ระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางที่ใช้ค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองโรเตอร์บนแกนอ้างอิงโฮโลโนมิก

นายจิรัฏฐ์ อุดมศรี

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 POSITION-SENSORLESS VECTOR-CONTROL SYSTEM FOR DOUBLY-FED INDUCTION MACHINES USING ERROR ROTOR MODEL ON HOLONOMIC REFERENCE FRAME

Mr. Jirat Udomsri

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	ระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางที่ใช้ค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองโรเตอร์บนแกนอ้างอิงโฮโลโนมิก
โดย	นายจิรัฏฐ์ อุดมศรี
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรพงศ์ สุวรรณกวิน

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

....ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. แนบบุญ หุนเจริญ)

....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรพงศ์ สุวรรณกวิน)

....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรชาติ สุวรรณงาม)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

จิรัฏฐ์ อุดมศรี : ระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางที่ใช้ค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองโรเตอร์บนแกนอ้างอิงโฮโลโนมิก. (A POSITION-SENSORLESS VECTOR-CONTROL SYSTEM FOR DOUBLY-FED INDUCTION MACHINES USING ERROR ROTOR MODEL ON HOLONOMIC REFERENCE FRAME) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. สุรพงศ์ สุวรรณกวิน, หน้า.

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอระบบขับเคลื่อนสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางแบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งที่ใช้วิธีค่าผิดพลาดของแบบจำลองโรเตอร์บนแกนอ้างอิงโฮโลโนมิก แนวคิดที่นำเสนอในงานวิจัยปราศจากผลกระทบจากการเลื่อนของสัญญาดีซีออฟเซต อีกทั้งสามารถทำงานได้ในสภาวะที่กระแสโรเตอร์มีขนาดน้อยๆและสภาวะเชื่อมต่อกับกริด โดยวิธีประมาณตำแหน่งและความเร็วโรเตอร์ มีโครงสร้างการคำนวณที่ง่ายและไม่ซับซ้อน งานวิจัยนี้ยังได้วิเคราะห์เสถียรภาพของระบบประมาณค่าตำแหน่งด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นและสามารถแสดงเงื่อนไขเพียงพอสำหรับการยืนยันความมีเสถียรภาพรอบๆค่าประมาณหนึ่ง นอกจากนี้ยังนำเสนอการออกแบบค่าอัตราขยายการปรับตัวสำหรับระบบประมาณตำแหน่งที่มีลักษณะการควบคุมแบบวงรอบเปิด โดยพิจารณาผลตอบสนองอันดับหนึ่งแบบหน่วงเกินในการออกแบบ ความถูกต้องทางทฤษฎีที่นำเสนอสามารถยืนยันได้ด้วยผลการจำลองการทำงานและผลการทดลองกับระบบจริง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า	ลายมือชื่อนิสิต	....
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	....
ปีการศึกษา	2556		

5370411421 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING
KEYWORDS: SENSORLESS / DOUBLY-FED INDUCTION MACHINE / HOLONOMIC REFERENCE FRAME / STABILITY / VECTOR CONTROL

JIRAT UDOMSRI: A POSITION-SENSORLESS VECTOR-CONTROL SYSTEM FOR DOUBLY-FED INDUCTION MACHINES USING ERROR ROTOR MODEL ON HOLONOMIC REFERENCE FRAME. ADVISOR: ASST. PROF. SURAPONG SUWANKAWIN, pp.

A position-sensorless drive for doubly-fed induction machines based on the method of error rotor model on holonomic reference frame is proposed in this thesis. The proposed estimation scheme does not suffer from the DC offset drift problem and this system has the capability to operate at zero rotor current, e.g. at no-load condition with reactive current drawn from grid. The rotor position estimation is also simple for implementation. The stability of the position-sensorless is validated by the linearization method and the sufficient conditions are given. In addition, the design guidelines for adaptive gains are introduced to obtain the over-damped first-order response. The simulation and experiment confirmed the validation of theoretical results.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Department:	Electrical Engineering	Student's Signature	....
Field of Study:	Electrical Engineering	Advisor's Signature	....
Academic Year:	2013		

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความเอาใจใส่ที่ตั้งใจและช่วยเหลืออย่างดียิ่งของอาจารย์ ผศ.ดร.สุรพงศ์ สุวรรณกวิน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ที่ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือในด้านต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัยเสมอมา ขอขอบคุณ อาจารย์ ผศ.ดร. สมบูรณ์ แสงวงค์วาณิชย์ รวมทั้งรุ่นพี่รุ่นน้องห้องปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์กำลังทุกคนโดยเฉพาะ คุณพันไซและคุณสมรัฐ ตลอดจนโครงการก้นกุฏิที่ได้ให้การสนับสนุนทุนการศึกษาในการทำงานวิจัย

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณบิดา มารดา และญาติพี่น้อง ผู้ซึ่งให้โอกาสทางการศึกษาและเป็นกำลังใจด้วยดีเสมอมา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย....................ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ....................จ

กิตติกรรมประกาศ....................ฉ

สารบัญ....................ช

สารบัญตาราง....................ญ

สารบัญภาพ....................ฎ

รายการสัญลักษณ์....................ท

บทที่ 1 บทนำ....................1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา....................1

1.2 วิธีการประมาณตำแหน่งและความเร็วโรเตอร์จากงานวิจัยในอดีต....................2

1.2.1 การประมาณตำแหน่งและความเร็วโรเตอร์ด้วยวิธี MRAS....................2

1.2.2 การประมาณตำแหน่งและความเร็วโรเตอร์วิธีตัวสังเกตแบบปรับตัว (Adaptive Observer)....................8

1.3 สรุปปัญหาและข้อจำกัดในงานวิจัยที่ผ่านมา....................11

1.4 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย....................13

1.5 ขอบเขตวิทยานิพนธ์....................13

บทที่ 2 การควบคุมเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วมสำหรับ เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง....................14

2.1 แบบจำลองทางพลวัตของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง....................14

2.2 แบบจำลองของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดขดลวดพันบนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์....................15

2.3 การควบคุมเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วม....................16

2.4 การชดเชยผลกระทบแรงดันผิดพลาด....................18

2.4.1 การชดเชยแรงดันจากผลของแรงดันตกคร่อมสวิตซ์กำลัง (IGBT & Diode)....................19

2.4.2 การชดเชยแรงดันผิดพลาดจากการประวิงเวลาการสวิตซ์....................19

2.4.3 การชดเชยแรงดันผิดพลาดในทางปฏิบัติ....................21

2.5 ผลการจำลองการทำงานและผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วม....................21

หน้า

2.5.1 ผลตอบสนองในสภาวะความเร็วคงที่ 22
2.5.2 ผลตอบสนองในสภาวะชั่วครู่เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเร็ว 23
2.5.3 ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงกระแสกระตุ้นฟลักซ์แบบขั้นบันได 23
2.5.4 ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้นบันได 24
2.5.5 ลักษณะสมบัติของแรงบิด-ความเร็วของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง 24
บทที่ 3 ทฤษฎีการควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง 66
3.1 การประมาณความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์ด้วยวิธีแบบจำลองผิดพลาด 66
3.2 ข้อดีของระบบประมาณตำแหน่งด้วยวิธีผิดพลาดของแบบจำลองโรเตอร์ 68
3.3 ผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง 69
3.4 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง 78
3.4.1 ผลตอบสนองในสภาวะความเร็วคงที่ 78
3.4.2 ผลตอบสนองในสภาวะชั่วครู่เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเร็ว 79
3.4.3 ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงกระแสกระตุ้นฟลักซ์แบบขั้นบันได 79
3.4.4 ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้นบันได 79
บทที่ 4 เสถียรภาพของระบบประมาณค่าตำแหน่งโรเตอร์และ การออกแบบอัตราขยายการปรับตัว 103
4.1 สมการค่าผิดพลาดของระบบประมาณตำแหน่ง 103
4.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีทำให้เป็นเชิงเส้น 103
4.3 การออกแบบอัตราขยายการปรับตัวสำหรับการประมาณตำแหน่งโรเตอร์ 104
4.4 ข้อจำกัดทางด้านการประมาณค่าได้ของระบบประมาณตำแหน่ง 111
4.4.1 ข้อจำกัดทางทฤษฎีของระบบประมาณตำแหน่ง 111
4.4.2 ข้อจำกัดในการทดลองและผลกระทบทางจากแรงดันผิดพลาดจากการประวิงเวลาและแรงดันตกคร่อมสวิตช์กำลัง 112
4.4.3 ผลการทดลองของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางในย่านความเร็วซิงโครนัส 115
4.5 ลักษณะสมบัติของแรงบิด-ความเร็วของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง 120
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ 121

หน้า

5.1 บทสรุปงานวิจัย 121
5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับพัฒนางานวิจัยในลำดับถัดไป 121
รายการอ้างอิง 123
ภาคผนวก ก 126
ภาคผนวก ข 130
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 132

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

1 เปรียบเทียบคุณสมบัติของวิธีการประมาณตำแหน่งและความเร็วโรเตอร์ของงานวิจัยที่ผ่านมา. 11

2 ตารางสรุปผลการทดลองระบบควบคุมเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วม....................................65

3 ตารางสรุปผลการทดลองระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง 80

4 สรุปเงื่อนไขข้อจำกัดในการทำงานเปรียบเทียบระหว่างเชิงทฤษฎีและเชิงปฏิบัติ 118

ก.1 พิกัดและค่าพารามิเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางที่ใช้ในงานวิจัย....127

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญภาพ

รูปที่ หน้า

1.1 โครงสร้างทั่วไปของระบบควบคุมเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง 1
1.2 หลักการประมาณโดยใช้ตัวสังเกต MRAS 2
1.3 การประมาณด้วยวิธี MRAS โดยใช้สมการสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ $(\alpha-\beta)$ เป็นแบบจำลองอ้างอิงและสเตเตอร์ฟลักซ์เป็นสัญญาณอ้างอิง 3
1.4 การประมาณด้วยวิธี MRAS โดยใช้สมการสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์$(\alpha-\beta)$ เป็นแบบจำลองอ้างอิงและโรเตอร์ฟลักซ์เป็นสัญญาณอ้างอิง 4
1.5 ระบบควบคุมด้วยตัวสังเกต MRAS โดยใช้กระแสสเตเตอร์เป็นสัญญาณอ้างอิง 5
1.6 ระบบควบคุมด้วยตัวสังเกต MRAS โดยใช้กระแสโรเตอร์เป็นสัญญาณอ้างอิง 6
1.7 โครงสร้างของระบบประมาณตำแหน่งโดยใช้การประมาณกำลังช่องอากาศ 6
1.8 ระบบควบคุมด้วยตัวสังเกต MRAS โดยใช้ความสัมพันธ์ของแรงบิดและกระแสโรเตอร์ 7
1.9 ระบบประมาณความเร็วด้วยตัวสังเกตเต็มอันดับแบบปรับตัวบนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ ฟลักซ์... 9
1.10 ระบบประมาณความเร็วด้วยตัวสังเกตลดอันดับแบบปรับตัวบนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์ ... 10
2.1 โครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง (ขดลวดพัน) 14
2.2 แกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์สำหรับการควบคุมแบบเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วม 15
2.3 โครงสร้างการควบคุมเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วม 18
2.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันคำสั่งทางด้านโรเตอร์และความเร็วของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง 19
2.5 แรงดันตกคร่อมภายในสวิตช์กำลัง (V_{CE} และ V_D) 20
2.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลกระทบของสัญญาณประวิงเวลาและความเร็วของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง 21
2.7 ระบบควบคุมเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วมสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง 22
2.8 ผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมเวกเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางที่ 1050 rpm ที่สภาวะไร้โหลดและ $i_{rd}^{*}=3A$ 25
2.9 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางที่ 1050 rpm ที่สภาวะไร้โหลดและ $i_{rd}^{*}=3A$ 26

รูปที่ หน้า

2.10 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางที่ความซิงโครนัส สภาวะไร้โหลดและ $i_{rd}^{*}=3A$ 27

2.11 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางที่ 1800 rpm ที่สภาวะไร้โหลดและ $i_{rd}^{*}=3A$ 28

2.12 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางที่ 1050 rpm สภาวะไร้โหลดและ $i_{rd}^{*}=0A$ 29

2.13 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางที่ 1800 rpm สภาวะไร้โหลดและ $i_{rd}^{*}=0A$ 30

2.14 ผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมเวกเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางที่ 1050 rpm สภาวะโหลดพิกัดในย่านมอเตอร์ และ $i_{rd}^{*}=3A$ 31

2.15 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางที่ 1050 rpm สภาวะโหลดพิกัดในย่านมอเตอร์ และ $i_{rd}^{*}=3A$ 32

2.16 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางที่ 1500 rpm สภาวะโหลดพิกัดในย่านมอเตอร์และ $i_{rd}^{*}=3A$ 33

2.17 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางที่ 1800 rpm สภาวะโหลดพิกัดในย่านมอเตอร์และ $i_{rd}^{*}=3A$ 34

2.18 ผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมเวกเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางที่ 1050 rpm สภาวะโหลดพิกัดในย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและ $i_{rd}^{*}=3A$ 35

2.19 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางที่ 1050 rpm สภาวะโหลดพิกัดในย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและ $i_{rd}^{*}=3A$ 36

2.20 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางที่ 1500 rpm สภาวะโหลดพิกัดในย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและ $i_{rd}^{*}=3A$ 37

2.21 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางที่ 1800 rpm สภาวะโหลดพิกัดในย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและ $i_{rd}^{*}=3A$ 38

2.22 ผลการจำลองของระบบควบคุมเวกเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางที่ในกรณีเปลี่ยนแปลงความเร็วแบบขั้นบันไดจาก 1200 $\rightarrow$ 1350 $\rightarrow$ 1650 $\rightarrow$ 1800 rpm ในสภาวะไร้โหลดและ $i_{rd}^{*}=3A$ 39

รูปที่ หน้า

2.23 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง ในกรณีเปลี่ยนแปลงความเร็วแบบขั้นบันไดจาก 1200 $\rightarrow$ 1350 $\rightarrow$ 1650 $\rightarrow$ 1800 rpm ในสภาวะไร้โหลดและ $i_{rd}^{*}=3A$ 40

2.24 ผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมเวกเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางในกรณีเปลี่ยนแปลงความเร็วแบบขั้นบันไดจาก 1200 $\rightarrow$ 1350 $\rightarrow$ 1650 $\rightarrow$ 1800rpm ในสภาวะโหลดพิกัดในย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและ $i_{rd}^{*}=3A$ 41

2.25 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางที่ในกรณีเปลี่ยนแปลงความเร็วแบบขั้นบันไดจาก 1200 $\rightarrow$ 1350 $\rightarrow$ 1650 $\rightarrow$ 1800 rpm ในสภาวะโหลดพิกัดในย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและ $i_{rd}^{*}=3A$ 42

2.26 ผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมเวกเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางที่ในกรณีเปลี่ยนแปลงความเร็วแบบขั้นบันไดจาก 1200 $\rightarrow$ 1350 $\rightarrow$ 1650 $\rightarrow$ 1800 rpm ในสภาวะโหลดพิกัดในย่านมอเตอร์และ $i_{rd}^{*}=3A$ 43

2.27 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางที่ในกรณีเปลี่ยนแปลงความเร็วแบบขั้นบันไดจาก 1200 $\rightarrow$ 1350 $\rightarrow$ 1650 $\rightarrow$ 1800 rpm ในสภาวะโหลดพิกัดในย่านมอเตอร์และ $i_{rd}^{*}=3A$ 44

2.28 ผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมเวกเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางที่ความเร็ว 1200 rpm ในกรณีเปลี่ยนแปลงกระแสกระตุ้นฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์แบบขั้นบันได ($i_{rd}^{*}=0\rightarrow 3A$) และสภาวะไร้โหลด 45

2.29 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางที่ความเร็ว 1200 rpm ในกรณีเปลี่ยนแปลงกระแสกระตุ้นฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์แบบขั้นบันได ($i_{rd}^{*}=0\rightarrow 3A$) และสภาวะไร้โหลด 46

2.30 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางที่ความเร็ว 1800 rpm ในกรณีเปลี่ยนแปลงกระแสกระตุ้นฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์แบบขั้นบันได ($i_{rd}^{*}=0\rightarrow 3A$) และสภาวะไร้โหลด 47

2.31 ผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมเวกเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางที่ความเร็ว 1200 rpm ในกรณีเปลี่ยนแปลงกระแสกระตุ้นฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์แบบขั้นบันได ($i_{rd}^{*}=0\rightarrow 3A$) และสภาวะโหลดพิกัดย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 48

รูปที่ หน้า

2.32 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางที่ความเร็ว 1200 rpm ในกรณีเปลี่ยนแปลงกระแสกระตุ้นฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์แบบขั้นบันได ($i_{rd}^* = 0 \rightarrow 3A$) และสภาวะโหลดพิกัดย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า....49

2.33 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางที่ความเร็ว 1500 rpm ในกรณีเปลี่ยนแปลงกระแสกระตุ้นฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์แบบขั้นบันได ($i_{rd}^* = 0 \rightarrow 3A$) และสภาวะโหลดพิกัดย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า....50

2.34 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางที่ความเร็ว 1800 rpm ในกรณีเปลี่ยนแปลงกระแสกระตุ้นฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์แบบขั้นบันไดจาก ($i_{rd}^* = 0 \rightarrow 3A$) และสภาวะโหลดพิกัดย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า....51

2.35 ผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมเวกเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางที่ความเร็ว 1200 rpm ในกรณีเปลี่ยนแปลงกระแสกระตุ้นฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์แบบขั้นบันได ($i_{rd}^* = 0 \rightarrow 3A$) และสภาวะโหลดพิกัดย่านมอเตอร์....52

2.36 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางที่ความเร็ว 1200 rpm ในกรณีเปลี่ยนแปลงกระแสกระตุ้นฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์แบบขั้นบันได ($i_{rd}^* = 0 \rightarrow 3A$) และสภาวะโหลดพิกัดย่านมอเตอร์....53

2.37 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางที่ความเร็ว 1500 rpm ในกรณีเปลี่ยนแปลงกระแสกระตุ้นฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์แบบขั้นบันได ($i_{rd}^* = 0 \rightarrow 3A$) และสภาวะโหลดพิกัดย่านมอเตอร์....54

2.38 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางที่ความเร็ว 1800 rpm ในกรณีเปลี่ยนแปลงกระแสกระตุ้นฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์แบบขั้นบันได ($i_{rd}^* = 0 \rightarrow 3A$) และสภาวะโหลดพิกัดย่านมอเตอร์....55

2.39 ผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมเวกเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางในกรณีเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้นบันไดไปยังสภาวะโหลดพิกัดย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ความเร็ว 1500 rpm และ $i_{rd}^* = 3A$....56

2.40 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางในกรณีเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้นบันไดไปยังสภาวะโหลดพิกัดย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ความเร็ว 1500 rpm และ $i_{rd}^* = 3A$....57

รูปที่ หน้า

2.41 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง ในกรณีเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้นบันไดไปยังสภาวะโหลดพิกัดย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที ความเร็ว 1200 rpm และ $i_{rd}^{*} = 3A$ 58

2.42 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง ในกรณีเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้นบันไดไปยังสภาวะโหลดพิกัดย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ ความเร็ว 1800 rpm และ $i_{rd}^{*} = 3A$ 59

2.43 ผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมเวกเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางในกรณีเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้นบันไดไปยังสภาวะโหลดพิกัดย่านมอเตอร์ที่ ความเร็ว 1500 rpm และ $i_{rd}^{*} = 3A$ 60

2.44 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง ในกรณีเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้นบันไดไปยังสภาวะโหลดพิกัดย่านมอเตอร์ที่ความเร็ว 1500 rpm และ $i_{rd}^{*} = 3A$ 61

2.45 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง ในกรณีเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้นบันไดไปยังสภาวะโหลดพิกัดย่านมอเตอร์ที่ความเร็ว 1200 rpm และ $i_{rd}^{*} = 3A$ 62

2.46 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง ในกรณีเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้นบันไดไปยังสภาวะโหลดพิกัดย่านมอเตอร์ที่ความเร็ว 1800 rpm และ $i_{rd}^{*} = 3A$ 63

2.47 ลักษณะสมบัติของแรงบิดและความเร็วของการควบคุมแบบเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วมที่ได้จากผลการทดลองการทำงานในย่านความเร็วต่างๆ ทั้งความเร็วซับซิงโครนัส ความเร็วซิงโครนัสและความเร็วซุปเปอร์ซิงโครนัส 64

3.1 ระบบประมาณตำแหน่งด้วยวิธีค่าผิดพลาดของแบบจำลองโรเตอร์ที่นำเสนอ 67

3.2 กลไกในการประมาณตำแหน่งโรเตอร์จากค่าผิดพลาดของกระแสโรเตอร์ 68

3.3 โครงสร้างระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง..... 69

3.4 ผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งที่ 1200 rpm ที่สภาวะไร้โหลดและ $i_{rd}^{*} = 0A$ 71

3.5 ผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งที่ 1200 rpm ที่สภาวะโหลดพิกัดย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและ $i_{rd}^{*} = 0A$ 72

3.6 ผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งที่ 1200 rpm ที่สภาวะโหลดพิกัดย่านมอเตอร์และ $i_{rd}^{*} = 0A$ 73

รูปที่ หน้า

3.7 ผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งในกรณีเปลี่ยนแปลงความเร็วแบบขั้นบันได 1200 $\rightarrow$ 1350 $\rightarrow$ 1650 $\rightarrow$ 1800 rpm ที่สภาวะโหลดพิกัดในย่านมอเตอร์และ $i_{rd}^{*} = 3A$ 74

3.8 ผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งในกรณีเปลี่ยนแปลงความเร็วแบบขั้นบันไดจาก 1200 $\rightarrow$ 1350 $\rightarrow$ 1650 $\rightarrow$ 1800 rpm ที่สภาวะโหลดพิกัดในย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและ $i_{rd}^{*} = 3A$ 75

3.9 ผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งในกรณีเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้นบันไดไปยังสภาวะโหลดพิกัดย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าความเร็ว 1200 rpm และ $i_{rd}^{*} = 3A$ 76

3.10 ผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งในกรณีเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้นบันไดไปยังสภาวะโหลดพิกัดย่านมอเตอร์ที่ความเร็ว 1200 rpm และ $i_{rd}^{*} = 3A$ 77

3.11 ภาพรวมของระบบควบคุมความเร็วด้วยตัวควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง 78

3.12 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งที่ 1050 rpm ที่สภาวะไร้โหลดและ $i_{rd}^{*} = 3A$ 81

3.13 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งที่ 1800 rpm ที่สภาวะไร้โหลดและ $i_{rd}^{*} = 3A$ 82

3.14 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งที่ 1200 rpm ที่สภาวะไร้โหลดและ $i_{rd}^{*} = 0A$ 83

3.15 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งที่ 1800 rpm ที่สภาวะไร้โหลดและ $i_{rd}^{*} = 0A$ 84

3.16 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งที่ 1200 rpm ที่สภาวะโหลดพิกัดย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและ $i_{rd}^{*} = 3A$ 85

3.17 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งที่ 1800 rpm ที่สภาวะโหลดพิกัดย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและ $i_{rd}^{*} = 3A$ 86

3.18 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งที่ 1200 rpm ที่สภาวะโหลดพิกัดย่านมอเตอร์และ $i_{rd}^{*} = 0A$ 87

3.19 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งที่ 1800 rpm ที่สภาวะโหลดพิกัดย่านมอเตอร์และ $i_{rd}^{*} = 0A$ 88

รูปที่ หน้า

3.20 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งในกรณีแปลี่ยนแปลง ความเร็วแบบขั้นบันได 1200 $\rightarrow$ 1350 $\rightarrow$ 1650 $\rightarrow$ 1800 rpm ที่สภาวะไร้โหลดและ $i_{rd}^{*} = 0A$ 89

3.21 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งในกรณีเปลี่ยนแปลง ความเร็วแบบขั้นบันได 1200 $\rightarrow$ 1350 $\rightarrow$ 1650 $\rightarrow$ 1800 rpm ที่สภาวะไร้โหลดและ $i_{rd}^{*} = 3A$ 90

3.22 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งในกรณีเปลี่ยนแปลง ความเร็วแบบขั้นบันไดจาก 1200 $\rightarrow$ 1350 $\rightarrow$ 1650 $\rightarrow$ 1800 rpm ที่สภาวะโหลดพิกัดในย่าน เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและ $i_{rd}^{*} = 3A$ 91

3.23 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งในกรณีเปลี่ยนแปลง ความเร็วแบบขั้นบันไดจาก 1200 $\rightarrow$ 1350 $\rightarrow$ 1650 $\rightarrow$ 1800 rpm ที่สภาวะโหลดพิกัดในย่าน มอเตอร์และ $i_{rd}^{*} = 3A$ 92

3.24 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งในกรณีเปลี่ยนแปลง กระแสกระตุ้นฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์แบบขั้นบันได ($i_{rd}^{*} = 0 \rightarrow 3A$) ที่ความเร็ว 1200 rpm ใน สภาวะไร้โหลด 93

3.25 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งในกรณีเปลี่ยนแปลง กระแสกระตุ้นฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์แบบขั้นบันได ($i_{rd}^{*} = 0 \rightarrow 3A$) ที่ความเร็ว 1800 rpm ใน สภาวะไร้โหลด 94

3.26 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งในกรณีเปลี่ยนแปลง กระแสกระตุ้นฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์แบบขั้นบันได ($i_{rd}^{*} = 2 \rightarrow 5A$) ที่ความเร็ว 1200 rpm และสภาวะโหลดพิกัดในย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 95

3.27 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งในกรณีเปลี่ยนแปลง กระแสกระตุ้นฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์แบบขั้นบันได ($i_{rd}^{*} = 2 \rightarrow 5A$) ที่ความเร็ว 1800 rpm และสภาวะโหลดพิกัดในย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 96

3.28 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งในกรณีเปลี่ยนแปลง กระแสกระตุ้นฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์แบบขั้นบันได ($i_{rd}^{*} = 2 \rightarrow 5A$) ที่ความเร็ว 1200 rpm และสภาวะโหลดพิกัดในย่านมอเตอร์ 97

รูปที่ หน้า

3.29 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งในกรณีเปลี่ยนแปลงกระแสกระตุ้นฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์แบบขั้นบันได ($i_{rd}^{*} = 2 \rightarrow 5A$) ที่ความเร็ว 1800 rpm และสภาวะโหลดพิกัดในย่านมอเตอร์ 98

3.30 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งในกรณีเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้นบันไดไปยังสภาวะโหลดพิกัดย่านมอเตอร์ที่ความเร็ว 1050 rpm และ $i_{rd}^{*} = 3A$ 99

3.31 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งในกรณีเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้นบันไดไปยังสภาวะโหลดพิกัดย่านมอเตอร์ที่ความเร็ว 1800 rpm และ $i_{rd}^{*} = 3A$ 100

3.32 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งในกรณีเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้นบันไดไปยังสภาวะโหลดพิกัดย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ความเร็ว 1050 rpm และ $i_{rd}^{*} = 3A$ 101

3.33 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งในกรณีเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้นบันไดไปยังสภาวะโหลดพิกัดย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ความเร็ว 1800 rpm และ $i_{rd}^{*} = 3A$ 102

4.1 บล็อกไดอะแกรมของระบบประมาณตำแหน่งโรเตอร์........ 105

4.2 ตำแหน่งของขั้วและศูนย์ และทางเดินรากของระบบประมาณตำแหน่งโรเตอร์ขณะที่ อัตราส่วนของ K_I / K_P มากกว่า R_r / L_r 106

4.3 ตำแหน่งของขั้วและศูนย์ และทางเดินรากของระบบประมาณตำแหน่งโรเตอร์ขณะที่ $K_I = 2.891, K_P = 0.25$ และ $\left|\hat{i}_s'\right| = 5\,A$ 106

4.4 ผลการตอบสนองทางเวลาของระบบประมาณตำแหน่งต่อการเปลี่ยนแปลงจากฟังก์ชันขั้นบันไดหนึ่งหน่วย ขณะที่ $K_I = 2.891, K_P = 0.25$ และ $\left|\hat{i}_s'\right| = 5\,A$ 107

4.5 ผลการตอบสนองทางเวลาของระบบประมาณตำแหน่งต่อการเปลี่ยนแปลงจากฟังก์ชันขั้นบันไดหนึ่งหน่วย ขณะที่ $K_I = 25, K_P = 0.25$ และ $\left|\hat{i}_s'\right| = 5\,A$ 107

4.6 ตำแหน่งของขั้วและศูนย์ และทางเดินรากของระบบประมาณตำแหน่งโรเตอร์ที่นำเสนอ (อัตราส่วนของ K_I / K_P มีขนาดเท่ากับ R_r / L_r)........ 108

4.7 ผลตอบสนองทางความถี่ของฟังก์ชันโอนย้ายวงรอบเปิดของระบบประมาณตำแหน่งโรเตอร์ 109

4.8 ผลการตอบสนองทางเวลาของระบบประมาณตำแหน่งที่นำเสนอต่อการเปลี่ยนแปลงจากฟังก์ชันขั้นบันไดหนึ่งหน่วย........ 110

รูปที่ หน้า

4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสสเตเตอร์, ค่าอัตรายขยาย K_P และ K_I ที่เงื่อนไขแบนด์วิดธ์ของระบบประมาณ $\omega_c = 50 rad/s$ 110
4.10 ผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งในกรณีเปลี่ยนแปลงความเร็วแบบขั้นบันได 1200 $\rightarrow$ 1500 $\rightarrow$ 1800 rpm ที่สภาวะโหลดพิกัดในย่านมอเตอร์และ $i_{rd}^* = 3A$ 113
4.11 แสดงผลการจำลองในสภาวะที่พิจารณาค่าแรงดันผิดพลาดเข้าไประบบประมาณค่าตำแหน่งโรเตอร์ และกำหนดให้แบนด์วิธด์ $\omega_c = 50 rad/s$ 114
4.12 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งที่ 1500 rpm ที่สภาวะไร้โหลดและ $i_{rd}^* = 3A$ 116
4.13 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งที่ 1500 rpm ที่สภาวะไร้โหลดและ $i_{rd}^* = 0A$ 117
4.14 ลักษณะสมบัติของแรงบิดและความเร็วของระบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งที่ได้จากผลการทดลองการทำงานในย่านต่างๆ 120
ก.1 โครงสร้างฮาร์ดแวร์ของระบบที่ใช้ในการทดลอง 127
ก.2 ไดอะแกรมเวลาของซอฟต์แวร์โมดูล 129

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รายการสัญลักษณ์

กระแส

i_o : กระแสกระตุ้นสเตเตอร์ฟลักซ์

$\vec{i}_r'$: กระแสโรเตอร์บนแกนอ้างอิงโรเตอร์

i_{ra} : กระแสโรเตอร์เฟส *a*

i_{rd}, i_{rq} : กระแสโรเตอร์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์ องค์ประกอบแกน *d* และ *q*

i_{rd}^*, i_{rq}^* : กระแสโรเตอร์คำสั่งบนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์ องค์ประกอบแกน *d* และ *q*

i_{cd}, i_{cq} : กระแสชดเชยจากวงรอบควบคุมกระแสโรเตอร์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์ องค์ประกอบแกน *d* และ *q*

$\vec{i}_s$: กระแสสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์

i_{ds}, i_{qs} : กระแสสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงโรเตอร์ องค์ประกอบแกน *d* และ *q*

i_{sd}, i_{sq} : กระแสสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์ องค์ประกอบแกน *d* และ *q*

i_{su} : กระแสสเตเตอร์เฟส *u*

$\left|\hat{i}_s'\right|$: ขนาดของกระแสสเตเตอร์ประมาณ

แรงดัน

$\vec{v}_s$: แรงดันสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์

v_{us}, v_{vs}, v_{ws} : แรงดันของขดลวดสเตเตอร์เฟส *u, v* และ *w*

v_{sd}, v_{sq} : แรงดันสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์ องค์ประกอบแกน *d* และ *q*

$\vec{v}_r'$: แรงดันโรเตอร์บนแกนอ้างอิงโรเตอร์

v_{ur}, v_{vr}, v_{wr} : แรงดันของขดลวดโรเตอร์เตอร์เฟส *u, v* และ *w*

v_{rd}, v_{rq} : แรงดันสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์ องค์ประกอบแกน *d* และ *q*

v_{rd}^*, v_{rq}^* : แรงดันโรเตอร์คำสั่งบนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์ องค์ประกอบแกน *d* และ *q*

U_{dn} : ขนาดค่าเฉลี่ยของแรงดันที่ขาดหายไปจากการสวิตช์

U_{dc} : แรงดันไฟตรง

V_{comp} : แรงดันชดเชยผลกระทบเนื่องจากแรงดันผิดพลาด

V_{CE} : แรงดันคร่อมระหว่างขั้วคอลเล็กเตอร์และขั้วอิมิตเตอร์ของสวิตช์กำลัง

V_D : แรงดันคร่อมไดโอดของสวิตช์กำลัง

ฟลักซ์ ตำแหน่ง และความเร็ว

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

$\lambda_{su}, \hat{\lambda}_{su}$: สเตเตอร์ฟลักซ์จริงและสเตเตอร์ฟลักซ์ประมาณเฟส *u*

ω_m : ความเร็วจริงเชิงมุมทางกลของโรเตอร์

$\hat{\omega}_m$: ความเร็วประมาณเชิงมุมทางกลของโรเตอร์

ω_r : ความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้าของโรเตอร์

$\omega_s = \omega_o - \omega_r$: ความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้าของสลิป

ω_o : ความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้าของสเตเตอร์ฟลักซ์

ω_c : ความเร็วเชิงมุมของวงรอบปิดควบคุม

$\hat{\theta}_m$: ตำแหน่งโรเตอร์ประมาณทางกล

θ_m : ตำแหน่งโรเตอร์จริงทางกล

θ_r : ตำแหน่งโรเตอร์จริงทางไฟฟ้า

θ_o : ตำแหน่งมุมสเตเตอร์ฟลักซ์ทางไฟฟ้า

พารามิเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางอ้างอิงทางด้านสเตเตอร์

L_r : ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดโรเตอร์

L_s : ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดสเตเตอร์

M : ค่าความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดลวดสเตเตอร์และขดลวดโรเตอร์

R_r : ความต้านทานของขดลวดโรเตอร์

R_s : ความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์

p : จำนวนคู่ขั้วของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

T_m : แรงบิดของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

$\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r}$: สัมประสิทธิ์การรั่วไหลรวม

ค่าความผิดพลาด

e_s : ค่าผิดพลาดของกระแสสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์

e_r : ค่าผิดพลาดของกระแสโรเตอร์บนแกนอ้างอิงโรเตอร์

e_θ : ค่าผิดพลาดของตำแหน่งประมาณเชิงกล

e_ω : ค่าผิดพลาดของความเร็วประมาณเชิงกล

$\hat{e}_{dr}, \hat{e}_{qr}$: ค่าผิดพลาดของกระแสโรเตอร์บนแกนอ้างอิงโรเตอร์ องค์ประกอบแกน d และ q

ε : ค่าความผิดพลาด

อัตราขยาย

K_P : อัตราขยายการปรับตัวแบบแปรตาม

K_I : อัตราขยายการปรับตัวแบบอินทิเกรต

แกนอ้างอิง

ตัวห้อย u, v, w หมายถึงองค์ประกอบในแกน u, v, w บนแกนอ้างอิงสามเฟส

ตัวห้อย α, β หมายถึงองค์ประกอบในแกน α, β บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์

ตัวห้อย d, q หมายถึงองค์ประกอบในแกน d, q บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์

ตัวห้อย dr, qr หมายถึงองค์ประกอบในแกน d, q บนแกนอ้างอิงโรเตอร์ของกระแสโรเตอร์

ตัวห้อย ds, qs หมายถึงองค์ประกอบในแกน d, q บนแกนอ้างอิงโรเตอร์ของกระแสสเตเตอร์

“ $\vec{}$ ” หมายถึง สเปซเวกเตอร์

“ $\hat{}$ ” หมายถึง ค่าประมาณ

“ * ” หมายถึง ค่าคำสั่ง

“ ′ ” หมายถึง กรอบอ้างอิงโรเตอร์

อื่นๆ

f_{sw} : ความถี่การสวิตช์

f_{syn} : ความถี่ของความเร็วซิงโครนัส

t_d : เวลาในการประวิง

t_{off} : เวลาที่สวิตช์ต้องใช้ในการหยุดนำกระแส (Turn-off time, s)

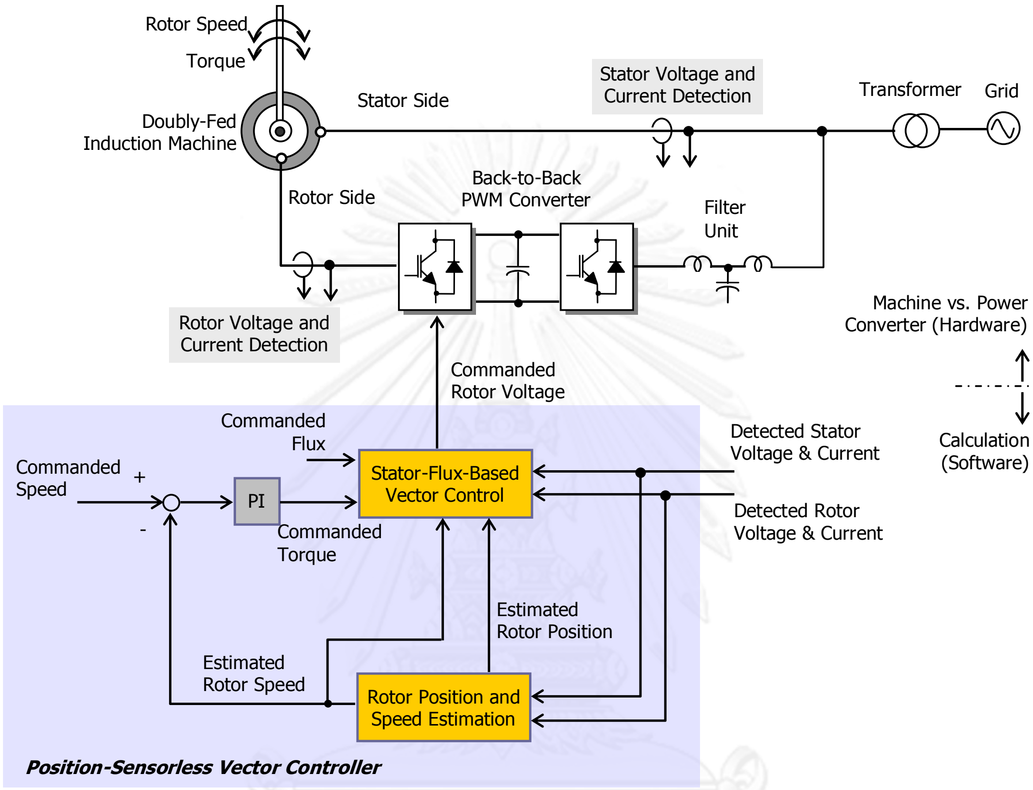
τ_c : ค่าคงตัวเวลาของวงจรรอบเปิดควบคุม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา



รูปที่ 1.1 โครงสร้างทั่วไปของระบบควบคุมเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง

ในปัจจุบันระบบขับเคลื่อนแบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอกเป็นฟังก์ชันที่แพร่หลายอย่างมากตามความต้องการของผู้ใช้ อย่างไรก็ตามหลักการในระบบขับเคลื่อนแบบเดิมยังมีวิธีการที่แตกต่างหากนำมาประยุกต์ใช้กับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง ซึ่งปัจจุบันในอุตสาหกรรมเกี่ยวข้องกับพลังงานทางเลือกเช่น พลังงานลม พลังงานคลื่น มีการนำมาใช้เป็นอย่างมาก หากเปรียบเทียบกับการใช้เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอกแล้ว เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางมีข้อได้เปรียบ เนื่องจากควบคุมกระแสและแรงดันทางด้านโรเตอร์ส่งผลให้สามารถใช้วงจรแปลงผันกำลังที่มีพิกัดกำลังเล็กลงได้ ทำให้ลดค่าใช้จ่ายของระบบโดยรวมได้ [1] อย่างไรก็ดีการควบคุมแบบเวกเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำต้องการข้อมูลตำแหน่งโรเตอร์ ซึ่งตัวเซนเซอร์วัดตำแหน่งและวงจรส่วนเชื่อมต่อต้องทนทานต่อสัญญาณรบกวน (Noise Immunity) นอกจากนี้การซ่อมบำรุงส่วนตรวจวัดตำแหน่งภายหลังติดตั้งใช้งานแล้วยังเป็นอุปสรรคที่สำคัญในทางปฏิบัติ จากข้อมูลเท่าที่ผู้เขียนทราบระบบขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำหรับกังหันลมจะมีโหมดควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งที่

เป็นฟังก์ชันเสริมและจะทำงานเมื่อส่วนตรวจวัดตำแหน่งจากเซนเซอร์ทำงานผิดปกติ ทั้งนี้เพื่อให้ระบบขับเคลื่อนสามารถทำงานต่อเนื่องได้ (High Reliability) หรือเลือกใช้โหมดไร้เซนเซอร์เพื่อลดข้อจำกัดในการซ่อมบำรุง (Maintenance Free)

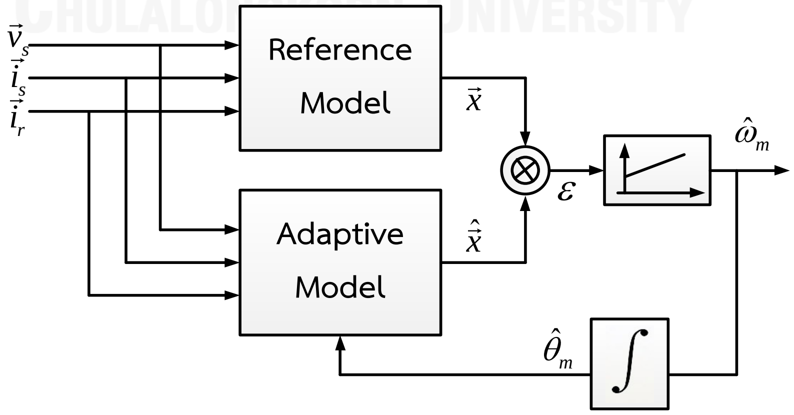
รูปที่ 1.1 แสดงโครงสร้างทั่วไปของระบบควบคุมความเร็วด้วยเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง ส่วนควบคุมมีองค์ประกอบหลักอยู่ 2 ส่วน คือ ส่วนควบคุมแบบเวกเตอร์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์ และส่วนประมาณค่าตำแหน่งและความเร็วโรเตอร์ ตำแหน่งโรเตอร์เป็นข้อมูลที่สำคัญสำหรับส่วนควบคุมแบบเวกเตอร์ที่ใช้ในการแปลงแกนอ้างอิงของสัญญาณต่างๆ สำหรับจุดเด่นของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางคือการมีข้อมูลของแรงดันและกระแสครบถ้วนจากการตรวจจับทั้งทางฝั่งโรเตอร์และสเตเตอร์ ด้วยเหตุนี้จึงมีการนำเสนอวิธีประมาณตำแหน่งและความเร็วโรเตอร์ที่หลากหลาย [2]-[12] ซึ่งขึ้นอยู่กับสัญญาณความผิดพลาดและแบบจำลองที่เลือกใช้ โดยหลักการแล้วการเลือกใช้ข้อมูลและแบบจำลองที่เหมาะสมจะทำให้สามารถสร้างระบบประมาณตำแหน่งที่ง่ายไม่ซับซ้อนซึ่งเป็นวัตถุประสงค์หลักของโครงงานวิจัยนี้

1.2 วิธีการประมาณตำแหน่งและความเร็วโรเตอร์จากงานวิจัยในอดีต

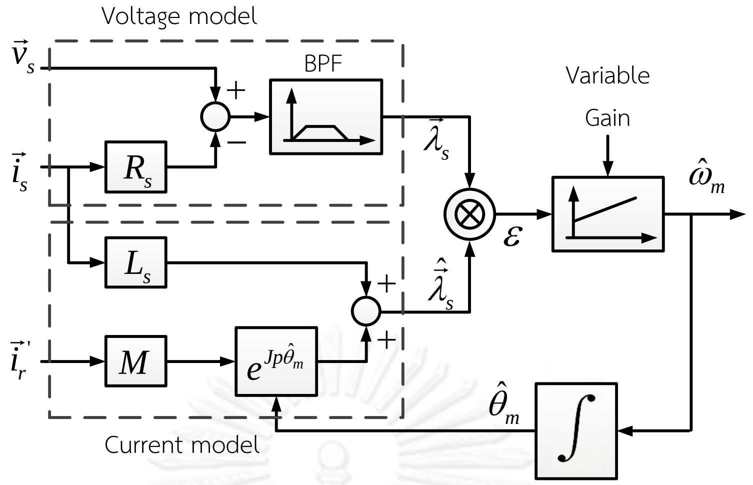
วิธีการประมาณตำแหน่งและความเร็วโรเตอร์จากงานวิจัยในอดีตสามารถแบ่งออกเป็น 2 แนวทางหลักๆ คือ 1) ระบบปรับตัวที่ใช้แบบจำลองอ้างอิง (Model Reference Adaptive System; MRAS) และ 2) ตัวสังเกตแบบปรับตัว (Adaptive Observer)

1.2.1 การประมาณตำแหน่งและความเร็วโรเตอร์ด้วยวิธี MRAS

รูปที่ 1.2 แสดงหลักการทำงานของวิธี MRAS (Model Reference Adaptive System) โดยระบบประมาณตำแหน่งและความเร็วโรเตอร์จะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งแบ่งเป็นสองส่วนหลักๆ คือ แบบจำลองอ้างอิง (Reference Model) เป็นแบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับตำแหน่งและ/หรือความเร็วโรเตอร์และทำหน้าที่คำนวณค่าสัญญาณอ้างอิง ($\vec{x}$) และส่วนที่สองคือ แบบจำลองปรับตัว (Adaptive Model) ที่ขึ้นอยู่กับตำแหน่งและ/หรือความเร็วโรเตอร์ทำหน้าที่คำนวณสัญญาณ



รูปที่ 1.2 หลักการประมาณโดยใช้ตัวสังเกต MRAS



รูปที่ 1.3 การประมาณด้วยวิธี MRAS โดยใช้สมการสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ $(\alpha-\beta)$ เป็นแบบจำลองอ้างอิงและสเตเตอร์ฟลักซ์เป็นสัญญาณอ้างอิง

ประมาณ ($\hat{x}$) ซึ่งค่าความแตกต่างระหว่างสัญญาณอ้างอิงและสัญญาณประมาณ (ε) จะถูกนำไปคำนวณค่าความเร็วประมาณและตำแหน่งประมาณตามลำดับ ข้อมูลของตำแหน่งโรเตอร์ประมาณจะถูกป้อนกลับสู่แบบจำลองปรับตัว ถ้าตำแหน่งและความเร็วโรเตอร์ประมาณมีค่าถูกต้องเท่ากับตำแหน่งและความเร็วโรเตอร์จริงแล้ว ค่าผิดพลาด (ε) จะลู่เข้าสู่ศูนย์ จากหลักการที่กล่าวมาในเบื้องต้นสำหรับวิธี MRAS ของงานวิจัยต่างๆที่นำเสนอในอดีตจะแตกต่างไปตามแบบจำลองและ/หรือค่าสัญญาณอ้างอิงที่เลือกใช้ โดยมีรายละเอียดของแต่ละวิธีดังนี้

1.2.1.1 การประมาณด้วยวิธี MRAS โดยใช้สมการสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ $(\alpha-\beta)$ เป็นแบบจำลองอ้างอิงและสเตเตอร์ฟลักซ์เป็นสัญญาณอ้างอิง

งานวิจัย [2]-[3] นำเสนอระบบประมาณตำแหน่งดังแสดงในรูปที่ 1.3 โดยมีสมการสเตเตอร์ (1.1) เป็นแบบจำลองอ้างอิงและสมการสเตเตอร์ฟลักซ์ (1.2) เป็นแบบจำลองปรับตัว

แบบจำลองอ้างอิง:

$$\vec{\lambda}_s = \int \left(\vec{v}_s - R_s \vec{i}_s \right) dt \tag{1.1}$$

แบบจำลองปรับตัว:

$$\hat{\vec{\lambda}}_s = L_s \vec{i}_s + M \left(e^{Jp\hat{\theta}_m} \vec{i}_r{}' \right) \tag{1.2}$$

ในทางปฏิบัติมีการปรับเปลี่ยนแบบจำลองอ้างอิงในสมการ (1.1) โดยจะใช้วงจรกรองผ่านแถบ (Band-Pass Filter; BPF) แทนตัวอินทิเกรต เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาทางปฏิบัติที่เกิดจากการเลื่อน (Drift) ของสัญญาณดีซีออฟเซต ผลจากการใช้วงจรกรองผ่านแถบทำให้ผลตอบสนองทางพลวัตคลาดเคลื่อนไปจากผลตอบสนองจริงของแบบจำลองได้ สำหรับสัญญาณผิดพลาดที่ใช้ในการคำนวณความเร็วสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\varepsilon = \left(\vec{\lambda}_s \otimes \hat{\vec{\lambda}}_s\right) \bullet \vec{z} = \left(\vec{\lambda}_s - \hat{\vec{\lambda}}_s\right)^T J \hat{\vec{\lambda}}_s \tag{1.3}$$

จากสมการ (1.2) จะเห็นได้ว่าค่าผิดพลาดของตำแหน่งโรเตอร์จะสะท้อนไปยังค่าผิดพลาดสเตเตอร์ฟลักซ์ผ่านกระแสโรเตอร์ ดังนั้นในการทำงานบางลักษณะที่กระแสโรเตอร์เท่ากับศูนย์ ($\vec{i}_r' = 0$) (เช่นในกรณีที่เชื่อมต่อกับกริดและกระแสโรเตอร์มีค่าน้อยๆ) ระบบจะไม่สามารถประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์ได้

1.2.1.2 การประมาณด้วยวิธี MRAS โดยใช้สมการสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ $(\alpha - \beta)$ เป็นแบบจำลองอ้างอิงและโรเตอร์ฟลักซ์เป็นสัญญาณอ้างอิง

งานวิจัย [3] นำเสนอระบบประมาณตำแหน่งดังแสดงในรูปที่ 1.4 โดยอาศัยการคำนวณโรเตอร์ฟลักซ์ด้วยสมการสเตเตอร์ฟลักซ์ใน (1.1) เพื่อเป็นแบบจำลองอ้างอิงได้ดังสมการที่ (1.4) และใช้สมการโรเตอร์ฟลักซ์พื้นฐานที่แปลงมาอยู่บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์เป็นแบบจำลองปรับตัว (1.5)

แบบจำลองอ้างอิง:

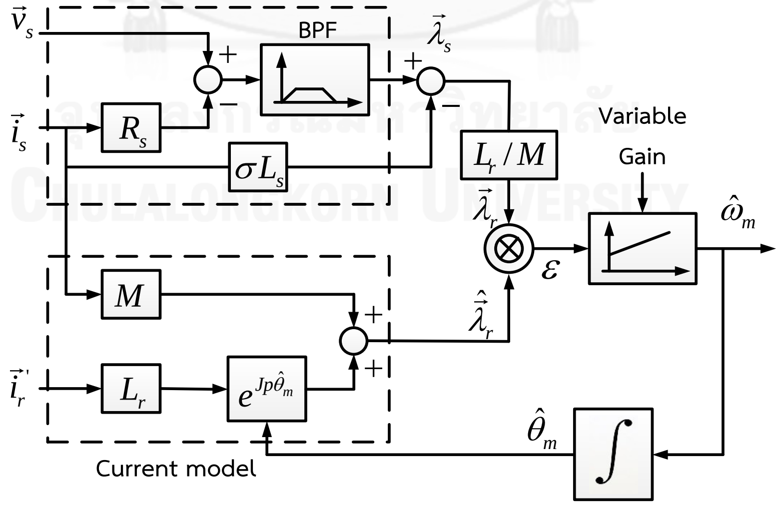
$$\vec{\lambda}_r = \frac{L_r}{M}\left[\vec{\lambda}_s - \sigma L_s \vec{i}_s\right] \tag{1.4}$$

แบบจำลองปรับตัว:

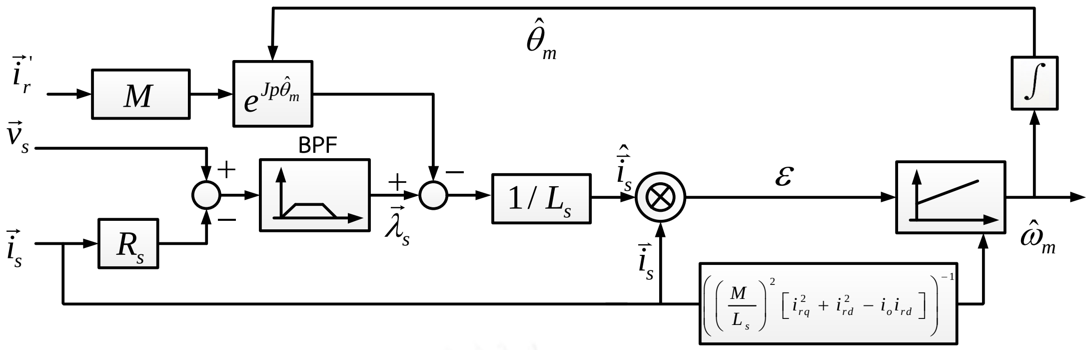
$$\hat{\vec{\lambda}}_r = L_r\left(e^{Jp\hat{\theta}_m}\vec{i}_r\right) + M\vec{i}_s \tag{1.5}$$

ดังนั้นแบบจำลองอ้างอิงประกอบด้วยสมการ (1.1) และ (1.4) โดยแบบจำลองปรับตัวจะใช้สมการ (1.5) และสัญญาณผิดพลาดในการประมาณความเร็วโรเตอร์จะสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\varepsilon = \left(\vec{\lambda}_r \otimes \hat{\vec{\lambda}}_r\right) \bullet \vec{z} = \left(\vec{\lambda}_r - \hat{\vec{\lambda}}_r\right)^T J \hat{\vec{\lambda}}_r \tag{1.6}$$



รูปที่ 1.4 การประมาณด้วยวิธี MRAS โดยใช้สมการสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ $(\alpha - \beta)$ เป็นแบบจำลองอ้างอิงและโรเตอร์ฟลักซ์เป็นสัญญาณอ้างอิง



รูปที่ 1.5 ระบบควบคุมด้วยตัวสังเกต MRAS โดยใช้กระแสสเตเตอร์เป็นสัญญาณอ้างอิง

การประมาณด้วยวิธีนี้มีข้อจำกัดเช่นเดียวกันกับการประมาณด้วยสเตเตอร์ฟลักซ์ กล่าวคือระบบประมาณไม่สามารถประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์ได้ ในกรณีที่เชื่อมต่อกับกริดหรือกรณีที่กระแสโรเตอร์มีค่าน้อยๆ ($\vec{i}_r' \approx 0$) นอกจากนี้ยังมีข้อจำกัดของผลกระทบการเลื่อนเนื่องจากสัญญาณดีซีออฟเซต รวมถึงต้องใช้พารามิเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าสำหรับการคำนวณมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีประมาณอื่นๆ

1.2.1.3 การประมาณด้วยวิธี MRAS โดยใช้สมการสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ $(\alpha-\beta)$ เป็นแบบจำลองปรับตัวและกระแสสเตเตอร์เป็นสัญญาณอ้างอิง

งานวิจัย [3] นำเสนอระบบประมาณตำแหน่งดังแสดงในรูปที่ 1.5 โดยใช้กระแสสเตเตอร์จากการตรวจจับเป็นสัญญาณอ้างอิง ส่วนแบบจำลองปรับตัวจะประกอบด้วยสมการสเตเตอร์ (1.1) ที่ใช้คำนวณสเตเตอร์ฟลักซ์และการประมาณกระแสสเตเตอร์ด้วยสมการ (1.7)

แบบจำลองปรับตัว:

$$\hat{\vec{i}}_s = \frac{\vec{\lambda}_s}{L_s} - \frac{M}{L_s}\left(e^{Jp\hat{\theta}_m}\vec{i}_r'\right) \tag{1.7}$$

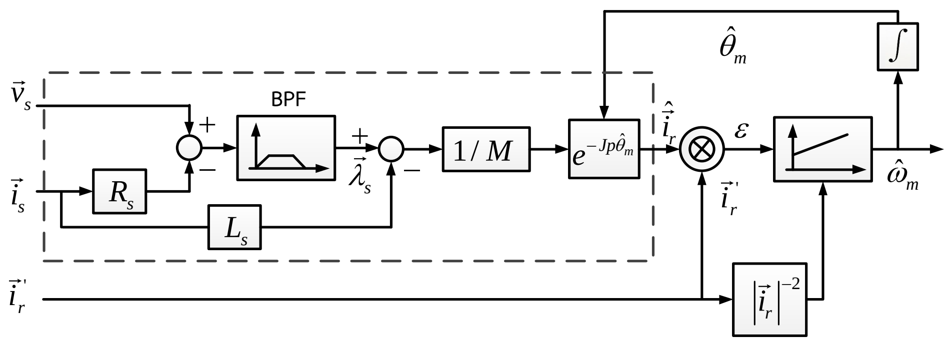
และสัญญาณผิดพลาดสำหรับการประมาณความเร็วโรเตอร์สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\varepsilon = \left(\vec{i}_s \otimes \hat{\vec{i}}_s\right) \bullet \vec{z} = \left(\vec{i}_s - \hat{\vec{i}}_s\right)^T J\hat{\vec{i}}_s \tag{1.8}$$

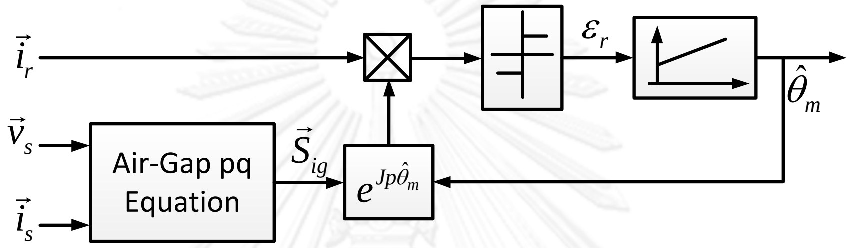
ข้อจำกัดในการประมาณด้วยวิธีนี้คือ ปัญหาการเลื่อนของสัญญาณดีซีออฟเซตจากการคำนวณสเตเตอร์ฟลักซ์ใน (1.7) และระบบประมาณไม่สามารถประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์ได้ในกรณีที่ทำงานแบบแยกโดด (Standalone) โดยไม่เชื่อมต่อกับกริดหรือขณะที่กระแสสเตเตอร์มีค่าน้อยๆ ($\hat{\vec{i}}_s \approx 0$) รวมทั้งกรณีที่ทำงานในสภาวะไร้โหลดหรือขณะที่กระแสโรเตอร์มีค่าน้อยๆ ($\vec{i}_r' \approx 0$)

1.2.1.4 การประมาณด้วยวิธี MRAS โดยใช้แบบจำลองสเตเตอร์และกระแสโรเตอร์

การประมาณด้วยค่าผิดพลาดจากกระแสโรเตอร์เป็นที่นิยมอย่างกว้างขวาง [4],[5],[6] โดยใช้สมการสเตเตอร์ฟลักซ์ (1.1) ประมาณกระแสโรเตอร์บนแกนอ้างอิงโรเตอร์ $(dr-qr)$ ดังนี้



รูปที่ 1.6 ระบบควบคุมด้วยตัวสังเกต MRAS โดยใช้กระแสโรเตอร์เป็นสัญญาณอ้างอิง



รูปที่ 1.7 โครงสร้างของระบบประมาณตำแหน่งโดยใช้การประมาณกำลังช่องอากาศ

แบบจำลองปรับตัว:

$$\hat{\vec{i}}_r' = \frac{\vec{\lambda}_s - L_s\vec{i}_s}{M} e^{-Jp\hat{\theta}_m} \tag{1.9}$$

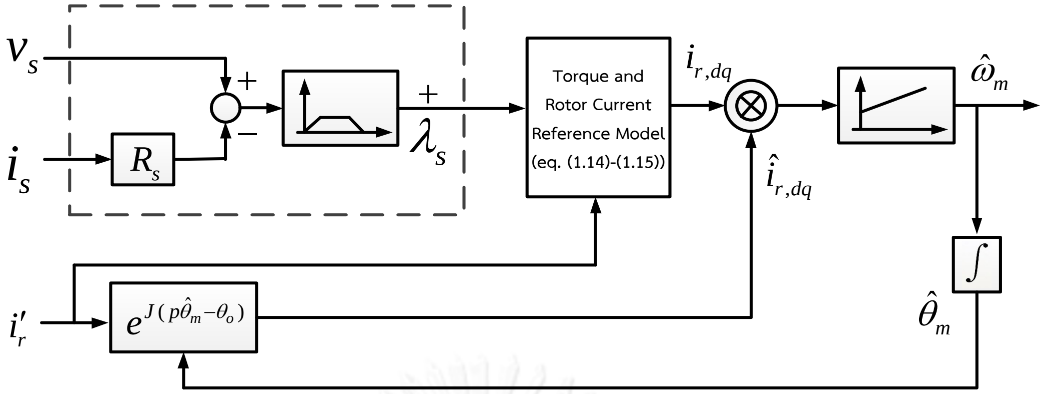
และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับกระแสโรเตอร์จริงจากการตรวจจับ สามารถเขียนสัญญาณผิดพลาดสำหรับการประมาณความเร็วโรเตอร์ได้ดังนี้

$$\varepsilon = \left(\vec{i}_r' \otimes \hat{\vec{i}}_r'\right) \bullet \vec{z} = \left(\vec{i}_r' - \hat{\vec{i}}_r'\right)^T J\hat{\vec{i}}_r' \tag{1.10}$$

รูปที่ 1.6 แสดงถึงระบบประมาณด้วยค่าผิดพลาดของกระแสโรเตอร์บนแกนอ้างอิงโรเตอร์ที่ผ่านการคำนวณในสมการ (1.9)-(1.10) ข้อจำกัดของการประมาณด้วยวิธีนี้คือ ปัญหาการเลื่อนของสัญญาณดีซีออฟเซตจากการคำนวณสเตเตอร์ฟลักซ์ และระบบประมาณไม่สามารถประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์ได้ ในกรณีที่เชื่อมต่อกับกริดหรือกระแสโรเตอร์มีค่าน้อยๆ ($\hat{\vec{i}}_r' \approx 0$) เช่น ในสภาวะไร้โหลด

1.2.1.5 การประมาณด้วยวิธี MRAS โดยใช้แบบจำลองสเตเตอร์เพื่อประมาณกำลังช่องอากาศและกระแสโรเตอร์เป็นสัญญาณอ้างอิง

งานวิจัย [7] นำเสนอระบบประมาณด้วยการคำนวณกำลังในช่องอากาศ เพื่อหลีกเลี่ยงการใช้ตัวอินทิเกรตในการประมาณสเตเตอร์ฟลักซ์ดังรูปที่ 1.7 จากรูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสโรเตอร์และกำลังในช่องอากาศ (Air-Gap Power) ที่ใช้แบบจำลองสเตเตอร์ในการคำนวณกำลังช่องอากาศแทนการคำนวณกระแสโรเตอร์ ซึ่งการคำนวณสัญญาณผิดพลาดสำหรับการประมาณความเร็วโรเตอร์สามารถเขียนได้ดังนี้



รูปที่ 1.8 ระบบควบคุมด้วยตัวสังเกต MRAS โดยใช้ความสัมพันธ์ของแรงบิดและกระแสโรเตอร์

$$\varepsilon = \left(\vec{i}_r' \otimes \hat{\vec{S}}_g'\right) \bullet \vec{z} = \left(\vec{i}_r' - \hat{\vec{S}}_g'\right)^T J\hat{\vec{S}}_g' \qquad (1.11)$$

ข้อจำกัดของการประมาณด้วยวิธีนี้คือ ระบบประมาณไม่สามารถประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์ในกรณีที่เชื่อมต่อกับกริดและอยู่ในสภาวะไร้โหลด ($\hat{\vec{S}}_g' = 0$) นอกจากนี้ในการคำนวณค่ากำลังในช่องอากาศ (Air-Gap Power) จำเป็นต้องพิจารณากำลังสูญเสียในแกนเหล็ก (core loss) เพราะฉะนั้นจึงต้องการพารามิเตอร์ที่ใช้คำนวณเพิ่มเติม ส่งผลให้การคำนวณซับซ้อนมากยิ่งขึ้น

1.2.1.6 การประมาณด้วยวิธี MRAS โดยใช้สมการโรเตอร์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์ $(d-q)$ เป็นแบบจำลองปรับตัวและกระแสโรเตอร์เป็นสัญญาณอ้างอิงจากความสัมพันธ์ของแรงบิด

งานวิจัย [8] ได้นำเสนอความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและกระแสโรเตอร์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์สำหรับการประมาณค่าตำแหน่งดังแสดงในรูปที่ 1.8 แบบจำลองอ้างอิงสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (1.14)-(1.15) และแบบจำลองปรับตัวคือ กระแสโรเตอร์จริงที่ย้ายกรอบอ้างอิงจากแกนอ้างอิงโรเตอร์ไปยังแกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์ (1.16)

สมการแรงบิดบนแกนอ้างอิงสเตเตอร์:

$$T_m = -p\,\mathrm{Im}\left(\lambda_{s,\alpha\beta} \cdot i_{s,\alpha\beta}\right) \qquad (1.12)$$

สมการแรงบิดบนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์:

$$T_m = -p\frac{M}{L_s}\lambda_{sd} i_{rq} \qquad (1.13)$$

หากพิจารณาสมการแรงบิดบนแกนอ้างอิงสเตเตอร์และแกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์ในสมการ (1.12) และ (1.13) ตามลำดับ จะสามารถแสดงแบบจำลองอ้างอิงของกระแสโรเตอร์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์ดังนี้

แบบจำลองอ้างอิงบนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์:

$$i_{rq} = \frac{L_s}{M}\frac{\mathrm{Im}(\lambda_{s,\alpha\beta} \cdot i_{s,\alpha\beta})}{\lambda_{sd}} \qquad (1.14)$$

$$i_{rd} = \sqrt{\left|i_r'\right|^2 - i_{rq}^2} \quad (1.15)$$

แบบจำลองปรับตัวบนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์:

$$\hat{\vec{i}}_{r,dq} \quad = \quad e^{-J(p\hat{\theta}_m - \theta_o)}\vec{i}_r' \quad (1.16)$$

อย่างไรก็ตามแบบจำลองอ้างอิงจำเป็นต้องใช้ข้อมูลจากการคำนวณหาสเตเตอร์ฟลักซ์ และการคำนวณสเตเตอร์ฟลักซ์โดยตรงด้วยอินทิเกรตก็เป็นอุปสรรคในทางปฏิบัติ แม้ว่าจะหลีกเลี่ยงปัญหาด้วยการใช้วงจรกรองผ่านแถบ รวมถึงการคำนวณที่ซับซ้อนและสภาวะที่กระแสโรเตอร์น้อยๆยังเป็นข้อจำกัดเช่นเดียวกับงานวิจัยที่ผ่านมา

1.2.2 การประมาณตำแหน่งและความเร็วโรเตอร์วิธีตัวสังเกตแบบปรับตัว (Adaptive Observer)

1.2.2.1 ตัวสังเกตเต็มอันดับแบบปรับตัว

โดยงานวิจัย [9] นำเสนอตัวสังเกตเต็มอันดับแบบปรับตัวในการประมาณสเตเตอร์ฟลักซ์ กระแสโรเตอร์และความเร็วโรเตอร์ไปพร้อมๆกัน โดยใช้แบบจำลองทั้งสมการสเตเตอร์และสมการโรเตอร์บนแกนอ้างอิงหมุนของโรเตอร์ ตัวสังเกตที่นำเสนอจะใช้ค่าผิดพลาดของกระแสโรเตอร์ในการประมาณความเร็วโรเตอร์ รวมถึงใช้เป็นสัญญาณป้อนกลับผ่านอัตราขยายป้อนกลับ (K) เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของตัวสังเกตดังแสดงในสมการ (1.17)-(1.18) และรูปที่ 1.9

สมการตัวสังเกตแบบเต็มอันดับแบบปรับตัว:

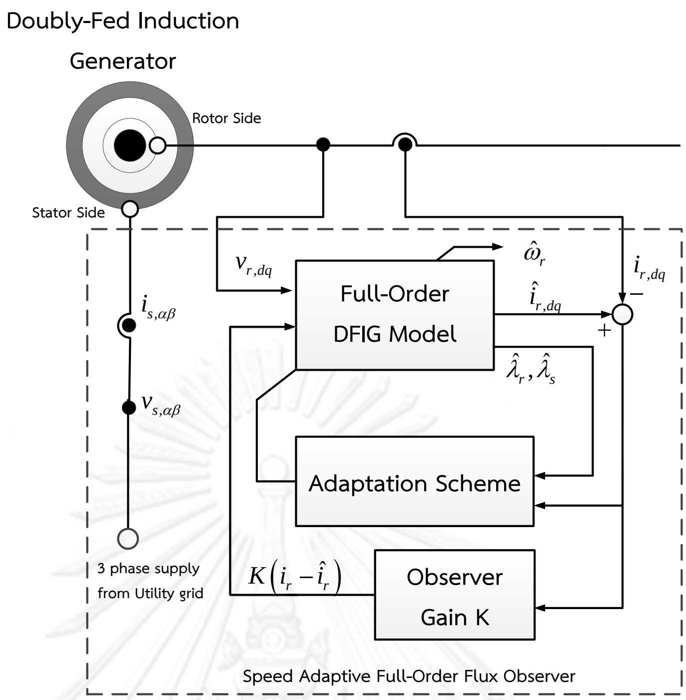
$$\frac{d\hat{x}}{dt} = \hat{A}\hat{x} + Bu + K\left(i_r - \hat{i}_r\right) \quad (1.17)$$

นิยามให้ $\hat{x} = \begin{bmatrix}\hat{\lambda}_s & \hat{i}_r\end{bmatrix}^T$ และ $u = \begin{bmatrix}v_s & v_r\end{bmatrix}^T$

โดยที่เมทริกซ์ $\hat{A}$ และ B คือ

$$\left.\begin{aligned} \hat{A} &= \begin{bmatrix} -\dfrac{R_s}{L_s} - j\omega_s & \dfrac{MR_s}{L_s} \\ \dfrac{MR_s}{\sigma L_s^2 L_r} + j\dfrac{M}{\sigma L_s L_r}\hat{\omega}_r & -\dfrac{M^2 R_s}{\sigma L_s^2 L_r} - \dfrac{R_r}{\sigma L_r} - j\left(\omega_s - \hat{\omega}_r\right) \end{bmatrix} \\ B &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\dfrac{M}{\sigma L_s L_r} & \dfrac{1}{\sigma L_r} \end{bmatrix} \end{aligned}\right\} \quad (1.18)$$

เมื่อพิจารณาจากทฤษฎีทางเครื่องจักรกลไฟฟ้าแล้วแบบจำลองในลักษณะดังกล่าวจะอยู่บนแกนอ้างอิงชนิดนอนโฮโลโนมิก (Nonholonomic reference frame) [10] เนื่องจากการแปลงแกนอ้างอิงของสมการโรเตอร์มาบนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ส่งผลให้ภายในเมทริกซ์ $\hat{A}$ ประกอบไปด้วยเทอมที่ขึ้นอยู่กับความเร็วประมาณในแบบจำลองทางพลวัต ส่งผลให้อัตราขยายป้อนกลับของตัวสังเกตจะขึ้นอยู่กับความเร็วประมาณไปด้วย อนึ่งสำหรับระบบขับเคลื่อนแบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งแล้วข้อมูล



รูปที่ 1.9 ระบบประมาณความเร็วด้วยตัวสังเกตเต็มอันดับแบบปรับตัวบนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์

ความเร็วเป็นข้อมูลที่ไม่มีอยู่จริง ดังนั้นการใช้ความเร็วประมาณแทนความเร็วจริงในอัตราขยายป้อนกลับของตัวสังเกตจึงไม่สามารถยืนยันถึงเสถียรภาพได้อย่างสมบูรณ์ ข้อเสียอีกประเด็นหนึ่งของตัวสังเกตเต็มอันดับแบบปรับตัวคือมีการคำนวณที่มากทำให้ระบบโดยรวมซับซ้อนเกินความจำเป็น

1.2.2.2 ตัวสังเกตลดอันดับแบบปรับตัว

งานวิจัย [11] นำเสนอระบบประมาณด้วยตัวสังเกตลดอันดับแบบปรับตัว วิธีนี้พิจารณาสเตเตอร์ฟลักซ์เป็นตัวแปรสถานะที่ทราบค่า โดยอาศัยสมการสเตเตอร์ฟลักซ์ในการคำนวณ ซึ่งแตกต่างระบบประมาณด้วยตัวสังเกตเต็มอันดับที่ใช้การประมาณค่าสเตเตอร์ฟลักซ์ และใช้กระแสโรเตอร์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์เป็นตัวแปรสถานะที่ต้องการประมาณ ในรูปที่ 1.10 แสดงแบบจำลองของตัวสังเกตซึ่งเป็นแบบจำลองทางพลวัตของโรเตอร์ที่อ้างอิงบนแกนสเตเตอร์ฟลักซ์ แบบจำลองในลักษณะนี้จะอยู่บนแกนอ้างอิงชนิดนอนโฮโลโนมิก (Nonholonomic Reference Frame) และสามารถเขียนสมการตัวสังเกตลดอันดับแบบปรับตัวได้ดังนี้

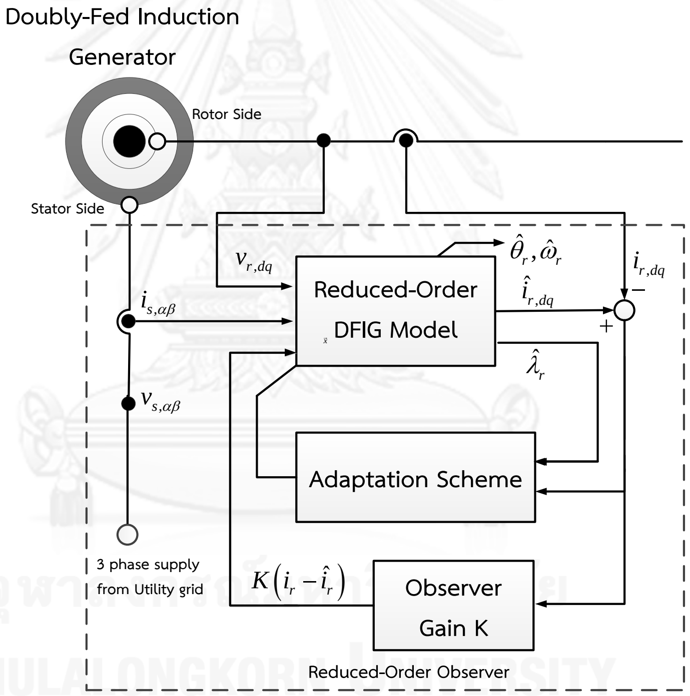
$$\frac{d\hat{x}}{dt} = \hat{A}\hat{x} + Bu + K\left(i_r - \hat{i}_r\right) \tag{1.19}$$

นิยามให้ $\hat{x} = \begin{bmatrix} \lambda_s & \hat{i}_r \end{bmatrix}^T$ และ $u = \begin{bmatrix} v_s & v_r \end{bmatrix}^T$

โดยที่เมทริกซ์ $\hat{A}$ และ B คือ

$$\left.\begin{array}{c} \hat{A}=\left[\dfrac{R_sM}{\sigma L_s^2L_r}+j\dfrac{M}{\sigma L_sL_r}\hat{\omega}_r \quad -\left(\dfrac{R_sM^2+R_rL_s^2}{\sigma L_s^2L_r}+j\omega_s\right)\right] \\ B=\left[\dfrac{M}{\sigma L_sL_r} \quad \dfrac{1}{\sigma L_r}\right] \end{array}\right\} \qquad (1.20)$$

อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ยังมีข้อจำกัดในการออกแบบอัตราขยายป้อนกลับเช่นเดียวกับกรณีของตัวสังเกตเต็มอันดับในหัวข้อก่อนหน้า คือ แบบจำลองในเมทริกซ์ $\hat{A}$ ยังขึ้นอยู่กับความเร็วประมาณ ทำให้อัตราขยายการปรับตัวขึ้นอยู่กับความประมาณไปด้วย และข้อจำกัดอีกประเด็นหนึ่งของงานวิจัยที่ใช้ตัวสังเกตลดอันดับคือ การพิจารณาว่าสเตเตอร์ฟลักซ์เป็นตัวแปรสถานะที่ตรวจจับได้โดยอ้อมจากการคำนวณโดยอาศัยสมการ (1.1) ดังนั้นการคำนวณจำเป็นต้องหลีกเลี่ยงปัญหาการเลื่อนของสัญญาณดีซีออฟเซต ด้วยการใช้วงจรกรองผ่านแถบแทนการใช้ตัวอินทิเกรตเช่นเดียวกับระบบประมาณแบบวิธี MRAS



รูปที่ 1.10 ระบบประมาณความเร็วด้วยตัวสังเกตลดอันดับแบบปรับตัวบนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์

1.3 สรุปปัญหาและข้อจำกัดในงานวิจัยที่ผ่านมา

จากการเปรียบเทียบในตารางที่ 1 จะเห็นว่าการใช้สัญญาณผิดพลาดของกระแสโรเตอร์ในการประมาณตำแหน่งและ/หรือความเร็วจะเป็นที่นิยมอย่างมาในงานวิจัยที่ผ่านมา [2]-[9],[11] ซึ่งเป็นที่เข้าใจได้ว่าเพราะเป็นข้อมูลที่มีอยู่สามารถตรวจจับเป็นสัญญาณอ้างอิงได้และเป็นข้อมูลที่สะท้อนตำแหน่งและความเร็วโรเตอร์ได้โดยตรง อย่างไรก็ดีมีประเด็นปัญหาและข้อจำกัดดังนี้

1. การเลื่อนของสัญญาณดีซีออฟเซต: ระบบประมาณจะใช้การคำนวณสเตเตอร์ฟลักซ์เพื่อประมาณกระแสโรเตอร์ และจะต้องแก้ปัญหาการเลื่อนของสัญญาณดีซีออฟเซตโดยใช้วงจรกรองผ่านแถบ (Band-pass filter) [2],[3],[4],[8] หรือผ่านต่ำแทนตัวอินทิเกรต (Low-pass filter) [3],[7],[11] ทำให้ไม่สามารถคำนวณสเตเตอร์ฟลักซ์ได้อย่างถูกต้อง
2. การคำนวณที่ซับซ้อน: งานวิจัยในลำดับถัดๆมานำเสนอการแก้ปัญหาการเลื่อนจากสัญญาณดีซีออฟเซต โดยการคำนวณสเตเตอร์ฟลักซ์ด้วยวงรอบป้อนกลับ [5] และด้วยตัวสังเกต [9],[11] ในงานวิจัย [7] ได้คำนวณกำลังช่องอากาศและใช้เป็นสัญญาณแทนกระแสโรเตอร์ประมาณ วิธีแก้ปัญหาการคำนวณสเตเตอร์ฟลักซ์ที่กล่าวมานี้ทำให้เพิ่มความซับซ้อนในการคำนวณและยังต้องการพารามิเตอร์ของเครื่องจักรกลเพิ่มเติมอีกด้วย
3. การทำงานที่ต่อกับกริดและมีขนาดกระแสโรเตอร์ต่ำ: เงื่อนไขการทำงานที่ต่อกับกริดโดยที่เครื่องจักรกลไฟฟ้ารับกำลังรีแอกทีฟทั้งหมดจากฝั่งสเตเตอร์และทำงานที่สภาวะไร้โหลด จะทำให้ขนาดกระแสโรเตอร์ต่ำๆเกิดขึ้นและทำให้ระบบประเมินขนาดคุณสมบัติในการประมาณค่าได้ วิธีประมาณของงานวิจัยที่ผ่านมา [2]-[8] จะไม่สามารถประมาณตำแหน่งและความเร็วโรเตอร์ที่เงื่อนไขนี้ได้ดังที่ได้อธิบายในหัวข้อก่อนหน้านี้

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบคุณสมบัติของวิธีการประมาณตำแหน่งและความเร็วโรเตอร์ของงานวิจัยที่ผ่านมา

Estimation Method	Model	Error Signal (for estimation)	Required filter (BPF, LPF)	Grid connection with low rotor current	Complexity of calculation	Remark
MRAS approach						
R. Cardenas Dec. 2005 [2]	Stator equation	Stator flux on stator ref. frame	Yes	No	Simple	-
R. Cardenas May 2008 [3]	Stator equation	Rotor flux on stator ref. frame	Yes	No	Fair	-
R. Cardenas May 2008 [3]	Stator equation	Stator current on stator ref. frame	Yes	Yes	Simple	-
R. Pena Jan 2008 [4]	Stator equation	Rotor current on rotor ref. frame	Yes	No	Simple	-

G. D. Marques 2010 [5]	Stator equation	Rotor current on stator and rotor ref. frames	Yes	No	Simple	Noisy with hysteresis control
I. Serban 2006 [12]	Stator equation	Rotor current on rotor ref. frame	No	No	Fair	Include feedback loop for stator-flux regulation
D. G. Forchetti 2009 [6]	Stator equation	Rotor current on rotor ref. frame	No	No	Complicated	Include stator-flux observer
G. D. Marques 2011 [7]	Stator equation	Air-gap power on stator and rotor ref. frames	No	No	Fair	Require core-loss parameters
Dezza, F.C. 2012 [8]	Stator equation	Rotor current on Stator flux ref. frames	Yes	No	Fair	-
Adaptive observer approach						
Sheng Yang 2009 (Full-order observer) [9]	Stator and rotor equations on synchronous ref. frame	Rotor current on synchronous ref. frame	No	Probably	Very complicated	Model on nonholonomic ref. frame
Sheng Yang 2010 (Reduced-order observer) [11]	Rotor equation on synchronous ref. frame	Rotor current on synchronous ref. frame	Yes (for stator flux calculation)	Probably	Complicated	Model on nonholonomic ref. frame
Error model approach						
Proposed in thesis	Rotor equation on rotor ref. frame	Rotor current on rotor ref. frame	No	Yes	Simple	Model on holonomic ref. frame

Chulalongkorn University

1.4 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

พัฒนาระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง และวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบประมาณ รวมถึงนำเสนอการออกแบบอัตราขยายการปรับตัวที่เหมาะสมสำหรับระบบประมาณตำแหน่งเพื่อผลตอบสนองที่ดีของการควบคุม

1.5 ขอบเขตวิทยานิพนธ์

1. นำเสนอระบบประมาณตำแหน่งด้วยวิธีค่าผิดพลาดของแบบจำลองโรเตอร์บนแกนอ้างอิงโฮโลโนมิก
2. วิเคราะห์เสถียรภาพของระบบประมาณความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์
3. ออกแบบอัตราขยายการปรับตัวของระบบประมาณความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์
4. ยืนยันแนวคิดทางทฤษฎีด้วยผลการจำลองการทำงานและผลการทดลองระบบจริงในทางปฏิบัติ

เนื้อหาของวิทยานิพนธ์แบ่งออกเป็น 5 บท โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงที่มาและความสำคัญของวิทยานิพนธ์นี้ โดยนำเสนอวิธีประมาณค่าตำแหน่งและความเร็วของงานวิจัยแบบต่างๆในอดีตที่ผ่านมา แสดงให้เห็นและเปรียบเทียบ ข้อดี/ข้อเสียของแต่ละวิธี รวมถึงวัตถุประสงค์และขอบเขตของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงหลักการพื้นฐานของการควบคุมเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วมสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง นำเสนอวิธีการชดเชยความผิดพลาดของแรงดันโรเตอร์ และยืนยันทฤษฎีพื้นฐานผ่านผลการจำลองการทำงานและผลการทดลองของระบบควบคุม

บทที่ 3 กล่าวถึงระบบการควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง รวมทั้งแสดงผลการจำลองการทำงานและผลการทดลองของระบบควบคุมที่สอดคล้องกับทฤษฎีที่นำเสนอ

บทที่ 4 กล่าวถึงเสถียรภาพของระบบประมาณค่าตำแหน่งด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นรอบๆจุดทำงานหนึ่ง อธิบายเงื่อนไขข้อจำกัดทางด้านเสถียรภาพของระบบควบคุมแบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งและการออกแบบอัตราขยายการปรับตัวของระบบควบคุม อีกทั้งสรุปข้อจำกัดในการทดลองเนื่องจากผลกระทบในเชิงปฏิบัติ

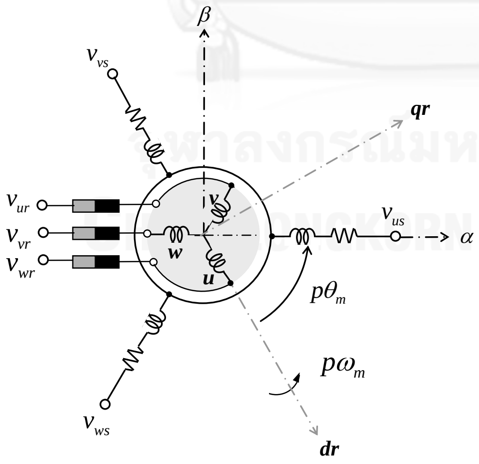
บทที่ 5 สรุปเนื้อหาประเด็นต่างๆที่นำเสนอในงานวิจัยและข้อเสนอแนะสำหรับการพัฒนางานวิจัยในลำดับถัดไป

บทที่ 2
การควบคุมเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วมสำหรับ
เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง

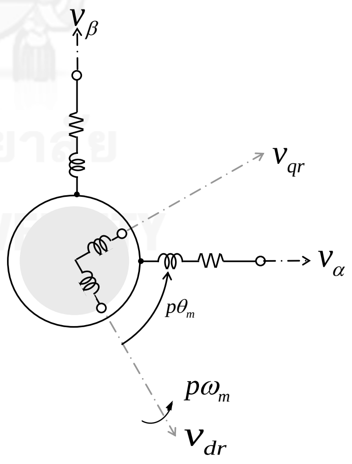
ไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง โดยส่วนแรกจะกล่าวถึงแบบจำลองพื้นฐานทางพลวัตของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งแบบจำลองดังกล่าวสามารถพัฒนาระบบการควบคุมเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วมบนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์ นอกจากนี้พิจารณาแรงดันผิดพลาดของการประวิงเวลาและแรงดันตกคร่อมสวิตช์กำลังเพื่อชดเชยผลกระทบที่เกิดขึ้น โดยผลการจำลองการทำงานและผลการทดลองแสดงสมรรถนะของระบบควบคุมการทำงานในสภาวะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและมอเตอร์สอดคล้องตามทฤษฎีที่นำเสนอ

2.1 แบบจำลองทางพลวัตของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง

โครงสร้างขดลวดพันของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางในรูปที่ 2.1 (ก) แสดงแบบจำลองขดลวดทางด้านสเตเตอร์แบบ 3 เฟสทั้งทางฝั่งสเตเตอร์และฝั่งโรเตอร์ โดยแรงดันที่ป้อนให้ทางฝั่งสเตเตอร์นิยามให้เป็น v_{us}, v_{vs} และ v_{ws} ส่วนแรงดันฝั่งโรเตอร์นิยามให้เป็น v_{ur}, v_{vr} และ v_{wr} ตามลำดับ สำหรับรูปที่ 2.1 (ข) แสดงแบบจำลองแบบ 2 เฟส หลังจากการแปลงปริมาณแรงดันและกระแสแบบ 3 เฟสให้เป็นสเปซเวกเตอร์ ซึ่งนิยามให้แรงดันสเตเตอร์และกระแสสเตเตอร์เป็นปริมาณเปรียบเทียบบนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ $(\alpha - \beta)$ ส่วนแรงดันโรเตอร์และกระแสโรเตอร์จะเป็นปริมาณเปรียบเทียบบนแกนอ้างอิงโรเตอร์ $(dr - qr)$ โดยที่แกนอ้างอิงโรเตอร์คือ แกนหมุนที่มีตำแหน่งโรเตอร์ทางไฟฟ้า ($p\theta_m$) เทียบกับแกนอ้างอิงสเตเตอร์



(ก) แบบจำลองแบบ 3 เฟส



(ข) แบบจำลองแบบ 2 เฟส

รูปที่ 2.1 โครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง (ขดลวดพัน)

จากรูปที่ 2.1 (ข) เราสามารถเขียนสมการแบบจำลองทางพลวัตของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางได้ดังนี้

สมการสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ $(\alpha-\beta)$:

$$\frac{d\vec{i}_s}{dt} = -\frac{R_s}{L_s}\vec{i}_s - \frac{M}{L_s}\frac{d}{dt}\left(e^{Jp\theta_m}\vec{i}_r{}'\right) + \frac{\vec{v}_s}{L_s} \tag{2.1}$$

สมการสเตเตอร์ฟลักซ์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ $(\alpha-\beta)$:

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

สมการโรเตอร์บนแกนอ้างอิงโรเตอร์ $(dr-qr)$:

$$\frac{d\vec{i}_r{}'}{dt} = -\frac{R_r}{L_r}\vec{i}_r{}' - \frac{M}{L_r}\frac{d}{dt}\left(e^{-Jp\theta_m}\vec{i}_s\right) + \frac{\vec{v}_r{}'}{L_r} \tag{2.3}$$

สมการโรเตอร์ฟลักซ์บนแกนอ้างอิงโรเตอร์ $(dr-qr)$:

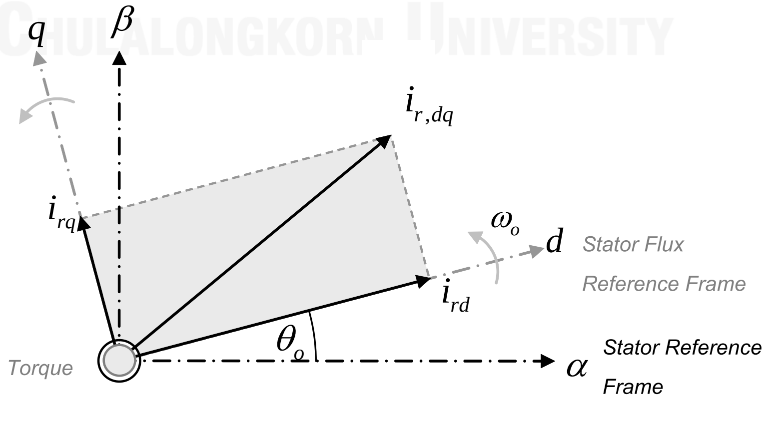
$$\vec{\lambda}_r' = L_r\vec{i}_r{}' + M\left(e^{Jp\theta_m}\vec{i}_s\right) \tag{2.4}$$

สมการแรงบิด:

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

2.2 แบบจำลองของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดขดลวดพันบนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์

จากรูปที่ 2.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์และแกนอ้างอิงสเตเตอร์ โดยแกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์ $(d-q)$ จะเป็นแกนที่หมุนด้วยมุมทางไฟฟ้าของสเตเตอร์ฟลักซ์ (θ_o) เมื่อเปรียบเทียบกับแกนอ้างอิงสเตเตอร์ $(\alpha-\beta)$ ซึ่งการควบคุมเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วมสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางนั้น เราจะพิจารณาแบบจำลองทางพลวัตบนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์



รูปที่ 2.2 แกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์สำหรับการควบคุมแบบเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วม

เพราะฉะนั้นจากสมการที่ (2.1)-(2.5) เมื่อทำการย้ายกรอบอ้างอิงของสมการสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์มายังแกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์ และย้ายกรอบอ้างอิงของสมการโรเตอร์บนแกนอ้างอิงโรเตอร์มายังแกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์ เราสามารถเขียนแบบจำลองพลวัตของเครื่องจักรกลเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางบนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์ได้ใหม่ดังนี้

สมการสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์ $(d-q)$**:**

$$\frac{di_o}{dt} = \frac{R_s}{L_s} i_{rd} - \frac{R_s}{L_s} i_o + \frac{v_{sd}}{M} \tag{2.6}$$

$$\frac{d\theta_o}{dt} = \omega_o = \frac{R_s}{L_s} \frac{i_{rq}}{i_o} + \frac{v_{sq}}{Mi_o} \tag{2.7}$$

สมการโรเตอร์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์ $(d-q)$**:**

$$\frac{di_{rd}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_r}\left\{-R_r i_{rd} + \omega_s \sigma L_r i_{rq} + \frac{M}{L_s}(R_s i_{sd} - v_{sd}) + v_{rd}\right\} \tag{2.8}$$

$$\frac{di_{rq}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_r}\left\{-R_r i_{rq} - \omega_s \sigma L_r i_{rd} + \frac{M}{L_s}(R_s i_{sq} - v_{sq}) + \frac{M^2}{L_s} p\omega_m i_o + v_{rq}\right\} \tag{2.9}$$

สมการแรงบิด:

$$T_m = -p\frac{M^2}{L_s} i_o i_{rq} \tag{2.10}$$

โดยที่ $\vec{i}_o$ คือ กระแสกระตุ้นสร้างสเตเตอร์ฟลักซ์

$$\vec{\lambda}_s \triangleq M\vec{i}_o \tag{2.11}$$

2.3 การควบคุมเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วม

การควบคุมเวกเตอร์แบบเวกเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางนิยมควบคุมกระแสโรเตอร์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์ $(d-q)$ โดยสามารถแบ่งหลักการควบคุมออกเป็นสองส่วน คือ 1) การควบคุมกำลังรีแอกทีฟ และ 2) การควบคุมแรงบิด

1. <u>การควบคุมกำลังรีแอกทีฟทางด้านโรเตอร์</u> หรือ การควบคุมกระแสโรเตอร์บนองค์ประกอบในแกน d (i_{rd}) โดยทั่วไปสเตเตอร์ฟลักซ์จะถูกกำหนดด้วยแรงดันทางด้านสเตเตอร์ในสภาวะเชื่อมต่อเข้ากับกริด ดังนั้นในสภาวะปกติสามารถกำหนดให้กระแสโรเตอร์บนองค์ประกอบในแกน d มีค่าเท่ากับศูนย์ $(i_{rd} = 0)$

2. <u>การควบคุมแรงบิด (กำลังไฟฟ้าจริง)</u> หรือ การควบคุมกระแสโรเตอร์บนองค์ประกอบในแกน q (i_{rq}) โดยขนาดและเครื่องหมายของแรงบิด และกระแสโรเตอร์บนองค์ประกอบแกน q จะขึ้นอยู่กับย่านการทำงานว่าเป็นสภาวะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือมอเตอร์

หากพิจารณาลักษณะพลวัตของกระแสโรเตอร์องค์ประกอบ d บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์ในสมการที่ (2.8) จะพบกระแสโรเตอร์บนองค์ประกอบ q (i_{rq}) ในเทอมของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ เช่นเดียวกันกับสมการที่ (2.9) ซึ่งแสดงลักษณะพลวัตของกระแสโรเตอร์องค์ประกอบ q ที่แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำนั้นประกอบไปด้วยกระแสโรเตอร์แกน d (i_{rd}) เนื่องจากทั้งสองสมการแสดงถึงความเชื่อมโยงของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำระหว่างแกนผ่านกระแสในแกน d และ q ดังนั้นเพื่อให้ระบบควบคุมเวกเตอร์สามารถควบคุมกำลังรีแอกทีฟทางด้านโรเตอร์และกำลังไฟฟ้าจริงได้อย่างอิสระ จึงควบคุมกระแสโรเตอร์ผ่านสมการแรงดันโรเตอร์ใหม่ดังนี้:

$$v_{rd}^* = \underbrace{R_r i_{rd}^*}_{\text{Feed forward term}} \underbrace{- \omega_s \sigma L_r i_{rq} + \frac{M}{L_s}\left(v_{sd} - R_s i_{sd}\right)}_{\text{Decoupling voltage terms}} \tag{2.12}$$

$$v_{rq}^* = \underbrace{R_r i_{rq}^*}_{\text{Feed forward term}} \underbrace{+ \omega_s \sigma L_r i_{rd} + \frac{M}{L_s}\left(v_{sq} - R_s i_{sq}\right) - \frac{M^2}{L_s} p \omega_m i_o}_{\text{Decoupling voltage terms}} \tag{2.13}$$

นิยามให้ i_{rd}^*, i_{rq}^* คือ กระแสโรเตอร์คำสั่งบนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์

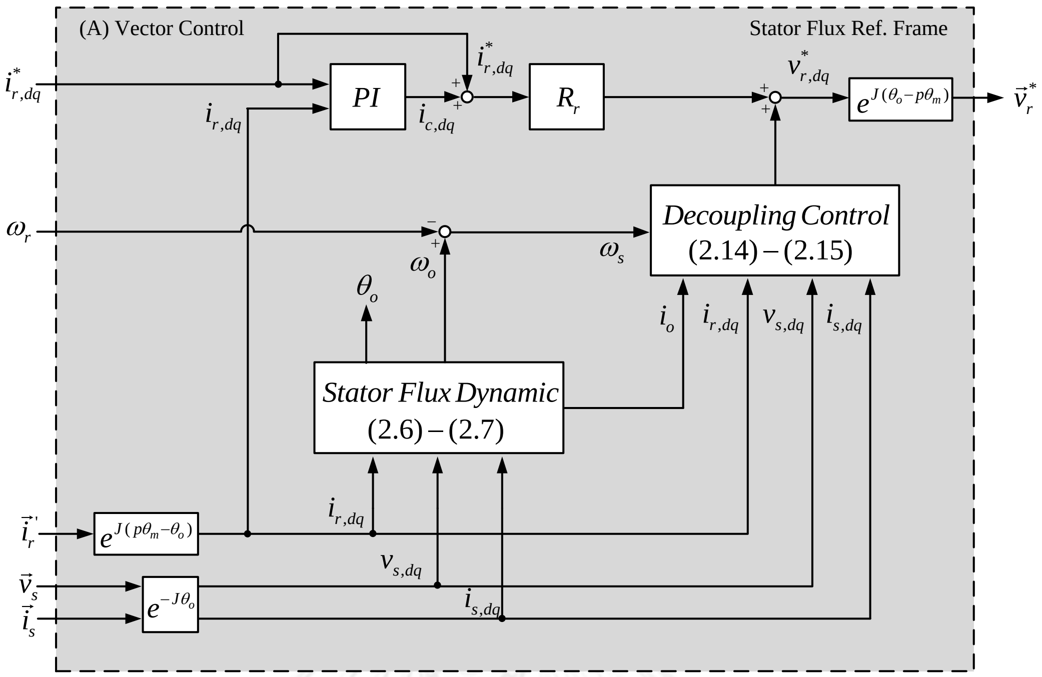
เมื่อป้อนขนาดแรงดันโรเตอร์คำสั่ง (v_{rd}^*, v_{rq}^*) จากการคำนวณด้วยสมการที่ (2.12)-(2.13) ลงในสมการโรเตอร์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์ ((2.8)-(2.9)) จะสามารถแสดงผลตอบสนองทางผลวัตรของกระแสโรเตอร์คำสั่งได้ดังนี้

$$\left.\begin{aligned} R_r i_{rd}^* &= R_r i_{rd} + \sigma L_r \frac{di_{rd}}{dt} \\ R_r i_{rq}^* &= R_r i_{rq} + \sigma L_r \frac{di_{rq}}{dt} \end{aligned}\right\} \tag{2.14}$$

โดยกระแสโรเตอร์คำสั่ง (i_{rd}^*, i_{rq}^*) จะมีผลตอบสนองอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวทางเวลาเท่ากับ $R_r / \sigma L_r$ เพราะฉะนั้นการควบคุมเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางผ่านทางกระแสโรเตอร์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์ในสมการ (2.12)-(2.13) แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการควบคุมขนาดฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์และแรงบิดอย่างอิสระต่อกัน ผ่านทางกระแสโรเตอร์คำสั่งบนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์ (i_{rd}^*, i_{rq}^*) อีกทั้งการควบคุมกระแส i_{rd} และ i_{rq} จะใช้เทอมป้อนไปหน้า (Feed forward term) เป็นเทอมหลักในการควบคุมกระแส พร้อมกับการชดเชยแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่เชื่อมร่วมระหว่างแกน (Decoupling voltage terms)

อย่างไรก็ตามเพื่อลดผลกระทบจากความคลาดเคลื่อนของกระแสเนื่องจากความไม่เป็นอุดมคติของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง และความผิดพลาดจากค่าพารามิเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง สมการควบคุมกระแสโรเตอร์จึงเพิ่มวงรอบป้อนกลับของการควบคุมกระแส (i_{cd}, i_{cq}) ดังแสดงในสมการที่ (2.15) และ (2.16) โดยโครงสร้างการควบคุมเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วมสามารถเขียนได้ดังรูปที่ 2.3

CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 2.3 โครงสร้างการควบคุมเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วม

การควบคุมกระแสโรเตอร์ที่มีการชดเชยการเชื่อมโยงระหว่างแกน:

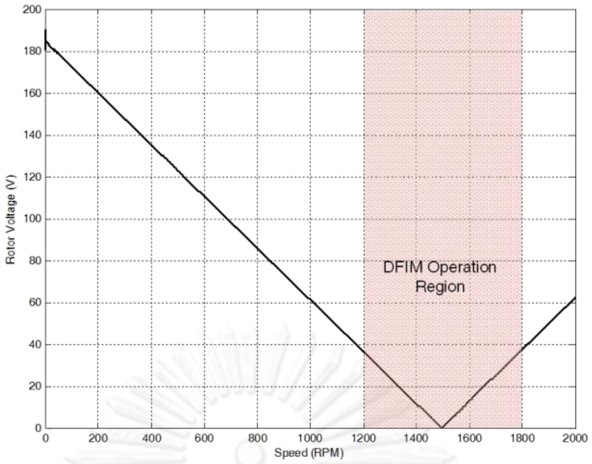
$$v^*_{rd} = \underbrace{R_r i^*_{rd}}_{\text{Feed forward term}} \underbrace{- \omega_s \sigma L_r i_{rq} + \frac{M}{L_s}\left(v_{sd} - R_s i_{sd}\right)}_{\text{Decoupling voltage terms}} + \underbrace{R_r i_{cd}}_{\text{Feedback term}} \tag{2.15}$$

$$v^*_{rq} = \underbrace{R_r i^*_{rq}}_{\text{Feed forward term}} + \underbrace{\omega_s \sigma L_r i_{rd} + \frac{M}{L_s}\left(v_{sq} - R_s i_{sq}\right) - \frac{M^2}{L_s} p\omega_m i_o}_{\text{Decoupling voltage terms}} + \underbrace{R_r i_{cq}}_{\text{Feedback term}} \tag{2.16}$$

2.4 การชดเชยผลกระทบแรงดันผิดพลาด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

แม้ว่าจะมีการชดเชยผลกระทบแรงดันผิดพลาดเนื่องจากความไม่เป็นอุดมคติของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังด้วยวงรอบป้อนกลับควบคุมกระแส (i_{cd}, i_{cq}) แล้ว อย่างไรก็ตามการชดเชยผลกระทบนี้โดยตรงจะมีความสำคัญสำคัญระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดความเร็วเป็นอย่างมาก ซึ่งจะอธิบายเพิ่มเติมในบทที่ 4 เป็นลำดับถัดไป หากพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันคำสั่งทางด้านโรเตอร์ และย่านความเร็วการทำงานของเครื่องกลจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางสามารถแสดงในรูปที่ 2.4 ที่คำนวณได้จากสมการ (2.15)-(2.16) พบว่าในสภาวะเริ่มต้น แรงดันคำสั่งทางด้านโรเตอร์ (v^*_{rd}, v^*_{rq}) มีขนาดใกล้เคียงค่าพิกัด จากนั้นแรงดันคำสั่งทางด้านโรเตอร์จะมีขนาดลดลงเรื่อยๆ ตามความเร็วโรเตอร์ที่เข้าใกล้ความเร็วซิงโครนัส ($p\omega_m \rightarrow \omega_o$) เนื่องจากจุดทำงานดังกล่าวนั้น ความถี่สลิปมีค่าน้อยมากๆ ($\omega_s \approx 0$) ส่งผลให้แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำต้านกลับและแรงดันคำสั่งทางด้านโรเตอร์มีขนาดเล็กมาก



รูปที่ 2.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันคำสั่งทางด้านโรเตอร์และความเร็วของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง

นอกจากนี้ในย่านความเร็วซิงโครนัส ($p\omega_m = \omega_o$) ที่กำหนดเงื่อนไขให้กระแสสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์มีขนาดเป็นศูนย์ ($i_{rd}^* = 0A$) จะพบว่าขนาดแรงดันทางด้านโรเตอร์มีค่าขนาดและความถี่เป็นศูนย์เสมือนสัญญาณแรงดันไฟตรง ดังนั้นความผิดพลาดของแรงดันแม้เพียงเล็กน้อยจึงมีนัยสำคัญมาก

จากปัญหาที่กล่าวมาในหัวข้อนี้จึงพิจารณา ผลกระทบแรงดันผิดพลาดในการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วม และการชดเชยผลกระทบจากแรงดันผิดพลาด โดยสามารถแบ่งได้เป็นสองกรณีคือ 1) การชดเชยแรงดันจากผลของแรงดันตกคร่อมสวิตช์กำลัง และ 2) การชดเชยแรงดันผิดพลาดจากการประวิงเวลาการสวิตช์

2.4.1 การชดเชยแรงดันจากผลของแรงดันตกคร่อมสวิตช์กำลัง (IGBT & Diode)

ขณะที่สวิตช์กำลังทำงาน (Q1-on, Q4-off) และสภาวะที่กระแสโรเตอร์มีขนาดมากกว่าศูนย์ ($i_{ra} > 0$) จะเกิดแรงดันที่ตกคร่อมระหว่างขั้วคอลเล็กเตอร์ (Collector; C) และขั้วอิมิตเตอร์ (Emitter, E) ของสวิตช์กำลัง (IGBT) ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.4 (ก) ขณะเดียวกันที่สภาวะกระแสโรเตอร์มีค่าน้อยกว่าศูนย์ ($i_{ra} < 0$) ในรูปที่ 2.4 (ข) จะเกิดค่าแรงดันตกคร่อมไดโอด (V_D) ขึ้น ซึ่งในการพิจารณาแรงดันตกคร่อมภายในสวิตช์ชนิด IGBT และไดโอดนั้น วิทยานิพนธ์นี้จะอ้างอิงค่า V_{CE} และ V_D ตามข้อมูลจำเพาะของชนิดสวิตช์กำลังที่ใช้ สำหรับการชดเชยในหัวข้อ 2.4.2 และ 2.4.3

2.4.2 การชดเชยแรงดันผิดพลาดจากการประวิงเวลาการสวิตช์

จากงานวิจัย [13] ขนาดของแรงดันที่ต้องชดเชยสามารถคำนวณได้ดังสมการ (2.17)

$$U_{dn} = (t_d + t_{on} - t_{off}) \cdot f_{sw} \cdot (U_{dc} - V_{CE} + V_D) \tag{2.17}$$

โดยที่ U_{dn} : ขนาดค่าเฉลี่ยของแรงดันที่ขาดหายไปจากการสวิตช์ (V)

t_d : เวลาในการประวิง (s)

t_{on} : เวลาที่สวิตช์ต้องใช้ในการเริ่มนำกระแส (Turn-off time, s)

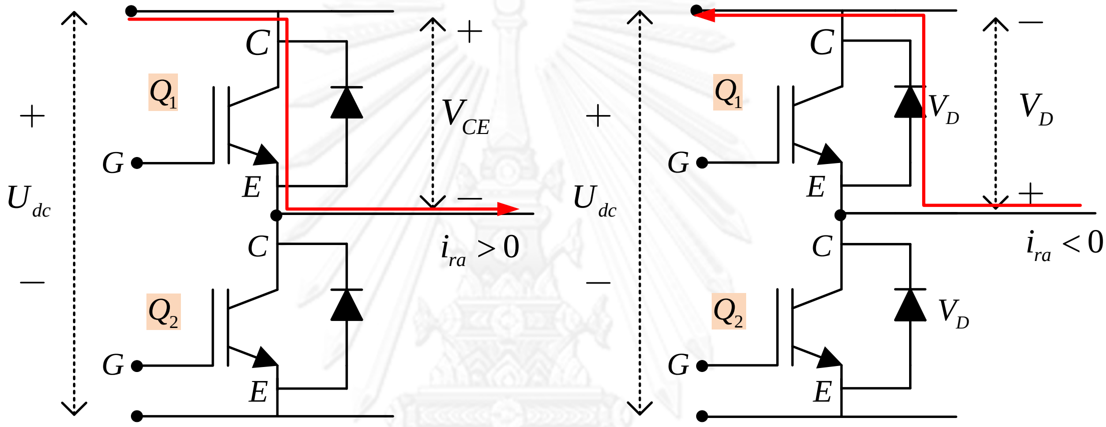
t_{off} : เวลาที่สวิตช์ต้องใช้ในการหยุดนำกระแส (Turn-off time, s)

f_{sw} : ความถี่การสวิตช์ (Hz)

U_{dc} : แรงดันไฟตรง (V)

V_{CE} : แรงดันตกคร่อมสวิตช์กำลัง (V)

V_D : แรงดันตกคร่อมไดโอด (V)



(ก) สภาวะ $i_{ra} > 0$　　　(ข) สภาวะ $i_{ra} < 0$

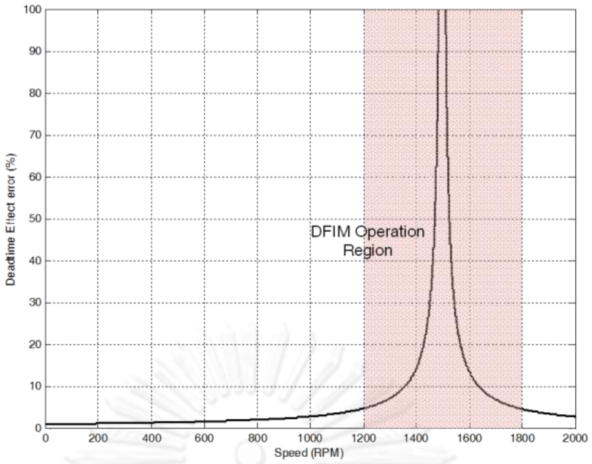
รูปที่ 2.5　แรงดันตกคร่อมภายในสวิตช์กำลัง (V_{CE} และ V_D)

เนื่องจากการพิจารณาผลกระทบของแรงดันตกคร่อมอุปกรณ์สวิตช์กำลังและแรงดันผิดพลาดจากการประวิงเวลาจึงมีผลต่อระบบควบคุมที่ใช้สมการโรเตอร์เป็นอย่างมากในย่านแรงดันต่ำๆ โดยสามารถยกตัวอย่างขนาดแรงดันผิดพลาดเนื่องจากการประวิงเวลาได้ดังนี้

$$f_{sw} = 4kHz \, , t_d = 2.13\,\mu s \, , t_{on} = 1\mu s \, , \; t_{off} = 2.5\,\mu s$$

$$V_{CE} = 3.2V \, , V_D = 0.7V \, , \; U_{dc} = 680V$$

พิจารณาค่าในเบื้องต้น ลงในสมการ (2.17) สามารถคำนวณขนาดแรงดันที่ผิดพลาดจากการประวิงเวลาได้เท่ากับ $U_{dn} = 1.707V$ จากนั้นเมื่อนำค่าแรงดันผิดพลาดจากการประวิงเวลาพล็อตเปรียบเทียบกับแรงดันคำสั่งเพื่อหาเปอร์เซ็นความสัมพันธ์ระหว่างความผิดพลาดของแรงดันและความเร็ว สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.6 ซึ่งพบว่ายิ่งความเร็วของโรเตอร์ลู่เข้าใกล้ความเร็วซิงโครนัสของระบบเมื่อไร ค่าความผิดพลาดจากการประวิงเวลาจะมีผลกระทบต่อระบบมากยิ่งขึ้น



รูปที่ 2.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลกระทบของสัญญาณประวิงเวลาและความเร็วของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง

2.4.3 การชดเชยแรงดันผิดพลาดในทางปฏิบัติ

จากหัวข้อที่ 2.4.1 และ 2.4.2 สามารถเขียนสมการแรงดันชดเชยรวมได้ดังนี้

สมการแรงดันชดเชยรวม:

$$V_{comp} = U_{dn} + \frac{V_{CE} + V_d}{2} \tag{2.18}$$

สำหรับเงื่อนไขในการชดเชยแรงดัน

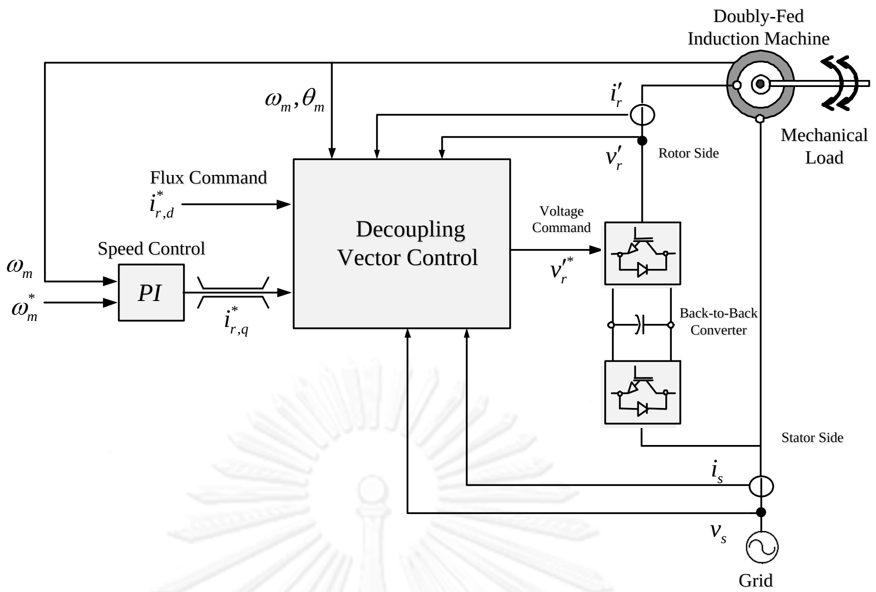
V_{comp} มีขนาดเป็นค่าบวก เมื่อ $i_{ra} > 0$

V_{comp} มีขนาดเป็นค่าลบ เมื่อ $i_{ra} < 0$

ในสภาวะที่กระแสโรเตอร์ในแต่ละเฟสมีค่าเป็นบวก แรงดัน V_{comp} จะชดเชยขนาดแรงดันเป็นบวกของแรงดันโรเตอร์ด้านออกในแต่ละเฟส เช่นเดียวกันในขณะที่กระแสเฟสโรเตอร์มีค่าน้อยกว่าศูนย์ จะชดเชยแรงดันค่าลบให้สอดคล้องกับเครื่องหมายของกระแสโรเตอร์นั้นเอง

2.5 ผลการจำลองการทำงานและผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วม

ในหัวข้อนี้แสดงผลการจำลองการทำงานและผลการทดลองของการควบคุมเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วมสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง สำหรับภาพรวมการทำงานของระบบสามารถแสดงดังรูปที่ 2.7 โดยค่าความเร็วคำสั่ง (ω_m^*) จะควบคุมด้วยองค์ประกอบของกระแสโรเตอร์คำสั่งในแกน q (i_{rq}^*) ที่ผ่านวงรอบปิดความคุมความเร็ว (PI Speed Control) และขนาดฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์จะควบคุมผ่านองค์ประกอบของกระแสโรเตอร์คำสั่งในแกน d (i_{rd}^* : Flux Command) โดยมีการตรวจวัดของค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์เพื่อใช้สำหรับการควบคุมสำหรับย่านการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางประกอบไปด้วย 1) ย่าน



รูปที่ 2.7 ระบบควบคุมเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วมสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง

ความเร็วซับซิงโครนัส 2) ความเร็วซิงโครนัส และ 3) ย่านความเร็วซุปเปอร์ซิงโครนัส นอกจากนี้สามารถประพฤติตัวเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (ย่านคืนพลังงาน) และมอเตอร์ได้ โดยค่าพิกัดและพารามิเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ใช้ในการคำนวณสามารถอ้างอิงได้ตามตารางที่ ก.1 ในภาคผนวก ก สำหรับผลการจำลองการทำงานและผลการทดลองสามารถแบ่งตามลักษณะการทำงานต่างๆได้ดังต่อไปนี้

2.5.1 ผลตอบสนองในสภาวะความเร็วคงที่

จากรูปที่ 2.8 และรูปที่ 2.9 แสดงผลจำลองการทำงานและผลการทดลองในสภาวะไร้โหลดที่ความเร็วคำสั่งคงที่ 1050 rpm และ $i^*_{rd} = 3A$ จะเห็นได้ว่าระบบสามารถควบคุมความเร็วได้ตามค่าคำสั่ง โดยกระแสโรเตอร์ในแกน d (i_{rd}) มีค่าเท่ากับ 3 A และกระโรเตอร์บนแกน q (i_{rq}) มีขนาดเท่ากับ 0 A ในทำนองเดียวกันสำหรับรูปที่ 2.10 และรูปที่ 2.11 แสดงกรณีควบคุมความเร็วคงที่ 1500 และ 1800 rpm ตามลำดับ จากผลการทดลองดังกล่าว ระบบควบคุมแบบแยกการเชื่อมร่วมสามารถควบคุมความเร็วและขนาดกระแสโรเตอร์ในแต่ละแกน (i_{rd}, i_{rq}) ได้อย่างถูกต้อง และในรูปที่ 2.12-รูปที่ 2.13 แสดงผลการทดลองในสภาวะไร้โหลดที่ความเร็ว 1500 และ 1800 rpm ตามลำดับ โดยควบคุมกระแสโรเตอร์ $i^*_{rd} = 0A$ หรือสภาวะที่ไม่มีการกระตุ้นฟลักซ์จากทางฝั่งโรเตอร์ จะพบว่าขนาดของสเตเตอร์ฟลักซ์ (λ_s) มีค่าคงที่โดยกระตุ้นผ่านด้านสเตเตอร์ทั้งหมด ซึ่งเห็นได้จากกระแสค่ากระแสสเตเตอร์ที่เพิ่มขึ้น

รูปที่ 2.14-รูปที่ 2.15 แสดงผลการจำลองการทำงานและผลการทดลองที่สภาวะความเร็วคงที่ในขณะที่มีโหลดพิกัดย่านมอเตอร์ที่ความเร็ว 1050 rpm และรูปที่ 2.16-รูปที่ 2.17 สำหรับความเร็วที่ 1500 และ 1800 rpm ตามลำดับ โดยกระแสโรเตอร์องค์ประกอบ d (i_{rd}) สามารถควบคุมได้

ตามค่ากระแสคำสั่งที่ $i_{rd}^{*} = 3A$ และกระแสโรเตอร์องค์ประกอบ *q* (i_{rq}) มีผลตอบสนองที่ดีต่อโหลดพิกัดขนาด 27.4 Nm. เช่นเดียวกันในรูปที่ 2.18-รูปที่ 2.19 แสดงผลการจำลองการทำงานและผลการทดลองที่สภาวะความเร็วคงที่ 1050 สำหรับสภาวะโหลดพิกัดย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และรูปที่ 2.20-รูปที่ 2.21 สำหรับความเร็วที่ 1500 และ 1800 rpm ตามลำดับ โดยกระแสโรเตอร์ในแกน *d* (i_{rd}) สามารถควบคุมได้ตามค่าคำสั่ง ($i_{rd}^{*} = 3A$) และกระแสโรเตอร์ในแกน *q* (i_{rq}) ให้ผลตอบสนองที่ดีในย่านโหลดพิกัดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด 27.4 Nm.

2.5.2 ผลตอบสนองในสภาวะชั่วครู่เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเร็ว

การทดลองในหัวข้อนี้แสดงผลการทดลองในกรณีที่เปลี่ยนแปลงความเร็วคำสั่ง โดยจะควบคุมกระแสโรเตอร์คำสั่งองค์ประกอบ *d* ที่ 3 A ($i_{rd}^{*} = 3A$) โดยสภาวะเริ่มต้นควบคุมให้เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางทำงานที่ย่านซับซิงโครนัสที่ความเร็ว 1200 rpm จากนั้นเมื่อเวลาผ่านไป 1 วินาที จึงเปลี่ยนแปลงความเร็วคำสั่งแบบขั้นบันไดไปยังความเร็ว 1350 rpm และคงสถานะความเร็วคงที่เป็นเวลา 3 วินาที ในลำดับต่อไปจึงเพิ่มค่าความเร็วคำสั่งแบบแรมป์ผ่านย่านความเร็วซิงโครนัสไปยังความเร็วย่านซุปเปอร์ซิงโครนัสที่ 1650 rpm และคงสถานะความเร็วคงที่ก่อนเปลี่ยนแปลงความเร็วคำสั่งแบบขั้นบันไดไปยังความเร็วสุดท้ายที่ 1800 rpm

ผลการจำลองการทำงานและผลการทดลองในรูปที่ 2.22-รูปที่ 2.23 แสดงผลตอบสนองการควบคุมในสภาวะไร้โหลด โดยกระแสโรเตอร์ i_{rd} และ i_{rq} มีการเปลี่ยนแปลงในสภาวะชั่วครู่ก่อนลู่เข้าสู่ค่าคงตัวในสภาวะความเร็วคงที่ ผลตอบสนองดังกล่าวยืนยันความสามารถในการควบคุมความเร็วได้อย่างถูกต้อง ผ่านทางกระแสโรเตอร์แกน *q* (i_{rq}^{*}) และสามารถควบคุมขนาดของฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ผ่านทางกระแสโรเตอร์แกน *d* (i_{rd}^{*}) ได้อย่างอิสระ เช่นเดียวกันในรูปที่ 2.24-รูปที่ 2.27 สามารถแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการควบคุมเพื่อระบบทำงานที่พิกัดย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและมอเตอร์

2.5.3 ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงกระแสกระตุ้นฟลักซ์แบบขั้นบันได

สำหรับผลตอบสนองของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางขณะเปลี่ยนแปลงกระแสกระตุ้นสเตเตอร์ฟลักซ์ผ่านองค์ประกอบแกน *d* ของกระแสโรเตอร์ (i_{rd}^{*}) แบบขั้นบันไดเริ่มต้นควบคุมกระแสโรเตอร์คำสั่งในแกน *d* ให้มีค่าเท่ากับ 0 A จากนั้นเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันไดไปที่ 3 A ($i_{rd}^{*} = 0 \rightarrow 3A$) โดยสามารถแสดงผลการจำลองการทำงานและผลการทดลองในรูปที่ 2.28-รูปที่ 2.29 ที่ความเร็วคงที่ 1200 rpm และรูปที่ 2.30 สำหรับที่ความเร็ว 1800 rpm ซึ่งทั้งสองทดลองทำงานในสภาวะไร้โหลด โดยสามารถควบคุมกระแสโรเตอร์ i_{rd} ได้ตามค่ากระแสคำสั่งที่ $i_{rd}^{*} = 0 \rightarrow 3A$ นอกจากนี้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงกระแสกระตุ้นฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ จะพบว่าขนาดของกระแสสเตเตอร์จะมีค่าลดลง แต่ขนาดของสเตเตอร์ฟลักซ์ไม่เปลี่ยนแปลง เนื่องจากกระแสโรเตอร์ในแกน *d* มาช่วยสร้างสเตเตอร์ฟลักซ์ให้มีขนาดคงที่

รูปที่ 2.31-รูปที่ 2.32 แสดงผลการจำลองการทำงานและผลการทดลองที่สภาวะความเร็วคงที่ในขณะที่มีโหลดพิกัดย่านมอเตอร์ที่ความเร็ว 1200 rpm และรูปที่ 2.33-รูปที่ 2.34 สำหรับ

ความเร็วที่ 1500 และ 1800 rpm ตามลำดับ และเช่นเดียวกันในสภาวะโหลดพิกัดย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดังรูปที่ 2.35-รูปที่ 2.38 การทดลองดังกล่าวสามารถยืนยันสมรรถนะของระบบควบคุมขณะมีการเปลี่ยนแปลงกระแสกระตุ้นฟลักซ์แบบขั้นบันไดได้

2.5.4 ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้นบันได

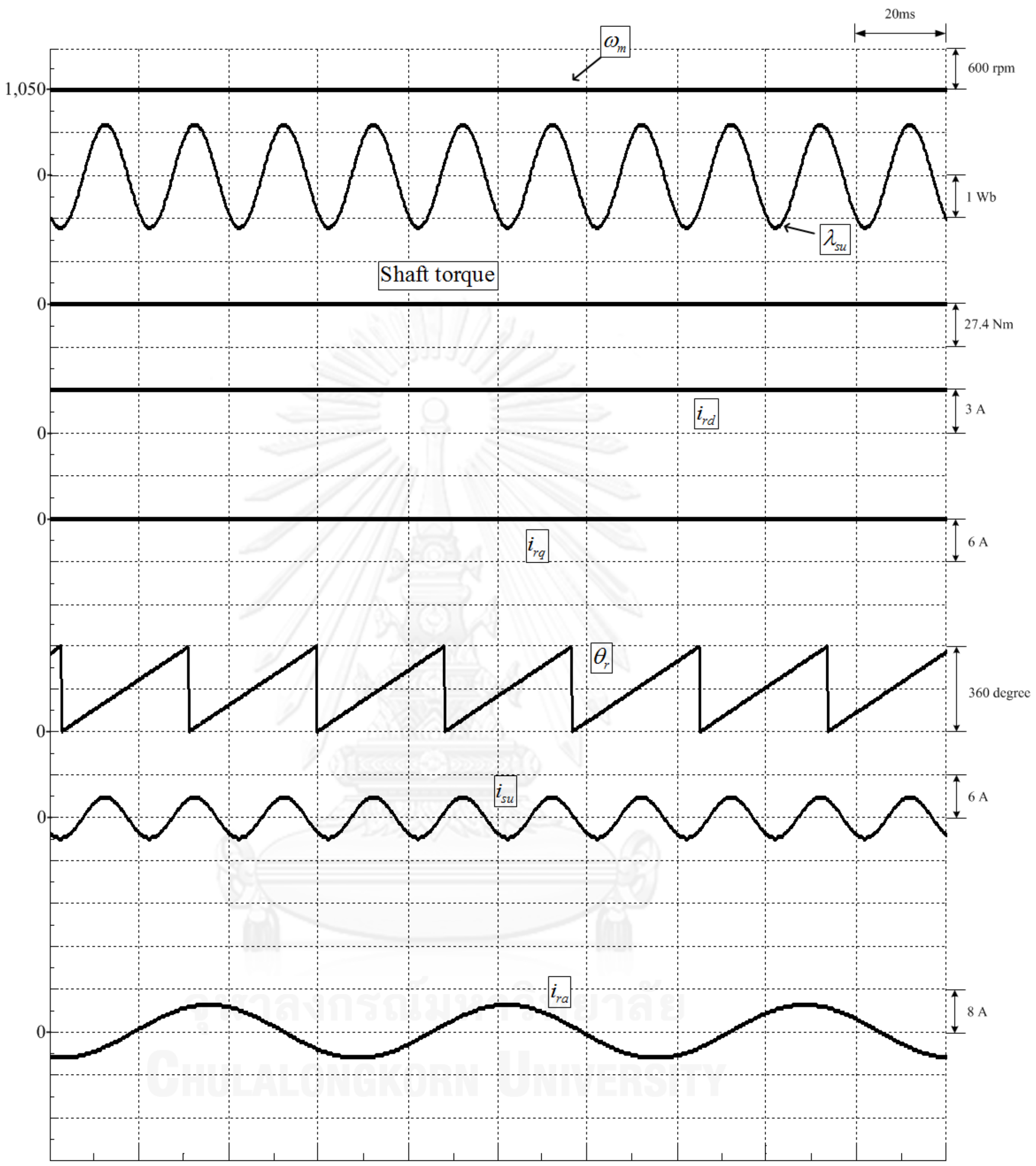
รูปที่ 2.39 และรูปที่ 2.40 แสดงผลการจำลองการทำงานและผลการทดลองในสภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงโหลดพิกัดแบบขั้นบันไดของเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง ขณะทำงานสภาวะความเร็วคงที่และควบคุมกระแสโรเตอร์ $i_{rd}^{*} = 3A$ ในสภาวะเริ่มต้นเครื่องกลจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางทำงาน ณ สภาวะไร้โหลดที่ความเร็ว 1500 rpm จนกระทั่งวินาทีที่ 3 มีการเปลี่ยนแปลงโหลดไปยังสภาวะโหลดพิกัดที่ประพฤติตัวเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (- 27.4 N.m.) จากนั้นคงสภาพโหลดพิกัดเป็นเวลา 4 วินาที ก่อนปลดโหลดเพื่อกลับเข้าสู่สภาวะไร้โหลดที่วินาทีที่ 7 นอกจากนี้ในรูปที่ 2.41-รูปที่ 2.42 แสดงผลการทดลองที่ความเร็วคงที่ 1200 และ 1800 rpm ตามลำดับ จากผลการทดลองดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าระบบควบคุมสามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของโหลดแบบขั้นบันได และควบคุมความเร็วในสภาวะคงที่ได้ตามค่าคำสั่ง รวมทั้งควบคุมกระแสกระตุ้นฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ได้

สำหรับการควบคุมขณะประพฤติตัวเป็นมอเตอร์สามารถแสดงผลตอบสนองทั้งผลการจำลองการทำงานและผลทดลองได้ที่ความเร็ว 1500 rpm ในรูปที่ 2.43-รูปที่ 2.44 และที่ความเร็วคงที่ 1200 และ 1800 rpm ในรูปที่ 2.45-รูปที่ 2.46 ตามลำดับ

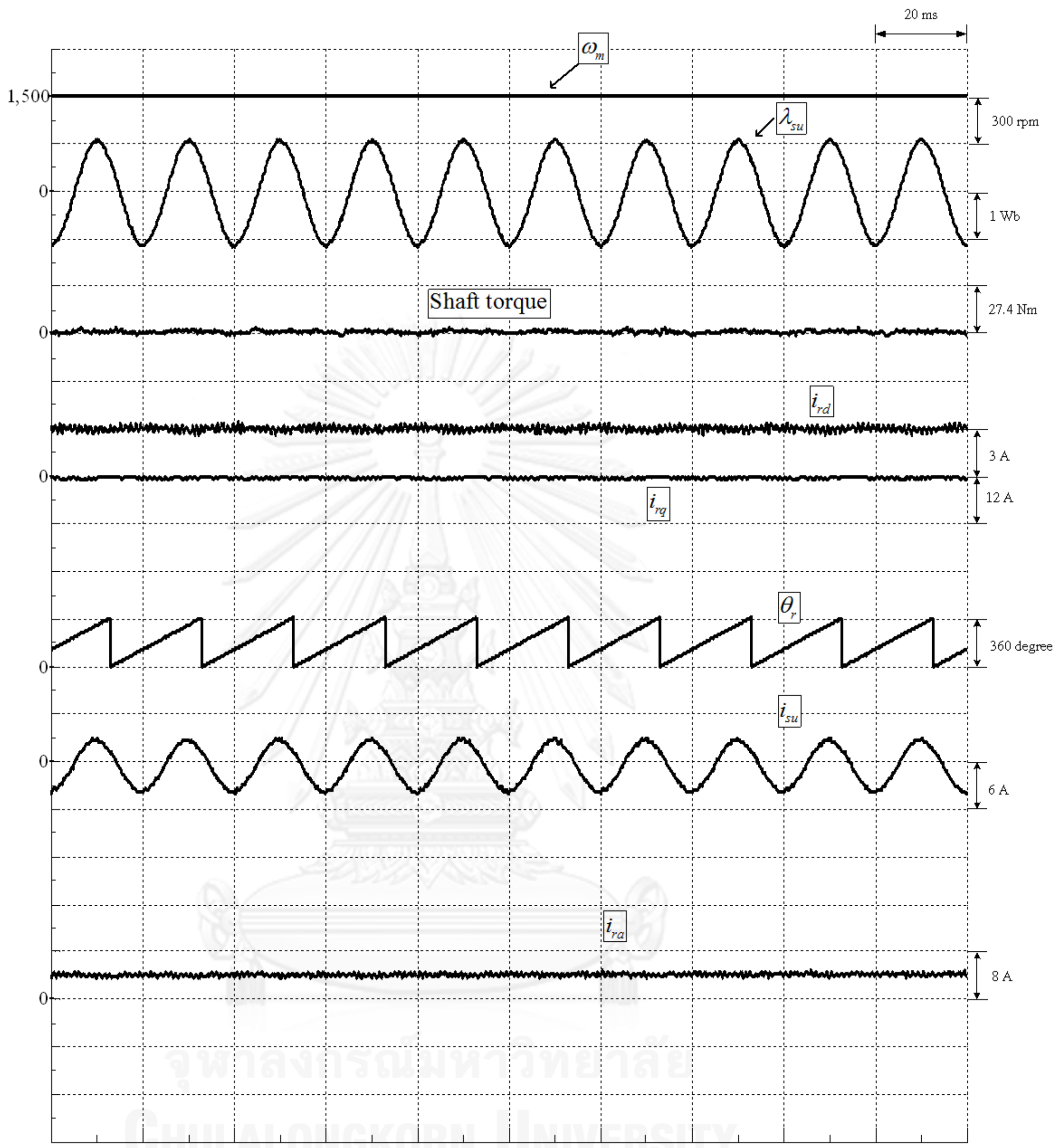
2.5.5 ลักษณะสมบัติของแรงบิด-ความเร็วของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง

ผลการทดลองในรูปที่ 2.47 แสดงลักษณะแรงบิด-ความเร็วของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางโดยใช้การควบคุมเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วม จากการทดลองจะเห็นว่าเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางสามารถควบคุมความเร็วให้มีขนาดคงที่ในสภาวะที่พิกัดมอเตอร์และพิกัดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ตลอดย่านความเร็ว เช่น ย่านความเร็วซับซิงโครนัส ความเร็วซิงโครนัส และความเร็วพิกัดที่สูงกว่าความเร็วซิงโครนัส จากการทดลองทำการเปลี่ยนแปลงแรงบิดสูงสุดในย่านการทำงานแบบมอเตอร์แล้วลดลงจนถึงแรงบิดเป็นศูนย์อย่างช้าๆ จากนั้นกลับทิศย่านการทำงานเป็นแบบคืนพลังงานหรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยมีการเปลี่ยนแปลงขนาดแรงบิดอย่างช้าๆ จนกระทั่งเข้าสู่สภาวะพิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งระบบควบคุมเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วมแสดงให้เห็นสมรรถนะในการควบคุมความเร็วได้คงที่ตลอดช่วงการเปลี่ยนแปลงขนาดแรงบิด อีกทั้งยังสามารถควบคุมกระแสโรเตอร์แกน d ให้มีขนาดคงที่ได้

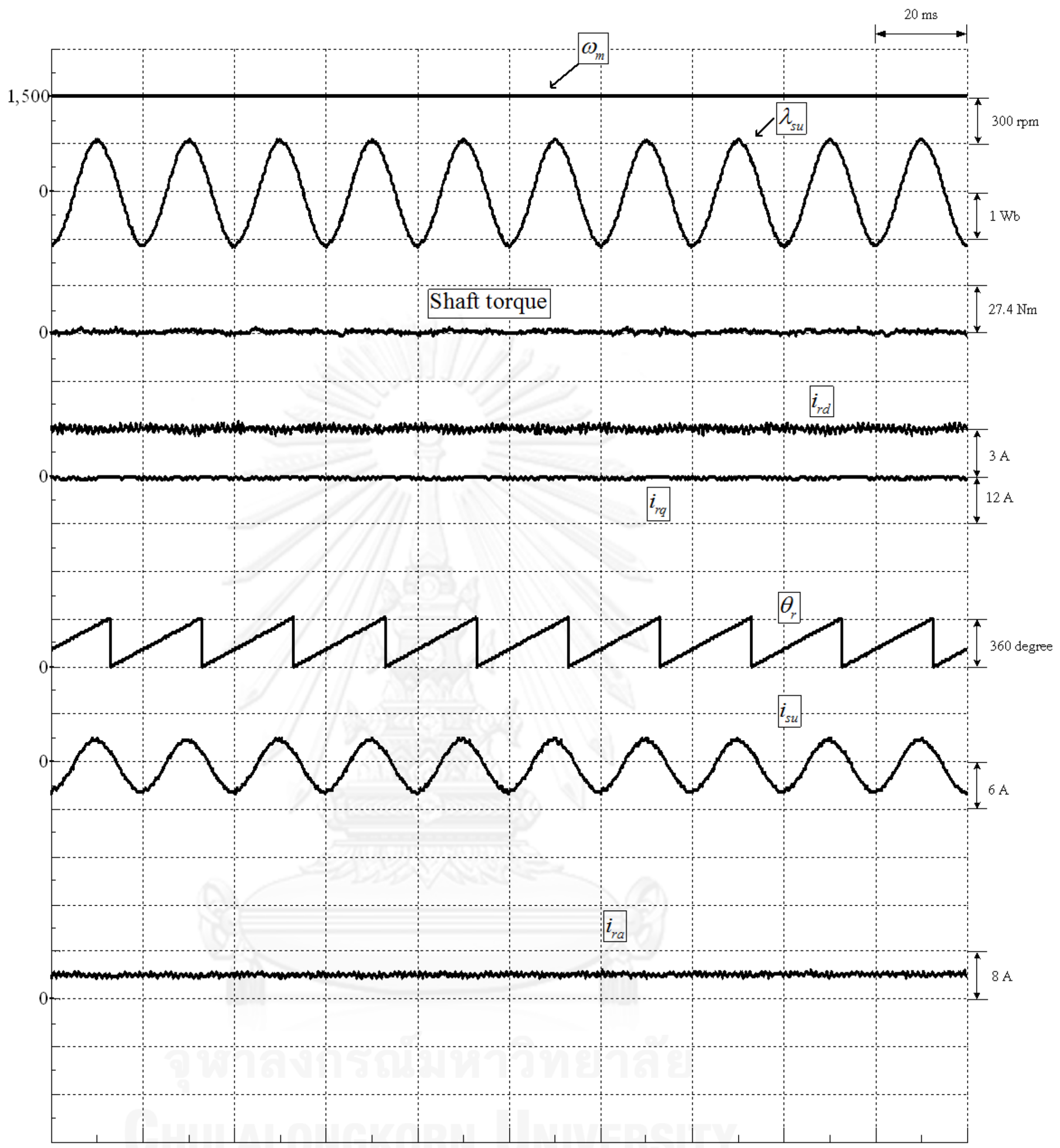
จากผลการจำลองการทำงานและผลการทดลองดังกล่าวสามารถสรุปได้ในตารางที่ 2 ซึ่งระบบควบคุมเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วมของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางดังที่ได้นำเสนอนั้น แสดงให้เห็นสมรรถะการทำงานในย่านต่างๆ เช่น ย่านพิกัดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและมอเตอร์ โดยเราจะใช้โครงสร้างการทำงานของระบบควบคุมนี้เพื่อพัฒนาระบบควบคุมแบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งในบทถัดไป



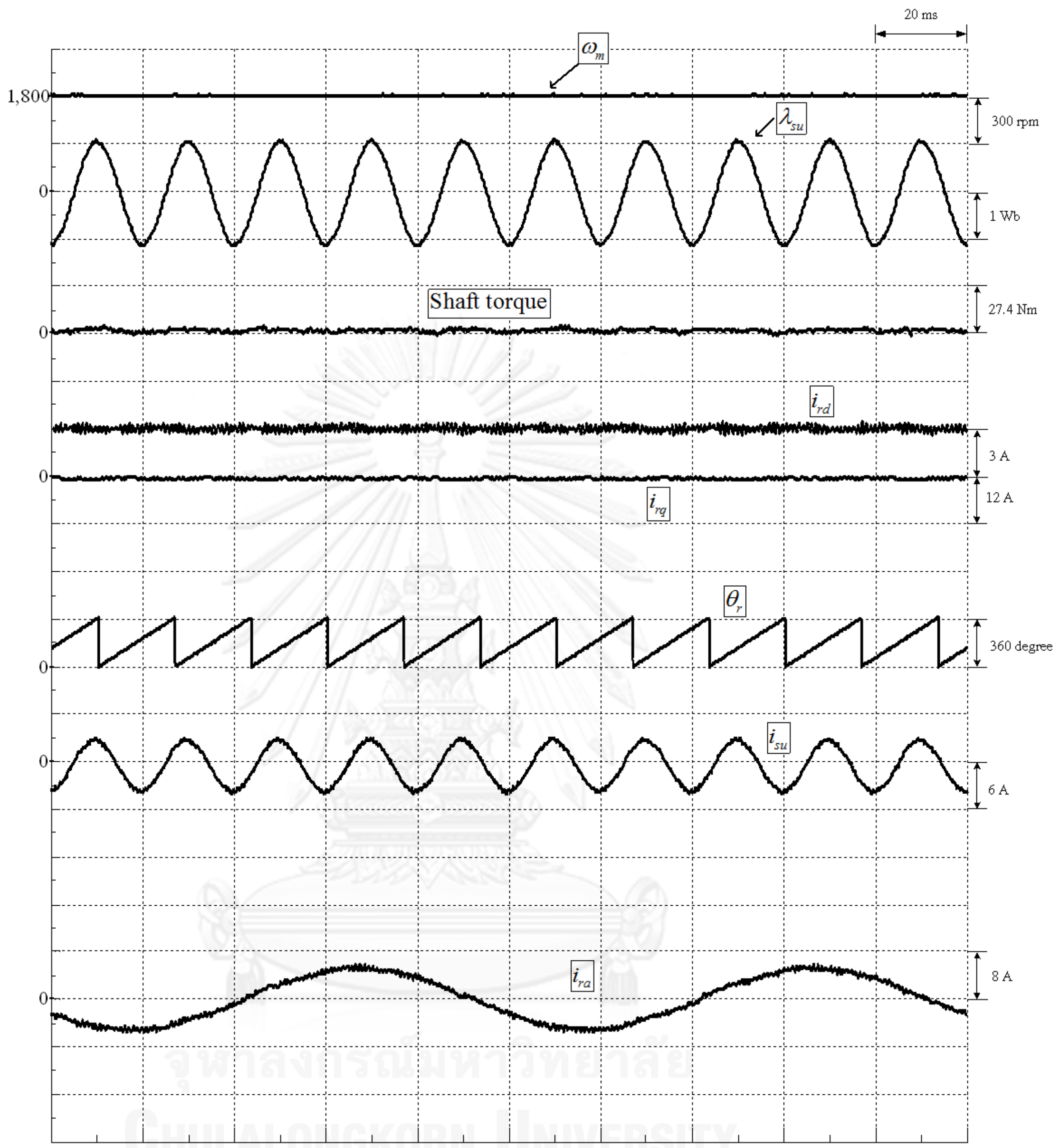
รูปที่ 2.8 ผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมเวกเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางที่ 1050 rpm ที่สภาวะไร้โหลดและ $i_{rd}^{*} = 3A$



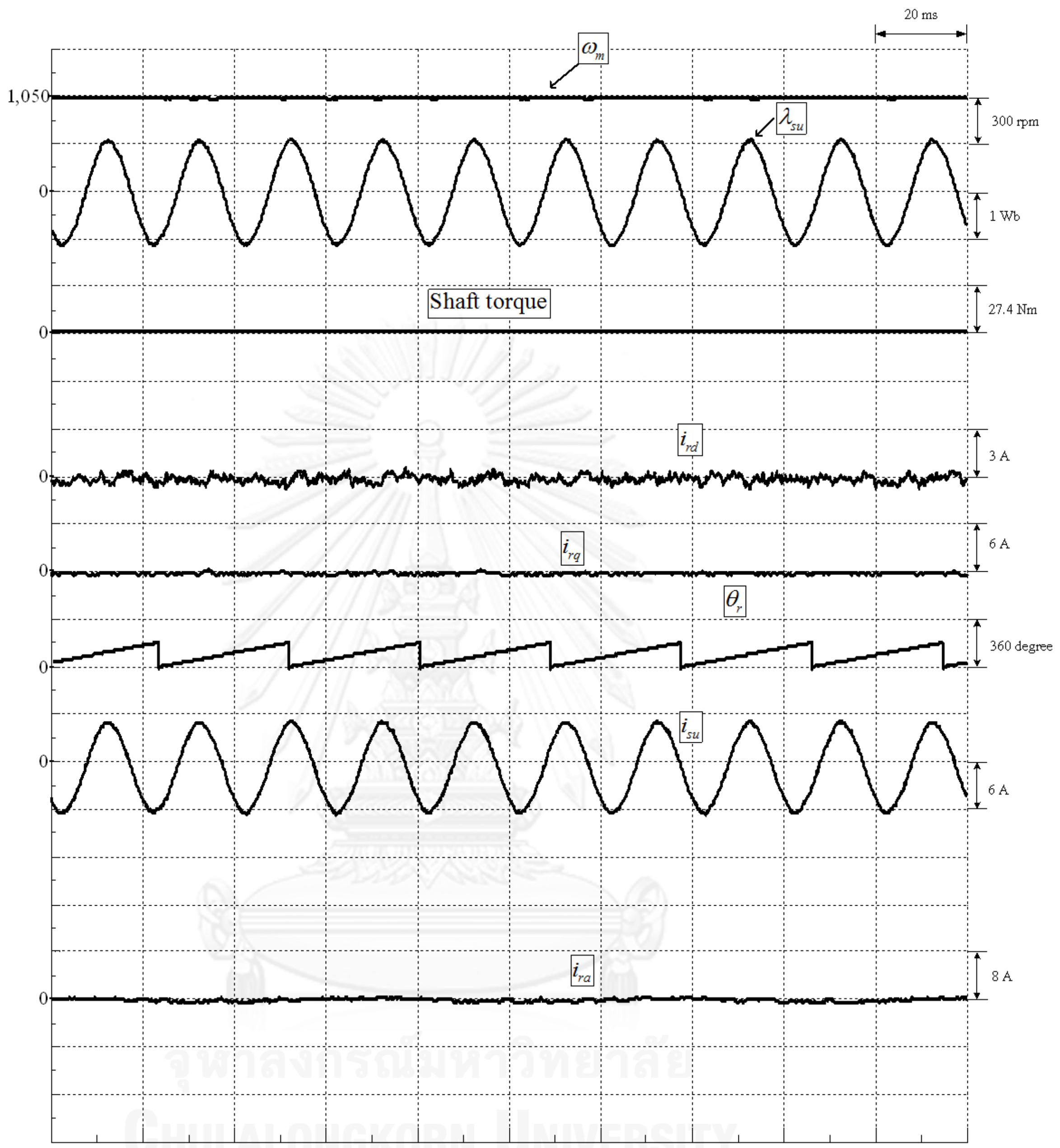
รูปที่ 2.9 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางที่ 1050 rpm ที่สภาวะไร้โหลดและ $i_{rd}^{*} = 3A$



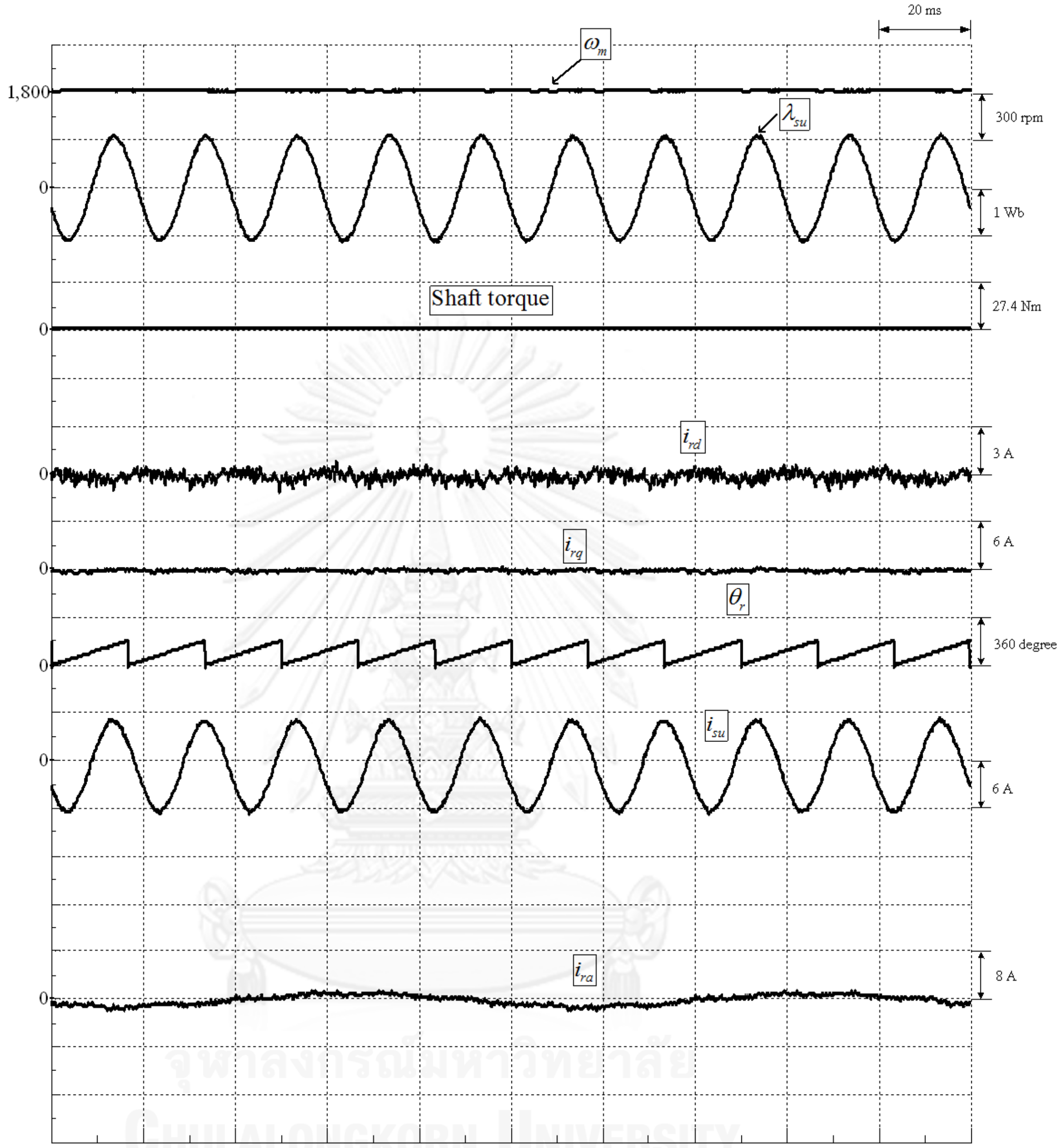
รูปที่ 2.10 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางที่ความซิงโครนัส สภาวะไร้โหลดและ $i_{rd}^* = 3A$



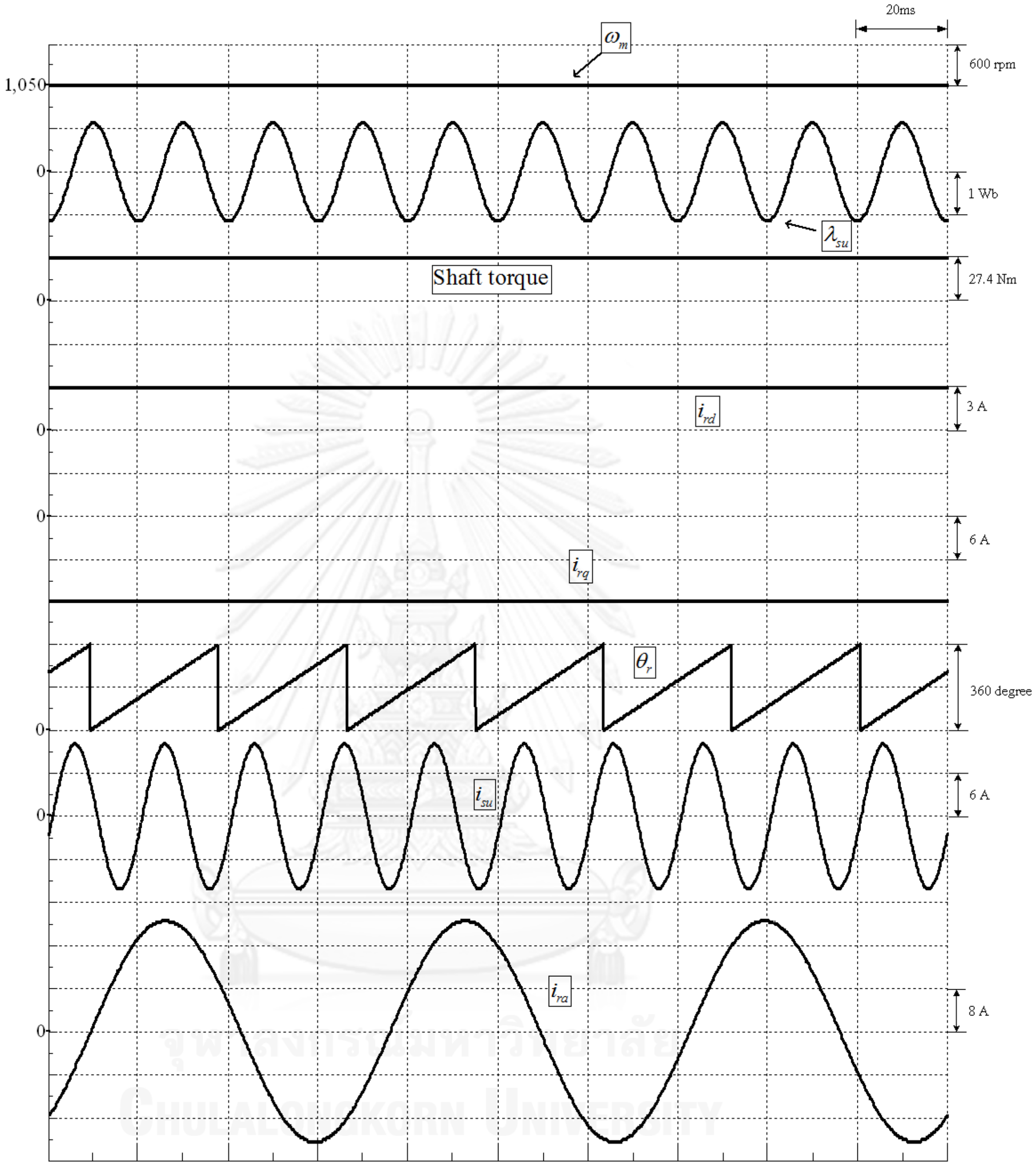
รูปที่ 2.11 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางที่ 1800 rpm ที่สภาวะไร้โหลดและ $i_{rd}^{*} = 3A$



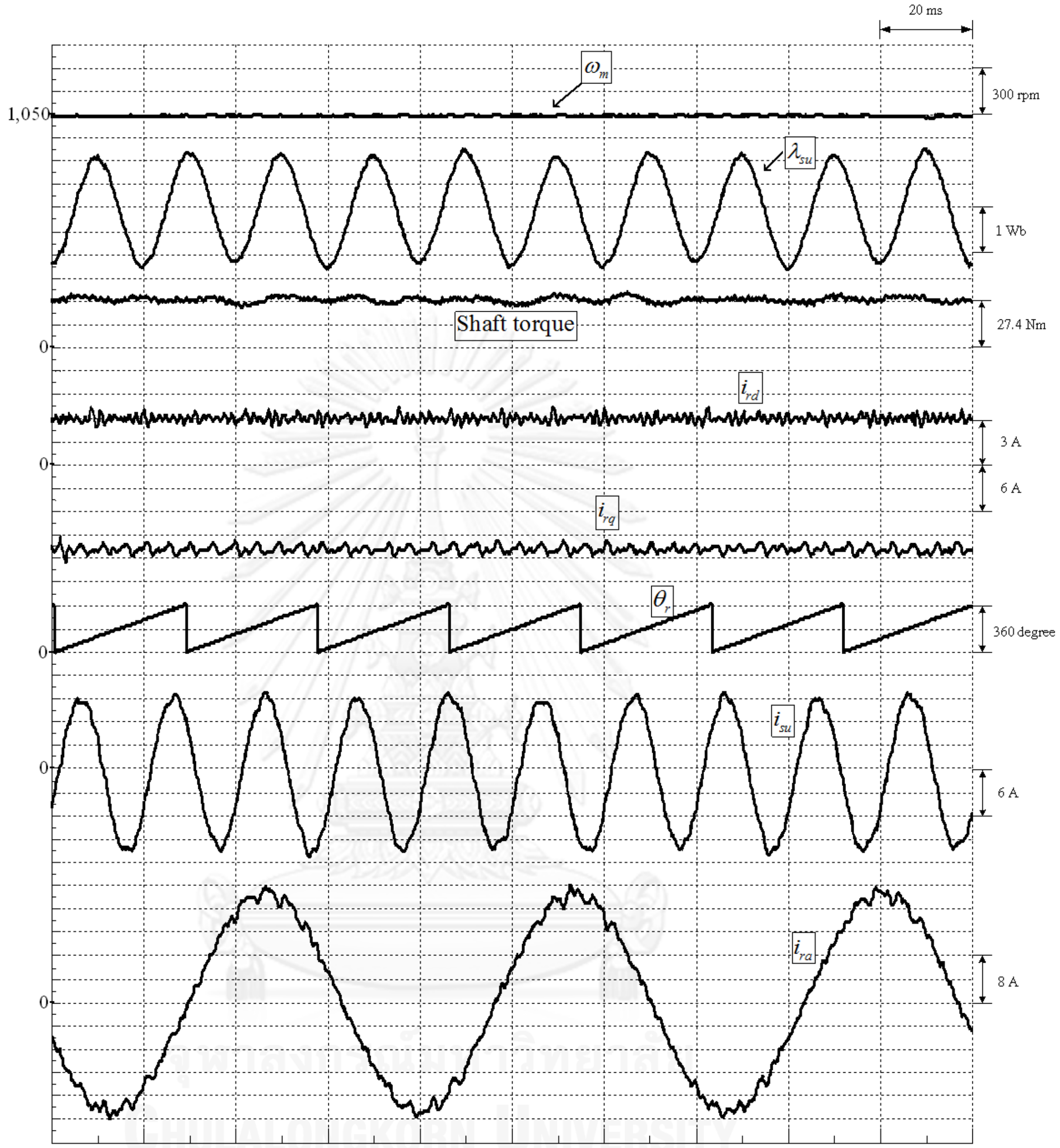
รูปที่ 2.12 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางที่ 1050 rpm สภาวะไร้โหลดและ $i_{rd}^{*} = 0A$



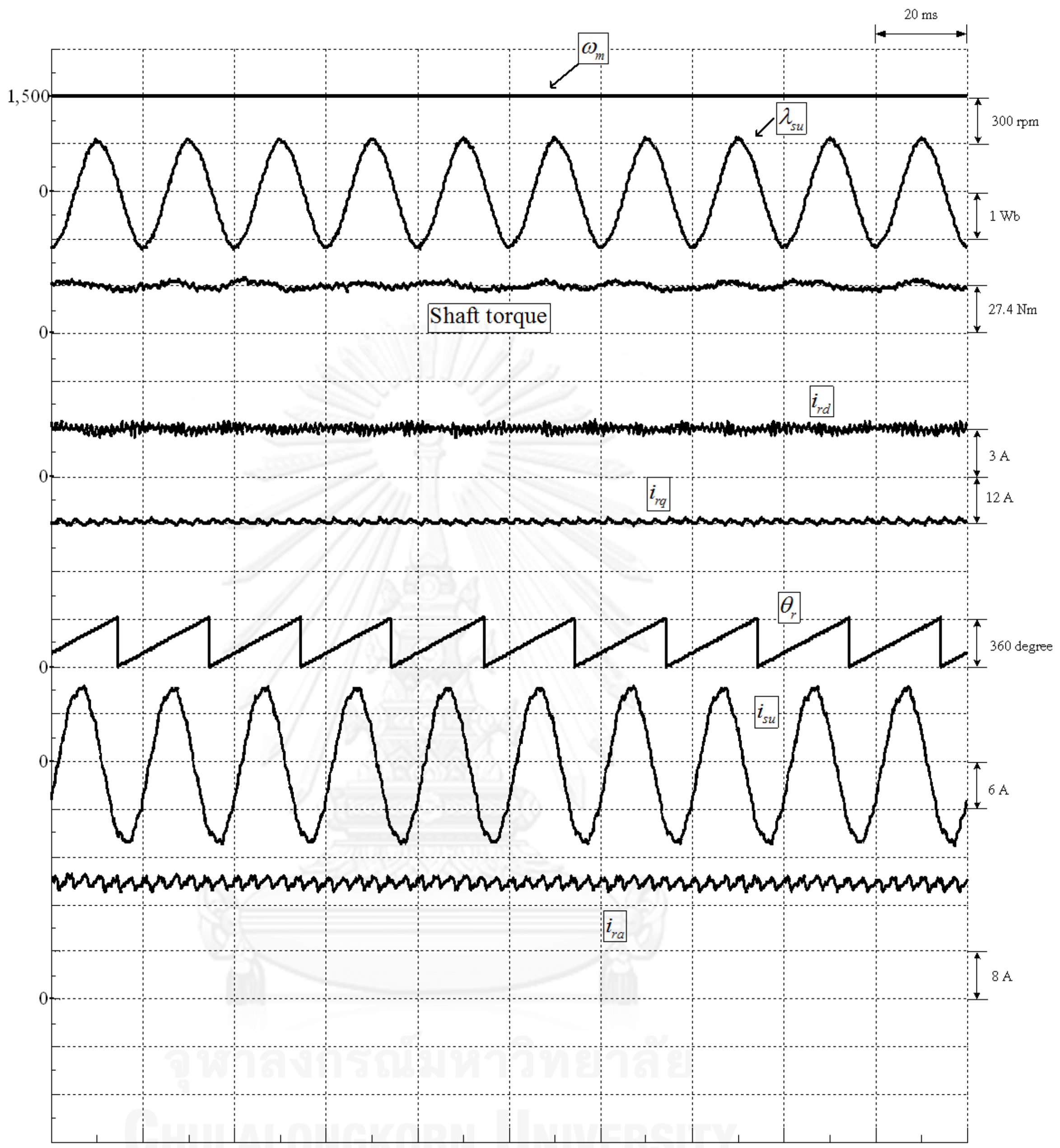
รูปที่ 2.13 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางที่ 1800 rpm สภาวะไร้โหลดและ $i_{rd}^* = 0A$



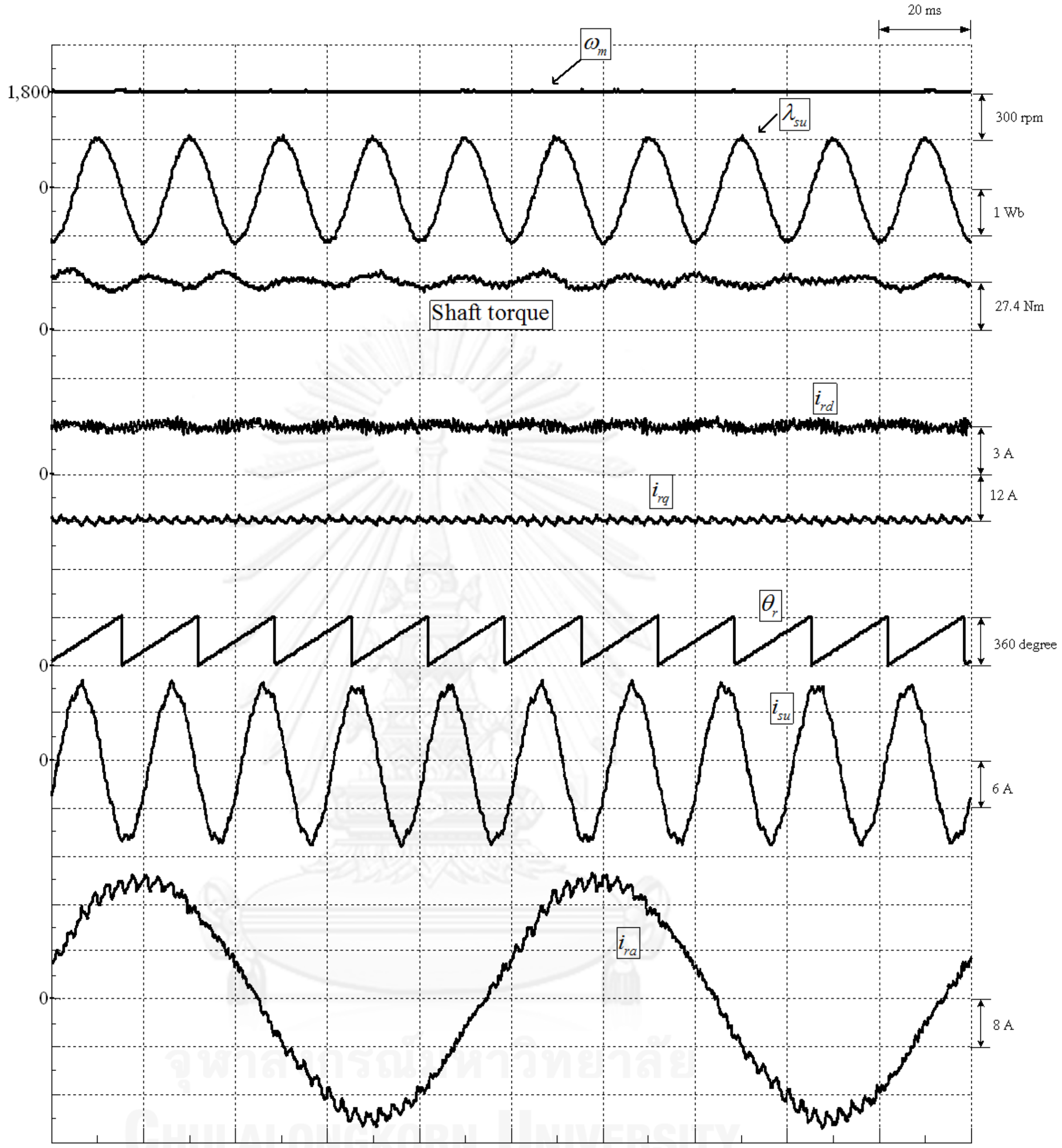
รูปที่ 2.14 ผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมเวกเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางที่ 1050 rpm สภาวะโหลดพิกัดในย่านมอเตอร์ และ $i_{rd}^* = 3A$



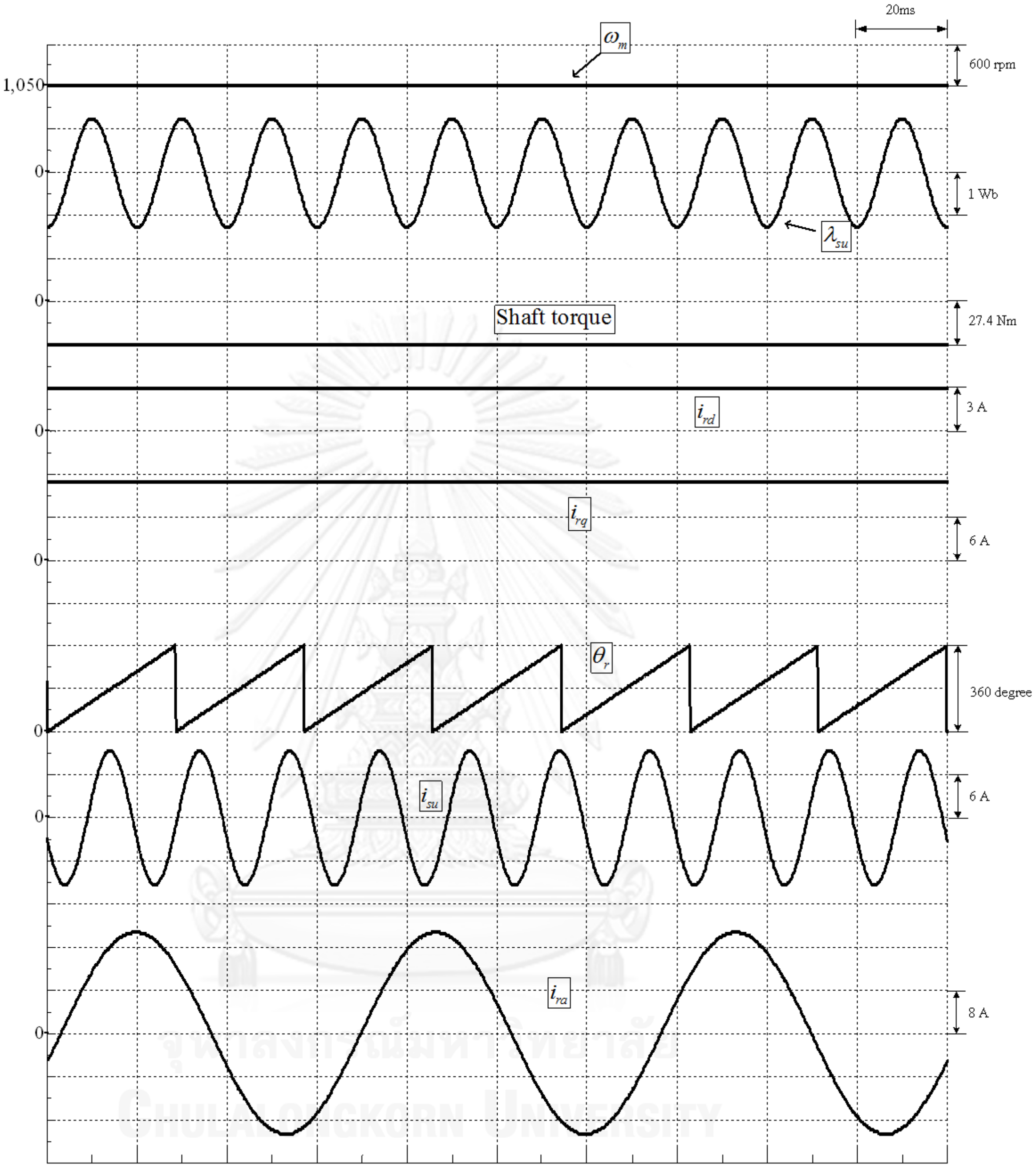
รูปที่ 2.15 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางที่ 1050 rpm สภาวะโหลดพิกัดในย่านมอเตอร์ และ $i_{rd}^* = 3A$



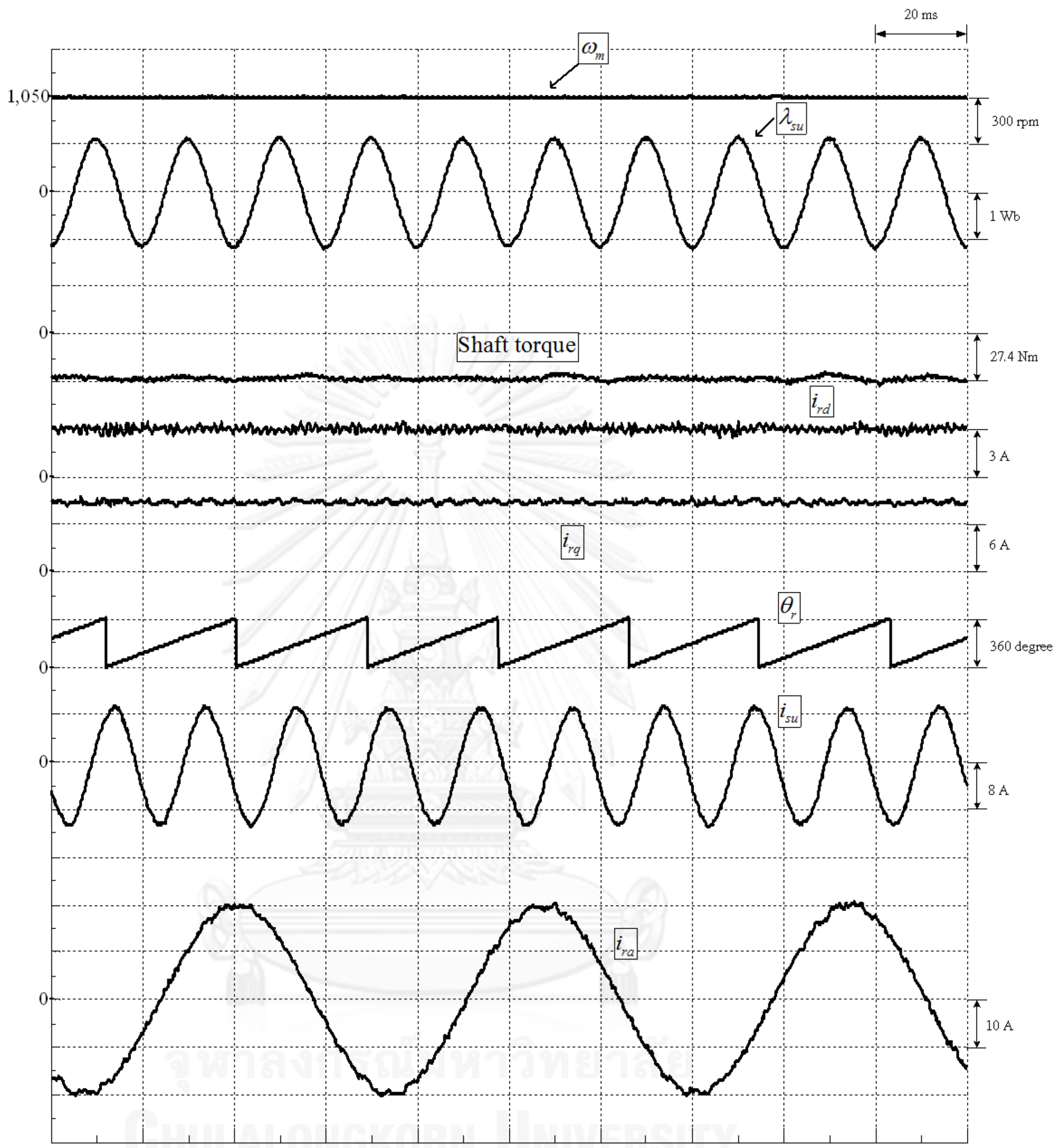
รูปที่ 2.16 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางที่ 1500 rpm สภาวะโหลดพิกัดในย่านมอเตอร์และ $i_{rd}^{*} = 3A$



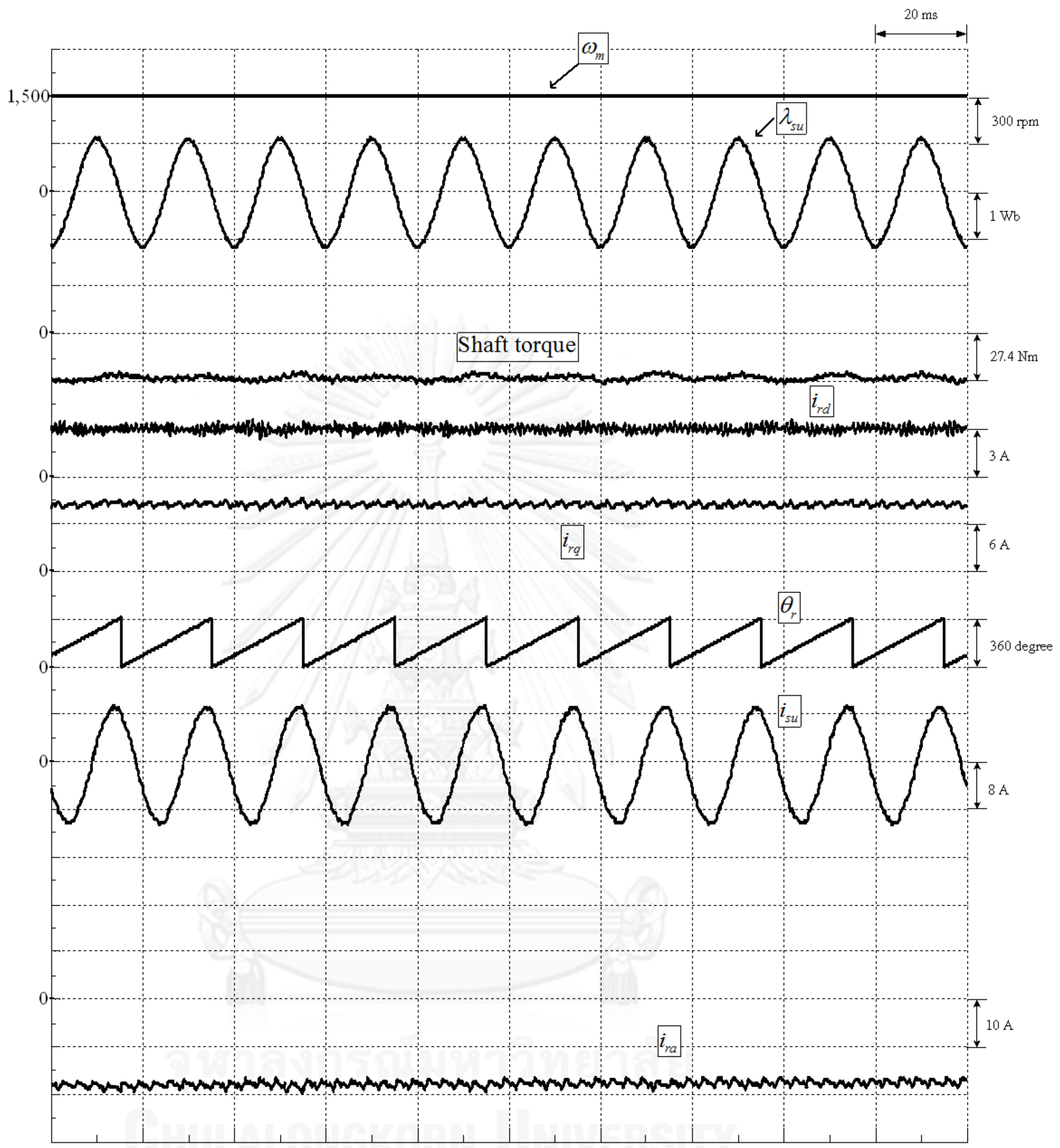
รูปที่ 2.17 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางที่ 1800 rpm สภาวะโหลดพิกัดในย่านมอเตอร์และ $i_{rd}^{*} = 3A$



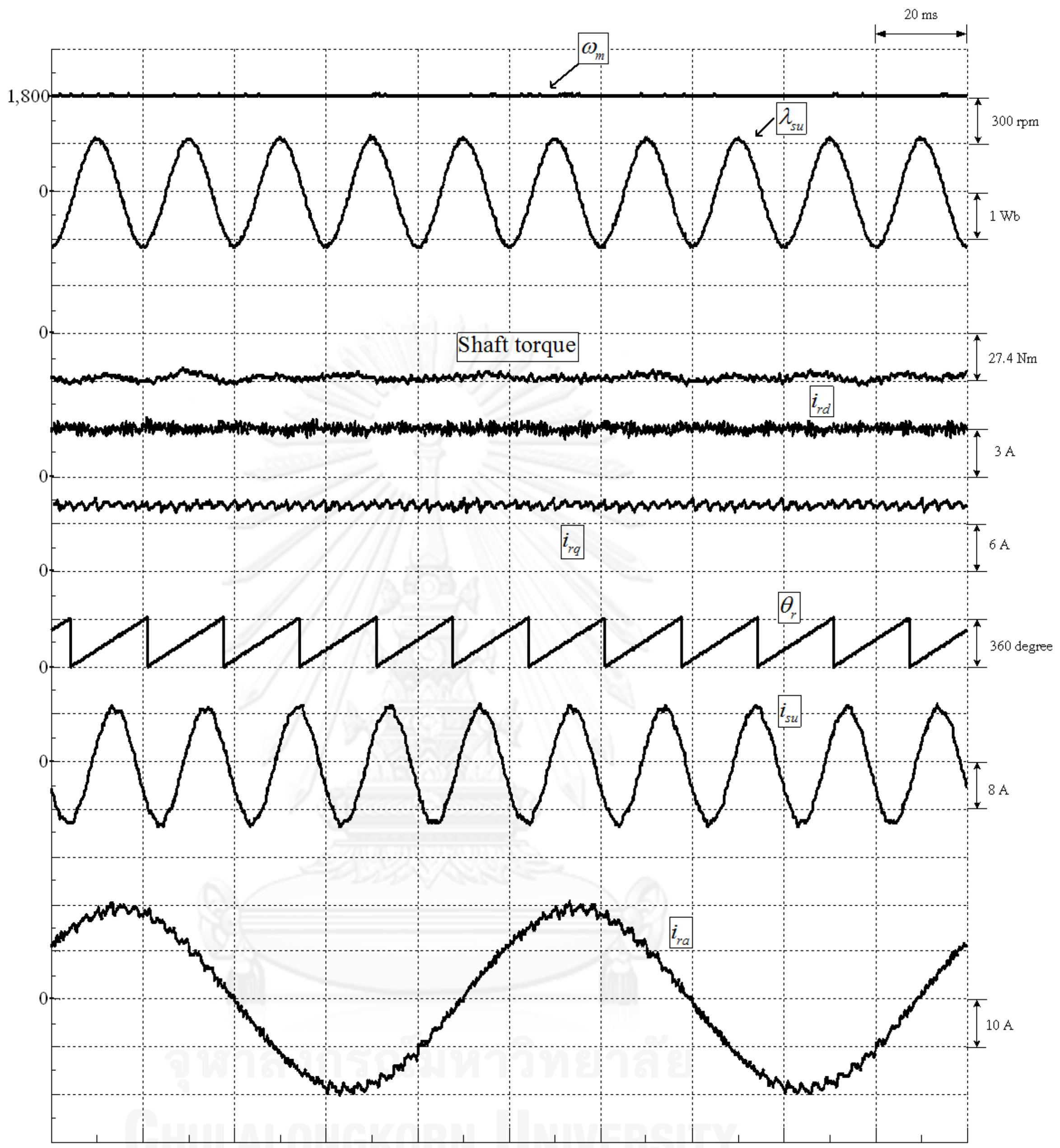
รูปที่ 2.18 ผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมเวกเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางที่ 1050 rpm สภาวะโหลดพิกัดในย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและ $i_{rd}^{*} = 3A$



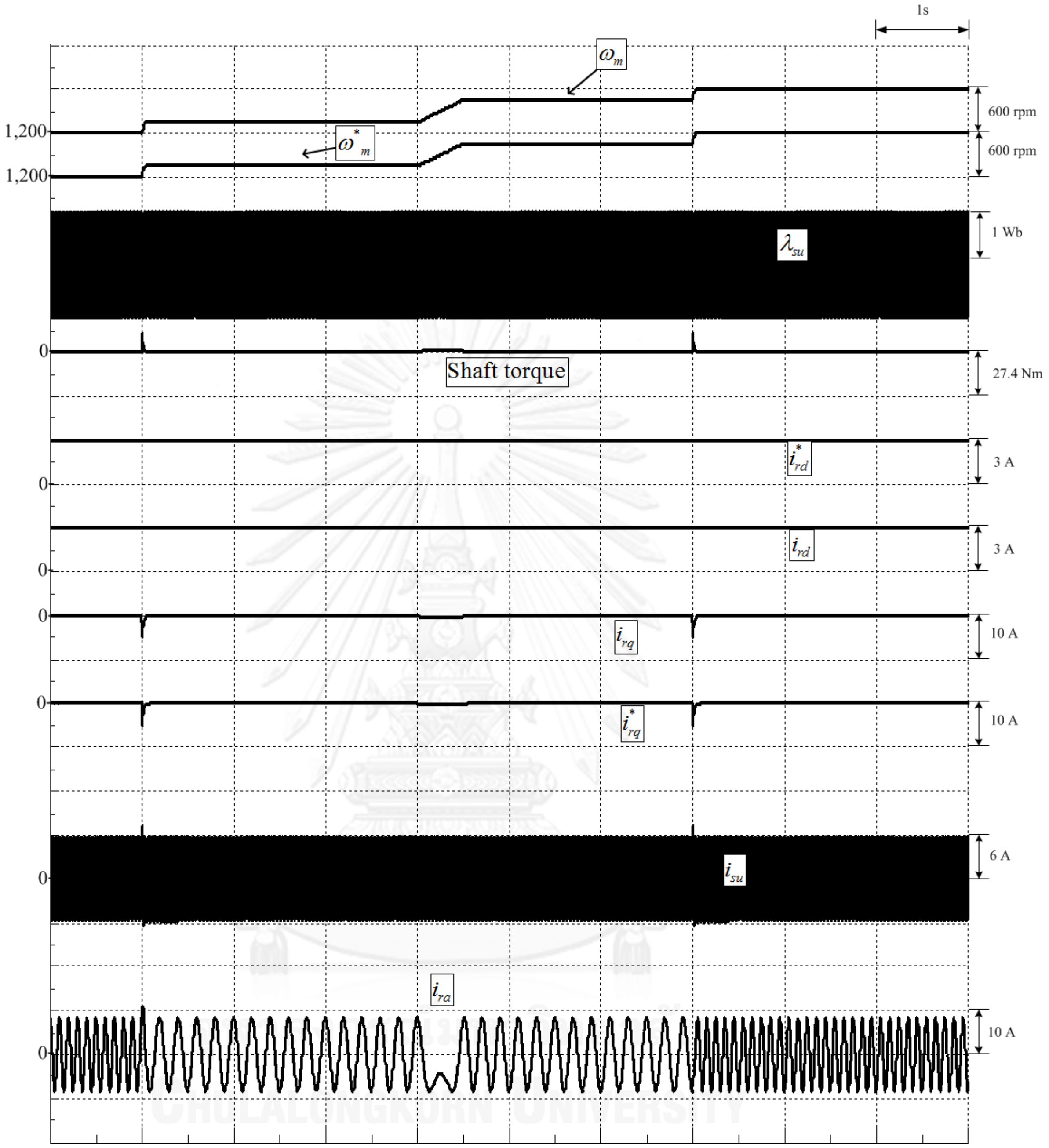
รูปที่ 2.19 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางที่ 1050 rpm สภาวะโหลดพิกัดในย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและ $i_{rd}^* = 3A$



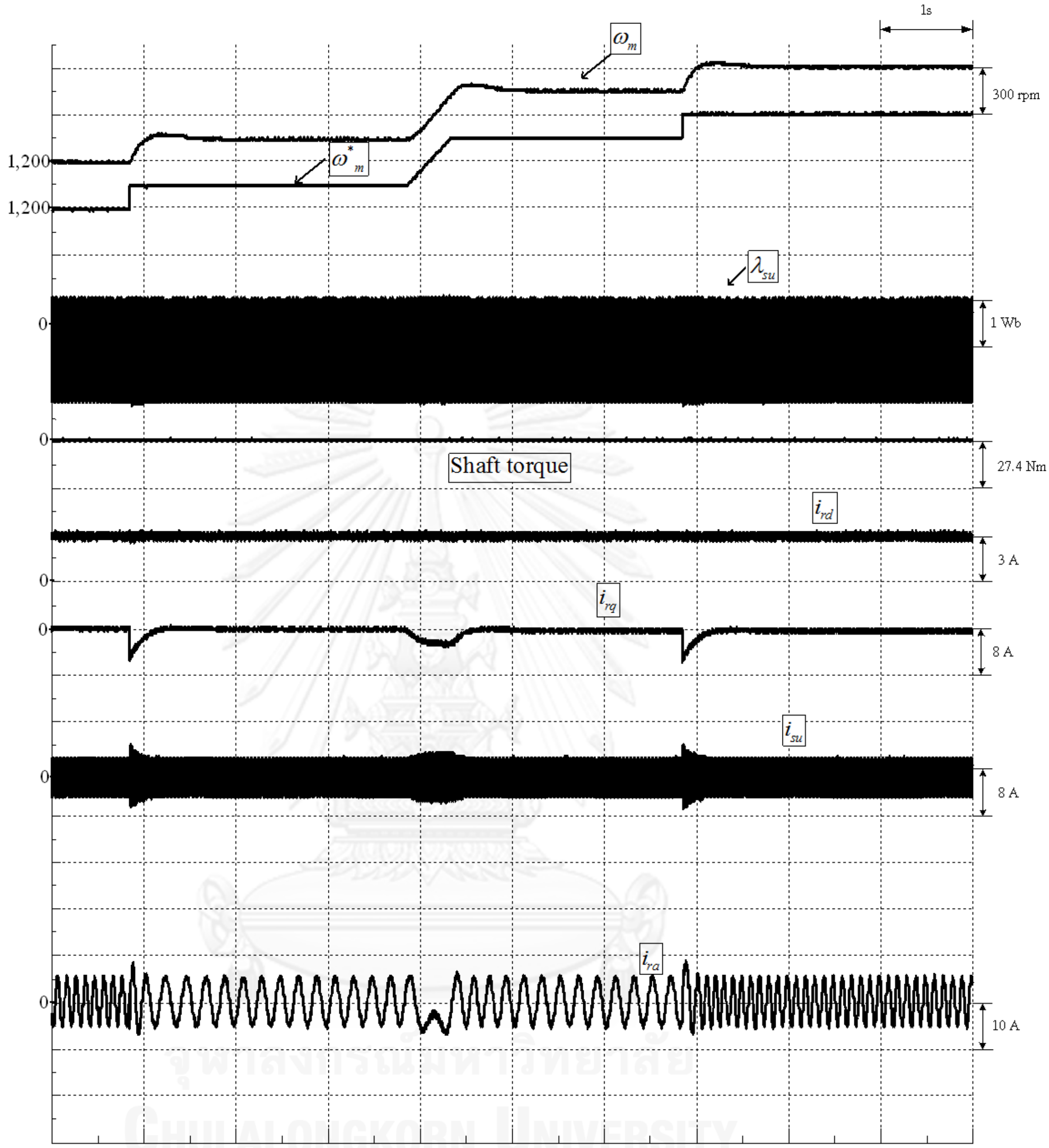
รูปที่ 2.20 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางที่ 1500 rpm สภาวะโหลดพิกัดในย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและ $i_{rd}^* = 3A$



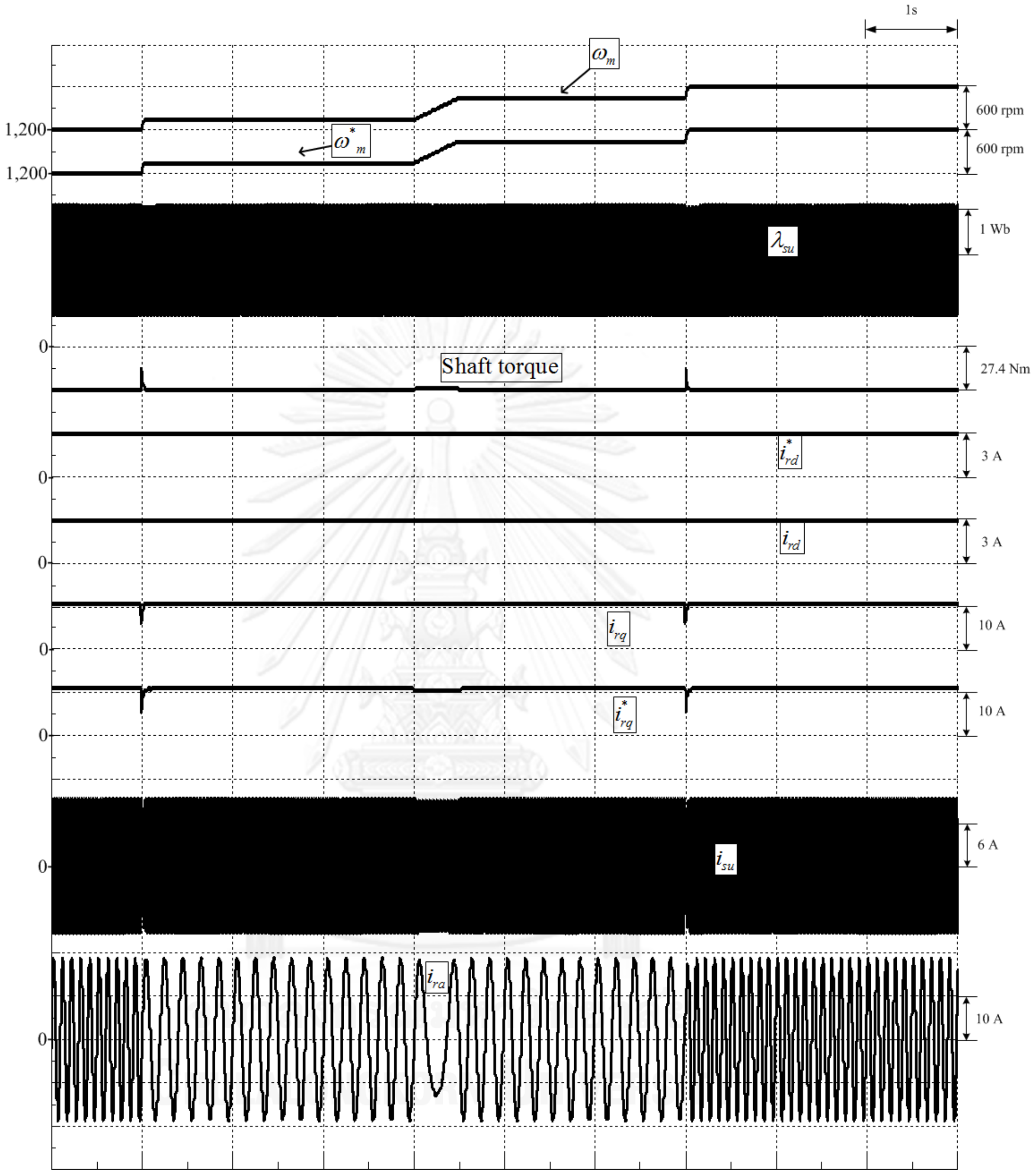
รูปที่ 2.21 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางที่ 1800 rpm สภาวะโหลดพิกัดในย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและ $i_{rd}^{*} = 3A$



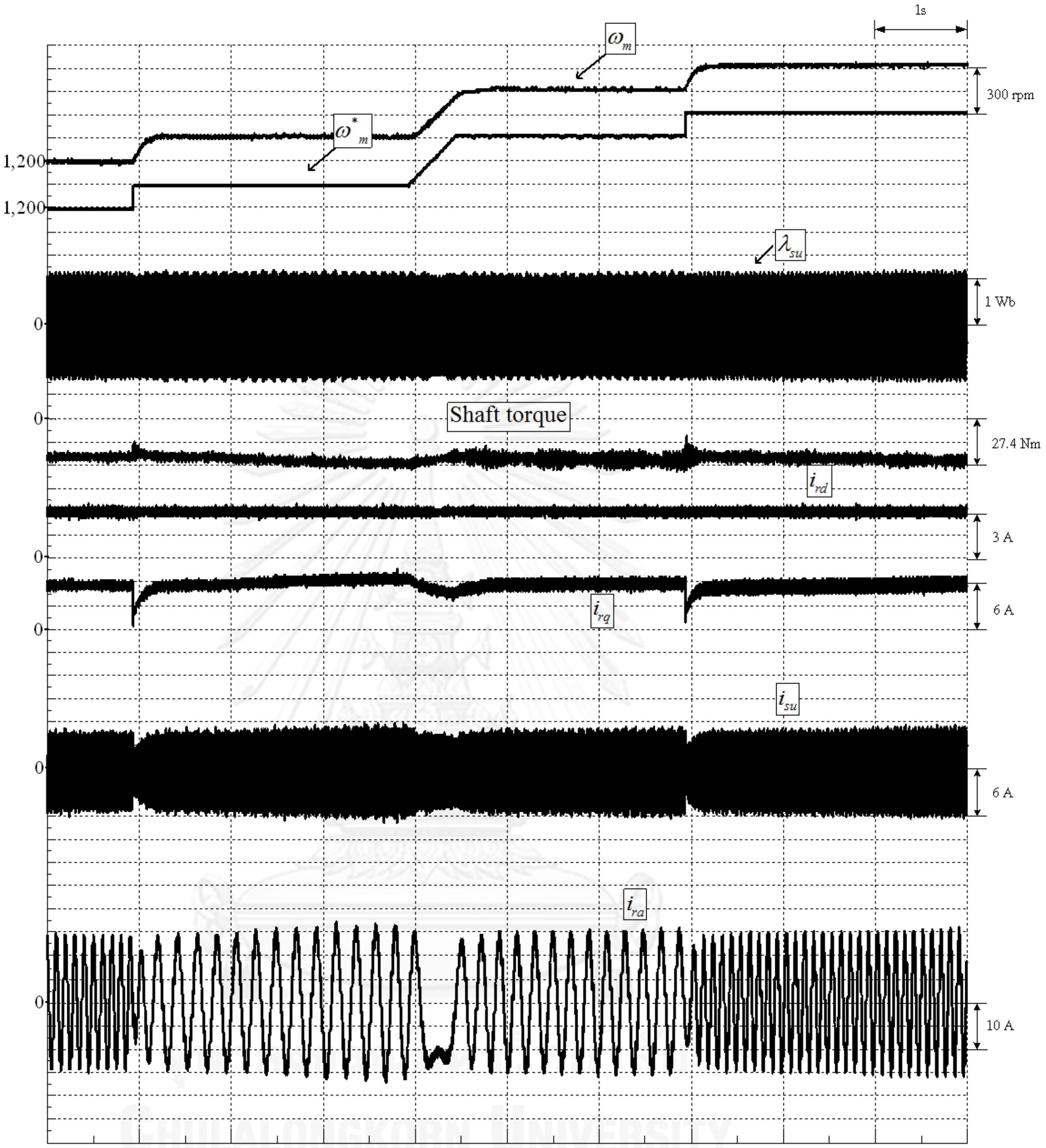
รูปที่ 2.22 ผลการจำลองของระบบควบคุมเวกเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางที่ในกรณีเปลี่ยนแปลงความเร็วแบบขั้นบันไดจาก 1200→1350→1650→1800 rpm ในสภาวะไร้โหลดและ $i^*_{rd} = 3A$



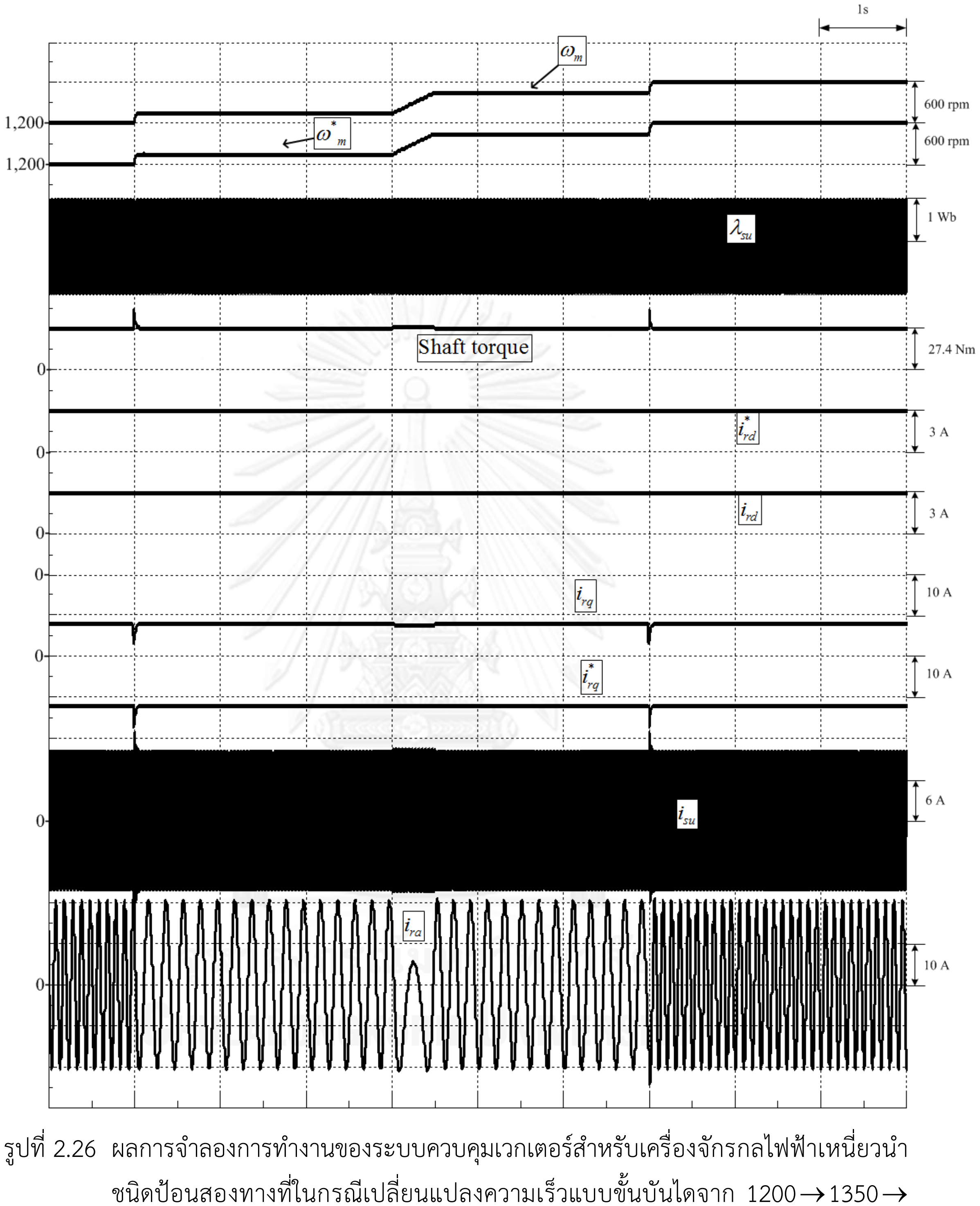
รูปที่ 2.23 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางในกรณีเปลี่ยนแปลงความเร็วแบบขั้นบันไดจาก 1200→1350→1650→1800 rpm ในสภาวะไร้โหลดและ $i_{rd}^* = 3A$



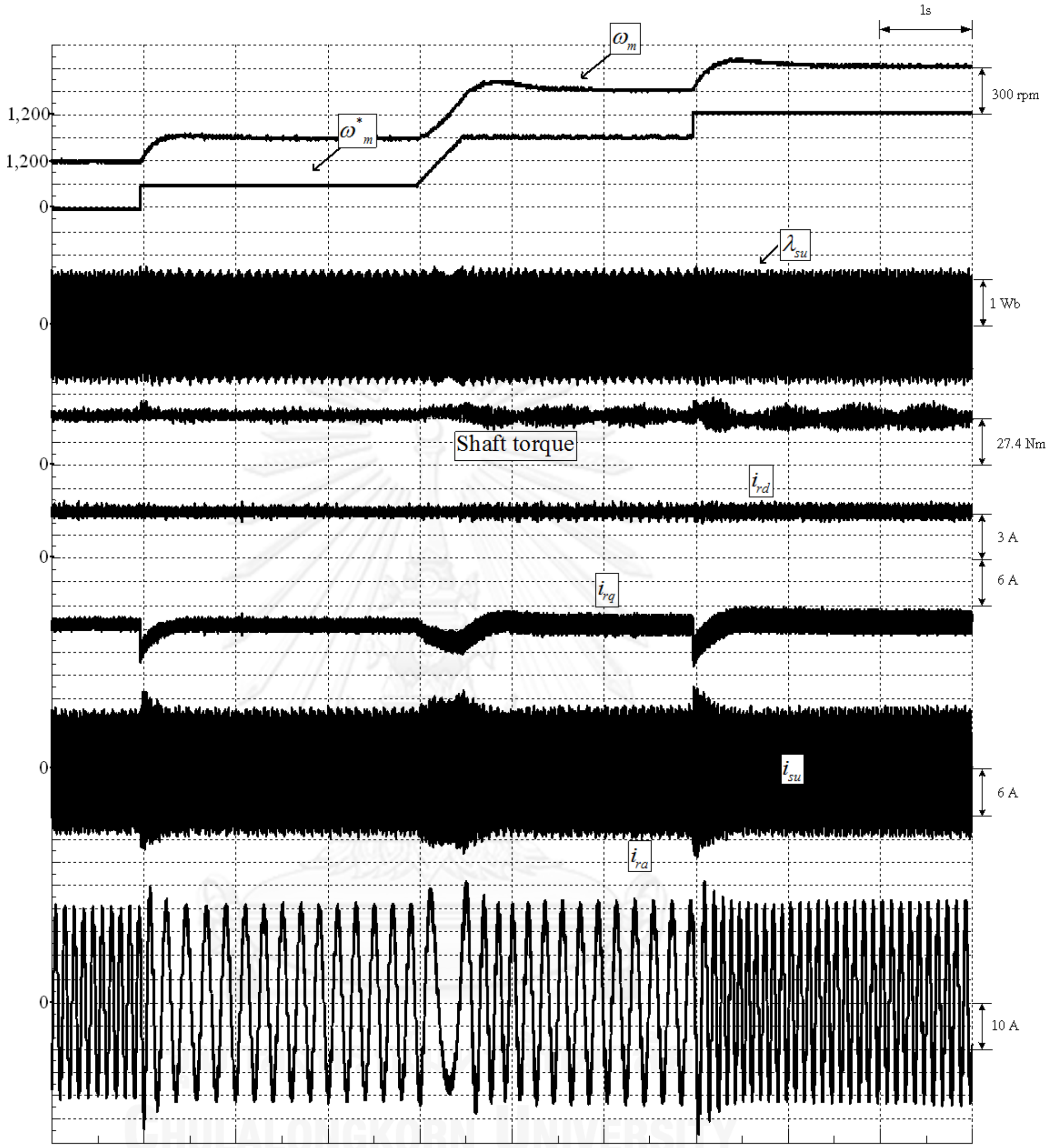
รูปที่ 2.24 ผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมเวกเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางในกรณีเปลี่ยนแปลงความเร็วแบบขั้นบันไดจาก 1200 $\rightarrow$ 1350 $\rightarrow$ 1650 $\rightarrow$ 1800rpm ในสภาวะโหลดพิกัดในย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและ $i_{rd}^* = 3A$



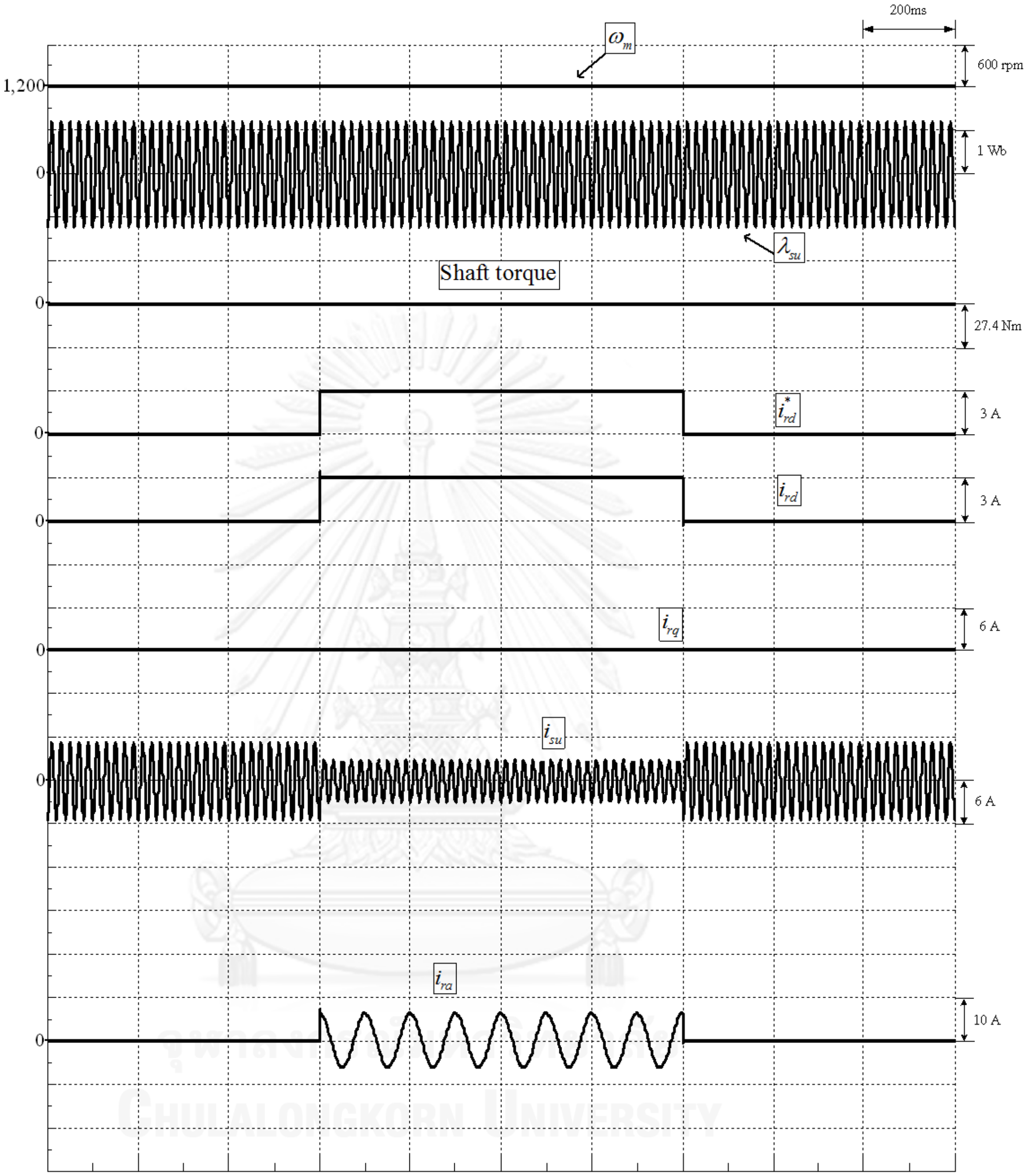
รูปที่ 2.25 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางที่ในกรณีเปลี่ยนแปลงความเร็วแบบขั้นบันไดจาก 1200→1350→1650→1800 rpm ในสภาวะโหลดพิกัดในย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและ $i^*_{rd} = 3A$



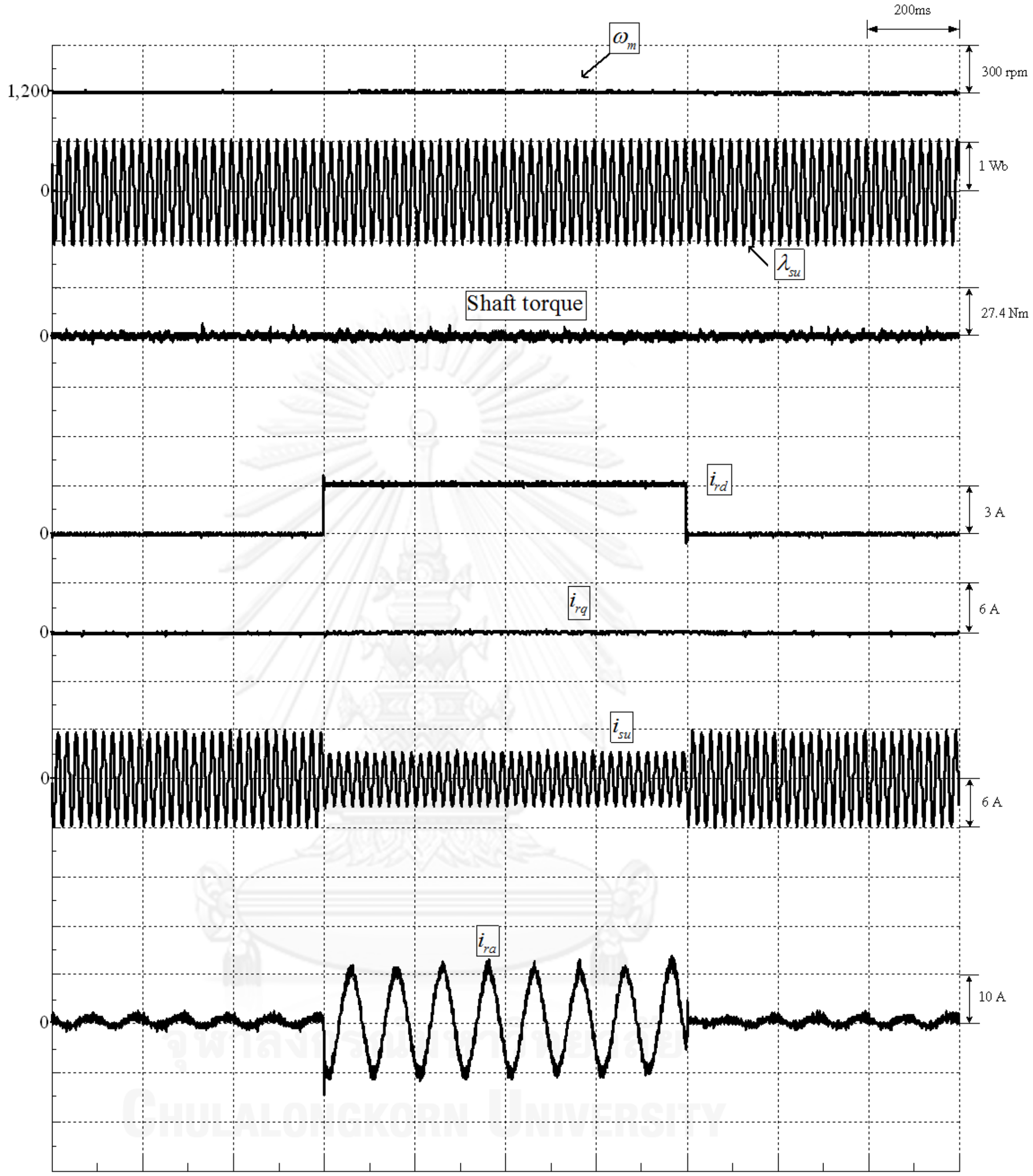
รูปที่ 2.26 ผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมเวกเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางที่ในกรณีเปลี่ยนแปลงความเร็วแบบขั้นบันไดจาก 1200 $\rightarrow$ 1350 $\rightarrow$ 1650 $\rightarrow$ 1800 rpm ในสภาวะโหลดพิกัดในย่านมอเตอร์และ $i_{rd}^* = 3A$



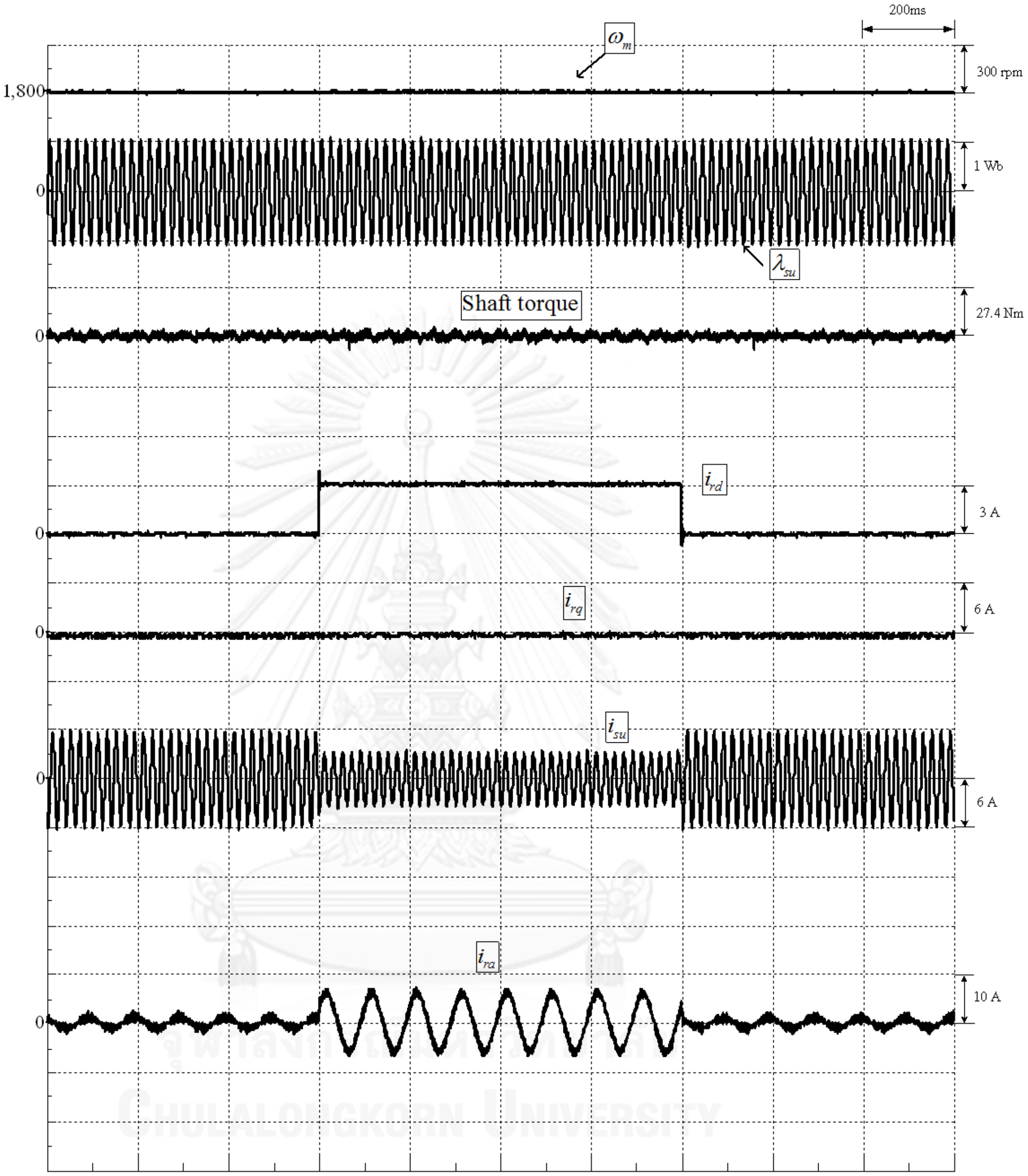
รูปที่ 2.27 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางที่ในกรณีเปลี่ยนแปลงความเร็วแบบขั้นบันไดจาก 1200→1350→1650→1800 rpm ในสภาวะโหลดพิกัดในย่านมอเตอร์และ $i^*_{rd} = 3A$



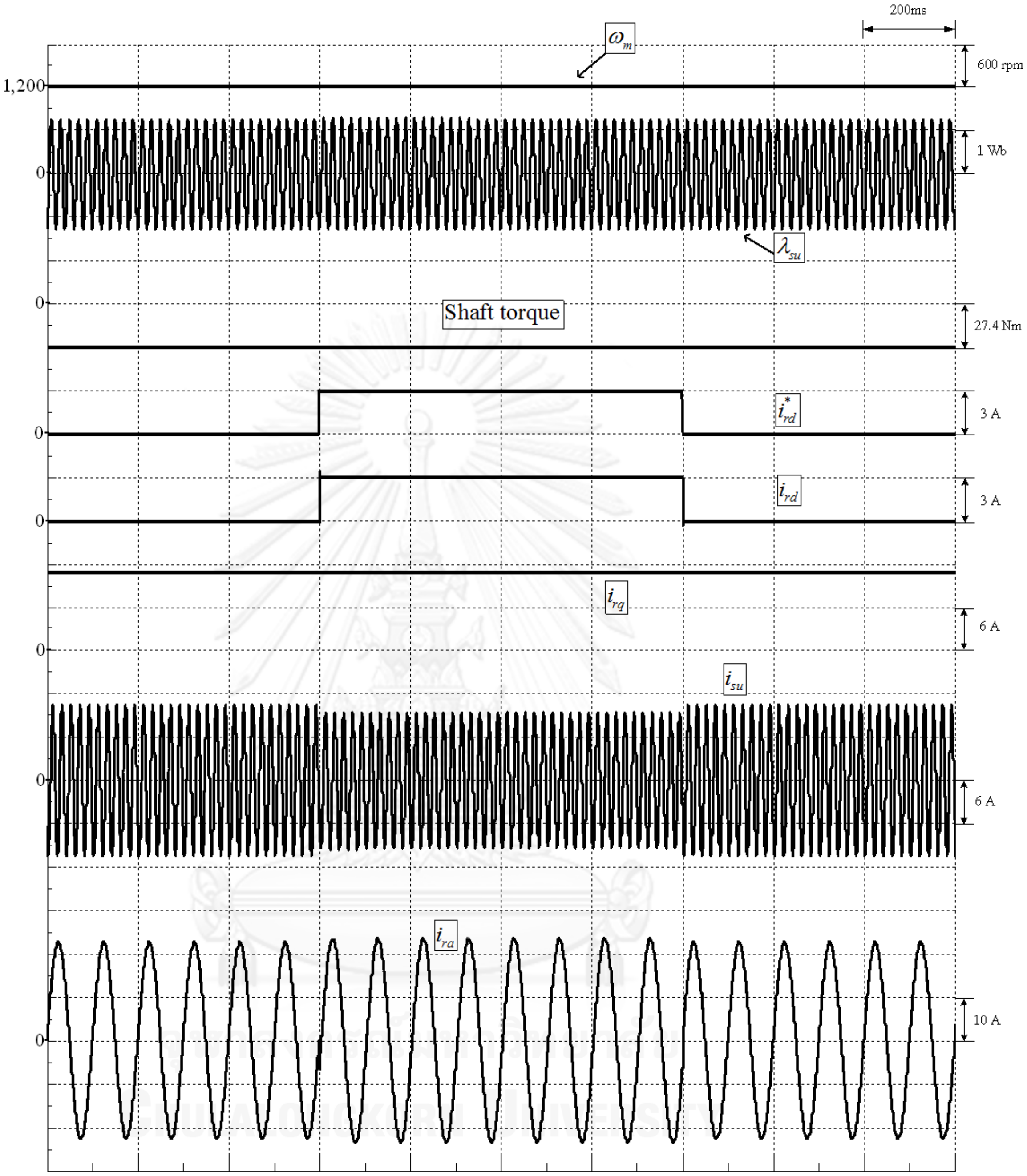
รูปที่ 2.28 ผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมเวกเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางที่ความเร็ว 1200 rpm ในกรณีเปลี่ยนแปลงกระแสกระตุ้นฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์แบบขั้นบันได ($i_{rd}^* = 0 \rightarrow 3A$) และสภาวะไร้โหลด



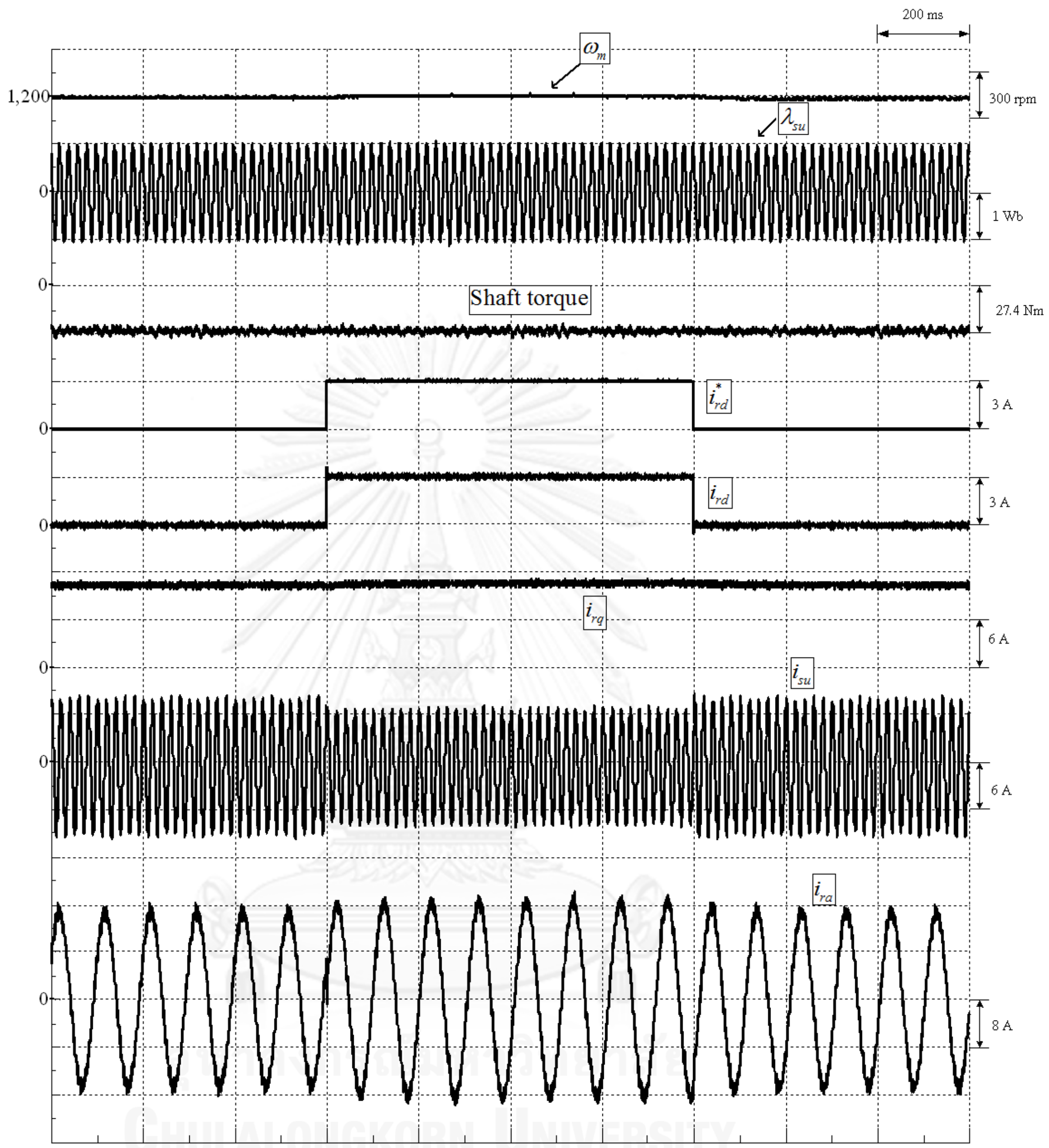
รูปที่ 2.29 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางที่ความเร็ว 1200 rpm ในกรณีเปลี่ยนแปลงกระแสกระตุ้นฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์แบบขั้นบันได($i_{rd}^{*} = 0 \rightarrow 3A$) และสภาวะไร้โหลด



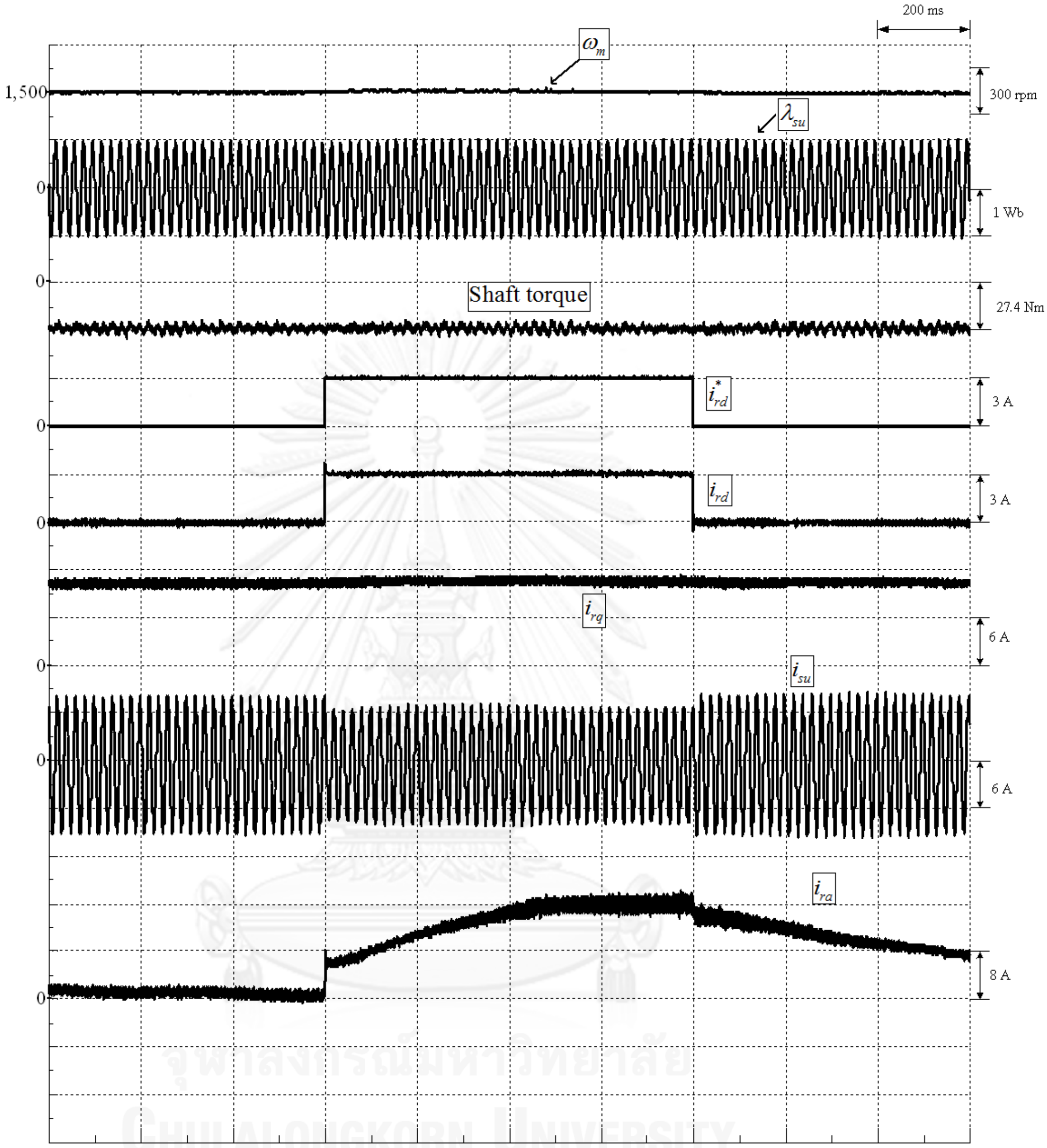
รูปที่ 2.30 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางที่ความเร็ว 1800 rpm ในกรณีเปลี่ยนแปลงกระแสกระตุ้นฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์แบบขั้นบันได ($i_{rd}^{*} = 0 \rightarrow 3A$) และสภาวะไร้โหลด



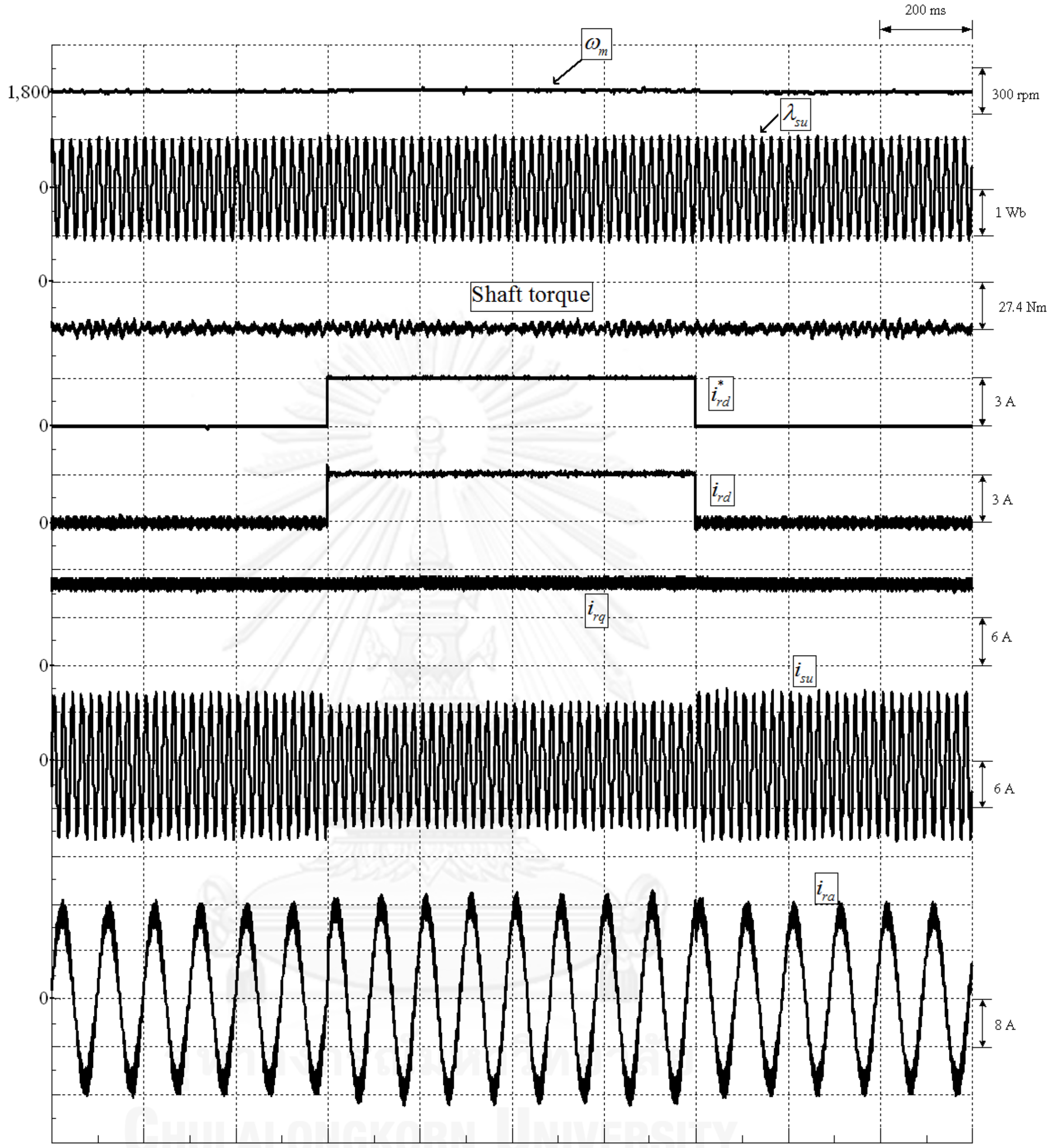
รูปที่ 2.31 ผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมเวกเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางที่ความเร็ว 1200 rpm ในกรณีเปลี่ยนแปลงกระแสกระตุ้นฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์แบบขั้นบันได ($i_{rd}^* = 0 \rightarrow 3A$) และสภาวะโหลดพิกัดย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



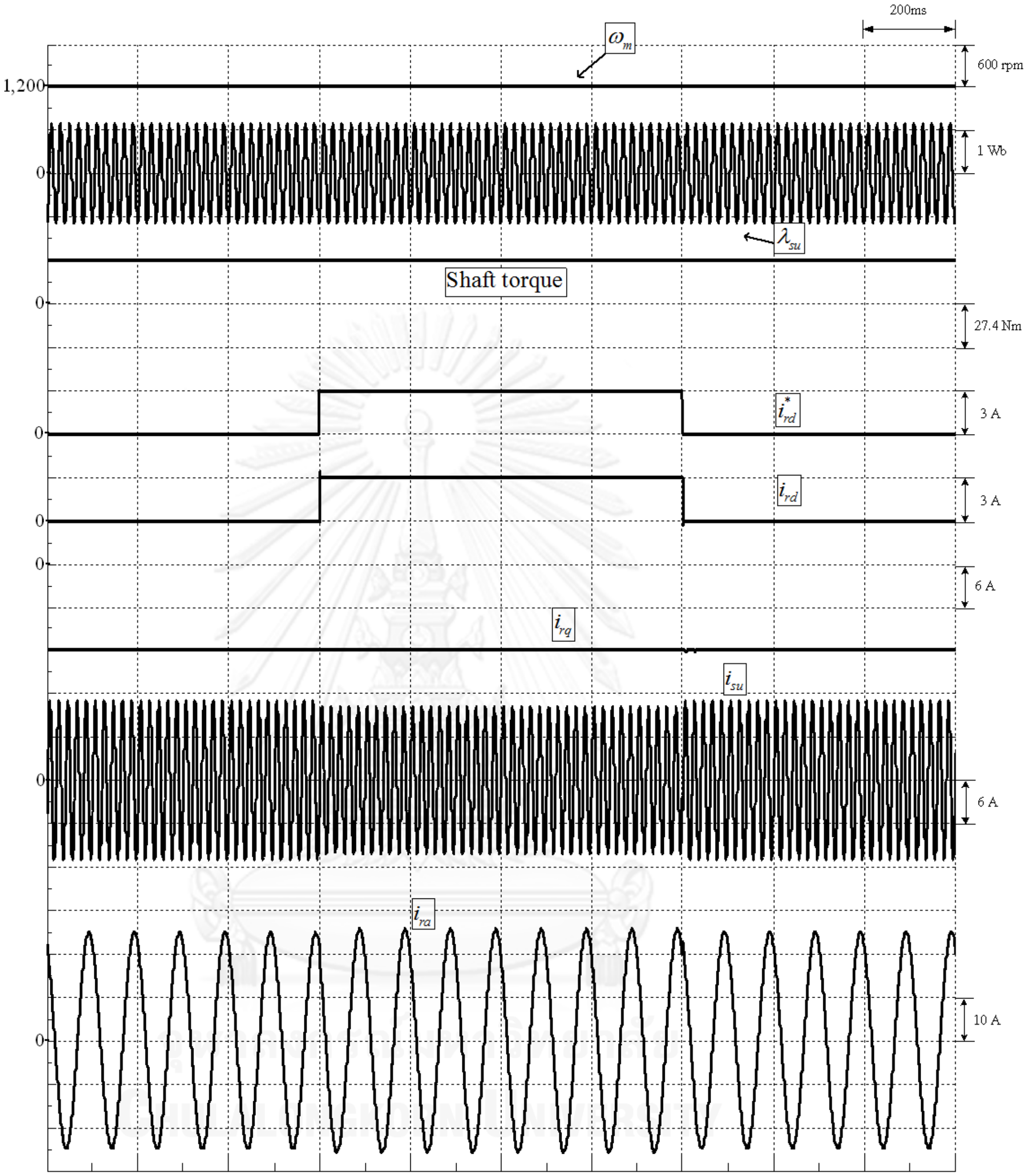
รูปที่ 2.32 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางที่ความเร็ว 1200 rpm ในกรณีเปลี่ยนแปลงกระแสกระตุ้นฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์แบบขั้นบันได ($i_{rd}^* = 0 \rightarrow 3A$) และสภาวะโหลดพิกัดย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



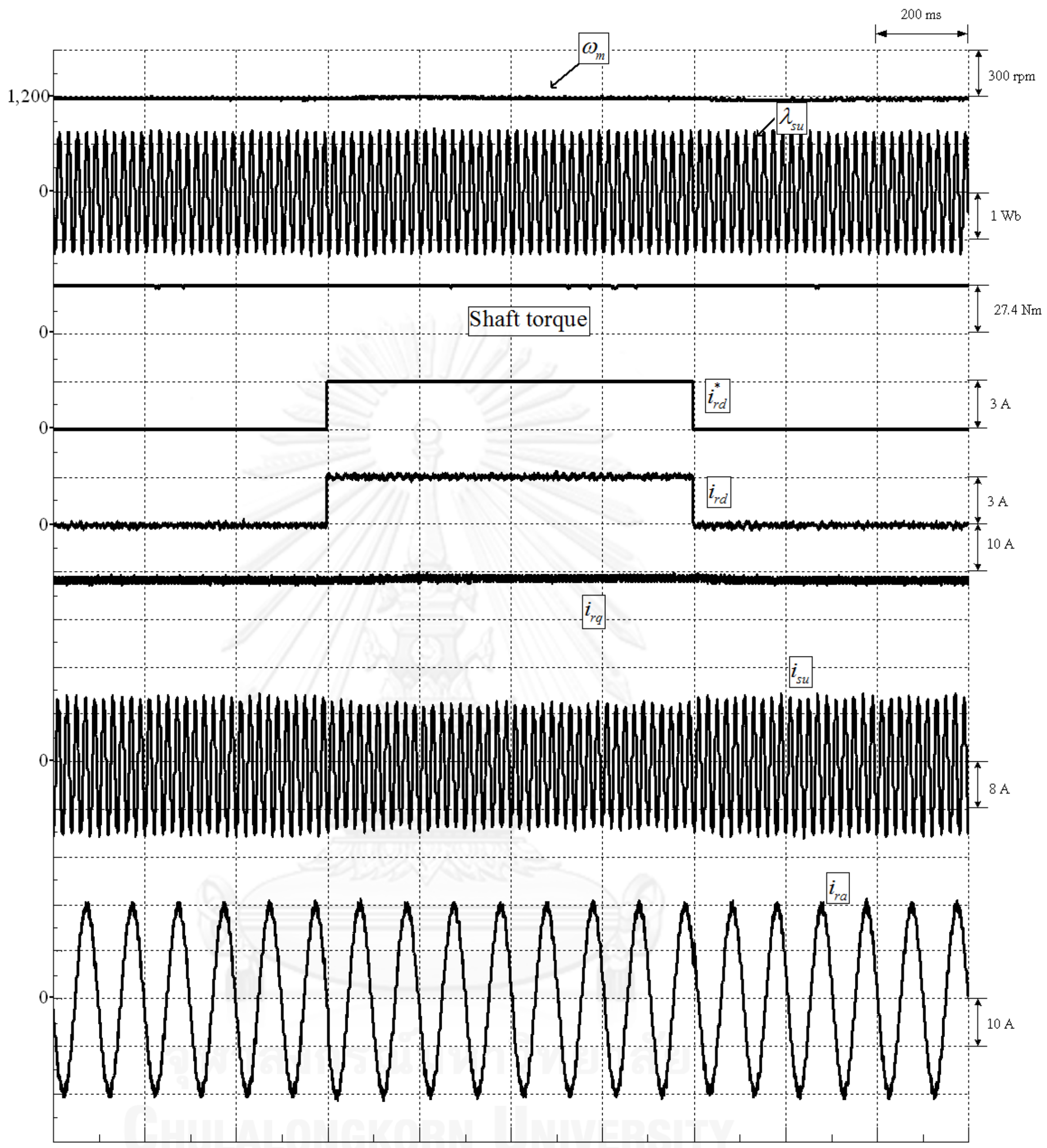
รูปที่ 2.33 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางที่ความเร็ว 1500 rpm ในกรณีเปลี่ยนแปลงกระแสกระตุ้นฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์แบบขั้นบันได ($i_{rd}^{*} = 0 \rightarrow 3A$) และสภาวะโหลดพิกัดย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



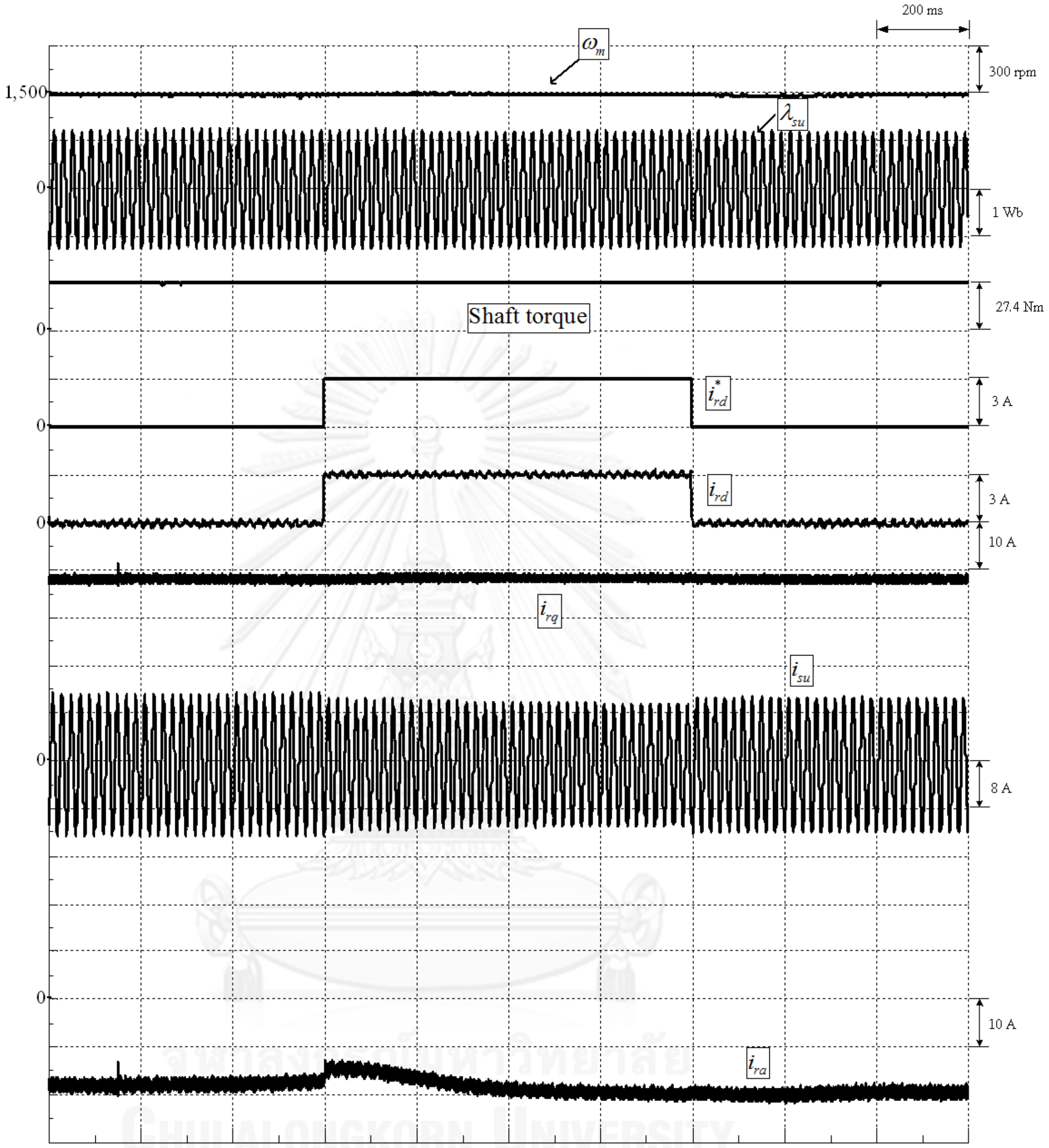
รูปที่ 2.34 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางที่ความเร็ว 1800 rpm ในกรณีเปลี่ยนแปลงกระแสกระตุ้นฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์แบบขั้นบันไดจาก ($i_{rd}^* = 0 \rightarrow 3A$) และสภาวะโหลดพิกัดย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



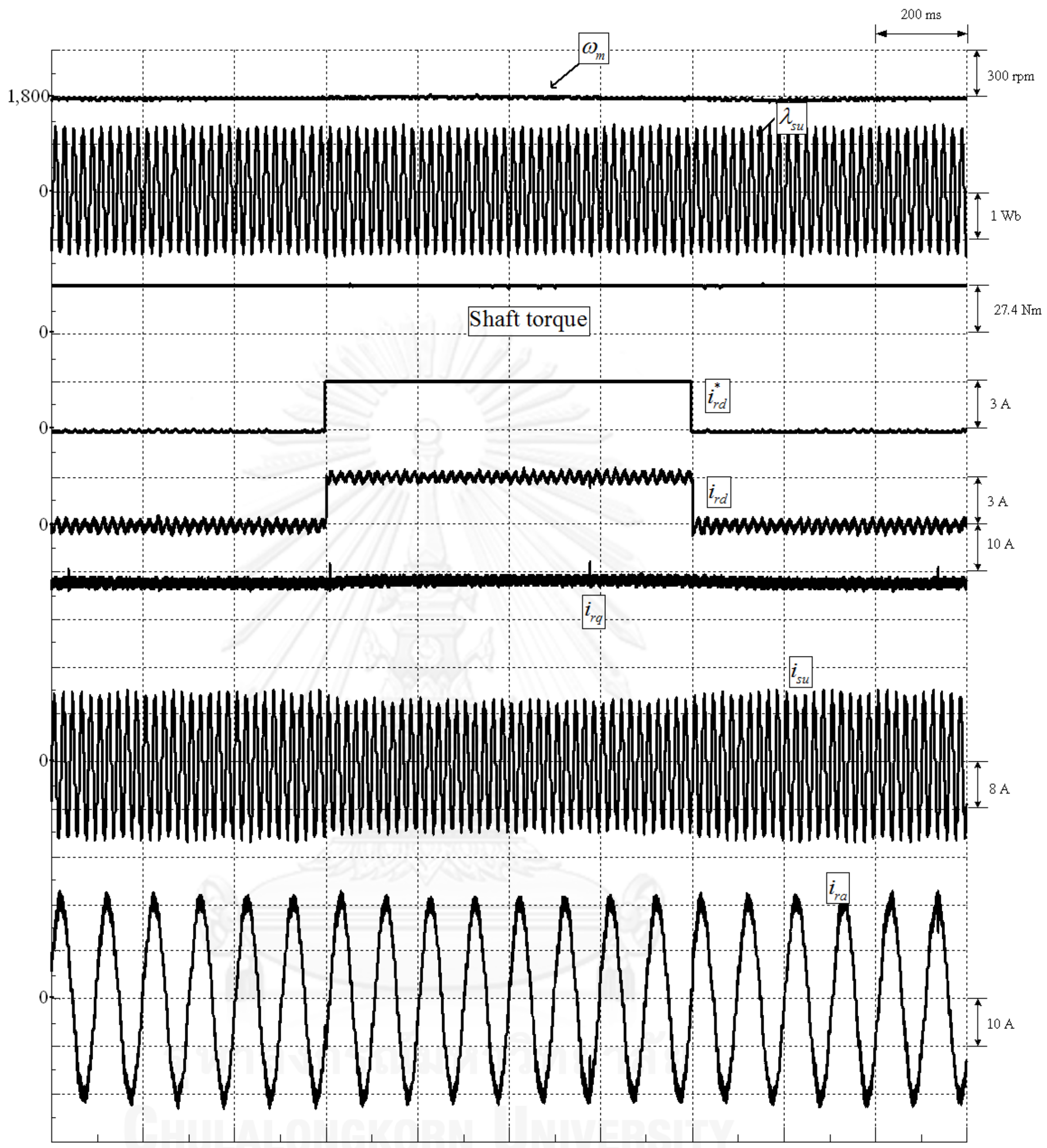
รูปที่ 2.35 ผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมเวกเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางที่ความเร็ว 1200 rpm ในกรณีเปลี่ยนแปลงกระแสกระตุ้นฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์แบบขั้นบันได ($i_{rd}^{*} = 0 \rightarrow 3A$) และสภาวะโหลดพิกัดย่านมอเตอร์



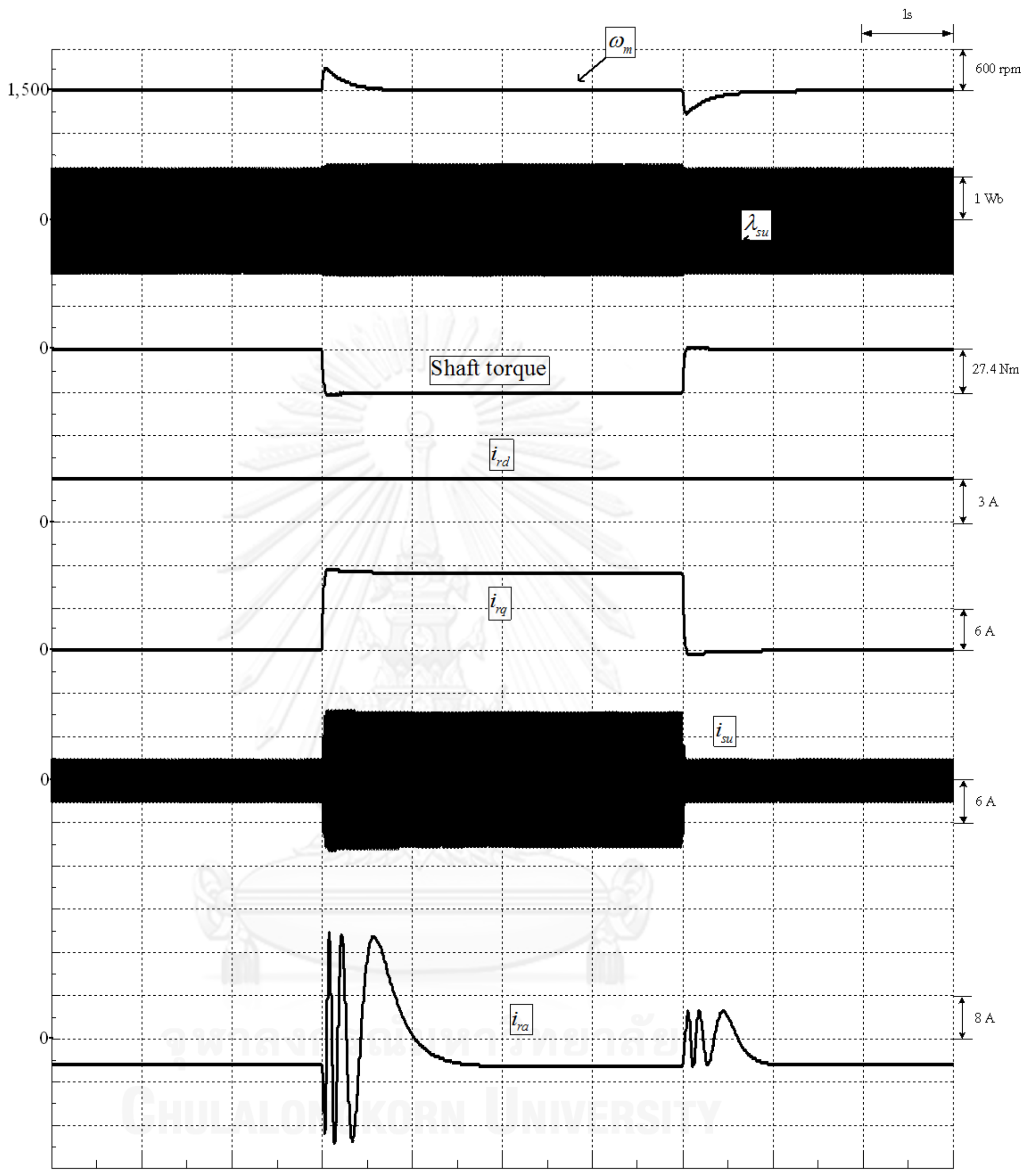
รูปที่ 2.36 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางที่ความเร็ว 1200 rpm ในกรณีเปลี่ยนแปลงกระแสกระตุ้นฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์แบบขั้นบันได ($i_{rd}^* = 0 \rightarrow 3A$) และสภาวะโหลดพิกัดย่านมอเตอร์



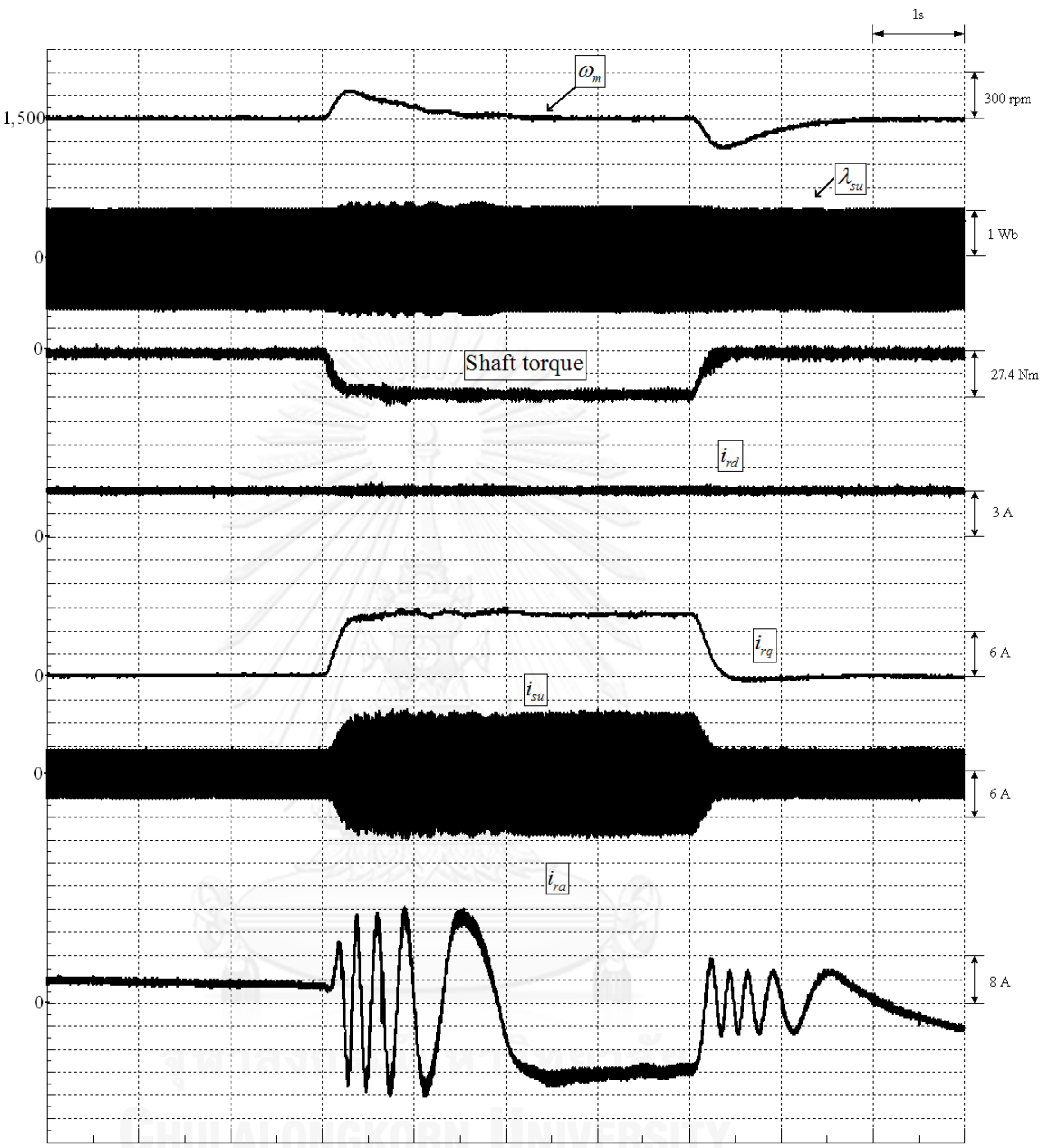
รูปที่ 2.37 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางที่ความเร็ว 1500 rpm ในกรณีเปลี่ยนแปลงกระแสกระตุ้นฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์แบบขั้นบันได ($i_{rd}^* = 0 \rightarrow 3A$) และสภาวะโหลดพิกัดย่านมอเตอร์



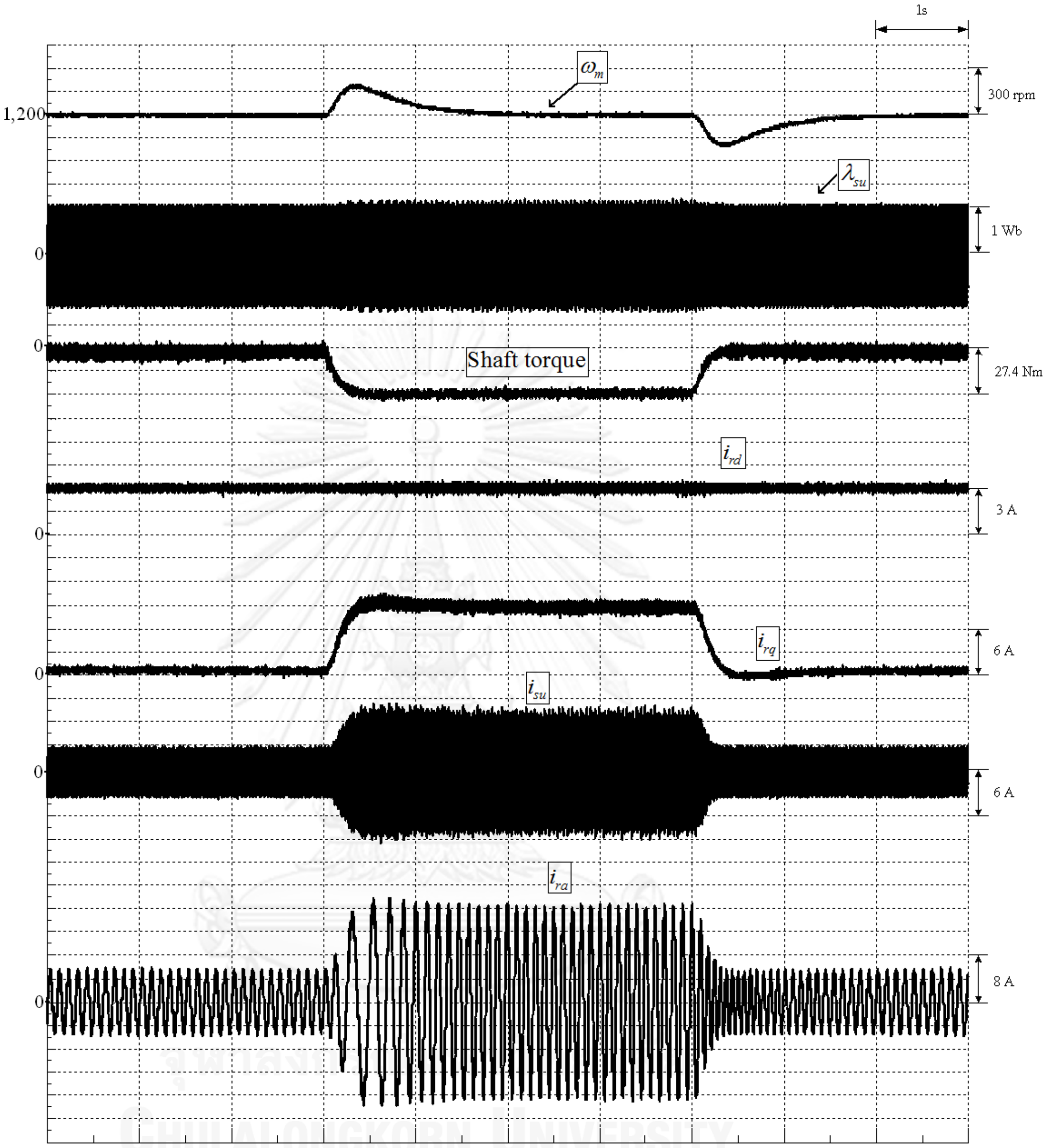
รูปที่ 2.38 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางที่ความเร็ว 1800 rpm ในกรณีเปลี่ยนแปลงกระแสกระตุ้นฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์แบบขั้นบันได ($i_{rd}^* = 0 \rightarrow 3A$) และสภาวะโหลดพิกัดย่านมอเตอร์



รูปที่ 2.39 ผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมเวกเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางในกรณีเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้นบันไดไปยังสภาวะโหลดพิกัดย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ความเร็ว 1500 rpm และ $i_{rd}^{*} = 3A$

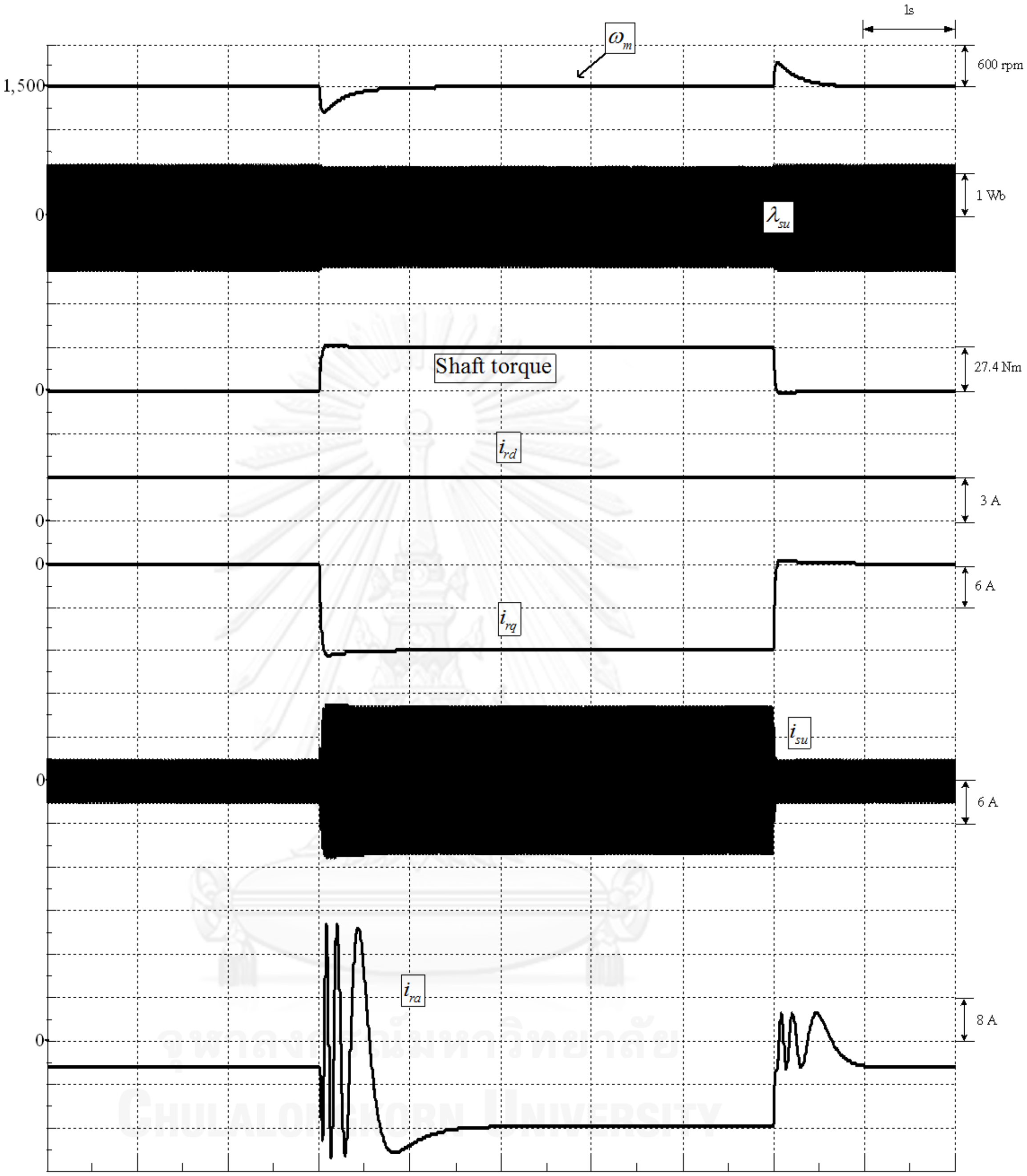


รูปที่ 2.40 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางในกรณีเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้นบันไดไปยังสภาวะโหลดพิกัดย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ความเร็ว 1500 rpm และ $i_{rd}^{*} = 3A$

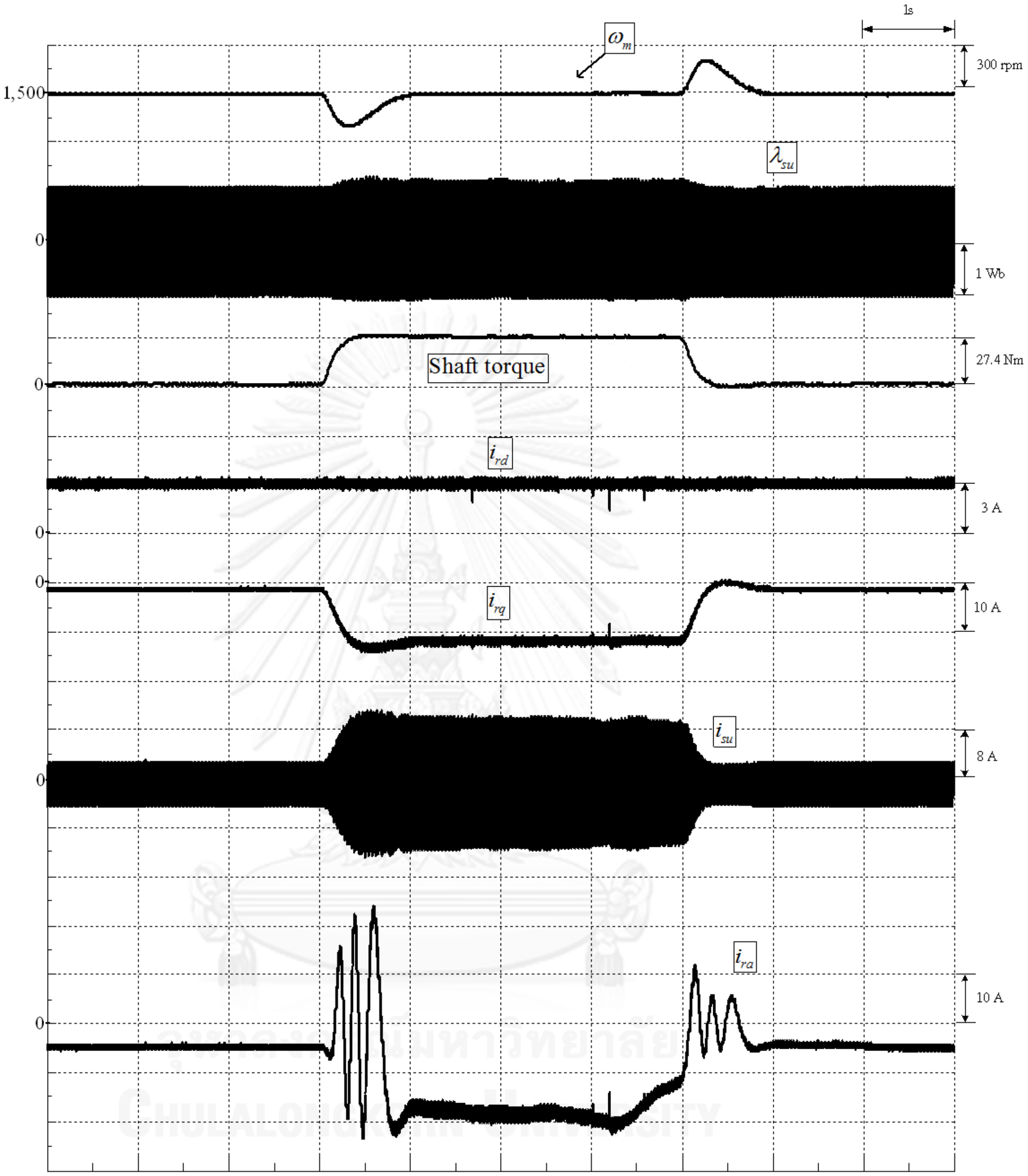


รูปที่ 2.41 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางในกรณีเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้นบันไดไปยังสภาวะโหลดพิกัดย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ความเร็ว 1200 rpm และ $i_{rd}^{*} = 3A$

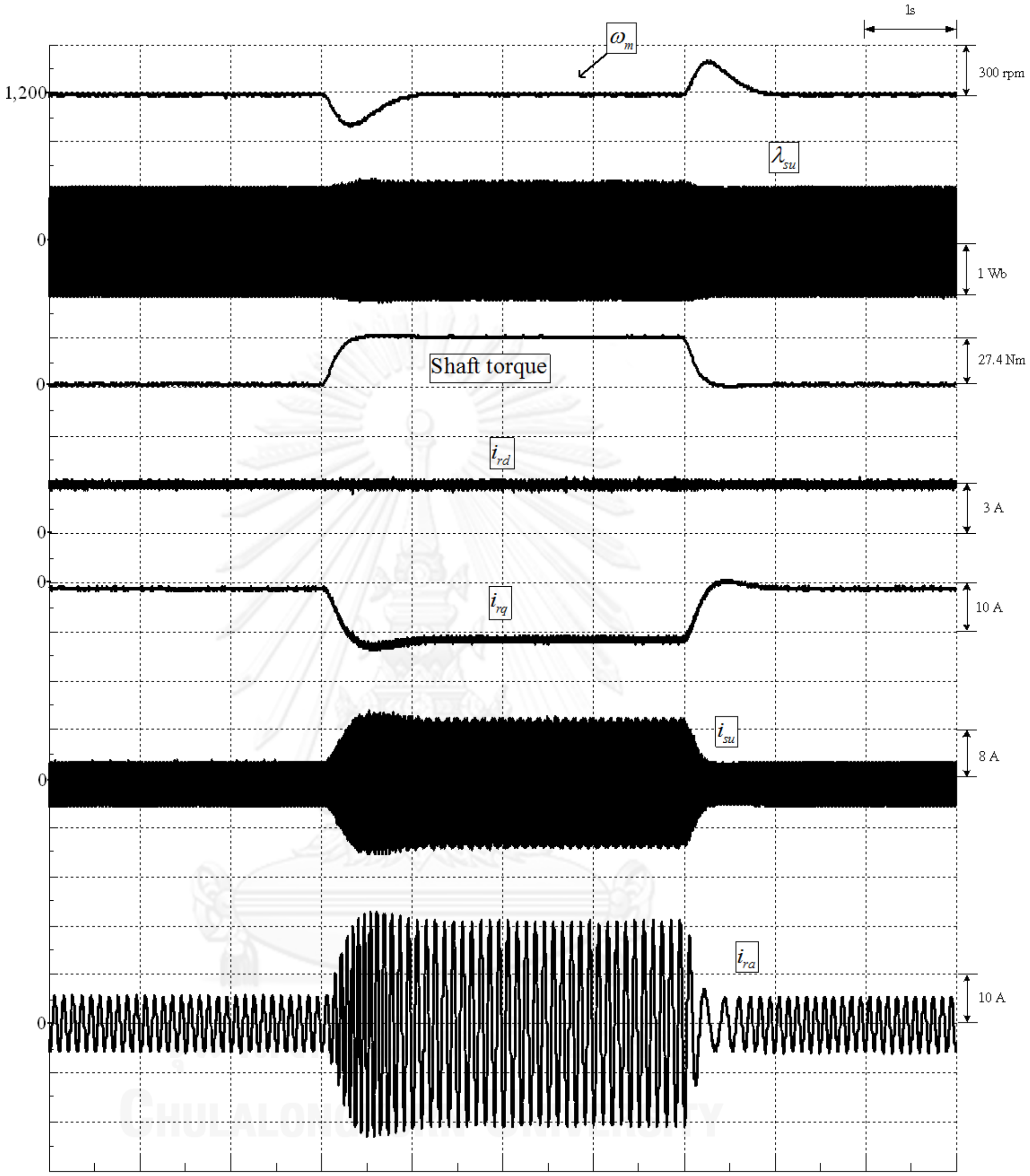
รูปที่ 2.42 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางในกรณีเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้นบันไดไปยังสภาวะโหลดพิกัดย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ความเร็ว 1800 rpm และ $i_{rd}^{*} = 3A$



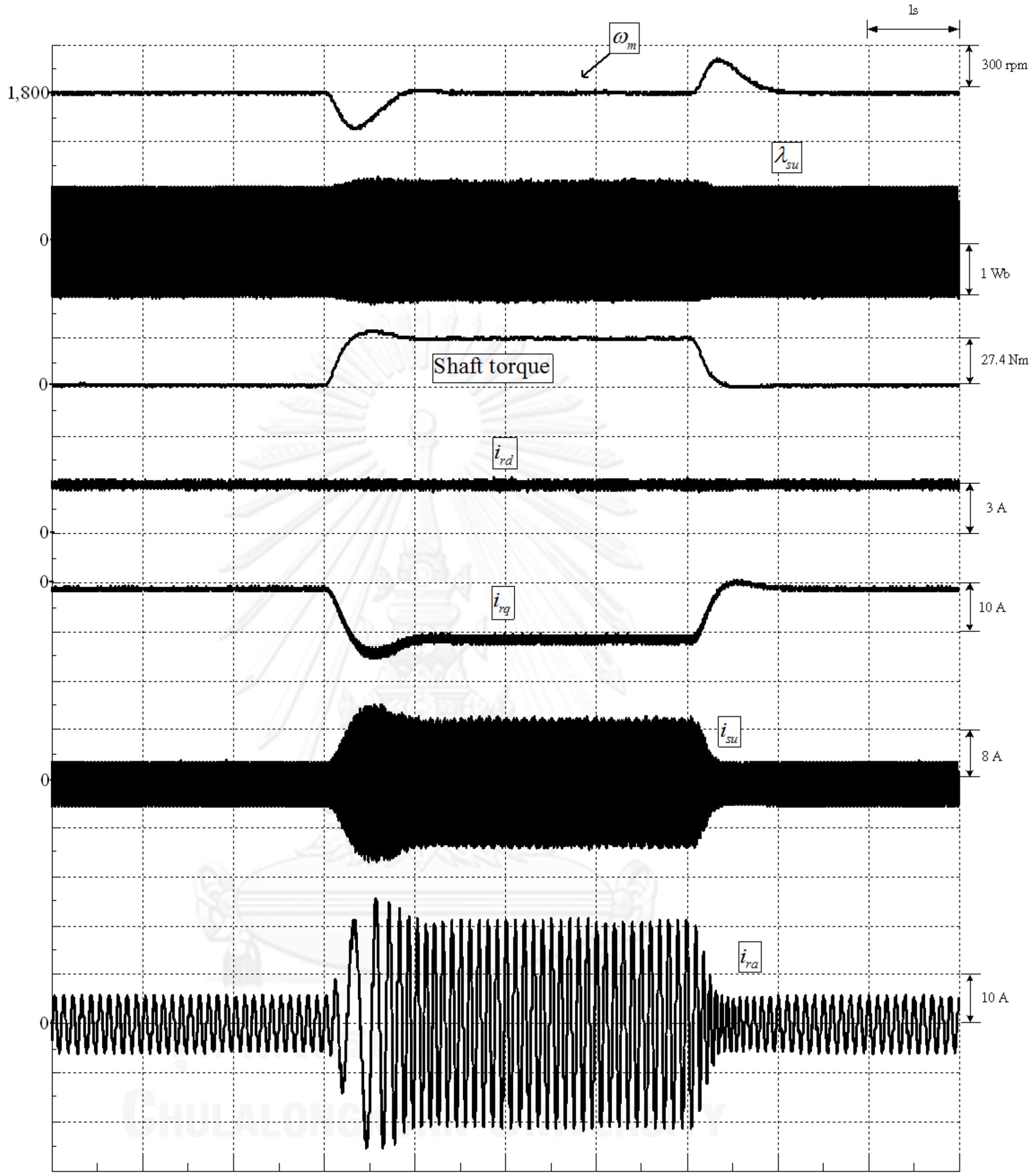
รูปที่ 2.43 ผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมเวกเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางในกรณีเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้นบันไดไปยังสภาวะโหลดพิกัดย่านมอเตอร์ที่ความเร็ว 1500 rpm และ $i_{rd}^{*} = 3A$



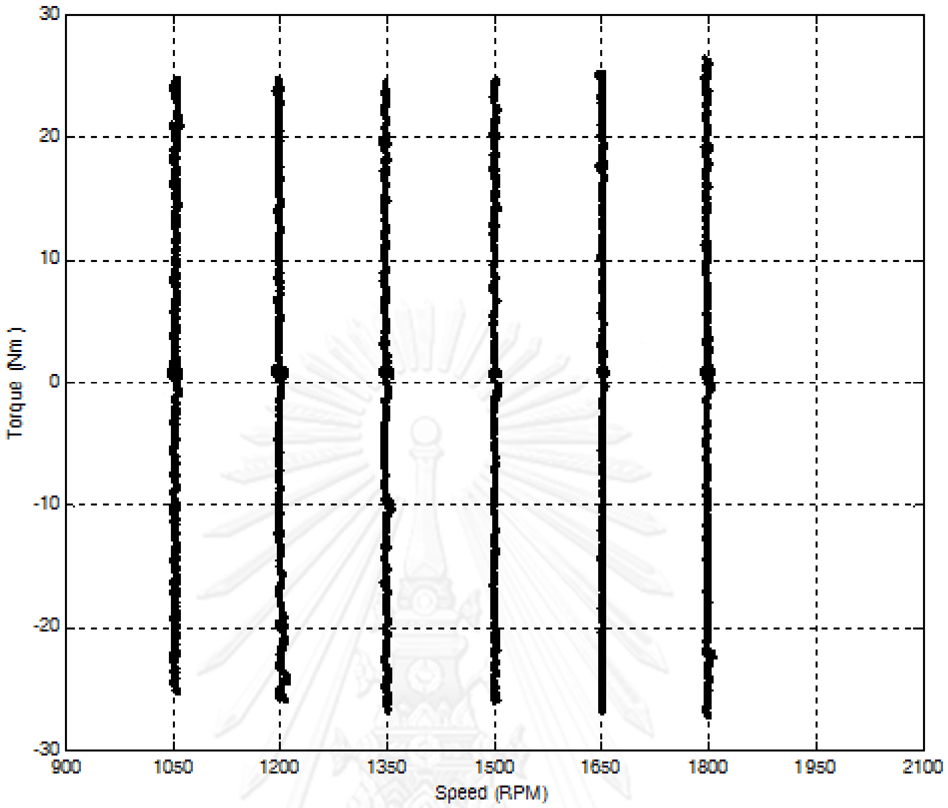
รูปที่ 2.44 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางในกรณีเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้นบันไดไปยังสภาวะโหลดพิกัดย่านมอเตอร์ที่ความเร็ว 1500 rpm และ $i_{rd}^* = 3A$



รูปที่ 2.45 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางในกรณีเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้นบันไดไปยังสภาวะโหลดพิกัดย่านมอเตอร์ที่ความเร็ว 1200 rpm และ $i_{rd}^* = 3A$



รูปที่ 2.46 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางในกรณีเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้นบันไดไปยังสภาวะโหลดพิกัดย่านมอเตอร์ที่ความเร็ว 1800 rpm และ $i_{rd}^{*} = 3A$



รูปที่ 2.47 ลักษณะสมบัติของแรงบิดและความเร็วของการควบคุมแบบเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วมที่ได้จากผลการทดลองการทำงานในย่านความเร็วต่างๆ ทั้งความเร็วซับซิงโครนัส ความเร็วซิงโครนัสและความเร็วซุปเปอร์ซิงโครนัส

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 2 ตารางสรุปผลการทดลองระบบควบคุมเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วม

เงื่อนไขการทำงาน	ความเร็ว (rpm)	สภาวะไร้โหลด	สภาวะเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	สภาวะมอเตอร์
2.5.1 ผลตอบสนองในสภาวะความเร็วคงที่				
1. ผลการจำลองการทำงานขณะ $i_{rd}^{*} = 3A$	1050	รูปที่ 2.8	รูปที่ 2.18	รูปที่ 2.14
2. ผลการทดลองการทำงานขณะ $i_{rd}^{*} = 3A$	1050	รูปที่ 2.9	รูปที่ 2.19	รูปที่ 2.15
	1500	รูปที่ 2.10	รูปที่ 2.20	รูปที่ 2.16
	1800	รูปที่ 2.11	รูปที่ 2.21	รูปที่ 2.17
3. ผลการทดลองการทำงานขณะ $i_{rd}^{*} = 0A$	1050	รูปที่ 2.12	-	-
	1800	รูปที่ 2.13	-	-
2.5.2 ผลตอบสนองในสภาวะชั่วครู่เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเร็ว ($1200 \rightarrow 1350 \rightarrow 1650 \rightarrow 1800$ rpm)				
1. ผลการจำลองการทำงานขณะ $i_{rd}^{*} = 3A$	*	รูปที่ 2.22	รูปที่ 2.24	รูปที่ 2.26
2. ผลการทดลองการทำงานขณะ $i_{rd}^{*} = 3A$	*	รูปที่ 2.23	รูปที่ 2.25	รูปที่ 2.27
2.5.3 ผลตอบสนองต่อกระแสกระตุ้นฟลักซ์แบบขั้นบันได				
1. ผลการจำลองการทำงานขณะ $i_{rd}^{*} = 0 \rightarrow 3A$	1200	รูปที่ 2.28	รูปที่ 2.31	รูปที่ 2.35
2. ผลการทดลองการทำงานขณะ $i_{rd}^{*} = 0 \rightarrow 3A$	1200	รูปที่ 2.29	รูปที่ 2.32	รูปที่ 2.36
	1500	-	รูปที่ 2.33	รูปที่ 2.37
	1800	รูปที่ 2.30	รูปที่ 2.34	รูปที่ 2.38
2.5.4 ผลตอบสนองต่อโหลดแบบขั้นบันได				
1. ผลการจำลองการทำงานขณะ $i_{rd}^{*} = 3A$	1500	-	รูปที่ 2.39	รูปที่ 2.43
2. ผลการทดลองการทำงานขณะ $i_{rd}^{*} = 3A$	1200	-	รูปที่ 2.41	รูปที่ 2.45
	1500	-	รูปที่ 2.40	รูปที่ 2.44
	1800	-	รูปที่ 2.42	รูปที่ 2.46

หมายเหตุ

- "-" หมายถึง ไม่ได้แสดงผลการทดลองลงในงานวิทยานิพนธ์
- "*" หมายถึง มีค่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วหลายย่าน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 3

ทฤษฎีการควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง

ในบทนี้นำเสนอระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง ในส่วนแรกนำเสนอหลักการและข้อดีของการประมาณตำแหน่งโรเตอร์ด้วยวิธีค่าผิดพลาดของแบบจำลองโรเตอร์บนแกนอ้างอิงโฮโลโนมิก จากนั้นยืนยันแนวคิดทางทฤษฎีด้วยผลการจำลองการทำงานและผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง

3.1 การประมาณความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์ด้วยวิธีแบบจำลองผิดพลาด

หากพิจารณาสมการแรงดันและกระแสของแบบจำลองสเตเตอร์ (2.1) และโรเตอร์ (2.3) รวมทั้งระบบควบคุมเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วมในบทที่ 2 (รูปที่ 2.3) พบว่าในกรณีของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางสามารถตรวจจับข้อมูลกระแสและแรงดันได้ทั้งทางฝั่งโรเตอร์และสเตเตอร์ อีกทั้งคำนวณค่าสเตเตอร์ฟลักซ์และโรเตอร์ฟลักซ์ได้โดยตรงจากสมการที่ (2.2) และ (2.4) ตามลำดับ นอกจากนี้สมการแบบจำลองดังกล่าว จะมีเพียงข้อมูลของตำแหน่งโรเตอร์เท่านั้นที่ไม่ทราบค่า จากที่กล่าวมาข้างต้นจึงสามารถนำเสนอวิธีการประมาณความเร็วและตำแหน่งได้ดังต่อไปนี้

แบบจำลองโรเตอร์บนแกนอ้างอิงโรเตอร์ (แกนอ้างอิงโฮโลโนมิก):

$$\frac{d\vec{i}_r'}{dt} = -\frac{R_r}{L_r}\vec{i}_r' - \frac{M}{L_r}\frac{d}{dt}\left(e^{-Jp\theta_m}\vec{i}_s\right) + \frac{\vec{v}_r'}{L_r} \tag{3.1}$$

เมื่อพิจาณาแบบจำลองทางพลวัตของโรเตอร์ในสมการ (3.1) สามารถเขียนแบบจำลองโรเตอร์ประมาณบนแกนอ้างอิงโรเตอร์ (3.2) ดังนี้

แบบจำลองโรเตอร์ประมาณบนแกนอ้างอิงโรเตอร์:

$$\frac{d\hat{\vec{i}}_r'}{dt} = -\frac{R_r}{L_r}\hat{\vec{i}}_r' - \frac{M}{L_r}\frac{d}{dt}\left(e^{-Jp\hat{\theta}_m}\vec{i}_s\right) + \frac{\vec{v}_r'}{L_r} \tag{3.2}$$

จากสมการที่ (3.1)-(3.2) สามารถเขียนสมการกระแสโรเตอร์ผิดพลาดได้ว่า

$$\frac{d\vec{e}_r}{dt} = -\frac{R_r}{L_r}\vec{e}_r - \frac{M}{L_r}\frac{d}{dt}\left[\left(I - e^{Jp\Delta\theta_m}\right)\cdot e^{-Jp\hat{\theta}_m}\vec{i}_s\right] \tag{3.3}$$

โดยนิยามให้ $\vec{e}_r = \hat{\vec{i}}_r' - \vec{i}_r'$ และ $\Delta\theta_m = \hat{\theta}_m - \theta_m$

ในสมการที่ (3.3) หากตำแหน่งโรเตอร์ประมาณมีค่าผิดพลาด ($\hat{\theta}_m \neq \theta_m$) จะเกิดค่าผิดพลาดของกระแสโรเตอร์ ($\vec{e}_r$) ขึ้น ด้วยเหตุนี้จึงใช้ค่าผิดพลาดของกระแสโรเตอร์สำหรับการประมาณค่าความเร็ว เพราะฉะนั้นจากความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งค่าผิดพลาด ($\Delta\theta_m$) และค่ากระแสโรเตอร์

ผิดพลาด ($\vec{e}_r$) ในสมการ (3.3) เราสามารถแสดงสมการการประมาณของความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์ได้ใน (3.4)

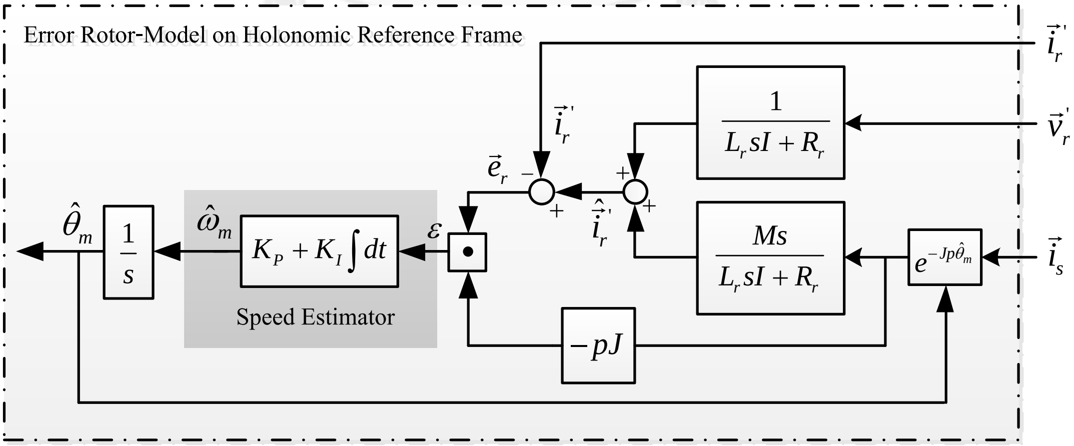
$$\hat{\omega}_m = \left(K_P + K_I \int dt\right)\left[\left(-Jpe^{-Jp\hat{\theta}_m}\vec{i}_s\right)^T \vec{e}_r\right] \tag{3.4}$$

$$\hat{\theta}_m = \int \hat{\omega}_m \, dt \tag{3.5}$$

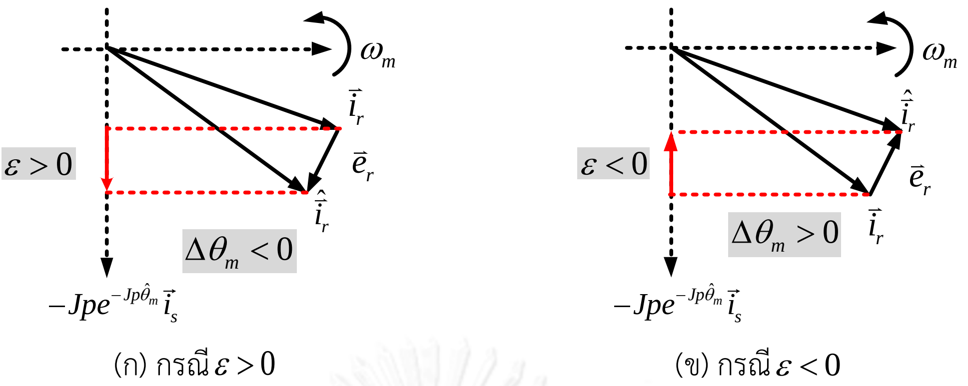
โดยที่ $-Jpe^{-Jp\hat{\theta}_m}\vec{i}_s$ เป็นเวกเตอร์รีเกรสเซอร์และ $K_P,\, K_I > 0$

จากสมการที่ (3.2), (3.4) และ (3.5) สามารถแสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบประมาณตำแหน่งด้วยวิธีค่าผิดพลาดของแบบจำลองโรเตอร์ได้ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งการคำนวณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์ประมาณจะพิจารณาจาก ค่าผิดพลาด (ε) ที่เกิดจากเวกเตอร์ค่าผิดพลาดของกระแสโรเตอร์ ($\vec{e}_r$) บนแกนอ้างอ้างอิงโฮโลโนมิกที่โปรเจกต์ลงบนเวกเตอร์รีเกรสเซอร์ ($-Jpe^{-Jp\hat{\theta}_m}\vec{i}_s$) จากนั้นค่าผิดพลาด (ε) จะผ่านอัตราขยาย $K_P,\, K_I$ เพื่อคำนวณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์ประมาณตามลำดับ หากขนาดของกระแสโรเตอร์จริงและประมาณมีค่าแตกต่างกัน ค่าผิดพลาดของกระแสโรเตอร์ ($\vec{e}_r$) จะสะท้อนไปยังตำแหน่งโรเตอร์ประมาณ ($\hat{\theta}_m$) โดยหลักการทำงานของระบบประมาณค่าตำแหน่งโรเตอร์ดังกล่าวสามารถพิจารณาได้จากแผนภาพในรูปที่ 3.2

ยกตัวอย่างกลไกในการประมาณตำแหน่งกรณีที่ $\Delta\theta_m < 0$ หรือ ตำแหน่งโรเตอร์ประมาณช้ากว่าตำแหน่งโรเตอร์จริง (รูปที่ 3.2 (ก)) กรณีนี้ ค่าความผิดพลาด (ε) จากเวกเตอร์ค่าผิดพลาดของกระแสโรเตอร์ที่โปรเจกต์ลงบนเวกเตอร์รีเกรสเซอร์ ($-Jpe^{-Jp\hat{\theta}_m}\vec{i}_s$) จะมีค่าเป็นบวก ($\varepsilon > 0$) และเมื่อผ่านอัตราขยาย PI ($K_P,\, K_I$) ค่าของความเร็วประมาณและมุมประมาณจะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่ามุมโรเตอร์ประมาณลู่เข้าสู่ค่าที่ถูกต้องได้ ส่วนกรณีที่ $\Delta\theta_m > 0$ สามารถแสดงกลไกในการประมาณดังรูปที่ 3.2 (ข)



รูปที่ 3.1 ระบบประมาณตำแหน่งด้วยวิธีค่าผิดพลาดของแบบจำลองโรเตอร์ที่นำเสนอ



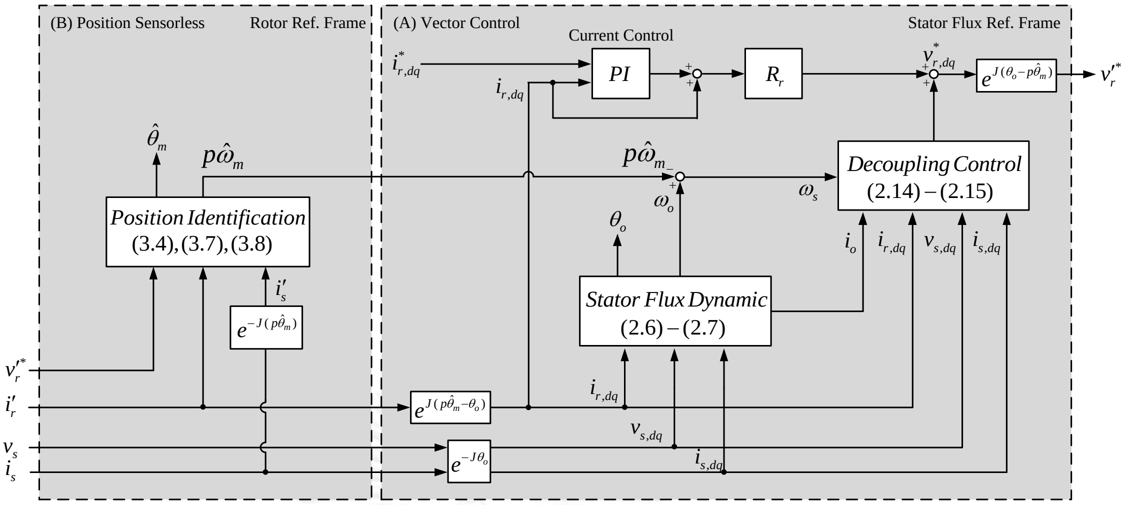
รูปที่ 3.2 กลไกในการประมาณตำแหน่งโรเตอร์จากค่าผิดพลาดของกระแสโรเตอร์

3.2 ข้อดีของระบบประมาณตำแหน่งด้วยวิธีผิดพลาดของแบบจำลองโรเตอร์

1) ไม่มีผลกระทบการเลื่อนของสัญญาณดีซีออฟเซต การใช้สมการประมาณกระแสโรเตอร์จากสมการ (3.2) ไม่ได้ใช้วิธีการหาค่าสเตเตอร์ฟลักซ์ แต่ใช้การคำนวณกระแสโรเตอร์ประมาณด้วยฟังก์ชันโอนย้ายของแบบจำลองโดยตรง ซึ่งมีคุณสมบัติเสมือนเป็นวงจรกรองผ่านต่ำที่มีค่าคงตัวทางเวลาอยู่ในภายใน เพราะฉะนั้นระบบจึงไม่มีผลกระทบจากปัญหาการเลื่อนของสัญญาณดีซีออฟเซต และไม่จำเป็นต้องมีวงจรกรองความถี่เพิ่มเติม เพื่อกำจัดผลของตัวอินทิเกรต

2) การคำนวณที่ไม่ซับซ้อน เนื่องจากแบบจำลองโรเตอร์มีเพียงข้อมูลตำแหน่งโรเตอร์เท่านั้นที่ไม่ทราบค่า การใช้ค่ากระแสโรเตอร์, แรงดันโรเตอร์, และกระสเตเตอร์จากการตรวจวัดจริงจึงง่าย และลดปัญหาจากความผิดพลาดในคำนวณด้วยโปรแกรมที่ซับซ้อน เช่น ความผิดพลาดจากการตัดเศษ (Truncation) นอกจากนี้ยังมีความแตกต่างจากงานวิจัยอื่นๆ [2]-[8] ที่ใช้สมการสเตเตอร์หรือสมการโรเตอร์ฟลักซ์เป็นแบบจำลองปรับตัว ส่งผลให้การประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งซึ่งมีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น

3) สามารถทำงานในสภาวะเชื่อมต่อกับกริดและขณะที่ขนาดกระแสโรเตอร์มีค่าน้อยๆ เนื่องจากสมการประมาณค่าความเร็วโรเตอร์ (3.4) มีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความผิดพลาดของกระแสโรเตอร์ ($\vec{e}_r$) และรีเกสเซอร์เวกเตอร์ ($-Jpe^{-Jp\hat{\theta}_m}\vec{i}_s$) ขณะเดียวกันกระแสสเตเตอร์จะมีขนาด $|\vec{i}_s| > 0$ เสมอในสภาวะเชื่อมต่อกับกริด เพราะฉะนั้นในสภาวะที่กระแสโรเตอร์ต่ำๆ จึงไม่มีผลกระทบต่อระบบการประมาณตำแหน่งโรเตอร์ที่นำเสนอ



รูปที่ 3.3 โครงสร้างระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง

3.3 ผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง

รูปที่ 3.3 แสดงโครงสร้างของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งที่ประยุกต์แนวคิดระบบการควบคุมเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วมในบทที่ 2 และการประมาณค่าตำแหน่งด้วยค่าผิดพลาดของแบบจำลองโรเตอร์บนแกนอ้างอิงโฮโลโนมิกที่นำเสนอเข้าด้วยกัน โดยตำแหน่งประมาณ ($\hat{\theta}_m$) และความเร็วประมาณ ($\hat{\omega}_m$) ของโรเตอร์เป็นสัญญาณป้อนกลับสำหรับคำนวณแรงดันคำสั่งของการควบคุมเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วม (v_{rd}^*, v_{rq}^*) และสำหรับคำนวณแบบจำลองทางพลวัตของสมการสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์ (i_o, ω_o, θ_o) ดังนั้นเพื่อเป็นการยืนยันความเป็นไปได้ของแนวคิดในเบื้องต้น ในหัวข้อนี้จะนำเสนอผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางในเงื่อนไขดังต่อไปนี้

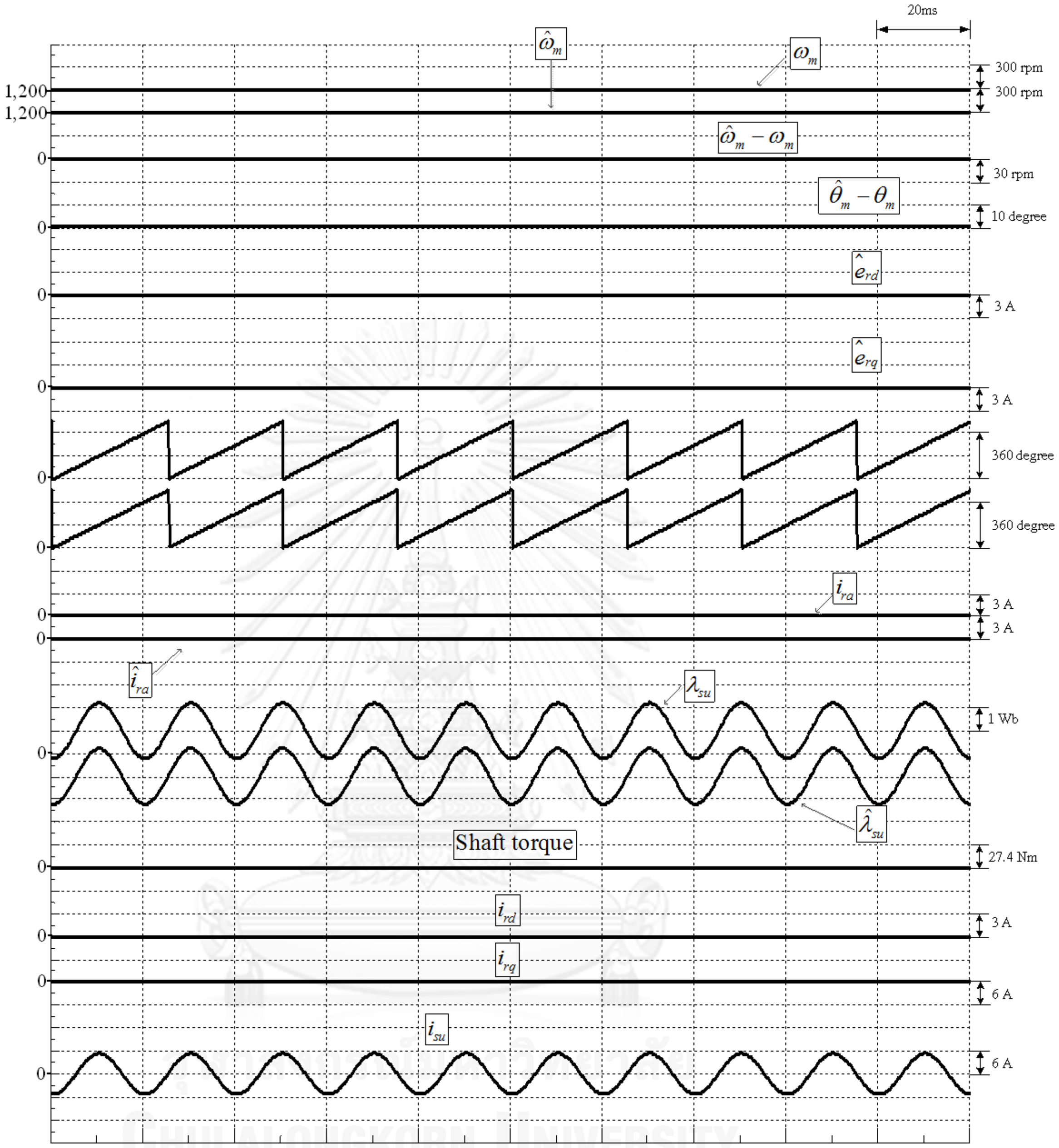
จากผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซอร์วัดตำแหน่งที่สภาวะความเร็วคงที่ 1200 rpm และกระตุ้นสเตเตอร์ฟลักซ์ผ่านทางด้านสเตเตอร์ทั้งหมด ($i_{rd}^* = 0A$) พบว่าที่สภาวะไร้โหลด หรือขณะที่กระแสโรเตอร์มีค่าน้อยๆ ระบบประมาณตำแหน่งโรเตอร์สามารถทำงานได้อย่างถูกต้อง เห็นได้จากค่าความผิดพลาดของมุมประมาณโรเตอร์มีขนาดเป็นศูนย์ดังรูปที่ 3.4 เช่นเดียวกันกับสภาวะที่ประพฤติตัวเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและมอเตอร์ ระบบประมาณตำแหน่งสามารถประมาณตำแหน่งและความเร็วได้ นอกจากนี้ระบบควบคุมเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วมที่ใช้ตำแหน่งโรเตอร์และความเร็วประมาณในการป้อนกลับ สามารถควบคุมขนาดของแรงบิดและความเร็วได้ถูกต้อง ดังแสดงในรูปที่ 3.5และรูปที่ 3.6 ตามลำดับ

ในรูปที่ 3.4 และรูปที่ 3.5 แสดงผลการจำลองการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางในสภาวะที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและมอเตอร์ที่แรงบิดพิกัด 24.7 Nm รวมทั้งมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วในช่วง 1200, 1350, 1650 และ 1800 rpm ตามลำดับ ซึ่งครอบคลุมการทำงานในย่านความเร็วซับซิงโครนัสและซุปเปอร์ซิงโครนัส จากผลการจำลองการทำงานดังกล่าว

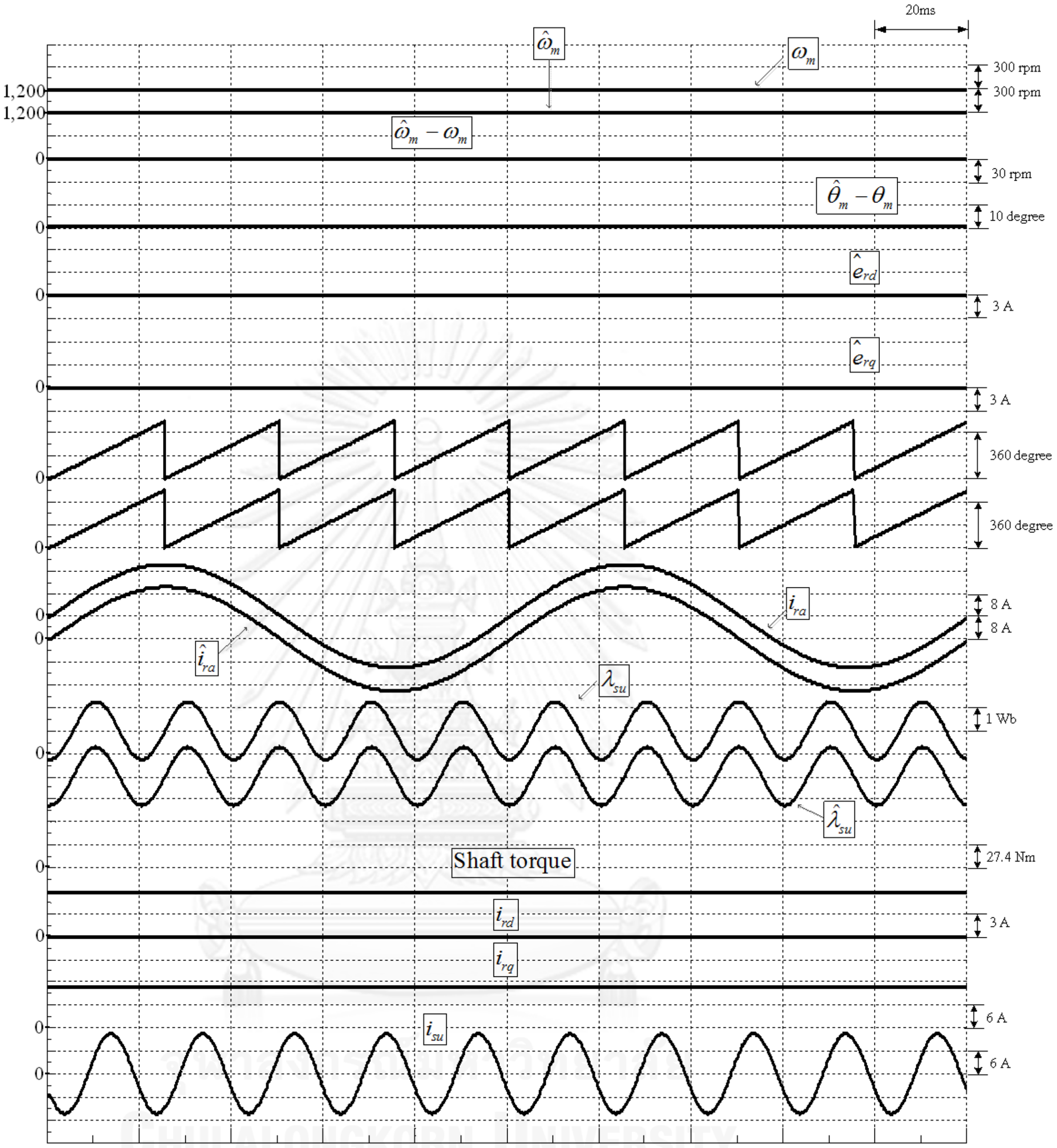
พบว่าค่าผิดพลาดของตำแหน่งโรเตอร์และค่าผิดพลาดของกระแสโรเตอร์มีขนาดเป็นศูนย์ในสภาวะอยู่ตัว ขณะที่ในสภาวะชั่วครู่ขณะมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วนั้น ค่าความผิดพลาดของตำแหน่งมีขนาดเพียงเล็กน้อย

สำหรับผลการจำลองการทำงานในสภาวะเปลี่ยนแปลงแรงบิดแบบขั้นบันไดจากสภาวะไร้โหลดไปยังแรงบิดพิกัดย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดังรูปที่ 3.9 ในสภาวะชั่วครู่ขณะมีการเปลี่ยนแปลงโหลดจะเกิดค่าผิดพลาดของความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์ประมาณขึ้น หลังจากนั้นระบบประมาณตำแหน่งจะทำการปรับค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์จนทำให้ค่าความผิดพลาดลู่เข้าศูนย์ได้ในสภาวะอยู่ตัว เห็นได้ว่าระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งสามารถตอบสนองการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวได้ นอกจากนี้ยังสามารถควบคุมค่ากระแสโรเตอร์ในแกน d ให้มีขนาดตามค่ากระแสโรเตอร์คำสั่งที่ $i_{rd}^* = 3A$ ได้อย่างอิสระ ทั้งสภาวะย่านการทำงานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและย่านมอเตอร์ในรูปที่ 3.9 และรูปที่ 3.10 ตามลำดับ

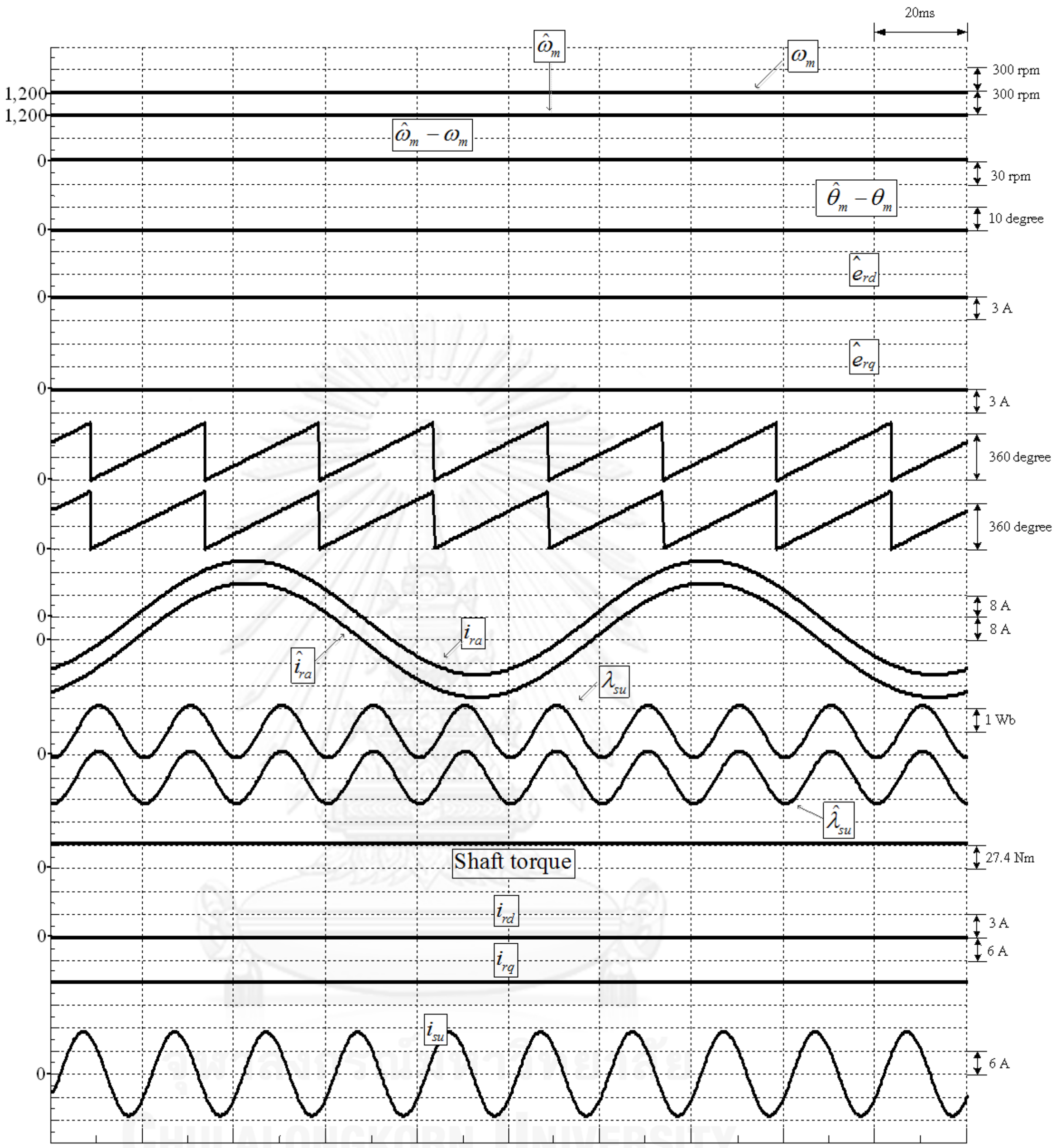
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



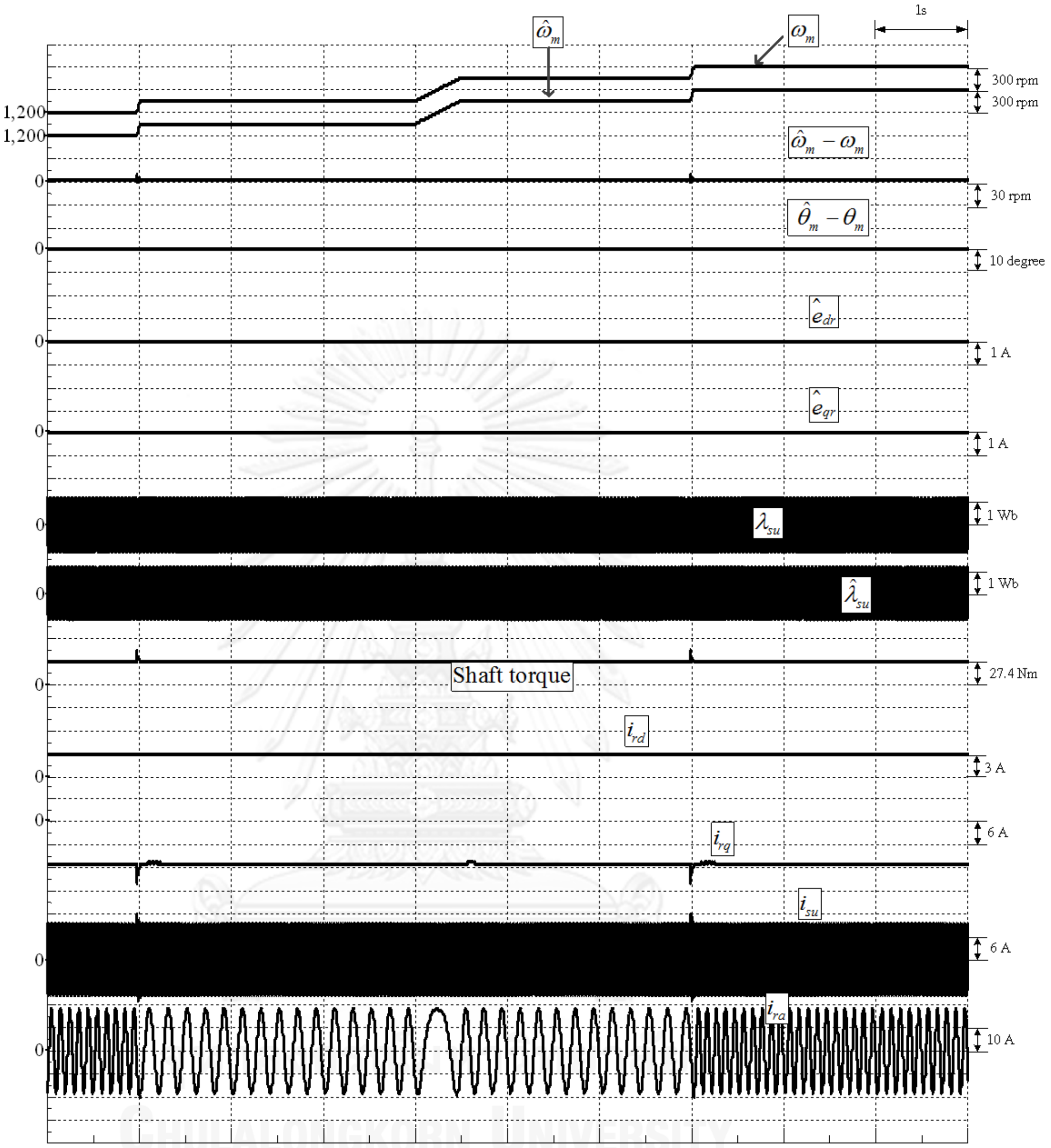
รูปที่ 3.4 ผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งที่ 1200 rpm ที่สภาวะไร้โหลดและ $i_{rd}^{*} = 0A$



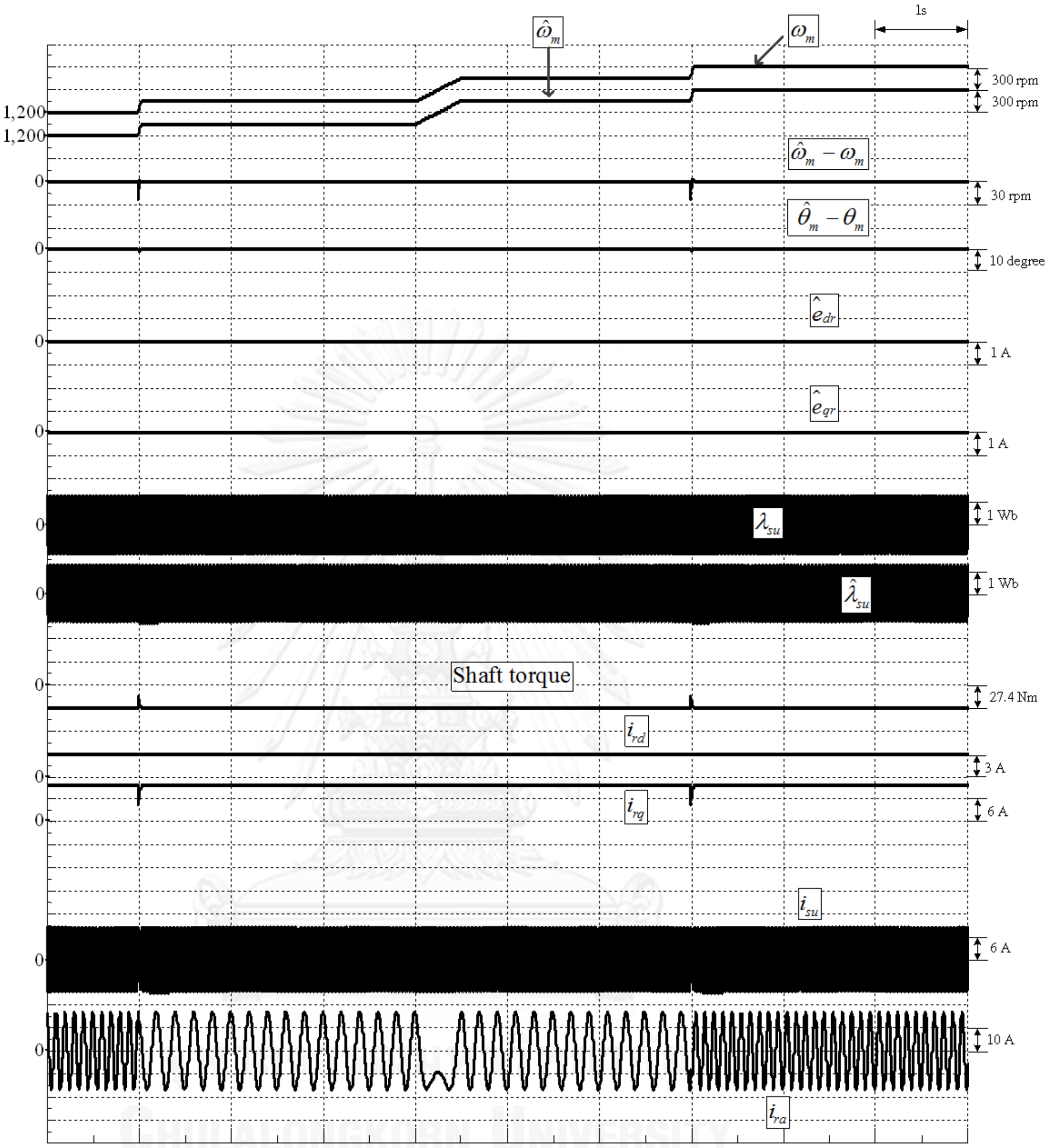
รูปที่ 3.5 ผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งที่ 1200 rpm ที่สภาวะโหลดพิกัดย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและ $i_{rd}^{*} = 0A$



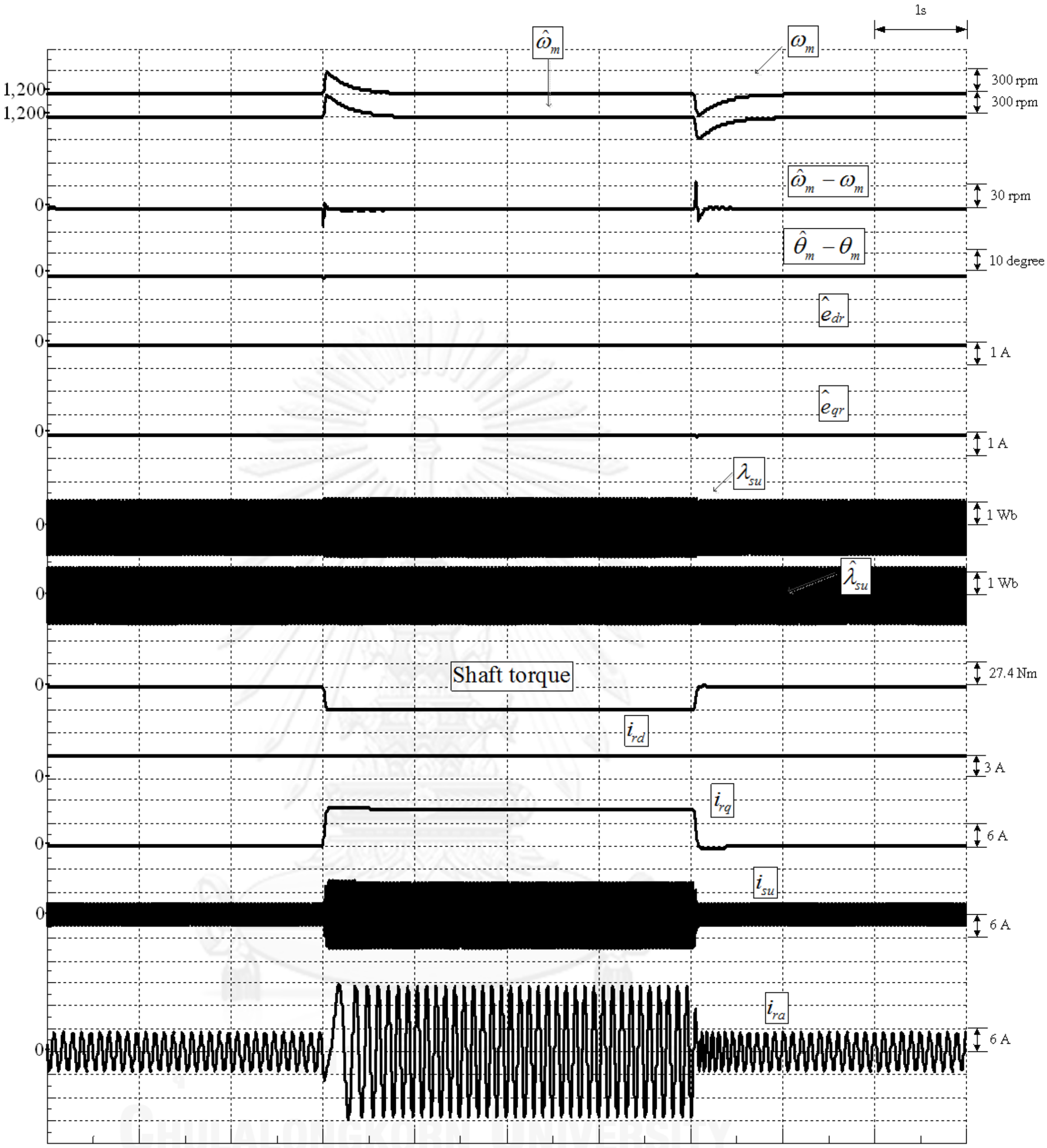
รูปที่ 3.6 ผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งที่ 1200 rpm ที่สภาวะโหลดพิกัดย่านมอเตอร์และ $i_{rd}^* = 0A$



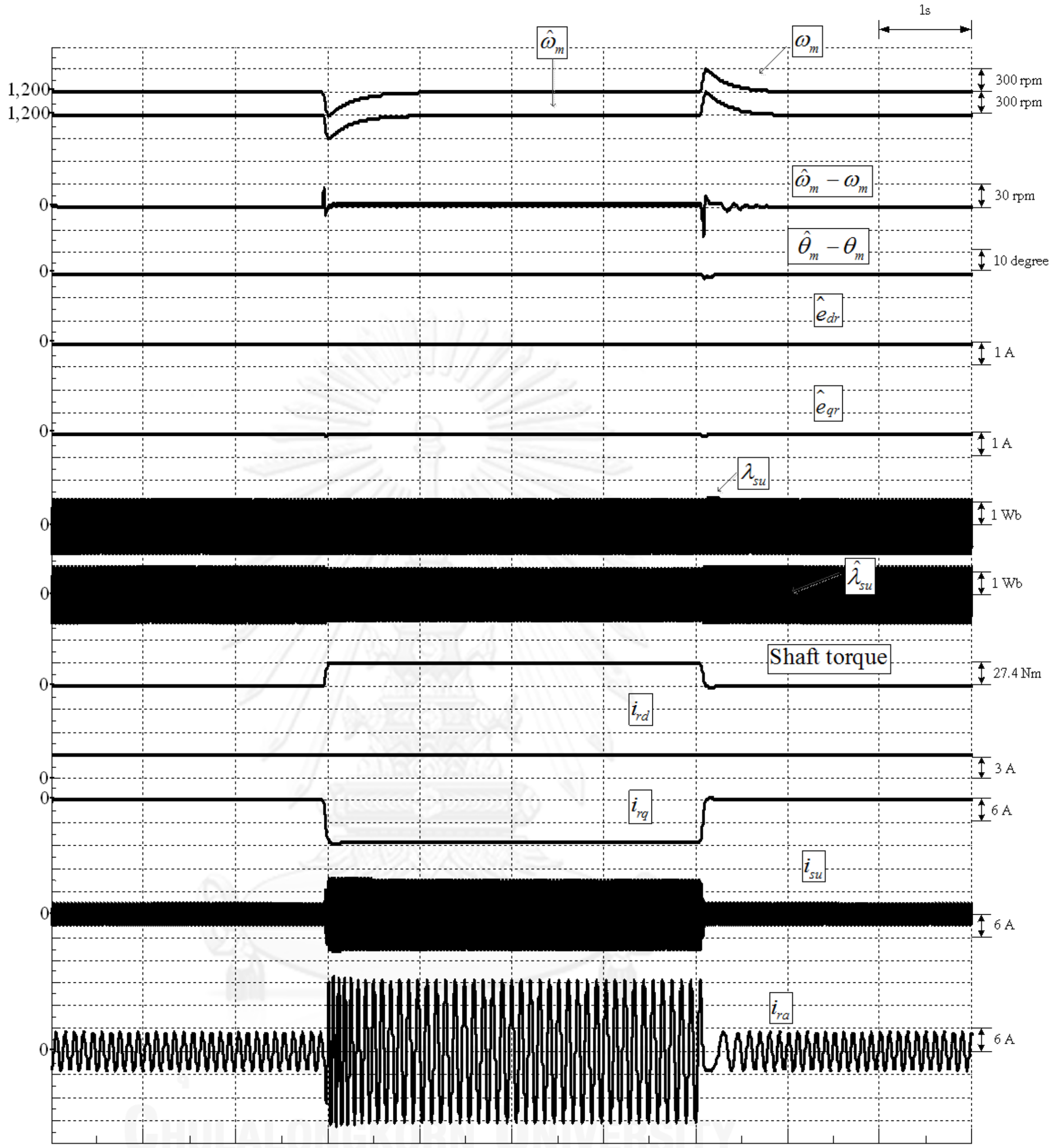
รูปที่ 3.7 ผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งในกรณีเปลี่ยนแปลงความเร็วแบบขั้นบันได 1200→1350→1650→1800 rpm ที่สภาวะโหลดพิกัดในย่านมอเตอร์และ $i_{rd}^* = 3A$



รูปที่ 3.8 ผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งในกรณีเปลี่ยนแปลงความเร็วแบบขั้นบันไดจาก 1200 → 1350 → 1650 → 1800 rpm ที่สภาวะโหลดพิกัดในย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและ $i_{rd}^* = 3A$



รูปที่ 3.9 ผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งในกรณีเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้นบันไดไปยังสภาวะโหลดพิกัดย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าความเร็ว 1200 rpm และ $i_{rd}^* = 3A$



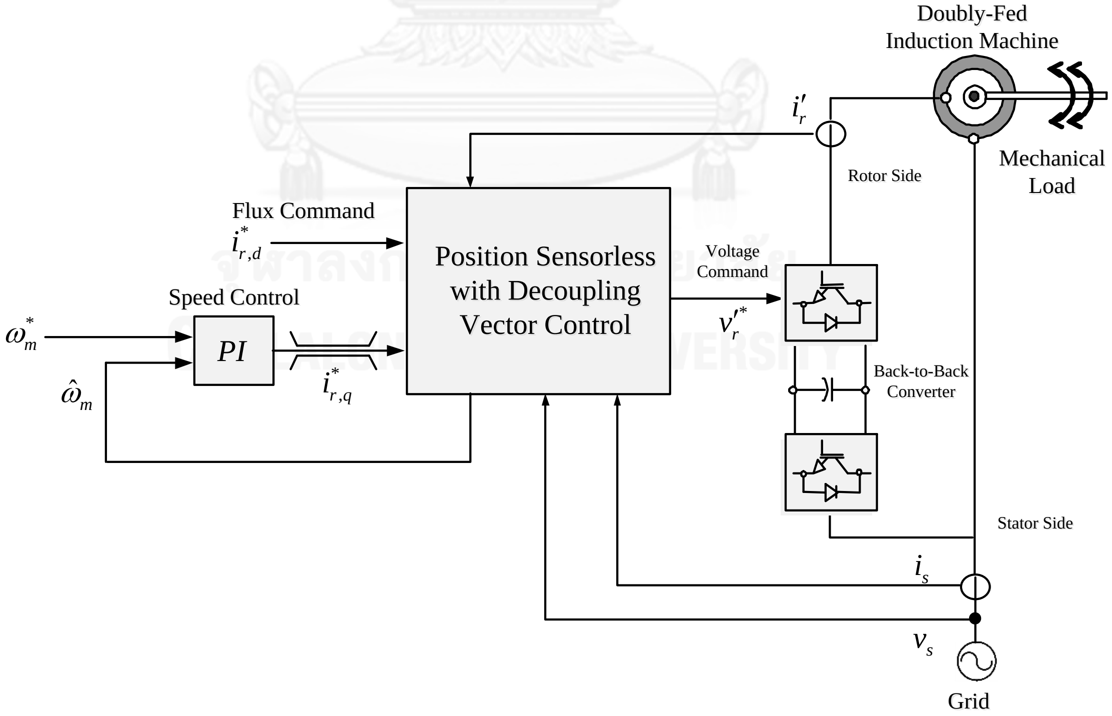
รูปที่ 3.10 ผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งในกรณีเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้นบันไดไปยังสภาวะโหลดพิกัดย่านมอเตอร์ที่ความเร็ว 1200 rpm และ $i_{rd}^* = 3A$

3.4 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง

ภาพรวมของระบบควบคุมความเร็วด้วยตัวควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง สำหรับการทดลองการทำงานสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.11 ซึ่งบูรณาการหลักการทำงานของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วมจากบทที่ 2 โดยปราศจากการตรวจวัดตำแหน่งและความเร็วโรเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง การประมาณค่าตำแหน่งและความเร็วจะใช้ข้อมูลกระแสทั้งด้านโรเตอร์และสเตเตอร์ สำหรับข้อมูลแรงดันจะใช้ค่าที่ตรวจวัดได้เฉพาะทางด้านสเตเตอร์ ส่วนแรงดันโรเตอร์จะใช้ข้อมูลจากแรงดันคำสั่งด้านโรเตอร์ (v_{rd}^*, v_{rq}^*) ในการคำนวณ โดยผลการทดลองสรุปได้ดังตารางที่ 3 และสามารถแบ่งลักษณะการทำงานต่างๆดังต่อไปนี้

3.4.1 ผลตอบสนองในสภาวะความเร็วคงที่

ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งที่ความเร็วคงที่ 1050 rpm และ 1800 rpm โดยควบคุมกระแสโรเตอร์องค์ประกอบ d เท่ากับ 3 A ($i_{rd}^* = 3$) สามารถแสดงได้ในรูปที่ 3.12 และรูปที่ 3.13 ตามลำดับ ระบบสามารถประมาณค่าตำแหน่งและความเร็วได้ โดยกระแสโรเตอร์ประมาณ ($\hat{i}_{ra}$) มีค่าใกล้เคียงกับค่ากระแสโรเตอร์จริง (i_{ra})รูปที่ 3.14-รูปที่ 3.15 แสดงถึงกรณีที่สเตเตอร์ฟลักซ์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าถูกกระตุ้นผ่านด้านสเตเตอร์ทั้งหมด หรือกระแสโรเตอร์บนองค์ประกอบในแกน d มีค่าเท่ากับ 0 A ($i_{rd}^* = 0$) นอกจากนี้ในรูปที่ 3.16-รูปที่ 3.20 แสดงถึงการทำงานที่สภาวะความเร็วคงที่ 1050 rpm และ 1800 rpm ในขณะที่มีโหลดย่านพิกัดในย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและมอเตอร์ตามลำดับ จากผลการทดลองแสดงสมรรถนะของระบบประมาณ



รูปที่ 3.11 ภาพรวมของระบบควบคุมความเร็วด้วยตัวควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง

ผ่านทางค่าผิดพลาดของกระแส ความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์ที่มีค่าลู่เข้าศูนย์ นอกจากนี้สามารถควบคุมกระแสโรเตอร์องค์ประกอบ *d* และ *q* ได้อย่างอิสระ

3.4.2 ผลตอบสนองในสภาวะชั่วครู่เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเร็ว

รูปที่ 3.20 และรูปที่ 3.21 แสดงผลการทดลองการทำงานของระบบที่มีการเร่งและลดความเร็ว โดยมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วจาก 1200 rpm ไปยัง 1350 rpm, 1650 rpm และ 1800 rpm ในสภาวะไร้โหลด และควบคุมกระแสโรเตอร์องค์ประกอบ *d* ให้มีค่า $i_{rd} = 0$ และ $i_{rd} = 3$ ตามลำดับ นอกจากนั้นในรูปที่ 3.19 และรูปที่ 3.20 แสดงผลตอบสนองการทำงานขณะมีโหลดพิกัดย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและมอเตอร์ โดยควบคุมกระแสกระตุ้นฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ให้มีขนาด 3 A

จากผลการทดลองจะพบว่า ขณะมีการเปลี่ยนแปลงความเร็ว ค่าความผิดพลาดของกระแสโรเตอร์ทั้งบนองค์ประกอบ *d* และ *q* ($\hat{e}_{dr}, \hat{e}_{qr}$) และค่าความผิดพลาดของตำแหน่งจะเกิดขึ้น แต่อย่างไรก็ตามค่าผิดพลาดตำแหน่งสามารถลู่เข้าใกล้ศูนย์ในสภาวะคงที่และสามารถควบคุมกระแสโรเตอร์องค์ประกอบแกน *d* (i_{rd}) ได้อย่างถูกต้อง แม้ว่าในช่วงเปลี่ยนแปลงความเร็วจาก 1350 rpm ไปยัง 1650 rpm จะมีค่าความผิดพลาดทั้งกระแสโรเตอร์, ตำแหน่งและความเร็วมากกว่าปกติ ซึ่งสามารถอธิบายเพิ่มเติมในหัวข้อ 4.4 ของบทถัดไป

3.4.3 ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงกระแสกระตุ้นฟลักซ์แบบขั้นบันได

การทดลองนี้แสดงผลตอบสนองของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้องสองทางขณะเปลี่ยนแปลงกระแสกระตุ้นฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์แบบขั้นบันไดเช่นเดียวกับการทดลองในหัวข้อ 2.5.3 ($i^*_{rd} = 0 \rightarrow 3A$) โดยรูปที่ 3.24 และรูปที่ 3.25 แสดงผลตอบสนองขณะควบคุมความเร็วที่ 1200 rpm และ 1800 rpm ในสภาวะไร้โหลดตามลำดับ นอกจากนี้ในสภาวะโหลดพิกัดย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและย่านมอเตอร์สามารถแสดงผลการทดลองในกรณีที่ควบคุมกระแสคำสั่งโรเตอร์บนองค์ประกอบในแกน *d* ขณะเริ่มต้นที่ $i^*_{rd} = 2\,A$ จากนั้นเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันไดไปยัง $i^*_{rd} = 5\,A$ ดังรูปที่ 3.27-รูปที่ 3.26

จากผลการทดลองในเบื้องต้นพบว่า ขณะมีการเปลี่ยนแปลงค่าคำสั่งของกระแสกระตุ้นฟลักซ์ (i^*_{rd}) ระบบควบคุมยังสามารถให้ผลตอบสนองได้ดี เห็นได้จากค่าความผิดพลาดของกระแสโรเตอร์ ($\hat{e}_{dr}, \hat{e}_{qr}$) และค่าความผิดพลาดของตำแหน่งไม่แตกต่างจากสภาวะคงที่และให้ผลตอบสนองของค่า i_{rd} เช่นเดียวกับการควบคุมแบบใช้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง อีกทั้งยังสามารถควบคุมความเร็วและแรงบิดได้อิสระต่อกัน

3.4.4 ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้นบันได

รูปที่ 3.30-รูปที่ 3.30 แสดงผลการทดลองในสภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้นบันไดที่ความเร็วคงที่ 1200 rpm และ 1800 rpm ตามลำดับ โดยมีการเปลี่ยนแปลงโหลดจากสภาวะไร้โหลด ($T_e = 0\,N.m.$) ไปยังสภาวะพิกัดมอเตอร์ที่แรงบิดขนาด $T_e = 24.7\,N.m.$ และพิกัดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่แรงบิดขนาด $T_e = -24.7\,N.m.$ จากนั้นปลดโหลดกลับเข้าสู่สภาวะไร้โหลด จากผล

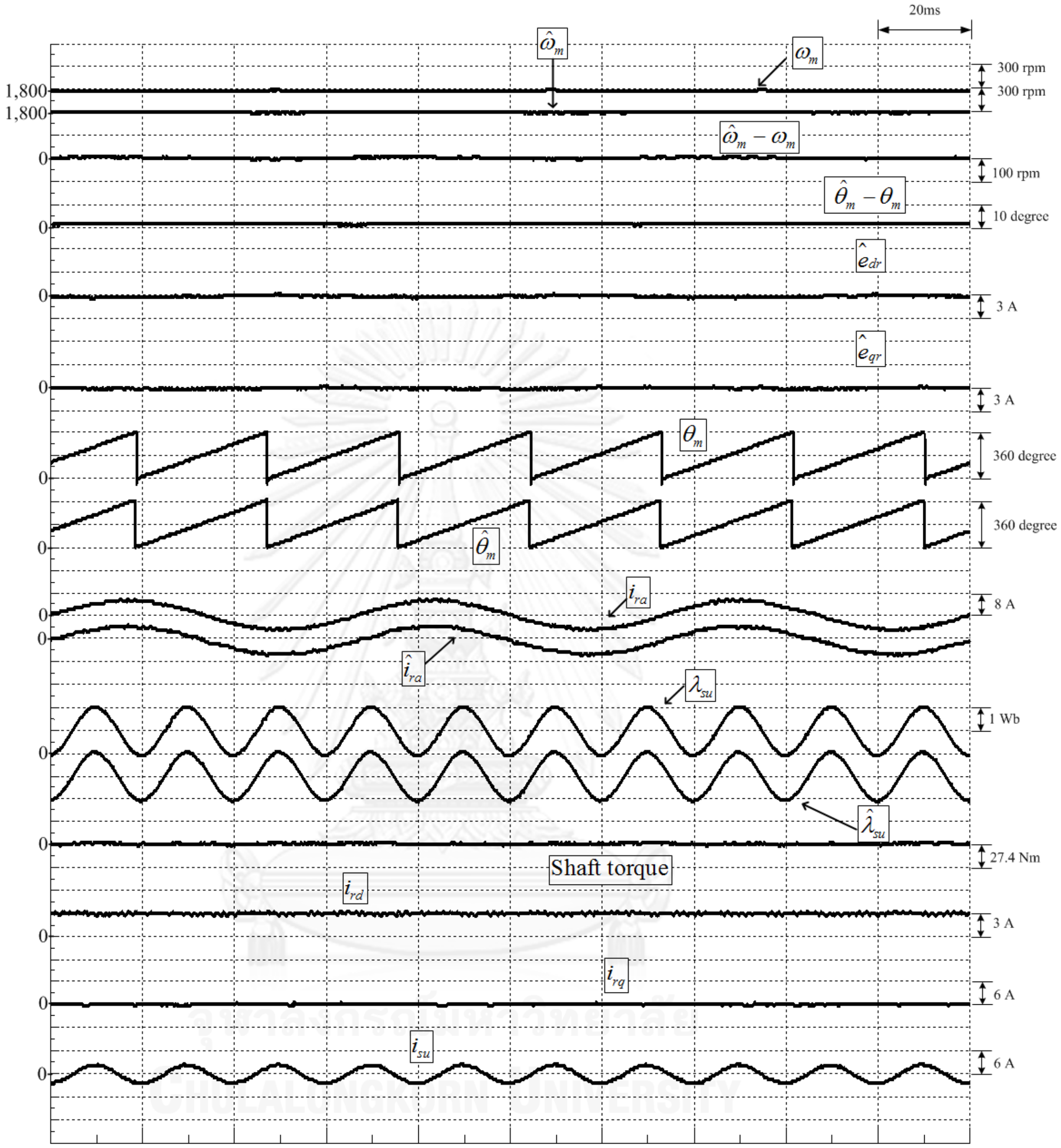
การทดลองแสดงผลตอบสนองของระบบควบคุมที่สามารถควบคุมขนาดของกระแสกระตุ้นฟลักซ์และแรงบิดได้อย่างอิสระ นอกจากนี้ในส่วนระบบประมาณค่าตำแหน่ง ในขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดแรงบิดแบบขั้นบันได จะเกิดค่าความผิดพลาดของกระแสโรเตอร์ ($\hat{e}_{dr}, \hat{e}_{qr}$) และค่าความผิดพลาดของตำแหน่งขึ้น แต่ค่าผิดพลาดดังกล่าวสามารถลู่เข้าศูนย์ในสภาวะคงที่ จึงเป็นการยืนยันถึงสมรรถนะของระบบประมาณค่าตำแหน่งที่นำเสนอ

ตารางที่ 3 ตารางสรุปผลการทดลองระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง

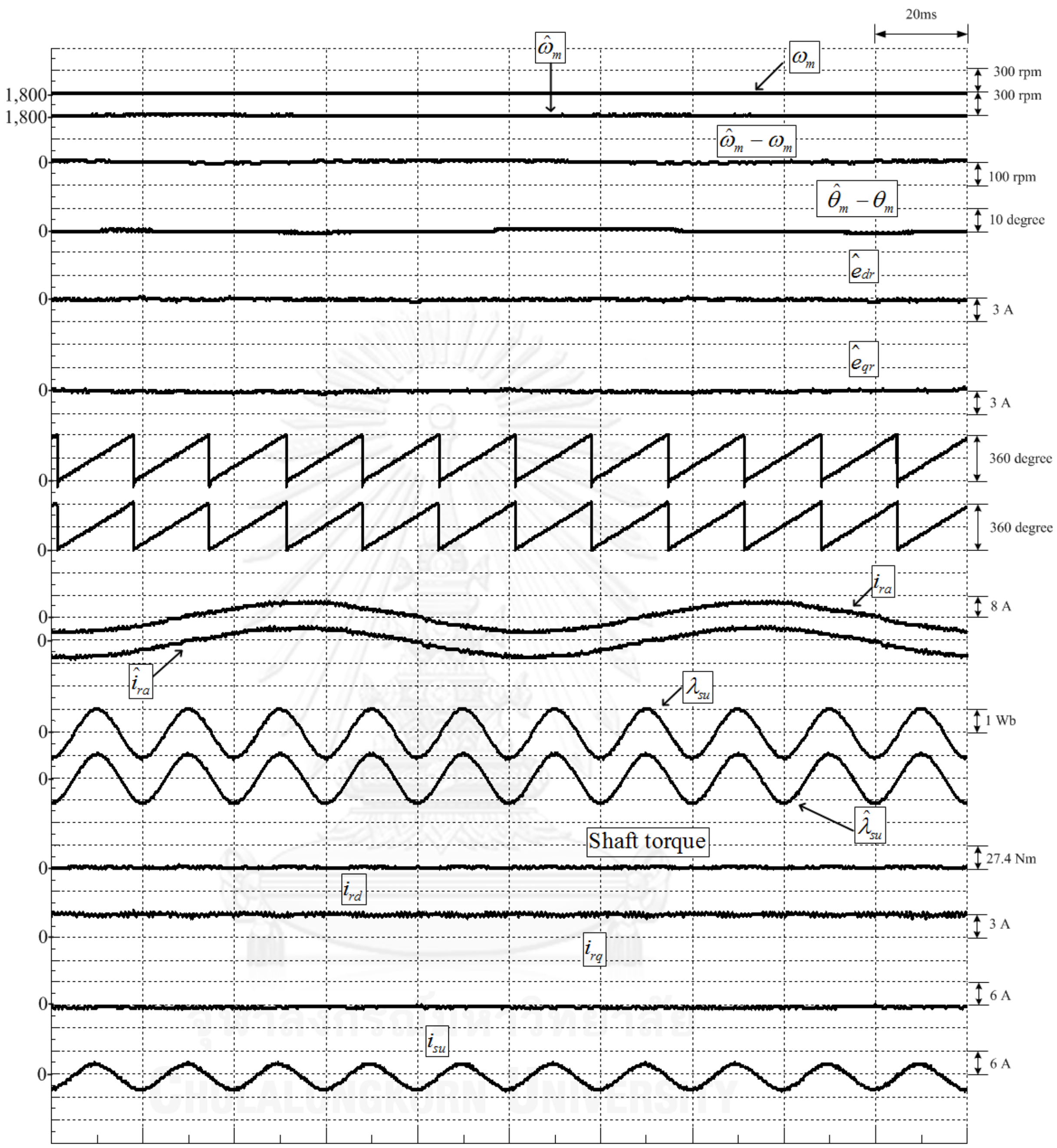
เงื่อนไขการทำงาน	ความเร็ว (rpm)	สภาวะไร้โหลด	สภาวะเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	สภาวะมอเตอร์
3.4.1 ผลตอบสนองในสภาวะความเร็วคงที่				
1. ผลการทดลองการทำงานขณะ $i_{rd}^* = 0A$	1200	รูปที่ 3.4	รูปที่ 3.5	รูปที่ 3.6
2. ผลการทดลองการทำงานขณะ $i_{rd}^* = 3A$	1050	รูปที่ 3.12	รูปที่ 3.16-	-
	1800	รูปที่ 3.13	รูปที่ 3.17	-
3. ผลการทดลองการทำงานขณะ $i_{rd}^* = 0A$	1200	รูปที่ 3.14	-	รูปที่ 3.18
	1800	รูปที่ 3.15	-	รูปที่ 3.19
3.4.2 ผลตอบสนองในสภาวะชั่วครู่เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเร็ว (1200 $\rightarrow$ 1350 $\rightarrow$ 1650 $\rightarrow$ 1800 rpm)				
1. ผลการจำลองการทำงานขณะ $i_{rd}^* = 3A$	*	-	รูปที่ 3.8	รูปที่ 3.7
2. ผลการทดลองการทำงานขณะ $i_{rd}^* = 0A$	*	รูปที่ 3.20	-	-
3. ผลการทดลองการทำงานขณะ $i_{rd}^* = 3A$	*	รูปที่ 3.21	รูปที่ 3.22	รูปที่ 3.23
3.4.3 ผลตอบสนองต่อกระแสกระตุ้นฟลักซ์แบบขั้นบันได				
1. ผลการทดลองการทำงานขณะ $i_{rd}^* = 0 \rightarrow 3A$	1200	รูปที่ 3.24	-	-
	1800	รูปที่ 3.25	-	-
2. ผลการทดลองการทำงานขณะ $i_{rd}^* = 2 \rightarrow 5A$	1200	-	รูปที่ 3.26	รูปที่ 3.28
	1800	-	รูปที่ 3.27	รูปที่ 3.29
3.4.4 ผลตอบสนองต่อโหลดแบบขั้นบันได				
1. ผลการจำลองการทำงานขณะ $i_{rd}^* = 3A$	1200	-	รูปที่ 3.9	รูปที่ 3.10
2. ผลการทดลองการทำงานขณะ $i_{rd}^* = 3A$	1050	-	รูปที่ 3.32	รูปที่ 3.30
	1800	-	รูปที่ 3.33	รูปที่ 3.31

หมายเหตุ

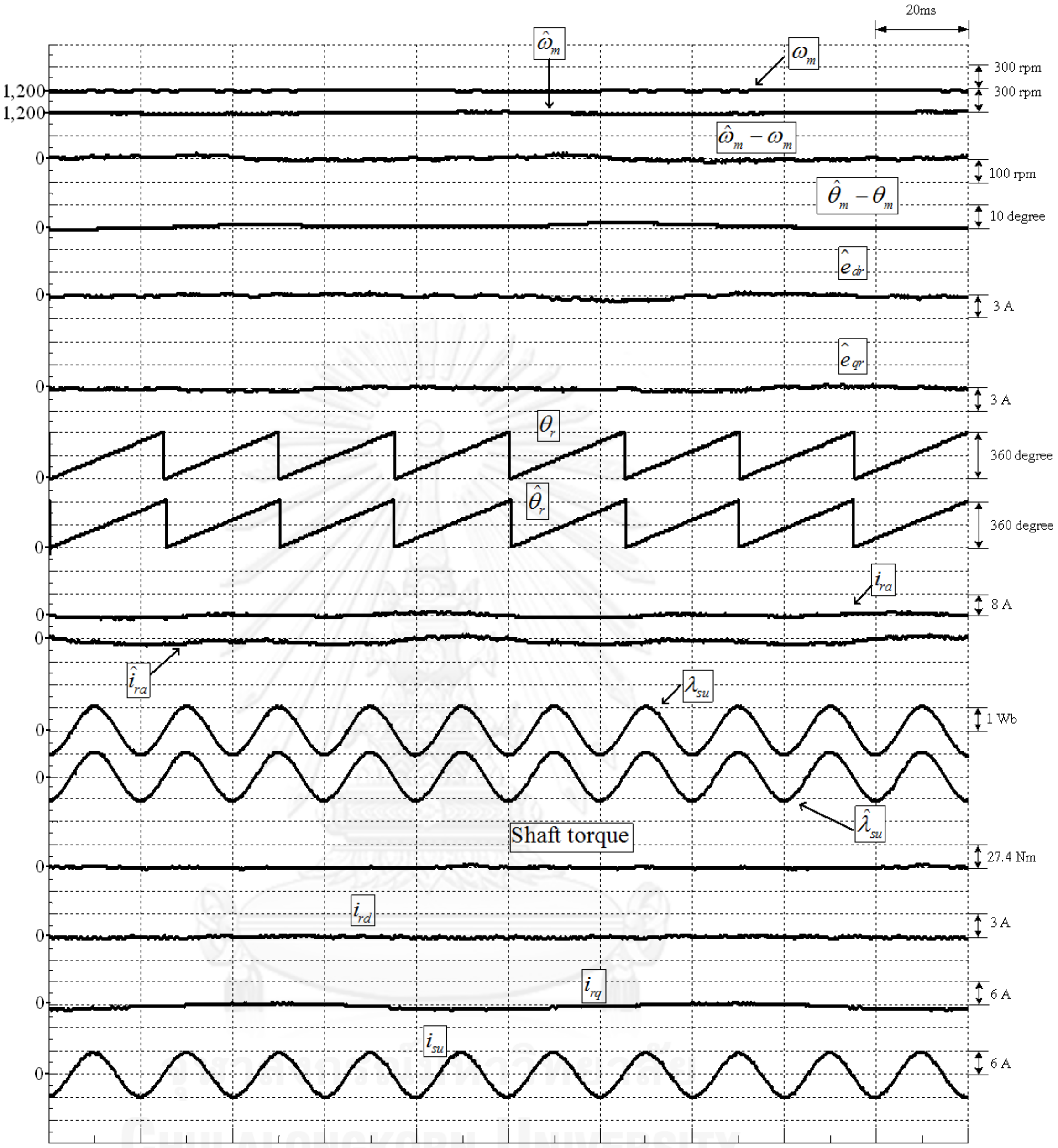
- “-” หมายถึง ไม่ได้แสดงผลการทดลองลงในวิทยานิพนธ์
- “*” หมายถึง มีการเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วหลายย่าน



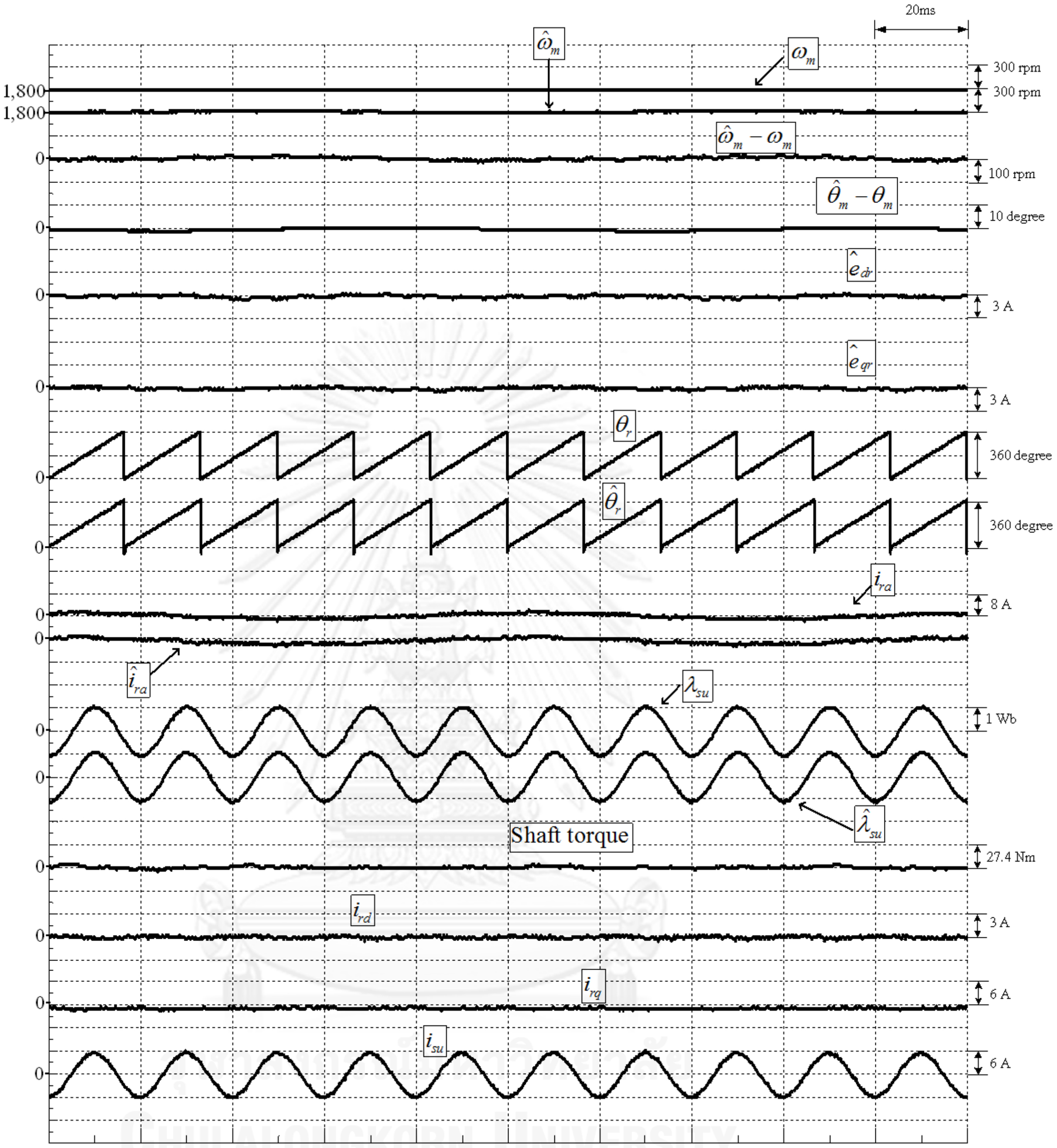
รูปที่ 3.12 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งที่ 1050 rpm ที่สภาวะไร้โหลดและ $i_{rd}^{*} = 3A$



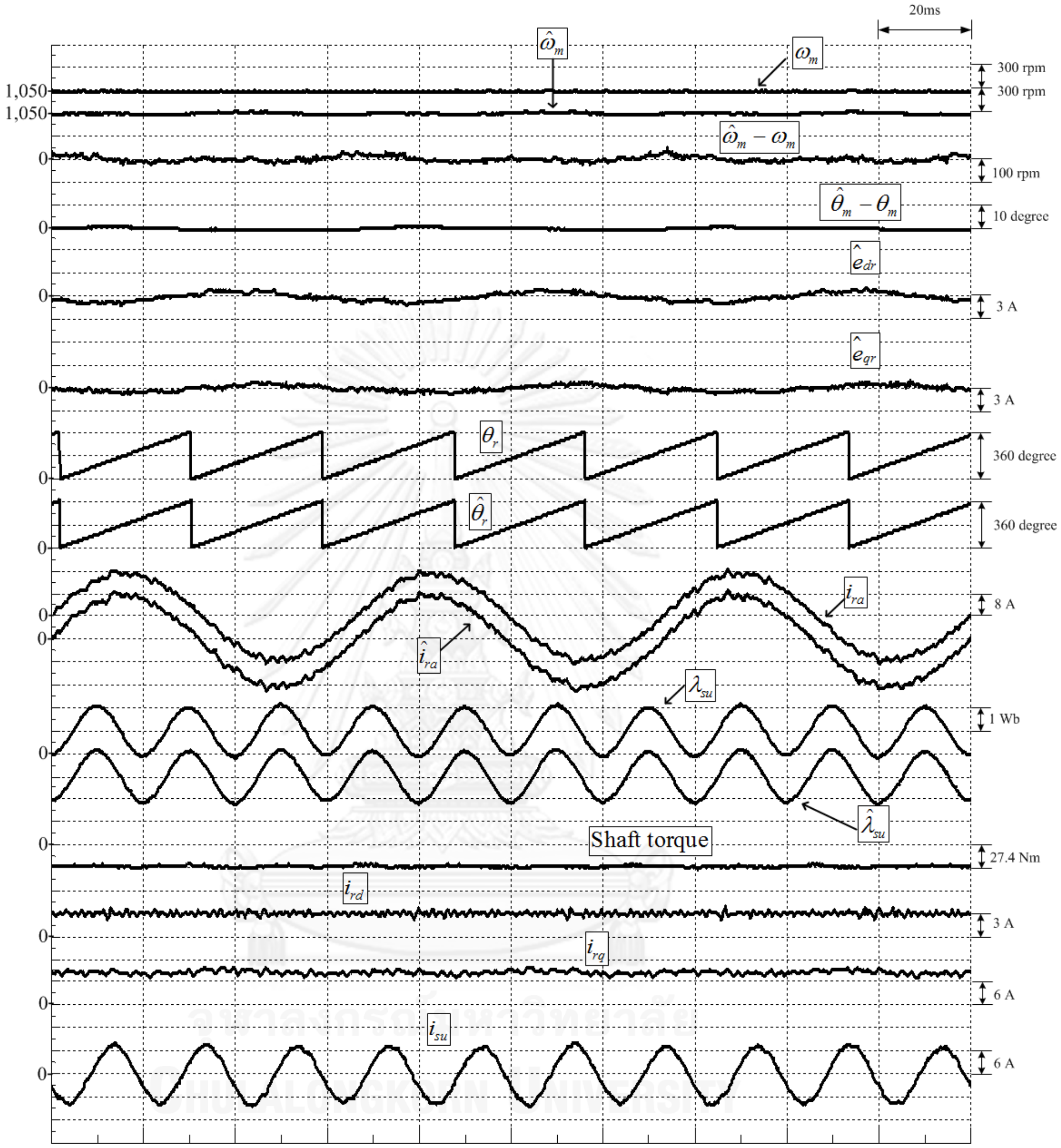
รูปที่ 3.13 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งที่ 1800 rpm ที่สภาวะไร้โหลดและ $i_{rd}^* = 3A$



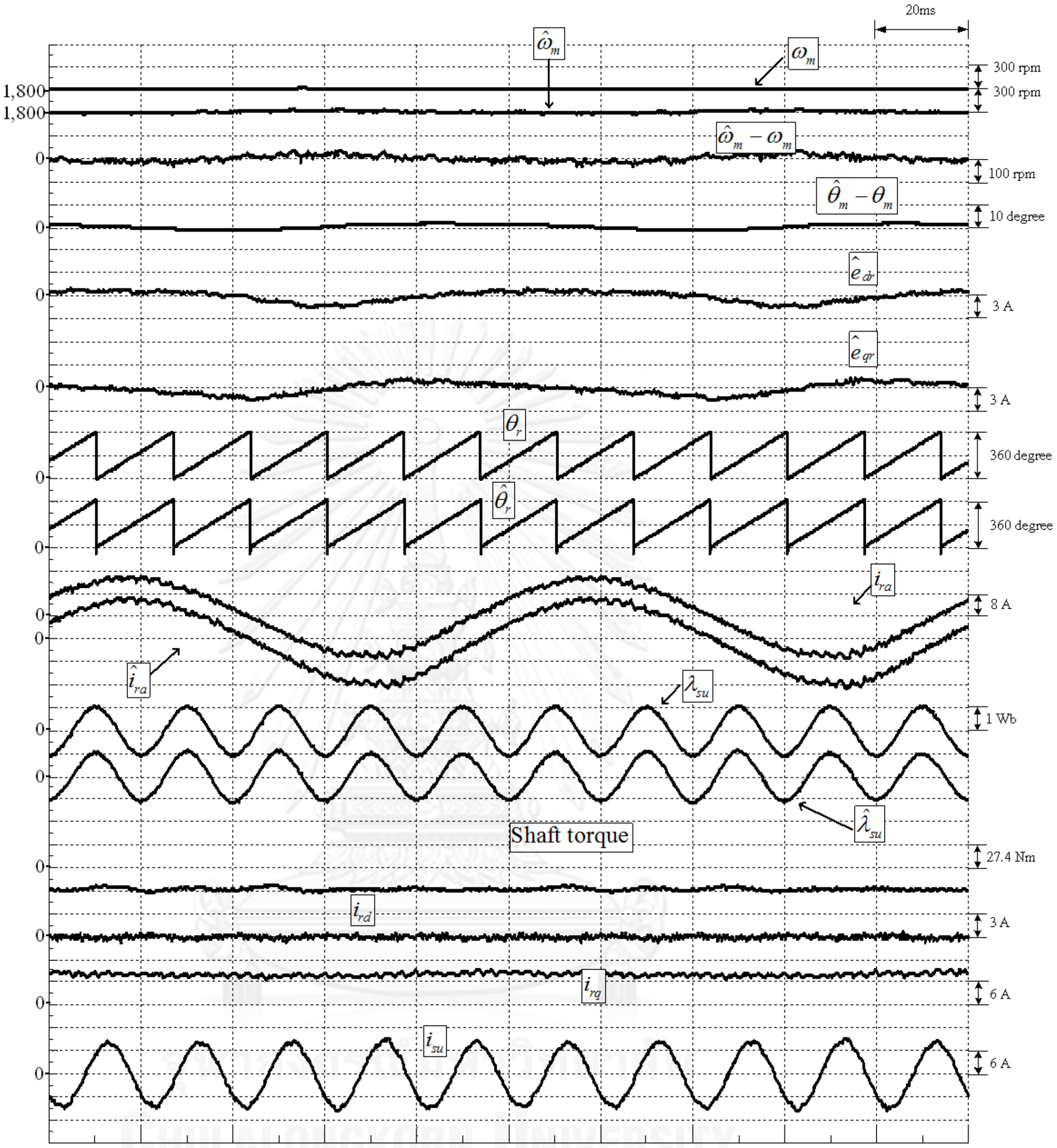
รูปที่ 3.14 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งที่ 1200 rpm ที่สภาวะไร้โหลดและ $i_{rd}^{*} = 0A$



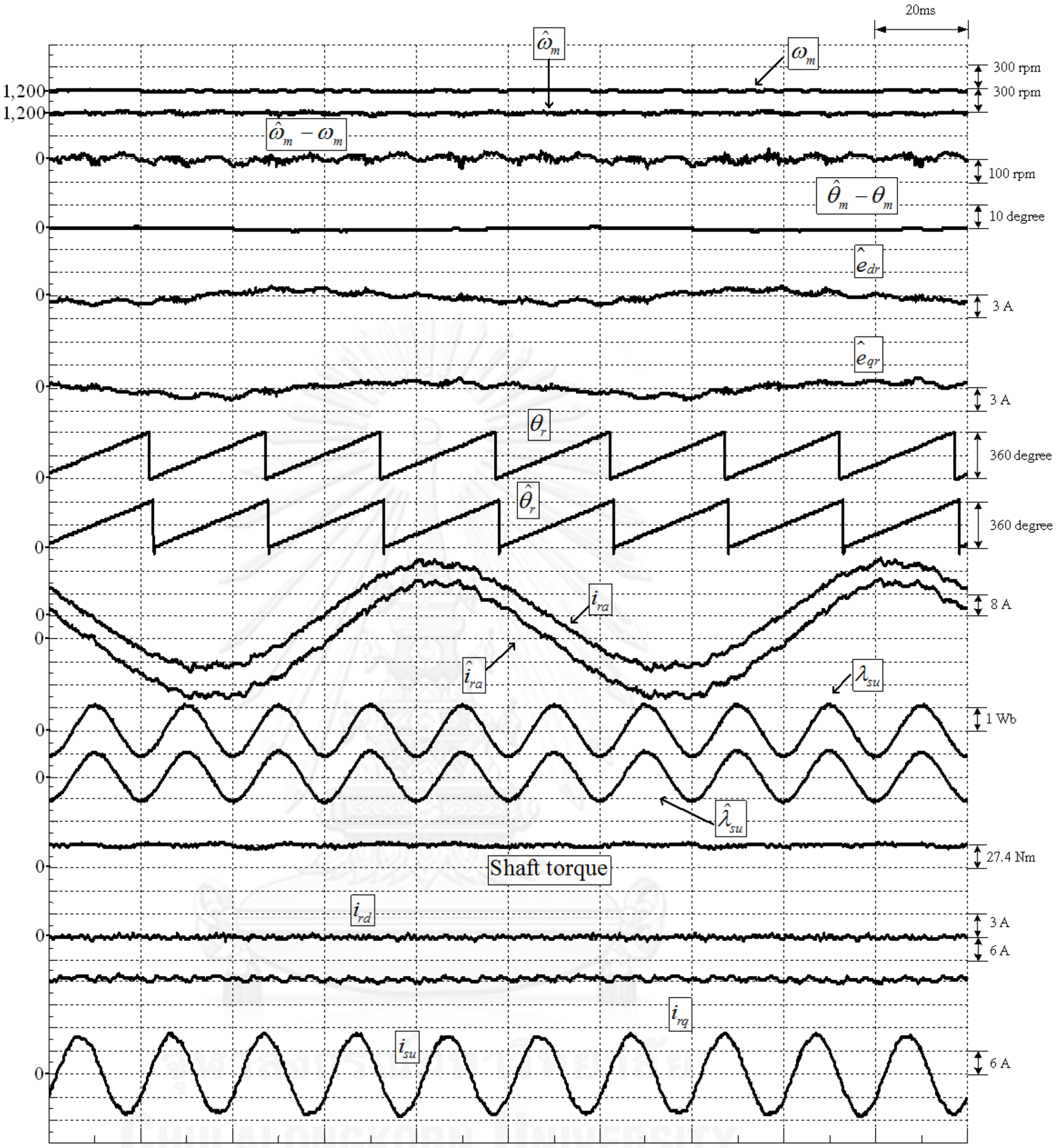
รูปที่ 3.15 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งที่ 1800 rpm ที่สภาวะไร้โหลดและ $i_{rd}^{*} = 0A$



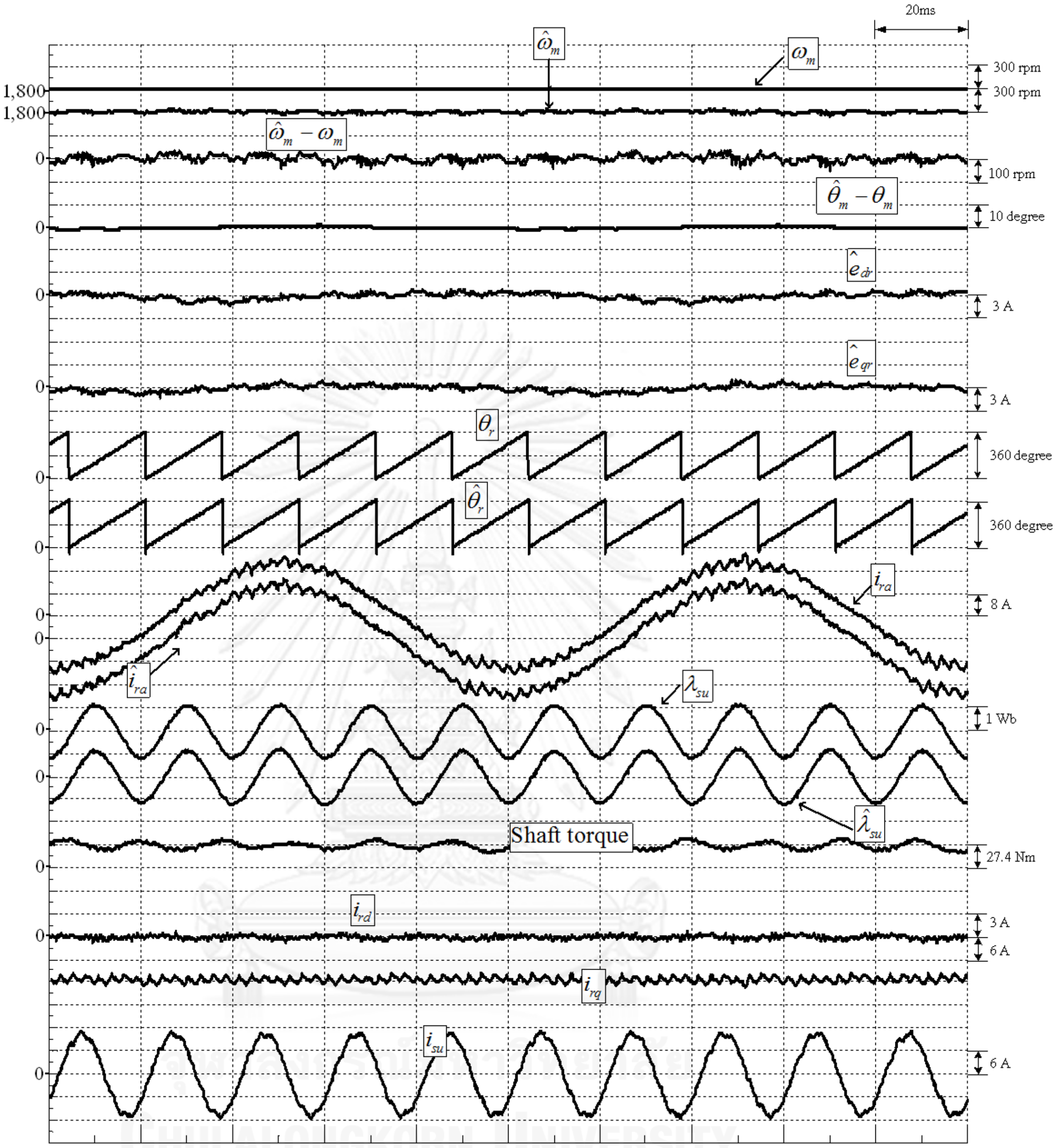
รูปที่ 3.16 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งที่ 1050 rpm ที่สภาวะโหลดพิกัดย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและ $i_{rd}^* = 3A$



รูปที่ 3.17 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งที่ 1800 rpm ที่สภาวะโหลดพิกัดย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและ $i_{rd}^{*} = 3A$



รูปที่ 3.18 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งที่ 1200 rpm ที่สภาวะโหลดพิกัดย่านมอเตอร์และ $i_{rd}^{*} = 0A$

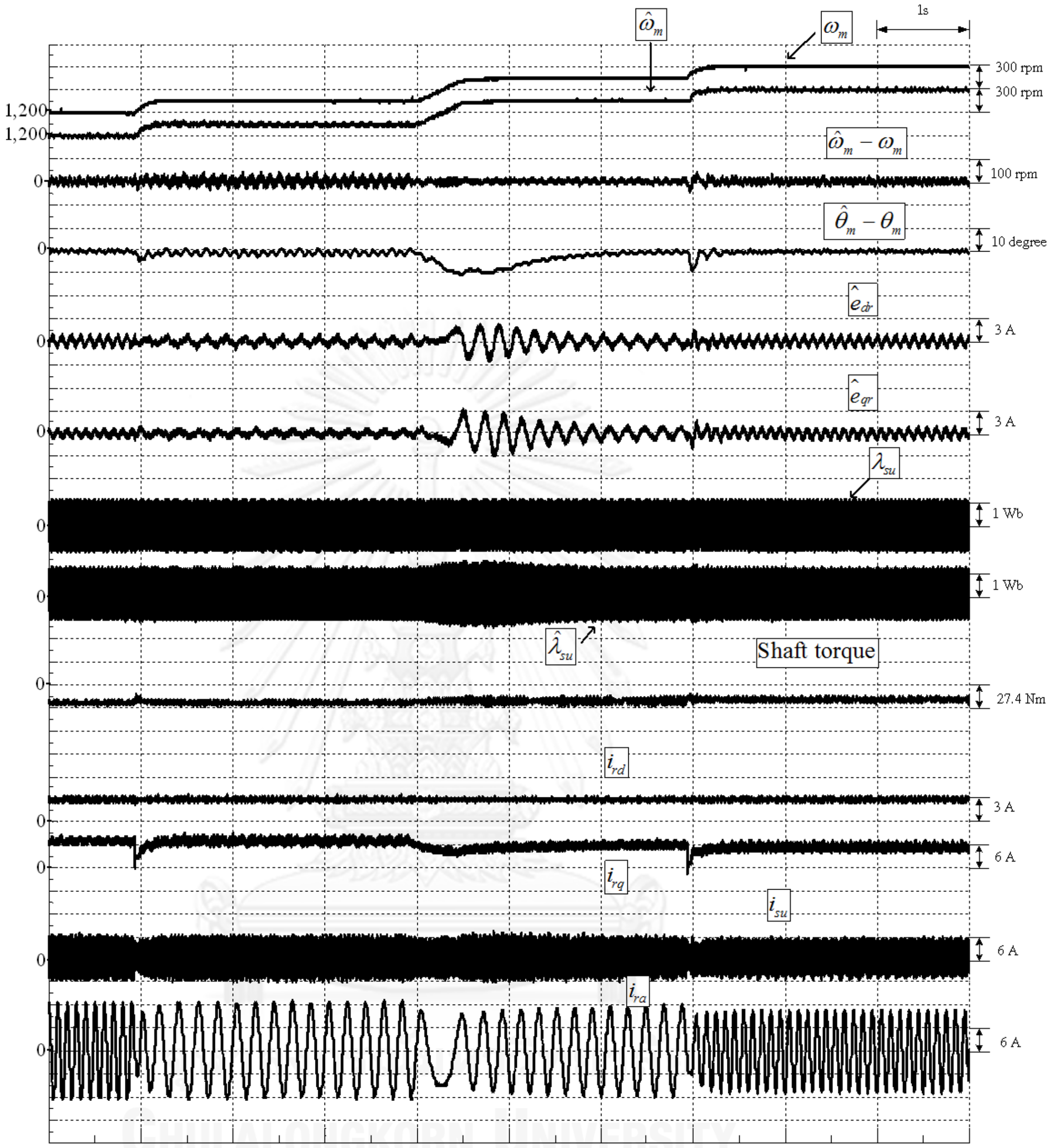


รูปที่ 3.19 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งที่ 1800 rpm ที่สภาวะโหลดพิกัดย่านมอเตอร์และ $i_{rd}^* = 0A$

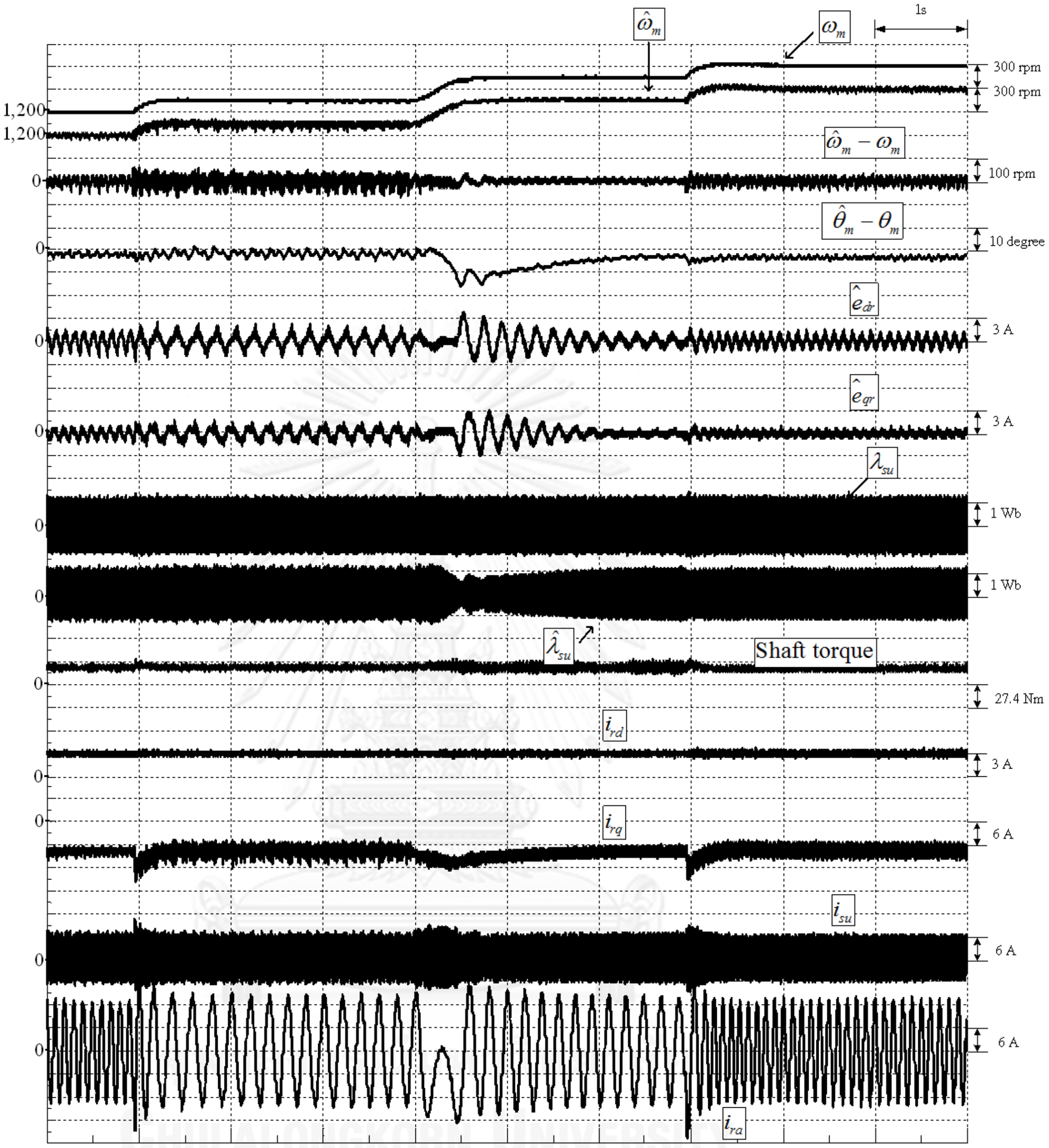
Chulalongkorn University

รูปที่ 3.20 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งในกรณีแปลี่ยนแปลงความเร็วแบบขั้นบันได $1200 \rightarrow 1350 \rightarrow 1650 \rightarrow 1800$ rpm ที่สภาวะไร้โหลดและ $i_{rd}^* = 0A$

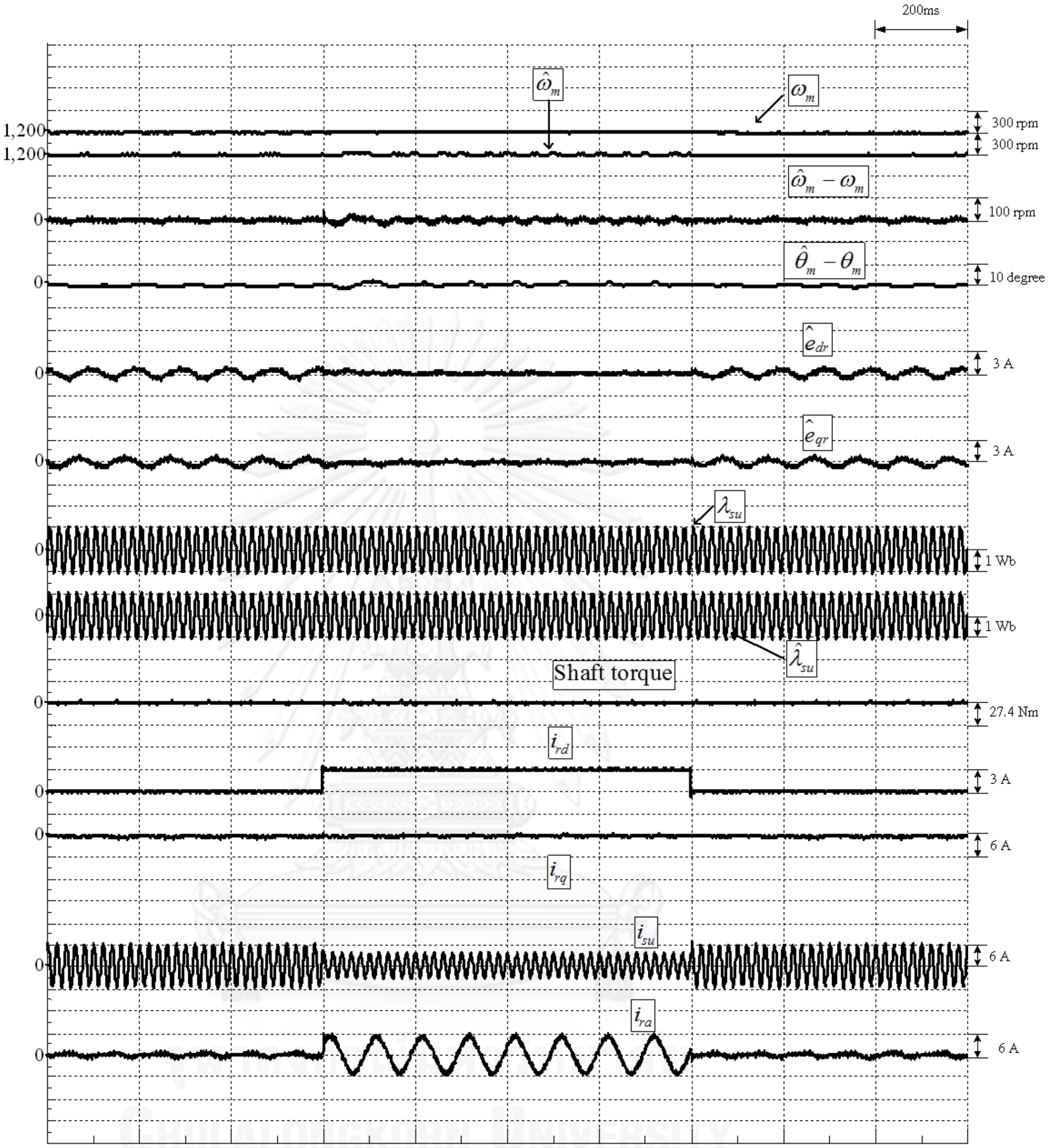
รูปที่ 3.21 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งในกรณีเปลี่ยนแปลงความเร็วแบบขั้นบันได $1200 \rightarrow 1350 \rightarrow 1650 \rightarrow 1800$ rpm ที่สภาวะไร้โหลดและ $i_{rd}^{*} = 3A$



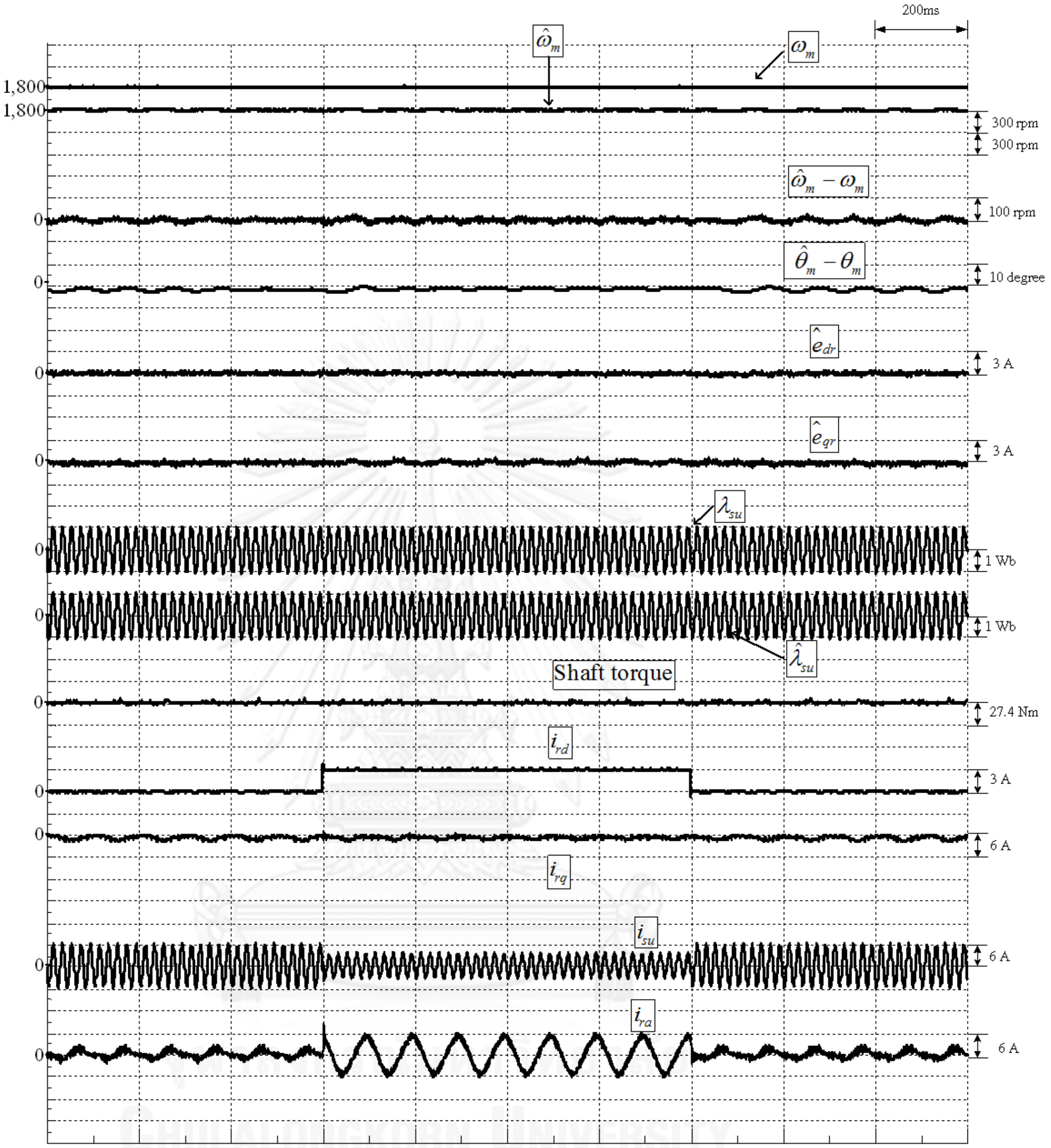
รูปที่ 3.22 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งในกรณีเปลี่ยนแปลงความเร็วแบบขั้นบันไดจาก 1200 $\rightarrow$ 1350 $\rightarrow$ 1650 $\rightarrow$ 1800 rpm ที่สภาวะโหลดพิกัดในย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและ $i_{rd}^* = 3A$



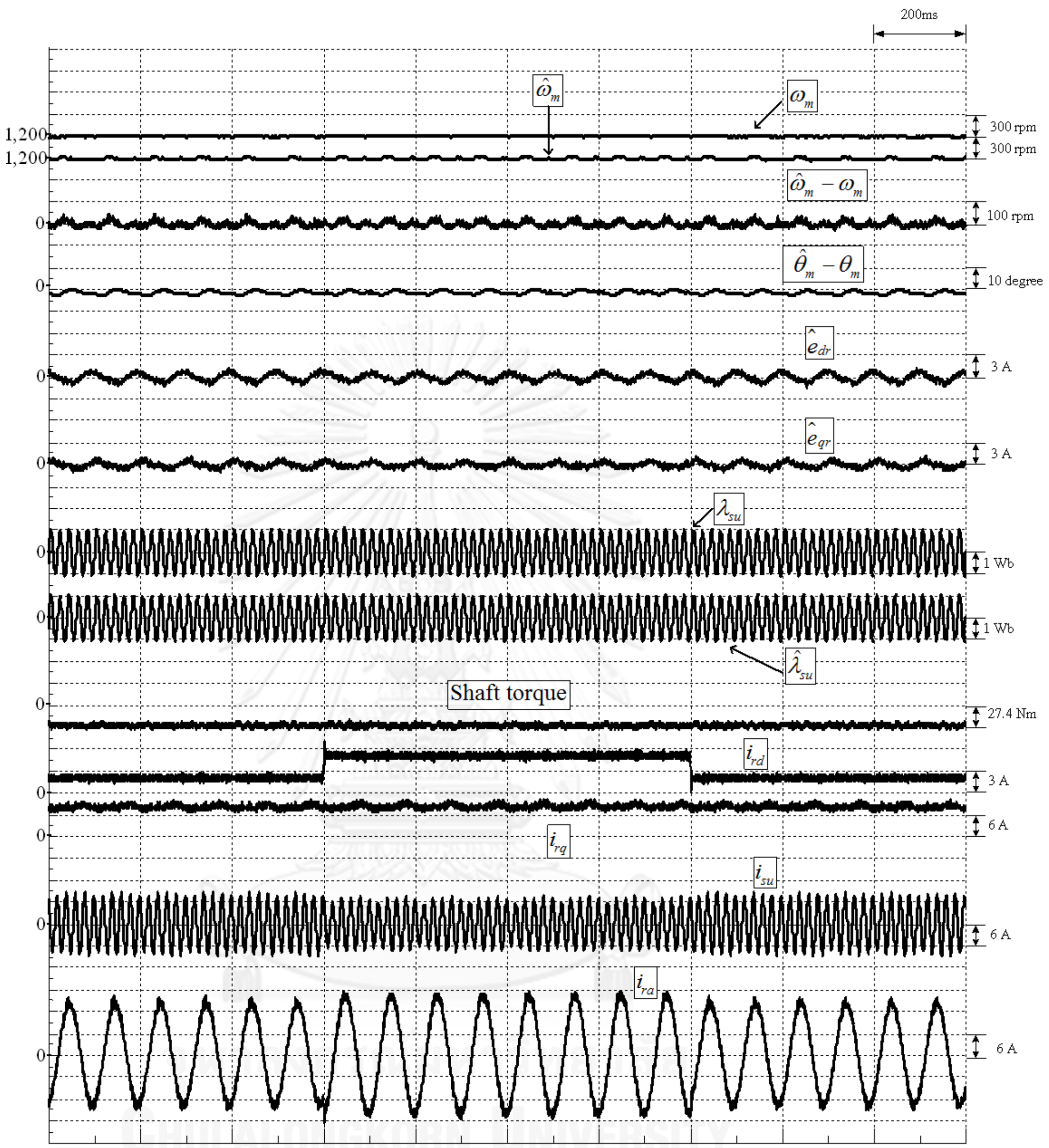
รูปที่ 3.23 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งในกรณีเปลี่ยนแปลงความเร็วแบบขั้นบันไดจาก 1200 → 1350 → 1650 → 1800 rpm ที่สภาวะโหลดพิกัดในย่านมอเตอร์และ $i_{rd}^* = 3A$



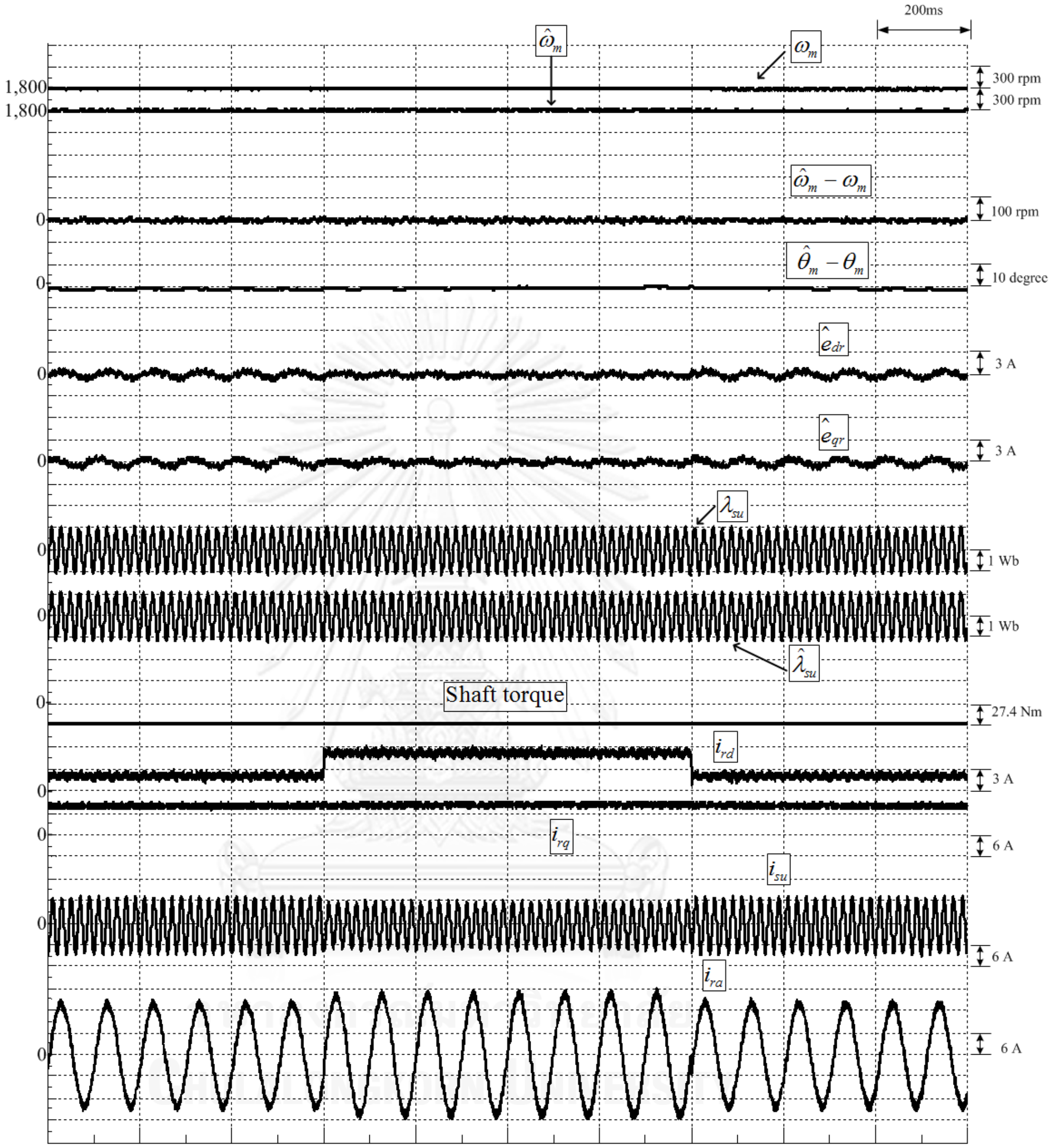
รูปที่ 3.24 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งในกรณีเปลี่ยนแปลงกระแสกระตุ้นฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์แบบขั้นบันได ($i_{rd}^{*} = 0 \rightarrow 3A$) ที่ความเร็ว 1200 rpm ในสภาวะไร้โหลด



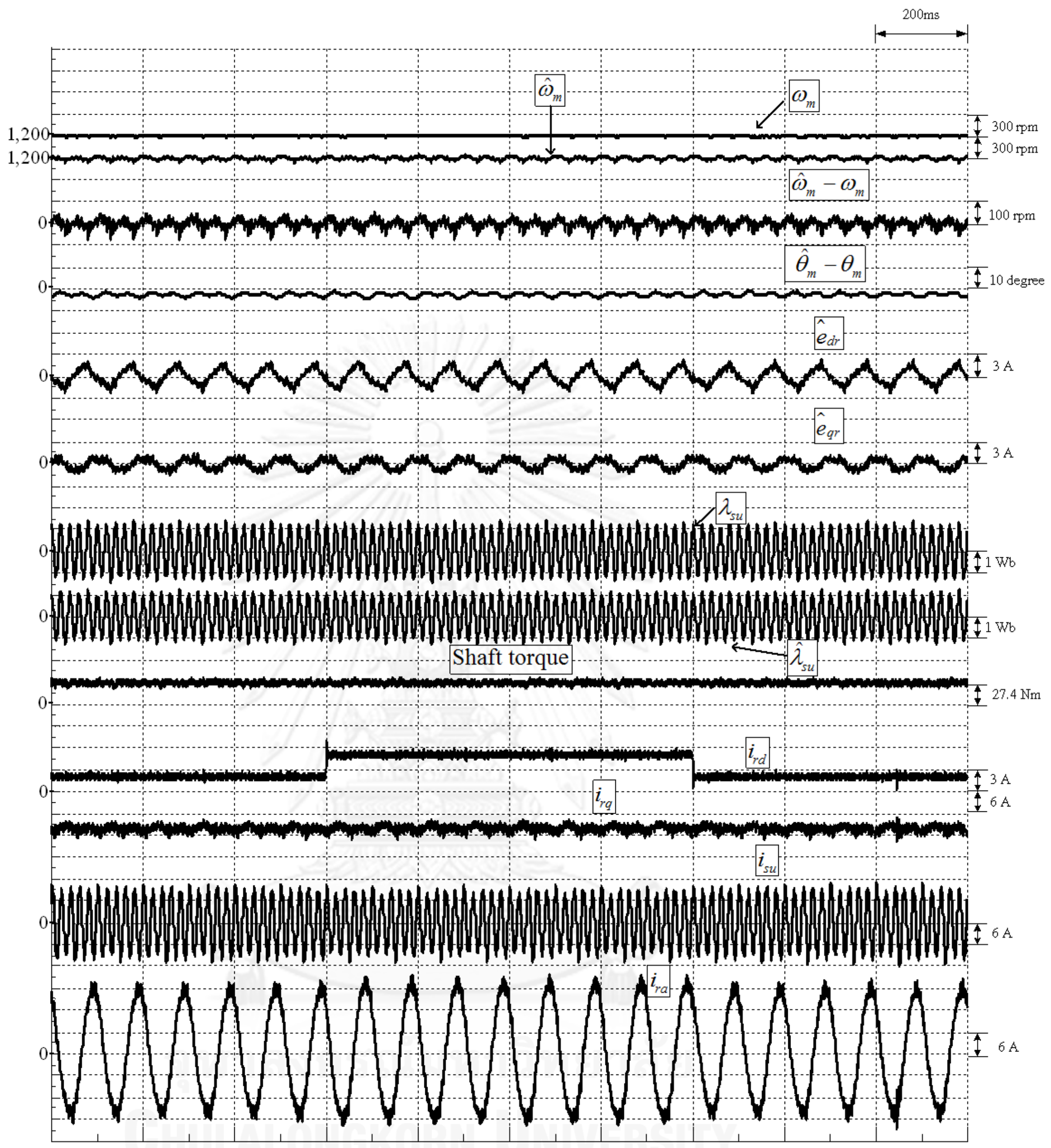
รูปที่ 3.25 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งในกรณีเปลี่ยนแปลงกระแสกระตุ้นฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์แบบขั้นบันได ($i_{rd}^{*} = 0 \rightarrow 3A$) ที่ความเร็ว 1800 rpm ในสภาวะไร้โหลด



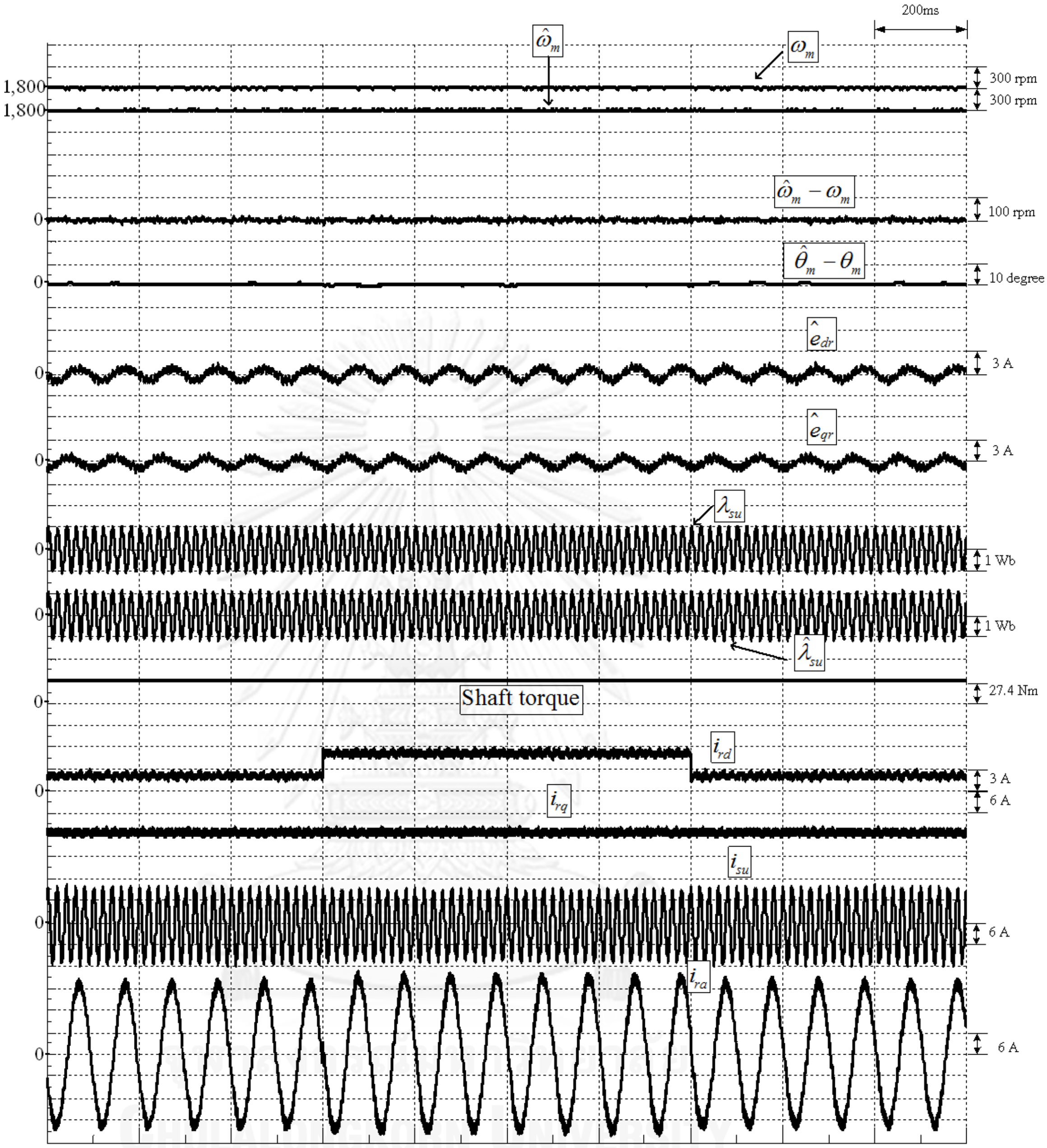
รูปที่ 3.26 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งในกรณีเปลี่ยนแปลงกระแสกระตุ้นฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์แบบขั้นบันได ($i_{rd}^* = 2 \rightarrow 5A$) ที่ความเร็ว 1200 rpm และสภาวะโหลดพิกัดในย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



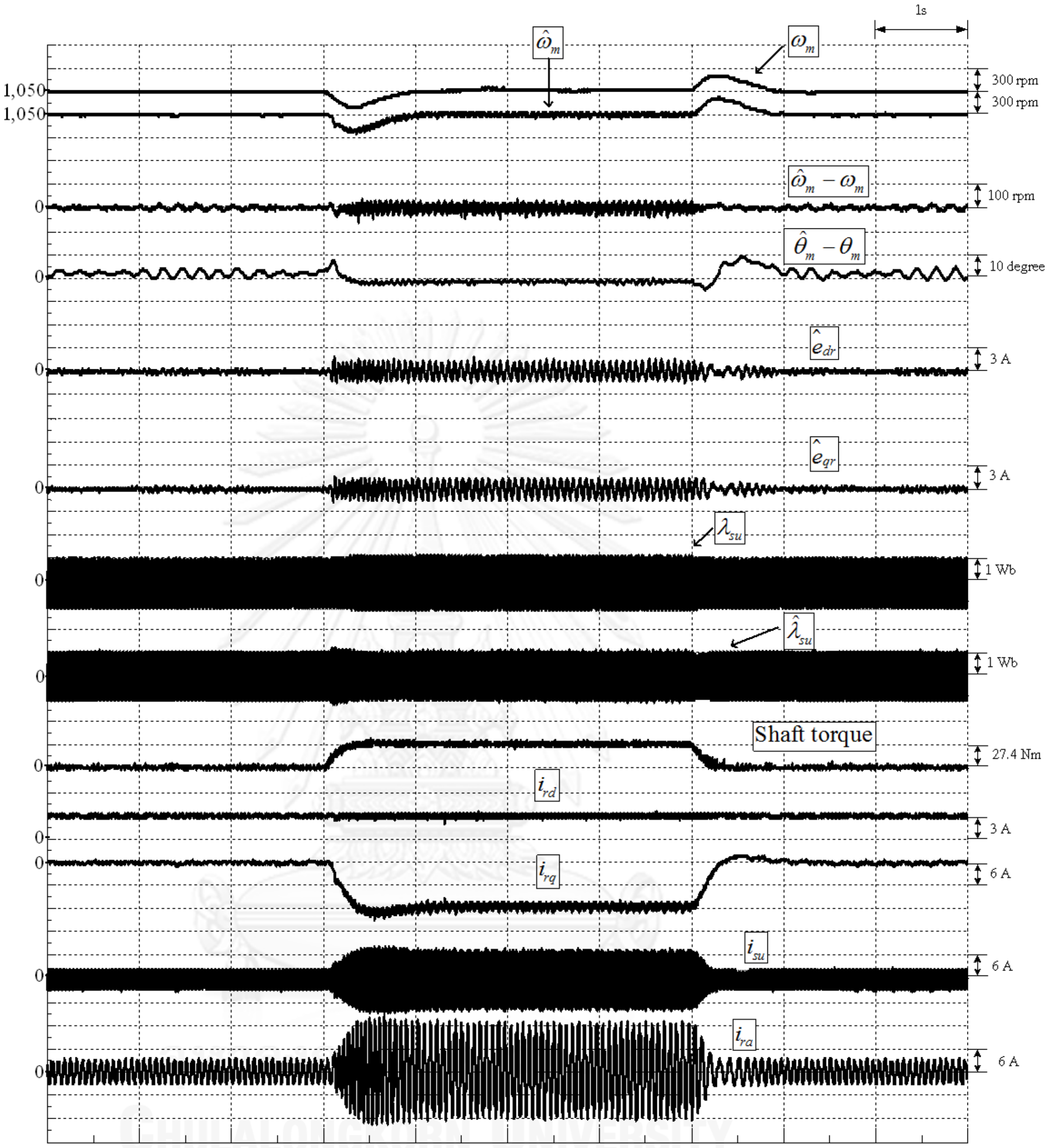
รูปที่ 3.27 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งในกรณีเปลี่ยนแปลงกระแสกระตุ้นฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์แบบขั้นบันได ($i_{rd}^* = 2 \rightarrow 5A$) ที่ความเร็ว 1800 rpm และสภาวะโหลดพิกัดในย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



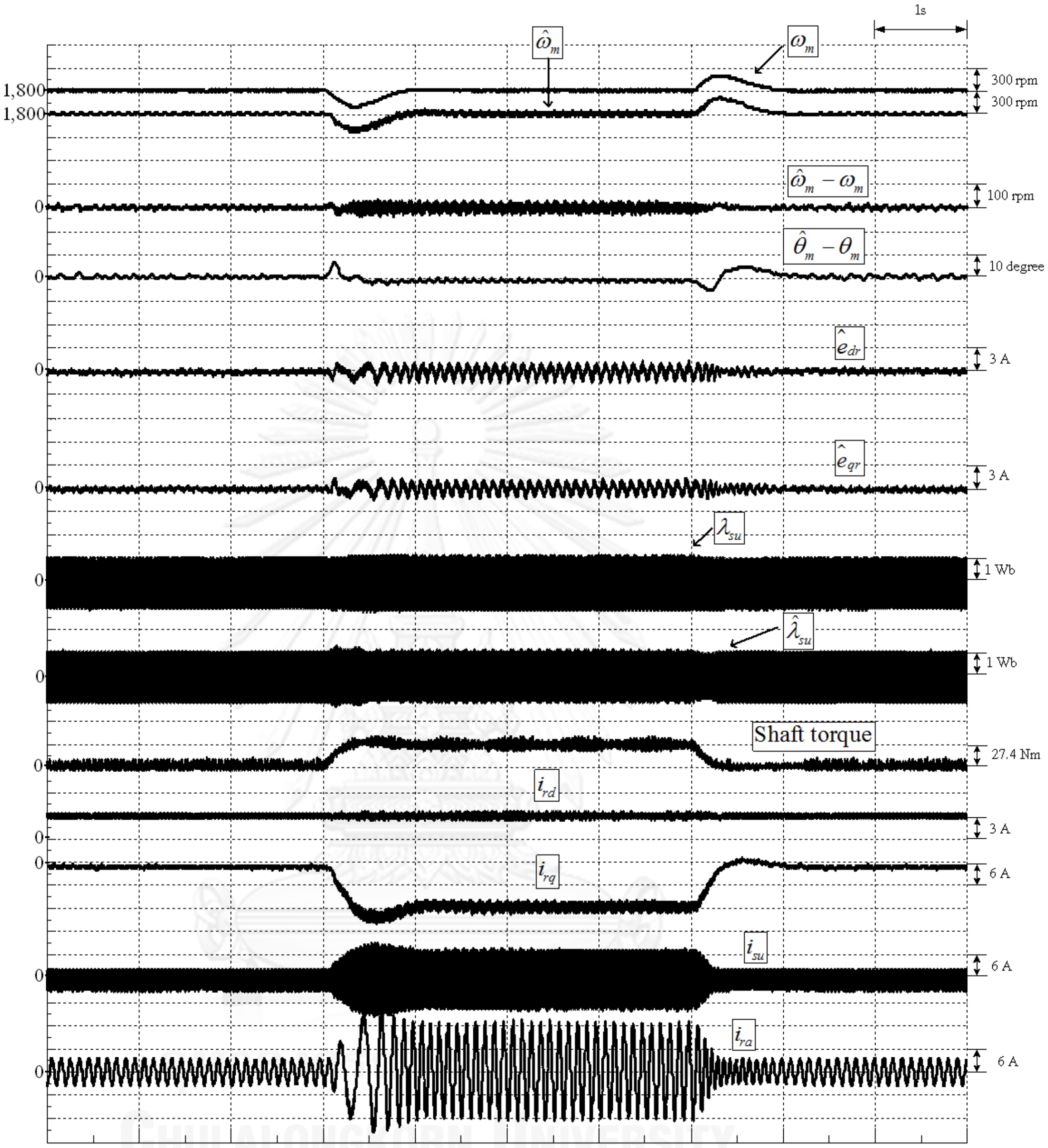
รูปที่ 3.28 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งในกรณีเปลี่ยนแปลงกระแสกระตุ้นฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์แบบขั้นบันได ($i_{rd}^* = 2 \rightarrow 5A$) ที่ความเร็ว 1200 rpm และสภาวะโหลดพิกัดในย่านมอเตอร์



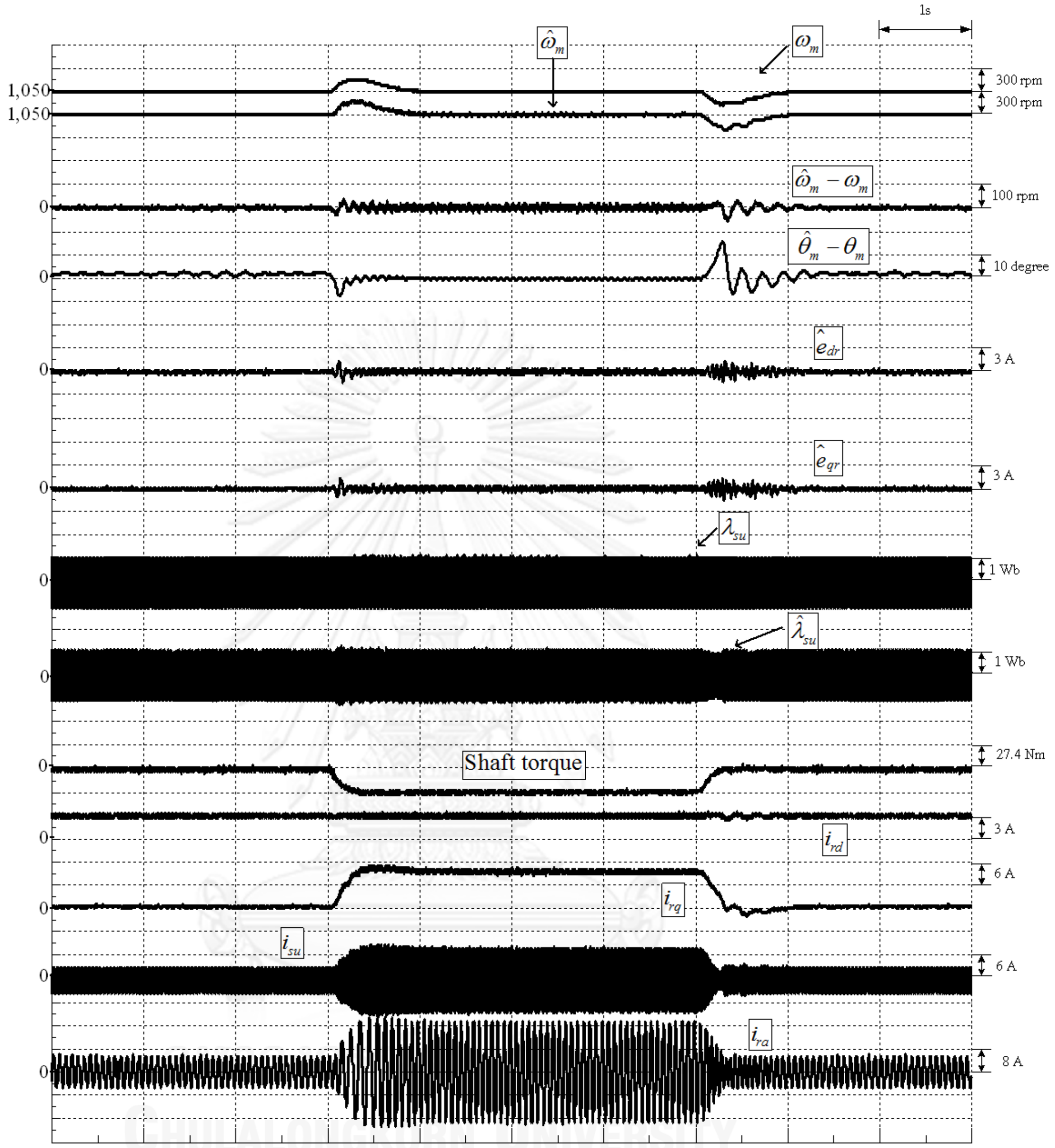
รูปที่ 3.29 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งในกรณีเปลี่ยนแปลงกระแสกระตุ้นฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์แบบขั้นบันได ($i_{rd}^{*} = 2 \rightarrow 5A$) ที่ความเร็ว 1800 rpm และสภาวะโหลดพิกัดในย่านมอเตอร์



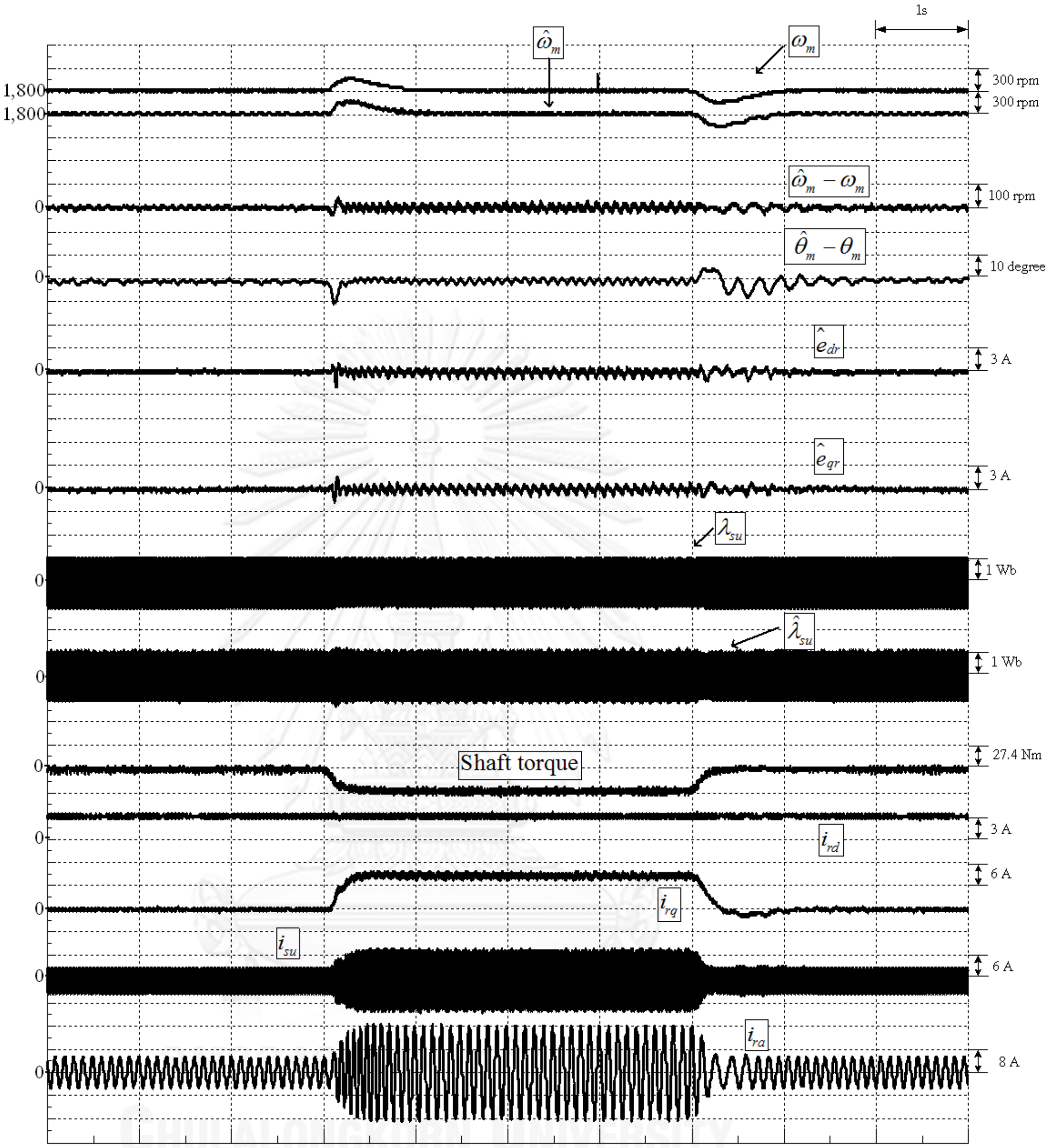
รูปที่ 3.30 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งในกรณีเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้นบันไดไปยังสภาวะโหลดพิกัดย่านมอเตอร์ที่ความเร็ว 1050 rpm และ $i_{rd}^* = 3A$



รูปที่ 3.31 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งในกรณีเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้นบันไดไปยังสภาวะโหลดพิกัดย่านมอเตอร์ที่ความเร็ว 1800 rpm และ $i_{rd}^* = 3A$



รูปที่ 3.32 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งในกรณีเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้นบันไดไปยังสภาวะโหลดพิกัดย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ความเร็ว 1050 rpm และ $i_{rd}^{*} = 3A$



รูปที่ 3.33 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งในกรณีเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้นบันไดไปยังสภาวะโหลดพิกัดย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ความเร็ว 1800 rpm และ $i_{rd}^{*} = 3A$

บทที่ 4
เสถียรภาพของระบบประมาณค่าตำแหน่งโรเตอร์และการออกแบบอัตราขยายการปรับตัว

บทนี้กล่าวถึงการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบประมาณค่าตำแหน่งโรเตอร์ ด้วยการยืนยันเสถียรภาพแบบเชิงเส้น (Linearization) รอบจุดทำงานหนึ่งๆ และแสดงเงื่อนไขข้อจำกัดด้านเสถียรภาพของระบบประมาณ จากนั้นนำเสนอการออกแบบอัตราขยายการปรับตัวของระบบประมาณตำแหน่ง นอกจากนี้ยังกล่าวถึงข้อจำกัดในการทดลองและผลกระทบทางปฏิบัติเนื่องจากแรงดันตกคร่อมสวิตช์กำลังอีกด้วย

4.1 สมการค่าผิดพลาดของระบบประมาณตำแหน่ง

การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบประมาณตำแหน่งโรเตอร์จะพิจารณาความสัมพันธ์จากสมการค่าผิดพลาดของแบบจำลองเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง เพราะฉะนั้นจากสมการ (3.1)-(3.4) ของการประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งในหัวข้อที่ 3.1 จึงสามารถเขียนสมการค่าผิดพลาดของระบบประมาณตำแหน่งได้ดังนี้

สมการค่าผิดพลาดกระแสโรเตอร์บนแกนอ้างอิงโรเตอร์ ($\vec{e}_r = \hat{\vec{i}}_r' - \vec{i}_r'$):

$$\frac{d\vec{e}_r}{dt} = -\frac{R_r}{L_r}\vec{e}_r - \frac{M}{L_r}\frac{d}{dt}\left\{\left(I - e^{Jp\left(\hat{\theta}_m - \theta_m\right)}\right)e^{-Jp\hat{\theta}_m}\vec{i}_s\right\} \tag{4.1}$$

สมการค่าผิดพลาดของความเร็วโรเตอร์ ($e_\omega = \hat{\omega}_m - \omega_m$):

$$\frac{d\left(\hat{\omega}_m - \omega_m\right)}{dt} \triangleq \frac{de_\omega}{dt} = K_P\frac{d}{dt}\left\{\left(-Je^{-Jp\hat{\theta}_m}\vec{i}_s\right)^T\vec{e}_r\right\} + K_I\left(-Je^{-Jp\hat{\theta}_m}\vec{i}_s\right)^T\vec{e}_r \tag{4.2}$$

สมการค่าผิดพลาดของตำแหน่งโรเตอร์ ($e_\theta = \hat{\theta}_m - \theta_m$):

$$\frac{d\left(\hat{\theta}_m - \theta_m\right)}{dt} = \frac{de_\theta}{dt} = e_\omega \tag{4.3}$$

เพื่อความสะดวกในการพิจารณาสมการค่าผิดพลาด และการวิเคราะห์เสถียรภาพในลำดับถัดไป เราจะนิยามตัวแปรใหม่สำหรับสมการค่าผิดพลาดความเร็วโรเตอร์ในสมการที่ (4.2)-(4.3) ได้ดังนี้

$$\zeta = e_\omega - K_P\left(-Jpe^{-Jp\hat{\theta}_m}\vec{i}_s\right)^T\vec{e}_r \tag{4.4}$$

4.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีทำให้เป็นเชิงเส้น

ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบประมาณจะใช้วิธีการทำสมการให้เป็นเชิงเส้น โดยจะพิจารณาเสถียรภาพของระบบประมาณรอบๆ จุดทำงานหนึ่งๆ ตามเงื่อนไขต่อไปนี้

$$\begin{aligned}\vec{e}_r &= 0\\ e_\theta &= e_\omega = 0\end{aligned} \tag{4.5}$$

จากเงื่อนไขในสมการ (4.5) สามารถแสดงผลการทำระบบประมาณตำแหน่งให้เป็นเชิงเส้นในปริภูมิสถานะได้ดังสมการที่ (4.6)

$$\begin{bmatrix} \delta\dot{e}_{rd} \\ \delta\dot{e}_{rq} \\ \delta\dot{\zeta} \\ \delta\dot{e}_{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_r}{L_r} - K_P \frac{M}{L_r}(p\hat{i}_{qs})^2 & K_P \frac{M}{L_r} p^2 \hat{i}_{ds}\hat{i}_{qs} & \frac{-M}{L_r} p\hat{i}_{qs} & 0 \\ K_P \frac{M}{L_r} p^2 \hat{i}_{ds}\hat{i}_{qs} & -\frac{R_r}{L_r} - K_P \frac{M}{L_r}(p\hat{i}_{ds})^2 & \frac{M}{L_r} p\hat{i}_{ds} & 0 \\ K_I p\hat{i}_{qs} & -K_I p\hat{i}_{ds} & 0 & 0 \\ K_P p\hat{i}_{qs} & -K_P p\hat{i}_{ds} & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta e_{rd} \\ \delta e_{rq} \\ \delta\zeta \\ \delta e_{\theta} \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

โดยสามารถวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบประมาณได้ด้วยวิธีการหาค่าลักษณะเฉพาะ (Eigenvalue) ของปริภูมิสถานะ ซึ่งค่าลักษณะเฉพาะของระบบประมาณตำแหน่งจะประกอบด้วย

$$\begin{aligned} s_1 &= 0 \\ s_2 &= -\frac{R_r}{L_r} \\ s_3, s_4 &= \frac{-R_r - K_P M p^2 \left|\hat{i}'_s\right|^2 \pm \sqrt{\left(K_P M p^2 \left|\hat{i}'_s\right|^2 + R_r\right)^2 - 4 L_r K_I M p^2 \left|\hat{i}'_s\right|^2}}{2L_r} \end{aligned} \quad (4.7)$$

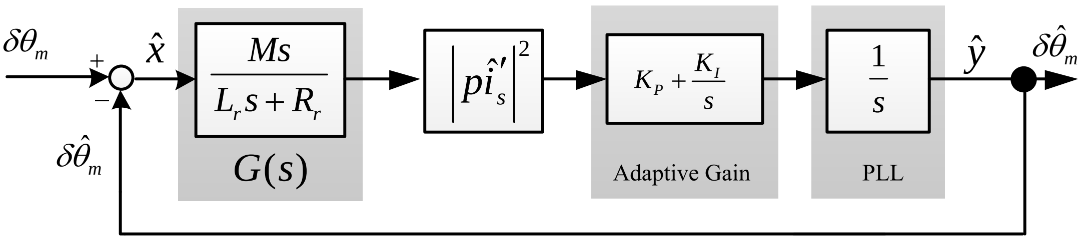
<u>**เงื่อนไขที่เพียงพอสำหรับเสถียรภาพของระบบประมาณตำแหน่ง**</u>

เมื่อพิจารณารากของค่าลักษณะเฉพาะใน (4.7) จะพบว่า ค่าทั้งหมดขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง, ขนาดของกระแสสเตเตอร์ ($\left|\hat{i}'_s\right|$) และค่าอัตราขยาย (K_P, K_I) เพราะฉะนั้นหากพิจาณาค่าลักษณะเฉพาะในสภาวะที่เชื่อมต่อเข้ากับกริด ซึ่งเป็นย่านการทำงานปกติของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง ขนาดของกระแสสเตเตอร์จะมีค่ามากกว่าศูนย์เสมอ ($\left|\hat{i}'_s\right| > 0$) และโดยทั่วไปจะนิยามให้ค่าอัตราขยาย ($K_P, K_I > 0$) มีค่ามากกว่าศูนย์ จากเงื่อนไขทั้งสองดังที่กล่าวมา พบว่าขั้ว (poles) ของระบบประมาณตำแหน่งจะอยู่ทางฝั่งซ้ายของระนาบเอสทั้งหมด ส่งผลให้ระบบประมาณตำแหน่งมีเสถียรภาพในเงื่อนไขการทำงานย่านปกติ ดังนั้นจึงสามารถสรุปเงื่อนไขที่เพียงพอสำหรับเสถียรภาพได้ดังสมการที่ (4.8)

$$\left|\hat{i}'_s\right|^2 \neq 0 \text{ และ } K_P, K_I > 0 \quad (4.8)$$

4.3 การออกแบบอัตราขยายการปรับตัวสำหรับการประมาณตำแหน่งโรเตอร์

จากการยืนยันเสถียรภาพในหัวข้อที่ผ่านมา ในหัวข้อนี้จะนำเสนอการออกแบบอัตราขยายการปรับตัวสำหรับการประมาณตำแหน่งโรเตอร์ที่สอดคล้องกับเสถียรภาพ และแสดงผลตอบสนองของระบบประมาณบนโดเมนเวลาและความถี่ตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ดังนี้



รูปที่ 4.1 บล็อกไดอะแกรมของระบบประมาณตำแหน่งโรเตอร์

เริ่มต้นจากการพิจารณาปริภูมิสถานะในสมการที่ (4.6) จะสามารถเขียนบล็อกไดอะแกรมของระบบประมาณตำแหน่งโรเตอร์ได้ในรูปที่ 4.1 ระบบประมาณตำแหน่งโรเตอร์ จะประกอบด้วยสัญญาณขาเข้าคือ ตำแหน่งโรเตอร์ทางกล ($\delta\theta_m$) ส่วนสัญญาณขาออกและสัญญาณป้อนกลับของระบบคือ ตำแหน่งโรเตอร์ประมาณ ($\delta\hat{\theta}_m$) จากบล็อกไดอะแกรมดังกล่าวจะเห็นได้ว่า ผลตอบสนองของระบบประมาณตำแหน่งโรเตอร์จะขึ้นอยู่กับฟังก์ชันโอนย้าย $G(s)$ และอัตราขยายปรับตัว K_I และ K_P รวมทั้งขนาดของกระแสสเตเตอร์ ($\left|\hat{i}'_s\right|$)

เพื่อลดความซับซ้อนในการออกแบบอัตราขยายการปรับตัวของระบบประมาณตำแหน่ง เราจะพิจารณาระบบประมาณตำแหน่งด้วยฟังก์ชันโอนย้ายของระบบวงรอบเปิด (Open loop) แทนการวิเคราะห์ด้วยฟังก์ชันโอนย้ายของระบบวงรอบปิด (Closed loop) เพราะฉะนั้นจึงสามารถเขียนฟังก์ชันโอนย้ายของระบบวงรอบเปิดของระบบประมาณตำแหน่งได้ใหม่ดังนี้

$$\hat{y} = \frac{M\left|p\hat{i}'_s\right|^2 s}{L_r}\frac{1}{s^2}K_P\frac{\left(s+\frac{K_I}{K_P}\right)}{\left(s+\frac{R_r}{L_r}\right)}\hat{x} \tag{4.9}$$

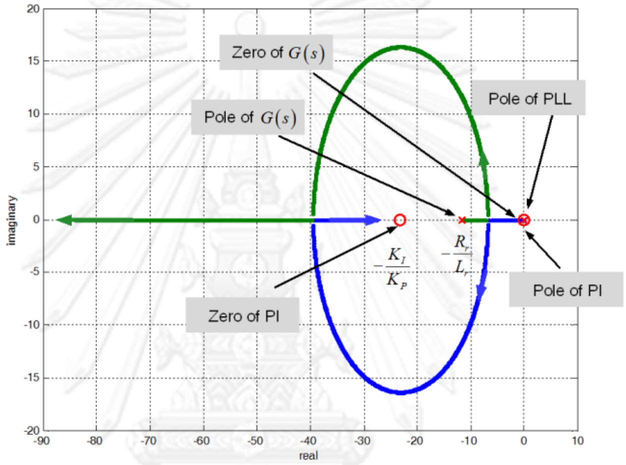
กำหนดให้ $\hat{x} = \delta\theta_m - \delta\hat{\theta}_m$ และ $\hat{y} = \delta\hat{\theta}_m$

ในการวิเคราะห์ผลตอบสนองของระบบประมาณตำแหน่งนั้น จากสมการ(4.9) จะพบว่าตัวแปรที่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้ และส่งผลต่อการตอบสนองของระบบประมาณคือ ขนาดของกระแสสเตเตอร์ ($\left|\hat{i}'_s\right|$) และค่าอัตราขยายการปรับตัว K_I, K_P ซึ่งในเบื้องต้นจะพิจารณาในกรณีที่กำหนดให้อัตราส่วนของอัตราขยาย K_I / K_P มีขนาดมากกว่า R_r / L_r เป็นสองเท่าดังนี้

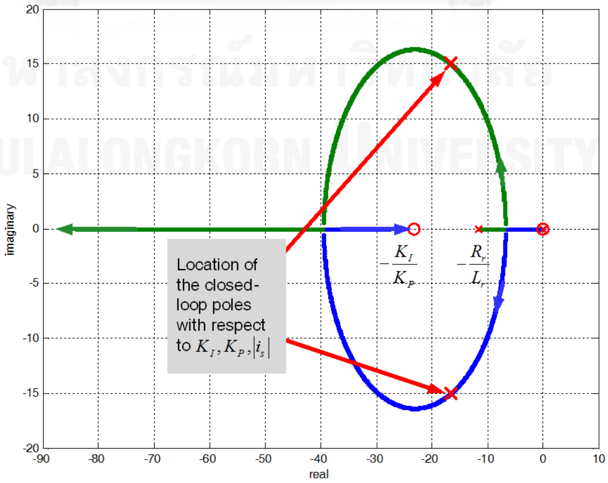
$$\frac{R_r}{L_r} = 11.557 \text{ และ } \frac{K_I}{K_P} = 23.11 \tag{4.10}$$

หากแทนค่าสมการ (4.10) ลงในฟังก์ชันโอนย้ายของวงรอบเปิดของสมการ (4.9) โดยฟังก์ชันโอนย้ายดังกล่าวสามารถแสดงตำแหน่งของขั้วและศูนย์ รวมทั้งเส้นทางเดินรากของระบบประมาณตำแหน่งโรเตอร์ได้ดังรูปที่ 4.2 ผลตอบสนองของระบบประมาณตำแหน่งจะขึ้นอยู่กับขนาดกระแสสเตเตอร์ และค่าอัตราขยาย K_I, K_P ณ ค่าใดๆตามลำดับ

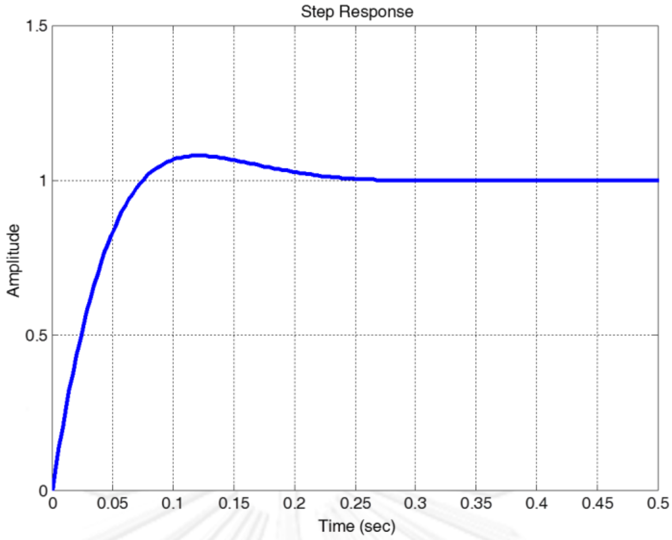
ยกตัวอย่างเช่น ในรูปที่ 4.3 เมื่อพิจารณาตำแหน่งของขั้วและศูนย์ รวมทั้งเส้นทางเดินของรากของระบบประมาณตำแหน่งในกรณีที่กำหนดให้ $\left|\hat{i}_s'\right| = 5A$ และ $K_I = 2.891,\ K_P = 0.25$ พบว่า รากของระบบประมาณจะประกอบไปด้วย ขั้วและศูนย์ของระบบที่ตำแหน่งจุดกำเนิด รวมทั้งขั้วที่เป็นสังยุคของจำนวนเชิงซ้อน (Complex conjugate poles) ซึ่งขั้วที่เป็นสังยุคของจำนวนเชิงซ้อนจะให้ผลตอบสนองทางเวลาเป็นแบบหน่วงต่ำกว่าค่าวิกฤติ (Underdamped response) ก่อนจะลู่เข้าสู่สภาวะคงที่ โดยผลตอบสนองทางเวลาของระบบประมาณตำแหน่งดังกล่าวสามารถแสดงได้ในรูปที่ 4.4 ซึ่งนิยามให้แกนนอนเป็นเวลาในการเข้าสู่สภาวะคงที่ และแกนตั้งเป็นขนาดของฟังก์ชันขั้นบันไดหนึ่งหน่วย (Unit step function)



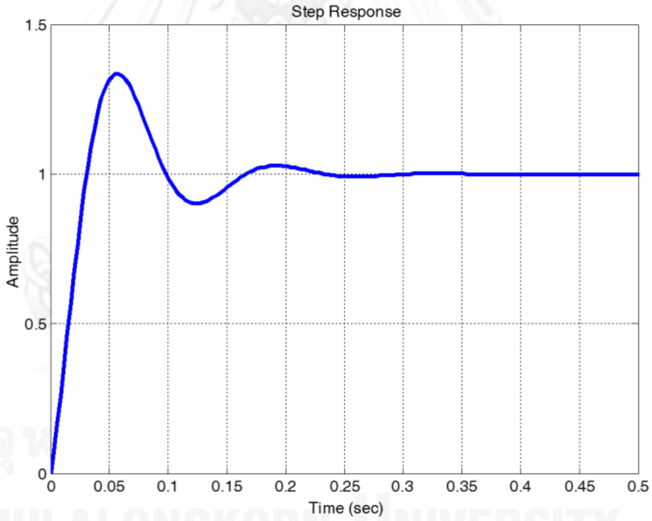
รูปที่ 4.2 ตำแหน่งของขั้วและศูนย์ และทางเดินรากของระบบประมาณตำแหน่งโรเตอร์ขณะที่อัตราส่วนของ K_I / K_P มากกว่า R_r / L_r



รูปที่ 4.3 ตำแหน่งของขั้วและศูนย์ และทางเดินรากของระบบประมาณตำแหน่งโรเตอร์ขณะที่ $K_I = 2.891, K_P = 0.25$ และ $\left|\hat{i}_s'\right| = 5A$



รูปที่ 4.4 ผลการตอบสนองทางเวลาของระบบประมาณตำแหน่งต่อการเปลี่ยนแปลงจากฟังก์ชันขั้นบันไดหนึ่งหน่วย ขณะที่ $K_I = 2.891, K_P = 0.25$ และ $\left|\hat{i}_s'\right| = 5\,A$



รูปที่ 4.5 ผลการตอบสนองทางเวลาของระบบประมาณตำแหน่งต่อการเปลี่ยนแปลงจากฟังก์ชันขั้นบันไดหนึ่งหน่วย ขณะที่ $K_I = 25, K_P = 0.25$ และ $\left|\hat{i}_s'\right| = 5\,A$

อย่างไรก็ตาม หากค่าอัตราขยาย K_I, K_P มีการเปลี่ยนแปลง ผลตอบสนองของระบบประมาณย่อมเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ยกตัวอย่างเช่น รูปที่ 4.5 แสดงผลตอบสนองทางเวลาของระบบประมาณตำแหน่งต่อการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันได ขณะที่กำหนดให้ $K_I = 25, K_P = 0.25$ และ $\left|\hat{i}_s'\right| = 5\,A$ โดยผลตอบสนองทางเวลาของฟังก์ชันโอนย้ายวงรอบปิดที่ได้จะมีลักษณะเป็นค่าพุ่งเกิน (Overshoot) และสั่นไกว (Oscillate) ก่อนจะลู่เข้าสู่สภาวะคงที่ตามลำดับ

เพราะฉะนั้นจากลักษณะของผลตอบสนองทางเวลาที่กล่าวมาในเงื่อนไขต่างๆ ในการออกแบบอัตราขยายการปรับตัวของระบบประมาณตำแหน่งที่นำเสนอนั้น จะกำหนดให้ระบบประมาณมีผลตอบสนองอันดับหนึ่งแบบหน่วงเกิน โดยให้ความถี่หักมุมของอัตราขยายการปรับตัว PI K_I / K_P มีค่าเท่ากับ R_r / L_r ซึ่งจากเงื่อนไขดังกล่าวสามารถเขียนแสดงฟังก์ชันโอนย้ายวงรอบเปิดได้ใหม่ดังสมการที่ (4.11)

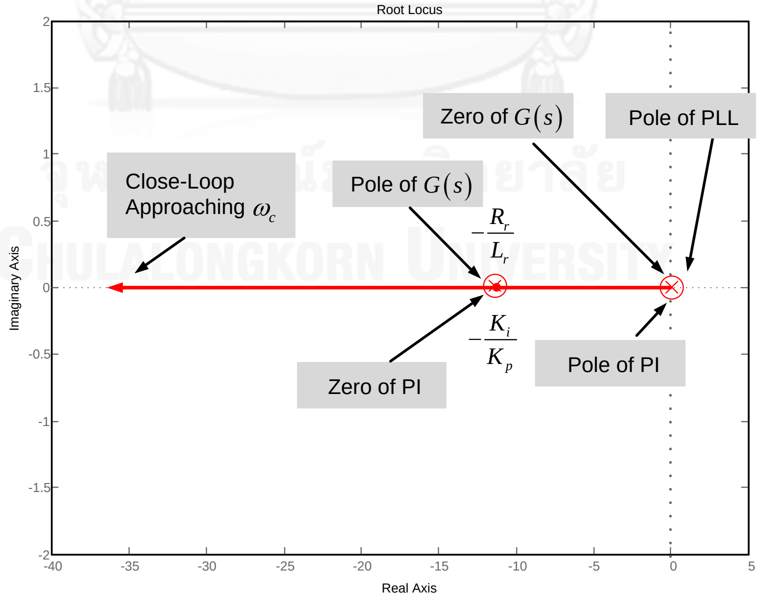
$$\hat{y} = \left[\frac{M \left| p\hat{i}_s' \right|^2}{L_r} \frac{1}{s} K_P \right] \hat{x} \tag{4.11}$$

จากสมการดังกล่าวสามารถแสดงตำแหน่งของขั้ว/ศูนย์ และทางเดินของรากของระบบประมาณตำแหน่งในรูปที่ 4.6 ซึ่งการหักล้างกันของขั้วและศูนย์ทั้ง 2 คู่ ทำให้ทางเดินรากของระบบวงรอบปิดถูกกำหนดด้วยขั้วเด่นที่จุดกำเนิด (ขั้วของอัตราขยายการปรับตัว PI) ซึ่งจะวิ่งไปทางซ้ายตามค่าอัตราขยายที่ออกแบบ ระบบวงรอบปิดจะมีผลลัพธ์เป็นผลตอบสนองอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลาตามแบนด์วิดธ์ที่กำหนด ($\tau_c = 1/\omega_c$)

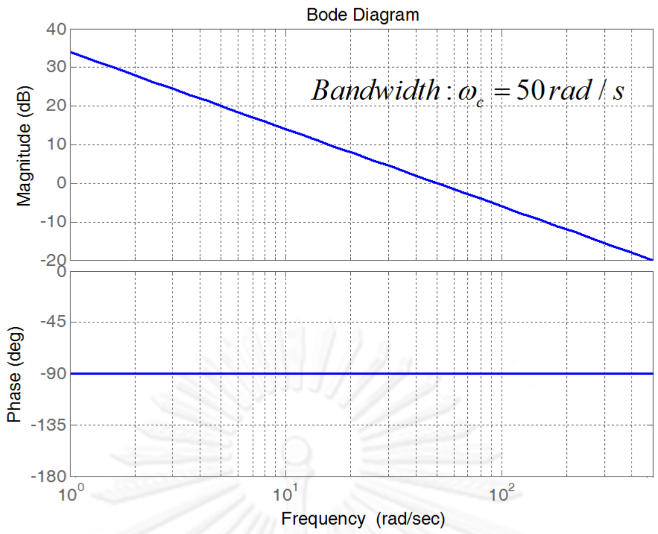
เงื่อนไขสำหรับการออกแบบอัตราขยายการปรับตัวสามารถสรุปได้ดังนี้

$$K_P = \frac{L_r}{M} \frac{1}{\left| p\hat{i}_s' \right|^2} \left| j\omega_c \right| \tag{4.12}$$

$$K_I = \frac{R_r}{L_r} K_P \tag{4.13}$$



รูปที่ 4.6 ตำแหน่งของขั้วและศูนย์ และทางเดินรากของระบบประมาณตำแหน่งโรเตอร์ที่นำเสนอ (อัตราส่วนของ K_I / K_P มีขนาดเท่ากับ R_r / L_r)



รูปที่ 4.7 ผลตอบสนองทางความถี่ของฟังก์ชันโอนย้ายวงรอบเปิดของระบบประมาณตำแหน่งโรเตอร์

จากสมการอัตราขยายการปรับตัวในสมการ (4.12)-(4.13) และค่าพารามิเตอร์ของเครื่องจักรกลในตารางที่ ก.1 หากกำหนดให้ค่าคงตัวเวลาของวงรอบประมาณตำแหน่งโรเตอร์ให้มีค่าเท่ากับ 20 ms เราสามารถออกแบบอัตราขยายการปรับตัวได้ดังนี้

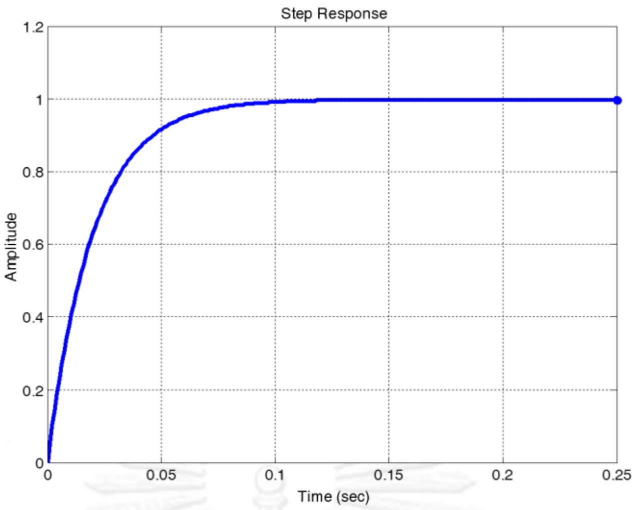
$$\omega_c = 50\,rad/s \text{ และ } \left|\hat{i}_s'\right| = 5\,A$$

และสามารถคำนวณค่าอัตราขยายของระบบประมาณตำแหน่ง

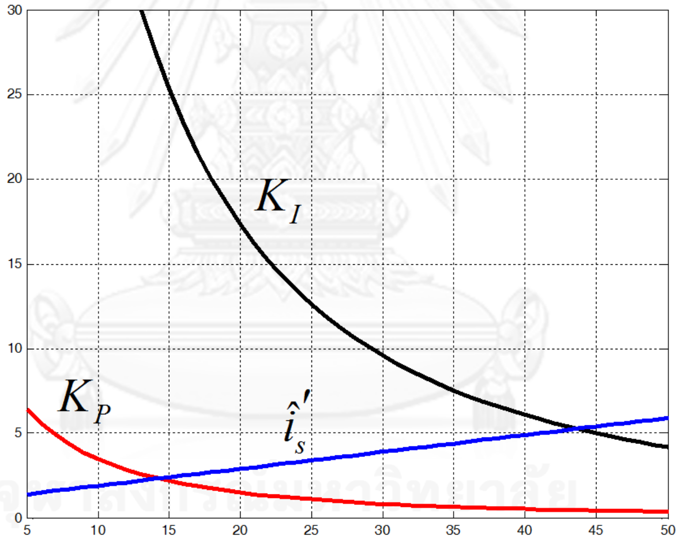
$$K_P = 0.50404 \text{ และ } K_I = 5.83$$

โดยรูปที่ 4.7 แสดงถึงผลตอบสนองเชิงความถี่ของฟังก์ชันโอนย้ายวงรอบเปิดของระบบประมาณตำแหน่งโรเตอร์ และรูปที่ 4.8 แสดงผลตอบสนองแบบหน่วงเกินต่อการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันไดของระบบประมาณตำแหน่งดังที่กำหนดไว้

จากสมการ (4.12) นอกจากแบนด์วิดธ์ของระบบ (ω_c) ที่เป็นตัวแปรต้นของอัตราขยายแล้วขนาดของกระแสสเตเตอร์ ก็ส่งผลต่อค่าอัตราขยาย K_P และ K_I เช่นกัน เพราะฉะนั้นในกรณีที่ต้องการกำหนดให้แบนด์วิดธ์ของระบบประมาณตำแหน่งมีค่าคงที่ ขนาดของ K_P และ K_I จำเป็นต้องแปรผันตามค่ากระแสสเตเตอร์ด้วย โดยสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสสเตเตอร์และค่าอัตราขยายการปรับตัว K_P และ K_I ที่เงื่อนไขแบนด์วิดธ์ของระบบประมาณ $\omega_c = 50\,rad/s$ ได้ดังรูปที่ 4.9 เมื่อขนาดของกระแสสเตเตอร์มีขนาดเพิ่มขึ้น ค่าของอัตราขยายการปรับตัว K_P และ K_I มีขนาดลดลงเรื่อยๆ ดังคำนวณจากสมการที่ (4.12) และ (4.13) เพราะเหตุนี้ระบบประมาณตำแหน่งจึงสามารถรักษาแบนด์วิดธ์ (ω_c) ของระบบให้คงที่ได้ แม้ว่ากระแสสเตเตอร์จะมีการเปลี่ยนแปลงตามระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งที่สภาวะต่างๆ เช่น ควบคุมกระแสกระตุ้นฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ ($i_{rd}^* = 3$)



รูปที่ 4.8 ผลการตอบสนองทางเวลาของระบบประมาณตำแหน่งที่นำเสนอต่อการเปลี่ยนแปลงจากฟังก์ชันขั้นบันไดหนึ่งหน่วย



รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสสเตเตอร์, ค่าอัตราขยาย K_P และ K_I ที่เงื่อนไขแบนด์วิดธ์ของระบบประมาณ $\omega_c = 50\,rad/s$

อย่างไรก็ตามในสภาวะกระแสสเตเตอร์มีค่าน้อยๆ ค่าอัตราขยาย K_P และ K_I จะมีค่าสูงขึ้นเป็นอย่างมาก ดังแสดงในรูปที่ 4.9 เพราะฉะนั้นในทางปฏิบัติจำเป็นต้องจำกัดค่าอัตราขยาย K_P และ K_I ไว้ที่ค่าคงที่ค่าหนึ่ง เฉพาะการทำงานในสภาวะกระแสสเตเตอร์มีขนาดน้อยๆ เพื่อไม่ให้เกิดผลกระทบต่อระบบประมาณ เนื่องจากการใช้อัตราขยายที่มีค่ามาก

4.4 ข้อจำกัดทางด้านการประมาณค่าได้ของระบบประมาณตำแหน่ง

แม้ว่าระบบประมาณตำแหน่งด้วยวิธีค่าผิดพลาดของแบบจำลองโรเตอร์สามารถทำงานได้ในย่านความเร็วต่างๆ ซึ่งยืนยันได้จากผลการทดลองการทำงานในบทที่ 3 แต่อย่างไรก็ตามที่ระบบประมาณตำแหน่งที่นำเสนอนั้น มีข้อจำกัดทางด้านการประมาณค่าจากสองสาเหตุหลัก อันได้แก่ 1) การขาดคุณสมบัติในการประมาณค่าได้ในย่านความเร็วซิงโครนัส เนื่องจากข้อจำกัดทางทฤษฎี และ 2) ผลกระทบจากค่าแรงดันผิดพลาดในทางปฏิบัติ

4.4.1 ข้อจำกัดทางทฤษฎีของระบบประมาณตำแหน่ง

แม้ว่าระบบประมาณจะมีเสถียรภาพสอดคล้องกับเงื่อนไขในสมการที่ (4.8) แต่ค่าลักษณะเฉพาะในสมการที่ (4.7) แสดงค่าขั้ว (pole) อยู่ที่ตำแหน่งจุดกำเนิด ($s_1 = 0$) ซึ่งไม่สามารถยืนยันถึงการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ (Asymptotically Stable) ได้ ทั้งนี้ระบบประมาณตำแหน่งจะมีค่าผิดพลาด โดยไม่ลู่เข้าได้ในกรณีที่ ความถี่ของกระแสโรเตอร์มีค่าเป็นศูนย์ (สภาวะไฟกระแสตรง) หรือ กรณีที่ความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์มีค่าเท่ากับความเร็วซิงโครนัส $\left(p\omega_m = \omega_o\right)$ จากเงื่อนไขดังกล่าวสามารถอธิบายได้โดยง่าย ด้วยการเขียนสมการค่าผิดพลาดกระแสโรเตอร์ (4.1) ใหม่ดังนี้

กำเนิดให้ $\vec{i}_s \triangleq |i_s| e^{J\theta_o}$ จากนั้นแทนตัวแปรลงในสมการที่ (4.1) จะได้ว่า

$$\frac{d\vec{e}_r}{dt} = -\frac{R_r}{L_r}\vec{e}_r - \frac{M}{L_r}\frac{d}{dt}\left\{\left(I - e^{Jp\left(\hat{\theta}_m - \theta_m\right)}\right)|i_s| e^{J\left(\theta_o - p\hat{\theta}_m\right)}\right\} \tag{4.14}$$

เมื่อพิจารณาสมการ (4.14) กรณีที่ความถี่ทางไฟฟ้าของโรเตอร์มีค่าเท่ากับความถี่ของกระแสสเตเตอร์ $\left(p\hat{\omega}_m = \omega_o\right)$ หรือ กรณีค่าความแตกต่างระหว่างมุม ($\theta_o - p\hat{\theta}_m$) มีค่าคงที่ ดังนั้นหากสมมติว่า เกิดค่าผิดพลาดของตำแหน่งโรเตอร์คงที่ค่าหนึ่ง ($e_\theta \neq 0$) ค่าผิดพลาดของตำแหน่งโรเตอร์ดังกล่าวจะไม่สะท้อนไปยังค่าผิดพลาดของกระแสโรเตอร์ได้เลย โดยในกรณีสมการ (4.14) จะเป็นจริงก็ต่อเมื่อค่าความผิดพลาดของกระแสโรเตอร์มีค่าเป็นศูนย์ ($\vec{e}_r = 0$) ระบบประมาณตำแหน่งจึงหยุดการปรับค่าตำแหน่งประมาณ และเกิดค่าผิดพลาดของตำแหน่งโรเตอร์โดยไม่ลู่เข้าสู่ค่าศูนย์ในที่สุด ในทำนองเดียวกันหากพิจารณาคุณสมบัติทางกายภาพของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางเงื่อนไขการทำงานลักษณะนี้ เสมือนกับการป้อนแรงดันไฟตรงทางด้านฝั่งโรเตอร์หรือสเตเตอร์ ซึ่งจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงใดๆ ของกระแสและแรงดันเลย

ยกตัวอย่างผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งในกรณีเปลี่ยนแปลงความเร็วแบบขั้นบันได ที่สภาวะโหลดพิกัดในย่านมอเตอร์ในรูปที่ 4.10 โดยในสภาวะเริ่มต้น ควบคุมความเร็วที่ 1200 rpm ก่อนเปลี่ยนแปลงความเร็วแบบขั้นไปยังย่านความเร็วซิงโครนัสที่ 1500 rpm และย่านซุปเปอร์ซิงโครนัสที่ 1800 rpm ตามลำดับ จากผลการจำลองพบว่าในย่านความเร็ว 1200 rpm ระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดความเร็วสามารถทำงานได้โดยค่าความผิดพลาดของกระแสโรเตอร์ และค่าความผิดพลาดของความเร็วมีขนาดเป็นศูนย์ ($\vec{e}_r = 0, e_\omega = 0$) อีกทั้งสามารถควบคุมแรงบิด และกระแสกระตุ้นฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ได้อย่าง

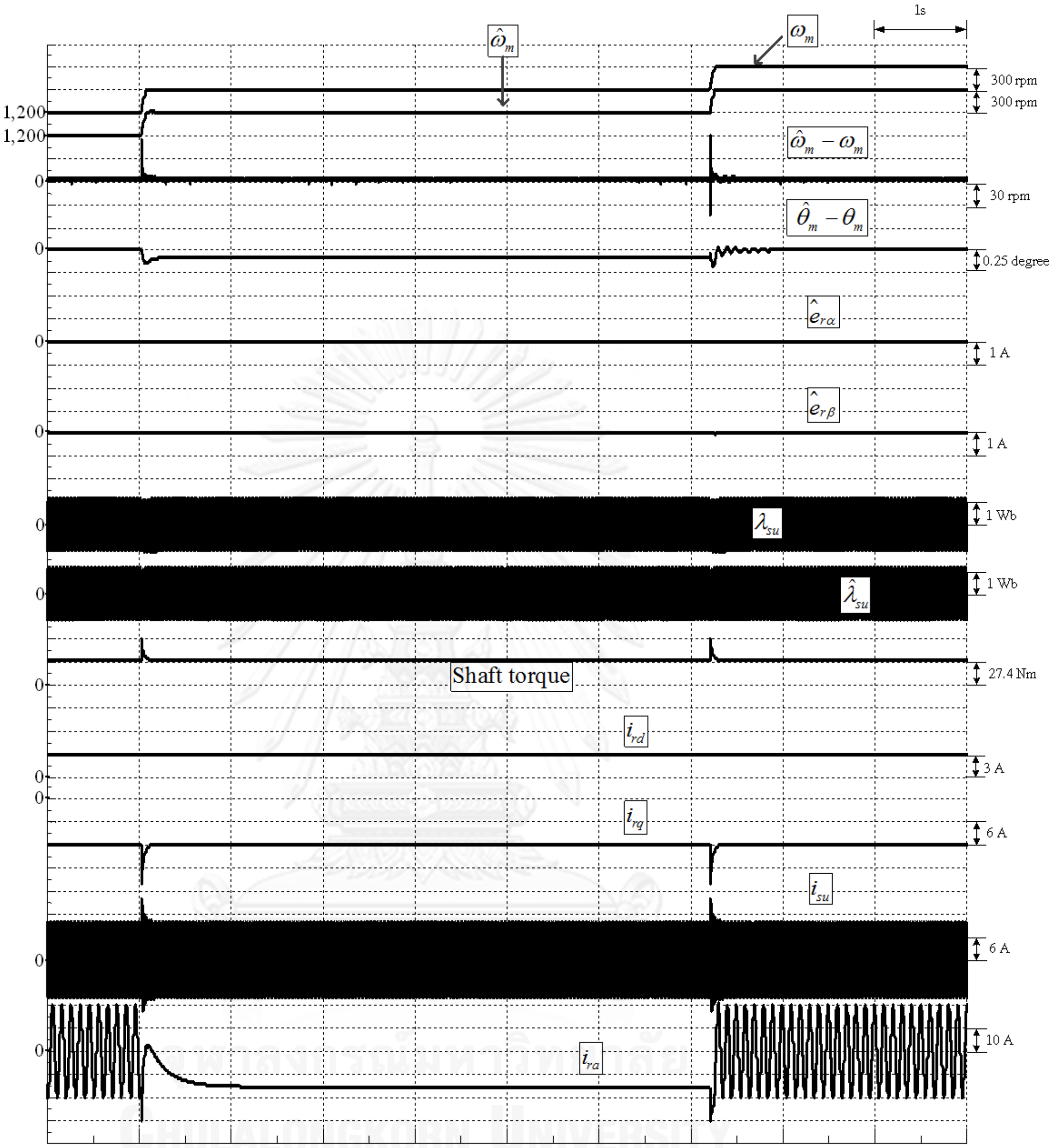
อิสระ แต่อย่างไรก็ตามที่ความเร็วซิงโครนัส ค่าความผิดพลาดของตำแหน่งจะมีค่าคงที่ ($e_\theta \neq 0$) เนื่องจากระบบประมาณตำแหน่งหยุดการปรับค่าตำแหน่งประมาณ และเกิดค่าผิดพลาดของตำแหน่งโรเตอร์ โดยไม่ลู่เข้าสู่ค่าศูนย์ในที่สุด อันเป็นข้อจำกัดทางทฤษฎีของระบบประมาณนี้

4.4.2 ข้อจำกัดในการทดลองและผลกระทบทางจากแรงดันผิดพลาดจากการประวิงเวลาและแรงดันตกคร่อมสวิตช์กำลัง

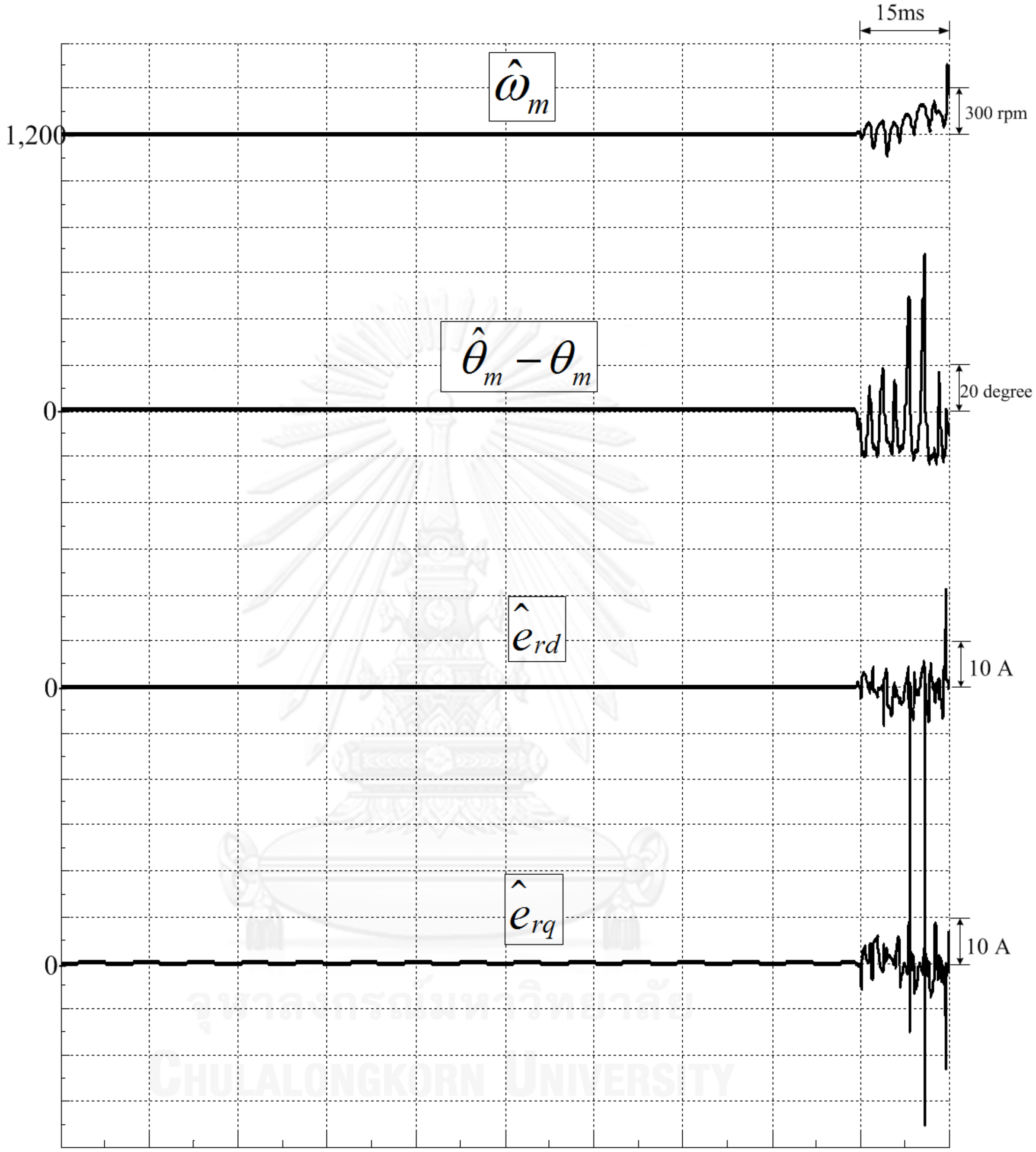
ในทางปฏิบัตินั้นแรงดันโรเตอร์ด้านขาออกจากอินเวอร์เตอร์จะถูกสร้างมาจากสัญญาณปรับความกว้างพัลส์ (PWM) จึงจำเป็นต้องใช้วงจรผ่านต่ำ (Low pass filter) เพิ่มเติม จึงมีข้อจำกัดเนื่องจากผลการหน่วงเวลาของวงจรผ่านต่ำ (Delay time) อีกทั้งทำให้ให้การคำนวณและวงจรควบคุมซับซ้อนมากขึ้น เพราะฉะนั้นในวิทยานิพนธ์นี้ จะใช้แรงดันโรเตอร์คำสั่ง (v_{rd}^*, v_{rq}^*) จากระบบควบคุมเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วมในสมการที่ (2.15)-(2.16) แทนการตรวจวัดแรงดันโรเตอร์จริงเพื่อใช้คำนวณค่ากระแสโรเตอร์ประมาณ บนแบบจำลองโรเตอร์ดังสมการที่ (3.2) ดังนั้นหากแรงดันที่ขั้วโรเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวมีค่าไม่ตรงตามแรงดันคำสั่งจากส่วนควบคุม จะส่งผลให้กระแสโรเตอร์จริงผิดเพี้ยนไปจากความเป็นจริง โดยในรูปที่ 4.11 แสดงผลการจำลองระบบควบคุมแบบไร้เซนเซอร์วัดความเร็วที่ความเร็วคงที่ 1200 rpm ในสภาวะปกติ จากนั้นทำการเพิ่มค่าแรงดันผิดพลาดจากการประวิงเวลาที่ $U_{dn} = 1.707V$ เข้าไปในระบบควบคุม ณ วินาทีที่ 1.35 พบว่าเกิดค่าความผิดพลาดในการประมาณกระแสโรเตอร์ทั้งบนองค์ประกอบ d และ q อีกทั้งยังเกิดค่าความผิดพลาดระหว่างมุมโรเตอร์ประมาณและโรเตอร์จริงในทันที ส่งผลให้ความเร็วประมาณโรเตอร์มีค่าลู่ออกและระบบไม่สามารถควบคุมได้

ดังนั้นการชดเชยแรงดันผิดพลาดจากการประวิงเวลาและแรงดันตกคร่อมสวิตช์กำลังในหัวข้อที่ 2.4 จึงมีความสำคัญอย่างมากในทางปฏิบัติสำหรับการควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 4.10 ผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งในกรณีเปลี่ยนแปลงความเร็วแบบขั้นบันได 1200 $\rightarrow$ 1500 $\rightarrow$ 1800 rpm ที่สภาวะโหลดพิกัดในย่านมอเตอร์และ $i_{rd}^{*} = 3A$

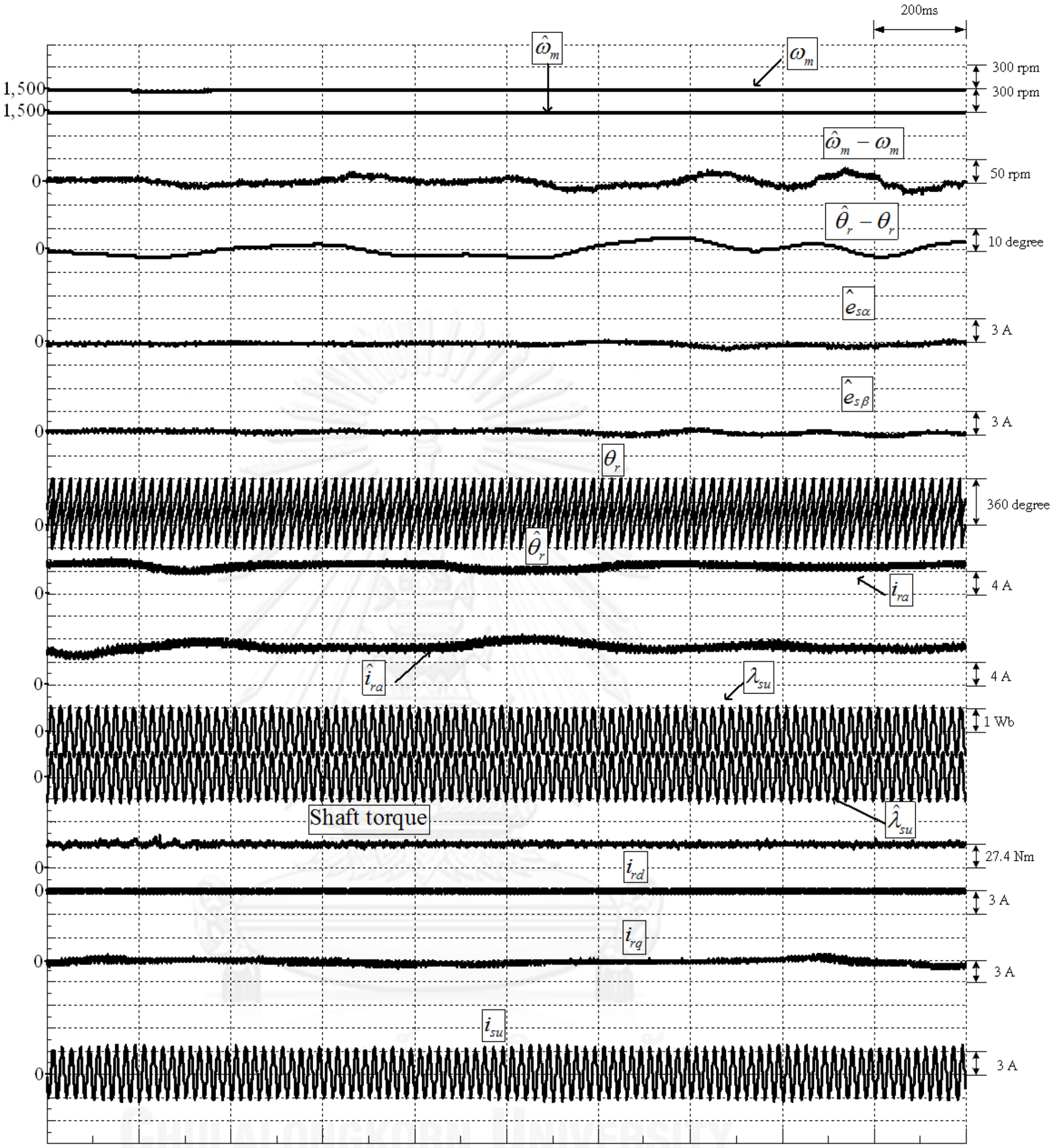


รูปที่ 4.11 แสดงผลการจำลองในสภาวะที่พิจารณาค่าแรงดันผิดพลาดเข้าไประบบประมาณค่าตำแหน่งโรเตอร์ และกำหนดให้แบนด์วิธด์ $\omega_c = 50\,rad/s$

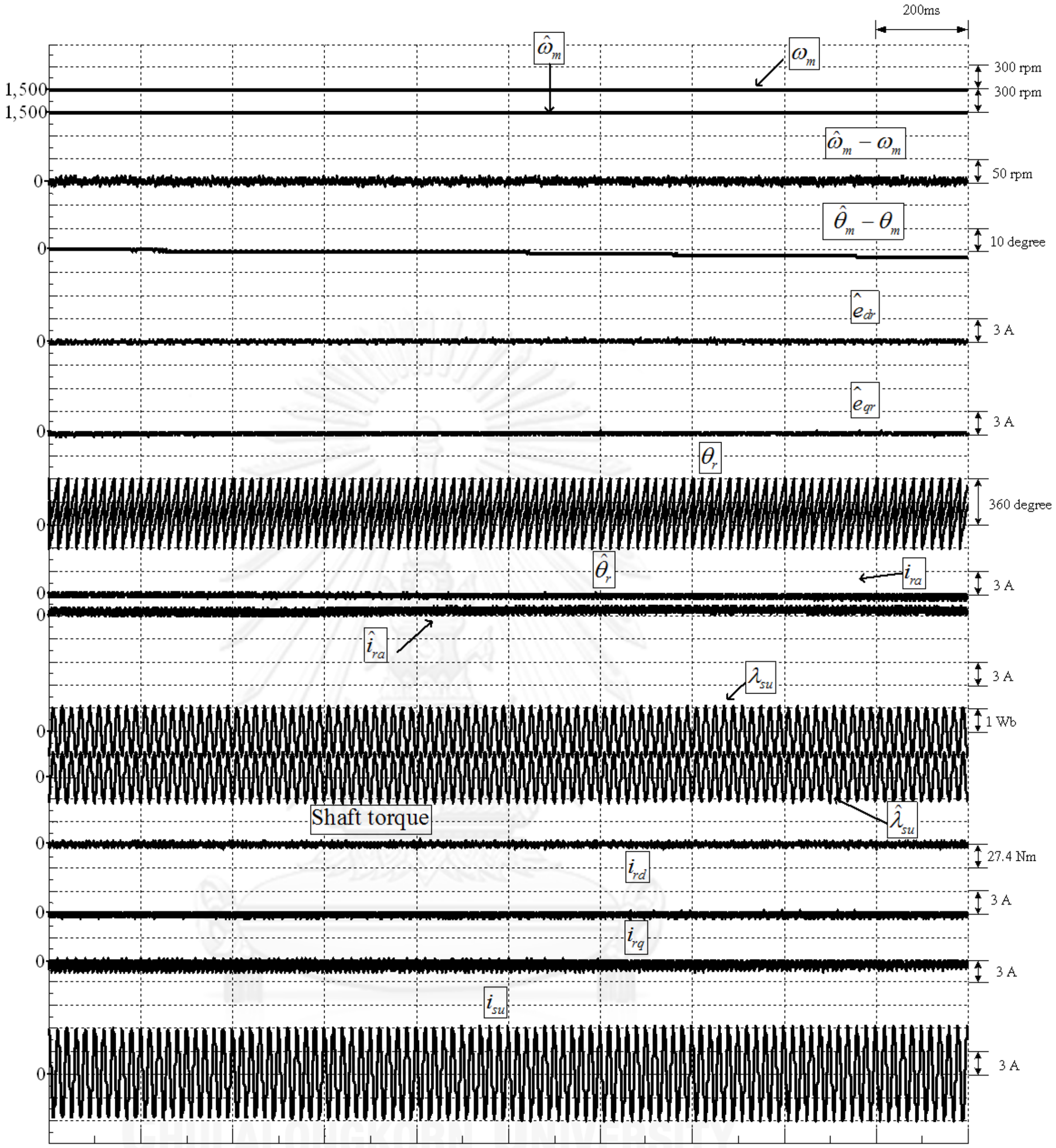
4.4.3 ผลการทดลองของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางในย่านความเร็วซิงโครนัส

ในหัวข้อนี้แสดงผลการทดลองสภาวะความเร็วซิงโครนัสที่ 1500 rpm ซึ่งเป็นสภาวะที่ระบบประมาณตำแหน่งขาดคุณสมบัติในการประมาณค่าได้ ดังที่กล่าวมาในหัวข้อ 4.3 โดยในรูปที่ 4.12 แสดงผลการทดลองกรณีที่เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางทำงานในสภาวะไร้โหลดและควบคุมให้กระแสโรเตอร์ $i_{rd}^{*} = 3A$ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถควบคุมความเร็วได้ แต่ค่าความผิดพลาดของตำแหน่งโรเตอร์และความเร็วประมาณจะแกว่งตัวอยู่รอบๆศูนย์ และในรูปที่ 4.13 แสดงผลการทดลองในสภาวะความเร็วเดียวกัน เพียงแต่ควบคุมให้ขนาดกระแสโรเตอร์ $i_{rd}^{*} = 0A$ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถควบคุมความเร็วได้ แต่ค่าผิดพลาดของตำแหน่งโรเตอร์มีลักษณะลู่ออก จากการทดลองเสมือนว่าระบบยังสามารถควบคุมความเร็วได้ในชั่วขณะหนึ่ง แต่อย่างไรก็ตามเมื่อระยะเวลาผ่านไปหรือมีการเปลี่ยนแปลงความเร็ว/แรงบิด ระบบจะไม่สามารถกลับสู่สภาวะคงตัวได้ เนื่องจากมีข้อจำกัดทั้งทางทฤษฎีดังอธิบายในหัวข้อ 4.4.1 และผลกระทบจากทางปฏิบัติดังหัวข้อ 4.4.2 รวมทั้งผลกระทบจากค่าความผิดพลาดพารามิเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง ส่งผลให้ค่าความผิดพลาดของตำแหน่งโรเตอร์มีขนาดไม่คงที่ เหมือนผลจำลองการทำงานในรูปที่ 4.10

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 4.12 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งที่ 1500 rpm ที่สภาวะไร้โหลดและ $i_{rd}^* = 3A$



รูปที่ 4.13 ผลการทดลองของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งที่ 1500 rpm ที่สภาวะไร้โหลดและ $i_{rd}^* = 0A$

ตารางที่ 4 สรุปเงื่อนไขข้อจำกัดในการทำงานเปรียบเทียบระหว่างเชิงทฤษฎีและเชิงปฏิบัติ

เงื่อนไขข้อจำกัดในการทำงาน	เชิงปฏิบัติ (ผลการทดลอง)	หมายเหตุ
1. การควบคุมแบบเวกเตอร์แยกการเชื่อมร่วม		
1.1 ผลกระทบค่าความผิดพลาดของพารามิเตอร์	มีผล แต่แก้ไขโดยการชดเชยด้วยวงรอบปิดควบคุมกระแส	-
1.2 ผลกระทบจากแรงดันผิดพลาดของการประวิงเวลาและแรงดันตกคร่อมสวิตช์กำลัง	มีผล แต่แก้ไขโดยการชดเชยค่าแรงดันผิดพลาด	-
1.3 แรงดันโรเตอร์มีขนาดน้อยๆ	ไม่มีข้อจำกัด	-
1.4 ย่านการทำงานที่ความเร็วซิงโครนัส	ไม่มีข้อจำกัด	-
2. การควบคุมแบบเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง		
2.1 ผลกระทบค่าความผิดพลาดของพารามิเตอร์	มีผลกระทบต่อการประมาณค่ากระแสและตำแหน่งโรเตอร์	-
2.2 ผลกระทบจากแรงดันผิดพลาดของการประวิงเวลาและแรงดันตกคร่อมสวิตช์กำลัง	มีผลกระทบต่อการประมาณค่ากระแสและตำแหน่งโรเตอร์	-
2.3 แรงดันโรเตอร์มีขนาดน้อยๆ	มีผลกระทบต่อการประมาณค่ากระแสและตำแหน่งโรเตอร์จากสาเหตุ (2.1)-(2.2)	-
2.4 ย่านการทำงานที่ความเร็วซิงโครนัส	มีผลกระทบต่อการประมาณค่ากระแสและตำแหน่งโรเตอร์จากสาเหตุ(2.1)-(2.3)	ข้อจำกัดทางทฤษฎีของระบบประมาณตำแหน่งโรเตอร์
2.5 สภาวะการทำงานแบบแยกโดด ($i_s = 0$)	มีผลกระทบต่อการประมาณค่ากระแสและตำแหน่งโรเตอร์	ข้อจำกัดทางทฤษฎีของระบบประมาณตำแหน่งโรเตอร์

จากข้อจำกัดในการทำงานทั้งในเชิงทฤษฎีและปฏิบัติของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วมสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง ทั้งแบบใช้เซนเซอร์และไม่ใช้เซนเซอร์วัดตำแหน่งในตารางที่ 4 นั้น สามารถสรุปข้อจำกัดในการทำงานได้ 4 เงื่อนไขดังต่อไปนี้

1. <u>ผลกระทบของค่าความผิดพลาดของพารามิเตอร์</u> ในส่วนผลการจำลองค่าพารามิเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางสามารถกำหนดค่าที่ถูกต้องสอดคล้องกันได้ แต่ในการทดลองกับระบบจริง ค่าความผิดพลาดของพารามิเตอร์สามารถเกิดขึ้นได้จาก ผลกระทบของอุณหภูมิต่อค่าพารามิเตอร์ หรือการใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ผิดพลาด ด้วยเหตุนี้จึงมีการชดเชยวงรอบป้อนกลับควบคุมกระแส เพื่อแก้ไขผลกระทบที่เกิดขึ้นสำหรับระบบควบคุมเวกเตอร์แบบการแยกเชื่อมร่วม แต่การชดเชยลักษณะนี้ไม่สามารถแก้ไขผลกระทบที่เกิดกับการควบคุมแบบเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดความเร็ว เนื่องจากสมการที่ใช้ประมาณค่ากระแสและตำแหน่งโรเตอร์ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ของมอเตอร์แทบทั้งสิ้น

2. <u>ผลกระทบของแรงดันผิดพลาดจากการประวิงเวลาและแรงดันตกคร่อมสวิตช์กำลัง</u> ดังที่ได้อธิบายและแสดงผลกระทบในหัวข้อที่ 4.4.2 และวิธีแก้ไขเบื้องต้นในหัวข้อที่ 2.4 ตามลำดับ

3. <u>สภาวะแรงดันโรเตอร์มีขนาดน้อยๆ</u> หรือ สภาวะที่แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำไฟฟ้าของเครื่องจักรกลไฟฟ้ามีขนาดน้อยๆ ในย่านการทำงานที่ความเร็วรอบๆ ความเร็วซิงโครนัส ย่านการทำงานนี้ จะทำให้ผลกระทบเนื่องจากค่าความผิดพลาดของพารามิเตอร์และค่าแรงดันผิดพลาดจากการประวิงเวลาและแรงดันตกคร่อมสวิตช์กำลังเด่นชัดมากยิ่งขึ้น เพราะความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันผิดพลาด เมื่อเทียบกับขนาดแรงดันโรเตอร์ที่มีค่าๆน้อย ค่าเปอร์เซ็นความผิดพลาดสูงขึ้นตามลำดับ

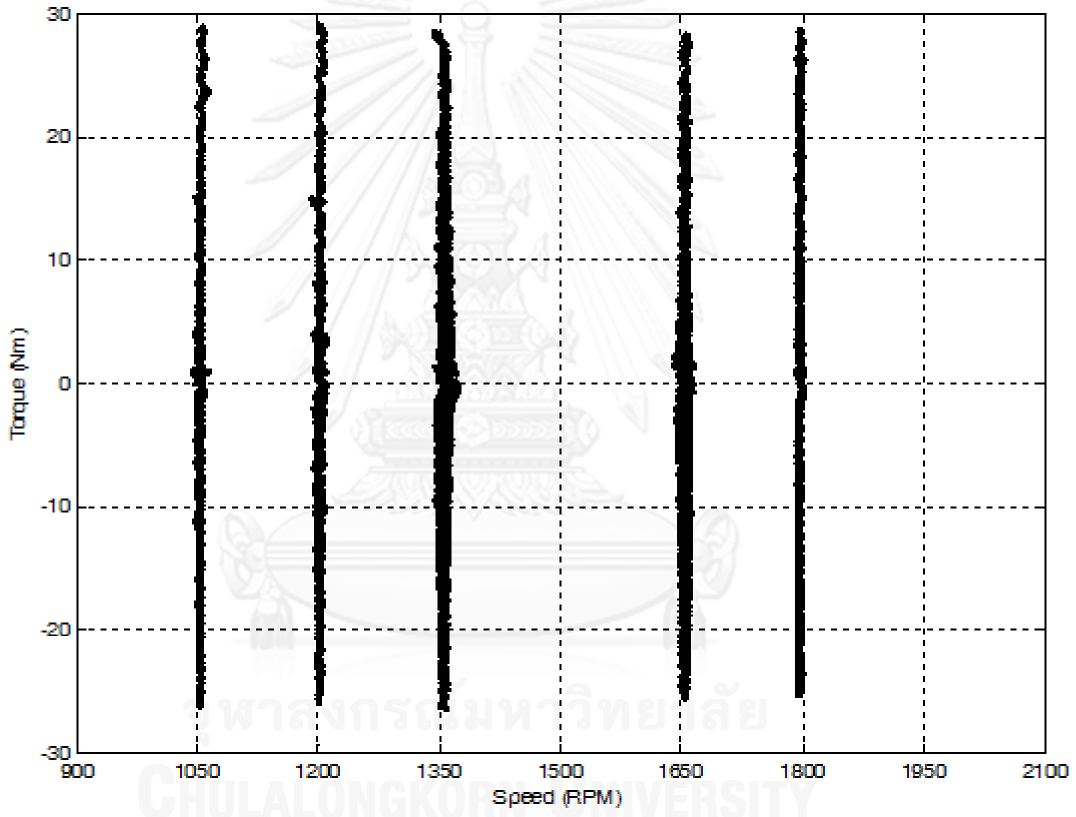
4. <u>การทำงานในย่านความเร็วซิงโครนัส</u> เนื่องจากเหตุผลของข้อจำกัดทางทฤษฎีที่นำเสนอในหัวข้อที่ 4.4.1 โดยระบบประมาณไม่สามารถปรับค่าผิดพลาดของตำแหน่งประมาณให้ลู่เข้าศูนย์ได้ อีกทั้งในทางปฏิบัติการทำงานย่านความเร็วซิงโครนัส ขนาดแรงดันทางด้านโรตอร์จะมีค่าน้อยมาก จึงส่งผลกระทบลักษณะเดียวกับข้อจำกัดในข้อ 3 หรือ สภาวะแรงดันโรเตอร์มีขนาดน้อยๆ ซึ่งทำให้การแก้ปัญหาในย่านการทำงานที่ความเร็วซิงโครนัสมีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น

5. <u>การทำงานในสภาวะที่กระแสสเตเตอร์มีขนาดเท่ากับศูนย์</u> ($i_s = 0$) หรือ สภาวะที่เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางทำงานแบบแยกโดด (Stand alone scheme) โดยระบบประมาณตำแหน่งจะไม่สามารถทำงานได้ เนื่องจากสภาวะนี้ไม่สอดคล้องกับเงื่อนไขพอเพียงสำของระบบประมาณตำแหน่งดังในสมการที่ *(4.8)* อย่างไรก็ตามแม้สภาวะนี้จะไม่เกิดขึ้นในขณะที่เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางถูกกระตุ้นฟลักซ์ทางด้านสเตเตอร์ตลอดเวลา ($i_s \neq 0$) แต่ในสภาวะบางเงื่อนไข เช่น การเริ่มต้นการออกตัวด้วยการกระตุ้นฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ หลังจากนั้นจึงเชื่อมต่อเข้ากับระบบกริด ซึ่งในช่วงก่อนการเชื่อมต่อเข้ากับกริดจะเกิดสภาวะที่กระแสสเตเตอร์มีขนาดเป็นศูนย์ได้ ($i_s = 0$) ดังนั้นก่อนการประยุกต์ในทางปฏิบัติ จำเป็นต้องพิจารณาวิธีการออกตัวของระบบควบคุมด้วย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.5 ลักษณะสมบัติของแรงบิด-ความเร็วของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง

เนื่องจากข้อจำกัดการทำงานของระบบประมาณตำแหน่งในหัวข้อ 4.4 จึงสามารถสรุปย่านการทำงานของระบบควบคุมแบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งสำหรับเครื่องจักรกลเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางได้โดยแสดงผ่านลักษณะแรงบิด-ความเร็วของระบบควบคุมแบบไร้เซนเซอร์วัดความเร็วสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางดังรูปที่ 4.14 ในสภาวะที่มีการเปลี่ยนแรงบิดจากศูนย์ไปยังค่าพิกัดอย่างช้าๆ ขณะประพฤติตัวเป็นมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ความเร็วซับซิงโครนัสและความเร็วซุปเปอร์ซิงโครนัส ระบบสามารถควบคุมการทำงานได้เช่นเดียวกันกับการควบคุมแบบใช้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง ซึ่งยกเว้นย่านความเร็วซิงโครนัสที่ระบบจะไม่สามารถทำการประมาณค่าตำแหน่งได้อย่างถูกต้อง



รูปที่ 4.14 ลักษณะสมบัติของแรงบิดและความเร็วของระบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งที่ได้จากผลการทดลองการทำงานในย่านต่างๆ

บทที่ 5
บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุปงานวิจัย

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งที่ใช้ค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองโรเตอร์บนแกนอ้างอิงโฮโลโนมิก สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางขนาด 4 kW โดยผลงานวิจัยสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. นำเสนอการควบคุมเครื่องกลจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางแบบเวกเตอร์แยกการเชื่อมร่วมบนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์ ระบบแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการควบคุมความเร็วในช่วงกว้างทั้งสภาวะความเร็วในย่านซับซิงโครนัส ย่านซิงโครนัส และย่านซับซิงโครนัส (1050 – 1800 rpm) การควบคุมขนาดของกระแสกระตุ้นสเตเตอร์ฟลักซ์ และแรงบิดทั้งในสภาวะมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้อย่างอิสระ

2. พัฒนาระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งที่ใช้ค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองโรเตอร์บนแกนอ้างอิงโฮโลโนมิก ระบบควบคุมสามารถตอบสนองต่อย่านการทำงานในสภาวะต่างๆของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางลักษณะเดียวกับการควบคุมแบบใช้เซนเซอร์ โดยระบบที่นำเสนอสามารถประยุกต์เข้ากับการเชื่อมต่อกริดหรือสภาวะกระแสทางด้านโรเตอร์มีขนาดน้อยๆ อีกทั้งการคำนวณไม่ซับซ้อนและไม่มีผลกระทบจากการเลื่อนของสัญญาณไฟตรง นอกจากนี้สามารถพิสูจน์ยืนยันเสถียรภาพของระบบประมาณ และนำเสนอการออกแบบค่าอัตราขยายการปรับตัวเบื้องต้น

5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับพัฒนางานวิจัยในลำดับถัดไป

สำหรับระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งที่ใช้ค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองโรเตอร์บนแกนอ้างอิงโฮโลโนมิกสามารถทำงานได้ในย่านการทำงานต่างๆ ทั้งย่านความเร็วซับซิงโครนัสและซุปเปอร์ซิงโครนัส แต่อย่างไรก็ตามในสภาวะที่ความเร็วเข้าใกล้ความเร็วซิงโครนัส ระบบประมาณยังมีข้อจำกัดอยู่เนื่องจาก ผลกระทบจากค่าผิดพลาดของพารามิเตอร์ของมอเตอร์, ผลกระทบจากการประวิงเวลาและแรงดันตกคร่อมสวิตช์กำลัง โดยข้อเสนอแนะสำหรับการพัฒนาระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งในลำดับถัดไปมีดังนี้

1. การควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งที่ใช้ความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองสเตเตอร์แทนแบบจำลองโรเตอร์ เนื่องจากเมื่อพิจารณาที่ความเร็วใกล้ซิงโครนัสขนาดของกระแสสเตเตอร์จะมีความถี่แปรผันตามแรงดันกริดและขนาดของกระแสสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ เพื่อหลีกเลี่ยงสภาวะที่กระแสโรเตอร์ประมาณมีความถี่ใกล้ค่าศูนย์

2. เนื่องจากขนาดแรงดันและความถี่ของโรเตอร์มีขนาดน้อยมากๆ จึงทำให้ข้อมูลแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำมีขนาดน้อยด้วย จากข้อจำกัดดังกล่าว เราสามารถใช้เทคนิคการฉีดสัญญาณความถี่สูง

(High frequency Injection) เพื่อทำให้ระบบประมาณมีความคงทนต่อผลกระทบจากความผิดพลาดของพารามิเตอร์และความไม่เป็นอุดมคติของสวิตช์กำลัง

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. Cardenas, R., et al., *MRAS observer for sensorless control of standalone doubly fed induction generators.* Energy Conversion, IEEE Transactions on, 2005. 20(4): p. 710-718.
3. 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.
4. Pena, R., et al., *Sensorless Control of Doubly-Fed Induction Generators Using a Rotor-Current-Based MRAS Observer.* Industrial Electronics, IEEE Transactions on, 2008. 55(1): p. 330-339.
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. Forchetti, D.G., G.O. Garcia, and M.I. Valla, *Adaptive Observer for Sensorless Control of Stand-Alone Doubly Fed Induction Generator.* Industrial Electronics, IEEE Transactions on, 2009. 56(10): p. 4174-4180.
7. 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.
8. 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.
9. Sheng, Y. and V. Ajjarapu. *Sensorless Control of the Doubly-Fed Induction Generator for Wind Energy Generations Using a Speed-Adaptive Full-Order Flux Observer*. in *Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2009. APEC 2009. Twenty-Fourth Annual IEEE*. 2009.
10. Kron, G., Equivalent circuits of electric machinery. 1967, New York: Dover Publications.
11. Sheng, Y. and V. Ajjarapu, A Speed-Adaptive Reduced-Order Observer for Sensorless Vector Control of Doubly Fed Induction Generator-Based Variable-Speed Wind Turbines. Energy Conversion, IEEE Transactions on, 2010. 25(3): p. 891-900.
12. Serban, I., et al. New State Observers and Sensorless Control of Wound Rotor Induction Generator (WRIG) at Power Grid with Experimental Characterization. in IEEE Industrial Electronics, IECON 2006 - 32nd Annual Conference on. 2006.

Chulalongkorn University

13. Munoz, A.R. and T.A. Lipo, On-line dead-time compensation technique for open-loop PWM-VSI drives. Power Electronics, IEEE Transactions on, 1999. 14(4): p. 683-689.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ก

โครงสร้างฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ของระบบ

1. โครงสร้างฮาร์ดแวร์

ในส่วนโครงสร้างฮาร์ดแวร์ของระบบควบคุมแสดงดังรูปที่ ก.1 สามารถแบ่งได้เป็น 3 ส่วนหลักๆ คือ

ส่วนที่ 1 คอนเวอร์เตอร์ภาคกำลัง (Power Converters)

วงจรแปลงผันแบบหลังชนหลัง (Back-to-Back converter) ประกอบไปด้วยโครงสร้างพื้นฐานทั่วไปของระบบอินเวอร์เตอร์ได้แก่ ภาคขับเคลื่อนภาคหน้าสำหรับทางด้านโรเตอร์ใช้อินเวอร์เตอร์สำเร็จรูปของบริษัท A.P.Y. Engineering รุ่น FRECON iH มีย่านความถี่การสวิตช์ (switching frequency) ที่ 1-15 KHz รวมถึงตัวเก็บประจุที่บัสไฟตรง ส่วนที่สองคือ วงจรแปลงผันไฟตรง (Converter) สำเร็จรูปรุ่น FRECON iX ทำหน้าที่สร้างแรงดันบัสไฟตรงให้กับส่วนอินเวอร์เตอร์ และส่วนสุดท้ายคืออินเวอร์เตอร์รุ่น FRECON iSH สำหรับควบคุมโหลดให้กับระบบโดยตั้งค่าในโหมดควบคุมแรงบิด (Torque Control)

ส่วนที่ 2 ชุดบอร์ดการคำนวณและประมวลผล

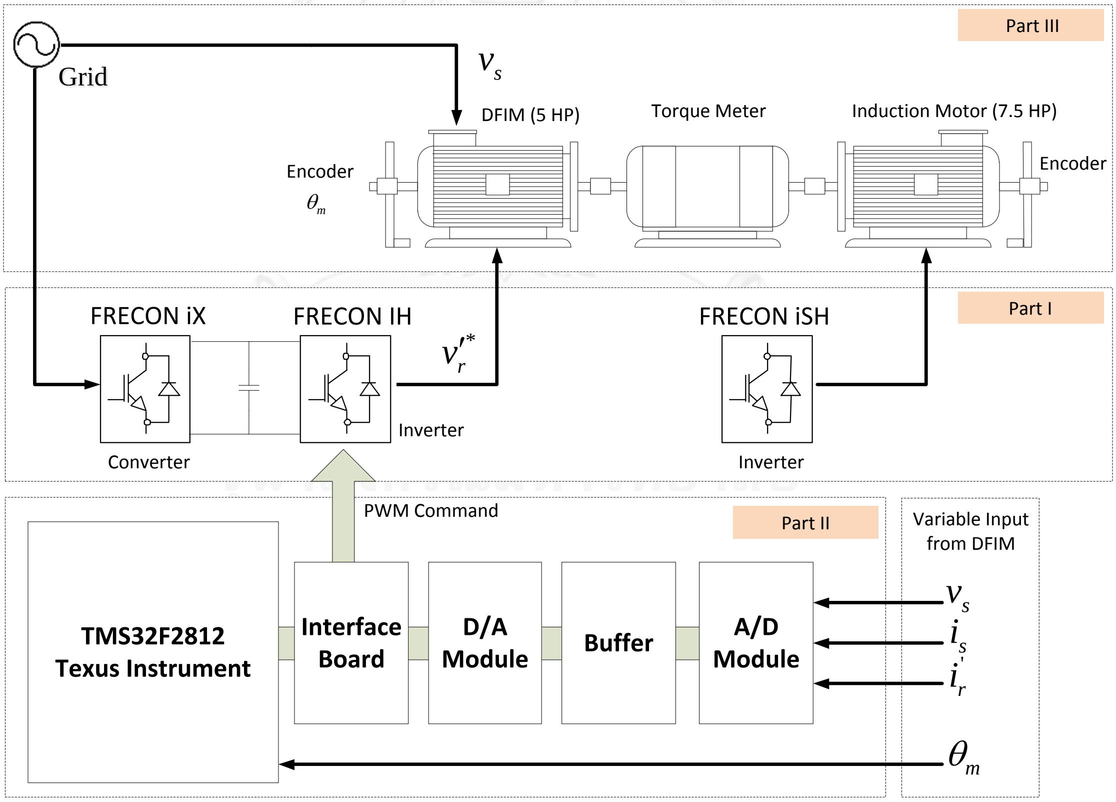
ชุดบอร์ดการคำนวณและประมวลผลสำเร็จรูปของบริษัท Texas Instrument รุ่น TMS32F2812 ประกอบด้วย โครงสร้างสถาปัตยกรรมแบบ 32 บิต, สัญญาณนาฬิกาภายในที่มีความถี่ 150 MHz, หน่วนความจำ (RAM) ขนาด18 KB, ตัวแปลงสัญญาณ A/D ขนาด 12 บิต จำนวน 16 ช่อง, ช่องสัญญาณสำหรับ PWM จำนวน 16 ช่อง, I/O พอร์ต และพอร์ตแบบขนาน (Parallel port) สำหรับเชื่อมต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์ นอกจากนี้ยังมีวงจรตรวจวัดขนาดแรงดันและกระแสทางด้านโรเตอร์และสเตเตอร์ รวมทั้งวงจรกันชน (Buffer) เพื่อป้องกันขนาดสัญญาณแรงดันที่มีผลกระทบต่อบอร์ดประมวลผล และส่วนสุดท้ายคือ วงจรเชื่อมต่อระหว่างบอร์ดประมวลผลไปยังชุดอินเวอร์เตอร์ในสวนที่ 1 เพื่อส่งข้อมูลสัญญาณคำสั่งการสวิตช์ ในรูปแบบของสัญญาคำสั่ง PWM จำนวน 6 ไปยังภาคคอนเวอร์เตอร์กำลังในส่วนที่ 1

ส่วนที่ 3 เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางขนาด 5 HP (4 kW) มีค่าพิกัดและพารามิเตอร์สามารถดังตารางที่ ก.1 ทำหน้าที่เป็นชุดขับเคลื่อนหลัก และมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าแบบกรงกระรอกขนาด 7.5 HP (5.5 kW) ทำหน้าที่เป็นโหลดของระบบ ตำแหน่งโรเตอร์ (θ_m) จะตรวจวัดด้วยเอนโค้ดเดอร์ (Encoder) และส่งสัญญาณพัลส์ของตำแหน่งโรเตอร์ไปยังชุดประมวลผลในส่วนที่ 2 นอกจากนี้ยังมีอุปกรณ์วัดแรงบิดเชื่อมต่อเข้าระหว่างเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำทั้งสองตัว เพื่อตรวจวัดขนาดแรงบิดสำหรับการแสดงผลขณะขับเคลื่อนโหลด

ตารางที่ ก.1 พิกัดและค่าพารามิเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางที่ใช้ในงานวิจัย

5 HP (4kW) Doubly-Fed Induction Machine (DFIM)	
Stator 400 V/6.8 A	Rotor 196/13.5 A
$R_s = 1.65\Omega$	$R_r = 2.1613\Omega$
$L_s = 0.186 H$	$L_r = 0.187 H$
$M = 0.1855 H$	$J = 0.0114 kg \cdot m^2$
Pole pair = 2	Rated Speed 1393 rpm, (50 Hz)
$\omega_c = 50 rad/s$	Speed loop gain ($K_P = 0.297, K_I = 3.87$)



รูปที่ ก.1 โครงสร้างฮาร์ดแวร์ของระบบที่ใช้ในการทดลอง

2. โครงสร้างซอฟต์แวร์

จากโครงสร้างระบบควบคุมในบทที่ 3 (รูปที่ 3.11) ไมโครคอนโทรลเลอร์คำนวณค่ากระแสสร้างแรงบิด (i_{rq}^*) จากผลต่างระหว่างค่าความเร็วคำสั่งกับความเร็วประมาณ ($\omega_m^* - \hat{\omega}_m$) ผ่านตัวควบคุมแบบ PI และจากนั้นกระแสโรเตอร์คำสั่งในแกน q จะจำกัดขนาดไม่ให้เกินค่าพิกัดของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ($i_{r,peak} = 19.1A$) เมื่อได้ค่ากระแสคำสั่งควบคุมแรงบิด (i_{rq}^*) จากการคำนวณ และกระแสคำสั่งควบคุมฟลักซ์ (i_{rd}^*) ตามเงื่อนไขที่กำหนด เช่น $i_{rd}^* = 0$ หรือ $i_{rd}^* = 3A$ รวมทั้งข้อมูลกระแสและแรงดันทางด้านสเตเตอร์และโรเตอร์ จึงสามารถคำนวณแรงดันโรเตอร์คำสั่งของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วม(v_{rd}^*, v_{rq}^*) โดยมีการชดเชยแรงดันเนื่องจากผลการประวิงเวลาและแรงดันตกคร่อมในสวิทช์กำลัง (V_{comp}) ในส่วนการคำนวณระบบประมาณตำแหน่งและความเร็ว ใช้ค่ากระแสโรเตอร์จริง ($\vec{i}_r'$) ด้วยการตรวจวัด และกระแสโรเตอร์ประมาณ ($\hat{\vec{i}}_r'$) บนแกนอ้างอิงโฮโลโนมิกสำหรับการหาค่าผิดพลาด ซอฟต์แวร์ทั้งหมดสามารถเขียนแสดงได้ดัง PDL (Program Development Language) ซึ่งโปรแกรมในซอฟต์แวร์นี้ใช้การอินเทอร์รัปต์ (Interrupt) ทุกๆ 125 ไมโครวินาที

****

POSITION-SENSORLESS VECTOR CONTROL PROGRAM OF
DOUBLY-FED INDUCTION MACHINES

****

MODULE: MAIN PROGRAM

Initialize

    Initialize all variables

    Initialize all timers

    Offset calculation

    Enable timer interruption

Loop here and wait for interrupt only

Switching frequency interrupt service routine

    Read machine stator voltage and current

        Input $\vec{v}_s$ and $\vec{i}_s$ from A/D

        Axis transformation from stator reference to rotor reference frame

    Read machine rotor current

        Input $\vec{i}_r'$ from A/D

    Position estimation

        Calculate the estimated rotor currents ($\hat{\vec{i}}_r'$)

Calculate the estimated rotor current error ($\vec{e} = \hat{\vec{i}}_r^{'} - \vec{i}_r^{'}$)

Calculate the estimated angle and speed ($\hat{\theta}_m, \hat{\omega}_m$)

Stator Flux dynamic

Calculate i_o and ω_o

$\vec{v}_s$ and $\vec{i}_s$ Axis transformation from stator reference to stator flux reference

$\vec{i}_r^{'}$ Axis transformation from rotor reference to stator flux reference

Get speed command (ω_m^*)

Get flux command (i_{rd}^*)

Speed Regulator

Calculate speed error ($\omega_m^* - \hat{\omega}_m$)

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

Current Control

Calculate PI-Control in d-Axis (i_{cd})

Calculate PI-Control in q-Axis (i_{cq})

Decoupling control

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

Calculate compensated angle

Voltage Compensation (V_{comp})

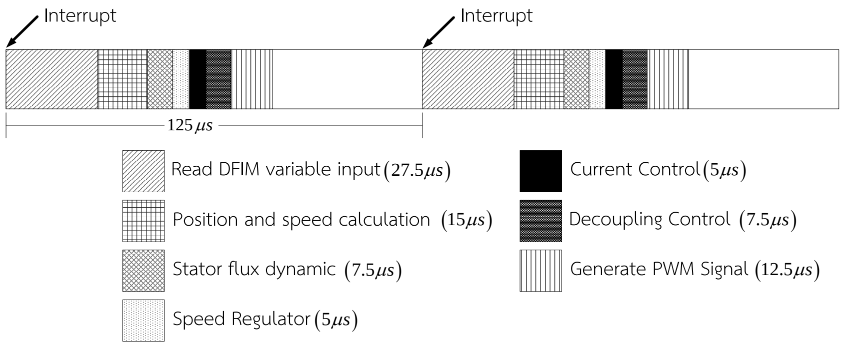
Generate PWM signal

Carrier based space vector PWM

Return

END OF MAIN PROGRAM

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ ก.2 ไดอะแกรมเวลาของซอฟต์แวร์โมดูล

ภาคผนวก ข

ค่าผิดพลาดของแบบจำลองโรเตอร์และสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงโฮโลโนมิก

ภาคผนวกนี้จะกล่าวถึงหลักการและเหตุผลในการเลือกสมการค่าผิดพลาดกระแสโรเตอร์บนแกนอ้างอิงโฮโลโนมิก

1. แบบจำลองโรเตอร์บนแกนอ้างอิงโฮโลโนมิก

จากสมการ (3.1)-(3.2) ในบทที่ 3 เราสามารถเขียนสมการค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองทางได้โรเตอร์ (Error Rotor current Model) ได้ดังนี้

$$0 = R_r\vec{e}_r + L_r\frac{d\vec{e}_r}{dt} + M\frac{d}{dt}\left\{\left(1-e^{Jp\Delta\theta_m}\right)\cdot e^{-Jp\hat{\theta}_m}\vec{i}_s\right\} \quad (ข.1)$$

หรือ

$$\vec{e}_r = -\frac{Ms}{L_r sI + R_r}\left[\left(1-e^{Jp\Delta\theta_m}\right)\cdot e^{-Jp\hat{\theta}_m}\vec{i}_s\right] \quad (ข.2)$$

หากพิจารณาการทำให้เป็นลักษณะเชิงเส้น โดยกำหนดให้ค่าความผิดพลาดระหว่างตำแหน่งโรเตอร์จริงและมุมประมาณมีค่าน้อยกว่า 1 มากๆ $\left(\Delta\theta_m << 1\right)$ สามารถเขียนสมการ (ข.2) ได้ใหม่ดังนี้

$$\vec{e}_r \approx \frac{-Ms}{L_r sI + R_r}\left[\left(-p\Delta\theta_m\right)Je^{-Jp\hat{\theta}_m}\vec{i}_s\right] \quad (ข.3)$$

จากสมการเบื้องต้น พบว่าค่าผิดพลาดกระแสของกระแสโรเตอร์สัมพันธ์กับค่าความผิดพลาดของตำแหน่งโรเตอร์ เพราะฉะนั้นจึงสามารถเขียนสมการประมาณค่าความเร็วได้ดังแสดงในสมการ (ข.4)

$$\hat{\omega}_m = \left(K_P + K_I\int dt\right)\left[\left(-Jpe^{-Jp\hat{\theta}_m}\vec{i}_s\right)^T\vec{e}_r\right] \quad (ข.4)$$

โดยสมการประมาณค่าความเร็วดังกล่าจะมีข้อจำกัดในการประมาณค่ากรณีที่เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางทำงานในสภาวะแยกโดด (Stand alone scheme) เท่านั้น เนื่องจากกระแสสเตเตอร์จะมีขนาดเป็นศูนย์ เพราะฉะนั้นเวกเตอร์ค่าผิดพลาดของกระแสโรเตอร์จึงไม่สะท้อนมายังความเร็วประมาณ ส่งผลให้ระบบไม่สามารถปรับตัวเข้าสู่ค่าที่ถูกต้องได้

2. แบบจำลองสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงโฮโลโนมิก

จากหลักการที่กล่าวมาเบื้องต้นของแบบจำลองโรเตอร์ เราสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับแบบจำลองสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ (แกนอ้างอิงโฮโลโนมิก) ได้ดังนี้

สมการสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์:

$$\frac{d\vec{i}_s}{dt} = -\frac{R_s}{L_s}\vec{i}_s - \frac{M}{L_s}\frac{d}{dt}\left(e^{Jp\theta_m}\cdot\vec{i}_r\right) + \frac{\vec{v}_s}{L_s} \quad (ข.5)$$

เมื่อพิจาณาแบบจำลองทางพลวัตของโรเตอร์ในสมการ (ข.5) สามารถนำมาเขียนแบบจำลองกระแสสเตเตอร์ประมาณบนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ (ข.6) ได้ดังนี้

$$\frac{d\hat{\vec{i}}_s}{dt} = -\frac{R_s}{L_s}\hat{\vec{i}}_s - \frac{M}{L_s}\frac{d}{dt}\left(e^{Jp\hat{\theta}_m}\cdot\vec{i}_r'\right)+\frac{\vec{v}_s}{L_s} \tag{ข.6}$$

อย่างไรก็ตามหากพิจารณาการทำให้เป็นลักษณะเชิงเส้น สมการค่าผิดพลาดของกระแสสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ดังสมการ (ข.5-ข.6) จะพบได้ว่า

$$\vec{e}_s \approx \frac{-Ms}{L_s sI + R_s}\left[\left(p\Delta\theta_m\right)Je^{Jp\hat{\theta}_m}\vec{i}_r'\right] \tag{ข.7}$$

หากนำมาเขียนสมการประมาณค่าความเร็ว จากแบบจำลองสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงโฮโลโนมิก สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\hat{\omega}_m = \left(K_P + K_I\int dt\right)\left[\left(Jpe^{Jp\hat{\theta}_m}\vec{i}_r'\right)^T \vec{e}_s\right] \tag{ข.8}$$

เนื่องจากสมการประมาณค่าความเร็ว (ข.8) แสดงให้เห็นว่าค่าความผิดพลาดของกระแสสเตเตอร์จะขึ้นอยู่กับเทอม ($Je^{Jp\hat{\theta}_m}\vec{i}_r$) เพราะฉะนั้นข้อจำกัดของเงื่อนไขนี้คือ ในสภาวะที่กระแสโรเตอร์มีขนาดเป็น 0 A หรือสภาวะไร้โหลด จะส่งผลให้ค่าความผิดพลาดของกระแสสเตเตอร์ ไม่สะท้อนไปยังค่าความผิดพลาดความเร็วโรเตอร์ประมาณ จึงทำให้ไม่สามารถประมาณค่าความเร็วได้ถูกต้อง

ซึ่งระบบการควบคุมเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วมของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง มักจะใช้กระแสกระตุ้นฟลักซ์ทางด้านสเตเตอร์ทั้งหมด ส่งผลให้ในสภาวะไร้โหลด ขนาดกระแสโรเตอร์จะมีค่าเป็นศูนย์ เพราะเหตุนี้แบบจำลองกระแสสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงโฮโลโนมิกจะไม่สามารถประมาณค่าตำแหน่งได้ถูกต้อง จึงเป็นผลให้เลือกใช้สมการโรเตอร์บนแกนอ้างอิงโฮโลโนมิกสำหรับการประมาณค่าตำแหน่งในวิทยานิพนธ์นี้นั้นเอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย จิรัฏฐ์ อุดมศรี เกิดเมื่อวันที่ 18 ตุลาคม พ.ศ. 2530 ที่อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ปีการศึกษา 2552 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า (อิเล็กทรอนิกส์กำลัง) ณ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2553

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University