

การประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์เพื่อการควบคุมเวกเตอร์
ฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
ROTOR FLUX ESTIMATION FOR ROTOR FLUX VECTOR CONTROL
OF AN INDUCTION MACHINE

โดย

นายกฤติน	สำเร็จผลไพบูลย์
นายคณิศร	ศิริพันธ์ุ
นายฉัตรมงคล	เชษฐพันธ์
นายปัทวี	จิตรหลัง

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2561

การประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์เพื่อการควบคุมเวกเตอร์
ฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
ROTOR FLUX ESTIMATION FOR ROTOR FLUX VECTOR CONTROL
OF AN INDUCTION MACHINE



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ROTOR FLUX ESTIMATION FOR ROTOR FLUX VECTOR CONTROL OF AN
INDUCTION MACHINE



THIS PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT
FOR THE BACHELOR DEGREE IN ELECTRICAL ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING

2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2561

การประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์เพื่อการควบคุมเวกเตอร์

ฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

ROTOR FLUX ESTIMATION FOR ROTOR FLUX VECTOR CONTROL OF AN
INDUCTION MACHINE



อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.วรชาติ สุวรรณงาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2561

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์เพื่อการควบคุมเวกเตอร์ฟลักซ์แม่เหล็ก
โรเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

ผู้จัดทำ



1. นายกฤติน

สำเร็จผลไพบูลย์

2. นายคณิศร

ศิริพันธุ์

3. นายฉัตรมงคล

เชษฐพันธ์

4. นายปัทวี

จิตรหลัง

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผศ.ดร.วราชาติ สุวรรณงาม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์เพื่อการควบคุมเวกเตอร์

ฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

นายกฤติน สำเร็จผลไพบูลย์

นายคณิศร ศิริพันธ์

นายฉัตรมงคล เชษฐพันธ์

นายปัทวี จิตรหลัง

ผศ.ดร.วรชาติ สุวรรณงาม อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2561

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้นำเสนอการประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์สำหรับการประยุกต์ใช้ในการควบคุมเวกเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยทั่วไปทางทฤษฎีวิธีการประมาณเวกเตอร์ของฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์อย่างง่ายสามารถประมาณโดยอาศัยแบบจำลองแรงดัน และแบบจำลองกระแส แต่ทั้งสองวิธีนั้นมีข้อจำกัดแตกต่างกัน อย่างไรก็ตามวิธีการที่มีการนำมาใช้คือการใช้งานร่วมกันของแบบจำลองแรงดันและแบบจำลองกระแส วิธีการในการประมาณฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ที่ใช้ในโครงงานนี้เป็นวิธีการที่อาศัยการคำนวณร่วมกันของแบบจำลองแรงดันและแบบจำลองกระแส การประมาณค่านั้นต้องวัดค่าแรงดันและกระแสป้อนเข้าสเตเตอร์และทำการแปลงให้อยู่ในกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งเทียบกับสเตเตอร์ โดยการจำลองการประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ทางคอมพิวเตอร์ใช้โปรแกรม PLECS และโปรแกรมการคำนวณใช้โมโครคอนโทรลเลอร์ของบริษัท เทกซัส อินสตรูเมนต์ จำกัด เบอร์ TMS320F2812 ในการประมวลผล

Rotor Flux Estimation for Rotor Flux Vector Control of an Induction Machine

Mr.Krittin Sumrejphonpaiboon

Mr.Kanisorn Siripan

Mr.Chatmongkol Chedthapan

Mr.Pattawe Jitlang

Asst.Prof.Dr.Warachart Suwan-ngam Supervisor

Year 2018

Abstract

This thesis presents rotor flux estimation for vector control of an induction machine. Theoretically, the simple voltage model and current model are applied to estimate the rotor flux linkage. Both methods have their limits, so only one method is not adequate for application. Therefore, the combination of voltage and current model is applied to estimate the rotor flux. The method used in this project is the combination method of both voltage and current models. The algorithm is achieved by measuring the stator terminal voltages and stator currents. The PLECS program is applied to validate the rotor flux estimation algorithm. The algorithm is then implemented by using the TI TMS320F2812 digital signal controller.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี โดยการสนับสนุนของ ผศ.ดร.วรชาติ สุวรรณงาม อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ให้ความรู้ในการดำเนินโครงการนี้ในทุกขั้นตอน และคำแนะนำเกี่ยวกับการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างการทำงาน ตลอดจนอาจารย์ในภาควิชาทุกท่านที่ได้ให้วิชาความรู้มาตลอดเวลา 4 ปี คณะผู้จัดทำโครงการนี้ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่ง

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการที่ให้ยืมอุปกรณ์ เครื่องมือ และเจ้าหน้าที่ห้องธุรการที่อำนวยความสะดวกในการเบิกค่าใช้จ่ายของโครงการ

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณครอบครัวและเพื่อนๆ สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานไฟฟ้า ที่ให้กำลังใจในการทำโครงการอยู่เสมอ ตลอดจนผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องในโครงการนี้ทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวถึง ขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้

คณะผู้จัดทำ



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ	2
1.4 วิธีการดำเนินโครงการ	2
1.5 แผนการดำเนินโครงการ	3
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ	4
1.7 การจัดโครงสร้างของเนื้อหาภายในปฏิญานิพนธ์	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 บทนำ	5
2.2 ทฤษฎีของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	5
2.2.1 เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	5
2.2.2 โครงสร้างและหลักการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	5
2.2.3 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	7
2.2.4 กำลังและแรงบิดในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	8
2.2.5 การทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส	10
2.3 ทฤษฎีกรอบอ้างอิง	14
2.3.1 วิธีการแปลงกรอบอ้างอิง	15
2.3.1.1 การแปลงจากกรอบอ้างอิงสามเฟสเป็นกรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง	15
2.3.1.2 การแปลงจากกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งเป็นกรอบอ้างอิงหมุน	16
2.3.1.3 การแปลงจากกรอบอ้างอิงหมุนเป็นกรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง	16
2.3.1.4 การแปลงจากกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งเป็นกรอบอ้างอิงสามเฟส	16
2.4 การควบคุมเวกเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	17
2.5 บทสรุป	18
บทที่ 3 การประมาณเวกเตอร์ของฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์	19
3.1 บทนำ	19
3.2 แบบจำลองการหาค่าฟลักซ์แม่เหล็ก	19
3.2.1 การประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กแบบจำลองกระแส	20
3.2.2 การประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กแบบจำลองแรงดัน	21
3.3 การประมาณค่าเวกเตอร์ของฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์	22

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4 สมการการประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์	24
3.5 บทสรุป	25
บทที่ 4 การจำลองทางคอมพิวเตอร์และการทดลอง	26
4.1 บทนำ	26
4.2 การจำลองทางคอมพิวเตอร์ของการประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์	26
4.2.1 ไดอะแกรมการแปลงจากกรอบอ้างอิงสามเฟสไปสู่กรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง	27
4.2.2 การประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์	28
4.2.3 การประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์และสเตเตอร์โดยแบบจำลองกระแส	29
4.2.4 การประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์และสเตเตอร์โดยแบบจำลองแรงดัน	30
4.3 การทดลองการประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์	31
4.4 วิธีการทดลองการประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์	32
4.5 บทสรุป	35
บทที่ 5 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์และผลการทดลอง	36
5.1 บทนำ	36
5.2 การเปรียบเทียบผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์และผลการทดลองเครื่องต้นแบบ	36
5.2.1 ผลการทดลองการประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์	36
5.2.2 ผลการทดลองการประมาณตำแหน่งของเวกเตอร์ฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์	38
5.2.3 ผลการทดลองการประมาณค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ	39
5.3 สรุป	40
บทที่ 6 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	41
6.1 สรุปการทดลอง	41
6.2 ข้อเสนอแนะ	41
6.3 เป้าหมายในอนาคต	41
เอกสารอ้างอิง	42
ภาคผนวก	43
ภาคผนวก ก. รูปถ่ายชิ้นงานและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	44
ภาคผนวก ข. บทความทางวิชาการ	49
ประวัติผู้เขียน	56

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า	
2.1	วงจรมุมของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	7
2.2	วงจรมุมต่อเฟสของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	8
2.3	กราฟแสดงแรงบิด, ความเร็ว และสลลิปของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส	10
2.4	VI-method ขดลวดสเตเตอร์ต่อแบบสตาร์	11
2.5	VI-method ขดลวดสเตเตอร์ต่อแบบเดลต้า	11
2.6	วงจรถดสอบที่สภาวะไร้ภาระ	11
2.7	การทดสอบที่สภาวะไร้ภาระของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส	12
2.8	วงจรถดสอบบล็อกโรเตอร์	13
2.9	วงจรถดสอบบล็อกโรเตอร์มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส	13
2.10	ไดอะแกรมของการแปลงกรอบอ้างอิง	15
2.11	การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยกและมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (ก) การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยก (ข) การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	17
2.12	ไดอะแกรมขณะใดขณะหนึ่งภายใต้การควบคุมเครื่องจักรกลไฟฟ้า	17
3.1	การประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์แบบจำลองกระแสไฟฟ้า	21
3.2	การประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์แบบจำลองแรงดันไฟฟ้า	22
3.3	ไดอะแกรมของการประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์	24
4.1	แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์การประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์	26
4.2	แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์การแปลงกรอบอ้างอิง (ก) ไดอะแกรมการแปลงแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าจากกรอบอ้างอิงสามเฟส ไปสู่กรอบอ้างอิงหยุดนิ่งและกรอบอ้างอิงใดๆ (ข) ไดอะแกรมการแปลงแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าจากกรอบอ้างอิงสามเฟส ไปสู่กรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง (ค) ไดอะแกรมการแปลงแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าจากกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งไปสู่ กรอบอ้างอิงใดๆ	27
4.3	แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของการประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ (ก) ไดอะแกรมการประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ (ข) ไดอะแกรมการประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์และสเตเตอร์ แบบจำลองแรงดันและกระแส (ค) ไดอะแกรมการประมาณความเร็วเชิงมุม และตำแหน่งของเวกเตอร์ฟลักซ์ แม่เหล็กโรเตอร์โดยเฟสล็คคลูป	28

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.4	แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์การประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์และสเตเตอร์แบบจำลองกระแส	29
	(ก) ไดอะแกรมการประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์และสเตเตอร์แบบจำลองกระแส	
	(ข) ไดอะแกรมการประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กสเตเตอร์แบบจำลองกระแส ไดอะแกรมการประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์แบบจำลองกระแส	
4.5	แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของการประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์และสเตเตอร์แบบจำลองแรงดัน	30
	(ก) ไดอะแกรมการประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์แบบจำลองแรงดัน	
	(ข) ไดอะแกรมการคำนวณแรงดันชดเชยในการประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กสเตเตอร์	
	(ค) ไดอะแกรมการประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์และสเตเตอร์	
4.6	การประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์	31
4.7	เครื่องต้นแบบที่ใช้ในการประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์	31
4.8	สวิตช์ Circuit Breaker ที่ควบคุมแหล่งจ่ายไฟ	32
4.9	บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F2812	32
4.10	อุปกรณ์ HDSP-XDS100V2ISO Emulator	32

สารบัญญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 สวิตช์ Circuit Breaker ที่ควบคุมการทำงานของ Relay	33
4.12 สถานะการเปิดการทำงานสวิตช์ B11 เพื่อชดเชยค่าของไมโครคอนโทรลเลอร์	33
4.13 การควบคุมภาระทางกลที่สภาวะไร้ภาระ	33
4.14 หม้อแปลงปรับแรงดันไฟฟ้า	34
4.15 อุปกรณ์ไค์ฟที่ใช้ในการควบคุมภาระทางกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	34
4.16 การวัดความเร็วรอบมอเตอร์	34
4.17 รูปคลื่นสัญญาณขาออกของไมโครคอนโทรลเลอร์	35
5.1 รูปคลื่นฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์สภาวะไร้ภาระ (ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์, (ข) ผลการทดลอง	37
5.2 รูปคลื่นฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์สภาวะภาระ 50% (ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์, (ข) ผลการทดลอง	37
5.3 รูปคลื่นตำแหน่งของเวกเตอร์ฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์สภาวะไร้ภาระ (ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์, (ข) ผลการทดลอง	38
5.4 รูปคลื่นตำแหน่งของเวกเตอร์ฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์สภาวะภาระ 50% (ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์, (ข) ผลการทดลอง	39
5.5 รูปคลื่นแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับสภาวะไร้ภาระ (ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์, (ข) ผลการทดลอง	39
5.6 รูปคลื่นแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับสภาวะภาระ 50% (ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์, (ข) ผลการทดลอง	40

สารบัญตาราง

ตารางที่

หน้า

1.1 แผนการดำเนินโครงการ

3



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

การควบคุมสมรรถนะสูงสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นการควบคุมเวกเตอร์ของตัวแปรควบคุม เพื่อให้มีสมรรถนะเทียบเท่าหรือดีกว่าการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยก โดยในการควบคุมเวกเตอร์จำเป็นที่จะต้องอาศัยความรู้ความเข้าใจในเรื่องของทฤษฎีการออกแบบเพื่อทำการเลือกการออกแบบที่เหมาะสมสำหรับการควบคุมตัวแปรทางไฟฟ้าของมอเตอร์ ในการควบคุมเวกเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำจำเป็นต้องแยกองค์ประกอบของสัญญาณแรงดันและกระแสที่จ่ายเข้าสู่มอเตอร์เพื่อเลียนแบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยก โดยใช้ทฤษฎีการออกแบบในการแยกองค์ประกอบของสัญญาณเพื่อใช้ในการแบ่งส่วนการควบคุมออกเป็น 2 ส่วน คือ การควบคุมความเร็วในการหมุนของโรเตอร์ และการควบคุมค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ การควบคุมทั้ง 2 ส่วนจะแยกออกจากกันเหมือนกับการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยก

ในการควบคุมค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์จะใช้การประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ เนื่องจากในเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดกรงกระรอกไม่สามารถวัดค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ได้ จึงจำเป็นต้องมีการประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ออกมา เพื่อนำค่าที่ประมาณออกมาไปใช้ในการควบคุมเวกเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ในการควบคุมเวกเตอร์สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามารถทำการควบคุมตัวแปรในกรอบอ้างอิง 3 ประเภท

1. กรอบอ้างอิงฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์
2. กรอบอ้างอิงฟลักซ์แม่เหล็กสเตเตอร์
3. กรอบอ้างอิงฟลักซ์แม่เหล็กที่ช่องว่างอากาศ

โดยทั่วไปจะใช้กรอบอ้างอิงฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์และทำการแปลงตัวแปรต่างๆให้อยู่ในกรอบอ้างอิงโรเตอร์ ดังนั้นหัวใจหลักของการควบคุมเวกเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำคือ กระแสสเตเตอร์บนกรอบอ้างอิงโรเตอร์

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อการประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์เพื่อการควบคุมเวกเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
2. เพื่อศึกษาการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ
3. เพื่อศึกษาทฤษฎีการควบคุมเวกเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการงาน

โครงการงานนี้เป็นการการประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์เพื่อการควบคุมเวกเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยใช้การจำลองทางคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม PLECS ในการออกแบบโปรแกรมการคำนวณที่ใช้ในการทดลองโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ของบริษัท เทกซัส อินสตรูเมนต์ จำกัด เบอร์ TMS320F2812 ในการประมวลผล

1.4 วิธีการดำเนินโครงการงาน

1. ศึกษาและค้นคว้าข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับโครงการงาน โดยศึกษาทฤษฎีการควบคุมเวกเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และการประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์
2. จัดเตรียมอุปกรณ์และศึกษาวิธีการใช้งานอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับโครงการงาน
3. สร้างแบบจำลองการควบคุมการทำงาน โดยใช้โปรแกรม PLECS
4. เขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานลงในไมโครคอนโทรลเลอร์
5. ทำการทดลอง บันทึกผลการสอบ และแก้ไขสิ่งที่มีผิดพลาดที่เกิดขึ้น
6. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์ โปสเตอร์ และเตรียมการนำเสนอ
7. สรุปผลการทำโครงการงาน และนำเสนอ

1.5 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน

การดำเนินงาน	เดือน									
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ษ.	พ.ค.
ศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับโครงการ	■	■								
ออกแบบการคำนวณการประมาณค่าพลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์		■	■	■						
สร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์			■	■	■					
ศึกษาการเขียนโปรแกรมการคำนวณ					■	■	■			
เขียนโปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณ					■	■	■	■		
ทำการทดลองบันทึกผลการทดลองและแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น								■	■	
สรุปผลการทดลอง								■	■	
จัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์									■	■

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ

1. โครงการวิจัยนี้ทำให้เกิดความรู้ความเข้าใจในหลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ
2. โครงการวิจัยนี้ทำให้เกิดความรู้ความเข้าใจในหลักการทำงานและการควบคุมเวกเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
3. โครงการวิจัยนี้เป็นการนำองค์ความรู้ในวิชาต่างๆ มาประยุกต์ใช้เข้าด้วยกันให้เกิดประโยชน์ เช่น มอเตอร์เหนี่ยวนำ, ทฤษฎีการควบคุมเวกเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ, การประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์

1.7 การจัดโครงสร้างของเนื้อหาภายในปฏิญญาพันธ

เนื้อหาภายในปฏิญญาพันธฉบับนี้สามารถจำแนกได้ดังนี้

บทที่ 1 บทนำ ซึ่งจะกล่าวถึงที่มาและความสำคัญของโครงการ, วัตถุประสงค์ของโครงการ, ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ, วิธีการดำเนินโครงการ, แผนการดำเนินโครงการ, ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ซึ่งจะกล่าวถึงโครงสร้างและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับหลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส และทฤษฎีการควบคุมเวกเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

บทที่ 3 การประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ ซึ่งจะกล่าวถึงโครงสร้างและทฤษฎีการประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กไฟฟ้าในแบบจำลองแรงดันไฟฟ้า และแบบจำลองกระแสไฟฟ้า

บทที่ 4 การจำลองทางคอมพิวเตอร์และการทดลอง ซึ่งจะกล่าวถึงการนำทฤษฎีที่ได้ศึกษามาจำลองทางคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม PLECS

บทที่ 5 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์และการทดลอง ซึ่งจะกล่าวถึงการนำผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์มาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลอง เพื่อยืนยันว่าทฤษฎีนั้นถูกต้อง

บทที่ 6 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ ซึ่งจะกล่าวถึงในส่วนบทสรุปของโครงการทั้งหมดรวมถึงข้อเสนอแนะ และแนวทางการพัฒนาของโครงการต่อไป

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการทำงานพื้นฐานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ วงจรสมมูลต่อเฟสของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำทั่วไป รวมถึงการอธิบายการมอเตอร์เหนี่ยวนำเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ หลังจากนั้นนำค่าที่ได้ไปใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม PLECS เพื่อใช้ในจำลองการควบคุม

2.2 ทฤษฎีของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ [1]

2.2.1 เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induction Machine)

เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีสเตเตอร์ทางกายภาพเหมือนกับเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส แต่มีโครงสร้างโรเตอร์ที่ต่างกัน ซึ่งโครงสร้างของโรเตอร์ในเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีอยู่ 2 ประเภทคือ โรเตอร์แบบขดลวดและโรเตอร์แบบกรงกระรอก

2.2.2 โครงสร้างและหลักการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

เมื่อทำการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสให้กับขดลวดสเตเตอร์ กระแสไฟฟ้าที่ไหลอยู่ในสเตเตอร์จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุน ซึ่งความเร็วรอบของสนามแม่เหล็กหมุนเรียกว่า “ความเร็วซิงโครนัส (n_s)” ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2-1

$$n_s = \frac{120 f_e}{P} \quad (2-1)$$

โดยที่ f_e แทน ความถี่ของระบบในหน่วยเฮิร์ตซ์ (Hz) และ P แทน จำนวนขั้วของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งสนามแม่เหล็กหมุนที่เกิดจากสเตเตอร์ จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นบนตัวนำโรเตอร์

ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กบนแกนเหล็กโรเตอร์ และเนื่องจากโรเตอร์มีแท่งตัวนำฝังอยู่ในร่องสลีตและมีการลัดวงจร ทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กเกี่ยวคล้องแท่งตัวนำดังกล่าวมีการเปลี่ยนแปลง ส่งผลให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำบนวงจรโรเตอร์ ผลที่ตามมาคือเกิดกระแสไหลในวงจรโรเตอร์ ส่งผลให้เกิดแรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้า

หลังจากเกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เมื่อมีการลัดวงจรบนตัวนำโรเตอร์ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลบนตัวนำและเกิดสนามแม่เหล็กขึ้นที่โรเตอร์เช่นเดียวกับที่สเตเตอร์ ผลรวมของเส้นแรงแม่เหล็กที่สเตเตอร์กับเส้นแรงแม่เหล็กรอบตัวนำโรเตอร์ทำให้เกิดแรงบิดขึ้นที่โรเตอร์ ส่งผลให้โรเตอร์หมุนในทิศทางเดียวกันกับทิศทางการหมุนของสนามแม่เหล็กที่สเตเตอร์

แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนตัวนำโรเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นอยู่กับความเร็วของโรเตอร์ที่สัมพันธ์กับความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุนของสเตเตอร์ และความเร็วสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของโรเตอร์ที่กับความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุนของสเตเตอร์ เรียกว่า “ความเร็วสลลิป”

$$n_{slip} = n_s - n_r \quad (2-3)$$

โดยที่ n_{slip} แทน ความเร็วสลลิปของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

n_s แทน ความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุนที่สเตเตอร์

n_r แทน ความเร็วของโรเตอร์

ความเร็วสัมพันธ์ที่แสดงเป็นต่อหน่วยคือ สลลิป (s) ใช้การคำนวณจากสมการต่อไปนี

$$s = \frac{n_{slip}}{n_s} \quad (2-4)$$

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (2-5)$$

สมการที่ (2-4) และ (2-5) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของความเร็วเชิงมุมได้เป็นสมการต่อไป

$$s = \frac{\omega_e - \omega_r}{\omega_e} \quad (2-6)$$

มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำทำงานได้โดยการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กสเตเตอร์จึงเกิดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในโรเตอร์ของมอเตอร์ และด้วยเหตุนี้จึงถูกเรียกว่าหม้อแปลงหมุน เช่นเดียวกับหม้อแปลงตัวหลัก (สเตเตอร์) ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าในตัวที่สอง (โรเตอร์) แต่มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแตกต่างจากหม้อแปลงคือความถี่ของแรงดันไฟฟ้าบนโรเตอร์ (f_r) ไม่เท่ากับความถี่ของแรงดันไฟฟ้าบนสเตเตอร์ (f_e)

ความถี่ของโรเตอร์ (f_r) สามารถคำนวณได้จาก

$$f_r = sf_e \quad (2-7)$$

เมื่อนำสมการ (2-5) แทนค่าลงไปในสมการ (2-7)

$$f_r = \frac{n_s - n_r}{n_s} f_e \quad (2-8)$$

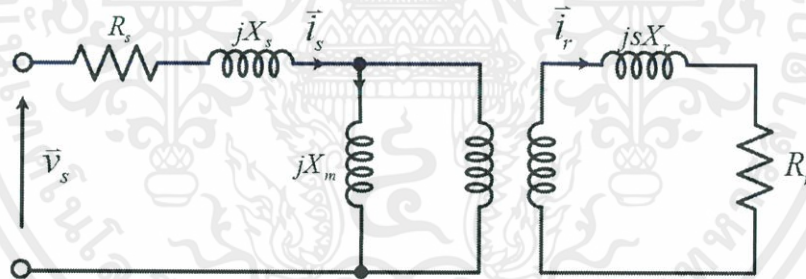
จากสมการ (2-1) แทนลงใน (2-8)

$$f_r = (n_s - n_r) \frac{P}{120 f_e} f_e$$

$$f_r = \frac{P}{120} (n_s - n_r) \quad (2-9)$$

2.2.3 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ (Induction Motor Equivalent Circuit)

มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหลักการการทำงานโดยป้อนสัญญาณไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไปในสเตเตอร์ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำและกระแสไฟฟ้าในโรเตอร์ เนื่องจากการเหนี่ยวนำของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเหมือนกับการทำงานของหม้อแปลง ทำให้วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำคล้ายกับวงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งสามารถเขียนวงจรสมมูลได้ดังนี้



รูปที่ 2.1 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

ในการเขียนวงจรสมมูลต่อเฟสสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำจำเป็นต้องอ้างอิงถึงในส่วนของโรเตอร์ในฝั่งสเตเตอร์ การแปลงค่าพารามิเตอร์จากฝั่งโรเตอร์ไปยังฝั่งสเตเตอร์จะใช้การคำนวณค่าเดียวกับการคำนวณในหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งมีสมการดังนี้

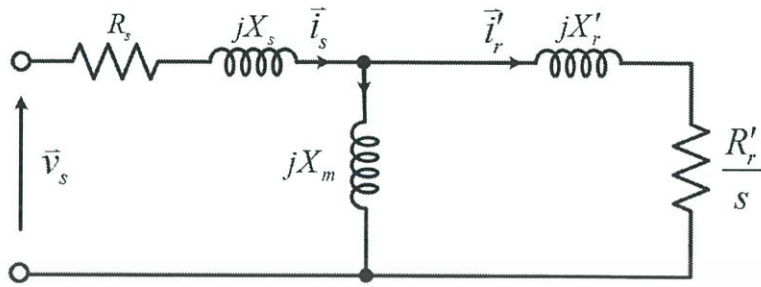
$$\vec{i}_r = \frac{s\vec{i}_r}{a} \quad (2-10)$$

$$X_r' = \frac{a^2 X_r}{s} \quad (2-11)$$

$$R_r' = \frac{a^2 R_r}{s} \quad (2-12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นในการเขียนวงจรสมมูลต่อเฟสสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้ดัง รูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

2.2.4 กำลังและแรงบิดในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

จากรูปที่ 2.2 สามารถใช้เพื่อหาค่ากำลังไฟฟ้าและสมการแรงบิดที่ควบคุมการทำงานของมอเตอร์ได้ กระแสไฟฟ้าที่สเตเตอร์สามารถหาจากสมการที่ (2-13)

$$I_s = \frac{V_s}{Z_{eq}} \quad (2-13)$$

โดยที่

$$Z_{eq} = R_s + jX_s + \left(R_c \parallel jX_m \parallel \left(\frac{R_r'}{s} + jX_r' \right) \right) \quad (2-14)$$

ดังนั้นค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก และค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดสเตเตอร์ 3 เฟสสามารถคำนวณได้ตามสมการต่อไปนี้

$$P_{scl} = 3I_s^2 R_s \quad (2-15)$$

$$P_c = \frac{3E_1^2}{R_c} \quad (2-16)$$

ซึ่งกำลังไฟฟ้าในช่องว่างอากาศสามารถคำนวณได้ตามสมการต่อไปนี้

$$P_{ag} = P_{in} - P_{scl} - P_c \quad (2-17)$$

เมื่อฝั่งของโรเตอร์กำลังไฟฟ้าในช่องว่างอากาศสามารถคำนวณได้จากตัวต้านทาน $\left(\frac{R_r'}{s} \right)$ โดยคำนวณด้วยสมการต่อไปนี้

$$P_{ag} = 3I_r'^2 \frac{R_r'}{s} \quad (2-18)$$

กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากขดลวดโรเตอร์หาได้จากสมการต่อไปนี้

$$P_{rcl} = 3I_r^2 R_r \quad (2-19)$$

หลังจากคำนวณกำลังไฟฟ้าสูญเสียจากขดลวดสเตเตอร์, แกนเหล็ก และขดลวดโรเตอร์ โดยผลลัพธ์ของพลังงานคือกำลังไฟฟ้าซึ่งถูกเปลี่ยนเป็นกำลังทางกล (ยังไม่ได้คิดกำลังสูญเสียทางกล)

$$\begin{aligned} P_{conv} &= P_{ag} - P_{rcl} \\ &= 3I_r^2 \frac{R_r}{s} - 3I_r^2 R_r \\ &= 3I_r^2 R_r \left(\frac{1}{s} - 1 \right) \\ P_{conv} &= 3I_r^2 R_r \left(\frac{1-s}{s} \right) \end{aligned} \quad (2-20)$$

จากสมการ (2-18) และ (2-19) สามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังต่อไปนี้

$$P_{rcl} = sP_{ag} \quad (2-21)$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} P_{conv} &= P_{ag} - sP_{ag} \\ &= (1-s)P_{ag} \end{aligned} \quad (2-22)$$

ถ้าทราบถึงกำลังสูญเสียจากแรงเสียดทานและการหมุน สามารถคำนวณหา กำลังทางกลของมอเตอร์ได้ด้วยสมการดังต่อไปนี้

$$P_{out} = P_{conv} - P_{F\&W} - P_{misc} \quad (2-23)$$

แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า คือแรงบิดที่เกิดจากการแปลงกำลังไฟฟ้าเป็นกำลังทางกล แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

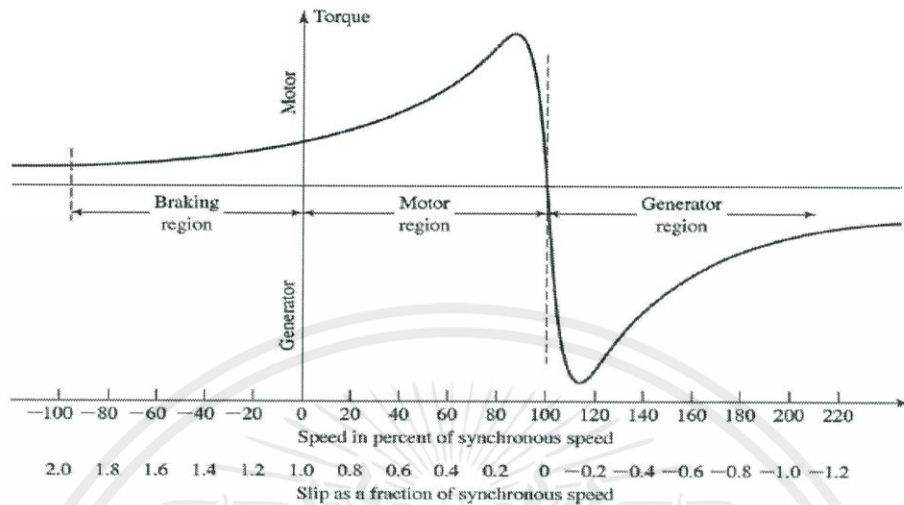
$$T_e = \frac{P_{conv}}{\omega_m} \quad (2-24)$$

$$T_e = \frac{(1-s)P_{ag}}{(1-s)\omega_s}$$

$$T_e = \frac{P_{ag}}{\omega_s} \quad (2-25)$$

ในขณะที่มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำทำงานในส่วนของโรเตอร์จะหมุนในทิศทางเดียวกันกับสนามแม่เหล็กหมุนซึ่งถูกสร้างขึ้นโดยกระแสไฟฟ้าที่สเตเตอร์ ความเร็วของโรเตอร์จะมีค่าอยู่ระหว่างศูนย์ถึงความเร็วซิงโครนัส ทำให้เกิดสลิปซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0 และ 1 เป็นการทำงานในโหมดของมอเตอร์ไฟฟ้า ($n_s > n_r$)

ถ้าค่าสลิปที่มีค่าติดลบ เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำทำงานอยู่ในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยความเร็วของโรเตอร์มีความเร็วมากกว่าความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุน ($n_s < n_r$)



รูปที่ 2.3 กราฟแสดงแรงบิด, ความเร็ว และสลิปของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส

2.2.5 การทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส (Three-Phase Induction Motor Tests)

จากวงจรสมมูลรูปที่ 2.2 จะเห็นว่ามีค่าพารามิเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำคือ ความต้านทานขดลวดสเตเตอร์ (R_s), ความต้านทานเสมือนสเตเตอร์ (X_s), ความต้านทานขดลวดโรเตอร์ในฝั่งสเตเตอร์ (R'_r), ความต้านทานเสมือนโรเตอร์ในฝั่งสเตเตอร์ (X'_r) และ ความต้านทานเสมือนแม่เหล็ก (X_m) ซึ่งสามารถหาได้จากการทดสอบมอเตอร์ในลักษณะต่างๆ ได้แก่ การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้ากระแสตรงของขดลวดสเตเตอร์ (VI-method), การทดสอบแบบที่สภาวะไร้ภาระ (No-load test) และการทดสอบแบบบล็อกโรเตอร์ (Blocked-rotor test)

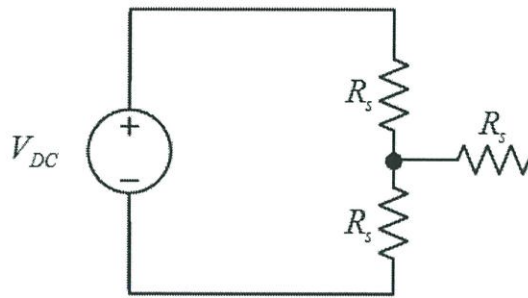
- การทดสอบหาค่าความต้านทานไฟฟ้าของขดลวดสเตเตอร์ด้วยวิธีแรงดัน-กระแส (VI-method)

การทดสอบนี้จะป้อนไฟฟ้ากระแสตรงเข้าไปขดลวดสเตเตอร์ ไฟฟ้ากระแสตรงที่ป้อนเข้าสเตเตอร์จะทำการกำหนดค่ากระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสเตเตอร์จนถึงพิกัดกระแสของมอเตอร์ และทำการวัดค่าแรงดันตามช่วงของกระแสที่ป้อนเข้า หลังจากนั้นนำค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าไปสร้างกราฟระหว่างแรงดันกับกระแส ความชันของกราฟจะเป็นค่าของความต้านทานสเตเตอร์ การคำนวณความต้านทานสเตเตอร์ขึ้นอยู่กับลักษณะการต่อขดลวดสเตเตอร์ซึ่งมีอยู่ 2 แบบคือ เดลต้า และสตาร์

สมการเมื่อขดลวดสเตเตอร์ต่อแบบสตาร์

$$\frac{\Delta V}{\Delta I} = 2R_s \quad (2-26)$$

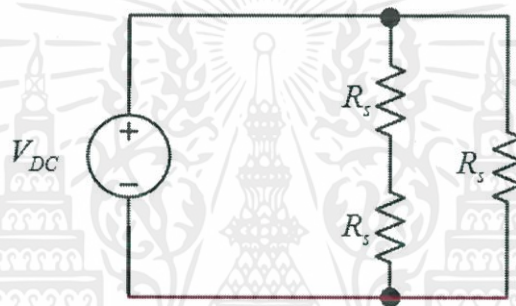
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 VI-method ขดลวดสเตเตอร์ต่อแบบสตาร์

สมการเมื่อขดลวดสเตเตอร์ต่อแบบเดลต้า

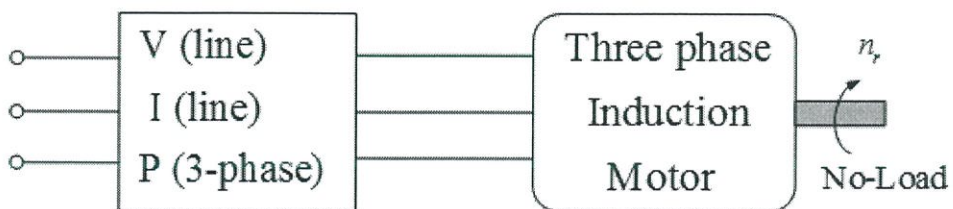
$$\frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{2}{3} R_s \tag{2-27}$$



รูปที่ 2.5 VI-method ขดลวดสเตเตอร์ต่อแบบเดลต้า

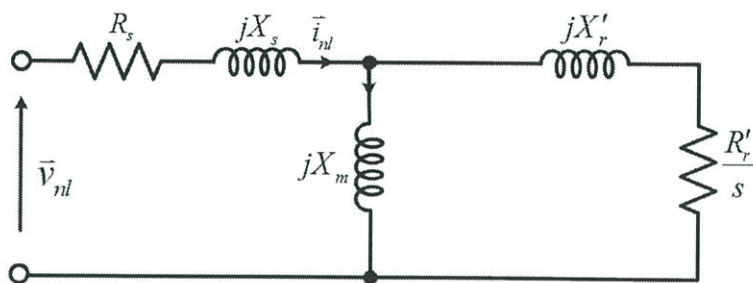
- การทดสอบที่สภาวะไร้ภาระ (No-Load Test) [2]

การทดสอบนี้มีลักษณะคล้ายกันกับการทดสอบแบบเปิดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้า เพราะที่สภาวะไร้ภาระทางกลความเร็วของโรเตอร์เข้าใกล้กับความเร็วซิงโครนัสทำให้ค่าสลลิปมีค่าเข้าใกล้ 0 ส่งผลให้ $\frac{R_r}{s}$ มีค่าสูงมาก ทำให้กระแสไฟฟ้าที่โรเตอร์มีค่าต่ำมากคล้ายกับการทดสอบแบบเปิดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้า การทดสอบจะกระทำที่พิกัดแรงดันไฟฟ้าของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จากนั้นทำการบันทึกค่ากระแสไฟฟ้า, กำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนที่แรงดันไฟฟ้าพิกัด



รูปที่ 2.6 วงจรการทดสอบที่สภาวะไร้ภาระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 การทดสอบที่สภาวะไร้ภาระของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

โดยที่ P_{nl} แทน กำลังไฟฟ้าสามเฟสในสภาวะที่สภาวะไร้ภาระ
 \bar{v}_{nl} แทน แรงดันไฟฟ้าต่อเฟส
 \bar{i}_{nl} แทน กระแสไฟฟ้าต่อเฟส

ในอุดมคติขณะที่สภาวะไร้ภาระจะไม่มีกระแสบนตัวนำโรเตอร์ เนื่องจากความเร็วโรเตอร์เท่ากับความเร็วซิงโครนัส แต่ในความเป็นจริงกระแสในโรเตอร์จะมีค่าเพียงเล็กน้อยเพื่อใช้สำหรับสร้างแรงบิดที่สามารถต้านแรงเสียดทานและแรงต้านลม (Friction and windage loss) กระแสที่ไหลไปที่โรเตอร์มีค่าต่ำมากจึงไม่นำกำลังสูญเสียในโรเตอร์ไปคำนวณ แต่เนื่องจากวงจรแม่เหล็กของมอเตอร์มีช่องว่างอากาศ ทำให้ค่ากระแสกระตุ้นในสเตเตอร์มีค่าสูงกว่าปกติ

ในการทดสอบกำลังสูญเสียของระบบ (P_r) หาได้จากสมการต่อไปนี้

$$P_r = P_{nl} - 3I_{nl}^2 R_1 \quad (2-28)$$

ในกรณีที่ทราบกำลังสูญเสียจากแรงเสียดทานและแรงต้านลม ($P_{f\&W}$) สามารถหา กำลังสูญเสียในแกนเหล็กได้จากสมการต่อไปนี้

$$P_{core} = P_r - P_{f\&W} \quad (2-29)$$

ค่าความสูญเสียในแกนเหล็กจะประมาณค่าได้จาก $R_c \approx \frac{3V_{nl}^2}{P_{core}}$ ซึ่งในทางปฏิบัติไม่

จำเป็นต้องใช้ในการคำนวณ เพราะกำลังสูญเสียในแกนเหล็กมีค่าต่ำมากจึงไม่จำเป็นต้องนำมาคำนวณ ในวงจรสมมูล จากรูปที่ 2.7 จะเห็นได้ว่าค่าความต้านทานเสมือนที่ปรากฏในขณะที่ทดสอบแบบที่สภาวะไร้ภาระจะมีค่าประมาณตามสมการต่อไปนี้

$$X_{nl} \approx X_s + X_m \quad (2-30)$$

ค่า X_{nl} จะพิจารณาได้จากค่ากำลังไฟฟ้าเสมือน (Q_{nl}) ซึ่งได้จากข้อมูลการทดสอบดังนี้

$$Q_{nl} = \sqrt{S_{nl}^2 - P_{nl}^2} \quad (2-31)$$

โดยที่ $S_{nl} = 3V_{nl}I_{nl}$ และค่า X_{nl} จะคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$X_{nl} = \frac{Q_{nl}}{3I_{nl}^2} \quad (2-32)$$

หรือสามารถพิจารณาได้จากความสัมพันธ์ของวงจรมูลคั้งนี้

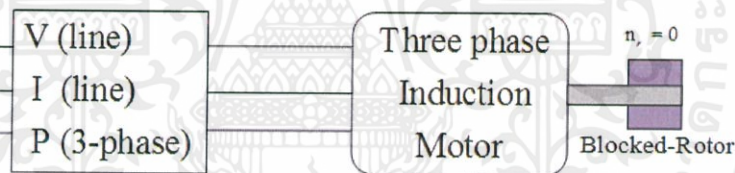
$$|Z_{nl}| = \frac{V_{nl}}{I_{nl}} \quad (2-33)$$

$$R_{nl} = \frac{P_{nl}}{3i_{nl}^2} \quad (2-34)$$

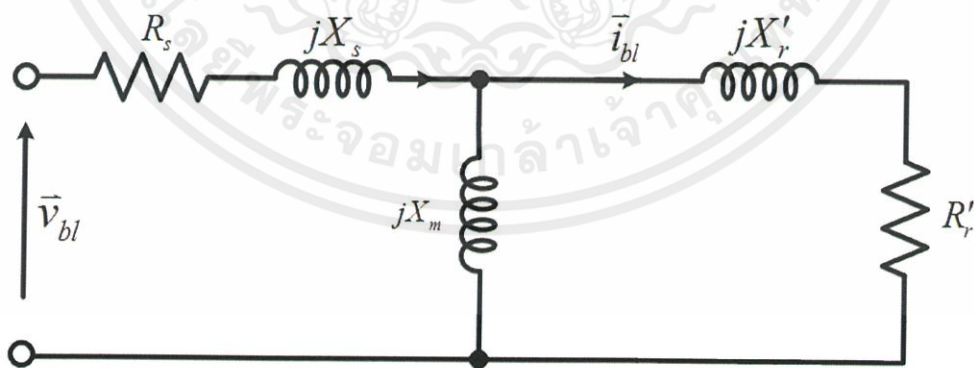
$$X_{nl} = \sqrt{Z_{nl}^2 - R_{nl}^2} \quad (2-35)$$

- การทดสอบแบบบล็อกโรเตอร์ (Blocked-Rotor Test)

การทดสอบนี้มีลักษณะคล้ายกันกับการทดสอบแบบลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้า เพราะในช่วงที่บล็อกโรเตอร์จะไม่มีความเร็วที่โรเตอร์ส่งผลให้สลิปเท่ากับ 1 การทดสอบนี้จะป้อนไฟเข้าไปสเตเตอร์ที่พิกัดกระแสหลังจากนั้นวัดค่าแรงดัน, กำลังไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าเสมือน



รูปที่ 2.8 วงจรการทดสอบบล็อกโรเตอร์



รูปที่ 2.9 วงจรการทดสอบบล็อกโรเตอร์มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

โดยที่ P_{bl} เป็นกำลังไฟฟ้าสามเฟส

\vec{v}_{bl} เป็นแรงดันไฟฟ้าต่อเฟส

\vec{i}_{bl} เป็นกระแสไฟฟ้าต่อเฟส

ถ้าต้องการพิจารณาคูณลักษณะในสภาพการทำงานปกติ (ที่พิกัด) การทดสอบจะปรับค่าแรงดันไฟฟ้าจนทำให้เกิดค่ากระแสในสเตเตอร์เท่ากับพิกัด และความถี่ที่ใช้จะต้องลดลงด้วยเพื่อให้ใกล้เคียงกับความถี่ที่เกิดขึ้นจริงในโรเตอร์

ความต้านทานเสมือนที่ได้จากการทดสอบบล็อกโรเตอร์ X_{bl} จะหาได้จากค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนขณะบล็อกโรเตอร์ดังนี้

$$Q_{bl} = \sqrt{S_{bl}^2 - P_{bl}^2} \quad (2-36)$$

โดยที่ $S_{bl} = 3V_{bl}I_{bl}$ และค่า X_{bl} จะคำนวณได้จาก

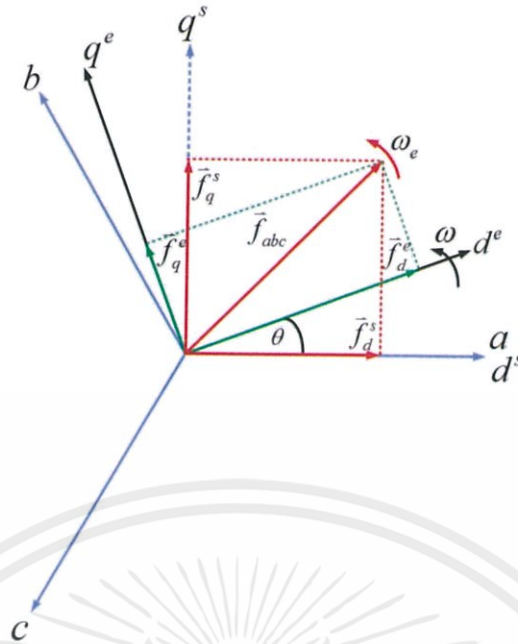
$$X_{bl} = \frac{Q_{bl}}{3i_{bl}^2} \approx \frac{f_{rated}}{f_{nl}} \quad (2-37)$$

ความต้านทานไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบแบบบล็อกโรเตอร์ R_{bl}

$$R_{bl} = \frac{P_{bl}}{3I_{bl}^2} \quad (2-38)$$

2.3 ทฤษฎีกรอบอ้างอิง [5]

การควบคุมการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก (Squirrel-cage rotor) ใช้ทฤษฎีกรอบอ้างอิงในการแยกองค์ประกอบของสัญญาณเพื่อใช้ในการแบ่งส่วนการควบคุมออกเป็น 2 ส่วน คือ การควบคุมความเร็วในการหมุนของโรเตอร์ และการควบคุมค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ ซึ่งการควบคุมทั้ง 2 ส่วนจะแยกการควบคุมออกจากกันเหมือนกับการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยก โดยแปลงจากกรอบอ้างอิงสามเฟสเป็นกรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง และกรอบอ้างอิงหมุน เพื่อใช้การประมาณเวกเตอร์ของฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ และความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้า (ω_e) ในการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ



รูปที่ 2.10 ไดอะแกรมของการแปลงกรอบอ้างอิง [5]

2.3.1 วิธีการแปลงกรอบอ้างอิง (Reference frame transformation)

การแปลงกรอบอ้างอิงมี 4 แบบ

- การแปลงจากกรอบอ้างอิงสามเฟสเป็นกรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง
- การแปลงจากกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งเป็นกรอบอ้างอิงใดๆ
- การแปลงจากกรอบอ้างอิงใดๆเป็นกรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง
- การแปลงจากกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งเป็นกรอบอ้างอิงสามเฟส

2.3.1.1 การแปลงจากกรอบอ้างอิงสามเฟสเป็นกรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง

การแปลงจากกรอบอ้างอิงสามเฟสเป็นกรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง เป็นหลักการแปลงกรอบอ้างอิงของคลาร์ก (Clarke's transformation) การแปลงกรอบอ้างอิงสามารถคำนวณได้ตามสมการต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} f_{sd}^s \\ f_{sq}^s \\ f_{so}^s \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \quad (2-39)$$

2.3.1.2 การแปลงจากกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งเป็นกรอบอ้างอิงหมุน

การแปลงจากกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งเป็นกรอบอ้างอิงหมุน เป็นหลักการแปลงกรอบอ้างอิงของพาร์ค (Park's transformation) กรอบอ้างอิงหมุนจะมีความเร็วเชิงมุม $\omega = \frac{d\theta}{dt}$ ค่า θ คำนวณจากค่าเวกเตอร์ของฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ โดยการแปลงจากกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งเป็นกรอบอ้างอิงหมุนสามารถคำนวณได้ตามสมการต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} f_{sd}^e \\ f_{sq}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{sd}^s \\ f_{sq}^s \end{bmatrix} \quad (2-40)$$

2.3.1.3 การแปลงจากกรอบอ้างอิงหมุนเป็นกรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง

การแปลงจากกรอบอ้างอิงหมุนเป็นกรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง เป็นหลักการแปลงกรอบอ้างอิงย้อนกลับของพาร์ค (Inverse Park's transformation) โดยการแปลงจากกรอบอ้างอิงหมุนเป็นกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งใช้การคำนวณตามสมการต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} f_{sd}^s \\ f_{sq}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & -\cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{sd}^e \\ f_{sq}^e \end{bmatrix} \quad (2-41)$$

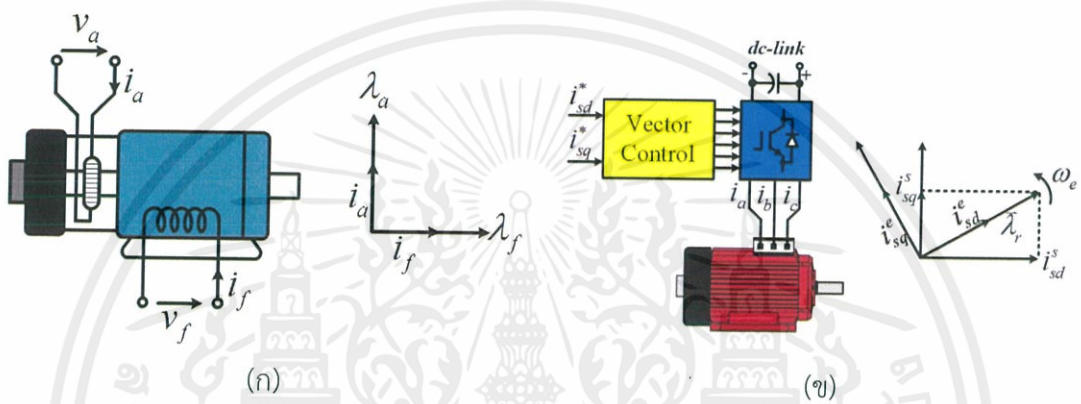
2.3.1.4 การแปลงจากกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งเป็นกรอบอ้างอิงสามเฟส

การแปลงจากกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งเป็นกรอบอ้างอิงสามเฟส เป็นหลักการแปลงกรอบอ้างอิงย้อนกลับของคลาร์ก (Inverse Clarke's transformation) การแปลงกรอบอ้างอิงสามารถคำนวณได้ตามสมการต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ \frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{sd}^s \\ f_{sq}^s \\ f_{so}^s \end{bmatrix} \quad (2-42)$$

2.4 การควบคุมเวกเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ [3,5]

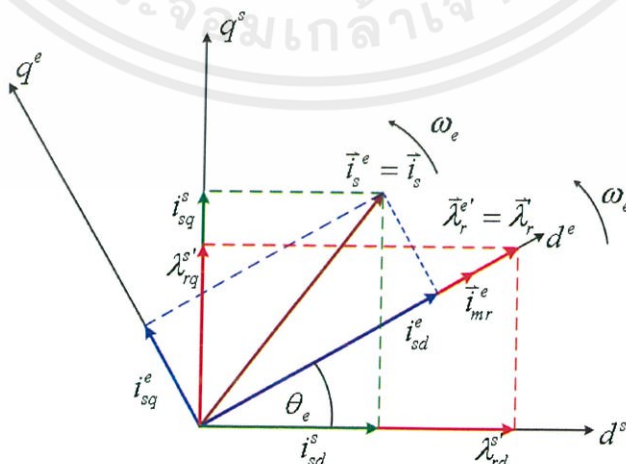
การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำให้มีสมรรถนะสูงใช้การควบคุมแบบเวกเตอร์ที่ให้ผลเหมือนการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยก ในการควบคุมเวกเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำจำเป็นต้องแยกองค์ประกอบของสัญญาณแรงดันและกระแสที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์ โดยใช้ทฤษฎีกรอบอ้างอิงในการแยกองค์ประกอบของสัญญาณเพื่อใช้ในการแบ่งส่วนการควบคุมออกเป็น 2 ส่วน คือ การควบคุมความเร็วในการหมุนของโรเตอร์และการควบคุมค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ โดยทั้ง 2 ส่วนจะแยกการควบคุมออกจากกันเหมือนกับการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยก



รูปที่ 2.11 การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยกและมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ [5]

- (ก) การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยก
- (ข) การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนทางเดียวจะถูกกระตุ้นผ่านทางสเตเตอร์เท่านั้น ดังนั้นตัวแปรที่ใช้ในการควบคุมเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำประเภทนี้คือกระแสสเตเตอร์ ทำการแปลงแรงดันและกระแสสเตเตอร์ให้อยู่ในกรอบอ้างอิงฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ นำแรงดันและกระแสไปคำนวณการประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ เพื่อใช้ในการควบคุมเวกเตอร์



รูปที่ 2.12 ไดอะแกรมขณะใดขณะหนึ่งภายใต้การควบคุมเครื่องจักรกลไฟฟ้า [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวกเตอร์ต่างๆที่ปรากฏในรูปที่ 2.12 เป็นเวกเตอร์ของตัวแปรต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมฟลักซ์แม่เหล็กเกี่ยวคัลล์งที่โรเตอร์โดยตรง จากรูปจะพบว่ากรอบอ้างอิงฟลักซ์แม่เหล็กเกี่ยวคัลล์งที่โรเตอร์นั้นมีความเร็วเชิงมุมคงที่เท่ากับ ω_e โดยมีทิศทางทวนเข็มนาฬิกา ณ ขณะใดขณะหนึ่งนั้นกรอบอ้างอิงฟลักซ์แม่เหล็กเกี่ยวคัลล์งที่โรเตอร์ทำมุมกับกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งเท่ากับ θ_e เวกเตอร์ของฟลักซ์แม่เหล็กเกี่ยวคัลล์งที่โรเตอร์จะถูกกำหนดให้มีองค์ประกอบอยู่บนแกน d เท่านั้น ทำให้เวกเตอร์ของกระแสแมกเนตซึ่งมีองค์ประกอบอยู่บนแกน d เช่นกัน ส่งผลให้ในกรอบอ้างอิงฟลักซ์แม่เหล็กเกี่ยวคัลล์งที่โรเตอร์องค์ประกอบแกน d ของกระแสไฟฟ้าโรเตอร์ใช้ในการควบคุมฟลักซ์แม่เหล็กเกี่ยวคัลล์งที่โรเตอร์ และองค์ประกอบแกน q ของกระแสไฟฟ้าโรเตอร์ใช้ในการควบคุมความเร็วรอบของโรเตอร์

2.5 บทสรุป

บทนี้กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์โดยใช้ทฤษฎีของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ, ทฤษฎีกรอบอ้างอิง และทฤษฎีการควบคุมเวกเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำในการประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์



บทที่ 3

การประมาณเวกเตอร์ของฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์

3.1 บทนำ

ในการควบคุมเวกเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำจำเป็นต้องมีการประมาณเวกเตอร์ของฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์เนื่องจากไม่สามารถวัดค่าของฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ได้จึงจำเป็นต้องมีการประมาณค่าขึ้นมา ซึ่งการประมาณเวกเตอร์ของฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์มี 2 แบบ คือ แบบจำลองแรงดันและแบบจำลองกระแส

3.2 แบบจำลองการหาค่าฟลักซ์แม่เหล็ก [5]

ปัจจุบันมีสองแบบจำลอง คือ การประมาณฟลักซ์แม่เหล็กแบบจำลองกระแสที่ถูกต้องแม่นยำเหมาะกับการใช้งานในย่านความเร็วต่ำและการประมาณฟลักซ์แม่เหล็กแบบจำลองแรงดันเหมาะสมกับการประมาณฟลักซ์แม่เหล็กในช่วงการใช้ความเร็วที่สูงขึ้น

การคำนวณฟลักซ์แม่เหล็กสเตเตอร์ (λ_s), ฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ (λ_r), แรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้า (T_e) และความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์ (ω_r) อาศัยสมการของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ (3-1) - (3-5) มีอินพุตของการประมาณค่าคือแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่สเตเตอร์ในรูปสเปซเวกเตอร์ที่แปลงไปยังกรอบอ้างอิงนี้

$$\vec{v}_s = R_s \vec{i}_s + s \vec{\lambda}_s + j \omega_e \vec{\lambda}_s \quad (3-1)$$

$$0 = R_r \vec{i}_r' + s \vec{\lambda}_r + j (\omega_e - \omega_r) \vec{\lambda}_r \quad (3-2)$$

$$\vec{\lambda}_s = L_s \vec{i}_s + L_m \vec{i}_r' \quad (3-3)$$

$$\vec{\lambda}_r = L_r \vec{i}_r' + L_m \vec{i}_s \quad (3-4)$$

$$T_e = 1.5P (\vec{\lambda}_{sd}^s \vec{i}_{sq}^s - \vec{\lambda}_{sq}^s \vec{i}_{sd}^s) \quad (3-5)$$

โดยที่ \vec{v}_s	แทน แรงดันไฟฟ้าที่สเตเตอร์
$\vec{i}_s^s, \vec{i}_r^s, \vec{i}_r^e$	แทน กระแสไฟฟ้าที่สเตเตอร์และโรเตอร์
$\vec{\lambda}_s^s, \vec{\lambda}_r^s, \vec{\lambda}_r^e$	แทน ฟลักซ์แม่เหล็กที่สเตเตอร์และโรเตอร์
R_s, R_r'	แทน ค่าความต้านทานสเตเตอร์และโรเตอร์
L_s, L_r', L_m	แทน ค่าเหนี่ยวนำที่สเตเตอร์โรเตอร์ และแมกเนโตอิงสามเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ω_e	แทน ความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้า
ω_r	แทน ความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์
T_e	แทน แรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้า

3.2.1 การประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กแบบจำลองกระแส

การประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์แบบจำลองกระแสสามารถทำได้โดยการนำค่ากระแสที่สเตเตอร์จากวงจรตรวจจับกระแสมาใช้ในการคำนวณดังสมการ (3-6)

$$\bar{\lambda}_r^{ei}(t) = \int \left[\frac{1}{\tau_r} L_m \bar{i}_s^e(t) + \left(j\omega_m - \frac{1}{\tau_r} \right) \bar{\lambda}_r^{ei}(t) \right] dt \quad (3-6)$$

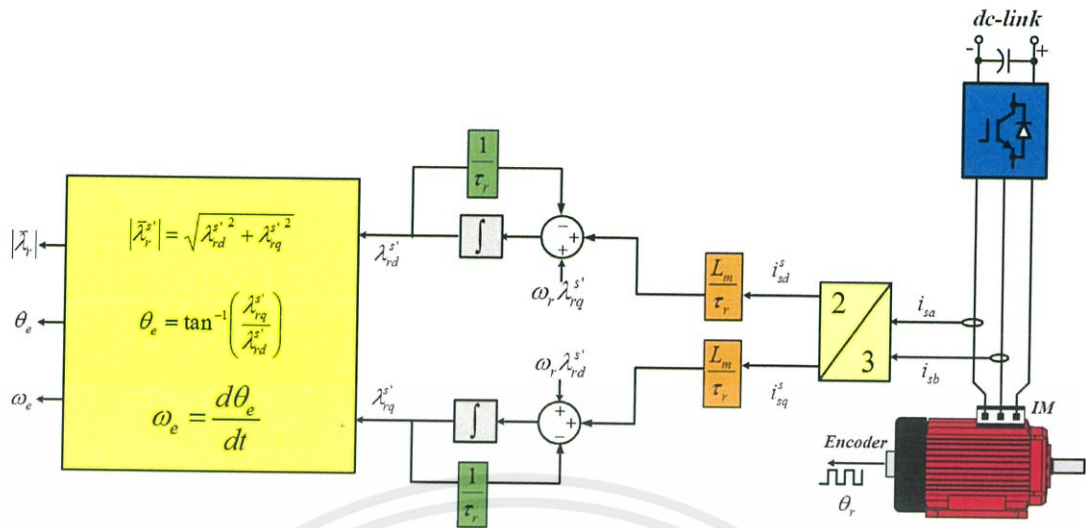
ฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์แบบจำลองกระแสสามารถแยกองค์ประกอบให้อยู่ในแนวแกน d และแนวแกน q ของกรอบอ้างอิงโรเตอร์ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ (3-7) - (3-8)

$$\bar{\lambda}_{rd}^{ei}(t) = \int \left[\frac{1}{\tau_r} L_m \bar{i}_{sd}^e(t) - \omega_e \bar{\lambda}_{rq}^{ei} - \frac{1}{\tau_r} \bar{\lambda}_{rd}^{ei}(t) \right] dt \quad (3-7)$$

$$\bar{\lambda}_{rq}^{ei}(t) = \int \left[\frac{1}{\tau_r} L_m \bar{i}_{sq}^e(t) - \omega_e \bar{\lambda}_{rd}^{ei} - \frac{1}{\tau_r} \bar{\lambda}_{rq}^{ei}(t) \right] dt \quad (3-8)$$

โดยที่ $\bar{\lambda}_r^{ei}$	แทน ฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ในกรอบอ้างอิงโรเตอร์
$\bar{\lambda}_{rd}^{ei}, \bar{\lambda}_{rq}^{ei}$	แทน ฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ในกรอบอ้างอิงโรเตอร์ในแกน dq
\bar{i}_s^e	แทน กระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในกรอบอ้างอิงโรเตอร์
$\bar{i}_{sd}^e, \bar{i}_{sq}^e$	แทน กระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งในแกน dq
L_m	แทน ค่าความเหนี่ยวนำแม่เหล็กแมกเนตซึ่งสามเฟส
ω_m, ω_e	แทน ความเร็วเชิงมุมทางกลและความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้า
τ_r	แทน ค่าคงตัวเวลาของวงจรโรเตอร์

รูปที่ 3.1 คือ ไดอะแกรมแสดงการประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์แบบจำลองกระแส โดยคำนวณหาค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ในแบบจำลองกระแสจะวัดค่ากระแสโดยใช้ Current Sensor นำค่าที่วัดได้ไปแปลงกรอบอ้างอิงให้อยู่ในกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งและใช้ค่าในกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งคำนวณหาค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์



รูปที่ 3.1 การประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์แบบจำลองกระแส [5]

3.2.2 การประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กแบบจำลองแรงดัน

การประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์แบบจำลองแรงดันจะใช้ค่าแรงดันและกระแสที่สเตเตอร์มาใช้ในการคำนวณดังสมการ (3-9)

$$\bar{\lambda}_r^{sv}(t) = \frac{L'_r}{L_m} \left[\int (\bar{v}_s^s - R_s \bar{i}_s^s) dt - \sigma L_s \bar{i}_s^s \right] \tag{3-9}$$

ฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์แบบจำลองแรงดันนั้นสามารถแยกองค์ประกอบของฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ให้อยู่ในแนวแกน d และแนวแกน q ของกรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ (3-10) – (3-11)

$$\bar{\lambda}_{rd}^{sv} = \frac{L'_r}{L_m} \left[\int (\bar{v}_{sd}^s - R_s \bar{i}_{sd}^s) dt - \sigma L_s \bar{i}_{sd}^s \right] \tag{3-10}$$

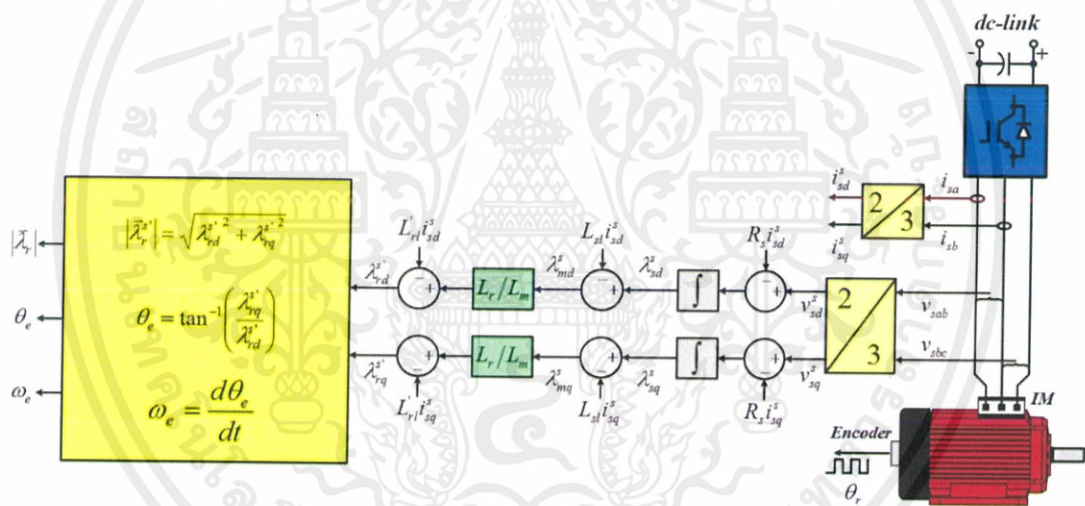
$$\bar{\lambda}_{rq}^{sv} = \frac{L'_r}{L_m} \left[\int (\bar{v}_{sq}^s - R_s \bar{i}_{sq}^s) dt - \sigma L_s \bar{i}_{sq}^s \right] \tag{3-11}$$

- โดยที่ $\bar{\lambda}_r^{sv}$ แทน ฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ในกรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง
- $\bar{\lambda}_{rd}^{sv}, \bar{\lambda}_{rq}^{sv}$ แทน ฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ในกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งในแกน dq
- \bar{v}_s^s แทน แรงดันไฟฟ้าสเตเตอร์ในกรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง
- $\bar{v}_{sq}^s, \bar{v}_{sd}^s$ แทน แรงดันไฟฟ้าสเตเตอร์ในกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งในแกน dq
- \bar{i}_s^s แทน กระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในกรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\vec{i}_{sd}^s, \vec{i}_{sq}^s$	แทน กระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ในกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งในแกน dq
L_m	แทน ค่าความเหนี่ยวนำแม่เหล็กแมกเนไตซึ่งสามเฟส
R_s	แทน ค่าความต้านทานสเตเตอร์
L_s	แทน ค่าความเหนี่ยวนำสเตเตอร์
L_r'	แทน ค่าความเหนี่ยวนำโรเตอร์
σ	แทน total leakage factor $\left(1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}\right)$

ไดอะแกรมแสดงการประมาณค่าการประมาณฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์แบบจำลองแรงดันดังรูปที่ 3.2 สามารถทำได้โดยการรับค่าแรงดันและกระแสสเตเตอร์จากวงจรตรวจจับแรงดันและกระแสมาใช้ในการคำนวณ



รูปที่ 3.2 การประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์แบบโมเดลแรงดัน [5]

3.3 การประมาณค่าแวกเตอร์ของฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ [4]

การประมาณฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ในสมการที่ (3-12) อนุমানได้จากสมการ (3-2) และ(3-4) ในกรอบอ้างอิงของหมุน

$$\vec{\lambda}_r^{ei} = \frac{L_m}{1 + s\tau_r} \vec{i}_s^e - j \frac{\omega_e - \omega_r}{1 + s\tau_r} \vec{\lambda}_r^e \tag{3-12}$$

โดยที่ $\tau_r = L_r' / R_r'$ แทนที่ ค่าคงตัวเวลาของวงจรรโรเตอร์

จากทฤษฎีการควบคุมเวกเตอร์ฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ในกรอบอ้างอิงหมุนจะกำหนดให้ฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์อยู่บนแกน d ของกรอบอ้างอิงหมุน ส่งผลให้ขนาดของฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์บนแกน q ของกรอบอ้างอิงหมุนมีขนาดเท่ากับ 0 จึงสามารถแยกองค์ประกอบของฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ให้อยู่ในองค์ประกอบในแนวแกน d และแกน q คือ

$$\bar{\lambda}_{rd}^{ei} = \frac{L_m}{1 + s\tau_r} \bar{i}_{sd}^e \quad (3-13)$$

$$\bar{\lambda}_{rq}^{ei} = 0 \quad (3-14)$$

การประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์แบบจำลองกระแสใช้ในการคำนวณหาค่าฟลักซ์แม่เหล็กสเตเตอร์แบบจำลองกระแสไฟฟ้าได้ดังสมการ (3-15)

$$\bar{\lambda}_s^{si} = \frac{L_m}{L_r} \bar{\lambda}_r^{si} + \frac{L_s L_r - L_m^2}{L_r} \bar{i}_s^s \quad (3-15)$$

ฟลักซ์แม่เหล็กสเตเตอร์แบบจำลองแรงดันสามารถคำนวณค่าได้ดังสมการ 3-16 ซึ่งอาศัยสมการแรงดันไฟฟ้าที่สเตเตอร์ของแบบจำลองแรงดันจากสมการ 3-1 โดยใช้แรงดันไฟฟ้าสเตเตอร์, กระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ และค่าแรงดันชดเชยในการคำนวณ

$$\bar{\lambda}_s^{sv} = \frac{1}{s} (\bar{v}_s^s - R_s \bar{i}_s^s - \bar{v}_{comp}) \quad (3-16)$$

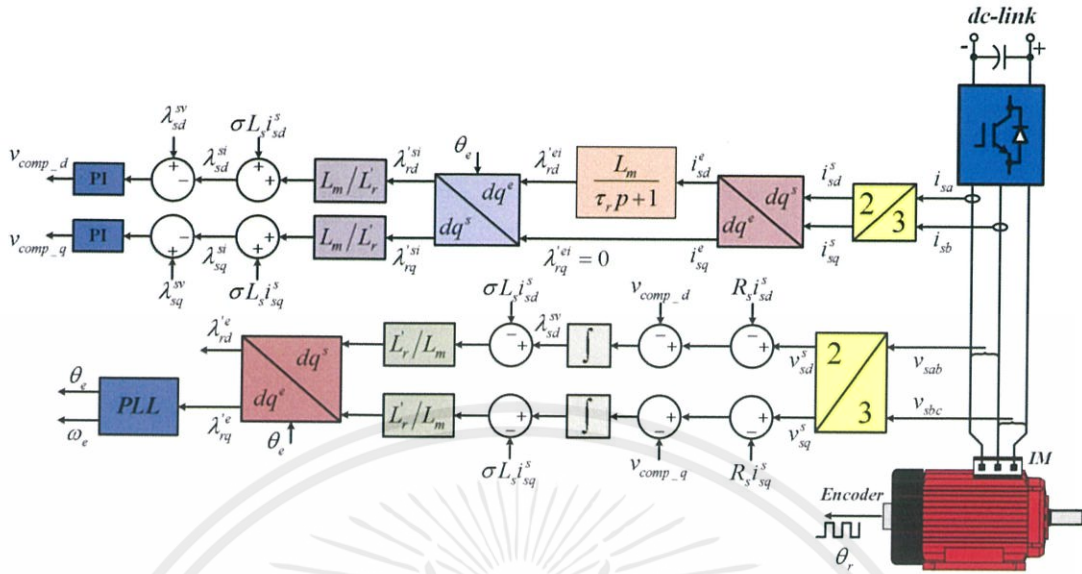
การคำนวณค่าฟลักซ์แม่เหล็กสเตเตอร์ให้ถูกต้องและแม่นยำมากขึ้นต้องทำการชดเชยค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการอินทิเกรตและการวัดค่าความต้านทานที่สเตเตอร์ที่ความเร็วรอบต่ำผ่านการประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กสเตเตอร์แบบจำลองกระแสถูกดัดแปลงผ่านตัวควบคุมแบบ PI สามารถเขียนได้เป็นสมการ 3-17

$$\bar{v}_{comp} = (K_p + K_I \frac{1}{s}) (\bar{\lambda}_s^{sv} - \bar{\lambda}_s^{si}) \quad (3-17)$$

เนื่องจากการวัดค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์นั้นไม่สามารถวัดค่าได้จริง จึงต้องมีการประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ดังสมการ 3-18 ซึ่งมี 2 ปัจจัยที่จำเป็นในการคำนวณคือค่าฟลักซ์แม่เหล็กสเตเตอร์ที่หาได้จากสมการ 3-16 และค่ากระแสที่สเตเตอร์ที่วัดได้

$$\bar{\lambda}_r^s = \frac{L_r'}{L_m} \bar{\lambda}_s^{sv} - \frac{L_s L_r' - L_m^2}{L_m} \bar{i}_s^s \quad (3-18)$$

การประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์สามารถใช้ไดอะแกรมที่แสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ไดอะแกรมของการประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ [4,5]

3.4 สมการการประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์

เรื่องนี้กล่าวถึงสมการในรูปของ Time domain, s domain, z domain และ Discrete form ที่ใช้ในการคำนวณการประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ที่ใช้ในการจำลองทางคอมพิวเตอร์ และการทดลอง

3.4.1 สมการที่ใช้ในการคำนวณ

- สมการการประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์แบบจำลองกระแส

Time domain
$$\bar{\lambda}_r^{ei}(t) = \int \left[\frac{1}{\tau_r} L_m \bar{i}_s^e(t) + \left(j\omega_m - \frac{1}{\tau_r} \right) \bar{\lambda}_r^e(t) \right] dt \tag{3-19}$$

S domain
$$\bar{\lambda}_{rd}^e(s) = \frac{L_m}{1 + s\tau_r} \bar{i}_{sd}^e(s) \tag{3-20}$$

z domain
$$\bar{\lambda}_{sd}^e(z) = \left(\frac{zT_s}{(T_s + \tau_r)z - \tau_r} \right) L_m \bar{i}_{sd}^e(z) \tag{3-21}$$

Discrete form
$$\bar{\lambda}_{rd}^e[k] = \left(\frac{T_s}{T_s - \tau_r} \right) L_m \bar{i}_{sd}^e[k] + \left(\frac{\tau_r}{\tau_r + T_s} \right) \bar{\lambda}_{rd}^e[k-1] \tag{3-22}$$

- สมการการประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กสเตเตอร์แบบจำลองแรงดัน

$$\text{Time domain} \quad \bar{\lambda}_s^s(t) = \int [\bar{v}_o(t)] dt \quad (3-23)$$

$$\text{S domain} \quad \bar{\lambda}_s^s(s) = \frac{1}{s} [\bar{v}_o(s)] \quad (3-24)$$

$$\text{z domain} \quad \bar{\lambda}_s^s(z) = \left[\frac{T_s(z+1)}{2(z-1)} \right] [\bar{v}_o(z)] \quad (3-25)$$

$$\text{Discrete form} \quad \bar{\lambda}_s^s[k] = \frac{T_s(\bar{v}_o[k] + \bar{v}_o[k-1]) + \bar{\lambda}_s^s[k-1]}{2} \quad (3-26)$$

$$\text{กำหนดให้ } \bar{v}_o = \bar{v}_s^s - R_s \bar{i}_s^s - \bar{v}_{comp}$$

- สมการการประมาณตำแหน่งของเวกเตอร์ฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์

$$\text{Time domain} \quad \theta_e(t) = \int \omega_e(t) dt \quad (3-27)$$

$$\text{S domain} \quad \theta_e(s) = \frac{1}{s} [\omega_e(s)] \quad (3-28)$$

$$\text{z domain} \quad \theta_e(z) = \left[\frac{T_s(z+1)}{2(z-1)} \right] [\omega_e(z)] \quad (3-29)$$

$$\text{Discrete form} \quad \theta_e[k] = \frac{T_s(\omega_e[k] + \omega_e[k-1]) + \theta_e[k-1]}{2} \quad (3-30)$$

3.5 บทสรุป

บทนี้จะกล่าวถึงเรื่องการประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์โดยใช้การคำนวณร่วมกันของแบบจำลองแรงดันและแบบจำลองกระแส และแสดงรูปแบบสมการที่ใช้ในการจำลองทางคอมพิวเตอร์ในรูป z domain และสมการการคำนวณของโปรแกรมในไมโครคอนโทรลเลอร์ในรูป Discrete form

บทที่ 4

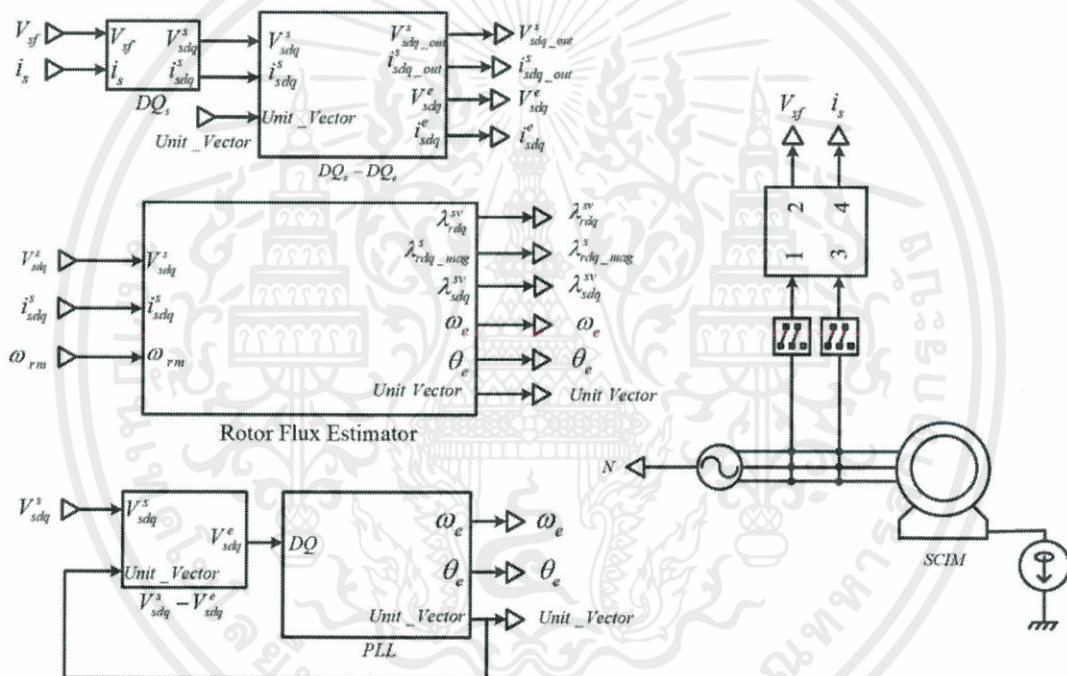
การจำลองทางคอมพิวเตอร์และการทดลอง

4.1 บทนำ

ในบทนี้กล่าวถึงการจำลองทางคอมพิวเตอร์ซึ่งเป็นการจำลองการทำงานทั้งระบบโดยใช้หลักการและทฤษฎีที่ได้ศึกษาการควบคุมเวกเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำรวมถึงการออกแบบโปรแกรมการคำนวณในไมโครคอนโทรลเลอร์

4.2 การจำลองทางคอมพิวเตอร์ของการประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์

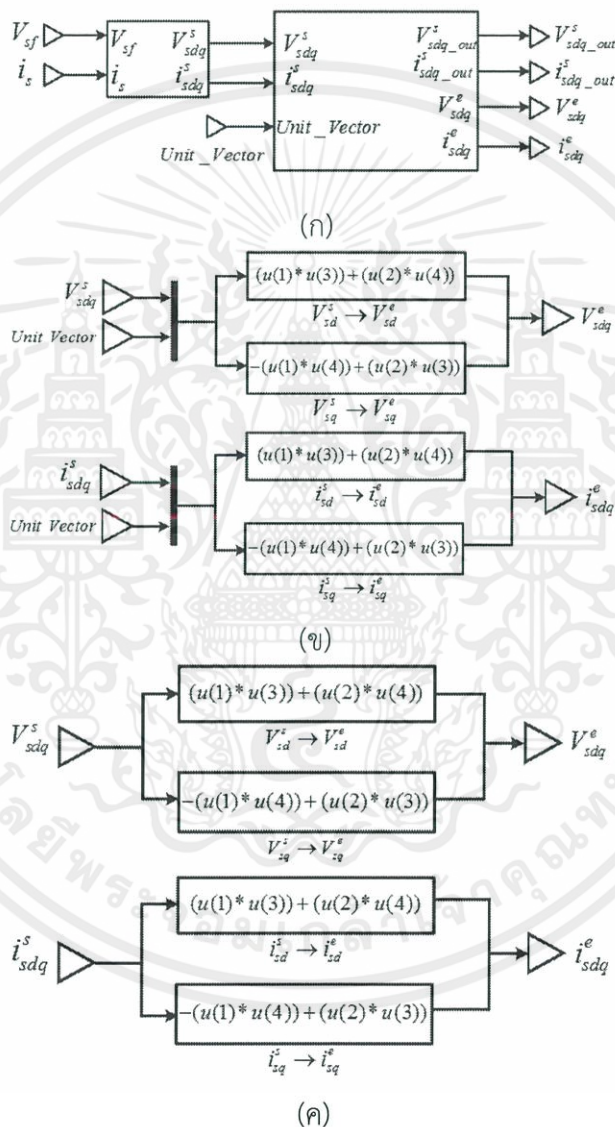
ในส่วนนี้เป็นการจำลองการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดโรเตอร์กรงกระรอกและการประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์เพื่อการควบคุมเวกเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยใช้โปรแกรม PLECS ซึ่งจะมีไดอะแกรมในการทำงานดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์การประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์

4.2.1 ไดอะแกรมการแปลงจากกรอบอ้างอิงสามเฟสไปสู่กรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง

ในการประมาณค่าพิกซ์แม่เหล็กโรเตอร์จะวัดสัญญาณกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสเตเตอร์ แล้วแปลงสัญญาณกระแสและแรงดันไฟฟ้าจากกรอบอ้างอิงสามเฟสไปสู่กรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง โดยอาศัยการแปลงของคลาร์ก (Clark's Transformation) และแปลงไปสู่กรอบอ้างอิงใดๆ โดยอาศัยการแปลงของพาร์ค (Park's Transformation) ซึ่งไดอะแกรมจะแสดงดังรูปที่ 4.2

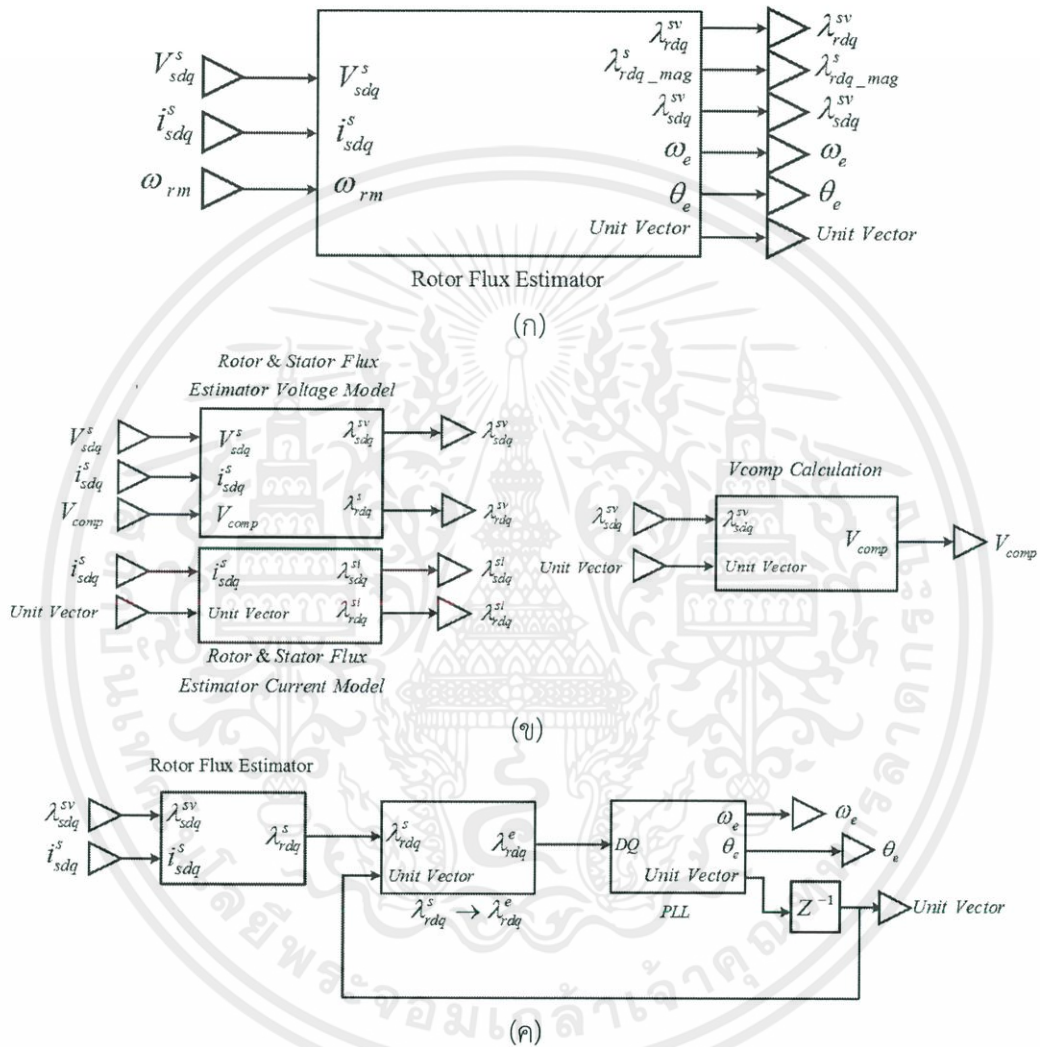


รูปที่ 4.2 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์การแปลงกรอบอ้างอิง

- (ก) ไดอะแกรมการแปลงแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าจากกรอบอ้างอิงสามเฟสไปสู่กรอบอ้างอิงหยุดนิ่งและกรอบอ้างอิงใดๆ
- (ข) ไดอะแกรมการแปลงแรงดันและกระแสจากกรอบอ้างอิงสามเฟสไปสู่กรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง
- (ค) ไดอะแกรมการแปลงแรงดันและกระแสจากกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งไปสู่กรอบอ้างอิงใดๆ

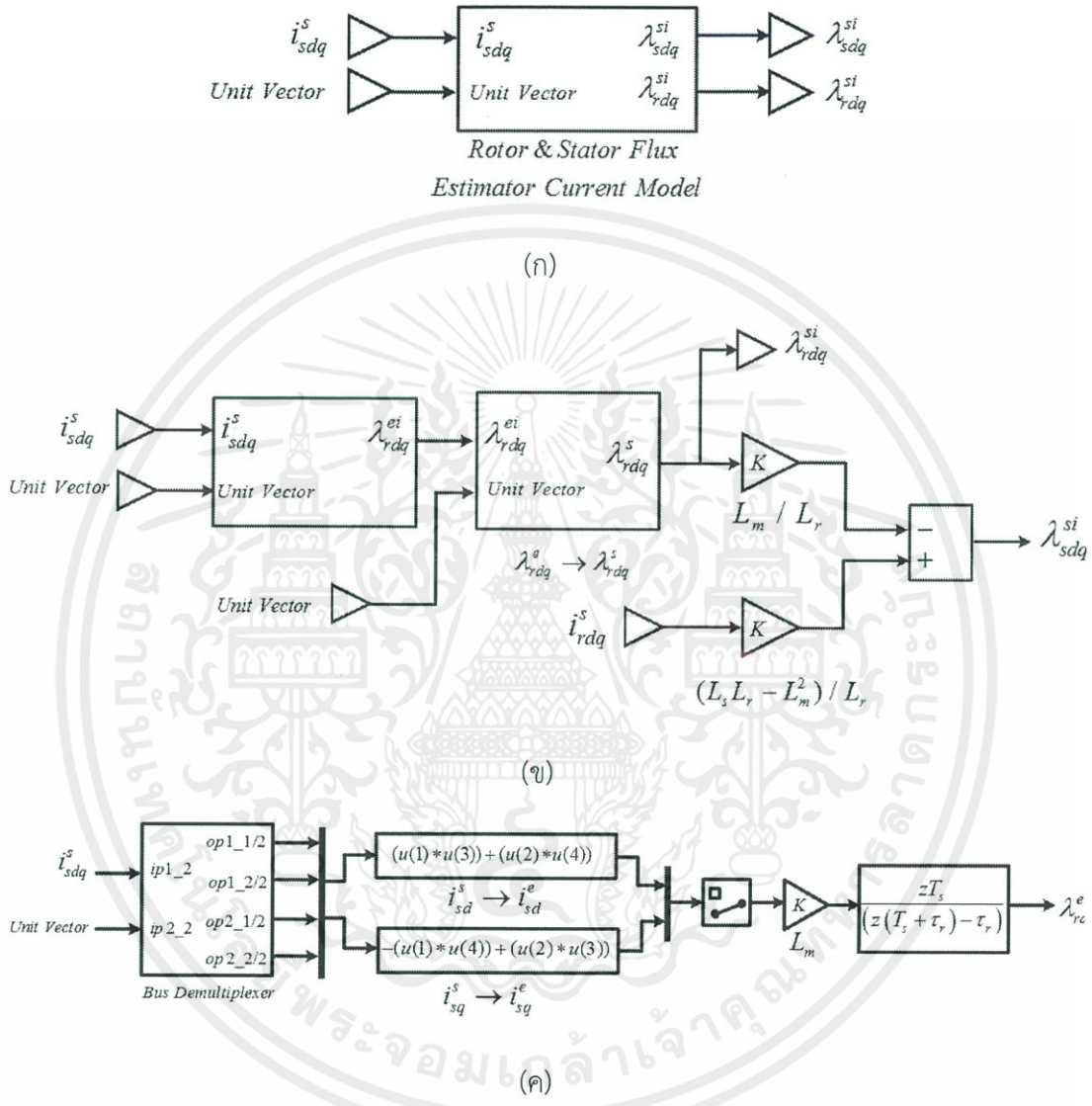
4.2.2 การประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์

การประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์สามารถทำได้โดยการนำค่าแรงดันและกระแสในกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งมาคำนวณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์จากนั้นนำค่าที่ได้มาทำการคำนวณหาฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ในกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งและใช้วงจรเฟสลอคคูลูปในการประมาณตำแหน่งและความเร็วเชิงมุมของฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ในกรอบอ้างอิงหมุนดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของการประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์
 (ก) ไดอะแกรมการประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์
 (ข) ไดอะแกรมการประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์และสเตเตอร์แบบจำลองแรงดันและกระแส
 (ค) ไดอะแกรมการประมาณความเร็วเชิงมุมและตำแหน่งของเวกเตอร์ฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์โดยเฟสลอคคูลูป

4.2.3 การประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์และสเตเตอร์โดยแบบจำลองกระแส
 การประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์แบบจำลองกระแสเป็นการประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็ก
 โรเตอร์เพื่อใช้ในการประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กสเตเตอร์แบบจำลองกระแสซึ่งใช้ฟลักซ์แม่เหล็ก
 สเตเตอร์แบบจำลองกระแสนี้ในการคำนวณแรงดันชดเชยในแบบจำลองแรงดัน

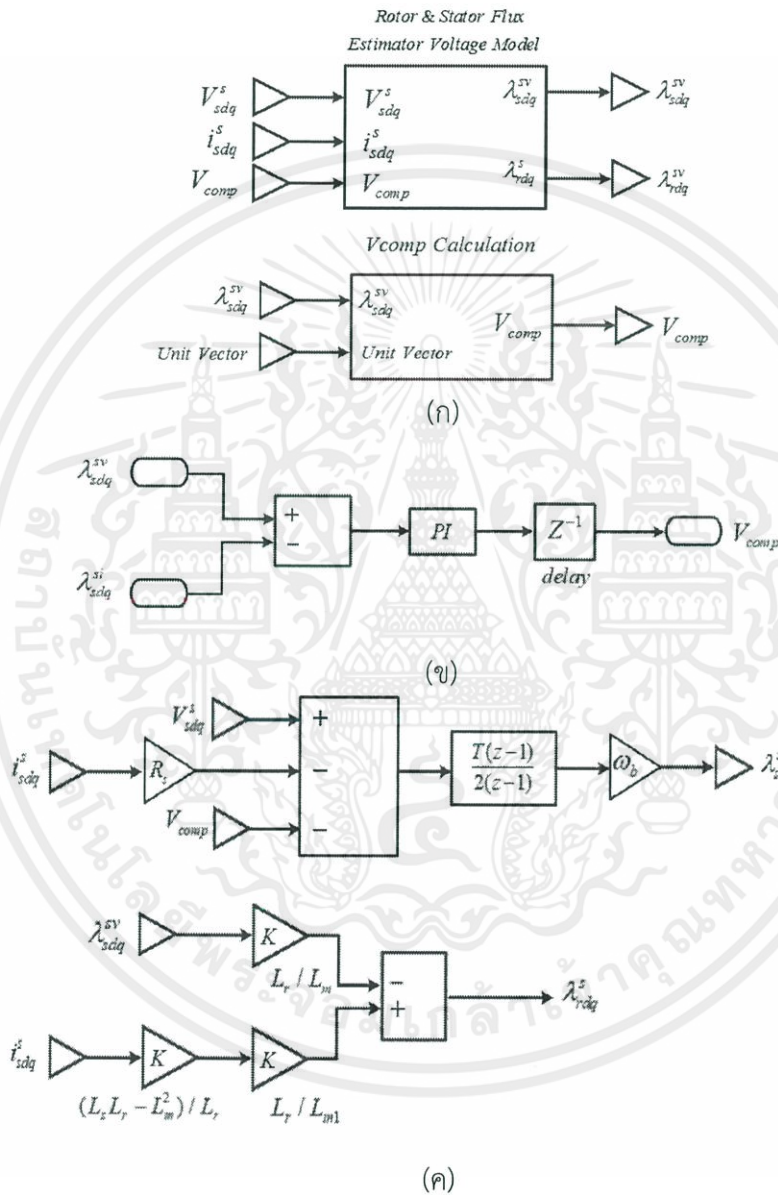


รูปที่ 4.4 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์การประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์และสเตเตอร์แบบจำลองกระแส

- (ก) ไดอะแกรมการประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์และสเตเตอร์แบบจำลองกระแส
- (ข) ไดอะแกรมการประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กสเตเตอร์แบบจำลองกระแส
- (ค) ไดอะแกรมการประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์แบบจำลองกระแส

4.2.4 การประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์และสเตเตอร์โดยแบบจำลองแรงดัน

การประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์และสเตเตอร์แบบจำลองแรงดันเป็นการประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์เพื่อนำไปใช้ในการควบคุมเวกเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยลบแรงดันชดเชยในช่วงคำนวณฟลักซ์แม่เหล็กสเตเตอร์เพื่อให้การประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์มีความแม่นยำมากขึ้น



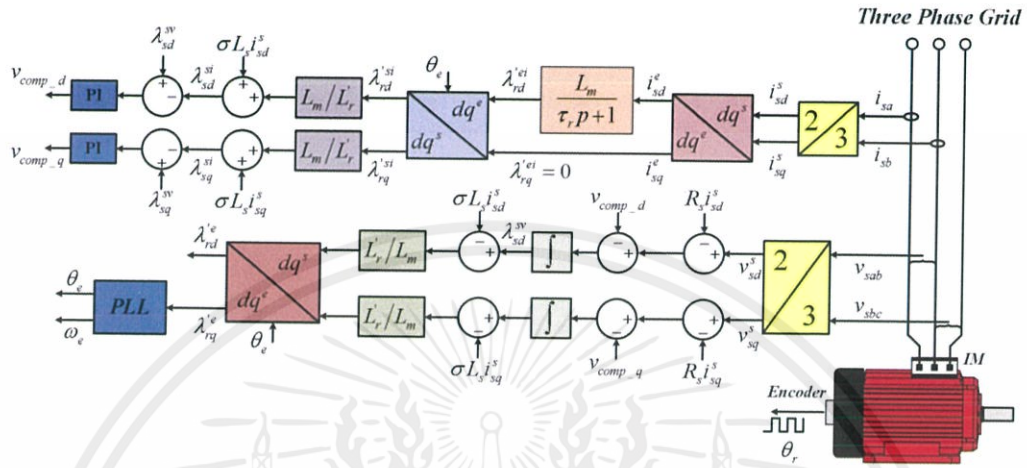
รูปที่ 4.5 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของการประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์และสเตเตอร์แบบจำลองแรงดัน

- (ก) ไดอะแกรมการประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์แบบจำลองแรงดัน
- (ข) ไดอะแกรมการคำนวณแรงดันชดเชยในการประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กสเตเตอร์
- (ค) ไดอะแกรมการประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์และสเตเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การทดลองการประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์

ในส่วนของการทดลองใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการประมวลผลนั้นได้นำเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดโรเตอร์กรงกระรอกขนาด 3 แรงม้ามาใช้ในการทดลอง โดยต่อะแกรมในการทำการทดลองจะทำการทดลองโดยการป้อนแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสจากระบบไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 โต๊ะแกรมการประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ที่ใช้ในโครงการนี้ [5]

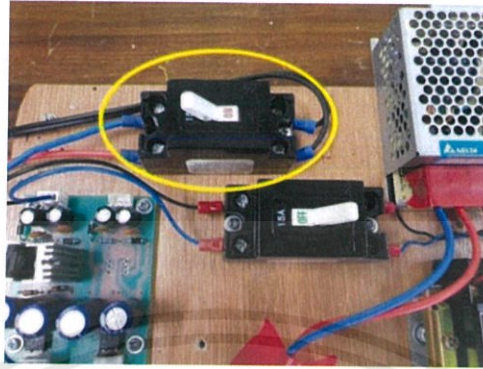
การประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์จะถูกคำนวณโดยไมโครคอนโทรลเลอร์และแสดงผลในรูปแบบของสัญญาณที่คำนวณได้โดยใช้วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัล-อนาล็อก ซึ่งเครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้นได้แสดงดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 เครื่องต้นแบบที่ใช้ในการประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์

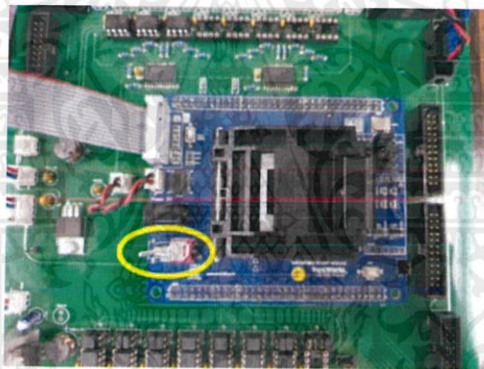
4.4 วิธีการทดลองการประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์

1. เปิดสวิตซ์การทำงาน Circuit Breaker ควบคุมการทำงานของแหล่งจ่ายไฟ



รูปที่ 4.8 สวิตซ์ Circuit Breaker ที่ควบคุมแหล่งจ่ายไฟ

2. เปิดสวิตซ์การทำงานบนบอร์ด DSP ของไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F2812



รูปที่ 4.9 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F2812

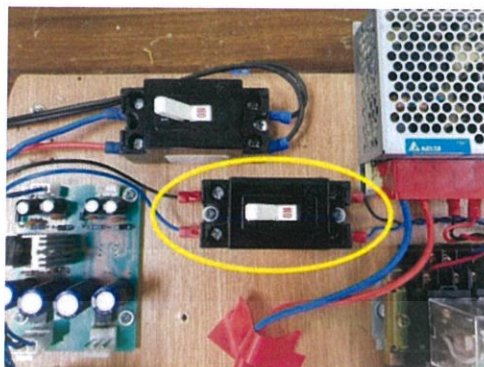
3. ทำการเชื่อมต่อ HDSP-XDS100V2ISO Emulator เข้ากับคอมพิวเตอร์และเขียนโปรแกรมการคำนวณลงในไมโครคอนโทรลเลอร์



รูปที่ 4.10 อุปกรณ์ HDSP-XDS100V2ISO Emulator

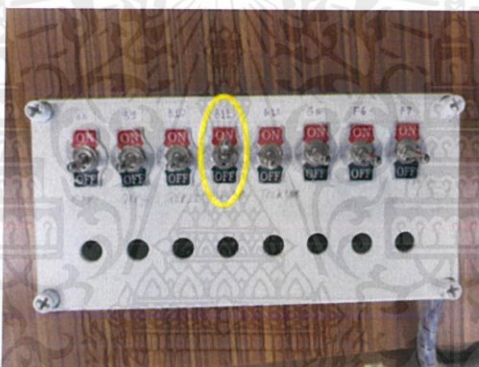
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. เปิดสวิตช์การทำงาน Circuit Breaker หน้าที่ควบคุมการทำงานของ Relay



รูปที่ 4.11 สวิตช์ Circuit Breaker ที่ควบคุมการทำงานของ Relay

5. เปิดสวิตช์ B11 เพื่อตั้งค่าเริ่มต้นเป็นค่าเฉลี่ยเป็น 0 ในการตั้งค่าสัญญาณในตอนเริ่มต้นของไมโครคอนโทรลเลอร์



รูปที่ 4.12 สถานะการเปิดการทำงานสวิตช์ B11 เพื่อชดเชยค่าของไมโครคอนโทรลเลอร์

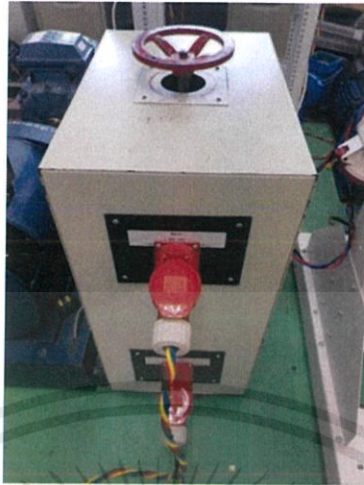
6. เริ่มต้นเดินมอเตอร์เหนี่ยวนำ



รูปที่ 4.13 การควบคุมภาระทางกลที่สภาวะไร้ภาระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. จ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ



รูปที่ 4.14 หม้อแปลงปรับแรงดันไฟฟ้า

8. เริ่มต้นเดินภาระทางกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ



รูปที่ 4.15 อุปกรณ์ไทรฟ์ที่ใช้ในการควบคุมภาระทางกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

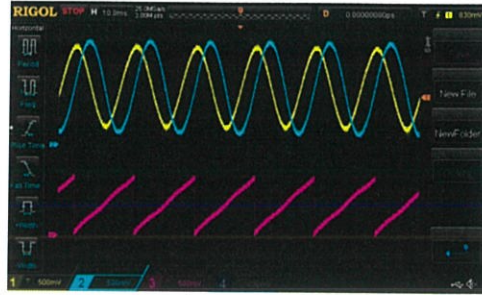
9. วัดความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ



รูปที่ 4.16 การวัดความเร็วรอบมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. วัดสัญญาณขาออกของไมโครคอนโทรลเลอร์ด้วยออสซิลอโคป



รูปที่ 4.17 รูปคลื่นสัญญาณขาออกของไมโครคอนโทรลเลอร์

4.5 บทสรุป

เนื้อหาในบทนี้เป็นการใช้หลักการจากบทที่ 2 , 3 และ 4 มาประยุกต์ใช้ในการจำลองการทำงานทางคอมพิวเตอร์เพื่อออกแบบโปรแกรมการคำนวณการประมาณค่าฟังก์ชันแม่เหล็กโรเตอร์โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการประมวลผล ซึ่งผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์และผลการทดลองจะแสดงรายละเอียดในบทที่ 5

บทที่ 5

ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์และผลการทดลอง

5.1 บทนำ

ในบทนี้จะนำเสนอผลจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม PLECS เปรียบเทียบกับผลการทดลองจากโปรแกรมการคำนวณการประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการประมวลผล เพื่อทดลองว่าสามารถประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ได้ตามการจำลองทางคอมพิวเตอร์

ขอบเขตของการทดลองนั้นอยู่ที่การประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์, การประมาณตำแหน่งของเวกเตอร์ฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ และแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ ซึ่งผลที่ได้จากโครงการวิจัยนี้สามารถนำไปใช้ต่อยอดในส่วนของควบคุมเวกเตอร์เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

5.2 การเปรียบเทียบผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์และผลการทดลองเบื้องต้นแบบ

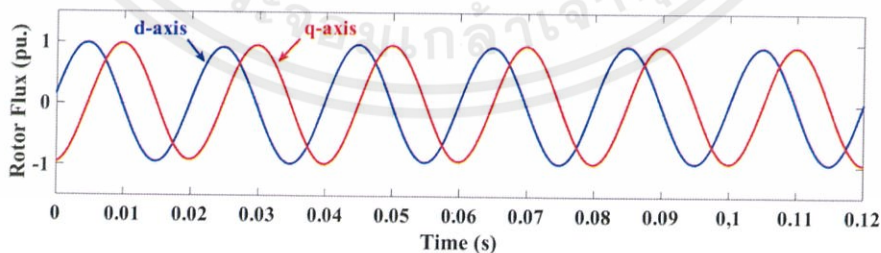
การเปรียบเทียบผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์และผลการทำการทดลองโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ประมวลผลแบ่งออกเป็น 3 หัวข้อ

- ผลการทดลองการประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์
- ผลการทดลองประมาณตำแหน่งของเวกเตอร์ฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์
- ผลการทดลองการประมาณค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ

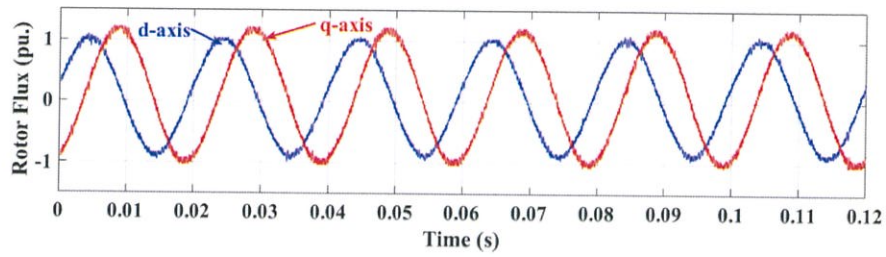
5.2.1 ผลการทดลองการประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์

การประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์สามารถทำได้โดยการนำค่าแรงดันและกระแสที่จ่ายเข้ามาที่สเตเตอร์นำมาคำนวณ โดยแบ่งการจำลองทางคอมพิวเตอร์และการทดลองออกเป็น 2 สภาวะคือ สภาวะไร้ภาระ และสภาวะภาระ 50%

- ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์และผลการทดลองการประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ภายใต้การทำงานในสภาวะไร้ภาระ



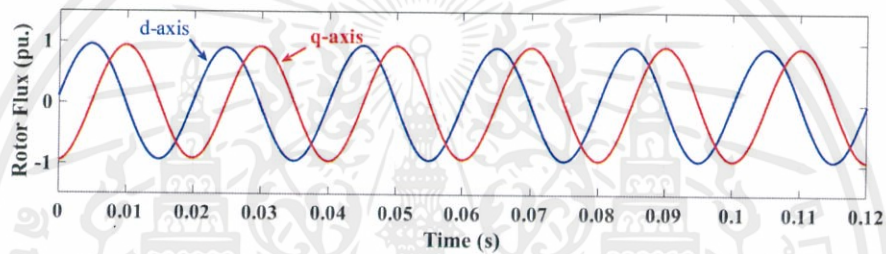
(ก)



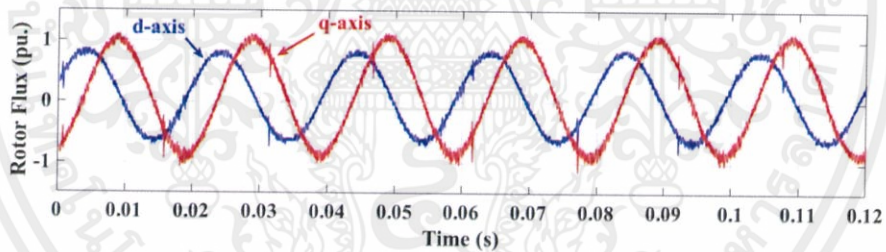
(ข)

รูปที่ 5.1 รูปคลื่นฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ภายใต้การทำงานในสภาวะไร้ภาระ
(ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์, (ข) ผลการทดลอง

- ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์และผลการทดลองการประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ภายใต้การทำงานในสภาวะภาระ 50%



(ก)



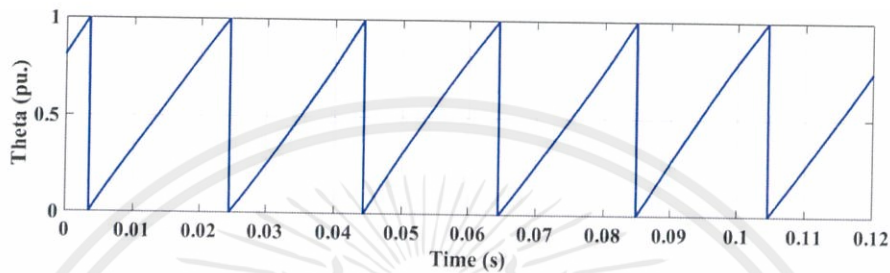
(ข)

รูปที่ 5.2 รูปคลื่นฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ภายใต้การทำงานในสภาวะภาระ 50%
(ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์, (ข) ผลการทดลอง

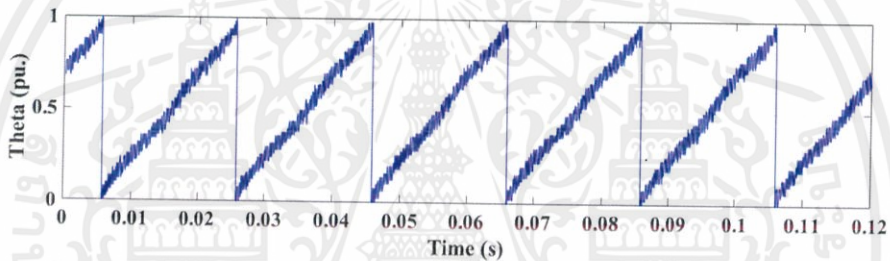
5.2.2 ผลการทดลองประมาณตำแหน่งของเวกเตอร์ฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์

การประมาณตำแหน่งของเวกเตอร์ฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์สามารถกระทำได้อาศัยเฟสล็อกด้วยแบ่งการจำลองทางคอมพิวเตอร์และการทดลองออกเป็น 2 สภาวะคือ สภาวะไร้ภาระและสภาวะภาระ 50%

- ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์และผลการทดลองการประมาณตำแหน่งของเวกเตอร์ฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ภายใต้การทำงานในสภาวะไร้ภาระ



(ก)

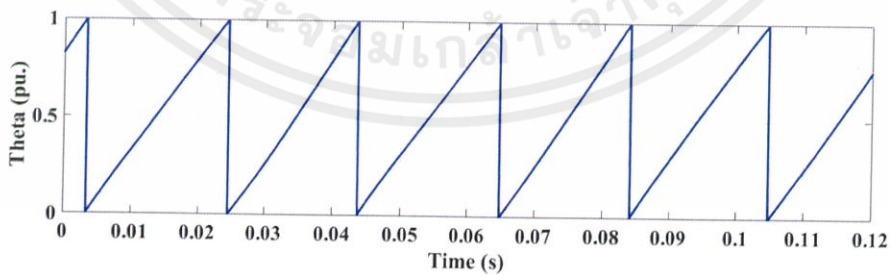


(ข)

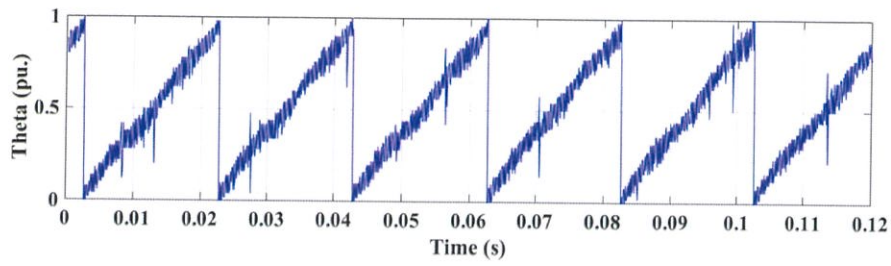
รูปที่ 5.3 รูปคลื่นตำแหน่งของเวกเตอร์ฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ภายใต้การทำงานในสภาวะไร้ภาระ

(ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์, (ข) ผลการทดลอง

- ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์และผลการทดลองการประมาณตำแหน่งของเวกเตอร์ฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ภายใต้การทำงานในสภาวะภาระ 50%



(ก)



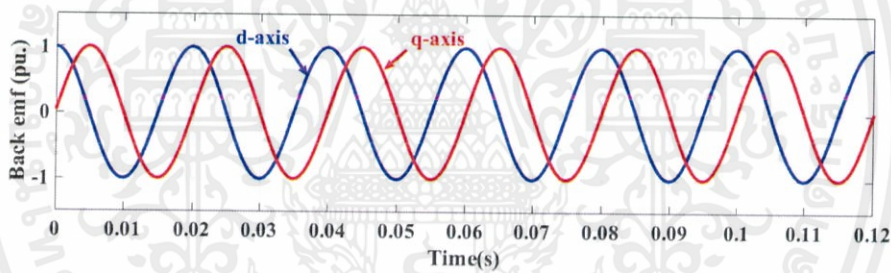
(ข)

รูปที่ 5.4 รูปคลื่นตำแหน่งของเวกเตอร์ฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ภายใต้การทำงานในสภาวะภาระ 50% (ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์, (ข) ผลการทดลอง

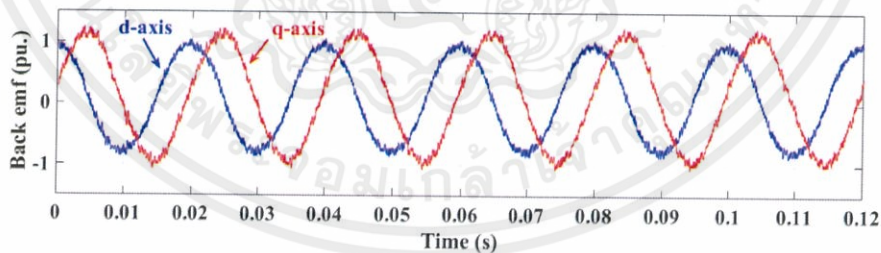
5.2.3 ผลการทดลองการประมาณค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ

การประมาณค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับสามารถคำนวณได้จากแรงดันและกระแสที่สเตเตอร์ในกรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง โดยแบ่งการจำลองทางคอมพิวเตอร์และการทดลองออกเป็น 2 สภาวะ ได้แก่ สภาวะไร้ภาระ และสภาวะภาระ 50%

- ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์และผลการทดลองของแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับภายใต้การทำงานในสภาวะไร้ภาระ



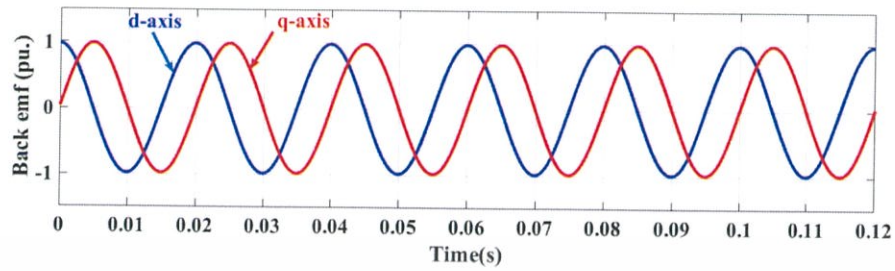
(ก)



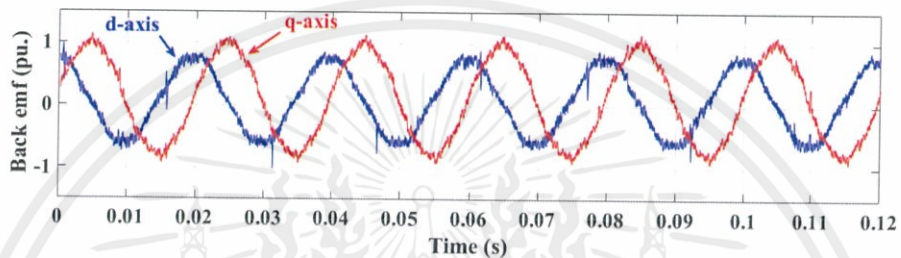
(ข)

รูปที่ 5.5 รูปคลื่นแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับภายใต้การทำงานในสภาวะไร้ภาระ (ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์, (ข) ผลการทดลอง

- ผลจำลองทางคอมพิวเตอร์และผลการทดลองของแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับภายใต้การทำงานในสภาวะภาระ 50%



(ก)



(ข)

รูปที่ 5.6 รูปคลื่นแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับภายใต้การทำงานในสภาวะภาระ 50%
(ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์, (ข) ผลการทดลอง

5.3 บทสรุป

จากการเปรียบเทียบผลการทดลองโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการประมวลผลกับการจำลองทางคอมพิวเตอร์พบว่ารูปคลื่นของฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์, ตำแหน่งของเวกเตอร์ฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์และแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ จากการทดลองใกล้เคียงกับรูปคลื่นจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าสามเฟสที่ป้อนเข้ามอเตอร์เหนี่ยวนำไม่สมดุลกันทำให้รูปคลื่นจากการทดลองต่างจากรูปคลื่นจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์

บทที่ 6

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปการทดลอง

จากการศึกษาการประมาณค่าฟลักซ์เวกเตอร์ของแม่เหล็กโรเตอร์เพื่อการควบคุมเวกเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ในการประมาณค่าเวกเตอร์ของฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์นั้นอาศัยการวัดค่าแรงดันไลน์และกระแสไฟฟ้าที่สเตเตอร์ โดยแปลงกรอบอ้างอิงให้อยู่ในกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งแล้วทำการประมาณค่าเวกเตอร์ฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์โดยอาศัยการคำนวณร่วมกันของแบบจำลองแรงดันและแบบจำลองกระแสเพื่อความสามารถในการทำงานในย่านความเร็วสูงและความเร็วต่ำ การประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ใช้การจำลองทางคอมพิวเตอร์โดยโปรแกรม PLECS ในการออกแบบโปรแกรมการคำนวณที่ใช้ทดลองโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ของบริษัท เทกซ์ส อินสตรูเมนต์ จำกัด เบอร์ TMS320F2812 ในการประมวลผล

ผลการทดลองโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการประมวลผลสามารถสรุปได้ว่าผลลัพธ์การประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์, ตำแหน่งของเวกเตอร์ฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ และแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับใกล้เคียงกับการจำลองทางคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม PLECS เป็นไปตามทฤษฎีที่ได้ทำการศึกษาค้นคว้ามา ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการควบคุมเวกเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำต่อไป

6.2 ข้อเสนอแนะ

การประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์นี้ต้องทราบค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเพื่อนำไปใช้ในการประมาณฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ ซึ่งในโครงการนี้ได้ทำการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆจากการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ดังนั้นถ้านำไปใช้กับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเครื่องอื่นจำเป็นต้องทำการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำเครื่องนั้น เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณ

6.3 เป้าหมายในอนาคต

โครงการนี้ได้ทำการหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำและได้ทำการประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ สามารถนำไปต่อยอดเพิ่มในส่วนของการควบคุมเวกเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Stephen J.Chapman. **Eletric Machinery Fundamentals 4thedition.**
Australia : BAE SYSTEMS.
- [2] A.E. Fitzgerald, Charles Kingsley, Jr.Stephen D.Umans. **Electric Machinery:
6th edition.** Singapore: McGraw-Hill Companies; 2003.
- [3] Peter Vas. **Vector Control of AC Machines.** CLARENDON PRESS OXFORD
- [4] C. Lascu, I. Boldea and F. Blaabjerg, “A Modified Direct Torque Control
for Induction Motor Sensorless Drive” IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 36,
pp. 122-130, Jan./Feb. 2000.
- [5] วรชาติ สุวรรณงาม, "เอกสารประกอบการสอนเรื่อง การขับเคลื่อนเครื่องจักรกล
ไฟฟ้า", สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
เจ้าคุณทหารลาดกระบัง; ปีการศึกษาที่ 2/2561



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.


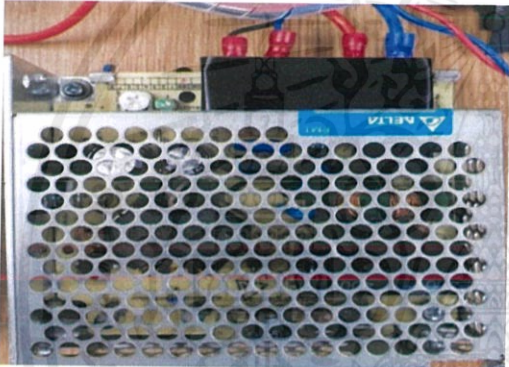

รูปถ่ายชิ้นงานและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ ก.1 รูปถ่ายชิ้นงานและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

รูปถ่าย	รายละเอียด
	<p>FLUKE 115/110 TRUE RMS MULTIMETER</p>
	<p>Commercial-Drive ABB VSD ACS550-01-08A8-4</p>
	<p>RIGOL DS1104Z Digital Oscilloscope LXI 4 Channel 100MHz 2GSa/s</p>

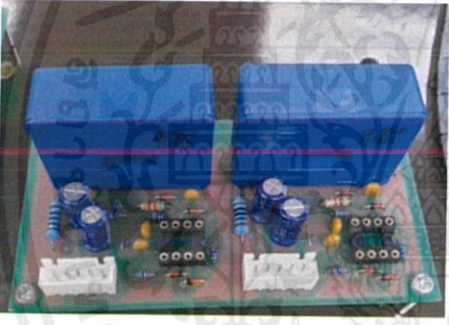
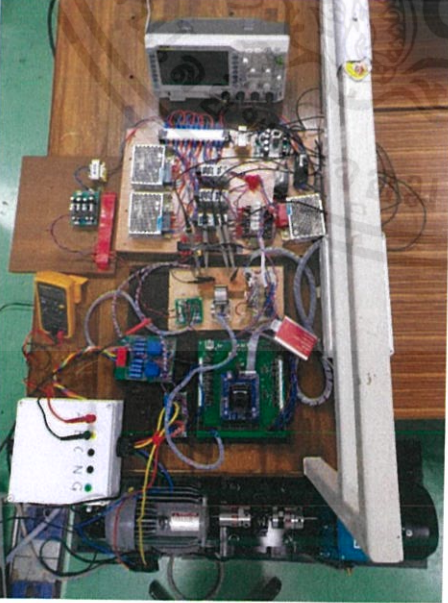
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 รูปถ่ายชิ้นงานและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

รูปถ่าย	รายละเอียด
	<p>Relay MY2N 12 VDC</p>
	<p>Switching Power Supply Delta 15VDC</p>
	<p>Switching Power Supply Delta 5VDC</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 รูปถ่ายชิ้นงานและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

รูปถ่าย	รายละเอียด
	<p>Voltage Sensor LEM LV25-P79211 & Signal Conditioning Circuit</p>
	<p>Current Sensor LEM LA55-P711015 & Signal Conditioning Circuit</p>
	<p>Overview of the Hardware</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Rotor Flux Estimation for Rotor Flux Vector Control of an Induction Machine

Krittin Sumrejphonpaiboon¹, Kanisorn Siripan², Chatmongkol Chedthapan³ and Pattawe Jitlang⁴

Project Advisor: Asst.Prof.Dr.Warachart Suwan-ngam

Department of Electrical Engineering

Abstract

This project presents rotor flux estimation for application in vector control of an induction machine. The combination of voltage and current models is applied to estimate the rotor flux linkage. The estimation requires measurement of the terminal voltages and currents flowing into the machine. PLECS program is used to simulate the rotor flux estimation method. The algorithm is implemented by using the TI TMS320F2812 digital signal controller.

Methodology

The system is first simulated by using the PLECS program to validate the rotor flux estimation method. The motor is supplied by the three-phase sinusoidal source. The flux estimator is the full order stator and rotor flux observer containing the open-loop current model and adaptive voltage model [1]. System validation and implementation are performed using discrete equations.

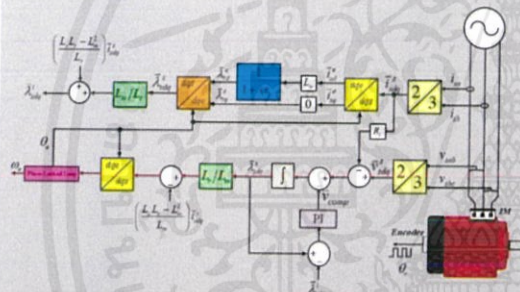


Figure 1 Block diagram of rotor flux estimation

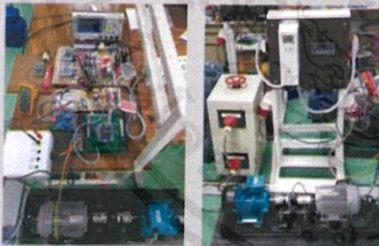


Figure 2 Experimental System

Conclusion

The comparison between the simulation results and the experimental results shows that the estimation method is valid. The future step is to apply the estimation method to the real AC drive system.

Results

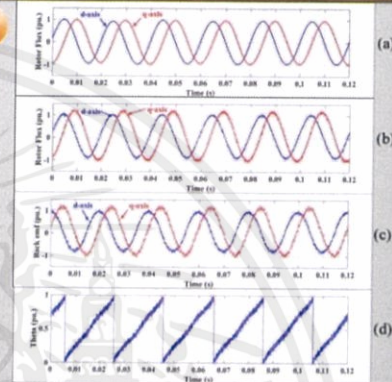


Figure 3 Rotor flux waveforms in stationary reference frame (a) Simulation, (b) Experiment, (c) Stator Back emf and (d) Rotor Flux angle under no-load condition

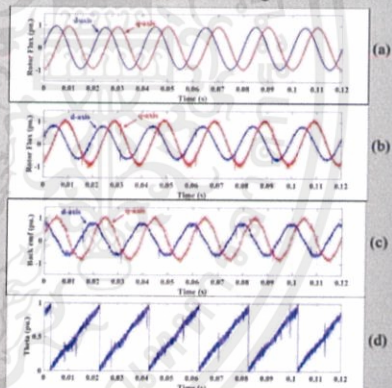


Figure 4 Rotor flux waveforms in stationary reference frame (a) Simulation, (b) Experiment, (c) Stator Back emf and (d) Rotor Flux angle under load condition

References

[1] C. Lascu, I. Boldea and F. Blaabjerg, "A Modified Direct Torque Control for Induction Motor Sensorless Drive" IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 36, pp. 122-130, Jan./Feb. 2000.



Advisor E-mail: warachart.su@kmitl.ac.th



ภาคผนวก ข.
บทความทางวิชาการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์เพื่อการควบคุมเวกเตอร์ฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์
ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

ROTOR FLUX ESTIMATION FOR ROTOR FLUX VECTOR CONTROL
OF AN INDUCTION MACHINE

นายกฤติน สำเร็จผลไพบูลย์ นายคณิศร ศิริพันธ์ นายฉัตรมงคล เชษฐพันธ์ และนายปัทวี จิตรหลัง
สาขาวิศวกรรมพลังงานไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เลขที่ 1 ซ.ฉลองกรุง แขวงลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 โทร/โทรสาร. 02-7392478

บทคัดย่อ

ปัญญานิพนธ์นี้นำเสนอการประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์สำหรับการประยุกต์ใช้ในการควบคุมเวกเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยทั่วไปทางทฤษฎี วิธีการประมาณเวกเตอร์ของฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์อย่างง่ายสามารถประมาณโดยอาศัยแบบจำลองแรงดัน และแบบจำลองกระแส แต่ทั้งสองวิธีนั้นมีข้อจำกัดแตกต่างกัน อย่างไรก็ตามวิธีการที่มีการนำมาใช้คือการใช้งานร่วมกันของแบบจำลองแรงดันและแบบจำลองกระแส วิธีการในการประมาณฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ที่ใช้ในโครงการนี้เป็นวิธีการที่อาศัยการคำนวณร่วมกันของแบบจำลองแรงดันและแบบจำลองกระแส การประมาณค่านั้นต้องวัดค่าแรงดันและกระแสป้อนเข้าสเตเตอร์และทำการแปลงให้อยู่ในกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งเทียบกับสเตเตอร์ โดยการจำลองการประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ทางคอมพิวเตอร์ใช้โปรแกรม PLECS และโปรแกรมการคำนวณใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ของบริษัท เทกซัส อินสตรูเมนต์ จำกัด เบอร์ TMS320F2812 ในการประมวลผล

Abstract

This thesis presents rotor flux estimation for vector control of an induction machine. Theoretically, the simple voltage model and current model are applied to estimate the rotor flux linkage. Both methods have their limits, so only one method is not adequate for application. Therefore, the

combination of voltage and current model is applied to estimate the rotor flux. The method used in this project is the combination method of both voltage and current models. The algorithm is achieved by measuring the stator terminal voltages and stator currents. The PLECS program is applied to validate the rotor flux estimation algorithm. The algorithm is then implemented by using the TI TMS320F2812 digital signal controller.

1. บทนำ

การควบคุมสมรรถนะสูงสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นการควบคุมเวกเตอร์ของตัวแปรควบคุมเพื่อให้มีสมรรถนะเทียบเท่าหรือดีกว่าการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยกโดยในการควบคุมเวกเตอร์จำเป็นที่จะต้องอาศัยความรู้ความเข้าใจในเรื่องของทฤษฎีกรอบอ้างอิงเพื่อทำการเลือกกรอบอ้างอิงที่เหมาะสมสำหรับการควบคุมตัวแปรทางไฟฟ้าของมอเตอร์ในการควบคุมเวกเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำจำเป็นต้องแยกองค์ประกอบของสัญญาณแรงดันและกระแสที่จ่ายเข้าสู่มอเตอร์เพื่อเลียนแบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยกโดยใช้ทฤษฎีกรอบอ้างอิงในการแยกองค์ประกอบของสัญญาณเพื่อใช้ในการแบ่งส่วนการควบคุมออกเป็น 2 ส่วน คือ การควบคุมความเร็วในการหมุนของโรเตอร์ และการควบคุมค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์การควบคุมทั้ง 2 ส่วนจะแยกออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกันเหมือนกับการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงชนิดกระตุ้นแยก

ในการควบคุมค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์จะใช้การประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์เนื่องจากในเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดกรงกระรอกไม่สามารถวัดค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ได้จึงจำเป็นต้องมีการประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ออกมาเพื่อนำค่าที่ประมาณออกมาไปใช้ในการควบคุมเวกเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ในการควบคุมเวกเตอร์สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามารถทำการควบคุมตัวแปรในกรอบอ้างอิง 3 ประเภท 1. กรอบอ้างอิงฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ 2. กรอบอ้างอิงฟลักซ์แม่เหล็กสเตเตอร์ 3. กรอบอ้างอิงฟลักซ์แม่เหล็กที่ช่องว่างอากาศ

2. เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induction Machine)

มอเตอร์เหนี่ยวนำมีสเตเตอร์ทางกายภาพเหมือนกับเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสแต่มีโครงสร้างโรเตอร์ที่ต่างกันซึ่งโครงสร้างของโรเตอร์ในเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีอยู่ 2 ประเภท คือ โรเตอร์แบบขดลวด และโรเตอร์แบบกรงกระรอก

2.1 การทดสอบหาค่าความต้านทานไฟฟ้าของขดลวดสเตเตอร์ด้วยวิธีแรงดัน-กระแส (VI-method)

จะป้อนไฟฟ้ากระแสตรงเข้าไปขดลวดสเตเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ป้อนเข้าสเตเตอร์จะทำการกำหนดค่ากระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสเตเตอร์จนถึงพิกัดกระแสของมอเตอร์และทำการวัดค่าแรงดันตามช่วงของกระแสที่ป้อนเข้าหลังจากนั้นนำค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าไปสร้างกราฟระหว่างแรงดันกับกระแสความชันของกราฟจะเป็นค่าของความต้านทานสเตเตอร์การคำนวณความต้านทานสเตเตอร์ขึ้นอยู่กับลักษณะการต่อขดลวดสเตเตอร์ซึ่งมีอยู่ 2 แบบคือ เดลต้าและสตาร์

2.2 การทดสอบไร้ภาระ (No-Load Test)

การทดสอบนี้มีลักษณะคล้ายกันกับการทดสอบแบบเปิดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้าเพราะที่สภาวะที่สภาวะไร้ภาระความเร็วของโรเตอร์เข้าใกล้กับความเร็วซิงโครนัสทำให้ค่าสลิปมีค่าเข้าใกล้ 0

ส่งผลให้มีค่าสูงมาก ทำให้กระแสไฟฟ้าที่โรเตอร์มีค่าต่ำมากคล้ายกับการทดลองแบบเปิดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้าการทดสอบจะกระทำที่พิกัดแรงดันไฟฟ้าของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำจากนั้นทำการบันทึกค่ากระแสไฟฟ้า, กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนที่แรงดันไฟฟ้าพิกัด

2.3 การทดสอบแบบบล็อกโรเตอร์ (Blocked-Rotor Test)

การทดสอบนี้มีลักษณะคล้ายกันกับการทดลองแบบลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้าเพราะในช่วงที่บล็อกโรเตอร์จะไม่มีความเร็วที่โรเตอร์ส่งผลให้สลิปเท่ากับ 1 การทดสอบนี้จะป้อนไฟเข้าไปสเตเตอร์ที่พิกัดกระแสหลังจากนั้นวัดค่าแรงดัน, กำลังไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าเสมือน

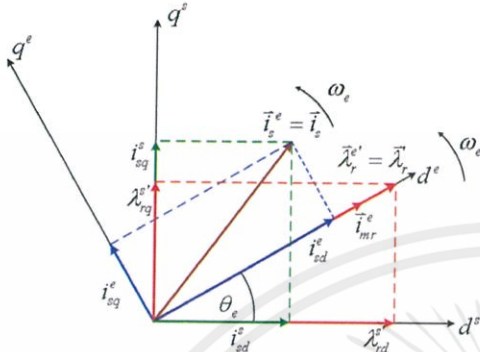
2.4 ทฤษฎีกรอบอ้างอิง

การควบคุมการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก (Squirrel-cage rotor) ใช้ทฤษฎีกรอบอ้างอิงในแยกองค์ประกอบของสัญญาณเพื่อใช้ในการแบ่งส่วนการควบคุมออกเป็น 2 ส่วน คือ การควบคุมความเร็วในการหมุนของโรเตอร์และการควบคุมค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ ซึ่งการควบคุมทั้ง 2 ส่วนจะแยกการควบคุมออกจากกันเหมือนกับการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก โดยแปลงจากกรอบอ้างอิงสามเฟสเป็นกรอบอ้างอิงหุดยุติหนึ่ง และกรอบอ้างอิงหมุนเพื่อใช้ในการประมาณเวกเตอร์ของฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์และความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้า (ω_e) ในการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

2.5 การควบคุมเวกเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำให้มีสมรรถนะสูงใช้การควบคุมแบบเวกเตอร์ที่ให้ผลเหมือนการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก ในการควบคุมเวกเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำจำเป็นต้องแยกองค์ประกอบของสัญญาณแรงดันและกระแสที่จ่ายเข้าสู่มอเตอร์ โดยใช้ทฤษฎีกรอบอ้างอิงในแยกองค์ประกอบของสัญญาณเพื่อใช้ในการแบ่งส่วนการควบคุมออกเป็น 2 ส่วน คือ การควบคุมความเร็วใน

การหมุนของโรเตอร์และการควบคุมค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ทั้ง 2 ส่วนจะแยกการควบคุมออกจากกันเหมือนกับการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก



รูปที่ 2.1 ไดอะแกรมขณะใดขณะหนึ่งภายใต้การควบคุมเครื่องจักรกลไฟฟ้า

3. การประมาณเวกเตอร์ของฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์

การประมาณฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์จะใช้การประมาณร่วมกันของแบบจำลองกระแสและแบบจำลองแรงดัน โดยแบบจำลองกระแสมีสมการดังต่อไปนี้

$$\bar{\lambda}_r^{ei} = \frac{L_m}{1 + s\tau_r} \bar{i}_s^e - j \frac{\omega_e - \omega_r}{1 + s\tau_r} \bar{\lambda}_r^e \quad (3-1)$$

โดยที่ $\tau_r = L_r' / R_r'$ แทนที่ ค่าคงตัวเวลาของวงจรโรเตอร์

จากทฤษฎีการควบคุมเวกเตอร์ฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ในกรอบอ้างอิงหมุนจะกำหนดให้ฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์อยู่บนแกน d ของกรอบอ้างอิงหมุน ส่งผลให้ขนาดของฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์บนแกน q ของกรอบอ้างอิงหมุนมีขนาดเท่ากับ 0 จึงสามารถแยกองค์ประกอบของฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ให้อยู่ในองค์ประกอบในแนวแกน d และแกน q คือ

$$\bar{\lambda}_{rd}^{ei} = \frac{L_m}{1 + s\tau_r} \bar{i}_{sd}^e \quad (3-2)$$

$$\bar{\lambda}_{rq}^{ei} = 0 \quad (3-3)$$

การประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์แบบจำลองกระแสใช้ในการคำนวณค่าฟลักซ์แม่เหล็กสเตเตอร์แบบจำลองกระแสไฟฟ้าได้ดังสมการ (3-4)

$$\bar{\lambda}_s^{si} = \frac{L_m}{L_r} \bar{\lambda}_r^{si} + \frac{L_s L_r - L_m^2}{L_r} \bar{i}_s^s \quad (3-4)$$

ฟลักซ์แม่เหล็กสเตเตอร์แบบจำลองกระแสสามารถคำนวณค่าได้ดังสมการ 3-5 โดยใช้แรงดันไฟฟ้าสเตเตอร์, กระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ และค่าแรงดันชดเชยในการคำนวณ

$$\bar{\lambda}_s^{sv} = \frac{1}{s} (\bar{v}_s^s - R_s \bar{i}_s^s - \bar{v}_{comp}) \quad (3-5)$$

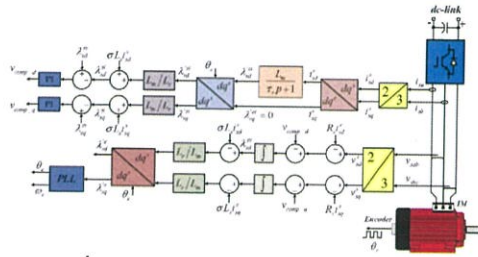
การคำนวณค่าฟลักซ์แม่เหล็กสเตเตอร์ให้ถูกต้องและแม่นยำมากขึ้น ต้องทำการชดเชยค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการอินทิเกรตและการวัดค่าความต้านทานที่สเตเตอร์ที่ความเร็วรอบต่ำผ่านการประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กสเตเตอร์แบบจำลองกระแสถูกตัดแปลงผ่านตัวควบคุมแบบ PI สามารถเขียนได้เป็นสมการ (3-6)

$$\bar{v}_{comp} = (K_p + K_i \frac{1}{s}) (\bar{\lambda}_s^{sv} - \bar{\lambda}_s^{si}) \quad (3-6)$$

เนื่องจากการวัดค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์นั้นไม่สามารถวัดค่าได้จริง จึงต้องมีการประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ดังสมการ 3-18 ซึ่งมี 2 ปัจจัยที่จำเป็นในการคำนวณคือ ค่าฟลักซ์แม่เหล็ก สเตเตอร์ที่หาได้จากสมการ 3-16 และค่ากระแสไฟฟ้าที่สเตเตอร์ที่วัดได้

$$\bar{\lambda}_r^s = \frac{L_r'}{L_m} \bar{\lambda}_s^{sv} - \frac{L_s L_r' - L_m^2}{L_m} \bar{i}_s^s \quad (3-7)$$

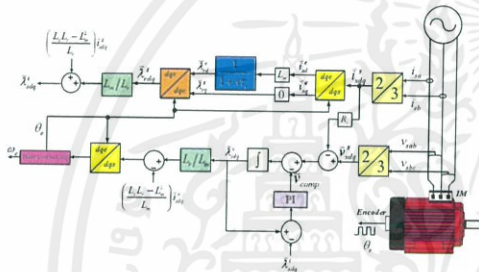
การประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์สามารถใช้ไดอะแกรมที่แสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 โดอะแกรมของการประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์

4. ระบบที่ใช้ในการทดลอง

ในส่วนของการทดลองนี้จะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการประมวลผลนั้นได้นำเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดโรเตอร์กรงกระรอกขนาด 3 แรงม้ามาใช้ในการทดลองโดยโดอะแกรมในการประมวลผลจะแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 การประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์

5. ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์และผลการทดลอง

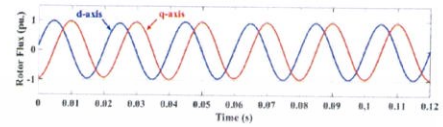
ในบทนี้จะนำเสนอผลจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม PLECS เปรียบเทียบกับผลการทดลองจากโปรแกรมการคำนวณการประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการประมวลผลเพื่อทดลองว่าสามารถประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์ได้ตามการจำลองทางคอมพิวเตอร์ การเปรียบเทียบผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์และผลการทำการทดลองโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ประมวลผลแบ่งออกเป็น 3 หัวข้อ

5.1 ผลการทดลองการประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์

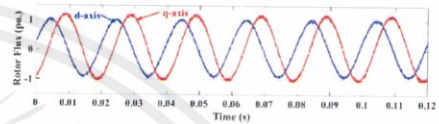
การประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์สามารถทำได้โดยการนำค่าแรงดันและกระแสที่จ่ายเข้ามาที่สเตเตอร์นำมาคำนวณโดยแบ่งการจำลอง

ทางคอมพิวเตอร์และการทดลองออกเป็น 2 สภาวะคือ สภาวะไร้ภาระและสภาวะภาระ 50%

- ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์และผลการทดลองการประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์สภาวะไร้ภาระ



(ก)



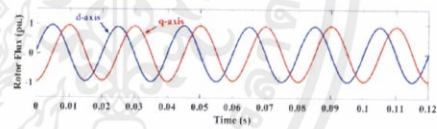
(ข)

รูปที่ 5.1 รูปคลื่นฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์สภาวะไร้ภาระ

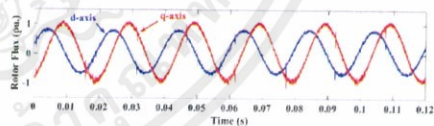
(ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์

(ข) ผลการทดลอง

- ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์และผลการทดลองการประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์สภาวะภาระ50%



(ก)



(ข)

รูปที่ 5.2 รูปคลื่นฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์สภาวะภาระ50%

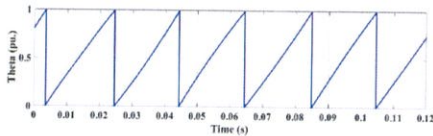
(ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์,

(ข) ผลการทดลอง

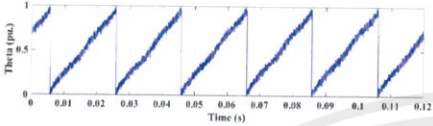
5.2 ผลการทดลองประมาณตำแหน่งเวกเตอร์ของฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์

การประมาณตำแหน่งของเวกเตอร์ฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์สามารถกระทำได้โดยอาศัยเฟสล็อกลูป โดยแบ่งการจำลองทางคอมพิวเตอร์และการทดลองออกเป็น 2 สภาวะคือ สภาวะไร้ภาระและสภาวะภาระ 50%

- ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์และผลการทดลองการประมาณตำแหน่งของเวกเตอร์ฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์สภาวะไร้ภาระ



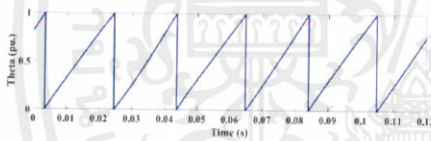
(ก)



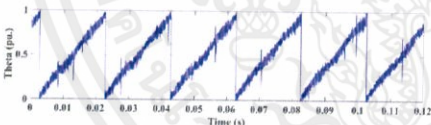
(ข)

รูปที่ 5.3 รูปคลื่นตำแหน่งของเวกเตอร์ฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์สภาวะไร้ภาระ (ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์, (ข) ผลการทดลอง

- ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์และผลการทดลองการประมาณตำแหน่งของเวกเตอร์ฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์สภาวะภาระ 50%



(ก)



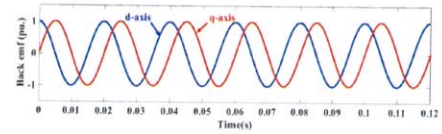
(ข)

รูปที่ 5.4 รูปคลื่นตำแหน่งของฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์สภาวะภาระ 50% (ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์, (ข) ผลการทดลอง

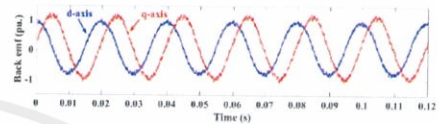
5.3 ผลการทดลองการประมาณค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ

การประมาณค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับสามารถคำนวณได้จากแรงดันและกระแสที่สเตเตอร์ในกรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง โดยแบ่งการจำลองทางคอมพิวเตอร์และการทดลองออกเป็น 2 สภาวะคือ ได้แก่ สภาวะไร้ภาระและสภาวะภาระ 50%

- ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์และผลการทดลองของแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับสภาวะไร้ภาระ



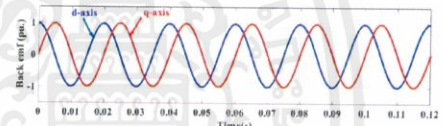
(ก)



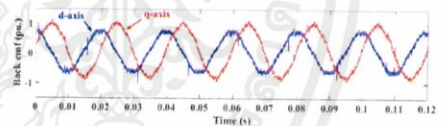
(ข)

รูปที่ 5.5 รูปคลื่นแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับสภาวะไร้ภาระ (ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์, (ข) ผลการทดลอง

- ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์และผลการทดลองของแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับสภาวะภาระ 50%



(ก)



(ข)

รูปที่ 5.6 รูปคลื่นแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับสภาวะภาระ 50% (ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์, (ข) ผลการทดลอง

6. บทสรุป

ผลการทดลองโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการประมวลผลสามารถสรุปได้ว่าผลลัพธ์การประมาณค่าฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์, ตำแหน่งของเวกเตอร์ฟลักซ์แม่เหล็กโรเตอร์และแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับใกล้เคียงกับการจำลองทางคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม PLECS เป็นไปตามทฤษฎีที่ได้ทำการศึกษาค้นคว้ามาซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการควบคุมเวกเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] Stephen J.Chapman. “Electric Machinery Fundamentals 4th edition”. Australia : BAE SYSTEMS.
- [2] A.E. Fitzgerald, Charles Kingsley, Jr.Stephen D.Umans. “Electric Machinery: 6th edition”. Singapore: McGraw-Hill Companies; 2003.
- [3] Peter Vas. “Vector Control of AC Machines”. CLARENDON PRESS OXFORD
- [4] C. Lascu, I. Boldea and F. Blaabjerg, “A Modified Direct Torque Control for Induction Motor Sensorless Drive” IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 36, pp. 122-130, Jan./Feb. 2000.
- [5] วรชาติ สุวรรณงาม, "เอกสารประกอบการสอน เรื่อง การขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้า", สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง; ปีการศึกษาที่ 2/2560

ประวัติผู้จัดทำ



นายกฤติน สำเร็จผลไพบูลย์
เกิดวันที่ 16 พฤษภาคม 2540
โทรศัพท์ 090-9181001
diim_@windowslive.com



นายคณิศร ศิริพันธ์
เกิดวันที่ 5 ธันวาคม 2539
โทรศัพท์ 095-7569229
Kskanisorn@gmail.com



นายฉัตรมงคล เชษฐพันธ์
เกิดวันที่ 5 พฤษภาคม 2540
โทรศัพท์ 088-7685087
chedthapan@gmail.com



นายปัทวี จิตรหลัง
เกิดวันที่ 28 พฤษภาคม 2539
โทรศัพท์ 064-2196606
Lek_pattawe@yahoo.com

ประวัติผู้จัดทำ



นายกฤติน สำเร็จผลไพบูลย์

เกิดวันที่ 16 พฤษภาคม 2540

โทรศัพท์ 090-9181001

diim_@windowslive.com



นายคณิศร ศิริพันธ์

เกิดวันที่ 5 ธันวาคม 2539

โทรศัพท์ 095-7569229

Kskanisorn@gmail.com



นายฉัตรมงคล เชษฐพันธ์

เกิดวันที่ 5 พฤษภาคม 2540

โทรศัพท์ 088-7685087

chedthapan@gmail.com



นายปัทวี จิตรหลัง

เกิดวันที่ 28 พฤษภาคม 2539

โทรศัพท์ 064-2196606

Lek_pattawe@yahoo.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้