

การควบคุมกำลังรีแอกทีฟทางด้านโรเตอร์สำหรับระบบควบคุมเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง
ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง



นายสมรัฐ สมิทธิสมบูรณ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR) are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

A ROTOR-SIDE REACTIVE POWER CONTROL FOR POSITION-SENSORLESS VECTOR
CONTROL SYSTEM OF DOUBLY-FED INDUCTION MACHINES

Mr. Somrat Smiththisomboon



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

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

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2013

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การควบคุมกำลังรีแอกทีฟทางด้านโรเตอร์สำหรับระบบ
ควบคุมเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งของเครื่องจักรกล
ไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง

โดย

นายสมรัฐ สมितिสมบูรณ์

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรพงศ์ สุวรรณกวิน

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. แนบบุญ หุนเจริญ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรพงศ์ สุวรรณกวิน)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรชาติ สุวรรณงาม)

CHULALONGKORN UNIVERSITY

สมรวิฐ สมितिสมบุรณ์ : การควบคุมกำลังรีแอกทีฟทางด้านโรเตอร์สำหรับระบบควบคุม
 เวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง. (A
 ROTOR-SIDE REACTIVE POWER CONTROL FOR POSITION-SENSORLESS
 VECTOR CONTROL SYSTEM OF DOUBLY-FED INDUCTION MACHINES) อ.ที่
 ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. สุรพงษ์ สุวรรณกวิน, หน้า.

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอวิธีประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์แบบใหม่สำหรับ
 ระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อน
 สองทางที่มีการควบคุมกำลังรีแอกทีฟทางด้านโรเตอร์ โดยตัวสังเกตลดอันดับแบบปรับตัวจะ
 ประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์จากแบบจำลองค่าผิดพลาดทางด้านสเตเตอร์ และมี
 กระแสโรเตอร์เป็นเวกเตอร์รีเกรสเซอร์ ระบบประมาณจึงสามารถทำงานในโหมดควบคุมกำลังรี
 แอกทีฟตามข้อกำหนดโครงข่ายไฟฟ้าได้ นอกจากนี้ระบบประมาณยังมีการคำนวณที่เรียบง่าย
 และไม่จำเป็นต้องใช้ข้อมูลสเตเตอร์ฟลักซ์ ทำให้ลดปัญหาการเลื่อนของสัญญาณไฟตรงได้
 งานวิจัยที่นำเสนอข้ได้ศึกษาถึงขีดจำกัดในการทำงานของระบบประมาณ โดยการวิเคราะห์
 เสถียรภาพด้วยวิธีประมาณระบบเป็นเชิงเส้น รวมถึงนำเสนอขั้นตอนการออกแบบอัตราขยาย
 การปรับตัวควบคุมแบบ PI ด้วย ผลการทดลองด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink และผลการ
 ทดลองด้วยระบบทดสอบสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎี โดยระบบควบคุมเวกเตอร์
 แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งสามารถทำงานได้ที่ทุกเงื่อนไขการทำงานในโหมดควบคุมกำลังรีแอก
 ทีฟทางด้านโรเตอร์ และสามารถควบคุมกระแสโรเตอร์ได้อย่างอิสระสอดคล้องกับทฤษฎีการ
 ควบคุมแบบแยกการเชื่อมร่วม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ปีการศึกษา 2556

5470488921 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS: REDUCED-ORDER ADAPTIVE OBSERVER POSITION-SENSORLESS VECTOR CONTROL DFIM ROTOR-SIDE REACTIVE POWER CONTROL

SOMRAT SMITHTHISOMBOON: A ROTOR-SIDE REACTIVE POWER CONTROL FOR POSITION-SENSORLESS VECTOR CONTROL SYSTEM OF DOUBLY-FED INDUCTION MACHINES. ADVISOR: ASST. PROF. SURAPONG SUWANKAWIN, pp.

In this thesis, a novel estimation method of rotor speed and position is proposed for a position-sensorless vector control of doubly-fed induction machines with rotor-side reactive power control. The proposed method is based on the reduced-order adaptive observer. By using the stator error model and the reactive power control on the rotor side, the rotor current can be treated as the regressor vector, and the position estimation system is identifiable for all operating conditions. The system can also comply with grid codes. Furthermore, the calculation of estimation system is simple without pure integration for stator flux calculation, the drift problem can be avoided. The stability of position estimation system is analyzed by the linearization approach. Design guidelines position estimation of adaptation gains are also described. Simulation results with Matlab/Simulink program and experimental results from real implementation confirm the validity of theoretical results. The position-sensorless vector control can work correctly along with the rotor-side reactive power control and also rotor currents can be controlled independently corresponding to the decoupling control

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Department: Electrical Engineering Student's Signature

Field of Study: Electrical Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2013

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ภายใต้ทุนพัฒนานักวิจัยเลขที่ RSA5580039 และโครงการทุนศิษย์ก้นกุฏิ (ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า/ศูนย์เชี่ยวชาญฯ) โดยมี ผศ.ดร. สุรพงศ์ สุวรรณกวิน เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ที่ให้ความช่วยเหลือและเอาใจใส่อย่างดีถึงจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วง และ ผศ.ดร. สมบูรณ์ แสงวงศ์ วาณิช ผู้ที่ให้คำแนะนำทางวิชาการสำหรับการทำวิทยานิพนธ์ คุณคุณพันไช จันทวงศ์ คุณจิรัฏฐ์ อุดมศรี คุณกรวิทย์ นิยมเสถียร คุณสุรเชษฐ์ เสมอเหมือน ตลอดจนบุคลากรในห้องปฏิบัติการ อิเล็กทรอนิกส์กำลังทุกท่าน ผู้ที่ให้คำปรึกษาและคำแนะนำในการทดสอบระบบฮาร์ดแวร์ ขอกราบขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดา-มารดา คุณครู-อาจารย์และญาติพี่น้องของข้าพเจ้า ผู้ที่ให้โอกาสทางการศึกษาและเป็นกำลังใจด้วยดีเสมอมา



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ญ
นิยามสัญลักษณ์.....	ต
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเบื้องต้น.....	1
1.2 การประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์สำหรับระบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง.....	3
1.2.1 การประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์ด้วยค่าผิดพลาดของกระแสสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์และมีการคำนวณสเตเตอร์ฟลักซ์ [4].....	5
1.2.2 การประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์ด้วยการคำนวณค่าสเตเตอร์ฟลักซ์ [5]... ..	6
1.2.3 การประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์ด้วยค่าผิดพลาดของกำลังที่ช่องอากาศบนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์ [6].....	7
1.2.4 การประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์ด้วยค่าผิดพลาดกระแสโรเตอร์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์โดยอาศัยการคำนวณแรงบิด [7].....	7
1.2 สรุปปัญหาและข้อจำกัดของงานวิจัยที่ผ่านมา.....	9
1.3 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	9
1.4 ขอบเขตวิทยานิพนธ์.....	10
1.5 วิธีดำเนินการ.....	10
บทที่ 2 ระบบประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์ด้วยตัวสังเกตลดอันดับแบบปรับตัว.....	11
2.1. แบบจำลองทางพลวัตของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง.....	11
2.2. ตัวสังเกตลดอันดับแบบปรับตัว.....	12
บทที่ 3 การวิเคราะห์เสถียรภาพและการออกแบบอัตราขยายการปรับตัวของระบบประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์.....	15
3.1. การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์.....	15

3.2. การออกแบบอัตราขยายการปรับตัวของระบบประมาณ	18
บทที่ 4 โครงสร้างของระบบควบคุมเวกเตอร์สเตเตอร์ฟลักซ์แบบไร้เซ็นเซอร์วัดตำแหน่ง	22
4.1. การคำนวณค่าตำแหน่งสเตเตอร์ฟลักซ์	23
4.2. การควบคุมแบบแยกการเชื่อมร่วม (Decoupling Control)	24
4.3 การควบคุมกำลังรีแอกทีฟทางด้านโรเตอร์	37
บทที่ 5 ผลการทดลอง	42
5.1. ผลการทดลองของระบบขับเคลื่อนที่สถานะอยู่ตัว (Steady State)	43
5.2. ผลการทดสอบของผลตอบสนองชั่วคราว (Transient Response)	55
5.2.1. การเปลี่ยนแปลงความเร็วแบบขั้น	55
5.2.2. ผลการทดสอบที่มีการป้อน/ปลดโหลดออกแบบขั้น	63
5.2.3. ผลการทดสอบที่การเปลี่ยนแปลงกระแสโรเตอร์ในแกน d แบบขั้น	77
5.2.4. ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงโหลดแบบแรมป์ที่ความเร็วคงที่	81
บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	83
6.1. บทสรุปผลการวิจัย	83
6.2. ข้อเสนอแนะ	83
รายการอ้างอิง	85
ภาคผนวก ก การพิสูจน์เสถียรภาพของตัวสังเกตลดอันดับแบบปรับตัว	87
ภาคผนวก ข การหารากตัวที่สาม และรากตัวที่สี่ของระบบประมาณ	90
ภาคผนวก ค การจัดรูปสมการสเตเตอร์เป็นสมการสเตเตอร์ฟลักซ์	92
ภาคผนวก ง พารามิเตอร์ของมอเตอร์	94
ภาคผนวก จ โครงสร้างฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ของระบบ	95
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	99

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่	
1.1	เปรียบเทียบคุณสมบัติการประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์ของงานวิจัยที่ผ่านมา 9
5.1	เงื่อนไขการทดสอบระบบขับเคลื่อนแบบเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งที่สถานะอยู่ตัว 44
5.2	เงื่อนไขการทดสอบระบบขับเคลื่อนแบบเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งที่เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงความเร็วแบบขั้น 55
5.3	ผลการทดลองระบบขับเคลื่อนแบบเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งที่เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงความเร็วแบบขั้น 56
5.4	เงื่อนไขการทดสอบระบบขับเคลื่อนแบบเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งที่การใส่โหลดและปลดโหลดออกแบบขั้น 63
5.5	ผลตอบสนองของแรงบิด ความเร็ว กระแสโรเตอร์ในแกน q และตำแหน่งประมาณที่เงื่อนไขต่างๆ..... 64
5.6	เงื่อนไขการทดสอบระบบขับเคลื่อนแบบเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งที่การเปลี่ยนแปลงแบบขั้นของกระแสโรเตอร์ในแกน d จาก $3 \rightarrow 6 \rightarrow 3$ A แบบขั้น 77
ง.1	ค่าพิกัด/ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง..... 94

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่

1.1	กำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อกริดของ EWEA [3]	1
1.2	โครงสร้างของระบบควบคุมเวกเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง	2
1.3	การประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์ด้วยวิธี MRAS	3
1.4	แผนภาพการคำนวณค่าผิดพลาดด้วยการโปรเจกต์เวกเตอร์ผิดพลาด \vec{e} ลงบนเวกเตอร์รีเฟรเอนซ์ $J \hat{i}$	4
1.5	โครงสร้างของระบบประมาณตำแหน่งโดยใช้ค่าผิดพลาดกระแสสเตเตอร์	5
1.6	เวกเตอร์ไดอะแกรมแสดงการขาดคุณสมบัติในการประมาณที่สภาวะไร้โหลด ($\vec{i}_s = 0$)	6
1.7	โครงสร้างของระบบประมาณตำแหน่งโดยใช้การประมาณกระแสโรเตอร์	6
1.8	โครงสร้างของระบบประมาณตำแหน่งโดยใช้การประมาณกำลังช่องอากาศ	7
1.9	โครงสร้างของระบบประมาณตำแหน่งโดยใช้การประมาณกระแสโรเตอร์บนแกนอ้างอิง สเตเตอร์ฟลักซ์	8
2.1	โครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง	11
2.2	ระบบประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์ด้วยตัวสังเกตลดอันดับแบบปรับตัว	12
2.3	กลไกการประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์	14
3.1	ผลจำลองการทำงานของระบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง เมื่อกระแสโรเตอร์เท่ากับศูนย์	18
3.2	วงรอบการประมาณตำแหน่งโรเตอร์ ด้วยวิธีการประมาณเป็นเชิงเส้น	19
3.3	ตำแหน่งของขั้วและศูนย์ของฟังก์ชันโบนย้ายวงรอบเปิดที่มีการออกแบบอัตราขยายป้อนกลับที่เสนอใน (3.12)	20
3.4	ทางเดินรากของระบบประมาณเมื่อมีการออกแบบอัตราขยายการป้อนกลับที่เสนอใน (3.12) และ (3.14)	20
4.1	ระบบควบคุมเวกเตอร์ที่มีการควบคุมสเตเตอร์ฟลักซ์	22
4.2	แผนภาพแกนอ้างอิงสเตเตอร์ แกนอ้างอิงโรเตอร์ และแกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์	23
4.3	โครงสร้างการคำนวณค่า i_o , ω_o และ θ_o ด้วยแบบจำลองสเตเตอร์บนแกนอ้างอิง สเตเตอร์ฟลักซ์	24
4.4	วงรอบควบคุมความเร็วที่กำหนดคำสั่งกระแส i_{dq}^* สำหรับการควบคุมแบบแยกการเชื่อมร่วม	24
4.5	โครงสร้างของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง	27

รูปที่

4.6 ผลการจำลองการทำงานของระบบโดยเร่งความเร็วจาก 1350->1500->1650 rpm และลดความเร็วจาก 1650->1500 rpm ที่กระแสโรเตอร์ในแกน d (i_{rd}) 6 A สภาวะไร้โหลด	28
4.7 ผลการจำลองการทำงานของระบบโดยเร่งความเร็วจาก 1350->1500->1650 rpm และลดความเร็วจาก 1650->1500 rpm ที่กระแสโรเตอร์แกน d (i_{rd}) 6 A ย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	29
4.8 ผลการจำลองการทำงานของระบบโดยเร่งความเร็วจาก 1350->1500->1650 rpm และลดความเร็ว จาก 1650->1500 rpm ที่กระแสโรเตอร์แกน d (i_{rd}) 6 A ย่านมอเตอร์.....	30
4.9 ผลการจำลองการทำงานของระบบโดยลดแรงบิดโหลดจาก 0-> -27.4 Nm และเพิ่มแรงบิดโหลดจาก -27.4->0 Nm ที่ความเร็ว 1500 rpm และค่ากระแสโรเตอร์แกน d (i_{rd}) 6 A	31
4.10 ผลการจำลองการทำงานของระบบโดยเพิ่มแรงบิดโหลดจาก 0->27.4 Nm และลดแรงบิดโหลดจาก 27.4->0 Nm ที่ความเร็ว 1500 rpm และค่ากระแสโรเตอร์แกน d (i_{rd}) 6 A.....	32
4.11 ผลการจำลองการทำงานของระบบโดยเพิ่มกระแสโรเตอร์แกน d (i_{rd}) จาก 3->6 A ที่ความเร็ว 1500 rpm สภาวะไร้โหลด.....	33
4.12 ผลการจำลองการทำงานของระบบที่สถานะอยู่ตัวที่ความเร็ว 1500 rpm กระแสโรเตอร์ในแกน d (i_{rd}) 6 A สภาวะไร้โหลด.....	34
4.13 ผลการจำลองการทำงานของระบบที่สถานะอยู่ตัวที่ความเร็ว 1050 rpm กระแสโรเตอร์ แกน d (i_{rd}) 6 A ย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Sub-Synchronous Speed).....	35
4.14 ผลการจำลองการทำงานของระบบที่สถานะอยู่ตัวที่ความเร็ว 1950 rpm กระแสโรเตอร์ แกน d (i_{rd}) 6 A ย่านมอเตอร์ (Super-Synchronous Speed).....	36
4.15 การควบคุมกำลังรีแอกทีฟทางด้านโรเตอร์	37
4.16 โครงสร้างระบบควบคุมเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งในโหมดควบคุมกำลังรีแอกทีฟทางด้านโรเตอร์.....	38
4.17 ค่าคำสั่งกำลังรีแอกทีฟทางด้านสเตเตอร์	38
4.18 ผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งในโหมดควบคุมกำลังรีแอกทีฟทางด้านโรเตอร์ ที่ความเร็ว 1050 rpm ณ สภาวะไร้โหลด	39
4.19 ผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งในโหมดควบคุมกำลังรีแอกทีฟทางด้านโรเตอร์ ที่ความเร็ว 1500 rpm ณ สภาวะไร้โหลด	40

รูปที่

4.20 ผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งในโหมดควบคุมกำลังรีแอกทีฟทางด้านโรเตอร์ ที่ความเร็ว 1650 rpm ณ สภาวะไร้โหลด	41
5.1 โครงสร้างระบบทดสอบการควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง.....	43
5.2 ผลการทดลองของระบบที่สถานะอยู่ตัวที่สภาวะไร้โหลด ความเร็ว 1950 rpm และกระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ 3 A	45
5.3 ผลการทดลองของระบบที่สถานะอยู่ตัวที่สภาวะไร้โหลด ความเร็ว 1950 rpm และกระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ 6 A	46
5.4 ผลการทดลองของระบบที่สถานะอยู่ตัวที่สภาวะไร้โหลด ความเร็ว 1050 rpm และกระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ 3 A	47
5.5 ผลการทดลองของระบบที่สถานะอยู่ตัวที่สภาวะไร้โหลด ความเร็ว 1050 rpm และกระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ 6 A	48
5.6 ผลการทดลองของระบบที่สถานะอยู่ตัวที่สภาวะไร้โหลด ความเร็ว 1500 rpm และกระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ 3 A	49
5.7 ผลการทดลองของระบบที่สถานะอยู่ตัวที่สภาวะไร้โหลด ความเร็ว 1500 rpm และกระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ 6 A	50
5.8 ผลการทดลองของระบบที่สถานะอยู่ตัวที่ย่านมอเตอร์ ความเร็ว 1950 rpm และกระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ 3 A	51
5.9 ผลการทดลองของระบบที่สถานะอยู่ตัวที่ย่านมอเตอร์ ความเร็ว 1950 rpm และกระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ 6 A	52
5.10 ผลการทดลองของระบบที่สถานะอยู่ตัวที่ย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ความเร็ว 1050 rpm และกระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ 3 A	53
5.11 ผลการทดลองของระบบที่สถานะอยู่ตัวที่ย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ความเร็ว 1050 rpm และกระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ 6 A	54
5.12 ผลการทดลองของระบบที่การเปลี่ยนแปลงความเร็วแบบขึ้น สภาวะไร้โหลด และกระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ 3 A	57
5.13 ผลการทดลองของระบบที่การเปลี่ยนแปลงความเร็วแบบขึ้น สภาวะไร้โหลด และกระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ 6 A	58
5.14 ผลการทดลองของระบบที่การเปลี่ยนแปลงความเร็วแบบขึ้น ย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และกระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ 3 A	59

5.30 ผลการทดลองของระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงกระแสกระตุ้นสร้างสเตเตอร์ฟลักซ์ผ่านกระแสทางด้านโรเตอร์ i_{rd} จาก 3->6->3 A ที่ความเร็ว 1500 rpm และสภาวะไร้โหลด.....	78
5.31 ผลการทดลองของระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงกระแสกระตุ้นสร้างสเตเตอร์ฟลักซ์ผ่านกระแสทางด้านโรเตอร์ i_{rd} จาก 3->6->3 A ที่ความเร็ว 1500 rpm และย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ...	79
5.32 ผลการทดลองของระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงกระแสกระตุ้นสร้างสเตเตอร์ฟลักซ์ผ่านกระแสทางด้านโรเตอร์ i_{rd} จาก 3->6->3 A ที่ความเร็ว 1500 rpm และย่านมอเตอร์.....	80
5.33 ลักษณะสมบัติของแรงบิดและความเร็วที่ทดสอบโดยเปลี่ยนแปลงโหลดแบบแรมป์ จากโหลดย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไปเป็นโหลดในย่านมอเตอร์ ที่ความเร็ว 1050, 1350, 1500, 1650 และ 1950 rpm.....	81
จ.1 โครงสร้างฮาร์ดแวร์ที่ใช้ในการทดสอบของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง.....	95
จ.2 ไดอะแกรมเวลาของซอฟต์แวร์โมดูล.....	98

นิยามสัญลักษณ์

\bar{v}_s, \bar{v}_r	:	แรงดันสเตเตอร์และแรงดันโรเตอร์
\bar{i}_s, \bar{i}_r	:	กระแสสเตเตอร์และกระแสโรเตอร์
\bar{i}_o	:	กระแสกระตุ้นสร้างสเตเตอร์ฟลักซ์
$\bar{\lambda}_s, \bar{\lambda}_r$:	สเตเตอร์ฟลักซ์และโรเตอร์ฟลักซ์
R_s, R_r	:	ค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์และขดลวดโรเตอร์
L_s, L_r	:	ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดสเตเตอร์และขดลวดโรเตอร์
$\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r}$:	สัมประสิทธิ์การรั่วไหลรวม (Total Leakage Coefficient)
M	:	ค่าความเหนี่ยวนำร่วม
p	:	จำนวนคู่ขั้วของมอเตอร์
ω_m, ω_r	:	ความเร็วโรเตอร์ทางกลและทางไฟฟ้า
θ_m, θ_r	:	ตำแหน่งโรเตอร์ทางกลและทางไฟฟ้า
ω_o	:	ความถี่สเตเตอร์ฟลักซ์
θ_o	:	ตำแหน่งสเตเตอร์ฟลักซ์
ε	:	สัญญาณค่าผิดพลาดที่ใช้ในการประมาณค่าความเร็ว
T_e	:	แรงบิดเหนี่ยวนำ
Q_s	:	กำลังรีแอกทีฟทางด้านสเตเตอร์
Q_r	:	กำลังรีแอกทีฟทางด้านโรเตอร์ระหว่างเครื่องจักรกลกับวงจรแปลงผัน
Q_{gs}	:	กำลังรีแอกทีฟทางด้านโรเตอร์ระหว่างจุดเชื่อมต่อกับวงจรแปลงผัน
P_s	:	กำลังจริงทางด้านสเตเตอร์
K_p, K_I	:	อัตราขยายการปรับตัวของตัวสังเกตอันดับแบบปรับตัว
$K_{P\omega}, K_{I\omega}$:	อัตราขยายของวงรอบควบคุมความเร็ว
K_{Pc}, K_{Ic}	:	อัตราขยายของวงรอบควบคุมกระแส
\times	:	การคูณระหว่างเวกเตอร์
J	:	$\begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$
ตัวห้อย u, v, w	:	หมายถึง ปริมาณในเฟส u, v, w

ตัวห้อย α, β	หมายถึง องค์ประกอบในแกน α, β บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์
ตัวห้อย dr, qr	หมายถึง องค์ประกอบในแกน dr, qr บนแกนอ้างอิงโรเตอร์
ตัวห้อย d, q	หมายถึง องค์ประกอบในแกน d, q บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์
ตัวยก “ ’ ”	หมายถึง ค่าบนแกนอ้างอิงโรเตอร์
ตัวยก “ ^ ”	หมายถึง ค่าประมาณ
ตัวยก “ * ”	หมายถึง ค่าคำสั่ง



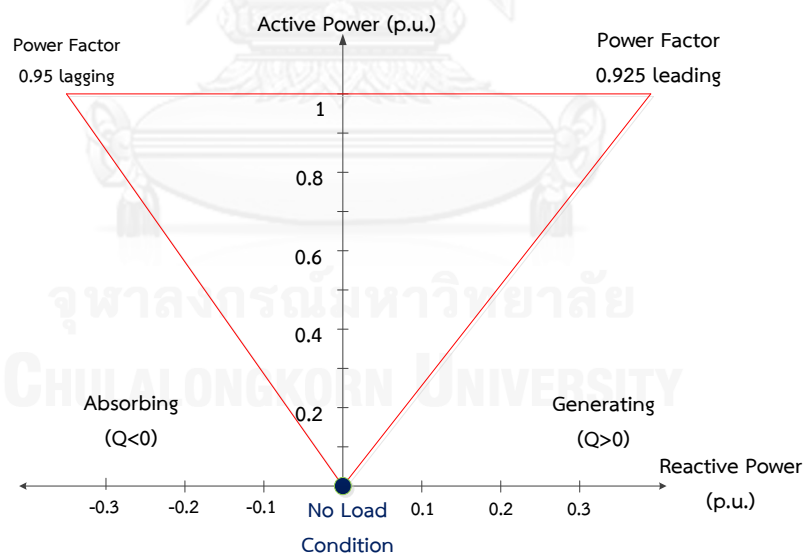
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเบื้องต้น

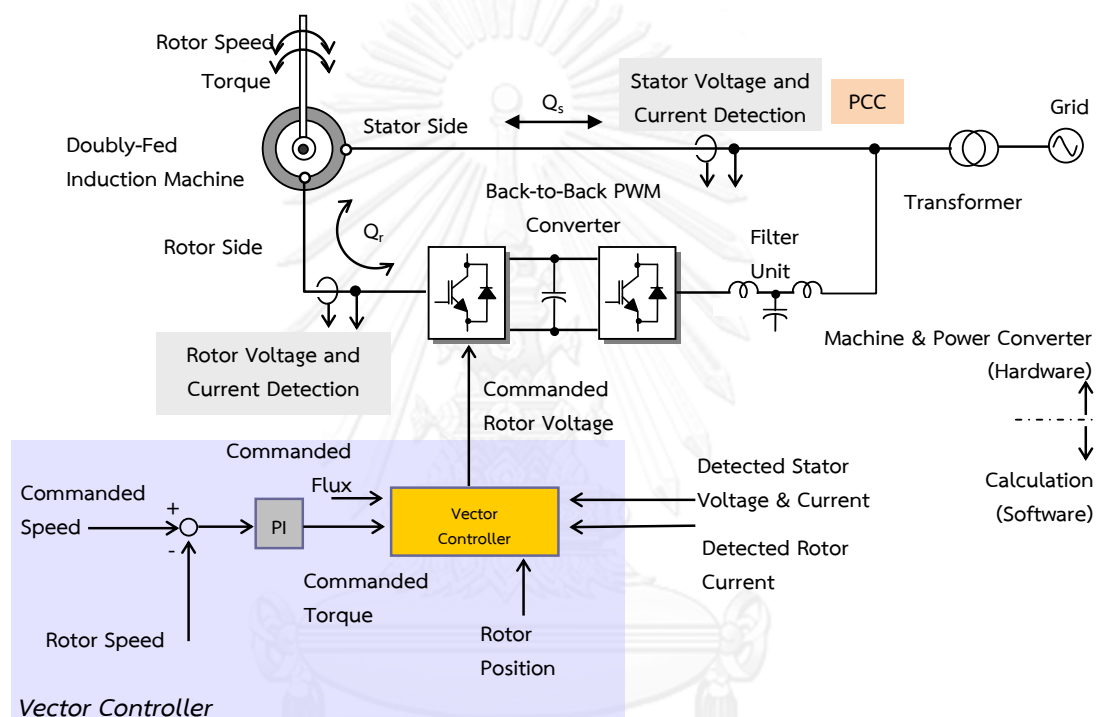
ระบบขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางเป็นที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานลม เนื่องจากวงจรแปลงผันกำลังมีขนาดพิกัด 30% ของพิกัดกำลังเครื่องจักรกล [1] ทำให้ลดค่าใช้จ่ายโดยรวมของระบบได้ อีกทั้งยังสามารถควบคุมกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟ ณ จุดเชื่อมต่อกริดผ่านทางขดลวดด้านโรเตอร์ได้ ในปัจจุบันพลังงานลมเป็นพลังงานที่มีสัดส่วนการติดตั้งเพิ่มขึ้นในทุกๆ ปี [2] โดยพบว่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากพลังงานลมทั่วโลกในปี 2012 มีค่าประมาณ 283 กิกะวัตต์ และในปี 2013 เพิ่มขึ้นเป็น 318 กิกะวัตต์ ด้วยสัดส่วนการติดตั้งระบบพลังงานลมที่เพิ่มมากขึ้น การเชื่อมต่อในปัจจุบันได้มีการปรับปรุงข้อกำหนดการเชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า (Grid Codes) โดยมีวัตถุประสงค์ให้แหล่งพลังงานไฟฟ้าแบบกระจายตัวมีฟังก์ชันสนับสนุนการทำงานของระบบไฟฟ้ากำลัง อาทิ การควบคุมกำลังรีแอกทีฟเพื่อเพิ่มคุณภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง รูปที่ 1.1 แสดงตัวอย่างข้อกำหนดที่มีฟังก์ชันการควบคุมกำลังรีแอกทีฟที่จุดเชื่อมสำหรับแหล่งพลังงานไฟฟ้าแบบกระจายตัว ซึ่งจะเห็นได้ว่าได้มีการกำหนดให้ค่ากำลังรีแอกทีฟมีค่าเป็นศูนย์ที่สภาวะไร้อโหลด



รูปที่ 1.1 กำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อกริดของ EWEA [3]

รูปที่ 1.2 แสดงโครงสร้างของระบบควบคุมเวกเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง โดยฝั่งสเตเตอร์ต่อเชื่อมตรงเข้าสู่กริด ในขณะที่ฝั่งโรเตอร์ต่อเชื่อมผ่านวงจรแปลงผันแบบหลังชนหลังไปบรรจบกับฝั่งสเตเตอร์ ณ จุดต่อเชื่อมร่วม (Point of Common Coupling; PCC) ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีการควบคุมค่าตัวประกอบกำลังตามข้อกำหนดโครงข่ายไฟฟ้า (Grid Codes)

แนวคิดในการควบคุมแบบดั้งเดิมจะให้ความสำคัญแก่การควบคุมกำลังจริงทางด้านสเตเตอร์ โดยกำลังรีแอกทีฟจะไหลจากจุดเชื่อมต่อเข้ามาที่เครื่องจักรกลทางด้านสเตเตอร์เพื่อสร้างกระแสกระตุ้นสร้างสเตเตอร์ฟลักซ์ ทำให้มีค่าตัวประกอบกำลังต่ำในกรณีโหลดเบาและไม่สอดคล้องกับข้อกำหนดการเชื่อมต่อ อย่างไรก็ตามเราสามารถปรับปรุงตัวประกอบกำลังที่จุดเชื่อมต่อได้ด้วยการควบคุมกำลังรีแอกทีฟทางด้านโรเตอร์ โดยกระแสกระตุ้นสร้างสเตเตอร์ฟลักซ์จะถูกกำหนดด้วยกำลังรีแอกทีฟที่ไหลวนระหว่างโรเตอร์กับวงจรแปลงผันกำลัง อาจกล่าวได้ว่าเพื่อให้สอดคล้องกับข้อกำหนดการเชื่อมต่อ เราจะต้องมีการควบคุมกำลังรีแอกทีฟทางด้านโรเตอร์ของเครื่องจักรกลเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางด้วย



รูปที่ 1.2 โครงสร้างของระบบควบคุมเวกเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง

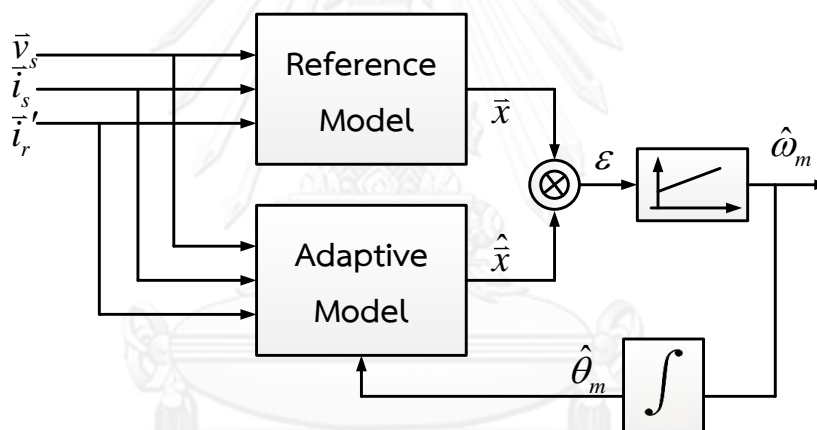
การควบคุมอัตราส่วนระหว่างกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางสามารถควบคุมได้ด้วยการควบคุมแบบเวกเตอร์ ซึ่งต้องอาศัยข้อมูลตำแหน่งโรเตอร์ที่มีการตรวจวัดด้วยเซนเซอร์วัดตำแหน่ง และมีวงจรส่วนเชื่อมต่อที่ทนทานต่อสัญญาณรบกวนได้อย่างดี อย่างไรก็ตามก็มีส่วนตรวจวัดตำแหน่งยังคงเป็นจุดอ่อนทางปฏิบัติที่สามารถเสียหาย และยังคงต้องการการซ่อมบำรุงหลังการติดตั้ง เพื่อให้ระบบสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องแม้เกิดความเสียหายขึ้นที่ส่วนตรวจวัดตำแหน่ง การควบคุมแบบเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งจึงเป็นโหมดป้องกันความผิดพลาด (Fail-Safe Mode) และเป็นโหมดทำงานสำรองที่รองรับปัญหาข้างต้น อีกทั้งยังเพิ่มความน่าเชื่อถือของระบบอีกด้วย

วิธีการประมาณค่าตำแหน่งโรเตอร์สำหรับการควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซ็นเซอร์วัดตำแหน่ง จะต้องมีคุณสมบัติประมาณค่าได้ตามเงื่อนไขการควบคุมกำลังรีแอกทีฟทางด้านโรเตอร์ได้ ซึ่งงานวิจัยในอดีตโดยส่วนใหญ่มีข้อจำกัดดังนี้

- 1) ระบบประมาณไม่สามารถประมาณตำแหน่งโรเตอร์ได้ที่สภาวะไร้โหลด
- 2) ปัญหาการเลื่อนของสัญญาณดีซีออฟเซต อันเนื่องมาจากการคำนวณสเตเตอร์ฟลักซ์ ด้วยการอินทิเกรต
- 3) ระบบประมาณมีการคำนวณที่ซับซ้อน และต้องการพารามิเตอร์เกินความจำเป็น

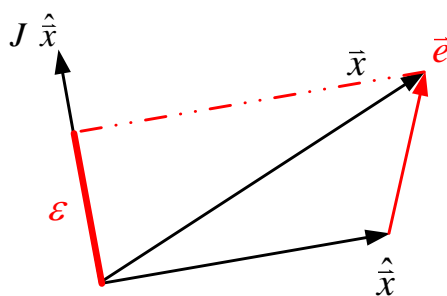
เป้าหมายหลักของงานวิจัยนี้คือนำเสนอวิธีการประมาณตำแหน่งโรเตอร์สำหรับระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซ็นเซอร์วัดตำแหน่งที่มีการควบคุมกำลังรีแอกทีฟทางด้านโรเตอร์ โดยระบบประมาณสามารถประมาณค่าตำแหน่งโรเตอร์ได้ในทุกเงื่อนไขการทำงาน ไม่มีข้อจำกัดจากปัญหาการเลื่อนของสัญญาณดีซีออฟเซต และมีการคำนวณที่เรียบง่าย ไม่ซับซ้อน

1.2 การประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์สำหรับระบบไร้เซ็นเซอร์วัดตำแหน่ง



รูปที่ 1.3 การประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์ด้วยวิธี MRAS

เป็นที่ยอมรับว่าวิธีการประมาณตำแหน่งโรเตอร์ด้วยระบบแบบจำลองปรับตัว (Model Reference Adaptive System; MRAS) เป็นวิธีที่เหมาะสมในทางปฏิบัติ ในเบื้องต้นจะกล่าวถึงหลักการพื้นฐานการประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์ด้วยวิธี MRAS โดยพอสังเขป และในลำดับถัดไปเราจะเปรียบเทียบการประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์ของงานวิจัยในอดีต [4]-[7]



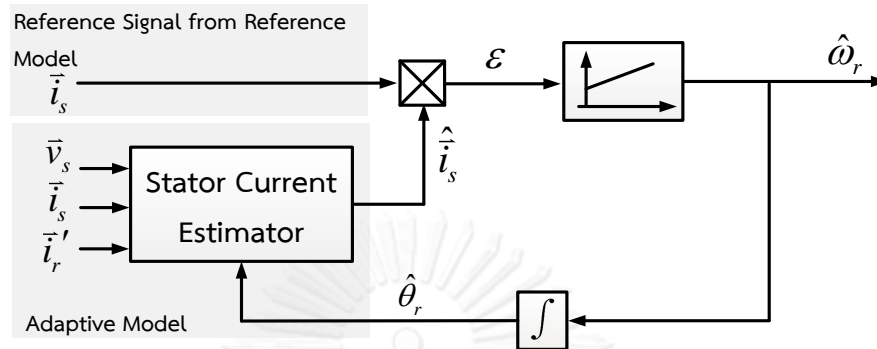
รูปที่ 1.4 แผนภาพการคำนวณค่าผิดพลาดด้วยการโปรเจกต์เวกเตอร์ผิดพลาด \bar{e} ลงบนเวกเตอร์รีเกรสเซอร์ $J \hat{x}$

รูปที่ 1.3 แสดงโครงสร้างของระบบประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์ด้วยวิธี MRAS โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นหลัก ซึ่งประกอบด้วย 1) แบบจำลองอ้างอิง (Reference Model) เป็นแบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับข้อมูลตำแหน่งโรเตอร์และ/หรือความเร็วโรเตอร์ และมีสัญญาณด้านออกเป็นอ้างอิง \bar{x} 2) แบบจำลองปรับตัว (Adaptive Model) เป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับข้อมูลตำแหน่งโรเตอร์และ/หรือความเร็วโรเตอร์ และมีหน้าที่คำนวณสัญญาณประมาณ \hat{x} โดยค่าผิดพลาดระหว่างสัญญาณอ้างอิง (\bar{x}) กับสัญญาณประมาณ (\hat{x}) สะท้อนถึงค่าผิดพลาดตำแหน่งโรเตอร์ เนื่องจากทั้งสัญญาณอ้างอิง (\bar{x}) และสัญญาณประมาณ (\hat{x}) ล้วนเป็นปริมาณเวกเตอร์ ดังนั้นในการประมาณค่าตำแหน่งโรเตอร์ (ปริมาณสเกลาร์) เราจะคำนวณค่าผิดพลาดด้วยผลคูณเชิงเวกเตอร์ของสัญญาณทั้งสอง ($\bar{x} \otimes \hat{x}$) และโปรเจกต์ลงบนทิศทางของเวกเตอร์รีเกรสเซอร์ $J \hat{x}$ ตามสมการ (1.1) หรือนำผลต่างของเวกเตอร์ผิดพลาด ($\bar{x} - \hat{x}$) โปรเจกต์ลงบนเวกเตอร์รีเกรสเซอร์ $J \hat{x}$ ตามสมการ (1.2) ผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นปริมาณสเกลาร์ ε ที่สะท้อนถึงค่าผิดพลาดตำแหน่งโรเตอร์ ($\hat{\theta}_m - \theta_m$) รูปที่ 1.4 แสดงกลไกการคำนวณค่า ε เพื่อใช้ในการคำนวณค่าความเร็วโรเตอร์ประมาณ $\hat{\omega}_m$ และค่าตำแหน่งโรเตอร์ประมาณ $\hat{\theta}_m$ ความเร็วโรเตอร์ประมาณหรือตำแหน่งโรเตอร์ประมาณจะถูกป้อนกลับไปแบบจำลองปรับตัว ซึ่งสามารถพิจารณาได้ว่าเมื่อค่าผิดพลาดและเวกเตอร์ผิดพลาด (ε, \bar{e}) ลู่เข้าสู่ค่าศูนย์ ค่าความเร็วโรเตอร์ประมาณและค่าตำแหน่งโรเตอร์ประมาณจะมีค่าถูกต้องหรือมีค่าเท่ากับความเร็วโรเตอร์จริงและตำแหน่งโรเตอร์จริง จากงานวิจัยในอดีต การประมาณค่าตำแหน่งโรเตอร์และค่าความเร็วโรเตอร์ด้วยวิธี MRAS จะมีลักษณะสมบัติแตกต่างไปตามแบบจำลองและ/หรือค่าสัญญาณอ้างอิงที่เลือกใช้ ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดของแต่ละวิธีในหัวข้อถัดไป

$$\varepsilon = (\bar{x} \otimes \hat{x}) \cdot \bar{e} \quad (1.1)$$

$$\varepsilon = (\bar{x} - \hat{x})^T J \hat{x} = \bar{e}^T J \hat{x} \quad (1.2)$$

1.2.1 การประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์ด้วยค่าผิดพลาดของกระแสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์และมีการคำนวณสเตเตอร์ฟลักซ์ [4]



รูปที่ 1.5 โครงสร้างของระบบประมาณตำแหน่งโดยใช้ค่าผิดพลาดกระแสเตเตอร์

บทความของ R. Cardenas [4] ได้นำเสนอการประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์โดยอาศัยค่าผิดพลาดกระแสเตเตอร์ รูปที่ 1.5 แสดงโครงสร้างของระบบประมาณ สัญญาณอ้างอิงคือกระแสเตเตอร์ที่ตรวจวัดจากฝั่งสเตเตอร์ \vec{i}_s สัญญาณปรับตัวคือกระแสเตเตอร์ประมาณ $\hat{\vec{i}}_s$ ซึ่งคำนวณได้ดังสมการ (1.3)

$$\hat{\vec{i}}_s = \left(\frac{\vec{\lambda}_s - Me^{j\hat{\theta}_r} \vec{i}_r'}{L_s} \right) \quad (1.3)$$

การประมาณกระแสเตเตอร์ใน (1.3) ต้องคำนวณผ่านค่าสเตเตอร์ฟลักซ์ $\vec{\lambda}_s$ ที่ได้จากการอินทิเกรตแรงดันสเตเตอร์ดังสมการ (1.4) ซึ่งทำให้เกิดปัญหาการเลื่อนของสัญญาณดีซีออฟเซตในทางปฏิบัติได้

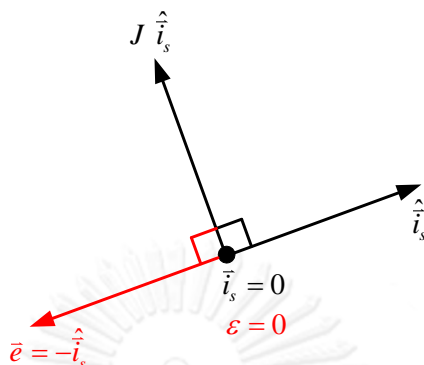
$$\vec{\lambda}_s = \int (\vec{v}_s - \vec{i}_s R_s) dt \quad (1.4)$$

การประมาณค่าความเร็วโรเตอร์จะอาศัยสัญญาณผิดพลาด ε ตามสมการ (1.5) โดยมีกระแสเตเตอร์ประมาณเป็นเวกเตอร์รีเกรสเซอร์ $J \hat{\vec{i}}_s$ จากข้อกำหนดการเชื่อมต่อในรูปที่ 1.5 พบว่าที่สภาวะไร้อโหลด ($P_s = 0$) กำลังรีแอกทีฟที่จุดเชื่อมต่อต้องเท่ากับศูนย์ ($Q_s = 0$) กระแสเตเตอร์จะมีค่าเท่ากับศูนย์ ($\vec{i}_s = 0$) ที่เงื่อนไขนี้ ทำให้เวกเตอร์รีเกรสเซอร์มีค่าเป็นศูนย์ด้วย ในกรณีนี้จะทำให้ระบบประมาณขาดคุณสมบัติในการประมาณค่าได้ (Loss of Identifiability)

$$\varepsilon = \left(\vec{i}_s - \hat{\vec{i}}_s \right)^T J \hat{\vec{i}}_s = \vec{e}^T J \hat{\vec{i}}_s \quad (1.5)$$

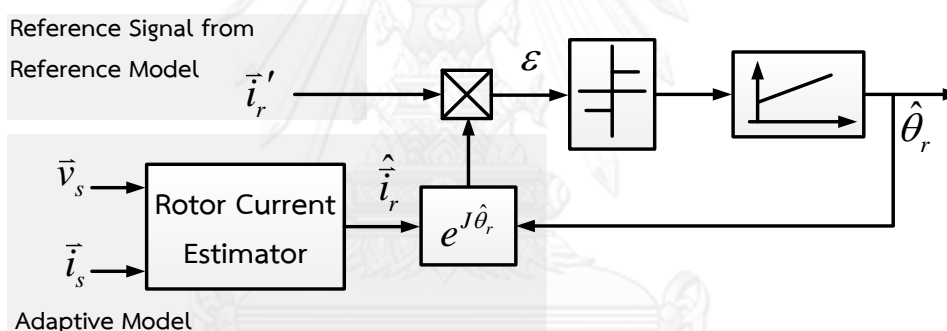
ยกตัวอย่างเช่นในกรณีที่ $\hat{\theta}_r \neq \theta_r$ และ $\vec{i}_s = 0$ ดังแสดงในรูปที่ 1.6 เราจะพบว่าเวกเตอร์ผิดพลาด \vec{e} จะมีค่าเท่ากับ $-\hat{\vec{i}}_s$ ซึ่งมีทิศตั้งฉากกับเวกเตอร์รีเกรสเซอร์ $J \hat{\vec{i}}_s$ เมื่อโปรเจกต์เวกเตอร์ผิดพลาด \vec{e} ลงบนเวกเตอร์รีเกรสเซอร์ $J \hat{\vec{i}}_s$ ค่าผิดพลาด ε จะมีค่าเท่ากับศูนย์ ระบบประมาณจะหยุดการประมาณแม้ว่าความเร็วประมาณและตำแหน่งโรเตอร์ประมาณยังคงมีความผิดพลาดอยู่ก็ตาม ซึ่งกล่าวได้ว่าระบบไม่สามารถประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์ได้ การประมาณความเร็วโร

เตอร์ด้วยวิธีข้างต้น จึงมีข้อจำกัดสำหรับโหมตควบคุมกำลังรีแอคทีฟทางด้านโรเตอร์ตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อ



รูปที่ 1.6 เวกเตอร์โตะแกรมแสดงการขาดคุณสมบัติในการประมาณที่สภาวะไร้โหลด ($\hat{i}_s = 0$)

1.2.2 การประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์ด้วยการคำนวณค่าสเตเตอร์ฟลักซ์ [5]



รูปที่ 1.7 โครงสร้างของระบบประมาณตำแหน่งโดยใช้การประมาณกระแสโรเตอร์

G. D. Marques [5] นำเสนอวิธีการประมาณค่าความเร็วและค่าตำแหน่งโรเตอร์ด้วยค่าผิดพลาดกระแสโรเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 1.7 โดยตรวจจับกระแสโรเตอร์ \hat{i}_r' เป็นสัญญาณอ้างอิงและประมาณกระแสโรเตอร์ \hat{i}_r' ด้วยข้อมูลสเตเตอร์ฟลักซ์ $\hat{\lambda}_s$ ดังแสดงในสมการ (1.6)

$$\hat{i}_r' = e^{-j\hat{\theta}_r} \left(\frac{\hat{\lambda}_s - L_s \vec{i}_s}{M} \right) \quad (1.6)$$

และค่าผิดพลาด ε สามารถคำนวณได้ดังสมการ (1.7)

$$\varepsilon = \left(\vec{i}_r' - \hat{i}_r' \right)^T J \hat{i}_r' \quad (1.7)$$

พิจารณาสมการ (1.7) พบว่า เวกเตอร์รีเกรสเซอร์ $J \hat{i}_r'$ ถูกกำหนดด้วยกระแสโรเตอร์ประมาณ ซึ่งในกรณีควบคุมกำลังรีแอคทีฟทางด้านโรเตอร์ กระแสโรเตอร์จะสร้างฟลักซ์ให้แก่เครื่องจักรกล เวกเตอร์รีเกรสเซอร์จึงมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ ($\hat{i}_r' \neq 0$) ซึ่งทำให้ระบบประมาณสามารถทำงานได้โดย

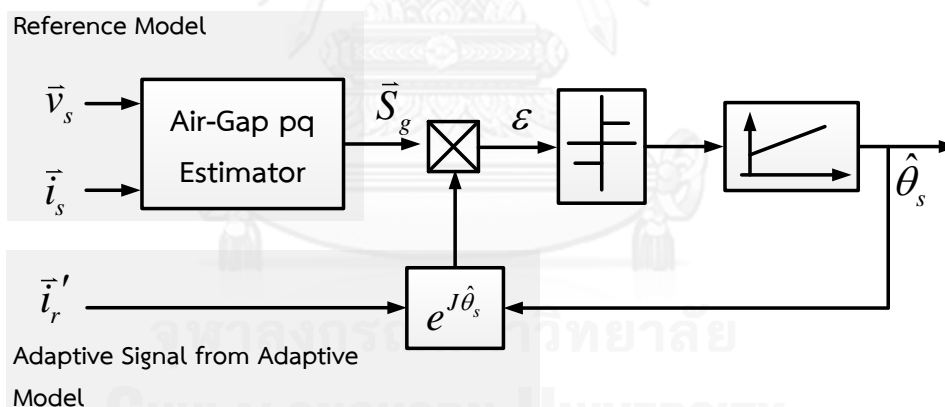
ปราศจากข้อจำกัดที่สภาวะไร้โหลด อย่างไรก็ตามการประมาณกระแสโรเตอร์จำเป็นต้องคำนวณค่าสเตเตอร์ฟลักซ์ด้วยการอินทิเกรต ทำให้เกิดปัญหาการเลื่อนของสัญญาณดีซีออฟเซตในทางปฏิบัติได้

1.2.3 การประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์ด้วยค่าผิดพลาดของกำลังที่ช่องอากาศบนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์ [6]

บทความวิจัยถัดมาของ G. D. Marques [6] ใช้ค่าผิดพลาดของกำลังที่ช่องอากาศในการประมาณความถี่สลลิป ทั้งนี้การคำนวณกำลังที่ช่องอากาศ \bar{S}_g จะคำนวณผ่านแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำของสเตเตอร์ฟลักซ์ จึงสามารถลดปัญหาการเลื่อนของสัญญาณดีซีออฟเซตได้ รูปที่ 1.8 แสดงโครงสร้างของระบบประมาณตำแหน่ง ซึ่งจะเห็นได้ว่าสัญญาณอ้างอิงคือกำลังช่องอากาศ \bar{S}_g ที่คำนวณจากสมการสเตเตอร์ สัญญาณประมาณคือกระแสโรเตอร์ที่แปรผันตรงกับกำลังช่องอากาศ สัญญาณผิดพลาดสามารถคำนวณได้ดังสมการ (1.8)

$$\varepsilon = (\bar{S}_g - \bar{i}'^T) J \hat{i}' \quad (1.8)$$

จากสมการ (1.8) จะสังเกตได้ว่า วิธีประมาณนี้มีกระแสโรเตอร์เป็นเวกเตอร์รีเกรสเซอร์ $J\hat{i}'$ จึงไม่มีข้อจำกัดในการประมาณตำแหน่งโรเตอร์เมื่อนำไปใช้กับระบบขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางที่ควบคุมกำลังรีแอกทีฟทางด้านโรเตอร์ตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อ



รูปที่ 1.8 โครงสร้างของระบบประมาณตำแหน่งโดยใช้การประมาณกำลังช่องอากาศ

อย่างไรก็ดีข้อจำกัดของระบบประมาณวิธีนี้คือการคำนวณกำลังที่ช่องอากาศต้องอาศัยพารามิเตอร์เพิ่มเติม เช่น กำลังสูญเสียแกนเหล็ก และกำลังรีแอกทีฟ ณ สภาวะไร้โหลด อีกทั้งขั้นตอนการคำนวณกำลังที่ช่องอากาศค่อนข้างยุ่งยากและซับซ้อน

1.2.4 การประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์ด้วยค่าผิดพลาดกระแสโรเตอร์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์โดยอาศัยการคำนวณแรงบิด [7]

F. C. Dezza [7] ได้นำเสนอการประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์ด้วยค่าผิดพลาดกระแสโรเตอร์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์ รูปที่ 1.9 แสดงโครงสร้างของระบบประมาณ สัญญาณ

อ้างอิงคือกระแสโรเตอร์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์ (i_{rd}, i_{rq}) ซึ่งคำนวณผ่านค่าแรงบิดเหนี่ยวนำ T_e และค่าสเตเตอร์ฟลักซ์ $\vec{\lambda}_s$ ตามสมการ (1.9)-(1.10)

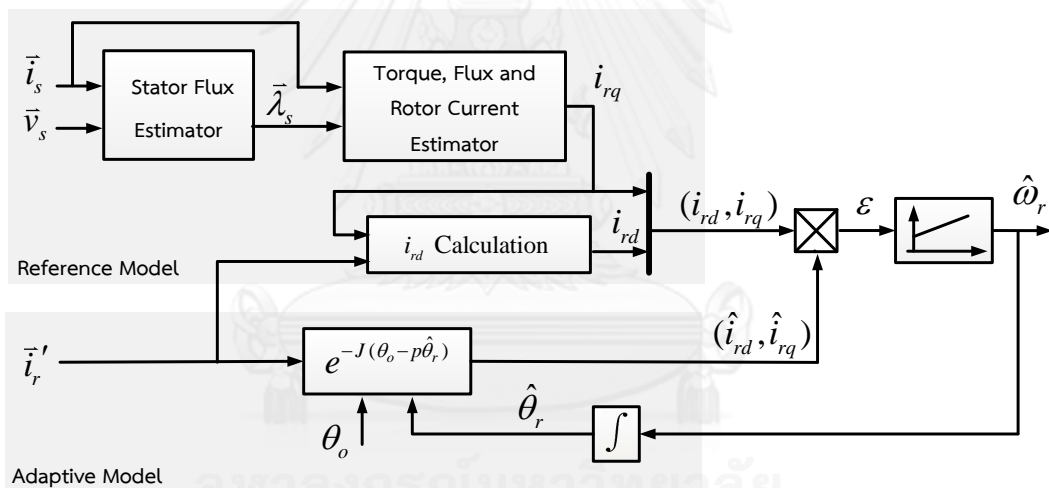
$$i_{rq} = \frac{L_s T_e}{M |\vec{\lambda}_s|} = \frac{L_s - p(\vec{i}_s \times \vec{\lambda}_s)}{M |\vec{\lambda}_s|} \quad (1.9)$$

$$i_{rd} = \sqrt{|\vec{i}_r|^2 - i_{rq}^2} \quad (1.10)$$

ในส่วนของแบบจำลองปรับตัว การคำนวณกระแสโรเตอร์ประมาณบนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์ ($\hat{i}_{rd}, \hat{i}_{rq}$) จะอาศัยการตรวจจับกระแสโรเตอร์ และข้อมูลป้อนกลับของตำแหน่งโรเตอร์ที่ได้จากระบบประมาณ ค่าผิดพลาดกระแสโรเตอร์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์ ε สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\varepsilon = \left(\vec{i}_{r,dq} - \hat{i}_{r,dq} \right)^T J \hat{i}_{r,dq} \quad (1.11)$$

พิจารณาสมการ (1.11) จะสังเกตได้ว่า เวกเตอร์รีเกรสเซอร์ คือ กระแสโรเตอร์ประมาณ ($\hat{i}_{rd}, \hat{i}_{rq}$) การประมาณวิธีนี้จึงไม่มีข้อจำกัดที่เงื่อนไขไร้โหดด้วยเหตุผลเดียวกันกับวิธีประมาณในหัวข้อที่แล้ว



รูปที่ 1.9 โครงสร้างของระบบประมาณตำแหน่งโดยใช้การประมาณกระแสโรเตอร์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์

อย่างไรก็ดีการประมาณความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์วิธีนี้ ต้องอาศัยการคำนวณสเตเตอร์ฟลักซ์ ทำให้เกิดปัญหาการเลื่อนของสัญญาณดีซีออฟเซต อีกทั้งขั้นตอนการคำนวณสัญญาณอ้างอิงดังรูปที่ 1.9 มีความยุ่งยากและซับซ้อน

ตารางที่ 1.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติการประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์ของงานวิจัยที่ผ่านมา

Estimation Method	Error Signal	Identifiability at light load	DC-Offset Drift Problem	Complexity of Calculation	Remark
R.Cardenas [4] May 2008	Stator current on stator ref. frame with stator flux calculation	No	Yes	Simple	-
G.D.Marques [5] Mar 2011	Rotor current on rotor ref. frame with stator flux calculation	Yes	Yes	Simple	Noisy with hysteresis control
G.D.Marques [6] Oct 2011	Air-gap power on stator flux ref. frame	Yes	No	Fair	Require core-loss parameter
F.C.Dezza [7] May 2012	Rotor current on stator flux ref. frame with stator flux & torque calculations	Yes	Yes	Complicated	-
Proposed approach in this thesis	Stator current on stator ref. frame	Yes	No	Simple	-

1.2 สรุปปัญหาและข้อจำกัดของงานวิจัยที่ผ่านมา

1) การประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์ที่สภาวะไร้โหลด: ตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อ สภาวะไร้โหลด กำลังรีแอกทีฟมีค่าเท่ากับศูนย์ ระบบประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์ในงานวิจัย [4] ขาดคุณสมบัติในการประมาณค่าได้

2) การเลื่อนของสัญญาณดีซีออฟเซต: งานวิจัยที่อาศัยการคำนวณค่าสเตเตอร์ฟลักซ์ [5]-[7] จำเป็นต้องแก้ปัญหการเลื่อนของสัญญาณดีซีออฟเซตโดยใช้วงจรกรองผ่านแถบหรือวงจรกรองผ่านต่ำแทนตัวอินทิเกรต ทำให้ไม่สามารถคำนวณสเตเตอร์ฟลักซ์ได้อย่างถูกต้องได้

3) การคำนวณที่ซับซ้อน: การเลือกแบบจำลองและสัญญาณอ้างอิงที่ไม่เหมาะสม ทำให้การคำนวณมีความซับซ้อนเกินความจำเป็น [6]-[7] รวมถึงต้องการข้อมูลพารามิเตอร์ของเครื่องจักรกลเพิ่มเติมอีกด้วย

1.3 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

นำเสนอระบบประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางที่โดยใช้แบบจำลองสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์และค่าความผิดพลาดกระแสสเตเตอร์ ระบบประมาณมีคุณสมบัติดังนี้

1. ระบบประมาณสามารถประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์ได้ทุกเงื่อนไขการทำงานในโหมดการควบคุมกำลังรีแอกทีฟทางด้านโรเตอร์ ($i_r' \neq 0$) สอดคล้องตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อกริด
2. ระบบประมาณสามารถประมาณค่าได้ โดยไม่พบปัญหาการเลื่อนสัญญาณดีซีออฟเซตจากการอินทิเกรต

3. การคำนวณในระบบประมามีความเรียบง่าย ไม่ซับซ้อน

1.4 ขอบเขตวิทยานิพนธ์

พัฒนาและสร้างระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง โดยระบบประมามีสามารถประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์ตามวิธีและเงื่อนไขที่ได้นำเสนอ และระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งสามารถควบคุมสมรรถนะของเครื่องจักรกลไฟฟ้าได้สอดคล้องกับทฤษฎีการควบคุมแบบแยกเชื่อมร่วม (Decoupling Control)

1.5 วิธีดำเนินการ

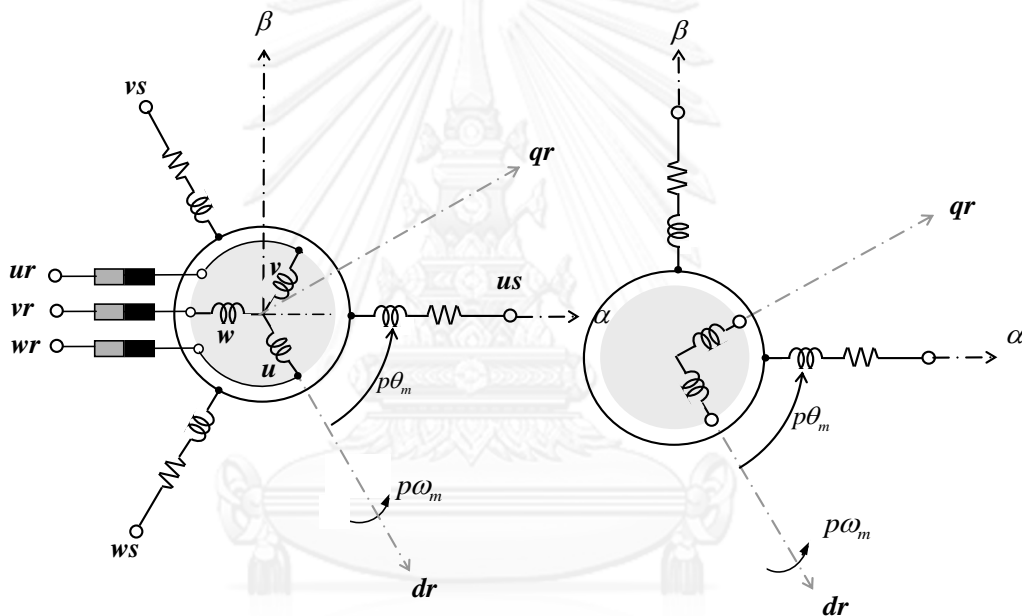
1. ศึกษาแบบจำลองพื้นฐานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง
2. ศึกษาระบบประมาณความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์ด้วยตัวสังเกตอันดับแบบปรับตัวโดยใช้แบบจำลองสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์
3. พิสูจน์เสถียรภาพของระบบประมาณด้วยการทำให้เป็นเชิงเส้น พร้อมทั้งนำเสนอการออกแบบอัตราขยายแบบปรับตัวของระบบประมาณ
4. จำลองการทำงานการควบคุมแบบเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink
5. ศึกษาและพัฒนาระบบควบคุมของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางในทางปฏิบัติ อาทิ ตัวประมวลผลดีเอสพี วงจรวัดแรงดัน วงจรวัดกระแส การเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานแก่ตัวประมวลผลดีเอสพี เป็นต้น
6. เก็บผลการทดสอบสมรรถนะการทำงานของเครื่องจักรกลโดยเปรียบเทียบระหว่างการควบคุมเวกเตอร์แบบมีเซนเซอร์วัดตำแหน่งและการควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง
7. วิเคราะห์ผลการทดลอง และเขียนเล่มวิทยานิพนธ์

บทที่ 2

ระบบประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์ด้วยตัวสังเกตลดอันดับแบบปรับตัว

ในบทนี้จะกล่าวถึง ระบบประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์ด้วยตัวสังเกตลดอันดับแบบปรับตัว (Reduced-order Adaptive Observer) โดยเริ่มจากการอธิบายถึงแบบจำลองทางพลวัตของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง จากนั้นเราจะพิจารณาแบบจำลองที่ได้กล่าวถึง เพื่อสร้างตัวสังเกตลดอันดับแบบปรับตัว พร้อมทั้งอธิบายกลไกการประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์

2.1. แบบจำลองทางพลวัตของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง



(ก) แบบจำลอง 3 เฟส

(ข) แบบจำลอง 2 เฟส

รูปที่ 2.1 โครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง

รูปที่ 2.1(ก) แสดงโครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางซึ่งประกอบด้วยขดลวด 3 เฟสทางด้านสเตเตอร์ และขดลวด 3 เฟสทางด้านโรเตอร์ โดยอาศัยการแปลงปริมาณ 3 เฟสเป็น 2 เฟสแบบคลาร์ก (Clark's Transformation) เราสามารถแสดงแบบจำลอง 2 เฟสได้ดังรูปที่ 2.1(ข) โดยขดลวดสเตเตอร์อ้างอิงบนแกนนิ่งหรือแกนอ้างอิงสเตเตอร์ ($\alpha - \beta$) และขดลวดโรเตอร์อ้างอิงบนแกนหมุนของโรเตอร์ ($dr - qr$) ซึ่งเหมือนกับแกนอ้างอิงสเตเตอร์ด้วยมุมโรเตอร์ ($p\theta_m$) เราสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสของขดลวดทั้งสองได้ดังนี้

สมการแบบจำลองฝั่งสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ ($\alpha - \beta$)

$$\vec{v}_s = \vec{i}_s R_s + \frac{d\vec{\lambda}_s}{dt} \quad (2.1)$$

โดยที่ฟลักซ์ค้ำของขดลวดสเตเตอร์คือ

$$\vec{\lambda}_s = L_s \vec{i}_s + M \left(e^{jp\theta_m} \vec{i}_r' \right) \quad (2.2)$$

สมการแบบจำลองฝั่งสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ ($dr - dq$)

$$\vec{v}_r' = \vec{i}_r' R_r + \frac{d\vec{\lambda}_r'}{dt} \quad (2.3)$$

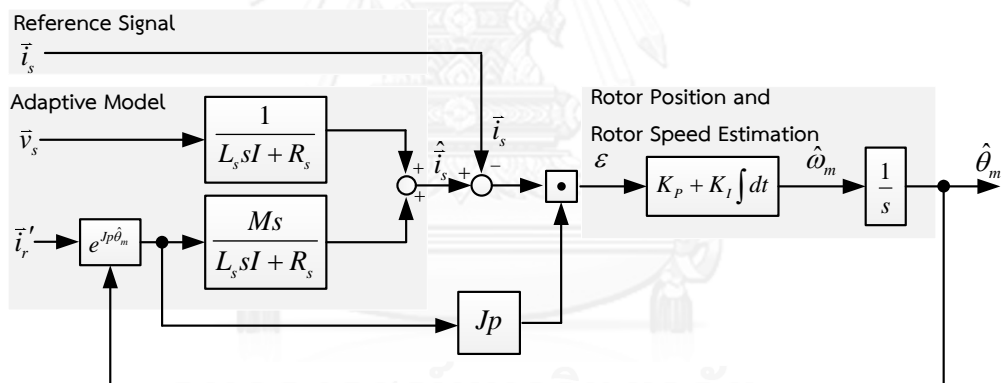
โดยที่ฟลักซ์ค้ำของขดลวดโรเตอร์คือ

$$\vec{\lambda}_r' = L_r \vec{i}_r' + M \left(e^{-jp\theta_m} \vec{i}_s \right) \quad (2.4)$$

สมการแรงบิด

$$T_e = -p \left(\vec{i}_s \times \vec{\lambda}_s \right) \quad (2.5)$$

2.2. ตัวสังเกตลดอันดับแบบปรับตัว



รูปที่ 2.2 ระบบประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์ด้วยตัวสังเกตลดอันดับแบบปรับตัว

เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางมีจุดเด่นคือสามารถตรวจจับแรงดันและกระแสได้ทั้งทางฝั่งสเตเตอร์และฝั่งโรเตอร์ จากแบบจำลองพลวัตของสมการสเตเตอร์และสมการโรเตอร์ (สมการ(2.1)-(2.4)) พบว่ามีเพียงตำแหน่งโรเตอร์ ($p\theta_m$) เท่านั้นที่ไม่ทราบค่า (สำหรับกรณีไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง) ในการประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะสร้างตัวสังเกตลดอันดับแบบปรับตัวจากแบบจำลองสเตเตอร์ โดยเบื้องต้นเราจะจัดรูปสมการสเตเตอร์ (2.1)-(2.2) ให้อยู่บนแกนอ้างอิงขดลวดสเตเตอร์ดังสมการ (2.6) แกนอ้างอิงชนิดนี้มีชื่อเฉพาะในทางทฤษฎีของเครื่องจักรกลไฟฟ้าว่า “แกนอ้างอิงโฮโลโนมิก (Holonomic Reference Frame) [8]” ซึ่งมีข้อดีหลัก คือ ในแบบจำลองไม่มีเทอมความเร็ว ทำให้สามารถออกแบบอัตราขยายป้อนกลับ (Feedback gain) โดยไม่ต้องใช้ข้อมูลของความเร็วจริงได้ ข้อดีรองคือ เนื่องจากเราใช้ค่าผิดพลาดของกระแส

สเตเตอร์เป็นสัญญาณค่าผิดพลาดในการประมาณ และการประมาณกระแสสเตเตอร์ (\bar{i}_s) สามารถใช้แบบจำลองสเตเตอร์ได้ (ดังแสดงในสมการ (2.7)) โดยไม่จำเป็นต้องคำนวณค่าสเตเตอร์ฟลักซ์ ($\hat{\lambda}_s$) ทำให้ลดปัญหาการเลื่อนของสัญญาณดิจิตอลเฟสได้

ตัวสังเกตลดอันดับแบบปรับตัวประกอบด้วย 1) สัญญาณอ้างอิงคือกระแสสเตเตอร์ที่ตรวจวัดได้ และ 2) สัญญาณปรับตัวที่เป็นกระแสสเตเตอร์ประมาณจากการคำนวณ จากสมการ (2.6) เมื่อแทนค่าตำแหน่งโรเตอร์ประมาณ เราสามารถคำนวณกระแสสเตเตอร์ประมาณได้ว่า

$$\frac{d\bar{i}_s}{dt} = -\frac{R_s}{L_s} \bar{i}_s - \frac{M}{L_s} \frac{d}{dt} (e^{Jp\theta_m} \cdot \bar{i}_r') + \frac{\bar{v}_s}{L_s} \quad (2.6)$$

$$\frac{d\hat{i}_s}{dt} = -\frac{R_s}{L_s} \hat{i}_s - \frac{M}{L_s} \frac{d}{dt} (e^{Jp\hat{\theta}_m} \cdot \bar{i}_r') + \frac{\bar{v}_s}{L_s} \quad (2.7)$$

จากสมการ (2.6)-(2.7) สมการค่าผิดพลาดกระแสสเตเตอร์สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\frac{d}{dt} (\hat{i}_s - \bar{i}_s) = \frac{d\bar{e}_s}{dt} = -\frac{R_s}{L_s} \bar{e}_s - \frac{M}{L_s} \frac{d}{dt} \left[(e^{Jp\hat{\theta}_m} - e^{Jp\theta_m}) \bar{i}_r' \right] \quad (2.8)$$

พิจารณาสมการค่าผิดพลาดกระแสสเตเตอร์ (สมการ (2.8)) พบว่าเวกเตอร์ผิดพลาดกระแสสเตเตอร์ \bar{e}_s สะท้อนถึงค่าผิดพลาดของตำแหน่งโรเตอร์ในเทอมของ $(e^{Jp\hat{\theta}_m} - e^{Jp\theta_m})$ กำหนดให้เวกเตอร์รีเกรสเซอร์คือกระแสโรเตอร์ $Jp\hat{i}_r$ เมื่อเวกเตอร์ผิดพลาดกระแสสเตเตอร์ \bar{e}_s ถูกโปรเจกต์ลงบนเวกเตอร์รีเกรสเซอร์ เราจะสามารถคำนวณค่าสัญญาณผิดพลาด ε เป็นปริมาณสเกลาร์ได้ดังสมการ (2.9)

$$\varepsilon = \left(Jp\hat{i}_r \right)^T \bar{e}_s \quad (2.9)$$

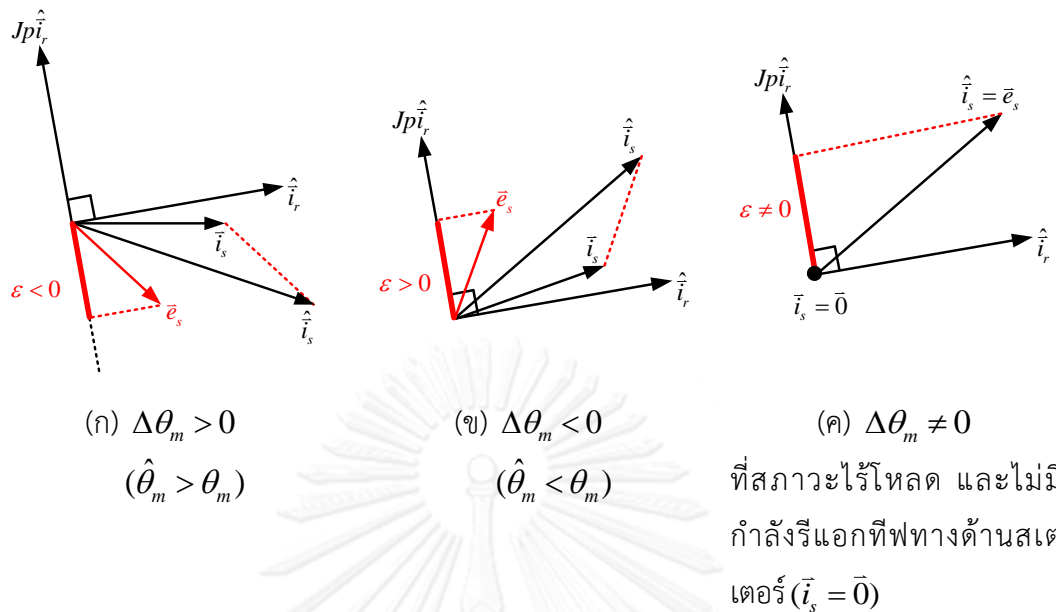
ค่าสัญญาณผิดพลาด ε จะถูกนำมาประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์ด้วยอัตราขยายปรับตัวแบบพีโอ โดยอาศัยสมการประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์ดังสมการ (2.10)-(2.11)

$$\hat{\omega}_m = \left(K_p + K_I \int dt \right) \left[\left(Jp\hat{i}_r \right)^T \bar{e}_s \right] \quad (2.10)$$

$$\hat{\theta}_m = \int \hat{\omega}_m dt \quad (2.11)$$

โดยที่ $K_p, K_I > 0$

รูปที่ 2.2 แสดงแผนภาพระบบประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์ด้วยตัวสังเกตลดอันดับแบบปรับตัว โดยกำหนดให้อัตราขยายการปรับตัวมีค่ามากกว่าศูนย์ ($K_p, K_I > 0$) จะเห็นได้ว่าระบบประมาณมีขั้นตอนการคำนวณที่เรียบง่าย และไม่จำเป็นต้องคำนวณสเตเตอร์ฟลักซ์จากการอินทิเกรต ทำให้ลดปัญหาการเลื่อนของสัญญาณดิจิตอลเฟสได้ อีกทั้งมีกระแสโรเตอร์เป็นองค์ประกอบของเวกเตอร์รีเกรสเซอร์ $Jp\hat{i}_r$ ทำให้ระบบประมาณสามารถทำงานได้ที่ทุกเงื่อนไขการทำงานในโหมดควบคุมกำลังรีแอกทีฟทางด้านโรเตอร์ ($\bar{i}_r' \neq 0$) แม้อยู่ในสภาวะไร้อโหลดก็ตาม



รูปที่ 2.3 กลไกการประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์

รูปที่ 2.3 แสดงกลไกการประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์ด้วยสมการ (2.10)-(2.11) ยกตัวอย่างในกรณีที่ $\Delta\theta_m > 0$, ($\hat{\theta}_m > \theta_m$) ดังรูปที่ 2.3(ก) ระบบประมาณจะโปรเจกต์เวกเตอร์ผิดพลาด \vec{e}_s ลงบนเวกเตอร์รีเกรสเซอร์ $Jp\hat{i}_r$ ค่าสัญญาณผิดพลาด ε ที่มีค่าน้อยกว่าศูนย์ เมื่อนำค่า ε ไปคำนวณผ่านอัตราขยายการปรับตัวพีโอ ($K_p, K_i > 0$) ระบบประมาณจะปรับลดความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์ประมาณ เพื่อให้เวกเตอร์ผิดพลาด \vec{e}_s ค่าความเร็วผิดพลาด $\Delta\omega_m$ และค่าตำแหน่งผิดพลาด $\Delta\theta_m$ ลดลงสู่เข้าสู่ค่าศูนย์ด้วย ในกรณีที่ $\Delta\theta_m < 0$, ($\hat{\theta}_m < \theta_m$) ดังรูปที่ 2.3(ข) กลไกการประมาณสามารถอธิบายได้ในทำนองเดียวกัน

สำหรับคุณสมบัติในการประมาณค่าได้ เราสามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 2.3(ค) จากข้อกำหนดการเชื่อมต่อที่สถานะไร้อะไหลด ($T_e = 0$) กำลังรีแอกทีฟจะต้องเท่ากับศูนย์ด้วย ($Q_s = 0$) ดังนั้นกระแสสเตเตอร์ที่สถานะนี้จะเท่ากับศูนย์ด้วย ($\vec{i}_s = \vec{0}$) ทั้งนี้เนื่องจากเราสามารถสร้างกระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ผ่านขดลวดโรเตอร์ ($\vec{i}_r \neq \vec{0}$) ดังนั้นระบบประมาณยังคงสามารถประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์ได้ เวกเตอร์ไดอะแกรมรูปที่ 2.3(ค) แสดงถึงสถานะที่มีค่าผิดพลาดตำแหน่งโรเตอร์ ($\hat{\theta}_m \neq \theta_m$) เวกเตอร์ผิดพลาดสเตเตอร์จะมีค่าเป็น \vec{i}_s (ตามสมการ (2.8)) เนื่องจากเวกเตอร์รีเกรสเซอร์ $Jp\hat{i}_r$ มีค่าไม่เท่ากับศูนย์เช่นเดียวกับกระแสโรเตอร์ ($\vec{i}_r \neq \vec{0}$) ระบบประมาณจึงสามารถประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์ได้ในทำนองเดียวกับ 2 กรณีข้างต้น

บทที่ 3

การวิเคราะห์เสถียรภาพและการออกแบบอัตราขยายการปรับตัวของระบบประมาณค่า ความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์

ในบทนี้เราจะศึกษาเสถียรภาพของระบบประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์ด้วยตัวสังเกตลดอันดับแบบปรับตัว เพื่อให้ทราบถึงเงื่อนไขและขีดจำกัดของการประมาณค่าได้ ในการพิสูจน์เสถียรภาพของระบบประมาณ เราจะพิจารณาจากสมการผิดพลาดต่างๆ ด้วยวิธีทำให้เป็นเชิงเส้น (Linearization) จากนั้นเราจะเขียนสมการค่าผิดพลาดในรูปแบบของปริภูมิสถานะ และวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบประมาณด้วยการหาค่าลักษณะเฉพาะ (Eigenvalue) นอกจากนี้เรายังศึกษาถึงเกณฑ์ในการออกแบบอัตราขยายการปรับตัวของระบบประมาณด้วย

3.1. การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์

จากบทที่ 2 ได้กล่าวถึงการประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์ด้วยค่าผิดพลาดของกระแสสเตเตอร์และสมการประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์ ในการพิจารณาเสถียรภาพของระบบประมาณ เราจะจัดรูปสมการประมาณกระแสสเตเตอร์ สมการประมาณความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์อยู่ในรูปสมการค่าผิดพลาดที่อ้างอิงบนแกนสเตเตอร์ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการ (3.1)-(3.3) สมการค่าผิดพลาดกระแสสเตเตอร์:

$$\dot{\bar{e}}_s = \frac{d(\hat{i}_s - \bar{i}_s)}{dt} = -\frac{R_s}{L_s} \bar{e}_s - \frac{M}{L_s} \frac{d}{dt} \left[(e^{Jp\hat{\theta}_m} - e^{Jp\theta_m}) \bar{i}_r' \right] \quad (3.1)$$

สมการค่าผิดพลาดความเร็วโรเตอร์:

$$\dot{e}_\omega = \frac{d(\hat{\omega}_m - \omega_m)}{dt} = \frac{d}{dt} \left(K_p + K_I \int dt \right) \left\{ \left(Jpe^{Jp\hat{\theta}_m} \cdot \bar{i}_r' \right)^T \cdot \bar{e}_s \right\} \quad (3.2)$$

สมการค่าผิดพลาดตำแหน่งโรเตอร์:

$$\dot{e}_{\theta_m} = \frac{d(\hat{e}_{\theta_m} - e_{\theta_m})}{dt} = e_\omega \quad (3.3)$$

เนื่องจากสมการ (3.2) มีความซับซ้อนในการวิเคราะห์เสถียรภาพ เราจึงนิยามตัวแปรใหม่ (ζ) ดังสมการ (3.4)

$$\zeta \triangleq e_\omega - K_p \left(Jpe^{Jp\hat{\theta}_m} \cdot \bar{i}_r' \right)^T \cdot \bar{e}_s \quad (3.4)$$

สมการค่าผิดพลาดความเร็วโรเตอร์ในตัวแปรใหม่สามารถแสดงได้ดังสมการ (3.5)

$$\dot{\zeta} = K_I \left(Jpe^{Jp\hat{\theta}_m} \bar{i}_r' \right)^T \bar{e}_s \quad (3.5)$$

จากสมการค่าผิดพลาดกระแสสเตเตอร์ (3.1) สมการค่าผิดพลาดความเร็วโรเตอร์ (3.5) และสมการค่าผิดพลาดตำแหน่งโรเตอร์ (3.3) เราสามารถประมาณสมการค่าผิดพลาดทั้ง 3 สมการข้างต้นเป็น

เชิงเส้น โดยมีเงื่อนไขจุดทำงานสงบดังสมการ (3.5)-(3.6) และสามารถแสดงสมการการประมาณเป็นเชิงเส้นในรูปปริภูมิสถานะได้ดังสมการ (3.7)

$$\bar{e}_s = \bar{0} \quad (3.5)$$

$$\zeta = e_\theta = 0 \quad (3.6)$$

$$\begin{bmatrix} \delta \dot{e}_{s\alpha} \\ \delta \dot{e}_{s\beta} \\ \delta \dot{\zeta} \\ \delta \dot{e}_\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_s} - K_P \frac{M}{L_s} (p\hat{i}_{r\beta})^2 & K_P \frac{M}{L_s} p^2 \hat{i}_{r\alpha} \hat{i}_{r\beta} & \frac{M}{L_s} p\hat{i}_{r\beta} & 0 \\ K_P \frac{M}{L_s} p^2 \hat{i}_{r\alpha} \hat{i}_{r\beta} & -\frac{R_s}{L_s} - K_P \frac{M}{L_s} (p\hat{i}_{r\alpha})^2 & -\frac{M}{L_s} p\hat{i}_{r\alpha} & 0 \\ -K_I p\hat{i}_{r\beta} & K_I p\hat{i}_{r\alpha} & 0 & 0 \\ -K_P p\hat{i}_{r\beta} & K_P p\hat{i}_{r\alpha} & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta e_{s\alpha} \\ \delta e_{s\beta} \\ \delta \zeta \\ \delta e_\theta \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

จากสมการ (3.7) เราสามารถหาค่าลักษณะเฉพาะหรือขั้วของระบบประมาณได้ดังนี้

$$\begin{aligned} s_1 &= 0 \\ s_2 &= -\frac{R_s}{L_s} \\ s_3, s_4 &= \frac{-R_s - K_P M p^2 (\hat{i}_{r\alpha}^2 + \hat{i}_{r\beta}^2) \pm \sqrt{(K_P M p^2 (\hat{i}_{r\alpha}^2 + \hat{i}_{r\beta}^2) + R_s)^2 - 4L_s K_I M p^2 (\hat{i}_{r\alpha}^2 + \hat{i}_{r\beta}^2)}}{2L_s} \end{aligned} \quad (3.8)$$

ระบบประมาณมีขั้วทั้งหมด 4 ขั้ว ซึ่งสามารถพิจารณาขั้วต่างๆได้ดังต่อไปนี้

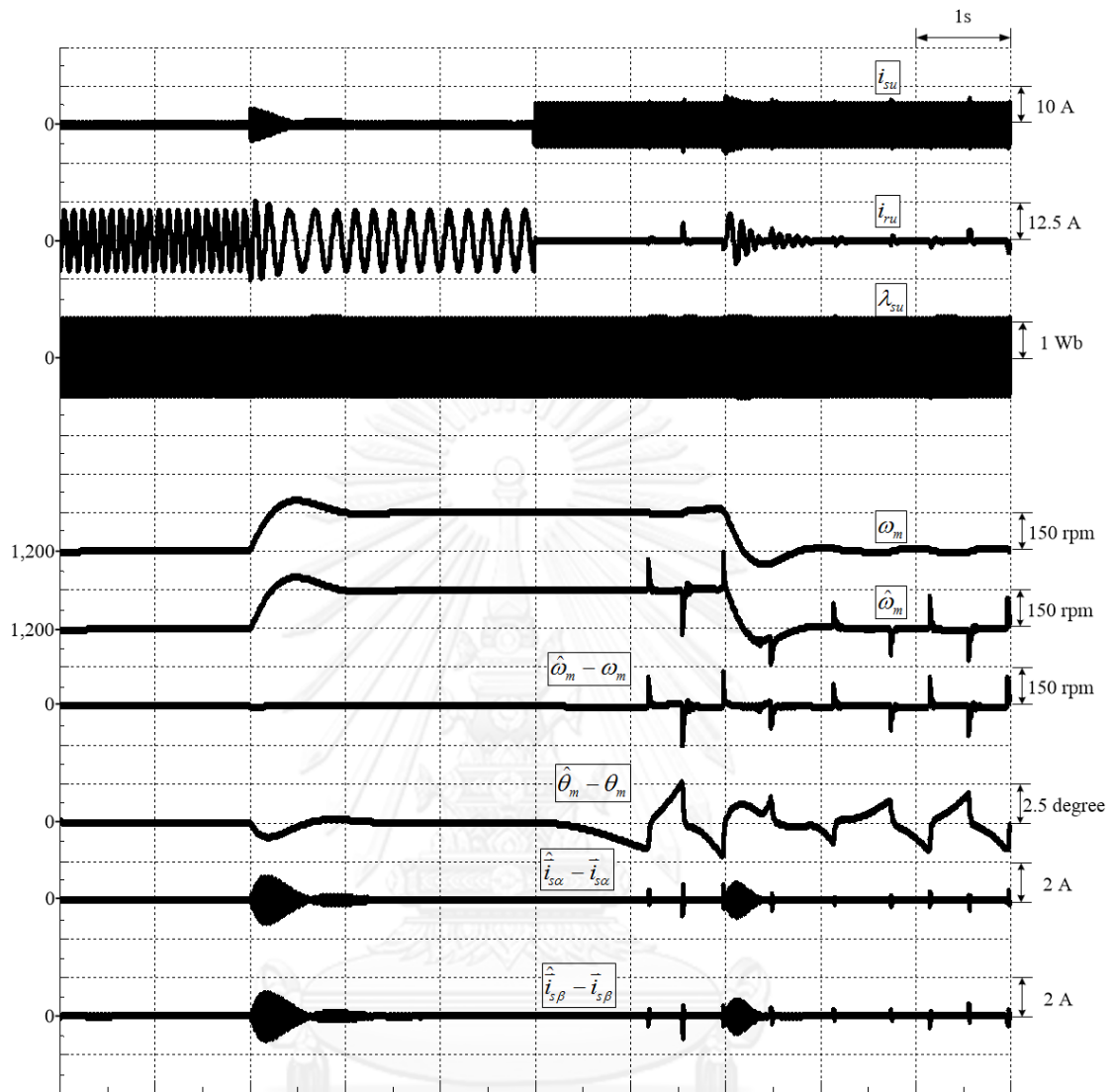
ขั้วตัวที่หนึ่ง s_1 : ขั้วที่จุดกำเนิด ($s = 0$) สะท้อนถึงเงื่อนไขการทำงานที่ความถี่ศูนย์ (Zero Frequency) ซึ่งไม่สามารถยืนยันถึงการมีเสถียรภาพแบบลู่เข้า (Asymptotically Stable) ได้ อย่างไรก็ตามระบบประมาณที่นำเสนอมีการคำนวณค่าบนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ ทำให้ข้อมูลกระแสและแรงดันมีความถี่ทางไฟฟ้าเท่ากับความถี่ที่เชื่อมต่อกรีด (ความถี่ 50 Hz) ระบบประมาณจึงไม่มีการทำงานที่เงื่อนไขความถี่ศูนย์ดังกล่าว

ขั้วตัวที่สอง s_2 : ขั้วอยู่บนแกนจริงที่ตำแหน่ง $-R_s / L_s$ ซึ่งมีค่าเท่ากับค่าคงตัวเวลาของวงจรด้านสเตเตอร์ เนื่องจากพารามิเตอร์ของมอเตอร์มีค่าเป็นบวกเสมอ ขั้วนี้จึงเป็นขั้วจริงฝั่งลบที่มีเสถียรภาพ

ขั้วตัวที่สามและสี่ s_3, s_4 (ขั้วสังยุคเชิงซ้อน): เนื่องจากเรากำหนดให้ค่าอัตราขยายของตัวควบคุมพีไอมากกว่าศูนย์ ($K_P, K_I > 0$) และระบบทำงานในโหมดควบคุมกำลังรีแอกทีฟทางด้านโรเตอร์ ขนาดของกระแสโรเตอร์มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ ($\|\hat{i}_r\| \neq 0$; $\sqrt{\hat{i}_{r\alpha}^2 + \hat{i}_{r\beta}^2} \neq 0$) จากภาคผนวก ก เราสามารถตรวจสอบได้ว่าขั้วที่เป็นคู่สังยุคนี้มีเสถียรภาพ

รูปที่ 3.1 แสดงผลจำลองการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink โดยใช้ระบบประมาณค่าตำแหน่งและความเร็วโรเตอร์ กำหนดค่า

อัตราขยาย $K_p, K_I > 0$ ในช่วงแรกระบบขับเคลื่อนรันที่ความเร็ว 1200 rpm กระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ถูกกำหนดด้วยกระแสโรเตอร์ ทำให้กระแสสเตเตอร์มีค่าเท่ากับศูนย์ เมื่อเปลี่ยนแปลงความเร็วแบบขั้นจาก 1,200 rpm เป็น 1,350 rpm พบว่า ระบบขับเคลื่อนสามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความเร็วได้ โดยระบบประมาณสามารถประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์เข้าสู่ค่าจริง ค่าผิดพลาดกระแสสเตเตอร์ ค่าผิดพลาดความเร็วโรเตอร์ และค่าผิดพลาดความเร็วโรเตอร์เข้าสู่ค่าศูนย์ อย่างไรก็ตามเมื่อกำหนดให้กระแสโรเตอร์เป็นศูนย์ เพื่อให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางตั้งกระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์จากฝั่งสเตเตอร์ (กริด) พบว่ากระแสสเตเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้นเพื่อสร้างฟลักซ์ให้กับเครื่องจักรกลไฟฟ้า กระแสโรเตอร์มีค่าลดลงจนเป็นศูนย์ ค่าตำแหน่งประมาณเริ่มผิดเพี้ยนจากค่าตำแหน่งจริงโดยค่อยๆ ลู่ออก อันเนื่องมาจากเวกเตอร์รีเกรสเซอร์มีค่าเป็นศูนย์ ระบบประมาณไม่สามารถสะท้อนค่าผิดพลาดตำแหน่งโรเตอร์ได้ และเมื่อเปลี่ยนความเร็วคำสั่งจาก 1350 rpm เป็น 1200 rpm ระบบขับเคลื่อนไม่สามารถตอบสนองต่อความเร็วคำสั่ง อีกทั้งค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์ยังผิดเพี้ยนจากค่าจริง จึงกล่าวได้ว่า ที่เงื่อนไขเวกเตอร์รีเกรสเซอร์เป็นศูนย์ ระบบขาดคุณสมบัติในการประมาณค่าได้และขาดเสถียรภาพในการประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์

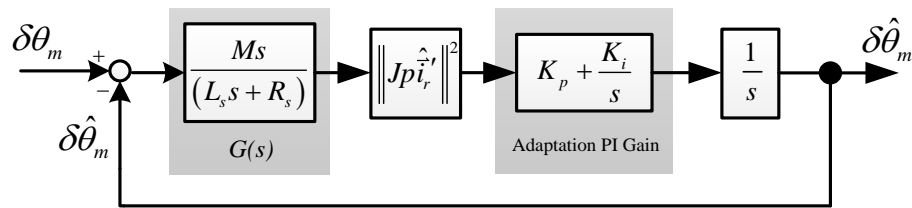


รูปที่ 3.1 ผลจำลองการทำงานของระบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง เมื่อกระแสโรเตอร์เท่ากับศูนย์

3.2. การออกแบบอัตราขยายการปรับตัวของระบบประมาณ

อัตราขยาย K_p และ K_I ของระบบประมาณเป็นตัวกำหนดผลตอบสนองและสมรรถนะการติดตามต่อตำแหน่งจริง (Response and Tracking Performance) การออกแบบอัตราขยายจึงจำเป็นต้องพิจารณาจากฟังก์ชันโอนย้ายระหว่างตำแหน่งประมาณ $\hat{\theta}_m$ กับตำแหน่งจริง θ_m จากสมการการประมาณเชิงเส้นในรูปปริภูมิสถานะ (สมการ (3.7)) เราสามารถแสดงฟังก์ชันโอนย้ายวงรอบเปิด $F(s)$ ระหว่าง $\delta\hat{\theta}_m$ กับ $\delta\theta_m - \delta\hat{\theta}_m$ ได้ดังสมการ (3.9)

$$F(s) = \underbrace{\frac{1}{s} \left(K_p + \frac{K_I}{s} \right)}_{PI \text{ Controller}} \left\| Jp\hat{i}_r' \right\|^2 \underbrace{\left(\frac{Ms}{(sL_s + R_s)} \right)}_{G(s)} \quad (3.9)$$



รูปที่ 3.2 วงจรการประมาณตำแหน่งโรเตอร์ ด้วยวิธีการประมาณเป็นเชิงเส้น

รูปที่ 3.2 แสดงวงจรการประมาณตำแหน่งโรเตอร์ด้วยวิธีการประมาณเป็นเชิงเส้น เมื่อพิจารณาขั้ว (Pole) และศูนย์ (Zero) ของฟังก์ชันโอนย้ายวงรอบเปิด $F(s)$ พบว่าระบบประมาณมีขั้วสามตัว คือ ขั้วของตัวอินทิเกรต ขั้วของตัวควบคุมแบบพีไอ และขั้วของฟังก์ชันโอนย้าย $G(s)$ ขณะที่ศูนย์มีสองตัวคือศูนย์ของตัวควบคุมแบบพีไอ และศูนย์ของฟังก์ชันโอนย้าย $G(s)$ เราสามารถจัดรูปฟังก์ชันโอนย้ายวงรอบเปิดในรูปขั้วและศูนย์ได้ดังสมการ (3.10)

$$F(s) = \frac{1}{s^2} \frac{sMK_p}{L_s} \left\| Jp\hat{i}_r' \right\|^2 \frac{\left(s + \frac{K_I}{K_p} \right)}{\left(s + \frac{R_s}{L_s} \right)} \quad (3.10)$$

พิจารณาสมการ (3.10) พบว่า มีการหักล้างขั้วของตัวควบคุมแบบพีไอและศูนย์ของฟังก์ชันโอนย้าย $G(s)$ หนึ่งคู่ที่จุดกำเนิด ผลลัพธ์ของระบบประมาณจึงเป็นระบบที่มีผลตอบสนองอันดับที่สอง (Second-order System) ซึ่งแสดงได้ดังนี้

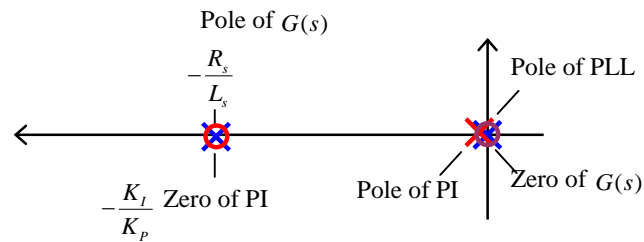
$$F(s) = \frac{1}{s} \frac{MK_p}{L_s} \left\| Jp\hat{i}_r' \right\|^2 \frac{\left(s + \frac{K_I}{K_p} \right)}{\left(s + \frac{R_s}{L_s} \right)} \quad (3.11)$$

เพื่อให้ระบบประมาณมีผลตอบสนองอันดับที่หนึ่งแบบหน่วงเกิน (Overdamped First-Order Response) เราจะกำหนดความถี่ตัด (Cutoff Frequency) ของตัวควบคุมแบบพีไอดังสมการ (3.12) ซึ่งทำให้เกิดการหักล้างระหว่างขั้วของ $G(s)$ และศูนย์ของตัวควบคุมแบบพีไอเป็นคู่ที่สอง

$$\frac{K_I}{K_p} = \frac{R_s}{L_s} \quad (3.12)$$

เมื่อแทนค่า $\frac{K_I}{K_p}$ ตามสมการ(3.12) ลงในสมการ (3.11) เราสามารถจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$F(s) = \frac{1}{s} \frac{MK_p}{L_s} \left\| Jp\hat{i}_r' \right\|^2 \quad (3.13)$$

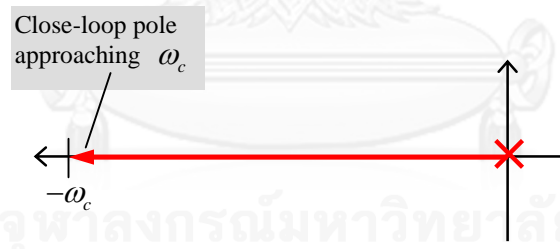


รูปที่ 3.3 ตำแหน่งของขั้วและศูนย์ของฟังก์ชันโอนย้ายวงรอบเปิดที่มีการออกแบบอัตราขยายป้อนกลับตาที่เสนอใน (3.12)

พิจารณาสมการ (3.13) พบว่าฟังก์ชันโอนย้ายวงรอบเปิด $F(s)$ มีขั้วอยู่ที่จุดกำเนิด และเราสามารถกำหนดแบนด์วิดท์ (Bandwidth) ของระบบประมาณผ่านค่า K_p ได้ดังสมการ (3.14)

$$K_p = \frac{L_s}{M \left\| \hat{J} p i_r' \right\|^2} |j\omega|_{\omega_c} \quad (3.14)$$

โดยที่ ω_c คือ ความถี่ตัดข้าม (Cross-over frequency) ของระบบวงรอบเปิด รูปที่ 3.3 แสดงตำแหน่งของขั้วและศูนย์ของฟังก์ชันโอนย้ายวงรอบเปิด $F(s)$ ซึ่งมีการหักล้างกันระหว่างขั้วและศูนย์ตามแนวทางการออกแบบ ทำให้ได้ผลลัพธ์ของตำแหน่งขั้วและศูนย์เป็นดังแสดงในรูปที่ 3.4 ซึ่งจะเห็นได้ว่าทางเดินรากของขั้วของวงรอบเปิดจะถูกกำหนดโดยค่า K_p ตามสมการ (3.14)



รูปที่ 3.4 ทางเดินรากของขั้วเด่นของระบบประมาณเมื่อมีการออกแบบอัตราขยายการป้อนกลับที่เสนอใน (3.12) และ (3.14)

สรุปแนวทางการออกแบบอัตราขยายป้อนกลับได้ว่า

1. เราสามารถออกแบบให้ระบบประมามีผลตอบสนองแบบหน่วงเกินอันดับที่หนึ่งได้ โดยกำหนดความสัมพันธ์ของอัตราขยายการปรับตัวดังสมการ (3.12)

$$\frac{K_I}{K_p} = \frac{R_s}{L_s} \quad (3.12)$$

2. ค่าแบนด์วิดท์ของระบบประมามีสามารถกำหนดผ่านค่า K_p ได้ด้วยสมการ (3.14)

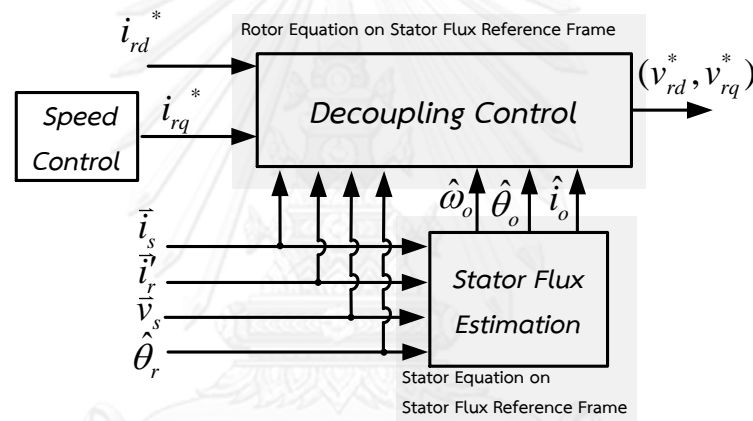
$$K_p = \frac{L_s}{M \left\| Jp\hat{i}'_r \right\|^2} |j\omega|_{\omega_c} \quad (3.14)$$



บทที่ 4

โครงสร้างของระบบควบคุมเวกเตอร์สเตเตอร์ฟลักซ์แบบไร้เซ็นเซอร์วัดตำแหน่ง

ระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซ็นเซอร์วัดตำแหน่งมีส่วนประกอบใหญ่อยู่ 2 ส่วนคือ ระบบควบคุมเวกเตอร์ และระบบประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์ โดยที่ระบบควบคุมเวกเตอร์เป็นการควบคุมสเตเตอร์ฟลักซ์ ซึ่งการคำนวณจะอยู่บนแกนหมุนสเตเตอร์ฟลักซ์ ในขณะที่ระบบประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์จะคำนวณบนแกนนิ่ง (แกนอ้างอิงสเตเตอร์) ในเบื้องต้นเราจะศึกษาการควบคุมเวกเตอร์ชนิดแกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์ จากนั้นเราจะนำตัวสังเกตลดอันดับแบบปรับตัวสำหรับการประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์มาใช้ร่วมกับการควบคุมแบบเวกเตอร์ พร้อมทั้งนำเสนอผลจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink เพื่อแสดงถึงสมรรถนะของระบบควบคุมแบบเวกเตอร์ไร้เซ็นเซอร์วัดตำแหน่ง

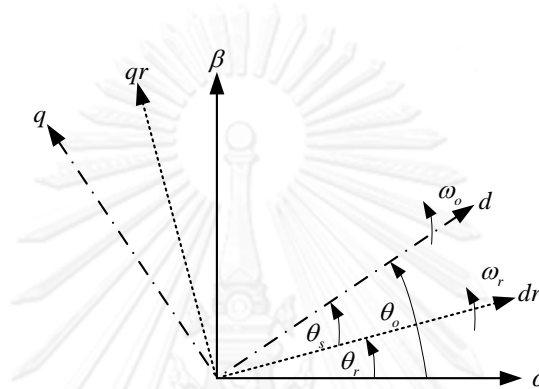


Stator Flux-Based Vector Control

รูปที่ 4.1 ระบบควบคุมเวกเตอร์ที่มีการควบคุมสเตเตอร์ฟลักซ์

การควบคุมแบบเวกเตอร์คือการควบคุมฟลักซ์และแรงบิดผ่านค่ากระแสคำสั่ง เนื่องจากเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางสามารถป้อนแรงดันไฟฟ้าได้สองฝั่ง โดยขดลวดทางฝั่งสเตเตอร์จะรับแรงดันไฟฟ้าจากกริด ในขณะที่ขดลวดฝั่งหลังจะสร้างแรงดันจากค่าแรงดันโรเตอร์คำสั่ง (\vec{v}_r^*) เพื่อป้อนแก่ขดลวดโรเตอร์ด้วย รูปที่ 4.1 แสดงโครงสร้างการคำนวณค่าแรงดันโรเตอร์คำสั่ง โดยมีกระแสโรเตอร์คำสั่งในแกน d (i_{rd}^*) ทำหน้าที่ควบคุมฟลักซ์ของเครื่องจักรกล โดยกำหนดเป็นค่าคงที่ของค่าขนาดกระแส ณ สภาวะไร้โหลด หรือแปรค่าได้ในกรณีควบคุมกำลังรีแอกทีฟทางโรเตอร์ ในขณะที่กระแสโรเตอร์คำสั่งในแกน q (i_{rq}^*) ทำหน้าที่ควบคุมแรงบิดของเครื่องจักรกล ซึ่งกำหนดได้จากวงรอบควบคุมความเร็ว ค่ากระแสโรเตอร์คำสั่งข้างต้นจะถูกใช้ในการคำนวณแรงดันโรเตอร์คำสั่ง (v_{rd}^*, v_{rq}^*) ด้วยการควบคุมแบบแยกการเชื่อมร่วม (Decoupling Control) การควบคุมจะอาศัยข้อมูลกระแสและแรงดันที่ตรวจวัดได้จากขดลวดสเตเตอร์ที่อยู่บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ (แกนนิ่งหรือแกน $\alpha-\beta$) และข้อมูลจากการตรวจวัดทางขดลวดโร

เตอร์จะอยู่บนแกนอ้างอิงโรเตอร์ (แกนหมุนหรือแกน dr-qr) ในขณะที่การควบคุมแบบเวกเตอร์จะอยู่บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์ แผนภาพแกนอ้างอิงสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าการย้ายแกนอ้างอิงของปริมาณต่างๆ ไปบนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์ เราจำเป็นต้องรู้ค่าตำแหน่งสเตเตอร์ฟลักซ์ (θ_o) และค่าตำแหน่งโรเตอร์ทางไฟฟ้า (θ_r) โดยค่าตำแหน่งสเตเตอร์ฟลักซ์ (θ_o) สามารถคำนวณได้ด้วยสมการสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์ ส่วนค่าตำแหน่งโรเตอร์ทางไฟฟ้า (θ_r) (กรณีไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง) สามารถประมาณค่าได้ด้วยตัวสังเกตอันดับแบบปรับตัวที่ได้นำเสนอในบทที่ 2



รูปที่ 4.2 แผนภาพแกนอ้างอิงสเตเตอร์ แกนอ้างอิงโรเตอร์ และแกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์

4.1. การคำนวณค่าตำแหน่งสเตเตอร์ฟลักซ์

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการคำนวณหาตำแหน่งสเตเตอร์ฟลักซ์ θ_o ซึ่งเป็นข้อมูลที่จำเป็นสำหรับการควบคุมแบบเวกเตอร์ชนิดแกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์ จากแบบจำลองสเตเตอร์ (สมการ (2.1-2.2)) และการนิยามค่ากระแสกระตุ้นสเตเตอร์ฟลักซ์ \vec{i}_o บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ดังสมการ (4.2) เราสามารถแสดงสมการสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ ฟลักซ์ดังสมการ (4.3-4.4) (ขั้นตอนการจัดรูปสมการจากแกนอ้างอิงสเตเตอร์เป็นแกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์สามารถดูได้ที่ภาคผนวก ก)

นิยามกระแสกระตุ้นสร้างสเตเตอร์ฟลักซ์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ :

$$\vec{\lambda}_s \triangleq M \vec{i}_o \quad (4.2)$$

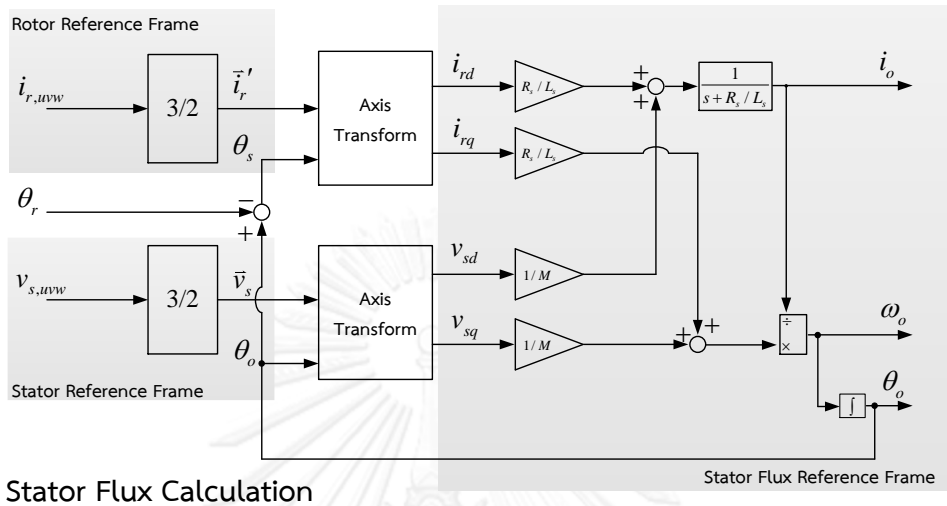
สมการสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์ :

$$\frac{di_o}{dt} = \frac{R_s}{L_s} i_{rd} - \frac{R_s}{L_s} i_o + \frac{v_{sd}}{M} \quad (4.3)$$

$$\frac{d\theta_o}{dt} = \omega_o = \frac{R_s}{L_s} \frac{i_{rq}}{i_o} + \frac{v_{sq}}{M i_o} \quad (4.4)$$

จากสมการ (4.3) เราสามารถคำนวณค่ากระแสกระตุ้นสร้างสเตเตอร์ฟลักซ์ (i_o) ได้ ซึ่งสามารถกำหนดได้จากกระแสโรเตอร์ในแกน d (i_{rd}) จากนั้นเราจะนำค่ากระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ไปใช้ในการคำนวณค่าตำแหน่งสเตเตอร์ฟลักซ์ (θ_o) ดังสมการ (4.4) โครงสร้างการคำนวณค่ากระแส

กระตุ้นสร้างสเตเตอร์ฟลักซ์ (i_o) และค่าตำแหน่งสเตเตอร์ฟลักซ์ (θ_o) สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.3



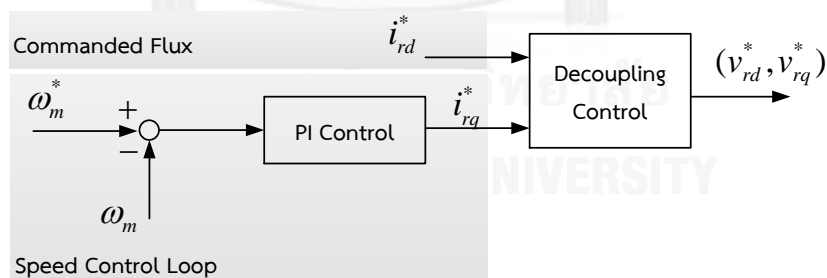
Stator Flux Calculation

รูปที่ 4.3 โครงสร้างการคำนวณค่า i_o , ω_o และ θ_o ด้วยแบบจำลองสเตเตอร์บนแกนอ้างอิง สเตเตอร์ฟลักซ์

4.2. การควบคุมแบบแยกการเชื่อมร่วม (Decoupling Control)

จากสมการแรงบิด (2.5) ที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 เราสามารถแสดงค่าแรงบิดในรูปผลคูณของ กระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์และกระแสโรเตอร์ในแกน q ได้ดังสมการ (4.5)

$$T_e = -p \frac{M^2}{L_s} i_o i_{rq} \tag{4.5}$$



รูปที่ 4.4 วงรอบควบคุมความเร็วที่การกำหนดค่าสั่งกระแส i_{rq}^* สำหรับการควบคุมแบบแยกการ เชื่อมร่วม

ที่ฟลักซ์คงที่ (i_o คงที่) ค่าแรงบิดจะแปรผันโดยตรงกับค่ากระแสโรเตอร์ในแกน q i_{rq} จึง กล่าวได้ว่า กระแสโรเตอร์ในแกน q ทำหน้าที่สร้างแรงบิดให้แก่ระบบขับเคลื่อน เราจึงกำหนด สัญญาณด้านนอกตัวควบคุมแบบพีไอของวงรอบควบคุมความเร็วเป็นค่ากระแสโรเตอร์คำสั่งในแกน q i_{rq}^* ดังรูปที่ 4.4 ขณะที่ค่ากระแสกระตุ้นสร้างสเตเตอร์ฟลักซ์ i_o สามารถกำหนดได้ด้วยกระแสโร

เตอร์คำสั่งในแกน d i_{rd}^* กระแสโรเตอร์จะถูกควบคุมผ่านค่าแรงดันโรเตอร์คำสั่ง ในการคำนวณแรงดันโรเตอร์คำสั่ง เราจะเริ่มพิจารณาจากการจัดรูปสมการโรเตอร์ ((2.3)-(2.4)) บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์ซึ่งแสดงได้ดังสมการ (4.6)-(4.7)

สมการโรเตอร์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์ :

$$v_{rd} + \omega_s \sigma L_r i_{rq} - \frac{M}{L_s} (v_{sd} - R_s i_{sd}) = \sigma L_r \frac{di_{rd}}{dt} + R_r i_{rd} \quad (4.6)$$

$$v_{rq} + \omega_s \sigma L_r i_{rd} - \frac{M}{L_s} (v_{sq} - R_s i_{sq}) + \frac{M^2}{L_s} \omega_r i_o = R_r i_{rq} + \sigma L_r \frac{di_{rq}}{dt} \quad (4.7)$$

เราจะเห็นได้ว่ามีเทอมของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำเชื่อมร่วมระหว่างปริมาณในแกน d และในแกน q ทำให้การควบคุมกระแสในแต่ละแกนผ่านทางแรงดันโรเตอร์ไม่เป็นอิสระต่อกัน เพื่อให้สามารถควบคุมกระแสในแต่ละแกนได้อย่างอิสระ จึงประยุกต์ใช้วิธีการควบคุมแบบแยกการเชื่อมร่วมโดยทำการชดเชยแรงดันที่เชื่อมโยงระหว่างแกนดังแสดงในสมการแรงดันโรเตอร์คำสั่ง (4.8-4.9)

$$v_{rd}^* = u_{rd}^* - \omega_s \sigma L_r i_{rq} + \frac{M}{L_s} (v_{sd} - R_s i_{sd}) \quad (4.8)$$

$$v_{rq}^* = u_{rq}^* - \omega_s \sigma L_r i_{rd} + \frac{M}{L_s} (v_{sq} - R_s i_{sq}) - \frac{M^2}{L_s} \omega_r i_o \quad (4.9)$$

ทำให้เราสามารถเขียนสมการโรเตอร์ (4.6-4.7) ได้เป็น

$$u_{rd} = \sigma L_r \frac{di_{rd}}{dt} + R_r i_{rd} \quad (4.10)$$

$$u_{rq} = \sigma L_r \frac{di_{rq}}{dt} + R_r i_{rq} \quad (4.11)$$

สมการข้างต้นเป็นสมการทางพลวัตของกระแสโรเตอร์ที่สามารถควบคุมกระแสในแต่ละแกนได้อย่างอิสระ โดยเราสามารถควบคุมกระแสในแต่ละแกนผ่านเทอมแรงดันป้อนไปหน้าได้ $u_{rd}^* = R_r i_{rd}^*$, $u_{rq}^* = R_r i_{rq}^*$ ตามลำดับ อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติมีความไม่เป็นอุดมคติอันเนื่องมาจากพารามิเตอร์มอเตอร์ วงจรตรวจวัดกระแสและแรงดัน รวมถึงวงจรแปลงผันพลังงาน เป็นต้น ทำให้แรงดันคำสั่งมีค่าผิดพลาดได้ ดังนั้นเราจึงเพิ่มเติมวงรอบควบคุมกระแสเพื่อชดเชยค่าผิดพลาดดังกล่าวโดยสามารถเขียนสมการแรงดันโรเตอร์คำสั่งได้เป็น

$$v_{rd}^* = \underbrace{R_r i_{rd}^*}_{\text{Feed Forward Voltage Term}} - \underbrace{\sigma \omega_s L_r i_{rq} + \frac{M}{L_s} (v_{sd} - R_s i_{sd})}_{\text{Decoupling Voltage Terms}} + \underbrace{v_{cd}}_{\text{Voltage Term from Current-Control Loop}} \quad (4.12)$$

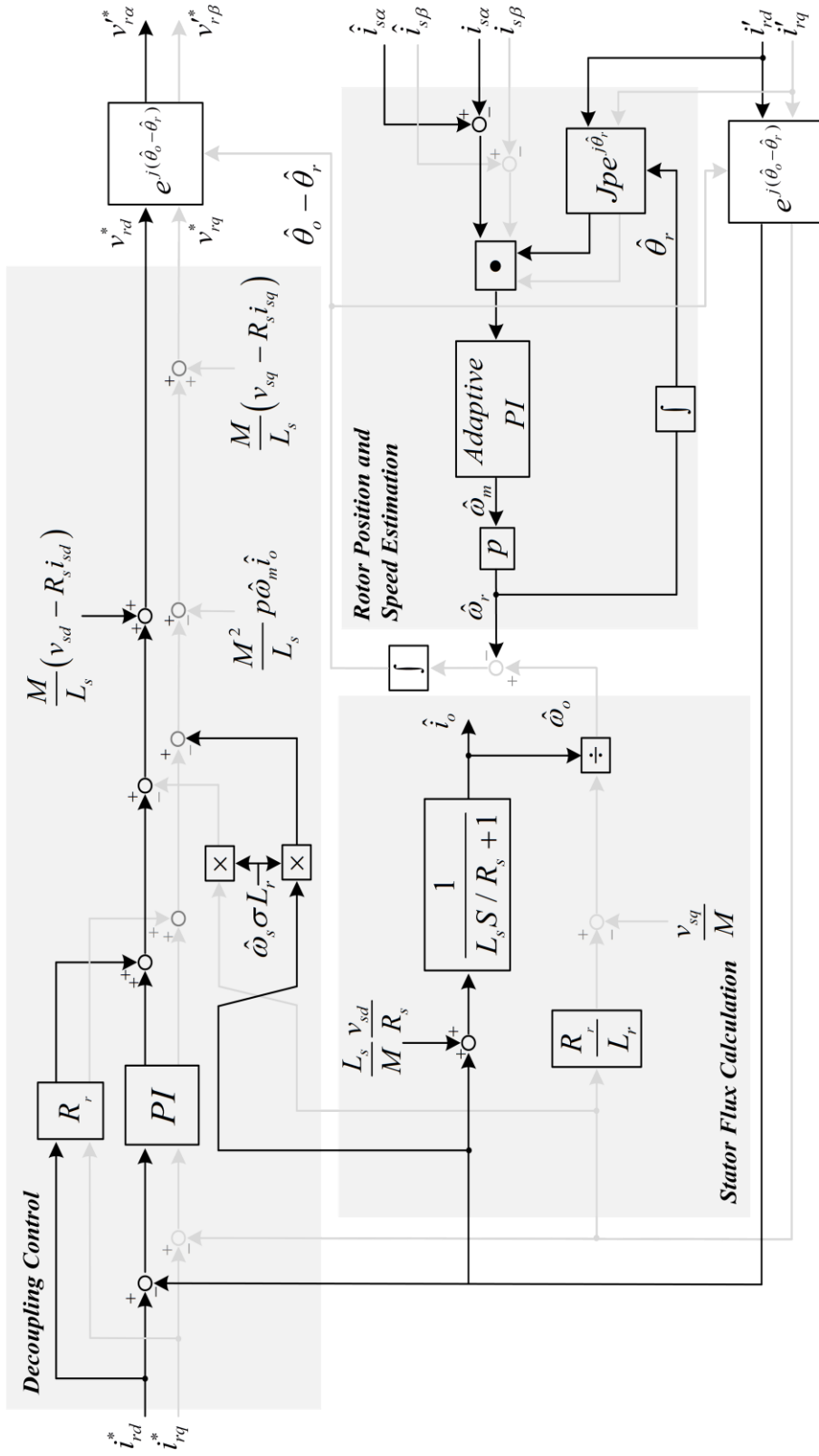
$$v_{rq}^* = \underbrace{R_r i_{rq}^*}_{\text{Feed Forward Voltage Term}} + \underbrace{\sigma \omega_s L_r i_{rd} + \frac{M}{L_s} (v_{sq} - R_s i_{sq}) - \frac{M^2}{L_s} \omega_r i_o}_{\text{Decoupling Voltage Terms}} + \underbrace{v_{cq}}_{\text{Voltage Term from Current-Control Loop}} \quad (4.13)$$

เมื่อเรารวมส่วนของระบบควบคุมแวกเตอร์ (สมการ(4.3)-(4.4) และ (4.12)-(4.13)) แบบแรงดันเข้ากับระบบประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์ (ตัวสังเกตลดอันดับแบบปรับตัว สมการ (2.10)-

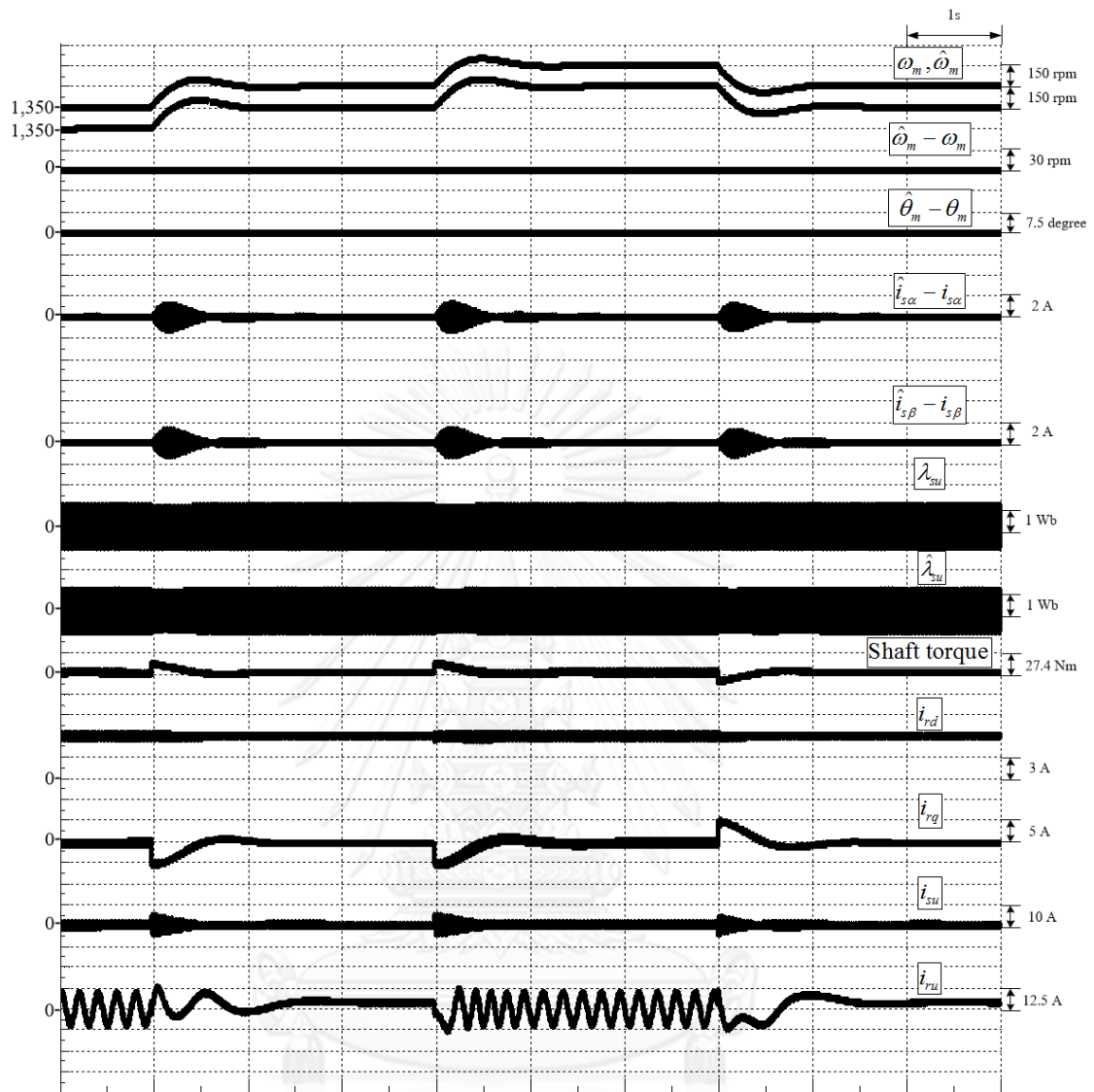
(2.11)) เราจะได้โครงสร้างของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซ็นเซอร์วัดตำแหน่งดังรูปที่ 4.5 การจำลองการทำงานของระบบด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink สามารถแบ่งออกเป็น 4 เงื่อนไขการทำงาน คือ 1) การเปลี่ยนแปลงความเร็วคำสั่งแบบขั้น (Step Speed Response) 2) การเปลี่ยนแปลงแรงบิดโหลดแบบขั้น 3) การเปลี่ยนแปลงกระแสโรเตอร์คำสั่งบนแกน d แบบขั้น และ 4) การทำงานที่สถานะอยู่ตัว ในการจำลองการทำงานจะใช้ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำตามภาคผนวก ข และกำหนดแบนด์วิดท์ของตัวสังเกตลดอันดับเป็น $\omega_c = 40 \text{ rad/s}$ ผลการจำลองที่เงื่อนไขการทำงานต่างๆ สามารถพิจารณาได้ดังนี้

1. การจำลองระบบโดยเปลี่ยนแปลงความเร็วแบบขั้นจาก 1350 (Sub-Synchronous Speed) เป็น 1500 rpm (Synchronous Speed) และจาก 1500 rpm เป็น 1650 rpm (Super-Synchronous Speed) จากนั้นลดความเร็วจาก 1650 rpm เป็น 1500 rpm ที่กระแสโรเตอร์บนแกน d เป็น 6 A แบ่งการจำลองเป็น 3 การจำลอง คือ 1. สภาวะไร้โหลด 2. ย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (แรงบิดโหลดพิกัดมีค่าเป็น -27.4 Nm) และ 3. ย่านมอเตอร์ (แรงบิดโหลดพิกัดมีค่าเป็น 27.4 Nm) ผลการจำลองสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.6-รูปที่ 4.8 ตามลำดับ
2. การจำลองระบบโดยเพิ่ม/ลดแรงบิดโหลดแบบขั้นที่ความเร็ว 1500 rpm (Synchronous Speed) และกระแสโรเตอร์ในแกน d 6 A โดยแบ่งออกเป็น 2 การจำลองคือ 1. การเปลี่ยนจากสภาวะไร้โหลดเป็นย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (แรงบิดโหลดพิกัด -27.4 Nm) 2. การเปลี่ยนจากสภาวะไร้โหลดเป็นย่านมอเตอร์ (แรงบิดโหลดพิกัด 27.4 Nm) ซึ่งมีผลการจำลองดังรูปที่ 4.9-รูปที่ 4.10 ตามลำดับ
3. การจำลองระบบโดยเพิ่มกระแสโรเตอร์ในแกน d แบบขั้น จาก 3 A เป็น 6 A ที่ความเร็ว 1500 rpm สภาวะไร้โหลด เงื่อนไขการทำงานนี้สะท้อนถึงการควบคุมกำลังรีแอกทีฟทางด้านโรเตอร์เพื่อให้สอดคล้องกับข้อกำหนดโครงข่ายไฟฟ้า ผลการจำลองแสดงได้ดังรูปที่ 4.11
4. การจำลองระบบที่สถานะอยู่ตัวที่ความเร็ว 1500 rpm กระแสโรเตอร์แกน 6 A โดยแบ่งการจำลองเป็น 3 การจำลอง คือ 1. สภาวะไร้โหลด 2. ย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 3. ย่านมอเตอร์ ซึ่งมีผลการจำลองดังรูปที่ 4.12-รูปที่ 4.14 ตามลำดับ

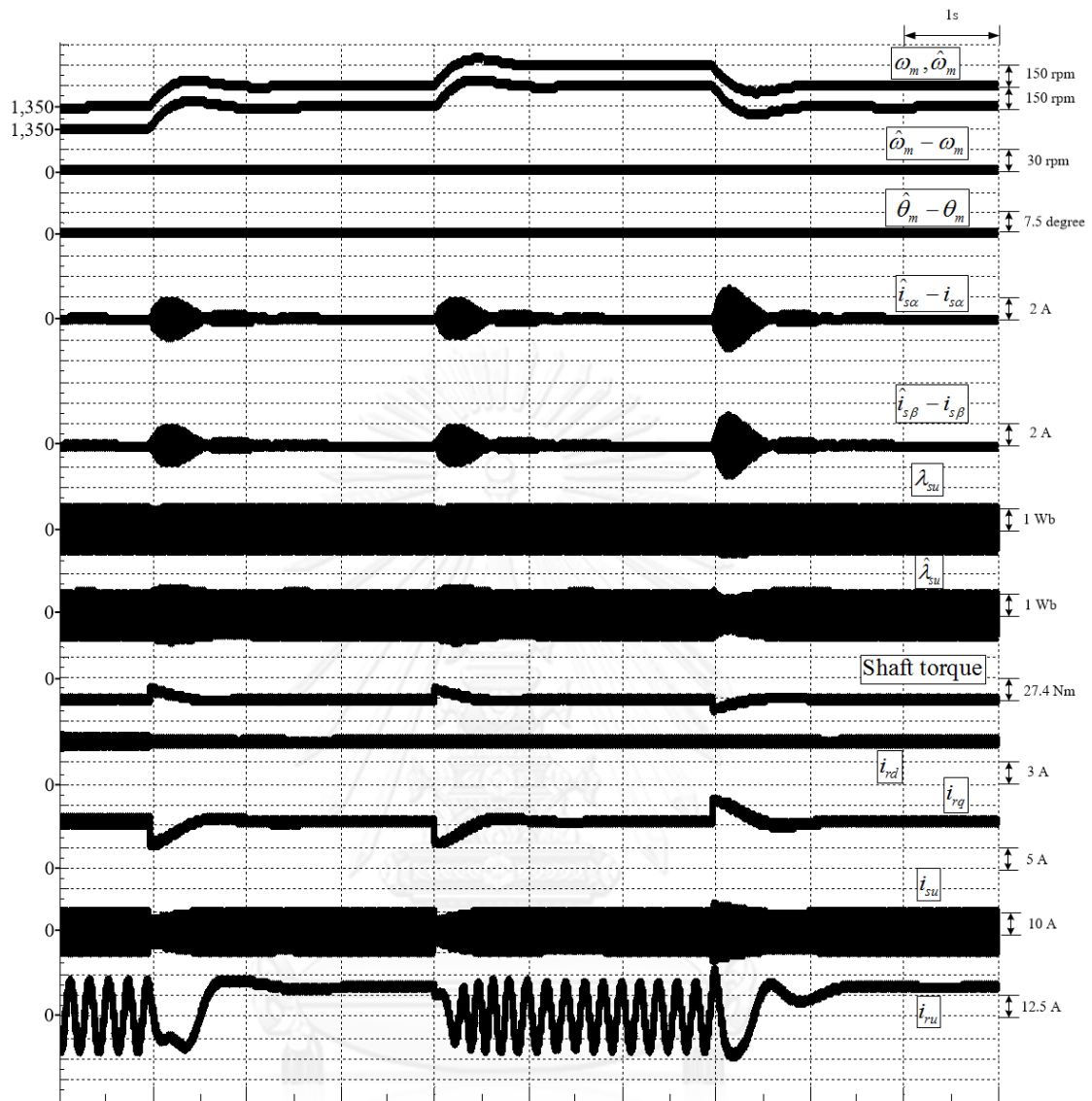
จากผลการจำลองการทำงานทั้ง 4 หัวข้อ จะเห็นได้ว่าค่าผิดพลาดของระบบประมาณ ได้แก่ ค่าผิดพลาดความเร็วโรเตอร์ ($\hat{\omega}_m - \omega_m$) ค่าผิดพลาดตำแหน่งโรเตอร์ทางกล ($\hat{\theta}_m - \theta_m$) ค่าผิดพลาดกระแสสเตเตอร์ในแกน α ($\hat{i}_{s\alpha} - i_{s\alpha}$) และแกน β ($\hat{i}_{s\beta} - i_{s\beta}$) ล้วนมีค่าลู่เข้าสู่ศูนย์ ซึ่งกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่าค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์ประมาณได้ลู่เข้าสู่ค่าจริง จากผลการทดลองข้างต้นสามารถยืนยันได้ว่าตัวสังเกตลดอันดับแบบปรับตัวสามารถประมาณค่าความเร็วและค่าตำแหน่งโรเตอร์ได้อย่างถูกต้องในทุกเงื่อนไขการทำงาน และระบบสามารถควบคุมกระแสโรเตอร์ในแกน d และแกน q ได้อย่างอิสระต่อกัน ซึ่งสอดคล้องกับหลักการควบคุมแบบแยกการเชื่อมร่วม



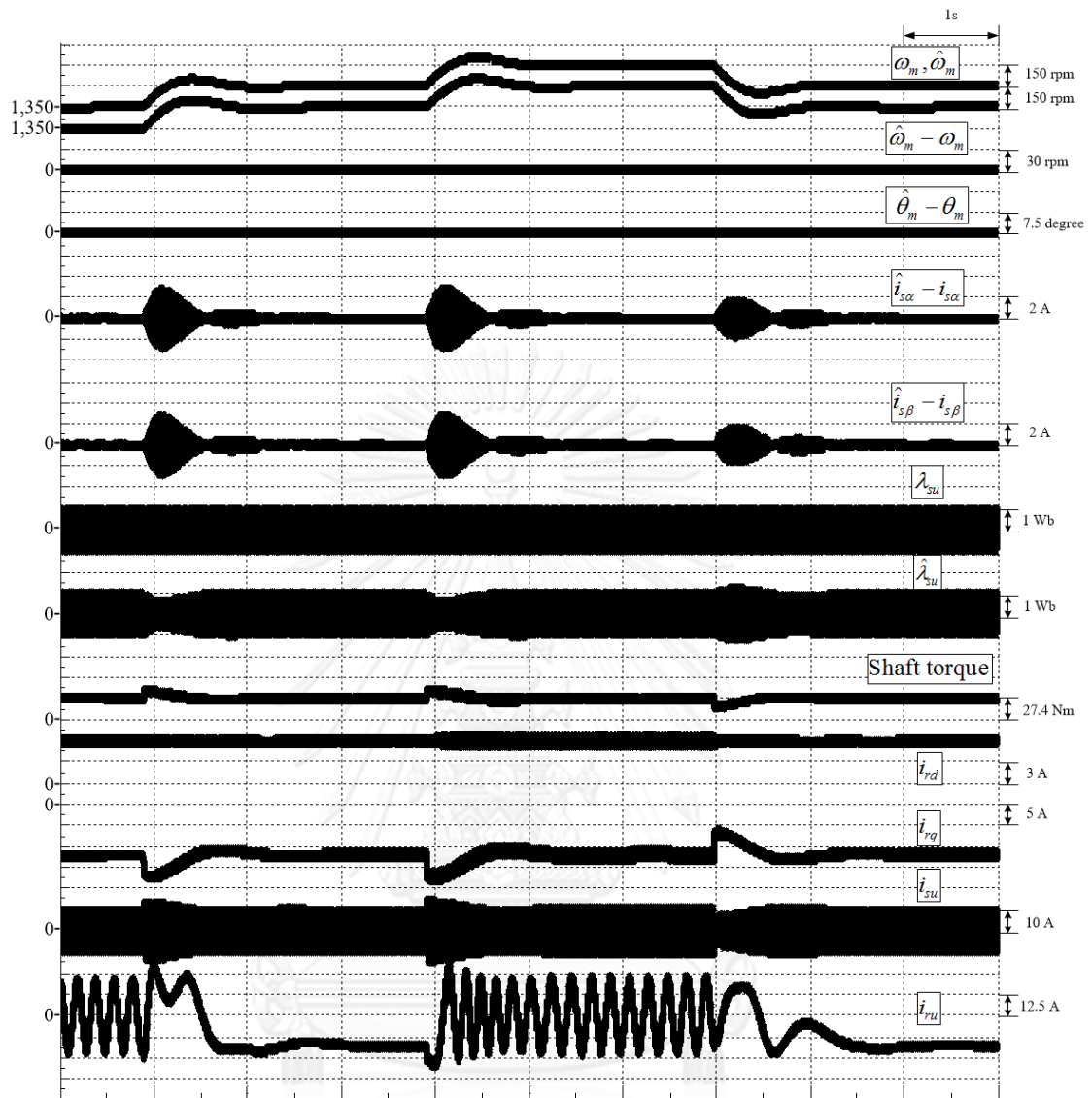
รูปที่ 4.5 โครงสร้างของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซ็นเซอร์วัดตำแหน่ง



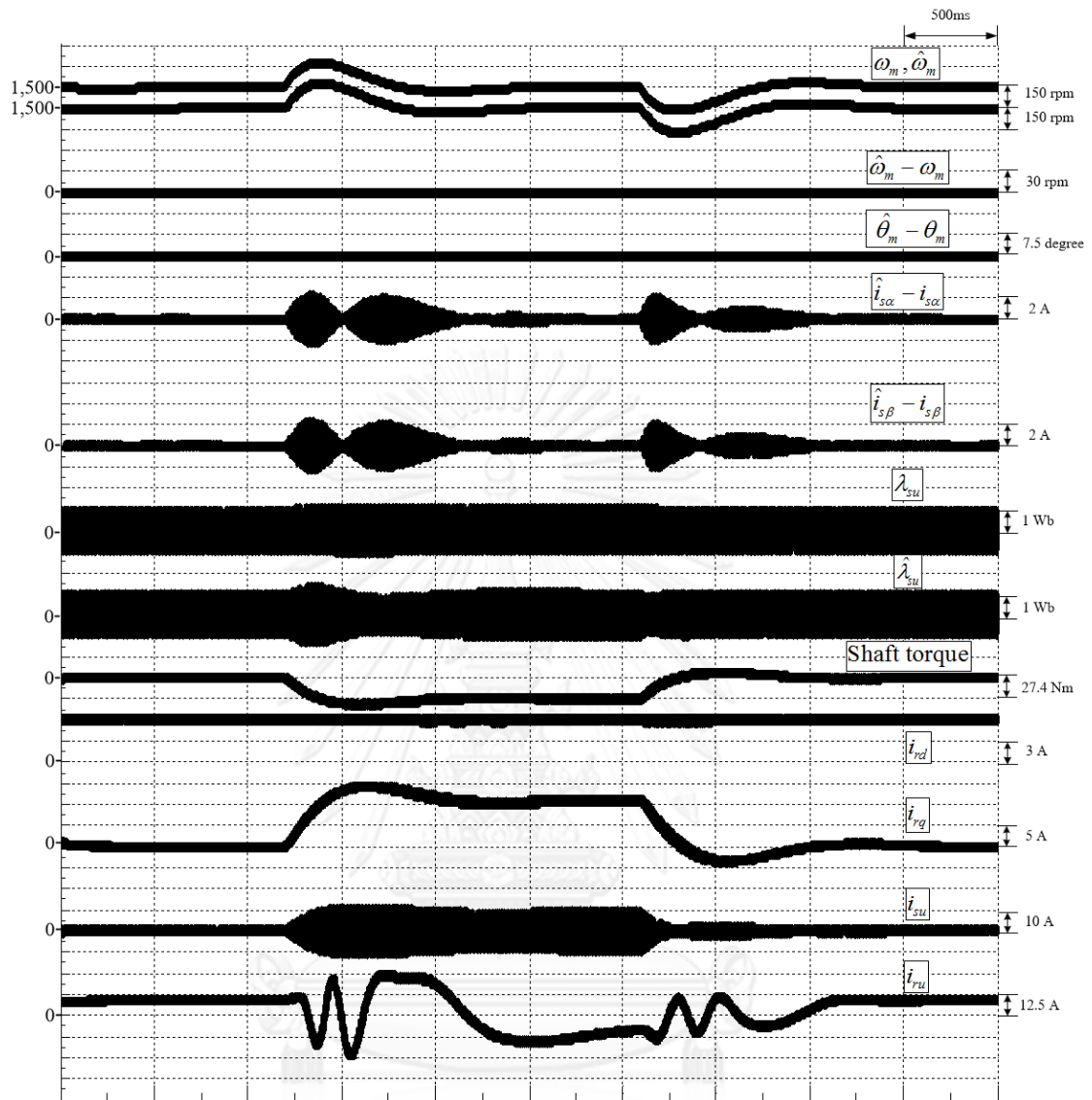
รูปที่ 4.6 ผลการจำลองการทำงานของระบบโดยเร่งความเร็วจาก 1350->1500->1650 rpm และลดความเร็วจาก 1650->1500 rpm ที่กระแสโรเตอร์ในแกน d (i_{rd}) 6 A สภาวะไร้โหลด



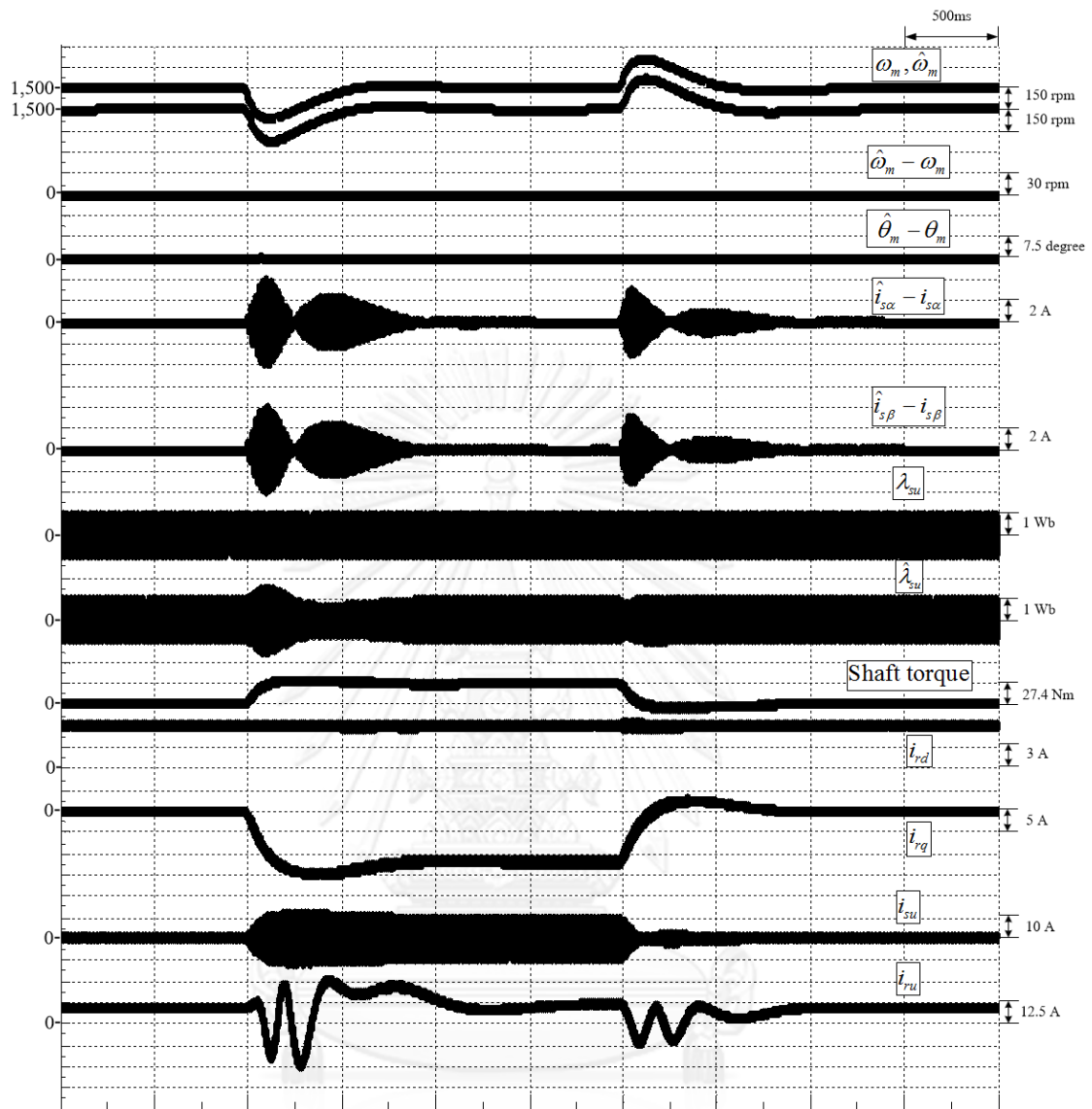
รูปที่ 4.7 ผลการจำลองการทำงานของระบบโดยเร่งความเร็วจาก 1350->1500->1650 rpm และลดความเร็วจาก 1650->1500 rpm ที่กระแสโรเตอร์แกน d (i_{rd}) 6 A ย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



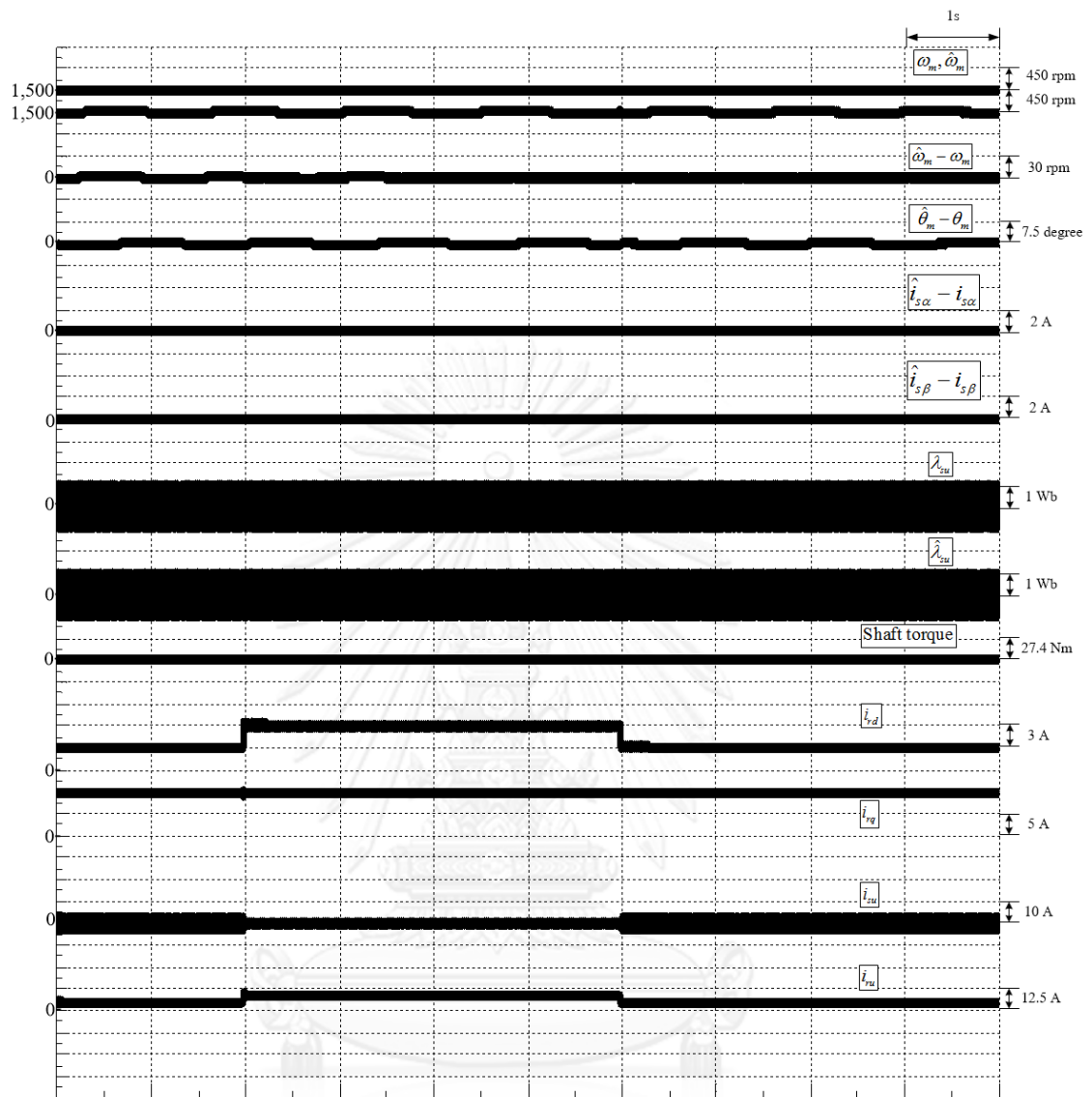
รูปที่ 4.8 ผลการจำลองการทำงานของระบบโดยเร่งความเร็วจาก 1350->1500->1650 rpm และลดความเร็ว จาก 1650->1500 rpm ที่กระแสโรเตอร์แกน d (i_{rd}) 6 A ย่านมอเตอร์



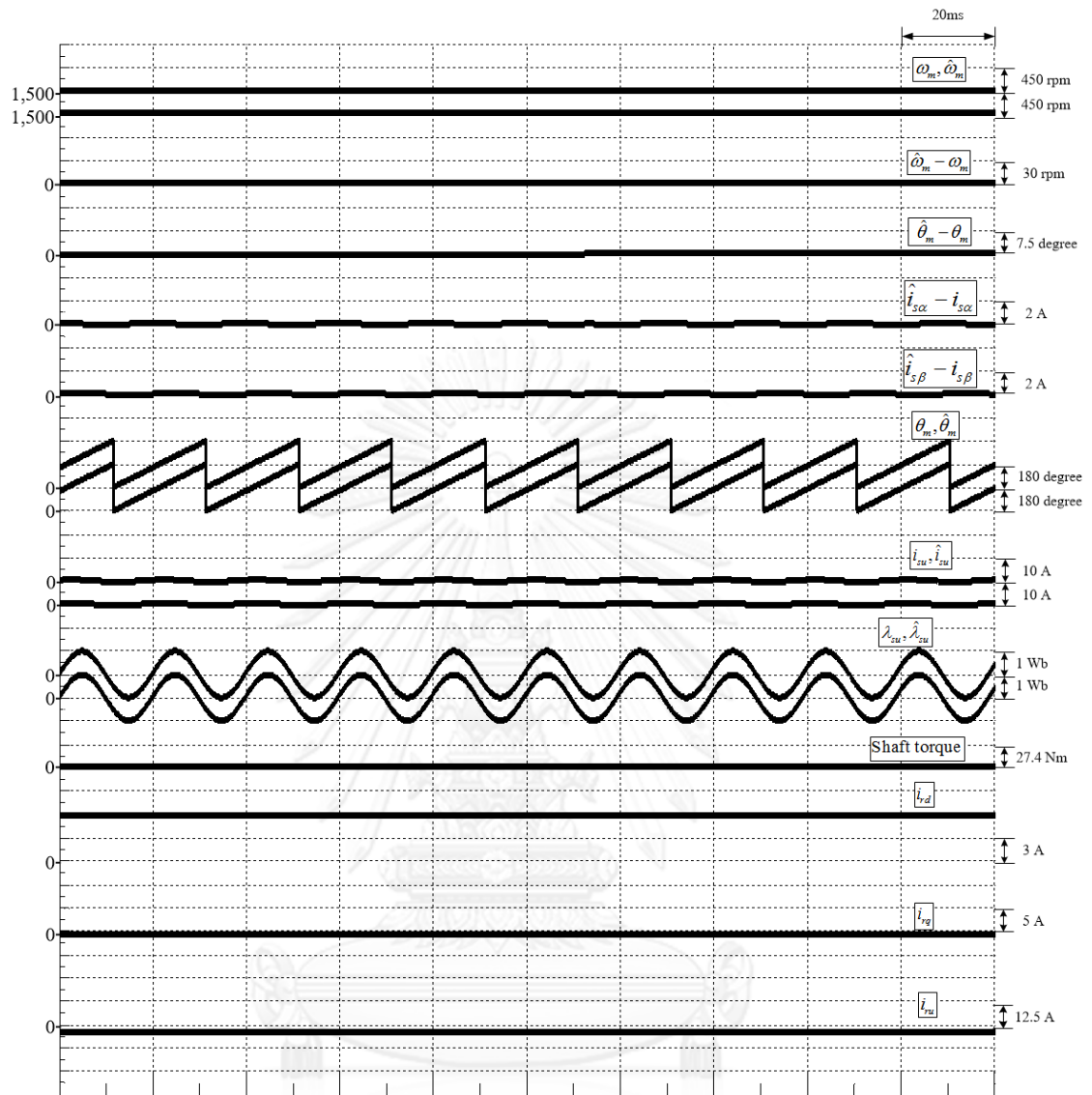
รูปที่ 4.9 ผลการจำลองการทำงานของระบบโดยลดแรงบิดโหลดจาก 0- \rightarrow -27.4 Nm และเพิ่มแรงบิดโหลดจาก -27.4- \rightarrow 0 Nm ที่ความเร็ว 1500 rpm และค่ากระแสโรเตอร์แกน d (i_{rd}) 6 A



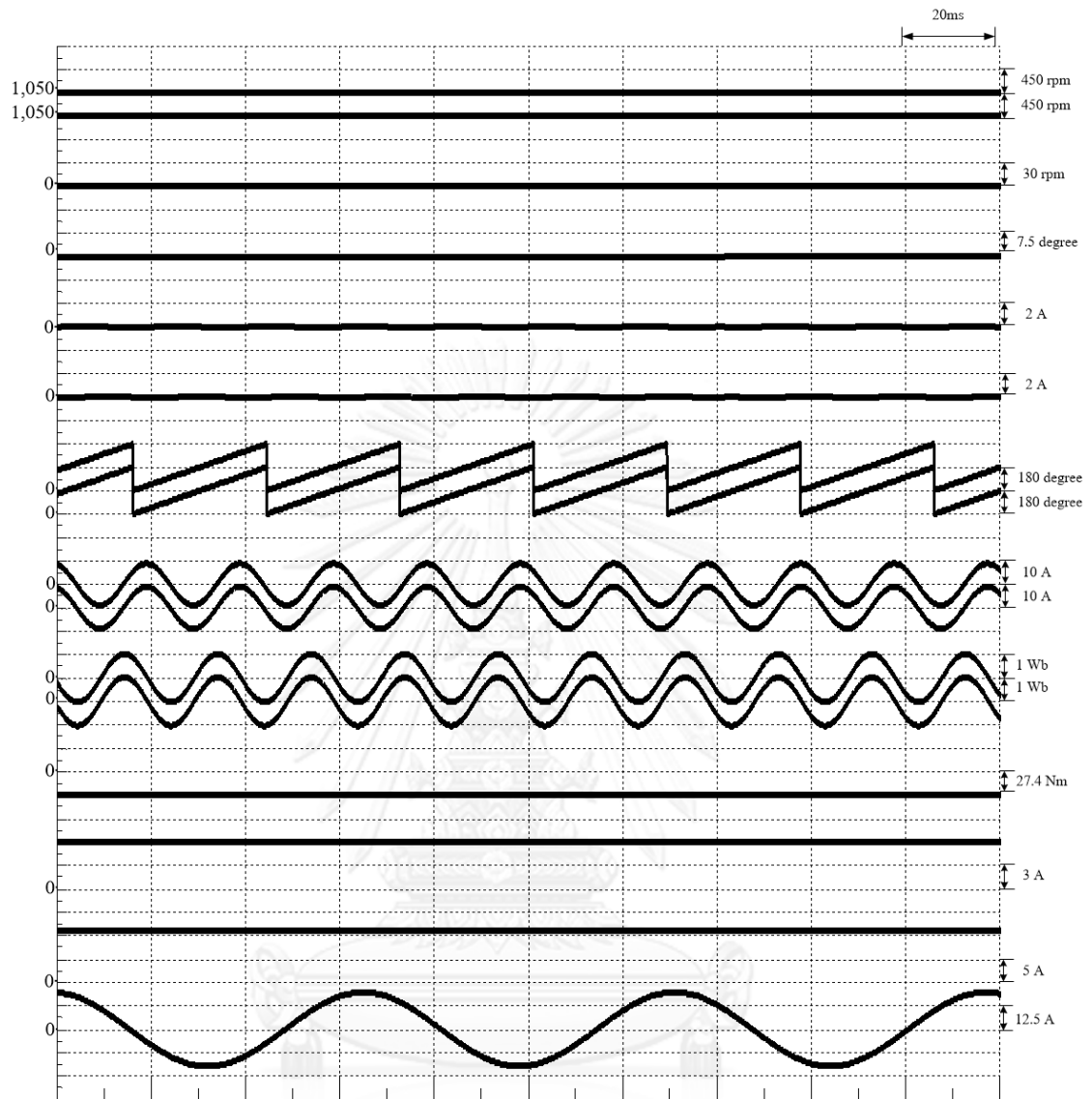
รูปที่ 4.10 ผลการจำลองการทำงานของระบบโดยเพิ่มแรงบิดโหลดจาก 0->27.4 Nm และลดแรงบิดโหลดจาก 27.4->0 Nm ที่ความเร็ว 1500 rpm และค่ากระแสโรเตอร์แกน d (i_{rd}) 6 A



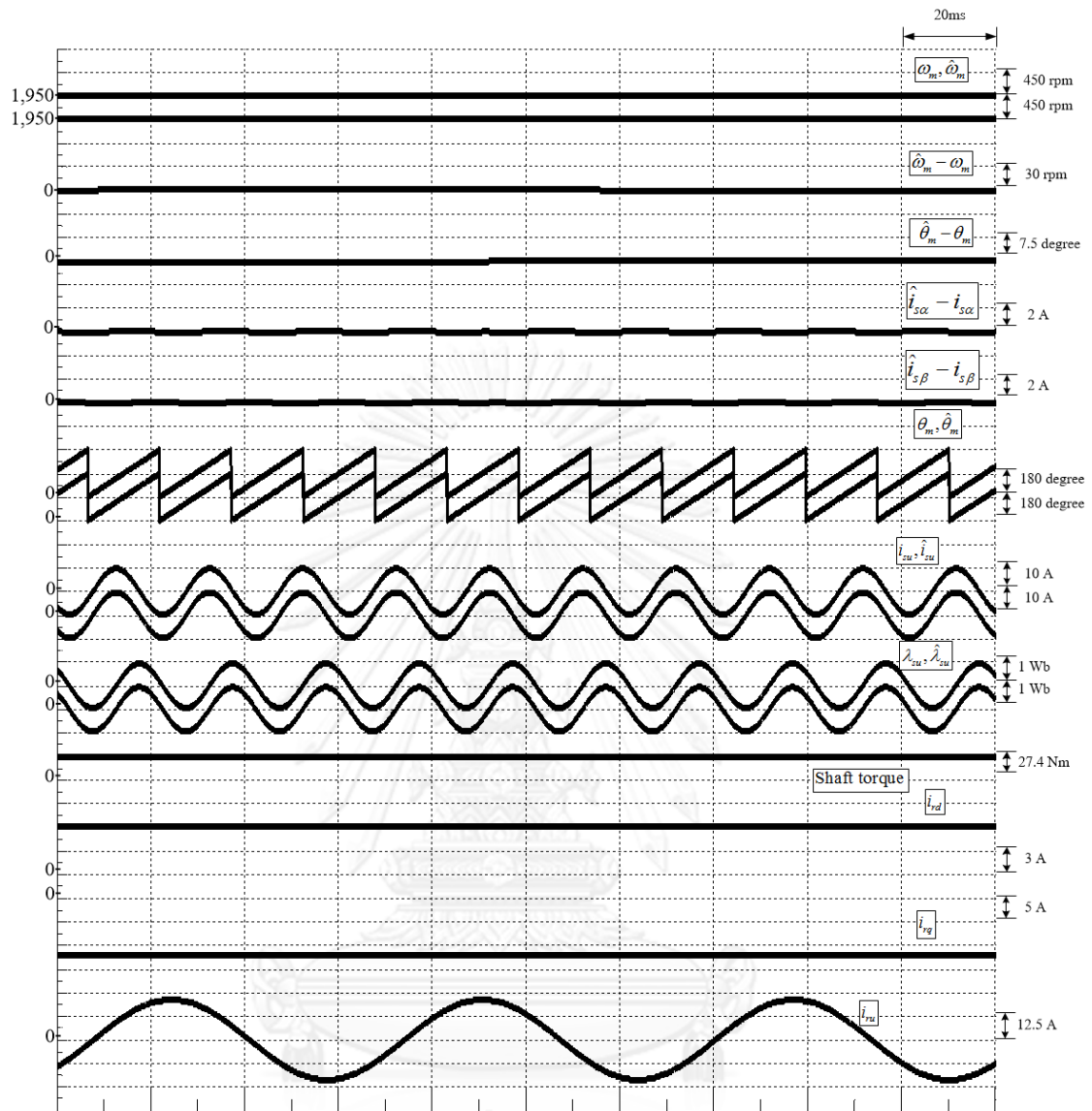
รูปที่ 4.11 ผลการจำลองการทำงานของระบบโดยเพิ่มกระแสโรเตอร์แกน d (i_{rd}) จาก 3->6 A ที่ความเร็ว 1500 rpm สภาวะไร้โหลด



รูปที่ 4.12 ผลการจำลองการทำงานของระบบที่สถานะอยู่ตัวที่ความเร็ว 1500 rpm กระแสโรเตอร์ในแกน d (i_{rd}) 6 A สภาวะไร้โหลด

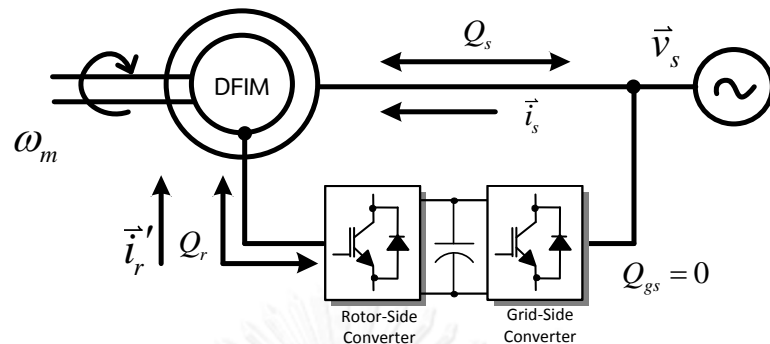


รูปที่ 4.13 ผลการจำลองการทำงานของระบบที่สถานะอยู่ตัวที่ความเร็ว 1050 rpm กระแสโรเตอร์แกน d (i_{rd}) 6 A ย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Sub-Synchronous Speed)



รูปที่ 4.14 ผลการจำลองการทำงานของระบบที่สถานะอยู่ตัวที่ความเร็ว 1950 rpm กระแสโรเตอร์แกน d (i_{rd}) 6 A ย่านมอเตอร์ (Super-Synchronous Speed)

4.3 การควบคุมกำลังรีแอกทีฟทางด้านโรเตอร์



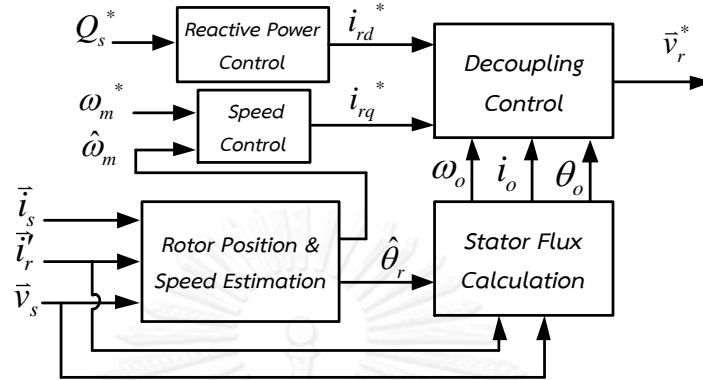
รูปที่ 4.15 การควบคุมกำลังรีแอกทีฟทางด้านโรเตอร์

โดยทั่วไปกำลังรีแอกทีฟทางด้านสเตเตอร์ (Q_s) จะไหลจากกริดเข้าสู่เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เพื่อสร้างฟลักซ์ให้แก่เครื่องจักรกล แต่เนื่องจากข้อกำหนดโครงข่ายไฟฟ้าที่กำหนดให้มีการควบคุมค่าตัวประกอบกำลังที่จุดเชื่อมต่อ จึงมีความจำเป็นต้องปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังผ่านการควบคุมกำลังรีแอกทีฟทางด้านโรเตอร์ รูปที่ 4.15 แสดงแผนภาพการไหลของกำลังรีแอกทีฟที่กำหนดให้วงจรแปลงผันฝั่งกริด (Grid-Side Converter) ควบคุมค่ากำลังรีแอกทีฟฝั่งกริดเป็นศูนย์ ($Q_{gs} = 0$) ค่ากำลังรีแอกทีฟทางด้านสเตเตอร์ (Q_s) จึงถูกควบคุมผ่านวงจรแปลงผันฝั่งโรเตอร์ (Rotor-Side Converter) โดยควบคุมผ่านกระแสโรเตอร์ในแกน d ดังสมการ (4.14) ทั้งนี้กำลังรีแอกทีฟทางด้านโรเตอร์จะไหลวนระหว่างเครื่องจักรกลไฟฟ้ากับวงจรแปลงผันฝั่งโรเตอร์

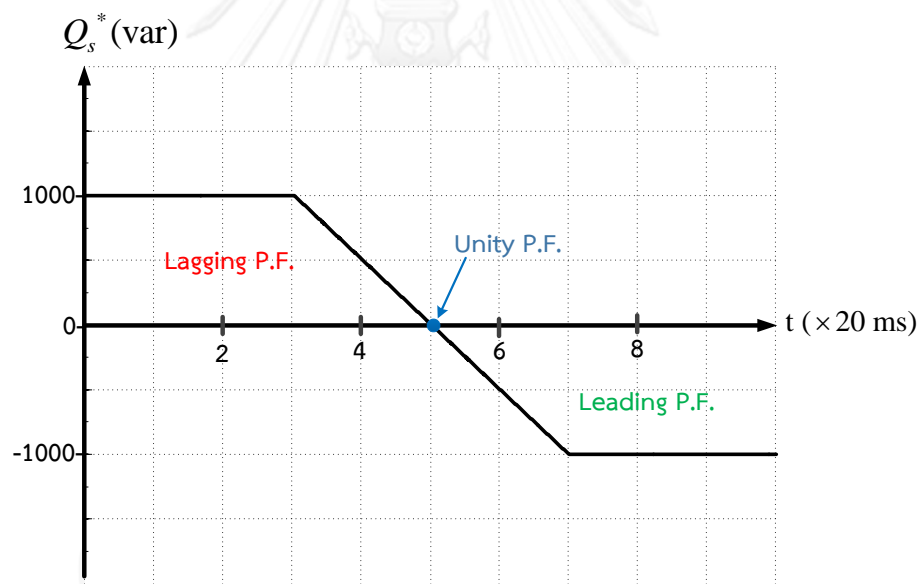
$$i_{rd}^* = \frac{\|\vec{v}_s\|}{\omega_o M} - \frac{Q_s^*}{\|\vec{v}_s\|} \quad (4.14)$$

ในการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink เราจะจำลองระบบควบคุมเวกเตอร์ไร้เซ็นเซอร์วัดตำแหน่งในโหมดควบคุมกำลังรีแอกทีฟทางด้านโรเตอร์ดังรูปที่ 4.16 ขณะระบบขับเคลื่อนเริ่มการทำงาน เรากำหนดให้ระบบทำงานที่ความเร็วคงที่ ณ สถานะไร้โหลด โดยมีค่าคำสั่งกำลังรีแอกทีฟทางด้านสเตเตอร์เท่ากับ 1000 var จนระบบเข้าสู่สถานะอยู่ตัว จากนั้นปรับค่าคำสั่งของกำลังรีแอกทีฟที่ลดลงเป็นฟังก์ชันแรมป์จนถึงค่า -1000 var ดังแสดงในรูปที่ 4.17 ระบบมีการควบคุมค่าตัวประกอบกำลังแบบล่าหลัง (Lagging P.F.) ผ่านจุดที่มีค่าตัวประกอบกำลังเป็นหนึ่ง (Unity P.F.) ไปยังค่าตัวประกอบกำลังแบบนำหน้า (Leading P.F.) เราสามารถแบ่งเงื่อนไขการจำลองการทำงานที่ค่าความเร็วต่างๆ คือ 1) 1050 rpm (Sub-Synchronous Speed) 2) 1500 rpm (Synchronous Speed) และ 3) 1950 rpm (Super-Synchronous Speed) จากผลการจำลองดังรูปที่ 4.18-รูปที่ 4.20 พบว่าระบบสามารถควบคุมกำลังรีแอกทีฟทางด้านสเตเตอร์ผ่านกระแสโรเตอร์ได้ และสามารถควบคุมความเร็วได้อย่างถูกต้อง โดยค่าผิดพลาดของระบบประมาณได้แก่ ค่าผิดพลาดความเร็วโรเตอร์ ($\hat{\omega}_m - \omega_m$) ค่าผิดพลาดตำแหน่งโรเตอร์ทางกล ($\hat{\theta}_m - \theta_m$) ค่าผิดพลาดกระแสสเตเตอร์ในแกน α ($\hat{i}_{s\alpha} - i_{s\alpha}$) และแกน β ($\hat{i}_{s\beta} - i_{s\beta}$) ล้วนมีค่าเป็นศูนย์ เราสามารถสรุปได้ว่าระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซ็นเซอร์วัดตำแหน่งสามารถทำงานได้ในโหมดควบคุม

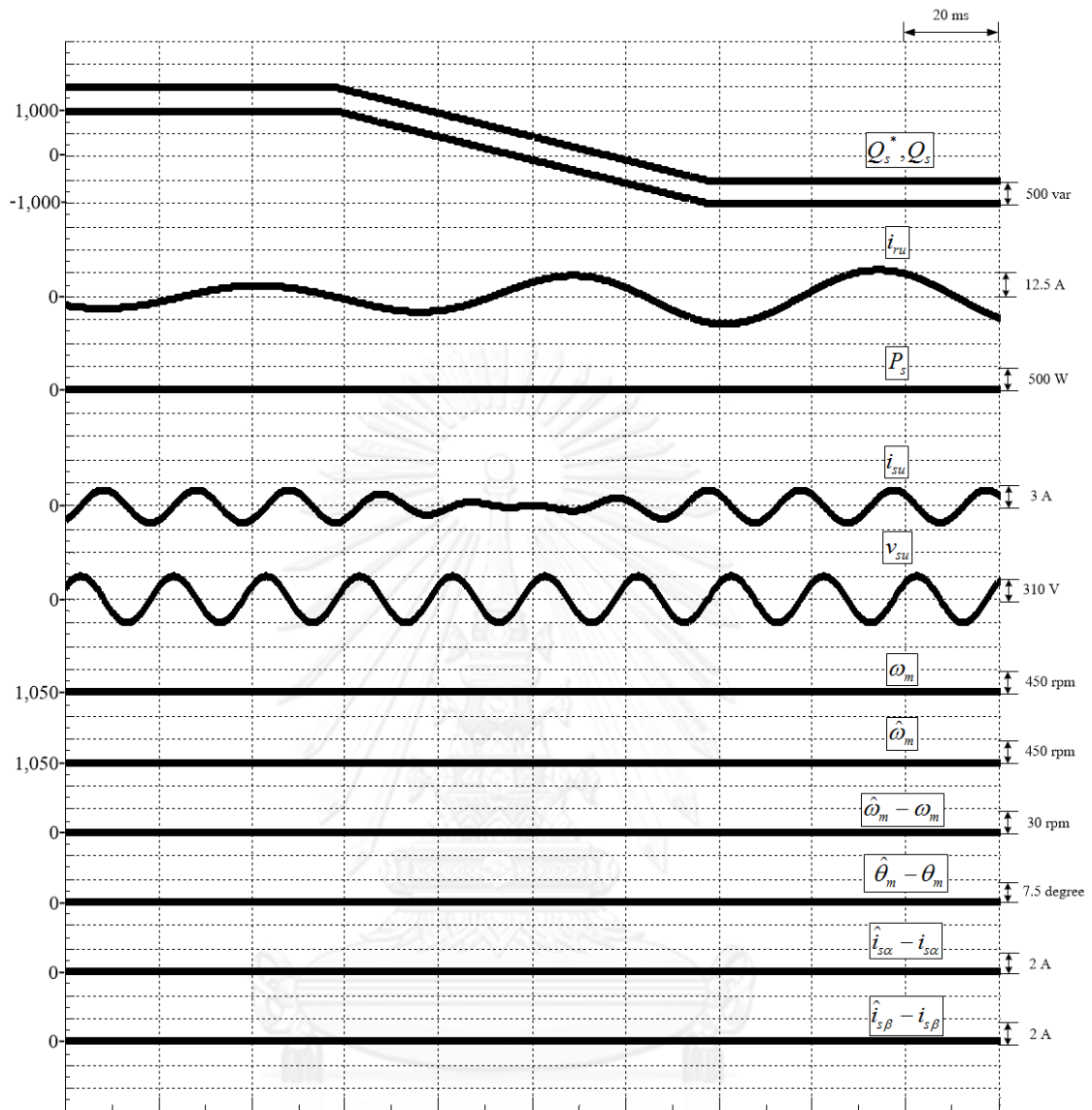
กำลังรีแอกทีฟทางด้านโรเตอร์ได้อย่างถูกต้อง ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีและเงื่อนไขการทำงานที่ได้นำเสนอ



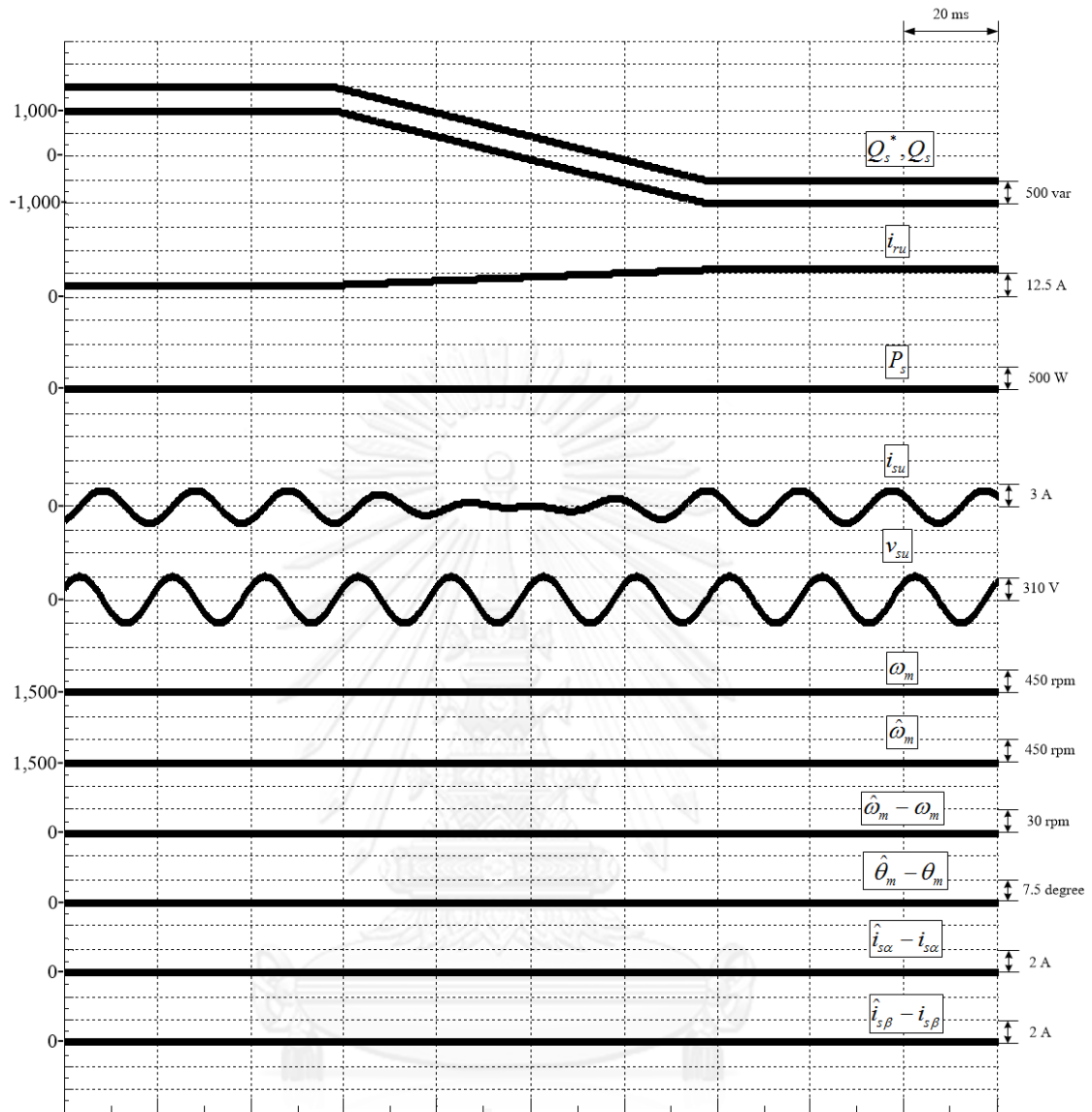
รูปที่ 4.16 โครงสร้างระบบควบคุมเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งในโหมดควบคุมกำลังรีแอกทีฟทางด้านโรเตอร์



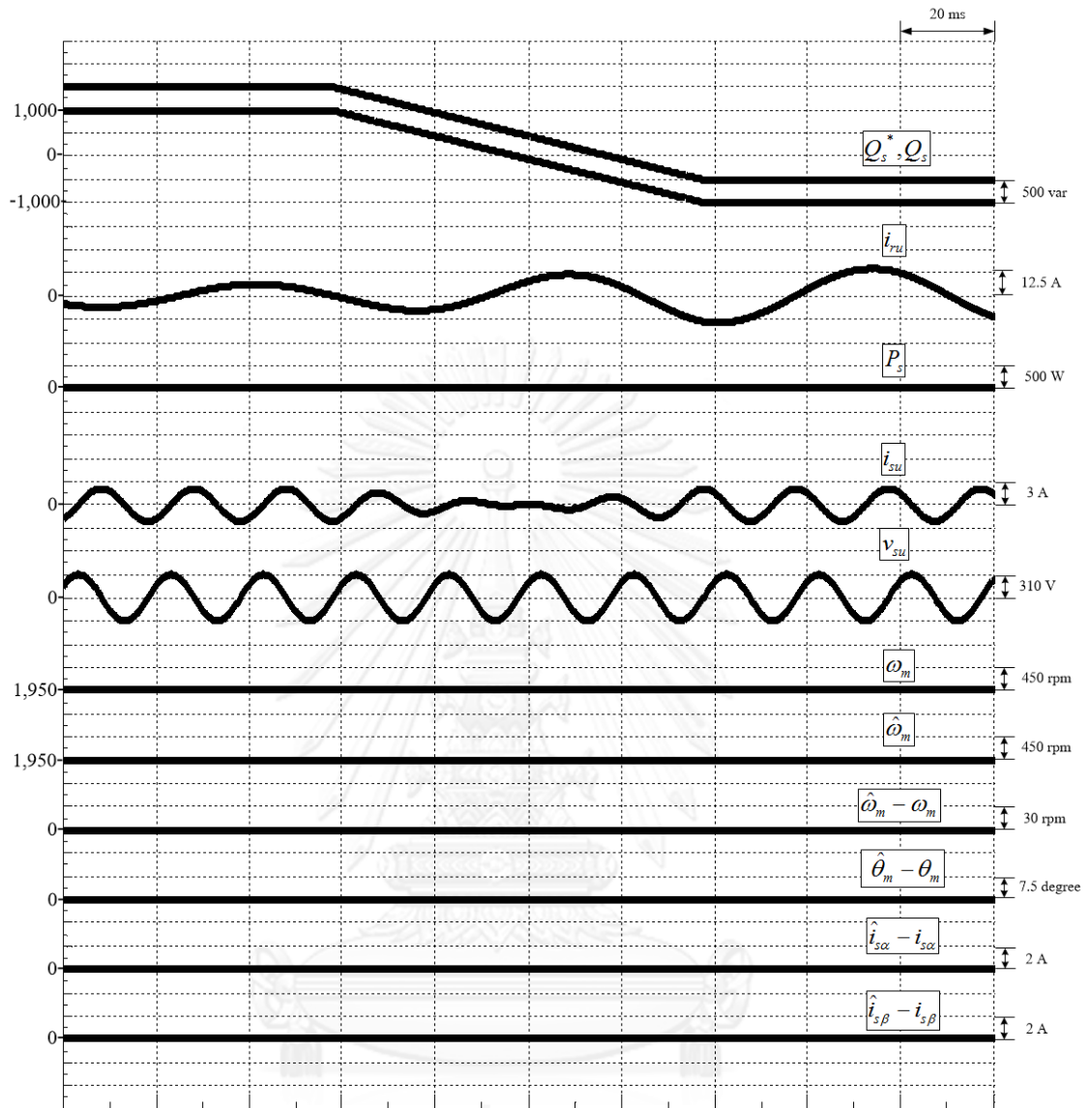
รูปที่ 4.17 ค่าคำสั่งกำลังรีแอกทีฟทางด้านสเตเตอร์



รูปที่ 4.18 ผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซ็นเซอร์วัดตำแหน่งในโหมดควบคุมกำลังรีแอกทีฟทางด้านโรเตอร์ ที่ความเร็ว 1050 rpm ณ สภาวะไร้โหลด



รูปที่ 4.19 ผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซ็นเซอร์วัดตำแหน่งในโหมดควบคุมกำลังรีแอกทีฟทางด้านโรเตอร์ ที่ความเร็ว 1500 rpm ณ สภาวะไร้โหลด



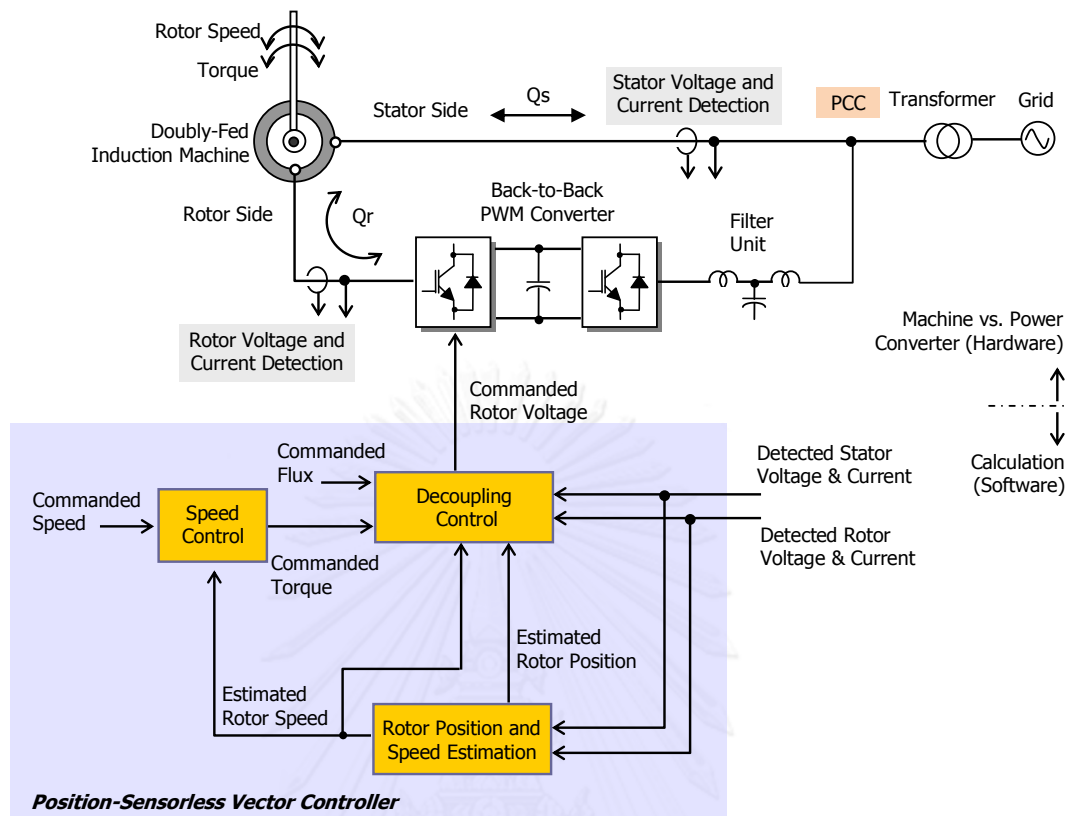
รูปที่ 4.20 ผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งในโหมดควบคุมกำลังรีแอกทีฟทางด้านโรเตอร์ ที่ความเร็ว 1650 rpm ณ สภาวะไร้โหลด

บทที่ 5

ผลการทดลอง

ในการทดสอบสมรรถนะของระบบขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางสามารถทำงานได้ตั้งแต่ย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (โหลดพิกัด -27.4 Nm) และย่านมอเตอร์ (โหลดพิกัด 27.4 Nm) และในทางปฏิบัติมีการปรับความเร็วรอบในช่วง -30% ของความเร็วซิงโครนัส (1050 rpm) ถึง +30% ของความเร็วซิงโครนัส (1950 rpm) ในการกำหนดเงื่อนไขการทดสอบระบบขับเคลื่อนด้วยตัวควบคุมเวกเตอร์ไรเซนเซอร์วัดตำแหน่ง เราจะกำหนดเงื่อนไขการทำงานที่ค่าโหลดและค่าความเร็วที่ค่ากระแสสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ (i_{rd}) ต่างๆ เพื่อแสดงถึงสมรรถนะของระบบประมาณและระบบควบคุมแบบเวกเตอร์ สำหรับการทดสอบคุณสมบัติในการประมาณค่าได้ เราจะปรับเปลี่ยนค่ากระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ (เวกเตอร์รีเฟอเรนซ์) เช่น i_{rd} เท่ากับ 3 A (50% ของค่ากระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์พิกัด) หรือ 6 A (100% ของค่ากระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์พิกัด) ดังนั้นเงื่อนไขการทดสอบระบบขับเคลื่อนแบบเวกเตอร์ไรเซนเซอร์วัดตำแหน่งสามารถจึงสามารถจำแนกได้ตามค่าโหลด ค่าความเร็ว และค่ากระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ (i_{rd}) ดังที่ได้กล่าวข้างต้น

ในบทนี้เราจะกล่าวถึงการทดสอบระบบขับเคลื่อนแบบเวกเตอร์ไรเซนเซอร์วัดตำแหน่งที่โหมดการทำงานต่างๆ เช่น การเปลี่ยนแปลงความเร็วแบบขั้น การป้อน/ปลดโหลดออกแบบขั้น การเปลี่ยนแปลงกระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์แบบขั้น การเปลี่ยนแปลงโหลดแบบแรมป์ จากย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าถึงย่านมอเตอร์ที่ความเร็วคงที่ เพื่อดูผลตอบสนองที่สภาวะอยู่ตัว (Steady State) และที่สภาวะชั่วคราว (Transient State) โดยระบบทดสอบจะอาศัยฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ในภาคผนวก ค ซึ่งโครงสร้างระบบทดสอบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.1 ซอฟต์แวร์จะประกอบด้วย 3 ส่วน คือ 1) วงรอบความเร็วทำหน้าที่ควบคุมความเร็วด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ โดยกำหนดให้ $K_{P\omega} = 0.3$, $K_{I\omega} = 1.15$ 2) ระบบประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์ทำหน้าที่ประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์โดยใช้อัตราขยายการปรับตัว (K_p , K_I) ตามหลักการออกแบบที่ได้นำเสนอในบทที่ 3 ซึ่งกำหนดให้แบนด์วิดท์เท่ากับ 50 rad/s ($\omega_c = 50 \text{ rad/s}$) และ 3. การควบคุมแบบแยกการเชื่อมร่วม มีหน้าที่คำนวณแรงดันคำสั่งโรเตอร์ในแกน d และแกน q โดยการคำนวณจะมีตัวควบคุมแบบพีไอควบคุมกระแสในแกน d และแกน q เรากำหนดให้ $K_{Pc} = 40$, $K_{Ic} = 4000$ ค่าพารามิเตอร์มอเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณสามารถแสดงได้ดังภาคผนวก ง



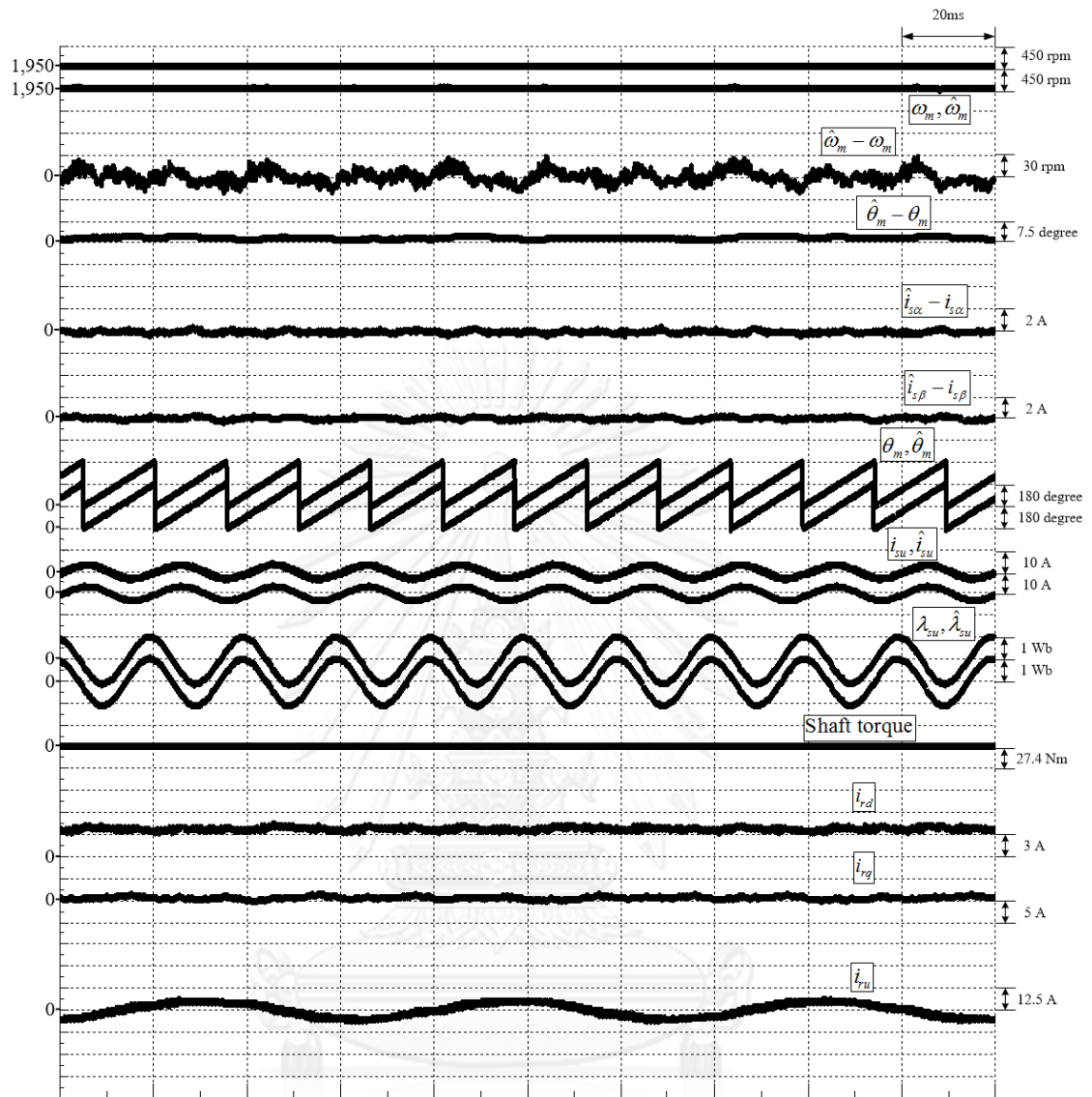
รูปที่ 5.1 โครงสร้างระบบทดสอบการควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง

5.1. ผลการทดลองของระบบขับเคลื่อนที่สถานะอยู่ตัว (Steady State)

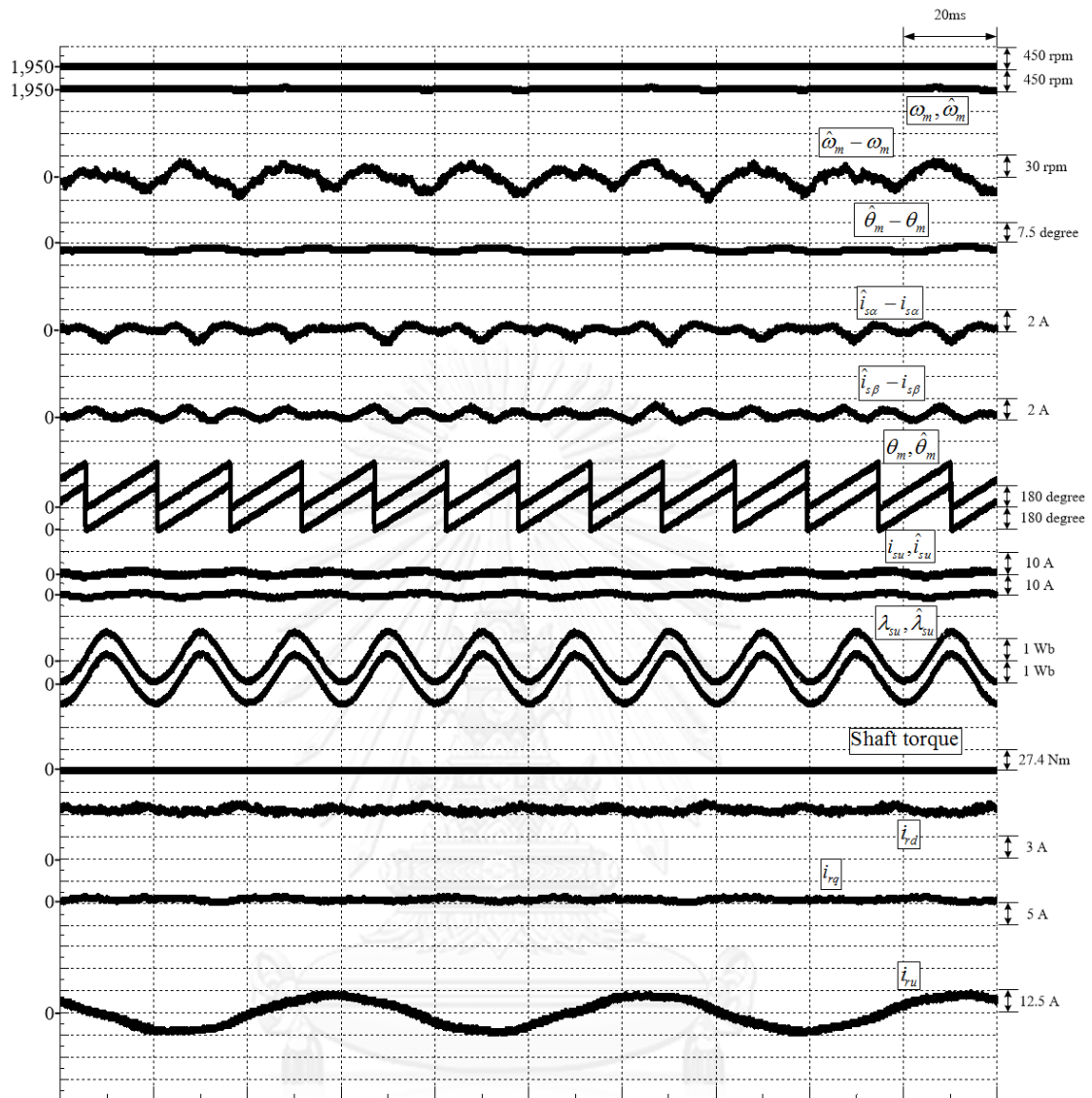
การทดสอบการทำงานของระบบขับเคลื่อนที่สถานะอยู่ตัวสามารถแบ่งออกเป็น 3 โหมดการทำงาน คือ 1) สถานะไร้โหลด 2) โหลดยานมอเตอร์ และ 3) โหลดยานเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยโหมดต่างๆ จะทดสอบที่ค่าความเร็วและค่ากระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ดังตารางที่ 1.1 ตารางที่ 5.1 และมีรูปที่ 5.2-รูปที่ 5.11 แสดงผลการทดลองทั้ง 3 โหมดการทำงาน จากผลการทดลองพบว่าค่าความเร็วประมาณมีค่าเท่ากับค่าความเร็วจริง โดยมีค่าระลอกอยู่ในช่วง 0-30 rpm (คิดเป็น 0-2% ของความเร็วซิงโครนัส) ขณะที่ตำแหน่งโรเตอร์ประมาณมีค่าระลอกของค่าผิดพลาดของตำแหน่งอยู่ในช่วง 0-5 องศา (0-1.39%) ค่าผิดพลาดกระแสสเตเตอร์ประมาณในแกน α และแกน β มีค่าเฉลี่ยเป็น 0 และมีค่าระลอกอยู่ในช่วง 0-0.4 A (0-3.49% ของกระแสสเตเตอร์พิกัด) ในส่วนของการควบคุมแบบเวกเตอร์ กระแสโรเตอร์ในแกน d และแกน q มีค่าตรงตามค่าคำสั่งและสามารถควบคุมได้อย่างอิสระต่อกัน

ตารางที่ 5.1 เงื่อนไขการทดสอบระบบขับเคลื่อนแบบเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งที่สถานีอยู่ตัว

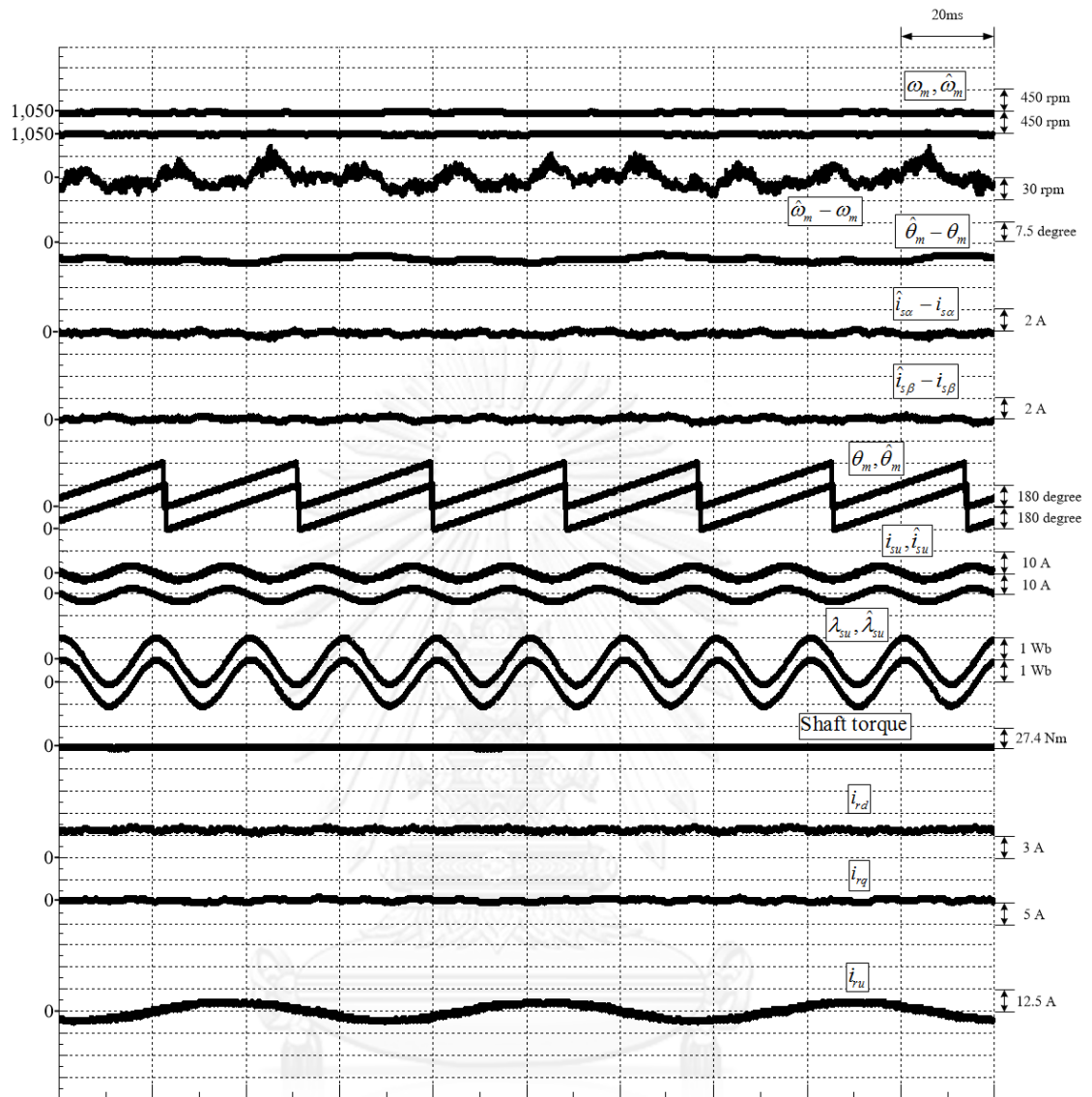
ลำดับ	ย่านการทำงาน	ความเร็ว (rpm)	กระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ (A)	ผลการทดลอง
1	ไร้โหลด	1950 (Super-Synchronous Speed)	3	รูปที่ 5.2
			6	รูปที่ 5.3
		1050 (Sub-Synchronous Speed)	3	รูปที่ 5.4
			6	รูปที่ 5.5
		1500 (Synchronous Speed)	3	รูปที่ 5.6
			6	รูปที่ 5.7
2	มอเตอร์	1950 (Super-Synchronous Speed)	3	รูปที่ 5.8
			6	รูปที่ 5.9
3	เครื่องกำเนิดไฟฟ้า	1050 (Sub-Synchronous Speed)	3	รูปที่ 5.10
			6	รูปที่ 5.11



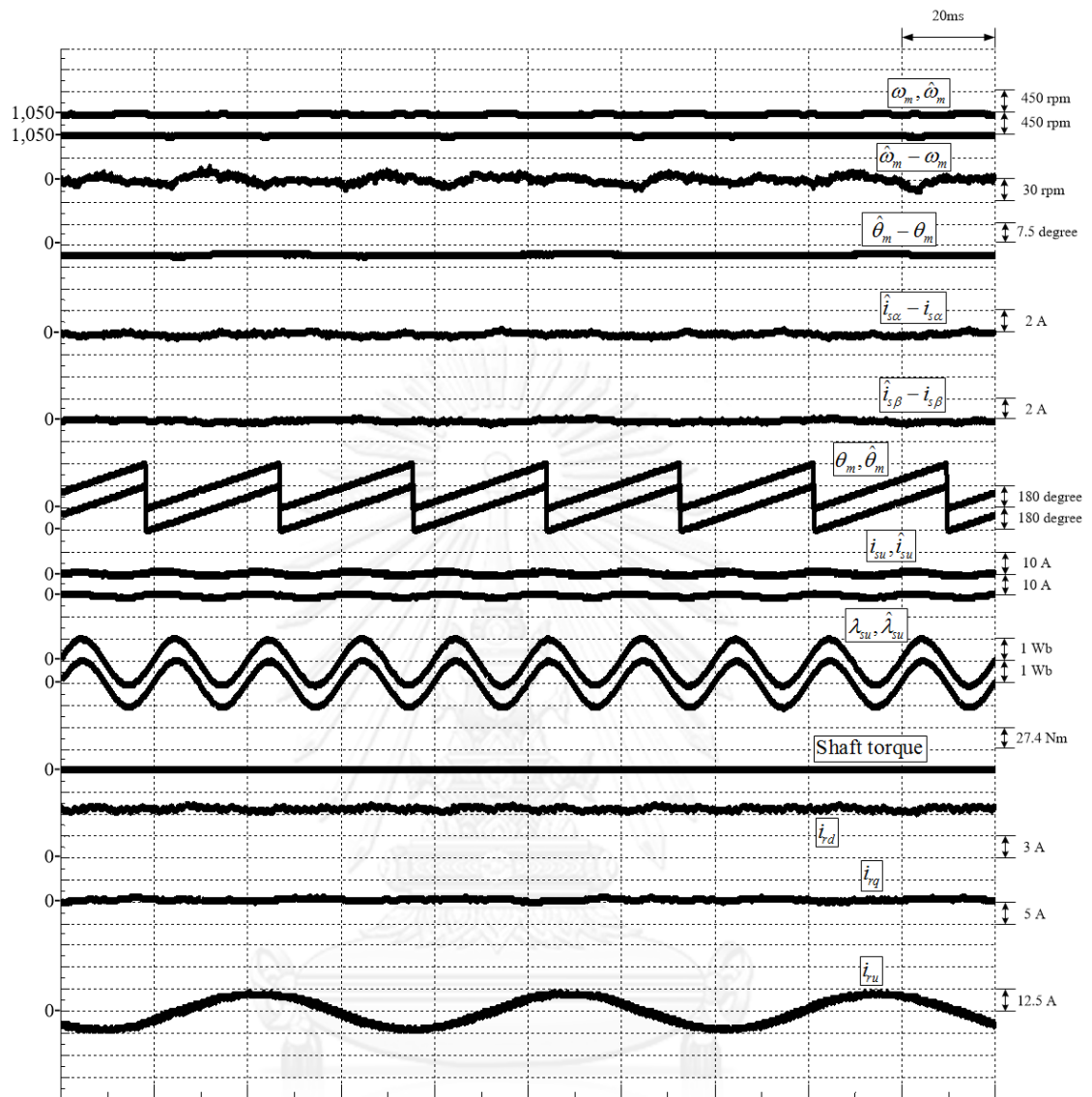
รูปที่ 5.2 ผลการทดลองของระบบที่สถานะอยู่ตัวที่สภาวะไร้อโหลด ความเร็ว 1950 rpm และกระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ 3 A



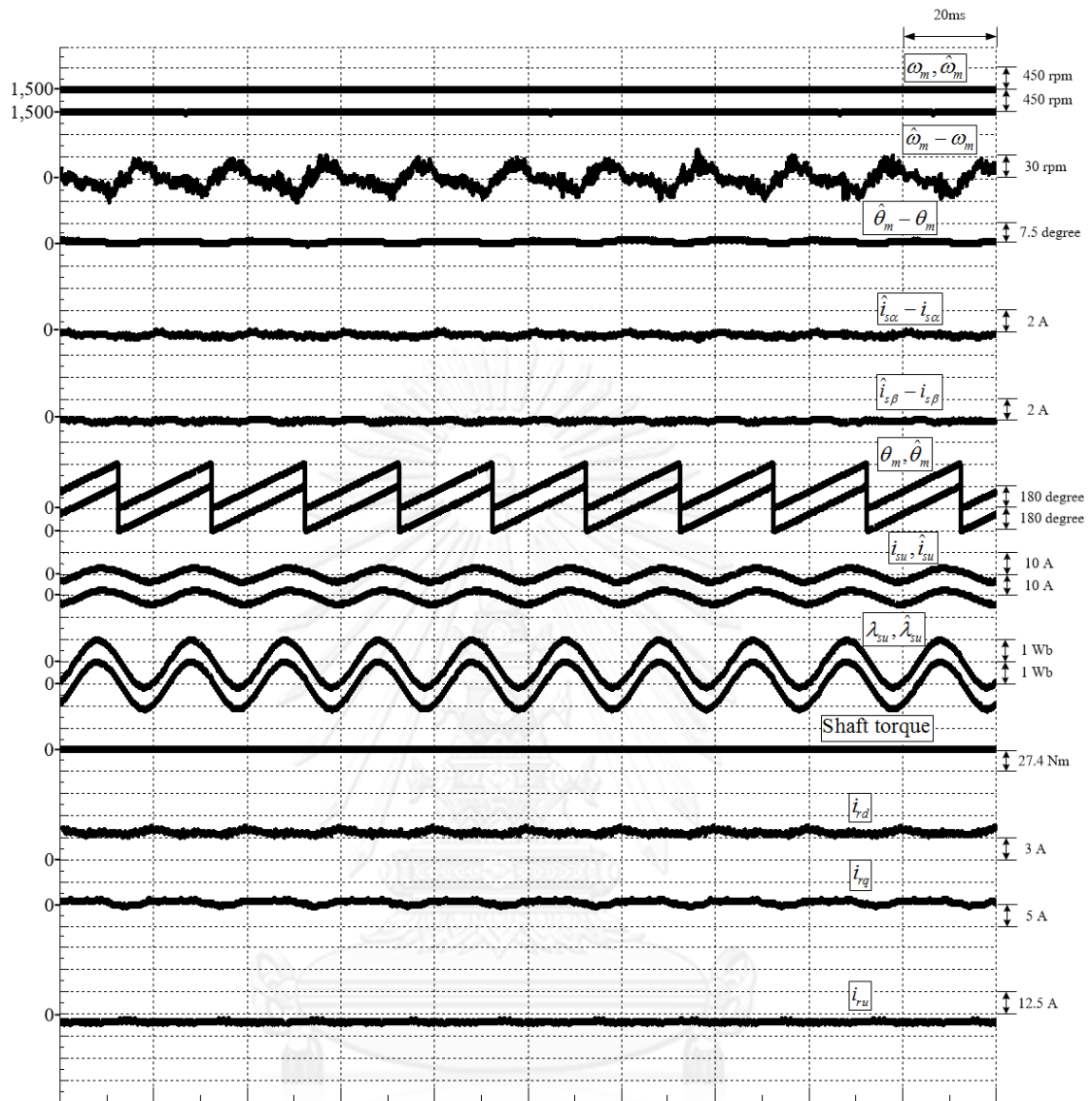
รูปที่ 5.3 ผลการทดลองของระบบที่สถานะอยู่ตัวที่สภาวะไร้อโหลด ความเร็ว 1950 rpm และกระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ 6 A



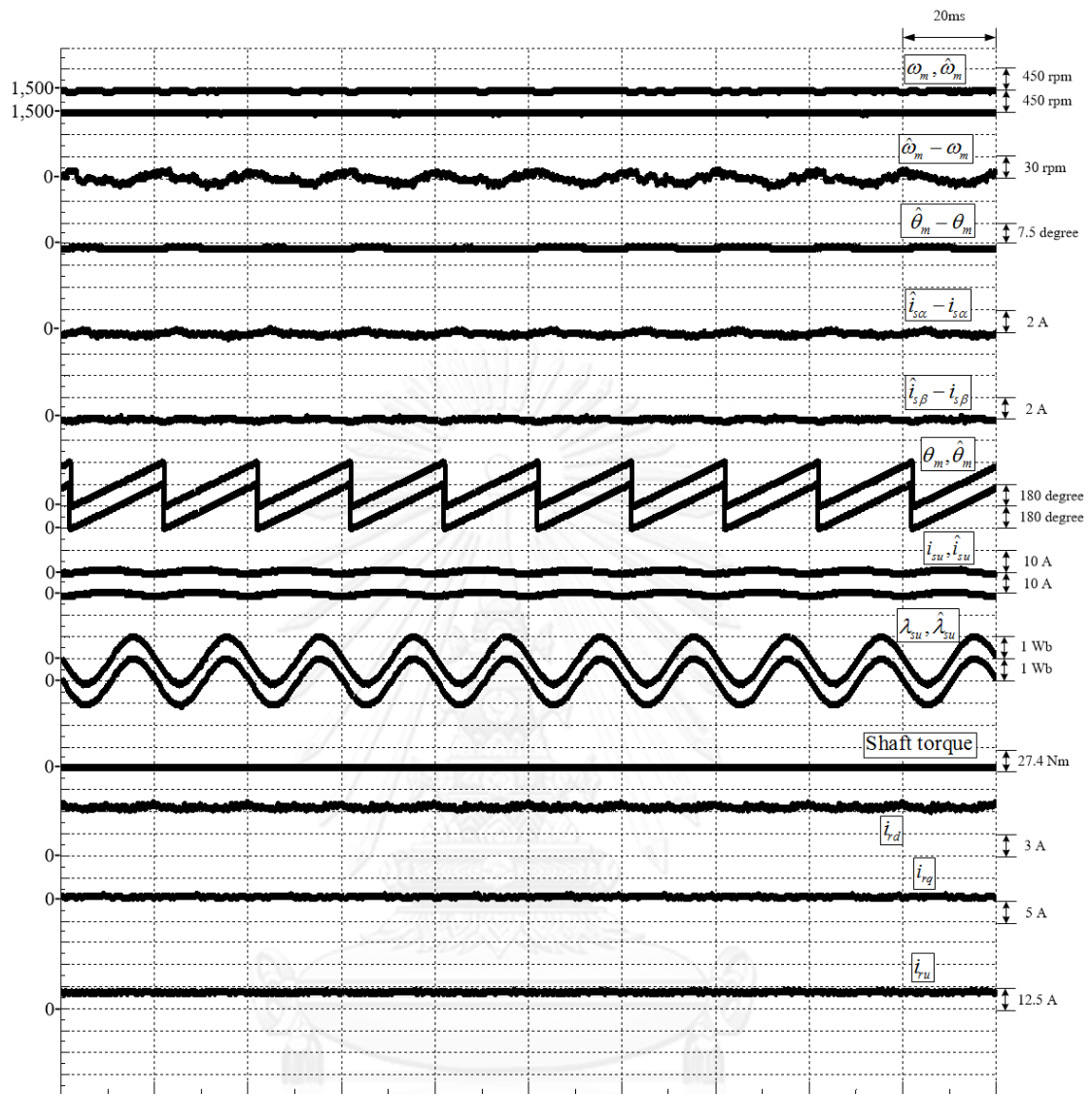
รูปที่ 5.4 ผลการทดลองของระบบที่สถานะอยู่ตัวที่สภาวะไร้อโหลด ความเร็ว 1050 rpm และกระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ 3 A



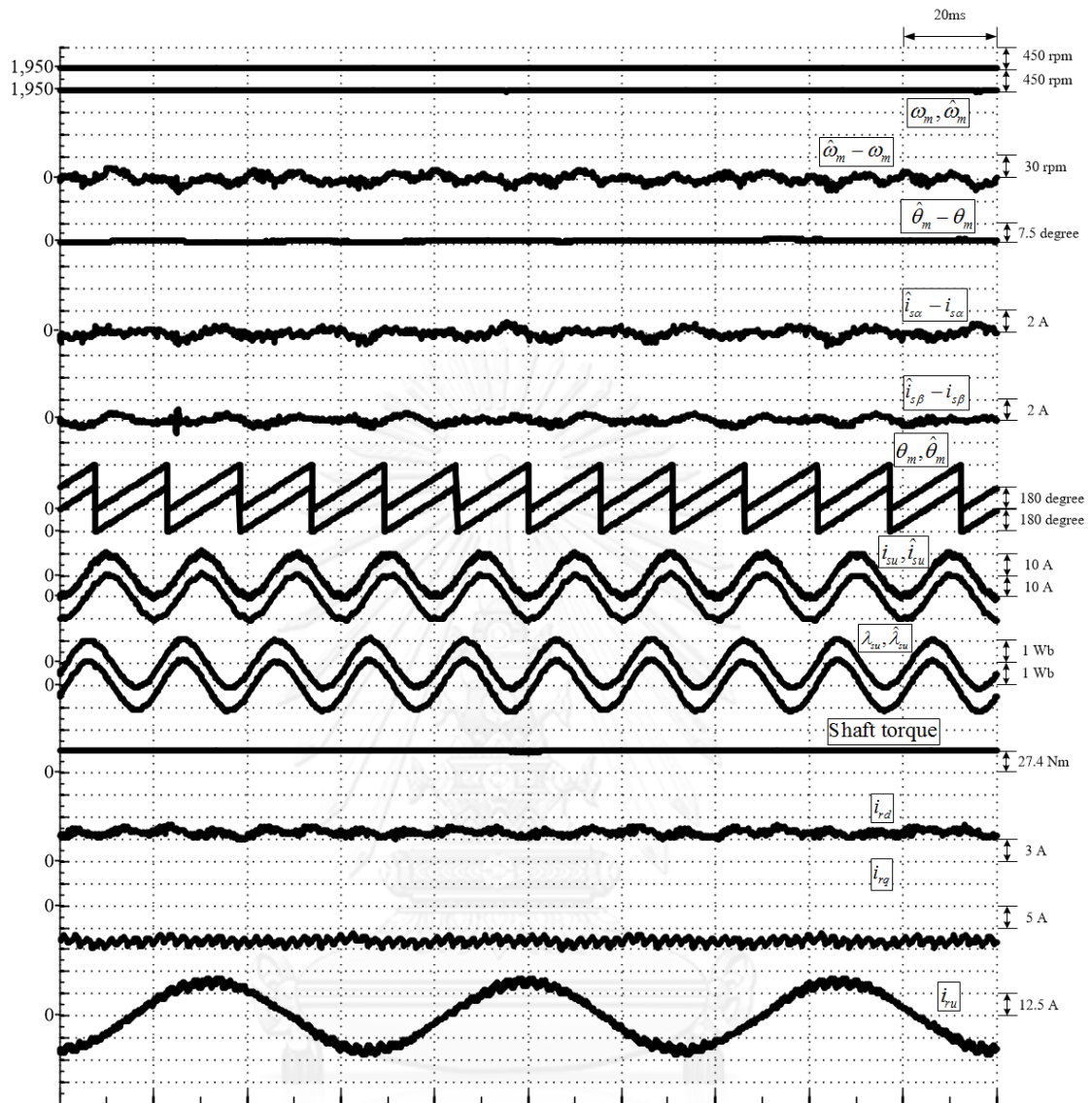
รูปที่ 5.5 ผลการทดลองของระบบที่สถานะอยู่ตัวที่สภาวะไร้โหลด ความเร็ว 1050 rpm และกระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ 6 A



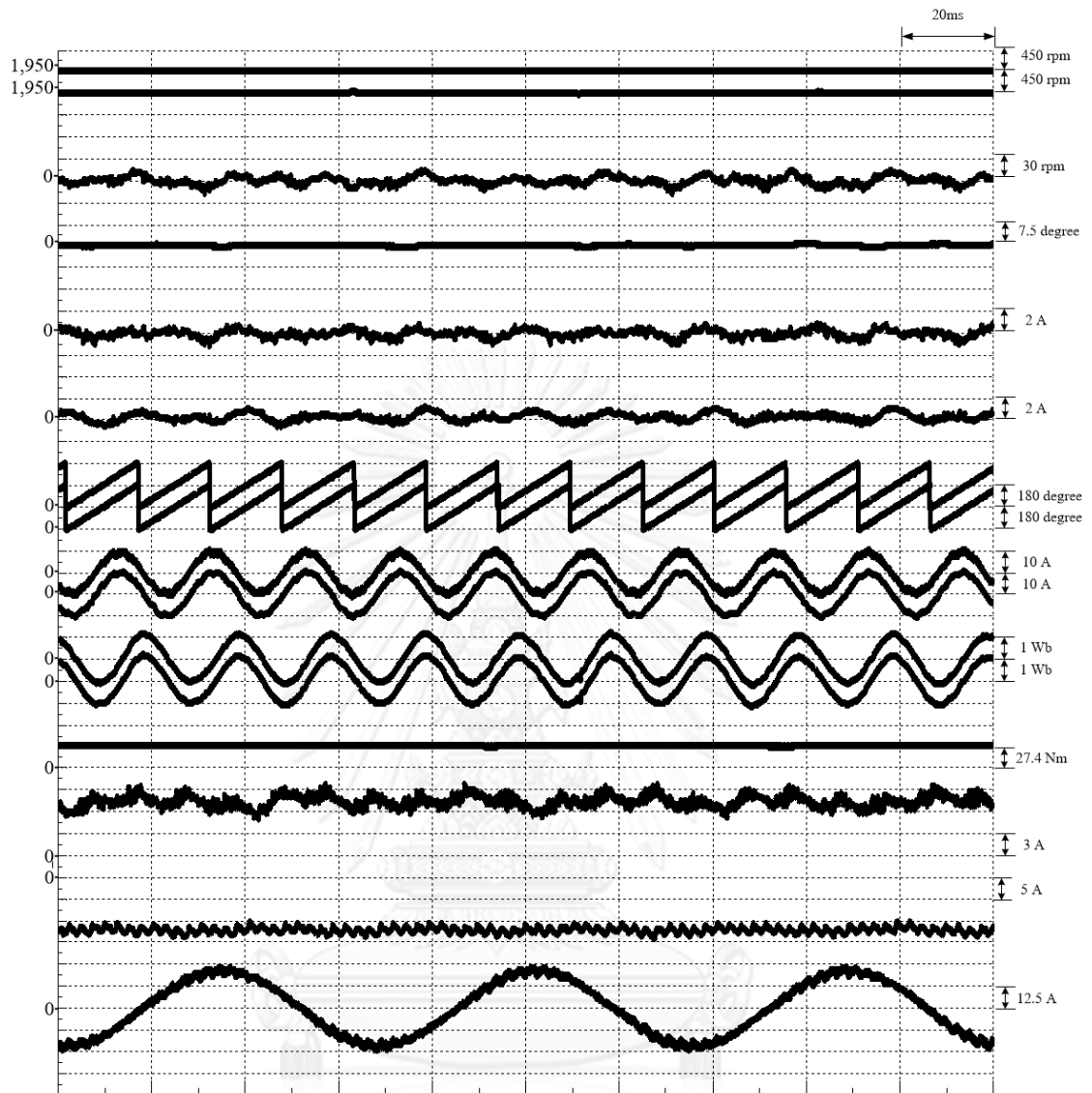
รูปที่ 5.6 ผลการทดลองของระบบที่สถานะอยู่ตัวที่สภาวะไร้โหลด ความเร็ว 1500 rpm และกระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ 3 A



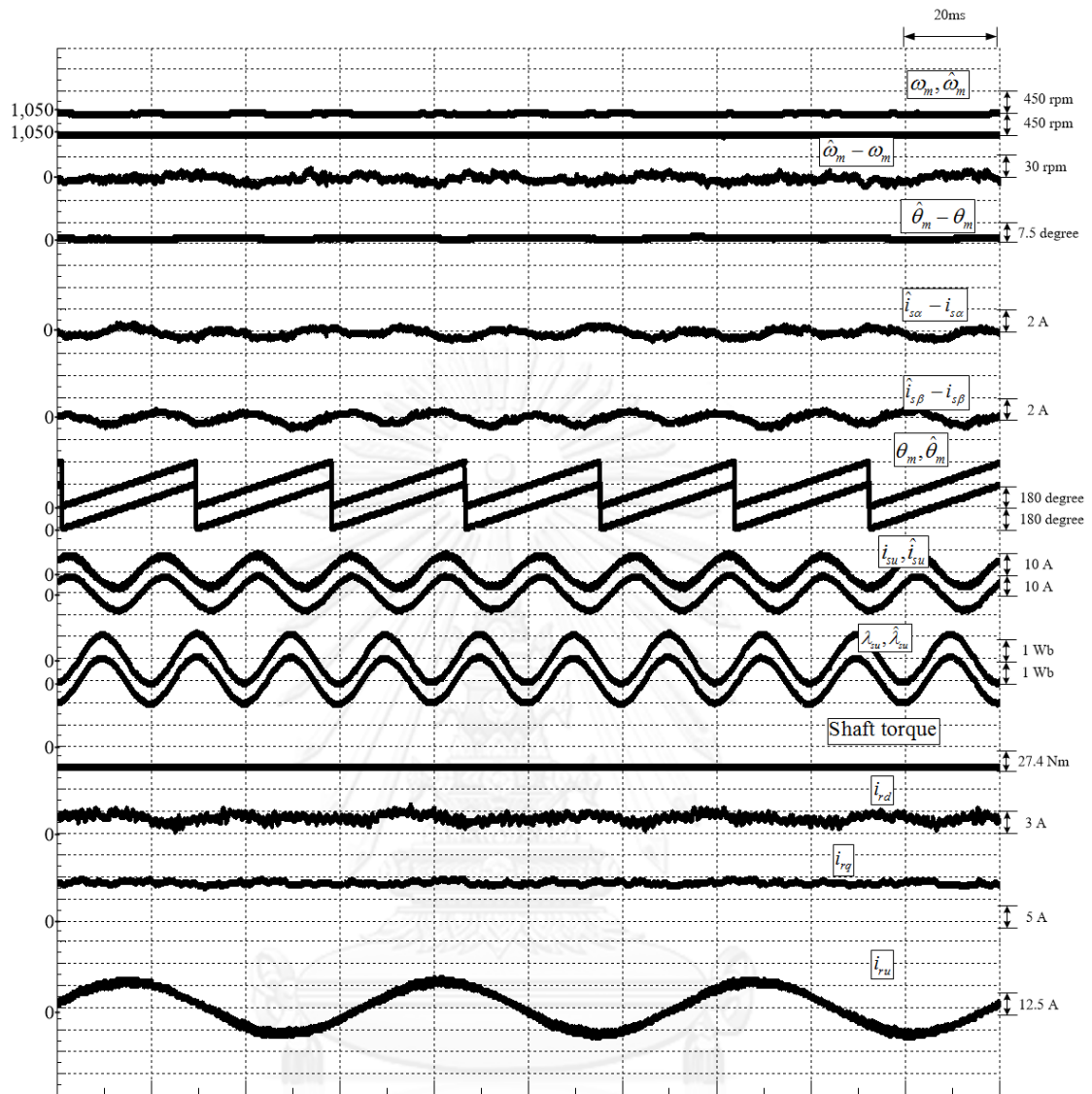
รูปที่ 5.7 ผลการทดลองของระบบที่สถานะอยู่ตัวที่สภาวะไร้โหลด ความเร็ว 1500 rpm และกระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ 6 A



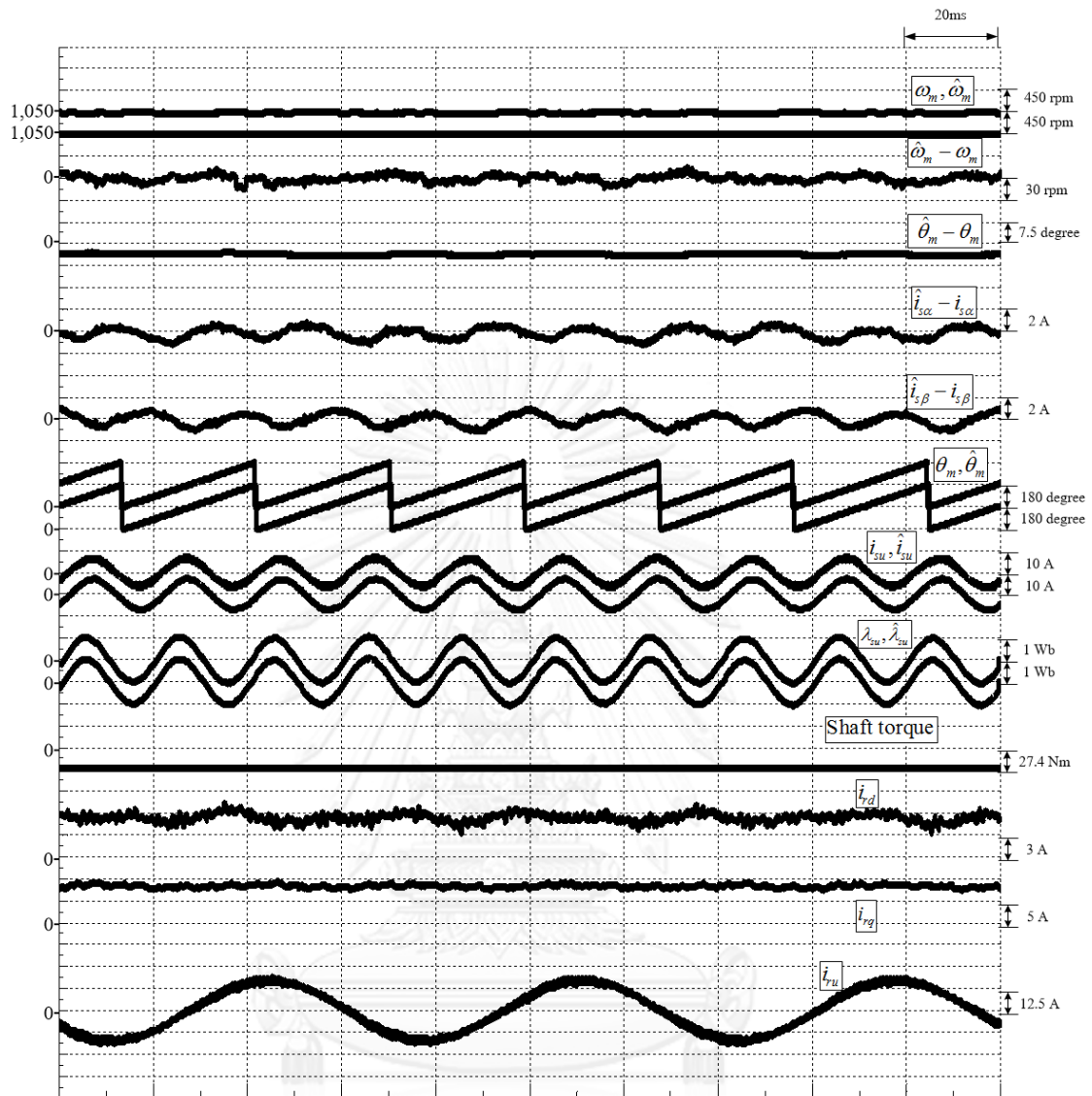
รูปที่ 5.8 ผลการทดลองของระบบที่สถานะอยู่ตัวที่ย่านมอเตอร์ ความเร็ว 1950 rpm และกระแส กระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ 3 A



รูปที่ 5.9 ผลการทดลองของระบบที่สถานะอยู่ตัวที่ย่านมอเตอร์ ความเร็ว 1950 rpm และกระแส กระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ 6 A



รูปที่ 5.10 ผลการทดลองของระบบที่สถานะอยู่ตัวที่ย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ความเร็ว 1050 rpm และกระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ 3 A



รูปที่ 5.11 ผลการทดลองของระบบที่สถานะอยู่ตัวที่ย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ความเร็ว 1050 rpm และกระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ 6 A

5.2. ผลการทดสอบของผลตอบสนองชั่วคราว (Transient Response)

การทดสอบผลตอบสนองชั่วคราวของระบบขับเคลื่อนแบบเวกเตอร์ไร้เซ็นเซอร์วัดตำแหน่งได้แบ่งโหมดการทดสอบเป็น 4 โหมดการทำงาน คือ 1. การเปลี่ยนแปลงความเร็วแบบขั้น 2. การป้อน/ปลดโหลดแบบขั้น 3. การเปลี่ยนแปลงกระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์แบบขั้น และ 4. การเปลี่ยนแปลงโหลดแบบแรมป์จากย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าถึงย่านมอเตอร์ที่มีความเร็วคงที่

5.2.1. การเปลี่ยนแปลงความเร็วแบบขั้น

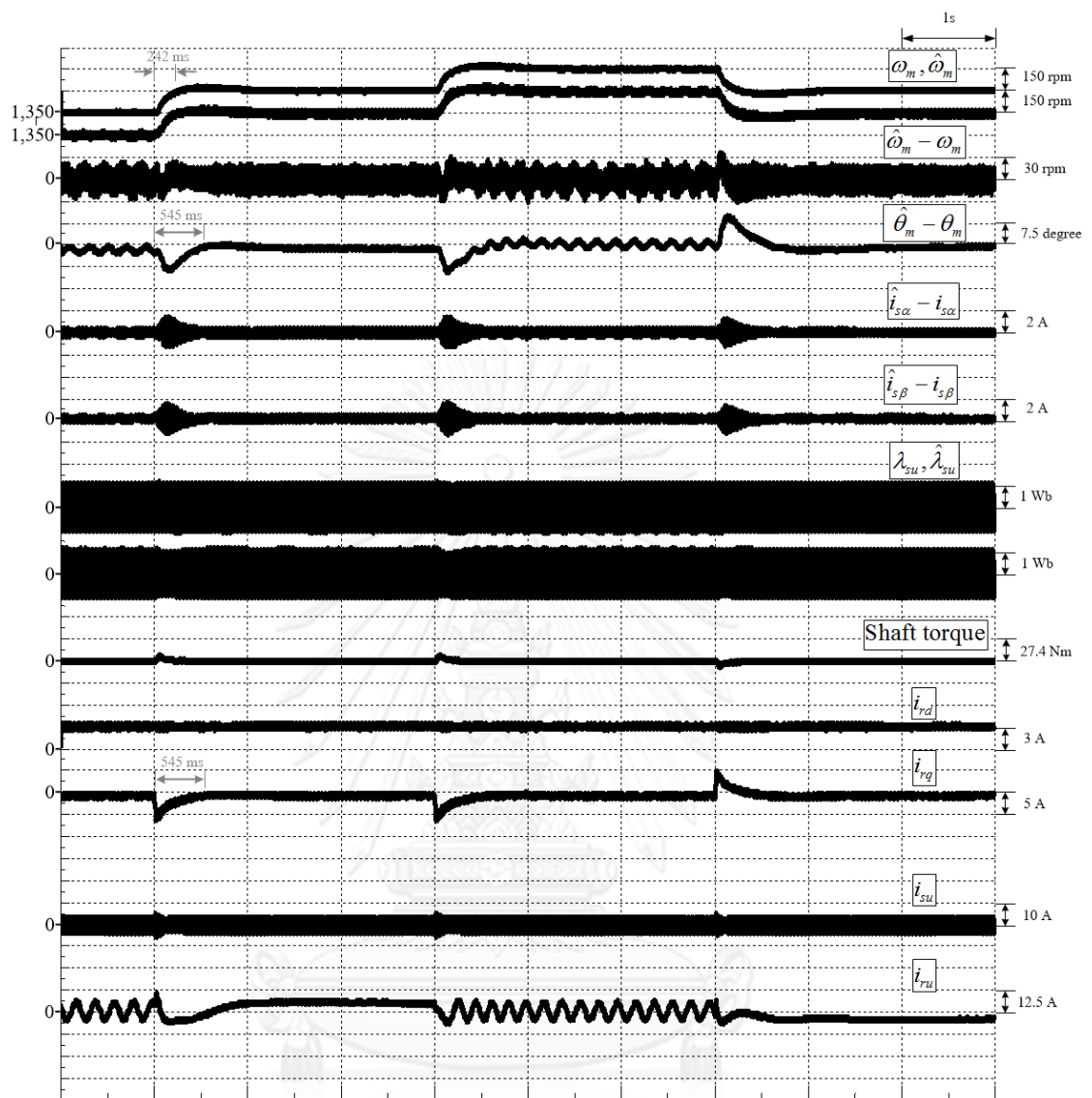
ตารางที่ 5.2 เงื่อนไขการทดสอบระบบขับเคลื่อนแบบเวกเตอร์ไร้เซ็นเซอร์วัดตำแหน่งที่เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงความเร็วแบบขั้น

ลำดับ	โหมดการทำงาน	กระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ (A)	ผลการทดลอง
1	ไร้โหลด ($T_L = 0Nm$)	3	รูปที่ 5.12
		6	รูปที่ 5.13
2	เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ($T_L = -27.4Nm$)	3	รูปที่ 5.14
		6	รูปที่ 5.15
3	มอเตอร์ ($T_L = 27.4Nm$)	3	รูปที่ 5.16
		6	รูปที่ 5.17

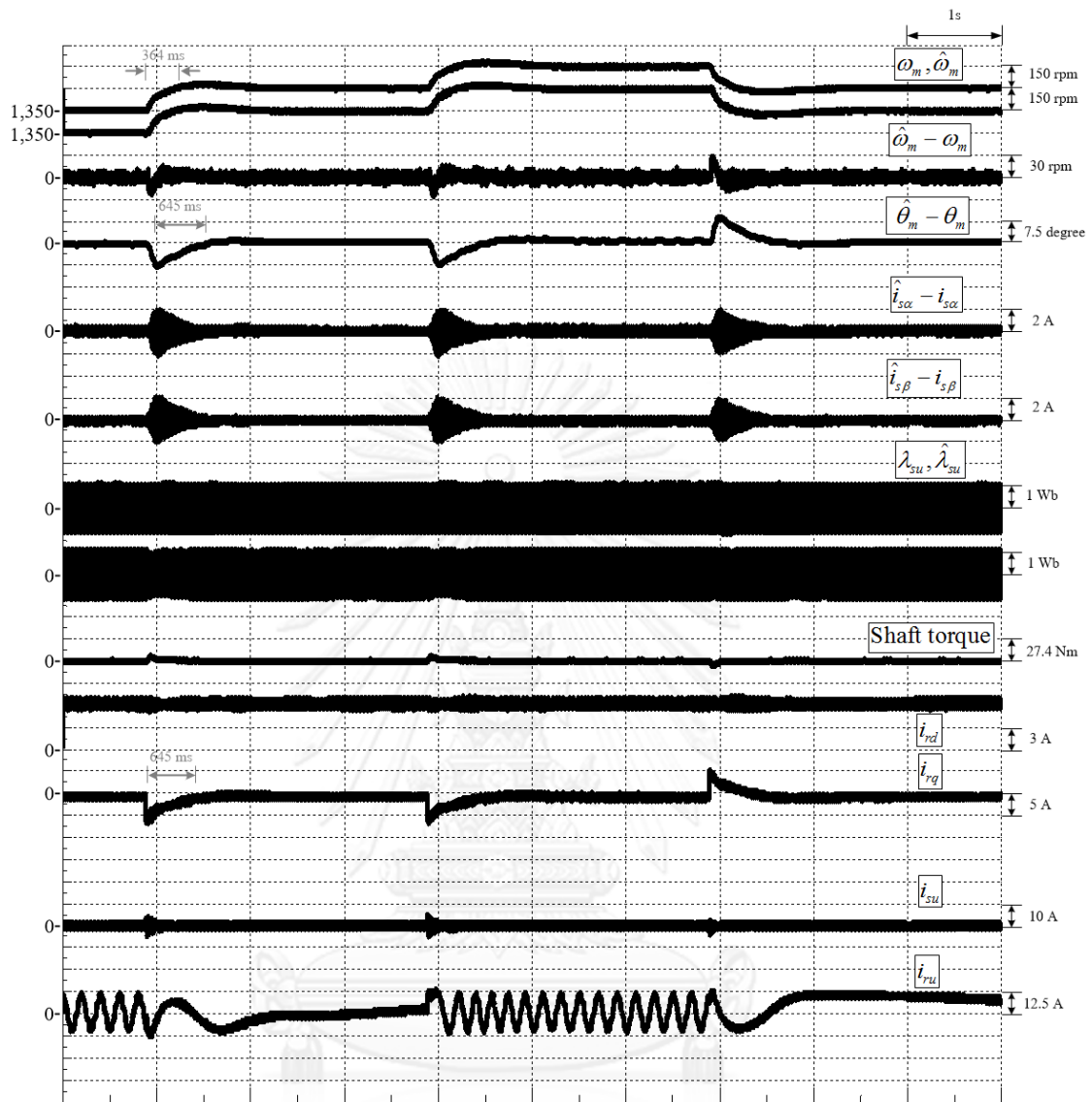
ระบบขับเคลื่อนเริ่มต้นที่ความเร็ว 1350 rpm (ความเร็วซิงโครนัส ซึ่งคิดเป็น -5% ของความเร็วซิงโครนัส) และเพิ่มความเร็วแบบขั้นไปที่ความเร็ว 1500 rpm (ความเร็วซิงโครนัส) และ 1650 rpm (ความเร็วซูปเปอร์ซิงโครนัส ซึ่งเป็น +5% ของความเร็วซิงโครนัส) จากนั้นลดความเร็วเป็น 1500 rpm ตามลำดับ ตารางที่ 5.2 แสดงเงื่อนไขการทดลองระบบขับเคลื่อน ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 โหมดการทำงาน คือ สภาวะไร้โหลด โหลดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และโหลดมอเตอร์ ผลการทดลองดังรูปที่ 5.12-รูปที่ 5.17 สามารถแสดงให้เห็นว่ากระแสโรเตอร์ในแกน d และ แกน q สามารถควบคุมได้อย่างอิสระต่อกัน ระบบขับเคลื่อนสามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความเร็วแบบขั้นได้ ตารางที่ 5.3 แสดงผลตอบสนองของระบบและค่าผิดพลาดต่างๆ ของระบบประมาณของการทดสอบทั้ง 3 โหมดการทำงาน โดยพบว่าผลตอบสนองต่อความเร็ว ผลตอบสนองต่อการประมาณตำแหน่ง และผลตอบสนองของกระแสโรเตอร์ในแกน q (กระแสสร้างแรงบิด) ในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่าน้อยที่สุด (ตอบสนองได้เร็วที่สุด) ที่สภาวะไร้โหลดมีค่าปานกลาง และที่โหมดมอเตอร์มีค่ามากที่สุด (ตอบสนองได้ช้าที่สุด) ขณะที่สัญญาณผิดพลาดค่าต่างๆ ของระบบประมาณ เช่น ค่าผิดพลาดความเร็ว ค่าผิดพลาดกระแสในแกน α และแกน β มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ และมีค่ายอดของระลอกดังตารางที่ 5.3 ส่วนค่าผิดพลาดตำแหน่งโรเตอร์จะมีค่าอยู่ในช่วง 0.5-2 องศา

ตารางที่ 5.3 ผลการทดลองระบบขับเคลื่อนแบบเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งที่เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงความเร็วแบบขั้น

โหมดการทำงาน	ผลการทดลอง	ผลตอบสนองความเร็ว (ms)	ผลตอบสนองตำแหน่งประมาณ (ms)	ผลตอบสนองกระแสโรเตอร์ในแกน q (ms)	ค่ายอดของระลอกค่าผิดพลาดความเร็ว (rpm)	ค่าผิดพลาดตำแหน่งที่สถานะอยู่ตัว (Degree)	ค่ายอดของระลอกค่าผิดพลาดกระแสสเตเตอร์ (A)
ไร้โหลด	รูปที่ 5.12	242	545	545	25	0.5	0.5
	รูปที่ 5.13	364	645	645	15	0.5	0.5
เครื่องกำเนิดไฟฟ้า	รูปที่ 5.14	197	450	350	25	0.5	0.8
	รูปที่ 5.15	313	545	545	20	0.5	1
มอเตอร์	รูปที่ 5.16	328	625	625	25	2	1
	รูปที่ 5.17	359	703	703	20	2	0.8



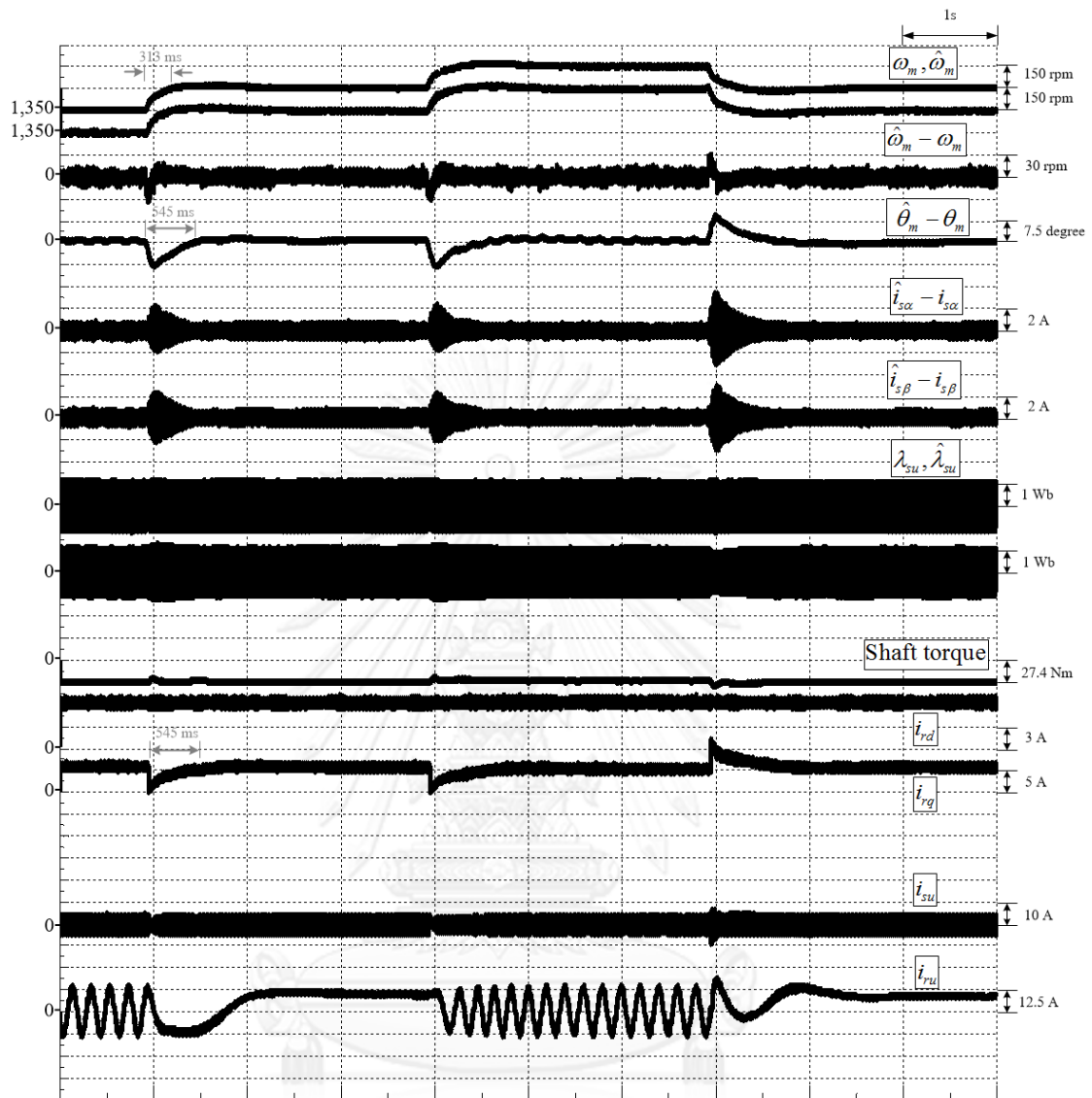
รูปที่ 5.12 ผลการทดลองของระบบที่การเปลี่ยนแปลงความเร็วแบบขั้น สภาวะไร้โหลด และ
กระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ 3 A



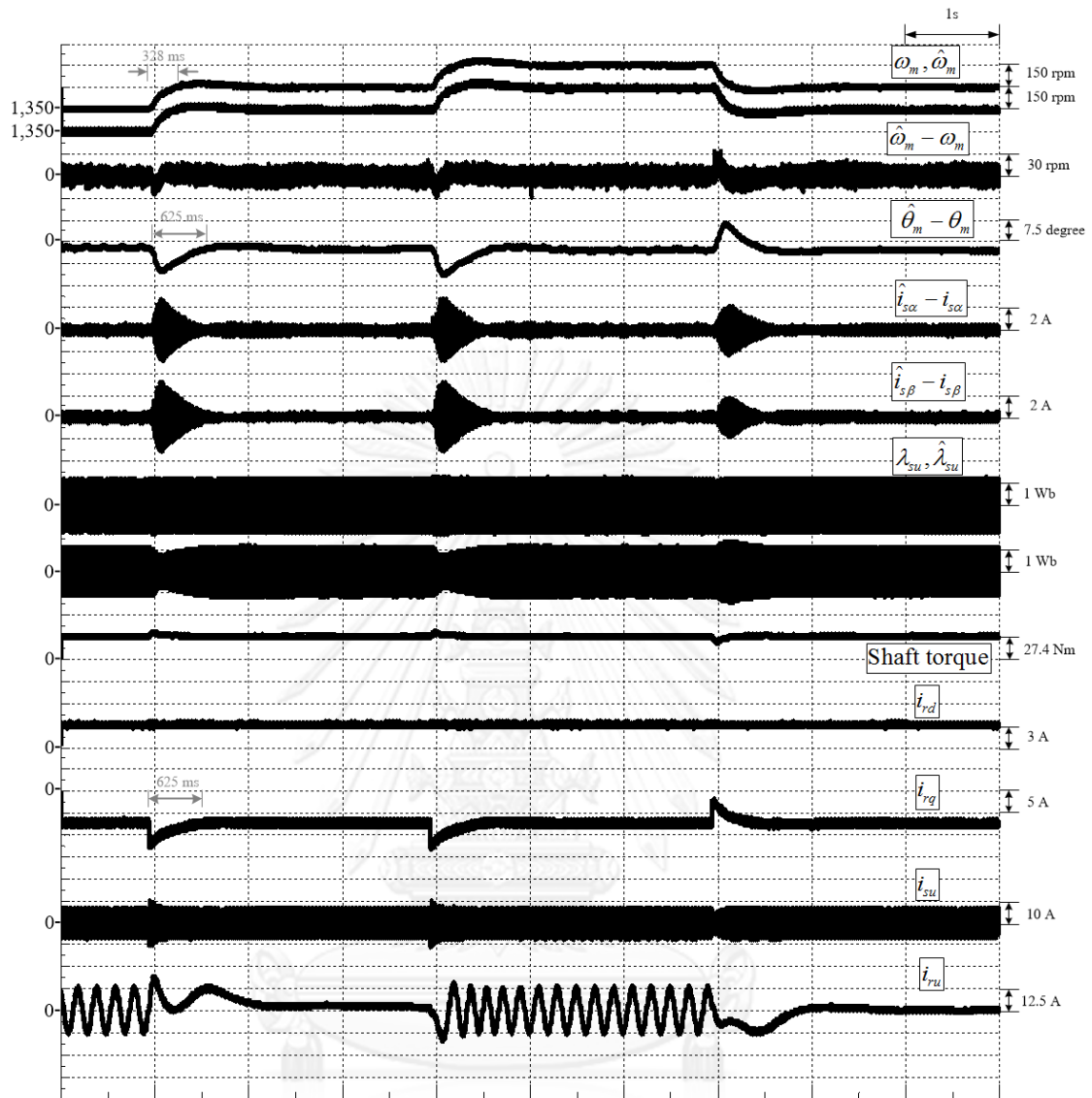
รูปที่ 5.13 ผลการทดลองของระบบที่การเปลี่ยนแปลงความเร็วแบบขั้น สภาวะไร้อโหลด และกระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ 6 A



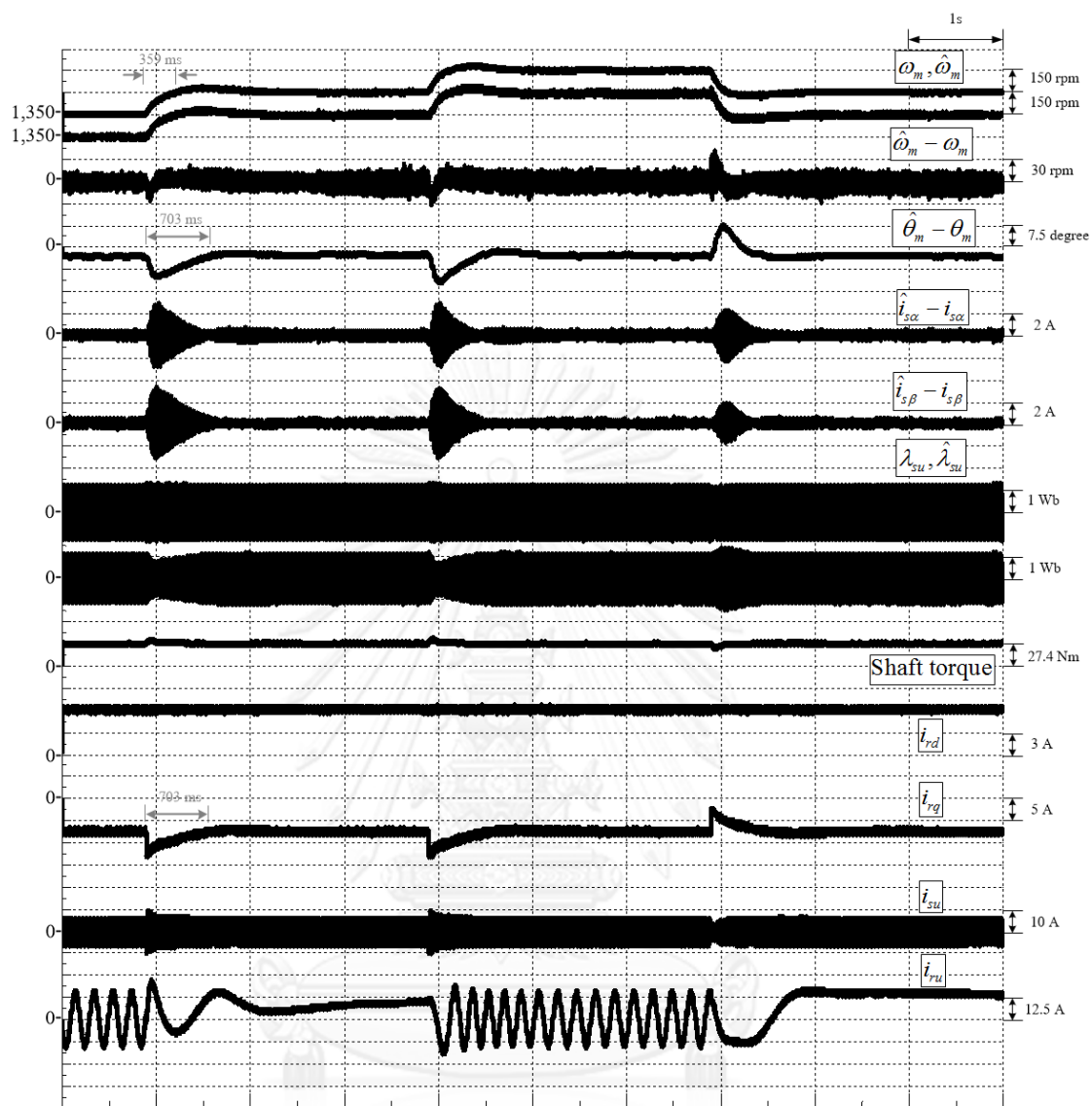
รูปที่ 5.14 ผลการทดลองของระบบที่การเปลี่ยนแปลงความเร็วแบบขั้น ย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และกระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ 3 A



รูปที่ 5.15 ผลการทดลองของระบบที่การเปลี่ยนแปลงความเร็วแบบขั้น ย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และกระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ 6 A



รูปที่ 5.16 ผลการทดลองของระบบที่การเปลี่ยนแปลงความเร็วแบบขั้น ยานมอเตอร์ และกระแส กระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ 3 A



รูปที่ 5.17 ผลการทดลองของระบบที่การเปลี่ยนแปลงความเร็วแบบขั้น ยานมอเตอร์ และกระแส กระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ 6 A

5.2.2. ผลการทดสอบที่มีการป้อน/ปลดโหลดออกแบบขั้น

ตารางที่ 5.4 เงื่อนไขการทดสอบระบบขับเคลื่อนแบบเวกเตอร์ไร้เซ็นเซอร์วัดตำแหน่งที่มีการใส่โหลดและปลดโหลดออกแบบขั้น

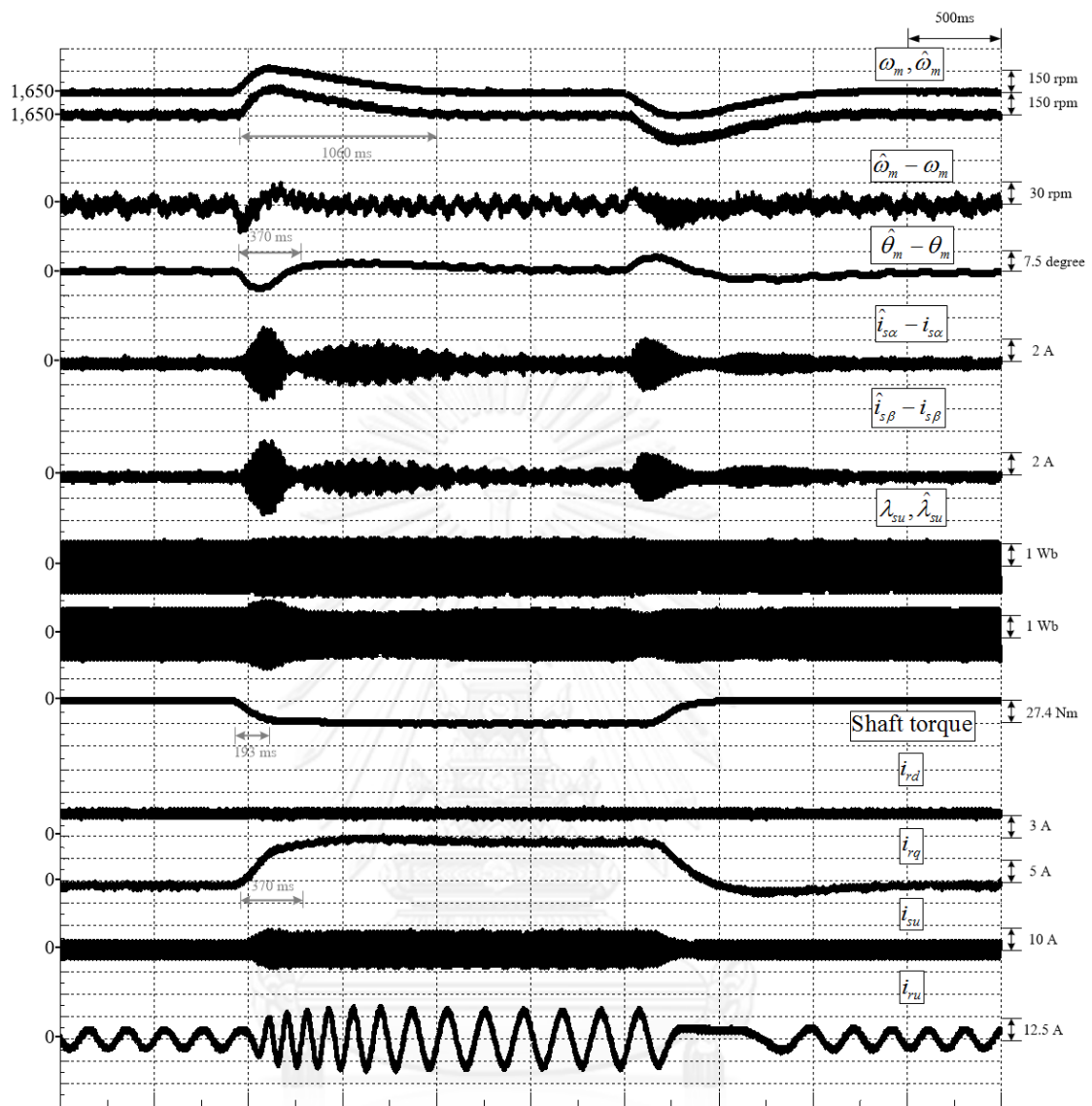
ลำดับ	โหมดการทำงาน	ความเร็ว (rpm)	กระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ (A)	ผลการทดลอง
1	เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ($T_L = -27.4Nm$)	1650 (Super-Synchronous Speed)	3	รูปที่ 5.18
			6	รูปที่ 5.19
		1350 (Sub-Synchronous Speed)	3	รูปที่ 5.20
			6	รูปที่ 5.21
		1500 (Synchronous Speed)	3	รูปที่ 5.22
			6	รูปที่ 5.23
2	มอเตอร์ ($T_L = 27.4Nm$)	1650 (Super-Synchronous Speed)	3	รูปที่ 5.24
			6	รูปที่ 5.25
		1350 (Sub-Synchronous Speed)	3	รูปที่ 5.26
			6	รูปที่ 5.27
		1500 (Synchronous Speed)	3	รูปที่ 5.28
			6	รูปที่ 5.29

การทดสอบระบบขับเคลื่อนโดยการป้อน/ปลดโหลดจะทดสอบที่เงื่อนไขดังตารางที่ 5.4 โดยในช่วงเริ่มต้นระบบขับเคลื่อนจะเข้าสู่สถานะอยู่ตัวที่ความเร็ว ω_m และกระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ i_{rd} คงที่ จากนั้นเราจะป้อนโหลดพิกัดให้แก่ระบบขับเคลื่อนนาน 2 วินาที ผลการทดลองป้อน/ปลดโหลดยานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและยานมอเตอร์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.18-รูปที่ 5.23 และรูปที่ 5.24 -รูปที่ 5.29 ตามลำดับ เราจะเห็นได้ว่าระบบประมาณสามารถประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์ได้อย่างถูกต้อง ระบบขับเคลื่อนสามารถตอบสนองต่อโหลดและความเร็วได้ โดยควบคุมกระแสโรเตอร์ในแกน d และแกน q ได้อย่างอิสระต่อกัน ตารางที่ 5.5 แสดงถึงผลตอบสนองต่างๆ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าทั้งในกรณีโหลดยานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและยานมอเตอร์ ระบบตอบสนองต่อการควบคุมความเร็วด้วยเวลาเท่ากันคือ 1060 ms ในขณะที่การตอบสนองต่อแรงบิดโหลดพบว่า ระบบสามารถตอบสนองต่อโหลดยานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยเวลา 193 ms ซึ่งเร็วกว่าการตอบสนองโหลดยานมอเตอร์ที่ใช้เวลา 250 ms ขณะที่การประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์มีค่าช่วงเวลาเข้าที่ (Settling time) ใกล้เคียงกัน และสอดคล้องกับผลตอบสนองของกระแสโรเตอร์ในแกน q ของวงรอบควบคุมความเร็วด้วย ในส่วนค่าผิดพลาดของระบบประมาณ พบว่า ณ สภาวะชั่วครู่ค่าผิดพลาดของความเร็ว ตำแหน่ง กระแสสเตเตอร์ในแกน α

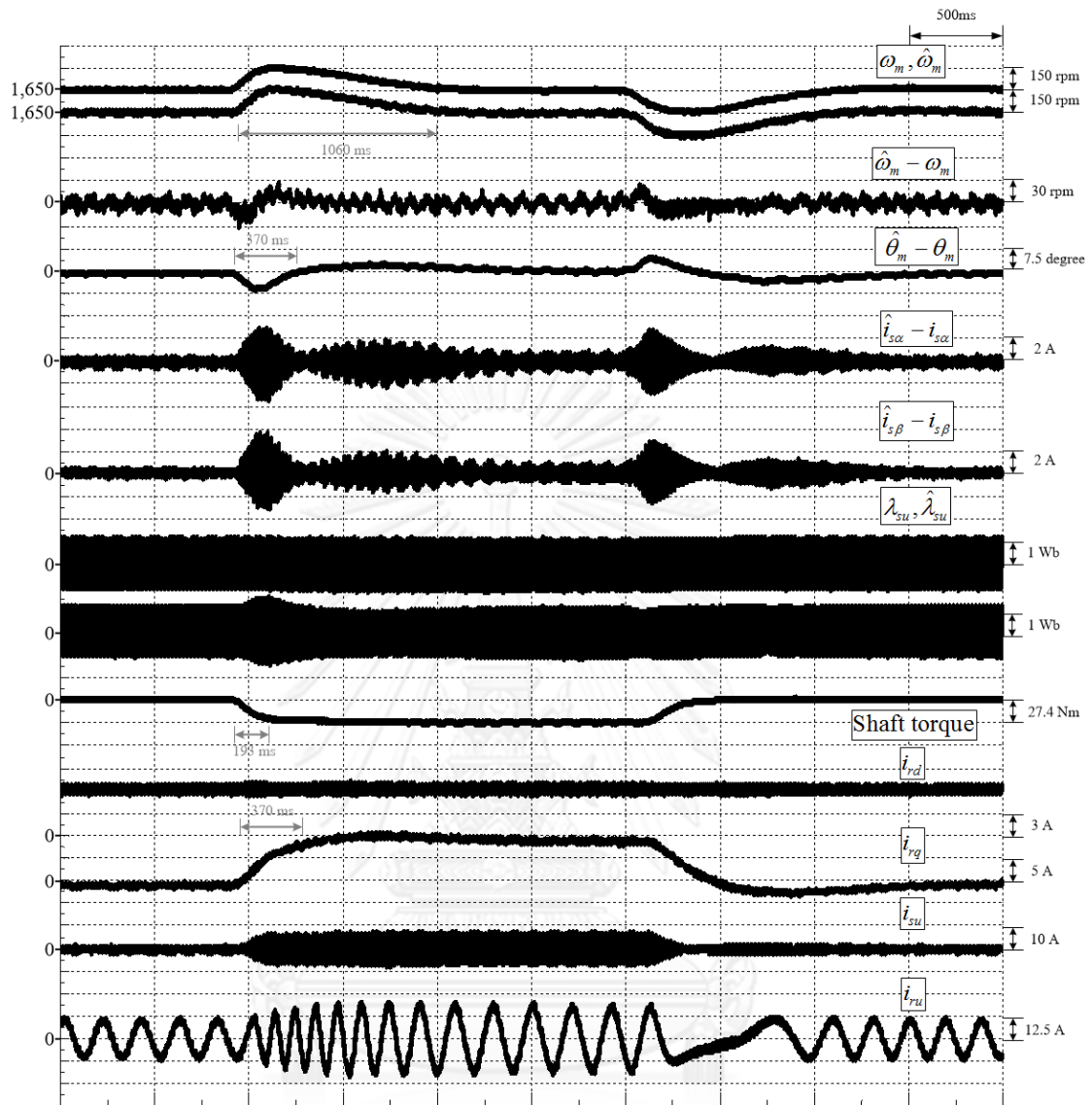
และแกน β จะลู่เข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งยืนยันได้ถึงเสถียรภาพของระบบประมาณ โดยมีเวลาเข้าที่ (Settling Time) ใกล้เคียงกัน เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว ค่าผิดพลาดความเร็วประมาณค่ายอดของระลอกอยู่ในช่วง 10-15 rpm ตำแหน่งประมาณมีค่าผิดพลาดอยู่ในช่วง 0.5-2 องศา และค่าผิดพลาดกระแสในแกน α และแกน β มีค่ายอดของระลอกในช่วง 0.4 -1 A ความผิดพลาดดังกล่าวอาจมีสาเหตุมาจากความไม่เป็นอุดมคติของพารามิเตอร์ของเครื่องจักรกล ความผิดพลาดจากการตรวจวัดสัญญาณ รวมถึงความไม่เป็นอุดมคติของสวิทช์กำลัง จากผลการทดลอง เราสามารถสรุปได้ว่าระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซ็นเซอร์วัดตำแหน่งสามารถตอบสนองต่อโหลดได้ทั้งย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและย่านมอเตอร์ที่ทุกเงื่อนไขความเร็ว และทุกเงื่อนไขกระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์

ตารางที่ 5.5 ผลตอบสนองของแรงบิด ความเร็ว กระแสโรเตอร์ในแกน q และตำแหน่งประมาณที่เงื่อนไขต่างๆ

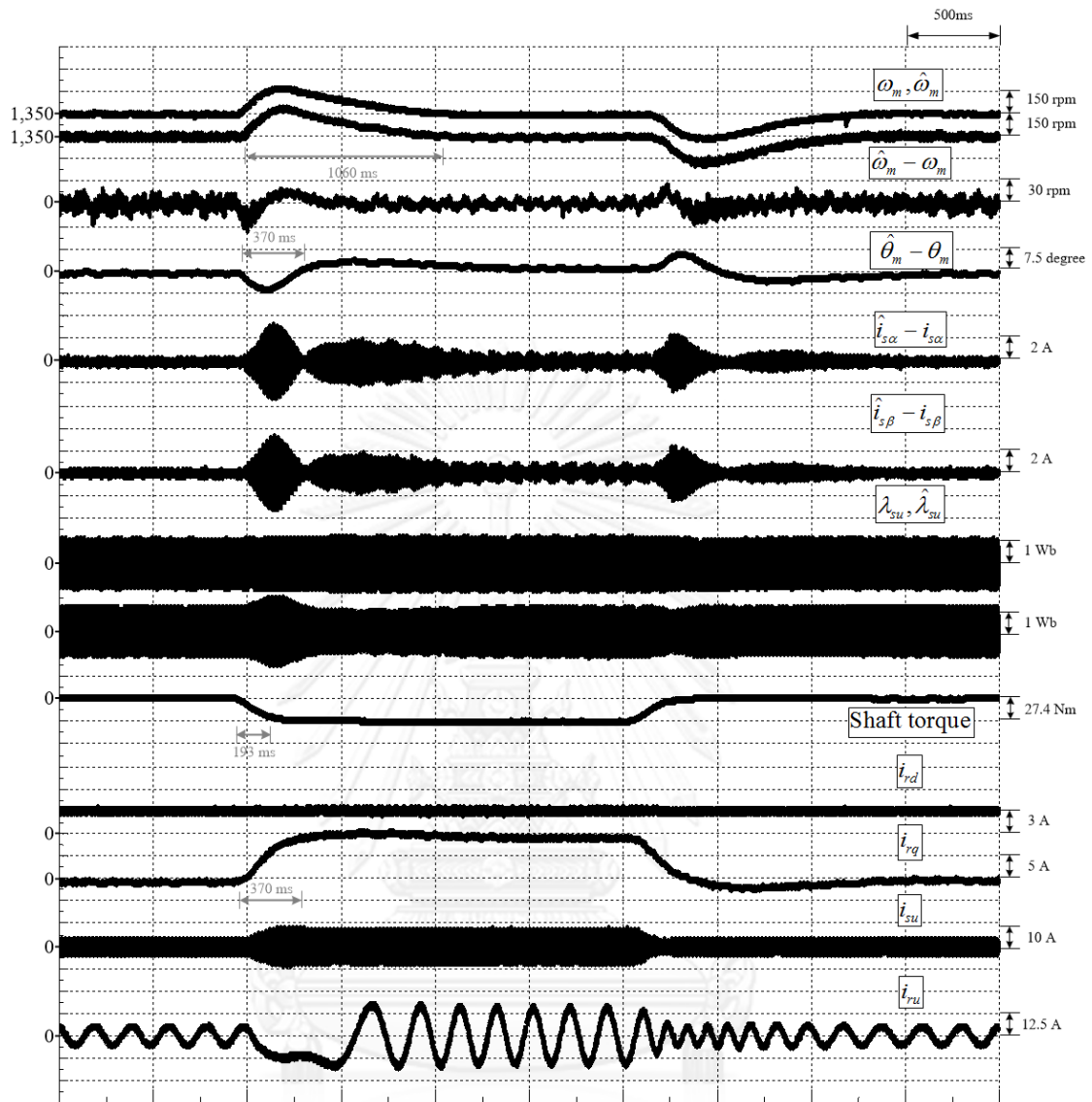
โหมดการทำงาน	ผลการทดลอง	เวลาในการตอบสนอง			
		แรงบิด (ms)	ความเร็ว (ms)	กระแสโรเตอร์ในแกน q (ms)	ความเร็วและตำแหน่งประมาณ (ms)
เครื่องกำเนิดไฟฟ้า	รูปที่ 5.18	193	1060	370	370
	รูปที่ 5.19	193	1060	370	370
	รูปที่ 5.20	193	1060	370	370
	รูปที่ 5.21	193	1060	370	370
	รูปที่ 5.22	193	1060	370	370
	รูปที่ 5.23	193	1060	350	370
มอเตอร์	รูปที่ 5.24	250	1060	510	420
	รูปที่ 5.25	250	1060	510	420
	รูปที่ 5.26	250	1060	500	420
	รูปที่ 5.27	250	1060	510	420
	รูปที่ 5.28	250	1060	500	420
	รูปที่ 5.29	250	1060	500	420



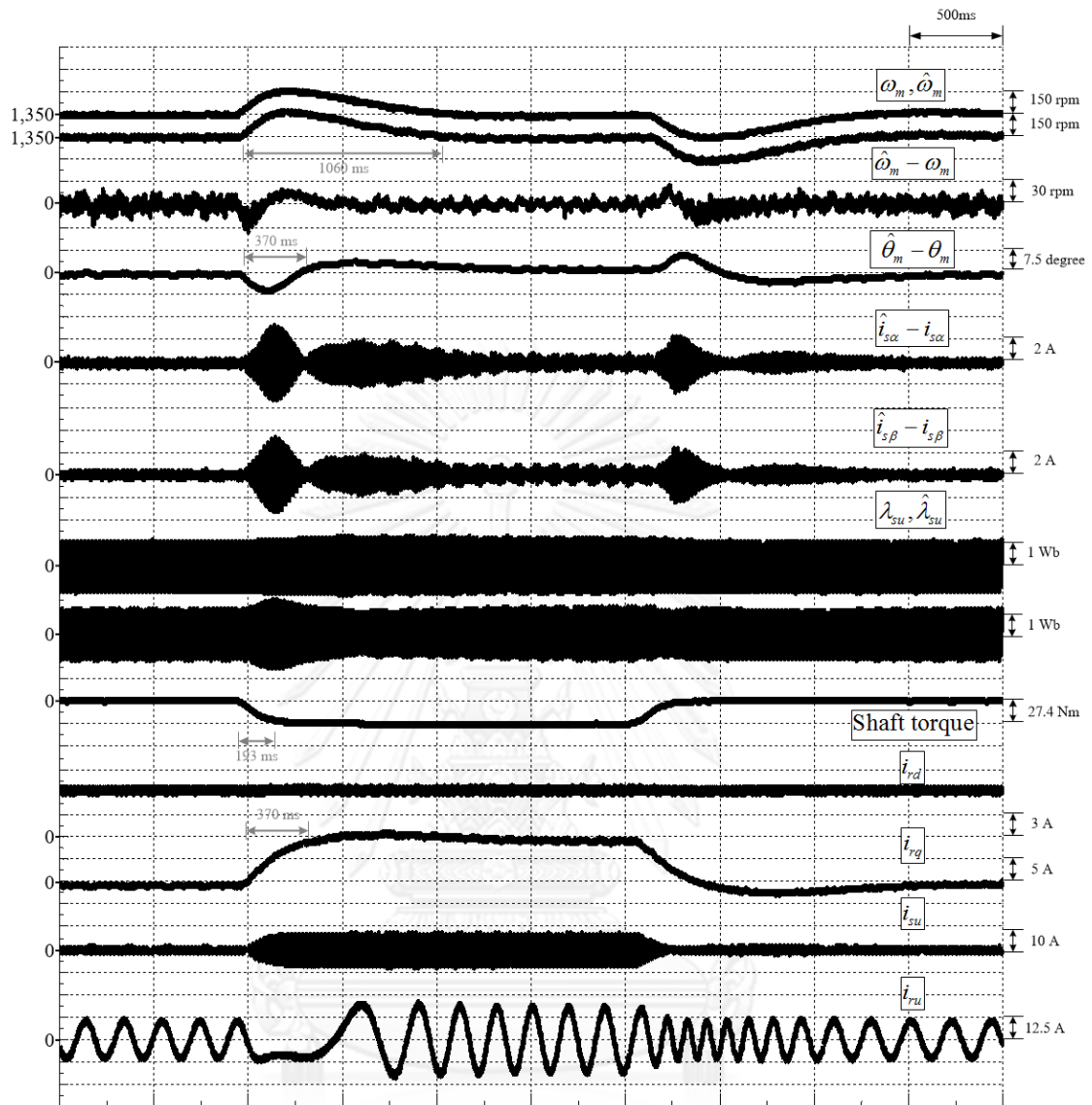
รูปที่ 5.18 ผลการทดลองของระบบที่การแปลงโพลแบบชั้นในย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ที่ความเร็ว 1650 rpm และกระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ (i_{rd}) 3 A



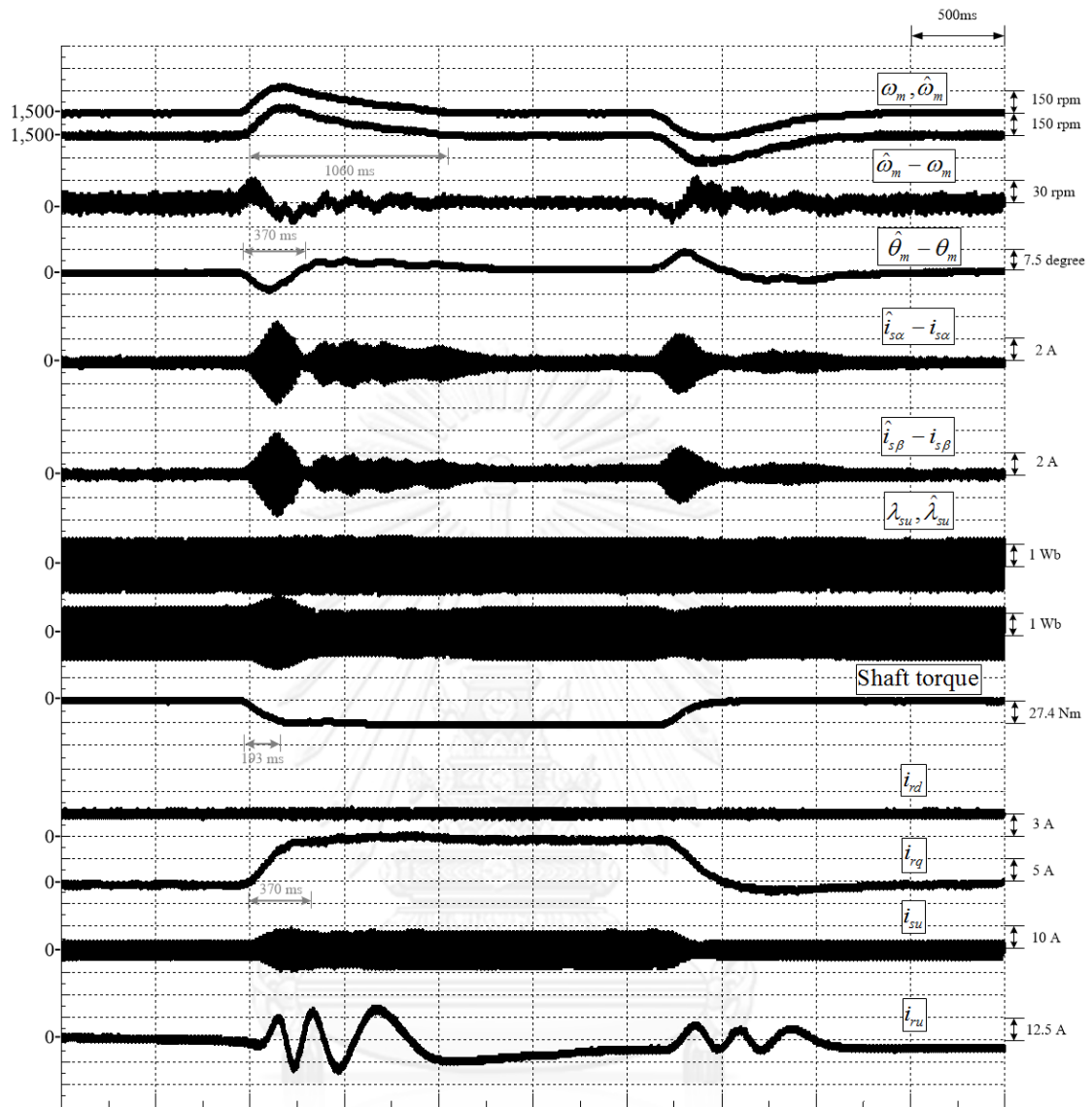
รูปที่ 5.19 ผลการทดลองของระบบที่การเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้นในย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ที่ความเร็ว 1650 rpm และกระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ (i_{rd}) 6 A



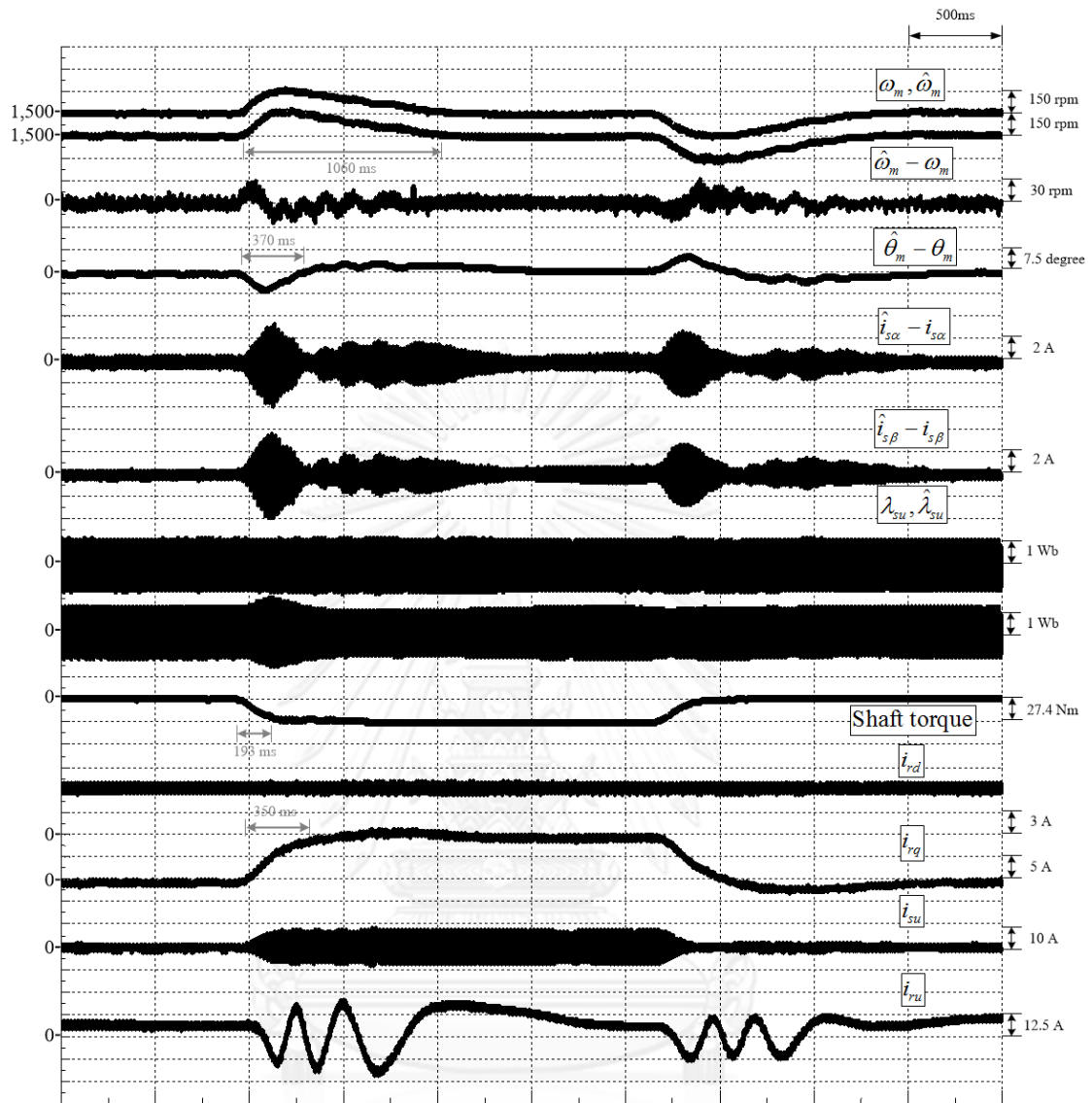
รูปที่ 5.20 ผลการทดลองของระบบที่การเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้นในย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ที่ความเร็ว 1350 rpm และกระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ (i_{rd}) 3 A



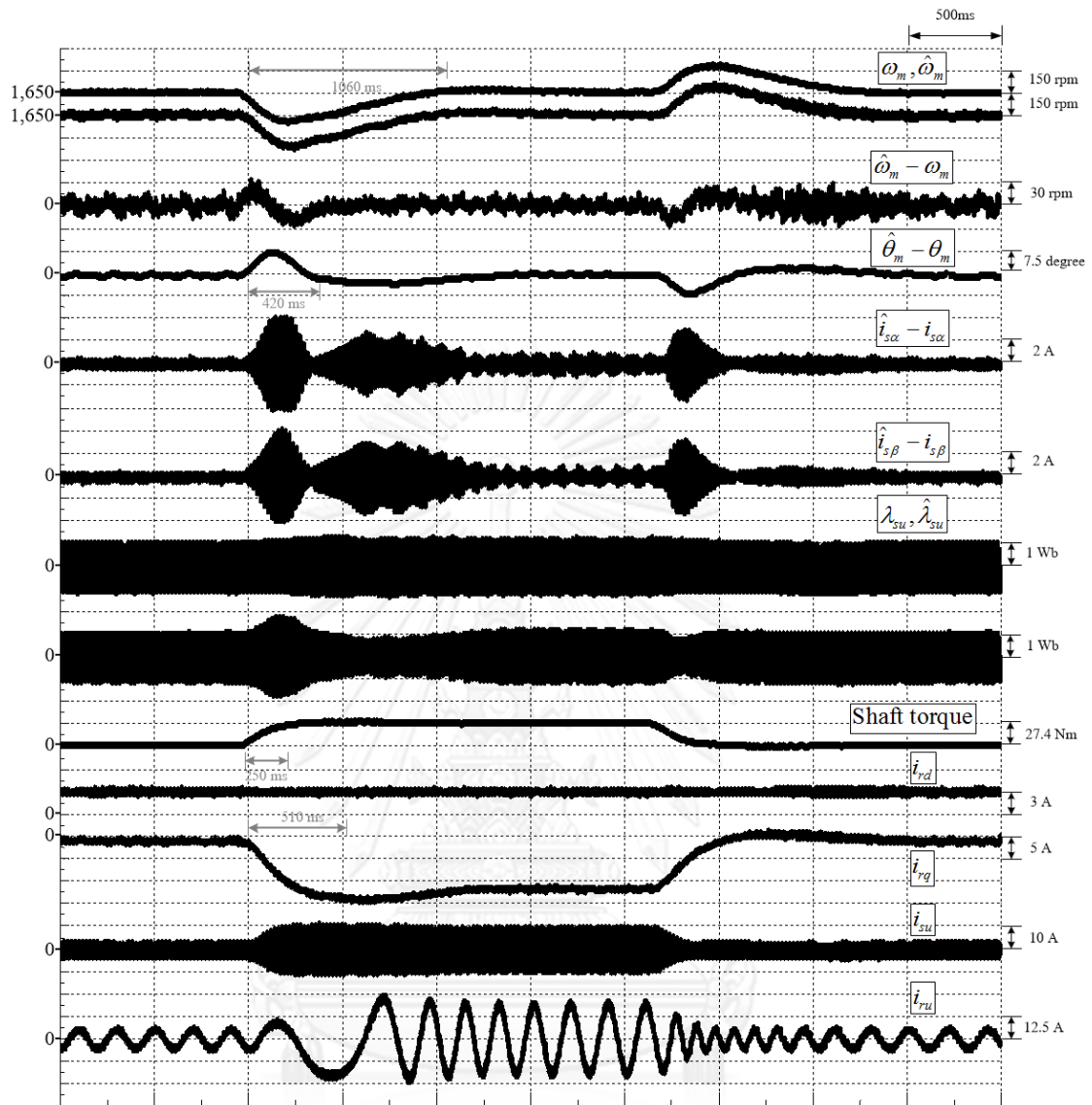
รูปที่ 5.21 ผลการทดลองของระบบที่การเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้นในย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ที่ความเร็ว 1350 rpm และกระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ (i_{rd}) 6 A



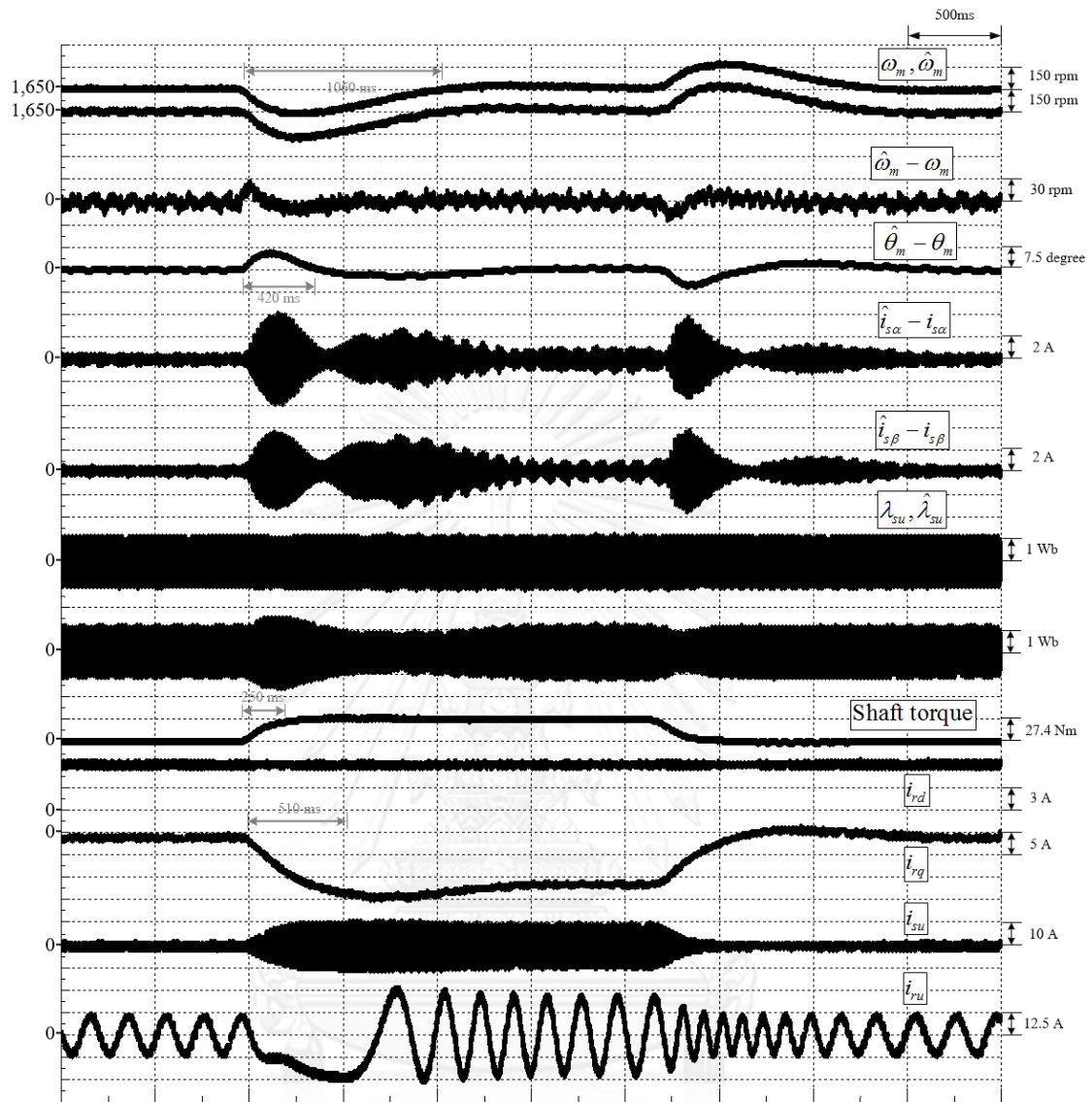
รูปที่ 5.22 ผลการทดลองของระบบที่การเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้นในย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ที่ความเร็ว 1500 rpm และกระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ (i_{rd}) 3 A



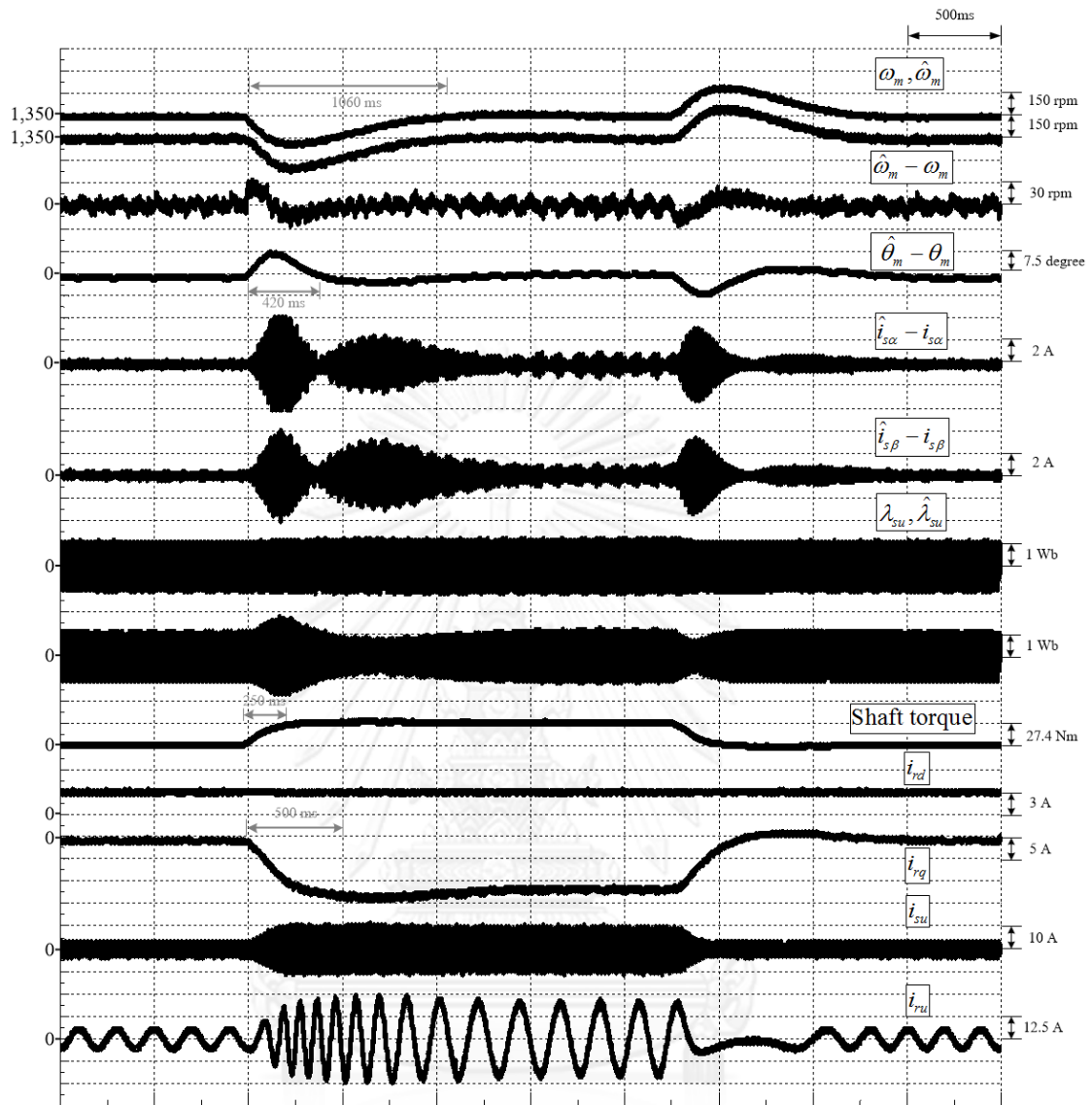
รูปที่ 5.23 ผลการทดลองของระบบที่การแปลงโพลแบบชั้นในย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ที่ความเร็ว 1500 rpm และกระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ (i_{rd}) 6 A



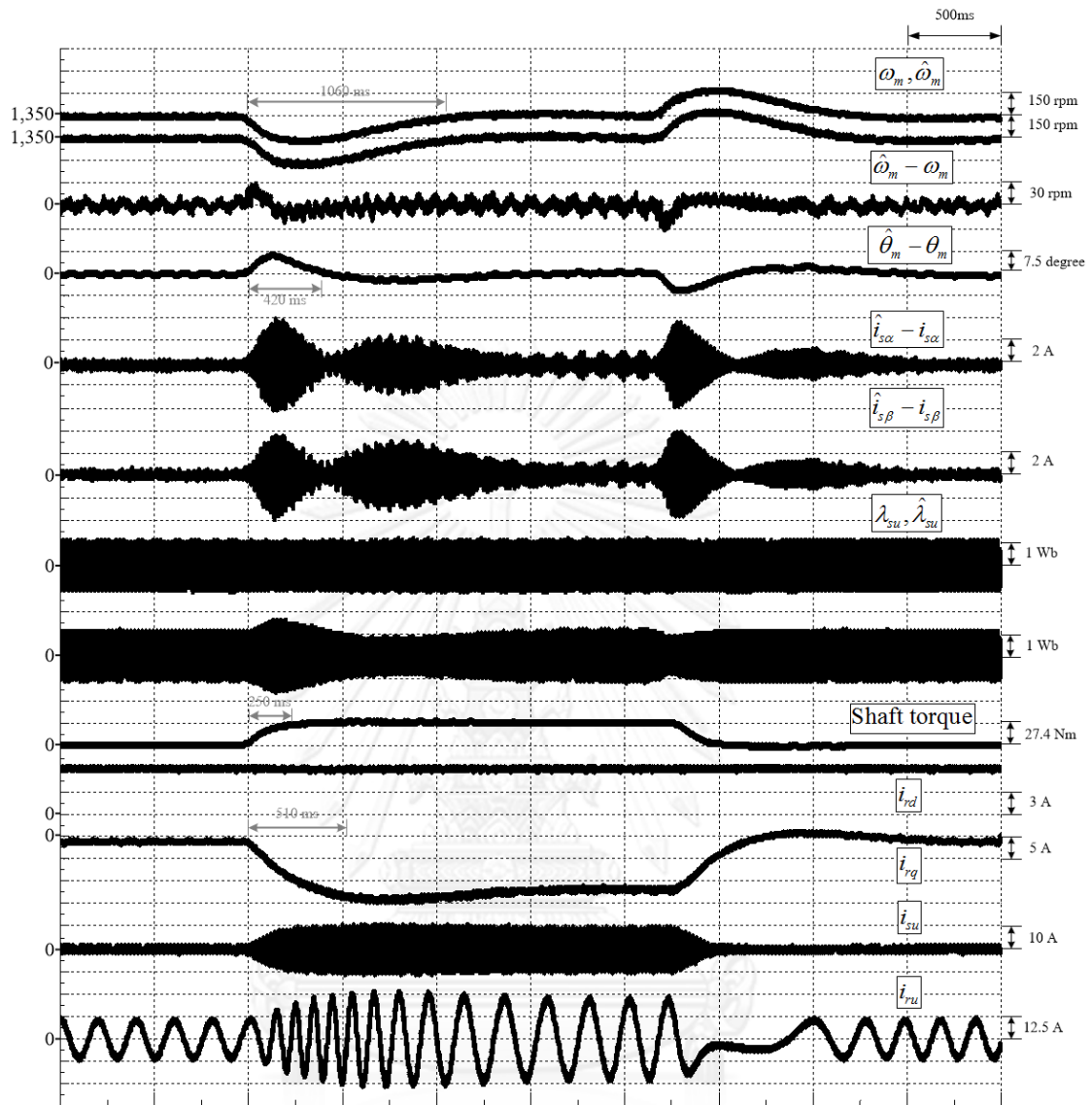
รูปที่ 5.24 ผลการทดลองของระบบที่การเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้นในยานมอเตอร์ ที่ความเร็ว 1650 rpm และกระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ (i_{rd}) 3 A



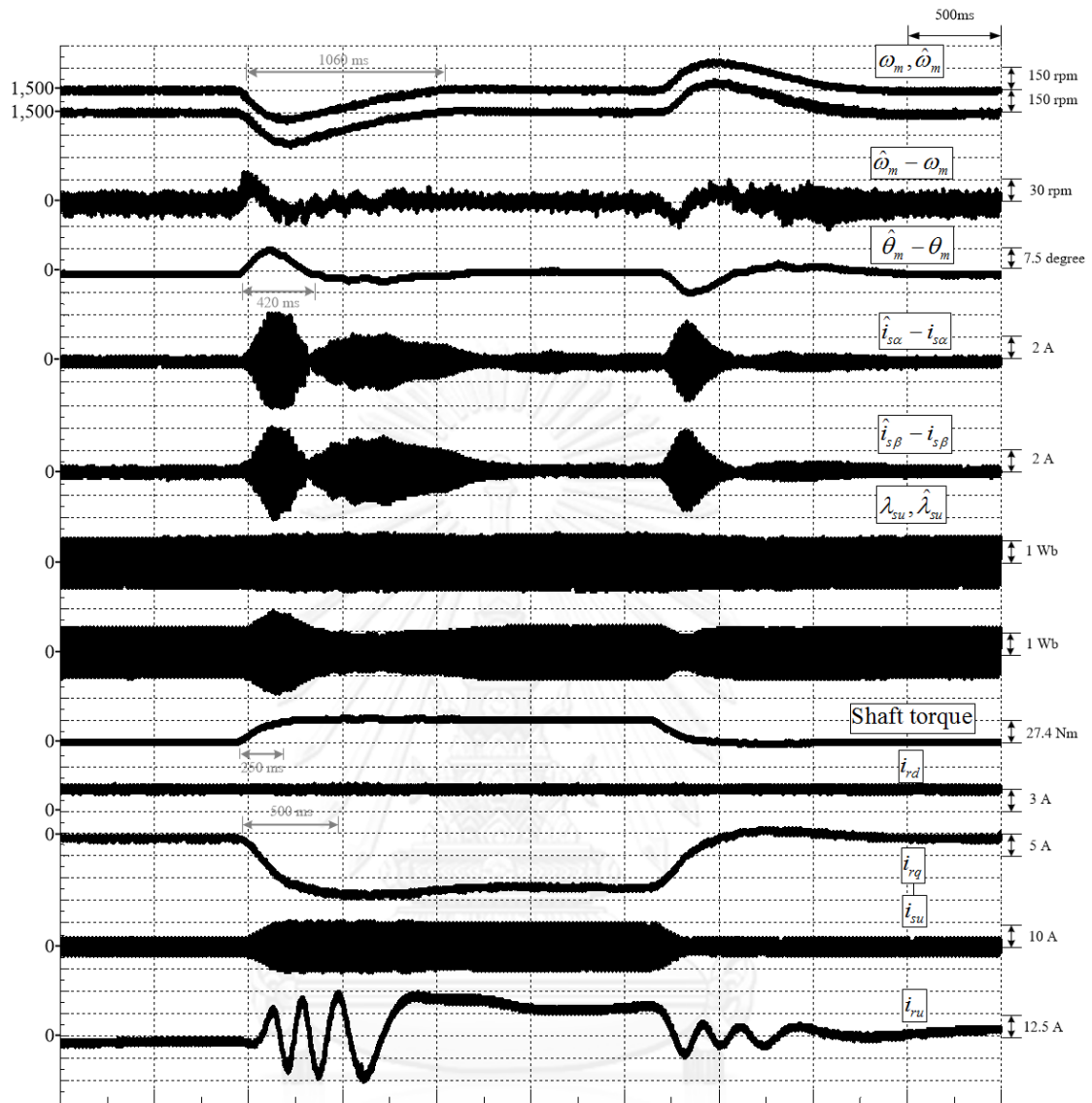
รูปที่ 5.25 ผลการทดลองของระบบที่การเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้นในยานมอเตอร์ ที่ความเร็ว 1650 rpm และกระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ (i_{rd}) 6 A



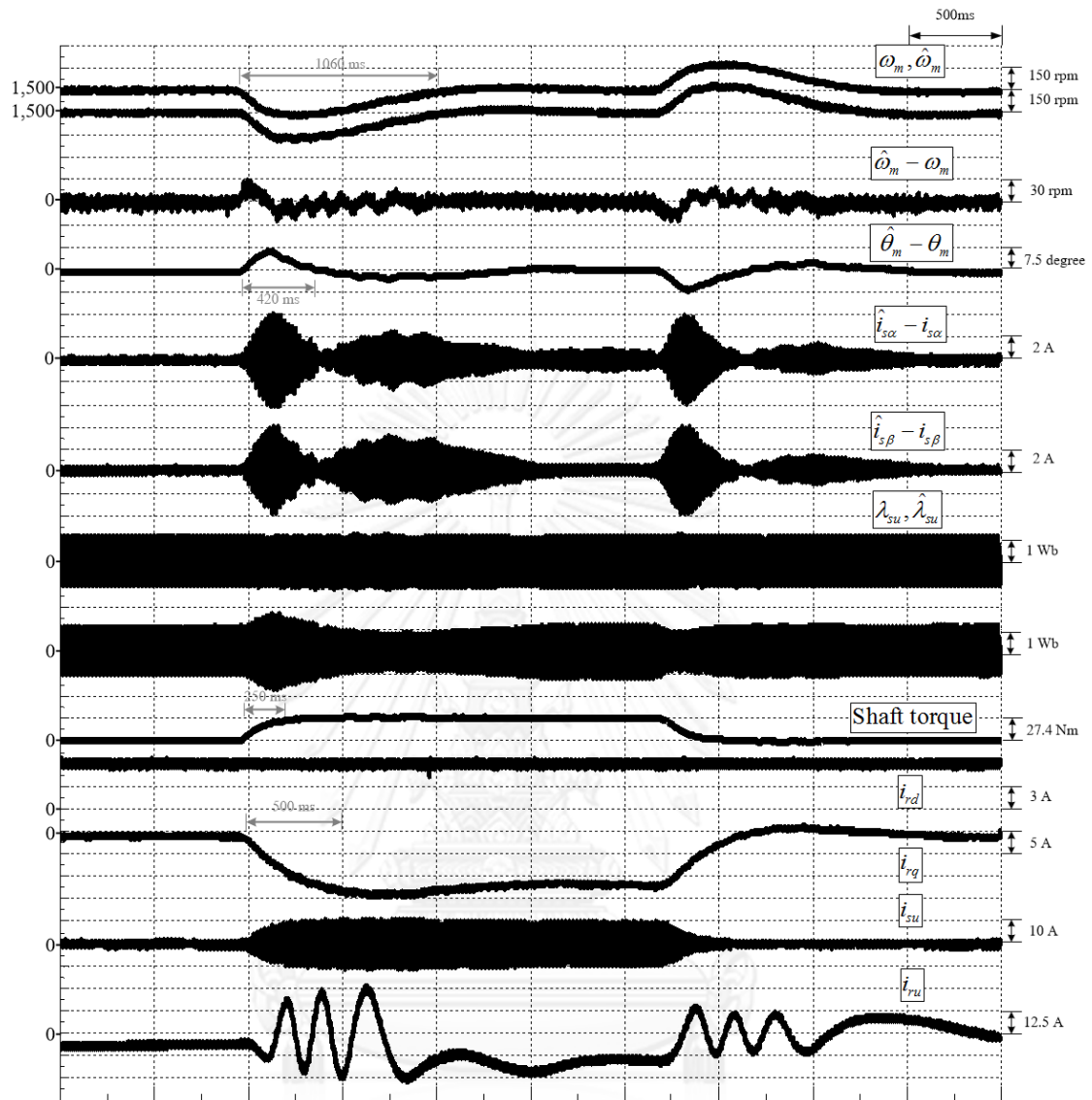
รูปที่ 5.26 ผลการทดลองของระบบที่การเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้นในย่านมอเตอร์ ที่ความเร็ว 1350 rpm และกระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ (i_{rd}) 3 A



รูปที่ 5.27 ผลการทดลองของระบบที่การเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้นในย่านมอเตอร์ ที่ความเร็ว 1350 rpm และกระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ (i_{rd}) 6 A



รูปที่ 5.28 ผลการทดลองของระบบที่การเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้นในยานมอเตอร์ ที่ความเร็ว 1500 rpm และกระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ (i_{rd}) 3 A



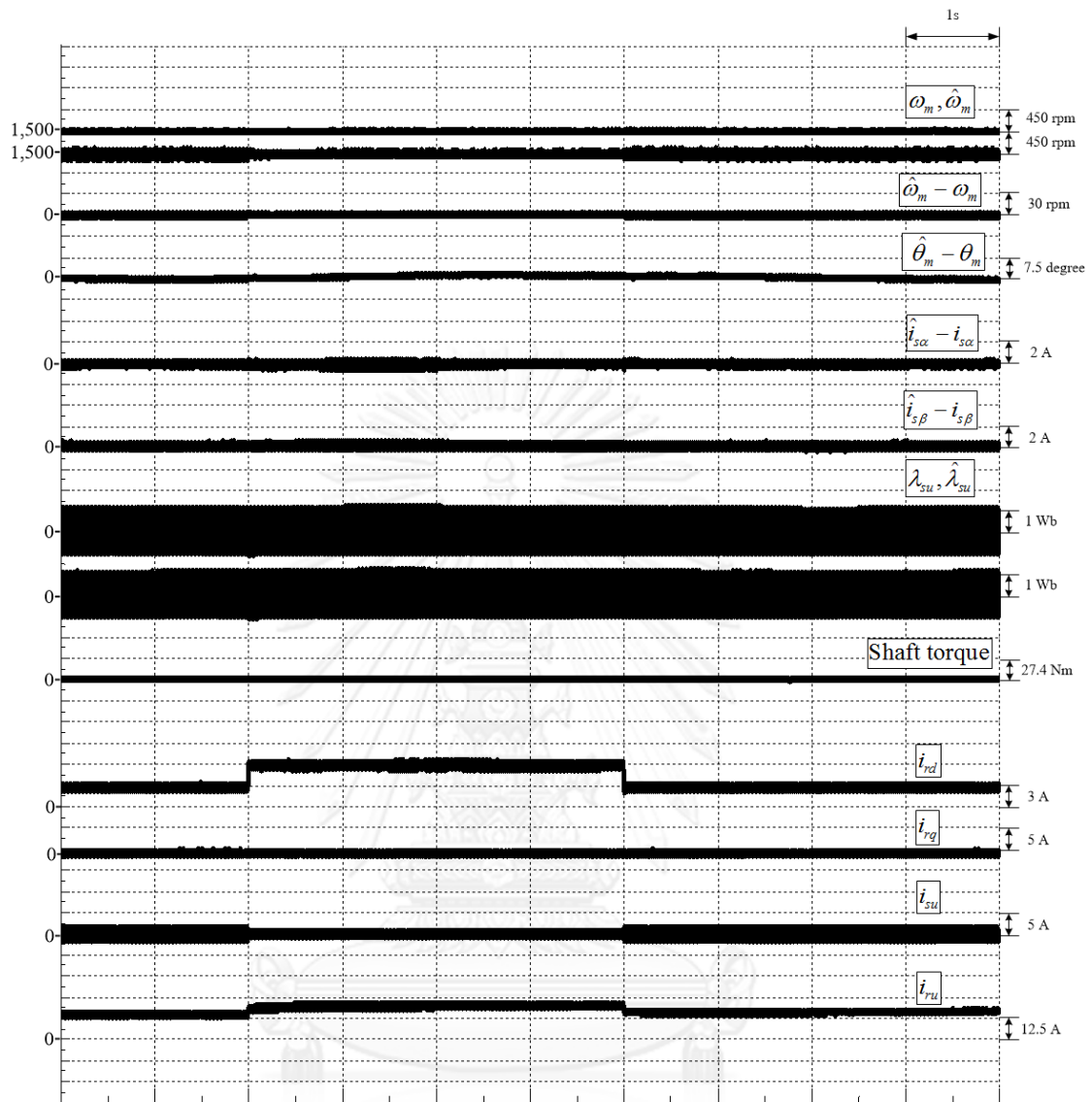
รูปที่ 5.29 ผลการทดลองของระบบที่การเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้นในย่านมอเตอร์ ที่ความเร็ว 1500 rpm และกระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ (i_{rd}) 6 A

5.2.3. ผลการทดสอบที่การเปลี่ยนแปลงกระแสโรเตอร์ในแกน d แบบขั้น

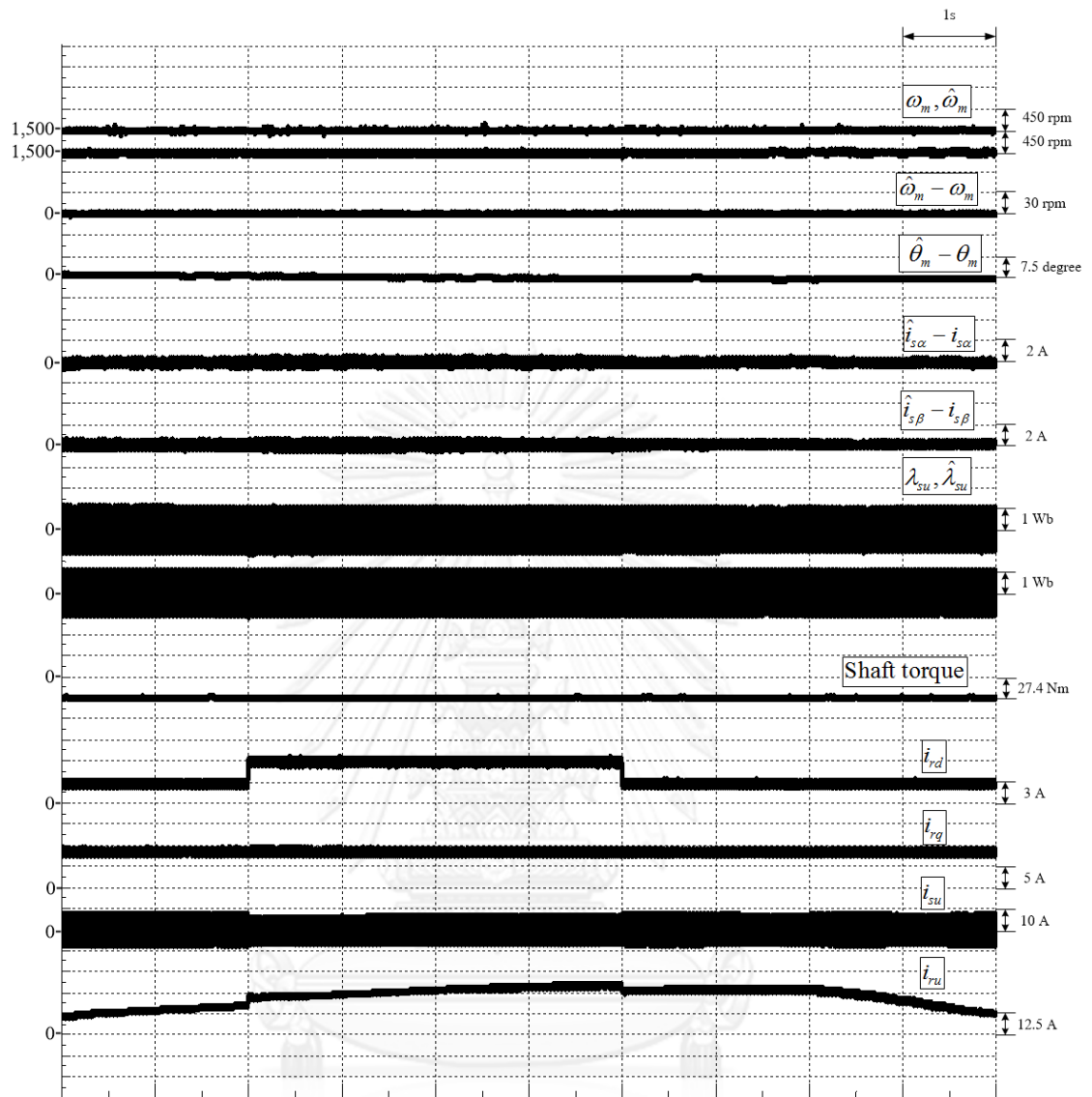
ตารางที่ 5.6 เจื่อนไขการทดสอบระบบขับเคลื่อนแบบเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งที่การเปลี่ยนแปลงแบบขั้นของกระแสโรเตอร์ในแกน d จาก 3->6->3 A

ลำดับ	ความเร็ว (rpm)	โหลด (Nm)	ผลการทดลอง
1	1500 (Synchronous Speed)	0 (ไร้โหลด)	รูปที่ 5.30
		-27.4 (โหลดพิกัดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า)	รูปที่ 5.31
		27.4 (โหลดพิกัดมอเตอร์)	รูปที่ 5.32

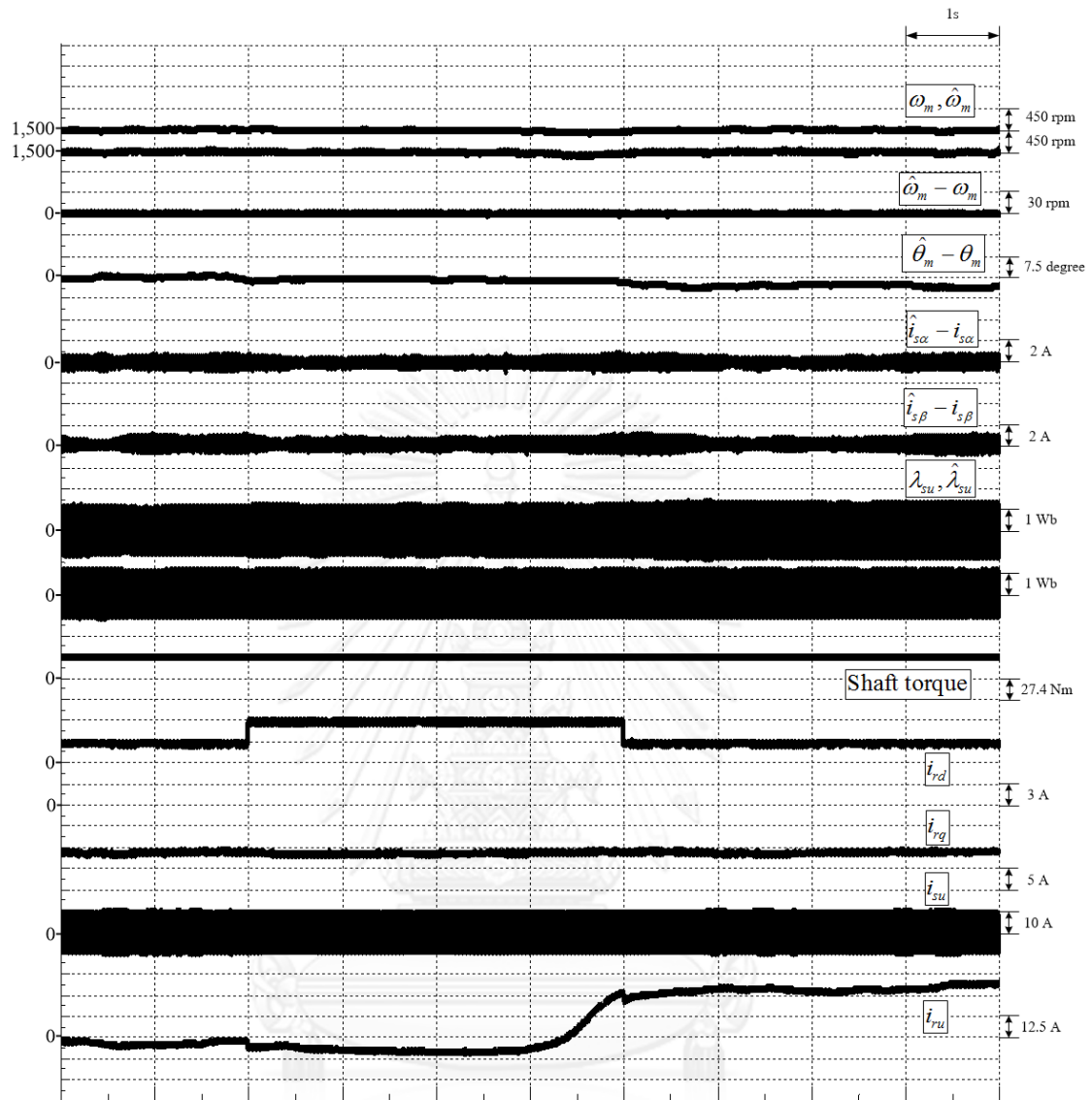
เนื่องจากการควบคุมกำลังรีแอกทีฟทางด้านโรเตอร์สามารถควบคุมผ่านกระแสโรเตอร์ในแกน d ได้ ในการทดสอบระบบนี้จึงกำหนดการเปลี่ยนแปลงกระแสโรเตอร์ในแกน d แบบขั้น ตารางที่ 5.6 แสดงถึงเงื่อนไขทดสอบระบบขับเคลื่อน โดยพบว่า ณ สภาวะไร้โหลด ค่าเวกเตอร์รีเกรสเซอร์จะมีค่าน้อยสุด $\left(\vec{i}_r' = \sqrt{i_{rd}^2 + i_{rq}^2}\right)$ ที่ค่ากระแสโรเตอร์ในแกน d หนึ่งๆ ขณะที่โหลดย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและมอเตอร์จะทำให้ค่าเวกเตอร์รีเกรสเซอร์มีค่าสูงสุด ผลการทดลองในรูปที่ 5.30-รูปที่ 5.32 แสดงให้เห็นว่าช่วงเริ่มต้นระบบอยู่ที่สถานะอยู่ตัวที่ความเร็ว 1500 rpm และกระแสโรเตอร์ในแกน d มีขนาด 3 A จากนั้นเพิ่มกระแสโรเตอร์ในแกน d แบบขั้นเป็น 6 A เป็นเวลานาน 4 วินาที หลังจากนั้นลดกระแสในแกน d ลงมาเป็น 3 A โดยการทดสอบการทำงานของระบบทั้ง 3 ย่านการทำงาน (ไร้โหลด โหลดพิกัดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และโหลดพิกัดมอเตอร์) จะเห็นได้ว่าระบบสามารถควบคุมควบคุมกำลังรีแอกทีฟทางด้านโรเตอร์ (i_{rd}) และแรงบิดโหลด (i_{rq}) ได้อย่างอิสระต่อกัน และระบบประมาณสามารถประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์ได้ถูกต้อง



รูปที่ 5.30 ผลการทดลองของระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงกระแสกระตุ้นสร้างสเตเตอร์ฟลักซ์ผ่านกระแสทางด้านโรเตอร์ i_{rd} จาก 3->6->3 A ที่ความเร็ว 1500 rpm และสภาวะไร้โหลด

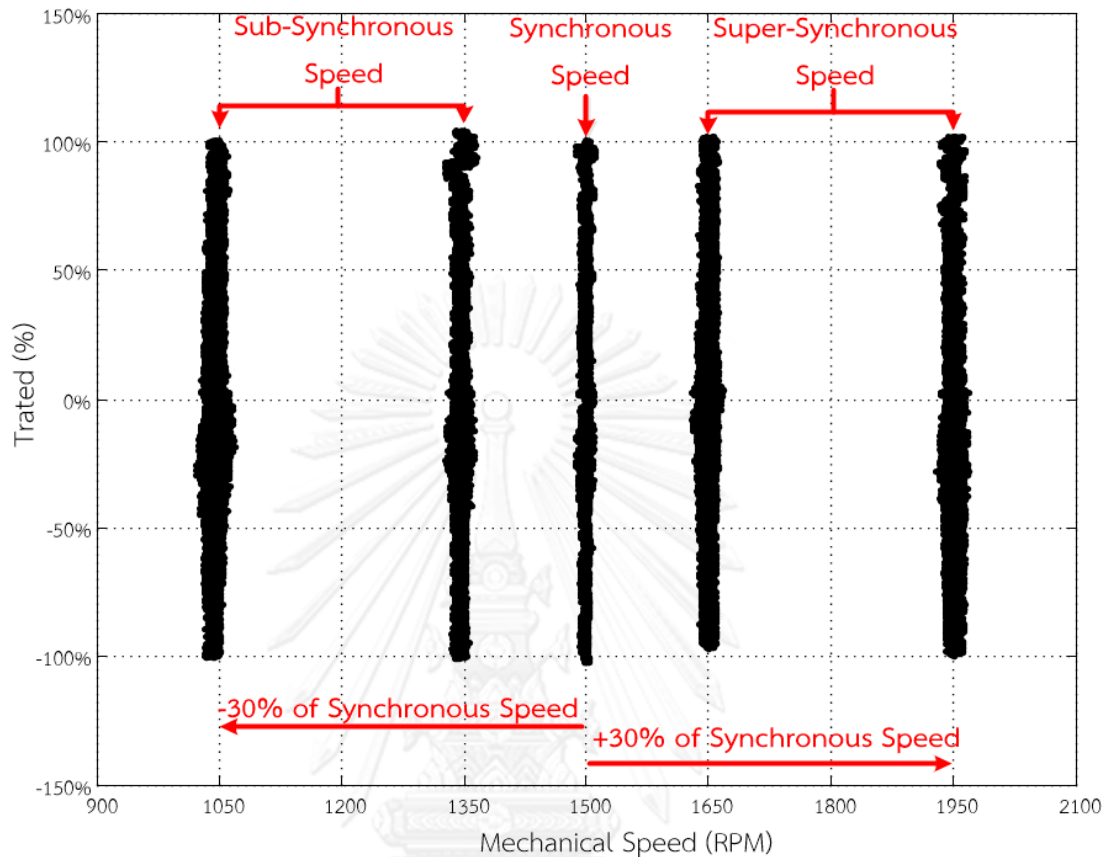


รูปที่ 5.31 ผลการทดลองของระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงกระแสกระตุ้นสร้างสเตเตอร์ฟลักซ์ผ่านกระแสทางด้านโรเตอร์ i_{rd} จาก 3->6->3 A ที่ความเร็ว 1500 rpm และย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



รูปที่ 5.32 ผลการทดลองของระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงกระแสกระตุ้นสร้างสเตเตอร์ฟลักซ์ผ่านกระแสทางด้านโรเตอร์ i_{rd} จาก 3->6->3 A ที่ความเร็ว 1500 rpm และย่านมอเตอร์

5.2.4. ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงโหลดแบบแรมป์ที่ความเร็วคงที่



รูปที่ 5.33 ลักษณะสมบัติของแรงบิดและความเร็วที่ทดสอบโดยเปลี่ยนแปลงโหลดแบบแรมป์ จาก โหลดย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไปเป็นโหลดในย่านมอเตอร์ ที่ความเร็ว 1050, 1350, 1500, 1650 และ 1950 rpm

สมรรถนะของเครื่องจักรกลไฟฟ้าสามารถขับเคลื่อนได้ตั้งแต่ความเร็วซิงโครนัส (1050 rpm) ถึงความเร็วซูเปอร์ซิงโครนัส (1950 rpm) และสามารถป้อนโหลดได้ตั้งแต่นานเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (-27.4 Nm, -100% ของโหลดพิกัด) ถึงย่านมอเตอร์ (27.4 Nm, 100% ของโหลดพิกัด) การทดลองนี้จึงทดสอบระบบขับเคลื่อนดังสมรรถนะข้างต้น โดยระบบขับเคลื่อนเริ่มต้นทำงานที่สถานะอยู่ตัวที่ค่ากระแสโรเตอร์ในแกน d เท่ากับ 3 A และมีความเร็วคงที่ เช่น 1050 rpm (-30% of Synchronous Speed), 1200 rpm (-5% of Synchronous Speed), 1500 rpm (Synchronous Speed), 1650 rpm (+5% of Synchronous Speed), 1950 rpm (+30% of Synchronous Speed) จากนั้นเราจะป้อนโหลดแบบแรมป์ (โหลดเพิ่มขึ้นด้วยฟังก์ชันเส้นตรง) ให้แก่ระบบขับเคลื่อน โดยเริ่มต้นที่โหลดขนาดเท่ากับ -27.4 Nm (โหลดย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า) และเพิ่มขึ้นจนถึง 27.4 Nm (โหลดย่านมอเตอร์) จากผลการทดลองในรูปที่ 5.33 พบว่าที่ความเร็ว 1050, 1350, 1500, 1650 และ 1950 rpm ระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งสามารถตอบสนองต่อโหลดได้ทั้งในย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า สภาวะไร้โหลด และย่านมอเตอร์ อีกทั้งสามารถควบคุมความเร็วได้คงที่ ซึ่งอาจกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่าระบบประมาณที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

สามารถประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์ได้ทุกเงื่อนไขการทำงานในโหมดการควบคุมกำลังรี
แอกทีฟทางด้านโรเตอร์



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 6

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

6.1. บทสรุปผลการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอระบบประมาณความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์ด้วยตัวสังเกตลดอันดับแบบปรับตัวโดยอาศัยแบบจำลองค่าผิดพลาดกระแสสเตเตอร์สำหรับระบบขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดบ่อนสอง ข้อดีของระบบประมาณวิธีนี้สามารถจำแนกได้ 5 ข้อ ดังนี้

1. ระบบประมาณไม่จำเป็นต้องใช้ค่าสเตเตอร์ฟลักซ์สำหรับการประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์ จึงสามารถหลีกเลี่ยงการเลื่อนของสัญญาณไฟตรง (DC offset problem) อันเนื่องมาจากการคำนวณสเตเตอร์ฟลักซ์ด้วยการอินทิเกรตได้

2. ตัวสังเกตลดอันดับแบบปรับตัวสามารถประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์ได้ที่ทุกเงื่อนไขการทำงานในโหมดควบคุมกำลังรีแอกทีฟทางด้านโรเตอร์ ซึ่งสอดคล้องตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อโครงข่ายไฟฟ้า (Grid code)

3. ระบบประมาณมีการคำนวณที่เรียบง่าย ไม่ซับซ้อน และไม่ต้องใช้พารามิเตอร์เกินความจำเป็น เช่น ค่ากำลังสูญเสียที่แกนเหล็ก เป็นต้น

4. ระบบประมาณสามารถวิเคราะห์ได้ด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น (Linearization) ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ว่าระบบประมาณมีเสถียรภาพสำหรับทุกเงื่อนไขการทำงานในโหมดควบคุมกำลังรีแอกทีฟทางด้านโรเตอร์

5. การนำเสนอเกณฑ์การออกแบบอัตราขยายเพื่อให้ระบบประมาณมีผลตอบสนองแบบหน่วงเกิน (Overdamp response)

จากผลการจำลองด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink และผลการทดลองด้วยระบบทดสอบสามารถยืนยันเสถียรภาพและคุณสมบัติในการประมาณค่าได้ของตัวสังเกตลดอันดับแบบปรับตัว อีกทั้งยังสามารถควบคุมระบบขับเคลื่อนแบบเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งได้สอดคล้องกับทฤษฎีการควบคุมแบบแยกการเชื่อมร่วม (Decoupling Control) ด้วย

6.2. ข้อเสนอแนะ

1. ค่าความผิดพลาดของพารามิเตอร์และข้อมูลที่ตรวจวัดส่งผลให้ความแม่นยำในการประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์ลดลง ความผิดพลาดของพารามิเตอร์ ได้แก่ ค่าผิดพลาดของความต้านทานด้านสเตเตอร์ (ΔR_s) ค่าผิดพลาดของความเหนี่ยวนำของขดลวดสเตเตอร์ (ΔL_s) ในส่วนของค่าความผิดพลาดของข้อมูลที่ตรวจวัด เช่น ค่าความผิดพลาดของแรงดันสเตเตอร์ ($\Delta \bar{v}_s$) ค่าความผิดพลาดของกระแสโรเตอร์ ($\Delta \bar{i}'_r$) เป็นต้น สาเหตุของความแปรปรวนอาจเกิดจาก

ความไม่อุดมคติของฮาร์ดแวร์ เราจึงควรตรวจวัดค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดด้านสเตเตอร์ที่ทุกย่านการทำงานของระบบขับเคลื่อน และนำค่าที่ตรวจวัดได้มาประยุกต์ใช้ในการคำนวณด้วย

2. เนื่องจากแรงดันโรเตอร์มีค่าอยู่ในช่วง 0- 50 V หรือมีค่าเป็น 0-7.46% ของแรงดันบัสไฟตรง (670 V) สัญญาณคำสั่ง PWM กับแรงดันบัสจึงมีค่าแตกต่างกันมาก ในการสร้างแรงดัน ช่วงเวลาการ On ของสวิตช์สั้น ทำให้การ Off ของสวิตช์ยาว แรงดันที่ผิดพลาดจากผลของการประวิงเวลาในการขับนำสวิตช์จึงมีค่ามากเมื่อเทียบกับขนาดแรงดันที่สร้าง ซึ่งส่งผลให้แรงดันที่สร้างได้ผิดพลาดจากแรงดันคำสั่งแม้มีการคำนวณแรงดันชดเชย ดังนั้นเราควรเลือกใช้แรงดันบัสไฟตรงที่เหมาะสมและมีค่าใกล้เคียงกับค่าแรงดันของระบบขับเคลื่อน เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพในการสร้างแรงดันมากขึ้น



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รายการอ้างอิง

1. Muller, S., M. Deicke, and R.W. De Doncker, *Doubly fed induction generator systems for wind turbines*. Industry Applications Magazine, IEEE, 2002. **8**(3): p. 26-33.
2. GWEC. *Global Cumulative Installed Wind Capacity 1996-2013*. [cited 2014 May 8]; Available from: http://www.gwec.net/wp-content/uploads/2014/04/6_21-2_global-cumulative-installed-wind-capacity-1996-2013.jpg.
3. EWEA. *Generic Grid Code Format for Wind Power Plants*. [cited 2014 May 8]; Available from: http://www.ewea.org/fileadmin/ewea_documents/documents/publications/091127_GGCF_Final_Draft.pdf.
4. Cardenas, R., et al., *MRAS Observers for Sensorless Control of Doubly-Fed Induction Generators*. Power Electronics, IEEE Transactions on, 2008. **23**(3): p. 1075-1084.
5. Marques, G.D., et al., *A DFIG Sensorless Rotor-Position Detector Based on a Hysteresis Controller*. Energy Conversion, IEEE Transactions on, 2011. **26**(1): p. 9-17.
6. Marques, G.D. and D.M. Sousa, *Air-Gap-Power-Vector-Based Sensorless Method for DFIG Control Without Flux Estimator*. Industrial Electronics, IEEE Transactions on, 2011. **58**(10): p. 4717-4726.
7. Dezza, F.C., et al., *An MRAS Observer for Sensorless DFIM Drives With Direct Estimation of the Torque and Flux Rotor Current Components*. Power Electronics, IEEE Transactions on, 2012. **27**(5): p. 2576-2584.
8. Kron, G., *Equivalent Circuits of Electric Machinery*. 1967, New York: Dover Publications.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

การพิสูจน์เสถียรภาพของตัวสังเกตอันดับแบบปรับตัว

ตัวสังเกตอันดับแบบปรับตัวสามารถประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์ด้วยค่าความผิดพลาดกระแสสเตเตอร์ดังสมการ(ก.1) โดยเราสามารถแสดงค่าผิดพลาดความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์ได้ดังสมการ(ก.2)-(ก.3)

$$\frac{d}{dt}(\hat{i}_s - \bar{i}_s) = \frac{d\bar{e}_s}{dt} = -\frac{R_s}{L_s}\bar{e}_s - \frac{M}{L_s} \frac{d}{dt} \left[(e^{Jp\hat{\theta}_m} - e^{Jp\theta_m}) \bar{i}_r' \right] \quad (\text{ก.1})$$

$$\dot{e}_\omega = \frac{d(\hat{\omega}_m - \omega_m)}{dt} = \frac{d}{dt} (K_p + K_I \int dt) \left\{ \left(Jpe^{Jp\hat{\theta}_m} \cdot \bar{i}_r' \right)^T \cdot \bar{e}_s \right\} \quad (\text{ก.2})$$

$$\dot{e}_{\theta_m} = \frac{d(\hat{e}_{\theta_m} - e_{\theta_m})}{dt} = e_\omega \quad (\text{ก.3})$$

ในภาคผนวกนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์เสถียรภาพ โดยพิจารณาจากสมการผิดพลาดทั้ง 3 สมการข้างต้นด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น (Linearization) เงื่อนไขจุดทำงานสงบคือค่าผิดพลาดกระแส ค่าผิดพลาดความเร็วโรเตอร์ และค่าผิดพลาดตำแหน่งโรเตอร์มีค่าเท่ากับศูนย์ดังสมการ (ก.4)-(ก.5)

$$\bar{e}_s = \bar{0} \quad (\text{ก.4})$$

$$e_\omega = e_\theta = 0 \quad (\text{ก.5})$$

การทำให้เป็นเชิงเส้น (Linearization)

สมการผิดพลาดกระแสสเตเตอร์:

จากสมการผิดพลาดกระแสสเตเตอร์ (ก.1) เราสามารถประมาณเป็นเชิงเส้นได้ดังสมการ (ก.6)

$$\delta \dot{e}_s = a_0 \cdot \delta e_\theta + b_0 \cdot \delta e_s + c_0 \cdot \delta e_\omega \quad (\text{ก.6})$$

โดยค่าสัมประสิทธิ์ a_0, b_0, c_0 สามารถคำนวณได้ที่เงื่อนไขค่าผิดพลาดความเร็วโรเตอร์ ค่าผิดพลาดตำแหน่งโรเตอร์ และค่าผิดพลาดกระแสสเตเตอร์เป็นศูนย์ (สมการ(ก.4)-(ก.5)) และพิจารณาข้อมูลที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (Time Variant Variable) บนจุดทำงานสงบหนึ่งๆ เช่น \bar{i}_r' $\hat{\theta}_m$ เป็นต้น การคำนวณสามารถแบ่งได้ 3 กรณีดังนี้

กรณีที่ 1: คำนวณ a_0

$$a_0 = \frac{\delta \dot{e}_s}{\delta e_\theta} = \frac{\delta}{\delta e_\theta} \left[-\frac{R_s}{L_s} e_s - \frac{M}{L_s} \left\{ \frac{d}{dt} (e^{Jp\hat{\theta}_m} \bar{i}_r') - e^{-Jpe_\theta} \frac{d}{dt} (e^{Jp\hat{\theta}_m} \bar{i}_r') + (Jpe_\omega e^{-Jpe_\theta}) (e^{Jp\hat{\theta}_m} \bar{i}_r') \right\} \right] \quad (\text{ก.7})$$

$$a_0 = \frac{-M}{L_s} \frac{\delta}{\delta e_\theta} \left[\frac{d}{dt} (e^{Jp\hat{\theta}_m} \bar{i}_r') - e^{-Jpe_\theta} \frac{d}{dt} (e^{Jp\hat{\theta}_m} \bar{i}_r') + (Jpe_\omega e^{-Jpe_\theta}) (e^{Jp\hat{\theta}_m} \bar{i}_r') \right] \quad (\text{ก.8})$$

$$a_0 = 0 \quad (\text{ก.9})$$

กรณีที่ 2: คำนวณ b_0

$$b_o = \frac{\delta \dot{e}_s}{\delta e_s} = \frac{\delta}{\delta e_s} \left[-\frac{R_s}{L_s} \bar{e}_s - \frac{M}{L_s} \left\{ \frac{d}{dt} (e^{Jp\hat{\theta}_m \bar{i}'}) - e^{-Jpe_0} \frac{d}{dt} (e^{Jp\hat{\theta}_m \bar{i}'}) + (Jpe_\omega e^{-Jpe_0}) (e^{Jp\hat{\theta}_m \bar{i}'}) \right\} \right] \quad (\text{ก.9})$$

$$b_o = -\frac{R_s}{L_s} \quad (\text{ก.10})$$

กรณีที่ 3: คำนวณ c_0

$$c_o = \frac{\delta \dot{e}_s}{\delta e_\omega} = \frac{\delta}{\delta e_\omega} \left[-\frac{R_s}{L_s} \bar{e}_s - \frac{M}{L_s} \left\{ \frac{d}{dt} (e^{Jp\hat{\theta}_m \bar{i}'}) - e^{-Jpe_0} \frac{d}{dt} (e^{Jp\hat{\theta}_m \bar{i}'}) + (Jpe_\omega e^{-Jpe_0}) (e^{Jp\hat{\theta}_m \bar{i}'}) \right\} \right] \quad (\text{ก.11})$$

$$c_o = \frac{-M}{L_s} \left[(Jpe^{-Jpe_0}) (e^{Jp\hat{\theta}_m \bar{i}'}) \right] \quad (\text{ก.12})$$

$$c_o = -\frac{M}{L_s} Jpe^{Jp\hat{\theta}_m \bar{i}'} \quad (\text{ก.13})$$

จากการคำนวณ 3 กรณีข้างต้น เราสามารถแสดงสมการค่าผิดพลาดกระแสสเตเตอร์ที่ทำให้เป็นเชิงเส้นได้ดังสมการ (ก.14)

$$\delta \dot{e}_s = -\frac{R_s}{L_s} \delta e_s - \frac{M}{L_s} Jpe^{Jp\hat{\theta}_m \bar{i}'} \delta e_\omega \quad (\text{ก.14})$$

สมการค่าผิดพลาดความเร็วโรเตอร์:

เนื่องจากสมการ (ก.2) มีความซับซ้อนในการวิเคราะห์เสถียรภาพ เราจึงนิยามตัวแปรใหม่ดังสมการ (ก.15) ในส่วนของสมการผิดพลาดความเร็ว เราสามารถพิจารณาจากสมการได้ดังนี้

$$\zeta \triangleq e_\omega - K_p \left(Jpe^{Jp\hat{\theta}_m \bar{i}'} \right)^T \bar{e}_s \quad (\text{ก.15})$$

เราสามารถจัดรูปสมการค่าผิดพลาดความเร็วโรเตอร์ใหม่ได้ดังนี้

$$\dot{\zeta} = \dot{e}_\omega - K_p \frac{d}{dt} \left[\left(Jpe^{Jp\hat{\theta}_m \bar{i}'} \right)^T \bar{e}_s \right] \quad (\text{ก.16})$$

$$\dot{\zeta} = K_I \frac{d}{dt} \left[\int \left(Jpe^{Jp\hat{\theta}_m \bar{i}'} \right)^T \bar{e}_s dt \right] \quad (\text{ก.17})$$

$$\dot{\zeta} = K_I \left(Jpe^{Jp\hat{\theta}_m \bar{i}'} \right)^T \bar{e}_s \quad (\text{ก.17})$$

จากสมการ (ก.17) เราสามารถประมาณเป็นเชิงเส้นได้ดังสมการ (ก.18)

$$\delta \dot{\zeta} = K_I \left(Jpe^{Jp\hat{\theta}_m \bar{i}'} \right)^T \cdot \delta \bar{e}_s \quad (\text{ก.18})$$

$$\delta \dot{\zeta} = K_I \begin{bmatrix} -p\hat{i}_{r\beta} \\ p\hat{i}_{r\alpha} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \delta e_{s\alpha} \\ \delta e_{s\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{ก.19})$$

สมการค่าผิดพลาดตำแหน่งโรเตอร์:

จากสมการผิดพลาดตำแหน่งโรเตอร์ (สมการ (ก.3)) และจากการนิยามตัวแปรใหม่ (สมการ (ก.15)) เราสามารถจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$\dot{e}_\theta = \zeta + K_p \left(J p e^{J p \hat{\theta}_m} \bar{i}_r' \right)^T \bar{e}_s \quad (\text{ก.20})$$

จากสมการ (ก.21) เราสามารถประมาณสมการเป็นเชิงเส้นได้ดังนี้

$$\delta \dot{e}_\theta = \delta \zeta + K_p \left(J p e^{J p \hat{\theta}_m} \bar{i}_r' \right)^T \delta \bar{e}_s \quad (\text{ก.21})$$

$$\delta \dot{e}_\theta = \delta \zeta + K_p \begin{bmatrix} -p \hat{i}_{r\beta} \\ p \hat{i}_{r\alpha} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \delta e_{s\alpha} \\ \delta e_{s\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{ก.22})$$

เนื่องจากการนิยามตัวแปรใหม่ (ζ) เราจึงจัดรูปสมการค่าผิดพลาดกระแสเดเตอร์ (ก.14) ในเทอมตัวแปร ζ ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} \delta \dot{e}_{s\alpha} \\ \delta \dot{e}_{s\beta} \end{bmatrix} = -\frac{R_s}{L_s} \begin{bmatrix} \delta e_{s\alpha} \\ \delta e_{s\beta} \end{bmatrix} - K_p \frac{M}{L_s} \begin{bmatrix} (p \hat{i}_{r\beta})^2 \delta e_{s\alpha} - p^2 \hat{i}_{r\alpha} \hat{i}_{r\beta} \delta e_{s\beta} \\ -p^2 \hat{i}_{r\alpha} \hat{i}_{r\beta} \delta e_{s\alpha} + (p \hat{i}_{r\alpha})^2 \delta e_{s\beta} \end{bmatrix} - \frac{M}{L_s} \begin{bmatrix} -p \hat{i}_{r\beta} \\ p \hat{i}_{r\alpha} \end{bmatrix} \delta \zeta \quad (\text{ก.23})$$

จากสมการค่าผิดพลาดทั้ง 3 สมการ (ก.19), (ก.22) และ(ก.23) เราสามารถแสดงในรูปปริภูมิสถานะได้ดังสมการ (ก.24)

$$\begin{bmatrix} \delta \dot{e}_{s\alpha} \\ \delta \dot{e}_{s\beta} \\ \delta \dot{\zeta} \\ \delta \dot{e}_\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_s} - K_p \frac{M}{L_s} (p \hat{i}_{r\beta})^2 & K_p \frac{M}{L_s} p^2 \hat{i}_{r\alpha} \hat{i}_{r\beta} & \frac{M}{L_s} p \hat{i}_{r\beta} & 0 \\ K_p \frac{M}{L_s} p^2 \hat{i}_{r\alpha} \hat{i}_{r\beta} & -\frac{R_s}{L_s} - K_p \frac{M}{L_s} (p \hat{i}_{r\alpha})^2 & -\frac{M}{L_s} p \hat{i}_{r\alpha} & 0 \\ -K_I p \hat{i}_{r\beta} & K_I p \hat{i}_{r\alpha} & 0 & 0 \\ -K_p p \hat{i}_{r\beta} & K_p p \hat{i}_{r\alpha} & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta e_{s\alpha} \\ \delta e_{s\beta} \\ \delta \zeta \\ \delta e_\theta \end{bmatrix} \quad (\text{ก.24})$$

สำหรับการหาค่าลักษณะเฉพาะของระบบประมาณ (Eigen Value) เราสามารถคำนวณได้จากสมการปริภูมิสถานะข้างต้น

ภาคผนวก ข

การหารากตัวที่สาม และรากตัวที่สี่ของระบบประมาณ

จากสมการ (3.9) รากตัวที่สาม และรากตัวที่สี่ คือ

$$s_3, s_4 = \frac{-R_s - K_p Mp^2 (\hat{i}_{r\alpha}^2 + \hat{i}_{r\beta}^2) \pm \sqrt{(K_p Mp^2 (\hat{i}_{r\alpha}^2 + \hat{i}_{r\beta}^2) + R_s)^2 - 4L_s K_I Mp^2 (\hat{i}_{r\alpha}^2 + \hat{i}_{r\beta}^2)}}{2L_s} \quad (\text{ข.1})$$

เงื่อนไขในการพิจารณาขั้วตัวที่สามและขั้วตัวที่สี่ สามารถพิจารณาได้ดังนี้

1. จาก $K_p, K_I > 0$ และ $(\hat{i}_{r\alpha}^2 + \hat{i}_{r\beta}^2) \neq 0$ จะได้ว่า $K_p Mp^2 (\hat{i}_{r\alpha}^2 + \hat{i}_{r\beta}^2) + R_s > 0$ และ

$$-K_p Mp^2 (\hat{i}_{r\alpha}^2 + \hat{i}_{r\beta}^2) - R_s < 0 \quad \text{หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือส่วนจริงของขั้วมีค่าเป็นลบด้วย ดังนั้น}$$

ขั้วที่เป็นคู่สังยุคนี้จึงเป็นขั้วที่มีเสถียรภาพ

2. พิจารณา $\sqrt{(K_p Mp^2 (\hat{i}_{r\alpha}^2 + \hat{i}_{r\beta}^2) + R_s)^2 - 4L_s K_I Mp^2 (\hat{i}_{r\alpha}^2 + \hat{i}_{r\beta}^2)}$ จะพบว่าผลลัพธ์เกิดขึ้นได้ 2 กรณี ดังนี้

2.1 ในกรณี $(K_p Mp^2 (\hat{i}_{r\alpha}^2 + \hat{i}_{r\beta}^2) + R_s)^2 - 4L_s K_I Mp^2 (\hat{i}_{r\alpha}^2 + \hat{i}_{r\beta}^2) < 0$ ขั้วตัวที่สามและขั้วตัวที่สี่จะมีผลเฉลยเป็นจำนวนเชิงซ้อนที่มีค่าจริงเป็นลบเสมอ ดังนั้นขั้วที่เป็นคู่สังยุคนี้จึงเป็นขั้วที่มีเสถียรภาพ

2.2 ในกรณี $(K_p Mp^2 (\hat{i}_{r\alpha}^2 + \hat{i}_{r\beta}^2) + R_s)^2 - 4L_s K_I Mp^2 (\hat{i}_{r\alpha}^2 + \hat{i}_{r\beta}^2) > 0$

$$\text{เนื่องจาก } (K_p Mp^2 (\hat{i}_{r\alpha}^2 + \hat{i}_{r\beta}^2) + R_s) = \sqrt{(K_p Mp^2 (\hat{i}_{r\alpha}^2 + \hat{i}_{r\beta}^2) + R_s)^2}$$

ซึ่งสามารถพิจารณา $\sqrt{(K_p Mp^2 (\hat{i}_{r\alpha}^2 + \hat{i}_{r\beta}^2) + R_s)^2 - 4L_s K_I Mp^2 (\hat{i}_{r\alpha}^2 + \hat{i}_{r\beta}^2)}$ ได้ว่า

$$(K_p Mp^2 (\hat{i}_{r\alpha}^2 + \hat{i}_{r\beta}^2) + R_s) > \sqrt{(K_p Mp^2 (\hat{i}_{r\alpha}^2 + \hat{i}_{r\beta}^2) + R_s)^2 - 4L_s K_I Mp^2 (\hat{i}_{r\alpha}^2 + \hat{i}_{r\beta}^2)}$$

เมื่อย้ายประพจน์ฝั่งซ้ายไปอยู่ฝั่งขวา เราสามารถจัดรูปใหม่ได้ว่า

$$0 > -(K_p Mp^2 (\hat{i}_{r\alpha}^2 + \hat{i}_{r\beta}^2) + R_s) + \sqrt{(K_p Mp^2 (\hat{i}_{r\alpha}^2 + \hat{i}_{r\beta}^2) + R_s)^2 - 4L_s K_I Mp^2 (\hat{i}_{r\alpha}^2 + \hat{i}_{r\beta}^2)}$$

จากสมการข้างต้น เราสามารถกล่าวได้ว่า

$$0 > -(K_p Mp^2 (\hat{i}_{r\alpha}^2 + \hat{i}_{r\beta}^2) + R_s) - \sqrt{(K_p Mp^2 (\hat{i}_{r\alpha}^2 + \hat{i}_{r\beta}^2) + R_s)^2 - 4L_s K_I Mp^2 (\hat{i}_{r\alpha}^2 + \hat{i}_{r\beta}^2)}$$

เราจะเห็นได้ว่าขั้วคู่สังยุคในกรณีนี้มีค่าน้อยกว่าศูนย์ จึงเป็นขั้วที่มีเสถียรภาพ

จากกรณีที่ 1 และกรณีที่ 2 เราสามารถสรุปได้ว่า ข้าวตัวที่สามและข้าวตัวที่สี่ล้วนมีค่าน้อยกว่า ศูนย์เสมอ จึงเป็นข้าวคู่สังยุคที่มีเสถียรภาพ



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ค

การจัดรูปสมการสเตเตอร์เป็นสมการสเตเตอร์ฟลักซ์

จากสมการสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์

$$\bar{v}_s = \bar{i}_s R_s + M \frac{d\bar{\lambda}_s}{dt} \quad (\text{ค.1})$$

$$\bar{i}_s = \frac{\bar{\lambda}_s - M e^{J\theta_r} \bar{i}_r'}{L_s} \quad (\text{ค.2})$$

และจากการนิยามกระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์

$$\bar{\lambda}_s = M \bar{i}_o \quad (\text{ค.3})$$

แทนสมการ (ค.1) และ (ค.2) ลงใน (ค.3) เราสามารถจัดสมการในรูปกระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ได้ดังนี้

$$M \frac{d\bar{i}_o}{dt} = \bar{v}_s - \frac{R_s M \bar{i}_o - M R_s e^{J\theta_r} \bar{i}_r'}{L_s}$$

$$\frac{d\bar{i}_o}{dt} = \frac{\bar{v}_s}{M} - \frac{R_s}{L_s} \bar{i}_o + \frac{R_s}{L_s} e^{J\theta_r} \bar{i}_r' \quad (\text{ค.4})$$

ย้ายแกนอ้างอิงสเตเตอร์เป็นแกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์ด้วยการคูณด้วยพจน์ $e^{-J\theta_o}$

$$e^{-J\theta_o} \frac{d\bar{i}_o}{dt} = \frac{\bar{v}_s e^{-J\theta_o}}{M} - \frac{R_s}{L_s} e^{-J\theta_o} \bar{i}_o + \frac{R_s}{L_s} e^{J\theta_r} e^{-J\theta_o} \bar{i}_r' \quad (\text{ค.5})$$

พิจารณาพจน์ $\frac{d}{dt}(e^{-J\theta_o} \bar{i}_o)$

$$\frac{d}{dt}(e^{-J\theta_o} \bar{i}_o) = -\bar{i}_o e^{-J\theta_o} J \omega_o + e^{-J\theta_o} \frac{d\bar{i}_o}{dt}$$

จะได้

$$e^{-J\theta_o} \frac{d\bar{i}_o}{dt} = \frac{d}{dt}(e^{-J\theta_o} \bar{i}_o) + \omega_o J e^{-J\theta_o} \bar{i}_o \quad (\text{ค.6})$$

แทนสมการ (ค.6) ในสมการ (ค.5) เราสามารถจัดรูปได้เป็น

$$\frac{d}{dt}(e^{-J\theta_o} \bar{i}_o) = \frac{1}{M} e^{-J\theta_o} \bar{v}_s - \frac{R_s}{L_s} e^{-J\theta_o} \bar{i}_o + \frac{R_s}{L_s} e^{-J\theta_o} \bar{i}_r' - \omega_o J e^{-J\theta_o} \bar{i}_o \quad (\text{ค.7})$$

เปลี่ยนสมการ (ค.7) ในรูปเมทริกซ์ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} \frac{d\bar{i}_o}{dt} \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{M} \begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \end{bmatrix} - \frac{R_s}{L_s} \begin{bmatrix} \bar{i}_o \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{R_s}{L_s} \begin{bmatrix} \bar{i}_{rd} \\ \bar{i}_{rq} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & -\omega_o \\ \omega_o & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{i}_o \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{ค.8})$$

สมการคำนวณ i_o และ θ_o สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\frac{di_o}{dt} = \frac{R_s}{L_s} i_{rd} - \frac{R_s}{L_s} i_o + \frac{v_{sd}}{M}$$

$$\frac{d\theta_o}{dt} = \omega_o = \frac{R_s}{L_s} \frac{i_{rq}}{i_o} + \frac{v_{sq}}{Mi_o}$$



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ง
พารามิเตอร์ของมอเตอร์

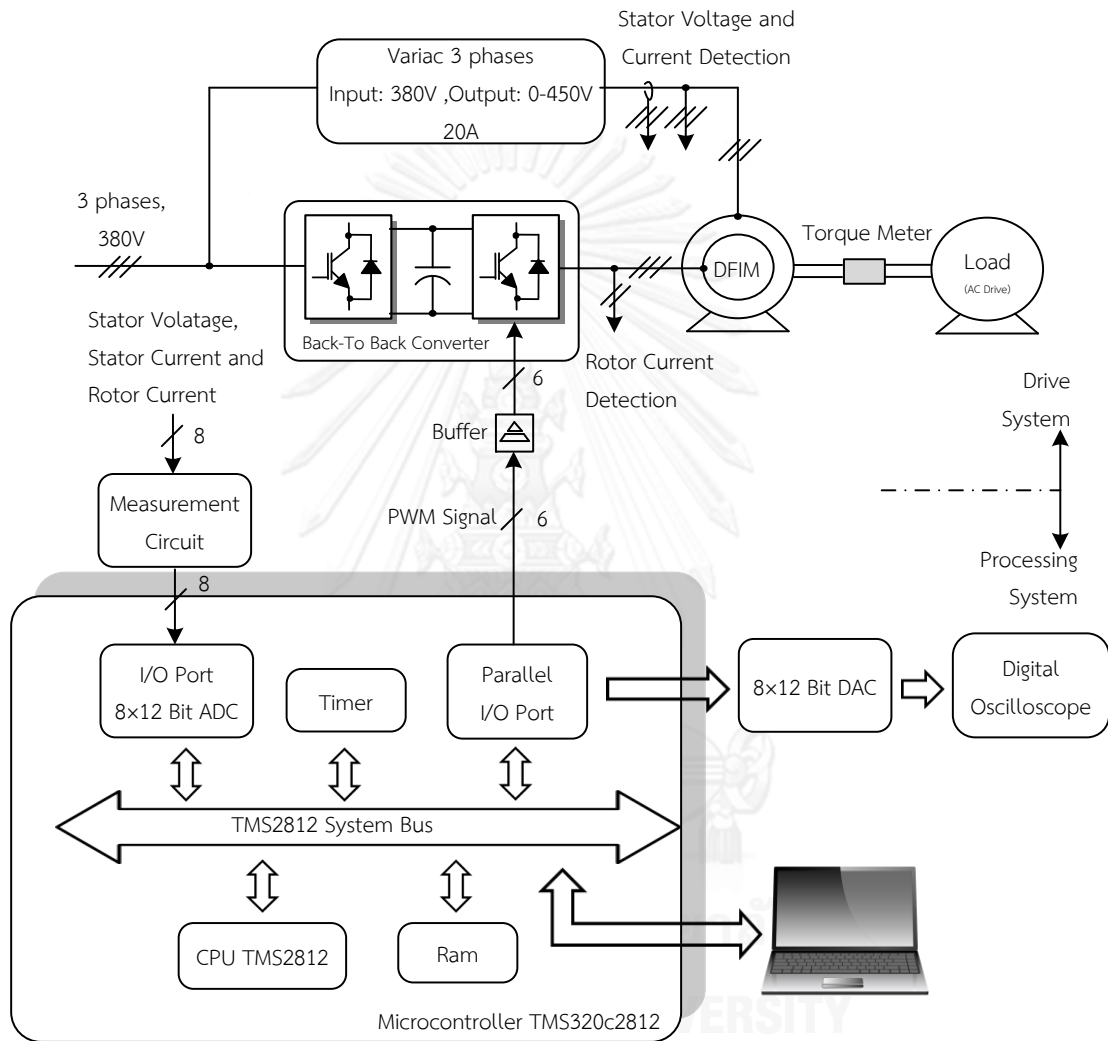
ตารางที่ ง.1 ค่าพิกัด/ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง

ค่าพิกัด/ค่าพารามิเตอร์	ค่า
กำลังไฟฟ้า (kW)	4
แรงดันฝั่งสเตเตอร์ (V)	380
กระแสฝั่งสเตเตอร์ (A)	8.1
แรงดันฝั่งโรเตอร์ (V)	196
กระแสพิกัดฝั่งโรเตอร์ (A)	13.5
ความต้านทานฝั่งสเตเตอร์ $R_s (\Omega)$	1.75
ความต้านทานฝั่งโรเตอร์ $R_r (\Omega)$ (อ้างอิงด้านสเตเตอร์)	2.1613
ความเหนี่ยวนำตัวเองฝั่งสเตเตอร์ L_s (mH)	187
ความเหนี่ยวนำตัวเองฝั่งโรเตอร์ L_r (mH) (อ้างอิงด้านสเตเตอร์)	187
ความเหนี่ยวนำร่วม M (mH) (อ้างอิงด้านสเตเตอร์)	185
โมเมนต์ความเฉื่อย (kg.m^2)	0.0114
จำนวนคู่ขั้ว p (คู่)	2
ความเร็วพิกัด (rpm)	1393
ความถี่ไฟฟ้า (Hz)	50

ภาคผนวก จ

โครงสร้างฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ของระบบ

1. ฮาร์ดแวร์ของระบบ



รูปที่ จ.1 โครงสร้างฮาร์ดแวร์ที่ใช้ในการทดสอบของระบบควบคุมมอเตอร์แบบไร้เซ็นเซอร์วัดตำแหน่งสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง

โครงสร้างฮาร์ดแวร์ของระบบขับเคลื่อนจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง (DFIM) ประกอบด้วย 2 ส่วนคือ 1. ฮาร์ดแวร์ส่วนกำลัง และ 2. ฮาร์ดแวร์ส่วนประมวลผล โดยทั้งสองส่วนเชื่อมต่อกันดังรูปที่ จ.1 ซึ่งจะเห็นได้ว่าระบบไฟฟ้า 3 เฟสขนาด 380 โวลต์ป้อนเข้าสู่หม้อแปลงปรับค่าได้ (Variac 3 phases) และวงจรแปลงผันพลังงานแบบหลังชนหลัง (Back-To-Back Converter) โดยเอาต์พุตของหม้อแปลงเชื่อมตรงเข้าที่ฝั่งสเตเตอร์ ขณะที่ด้านออกของวงจรแปลงผันพลังงาน

แบบหลังชนหลังจะสร้างแรงดันโรเตอร์จากสัญญาณ PWM ที่คำนวณจากส่วนประมวลผล โดยแรงดันดังกล่าวจะถูกป้อนที่ฝั่งโรเตอร์ การตรวจจับข้อมูลแรงดันและกระแสจากฝั่งสเตเตอร์และโรเตอร์ เพื่อใช้ในการควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง ข้อมูลทั้งหมดจะถูกส่งไปที่วงจรตรวจวัดเพื่อนำไปใช้ในส่วนการคำนวณ ในงานวิจัยนี้เราใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS3202812 เป็นส่วนประมวลผล ซึ่งประกอบด้วย 1) ตัวประมวลผลกลาง (CPU) ที่มีความถี่สัญญาณนาฬิกา 75 MHz 2) ตัวสร้างสัญญาณนาฬิกา ทำหน้าที่สร้างสัญญาณอินเทอร์รัปต์สำหรับการคำนวณระบบเวกเตอร์ไร้ ค่าคำนวณตำแหน่งและความเร็วโรเตอร์ประมาณ และคำนวณสัญญาณ PWM 3) ช่องสัญญาณขาเข้า/ออก (I/O Port Analog to Digital Converter; ADC) จำนวน 8 ช่องสัญญาณ ขนาด 32 บิต ทำหน้าที่แปลงสัญญาณแอนะล็อกจากวงจรตรวจวัดเป็นสัญญาณดิจิทัล 4) ช่องสัญญาณขาเข้า/ออก แบบขนาน (Parallel I/O Port) ทำหน้าที่ส่งสัญญาณที่ประมวลผลออกสู่ระบบ เช่น สัญญาณ PWM หรือสัญญาณต่างๆ ที่ต้องการแสดงผลที่ Oscilloscope โดยส่งผ่านวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อก (Digital to Analog Converter; DAC) จำนวน 8 ช่องสัญญาณ ขนาด 32 บิต และ 5) หน่วยความจำหลัก (Ram) ทำหน้าที่เก็บข้อมูลกระแส แรงดันต่างๆ รวมถึงโปรแกรมการควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งสำหรับการประมวลผลบนบอร์ดดีเอสพี ซึ่งโปรแกรมนี้อาจกล่าวในรายละเอียดในลำดับถัดไป

2. ซอฟต์แวร์ของระบบ

ส่วนโปรแกรมมีหน้าที่หลักคือ คำนวณสัญญาณ PWM ของแรงดันโรเตอร์ โดยอาศัยการควบคุมเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง ในการคำนวณ เรากำหนดให้ความถี่ของสัญญาณ Interrupt เท่ากับ 8 kHz (125 μ s) และกำหนดความถี่ของสัญญาณ PWM เท่ากับ 4 kHz (250 μ s) ขั้นตอนการเขียนโปรแกรมสามารถแสดงได้ดังนี้

SPEED-SENSORLESS VECTOR CONTROL PROGRAM OF DFIM

MODULE : MAIN PROGRAM

Initialize

Initialize all variables

Initialize all timers and enable time interrupt

Loop here and wait for interrupt only

Switching frequency Interrupt Service Routine

Get estimated position $\hat{\theta}_m$ and stator flux position θ_o from the previous interrupt service routine

Read stator currents, stator voltages and rotor currents

Input $i_{su}, i_{sv}, i_{sw}, v_{su}, v_{sv}, v_{sw}, i_{ru}, i_{rv}$ from A/D

Calculate $i_{rw} = -i_{ru} - i_{rv}$

Convert all data from 3 phase to 2 phase (vector data)

Transform all vector data into stator flux d-q axis with $\hat{\theta}_m$ and θ_o

Reduced-Order Observer

Calculate estimated currents ($\hat{i}_{s\alpha}, \hat{i}_{s\beta}$) and current error

$(\hat{i}_{s\alpha} - i_{s\alpha}, \hat{i}_{s\beta} - i_{s\beta})$

Calculate estimated mechanical rotor speed $\hat{\omega}_m$ and estimated mechanical rotor position $\hat{\theta}_m$

Stator flux calculation

Calculate i_o, ω_o and θ_o

Get speed command

Speed regulator

Calculate speed error

Calculate speed controller output (i_{rq}^*)

Get rotor current of d-axis command (i_{rd}^*) for controlling stator flux

Current Control

Calculate PI-Control in d-axis

Calculate PI-Control in q-axis

Decoupling Control

Calculate v_{rd}^* and v_{rq}^*

Generate PWM signal

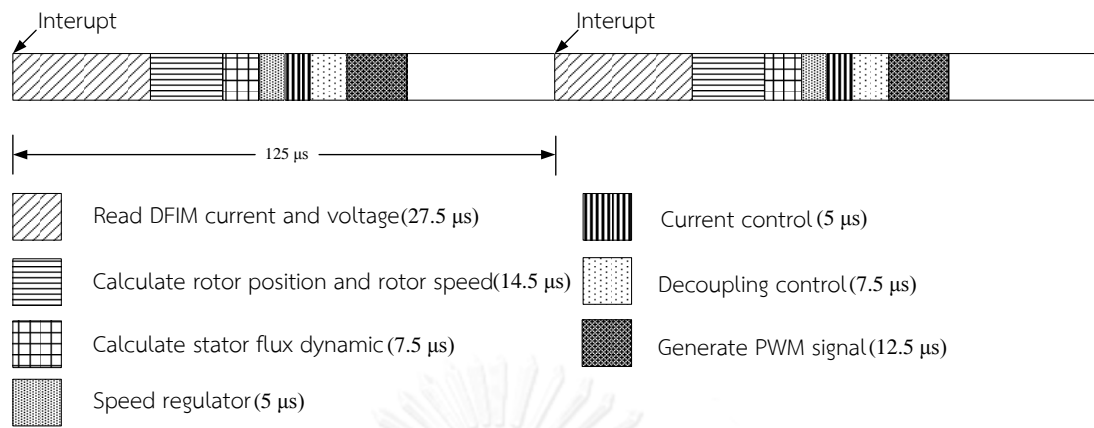
Convert (v_{rd}^*, v_{rq}^*) to $(v_{ru}^*, v_{rv}^*, v_{rw}^*)$

Calculate dead-time compensated voltage

Carrier based PWM

Return

End of Main Program



รูปที่ จ.2 ไตอะแกรมเวลาของซอฟต์แวร์ไมโคร

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายสมรัฐ สมितिสมบุญ เกิดเมื่อวันที่ 11 กรกฎาคม พ.ศ. 2531 ที่เขตบางกอกน้อย กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า (กำลัง) จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2553 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า (อิเล็กทรอนิกส์กำลัง) ณ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2554



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY