหาการขาดเสถียรภาพได้



รูปที่ 3.2 ระบบควบคุมเวกเตอร์โดยทั่วไปที่ใช้วงรอบควบคุมกระแสที่มีแบนด์วิดธ์สูง

ในทางตรงกันข้ามระบบควบคุมเวกเตอร์แบบแรงดันจะอาศัยการควบคุมแบบแยกการเชื่อมร่วม ในการควบคุมกระแส โดยทำการชดเชยแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่เชื่อมโยงระหว่างแกน  $d$  และ  $q$  และเนื่องจากตัวควบคุมทำงานในลักษณะป้อนไปหน้า จึงไม่มีปัญหาในเรื่องเสถียรภาพของการควบคุมกระแส

ระบบควบคุมเวกเตอร์แบบแรงดันที่อาศัยหลักการควบคุมแยกการเชื่อมร่วมสามารถอธิบายได้โดยเริ่มต้นจากแบบจำลองของมอเตอร์ซึ่งโครนัสแม่เหล็กถาวรบนแกนอ้างอิงโรเตอร์ในสมการที่ (2.10) ซึ่งสามารถเขียนได้ใหม่ได้ดังนี้

$$L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} - R \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \omega L i_q \\ \omega L i_d \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \Psi \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

จากสมการที่ (3.1) จะสังเกตได้ว่ามีเทอมของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำเชื่อมโยงระหว่างปริมาณในแกน  $d$  และแกน  $q$  ทำให้การควบคุมกระแสในแกนทั้งสองผ่านทางแรงดันสเตเตอร์ยุ่งยากและไม่มีอิสระในการควบคุมกระแสในแต่ละแกน ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหานี้เราจึงทำการชดเชยแรงดันที่เชื่อมโยงระหว่างแกนทั้งสองโดยกำหนดให้แรงดันสเตเตอร์ที่จ่ายให้กับมอเตอร์เป็นไปตามสมการที่ (3.2)

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u'_d \\ u'_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\omega Li_q \\ \omega Li_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega\Psi \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

เมื่อแทนสมการที่ (3.2) ลงในสมการที่ (3.1) จะได้

สมการสเตเตอร์หลังการควบคุมแยกการเชื่อมร่วม:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = -\frac{R}{L} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} u'_d \\ u'_q \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

สมการข้างต้นแสดงถึงลักษณะทางพลวัตของกระแสสเตเตอร์ที่มีการควบคุมได้อย่างอิสระในแต่ละแกนผ่านแรงดัน  $u'_d$  และ  $u'_q$  และเราเรียกการควบคุมแรงดัน  $u_d$  และ  $u_q$  ตามสมการ (3.2) ว่าเป็นการควบคุมแยกการเชื่อมร่วม (*Decoupling Control*) และถ้าเรากำหนดให้

$$\begin{bmatrix} u'_d \\ u'_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Ri_d^* \\ Ri_q^* \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

เราจะได้ผลตอบสนองของกระแสสเตเตอร์ ( $i_d, i_q$ ) ต่อกระแสคำสั่งในแต่ละแกน ( $i_d^*, i_q^*$ ) เป็นกรณ่วงแบบอันดับหนึ่งด้วยค่าคงตัวทางเวลาเท่ากับ  $L/R$

จากแนวคิดของการควบคุมแยกการเชื่อมร่วมข้างต้น เราสามารถเขียนสมการต่างๆของตัวควบคุมเวกเตอร์แบบแรงดันด้วยการควบคุมแบบแยกการเชื่อมร่วมที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ได้ดังสมการที่ (3.5)-(3.7)

แรงดันสเตเตอร์ของตัวควบคุมแยกการเชื่อมร่วมที่มีการชดเชยแรงดันที่เชื่อมโยงระหว่างแกน:

$$\begin{bmatrix} u_d^* \\ u_q^* \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_d^* \\ i_q^* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\omega L \hat{i}_q \\ \omega L \hat{i}_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \Psi \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

สมการสเตเตอร์หลังการควบคุมแยกการเชื่อมร่วม:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{i}_d \\ \hat{i}_q \end{bmatrix} = -\frac{R}{L} \begin{bmatrix} \hat{i}_d \\ \hat{i}_q \end{bmatrix} + \frac{R}{L} \begin{bmatrix} i_d^* \\ i_q^* \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

หรือ

$$\hat{i}_d = \frac{1}{Ls/R+1} i_d^* \quad (3.7)$$

$$\hat{i}_q = \frac{1}{Ls/R+1} i_q^* \quad (3.8)$$

ในกรณีที่เราเลือก  $i_d^* = 0$  (เพื่อต้องการให้อัตราส่วนของแรงบิดต่อกระแสสูงสุด) และ  $\hat{i}_d(0) = 0$  จะได้  $\hat{i}_d(t) \equiv 0$  ดังนั้นสมการที่ (3.7)-(3.8) สามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการที่ (3.9) และ (3.10) ตามลำดับ

$$\hat{i}_d = 0 \quad (3.9)$$

$$\hat{i}_q = \frac{1}{Ls/R+1} i_q^* \quad (3.10)$$

ในการคำนวณแรงดันขดเชยตามสมการที่ (3.5) เราจำเป็นต้องทราบข้อมูลของฟลักซ์แม่เหล็กซึ่งสามารถหาได้จากการวัดตำแหน่งโรเตอร์และการคำนวณได้จากสมการที่ (3.11)

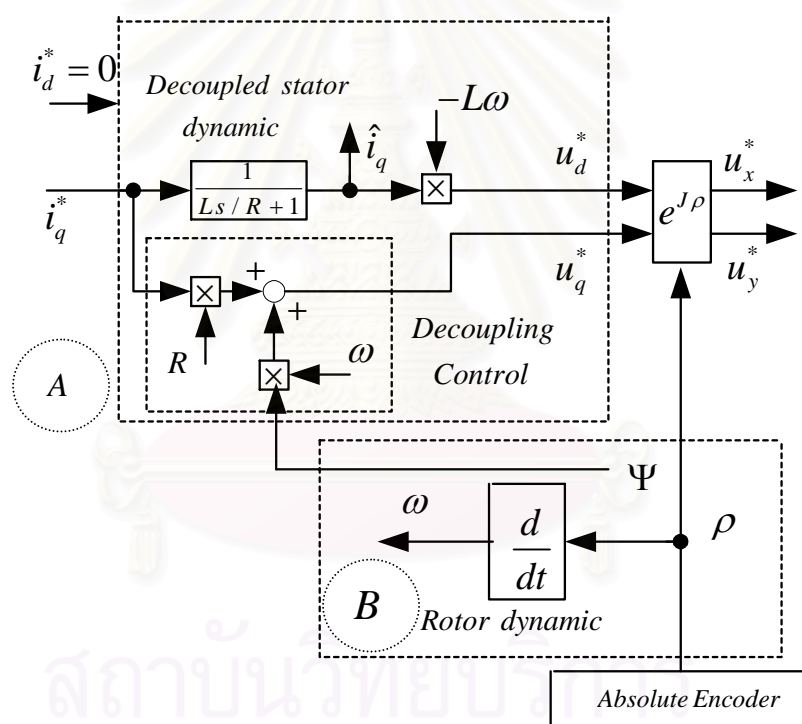
สมการโรเตอร์ในตัวควบคุมแยกการเชื่อมร่วม:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \rho \\ \Psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

จากสมการที่ (3.5) จะเห็นได้ว่าในกรณีนี้เราสามารถใส่กระแสสเตเตอร์ ( $\hat{i}_d, \hat{i}_q$ ) ที่คำนวณได้จากสมการที่ (3.9) และ (3.10) แทนการใช้ค่ากระแสจริงจากการตรวจจับ ( $i_d, i_q$ ) ซึ่งถือได้ว่าเป็นข้อดีของการควบคุมเวกเตอร์แบบแรงดัน ที่เราสามารถควบคุมแรงบิดของมอเตอร์ได้โดยไม่ต้องใช้ตัวตรวจจับกระแส เนื่องจากการคำนวณแรงดันขดเชยในการควบคุมแบบแยกการเชื่อมร่วม

ต้องการข้อมูลของกระแสเตเตอร์ ( $\hat{i}_d, \hat{i}_q$ ) และแรงดันที่เราสามารถสร้างได้ด้วยอินเวอร์เตอร์เป็นแรงดันบนแกนอ้างอิงของสเตเตอร์ เราจึงต้องแปลงแรงดันที่คำนวณได้ตามสมการที่ (3.5) ซึ่งอ้างอิงอยู่กับแกนอ้างอิงโรเตอร์ไปเป็นคำสั่งแรงดันบนแกนอ้างอิงของสเตเตอร์โดยใช้ข้อมูลของตำแหน่งเชิงมุมของเวกเตอร์ฟลักซ์แม่เหล็ก ซึ่งหาได้จากตัวเซนเซอร์วัดตำแหน่งโรเตอร์ ส่วนความเร็วโรเตอร์นั้นสามารถหาได้จากสมการที่ (3.11)

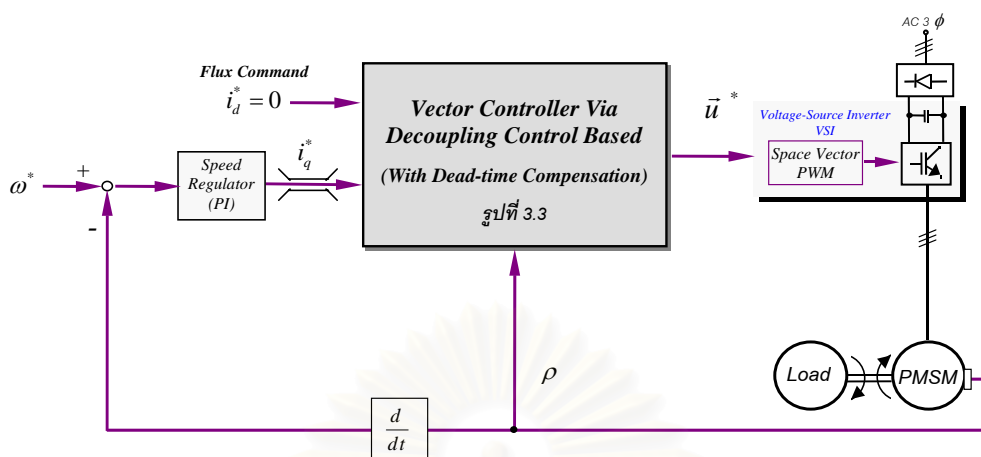
โครงสร้างของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบแรงดันที่มีการควบคุมแยกการเชื่อมร่วมสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.3 ในบริเวณ A คือการควบคุมแยกการเชื่อมร่วม (สมการที่ (3.5)) และลักษณะทางพลวัตทางด้านสเตเตอร์ (สมการที่ (3.10)) สำหรับบริเวณ B คือลักษณะทางพลวัตทางด้านโรเตอร์ (สมการที่ (3.11))



รูปที่ 3.3 โครงสร้างของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบแรงดันโดยอาศัยการควบคุมแยกการเชื่อมร่วม

### 3.2 ผลการจำลองการทำงานและผลการทดสอบสมรรถนะของระบบควบคุมแบบแยกการเชื่อมร่วม

รูปที่ 3.4 แสดงถึงโครงสร้างของระบบควบคุมความเร็วด้วยตัวควบคุมแบบแยกการเชื่อมร่วมที่ใช้ในการทดลองและจำลองการทำงาน โดยรายละเอียดของฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการทดลองได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก



รูปที่ 3.4 ระบบควบคุมความเร็วด้วยตัวควบคุมเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วม

#### ผลตอบสนองในสถานะอยู่ตัว

รูปที่ 3.13-3.15 เป็นผลการทดลองการทำงานในสถานะอยู่ตัวของระบบที่ความเร็ว 1000, 500 และ 200 rpm (มอเตอร์ขับโหลดอยู่ 2.1 Nm) ตามลำดับ ที่ความเร็ว 500 และ 1000 rpm ระบบสามารถ ควบคุมกระแสสร้างแรงบิดและฟลักซ์แม่เหล็กได้เป็นอย่างดี โดยดูจากค่าผิดพลาดของกระแสประมาณศูนย์ ในช่วงความเร็วต่ำ 200 rpm นั้น ผลการประวิงเวลา (Dead time) ของการสวิตช์ในอินเวอร์เตอร์และความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของมอเตอร์จะส่งผลกระทบต่อ การควบคุมแรงบิดของมอเตอร์ ทำให้สมรรถนะในการควบคุมแรงบิดลดลง นอกจากนี้กระแส สเตเตอร์ก็จะมีค่าผิดพลาดเพิ่มขึ้นไปจากรูปคลื่นไซน์ด้วยเช่นกัน

#### ผลตอบสนองต่อการกลับทิศความเร็ว

รูปที่ 3.5-3.6 และรูปที่ 3.16-3.17 เป็นผลการจำลองการทำงานและผลการทดลองในขณะ กลับทิศความเร็วจาก 1000 ↔ -1000 rpm ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าระบบสามารถควบคุมแรงบิด ของมอเตอร์ได้เป็นอย่างดี โดยดูจาก Envelope ของกระแสสเตเตอร์ที่เป็นไปตามกระแสสร้าง แรงบิดคำสั่ง ทั้งผลการทดลองและผลการจำลองการทำงาน

#### ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความเร็วคำสั่งในช่วงแคบ

รูปที่ 3.7-3.9 และรูปที่ 3.18-3.20 เป็นผลการจำลองการทำงานและผลการทดลอง ในกรณี เปลี่ยนแปลงความเร็วคำสั่งจาก 1000 ↔ 1100 rpm ตามลำดับ จะเห็นว่าระบบควบคุมสามารถ

ควบคุมความเร็วได้ตามค่าคำสั่งอย่างรวดเร็ว ซึ่งก็จะสอดคล้องกันระหว่างผลการทดลองและผลการจำลองการทำงาน

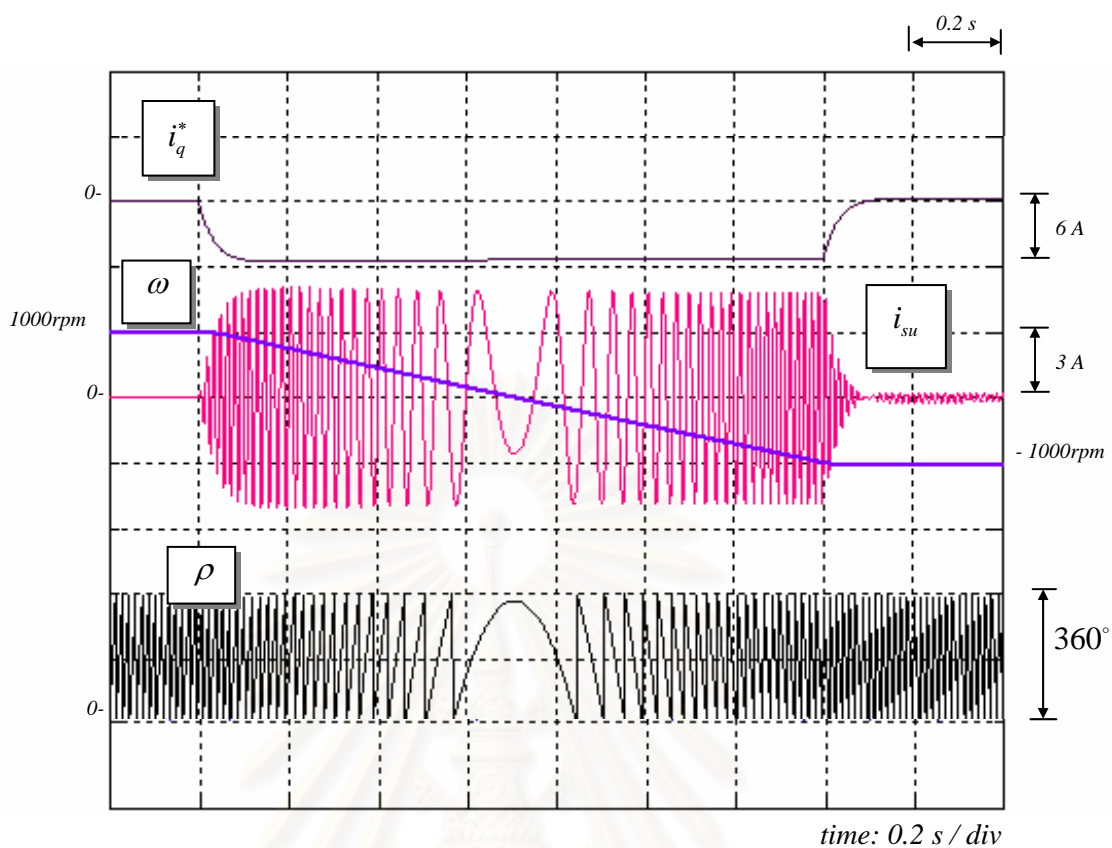
#### ผลตอบสนองต่อโหลดแบบขั้น

รูปที่ 3.10-3.12 และรูปที่ 3.21-3.23 เป็นผลการจำลองการทำงานและผลการทดลอง ในกรณีเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้น (2.1 Nm) ที่ความเร็ว 1000, 500 และ 200 rpm ตามลำดับ จะเห็นว่าระบบควบคุมสามารถควบคุมแรงบิดได้อย่างรวดเร็ว โดยสังเกตจากกระแสสร้างแรงบิดของมอเตอร์ก็จะเป็นตามค่าคำสั่ง และมีเวลาในการตอบสนองของความเร็วมีประมาณ 700 ms ทั้งผลการทดลองและผลการจำลองการทำงาน

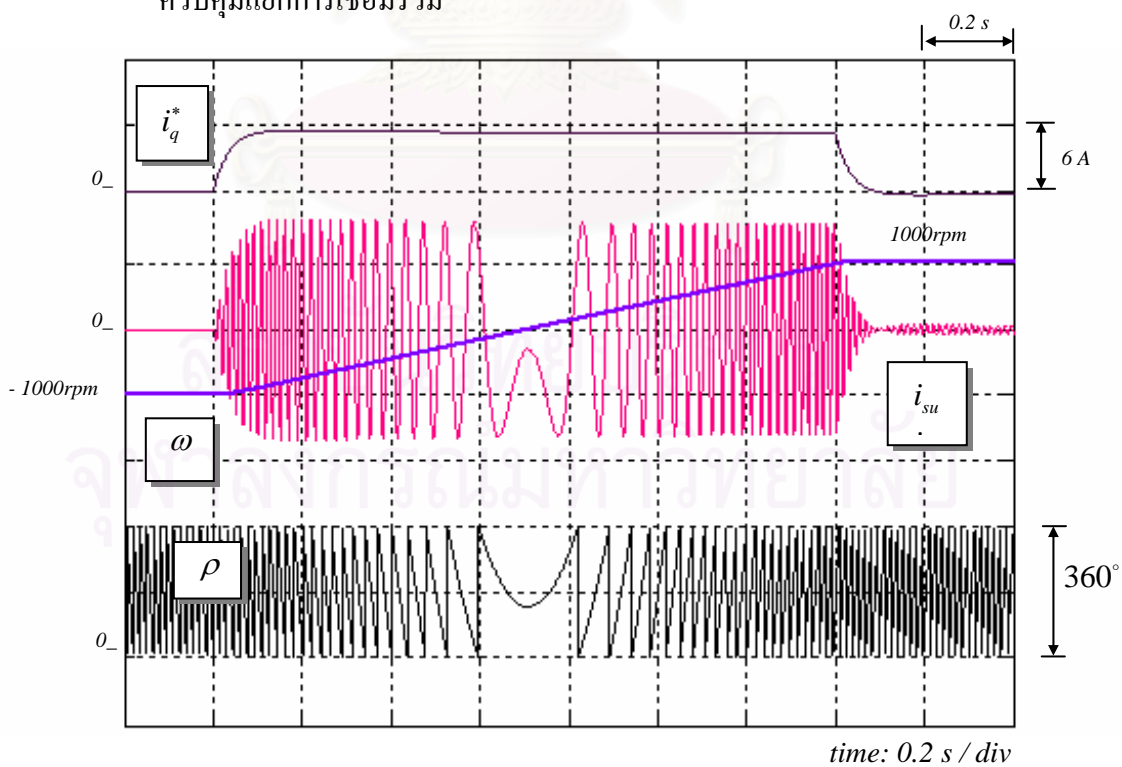


สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

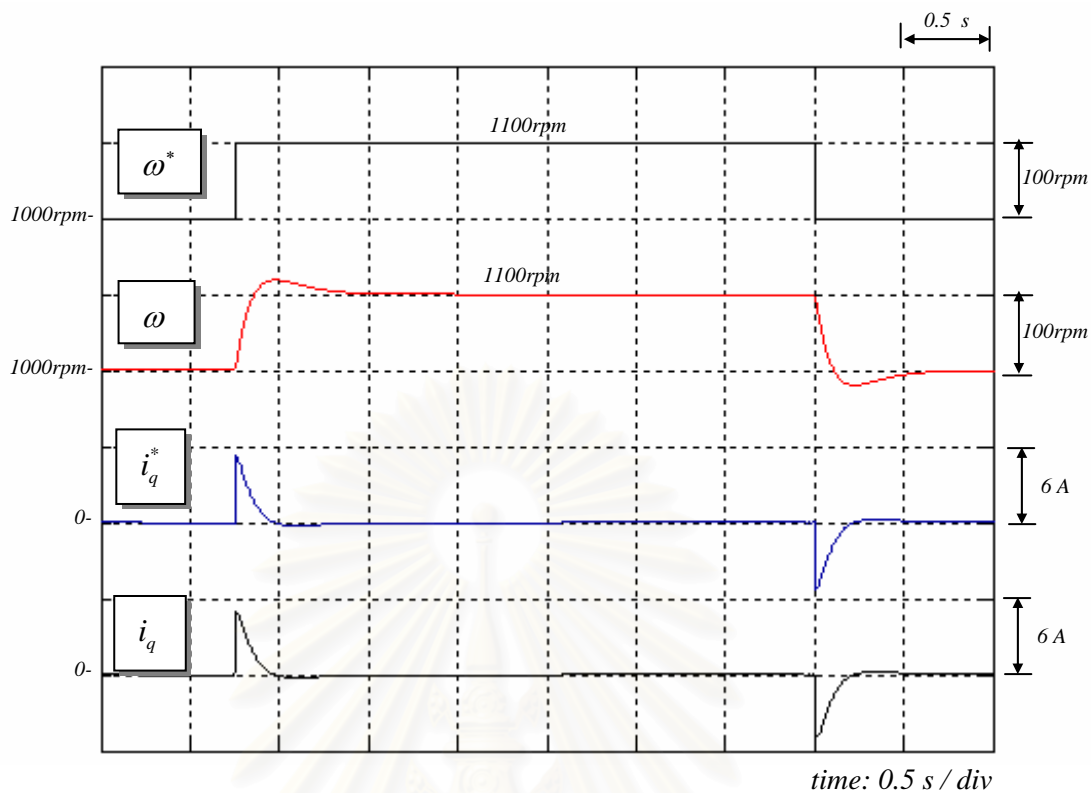




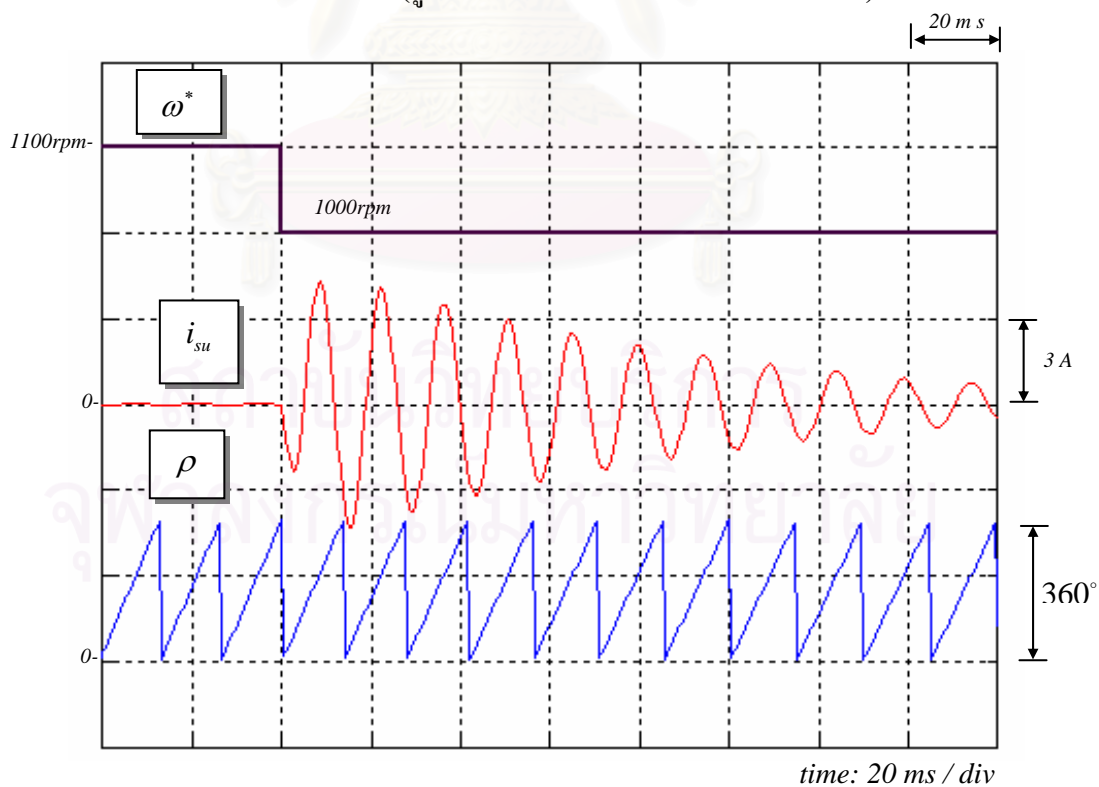
รูปที่ 3.5 ผลการจำลองการทำงานขณะกลับทิศความเร็วจาก 1000 ไป -1000 rpm เมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วม



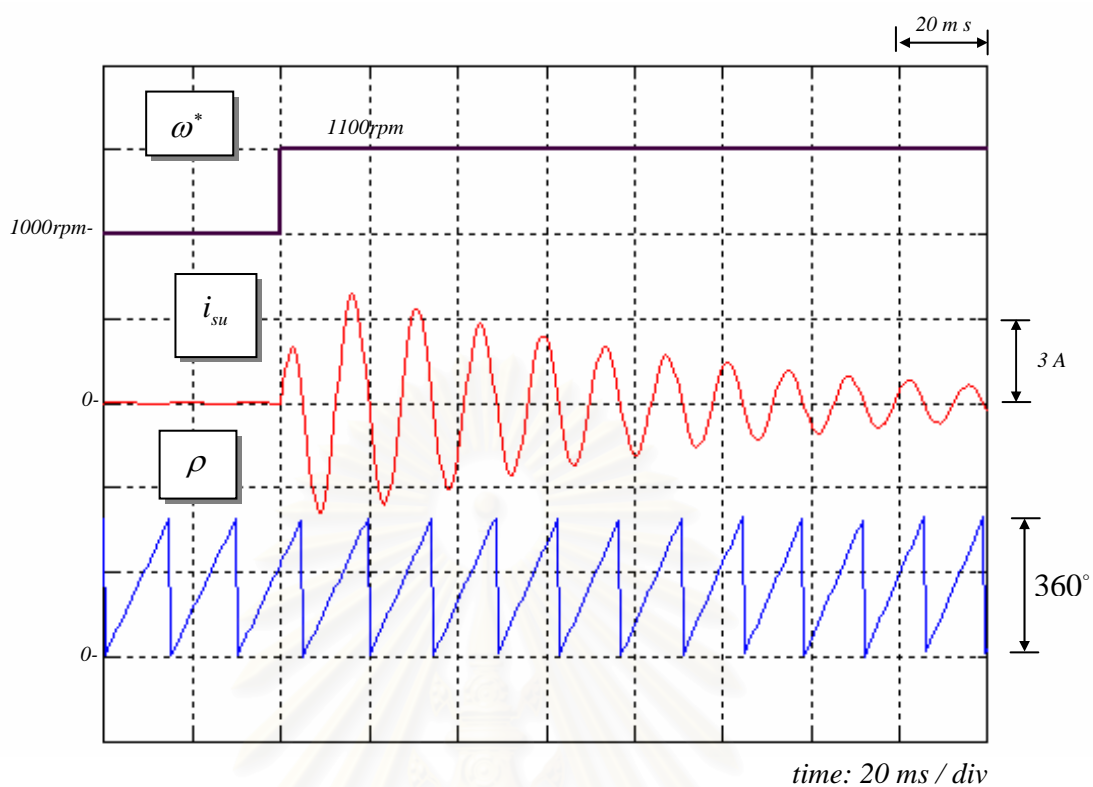
รูปที่ 3.6 ผลการจำลองการทำงานขณะกลับทิศความเร็วจาก -1000 ไป 1000 rpm เมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วม



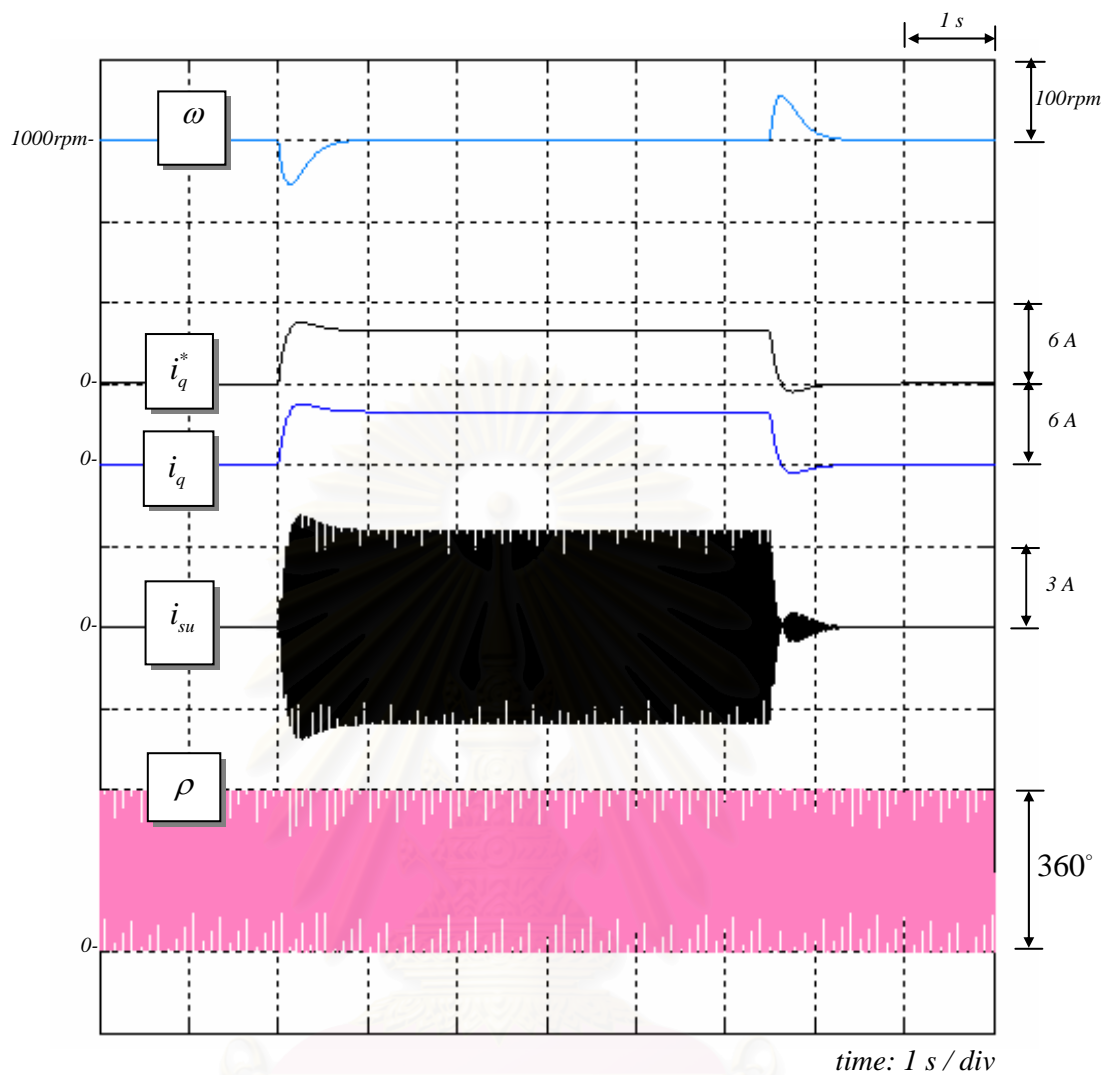
รูปที่ 3.7 ผลการจำลองการทำงานเมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วมในกรณีเปลี่ยนแปลงความเร็วคำสั่งในช่วงแคบ (รูปคลื่นความเร็วและกระแสสร้างแรงบิด)



รูปที่ 3.8 ผลการจำลองการทำงานเมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วมในกรณีเปลี่ยนแปลงความเร็วคำสั่งในช่วงแคบจาก 1100 ไป 1000 rpm (รูปคลื่นตำแหน่งและกระแสเฟส u)

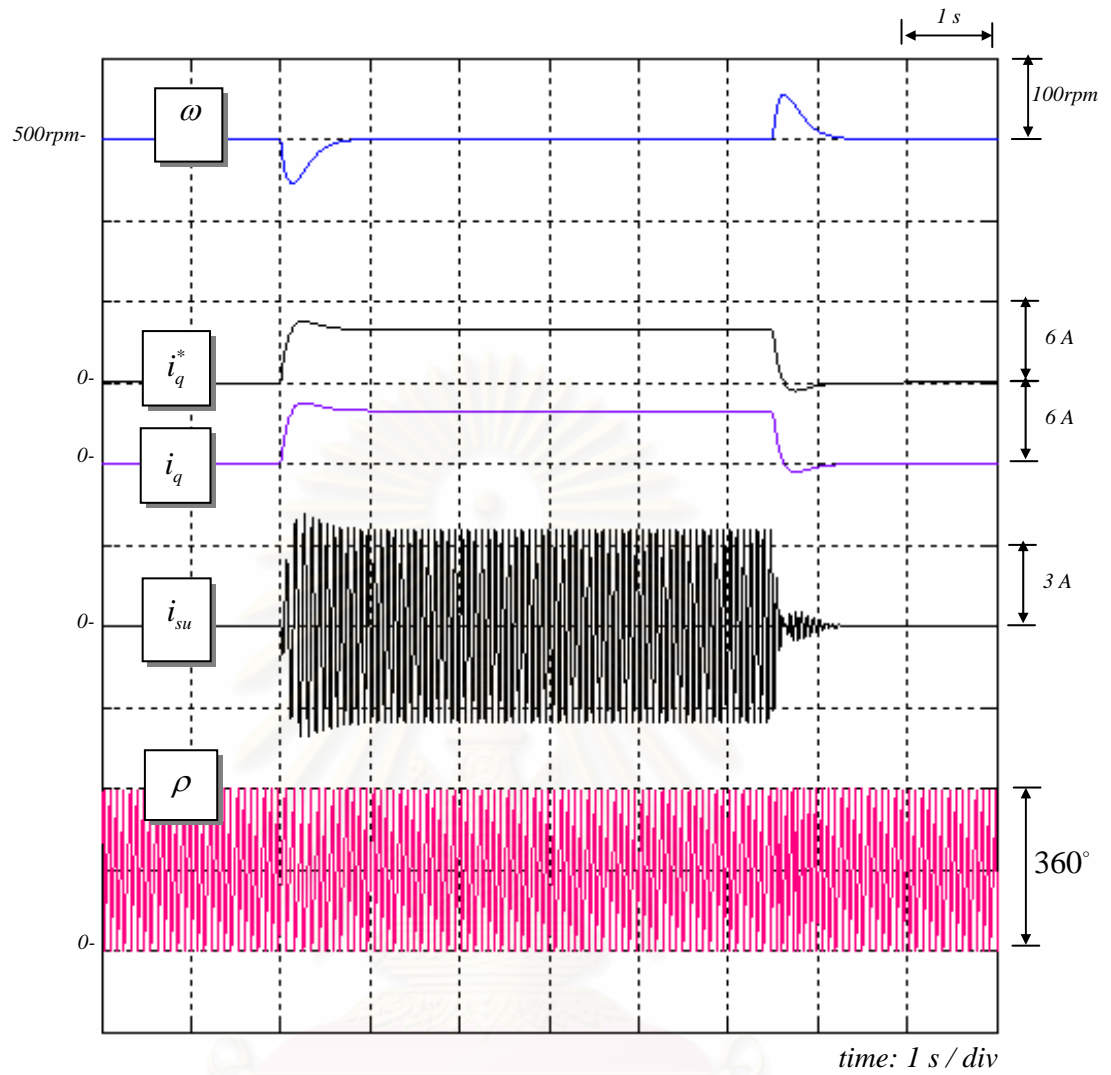


รูปที่ 3.9 ผลการจำลองการทำงานเมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วมในกรณีเปลี่ยนแปลงความเร็วคำสั่งในช่วงแคบจาก 1000 ไป 1100 rpm (รูปคลื่นตำแหน่งและกระแสเฟส u)



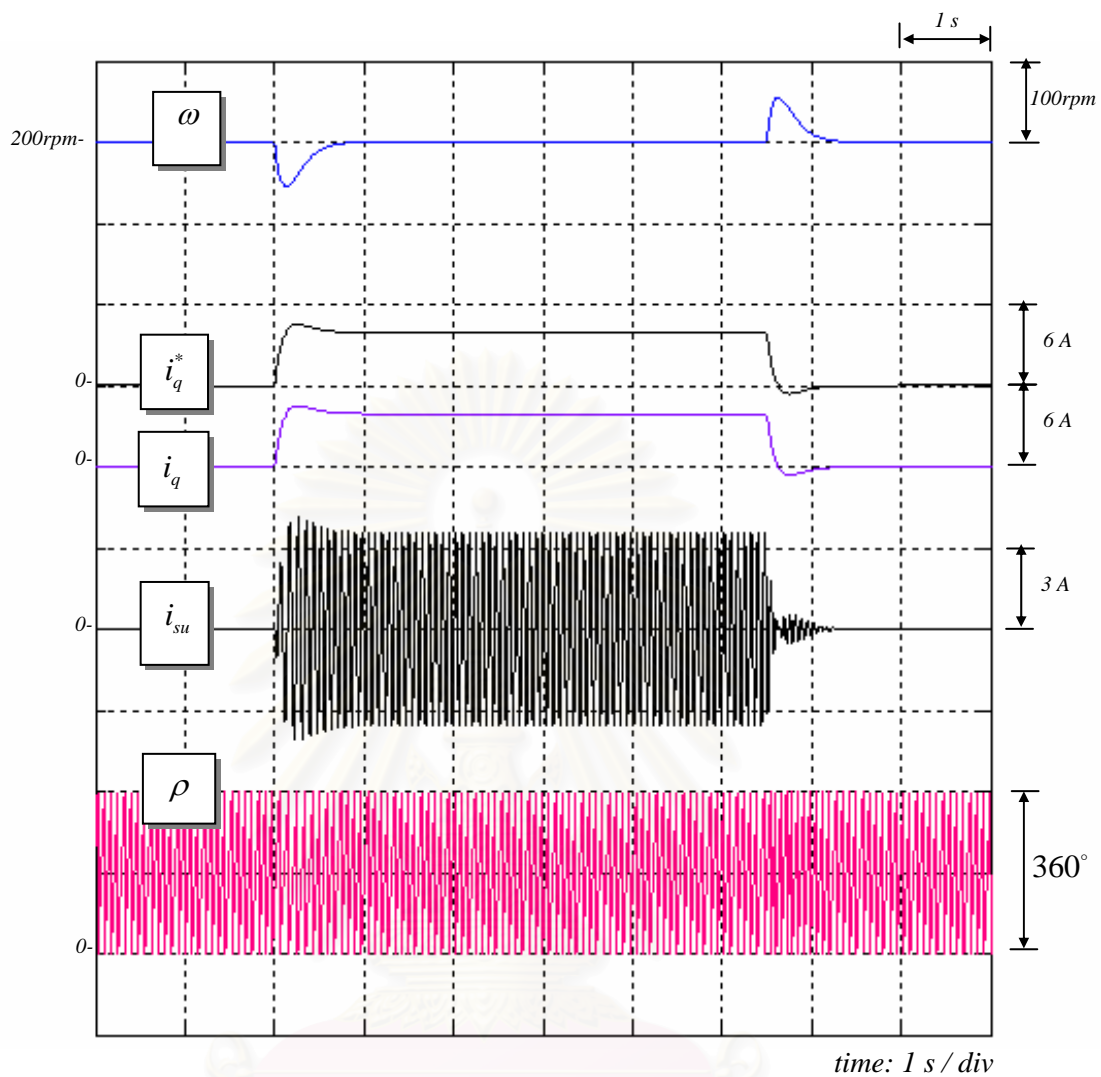
รูปที่ 3.10 ผลการจำลองการทำงานในกรณีเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้นที่ความเร็ว 1000 rpm  
เมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วม

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



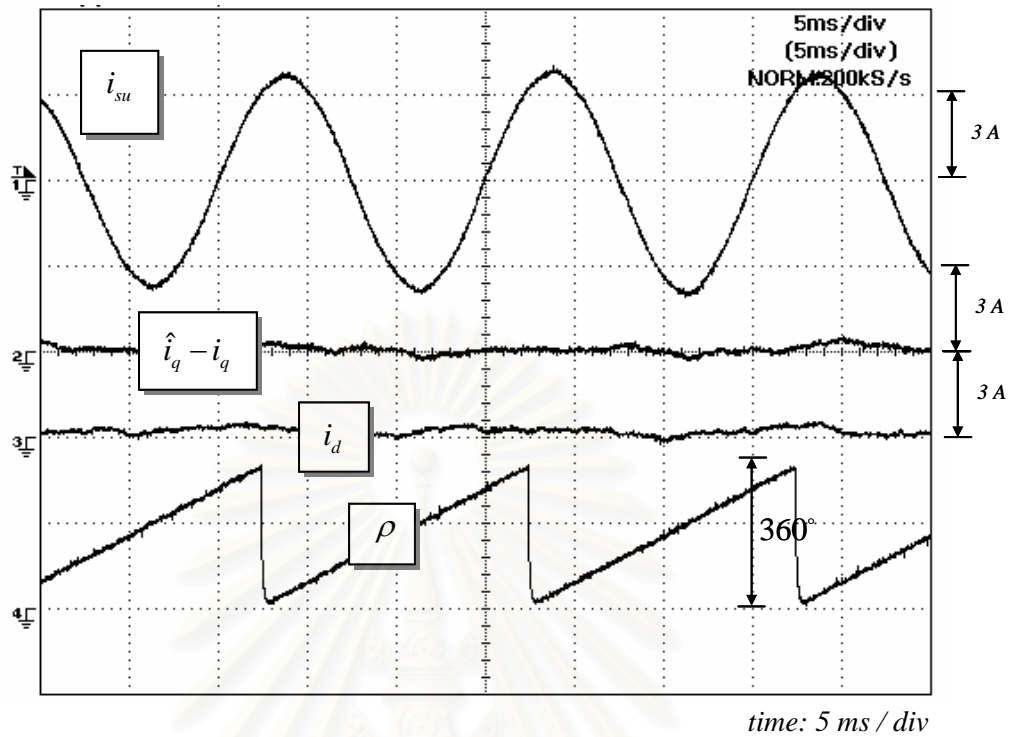
รูปที่ 3.11 ผลการจำลองการทำงานในกรณีเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้นที่ความเร็ว 500 rpm  
เมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วม

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

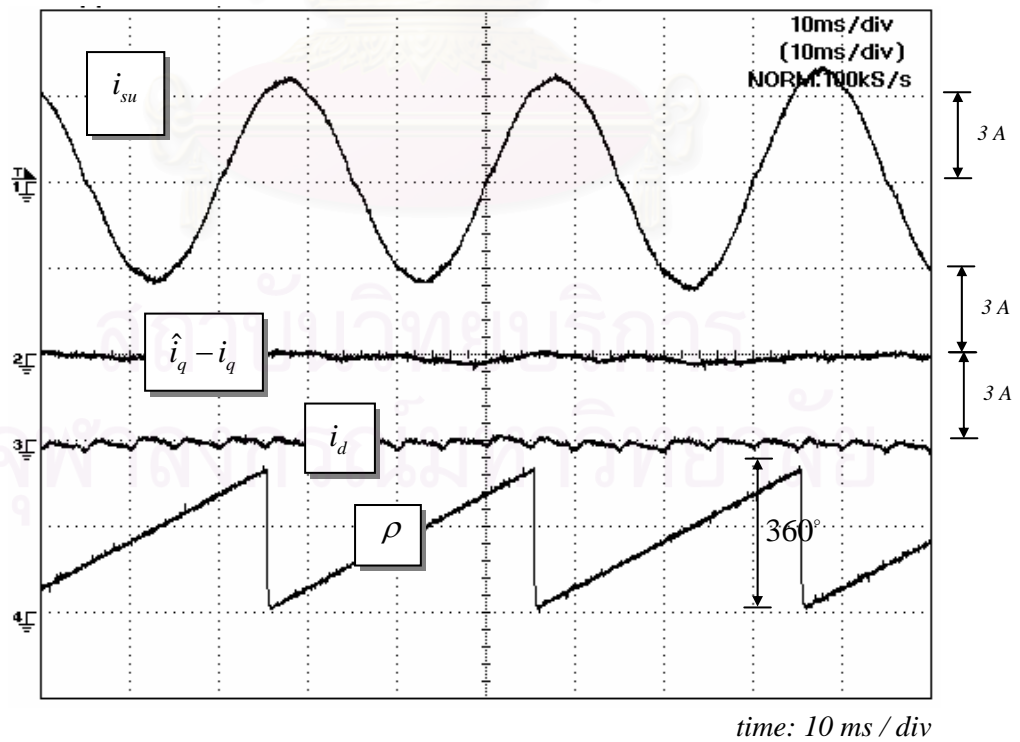


รูปที่ 3.12 ผลการจำลองการทำงานในกรณีเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้นที่ความเร็ว 200 rpm  
เมื่อใช้การควบคุมแบบแยกการเชื่อมร่วม

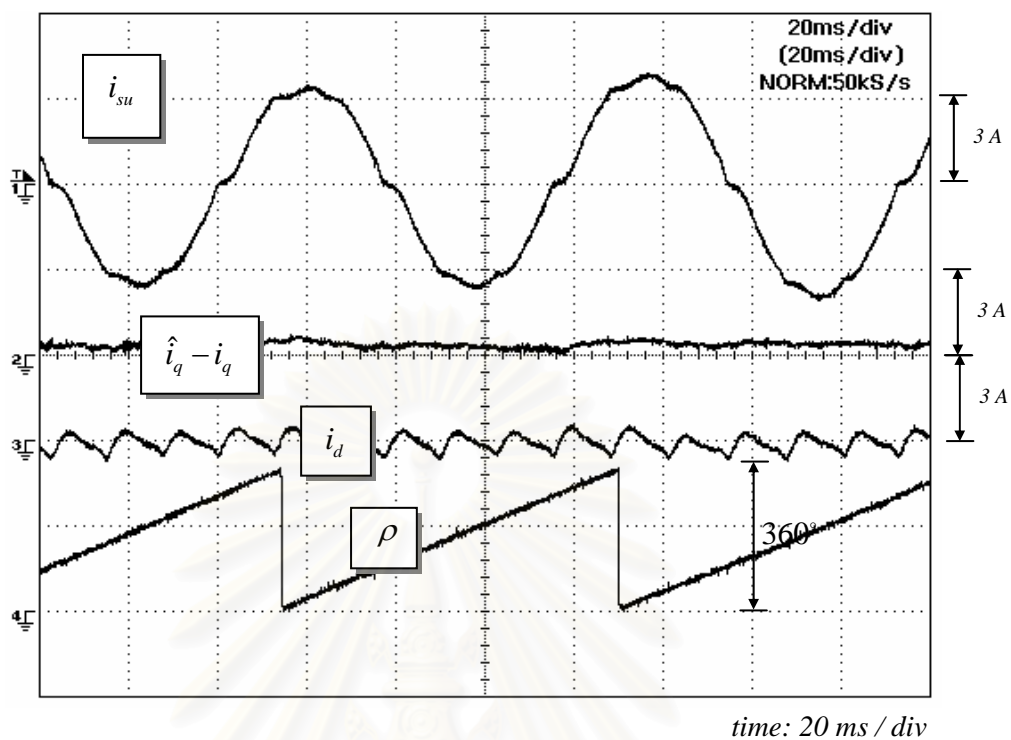
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.13 ผลการทดลองในสถานะอยู่ตัวเมื่อความเร็วคำสั่งมีค่าเท่ากับ 1000 rpm เมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วม (รูปคลื่นกระแสและตำแหน่ง)

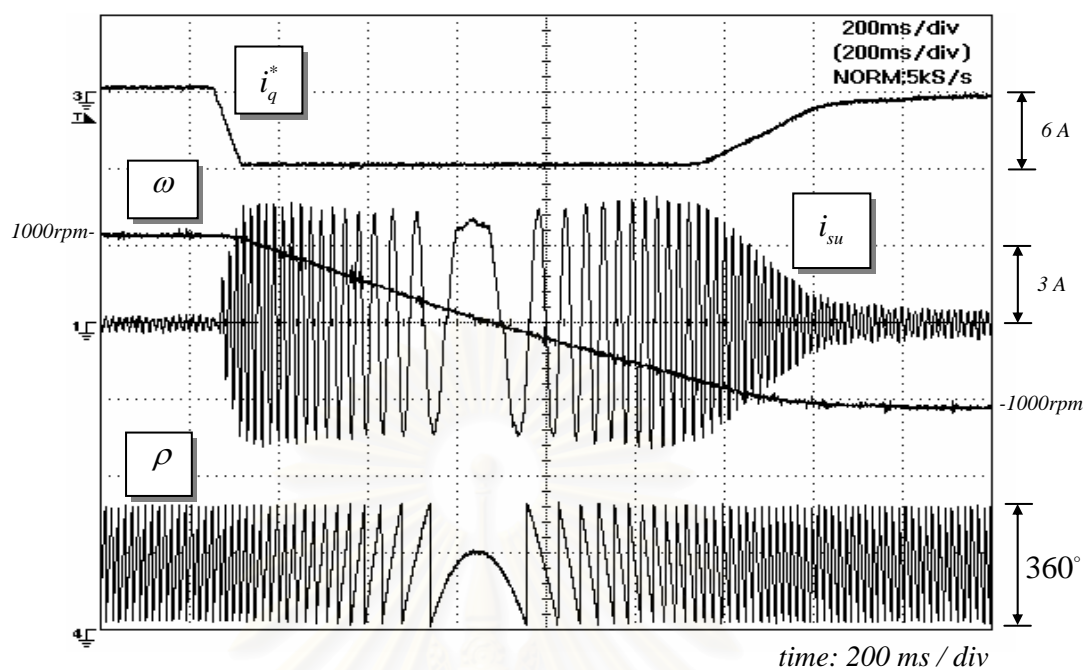


รูปที่ 3.14 ผลการทดลองในสถานะอยู่ตัวเมื่อความเร็วคำสั่งมีค่าเท่ากับ 500 rpm เมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วม (รูปคลื่นกระแสและตำแหน่ง)

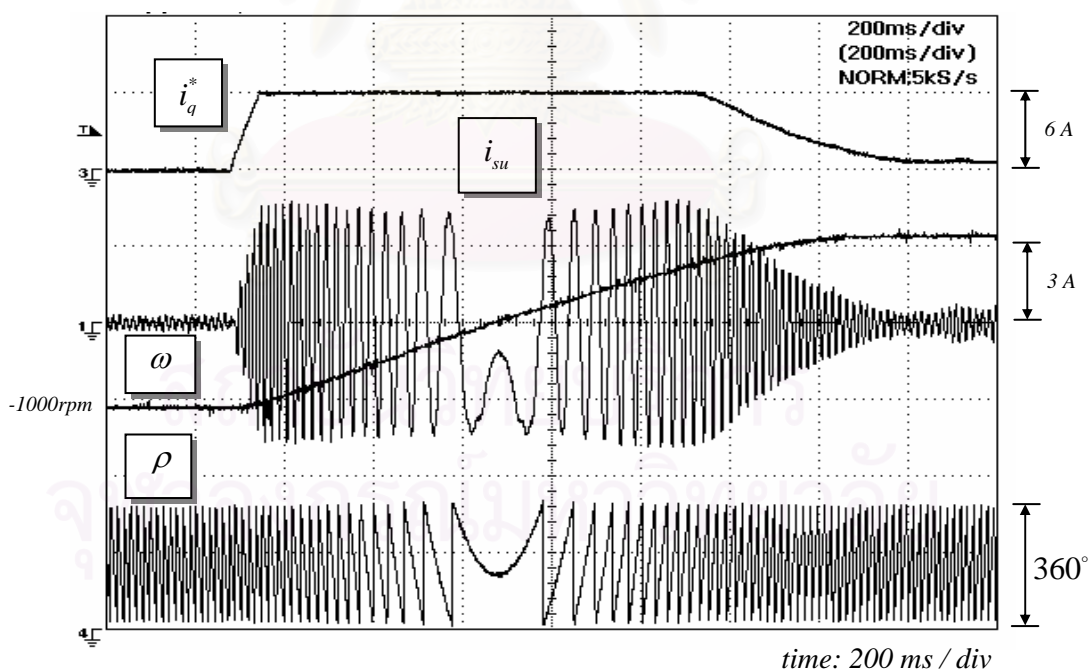


รูปที่ 3.15 ผลการทดลองในสภาวะอยู่ตัวเมื่อความเร็วคำสั่งมีค่าเท่ากับ 200 rpm เมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วม (รูปคลื่นกระแสและตำแหน่ง)

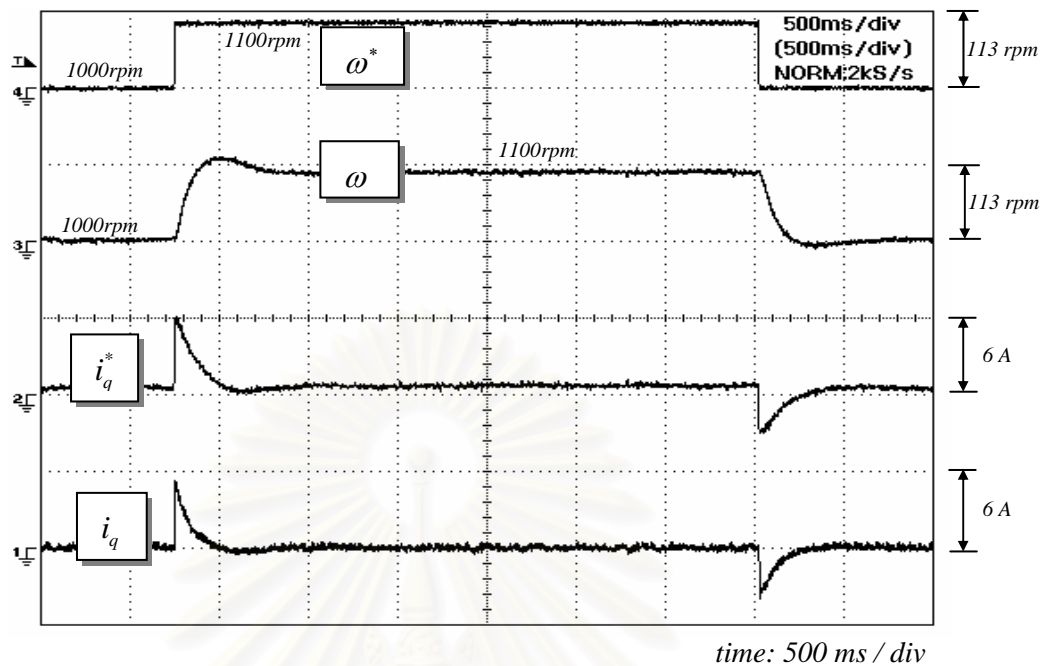




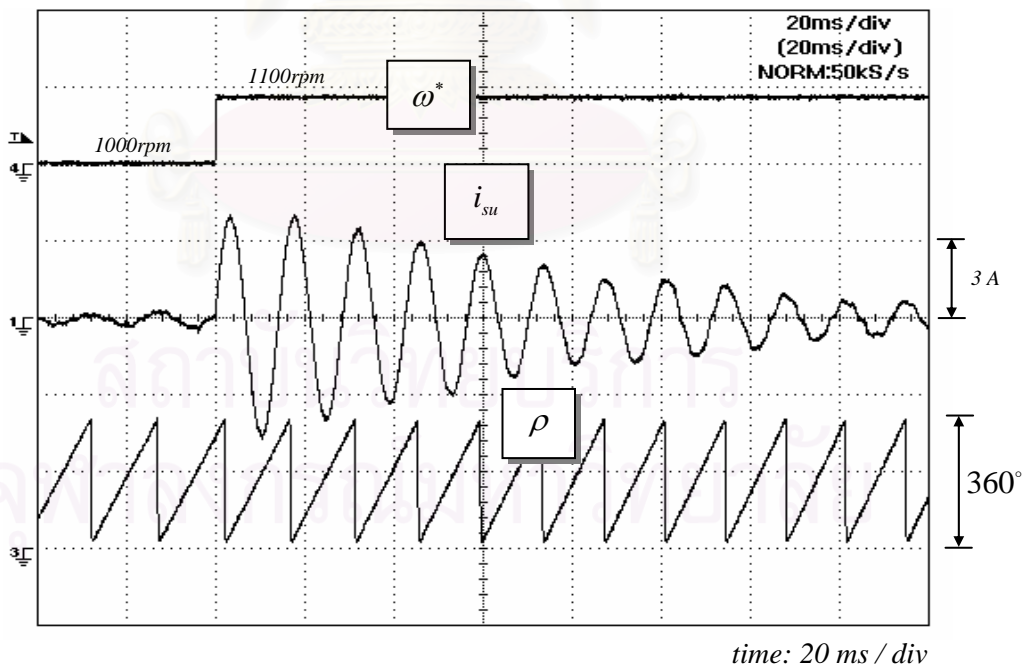
รูปที่ 3.16 ผลการทดลองขณะกลับทิศความเร็วจาก 1000 ไป -1000 rpm เมื่อใช้การควบคุม  
แยกการเชื่อมร่วม (รูปคลื่นความเร็วและกระแสสร้างแรงบิด)



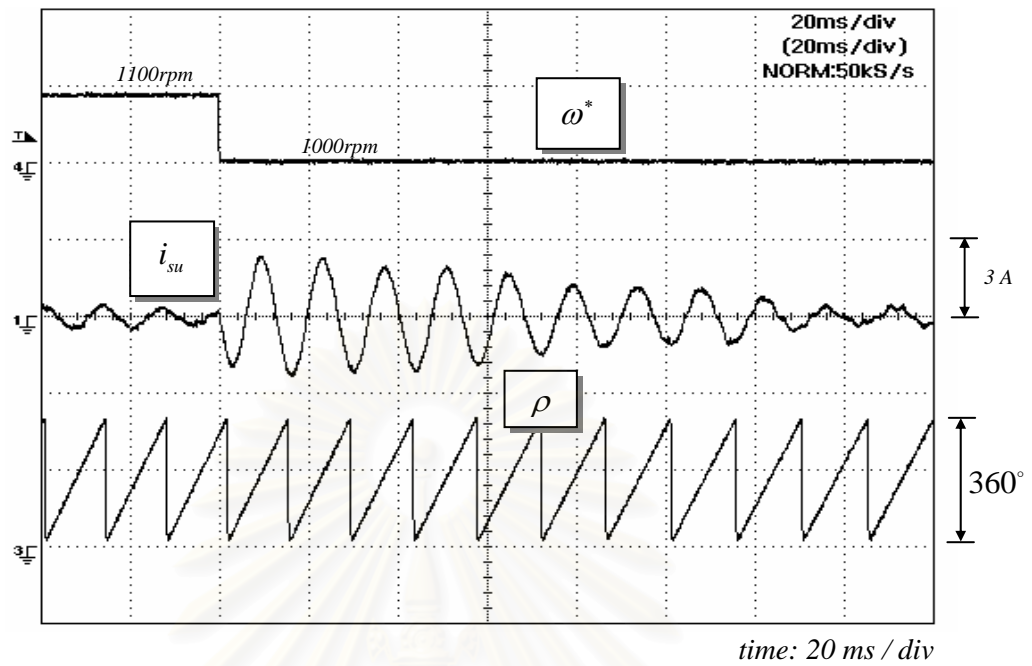
รูปที่ 3.17 ผลการทดลองขณะกลับทิศความเร็วจาก -1000 ไป 1000 rpm เมื่อใช้การควบคุม  
แยกการเชื่อมร่วม (รูปคลื่นความเร็วและกระแสสร้างแรงบิด)



รูปที่ 3.18 ผลการทดลองเมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วมในกรณีเปลี่ยนแปลงความเร็ว  
คำสั่งในช่วงแคบ (รูปคลื่นความเร็วและกระแสสร้างแรงบิด)



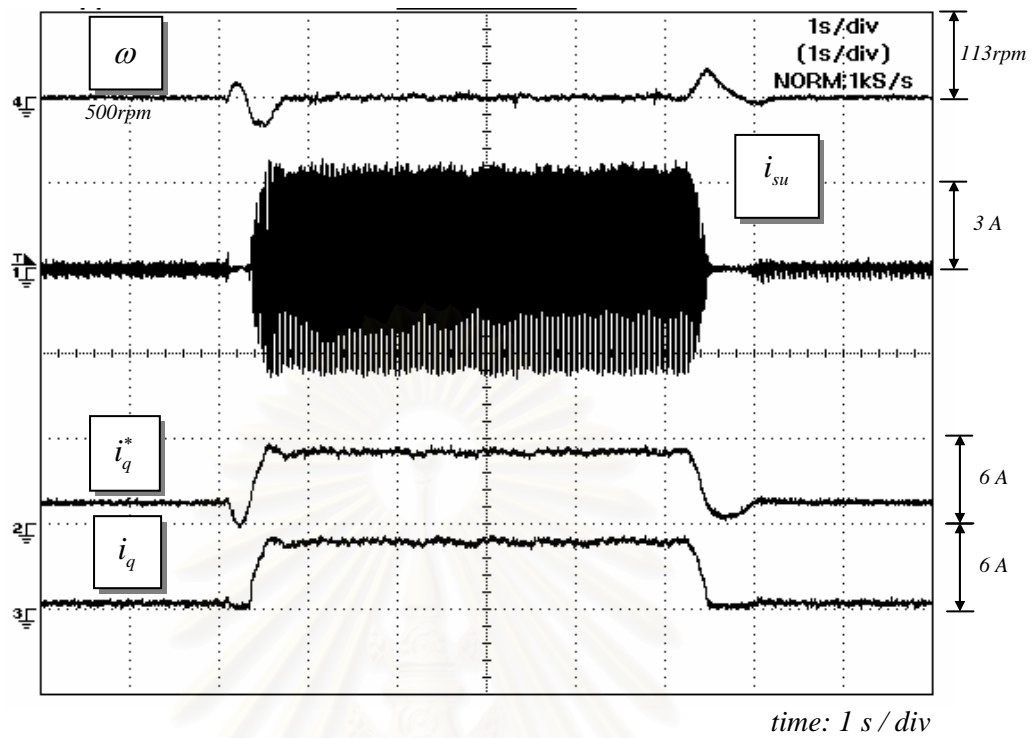
รูปที่ 3.19 ผลการทดลองเมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วมในกรณีเปลี่ยนแปลงความเร็ว  
คำสั่งในช่วงแคบจาก 1000 ไป 1100 rpm (รูปคลื่นตำแหน่งและกระแสเฟส u)



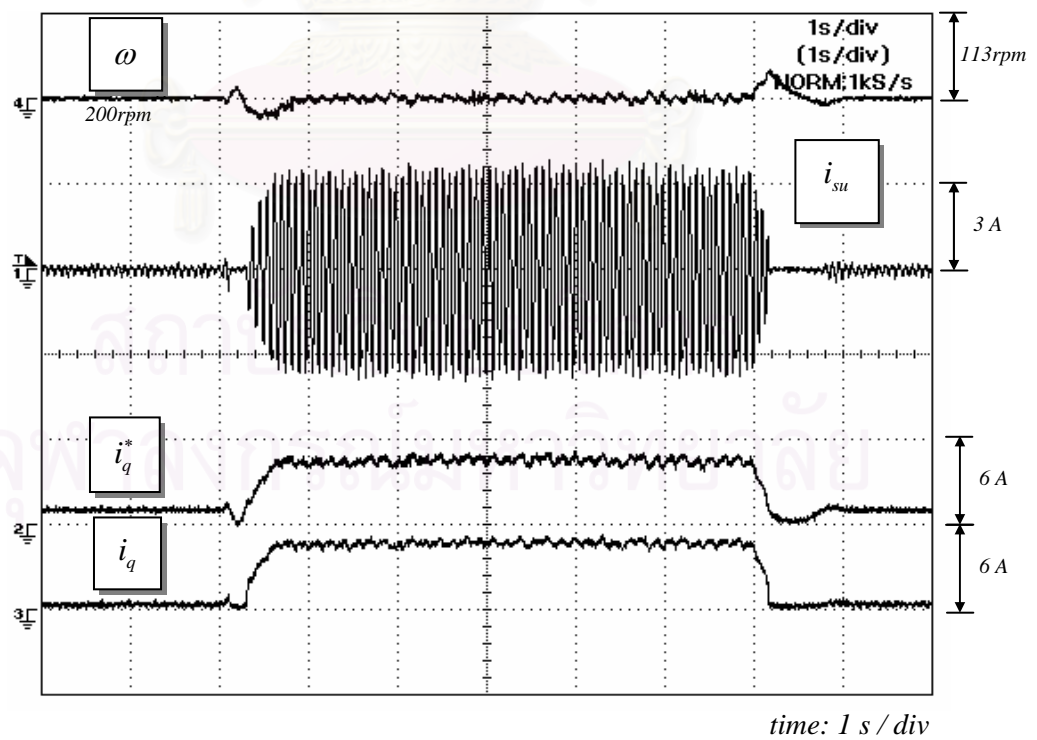
รูปที่ 3.20 ผลการทดลองเมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วมในกรณีเปลี่ยนแปลงความเร็วคำสั่งในช่วงแคบจาก 1100 ไป 1000 rpm (รูปคลื่นตำแหน่งและกระแสเฟส u)



รูปที่ 3.21 ผลการทดลองในกรณีเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้นที่ความเร็ว 1000 rpm เมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วม



รูปที่ 3.22 ผลการทดลองในกรณีเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้นที่ความเร็ว 500 rpm เมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วม



รูปที่ 3.23 ผลการทดลองในกรณีเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้นที่ความเร็ว 200 rpm เมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วม

## บทที่ 4

### ตัวสังเกตเต็มอันดับสำหรับมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร

ในบทนี้เราจะกล่าวถึงการสร้างตัวสังเกตเต็มอันดับจากแบบจำลองเชิงเส้นที่นำเสนอในบทที่ 2 เพื่อใช้ในการประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กและตำแหน่งของโรเตอร์ โดยจะใช้เพียงแค่ตัวตรวจจับความเร็วเท่านั้น ในการประมาณค่าตำแหน่งของโรเตอร์ดังรายละเอียดต่อไปนี้

#### 4.1 ตัวสังเกตเต็มอันดับ (Full-Order Observer)

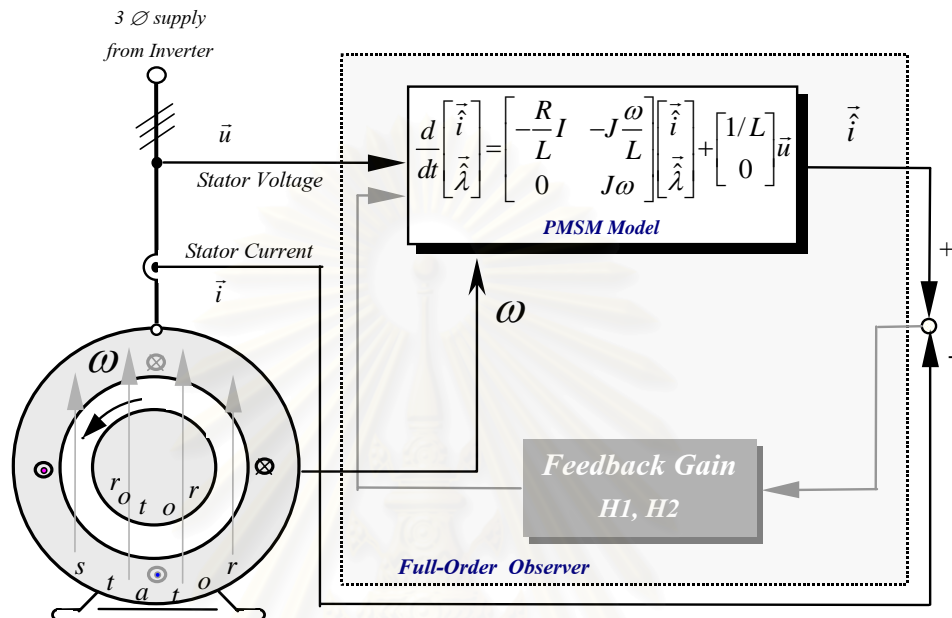
จากแบบจำลองเชิงเส้นที่นำเสนอในสมการที่ (2.5) เราสามารถใช้ข้อมูลความเร็วโรเตอร์, แรงดันและกระแสเตเตอร์ ประมาณค่ากระแสเตเตอร์และตำแหน่งของโรเตอร์รวมทั้งขนาดของฟลักซ์แม่เหล็กได้ โดยใช้ตัวสังเกตเต็มอันดับดังแสดงในสมการที่ (4.1)

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{i} \\ \hat{\lambda} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} I & -J \frac{\omega}{L} \\ 0 & J \omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i} \\ \hat{\lambda} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/L \\ 0 \end{bmatrix} \bar{u} + \begin{bmatrix} 0 \\ H1 * I + H2 * J \end{bmatrix} [\hat{i} - \bar{i}] \quad (4.1)$$

โดยที่  $\hat{\lambda} = \hat{\Psi} e^{J\hat{\rho}}$  และ  $H1, H2$  คือ อัตราขยายป้อนกลับ(Feedback gain)

จากสมการที่ (4.1) จะเห็นได้ว่าตัวสังเกตเต็มอันดับประกอบด้วยแบบจำลองของมอเตอร์และสัญญาณป้อนกลับของค่าผิดพลาดของกระแสเตเตอร์ผ่านอัตราขยายป้อนกลับ  $H_1$  และ  $H_2$  ซึ่งถ้าเราใช้ค่าเวกเตอร์ฟลักซ์แม่เหล็กที่ไม่ถูกต้องในตัวสังเกตเต็มอันดับกล่าวคือ  $\hat{\lambda} \neq \bar{\lambda}$  ผลที่ได้ก็จะเกิดค่าผิดพลาดของกระแสเตเตอร์ ( $\bar{e}_i = \hat{i} - \bar{i}$ ) ซึ่งเราสามารถวัดและคำนวณได้ ด้วยเหตุนี้เราจึงใช้ค่าผิดพลาดของกระแสเตเตอร์มาปรับค่าในตัวสังเกตเต็มอันดับผ่านอัตราขยายป้อนกลับ  $H_1$  และ  $H_2$  สำหรับการป้อนกลับค่าผิดพลาดนั้นเราจะใช้ในส่วนของการประมาณค่าเวกเตอร์ ฟลักซ์แม่เหล็กเท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากสมการกระแสทางด้านสเตเตอร์นั้นโดยพื้นฐานก็คือสมการ ของวงจร RL ดังนั้นค่าความผิดพลาดจะเข้าสู่ศูนย์โดยธรรมชาติอยู่แล้ว เนื่องจากแบบจำลองของมอเตอร์มีคุณสมบัติที่เป็น skew-symmetric ดังนั้นเราจึงกำหนดให้อัตราขยาย

ป้อนกลับมีลักษณะเป็น skew-symmetric ( $H1.I+H2.J$ ) ด้วย รูปที่ 4.1 แสดงแผนภาพรวมการทำงานของตัวสังเกตเต็มอันดับที่นำเสนอ



รูปที่ 4.1 ภาพรวมการทำงานของตัวสังเกตแบบเต็มอันดับ

#### 4.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพของตัวสังเกตเต็มอันดับ

ในหัวข้อนี้เราจะกล่าวถึงการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบประมาณเพื่อนำไปสู่การเลือกใช้อัตราขยายป้อนกลับที่ทำให้ระบบประมาณค่ามีเสถียรภาพตลอดย่านการทำงาน เริ่มต้นโดยการหาสมการลักษณะทางพลวัตของค่าความผิดพลาด ซึ่งจากสมการที่ (2.5) และ (4.1) เราจะได้

สมการลักษณะทางพลวัตของค่าความผิดพลาด:

$$\frac{d\bar{e}}{dt} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{i} - i \\ \hat{\lambda} - \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L}I & -J\frac{\omega}{L} \\ H1*I + H2*J & J\omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i} - i \\ \hat{\lambda} - \lambda \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

จากสมการที่ (4.2) เราจะเห็นได้ว่าในกรณีที่อัตราขยายป้อนกลับเป็นศูนย์ ( $H1=H2=0$ ) นั้นระบบประมาณจะมีขั้วอยู่ที่จุดกำเนิด ซึ่งจะทำให้ค่าความผิดพลาดแกว่งเป็นฟังก์ชันไซน์ ไม่มีทางที่จะลู่

เข้าสู่ศูนย์ได้ ซึ่งจะแตกต่างกับมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ระบบประมาณสามารถทำงานได้ อย่างมีเสถียรภาพได้ตลอดช่วงทำงาน ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากโครงสร้างทางโรเตอร์ที่แตกต่างกัน เงื่อนไขที่ทำให้ตัวสังเกตหรือระบบประมาณมีเสถียรภาพ ก็คือเงื่อนไขที่ทำให้ตำแหน่งขั้ว(Poles) ของสมการคุณลักษณะซึ่งหาได้จาก  $|sI - A|^{-1} = 0$  อยู่ทางฝั่งซ้ายของระนาบเชิงซ้อน (s-plane) ซึ่งเงื่อนไขของขั้วที่เสถียร (Stable pole conditions) แสดงดังสมการที่ (4.3) (ภาคผนวก ค)

$$\omega \left[ \omega \left( (H1 - R)^2 / R + (H1 - R) \right) + H2 * R / L \right] < 0 \quad (4.3)$$

ตัวอย่างหนึ่งของการออกแบบอัตราขยายให้เงื่อนไขขั้วที่เสถียรเป็นจริง คือ

$$\begin{aligned} H2 &= -k\omega \quad \text{โดยที่ } k > 0 \\ H1 &= R \end{aligned} \quad (4.4)$$

จากการเลือกอัตราขยายป้อนกลับให้สอดคล้องกับเงื่อนไขขั้วที่เสถียร เราก็จะได้ข้อมูลของขนาดและตำแหน่งของพลาซมีแม่เหล็กที่ถูกต้องเมื่อเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว ด้วยเหตุที่ในการประมาณนั้นเราต้องการเพียงแค่ข้อมูลความเร็วจริงของมอเตอร์ ไม่จำเป็นต้องรู้ข้อมูลตำแหน่งจริงของโรเตอร์ ทำให้เราสามารถใช้อัตราวัดความเร็วแบบ แทโคเจนเนอเรเตอร์ หรือตัวตรวจจับตำแหน่งที่เป็นแบบ Incremental Encoder ได้ โดยไม่จำเป็นต้องใช้อัตราวัดตำแหน่งที่เป็นแบบ Absolute Encoder ซึ่งมีราคาแพง ผลการจำลองการทำงานและผลการทดสอบกับระบบจริงจะแสดงในหัวข้อที่ 4.4

#### 4.3 การบูรณาการตัวสังเกตกับการควบคุมแบบแยกการเชื่อมร่วม

ในหัวข้อนี้เราจะกล่าวถึงการบูรณาการ(Integration)ตัวสังเกตเข้ากับการควบคุมเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วม ทั้งนี้เนื่องจากการประมาณค่าพลาซมีแม่เหล็กและค่ากระแสเดเตอร์ตามสมการที่ (4.1) นั้นคำนวณบนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ แต่ระบบควบคุมเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วมที่ได้แสดงในบทที่ 3 นั้นอ้างอิงบนแกนอ้างอิงโรเตอร์ ดังนั้นเพื่อลดความซับซ้อนของแบบจำลองที่ใช้ในทั้งตัวสังเกตและการควบคุมเวกเตอร์เราจึงทำการบูรณาการทั้งสองระบบเข้าด้วยกัน ซึ่งในกรณีนี้ระบบควบคุมเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วมจะต้องใช้ค่าของพลาซมีประมาณในการควบคุม ดังนั้นแกนอ้างอิงที่ใช้จะกลายเป็นแกนอ้างอิงของพลาซมีประมาณแทน ซึ่งก็จะเหมือนกับตัวสังเกต

เต็มอันดับที่จะต้องย้ายมาอ้างอิงบนแกนฟลักซ์ประมาณเช่นกัน ถึงจะสามารถบูรณาการทั้งสองระบบเข้ากันได้ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้ สมการที่ (4.1) สามารถเขียนในรูปแบบจำนวนเชิงซ้อนได้ดังสมการที่ (4.5)- (4.6)

$$\frac{d\vec{i}}{dt} = -\frac{R}{L}\vec{i} - j\frac{\omega}{L}\vec{\lambda} + \frac{\vec{u}}{L} \quad (4.5)$$

$$\frac{d\vec{\lambda}}{dt} = [H1 + jH2][\vec{i} - \vec{i}] + j\omega\vec{\lambda} = [H1 + jH2]\vec{e}_i + j\omega\vec{\lambda} \quad (4.6)$$

ซึ่งเราก็สามารถแสดงสมการตัวสังเกตเต็มอันดับอ้างอิงบนแกนอ้างอิงฟลักซ์ประมาณ(แกน  $\hat{d}, \hat{q}$ ) ได้ในทำนองเดียวกับการย้ายแบบจำลองมาอ้างอิงบนแกนอ้างอิงโรเตอร์ซึ่งกล่าวในบทที่ 2 โดยการคูณ  $e^{-j\hat{p}}$  ทั้งสองข้างของสมการที่ (4.5) และ (4.6) เริ่มพิจารณาสมการที่ (4.5) ก่อนจะได้

$$e^{-j\hat{p}} \frac{d\vec{i}}{dt} = -\frac{R}{L}\vec{i} e^{-j\hat{p}} - j\frac{\omega}{L}\vec{\lambda} e^{-j\hat{p}} + \frac{\vec{u}}{L} e^{-j\hat{p}}$$

$$\frac{d}{dt} [\vec{i} e^{-j\hat{p}}] + j \frac{d\hat{p}}{dt} \vec{i} e^{-j\hat{p}} = -\frac{R}{L} \vec{i} e^{-j\hat{p}} - j \frac{\omega}{L} \vec{\lambda} e^{-j\hat{p}} + \frac{\vec{u}}{L} e^{-j\hat{p}} \quad (4.7)$$

นิยาม:

$\vec{i} e^{-j\hat{p}} = \hat{i}_d + j\hat{i}_q$  : สเปซเวกเตอร์ของกระแสเดเตอร์ประมาณบนแกนอ้างอิงโรเตอร์  
ฟลักซ์ประมาณ  $\hat{d}, \hat{q}$

$\vec{u} e^{-j\hat{p}} = u_d + ju_q$  : สเปซเวกเตอร์ของแรงดันสแตเตอร์บนแกนอ้างอิงโรเตอร์ฟลักซ์  
ประมาณ  $\hat{d}, \hat{q}$

เขียนสมการที่ (4.7) ได้เป็น

$$\frac{d}{dt} [\hat{i}_d + j\hat{i}_q] + j [\hat{i}_d + j\hat{i}_q] \frac{d\hat{p}}{dt} = -\frac{R}{L} [\hat{i}_d + j\hat{i}_q] - j \frac{\omega}{L} \vec{\lambda} e^{-j\hat{p}} + \frac{1}{L} [u_d + ju_q] \quad (4.8)$$

เมื่อทำการแยกส่วนจริงกับส่วนจินตภาพของสมการที่ (4.8) แล้วจัดรูป จะได้สมการทางด้านสแตเตอร์ของตัวสังเกตเต็มอันดับที่อ้างอิงบนแกนอ้างอิงฟลักซ์ประมาณในรูปแบบเวกเตอร์ดังสมการที่ (4.9)



สมการทางด้านสเตเตอร์ของตัวสังเกตเต็มอันดับอ้างอิงบนแกนอ้างอิงฟลักซ์ประมาณ:

$$L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{i}_d \\ \hat{i}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} - R \begin{bmatrix} \hat{i}_d \\ \hat{i}_q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -L\hat{i}_q \frac{d\hat{\rho}}{dt} \\ L\hat{i}_d \frac{d\hat{\rho}}{dt} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ \omega\hat{\Psi} \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

สำหรับสมการทางพลวัตของฟลักซ์ประมาณอ้างอิงบนแกนฟลักซ์ประมาณนั้นก็สามารถหาได้โดยการคูณ  $e^{-j\hat{\rho}}$  ทั้งสองข้างของสมการที่ (4.6) จะได้

$$\begin{aligned} e^{-j\hat{\rho}} \frac{d\vec{\lambda}}{dt} &= [H1 + jH2] \vec{e}_i e^{-j\hat{\rho}} + j\omega \vec{\lambda} e^{-j\hat{\rho}} \\ \frac{d}{dt} \left[ \vec{\lambda} e^{-j\hat{\rho}} \right] + j\hat{\Psi} \frac{d\hat{\rho}}{dt} &= [H1 + jH2] [e_d + je_q] + j\omega\hat{\Psi} \\ \frac{d\hat{\Psi}}{dt} + j\hat{\Psi} \frac{d\hat{\rho}}{dt} &= [H1 + jH2] [e_d + je_q] + j\omega\hat{\Psi} \end{aligned} \quad (4.10)$$

นิยาม:

$$\vec{e}_i e^{-j\hat{\rho}} = e_d + je_q \quad : \text{สเปซเวกเตอร์ของค่าผิดพลาดของกระแสสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงฟลักซ์ประมาณ } \hat{d}, \hat{q}$$

โดยที่

$$\begin{aligned} e_d &= \hat{i}_d - i_d \quad : \text{ค่าผิดพลาดของกระแสในแนวแกน } \hat{d} \\ e_q &= \hat{i}_q - i_q \quad : \text{ค่าผิดพลาดของกระแสในแนวแกน } \hat{q} \end{aligned}$$

เมื่อทำการแยกส่วนจริงกับจินตภาพของสมการที่ (4.10) เราจะได้สมการทางด้านโรเตอร์ของตัวสังเกตเต็มอันดับบนแกนอ้างอิงฟลักซ์ประมาณ ดังสมการที่ (4.11)-(4.12)

สมการทางด้านโรเตอร์ของตัวสังเกตเต็มอันดับอ้างอิงบนแกนฟลักซ์ประมาณ:

$$\frac{d\hat{\Psi}}{dt} = H1 e_d - H2 e_q \quad (4.11)$$

$$\frac{d\hat{\rho}}{dt} = \omega + [H2 e_d + H1 e_q] / \hat{\Psi} \quad (4.12)$$

ลำดับต่อไปเราจะหาสมการในส่วนการควบคุมเวกเตอร์ที่อ้างอิงบนแกนฟลักซ์ประมาณ ซึ่งก็มีวิธีการหาเหมือนกับตัวสังเกตเต็มอันดับ แบบจำลองของมอเตอร์ในส่วนการควบคุมเวกเตอร์ สมการที่ (2.6) สามารถแสดงอ้างอิงบนแกนฟลักซ์ประมาณได้ดังสมการที่ (4.13)

สมการทางด้านสเตเตอร์ของแบบจำลองมอเตอร์อ้างอิงบนแกนฟลักซ์ประมาณ:

$$\begin{bmatrix} u_d^* \\ u_q^* \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_d^* \\ i_q^* \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d^* \\ i_q^* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -Li_q^* \frac{d\hat{\rho}}{dt} \\ Li_d^* \frac{d\hat{\rho}}{dt} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega\hat{\Psi} \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

จากค่าประมาณของตำแหน่งโรเตอร์, ฟลักซ์แม่เหล็ก, และกระแสสเตเตอร์ ที่ได้จากตัวสังเกตเต็มอันดับ ความเร็วโรเตอร์ที่ได้จากการตรวจจับ และแบบจำลองมอเตอร์อ้างอิงบนแกนฟลักซ์ประมาณ เราสามารถควบคุมแรงบิดและฟลักซ์ในช่องอากาศได้โดยการควบคุมกระแส  $i_q^*$  และ  $i_d^*$  ตามลำดับ ซึ่งค่ากระแส  $i_q^*$  และ  $i_d^*$  นั้นเราสามารถควบคุมผ่านแรงดันสเตเตอร์ได้โดยอาศัยการควบคุมแยกการเชื่อมร่วม ซึ่งก็ใช้หลักการเช่นเดียวกับบทที่ 3 ที่ผ่านมา

เนื่องจากสมการที่ (4.9) ซึ่งเป็นสมการทางด้านสเตเตอร์ของตัวสังเกตเต็มอันดับเป็นสมการเดียวกันกับแบบจำลองทางด้านสเตเตอร์ (4.13) ในส่วนการควบคุมเวกเตอร์ ดังนั้นแรงดันแยกการเชื่อมร่วมจะชดเชยแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำเชื่อมโยงระหว่างแกนของตัวสังเกตได้อย่างสมบูรณ์ด้วย ซึ่งจะเป็นไปดังสมการที่ (4.14)

แรงดันสเตเตอร์ของตัวควบคุมเวกเตอร์ที่มีการชดเชยแรงดันเชื่อมโยงระหว่างแกน:

$$\begin{bmatrix} u_d^* \\ u_q^* \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_d^* \\ i_q^* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -L\hat{i}_q^* \frac{d\hat{\rho}}{dt} \\ L\hat{i}_d^* \frac{d\hat{\rho}}{dt} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega\hat{\Psi} \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

เมื่อเราแทนแรงดันคำสั่งสมการที่ (4.14) ลงในสมการทางด้านสเตเตอร์ของทั้งส่วนควบคุมเวกเตอร์ (4.13) และตัวสังเกตเต็มอันดับ (4.9) เราจะได้

สมการทางด้านสเตเตอร์หลังการควบคุมแยกการเชื่อมร่วม:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{i}_d \\ \hat{i}_q \end{bmatrix} = -\frac{R}{L} \begin{bmatrix} \hat{i}_d \\ \hat{i}_q \end{bmatrix} + \frac{R}{L} \begin{bmatrix} i_d^* \\ i_q^* \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

หรือ

$$\hat{i}_d = \frac{1}{Ls/R+1} i_d^* \quad (4.16)$$

$$\hat{i}_q = \frac{1}{Ls/R+1} i_q^* \quad (4.17)$$

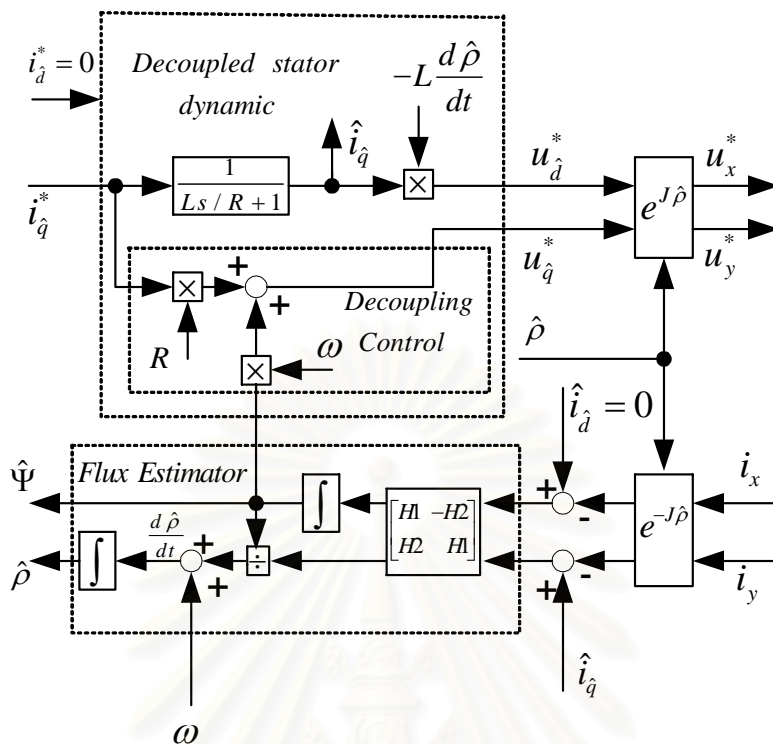
ในกรณีที่เรานำเลือก  $i_d^* = 0$  และ  $\hat{i}_d(0) = 0$  จะได้  $\hat{i}_d(t) \equiv 0$  ดังนั้นสมการที่ (4.16)- (4.17) สามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการที่ (4.18) และ (4.19)

$$\hat{i}_d = 0 \quad (4.18)$$

$$\hat{i}_q = \frac{1}{Ls/R+1} i_q^* \quad (4.19)$$

กล่าวโดยสรุปแล้วตอนนี้เรามีสมการแรงดันสเตเตอร์ในตัวควบคุมที่มีการชดเชยแรงดันที่เชื่อมโยงระหว่างแกนสมการที่ (4.14), สมการทางด้านโรเตอร์ของตัวสังเกตเพิ่มเติมอันดับสมการที่ (4.11)-(4.12) และสมการทางด้านสเตเตอร์ของส่วนควบคุมเวกเตอร์และตัวสังเกตเพิ่มเติมอันดับหลังการควบคุมแยกการเชื่อมร่วมเป็นสมการที่ (4.18)-(4.19) เราสามารถบูรณาการการควบคุมแยกการเชื่อมร่วมกับตัวสังเกตเพิ่มเติมอันดับซึ่งใช้แบบจำลองร่วมกันได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.2

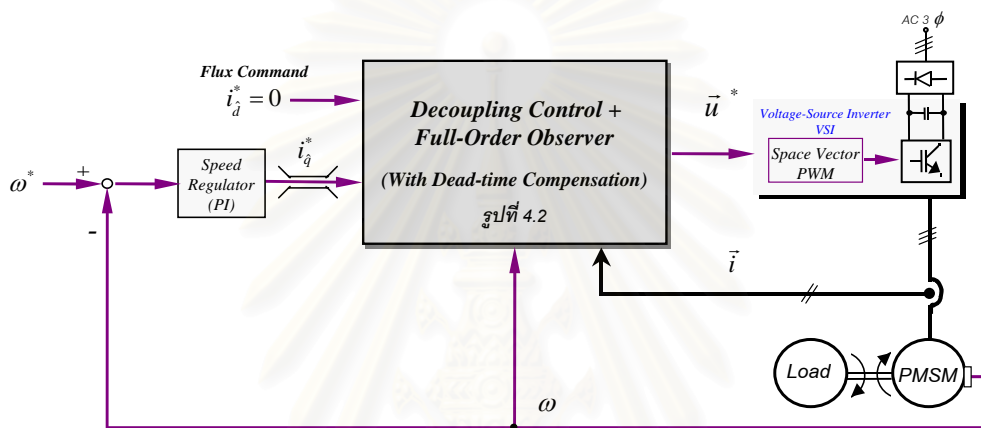
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.2 บล็อกไดอะแกรมโดยรวมหลังบูรณาการตัวสังเกตเข้ากับระบบควบคุมเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วม

#### 4.4 ผลจำลองการทำงานและผลการทดสอบสมรรถนะของระบบประมาณค่าตำแหน่งด้วยตัว สังเกตเต็มอันดับ

รูปที่ 4.3 แสดงถึงโครงสร้างของระบบควบคุมความเร็วที่ใช้ระบบควบคุมแวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วมที่มีการประมาณค่าตำแหน่งด้วยตัวสังเกตเต็มอันดับที่ใช้ในการทดลองและจำลองการทำงาน โดยรายละเอียดของฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการทดลองแสดงไว้ในภาคผนวก ก



รูปที่ 4.3 ระบบควบคุมความเร็วที่ใช้ระบบควบคุมแยกการเชื่อมร่วมที่มีการประมาณค่า  
ตำแหน่งด้วยตัวสังเกตเต็มอันดับ

#### ผลตอบสนองในสถานะอยู่ตัว

รูปที่ 4.13, 4.15 และ 4.17 เป็นรูปคลื่นกระแสและตำแหน่งจากผลการทดลองในสถานะอยู่ตัว ของระบบที่ความเร็ว 1000, 500 และ 200 rpm (มอเตอร์ขับโหลดอยู่ 2.1 Nm) ตามลำดับ จะเห็นว่าระบบสามารถประมาณค่าตำแหน่งได้ดีที่ความเร็ว 1000 rpm (ค่าเฉลี่ย  $\approx 0^\circ$ , ค่าผิดพลาดสูงสุด  $\approx 0.68^\circ$ ) และมีค่าผิดพลาดของตำแหน่งเฉลี่ย  $\approx 4^\circ$  และ  $5^\circ$  ที่ความเร็ว 500 และ 200 rpm ตามลำดับ โดยที่  $e_p = \hat{\rho} - \rho$

รูปที่ 4.14, 4.16 และ 4.18 เป็นรูปคลื่นค่าผิดพลาดของกระแสและฟลักซ์แม่เหล็กประมาณ ซึ่งจะเห็นว่าค่าผิดพลาดของกระแสมีค่าน้อยมาก (ค่าเฉลี่ยสูงสุด  $\approx 0.3$  A) สำหรับค่าความผิดพลาดของฟลักซ์แม่เหล็กนั้นมีค่าเป็น 1.81%, 8.18% และ 13.63% ที่ความเร็ว 1000, 500 และ 200 rpm ตามลำดับ ซึ่งก็ถือว่ามีค่าน้อย โดยที่ฟลักซ์แม่เหล็กจริงของมอเตอร์ (ภาคผนวก ก) มีค่าเท่ากับ 110 mWb

### ผลตอบสนองต่อการกลับทิศความเร็ว

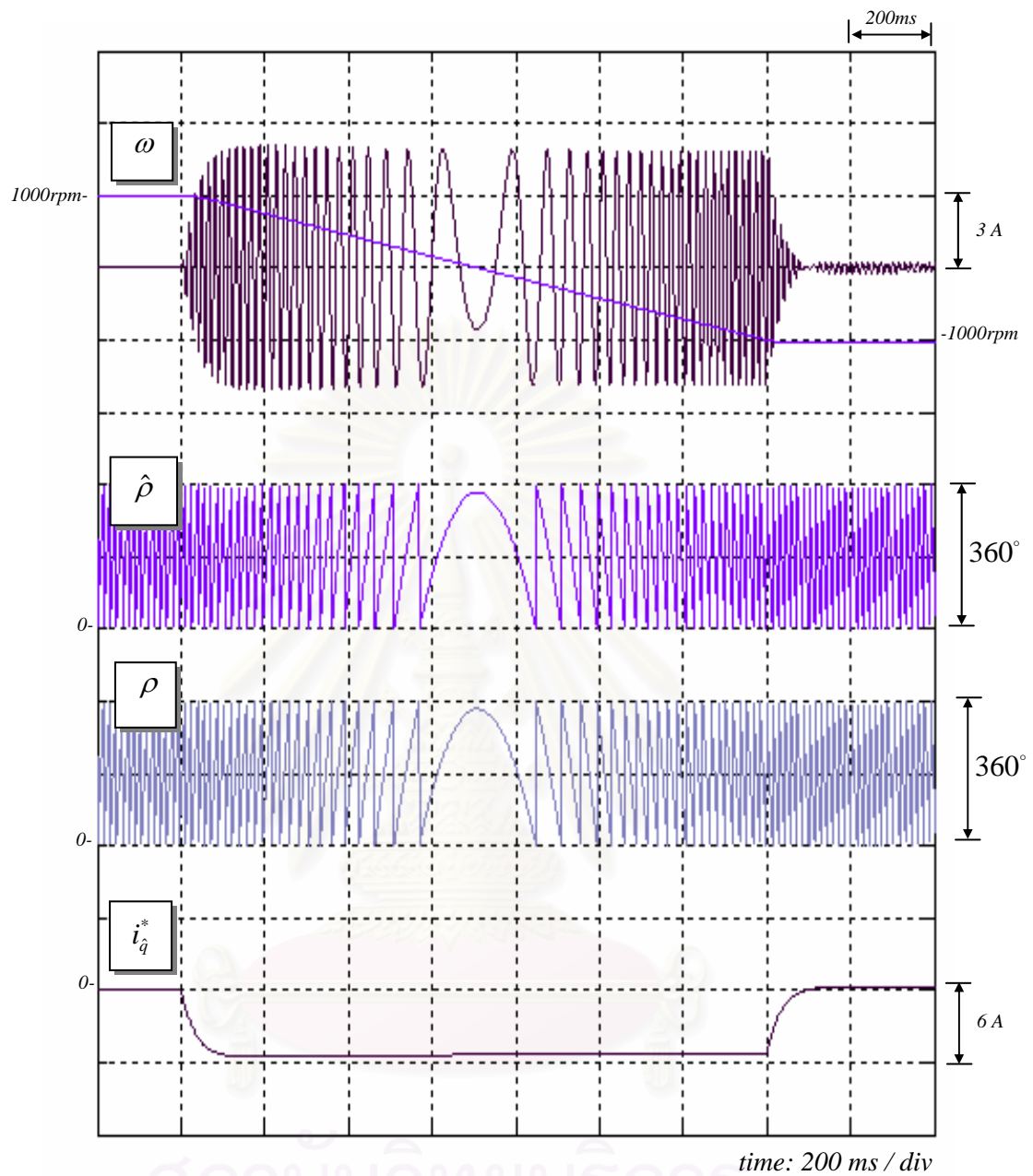
รูปที่ 4.4-4.5 และรูปที่ 4.19-4.22 เป็นผลการจำลองการทำงานและผลการทดลองในขณะกลับทิศความเร็วจาก  $1000 \leftrightarrow -1000$  rpm ตามลำดับ จากผลการจำลองการทำงานจะเห็นว่าระบบสามารถควบคุมแรงบิดของมอเตอร์ได้เป็นอย่างดี ซึ่งจะแตกต่างจากผลการทดลองที่ระบบควบคุมแรงบิดได้ไม่ดีเท่าที่ควร ทั้งนี้เนื่องจากการคำนวณความเร็วจริงของมอเตอร์ที่จะนำมาคำนวณหาตำแหน่งของโรเตอร์นั้นคำนวณทุกๆ 10 ms ดังนั้นช่วงที่ความเร็วคำสั่งเริ่มเปลี่ยนแปลง ความเร็วจริงของมอเตอร์ก็จะเปลี่ยนไปแต่ค่าที่นำมาใช้คำนวณหาตำแหน่งของฟลักซ์ยังคงเป็นค่าเดิมที่ของคาบเวลา 10 ms ก่อนหน้าอยู่ จึงทำให้เกิดความผิดพลาดดังกล่าว

### ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความเร็วคำสั่งในช่วงแคบ

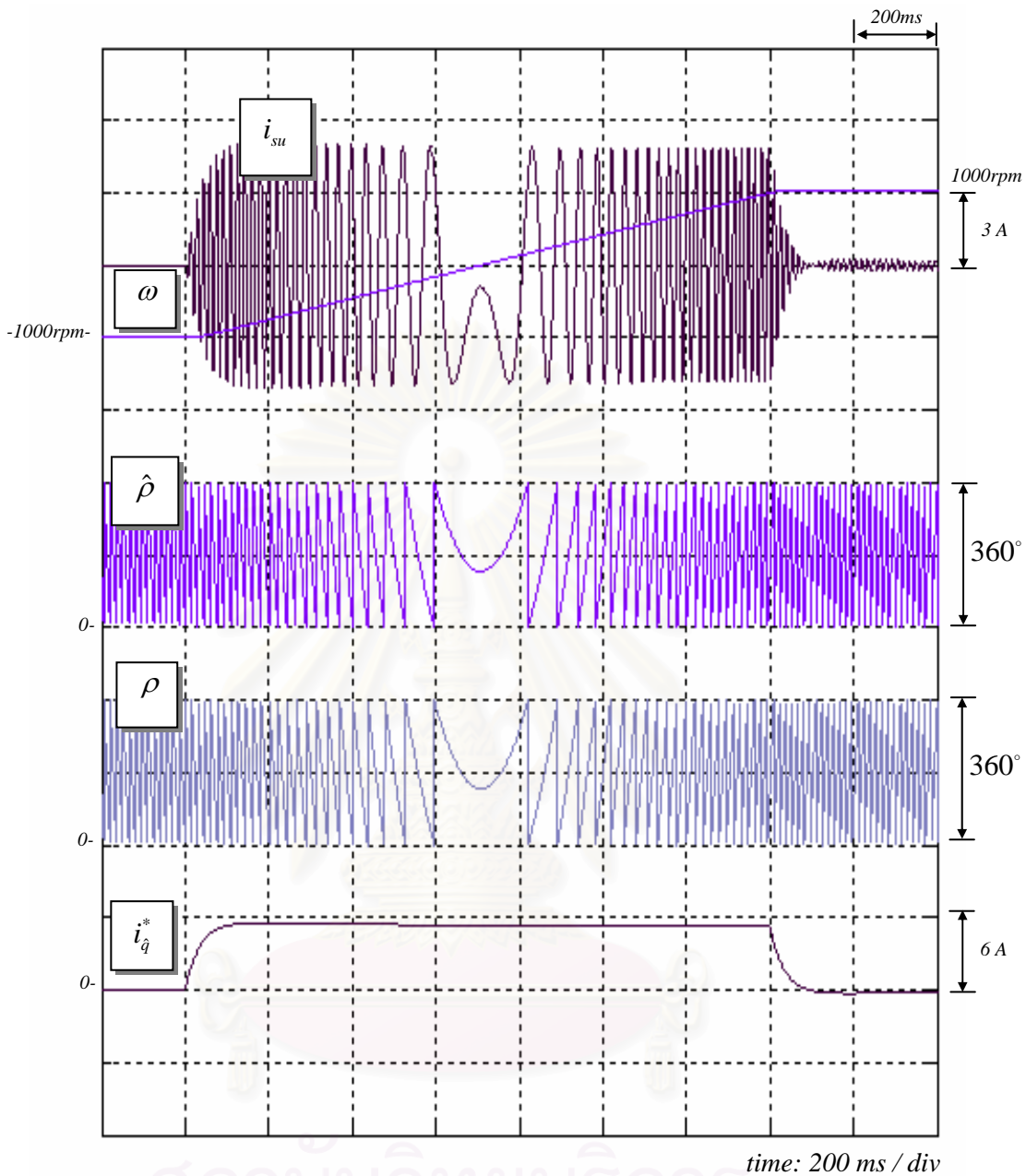
รูปที่ 4.6-4.9 และรูปที่ 4.23-4.26 เป็นผลการจำลองการทำงานและผลการทดลอง ในกรณีเปลี่ยนแปลงความเร็วคำสั่งจาก  $1000 \leftrightarrow 1100$  rpm ตามลำดับ จะเห็นว่าระบบควบคุมสามารถควบคุมความเร็วได้ตามค่าคำสั่งอย่างรวดเร็ว ซึ่งก็จะสอดคล้องกันระหว่างผลการทดลองและผลการจำลองการทำงาน สำหรับค่าความผิดพลาดของตำแหน่งเฉลี่ยนั้นมีประมาณ  $4^\circ$  (ค่าสูงสุด  $\approx 6^\circ$ )

### ผลตอบสนองต่อโหลดแบบขั้น

รูปที่ 4.10-4.12 และรูปที่ 4.27-4.32 เป็นผลการจำลองการทำงานและผลการทดลอง ในกรณีเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้น (2.1 Nm) ที่ความเร็ว 1000, 500 และ 200 rpm ตามลำดับ จะเห็นว่าระบบควบคุมสามารถควบคุมแรงบิดได้อย่างรวดเร็ว โดยสังเกตจากกระแสสร้างแรงบิดของมอเตอร์ก็จะเป็นตามค่าคำสั่ง และมีเวลาในการตอบสนองของความเร็วที่ช้าที่สุดประมาณ 1s จากผลการทดลอง และประมาณ 700 ms สำหรับผลการจำลองการทำงาน ในส่วนของค่าผิดพลาดของตำแหน่งนั้นจะมีค่อนข้างมากที่ความเร็วต่ำ (200 rpm) และไว้โหลด (ดูรูปที่ 4.32) ประมาณ  $22^\circ$  แล้วจะมีค่าต่ำเมื่อมีโหลดประมาณ  $5.4^\circ$  ทั้งนี้เนื่องจากขณะไว้โหลดนั้นมอเตอร์ซึ่งโครนัสแม่เหล็กถาวร นั้นไม่ต้องการกระแสสร้างฟลักซ์ซึ่งจะแตกต่างจากมอเตอร์เหนี่ยวนำ ทำให้ผลของการประวิงเวลามีบทบาทมากต่อรูปคลื่นกระแส เนื่องจากกระแสที่ความถี่หลักมูลฐานมีค่าต่ำ ทำให้เราได้ข้อมูลของกระแสที่ความถี่หลักมูลฐานในการประมาณค่าตำแหน่งค่อนข้างน้อย จึงเกิดค่าผิดพลาดดังกล่าว แต่ที่ความเร็ว 1000 rpm ขณะมีโหลด (ดูรูปที่ 4.28) ค่าผิดพลาดของตำแหน่งเฉลี่ยมีประมาณเพียง  $1.4^\circ$

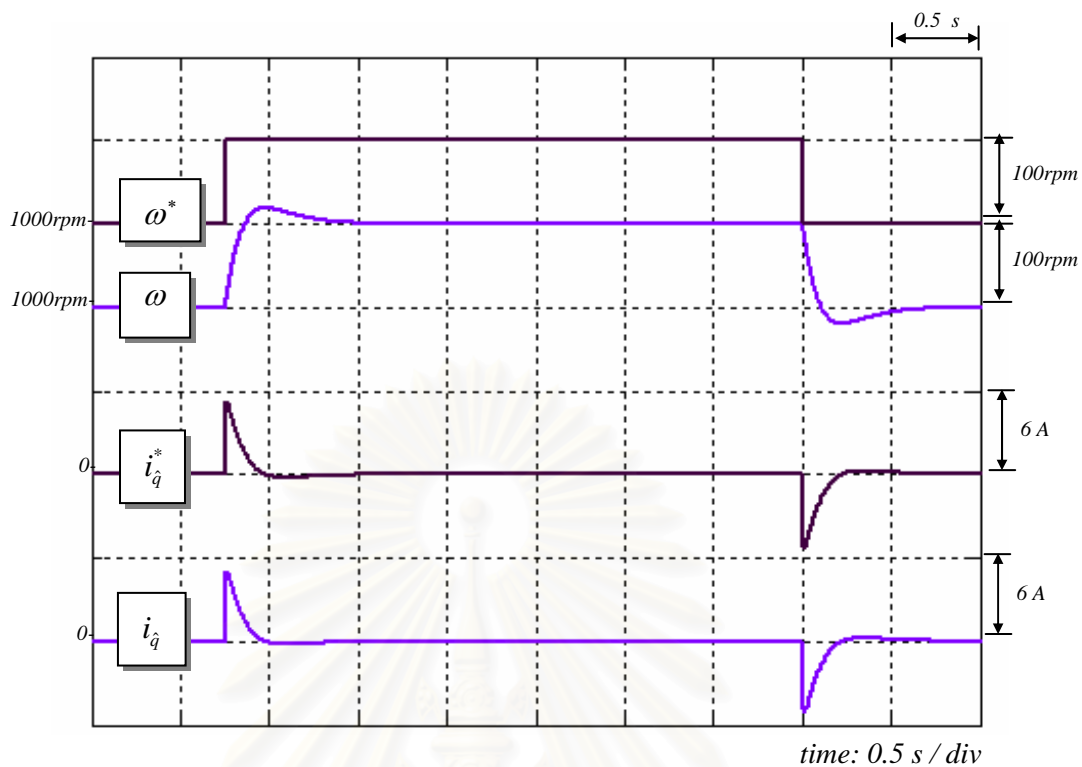


รูปที่ 4.4 ผลการจำลองการทำงานขณะกลับทิศความเร็วจาก 1000 ไป -1000 rpm เมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วมและตัวสังเกต

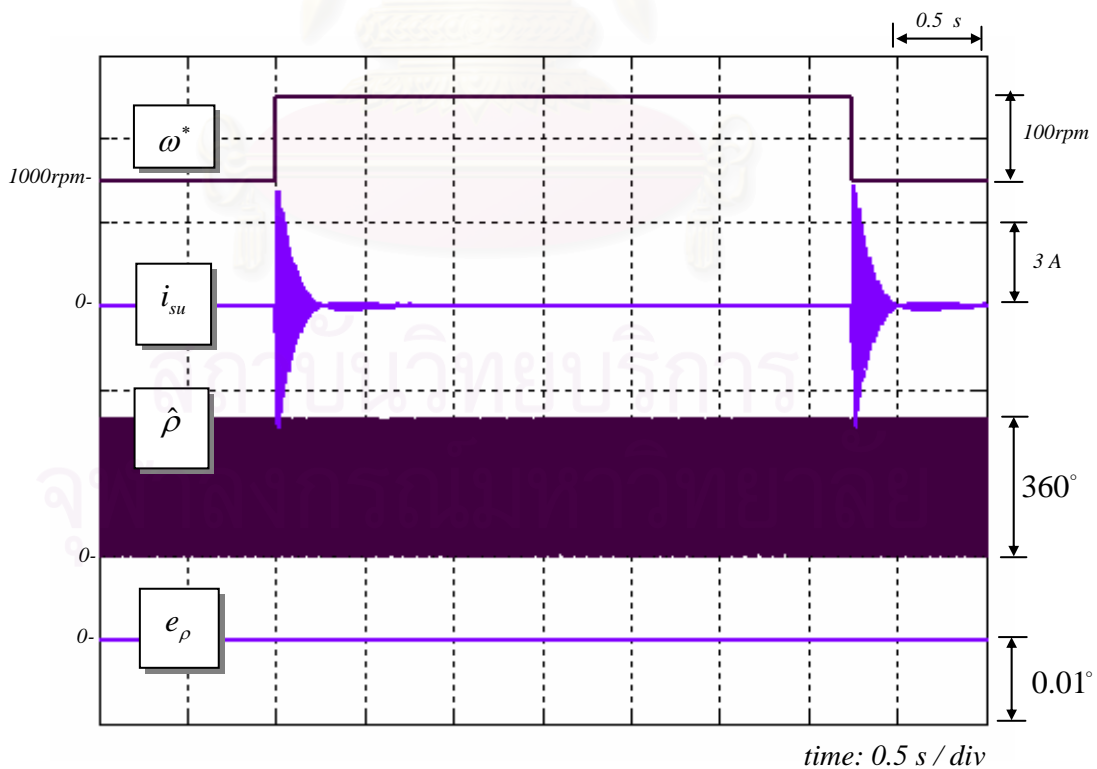


รูปที่ 4.5 ผลการจำลองการทำงานขณะกลับทิศความเร็วจาก -1000 ไป 1000 rpm เมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วมและตัวสังเกต

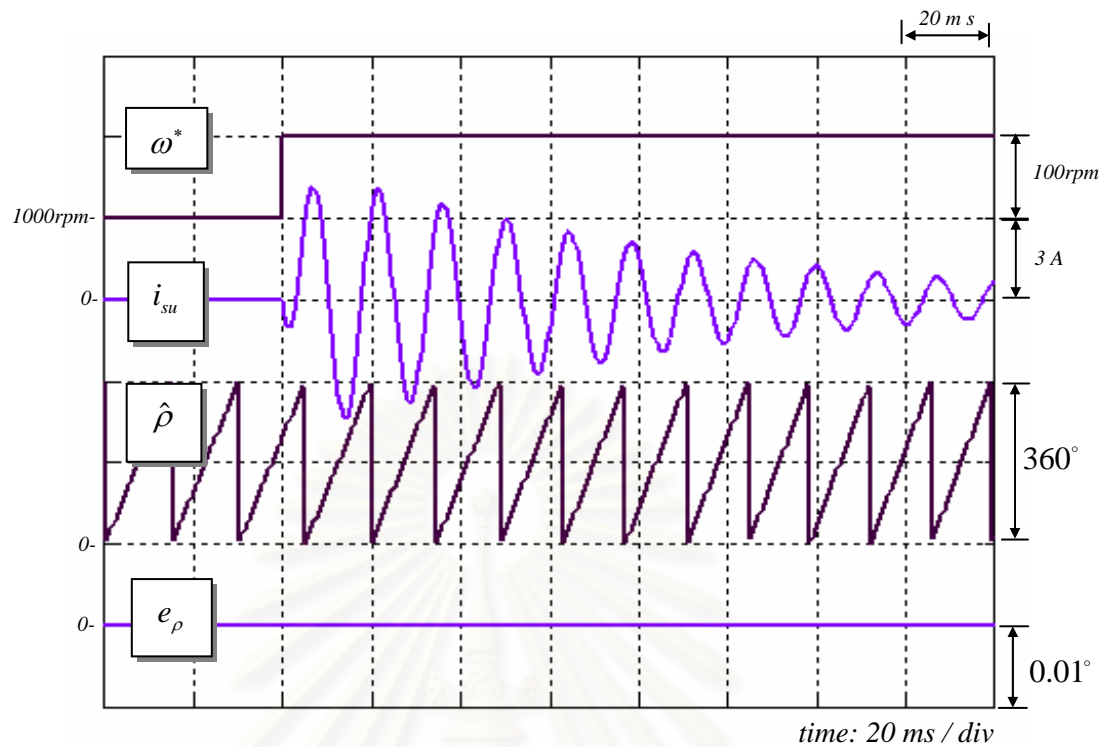




รูปที่ 4.6 ผลการจำลองการทำงานเมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วมและตัวสังเกตในกรณีเปลี่ยนแปลงความเร็วคำสั่งในช่วงแคบ (รูปคลื่นความเร็วและกระแสสร้างแรงบิด)

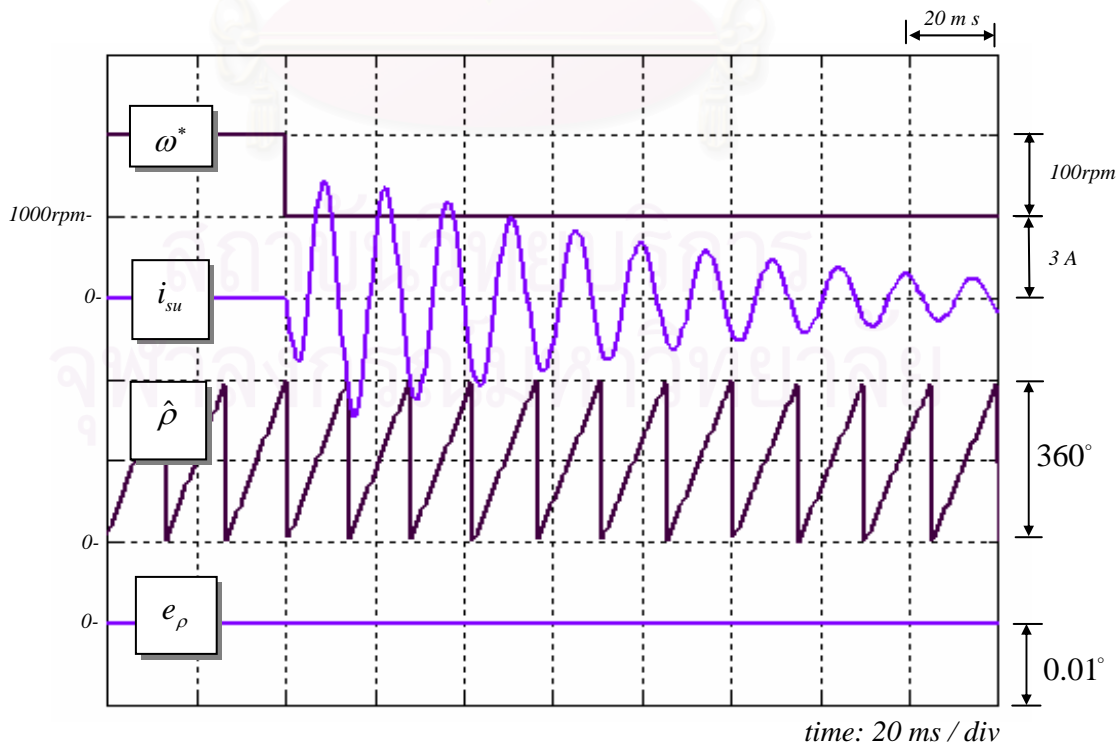


รูปที่ 4.7 ผลการจำลองการทำงานเมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วมและตัวสังเกตในกรณีเปลี่ยนแปลงความเร็วคำสั่งในช่วงแคบ (รูปคลื่นตำแหน่งและกระแสเฟส u)



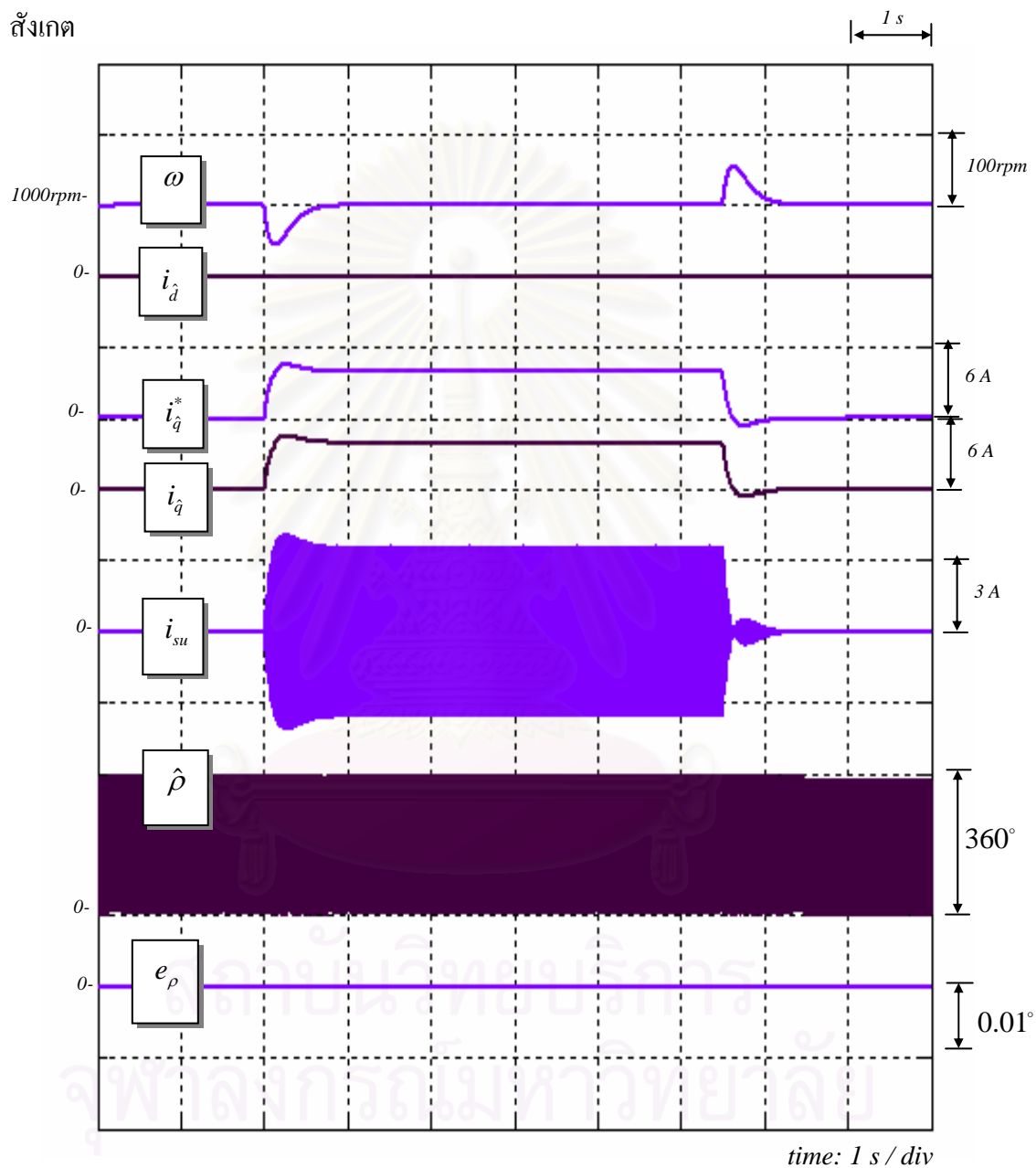
รูปที่ 4.8 ภาพขยายของข้อมูลตำแหน่งและกระแสเฟส  $u$  ของรูปที่ 4.7 ในขณะเปลี่ยนแปลงความเร็ว

คำสั่งในช่วงแคบจาก 1000 ไป 1100 rpm เมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วมและตัวสังเกต

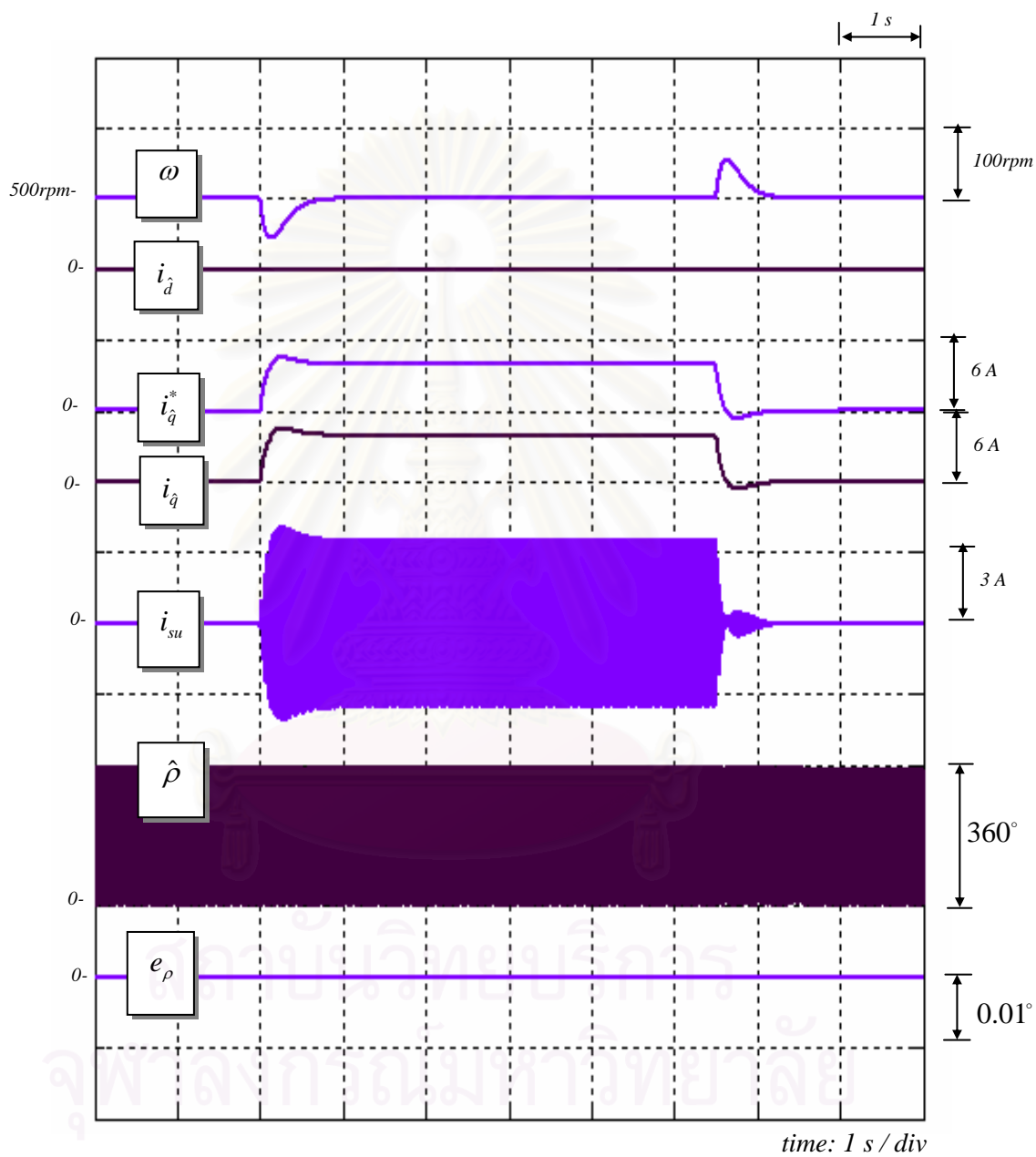


รูปที่ 4.9 ภาพขยายของข้อมูลตำแหน่งและกระแสเฟส u ของรูปที่ 4.7 ในขณะที่เปลี่ยนแปลงความเร็ว

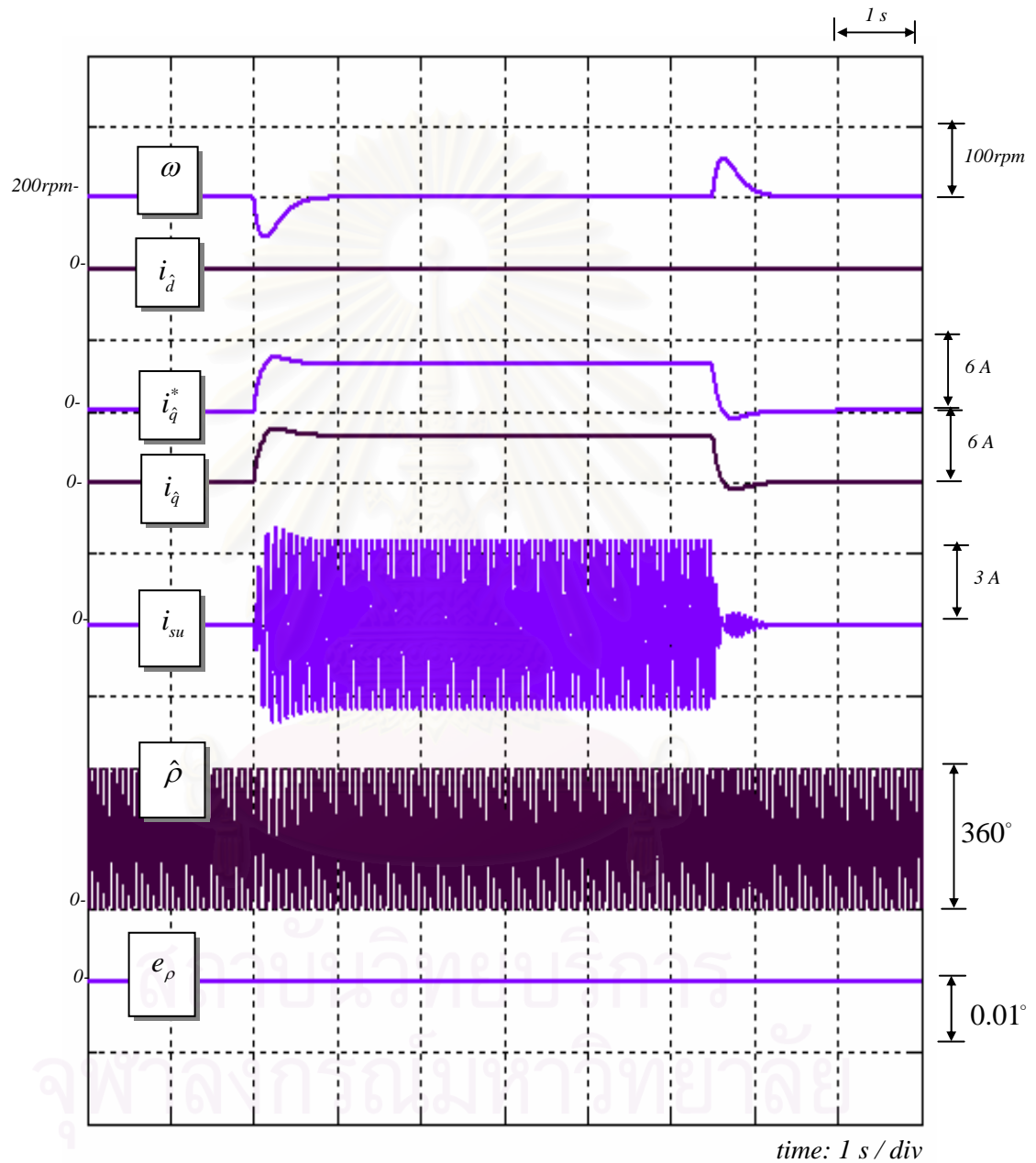
คำสั่งในช่วงแคบจาก 1100 ไป 1000 rpm เมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วมและตัวสั่งเกิด



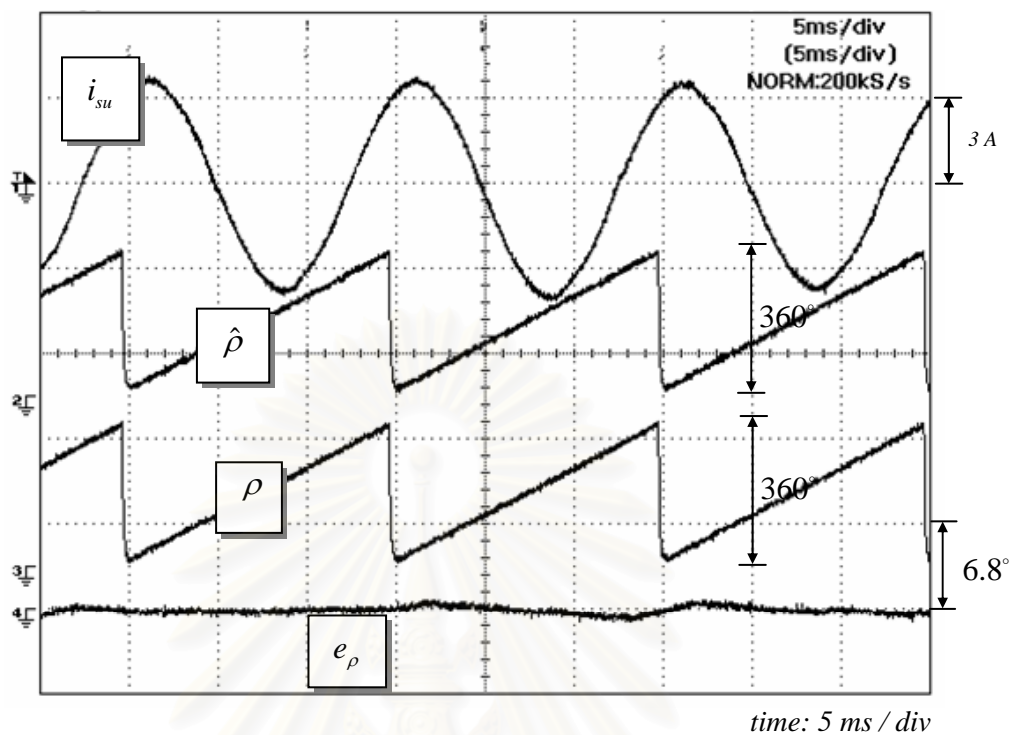
รูปที่ 4.10 ผลการจำลองการทำงานในกรณีเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้นที่ความเร็ว 1000 rpm เมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วมและตัวสั่งเกิด



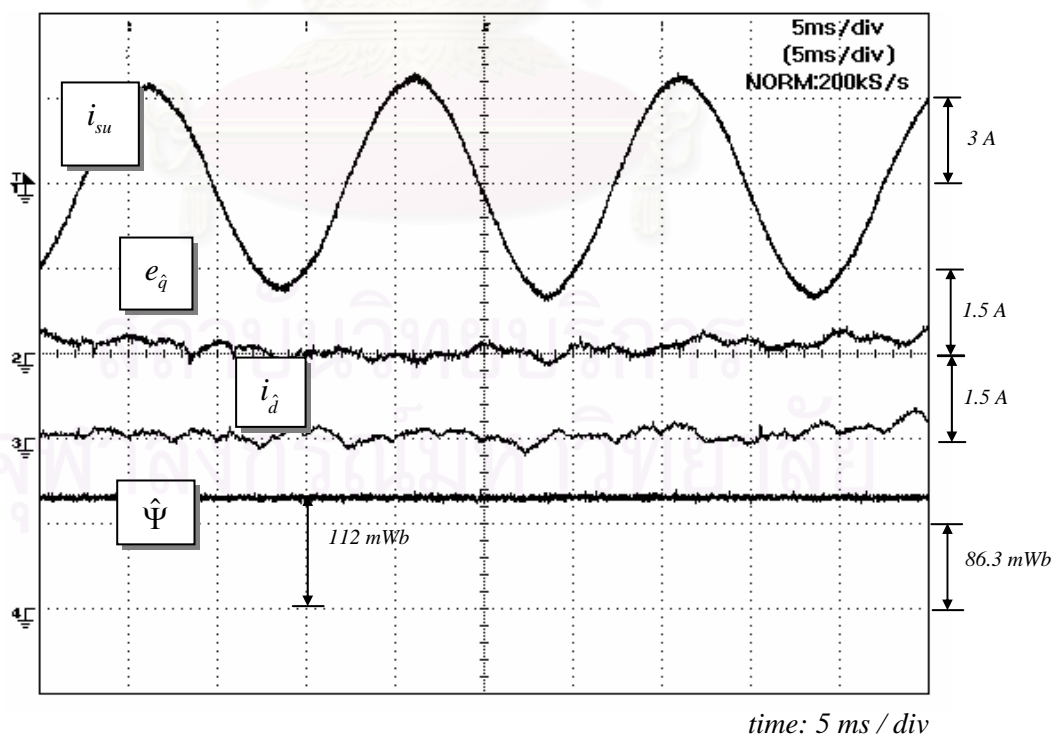
รูปที่ 4.11 ผลการจำลองการทำงานในกรณีเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้นที่ความเร็ว 500 rpm  
เมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วมและตัวสังเกต



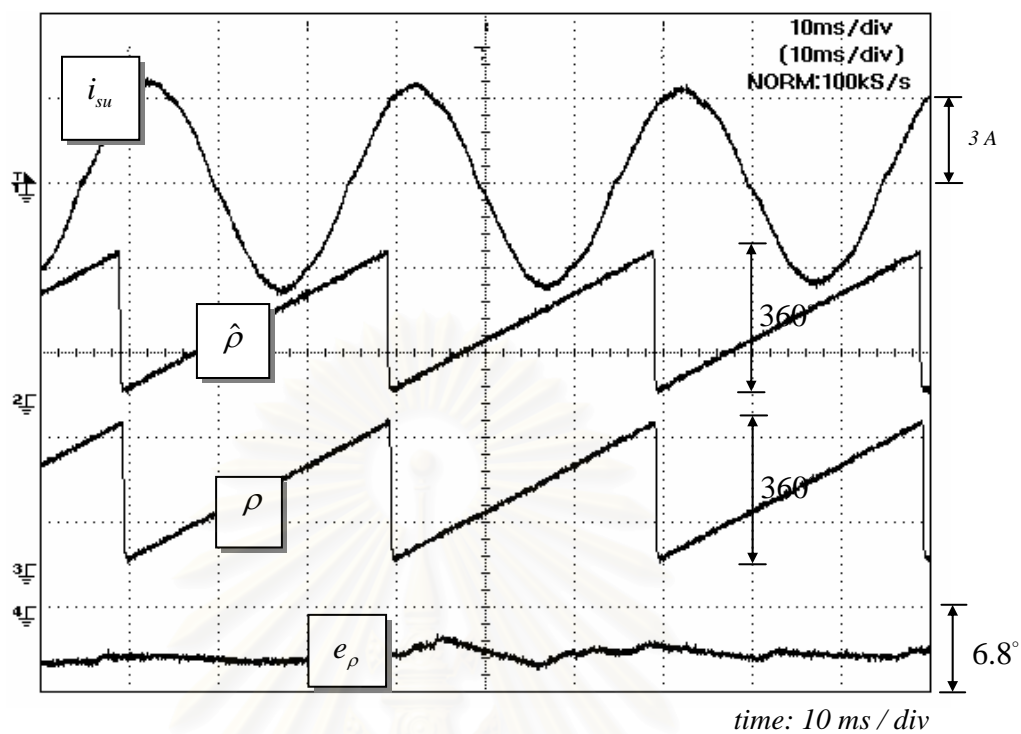
รูปที่ 4.12 ผลการจำลองการทำงานในกรณีเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้นที่ความเร็ว 200 rpm  
เมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วมและตัวสังเกต



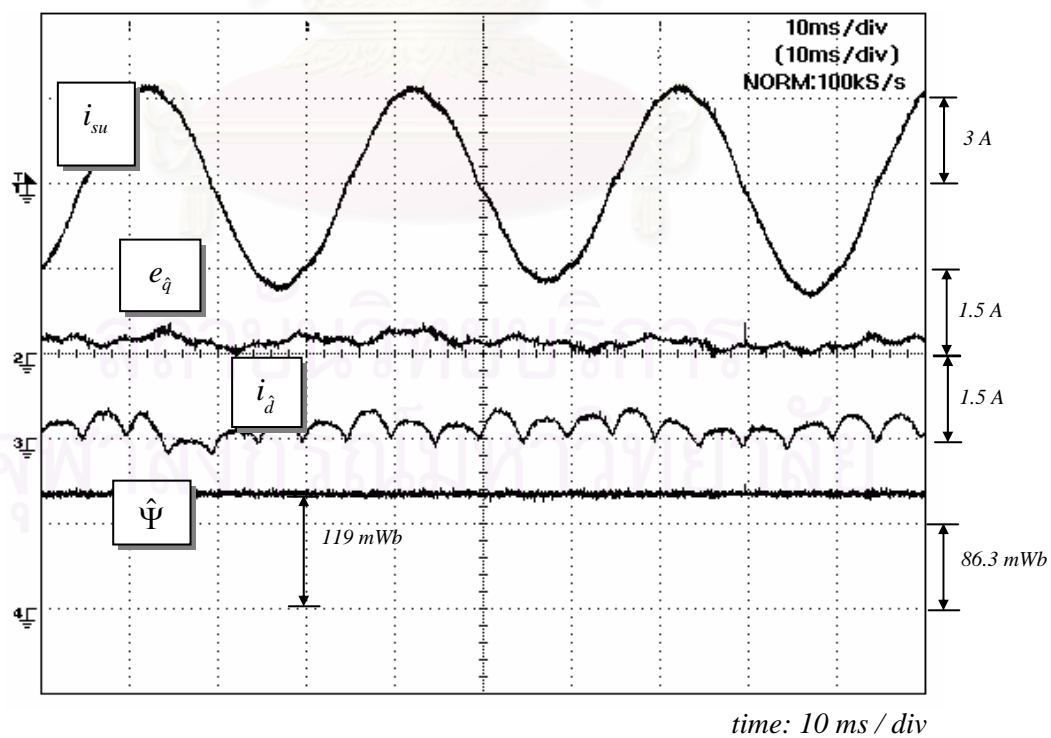
รูปที่ 4.13 ผลการทดลองในสภาวะอยู่ตัวเมื่อความเร็วคำสั่งมีค่าเท่ากับ 1000 rpm เมื่อใช้การควบคุมแบบการเชื่อมร่วมและตัวสังเกต(รูปคลื่นกระแสและตำแหน่ง)



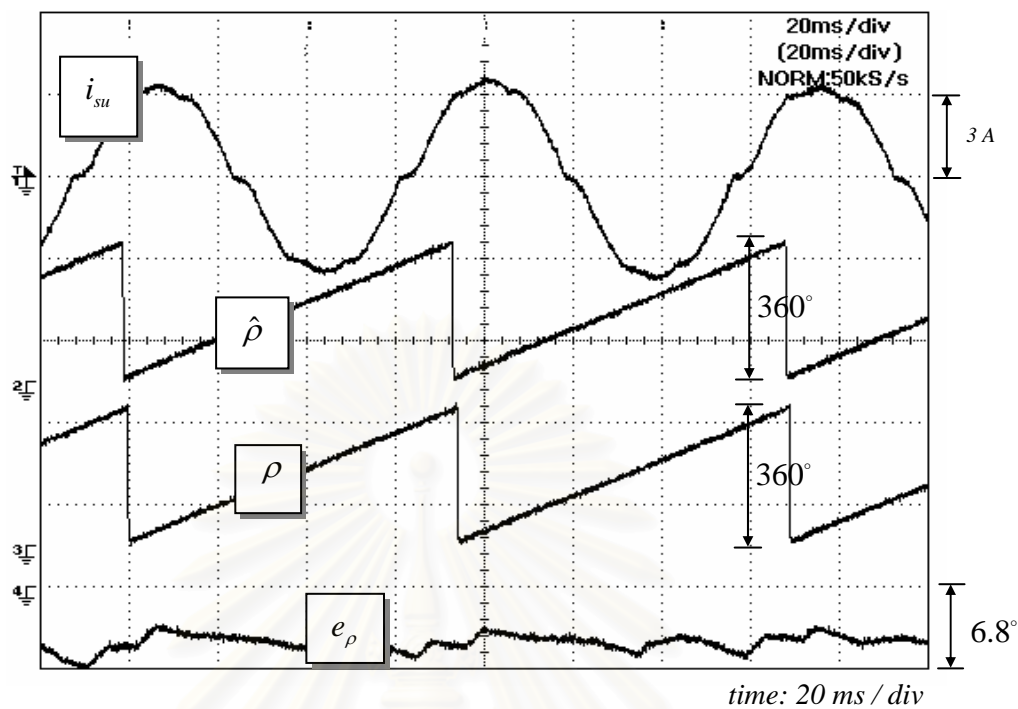
รูปที่ 4.14 ผลการทดลองในสภาวะอยู่ตัวเมื่อความเร็วคำสั่งมีค่าเท่ากับ 1000 rpm เมื่อใช้การควบคุมแบบการเชื่อมร่วมและตัวสังเกต(รูปคลื่นกระแสและฟลักซ์แม่เหล็ก)



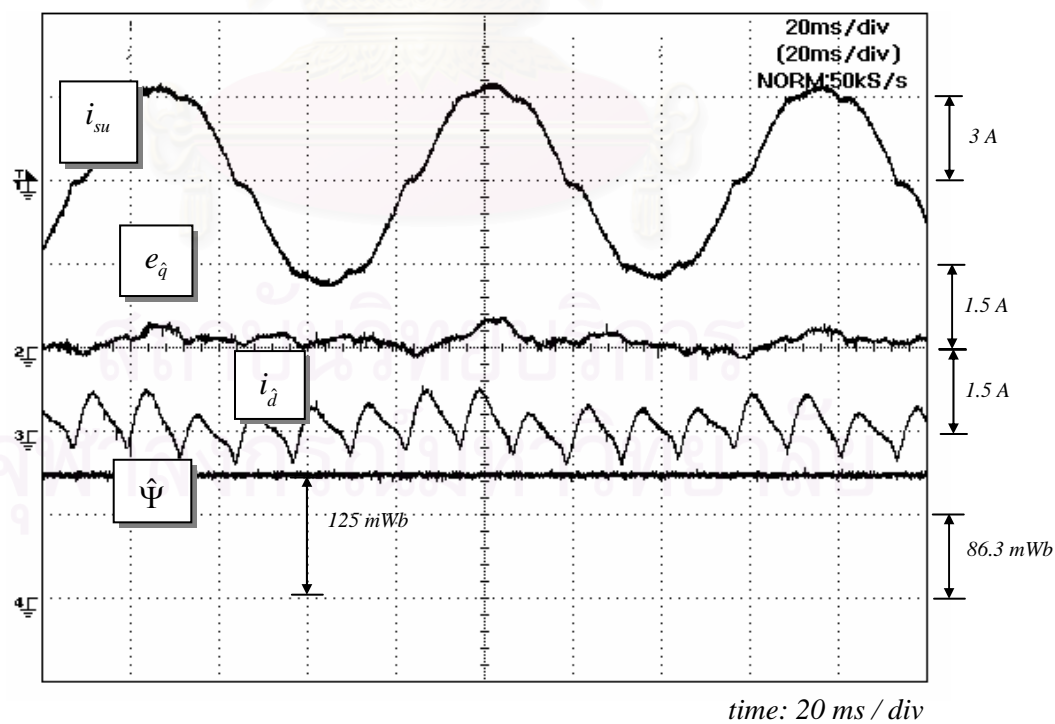
รูปที่ 4.15 ผลการทดลองในสถานะอยู่ตัวเมื่อความเร็วคำสั่งมีค่าเท่ากับ 500 rpm เมื่อใช้การควบคุมแบบการเชื่อมร่วมและตัวสังเกต(รูปคลื่นกระแสและตำแหน่ง)



รูปที่ 4.16 ผลการทดลองในสถานะอยู่ตัวเมื่อความเร็วคำสั่งมีค่าเท่ากับ 500 rpm เมื่อใช้การควบคุมแบบการเชื่อมร่วมและตัวสังเกต(รูปคลื่นกระแสและฟลักซ์แม่เหล็ก)

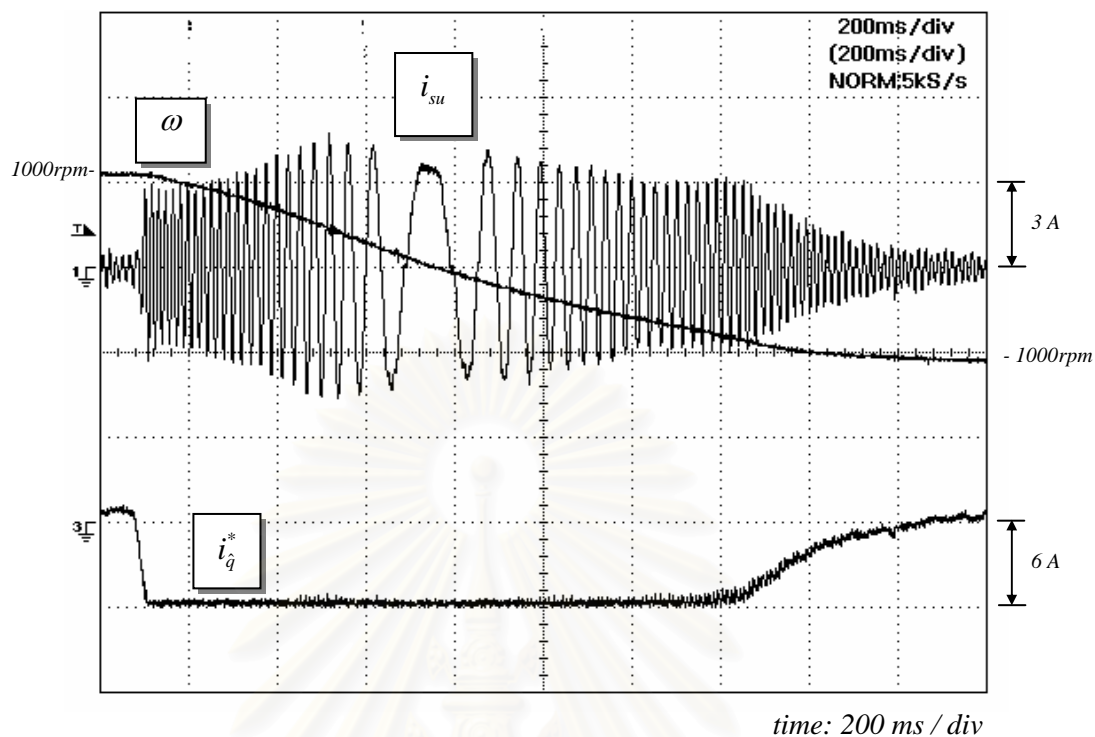


รูปที่ 4.17 ผลการทดลองในสภาวะอยู่ตัวเมื่อความเร็วคำสั่งมีค่าเท่ากับ 200 rpm เมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วมและตัวสังเกต(รูปคลื่นกระแสและตำแหน่ง)

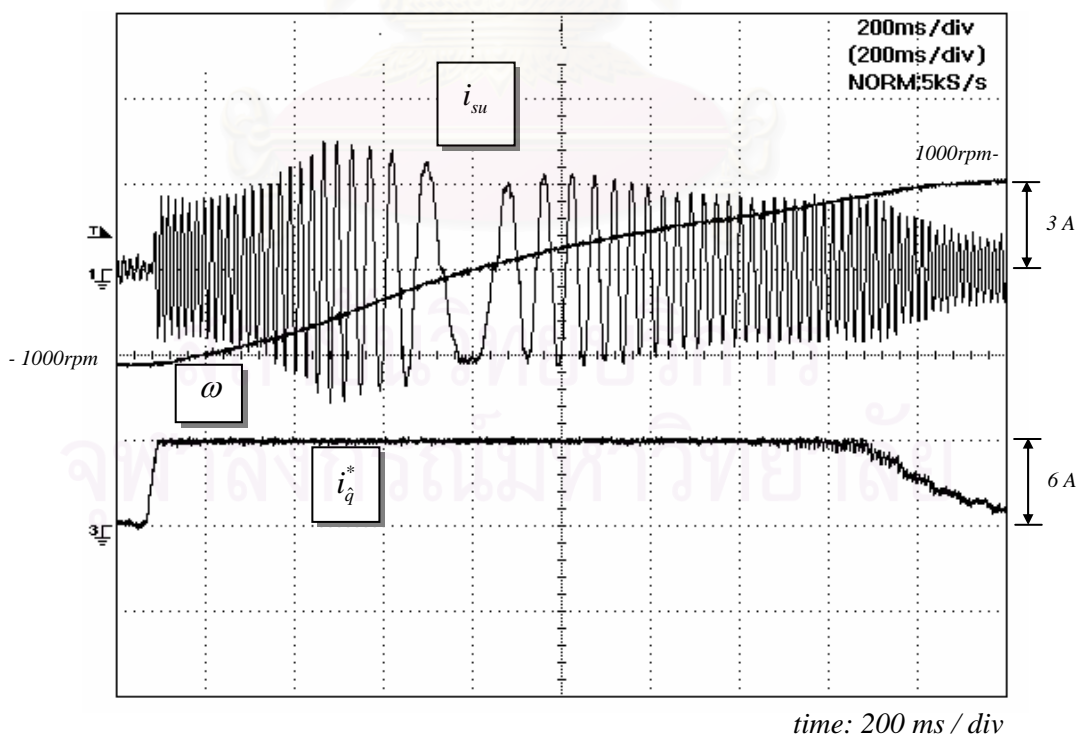


รูปที่ 4.18 ผลการทดลองในสภาวะอยู่ตัวเมื่อความเร็วคำสั่งมีค่าเท่ากับ 200 rpm เมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วมและตัวสังเกต(รูปคลื่นกระแสและฟลักซ์แม่เหล็ก)

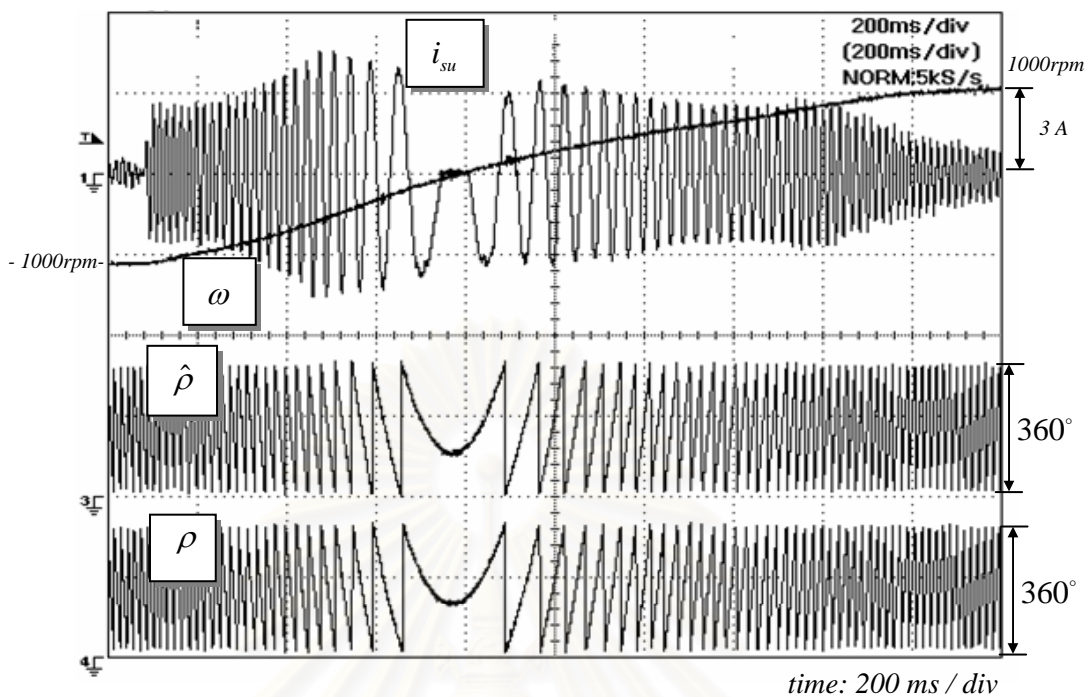




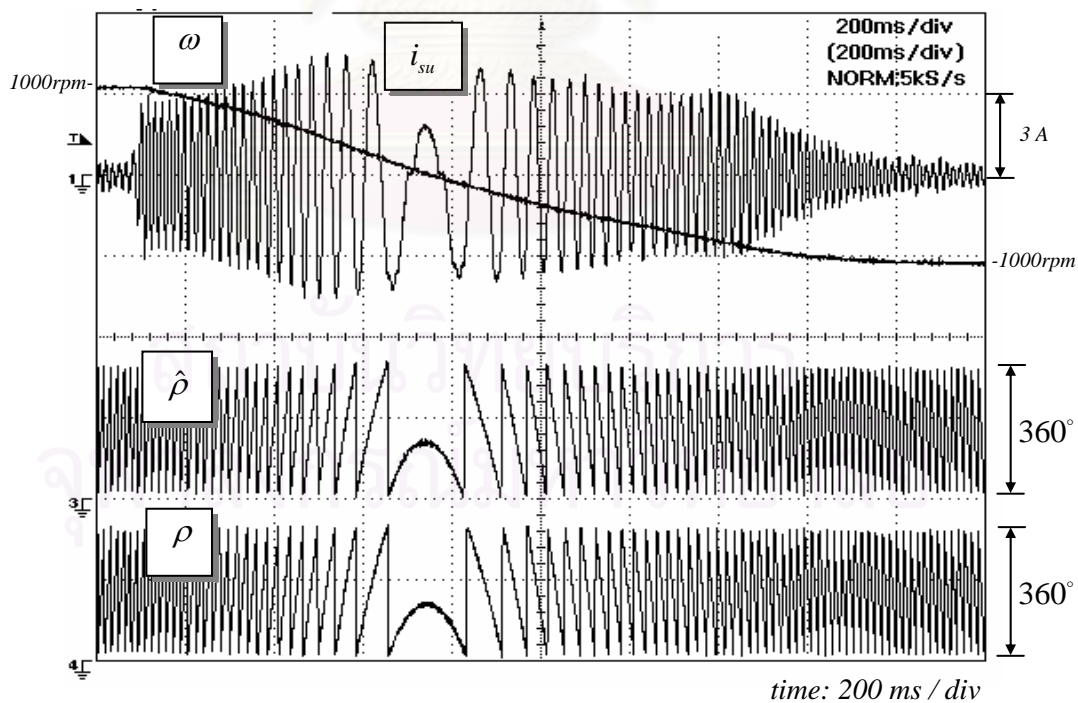
รูปที่ 4.19 ผลการทดลองขณะกลับทิศความเร็วจาก 1000 ไป -1000 rpm เมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วมและตัวสังเกต (รูปคลื่นความเร็วและกระแสสร้างแรงบิด)



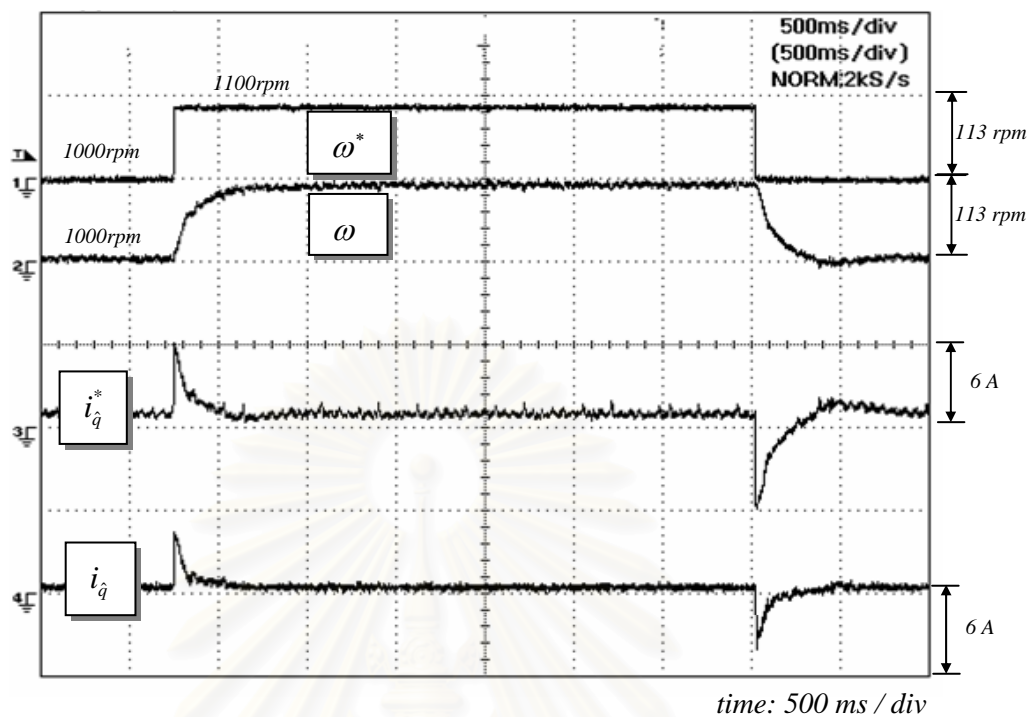
รูปที่ 4.20 ผลการทดลองขณะกลับทิศความเร็วจาก -1000 ไป 1000 rpm เมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วมและตัวสังเกต (รูปคลื่นความเร็วและกระแสสร้างแรงบิด)



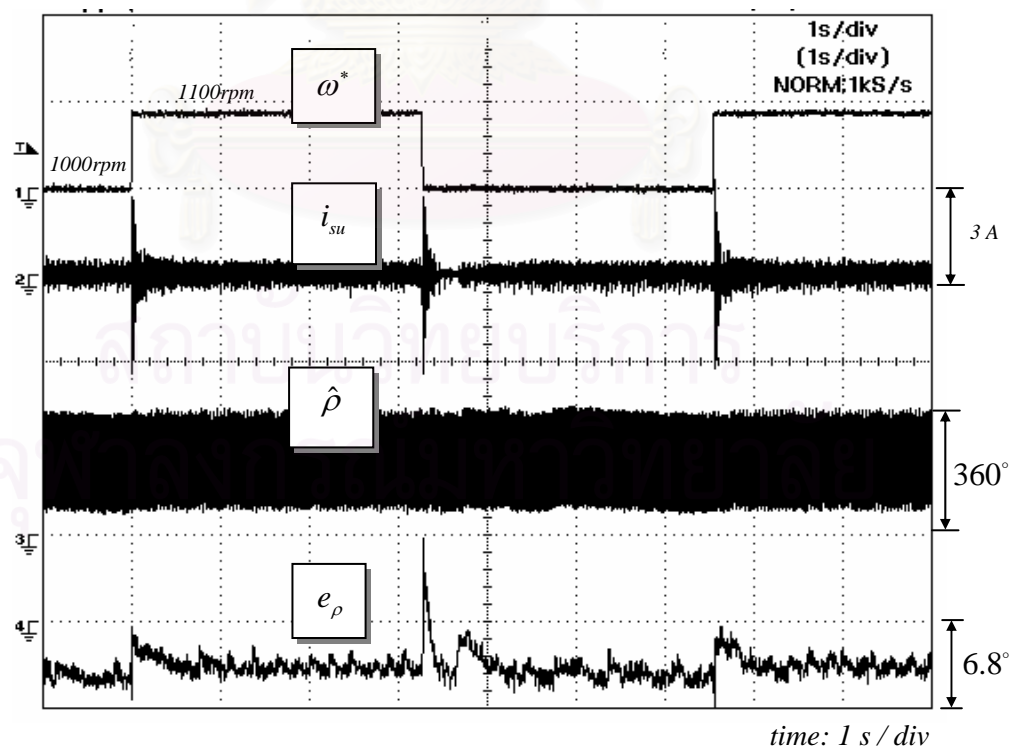
รูปที่ 4.21 ผลการทดลองขณะกลับทิศความเร็วจาก -1000 ไป 1000 rpm เมื่อใช้การควบคุม  
แยกการเชื่อมร่วมและตัวสังเกต (รูปคลื่นกระแส, ความเร็วและตำแหน่ง)



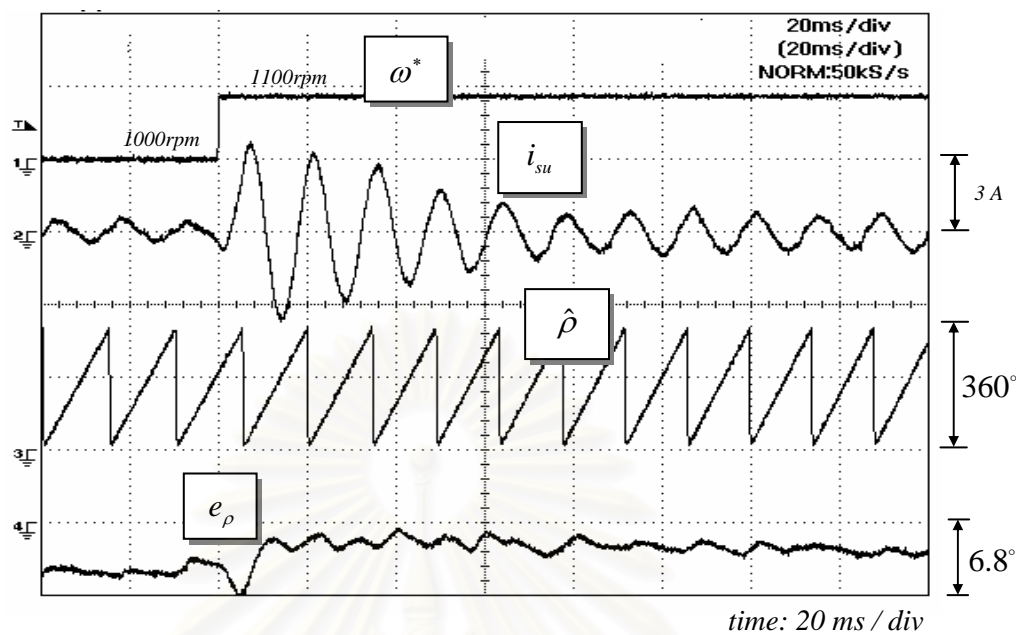
รูปที่ 4.22 ผลการทดลองขณะกลับทิศความเร็วจาก 1000 ไป -1000 rpm เมื่อใช้การควบคุม  
แยกการเชื่อมร่วมและตัวสังเกต (รูปคลื่นกระแส, ความเร็วและตำแหน่ง)



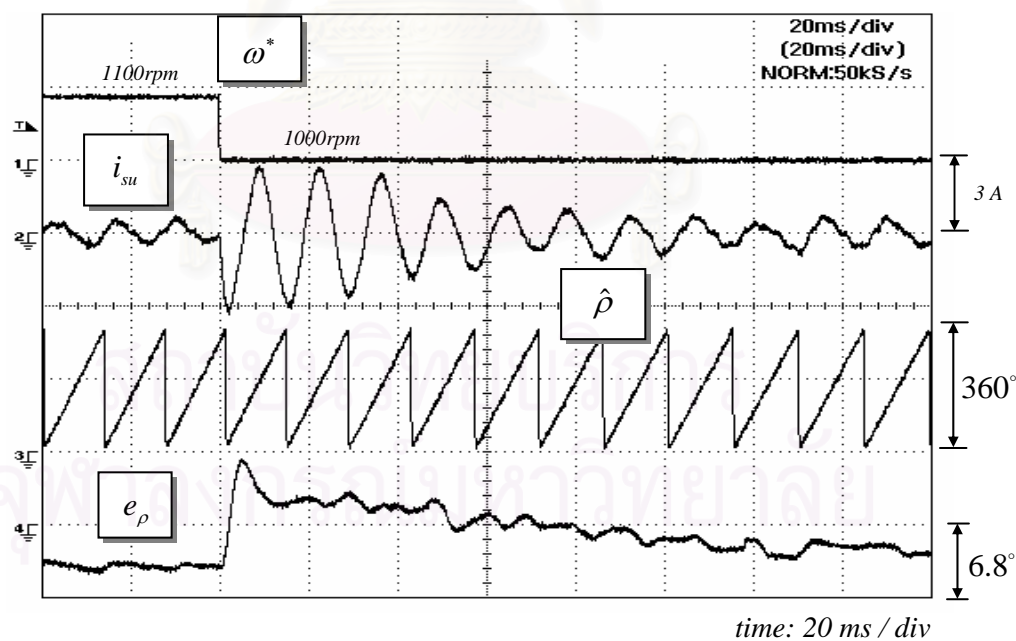
รูปที่ 4.23 ผลการทดลองเมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วมและตัวสังเกตในกรณี  
เปลี่ยนแปลงความเร็วคำสั่งในช่วงแคบ (รูปคลื่นความเร็วและกระแสสร้างแรงบิด)



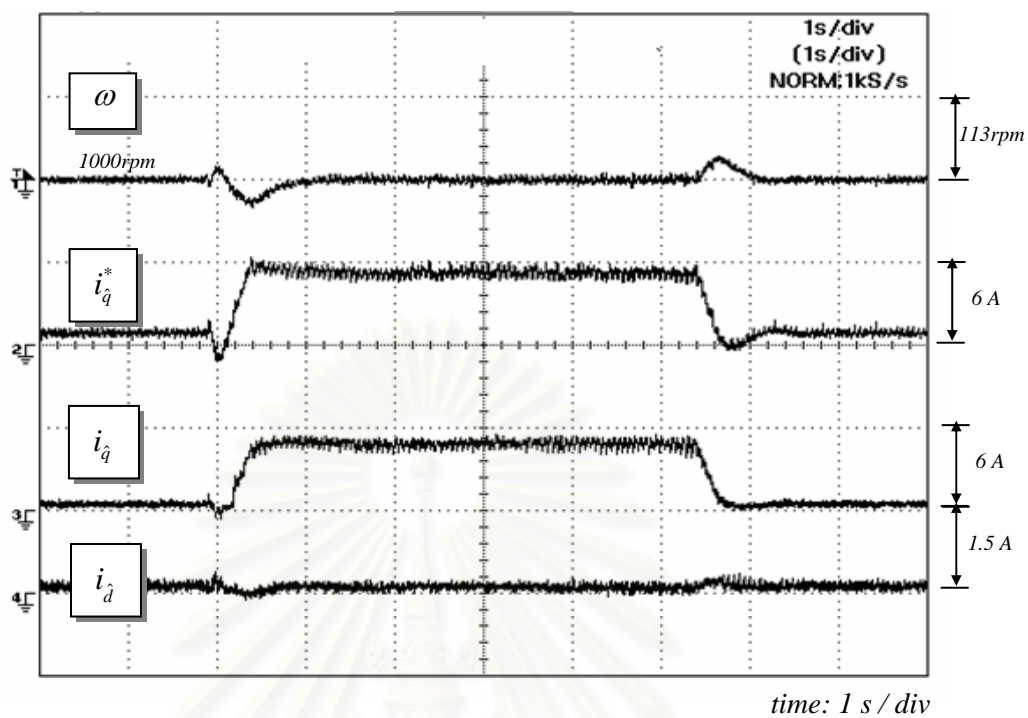
รูปที่ 4.24 ผลการทดลองเมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วมและตัวสังเกตในกรณี  
เปลี่ยนแปลงความเร็วคำสั่งในช่วงแคบ (รูปคลื่นตำแหน่งและกระแสเฟส u)



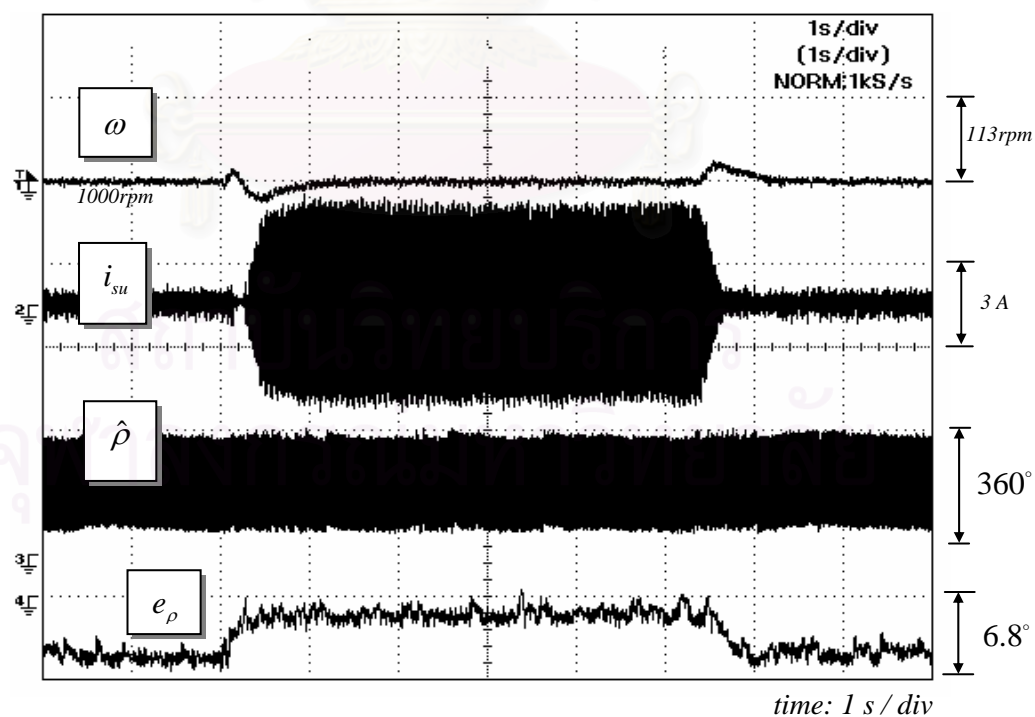
รูปที่ 4.25 ภาพขยายของข้อมูลตำแหน่งและกระแสเฟส u ของรูปที่ 4.24 ในขณะที่เปลี่ยนแปลงความเร็วคำสั่งในช่วงแคบจาก 1000 ไป 1100 rpm เมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วมและตัวสังเกต



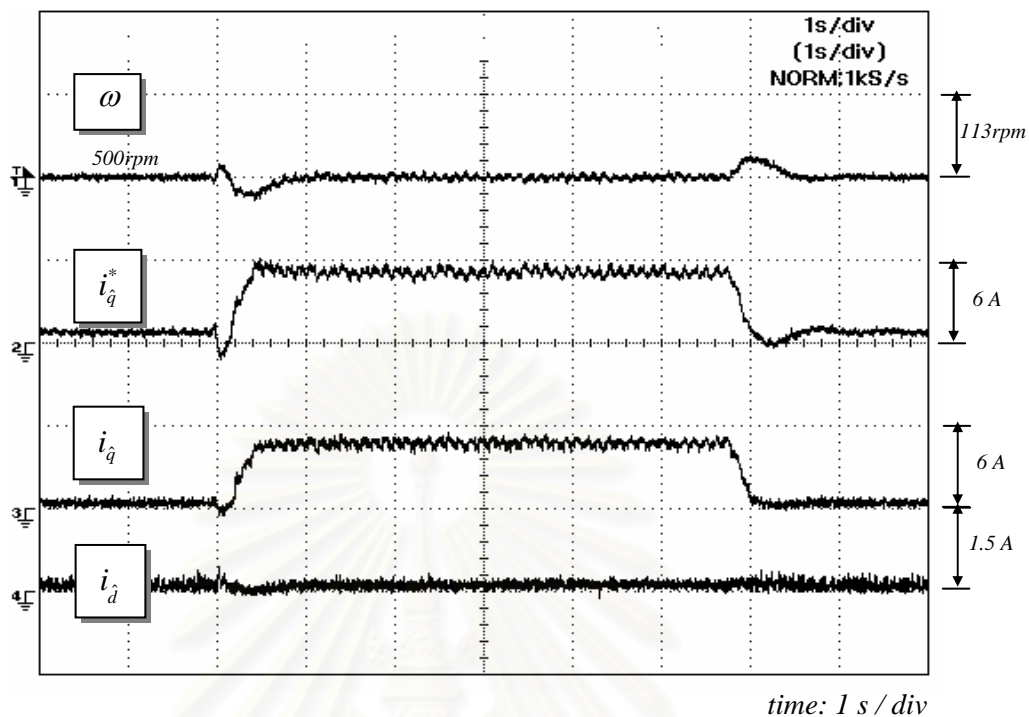
รูปที่ 4.26 ภาพขยายของข้อมูลตำแหน่งและกระแสเฟส u ของรูปที่ 4.24 ในขณะที่เปลี่ยนแปลงความเร็วคำสั่งในช่วงแคบจาก 1100 ไป 1000 rpm เมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วมและตัวสังเกต



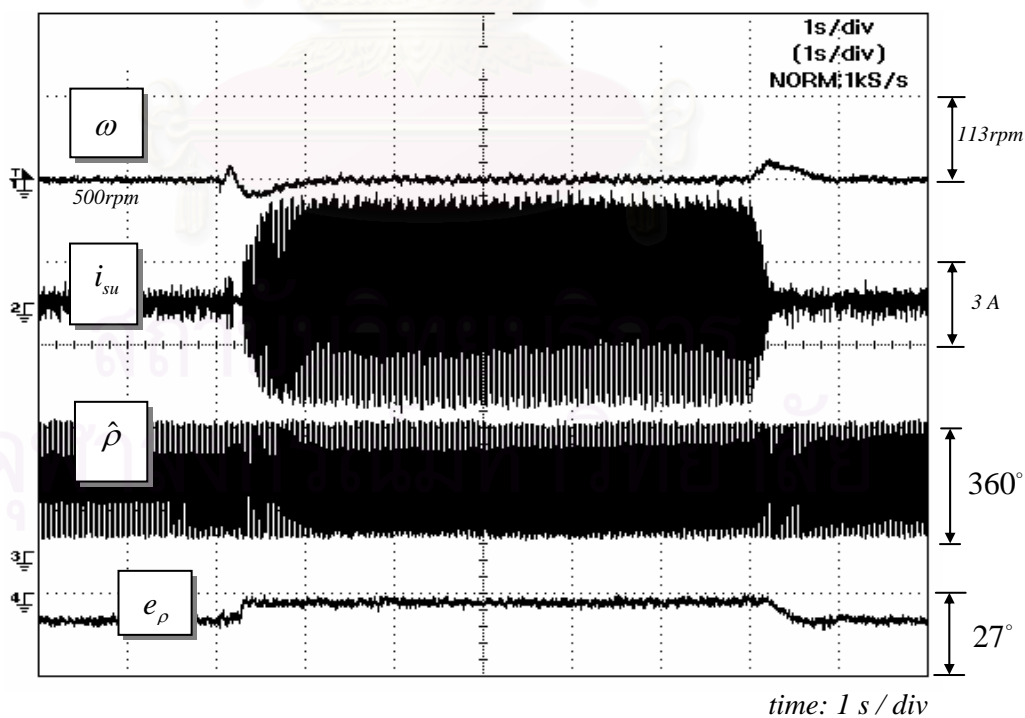
รูปที่ 4.27 ผลการทดลองในกรณีเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้นที่ความเร็ว 1000 rpm เมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วมและตัวสังเกต (รูปคลื่นความเร็วและกระแสสร้างแรงบิด)



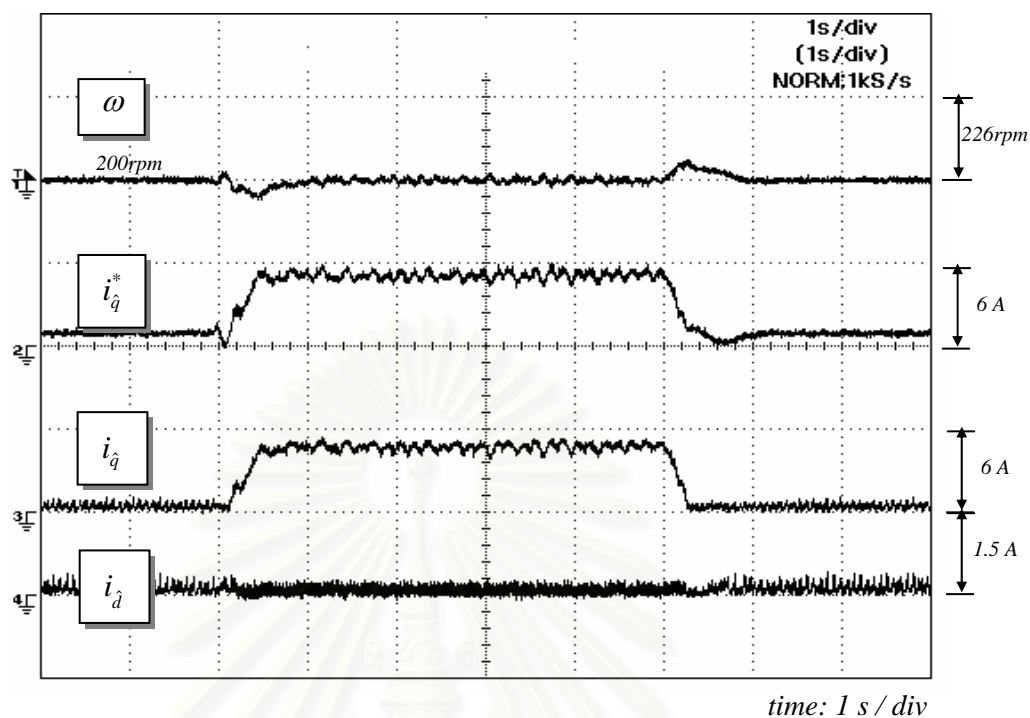
รูปที่ 4.28 ผลการทดลองในกรณีเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้นที่ความเร็ว 1000 rpm เมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วมและตัวสังเกต (รูปคลื่นกระแสและตำแหน่ง)



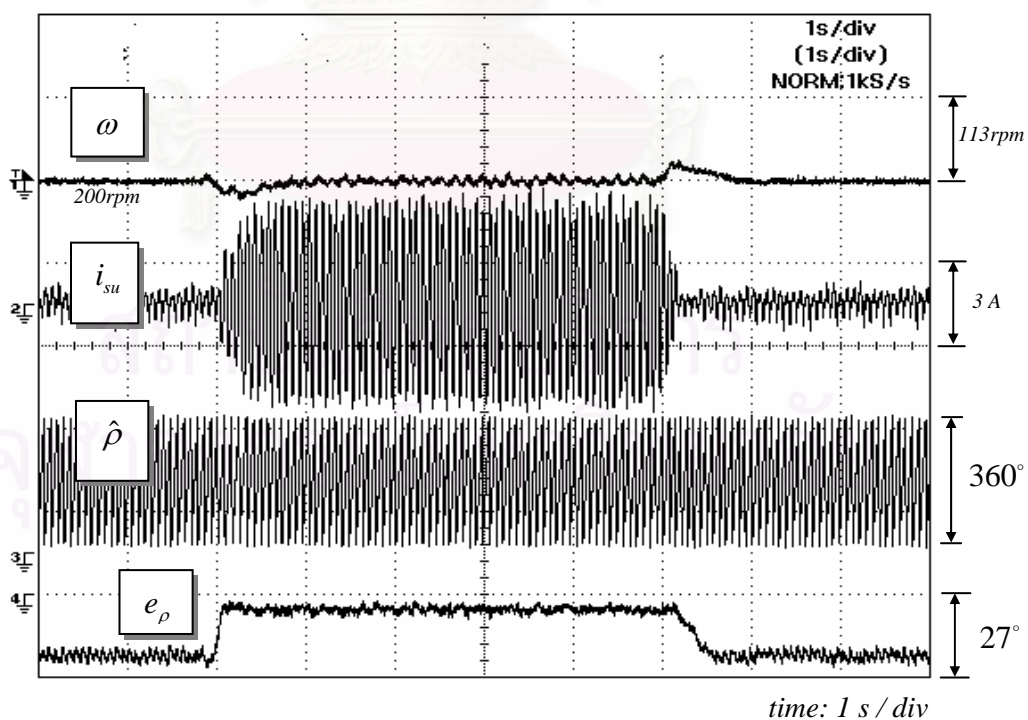
รูปที่ 4.29 ผลการทดลองในกรณีเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้นที่ความเร็ว 500 rpm เมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วมและตัวสังเกต (รูปคลื่นความเร็วและกระแสสร้างแรงบิด)



รูปที่ 4.30 ผลการทดลองในกรณีเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้นที่ความเร็ว 500 rpm เมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วมและตัวสังเกต (รูปคลื่นกระแสและตำแหน่ง)



รูปที่ 4.31 ผลการทดลองในกรณีเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้นที่ความเร็ว 200 rpm เมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วมและตัวสังเกต (รูปคลื่นความเร็วและกระแสสร้างแรงบิด)



รูปที่ 4.32 ผลการทดลองในกรณีเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้นที่ความเร็ว 200 rpm เมื่อใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วมและตัวสังเกต (รูปคลื่นกระแสและตำแหน่ง)

## บทที่ 5

### ทฤษฎีการควบคุมมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรแบบเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง

ในบทนี้เราจะกล่าวถึงการสร้างตัวสังเกตเต็มอันดับแบบปรับตัวจากแบบจำลองเชิงเส้นที่นำเสนอในบทที่ 2 เพื่อใช้ในการประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กและตำแหน่งของโรเตอร์ รวมทั้งความเร็วโรเตอร์ ซึ่งทำให้เราสามารถสร้างระบบควบคุมเวกเตอร์ได้โดยไม่ต้องใช้ตัวตรวจจับความเร็วหรือตำแหน่งใดๆทั้งสิ้น ดังรายละเอียดต่อไปนี้

#### 5.1 ตัวสังเกตเต็มอันดับแบบปรับตัว (Full-Order Adaptive Observer)

จากตัวสังเกตเต็มอันดับที่นำเสนอในบทที่ 4 (สมการที่ (4.1)) เมื่อเราใช้ค่าความเร็วประมาณ ( $\hat{\omega}$ ) แทนค่าจริง ( $\omega$ ) จะได้ตัวสังเกตเต็มอันดับแบบปรับตัวดังแสดงในสมการที่ (5.1)

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{i} \\ \hat{\lambda} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L}I & -J\frac{\hat{\omega}}{L} \\ 0 & J\hat{\omega} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i} \\ \hat{\lambda} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/L \\ 0 \end{bmatrix} \bar{u} + \begin{bmatrix} 0 \\ H1*I + H2*J \end{bmatrix} [\hat{i} - i] \quad (5.1)$$

สมการประมาณค่าความเร็ว:

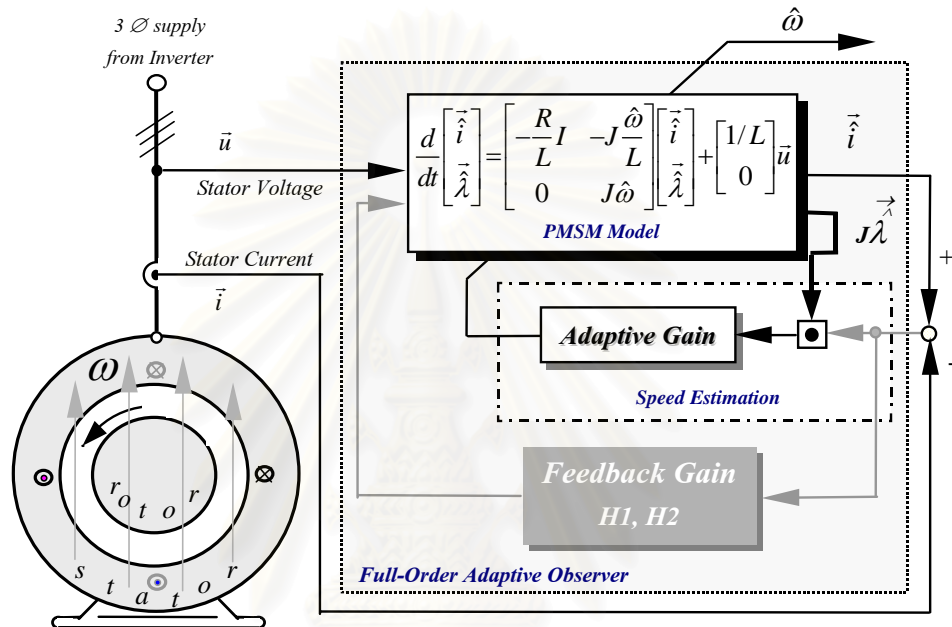
$$\hat{\omega} = (K_p + K_i \int dt) \left\{ \bar{e}_i^T J \hat{\lambda} \right\}; \quad K_p, K_i > 0 \quad (5.2)$$

จากสมการที่ (5.1) จะเห็นได้ว่าตัวสังเกตเต็มอันดับแบบปรับตัวประกอบด้วยแบบจำลองของมอเตอร์และสัญญาณป้อนกลับของค่าผิดพลาดของกระแสเตเตอร์ผ่านอัตราขยาย  $H1$  และ  $H2$  ค่าความเร็วที่ใช้ในตัวสังเกตเต็มอันดับเป็นค่าที่ได้จากการประมาณ ( $\hat{\omega}$ ) ซึ่งถ้าความเร็วมอเตอร์ไม่ถูกต้องกล่าวคือ  $\hat{\omega} \neq \omega$  ผลที่ได้ก็คือจะเกิดค่าผิดพลาดของทั้งกระแสเตเตอร์ ( $\bar{e}_i$ ) และฟลักซ์แม่เหล็ก ( $\bar{e}_\lambda$ ) แต่เนื่องจากสัญญาณที่เราสามารถวัดหรือคำนวณได้คือค่าผิดพลาดของกระแสเตเตอร์ ด้วยเหตุนี้เราจึงใช้ค่าผิดพลาดของกระแสเตเตอร์เป็นหลักในการประมาณค่าความเร็วมอเตอร์

ในการประมาณค่าความเร็วมอเตอร์ เราใช้วิธีที่เรียกว่า เกรเดียนต์ อัลกอริทึม (Gradient Algorithm) โดยมี  $J \hat{\lambda}$  เป็นรีเกรสเซอร์เวกเตอร์ดังแสดงในสมการที่ (5.2)



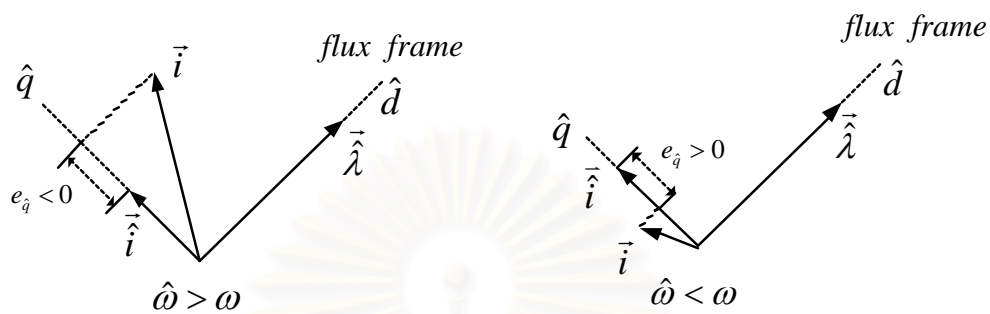
เราสามารถแสดงภาพรวมของบล็อกไดอะแกรมของตัวสังเกตแบบปรับตัวได้ดังรูปที่ 5.1 จะเห็นได้ว่าตัวสังเกตแบบปรับตัวที่พัฒนาขึ้นนี้จะมียังประกอบ 3 ส่วน ได้แก่ แบบจำลองมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร ส่วนประมาณค่าความเร็ว และส่วนป้อนกลับค่าผิดพลาดผ่านอัตราขยายป้อนกลับ  $H1$  และ  $H2$



รูปที่ 5.1 แผนภาพรวมของตัวสังเกตเต็มอันดับแบบปรับตัว

ตัวสังเกตแบบปรับตัวจะทำการคำนวณค่าความเร็วโรเตอร์ ( $\hat{\omega}$ ) กระแสสเตเตอร์ ( $\hat{i}$ ) และเวกเตอร์ฟลักซ์แม่เหล็ก ( $\hat{\lambda}$ ) ไปพร้อมๆกัน ในการคำนวณค่าความเร็วโรเตอร์เรานำผลต่างระหว่างค่าจริงของกระแสสเตเตอร์กับค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองมาผ่านอัตราขยาย PI ตามสมการที่ (5.2) อย่างไรก็ตามเราจะใช้เพียงองค์ประกอบค่าผิดพลาดในแกน  $\hat{q}$  ในการประมาณค่าความเร็วดังแสดงในรูปที่ 3.2 ด้วยการโปรเจกต์เวกเตอร์ค่าผิดพลาดของกระแสสเตเตอร์ ( $\vec{e}_i$ ) ลงบนแกนอ้างอิง  $\hat{q}$  ของฟลักซ์ประมาณ ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากแนวคิดพื้นฐานที่ว่า ถ้าความเร็วประมาณที่ใช้ในตัวสังเกต ( $\hat{\omega}$ ) ไม่ตรงกับค่าจริง ( $\omega$ ) ค่าผิดพลาดนี้ก็จะส่งผลทำให้ค่ากระแสที่ประมาณได้ผิดพลาดไปด้วย ดังนั้นถ้าเราสามารถทราบเครื่องหมายค่าผิดพลาด ( $\Delta\omega = \hat{\omega} - \omega$ ) เราก็จะสามารถปรับค่าความเร็วประมาณไปในทิศทางที่ถูกต้องจนเข้าสู่ความเร็วจริงในที่สุด ซึ่งในที่นี้เราเลือกใช้ข้อมูลค่าผิดพลาดของกระแสในแกน  $\hat{q}$  เพราะกระแสในแกน  $\hat{q}$  จะได้รับอิทธิพลจากแรงเคลื่อน

เหนี่ยวนำที่เกิดจากการที่โรเตอร์ ฟลักซ์หมุนตัดขดลวดสเตเตอร์ซึ่งสะท้อนถึงข้อมูลของความเร็วโรเตอร์และแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำนี้มีทิศทางชี้ในแนวแกน  $\hat{q}$



รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าผิดพลาดของกระแสสเตเตอร์และค่าผิดพลาดของความเร็วประมาณ

## 5.2 การบูรณาการตัวสังเกตแบบปรับตัวกับการควบคุมเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วม

ในหัวข้อนี้เราจะแสดงผลการบูรณาการตัวสังเกตแบบปรับตัวกับการควบคุมเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วม ซึ่งเหมือนกับบทที่ 4 หัวข้อ 4.3 เพียงแค่เราแทนที่  $\omega$  ด้วย  $\hat{\omega}$  ใน สมการที่ (4.9), (4.11)-(4.14) เราก็จะได้สมการที่ (5.3)-(5.10) ดังนี้

สมการทางด้านสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงฟลักซ์ประมาณ:

$$L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{i}_d \\ \hat{i}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} - R \begin{bmatrix} \hat{i}_d \\ \hat{i}_q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -L \hat{i}_q \frac{d\hat{\rho}}{dt} \\ L \hat{i}_d \frac{d\hat{\rho}}{dt} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ \hat{\omega} \hat{\Psi} \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

สมการทางด้าน โรเตอร์บนแกนอ้างอิงฟลักซ์ประมาณ:

$$\frac{d\hat{\Psi}}{dt} = H1 e_d - H2 e_q \quad (5.4)$$

$$\frac{d\hat{\rho}}{dt} = \hat{\omega} + [H1 e_d - H2 e_q] / \hat{\Psi} \quad (5.5)$$

แรงดันสเตเตอร์ของตัวควบคุมเวกเตอร์ที่มีการชดเชยแรงดันเชื่อม โยงระหว่างแกน:

$$\begin{bmatrix} u_d^* \\ u_q^* \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_d^* \\ i_q^* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -L\hat{i}_q \frac{d\hat{\rho}}{dt} \\ L\hat{i}_d \frac{d\hat{\rho}}{dt} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \hat{\omega}\hat{\Psi} \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

สมการทางด้านสเตเตอร์หลังการควบคุมแยกการเชื่อมร่วม:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{i}_d \\ \hat{i}_q \end{bmatrix} = -\frac{R}{L} \begin{bmatrix} \hat{i}_d \\ \hat{i}_q \end{bmatrix} + \frac{R}{L} \begin{bmatrix} i_d^* \\ i_q^* \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

หรือ

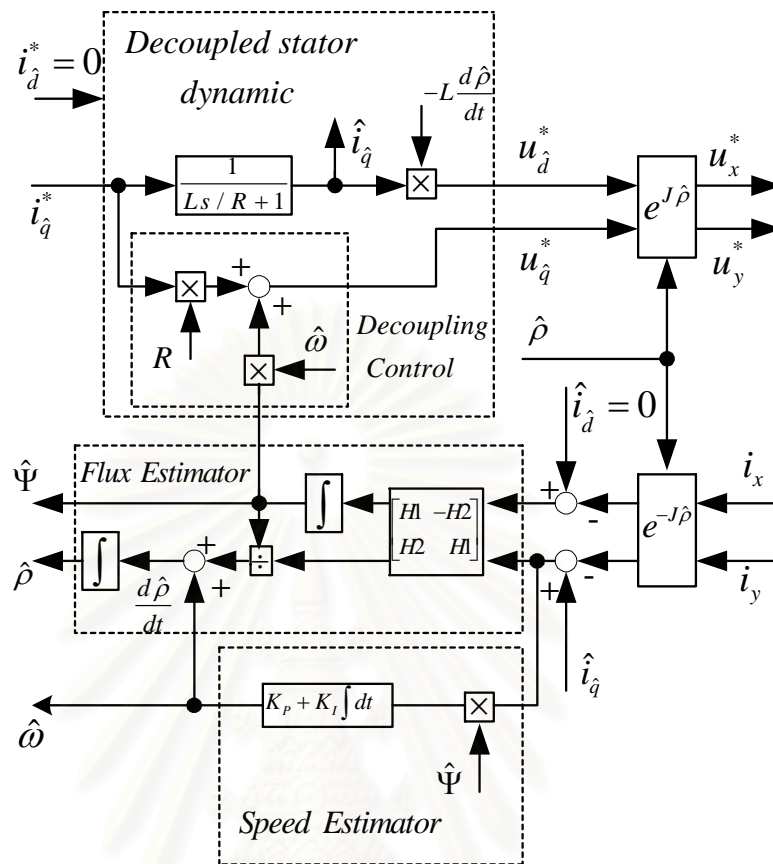
$$\hat{i}_d = 0 \quad (5.8)$$

$$\hat{i}_q = \frac{1}{Ls/R+1} i_q^* \quad (5.9)$$

สมการประมาณค่าความเร็ว:

$$\hat{\omega} = (K_p + K_I \int dt) \{ e_{\hat{q}} \cdot \hat{\Psi} \} ; K_p, K_I > 0 \quad (5.10)$$

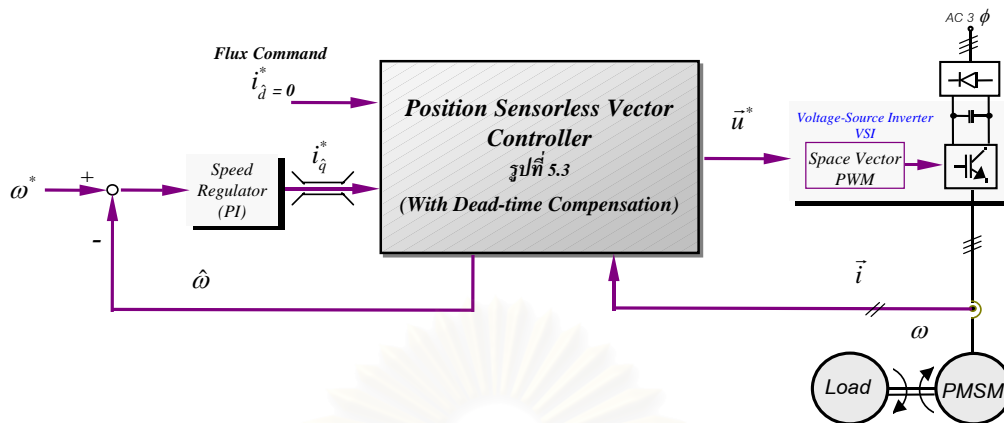
กล่าวโดยสรุปแล้วตอนนี้เรามีสมการแรงดันสเตเตอร์ในตัวควบคุมเวกเตอร์ที่มีการชดเชยแรงดันที่เชื่อม โยงระหว่างแกนเป็นสมการที่ (5.6), สมการทางด้านโรเตอร์ของตัวสังเกตเต็มอันดับแบบปรับตัวเป็นสมการที่ (5.4)-(5.5) , สมการทางด้านสเตเตอร์ของตัวสังเกตเต็มอันดับแบบปรับตัวหลังการควบคุมแยกการเชื่อมร่วมเป็นสมการที่ (5.8)-(5.9) และสมการประมาณค่าความเร็วเป็นสมการที่ (5.10) แผนภาพโดยรวมของระบบเมื่อทำการบูรณาการ การควบคุมแยกการเชื่อมร่วมกับตัวสังเกตเต็มอันดับแบบปรับตัว แสดงได้ดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 บล็อกไดอะแกรมโดยรวมหลังบูรณาการตัวสังเกตแบบปรับตัวเข้ากับระบบควบคุมเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วม

### 5.3 ผลจำลองการทำงานและผลการทดสอบสมรรถนะของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์ วัดตำแหน่งและความเร็ว

รูปที่ 5.4 แสดงถึงโครงสร้างของระบบควบคุมความเร็วที่ใช้ระบบควบคุมเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วมที่มีการประมาณค่าตำแหน่งและความเร็วด้วยตัวสังเกตแบบปรับตัวที่ใช้ในการทดลองและจำลองการทำงาน โดยรายละเอียดของฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการทดลองได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก



รูปที่ 5.4 ระบบควบคุมความเร็วที่ใช้ระบบควบคุมเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วมที่มีการประมาณค่าตำแหน่งและความเร็วด้วยตัวสังเกตเต็มอันดับแบบปรับตัว

#### ผลตอบสนองในสภาวะอยู่ตัว

รูปที่ 5.17-5.25 เป็นผลการจำลองในสภาวะอยู่ตัว (มอเตอร์ขับโหลดอยู่ 2.1 Nm) จะเห็นว่าระบบสามารถทำงานได้ดีและมีเสถียรภาพ โดยมีค่าความผิดพลาดของความเร็วสูงสุด (ที่ 200 rpm)  $\approx 5$  rpm , ค่าผิดพลาดของตำแหน่งสูงสุดที่ (200 rpm)  $\approx 1.4^\circ$  สำหรับค่าความผิดพลาดของฟลักซ์แม่เหล็กนั้นมีค่าเป็น 1.81%, 5.5% และ 25.5% ที่ความเร็ว 1000, 500 และ 200 rpm ตามลำดับ โดยที่  $e_\omega = \hat{\omega} - \omega$

#### ผลตอบสนองต่อการกลับทิศความเร็ว

รูปที่ 5.8-5.9 และรูปที่ 5.26-5.29 เป็นผลการจำลองการทำงานและผลการทดลองในขณะกลับทิศความเร็วจาก 1000  $\leftrightarrow$  -1000 rpm ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าระบบสามารถควบคุมแรงบิดของมอเตอร์ได้เป็นอย่างดี โดยดูจาก Envelope ของกระแสเดเตอร์ที่เป็นไปตามกระแสสร้างแรงบิดคำสั่ง ทั้งผลการทดลองและผลการจำลองการทำงาน

#### ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความเร็วคำสั่งในช่วงแคบ

รูปที่ 5.10-5.13 และรูปที่ 5.30-5.33 เป็นผลการจำลองการทำงานและผลการทดลอง ในกรณีเปลี่ยนแปลงความเร็วคำสั่งจาก 1000  $\leftrightarrow$  1100 rpm ตามลำดับ จะเห็นว่าระบบควบคุมสามารถควบคุมความเร็วได้ตามคำสั่งอย่างรวดเร็ว ซึ่งก็จะสอดคล้องกันระหว่างผลการทดลองและ

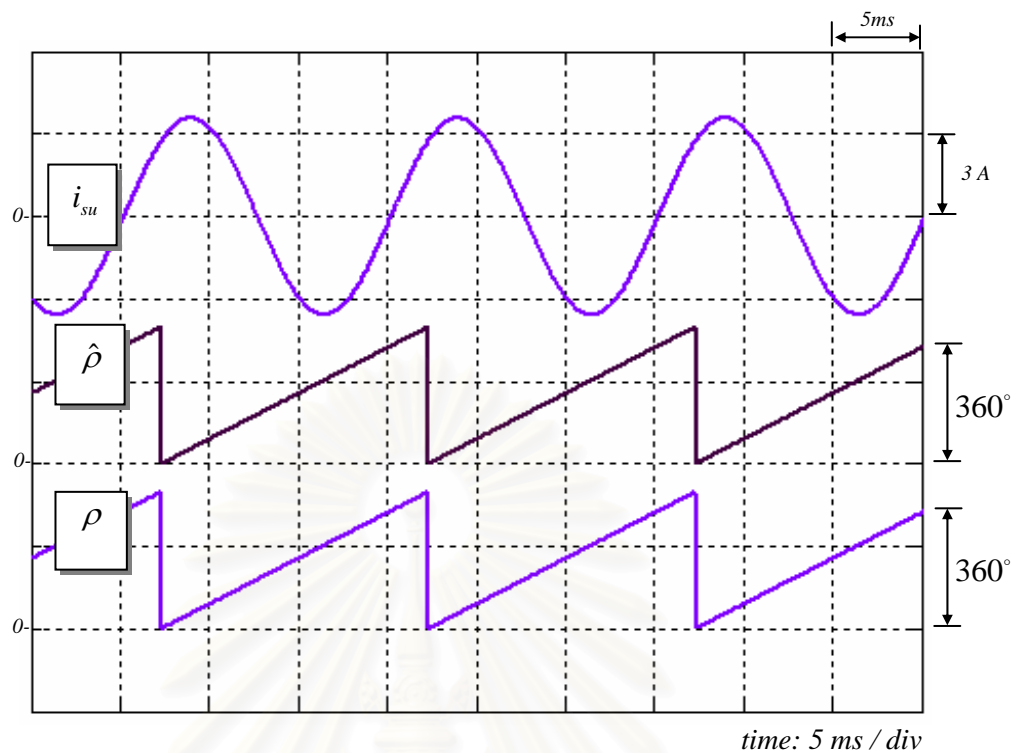
ผลการจำลองการทำงาน สำหรับค่าความผิดพลาดสูงสุดของตำแหน่ง(จากการทดลอง)นั้นมี  
ประมาณ  $7^\circ$  และประมาณ  $2.5^\circ$  จากการจำลองการทำงาน

#### ผลตอบสนองต่อโหลดแบบขั้น

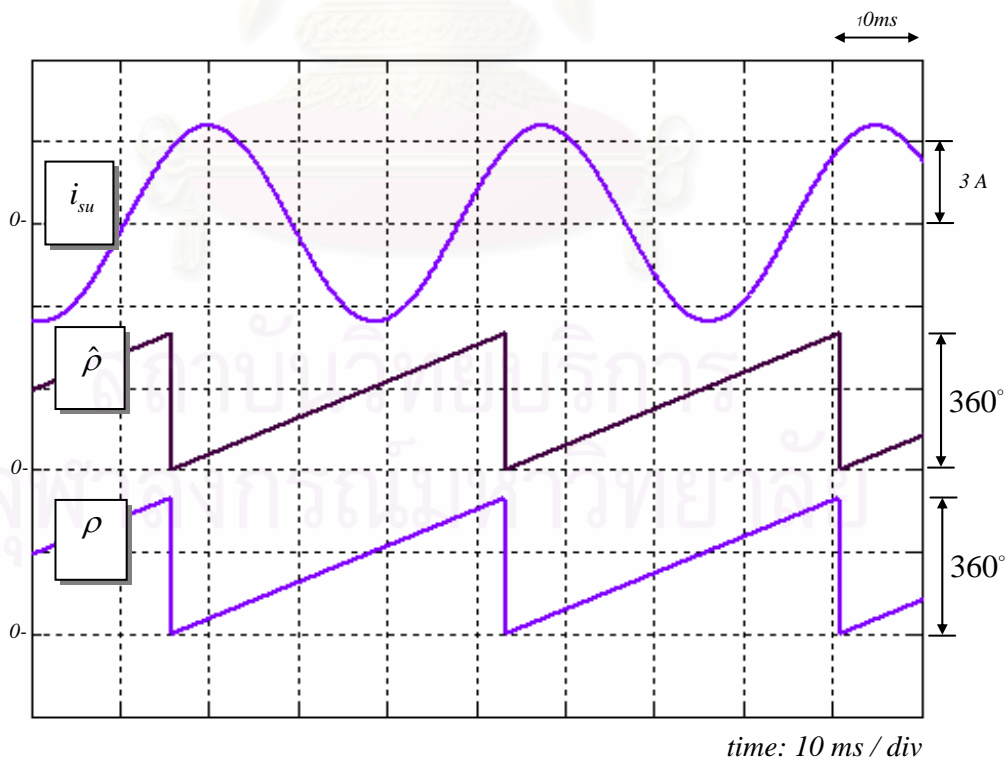
รูปที่ 5.14-5.16 และรูปที่ 5.34-5.39 เป็นผลการจำลองการทำงานและผลการทดลอง ใน  
กรณีเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้น ( $2.1 \text{ Nm}$ ) ที่ความเร็ว 1000, 500 และ 200 rpm ตามลำดับ จะเห็นว่า  
ระบบควบคุมสามารถควบคุมแรงบิดได้อย่างรวดเร็ว โดยสังเกตจากกระแสสร้างแรงบิดของ  
มอเตอร์ก็จะเป็นตามค่าคำสั่ง ความเร็วประมาณก็ติดตามความเร็วจริงได้เป็นอย่างดี และมีเวลาใน  
การตอบสนองของความเร็วที่ช้าที่สุดประมาณ 1s จากผลการทดลองที่ 200 rpm และประมาณ 700  
ms สำหรับผลการจำลองการทำงาน ในส่วนของค่าผิดพลาดของตำแหน่งนั้นมีค่าสูงสุดที่ความเร็ว  
ต่ำ (200 rpm) ประมาณ  $25^\circ$



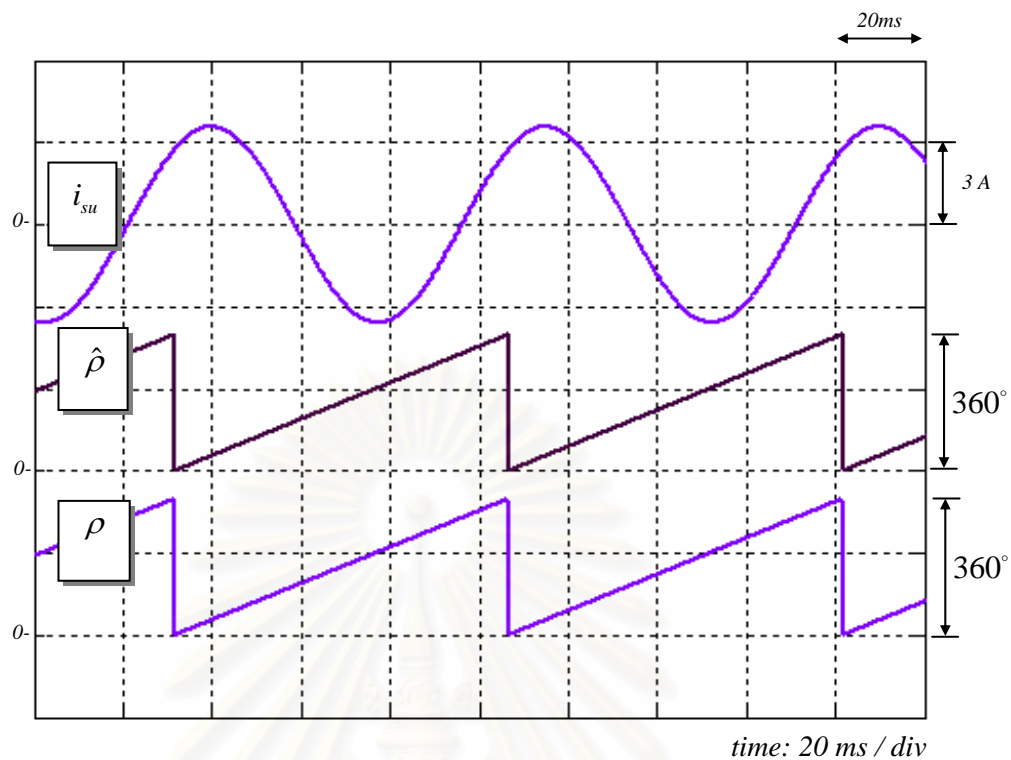
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.5 ผลการจำลองการทำงานในสถานะอยู่ตัวเมื่อความเร็วคำสั่งมีค่าเท่ากับ 1000 rpm เมื่อใช้ระบบควบคุมเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง(รูปคลื่นกระแสและตำแหน่ง)

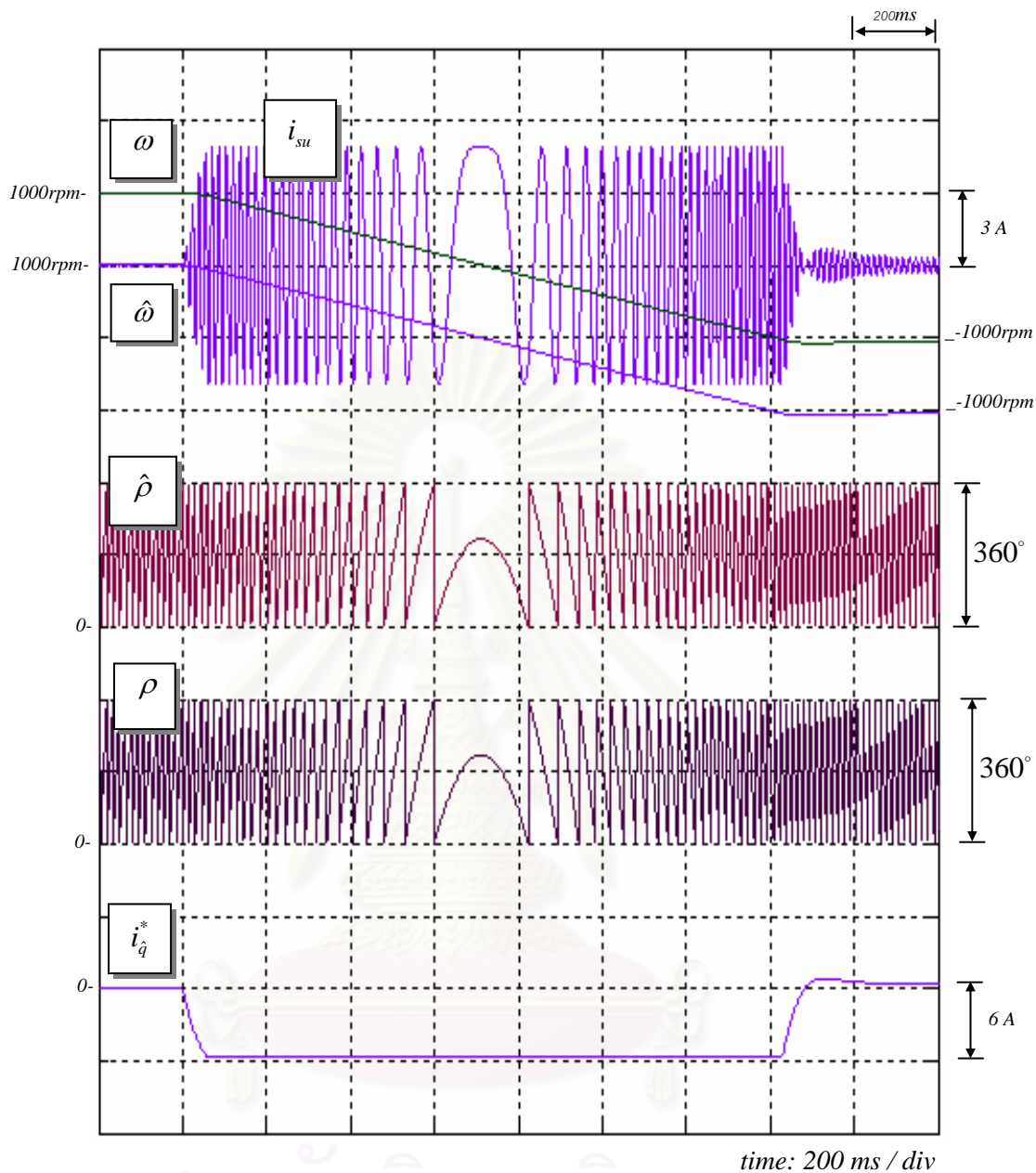


รูปที่ 5.6 ผลการจำลองการทำงานในสถานะอยู่ตัวเมื่อความเร็วคำสั่งมีค่าเท่ากับ 500 rpm เมื่อใช้ระบบควบคุมเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง(รูปคลื่นกระแสและตำแหน่ง)

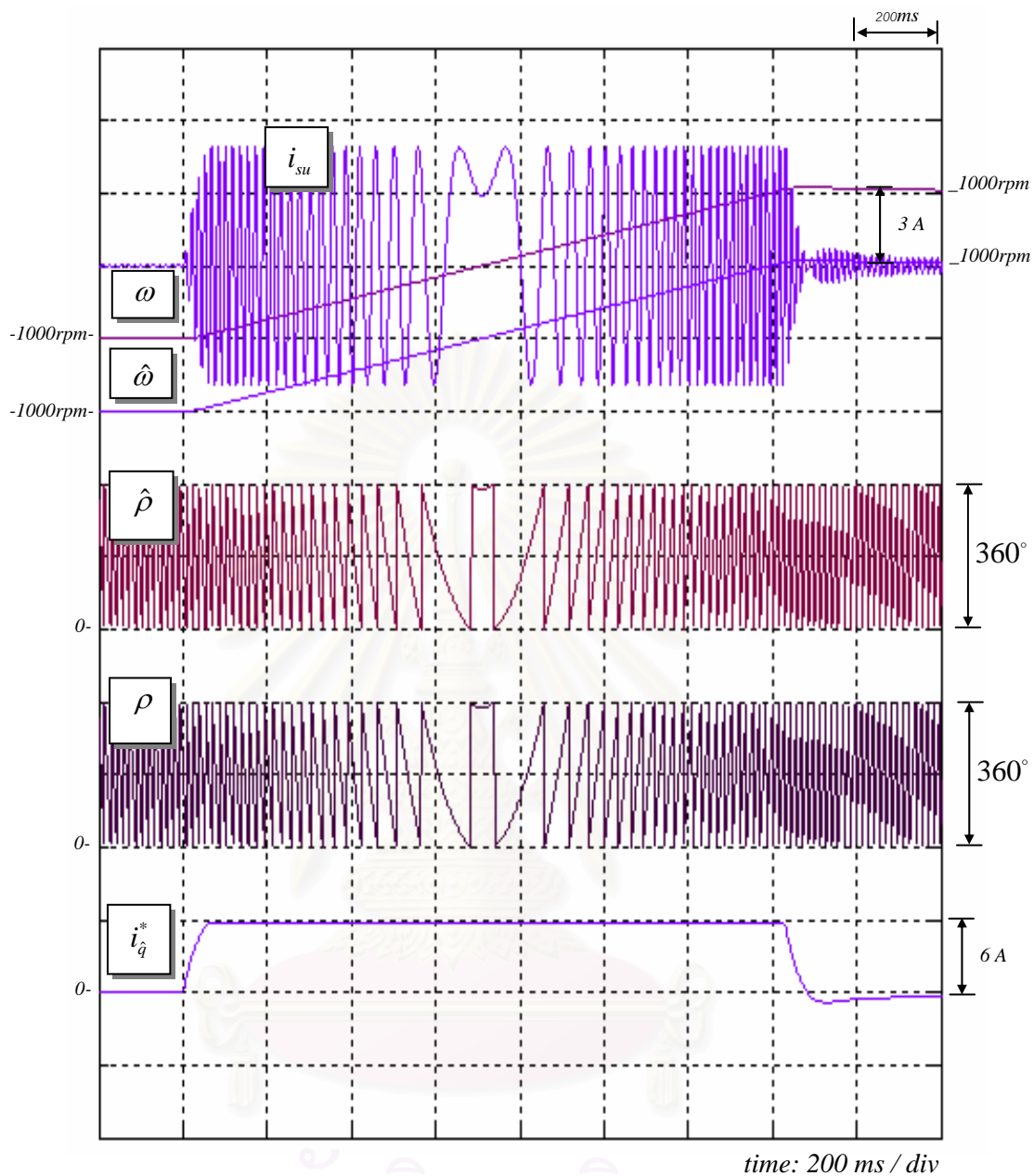


รูปที่ 5.7 ผลการจำลองการทำงานในสภาวะอยู่ตัวเมื่อความเร็วคำสั่งมีค่าเท่ากับ 200 rpm เมื่อใช้ระบบควบคุมเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง(รูปคลื่นกระแสและตำแหน่ง)

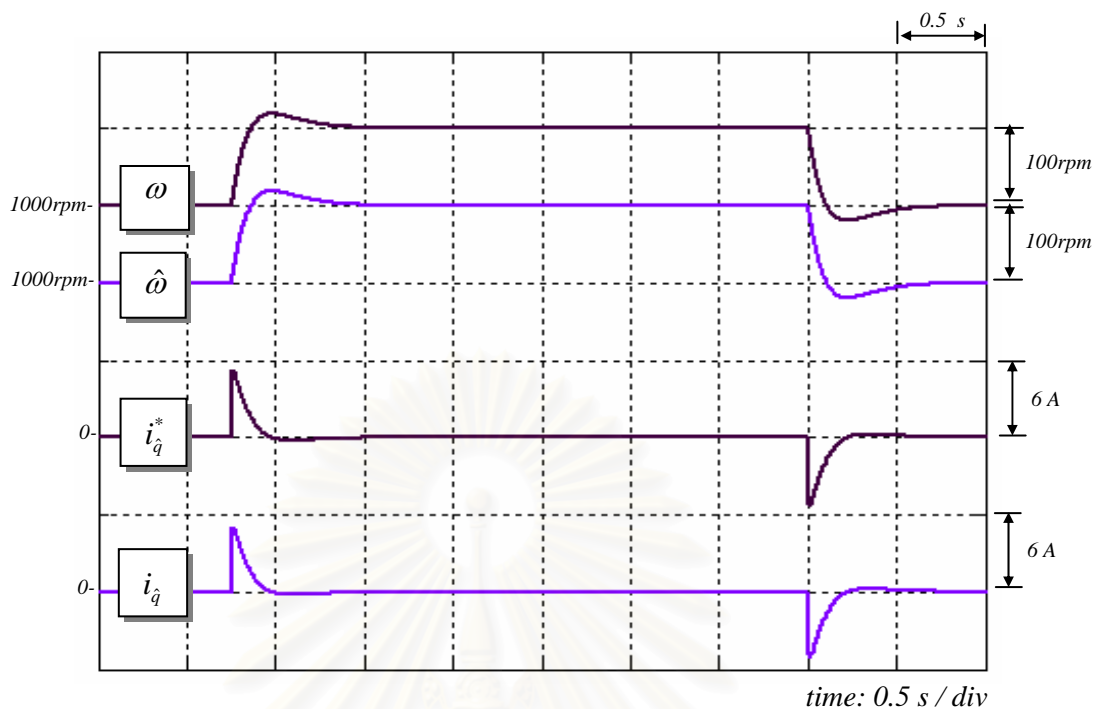




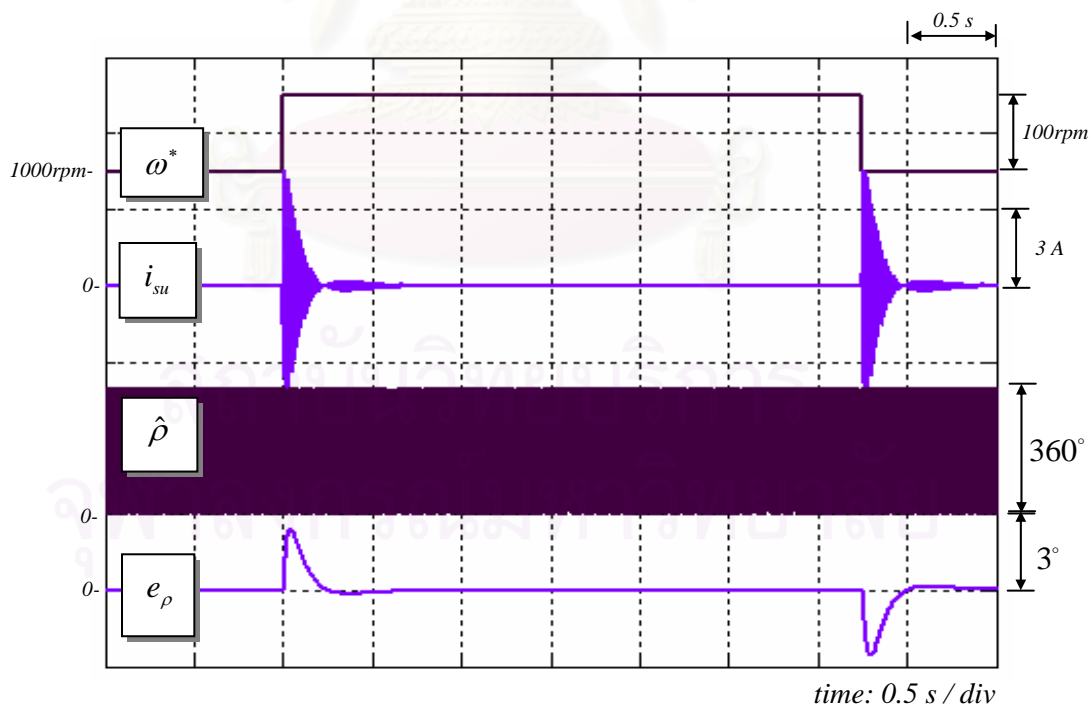
รูปที่ 5.8 ผลการจำลองการทำงานขณะกลับทิศความเร็วจาก 1000 ไป -1000 rpm เมื่อใช้ระบบควบคุมเวกเตอร์ไร้เซ็นเซอร์วัดตำแหน่ง



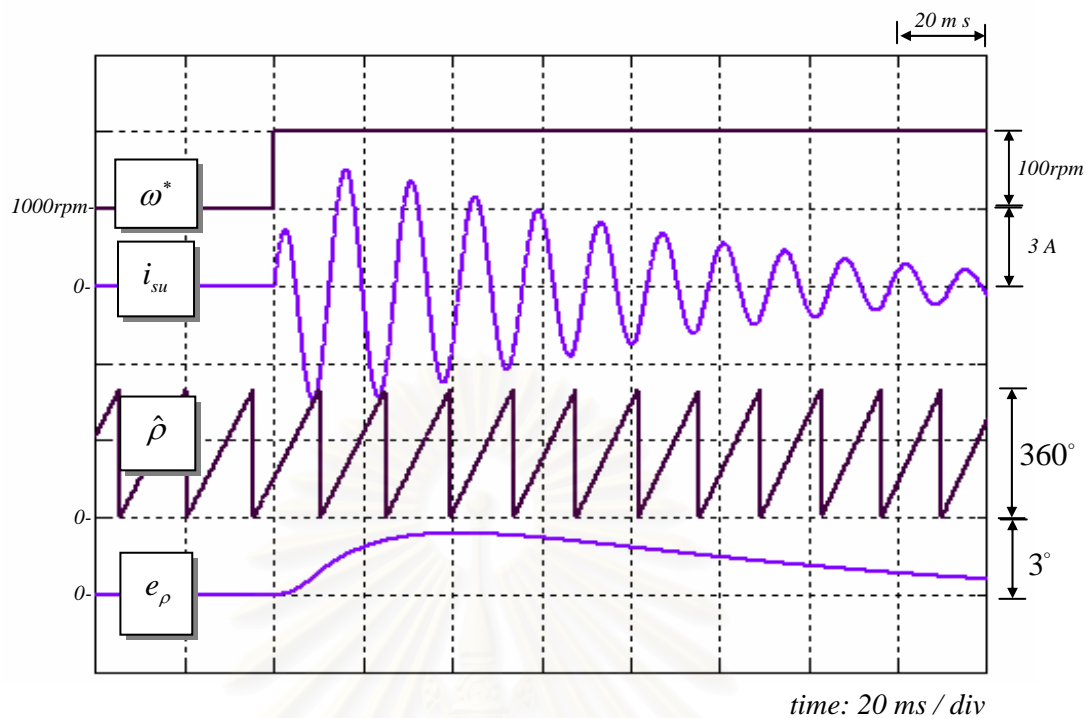
รูปที่ 5.9 ผลการจำลองการทำงานขณะกลับทิศความเร็วจาก -1000 ไป 1000 rpm เมื่อใช้ระบบควบคุมเวกเตอร์ไ้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง



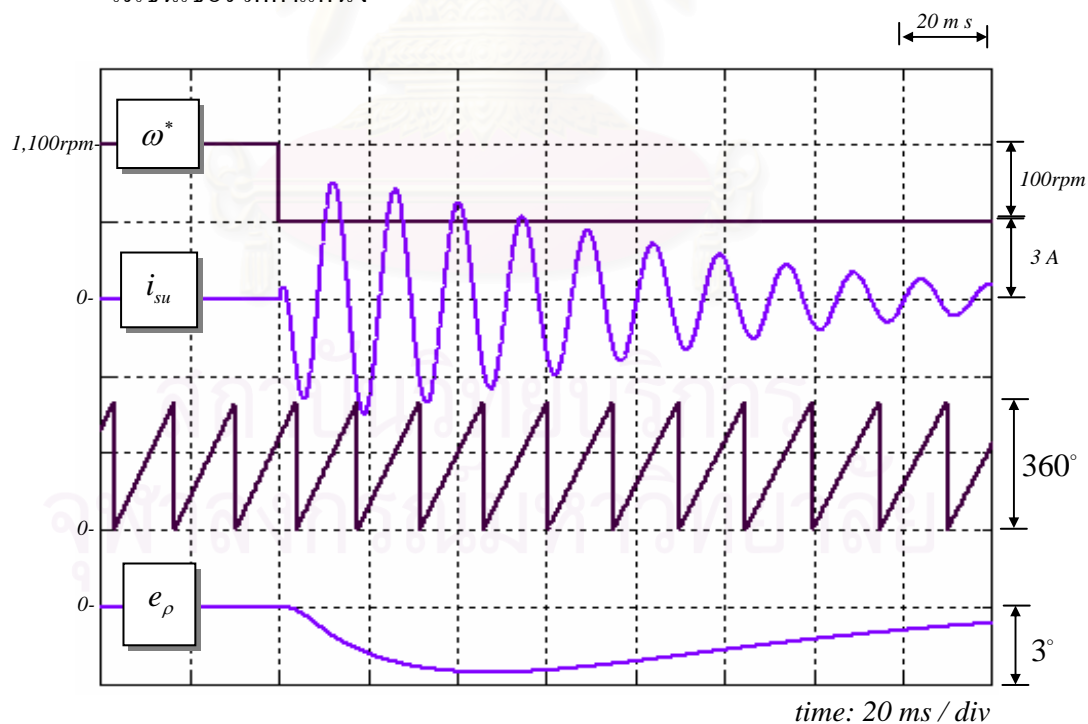
รูปที่ 5.10 ผลการจำลองการทำงานเมื่อใช้ระบบควบคุมเวกเตอร์ไร้เซ็นเซอร์วัดตำแหน่งในกรณีเปลี่ยนแปลงความเร็วคำสั่งในช่วงแคบ (รูปคลื่นความเร็วและกระแสสร้างแรงบิด)



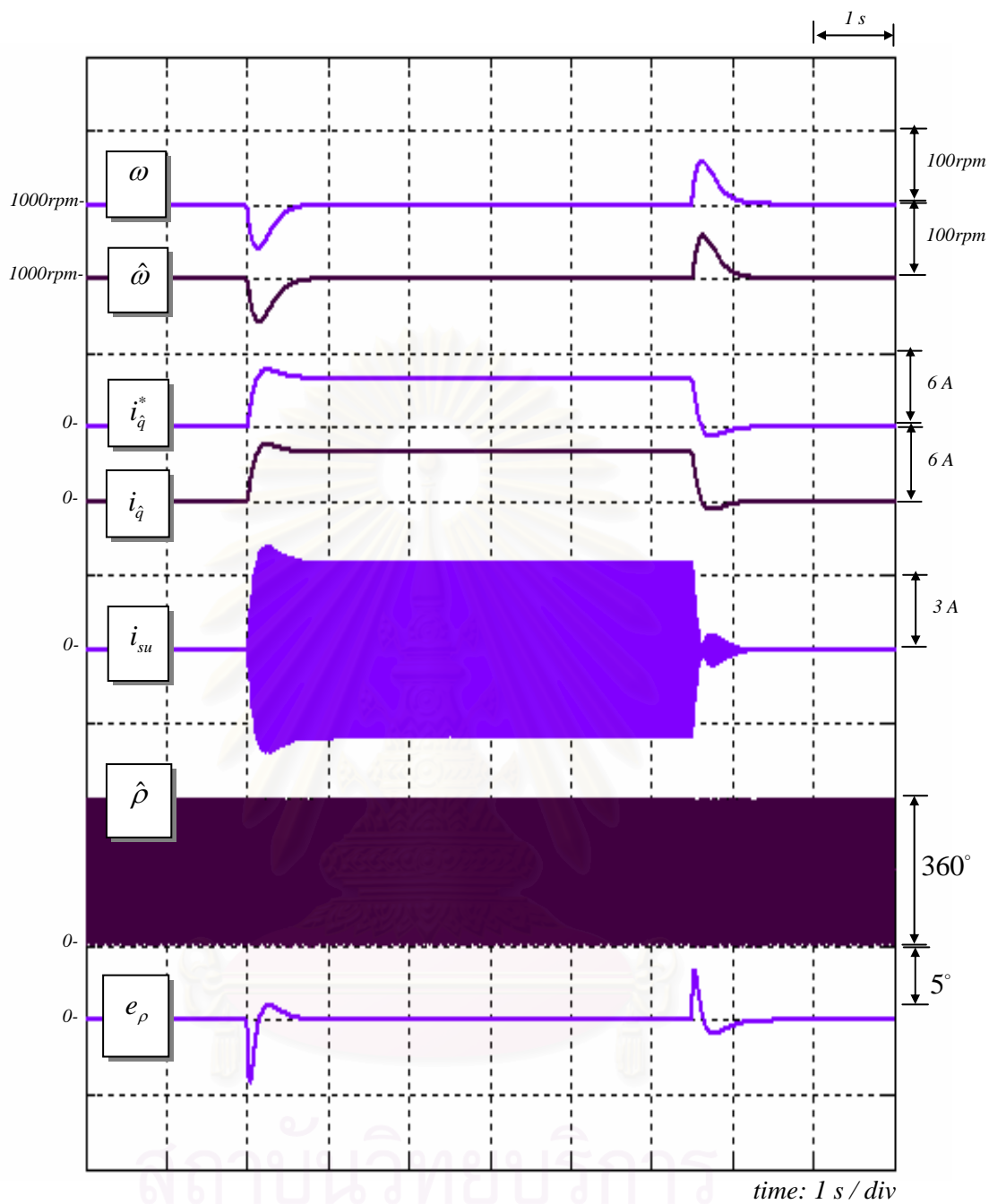
รูปที่ 5.11 ผลการจำลองการทำงานเมื่อใช้ระบบควบคุมเวกเตอร์ไร้เซ็นเซอร์วัดตำแหน่งในกรณีเปลี่ยนแปลงความเร็วคำสั่งในช่วงแคบ (รูปคลื่นตำแหน่งและกระแสเฟส u)



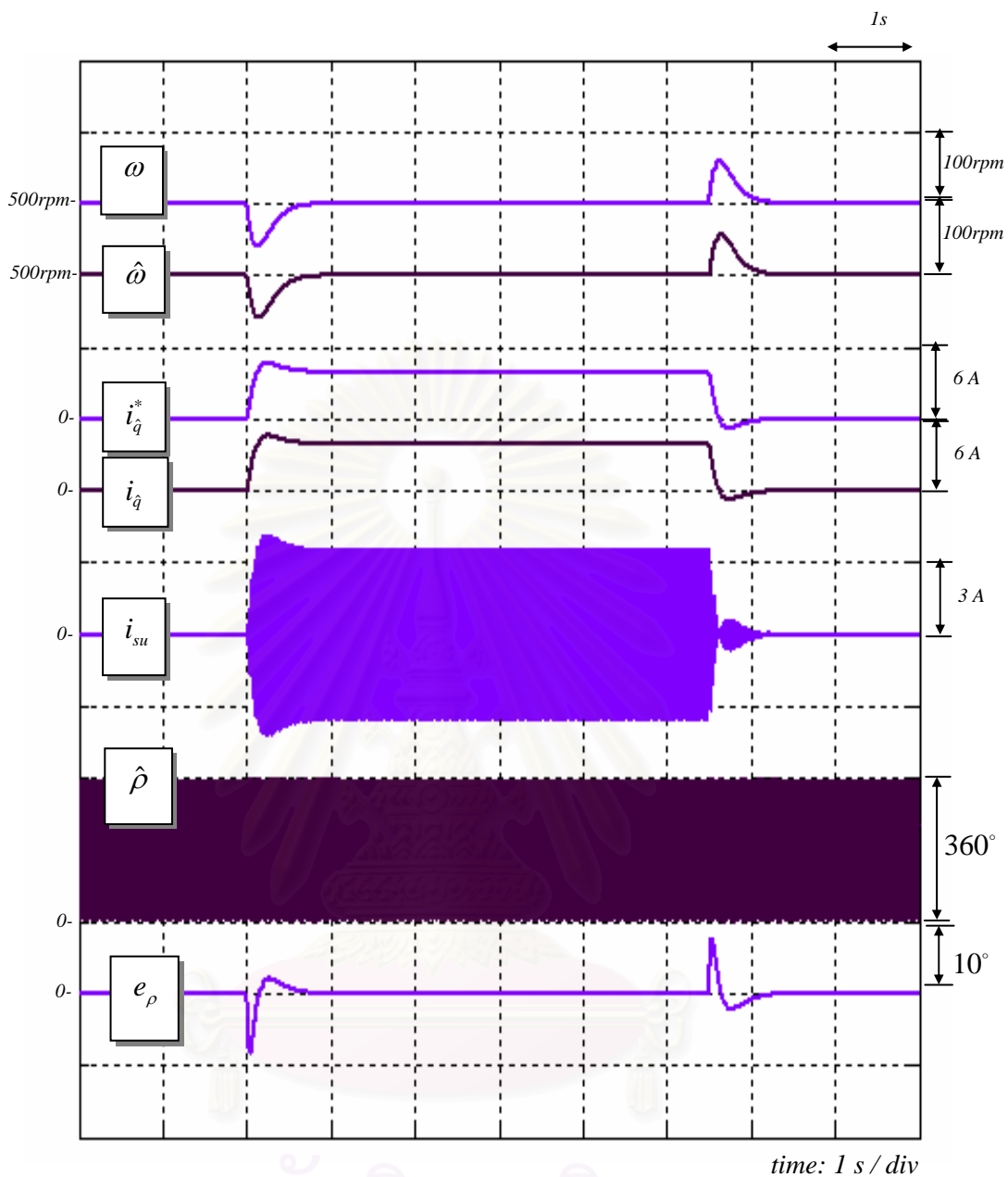
รูปที่ 5.12 ภาพขยายของข้อมูลตำแหน่งและกระแสเฟส  $u$  ของรูปที่ 5.11 ในขณะเปลี่ยนแปลงความเร็วคำสั่งในช่วงแคบจาก 1000 ไป 1100 rpm เมื่อใช้ระบบควบคุมเวกเตอร์ไว้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง



รูปที่ 5.13 ภาพขยายของข้อมูลตำแหน่งและกระแสเฟส  $u$  ของรูปที่ 5.11 ในขณะเปลี่ยนแปลงความเร็วคำสั่งในช่วงแคบจาก 1100 ไป 1000 rpm เมื่อใช้ระบบควบคุมเวกเตอร์ไว้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง

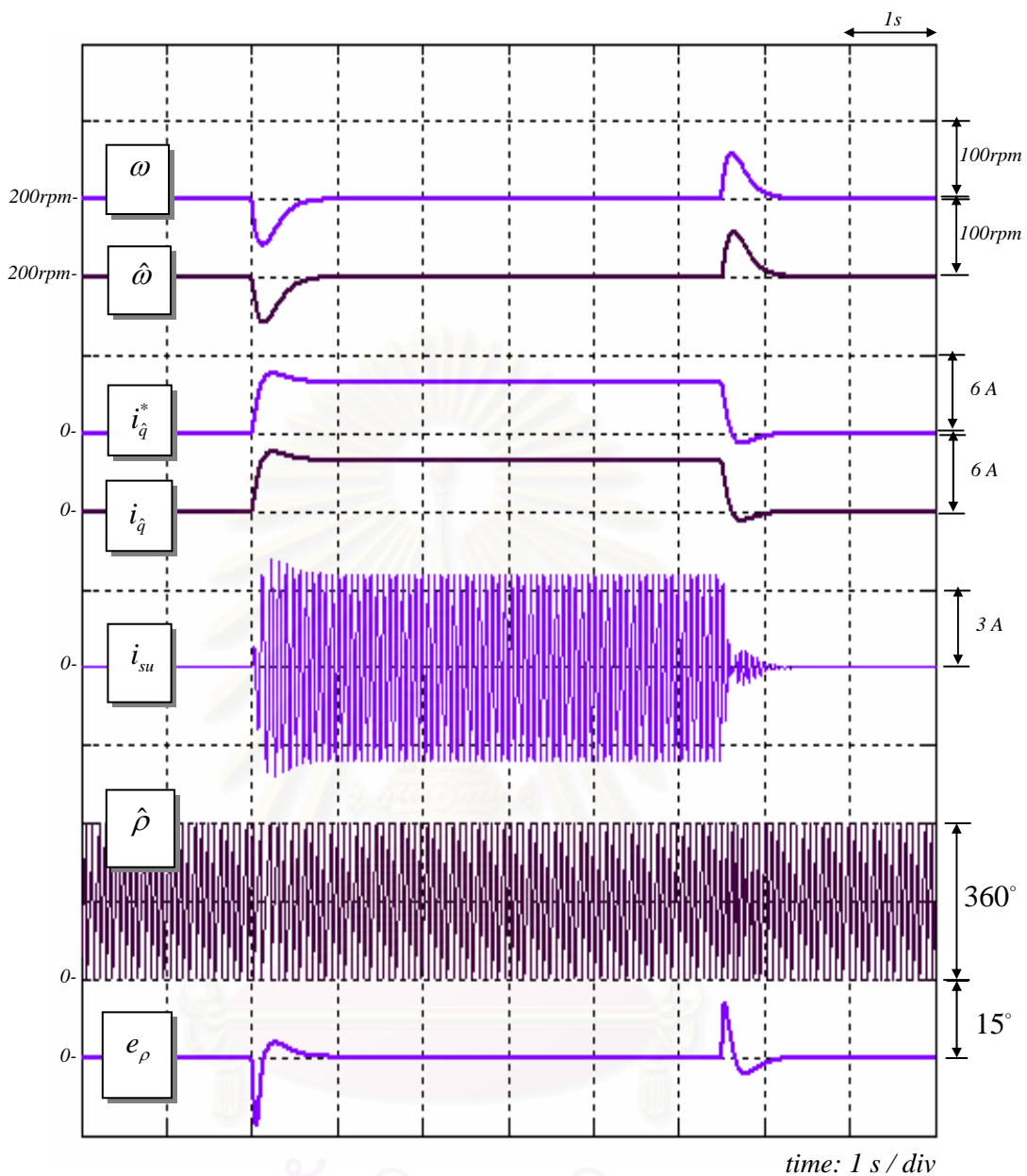


รูปที่ 5.14 ผลการจำลองการทำงานในกรณีเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้นที่ความเร็ว 1000 rpm เมื่อใช้ระบบควบคุมเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง



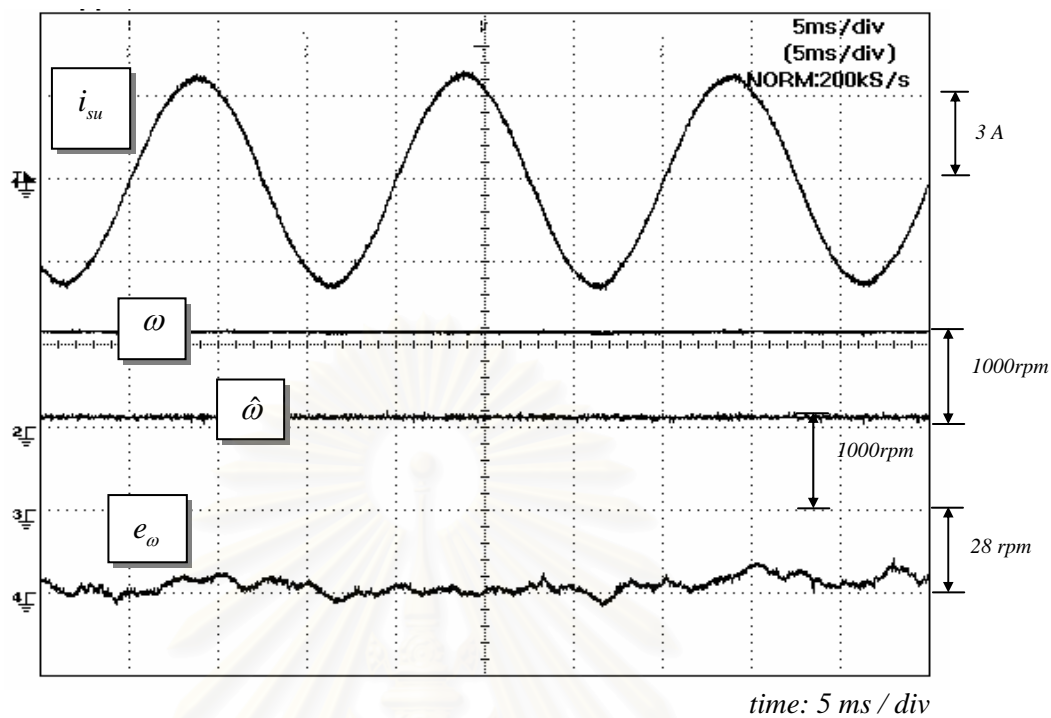
รูปที่ 5.15 ผลการจำลองการทำงานในกรณีเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้นที่ความเร็ว 500 rpm

เมื่อใช้ระบบควบคุมเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง

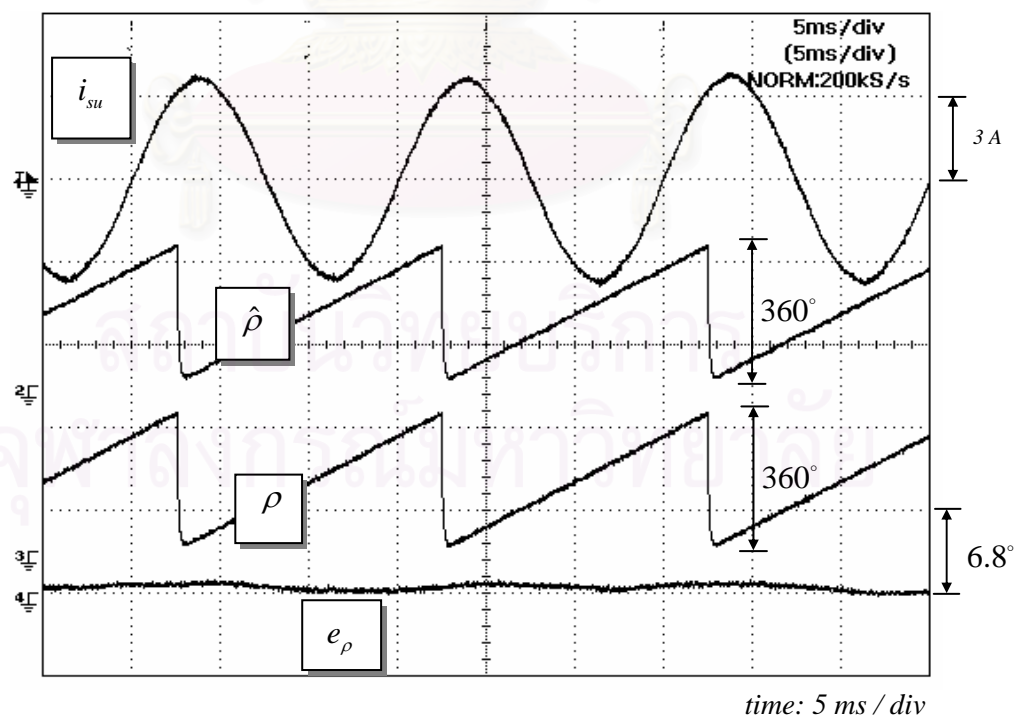


รูปที่ 5.16 ผลการจำลองการทำงานในกรณีเปลี่ยนแปลงโพลแบบขั้นที่ความเร็ว 200 rpm

เมื่อใช้ระบบควบคุมเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง

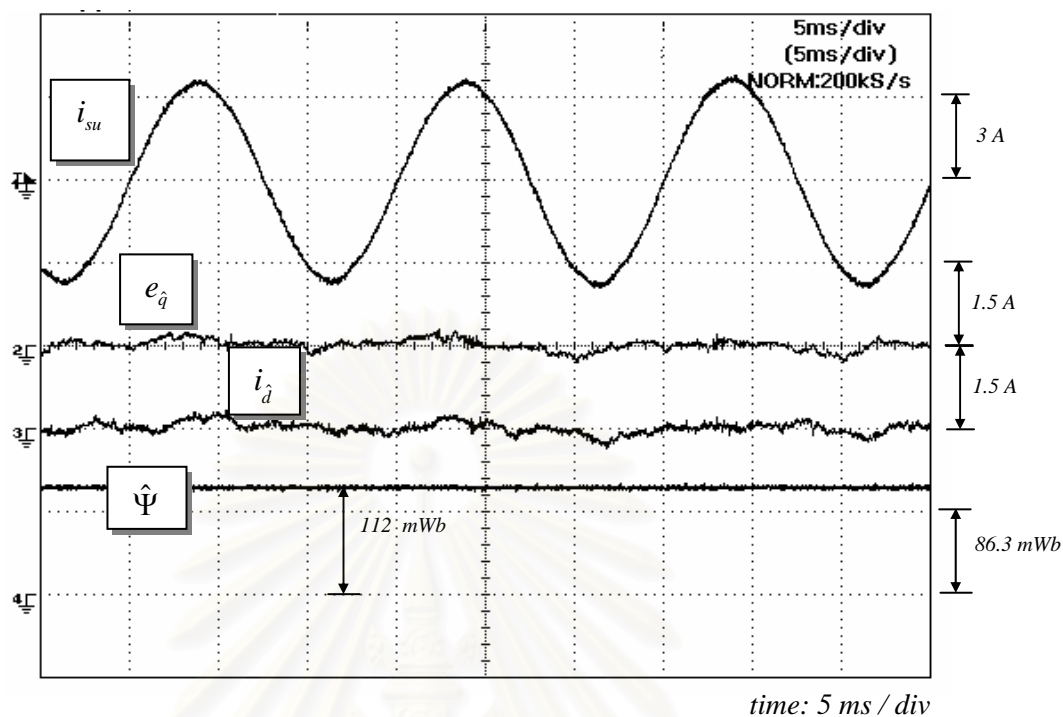


รูปที่ 5.17 ผลการทดลองในสภาวะอยู่ตัวเมื่อความเร็วคำสั่งมีค่าเท่ากับ 1000 rpm เมื่อใช้ระบบควบคุมเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง (รูปคลื่นกระแสและความเร็ว)

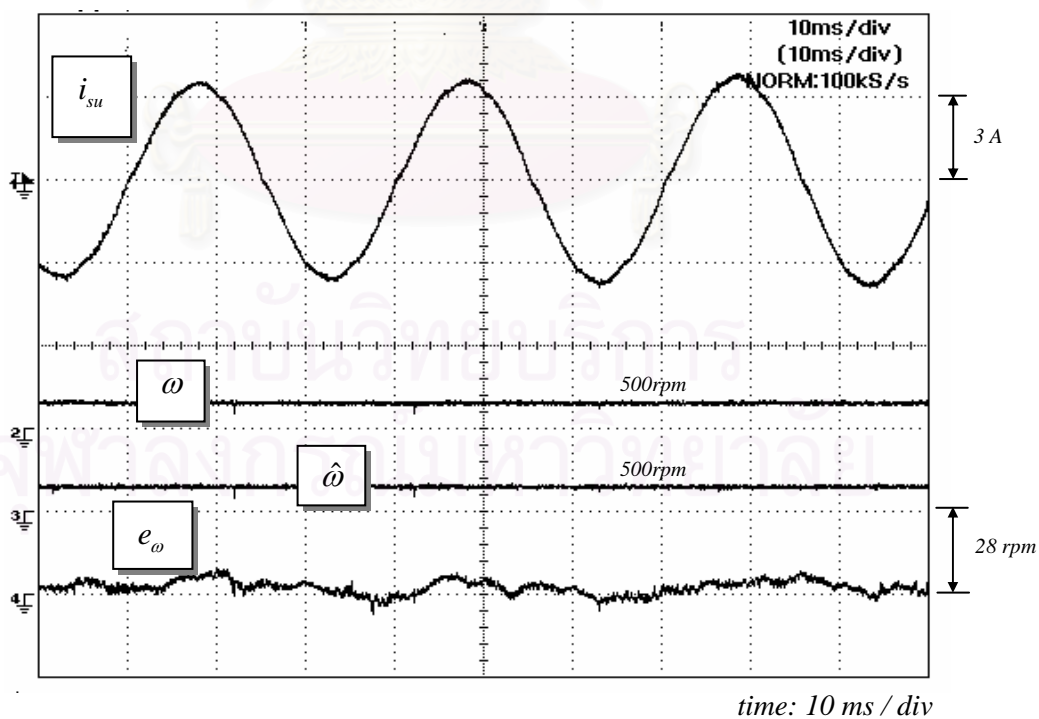


รูปที่ 5.18 ผลการทดลองในสภาวะอยู่ตัวเมื่อความเร็วคำสั่งมีค่าเท่ากับ 1000 rpm เมื่อใช้ระบบควบคุมเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง (รูปคลื่นกระแสและตำแหน่ง)

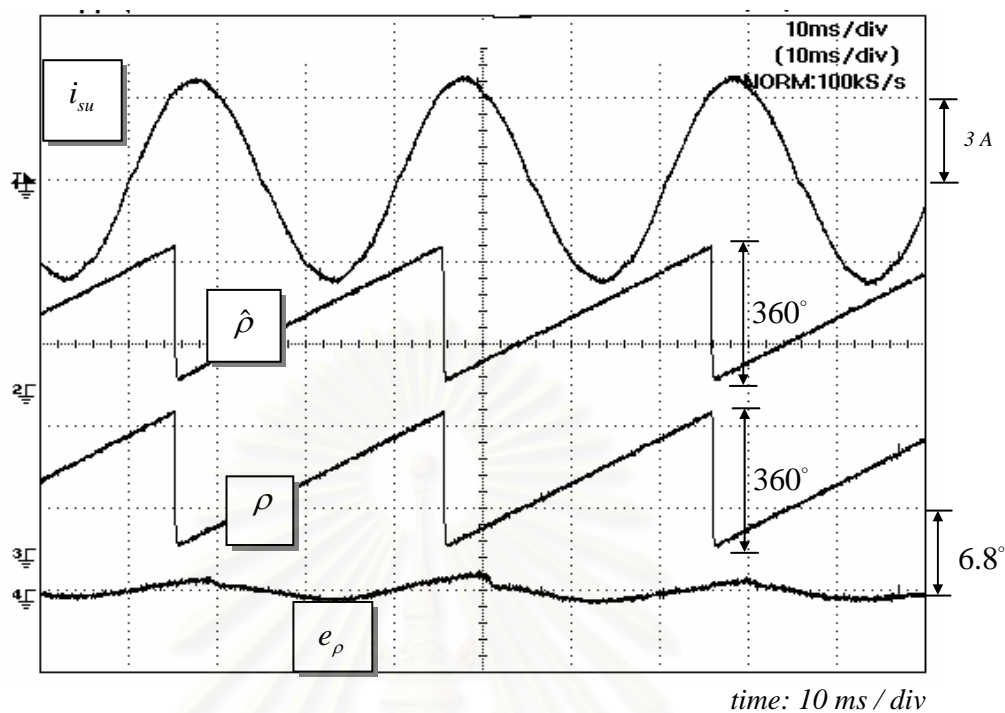




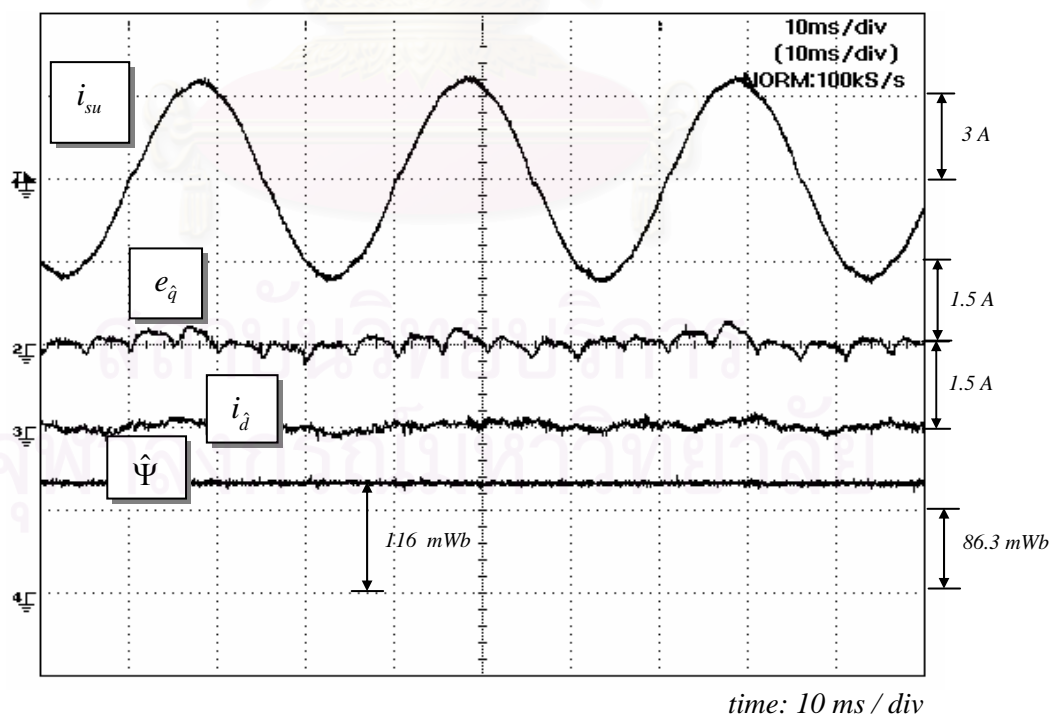
รูปที่ 5.19 ผลการทดลองในสภาวะอยู่ตัวเมื่อความเร็วคำสั่งมีค่าเท่ากับ 1000 rpm เมื่อใช้ระบบควบคุมเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง (รูปคลื่นกระแสและฟลักซ์แม่เหล็ก)



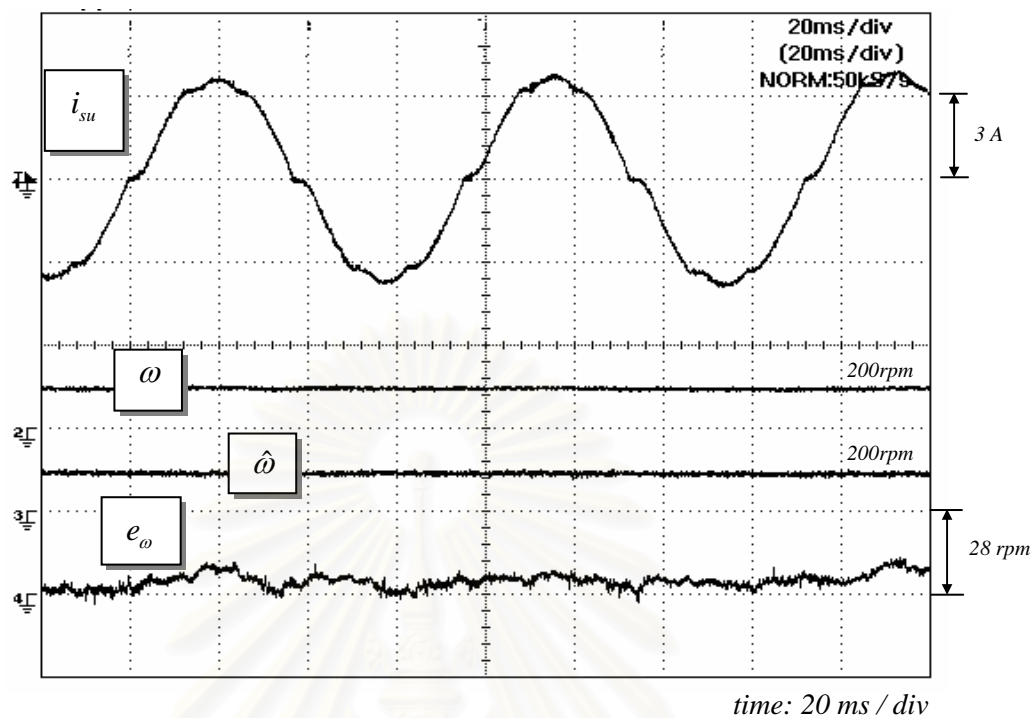
รูปที่ 5.20 ผลการทดลองในสภาวะอยู่ตัวเมื่อความเร็วคำสั่งมีค่าเท่ากับ 500 rpm เมื่อใช้ระบบควบคุมเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง (รูปคลื่นกระแสและความเร็ว)



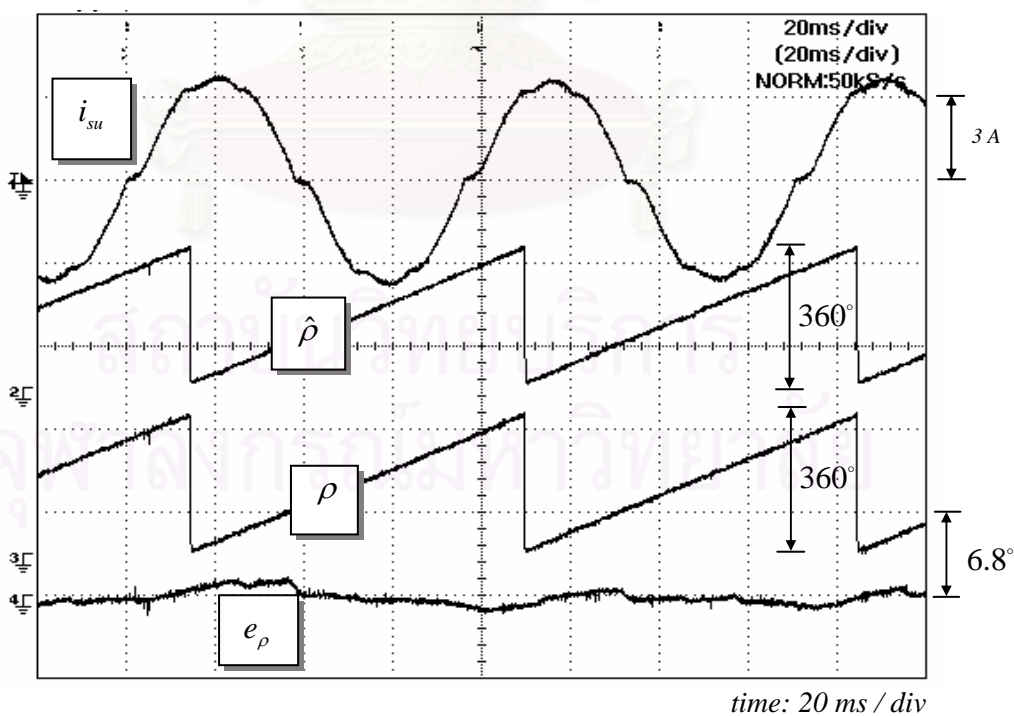
รูปที่ 5.21 ผลการทดลองในสถานะอยู่ตัวเมื่อความเร็วคำสั่งมีค่าเท่ากับ 500 rpm เมื่อใช้ระบบควบคุมเวกเตอร์ไร้เซ็นเซอร์วัดตำแหน่ง (รูปคลื่นกระแสและตำแหน่ง)



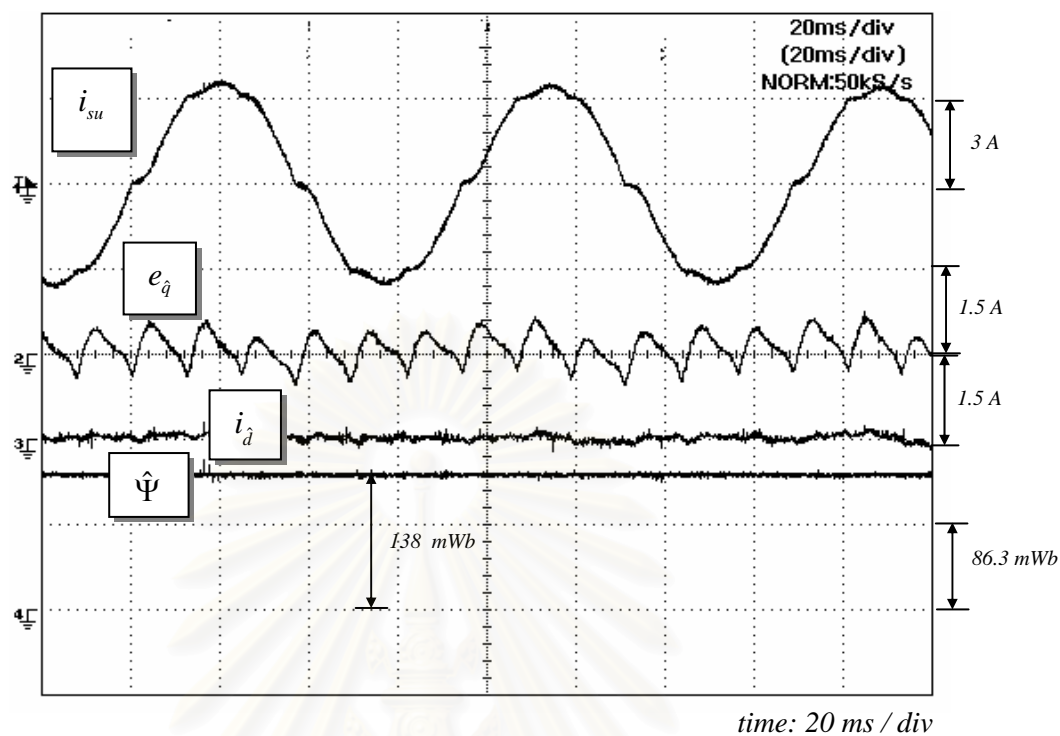
รูปที่ 5.22 ผลการทดลองในสถานะอยู่ตัวเมื่อความเร็วคำสั่งมีค่าเท่ากับ 500 rpm เมื่อใช้ระบบควบคุมเวกเตอร์ไร้เซ็นเซอร์วัดตำแหน่ง (รูปคลื่นกระแสและฟลักซ์แม่เหล็ก)



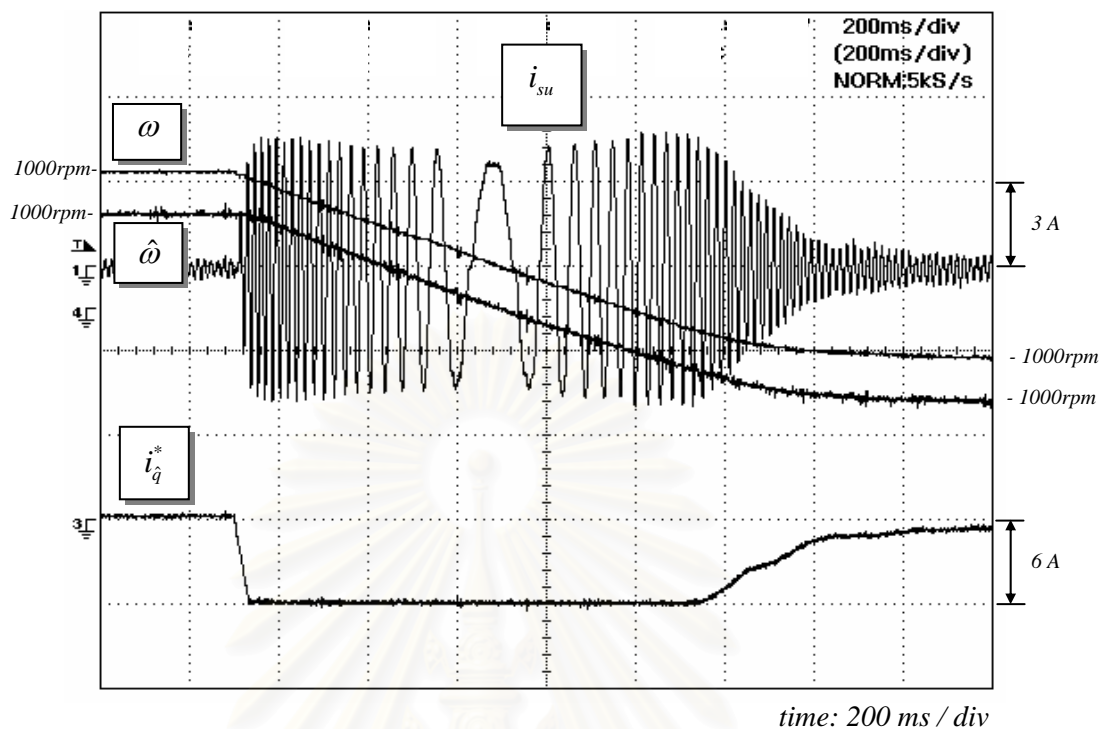
รูปที่ 5.23 ผลการทดลองในสถานะอยู่ตัวเมื่อความเร็วคำสั่งมีค่าเท่ากับ 200 rpm เมื่อใช้ระบบควบคุมเวกเตอร์ไรเซนเซอร์วัดตำแหน่ง (รูปคลื่นกระแสและความเร็ว)



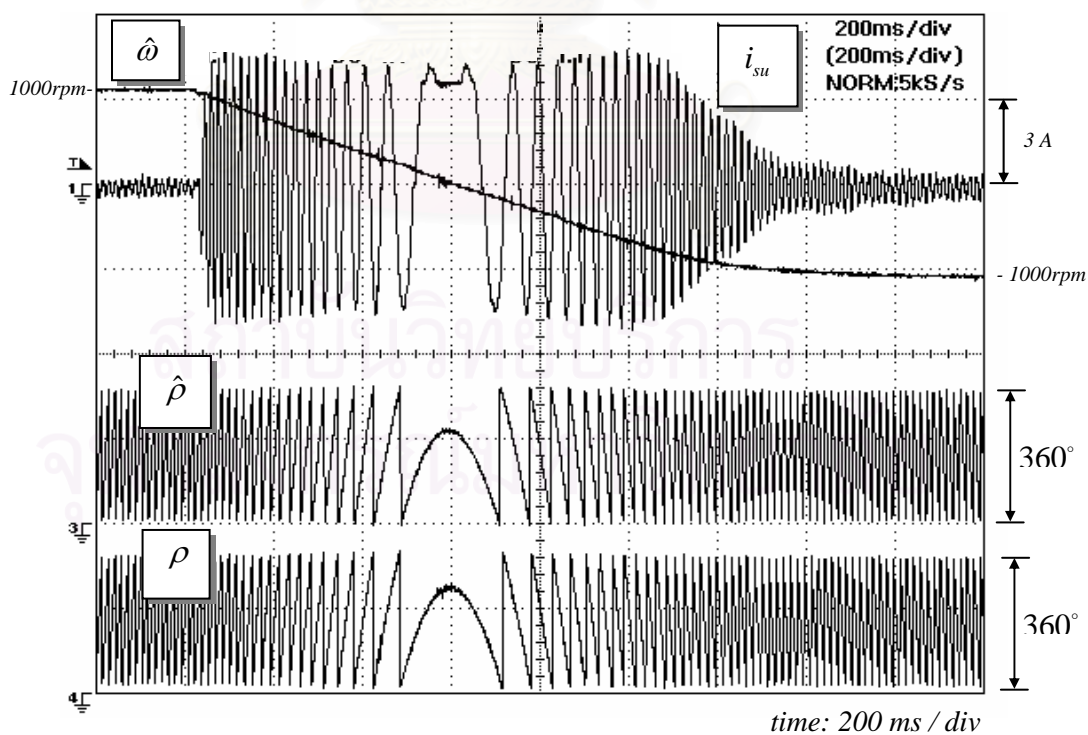
รูปที่ 5.24 ผลการทดลองในสถานะอยู่ตัวเมื่อความเร็วคำสั่งมีค่าเท่ากับ 200 rpm เมื่อใช้ระบบควบคุมเวกเตอร์ไรเซนเซอร์วัดตำแหน่ง (รูปคลื่นกระแสและตำแหน่ง)



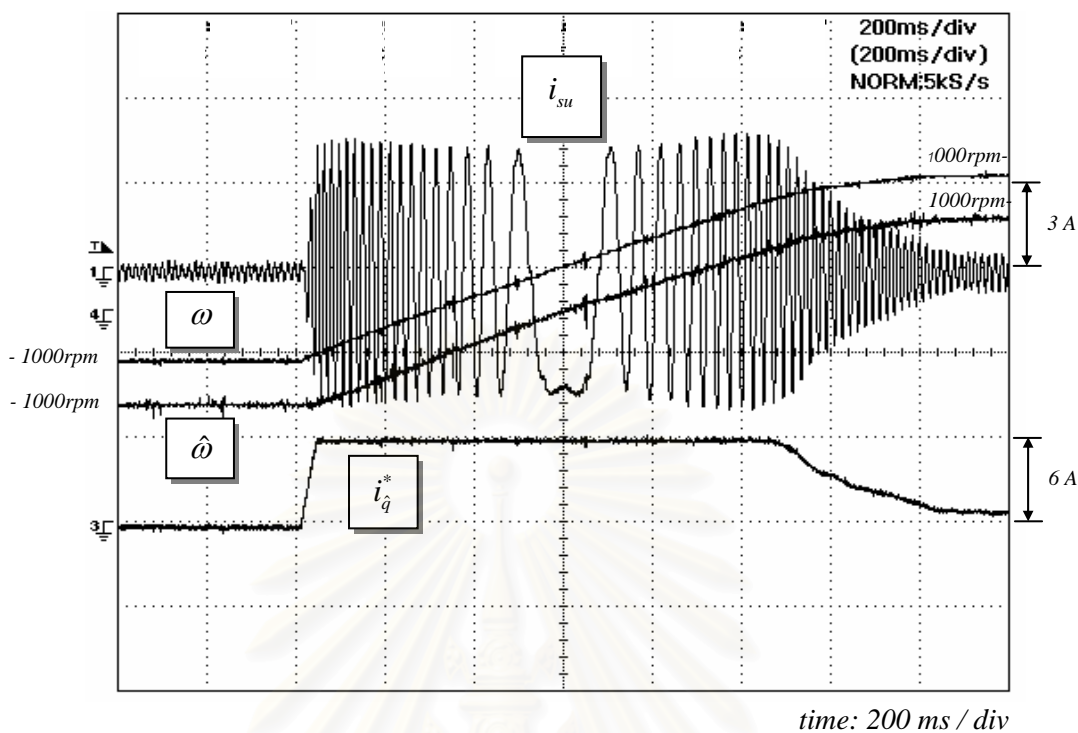
รูปที่ 5.25 ผลการทดลองในสภาวะอยู่ตัวเมื่อความเร็วคำสั่งมีค่าเท่ากับ 200 rpm เมื่อใช้ระบบควบคุมเวกเตอร์ไรเซนเซอร์วัดตำแหน่ง (รูปคลื่นกระแสและฟลักซ์แม่เหล็ก)



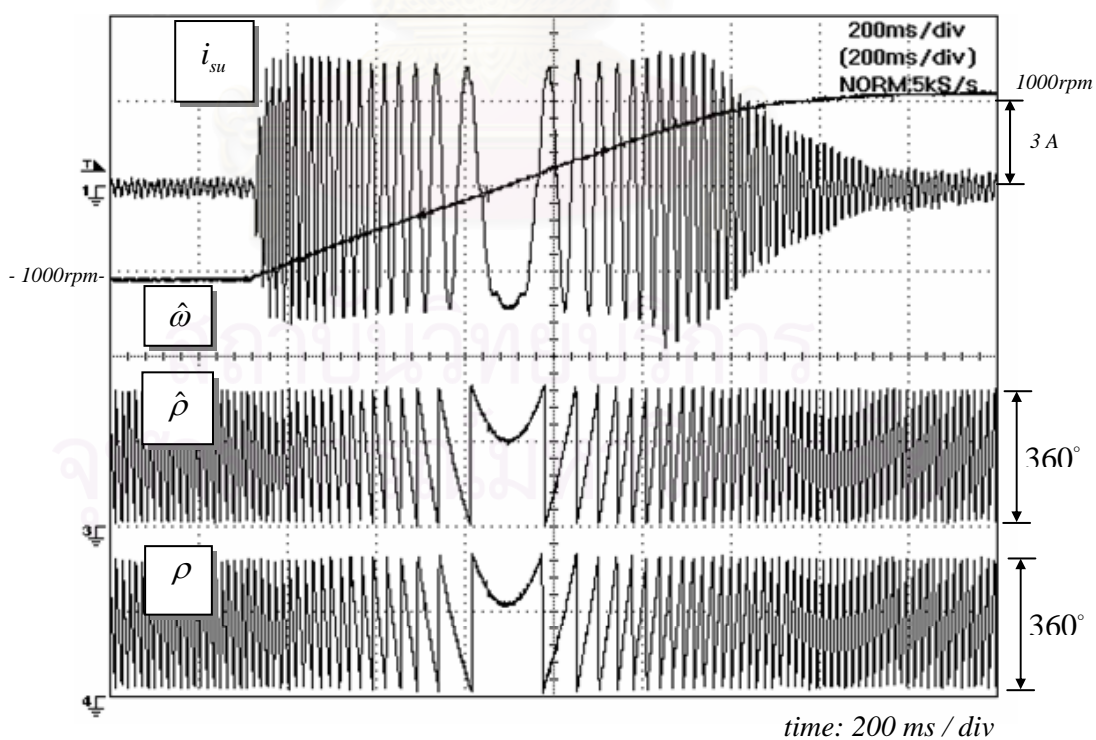
รูปที่ 5.26 ผลการทดลองขณะกลับทิศความเร็วจาก 1000 ไป -1000 rpm เมื่อใช้ระบบควบคุม  
เวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง (รูปคลื่นความเร็วและกระแสสร้างแรงบิด)



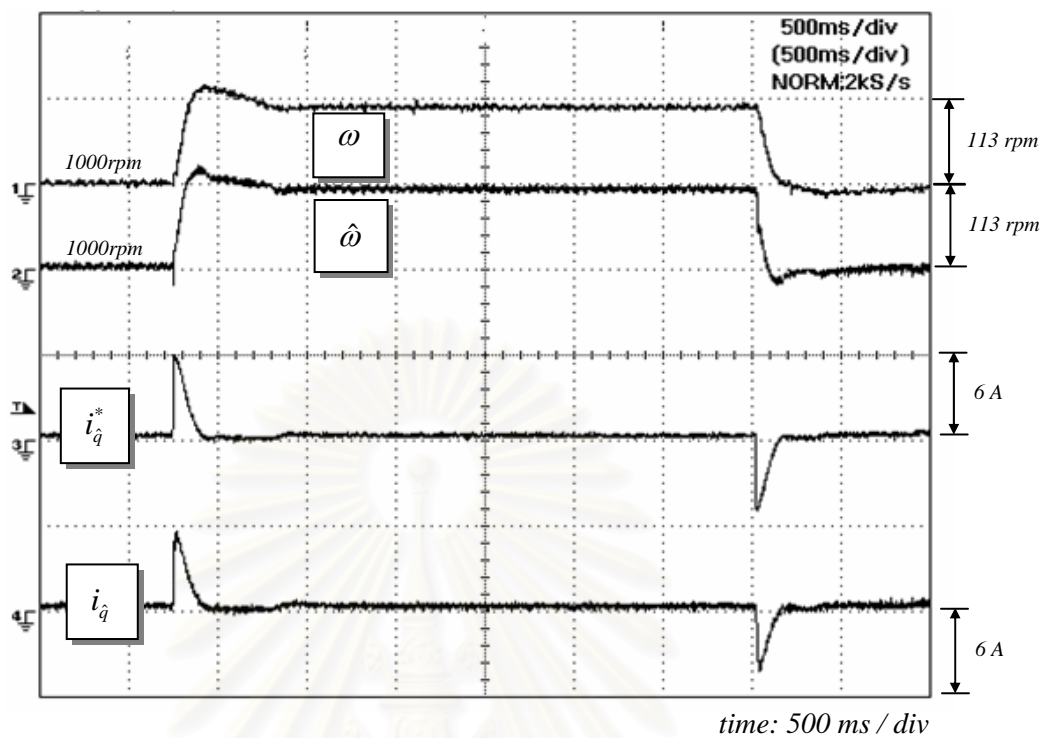
รูปที่ 5.27 ผลการทดลองขณะกลับทิศความเร็วจาก 1000 ไป -1000 rpm เมื่อใช้ระบบควบคุม  
เวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง (รูปคลื่นกระแส, ความเร็วและตำแหน่ง)



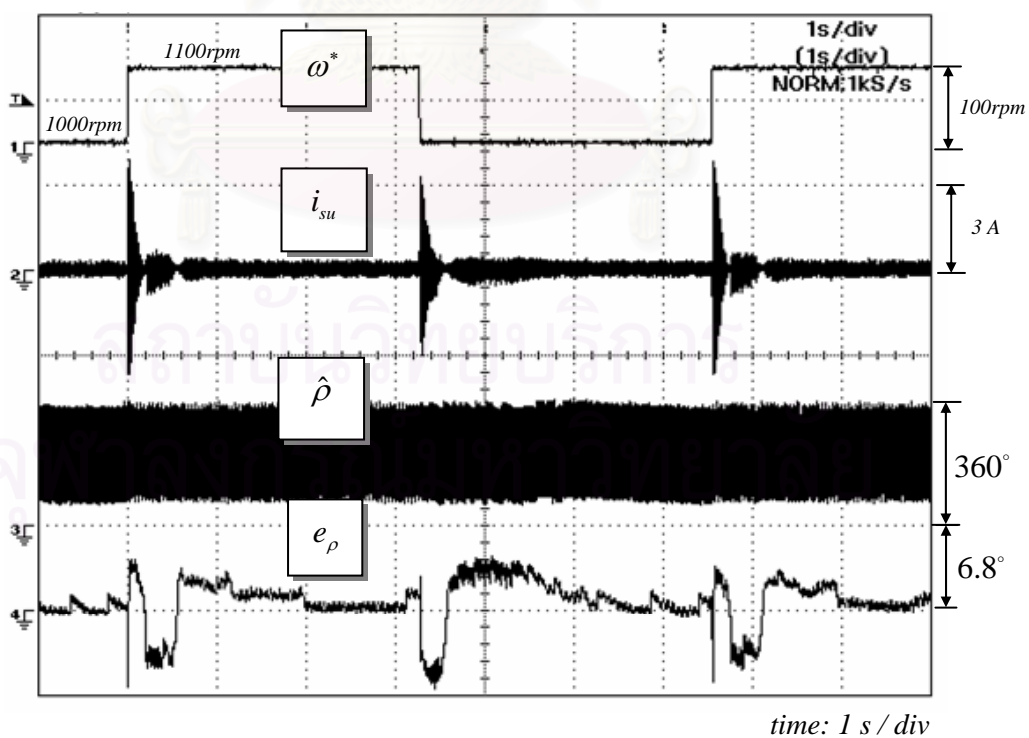
รูปที่ 5.28 ผลการทดลองขณะกลับทิศความเร็วจาก -1000 ไป 1000 rpm เมื่อใช้ระบบควบคุม  
เวกเตอร์ไร้เซ็นเซอร์วัดตำแหน่ง (รูปคลื่นความเร็วและกระแสสร้างแรงบิด)



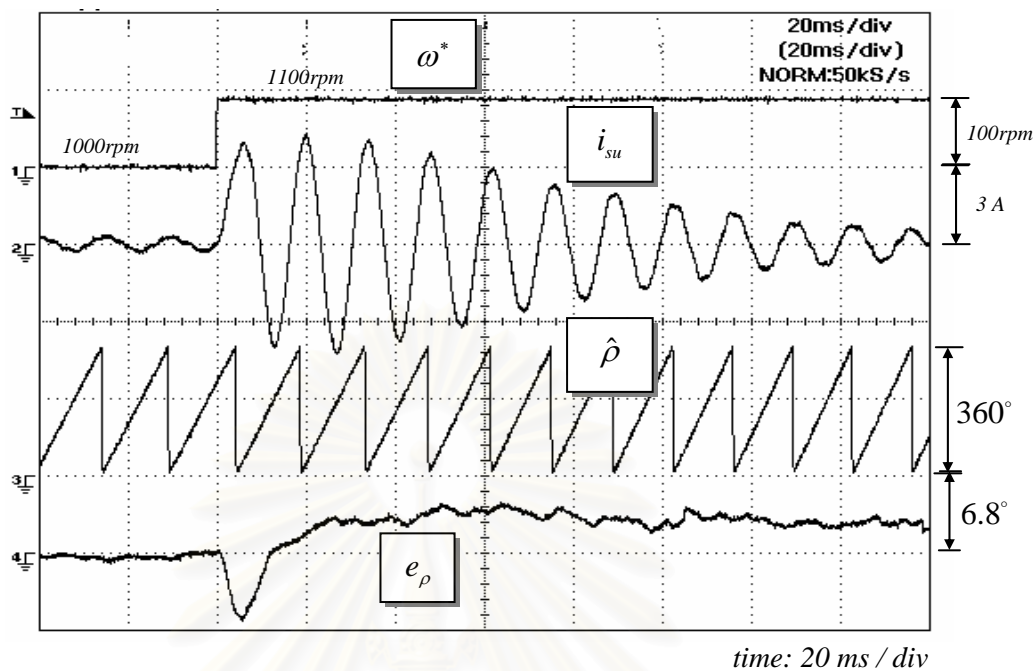
รูปที่ 5.29 ผลการทดลองขณะกลับทิศความเร็วจาก -1000 ไป 1000 rpm เมื่อใช้ระบบควบคุม  
เวกเตอร์ไร้เซ็นเซอร์วัดตำแหน่ง (รูปคลื่นกระแส, ความเร็วและตำแหน่ง)



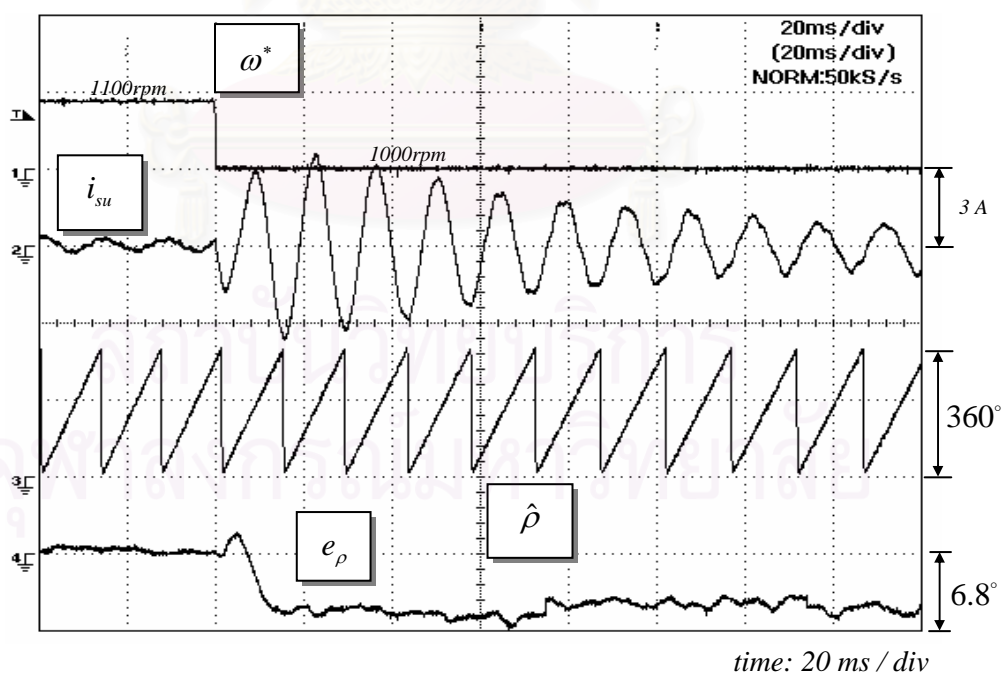
รูปที่ 5.30 ผลการทดลองเมื่อใช้ระบบควบคุมเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งในกรณี  
เปลี่ยนแปลงความเร็วคำสั่งในช่วงแคบ (รูปคลื่นความเร็วและกระแสสร้างแรงบิด)



รูปที่ 5.31 ผลการทดลองเมื่อใช้ระบบควบคุมเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งในกรณี  
เปลี่ยนแปลงความเร็วคำสั่งในช่วงแคบ (รูปคลื่นความเร็วและกระแสเฟส u)

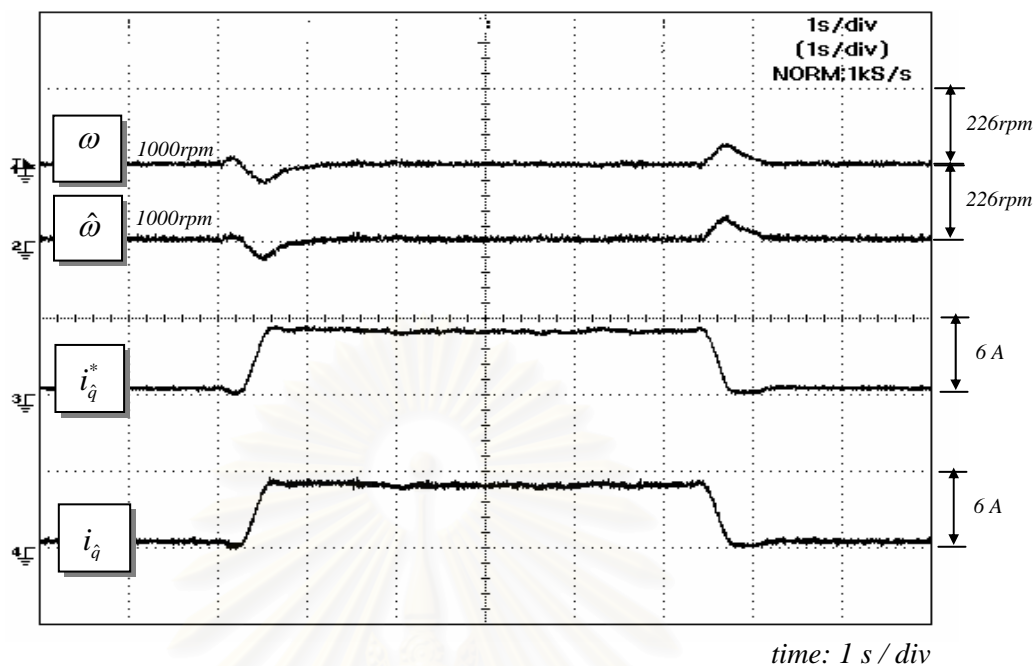


รูปที่ 5.32 ภาพขยายของข้อมูลตำแหน่งและกระแสเฟส u ของรูปที่ 4.24 ในขณะที่เปลี่ยนแปลงความเร็วคำสั่งในช่วงแคบจาก 1000 ไป 1100 rpm เมื่อใช้ระบบควบคุมเวกเตอร์ไโรเซนเซอร์วัดตำแหน่ง

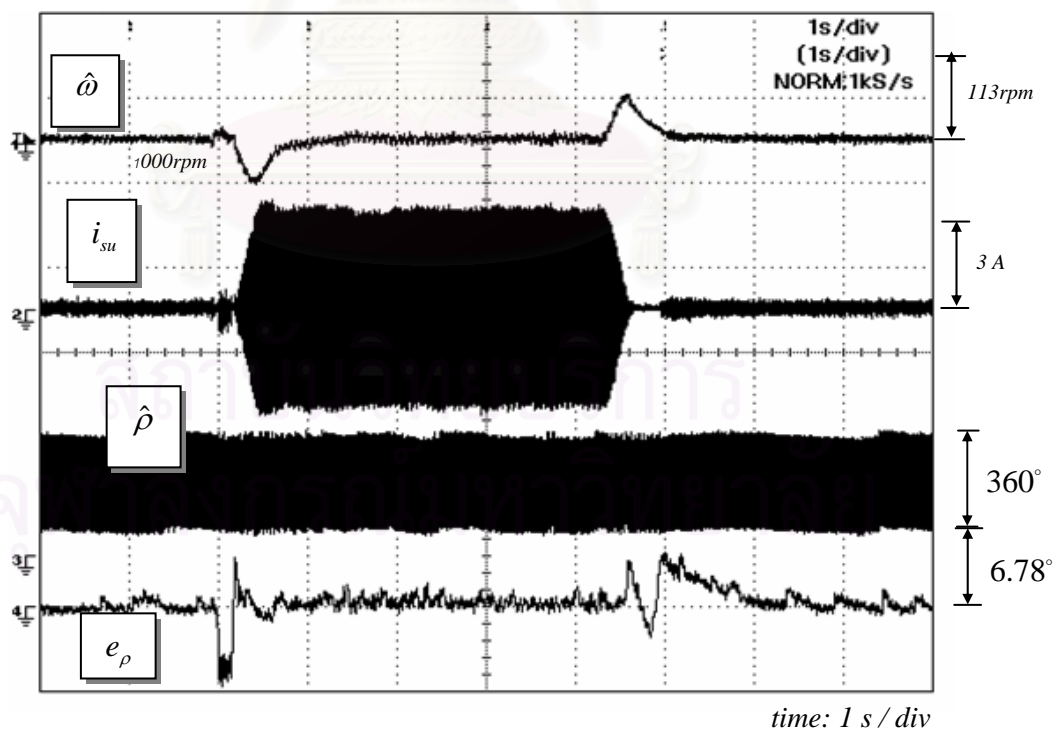


รูปที่ 5.33 ภาพขยายของข้อมูลตำแหน่งและกระแสเฟส u ของรูปที่ 4.24 ในขณะที่เปลี่ยนแปลงความเร็วคำสั่งในช่วงแคบจาก 1100 ไป 1000 rpm เมื่อใช้ระบบควบคุมเวกเตอร์ไโรเซนเซอร์วัดตำแหน่ง

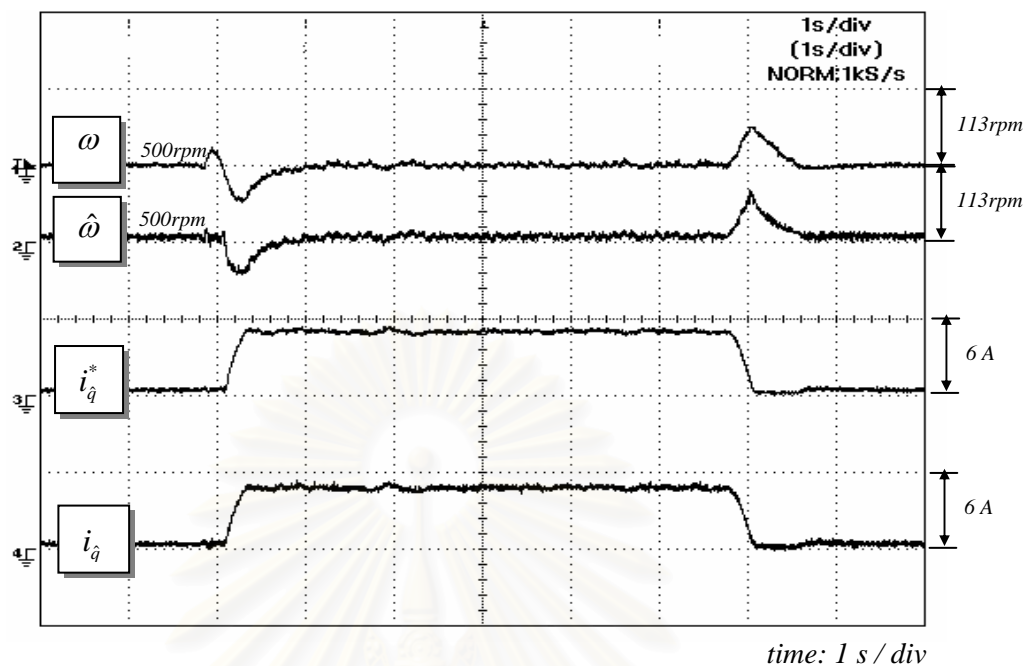




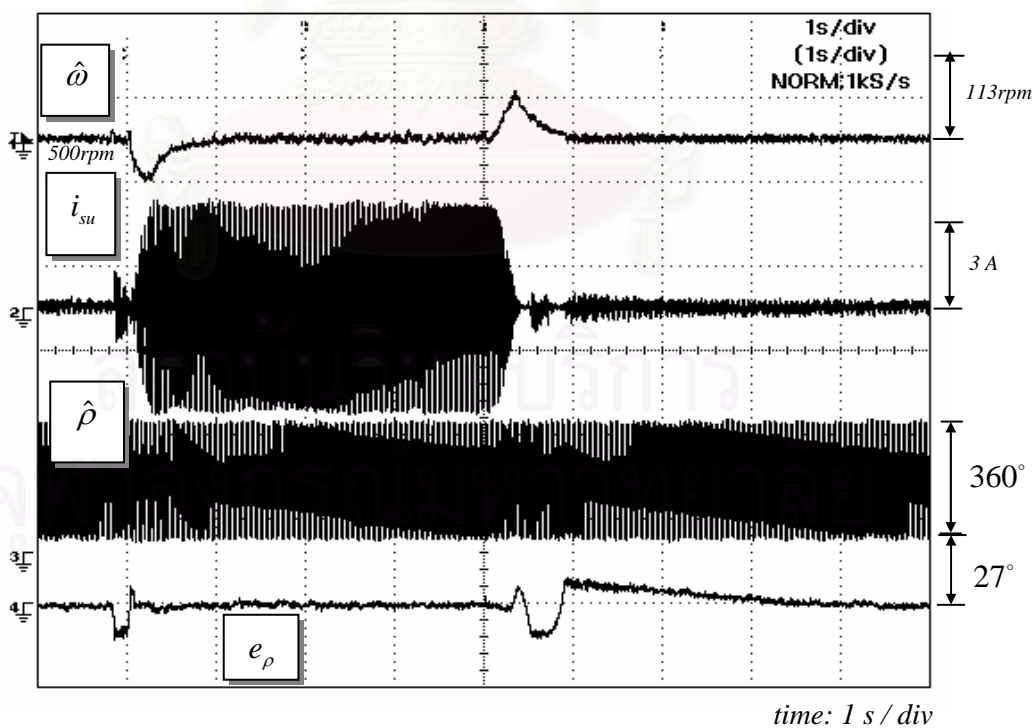
รูปที่ 5.34 ผลการทดลองในกรณีเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้นที่ความเร็ว 1000 rpm เมื่อใช้ระบบควบคุมเวกเตอร์ไรเซนเซอร์วัดตำแหน่ง (รูปคลื่นความเร็วและกระแสสร้างแรงบิด)



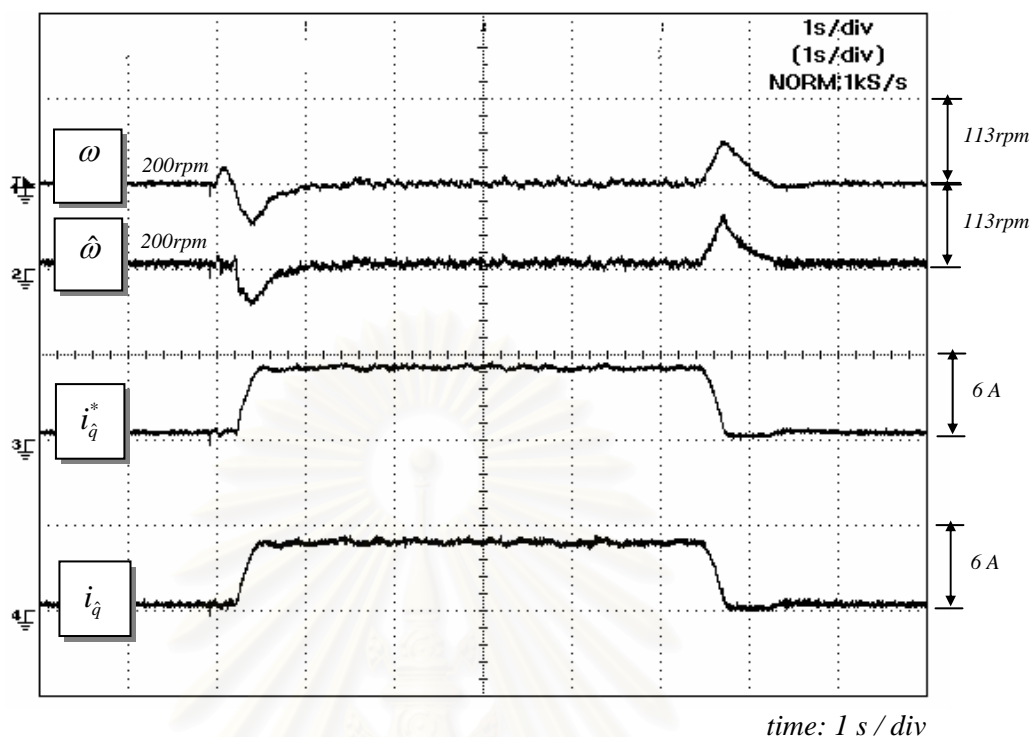
รูปที่ 5.35 ผลการทดลองในกรณีเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้นที่ความเร็ว 1000 rpm เมื่อใช้ระบบควบคุมเวกเตอร์ไรเซนเซอร์วัดตำแหน่ง (รูปคลื่นกระแสและตำแหน่ง)



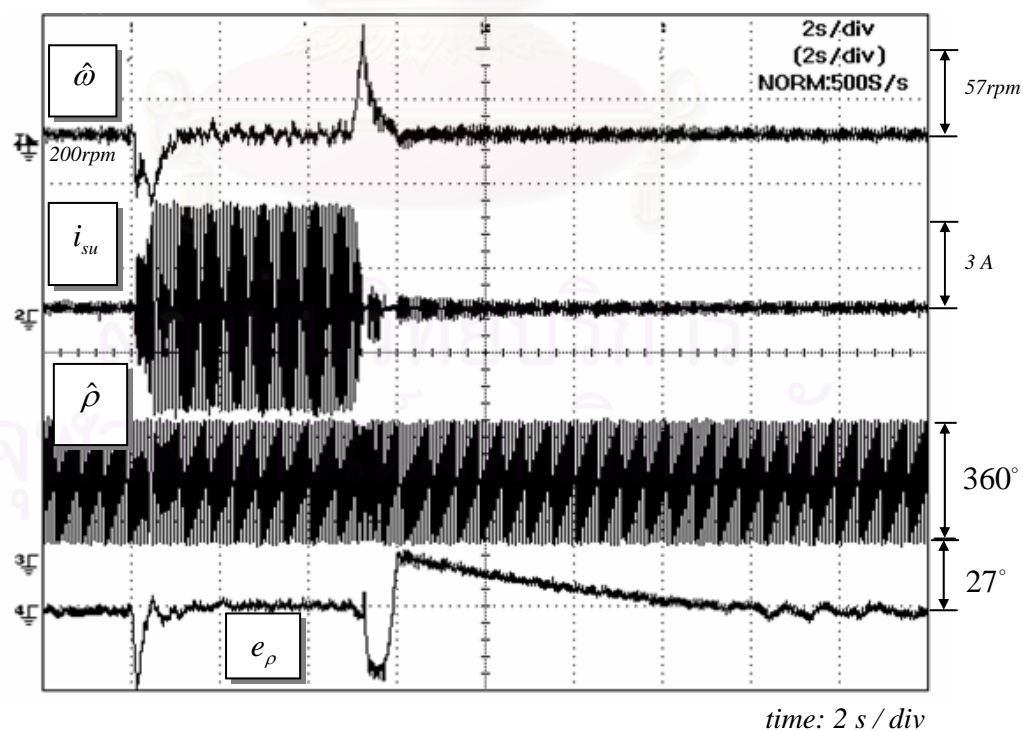
รูปที่ 5.36 ผลการทดลองในกรณีเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้นที่ความเร็ว 500 rpm เมื่อใช้ระบบควบคุมเวกเตอร์ไรเซนเซอร์วัดตำแหน่ง (รูปคลื่นความเร็วและกระแสสร้างแรงบิด)



รูปที่ 5.37 ผลการทดลองในกรณีเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้นที่ความเร็ว 500 rpm เมื่อใช้ระบบควบคุมเวกเตอร์ไรเซนเซอร์วัดตำแหน่ง (รูปคลื่นกระแสและตำแหน่ง)



รูปที่ 5.38 ผลการทดลองในกรณีเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้นที่ความเร็ว 200 rpm ใช้ระบบควบคุมเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง (รูปคลื่นความเร็วและกระแสสร้างแรงบิด)



รูปที่ 5.39 ผลการทดลองในกรณีเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้นที่ความเร็ว 200 rpm เมื่อใช้ระบบควบคุมเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง (รูปคลื่นกระแสและตำแหน่ง)

## บทที่ 6

### เสถียรภาพและการออกแบบระบบประมาณค่าความเร็ว

เนื่องจากการประมาณค่าความเร็วด้วยตัวสังเกตแบบปรับตัวเป็นระบบวงรอบปิด ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่เราจะต้องศึกษาและวิเคราะห์ถึงเสถียรภาพของระบบประมาณ โดยการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบประมาณนี้ เราจะใช้วิธีเชิงพารามิเตอร์ [5] ซึ่งจะแปลงระบบประมาณไปแสดงบนแกนอ้างอิงพลาซมาและใช้ Routh-Hurwitz Criterion ในการหาเงื่อนไขทางด้านเสถียรภาพในรูปของสมการที่ชัดเจน นอกจากนี้เรายังศึกษาถึงเกณฑ์ในการออกแบบอัตราขยายการปรับตัวโดยพิจารณาจากสมรรถนะในการติดตามความเร็วจริง (Tracking performance) ที่เปลี่ยนแปลงในช่วงเร่งและลดความเร็ว ดังรายละเอียดต่อไปนี้

#### 6.1 สมการค่าผิดพลาดในการประมาณ

ในเบื้องต้นนี้เราจะแสดงความสัมพันธ์ของค่าผิดพลาดของสัญญาณต่างๆ และบล็อกไดอะแกรมของค่าผิดพลาดในการประมาณค่าความเร็ว ซึ่งจะใช้เป็นบล็อกไดอะแกรมพื้นฐานสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพในหัวข้อถัดไป

จากสมการที่ (2.5) และ (5.1) เราสามารถคำนวณหาสมการค่าผิดพลาดในการประมาณค่าได้ดังนี้คือ

$$\frac{d\vec{e}}{dt} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \vec{i} - \hat{i} \\ \vec{\lambda} - \hat{\lambda} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L}I & -J\frac{\omega}{L} \\ H1*I + H2*J & J\omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{i} - \hat{i} \\ \vec{\lambda} - \hat{\lambda} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -I/L \\ I \end{bmatrix} * J\vec{\lambda}(\hat{\omega} - \omega) \quad (6.1)$$

และเมื่อพิจารณาเฉพาะส่วนค่าผิดพลาดของกระแสเตเตอร์ ซึ่งเป็นค่าที่เราสามารถคำนวณได้ จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าผิดพลาดของกระแสกับค่าผิดพลาดของความเร็วประมาณเป็นดังสมการที่ (6.2)

ค่าผิดพลาดของกระแสเตเตอร์:

$$\begin{aligned}\vec{e}_i &= \vec{i}^* - \vec{i} \\ &= \frac{s}{L} \left[ s^2 I + s \left( \frac{R}{L} I - J\omega \right) - \frac{\omega}{L} H2 * I + J \frac{\omega}{L} (H1 - R) \right]^{-1} J \vec{\lambda} (\omega - \hat{\omega}) \\ &= G(s) * J \vec{\lambda} (\omega - \hat{\omega})\end{aligned}\quad (6.2)$$

โดยที่

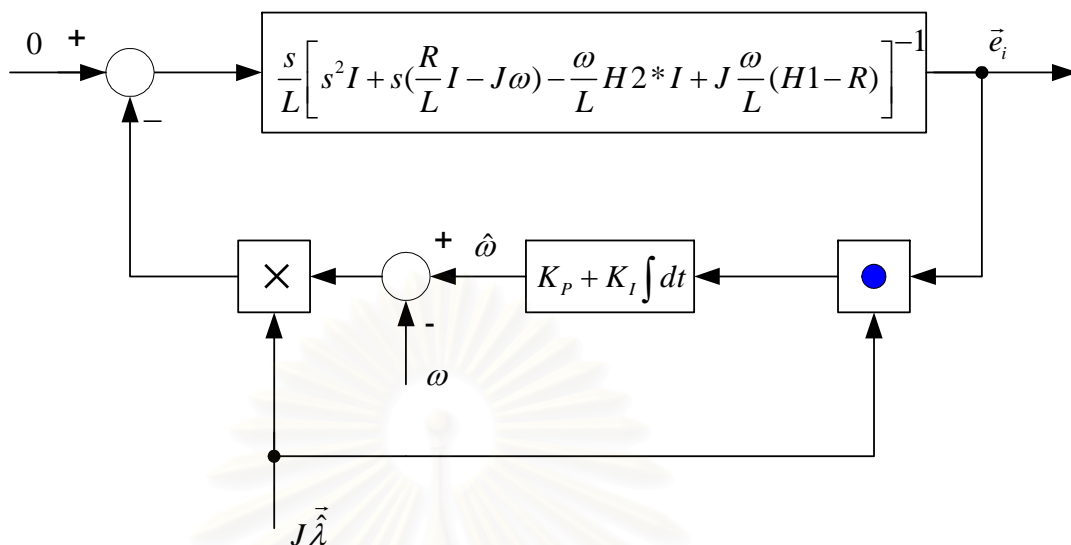
$$G(s) = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix} = \frac{s}{L} \left[ s^2 I + (xI + yJ)s + mI + nJ \right]^{-1}\quad (6.3)$$

และ

$$\begin{aligned}x &= R/L \\ y &= -\omega \\ m &= -\omega H2/L \\ n &= \omega(H1 - R)/L\end{aligned}\quad (6.4)$$

จากสมการที่ (6.2) จะเห็นได้ว่าค่าผิดพลาดของความเร็วจะสะท้อนไปยังค่าผิดพลาดของกระแสเตเตอร์ผ่านฟังก์ชันโอนย้าย  $G(s)$  และค่าผิดพลาดของกระแสเตเตอร์ถูกนำไปใช้ในการประมาณค่าความเร็วตามสมการที่ (5.2) ดังนั้นเราสามารถแสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบวงรอบปิดที่ประกอบด้วยฟังก์ชันโอนย้ายของค่าผิดพลาดกระแสพร้อมกันกับตัวควบคุม PI ในส่วนประมาณค่าความเร็วของตัวสังเกตแบบปรับตัวได้ดังรูปที่ 6.1 ซึ่งจะเป็นบล็อกไดอะแกรมพื้นฐานสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพต่อไป

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 6.1 บล็อกไดอะแกรมของค่าผิดพลาดในระบบประมาณค่าความเร็วบนแกนอ้างอิงสเตเตอร์

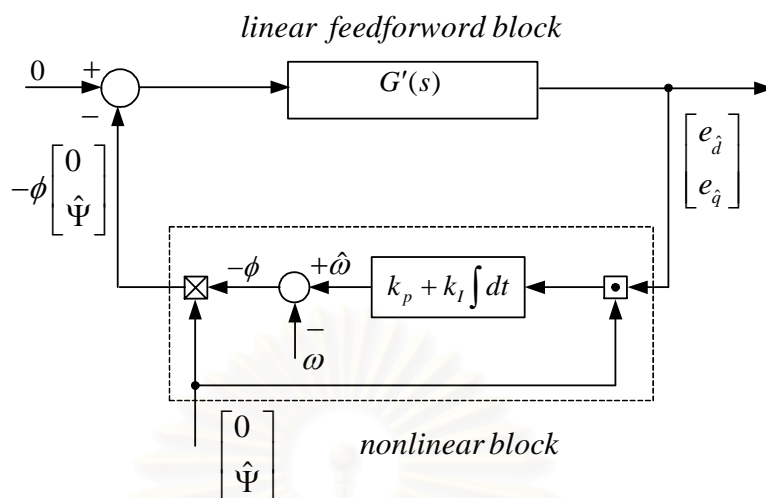
## 6.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพบนแกนอ้างอิงพลาซมาด้วยวิธีเชิงพารามิเตอร์

เราจะกล่าวถึงการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบประมาณค่าความเร็วด้วยวิธีเชิงพารามิเตอร์ดังรายละเอียดต่อไปนี้

### 6.2.1 บล็อกไดอะแกรมของค่าผิดพลาดบนแกนอ้างอิงหมุนของพลาซมา

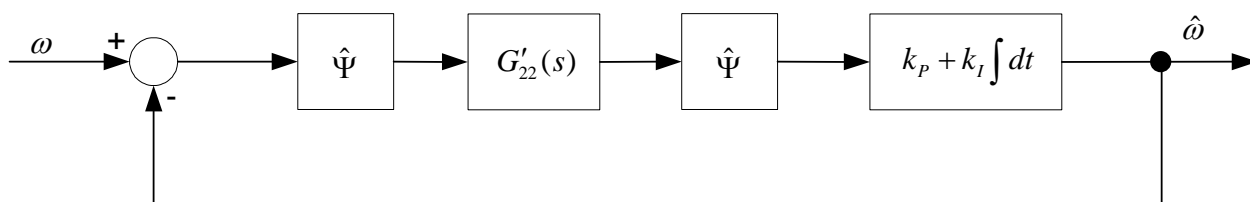
ในเบื้องต้นเราจะทำการแปลงระบบวงรอบปิดของค่าผิดพลาดในระบบประมาณค่าความเร็วในรูปที่ 6.1 ซึ่งแสดงอยู่บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ไปแสดงบนแกนอ้างอิงหมุนของพลาซมาดังแสดงในรูปที่ 6.2 โดย  $[e_{\dot{d}} \ e_{\dot{q}}]^T$  และ  $G'(s)$  ในรูปที่ 6.2 และในสมการที่ (6.5) หมายถึงค่าผิดพลาดของกระแสสเตเตอร์และฟังก์ชันโอนย้าย  $G(s)$  ที่แสดงบนแกนอ้างอิงของพลาซมาตามลำดับ สำหรับการคำนวณหา  $G'(s)$  ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ข

$$\begin{bmatrix} e_{\dot{d}} \\ e_{\dot{q}} \end{bmatrix} = G'(s) \begin{bmatrix} 0 \\ \hat{\Psi} \end{bmatrix} (\omega - \hat{\omega}); \quad G'(s) = \begin{bmatrix} G'_{11}(s) & G'_{12}(s) \\ G'_{21}(s) & G'_{22}(s) \end{bmatrix} \quad (6.5)$$



รูปที่ 6.2 บล็อกไดอะแกรมของค่าผิดพลาดในระบบประมาณค่าความเร็วบนแกนหมุนของฟลักซ์ประมาณ

เนื่องจากเวกเตอร์ฟลักซ์ประมาณ  $\vec{\lambda}$  จะชี้ในแนวแกน  $\hat{d}$  รีเกรสเซอร์เวกเตอร์  $J\vec{\lambda}$  ที่แสดงบนแกนอ้างอิงฟลักซ์ประมาณจึงมีเฉพาะองค์ประกอบในแกน  $\hat{q}$  เท่านั้น เวกเตอร์สัญญาณขาเข้าของฟังก์ชันโอนย้ายเชิงเส้นป้อนไปหน้า  $G'(s)$  ซึ่งมีค่าเป็น  $\hat{\Psi}(\omega - \hat{\omega})$  ก็จะมีองค์ประกอบเฉพาะในแกน  $\hat{q}$  เช่นเดียวกันและฟังก์ชันโอนย้ายที่ตอบสนองกับสัญญาณขาเข้านี้คือ  $G'_{12}(s)$  และ  $G'_{22}(s)$  ซึ่งทำให้เกิดค่าผิดพลาดของกระแสเดเตอร์ในแกน  $\hat{d}$  และ แกน  $\hat{q}$  ตามลำดับ นอกจากนี้เนื่องจากผลคูณสเกลาร์ที่ใช้ในการประมาณค่าความเร็วมอเตอร์ตามสมการที่ (5.10) มีค่าเท่ากับ  $\hat{\Psi} \cdot e_{\hat{q}}$  ซึ่งคำนวณมาจากค่าผิดพลาดของกระแสในแกน  $\hat{q}$  เท่านั้น ดังนั้นสัญญาณขาเข้าของส่วนไม่เชิงเส้นป้อนกลับจึงมีเพียงแค่สัญญาณในแกน  $\hat{q}$  จากที่กล่าวมาทั้งหมดทำให้เราสามารถสรุปได้ว่าวงรอบป้อนกลับของค่าผิดพลาดในการประมาณค่าความเร็วเกิดจากสัญญาณเฉพาะในแกน  $\hat{q}$  นั้นหมายความว่าฟังก์ชันโอนย้าย  $G'_{22}(s)$  เท่านั้นที่เกี่ยวข้องในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบวงรอบปิด ดังนั้นเราสามารถสรุปและจัดระบบวงรอบปิดของค่าผิดพลาดได้ใหม่ดังแสดงในรูปที่ 6.3



รูปที่ 6.3 วงรอบปิดของระบบประมาณค่าความเร็วแบบสัญญาณเข้าออกเดี่ยว (SISO) บนแกนอ้างอิงฟลักซ์ประมาณ

ฟังก์ชันโอนย้าย  $G'_{22}(s)$  สามารถคำนวณจากสมการที่ (6.3) ได้เป็น (ดูภาคผนวก ข)

$$G'_{22}(s) \cong \frac{1}{L} \left[ \frac{s^3 + xs^2 + \left( \left( \frac{d\hat{p}}{dt} \right)^2 + m \right) s + \left( \frac{d\hat{p}}{dt} \right)^2 x + \frac{d\hat{p}}{dt} n}{\left( s^2 + xs - \left( \frac{d\hat{p}}{dt} \right)^2 - \frac{d\hat{p}}{dt} y + m \right)^2 + \left( \left( 2 \frac{d\hat{p}}{dt} + y \right) s + \frac{d\hat{p}}{dt} x + n \right)^2} \right] \quad (6.6)$$

### 6.2.2 เสถียรภาพและเงื่อนไขศูนย์ที่มีเสถียรภาพ

ระบบประมาณในรูปที่ 6.3 มีลักษณะที่ง่ายต่อการวิเคราะห์ทั้งนี้เนื่องจากเป็นระบบแบบสัญญาณเข้า-ออกเดี่ยว (single-input-single-output; SISO) โดยมีสัญญาณขาเข้าเป็นความเร็วจริงและสัญญาณขาออกคือค่าความเร็วประมาณ ในการวิเคราะห์เสถียรภาพเราจะพิจารณาดำแหน่งของขั้วและศูนย์ของฟังก์ชันโอนย้าย  $G'_{22}(s)$  โดยเราสามารถหาเงื่อนไขสำหรับความมีเสถียรภาพของขั้วของตัวสังเกตโดยการประยุกต์ใช้ Routh-like scheme [4] กับฟังก์ชันโอนย้าย  $G(s)$  และได้เงื่อนไขดังแสดงในสมการที่ (6.7) (ภาคผนวก ค)

เงื่อนไขที่จำเป็นและเพียงพอสำหรับขั้วของตัวสังเกตที่มีเสถียรภาพ:

$$mx + ny - \frac{n^2}{x} > 0 \quad (6.7)$$

เมื่อเราแทนค่า  $m, n, x$  และ  $y$  ในสมการที่ (6.4) ลงในสมการที่ (6.7) แล้วจัดรูป จะได้



$$\omega \left[ \omega \left( (H1-R)^2 / R + (H1-R) \right) + H2 * R / L \right] < 0 \quad (6.8)$$

ซึ่งอสมการที่ (6.8) ก็คือ อสมการที่ (4.3) นั่นเอง ดังนั้นข้อของฟังก์ชันโอนย้าย  $G'_{22}(s)$  จึงมีตำแหน่งอยู่ทางด้านซ้ายของระนาบเชิงซ้อน S เสมอ ถ้าเราเลือกอัตราขยายป้อนกลับ ( $H1, H2$ ) ตามสมการที่ (4.4)

สำหรับตำแหน่งของศูนย์ของ  $G'_{22}(s)$  นั้น เนื่องจากว่าโดยปกติเรานิยมใช้อัตราขยายการปรับตัวที่มีค่าสูง เพื่อให้ได้ผลตอบสนองที่ดีของการประมาณค่าความเร็วโรเตอร์ ดังนั้นตำแหน่งของศูนย์ทั้งหมดของฟังก์ชันโอนย้าย  $G'_{22}(s)$  จะต้องอยู่ทางด้านซ้ายของระนาบเชิงซ้อน S เพื่อให้ระบบขาดเสถียรภาพจากการที่ขั้ววิ่งเข้าหาศูนย์ โดยการประยุกต์ใช้ Routh-Hurwitz Criterion เราได้เงื่อนไขที่จำเป็นและเพียงพอที่รากทั้งหมดของพหุนามตัวตั้ง (Numerator) ของ  $G'_{22}(s)$  จะอยู่ทางด้านซ้ายของระนาบเชิงซ้อน S (ศูนย์ที่มีเสถียรภาพ (stable zeros)) ดังนี้

เงื่อนไขศูนย์ที่มีเสถียรภาพ:

$$\begin{aligned} \frac{d\hat{p}}{dt} * \left( \frac{d\hat{p}}{dt} + \omega(H1-R)/R \right) &> 0 \\ \frac{d\hat{p}}{dt} * \omega(H1-R) + \omega H2R/L &< 0 \end{aligned} \quad (6.9)$$

เราจึงสามารถสรุปได้ว่า ถ้าต้องการให้ระบบประมาณค่าความเร็วด้วยตัวสังเกตแบบปรับตัวมีเสถียรภาพ เราจะต้องออกแบบอัตราขยายป้อนกลับที่ทำให้เงื่อนไขขั้วที่เสถียร(อสมการที่ (6.8)) และเงื่อนไขศูนย์ที่เสถียร (อสมการที่ (6.9)) เป็นจริง ในที่นี้เรานำเสนอตัวอย่างหนึ่งของการออกแบบอัตราขยายป้อนกลับที่ทำให้ระบบประมาณมีเสถียรภาพตลอดย่านการทำงานคือ

$$\begin{aligned} H1 &= R \\ H2 &= -k\omega \quad \text{โดยที่ } k > 0 \end{aligned} \quad (6.10)$$

แต่เนื่องจากในทางปฏิบัติเราไม่สามารถทราบความเร็วจริง( $\omega$ )ได้ ในที่นี้เราจึงใช้อัตราขยายป้อนกลับดังแสดงในสมการที่ (6.11) แทน

$$\begin{aligned} H1 &= R \\ H2 &= -k\hat{\omega} \end{aligned} \quad \text{โดยที่ } k > 0 \quad (6.11)$$

โดยถือว่าความเร็วประมาณ ( $\hat{\omega}$ ) มีค่าใกล้เคียงกับค่าจริง ( $\omega$ ) ตลอดเวลา

### 6.3 การออกแบบอัตรายายป้อนกลับ( $H2$ )

จากเงื่อนไขเสถียรภาพถ้าเราเลือก  $H2 = -k\hat{\omega}$  ตามสมการที่ (6.11) โดยที่  $k > 0$  ระบบก็จะมีเสถียรภาพ แต่  $k$  ควรมีค่าเท่าใดนั้นเราจะพิจารณาจากอัตรการลู่เข้าของค่าความผิดพลาดดังต่อไปนี้

ค่ารากของสมการคุณลักษณะของสมการค่าผิดพลาด(สมการที่ (6.1)) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (6.12)

$$\begin{aligned} \underline{p}_1 &= \frac{-1}{2\tau} + j\frac{\omega}{2} + \frac{1}{2\tau} \sqrt{1 - \omega^2 \tau^2 \left(1 + \frac{4k}{L}\right) - j2\omega\tau} \\ \underline{p}_2 &= \frac{-1}{2\tau} + j\frac{\omega}{2} - \frac{1}{2\tau} \sqrt{1 - \omega^2 \tau^2 \left(1 + \frac{4k}{L}\right) - j2\omega\tau} \end{aligned} \quad (6.12)$$

โดยที่  $\underline{p}_1, \underline{p}_1^* ; \underline{p}_2, \underline{p}_2^*$  คือค่ารากที่เป็นคู่สังยุคเชิงซ้อน และ  $\tau = L/R$

ในช่วง  $|\omega^*| < 0.1/\tau$  เราจะกำหนดให้  $k = 22.5L$  ซึ่งจะได้ส่วนจริงของสมการที่ (6.12) ที่เป็นขั้วเอก (Dominant pole) เท่ากับ  $-0.342/\tau$  ซึ่งเป็นค่าที่ให้อัตรการลู่เข้าเพียงพอ และสำหรับช่วง  $|\omega^*| \geq 0.1/\tau$  ค่า  $k$  จะไม่ส่งผลกระทบต่ออัตรการลู่เข้า ดังนั้นค่า  $k$  ในช่วงนี้จะพิจารณาจากความเหมาะสมของอัตรายายของการประมาณค่าพลาซในสมการที่ (5.4) ซึ่งเมื่อเราแทนค่า  $H1, H2$  จากสมการที่ (6.11) ลงในสมการที่ (5.4) จะได้

$$\frac{d\hat{\Psi}}{dt} = R(\hat{i}_d - i_d) + k\hat{\omega}(\hat{i}_q - i_q) \quad (6.13)$$

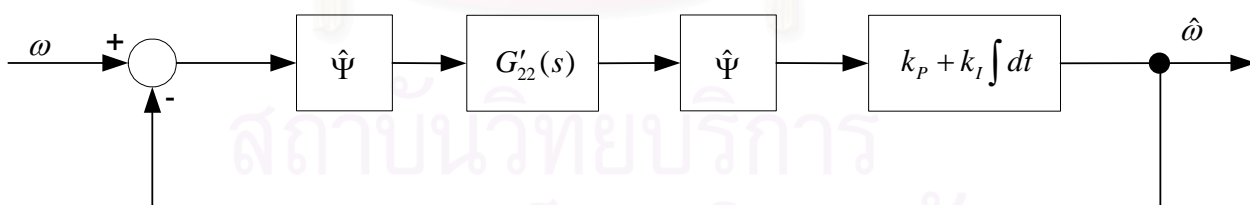
เพื่อให้ค่าอัตราขยายของค่าความผิดพลาดของกระแสในแกน  $\hat{d}$  และ แกน  $\hat{q}$  มีค่าเท่ากันดังนั้นช่วง  $|\omega^*| \geq 0.1/\tau$  จะกำหนดให้  $k = \frac{R}{|\omega^*|}$  กล่าวโดยสรุปคือ

$$k = \begin{cases} 22.5L & ; |\omega^*| < \frac{0.1}{\tau} \\ \frac{R}{|\omega^*|} & ; |\omega^*| \geq \frac{0.1}{\tau} \end{cases} \quad (6.14)$$

#### 6.4 การออกแบบอัตราขยายการปรับตัว

นอกเหนือไปจากอัตราขยายป้อนกลับที่ตัวสังเกตแบบปรับตัวแล้ว อัตราขยายการปรับตัว (Adaptation gains) ก็เป็นอีกพารามิเตอร์หนึ่งซึ่งจำเป็นที่จะต้องหาแนวทางในการออกแบบ เพราะมีส่วนสำคัญในการกำหนดคุณสมบัติการประมาณค่าความเร็วเช่นกัน ในที่นี้เราจะกล่าวถึงวิธีการออกแบบค่าอัตราขยายการปรับตัว โดยแนวทางที่นำเสนอจะพิจารณาคุณสมบัติของตัวประมาณค่าความเร็วในด้านความเร็วในการติดตามค่าความเร็วโรเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงในช่วงเร่งและลดความเร็ว

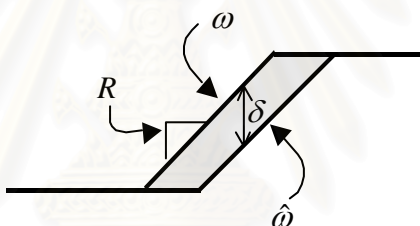
ในการหาเกณฑ์การออกแบบอัตราขยายการปรับตัวนี้เราจะใช้บล็อกไดอะแกรมดังแสดงในรูปที่ 6.3 ซึ่งนำมาเขียนใหม่ดังรูปที่ 6.4 ซึ่งระบบมีสัญญาณขาเข้าคือความเร็วจริงของมอเตอร์  $\omega$  และสัญญาณขาออกคือความเร็วที่ประมาณ  $\hat{\omega}$



รูปที่ 6.4 บล็อกไดอะแกรมของระบบประมาณค่าความเร็วที่ใช้ในการพิจารณาค่าอัตราขยายการปรับตัว

6.4.1 ความเร็วในการติดตามค่าความเร็วที่เปลี่ยนแปลง

ระบบควบคุมความเร็วโดยทั่วไปจะมีการจำกัดขนาดสัญญาณขาออกของตัวควบคุมความเร็ว (Speed regulator) ดังนั้นในกรณีที่เรทำการเร่งหรือลดความเร็วมอเตอร์ที่มีช่วงกว้างพอประมาณ แรงบิดคำสั่งจะมีค่าคงที่ในช่วงเร่งลดความเร็วและความเร็วของมอเตอร์จะเพิ่มขึ้นหรือลดลงเป็นเชิงเส้น โดยมีความชันเท่ากับ  $R \square \frac{d\omega}{dt} = \frac{p T_m}{2 J_s}$  โดยที่  $J_s$  คือค่าความเฉื่อยของระบบ ขับเคลื่อน ด้วยเหตุนี้เราจึงเลือกที่จะศึกษาถึงผลตอบสนองของระบบประมาณค่าความเร็วต่อสัญญาณแรมป์ (Ramp Response) โดยในการวิเคราะห์ความเร็วในการตอบสนองของระบบนั้น เราจะพิจารณาจากค่าผิดพลาดในการประมาณค่าของความเร็ว ( $\delta$ ) ในช่วงเร่ง/ลดความเร็วดังแสดงในรูปที่ 6.5



รูปที่ 6.5 ผลตอบสนองแบบแรมป์ของการประมาณค่าความเร็ว

จากบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 6.4 เราสามารถหาฟังก์ชัน โอนย้ายระหว่างความเร็วจริงและสัญญาณผิดพลาดของความเร็วประมาณได้ดังนี้ คือ

$$\frac{\omega - \hat{\omega}}{\omega} = \frac{1}{1 + C^2 G'_{22}(s)(K_p + K_I/s)} \tag{6.15}$$

โดยที่  $C = \dot{\Psi} = 0.11$  [Wb]

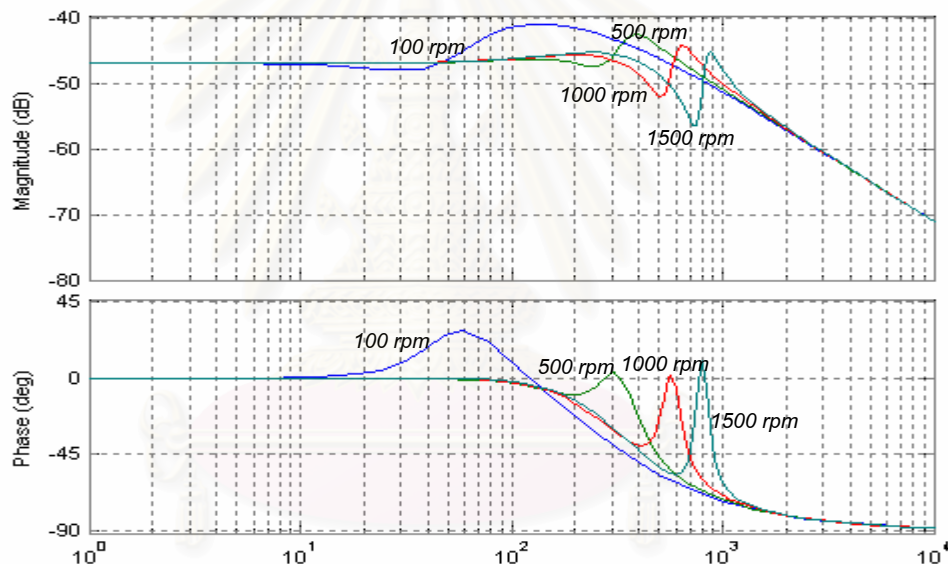
โดยใช้ทฤษฎีบทค่าสุดท้าย (Final Value Theorem) เราสามารถหาค่าผิดพลาดของความเร็วประมาณในช่วงแรมป์ ( $\delta$ ) ได้เป็น

$$\delta = \lim_{s \rightarrow 0} s \times \frac{R}{s^2} \times \frac{1}{1 + C^2 G'_{22}(s)(K_p + K_I/s)}$$

$$= \frac{R}{K_I C^2 G'_{22}(s)|_{s=0}} \tag{6.16}$$

$$\therefore K_I = \frac{R}{\delta C^2 G'_{22}(s)|_{s=0}} \tag{6.17}$$

จากการศึกษาแผนภาพโบลด์(รูปที่ 6.6)จะพบว่า  $C^2 G'_{22}(s)$  ที่  $s=0$  มีค่าค่อนข้างคงที่ (เท่ากับ 0.0045 โดยประมาณ) ดังนั้นจากสมการที่ (6.17) ถ้าเราใช้ค่าอัตราขยายของตัวควบคุมแบบอินทิเกรต  $K_I$  ที่มีค่าสูงก็จะทำให้ระบบประมาณค่าความเร็วมีผลตอบสนองแบบแรมป์ที่ดีได้ ในการออกแบบเราจะกำหนดค่าความผิดพลาด  $\delta$  และใช้สมการ (6.17) ในการออกแบบค่า  $K_I$



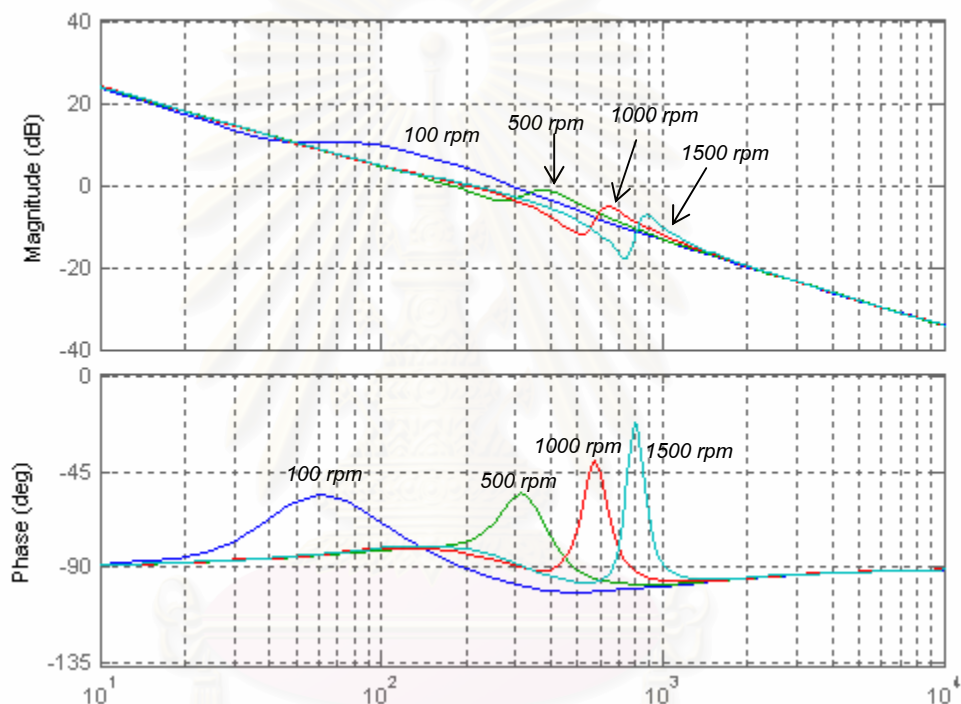
รูปที่ 6.6 แผนภาพโบลด์ของ  $C^2 G'_{22}(s)$

ถ้าเราต้องการให้มีค่าความผิดพลาดขณะเร่งลดความเร็วที่แรงบิดพิกัด 10 rpm ( $\delta = 4.186 \text{ rad/s}$ ) ซึ่งเป็นค่าน้อยเพียงพอ เมื่อแทนค่าต่างๆในสมการที่ (6.17) จะได้

$$K_I = 35,406$$

สำหรับการออกแบบค่า  $K_p$  นั้นจะพิจารณาจากช่วงเฟสที่ปลอดภัย (Phase margin) ของระบบประมาณค่าความเร็วซึ่งจากแผนภาพโบลด์ของ  $C^2 G'_{22}(s)$  จะเห็นว่าไม่ควรที่จะเลือกให้

ความถี่หักมุมของตัวควบคุม PI  $\left(\omega_{cn} = \frac{K_I}{K_P}\right)$  มีค่าสูงจนเกินไปเพราะจะทำให้เกิดเฟสล่าช้าหลังของตัวควบคุมมีผลต่อเสถียรภาพของระบบได้ อย่างไรก็ตามการเลือกความถี่หักมุมน้อยก็มิได้หมายความว่าระบบจะทำงานได้ดี ทั้งนี้เพราะเราจะต้องใช้ค่า  $K_P$  ที่มีค่าสูงซึ่งทำให้ผลกระทบของสัญญาณรบกวนมีมาก ซึ่งถ้าเราเลือก  $\omega_{cn} = 500 \text{ rad/s}$  จะได้  $K_P = 70.81$  เมื่อเรานำเอาค่าอัตราขยายการปรับตัวที่ได้ออกแบบไปหาค่าฟังก์ชันโอนย้ายวงรอบเปิดของระบบประมาณค่าความเร็ว (รูปที่ 6.4) แล้วไปวาดแผนภาพโบด จะได้ดังรูปที่ 6.7

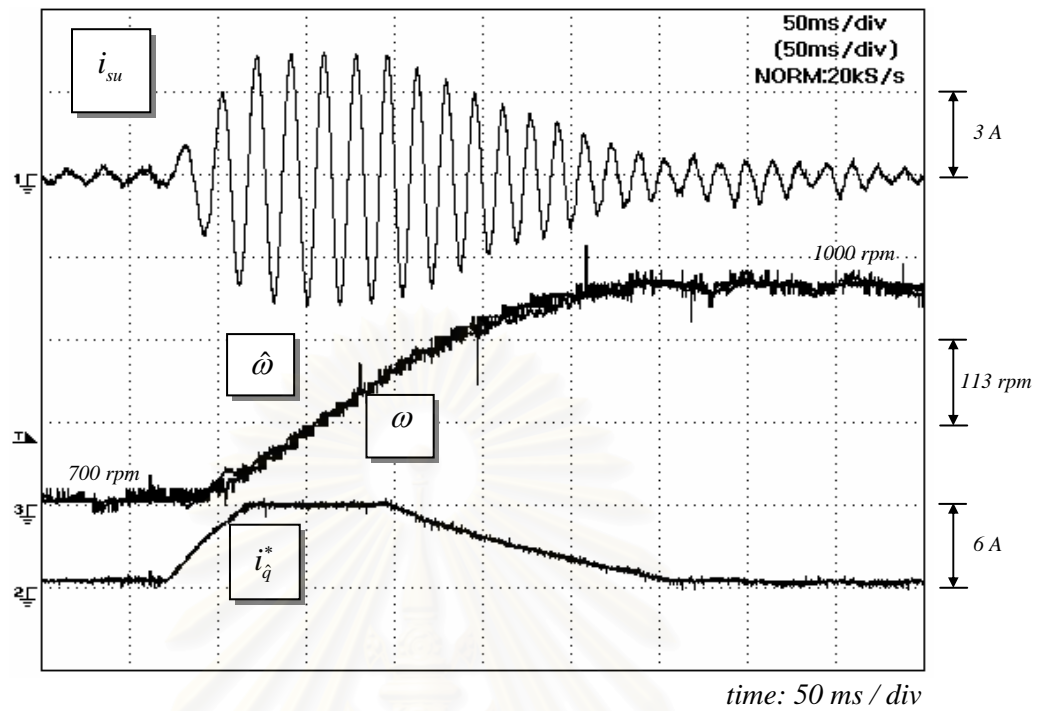


รูปที่ 6.7 แผนภาพโบดของฟังก์ชันโอนย้ายวงรอบเปิดของระบบประมาณค่าความเร็ว

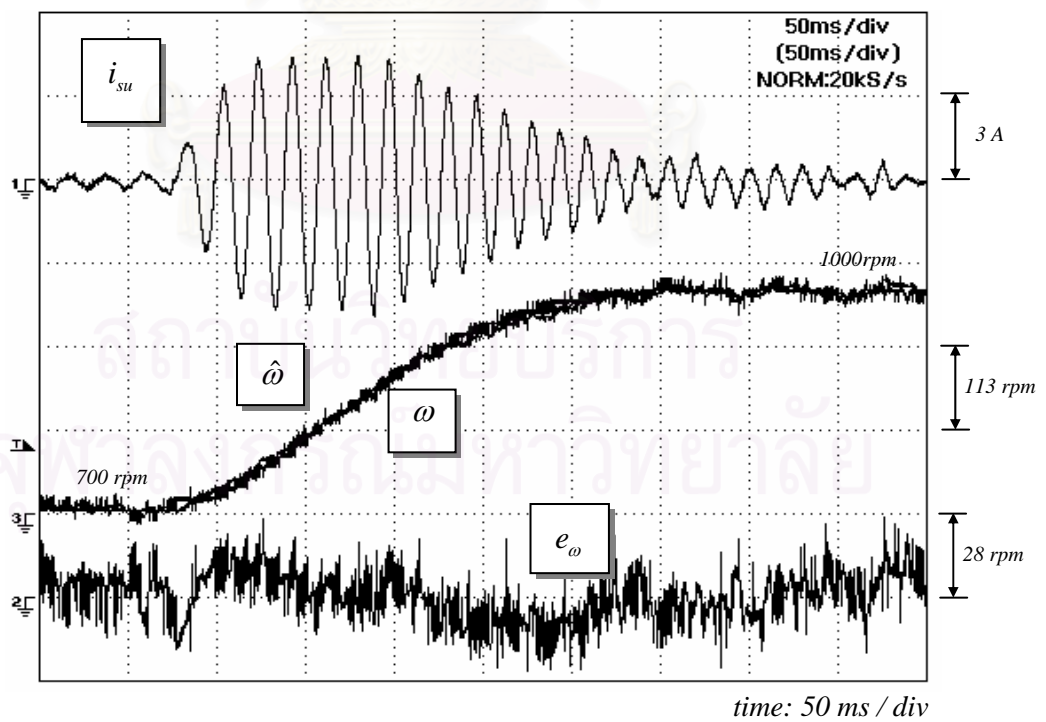
ซึ่งจากรูปที่ 6.7 จะเห็นว่าระบบประมาณค่าความเร็วจะมีช่วงเฟสที่ปลอดภัยประมาณ 90 องศา ตลอดย่านการทำงาน ซึ่งเพียงพอสำหรับระบบควบคุม สำหรับการทดสอบการทำงานกับระบบจริงจะเสนอในหัวข้อต่อไป

#### 6.5 ผลการทดลองจากการออกแบบอัตราขยายการปรับตัว

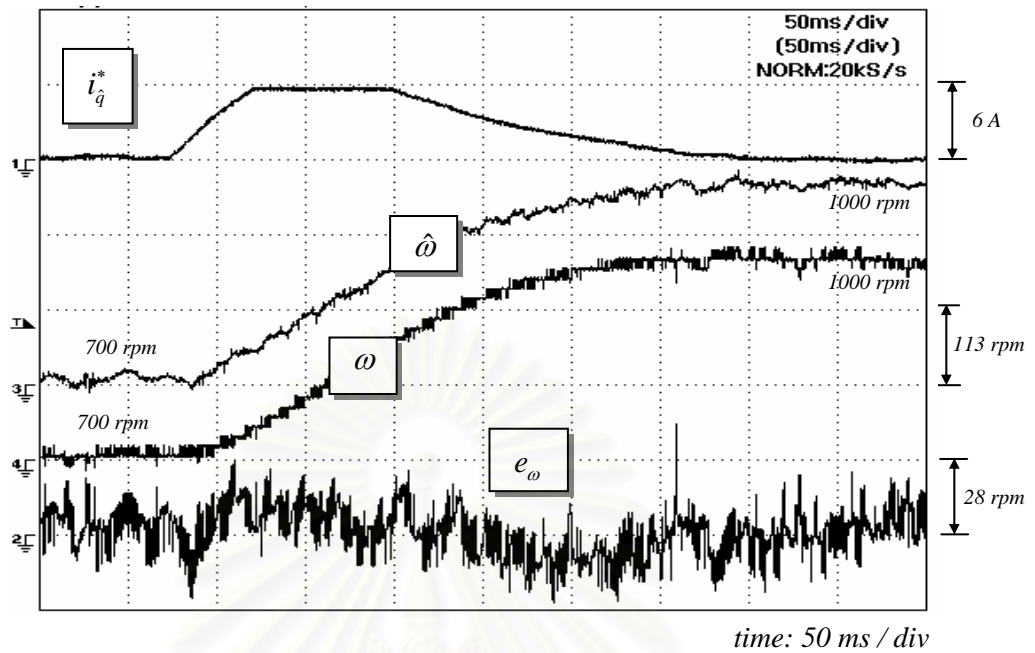
รูปที่ 6.8-6.12 เป็นการทดสอบขณะเร่งความเร็วจาก 700 ไป 1000 rpm จะเห็นค่าความผิดพลาดของความเร็วนั้นมีค่าน้อย (จากการออกแบบที่ 10 rpm) สำหรับค่าผิดพลาดของตำแหน่งสูงสุดประมาณ  $5^\circ$  ดังนั้นจากการประยุกต์ใช้การวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงพารามิเตอร์ ทำให้เราได้บล็อกไดอะแกรมของระบบประมาณค่าความเร็วเป็นลักษณะเข้าเดี่ยวออกเดี่ยว ซึ่งเราสามารถปรับปรุงสมรรถนะของระบบประมาณค่าความเร็วเพื่อให้ได้คุณสมบัติในการติดตามความเร็วจริงในขณะเร่งลดความเร็ว โดยใช้แนวทางการออกแบบอัตราขยายการปรับตัวที่นำเสนอได้อีกด้วย



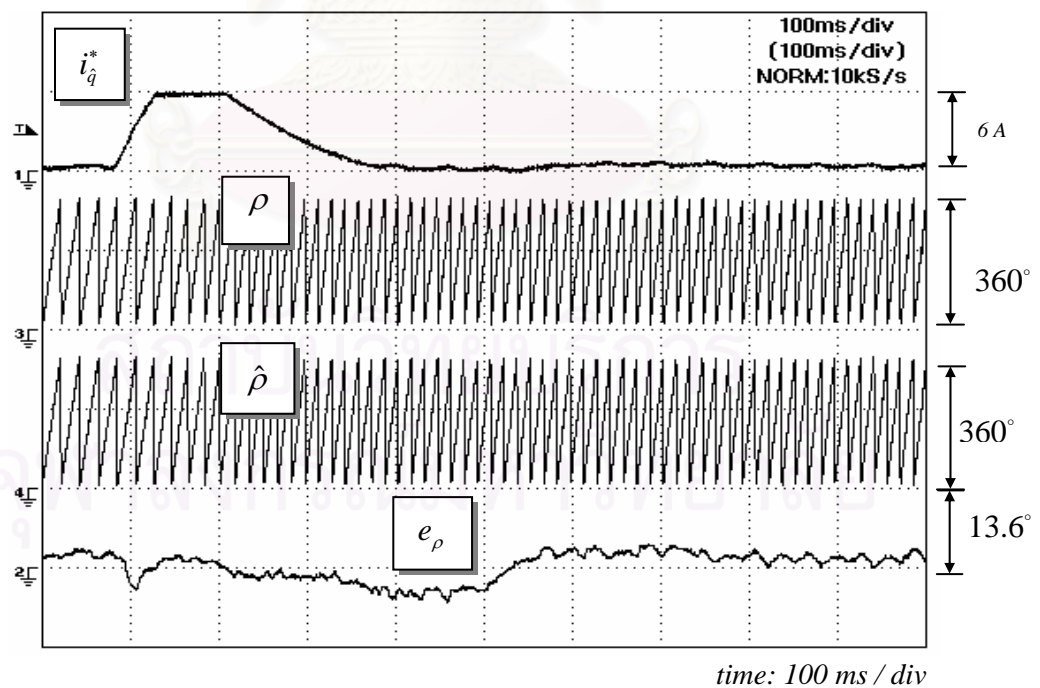
รูปที่ 6.8 ผลการทดลองการเร่งความเร็วเพื่อดูผลตอบสนองแบบแรมป์ของระบบประมาณค่าความเร็ว (รูปคลื่นความเร็ว, กระแสสร้างแรงบิดคำสั่ง และกระแสเฟส u)



รูปที่ 6.9 ผลการทดลองการเร่งความเร็วเพื่อดูผลตอบสนองแบบแรมป์ของระบบประมาณค่าความเร็ว (รูปคลื่นความเร็ว, ค่าความผิดพลาดของความเร็ว และกระแสเฟส u)

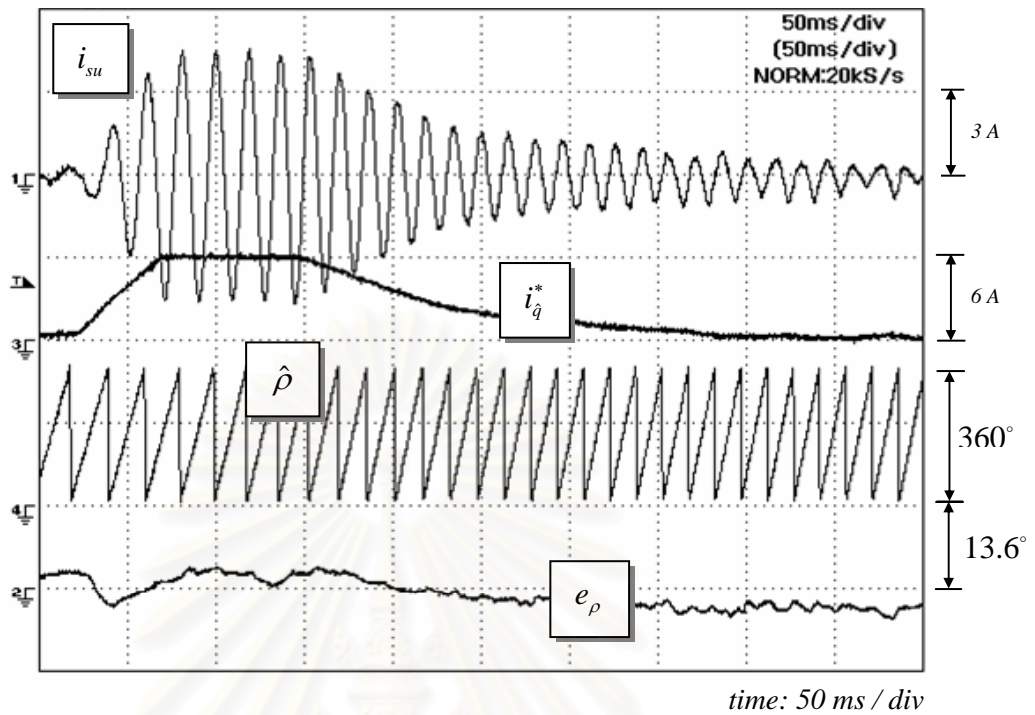


รูปที่ 6.10 ผลการทดลองการเร่งความเร็วเพื่อดูผลตอบสนองแบบแรมป์ของระบบประมาณค่าความเร็ว (รูปคลื่นความเร็ว, ค่าความผิดพลาดของความเร็ว และกระแสสร้างแรงบิดคำสั่ง)



รูปที่ 6.11 ผลการทดลองการเร่งความเร็วเพื่อดูผลตอบสนองแบบแรมป์ของระบบประมาณค่าความเร็ว (รูปคลื่นตำแหน่ง, ค่าความผิดพลาดตำแหน่ง และกระแสสร้างแรงบิดคำสั่ง)





รูปที่ 6.12 ผลการทดลองการเร่งความเร็วเพื่อตอบสนองแบบแรมป์ของระบบประมาณค่าความเร็ว (รูปคลื่นตำแหน่งประมาณ, ค่าความผิดพลาดตำแหน่ง, กระแสสร้างแรงบิดคำสั่ง และ กระแสเฟส u)

## บทที่ 7

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

#### บทสรุปผลการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์นี้ผู้เขียนได้ทำการวิจัยและพัฒนาระบบควบคุมเวกเตอร์ไร้เซ็นเซอร์วัดตำแหน่งแบบใหม่สำหรับมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร โดยผลงานวิจัยสามารถสรุปเป็นประเด็นต่างๆได้ดังนี้

- 1) การนำเสนอแบบจำลองพลวัตของมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรแบบใหม่ที่เป็นเชิงเส้น ซึ่งเมื่อนำมาสร้างตัวสังเกตเพื่อประมาณค่าตำแหน่งแล้ว ตัวสังเกตก็จะเป็นเชิงเส้นตามแบบจำลอง ทำให้เราสามารถนำ ทฤษฎีระบบควบคุมแบบเชิงเส้น ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบประมาณได้โดยตรง ปราศจากการทำให้ระบบเป็นเชิงเส้นรอบจุดทำงาน
- 2) การนำเสนอระบบควบคุมเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วมที่ควบคุมกระแสสเตเตอร์ผ่านแรงดันสเตเตอร์ ซึ่งมีสมรรถนะในการควบคุมแรงบิดที่สามารถตอบสนองต่อโหลดได้เป็นอย่างดี และโครงสร้างของตัวควบคุมแยกการเชื่อมร่วมยังมีแบบจำลอง (ที่นำเสนอ) เข้ากันได้กับตัวสังเกต ซึ่งเราสามารถบูรณาการระบบควบคุมเวกเตอร์กับตัวสังเกตได้ ทำให้โครงสร้างโดยรวมของระบบสามารถนำไปสร้างจริงในทางปฏิบัติได้โดยง่าย
- 3) การพัฒนาและสร้างระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซ็นเซอร์วัดตำแหน่ง ที่ใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วมในส่วนควบคุม และประยุกต์ใช้ตัวสังเกตเต็มอันดับในการประมาณค่าตำแหน่ง ซึ่งทำให้เราอาศัยแค่ตัวตรวจจับความเร็วหรือตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ที่เป็นแบบ Incremental Encoder ได้ซึ่งมีราคาถูกเมื่อเทียบกับตัวตรวจจับตำแหน่งแบบ Absolute Encoder ที่ใช้ในระบบควบคุมเวกเตอร์ทั่วไป
- 4) การพัฒนาและสร้างระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซ็นเซอร์วัดตำแหน่งและความเร็ว ที่ใช้การควบคุมแยกการเชื่อมร่วมในส่วนควบคุม และประยุกต์ใช้ตัวสังเกตเต็มอันดับ

- แบบปรับตัวในการประมาณค่าตำแหน่งและความเร็ว ซึ่งระบบสามารถควบคุมแรงบิดของมอเตอร์ได้ดีเทียบเท่ากับระบบควบคุมเวกเตอร์ที่ใช้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง
- 5) การประยุกต์ใช้วิธีเชิงพารามิเตอร์ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบประมาณและประยุกต์ใช้ Routh Hurwitz Criterion ในการหาเงื่อนไขของการมีเสถียรภาพเชิงสมการอย่างชัดเจน ทำให้เราสามารถเลือกใช้อัตราขยายป้อนกลับของตัวสังเกตที่เหมาะสม ที่ทำให้ระบบประมาณมีเสถียรภาพตลอดย่านการทำงาน
  - 6) การนำเสนอแนวทางในการออกแบบอัตราขยายป้อนกลับ  $H_2$  โดยพิจารณาจากการดูเข้าของค่าความผิดพลาด และความเหมาะสมจากอัตราขยายความผิดพลาดของกระแส และนำเสนอแนวทางในการออกแบบอัตราขยายการปรับตัว โดยพิจารณาจากสมรรถนะในการติดตามความเร็วจริงและช่วงเฟสของระบบ

### ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในลำดับถัดไป

แม้ว่าสมรรถนะโดยรวมของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งแบบใหม่ที่น่าเสนอจะอยู่ในเกณฑ์ที่ดีและเพียงพอสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมได้ในระดับหนึ่ง แต่ก็ยังมีประเด็นที่สำคัญบางประการที่ควรพิจารณาศึกษาและวิจัยเพิ่มเติม เพื่อพัฒนาขีดความสามารถของระบบให้ดียิ่งขึ้นไปอีกดังนี้

- 1) ความถูกต้องของค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ที่ใช้ในตัวควบคุมถือเป็นตัวแปรสำคัญที่ชี้บ่งถึงสมรรถนะของการควบคุม แต่เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ต่างๆของมอเตอร์จะเปลี่ยนแปลงไปตามสภาวะและเงื่อนไขในการทำงาน ยกตัวอย่างเช่น ค่าความต้านทานของมอเตอร์จะแปรเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิแวดล้อม ดังนั้นเราควรศึกษาและวิเคราะห์ว่าความผิดพลาดของค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์มีผลกระทบอย่างไรต่อการประมาณค่าตำแหน่ง, ฟลักซ์และกระแสเดเตอร์ รวมไปถึงผลกระทบต่อศักยภาพในการควบคุมแรงบิดด้วย
- 2) ควรพัฒนาวิธีการควบคุมเพื่อให้ระบบมีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ ซึ่งมีอยู่ด้วยกันหลายแนวทางเช่น ก) หาแนวทางในการออกแบบค่าอัตราขยายป้อนกลับเพื่อให้ตัวสังเกตแบบปรับตัวมีความคงทนหรือ ข) ทำการประมาณค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์บางตัวไปพร้อมๆกับการประมาณค่าความเร็ว

โดยเฉพาะอย่างยิ่งค่าความต้านทานของมอเตอร์ที่มีผลกระทบต่อสมรรถนะในการควบคุมค่อนข้างมาก ในย่านการทำงานที่ความเร็วต่ำ



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

### ภาษาอังกฤษ

- [1] N.Ertugrul and P.Acarney, "A New Algorithm for Sensorless Operation of Permanent Magnet Motors", IEEE Trans. on Ind. Appl., Vol.30, no.1, 1994 , pp. 126-133.
- [2] D.Hamada, K.Uchida, F.Yusivar, H.Haratsu, S.Wakao, and T.Onuki "Stability Analysis of Sensorless Permanent Magnet Synchronous Motor Drive with a Reduced Order Observer", Conf. Rec. of IEMD'99, pp. 95-97.
- [3] Geng Yang, Richiko Tomioka, Motomu Nakano and Tung-Hai Chin "Position and Speed Sensorless Control of Brush-Less DC Motor Based on an Adaptive Observer ", IEE Japan, Vol.113-D, no.5, 1993, pp. 579-586.
- [4] P.C. Parks, V. Hahn. "Stability Theory", Prentice Hall, 1993.

### ภาษาไทย

- [5] สุรพงษ์ สุวรรณกวิน, เทคนิคใหม่ในการวิเคราะห์เสถียรภาพและออกแบบระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำไร้เซนเซอร์วัดความเร็วที่ใช้การควบคุมแบบแยกการเชื่อมร่วม , วิทยานิพนธ์ปริญญาคุชฎีบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.
- [6] โสภณ สมัยรัฐ, ระบบควบคุมเวกเตอร์เหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก

## โครงสร้างฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ของระบบ

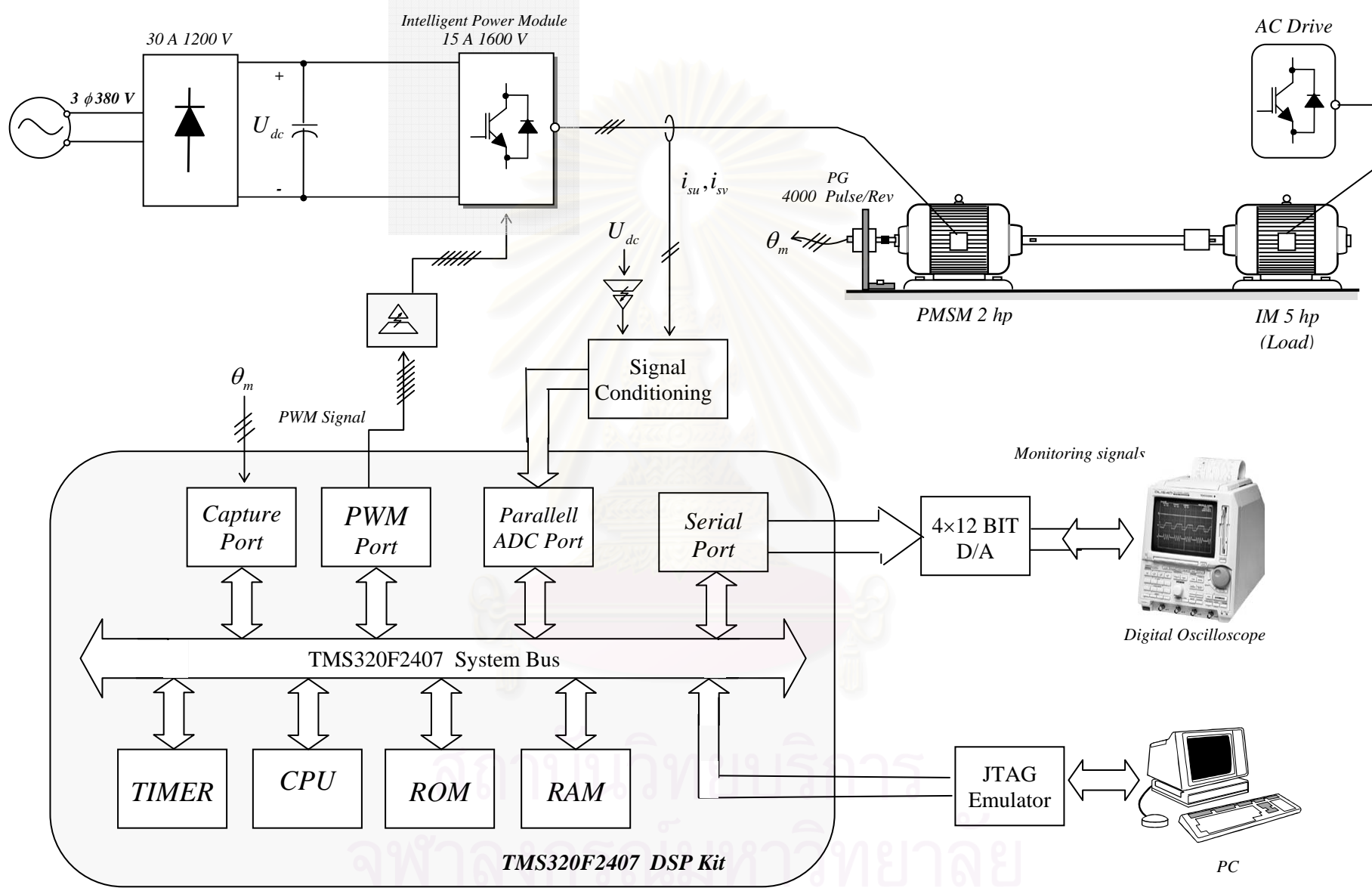
## 1. ฮาร์ดแวร์ของระบบ

รูป ก.1 แสดงให้เห็นถึงภาพรวมของฮาร์ดแวร์ของระบบควบคุมมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรที่พัฒนาขึ้น ในส่วนการคำนวณและประมวลผลเราได้ใช้บอร์ด DSP TMS320F2407 สำเร็จรูป ของบริษัท Texas Instrument โดย DSP บอร์ดสำเร็จรูปนี้มีความถี่สัญญาณพิกษาเท่ากับ 33 MHz และซอฟต์แวร์ที่ทำการพัฒนาบนคอมพิวเตอร์จะถูกถ่ายโอนมาที่ RAM บนบอร์ดสำเร็จรูปผ่าน JTAG Emulator

ฮาร์ดแวร์ในส่วนของภาคกำลังนั้นจะมีโครงสร้างเหมือนอินเวอร์เตอร์พื้นฐานทั่วไปที่ประกอบด้วย ส่วนเรียงกระแสไฟตรง, ตัวเก็บประจุที่บัสไฟตรงและวงจรมอเตอร์ซึ่งเราใช้ IPM (Intelligent Power Module) เป็นอุปกรณ์กำลัง สำหรับระบบขับเคลื่อนทางกลจะประกอบด้วยมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรขนาด 2 แรงม้า โดยค่าพิกัดและค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ได้แสดงไว้ในตารางที่ ก.1 โหลดที่ใช้ในระบบนี้จะเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 5 แรงม้า ซึ่งมีชุดควบคุมแบบเวกเตอร์เป็นตัวขับเคลื่อน

ตารางที่ ก.1 พิกัดและพารามิเตอร์ของมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรที่ใช้ในงานวิจัย

2HP, 200 V, 200 Hz, 3.4 A, 3000 rpm, 8 Poles	
$i_q = 5.88 \text{ A (rated)}$	$L = 4.34 \text{ mH}$
$R = 1.355 \ \Omega$	$\Psi = 0.11 \text{ Wb}$
$J = 0.01547 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$	



รูปที่ ก.1 โครงสร้างฮาร์ดแวร์ของระบบที่ใช้ในการทดสอบ



## 2. ซอฟต์แวร์แวร์ของระบบ

จากโครงสร้างส่วนการควบคุมในรูปแบบที่ 5.3 ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลจะทำการคำนวณกระแสสร้างแรงบิดคำสั่ง ( $i_d^*$ ) จากผลต่างระหว่างความเร็วคำสั่งกับความเร็วประมาณ ผ่านตัวควบคุม PI ที่มีการจำกัดค่ากระแสคำสั่ง ไม่ให้เกินค่าพิกัด กระแสคำสั่ง  $i_d^*$  ที่คำนวณได้ จะถูกส่งไปยังตัวควบคุมเวกเตอร์ไร้เซ็นเซอร์วัดตำแหน่ง ซึ่งจะประมาณค่าความเร็วจากค่าผิดพลาดระหว่างกระแสประมาณกับกระแสเดเตอร์ที่ตรวจจับมา เพื่อใช้ในวงรอบควบคุมความเร็วด้านนอก และคำนวณค่าแรงดันสำหรับการควบคุมแยกการเชื่อมร่วมในส่วนของระบบควบคุมเวกเตอร์ โดยมีการชดเชยแรงดันเนื่องมาจากผลของการประวิงเวลาสวิตช์ด้วย ค่าแรงดันคำสั่งที่ได้จะถูกนำไปสร้างสัญญาณปรับความกว้างพัลส์ (PWM) สำหรับขับนำเกตของอินเวอร์เตอร์โดยอาศัยหลักการทาง สเปซเวกเตอร์ของแรงดัน(voltage space vector)[6] ซึ่งใช้แรงดันบัสไฟตรงที่ตรวจจับได้เป็นแรงดันฐาน ซอฟต์แวร์ทั้งหมดสามารถเขียนได้ดังแสดงใน PDL (Program Development Language) ต่อไปนี้ และสามารถแสดงไคอะแกรมเวลาได้ดังรูปที่ ก.2 ซอฟต์แวร์โมดูลนี้จะใช้การอินเทอร์รัปต์ทุกๆ 100 ไมโครวินาที และโปรแกรมในการบริการการอินเทอร์รัปต์จะใช้เวลาทั้งหมดประมาณ 26 ไมโครวินาที ซึ่งจะเห็นว่าเราจะทำการอ่านกระแสก่อนเป็นอันดับแรก ทั้งนี้เพื่อให้กระแสที่อ่านได้ใกล้เคียงกับกระแสที่ความถี่หลักมูลมากที่สุด

\*\*\*\*\*

\*\*\*\*\*

### POSITION-SENSORLESS VECTOR CONTROL PROGRAM

### OF A PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR (MAIN PROGRAM)

\*\*\*\*\*

\*\*\*\*\*

## MODULE : MAIN PROGRAM

### Initialize

Initialize all variables  
 Initialize all timers  
 Clear all variables  
 Wait for data from keyboard  
 Enable time interrupt

**Loop here and wait for interrupt only**

**Switching frequency Interrupt Service Routine**

Read motor currents

Input  $i_{su}, i_{sv}$  from A/D

Convert to rotating  $\hat{d} - \hat{q}$  axis (  $i_{\hat{d}}, i_{\hat{q}}$  )

Get speed command

Get estimated speed from previous interrupt service routine

Speed regulator

Calculate speed error

Calculate Speed Controller output (  $i_{\hat{q}}^*$  )

Stator dynamics

Calculate estimated currents (  $\hat{i}_{\hat{d}}, \hat{i}_{\hat{q}}$  )

Adaptive Controller

Calculate current error (  $\hat{i}_{\hat{q}} - i_{\hat{q}}$  )

Calculate estimated speed  $\hat{\omega}$

Calculate estimated flux  $\hat{\Psi}$  and angle  $\hat{\rho}$

Decoupling control

Calculate  $u_{\hat{d}}^*, u_{\hat{q}}^*$

Calculate dead-time compensated voltage

Generate PWM signal

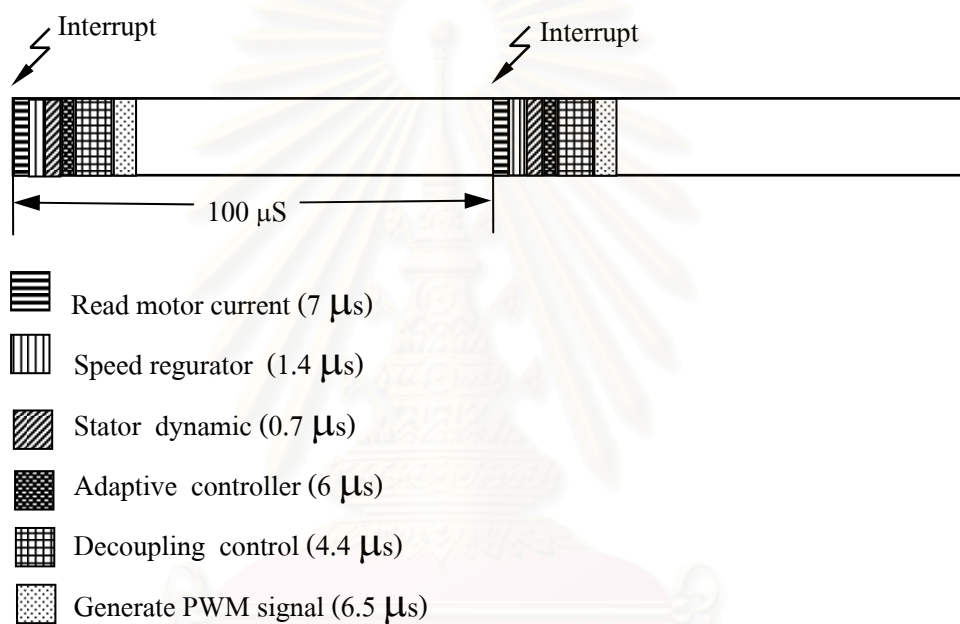
Find sector of compensated voltage vector

Calculate timing of switching pattern

Return

**END MAIN PROGRAM**

\*\*\*\*\*



รูปที่ ก.2 ไลออะแกรมเวลาของซอฟต์แวร์โมดูล

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ข

ฟังก์ชันโอนย้าย  $G(s)$  บนแกนอ้างอิงหมุนของฟลักซ์ประมาณ

จากนิยามของฟังก์ชันโอนย้าย  $G(s)$  บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ในสมการที่ (6.3) ของบทที่ 6 ที่แสดงไว้ในสมการ (ข.1)

$$\begin{aligned} G(s) &= \frac{s}{L} \left[ s^2 I + (xI + yJ)s + mI + nJ \right]^{-1} \\ &= \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (\text{ข.1})$$

เราสามารถคำนวณหาฟังก์ชันโอนย้าย  $G(s)$  บนแกนอ้างอิงของฟลักซ์ประมาณซึ่งหมุนด้วยความเร็ว  $\frac{d\hat{p}}{dt}$  ได้ดังนี้คือ

$$\begin{aligned} G'(s) &= TG(s)T^{-1} = G(s') \Big|_{s' = sI + J \frac{d\hat{p}}{dt}} \\ &= \begin{bmatrix} G'_{11}(s) & G'_{12}(s) \\ G'_{21}(s) & G'_{22}(s) \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{L} \left[ sI + J \frac{d\hat{p}}{dt} \right] \left[ \left( sI + J \frac{d\hat{p}}{dt} \right) \left( sI + J \frac{d\hat{p}}{dt} \right) + \left( sI + J \frac{d\hat{p}}{dt} \right) (xI + yJ) + mI + nJ \right]^{-1} \\ &= \frac{1}{\varepsilon} \left[ sI + J \frac{d\hat{p}}{dt} \right] \left[ s^2 I + sJ \frac{d\hat{p}}{dt} + J \frac{d\hat{p}}{dt} sJ - \left( \frac{d\hat{p}}{dt} \right)^2 I + \right. \\ &\quad \left. sxI + syJ + J \frac{d\hat{p}}{dt} xJ - J \frac{d\hat{p}}{dt} yJ + mI + nJ \right]^{-1} \\ &= \frac{1}{L} \left[ sI + J \frac{d\hat{p}}{dt} \right] * \\ &\quad * \begin{bmatrix} s^2 - \left( \frac{d\hat{p}}{dt} \right)^2 + sx - \frac{d\hat{p}}{dt} y + m & -(s \frac{d\hat{p}}{dt} + \frac{d\hat{p}}{dt} s + sy + \frac{d\hat{p}}{dt} x + n) \\ s \frac{d\hat{p}}{dt} + \frac{d\hat{p}}{dt} s + sy + \frac{d\hat{p}}{dt} x + n & s^2 - \left( \frac{d\hat{p}}{dt} \right)^2 + sx - \frac{d\hat{p}}{dt} y + m \end{bmatrix}^{-1} \end{aligned}$$

$$= \frac{1}{L} \frac{\left[ sI + J \frac{d\hat{\rho}}{dt} \right]}{\left( s^2 - \left( \frac{d\hat{\rho}}{dt} \right)^2 + sx - \frac{d\hat{\rho}}{dt} y + m \right)^2 + \left( s\omega + \omega s + sy + \omega x + n \right)^2} * \quad (ข.2)$$

$$* \begin{bmatrix} s^2 - \left( \frac{d\hat{\rho}}{dt} \right)^2 + sx - \frac{d\hat{\rho}}{dt} y + m & s \frac{d\hat{\rho}}{dt} + \frac{d\hat{\rho}}{dt} s + sy + \frac{d\hat{\rho}}{dt} x + n \\ - \left( s \frac{d\hat{\rho}}{dt} + \frac{d\hat{\rho}}{dt} s + sy + \frac{d\hat{\rho}}{dt} x + n \right) & s^2 - \left( \frac{d\hat{\rho}}{dt} \right)^2 + sx - \frac{d\hat{\rho}}{dt} y + m \end{bmatrix}$$

โดยที่

$$T = \begin{bmatrix} \cos \hat{\rho} & \sin \hat{\rho} \\ -\sin \hat{\rho} & \cos \hat{\rho} \end{bmatrix} \quad (ข.3)$$

$\hat{\rho}$  : คือมุมของฟลักซ์ประมาณเทียบกับแกนอ้างอิงสเตเตอร์

จากสมการที่ (ข.2) เราจะได้

$$G'_{22}(s) = \frac{1}{L} \frac{\left( s \frac{d\hat{\rho}}{dt} + \frac{d\hat{\rho}}{dt} s + sy + \frac{d\hat{\rho}}{dt} x + n \right) + s \left( s^2 - \left( \frac{d\hat{\rho}}{dt} \right)^2 + sx - \frac{d\hat{\rho}}{dt} y + m \right)}{\left( s^2 + sx - \left( \frac{d\hat{\rho}}{dt} \right)^2 - \frac{d\hat{\rho}}{dt} y + m \right)^2 + \left( s \frac{d\hat{\rho}}{dt} + \frac{d\hat{\rho}}{dt} s + sy + \frac{d\hat{\rho}}{dt} x + n \right)^2} \quad (ข.4)$$

โดยที่  $m, n$  และ  $y$  ขึ้นอยู่กับ  $\omega$  ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามเวลา  $\frac{d\hat{\rho}}{dt}$ ,  $m, n$  และ  $y$  จึงเป็นตัวแปรที่ขึ้นอยู่กับเวลา ดังนั้นตัวปฏิบัติการ  $s \frac{d\hat{\rho}}{dt}$  จึงสามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการที่ (ข.5)

$$s \frac{d\hat{\rho}}{dt} = \frac{d\hat{\rho}}{dt} s + \left\langle s \frac{d\hat{\rho}}{dt} \right\rangle \quad (ข.5)$$

โดยที่  $\left\langle s \frac{d\hat{\rho}}{dt} \right\rangle = \frac{d}{dt} \left( \frac{d\hat{\rho}}{dt} \right)$  คืออัตราการเปลี่ยนแปลงของความถี่ของฟลักซ์ประมาณ และเราจะ

ได้ความสัมพันธ์ในทำนองเดียวกันสำหรับตัวปฏิบัติการ  $sm, sn$  และ  $sy$  ด้วยเช่นกัน ดังนั้นเราจึงเขียนสมการที่ (ข.4) ได้ใหม่

เป็น

$$\begin{aligned}
G'_{22}(s) &= \frac{1}{L} \frac{1}{(s^2 + sx - \left(\frac{d\hat{\rho}}{dt}\right)^2 - \frac{d\hat{\rho}}{dt}y + m)^2 + (2\frac{d\hat{\rho}}{dt}s + \left\langle s\frac{d\hat{\rho}}{dt} \right\rangle + ys + \langle sy \rangle + \frac{d\hat{\rho}}{dt}x + n)^2} * \\
& * \left[ 2\left(\frac{d\hat{\rho}}{dt}\right)^2 s + \frac{d\hat{\rho}}{dt} \left\langle s\frac{d\hat{\rho}}{dt} \right\rangle + \frac{d\hat{\rho}}{dt}ys + \frac{d\hat{\rho}}{dt} \langle sy \rangle + \left(\frac{d\hat{\rho}}{dt}\right)^2 x + \frac{d\hat{\rho}}{dt}n + \right. \\
& \left. s^3 + s^2x - \left(\frac{d\hat{\rho}}{dt}\right)^2 s - 2\frac{d\hat{\rho}}{dt} \left\langle s\frac{d\hat{\rho}}{dt} \right\rangle - \frac{d\hat{\rho}}{dt}ys - \frac{d\hat{\rho}}{dt} \langle sy \rangle - y \left\langle s\frac{d\hat{\rho}}{dt} \right\rangle + ms + \langle sm \rangle \right] \\
& = \frac{s^3 + xs^2 + \left(\frac{d\hat{\rho}}{dt}\right)^2 s + \left(\frac{d\hat{\rho}}{dt}\right)^2 x + \frac{d\hat{\rho}}{dt}n - \left(\frac{d\hat{\rho}}{dt} + y\right) \left\langle s\frac{d\hat{\rho}}{dt} \right\rangle + \langle sm \rangle}{L[(s^2 + xs - \left(\frac{d\hat{\rho}}{dt}\right)^2 - \frac{d\hat{\rho}}{dt}y + m)^2 + ((2\frac{d\hat{\rho}}{dt} + y)s + \frac{d\hat{\rho}}{dt}x + n + \left\langle s\frac{d\hat{\rho}}{dt} \right\rangle + \langle sy \rangle)^2]} \\
& \tag{ข.6}
\end{aligned}$$

ในกรณีที่จุดทำงานเปลี่ยนแปลงช้าและละเอียดเมื่อเทียบกับพจน์อื่น [ $\left\langle s\frac{d\hat{\rho}}{dt} \right\rangle \approx \langle sm \rangle \approx \langle sn \rangle \approx \langle sy \rangle \approx 0$ ] จะได้ว่า

$$G'_{22}(s) \cong \frac{1}{L} \left[ \frac{s^3 + xs^2 + \left(\left(\frac{d\hat{\rho}}{dt}\right)^2 + m\right)s + \left(\frac{d\hat{\rho}}{dt}\right)^2 x + \frac{d\hat{\rho}}{dt}n}{\left(s^2 + xs - \left(\frac{d\hat{\rho}}{dt}\right)^2 - \frac{d\hat{\rho}}{dt}y + m\right)^2 + \left(\left(2\frac{d\hat{\rho}}{dt} + y\right)s + \frac{d\hat{\rho}}{dt}x + n\right)^2} \right] \tag{ข.7}$$

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ค

เงื่อนไขที่จำเป็นและเพียงพอสำหรับขั้วของตัวสังเกตที่มีเสถียรภาพ  
(สุรพงศ์ สุวรรณกวิน 2544)

ขั้วของตัวสังเกตที่เราจะพิจารณาจะเท่ากับขั้วของฟังก์ชันโอนย้าย  $G(s)$  ในสมการที่ (6.3) ซึ่งนำเขียนใหม่ได้ดังสมการที่ (ค.1)

$$G(s) = \frac{S}{L} [s^2 I + (xI + yJ)s + mI + nJ]^{-1} \quad (\text{ค.1})$$

เนื่องจากสเปซเวกเตอร์สามารถแสดงเป็นเวกเตอร์หรือจำนวนเชิงซ้อนก็ได้แล้วแต่ความสะดวก เพราะว่าปริภูมิเวกเตอร์และปริภูมิจำนวนเชิงซ้อนมีคุณสมบัติ Isomorphism ระหว่างกัน ในที่นี้เพื่อให้การคำนวณขั้วของฟังก์ชันโอนย้าย  $G(s)$  ง่ายและชัดเจน เราจะแสดงฟังก์ชันโอนย้าย  $G(s)$  บนปริภูมิจำนวนเชิงซ้อนแทนได้เป็นสมการที่ (ค.2)

$$G(s) = \frac{S}{L} [s^2 + (x + jy)s + m + jn]^{-1} \quad (\text{ค.2})$$

ดังนั้นเราสามารถพิจารณาขั้วของตัวสังเกตได้จากพหุนาม

$$s^2 + (x + jy)s + m + jn \quad (\text{ค.3})$$

จะเห็นว่าพหุนามใน (ค.3) จะมีสัมประสิทธิ์เป็นจำนวนเชิงซ้อน ดังนั้นเราจะใช้ Routh-like scheme [4] ในการหาเงื่อนไขที่จำเป็นและเพียงพอของขั้วที่มีเสถียรภาพ สำหรับพหุนามที่มีรูปแบบทั่วไปดังในสมการที่ (ค.4)

$$f(s) = s^2 + (a_{r1} + ja_{i1})s + (a_{r0} + ja_{i0}) = 0 \quad (\text{ค.4})$$

เราสามารถเขียน Routh Array ได้ดังนี้

$$\begin{array}{ccc} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & \\ r_{41} & & \end{array}$$

โดยที่

$$r_{ij} = \frac{r_{i-1,1}r_{i-2,j+1} - r_{i-2,1}r_{i-1,j+1}}{r_{i-1,1}} \quad \begin{array}{l} i = 1, 2, \dots \\ j = 1, 2, \dots \end{array} \quad (\text{ค.5})$$

และเงื่อนไขที่จำเป็นและเพียงพอสำหรับพหุนามใน (ค.4) ที่มีรากทั้งหมดอยู่ทางด้านซ้ายของระนาบจำนวนเชิงซ้อนก็คือ

$$D_1 = r_{21} > 0 \quad (\text{ค.6})$$

$$D_2 = r_{21} \cdot r_{31} \cdot r_{41} > 0 \quad (\text{ค.7})$$

จากสมการที่ (ค.3) และ (ค.4) เราจะได้ว่า

$$\begin{array}{lll} r_{11} = 1 & r_{12} = a_{i1} = y & r_{13} = -a_{r0} = -m \\ r_{21} = a_{r1} = x & r_{22} = a_{i0} = n & r_{23} = 0 \\ r_{31} = \frac{a_{r1}a_{i1} - a_{i0}}{a_{r1}} = \frac{xy - n}{x} & r_{32} = \frac{-a_{r0}a_{r1} + 0}{a_{r1}} = -m & \\ r_{41} = \frac{r_{31}r_{22} - r_{21}r_{32}}{r_{31}} = \frac{\frac{xy - n}{x}n - x(-m)}{\frac{xy - n}{x}} & & \end{array} \quad (\text{ค.8})$$

แทนสมการที่ (ค.8) ลงในสมการที่ (ค.6) และ (ค.7) เราจะได้ว่า

$$D_1 = r_{21} = x > 0 \quad (\text{ค.9})$$



$$\begin{aligned}
 D_2 &= r_{21} \cdot r_{31} \cdot r_{41} \\
 &= x \cdot \frac{xy-n}{x} \cdot \frac{\frac{xy-n}{x} n - x(-m)}{\frac{xy-n}{x}} \\
 &= mx + ny - \frac{n^2}{x} > 0
 \end{aligned} \tag{ค.10}$$

จากสมการที่ (ค.9) และ (ค.10) เราสามารถสรุปได้ว่าเงื่อนไขที่จำเป็นและเพียงพอสำหรับตัวของตัวสังเกตที่มีเสถียรภาพคือ

$$x > 0 \tag{ค.11}$$

$$mx + ny - \frac{n^2}{x} > 0 \tag{ค.12}$$

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายสาคร โปธิงาม เกิดเมื่อวันที่ 18 ตุลาคม พ.ศ. 2519 ที่อำเภอเมือง จังหวัดพะเยา สำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า (เกียรตินิยมอันดับหนึ่ง) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ปีการศึกษา 2544 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า (อิเล็กทรอนิกส์กำลัง) ณ ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2544

### บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

สาคร โปธิงาม สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์ “ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็ก ถาวรไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งแบบใหม่ที่ใช้แบบจำลองเชิงเส้น” การประชุมวิชาการทาง วิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 25, 2545 หน้า 142-146.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย