

ระบบควบคุมมอเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสอง  
ทางโดยใช้ตัวสังเกตลดอันดับแบบปรับตัวที่มีการป้อนกลับกระแสสเตเตอร์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2561  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A POSITION-SENSORLESS VECTOR-CONTROL SYSTEM FOR DOUBLY-  
FED INDUCTION MACHINES USING ADAPTIVE REDUCED-  
ORDER OBSERVER WITH STATOR CURRENT FEEDBACK



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

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2018

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซ็นเซอร์วัดตำแหน่งสำหรับ  
เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางโดยใช้ตัว  
สังเกตลอคอันดับแบบปรับตัวที่มีการป้อนกลับกระแส  
สเตเตอร์

โดย

นายศุภษร หมั่นพล

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรพงษ์ สุวรรณกวิน

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(ศาสตราจารย์ ดร.เดวิด บรรณเจตพงศ์ชัย)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรพงษ์ สุวรรณกวิน)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรชาติ สุวรรณงาม)

ศุภษร หมื่นพล : ระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซ็นเซอร์วัดตำแหน่งสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางโดยใช้ตัวสังเกตลดอันดับแบบปรับตัวที่มีการป้อนกลับกระแสสเตเตอร์. ( A POSITION-SENSORLESS VECTOR-CONTROL SYSTEM FOR DOUBLY-FED INDUCTION MACHINES USING ADAPTIVE REDUCED-ORDER OBSERVER WITH STATOR CURRENT FEEDBACK) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ผศ. ดร.สุรพงษ์ สุวรรณกวิน

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอระบบควบคุมเวกเตอร์ไร้เซ็นเซอร์วัดตำแหน่งสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง โดยใช้ตัวสังเกตลดอันดับแบบปรับตัวจากแบบจำลองสเตเตอร์ แนวคิดที่นำเสนอมีการคำนวณที่เรียบง่ายไม่ซับซ้อน และไม่จำเป็นต้องคำนวณค่าปริพันธ์ของสเตเตอร์ฟลักซ์ ทำให้ลดปัญหาเรื่องการเลื้อนของสัญญาณไฟตรงได้ การวิเคราะห์เสถียรภาพของแบบจำลองในวิทยานิพนธ์นี้ใช้วิธีการทำให้ระบบเป็นเชิงเส้นและใช้ทฤษฎีบทเรทท์-เฮอริวิตซ์ ยืนยันเสถียรภาพของระบบรอบ ๆ จุดทำงาน นอกจากนี้ยังนำเสนอแนวทางการออกแบบอัตราขยายป้อนกลับและอัตราขยายป้อนกลับแบบปรับตัวสำหรับตัวประมาณตำแหน่ง เพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบตัวควบคุม อีกทั้งเสนอการวิเคราะห์ผลกระทบของการประมาณตำแหน่ง เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง และสุดท้ายนี้เพื่อเป็นการยืนยันแนวคิดทางทฤษฎีโดยการจำลองผลด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink และการทดสอบด้วยระบบจริง โดยระบบควบคุมเวกเตอร์ไร้เซ็นเซอร์วัดตำแหน่ง สามารถทำงานได้ทุกเงื่อนไขการทำงาน และสามารถควบคุมกระแสโรเตอร์ได้อย่างอิสระ สอดคล้องหลักการการควบคุมแบบแยกการเชื่อมร่วม

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อนิสิต .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

# # 5870252421 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORD: Reduced-order adaptive observer, position-sensorless vector control, Doubly-Fed Induction Machine (DFIM), observer's feedback gain, parameter sensitivity.

Suppasorn      Munphal      :      A POSITION-SENSORLESS VECTOR-CONTROL SYSTEM FOR DOUBLY-FED INDUCTION MACHINES USING ADAPTIVE REDUCED-ORDER OBSERVER WITH STATOR CURRENT FEEDBACK. Advisor: Asst. Prof. Surapong Suwankawin, Ph.D.

In this thesis, a position-sensorless vector control for doubly-fed induction machines is proposed; a stator-model based reduced-order adaptive observer is used. The calculation is proposed not only with simplicity but also without pure integration for stator flux calculation and, therefore, the DC offset drift problem can be solved. The stability of reduced-order adaptive observer is analyzed using the linearization method; the stability conditions are also provided by the Routh-Hurwitz theorem. In addition, the design guidelines of adaptive observer's feedback gain and adaptation PI gains are given. The effects of parameters variation on the estimator are considered by which the sensitivity analysis is presented. Finally, the simulation and experiment confirm the validation of theoretical results. The sensorless vector control system can perform well for every operating condition and can be able to control each component of rotor currents independently, which agrees with the concept of decoupling control.

Field of Study:    Electrical Engineering

Student's Signature .....

Academic Year:    2018

Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความเอาใจใส่ และความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของอาจารย์ ผศ. ดร.สุรพงษ์ สุวรรณภวิน อาจารย์ที่ปรึกษาของวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือในด้านต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการดำเนินงานเสมอมา ขอขอบคุณอาจารย์ ผศ.ดร. สมบูรณ์ แสงวงศ์ วาณิชย์ รวมถึงบุคลากรในห้องปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์กำลังทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือ รวมถึงให้คำปรึกษาและคำแนะนำในการดำเนินงานตลอดมา

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดา - มารดา คุณครู - อาจารย์ และญาติพี่น้อง ผู้ให้โอกาสทางการศึกษาไม่ว่าจะเป็นความรู้ในสาขาวิชาต่างๆ รวมถึงกำลังใจด้วยดีเสมอมา

ศุภักษร หมื่นพล



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ญ
นิยามสัญลักษณ์.....	ณ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วิธีการประมาณค่าตำแหน่งและความเร็วโรเตอร์จากงานวิจัยในอดีต.....	4
1.2.1 การประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์ด้วยค่าผิดพลาดของกระแสสเตเตอร์บน แกนอ้างอิงสเตเตอร์และมีการคำนวณสเตเตอร์ฟลักซ์.....	5
1.2.2 ค่าผิดพลาดกระแสโรเตอร์บนแกนอ้างอิงโรเตอร์โดยอาศัยการคำนวณสเตเตอร์ฟลักซ์.....	7
1.2.3 การประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์ด้วยค่าผิดพลาดของกำลังที่ช่องอากาศบน แกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์.....	8
1.2.4 การประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์ด้วยค่าผิดพลาดกระแสโรเตอร์บนแกน อ้างอิง สเตเตอร์ฟลักซ์โดยอาศัยการคำนวณแรงบิด.....	9
1.2.5 การประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์ด้วยค่าผิดพลาดกระแสโรเตอร์บนแกน อ้างอิงโรเตอร์.....	10
1.2.6 การประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์ด้วยค่าผิดพลาดกระแสสเตเตอร์บนแกน อ้างอิงสเตเตอร์.....	11
1.3 สรุปปัญหาและข้อจำกัดของงานวิจัยที่ผ่านมา.....	12

1.4	วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ .....	12
1.5	ขอบเขตวิทยานิพนธ์ .....	12
1.6	ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย .....	13
บทที่ 2	ระบบประมาณตำแหน่งและความเร็วของโรเตอร์โดยใช้ตัวสังเกตลดอันดับแบบปรับตัว.....	14
2.1	แบบจำลองทางพลวัตของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง.....	14
2.2	ระบบประมาณที่ใช้สมการสเตเตอร์ .....	15
บทที่ 3	การวิเคราะห์เสถียรภาพและแนวทางการออกแบบอัตราขยายของระบบประมาณ .....	19
3.1	การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบประมาณตำแหน่งและความเร็วของโรเตอร์.....	19
3.2	การออกแบบสมรรถนะสำหรับระบบประมาณตำแหน่งและความเร็วโรเตอร์ .....	22
3.3	แนวทางการออกแบบอัตราขยายของระบบประมาณ .....	24
3.3.1	แนวทางการออกแบบอัตราขยายของระบบประมาณ.....	24
3.3.2	การออกแบบค่าอัตราขยายป้อนกลับแบบปรับตัวสำหรับตัวควบคุมพีไอ.....	26
บทที่ 4	การควบคุมเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วม สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง.....	29
4.1	การควบคุมแบบเวกเตอร์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์ .....	29
4.2	การควบคุมเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วม .....	30
4.3	การชดเชยผลกระทบแรงดันผิดพลาตเนื่องจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง.....	32
4.3.1	การชดเชยแรงดันที่ตกคร่อมสวิตช์กำลัง .....	32
4.3.2	การชดเชยแรงดันจากการประวิงเวลาการสวิตช์ .....	34
บทที่ 5	การวิเคราะห์ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของเครื่องจักรกลทางไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางต่อระบบประมาณตำแหน่งและความเร็วโรเตอร์.....	36
5.1	การวิเคราะห์ผลกระทบของค่าพารามิเตอร์ของระบบประมาณ.....	36
5.1.1	ผลกระทบของค่าความต้านทานขดลวดสเตเตอร์ ( $R_s$ ) .....	37
5.1.2	ผลกระทบของค่าความเหนี่ยวนำร่วม ( $M$ ).....	38



5.2 แนวทางการลดผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ .....	40
บทที่ 6 ผลการทดลอง.....	45
6.1 ผลการทดลองของระบบขับเคลื่อนที่สภาวะอยู่ตัว (Steady State).....	47
6.2 ผลการทดลองของผลตอบสนองชั่วคราว (Transient Response).....	66
6.2.1 ผลการเปลี่ยนแปลงความเร็วในช่วงแคบ.....	66
6.2.2 ผลการเปลี่ยนแปลงความเร็วในช่วงกว้าง.....	73
6.2.3 ผลการทดสอบใส่/ปลดโหลดแบบขั้น.....	80
6.2.4 ผลการทดสอบการเปลี่ยนโหลดแบบเชิงเส้นที่ความเร็วคงที่.....	93
6.2.5 ผลการทดสอบการเปลี่ยนโหลดความเร็วแบบเชิงเส้นที่โหลดคงที่.....	94
บทที่ 7 บทสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	95
7.1 บทสรุปผลการวิจัย.....	95
7.2 ข้อเสนอแนะ.....	95
ภาคผนวก ก การพิสูจน์เสถียรภาพของตัวสังเกตอันดับแบบปรับตัว.....	98
ภาคผนวก ข ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่อระบบประมาณ.....	104
ภาคผนวก ค การทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง....	106
ภาคผนวก ง ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง.....	108
บรรณานุกรม.....	109
ประวัติผู้เขียน.....	111

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 การประเมินค่าระบบไฟฟ้าพลังงานลม.....	1
ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณหาค่าอัตราขยายป้อนกลับ.....	25
ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์และพิกัดของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง .....	26
ตารางที่ 6.1 เงื่อนไขการทดสอบระบบขับเคลื่อนแบบเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งที่สภาวะอยู่ตัว .....	47
ตารางที่ 6.2 เงื่อนไขการทดสอบระบบขับเคลื่อนแบบเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งที่เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงความเร็วในช่วงแคบ .....	66
ตารางที่ 6.3 เงื่อนไขการทดสอบระบบขับเคลื่อนแบบเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งที่เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงความเร็วในช่วงกว้าง.....	73
ตารางที่ 6.4 เงื่อนไขการทดสอบระบบขับเคลื่อนแบบเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งที่เงื่อนไขการทดสอบใส่/ปลดโหลดแบบขั้น.....	80
ตารางที่ ง.1 ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง.....	108

## สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 กำลังผลิตไฟฟ้าติดตั้งรวมทั่วโลกในแต่ละปี.....	2
รูปที่ 1.2 โครงสร้างทั่วไปของระบบควบคุมความเร็วแบบไร้เซนเซอร์ตรวจวัดตำแหน่ง สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง .....	3
รูปที่ 1.3 การประมาณตำแหน่งและความเร็วของโรเตอร์ด้วยวิธี MRAS.....	4
รูปที่ 1.4 แผนภาพแสดงการโปรเจกต์เวกเตอร์ค่าผิดพลาด $\bar{e}$ ลงบนรีเกรสเซอร์เวกเตอร์ $J \hat{i}$ .....	4
รูปที่ 1.5 โครงสร้างระบบประมาณตำแหน่งโดยใช้ค่าผิดพลาดกระแสเดเตอร์.....	5
รูปที่ 1.6 การคำนวณค่าผิดพลาด ( $\varepsilon$ ) ด้วยการโปรเจกต์เวกเตอร์ผิดพลาด ( $\bar{e}$ ) ลงบนรีเกรสเซอร์เวกเตอร์ $J \hat{i}_i$ ที่สภาวะไร้โหลดและตัวประกอบกำลังเท่ากับหนึ่ง .....	6
รูปที่ 1.7 โครงสร้างระบบประมาณตำแหน่งโดยใช้การประมาณกระแสโรเตอร์.....	7
รูปที่ 1.8 โครงสร้างของระบบประมาณตำแหน่งโดยใช้การประมาณกำลังที่ช่องอากาศ.....	8
รูปที่ 1.9 โครงสร้างระบบประมาณตำแหน่งโดยใช้การประมาณกระแสโรเตอร์ บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์.....	9
รูปที่ 1.10 โครงสร้างระบบประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์ ด้วยค่าผิดพลาดกระแสโรเตอร์บนแกนอ้างอิงโรเตอร์.....	10
รูปที่ 1.11 โครงสร้างระบบประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์ ด้วยค่าผิดพลาดกระแสเดเตอร์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ .....	11
รูปที่ 2.1 แผนภาพแสดงโครงสร้างขดลวดของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง.....	14
รูปที่ 2.2 ระบบประมาณตำแหน่งและความเร็วโรเตอร์ด้วยตัวสังเกตอันดับ แบบปรับตัวที่ใช้สมการสเตเตอร์.....	17
รูปที่ 2.3 กลไกการประมาณค่าตำแหน่งของโรเตอร์.....	18
รูปที่ 3.1 ความสัมพันธ์ของแกนอ้างอิงต่าง ๆ.....	19
รูปที่ 3.2 ระบบประมาณความเร็วโรเตอร์และตำแหน่งโรเตอร์ ที่ประมาณให้เป็นเชิงเส้นบนแกนอ้างอิงสเตเตอร์.....	21

รูปที่ 3.3 ระบบประมาณความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์ที่ประมาณ ให้เป็นเชิงเส้นบนแกนอ้างอิง  
กระแสโรเตอร์ ..... 22

รูปที่ 3.4 ลักษณะสัญญาณความเร็วและตำแหน่งของโรเตอร์ขณะเร่งความเร็ว ..... 23

รูปที่ 3.5 ผลการจำลองขณะเร่งความเร็วจาก 1200 rpm ไปที่ความเร็ว 1800 rpm เมื่อ  $i_{rd} = 3A$ ,  
 $K = 33$ ,  $K_p = 50$ ,  $K_I = 5000$  ..... 27

รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการออกแบบอัตราขยายของระบบประมาณตำแหน่งและความเร็วโรเตอร์..... 28

รูปที่ 4.1 การควบคุมแบบเวกเตอร์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์..... 29

รูปที่ 4.2 โครงสร้างตัวควบคุมเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วมบนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์..... 31

รูปที่ 4.3 แรงดันตกคร่อมสวิตช์กำลัง ..... 33

รูปที่ 4.4 แรงดันชดเชยแบบเชิงเส้น ..... 34

รูปที่ 5.1 ผลการจำลองการทำงานแสดงผลกระทบของค่าความต้านทานขดลวดสเตเตอร์ ( $\Delta R = 40\%$ ) เมื่อใช้อัตราขยายป้อนกลับ  $K = 0$  และ  $i_{rd} = 3A$  ในสถานะอยู่ตัว ..... 38

รูปที่ 5.2 ผลการจำลองการทำงานแสดงผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำร่วม ( $\Delta M = 15\%$ ) เมื่อใช้อัตราขยายป้อนกลับ  $K = 0$  และ  $i_{rd} = 3A$  ในสถานะอยู่ตัว ..... 39

รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันสเตเตอร์ ( $v_s$ ) และค่าความเหนี่ยวนำร่วม ( $M$ )..... 40

รูปที่ 5.4 โครงสร้างการทำงานโดยรวมของระบบ..... 41

รูปที่ 5.5 ค่าความเหนี่ยวนำร่วม ( $M$ ) ที่ใช้ในการทดสอบการทำงาน..... 42

รูปที่ 5.6 ผลการทดลองค่าพารามิเตอร์คงที่ในสถานะอยู่ตัวที่การทำงานที่สภาวะไร้โหลด  
 $\omega_m = 1500 rpm$ ,  $v_s = 300V$ ,  $i_{rd} = 3A$ ,  $M = 179.8 mH$  ..... 43

รูปที่ 5.7 ผลการทดลองการปรับค่าพารามิเตอร์ตามเงื่อนไขการทำงานที่สภาวะอยู่ตัว ที่จุดการทำงาน  
ที่สภาวะไร้โหลด  $\omega_m = 1500 rpm$ ,  $v_s = 300 V$ ,  $i_{rd} = 3A$ ,  $M = 222.5mH$  ..... 44

รูปที่ 6.1 โครงสร้างระบบทดสอบการควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง สำหรับ  
เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง ..... 46

รูปที่ 6.2 ผลการทดลองที่สภาวะอยู่ตัว ที่สภาวะไร้โหลด ความเร็ว 1,800 rpm และกระแสกระตุ้น  
สร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ 3 A ..... 48







รูปที่ 6.42 ผลการทดลองใส่/ปลดโหลด ที่ย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ที่ความเร็ว 1,200 rpm และกระแส กระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ 3 A.....	91
รูปที่ 6.43 ผลการทดลองใส่/ปลดโหลด ที่ย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ที่ความเร็ว 1,200 rpm และกระแส กระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ 6 A.....	92
รูปที่ 6.44 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงโหลดแบบเชิงเส้นที่ความเร็วคงที่ .....	93
รูปที่ 6.45 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงความเร็วแบบเชิงเส้นที่โหลดคงที่ .....	94
รูปที่ ก.1 แผนภาพแสดงลักษณะวงรอบควบคุมของตัวสังเกตอันดับแบบปรับตัว.....	100
รูปที่ ก.2 แผนภาพแสดงลักษณะวงรอบควบคุมบนโดเมนความถี่.....	100
รูปที่ ค.1 ลักษณะการต่อวงจรทดสอบ .....	107





## นิยามสัญลักษณ์

$\bar{v}_s, \bar{v}_r$	:	แรงดันสเตเตอร์และแรงดันโรเตอร์
$\bar{i}_s, \bar{i}_r$	:	กระแสสเตเตอร์และกระแสโรเตอร์
$\bar{i}_c$	:	กระแสจากวงรอบคুমคุมกระแส
$\bar{i}_o$	:	กระแสกระตุ้นสร้างสเตเตอร์ฟลักซ์
$\bar{\lambda}_s, \bar{\lambda}_r$	:	สเตเตอร์ฟลักซ์และโรเตอร์ฟลักซ์
$p$	:	จำนวนคู่ขั้วของเครื่องจักรกลไฟฟ้า
$R_s, R_r$	:	ค่าความต้านทานขดลวดฝั่งสเตเตอร์และขดลวดโรเตอร์
$L_s, L_r$	:	ค่าความเหนี่ยวนำขดลวดฝั่งสเตเตอร์และขดลวดโรเตอร์
$M$	:	ค่าความเหนี่ยวนำร่วม
$L_{leak}$	:	ค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหล
$\gamma_R$	:	ร้อยละของการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานขดลวดสเตเตอร์
$\gamma_L$	:	ร้อยละของการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำขดลวดสเตเตอร์
$\Delta R$	:	ค่าความต้านทานขดลวดสเตเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงไป
$\Delta L$	:	ค่าความเหนี่ยวนำขดลวดสเตเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงไป
$\Delta M$	:	ค่าความเหนี่ยวนำร่วมที่เปลี่ยนแปลงไป
$\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r}$	:	สัมประสิทธิ์การรั่วไหลรวม (Total Leakage Coefficient)
$\omega_m, \omega_r$	:	ความเร็วทางกลและความเร็วทางไฟฟ้าของโรเตอร์
$\theta_m, \theta_r$	:	ตำแหน่งทางกลและตำแหน่งทางไฟฟ้าของโรเตอร์
$\omega_o$	:	ความถี่ทางไฟฟ้าหรือความเร็วทางไฟฟ้าของสเตเตอร์ฟลักซ์
$\theta_o$	:	ตำแหน่งทางไฟฟ้าของสเตเตอร์ฟลักซ์
$K$	:	อัตราขยายสำหรับสัญญาณป้อนกลับ
$K_p, K_I$	:	อัตราขยายปรับตัวสำหรับตัวควบคุมแบบพีไอ
$\tau_e$	:	แรงบิดเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า
$\tau_{rated}$	:	แรงบิดพิคคุดของเครื่องจักรกลไฟฟ้า
$\bar{e}_i$	:	เวกเตอร์ค่าผิดพลาดกระแสสเตเตอร์
$\varepsilon$	:	สัญญาณค่าผิดพลาดใช้สำหรับการประมาณตำแหน่งและความเร็ว
$\Delta\theta_{ss}$	:	ค่าผิดพลาดตำแหน่งของโรเตอร์ประมาณในช่วงเร่งหรือลดความเร็ว

$R_\omega$	:	อัตราเร่งที่แรงบิดพิกัดของมอเตอร์
$V_{DC}$	:	แรงดันที่บัสไฟตรง
$T_{DT}$	:	เวลาประวิงที่ใช้ในการสวิตช์
$f_{sw}$	:	ความถี่การสวิตช์
$V_{comp}$	:	แรงดันชดเชย
$i_{oth}$	:	ค่ากระแสใช้สำหรับตั้งค่ากระแสหยุดการชดเชยแบบเชิงเส้น
$i_{ith}$	:	ค่ากระแสใช้สำหรับตั้งค่ากระแสหยุดการชดเชย
$\otimes$	:	ผลคูณเชิงเวกเตอร์
$\  \ \ $	:	ขนาดของปริมาณนั้น ๆ
ตัวห้อย $u, v, w$	:	ปริมาณเฟสของเฟส $u, v, w$
ตัวห้อย $\alpha, \beta$	:	ปริมาณในองค์ประกอบแกน $\alpha, \beta$ บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์
ตัวห้อย $dr, qr$	:	ปริมาณในองค์ประกอบแกน $dr, qr$ บนแกนอ้างอิงโรเตอร์
ตัวห้อย $d, q$	:	ปริมาณในองค์ประกอบแกน $d, q$ บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์
ตัวห้อย $\tilde{d}, \tilde{q}$	:	ปริมาณในองค์ประกอบแกน $\tilde{d}, \tilde{q}$ บนแกนอ้างอิงกระแสโรเตอร์
ตัวห้อย $s, r$	:	ปริมาณฝั่งสเตเตอร์และปริมาณฝั่งโรเตอร์
ตัวห้อย 0	:	ค่าตั้งต้น
ตัวยก “ ’ ”	:	ค่าบนแกนอ้างอิงโรเตอร์
ตัวยก “ ” ”	:	ค่าบนแกนอ้างอิงกระแสโรเตอร์
ตัวยก “ ^ ”	:	ค่าประมาณ
ตัวยก “ * ”	:	ค่าคำสั่ง
ตัวยก “ $\rightarrow$ ”	:	สเปซเวกเตอร์
$I$	:	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$
$J$	:	$\begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$

# บทที่ 1

## บทนำ

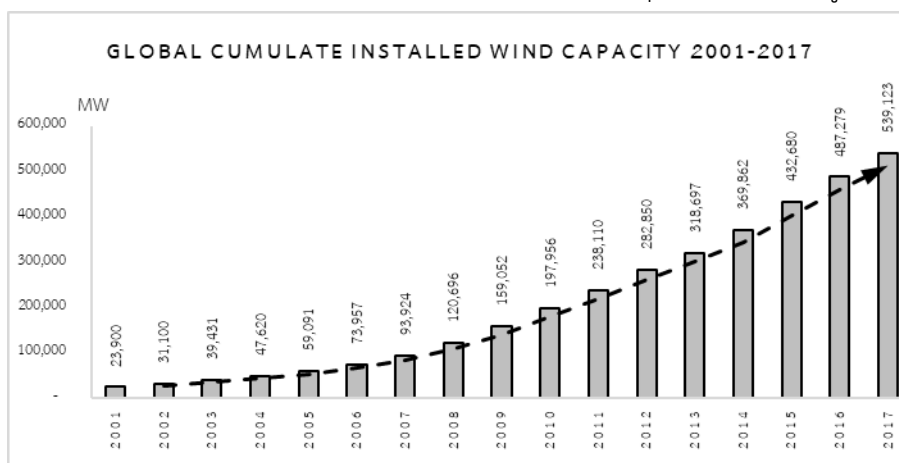
### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันการควบคุมแบบไร้เซนเซอร์ตรวจวัดตำแหน่งของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอกเป็นฟังก์ชันการใช้งานที่แพร่หลายอย่างมากตามความต้องการของผู้ใช้ อย่างไรก็ตามการควบคุมแบบไร้เซนเซอร์ตรวจวัดตำแหน่งถูกนำมาประยุกต์ใช้กับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง ซึ่งเป็นที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับพลังงานทางเลือก เช่น ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลม เป็นต้น เนื่องจากการใช้เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางนั้นใช้วงจรแปลงผันกำลังงานที่มีพิกัดกำลังขนาดเล็ก [1] จึงทำให้สามารถช่วยลดค่าใช้จ่ายรวมของระบบลงได้ เมื่อนำเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางมาเปรียบเทียบกับเครื่องจักรกลชนิดอื่น ๆ แสดงได้ดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 การประเมินค่าระบบไฟฟ้าพลังงานลม

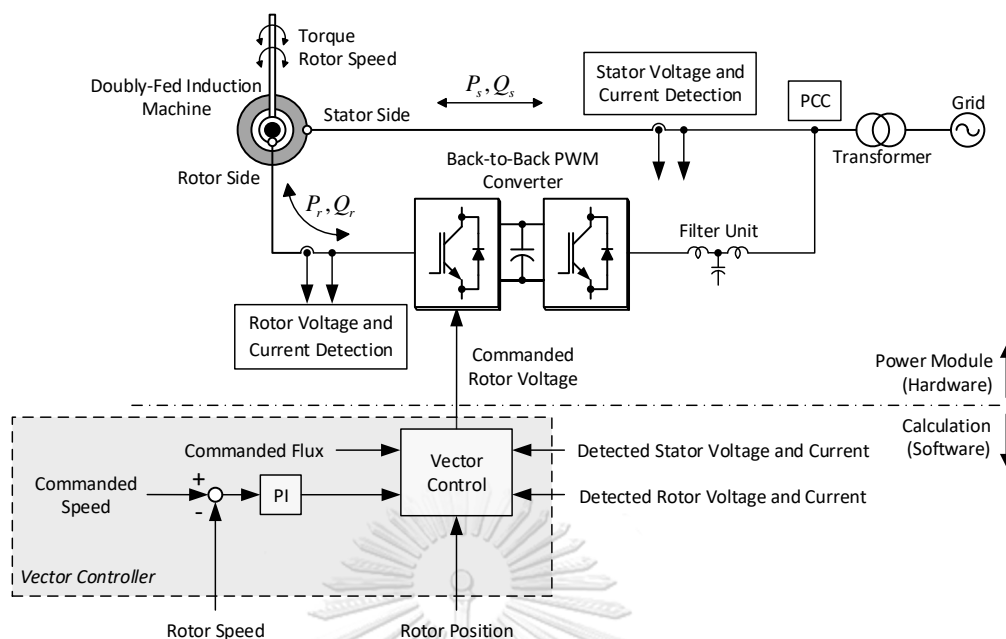
Generation Systems Characteristics	Doubly-Fed Induction Generator (DFIG)	Squirrel-Cage Induction Generator (SCIG)	Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG)	Switched Reluctance Generator (SRG)
Power Density	4.5	3.5	5	3.5
Efficiency	4	3.5	5	3.5
Controllability	5	4	5	4
Reliability	4	3	4	5
Technological maturity	5	5	4	4
Weight	3.5	3.5	5	2
Cost	4	4	3	5
Total	30	26.5	31	26

จากตารางข้างต้นพบว่าเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางได้รับคะแนนรวมเป็นอันดับสอง หรืออาจกล่าวได้ว่าเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางได้รับความสนใจในการนำไปใช้กับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลม อย่างไรก็ตามระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมมีสัดส่วนปริมาณการติดตั้งเพิ่มขึ้นในทุก ๆ ปี [3] โดยกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากทั่วโลกในปี 2001 มีค่าประมาณ 24 กิกะวัตต์ และในปี 2017 มีค่าประมาณ 539 กิกะวัตต์ และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกปี ดังแสดงในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 กำลังผลิตไฟฟ้าติดตั้งรวมทั่วโลกในแต่ละปี

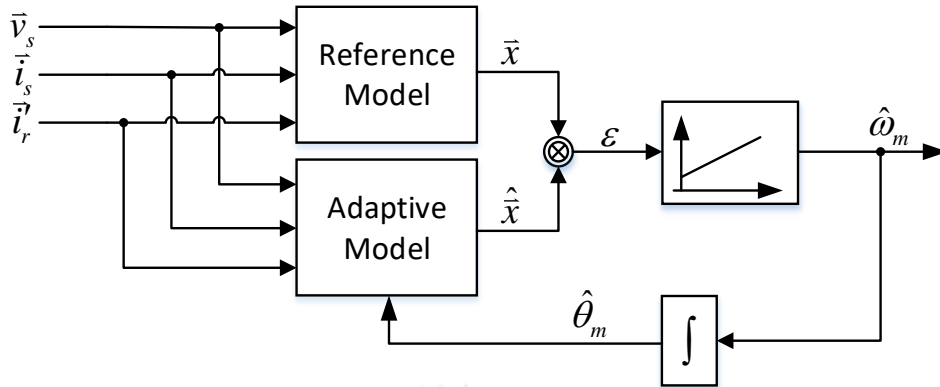
อย่างไรก็ตามเซนเซอร์วัดตำแหน่งและอุปกรณ์ตรวจวัดต้องมีความทนทานต่อสัญญาณรบกวน (Noise Immunity) เนื่องจากการซ่อมบำรุงส่วนตรวจวัดภายหลังการติดตั้งไปแล้ว นั้นเป็นไปได้ยากในทางปฏิบัติ ทำให้การควบคุมความเร็วแบบไร้เซนเซอร์ตรวจวัดตำแหน่งเป็นโหมดเสริมที่จะช่วยให้ระบบสามารถทำงานต่อไปได้ แม้ว่าเซนเซอร์ตรวจวัดตำแหน่งทำงานผิดพลาด (Fail-safe mode) ก็ตามซึ่งจะช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือให้กับระบบไฟฟ้าอีกด้วย [4]



รูปที่ 1.2 โครงสร้างทั่วไปของระบบควบคุมความเร็วแบบไร้เซ็นเซอร์ตรวจวัดตำแหน่ง สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง

จากรูปที่ 1.2 แสดงโครงสร้างทั่วไปของระบบควบคุมความเร็วแบบไร้เซ็นเซอร์ตรวจวัดตำแหน่งสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง จะประกอบไปด้วยสองส่วนหลัก ๆ คือ 1) ส่วนที่เป็นอุปกรณ์ต่าง ๆ (Hardware) จะประกอบไปด้วยฝั่งสเตเตอร์และฝั่งโรเตอร์ โดยฝั่งสเตเตอร์จะเชื่อมต่ออยู่กับโครงข่ายไฟฟ้าโดยตรง ในขณะที่ฝั่งโรเตอร์จะเชื่อมต่อเข้ากับ วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบหลังชนหลัง (Back-to-Back Converter) ก่อนที่จะเชื่อมต่อกับโครงข่ายไฟฟ้า ณ จุดเชื่อมต่อร่วม (Point of Common Coupling) โดยทั้งสองฝั่งจะมีการตรวจจับกระแสและแรงดันเพื่อนำไปใช้ในส่วนคำนวณต่อไป และ 2) ส่วนที่เป็นโปรแกรมการคำนวณต่าง ๆ (Software) ในส่วนนี้จะใช้วิธีการควบคุมแบบเวกเตอร์ไร้เซ็นเซอร์ตรวจวัดตำแหน่ง ระบบประมาณจะนำค่ากระแสและแรงดันทั้งฝั่งสเตเตอร์และฝั่งโรเตอร์มาคำนวณ เพื่อหาค่าตำแหน่งและความเร็วของโรเตอร์ซึ่งจะถูกนำไปใช้ในการควบคุมแบบเวกเตอร์ จากนั้นระบบควบคุมแบบเวกเตอร์จะคำนวณค่าแรงดันคำสั่งแล้วส่งให้กับวงจรแปลงผันกำลังต่อไป

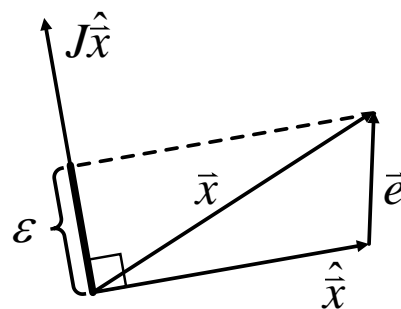
## 1.2 วิธีการประมาณค่าตำแหน่งและความเร็วโรเตอร์จากงานวิจัยในอดีต



รูปที่ 1.3 การประมาณตำแหน่งและความเร็วของโรเตอร์ด้วยวิธี MRAS

การประมาณตำแหน่งและความเร็วโรเตอร์ด้วยระบบแบบจำลองปรับตัว (MRAS : Model Reference Adaptive System) นั้นเหมาะสมในทางปฏิบัติ โดยหลักการของวิธีนี้คือจะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สองแบบจำลองคือ 1) แบบจำลองอ้างอิง (Reference Model) เป็นแบบจำลองที่ไม่ขึ้นกับตำแหน่งและ/หรือความเร็วของโรเตอร์ ซึ่งจะใช้สัญญาณด้านออกของแบบจำลองเป็นสัญญาณอ้างอิง ( $\bar{x}$ ) และ 2) แบบจำลองปรับตัว (Adaptive Model) เป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับตำแหน่งและ/หรือความเร็วของโรเตอร์ และมีสัญญาณด้านออกประมาณ ( $\hat{x}$ ) ดังแสดงในรูปที่ 1.3

การคำนวณหาค่าตำแหน่งโรเตอร์ซึ่งเป็นปริมาณสเกลาร์ (Scalar) จากสัญญาณอ้างอิง ( $\bar{x}$ ) และสัญญาณประมาณ ( $\hat{x}$ ) ซึ่งเป็นปริมาณทางเวกเตอร์นั้น สามารถทำได้โดยการนำผลคูณเชิงเวกเตอร์ของสัญญาณทั้งสองสัญญาณ ( $\bar{x} \otimes \hat{x}$ ) มาโปรเจกต์ลงบนทิศเวกเตอร์ลัพธ์ ( $\bar{e}$ ) ดังสมการ (1.1) หรือ นำเวกเตอร์ค่าผิดพลาด ( $\bar{e} = \bar{x} - \hat{x}$ ) มาโปรเจกต์ลงบนรีเกรสเซอร์เวกเตอร์ ( $J \hat{x}$ ) ตามสมการ (1.2) ผลลัพธ์ที่ได้คือค่าผิดพลาดเชิงสเกลาร์ ( $\epsilon$ ) ที่สะท้อนถึงค่าผิดพลาดตำแหน่งโรเตอร์ ( $\hat{\theta}_m - \theta_m$ ) ดังแสดงในรูปที่ 1.4



รูปที่ 1.4 แผนภาพแสดงการโปรเจกต์เวกเตอร์ค่าผิดพลาด  $\bar{e}$  ลงบนรีเกรสเซอร์เวกเตอร์  $J \hat{x}$

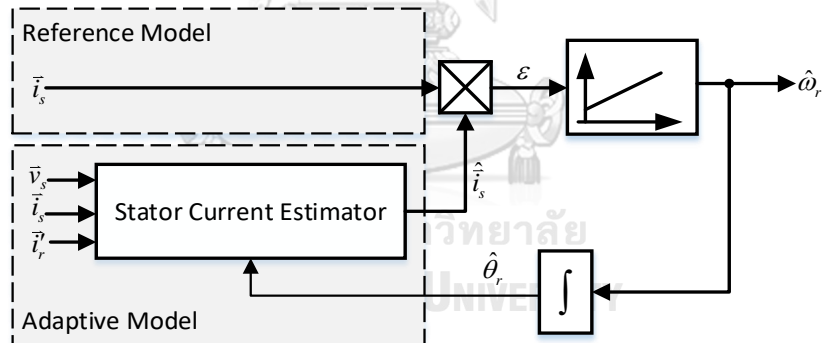
$$\varepsilon = (\bar{x} \otimes \hat{x}) \bullet \bar{z} \quad (1.1)$$

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

ค่าผิดพลาดเชิงสเกลาร์ ( $\varepsilon$ ) จะถูกนำไปคำนวณเพื่อหาตำแหน่งประมาณ ( $\hat{\theta}_m$ ) และความเร็วประมาณ ( $\hat{\omega}_m$ ) ของโรเตอร์ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ ซึ่งตำแหน่งประมาณ ( $\hat{\theta}_m$ ) ของโรเตอร์ที่คำนวณได้จะถูกป้อนกลับเข้าสู่แบบจำลองอันดับแบบปรับตัว หากว่าระบบมีเสถียรภาพที่สถานะอยู่ตัวค่าผิดพลาดเชิงสเกลาร์ ( $\varepsilon$ ) จะลู่เข้าสู่ศูนย์ ซึ่งนั่นหมายความว่าตำแหน่งประมาณ ( $\hat{\theta}_m$ ) และความเร็วประมาณ ( $\hat{\omega}_m$ ) ของโรเตอร์มีค่าเท่ากับค่าตำแหน่งจริง ( $\theta_m$ ) และความเร็วจริง ( $\omega_m$ ) ของโรเตอร์ตามลำดับ

จากงานวิจัยในอดีตที่ได้ศึกษา พบว่างานวิจัยแต่ละงานจะมีลักษณะและคุณสมบัติที่ต่างกันไปขึ้นอยู่กับแบบจำลองและ/หรือสัญญาณอ้างอิงที่เลือกนำมาใช้ โดยจะอธิบายรายละเอียดของแต่ละวิธีในหัวข้อถัดไป

### 1.2.1 การประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์ด้วยค่าผิดพลาดของกระแสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์และมีการคำนวณสเตเตอร์ฟลักซ์



รูปที่ 1.5 โครงสร้างระบบประมาณตำแหน่งโดยใช้ค่าผิดพลาดกระแสเตเตอร์

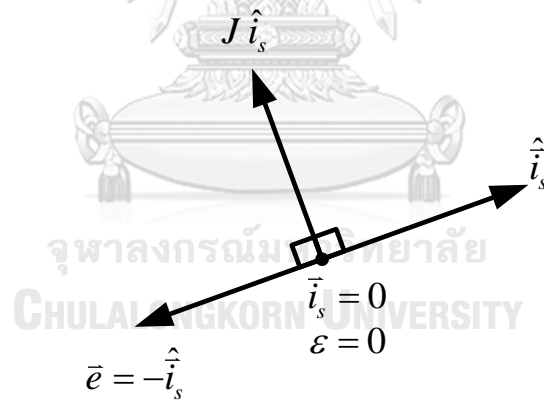
บทความของ R. Cardenas [5] นำเสนอระบบประมาณความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์โดยอาศัยค่าผิดพลาดกระแสเตเตอร์ ดังรูปที่ 1.5 โดยใช้กระแสเตเตอร์ ( $\vec{i}_s$ ) จากการตรวจวัดเป็นสัญญาณอ้างอิงและกระแสเตเตอร์ประมาณ ( $\hat{\vec{i}}_s$ ) ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการ (1.3)

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

การประมาณค่ากระแสสแตเตอร์ ( $\hat{i}_s$ ) นั้นจำเป็นต้องมีข้อมูลสแตเตอร์ฟลักซ์ ( $\hat{\lambda}_s$ ) ที่ได้จากการอินทิเกรตแรงดันสแตเตอร์ดังสมการที่ (1.4) ซึ่งทำให้เกิดปัญหาเรื่องการเลื่อนของสัญญาณไฟตรงในทางปฏิบัติ

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

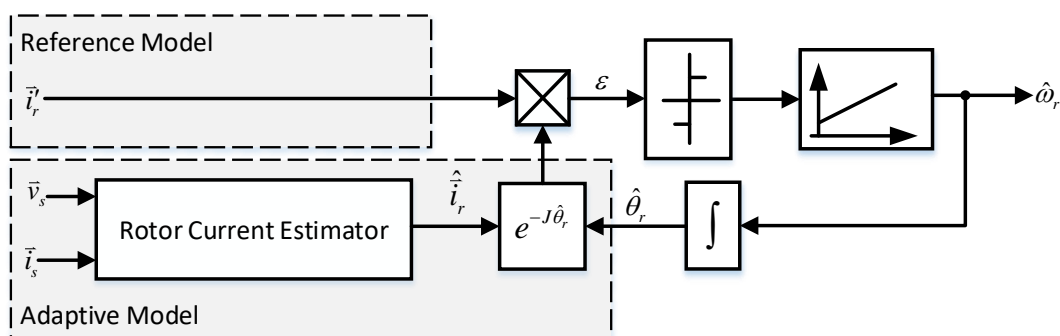
นอกจากนี้ข้อจำกัดของการประมาณค่าความเร็วโรเตอร์โดยอาศัยกระแสสแตเตอร์เป็นเวกเตอร์รีเกรสเซอร์ ( $J \hat{i}_s$ ) ในขณะที่เครื่องจักรกลไฟฟ้าทำงานในสภาวะไร้โหลดและมีตัวประกอบกำลังเป็นหนึ่ง จะทำให้กระแสสแตเตอร์เป็นศูนย์ ( $\bar{i}_s = 0$ ) ซึ่งจะทำให้เวกเตอร์รีเกรสเซอร์มีค่าเป็นศูนย์ไปด้วย ในกรณีนี้จะทำให้ระบบประมาณขาดคุณสมบัติการประมาณค่าได้ (Loss of Identifiability) และอีกหนึ่งกรณีคือที่  $\hat{\theta}_r \neq \theta_r$  และ  $\bar{i}_s = 0$  จะพบว่าเวกเตอร์ผิดพลาด ( $\bar{e}$ ) จะมีค่าเท่ากับ  $-\hat{i}_s$  ซึ่งมีทิศตั้งฉากกับรีเกรสเซอร์เวกเตอร์ ( $J \hat{i}_s$ ) ดังแสดงในรูปที่ 1.6 เมื่อนำเวกเตอร์ผิดพลาด ( $\bar{e}$ ) โปรเจกต์ลงบนรีเกรสเซอร์เวกเตอร์ ( $J \hat{i}_s$ ) จะทำให้ค่าผิดพลาด ( $\varepsilon$ ) ที่ได้มีค่าเท่ากับศูนย์ ทำให้ระบบประมาณหยุดการประมาณถึงแม้ว่าความเร็วประมาณและตำแหน่งประมาณยังมีค่าผิดพลาดอยู่ก็ตาม จึงกล่าวได้ว่าในกรณีนี้ระบบไม่สามารถประมาณตำแหน่งและความเร็วของโรเตอร์



รูปที่ 1.6 การคำนวณค่าผิดพลาด ( $\varepsilon$ ) ด้วยการโปรเจกต์เวกเตอร์ผิดพลาด ( $\bar{e}$ ) ลงบนรีเกรสเซอร์เวกเตอร์  $J \hat{i}_s$  ที่สภาวะไร้โหลดและตัวประกอบกำลังเท่ากับหนึ่ง



### 1.2.2 ค่าผิดพลาดกระแสโรเตอร์บนแกนอ้างอิงโรเตอร์โดยอาศัยการคำนวณสเตเตอร์ฟลักซ์



รูปที่ 1.7 โครงสร้างระบบประมาณตำแหน่งโดยใช้การประมาณกระแสโรเตอร์

ในงานวิจัยนี้ G. D. Marques [6] ได้นำเสนอแบบจำลองการประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์ด้วยค่าผิดพลาดกระแสโรเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 1.7 โดยการใช้กระแสโรเตอร์ ( $\vec{i}_r^*$ ) ที่ตรวจจับได้เป็นสัญญาณอ้างอิง และกระแสโรเตอร์ประมาณ ( $\hat{\vec{i}}_r$ ) โดยอาศัยข้อมูลสเตเตอร์ฟลักซ์ ( $\vec{\lambda}_s$ ) ดังสมการที่ (1.5)

$$\hat{\vec{i}}_r = e^{-j\hat{\theta}_r} \left( \frac{\vec{\lambda}_s - L_s \vec{i}_s}{M} \right) \quad (1.5)$$

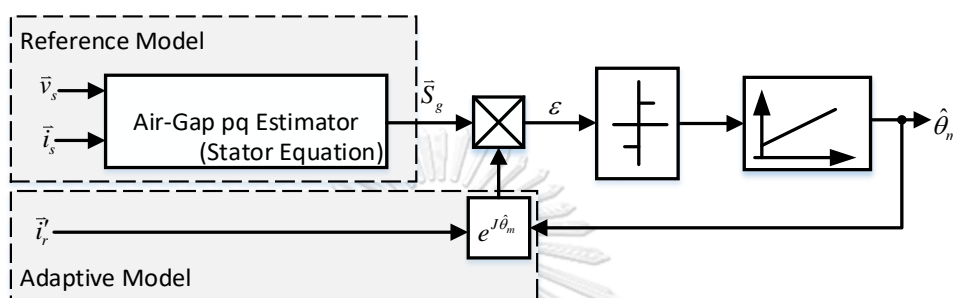
ค่าผิดพลาด ( $\varepsilon$ ) สามารถคำนวณได้ดังสมการ (1.6)

$$\varepsilon = \left( \vec{i}_r^* - \hat{\vec{i}}_r \right)^T J \hat{\vec{i}}_r \quad (1.6)$$

แม้ที่สภาวะไร้โหลดหากพิจารณาจากสมการที่ (1.6) จะเห็นได้ว่าเวกเตอร์รีเกรสเซอร์ ( $J \hat{\vec{i}}_r$ ) จะถูกกำหนดโดยกระแสโรเตอร์ประมาณ ( $\hat{\vec{i}}_r$ ) และกระแสโรเตอร์ใช้ในการสร้างฟลักซ์ทำให้กระแสโรเตอร์ประมาณมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ ( $\hat{\vec{i}}_r \neq 0$ ) ทำให้ระบบสามารถประมาณตำแหน่งและความเร็วโรเตอร์ได้แม้ในสภาวะไร้โหลด อย่างไรก็ตามกระแสโรเตอร์ประมาณ ( $\hat{\vec{i}}_r$ ) คำนวณด้วยข้อมูลสเตเตอร์ฟลักซ์ที่ได้จากอินทิเกรต จึงทำให้เกิดปัญหาการเลื่อนของสัญญาณไฟตรงในทางปฏิบัติได้

### 1.2.3 การประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์ด้วยค่าผิดพลาดของกำลังที่ช่องอากาศบนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์

G. D. Marques [7] ได้นำเสนองานวิจัยนี้เพื่อแก้ปัญหาค่าการเลื่อนของสัญญาณไฟตรงโดยใช้ค่าผิดพลาดของกำลังที่ช่องอากาศในการประมาณความถี่สลิป ซึ่งมีข้อดีคือเนื่องจากการคำนวณกำลังช่องอากาศ ( $\bar{S}_g$ ) จะคำนวณจากแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำของสเตเตอร์ฟลักซ์ จึงไม่จำเป็นต้องใช้ข้อมูลสเตเตอร์ฟลักซ์ ทำให้ลดปัญหาค่าการเลื่อนของสัญญาณไฟตรงได้



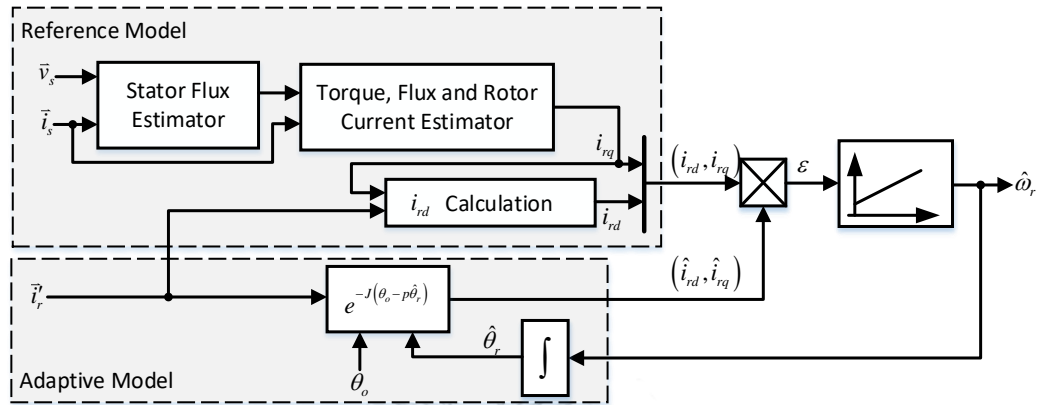
รูปที่ 1.8 โครงสร้างของระบบประมาณตำแหน่งโดยใช้การประมาณกำลังที่ช่องอากาศ

จากรูปที่ 1.8 แสดงโครงสร้างระบบประมาณตำแหน่งโดยใช้การประมาณกำลังที่ช่องอากาศ จะเห็นได้ว่าระบบประมาณจะใช้กำลังช่องอากาศ ( $\bar{S}_g$ ) ที่คำนวณจากสมการสเตเตอร์เป็นสัญญาณอ้างอิงสำหรับกำลังช่องอากาศ ( $\bar{S}_g$ ) ที่เป็นสัญญาณประมาณจะแทนใช้ด้วยกระแสโรเตอร์ประมาณ ( $\hat{i}_r$ ) ด้วยแนวคิดที่ว่ากำลังช่องอากาศจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับกระแสโรเตอร์และใช้กระแสโรเตอร์ ( $\hat{i}_r$ ) เป็นสัญญาณปรับตัวโดยสัญญาณผิดพลาด ( $\varepsilon$ ) สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (1.7)

$$\varepsilon = (\bar{S}_g - \hat{i}_r)^T J \hat{i}_r \quad (1.7)$$

อย่างไรก็ตามการประมาณความเร็วและตำแหน่งด้วยวิธีนี้มีข้อจำกัดในเรื่องการคำนวณกำลังช่องอากาศที่ต้องอาศัยตัวแปรของเครื่องจักรกลเพิ่มเติม เช่น กำลังสูญเสียในแกนเหล็ก (core loss) เป็นต้น และยังมีกรคำนวณที่ยุ่งยากและซับซ้อนอีกด้วย

### 1.2.4 การประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์ด้วยค่าผิดพลาดกระแสโรเตอร์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์โดยอาศัยการคำนวณแรงบิด



รูปที่ 1.9 โครงสร้างระบบประมาณตำแหน่งโดยใช้การประมาณกระแสโรเตอร์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์

ในงานวิจัยนี้ F. C. Dezza [8] ได้นำเสนอการประมาณความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์ด้วยค่าผิดพลาดของกระแสโรเตอร์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์ ดังรูปที่ 1.9 แสดงโครงสร้างระบบประมาณ โดยสัญญาณอ้างอิงที่ใช้คือกระแสโรเตอร์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์  $(i_{rd}, i_{rq})$  ซึ่งคำนวณจากค่าแรงบิดเหนี่ยวนำ  $(\tau_e)$  และค่าสเตเตอร์ฟลักซ์  $(\lambda_s)$  ตามสมการที่ (1.8) - (1.9)

$$i_{rq} = \frac{L_s}{M} \frac{\tau_e}{|\lambda_s|} = \frac{L_s}{M} \frac{-p(\vec{i}_s \times \vec{\lambda}_s)}{|\lambda_s|} \quad (1.8)$$

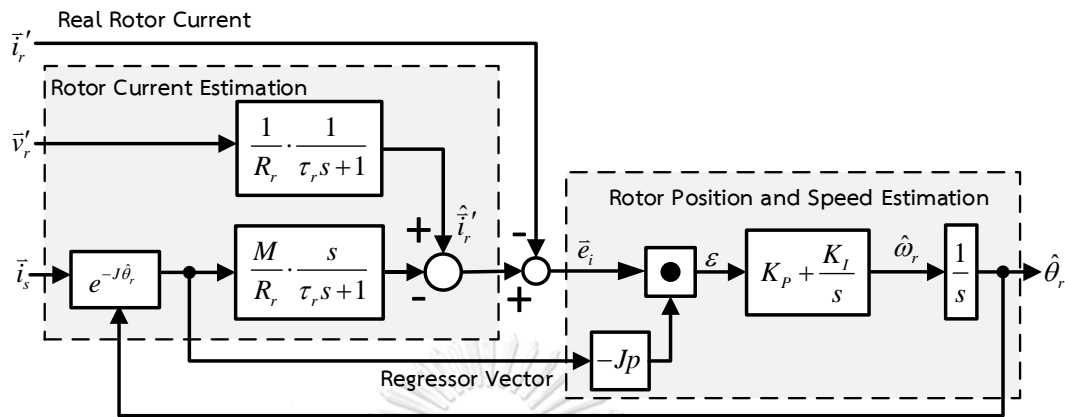
$$i_{rd} = \sqrt{|\vec{i}_r|^2 - i_{rq}^2} \quad (1.9)$$

ในส่วนของแบบจำลองแบบปรับตัว การคำนวณกระแสโรเตอร์ประมาณบนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์  $(\hat{i}_{rd}, \hat{i}_{rq})$  จะอาศัยการตรวจจับกระแสโรเตอร์ และข้อมูลป้อนกลับของตำแหน่งโรเตอร์  $(\hat{\theta}_r)$  ที่ได้จากระบบประมาณ โดยค่าผิดพลาดกระแสโรเตอร์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์  $(\epsilon)$  สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (1.10)

$$\epsilon = \left( \vec{i}_{r,dq} - \hat{\vec{i}}_{r,dq} \right)^T J \hat{\vec{i}}_{r,dq} \quad (1.10)$$

การประมาณตำแหน่งโรเตอร์ด้วยวิธีนี้จำเป็นต้องคำนวณสเตเตอร์ฟลักซ์ ซึ่งจะทำให้เกิดปัญหาการเลื่อนของสัญญาณไฟตรง และยังมีค่าการคำนวณที่ยุ่งยากซับซ้อนอีกด้วย

### 1.2.5 การประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์ด้วยค่าผิดพลาดกระแสโรเตอร์บนแกนอ้างอิงโรเตอร์



รูปที่ 1.10 โครงสร้างระบบประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์ด้วยค่าผิดพลาดกระแสโรเตอร์บนแกนอ้างอิงโรเตอร์

ในงานวิจัยที่ [9] การประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์ด้วยค่าผิดพลาดกระแสโรเตอร์ในรูปที่ 1.10 จะตรวจวัดกระแสโรเตอร์ ( $\hat{i}_r'$ ) เพื่อเป็นสัญญาณอ้างอิง และสัญญาณปรับตัวคือกระแสโรเตอร์ประมาณ ( $\hat{i}_r'$ ) ซึ่งได้จากการคำนวณสมการโรเตอร์ดังสมการที่ (1.11)

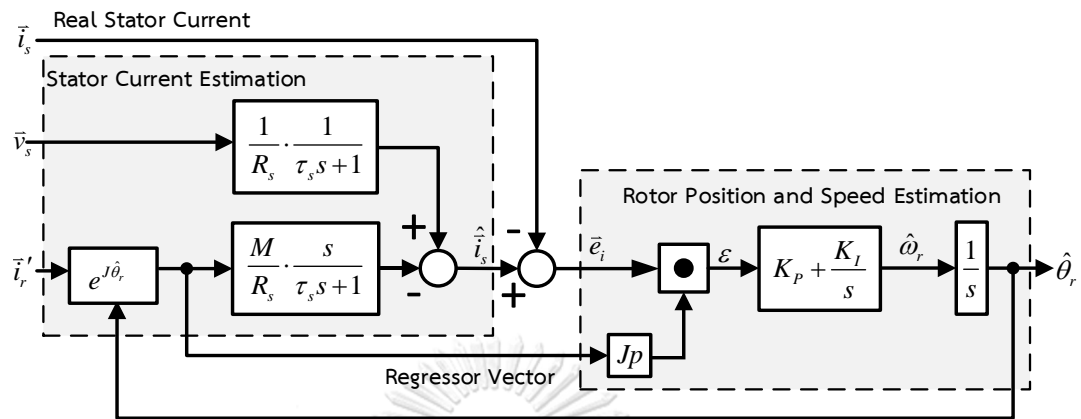
$$\frac{d\hat{i}_r'}{dt} = \frac{1}{L_r} \left[ -R_r \hat{i}_r' - M \frac{d}{dt} (e^{-j\hat{\theta}_r} \cdot \vec{i}_s) + \vec{v}_r' \right] \quad (1.11)$$

ค่าผิดพลาด ( $\varepsilon$ ) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (1.12)

$$\varepsilon = \left( -J p e^{-j p \hat{\theta}_m} \vec{i}_s \right)^T \left( \vec{i}_r' - \hat{i}_r' \right) \quad (1.12)$$

จากการประมาณตำแหน่งและความเร็วของโรเตอร์ด้วยวิธีนี้พบว่าระบบประมาณมีขั้นตอนการคำนวณที่เรียบง่าย และไม่จำเป็นต้องมีข้อมูลสเตเตอร์ฟลักซ์ที่ได้จากการอินทิเกรต ทำให้ลดปัญหาการเลื่อนของสัญญาณไฟตรงได้ แต่การเลือกใช้แบบจำลองทางโรเตอร์จะทำให้ระบบประมาณไม่มีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้า และที่ความเร็วใกล้ความเร็วซิงโครนัส และกระแสโรเตอร์จะมีความถี่เข้าใกล้ศูนย์ จะทำให้ค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นไม่สามารถสะท้อนถึงค่าตำแหน่งที่ผิดพลาดไปได้

### 1.2.6 การประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์ด้วยค่าผิดพลาดกระแสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์



รูปที่ 1.11 โครงสร้างระบบประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์  
ด้วยค่าผิดพลาดกระแสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์

ในงานวิจัยที่ [10] นี้เป็นการนำเสนอการประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์ด้วยค่าผิดพลาดกระแสเตเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 1.11 โดยตรวจวัดกระแสเตเตอร์ ( $\vec{i}_s$ ) เพื่อใช้เป็นสัญญาณอ้างอิงและสัญญาณปรับตัวคือกระแสเตเตอร์ประมาณ ( $\hat{\vec{i}}_s$ ) ซึ่งได้จากการคำนวณสมการสเตเตอร์ดังสมการที่ (1.13)

$$\frac{d\hat{\vec{i}}_s}{dt} = \frac{1}{L_s} \left[ -R_s \hat{\vec{i}}_s - M \frac{d}{dt} (e^{j\hat{\theta}_r} \cdot \vec{i}_r') + \vec{v}_s \right] \quad (1.13)$$

ค่าผิดพลาด ( $\epsilon$ ) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (1.14)

$$\epsilon = \left( J p \hat{\vec{i}}_r \right)^T \left( \vec{i}_s - \hat{\vec{i}}_s \right) \quad (1.14)$$

จากระบบประมาณจะเห็นได้ว่าระบบมีขั้นตอนการคำนวณที่เรียบง่าย และไม่จำเป็นต้องคำนวณสเตเตอร์ฟลักซ์จากการอินทิเกรต ทำให้ลดปัญหาการเลื่อนของสัญญาณไฟตรงได้ซึ่งสามารถแก้ไขข้อบกพร่องของงานวิจัยในอดีตที่ผ่านมาได้ แต่งานวิจัย [10] ยังไม่ได้กล่าวถึงการวิเคราะห์ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางเอาไว้

### 1.3 สรุปปัญหาและข้อจำกัดของงานวิจัยที่ผ่านมา

1. การเลื่อนของสัญญาณไฟตรง ในงานวิจัยที่ผ่านมาจะพบว่าระบบประมาณจะใช้ค่าสเตเตอร์ฟลักซ์ที่ได้จากการอินทิเกรตในการคำนวณ
2. เสถียรภาพของระบบประมาณ ในงานวิจัยที่ผ่านมาจะพบว่าระบบประมาณจะไม่มีอัตราขยายการป้อนกลับที่ตัวสังเกตซึ่งสามารถช่วยเพิ่มเสถียรภาพได้
3. ความคงทนของระบบประมาณต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้า ในงานวิจัยที่ผ่านมา บางงานวิจัยจะใช้แบบจำลองทางด้านโรเตอร์ซึ่งไม่คงทนต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้า อีกทั้งยังไม่มีวิเคราะห์ถึงผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์
4. ขาดแนวทางในการออกแบบอัตราขยายปรับตัวในช่วงทำงานกว้าง ในงานวิจัยที่ผ่านมาจะพิจารณาการออกแบบอัตราขยายการปรับตัวในช่วงแคบ ๆ ซึ่งไม่ครอบคลุมการทำงานจริงที่มีการเร่ง-ลดความเร็วในช่วงกว้างได้

### 1.4 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1. พัฒนาแบบจำลองลดอันดับแบบปรับตัวที่มีอัตราขยายการป้อนกลับ เพื่อใช้ประมาณตำแหน่งและความเร็วโรเตอร์
2. วิเคราะห์เสถียรภาพของระบบประมาณพร้อมการออกแบบอัตราขยายป้อนกลับของตัวสังเกต
3. ออกแบบอัตราขยายการปรับตัวสำหรับการติดตามการประมาณค่าตำแหน่ง
4. วิเคราะห์ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางต่อการประมาณตำแหน่งโรเตอร์

### 1.5 ขอบเขตวิทยานิพนธ์

1. นำเสนอระบบประมาณตำแหน่งและความเร็วของโรเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางโดยใช้ตัวสังเกตลดอันดับแบบปรับตัว
2. วิเคราะห์เสถียรภาพของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางของระบบประมาณ
3. ออกแบบอัตราขยายปรับตัวสำหรับระบบประมาณตำแหน่ง
4. การวิเคราะห์ผลกระทบต่อระบบประมาณตำแหน่งเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง
5. ทดสอบแนวคิดทางทฤษฎีด้วยการจำลองการทำงาน และทดลองกับระบบทดสอบ

## 1.6 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย

1. ทดสอบแนวคิดทางทฤษฎีด้วยการจำลองการทำงาน และทดลองกับระบบทดสอบ
2. ศึกษาแบบจำลองพื้นฐานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง
3. ศึกษาระบบประมาณที่ใช้ในการประมาณตำแหน่งและความเร็วของโรเตอร์ด้วยตัวสังเกตลดอันดับแบบปรับตัวโดยใช้แบบจำลองสเตเตอร์
4. พิสูจน์เสถียรภาพของระบบประมาณ พร้อมทั้งนำเสนอการออกแบบอัตราขยายปรับตัวของระบบประมาณ
5. จำลองการทำงานของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซ็นเซอร์ตรวจวัดตำแหน่งสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink
6. ออกแบบระบบประมาณและทดสอบการทำงาน
7. เก็บข้อมูลผลกาทดสอบสมรรถนะการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าโดยเปรียบเทียบการทำงานระหว่างการควบคุมแบบเวกเตอร์ไร้เซ็นเซอร์ตรวจวัดตำแหน่ง กับ การควบคุมแบบเวกเตอร์แบบมีเซ็นเซอร์ตรวจวัดตำแหน่ง
8. วิเคราะห์ผลการทดลอง และเขียนวิทยานิพนธ์

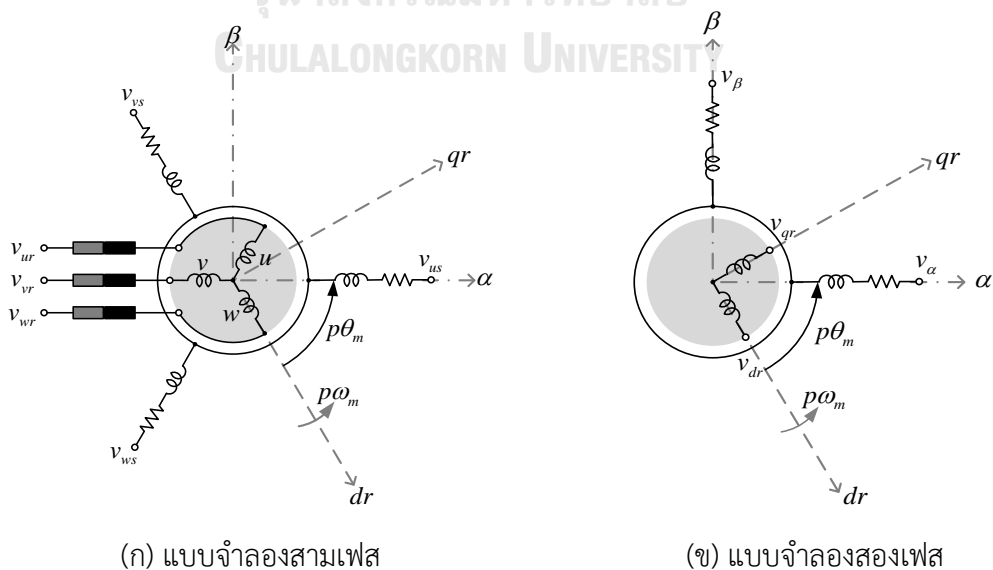
## บทที่ 2

### ระบบประมาณตำแหน่งและความเร็วของโรเตอร์โดยใช้ตัวสังเกตลดอันดับแบบปรับตัว

ในบทที่จะกล่าวถึงแบบจำลองทางพลวัตของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง ทั้งทางฝั่งสเตเตอร์และฝั่งโรเตอร์ โดยในการใช้สร้างตัวสังเกตลดอันดับแบบปรับตัว (Reduced-order Adaptive Observer) นั้นจะใช้แบบจำลองทางพลวัตทางฝั่งสเตเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง และอธิบายกลไกการทำงานของระบบประมาณตำแหน่งและความเร็วของโรเตอร์ การหาค่าตำแหน่งและความเร็วของโรเตอร์

#### 2.1 แบบจำลองทางพลวัตของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง

แบบจำลองทางพลวัตของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางแสดงลักษณะโครงสร้างของการพันขดลวดสามเฟสทั้งทางฝั่งสเตเตอร์และฝั่งโรเตอร์ โดยแรงดันฝั่งสเตเตอร์นิยามให้เป็น  $v_{us}, v_{vs}, v_{ws}$  และแรงดันฝั่งโรเตอร์นิยามให้เป็น  $v_{ur}, v_{vr}, v_{wr}$  ดังรูปที่ 2.1 (ก) และแบบจำลองสองเฟสที่ได้จากการแปลงของคลาร์ก (Clark's Transformation) โดยแรงดันฝั่งสเตเตอร์นิยามให้เป็น  $v_\alpha, v_\beta$  และแรงดันที่ฝั่งโรเตอร์นิยามให้เป็น  $v_{dr}, v_{qr}$  จะได้ดังรูปที่ 2.1 (ข) โดยมีแกน  $(\alpha - \beta)$  เป็นแกนอ้างอิงสเตเตอร์ และแกน  $(dr - qr)$  เป็นแกนอ้างอิงโรเตอร์ ที่มีมุมเมื่อเทียบกับแกนอ้างอิงสเตเตอร์เท่ากับ  $p\theta_m$  และมีความเร็วเท่ากับ  $p\omega_m$



รูปที่ 2.1 แผนภาพแสดงโครงสร้างขดลวดของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง



จากรูปที่ 2.1 แผนภาพแสดงโครงสร้างขดลวดของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง สามารถเขียนสมการแสดงการเปลี่ยนแปลงทางพลวัตของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางได้ดังนี้

สมการกระแสและแรงดันของขดลวดสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ ( $\alpha - \beta$ )

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

สมการสเตเตอร์ฟลักซ์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ ( $\alpha - \beta$ )

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

สมการกระแสและแรงดันของขดลวดโรเตอร์บนแกนอ้างอิงโรเตอร์ ( $dr - qr$ )

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

สมการโรเตอร์ฟลักซ์บนแกนอ้างอิงโรเตอร์ ( $dr - qr$ )

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

สมการแรงบิด

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

สมการตำแหน่งและความเร็วโรเตอร์

$$\theta_m = \int \omega_m dt \quad (2.6)$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## 2.2 ระบบประมาณที่ใช้สมการสเตเตอร์

จากแบบจำลองทางพลวัต จะเห็นได้ว่าจุดเด่นของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางคือ สามารถตรวจจับกระแสและแรงดันได้ทั้งฝั่งสเตเตอร์และฝั่งโรเตอร์ ทำให้มีเพียงค่าตำแหน่งโรเตอร์ ( $\theta_m$ ) เท่านั้นที่ไม่ทราบค่า (กรณีที่ใช้เซ็นเซอร์วัดตำแหน่ง) ระบบประมาณตำแหน่งจึงสามารถประมาณตำแหน่งของโรเตอร์ได้โดยอาศัยค่าผิดพลาดของกระแสสเตเตอร์หรือกระแสโรเตอร์ อย่างไรก็ตามการใช้ค่าผิดพลาดกระแสโรเตอร์ในการประมาณตำแหน่งและความเร็ว จะทำให้ระบบประมาณไม่คงทนต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้า [9] ซึ่งในทางปฏิบัติค่าพารามิเตอร์ต่างของเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดป้อนสองทางอาจมีการเปลี่ยนแปลงไปในแต่ละเงื่อนไข

การทำงาน ในงานวิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนอระบบประมาณโดยอาศัยค่าผิดพลาดกระแสสแตเตอร์ เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าวเนื่องจากการใช้สมการทางด้านสแตเตอร์จะมีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้ามากกว่าการใช้สมการทางด้านโรเตอร์

ตัวสังเกตลดอันดับแบบปรับตัวประกอบไปด้วย 1) สัญญาณอ้างอิงคือเวกเตอร์กระแสสแตเตอร์ ( $\vec{i}_s$ ) บนแกนอ้างอิงสแตเตอร์ที่สามารถตรวจวัดได้จากตัวตรวจวัด 2) สัญญาณปรับตัวคือเวกเตอร์กระแสสแตเตอร์ประมาณ ( $\hat{\vec{i}}_s$ ) ที่ได้จากการคำนวณในสมการที่ (2.8) โดยข้อดีของการอาศัยแบบจำลองค่าผิดพลาดกระแสสแตเตอร์คือไม่จำเป็นต้องคำนวณค่าสแตเตอร์ฟลักซ์ ซึ่งเป็นผลช่วยลดปัญหาเกิดการเลื่อนของสัญญาณไฟตรงได้ โดยสมการพื้นฐานที่เกี่ยวข้องมีดังนี้

### สมการสแตเตอร์

$$\frac{d\vec{i}_s}{dt} = \frac{1}{L_s} \left[ -R_s \vec{i}_s - M \frac{d}{dt} (e^{j p \theta_m} \cdot \vec{i}_r') + \vec{v}_s \right] \quad (2.7)$$

จากสมการสแตเตอร์ในสมการที่ (2.7) แสดงลักษณะทางพลวัตของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางทางฝั่งสแตเตอร์ ทำให้สามารถสร้างสมการประมาณกระแสสแตเตอร์โดยเพิ่มอัตราขยายป้อนกลับ ( $K$ ) เข้าไปจะได้ดังสมการที่ (2.8)

### สมการประมาณกระแสสแตเตอร์

$$\frac{d\hat{\vec{i}}_s}{dt} = \frac{1}{L_s} \left[ -R_s \hat{\vec{i}}_s - M \frac{d}{dt} (e^{j p \hat{\theta}_m} \cdot \vec{i}_r') + \vec{v}_s - K \vec{e}_i \right] \quad (2.8)$$

จากสมการที่ (2.7) - (2.8) จะได้สมการค่าผิดพลาดกระแสสแตเตอร์ดังนี้

### สมการค่าผิดพลาดกระแสสแตเตอร์

$$\frac{d}{dt} \vec{e}_i \triangleq \frac{d}{dt} (\hat{\vec{i}}_s - \vec{i}_s) = \frac{1}{L_s} \left[ -R_s \vec{e}_i - M \frac{d}{dt} (e^{j p \hat{\theta}_m} - e^{j p \theta_m}) \vec{i}_r' - K \vec{e}_i \right] \quad (2.9)$$

จากสมการค่าผิดพลาดกระแสสแตเตอร์ในสมการที่ (2.9) พบว่าเวกเตอร์ค่าผิดพลาดกระแสสแตเตอร์ ( $\vec{e}_i$ ) จะสามารถสะท้อนถึงค่าผิดพลาดตำแหน่งโรเตอร์ในเทอมของ  $(e^{j p \hat{\theta}_m} - e^{j p \theta_m})$  ได้

การประมาณตำแหน่งและความเร็วของโรเตอร์ในระบบประมาณนี้จะใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ ดังนั้นการนำเวกเตอร์ค่าผิดพลาดกระแสเตเตอร์ ( $\vec{e}_i$ ) ไปใช้นั้นไม่สามารถทำได้โดยตรงต้องทำให้เป็นปริมาณเชิงสเกลาร์เสียก่อน จึงกำหนดให้รีเกรสเซอร์เวกเตอร์คือเวกเตอร์กระแสโรเตอร์ประมาณ ( $Jp\hat{i}_r$ ) เมื่อมีเวกเตอร์ค่าผิดพลาดกระแสเตเตอร์ ( $\vec{e}_i$ ) เกิดขึ้นในระบบประมาณ ค่าผิดพลาดที่ได้จะถูกนำไปโปรเจกต์ลงบนเวกเตอร์รีเกรสเซอร์และคำนวณค่าผิดพลาดกระแสเตเตอร์เชิงสเกลาร์ ( $\varepsilon$ ) ได้ดังสมการที่ (2.10)

**สมการค่าผิดพลาดกระแสเตเตอร์**

$$\varepsilon = \left( Jp\hat{i}_r \right)^T \vec{e}_i \tag{2.10}$$

ค่าผิดพลาดกระแสเตเตอร์เชิงสเกลาร์ ( $\varepsilon$ ) ที่ได้จะสามารถนำไปคำนวณหาค่าความเร็วประมาณและตำแหน่งประมาณของโรเตอร์ได้ดังสมการที่ (2.11) และ (2.12)

**สมการประมาณความเร็ว**

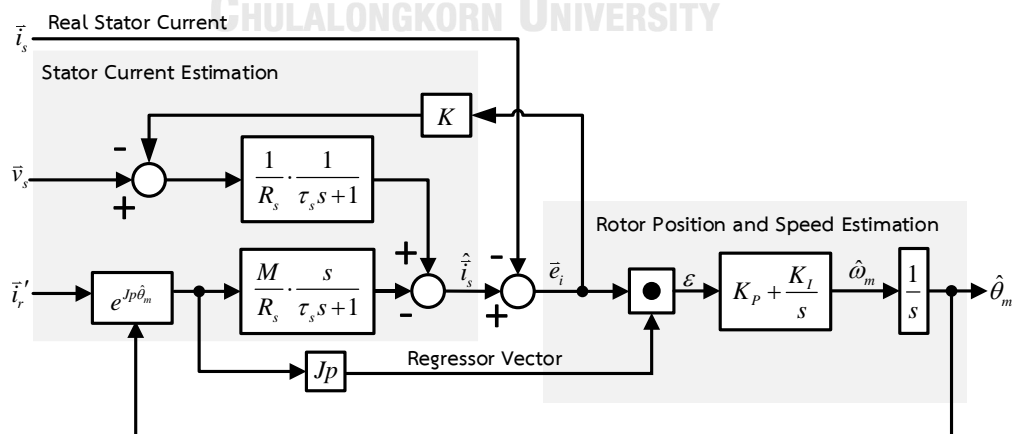
$$\hat{\omega}_m = \left( K_p + K_I \int dt \right) \cdot \left[ \left( Jp\hat{i}_r \right)^T \vec{e}_i \right] \tag{2.11}$$

โดยที่  $K_p, K_I > 0$

**สมการประมาณตำแหน่ง**

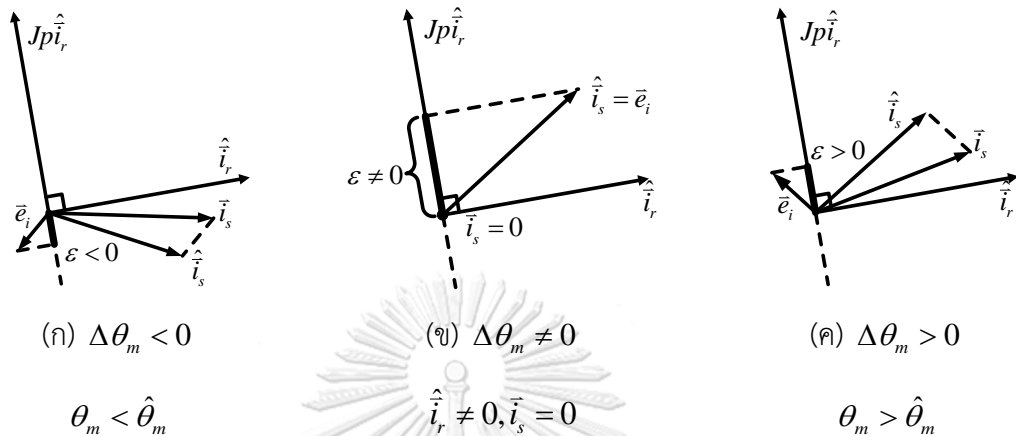
$$\hat{\theta}_m = \int \hat{\omega}_m dt \tag{2.12}$$

จากสมการที่ (2.8) - (2.12) จะสามารถเขียนเป็นแผนภาพระบบประมาณได้ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ระบบประมาณตำแหน่งและความเร็วโรเตอร์ด้วยตัวสังเกตลดอันดับแบบปรับตัวที่ใช้สมการสเตเตอร์

จากรูปที่ 2.2 แสดงแผนภาพระบบประมาณตำแหน่งและความเร็วโรเตอร์ด้วยตัวสังเกตลดอันดับแบบปรับตัว อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่าระบบประมาณมีการคำนวณที่เรียบง่ายไม่ซับซ้อน และไม่จำเป็นต้องคำนวณค่าสเตเตอร์ฟลักซ์ ทำให้สามารถลดปัญหาเรื่องการเลื่อนของสัญญาณไฟตรงได้



รูปที่ 2.3 กลไกการประมาณค่าตำแหน่งของโรเตอร์

จากรูปที่ 2.3 แสดงตัวอย่างกลไกการประมาณตำแหน่งของโรเตอร์ ยกตัวอย่างเช่นในกรณีรูปที่ 2.3 (ก) จะเป็นการประมาณตำแหน่งของโรเตอร์โดยการนำเวกเตอร์ค่าผิดพลาดกระแสสเตเตอร์ ( $\bar{e}_i$ ) ที่ได้จากการนำเวกเตอร์กระแสสเตเตอร์ประมาณ ( $\hat{i}_s$ ) ลบกับเวกเตอร์กระแสสเตเตอร์ ( $\bar{i}_s$ ) มาโปรเจกต์ลงบนเวกเตอร์รีเกรสเซอร์ ( $Jp\hat{i}_r$ ) จะได้ค่าผิดพลาดกระแสสเตเตอร์เชิงสเกลาร์ ( $\varepsilon$ ) มีค่าน้อยกว่าศูนย์ จากนั้นจึงนำค่าไปคำนวณผ่านอัตราขยายการปรับตัวพีโอ ( $K_p, K_I$ ) ทำให้สามารถคำนวณหาตำแหน่งและความเร็วของโรเตอร์ได้ ดังนั้นระบบประมาณจะปรับตัวโดยการปรับตำแหน่งของโรเตอร์ประมาณ เพื่อให้ค่ากระแสสเตเตอร์ประมาณ ( $\hat{i}_s$ ) มีค่าใกล้เคียงกับค่ากระแสสเตเตอร์ ( $\bar{i}_s$ ) เป็นผลทำให้ค่าผิดพลาดกระแสสเตเตอร์ ( $\bar{e}_i$ ) มีค่าลู่เข้าสู่ศูนย์ ทำให้ค่าผิดพลาดกระแสสเตเตอร์เชิงสเกลาร์ ( $\varepsilon$ ) มีค่าลู่เข้าสู่ศูนย์เช่นกัน ซึ่งจะกล่าวได้ว่าเป็นการทำให้  $\Delta\theta_m$  มีค่าลู่เข้าสู่ศูนย์ด้วยเช่นกัน อย่างไรก็ตามกลไกการประมาณตำแหน่งและความเร็วในกรณีอื่น ๆ ก็สามารถอธิบายได้ในทำนองเดียวกัน

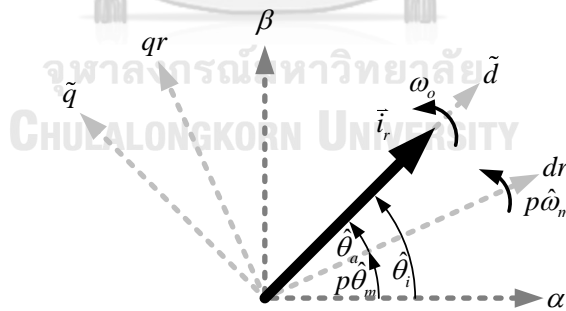
### บทที่ 3

#### การวิเคราะห์เสถียรภาพและแนวทางการออกแบบอัตราขยายของระบบประมาณ

ในบทนี้จะเป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบประมาณตำแหน่งและความเร็วของโรเตอร์ ด้วยตัวสังเกตลดอันดับแบบปรับตัว เพื่อหาเงื่อนไขการทำงานของระบบประมาณที่มีเสถียรภาพ โดยการพิสูจน์เสถียรภาพของระบบประมาณจะทำการประมาณค่าให้เป็นเชิงเส้น (Linearization) และนำทฤษฎีบทเรทท์-เฮอริวิตซ์ (Routh- Hurwitz Theorem) มาช่วยในการหาเงื่อนไขเสถียรภาพของระบบประมาณ เมื่อได้เงื่อนไขเสถียรภาพของระบบประมาณมาแล้ว ต่อไปจะกล่าวถึงแนวทางในการออกแบบอัตราขยายป้อนกลับ และอัตราการปรับตัวของระบบประมาณเพื่อให้ระบบประมาณนั้นสามารถทำงานได้ตามสมรรถนะที่ได้ออกแบบไว้

#### 3.1 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบประมาณตำแหน่งและความเร็วของโรเตอร์

การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบประมาณบนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ ( $\alpha - \beta$ ) จะมีความซับซ้อนมาก ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบประมาณ จะทำการวิเคราะห์บนแกนอ้างอิงกระแสโรเตอร์ ( $\tilde{d} - \tilde{q}$ ) เพื่อช่วยลดความซับซ้อนให้การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบประมาณ โดยความสัมพันธ์ของแกนอ้างอิงต่าง ๆ จะเป็นตามลักษณะดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ความสัมพันธ์ของแกนอ้างอิงต่าง ๆ

จากรูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ของมุมระหว่างแกนอ้างอิงต่าง ๆ โดยแกนอ้างอิงสเตเตอร์ ( $\alpha - \beta$ ) เป็นแกนอ้างอิงอยู่กับที่ และแกนอ้างอิงโรเตอร์ ( $d - q$ ) เป็นแกนอ้างอิงหมุนที่หมุนด้วยความเร็ว  $p\hat{\omega}_m$  และสุดท้ายแกนอ้างอิงกระแสโรเตอร์ ( $\tilde{d} - \tilde{q}$ ) เป็นแกนอ้างอิงหมุนที่หมุนด้วยความเร็วของความถี่ทางไฟฟ้า ( $\omega_o$ ) โดยที่มุมระหว่างแกนอ้างอิงต่าง ๆ จะมีความสัมพันธ์กันตามสมการที่ (3.1)

สมการแสดงความสัมพันธ์ของมุมระหว่างแกนอ้างอิงต่าง ๆ

$$\hat{\theta}_i = p\hat{\theta}_m + \hat{\theta}_a \quad (3.1)$$

มุม  $\hat{\theta}_i$  เป็นมุมระหว่างแกนอ้างอิงสเตเตอร์ ( $\alpha - \beta$ ) กับแกนอ้างอิงกระแสโรเตอร์ ( $\tilde{d} - \tilde{q}$ ) และมุม  $p\hat{\theta}_m$  เป็นมุมระหว่างแกนอ้างอิงสเตเตอร์ ( $\alpha - \beta$ ) กับแกนอ้างอิงโรเตอร์ ( $dr - qr$ ) และสุดท้ายมุม  $\hat{\theta}_a$  เป็นมุมระหว่างแกนอ้างอิงโรเตอร์ ( $dr - qr$ ) กับแกนอ้างอิงกระแสโรเตอร์ ( $\tilde{d} - \tilde{q}$ )

จากที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 2 สมการค่าผิดพลาดกระแสสมการที่ (2.9) จะสามารถเขียนสมการค่าผิดพลาดกระแสได้ใหม่ดังสมการที่ (3.2)

สมการค่าผิดพลาดกระแสสเตเตอร์(จากสมการที่(2.9))

$$\frac{d}{dt} \bar{e}_i = \frac{1}{L_s} \left\{ -R_s \bar{e}_i - M \frac{d}{dt} \left[ \left( e^{Jp\hat{\theta}_m} - e^{Jp\hat{\theta}_m} \right) \bar{i}'_r \right] - K \bar{e}_i \right\} \quad (3.2)$$

จากสมการค่าผิดพลาดกระแสสเตเตอร์ในสมการที่ (3.2) มาประมาณให้เป็นเชิงเส้นจะสามารถเขียนเป็นสมการใหม่ได้ดังสมการที่ (3.3)

$$\frac{d}{dt} \bar{e}_i = \frac{1}{L_s} \left\{ -R_s \bar{e}_i + M \frac{d}{dt} \left[ (p\Delta\theta_m) J e^{Jp\hat{\theta}_m} \bar{i}'_r \right] - K \bar{e}_i \right\} \quad (3.3)$$

กำหนดให้  $\Delta\theta_m = \theta_m - \hat{\theta}_m$

จากสมการค่าผิดพลาดกระแสสเตเตอร์ในสมการที่ (3.3) เมื่อเขียนใหม่ ให้อยู่บนโดเมนความถี่ได้ดังสมการที่ (3.4) และสามารถเขียนแผนภาพของระบบประมาณได้ดังรูปที่ 3.2

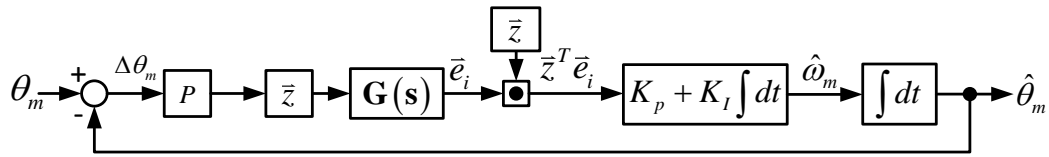
$$s\bar{e}_i = \frac{1}{L_s} \left\{ -R_s \bar{e}_i + Ms \left[ (p\Delta\theta_m) J e^{Jp\hat{\theta}_m} \bar{i}'_r \right] - K \bar{e}_i \right\}$$

$$\bar{e}_i = \underbrace{\frac{M}{L_s} \frac{s}{(s+a)}}_{\mathbf{G}(s)} (p\Delta\theta_m) \underbrace{J e^{Jp\hat{\theta}_m} \bar{i}'_r}_{\bar{z}} \quad (3.4)$$

$$\bar{z} = J e^{Jp\hat{\theta}_m} \bar{i}'_r$$

$$\bar{e}_i = \mathbf{G}(s) (p\Delta\theta_m) \bar{z}$$

กำหนดให้  $a = \frac{R_s + K}{L_s}$



รูปที่ 3.2 ระบบประมาณความเร็วโรเตอร์และตำแหน่งโรเตอร์  
ที่ประมาณให้เป็นเชิงเส้นบนแกนอ้างอิงสเตเตอร์

เพื่อลดความซับซ้อนในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ สามารถทำได้โดยการย้ายแกนอ้างอิงของระบบประมาณไปอยู่บนแกนอ้างอิงของกระแสโรเตอร์ ( $\tilde{d} - \tilde{q}$ ) ซึ่งสามารถเขียนค่าผิดพลาดกระแสสเตเตอร์ได้ใหม่ดังสมการที่ (3.5)

$$\bar{e}_i'' \triangleq e^{-J\hat{\theta}_i} \bar{e}_i = \underbrace{e^{-J\hat{\theta}_i} G(s) e^{J\hat{\theta}_i}}_{G''(s)} p \Delta\theta_m \underbrace{e^{-J\hat{\theta}_i} J e^{Jp\hat{\theta}_m}}_{\bar{z}''} \vec{i}_r' \quad (3.5)$$

หากพิจารณาในพจน์ของ

$$\begin{aligned} \underbrace{e^{-J\hat{\theta}_i} J e^{Jp\hat{\theta}_m}}_{\bar{z}''} \vec{i}_r' &= \underbrace{e^{-J\hat{\theta}_i} J e^{Jp\hat{\theta}_m} \|\vec{i}_r'\|}_{\bar{z}''} e^{Jp\hat{\theta}_a} \\ &= \underbrace{e^{-J\hat{\theta}_i} J \|\vec{i}_r'\|}_{\bar{z}''} e^{Jp\hat{\theta}_i} \end{aligned} \quad (3.6)$$

$$\bar{z}'' = \begin{bmatrix} 0 \\ \|\vec{i}_r'\| \end{bmatrix}$$

จากสมการที่ (3.5)-(3.6) สามารถเขียนสมการค่าผิดพลาดกระแสบนแกนอ้างอิงกระแสโรเตอร์ได้ดังสมการที่ (3.7)

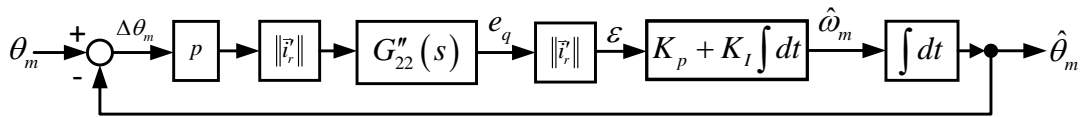
$$\bar{e}_i'' = \begin{bmatrix} e_d \\ e_q \end{bmatrix} = G''(s) p \Delta\theta_m \begin{bmatrix} 0 \\ \|\vec{i}_r'\| \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$$\text{โดยที่ } G''(s) = \begin{bmatrix} G''_{11}(s) & G''_{12}(s) \\ G''_{21}(s) & G''_{22}(s) \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

จากสมการที่ (3.7) และ (3.8) จะพบว่าการประมาณค่าตำแหน่งและความเร็วของโรเตอร์สามารถเลือกพิจารณาค่าผิดพลาดกระแสสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงกระแสโรเตอร์เพียงแกน  $\tilde{q}$  หรือก็คือค่า  $e_q$  เท่านั้น ดังแสดงในสมการที่ (3.9) และสามารถเขียนวงรอบป้อนกลับของระบบประมาณจากรูปที่ 3.2 ได้ใหม่ดังแสดงในรูปที่ 3.3

$$e_q = p\Delta\theta_m \|\vec{i}'_r\| G''_{22}(s) \quad (3.9)$$

$$\text{โดยที่ } G''_{22}(s) \cong \frac{M s(s+a) + \omega_o^2}{L_s (s+a)^2 + \omega_o^2} \quad (3.10)$$



รูปที่ 3.3 ระบบประมาณความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์ที่ประมาณ  
ให้เป็นเชิงเส้นบนแกนอ้างอิงกระแสโรเตอร์

จากรูปที่ 3.3 จะเห็นได้ว่าเราสามารถวิเคราะห์เสถียรภาพได้ง่ายขึ้นโดยใช้ทฤษฎีบท  
เรอท์-เฮอริวิตซ์ (Routh- Hurwitz Theorem) ทำให้ได้เงื่อนไขเสถียรภาพดังแสดงในสมการที่ (3.11)

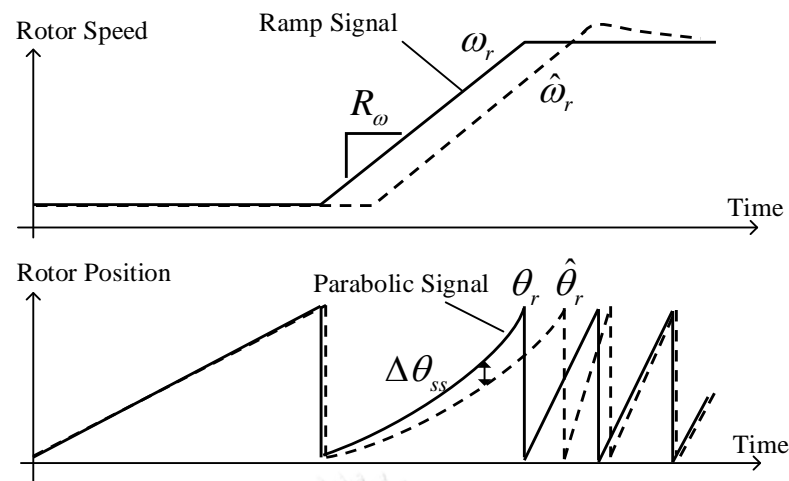
$$\frac{R_s + K}{L_s} > \frac{K_I}{K_p} > 0 \quad (3.11)$$

โดยรายละเอียดเพิ่มเติมเกี่ยวกับการพิสูจน์เสถียรภาพของระบบประมาณสามารถอ่าน  
เพิ่มเติมได้ที่ภาคผนวก ก.

### 3.2 การออกแบบสมรรถนะสำหรับระบบประมาณตำแหน่งและความเร็วโรเตอร์

ในกรณีที่เครื่องจักรกลไฟฟ้าแรงหรือลดความเร็ว ความเร็วของเครื่องจักรกลไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้น  
หรือลดลงเป็นเชิงเส้น โดยมีความชันเท่ากับ ( $R_o$ ) ส่วนตำแหน่งของโรเตอร์จะเพิ่มขึ้นหรือลดลงเป็น  
ฟังก์ชันพาราโบลา (Parabolic) แต่วาระบบประมาณตำแหน่งและความเร็วโรเตอร์ในช่วงเร่งหรือลด  
ความเร็ว ตำแหน่งประมาณโรเตอร์ ( $\hat{\theta}_r$ ) จะไม่สามารถเข้าสู่ตำแหน่งจริง ( $\theta_r$ ) ได้และมีค่าความ  
ผิดพลาดคงที่ค่าหนึ่งเมื่อเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว ( $\Delta\theta_{ss}$ ) ดังรูปที่ 3.4





รูปที่ 3.4 ลักษณะสัญญาณความเร็วและตำแหน่งของโรเตอร์ขณะเร่งความเร็ว

ดังนั้นในการออกแบบค่าอัตราขยายการปรับตัวจะพิจารณาสมรรถนะในการติดตามจะเลือกพิจารณาผลตอบสนองของระบบประมาณค่าตำแหน่งต่อสัญญาณพาราโบลิก (Parabolic response) จากรูปที่ 3.3 แผนภาพแสดงระบบประมาณค่าตำแหน่งและความเร็วบนแกนอ้างอิงกระแสโรเตอร์ เมื่อใช้ทฤษฎีบทค่าสุดท้าย (Final Value theorem) จะสามารถคำนวณหาค่าผิดพลาดของตำแหน่งโรเตอร์ประมาณในช่วงเร่งหรือลดความเร็ว ( $\Delta\theta_{ss}$ ) ได้ดังสมการที่ (3.12)

$$\begin{aligned}\Delta\theta_{ss} &= \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \frac{1}{1+G_\theta(s)} \cdot \frac{R_\omega}{s^3} \\ &= \frac{R_\omega L_s (a^2 + \omega_o^2)}{p M \omega_o^2 K_I \|\vec{i}_r\|^2}\end{aligned}\quad (3.12)$$

$$\text{โดยที่ } G_\theta(s) = p \|\vec{i}_r\|^2 G''_{22}(s) \cdot (K_p + K_I/s) \cdot (1/s) \quad (3.13)$$

จากสมการที่ (3.12)-(3.13) จะได้เงื่อนไขการออกแบบดังนี้

$$K_I = \frac{R_\omega L_s (a^2 + \omega_o^2)}{p \|\vec{i}_r\|^2 \omega_o^2 M \Delta\theta_{ss}} \quad (3.14)$$

โดยที่  $R_\omega = p \frac{\tau_{rated}}{J}$  คือ อัตราเร่งที่แรงบิดพิกัดของมอเตอร์

$\tau_{rated}$  คือ แรงบิดพิกัดของมอเตอร์

$J$  คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของระบบกล

จากสมการที่ (3.14) จะเห็นได้ว่าการออกแบบสมรรถนะของระบบประมาณค่าตำแหน่งและความเร็วโรเตอร์สามารถทำได้โดยการกำหนดค่าผิดพลาดตำแหน่งโรเตอร์ขณะเร่งหรือลดความเร็ว ( $\Delta\theta_{ss}$ ) ได้

### 3.3 แนวทางการออกแบบอัตราขยายของระบบประมาณ

จากเงื่อนไขเสถียรภาพที่ได้จากการวิเคราะห์เสถียรภาพในสมการที่ (3.11) และเงื่อนไขการออกแบบสมรรถนะของระบบประมาณในสมการที่ (3.14) จะพบว่ามีค่าที่เชื่อมโยงถึงกันเช่นค่า  $K_I$ ,  $M$  และ  $L_s$  เป็นต้น จึงต้องทำการกำหนดค่าใดค่าหนึ่งขึ้นมาก่อนจึงจะสามารถออกแบบค่าอัตราขยายอื่น ๆ ต่อไปได้ ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะทำการออกแบบอัตราขยายป้อนกลับ ( $K$ ) ก่อน จากนั้นจึงออกแบบค่าอัตราขยายป้อนกลับแบบปรับตัวของตัวควบคุมพีไอต่อไปตามลำดับ

#### 3.3.1 แนวทางการออกแบบอัตราขยายของระบบประมาณ

ในทางปฏิบัติค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางอาจมีค่าการเปลี่ยนแปลงไป โดยค่าความต้านทานของขดลวดมีค่าเปลี่ยนแปลงไป ( $\gamma_R$ ) ได้ถึงร้อยละ 40 จากค่าตั้งต้น ( $R_{s0}$ ) นอกจากนี้ค่าความเหนี่ยวนำขดลวดสเตเตอร์เปลี่ยนแปลงไป ( $\gamma_L$ ) ได้มากถึงร้อยละ 30 จากค่าตั้งต้น ( $L_{s0}$ ) สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (3.15)

$$\begin{aligned} R_s &\triangleq (1 + \gamma_R) R_{s0} \\ L_s &\triangleq (1 + \gamma_L) L_{s0} \end{aligned} \quad (3.15)$$

โดยที่  $|\gamma_R| \leq 0.4$  และ  $|\gamma_L| \leq 0.3$

ดังนั้นเพื่อให้ระบบประมาณมีเสถียรภาพขณะปฏิบัติงาน การออกแบบอัตราขยายป้อนกลับจึงจำเป็นต้องคำนึงถึงผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ด้วย โดยในเบื้องต้นกำหนดให้ค่าอัตราขยายป้อนกลับ ( $K$ ) มีค่าชดเชยในส่วนของผลกระทบการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าในกรณีที่แย่ที่สุด จากเงื่อนไขเสถียรภาพในสมการที่ (3.11) สามารถเขียนได้ใหม่ดังสมการที่ (3.16)

$$\frac{K + R_{s0} (1 - |\gamma_R|_{\max})}{L_{s0} (1 + |\gamma_L|_{\max})} > \frac{K_I}{K_P} > 0 \quad (3.16)$$

เมื่อกำหนดให้

$$\frac{R_{s0}}{L_{s0}} > \frac{K_I}{K_P} > 0 \quad (3.17)$$

จากสมการที่ (3.16)-(3.17) จะได้ว่า

$$\frac{R_{s0}}{L_{s0}} = \frac{K + R_{s0}(1 - |\gamma_R|_{\max})}{L_{s0}(1 + |\gamma_L|_{\max})} \quad (3.18)$$

$$K = [R_{s0}(1 + |\gamma_L|_{\max})] - [R_{s0}(1 - |\gamma_R|_{\max})] \quad (3.19)$$

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณหาค่าอัตราขยายป้อนกลับ

พารามิเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้า	ค่าที่ใช้	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด
ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด ( $L_s$ ) เปลี่ยนแปลงไปร้อยละ 30	338 mH (0.260x1.3)	0.260 mH	0.1430 mH
ค่าความต้านทานของขดลวด ( $R_s$ ) เปลี่ยนแปลงไปร้อยละ 40	1.0386 Ohm (1.731x0.6)	-	-

จากค่าในตารางที่ 3.1 และสมการที่ (3.19) จะได้ค่าอัตราขยายป้อนกลับดังนี้

$$K \approx 1.3 \quad (3.20)$$

อย่างไรก็ตามค่าอัตราป้อนกลับ ( $K$ ) สามารถออกแบบให้มีส่วนเผื่อ (Margin) ไว้ได้โดยในวิทยานิพนธ์นี้จะเลือกใช้ค่าอัตราขยายป้อนกลับ ( $K$ ) เป็น 25 เท่าของที่คำนวณได้จากสมการที่ (3.20) ดังนั้นค่าที่เลือกใช้คือ

$$K = 33 \quad (3.21)$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

### 3.3.2 การออกแบบค่าอัตราขยายป้อนกลับแบบปรับตัวสำหรับตัวควบคุมพีไอ

จากอัตราขยายป้อนกลับในสมการที่ (3.14), (3.21) จะสามารถคำนวณหาอัตราขยายป้อนกลับแบบปรับตัวของตัวควบคุมแบบพีไอได้ โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางที่เงื่อนไขการทำงานดัง

ตารางที่ 3.2 ค่าอัตราขยายป้อนกลับแบบปรับตัวที่คำนวณได้จะเป็นไปตามสมการที่ (3.22)

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์และพิกัดของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง

พารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณ	ค่าที่ใช้งาน
ความถี่ทางไฟฟ้า ( $\omega_o$ )	314.16 rad/s
ความต้านทาน ( $R_s$ )	1.731 Ohm
ความเหนี่ยวนำขดลวด ( $L_s$ )	181.8 mH
ความเหนี่ยวนำร่วม ( $M$ )	179.8 mH
จำนวนคู่ขั้วแม่เหล็ก ( $p$ )	2
อัตราเร่งที่แรงบิดพิกัดของมอเตอร์ ( $R_\omega$ )	4789.5 rad/s <sup>2</sup>
ค่าผิดพลาดตำแหน่งโรเตอร์ขณะเร่งหรือลดความเร็ว ( $\Delta\theta_{ss}$ )	< 5 Degree
ขนาดกระแสโรเตอร์ ( $\ \vec{i}_r'\ $ )	3 A
อัตราขยายป้อนกลับ ( $K$ )	33

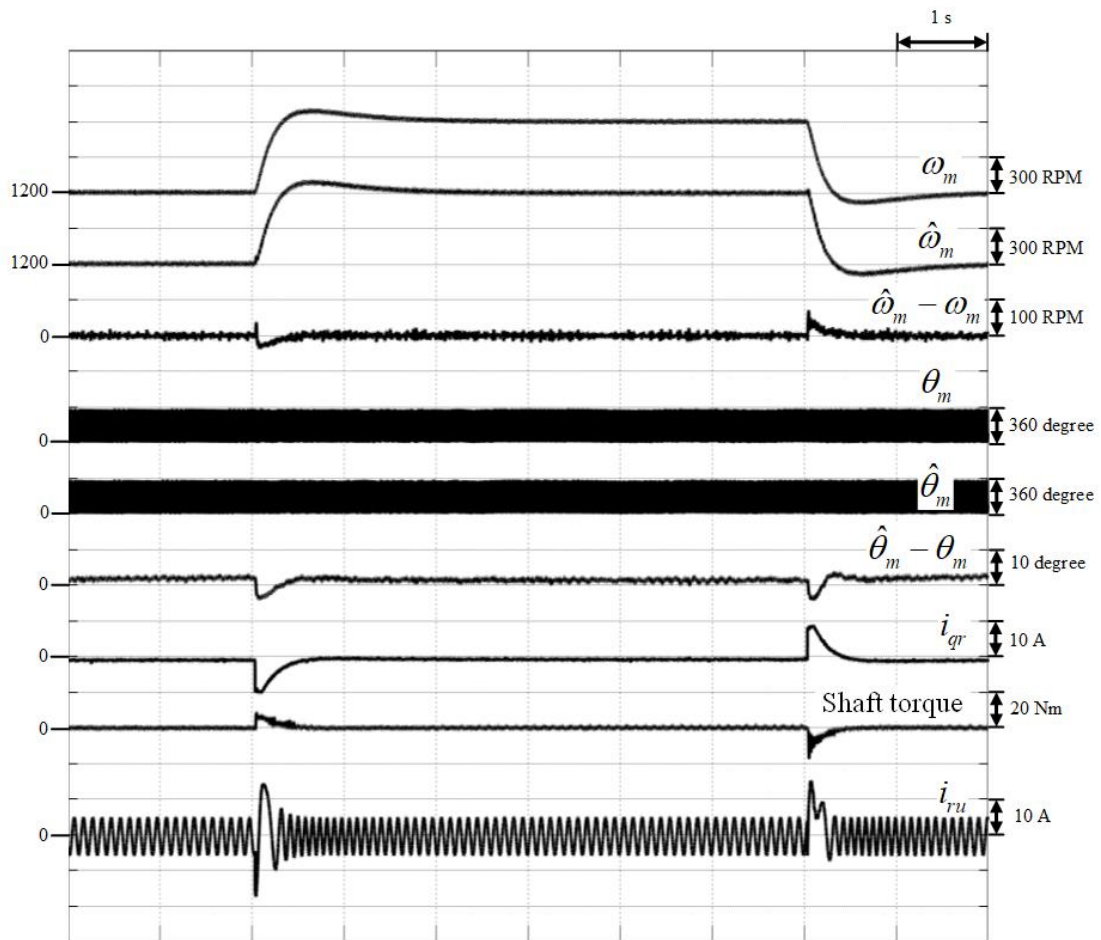
$$K_f \approx 5000 \quad (3.22)$$

เมื่อนำค่าในสมการที่ (3.22) และค่าพารามิเตอร์จากตารางที่ 3.1 แทนกลับไปในสมการที่ (3.16) จะได้เงื่อนไขดังนี้

$$K_p > 49.94 \quad (3.23)$$

ดังนั้นเลือกใช้ค่าอัตราขยาย ( $K_p$ ) ดังสมการที่ (3.24)

$$K_p = 50 \quad (3.24)$$

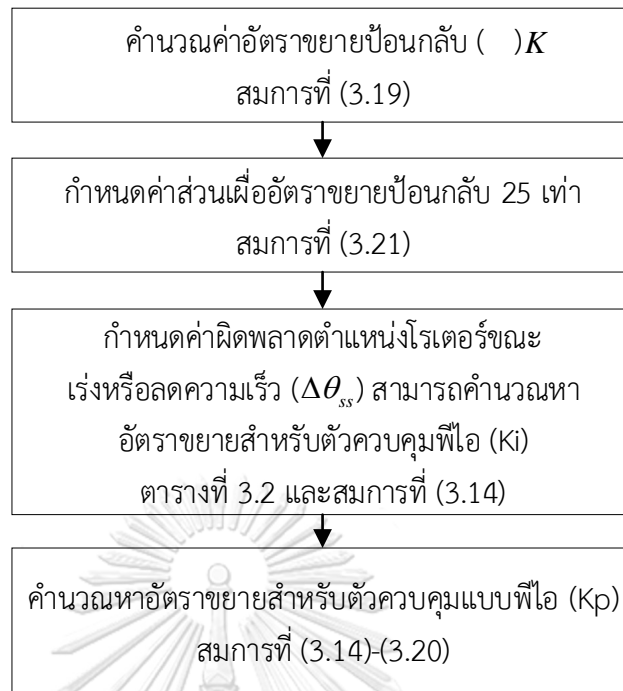


รูปที่ 3.5 ผลการจำลองขณะเร่งความเร็วจาก 1200 rpm ไปที่ความเร็ว 1800 rpm

$$\text{เมื่อ } i_{rd} = 3A, K = 33, K_p = 50, K_I = 5000$$

จากผลการจำลองการควบคุมแบบเวกเตอร์โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ดัง

ตารางที่ 3.2 รูปที่ 3.5 จะเห็นได้ว่าในขณะที่สั่งให้เครื่องจักรกลไฟฟ้าเร่งขึ้นจากความเร็ว 1200 rpm ไปที่ความเร็ว 1800 rpm แบบขั้นบันได ค่าผิดพลาดตำแหน่งของโรเตอร์ ( $\hat{\theta}_m - \theta_m$ ) จะลู่เข้าสู่ค่าคงที่ค่าหนึ่งซึ่งตรงกับค่าที่คำนวณได้จากสมการที่ (3.12) หรือประมาณ 4 องศา ซึ่งยืนยันให้เห็นถึงความถูกต้องของทฤษฎี จากที่ได้กล่าวมาสามารถสรุปขั้นตอนในการออกแบบอัตราขยายของระบบประมาณตำแหน่งและความเร็วโรเตอร์ได้ดังรูปที่ 3.6



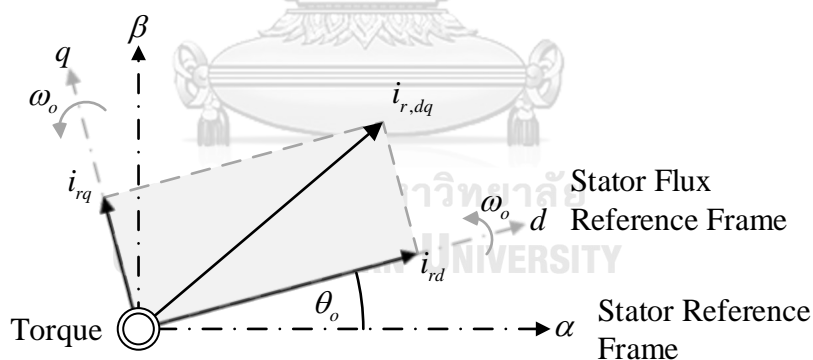
รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการออกแบบอัตราขยายของระบบประมาณตำแหน่งและความเร็วโรเตอร์

## บทที่ 4

### การควบคุมเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วม สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง

เพื่อการควบคุมแรงบิดและฟลักซ์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางได้อย่างอิสระต่อกัน จากบทที่ 2 ที่ได้กล่าวถึงแบบจำลองทางพลวัตของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง แบบจำลองนี้เมื่อพิจารณาบนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์สามารถนำมาพัฒนาใช้ร่วมกับการควบคุมแบบเวกเตอร์เพื่อแยกการเชื่อมร่วมได้ นอกจากนี้ยังพิจารณาแรงดันผิดพลาดที่เกิดขึ้น และสุดท้ายจะเป็นการแสดงผลของระบบควบคุมโดยผลการจำลองและผลการทดลองการทำงานในสภาวะการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและมอเตอร์

#### 4.1 การควบคุมแบบเวกเตอร์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์



รูปที่ 4.1 การควบคุมแบบเวกเตอร์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์

การควบคุมแบบเวกเตอร์อาศัยแบบจำลองทางพลวัตของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำบนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้

สมการสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์ ( $d-q$ )

$$\frac{d}{dt} i_o = \frac{R_s}{L_s} i_{rd} - \frac{R_s}{L_s} i_o + \frac{v_{sd}}{M} \quad (4.1)$$

$$\frac{d}{dt} \theta_o = \omega_o = \frac{R_s}{L_s} \frac{i_{rq}}{i_o} + \frac{v_{sq}}{M i_o} \quad (4.2)$$

สมการโรเตอร์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์ ( $d-q$ )

$$v_{rd} = R_r i_{rd} + \sigma L_r \frac{d}{dt} i_{rd} - \sigma \omega_s L_r i_{rq} + \frac{M}{L_s} (v_{sd} - R_s i_{sd}) \quad (4.3)$$

$$v_{rq} = R_r i_{rq} + \sigma L_r \frac{d}{dt} i_{rq} + \sigma \omega_s L_r i_{rd} + \frac{M}{L_s} (v_{sq} - R_s i_{sq}) - \frac{M^2}{L_s} p \omega_m i_o \quad (4.4)$$

สมการแรงบิด

$$\tau_e = -p \frac{M^2}{L_s} i_o i_{rq} \quad (4.5)$$

$$\bar{\lambda}_s \triangleq M \bar{i}_o \quad (4.6)$$

## 4.2 การควบคุมเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วม

การควบคุมเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วมของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง จะเป็นการควบคุมกระแสโรบนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์ ( $d-q$ ) ซึ่งประกอบไปด้วยการควบคุมกระแสโรเตอร์ในแนวแกน  $d$  หรือ  $i_{rd}$  จะทำหน้าที่สร้างสเตเตอร์ฟลักซ์ โดยปกติแล้วสเตเตอร์ฟลักซ์จะถูกกำหนดโดยแรงดันสเตเตอร์ในสถานะเชื่อมต่อกับโครงข่ายไฟฟ้า สำหรับกระแสโรเตอร์ในแนวแกน  $q$  หรือ  $i_{rq}$  จะทำหน้าที่สร้างแรงบิดของเครื่องจักรกลไฟฟ้า

หากพิจารณาสมการโรเตอร์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์ สมการที่ (4.3) - (4.4) พบว่ามีเทอมของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเชื่อมร่วมระหว่างปริมาณในแกน  $d$  และในแกน  $q$  ทำให้การควบคุมกระแสโรเตอร์ในแต่ละแกนผ่านแรงดันโรเตอร์ไม่เป็นอิสระต่อกัน เพื่อให้สามารถควบคุมกระแสในแต่ละแกนได้อย่างอิสระต่อกัน จึงทำการชดเชยแรงดันเชื่อมร่วมระหว่างแกน (Decoupling Voltage Term) ได้ตั้งสมการที่ (4.7) - (4.8)

$$v_{rd}^* = \underbrace{R_r i_{rd}^*}_{\text{Feed Forward Voltage Term}} \underbrace{-\sigma \omega_s L_r i_{rq} + \frac{M}{L_s} (v_{sd} - R_s i_{sd})}_{\text{Decoupling Voltage Term}} \quad (4.7)$$

$$v_{rq}^* = \underbrace{R_r i_{rq}^*}_{\text{Feed Forward Voltage Term}} \underbrace{+\sigma \omega_s L_r i_{rd} + \frac{M}{L_s} (v_{sq} - R_s i_{sq}) - \frac{M^2}{L_s} p \omega_m i_o}_{\text{Decoupling Voltage Term}} \quad (4.8)$$

เมื่อป้อนแรงดันโรเตอร์คำสั่งตั้งสมการ (4.7) - (4.8) จะพบว่าผลตอบสนองทางพลวัตของกระแสโรเตอร์บนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์จะเป็นไปตามสมการ (4.9)



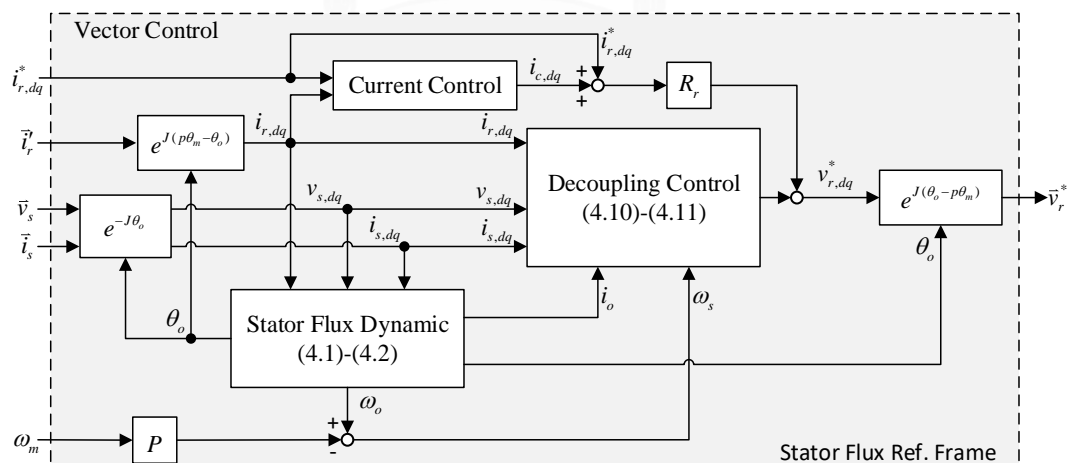
$$\left. \begin{aligned} R_r i_{rd}^* &= R_r i_{rd} + \sigma L_r \frac{d}{dt} i_{rd} \\ R_r i_{rq}^* &= R_r i_{rq} + \sigma L_r \frac{d}{dt} i_{rq} \end{aligned} \right\} \quad (4.9)$$

ผลตอบสนองทางพลวัตของกระแสโรเตอร์จะมีลักษณะเป็นผลตอบสนองอันดับที่หนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลาเท่ากับ  $R_r / \sigma L_r$  ผลดังกล่าวทำให้สามารถควบคุมขนาดฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์และแรงบิดของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางได้อย่างอิสระต่อกัน โดยควบคุมผ่านกระแสโรเตอร์คำสั่งบนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์ ( $i_{rd}^*, i_{rq}^*$ ) ดังนั้นการควบคุมกระแสโรเตอร์จะใช้  $R_r i_{rd}^*, R_r i_{rq}^*$  เป็นเทอมป้อนไปข้างหน้า (Feed Forward Voltage Term)

อย่างไรก็ตามเพื่อลดผลกระทบจากความคลาดเคลื่อนของกระแสเนื่องจากความไม่เป็นอุดมคติของอุปกรณ์ และค่าผิดพลาดของการเปลี่ยนแปลงค่าตัวพารามิเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางจึงเพิ่มวงรอบป้อนกลับของการควบคุมกระแส ( $i_{cd}, i_{cq}$ ) ดังแสดงในสมการ (4.10) - (4.11) และสามารถเขียนโครงสร้างของตัวควบคุมเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วมได้ดังรูปที่ 4.2

$$v_{rd}^* = \underbrace{R_r i_{rd}^*}_{\text{Feed Forward Voltage Term}} \underbrace{-\sigma \omega_s L_r i_{rq} + \frac{M}{L_s} (v_{sd} - R_s i_{sd})}_{\text{Decoupling Voltage Term}} + \underbrace{R_r i_{cd}}_{\text{Voltage Term from Current-Control Loop}} \quad (4.10)$$

$$v_{rq}^* = \underbrace{R_r i_{rq}^*}_{\text{Feed Forward Voltage Term}} \underbrace{+\sigma \omega_s L_r i_{rd} + \frac{M}{L_s} (v_{sq} - R_s i_{sq}) - \frac{M^2}{L_s} p \omega_m i_o}_{\text{Decoupling Voltage Term}} + \underbrace{R_r i_{cq}}_{\text{Voltage Term from Current-Control Loop}} \quad (4.11)$$



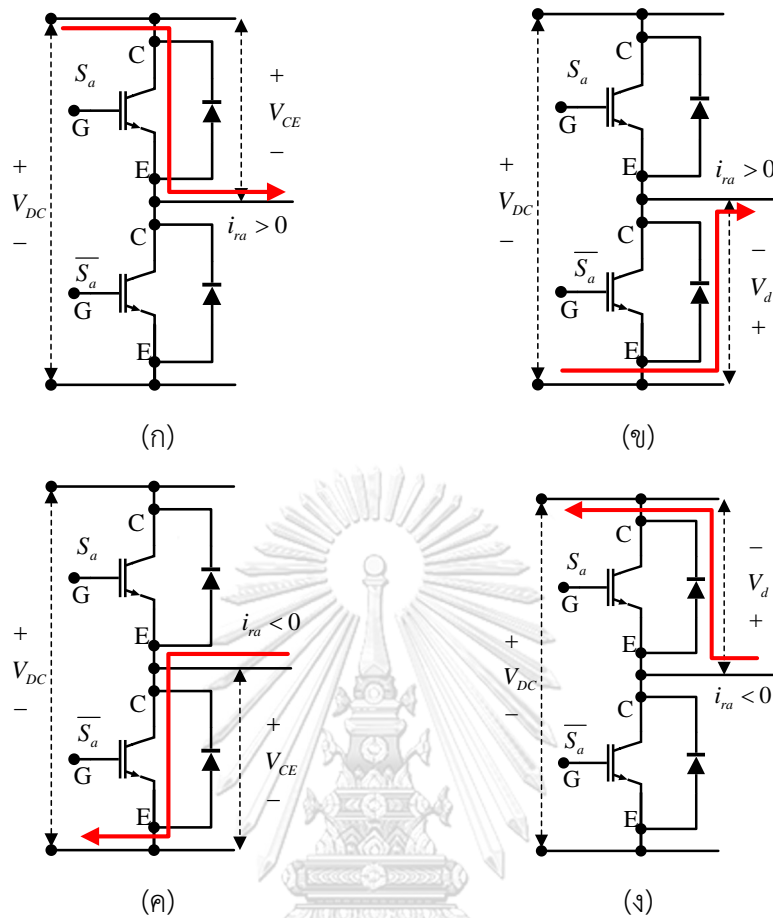
รูปที่ 4.2 โครงสร้างตัวควบคุมเวกเตอร์แบบแยกการเชื่อมร่วมบนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ฟลักซ์

### 4.3 การชดเชยผลกระทบแรงดันผิดพลาดเนื่องจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง

แม้ว่าจะมีวงรอบควบคุมป้อนกลับกระแสเพื่อชดเชยความไม่เป็นอุดมคติของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังแล้ว แต่ในทางปฏิบัตินั้นมีปัจจัยหลายประการที่สามารถทำให้เกิดแรงดันผิดพลาดได้ ไม่ว่าจะเป็นการควบคุมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีความจำเป็นต้องคำนึงถึงความปลอดภัยในการใช้ทำให้ต้องประวิงเวลาสัญญาณขับสวิตช์ และผลกระทบจากแรงดันที่ตกคร่อมอุปกรณ์สวิตช์กำลัง เป็นต้น โดยแรงดันผิดพลาดที่เกิดขึ้นจะส่งผลกระทบโดยตรงต่อระบบควบคุม ดังนั้นการชดเชยผลกระทบดังกล่าวที่อาจเกิดขึ้นมีความสำคัญอย่างมากต่อระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซ็นเซอร์ตรวจวัดตำแหน่ง

#### 4.3.1 การชดเชยแรงดันที่ตกคร่อมสวิตช์กำลัง

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าชนิดสามเฟส แบบสองระดับมีสวิตช์กำลังชนิด IGBT หากพิจารณาแรงดันที่ตกคร่อมสวิตช์กำลัง (IGBT) นั้นมีสองกรณีคือ 1) แรงดันตกคร่อมสวิตช์ขณะที่ IGBT นำกระแสจะหมายถึงแรงดันระหว่างขั้วคอลเล็กเตอร์ (Collector; C) และขั้วอีมิเตอร์ (Emitter; E) หรือ  $V_{CE}$  และ 2) แรงดันตกคร่อมไดโอดที่แฝงอยู่ในสวิตช์กำลังขณะที่ไดโอดนั้นขณะนำกระแส หรือ  $V_D$  ดังแสดงในรูปที่ 4.3 โดยวิทยานิพนธ์นี้จะอ้างอิงค่า  $V_{CE}$  และ  $V_D$  ตามข้อมูลจำเพาะของชนิดสวิตช์กำลังที่ใช้ คือ  $V_{CE} = 3.2 \text{ Volt}$ ,  $V_D = 0.7 \text{ Volt}$



รูปที่ 4.3 แรงดันตกคร่อมสวิตช์กำลัง

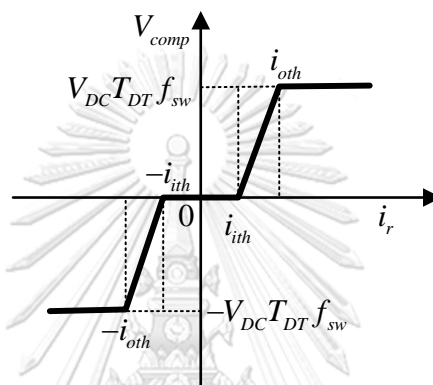
แรงดันที่วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าใช้ในการสร้างแรงดันขาออกโดยปกติแล้วจะใช้แรงดันที่บัสไฟตรง หรือ  $V_{DC}$  แต่ผลจากแรงดันตกคร่อมสวิตช์กำลังจะทำให้เกิดแรงดันผิดพลาดขึ้น จากรูปที่ 4.3 พบว่าแรงดันที่ผิดพลาดไปนั้นเกิดจากแรงดันที่ตกคร่อมสวิตช์กำลัง ( $V_{CE}$ ,  $V_D$ ) ซึ่งจะไม่เท่ากัน โดยขึ้นกับสถานะการสวิตช์ของสวิตช์กำลัง ยกตัวอย่างเช่นในกรณีรูปที่ 4.3 (ก) สวิตช์กำลังตัวบนนำกระแส จะมีแรงดันตกคร่อมสวิตช์กำลังเท่ากับ  $V_{CE}$  ดังนั้นแรงดันบัสไฟตรงที่วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าใช้จะมีค่าผิดพลาดไป  $V_{CE}$  เป็นต้น ในกรณีอื่น ๆ ก็สามารถอธิบายได้ในทำนองเดียวกัน ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการแรงดันชดเชยแรงดันตกคร่อมสวิตช์กำลังได้ดังสมการ (4.12)

$$V_{comp} = \text{sign}(i_{ra}) \cdot (-V_{CE} + V_D) \quad (4.12)$$

โดย 
$$\text{sign}(i_{ra}) = \begin{cases} 1, & i_{ra} > 0 \\ -1, & i_{ra} < 0 \end{cases}$$

#### 4.3.2 การชดเชยแรงดันจากการประวิงเวลาการสวิตช์

จากรูปที่ 4.3 หากสั่งให้สวิตช์กำลังทั้งสองทำงาน (Switch on) พร้อมกันจะทำให้เกิดอันตรายจากการลัดวงจรขึ้นและทำให้อุปกรณ์เสียหายได้ ดังนั้นในทางปฏิบัติการประวิงเวลาการสวิตช์ของสวิตช์กำลังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างมาก อย่างไรก็ตามการประวิงเวลาการสวิตช์จะทำให้เกิดแรงดันผิดพลาดซึ่งจะส่งต่อระบบควบคุม ดังนั้นการชดเชยแรงดันผิดพลาดจากการประวิงเวลาการสวิตช์สามารถทำได้หลายวิธี โดยในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้การชดเชยแรงดันแบบเป็นเชิงเส้นโดยนำงานวิจัยที่ [12] มาประยุกต์ใช้



รูปที่ 4.4 แรงดันชดเชยแบบเชิงเส้น

ลักษณะการทำงานของตัวชดเชยแรงดันแบบเชิงเส้นที่ใช้สามารถแสดงดังรูปที่ 4.4 โดยการทำงานของตัวชดเชยนั้นสามารถตั้งค่ากระแสทำงานสองจุดคือ 1)  $i_{ith}$  คือค่ากระแสที่ตัวชดเชยหยุดการทำงานและ/หรือค่ากระแสเริ่มการชดเชยแรงดันแบบเป็นเชิงเส้น และ 2)  $i_{oth}$  คือค่ากระแสที่ตัวชดเชยหยุดชดเชยแรงดันแบบเป็นเชิงเส้นและ/หรือค่ากระแสเริ่มต้นการชดเชยแรงดันแบบคงที่ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก แรงดันบัสไฟตรง ( $V_{DC}$ ), ค่าเวลประวิง ( $T_{DT}$ ), ค่าความถี่การสวิตช์ ( $f_{sw}$ ) โดยที่แรงดันชดเชย หรือ  $V_{comp}$  นั้นสามารถหาได้ดังสมการ (4.13) โดยการตั้งค่าตัวชดเชยนั้นสามารถทำได้โดยการปรับตั้งค่า

$$V_{comp} = \begin{cases} V_{DC} \cdot T_{DT} \cdot f_{sw} & , i_{oth} < i_r \\ V_{DC} \cdot T_{DT} \cdot f_{sw} \cdot \frac{i_r}{i_{ith}} & , i_{th} < i_r < i_{oth} \\ 0 & , -i_{ith} < i_r < i_{ith} \\ -V_{DC} \cdot T_{DT} \cdot f_{sw} \cdot \frac{i_r}{i_{ith}} & , -i_{oth} < i_r < -i_{ith} \\ -V_{DC} \cdot T_{DT} \cdot f_{sw} & , i_r < -i_{oth} \end{cases} \quad (4.13)$$

ขนาดของแรงดันที่ชดเชยจะสอดคล้องกับทิศทางของกระแสโรเตอร์ที่พิจารณา กล่าวคือ ขนาดแรงดันที่ชดเชยจะมีค่าเป็นบวกเมื่อกระแสโรเตอร์ในแต่ละเฟสมีค่ามากกว่าศูนย์ และเช่นเดียวกันขนาดแรงดันที่ชดเชยมีค่าเป็นลบเมื่อกระแสโรเตอร์ในแต่ละเฟสมีค่าน้อยกว่าศูนย์นั่นเอง



## บทที่ 5

### การวิเคราะห์ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของเครื่องจักรกลทางไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางต่อระบบประมาณตำแหน่งและความเร็วโรเตอร์

ในบทนี้จะเป็นการวิเคราะห์ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางในสถานะอยู่ตัว เนื่องจากในทางปฏิบัติค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าอาจเปลี่ยนไปตามเงื่อนไขการทำงานและ/หรือตามสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ได้เช่น อุณหภูมิขณะปฏิบัติงาน ฯลฯ เป็นต้น ด้วยสาเหตุนี้เองจึงทำให้เกิดค่าความผิดพลาดของพารามิเตอร์ขึ้นและอาจจะส่งต่อระบบประมาณได้ โดยผลกระทบของพารามิเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดป้อนสองทางที่นำมาวิเคราะห์ประกอบไปด้วย 1) ค่าความต้านทานขดลวดสเตเตอร์ ( $R_s$ ) 2) ค่าความเหนี่ยวนำร่วม ( $M$ ) นอกจากนี้ยังเสนอแนวทางในการลดผลกระทบที่เกิดขึ้นด้วย

#### 5.1 การวิเคราะห์ผลกระทบของค่าพารามิเตอร์ของระบบประมาณ

ในการวิเคราะห์ผลกระทบของค่าพารามิเตอร์ที่เกิดขึ้น จะกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางที่เปลี่ยนแปลงไปมีค่าดังนี้  $\hat{R}_s = R_{s0} + \Delta R$ ,  $\hat{M} = M_0 + \Delta M$ ,  $\hat{L}_s = M_0 + \Delta M + L_{leak}$  จากที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 2 สมการแบบจำลองทางพลวัตของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางสมการที่ (2.1) และสมการแบบจำลองของระบบประมาณตำแหน่งและความเร็วโรเตอร์สมการที่ (2.2) เมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงไปตามที่กำหนดสามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

สมการสเตเตอร์

$$\frac{d\vec{i}_s}{dt} = \frac{1}{L_s} \left[ -\hat{R}_s \vec{i}_s - M \frac{d}{dt} (e^{j\hat{p}\theta_m} \cdot \vec{i}_r') + \vec{v}_s \right] \quad (5.1)$$

สมการประมาณกระแสสเตเตอร์

$$\frac{d\hat{\vec{i}}_s}{dt} = \frac{1}{\hat{L}_s} \left[ -\hat{R}_s \hat{\vec{i}}_s - \hat{M} \frac{d}{dt} (e^{j\hat{p}\hat{\theta}_m} \cdot \vec{i}_r') + \vec{v}_s - \hat{K}\vec{e}_i \right] \quad (5.2)$$

จากสมการที่ (5.1) และ (5.2) จะสามารถจัดรูปหาสมการค่าผิดพลาดกระแสที่แสดงถึงผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ได้ตั้งสมการที่ (5.3) ดูรายละเอียดเพิ่มเติมได้ในภาคผนวก ข.

$$\vec{e}_i = \mathbf{R}(s)\Delta R\hat{i}_s + \mathbf{M}(s)\Delta M \left[ \hat{i}_s + \left( e^{j p \hat{\theta}_m} \cdot \vec{i}_r \right) \right] + \mathbf{G}(s)(p\Delta\theta_m) J e^{j p \hat{\theta}_m} \cdot \vec{i}_r \quad (5.3)$$

$$\text{โดยที่ } \mathbf{R}(s) = -\frac{1}{L_{s0}} \frac{1}{(s+a)I}, \quad \mathbf{M}(s) = -\frac{1}{L_{s0}} \frac{sI}{(s+a)I},$$

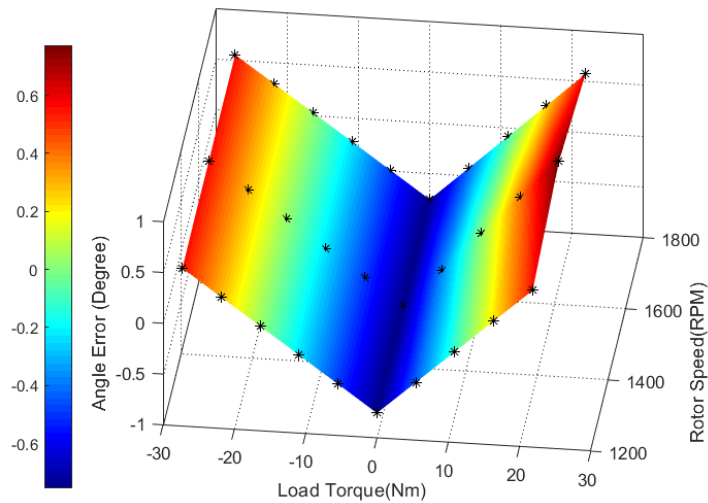
$$\mathbf{G}(s) = \frac{M_0}{L_{s0}} \frac{sI}{(s+a)I}, \quad a = \frac{R_{s0} + K}{L_{s0}}$$

### 5.1.1 ผลกระทบของค่าความต้านทานขดลวดสเตเตอร์ ( $R_s$ )

จากสมการที่ (5.3) จะพบว่าเมื่อพิจารณาผลกระทบเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานขดลวดสเตเตอร์ ( $\Delta R$ ) ในสถานะอยู่ตัว สามารถพิจารณาได้จากเทอมของ  $\mathbf{R}(s)\Delta R\hat{i}_s$  ซึ่งเป็นเทอมที่ขึ้นกับกระแสสเตเตอร์ และฟังก์ชันโอนย้าย  $\mathbf{R}(s)$  เมื่อพิจารณาที่สถานะอยู่ตัวสามารถเขียนได้ตั้งสมการที่ (5.4)

$$\begin{aligned} \mathbf{R}(s)|_{s \rightarrow \omega_0 j} &= -\frac{1}{L_{s0}} (\omega_0 J + aI)^{-1} \\ &= -\frac{1}{L_{s0}} \frac{1}{a^2 + \omega_0^2} \begin{bmatrix} a & \omega_0 \\ -\omega_0 & a \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5.4)$$

จากสมการที่ (5.4) พบว่าค่าความผิดพลาดของกระแสที่เกิดจากผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานขดลวดสเตเตอร์ ( $\Delta R$ ) นั้นสามารถลดได้ด้วยการเพิ่มหรือลดค่าอัตราขยายป้อนกลับ ( $K$ ) เพื่อลดอัตราขยายของฟังก์ชันโอนย้ายลง อย่างไรก็ตามการปรับอัตราขยายป้อนกลับ ( $K$ ) จะส่งผลกระทบต่อฟังก์ชันโอนย้ายของพารามิเตอร์อื่น ๆ รวมถึงฟังก์ชันโอนย้าย  $\mathbf{G}(s)$  ซึ่งเป็นของระบบประมาณด้วยเช่นกัน



รูปที่ 5.1 ผลการจำลองการทำงานแสดงผลกระทบของค่าความต้านทานขดลวดสเตเตอร์ ( $\Delta R = 40\%$ ) เมื่อใช้อัตราขยายป้อนกลับ  $K = 0$  และ  $i_{rd} = 3A$  ในสภาวะอยู่ตัว

จากรูปที่ 5.1 แสดงผลการจำลองการควบคุมแบบเวกเตอร์โดยใช้ค่าพารามิเตอร์เครื่องจักรกลไฟฟ้าตามตารางที่ 5.1 โดยมีการแปรค่าความเร็วระหว่าง 1200-1800 rpm ซึ่งเป็นช่วงการทำงานโดยทั่วไปของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง และมีการแปรค่าแรงบิดโหลดระหว่างค่า -27.3 Nm ถึง 21.8 Nm จะเห็นได้ว่าผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ ( $\Delta R$ ) จะขึ้นอยู่กับแรงบิดโหลดมากกว่าความเร็วของโรเตอร์ โดยในช่วงที่โหลดพิกัดจะมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ ( $\Delta R$ ) อย่างไม่กี่ค่าผิดพลาดตำแหน่งโรเตอร์มีค่าประมาณ 0.7 องศา เท่านั้น กล่าวได้ว่าระบบประมาณค่อนข้างมีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ ( $\Delta R$ ) ดังนั้นในการทำการทดลองจึงสามารถละเลยผลกระทบจากค่าความต้านทานขดลวดสเตเตอร์ได้

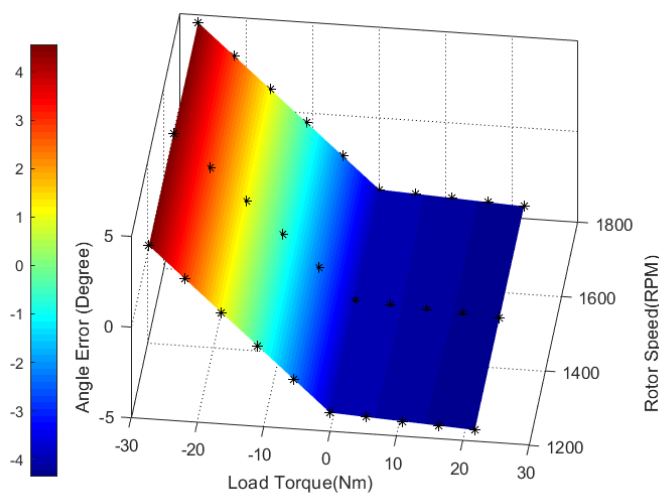
### 5.1.2 ผลกระทบของค่าความเหนี่ยวนำรวม ( $M$ )

จากสมการที่ (5.3) จะพบว่าเมื่อพิจารณาผลกระทบเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำรวม ( $\Delta M$ ) ในสภาวะอยู่ตัว สามารถพิจารณาได้จากเทอมของ  $\mathbf{M}(s)\Delta M \left[ \hat{i}_s + (e^{j\theta_m} \cdot \hat{i}_r) \right]$  ซึ่งเป็นเทอมที่ขึ้นกับทั้งกระแสสเตเตอร์และกระแสโรเตอร์ และฟังก์ชันโอนย้าย  $\mathbf{M}(s)$  เมื่อที่สถานะอยู่ตัวสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (5.5)



$$\begin{aligned} \mathbf{M}(s) |_{s \rightarrow \omega_0 J} &= -\frac{1}{L_{s0}} (\omega_0 J + aI)^{-1} \omega_0 J \\ &= -\frac{1}{L_{s0}} \frac{\omega_0}{a^2 + \omega_0^2} \begin{bmatrix} \omega_0 & -a \\ a & \omega_0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5.5)$$

จากสมการที่ (5.5) พบว่าค่าความผิดพลาดของกระแสที่เกิดจากผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำร่วม ( $\Delta M$ ) นั้นสามารถเพิ่มหรือลดได้ด้วยการปรับค่าอัตราขยายป้อนกลับ ( $K$ ) อย่างไรก็ตามการปรับอัตราขยายป้อนกลับ ( $K$ ) จะส่งผลกระทบต่อฟังก์ชันโอนย้ายของพารามิเตอร์อื่น ๆ รวมถึงฟังก์ชันโอนย้าย  $\mathbf{G}(s)$  ซึ่งเป็นของระบบประมาณด้วยเช่นกัน



รูปที่ 5.2 ผลการจำลองการทำงานแสดงผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำร่วม ( $\Delta M = 15\%$ ) เมื่อใช้อัตราขยายป้อนกลับ  $K = 0$  และ  $i_{rd} = 3 A$  ในสภาวะอยู่ตัว

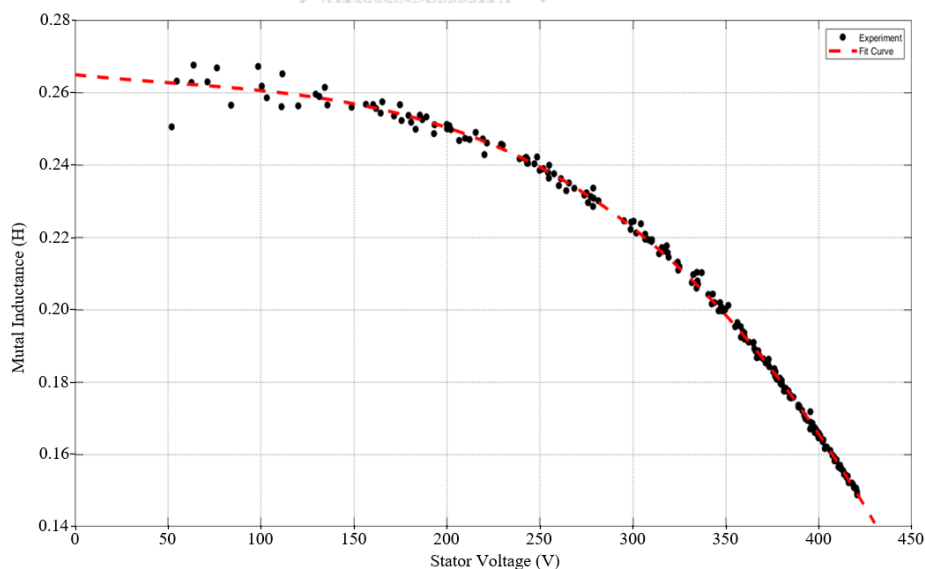
จากรูปที่ 5.2 ผลการจำลองการควบคุมแบบเวกเตอร์โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ของ เครื่องจักรกลไฟฟ้าตามตารางที่ ง.1 การแปรค่าความเร็วระหว่าง 1200-1800 rpm ซึ่งเป็นช่วงการทำงานโดยทั่วไปของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง และมีการแปรค่าแรงบิดโหลดระหว่างค่า -27.3 Nm ถึง 21.8 Nm จะเห็นได้ว่าผลของการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำร่วม ( $\Delta M$ ) ที่มีผลกระทบต่อระบบประมาณนั้นจะขึ้นอยู่กับแรงบิดมากกว่าความเร็ว โดยค่าผิดพลาดตำแหน่งโรเตอร์จะมีค่าอยู่ในช่วง -5 ถึง 5 องศา ซึ่งมีผลกระทบต่อระบบประมาณอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานขดลวดสเตเตอร์

## 5.2 แนวทางการลดผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์

จากการวิเคราะห์ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าในหัวข้อก่อนหน้านี้ การลดผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าด้วยการปรับค่าพารามิเตอร์ตามเงื่อนไขการทำงาน สามารถลดผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ได้โดยตรง และไม่ส่งผลกระทบต่อระบบประมาณ รวมถึงไม่กระทบต่อเงื่อนไขเสถียรภาพด้วย จากการวิเคราะห์ผลกระทบในหัวข้อก่อนหน้านี้พบว่า การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ ( $R_s$ ) นั้นมีผลกระทบน้อยมากจึงไม่นำมาพิจารณา ดังนั้นพารามิเตอร์ที่นำมาพิจารณาคือค่าความเหนี่ยวนำรวม ( $M$ ) โดยจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเหนี่ยวนำขดลวดสเตเตอร์ ( $L_s$ ) กับ ค่าความเหนี่ยวนำรวม ( $M$ ) จะเป็นไปตามสมการที่ (5.6)

$$L_s = M + L_{leak} \quad (5.6)$$

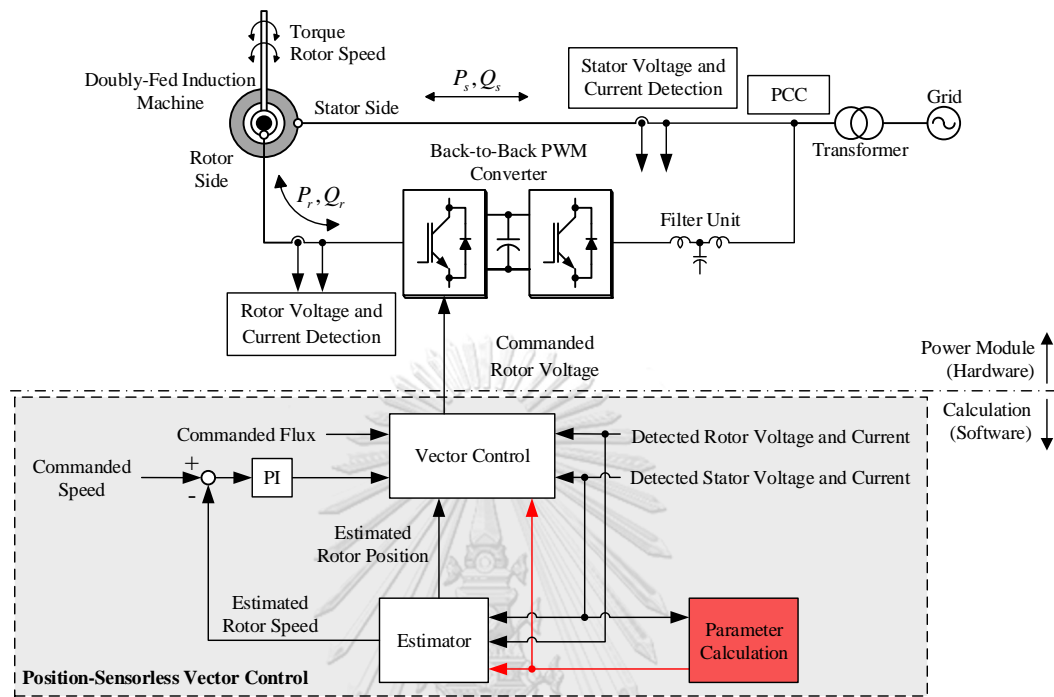
จากสมการที่ (5.6) จะพิจารณาค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหล ( $L_{leak}$ ) เป็นค่าคงที่ทุก ๆ เงื่อนไขการทำงานเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงค่าน้อยเมื่อเทียบกับการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำรวม ( $M$ ) ดังนั้นเมื่อทำการปรับค่าความเหนี่ยวนำรวม ( $M$ ) ค่าความเหนี่ยวนำขดลวดสเตเตอร์ ( $L_s$ ) ก็จะถูกปรับตามไปด้วย



รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันสเตเตอร์ ( $v_s$ ) และค่าความเหนี่ยวนำรวม ( $M$ )

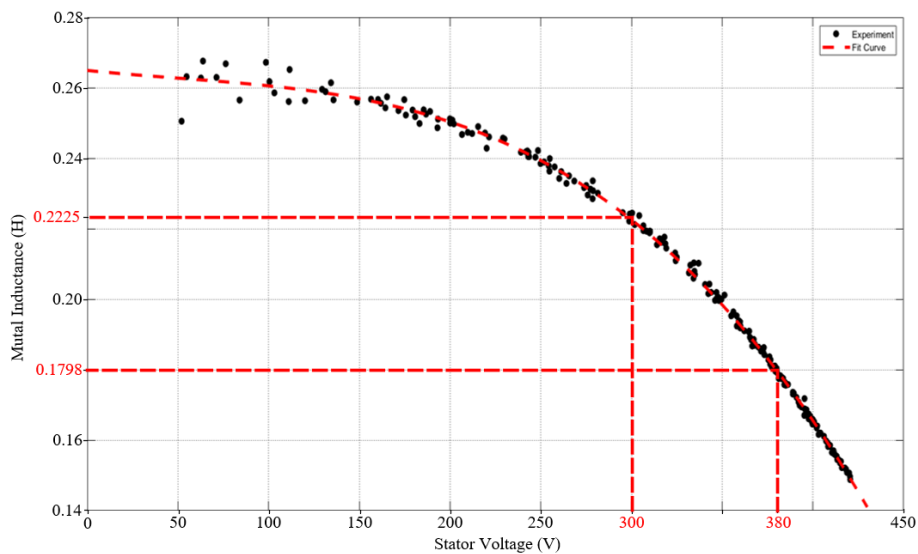
จากผลการทดสอบหาค่าความเหนี่ยวนำรวม ( $M$ ) ที่เงื่อนไขแรงดันสเตเตอร์ค่าต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 5.3 (จุดสีดำ) นำข้อมูลที่ได้มาทำการหาแนวโน้มค่าเฉลี่ยได้ดังรูปที่ 5.3 (เส้นประสีแดง) จากนั้นนำค่าที่ได้ไปใช้โดยการเพิ่มขั้นตอนการคำนวณหาพารามิเตอร์ในโปรแกรมควบคุมการ

ทำงานแบบเวกเตอร์ ซึ่งสามารถเขียนโครงสร้างการทำงานโดยรวมของระบบได้ดังรูปที่ 5.4 สามารถอ่านข้อมูลการทดสอบพารามิเตอร์เพิ่มเติมได้ที่ภาคผนวก ค.



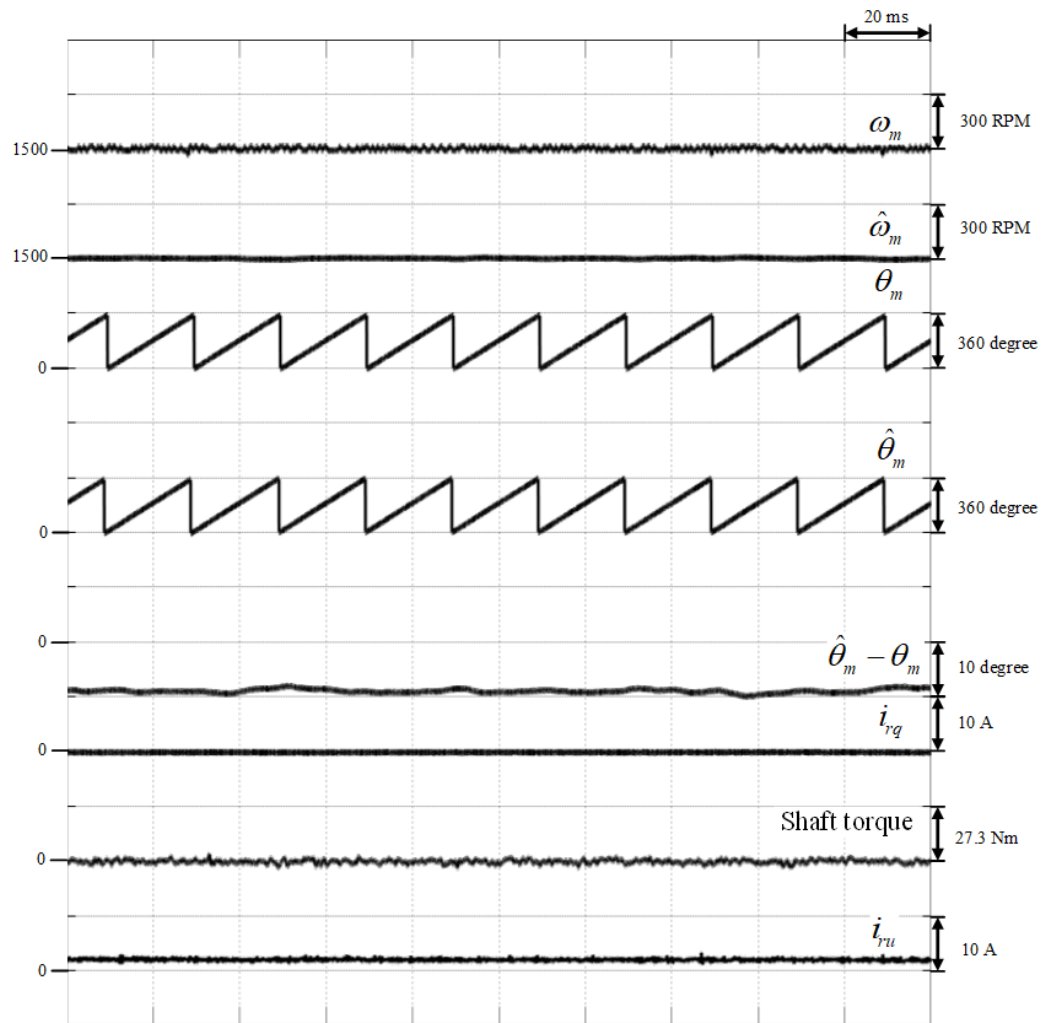
รูปที่ 5.4 โครงสร้างการทำงานโดยรวมของระบบ

เมื่อนำโครงสร้างจากจากรูปที่ 5.4 มาทำการทดสอบการทำงานที่เงื่อนไขการทำงานแบบเดียวกันคือ ทดสอบที่ความเร็ว ( $\omega_m$ ) = 1500 rpm, แรงดันสเตเตอร์ ( $v_s$ ) = 300V, กระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ ( $i_{rd}$ ) = 3A ที่สภาวะไร้โหลด โดยค่าความเหนี่ยวนำร่วม ( $M$ ) จากรูปที่ 5.3 จะสามารถเขียนค่าความเหนี่ยวนำร่วม ( $M$ ) ที่ใช้งานได้ดังรูปที่ 5.5 ซึ่งมีค่าเปลี่ยนแปลงไปประมาณร้อยละ 23



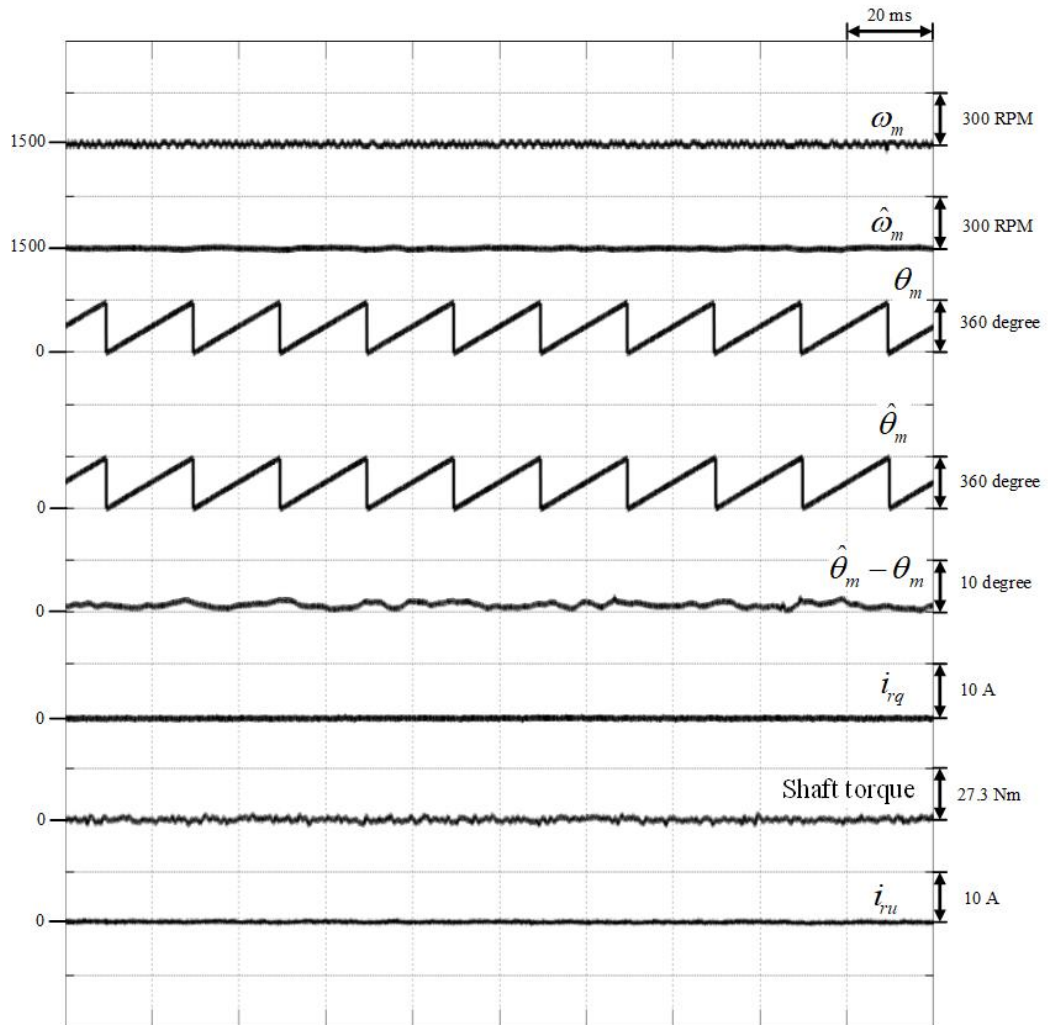
รูปที่ 5.5 ค่าความเหนี่ยวนำร่วม ( $M$ ) ที่ใช้ในการทดสอบการทำงาน

โดยเปรียบเทียบกันระหว่างการใช้ค่าพารามิเตอร์คงที่ดังแสดงในรูปที่ 5.6 กับการปรับค่าพารามิเตอร์ตามเงื่อนไขการทำงานดังแสดงในรูปที่ 5.7 พบว่าการปรับค่าพารามิเตอร์ตามเงื่อนไขการทำงาน จะทำให้ค่าผิดพลาดตำแหน่งที่เกิดขึ้นมีค่าเข้าใกล้ศูนย์องศาซึ่งน้อยกว่าการใช้ค่าพารามิเตอร์แบบคงที่ทุกเงื่อนไขการทำงานโดยมีค่าผิดพลาดตำแหน่งประมาณสิบองศา



รูปที่ 5.6 ผลการทดลองค่าพารามิเตอร์คงที่ในสถานะอยู่ตัวที่การทำงานที่สถานะไร้โหลด

$$\omega_m = 1500 \text{ rpm}, v_s = 300 \text{ V}, i_{rd} = 3 \text{ A}, M = 179.8 \text{ mH}$$



รูปที่ 5.7 ผลการทดลองการปรับค่าพารามิเตอร์ตามเงื่อนไขการทำงานที่สภาวะอยู่ตัว  
ที่จุดการทำงานที่สภาวะไร้โหลด  $\omega_m = 1500 \text{ rpm}$ ,  $v_s = 300 \text{ V}$ ,  $i_{rd} = 3 \text{ A}$ ,  $M = 222.5 \text{ mH}$

## บทที่ 6

### ผลการทดลอง

ในการทดสอบสมรรถนะของระบบขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง สามารถทำได้ตั้งแต่นำเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (โหลดพิกัด  $-27.3\text{Nm}$ ) จนถึงย่านมอเตอร์ (80% ของโหลดพิกัด  $21.8\text{ Nm}$ ) และสามารถปรับความเร็วได้ตั้งแต่ช่วง  $-20\%$  ของความเร็วซิงโครนัส ( $1,200\text{ rpm}$ ) จนถึงความเร็วช่วง  $+20\%$  ของความเร็วซิงโครนัส ( $1,800\text{ rpm}$ ) โดยเงื่อนไขการทดสอบระบบขับเคลื่อนด้วยตัวควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซ็นเซอร์วัดตำแหน่งมีดังต่อไปนี้

ค่าโหลดที่ทดสอบมี 3 ค่า

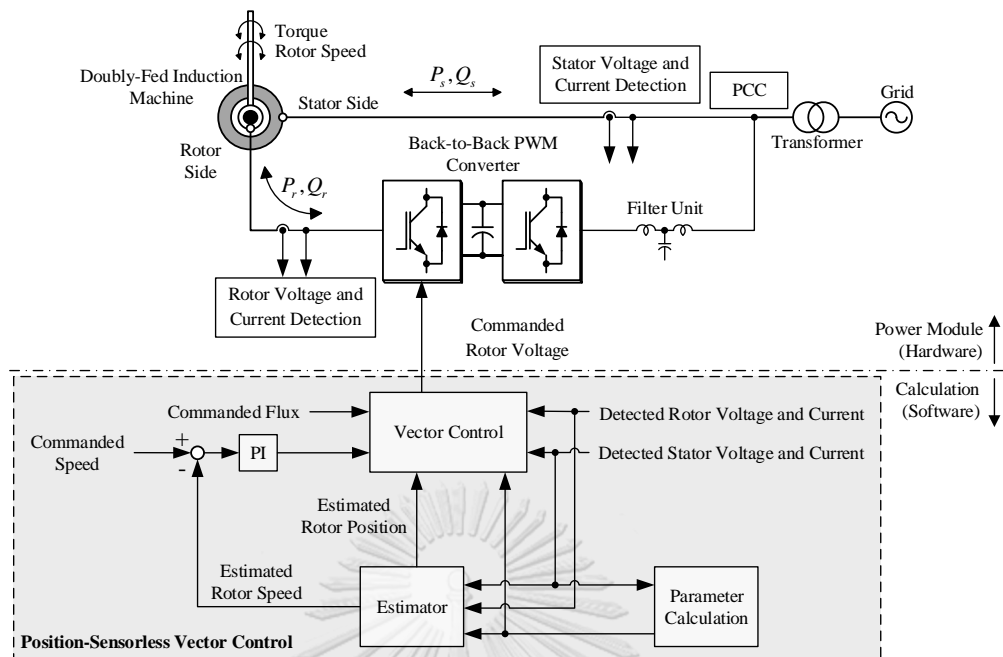
- 1) ไร้โหลด
- 2) โหลดพิกัดแรงบิดย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
- 3) 80% โหลดพิกัดย่านมอเตอร์

ค่ากระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ ( $i_{rd}$ ) ที่ 2 ค่าการทำงานคือ

- 1)  $i_{rd} = 3\text{ A}$  (50% ของค่ากระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์พิกัด) และ
- 2)  $i_{rd} = 6\text{ A}$  (100% ของค่ากระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์พิกัด)

ความเร็วที่ทดสอบมี 3 ค่า

- 1) ความเร็ว  $1,200\text{ rpm}$  (Sub-Synchronous Speed)
- 2) ความเร็ว  $1,500\text{ rpm}$  (Synchronous Speed) และ
- 3) ความเร็ว  $1,800\text{ rpm}$  (Super-Synchronous Speed)



รูปที่ 6.1 โครงสร้างระบบทดสอบการควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซ็นเซอร์วัดตำแหน่ง สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง

ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดสอบระบบขับเคลื่อนแบบเวกเตอร์ไร้เซ็นเซอร์วัดตำแหน่งที่เงื่อนไขการทำงานต่าง ๆ เช่น การเปลี่ยนความเร็วในช่วงแคบ/กว้าง การใส่/ปลดโหลดออกแบบขั้น การเปลี่ยนแปลงโหลดแบบเชิงเส้นในช่วงมอเตอร์ถึงช่วงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ความเร็วคงที่ เพื่อดูผลตอบสนองที่สภาวะอยู่ตัว (Steady State) และสภาวะชั่วครู่ (Transient State) โดยทดสอบกับระบบทดสอบโดยมีโครงสร้างระบบทดสอบดังรูปที่ 6.1 ประกอบด้วย 4 ส่วนคือ 1) วงรอบควบคุมความเร็วทำหน้าที่ควบคุมความเร็วด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ โดยกำหนดให้  $K_p = 0.4, K_i = 0.5$  2) ระบบประมาณค่าตำแหน่งและความเร็วโรเตอร์ทำหน้าที่ประมาณค่าตำแหน่งและความเร็วโรเตอร์โดยใช้อัตราขยายดังนี้  $K = 33, K_p = 50, K_i = 5000$  ตามค่าที่ได้นำเสนอไปแล้วในบทที่ 3 3) การควบคุมแบบแยกการเชื่อมร่วมมีหน้าที่คำนวณแรงดันโรเตอร์คำสั่งส่งให้กับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า โดยมีวงรอบควบคุมกระแสที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอมีอัตราขยายดังนี้  $K_p = 110, K_i = 13,750$

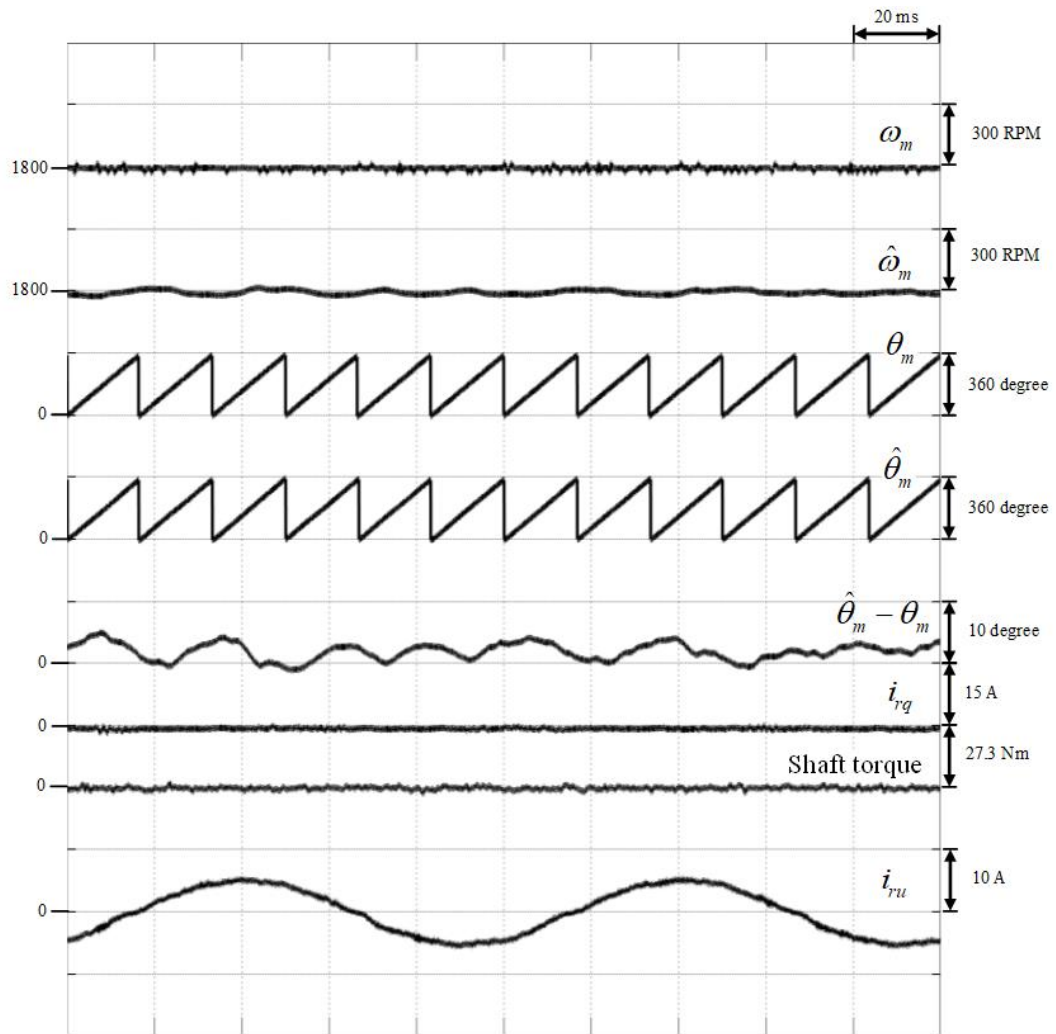


### 6.1 ผลการทดลองของระบบขับเคลื่อนที่สภาวะอยู่ตัว (Steady State)

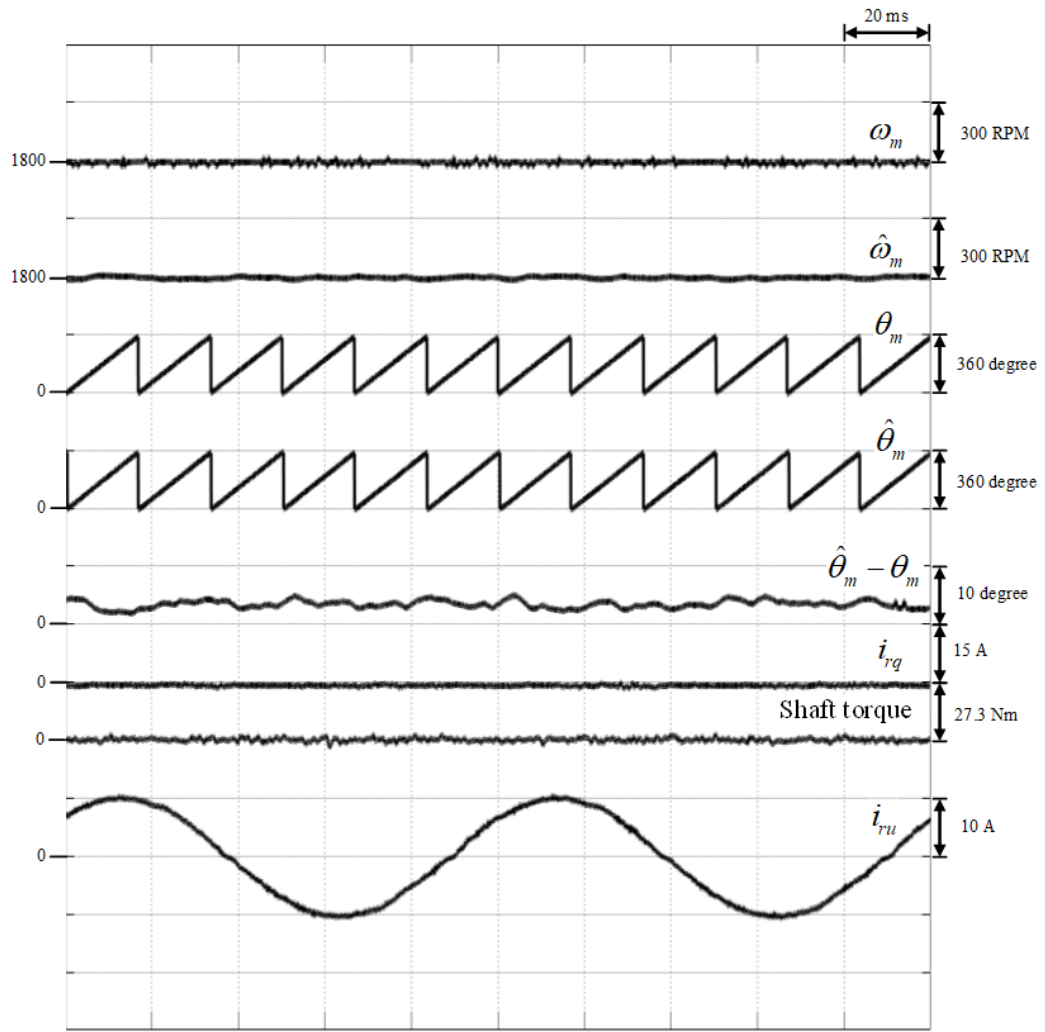
การทดสอบการทำงานของระบบขับเคลื่อนที่สภาวะอยู่ตัวแบ่งออกเป็น 3 โหมดการทำงาน คือ 1) สภาวะไร้อโหลด 2) โหลดย่านมอเตอร์ และ 3) โหลดย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยโหมดต่าง ๆ จะทดสอบที่ความเร็ว 1) 1,800 rpm (Super-Synchronous Speed) 2) 1,500 rpm (Synchronous Speed) 3) 1,200 rpm (Sub-Synchronous Speed)

ตารางที่ 6.1 เงื่อนไขการทดสอบระบบขับเคลื่อนแบบเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งที่สภาวะอยู่ตัว

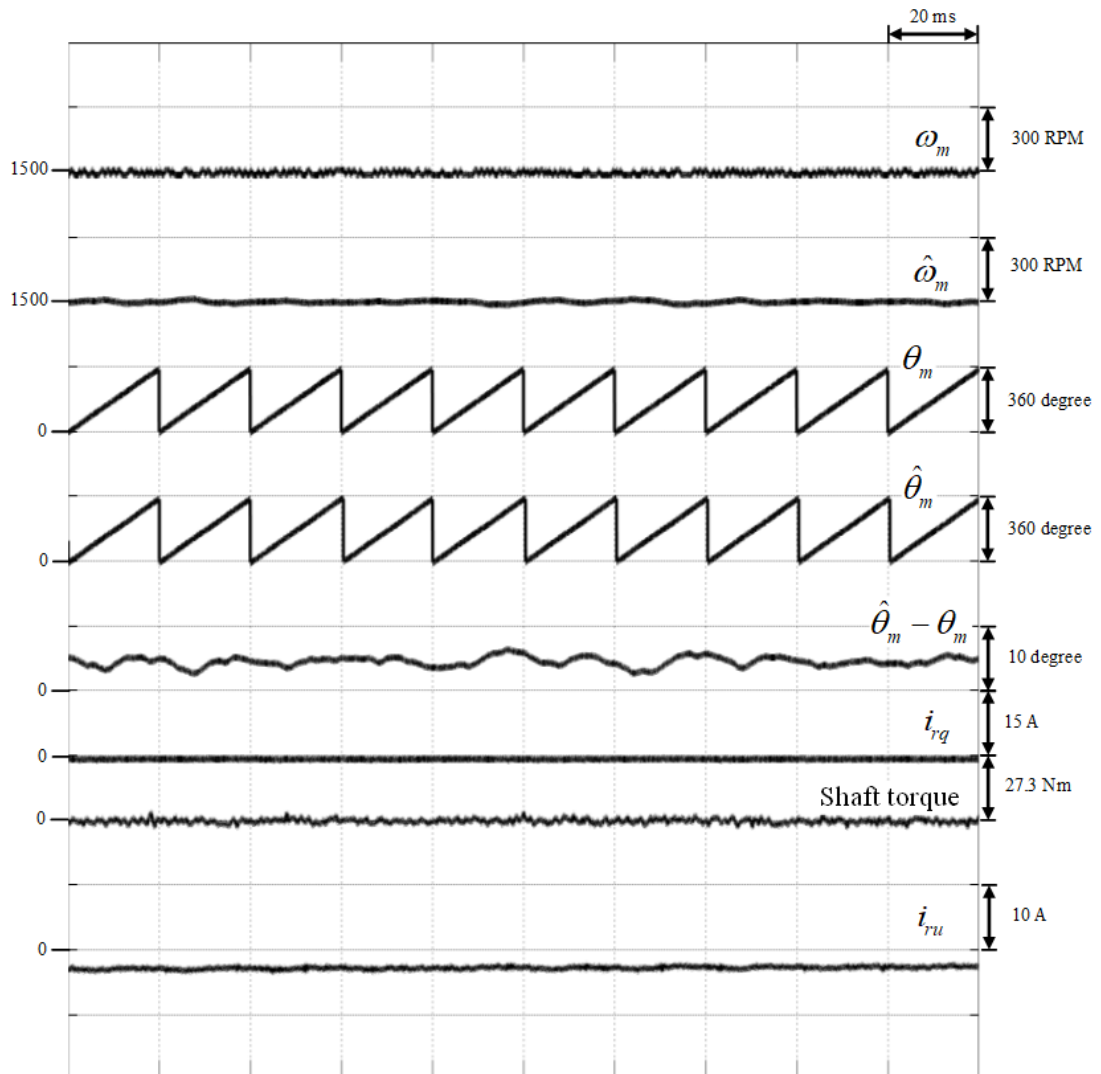
ลำดับ	ย่านการทำงาน	ความเร็วที่ทดสอบ (rpm)	กระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ (A)	ผลการทดลอง
1	ไร้อโหลด	1,800 (Super-Synchronous Speed)	3	รูปที่ 6.2
			6	รูปที่ 6.3
		1,500 (Synchronous Speed)	3	รูปที่ 6.4
			6	รูปที่ 6.5
		1,200 (Sub-Synchronous Speed)	3	รูปที่ 6.6
			6	รูปที่ 6.7
2	มอเตอร์ (21.8 Nm)	1,800 (Super-Synchronous Speed)	3	รูปที่ 6.8
			6	รูปที่ 6.9
		1,500 (Synchronous Speed)	3	รูปที่ 6.10
			6	รูปที่ 6.11
		1,200 (Sub-Synchronous Speed)	3	รูปที่ 6.12
			6	รูปที่ 6.13
3	เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (27.3 Nm)	1,800 (Super-Synchronous Speed)	3	รูปที่ 6.14
			6	รูปที่ 6.15
		1,500 (Synchronous Speed)	3	รูปที่ 6.16
			6	รูปที่ 6.17
		1,200 (Sub-Synchronous Speed)	3	รูปที่ 6.18
			6	รูปที่ 6.19



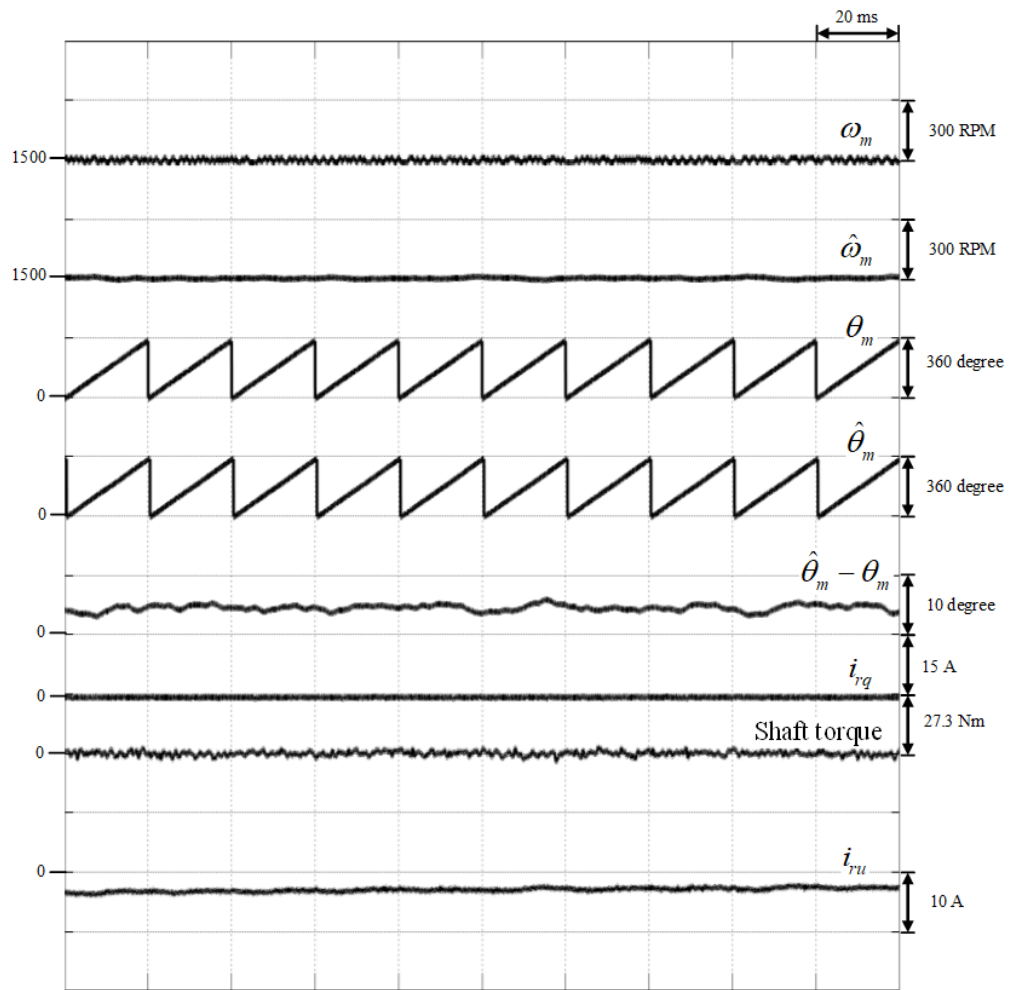
รูปที่ 6.2 ผลการทดลองที่สภาวะอยู่ตัว ที่สภาวะไร้อโหลด ความเร็ว 1,800 rpm และกระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ 3 A



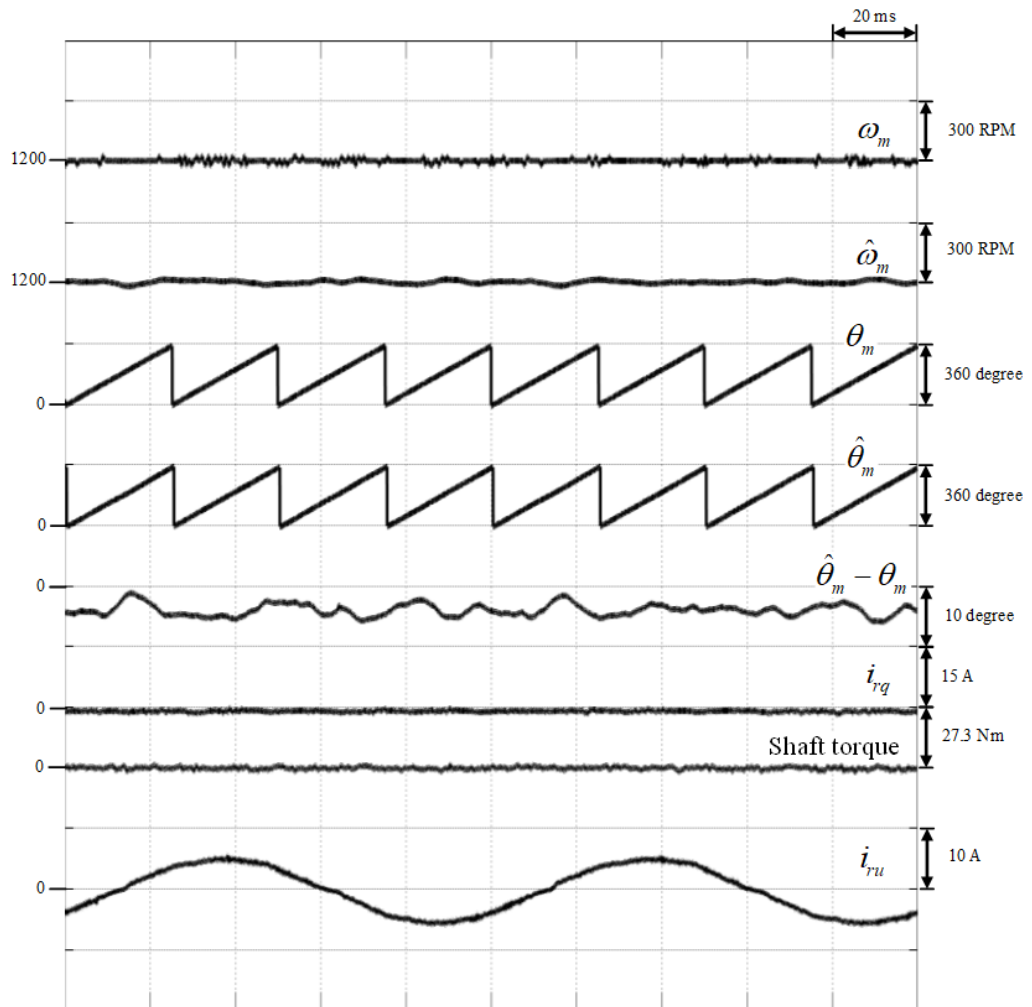
รูปที่ 6.3 ผลการทดลองที่สภาวะอยู่ตัว ที่สภาวะไร้โหลด ความเร็ว 1,800 rpm  
และกระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ 6 A



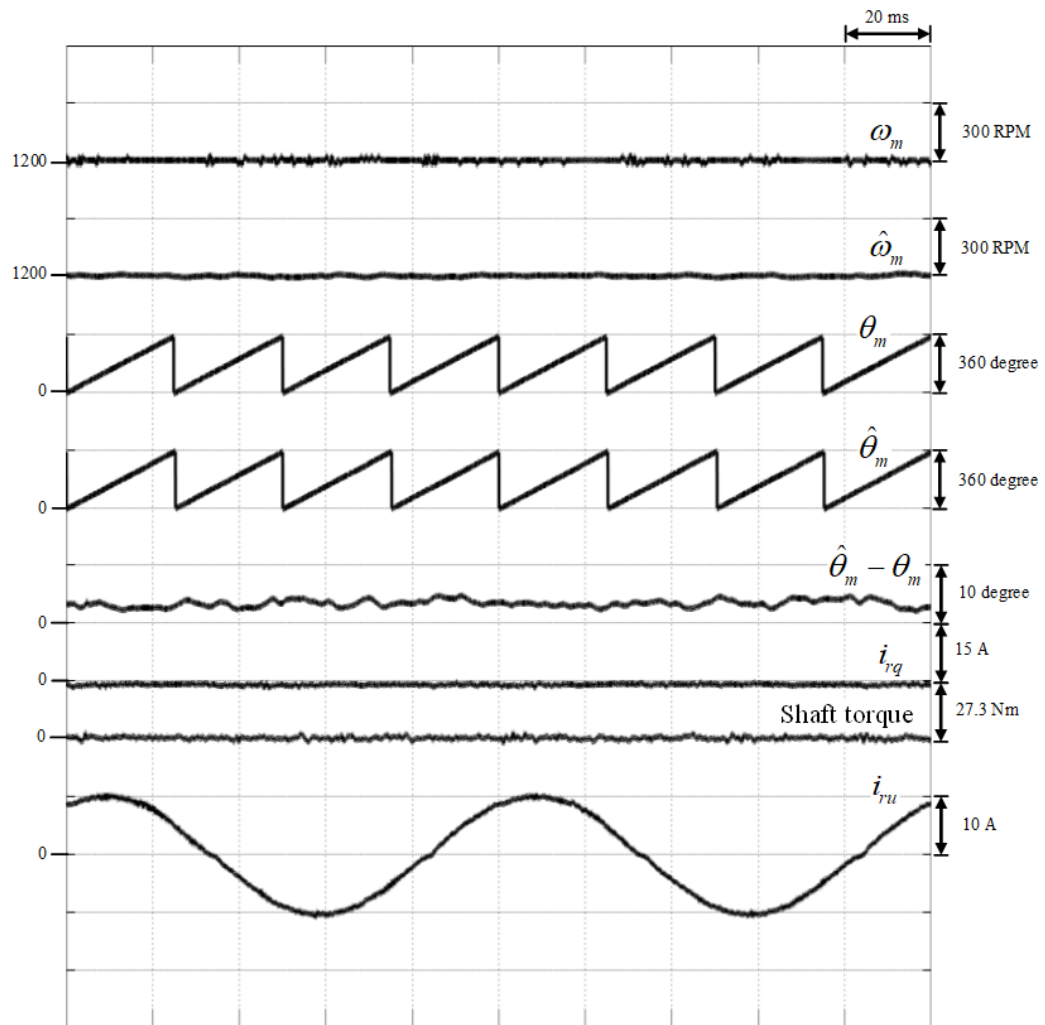
รูปที่ 6.4 ผลการทดลองที่สภาวะอยู่ตัว ที่สภาวะไร้โหลด ความเร็ว 1,500 rpm และกระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ 3 A



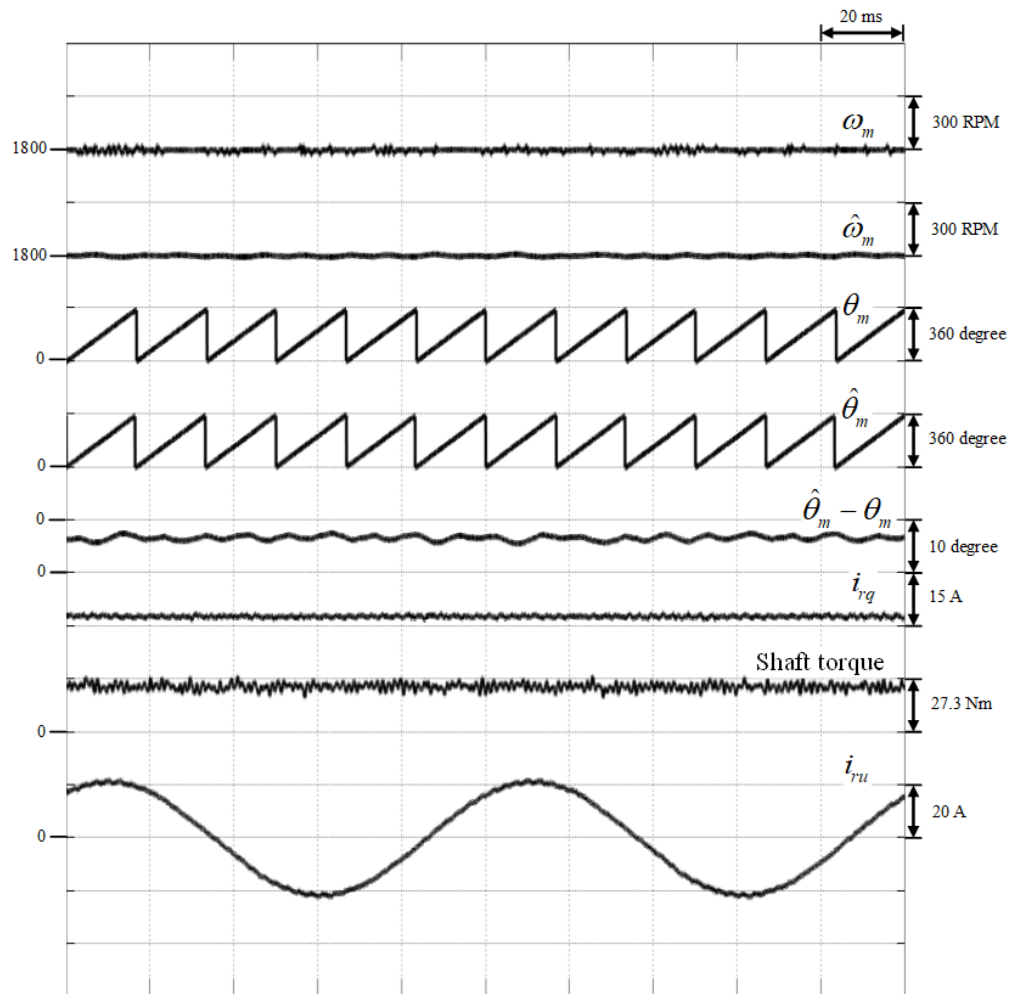
รูปที่ 6.5 ผลการทดลองที่สภาวะอยู่ตัว ที่สภาวะไร้อโหลด ความเร็ว 1,500 rpm และกระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ 6 A



รูปที่ 6.6 ผลการทดลองที่สภาวะอยู่ตัว ที่สภาวะไร้โหลด ความเร็ว 1,200 rpm และกระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ 3 A

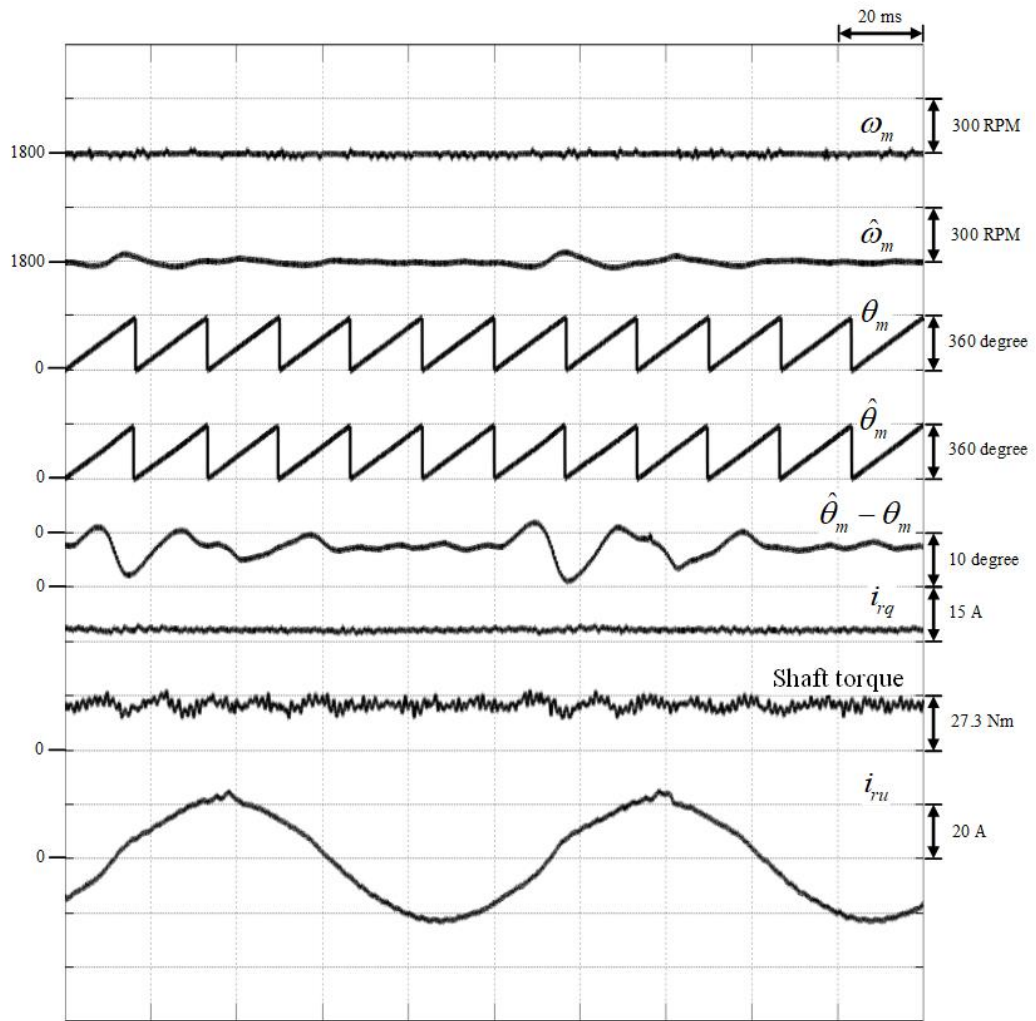


รูปที่ 6.7 ผลการทดลองที่สภาวะอยู่ตัว ที่สภาวะไร้อโหลด ความเร็ว 1,200 rpm และกระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ 6 A

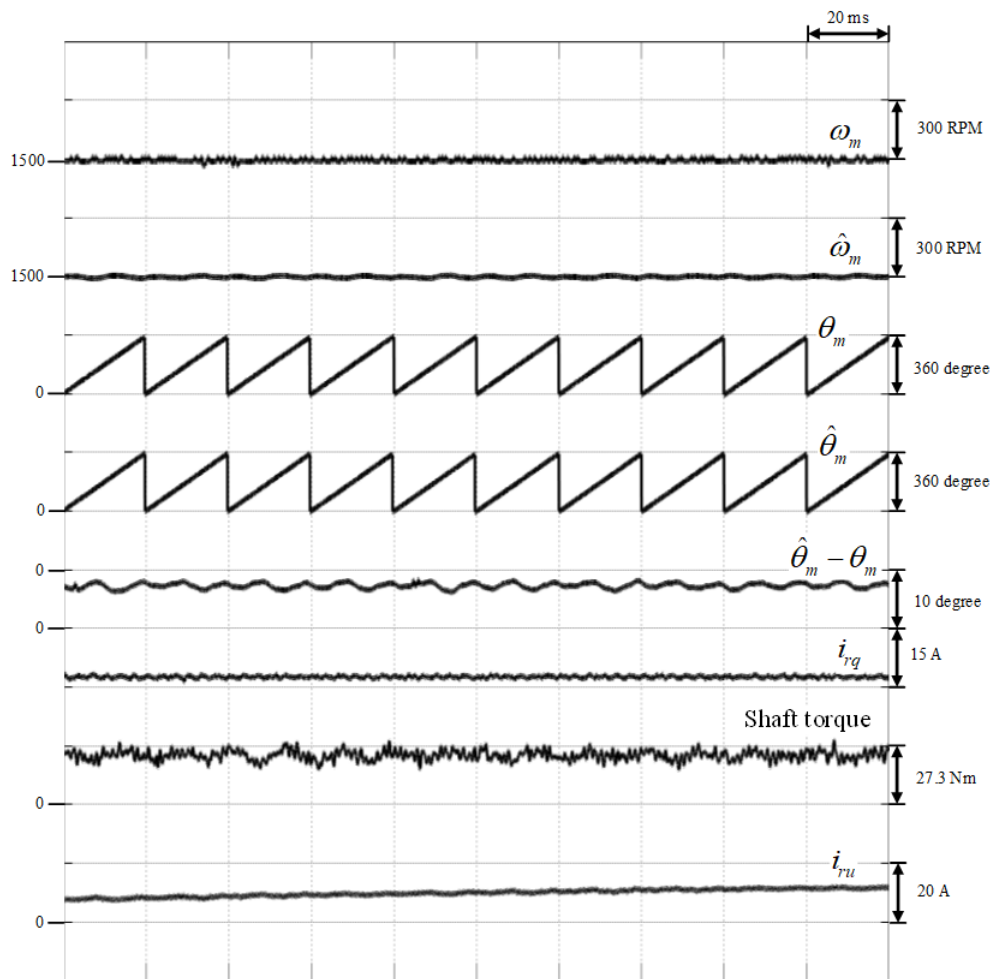


รูปที่ 6.8 ผลการทดลองที่สภาวะอยู่ตัว ที่ยานมอเตอร์ ความเร็ว 1,800 rpm และ  
กระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ 3 A

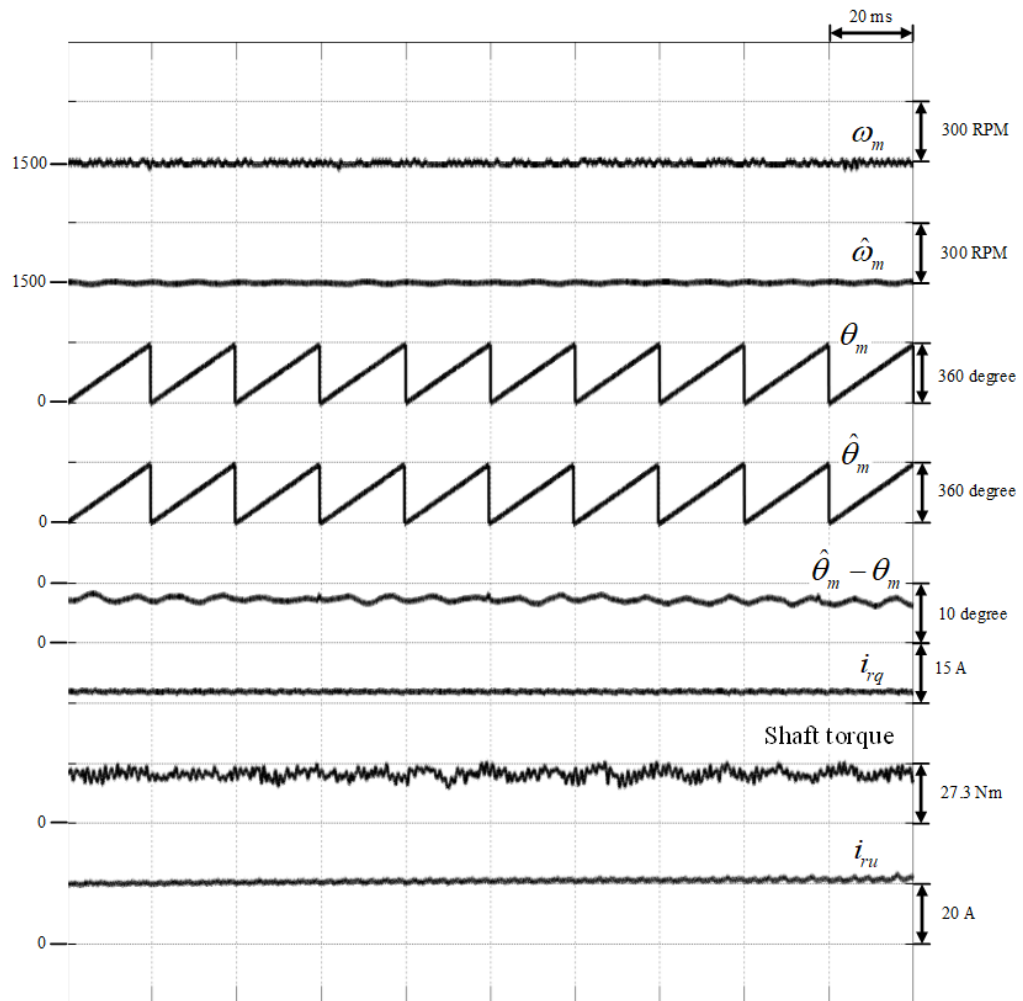




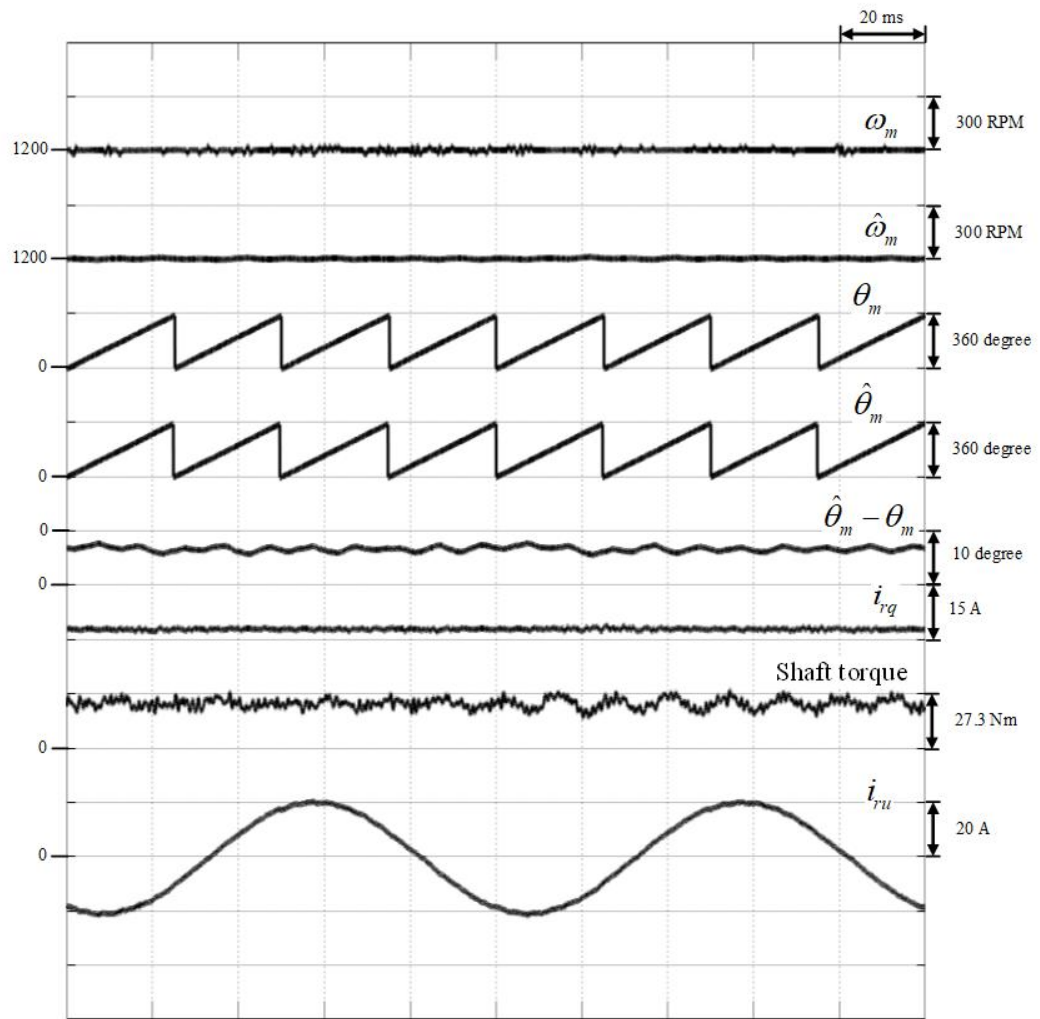
รูปที่ 6.9 ผลการทดลองที่สภาวะอยู่ตัว ที่ย่านมอเตอร์ ความเร็ว 1,800 rpm และกระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ 6 A



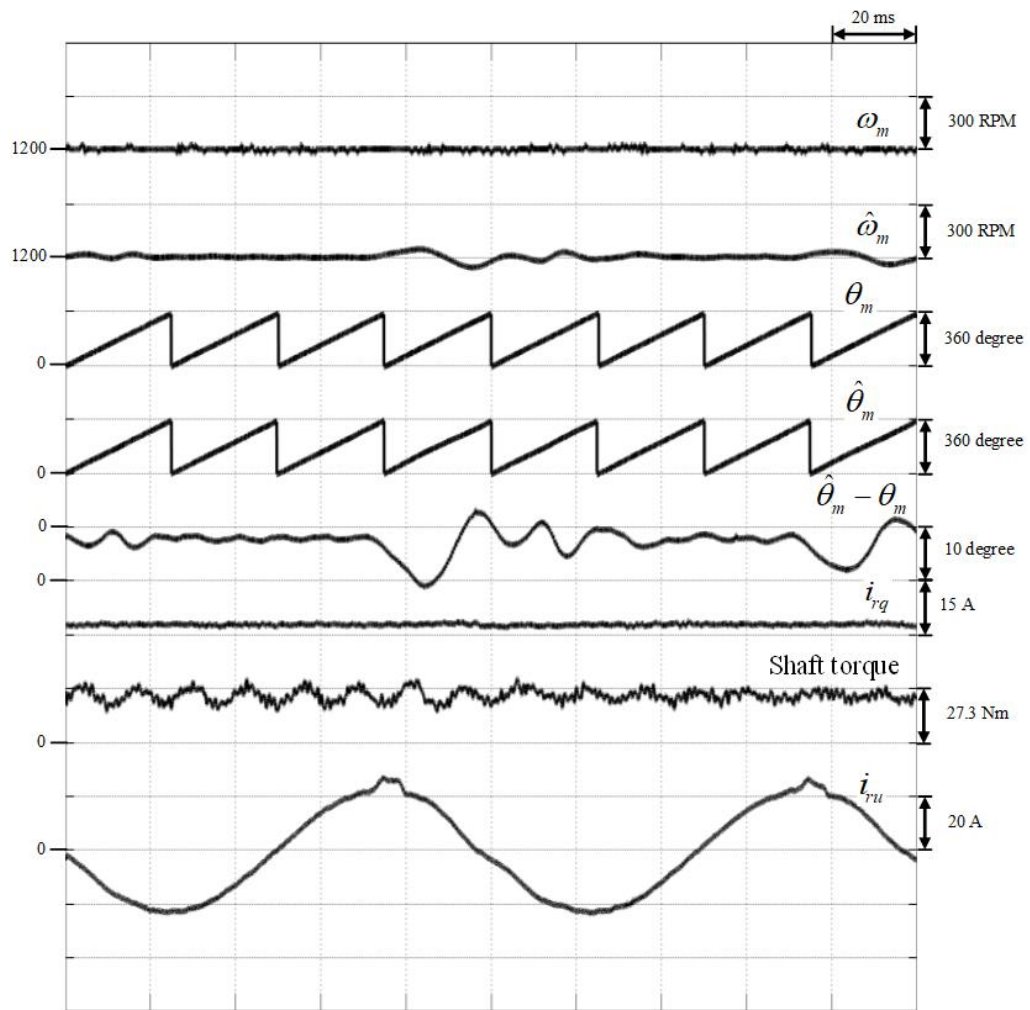
รูปที่ 6.10 ผลการทดลองที่สภาวะอยู่ตัว ที่ย่านมอเตอร์ ความเร็ว 1,500 rpm  
และกระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ 3 A



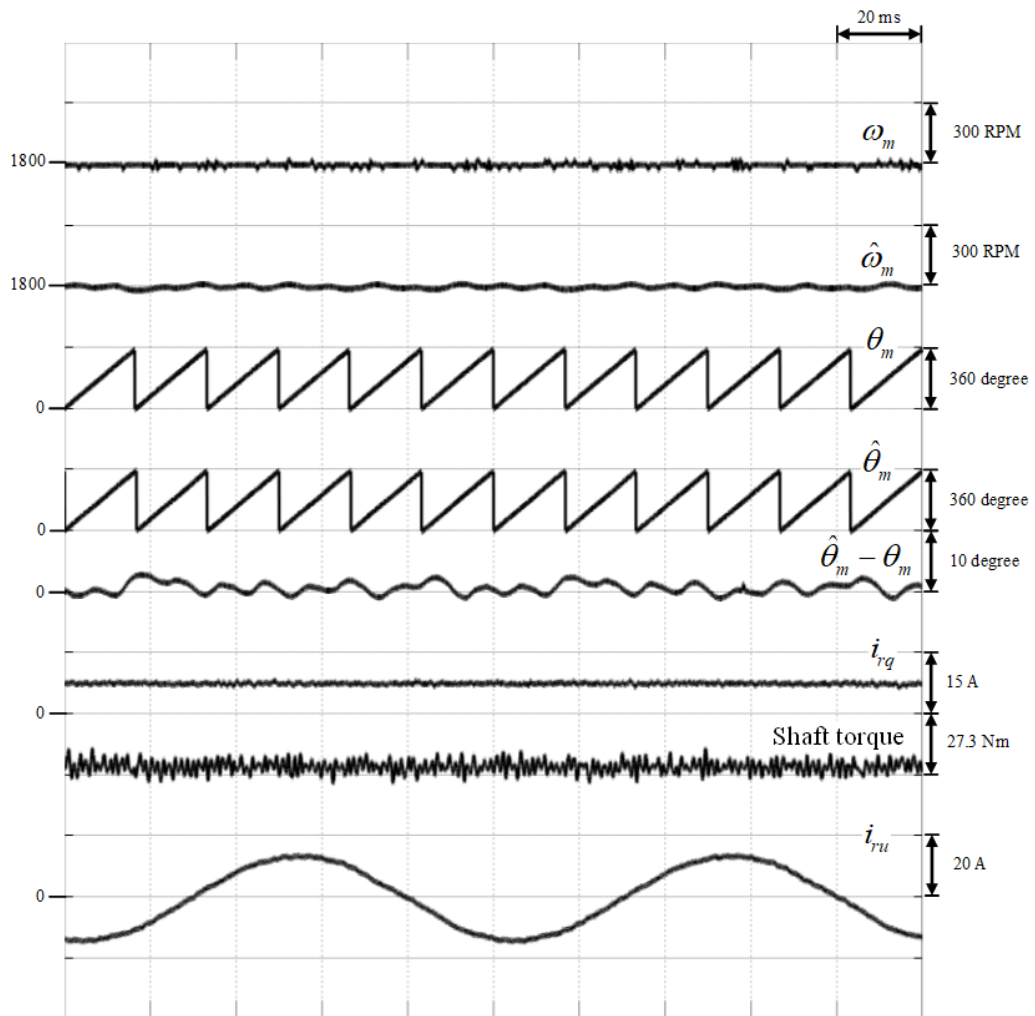
รูปที่ 6.11 ผลการทดลองที่สภาวะอยู่ตัว ที่ย่านมอเตอร์ ความเร็ว 1,500 rpm และ กระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ 6 A



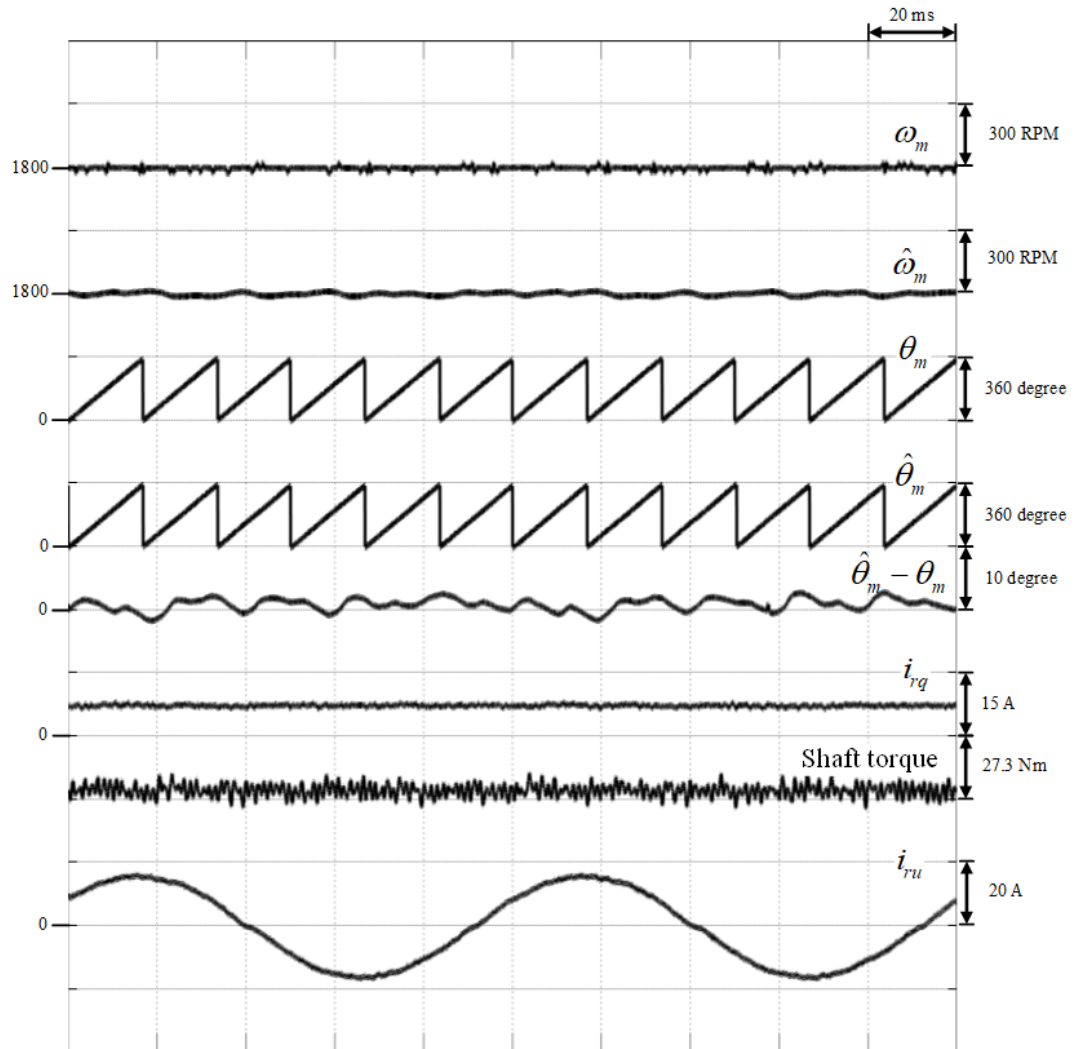
รูปที่ 6.12 ผลการทดลองที่สภาวะอยู่ตัว ที่ย่านมอเตอร์ ความเร็ว 1,200 rpm และกระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ 3 A



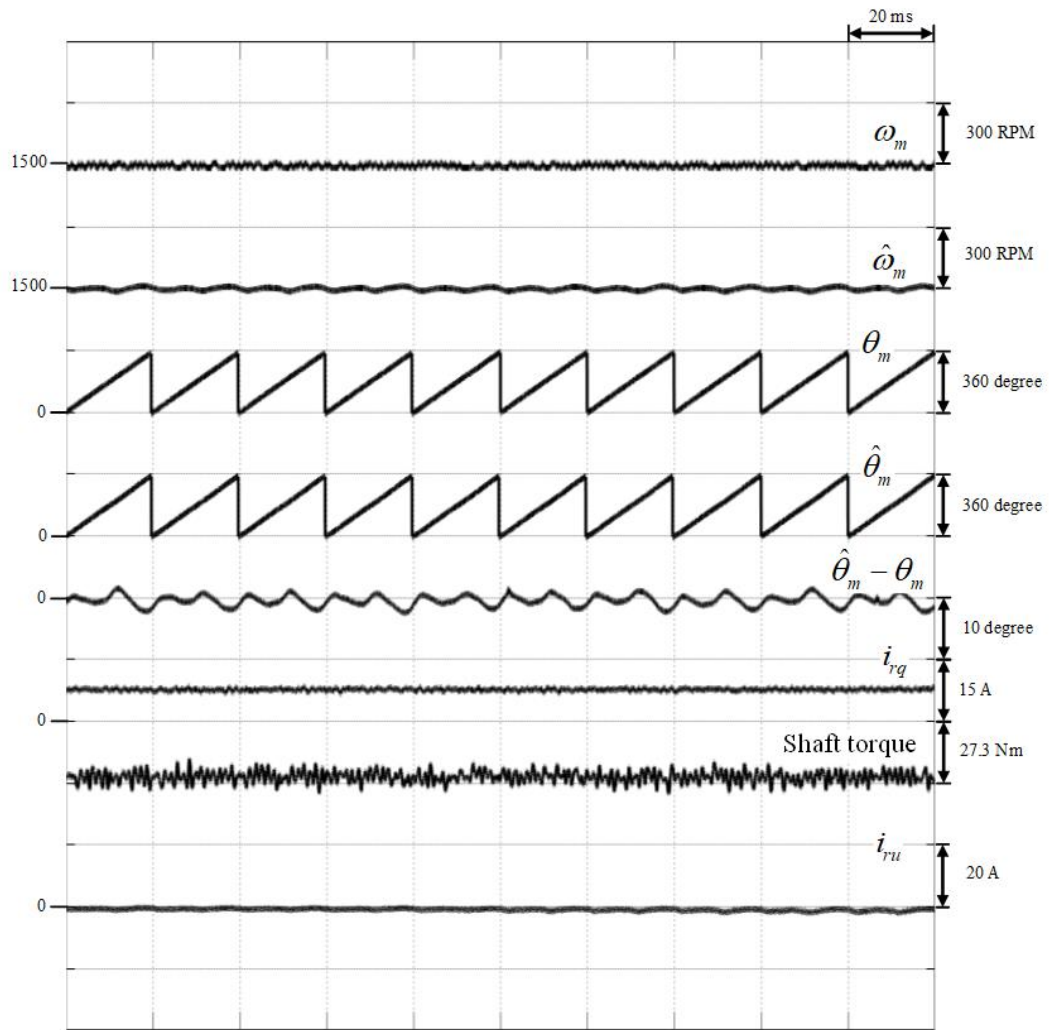
รูปที่ 6.13 ผลการทดลองที่สภาวะอยู่ตัว ที่ย่านมอเตอร์ ความเร็ว 1,200 rpm  
และกระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ 6 A



รูปที่ 6.14 ผลการทดลองที่สภาวะอยู่ตัว ที่ย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ความเร็ว 1,800 rpm และกระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ 3 A

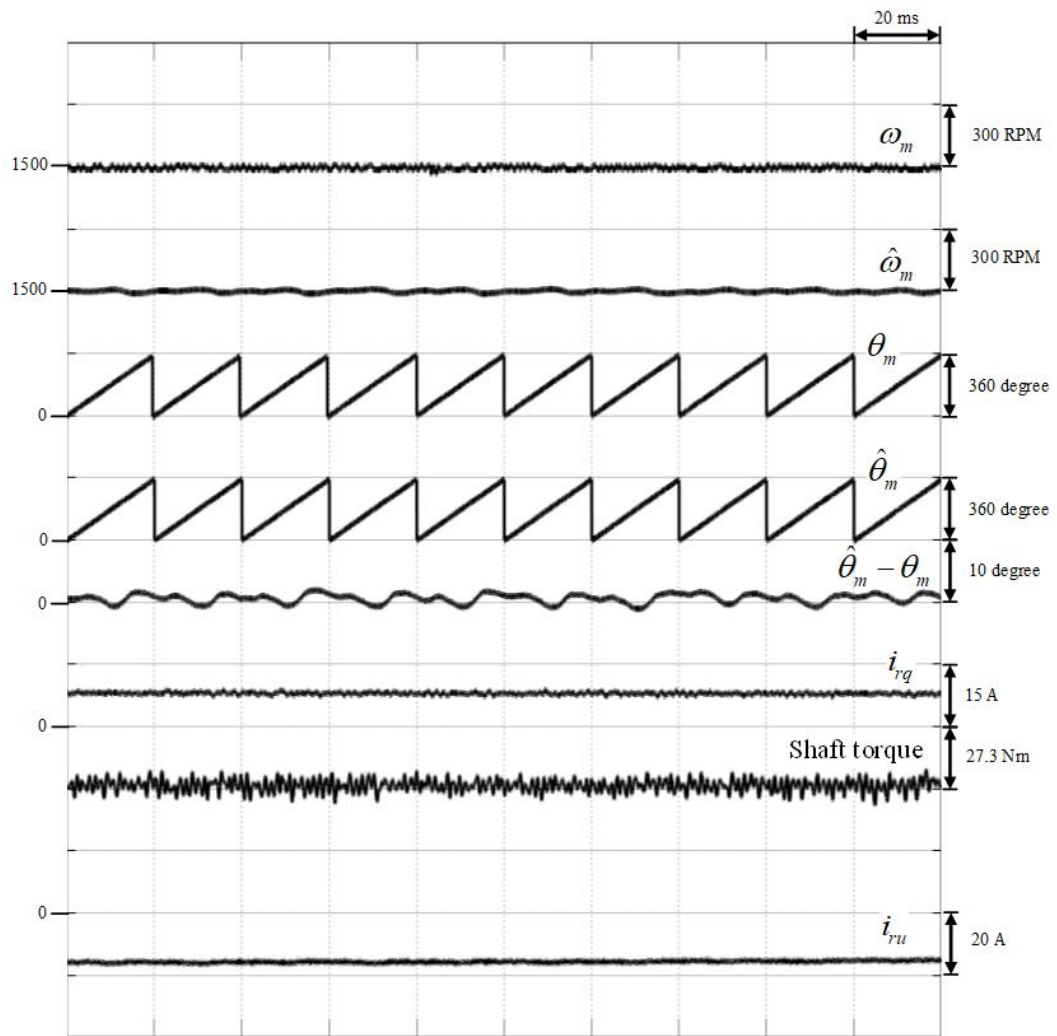


รูปที่ 6.15 ผลการทดลองที่สภาวะอยู่ตัว ที่ย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ความเร็ว 1,800 rpm และกระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ 6 A

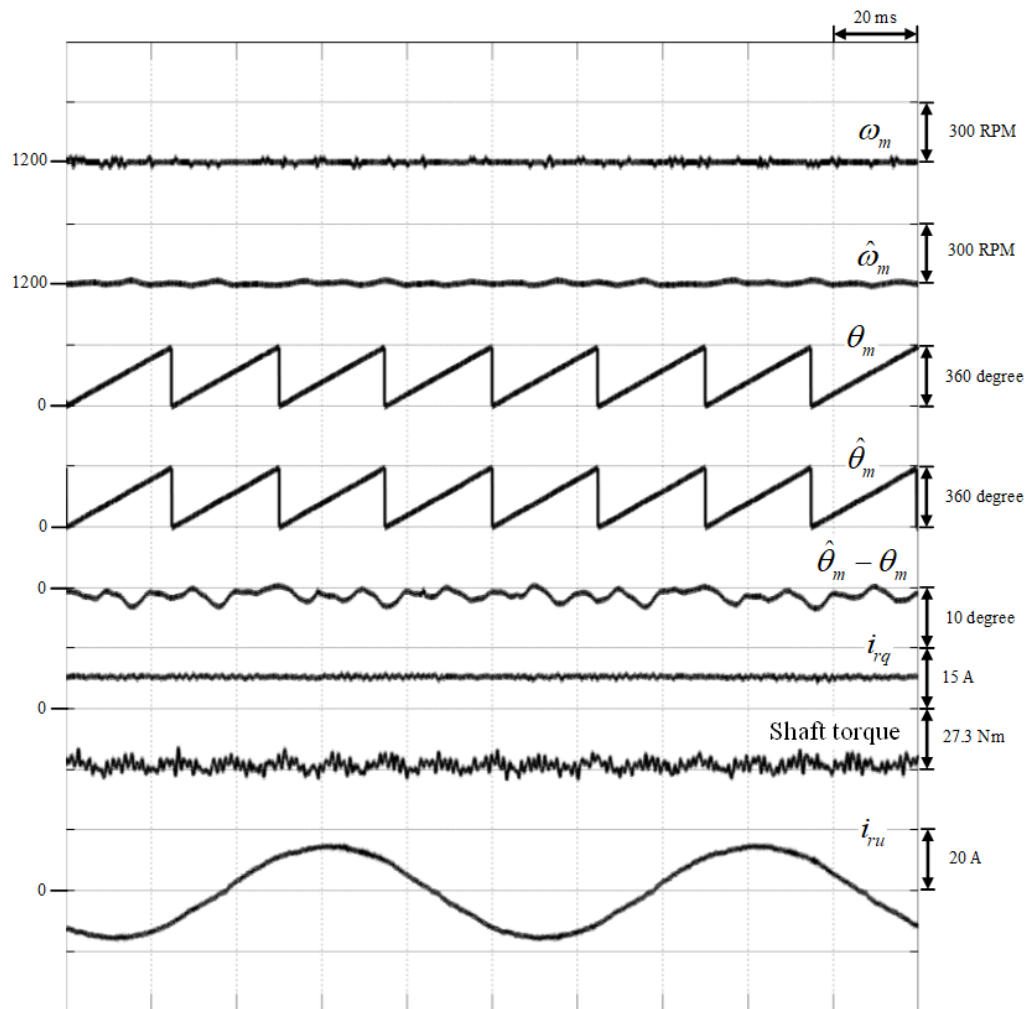


รูปที่ 6.16 ผลการทดลองที่สภาวะอยู่ตัว ที่ย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ความเร็ว 1,500 rpm และกระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ 3 A

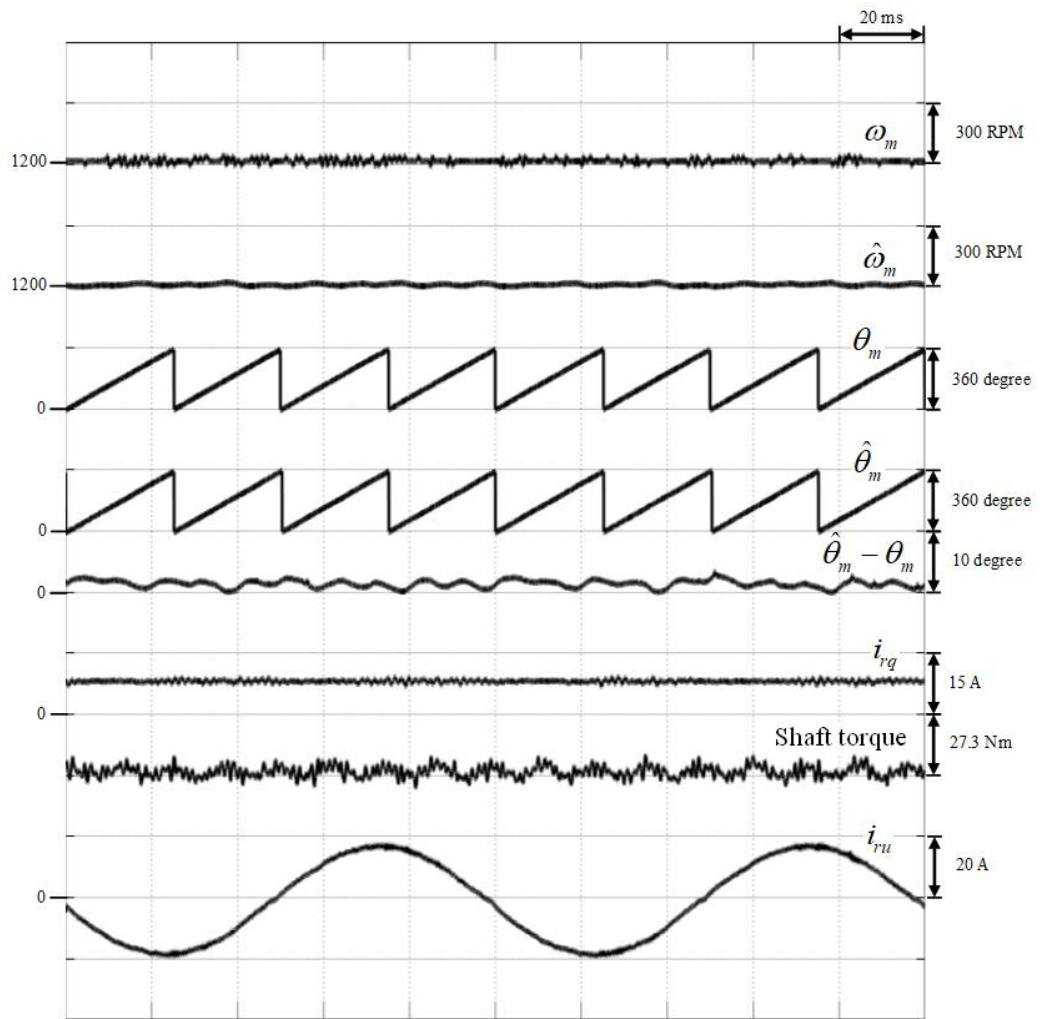




รูปที่ 6.17 ผลการทดลองที่สภาวะอยู่ตัว ที่ย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ความเร็ว 1,500 rpm และกระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ 6 A



รูปที่ 6.18 ผลการทดลองที่สภาวะอยู่ตัว ที่ย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ความเร็ว 1,200 rpm และกระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ 3 A



รูปที่ 6.19 ผลการทดลองที่สภาวะอยู่ตัว ที่ย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ความเร็ว 1,200 rpm และกระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ 6 A

## 6.2 ผลการทดลองของผลตอบสนองชั่วคราว (Transient Response)

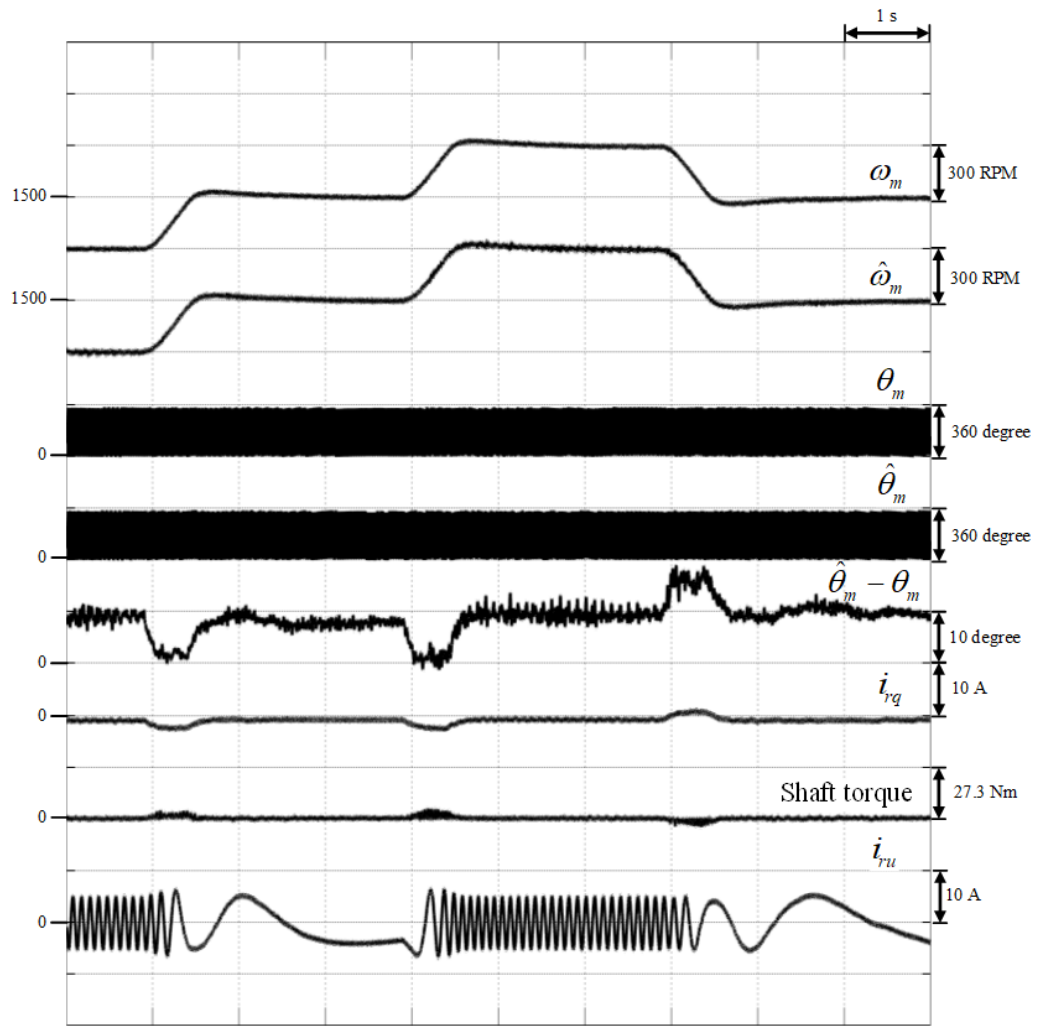
การทดสอบผลตอบสนองชั่วคราวของระบบขับเคลื่อนแบบเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งได้แบ่งการทดสอบออกเป็น 4 โหมดการทำงาน คือ 1) การเปลี่ยนความเร็วในช่วงแคบ 2) การเปลี่ยนแปลงความเร็วในช่วงกว้าง 3) การใส่/ปลดโหลดแบบขั้น 4) การเปลี่ยนแปลงโหลดแบบเชิงเส้นจากย่านมอเตอร์ถึงย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ความเร็วคงที่ 5) การเปลี่ยนแปลงความเร็วแบบเชิงเส้นที่โหลดคงที่

### 6.2.1 ผลการเปลี่ยนแปลงความเร็วในช่วงแคบ

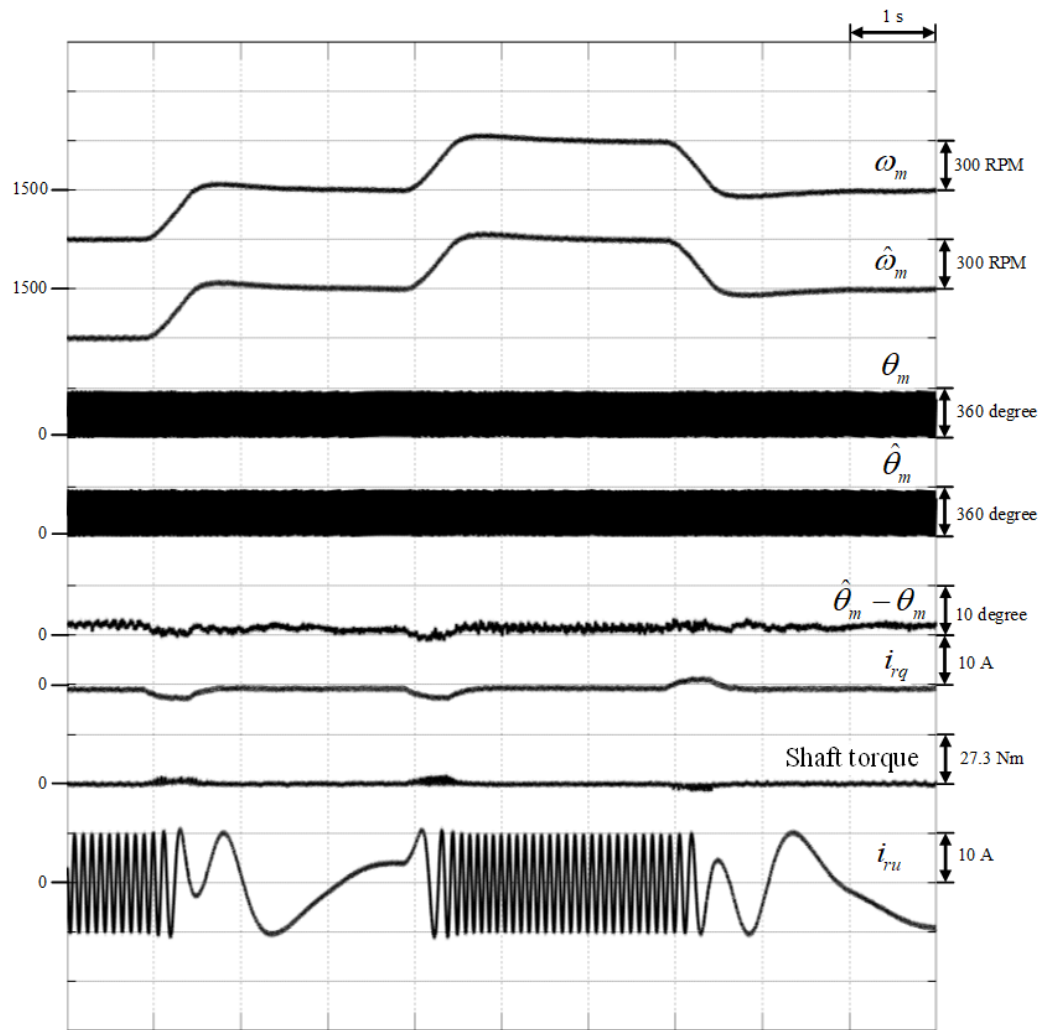
ระบบขับเคลื่อนเริ่มต้นที่ความเร็ว 1,200 rpm จากนั้นเพิ่มความเร็วไปที่ 1,500 rpm และเพิ่มต่อไปยัง 1,800 rpm จากนั้นลดความเร็วลงเหลือ 1,500 rpm ตามลำดับ โดยเงื่อนไขการทำงานสรุปไว้ดังตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.2 เงื่อนไขการทดสอบระบบขับเคลื่อนแบบเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งที่เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงความเร็วในช่วงแคบ

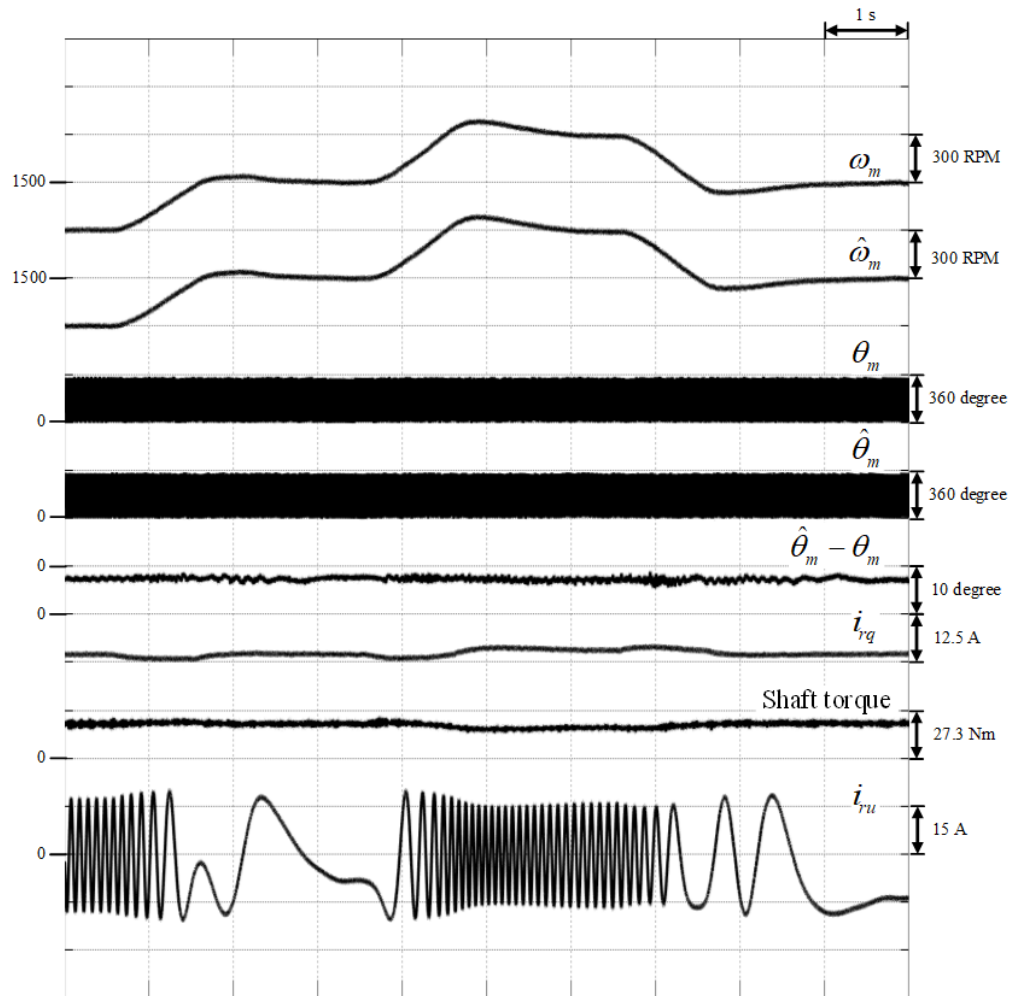
ลำดับ	โหมดการทำงาน	กระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ (A)	ผลการทดลอง
1	ไร้โหลด	3	รูปที่ 6.20
		6	รูปที่ 6.21
2	มอเตอร์ (21.8 Nm)	3	รูปที่ 6.22
		6	รูปที่ 6.23
3	เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (27.3 Nm)	3	รูปที่ 6.24
		6	รูปที่ 6.25



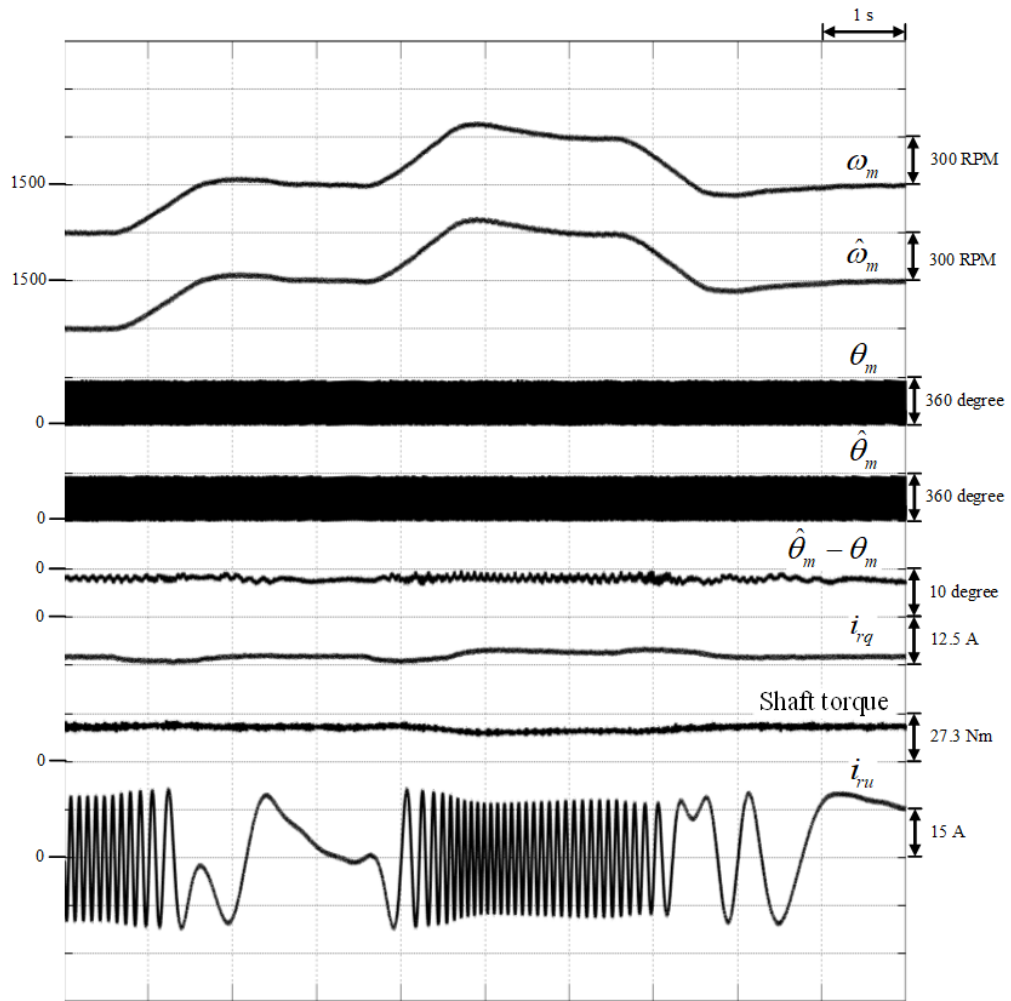
รูปที่ 6.20 ผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงความเร็วในช่วงแคบ ที่สภาวะไร้อโหลด และกระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ 3 A



รูปที่ 6.21 ผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงความเร็วในช่วงแคบ ที่สภาวะไว้โหลด และกระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ 6 A

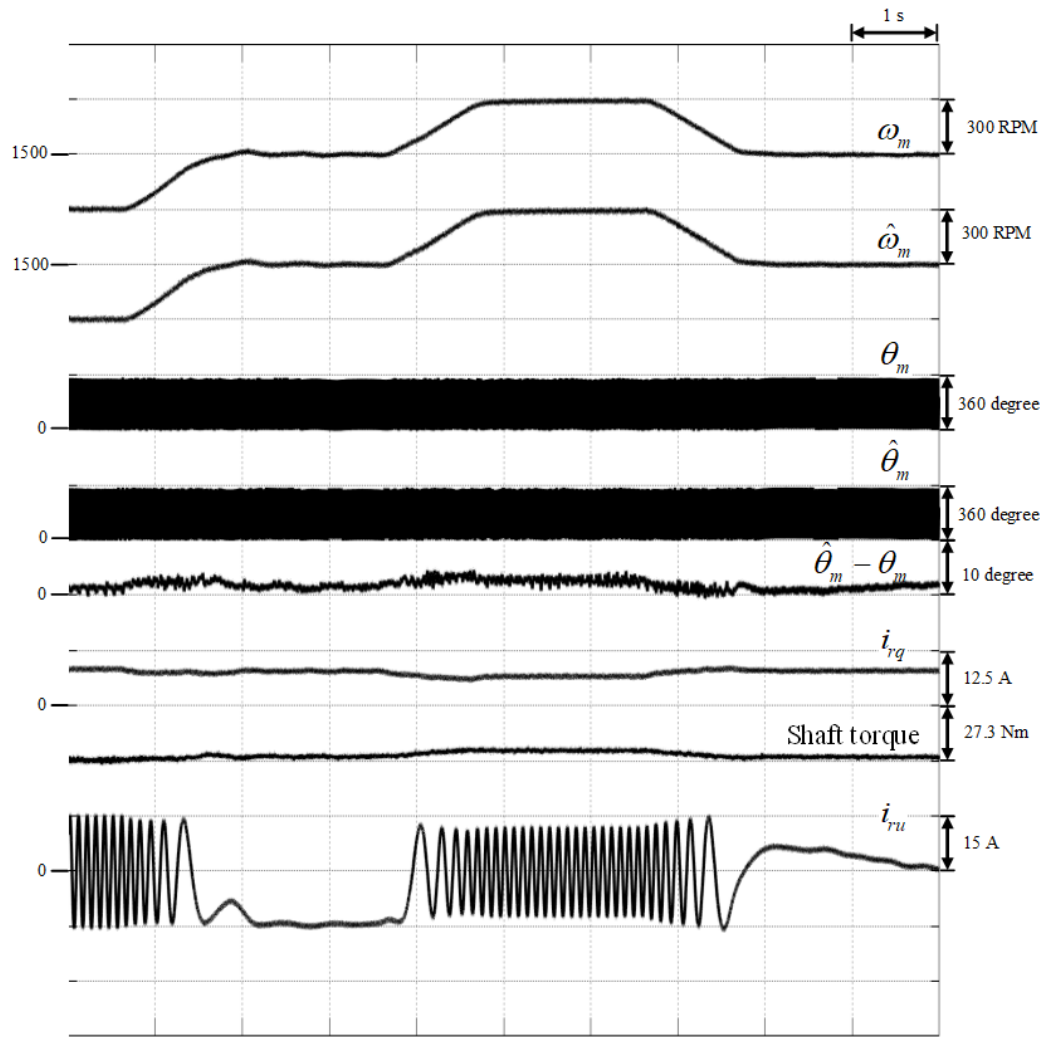


รูปที่ 6.22 ผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงความเร็วในช่วงแคบ ที่ย่านมอเตอร์ และกระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ 3 A

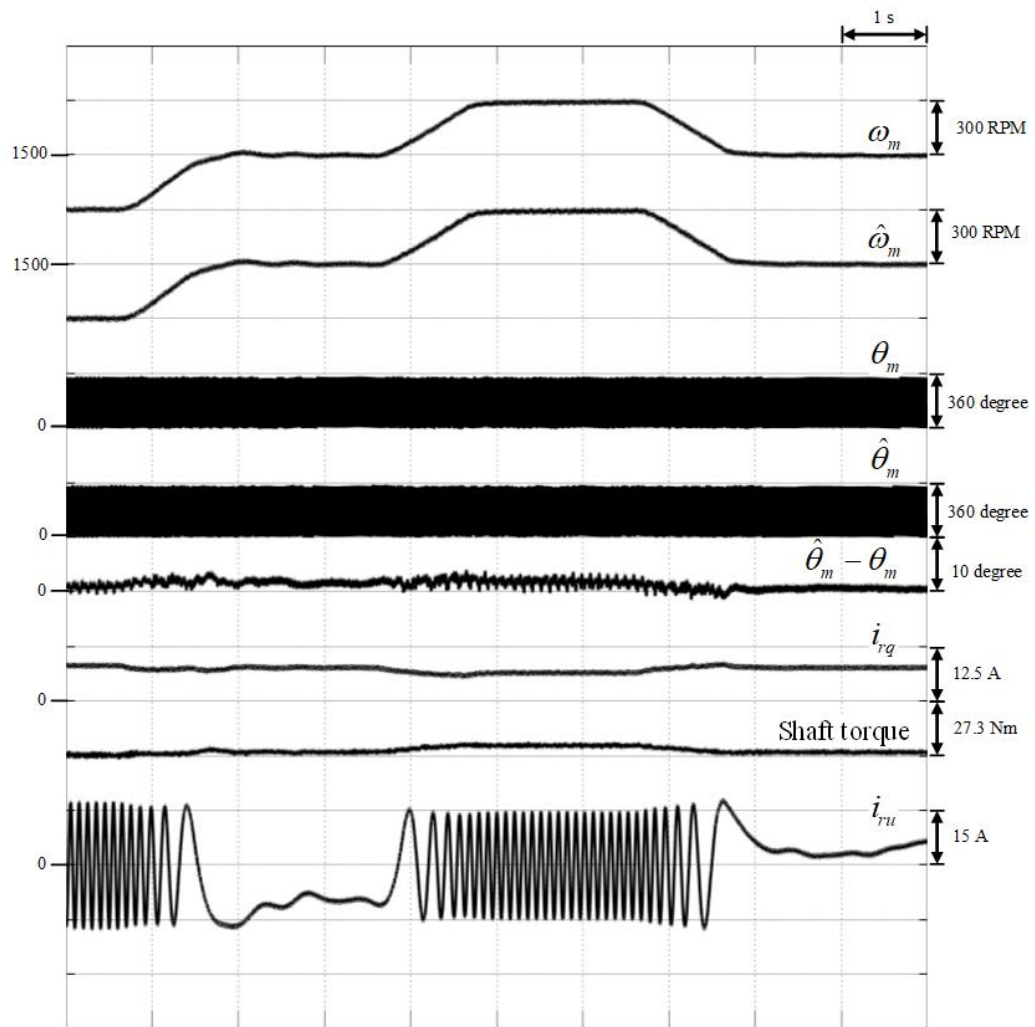


รูปที่ 6.23 ผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงความเร็วในช่วงแคบ ที่ย่านมอเตอร์ และกระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ 6 A





รูปที่ 6.24 ผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงความเร็วในช่วงแคบ ที่ย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และกระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ 3 A

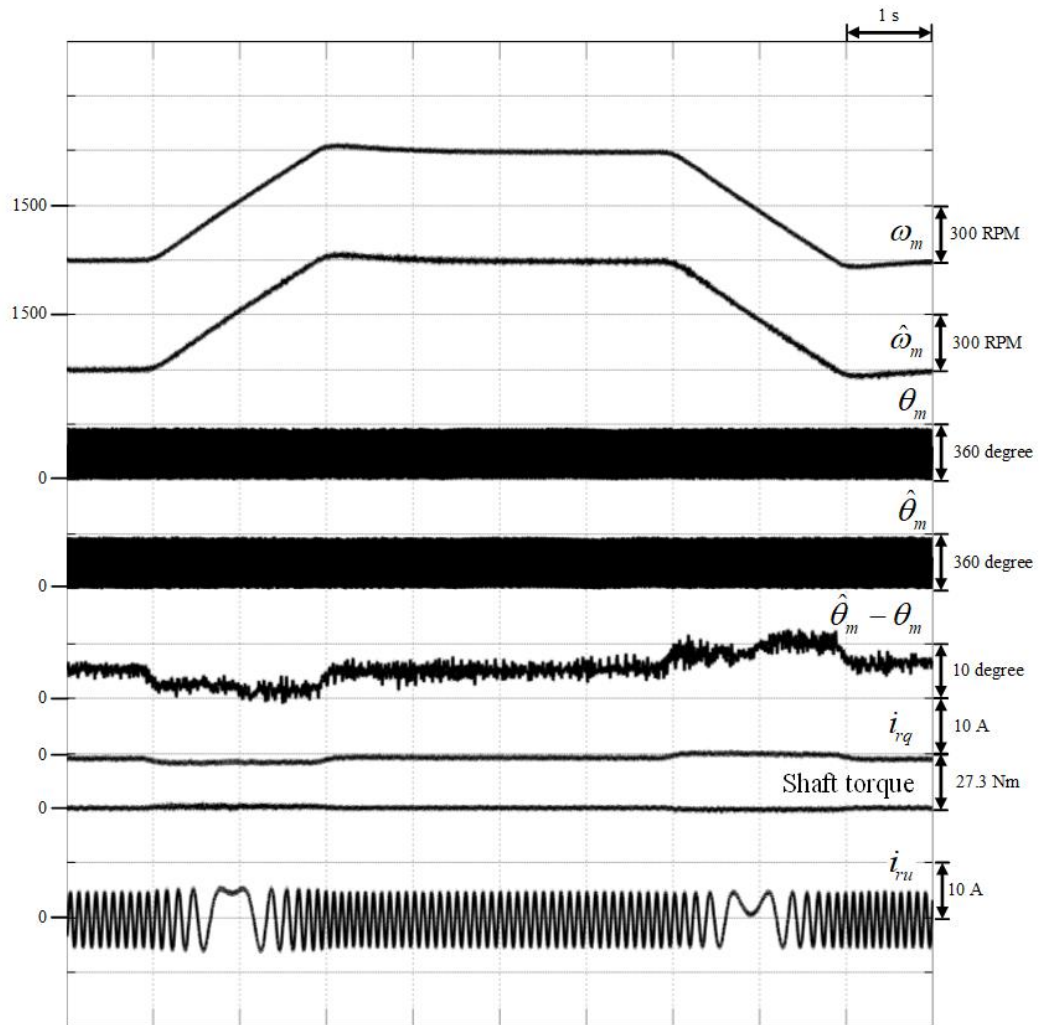


รูปที่ 6.25 ผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงความเร็วในช่วงแคบ ที่ย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และกระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ 6 A

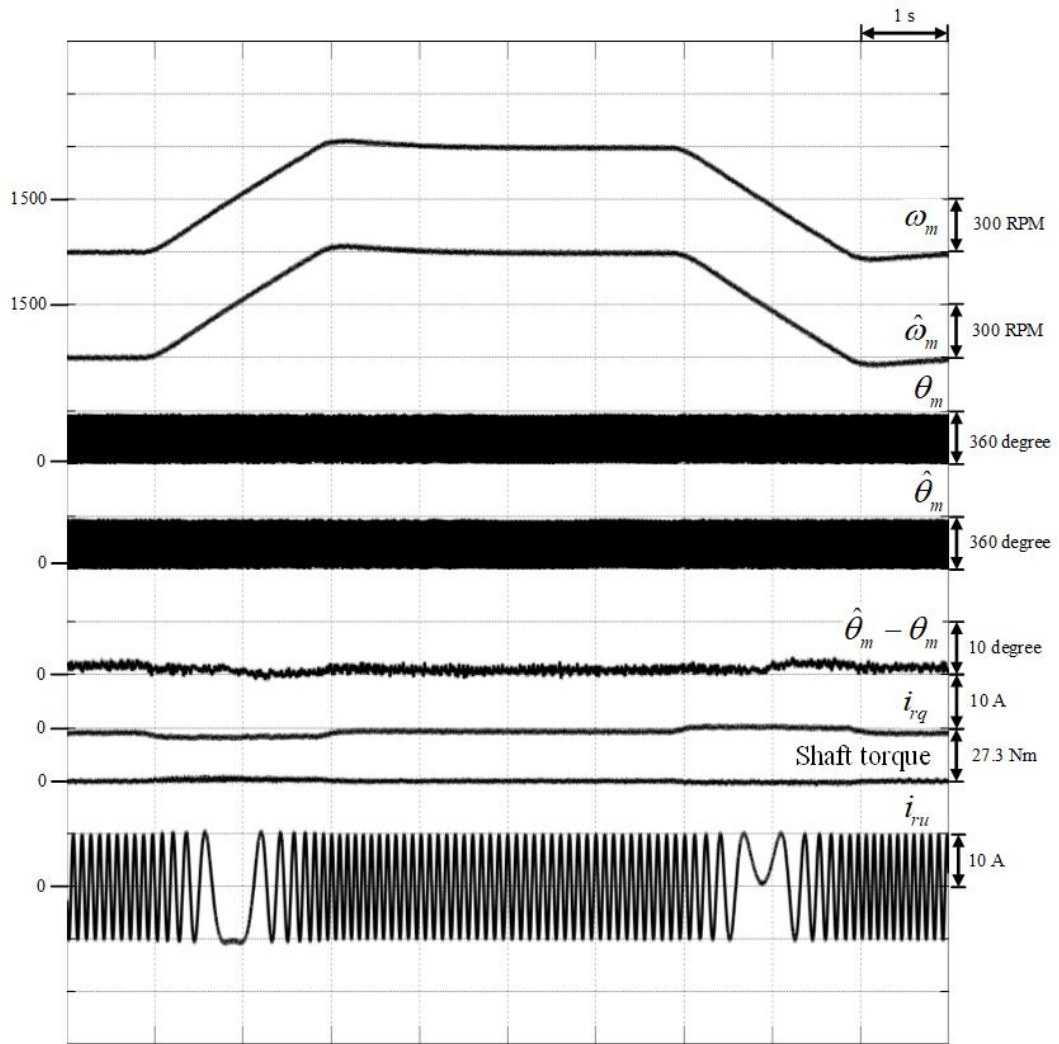
## 6.2.2 ผลการเปลี่ยนแปลงความเร็วในช่วงกว้าง

ระบบขับเคลื่อนเริ่มต้นที่ความเร็ว 1,200 rpm จากนั้นเพิ่มความเร็วไปที่ 1,800 rpm จากนั้นลดความเร็วลงเหลือ 1,200 rpm ตามลำดับ โดยเงื่อนไขการทำงานสรุปไว้ดังตารางที่ 6.3 ตารางที่ 6.3 เงื่อนไขการทดสอบระบบขับเคลื่อนแบบเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่งที่เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงความเร็วในช่วงกว้าง

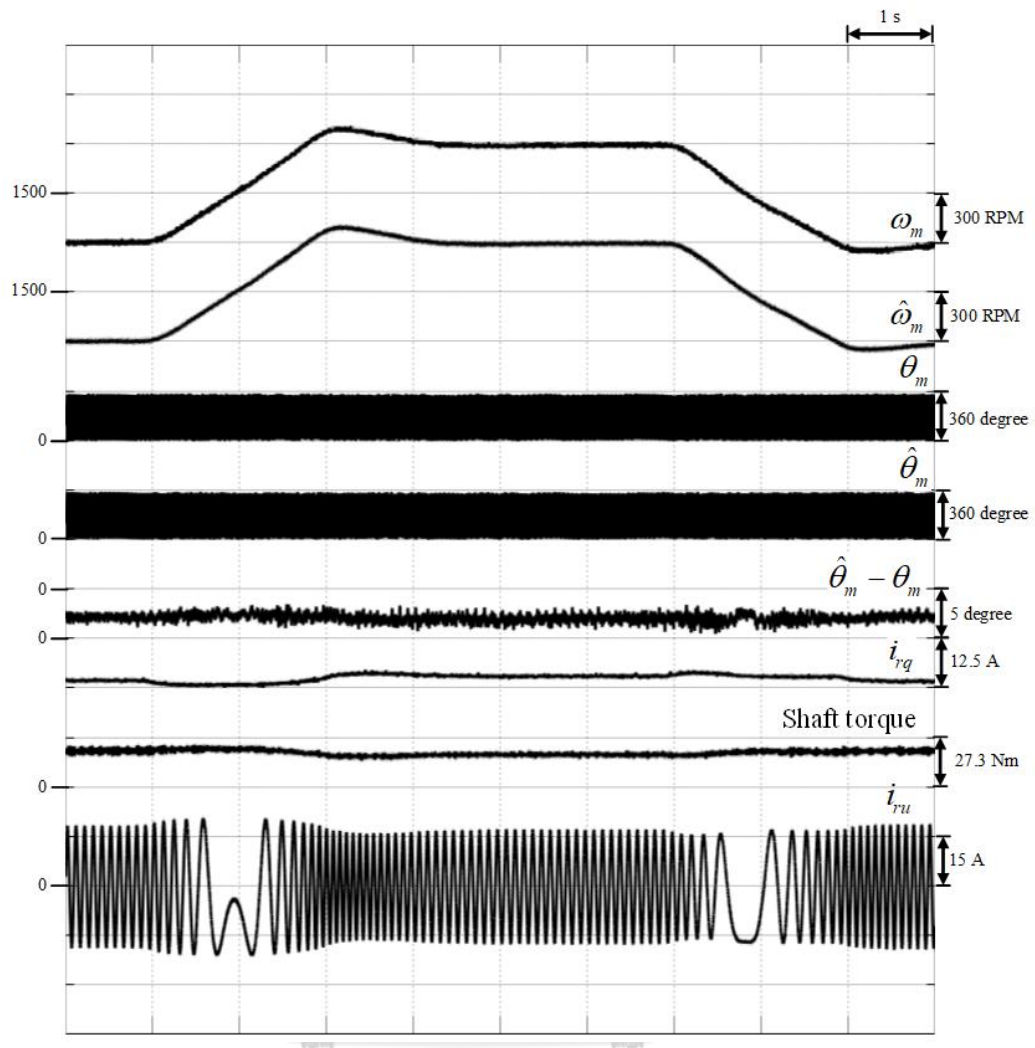
ลำดับ	โหมดการทำงาน	กระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ (A)	ผลการทดลอง
1	ไร้โหลด	3	รูปที่ 6.26
		6	รูปที่ 6.27
2	มอเตอร์ (21.8 Nm)	3	รูปที่ 6.28
		6	รูปที่ 6.29
3	เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (27.3 Nm)	3	รูปที่ 6.30
		6	รูปที่ 6.31



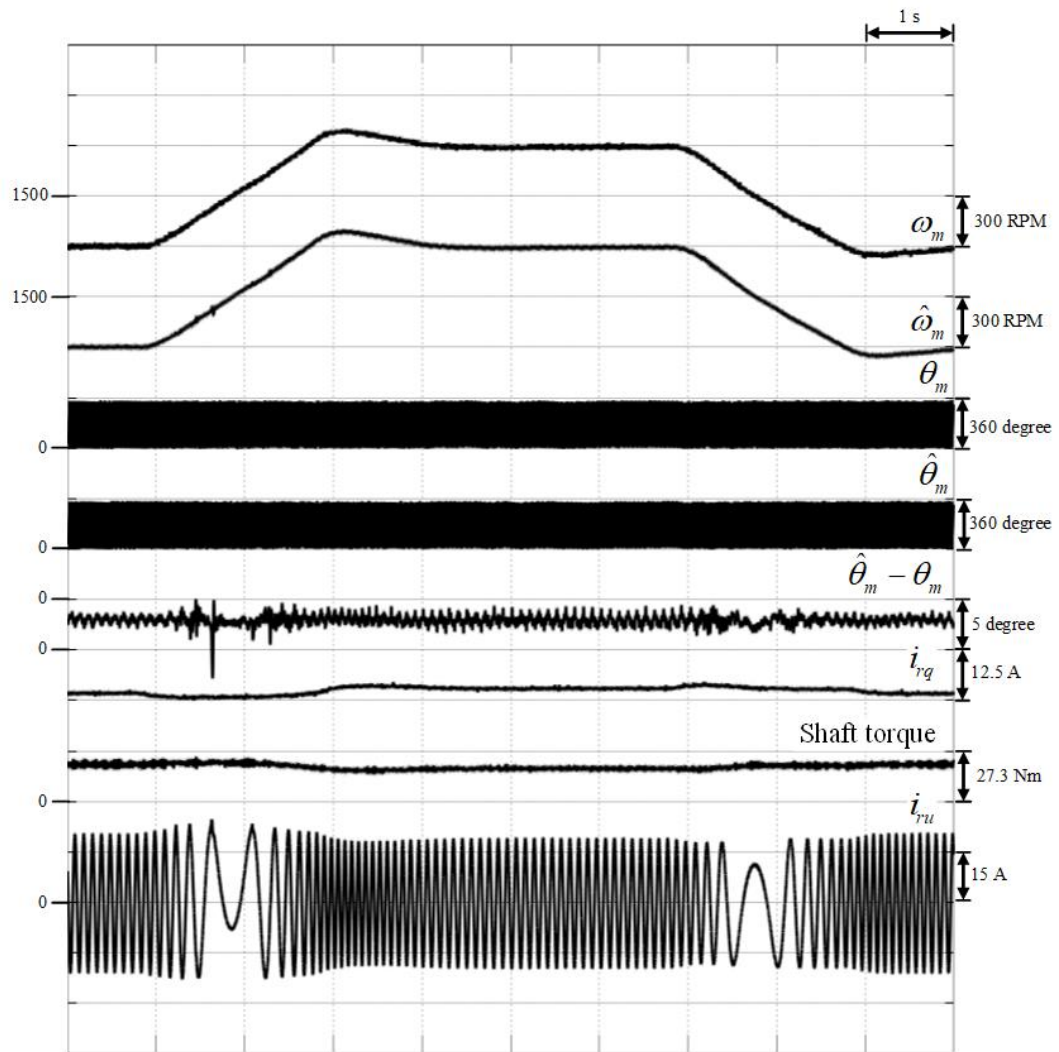
รูปที่ 6.26 ผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงความเร็วในช่วงกว้าง ที่สภาวะไร้โหลด และกระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ 3 A



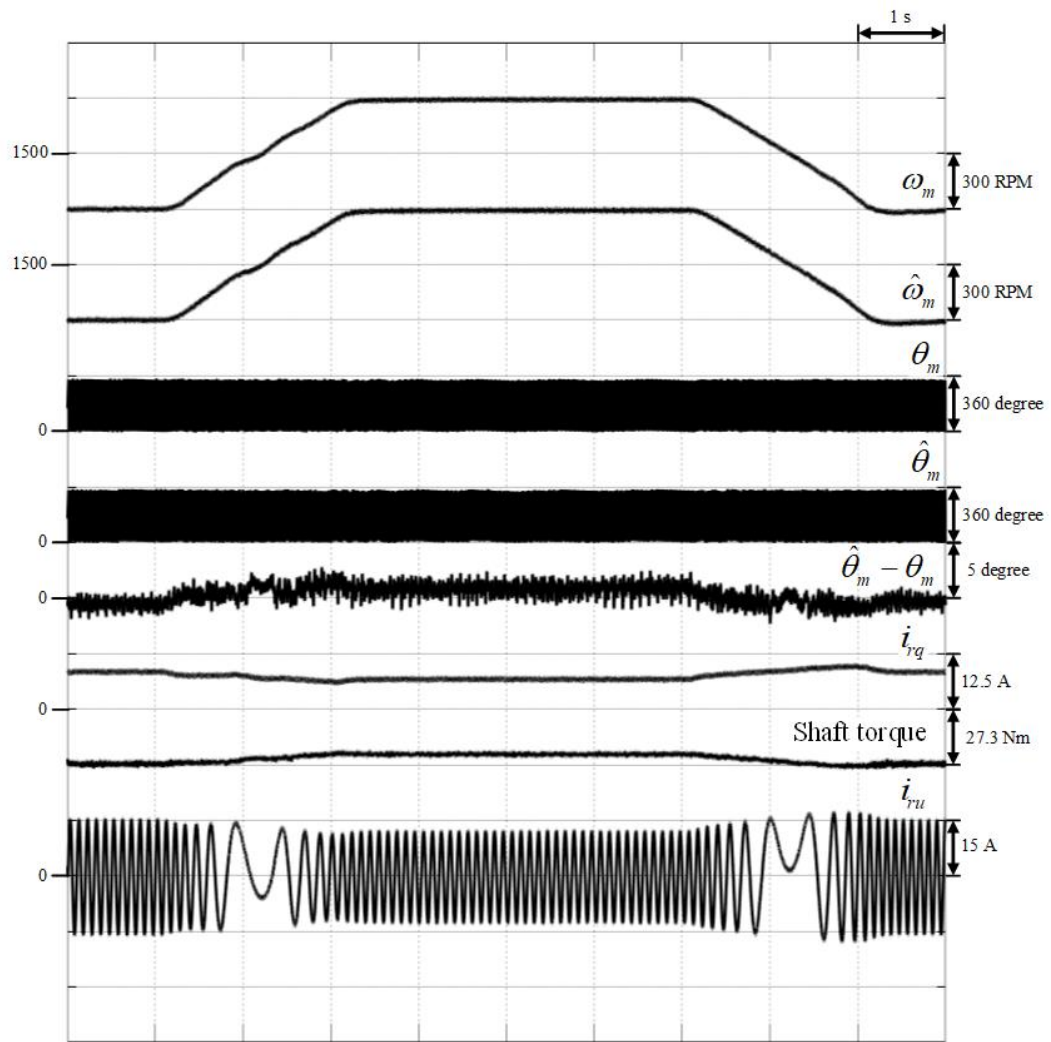
รูปที่ 6.27 ผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงความเร็วในช่วงกว้าง ที่สภาวะไร้โหลด และกระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ 6 A



รูปที่ 6.28 ผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงความเร็วในช่วงกว้าง ที่ยานมอเตอร์  
และกระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ 3 A

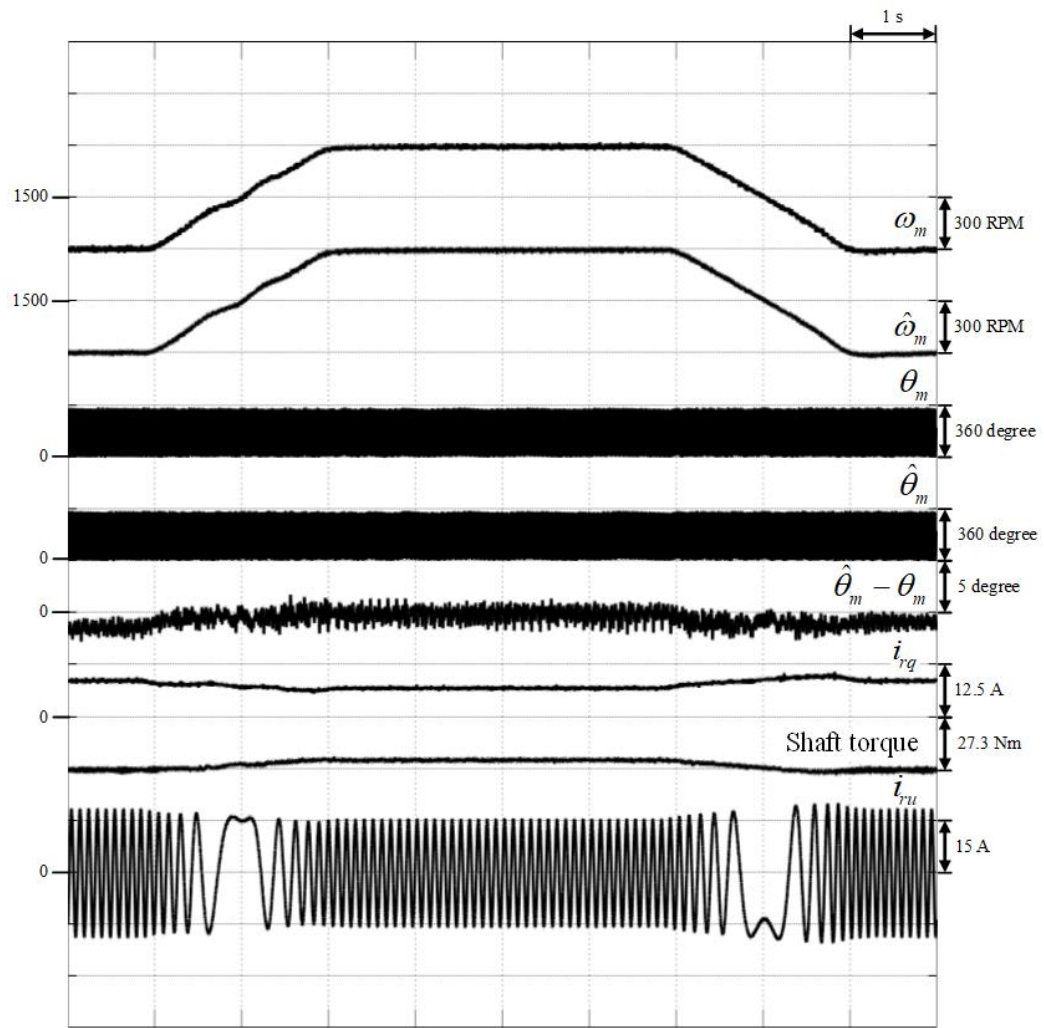


รูปที่ 6.29 ผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงความเร็วในช่วงกว้าง ที่ย่านมอเตอร์  
และกระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ 6 A



รูปที่ 6.30 ผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงความเร็วในช่วงกว้าง ที่ย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และกระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ 3 A





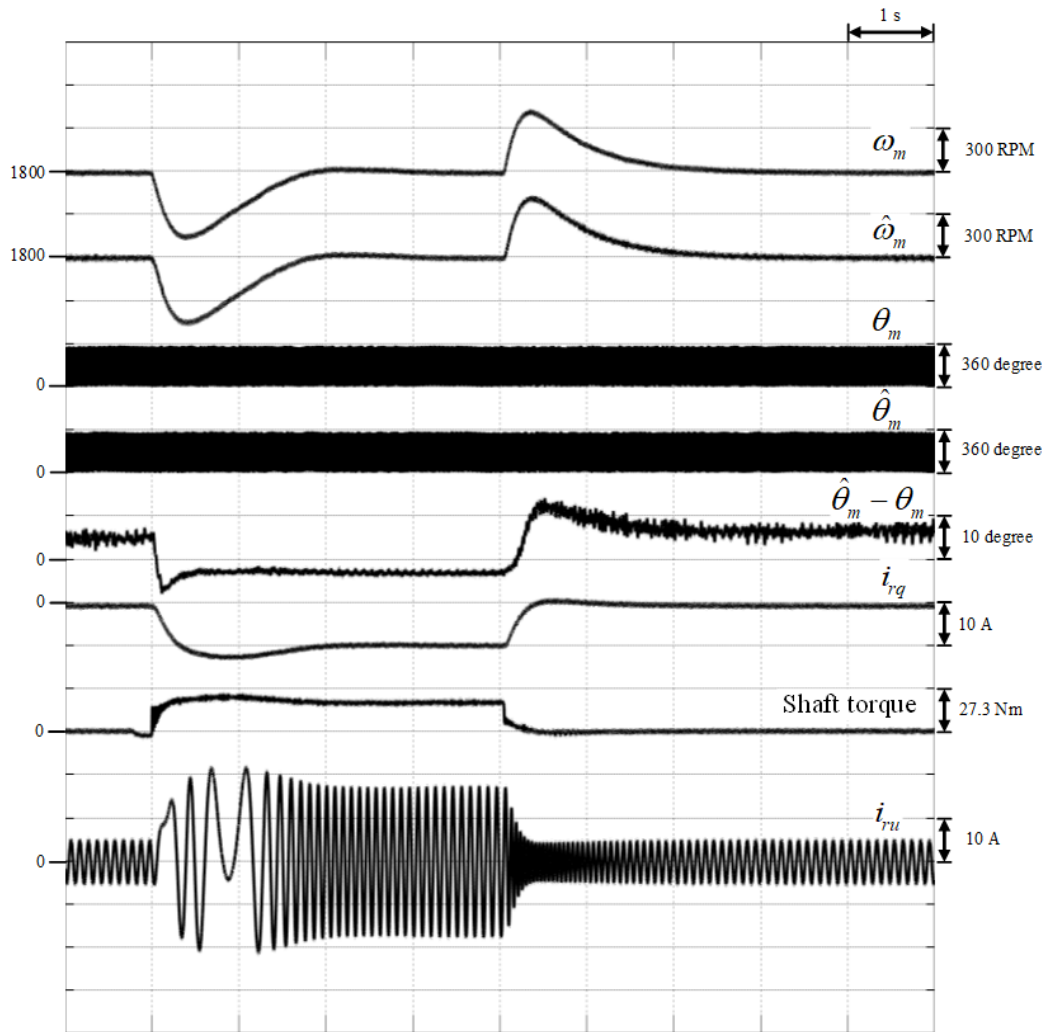
รูปที่ 6.31 ผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงความเร็วในช่วงกว้าง ที่ย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และกระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ 6 A

### 6.2.3 ผลการทดสอบใส่/ปลดโหลดแบบขั้น

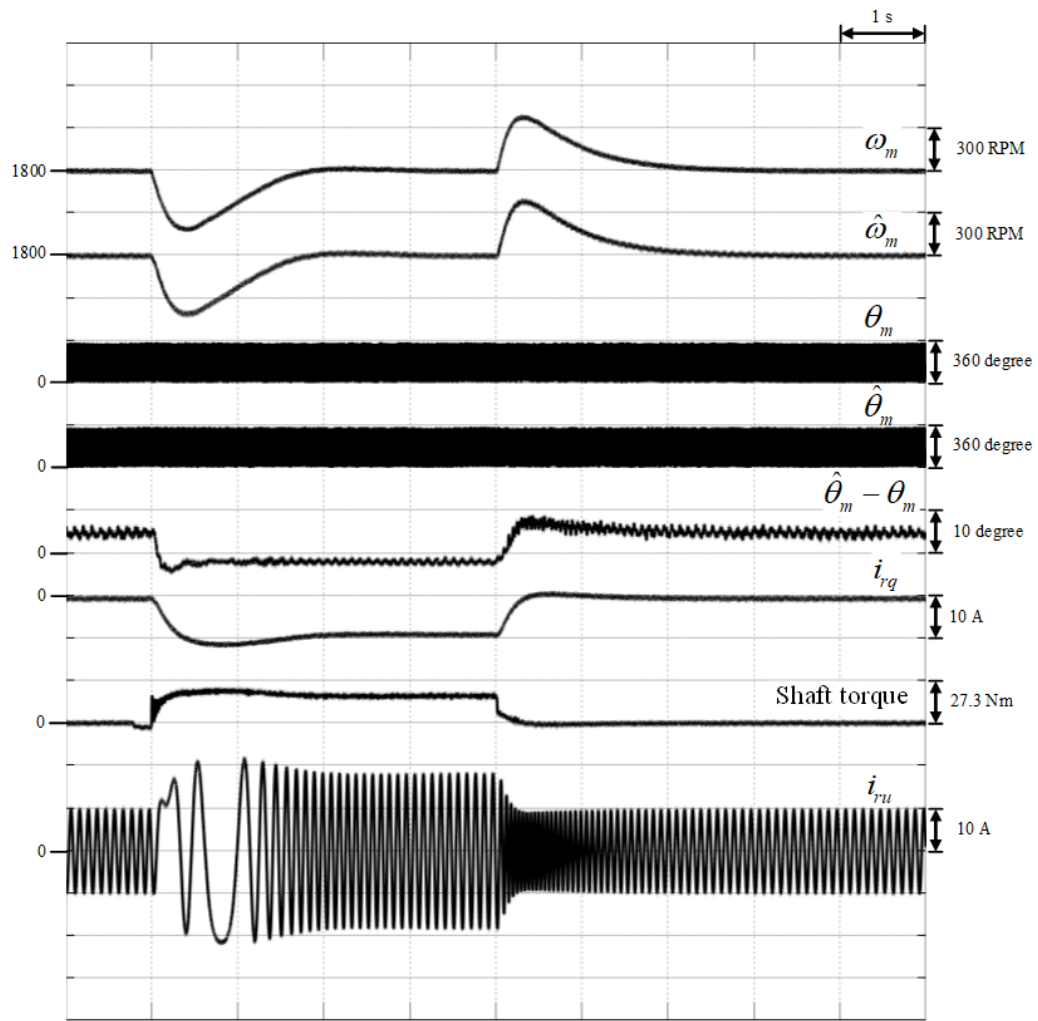
การทดสอบระบบขับเคลื่อนโดยการใส่/ปลดโหลดจะทดสอบด้วยเงื่อนไขในตารางที่ 6.4 โดยเริ่มต้นระบบจะอยู่ในสถานะอยู่ตัวที่ความเร็วคงที่ และกระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ ( $i_{rd}$ ) ทางด้านโรเตอร์คงที่ จากนั้นจะใส่โหลดให้กับระบบขับเคลื่อนนาน 4 วินาที จากนั้นจึงปลดโหลดออก

ตารางที่ 6.4 เงื่อนไขการทดสอบระบบขับเคลื่อนแบบเวกเตอร์ไร้เซ็นเซอร์วัดตำแหน่งที่เงื่อนไขการทดสอบใส่/ปลดโหลดแบบขั้น

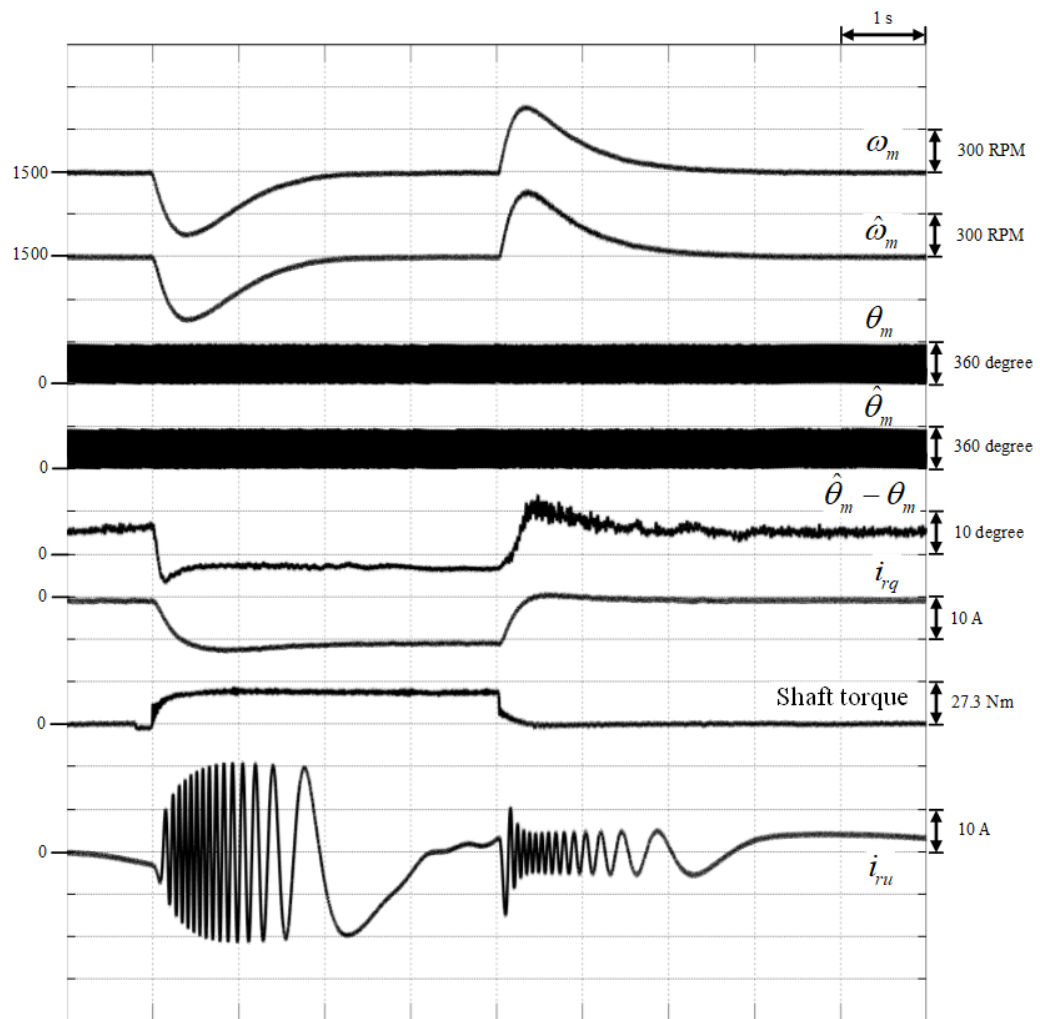
ลำดับ	โหมดการทำงาน	ความเร็วทดสอบ (rpm)	กระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ (A)	ผลการทดลอง
1	มอเตอร์ (21.8 Nm)	1,800 (Super-Synchronous Speed)	3	รูปที่ 6.32
			6	รูปที่ 6.33
		1,500 (Synchronous Speed)	3	รูปที่ 6.34
			6	รูปที่ 6.35
		1,200 (Sub-Synchronous Speed)	3	รูปที่ 6.36
			6	รูปที่ 6.37
2	เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (27.3 Nm)	1,800 (Super-Synchronous Speed)	3	รูปที่ 6.38
			6	รูปที่ 6.39
		1,500 (Synchronous Speed)	3	รูปที่ 6.40
			6	รูปที่ 6.41
		1,200 (Sub-Synchronous Speed)	3	รูปที่ 6.42
			6	รูปที่ 6.43



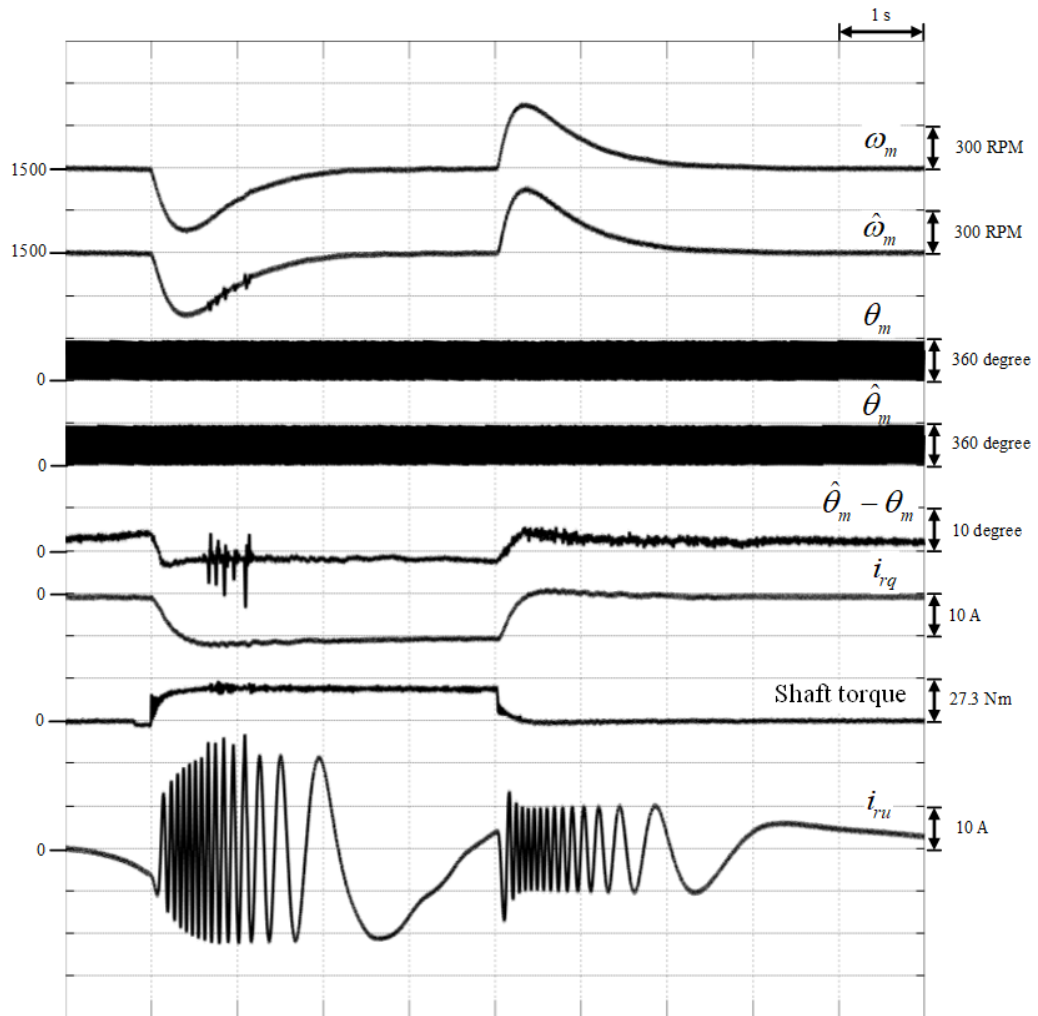
รูปที่ 6.32 ผลการทดลองใส่/ปลดโหลด ที่ย่านมอเตอร์ ที่ความเร็ว 1,800 rpm และกระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ 3 A



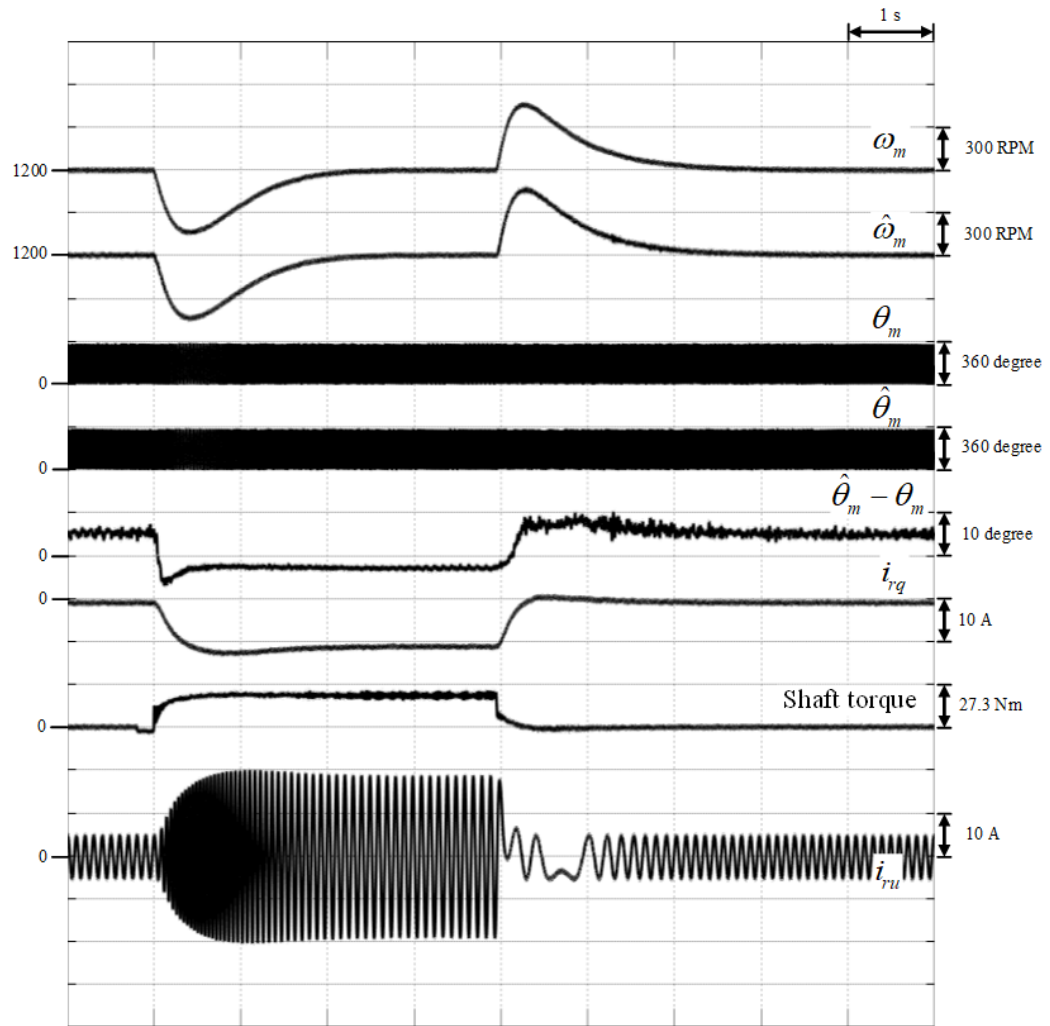
รูปที่ 6.33 ผลการทดลองใส่/ปลดโหลด ที่ย่านมอเตอร์ ที่ความเร็ว 1,800 rpm  
และกระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ 6 A



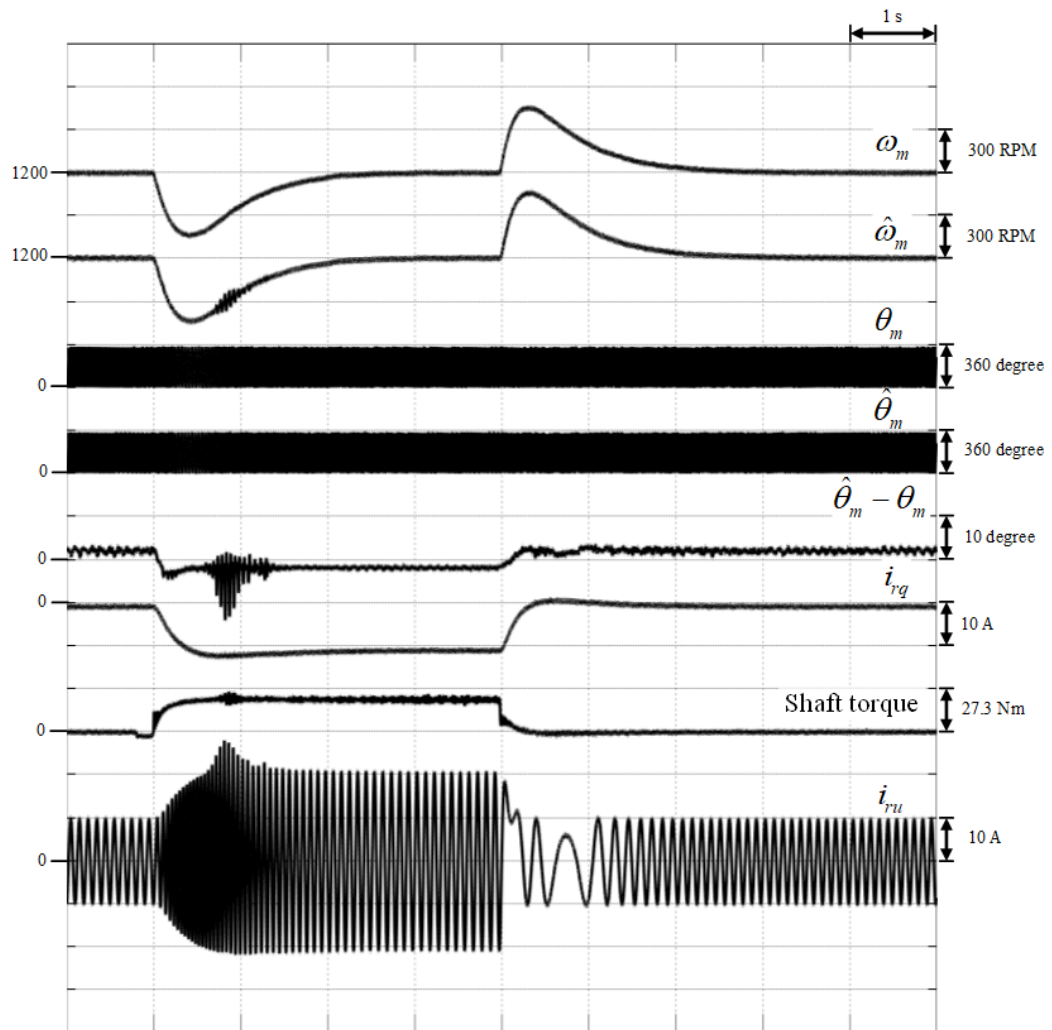
รูปที่ 6.34 ผลการทดลองใส่/ปลดโหลด ที่ย่านมอเตอร์ ที่ความเร็ว 1,500 rpm  
และกระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ 3 A



รูปที่ 6.35 ผลการทดลองใส่/ปลดโหลด ที่ย่านมอเตอร์ ที่ความเร็ว 1,500 rpm  
และกระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ 6 A

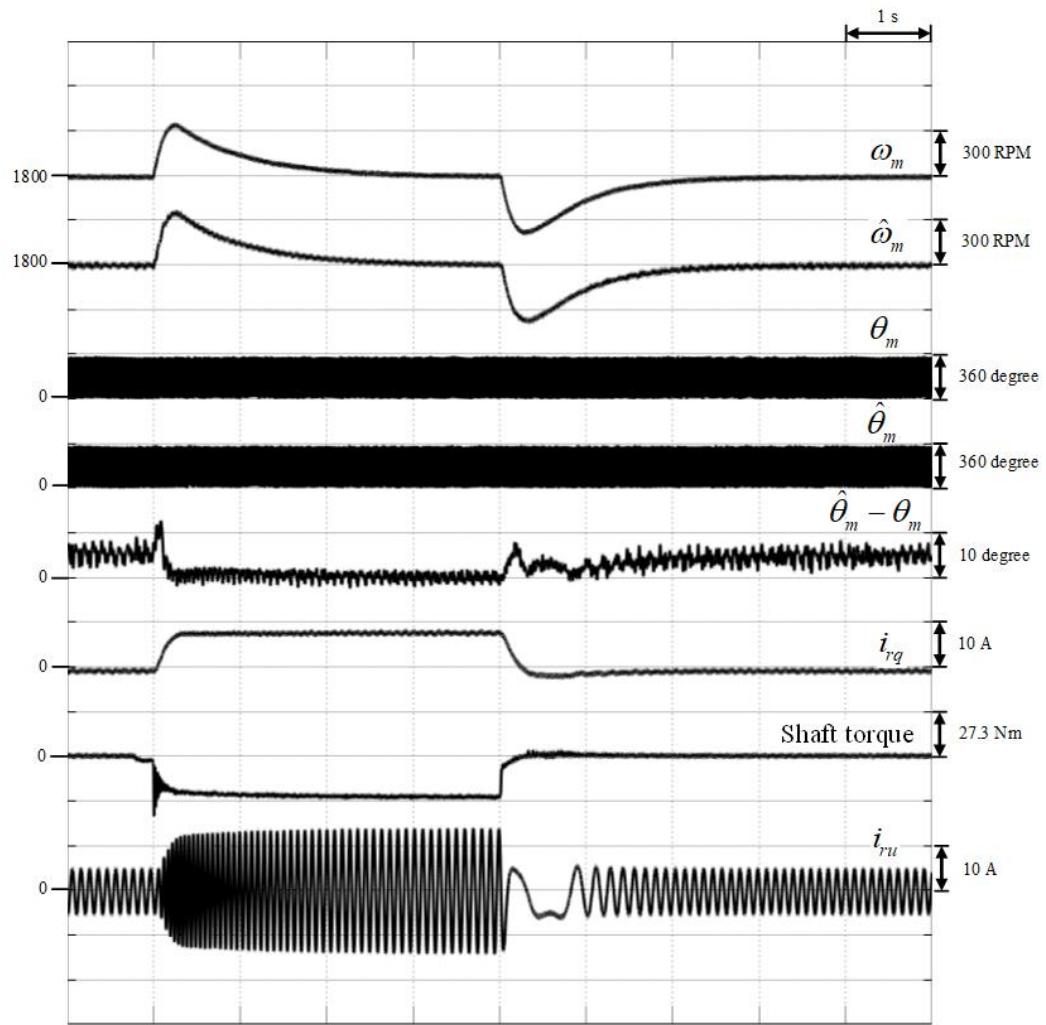


รูปที่ 6.36 ผลการทดลองใส่/ปลดโหลด ที่ย่านมอเตอร์ ที่ความเร็ว 1,200 rpm  
และกระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ 3 A

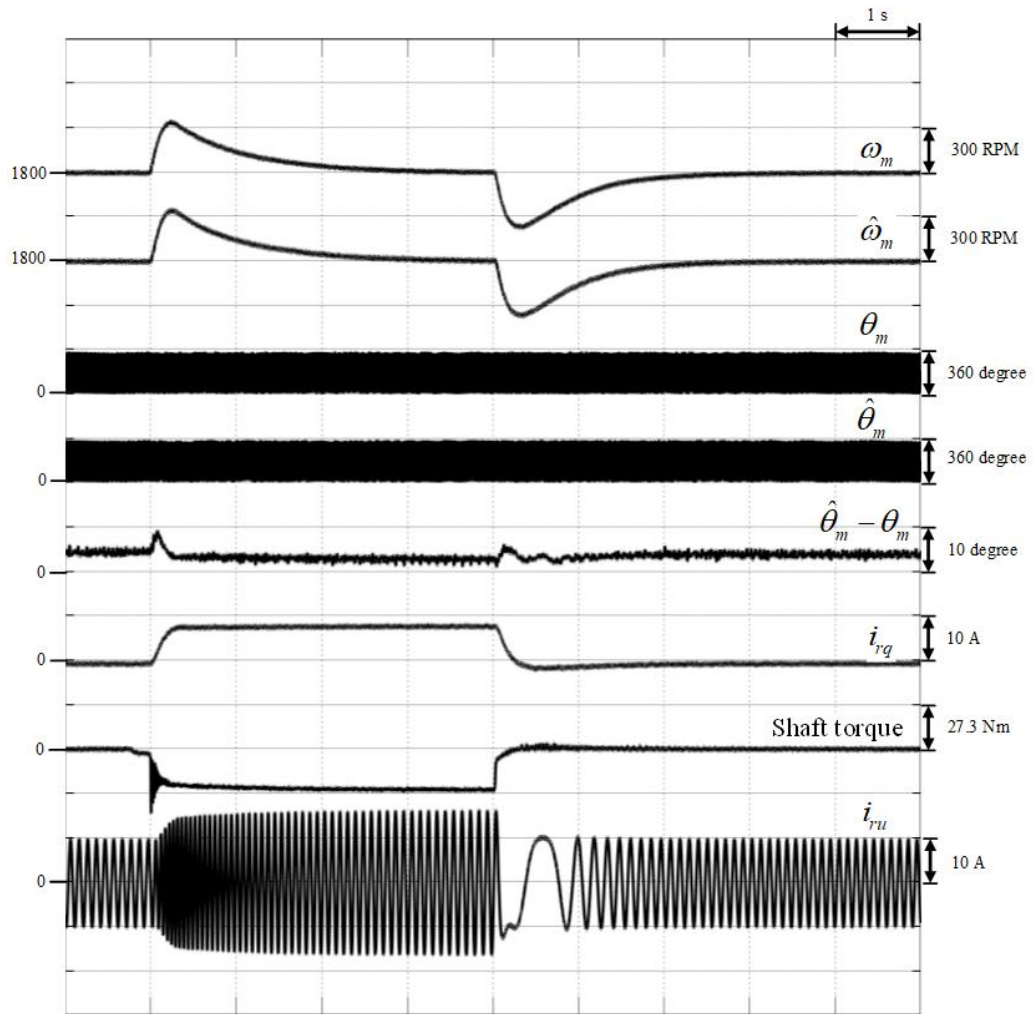


รูปที่ 6.37 ผลการทดลองใส่/ปลดโหลด ที่ย่านมอเตอร์ ที่ความเร็ว 1,200 rpm  
และกระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ 6 A

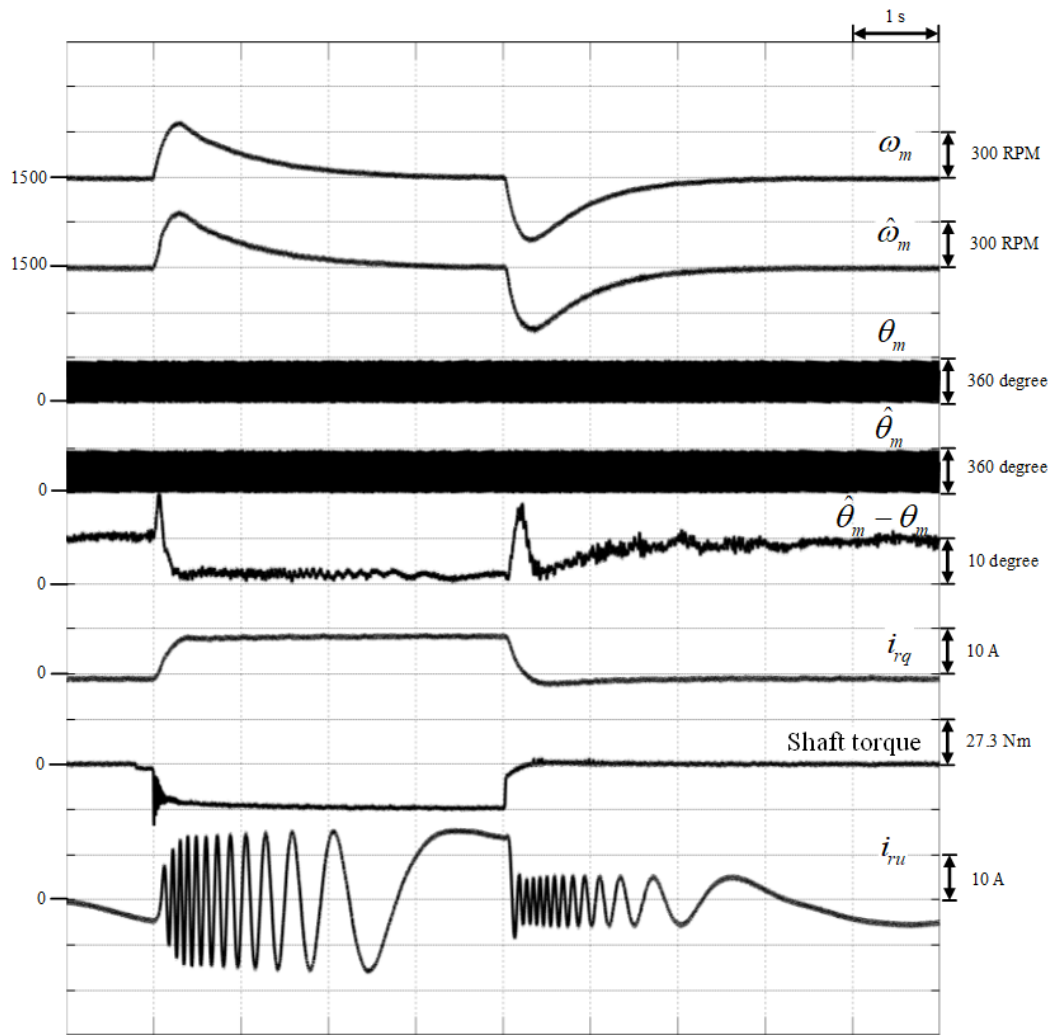




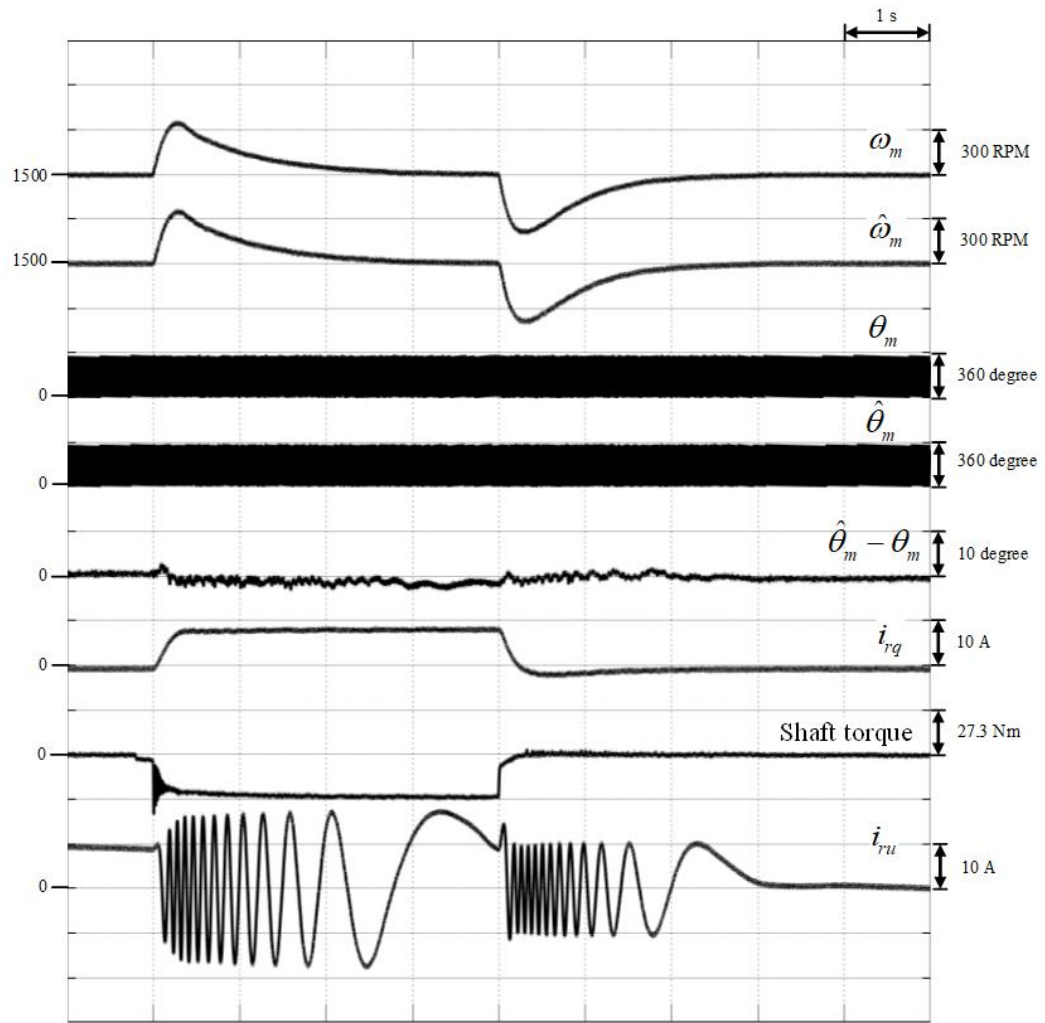
รูปที่ 6.38 ผลการทดลองใส่/ปลดโหลด ที่ย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ที่ความเร็ว 1,800 rpm และกระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ 3 A



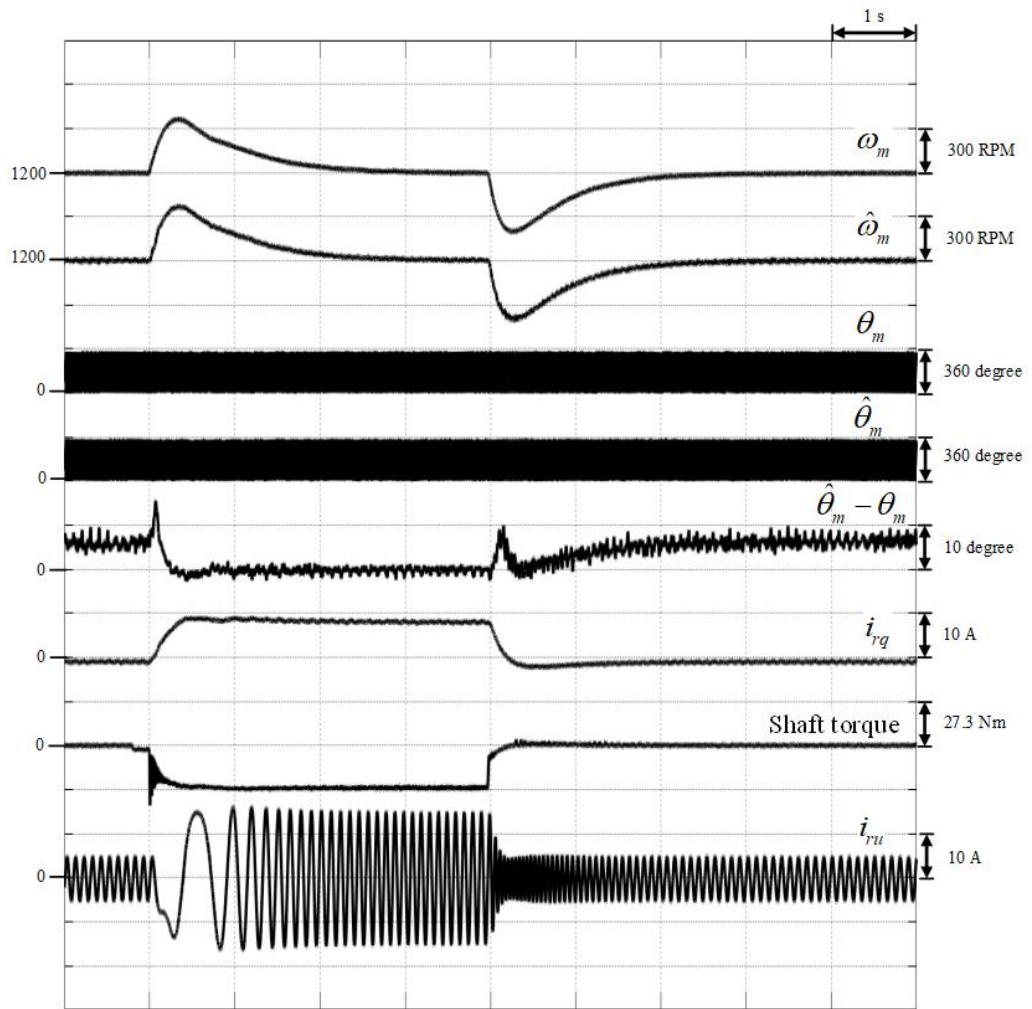
รูปที่ 6.39 ผลการทดลองใส่/ปลดโหลด ที่ย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ที่ความเร็ว 1,800 rpm และกระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ 6 A



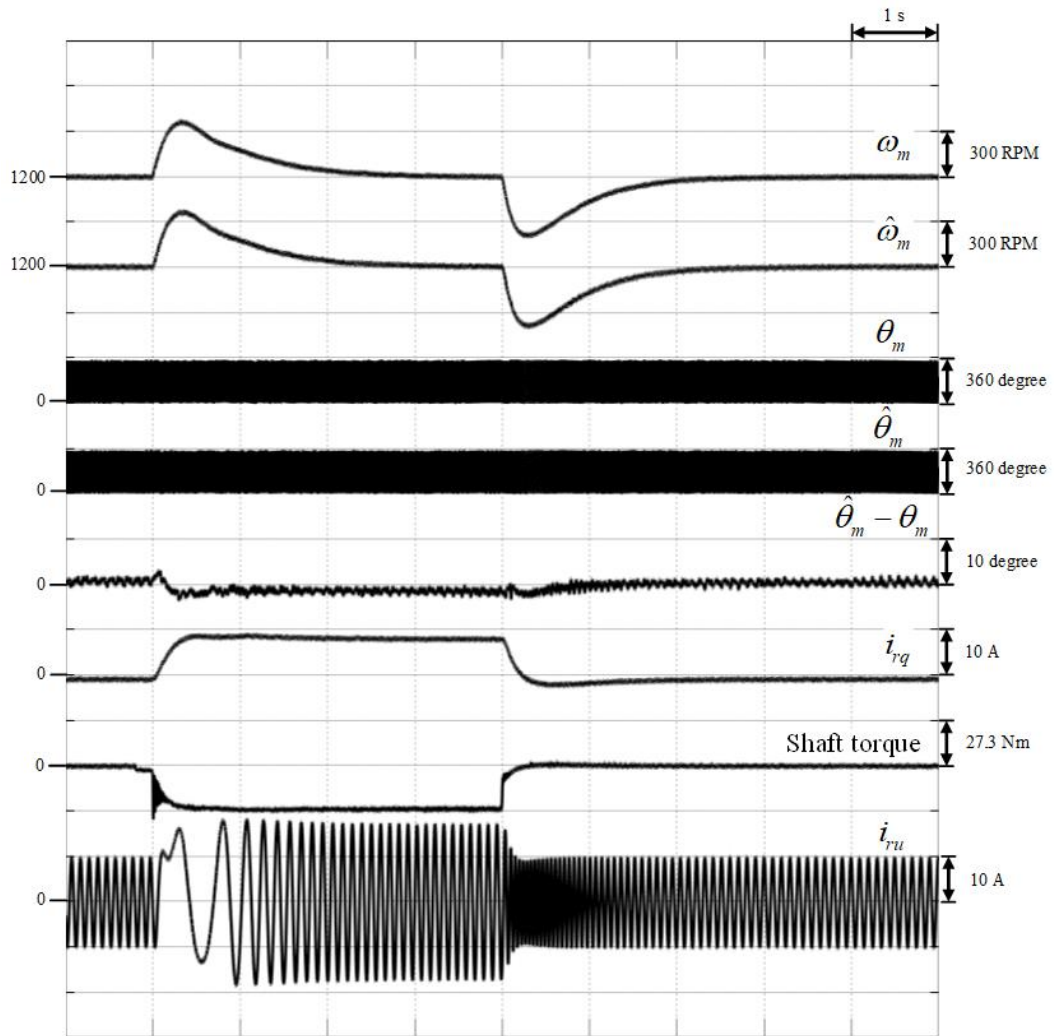
รูปที่ 6.40 ผลการทดลองใส่/ปลดโหลด ที่ย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ที่ความเร็ว 1,500 rpm และกระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ 3 A



รูปที่ 6.41 ผลการทดลองใส่/ปลดโหลด ที่ย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ที่ความเร็ว 1,500 rpm และกระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ 6 A



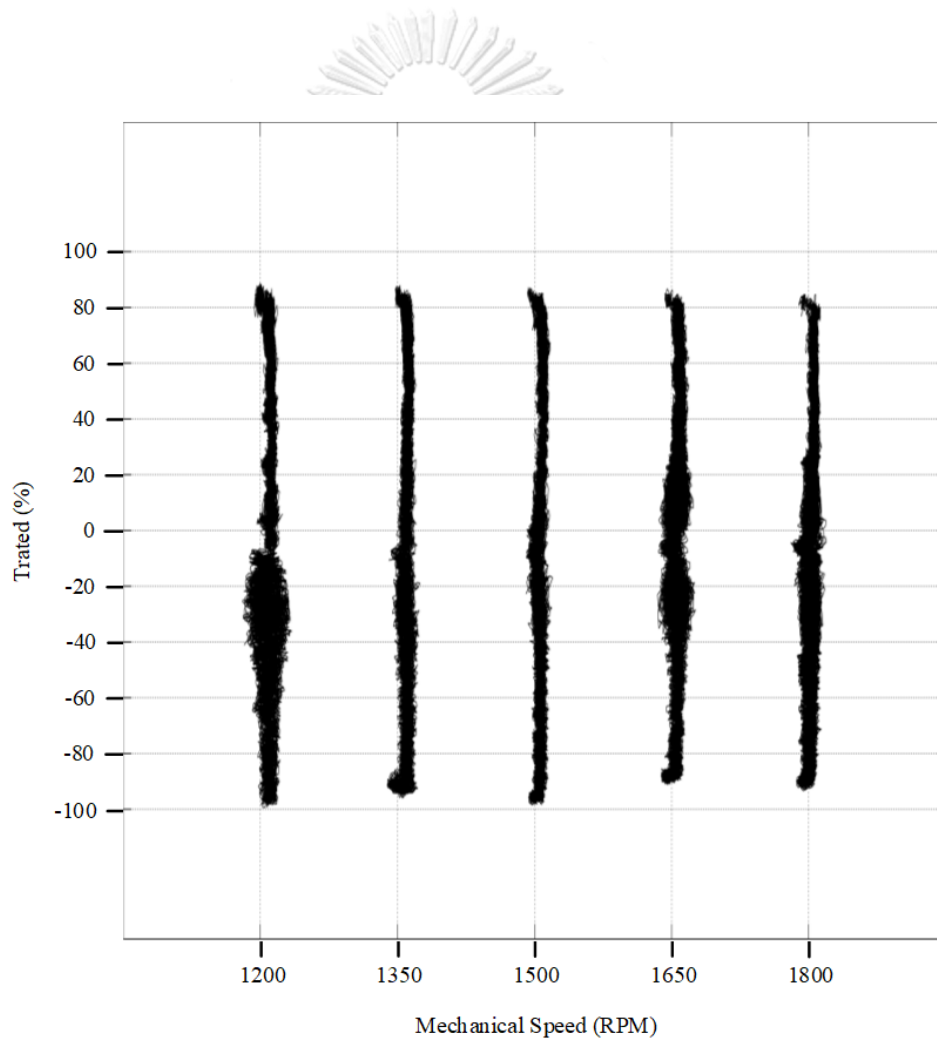
รูปที่ 6.42 ผลการทดลองใส่/ปลดโหลด ที่ย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ที่ความเร็ว 1,200 rpm และกระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ 3 A



รูปที่ 6.43 ผลการทดลองใส่/ปลดโหลด ที่ย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ที่ความเร็ว 1,200 rpm และกระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ 6 A

#### 6.2.4 ผลการทดสอบการเปลี่ยนโหลดแบบเชิงเส้นที่ความเร็วคงที่

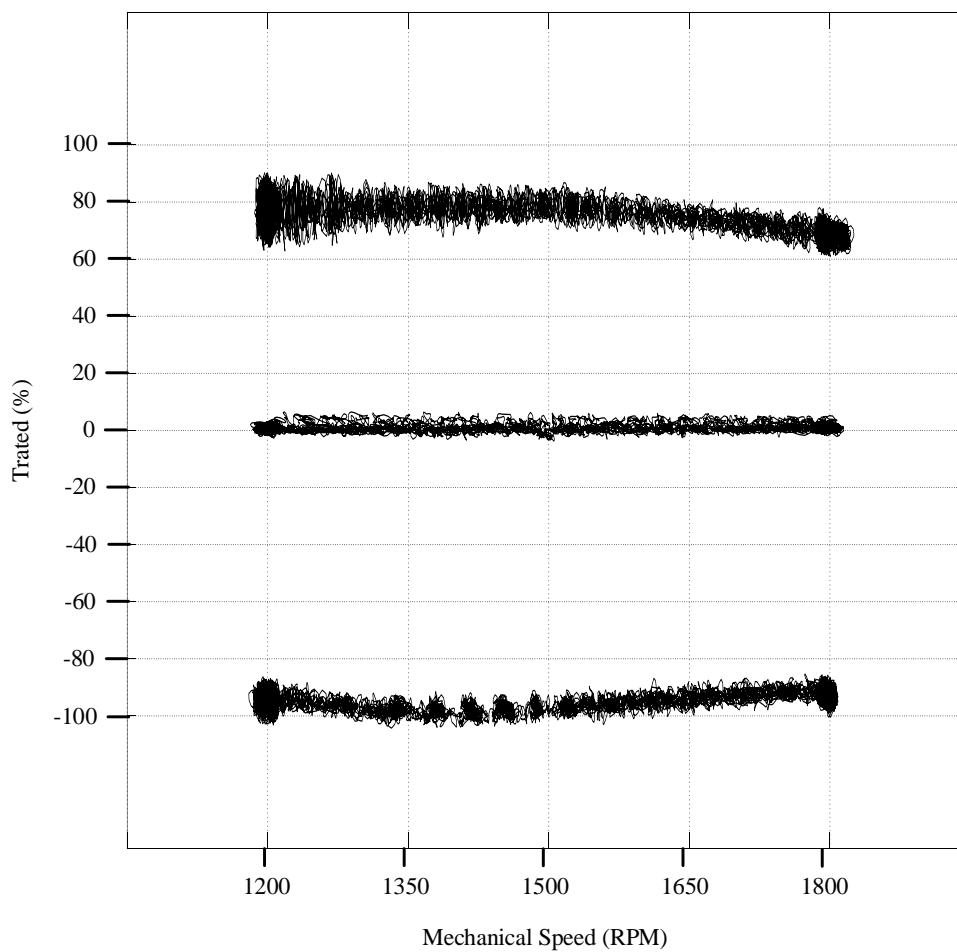
สมรรถนะของระบบควบคุมแบบเวกเตอร์ไร้เซ็นเซอร์วัดตำแหน่ง สามารถขับเคลื่อนได้ตั้งแต่ความเร็ว 1,200 rpm (Sub-Synchronous) ถึง ความเร็ว 1,800 rpm (Super-Synchronous) และสามารถป้อนโหลดได้ตั้งแต่นานเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (-27.3 Nm, 100% ของโหลดพิกัด) จนถึงโหลดย่านมอเตอร์ (21.8 Nm, 80% ของโหลดพิกัด) โดยทดสอบการทำงานที่กระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์เท่ากับ 3 A ที่ความเร็วคงที่ 1,200 rpm, 1,350 rpm, 1,500 rpm, 1,650 rpm, 1,800 rpm ตามลำดับ ระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซ็นเซอร์วัดตำแหน่งสามารถตอบสนองต่อโหลดในย่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ย่านมอเตอร์ และไร้โหลดได้ โดยสามารถควบคุมความเร็วให้คงที่ได้ดังรูปที่ 6.44



รูปที่ 6.44 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงโหลดแบบเชิงเส้นที่ความเร็วคงที่

### 6.2.5 ผลการทดสอบการเปลี่ยนโหลดความเร็วแบบเชิงเส้นที่โหลดคงที่

สมรรถนะของระบบควบคุมแบบเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง สามารถขับเคลื่อนได้ตั้งแต่ความเร็ว 1,200 rpm (Sub-Synchronous) ถึง ความเร็ว 1,800 rpm (Super-Synchronous) และสามารถป้อนโหลดได้ตั้งแต่มอเตอร์กำเนิดไฟฟ้า (-27.3Nm, 100% ของโหลดพิกัด) จนถึงโหลดมอเตอร์ (21.8 Nm, 80% ของโหลดพิกัด) โดยทดสอบการทำงานที่กระแสกระตุ้นสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์เท่ากับ 3 A ที่โหลดคงที่ มอเตอร์ (21.8 Nm, 80% ของโหลดพิกัด) ไร้โหลด และ มอเตอร์กำเนิดไฟฟ้า (27.3 Nm, 100% ของโหลดพิกัด) ตามลำดับ ดังรูปที่ 6.45



รูปที่ 6.45 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงความเร็วแบบเชิงเส้นที่โหลดคงที่



## บทที่ 7

### บทสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 7.1 บทสรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอระบบประมาณตำแหน่งและความเร็วโรเตอร์ ด้วยตัวสังเกตลดอันดับแบบปรับตัวโดยอาศัยแบบจำลองค่าผิดพลาดกระแสเดเตอร์ มีข้อดีดังนี้

1. ระบบประมาณมีการคำนวณที่เรียบง่าย ไม่ซับซ้อน ไม่ต้องใช้ค่าพารามิเตอร์ที่เกินความจำเป็นเช่น ค่ากำลังสูญเสียในแกนเหล็ก เป็นต้น
2. ไม่มีการใช้ค่าสเตเตอร์ฟลักซ์ในการคำนวณทำให้ลดปัญหาเรื่องการเลื่อนของสัญญาณไฟตรงได้
3. ระบบประมาณสามารถวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการทำให้เป็นเชิงเส้น ซึ่งสามารถพิสูจน์ได้ว่าระบบประมาณมีเสถียรภาพในทุก ๆ เงื่อนไขการทำงาน
4. มีแนวทางในการออกแบบอัตราขยายของระบบประมาณที่คำนึงถึงผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้า
5. มีการวิเคราะห์ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ต่อระบบประมาณ และแนวทางการปรับปรุงแก้ไข

#### 7.2 ข้อเสนอแนะ

1. ระบบประมาณขาดคุณสมบัติการประมาณค่าได้ในกรณีที่กระแสโรเตอร์มีค่าเป็นศูนย์
2. ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้า และความไม่เป็นอุดมคติของอุปกรณ์ มีผลกระทบอย่างมากต่อความแม่นยำในการประมาณตำแหน่งและความเร็วโรเตอร์ของระบบประมาณดังนั้นแนวทางในการแก้ไข
  - 2.1. ปรับค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าตามเงื่อนไขการทำงาน
  - 2.2. ใช้แบบจำลองที่ไม่ขึ้นกับค่าพารามิเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้า เช่น วิธีการฉีดสัญญาณความถี่สูง (High frequency injection)
  - 2.3. การเลือกใช้เวกเตอร์รีเกรสเซอร์แบบอื่น เพื่อใช้ลดผลช่วยลดผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ได้
  - 2.4. ออกแบบอัตราขยายป้อนกลับแบบอื่น ที่มีผลช่วยลดผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ได้

3. ค่ายอดแรงดันโรเตอร์มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับแรงดันบัสไฟตรง คิดเป็นร้อยละ 7.3 สัญญาณ PWM กับแรงดันไฟตรงมีความต่างกันมาก ในการสร้างแรงดันที่มีช่วงการ on ของสวิตช์สั้น และช่วง off ของสวิตช์นานจะทำให้ค่าแรงดันผิดพลาดจากการประวิงเวลาจะมีค่ามากขึ้น เมื่อเทียบกับขนาดแรงดันที่สร้างได้ แม้ว่าจะมีการคำนวณเพื่อชดเชยแล้วก็ตาม อย่างไรก็ตาม การเลือกใช้แรงดันบัสไฟตรงให้เหมาะสมจะช่วยให้ระบบทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

ภาคผนวก ก

การพิสูจน์เสถียรภาพของตัวสังเกตลัดอันดับแบบปรับตัว

จากสมการค่าผิดพลาดกระแสสแตเตอร์บนแกนอ้างอิงสแตเตอร์จากสมการที่ (2.9) เขียนใหม่จะได้

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

$$\frac{d}{dt} \bar{e}_i = \frac{1}{L_s} \left\{ -R_s \bar{e}_i + M \frac{d}{dt} \left[ \left( -I + e^{Jp(\theta_m - \hat{\theta}_m)} \right) e^{Jp\hat{\theta}_m} \bar{i}_r' \right] - K \bar{e}_i \right\} \quad (ก.2)$$

Linearization รอบ ๆ จุด  $\bar{e}_i(t) = 0$ , จะสามารถประมาณได้ว่า  $\hat{\theta}_m = \theta_m$

$$\frac{d}{dt} \bar{e}_i = \frac{1}{L_s} \left\{ -R_s \bar{e}_i + M \frac{d}{dt} \left[ \left( -I + \left( I + Jp(\theta_m - \hat{\theta}_m) \right) \right) e^{Jp\hat{\theta}_m} \bar{i}_r' \right] - K \bar{e}_i \right\} \quad (ก.3)$$

$$\frac{d}{dt} \bar{e}_i = \frac{1}{L_s} \left\{ -R_s \bar{e}_i + M \frac{d}{dt} \left[ Jp(\theta_m - \hat{\theta}_m) e^{Jp\hat{\theta}_m} \bar{i}_r' \right] - K \bar{e}_i \right\} \quad (ก.4)$$

เมื่อเขียนให้อยู่ในโดเมนความถี่จะเขียนใหม่ได้ว่า

$$s \bar{e}_i = \frac{1}{L_s} \left\{ -R_s \bar{e}_i + Ms \left[ Jp(\theta_m - \hat{\theta}_m) e^{Jp\hat{\theta}_m} \bar{i}_r' \right] - K \bar{e}_i \right\} \quad (ก.5)$$

จะรูปใหม่จะได้

$$\bar{e}_i = \frac{M}{L_s} (sI + aI)^{-1} s \left[ Jp(\theta_m - \hat{\theta}_m) e^{Jp\hat{\theta}_m} \bar{i}_r' \right] \quad (ก.6)$$

โดยที่  $a = \frac{R_s + K}{L_s}$

$$\bar{e}_i = \underbrace{\frac{M}{L_s} (sI + aI)^{-1} s (p\Delta\theta_m)}_{\mathbf{G}(s)} \underbrace{J e^{Jp\hat{\theta}_m} \bar{i}_r'}_{\bar{z}} \quad (ก.7)$$

โดยที่  $\Delta\theta_m = \theta_m - \hat{\theta}_m$

$$\bar{e}_i = \mathbf{G}(s) (p\Delta\theta_m) \bar{z} \quad (ก.8)$$

เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์เสถียรภาพจะย้ายการวิเคราะห์ไปอยู่บนแกนอ้างอิงกระแสโรเตอร์

$$\vec{e}_i'' \triangleq e^{-J\hat{\theta}_i} \vec{e}_i = \underbrace{e^{-J\hat{\theta}_i} G(s) e^{J\hat{\theta}_i}}_{G''(s)} p\Delta\theta_m \underbrace{e^{-J\hat{\theta}_i} J e^{Jp\hat{\theta}_m} \vec{i}_r'}_{\vec{z}''} \quad (ก.9)$$

หากพิจารณาในพจน์ของ

$$\begin{aligned} e^{-J\hat{\theta}_i} \underbrace{Jp e^{Jp\hat{\theta}_m} \vec{i}_r'}_{\vec{z}''} &= e^{-J\hat{\theta}_i} \underbrace{J e^{Jp\hat{\theta}_m} \|\vec{i}_r'\|}_{\vec{z}''} e^{Jp\hat{\theta}_i} \\ &= e^{-J\hat{\theta}_i} \underbrace{J \|\vec{i}_r'\|}_{\vec{z}''} e^{Jp\hat{\theta}_i} \end{aligned} \quad (ก.10)$$

$$\vec{z}'' = \begin{bmatrix} 0 \\ \|\vec{i}_r'\| \end{bmatrix}$$

จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (ก.11)

$$\begin{aligned} G''(s) &= G(s) |_{sI \leftarrow sI + \omega_o J} \\ G''(s) &= G(s'') |_{s'' \leftarrow sI + \omega_o J} \end{aligned} \quad (ก.11)$$

จะพบว่าจากสมการที่ (ก.7) แทนค่า จากสมการ (ก.11) จะได้ว่า

$$\vec{e}_i'' = \frac{M}{L_s} (sI + \omega_o J + aI)^{-1} (sI + \omega_o J) \begin{bmatrix} 0 \\ \|\vec{i}_r'\| \end{bmatrix} p\Delta\theta_m \quad (ก.12)$$

จัดรูปจะได้

$$\begin{aligned} \vec{e}_i'' &= \frac{M}{L_s} \frac{1}{(s+a)^2 + \omega_o^2} \begin{bmatrix} s+a & \omega_o \\ -\omega_o & s+a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s & -\omega_o \\ \omega_o & s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \|\vec{i}_r'\| \end{bmatrix} p\Delta\theta_m \\ \vec{e}_i'' &= \frac{M}{L_s} \begin{bmatrix} \frac{s(s+a) + \omega_o^2}{(s+a)^2 + \omega_o^2} & \frac{-(s+a)\omega_o + \omega_o s}{(s+a)^2 + \omega_o^2} \\ \frac{(s+a)\omega_o - \omega_o s}{(s+a)^2 + \omega_o^2} & \frac{s(s+a) + \omega_o^2}{(s+a)^2 + \omega_o^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \|\vec{i}_r'\| \end{bmatrix} p\Delta\theta_m \end{aligned} \quad (ก.13)$$

$$\vec{e}_i'' = \begin{bmatrix} e_d \\ e_q \end{bmatrix} = \frac{M}{L_s} \begin{bmatrix} G''_{11}(s) & G''_{12}(s) \\ G''_{21}(s) & G''_{22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \|\vec{i}_r'\| \end{bmatrix} p\Delta\theta_m \quad (ก.14)$$

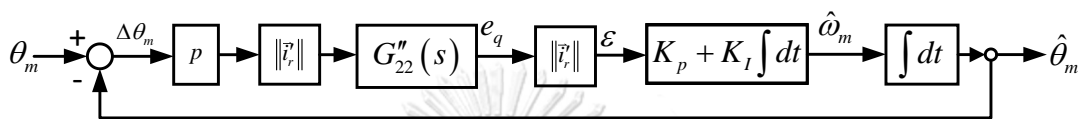
จากการเลือกพิจารณาค่าผิดพลาดกระแสในแนวแกน  $\tilde{q}$  หรือ  $e_q$  เท่านั้นจะได้ว่า

$$e_q = \frac{M}{L_s} \|\vec{i}_r\| p \Delta \theta_m G''_{22}(s) \tag{ก.15}$$

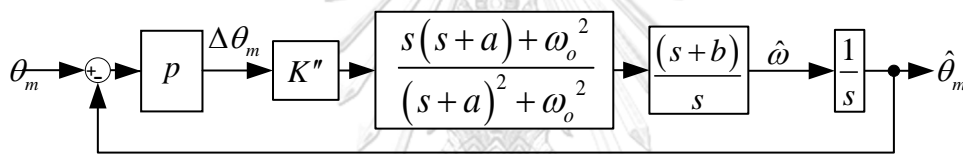
โดยจากสมการที่ (ก.13) จะได้

$$G''_{22}(s) = \frac{s(s+a) + \omega_o^2}{(s+a)^2 + \omega_o^2} \tag{ก.16}$$

เขียนเป็นแผนภาพได้ดังนี้



รูปที่ ก.1 แผนภาพแสดงลักษณะวงรอบควบคุมของตัวสังเกตลดอันดับแบบปรับตัว  
เขียนให้อยู่บนโดเมนความถี่จะได้ว่า



รูปที่ ก.2 แผนภาพแสดงลักษณะวงรอบควบคุมบนโดเมนความถี่

โดยที่  $K'' = \frac{MK_p \|\vec{i}_r\|^2}{L_s}$  ,  $a = \frac{R_s + K}{L_s}$  ,  $b = \frac{K_I}{K_p}$

จากรูปที่ ก.2 สามารถเขียนวงรอบปิดดังนี้

$$\begin{aligned} \frac{\hat{\theta}_m}{\theta_m} &= \frac{G_o(s)}{1+G_o(s)} \\ &= \frac{K''(s^2 + as + \omega_o^2)(s+b)}{s^4 + (2a + K'')s^3 + ((a^2 + \omega_o^2) + K''(a+b))s^2 + K''(ab + \omega_o^2)s + K''b\omega_o^2} \end{aligned} \tag{ก.17}$$

**เงื่อนไขเสถียรภาพ**

ดังนั้นสามารถพิจารณาขั้วของระบบได้จากพหุนาม

$$p(s) = s^4 + (2a + K'')s^3 + ((a^2 + \omega_o^2) + K''(a+b))s^2 + K''(ab + \omega_o^2)s + K''b\omega_o^2$$

เสถียรภาพของระบบควบคุมป้อนกลับสามารถพิจารณาได้จากตำแหน่งของขั้วของฟังก์ชันโอนย้าย  
วงรอบปิดในระนาบเชิงซ้อน



ใช้วิธีทดสอบเสถียรภาพด้วยวิธีเรท-เซอร์วิตซ์

สมการลักษณะเฉพาะของระบบ  $p(s) = 0$  จะได้ว่า

$$s^4 + (2a + K'')s^3 + ((a^2 + \omega_o^2) + K''(a+b))s^2 + K''(ab + \omega_o^2)s + K''b\omega_o^2 = 0$$

จะได้ว่า

$s^4$	1	$((a^2 + \omega_o^2) + K''(a+b))$	$K''\omega_o^2b$
$s^3$	$(2a + K'')$	$K''(ab + \omega_o^2)$	0
$s^2$	$b_1$	$b_2$	
$s^1$	$c_1$	0	
$s^0$	$d_1$		

โดยที่  $b_1 = \frac{2a^3 + 3a^2K'' + 2a\omega_o^2 + (a+b)K''^2 + abK''}{2a + K''} ; b_1 > 0$

$$b_2 = K''\omega_o^2b$$

$$c_1 = \frac{K''(ab + \omega_o^2)b_1 - (2a + K'')K''\omega_o^2b}{b_1} ; c_1 > 0$$

ดังนั้น  $c_1 > 0$  ก็ต่อเมื่อ  $(ab + \omega_o^2)b_1 > (2a + K'')\omega_o^2b$

จัดรูปใหม่จะได้

$$\left( \begin{array}{l} K''^2(a^2b + ab^2 + a\omega_o^2) \\ + K''[3a^3b + a^2b^2 + 3a\omega_o^2(a-b)] \\ + 2a^4b + 2a\omega_o^4 + 2a^2\omega_o^2(a-b) \end{array} \right) > 0 \quad (\text{ก.18})$$

$$d_1 = K''b\omega_o^2 ; d_1 > 0$$



พิจารณาตัวแปรและพารามิเตอร์ต่าง ๆ พบว่า

1. อัตราขยาย  $K_p, K_I$  และพารามิเตอร์  $L_s, R_s, K, M, \|i_r^*\|$  ล้วนแล้วแต่มีค่ามากกว่าศูนย์เสมอ
2. เทอมของความถี่ทางไฟฟ้า ( $\omega_o$ ) มีค่าได้ทั้งบวกและลบ แต่จะพบอยู่ในรูป  $\omega_o^2$  เสมอทำให้มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับศูนย์จากสมการที่ 4 พบว่าเทอม  $(a-b)$  ซึ่งคูณอยู่กับ  $\omega_o^2$  เพื่อให้สมการเป็นจริงเสมอเทอม  $(a-b)$  จะต้องมีค่ามากกว่าศูนย์ ทำให้ได้เงื่อนไข

$$a > b \quad (\text{ก.19})$$

จากสมการที่ (ก.17) จะได้ศูนย์ดังนี้

$$z(s) = K''(s^2 + as + \omega_o^2)(s+b) \quad (\text{ก.20})$$

เพื่อให้ได้ศูนย์ที่มีเสถียรภาพจะได้เงื่อนไขดังนี้

$$b > 0 \text{ และ } \operatorname{Re} \left[ \frac{-a \pm \sqrt{a^2 - 4\omega_o^2}}{2} \right] < 0 \quad (\text{ก.21})$$

ศูนย์ที่เป็นองค์ประกอบของ  $\frac{-a \pm \sqrt{a^2 - 4\omega_o^2}}{2}$  จะเปลี่ยนตำแหน่งไปตามความเร็ว อย่างไรก็ตามศูนย์ดังกล่าวมีส่วนจริงน้อยกว่าศูนย์เสมอยกเว้นในกรณีที่  $\omega_o = 0$  จะมีศูนย์จะวิ่งไปที่จุดกำเนิด ดังนั้น ศูนย์ที่เป็นคู่ประกอบนี้ถือว่าเป็นศูนย์ที่มีเสถียรภาพ

จากสมการที่ (ก.19) และ (ก.21) ทำให้ได้เงื่อนไขที่จำเป็นและเพียงพอที่ทำให้ระบบควบคุมมีเสถียรภาพคือ

$$a > b > 0 \text{ หรือ } \frac{R_s + K}{L_s} > \frac{K_I}{K_p} > 0 \quad (\text{ก.22})$$

## ภาคผนวก ข

### ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่อระบบประมาณ

สมการสเตเตอร์

$$\vec{v}_s = R_s \vec{i}_s + L_s \frac{d\vec{i}_s}{dt} + M \frac{d}{dt} (e^{j p \theta_m} \cdot \vec{i}_r') \quad (\text{ข.1})$$

สมการสเตเตอร์ประมาณ

$$\vec{v}_s = \hat{R}_s \hat{i}_s + \hat{L}_s \frac{d\hat{i}_s}{dt} + \hat{M} \frac{d}{dt} (e^{j p \hat{\theta}_m} \cdot \vec{i}_r') + K \vec{e}_i \quad (\text{ข.2})$$

สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเหนี่ยวนำขดลวดสเตเตอร์กับค่าความเหนี่ยวนำร่วมสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (ข.3)

$$L_{s0} = M_0 + L_{leak} \quad (\text{ข.3})$$

เมื่อกำหนดให้

$$\hat{R}_s = R_{s0} + \Delta R \quad (\text{ข.4})$$

$$\hat{M} = M_0 + \Delta M \quad (\text{ข.5})$$

จากความสัมพันธ์ของสมการที่ (ข.3)

$$\begin{aligned} \hat{L}_s &= \hat{M} + L_{leak} \\ &= M_0 + \Delta M + L_{leak} \end{aligned} \quad (\text{ข.6})$$

(ข.2)-(ข.1) จะเขียนเป็นสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} 0 &= (R_{s0} + \Delta R) \hat{i}_s - R_{s0} \vec{i}_s + (M_0 + \Delta M + L_{leak}) \frac{d\hat{i}_s}{dt} - (M_0 + L_{leak}) \frac{d\vec{i}_s}{dt} \\ &+ (M_0 + \Delta M) \frac{d}{dt} (e^{j p \hat{\theta}_m}) \vec{i}_r' - M_0 \frac{d}{dt} (e^{j p \theta_m}) \vec{i}_r' + K \vec{e}_i \end{aligned} \quad (\text{ข.7})$$

$$0 = R_{s0}\bar{e}_i + K\bar{e}_i + (M_0 + L_{leak})\frac{d}{dt}\bar{e}_i + M_0\frac{d}{dt}\left(e^{Jp\hat{\theta}_m} - e^{Jp\theta_m}\right)\bar{i}_r$$

$$+ \Delta R\hat{i}_s + \Delta M\frac{d}{dt}\hat{i}_s + \Delta M\frac{d}{dt}\left(e^{Jp\hat{\theta}_m} \cdot \bar{i}_r\right) \quad (\text{ข.8})$$

$$0 = \left(R_{s0}\bar{e}_i + L_{s0}\frac{d}{dt}\bar{e}_i + K\bar{e}_i\right) - M_0\frac{d}{dt}\left(-I + e^{Jp(\Delta\theta_m)}\right)e^{Jp\hat{\theta}_m} \cdot \bar{i}_r$$

$$+ \Delta R\hat{i}_s + \Delta M\frac{d}{dt}\hat{i}_s + \Delta M\frac{d}{dt}\left(e^{Jp\hat{\theta}_m} \cdot \bar{i}_r\right) \quad (\text{ข.9})$$

กำหนดให้  $\Delta\theta_m = \theta_m - \hat{\theta}_m$

และทำให้เป็นเชิงเส้นจะได้ว่า

$$0 = \left(R_{s0}\bar{e}_i + L_{s0}\frac{d}{dt}\bar{e}_i + K\bar{e}_i\right) - M_0p\Delta\theta_m\frac{d}{dt}Je^{Jp\hat{\theta}_m} \cdot \bar{i}_r$$

$$+ \Delta R\hat{i}_s + \Delta M\frac{d}{dt}\hat{i}_s + \Delta M\frac{d}{dt}\left(e^{Jp\hat{\theta}_m} \cdot \bar{i}_r\right) \quad (\text{ข.10})$$

เขียนให้อยู่บนโดเมนความถี่จะได้ว่า

$$0 = (a + s)\bar{e}_i - \frac{M_0s}{L_{s0}}p(\Delta\theta_m)Je^{Jp\hat{\theta}_m} \cdot \bar{i}_r$$

$$+ \frac{1}{L_{s0}}\left[\Delta R\hat{i}_s + \Delta Ms\hat{i}_s + \Delta Ms\left(e^{Jp\hat{\theta}_m} \cdot \bar{i}_r\right)\right] \quad (\text{ข.11})$$

กำหนดให้  $a = \frac{R_{s0} + K}{L_{s0}}$

$$\bar{e}_i = \frac{-1}{L_{s0}(s+a)}\left\{\Delta R\hat{i}_s + \Delta Ms\left[\hat{i}_s + \left(e^{Jp\hat{\theta}_m} \cdot \bar{i}_r\right)\right] - M_0s(p\Delta\theta_m)Je^{Jp\hat{\theta}_m} \cdot \bar{i}_r\right\} \quad (\text{ข.12})$$

จัดรูปใหม่จะได้ว่า

$$\bar{e}_i = \underbrace{-\frac{1}{L_{s0}} \cdot \frac{1}{s+a}}_{\mathbf{R}(s)} \Delta R\hat{i}_s - \underbrace{\frac{1}{L_{s0}} \cdot \frac{s}{s+a}}_{\mathbf{M}(s)} \Delta M \left[\hat{i}_s + \left(e^{Jp\hat{\theta}_m} \cdot \bar{i}_r\right)\right]$$

$$+ \underbrace{\frac{M_0}{L_{s0}} \cdot \frac{s}{s+a}}_{\mathbf{G}(s)} (p\Delta\theta_m) Je^{Jp\hat{\theta}_m} \cdot \bar{i}_r \quad (\text{ข.13})$$

เขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\bar{e}_i = \mathbf{R}(s)\Delta R\hat{i}_s + \mathbf{M}(s)\Delta M \left[\hat{i}_s + \left(e^{Jp\hat{\theta}_m} \cdot \bar{i}_r\right)\right] + \mathbf{G}(s)(p\Delta\theta_m) Je^{Jp\hat{\theta}_m} \cdot \bar{i}_r \quad (\text{ข.14})$$

## ภาคผนวก ค

### การทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง

ในการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง ก่อนอื่นจะพิจารณาสมการทางพลวัตทางด้านสเตเตอร์ดังสมการที่ (ค.1)

สมการสเตเตอร์

$$\vec{v}_s = R_s \vec{i}_s + L_s \frac{d\vec{i}_s}{dt} + M \frac{d}{dt} (e^{j\theta_m} \cdot \vec{i}_r') \quad (\text{ค.1})$$

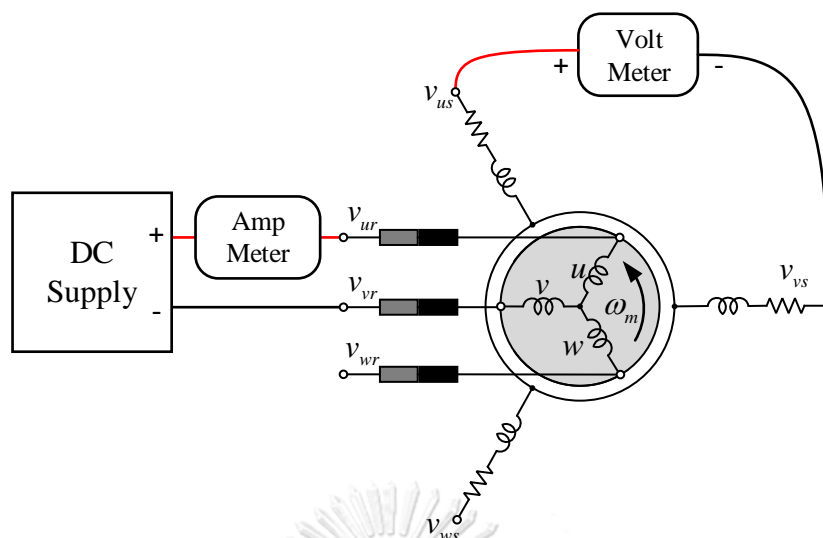
จากสมการที่ (ค.1) พบว่าหากต้องการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางโดยที่ไม่ขึ้นกับพารามิเตอร์อื่น ๆ สามารถทำได้โดยการทำการเปิดวงจรฝั่งสเตเตอร์ ซึ่งเป็นการทำให้กระแสสเตเตอร์เป็นศูนย์ เนื่องจากไม่มีกระแสไหลดังนั้นจะสามารถเขียนสมการได้ใหม่ดังนี้

$$\vec{v}_s = M \frac{d}{dt} (e^{j\theta_m} \cdot \vec{i}_r') \quad (\text{ค.2})$$

จากสมการที่ (ค.2) หากทำการทดสอบเราสามารถตรวจวัดขนาดแรงดันสเตเตอร์ ( $v_s$ ) ขนาดกระแสโรเตอร์ ( $i_r'$ ) และความเร็วโรเตอร์ได้จากเครื่องมือวัด ดังนั้นจะสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันฝั่งสเตเตอร์ ( $v_s$ ) กับค่าความเหนี่ยวนำร่วม ( $M$ ) ได้ดังนี้

$$M = \frac{\|\vec{v}_s\|}{\omega_m \cdot \|\vec{i}_r'\|} \quad (\text{ค.3})$$

โดยที่  $\omega_m = 2\pi f$



รูปที่ ค.1 ลักษณะการต่อวงจรทดสอบ

จากรูปที่ ค.1 แสดงลักษณะการต่อวงจรทดสอบพารามิเตอร์ โดยเปิดวงจรด้านสเตเตอร์ พร้อมวัดค่าขนาดแรงดันที่ได้ด้วยโวลต์มิเตอร์ จากนั้นต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงชั่วคราวผ่านแอมป์มิเตอร์เข้าขดลวดโรเตอร์เฟส  $u$  และต่อขั้วลวดเข้าขดลวดโรเตอร์เฟส  $v$  จากนั้นเริ่มทดสอบโดยการหมุนโรเตอร์ด้วยความเร็ว ( $\omega_m$ ) คงที่ค่าหนึ่งด้วยชุดไหลทดสอบ จากนั้นเมื่อความเร็วโรเตอร์คงที่แล้วใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเพิ่มแรงดันและกระแสขึ้นทีละน้อย ๆ จนถึงค่าพิกัด พร้อมกับจดค่าขนาดของกระแสโรเตอร์และแรงดันสเตเตอร์ที่ได้ เมื่อทำการทดลองเสร็จครั้งหนึ่งให้ลองเปลี่ยนเฟสที่ต่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงและทำการทดลองใหม่อีกครั้งจนครบทั้งสามเฟส เมื่อทดสอบเสร็จแล้วให้นำค่ากระแสโรเตอร์ที่วัดได้มาคำนวณสมการที่ (ค.4)

$$\begin{bmatrix} i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ru} \\ i_{rv} \\ i_{rw} \end{bmatrix} \quad (\text{ค.4})$$

$$\|\vec{i}_r\| = \sqrt{i_{rd}^2 + i_{rq}^2} \quad (\text{ค.5})$$

จากนั้นเมื่อนำค่าขนาดกระแสโรเตอร์ที่คำนวณได้จากสมการที่ (ค.5) ค่าแรงดันสเตเตอร์ที่วัดจากโวลต์มิเตอร์และความเร็วโรเตอร์ที่วัดได้ แทนค่าในสมการที่ (ค.3) จะสามารถคำนวณค่าความเหนี่ยวนำร่วมได้ ณ จุดการทำงานต่าง ๆ ได้ แต่ก่อนที่จะนำค่าที่ได้ไปใช้จะต้องทำการปรับเส้นโค้ง (Curve fitting) เสียก่อน เมื่อทำการปรับเส้นโค้ง (Curve fitting) เรียบร้อยแล้วจึงจะสามารถนำค่าที่ได้ไปสร้างโปรแกรมคำนวณค่าพารามิเตอร์เพื่อใช้ในการคำนวณในส่วนอื่น ๆ ของตัวควบคุมต่อไป

ภาคผนวก ง

ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง

ตารางที่ ง.1 ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง

พารามิเตอร์เครื่องจักรกลไฟฟ้า	ค่าที่ใช้งาน
ขนาดพิกัดกำลังเครื่องจักรกลไฟฟ้า	4 kW
พิกัดความเร็วโรเตอร์	1393 rpm
จำนวนขั้ว ( $p$ )	4 poles
พิกัดแรงดันโรเตอร์	196 V
พิกัดกระแสโรเตอร์	13.5 A
พิกัดแรงดันสเตเตอร์	400 V
พิกัดกระแสสเตเตอร์	8.1 A
ค่าความต้านทานขดลวดสเตเตอร์ ( $R_s$ )	1.731 $\Omega$
ค่าความเหนี่ยวนำขดลวดสเตเตอร์ ( $L_s$ )	187 mH
ค่าความเหนี่ยวนำรวม ( $M$ )	185 mH
ค่าความต้านทานขดลวดโรเตอร์ ( $R_r$ )	2.397 $\Omega$
ค่าความเหนี่ยวนำขดลวดโรเตอร์ ( $L_r$ )	187 mH

## บรรณานุกรม

1. Muller S, Deicke M, Doncker RWD. Doubly fed induction generator systems for wind turbines. IEEE Industry Applications Magazine. 2002;8(3):26-33.
2. Lebsir A, Bentounsi A, Benbouzid M, Mangel H. Electric Generators Fitted to Wind Turbine Systems: An Up-to-Date Comparative Study. 2015;11(3):281-95.
3. GWEC. Global Cumulative Installed Wind Capacity 2001-2017 [Available from: <https://gwec.net/wp-content/uploads/2018/04/Global-Cumulative-Installed-Wind-Capacity-2001-2017.jpg>].
4. Eichler M. Offshore but online PCS 6000 wind converter for 5 MW offshore wind turbine. ABB Review 3/2008. 2008.
5. Cardenas R, Pena R, Clare J, Asher G, Proboste J. MRAS Observers for Sensorless Control of Doubly-Fed Induction Generators. IEEE Transactions on Power Electronics. 2008;23(3):1075-84.
6. Marques GD, Pires VF, Sousa S, Sousa DM. A DFIG Sensorless Rotor-Position Detector Based on a Hysteresis Controller. IEEE Transactions on Energy Conversion. 2011;26(1):9-17.
7. Marques GD, Sousa DM. Air-Gap-Power-Vector-Based Sensorless Method for DFIG Control Without Flux Estimator. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2011;58(10):4717-26.
8. Dezza FC, Foglia G, Iacchetti MF, Perini R. An MRAS Observer for Sensorless DFIM Drives With Direct Estimation of the Torque and Flux Rotor Current Components. IEEE Transactions on Power Electronics. 2012;27(5):2576-84.
9. จิรัฏฐ์ อุดมศรี, สุรพงศ์ สุวรรณกวิน. ระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซ็นเซอร์วัดตำแหน่งสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ชนิดป้อนสองทางด้วยตัวสังเกตลดอันดับแบบปรับตัว. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 34; ธันวาคม 2554. p. 493-6.
10. Smiththisomboon S, Udomsri J, Suwankawin S, editors. A position-sensorless vector control for doubly-fed induction machines using adaptive reduced-order observers. 2015 18th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS); 2015 25-28 Oct. 2015.

11. Han SH, Jo TH, Park JH, Kim HG, Chun TW, Nho EC, editors. Dead time compensation for grid-connected PWM inverter. 8th International Conference on Power Electronics - ECCE Asia; 2011 May 30 2011-June 3 2011.
12. Mannen T, Fujita H, editors. Performance of dead time compensation methods in three-phase grid-connection converters. 2014 International Power Electronics Conference (IPEC-Hiroshima 2014 - ECCE ASIA); 2014 18-21 May 2014.
13. Scicluna K, Spiteri-Staines C, Apap M, editors. MRAS observers for Doubly-Fed Induction Machine in wind energy conversion systems. Eurocon 2013; 2013 1-4 July 2013.
14. Mossa MA, Bolognani S, editors. A novel sensorless direct torque control for a doubly fed induction machine. 2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM); 2016 4-7 Sept. 2016.
15. Iasson Karafyllis Z-PJ. Stability and Stabilization of Nonlinear System. London Springer; 2011.
16. Iamsamang P, Sangwongwanich S, editors. Position estimation of surface permanent-magnet synchronous motors based on a new reduced-order model with guaranteed global stability. 2015 18th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS); 2015 25-28 Oct. 2015.
17. Srivorakul A, Suwankawin S, editors. A synchro-perspective-based high-frequency signal injection method for position-sensorless vector control of doubly-fed induction machines. 2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE); 2016 18-22 Sept. 2016.



## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายศุภษร หมั่นพล
วัน เดือน ปี เกิด	10 กันยายน 2535
สถานที่เกิด	ชลบุรี
วุฒิการศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า(กำลัง) จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง ปีการศึกษา 2558 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า(อิเล็กทรอนิกส์กำลัง) ณ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2558
ที่อยู่ปัจจุบัน	39/2 ม.1 ต.หนองข้างคอก อ.เมืองชลบุรี จ.ชลบุรี 20,000
ผลงานตีพิมพ์	ศุภษร หมั่นพล, สุวรรณกวิน ส. ระบบควบคุมเวกเตอร์แบบไร้เซ็นเซอร์วัด ตำแหน่งสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางโดยใช้ ตัว สังเกตลวดอนัดับแบบปรับตัว. The 39th Electrical Engineering Conference (EECON-39); 2-4 พฤศจิกายน; โรงแรมเดอะ รีเจนท์ ชะอำ บีช รีสอร์ท จังหวัดเพชรบุรี: Chulalongkorn University; 2559. p. 331.