ระบบวัดแรงบิดและความเร็วแบบปราศจากเซนเซอร์ สำหรับการทดสอบเครื่องจักรกลไฟฟ้า

นาย คิดชอบ ไวยสุศรี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-17-0034-2

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A SENSORLESS TORQUE AND SPEED MONITORING SYSTEM FOR ELECTRICAL MACHINE TESTING

Mr. Kidchop Waiyasusri

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 974-17-0034-2

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ระบบวัดแรงบิดและความเร็วแบบปราศจากเซนเซอร์สำหรับการทดสอบเครื่องจักรกลไฟฟ้า
โดย	นายคิดชอบ ไวยสุศรี
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. เอกชัย ลีลารัศมี
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์ ดร. สมบูรณ์ แสงวงค์วาณิชย์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

…… ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ยุทธนา กุลวิทิต)

…….. อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร. เอกชัย ลีลารัศมี)

……อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(อาจารย์ ดร. สมบูรณ์ แสงวงค์วาณิชย์)

……กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มานพ วงศ์สายสุวรรณ)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คิดชอบ ไวยสุศรี : ระบบวัดแรงบิดและความเร็วแบบปราศจากเซนเซอร์สำหรับการทดสอบเครื่องจักรกลไฟฟ้า (A SENSORLESS TORQUE AND SPEED MONITORING SYSTEM FOR ELECTRICAL MACHINE TESTING) อ. ที่ปรึกษา : รศ. ดร. เอกชัย ลีลารัศมี , อ. ที่ปรึกษาร่วม : อ.ดร. สมบูรณ์ แสงวงค์วาณิชย์, 104 หน้า. ISBN 974-17-0034-2

ระบบวัดแรงบิดและความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ในการทดสอบเครื่องจักรกลไฟฟ้าโดยทั่วไปจะต้องใช้อุปกรณ์เซนเซอร์ในการวัดแรงบิดและความเร็วที่มีราคาแพง ติดตั้งได้ยาก และไม่สามารถนำไปใช้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสทั่วๆไปได้

เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงนำเสนอการพัฒนาระบบวัดแรงบิดและความเร็วสำหรับการทดสอบเครื่องจักรกลไฟฟ้า โดยอาศัยทฤษฎีของการควบคุมมอเตอร์แบบปราศจากเซนเซอร์วัดความเร็วและแรงบิดซึ่งจะใช้การตรวจจับแรงดันและกระแสของมอเตอร์มาคำนวณหาค่าแรงบิดและความเร็วด้วยตัวประมวลผลเชิงดิจิตอลแทนการใช้เซนเซอร์วัดแรงบิดและความเร็วของมอเตอร์โดยตรง นอกจากนี้เรายังได้ทำการชดเชยผลของกำลังสูญในแกนเหล็กและกำลังสูญทางกล เพื่อให้ค่าแรงบิดและความเร็วที่คำนวณได้มีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น ผลการทดสอบระบบที่พัฒนาขึ้นแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถวัดหรือควบคุมแรงบิดและความเร็วได้อย่างถูกต้องโดยมีค่าผิดพลาดไม่เกิน $\pm$10% และ $\pm$1% ของค่าพิกัดตามลำดับ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า	ลายมือชื่อนิสิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา	2544	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

4270237221 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD : TORQUE AND SPEED MONITORING/SENSORLESS/CORE LOSS/MECHANICAL LOSS

KIDCHOP WAIYASUSRI : A SENSORLESS TORQUE AND SPEED MONITORING SYSTEM FOR ELECTRICAL MACHINE TESTING. THESIS ADVISOR : DR. EKACHAI LEELARASMEE, THESIS CO ADVISOR : DR. SOMBOON SANGWONGWANICH, 104 pp. ISBN 974-17-0034-2

In general, the torque and speed monitoring system used in electrical machine testing, requires expensive torque and speed sensors, which is hard to install and cannot be coupled with a general-purpose three-phase induction motor.

To overcome these problems, a novel torque and speed monitoring system for electrical machine testing is developed and presented in this thesis. The proposed system, which is based on the torque and speed sensorless induction motor control theory, detects the input voltage and current of the induction motor, and uses them to calculate the torque and speed by a digital signal processor instead of using the torque and speed sensors. In addition, the effects of the core loss and mechanical loss are compensated to improve the accuracy of the calculated torque and speed. It is verified by experimental results that the developed system is capable of measuring or controlling both the torque and speed accurately within the errors of $\pm$10% and $\pm$1% of their rated values, respectively.

.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department/Program	Electrical Engineering	Student's signature
Field of study	Electrical Engineering	Advisor's signature
Academic year	2001	Co-advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วง ด้วยความช่วยเหลือและเอาใจใส่อย่างดียิ่งจากอาจารย์ ดร. สมบูรณ์ แสงวงค์วาณิชย์ ผู้ที่ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือด้านต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัยตลอดมา และขอขอบพระคุณ รศ. ดร.เอกชัย ลีลารัศมี ที่กรุณารับเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รวมทั้งท่านอาจารย์ทั้งหลายที่ให้วิชาความรู้ตั้งแต่อดีตจนกระทั่งปัจจุบัน

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และญาติพี่น้องของข้าพเจ้า ผู้ซึ่งให้โอกาสทางการศึกษาและเป็นกำลังใจด้วยดีเสมอมา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ
กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ
สารบัญ ..... ช
สารบัญตาราง ..... ซ
สารบัญภาพ ..... ฌ

บทที่

1 บทนำ 1
2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 5
3 การประมาณค่าความเร็วของมอเตอร์โดยอาศัยแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ..... 18
4 การสร้างระบบวัดและควบคุมแรงบิดและความเร็วของมอเตอร์แบบปราศจากเซนเซอร์ 29
..... 54
5 ผลการทดสอบการทำงานของระบบ 83
6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ 85
รายการอ้างอิง 86
ภาคผนวก 98
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

3.1 เครื่องหมายของความถี่โรเตอร์ฟลักซ์ ความถี่สลิป และความเร็วโรเตอร์ ……... 26

5.1 ค่าสัมประสิทธิ์และค่าอัตราขยายต่างๆที่ใช้ในระบบ …….…… 57

5.2 ค่าพิกัดและค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ SIEMENs ….…… 57

5.3 ค่าพิกัดและค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ Super Line ……..... 58

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

รูปที่ **หน้า**

1.1 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ตรวจวัดแรงบิดและความเร็วในวิชาปฏิบัติการพื้นฐาน..... 1
1.2 ภาพรวมของระบบวัดและควบคุมแรงบิดและความเร็วของมอเตอร์..... 2
1.3 ลักษณะการนำระบบวัดและควบคุมแรงบิดและความเร็วไปใช้งาน..... 3
2.1 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่คำนึงถึงผลของกำลังสูญแกนเหล็ก..... 5
2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าบนแกนอ้างอิงสเตเตอร์กับค่าบนแกนอ้างอิงโรเตอร์ฟลักซ์..... 8
2.3 แผนภาพส่วนการหาค่ามุมโรเตอร์ฟลักซ์..... 9
2.4 แผนภาพส่วนการหาค่ามุมโรเตอร์ฟลักซ์เมื่อคำนึงถึงผลของความไม่เป็นเชิงเส้นของ
ลักษณะการกระตุ้น..... 11
2.5 ตัวอย่างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างโรเตอร์ฟลักซ์กับกระแสสนามโรเตอร์ฟลักซ์ 12
2.6 แบบจำลองของความต้านทานสมมูลของกำลังสูญแกนเหล็ก(R_c) 13
2.7 ผลการทดสอบการหาค่าความต้านทานสมมูลของกำลังสูญแกนเหล็ก..... 14
2.8 ผลการทดสอบการหาค่ากำลังสูญทางกล..... 15
3.1 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ..... 18
3.2 ความสัมพันธ์ของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำกับแกนของฟลักซ์จริงในมอเตอร์เมื่อเกิดค่าผิดพลาด
มุมของแกนของฟลักซ์ในตัวควบคุม..... 20
3.3 ระบบประมาณค่าความเร็วในรูปแบบ MRAS ในกรณีที่มีการป้อนกลับค่าผิดพลาดของแรง
เคลื่อนเหนี่ยวนำ..... 22
3.4 การจำกัดอัตราขยาย k 25
3.5 ระบบประมาณค่าความเร็วบนแกนโรเตอร์ฟลักซ์ที่มีการลดอัตราขยายรวมของระบบโดย
อัตราขยาย a 28
4.1 แผนภาพของเป็นระบบวัดแรงบิดและความเร็วของมอเตอร์..... 32
4.2 แผนภาพของระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์ 35
4.3 แผนภาพของระบบควบคุมแรงบิดมอเตอร์..... 36
4.4 ระบบจำลองการทำงานของระบบวัดความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์..... 37
4.5 ผลการจำลองการทำงานของระบบที่สภาวะอยู่ตัวที่ความเร็ว 1200 RPM ขณะไร้โหลด..... 8
4.6 ผลการจำลองการทำงานของระบบที่สภาวะอยู่ตัวที่ความเร็ว 1200 RPM ขณะมีโหลด 4 Nm..9
4.7 ผลการจำลองการทำงานของระบบขณะเร่งความเร็วจาก 300 RPM เป็น 1500 RPM..... 39

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.8 ผลการจำลองการทำงานของระบบขณะลดความเร็วจาก 1500 RPM เป็น 300 RPM…… 40
4.9 ผลการจำลองการทำงานของระบบขณะกลับทิศความเร็วจาก 1200 RPM เป็น –1200 RPM…….. 40
4.10 ผลการจำลองการทำงานของระบบขณะเพิ่มโหลดจาก 0 Nm เป็น 4 Nm…… 41
4.11 ผลการจำลองการทำงานของระบบขณะลดโหลดจาก 4 Nm เป็น 0 Nm…… 41
4.12 ระบบจำลองการทำงานของระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์…….. 42
4.13 ผลการจำลองการทำงานของระบบที่สภาวะอยู่ตัวที่ความเร็ว 1200 RPM ขณะไร้โหลด... 43
4.14 ผลการจำลองการทำงานของระบบที่สภาวะอยู่ตัวที่ความเร็ว 100 RPM ขณะไร้โหลด….. 44
4.15 ผลการจำลองการทำงานของระบบที่สภาวะอยู่ตัวที่ความเร็ว 1200 RPM ขณะมีโหลด 4 Nm……44
4.16 ผลการจำลองการทำงานของระบบขณะเพิ่มความเร็วจาก 300 RPM เป็น 1200 RPM…... 45
4.17 ผลการจำลองการทำงานของระบบขณะลดความเร็วจาก 1200 RPM เป็น 300 RPM……...45
4.18 ผลการจำลองการทำงานของระบบขณะกลับทิศความเร็วจาก 1200 RPM เป็น -1200RPM…… 46
4.19 ผลการจำลองการทำงานของระบบขณะเพิ่มโหลดจาก 0 Nm เป็น 4 Nm …… 46
4.20 ผลการจำลองการทำงานของระบบขณะลดโหลดจาก 4 Nm เป็น 0 Nm ..…… 47
4.21 ระบบจำลองการทำงานของระบบควบคุมแรงบิดมอเตอร์……..…… 48
4.22 ระบบทดสอบมอเตอร์…….. 49
4.23 ย่านการทำงานของมอเตอร์…….. 49
4.24 ผลการจำลองการทำงานของระบบในสภาวะอยู่ตัวที่แรงบิด –4 Nm ความเร็ว 1200 RPM. 50
4.25 ผลการจำลองการทำงานของระบบในสภาวะอยู่ตัวที่แรงบิด –4 Nm ความเร็ว 100 RPM… 50
4.26 ผลการจำลองการทำงานของระบบขณะเพิ่มความเร็วจาก 300 RPM เป็น 1200 RPM ที่แรงบิด –4 Nm……...…….. 51
4.27 ผลการจำลองการทำงานของระบบขณะลดความเร็วจาก 1200 RPM เป็น 300 RPM ที่แรงบิด –4 Nm…….. 51
4.28 ผลการจำลองการทำงานของระบบขณะเพิ่มแรงบิดจาก –2 Nm เป็น –6 Nm ที่ความเร็ว 1200RPM…… 52

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.29 ผลการจำลองการทำงานของระบบขณะลดแรงบิดจาก –6 Nm เป็น –2 Nm ที่ความเร็ว 1200RPM…….. 52

5.1 ผลการตรวจจับแรงดันแบบ PWM……..…….. 55

5.2 โครงสร้างของระบบฮาร์ดแวร์โดยรวม…… 56

5.3 ระบบทดสอบการวัดความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์…… 59

5.4 กราฟเปรียบเทียบค่าแรงบิดที่คำนวณได้จากระบบที่สร้างขึ้นกับค่าแรงบิดที่วัดได้จากเครื่องวัดแรงบิดที่ความถี่ 50 Hz…….. 60

5.5 กราฟเปรียบเทียบค่าแรงบิดที่คำนวณได้จากระบบที่สร้างขึ้นกับค่าแรงบิดที่วัดได้จากเครื่องวัดแรงบิดที่ความถี่ 30 Hz…….. 60

5.6 ผลการวัดแรงบิดขณะที่มีการเพิ่มโหลด…… 61

5.7 ผลการวัดแรงบิดขณะที่มีการลดโหลด…… 61

5.8 กราฟเปรียบเทียบค่าความเร็วที่คำนวณได้จากระบบที่สร้างขึ้นกับค่าความเร็วที่วัดได้จากแทโคมิเตอร์…… 62

5.9 กราฟแสดงค่าความผิดพลาดในการวัดค่าความเร็วที่ค่าความเร็วต่างๆ…….. 63

5.10ผลการวัดความเร็วเมื่อมีการเร่ง ลดและกลับทิศความเร็วที่ความถี่ 50Hz…… 63

5.11ผลการวัดความเร็วเมื่อมีการเร่ง ลดและกลับทิศความเร็วที่ความถี่ 30Hz…… 64

5.12ผลการวัดความเร็วเมื่อมีการเร่ง ลดและกลับทิศความเร็วที่ความถี่ 5Hz…… 64

5.13ผลการทำงานของระบบที่ความเร็วคำสั่ง 1200 RPM ขณะที่ไม่มีโหลด……..…… 65

5.14ผลการทำงานของระบบที่ความเร็วคำสั่ง 1200 RPM ขณะที่มีโหลด 4 Nm……..…… 66

5.15 กราฟลักษณะสมบัติแรงบิด-ความเร็วของมอเตอร์ SIEMENs เมื่อทำการควบคุมความเร็ว. 67

5.16 กราฟลักษณะสมบัติแรงบิด-ความเร็วของมอเตอร์ SuperLine เมื่อทำการควบคุมความเร็ว..67

5.17 ผลการวัดแรงบิดของมอเตอร์ SIEMENs ที่ความเร็วคำสั่งต่างๆ……..……..... 68

5.18 ผลการวัดแรงบิดของมอเตอร์ Super Line ที่ความเร็วคำสั่งต่างๆ…… 68

5.19 ผลการทำงานของระบบโดยเร่งความเร็วจาก 200 RPM 1000 RPM……..…… 69

5.20 ผลการทำงานของระบบโดยลดความเร็วจาก 1000 RPM->200 RPM…….. 70

5.21 ผลการทำงานของระบบโดยการกลับทิศความเร็วจาก -1000 RPM-> 1000 RPM…… 71

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

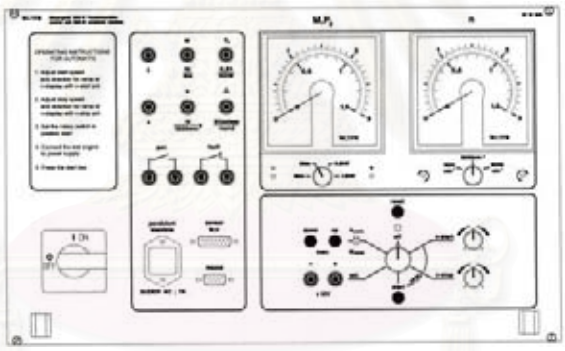
5.22 ผลการทำงานของระบบโดยการเพิ่มโหลดแบบขั้นจาก 0 Nm. เป็น 3 Nm ที่ความเร็วคำสั่ง 1200 RPM…… 72
5.23 ผลการทำงานของระบบโดยการลดโหลดแบบขั้นจาก 3 Nm. เป็น 0 Nm ที่ความเร็วคำสั่ง 1200 RPM…… 73
5.24 ระบบทดสอบการควบคุมแรงบิดของมอเตอร์…… 75
5.25 ผลการทำงานของระบบที่แรงบิดคำสั่ง 6 Nm ณ ความเร็ว –800 RPM…… 77
5.26 กราฟลักษณะสมบัติแรงบิด-ความเร็วของมอเตอร์ Super Line เมื่อทำการควบคุมแรงบิด.. 78
5.27 ผลการวัดความเร็วของมอเตอร์ Super Line ที่ค่าแรงบิดคำสั่งต่างๆ…… 78
5.28 ผลการทำงานของระบบเมื่อสั่งเพิ่มค่าแรงบิดจาก 1 Nm เป็น 6 Nmที่ –800 RPM…… 79
5.29 ผลการทำงานของระบบเมื่อสั่งลดค่าแรงบิดจาก 6 Nm เป็น 1 Nmที่ –800 RPM…… 80
5.30 ผลการทำงานของระบบเมื่อเพิ่มความเร็วจาก –300 RPM เป็น -600 RPM ที่แรงบิด 5 Nm…… 81
5.31 ผลการทำงานของระบบเมื่อลดความเร็วจาก –600 RPM เป็น -300 RPM ที่แรงบิด 5 Nm…… 82
6.1 ระบบประมาณค่าความเร็วในรูปแบบ MRAS กรณีที่การป้อนกลับค่าผิดพลาดของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำผ่านเมตริกซ์ H…… 84
ก.1 แผนภาพการทำงานโดยรวมของซอฟต์แวร์…… 87
ก.2 แผนภาพการทำงานของส่วนย่อยที่ 1 (Part 1)…… 88
ก.3 แผนภาพการทำงานของส่วนย่อยที่ 2 (Part 2)…… 89
ก.4 แผนภาพการทำงานของส่วนย่อยที่ 3 (Part 3)…… 90
ก.5 แผนภาพการทำงานของส่วนย่อยที่ 4 (Part 4)…… 91
ก.6 แผนภาพการทำงานของส่วนย่อยที่ 5 (Part 5)…… 92
ก.7 แผนภาพการทำงานของส่วนย่อยที่ 6 (Part 6)…… 93
ก.8 แผนภาพการทำงานของส่วนย่อยที่ 7(1) (Part 7(1))…… 94
ก.9 แผนภาพการทำงานของส่วนย่อยที่ 7(2) (Part 7(2))…… 95
ก.10 แผนภาพการทำงานของส่วนย่อยที่ 8 (Part 8)…… 96

บทที่ 1

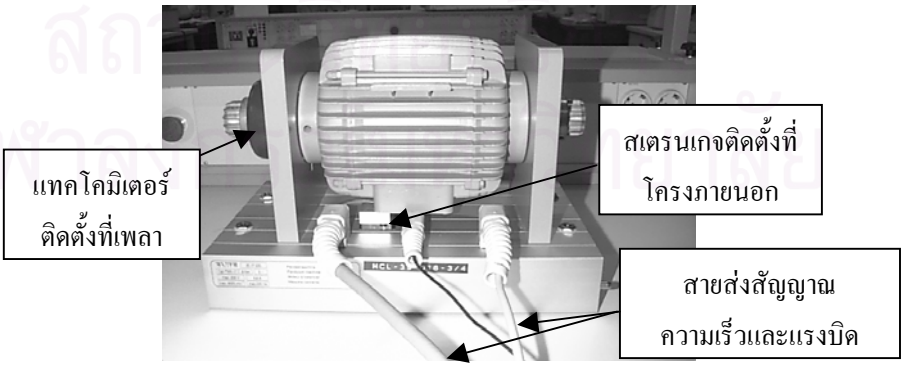
บทนำ

1.1 ความเบื้องต้น

วิชาปฏิบัติการพื้นฐานทางด้านเครื่องจักรกลไฟฟ้ากำลังในปัจจุบันได้มีการนำอุปกรณ์ที่ใช้ตรวจวัดแรงบิดและความเร็วที่มีความสามารถในการโหลดหรือขับเครื่องจักรกลไฟฟ้ามาใช้เป็นจำนวนมาก ซึ่งช่วยอำนวยให้การทดสอบเครื่องจักกรกลไฟฟ้าทำได้ง่ายขึ้น โดยอุปกรณ์ดังกล่าวจะมีลักษณะดังรูปที่ 1.1 ซึ่งประกอบด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสและชุดควบคุมซึ่งจะอาศัยการตรวจวัดแรงบิดจากสเตรนเกจและวัดความเร็วด้วยแทคโคมิเตอร์แล้วจึงนำค่าแรงบิดและความเร็วที่วัดได้นี้มาใช้ในการควบคุมมอเตอร์ด้วยอินเวอร์เตอร์ต่อไป



ก) ชุดควบคุม



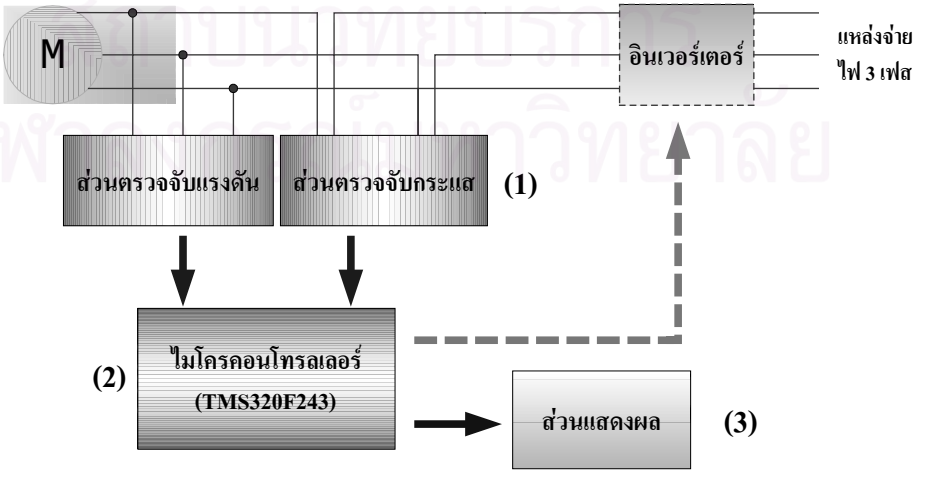
ข) เพนดูลัมแมชชีน

รูปที่ 1.1 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ตรวจวัดแรงบิดและความเร็วในวิชาปฏิบัติการพื้นฐาน

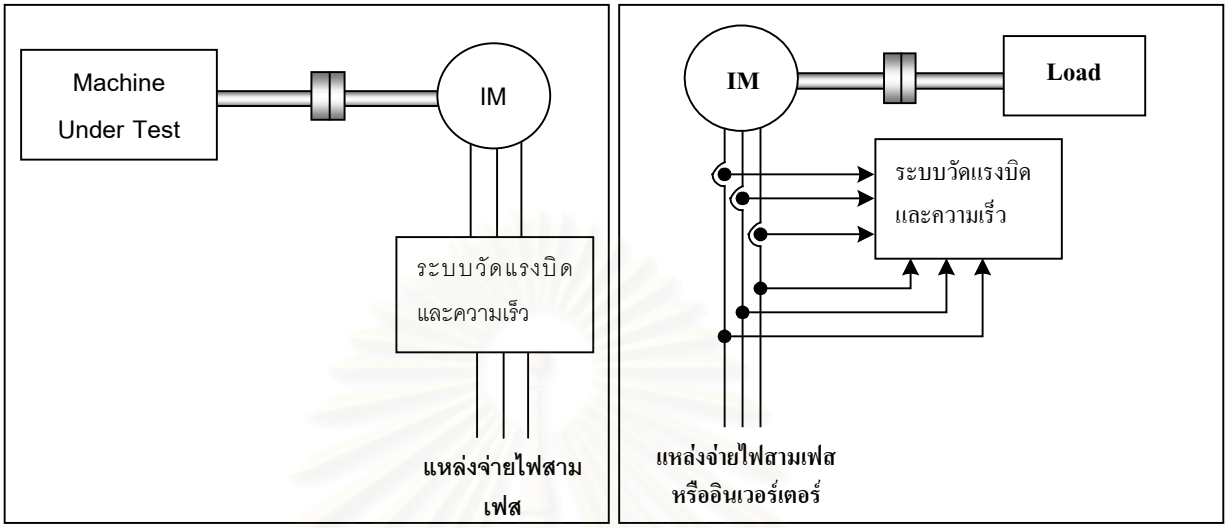
อย่างไรก็ตามสัญญาณที่ได้จากการวัดแรงบิดนั้นจะถูกรบกวนจากการสั่นสะเทือนและการทำงานของอินเวอร์เตอร์ที่ติดตั้งอยู่ในชุดควบคุมและยังอาจเกิดออฟเซตในค่าที่วัดได้เนื่องจากวิธีการวัดซึ่งเป็นแบบแอนาลอก ดังนั้นค่าแรงบิดที่วัดได้จึงมีความคลาดเคลื่อนและทำให้การควบคุมแรงบิดมีประสิทธิภาพไม่ดีเท่าที่ควร นอกจากนี้ชุดควบคุมของอุปกรณ์ที่ใช้อยู่ในปัจจุบันยังไม่สามารถนำไปใช้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำทั่วๆไปได้เนื่องจากมอเตอร์เหนี่ยวนำที่จะนำมาใช้ได้ต้องมีการปรับเปลี่ยนโครงสร้างเฟรมภายนอกให้สามารถติดตั้งสเตรนเกจเพื่อวัดแรงบิดและยังต้องติดตั้งแทคโคมิเตอร์ที่เพลาอีกด้วย

โครงงานวิทยานิพนธ์นี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะสร้างระบบวัดแรงบิดและความเร็วสำหรับการทดสอบเครื่องจักรกลไฟฟ้าขึ้น โดยอาศัยทฤษฎีของการควบคุมมอเตอร์แบบปราศจากเซนเซอร์วัดความเร็วและแรงบิดเพื่อทำให้ระบบที่พัฒนาขึ้นไม่มีปัญหาเกี่ยวกับอุปกรณ์เซนเซอร์และสามารถนำไปใช้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสใดๆได้ การทำงานของระบบจะอาศัยการตรวจจับค่าแรงดันและกระแสของมอเตอร์มาคำนวณค่าแรงบิดและความเร็วด้วยตัวประมวลผลแบบดิจิตอล พร้อมทั้งทำการชดเชยผลของกำลังสูญในแกนเหล็กและกำลังสูญทางกล เพื่อให้ค่าแรงบิดและความเร็วที่คำนวณได้มีค่าใกล้เคียงความเป็นจริงที่สุด

เราสามารถแสดงภาพรวมของระบบที่ต้องการจะสร้างขึ้นได้ดังรูปที่ 1.2 ส่วนในรูปที่ 1.3 นั้นจะแสดงถึงการนำระบบไปใช้งานใน 2 ลักษณะคือ รูปที่ 1.3 ก) เป็นการใช้ระบบเป็นตัววัดแรงบิดและความเร็วพร้อมทั้งทำการควบคุมมอเตร์เหนี่ยวนำที่เป็นโหลดเพื่อใช้ในการทดสอบเครื่องจักรกลไฟฟ้า ในขณะที่รูปที่ 1.3 ข) เป็นการใช้ระบบเป็นตัววัดแรงบิดและความเร็วของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำในในงานอุตสาหกรรมทั่วๆไป โดยมอเตอร์เหนี่ยวนำจะถูกควบคุมจากอุปกรณ์ควบคุมแยกต่างหาก



รูปที่ 1.2 ภาพรวมของระบบวัดและควบคุมแรงบิดและความเร็วของมอเตอร์



ก) ระบบทดสอบเครื่องจักรกลไฟฟ้า ข) ระบบวัดในงานอุตสากรรม

รูปที่ 1.3 ลักษณะการนำระบบวัดและควบคุมแรงบิดและความเร็วไปใช้งาน

1.2 วัตถุประสงค์

1. สร้างอุปกรณ์ที่มีความสามารถในการวัดและควบคุมแรงบิดและความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสสำหรับใช้ในการเรียนการสอนพื้นฐานและการทดสอบมอเตอร์เพื่อทดแทนการนำเข้าอุปกรณ์จากต่างประเทศ
2. ใช้การตรวจจับค่าแรงดัน และกระแสของมอเตอร์มาคำนวณค่าแรงบิดและความเร็วด้วยตัวประมวลผลแบบดิจิตอล (Digital Signal Processor)
3. มีการชดเชยผลของกำลังสูญในแกนเหล็กและกำลังสูญทางกล
4. ทำให้ระบบที่พัฒนาขึ้นไม่มีปัญหาเกี่ยวกับอุปกรณ์เซนเซอร์และสามารถนำไปใช้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสใดๆได้

1.3 ขอบเขตการวิจัย

ขอบเขตของโครงงานวิทยานิพนธ์นี้คือ การสร้างระบบวัดและควบคุมแรงบิดและความเร็วรอบที่มีการชดเชยผลของกำลังสูญในแกนเหล็ก (Core Loss) และกำลังสูญทางกล (Mechanical Loss) โดยระบบที่จะสร้างขึ้นจะมีข้อกำหนดดังนี้

1. ใช้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสขนาดไม่เกิน 1.5 กิโลวัตต์
2. ใช้กับแรงดันขนาดไม่เกิน 380 โวลท์ (V_{rms})
3. สามารถใช้กับแรงดันที่มีการมอดูเลตแบบปรับความกว้างพัลส์ (PWM Voltage) ได้
4. สามารถใช้งานได้ในย่านความถี่ที่มีค่าร้อยละ 10 ถึง 100 ของค่าความถี่ใช้งานของมอเตอร์
5. ค่าผิดพลาดในการวัดค่าแรงบิดไม่เกินร้อยละ 10 ของค่าแรงบิดพิกัดของมอเตอร์
6. ค่าผิดพลาดในการวัดค่าความเร็วไม่เกินร้อยละ 1 ของค่าความเร็วฐาน (ค่าความเร็วซิงโครนัสที่ความถี่ 50 เฮิรตซ์) ของมอเตอร์

1.4 ขั้นตอนในการดำเนินงาน

1. ศึกษาวิธีการคำนวณแรงบิด และความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส
2. ศึกษาทฤษฎีระบบควบคุมเวกเตอร์แบบการควบคุมแยกอิสระและแบบควบคุมกระแสไร้เซนเซอร์วัดความเร็ว
3. สร้างระบบในส่วนที่เกี่ยวข้องกับฮาร์ดแวร์และไมโครคอนโทรลเลอร์
4. ทดสอบ และปรับปรุงแก้ไขระบบ
5. ประเมินผล และสรุปผล
6. เขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. อุปกรณ์ที่สร้างขึ้นสามารถนำมาใช้ในวิชาปฏิบัติการพื้นฐานได้
2. อุปกรณ์ที่สร้างขึ้นสามารถทดแทนการนำเข้าอุปกรณ์จากต่างประเทศได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

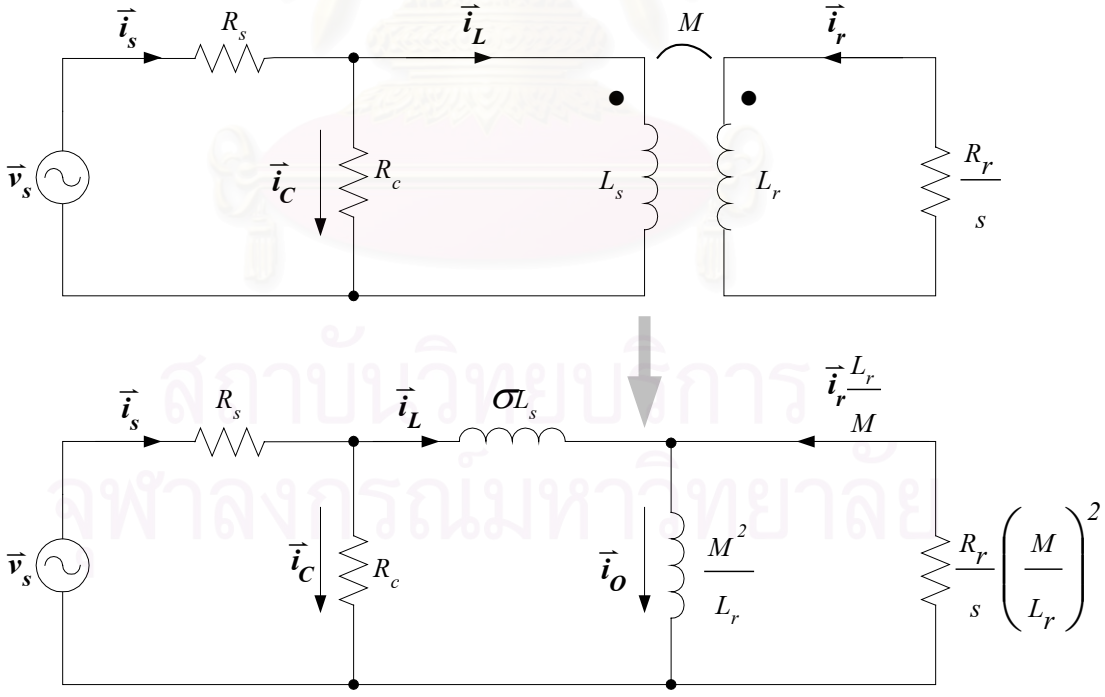
บทที่ 2

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

การวัดแรงบิดและความเร็วของมอเตอร์แบบไร้เซนเซอร์นั้นจะอาศัยการตรวจจับค่าแรงดันและกระแสของมอเตอร์มาคำนวณค่าแรงบิดและความเร็วแทนการใช้เซนเซอร์วัดโดยตรง ซึ่งในการคำนวณค่าแรงบิดและความเร็วนั้น เราจะคำนวณโดยอาศัยแบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีการคิดผลของกำลังสูญแกนเหล็กรวมอยู่ด้วย

2.1 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีการคิดผลของกำลังสูญแกนเหล็ก

ในที่นี้เราจะพิจารณาผลของกำลังสูญในแกนเหล็กโดยแสดงเป็นความต้านทานสมมูลของกำลังสูญแกนเหล็ก (R_c) ต่อขนานอยู่กับความเหนี่ยวนำของขดลวดสเตเตอร์ (S. Shinnaka, 1998) ซึ่งจะทำให้เราได้วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่คำนึงถึงผลของกำลังสูญแกนเหล็ก

โดยที่ $\vec{\lambda}_s = \sigma L_s \vec{i}_L + \vec{\lambda}_r$ (2.1)

$$\vec{\lambda}_r = M\,\vec{i}_L + L_r\,\vec{i}_r \quad = M\,\vec{i}_O \tag{2.2}$$

$$s = \frac{\omega - p\omega_m}{\omega} = \frac{\omega_s}{\omega} \tag{2.3}$$

เมื่อ $\vec{v}_s$: สเปซเวกเตอร์ของแรงดันสเตเตอร์

$\vec{i}_s$, $\vec{i}_r$: สเปซเวกเตอร์ของกระแสสเตเตอร์และโรเตอร์ตามลำดับ

$\vec{i}_C$: สเปซเวกเตอร์ของกระแสไหลผ่านความต้านทานสมมูลของกำลังสูญแกนเหล็ก

$\vec{i}_L$: สเปซเวกเตอร์ของกระแสสเตเตอร์หลังความต้านทานสมมูลของกำลังสูญแกนเหล็ก

$\vec{i}_O$: สเปซเวกเตอร์ของกระแสนามโรเตอร์ฟลักซ์

$\vec{\lambda}_s$, $\vec{\lambda}_r$: สเปซเวกเตอร์ของฟลักซ์แม่เหล็กด้านสเตเตอร์และโรเตอร์ตามลำดับ

R_s , R_r : ความต้านทานสเตเตอร์และโรเตอร์ตามลำดับ

R_c : ความต้านทานสมมูลของกำลังสูญแกนเหล็ก

L_s , L_r : ความเหนี่ยวนำด้านสเตเตอร์และโรเตอร์ตามลำดับ

σ : สัมประสิทธิ์การรั่วไหลรวม

M : ความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์

s : สลิป

ω : ความถี่ของปริมาณทางไฟฟ้า

ω_m : ความเร็วโรเตอร์ทางกล

ω_s : ความถี่สลิป

p : จำนวนคู่ขั้วของมอเตอร์

จากวงจรสมมูลในรูปที่ 2.1 เราสามารถเขียนสมการแบบจำลองทางพลวัตรของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีการคิดผลของกำลังสูญแกนเหล็กซึ่งอ้างอิงบนแกนสเตเตอร์ (แกน $\alpha-\beta$) โดยมีแรงดันสเตเตอร์ ($\vec{v}_s$) เป็นสัญญาณเข้า กระแสสเตเตอร์หลังความต้านทานสมมูลของกำลังสูญแกนเหล็ก ($\vec{i}_L$) และโรเตอร์ฟลักซ์ ($\vec{\lambda}_r$) เป็นตัวแปรสถานะได้ดังสมการ (2.4)

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix}\vec{i}_L \\ \vec{\lambda}_r\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\vec{i}_L \\ \vec{\lambda}_r\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}B_1 \\ 0\end{bmatrix}\vec{v}_s \tag{2.4}$$

โดยที่ $A_{11} = -\frac{1}{\sigma L_s}\left(\frac{R_s}{K_c} + R_r\left(\frac{M}{L_r}\right)^2\right)\boldsymbol{I}$, $B_1 = \frac{1}{\sigma L_s K_c}$

$A_{12} = \frac{MR_r}{\sigma L_s L_s^2}\boldsymbol{I} - \frac{p\omega_m M}{\sigma L_s L_r}\boldsymbol{J}$, $K_c = \frac{\left(R_s + R_c\right)}{R_c}$

$A_{21} = \frac{MR_r}{L_r}\boldsymbol{I}$, $\boldsymbol{I} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$

$A_{22} = -\frac{R_r}{L_r}\boldsymbol{I} + p\omega_m\boldsymbol{J}$, $\boldsymbol{J} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$

นอกจากสมการแบบจำลองทางพลวัตรของมอเตอร์เหนี่ยวนำแล้ว เรายังสามารถเขียนสมการทางวงจรไฟฟ้าได้ดังสมการ (2.5), (2.6) และ (2.7)

<u>สมการทางด้านสเตเตอร์</u>

$$\vec{\boldsymbol{i}}_{\boldsymbol{L}} = K_c\vec{\boldsymbol{i}}_{\boldsymbol{s}} - \frac{\vec{\boldsymbol{v}}_{\boldsymbol{s}}}{R_c} \tag{2.5}$$

$$\vec{\boldsymbol{v}}_{\boldsymbol{s}} = R_s\vec{\boldsymbol{i}}_{\boldsymbol{L}} + K_c\left(\sigma L_s\frac{d\vec{\boldsymbol{i}}_{\boldsymbol{L}}}{dt} + \frac{M}{L_r}.\frac{d\vec{\lambda}_{\boldsymbol{r}}}{dt}\right) \tag{2.6}$$

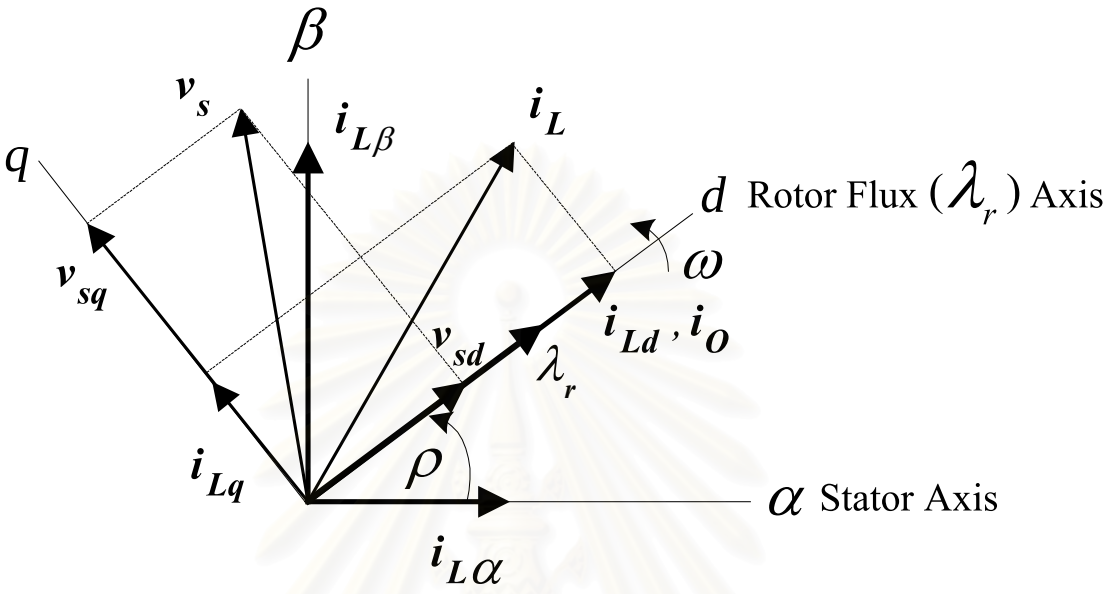
<u>สมการทางด้านโรเตอร์</u>

$$\frac{d\vec{\lambda}_{\boldsymbol{r}}}{dt} = \left(-\frac{R_r}{L_r}\boldsymbol{I} + p\omega_m\boldsymbol{J}\right)\vec{\lambda}_{\boldsymbol{r}} + \frac{MR_r}{L_r}\vec{\boldsymbol{i}}_{\boldsymbol{L}} \tag{2.7}$$

แต่อย่างไรก็ตาม การใช้ความสัมพันธ์ที่อ้างอิงบนแกนโรเตอร์ฟลักซ์ (แกน *d-q*) จะสะดวกต่อการสร้างระบบควบคุมความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์มากกว่าการใช้ความสัมพันธ์ที่อ้างอิงบนแกนสเตเตอร์ ดังนั้นเราจะแสดงสมการทางด้านสเตเตอร์และโรเตอร์ใหม่ดังสมการ (2.8)-(2.11)

สำนักวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างแกนสเตเตอร์กับแกนโรเตอร์ฟลักซ์นั้นสามารถแสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าบนแกนอ้างอิงสเตเตอร์กับค่าบนแกนอ้างอิงโรเตอร์ฟลักซ์

<u>สมการทางด้านสเตเตอร์</u>

$$v_{sd} = R_s i_{Ld} + K_c\left(\sigma L_s \frac{di_{Ld}}{dt} + \frac{M}{L_r}.\frac{d\lambda_r}{dt} - \omega\sigma L_s i_{Lq}\right)$$

$$= R_s i_{Ld} + K_c\left(\sigma L_s \frac{di_{Ld}}{dt} + \frac{R_r M^2}{L_r^2}\left(i_{Ld} - i_O\right) - \omega\sigma L_s i_{Lq}\right) \quad (2.8)$$

$$v_{sq} = R_s i_{Lq} + K_c\left(\sigma L_s \frac{di_{Lq}}{dt} + \omega\sigma L_s i_{Ld} + \frac{\omega M}{L_r}\lambda_r\right)$$

$$= R_s i_{Lq} + K_c\left(\sigma L_s \frac{di_{Lq}}{dt} - \omega\frac{M^2}{L_r}\left(i_{Ld} - i_O\right) + \omega L_s i_{Ld}\right) \quad (2.9)$$

<u>สมการทางด้านโรเตอร์</u>

$$\frac{d\lambda_{\boldsymbol{r}}}{dt} = \frac{R_r}{L_r}\left(M\boldsymbol{i}_{\boldsymbol{Ld}} - \lambda_{\boldsymbol{r}}\right) = \frac{MR_r}{L_r}\left(\boldsymbol{i}_{\boldsymbol{Ld}} - \boldsymbol{i}_{\boldsymbol{O}}\right) \tag{2.10}$$

$$\omega\lambda_{\boldsymbol{r}} = p\omega_m\lambda_{\boldsymbol{r}} + \frac{MR_r}{L_r}\boldsymbol{i}_{\boldsymbol{Lq}} \tag{2.11}$$

เมื่อ $[\bullet]_{\boldsymbol{d}}$, $[\bullet]_{\boldsymbol{q}}$ แทนองค์ประกอบของเวกเตอร์ในแกน d และ q ตามลำดับ

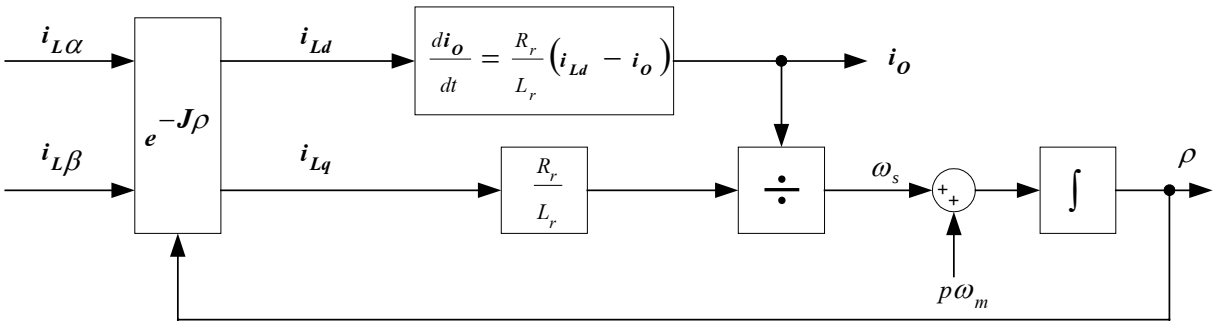
จากสมการทางด้านโรเตอร์ (2.10) และ (2.11) เราสามารถจัดรูปสมการใหม่ เพื่อใช้ในการหามุมของโรเตอร์ฟลักซ์ (ρ) ที่ใช้ในการแปลงค่าที่อ้างอิงบนแกนสเตเตอร์ (แกน $\alpha-\beta$) มาเป็นค่าที่อ้างอิงบนแกนโรเตอร์ฟลักซ์ได้ดังสมการ (2.12), (2.13) และ (2.14)

$$\frac{d\boldsymbol{i}_{\boldsymbol{O}}}{dt} = \frac{R_r}{L_r}\left(\boldsymbol{i}_{\boldsymbol{Ld}} - \boldsymbol{i}_{\boldsymbol{O}}\right) \tag{2.12}$$

$$\frac{d\rho}{dt} = \omega = p\omega_m + \frac{R_r}{L_r}\left(\frac{\boldsymbol{i}_{\boldsymbol{Lq}}}{\boldsymbol{i}_{\boldsymbol{O}}}\right) \tag{2.13}$$

$$\omega_{\boldsymbol{s}} = \frac{R_r}{L_r}\left(\frac{\boldsymbol{i}_{\boldsymbol{Lq}}}{\boldsymbol{i}_{\boldsymbol{O}}}\right) \tag{2.14}$$

จากสมการ (2.12), (2.13) และ (2.14) เราสามารถนำมาเขียนเป็นแผนภาพสำหรับการหาค่ามุมได้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แผนภาพส่วนการหาค่ามุมโรเตอร์ฟลักซ์

ส่วนสมการแรงบิดนั้น ในแบบจำลองดั้งเดิมเราจะคำนวณค่าแรงบิดจาก $\vec{i}_s$ แต่เมื่อเราคิดผลของความต้านทานสมมูลของกำลังสูญแกนเหล็กด้วยแล้ว กระแสที่จะเป็นตัวสร้างฟลักซ์และแรงบิดจะเป็น $\vec{i}_L$ แทน ซึ่งจะทำให้เราได้สมการของแรงบิดเป็นดังสมการที่ (2.15)

$$\tau = p\frac{M}{L_r}\vec{i}_L^{\,T}\boldsymbol{J}\vec{\lambda}_r = p\frac{M}{L_r}i_{Lq}\lambda_r \qquad (2.15)$$

เมื่อ τ : แรงบิดของมอเตอร์

2.2 <u>การคำนึงถึงผลของกำลังสูญทางกล</u>

ผลของกำลังสูญทางกลนั้น เราจะถือว่าส่งผลต่อแรงบิดเพียงตัวเดียวโดยไม่กระทบต่อปริมาณทางไฟฟ้าอื่นๆและจะทำการชดเชยผลของกำลังสูญทางกลที่มีต่อแรงบิดได้สมการ (2.16)

$$\tau = \tau - \frac{P_m}{\omega_m} \qquad (2.16)$$

เมื่อ τ : ค่าแรงบิดยังไม่ได้ชดเชยผลของกำลังสูญทางกลที่คำนวณจากสมการที่ (2.15)

$\hat{\tau}$: ค่าแรงบิดที่ชดเชยผลของกำลังสูญทางกลแล้ว

P_m : กำลังสูญทางกล

2.3 <u>การคำนึงถึงผลของความไม่เป็นเชิงเส้นของลักษณะการกระตุ้น (Nonlinear Magnetization Curve)</u>

ในความเป็นจริงนั้น โรเตอร์ฟลักซ์ (λ_r) ไม่ได้แปรผันตามกระแสสนามโรเตอร์ฟลักซ์ (i_o) อย่างเป็นเชิงเส้น เนื่องจากลักษณะสมบัติของแกนเหล็กของมอเตอร์ที่มีการอิ่มตัว ดังนั้นการ

คิดว่าค่าความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์ (M) เป็นค่าคงที่จึงก่อให้เกิดความผิดพลาดได้ในกรณีที่โรเตอร์ฟลักซ์มีการเปลี่ยนแปลงตามสภาวะทำงาน ซึ่งจากลักษณะความไม่เป็นเชิงเส้นนี้ทำให้

$$\frac{d\lambda_{\boldsymbol{r}}}{dt} \neq M\frac{d\boldsymbol{i_O}}{dt} \tag{2.17}$$

ดังนั้นสมการ (2.7) และ (2.12) ที่ได้จากการคิดว่า M เป็นค่าคงที่จึงไม่ถูกต้อง ซึ่งเราสามารถเขียนชุดสมการโรเตอร์ใหม่โดยคำนึงถึงผลของความไม่เป็นเชิงเส้นของฟลักซ์แม่เหล็กได้ดังนี้

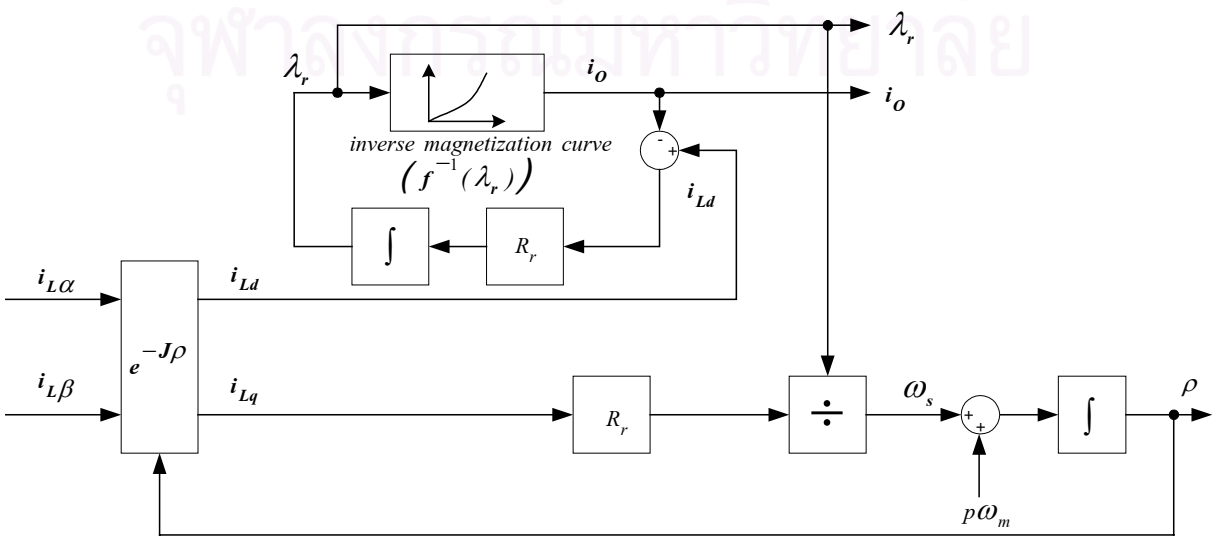
$$\frac{d\lambda_{\boldsymbol{r}}}{dt} = R_r\left(\boldsymbol{i_{Ld}} - \boldsymbol{i_O}\right) = -R_r\boldsymbol{i_{rd}} \tag{2.18}$$

$$\frac{d\rho}{dt} = \omega = p\omega_m + \frac{R_r M\boldsymbol{i_{Lq}}}{L_r\lambda_{\boldsymbol{r}}} \tag{2.19}$$

$$\omega_s = \frac{R_r M\boldsymbol{i_{Lq}}}{L_r\lambda_{\boldsymbol{r}}} \tag{2.20}$$

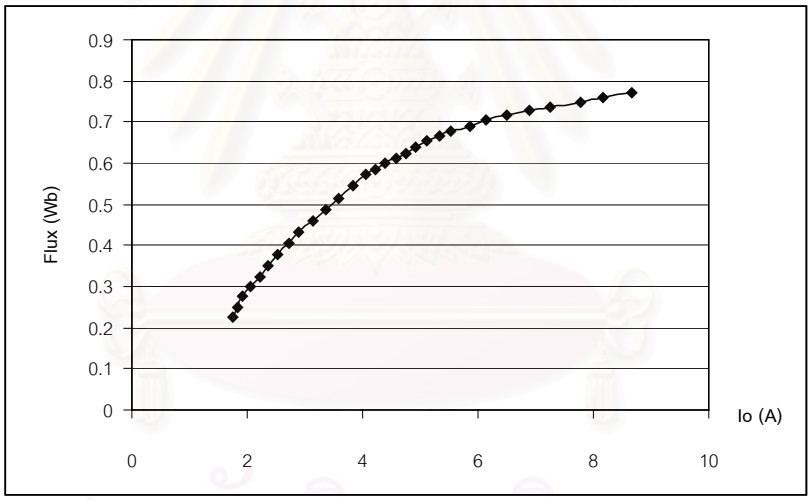
เมื่อ $\lambda_r = f(\boldsymbol{i_O})$: Magnetization Curve

จากสมการ (2.18), (2.19) และ (2.20) เราสามารถนำมาเขียนเป็นแผนภาพสำหรับการหาค่ามุมได้ใหม่ดังรูปที่ 2.4

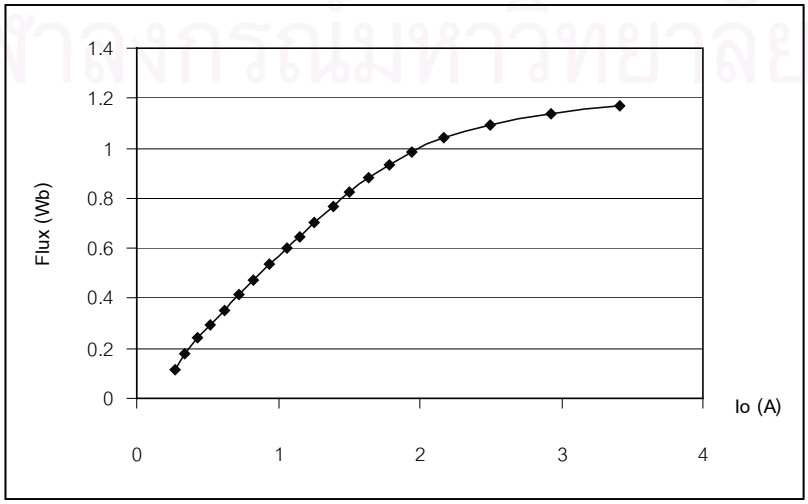


รูปที่ 2.4 แผนภาพส่วนการหาค่ามุมโรเตอร์ฟลักซ์เมื่อคำนึงถึงผลของ
ความไม่เป็นเชิงเส้นของลักษณะการกระตุ้น

จากรูปที่ 2.4 จะเห็นว่าเราจะต้องใช้ตารางความสัมพันธ์ระหว่างโรเตอร์ฟลักซ์กับกระแสสนามโรเตอร์ฟลักซ์ (Magnetization Curve) ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างโรเตอร์ฟลักซ์กับกระแสสนามโรเตอร์ฟลักซ์นี้เราสามารถหาได้จากการทดสอบแบบไร้โหลด (No Load Test) และล็อกโรเตอร์ (Lock Rotor Test) โดยทำการทดสอบแบบไร้โหลดที่ค่าแรงดันหลายๆค่า เพื่อจะนำมาหา M ที่ทุกๆค่าแรงดัน และเราจะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างโรเตอร์ฟลักซ์กับกระแสสนามโรเตอร์ ฟลักซ์ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.5



(ก) มอเตอร์ Super Line ขนาด 1.5 kW

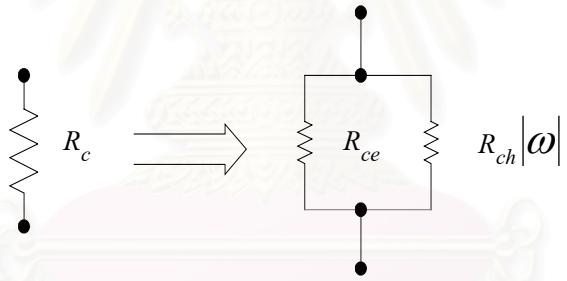


(ข) มอเตอร์ SIEMENs ขนาด 1.1 kW

รูปที่ 2.5 ตัวอย่างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างโรเตอร์ฟลักซ์กับกระแสสนามโรเตอร์ฟลักซ์

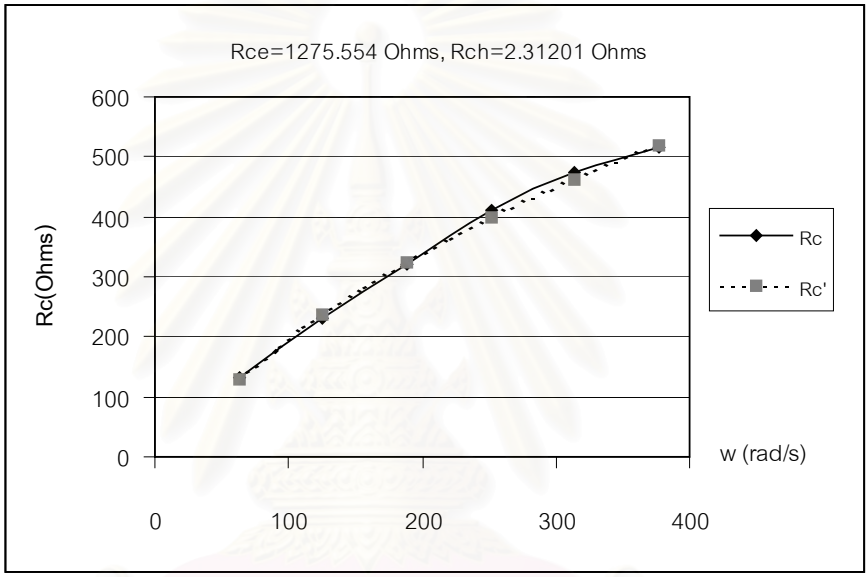
2.4 <u>การหาค่าความต้านทานสมมูลของกำลังสูญแกนเหล็กและกำลังสูญทางกล</u>

เนื่องจากกำลังสูญแกนเหล็กจะประกอบด้วยกำลังสูญฮิสเทอริซิส (Hysteresis Loss) และกำลังสูญเนื่องจากกระแสไหลวน (Eddy Current Loss) (S. Shinnaka, 1998) ดังนั้นเราอาจสมมติให้ความต้านทาน สมมูลของกำลังสูญแกนเหล็ก (R_c) ประกอบด้วยความต้านทานที่มีค่าแปรตามความถี่ $R_{ch}|\omega|$ ซึ่งเป็นตัวแทนของกำลังสูญฮิสเทอริซิสขนานอยู่กับความต้านทาน R_{ce} ซึ่งเป็นตัวแทนของกำลังสูญเนื่องจากกระแสไหลวนดังแสดงในรูปที่ 2.6

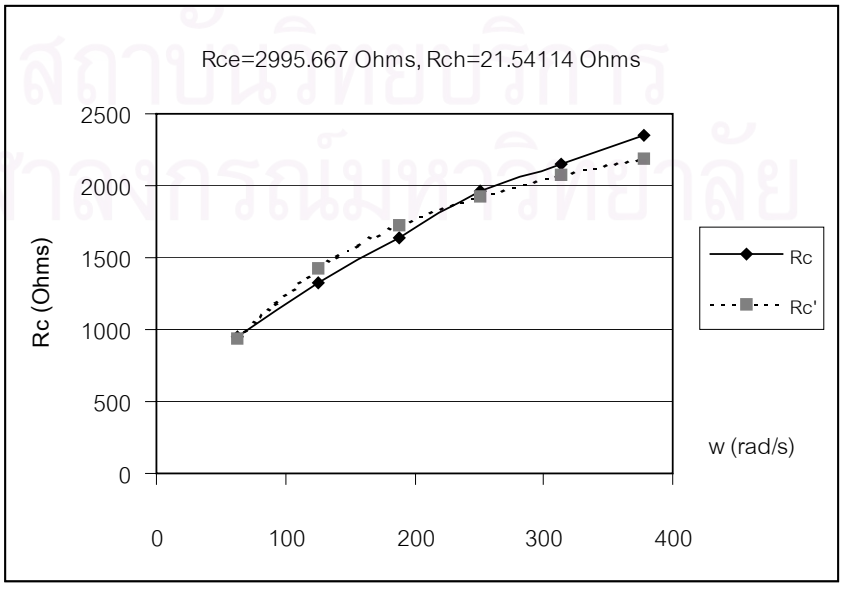


รูปที่ 2.6 แบบจำลองของความต้านทานสมมูลของกำลังสูญแกนเหล็ก (R_c)

ค่าความต้านทานสมมูลของกำลังสูญแกนเหล็กและกำลังสูญทางกลนั้น จะได้มาจากการทดสอบที่สภาวะไร้โหลด โดยเราจะใช้อินเวอร์เตอร์เป็นตัวปรับถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ เพื่อที่จะหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานสมมูลของกำลังสูญแกนเหล็กและกำลังสูญทางกลของมอเตอร์กับความถี่ ตัวอย่างผลการทดสอบการหาค่าความต้านทานสมมูลของกำลังสูญแกนเหล็กและกำลังสูญทางกลแสดงได้ดังรูปที่ 2.7 และ 2.8 ตามลำดับ



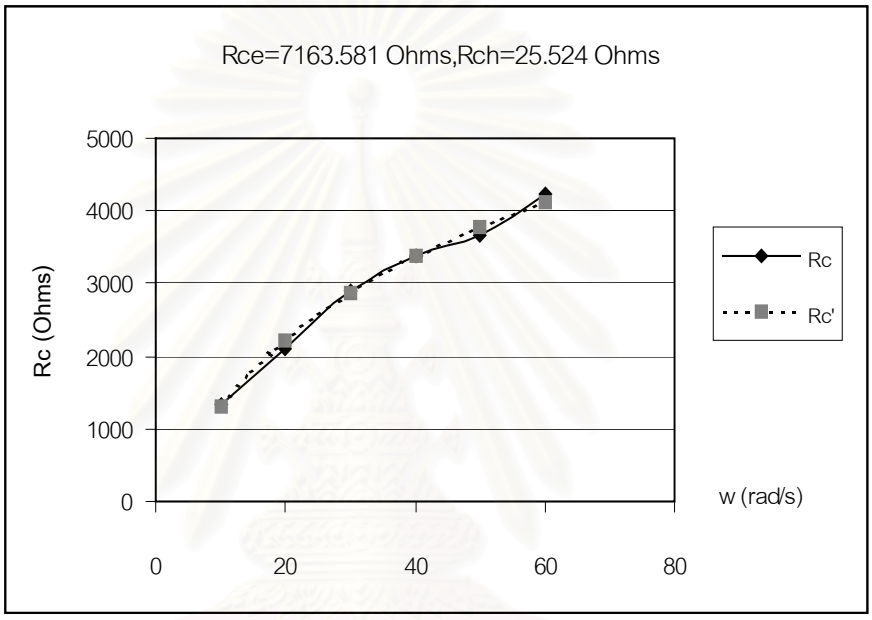
(ก) มอเตอร์ Super Line ขนาด 1.5 kW



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

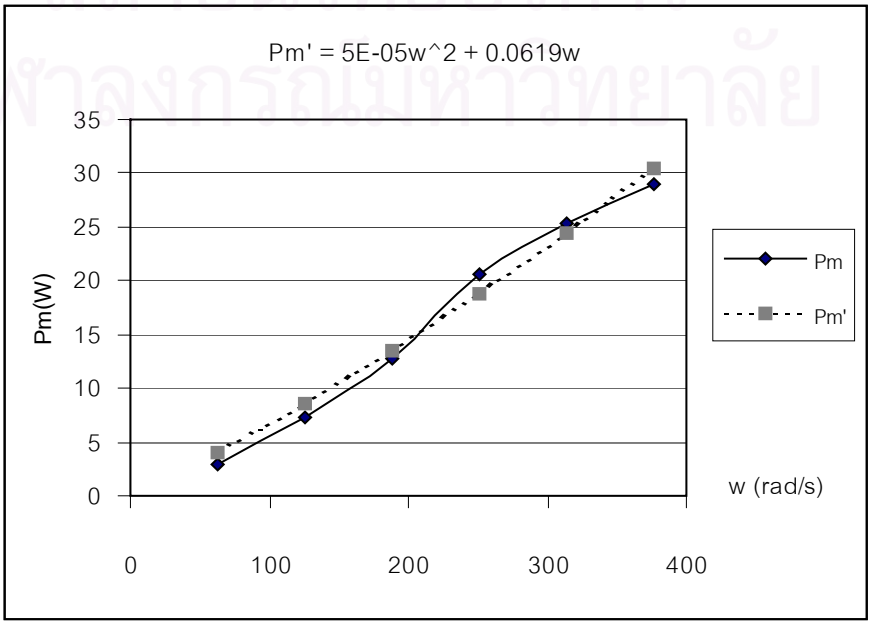
(ข) มอเตอร์ SIEMENs ขนาด 1.1 kW

รูปที่ 2.7 ผลการทดสอบการหาค่าความต้านทานสมมูลของกำลังสูญแกนเหล็ก



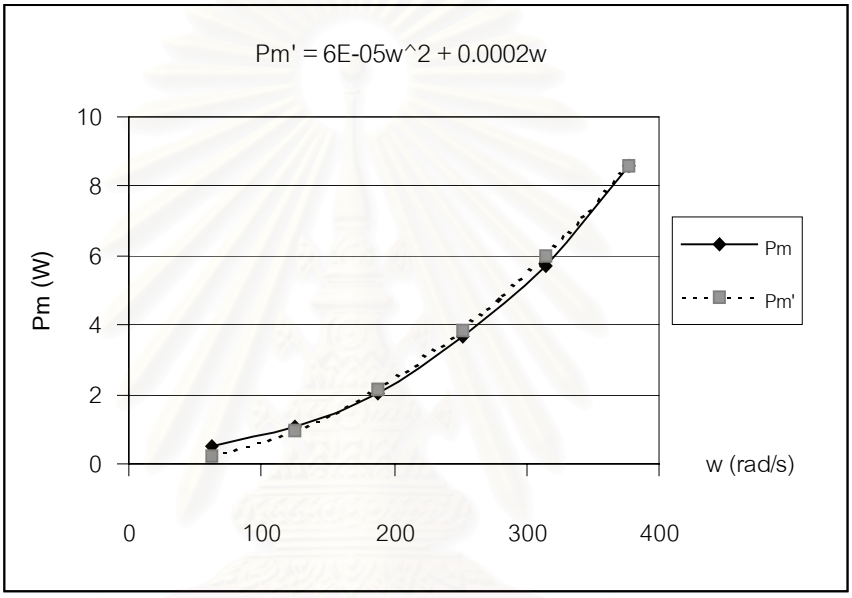
(ค) มอเตอร์ ABB ขนาด 0.37 kW

รูปที่ 2.7 (ต่อ) ผลการทดสอบการหาค่าความต้านทานสมมูลของกำลังสูญแกนเหล็ก

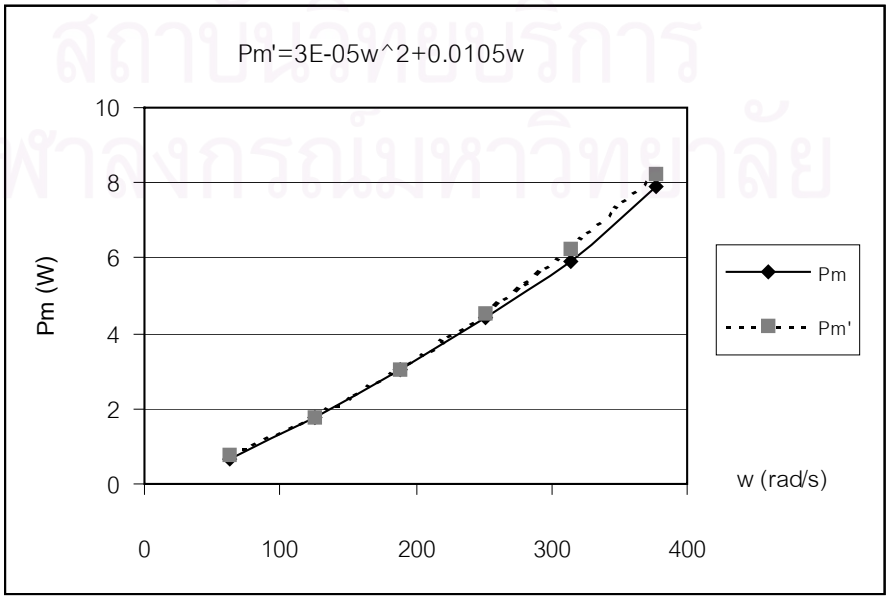


(ก) มอเตอร์ Super Line ขนาด 1.5 kW

รูปที่ 2.8 ผลการทดสอบการหาค่ากำลังสูญทางกล



(ข) มอเตอร์ SIEMENs ขนาด 1.1 kW



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

(ค) มอเตอร์ ABB ขนาด 0.37 kW

รูปที่ 2.8 (ต่อ) ผลการทดสอบการหาค่ากำลังสูญทางกล

จากผลการทดสอบการหาค่าความต้านทานสมมูลของกำลังสูญแกนเหล็กในรูปที่ 2.7 เราสามารถประมาณหาค่าความต้านทานสมมูลของกำลังสูญแกนเหล็กได้โดยใช้สมการที่ได้จากแบบจำลองในรูปที่ 2.6 คือ

$$R_c' = \frac{R_{ce}.R_{ch}|\omega|}{R_{ce} + R_{ch}|\omega|} \qquad (2.21)$$

เมื่อ R_c' : ค่าประมาณของความต้านทานสมมูลของกำลังสูญแกนเหล็ก

จากรูปที่ 2.7 เราจะเห็นว่าค่าความต้านทานประมาณ (R_c') ที่ได้นั้น ค่อนข้างใกล้เคียงกับค่าความต้านทานที่ได้จากการทดสอบจริง (R_c) ดังนั้นการประมาณค่าความต้านทานสมมูลของกำลังสูญแกนเหล็กโดยใช้สมการ (2.21) จึงเป็นวิธีที่เหมาะสม

ส่วนกำลังสูญทางกลนั้น จากผลการทดสอบในรูปที่ 2.8 จะเห็นว่าความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสูญทางกล (P_m) กับความถี่ (ω) จะมีลักษณะเป็นแบบโพลิโนเมียล ซึ่งเราอาจประมาณค่ากำลังสูญทางกลได้จากสมการ (2.22)

$$P_m' = A\omega^2 + B\omega \qquad (2.22)$$

เมื่อ P_m' : ค่ากำลังสูญทางกลประมาณ

จากรูปที่ 2.8 เราจะเห็นว่าการประมาณกำลังสูญทางกลด้วยสมการ (2.22) ค่ากำลังสูญทางกลประมาณ (P_m') จะมีค่าใกล้เคียงกับค่าค่ากำลังสูญทางกลที่ได้จากการทดสอบจริง (P_m) ดังนั้นการประมาณค่ากำลังสูญทางกลด้วยสมการแบบโพลิโนเมียล นี้จึงเป็นวิธีที่เหมาะสมเช่นกัน

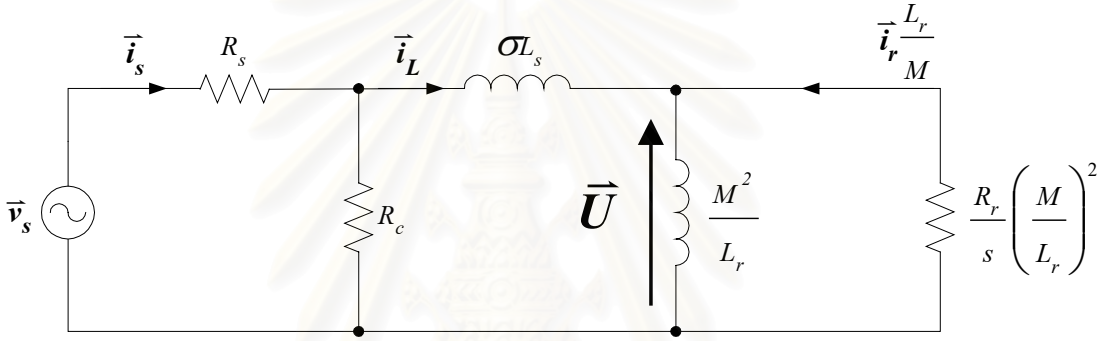
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

การประมาณค่าความเร็วของมอเตอร์โดยอาศัยแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ

3.1 หลักการประมาณค่าความเร็วของมอเตอร์โดยอาศัยแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ

แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ ($\vec{U}$) ที่เราจะใช้ในการประมาณค่าความเร็วนั้นคือแรงดันที่ตกคร่อมความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์ (M) ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

จากรูปที่ 3.1 จะได้ว่าแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่คิดอ้างอิงบนแกนอ้างอิงโรเตอร์ฟลักซ์ (แกน *d-q*) มีค่าดังสมการ (3.1) เราสามารถเขียนสมการองค์ประกอบ *d-q* ของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำนี้ในรูปของปริมาณทางด้านสเตเตอร์ได้ดังสมการ (3.2) – (3.3) หรือในรูปของปริมาณทางด้านโรเตอร์ได้ดังสมการ (3.4) – (3.5)

$$\vec{U} = \begin{bmatrix} U_d \\ U_q \end{bmatrix} = \frac{d\lambda_r}{dt} + \omega \boldsymbol{J} \lambda_r \qquad (3.1)$$

สมการแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำในรูปของปริมาณทางด้านสเตเตอร์

$$U_d = \frac{L_r}{MK_c}\left\{ v_{sd} - R_s i_{Ld} - K_c\left[\sigma L_s \frac{di_{Ld}}{dt} - \sigma L_s \omega i_{Lq} \right]\right\} \qquad (3.2)$$

$$\boldsymbol{U_q} = \frac{L_r}{MK_c}\left\{\boldsymbol{v_{sq}} - R_s\boldsymbol{i_{Lq}} - K_c\left[\sigma L_s\frac{d\boldsymbol{i_{Lq}}}{dt} + \sigma L_s\omega\boldsymbol{i_{Ld}}\right]\right\} \quad (3.3)$$

<u>สมการแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำในรูปของปริมาณทางด้านโรเตอร์</u>

$$\boldsymbol{U_d} = \frac{R_r}{L_r}M\left(\boldsymbol{i_{Ld}} - \boldsymbol{i_O}\right) \quad (3.4)$$

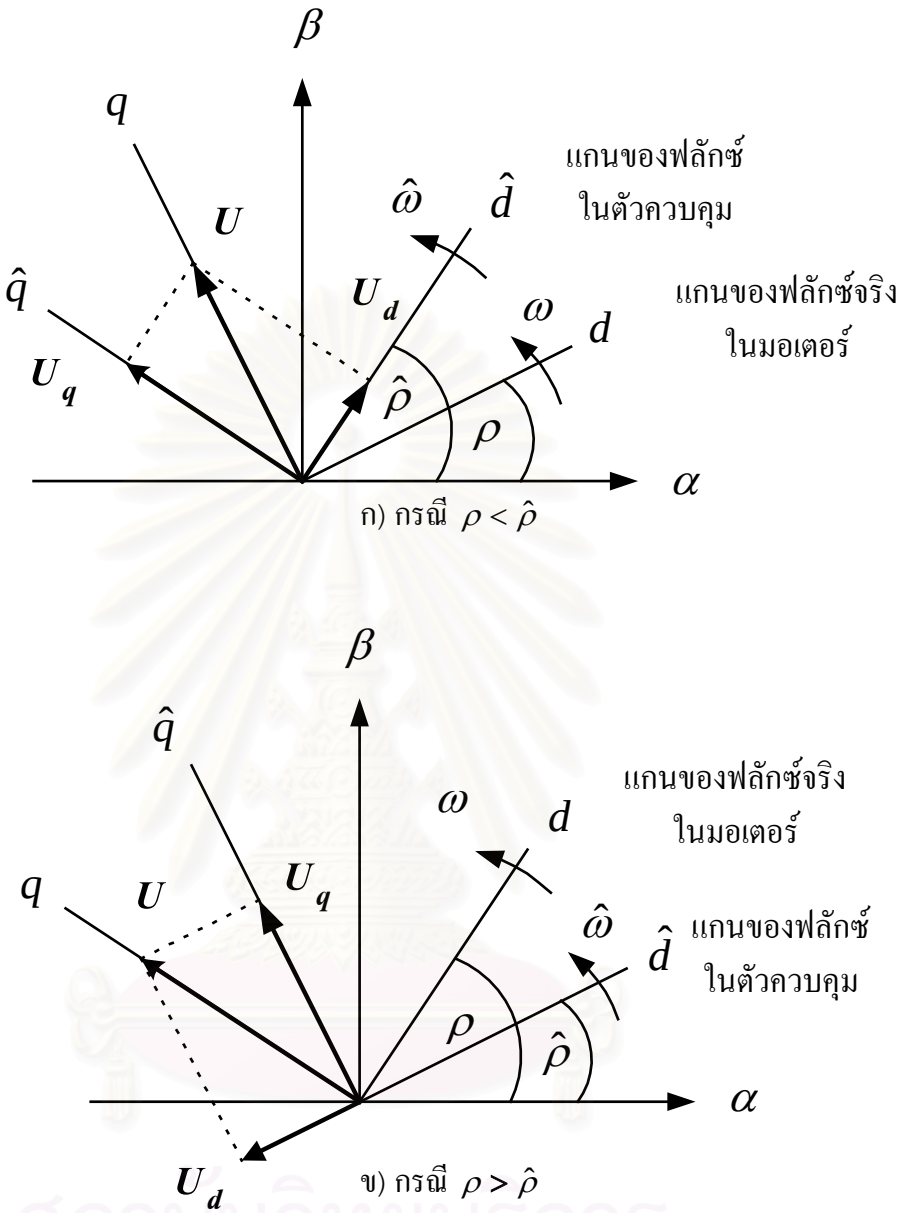
$$\boldsymbol{U_q} = \frac{R_r}{L_r}M\boldsymbol{i_{Lq}} + p\omega_{\boldsymbol{m}}\lambda_{\boldsymbol{r}} \quad (3.5)$$

จากสมการ (3.1) เราสามารถคำนวณหาค่าความถี่ของโรเตอร์ฟลักซ์ได้ดังสมการ (3.6)

$$\omega = \frac{\boldsymbol{U_q}}{\lambda_{\boldsymbol{r}}} \quad (3.6)$$

อย่างไรก็ตาม การนำสมการ (3.6) ไปใช้ในการคำนวณหาค่าความถี่โรเตอร์ฟลักซ์ (ω) อาจทำให้ระบบประมาณค่าความเร็วเกิดปัญหาด้านเสถียรภาพได้ เพราะค่าโรเตอร์ฟลักซ์ (λ_r) ที่เราใช้ในการคำนวณนั้นจะเป็นค่าโรเตอร์ฟลักซ์ประมาณ (λ_r) และหากเราพิจารณาถึงกรณีที่อาจเกิดค่าผิดพลาดระหว่างมุมโรเตอร์ฟลักซ์ในระบบประมาณค่าความเร็ว $(\hat{\rho})$ กับมุมของโรเตอร์ฟลักซ์จริงในมอเตอร์ (ρ) ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ค่าแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำในระบบประมาณค่าความเร็ว ($\boldsymbol{U_q}$) จึงอาจจะไม่ตรงกับค่าแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำจริง ($\boldsymbol{U}$)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.2 ความสัมพันธ์ของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำกับแกนของฟลักซ์จริงในมอเตอร์เมื่อเกิดค่าผิดพลาดของมุมของแกนโรเตอร์ฟลักซ์ในตัวควบคุม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากรูปที่ 3.2 จะเห็นได้ว่าในกรณีที่เกิดค่าผิดพลาดระหว่างมุมโรเตอร์ฟลักซ์ในระบบประมาณค่าความเร็วกับมุมของโรเตอร์ฟลักซ์จริงในมอเตอร์จะปรากฏแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำในแกน $\hat{d}$ (U_d) ซึ่งเครื่องหมายของค่าผิดพลาดของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำในแกน $\hat{d}$ นี้จะมีความสัมพันธ์กับเครื่องหมายของค่าผิดพลาดของมุมโรเตอร์ฟลักซ์ ดังนั้นเราจึงสามารถปรับปรุงสมการประมาณค่าความถี่โรเตอร์ฟลักซ์ด้วยการเพิ่มการป้อนกลับค่าผิดพลาดของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำในแกน d ผ่านอัตราขยาย k ได้ดังสมการ (3.7)

$$\omega = \frac{[U_q - k(U_d - U_d)]}{\lambda_r} \tag{3.7}$$

เมื่อ ω : ความถี่โรเตอร์ฟลักซ์ประมาณ

U_d : แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำในแกน d ที่คำนวณจากสมการโรเตอร์

จากรูปที่ 3.2 และสมการ (3.7) จะเห็นได้ว่ากรณีที่มุมของฟลักซ์ในในระบบประมาณค่าความเร็ว $(\hat{\rho})$ นำหน้ามุมของฟลักซ์จริงในมอเตอร์ (ρ) จะเกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ U_d บนแกน d ในทิศทางบวก ระบบจะปรับตัวในทิศทางที่จะลดค่า ω หรือมุม ρ ทำให้ค่า U_d ลดลงเข้าหาศูนย์ (ในสภาวะอยู่ตัว $U_d = 0$) ค่าผิดพลาดของมุมระหว่างแกนของฟลักซ์ในระบบประมาณค่าความเร็วกับแกนของฟลักซ์จริงในมอเตอร์ก็จะลดลงเป็นศูนย์เช่นเดียวกัน

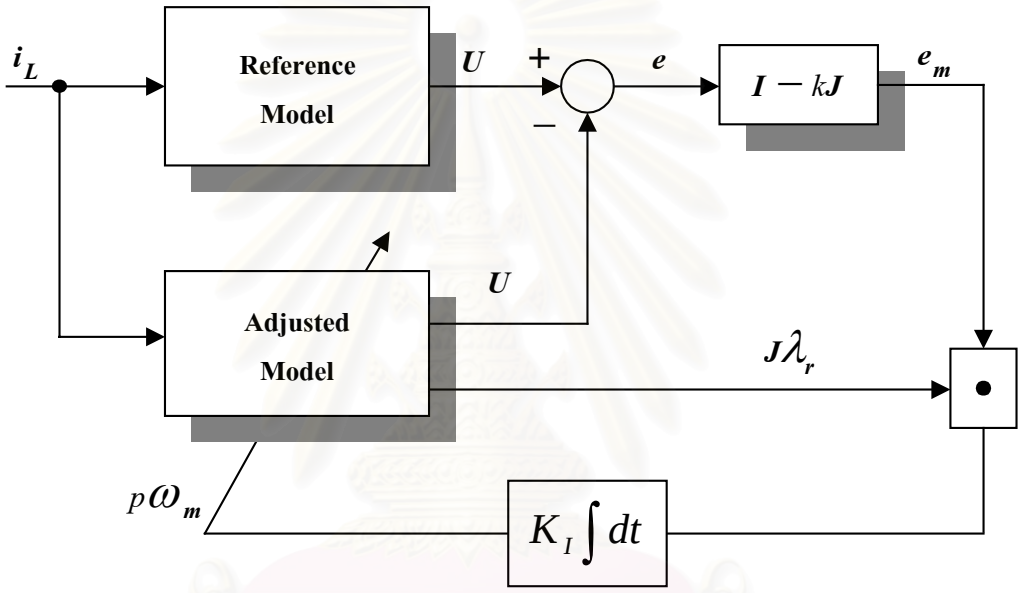
เราสามารถนำสมการ (3.7) มาใช้หาค่าความเร็วโรเตอร์ประมาณ (ω_m) ได้จากสมการ (3.8)

$$p\omega_m = \omega - \omega_s = \omega - \frac{R_r M i_{Lq}}{L_r \lambda_r} \tag{3.8}$$

เมื่อ ω_s : ความถี่สลิปประมาณ

เราอาจจะแสดงระบบประมาณค่าความเร็วให้อยู่ในลักษณะของ Model Reference Adaptive System (MRAS) ได้ (อุเทน นิตยาธารีกุล, 2542) โดยเราจะกำหนดให้สมการของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่คิดจากด้านสเตเตอร์ (สมการ (3.2)-(3.3)) ซึ่งไม่ขึ้นกับค่าความเร็วโรเตอร์ (ω_m)

เป็นแบบจำลองอ้างอิง (Reference Model) ในขณะที่สมการของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่คิดจากด้านโรเตอร์ (สมการ (3.4) - (3.5)) ซึ่งขึ้นกับค่าความเร็วโรเตอร์เป็นแบบจำลองปรับตัว (Adjusted Model) ทำให้ค่าแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่ได้จากสมการสเตเตอร์เป็นแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำอ้างอิง ($\boldsymbol{U}$) และค่าแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่ได้จากสมการโรเตอร์เป็นแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำประมาณ ($\boldsymbol{U}$) ซึ่งเราสามารถนำมาใช้หาความเร็วโรเตอร์ได้โดยอาศัยการป้อนกลับค่าผิดพลาดของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ ($\boldsymbol{e}$) ดังแผนภาพในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ระบบประมาณค่าความเร็วในรูปแบบ MRAS ในกรณีที่มีการป้อนกลับค่าผิดพลาดของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ

จากแผนภาพของระบบประมาณค่าความเร็วในที่ 3.3 เราสามารถเขียนสมการการประมาณค่าความเร็วได้ดังสมการ (3.9)

$$p\omega_m = K_I \int [(\boldsymbol{I} - k\boldsymbol{J}) * \boldsymbol{e}]^T \boldsymbol{J}\lambda_r dt \qquad (3.9)$$

โดยที่ $\boldsymbol{e} = \boldsymbol{U} - \boldsymbol{U}$ (3.10)

เราสามารถพิสูจน์ได้ว่าระบบประมาณค่าความเร็วในรูปที่ 3.3 สมมูลกับระบบประมาณที่นำเสนอในสมการ (3.7) - (3.8) ซึ่งอาศัยสมการ (3.2) – (3.5) ในการคำนวณค่าแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำเมื่อ

$$K_I = \frac{1}{\left\| \lambda_{\boldsymbol{r}} \right\|^2 T_s} \tag{3.11}$$

โดยที่ T_s คือ คาบเวลาในการสุ่มตัวอย่างในกรณีที่สร้างระบบประมาณจาก (3.7) - (3.8) ในเชิงดิจิตอล

3.2 <u>การออกแบบค่าอัตราขยาย *k*</u>

การที่จะทำให้ระบบประมาณค่าความเร็วมีเสถียรภาพได้นั้น เราจะต้องออกแบบค่าอัตราขยาย k ให้สอดคล้องกับสมการเงื่อนไขเสถียรภาพ (3.12) และ (3.13) (อุเทน นิตยาธารีกุล, 2542)

$$\omega(k\alpha + \omega_s) > 0 \tag{3.12}$$

$$k\omega_m + \alpha > 0 \tag{3.13}$$

เมื่อ $\alpha = \frac{R_r}{L_r}$

จากเงื่อนไขเสถียรภาพของระบบประมาณค่าความเร็ว เราสามารถออกแบบอัตราขยาย k ที่สอดคล้องตามเงื่อนไขทั้งสองได้ดังสมการ (3.14)

$$k = \frac{p\omega_m}{\alpha} \tag{3.14}$$

เราสามารถตรวจสอบได้โดยแทนค่า k ในสมการ (3.14) ลงในสมการ (3.12) – (3.13) ซึ่งจะได้ว่า

$$\omega(k\alpha + \omega_s) = \omega(p\omega_m + \omega_s) = \omega^2 > 0$$

$$\alpha + k\omega_m = \alpha + \frac{p\omega_m^2}{\alpha} > 0$$

อย่างไรก็ตามในระบบประมาณค่าความเร็วเราจะใช้ค่าความเร็วโรเตอร์ประมาณแทนค่าความเร็วจริง ดังนั้นอัตราขยาย k จึงสามารถคำนวณได้ใหม่ตามสมการ (3.15)

$$k = \frac{p\omega_m}{\alpha} \tag{3.15}$$

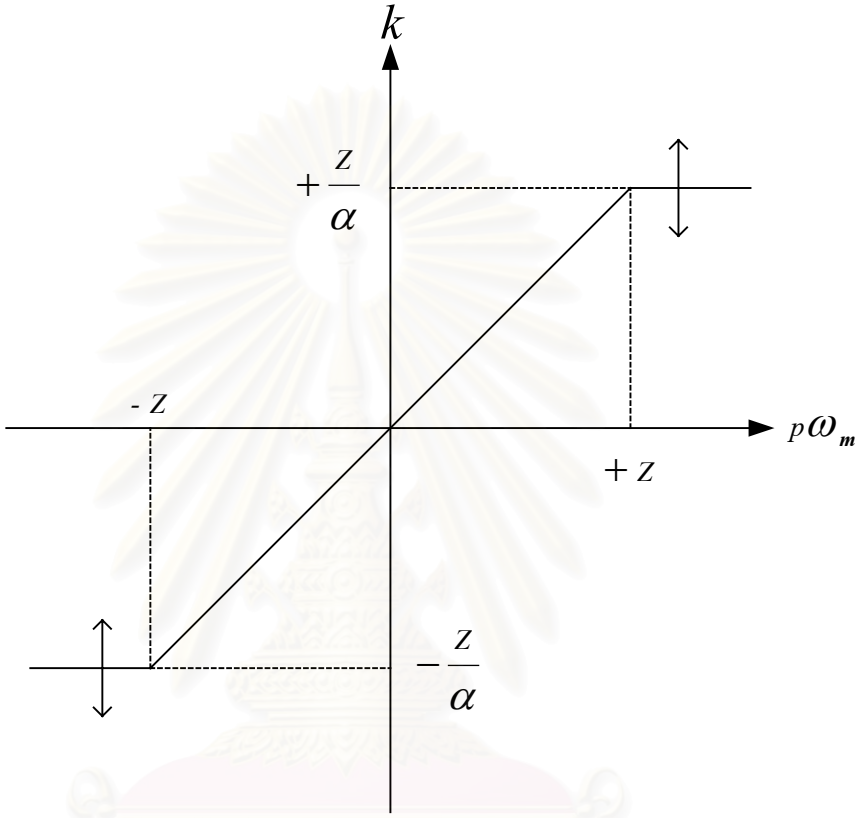
3.2.1 <u>การจำกัดอัตราขยาย k</u>

ถึงแม้ว่าอัตราขยาย k ที่ออกแบบตามสมการ (3.15) จะช่วยแก้ปัญหาด้านเสถียรภาพทำให้ระบบประมาณค่าความเร็วสามารถทำงานได้อย่างมีเสถียรภาพตลอดทุกย่านการทำงาน อย่างไรก็ตามหากมอเตอร์ทำงานในย่านความเร็วสูง ระบบประมาณอาจแกว่งได้เนื่องจากอัตราขยาย k มีค่าสูงมากขึ้นตามค่าความเร็วโรเตอร์จนระบบประมาณค่าความเร็วมีความไวต่อสัญญาณรบกวน เราสามารถแก้ปัญหานี้ได้โดยการจำกัดอัตราขยาย k ไว้ ซึ่งเราอาจเขียนสมการของอัตราขยาย k ที่มีการจำกัดค่าไว้ได้ดังสมการ (3.16)

$$k = \begin{cases} \dfrac{p\omega_m}{\alpha} & ; \ |p\omega_m| \le Z \\ (\dfrac{Z}{\alpha})sign(\omega_m) & ; \ |p\omega_m| > Z \end{cases} \tag{3.16}$$

$$\text{โดยที่} \quad Z = \begin{cases} C_0 & \text{ในกรณีที่} \quad sign(\omega_s) = sign(\omega) \\ C_1|\omega_s| & \text{ในกรณีที่} \quad sign(\omega_s) \neq sign(\omega) \end{cases} \tag{3.17}$$

เมื่อ $sign()$ คือฟังก์ชันเครื่องหมาย และ $C_0 > 0$; $C_1 > 1$



รูปที่ 3.4 การจำกัดอัตราขยาย *k*

เมื่อพิจารณาสมการของอัตราขยาย k ที่มีการจำกัดค่าไว้ตามสมการ (3.16) ร่วมกับสมการเงื่อนไขทางเสถียรภาพ (3.13) จะเห็นว่าสมการ (3.13) จะเป็นจริงเสมอ เพราะค่า k จะมีเครื่องหมายเดียวกับ ω_m จึงทำให้พจน์ $k\omega_m > 0$ และ $k\omega_m + \alpha > 0$ เสมอ

ส่วนสมการเงื่อนไขทางเสถียรภาพ (3.12) นั้นเราต้องพิจารณาเครื่องหมายของความถี่โรเตอร์ฟลักซ์ (ω) ความถี่สลิป (ω_s) และความเร็วโรเตอร์ ($p\omega_m$) ที่อาจเกิดขึ้นได้เสียก่อนดังต่อไปนี้

จากสมการ (3.18) เราสามารถแสดงเครื่องหมายของความถี่โรเตอร์ฟลักซ์ ความถี่สลิป และความเร็วโรเตอร์ที่อาจเกิดขึ้นได้ดังตารางที่ 3.1

$$\omega = p\omega_m + \omega_s \qquad (3.18)$$

ตารางที่ 3.1 เครื่องหมายของความถี่โรเตอร์ฟลักซ์ ความถี่สลิป และความเร็วโรเตอร์

	ω	$p\omega m$	ωs	ย่านการทำงาน
(I)	+	+	+	Motoring
(II)	-	-	-	
(III)	+	+	-	Regenerating
(IV)	-	-	+	
(V)	+	-	+	Plugging
(VI)	-	+	-	
(VII)	+	-	-	- (เป็นไปไม่ได้)
(VIII)	-	+	+	

จากตารางที่ 3.1 เราอาจแยกพิจารณาผลของการจำกัดอัตราขยาย k ร่วมกับสมการเงื่อนไขเสถียรภาพ (3.12) ได้ 3 กรณี ตามย่านการทำงานของมอเตอร์ นั่นคือ ย่านการทำงานแบบมอเตอร์ (Motoring Mode) ย่านการทำงานแบบคืนพลังงาน (Regenerative Mode) และย่านปลั๊กกิ้ง (Plugging Mode) ซึ่งในที่นี้เราจะถือว่า $\omega_m = \omega_m$ และ $\omega_s = \omega_s$ เพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณา

<u>ย่านการทำงานแบบมอเตอร์</u> : $sign(\omega) = sign(\omega_m) = sign(\omega_s)$

$$\omega(k\alpha+\omega_s)=\omega[C_0\,sign(\omega_m)+\omega_s]$$

$$=\begin{cases}\left|\omega\right|(C_0+\left|\omega_s\right|)>0 & ;\omega\geq 0\\ -\left|\omega\right|(-C_0-\left|\omega_s\right|)=\left|\omega\right|(C_0+\left|\omega_s\right|)>0 & ;\omega<0\end{cases}$$

<u>ย่านการทำงานแบบคืนพลังงาน</u> : $sign(\omega)=sign(\omega_m)=-sign(\omega_s)$

$$\omega(k\alpha+\omega_s)=\omega(C_1\left|\omega_s\right|+\omega_s)$$

$$=\begin{cases}\left|\omega\right|(C_1\left|\omega_s\right|-\left|\omega_s\right|)=\left|\omega\right|.\left|\omega_s\right|(C_1-1)>0 & ;\omega\geq 0\\ -\left|\omega\right|(-C_1\left|\omega_s\right|+\left|\omega_s\right|)=\left|\omega\right|.\left|\omega_s\right|(C_1-1)>0 & ;\omega<0\end{cases}$$

<u>ย่านปลั๊กกิ้ง</u> : $sign(\omega)=-sign(\omega_m)=sign(\omega_s)$

$$\omega(k\alpha+\omega_s)=\begin{cases}\left|\omega\right|(-C_0+\left|\omega_s\right|) & ;\omega\geq 0\\ -\left|\omega\right|(C_0-\left|\omega\right|)=\left|\omega\right|(-C_0+\left|\omega_s\right|) & ;\omega<0\end{cases}$$

เนื่องจากในย่านปลั๊กกิ้งนั้น $\left|p\omega_m\right|<\left|\omega_s\right|$

และค่าอัตราขยาย k จะถูกจำกัดเมื่อ $\left|p\omega_m\right|>C_0$

จึงทำให้ได้ว่า $C_0<\left|p\omega_m\right|<\left|\omega_s\right|$

ดังนั้น $-C_0+\left|\omega_s\right|>0$ และ $\left|\omega\right|(-C_0+\left|\omega_s\right|)>0$ เสมอ

จากการพิจารณาผลของการจำกัดอัตราขยาย k ร่วมกับสมการเงื่อนไขเสถียรภาพ (3.12) และ (3.13) ทั้งหมดจะเห็นได้ว่าระบบประมาณค่าความเร็วจะยังคงทำงานได้อย่างมีเสถียรภาพในทุกย่านการทำงานแม้ว่าอัตราขยาย k จะถูกจำกัดค่าไว้ตามสมการ (3.16) ก็ตาม

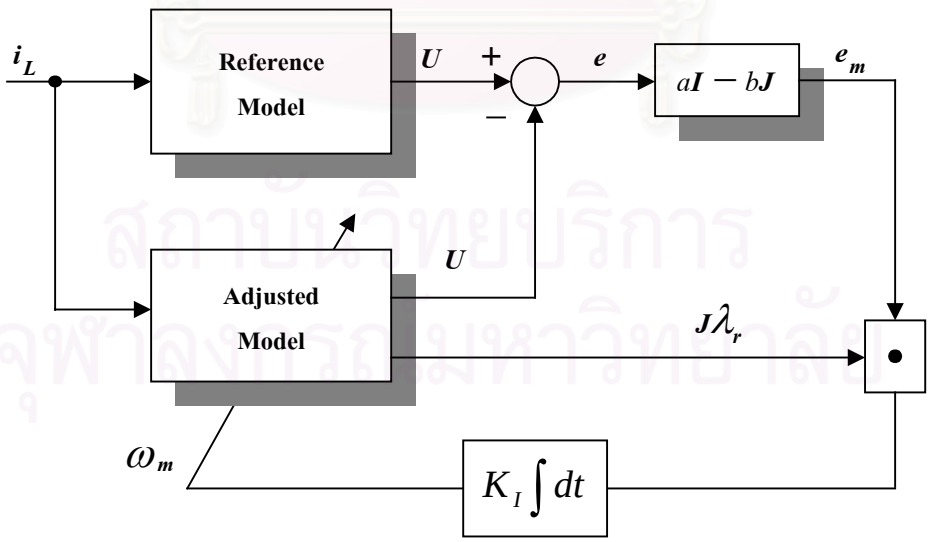
3.2.2 <u>การลดอัตราขยายโดยรวมของระบบประมาณค่าความเร็ว</u>

จากแผนภาพของระบบประมาณค่าความเร็วในรูปที่ 3.3 เราจะเห็นว่าส่วนของการป้อนกลับแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำจะถูกป้อนกลับผ่านเมตริกซ์อัตราขยาย $[I - kJ]$ ซึ่งเราสามารถลดอัตราขยายโดยรวมของระบบประมาณค่าความเร็วได้โดยการแทนเมตริกซ์ $[I - kJ]$ ด้วย $[aI - bJ]$ และเพื่อให้คุณสมบัติทางด้านเฟสของระบบประมาณค่าความเร็วไม่เปลี่ยนแปลง เราต้องกำหนดให้ค่า a และ b มีความสัมพันธ์กับอัตราขยาย k ตามสมการ (3.19)

$$k = \frac{b}{a} \tag{3.19}$$

โดยสรุปแล้ว การออกแบบอัตราขยาย k นั้น ในขั้นแรกเราจะต้องออกแบบให้อัตราขยาย k มีค่าสอดคล้องกับเงื่อนไขเสถียรภาพตามสมการ (3.12) และ (3.13) ก่อน แล้วเราจึงเลือกอัตราขยาย a ที่เหมาะสมเพื่อลดอัตราขยายโดยรวมของระบบ เป็นผลให้อัตราขยาย b ต้องถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับ ak และจะได้ว่าเทอม $[aI - bJ]$ มีค่าเท่ากับ $a[I - kJ]$ ซึ่งเสมือนกับเป็นการลดอัตราขยายของอินทิเกรเตอร์ K_I ลงเป็น aK_I นั่นเอง และจากสมการ (3.7) และ (3.19) เราสามารถเขียนสมการของการประมาณค่าความถี่โรเตอร์ฟลักซ์ได้ใหม่ดังสมการ (3.20) และระบบประมาณค่าความเร็วในรูปที่ 3.3 สามารถเขียนใหม่เป็นดังรูปที่ 3.5

$$\omega = \frac{1}{\|\lambda_r\|}\{U_q - (1-a)[U_q - U_q] - b[U_d - U_d]\} \tag{3.20}$$



รูปที่ 3.5 ระบบประมาณค่าความเร็วบนแกนโรเตอร์ฟลักซ์ที่มีการลดอัตราขยายรวมของระบบโดยอัตราขยาย a

บทที่ 4

การสร้างระบบวัดและควบคุมแรงบิดและความเร็วของมอเตอร์แบบปราศจากเซนเซอร์

4.1 ระบบวัดแรงบิดและความเร็วของมอเตอร์

เราสามารถสรุปสมการที่สำคัญต่างๆที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 และ 3 เพื่อนำมาใช้ในการสร้างระบบวัดแรงบิดและความเร็วของมอเตอร์ได้ดังนี้

สมการทางด้านสเตเตอร์

$$\vec{i}_L = K_c \vec{i}_s - \frac{\vec{v}_s}{R_c} \tag{4.1}$$

$$v_{sd} = R_s i_{Ld} + K_c \left(\sigma L_s \frac{di_{Ld}}{dt} + \frac{R_r M^2}{L_r^2} \left(i_{Ld} - i_O \right) - \omega \sigma L_s i_{Lq} \right) \tag{4.2}$$

$$v_{sq} = R_s i_{Lq} + K_c \left(\sigma L_s \frac{di_{Lq}}{dt} - \omega \frac{M^2}{L_r} \left(i_{Ld} - i_O \right) + \omega L_s i_{Ld} \right) \tag{4.3}$$

เมื่อ $K_c = \frac{\left(R_s + R_c \right)}{R_c}$

สมการทางด้านโรเตอร์

$$\frac{d\lambda_r}{dt} = R_r \left(i_{Ld} - i_O \right) = -R_r i_{rd} \tag{4.4}$$

$$\frac{d\rho}{dt} = \omega \tag{4.5}$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$\omega_s = \frac{R_r M \boldsymbol{i}_{\boldsymbol{Lq}}}{L_r \lambda_r} \tag{4.6}$$

<u>สมการแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ</u>

คิดจากด้านสเตเตอร์ ($\boldsymbol{U}$)

$$\boldsymbol{U}_{\boldsymbol{d}} = \frac{L_r}{MK_c}\left\{ \boldsymbol{v}_{\boldsymbol{sd}} - R_s \boldsymbol{i}_{\boldsymbol{Ld}} - K_c\left[\sigma L_s \frac{d\boldsymbol{i}_{\boldsymbol{Ld}}}{dt} - \sigma L_s \omega \boldsymbol{i}_{\boldsymbol{Lq}} \right] \right\} \tag{4.7}$$

$$\boldsymbol{U}_{\boldsymbol{q}} = \frac{L_r}{MK_c}\left\{ \boldsymbol{v}_{\boldsymbol{sq}} - R_s \boldsymbol{i}_{\boldsymbol{Lq}} - K_c\left[\sigma L_s \frac{d\boldsymbol{i}_{\boldsymbol{Lq}}}{dt} + \sigma L_s \omega \boldsymbol{i}_{\boldsymbol{Ld}} \right] \right\} \tag{4.8}$$

คิดจากด้านโรเตอร์ ($\boldsymbol{U}$)

$$\boldsymbol{U}_{\boldsymbol{d}} = \frac{R_r}{L_r} M\left(\boldsymbol{i}_{\boldsymbol{Ld}} - \boldsymbol{i}_{\boldsymbol{O}} \right) \tag{4.9}$$

$$\boldsymbol{U}_{\boldsymbol{q}} = \frac{R_r}{L_r} M \boldsymbol{i}_{\boldsymbol{Lq}} + p\omega_{\boldsymbol{m}} \lambda_r \tag{4.10}$$

<u>สมการการประมาณค่าความเร็ว</u>

$$k = \begin{cases} \dfrac{p\omega_{\boldsymbol{m}}}{\alpha} \;\; ; \;\; \left| p\omega_{\boldsymbol{m}} \right| < Z \\ \left(\dfrac{Z}{\alpha} \right) sign(\omega_{\boldsymbol{m}}) \;\; ; \;\; p\omega_{\boldsymbol{m}} > Z \end{cases} \tag{4.11}$$

โดยที่ $Z = \begin{cases} C_0 \;\; ; \;\; sign(\omega_s) = sign(\omega) \\ C_1 \left| \omega_{\boldsymbol{s}} \right| \;\; ; \;\; sign(\omega_{\boldsymbol{s}}) \neq sign(\omega) \end{cases}$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$k = \frac{b}{a} \tag{4.12}$$

$$\omega = \frac{1}{\|\lambda_r\|}\{U_q - (1-a)[U_q - U_q] - b[U_d - U_d]\} \tag{4.13}$$

$$p\omega_m = \omega - \omega_s \tag{4.14}$$

<u>สมการแรงบิด</u>

$$\tau = p\frac{M}{L_r} i_{Lq} \lambda_r \tag{4.15}$$

$$\tau = \tau - \frac{P_m}{\omega_m} \tag{4.16}$$

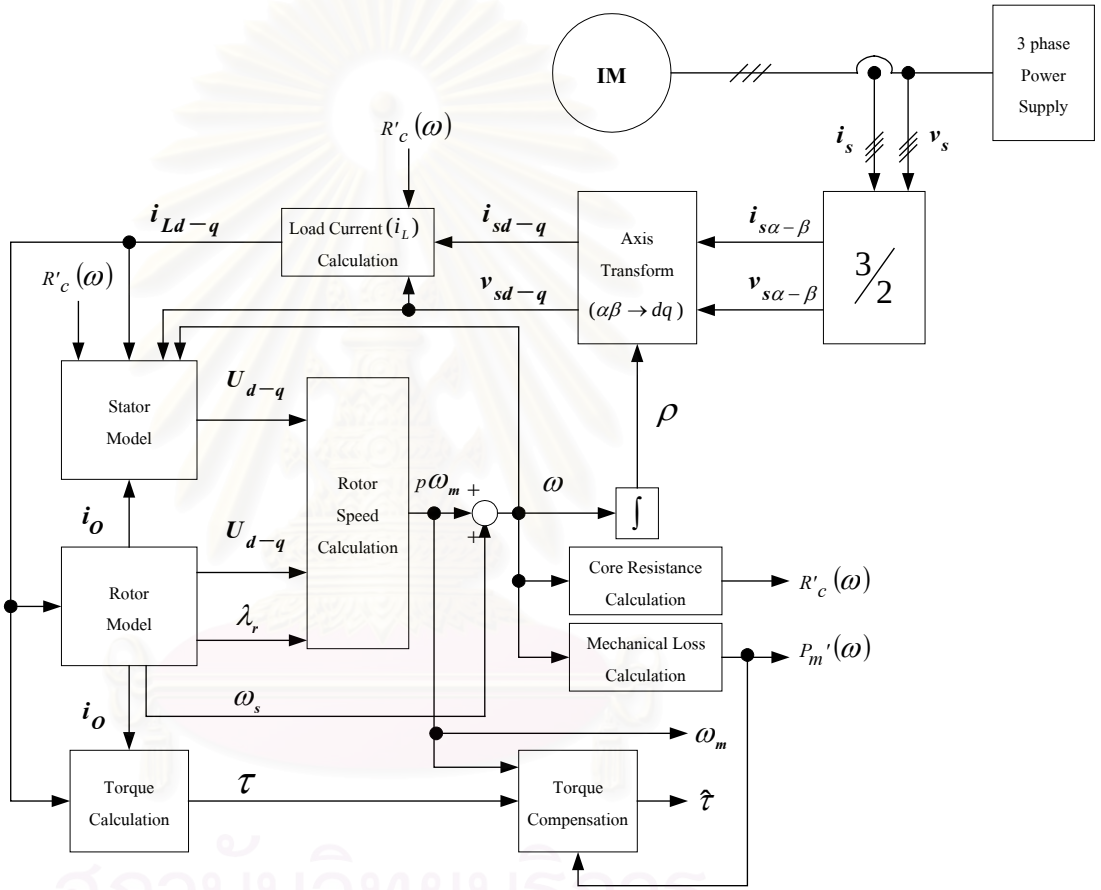
<u>สมการประมาณค่าความต้านทานสมมูลของกำลังสูญแกนเหล็ก</u>

$$R_c' = \frac{R_{ce}.R_{ch}|\omega|}{R_{ce} + R_{ch}|\omega|} \tag{4.17}$$

<u>สมการประมาณค่ากำลังสูญทางกล</u>

$$P_m' = A\omega^2 + B\omega \tag{4.18}$$

จากสมการ (4.1) – (4.18) นี้ เราสามารถนำมาสร้างเป็นระบบวัดแรงบิดและความเร็วของมอเตอร์ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แผนภาพของเป็นระบบวัดแรงบิดและความเร็วของมอเตอร์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2 ระบบควบคุมความเร็วของมอเตอร์

สำหรับการควบคุมความเร็วของมอเตอร์นั้น เราจะทำการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ผ่านทางการควบคุมกระแสอีกทอดหนึ่ง โดยเราจะใช้วิธีการควบคุมกระแสด้วยตัวควบคุม PI บนแกนหมุนของโรเตอร์ฟลักซ์ ซึ่งมีข้อดีคือกระแสคำสั่ง (i^*) จะมีค่าคงที่เมื่ออ้างอิงบนแกนโรเตอร์ฟลักซ์ทำให้ค่าผิดพลาดของกระแสในสภาวะอยู่ตัวเป็นศูนย์

โดยทั่วไปแล้วการควบคุมกระแสด้วยวิธี PI บนแกนหมุนนี้เราจะทำการตรวจจับกระแสสเตเตอร์ (i_s) ของมอเตอร์มาใช้ในการควบคุม แต่เมื่อเราคำนึงถึงผลของกำลังสูญแกนเหล็ก เราจะเปลี่ยนมาใช้กระแสสเตเตอร์หลังความต้านทานสมมูลของกำลังสูญแกนเหล็ก (i_L) แทน โดยเราจะตรวจจับกระแส i_s เข้ามาแปลงเป็นกระแส i_L ที่อ้างอิงบนแกนหมุนของโรเตอร์ฟลักซ์ (i_{Ld}, i_{Lq}) แล้วจึงนำไปเปรียบเทียบกับกระแสคำสั่ง (i_{Ld}^*, i_{Lq}^*) สัญญาณค่าผิดพลาดของกระแสที่ผ่านตัวควบคุม PI จะให้ค่าแรงดันคำสั่ง (v_{sd}^*, v_{sq}^*) ซึ่งจะถูกแปลงกลับมาอยู่บนแกนนิ่ง ($v_{s\alpha}^*, v_{s\beta}^*$) แล้วนำไปสร้างสัญญาณ PWM ด้วยวิธีสเปซเวกเตอร์เพื่อใช้ในการขับนำสวิตช์ในอินเวอร์เตอร์ต่อไป

อย่างไรก็ตามหากพิจารณาสมการ (4.2) และ (4.3) จะเห็นว่ามีเทอมของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำเชื่อมโยงระหว่างแกน d และ q ซึ่งทำให้การควบคุมกระแสในแกนทั้งสองไม่มีอิสระต่อกัน ซึ่งเราสามารถแก้ปัญหานี้ได้โดยการชดเชยส่วนแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่เชื่อมโยงระหว่างแกนด้วยการป้อนไปหน้า (feed forward) โดยกำหนดให้

$$v_{sd} = u_{sd} - K_c \sigma L_s \omega i_{Lq} + K_c \frac{M^2 R_r}{L_r^2}\left(i_{Ld} - i_O\right) \tag{4.19}$$

$$v_{sq} = u_{sq} + K_c L_s \omega i_{Ld} - K_c \omega \frac{M^2}{L_r}\left(i_{Ld} - i_O\right) \tag{4.20}$$

แทนสมการ (4.19) และ (4.20) ลงในสมการ (4.2) และ (4.3) จะได้สมการด้านสเตเตอร์ได้ใหม่ดังสมการ (4.21) และ (4.22) และส่วนของการชดเชยป้อนไปหน้าในแกน d และ q จะเป็นไปตามสมการ (4.23) และ (4.24) ตามลำดับ

$$\boldsymbol{u_{sd}} = R_s \boldsymbol{i_{Ld}} + K_c \sigma L_s \frac{d\boldsymbol{i_{Ld}}}{dt} \tag{4.21}$$

$$\boldsymbol{u_{sq}} = R_s \boldsymbol{i_{Lq}} + K_c \sigma L_s \frac{d\boldsymbol{i_{Lq}}}{dt} \tag{4.22}$$

$$\boldsymbol{f_d} = -K_c \sigma L_s \omega \boldsymbol{i_{Lq}} + K_c \frac{M^2 R_r}{L_r^2} \left(i_{Ld} - \boldsymbol{i_O} \right) \tag{4.23}$$

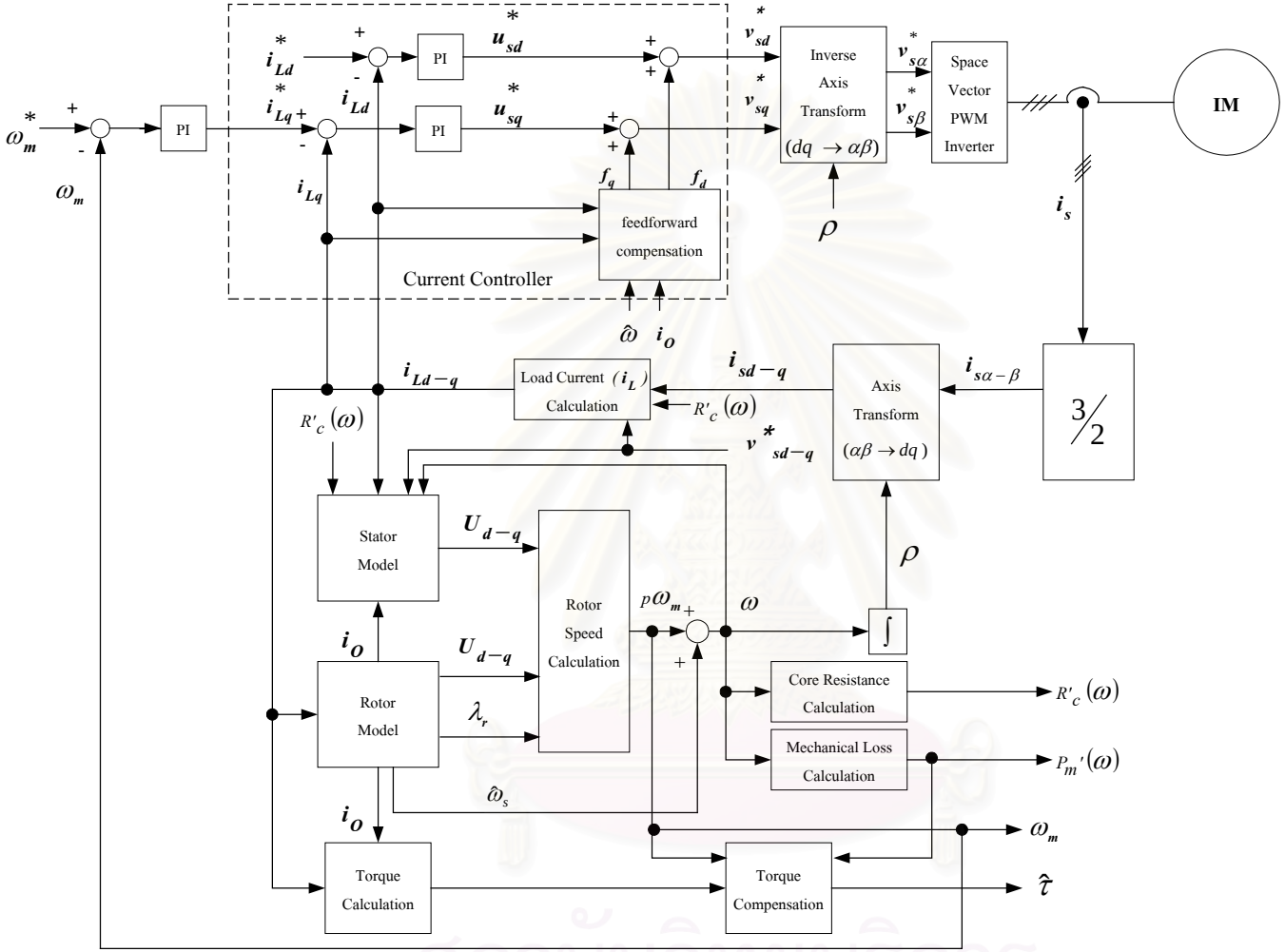
$$\boldsymbol{f_q} = K_c L_s \omega \boldsymbol{i_{Ld}} - K_c \omega \frac{M^2}{L_r} \left(\boldsymbol{i_{Ld}} - \boldsymbol{i_O} \right) \tag{4.24}$$

เราสามารถนำสมการเหล่านี้ไปใช้ในการสร้างระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์ดังแผนภาพในรูปที่ 3.2

4.3 <u>ระบบควบคุมแรงบิดของมอเตอร์</u>

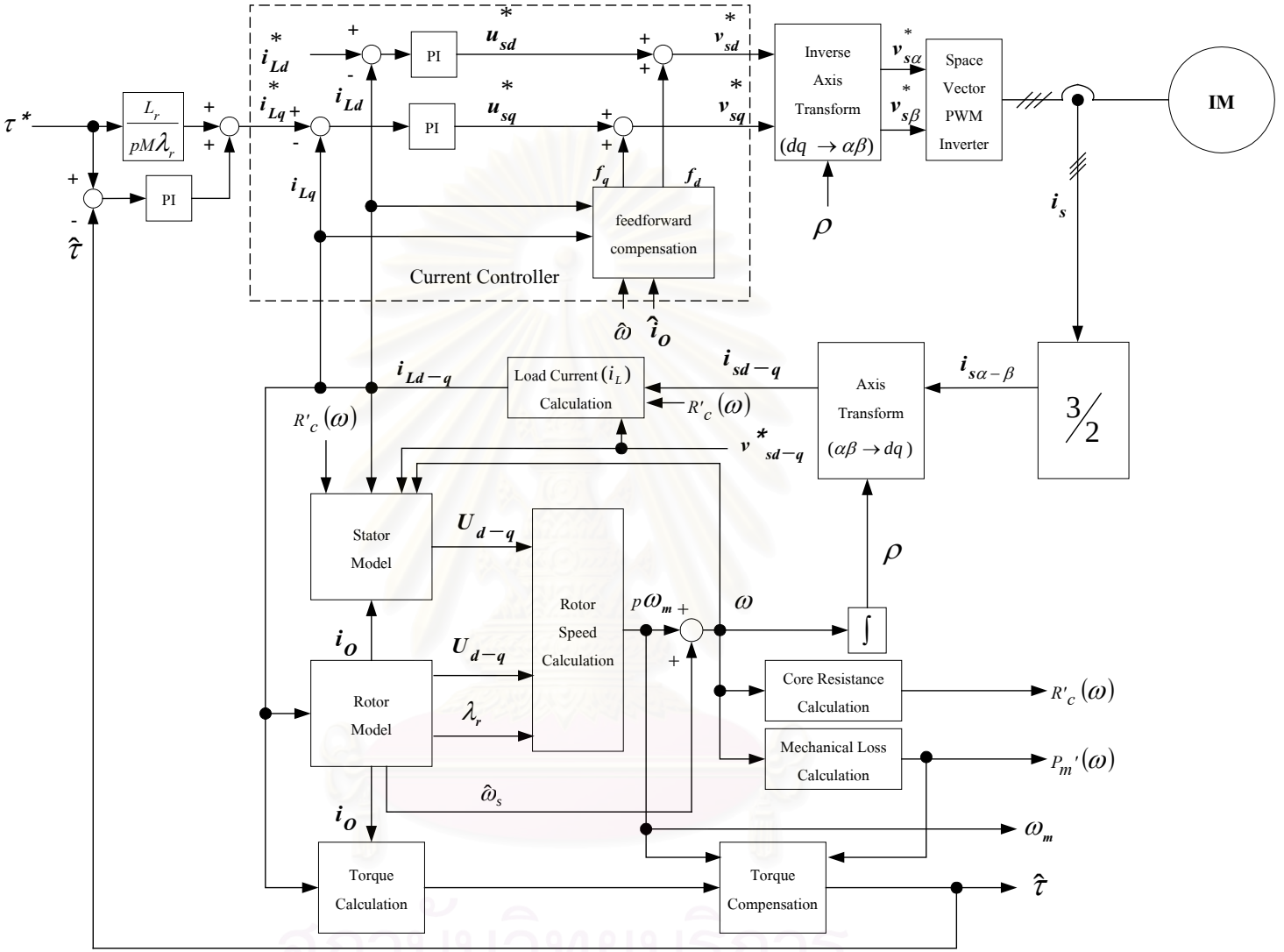
การสร้างระบบควบคุมแรงบิดของมอเตอร์นั้นเราจะใช้ระบบโดยรวมเหมือนกับระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์ แต่เราจะเปลี่ยนส่วนการควบคุม PI ของความเร็วมาเป็นส่วนการควบคุมแรงบิดแทน จากสมการแรงบิด (4.15) เราจะเห็นว่าค่าแรงบิดของมอเตอร์นั้นแปรผันตรงกับกระแส $\boldsymbol{i_{Lq}}$ ทำให้เราสามารถสั่ง $\boldsymbol{i_{Lq}}^*$ เพื่อควบคุมแรงบิดในลักษณะการป้อนไปหน้าได้ดังแผนภาพของระบบควบคุมแรงบิดของมอเตอร์ในรูปที่ 3.3ได้ แต่อย่างไรก็ตาม ถึงแม้เราจะชดเชยผลของกำลังสูญทางกลตามสมการ (4.16) แล้วก็ตาม ก็ยังอาจมีความคลาดเคลื่อนของค่าแรงบิดที่สร้างได้เนื่องจากปัจจัยอื่นๆอีก ดังนั้นเราจึงต้องเพิ่มตัวควบคุม PI เข้ามาเพื่อให้แรงบิด (τ) มีค่าเท่ากับค่าคำสั่ง (τ) ตามต้องการ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.2 แผนภาพของระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.3 แผนภาพของระบบควบคุมแรงบิดมอเตอร์

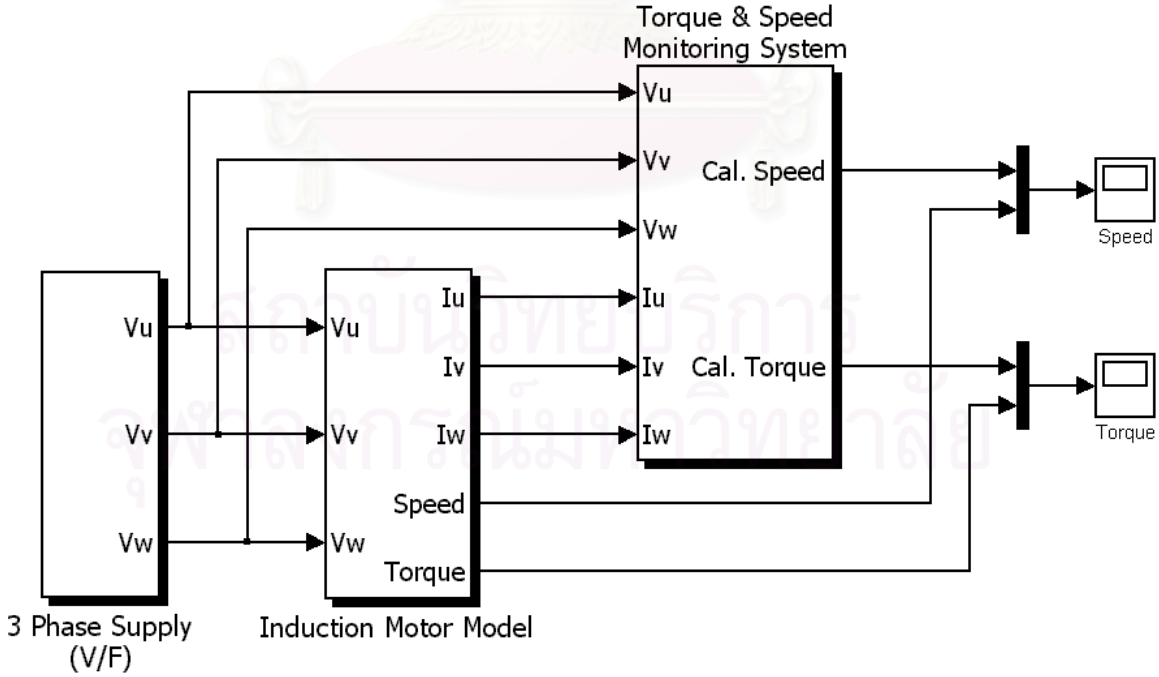
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.4 ผลการจำลองการทำงานของระบบวัดและควบคุมแรงบิดและความเร็วของมอเตอร์

เราจะจำลองการทำงานระบบวัดและควบคุมความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink โดยเราจะแบ่งการจำลองการทำงานเป็น 3 ส่วนคือ การจำลองการทำงานของระบบวัดความเร็วและแรงบิด การจำลองการทำงานของระบบควบคุมความเร็ว และการจำลองการทำงานของระบบควบคุมแรงบิด

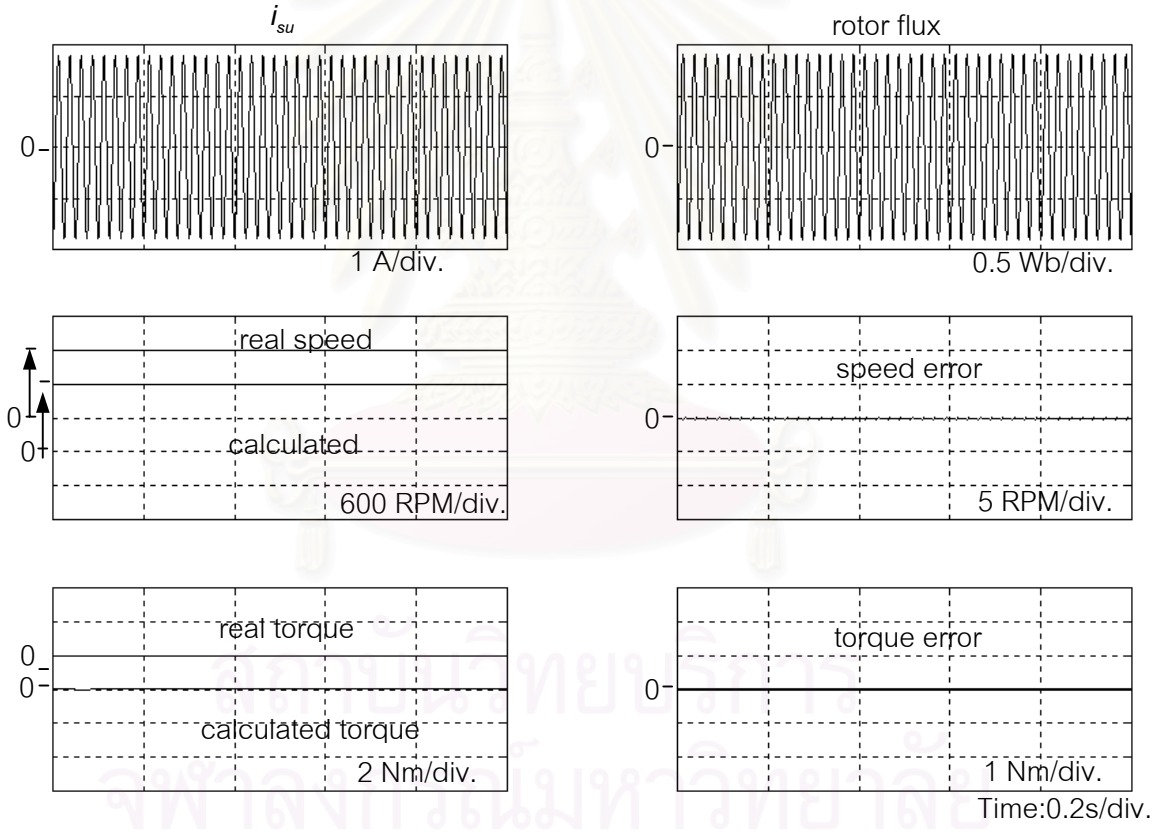
4.4.1 การจำลองการทำงานของระบบวัดความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์

ในการจำลองการทำงานของระบบวัดความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์นั้น เราจะใช้ระบบที่มีลักษณะดังรูปที่ 4.4 คือ เราจะใช้แหล่งจ่ายไฟที่มีอัตราส่วนของแรงดันต่อความถี่ (V/F) คงที่เป็นตัวควบคุมการทำงานของมอเตอร์ ซึ่งจะทำให้เราสามารถเปลี่ยนแปลงความเร็วของมอเตอร์ได้ด้วยการปรับค่าความถี่ของแหล่งจ่ายไฟ ส่วนแบบจำลองของระบบวัดความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์ที่เราใช้ในการทดสอบจะสร้างขึ้นตามแผนภาพของระบบวัดความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์ (รูปที่ 4.1) ดังที่ได้แสดงมาแล้วข้างต้น

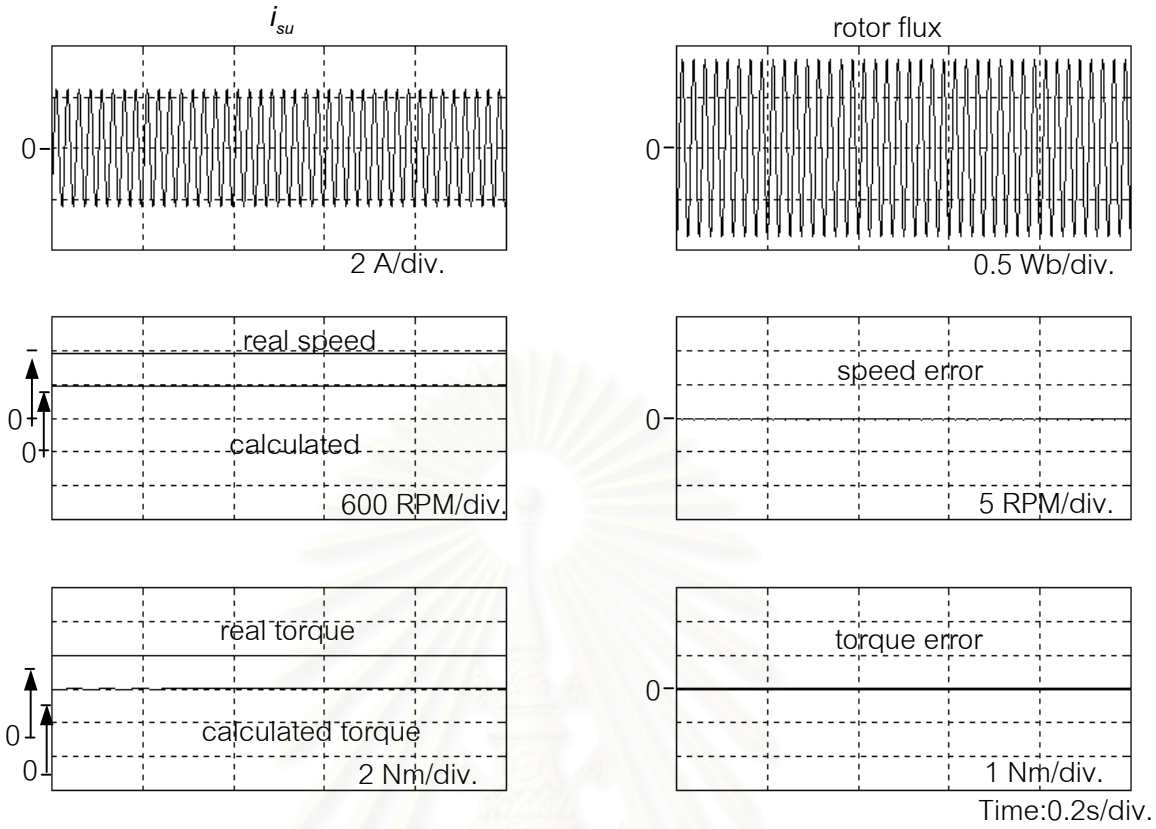


รูปที่ 4.4 ระบบจำลองการทำงานของระบบวัดความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์

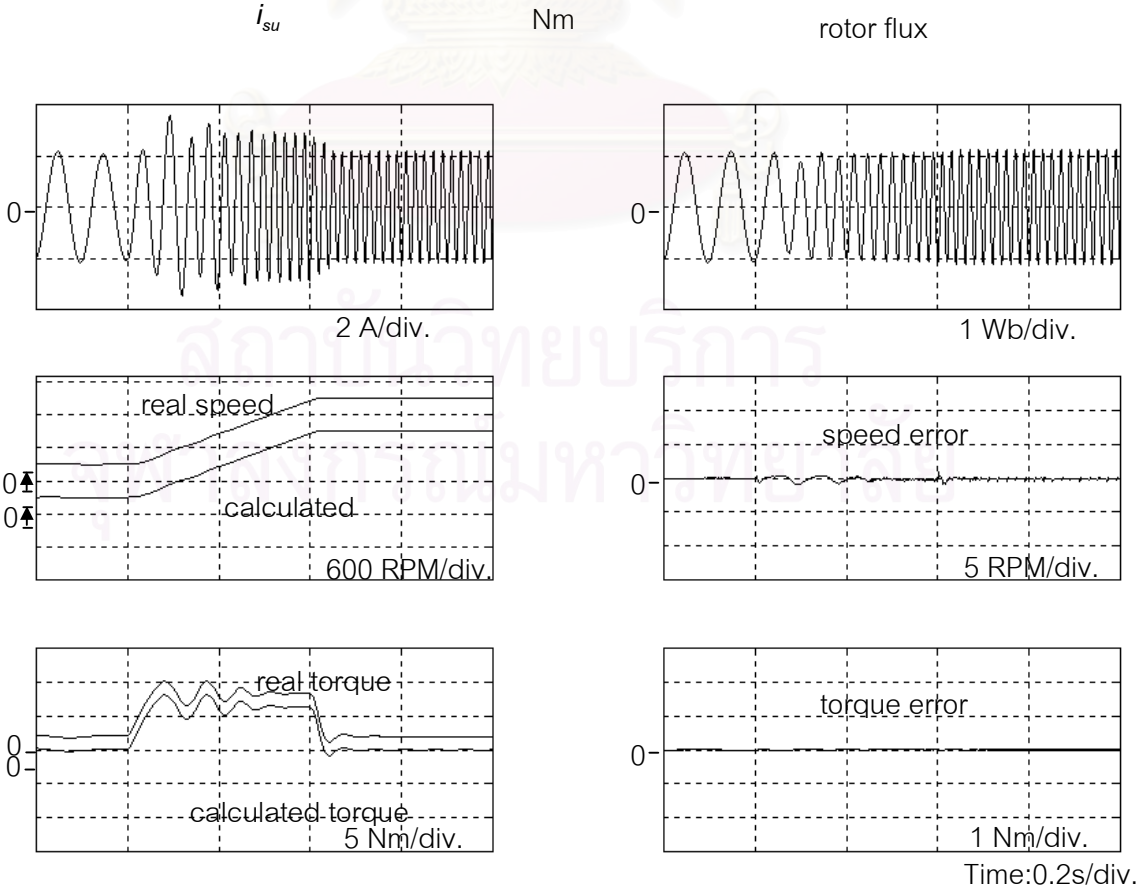
ในการทดสอบ เราจะพิจารณาผลการคำนวณค่าความเร็วและแรงบิด (Calculated Speed, Calculated Torque) ที่ได้จากระบบเปรียบเทียบกับค่าความเร็วและแรงบิดจริง (Real Speed, Real Torque) ที่ได้จากแบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งผลการจำลองการทำงานของระบบวัดความเร็วและแรงบิดสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.5 – 4.11 โดยผลการจำลองการทำงานในรูปที่ 4.5 – 4.6 เป็นผลการจำลองการทำงานในช่วงสภาวะอยู่ตัว รูปที่ 4.7 – 4.9 เป็นผลการจำลองการทำงานเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วของมอเตอร์ และรูปที่ 4.10 – 4.11 เป็นผลการจำลองการทำงานเมื่อมีการเพิ่มและลดโหลด



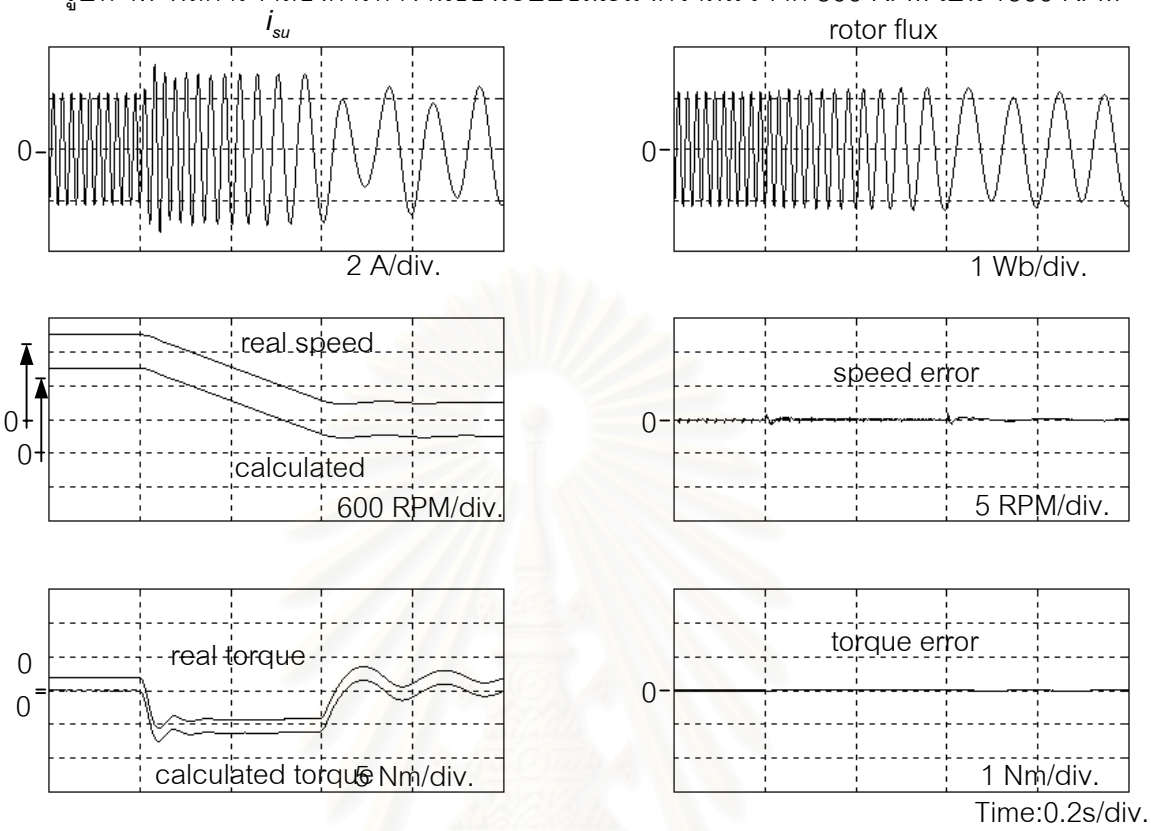
รูปที่ 4.5 ผลการจำลองการทำงานของระบบที่สภาวะอยู่ตัวที่ความเร็ว 1200 RPM ขณะไร้โหลด



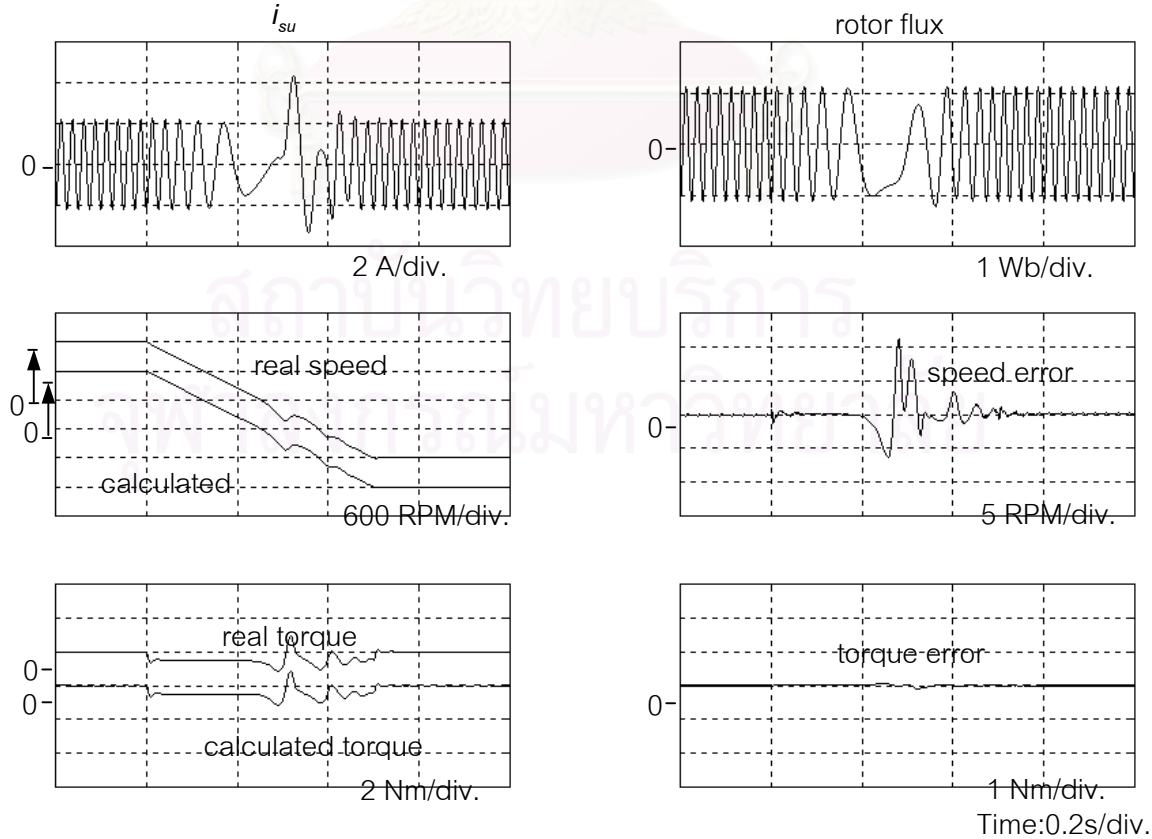
รูปที่ 4.6 ผลการจำลองการทำงานของระบบที่สภาวะอยู่ตัวที่ความเร็ว 1200 RPM ขณะมีโหลด 4



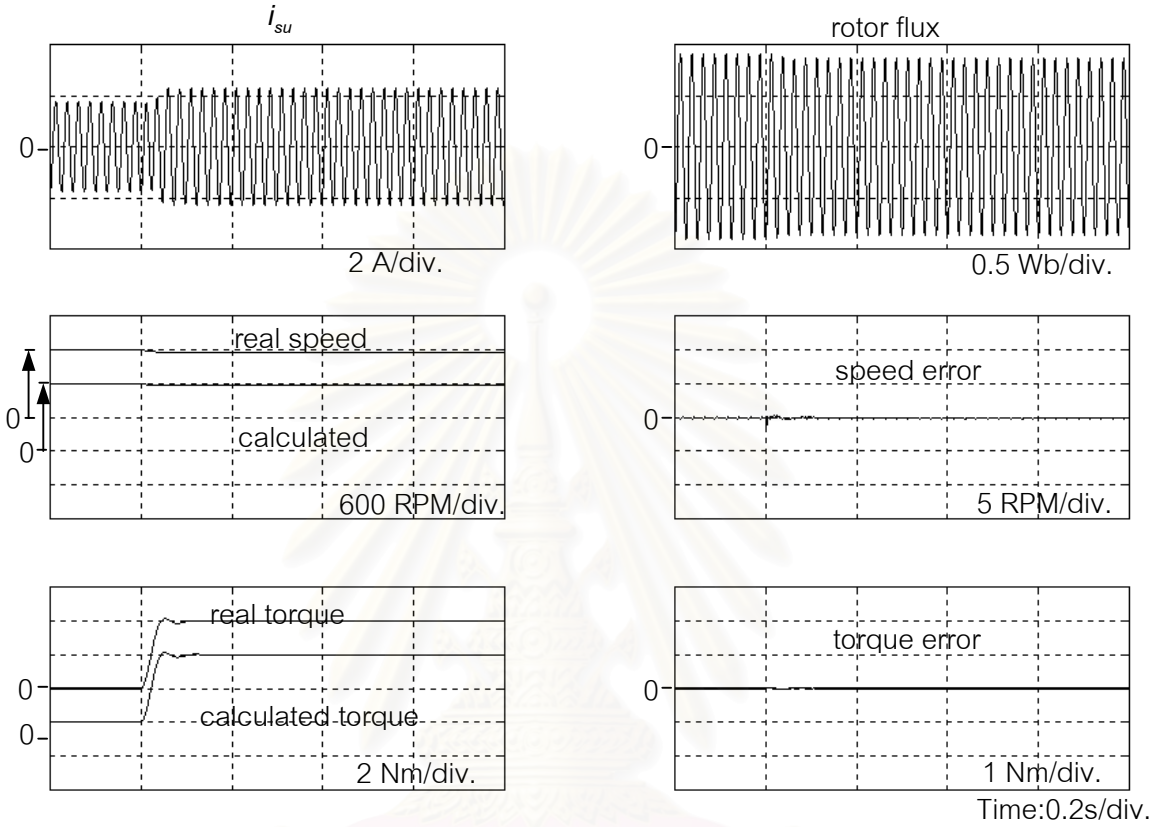
รูปที่ 4.7 ผลการจำลองการทำงานของระบบขณะเร่งความเร็วจาก 300 RPM เป็น 1500 RPM



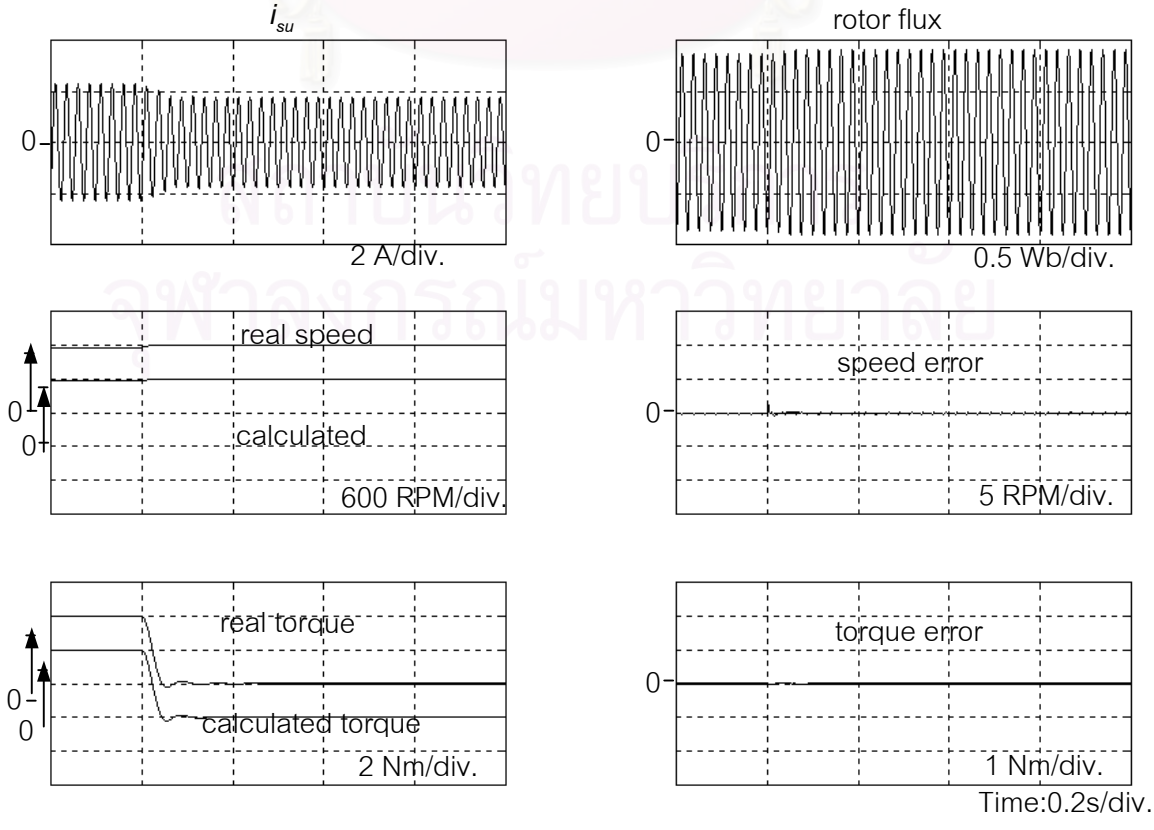
รูปที่ 4.8 ผลการจำลองการทำงานของระบบขณะลดความเร็วจาก 1500 RPM เป็น 300 RPM



รูปที่ 4.9 ผลการจำลองการทำงานของระบบขณะกลับทิศความเร็วจาก1200 RPM เป็น –1200 RPM



รูปที่ 4.10 ผลการจำลองการทำงานของระบบขณะเพิ่มโหลดจาก 0 Nm เป็น 4 Nm

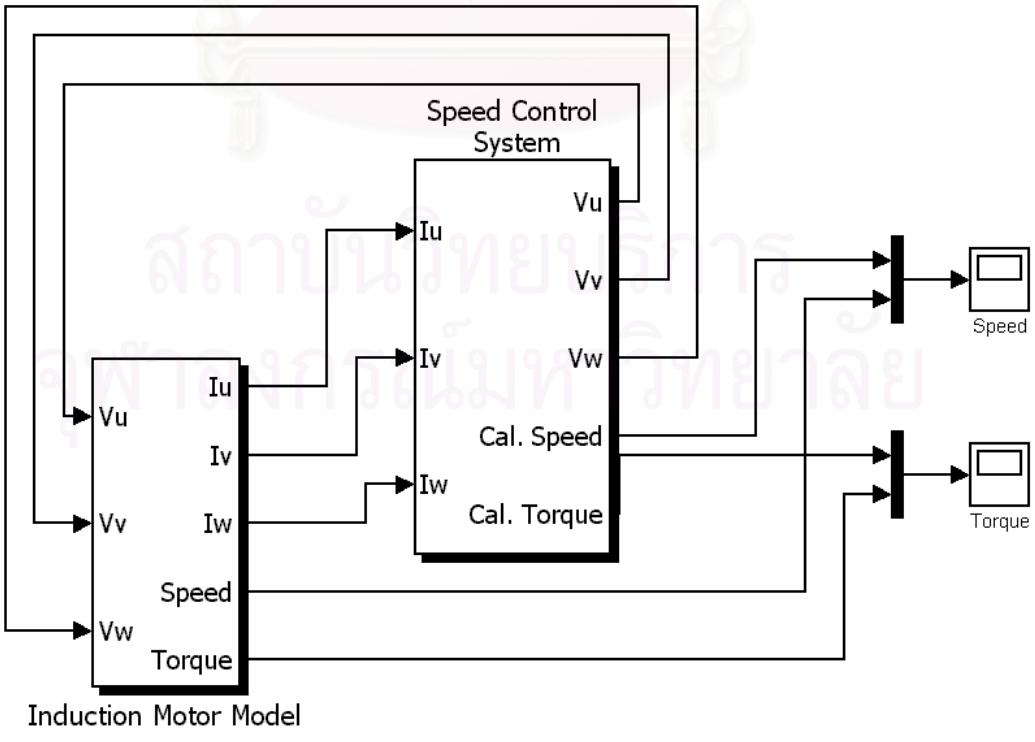


รูปที่ 4.11 ผลการจำลองการทำงานของระบบขณะลดโหลดจาก 4 Nm เป็น 0 Nm

ผลการจำลองการทำงานของระบบในสภาวะอยู่ตัวดังรูปที่ 4.5 - 4.6 แสดงให้เห็นว่าระบบวัดค่าความเร็วและแรงบิดสามารถคำนวณค่าความเร็วและแรงบิดได้อย่างถูกต้องทั้งในสภาวะที่มอเตอร์ทำงานแบบมีโหลดและไม่มีโหลด ส่วนผลการทำงานของระบบในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วหรือโหลดของมอเตอร์ตามรูปที่ 4.7 - 4.11 นั้น เราจะสังเกตเห็นว่าค่าความเร็วและแรงบิดที่ระบบคำนวณได้จะมีความผิดพลาดเกิดขึ้นเล็กน้อยในขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงการทำงานอยู่ครู่หนึ่ง แต่อย่างไรก็ตามค่าความเร็วและแรงบิดที่ระบบคำนวณได้ก็จะกลับมาถูกต้องในที่สุด

4.4.2 <u>การจำลองการทำงานของระบบควบคุมความเร็วของมอเตอร์</u>

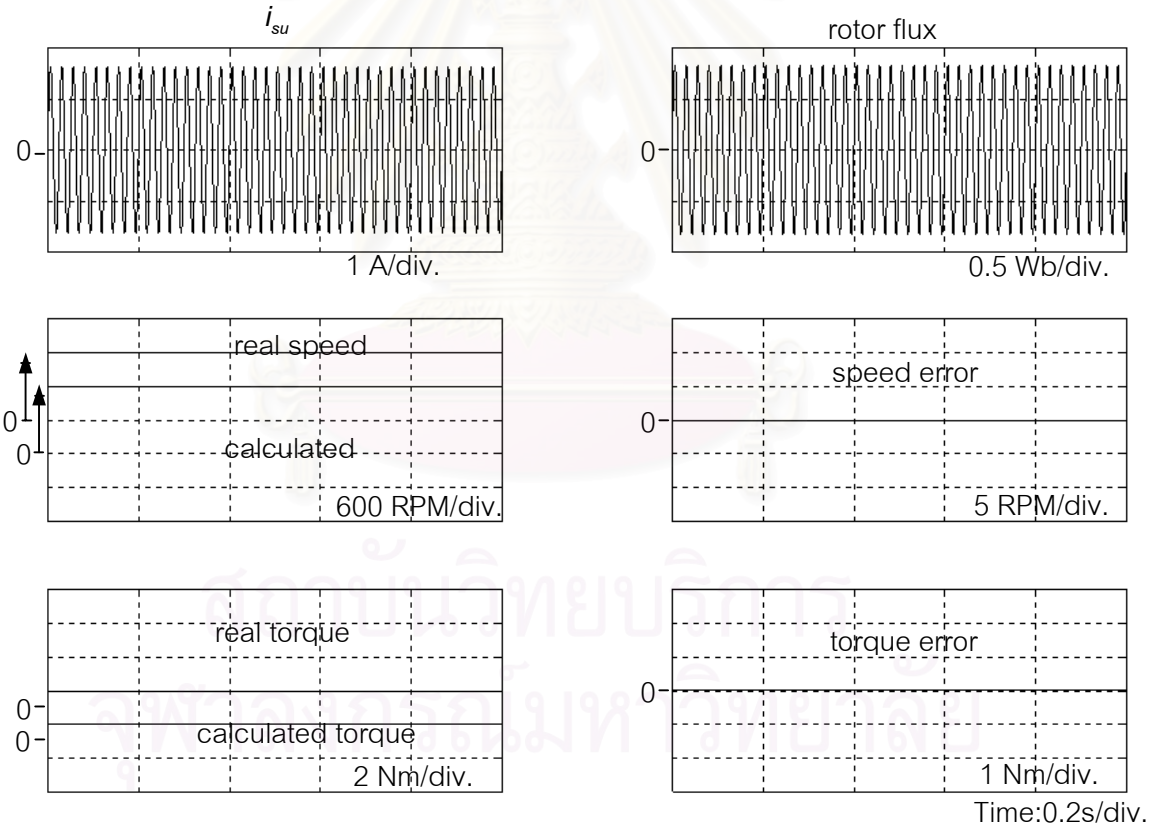
เราจะใช้ระบบที่มีลักษณะดังรูปที่ 4.12 ในการจำลองการทำงานของระบบควบคุมความเร็วของมอเตอร์ โดยเราจะสร้างแบบจำลองของระบบระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์ตามแผนภาพในรูปที่ 4.2 ซึ่งเราจะให้ระบบควบคุมเป็นตัวจ่ายแรงดันให้กับมอเตอร์เพื่อทำการควบคุมความเร็วของมอเตอร์



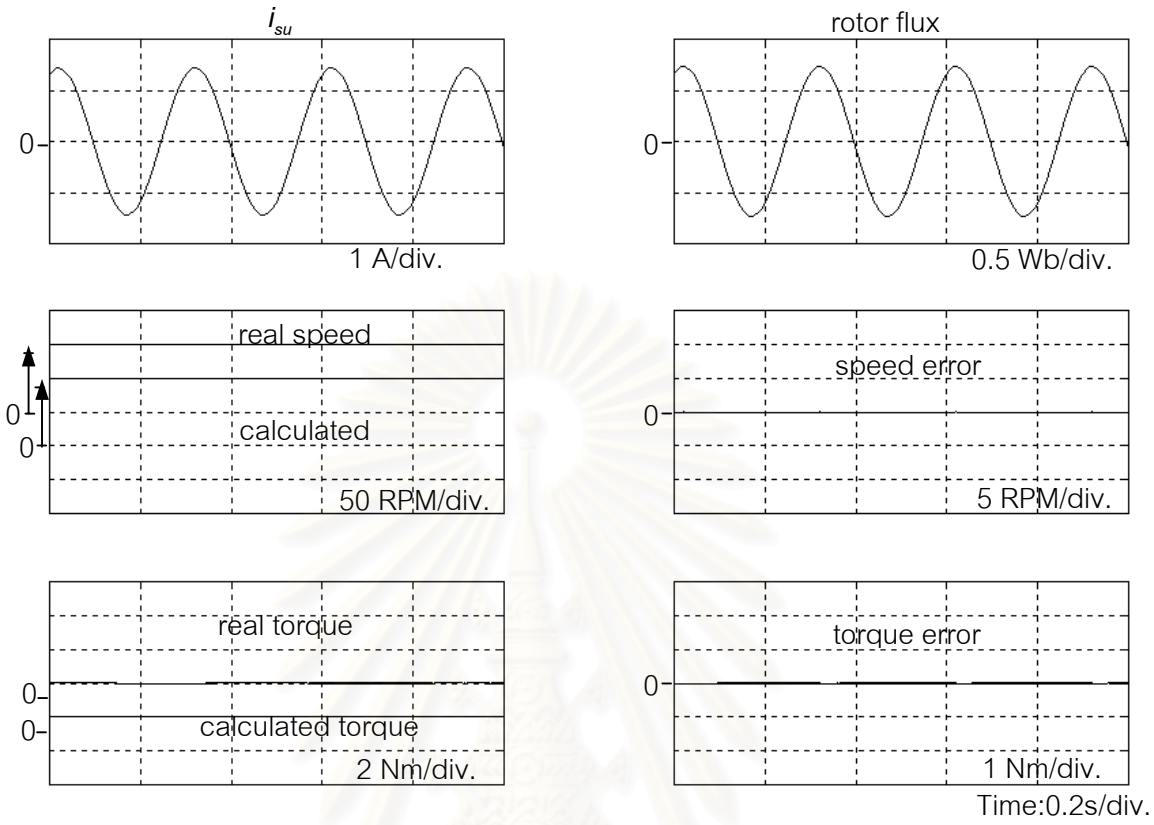
รูปที่ 4.12 ระบบจำลองการทำงานของระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์

ในการจำลองการทำงานระบบควบคุมความเร็วของมอเตอร์นั้น นอกจากเราจะพิจารณาผลของค่าความเร็วและแรงบิดที่คำนวณได้จากระบบเปรียบเทียบกับค่าความเร็วและแรงบิดจริงที่ได้จากแบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำแล้ว เรายังต้องพิจารณาถึงผลการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ด้วยว่ามีลักษณะเป็นไปตามที่สั่งหรือไม่

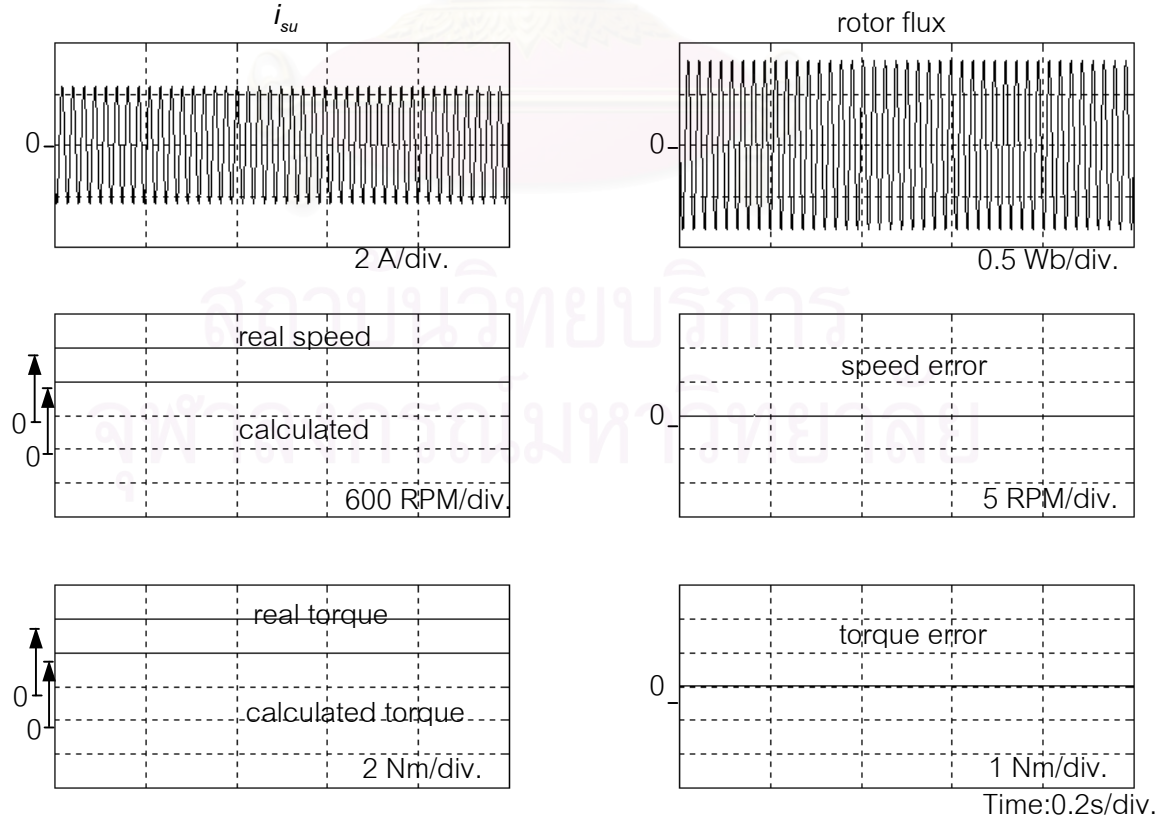
ผลการจำลองการทำงานระบบควบคุมความเร็วสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.13 – 4.20 โดยผลการจำลองการทำงานในรูปที่ 4.13 – 4.15 เป็นผลการจำลองการทำงานในช่วงสภาวะอยู่ตัว รูปที่ 4.16 – 4.18 เป็นผลการจำลองการทำงานเมื่อมีการสั่งเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วของมอเตอร์ และรูปที่ 4.19 – 4.20 เป็นผลการจำลองการทำงานเมื่อมีการเพิ่มและลดโหลด



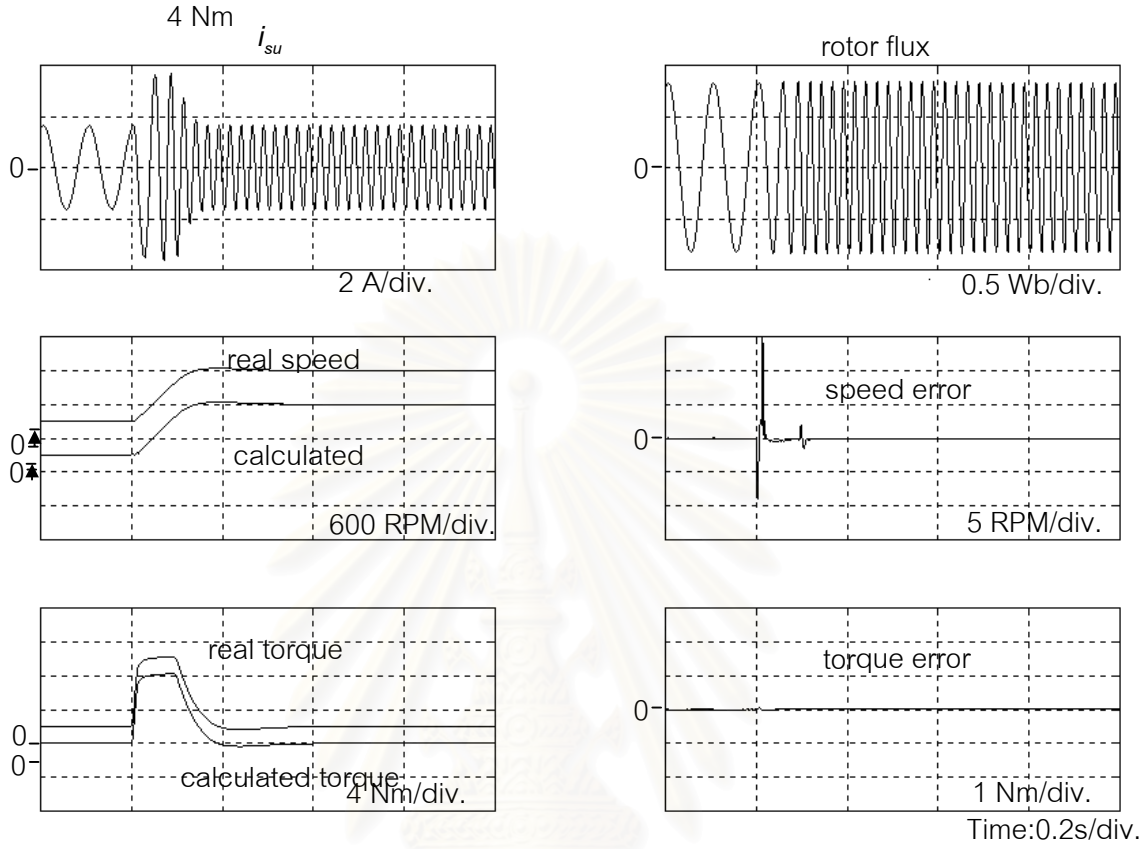
รูปที่ 4.13 ผลการจำลองการทำงานของระบบที่สภาวะอยู่ตัวที่ความเร็ว 1200 RPM ขณะไร้โหลด



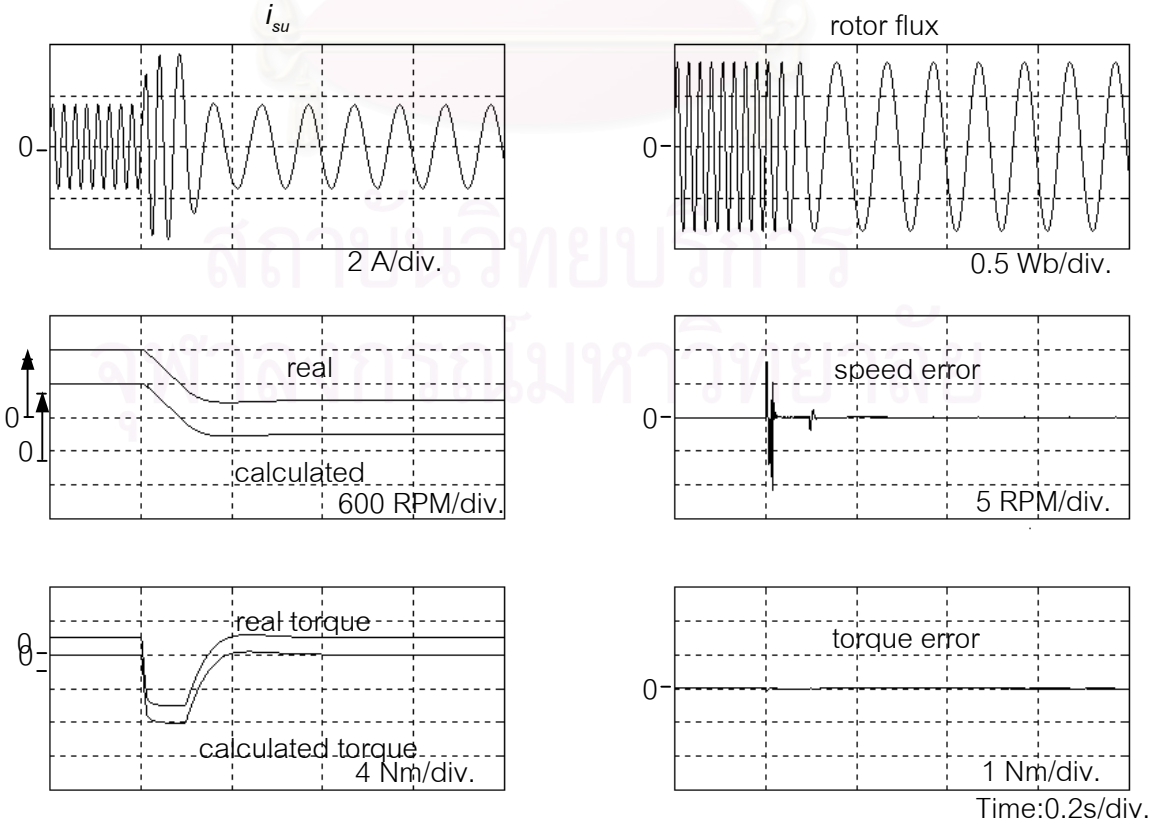
รูปที่ 4.14 ผลการจำลองการทำงานของระบบที่สภาวะอยู่ตัวที่ความเร็ว 100 RPM ขณะไร้โหลด



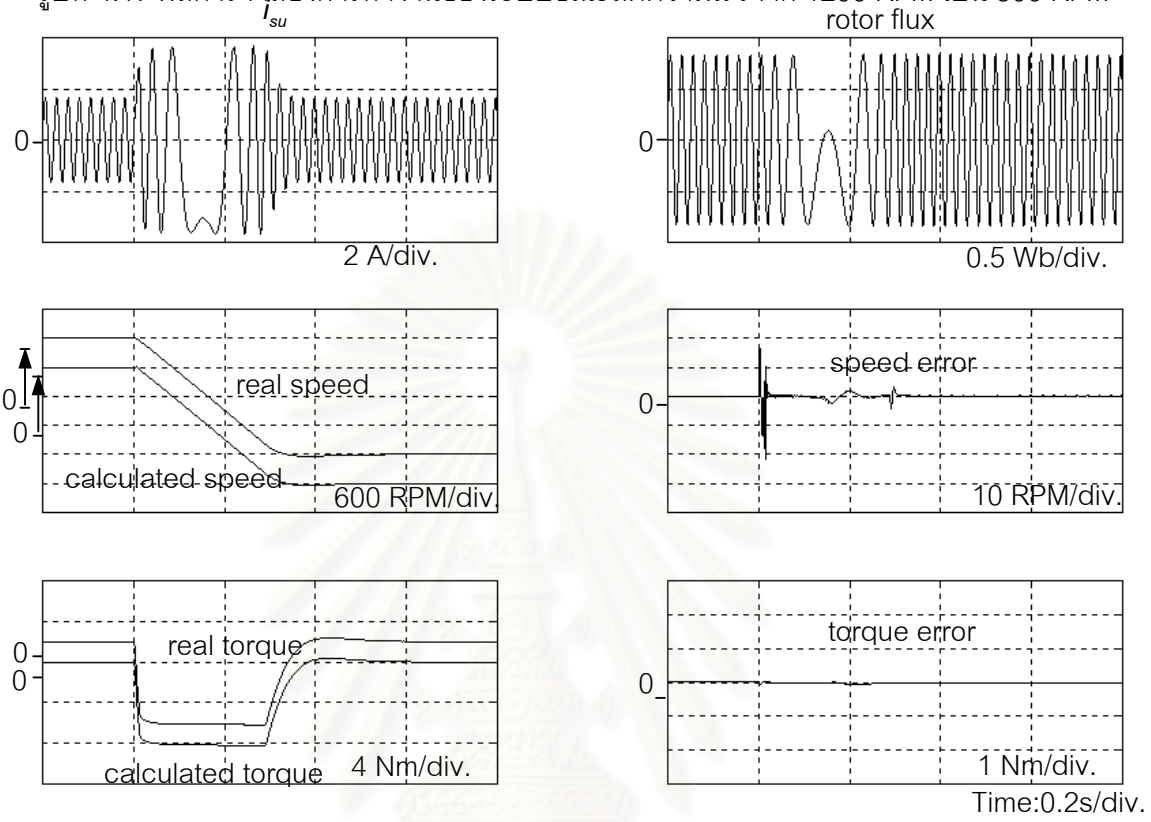
รูปที่ 4.15 ผลการจำลองการทำงานของระบบที่สภาวะอยู่ตัวที่ความเร็ว 1200 RPM ขณะมีโหลด



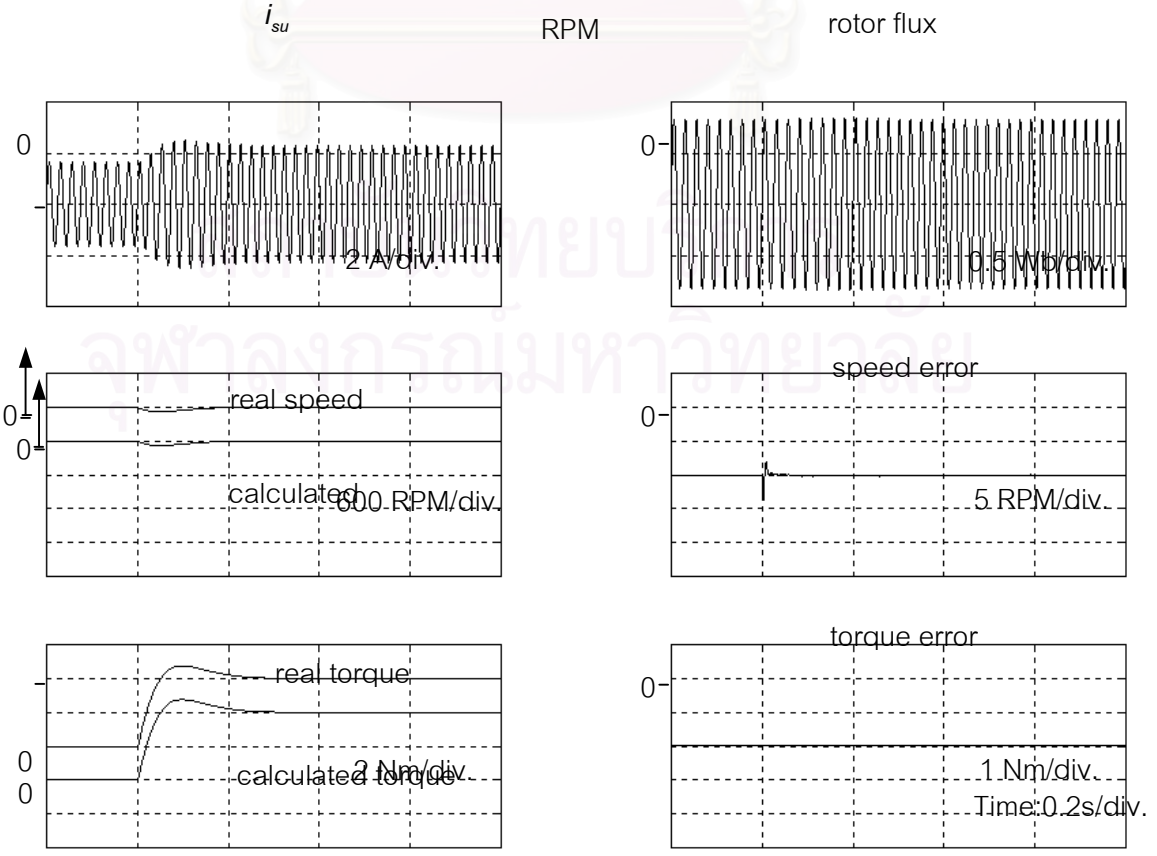
รูปที่ 4.16 ผลการจำลองการทำงานของระบบขณะเพิ่มความเร็วจาก 300 RPM เป็น 1200 RPM



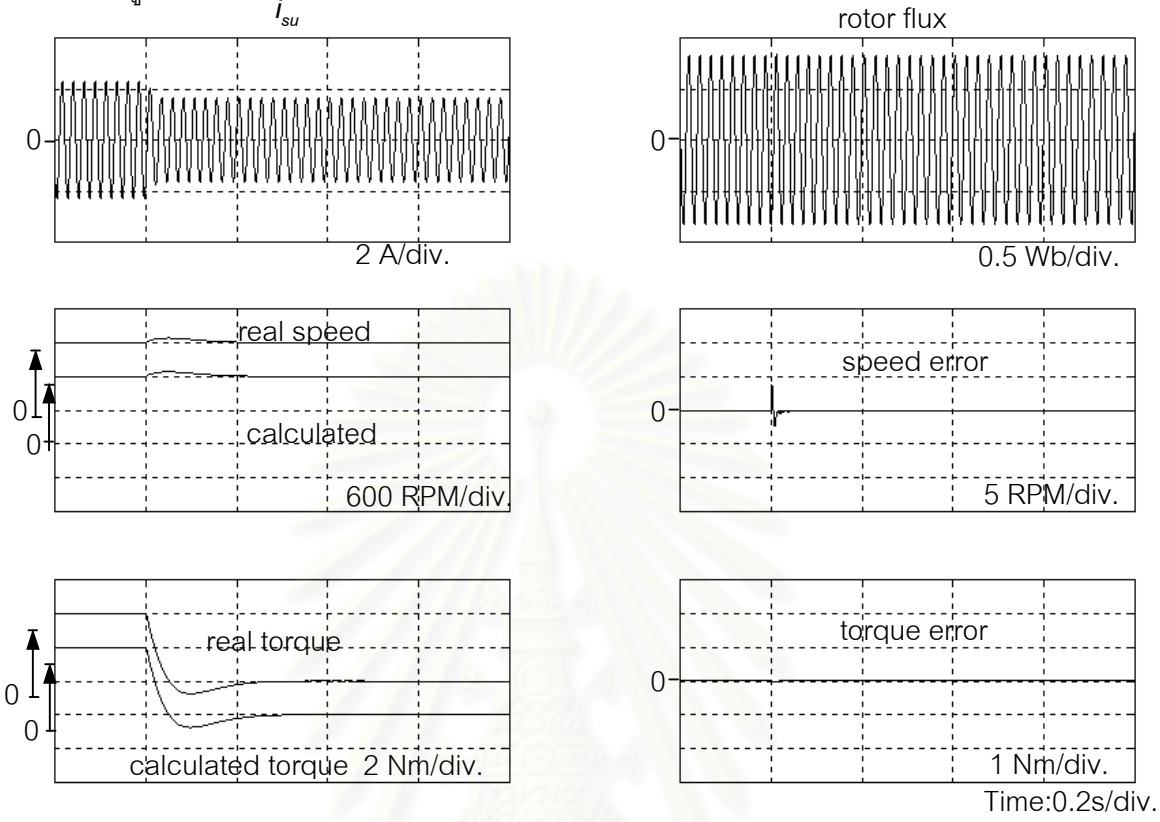
รูปที่ 4.17 ผลการจำลองการทำงานของระบบขณะลดความเร็วจาก 1200 RPM เป็น 300 RPM



รูปที่ 4.18 ผลการจำลองการทำงานของระบบขณะกลับทิศความเร็วจาก 1200 RPM เป็น –1200 RPM



- รูปที่ 4.19 ผลการจำลองการทำงานของระบบขณะเพิ่มโหลดจาก 0 Nm เป็น 4 Nm



รูปที่ 4.20 ผลการจำลองการทำงานของระบบขณะลดโหลดจาก 4 Nm เป็น 0 Nm

จากผลการจำลองการทำงานของระบบในสภาวะอยู่ตัวดังรูปที่ 4.13 - 4.14 เราจะเห็นว่าระบบสามารถควบคุมความเร็วของมอเตอร์รวมทั้งสามารถคำนวณค่าความเร็วและแรงบิดได้อย่างถูกต้องทั้งในสภาวะที่มอเตอร์ทำงานแบบมีโหลดและไม่มีโหลด ส่วนผลการจำลองการทำงานในรูปที่ 4.15 แสดงให้เห็นว่าระบบควบคุมความเร็วของมอเตอร์ยังคงสามารถทำงานได้อย่างมีเสถียรภาพแม้ในย่านความเร็วต่ำ

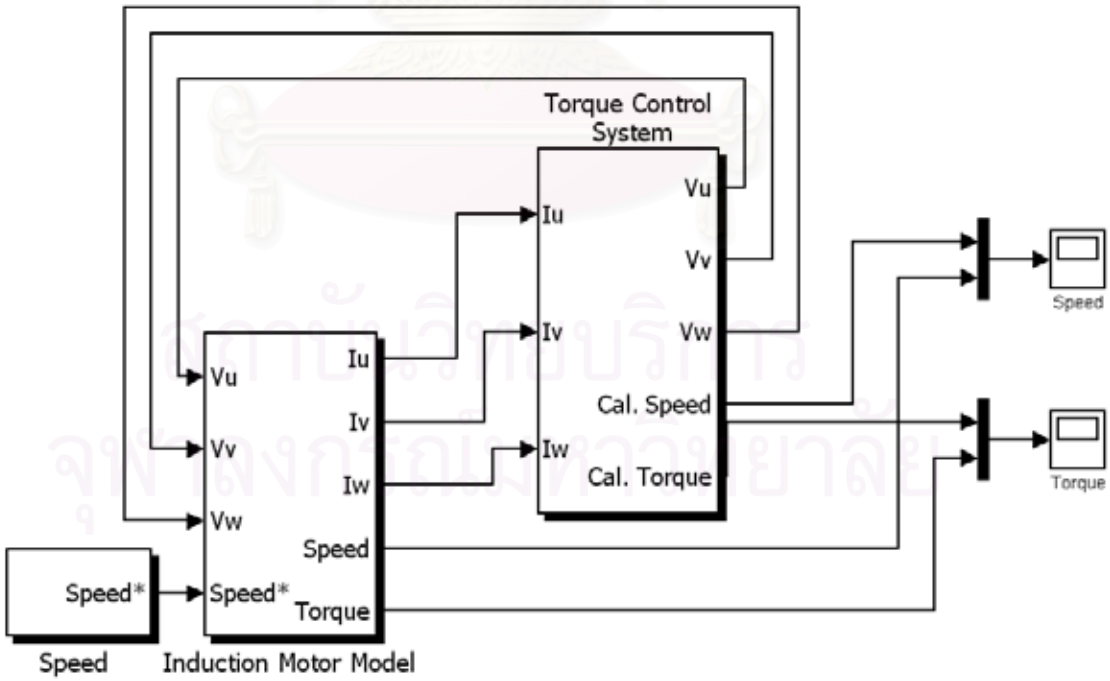
ในการทดสอบสั่งเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วของมอเตอร์ซึ่งมีผลดังรูปที่ 4.16 - 4.18 นั้น จะพบว่าเราสามารถควบคุมให้มอเตอร์เพิ่ม ลดและกลับทิศความเร็วได้ตามคำสั่ง แต่จะสังเกตเห็นว่าค่าความเร็วและแรงบิดที่ระบบคำนวณได้จะมีความผิดพลาดเกิดขึ้นในขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วอยู่ครู่หนึ่งก่อนที่จะกลับมาถูกต้องในที่สุดเช่นเดียวกับผลการจำลองการทำงานของระบบวัดความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์ที่ได้แสดงมาก่อนหน้านี้

ส่วนผลการจำลองการทำงานในกรณีที่มีการเพิ่มและลดโหลดในรูปที่ 4.19 – 4.20 แสดงให้เห็นว่าในช่วงสั้นๆหลังมีการเพิ่มหรือลดโหลด ความเร็วของมอเตอร์จะผิดไปจากค่าความเร็วคำ

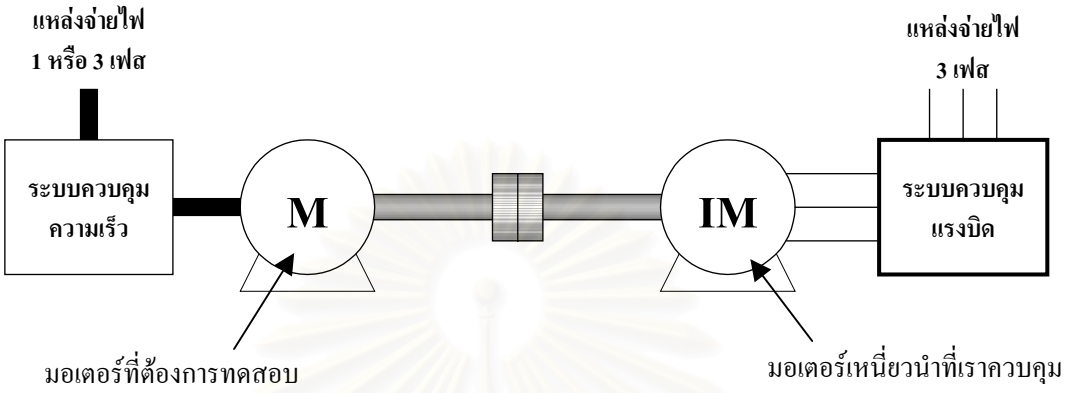
สั่ง และผลการคำนวณค่าความเร็วและแรงบิดจะมีความผิดพลาดเช่นกัน แต่สุดท้ายแล้วความเร็วของมอเตอร์รวมทั้งค่าความเร็วและแรงบิดที่คำนวณได้ก็จะกลับมาถูกต้องภายในระยะเวลาอันสั้น

4.4.3 การจำลองการทำงานของระบบควบคุมแรงบิดของมอเตอร์

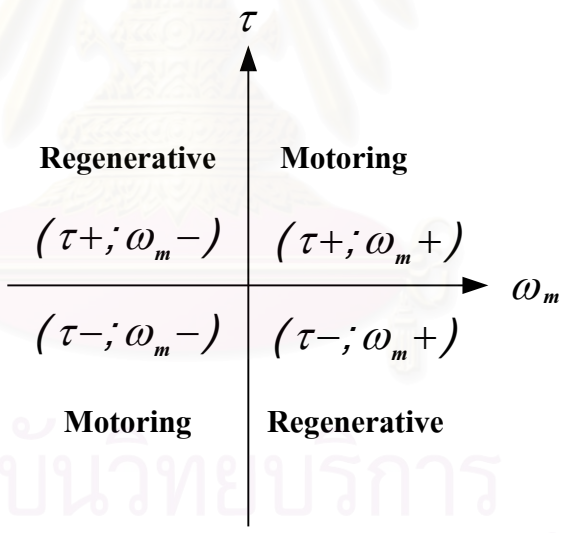
ในการจำลองการทำงานของระบบควบคุมแรงบิดของมอเตอร์นี้ เราจะใช้ระบบการจำลองการทำงานตามรูปที่ 4.21 ซึ่งเราจะให้มอเตอร์ที่เราควบคุมทำหน้าที่เสมือนเป็นโหลดให้กับมอเตอร์อีกตัวหนึ่งเหมือนกับระบบทดสอบมอเตอร์ที่แสดงในรูปที่ 4.22 ความเร็วของระบบจะถูกกำหนดโดยอุปกรณ์ควบคุมความเร็วของมอเตอร์ที่ต้องการทดสอบ ซึ่งในที่นี้เราจะจำลองพฤติกรรมนี้ในเชิงอุดมคติโดยการกำหนดค่าความเร็วของมอเตอร์เข้าไปโดยตรงที่แบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำให้มีค่าเท่ากับความเร็วของระบบที่ต้องการจำลอง (อาจเป็นค่าคงที่หรือมีการเร่งลดความเร็วก็ได้) และการที่จะให้มอเตอร์ที่เราควบคุมทำหน้าที่หน้าที่เสมือนเป็นโหลดให้กับมอเตอร์อีกตัวนั้นเราจะต้องให้มอเตอร์ที่เราควบคุมทำงานในย่านคืนพลังงาน(Regenerative Mode) ดังนั้นในการจำลองการทำงานเราจึงสั่งแรงบิดของมอเตอร์ในย่านคืนพลังงาน นั่นคือสั่งค่าแรงบิดให้มีเครื่องหมายตรงข้ามกับเครื่องหมายของค่าความเร็วนั่นเอง (ดูรูปที่ 4.23 ประกอบ)



รูปที่ 4.21 ระบบจำลองการทำงานของระบบควบคุมแรงบิดมอเตอร์



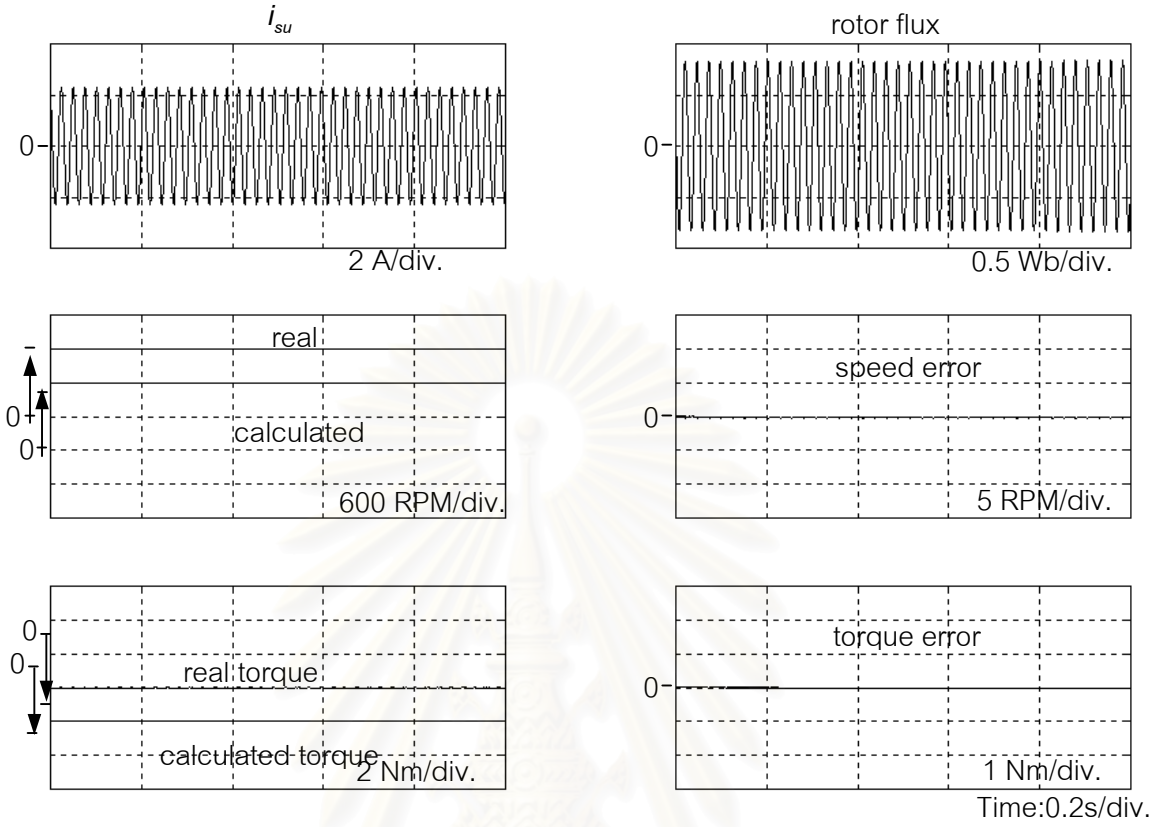
รูปที่ 4.22 ระบบทดสอบมอเตอร์



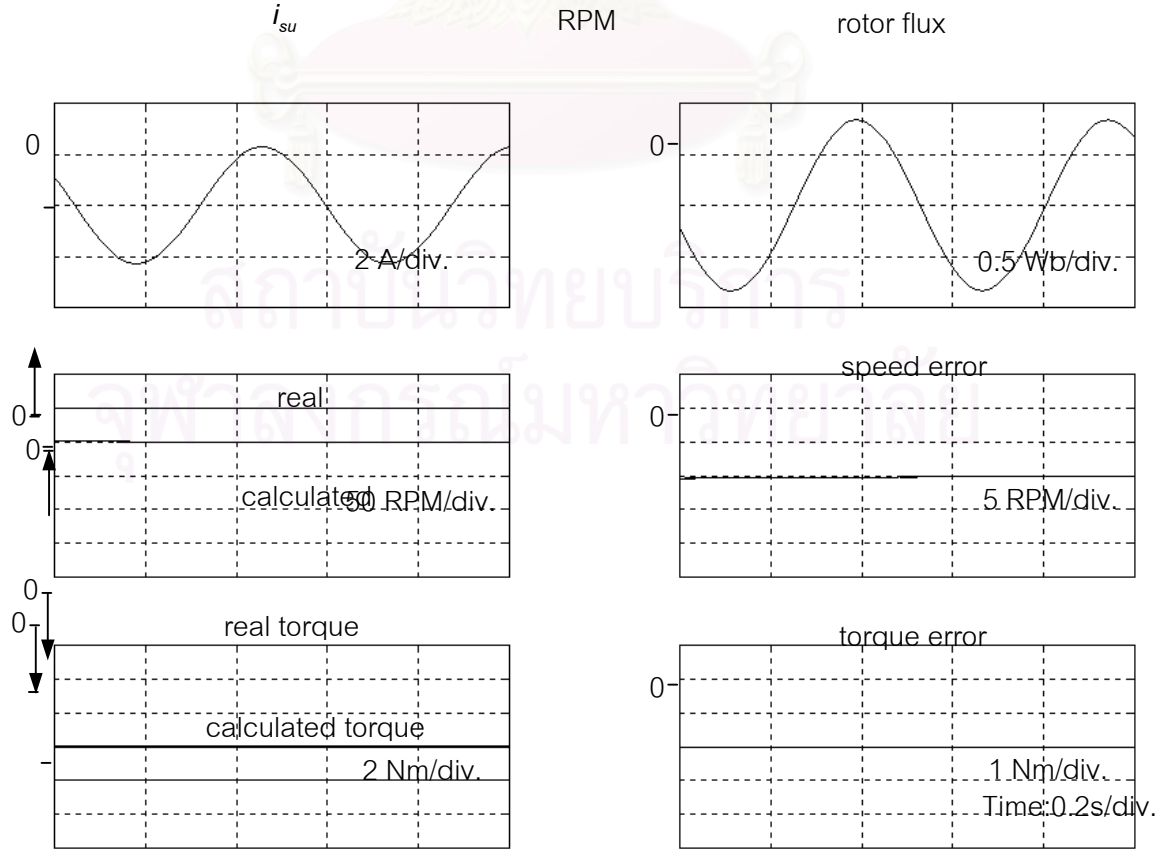
รูปที่ 4.23 ย่านการทำงานของมอเตอร์

ผลการจำลองการทำงานระบบควบคุมแรงบิดจะแสดงได้ดังรูปที่ 4.24 - 4.29 โดยผลการจำลองการทำงานในรูปที่ 4.24 – 4.25 เป็นผลการจำลองการทำงานในช่วงสภาวะอยู่ตัว รูปที่ 4.26 – 4.27 เป็นผลการจำลองการทำงานเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วของมอเตอร์ และรูปที่ 4.28 – 4.29 เป็นผลการจำลองการทำงานเมื่อสั่งให้เพิ่มและลดแรงบิด

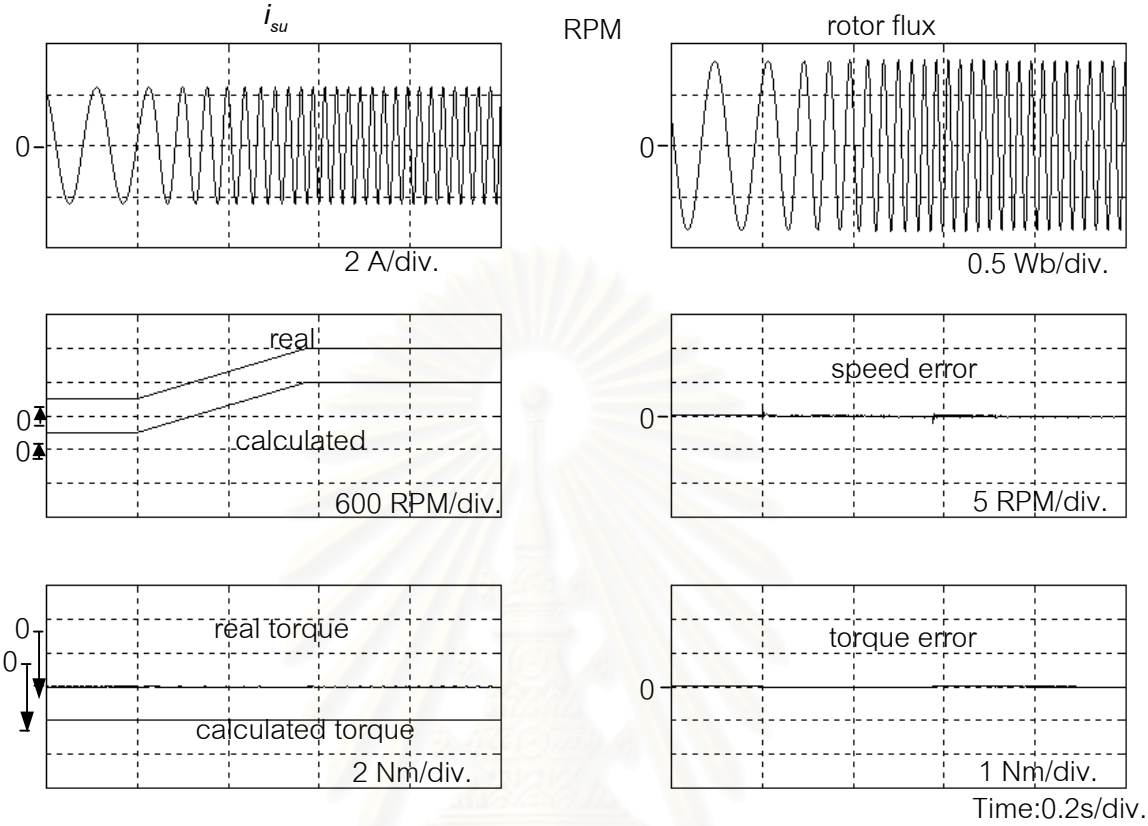
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.24 ผลการจำลองการทำงานของระบบในสภาวะอยู่ตัวที่แรงบิด –4 Nm ความเร็ว 1200

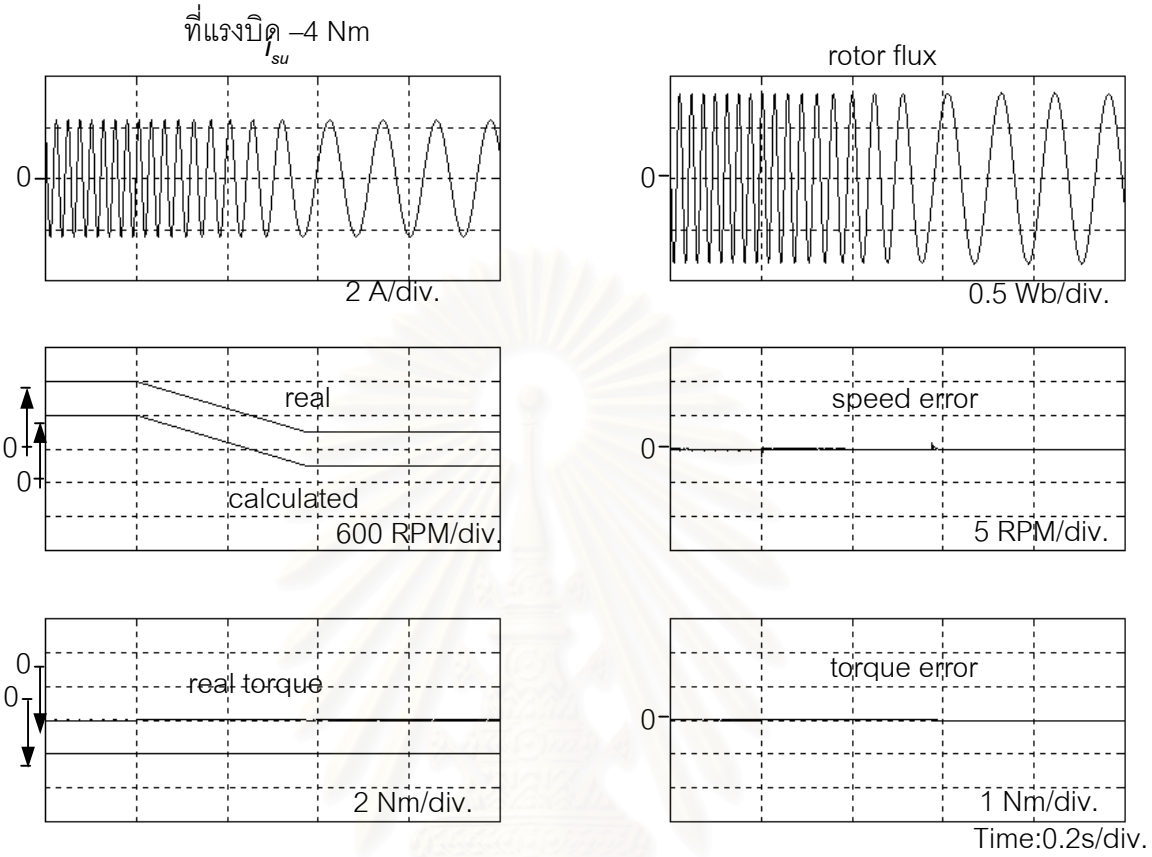


รูปที่ 4.25 ผลการจำลองการทำงานของระบบในสภาวะอยู่ตัวที่แรงบิด –4 Nm ความเร็ว 100



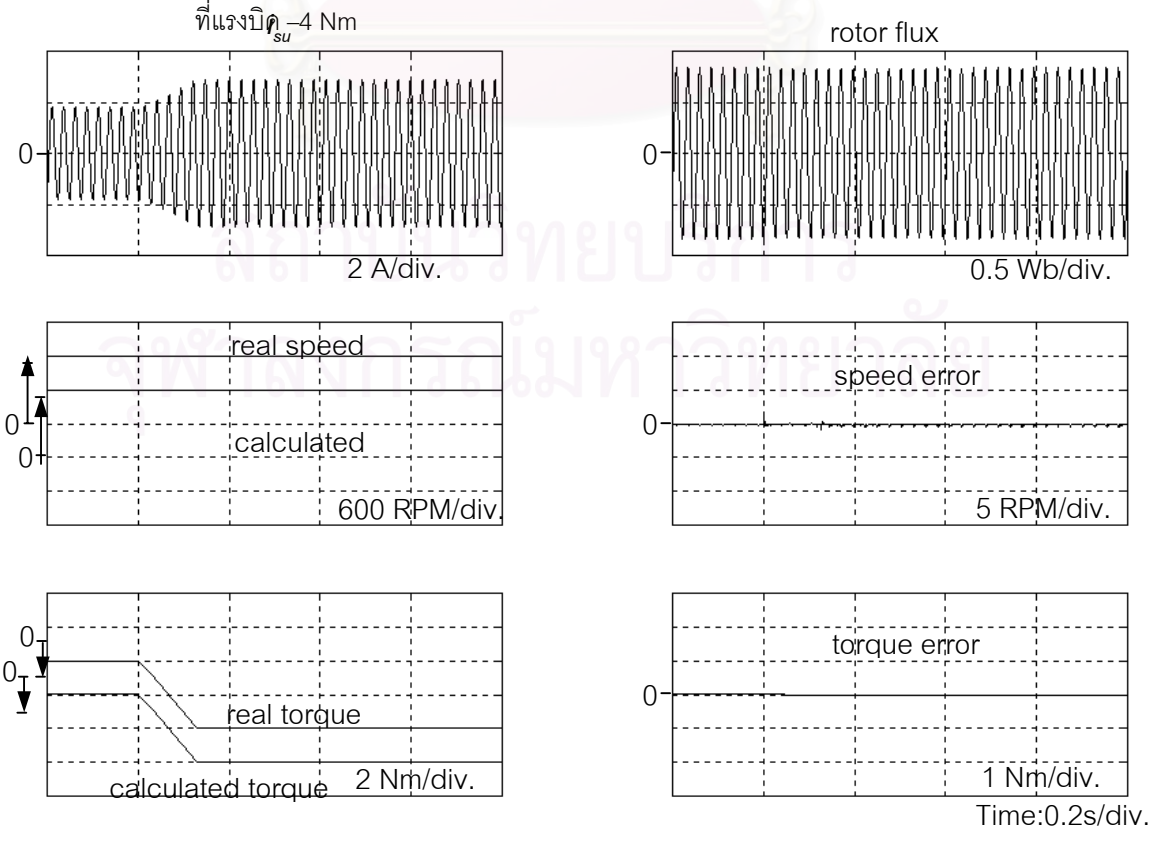
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.26 ผลการจำลองการทำงานของระบบขณะเพิ่มความเร็วจาก 300 RPM เป็น 1200 RPM ที่แรงบิด –4 Nm

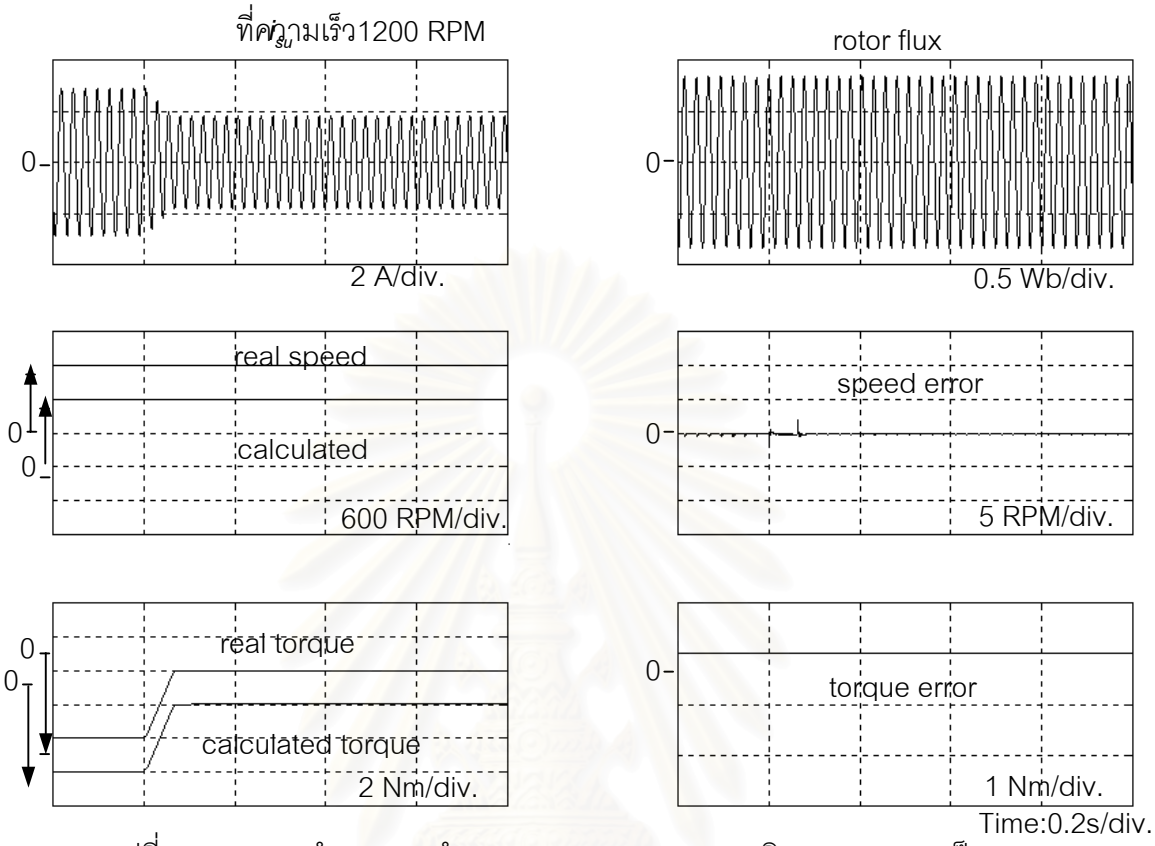


calculated torque

รูปที่ 4.27 ผลการจำลองการทำงานของระบบขณะลดความเร็วจาก 1200 RPM เป็น 300 RPM ที่แรงบิด –4 Nm



รูปที่ 4.28 ผลการจำลองการทำงานของระบบขณะเพิ่มแรงบิดจาก –2 Nm เป็น –6 Nm ที่ความเร็ว1200 RPM



รูปที่ 4.29 ผลการจำลองการทำงานของระบบขณะลดแรงบิดจาก –6 Nm เป็น –2 Nm ที่ความเร็ว1200 RPM

ผลการจำลองการทำงานของระบบในสภาวะอยู่ตัวดังรูปที่ 4.24 - 4.25 แสดงให้เห็นว่าระบบสามารถควบคุมแรงบิดของมอเตอร์รวมทั้งสามารถคำนวณค่าความเร็วและแรงบิดได้อย่างถูกต้องทั้งในย่านความเร็วสูงและความเร็วต่ำ ส่วนผลการควบคุมแรงบิดเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วของมอเตอร์ซึ่งมีผลดังรูปที่ 4.26 - 4.27 นั้น จะพบว่าเราสามารถควบคุมแรงบิดของมอเตอร์ให้นิ่งอยู่ที่ค่าคำสั่งได้ และจะสังเกตเห็นว่าค่าความเร็วและแรงบิดที่ระบบคำนวณได้จะมีความผิดพลาดเกิดขึ้นเล็กน้อยในช่วงสั้นๆ ขณะที่มีการเปลี่ยนแปลง

ส่วนผลการจำลองการทำงานในกรณีที่มีการสั่งเพิ่มและลดแรงบิดนั้น เมื่อพิจารณาจากผลการจำลองการทำงานตามรูปที่ 4.27 – 4.28 จะเห็นเราสามารถควบคุมให้มอเตอร์เพิ่มและลดแรงบิดได้ตามคำสั่ง แต่ค่าความเร็วและแรงบิดที่ระบบคำนวณได้ก็จะมีความผิดพลาดเล็กน้อยขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงแรงบิด

บทที่ 5

ผลการทดสอบการทำงานของระบบ

5.1 การสร้างระบบในทางปฏิบัติ

จากวิธีการสร้างระบบวัดและควบคุมแรงบิดและความเร็วของมอเตอร์ที่ได้นำเสนอมาแล้วในบทที่ 4 เราสามารถนำมาสร้างเป็นระบบจริงเพื่อใช้ในการทดสอบได้ดังนี้

5.1.1 ส่วนฮาร์ดแวร์

เราจะใช้บอร์ดตัวประมวลผลเชิงดิจิตอล (DSP Board) TMS320F2432 ขนาด 16 บิต เป็นตัวควบคุมการทำงานของระบบ โดยเราสามารถทำการพัฒนาซอฟต์แวร์บนคอมพิวเตอร์และถ่ายข้อมูลไปยังบอร์ดตัวประมวลผลเชิงดิจิตอลผ่านทางพอร์ตสื่อสารอนุกรม (RS-232) เพื่อใช้ในการควบคุมมอเตอร์ได้ตามที่ต้องการ

ส่วนการตรวจจับแรงดันและกระแสนั้น เราจะใช้วงจรออปแอมป์ในการคำนวณแรงดันและกระแสให้อยู่ในรูปของสเปซเวกเตอร์ ($v_{s,\alpha-\beta}, i_{s,\alpha-\beta}$) ตามสมการ (5.1) - (5.4) รวมทั้งทำการปรับระดับสัญญาณให้อยู่ในระดับ 0-5 โวลต์ ก่อนที่จะส่งให้กับตัวแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิตอล (A/D Converter) ของตัวประมวลผลเชิงดิจิตอลต่อไป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สมการแปลงสเปซเวกเตอร์ของแรงดัน

$$v_{s\alpha} = \sqrt{\frac{2}{3}} v_{uv} + \frac{1}{\sqrt{6}} v_{vw} \quad (5.1)$$

$$v_{s\beta} = \frac{1}{\sqrt{2}} v_{vw} \quad (5.2)$$

โดยที่ v_{uv}, v_{vw} คือ แรงดันระหว่างสายทางด้านสเตเตอร์

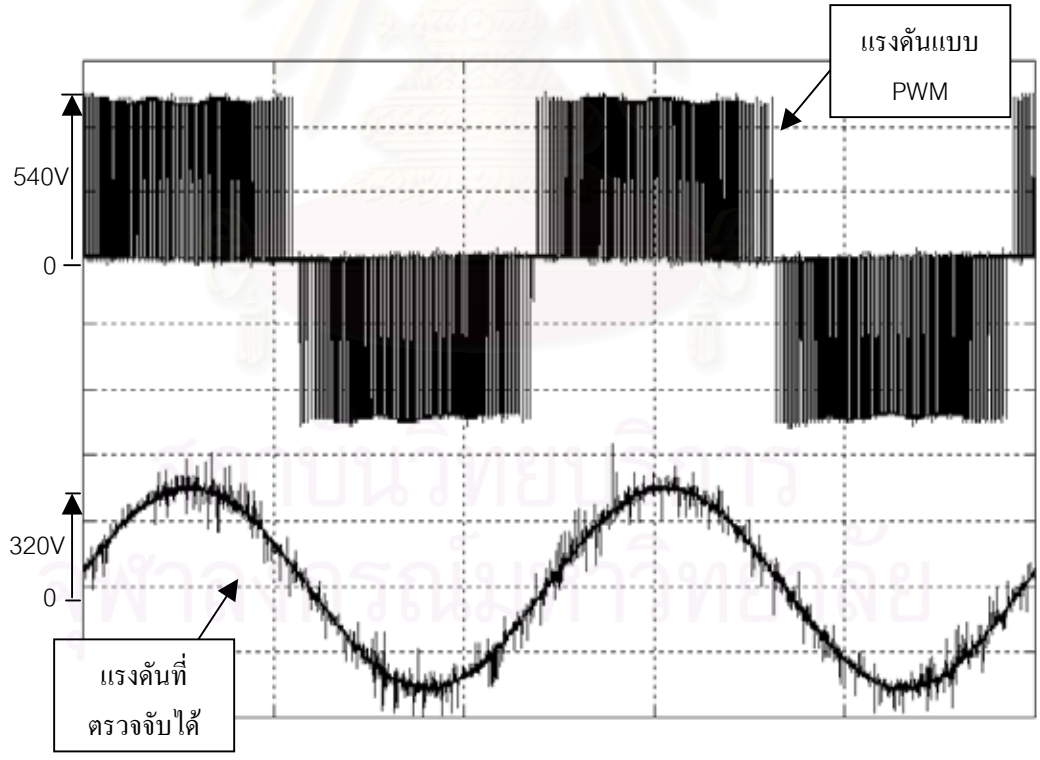
<u>สมการแปลงสเปซเวกเตอร์ของกระแส</u>

$$i_{s\alpha} = \sqrt{\frac{3}{2}} i_{su} \tag{5.3}$$

$$i_{s\beta} = \frac{1}{\sqrt{2}} i_{su} + \sqrt{2} i_{sv} \tag{5.4}$$

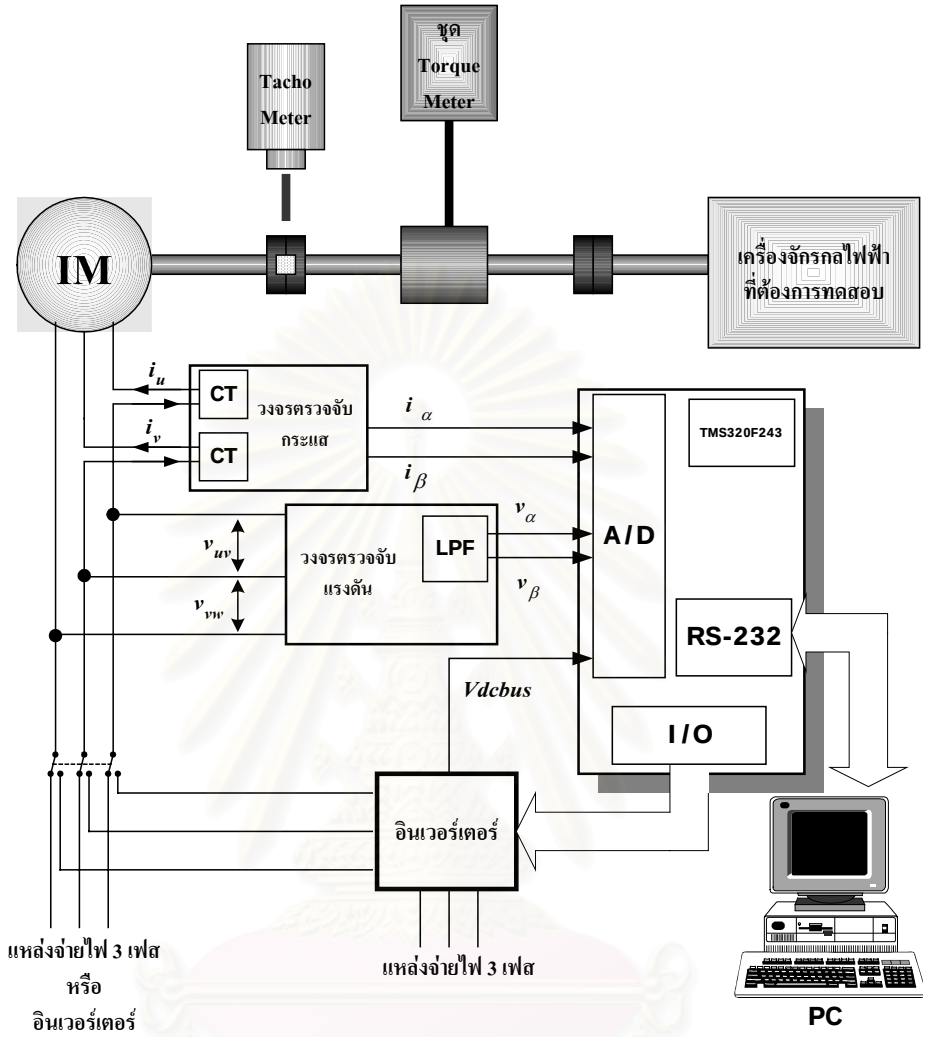
โดยที่ i_{su}, i_{sv} คือ กระแสสเตเตอร์ในเฟส *u* และ *v* ตามลำดับ

เนื่องจากเราต้องการที่สร้างระบบให้สามารถทำงานกับแรงดันที่มีการมอดูเลตแบบปรับความกว้างพัลส์ (PWM Voltage) ได้ด้วย ดังนั้นเราจะใส่ตัวกรองผ่านความถี่ต่ำ (Low pass Filter) เข้าไปที่ส่วนตรวจจับแรงดันด้วยเพื่อป้องกันการเกิดเกิดการซ้อนทับของสัญญาณ (Aliasing) ซึ่งในที่นี้เราเลือกใช้ตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับสามที่มีค่าความถี่หักมุม (corner frequency) เท่ากับ 750 เฮิรตซ์ ซึ่งตัวอย่างของการตรวจจับแรงดันแสดงได้ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 ผลการตรวจจับแรงดันแบบ PWM

โครงสร้างของฮาร์ดแวร์โดยรวมของระบบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 โครงสร้างของระบบฮาร์ดแวร์โดยรวม

5.1.2 <u>ส่วนซอฟต์แวร์</u>

ซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการทดสอบนี้จะเขียนขึ้นตามสมการและแผนภาพของระบบดังที่ได้นำเสนอมาแล้วในบทที่ 4 โดยค่าสัมประสิทธิ์และอัตราขยายต่างๆที่ใช้ในระบบจะแสดงได้ดังตารางที่ 5.1 อย่างไรก็ตาม การคำนวณค่าแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่คิดจากวงจรด้านสเตเตอร์ (U_d, U_q) ตามสมการ (4.7) และ (4.8) จะพบว่ามีเทอมอนุพันธ์ ($\frac{d}{dt}$) ของกระแสในแกน d และ q ซึ่งในทางปฏิบัติเราจะใส่ตัว

กรองผ่านต่ำ ($\frac{1}{\tau s+1}$) ให้กับส่วนคำนวณ $\frac{d}{dt}$ เพื่อป้องกันการขยายสัญญาณรบกวนในย่านความถี่สูง โดยในที่นี้กำหนดให้ค่า τ ของตัวกรองผ่านต่ำเป็น 10 ms

ตารางที่ 5.1 ค่าสัมประสิทธิ์และค่าอัตราขยายต่างๆที่ใช้ในระบบ

สัมประสิทธิ์จำกัดค่าอัตราขยาย k (C_0)	8
สัมประสิทธิ์จำกัดค่าอัตราขยาย k (C_1)	1.5
ค่าอัตราขยาย a	0.1
อัตราขยายวงรอบควบคุมกระแส	Kp = 20, Ki = 2500
อัตราขยายวงรอบควบคุมความเร็ว	Kp = 0.2, Ki = 1
อัตราขยายวงรอบควบคุมแรงบิด	Kp = 0.2, Ki = 1

5.2 ผลการทดสอบการทำงานของระบบ

เราจะทำการทดสอบระบบวัดและควบคุมแรงบิดและความเร็วของมอเตอร์ที่ได้พัฒนาขึ้น เพื่อดูสมรรถนะของระบบทั้งในด้านการวัดและการควบคุม โดยเราจะใช้มอเตอร์ 2 ตัวในการทดสอบ คือ มอเตอร์ SIEMENs และมอเตอร์ Super Line ซึ่งมีค่าพิกัดและค่าพารามิเตอร์ต่างตามตารางที่ 5.2 และ 5.3 ตามลำดับ

ตารางที่ 5.2 ค่าพิกัดและค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ SIEMENs

กำลังพิกัด(kW)	1.1	i_{sd}พิกัด(A)	2.4
แรงดันพิกัด(V)	380	i_{sq}พิกัด(A)	3.75
กระแสพิกัด(A)	2.6	$R_s(\Omega)$	8.5
แรงบิดพิกัด(Nm)	7.5	$R_r(\Omega)$	5
ความเร็วพิกัด(RPM)	1400	L_s(H)	0.483
ความถี่พิกัด(Hz)	50	L_r(H)	0.44
จำนวนขั้วของมอเตอร์	4	M(H)	0.44

ตารางที่ 5.3 ค่าพิกัดและค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ Super Line

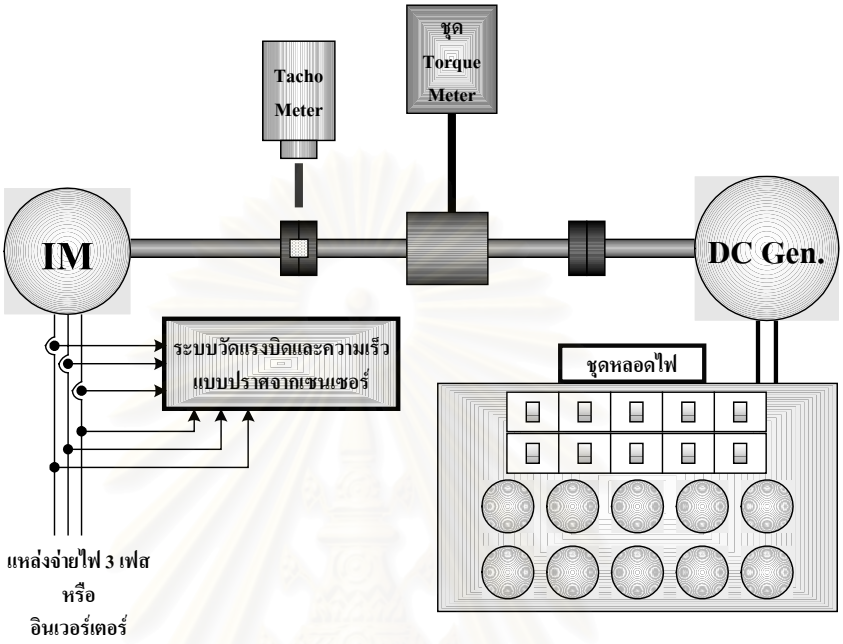
กำลังพิกัด(kW)	1.5	i_{sd}พิกัด(A)	3
แรงดันพิกัด(V)	380	i_{sq}พิกัด(A)	5.4
กระแสพิกัด(A)	3.8	$R_s(\Omega)$	4
แรงบิดพิกัด(Nm)	10	$R_r(\Omega)$	2.61
ความเร็วพิกัด(RPM)	1420	L_s(H)	0.423
ความถี่พิกัด(Hz)	50	L_r(H)	0.399
จำนวนขั้วของมอเตอร์	4	M(H)	0.399

สำหรับผลการทดสอบนั้นเราจะแบ่งเป็น 3 ส่วนคือ ผลการทดสอบระบบวัดแรงบิดและความเร็ว ผลการทดสอบระบบควบคุมความเร็ว และผลการทดสอบระบบควบคุมแรงบิด ตามลำดับ

5.2.1 <u>ผลการทดสอบระบบวัดแรงบิดและความเร็ว</u>

ในการทดสอบระบบวัดค่าแรงบิดและความเร็วของมอเตอร์นั้น เราจะแบ่งการทดสอบเป็นอีก 2 ส่วนย่อย คือ ส่วนการวัดแรงบิด และส่วนการวัดความเร็ว โดยเราจะใช้ระบบทดสอบที่มีลักษณะตามรูปที่ 5.3

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

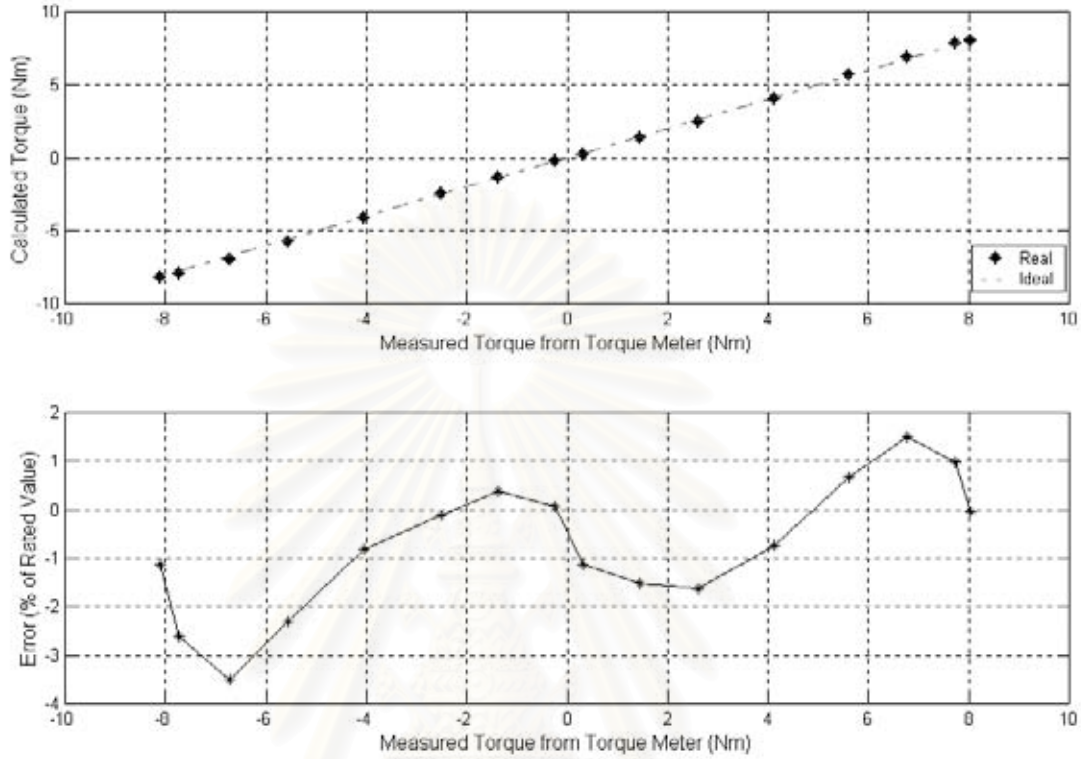


รูปที่ 5.3 ระบบทดสอบการวัดความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์

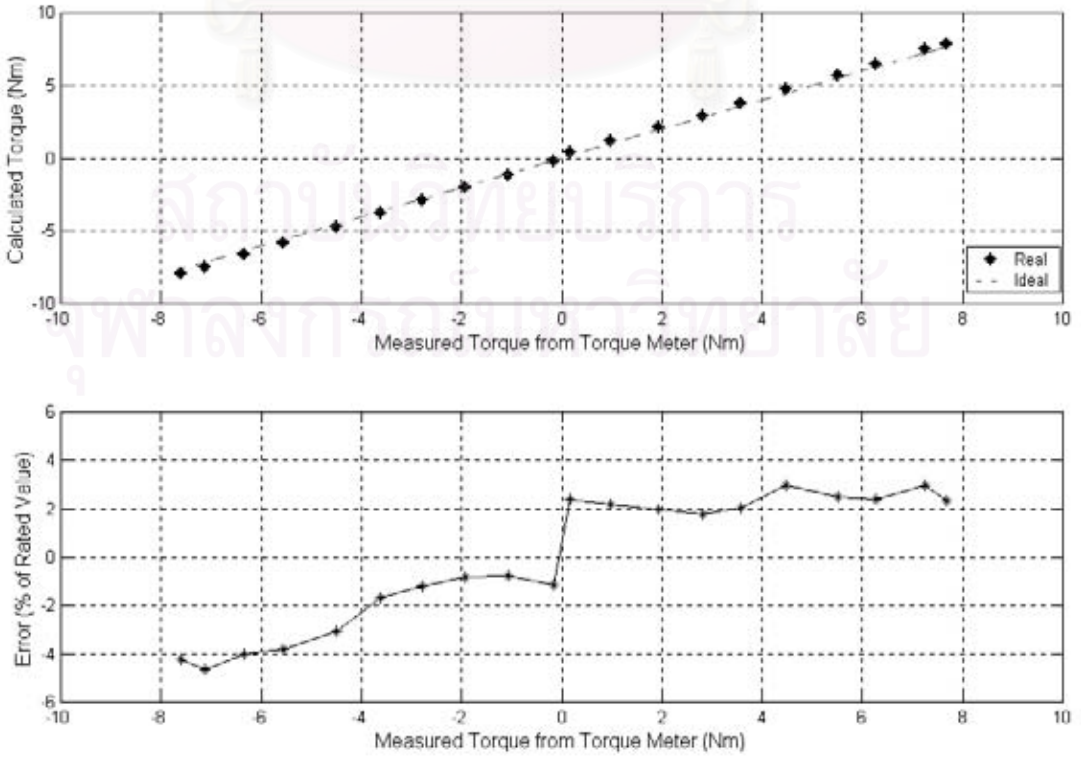
5.2.1.1 ผลการทดสอบการวัดแรงบิดของมอเตอร์

เราจะใช้อินเวอร์เตอร์แบบ V/F จ่ายไฟที่ค่าความถี่ต่างๆให้กับมอเตอร์ SIEMENs เพื่อขับโหลดโดยใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงที่ต่ออยู่กับชุดหลอดไฟเป็นโหลด และวัดค่าแรงบิดด้วยระบบที่สร้างขึ้นเทียบกับค่าที่วัดได้จากเครื่องวัดแรงบิดที่ใช้สเตรนเกจ ซึ่งจะได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 5.4 – 5.7

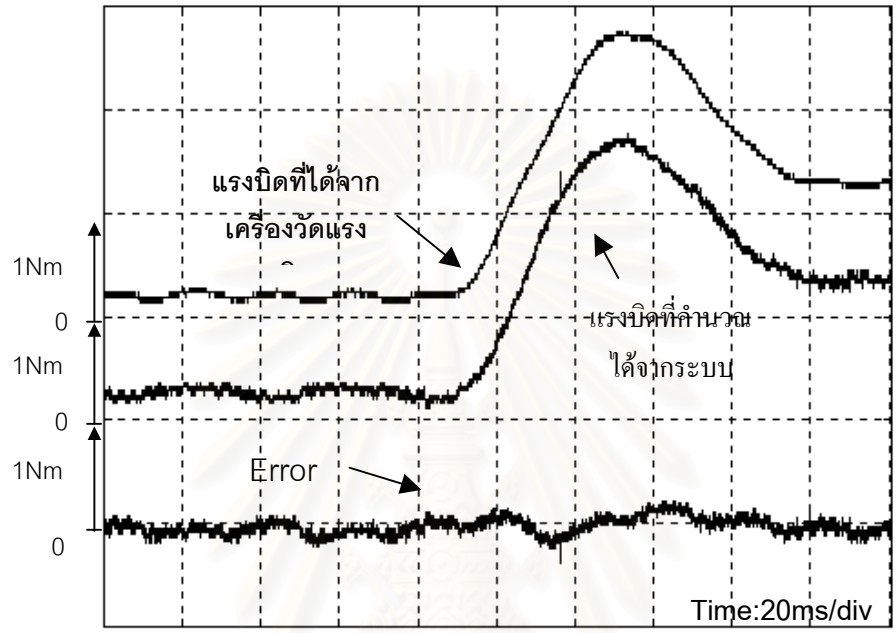
จากผลการทดสอบในรูปที่ 5.4 และ 5.5 จะเห็นว่าระบบสามารถวัดค่าแรงบิดได้โดยมีค่าความผิดพลาดไม่เกินร้อยละ 6 ของค่าแรงบิดพิกัด (7.5Nm) และเมื่อพิจารณาผลการทดสอบในรูปที่ 5.6 และ 5.7 ซึ่งเป็นผลการวัดแรงบิดเมื่อมีการเพิ่มและลดโหลดก็จะเห็นว่าระบบที่สร้างขึ้นนี้สามารถวัดค่าแรงบิดในช่วงภาวะชั่วครู่ (transient) ได้อย่างถูกต้องด้วยเช่นกัน



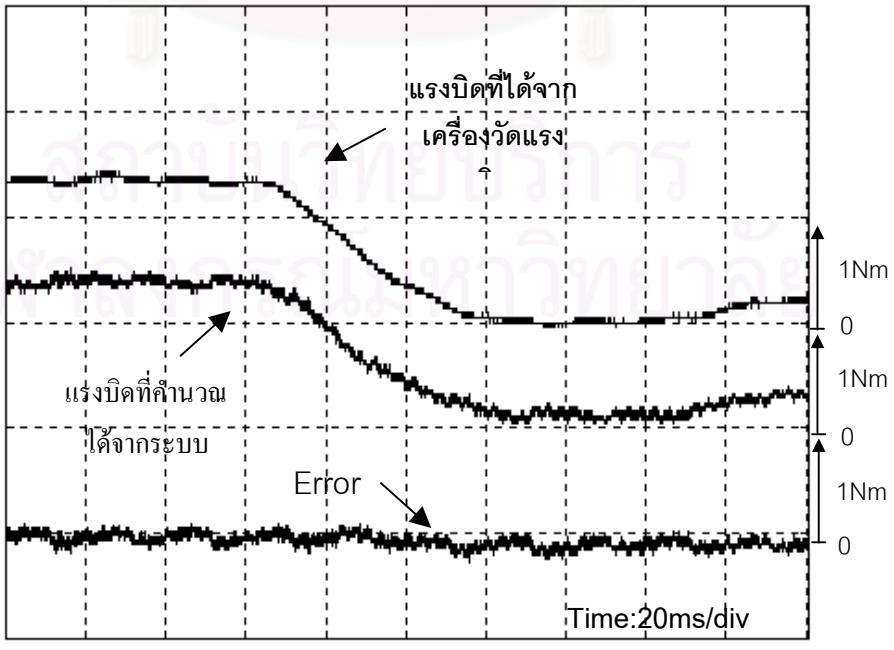
รูปที่ 5.4 กราฟเปรียบเทียบค่าแรงบิดที่คำนวณได้จากระบบที่สร้างขึ้นกับค่าแรงบิดที่วัดได้จากเครื่องวัดแรงบิดที่ความถี่ 50 Hz



รูปที่ 5.5 กราฟเปรียบเทียบค่าแรงบิดที่คำนวณได้จากระบบที่สร้างขึ้นกับค่าแรงบิดที่วัดได้จากเครื่องวัดแรงบิดที่ความถี่ 30 Hz



รูปที่ 5.6 ผลการวัดแรงบิดขณะที่มีการเพิ่มโหลด

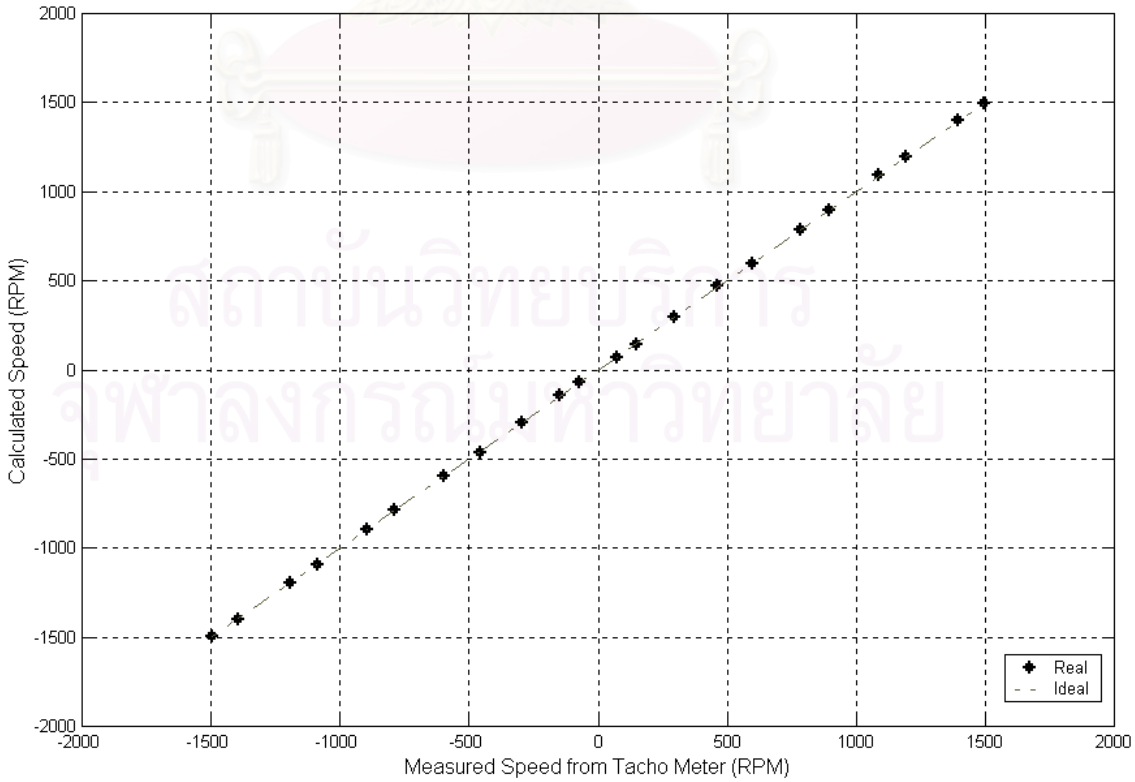


รูปที่ 5.7 ผลการวัดแรงบิดขณะที่มีการลดโหลด

5.2.1.2 ผลการทดสอบการวัดความเร็วของมอเตอร์

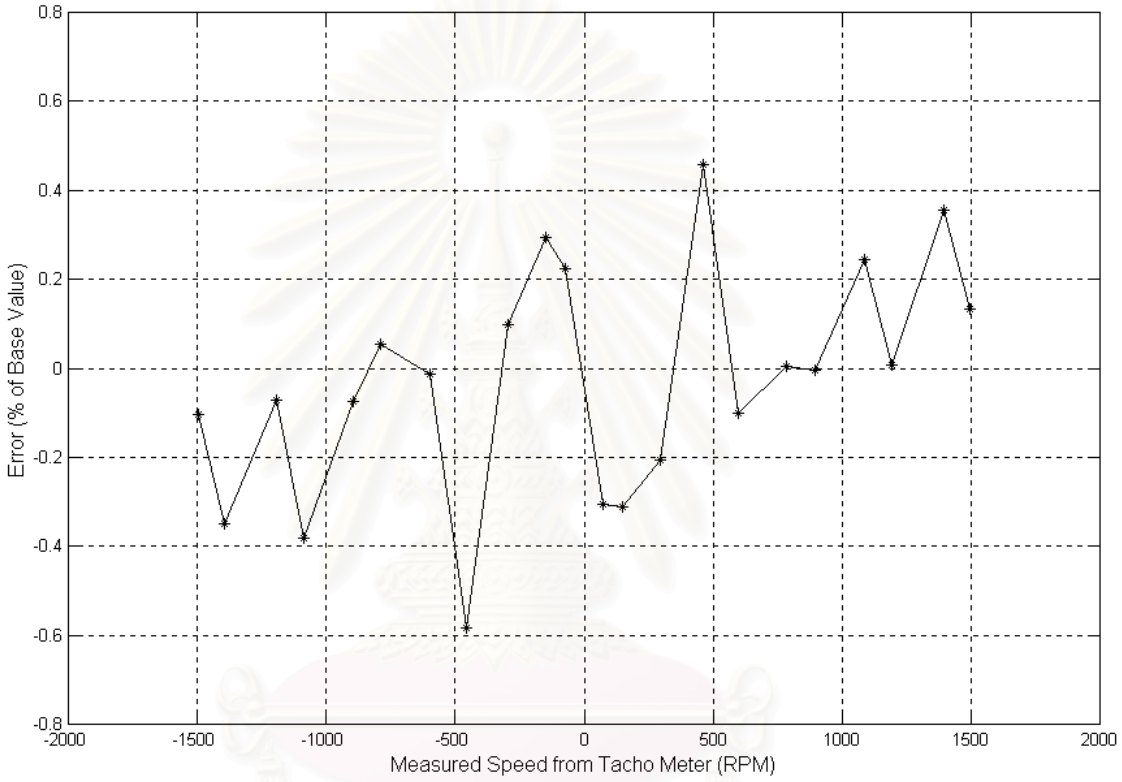
ในการทดสอบการวัดค่าความเร็วของมอเตอร์นั้น เราจะให้มอเตอร์ SIEMENs ทำงานที่ความเร็วค่าต่างๆ โดยใช้อินเวอร์เตอร์ช่วยในการปรับความเร็วและวัดค่าความเร็วด้วยระบบที่สร้างขึ้นเทียบกับค่าที่วัดได้จากแทโคมิเตอร์ ซึ่งจะได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 5.8 – 5.12

จากผลการทดสอบในรูปที่ 5.8 และ 5.9 จะเห็นว่าระบบสามารถวัดค่าความเร็วในสภาวะอยู่ตัวได้โดยมีค่าความผิดพลาดไม่เกินร้อยละ 0.6 ของค่าความเร็วฐาน (1500RPM) ของมอเตอร์ ส่วนผลการทดสอบในรูปที่ 5.10, 5.11 และ 5.12 ซึ่งเป็นผลการทดสอบการวัดความเร็วเมื่อมีการสั่งอินเวอร์เตอร์ให้เร่ง ลด และกลับทิศความเร็วของมอเตอร์ที่ค่าความถี่ 50Hz, 30Hz และ 10Hz ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าระบบที่สร้างขึ้นนี้สามารถวัดค่าความเร็วในช่วงสภาวะชั่วครู่ ได้

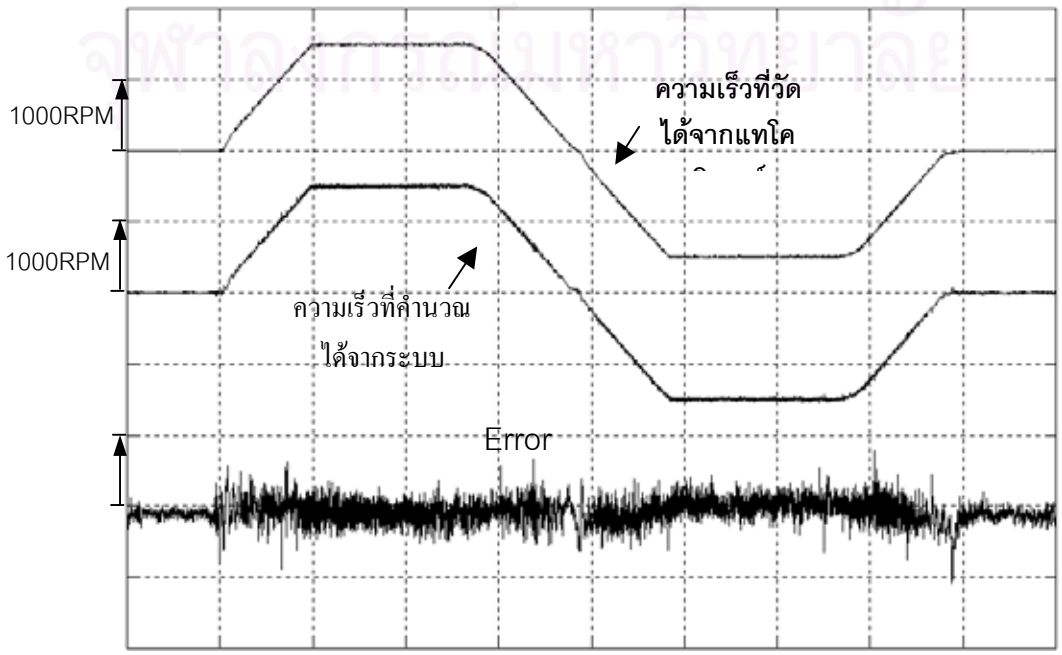


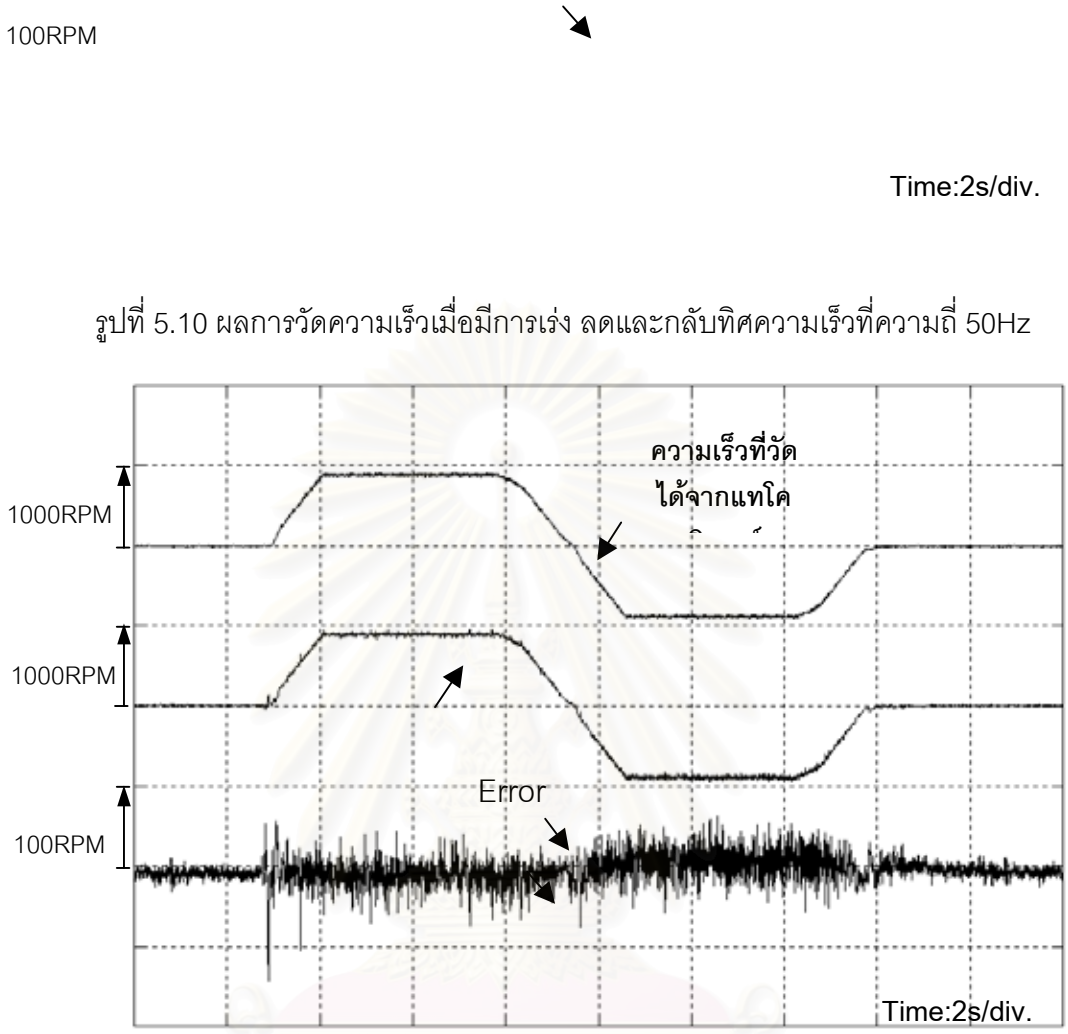
รูปที่ 5.8 กราฟเปรียบเทียบค่าความเร็วที่คำนวณได้จากระบบที่สร้างขึ้นกับค่าความเร็วที่วัดได้จาก

แทโคมิเตอร์



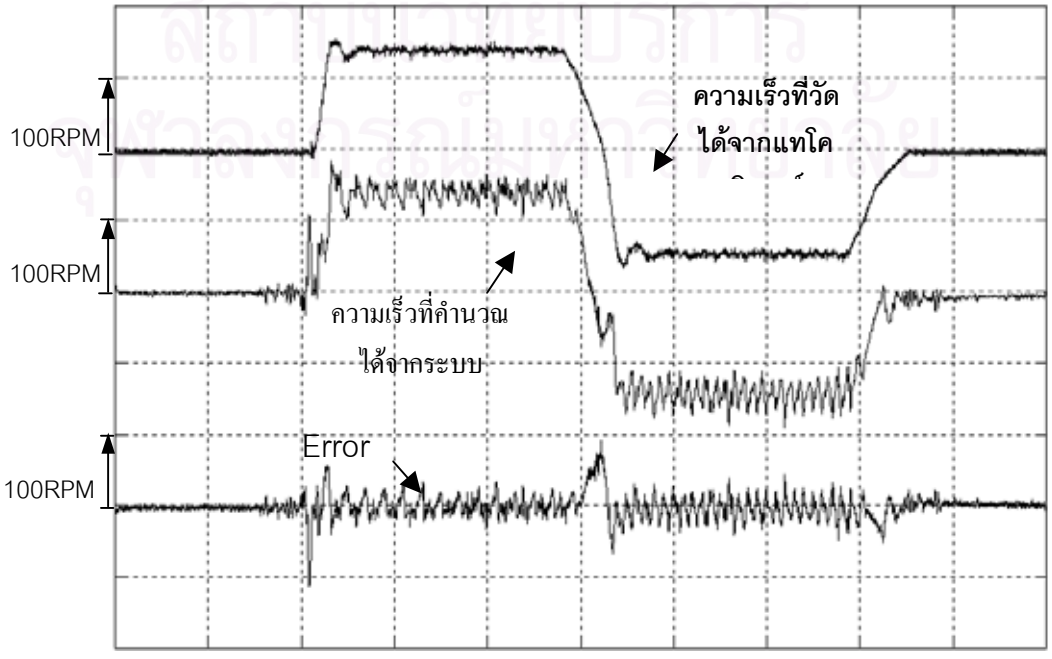
รูปที่ 5.9 กราฟแสดงค่าความผิดพลาดในการวัดค่าความเร็วที่ค่าความเร็วต่างๆ





รูปที่ 5.10 ผลการวัดความเร็วเมื่อมีการเร่ง ลดและกลับทิศความเร็วที่ความถี่ 50Hz

รูปที่ 5.11 ผลการวัดความเร็วเมื่อมีการเร่ง ลดและกลับทิศความเร็วที่ความถี่ 30Hz

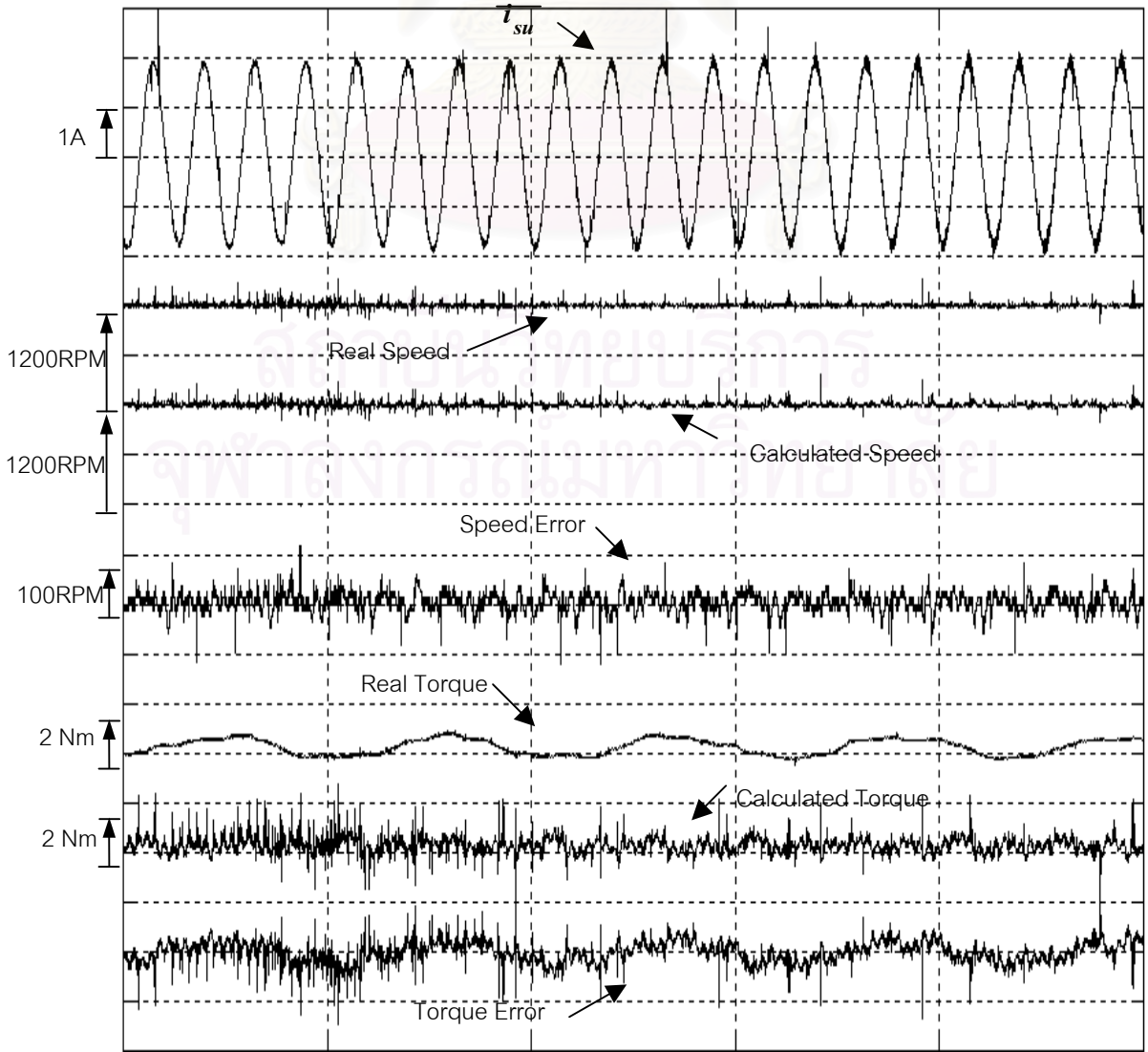


Time:2s/div.

รูปที่ 5.12 ผลการวัดความเร็วเมื่อมีการเร่ง ลดและกลับทิศความเร็วที่ความถี่ 5Hz

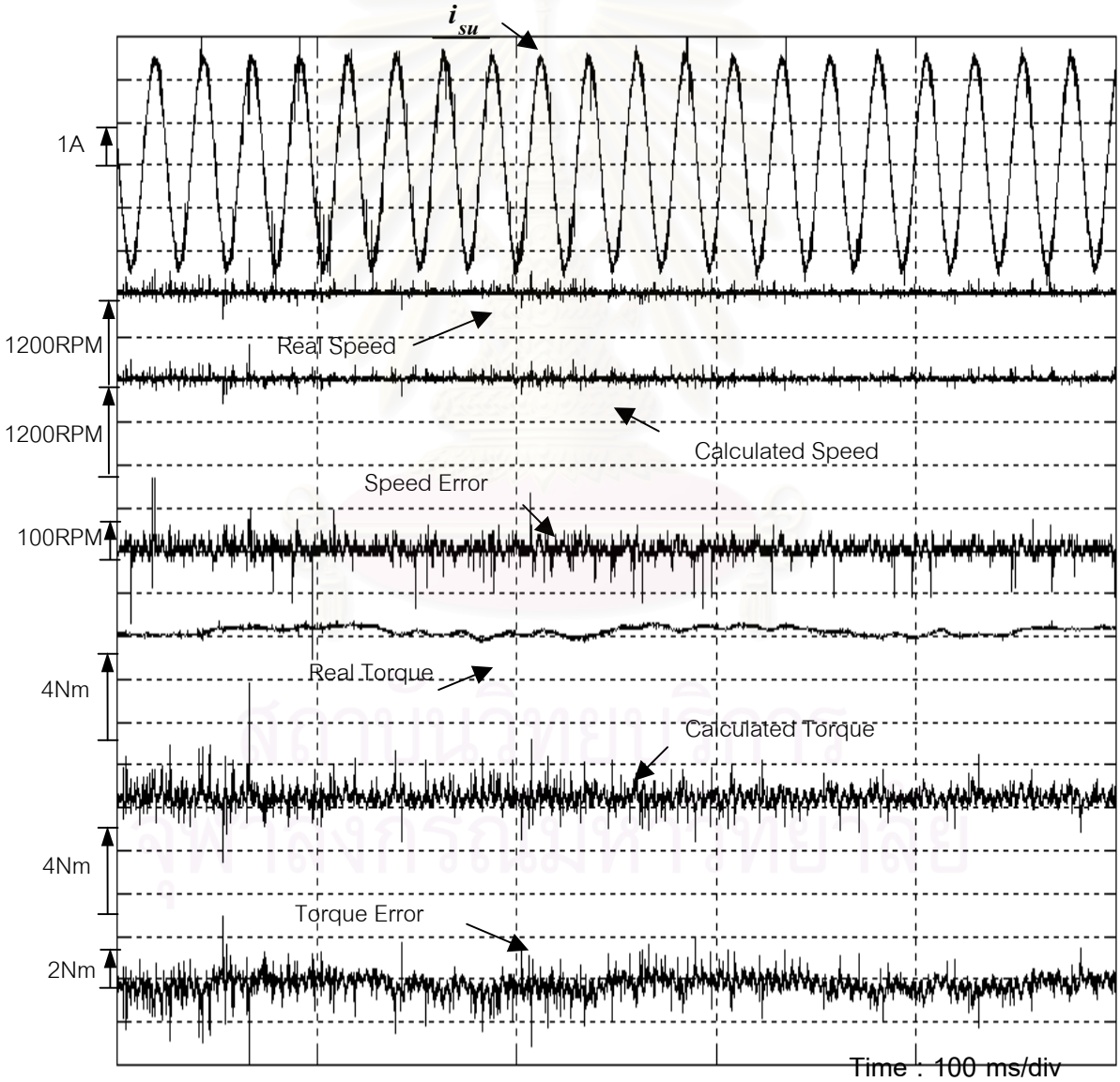
5.2.2 <u>ผลการทดสอบระบบควบคุมความเร็ว</u>

ในการทดสอบระบบควบคุมความเร็วของมอเตอร์นั้น เราจะยังคงใช้ระบบทดสอบที่มีลักษณะดังรูปที่ 5.3 โดยเราจะควบคุมมอเตอร์ให้ทำหน้าที่เป็นตัวขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงที่มีโหลดเป็นชุดหลอดไฟ ณ ค่าความเร็วต่างๆ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ เราทำการทดสอบในลักษณะคล้ายกับการทดลองคุณสมบัติพื้นฐานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยมีมอเตอร์เป็นตัวต้นกำลังนั่นเอง ซึ่งผลการทดลองจะแสดงได้ดังรูปที่ 5.13 - 5.23

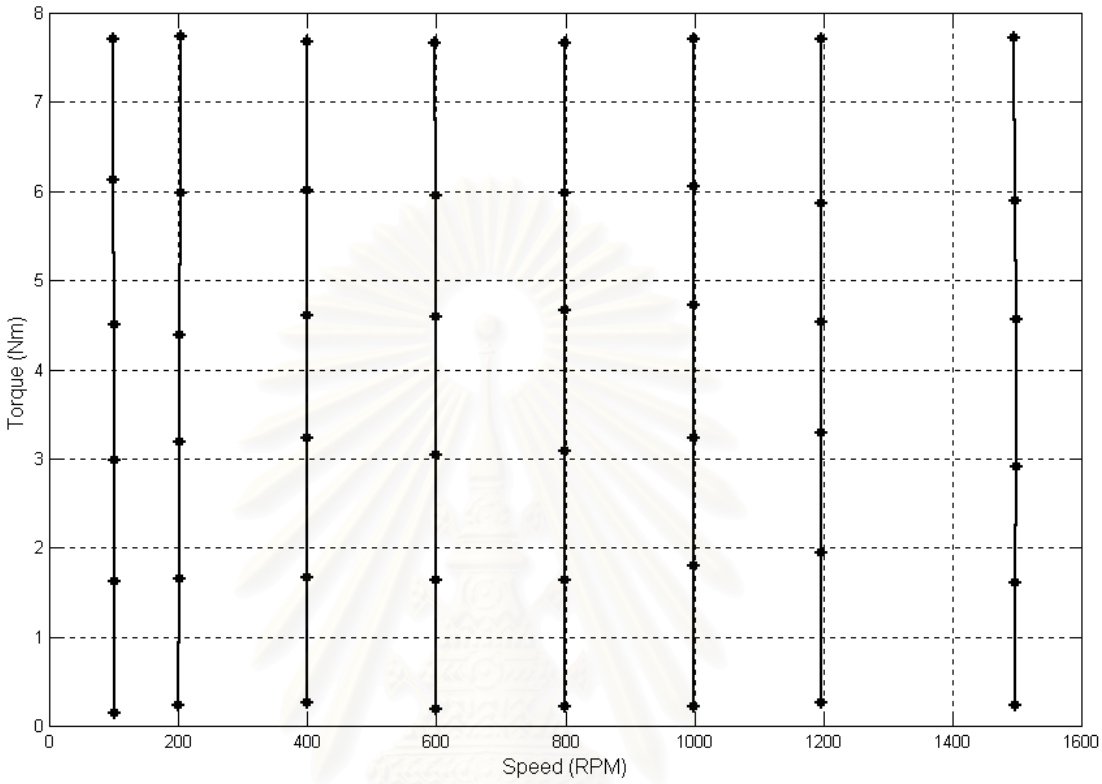


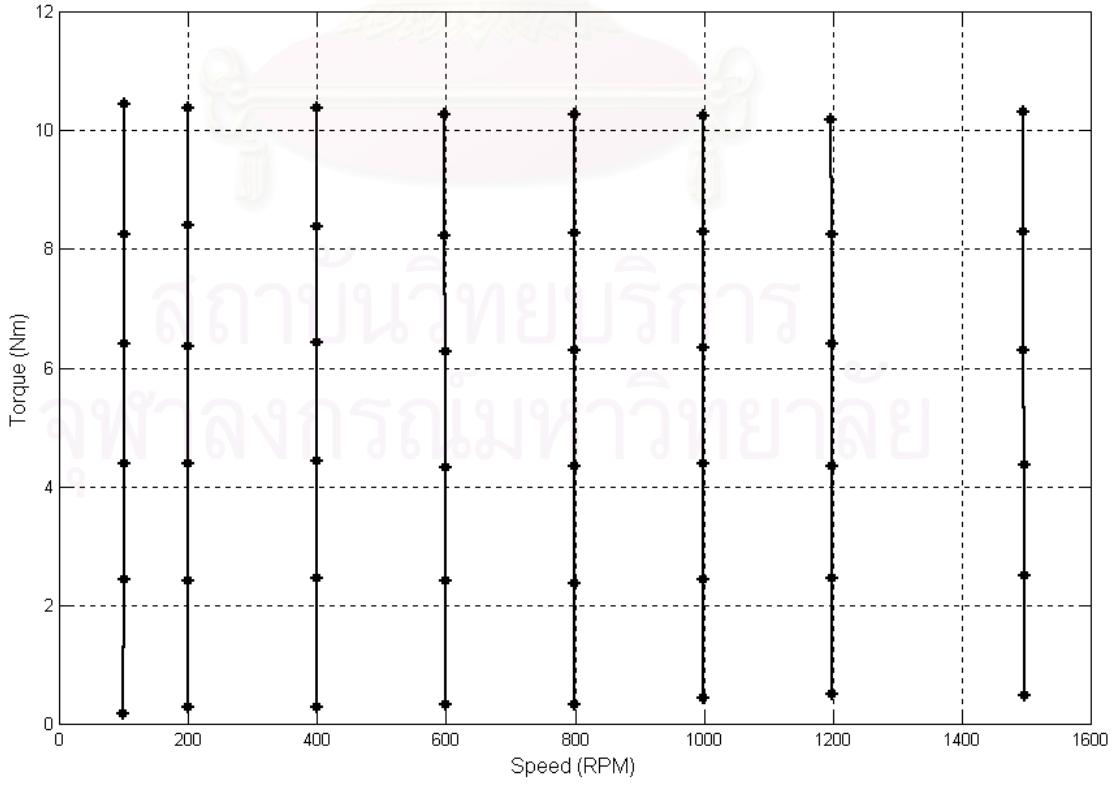
Time : 100 ms/div

รูปที่ 5.13 ผลการทำงานของระบบที่ความเร็วคำสั่ง 1200 RPM ขณะที่ไม่มีโหลด



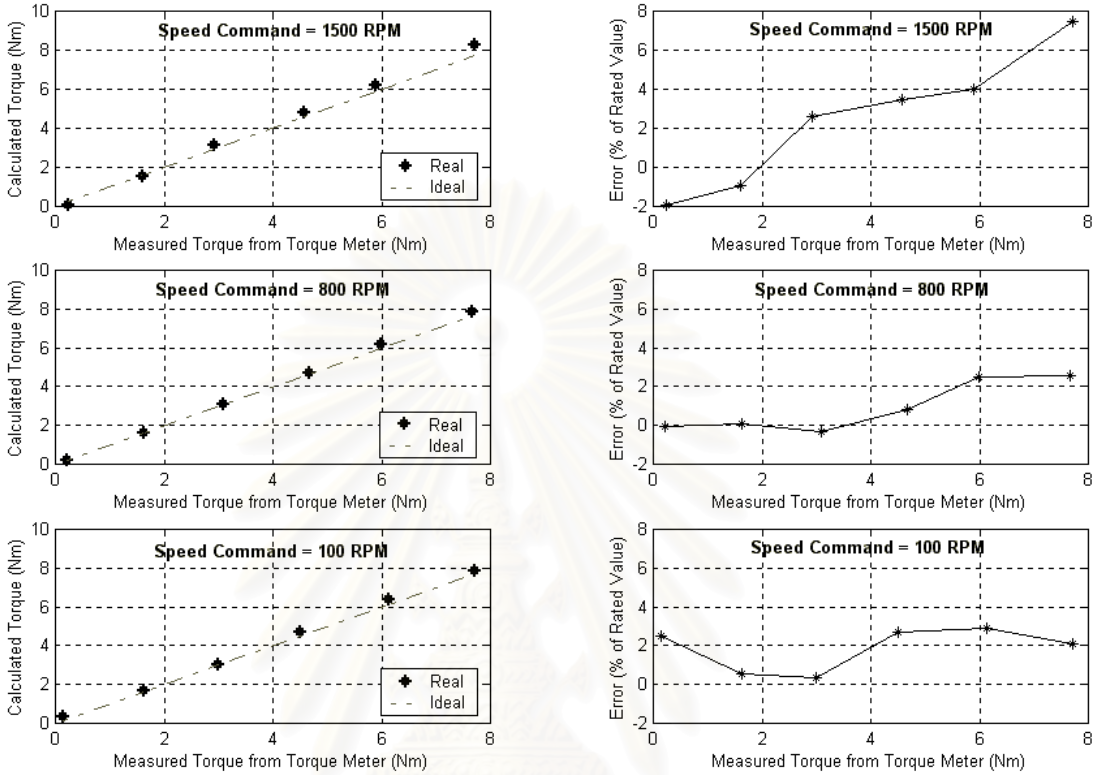
รูปที่ 5.14 ผลการทำงานของระบบที่ความเร็วคำสั่ง 1200 RPM ขณะที่มีโหลด 4 Nm



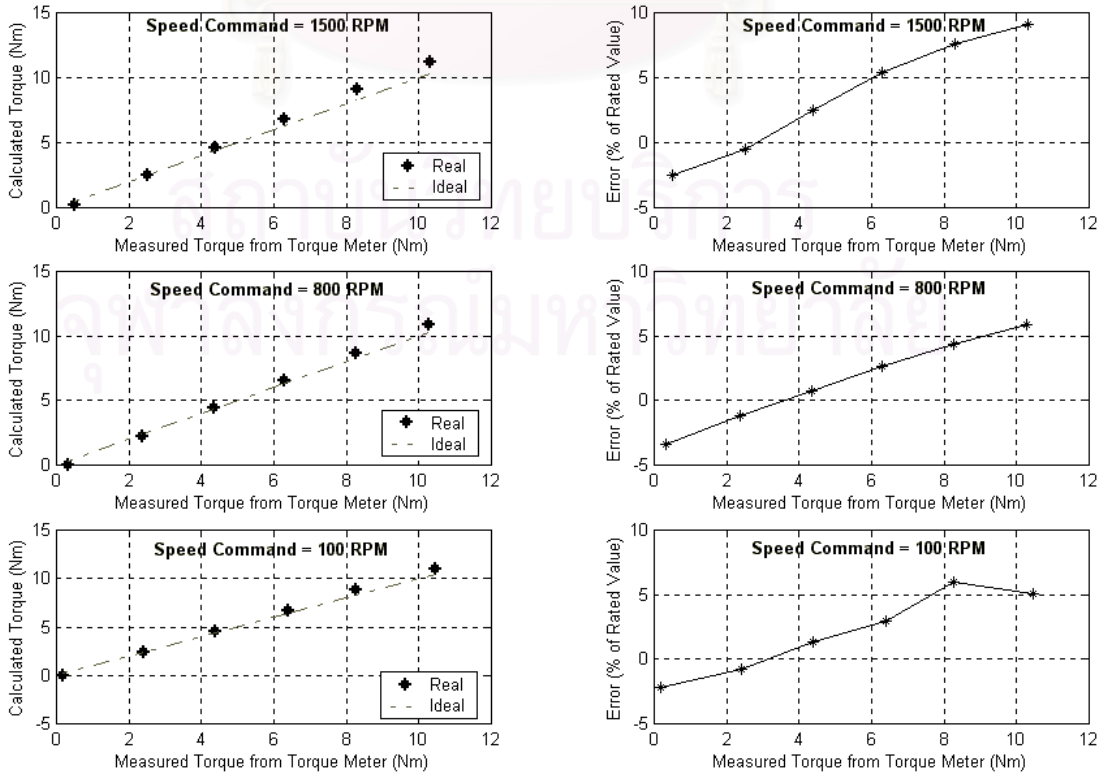


สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

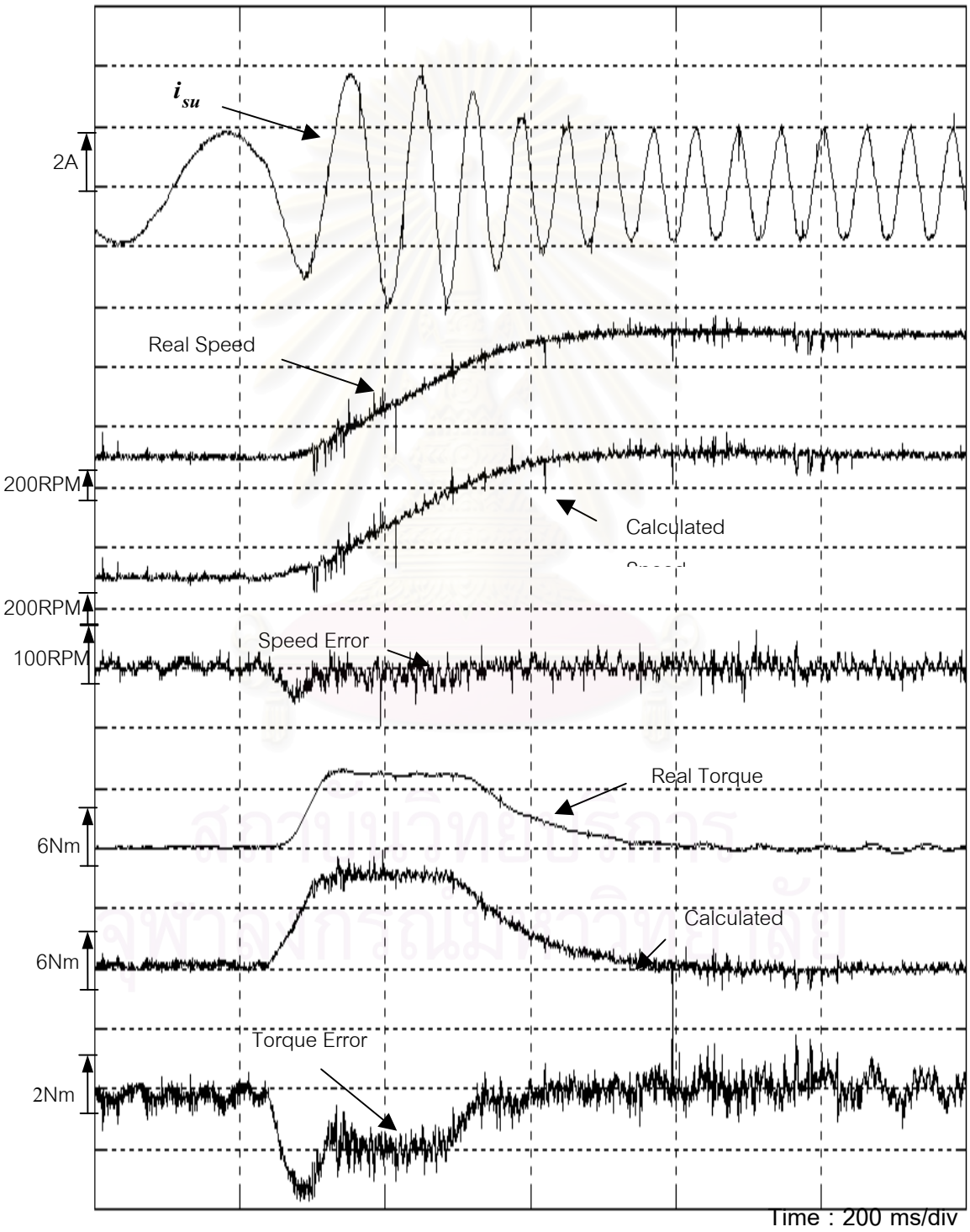
รูปที่ 5.16 กราฟลักษณะสมบัติแรงบิด-ความเร็วของมอเตอร์ SuperLine เมื่อทำการควบคุมความเร็ว



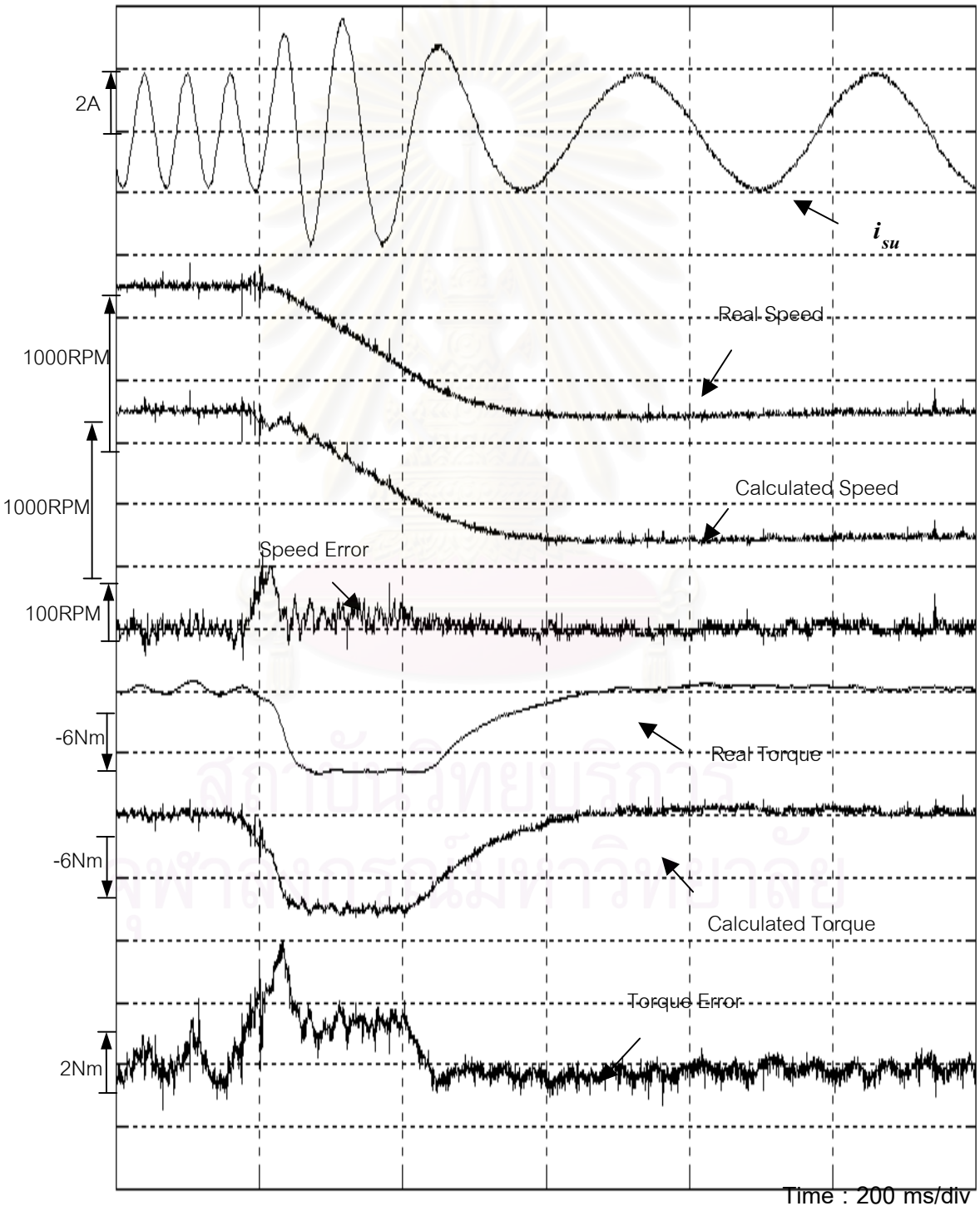
รูปที่ 5.17 ผลการวัดแรงบิดของมอเตอร์ SIEMENs ที่ความเร็วคำสั่งต่างๆ



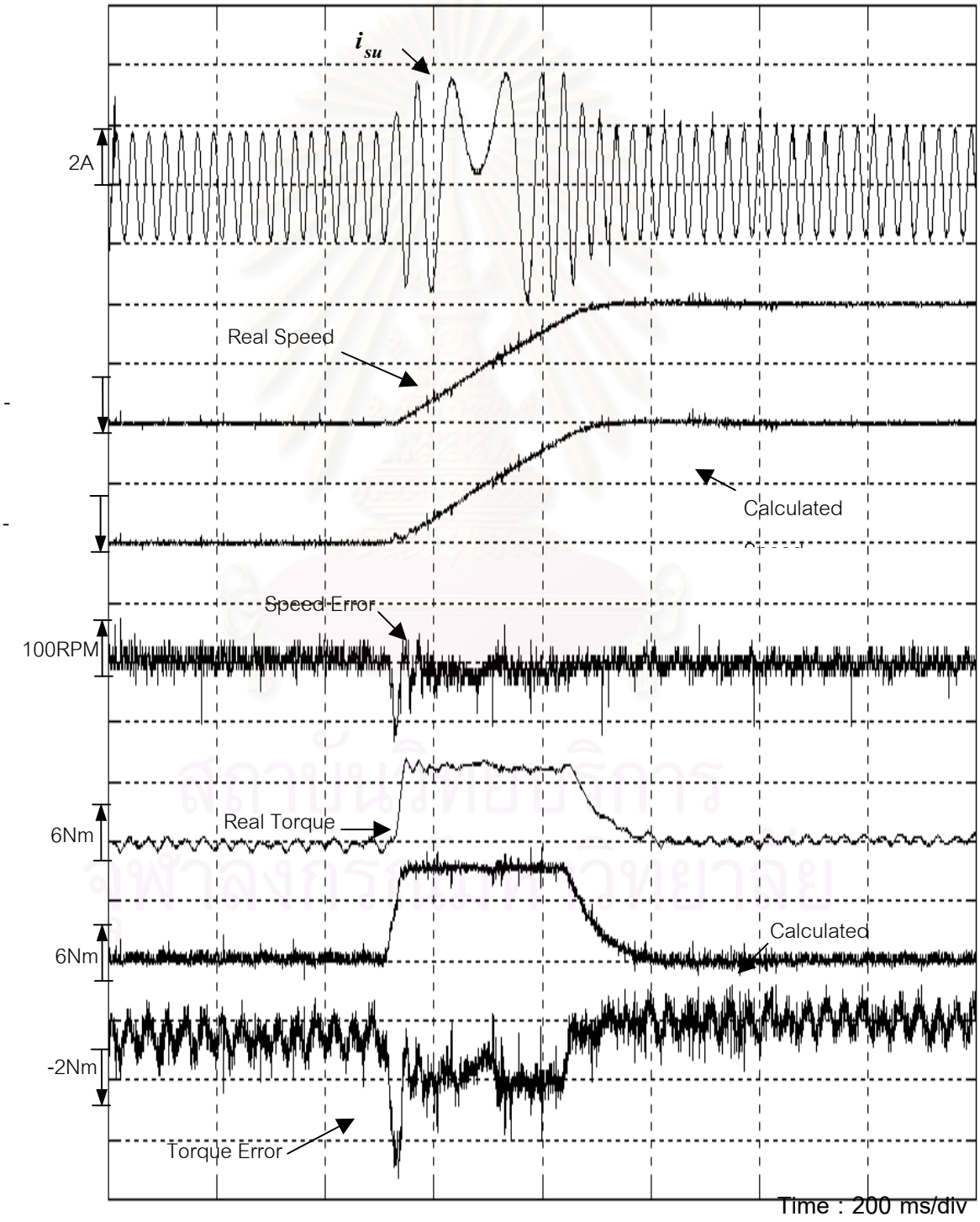
รูปที่ 5.18 ผลการวัดแรงบิดของมอเตอร์ Super Line ที่ความเร็วคำสั่งต่างๆ



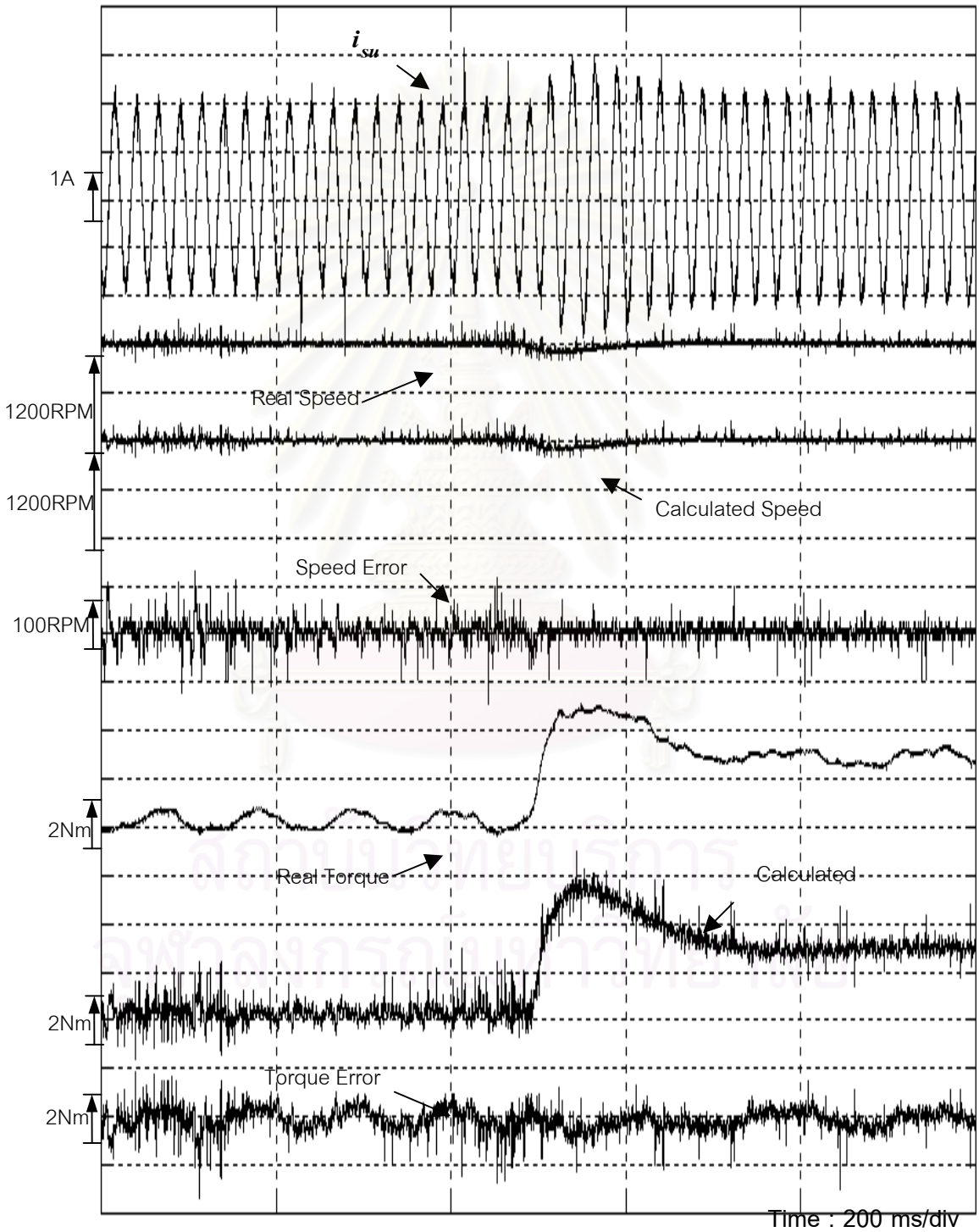
รูปที่ 5.19 ผลการทำงานของระบบโดยเร่งความเร็วจาก 200 RPM เป็น 1000 RPM



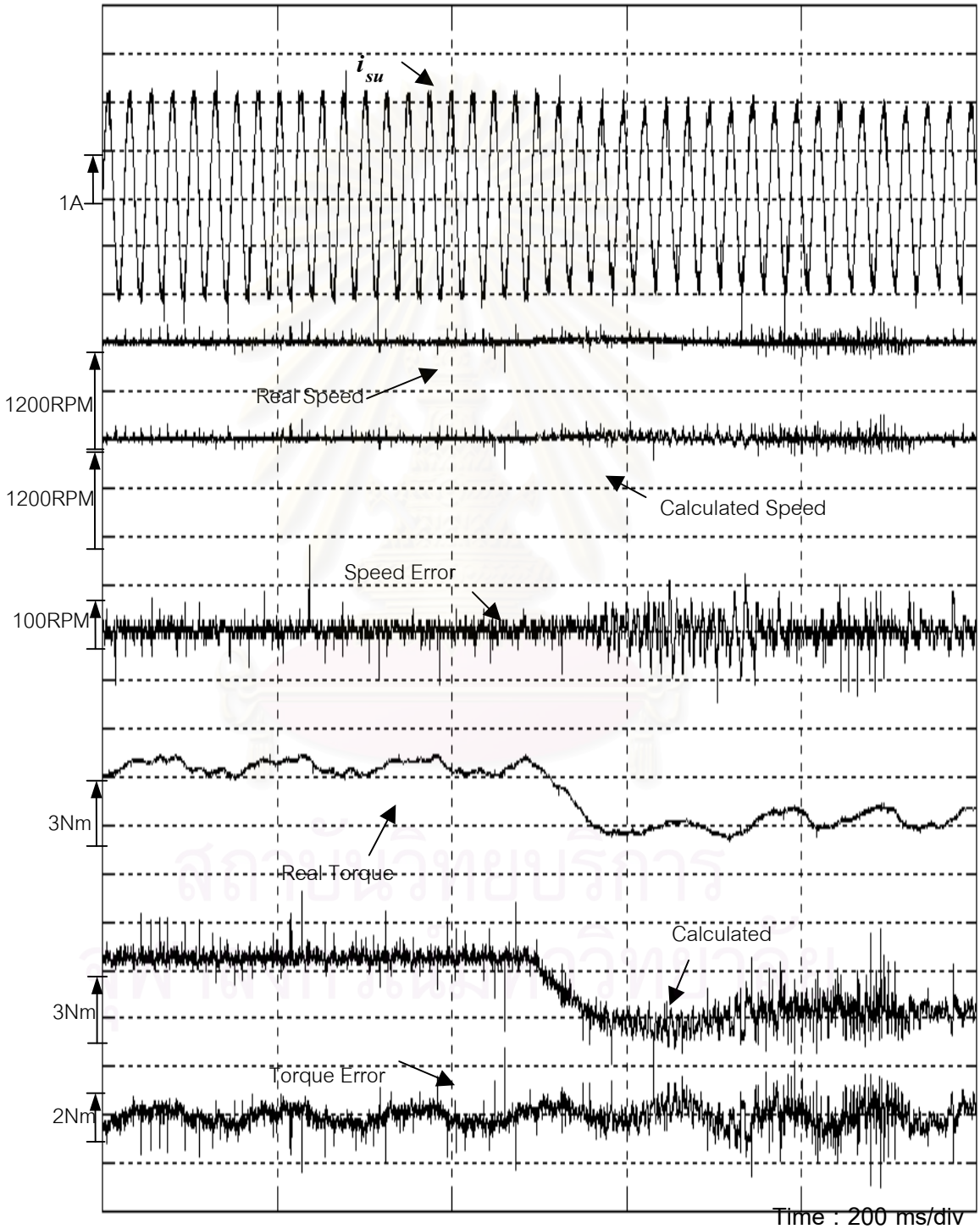
รูปที่ 5.20 ผลการทำงานของระบบโดยลดความเร็วจาก 1000 RPM เป็น 200 RPM



รูปที่ 5.21 ผลการทำงานของระบบโดยการกลับทิศความเร็วจาก -1000 RPM-> 1000 RPM



รูปที่ 5.22 ผลการทำงานของระบบโดยการเพิ่มโหลดแบบขั้นจาก 0 Nm เป็น 3 Nm
ที่ความเร็วคำสั่ง 1200 RPM



รูปที่ 5.23 **ผลการทำงานของระบบโดยการลดโหลดแบบขั้นจาก** 3 Nm **เป็น** 0 Nm ที่ความเร็วคำสั่ง 1200 RPM

ผลการทดลองในรูปที่ 5.13 และ 5.14 แสดงให้เห็นว่าระบบควบคุมสามารถควบคุมความเร็ว รวมทั้งคำนวณค่าความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์ได้อย่างถูกต้องในสภาวะอยู่ตัวทั้งในกรณีที่มอเตอร์ทำงานแบบมีหรือไม่มีโหลด และเมื่อเราทดลองสั่งความเร็วมอเตอร์ที่ 1500 RPM, 1200 RPM, 1000 RPM, 800 RPM, 600 RPM, 400 RPM, 200 RPM, 150 RPM และ 100 RPM แล้วนำค่าความเร็วจริงของมอเตอร์ที่วัดได้จากแทคโคมิเตอร์ ณ ค่าโหลดต่างๆในสภาวะอยู่ตัวมาเขียนเป็นกราฟลักษณะสมบัติแรงบิด-ความเร็วของมอเตอร์ก็จะได้ผลเป็นดังรูปที่ 5.15 และ 5.16 ซึ่งจากรูปจะพบว่ากราฟลักษณะสมบัติแรงบิด-ความเร็วของมอเตอร์มีลักษณะเป็นเส้นตรงในแนวตั้งอันสะท้อนให้เห็นว่าเราสามารถควบคุมความเร็วของมอเตอร์ได้ดี กล่าวคือ ความเร็วของมอเตอร์ที่ได้ ณ ค่าความเร็วคำสั่งหนึ่งๆจะถูกควบคุมให้มีค่าค่อนข้างคงที่และผิดพลาดไปจากค่าความเร็วคำสั่งไม่มากนักที่ทุกๆค่าความเร็ว ส่วนผลการคำนวณค่าแรงบิดขณะที่มีการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ก็มีค่าผิดพลาดไม่เกินร้อยละ 10 ของค่าแรงบิดพิกัดดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 5.17 และ 5.18

จากผลการทดสอบระบบเมื่อมีการสั่งเพิ่ม ลดและกลับทิศความเร็วของมอเตอร์ในรูปที่ 5.19, 5.20 และ 5.21 จะเห็นได้ว่าระบบควบคุมสามารถควบคุมให้ความเร็วของมอเตอร์เปลี่ยนแปลงไปตามคำสั่งได้อย่างถูกต้อง แต่อย่างไรก็ตามจากผลการทดลองเราจะสังเกตเห็นว่าการคำนวณค่าความเร็วและแรงบิดนั้นจะเกิดความผิดพลาดขึ้นในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วโหลด และเมื่อพิจารณาค่าแรงบิดที่คำนวณได้เปรียบเทียบกับค่าแรงบิดจริงที่วัดได้จากชุดวัดแรงบิดที่ใช้สเตรนเกจ เราจะสังเกตเห็นว่าค่าแรงบิดที่คำนวณได้ในช่วงภาวะชั่วครู่ (ช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็ว) จะมีค่ามากกว่าค่าแรงบิดจริง ทั้งนี้เป็นเพราะชุดวัดแรงบิดที่ใช้สเตรนเกจนั้นจะสามารถวัดแรงบิดที่เกิดจากทางด้านโหลดได้เท่านั้น ซึ่งหากเราพิจารณาจากสมการของแรงบิดที่เกิดขึ้นจริงที่มอเตอร์และสมการของแรงบิดที่เกิดขึ้นที่โหลดดังสมการ (5.7) จะพบว่าค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นจริงที่มอเตอร์นั้นมีค่ามากกว่าแรงบิดที่โหลดอยู่เท่ากับ $J_m \frac{d\omega_m}{dt}$ ดังนั้นค่าแรงบิดที่ระบบคำนวณได้ซึ่งเป็นค่าแรงบิดที่เกิดที่มอเตอร์นั้นจึงมีค่ามากกว่าค่าแรงบิดที่วัดได้จากชุดวัดแรงบิดที่ใช้สเตรนเกจซึ่งเป็นค่าแรงบิดที่เกิดทางด้านโหลดเพียงอย่างเดียว

$$\tau_m = J_m \frac{d\omega_m}{dt} + \tau_L = J_m \frac{d\omega_m}{dt} + J_L \frac{d\omega_m}{dt} + T_L \qquad (5.7)$$

เมื่อ τ_m, τ_L คือ แรงบิดทั้งหมดที่เกิดทางด้านมอเตอร์และโหลดตามลำดับ

J_m, J_L คือค่าความเฉื่อย (Inertia) ของมอเตอร์และโหลดตามลำดับ

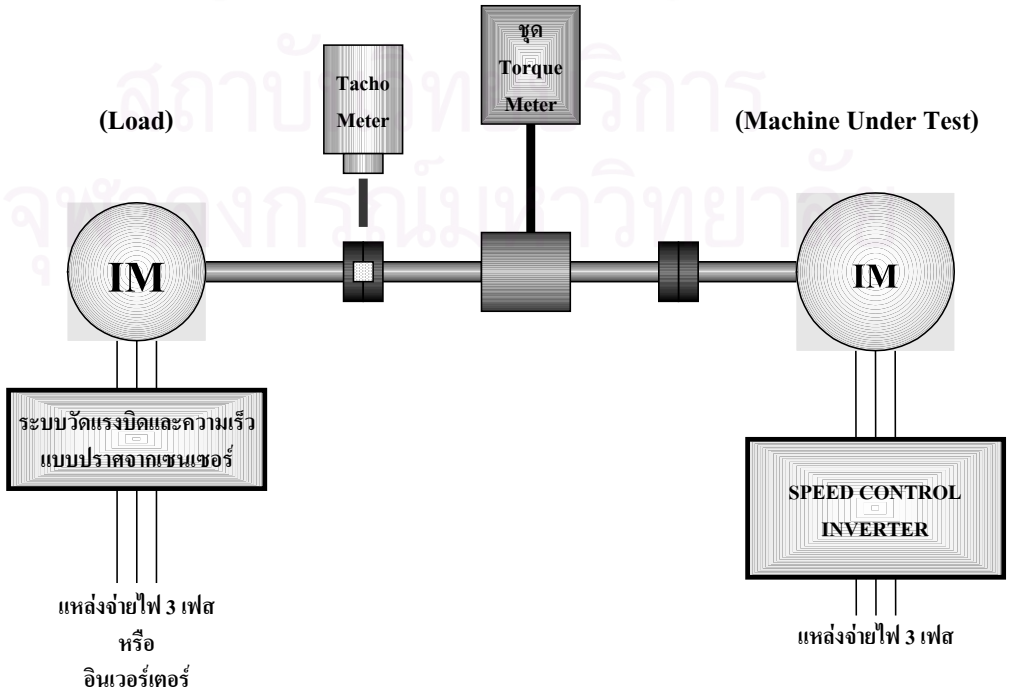
T_L คือ แรงบิดที่เกิดจากโหลด

นอกจากนี้เรายังจะสังเกตเห็นได้ว่าค่าแรงบิดที่คำนวณได้มีการเปลี่ยนแปลงในช่วงภาวะชั่วครู่ไวกว่าค่าแรงบิดจริง เนื่องจากชุดวัดแรงบิดที่ใช้สเตรนเกจนั้นจะมีการใส่ตัวกรองผ่านความถี่ต่ำอันดับ 1 ที่มีค่าความถี่หักมุมที่ 30 เฮิรตซ์ เพื่อลดผลของสัญญาณรบกวน จึงทำให้ผลตอบสนองของแรงบิดที่วัดได้จากชุดวัดแรงบิดช้ากว่าผลตอบสนองของแรงบิดที่ระบบคำนวณได้นั่นเอง

ผลการทดลองในกรณีที่มีการเพิ่มและลดโหลดของมอเตอร์แสดงได้รูปที่ 5.22 และ 5.23 เราจะเห็นว่าความเร็วของมอเตอร์ยังคงถูกควบคุมตามค่าคำสั่งได้ โดยจะมีความผิดพลาดไปจากค่าความเร็วคำสั่งเพียงเล็กน้อยในช่วงเวลาสั้นๆ ขณะที่เราทำการเพิ่มและลดโหลด

5.2.3 <u>ผลการทดสอบระบบควบคุมแรงบิด</u>

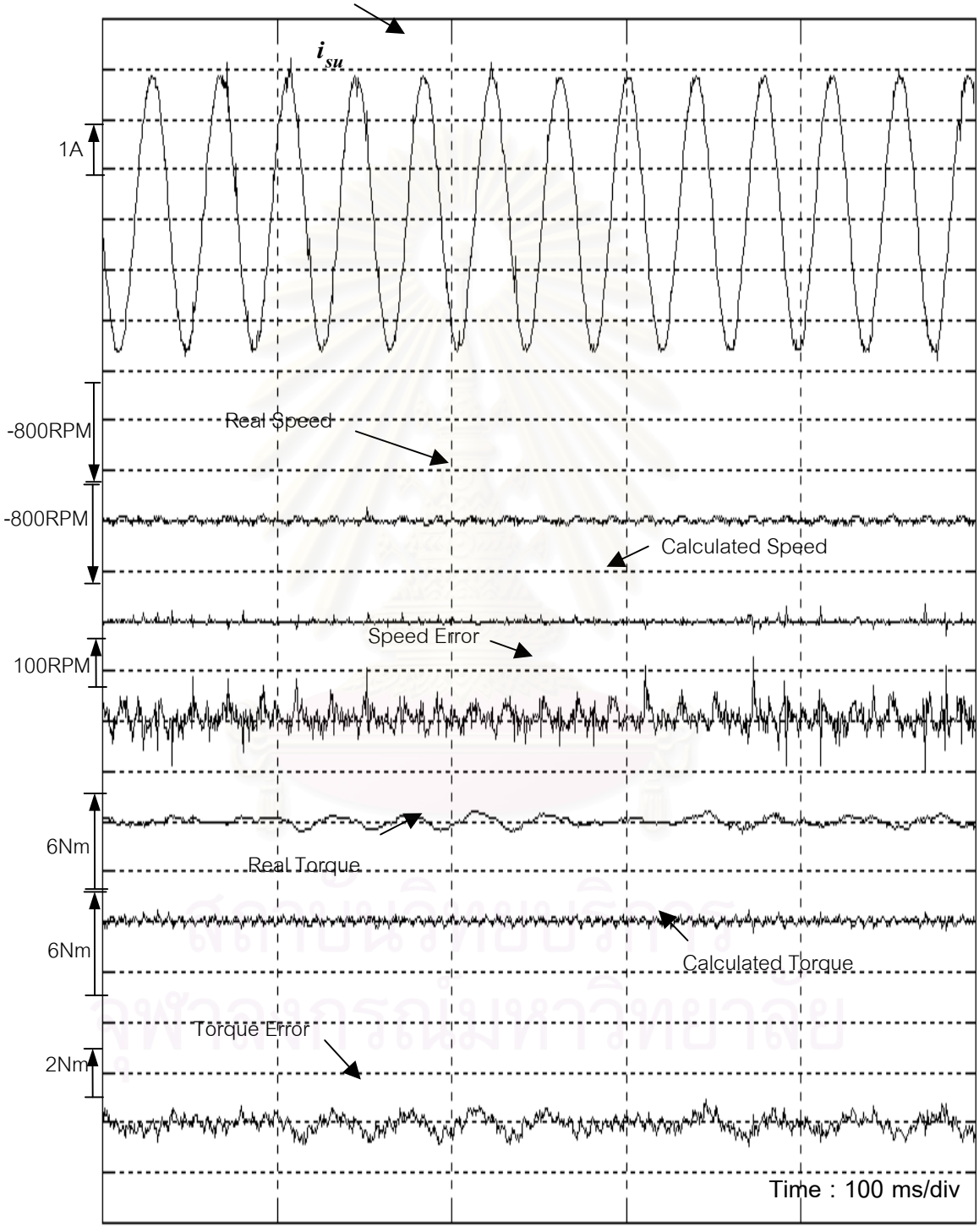
ในการทดสอบระบบควบคุมแรงบิดของมอเตอร์ เราจะใช้ระบบทดสอบที่มีลักษณะดังรูปที่ 5.24 โดยเราจะควบคุมมอเตอร์ทางด้านซ้ายมือในรูปให้ทำหน้าที่เป็นโหลดให้กับทางด้านขวามือซึ่งถูกควบคุมความเร็วอยู่ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ เราจะควบคุมแรงบิดที่เพลาของระบบเพื่อทดสอบคุณสมบัติโหลดของมอเตอร์ทางด้านขวามือเหมือนกับระบบควบคุมแรงบิดมอเตอร์ที่เราจำลองการทำงานในบทที่ 4 นั่นเอง ซึ่งผลการทดลองนั้นจะแสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 5.25 - 5.31



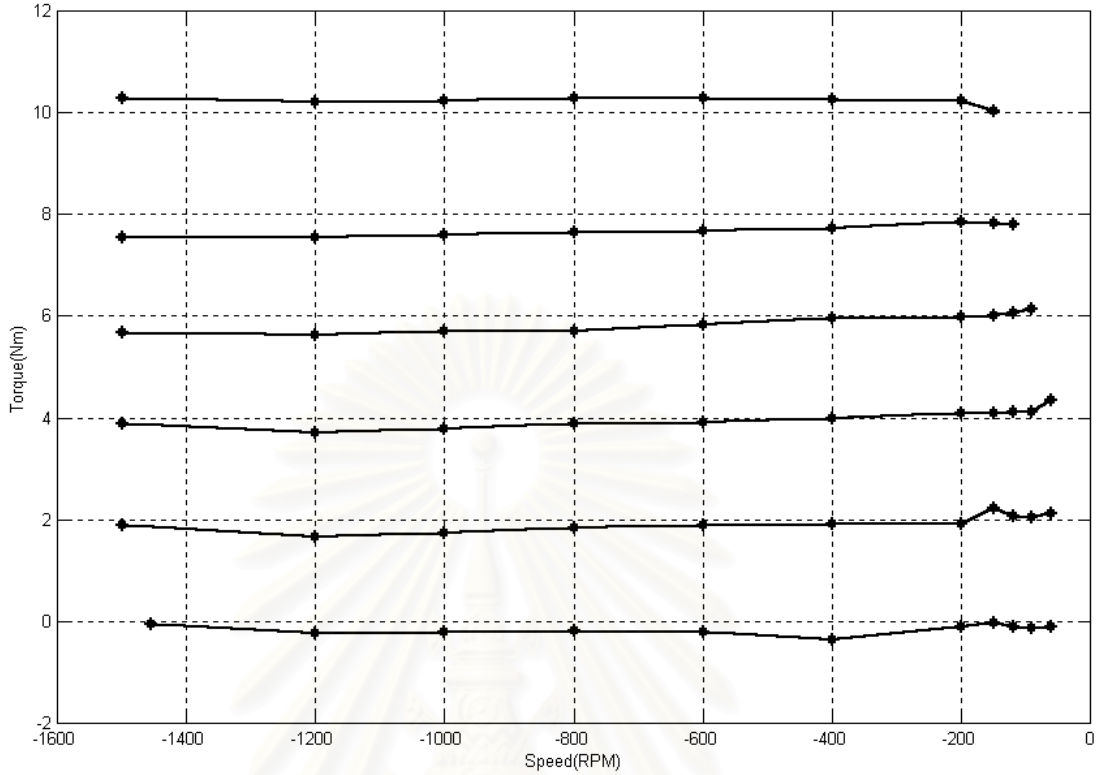
รูปที่ 5.24 ระบบทดสอบการควบคุมแรงบิดของมอเตอร์

ผลการทดลองในรูปที่ 5.25 แสดงให้เห็นว่าระบบควบคุมสามารถควบคุมแรงบิด รวมทั้งคำนวณค่าความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์ได้อย่างถูกต้องในสภาวะอยู่ตัว และเมื่อเราทดลองสั่งค่าแรงบิดของมอเตอร์ที่ ที่ 10.8 Nm, 8 Nm, 6 Nm, 4 Nm, 2 Nm และ 0 Nm แล้วนำค่าแรงบิดจริงของมอเตอร์ที่วัดได้ชุดวัดแรงบิดที่ใช้สเตรนเกจ ณ ค่าความเร็วต่างๆในสภาวะอยู่ตัวมาเขียนเป็นกราฟลักษณะสมบัติแรงบิด-ความเร็วของมอเตอร์ก็จะได้ผลเป็นดังรูปที่ 5.26 ซึ่งจากรูปจะพบว่ากราฟลักษณะสมบัติแรงบิด-ความเร็วของมอเตอร์มีลักษณะที่ค่อนข้างจะเป็นเส้นตรงในแนวนอนอันสะท้อนให้เห็นว่าเราสามารถควบคุมความแรงบิดของของมอเตอร์ได้ดีพอสมควร แต่อย่างไรก็ตามเราจะสังเกตเห็นว่าระบบควบคุมไม่สามารถควบคุมแรงบิดได้ที่ความเร็วต่ำ (< 150 RPM) ซึ่งอาจเป็นผลมาจากความคลาดเคลื่อนของค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ รวมไปถึงผลของเวลาประวิง (Dead-time) ที่ชดเชยไม่หมดทำให้การคำนวณและการควบคุมขาดเสถียรภาพ ส่วนผลการคำนวณค่าความเร็วขณะที่มีการควบคุมแรงบิดของมอเตอร์นั้นมีค่าผิดพลาดไม่เกินร้อยละ 1 ของค่าความเร็วฐาน (1500 RPM) ของมอเตอร์ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 5.27

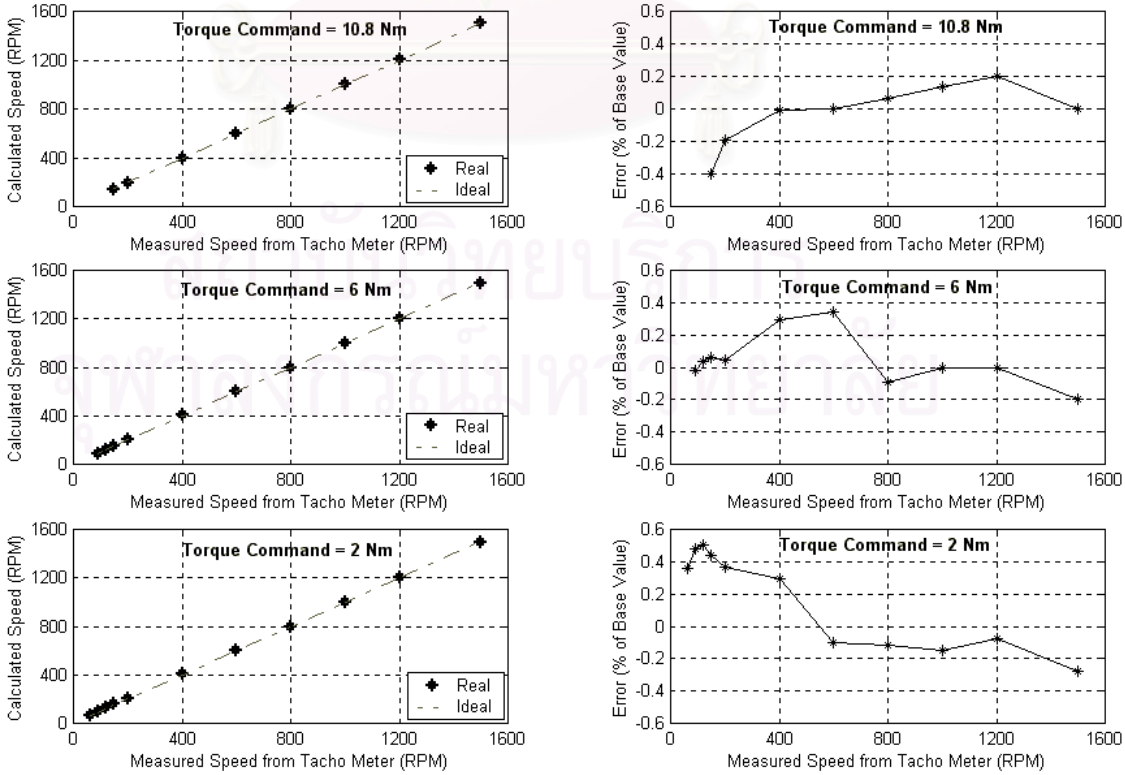
จากรูปที่ 5.28 และ 5.29 ซึ่งเป็นผลการทดสอบระบบเมื่อมีการสั่งเพิ่มและลดแรงบิดของมอเตอร์จะเห็นได้ว่าระบบควบคุมสามารถควบคุมให้แรงบิดของมอเตอร์เปลี่ยนแปลงไปตามคำสั่งได้อย่างถูกต้อง และจากผลการทดลองเราจะสังเกตเห็นว่าค่าแรงบิดที่คำนวณได้มีการเปลี่ยนแปลงในช่วงภาวะชั่วครู่ไวกว่าค่าแรงบิดจริง ซึ่งเป็นผลมาจากการใส่ตัวกรองผ่านต่ำในชุดวัดแรงบิดที่ใช้สเตรนเกจเพื่อลดผลของสัญญาณรบกวนตามที่ได้กล่าวถึงมาแล้วข้างต้นนั่นเอง และจากผลการทดลองในรูปที่ 5.30 และ 5.31 เราจะเห็นว่าระบบควบคุมสามารถทำงานได้ดี นั่นคือ แรงบิดของมอเตอร์ยังคงเป็นไปตามค่าแรงบิดคำสั่งตลอดเวลา แม้จะมีการเพิ่มหรือลดความเร็วของ มอเตอร์ก็ตาม



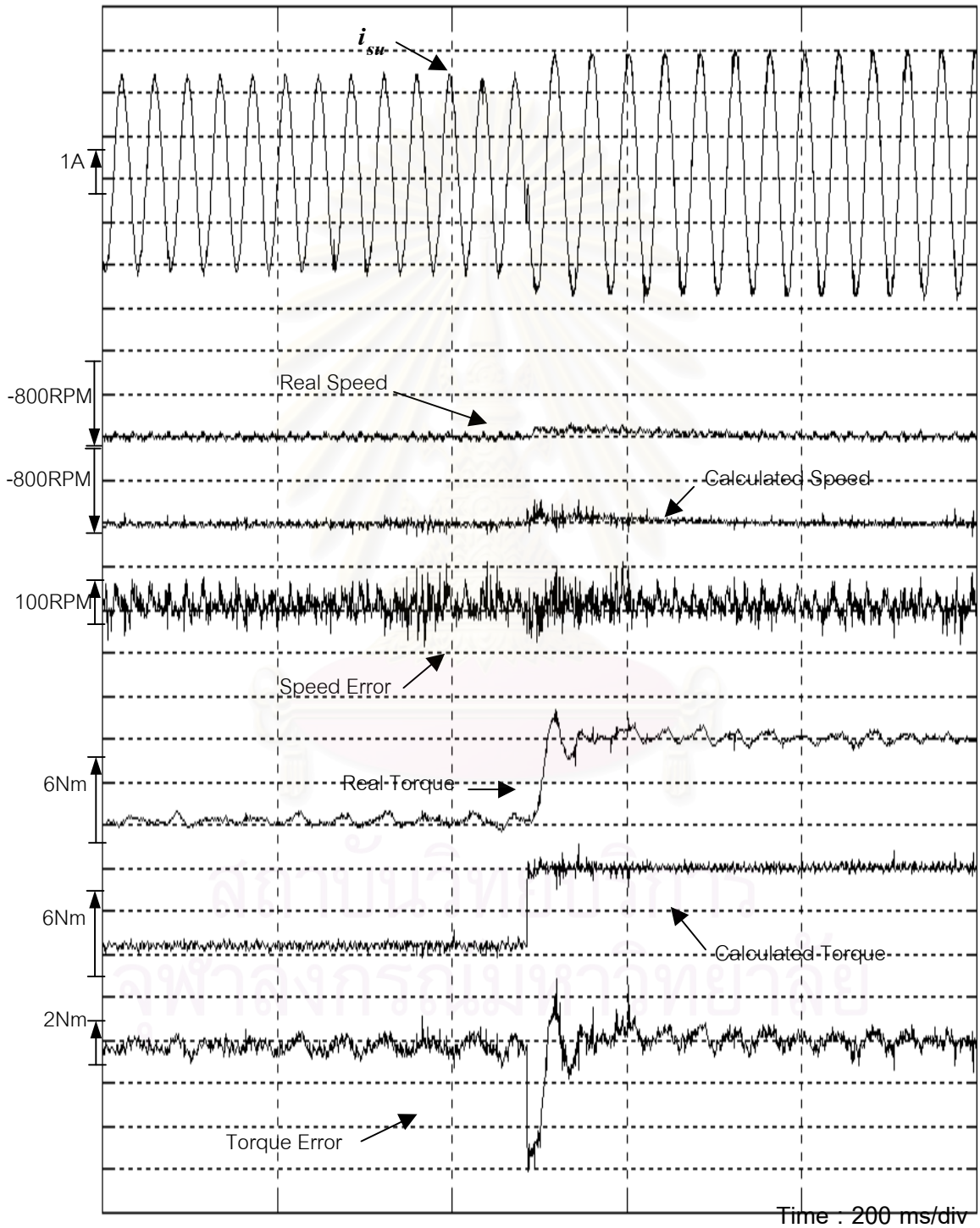
รูปที่ 5.25 ผลการทำงานของระบบที่แรงบิดคำสั่ง 6 Nm ณ ความเร็ว –800 RPM



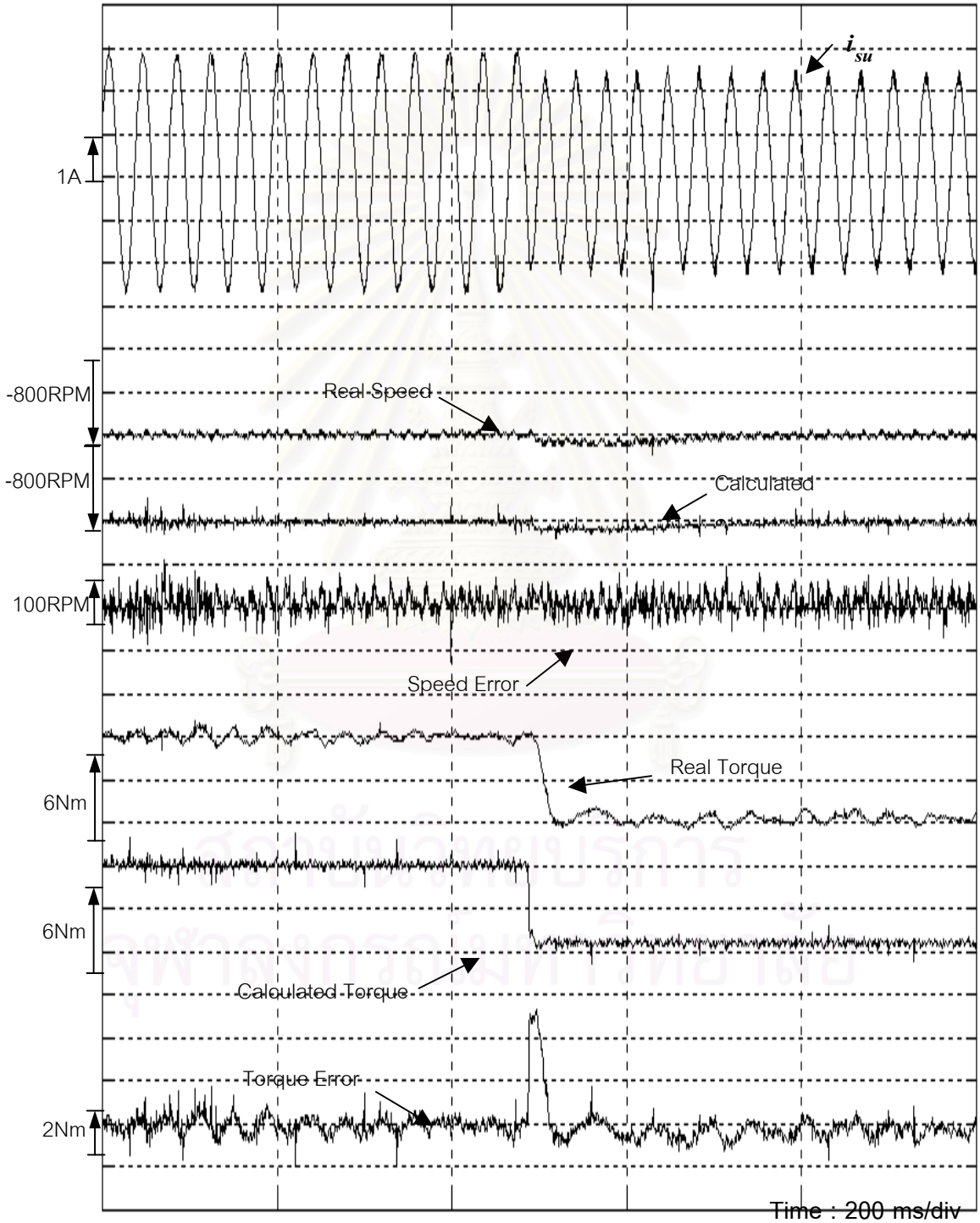
รูปที่ 5.26 กราฟลักษณะสมบัติแรงบิด-ความเร็วของมอเตอร์ Super Line เมื่อทำการควบคุมแรงบิด



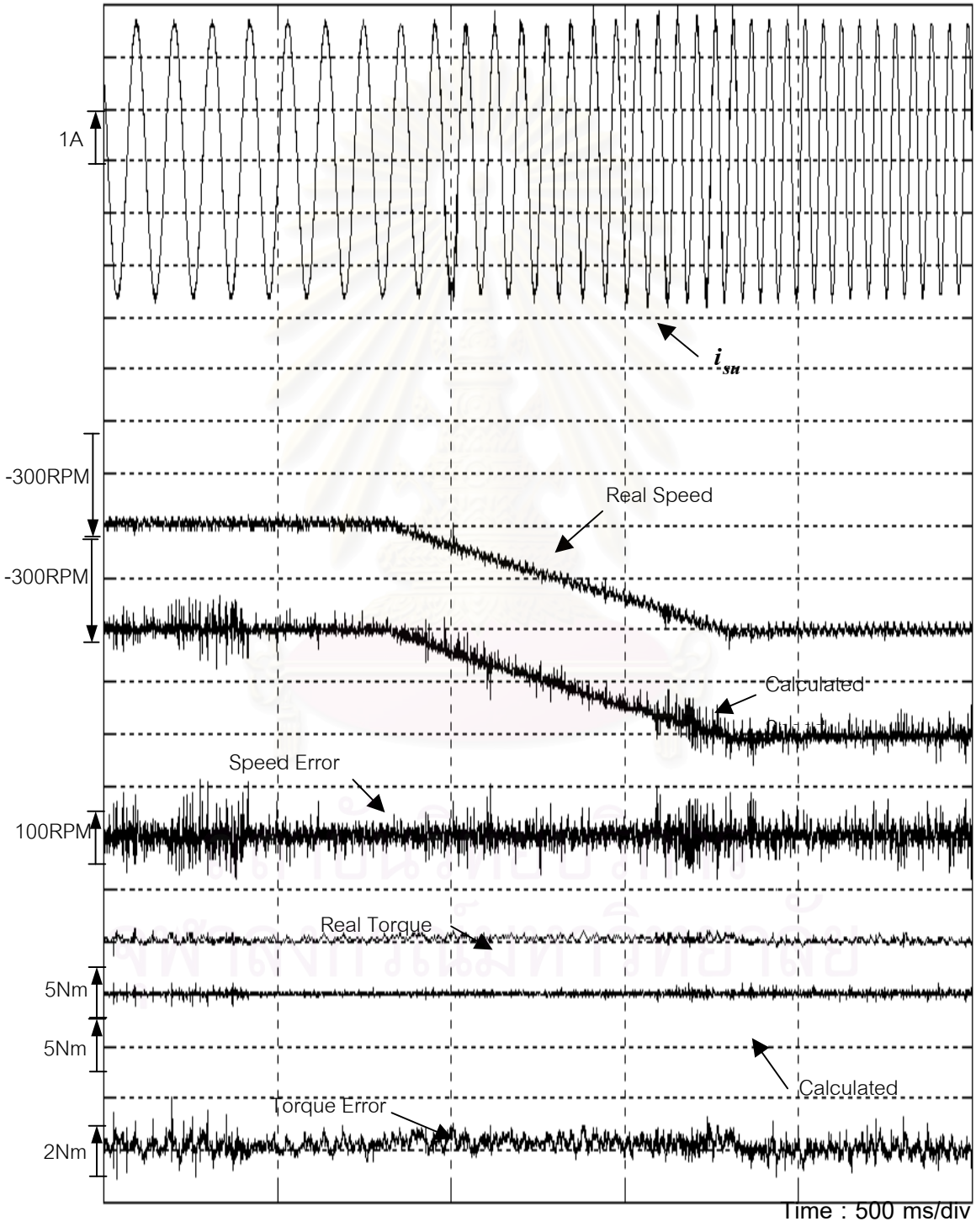
รูปที่ 5.27 ผลการวัดความเร็วของมอเตอร์ Super Line ที่ค่าแรงบิดคำสั่งต่างๆ



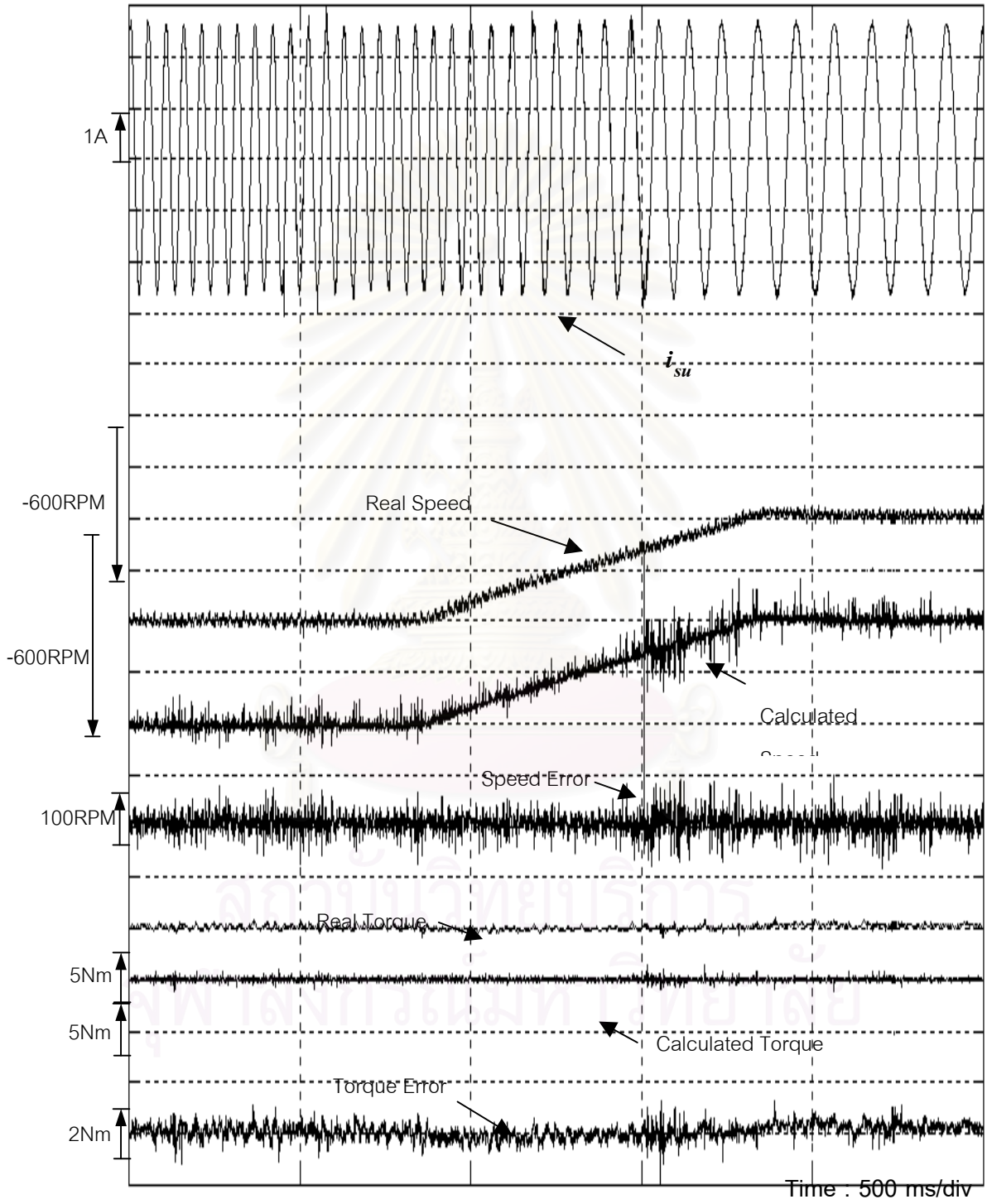
รูปที่ 5.28 ผลการทำงานของระบบเมื่อสั่งเพิ่มค่าแรงบิดจาก 1 Nm เป็น 6 Nmที่ความเร็ว –800 RPM



รูปที่ 5.29 ผลการทำงานของระบบเมื่อสั่งลดค่าแรงบิดจาก 6 Nm เป็น 1 Nm ที่ความเร็ว –800 RPM



รูปที่ 5.30 ผลการทำงานของระบบเมื่อเพิ่มความเร็วจาก –300 RPM เป็น -600 RPM ที่แรงบิดคำสั่ง 5 Nm



รูปที่ 5.31 ผลการทำงานของระบบเมื่อลดความเร็วจาก –600 RPM เป็น -300 RPM ที่แรงบิดคำสั่ง 5 Nm

บทที่ 6

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้พัฒนาระบบวัดและควบคุมแรงบิดและความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบปราศจากเซนเซอร์ขึ้นมาสำหรับใช้กับงานทดสอบเครื่องจักรกลไฟฟ้าในการเรียนการสอนวิชาปฏิบัติการพื้นฐานทางด้านเครื่องจักรกลไฟฟ้ากำลัง โดยอาศัยหลักการประมาณค่าความเร็วจากแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ และมีการชดเชยผลของกำลังสูญในแกนเหล็กและกำลังสูญทางกล เพื่อให้ค่าความเร็วและแรงบิดที่คำนวณได้มีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น ซึ่งระบบวัดและควบคุมแรงบิดและความ เร็วของมอเตอร์ที่ได้พัฒนาขึ้นมานี้มีคุณสมบัติที่สำคัญคือ

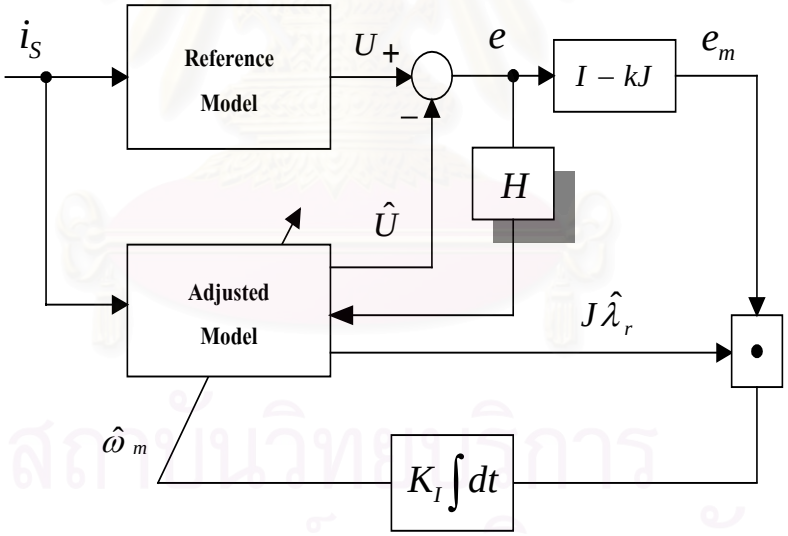
1) สามารถใช้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสทั่วไปได้โดยไม่ต้องปรับปรุงโครงสร้างทางกล
2) สามารถใช้เป็นระบบวัดอย่างเดียวหรือใช้เป็นระบบควบคุมแรงบิดและความเร็วของระบบได้
3) โดยการเพิ่มวงจรกรองผ่านต่ำอันดับ 3 ในส่วนตรวจจับแรงดันทำให้เราสามารถใช้ระบบที่พัฒนาขึ้นกับแรงดันแบบ PWM ได้
4) สามารถใช้งานได้ในย่านความถี่ 10% - 100% ของค่าความถี่ใช้งานของมอเตอร์ได้อย่างมีเสถียรภาพ
5) ค่าผิดพลาดในการวัดค่าแรงบิดอยู่ในขอบเขตไม่เกิน 10% ของค่าแรงบิดพิกัดของมอเตอร์
6) ค่าผิดพลาดในการวัดค่าความเร็วอยู่ในขอบเขตไม่เกิน 1% ของค่าความเร็วฐานของมอเตอร์

และผลการทดสอบระบบทั้งหมดแสดงให้เห็นว่าระบบที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถวัดและควบคุมความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์ได้ดีทั้งในสภาวะอยู่ตัวและสภาวะชั่วครู่

6.2 ข้อเสนอแนะ

1. ถึงแม้ระบบที่พัฒนาขึ้นนี้จะสามารถนำไปใช้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสใดๆที่มีขนาดไม่เกิน 1.5 กิโลวัตต์ และแรงดันขนาดไม่เกิน 380 โวลท์ (V_{rms}) ได้ แต่การที่จะนำระบบไปใช้กับมอเตอร์ตัวใดนั้น เราจำเป็นต้องรู้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของมอเตอร์ตัวนั้นด้วย ซึ่งนับว่าเป็นการยุ่งยากพอสมควร เราอาจแก้ปัญหานี้ได้โดยการรวมระบบหาค่าพารามิเตอร์เข้ากับระบบวัดและควบคุมแรงบิดและความเร็วของมอเตอร์

2. แม้เราจะทราบค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ที่เราต้องการใช้งานแล้วก็ตาม แต่ค่าพารามิเตอร์ก็อาจมีการเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของมอเตอร์ที่เพิ่มขึ้นในขณะที่มอเตอร์ทำงาน ซึ่งความผิดพลาดของค่าพารามิเตอร์นี้อาจส่งผลกระทบถึงเสถียรภาพในการทำงานของระบบได้ โดยเฉพาะการทำงานในย่านความเร็วต่ำ ซึ่งเราอาจแก้ปัญหานี้ได้โดยอาศัยเมตริกซ์ H ในการป้อนกลับค่าผิดพลาดของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำตามรูปที่ 6.1 ซึ่งต้องทำการศึกษาต่อไป



รูปที่ 6.1 ระบบประมาณค่าความเร็วในรูปแบบ MRAS กรณีที่การป้อนกลับค่าผิดพลาดของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำผ่านเมตริกซ์ H

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

ชูเกียรติ นิธโยธาน. ระบบควบคุมเวกเตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแสไร้เซนเซอร์วัดความเร็วสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.

โสภณ สมัยรัฐ. ระบบควบคุมเวกเตอร์เหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์. วิทยา
นิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.

อุเทน นิตยาธารีกุล. ระบบควบคุมเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดความเร็วที่อาศัยการประมาณค่าความเร็วจากแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.

ภาษาอังกฤษ

Shinji Shinnaka, "Proposition of New Mathematical Models with Core Loss Factor Controlling AC Motors", Proc. of IECON'98, Vol. 1, 1998, pp. 297-302.

Toshiko Noguchi, Paiboon Nakmahachalasint, Narin Watanakul, "Precise Torque Control of Induction Motor With On-Line Parameter Identification in Consideration of Core Loss", Proc. of Power Conversion Conference-Nagaoka 1997, Vol. 1, No. 1, 1997, pp. 113-118.

W. Leonhard, Control of Electric Drives, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, Germany, 1985.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

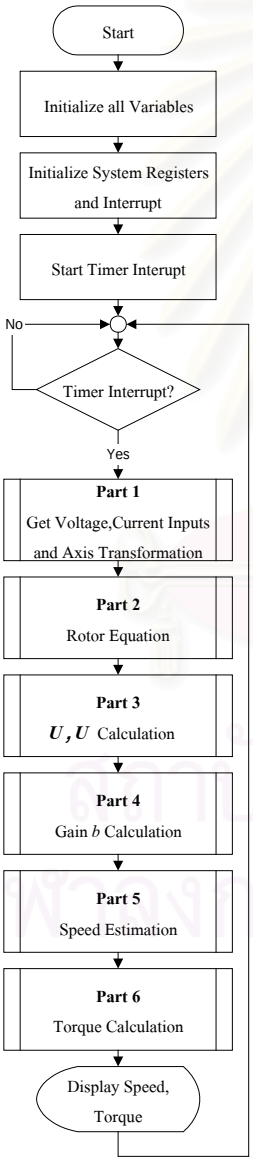
ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

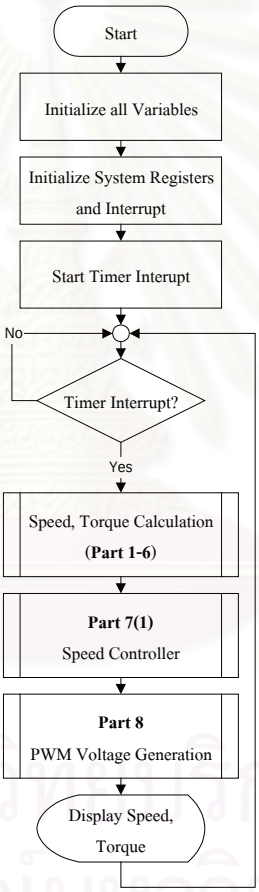
ภาคผนวก ก

ซอฟต์แวร์ของระบบ

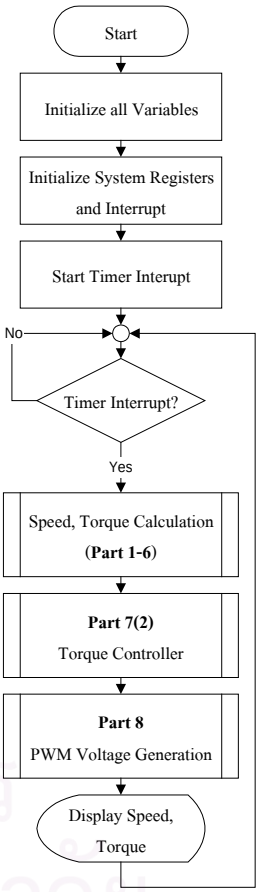
ซอฟต์แวร์ของระบบที่ใช้ในการทดสอบนั้น จะแบ่งเป็น 3 แบบคือ ซอฟต์แวร์สำหรับระบบวัดแรงบิดและความเร็ว ซอฟต์แวร์สำหรับระบบควบคุมความเร็ว และซอฟต์แวร์สำหรับระบบควบคุมแรงบิด ซึ่งซอฟต์แวร์แต่ละแบบจะมีแผนภาพการทำงานโดยรวมดังรูปที่ ก.1



(ก)ระบบวัดแรงบิดและความเร็ว



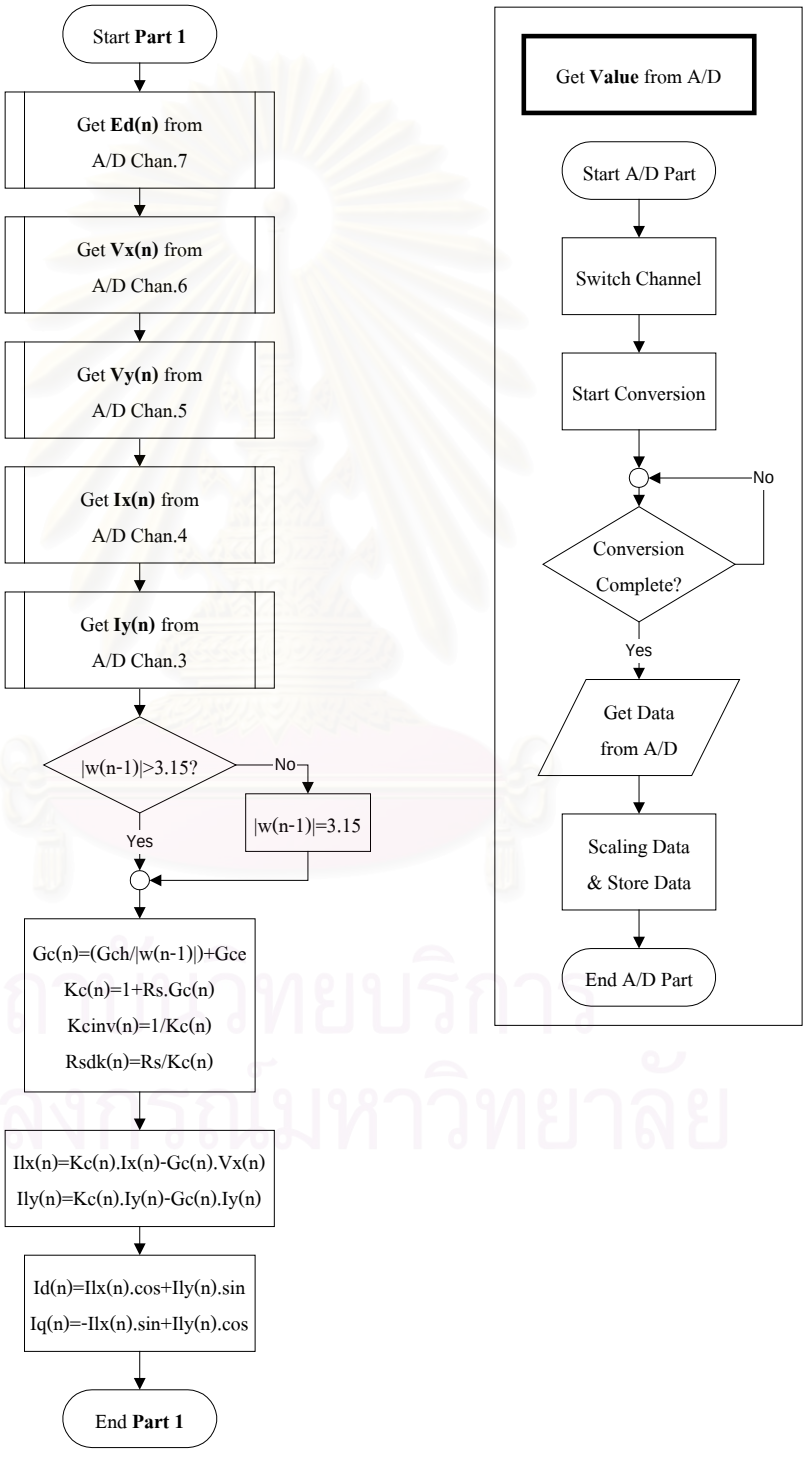
(ข)ระบบควบคุมความเร็ว



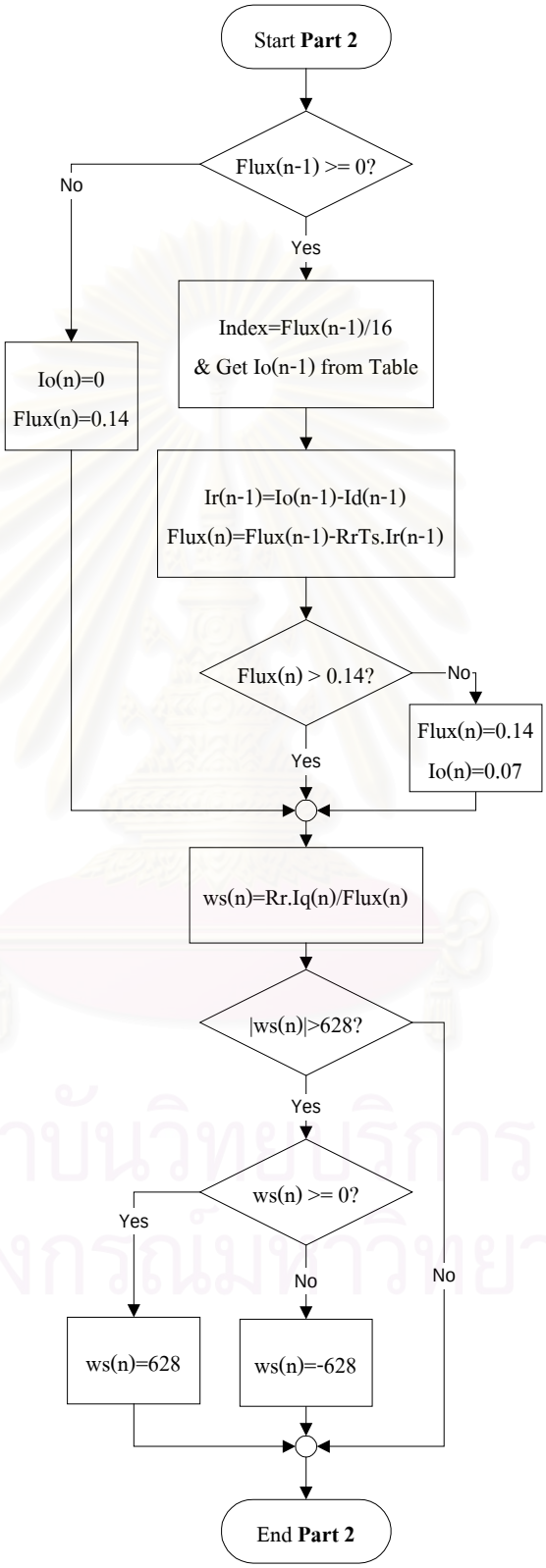
(ค)ระบบควบคุมแรงบิด

รูปที่ ก.1 แผนภาพการทำงานโดยรวมของซอฟต์แวร์

ส่วนรายละเอียดของการทำงานในส่วนย่อยต่างๆ (Part 1-8) สามารถแสดงได้ดังแผนภาพการทำงานในรูปที่ ก.2 – ก.10

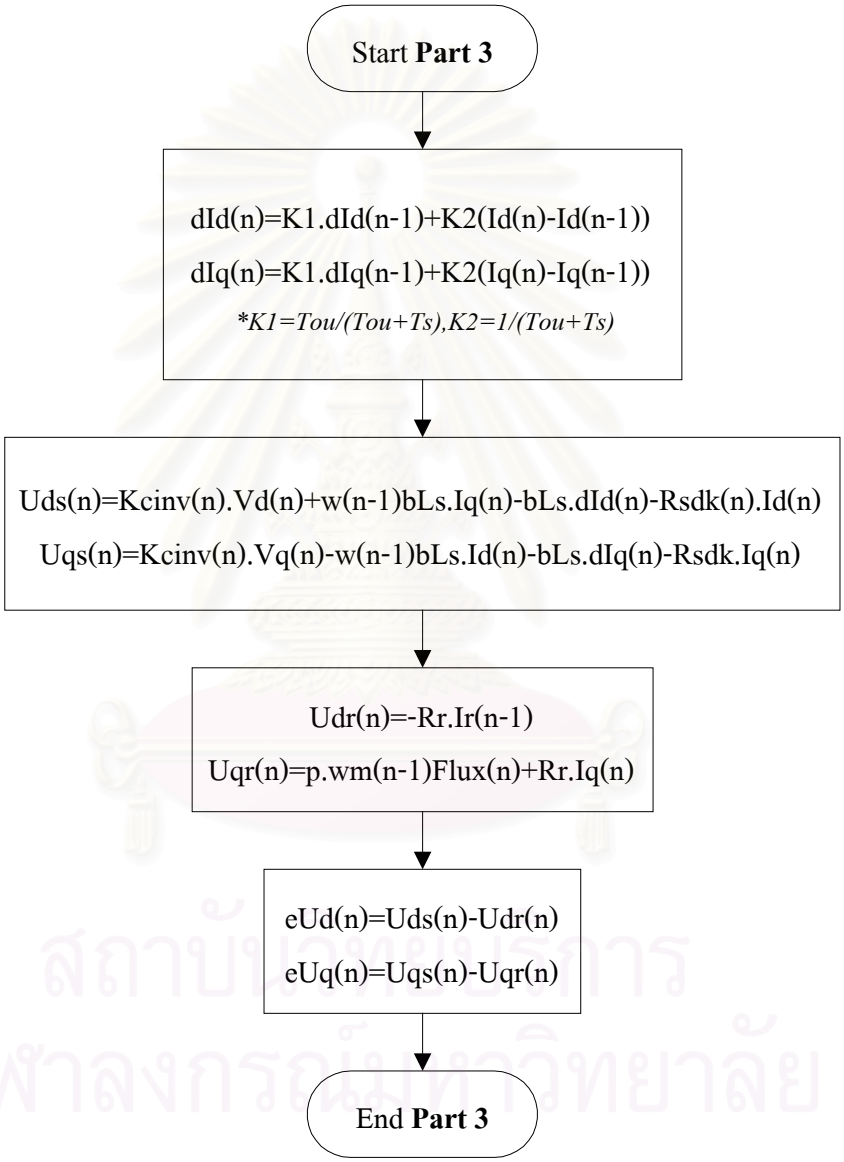


รูปที่ ก.2 แผนภาพการทำงานของส่วนย่อยที่ 1 (Part 1)

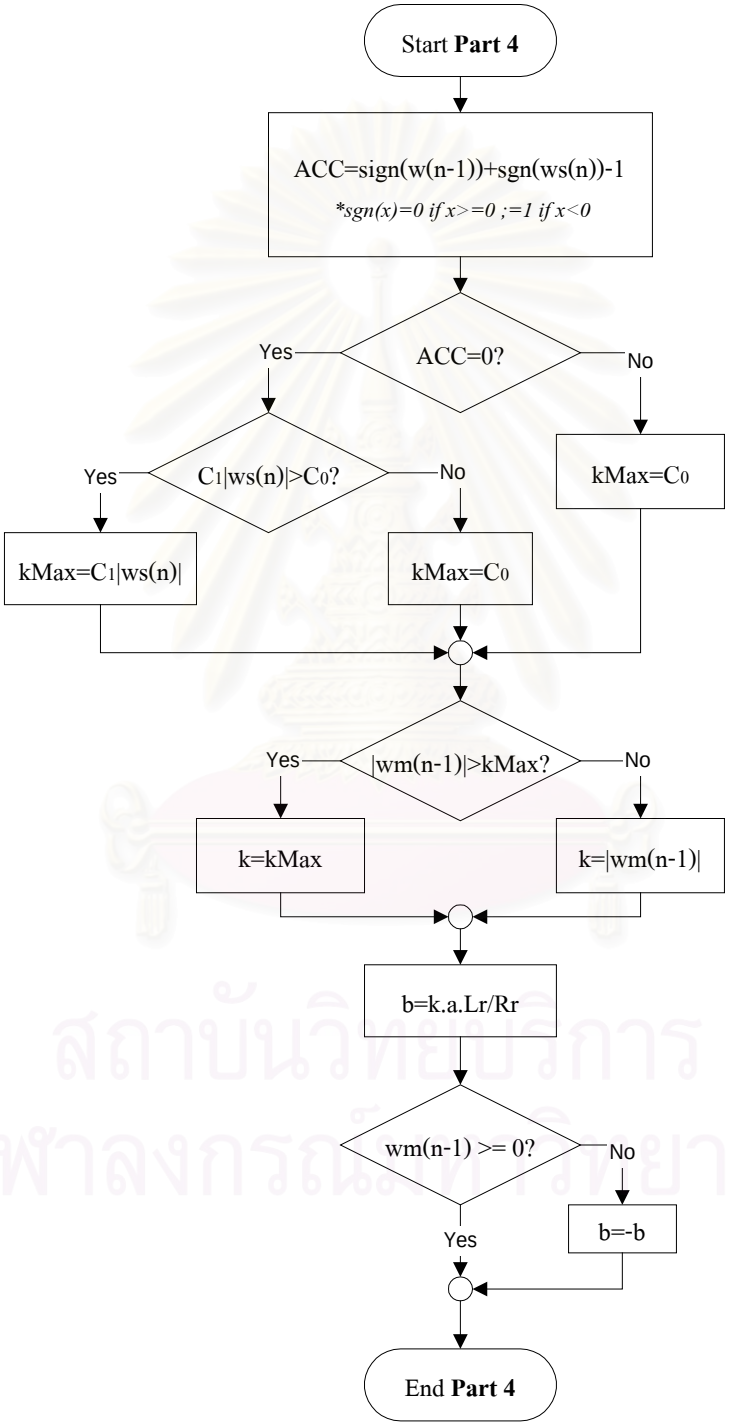


สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ ก.3 แผนภาพการทำงานของส่วนย่อยที่ 2 (Part 2)

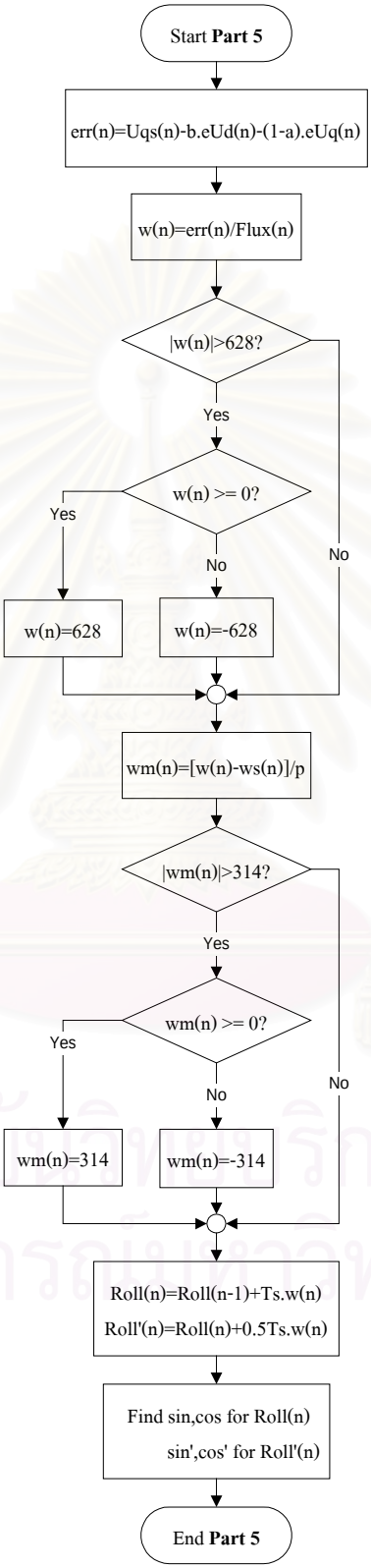


รูปที่ ก.4 แผนภาพการทำงานของส่วนย่อยที่ 3 (Part 3)



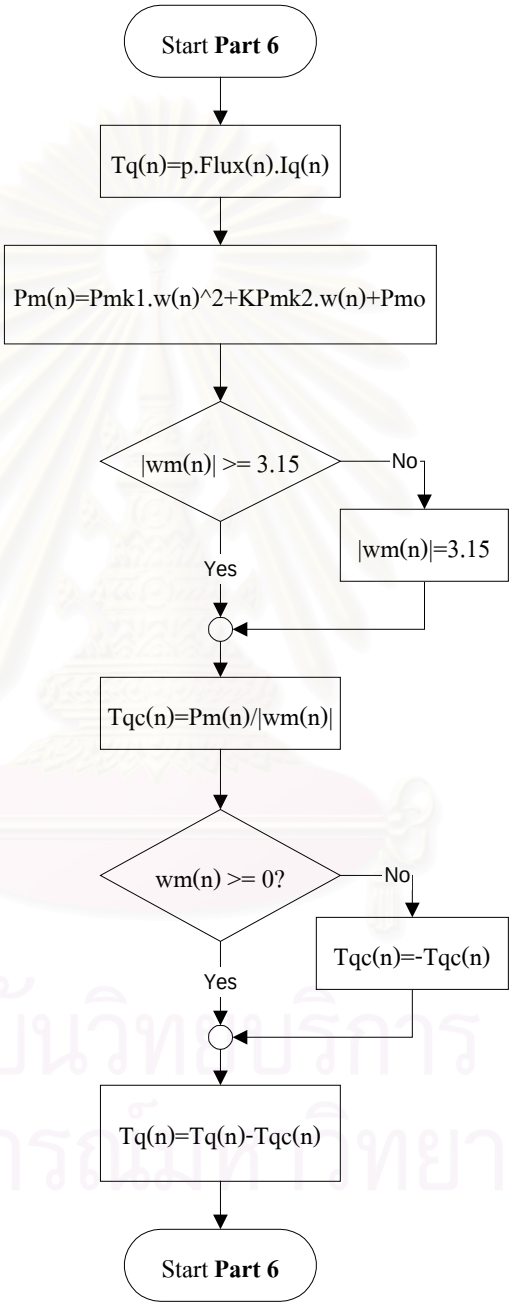
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ ก.5 แผนภาพการทำงานของส่วนย่อยที่ 4 (Part 4)



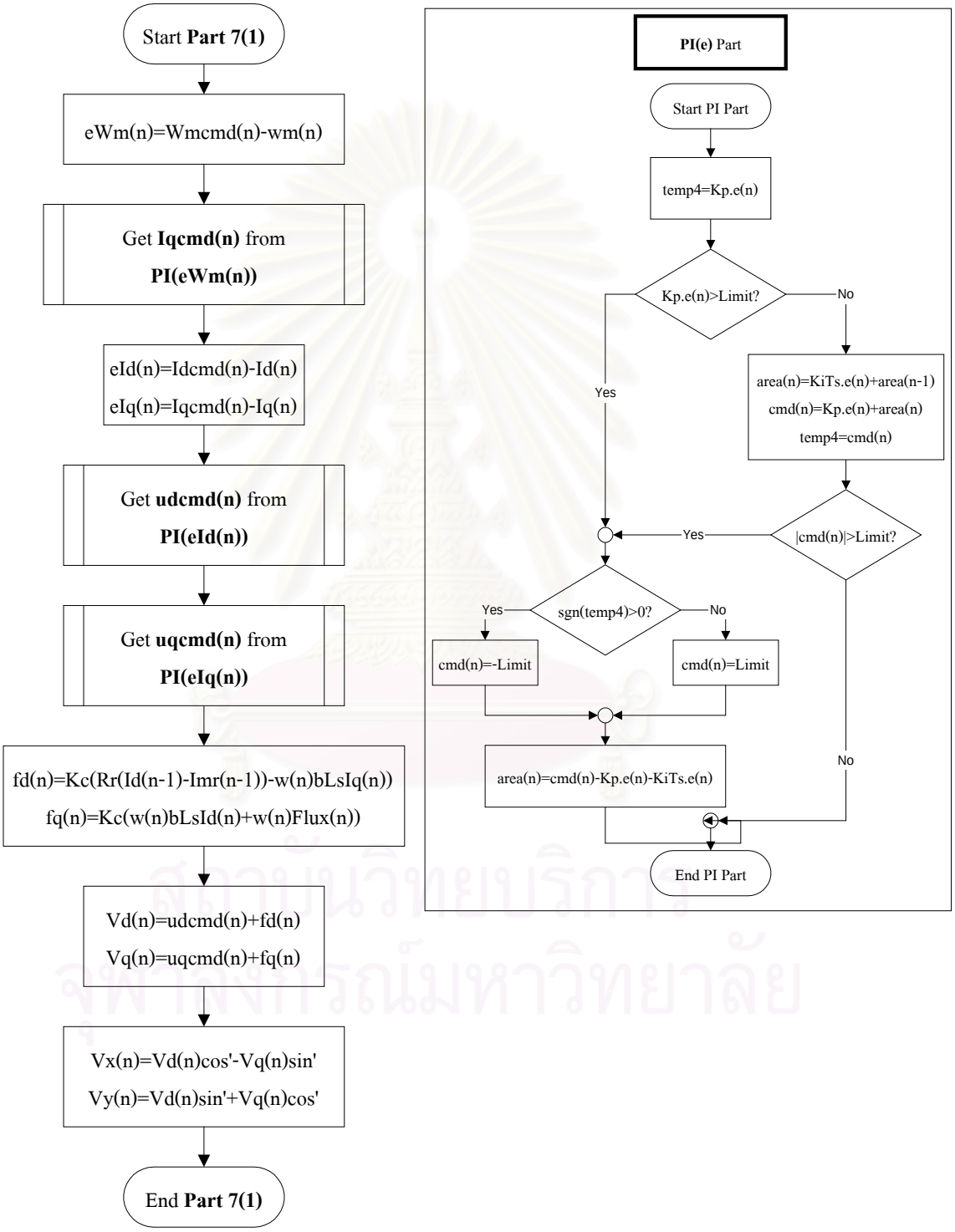
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ ก.6 แผนภาพการทำงานของส่วนย่อยที่ 5 (Part 5)

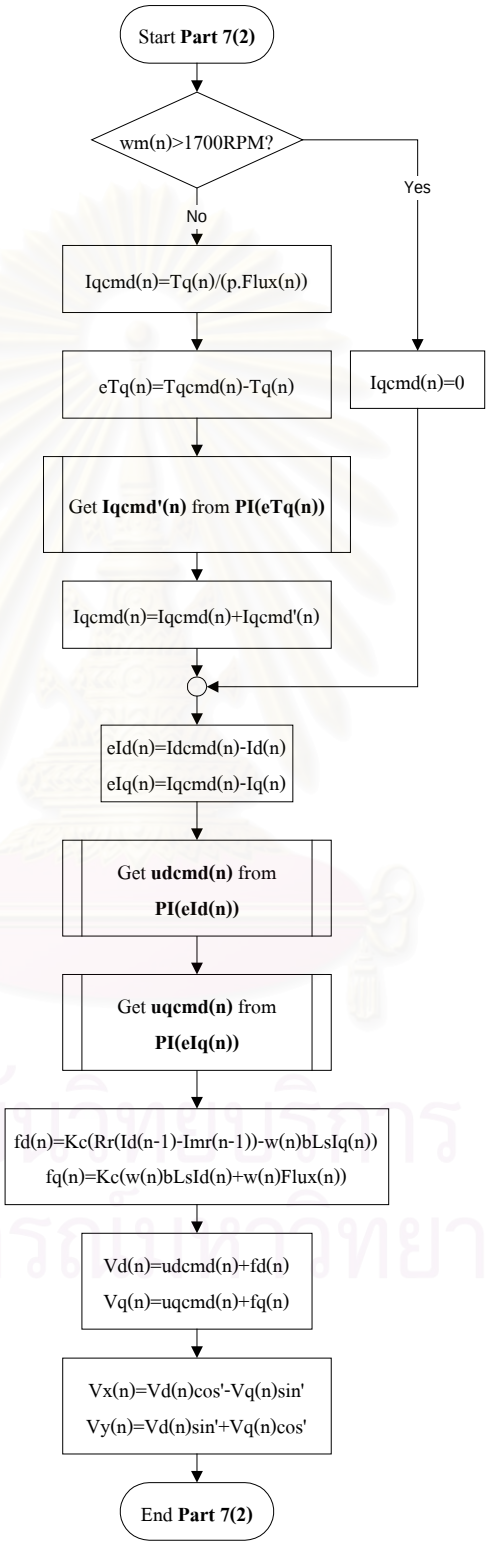


รูปที่ ก.7 แผนภาพการทำงานของส่วนย่อยที่ 6 (Part 6)

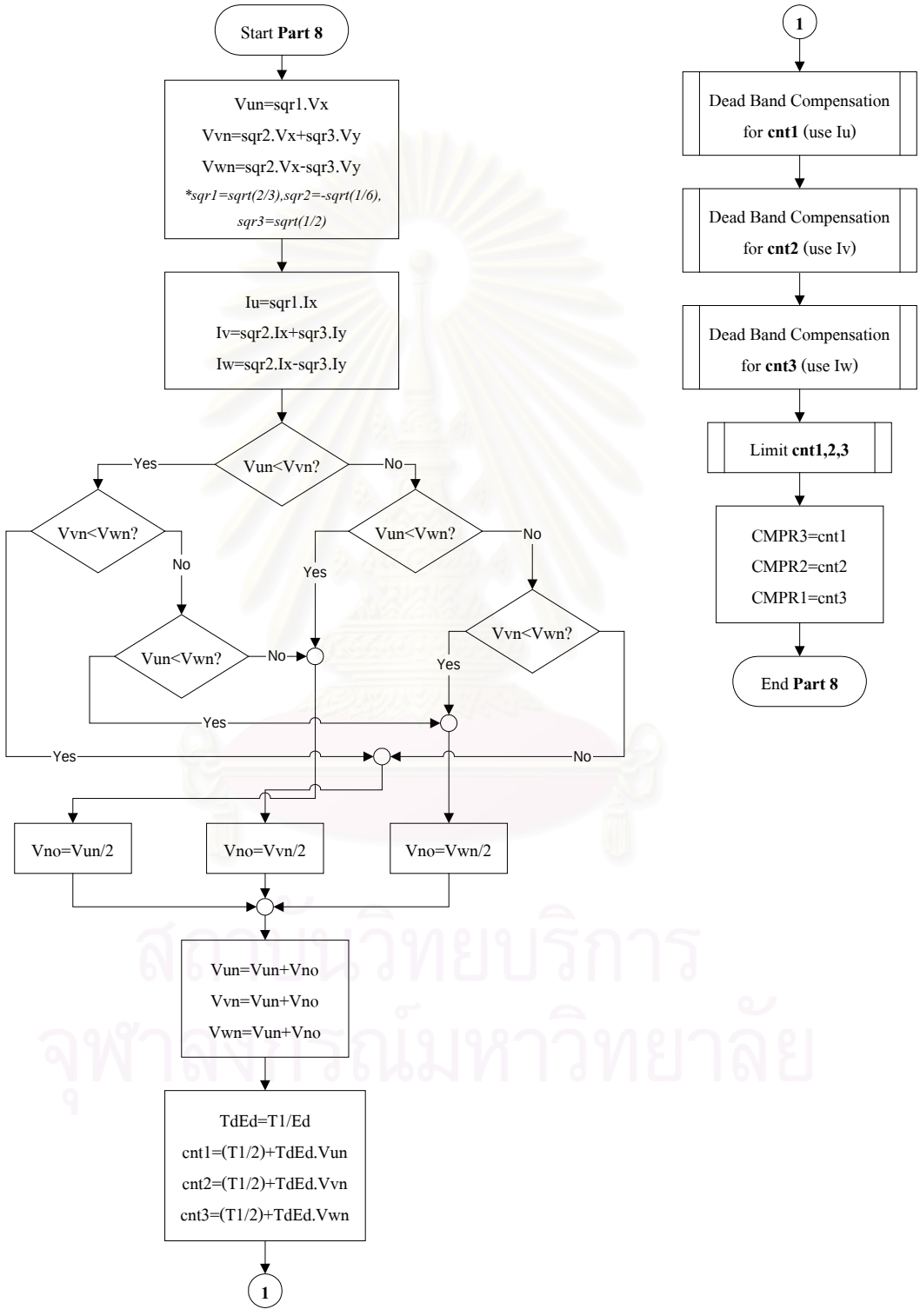
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย


Start Part 7(1)
eWm(n)=Wmcmd(n)-wm(n)
Get Iqcmd(n) from PI(eWm(n))
eId(n)=Idcmd(n)-Id(n)
eIq(n)=Iqcmd(n)-Iq(n)
Get udcmd(n) from PI(eId(n))
Get uqcmd(n) from PI(eIq(n))
fd(n)=Kc(Rr(Id(n-1)-Imr(n-1))-w(n)bLsIq(n))
fq(n)=Kc(w(n)bLsId(n)+w(n)Flux(n))
Vd(n)=udcmd(n)+fd(n)
Vq(n)=uqcmd(n)+fq(n)
Vx(n)=Vd(n)cos'-Vq(n)sin'
Vy(n)=Vd(n)sin'+Vq(n)cos'
End Part 7(1)
PI(e) Part
Start PI Part
temp4=Kp.e(n)
Kp.e(n)>Limit?
No
Yes
area(n)=KiTs.e(n)+area(n-1)
cmd(n)=Kp.e(n)+area(n)
temp4=cmd(n)
|cmd(n)|>Limit?
Yes
No
sgn(temp4)>0?
Yes
No
cmd(n)=-Limit
cmd(n)=Limit
area(n)=cmd(n)-Kp.e(n)-KiTs.e(n)
End PI Part

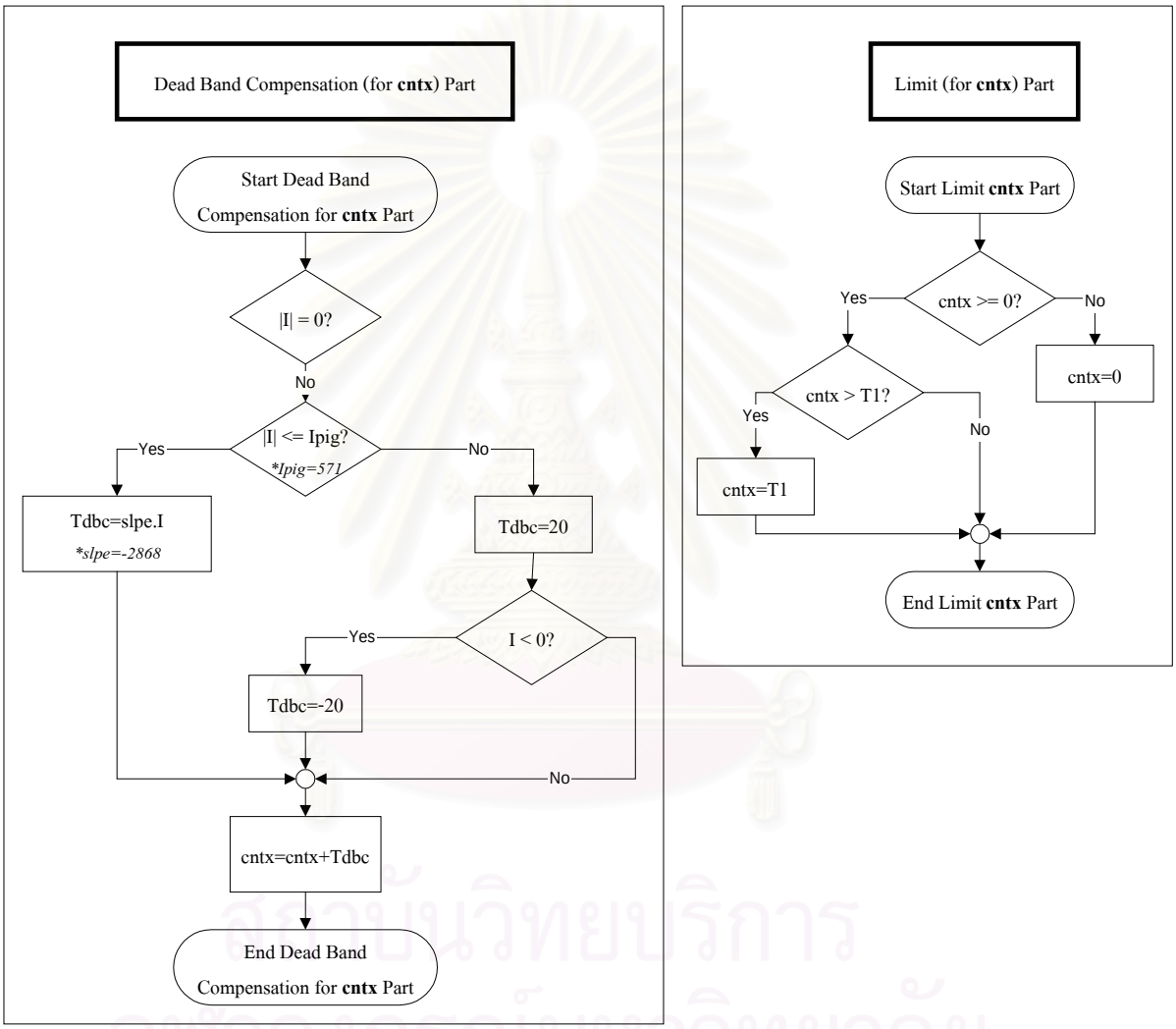
รูปที่ ก.8 แผนภาพการทำงานของส่วนย่อยที่ 7(1) (Part 7(1))



รูปที่ ก.9 แผนภาพการทำงานของส่วนย่อยที่ 7(2) (Part 7(2))



รูปที่ ก.10 แผนภาพการทำงานของส่วนย่อยที่ 10 (Part 10)



รูปที่ ก.10(ต่อ) แผนภาพการทำงานของส่วนย่อยที่ 10 (Part 10)

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย คิดชอบ ไวยสุศรี เกิดเมื่อวันที่ 28 เมษายน พ.ศ. 2521 ที่จังหวัดกรุงเทพฯ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า (ไฟฟ้ากำลัง) จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2541 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า (ระบบเชิงเลข) ณ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในภาคต้นของปีการศึกษา 2542

ผลงานวิจัย

คิดชอบ ไวยสุศรี. ระบบวัดแรงบิดและความเร็วแบบปราศจากเซนเซอร์ที่มีการชดเชยผลของกำลังสูญแกนเหล็กและกำลังสูญทางกล. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 24, 2544 : หน้า 393-398.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ระบบวัดแรงบิดและความเร็วแบบปราศจากเซนเซอร์ ที่มีการชดเชยผลของกำลังสูญแกนเหล็กและกำลังสูญทางกล

A Sensorless Torque and Speed Monitoring System with Core Loss and Mechanical Loss Compensation

คิดชอบ ไวยสุศรี สมบูรณ์ แสงวงค์วาณิชย์
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ถ. พญาไท ปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330 โทร (02) 218-6534 e-mail: 42702372@student.chula.ac.th

บทคัดย่อ

การวัดแรงบิดและความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยทั่วไปนั้นจะต้องใช้อุปกรณ์เซนเซอร์ที่มีราคาแพงและมีการติดตั้งที่ยุ่งยาก เพื่อแก้ปัญหาเหล่านี้ บทความนี้จึงนำเสนอถึงการพัฒนาระบบวัดแรงบิดและความเร็ว โดยอาศัยทฤษฎีของการควบคุมมอเตอร์แบบปราศจากเซนเซอร์วัดความเร็ว ซึ่งจะใช้การตรวจจับแรงดันและกระแสของมอเตอร์มาคำนวณหาค่าแรงบิดและความเร็วแทนการใช้เซนเซอร์วัดแรงบิดและความเร็วของมอเตอร์โดยตรง พร้อมทั้งทำการชดเชยผลของกำลังสูญแกนเหล็กและกำลังสูญทางกล เพื่อให้ค่าแรงบิดและความเร็วที่คำนวณได้มีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้นด้วย

คำสำคัญ: ระบบวัดแรงบิดและความเร็ว, ปราศจากเซนเซอร์, กำลังสูญแกนเหล็ก, กำลังสูญทางกล

Abstract

In general, the measurement of torque and speed of induction motor requires expensive sensors, whose installation is also cumbersome. To overcome these problems, a novel torque and speed monitoring system is developed and presented in this paper. The proposed system detects the input voltage and current of motor, and uses them to calculate the torque and speed instead of using torque and speed sensors. In addition, the effects of the core loss and mechanical loss are compensated to improve the accuracy of the calculated torque and speed.

Keywords: torque and speed monitoring, sensorless, core loss, mechanical loss.

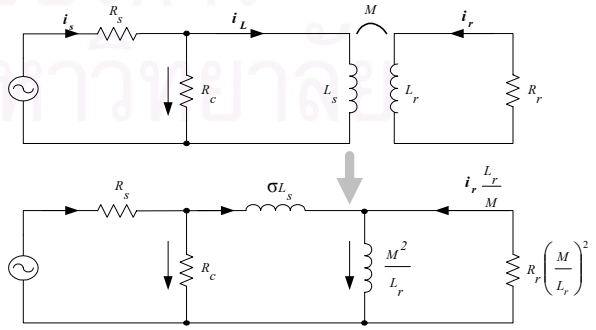
1. บทนำ

โดยทั่วไปแล้ว การวัดแรงบิดและความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำนั้นจะใช้สเตรนเกจเป็นตัววัดแรงบิดและเอ็นโคเดอร์หรือแทโคมิเตอร์เป็นตัววัดความเร็ว ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้มีราคาแพง นอกจากนี้ยังต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์ที่บริเวณเพลาของมอเตอร์ซึ่งค่อนข้างยุ่งยาก

บทความนี้จะนำเสนอการพัฒนาระบบวัดแรงบิดและความเร็วโดยอาศัยทฤษฎีของการควบคุมมอเตอร์แบบปราศจากเซนเซอร์ เพื่อทำให้ระบบวัดที่พัฒนาขึ้นไม่มีปัญหาเกี่ยวกับอุปกรณ์เซนเซอร์ ซึ่งระบบนี้จะอาศัยการตรวจจับแรงดันและกระแสของมอเตอร์มาคำนวณหาค่าแรงบิดและความเร็วแทนการใช้เซนเซอร์วัดแรงบิดและความเร็วของมอเตอร์โดยตรง ในการคำนวณหาค่าแรงบิดและความเร็วนั้น เราจะคำนวณโดยอาศัยวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีการคิดผลของกำลังสูญแกนเหล็ก [1] รวมอยู่ด้วย และจะนำวิธีการประมาณค่าความเร็วที่อาศัยแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ [3] มาประยุกต์ใช้ร่วมกับวงจรสมมูลดังกล่าว รวมทั้งจะทำการชดเชยผลของกำลังสูญทางกล เพื่อให้ค่าแรงบิดและความเร็วที่คำนวณได้มีค่าใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุด

2. วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีการคิดผลของกำลังสูญแกนเหล็ก

ในที่นี้เราจะพิจารณาผลของกำลังสูญในแกนเหล็กโดยแสดงเป็นความต้านทานสมมูลของกำลังสูญแกนเหล็ก (R_c) ต่อขนานอยู่กับความเหนี่ยวนำของขดลวดสเตเตอร์ [1] ซึ่งจะทำให้เราได้วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่คำนึงถึงผลของกำลังสูญแกนเหล็ก

โดยที่ $\lambda_s = \sigma L_s \, i_L + \lambda_r$ (1)

$\lambda_r = M \, i_L + L_r \, i_r = M \, i_O$ (2)

เมื่อ v_s : เวกเตอร์ของแรงดันสเตเตอร์

i_s , i_r : เวกเตอร์ของกระแสสเตเตอร์และโรเตอร์

i_C : เวกเตอร์ของกระแสไหลผ่านความต้านทานสมมูลของกำลังสูญแกนเหล็ก

i_L : เวกเตอร์ของกระแสคงเหลือหลังความต้านทานสมมูล R_c

i_O : เวกเตอร์ของกระแสสนามโรเตอร์ฟลักซ์

λ_s , λ_r :เวกเตอร์ของฟลักซ์แม่เหล็กด้านสเตเตอร์และโรเตอร์

R_s , R_r : ความต้านทานขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์

R_c : ความต้านทานสมมูลของกำลังสูญแกนเหล็ก

L_s , L_r : ความเหนี่ยวนำขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์

σ : สัมประสิทธิ์การรั่วไหลรวม

M : ความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์

จากวงจรสมมูลเราสามารถเขียนสมการแบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่คิดอ้างอิงบนแกนโรเตอร์ฟลักซ์ (แกน d-q) ได้ดังนี้

<u>สมการด้านสเตเตอร์</u>

$$i_C = R_k i_s - \frac{v_s}{R_c} \quad (3)$$

$$v_s = R_s i_L + K_c \left(\sigma L_s \frac{d i_L}{dt} + \omega \sigma L_s J i_L \right) + K_c \left(\frac{M}{L_r} \cdot \frac{d \lambda_r}{dt} + \frac{\omega M}{L_r} J \lambda_r \right) \quad (4)$$

<u>สมการด้านโรเตอร์</u>

$$\frac{d \lambda_r}{dt} + \omega J \lambda_r = \left(-\frac{R_r}{L_r} I + p \omega_m J \right) \lambda_r + \frac{M R_r}{L_r} i_L \quad (5)$$

เมื่อ ω : ความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์ฟลักซ์

ω_m : ความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์

p : จำนวนคู่ขั้วของมอเตอร์

$$K_c = \frac{\left(R_s + R_c \right)}{R_c}$$

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

เราสามารถเขียนสมการทางด้านโรเตอร์ (5) ใหม่เพื่อใช้ในการหามุมของโรเตอร์ฟลักซ์ (ρ)ที่ใช้ในการแปลงค่าที่อ้างอิงบนแกนสเตเตอร์ (แกน $\alpha - \beta$) มาเป็นค่าที่อ้างอิงบนแกน d-q ได้ดังนี้

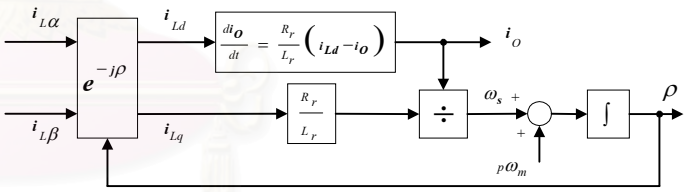
$$\frac{d i_O}{dt} = \frac{R_r}{L_r} \left(i_{Ld} - i_O \right) \quad (6)$$

$$\frac{d \rho}{dt} = \omega = p \omega_m + \frac{R_r}{L_r} \left(\frac{i_{Lq}}{i_O} \right) \quad (7)$$

$$\omega_s = \frac{R_r}{L_r} \left(\frac{i_{Lq}}{i_O} \right) \quad (8)$$

เมื่อ ω_s คือความถี่สลิปและ $[\bullet]_d$, $[\bullet]_q$ แทนองค์ประกอบในแกน d และ q ตามลำดับ

จากสมการ (6) , (7) และ (8) เราสามารถนำมาเขียนเป็นแผนภาพสำหรับการหาค่ามุมได้ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แผนภาพส่วนการหาค่ามุมโรเตอร์ฟลักซ์

ส่วนสมการแรงบิดนั้น ในแบบจำลองดั้งเดิมเราจะคำนวณค่าแรงบิดจาก i_s แต่เมื่อเราคิดผลของความต้านทานสมมูลของกำลังสูญแกนเหล็กด้วยแล้ว กระแสที่จะเป็นตัวสร้างฟลักซ์และแรงบิดจะเป็น i_L แทน ซึ่งจะทำให้เราได้สมการของแรงบิดเป็น

$$\tau = p i_L^T J \lambda_r \quad (9)$$

เมื่อ τ : แรงบิดของมอเตอร์

3. การคำนึงถึงผลของกำลังสูญทางกล

ผลของกำลังสูญทางกล (P_m) นั้น เราจะถือว่าส่งผลต่อแรงบิดเพียงตัวเดียว และจะทำการชดเชยผลของกำลังสูญทางกลที่มีต่อแรงบิดได้ดังนี้

$$\hat{\tau} = \tau - \frac{P_m}{\omega_m} \tag{10}$$

เมื่อ τ : ค่าแรงบิดยังไม่ได้ชดเชยผลของกำลังสูญทางกลที่คำนวณจากสมการที่ (9)

$\hat{\tau}$: ค่าแรงบิดที่ชดเชยผลของกำลังสูญทางกลแล้ว

4. การประมาณค่าความเร็วโดยอาศัยแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ

จากสมการที่ (4) และ (5) ที่กล่าวมาข้างต้นนั้น เราจะเห็นได้ว่าสมการที่ (4) นั้นคิดมาจากสมการด้านสเตเตอร์ ส่วนสมการที่ (5) จะคิดมาจากสมการด้านโรเตอร์ หากเรานำมาจัดรูปใหม่ให้เป็นสมการแสดงค่าแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ (U) ที่เกิดจากโรเตอร์ฟลักซ์ซึ่งมีค่าตามสมการ

$$U = \frac{d\lambda_r}{dt} + \omega J \lambda_r \tag{11}$$

จะได้ว่า

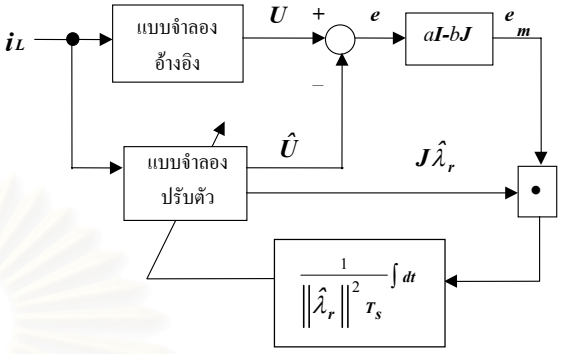
<u>จากสมการด้านสเตเตอร์</u>

$$U = \frac{L_r}{MK_c}\left\{ v_s - R_s i_L - K_c\left[\sigma L_s \frac{di_L}{dt} + \sigma L_s \omega J i_L \right] \right\} \tag{12}$$

<u>จากสมการด้านโรเตอร์</u>

$$U = \frac{R_r}{L_r} M\left(i_L - i_O\right) + p\omega_m J \lambda_r \tag{13}$$

เมื่อพิจารณาสมการที่ (12) และ (13) จะพบว่าสมการสเตเตอร์ไม่ขึ้นกับค่าความเร็วโรเตอร์ (ω_m) ส่วนสมการโรเตอร์จะขึ้นกับค่าความเร็วโรเตอร์ ในการประยุกต์ใช้เทคนิค Model Reference Adaptive System (MRAS) เราจึงกำหนดให้สมการสเตเตอร์เป็นสมการอ้างอิงและสมการโรเตอร์เป็นสมการปรับตัวเพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าความเร็วโรเตอร์ ซึ่งจะทำให้ได้ว่าค่าแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่ได้จากสมการสเตเตอร์เป็นแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำอ้างอิง (U) และค่าแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่ได้จากสมการโรเตอร์เป็นแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำประมาณ ($\hat{U}$) เราสามารถหาความเร็วโรเตอร์โดยอาศัยการป้อนกลับค่าผิดพลาดของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ(e) [3] ได้ดังแผนภาพในรูปที่ 3



รูปที่ 3 แผนภาพแสดงระบบประมาณค่าความเร็วในแบบ MRAS

ระบบประมาณค่าความเร็วในแผนภาพในรูปที่ 3 จะทำการปรับค่าความเร็วโรเตอร์โดยอาศัยการป้อนกลับค่าผิดพลาดของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ (e) ผ่านเมตริกซ์ $aI - bJ$ ซึ่งอัตราส่วน $\frac{b}{a}$ มีค่าดังสมการ (14) และสมการของค่าความเร็วโรเตอร์ประมาณ ($\hat{\omega}_m$) สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (15)

$$\frac{b}{a} = \frac{p\hat{\omega}_m}{\alpha} \tag{14}$$

เมื่อ $\alpha = \frac{R_r}{L_r}$

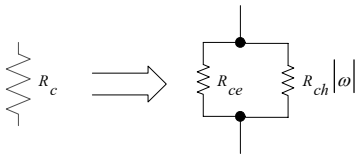
$$p\hat{\omega}_m = \frac{1}{\|\hat{\lambda}_r\|^2 T_s}\int \left[\left(aI - bJ\right)e\right]^T J\hat{\lambda}_r\, dt \tag{15}$$

เมื่อ T_s : คาบเวลาการสุ่มตัวอย่าง

5. การหาค่าความต้านทานสมมูลของกำลังสูญแกนเหล็กและกำลังสูญทางกล

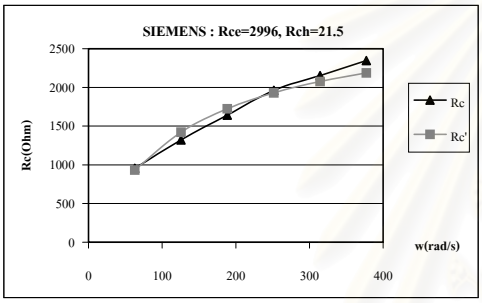
ในความเป็นจริงนั้น กำลังสูญแกนเหล็กจะประกอบด้วย Eddy Current Loss และ Hysteresis Loss [1] ดังนั้นเราจะสมมติให้ความต้านทานสมมูลของกำลังสูญแกนเหล็ก (R_c) ประกอบด้วยความต้านทาน R_{ce} ซึ่งเป็นตัวแทนของ Eddy Current Loss ต่อขนานอยู่กับความ

ต้านทานที่แปรตามความถี่ $R_{ch}|\omega|$ ซึ่งเป็นตัวแทนของ Hysteresis Loss ดังแสดงในรูปที่ 4

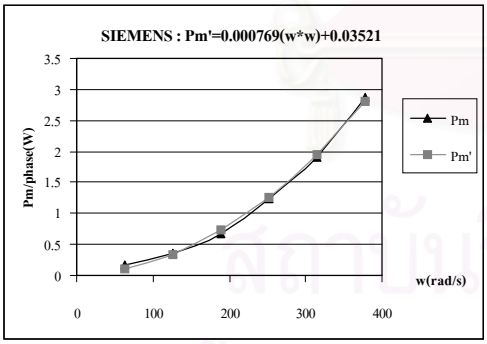


รูปที่ 4 แบบจำลองของ Rc

เราจะใช้วิธีการทดสอบที่สภาวะไร้โหลด (No load test) [2] มาช่วยในการหาค่าความต้านทานสมมูลของกำลังสูญแกนเหล็กและกำลังสูญทางกลในแต่ละค่าความถี่โดยเราจะใช้อินเวอร์เตอร์เป็นตัวปรับความถี่ ตัวอย่างผลการทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 5 และ 6



รูปที่ 5 ผลการหาค่าความต้านทานสมมูลของกำลังสูญแกนเหล็ก (Rc) ของมอเตอร์ SIEMENS (1.1 kW)



รูปที่ 6 ผลการหากำลังสูญทางกลต่อเฟส (Pm) ของมอเตอร์ SIEMENS (1.1 kW)

จากผลการทดสอบในรูปที่ 5 เราสามารถประมาณหาค่าความต้านทาน R_c ได้โดยใช้สมการที่ได้จากแบบจำลองในรูปที่ 4 คือ

$$R_c = \frac{R_{ce}.R_{ch}|\omega|}{R_{ce} + R_{ch}|\omega|} \qquad (16)$$

เราจะเห็นว่าค่าความต้านทานประมาณ (Rc') ที่ได้นั้น ค่อนข้างใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง (Rc) ดังนั้นการประมาณค่าความต้านทานสมมูลของกำลังสูญแกนเหล็กโดยใช้สมการ (16) จึงเป็นวิธีที่เหมาะสม

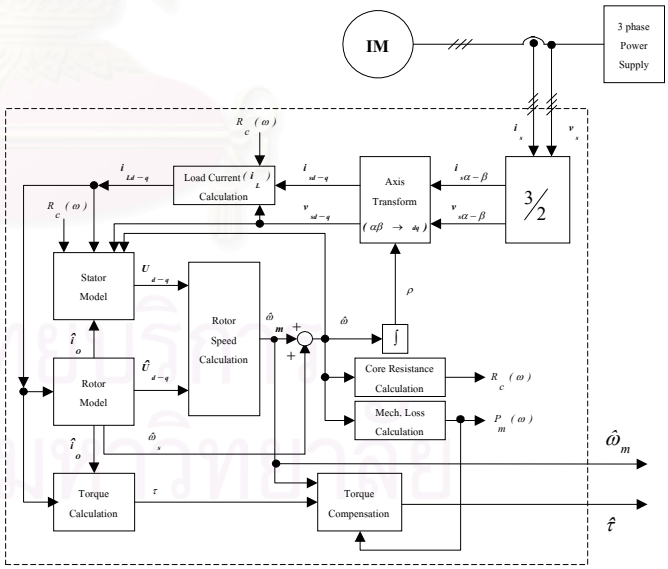
ส่วนกำลังสูญทางกลนั้น จากผลการทดสอบในรูปที่ 6 จะเห็นว่าความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสูญทางกล (Pm) กับความถี่ (ω) จะมีลักษณะเป็นแบบพาราโบลาคือ

$$P_m = k\omega^2 + C \qquad (17)$$

การประมาณกำลังสูญทางกลด้วยสมการ (17) ทำให้ได้กราฟของกำลังสูญทางกลประมาณ (Pm') ที่มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริงมาก ดังนั้นการประมาณค่ากำลังสูญทางกลด้วยสมการแบบพาราโบลานี้จึงเป็นวิธีที่เหมาะสมเช่นกัน

6. การสร้างระบบวัดแรงบิดและความเร็ว

จากหลักการทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้นเราสามารถนำมาสร้างเป็นระบบวัดแรงบิดและความเร็วได้ตามแผนภาพการทำงานของระบบในรูปที่ 7 โดยเราจะตรวจจับแรงดันและกระแสของมอเตอร์มาทำการคำนวณหาค่าแรงบิดและความเร็วด้วยตัวประมวลผลแบบเชิงเลข (Digital Signal Processor)



รูปที่ 7 แผนภาพการทำงานของระบบวัดแรงบิดและความเร็ว

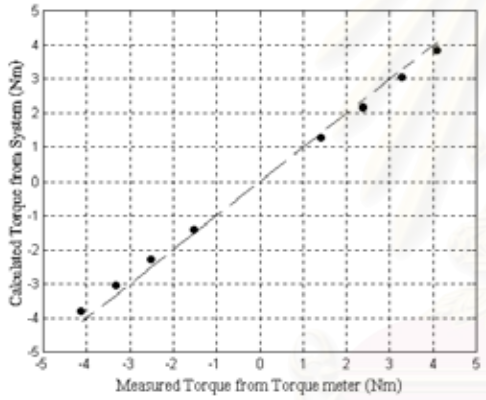
7. การทดสอบระบบวัดแรงบิดและความเร็ว

เราจะทำการทดสอบระบบวัดแรงบิดและความเร็วที่สร้างขึ้นกับมอเตอร์ SIEMENS ที่มีลักษณะสมบัติดังตารางที่ 1

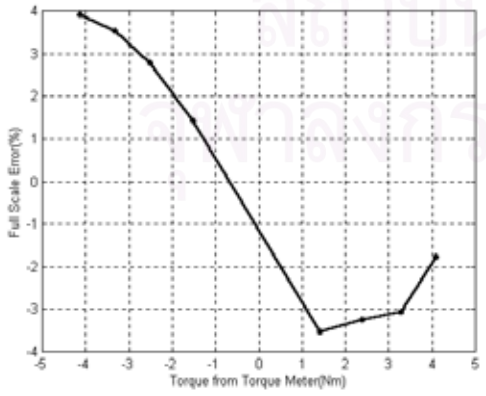
ตารางที่ 1 ลักษณะสมบัติของมอเตอร์ SIEMENS

กำลังพิกัด (kW)	1.1
แรงดันพิกัด (V)	400
กระแสพิกัด (A)	2.6
แรงบิดพิกัด (Nm)	7.5
ความเร็วพิกัด (rpm)	1400
ความถี่พิกัด (Hz)	50
จำนวนคู่ขั้วของมอเตอร์	4

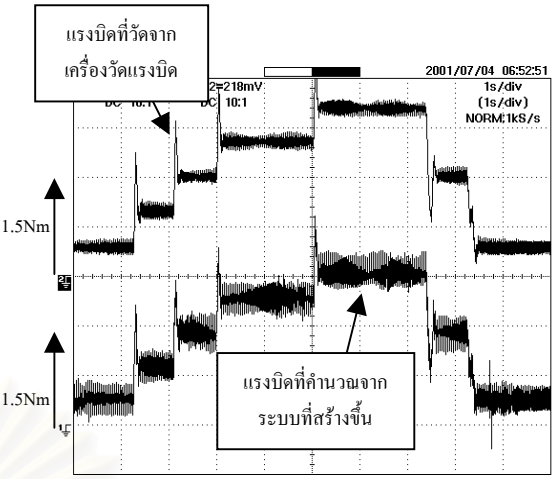
ในการทดสอบการวัดค่าแรงบิดของมอเตอร์นั้น เราจะให้มอเตอร์ขับโหลดค่าต่างๆ โดยใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงที่ต่ออยู่กับชุดหลอดไฟเป็นโหลด และวัดค่าแรงบิดด้วยระบบที่สร้างขึ้นเทียบกับค่าที่วัดได้จากเครื่องวัดแรงบิดที่ใช้สเตรนเกจ ซึ่งจะได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 8,9 และ 10



รูปที่ 8 กราฟเปรียบเทียบค่าแรงบิดที่คำนวณได้จากระบบที่สร้างขึ้นกับค่าแรงบิดที่วัดได้จากเครื่องวัดแรงบิด

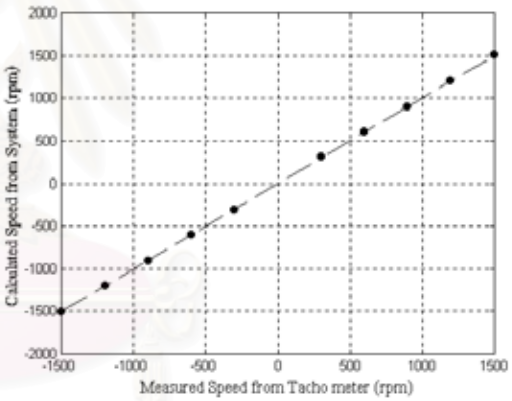


รูปที่ 9 ค่าความผิดพลาดของแรงบิดที่คำนวณได้เทียบกับค่าพิกัด (7.5 Nm)

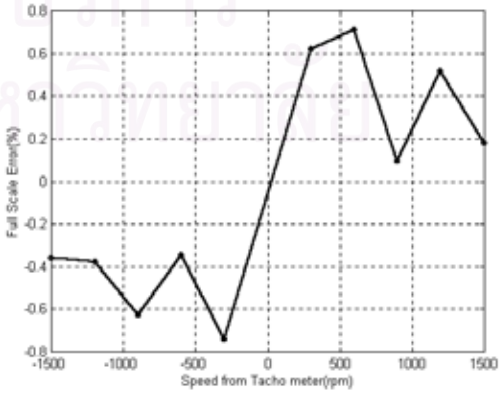


รูปที่ 10 ลักษณะแรงบิดที่วัดได้เมื่อมีการเปลี่ยนค่าโหลด

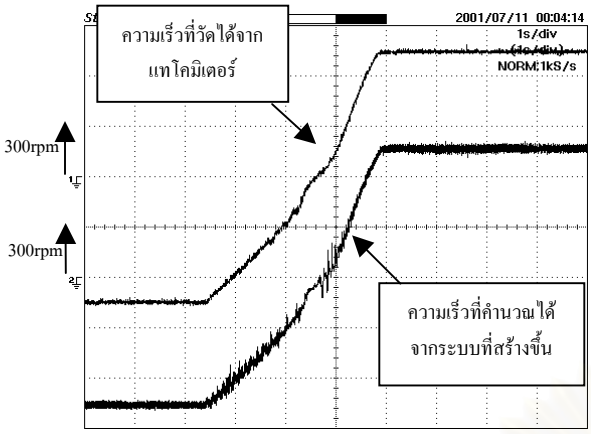
ส่วนการทดสอบการวัดค่าความเร็วของมอเตอร์นั้น เราจะให้มอเตอร์ทำงานที่ความเร็วค่าต่างๆ โดยใช้อินเวอร์เตอร์ช่วยในการปรับความเร็วและวัดค่าความเร็วด้วยระบบที่สร้างขึ้นเทียบกับค่าที่วัดได้จากแทโคมิเตอร์ ซึ่งจะได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 11,12 และ 13



รูปที่ 11 กราฟเปรียบเทียบค่าความเร็วที่คำนวณได้จากระบบที่สร้างขึ้นกับค่าความเร็วที่วัดได้จากแทโคมิเตอร์



รูปที่ 12 ค่าความผิดพลาดของความเร็วที่คำนวณได้เทียบกับค่าพิกัด (1500 rpm)



รูปที่ 13 ลักษณะความเร็วที่วัดได้ในสภาวะชั่วครู่เมื่อมีการกลับทิศความเร็วจาก –1500 rpm เป็น 1500 rpm

จากผลการทดสอบทั้งหมดจะเห็นได้ว่าระบบที่เราสร้างขึ้นนั้นสามารถคำนวณค่าแรงบิดและความเร็วของมอเตอร์ได้จริง และมีค่าความผิดพลาดเมื่อเทียบกับเครื่องวัดแรงบิดและแทโคมิเตอร์ไม่มากนัก โดยจากผลในรูปที่ 9 และ 12 ค่าแรงบิดที่คำนวณได้มีค่าผิดพลาดไม่เกินร้อยละ 4 และค่าความเร็วที่วัดได้มีค่าผิดพลาดไม่เกินร้อยละ 0.8 เมื่อเทียบกับค่าพิกัดของค่าแรงบิดและความเร็วของมอเตอร์ตามลำดับ

8. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอถึงการสร้างระบบวัดแรงบิดและความเร็ว โดยนำทฤษฎีของการควบคุมมอเตอร์แบบปราศจากเซนเซอร์วัดความเร็วมาประยุกต์ใช้ พร้อมทั้งทำการชดเชยผลของกำลังสูญแกนเหล็กและกำลังสูญทางกล เนื่องจากระบบที่สร้างขึ้นนี้อาศัยการตรวจจับแรงดันและกระแสของมอเตอร์มาคำนวณหาค่าแรงบิดและความเร็วจึงทำให้ระบบนี้มีการติดตั้งใช้งานที่สะดวกกว่าการใช้อุปกรณ์วัดแรงบิดและความเร็วทั่วไป และผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าระบบวัดแรงบิดและความเร็วที่สร้างขึ้นนี้สามารถนำมาใช้งานได้จริงและมีความผิดพลาดในการวัดไม่มากนัก

เอกสารอ้างอิง

[1] Shinji Shinnaka, “Proposition of New Mathematical Models with Core Loss Factor Controlling AC Motors”, Proc. of IECON’98, Vol.1, 1998, pp. 297-302.

[2] Toshiko Noguchi, Paiboon Nakmahachalasint, and Narin Watanakul, “Precise Torque Control of Induction Motor with On-Line Parameter Identification in Consideration of Core Loss”, Proc. of Power Conversion Conference-Nagaoka 1997, Vol. 1, Aug. 1997, pp. 113-118.

[3] อุเทน นิตยาธารีกุล, ระบบควบคุมเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดความเร็วที่อาศัยการประมาณค่าความเร็วจากแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ, วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542

คิดชอบ ไวยสุศรี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าจากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปี พ.ศ. 2541 ปัจจุบันกำลังศึกษาระดับปริญญาโทสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และทำงานวิจัยเรื่องระบบวัดแรงบิดและความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

สมบูรณ์ แสงวงค์วาณิชย์ จบการศึกษาระดับปริญญาตรี โท และเอกสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าจากมหาวิทยาลัย NAGOYA ประเทศญี่ปุ่น ในปี พ.ศ. 2528, 2530, และ 2533 ตามลำดับ ปัจจุบันดำรงตำแหน่งเป็นอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย