

การปรับปรุงสมรรถนะของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำไร้เซนเซอร์วัดความเร็ว
ในย่านความเร็วต่ำ



นายไพศาล สุควิไลย์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-0421-4

ลิขสิทธิ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**PERFORMANCE IMPROVEMENT OF A SPEED-SENSORLESS
INDUCTION MOTOR DRIVE IN THE LOW SPEED REGION**

Mr. Phaisarn Sudwilai

**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 2001**

ISBN 974-03-0421-4

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การปรับปรุงสมรรถนะของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำไว้
เซนเซอร์ วัดความเร็วในย่านความเร็วต่ำ

โดย นายไพศาล สุกวิสัย

สาขา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ ดร.สมบุญ แสงวงศ์วานิชย์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ยุทธนา กุลวิทิต)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร.สมบุญ แสงวงศ์วานิชย์)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.มานพ วงศ์สายสุวรรณ)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ไพศาล สุควิถี : การปรับปรุงสมรรถนะของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำไร้เซนเซอร์วัดความเร็ว
ในย่านความเร็วต่ำ (PERFORMANCE IMPROVEMENT OF A SPEED-SENSORLESS
INDUCTION MOTOR DRIVE IN THE LOW SPEED REGION) อ. ที่ปรึกษา : อ. ดร. สมบูรณ์ แสง
วงค์วานิชย์ , 99 หน้า. ISBN 974-03-0421-4

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อนำเสนอวิธีการปรับปรุงสมรรถนะของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบ
ไร้เซนเซอร์วัดความเร็วสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำในย่านความเร็วต่ำ โดยการเพิ่มวงรอบควบคุมกระแสเข้าไปใน
ระบบเพื่อลดทอนความผิดพลาดและความเพี้ยนของกระแสสแตเตอร์ที่เกิดจากการประวิงเวลาสวิตช์และความไม่
เป็นอุดมคติของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง สำหรับปัญหาเกี่ยวกับการที่ระบบประมาณค่าความเร็วมักจะขาด
เสถียรภาพในโหมดการทำงานแบบคืนพลังงานนั้น ผู้วิจัยได้นำเสนอวิธีการใช้อัตราขยายป้อนกลับของตัวสังเกต
ในการปรับปรุงให้ระบบประมาณค่าความเร็วมีเสถียรภาพในทุกๆย่านการทำงานของมอเตอร์รวมทั้งในย่านคืน
พลังงานด้วย นอกจากนี้แล้วระบบที่พัฒนาขึ้นนี้ยังสามารถแก้ไขปัญหาการออกตัวหรือออกตัวช้าของมอเตอร์
เนื่องจากแหล่งจ่ายไฟขาดตอนเป็นระยะเวลาสั้นๆ โดยจะช่วยให้มอเตอร์ออกตัวได้อย่างรวดเร็วและปราศจาก
กระแสเกิน ผลการทดสอบกับระบบจริงยืนยันถึงประสิทธิผลของระบบที่ได้พัฒนาขึ้น

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา.....2544.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4170452721: MAJOR POWER ELECTRONICS

KEYWORD: SENSORLESS / CURRENT CONTROL / STABILITY / LOW SPEED / FLYING START

PHAISARN SUDWILAI : PERFORMANCE IMPROVEMENT OF A SPEED-SENSORLESS
INDUCTION MOTOR DRIVE IN THE LOW SPEED REGION THESIS ADVISOR : DR.
SOMBOON SANGWONGWANICH 99 pp. ISBN 974-03-0421-4

The aim of this thesis is to introduce a current control loop into the decoupling control based speed-sensorless induction motor drive so as to improve its performance in the low speed region. The current controller effectively attenuates the waveform distortion and tracking error of the stator current which are caused by the dead-time effect, non-ideal switching devices, etc. Regarding the instability problem in the low speed regenerative region, the author has proposed a new feedback gain for the adaptive observer to restore the stability for the whole operating region including the regenerative mode. The improved sensorless system also alleviates the interruption problem associated with the starting and restarting from an unknown initial motor speed owing to its fast speed tracking and current control. The experimental results verify the effectiveness of the developed sensorless drive.



Department ELECTRICAL ENGINEERING Student's signature

Field of study ELECTRICAL ENGINEERING Advisor's signature

Academic year 2001 Co-advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ ด้วยความช่วยเหลือและเอาใจใส่อย่างดียิ่งของ อาจารย์ ดร. สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ที่ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือด้านต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัยตลอดมา พี่สุรพงษ์ สุวรรณกวิน ที่ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือด้านต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัยอย่างดียิ่ง ตลอดจนภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้การสนับสนุนในการวิจัยและโอกาสในการศึกษา รุ่นที่รุ่นน้องรวมถึงเพื่อน ๆ ในห้องปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำ และกำลังใจที่ดีในการทำวิทยานิพนธ์ รวมทั้งท่านอาจารย์ทั้งหลายที่ให้ความรู้ตั้งแต่อดีตจนกระทั่งปัจจุบัน ตลอดจนเงินทุนวิจัยจากห้องปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์กำลังและอุปกรณ์ในการทำวิทยานิพนธ์จากบริษัท A.P.Y. ENGINEERING CO.,LTD. ขอกราบขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และญาติพี่น้องของข้าพเจ้า ผู้ซึ่งให้โอกาสทางการศึกษาและเป็นกำลังใจด้วยดีเสมอมา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญเรื่อง

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญเรื่อง	ช
สารบัญตาราง	ซ
สารบัญภาพ	ฅ
บทที่	
1 บทนำ	1
2 ตัวสังเกตเต็มอันดับและการประมาณค่าความเร็ว	3
3 การควบคุมแบบแยกอิสระที่มีวงรอบควบคุมกระแส	13
4 ผลการทดสอบการทำงานของระบบ	25
5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	77
รายการอ้างอิง	79
ภาคผนวก	81
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	85

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 พิกัดและค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	26
4.2 อัตราขยายที่ได้ทำการออกแบบ	26



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างของตัวสังเกตเต็มอันดับแบบปรับตัว	5
2.2 บล็อกไดอะแกรมของระบบประมาณค่าความเร็ว.....	5
2.3 ระบบประมาณค่าความเร็วบนแกนโรเตอร์ฟลักซ์.....	7
2.4 วงรอบปิดของระบบประมาณค่าความเร็วแบบสัญญาณเข้าออกเดียว (SISO) บนแกนโรเตอร์ฟลักซ์	7
2.5 การจำลองการทำงานเมื่อมีการแปรค่าโหลดอย่างช้า ๆ จาก 10 Nm ไปยัง -10 Nm กรณีที่ไม่มีการป้อนกลับ ($H'_1, H'_2 = 0$).....	10
2.6 ลักษณะสมบัติของความเร็วและแรงบิดที่ค่าความเร็ว 50, 75, 100, 125, 150 และ 175 rpm ในกรณีที่ไม่ได้มีการป้อนกลับ ($H'_1, H'_2 = 0$)	10
2.7 การจำลองการทำงานเมื่อมีการแปรค่าโหลดอย่างช้า ๆ จาก 10 Nm ไปยัง -10 Nm กรณีที่ไม่มีการป้อนกลับ (H'_1, H'_2)	12
2.8 ลักษณะสมบัติของความเร็วและแรงบิดที่ค่าความเร็ว 50, 75, 100, 125, 150 และ 175 rpm ในกรณีที่มีการป้อนกลับ ($k=7$).....	12
3.1 โครงสร้างของระบบควบคุมแบบแยกอิสระ	16
3.2 โครงสร้างของระบบควบคุมแบบแยกอิสระที่มีวงรอบการควบคุมกระแส.....	17
3.3 แรงดันที่หายไปเนื่องจากการประวิงเวลาและแรงดันตกคร่อมสวิตช์กำลัง.....	17
3.4 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมกระแส	18
3.5 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของค่าผิดพลาดของกระแสต่อผลของการประวิงเวลา	20
3.6 ผลการจำลองการทำงานของระบบเมื่อไม่มีการควบคุมกระแส ($K_p=0, K_i=0$) ที่ความเร็ว 50 rpm สภาวะไร้โหลด (no-load) โดยคำนึงถึงผลของการประวิงเวลา.....	22
3.7 ผลการจำลองการทำงานของระบบเมื่อมีการควบคุมกระแส ($K_p=0, K_i=0$) ที่ความเร็ว 50 rpm สภาวะไร้โหลด (no-load) โดยคำนึงถึงผลของการประวิงเวลา.....	22
3.8 ผลการจำลองการทำงานของระบบเมื่อไม่มีการควบคุมกระแส ($K_p=0, K_i=0$) ความเร็ว 50 rpm และมีโหลดแบบขั้น 8 Nm โดยคำนึงถึงผลของการประวิงเวลา.....	23
3.9 ผลการจำลองการทำงานของระบบเมื่อมีการควบคุมกระแส ($K_p=5, K_i=400$) ความเร็ว 50 rpm และมีโหลดแบบขั้น 8 Nm โดยคำนึงถึงผลของการประวิงเวลา.....	23
3.10 ผลการจำลองการออกตัวของระบบเมื่อมอเตอร์กำลังหมุนที่ความเร็ว 1200 rpm โดยมีความเร็วคำสั่งที่ 1500 rpm และระบบไม่มีวงรอบควบคุมกระแส ($K_p=0, K_i=0$)	24

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.11 ผลการจำลองการออกตัวของระบบเมื่อมอเตอร์กำลังหมุนที่ความเร็ว 1200 rpm โดยมีความเร็วคำสั่งที่ 1500 rpm และระบบมีวงรอบควบคุมกระแส($K_p=5, K_i=400$).....	24
4.1 โครงสร้างของระบบควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์ไร้เซ็นเซอร์วัดความเร็ว....	27
4.2 ผลการทำงานในสภาวะอยู่ตัวเมื่อความเร็วคำสั่งมอเตอร์ เท่ากับ 1500 rpm ระบบไม่มี วงรอบควบคุมกระแส ($K_p, K_i=0$) และไม่มีอัตราขยายป้อนกลับ ($H'_1, H'_2 = 0$)	30
4.3 ผลการทำงานในสภาวะอยู่ตัวเมื่อความเร็วคำสั่งมอเตอร์ เท่ากับ 300 rpm ระบบไม่มี วงรอบควบคุมกระแส ($K_p, K_i=0$) ไม่มีอัตราขยายป้อนกลับ ($H'_1, H'_2 = 0$)	31
4.4 ผลการทำงานในสภาวะอยู่ตัวเมื่อความเร็วคำสั่งมอเตอร์ เท่ากับ 50 rpm ระบบไม่มี วงรอบควบคุมกระแส ($K_p, K_i=0$) ไม่มีอัตราขยายป้อนกลับ ($H'_1, H'_2 = 0$)	32
4.5 ผลการทำงานขณะกลับทิศความเร็วมอเตอร์จาก -1500 ไป 1500 rpm เมื่อระบบไม่มี วงรอบควบคุมกระแส ($K_p=0, K_i=0$) และไม่มีอัตราขยายป้อนกลับ ($H'_1, H'_2 = 0$) ...	33
4.6 ผลการทำงานขณะกลับทิศความเร็วมอเตอร์จาก 1500 ไป -1500 rpm เมื่อระบบไม่มี วงรอบควบคุมกระแส ($K_p=0, K_i=0$) และไม่มีอัตราขยายป้อนกลับ ($H'_1, H'_2 = 0$)...	33
4.7 ผลการทำงานในสภาวะอยู่ตัวเมื่อความเร็วคำสั่งมอเตอร์ เท่ากับ 1500 rpm ระบบมี วงรอบควบคุมกระแส ($K_p=5, K_i=400$) แต่ไม่มีอัตราขยายป้อนกลับ ($H'_1, H'_2 = 0$) ...	34
4.8 ผลการทำงานในสภาวะอยู่ตัวเมื่อความเร็วคำสั่งมอเตอร์ เท่ากับ 300 rpm ระบบมี วงรอบควบคุมกระแส ($K_p=5, K_i=400$) แต่ไม่มีอัตราขยายป้อนกลับ ($H'_1, H'_2 = 0$) ..	35
4.9 ผลการทำงานในสภาวะอยู่ตัวเมื่อความเร็วคำสั่งมอเตอร์ เท่ากับ 50 rpm ระบบมี วงรอบควบคุมกระแส ($K_p=5, K_i=400$) แต่ไม่มีอัตราขยายป้อนกลับ ($H'_1, H'_2 = 0$) ..	36
4.10 ผลการทำงานขณะกลับทิศความเร็วมอเตอร์จาก -1500 ไป 1500 rpm เมื่อระบบมี วงรอบควบคุมกระแส ($K_p=5, K_i=400$) และไม่มีอัตราขยายป้อนกลับ ($H'_1, H'_2 = 0$) ..	37
4.11 ผลการทำงานขณะกลับทิศความเร็วมอเตอร์จาก 1500 ไป -1500 rpm เมื่อระบบมี วงรอบควบคุมกระแส ($K_p=5, K_i=400$) และไม่มีอัตราขยายป้อนกลับ ($H'_1, H'_2 = 0$) ..	37
4.12 ผลการทำงานในสภาวะอยู่ตัวเมื่อความเร็วคำสั่งมอเตอร์ เท่ากับ 1500 rpm ระบบมี วงรอบควบคุมกระแส ($K_p=5, K_i=400$) และมีอัตราขยายป้อนกลับ (H'_1, H'_2) โดย $k=0.5$..	39
4.13 ผลการทำงานในสภาวะอยู่ตัวเมื่อความเร็วคำสั่งมอเตอร์ เท่ากับ 300 rpm ระบบมี วงรอบควบคุมกระแส ($K_p=5, K_i=400$) และมีอัตราขยายป้อนกลับ (H'_1, H'_2) โดยค่า $k=5$..	40

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.14 ผลการทำงานในสภาวะอยู่ตัวเมื่อความเร็วคำสั่งมอเตอร์ เท่ากับ 50 rpm ระบบมีวงรอบควบคุมกระแส ($K_p=5, K_i=400$) และมีอัตราขยายป้อนกลับ (H'_1, H'_2) โดยค่า $k=20$	41
4.15 ผลการทำงานในสภาวะอยู่ตัวเมื่อความเร็วคำสั่งมอเตอร์ เท่ากับ 25 rpm ระบบมีวงรอบควบคุมกระแส ($K_p=5, K_i=400$) และมีอัตราขยายป้อนกลับ (H'_1, H'_2) โดยค่า $k=20$	42
4.16 ผลการทำงานขณะกลับทิศความเร็วมอเตอร์จาก -1500 ไป 1500 rpm เมื่อระบบมีวงรอบควบคุมกระแส ($K_p=5, K_i=400$) และอัตราขยายป้อนกลับ H'_1, H'_2 โดยค่า $k=0.5$	43
4.17 ผลการทำงานขณะกลับทิศความเร็วมอเตอร์จาก 1500 ไป -1500 rpm เมื่อระบบมีวงรอบควบคุมกระแส ($K_p=5, K_i=400$) และอัตราขยายป้อนกลับ H'_1, H'_2 โดยค่า $k=0.5$	43
4.18 ผลตอบสนองของแรงบิดขณะใส่โหลดพิกัด(10Nm)เมื่อความเร็วของมอเตอร์ เท่ากับ 1450 rpm ระบบมีวงรอบควบคุมกระแส ($K_p=5, K_i=400$) แต่ไม่มีอัตราขยายป้อนกลับ ($H'_1, H'_2=0$).....	45
4.19 ผลตอบสนองของแรงบิดขณะใส่โหลดพิกัด(10Nm)เมื่อความเร็วของมอเตอร์ เท่ากับ 500 rpm ระบบมีวงรอบควบคุมกระแส ($K_p=5, K_i=400$) แต่ไม่มีอัตราขยายป้อนกลับ ($H'_1, H'_2=0$).....	46
4.20 ผลตอบสนองของแรงบิดขณะใส่โหลดพิกัด(10Nm)เมื่อความเร็วของมอเตอร์ เท่ากับ 100 rpm ระบบมีวงรอบควบคุมกระแส ($K_p=5, K_i=400$) แต่ไม่มีอัตราขยายป้อนกลับ ($H'_1, H'_2=0$).....	47
4.21 ผลตอบสนองของแรงบิดขณะใส่โหลดพิกัด(10Nm)เมื่อความเร็วของมอเตอร์ เท่ากับ 50 rpm ระบบมีวงรอบควบคุมกระแส ($K_p=5, K_i=400$) แต่ไม่มีอัตราขยายป้อนกลับ ($H'_1, H'_2=0$).....	48
4.22 ผลตอบสนองของแรงบิดขณะใส่โหลดพิกัด(10Nm)เมื่อความเร็วของมอเตอร์ เท่ากับ 25 rpm ระบบมีวงรอบควบคุมกระแส ($K_p=5, K_i=400$) แต่ไม่มีอัตราขยายป้อนกลับ ($H'_1, H'_2=0$).....	49

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.23 ผลตอบสนองของแรงบิดขณะใส่โหลดพิกัด(10Nm)เมื่อความเร็วของมอเตอร์เท่ากับ1450 rpm ระบบมีวงรอบควบคุมกระแส($K_p=5, K_i=400$) และมีอัตราขยายป้อนกลับ (H_1', H_2') ค่า $k=0.5$	50
4.24 ผลตอบสนองของแรงบิดขณะใส่โหลดพิกัด(10Nm)ความเร็วของมอเตอร์เท่ากับ 500 rpm ระบบมีวงรอบควบคุมกระแส($K_p=5, K_i=400$) และมีอัตราขยายป้อนกลับ(H_1', H_2') ค่า $k=3$	51
4.25 ผลตอบสนองของแรงบิดขณะใส่โหลดพิกัด(10Nm)ความเร็วของมอเตอร์เท่ากับ 100 rpm ระบบมีวงรอบควบคุมกระแส($K_p=5, K_i=400$) และมีอัตราขยายป้อนกลับ (H_1', H_2') ค่า $k=10$	52
4.26 ผลตอบสนองของแรงบิดขณะใส่โหลดพิกัด(10Nm)ความเร็วของมอเตอร์เท่ากับ 50 rpm ระบบมีวงรอบควบคุมกระแส ($K_p=5, K_i=400$) และมีอัตราขยายป้อนกลับ (H_1', H_2') ค่า $k=20$	53
4.27 ผลตอบสนองของแรงบิดขณะใส่โหลดพิกัด(10Nm)ความเร็วมอเตอร์เท่ากับ 25 rpm วงรอบควบคุมกระแส ($K_p=5, K_i= 400$) และอัตราขยายป้อนกลับ H_1', H_2' โดยค่า $k=20$	54
4.28 ผลตอบสนองของแรงบิดขณะใส่โหลดแบบคีนพลังงาน(-8.5 Nm)ความเร็วของมอเตอร์เท่ากับ 100 rpmระบบมีวงรอบควบคุมกระแส ($K_p=5, K_i= 400$) แต่ไม่มีอัตราขยายป้อนกลับ ($H_1', H_2'=0$).....	57
4.29 ผลตอบสนองของแรงบิดขณะใส่โหลดแบบคีนพลังงาน(-7.0 Nm) ความเร็วของมอเตอร์เท่ากับ 75 rpmระบบมีวงรอบควบคุมกระแส ($K_p=5, K_i= 400$) แต่ไม่มีอัตราขยายป้อนกลับ ($H_1', H_2'=0$).....	58
4.30 ผลตอบสนองของแรงบิดขณะใส่โหลดแบบคีนพลังงาน(-5.1 Nm) ความเร็วของมอเตอร์เท่ากับ 50 rpmระบบมีวงรอบควบคุมกระแส ($K_p=5, K_i= 400$) แต่ไม่มีอัตราขยายป้อนกลับ ($H_1', H_2'=0$).....	59
4.31 ผลตอบสนองของแรงบิดขณะใส่โหลดแบบคีนพลังงาน(-3.0 Nm) ความเร็วของมอเตอร์เท่ากับ 25 rpmระบบมีวงรอบควบคุมกระแส ($K_p=5, K_i= 400$) แต่ไม่มีอัตราขยายป้อนกลับ ($H_1', H_2'=0$).....	60

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.32 ผลตอบสนองของแรงบิดขณะใส่โหลดแบบคีนพลังงาน(-8.3Nm) ความเร็วมอเตอร์เท่ากับ100 rpm โดยที่มีวงรอบควบคุมกระแส ($K_p=5, K_i=400$) และมีอัตราขยายป้อนกลับ (H'_1, H'_2) ค่า $k=10$	61
4.33 ผลตอบสนองของแรงบิดขณะใส่โหลดแบบคีนพลังงาน(-6.2Nm) ความเร็วมอเตอร์เท่ากับ75 rpm โดยที่มีวงรอบควบคุมกระแส ($K_p=5, K_i=400$) และมีอัตราขยายป้อนกลับ (H'_1, H'_2) ค่า $k=15$	62
4.34 ผลตอบสนองของแรงบิดขณะใส่โหลดแบบคีนพลังงาน(-4.2Nm) ความเร็วมอเตอร์เท่ากับ50 rpm โดยที่มีวงรอบควบคุมกระแส ($K_p=5, K_i=400$) และมีอัตราขยายป้อนกลับ (H'_1, H'_2) ค่า $k=20$	63
4.35 ผลตอบสนองของแรงบิดขณะใส่โหลดแบบคีนพลังงาน(-2.0Nm) ความเร็วมอเตอร์เท่ากับ 25 rpm โดยที่มีวงรอบควบคุมกระแส ($K_p=5, K_i=400$) และมีอัตราขยายป้อนกลับ(H'_1, H'_2) ค่า $k=20$	64
4.36 ผลตอบสนองขณะที่มอเตอร์มีโหลดแบบ แรมป์ขนาด 10 Nm ถึง -10 Nm ที่ความเร็วมอเตอร์ 100 rpm วงรอบควบคุมกระแส($K_p=5, K_i=400$) และอัตราขยายป้อนกลับ ($H'_1, H'_2 = 0$).....	67
4.37 ผลตอบสนองขณะที่มอเตอร์มีโหลดแบบ แรมป์ขนาด 10 Nm ถึง -10 Nm ที่ความเร็วมอเตอร์ 50 rpm วงรอบควบคุมกระแส ($K_p=5, K_i=400$) และอัตราขยายป้อนกลับ ($H'_1, H'_2 = 0$).....	68
4.38 ผลตอบสนองขณะที่มอเตอร์มีโหลดแบบ แรมป์ขนาด 10 Nm ถึง -10 Nm ที่ความเร็วมอเตอร์ 100 rpm วงรอบควบคุมกระแส $K_p=5, K_i=400$ และอัตราขยายป้อนกลับ(H'_1, H'_2) โดยค่า $k=10$	69
4.39 ผลตอบสนองขณะที่มอเตอร์มีโหลดแบบ แรมป์ขนาด 10 Nm ถึง -10 Nm ที่ความเร็วมอเตอร์ 50 rpm วงรอบควบคุมกระแส ($K_p=5, K_i=400$) และอัตราขยายป้อนกลับ (H'_1, H'_2) โดยค่า $k=20$	70
4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์ เมื่อระบบไม่มีอัตราขยายป้อนกลับ H'_1, H'_2 และวงรอบควบคุมกระแส $K_p=5, K_i=400$ ในช่วงความเร็ว 15 ถึง 1500 rpm.....	71

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.41 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์ เมื่อระบบไม่มี อัตราขยายป้อนกลับ H_1', H_2' และวงรอบควบคุมกระแส $K_p=5, K_I=400$ ในช่วงความเร็ว 15 ถึง 300 rpm.....	71
4.42 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์ เมื่อระบบมี อัตราขยายป้อนกลับ H_1', H_2' และวงรอบควบคุมกระแส $K_p=5, K_I=400$ ในช่วงความเร็ว 15 ถึง 1500 rpm.....	72
4.43 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์ เมื่อระบบมี อัตราขยายป้อนกลับ H_1', H_2' และวงรอบควบคุมกระแส $K_p=5, K_I=400$ ในช่วงความเร็ว 15 ถึง 300 rpm.....	72
4.44 ผลการทำงานขณะกลับทิศความเร็วมอเตอร์จาก 100 ไป -100 rpm ในขณะที่มอเตอร์ มีโหลด ที่พิกัด 10 Nm เมื่อระบบมี วงรอบควบคุมกระแส ($K_p = 5, K_I = 400$) และอัตราขยายป้อนกลับ (H_1', H_2') โดยค่า $k=10$	73
4.45 ผลการทำงานของระบบเมื่อระบบมีการออกตัวที่ความเร็วคำสั่ง 1500 rpm และมอเตอร์มีความเร็วขณะออกตัว 1000 rpm ระบบมีวงรอบควบคุมกระแส ($K_p = 5, K_I = 400$) และอัตราขยายป้อนกลับ (H_1', H_2') โดยค่า $k=0.5$	75
4.46 ผลการทำงานของระบบเมื่อระบบมีการออกตัวที่ความเร็วคำสั่ง 1500 rpm และมอเตอร์ออกตัวจากความเร็วหยุดนิ่ง (0 rpm) ระบบมีวงรอบควบคุมกระแส ($K_p = 5, K_I = 400$) และอัตราขยายป้อนกลับ (H_1', H_2') โดยค่า $k=0.5$...	75
4.47 ผลการทำงานของระบบเมื่อระบบมีการออกตัวที่ความเร็วคำสั่ง 1500 rpm และขณะออกตัวมอเตอร์มีความเร็วทิศตรงข้ามกับความเร็วคำสั่ง (-500 rpm) ระบบมีวงรอบควบคุมกระแส ($K_p = 5, K_I = 400$) และอัตราขยายป้อนกลับ (H_1', H_2') โดยค่า $k=0.5$	76
ก.1 โครงสร้างฮาร์ดแวร์ของระบบที่ใช้ในการทดสอบ.....	81
ก.2 โค้ดอะแอสแมบลีของซอฟต์แวร์โมดูล.....	84

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเบื้องต้น

ในปัจจุบันอินเวอร์เตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดความเร็วได้มีบทบาทอย่างมากต่อระบบขับเคลื่อนในอุตสาหกรรม ทั้งนี้เนื่องมาจากลักษณะสมบัติในการควบคุมแรงบิดที่ใกล้เคียงกับการควบคุมแบบเวกเตอร์ที่ใช้เซนเซอร์วัดความเร็ว ประกอบกับการใช้งานที่ง่ายเช่นเดียวกับการควบคุมแบบ V/F ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำไร้เซนเซอร์วัดความเร็วที่มีการศึกษาและวิจัยโดยส่วนใหญ่นั้น จะมีข้อจำกัดของสมรรถนะที่ความเร็วรอบของมอเตอร์ต่ำๆซึ่งเราสามารถแยกสาเหตุของข้อจำกัดดังกล่าวของระบบได้เป็นประเด็นใหญ่ๆ คือ ความไม่มีเสถียรภาพของการประมาณค่าความเร็วในทางทฤษฎีแม้ในสถานะอุดมคติ และผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ ความไม่เป็นอุดมคติของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง โดยระบบมักจะขาดเสถียรภาพในขณะทำงานแบบคืนพลังงาน (Regenerative mode) และจะมีความไวต่อค่าผิดพลาดของพารามิเตอร์หรือแรงดันที่ใช้ค่อนข้างมาก ทำให้ค่าผิดพลาดของความเร็วประมาณมีค่าสูงในช่วงความเร็วต่ำ นอกจากนั้นแล้วก็ยังมีปัญหาในเรื่องการออกตัว(starting)และการออกตัวซ้ำ(restarting)ของมอเตอร์ในกรณีที่แหล่งจ่ายไฟขาดตอนในระยะเวลาสั้นๆและมอเตอร์ยังคงหมุนอยู่ด้วยความเฉื่อย สำหรับปัญหาการออกตัวในขณะมอเตอร์หมุนนั้นเกิดจากค่าความเร็วประมาณในระบบเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดความเร็วไม่ตรงกับค่าความเร็วจริง ทำให้ค่าความถี่สลิปและกระแสสูงเกินไป และเกิดการตัดตอนของวงจรส่วนการป้องกันในที่สุด ทำให้ระบบหยุดทำงานได้ ข้อจำกัดทางสมรรถนะของระบบเหล่านี้โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ความเร็วรอบต่ำๆ ยังคงเป็นประเด็นที่ได้รับการศึกษาและวิจัยกันอย่างต่อเนื่อง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะปรับปรุงเสถียรภาพของระบบประมาณค่าความเร็วในระบบเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดความเร็วที่อาศัยการควบคุมแบบแยกอิสระ(Decoupling control) (สุรพงศ์ สุวรรณกวิน, 2539) โดยอาศัยการกำหนดค่าอัตราขยายป้อนกลับของตัวสังเกตแบบปรับตัวที่เหมาะสม และจะเพิ่มวงรอบควบคุมกระแส(Current control)เข้าไปในโครงสร้างของตัวควบคุมแบบแยกอิสระเดิม(โสภณ สมัยรัฐ, 2538) เพื่อลดทอนผลกระทบจากความผิดพลาดของพารามิเตอร์ต่างๆและความไม่เป็นอุดมคติของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง โดยวงรอบควบคุมกระแสนี้ยังทำหน้าที่ปรับปรุงสมรรถนะของระบบในช่วงการออกตัวของระบบให้ดียิ่งขึ้นด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อปรับปรุงเสถียรภาพของการประมาณค่าความเร็ว และสมรรถนะของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดความเร็วที่ความเร็วรอบต่ำๆ ให้มีความทนต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ และไม่เป็นจุดมคคิของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง รวมถึงแก้ไขปัญหาในเรื่องการออกตัวและการออกตัวซ้ำของระบบในขณะที่เริ่มเดินเครื่อง

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

หาแนวทางในการออกแบบอัตราขยายป้อนกลับของตัวสังเกตเพื่อปรับปรุงเสถียรภาพของระบบประมาณค่าความเร็วและหาวิธีการออกแบบตัวควบคุมกระแสเพื่อลดทอนผลกระทบอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์และความไม่เป็นจุดมคคิของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง รวมถึงควบคุมกระแสในขณะออกตัวของระบบขับเคลื่อนให้ปราศจากการตัดตอนของวงจรถ่วงกัน

1.4 ขั้นตอนในการดำเนินงาน

1. ศึกษาทฤษฎีระบบควบคุมเวกเตอร์แบบการควบคุมแยกอิสระไร้เซนเซอร์วัดความเร็ว
2. ศึกษาทฤษฎีระบบควบคุมเวกเตอร์แบบควบคุมกระแส ไร้เซนเซอร์วัดความเร็ว
3. ศึกษาและวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นกับมอเตอร์ที่ความเร็วรอบมอเตอร์ต่ำ ๆ
4. จำลองการทำงาน ด้วยระบบคอมพิวเตอร์ เพื่อทดสอบแนวความคิด
5. ปรับปรุงแก้ไขระบบในส่วนซอฟต์แวร์ที่ได้พัฒนาขึ้น
6. เก็บข้อมูล ประเมินผล และสรุปผล
7. เขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ปรับปรุงความมีเสถียรภาพของระบบประมาณค่าความเร็วในทุกย่านการทำงาน
2. ลดทอนผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของมอเตอร์ และความไม่เป็นจุดมคคิของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ความเร็วรอบต่ำ ๆ
3. ปรับปรุงและแก้ไขปัญหาการออกตัวของระบบขับเคลื่อนในขณะที่มอเตอร์ยังคงหมุนด้วยความเฉื่อย
4. สามารถนำทฤษฎีที่ได้พัฒนาขึ้นไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมได้จริง

บทที่ 2

ตัวสังเกตเต็มอันดับและการประมาณค่าความเร็ว

ในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบไร้เซ็นเซอร์วัดความเร็ว การประมาณค่าความเร็วโรเตอร์จากค่าผิดพลาดของกระแสด้วยตัวสังเกตเต็มอันดับแบบปรับตัว เป็นวิธีหนึ่งที่ได้รับค่านิยมกันอย่างกว้างขวางและค่อนข้างได้ผลดีในทางปฏิบัติ อย่างไรก็ตามระบบประมาณค่าความเร็วมักจะขาดเสถียรภาพในขณะที่มอเตอร์ทำงานในย่านคืนพลังงาน ดังนั้นในบทนี้เราจะทำการวิเคราะห์ถึงสาเหตุของการขาดเสถียรภาพของระบบ ตลอดจนหาวิธีการออกแบบอัตราขยายป้อนกลับของตัวสังเกตแบบใหม่ที่ทำให้ระบบประมาณค่าความเร็วมีเสถียรภาพในทุกๆย่านการทำงานรวมถึงย่านการทำงานในโหมดคืนพลังงานด้วย

ในการวิเคราะห์เสถียรภาพและออกแบบอัตราขยายป้อนกลับเพื่อให้ระบบมีเสถียรภาพในทุกๆย่านการทำงานนั้น เราเน้นการวิเคราะห์เฉพาะในส่วนตัวสังเกตแบบเต็มอันดับแบบปรับตัวและระบบประมาณค่าความเร็วดังที่จะกล่าวถึงในลำดับต่อไป

2.1 ตัวสังเกตเต็มอันดับแบบปรับตัว

เราจะอธิบายถึงโครงสร้างของตัวสังเกตเต็มอันดับแบบปรับตัวที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ซึ่งเหมือนกันกับที่มีการประยุกต์ใช้ในงานวิจัยอื่นๆ (สุรพงษ์ สุวรรณกวิน, 2539) ซึ่งมีองค์ประกอบหลัก ๆ อยู่ 3 ส่วน อันได้แก่ แบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำ อัตราขยายป้อนกลับ และระบบประมาณค่าความเร็ว ในขั้นตอนแรกเราจะกล่าวถึงแบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำบนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ดังแสดงในสมการที่ (2.1) และ (2.2) ดังนี้

$$\frac{di_s^r}{dt} = A_{11} i_s^r + A_{12} i_o^r + B_1 v_s^r$$

(2.1)

$$\frac{di_o^r}{dt} = A_{21} i_s^r + A_{22} i_o^r$$

(2.2)

โดยที่

$$A_{11} = -(R_s + R_r M^2 / L_r^2) / \sigma L_s, \quad A_{12} = -A_{22} \cdot M^2 / \sigma L_s L_r, \quad A_{21} = R_r / L_r \cdot I$$

$$A_{22} = -(R_r / L_r) \cdot I + p\omega_m \cdot J, \quad B_I = 1 / \sigma L_s$$

$$\sigma = 1 - M^2 / L_s L_r, \quad I = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

(2.3)

\dot{v}_s^r : เวกเตอร์แรงดันสเตเตอร์

\dot{i}_s^r : เวกเตอร์กระแสสเตเตอร์

\dot{i}_o^r : เวกเตอร์กระแสกระตุ้นของโรเตอร์ฟลักซ์

R_s, R_r : ความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์

L_s, L_r : ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์

M : ค่าความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดลวดด้านสเตเตอร์และโรเตอร์

ω_m : ความเร็วโรเตอร์ p : จำนวนคู่ของขั้วแม่เหล็กของมอเตอร์

โดยอาศัยแบบจำลองข้างต้นเราสามารถสร้างตัวสังเกตเพิ่มอันดับและระบบประมาณค่าความเร็วได้ดังแสดงในสมการที่ (2.4), (2.5), และ (2.6) ตามลำดับ

$$\frac{d\dot{i}_s^r}{dt} = A_{11} \dot{i}_s^r + \hat{A}_{12} \dot{i}_o^r + B_I \dot{v}_s^r - H'_1 (\dot{i}_s^r - \dot{i}_s^r)$$

(2.4)

$$\frac{d\dot{i}_o^r}{dt} = A_{21} \dot{i}_s^r + \hat{A}_{22} \dot{i}_o^r - [H'_2 / M] (\dot{i}_s^r - \dot{i}_s^r)$$

(2.5)

$$\dot{\hat{\omega}}_m = (k_p + k_I \int dt) [w^T \bullet e]$$

(2.6)

โดยที่

$$\hat{A}_{12} = -\hat{A}_{22} \cdot M^2 / \sigma L_s L_r$$

$$\hat{A}_{22} = -(R_r / L_r) \cdot I + p\hat{\omega}_m \cdot J,$$

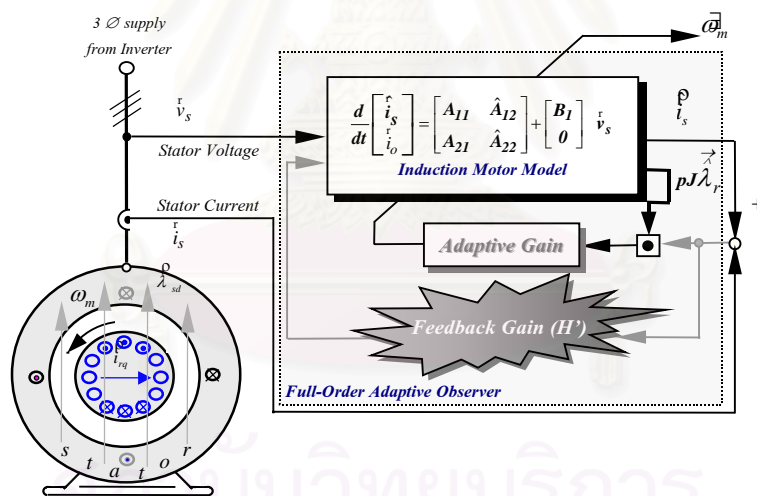
$$w = JpM \hat{i}_o, \hat{e} = \hat{i}_s - i_s,$$

$$H'_1 = \begin{bmatrix} h'_1 & -h'_2 \\ h'_2 & h'_1 \end{bmatrix}, H'_2 = \begin{bmatrix} h'_3 & -h'_4 \\ h'_4 & h'_3 \end{bmatrix}$$

(2.7)

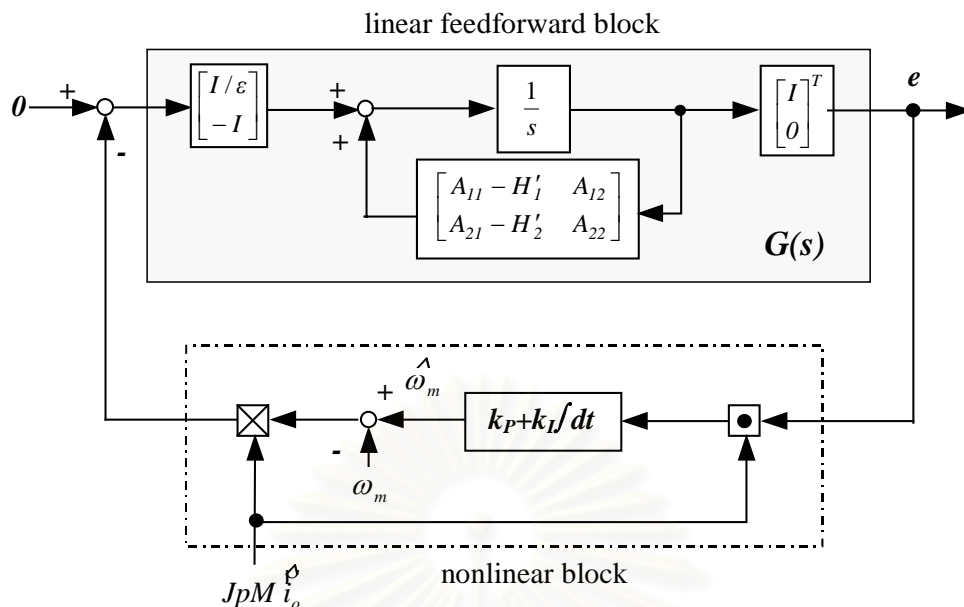
' \wedge ' แสดงถึงค่าประมาณ และ H'_1, H'_2 คืออัตรายายป้อนกลับของตัวสังเกต

บล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 2.1 แสดงถึงโครงสร้างของตัวสังเกตเต็มอันดับแบบปรับตัว สำหรับระบบขับเคลื่อนแบบไร้เซ็นเซอร์วัดความเร็วซึ่งมีองค์ประกอบหลักๆอยู่ด้วยกัน 3 ส่วน คือแบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำ อัตรายายป้อนกลับ และระบบประมาณค่าความเร็ว



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของตัวสังเกตเต็มอันดับแบบปรับตัว

จากสมการที่ (2.1)-(2.2) และ (2.4)-(2.6) เราสามารถแสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบประมาณค่าความเร็วได้ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งเป็นบล็อกไดอะแกรมพื้นฐานสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ



รูปที่ 2.2 บล็อกไดอะแกรมของระบบประมาณค่าความเร็ว

โดยที่

$$G(s) = -\frac{s}{\varepsilon} \left[s^2 I + s(xI + yJ) + mI + nJ \right]^{-1}$$

$$m = \left[\frac{R_r}{L_r} \left(h'_1 + \frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{h'_3}{\varepsilon} \right) + p\omega_m \left(h'_2 + \frac{h'_4}{\varepsilon} \right) \right]$$

$$n = \left[\frac{R_r}{L_r} \left(h'_2 + \frac{h'_4}{\varepsilon} \right) - p\omega_m \left(h'_1 + \frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{h'_3}{\varepsilon} \right) \right]$$

$$x = \left[h'_1 + \frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{R_r}{\sigma L_r} \right], \quad y = [h'_2 - p\omega_m], \quad \varepsilon = \frac{\sigma L_s L_r}{M}$$

(2.8)

2.2 เสถียรภาพของระบบประมาณค่าความเร็ว

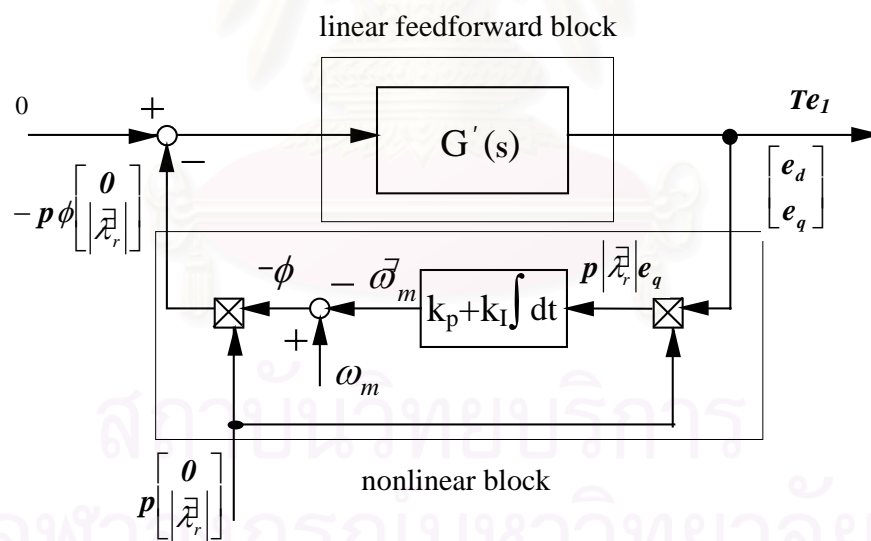
จากบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 2.2 จะเห็นได้ว่าวงรอบปิดของค่าผิดพลาดมีองค์ประกอบสองส่วนคือ ส่วนเชิงเส้นไปหน้า (linear feedforward block) และส่วนไม่เชิงเส้นป้อนกลับ (nonlinear feedback block) ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบประมาณค่าความเร็วนั้นเราจะทำการแปลงระบบวงรอบปิดของค่าผิดพลาดของระบบประมาณค่าความเร็วในรูปที่ 2.2 ซึ่งแสดง

อยู่บนแกนสเตเตอร์ (แกนนี้ $\alpha - \beta$) ไปแสดงบนแกนหมุนของโรเตอร์ฟลักซ์ ($d-q$) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 เมื่อเราแปลงระบบวงรอบปิดของค่าผิดพลาดในระบบประมาณค่าความเร็วไปบนแกนหมุนของโรเตอร์ฟลักซ์แล้วจะทำให้ระบบป้อนกลับของค่าผิดพลาดในการประมาณค่าความเร็วเกิดจากสัญญาณในแกน q เท่านั้น ดังนั้นฟังก์ชันโอนย้าย $G'(s)$ จะมีเฉพาะเทอม $G'_{22}(s)$ เท่านั้นที่เกี่ยวข้องในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบวงรอบปิด ดังนั้นเราสามารถสรุปและจัดระบบวงรอบปิดของค่าผิดพลาดได้ใหม่ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งง่ายต่อการวิเคราะห์เนื่องจากเป็นระบบแบบสัญญาณเข้า-ออกเดี่ยว (single-input-single-output; SISO) โดยมีสัญญาณขาเข้าเป็นความเร็วจริงและสัญญาณขาออกคือความเร็วประมาณ

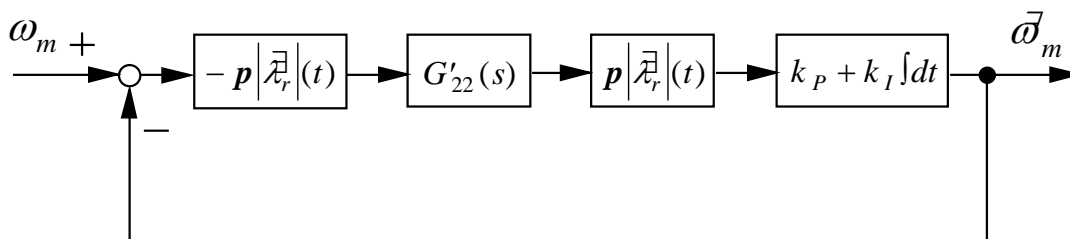
โดยที่ T คือ เมตริกซ์ที่ใช้ในการแปลงแกนจากแกนอ้างอิงสเตเตอร์ไปยังแกนอ้างอิงโรเตอร์ฟลักซ์

$G'(s)$ คือ ฟังก์ชันโอนย้ายเชิงเส้นป้อนไปหน้าบนแกนหมุนโรเตอร์ฟลักซ์

$$\begin{aligned} G'(s) &= TG(s)T^{-1} = G(s')|_{s'=sI+\omega_o J} \\ &= \begin{bmatrix} G'_{11}(s) & G'_{12}(s) \\ G'_{21}(s) & G'_{22}(s) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.9)$$



รูปที่ 2.3 ระบบประมาณค่าความเร็วบนแกนโรเตอร์ฟลักซ์



รูปที่ 2.4 วงรอบปิดของระบบประมาณค่าความเร็วแบบสัญญาณเข้าออกเดี่ยว (SISO) บนแกน
โรเตอร์ฟลักซ์

ในกรณีที่ความถี่ของโรเตอร์ฟลักซ์เปลี่ยนแปลงช้าและเราสามารถละเลยอัตราการเปลี่ยนแปลงนี้ได้ ($d\omega_o / dt \approx 0$) ในกรณีนี้ฟังก์ชันโอนย้าย $G'_{22}(s)$ จะแสดงได้ดังนี้คือ

$$G'_{22}(s) = \frac{s^3 + x s^2 + (\omega_o^2 + m) s + \omega_o^2 x + \omega_o n}{-\varepsilon [(s^2 + x s - \omega_o^2 - \omega_o y + m)^2 + ((2\omega_o + y)s + \omega_o x + n)^2]} \quad (2.10)$$

โดยที่ ω_o คือความถี่เชิงมุมของโรเตอร์ฟลักซ์

จากรูปที่ 2.4 ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบประมาณค่าความเร็ว เราจะพิจารณาคำแหน่งของศูนย์ของฟังก์ชันโอนย้าย $G'_{22}(s)$ (สำหรับตำแหน่งของขั้วของ $G'_{22}(s)$ เป็นตำแหน่งเดียวกันกับขั้วของตัวสังเกต ซึ่งเราต้องออกแบบให้มีเสถียรภาพ จึงมีตำแหน่งอยู่ทางด้านซ้ายของระนาบเชิงซ้อน S) ทั้งนี้ก็เนื่องจากว่าโดยปกติเรานิยมใช้อัตราขยายแบบปรับตัวที่มีค่าสูง เพื่อให้ได้ผลตอบสนองที่ดีของการประมาณค่าความเร็วมอเตอร์ ดังนั้นตำแหน่งของศูนย์ทั้งหมดของฟังก์ชันโอนย้าย $G'_{22}(s)$ จะต้องอยู่ทางด้านซ้ายของระนาบเชิงซ้อน S เพื่อไม่ให้ระบบขาดเสถียรภาพจากการที่ขั้ววิ่งเข้าหาศูนย์ โดยใช้เกณฑ์ของรูท-เฮอวิตซ์ (Routh-Hurwitz Criterion) เราได้เงื่อนไขที่จำเป็นและเพียงพอที่รากทั้งหมดของพหุนามตัวตั้ง (Numerator) ของ $G'_{22}(s)$ จะอยู่ทางด้านซ้ายของระนาบเชิงซ้อน S (stable zeros) ดังนี้

$$\omega_o \left(\omega_o + \frac{n}{x} \right) > 0 \quad (2.11)$$

$$x > 0$$

(2.12)

$$\omega_0 n < mx$$

(2.13)

โดยที่ และ x จะขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์และค่าอัตราขยายป้อนกลับดังที่ได้แสดงในสมการที่ (2.7) และ (2.8)

$$\text{เงื่อนไข } \omega_0(\omega_0 + \frac{n}{x}) > 0$$

ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบประมาณค่าความเร็วโรเตอร์ที่นำเสนอใน(สุรพงศ์ สุวรรณกวิน, 2539) ได้ข้อสรุปที่ว่าเงื่อนไข(2.10)เป็นเงื่อนไขเดียวที่ต้องพิจารณา ส่วนเงื่อนไข (2.12)และ(2.13) นั้นจะสอดคล้องตลอดเวลาอยู่แล้ว ดังนั้นเพื่อให้ระบบประมาณมีเสถียรภาพ ความถี่การทำงานของมอเตอร์ (ω) จะต้องสูงกว่าค่าความถี่วิกฤต (ω_c) ซึ่งถูกนิยามในเทอมของพารามิเตอร์ของมอเตอร์และอัตราขยายป้อนกลับ (H') ดังนี้

$$\omega > \omega_c \quad \text{โดย } \omega_c = -n/x \quad (\text{ความถี่วิกฤต})$$

$$= p\omega_m \frac{\frac{R_s}{\sigma L_s}}{\frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{R_r}{\sigma L_r}}$$

(2.14)

ระบบจะทำงานอยู่บนขอบเขตของเสถียรภาพเมื่อ $\omega = \omega_c$ และเราสามารถเขียนความสัมพันธ์เชิงเส้นของขอบเขตนี้ในเทอมของความเร็วและแรงบิดได้ดังสมการที่ (2.15)

$$T_m = -a \cdot \omega_m + b$$

(2.15)

โดยที่

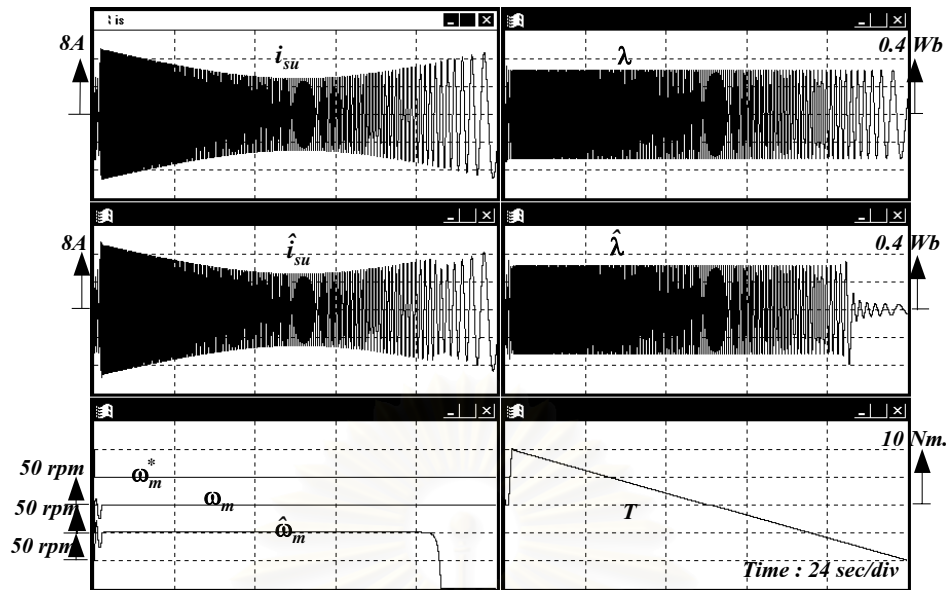
$$a = \frac{-\frac{h'_3}{\varepsilon} + \frac{R_r}{\sigma L_r}}{h'_1 + \frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{R_r}{\sigma L_r}} \cdot \frac{(pM i_o)^2}{R_r}$$

$$b = \frac{\frac{R_r}{L_r} \cdot (h'_2 + \frac{h'_4}{\varepsilon})}{h'_1 + \frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{R_r}{\sigma L_r}} \cdot \frac{(pM i_o)^2}{R_r}$$

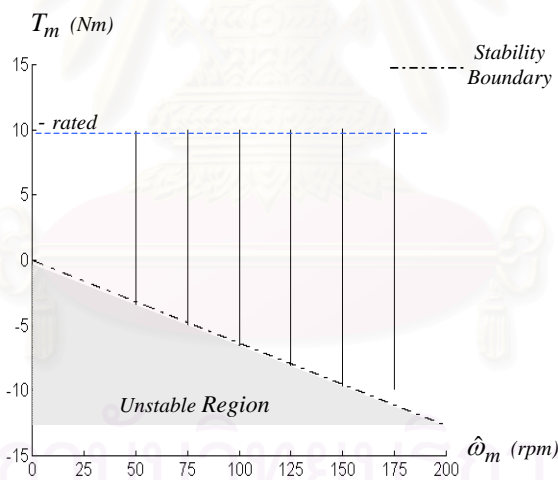
(2.16)

เพื่อทดสอบความถูกต้องของเงื่อนไขเสถียรภาพ (2.14), (2.15) เราจะควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำให้ทำงานที่ค่าความเร็วคำสั่งคงที่ในช่วง 50-175 rpm ด้วยตัวควบคุมแบบเวกเตอร์ซึ่งใช้ข้อมูลจากค่าความเร็วจริงของโรเตอร์ โดยมีการแปรค่าโพลดจากค่าพิคัดในย่านมอเตอร์จนถึงค่าพิคัดในย่านเจนเนอเรเตอร์ ผลการจำลองการทำงานในรูปที่ 2.5 แสดงถึงการเพิ่มโพลดให้กับมอเตอร์โดยมีการแปรโพลดอย่างช้า ๆ จาก 10 ไปยัง -10 Nm เพื่อดูตำแหน่งของการขาดเสถียรภาพในระนาบความเร็วและแรงบิดจะเห็นว่าเมื่อระบบขาดเสถียรภาพระบบจะไม่สามารถประมาณค่าความเร็วและโรเตอร์ฟลักซ์ได้เลย และผลจำลองการทำงานในรูปที่ 2.6 แสดงให้เห็นถึงลักษณะสมบัติของระบบประมาณค่าความเร็วบนระนาบของความเร็วและแรงบิดในกรณีที่ไม่มีการป้อนกลับ ($H' = 0$) เส้นปะในรูปแสดงถึงขอบเขตของเสถียรภาพตามสมการที่ (2.14) จะสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนว่าระบบจะขาดเสถียรภาพทันทีที่จุดทำงานข้ามผ่านขอบเขตของเสถียรภาพดังกล่าว คุณสมบัติความมีเสถียรภาพที่ได้ในรูปที่ 2.6 มาจากการจำลองการทำงานที่ไม่มีความผิดพลาดของค่าพารามิเตอร์ใดๆ ดังนั้นปรากฏการณ์การขาดเสถียรภาพของระบบจึงเป็นคุณสมบัติโดยธรรมชาติของการประมาณค่าความเร็วด้วยตัวสังเกตแบบปรับตัวและไม่เกี่ยวข้องกับความผิดพลาดของพารามิเตอร์หรือสัญญาณรบกวนใดๆทั้งสิ้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.5 การจำลองการทำงานเมื่อมีการแปรค่าโหลดอย่างช้า ๆ จาก 10 Nm ไปยัง -10 Nm
ในกรณีที่ไม่มีการป้อนกลับ ($H'_1, H'_2 = 0$)



รูปที่ 2.6 ลักษณะสมบัติของความเร็วและแรงบิดที่ค่าความเร็ว 50, 75, 100, 125, 150 และ 175 rpm

ในกรณีที่ไม่ได้มีการป้อนกลับ ($H'_1, H'_2 = 0$)

2.3 การออกแบบตัวสังเกตเต็มอันดับแบบปรับตัว

โดยอาศัยแนวทางการออกแบบที่นำเสนอในงานวิจัยที่มีมาแล้วในอดีต(ชูเกียรติ นิธิโยธาน, 2542) ในหัวข้อนี้เรานำเสนอการออกแบบค่าอัตราขยายป้อนกลับ (H') แบบใหม่ดังแสดงในสมการที่ (2.17) อัตราขยายดังกล่าวจะทำหน้าที่ปรับระบบประมาณค่าความเร็วให้สอดคล้องกับเงื่อนไขเสถียรภาพตามสมการที่ (2.14) เพื่อให้ระบบทำงานได้อย่างมีเสถียรภาพสำหรับทุกย่านการทำงาน

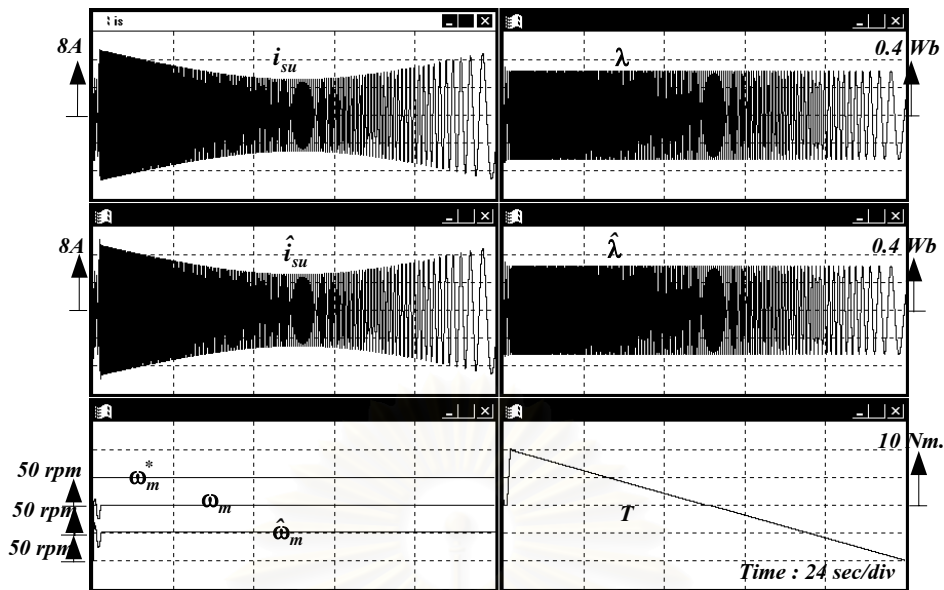
$$H'_1 = - \left[\frac{R_s}{\sigma L_s} + (1 - \sigma) \frac{R_r}{\sigma L_r} - k \frac{R_r}{L_r} \right] \cdot I + k p \hat{\omega}_m \cdot J$$

$$H'_2 = M \frac{R_r}{L_r} \cdot I \quad ; (k > 0)$$

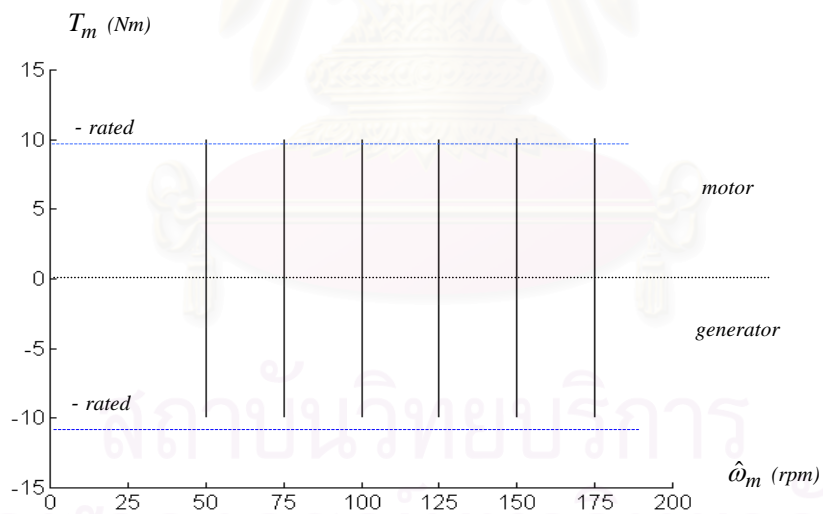
(2.17)

จากผลการจำลองการทำงานลักษณะสมบัติของแรงบิดและความเร็วเมื่อมีการป้อนกลับตามสมการที่ (2.17) แสดงได้ดังรูปที่ 2.7 และ 2.8 จะเห็นว่าระบบประมาณกลับมามีเสถียรภาพทั้งในย่านการทำงานแบบมอเตอร์และเจนเนอเรเตอร์ ซึ่งเป็นการยืนยันถึงความถูกต้องของวิธีการออกแบบที่นำเสนอ เมื่อพิจารณาพฤติกรรมของตัวสังเกตเมื่อมีการป้อนกลับด้วย H'_2 ในสมการที่ (2.17) จะพบว่าตัวสังเกตจะใช้กระแสจริงของมอเตอร์ (i_s^r) แทนกระแสประมาณ (i_s^e) ในการประมาณค่าโรเตอร์ฟลักซ์ (λ_r^r) สำหรับค่าอัตราขยาย H'_1 ในสมการที่ (2.17) จะเห็นว่าอยู่ในรูปแบบที่ง่ายและชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่นที่ค่อนข้างมีความซับซ้อนในการเลือกค่าอัตราขยายที่เหมาะสม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.7 การจำลองการทำงานเมื่อมีการแปรค่าโหลดอย่างช้า ๆ จาก 10 Nm ไปยัง -10 Nm ในกรณีที่มีการป้อนกลับ (H'_1, H'_2)



รูปที่ 2.8 ลักษณะสมบัติของความถี่และแรงบิดที่ค่าความเร็ว 50, 75, 100, 125, 150 และ 175

rpm

ในกรณีที่มีการป้อนกลับ ($k = 7$)

บทที่ 3

การควบคุมแบบแยกอิสระที่มีวงรอบควบคุมกระแส

ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์ไร้เซ็นเซอร์วัดความเร็วที่ได้พัฒนาขึ้นในงานวิจัยก่อนหน้านี้อาจใช้โครงสร้างที่มีการควบคุมแบบแยกอิสระ[1,3] ทั้งนี้เนื่องจากมีข้อได้เปรียบทางด้านปฏิบัติเมื่อเทียบกับระบบควบคุมแบบเวกเตอร์โดยส่วนใหญ่[1,2] ที่ต้องการวงรอบควบคุมกระแสที่มีแบนด์วิดท์สูง ยังผลให้เกิดความยุ่งยากและซับซ้อนทางด้านฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ต่อการนำไปสร้างจริง รวมไปถึงความต้องการตัวประมวลผลที่มีความเร็วสูง อย่างไรก็ตาม ด้วยลักษณะของการควบคุมแบบแยกอิสระ ซึ่งมีคุณสมบัติของการควบคุมเป็นแบบป้อนไปหน้าเพียงลำพังทำให้ระบบมีความไวต่อความผิดพลาดของพารามิเตอร์ต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในย่านการทำงานของมอเตอร์ที่ความเร็วรอบต่ำ ๆ ดังนั้นในบทนี้เราจะทำการปรับปรุงสมรรถนะของระบบควบคุมแบบเวกเตอร์ไร้เซ็นเซอร์วัดความเร็วที่มีการควบคุมแบบแยกอิสระ ด้วยการเพิ่มเติมวงรอบของการควบคุมกระแสเตอร์เข้าไป ทั้งนี้การควบคุมแบบแยกอิสระยังคงทำหน้าที่หลักในการควบคุม ในขณะที่วงรอบควบคุมกระแสที่เพิ่มเติมเข้ามานั้นจะทำหน้าที่ชดเชยผลกระทบอันเนื่องมาจากความผิดพลาดของพารามิเตอร์ต่างๆ โดยวงรอบควบคุมกระแสดังกล่าวไม่มีความจำเป็นที่จะต้องการแบนด์วิดท์สูงแต่อย่างใด นอกจากนี้ระบบควบคุมแบบเวกเตอร์ไร้เซ็นเซอร์วัดความเร็วที่มีวงรอบควบคุมกระแสยังมีบทบาทในการปรับปรุงสมรรถนะของระบบขับเคลื่อนในขณะมอเตอร์เริ่มเดินเครื่องหรือมอเตอร์มีการออกตัวช้าเนื่องจากปัญหาของแหล่งจ่ายไฟขาดคอนเป็นระยะเวลาสั้นๆเพื่อให้ระบบสามารถเข้าสู่สภาวะการทำงานปกติ โดยปราศจากการตัดตอนของอุปกรณ์ป้องกันได้

ในการที่จะพัฒนาระบบควบคุมแบบเวกเตอร์ที่อาศัยการควบคุมแบบแยกอิสระให้มีวงรอบควบคุมกระแส นั้น เราจะพิจารณาโดยอาศัยระบบควบคุมที่มีการบูรณาการของระบบสังเกตและระบบควบคุมแบบเวกเตอร์เข้าด้วยกัน และทำการแปลงระบบที่ได้บูรณาการแล้วไปแสดงอยู่บนแกนหมุนโรเตอร์ฟลักซ์ ซึ่งจะได้อีกกล่าวถึงในลำดับต่อไป

3.1 แบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำและระบบสังเกตเต็มอันดับบนแกนอ้างอิงของโรเตอร์ฟลักซ์

จากแบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำบนแกนนิ่งในสมการที่ (2.1)-(2.3) และระบบสังเกตเต็มอันดับในสมการที่ (2.4)-(2.7) เนื่องจากเราจะทำการควบคุมบนแกนหมุนของโรเตอร์ฟลักซ์ ดังนั้นเราจึงทำการย้ายแกนอ้างอิงไปอยู่บนแกนอ้างอิงโรเตอร์ฟลักซ์ได้ดังสมการ(3.1) และ(3.2)

$$\frac{d\dot{i}_s^v}{dt} = \{-[R_s + M^2 R_r / L_r^2] / \sigma L_s \bullet I - \omega J\} \dot{i}_s^v + \frac{M^2}{\sigma L_s L_r} [R_r / L_r \bullet I - p\omega_m J] \dot{i}_0^v + \frac{I}{\sigma L_s} \dot{v}_s^v$$

(3.1)

$$\frac{d\dot{i}_0^v}{dt} = \frac{R_r}{L_r} \dot{i}_s^v - [R_r / L_r \bullet I - (p\omega_m - \omega) J] \dot{i}_0^v$$

(3.2)

โดยที่

$$\dot{i}_s^v = \begin{bmatrix} \dot{i}_{sd} \\ \dot{i}_{sq} \end{bmatrix}, \quad \dot{v}_s^v = \begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \end{bmatrix}, \quad \dot{i}_0^v = \dot{\lambda}_r / M = \begin{bmatrix} \dot{i}_0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

(3.3)

และระบบสังเกตบนแกนหมุนโรเตอร์ฟลักซ์สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

$$R_s \dot{\bar{i}}_{sd} + \sigma L_s \frac{d\dot{\bar{i}}_{sd}}{dt} = \omega_o \sigma L_s \dot{\bar{i}}_{sq} - \frac{M^2}{L_r} R_r (\dot{\bar{i}}_{sd} - \dot{\bar{i}}_o) + v_{sd} - \sigma L_s [H_1' e_1]_d$$

(3.4)

$$R_s \dot{\bar{i}}_{sq} + \sigma L_s \frac{d\dot{\bar{i}}_{sq}}{dt} = -\omega_o L_s \dot{\bar{i}}_{sd} + \frac{M^2}{L_r} \omega_o (\dot{\bar{i}}_{sd} - \dot{\bar{i}}_o) + v_{sq} - \frac{M}{L_r} [H_2' e_1]_q - \sigma L_s [H_1' e_1]_q$$

(3.5)

$$R_r \dot{\bar{i}}_o + L_r \frac{d\dot{\bar{i}}_o}{dt} = R_r (\dot{\bar{i}}_{sd} - \frac{L_r}{R_r M} [H_2' e_1]_d)$$

(3.6)

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega_o = p\omega_m + \omega_s = p\omega_m + \left(\frac{R_r}{L_r} \dot{\bar{i}}_{sq} - \frac{[H_2' e_1]_q}{M} \right) / \dot{i}_o$$

(3.7)

ส่วนในการควบคุมแบบแยกอิสระก็จะมี การป้อนกลับค่าผิดพลาดของการประมาณค่า กระแสด้วยตามสมการ

$$v_{sd} = R_s i_{sd}^* - \omega_o \sigma L_s \hat{i}_{sq} + \frac{M^2}{L_r} R_r (\hat{i}_{sd} - i_o) + [K e_I]_d \quad (3.8)$$

$$v_{sq} = R_s i_{sq}^* + \omega_o L_s \hat{i}_{sd} - \frac{M^2}{L_r} \omega_o (\hat{i}_{sd} - \hat{i}_o) + [K e_I]_q \quad (3.9)$$

ซึ่งเป็นการผนวกการควบคุมแบบไปหน้า (Feed Forward Control) ของการควบคุมแยกอิสระ เข้ากับการควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback Control) ผ่านอัตราขยาย K ซึ่งจะทำให้เราสามารถปรับปรุงคุณภาพการควบคุมของระบบควบคุมเวกเตอร์ได้ดียิ่งขึ้นด้วย โดยการเลือกใช้ค่า k ที่เหมาะสม “_” : ค่าคำสั่ง

จากงานวิจัยที่มีมาแล้วในอดีต(สุรพงศ์ สุวรรณกวิน, 2539) เราสามารถบูรณาการระบบควบคุมเวกเตอร์แบบควบคุมแยกอิสระ(สมการ(3.1) - (3.2)) และระบบสังเกต(สมการ(3.4) - (3.5))เข้าด้วยกันได้เป็นสมการต่อไปนี้

$$R_s \hat{i}_{sd} + \sigma L_s \frac{d\hat{i}_{sd}}{dt} = u_{sd} + [K e_I]_d - \sigma L_s [H_1' e_1]_d \quad (3.10)$$

$$R_s \hat{i}_{sq} + \sigma L_s \frac{d\hat{i}_{sq}}{dt} = u_{sq} + [K e_I]_q - \frac{M}{L_r} [H_2' e_1]_q - \sigma L_s [H_1' e_1]_q \quad (3.11)$$

ถ้าเรากำหนดให้

$$[K e_I]_d = \sigma L_s [H_1' e_1]_d$$

$$[K e_I]_q = \frac{M}{L_r} [H_2' e_1]_q + \sigma L_s [H_1' e_1]_q \quad (3.12)$$

$$(3.13)$$

จะได้สมการของระบบสังเกตเป็นสมการของแบบจำลองในระบบควบคุมเวกเตอร์เดิมคือ

$$R_s \hat{i}_{sd} + \sigma L_s \frac{d\hat{i}_{sd}}{dt} = u_{sd}$$

(3.14)

$$R_s \hat{i}_{sq} + \sigma L_s \frac{d\hat{i}_{sq}}{dt} = u_{sq}$$

(3.15)

ดังนั้นเราจึงสามารถจะทำการลดทอนแบบจำลองในระบบได้โดยใช้แบบจำลองในระบบควบคุมเวกเตอร์เพียงตัวเดียว ในขณะที่การควบคุมแยกอิสระมีการปรับปรุงเพิ่มการป้อนกลับเข้ามาเป็น

$$v_{sd} = R_s i_{sd}^* - \omega_0 \sigma L_s \hat{i}_{sq} + \frac{M^2}{L_r^2} R_r (\hat{i}_{sd} - \hat{i}_0) + \sigma L_s [H_1' e_1]_d$$

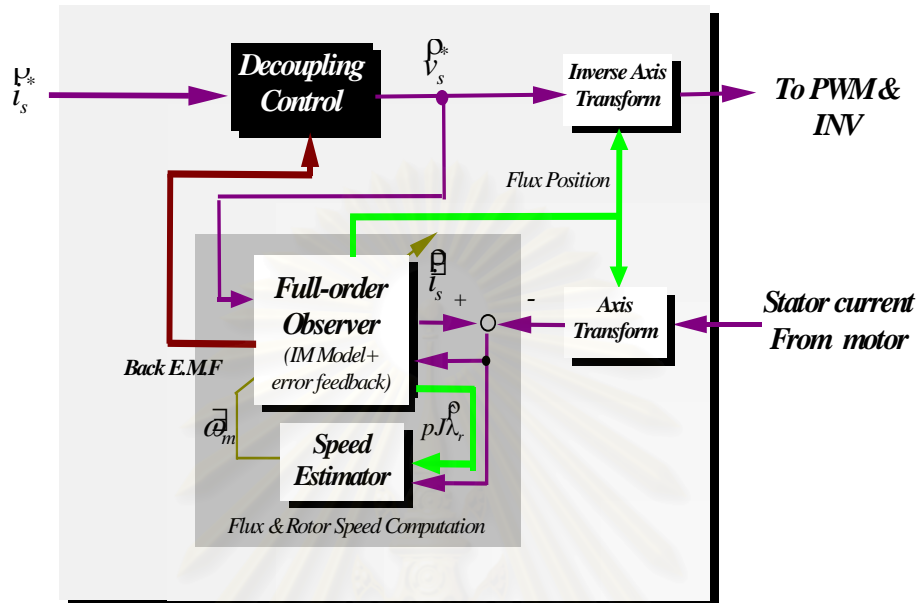
(3.16)

$$v_{sq} = R_s i_{sq}^* + \omega_0 L_s \hat{i}_{sd} - \frac{M^2}{L_r} \omega_0 (\hat{i}_{sd} - \hat{i}_0) + \frac{M}{L_r} [H_2' e_1]_q + \sigma L_s [H_1' e_1]_q$$

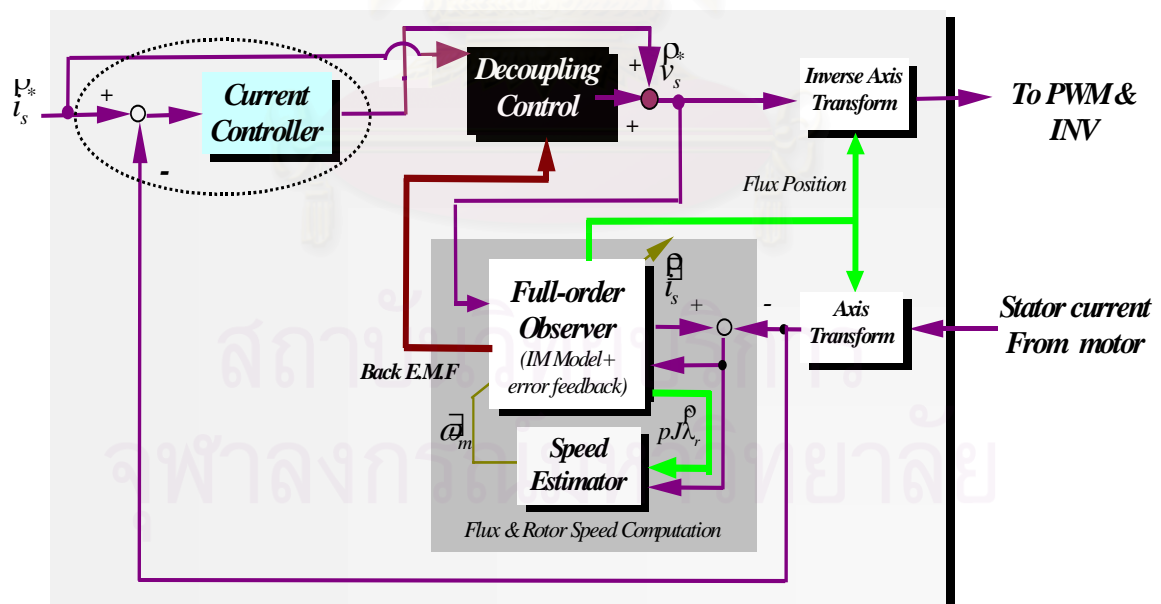
(3.17)

จากสมการ(3.14), (3.15)ข้างต้นจะเห็นว่าเราสามารถควบคุมกระแสในแต่ละแกนได้อย่างอิสระโดยการควบคุมผ่านแรงดัน u_{sd} และ u_{sq} โครงสร้างของระบบควบคุมแยกอิสระแสดงได้ในรูปที่ 3.1 ลักษณะของการควบคุมแบบแยกอิสระเป็นการควบคุมแบบป้อนไปหน้าโดยค่าแรงดัน (v_{sd}, v_{sq}) จะคำนวณจากกระแสคำสั่งในแต่ละแกน (i_{sd}^*, i_{sq}^*) และแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำซึ่งได้มาจากลักษณะทางพลวัตของทางด้านสเตเตอร์และโรเตอร์ตามสมการที่ (3.15)และ(3.16)ค่าแรงดันนี้จะถูกแปลงไปเป็นค่าแรงดันอ้างอิง ($v_{s\alpha}, v_{s\beta}$) บนแกนนิ่งสำหรับอินเวอร์เตอร์เพื่อสร้างแรงดันจริงจ่ายให้กับมอเตอร์ เนื่องจากพารามิเตอร์ของมอเตอร์เป็นข้อมูลที่สำคัญซึ่งใช้ในการคำนวณค่าแรงดัน และในทางปฏิบัติค่าพารามิเตอร์เหล่านี้อาจแปรเปลี่ยนได้ เช่น ค่าความต้านทาน (R_s, R_r) ซึ่งแปรค่าตามอุณหภูมิ และค่าความเหนี่ยวนำ ($\sigma L_s, M$) โดยเฉพาะอย่างยิ่งความผิดพลาดระหว่างแรงดันคำสั่งและแรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์อันเนื่องมาจากการประวิงเวลา(dead-time)และแรงดันตกคร่อมสวิตช์กำลัง จะส่งผลกระทบต่อกรควบคุม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงความเร็วรอบต่ำและทำให้กระแสสเตเตอร์เกิดความเพี้ยนและคลาดเคลื่อนไปจากค่าคำสั่ง ด้วยเหตุนี้เพื่อปรับปรุงให้กระแสสเตเตอร์มีค่าตามที่ต้องการแม้จะมีการรบกวนจากปัจจัยต่างๆดังกล่าวเราจึงใช้ค่าผิดพลาดระหว่างกระแสคำสั่ง (i_{sd}^*, i_{sq}^*) และกระแสจริงของมอเตอร์มาทำการป้อนกลับผ่านตัวควบคุมกระแสดังแสดงในเส้นประในรูปที่ 3.2 ทั้งนี้ตัวควบคุมแบบแยกอิสระเดิมยังคงทำหน้าที่หลักในการควบคุมในลักษณะป้อนไปหน้า โดยแรงดันคำสั่งจากส่วนการควบคุมแบบแยกอิสระจะมาจาก

ค่ากระแสคำสั่งเดิม ส่วนของแรงดันคำสั่งที่มาจากวงควบคุมกระแสของตัวควบคุมแบบ PI จะถูกป้อนให้กับตัวสังเกตด้วย ดังนั้นลักษณะสมบัติของตัวสังเกตในการประมาณค่าความเร็วและโรเตอร์ฟลักซ์ที่วิเคราะห์ไปในบทก่อนนี้จึงยังคงเดิมไม่มีการเปลี่ยนแปลงแต่อย่างใด



รูปที่ 3.1 โครงสร้างของระบบควบคุมแบบแยกอิสระ

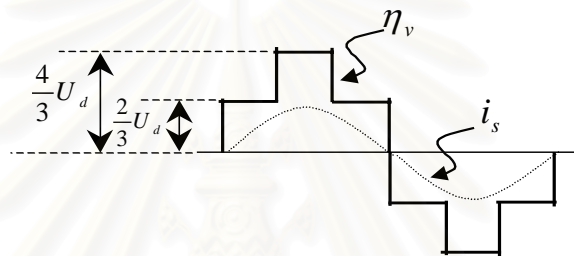


รูปที่ 3.2 โครงสร้างของระบบควบคุมแบบแยกอิสระที่มีวงรอบการควบคุมกระแส

3.3 การออกแบบตัวควบคุมกระแสในระบบควบคุมแบบแยกอิสระ

เมื่อเราแปลงทั้งตัวสังเกตและระบบควบคุมไปอ้างอิงบนแกนอ้างอิงโรเตอร์ฟลักซ์แล้ว จะทำให้เรามองเห็นกระแสเดเตอร์เป็นค่าสัญญาณไฟตรง ดังนั้นเราจึงเลือกตัวควบคุมกระแสเป็นตัวควบคุมแบบ PI เพราะสัญญาณค่าผิดพลาดจะถูกลดทอนด้วยตัวควบคุมอินทิเกรต ค่าผิดพลาดที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงความต้านทานสเตเตอร์ (ΔR_s) และสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการประวิงเวลา (τ_v) จะมีเฟสตรงกันกับกระแสเดเตอร์ ดังที่จะกล่าวถึงในลำดับต่อไป

ลักษณะของสัญญาณรบกวน (τ_v) ที่เกิดจากเวลาประวิงและแรงดันตกคร่อมสวิตช์กำลัง ประกอบด้วยองค์ประกอบหลักมูลซึ่งมีเฟสตรงกับกระแสเดเตอร์ (โศภณ สมัยรัฐ, 2538) และองค์ประกอบฮาร์มอนิกดังแสดงในรูปที่ 3.3 โดยในที่นี้เราจะพิจารณาเฉพาะอันดับที่ 5 และ 7 ซึ่งมีขนาดสูงเมื่อเทียบกับอันดับอื่น ๆ



รูปที่ 3.3 แรงดันเฟสที่หายไปเนื่องจากการประวิงเวลาและแรงดันตกคร่อมสวิตช์กำลัง

ขนาดของแรงดันที่ขาดหายไปอันเนื่องมาจากการประวิงเวลาในรูปที่ 3.3 สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3.18) (โศภณ สมัยรัฐ, 2538)

$$U_d = U_{dc} \times (t_d - t_{off}) \times f_{sw} \quad (3.18)$$

โดยที่ U_d = ขนาดของแรงดันที่ขาดหายไป

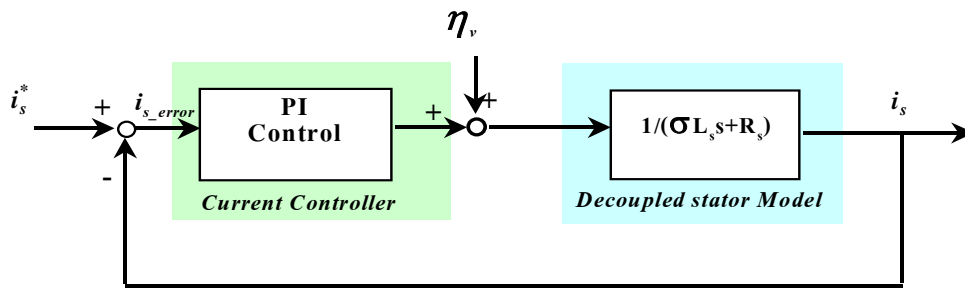
t_d = เวลาในการประวิง

t_{off} = เวลาที่สวิตช์ต้องใช้ในการหยุดนำกระแส (turn-off time)

f_{sw} = ความถี่ในการสวิตช์

U_{dc} = แรงดันไฟตรง

จากสมการที่ (3.14) และ (3.15) เราสามารถเขียนวงรอบควบคุมสำหรับกระแสในแต่ละแกนได้ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ลักษณะพลวัตของขดลวดสเตเตอร์จะมีลักษณะสมบัติเป็นฟังก์ชันโอนย้ายอันดับที่หนึ่ง ตัวควบคุมกระแสแบบ PI จะถูกออกแบบเพื่อลดทอนสัญญาณรบกวน (τ_v) ที่ส่งผลทำให้ค่ากระแสเดเตอร์ในมอเตอร์มีความเพี้ยน โดยเฉพาะในย่านความเร็วต่ำ



รูปที่ 3.4 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมกระแส

ฟังก์ชันโอนย้ายจากสัญญาณรบกวน (η_v) ไปยังค่าผิดพลาดของกระแส (i_{s_err}) สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\frac{i_{s_error}}{\eta_v} = \frac{s}{\sigma L_s s^2 + (K_p + R_s)s + K_I}$$

(3.19)

$$= \frac{s}{\frac{s^2}{\omega_n^2} + \frac{2\xi}{\omega_n}s + 1}$$

(3.20)

โดยที่ K_p, K_I คืออัตราขยายของตัวควบคุมและ

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_I}{\sigma L_s}}$$

(3.21)

$$\xi = \frac{(K_p + R_s)}{2} \times \sqrt{\frac{K_I}{\sigma L_s}}$$

(3.22)

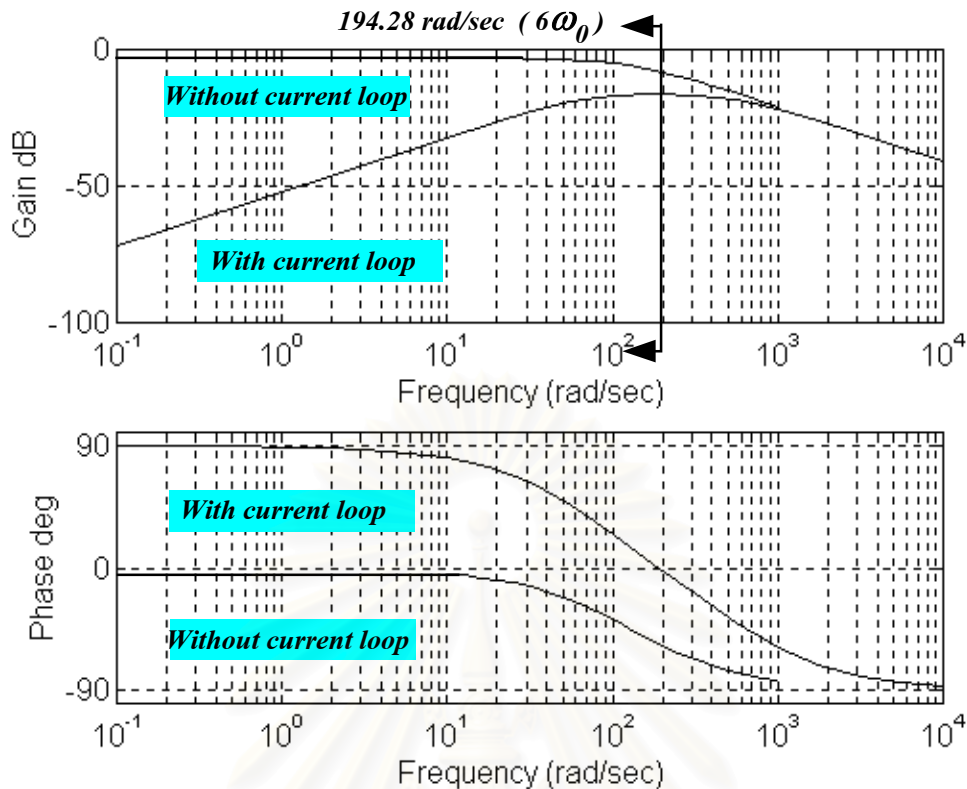
เนื่องจากวงรอบควบคุมกระแสในรูปที่ 3.4 จะอ้างอิงอยู่บนแกนอ้างอิงที่หมุนด้วยความถี่เดียวกันกับองค์ประกอบหลักมูล (fundamental component) ดังนั้นค่าผิดพลาดที่เกิดจากองค์ประกอบหลักมูลของสัญญาณรบกวนจะถูกลดทอนเป็นศูนย์ด้วยตัวควบคุมอินทิเกรต สำหรับองค์

ประกอบฮาร์มอนิกหลักอันดับที่ 5 และ 7 เมื่อถูกมองจากแกนหมุนจะกลายเป็นฮาร์มอนิกอันดับที่ 6 ทั้งคู่ ดังนั้นแนวทางในการออกแบบเราสามารถพิจารณาได้ดังต่อไปนี้

1) เลือกย่านความถี่ทำงานของระบบที่สัญญาณรบกวนมีผลต่อการทำงานของระบบค่อนข้างมาก โดยในที่นี้เรากำหนดเป็นย่านความถี่ทำงานที่ขนาดแรงดันฮาร์มอนิกที่เกิดจากสัญญาณรบกวน มีค่ามากกว่า 2% ของแรงดันมอเตอร์ที่ความถี่ทำงานนั้นๆ

2) เลือกอัตราขยายของตัวควบคุมกระแส (PI-Control) โดยคำนึงถึงผลฮาร์มอนิกที่อันดับ 5 และ 7 ที่รบกวนแรงดันในย่านความถี่การทำงานของมอเตอร์ที่พิจารณา

เช่น ในกรณี ที่ $f_{sw} = 2 \text{ kHz}$, $t_d = 4 \mu\text{s}$, $t_{off} = 2 \mu\text{s}$, $U_{dc} = 330 \text{ V}_{dc}$ จากสมการ (3.18) ค่าแรงดันที่ขาดหายไปเนื่องจากการประวิงเวลา มีค่าเท่ากับ 1.32 V คิดเป็นค่าขององค์ประกอบฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 และ 7 เท่ากับ $\left(\frac{1}{5} \times 1.32\right) + \left(\frac{1}{7} \times 1.32\right) = 0.452 \text{ V}$ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2% ของขนาดแรงดันที่มอเตอร์ได้รับ (22.64 V) ที่ความถี่ทำงานเท่ากับ 5.145 Hz ($\omega_0 = 32.38 \text{ rad/sec}$, 155 rpm) เนื่องจากการควบคุมกระแสจะอยู่บนแกนอ้างอิงที่หมุนด้วยความถี่เดียวกันกับองค์ประกอบหลักมูล ดังนั้นสัญญาณรบกวนองค์ประกอบหลักมูลจะถูกลดทอนด้วยตัวควบคุมอินทิเกรต สำหรับองค์ประกอบฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 และ 7 เมื่อถูกมองบนแกนหมุนจะกลายเป็นฮาร์มอนิกอันดับที่ 6 แถบความถี่ของสัญญาณรบกวนที่เราจะพิจารณาจะจึงมีค่าเป็น 6 เท่าของความถี่ทำงานมอเตอร์คือแถบความถี่ที่น้อยกว่า 194.28 rad/sec ($6\omega_0$) จากแผนภาพโบดพล็อตในรูปที่ 3.5 จะเห็นได้ว่าขนาดของอัตราขยายของสัญญาณรบกวนจะมีค่ามากที่สุดที่ความถี่มีค่าเท่ากับ ω_n ตามสมการที่ (3.21) ดังนั้นเพื่อลดทอนสัญญาณรบกวนตลอดย่านความถี่นี้ เราจะกำหนดให้ ω_n เท่ากับ $(6\omega_0)$ เท่ากับ 194.28 rad/sec ในที่นี้เราจะออกแบบให้อัตราขยายของสัญญาณรบกวนที่ความถี่ ลดลงเหลือเพียง 40 % ของในกรณีที่ไม่มีการควบคุมกระแสและจากสมการที่ (3.19) - (3.22) ทำให้ได้ค่า K_p , K_I มีค่าเท่ากับ 5 และ 414 ตามลำดับ



รูปที่ 3.5 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของค่าผิดพลาดของกระแสต่อผลของการประวิงเวลา

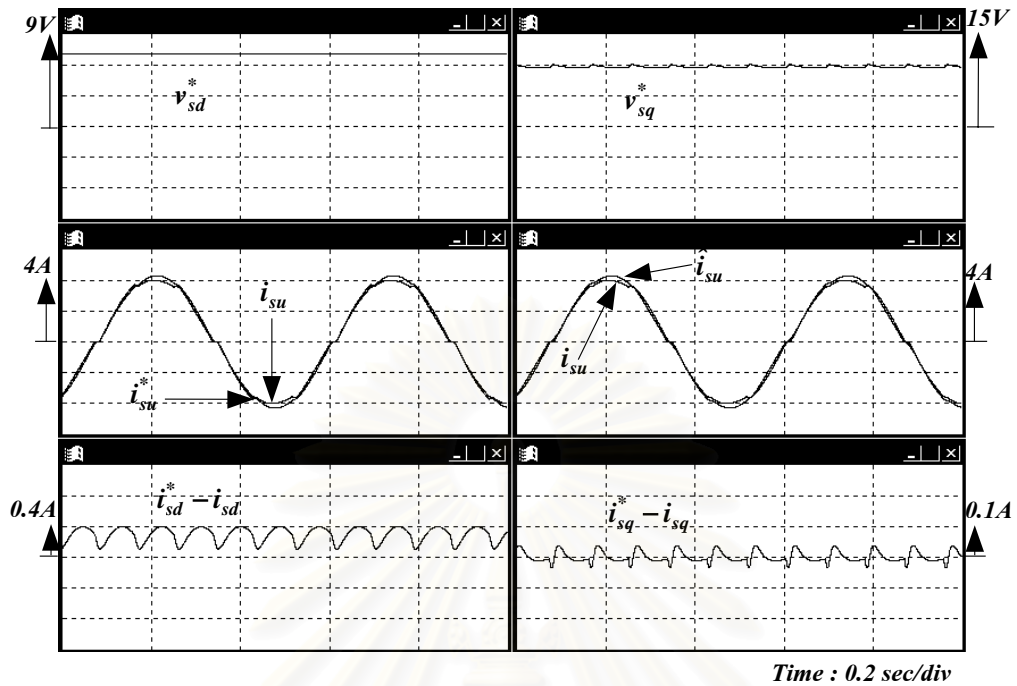
ผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดความเร็วที่อาศัยการควบคุมแบบแยกอิสระที่ไม่มีวงรอบควบคุมกระแสในสภาวะไร้โหลดโดยคำนึงถึงผลกระทบของการประวิงเวลาที่ความเร็วมอเตอร์ต่ำ ๆ (50rpm) แสดงได้ดังรูปที่ 3.6 จะเห็นได้ว่าผลของสัญญาณรบกวนทำให้เกิดค่าผิดพลาดของกระแสในแกน d ($i_{sd}^* - i_{sd}$) และแกน q ($i_{sq}^* - i_{sq}$) โดยค่าผิดพลาดในแกน d มีค่าเฉลี่ยประมาณ 0.4 A ค่าผิดพลาดในแกน q มีค่าขอดประมาณ 0.1 A และกระแสเฟส u ที่จ่ายให้กับมอเตอร์เมื่อเทียบกับกระแสคำสั่งเฟส u ก็เกิดความเพี้ยนด้วย แต่ในการจำลองผลในเงื่อนไขเดียวกันเมื่อระบบมีวงรอบควบคุมกระแสดังแสดงในรูปที่ 3.7 จะเห็นได้ว่าค่าผิดพลาดของกระแสในแกน d และแกน q มีขนาดลดลงอย่างเห็นได้ชัด ส่วนกระแสที่จ่ายให้กับมอเตอร์เฟส u นั้นสามารถควบคุมได้ดี ดังจะเห็นได้จากขนาดและความต่างเฟสนั้นไม่เกิดความเพี้ยนเลย ผลของตัวควบคุมกระแสทำให้แรงดันคำสั่งในแกน d และแกน q ได้รับแรงดันชดเชยในส่วนการชดเชยไปหน้าทำให้เห็นระลอกด้วยความถี่เป็น 6 เท่าของความถี่หลักมูลในสัญญาณแรงดันคำสั่ง

ผลการจำลองการทำงานของระบบในสภาวะที่มีโหลดแบบขั้น (8 Nm) แสดงได้ดังรูปที่ 3.8 จะเห็นได้ว่ามีค่ากระแสผิดพลาดในทั้งแกน d และแกน q โดยในแกน d มีค่าผิดพลาดประมาณ 1 A และในแกน q มีค่าผิดพลาดประมาณ 0.1 A ส่วนกระแสในเฟส u นั้นจะเห็นได้ว่ามี

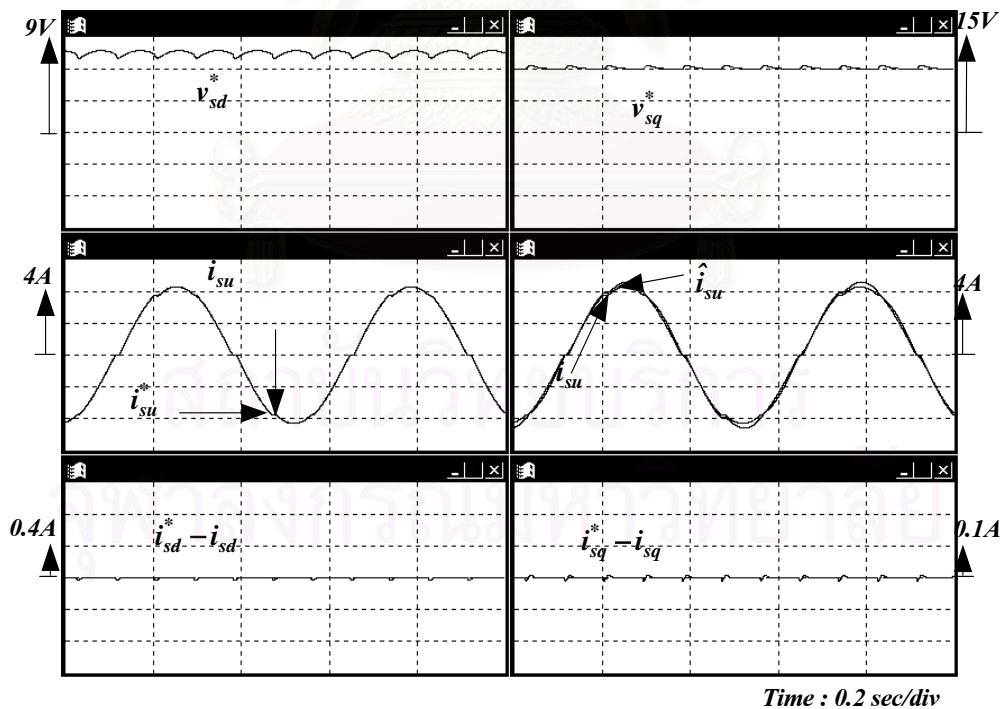
การควบคุมที่ผิดพลาด ทำให้ระบบควบคุมแรงบิดได้ไม่ดี แต่เมื่อระบบมีการเพิ่มวงรอบควบคุม กระแสเข้ามาดังแสดงในรูปที่ 3.9 จะเห็นได้ว่าระบบมีการควบคุมกระแสที่ดีขึ้น ค่าผิดพลาดในการควบคุมแรงบิดลดลง ตลอดจนค่าผิดพลาดของกระแสในแกน d และแกน q ก็ลดลงเช่นกัน จากผลการจำลองการทำงานของระบบทั้งหมดนั้น จะเห็นว่าเมื่อระบบมีวงรอบควบคุมกระแสเพิ่มเข้ามา ระบบจะมีสมรรถนะในการควบคุมกระแส และแรงบิดที่ดีขึ้น

3.4 การเริ่มต้นเดินเครื่อง และการออกตัวช้าของระบบ

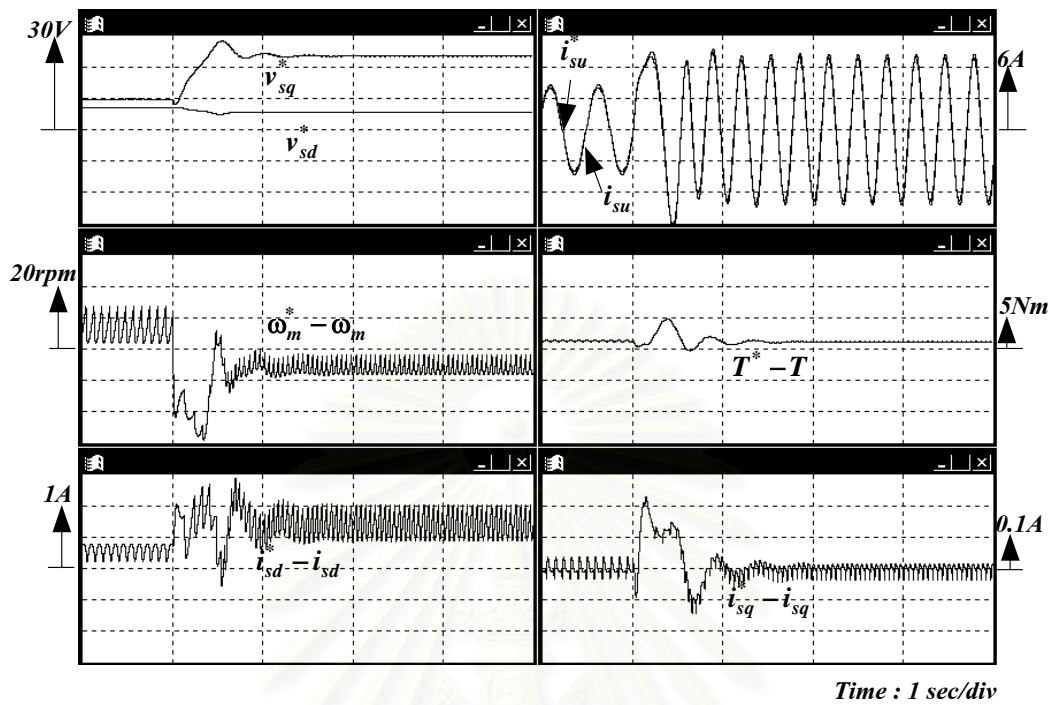
การออกตัวของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ในช่วงเริ่มต้นเดินเครื่องถือเป็นโหมดการทำงานที่มีความสำคัญในทางปฏิบัติ การปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของอินเวอร์เตอร์ที่ไม่เหมาะสมจะทำให้ค่ากระแสของมอเตอร์ในสถานะชั่วคราวนี้มีค่าสูง ทำให้อินเวอร์เตอร์ทำงานอยู่ในโหมดกระแสเกินเป็นระยะเวลานานโดยปราศจากแรงบิดที่เพียงพอสำหรับการขับเคลื่อนระบบให้สามารถออกตัวได้ ยังผลให้ฟังก์ชันในส่วนป้องกันกระแสเกินทำการตัดการทำงานของอินเวอร์เตอร์ออกจากระบบ นอกเหนือไปจากการออกตัวของระบบในช่วงเริ่มต้นแล้วการออกตัวช้าของระบบภายหลังจากแหล่งจ่ายไฟขาดตอนก็มีความสำคัญเช่นกัน โดยเฉพาะในระบบขับเคลื่อนที่มีความเฉื่อยสูง การออกตัวช้าโดยทันทีภายหลังจากแหล่งจ่ายไฟขาดตอนจะเป็นการออกตัวในขณะที่ความเร็วของมอเตอร์มีค่าสูง ซึ่งนอกจากจะเกิดปัญหากระแสเกินดังกล่าวข้างต้นแล้ว ยังมีปัญหาในเรื่องการประมาณค่าความเร็วของระบบด้วยดังตัวอย่างการทำงานแสดงในรูปที่ 3.10 ซึ่งจำลองการทำงานโดยให้ระบบทำการออกตัวในขณะที่ความเร็วรอบของมอเตอร์มีค่าเท่ากับ 1200 rpm จะเห็นได้ว่าในช่วงออกตัวระบบจะทำงานอยู่ในย่านคลื่นพลังงานซึ่งความเร็วของมอเตอร์จะค่อยๆลดลง โดยในช่วงเวลาดังกล่าวนี้ระบบจะทำงานที่ความถี่เท่ากับศูนย์ ซึ่งเป็นจุดทำงานที่ขาดคุณสมบัติของการประมาณได้ (identifiability) ของค่าความเร็วมอเตอร์ โดยสังเกตได้จากรูปคลื่นของความเร็วที่แตกต่างกันระหว่างความเร็วจริง (ω_m) และความเร็วประมาณ ($\hat{\omega}_m$) มีได้สะท้อนไปที่สัญญาณผิดพลาดของกระแส ($\hat{i}_{sq} - i_{sq}, \hat{i}_{sd} - i_{sd} = 0$) ซึ่งเป็นข้อมูลที่ใช้สำหรับการประมาณค่าความเร็วแต่อย่างใด ปรากฏการณ์ดังกล่าวทำให้ระบบสังเกตและระบบประมาณค่าความเร็วทำงานผิดพลาดและส่งผลกระทบต่อสมรรถนะในการควบคุมแรงบิดสำหรับการขับเคลื่อนระบบในที่สุด อย่างไรก็ตามก็การทำงานของระบบยังเป็นไปอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งมอเตอร์หยุดหมุนและระบบจะเข้าสู่กระบวนการออกตัวตามปกติ โดยกระบวนการดังกล่าวจะใช้เวลานานมากสำหรับระบบที่มีค่าความเฉื่อยสูงทำให้ไม่เหมาะที่จะใช้กับระบบขับเคลื่อนในทางอุตสาหกรรม ปัญหาเหล่านี้สามารถแก้ไขได้โดยการเพิ่มวงรอบควบคุมกระแสเข้าไปในระบบ ดังแสดงผลการจำลองการทำงานในรูปที่ 3.11 ซึ่งทำให้ระบบสามารถเข้าสู่สภาวะการออกตัวหรือออกตัวช้าของระบบได้ โดยปราศจากการตัดตอนของอุปกรณ์ป้องกันกระแสเกิน



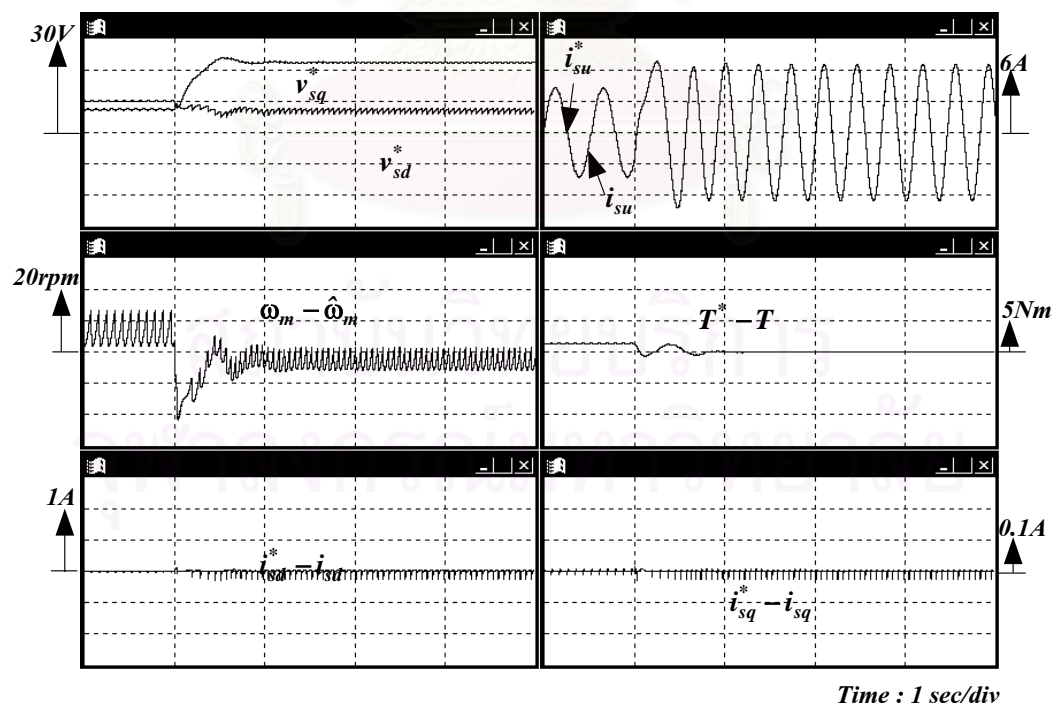
รูปที่ 3.6 ผลการจำลองทำงานของระบบเมื่อไม่มีการควบคุมกระแส ($K_p=0$, $K_i=0$) ที่ความเร็ว 50 rpm สภาวะไร้โหลด (no-load) โดยคำนึงถึงผลกระทบของการประวิงเวลา



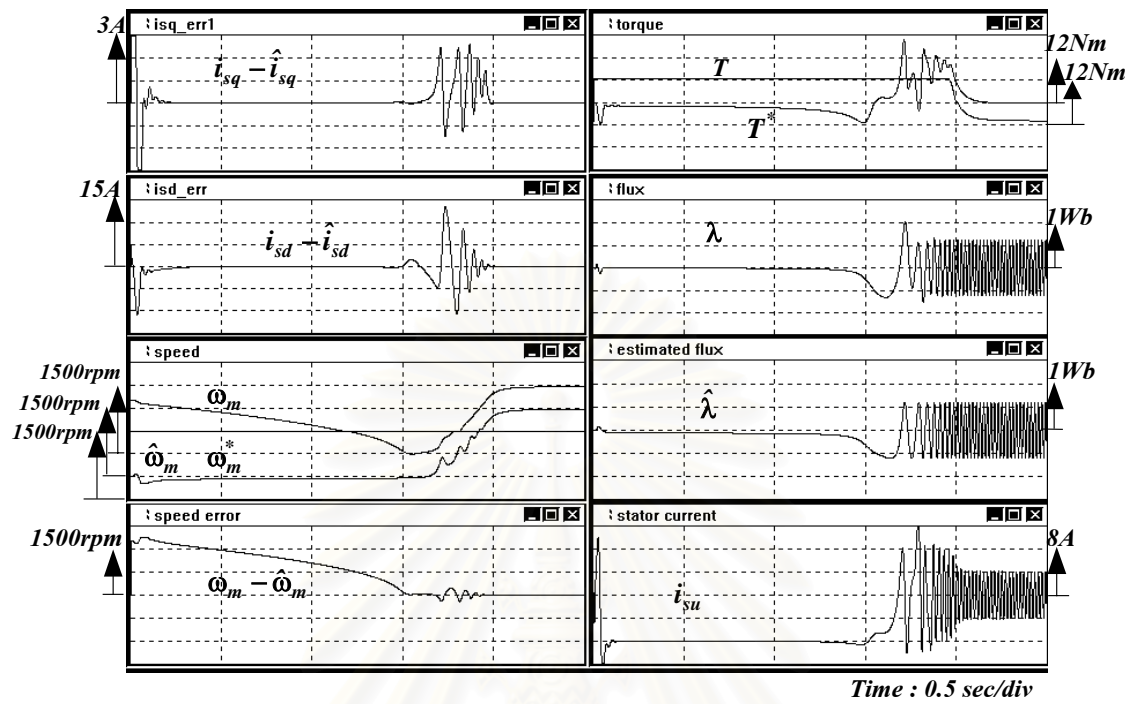
รูปที่ 3.7 ผลการจำลองทำงานของระบบเมื่อมีการควบคุมกระแส ($K_p=5$, $K_i=400$) ที่ความเร็ว 50 rpm สภาวะไร้โหลด (no-load) โดยคำนึงถึงผลกระทบของการประวิงเวลา



รูปที่ 3.8 ผลการจำลองการทำงานของระบบเมื่อไม่มีการควบคุมกระแส ($K_p=0$, $K_t=0$) ความเร็ว 50 rpm และมีโหลดแบบขั้นขนาด 8 Nm โดยคำนึงถึงผลกระทบของการประวิงเวลา

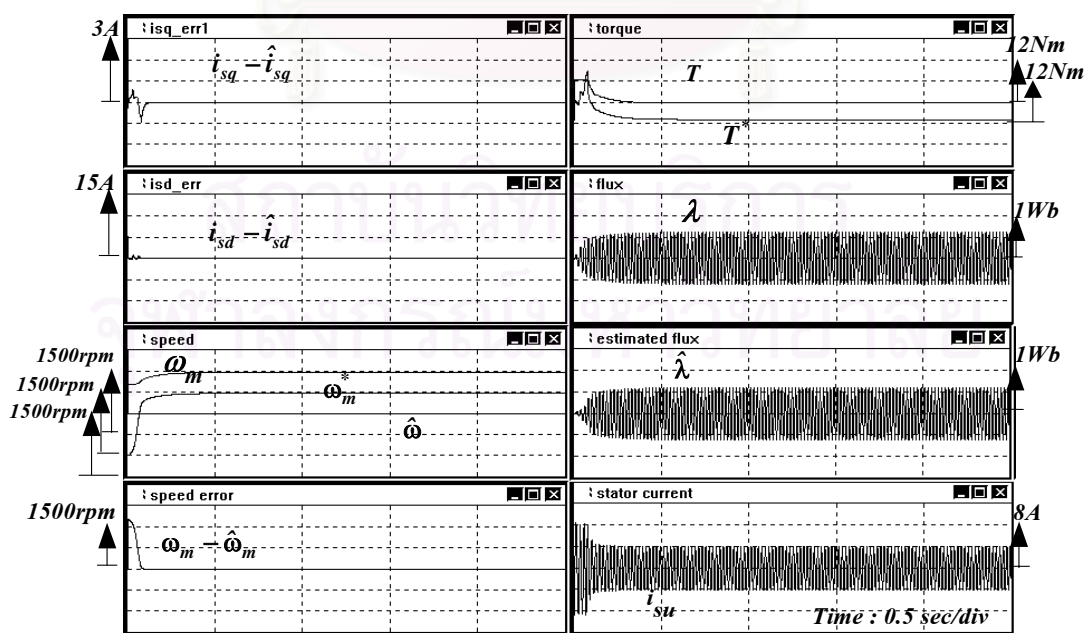


รูปที่ 3.9 ผลการจำลองการทำงานของระบบเมื่อไม่มีการควบคุมกระแส ($K_p=5$, $K_t=400$) ความเร็ว 50 rpm และมีโหลดแบบขั้นขนาด 8 Nm โดยคำนึงถึงผลกระทบของการประวิงเวลา



รูปที่ 3.10 ผลการจำลองการออกตัวของระบบเมื่อมอเตอร์กำลังหมุนที่ความเร็ว 1200 rpm โดยมีความเร็วคำสั่งที่ 1500 rpm และระบบมีไม่วงรอบควบคุมกระแส($K_p=0$,

K)



รูปที่ 3.11 ผลการจำลองการออกตัวของระบบเมื่อมอเตอร์กำลังหมุนที่ความเร็ว 1200 rpm

โดยมีความเร็วคำสั่งที่ 1500 rpm และระบบมีวงรอบควบคุมกระแส($K_p=5$, $K_i=400$)



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการทดสอบการทำงานของระบบ

ในบทนี้เราจะนำระบบที่ได้พัฒนาขึ้นมาทำการทดสอบกับระบบจริง ด้วยเงื่อนไขทำงานในลักษณะต่างๆ เช่น ที่สภาวะอยู่ตัวที่ความเร็วต่าง ๆ ของมอเตอร์ การกลับทิศความเร็วมอเตอร์ การใส่โหลดแบบขั้น การใส่โหลดแบบแปรค่าโหลดตั้งแต่ -10 Nm จนถึง 10 Nm เพื่อดูผลตอบสนองของระบบทั้งในสภาวะอยู่ตัวและสภาวะชั่วคราว

ระบบควบคุมเวกเตอร์ไร้เซ็นเซอร์วัดความเร็วที่ได้พัฒนาขึ้น มีโครงสร้างแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ได้แก่ ภาคนำกำลังและภาคควบคุม โดยในส่วนของ การควบคุมเราจะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ SH 7032 , ความถี่การสวิตช์เท่ากับ 2 kHz , แรงดันบัลไฟตรง 330 V และชดเชยเวลาประวิงในส่วนการสร้างสัญญาณ PWM เท่ากับ $4 \mu\text{s}$ บล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 4.1 แสดงโครงสร้างของระบบที่ใช้ในการทดสอบ โดยงานวิจัยนี้จะแบ่งการทดสอบออกเป็น 6 ส่วนดังนี้

- ก) การทดสอบคุณสมบัติการควบคุมความเร็วของระบบควบคุมแบบเวกเตอร์ไร้เซ็นเซอร์วัดความเร็วที่อาศัยการควบคุมแบบแยกอิสระ โดยระบบไม่มีวงรอบควบคุมกระแสและอัตราขยายป้อนกลับ
- ข) การทดสอบคุณสมบัติการควบคุมความเร็วของระบบควบคุมแบบเวกเตอร์ไร้เซ็นเซอร์วัดความเร็วที่อาศัยการควบคุมแบบแยกอิสระ โดยระบบมีวงรอบควบคุมกระแส
($K_P = 5, K_I = 400$) แต่ไม่มีอัตราขยายป้อนกลับ ($H_1', H_2' = 0$)
- ค) การทดสอบคุณสมบัติการควบคุมความเร็วของระบบควบคุมแบบเวกเตอร์ไร้เซ็นเซอร์วัดความเร็วที่อาศัยการควบคุมแบบแยกอิสระ โดยระบบมีวงรอบควบคุมกระแส
($K_P = 5,$
 $K_I = 400$) และมีอัตราขยายป้อนกลับ (H_1', H_2')

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- ง) การทดสอบดูผลตอบสนองต่อโหลดแบบขั้นเปรียบเทียบกับกรณีมีอัตราขยายป้อนกลับ (H_1', H_2') และมีวงรอบควบคุมกระแส ($K_p = 5, K_I = 400$) กับกรณีไม่มีอัตราขยายป้อนกลับ $(H_1', H_2' = 0)$ และมีวงรอบควบคุมกระแส ($K_p = 5, K_I = 400$)
- จ) การทดสอบดูผลตอบสนองต่อโหลดแบบแรมป์ (ramp load) ขนาด 10 Nm ถึง -10 Nm เปรียบเทียบกรณีมีอัตราขยายป้อนกลับ (H_1', H_2') และมีวงรอบควบคุมกระแส ($K_p = 5, K_I = 400$) กับกรณีไม่มีอัตราขยายป้อนกลับ $(H_1', H_2' = 0)$ และมีวงรอบควบคุมกระแส ($K_p = 5, K_I = 400$)
- ฉ) การทดสอบเมื่อมอเตอร์มีการออกตัว หรือออกตัวช้าเมื่อแหล่งจ่ายไฟตัดตอนเป็นระยะเวลาสั้นๆ

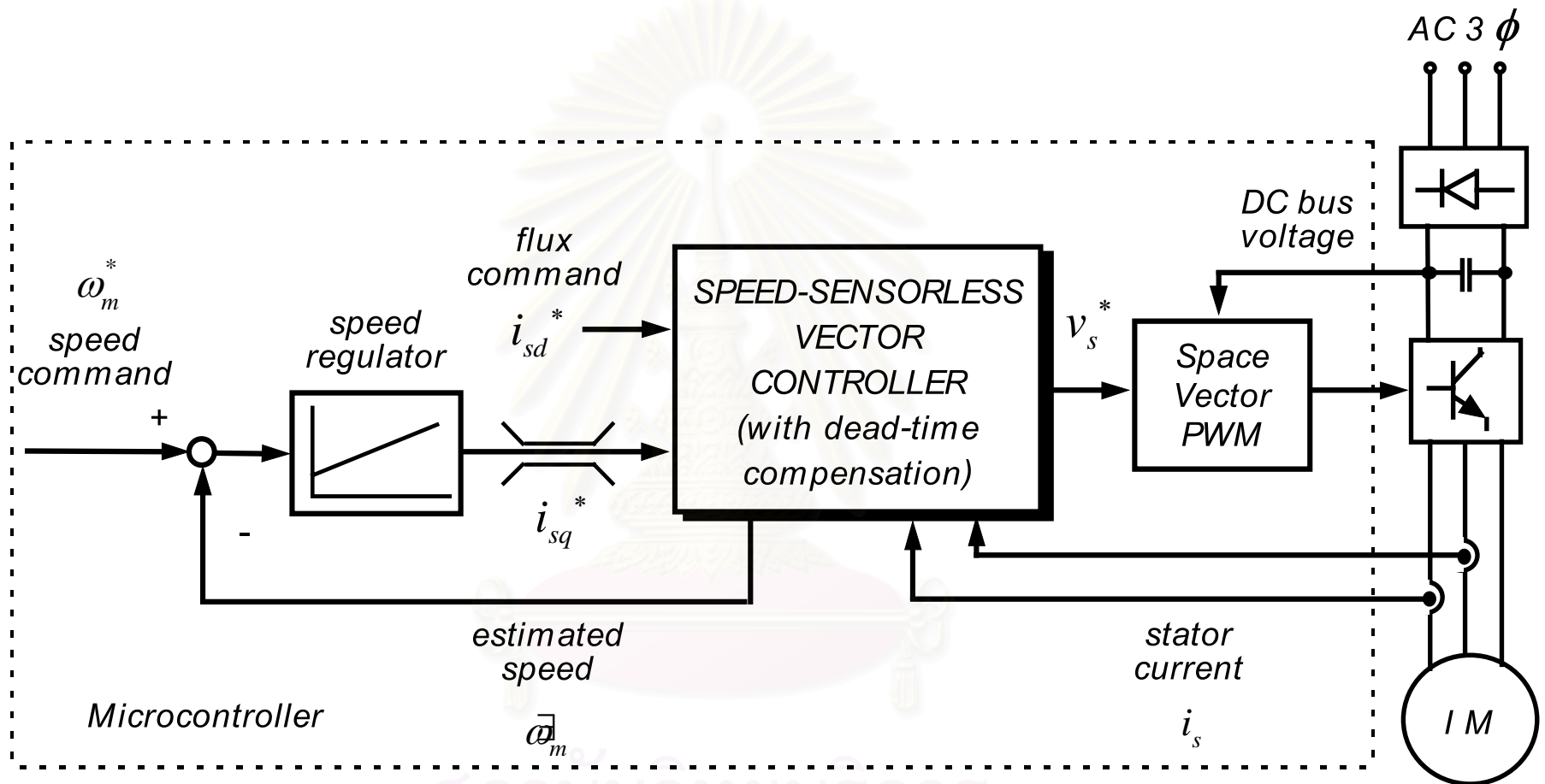
สำหรับพิกัดและค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยแสดงได้ดังตารางที่ 4.1 ส่วนค่าอัตราขยายที่ได้ทำการออกแบบและใช้ในการทดลองสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 พิกัดและพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ในงานวิจัย

2HP, 220/380 V, 6.0/3.5 A, 1450 rpm, 4 Poles	
$i_{sd} = 5.2 \text{ A (rated)}$	$i_{sq} = 8.8 \text{ A (rated)}$
$R_s = 1.40 \ \Omega$	$R_r = 0.80 \ \Omega$
$L_s = 0.134 \text{ H}$	$L_r = 0.123 \text{ H}$
$M = 0.123 \text{ H}$	$J = 0.019 \text{ kg} - \text{m}^2$

ตารางที่ 4.2 ค่าอัตราขยายที่ได้ทำการออกแบบ

อัตราขยาย PI ของส่วนประมาณค่าความเร็ว	$k_p = 3.5, k_i = 200$
อัตราขยายวงรอบควบคุมกระแส	$k_p = 5.0, k_i = 400$
อัตราขยายวงรอบควบคุมความเร็ว	$k_p = 0.4, k_i = 1.0$
ค่า k ในส่วนอัตราขยายป้อนกลับ H'1	$k = 0.5, 3, 5, 10, 15, 20$



รูปที่ 4.1 โครงสร้างของระบบควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์ไร้เซ็นเซอร์วัดความเร็ว

ก) การทดสอบคุณสมบัติการควบคุมความเร็วของระบบควบคุมแบบเวกเตอร์ไร้เซ็นเซอร์วัดความเร็วที่อาศัยการควบคุมแบบแยกอิสระ โดยระบบไม่มีวงรอบควบคุมกระแสและอัตราขยายป้อนกลับ

1. ผลการทดสอบในสภาวะอยู่ตัว

รูปที่ 4.2 – 4.4 เป็นการทดสอบระบบไม่มีทั้งวงรอบควบคุมกระแส และอัตราขยายป้อนกลับ ณ ความเร็วมอเตอร์ 1500, 300, 50 rpm ตามลำดับ จะพบว่าที่ความเร็วมอเตอร์ค่าสูง(1500 rpm)กระแสที่จ่ายให้กับมอเตอร์ในเฟส u ทั้งกระแสจริง กระแสประมาณ และกระแสคำสั่ง ต่างก็มีค่าใกล้เคียงกันมาก โดยค่าผิดพลาดของกระแสในแกน d และ q นั้นมีค่าสอดคล้องกับ 1 A และ 0.5 A ตามลำดับ ค่าผิดพลาดของกระแสนี้ส่งผลกระทบต่อระบบประมาณค่าความเร็วและระบบควบคุม โดยจะเห็นได้จากความเร็วประมาณนั้นมีค่าระลอกอยู่ประมาณ 10 rpm ทั้งนี้เนื่องจากอัตราขยายแบบปรับตัวในการประมาณค่าความเร็ว ($K_p = 3.5, K_I = 200$) ที่เลือกใช้อาจจะยังไม่ดีพอจึงทำให้เกิดการแกว่งที่ความเร็วมอเตอร์ค่าต่ำเมื่อพิจารณาจากค่ากระแสในเฟส u จะเห็นได้ว่าค่ากระแสจริงจะน้อยกว่าค่ากระแสคำสั่งมากขึ้นเรื่อยๆตามค่าความเร็วที่ลดลงซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าอิทธิพลของสัญญาณรบกวนที่มีมากขึ้นที่่านความเร็วต่ำที่แรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์มีค่าน้อย ค่าผิดพลาดของกระแสในแกน d ยังคงมีอยู่เช่นเดิม ส่วนค่าผิดพลาดในแกน q นั้นจะลดลงเพราะว่าผลของตัวอินทิเกรตในวงรอบประมาณค่าความเร็ว

2) ผลการทดสอบในสภาวะชั่วคราวเมื่อมีการกลับทิศความเร็ว

รูปที่ 4.5 และ 4.6 เป็นการทดสอบการทำงานขณะกลับทิศมอเตอร์ระหว่าง 1500 และ -1500 rpm โดยที่ระบบไม่มีวงรอบควบคุมกระแส และอัตราขยายป้อนกลับแต่อย่างใด จะเห็นว่าในช่วงที่มอเตอร์เริ่มกลับทิศจาก +1500 rpm ไปยัง -1500 rpm ความเร็วมอเตอร์จริงจะมีค่าน้อยกว่าความเร็วประมาณ และในทางตรงกันข้ามขณะกลับทิศจากจากความเร็ว-1500 rpm ไปยังทิศที่ความเร็ว +1500 rpm ความเร็วมอเตอร์จริงจะมีค่ามากกว่าความเร็วประมาณโดยค่าผิดพลาดของความเร็วจะมีค่าระลอกอยู่ประมาณ 50 rpm ซึ่งมีค่าค่อนข้างสูง ทั้งนี้คาดว่าอาจจะเนื่องมาจากอัตราขยายแบบปรับตัวของระบบประมาณค่าความเร็วที่ยังออกแบบไม่ดีพอ

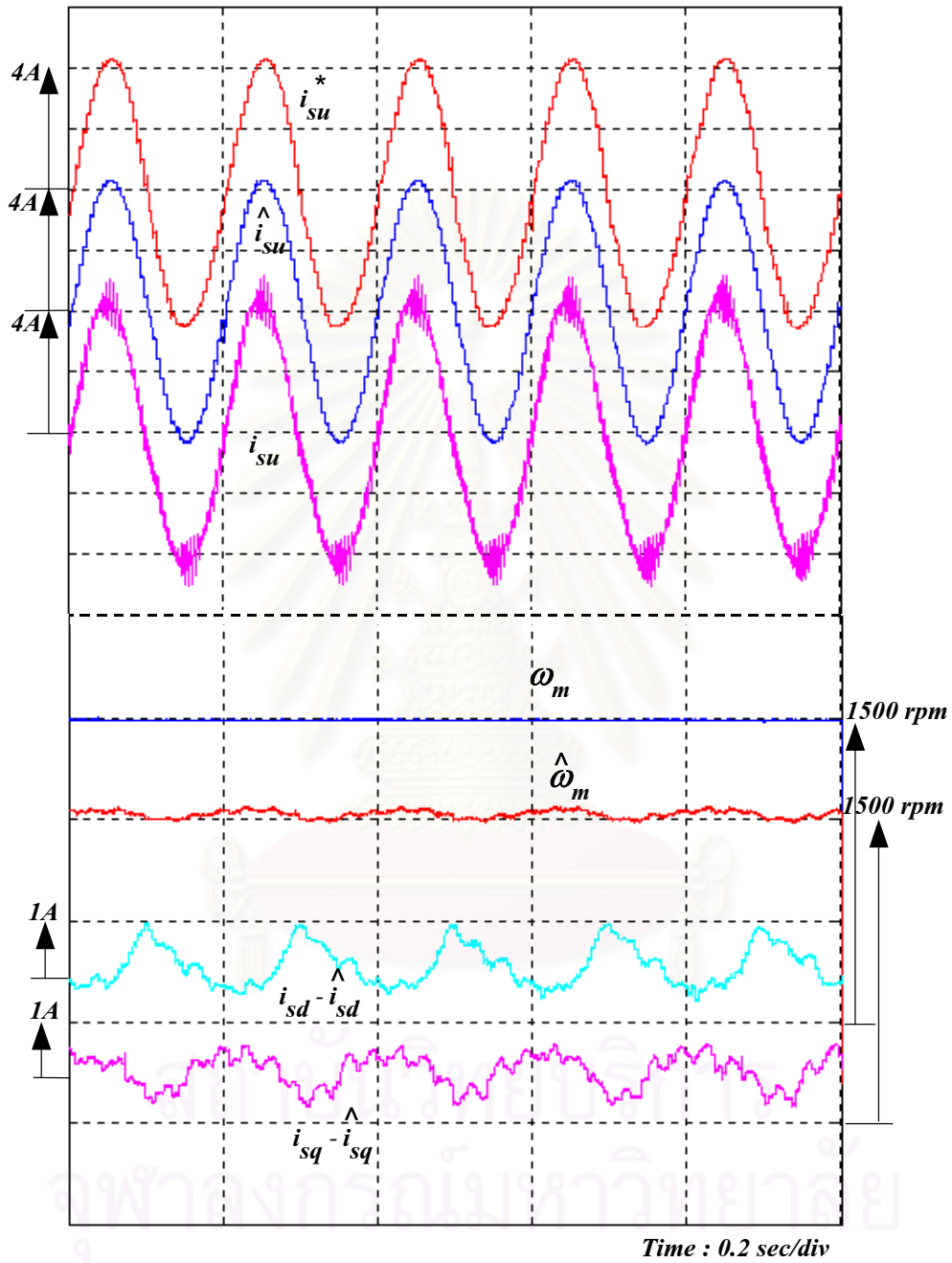
ข) การทดสอบคุณสมบัติการควบคุมความเร็วของระบบควบคุมแบบเวกเตอร์ไร้เซ็นเซอร์วัดความเร็วที่อาศัยการควบคุมแบบแยกอิสระ โดยระบบมีวงรอบควบคุมกระแส ($K_p = 5, K_I = 400$) แต่ไม่มีอัตราขยายป้อนกลับ ($H_1', H_2' = 0$)

1. ผลการทดสอบในสถานะอยู่ตัว

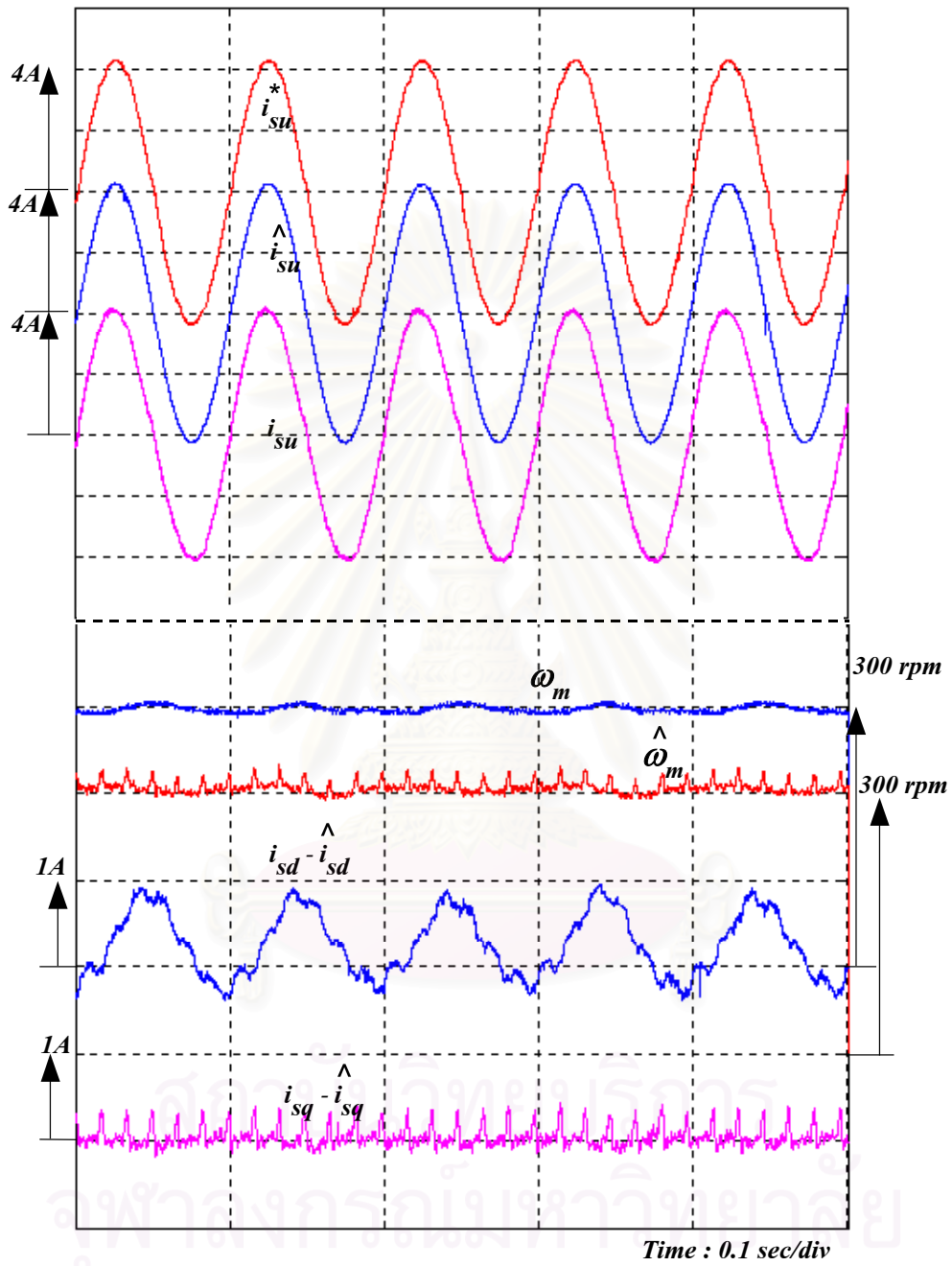
รูปที่ 4.7 – 4.9 เป็นการทดสอบกรณีระบบมีวงรอบควบคุมกระแส ($K_p = 5, K_I = 400$) แต่ไม่มีอัตราขยายป้อนกลับ ($H_1', H_2' = 0$) ที่ความเร็วมอเตอร์ 1500, 300, 50 rpm ตามลำดับ จะพบว่าที่ความเร็วมอเตอร์ค่าสูง (1500 rpm) ค่ากระแสที่จ่ายให้กับมอเตอร์ในเฟส u ทั้งค่ากระแสจริง กระแสประมาณ และกระแสคำสั่ง ต่างก็มีค่าใกล้เคียงกันมากเหมือนในกรณีไม่มีวงรอบควบคุมกระแส ค่าผิดพลาดของกระแสในแกน d และ q นั้นมีค่าสอดคล้องกับ 1 A และ 0.5 A ตามลำดับสำหรับย่านความเร็วต่ำนั้นจากรูปคลื่นกระแสเฟส u จะพบว่า กระแสจริงยังคงมีค่าสอดคล้องกับค่ากระแสคำสั่งได้ โดยไม่มีความผิดพลาดเหมือนในกรณีที่ไม่มีวงรอบควบคุมกระแส ซึ่งแสดงให้เห็นว่า วงรอบควบคุมกระแสสามารถลดทอนผลของเวลาประวิงและความไม่เป็นอุดมคติของสวิตช์กำลัง และสัญญาณรบกวนจากปัจจัยอื่นๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2. ผลการทดสอบในสถานะชั่วคราวเมื่อมีการกลับทิศความเร็ว

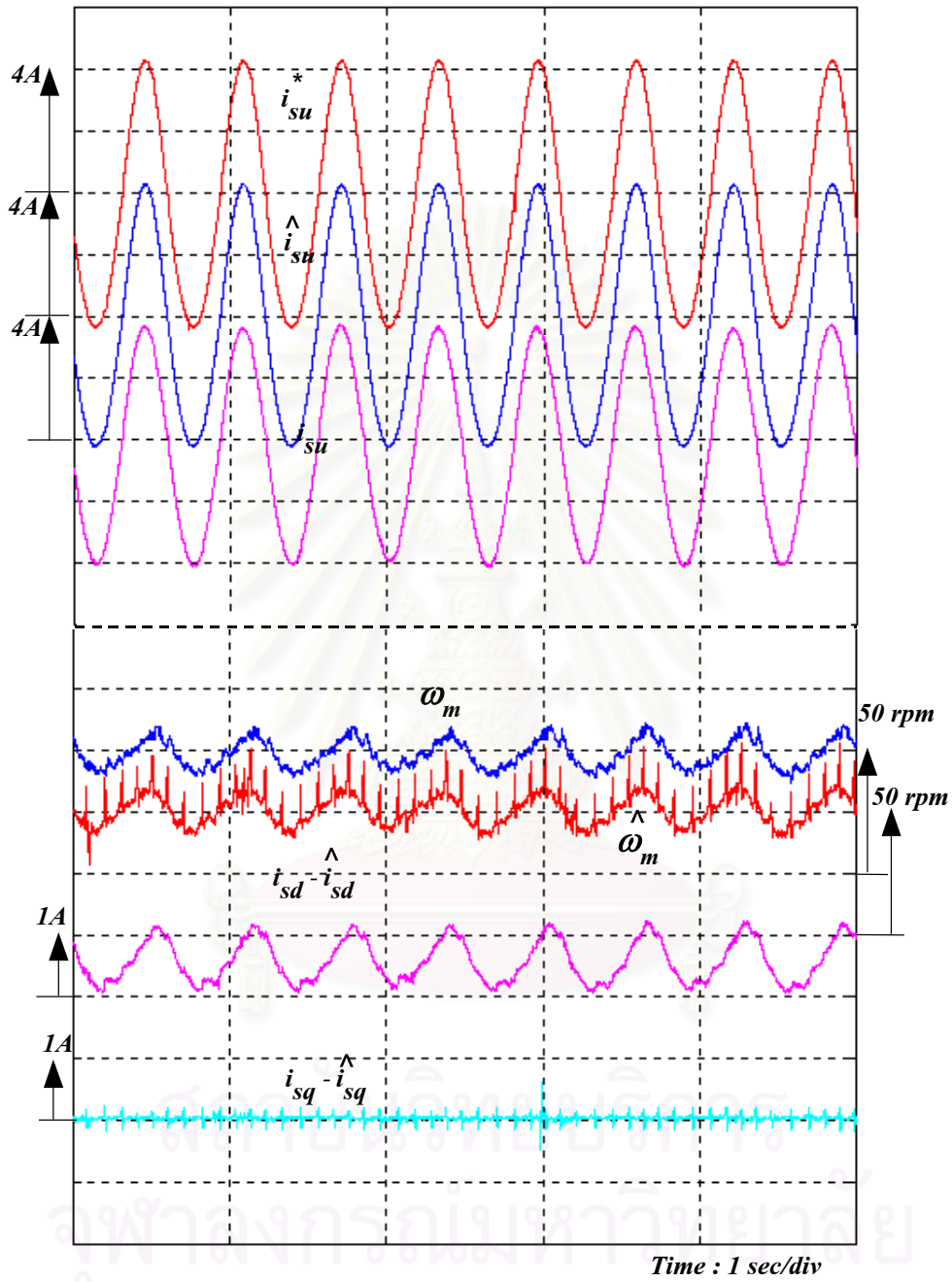
รูปที่ 4.10 และ 4.11 เป็นการทดสอบการทำงานขณะกลับทิศมอเตอร์ระหว่าง 1500 และ -1500 rpm โดยที่ระบบมีวงรอบควบคุมกระแส แต่ไม่มีอัตราขยายป้อนกลับ จะเห็นว่าระบบจะสามารถทำงานได้ดีเหมือนกับกรณีที่ไม่มีวงรอบควบคุมกระแส เพราะว่าการเพิ่มวงรอบควบคุมกระแสเข้าไปในระบบไม่ได้ทำให้เกิดปัญหาด้านเสถียรภาพ การควบคุมแรงบิด การควบคุมความเร็ว ของระบบแต่อย่างใด ในทางตรงกันข้ามผลการตอบสนองต่อกระแสคำสั่งในสถานะชั่วคราวของระบบจะดีกว่าตอนที่ไม่มีวงรอบควบคุมกระแส



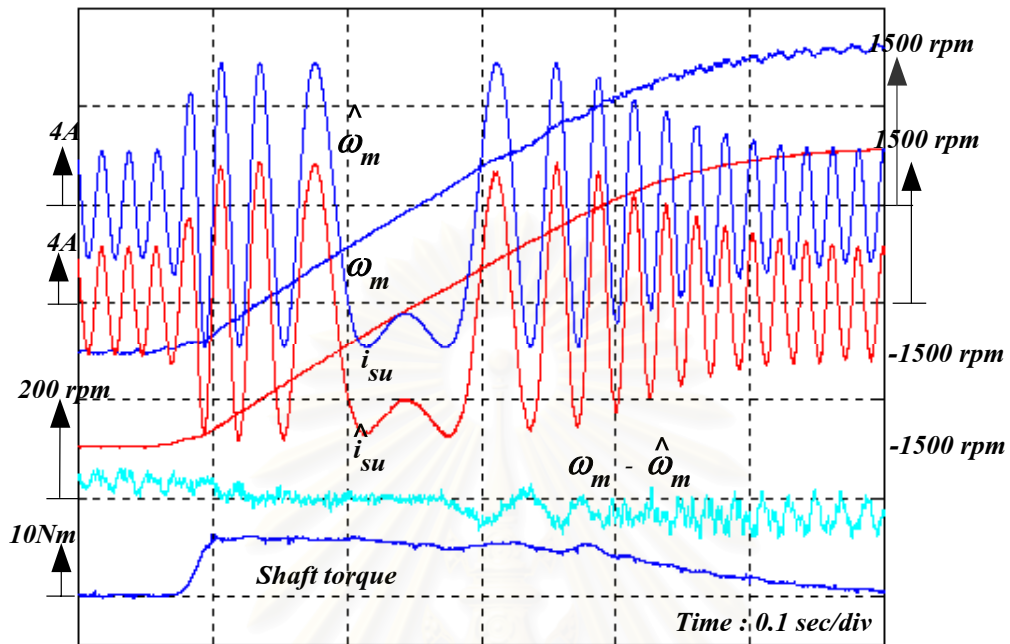
รูปที่ 4. 2 ผลการทำงานในสภาวะอยู่ตัวเมื่อความเร็วคำสั่งมอเตอร์ เท่ากับ 1500 rpm ระบบไม่มีวงรอบควบคุมกระแส ($K_p=0, K_i=0$) และไม่มีอัตราขยายป้อนกลับ ($H'_1, H'_2=0$)



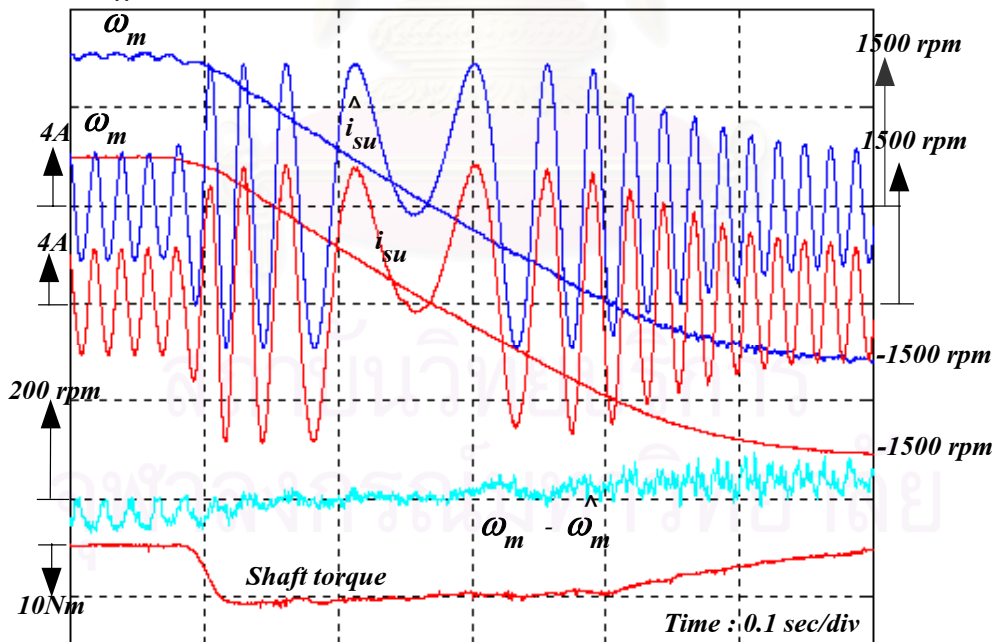
รูปที่ 4.3 ผลการทำงานในสถานะอยู่ตัวเมื่อความเร็วคำสั่งมอเตอร์ เท่ากับ 300 rpm ระบบไม่มีวงรอบควบคุมกระแส ($K_p=0, K_i=0$) และไม่มีอัตราขยายป้อนกลับ ($H'_1, H'_2=0$)



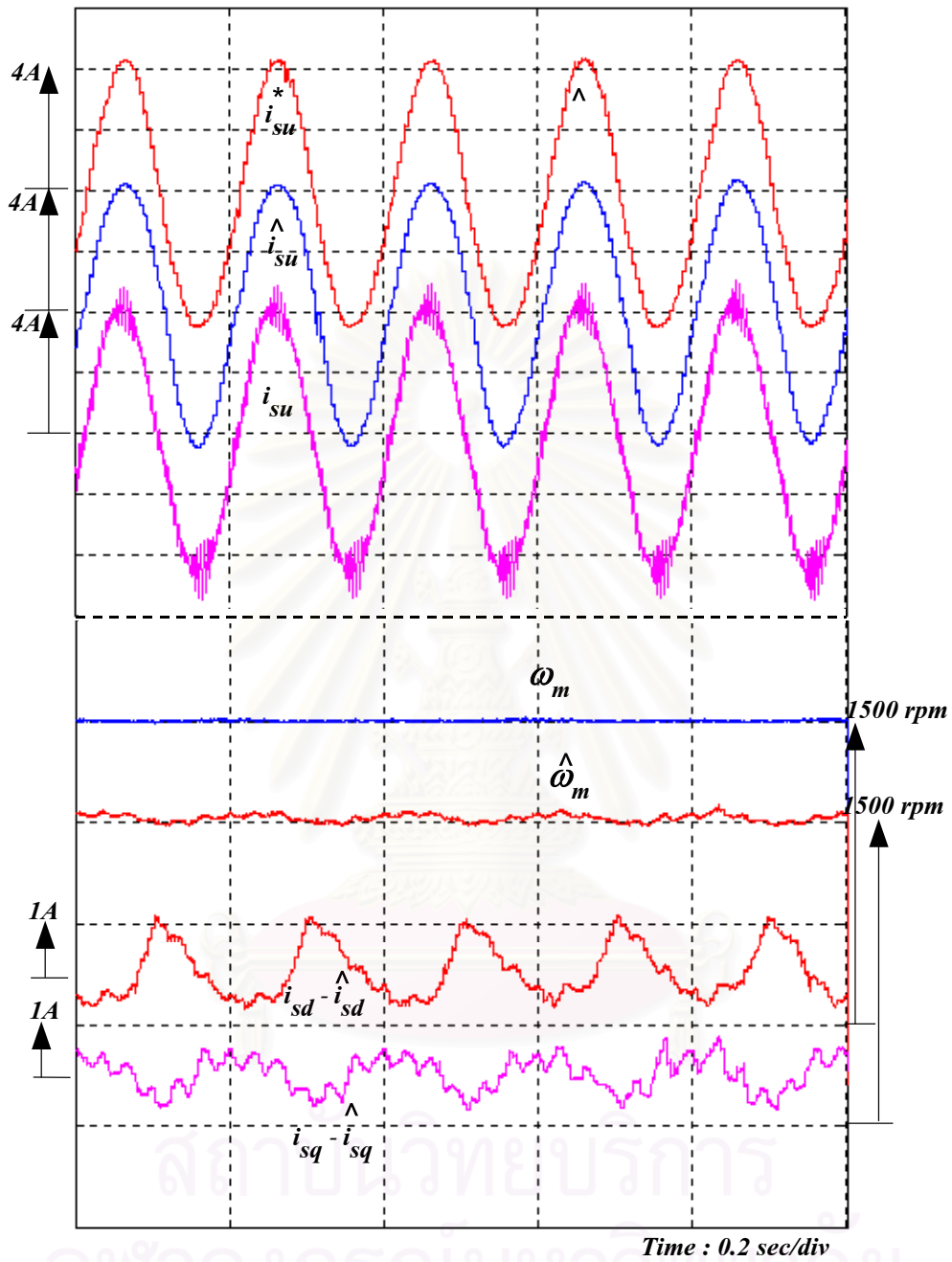
รูปที่ 4. 4 ผลการทำงานในสภาวะอยู่ตัวเมื่อความเร็วคำสั่งมอเตอร์ เท่ากับ 50 rpm ระบบไม่มีวงรอบควบคุมกระแส ($K_p=0, K_i=0$) และไม่มีอัตราขยายป้อนกลับ ($H'_1, H'_2=0$)



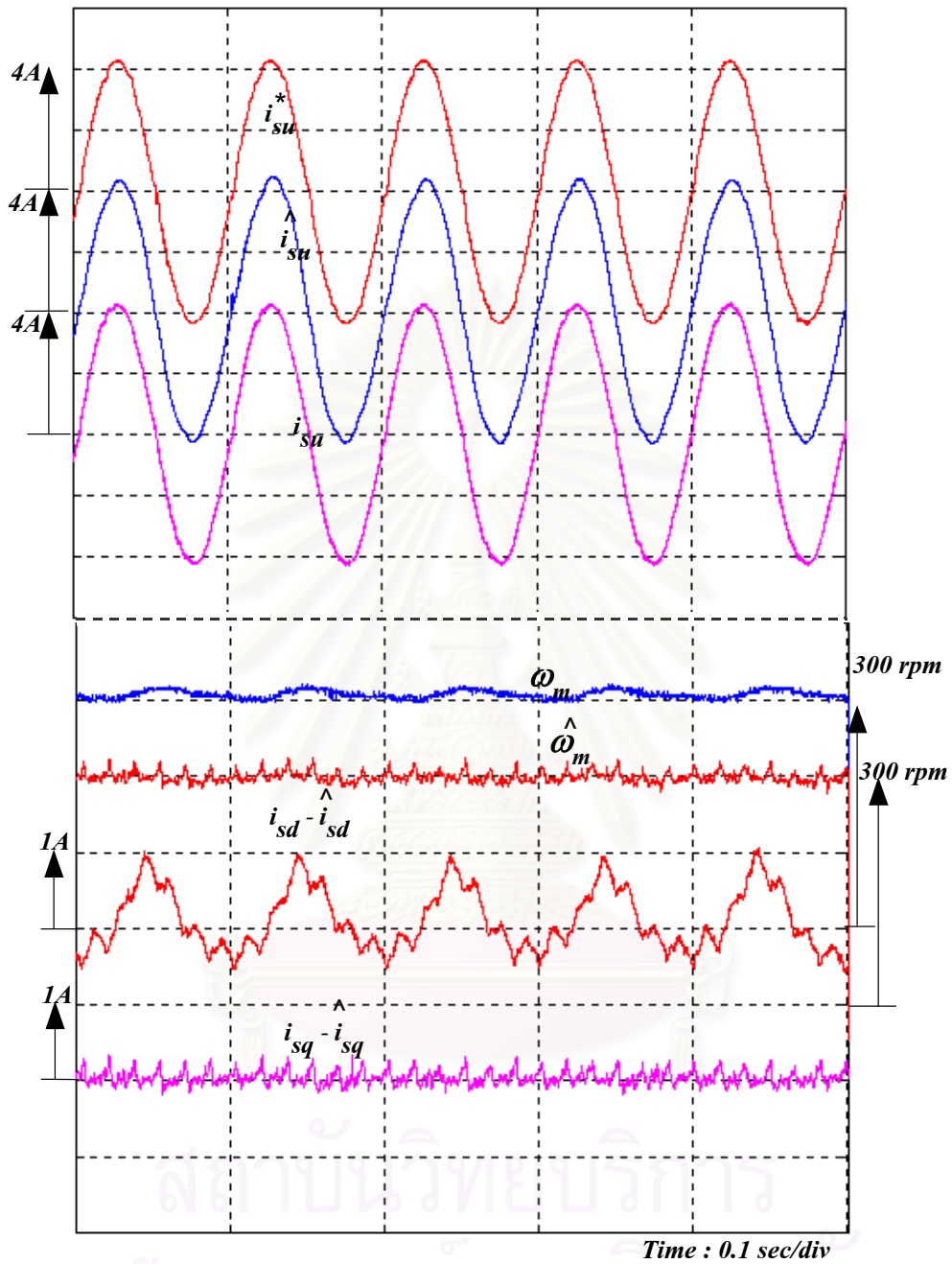
รูปที่ 4.5 ผลการทำงานขณะกลับทิศความเร็วมอเตอร์จาก -1500 ไป 1500 rpm เมื่อระบบไม่มีวงรอบควบคุมกระแส ($K_p=0, K_i=0$) และไม่มีอัตราขยายป้อนกลับ ($H'_1, H'_2=0$)



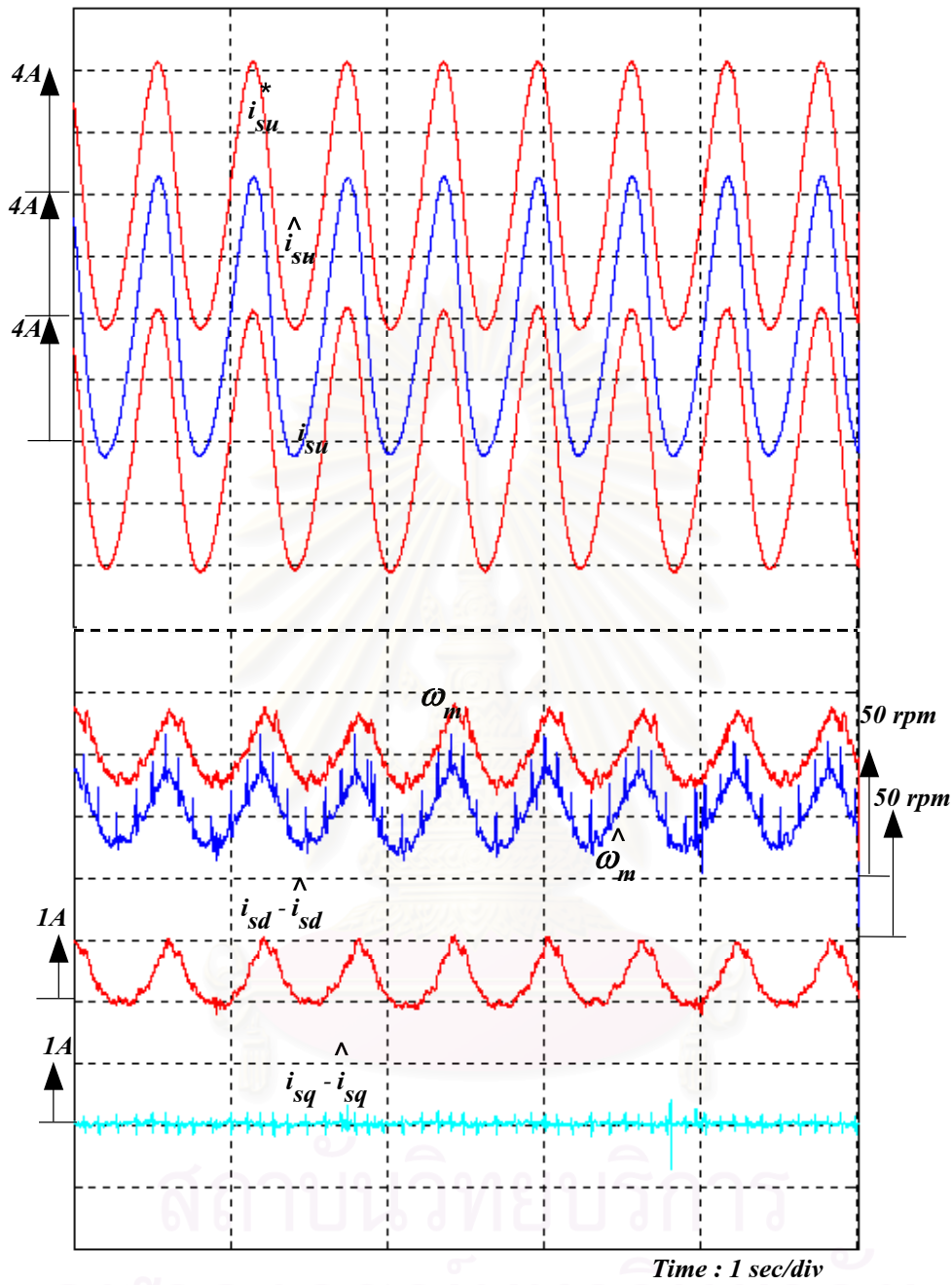
รูปที่ 4.6 ผลการทำงานขณะกลับทิศความเร็วมอเตอร์จาก 1500 ไป -1500 rpm เมื่อระบบไม่มีวงรอบควบคุมกระแส ($K_p=0, K_i=0$) และไม่มีอัตราขยายป้อนกลับ ($H'_1, H'_2=0$)



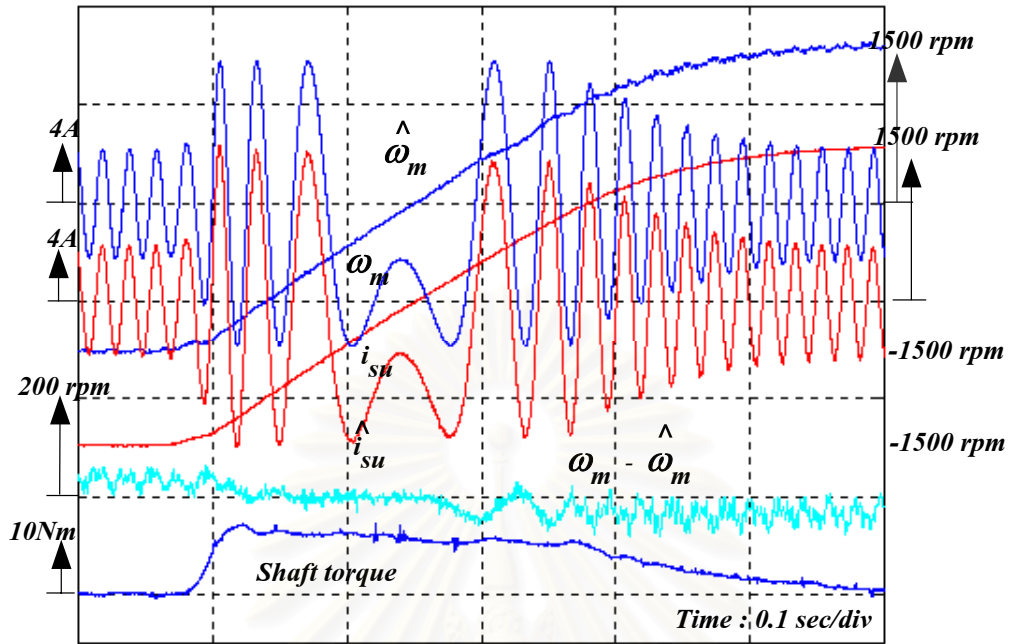
รูปที่ 4.7 ผลการทำงานในสภาวะอยู่ตัวเมื่อความเร็วคำสั่งมอเตอร์ เท่ากับ 1500 rpm ระบบมีวงรอบควบคุมกระแส ($K_p=5, K_i=400$) แต่ไม่มีอัตราขยายป้อนกลับ ($H'_1, H'_2 = 0$)



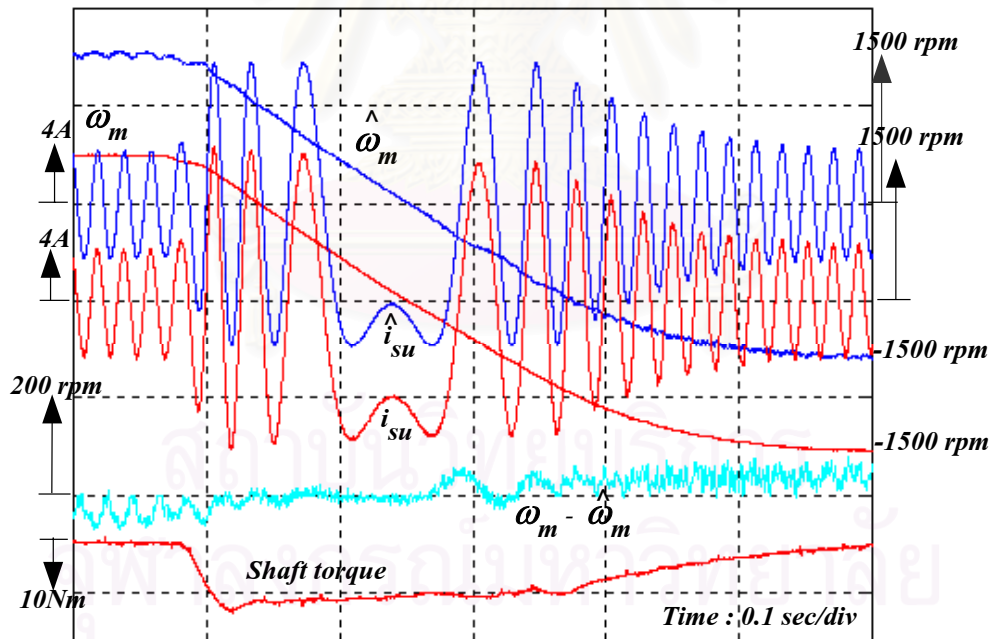
รูปที่ 4. 8 ผลการทำงานในสภาวะอยู่ตัวเมื่อความเร็วคำสั่งมอเตอร์ เท่ากับ 300 rpm ระบบมีวงรอบควบคุมกระแส ($K_p=5, K_i=400$) แต่ไม่มีอัตราขยายป้อนกลับ ($H'_1, H'_2 = 0$)



รูปที่ 4. 9 ผลการทำงานในสภาวะอยู่ตัวเมื่อความเร็วคำสั่งมอเตอร์ เท่ากับ 50 rpm ระบบมี
วงรอบควบคุมกระแส ($K_p=5$, $K_i= 400$) แต่ไม่มีอัตราขยายป้อนกลับ ($H'_1, H'_2 = 0$)



รูปที่ 4.10 ผลการทำงานขณะกลับทิศความเร็วมอเตอร์จาก -1500 ไป 1500 rpm เมื่อระบบมีวงรอบควบคุมกระแส ($K_p=5$, $K_i=400$) และไม่มีอัตราขยายป้อนกลับ ($H'_1, H'_2=0$)



รูปที่ 4.11 ผลการทำงานขณะกลับทิศความเร็วมอเตอร์จาก 1500 ไป -1500 rpm เมื่อระบบมีวงรอบควบคุมกระแส ($K_p=5$, $K_i=400$) และไม่มีอัตราขยายป้อนกลับ ($H'_1, H'_2=0$)

ค) การทดสอบคุณสมบัติการควบคุมความเร็วของระบบควบคุมแบบเวกเตอร์ไร้เซ็นเซอร์วัดความเร็วที่อาศัยการควบคุมแบบแยกอิสระ โดยระบบมีวงรอบควบคุมกระแส ($K_p = 5, K_I = 400$) และมีอัตราขยายป้อนกลับ (H_1', H_2')

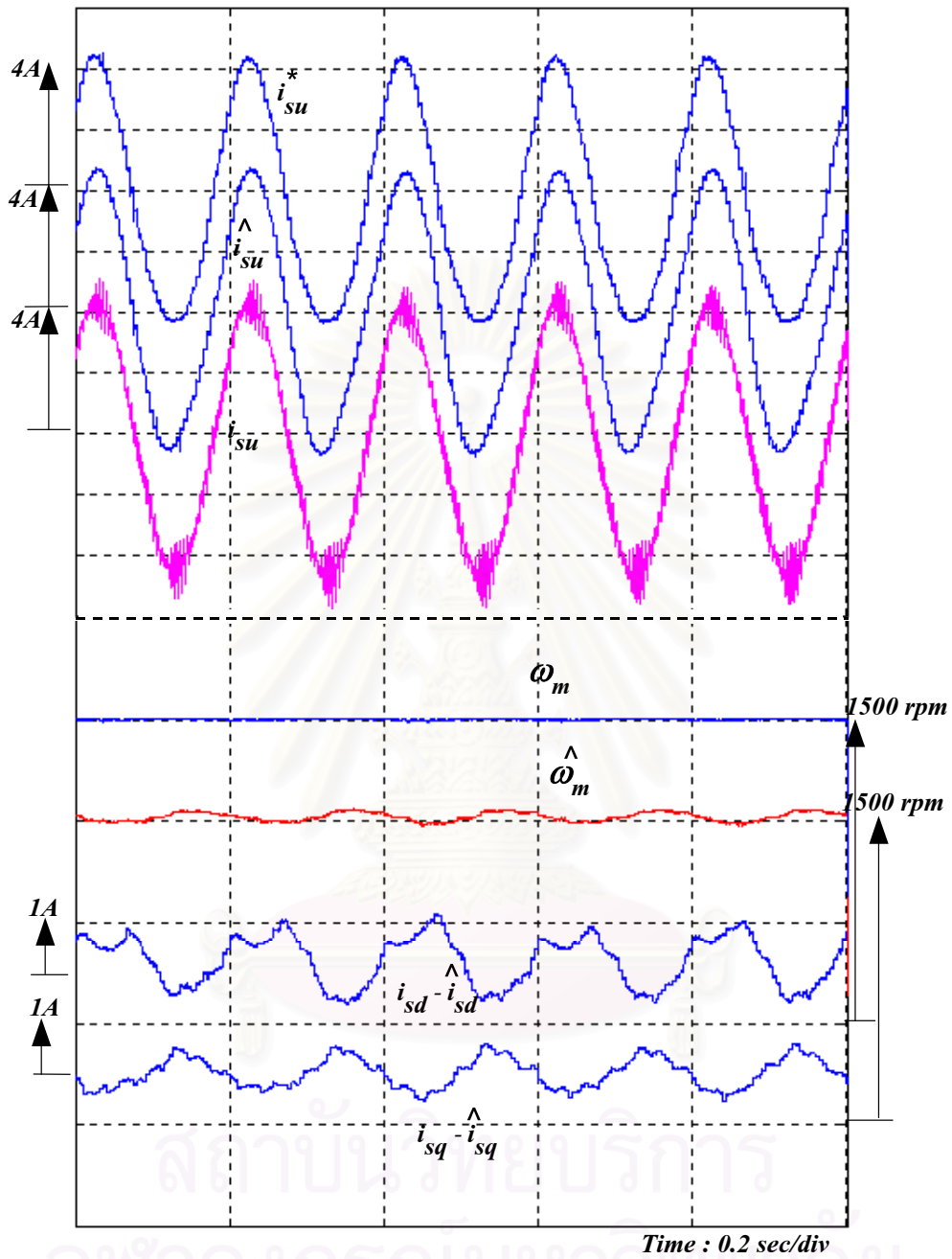
1. ผลการทดสอบในสภาวะอยู่ตัว

รูปที่ 4.12 – 4.15 เป็นการทดสอบระบบในกรณีที่มียังรอบควบคุมกระแส

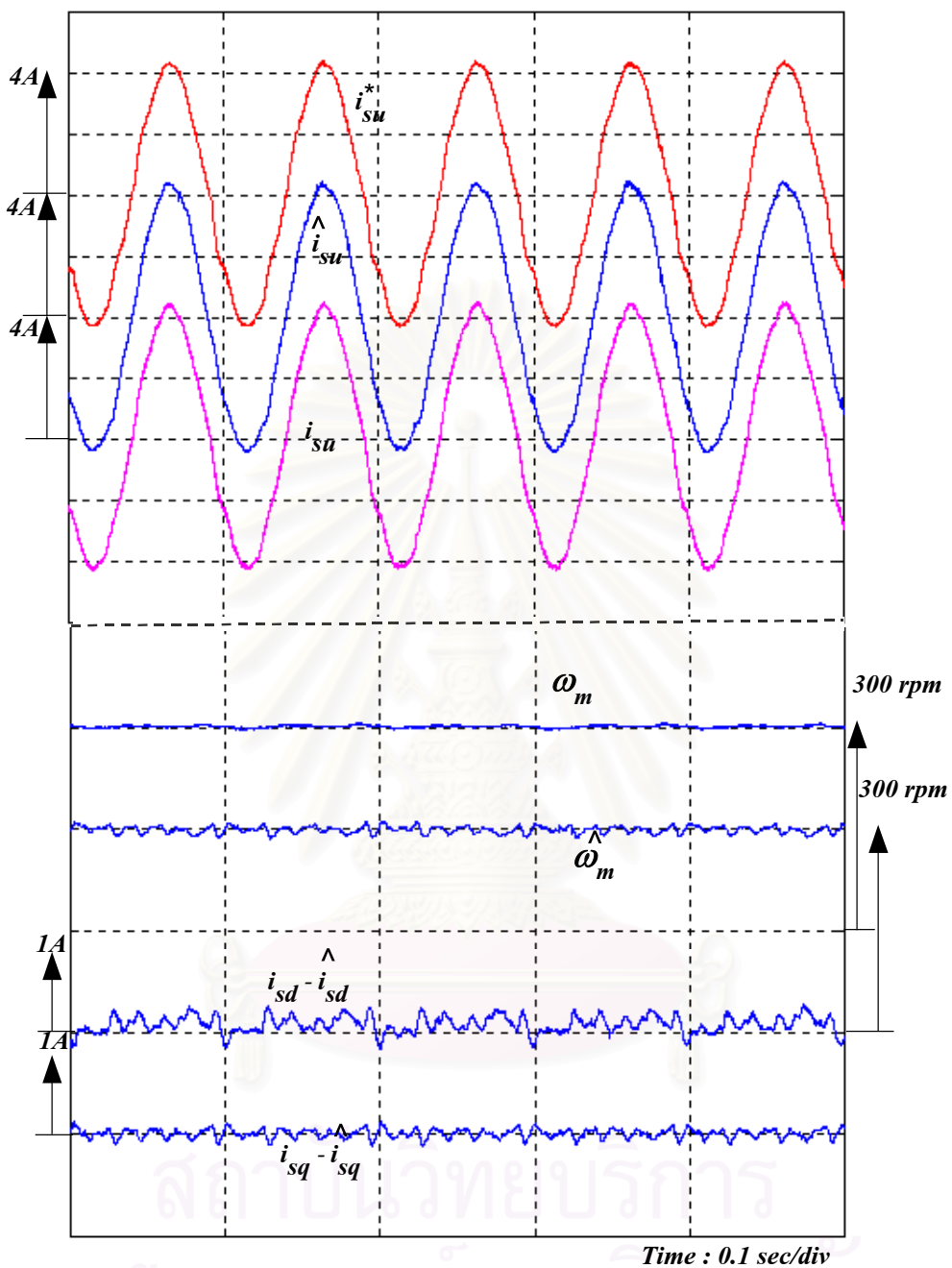
($K_p = 5, K_I = 400$) และมีอัตราขยายป้อนกลับ (H_1', H_2') เนื่องจากค่า k ในอัตราขยายป้อนกลับ H_1' จะเกี่ยวข้องโดยตรงกับขนาดของอัตราขยาย H_1' ซึ่งจากการทดสอบเราพบว่ามีผลทำให้การทำงานของระบบแตกต่างกันตามความเร็วของมอเตอร์ ทั้งนี้ค่าว่าเนื่องมาจากอัตราขยายป้อนกลับ H_1' ที่ใช้จะมีขนาดขึ้นกับความเร็วมอเตอร์หากเราใช้ค่า k คงที่ตลอดช่วงการทำงานก็จะทำให้เกิดการป้อนกลับด้วยอัตราขยายค่าสูงมาก ซึ่งจะทำให้ระบบเกิดการแกว่งและขาดเสถียรภาพได้ แต่ในทางกลับกันถ้าเราใช้ค่า k ค่าต่ำตลอดช่วงการทำงานก็จะเกิดปัญหาในย่านความเร็วต่ำเพราะอัตราขยายป้อนกลับจะมีค่าน้อยเกินไป ดังนั้นในที่นี้เราจึงแก้ปัญหานี้โดยปรับค่า k ของอัตราขยายป้อนกลับ H_1' ให้มีค่าเหมาะสมตามค่าความเร็วมอเตอร์ ค่าที่เลือกคือ $k=0.5, 5, 20, 20$ ที่ความเร็วมอเตอร์ 1500, 300, 50 และ 25 rpm ตามลำดับ จากผลการทดลองเราพบว่าค่าผิดพลาดของกระแสในแกน d และ q นั้นมีขนาดลดลงอย่างเห็นได้ชัดโดยเฉพาะในย่านความเร็วต่ำกระแสที่จ่ายให้กับมอเตอร์ทั้งกระแสจริง กระแสประมาณ และกระแสคำสั่งนั้นมีค่าใกล้เคียงกันมากแม้ว่าจะได้รับผลกระทบจากการประวิงเวลาและความไม่เป็นอุดมคติของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังก็ตามระบบสามารถทำงานตามกระแสคำสั่งได้แม้ว่าความเร็วมอเตอร์จะมีค่าต่ำมากก็ตามดังแสดงในรูปที่ 4.15 ซึ่งเป็นกรณีที่ความเร็วคำสั่งเท่ากับ 25 rpm

2. ผลการทดสอบในสภาวะชั่วคราวเมื่อมีการกลับทิศความเร็ว

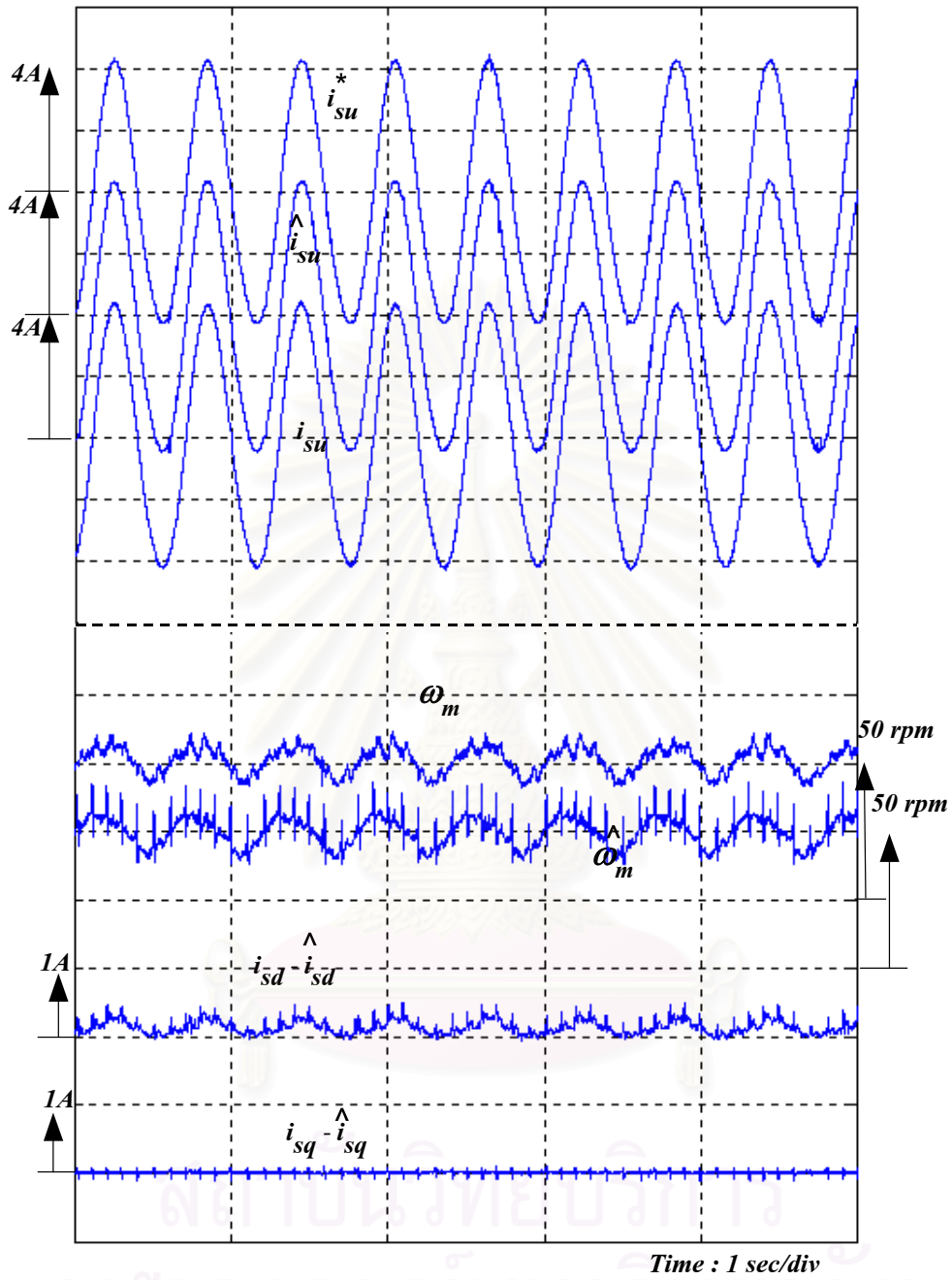
รูปที่ 4.16 และ 4.17 เป็นการทดสอบการทำงานขณะกลับทิศมอเตอร์ระหว่าง 1500 และ -1500 rpm โดยที่ระบบมีวงรอบควบคุมกระแส และมีอัตราขยายป้อนกลับ (H_1', H_2') โดยค่า k เท่ากับ 0.5 จะเห็นว่าค่าผิดพลาดของการประมาณค่าความเร็ว ($\omega_m - \hat{\omega}_m$) มีขนาดมากขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีที่ระบบไม่มีอัตราขยายป้อนกลับในตัวสังเกต ทั้งนี้สันนิษฐานว่าเป็นเพราะการใช้อัตราขยายป้อนกลับ H_1' และ H_2' ทำให้ฟังก์ชันโอนย้าย $G(s)$ เปลี่ยนไปจากเดิมส่งผลให้คุณสมบัติเชิงขนาดและเฟสของวงรอบการประมาณค่าความเร็วในรูปที่ 2.4 เปลี่ยนแปลงไป



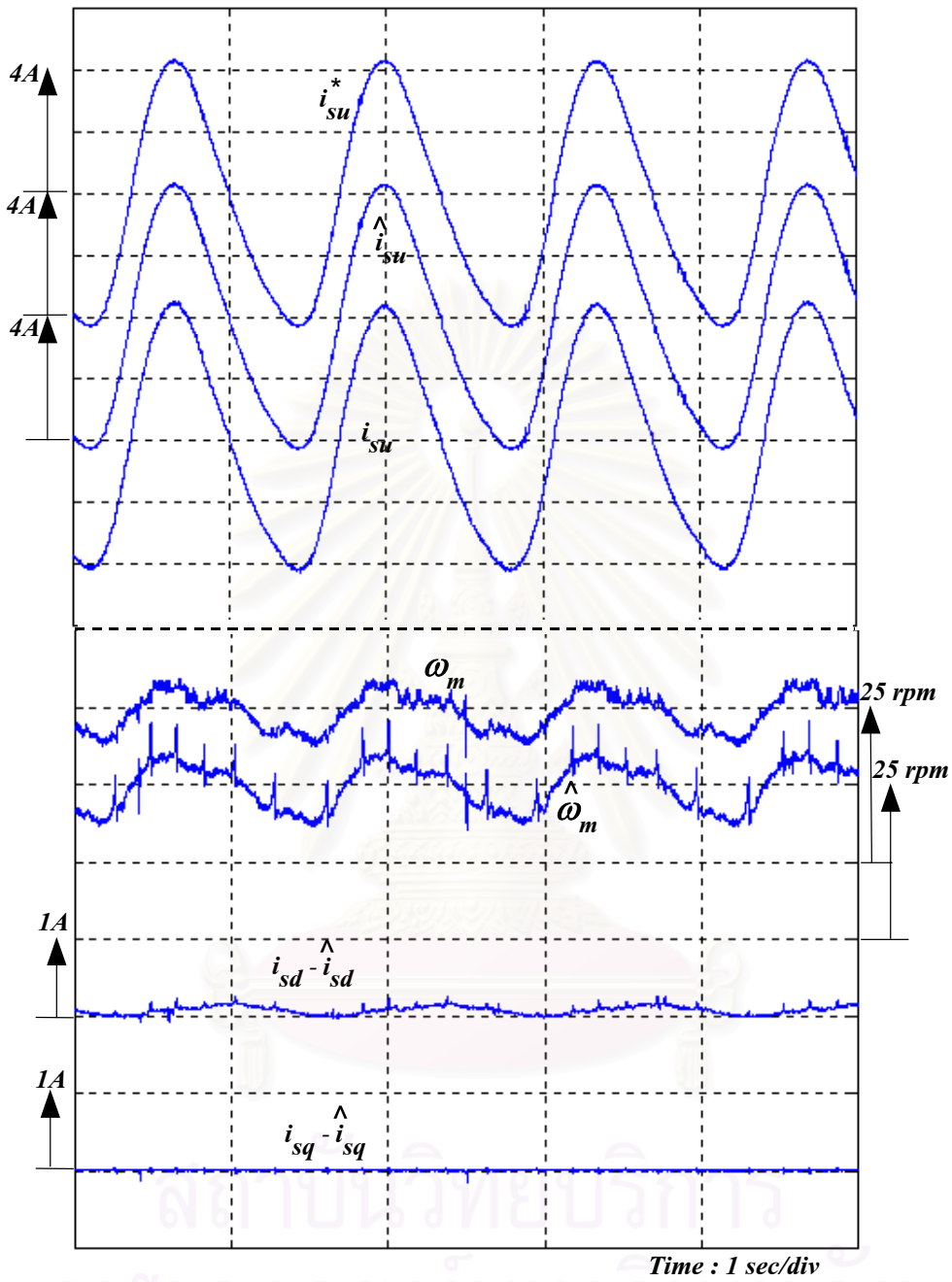
รูปที่ 4. 12 ผลการทำงานในสภาวะอยู่ตัวเมื่อความเร็วคำสั่งมอเตอร์ เท่ากับ 1500 rpm ระบบมี
วงรอบควบคุมกระแส ($K_p=5, K_i= 400$) และมีอัตราขยายป้อนกลับ (H'_1, H'_2) โดย $k=0.5$



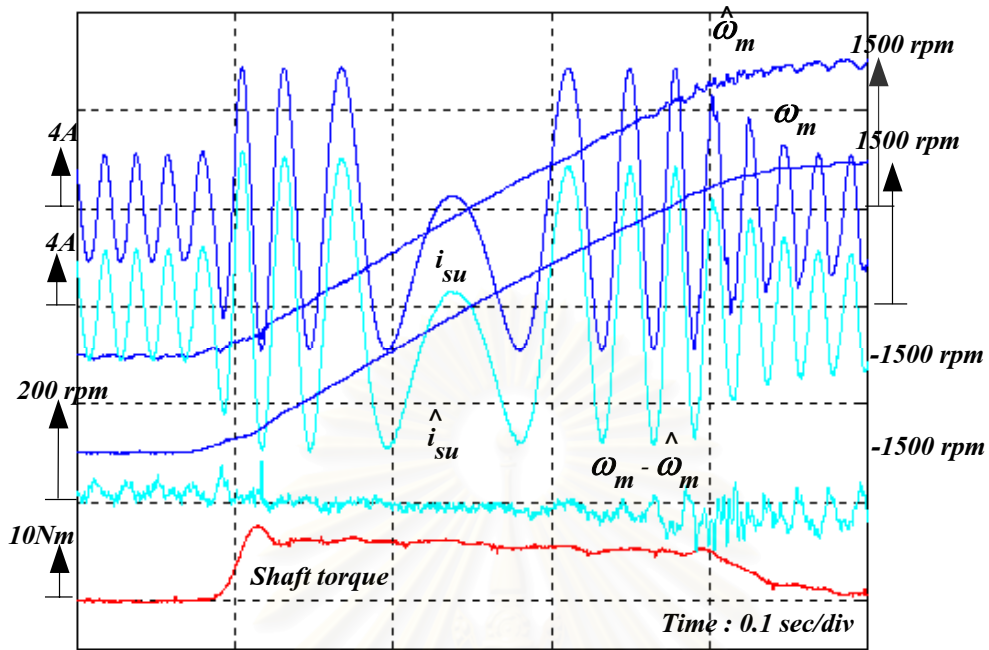
รูปที่ 4. 13 ผลการทำงานในสถานะอยู่ตัวเมื่อความเร็วคำสั่งมอเตอร์ เท่ากับ 300 rpm ระบบมีวงรอบควบคุมกระแส ($K_p=5, K_i= 400$) และมีอัตราขยายป้อนกลับ (H'_1, H'_2) โดยค่า $k=5$



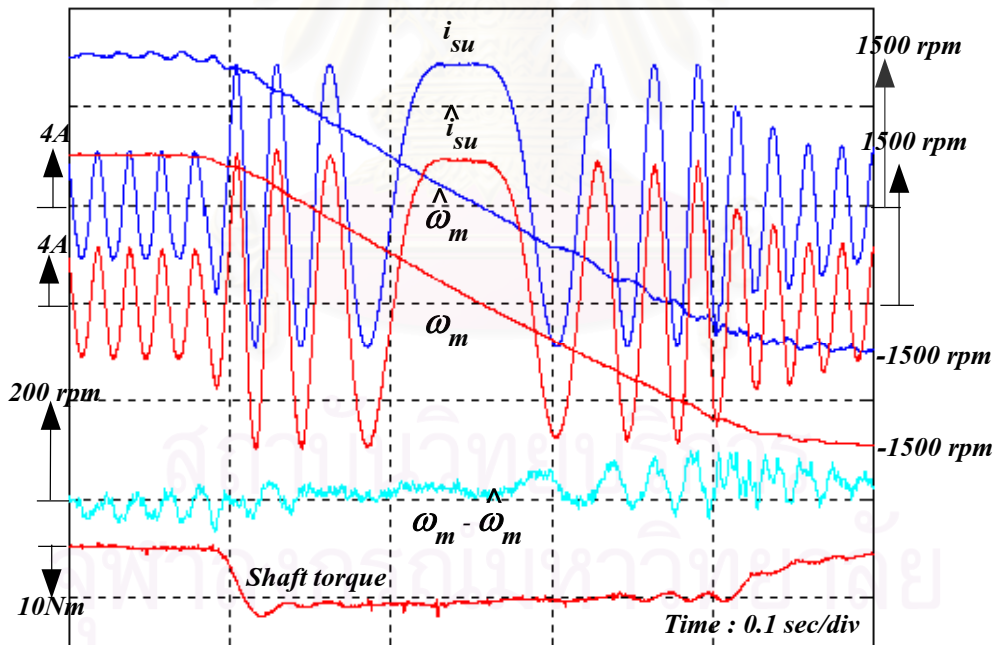
รูปที่ 4. 14 ผลการทำงานในสภาวะอยู่ตัวเมื่อความเร็วคำสั่งมอเตอร์ เท่ากับ 50 rpm ระบบมี
วงรอบควบคุมกระแส ($K_p=5$, $K_i= 400$) และมีอัตราขยายป้อนกลับ (H'_1, H'_2) โดยค่า $k=20$



รูปที่ 4.15 ผลการทำงานในสภาวะอยู่ตัวเมื่อความเร็วคำสั่งมอเตอร์ เท่ากับ 25 rpm ระบบมี
 วงรอบควบคุมกระแส ($K_p=5, K_i= 400$) และมีอัตราขยายป้อนกลับ (H'_1, H'_2) โดยค่า $k=20$



รูปที่ 4.16 ผลการทำงานขณะกลับทิศความเร็วมอเตอร์จาก -1500 ไป 1500 rpm เมื่อระบบมีวงรอบควบคุมกระแส ($K_p=5$, $K_i=400$) และอัตราขยายป้อนกลับ H_1', H_2' โดยค่า $k=0.5$



รูปที่ 4.17 ผลการทำงานขณะกลับทิศความเร็วมอเตอร์จาก 1500 ไป -1500 rpm เมื่อระบบมีวงรอบควบคุมกระแส ($K_p=5$, $K_i=400$) และอัตราขยายป้อนกลับ H_1', H_2' โดยค่า $k=0.5$

- ง) การทดสอบผลตอบสนองต่อโหลดแบบขั้นเปรียบเทียบกรณีมีอัตราขยายป้อนกลับ (H_1', H_2') และมีวงรอบควบคุมกระแส ($K_p = 5, K_I = 400$) กับกรณีไม่มีอัตราขยายป้อนกลับ $(H_1', H_2' = 0)$ และมีวงรอบควบคุมกระแส ($K_p = 5, K_I = 400$)

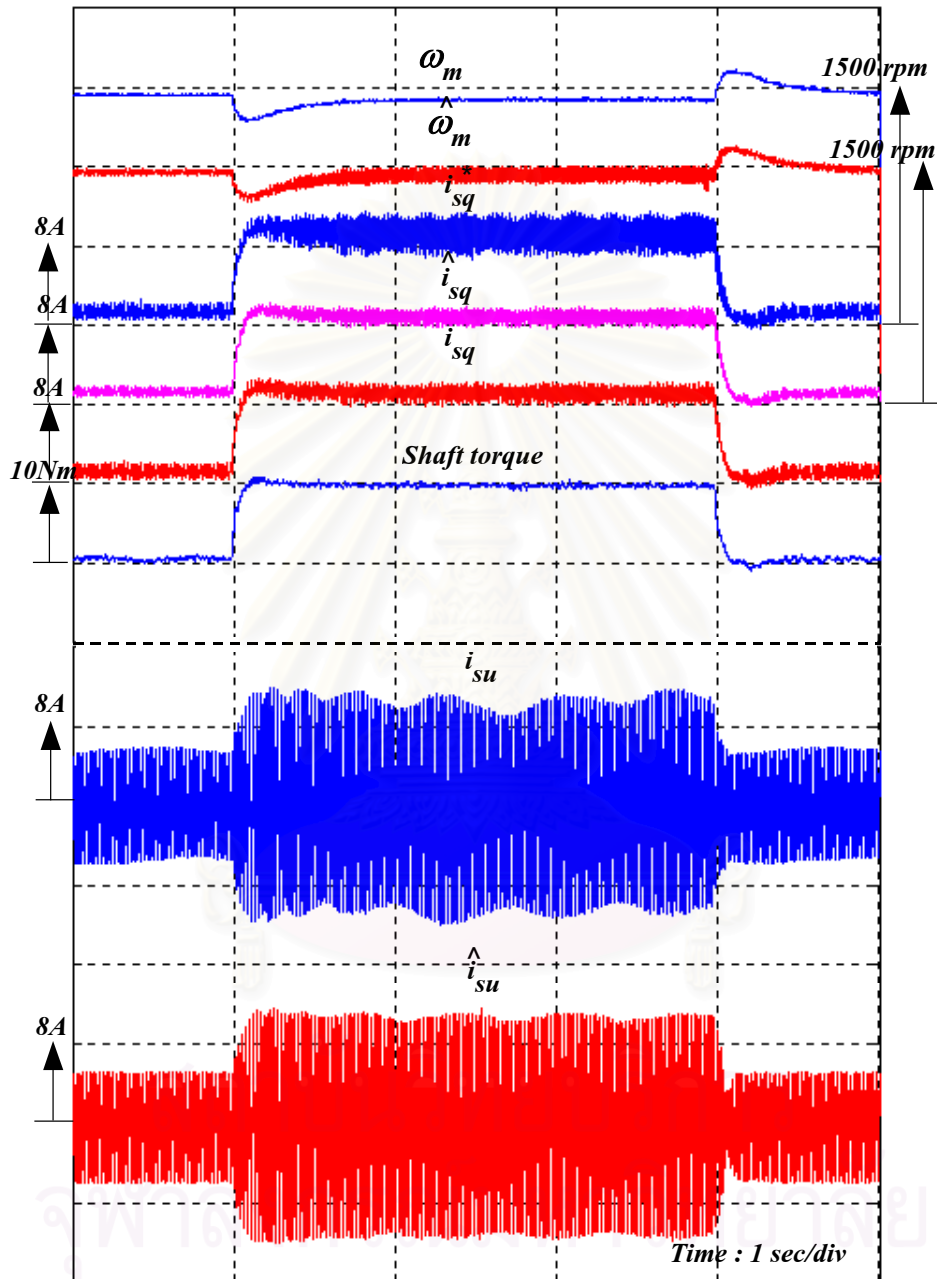
1) มอเตอร์ทำงานในโหมดมอเตอร์ (motoring mode)

1.1 ระบบมีวงรอบควบคุมกระแส ($K_p = 5, K_I = 400$) แต่ไม่มีอัตราขยายป้อนกลับของตัวสังเกต $(H_1', H_2' = 0)$

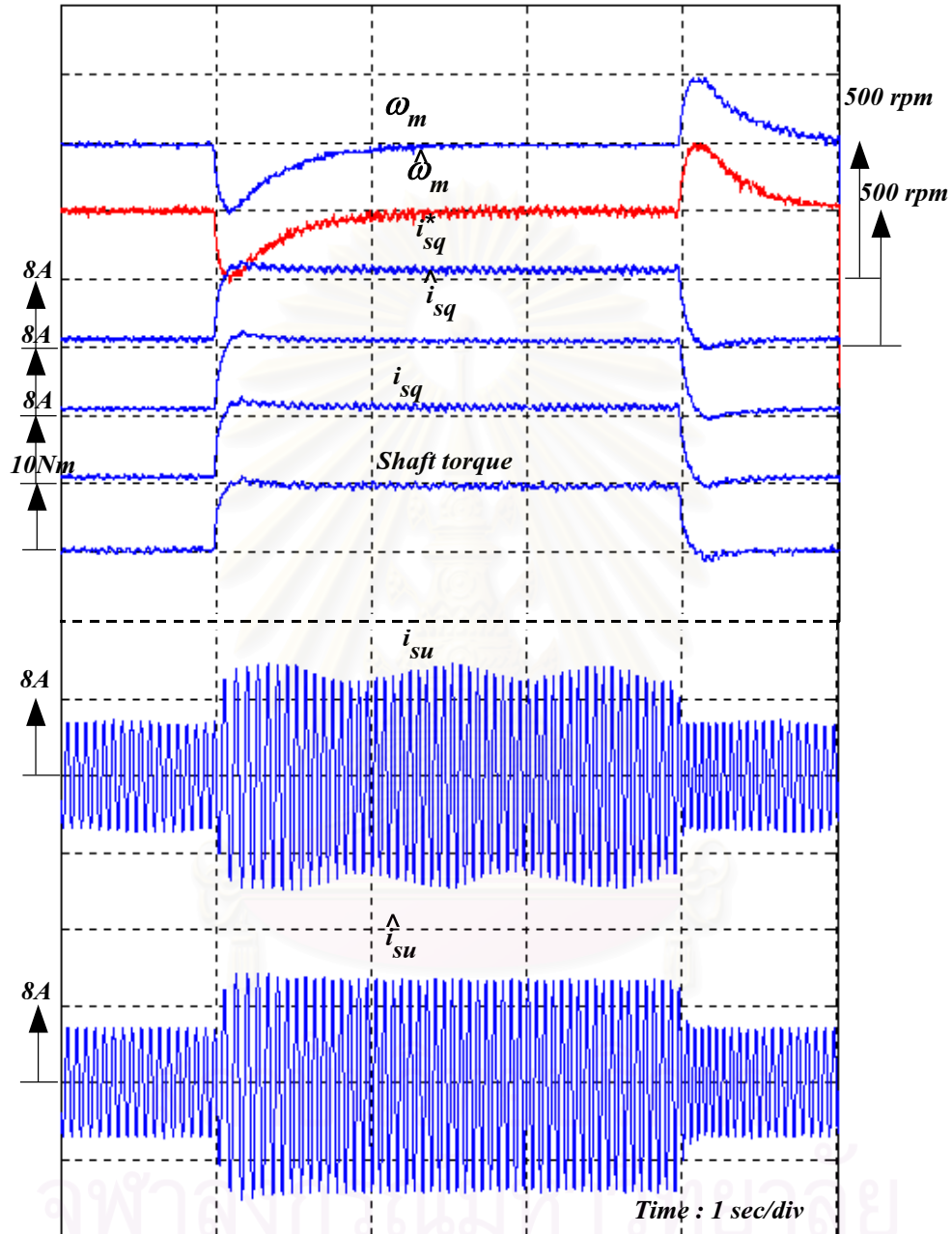
การทดสอบระบบในกรณีนี้เราจะทำการใส่โหลดแบบขั้นขนาด 10 Nm ซึ่งเป็นค่าพิกัดโดยให้มอเตอร์ทำงานที่ความเร็วต่าง ๆ คือ 1450, 500, 100, 50 และ 25 rpm ดังที่ได้แสดงในรูปที่ 4.18 – 4.22 ตามลำดับ เราพบว่าระบบสามารถควบคุมความเร็วและแรงบิดได้ดีโดยไม่มีปัญหาเรื่องเสถียรภาพ โดยมีเวลาในการตอบสนองต่อโหลดประมาณ 200 ms ในขณะที่ใส่โหลดเราพบว่าความเร็วมอเตอร์ตกลงและใช้เวลาประมาณ 250 ms กว่าจะกลับเข้าสู่ค่าเดิมซึ่งค่าค่อนข้างมาก ทั้งนี้เป็นผลจากการที่เราใช้อัตราขยายของวงรอบควบคุมความเร็วมีค่าต่ำ ($K_p = 0.4, K_I = 1$)

1.2 ระบบมีวงรอบควบคุมกระแส ($K_p = 5, K_I = 400$) และมีอัตราขยายป้อนกลับของตัวสังเกต (H_1', H_2')

การทดสอบระบบในกรณีนี้เราจะทำการใส่โหลดแบบขั้นขนาด 10 Nm ซึ่งเป็นค่าพิกัดโดยให้มอเตอร์ทำงานที่ความเร็วต่าง ๆ คือ 1450, 500, 100, 50 และ 25 rpm ดังที่ได้แสดงในรูปที่ 4.23 - 4.27 ตามลำดับ เราพบว่าระบบสามารถควบคุมความเร็วและแรงบิดได้ดีเช่นเดิม โดยมีเวลาในการตอบสนองต่อโหลดประมาณ 200 ms ดังนั้นการใส่อัตราขยายป้อนกลับไม่ได้ทำให้คุณสมบัติในย่านการทำงานในโหมดมอเตอร์เปลี่ยนแปลง นอกจากนั้นจากผลการทดลองเรายังพบว่าขนาดระลอกคลื่นในรูปคลื่นกระแสและความเร็วมีค่าลดลงเมื่อใช้อัตราขยายป้อนกลับ ซึ่งเป็นเป็นผลดีในแง่ที่ช่วยลดการแกว่งของระบบโดยเฉพาะในย่านความเร็วต่ำ

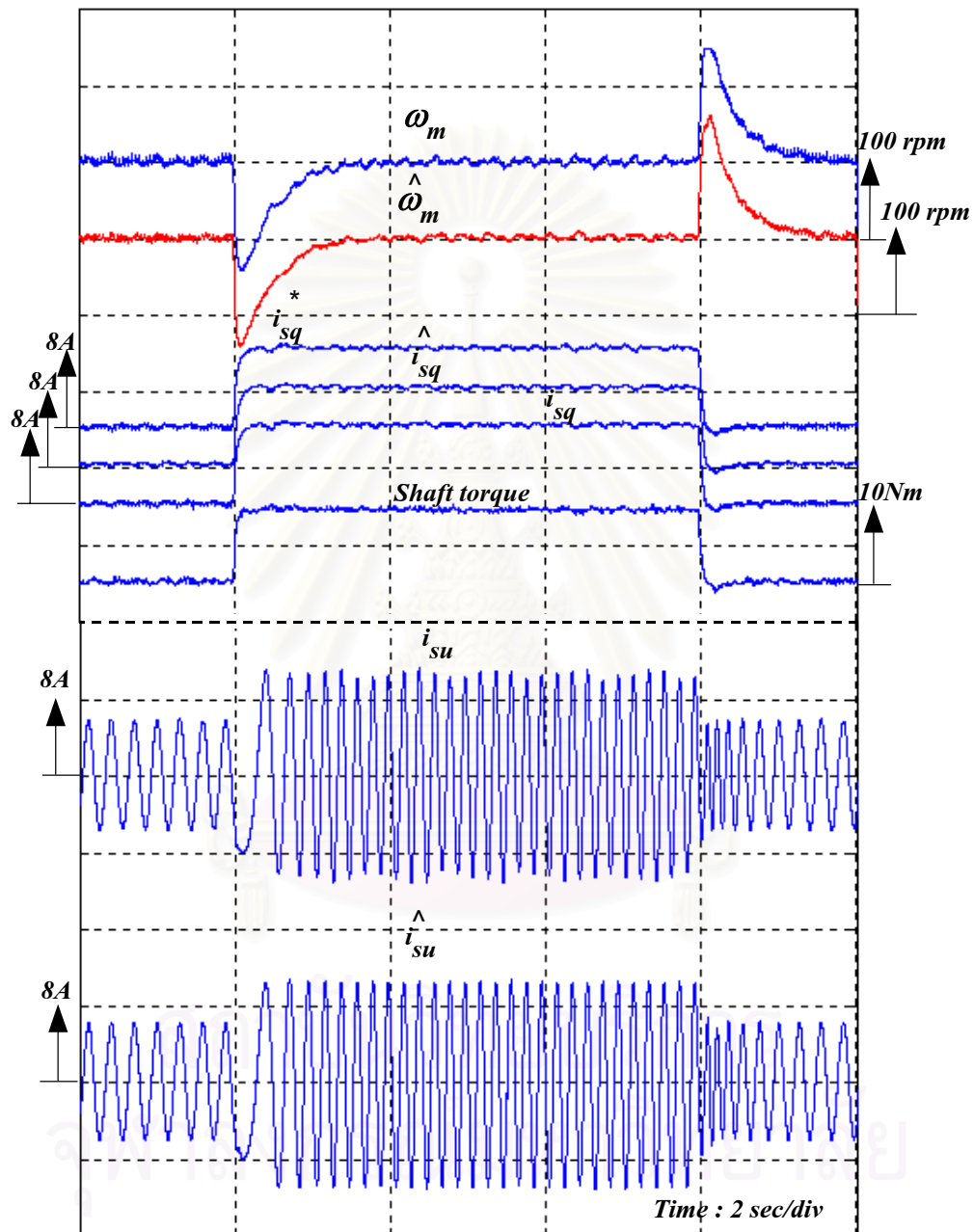


รูปที่ 4.18 ผลตอบสนองของแรงบิดขณะใส่โหลดพิกัด(10Nm)เมื่อความเร็วของมอเตอร์เท่ากับ 1450 rpm ระบบมีวงรอบควบคุมกระแส ($K_p=5$, $K_i= 400$) แต่ไม่มีอัตราขยายป้อนกลับ ($H'_1, H'_2=0$)

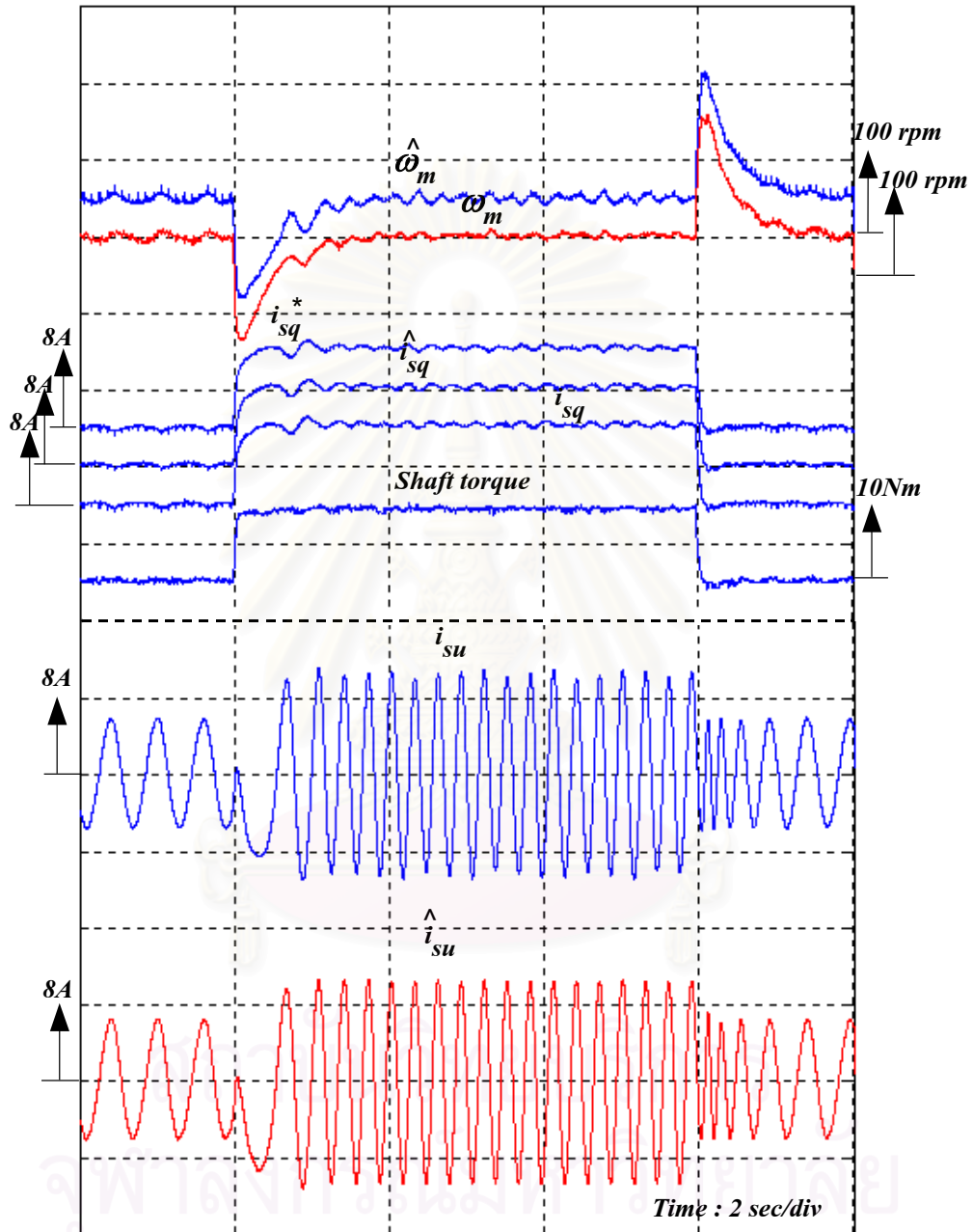


รูปที่ 4.19 ผลตอบสนองของแรงบิดขณะใส่โหลดพิกัด(10Nm)เมื่อความเร็วของมอเตอร์เท่ากับ 500 rpm ระบบมีวงรอบควบคุมกระแสกระแส ($K_p=5$, $K_i=400$) แต่ไม่มีอัตราขยายป้อนกลับ

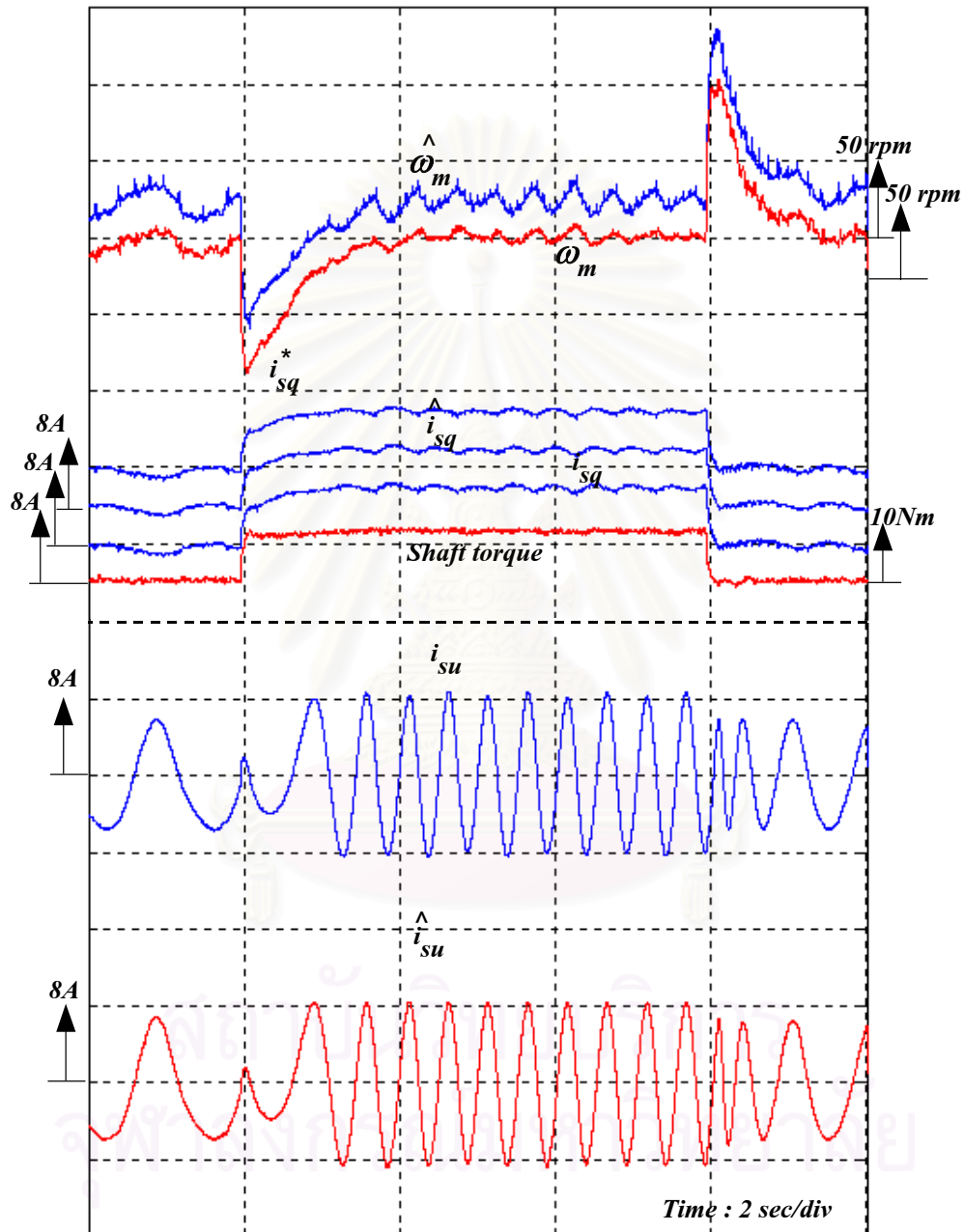
$$(H'_1, H'_2=0)$$



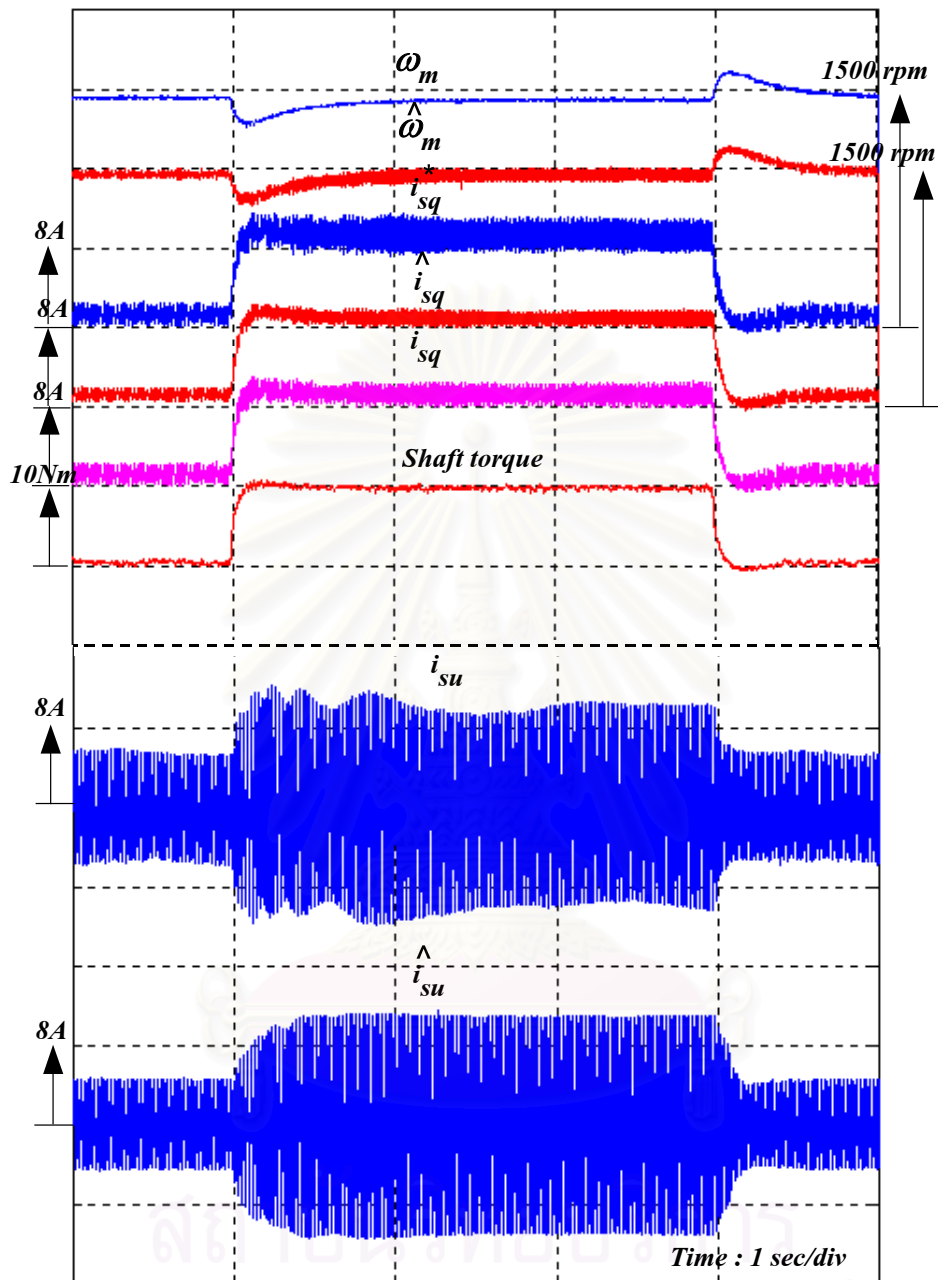
รูปที่ 4.20 ผลตอบสนองของแรงบิดขณะใส่โหลดพิกัด(10Nm)เมื่อความเร็วของมอเตอร์เท่ากับ 100 rpm ระบบมีวงรอบควบคุมกระแส ($K_p=5, K_i=400$) แต่ไม่มีอัตราขยายป้อนกลับ ($H_1, H_2=0$)



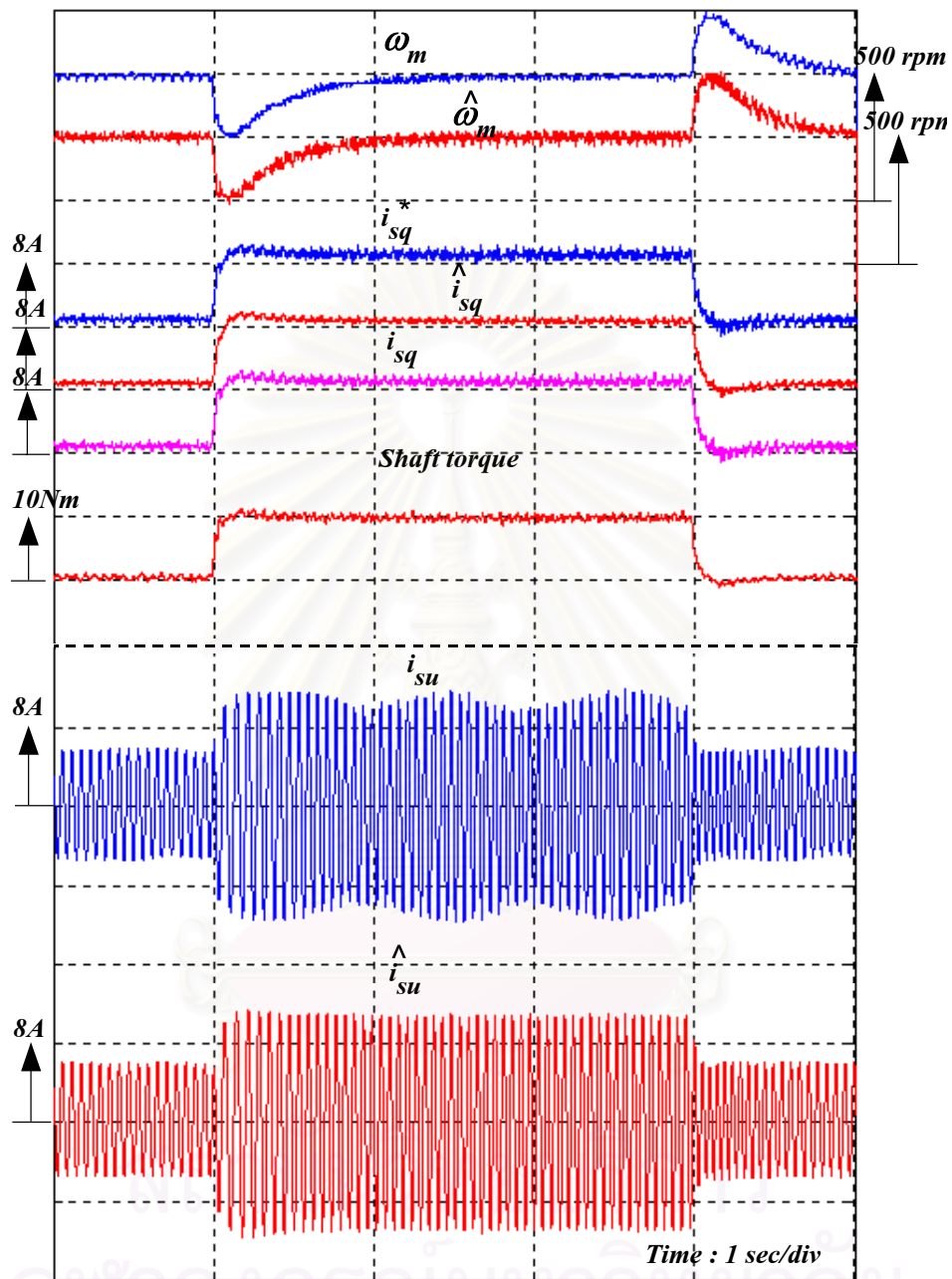
รูปที่ 4.21 ผลตอบสนองของแรงบิดขณะใส่โหลดพิกัด(10Nm)เมื่อความเร็วของมอเตอร์เท่ากับ 50 rpm ระบบมีวงรอบควบคุมกระแส ($K_p=5$, $K_i=400$) แต่ไม่มีอัตราขยายป้อนกลับ ($H_1', H_2'=0$)



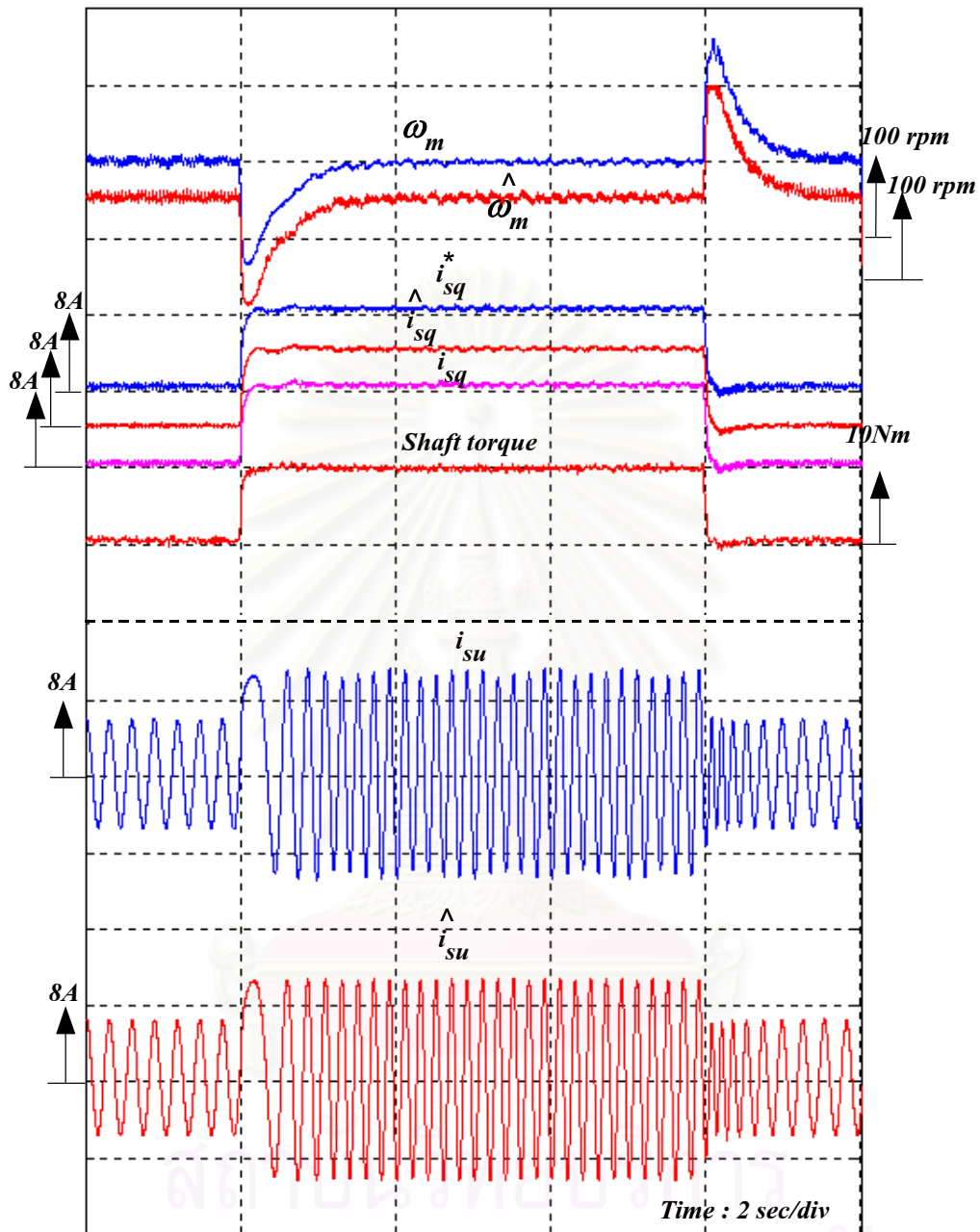
รูปที่ 4.22 ผลตอบสนองของแรงบิดขณะใส่โหลดพิกัด(10Nm)เมื่อความเร็วของมอเตอร์เท่ากับ 25 rpm ระบบมีวงรอบควบคุมกระแส ($K_p=5, K_i=400$) แต่ไม่มีอัตราขยายป้อนกลับ ($H_1, H_2=0$)



รูปที่ 4.23 ผลตอบสนองของแรงบิดขณะใส่โหลดพิกัด(10Nm)เมื่อความเร็วของมอเตอร์เท่ากับ 1450 rpm ระบบมีวงรอบควบคุมกระแส($K_p=5$, $K_i=400$)และมีอัตราขยายป้อนกลับ (H'_1, H'_2)ค่า $k=0.5$

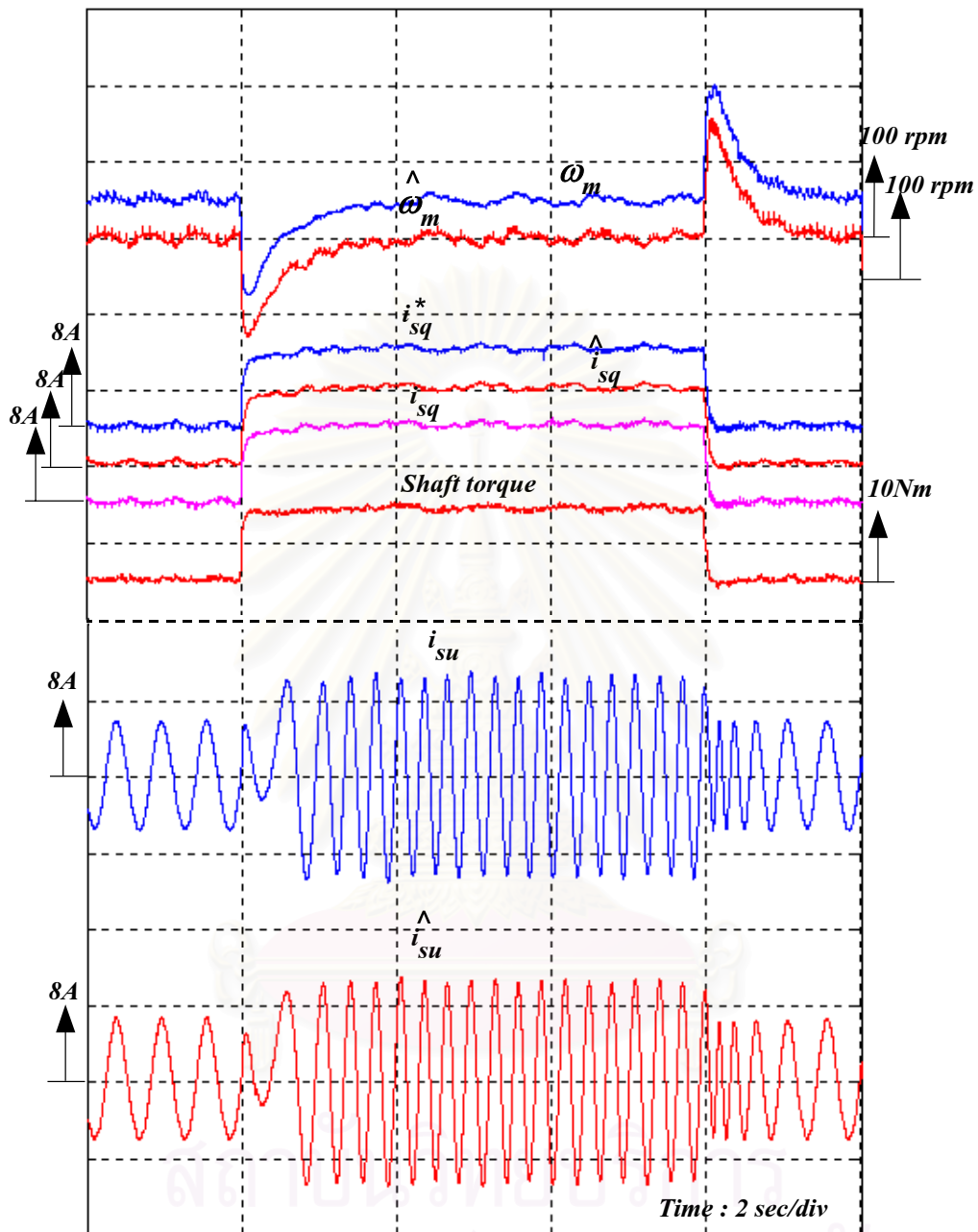


รูปที่ 4.24 ผลตอบสนองของแรงบิดขณะใส่โหลดพิกัด(10Nm)ความเร็วของมอเตอร์เท่ากับ 500 rpm ระบบมีวงรอบควบคุมกระแส($K_p=5$, $K_i=400$)และมีอัตราขยายป้อนกลับ(H'_1, H'_2) ค่า $k=3$



รูปที่ 4.25 ผลตอบสนองของแรงบิดขณะใส่โหลดพิกัด(10Nm)ความเร็วของมอเตอร์เท่ากับ 100 rpm ระบบมีวงรอบควบคุมกระแส($K_p=5$, $K_i=400$)และมีอัตราขยายป้อนกลับ (H'_1, H'_2) ค่า

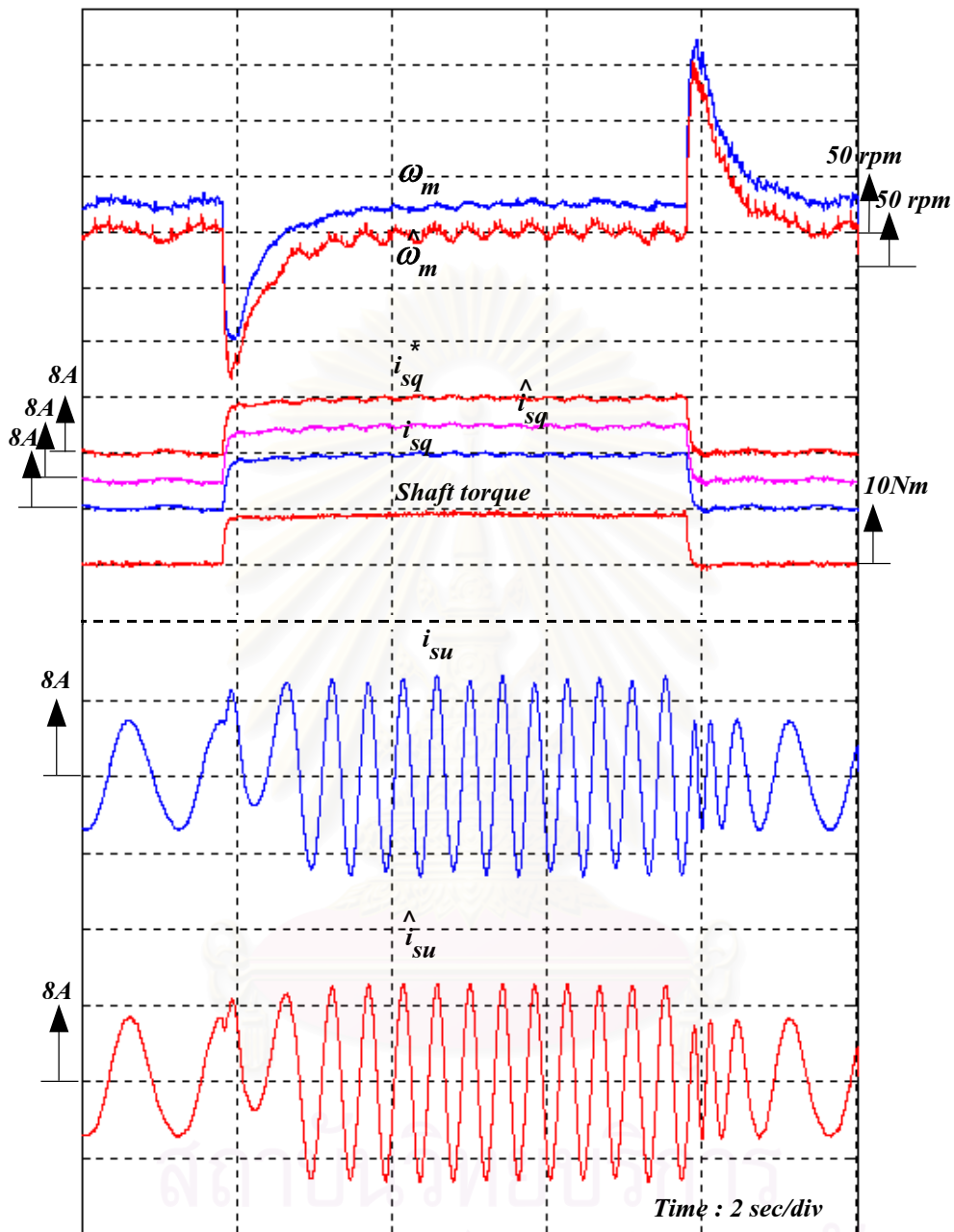
$k=10$



รูปที่ 4.26 ผลตอบสนองของแรงบิดขณะใส่โหลดพิกัด(10Nm)ความเร็วของมอเตอร์เท่ากับ 50 rpm

ระบบมีวงรอบควบคุมกระแส ($K_p=5$, $K_i=400$)และมีอัตราขยายป้อนกลับ (H_1, H_2) ค่า

$k=20$



รูปที่ 4.27 ผลตอบสนองของแรงบิดขณะใส่โหลดพิกัด(10Nm)ความเร็วมอเตอร์เท่ากับ 25 rpm
 วงรอบควบคุมกระแส $K_p=5$, $K_i=400$ และอัตราขยายป้อนกลับ H'_1, H'_2 โดยค่า $k=20$

2 มอเตอร์ทำงานในโหมดคืนพลังงาน (regenerative mode)

2.1 ระบบมีวงรอบควบคุมกระแส ($K_p = 5, K_I = 400$) แต่ไม่มีอัตราขยายป้อนกลับของตัวสังเกต ($H_1', H_2' = 0$)

จากการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบประมาณค่าความเร็วในบทที่ 2 เราได้ข้อสรุปที่ว่า ระบบประมาณค่าความเร็วจะขาดเสถียรภาพถ้าความถี่ทำงานของมอเตอร์อยู่ต่ำกว่าความถี่ทำงานวิกฤต ซึ่งในกรณีนี้เรายังไม่มีการป้อนกลับ H_1', H_2' เราจะได้ว่า

$$\text{ความถี่ทำงานวิกฤต} \quad \omega_c = p\omega_m \frac{\frac{R_s}{\sigma L_s}}{\frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{R_r}{\sigma L_r}}$$

(4.1)

เราสามารถเขียนความสัมพันธ์เชิงเส้นของขอบเขตนี้ในเทอมของความเร็วและแรงบิดได้ดังสมการ

$$T_m = -\frac{\frac{R_r}{\sigma L_r}}{\frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{R_r}{\sigma L_r}} \cdot \frac{(pM i_o)^2}{R_r} \cdot \omega_m$$

(4.2)

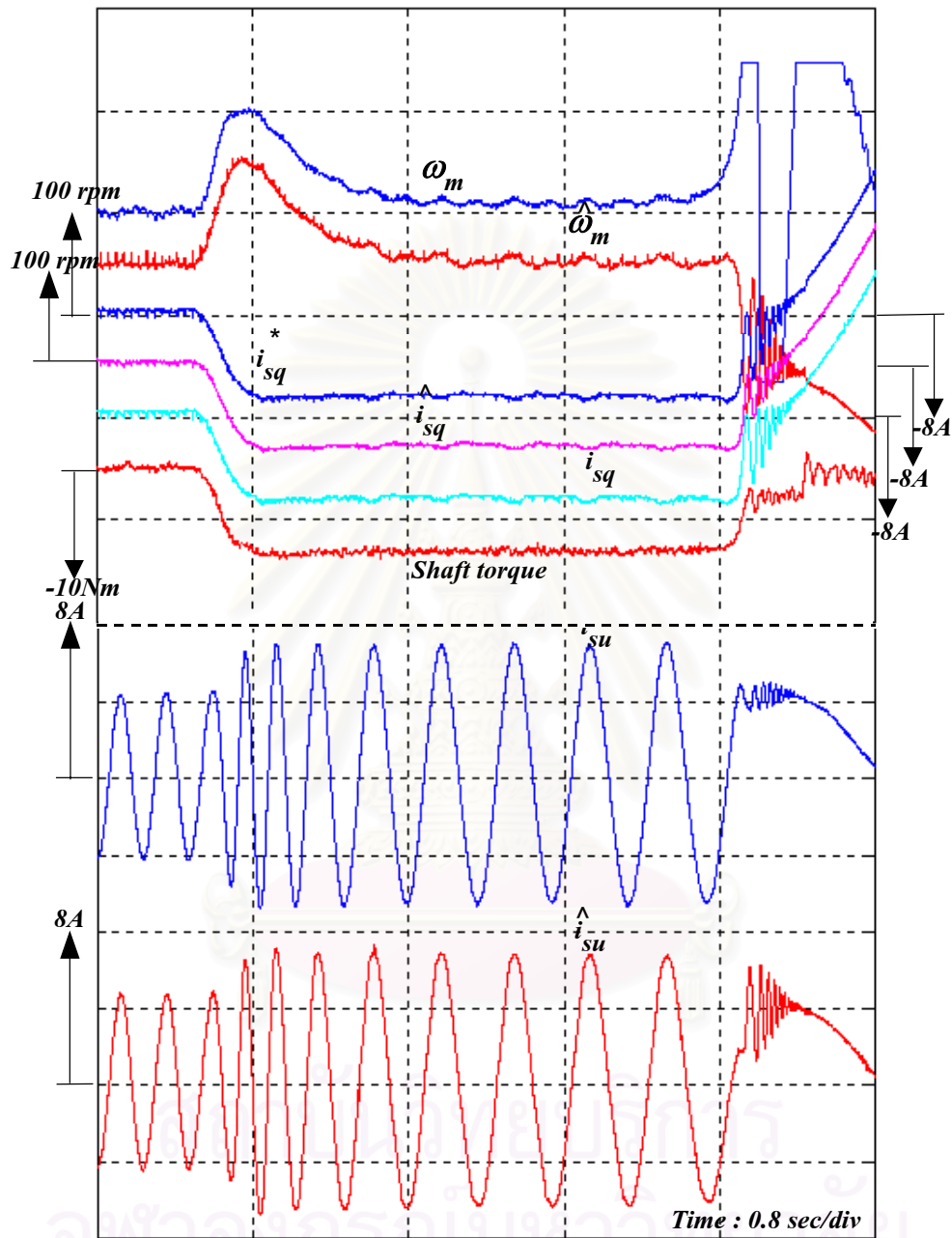
โดยสมการที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าความไม่มีเสถียรภาพของระบบจะเกิดขึ้นในกรณีที่มีมอเตอร์ทำงานในย่านคืนพลังงานเท่านั้น การทดสอบในกรณีนี้เราจึงทำการทดสอบที่รอบ ๆ จุดทำงานวิกฤตของระบบประมาณค่าความเร็วดังแสดงในรูปที่ 4.28-4.31 โดยให้มอเตอร์ทำงานที่ความเร็วเท่ากับ 100, 75, 50 และ 25 rpm ซึ่งโพลด์ที่ทำให้มอเตอร์ทำงานจุดวิกฤตเท่ากับ -8.3, -6.2, -4.2 และ -2.0 Nm ตามลำดับ เราพบว่าระบบจะขาดเสถียรภาพเมื่อมีการใส่โพลด์ให้กับมอเตอร์สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ข้างต้น ผลการทดสอบนี้จึงเป็นการยืนยันความถูกต้องของค่าขอบเขตความมีเสถียรภาพที่แสดงในสมการที่ 4.2 ได้เป็นอย่างดี

2.2 ระบบมีวงรอบควบคุมกระแส ($K_p = 5, K_I = 400$) และมีอัตราขยายป้อนกลับของตัวสังเกต (H_1', H_2')

จากการทดสอบมอเตอร์ในกรณีที่มีมอเตอร์ทำงานในโหมดคืนพลังงาน ณ จุดทำงานวิกฤต เดิมนี้ระบบประมาณค่าความเร็วเคชขาดเสถียรภาพดังที่ได้แสดงในรูปที่ 4.28-4.31 นั้น เราสามารถ แก้ไขให้ระบบประมาณค่าความเร็วกลับมามีเสถียรภาพได้เมื่อมอเตอร์ทำงานที่จุดวิกฤตดังกล่าว ดัง แสดงในรูปที่ 4.32 – 4.35 โดยค่า k ที่เลือกสำหรับอัตราขยายป้อนกลับคือ 10, 15, 20 และ 20 ที่ ความเร็วมอเตอร์ 100, 75, 50 และ 25 rpm ตามลำดับ ผลการทดสอบดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าเราสามารถปรับปรุงเสถียรภาพของระบบประมาณค่าความเร็วในย่านความเร็วต่ำได้จริงตามที่ได้ วิเคราะห์และออกแบบ อย่างไรก็ตามถึงแม้วิธีการออกแบบค่าอัตราขยายป้อนกลับจะใช้ได้ค่อนข้างดีดัง ผลที่ได้แสดงไว้แต่ค่าความคลาดเคลื่อนของพารามิเตอร์และความเร็วยังคงมีผลทำให้ระบบยังอาจ ขาดเสถียรภาพได้ในช่วงโหลดสูง แต่ก็ก็เป็นเพียงย่านแคบๆเท่านั้น ดังจะแสดงในหัวข้อถัดไป

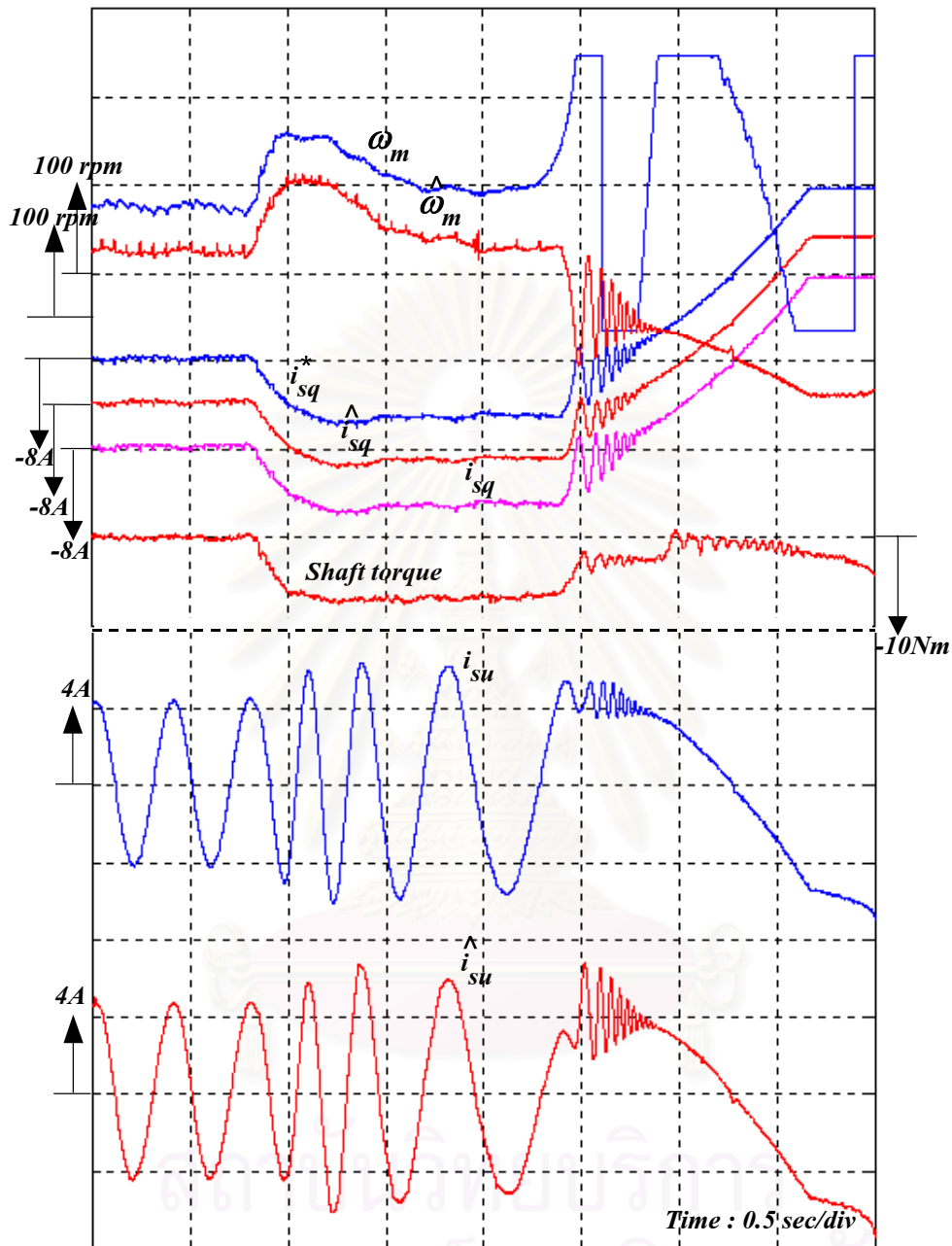


สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



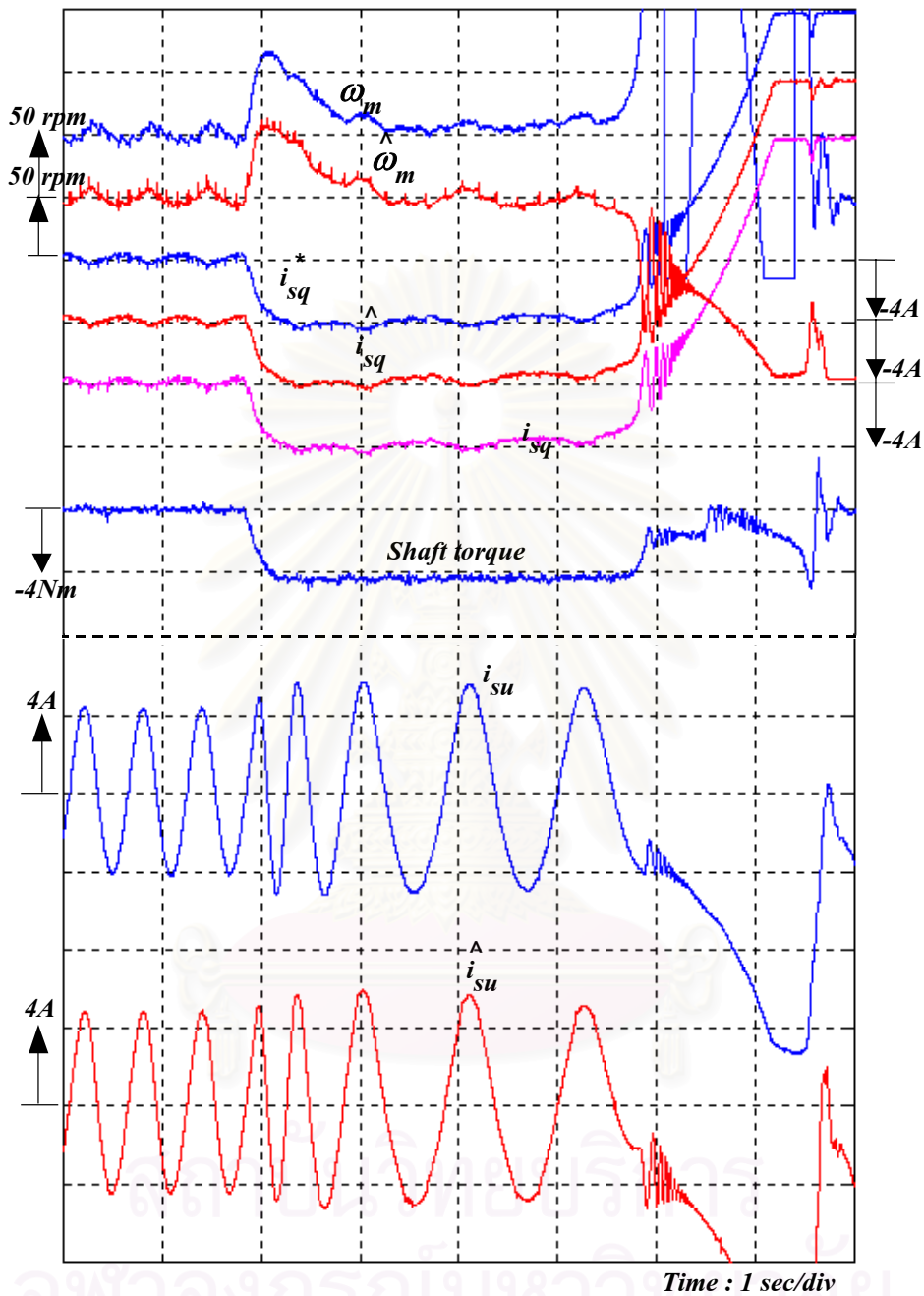
รูปที่ 4.28 ผลตอบสนองของแรงบิดขณะใส่โหลดแบบคีนพลังงาน(-8.3 Nm)ความเร็วของมอเตอร์เท่ากับ 100 rpmระบบมีวงรอบควบคุมกระแส ($K_p=5$, $K_i=400$)แต่ไม่มีอัตราขยายป้อนกลับ

$$\left(\quad H'_1, H'_2 \quad = \quad 0 \quad \right)$$



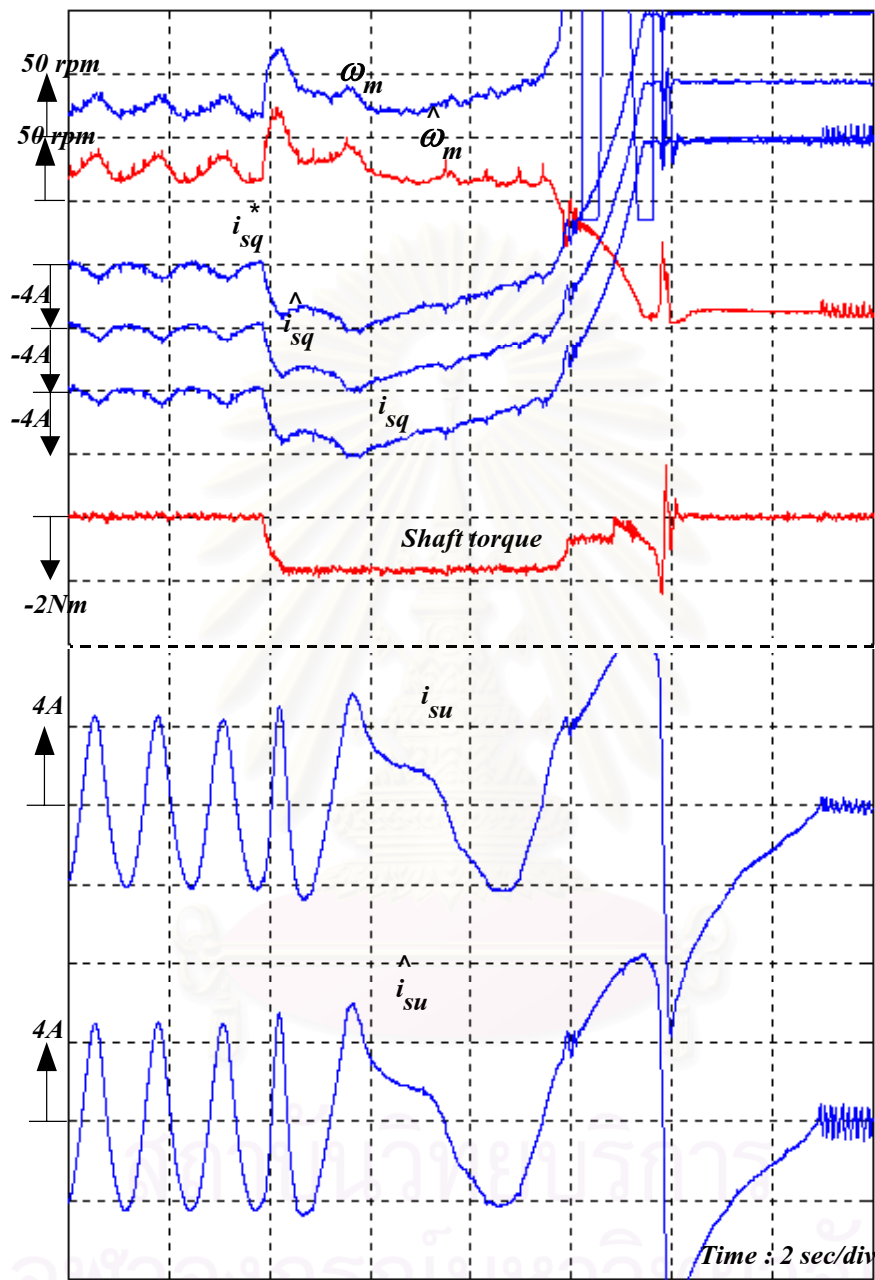
รูปที่ 4.29 ผลตอบสนองของแรงบิดขณะใส่โหลดแบบคีนพลังงาน (-6.2 Nm) ความเร็วของมอเตอร์เท่ากับ 75 rpm ระบบมีวงรอบควบคุมกระแส ($K_p=5$, $K_i=400$) แต่ไม่มีอัตราขยายป้อนกลับ

$$\left(\begin{array}{c} H'_1, H'_2 \\ \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} 0 \\ \end{array} \right)$$



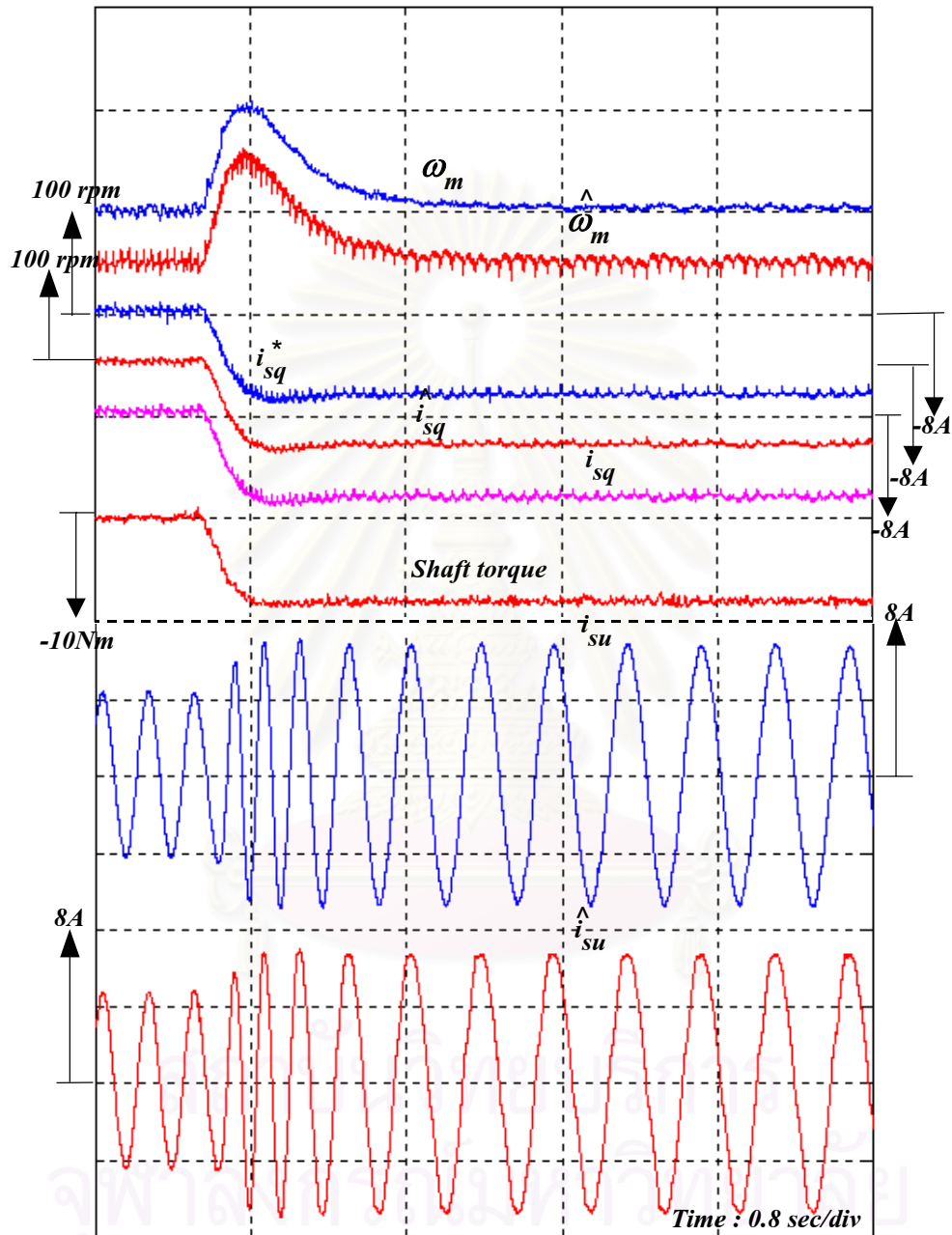
รูปที่ 4.30 ผลตอบสนองของแรงบิดขณะใส่โหลดแบบกึ่งพลังงาน(-4.2 Nm) ความเร็วของมอเตอร์เท่ากับ 50 rpmระบบมีวงรอบควบคุมกระแส ($K_p=5$, $K_i=400$) แต่ไม่มีอัตราขยายป้อนกลับ

$$\left(\quad H'_1, H'_2 \quad = \quad 0 \quad \right)$$

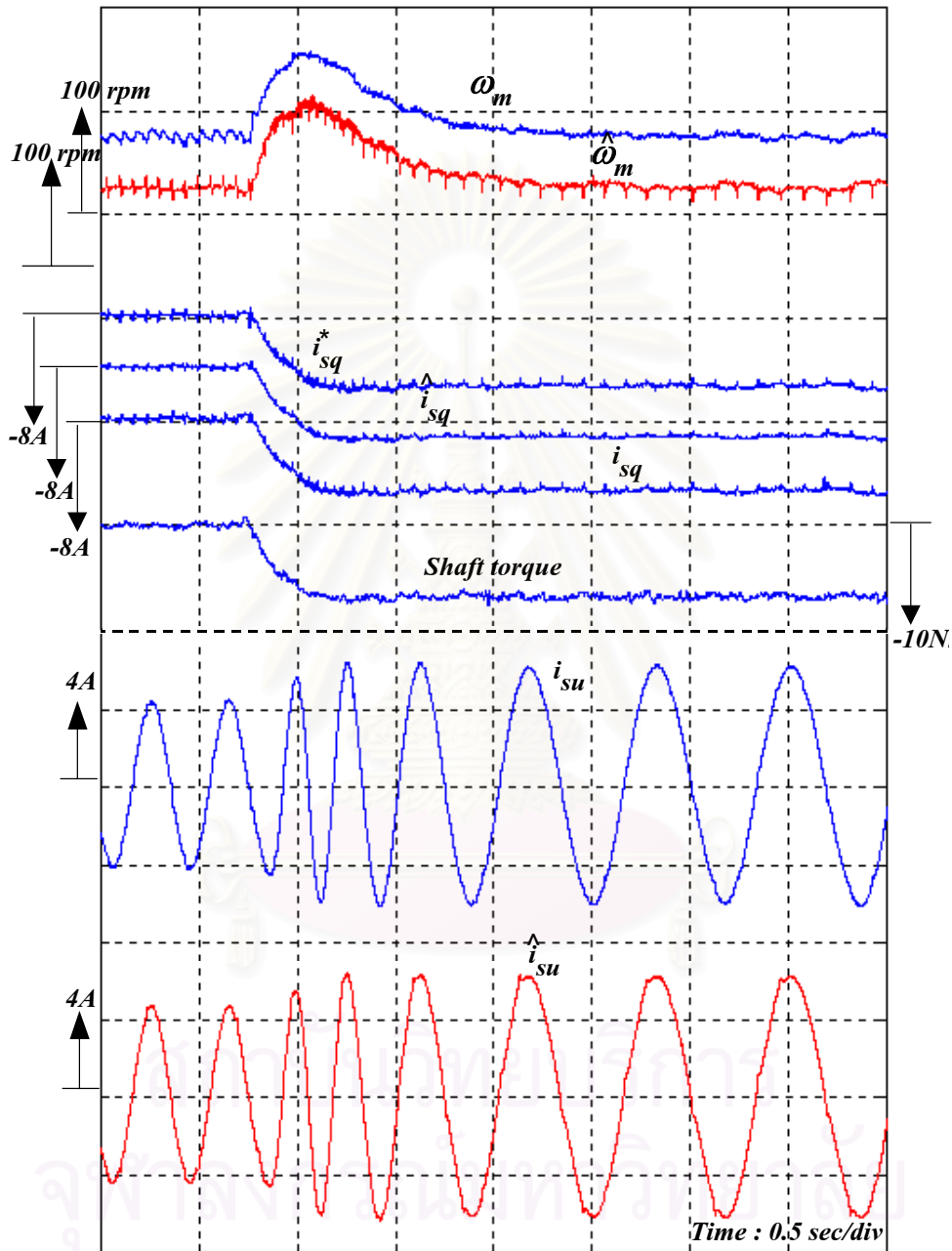


รูปที่ 4.31 ผลตอบสนองของแรงบิดขณะใส่โหลดแบบคีนพลังงาน(-2.0 Nm) ความเร็วของมอเตอร์เท่ากับ 25 rpmระบบมีวงรอบควบคุมกระแส ($K_p=5$, $K_i=400$) แต่ไม่มีอัตราขยายป้อนกลับ

$$\left(H'_1, H'_2 = 0 \right)$$

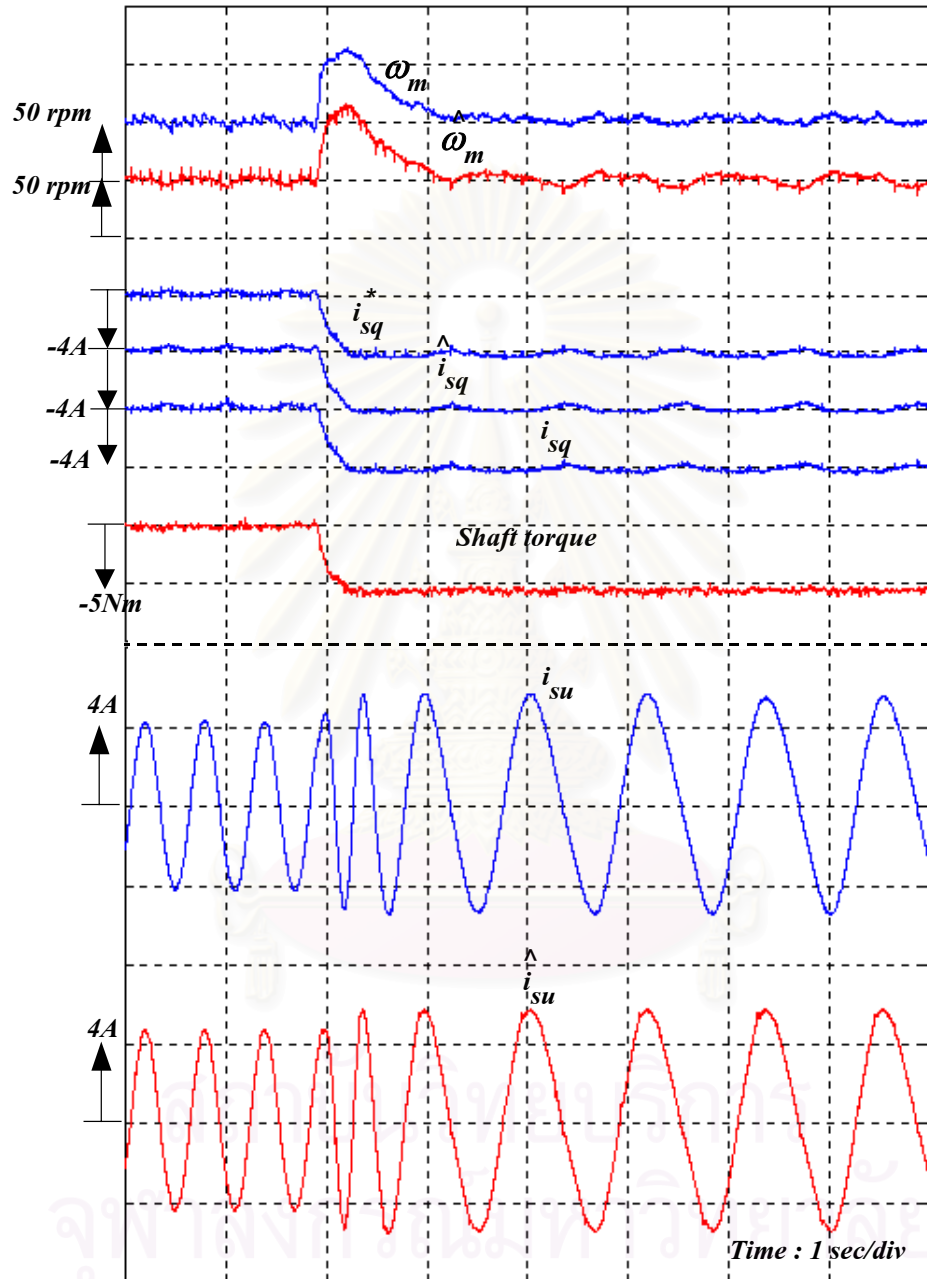


รูปที่ 4.32 ผลตอบสนองของแรงบิดขณะใส่โหลดแบบคีนพลังงาน(-8.5Nm) ความเร็วมอเตอร์เท่ากับ 100 rpm โดยที่มีวงรอบควบคุมกระแส ($K_p=5, K_i=400$) และมีอัตราขยายป้อนกลับ (H'_1, H'_2) ค่า $k=10$



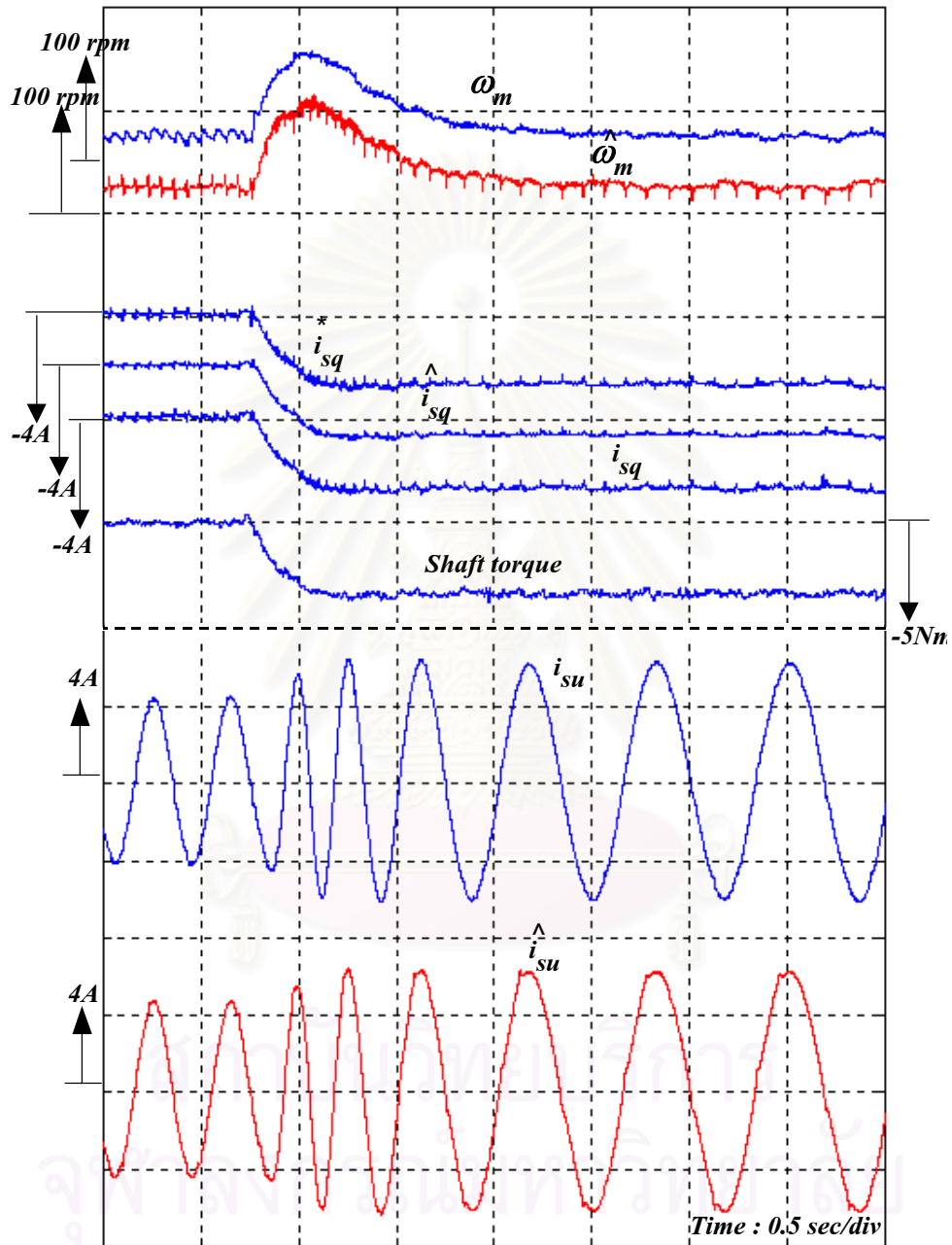
รูปที่ 4.33 ผลตอบสนองของแรงบิดขณะใส่โหลดแบบคีนพลังงาน(-7.0Nm) ความเร็วมอเตอร์เท่ากับ 75 rpm โดยมีวงรอบควบคุมกระแส ($K_p=5$, $K_i=400$) และมีอัตราขยายป้อนกลับ

(H'_1, H'_2) ค่า $k = 1$ 5



รูปที่ 4.34 ผลตอบสนองของแรงบิดขณะใส่โหลดแบบคีนพลังงาน(-5.1Nm) ความเร็วมอเตอร์เท่ากับ 50 rpm โดยมีวงรอบควบคุมกระแส ($K_p=5$, $K_i=400$) และมีอัตราขยายป้อนกลับ

$$\left(H'_1, H'_2 \right) \quad \text{ค่า} \quad k = 2 \quad 0$$



รูปที่ 4.35 ผลตอบสนองของแรงบิดขณะใส่โหลดแบบคืบพลังงาน(-3.0Nm) ความเร็วมอเตอร์เท่ากับ 25 rpm โดยมีวงรอบควบคุมกระแส ($K_p=5, K_i=400$) และมีอัตราขยายป้อนกลับ (H'_1, H'_2) ค่า $k = 20$

จ) การทดสอบผลตอบสนองต่อโหลดแบบแรมป์ (ramp load) ขนาด 10 Nm. ถึง -10 Nm เปรียบเทียบกรณีที่มีอัตราขยายป้อนกลับ (H_1', H_2') และมีวงรอบควบคุมกระแส ($K_p = 5, K_I = 400$) กับกรณีไม่มีอัตราขยายป้อนกลับ ($H_1', H_2' = 0$) และมีวงรอบควบคุมกระแส ($K_p = 5, K_I = 400$)

เราจะทำการทดสอบโดยการแปรค่าโหลดอย่างช้า ๆ จาก 10 ไปยัง -10 Nm เพื่อทดสอบหาตำแหน่งของการขาดเสถียรภาพ (จุดทำงานวิกฤต) ตัวอย่างรูปคลื่นของระบบที่ความเร็ว 100 และ 50 rpm ดังแสดงได้ดังรูปที่ 4.36 และ 4.37 จากรูปจะพบว่าระบบจะขาดเสถียรภาพที่ค่าแรงบิดของมอเตอร์มีค่าเท่ากับ -8.3 และ -4.2 Nm ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับค่าที่คำนวณได้จากสมการที่ 4.1 และ 4.2 และเมื่อมีการปรับปรุงเสถียรภาพของระบบประมาณค่าความเร็วโดยการใช้อัตราขยายป้อนกลับจะเห็นได้ว่าที่จุดทำงานวิกฤตเดิมระบบจะสามารถทำงานได้อย่างมีเสถียรภาพตลอดย่านแรงบิดทั้งในทิศบวกและลบดังแสดงในรูปที่ 4.38 และ 4.39

รูปที่ 4.40 และ 4.41 แสดงภาพลักษณะสมบัติความเร็ว-แรงบิดของระบบเมื่อมีการแปรค่าโหลดอย่างช้า ๆ จาก 10 Nm ไปยัง -10 Nm ที่ความเร็วมอเตอร์ 15, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 150, 200, 250, 500, 750, 1000, 1250 และ 1450 rpm ตามลำดับ เมื่อระบบไม่มีอัตราขยายป้อนกลับของตัวสังเกต ($H_1', H_2' = 0$) จะเห็นว่าระบบประมาณค่าความเร็วจะขาดเสถียรภาพที่จุดทำงานวิกฤตตามการคำนวณจากสมการที่ (4.1) และ (4.2) ดังแสดงเป็นเส้นประในรูป

สำหรับรูปที่ 4.42 และ 4.43 เป็นลักษณะสมบัติของความเร็ว-แรงบิดของระบบเมื่อมีการแปรค่าโหลดอย่างช้า ๆ จาก 10 Nm ไปยัง -10 Nm ที่ความเร็วมอเตอร์ 15, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 150, 200, 250, 500, 750, 1000, 1250 และ 1450 rpm โดยค่า $k=20, 20, 20, 20, 20, 20, 15, 15, 15, 10, 10, 10, 10, 5, 5, 3, 3, 0.5, 0.5$ และ 0.5 ตามลำดับ เมื่อมีอัตราขยายป้อนกลับของตัวสังเกตจะเห็นว่าระบบประมาณค่าความเร็วกลับมามีเสถียรภาพได้ตลอดย่านแรงบิดและความเร็ว

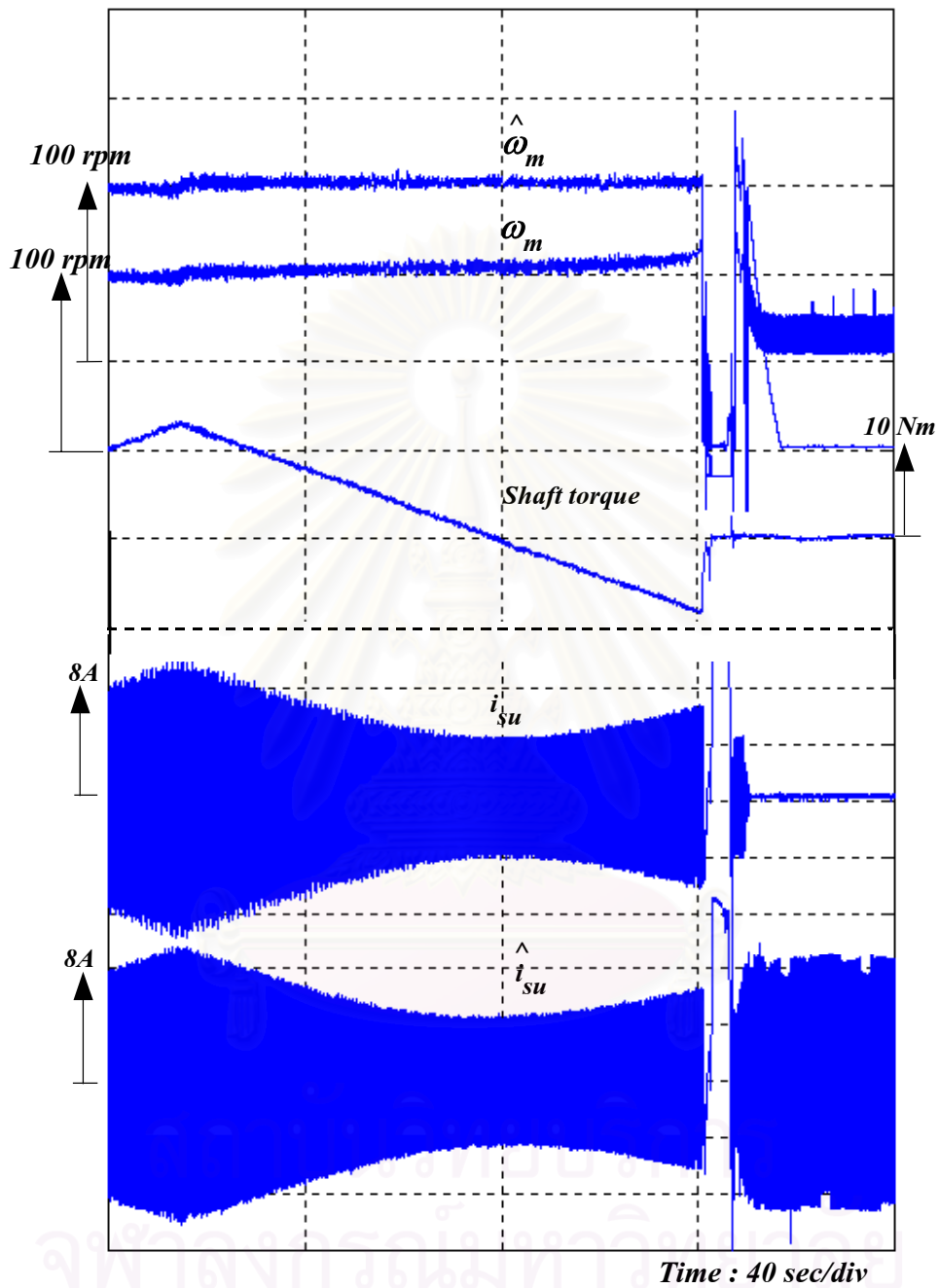
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลการทำงานขณะกลับทิศความเร็วมอเตอร์จาก 100 ไป -100 rpm ในขณะที่มอเตอร์มีโหลดที่พิกัด 10 Nm เมื่อระบบมีวงรอบควบคุมกระแส ($K_p = 5, K_I = 400$) และอัตราขยายป้อนกลับ (H_1', H_2') โดยค่า $k = 10$

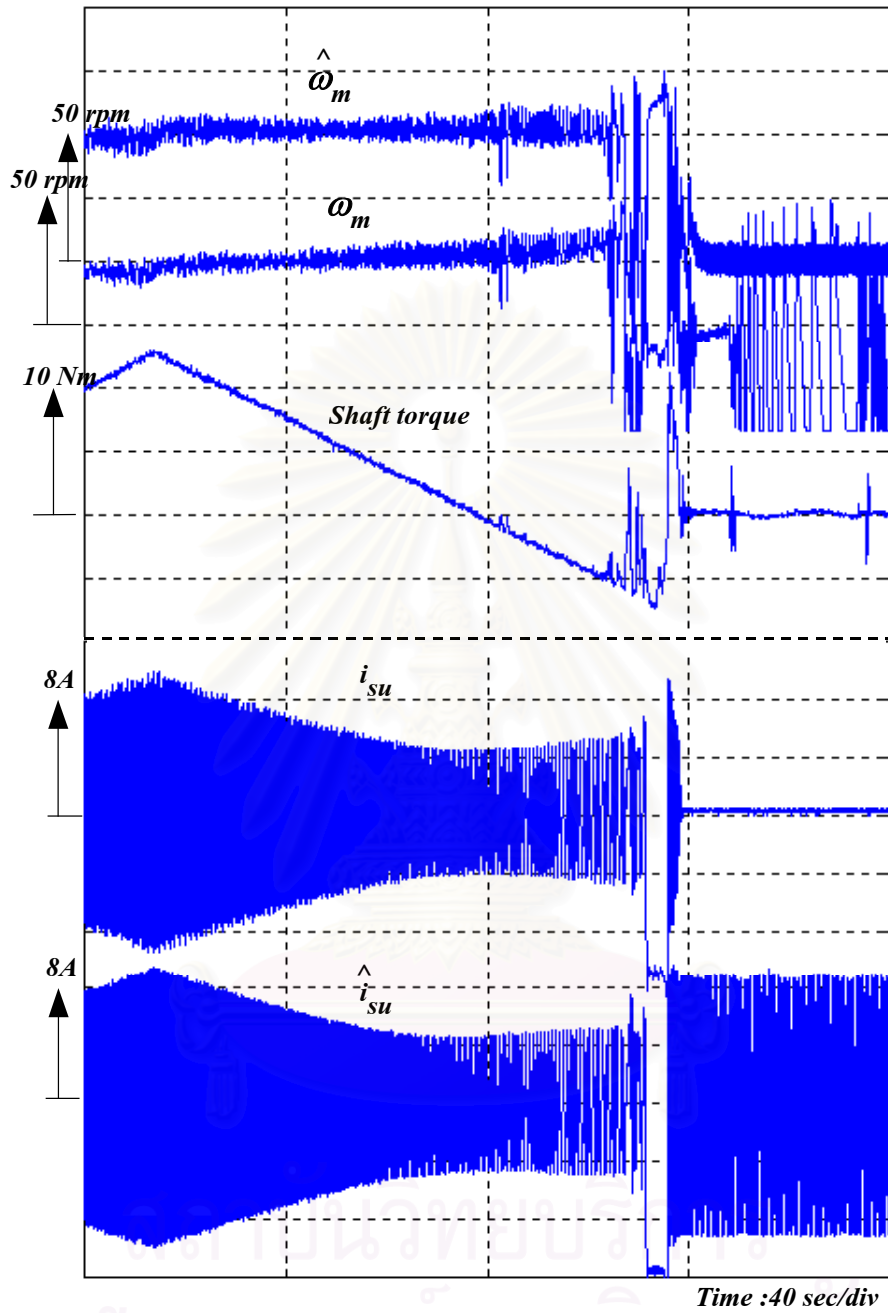
ผลการทดลองในรูปที่ 4.44 เป็นการทดสอบโดยให้โหลดมีค่าคงที่ที่พิกัด (10 Nm) แล้วเราทำการเปลี่ยนความเร็วมอเตอร์จาก 100 rpm ไปยัง -100 rpm เพื่อทดสอบความมีเสถียรภาพของระบบในอีกลักษณะหนึ่ง ซึ่งหากไม่มีการป้อนกลับแล้ว เมื่อความเร็วเริ่มกลับทิศ มอเตอร์ก็จะทำงานในย่านคืนพลังงานด้วยแรงบิดพิกัด ระบบก็จะขาดเสถียรภาพ แต่ในรูปที่ 4.44 เป็นกรณีที่มีการป้อนกลับด้วยอัตราขยาย H_1', H_2' ทำให้ระบบมีเสถียรภาพตลอดช่วงความเร็วที่เปลี่ยน



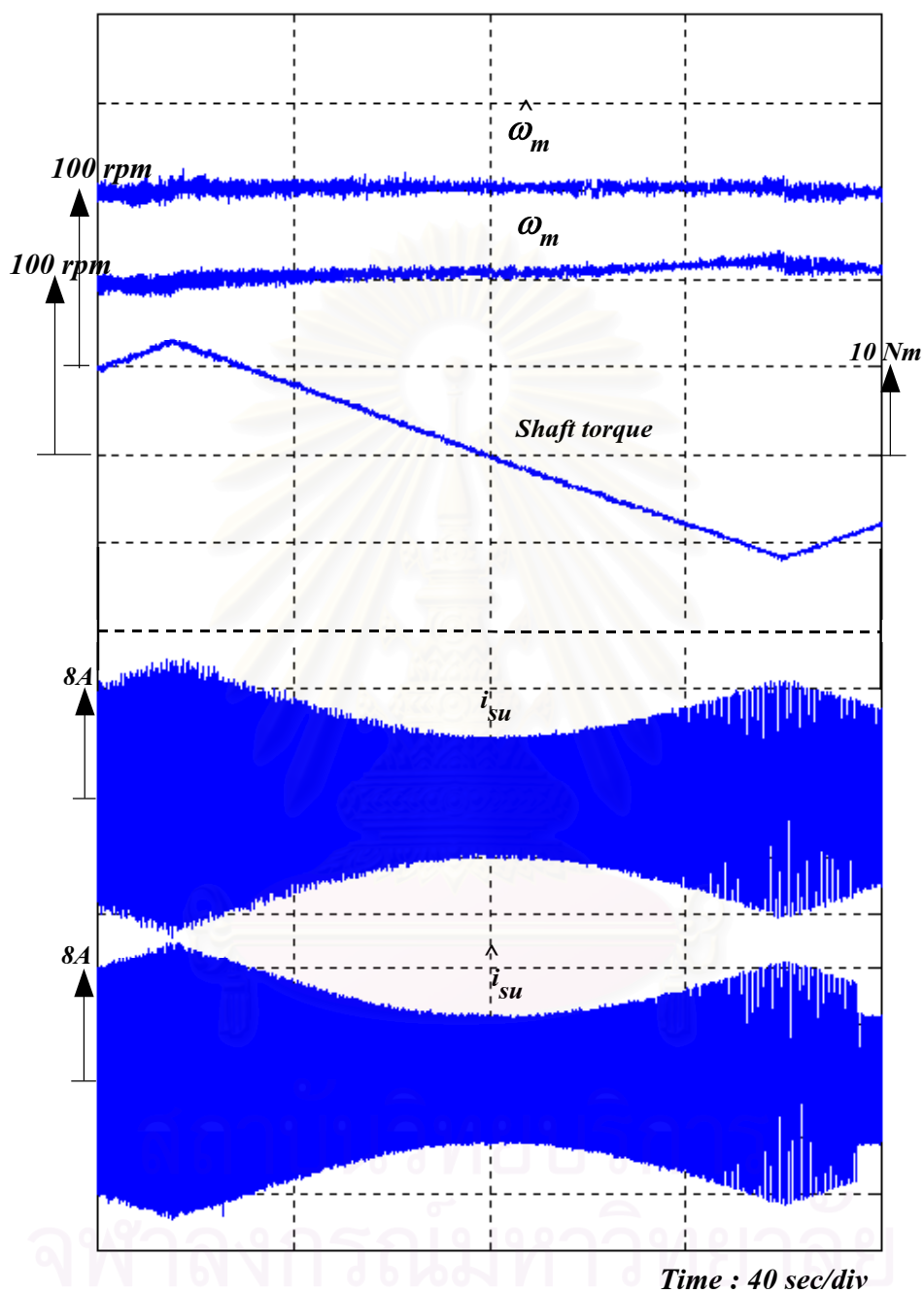
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



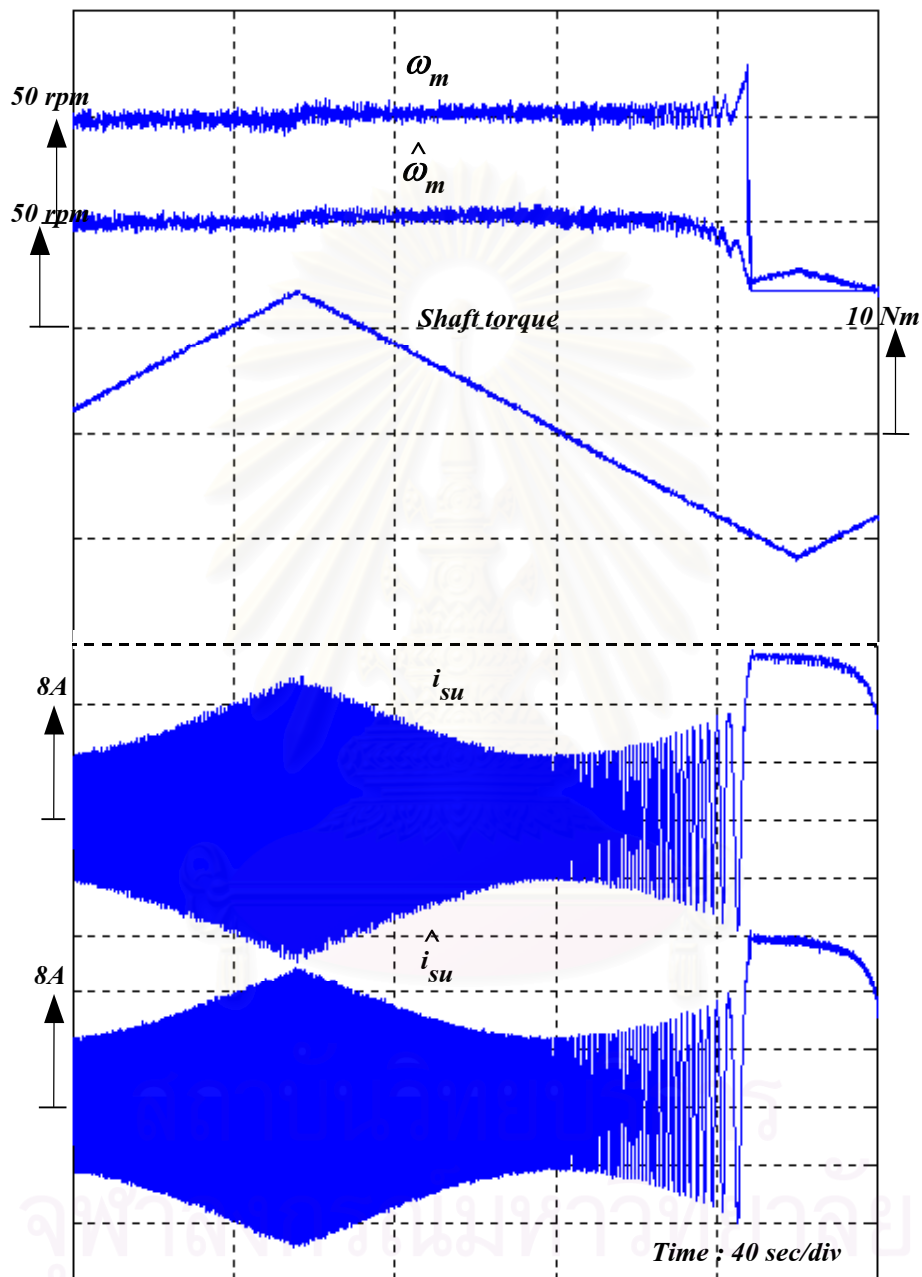
รูปที่ 4.36 ผลตอบสนองขณะที่มีมอเตอร์มีโหลดแบบ แรมป์ขนาด 10 Nm ถึง -10 Nm ที่ความเร็วมอเตอร์ 100 rpm วงรอบควบคุมกระแส ($K_p=5, K_i=400$) และอัตราขยายป้อนกลับ ($H'_1, H'_2 = 0$)



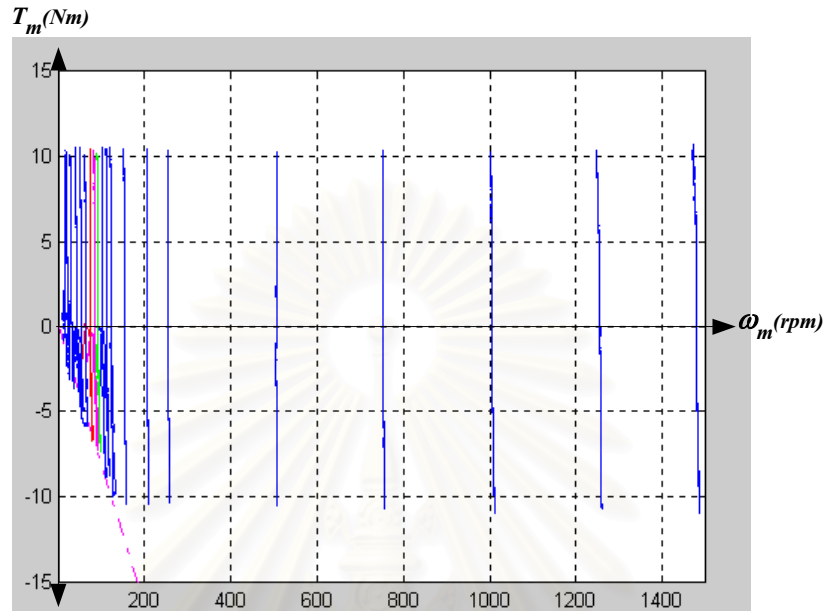
รูปที่ 4.37 ผลตอบสนองขณะที่มอเตอร์มีโหลดแบบ แรมป์ขนาด 10 Nm ถึง -10 Nm ที่ความเร็ว มอเตอร์ 50 rpm วงรอบควบคุมกระแส ($K_p=5$, $K_i=400$) และอัตราขยายป้อนกลับ ($H'_1, H'_2 = 0$)



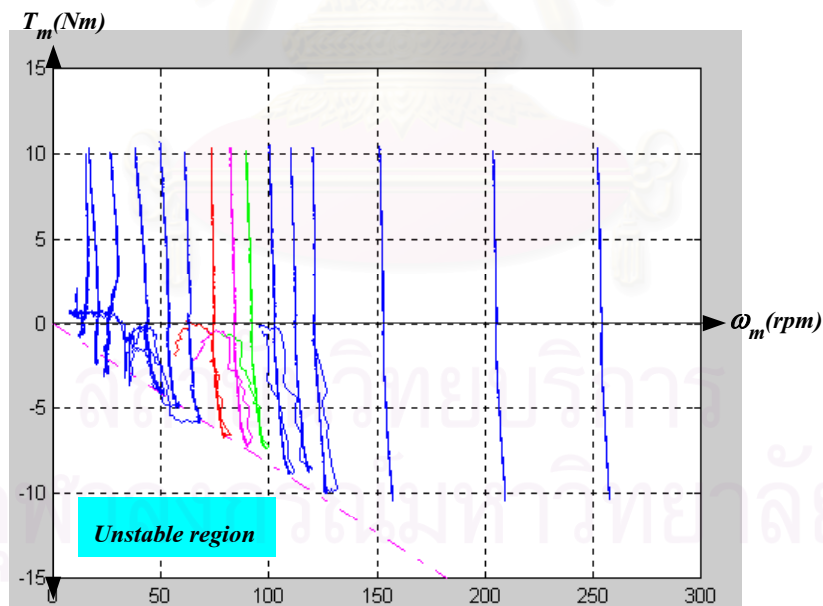
รูปที่ 4.38 ผลตอบสนองขณะที่มีโหลดแบบ แรมปีขนาด 10 Nm ถึง -10 Nm ที่ความเร็ว
 มอเตอร์ 100 rpm วงรอบควบคุมกระแส $K_p=5$, $K_i=400$ และอัตราขยายป้อนกลับ
 (H'_1, H'_2) โดยค่า $k=10$



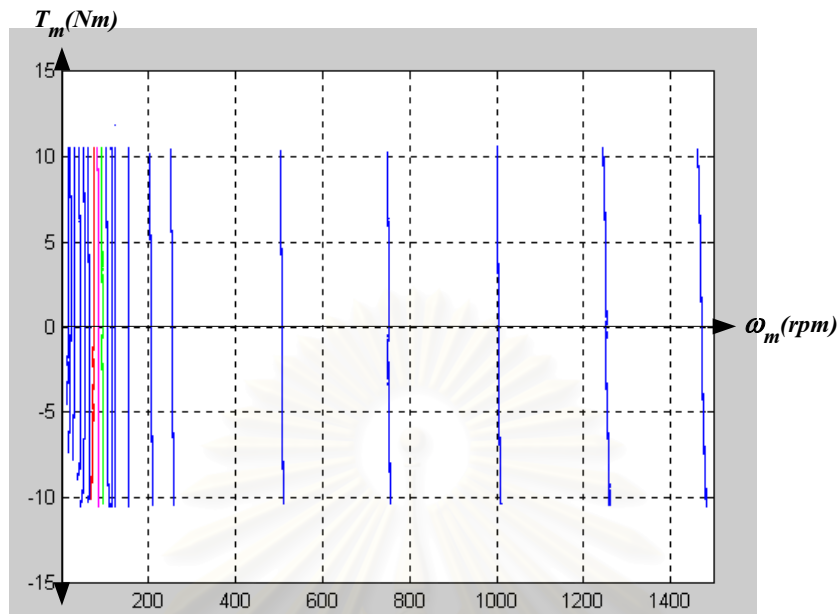
รูปที่ 4.39 ผลตอบสนองขณะที่มอเตอร์มีโหลดแบบ แรมป์ขนาด 10 Nm ถึง -10 Nm ที่ความเร็ว
 มอเตอร์ 50 rpm วงรอบควบคุมกระแส ($K_p=5, K_i= 400$) และอัตราขยายป้อนกลับ
 (H'_1, H'_2) โดยค่า $k=20$



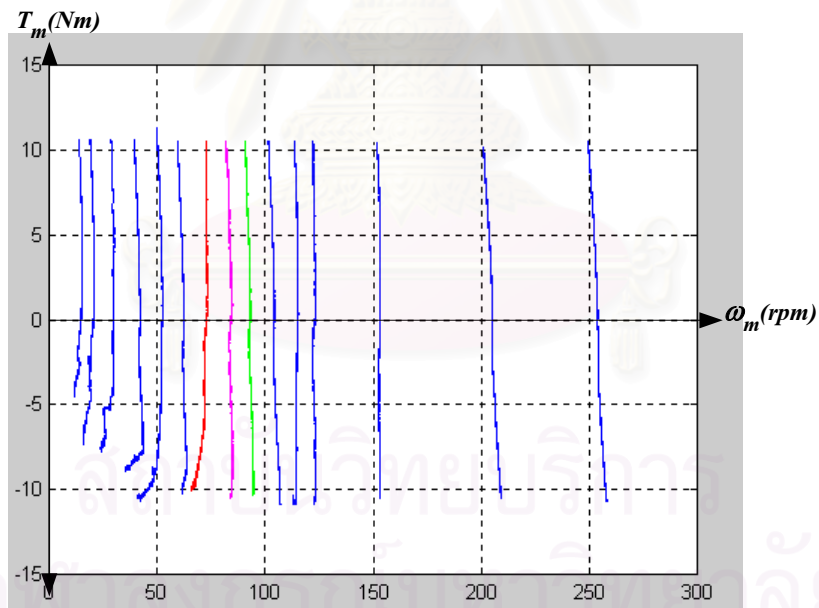
รูปที่ 4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์ เมื่อระบบไม่มีอัตราขยาย
ป้อนกลับ H'_1, H'_2 และวงรอบควบคุมกระแส $K_p=5, K_i=400$ ในช่วงความเร็ว 15 ถึง 1500 rpm



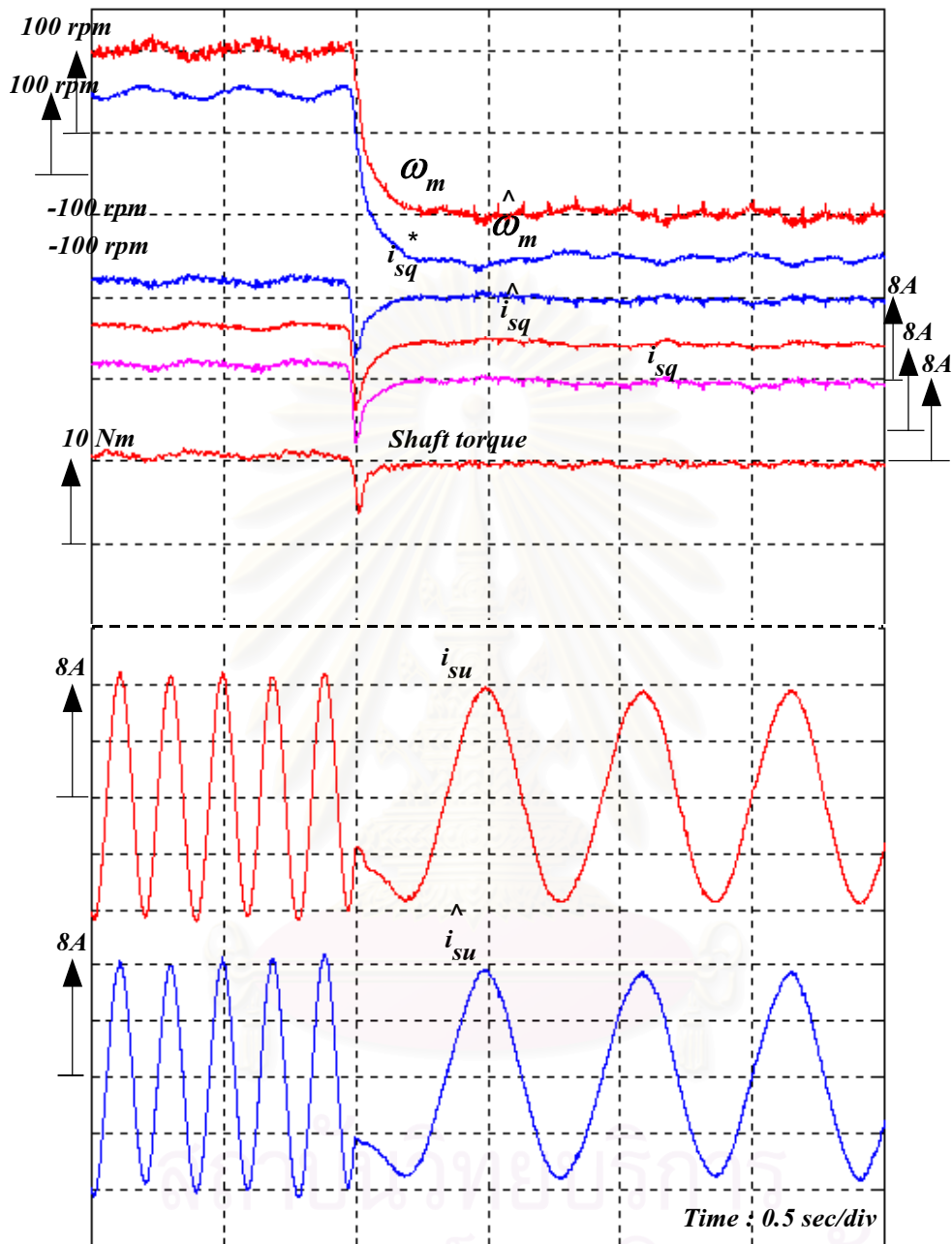
รูปที่ 4.41 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์ เมื่อระบบไม่มีอัตราขยาย
ป้อนกลับ H'_1, H'_2 และวงรอบควบคุมกระแส $K_p=5, K_i=400$ ในช่วงความเร็ว 15 ถึง 300 rpm



รูปที่ 4.42 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์ เมื่อระบบมีอัตราขยาย
ป้อนกลับ H'_1, H'_2 และวงรอบควบคุมกระแส $K_p=5, K_i=400$ ในช่วงความเร็ว 15 ถึง 1500 rpm



รูปที่ 4.43 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์ เมื่อระบบมีอัตราขยาย
ป้อนกลับ H'_1, H'_2 และวงรอบควบคุมกระแส $K_p=5, K_i=400$ ในช่วงความเร็ว 15 ถึง 300 rpm



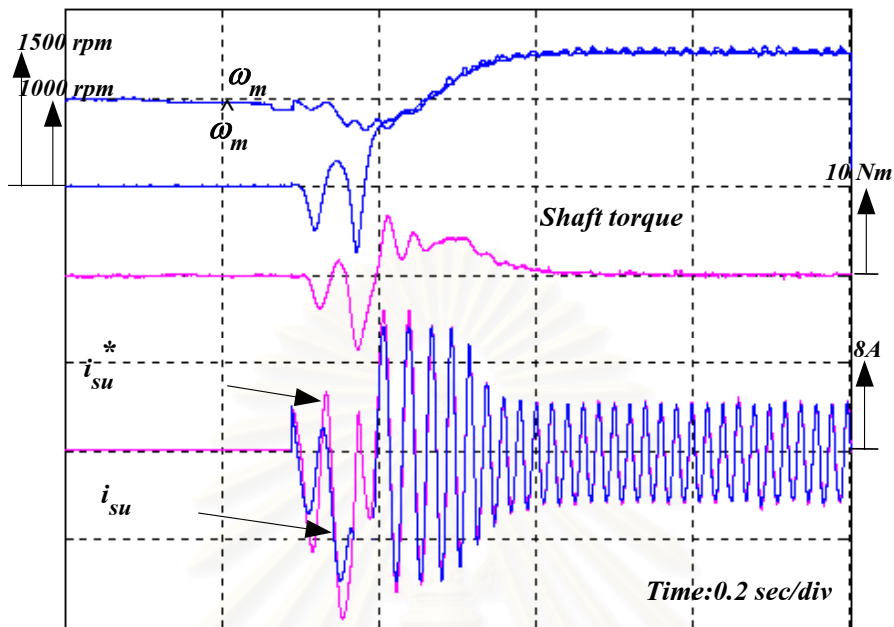
รูปที่ 4.44 ผลการทำงานขณะกลับทิศความเร็วมอเตอร์จาก 100 ไป -100 rpm ในขณะที่มอเตอร์มีโหลดที่ฝึกัด 10 Nm เมื่อระบบมีวงรอบควบคุมกระแส ($K_p = 5, K_I = 400$) และอัตราขยายป้อนกลับ (H_1', H_2') โดยค่า $k = 10$

จ) การทดสอบเมื่อมอเตอร์มีการออกตัว หรือออกตัวช้าเมื่อแหล่งจ่ายไฟตัดตอนเป็นระยะเวลาสั้นๆ

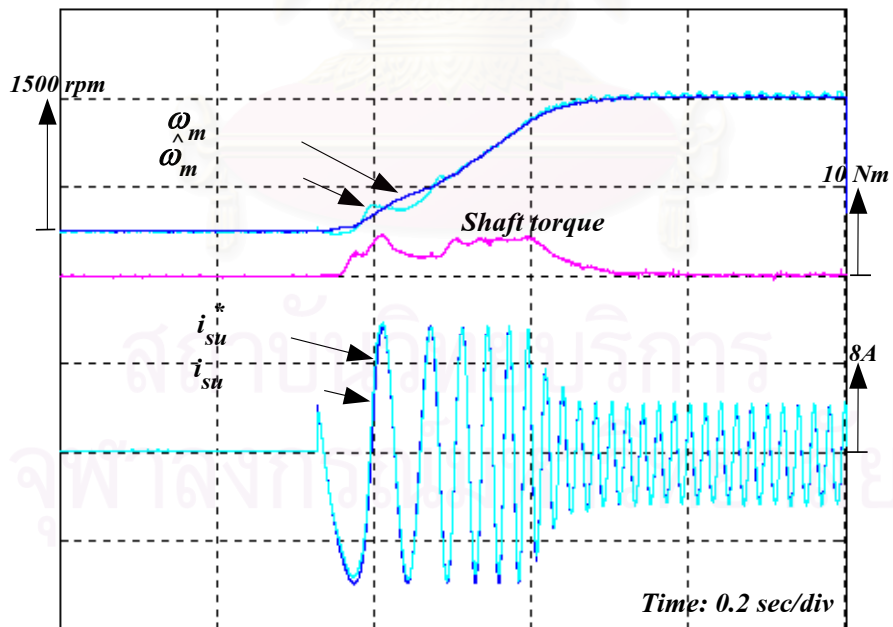
ผลการทดสอบในรูป 4.45 – 4.47 แสดงให้เห็นว่าไม่ว่าระบบจะมีการออกตัวจากความเร็วมอเตอร์ที่มีทิศทางเดียวกับความเร็วคำสั่ง(+1000 rpm) หรือออกตัวจากสภาวะขณะหยุดนิ่ง (0 rpm) หรือออกตัวจากความเร็วเริ่มต้นที่ตรงข้ามกับความเร็วคำสั่ง (-500 rpm) ก็ตาม มอเตอร์สามารถออกตัวเข้าสู่ความเร็วคำสั่งได้เป็นอย่างดีรวดเร็ว โดยระบบประมาณค่าความเร็วจะใช้เวลาประมาณ 50 ms ในการประมาณค่าความเร็ว หลังจากนั้นระบบก็จะเข้าสู่สภาวะการทำงานปกติต่อไป โดยปราศจากการตัดตอนของอุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินในอินเวอร์เตอร์



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

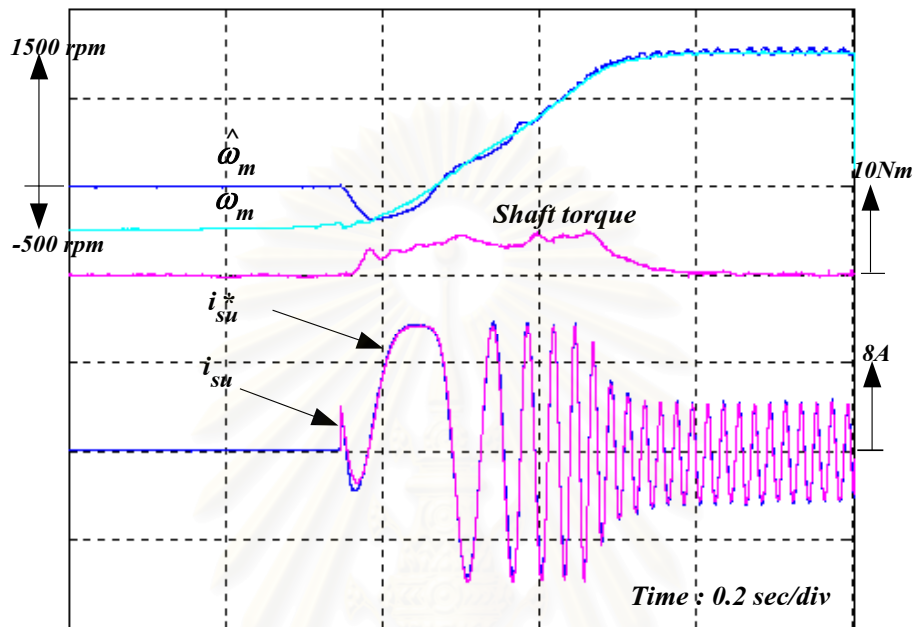


รูปที่ 4.45 ผลการทำงานของระบบเมื่อระบบมีการออกตัวที่ความเร็วคำสั่ง 1500 rpm และมอเตอร์มีความเร็วขณะออกตัว 1000 rpm ระบบมีวงรอบควบคุมกระแส ($K_P = 5, K_I = 400$) และอัตราขยายป้อนกลับ (H_1', H_2') โดยค่า $k = 0.5$



รูปที่ 4.46 ผลการทำงานของระบบเมื่อระบบมีการออกตัวที่ความเร็วคำสั่ง 1500 rpm และมอเตอร์

ออกตัวจากความเร็วหยุดนิ่ง (0 r p m) ระบบมีวงรอบควบคุมกระแส
 $(K_p = 5, K_I = 400)$
 และอัตราขยายป้อนกลับ (H_1', H_2') โดยค่า $k = 0.5$



รูปที่ 4.47 ผลการทำงานของระบบเมื่อระบบมีการออกตัวที่ความเร็วคำสั่ง 1500 rpm และขณะออกตัว

มอเตอร์มีความเร็วทิศตรงข้ามกับความเร็วคำสั่ง (-500 rpm) ระบบมีวงรอบควบคุมกระแส
 $(K_p = 5, K_I = 400)$ และอัตราขยายป้อนกลับ (H_1', H_2') โดยค่า $k = 0.5$

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์นี้ผู้วิจัยได้ปรับปรุงระบบควบคุมแวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดความเร็ว ที่อาศัยการควบคุมแบบแยกอิสระโดยการเพิ่มวงรอบควบคุมกระแส และได้นำเสนอวิธีการปรับปรุงเสถียรภาพของการประมาณค่าความเร็วด้วยตัวสังเกตเต็มอันดับแบบปรับตัว ประเด็นสำคัญที่ได้ทำการศึกษาและวิจัยได้แก่ 1) ปัญหาของผลกระทบอันเนื่องมาจากการประวิงเวลาสวิตช์ และความไม่เป็นอุดมคติของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ส่งผลให้เกิดความเพี้ยนของกระแสที่จ่ายให้กับมอเตอร์และสมรรถนะในการควบคุมแรงบิดที่ลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในย่านความเร็วมอเตอร์ต่ำๆ 2) ปัญหาในการออกตัวหรือออกตัวช้าของระบบเนื่องจากแหล่งจ่ายไฟตัดตอนในระยะเวลาสั้น ๆ 3) ปัญหาในเรื่องเสถียรภาพของระบบประมาณค่าความเร็ว โดยระบบมักจะขาดเสถียรภาพในโหมดการทำงานแบบคีนพลังงาน ซึ่งเราสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1. การออกแบบตัวควบคุมกระแส โดยเลือกใช้ ตัวควบคุมแบบ PI สามารถลดทอนปัญหาความคลาดเคลื่อนของกระแสที่จ่ายให้กับมอเตอร์ อันเนื่องมาจากผลของการประวิงเวลา และความไม่เป็นอุดมคติของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังได้ ทำให้ระบบมีสมรรถนะการควบคุมแรงบิดที่ดีขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในย่านความเร็วรอบต่ำๆ และระบบที่ได้พัฒนาและปรับปรุงขึ้นไม่ยุ่งยากซับซ้อน ทั้งนี้เนื่องจากวงรอบควบคุมกระแสที่ได้เพิ่มเติมเข้ามา ไม่ได้ต้องการแบนวิดท์ที่สูง ทำให้ง่ายต่อการนำไปสร้างจริง
2. อัตราขยายป้อนกลับสามารถแก้ไขปัญหาในเรื่องเสถียรภาพของระบบประมาณค่าความเร็ว โดยระบบประมาณค่าความเร็วจะมีเสถียรภาพที่ดีขึ้นในย่านคีนพลังงาน
3. วงรอบควบคุมกระแส และอัตราขยายป้อนกลับยังทำให้ระบบที่สามารถออกตัว หรือออกตัวช้าได้โดยอุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินในวงจรไม่ได้ทำการตัดวงจรแต่อย่างใด ทำให้สามารถแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นได้จริงในระบบอุตสาหกรรมได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

ค่าอัตราขยายป้อนกลับที่ได้ทำการออกแบบนั้นขึ้นอยู่กับความเร็ว (ω_m) และค่า k ดังนั้นการเลือกค่า k ที่เหมาะสมจะมีผลต่อเสถียรภาพของระบบประมาณค่าความเร็วด้วย จากการทำงานของระบบจริงพบว่า ค่า k ที่เหมาะสมในแต่ละย่านการทำงานจะไม่คงที่ ยกตัวอย่างเช่น ที่ความเร็วมอเตอร์ 1500 rpm ค่า k ที่เหมาะสมคือ 0.5, ที่ความเร็วมอเตอร์ 1000 rpm ค่า k ที่

เหมาะสมคือ 0.5, ที่ความเร็วมอเตอร์ 500 rpm ค่า k ที่เหมาะสมคือ 3, ที่ความเร็วมอเตอร์ 100 rpm ค่า k ที่เหมาะสมคือ 10, ที่ความเร็วมอเตอร์ 50 rpm ค่า k ที่เหมาะสมคือ 20, ที่ความเร็วมอเตอร์ 15 rpm ค่า k ที่เหมาะสมคือ 20 เป็นต้น ทำให้ไม่สะดวกในการนำไปใช้งานจริงกับระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วเพราะว่าต้องเปลี่ยนค่า k ด้วย ดังนั้นเราควรมีการหาค่า k ที่เหมาะสมที่สุดในแต่ละย่านความเร็วล่วงหน้า แล้วนำมาหาความสัมพันธ์เพื่อกำหนดเป็นตารางในซอฟต์แวร์ต่อไป

ข้อควรระวังในการใช้อัตราขยายป้อนกลับ (H') สำหรับมอเตอร์ที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นของค่าความเหนี่ยวนำร่วม (Magnetizing inductance) เนื่องจากพฤติกรรมของตัวสังเกตเมื่อใช้อัตราขยายป้อนกลับที่ได้ออกแบบเพื่อใช้ในการปรับปรุงเสถียรภาพของระบบประมาณค่าความเร็ว นั้น จะเป็นการใช้กระแสเตเตอร์จริง ในการคำนวณค่าความถี่สลิปและโรเตอร์ฟลักซ์ ซึ่งในกรณีที่ฟลักซ์มีค่าน้อย แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่คำนวณได้ในส่วนการควบคุมแยกอิสระ จะมีค่าน้อยกว่าค่าที่ควรจะเป็น ทั้งนี้ก็เนื่องจากค่าความเหนี่ยวนำร่วมในย่านฟลักซ์ต่ำในขณะที่แกนเหล็กยังไม่อิ่มตัวจะมีค่ามากกว่าค่าที่จุดทำงานพิกัดซึ่งแกนเหล็กเริ่มจะอิ่มตัวแล้ว ดังนั้นค่าความเหนี่ยวนำร่วมที่ใช้ในส่วนการควบคุมแยกอิสระจึงมีค่าน้อยกว่าค่าจริง ส่งผลให้แรงดันที่จ่ายให้มอเตอร์ผิดพลาด ทำให้กระแสเตเตอร์ไม่เพิ่มขึ้น ฟลักซ์จึงไม่เพิ่มขึ้นด้วย และระบบจะตกอยู่ในสภาวะนี้ตลอดไป เราได้ทำการแก้ไขปัญหาโดยใช้ตัวควบคุมกระแสบังคับให้กระแสมีค่าตามคำสั่งไม่ว่าแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำขนาดจะคลาดเคลื่อนก็ตาม และเมื่อฟลักซ์ในมอเตอร์อยู่ในระดับปรกติที่ค่าพิกัดแล้วค่าความเหนี่ยวนำร่วมก็จะเป็นค่าที่ถูกต้อง ทำให้ระบบมีการประมาณฟลักซ์ที่ถูกต้อง อีกแนวทางหนึ่งในการแก้ปัญหาดังกล่าว เราอาจทำได้โดยการใช้แบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่รวมเอาความไม่เป็นเชิงเส้นของแกนเหล็กในมอเตอร์เข้าไป และการประมาณฟลักซ์ทำได้โดยการใช้ความสัมพันธ์แบบไม่เชิงเส้นระหว่างกระแสกระตุ้นและโรเตอร์ฟลักซ์

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

ชูเกียรติ นิธิโยธาน. “ระบบควบคุมเวกเตอร์แบบควบคุมกระแสไร้เซนเซอร์วัดความเร็วสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ”, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.

สุรพงษ์ สุวรรณกวิน. “ระบบควบคุมเวกเตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันไร้เซนเซอร์วัดความเร็วสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ”, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.

โสภณ สมัยรัฐ. “ระบบควบคุมเวกเตอร์เหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์”, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.

ภาษาอังกฤษ

J. Holtz. “Controlled AC Drives with Ride-Through Capability at Power Interruption”, *IEEE Trans*

Industry Application, vol.30, No.5, 1994: pp.1275-1283.

J. Brian. “Inverter Control During Overload and Following Power Interruption”, *IEEE Trans. Industry Application*, Vol.28, No.3, 1992: pp. 567-573.

S. Sangwongwanich. “Speed-Sensorless Vector Control of Induction Motors–Stability Analysis and

Realization”, *Proc.of IPEC-Yokohama*, Vol.1, 1995: pp.310-315.

S. Sangwongwanich. S. Suwankawin, “A Speed-Sensorless IM Drive with Modified Decoupling

Control”, *Proc. Of PCC-Nagaoka*, Vol.1, 1997: pp. 85-90.

S. Suwankawin, and S.Sangwongwanich. “Stability Analysis of Speed–Sensorless Vector Control

System”, *Proc. of IPEC- Korea*, 1995: pp.403-408.

W. Leonhard. "Control of Electric Drive", Berlin, Heidelberg, Germany: Springer-verlag, 1985.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

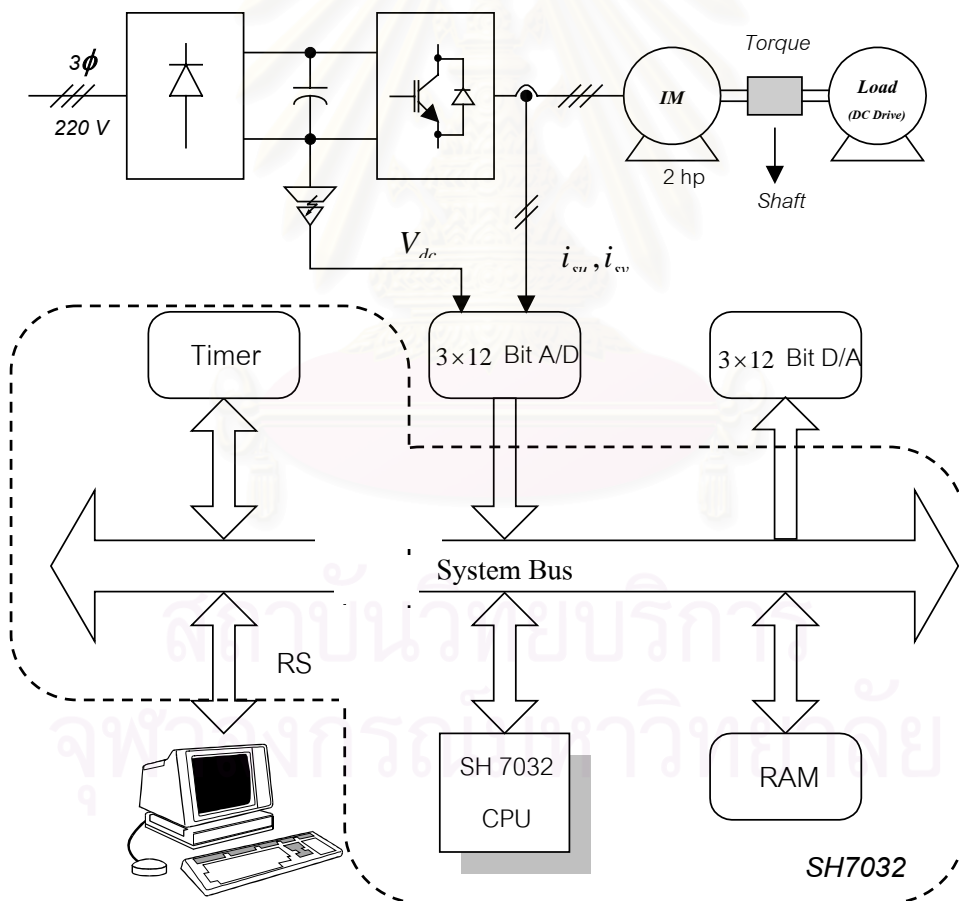
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

โครงสร้างฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ของระบบ

1. ฮาร์ดแวร์ของระบบ

ในส่วนของฮาร์ดแวร์ของระบบควบคุมแสดงดังรูป ก.1 เราใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ SH 7032 (32 บิต) ซึ่งจะประกอบด้วย ส่วน CPU ที่มีความถี่สัญญาณนาฬิกาเท่ากับ 20MHz, 128 Kbytes RAM, ตัวแปลงสัญญาณ A/D และ D/A ขนาด 12 บิต อย่างละ 3 ช่อง ในช่องที่ 3 เรามีการขยายตัวแปลงสัญญาณ D/A เพิ่มเป็น 4 ช่องสัญญาณ โดยเราสามารถทำการพัฒนาซอฟต์แวร์ทางคอมพิวเตอร์และถ่ายข้อมูลไปยังส่วนของไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่านทาง RS 232 เพื่อใช้ในการคำนวณและควบคุมมอเตอร์ตามที่ต้องการ



รูปที่ ก.1 โครงสร้างฮาร์ดแวร์ของระบบที่ใช้ในการทดสอบ

2. ซอฟต์แวร์ของระบบ

จากโครงสร้างส่วนการควบคุมในรูปที่ 4.1 ไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการคำนวณกระแสที่ทำให้เกิดแรงบิด (i_{sq}) จากผลต่างระหว่างความเร็วคำสั่งกับความเร็วประมาณ ผ่านตัวควบคุม PI ที่มีการจำกัดค่ากระแสคำสั่ง ไม่ให้เกินค่าพิคก กระแสคำสั่ง i_{sq}^* ที่คำนวณได้ และกระแสสร้างฟลักซ์ i_{sd}^* ที่กำหนด (ในการทดลองเราจะคงค่าไว้ที่ค่าพิคก) จะถูกส่งไปยังตัวควบคุมเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดความเร็ว ซึ่งจะประมาณค่าความเร็วจากค่าผิดพลาดระหว่างกระแสประมาณกับกระแสเดเตอร์ที่ตรวจจับมา เพื่อใช้ในวงรอบควบคุมความเร็วด้านนอก และคำนวณค่าแรงดันสำหรับการควบคุมแยกอิสระในส่วนของระบบควบคุมเวกเตอร์ โดยมีการชดเชยแรงดันเนื่องมาจากผลของการประวิงเวลาสวิตช์ด้วย ค่าแรงดันคำสั่งที่ได้จะถูกนำไปสร้างสัญญาณปรับความกว้างพัลส์ (PWM) สำหรับขับนำเกตของอินเวอร์เตอร์โดยอาศัยหลักการทางสเปซเวกเตอร์ของแรงดัน (voltage space vector) (โสภณ สมัยรัฐ 2538) ซึ่งใช้แรงดันบัสไฟตรงที่ตรวจจับได้เป็นแรงดันฐาน ซอฟต์แวร์ทั้งหมดสามารถเขียนได้ดังแสดงใน PDL (Program Development Language) ต่อไปนี้ และสามารถแสดงไคอะแกรมเวลาได้ดังรูปที่ ก.2 ซอฟต์แวร์โมดูลนี้จะใช้การอินเทอร์รัปต์ทุกๆ 500 ไมโครวินาที และโปรแกรมในการบริการการอินเทอร์รัปต์จะใช้เวลาทั้งหมดประมาณ 144 ไมโครวินาที ซึ่งจะเห็นว่าเราจะทำการอ่านกระแสก่อนเป็นอันดับแรก ทั้งนี้เพื่อให้กระแสที่อ่านได้ใกล้เคียงกับกระแสที่ความถี่หลักมากที่สุด

SPEED-SENSORLESS VECTOR CONTROL PROGRAM OF AN INDUCTION MOTOR (MAIN PROGRAM)

MODULE : MAIN PROGRAM

Initialize

Initialize all variables

Initialize all timers

Clear all variables

Wait for data from keyboard (flying start condition)

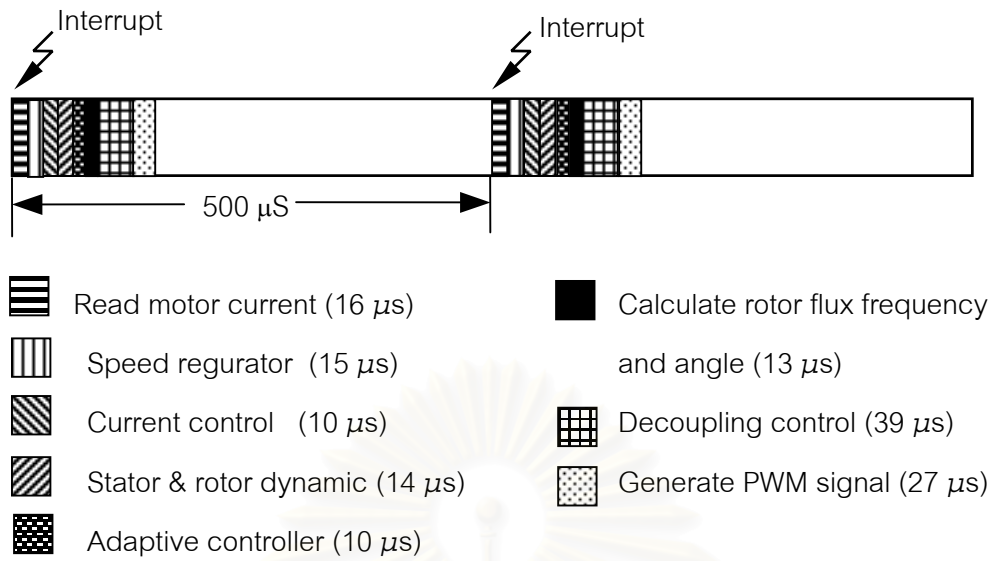
Enable time interrupt

Loop here and wait for interrupt only

Switching frequency Interrupt Service Routine

Read motor currents
 Input i_{st}, i_{sv} from A/D
 Convert to rotating d-q axis (i_{sd}, i_{sq})
 Get speed command
 Get estimated speed from previous interrupt service routine
 Speed regulator
 Calculate speed error
 Calculate Speed Controller output (i_{sq}^*)
 Current Control
 Calculate PI- Control in d-Axis
 Calculate PI-Control in q-Axis
 Stator and Rotor dynamics
 Calculate estimated currents ($\hat{i}_{sd}, \hat{i}_{sq}$)
 Adaptive Controller
 Calculate current error ($\hat{i}_{sq} - i_{sq}$)
 Calculate estimated speed $\hat{\omega}_m$
 Calculate rotor flux frequency and angle
 Decoupling control
 Calculate v_{sd}, v_{sq}
 Calculate dead-time compensated voltage (v_{sdc}^*, v_{sqc}^*)
 Generate PWM signal
 Find sector of compensated voltage vector
 Calculate timing of switching pattern
 Return

END MAIN PROGRAM



รูปที่ ก.2 ไตอะแกรมเวลาของซอฟต์แวร์โมดูล

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายไพศาล สดวิสัย เกิดเมื่อวันที่ 7 พฤษภาคม พ.ศ. 2519 ที่อำเภอประโคนชัย จังหวัดบุรีรัมย์ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า (ไฟฟ้ากำลัง) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีการศึกษา 2540 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตร-มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า (อิเล็กทรอนิกส์กำลัง) ณ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2541



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย