

การประมาณฟลักซ์ที่สเตเตอร์สำหรับการควบคุมเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิด
ป้อนสองทาง

STATOR FLUX ESTIMATION FOR CONTROL OF A DOUBLY-FED INDUCTION
MACHINE

โดย

นายจิราวัฒน์ คชพร

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2565

STATOR FLUX ESTIMATION FOR CONTROL OF A DOUBLY-FED INDUCTION
MACHINE

JIRAWAT KODCHAPORN

THIS PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT
FOR THE BACHELOR DEGREE IN ELECTRICAL ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2023

ปีการศึกษา 2565

การประมาณฟลักซ์ที่สเตเตอร์สำหรับการควบคุมเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อน

สองทาง

STATOR FLUX ESTIMATION FOR CONTROL OF A DOUBLY-FED INDUCTION
MACHINE

โดย

นายจิราวัฒน์ คชพร

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.วรชาติ สุวรรณงาม

ปริญญาโทปีการศึกษา 2565

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า


คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การประมาณฟลักซ์ที่สเตเตอร์สำหรับการควบคุมเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง

ผู้จัดทำ

1.นาย จิราวัฒน์

คชพร

.....  อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรชาติ สุวรรณงาม)

การประมาณฟลักซ์ที่สแตเตอร์สำหรับการควบคุมเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิด ป้อนสองทาง

นาย จิราวัฒน์ คชพร

ผศ.ดร.วรชาติ สุวรรณงาม อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2565

บทคัดย่อ

โครงการนี้มีเป้าหมายเพื่อการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง โดย
ใช้การควบคุมเวกเตอร์ของฟลักซ์เกี่ยวกับคลัสต์ที่สแตเตอร์ การควบคุมจะมุ่งไปยังการควบคุมคอนเวอร์
เตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้า โดยโปรเจกต์ทำการตรวจสอบความถูกต้องผ่านโปรแกรมจำลองทาง
คอมพิวเตอร์ PLEXIM ก่อนที่จะนำอัลกอริทึมมาใช้กับอุปกรณ์จริงภายใต้บอร์ดการควบคุมโดย
ไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F4 ในกรณีระบบที่นำมาใช้งานจริง จะมุ่งเข้าไปที่ การประมาณฟลักซ์
สแตเตอร์เท่านั้น ทั้งนี้จำเป็นต้องสอบเทียบของเอนโคเดอร์ ก่อนที่จะนำระเบียบวิธีการมาใช้กับ
ระบบจริง

STATOR FLUX ESTIMATION FOR CONTROL OF A DOUBLY-FED INDUCTION MACHINE

Mr.Jirawat Kodchaporn

Asst.Prof.Dr.Warachart Suwan-ngam Advisor

Abstract

This project aims at control of a doubly-fed-induction motor using stator flux vector control. The control is focusing on the machine-side converter of the system. The project is validated by computer simulation using PLEXIM software. The actual system is then implemented using the STM32F4 microcontroller. In the case of system implementation, only the stator flux estimation is focused. Therefore, encoder calibration is required. The algorithm is also validated in the software and then implemented.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ต้องขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.วรชาติ สุวรรณงาม อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ ผู้ให้ความรู้ ให้ความช่วยเหลือ และกำหนดแนวทางในการดำเนินโครงการนี้ให้เป็นไปตามลำดับขั้นตอน ตลอดจนให้คำแนะนำในการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างการทำงานด้วยความเอาใจใส่อย่างดียิ่งเสมอมา รวมทั้งการอำนวยความสะดวกและอุปกรณ์ต่าง ๆ ซึ่งมีความพร้อมสำหรับการดำเนินงานเป็นไปได้อย่างราบรื่น

ขอขอบคุณ นายชัยสวัชค์ ศรีคุณวัต นายณัฐภัทร เริงไว และ นายคณพศ ไซมณีนกร คอยช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา

ขอขอบคุณผู้มีพระคุณทุกท่าน บิดา มารดา และครอบครัว ที่ให้การสนับสนุนด้านการศึกษาและการเงินตลอดมา ตลอดจนผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องในโครงการนี้ทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวถึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้

จิราวัฒน์ คชพร

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
Abstract	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VI
สารบัญตาราง	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	1
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ	1
1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการ	2
1.5 แผนการดำเนินโครงการ	2
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย	2
บทที่ 2 ทฤษฎีบทที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 บทนำ	3
2.2 ทฤษฎีกรอบอ้างอิง	3
2.3 เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง	8
บทที่ 3 การจำลองทางคอมพิวเตอร์และการทดลอง	15
3.1 บทนำ	15
3.2 การจำลองทางคอมพิวเตอร์	15
3.3 การทดลอง	16
บทที่ 4 ผลการทดลองจำลองทางคอมพิวเตอร์และผลการทดลอง	20
4.1 บทนำ	20
4.2 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์และผลการทดลอง	20

บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	22
เอกสารอ้างอิง	23
ภาคผนวก	24

สารบัญญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ไดอะแกรมแวกเตอร์แสดงสเปซแวกเตอร์และกรอบอ้างอิงประเภทต่างๆ [1]	3
2.2 ไดอะแกรมแวกเตอร์แสดงสเปซแวกเตอร์และกรอบอ้างอิงประเภทต่างๆ [1]	6
2.3 ไดอะแกรมการควบคุมคอนเวอร์เตอร์ฝั่งเครื่องจักรกลไฟฟ้า [1]	8
2.4 ไดอะแกรมการอินทิเกรตด้วยการป้อนกลับเชิงลบ	10
2.5 ไดอะแกรมการทำงานของเฟสล็อกคัลูป	11
2.6 ไดอะแกรมแวกเตอร์สำหรับการควบคุมแวกเตอร์ฟลักซ์เกี่ยวกับคล่องที่สเตเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง [1]	12
2.7 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดง (a) ความเร็วเชิงมุมทางกลที่ 0.8 pu, 1.0 pu และ 1.2 pu และ (b) ค่าความคลาดเคลื่อนของความเร็วเชิงมุมทางกล 0.8 pu, 1.0 pu และ 1.2 pu	13
3.1 ไดอะแกรมการจำลองทางคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม PLEXIM	16
3.2 ไดอะแกรมการทดลองการประมาณฟลักซ์เกี่ยวกับคล่องที่สเตเตอร์	17
3.3 วงจรการวัดค่าและคำนวณแวกเตอร์ฟลักซ์เกี่ยวกับคล่องที่สเตเตอร์	18
3.4 แทนทดสอบเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดโรเตอร์ขดลวด	18
3.5 การสอบเทียบเอนโคเดอร์เพื่อประมาณตำแหน่งโรเตอร์ (a) วงจรโรเตอร์ภายใต้การสอบเทียบเอนโคเดอร์ (b) ตำแหน่งแวกเตอร์ของ \vec{v}_r^s , \vec{i}_s^s และ $\vec{\lambda}_r^s$ ขณะกระแสที่โรเตอร์เป็นศูนย์	19
4.1 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงการประมาณฟลักซ์เกี่ยวกับคล่องที่สเตเตอร์โดยแบบจำลองกระแสและแบบจำลองแรงดัน ขณะทำการสตาร์ทตรง	20
4.2 ผลการทดลองแสดงรูปคลื่นฟลักซ์เกี่ยวกับคล่องที่สเตเตอร์โดยแบบจำลองกระแสและแบบจำลองแรงดันภายใต้การสตาร์ทตรง	21
4.3 ผลการทดลองแสดงรูปคลื่นฟลักซ์เกี่ยวกับคล่องที่สเตเตอร์จากการประมาณฟลักซ์โดยแบบจำลองกระแสและแบบจำลองแรงดันภายใต้สภาวะคงตัว	21

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 แผนการดำเนินงาน	3

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถจำแนกได้สองประเภทตามประเภทของโรเตอร์ ได้แก่ ประเภทโรเตอร์ขดลวด และโรเตอร์แบบกรงกระรอก โดยมอเตอร์ที่มีใช้งานอยู่ทั่วไปจะเป็นชนิดโรเตอร์กรงกระรอกอันเนื่องมาจากความง่ายในการผลิตและราคาที่ถูกลงเมื่อเปรียบเทียบกับชนิดโรเตอร์ขดลวด อย่างไรก็ตามเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดโรเตอร์ขดลวดก็ยังคงมีการใช้งานในงานเฉพาะด้าน ไม่ว่าจะเป็นการทำงานในโหมดมอเตอร์สำหรับโหลดที่ต้องการแรงบิดออกตัวสูง และการทำงานงานโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่งเช่นกรณีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานลม นอกจากนี้การที่สามารถเข้าถึงวงจรรโรเตอร์ได้ ทำให้เมื่อมีการเชื่อมต่อแหล่งจ่ายเข้ากับวงจรรโรเตอร์ ทำให้เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดนี้มีชื่อเรียกว่า เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง (Doubly-Fed Induction Machine, DFIM) สำหรับโครงการนี้จะมุ่งไปที่การนำ DFIM มาใช้ในโหมดมอเตอร์[6] โดยทำการควบคุมวงจรรโรเตอร์ผ่านการควบคุมคอนเวอร์เตอร์ฝั่งเครื่องจักรกลไฟฟ้า เพื่อให้ DFIM สามารถทำงานที่ความเร็วรอบๆความเร็วซิงโครนัส

ในการควบคุม DFIM ที่นิยมใช้จะเป็นการควบคุมเวกเตอร์ฟลักซ์เกี่ยวกับเครื่องที่สเตเตอร์ โดยอาศัยการควบคุมตัวแปรควบคุมต่างๆ ในกรอบอ้างอิงที่สร้างจากเวกเตอร์ของฟลักซ์เกี่ยวกับเครื่องที่สเตเตอร์ ในการควบคุมตัวแปรกระแสโรเตอร์จำเป็นที่จะต้องข้อมูลตำแหน่งของโรเตอร์ โดยตำแหน่งของโรเตอร์จะทำการประมาณได้จากการใช้เอนโคเดอร์ ซึ่งจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการสอบเทียบตำแหน่งของเอนโคเดอร์ให้ถูกต้อง

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. การศึกษาการควบคุม DFIM โดยใช้การควบคุมเวกเตอร์ เพื่อให้เครื่องจักรกลไฟฟ้าทำงานเป็นมอเตอร์ในโหมดควบคุมความเร็ว
2. ทำการประมาณเวกเตอร์ของฟลักซ์เกี่ยวกับเครื่องที่สเตเตอร์โดยอาศัยแบบจำลองแรงดันและกระแส

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ

ในภาคการศึกษาที่หนึ่งเป็นการศึกษาการควบคุม DFIM โดยใช้การควบคุมเวกเตอร์ เพื่อให้เครื่องจักรกลไฟฟ้าทำงานเป็นมอเตอร์ในโหมดควบคุมความเร็วโดยทำการศึกษผ่านโปรแกรมจำลองคอมพิวเตอร์ สำหรับในภาคการศึกษาที่สองจะมุ่งเป้าเพียงการประมาณฟลักซ์เกี่ยวกับเครื่องที่สเตเตอร์ (stator flux linkage estimation) เท่านั้น เป็นการนำอัลกอริทึมจากจำลองทางคอมพิวเตอร์มาใช้ในระบบจริง

1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการ

วิธีการที่นำมาใช้ในโครงการนั้นจะประกอบไปด้วยสองขั้นตอนนั่นคือ ขั้นตอนแรกจะเป็นการออกแบบการจำลองการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง Plexim เพื่อใช้เป็นแนวทางในขั้นตอนที่สอง คือการนำแบบอัลกอริทึมจากแบบจำลองมาใช้กับระบบจริง

1.5 แผนการดำเนินโครงการ

แผนการดำเนินโครงการ ผู้จัดทำโครงการได้เริ่มทำงานโครงการ โดยมีระยะการดำเนินโครงการตั้งแต่เดือนสิงหาคม พ.ศ. 2565 ถึงเดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2566 ตามตารางที่ 1

การดำเนินงาน	ระยะเวลา									
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1. ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับทฤษฎีเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำ										
2. ทดสอบ DFIM ที่ จะทำการทดลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์เพื่อนำไปใช้ในวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของ DFIM										
3. ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับทฤษฎีกรอบอ้างอิง										
4. ดำเนินการสร้างแบบจำลองในโปรแกรม PLECS										
5. ศึกษาการวิธีการใช้ STM32										
6. ดำเนินการประกอบอุปกรณ์และนำระเบียบจากแบบจำลองมาใช้ในระบบจริง										
7. ทดลองและสรุปผล										
8. จัดทำรูปเล่มเอกสารสรุปวิชาโครงการ										

ตารางที่ 1 แผนการดำเนินโครงการ

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

1. ความเข้าใจในการควบคุมเวกเตอร์และสามารถสร้างแบบจำลองเองได้
2. ความรู้ความเข้าใจในการเขียนโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์
3. ได้ความรู้ความเข้าใจในความแตกต่างของการประมาณฟลักซ์โดยใช้แบบจำลองประเภทต่างๆ

บทที่ 2

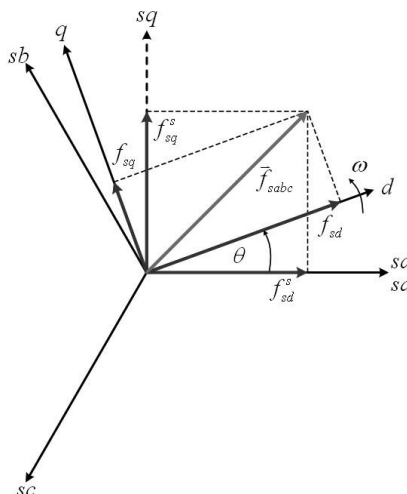
ทฤษฎีบทที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

การทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดบ่อนสองทางเพื่อให้ทำงานในทุกย่านความเร็วสามารถทำได้โดยควบคุมผ่านวงจรรีเตอร์โดยอาศัยคอนเวอร์เตอร์สามเฟสทำการควบคุมกระแสที่ไหลผ่านวงจรรีเตอร์ ซึ่งมีชื่อเรียกโดยทั่วไปว่าคอนเวอร์เตอร์ฝั่งเครื่องจักรกลไฟฟ้า โดยทั่วไปวิธีการนี้ได้รับความนิยมในการควบคุมเครื่องจักรกลไฟฟ้าในปัจจุบันเป็นการควบคุมเวกเตอร์ ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมเวกเตอร์ได้แก่ ทฤษฎีกรอบอ้างอิง และ หลักการในการประมาณเวกเตอร์ของฟลักซ์เกี่ยวคล้องที่สเตเตอร์ ซึ่งเป็นกรอบอ้างอิงหลักที่ใช้ในโครงการนี้

2.2 ทฤษฎีกรอบอ้างอิง

ในการควบคุมคอนเวอร์เตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดโรเตอร์ขดลวด โดยการใช้การควบคุมด้วยวิธีการควบคุมเวกเตอร์จำเป็นต้องใช้ทฤษฎีกรอบอ้างอิง ประโยชน์ของการใช้ทฤษฎีกรอบอ้างอิงคือ ลดรูปสมการและจำนวนตัวแปร กำจัดองค์ประกอบที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา และตำแหน่งของโรเตอร์ ตัวแปรที่พิจารณาในกรอบอ้างอิงที่เหมาะสมจะอยู่ในรูปของค่าไฟตรง การควบคุมเวกเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้า โดยกรอบอ้างอิงสำหรับควบคุมคอนเวอร์เตอร์ฝั่งเครื่องจักรกลไฟฟ้านั้นจะมีอยู่ 3 ประเภทได้แก่ กรอบอ้างอิงสามเฟส กรอบอ้างอิงหยุดนิ่งเทียบกับกรอบอ้างอิงสามเฟส และกรอบอ้างอิงใดๆ โดยไดอะแกรมเวกเตอร์แสดงตัวอย่างของกรอบอ้างอิงต่างๆ ได้ถูกแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ไดอะแกรมเวกเตอร์แสดงสเปซเวกเตอร์และกรอบอ้างอิงประเภทต่างๆ [1]

1. กรอบอ้างอิงสามเฟส (Three-Phase Reference Frame) คือ กรอบอ้างอิงของตัวแปรในระบบสามเฟสโดยกรอบอ้างอิงสามเฟสนี้จะมีกรอบอ้างอิงสามเฟสสเตเตอร์ เป็นกรอบอ้างอิงนี้อยู่กับที่และกรอบอ้างอิงสามเฟสโรเตอร์ เป็นกรอบอ้างอิงที่มีความเร็วการหมุนเท่ากับความเร็วโรเตอร์

2. กรอบอ้างอิงหยุดนิ่งเทียบกับกรอบอ้างอิงสามเฟส (Stationary Reference Frame Fixed to Three-Phase Reference Frame) คือ กรอบอ้างอิงชนิดนี้ประกอบด้วยแกนอ้างอิง 2 แกนตั้งฉากกัน เรียกว่าแกน d โดยแกน d จะอยู่ในแนวเดียวกันกับแกนเฟส a และอีก 1 แกนเรียกว่าแกน q ซึ่งมีมุมนำหน้าแกน d 90 องศาในทิศทวนเข็มนาฬิกา กรอบอ้างอิงชนิดนี้จะมีความเร็วสัมพันธ์กับกรอบอ้างอิงสามเฟสเท่ากับ 0 จึงเป็นที่มาของคำว่ากรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง โดยมีรูปแบบดังแสดงในรูปที่ 2.1

3. กรอบอ้างอิงใดๆ (Arbitrary Reference Frame) คือ กรอบอ้างอิงสองเฟสที่มีการเรียงตัวของแกนอ้างอิงเช่นเดียวกับกรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง แต่มีความเร็วเชิงมุมเป็นค่าใดๆ ขึ้นอยู่กับการกำหนดใช้งาน

การใช้งานทฤษฎีกรอบอ้างอิง คือ การทำการแปลงเวกเตอร์ของตัวแปรที่พิจารณาให้อยู่ในกรอบอ้างอิงต่างๆ ทั้งนี้จะอาศัยสมการทางคณิตศาสตร์ในการทำการคำนวณดังนี้

- การแปลงจากกรอบอ้างอิงสามเฟสไปสู่กรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง

$$\begin{bmatrix} f_{sd}^s \\ f_{sq}^s \\ f_{s0}^s \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{sa} \\ f_{sb} \\ f_{sc} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

- การแปลงจากกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งไปสู่กรอบอ้างอิงใดๆ

$$\begin{bmatrix} f_{sd} \\ f_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{sd}^s \\ f_{sq}^s \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

- การแปลงกลับจากกรอบอ้างอิงใดๆไปสู่กรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง

$$\begin{bmatrix} f_{sd}^s \\ f_{sq}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{sd} \\ f_{sq} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

- การแปลงกลับจากกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งไปสู่กรอบอ้างอิงสามเฟส

$$\begin{bmatrix} f_{sa} \\ f_{sb} \\ f_{sc} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{sd}^s \\ f_{sq}^s \\ f_{s0}^s \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

ในการควบคุมนี้จำเป็นต้องใช้ทฤษฎีกรอบอ้างอิงดังกล่าวในการแปลงไปสู่กรอบอ้างอิงที่ใช้ในการควบคุม เมื่อไม่พิจารณาในกรณีที่เกิดความไม่สมดุลของแรงดันและกระแส การแปลงแกนสามารถกระทำกับตัวแปรแรงดันไลน์ และกระแสเพียง 2 เฟส ทั้งนี้สมการการแปลงจะมีความแตกต่างกันคือสมการการแปลงกรอบอ้างอิงสามเฟสไปกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งเนื่องจากมีเซนเซอร์วัดแรงดันและกระแสอย่างละ 2 ชุด ทั้งนี้สมการแปลงแกนในแต่ละแนวแกนที่ได้จากสมการที่ 2.4 จะมีรูปแบบดังแสดงในสมการที่ 2.5 และ 2.6 ตามลำดับ

$$v_{sd}^s = \frac{2}{3}v_{sab} + \frac{1}{3}v_{sbc} \quad (2.5)$$

$$v_{sq}^s = \frac{1}{\sqrt{3}}v_{sbc} \quad (2.6)$$

โดยที่ $v_{sab} = v_{sa} - v_{sb}$ และ $v_{sbc} = v_{sb} - v_{sc}$

ในกรณีของตัวแปรกระแส จากสมมติฐานว่ากระแสสามเฟสสมดุล ดังแสดงในสมการที่ 2.7 และ 2.8

$$i_{sa} + i_{sb} + i_{sc} = 0 \quad (2.7)$$

$$i_{sc} = -i_{sa} - i_{sb} \quad (2.8)$$

จากสมการที่ 2.8 และสมการที่ 2.1 จะได้สมการกระแสในแต่ละแนวแกนดังแสดงในสมการที่ 2.9 และ 2.10 ตามลำดับ

$$i_{sd}^s = i_{sa} \quad (2.9)$$

$$i_{sq}^s = \frac{1}{\sqrt{3}}(2i_{sb} + i_{sa}) \quad (2.10)$$

สำหรับสมการการแปลงแรงดันและกระแสไลน์ของโรเตอร์สามารถทำได้แบบเดียวกันกับสเตเตอร์ดังแสดงในสมการที่ 2.11 และ 2.12 สำหรับแรงดันที่ขั้วโรเตอร์ในแกน d และ แกน q

$$v_{rd}' = \frac{2}{3}v_{rab}' + \frac{1}{3}v_{rbc}' \quad (2.11)$$

$$v_{rq}' = \frac{1}{\sqrt{3}}v_{rbc}' \quad (2.12)$$

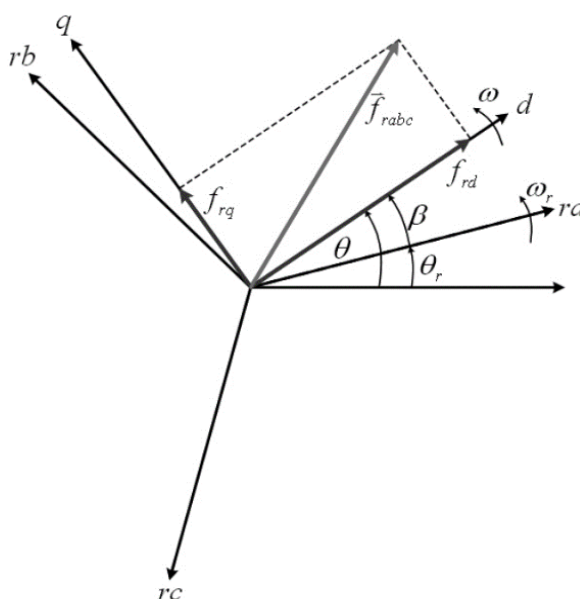
ในส่วนของสมการกระแสโรเตอร์ในกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งเทียบโรเตอร์ในแนวแกน d และแกน q จะได้สมการที่ 2.13 และ 2.14 ตามลำดับ

$$i_{rd}' = i_{ra}' \quad (2.13)$$

$$i_{rd}' = \frac{1}{\sqrt{3}}(i_{ra}' + 2i_{rb}') \quad (2.14)$$

- การแปลงจากกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งเทียบโรเตอร์ไปสู่กรอบอ้างอิงใดๆ

การแปลงจากกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งเทียบกับโรเตอร์ไปสู่กรอบอ้างอิงใดๆ จะแตกต่างจากกรณีของตัวแปรสเตเตอร์เนื่องจากตัวแปรโรเตอร์นั้นอยู่บนกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งเทียบกับโรเตอร์ซึ่งมีความเร็วเชิงมุมสัมพันธ์กับกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งเทียบกับสเตเตอร์เท่ากับ ω_r ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ไดอะแกรมเวกเตอร์แสดงสเปซเวกเตอร์และกรอบอ้างอิงประเภทต่างๆ [1]

ในการแปลงเวกเตอร์ของตัวแปรต่างๆในกรอบอ้างอิงโรเตอร์จากกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งเทียบกับโรเตอร์ไปสู่กรอบอ้างอิงใดๆจะอาศัยสมการที่ 2.15

$$\begin{bmatrix} f'_{rd} \\ f'_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta & \sin \beta \\ -\sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f'^r_{rd} \\ f'^r_{rq} \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

โดยที่ β แทนมุมระหว่างกรอบอ้างอิงใดๆเทียบกับกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งเทียบกับโรเตอร์ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.16

$$\beta = \theta - \theta_r \quad (2.16)$$

$$\theta_r(t) = \int \omega_r(t) dt + \theta_r(0) \quad (2.17)$$

โดยที่ θ แทน มุมของกรอบอ้างอิงหมุนใดๆ เทียบกับกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งเทียบกับสเตเตอร์
 θ_r แทน มุมของกรอบอ้างอิงโรเตอร์เทียบกับกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งเทียบกับสเตเตอร์
 โดยมุมดังกล่าวเป็นค่าทางไฟฟ้า เมื่อกำหนดให้กรอบอ้างอิงใดๆหมุนด้วยความเร็วเชิงมุมของฟลักซ์
 เกียวคล้องที่สเตเตอร์แล้วจะได้ว่า $\theta = \theta_e$ และ $\omega = \omega_e$ โดยในส่วนของ การประมาณตำแหน่งและ
 ความเร็วเชิงมุมของเวกเตอร์ของฟลักซ์เกียวคล้องสเตเตอร์จะกล่าวถึงในหัวข้อที่ 2.3

2.3.1 การประมาณฟลักซ์เกี่ยวค้ำงที่สเตเตอ์โดยแบบจ้าลองกระแสและแบบจ้าลองแรงดัน

การประมาณฟลักซ์เกี่ยวค้ำงที่สเตเตอ์โดยอาศัยแบบจ้าลองกระแสและแบบจ้าลองแรงดันทั้งสองวิธีนี้จะกระทำบนกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งเทียบสเตเตอ์ โดยฟลักซ์เกี่ยวค้ำงที่สเตเตอ์ของแบบจ้าลองกระแสซึ่งเป็นการประมาณอย่างง่ายแต่จะมีองค์ประกอบของกระแสโรเตอ์ในสมการส่งผลให้ฟลักซ์เกี่ยวค้ำงที่สเตเตอ์ขึ้นอยู่กัค่ากระแสที่โรเตอ์ด้วยดังสมการ (2.18)

$$\bar{\lambda}_{sdq}^s = L_s \bar{i}_{sdq}^s + L_m \bar{i}_{rdq}^s \quad (2.18)$$

เมื่อทำการแยกองค์ประกอบแกน d และ q ได้ตามสมการ (2.19) และ (2.20) ตามล้าดับ

$$\text{d-axis} \quad \lambda_{sd}^s = L_s i_{sd}^s + L_m i_{rd}^s \quad (2.19)$$

$$\text{q-axis} \quad \lambda_{sq}^s = L_s i_{sq}^s + L_m i_{rq}^s \quad (2.20)$$

โดยที่ L_s แทน ค่าความเหนี่ยวนำตัวเองของวงจรสเตเตอ์ และ
 L_m แทน ค่าความเหนี่ยวนำแมกเนไต้ซึ่งสามเฟส

ในการประมาณเวกเตอ์ของฟลักซ์เกี่ยวค้ำงที่สเตเตอ์จำเป็นต้องอาศัยข้อมูลของตัวแปรโรเตอ์ และจ้าเป็นอย่างยั้งที่จ้จะต้องมีข้อมูลของตำแหน่งโรเตอ์ที่ถูกต้อง อย่่างไรก็ตามทางเลือกในการประมาณเวกเตอ์ของฟลักซ์เกี่ยวค้ำงที่สเตเตอ์สามารถกระทำโดยอาศัยแบบจ้าลองแรงดัน โดยอาศัยสมการแรงดันที่ขั้วสเตเตอ์ในกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งเทียบกับสเตเตอ์ดังแสดงในสมการที่ 2.21

$$\bar{v}_{sdq}^s = R_s \bar{i}_{sdq}^s + \frac{d\bar{\lambda}_{sdq}^s}{dt} \quad (2.21)$$

พจน์ที่สองทางด้านขวามือของสมการที่ 2.21 เป็นค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับของสเตเตอ์เมื่อจัดรูปสมการที่ 2.21 ใหม่จะได้สมการที่ 2.22

$$\frac{d\bar{\lambda}_{sdq}^s}{dt} = \bar{v}_{sdq}^s - R_s \bar{i}_{sdq}^s \quad (2.22)$$

ทำการอินทิเกรตสมการที่ 2.22 จะได้เวกเตอ์ของฟลักซ์เกี่ยวค้ำงที่สเตเตอ์ดังแสดงในสมการที่ 2.23

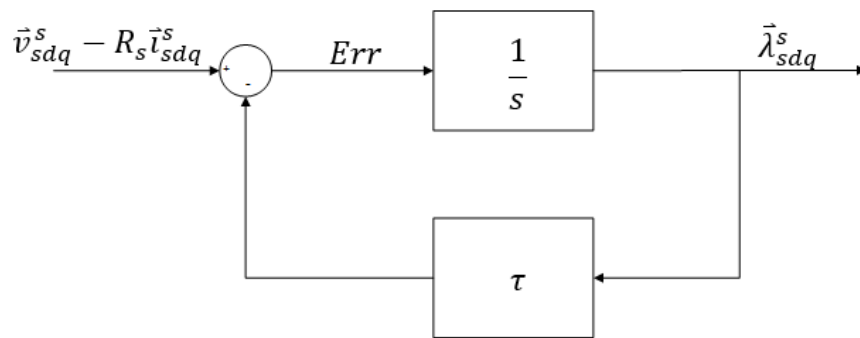
$$\bar{\lambda}_{sdq}^s = \int (\bar{v}_{sdq}^s - R_s \bar{i}_{sdq}^s) dt \quad (2.23)$$

จากสมการที่ (2.23) แยกองค์ประกอบแกน d และ q ได้ตามสมการ (2.24) และ (2.25) ตามล้าดับ

$$\text{d-axis} \quad \lambda_{sd}^s = \int (v_{sd}^s - R_s i_{sd}^s) dt \quad (2.24)$$

$$\text{q-axis} \quad \lambda_{sq}^s = \int (v_{sq}^s - R_s i_{sq}^s) dt \quad (2.25)$$

จากสมการที่ 2.24 และ 2.25 จะพบว่าในทางทฤษฎีนั้นจะพบว่าการประมาณเวกเตอร์ด้วยแบบจำลองแรงดันนั้นมีความง่ายและสะดวกกว่าการประมาณเวกเตอร์ด้วยแบบจำลองกระแส แต่ปัญหาที่อยู่ภายในการประมาณค่าด้วยวิธีแบบจำลองแรงดันคือการอินทิเกรต ซึ่งจะพบปัญหาหากว่ามีสัญญาณรบกวนที่เป็นค่าออฟเซต โดยค่าออฟเซตดังกล่าวจะทำให้ผลลัพธ์ของการอินทิเกรตเพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างไม่มีที่สิ้นสุด ซึ่งในทางปฏิบัติจะทำให้เกิดการโอเวอร์โพล์ในไมโครคอนโทรลเลอร์ วิธีการในการกำจัดปัญหาดังกล่าวได้ถูกนำเสนอในหลายบทความ โดยวิธีการอย่างง่ายที่ได้นำมาใช้ในโครงการนี้คือการปรับแต่งการอินทิเกรตให้มีการป้อนกลับด้วยค่าอัตราขยายป้อนกลับต่ำเพื่อกำจัดค่าออฟเซตก่อนทำการอินทิเกรตส่งผลให้ค่าเอาต์พุตเพิ่มขึ้นอย่างไร้ขอบเขตหมดไป [3] ดังมีไดอะแกรมแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ไดอะแกรมการอินทิเกรตด้วยการป้อนกลับเชิงลบ

จากรูปที่ 2.4 สามารถเขียนสมการเวกเตอร์ได้ดังสมการที่ 2.26

$$\bar{\lambda}_{sdq}^s = \frac{1}{(s + \tau)} (v_{sdq}^s - R_s \bar{i}_{sdq}^s) \quad (2.26)$$

โดยที่ $\tau = \frac{1}{f_c}$ และ $f_c \approx 1 \text{ Hz}$. [5]

จากสมการที่ 2.26 จะพบว่ารูปแบบสมการจะอยู่ในสมการของวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน โดยค่าความถี่คัตออฟจะถูกตั้งค่าไว้ไม่เกิน 5 Hz

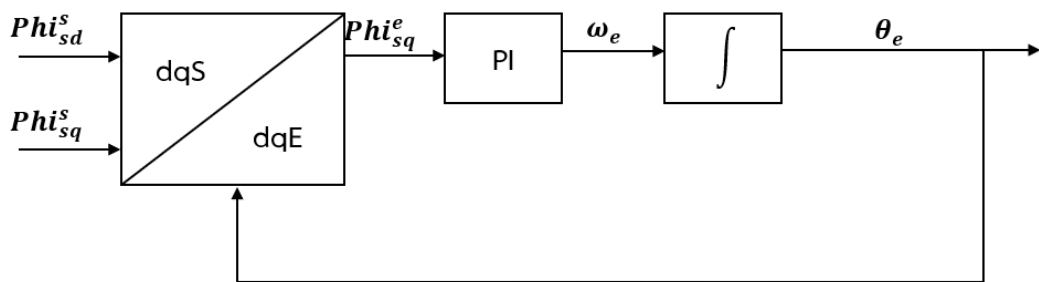
การทำการประมาณเวกเตอร์ในสมการ 2.26 จะได้รู้คลื่นของฟลักซ์เกี่ยวคัลล์ที่สเตเตอร์ในกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งเทียบกับสเตเตอร์ ดังนั้นในการประมาณหาตำแหน่งของเวกเตอร์

สามารถทำการประมาณโดยใช้ฟังก์ชัน $\theta_e = \tan^{-1}\left(\frac{\lambda_{sq}^s}{\lambda_{sd}^s}\right)$ และทำการหาอนุพันธ์ของตำแหน่งเพื่อจะ

$$\text{ได้ค่า } \omega_e = \frac{d\theta_e}{dt}$$

อย่างไรก็ตามวิธีการที่สามารถนำมาใช้ในประมาณตำแหน่งและความเร็วเชิงมุมของเวกเตอร์มีหลายวิธี โดยวิธีที่ใช้ในโครงงานนี้คือการใช้เฟสล็อกคูลูปดังแสดงในรูปที่ 2.5

เฟสล็อกคูลูปทำงานโดยทำการป้อนตัวแปรในแกน q ซึ่งโดยปกติจะถูกกำหนดให้มีค่าเป็น 0 ตลอดเวลาเนื่องจากเวกเตอร์ของฟลักซ์เกี่ยวค้ำเป็นแกนอ้างอิง ดังนั้นเพื่อรักษาให้ค่าแกน q มีค่าเป็น 0 ต้องทำการป้อนค่าดังกล่าวเข้าสู่อินทิเกรเตอร์เพื่อ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะเข้าสู่ระบบซึ่งมีแบบจำลองเป็นการอินทิเกรต ทั้งนี้เพื่อให้ได้ผลลัพธ์เป็นมุม ตัวแปรขาเข้าของการอินทิเกรตจะถูกกำหนดให้เป็นค่าความเร็วเชิงมุม ค่ามุมที่ได้จากการอินทิเกรตจะถูกป้อนกลับไปบล็อกแปลงแกนเพื่อทำการแปลงแกนสำหรับตัวแปรฟลักซ์เกี่ยวค้ำที่สเตเตอร์จากกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งเทียบกับสเตเตอร์ไปสู่กรอบอ้างอิงของตัวเอง

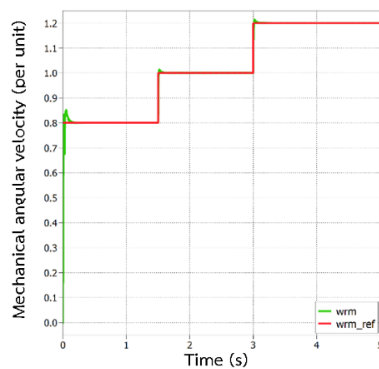


รูปที่ 2.5 ไดอะแกรมการทำงานของเฟสล็อกคูลูป

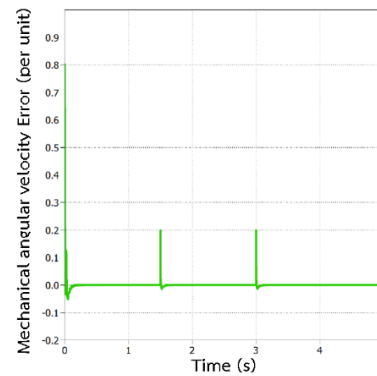
แรงดันครอสคัปปลิ่งในแนวแกน d คือ
$$-(1-\sigma)L_r \frac{d|\vec{i}_{ms}^e|}{dt} + (\omega_e - \omega_r)\sigma L_r i_{rq}^e$$

แรงดันครอสคัปปลิ่งในแนวแกน q คือ
$$-(\omega_e - \omega_r)(\sigma L_r i_{rd}^e + (1-\sigma)L_r |\vec{i}_{ms}^e|)$$

ระบบควบคุมจึงมีความจำเป็นในการชดเชยแรงดันของเทอมของแรงดันครอสคัปปลิ่งเพื่อให้การตอบสนองของกระแสโรเตอร์ตอบสนองแบบอันดับหนึ่งและการควบคุมแบบ PI จึงถูกนำมาใช้ดังแสดงในรูปที่ 2.3 คือการควบคุมในโหมด ควบคุมความเร็ว (speed controlled) ส่งผลให้สามารถควบคุมความเร็วให้อยู่รอบๆความเร็วซิงโครนัสได้ดังแสดงในรูปที่ 2.7



(a)



(b)

รูปที่ 2.7 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดง (a) ความเร็วเชิงมุมทางกลที่ 0.8 pu, 1.0 pu และ 1.2 pu และ (b) ค่าความคลาดเคลื่อนของความเร็วเชิงมุมทางกล 0.8 pu, 1.0 pu และ 1.2 pu

บทที่ 3

การจำลองทางคอมพิวเตอร์และการทดลอง

3.1 บทนำ

ในบทนี้จะอธิบายการจำลองทางคอมพิวเตอร์ โดยใช้โปรแกรม PLEXIM ในการจำลองการประมาณฟลักซ์เกี่ยวค้ำงที่สเตเตอร์เพื่อใช้เป็นแนวทางการออกแบบอุปกรณ์ประมาณฟลักซ์เกี่ยวค้ำงที่สเตเตอร์ นอกจากนี้ในส่วนของการทดลองจะกล่าวถึง วิธีการทดลอง อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง ในโครงการนี้

3.2 การจำลองทางคอมพิวเตอร์

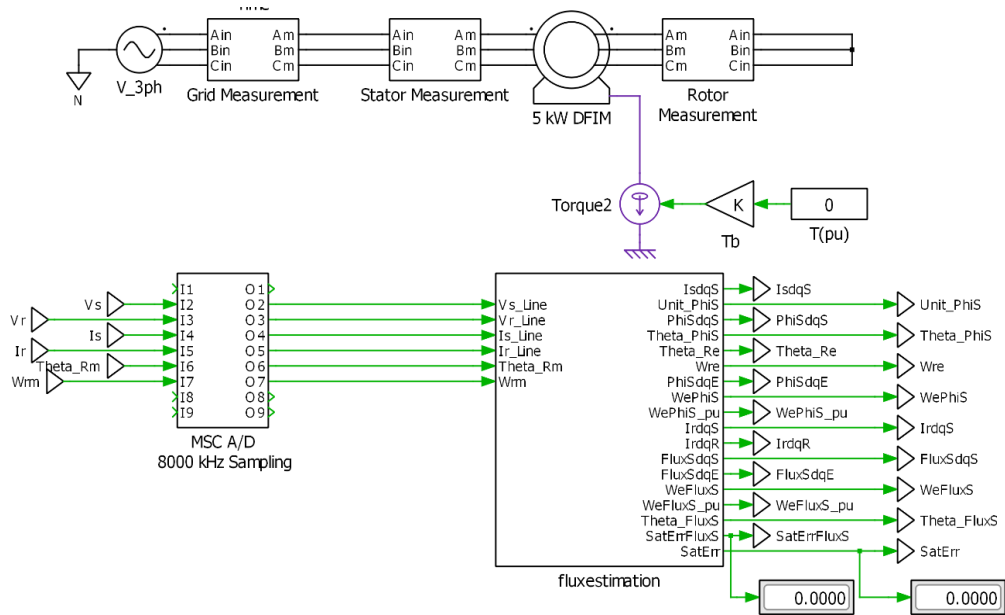
การจำลองทางคอมพิวเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 3.1 สามารถแบ่งวงจรในการจำลองเป็นสองส่วนดังนี้

3.2.1 วงจรกำลัง

การจำลองวงจรกำลังของการประมาณฟลักซ์เกี่ยวค้ำงที่สเตเตอร์ ประกอบไปด้วยแปลงจ่ายไฟฟ้า 3 เฟส ขนาดของแรงดันไลน์ 400 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ ต่อเข้าที่ฝั่งสเตเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้า สำหรับวงจรโรเตอร์ทำการลัดวงจร

3.2.2 วงจรควบคุม

วงจรควบคุมเป็นส่วนที่ใช้สำหรับการจำลอง การคำนวณ การควบคุม การประมาณฟลักซ์เกี่ยวค้ำงที่สเตเตอร์ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการเขียนโปรแกรมสำหรับการคำนวณฟลักซ์เกี่ยวค้ำงที่สเตเตอร์ในระบบจริง วงจรนี้ประกอบไปสองส่วน ส่วนแรกคือส่วนของการวัดเพื่อนำเข้าข้อมูลกระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และมุมของโรเตอร์เพื่อใช้ในการคำนวณ และส่วนที่สองคือส่วนของการคำนวณฟลักซ์เกี่ยวค้ำงที่สเตเตอร์



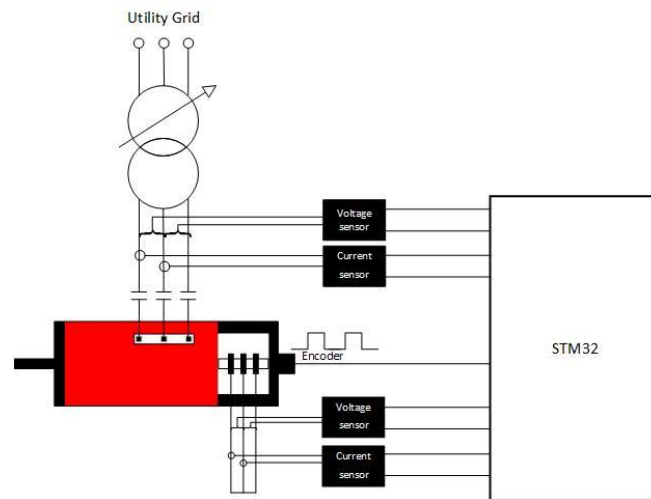
รูปที่ 3.1 ไดอะแกรมการจำลองทางคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม PLEXIM

3.3 การทดลอง

เป็นการนำระเบียบวิธีการจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์มาเป็นแนวทางการทดลองในระบบจริง

3.3.1 ระบบของการทดลอง

ระบบของการทดลองประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้าสามเฟส แมกเนติกคอนแทคเตอร์รุ่น A30-30-10 ของบริษัท ABB และเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำดังแสดงในรูปที่ 3.2 การคำนวณสแตตอร์ฟลักซ์ของระบบใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F407VGT6 ของบริษัท STMicroelectronics เซนเซอร์วัดกระแสใช้ของบริษัท LEM เบอร์ LA 55-P เป็นเซนเซอร์ชนิด Hall Effect แบบวงรอบปิด ส่วนเซนเซอร์วัดแรงดันใช้ของบริษัท LEM เบอร์ LV 25-P เซนเซอร์วัดมุมคือ Encoder 755 ของบริษัท British Encoder โดยกำหนดให้ความถี่แซมปลิ่งเท่ากับ 8.0 kHz



รูปที่ 3.2 ไดอะแกรมการทดลองการประมาณฟลักซ์เกี่ยวกับคล็องที่สเตเตอร์

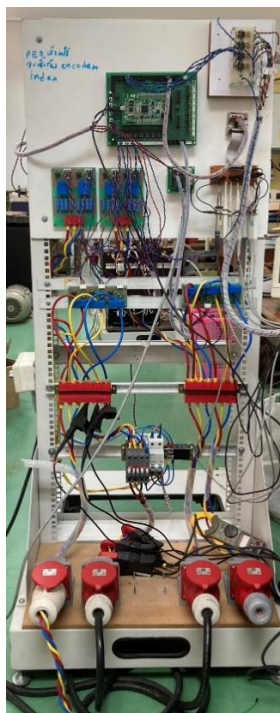
3.3.2 วิธีการทดลอง

การทดลองจะเป็นการเปรียบเทียบระหว่างการประมาณฟลักซ์เกี่ยวกับคล็องที่สเตเตอร์ โดยใช้แบบจำลองกระแสกับแบบจำลองแรงดันที่ได้จากการวัดตั้งไดอะแกรมการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.2 โดยการทดลองนี้เอนโคเดอร์จำเป็นต้องสอบเทียบอุปกรณ์วัดโดยวิธีการสอบเทียบ

3.3.3 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

3.3.3.1 ชุดวงจรควบคุม

วงจรควบคุมสำหรับวัดและคำนวณฟลักซ์เกี่ยวกับคล็องที่สเตเตอร์ ประกอบไปด้วยอุปกรณ์วัดเพื่อป้อนข้อมูลเข้าไมโครคอนโทรลเลอร์ และบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 วงจรการวัดค่าและคำนวณเวกเตอร์ฟลักซ์เกี่ยวกับเครื่องที่สเตเตอร์

3.3.3.2 แทนทดสอบเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดโรเตอร์ขดลวด
แทนทดสอบเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำโรเตอร์ขดลวดแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แทนทดสอบเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดโรเตอร์ขดลวด

3.3.3.3 เครื่องมือวัด

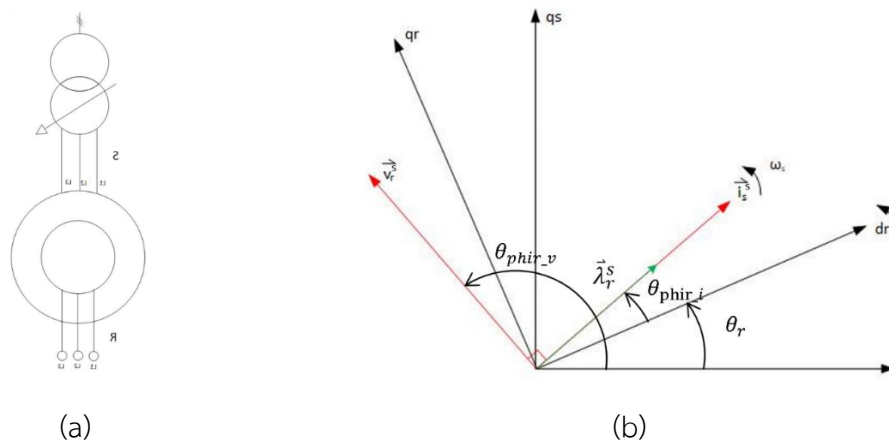
เครื่องมือที่ใช้ในการวัดผลการทดลองประกอบไปด้วย

- ออสซิลโลสโคป ยี่ห้อ RIGOL รุ่น DS1104B และ DS1104Z
- CHAUVIN ARNOUX CA 8331

- Digital Multimeter ยี่ห้อ Fluke

3.3.4 การหาตำแหน่งโรเตอร์เริ่มต้น

การประมาณฟลักซ์เกี่ยวค้ำงที่สเตเตอร์โดยใช้แบบจำลองกระแส นั้นจำเป็นต้องใช้ ข้อมูลตำแหน่งของโรเตอร์เพื่อใช้ในการเปลี่ยนกรอบอ้างอิงของโรเตอร์สู่กรอบอ้างอิงใดๆ สำหรับ อินครีเมนทอลเอนโคดเดอร์ (incremental encoder) ค่ามุมที่วัดได้จะเป็นสัมพัทธ์ของมุมที่หมุนกับ ตำแหน่งเริ่มต้นของโรเตอร์ θ_{ri} ส่งผลให้มุมที่ได้จากการวัดจะเท่ากับ θ_r ก็ต่อเมื่อมุม $\theta_{ri} = 0$ [4] การ พิจารณามุมทำขณะที่โรเตอร์เปิดวงจรและจ่ายไฟกระแสสลับเข้าที่สเตเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 การสอบเทียบเอนโคดเดอร์เพื่อประมาณตำแหน่งโรเตอร์ (a) วงจรโรเตอร์ภายใต้การ สอบเทียบเอนโคดเดอร์ (b) ตำแหน่งเวกเตอร์ของ \vec{v}_r^s , \vec{i}_r^s และ $\vec{\lambda}_r^s$ ขณะกระแสที่โรเตอร์เป็นศูนย์

ดังนั้นการพิจารณาค่าตำแหน่งเริ่มต้นของโรเตอร์จำเป็นต้องหาค่าก่อนทำการใช้ข้อมูล ตัวแปรที่อยู่ในกรอบอ้างอิงโรเตอร์ มุมที่วัดมาได้จากเอนโคดเดอร์ $\Delta\theta_r(t)$ ซึ่งเทียบกับ $\theta_{ri}(t)$ และ $\theta_r(t)$ [4] ดังนั้นมุมเริ่มต้นสามารถคำนวณได้จาก

$$\theta_{ri} = \theta_{phir_v} - 90^\circ - \theta_{phir_i}$$

โดยที่ $\theta_{phir_v} = \tan^{-1}\left(\frac{v_{rq}^s}{v_{rd}^s}\right)$ และ $\theta_{phir_i} = \tan^{-1}\left(\frac{i_{sq}^s}{i_{sd}^s}\right)$

3.3.5 การทดลองการประมาณฟลักซ์เกี่ยวค้ำงที่สเตเตอร์

การทดลองประมาณฟลักซ์เกี่ยวค้ำงที่สเตเตอร์โดยแบบจำลอง และ การ ประมาณฟลักซ์เกี่ยวค้ำงที่สเตเตอร์โดยแบบจำลองแรงดัน เป็นการปรับแรงดันของหม้อแปลงปรับ ค่าได้ให้ได้ขนาดแรงดันไลน์ 400 โวลท์ จากนั้นทำการสตาร์ทมอเตอร์โดยการสตาร์ทตรง (Direct Online Start) แล้วทำการเปรียบเทียบการตอบสนองของการประมาณฟลักซ์เกี่ยวค้ำงที่สเตเตอร์ ทั้งสองแบบ

บทที่ 4

ผลการทดลองจำลองทางคอมพิวเตอร์และผลการทดลอง

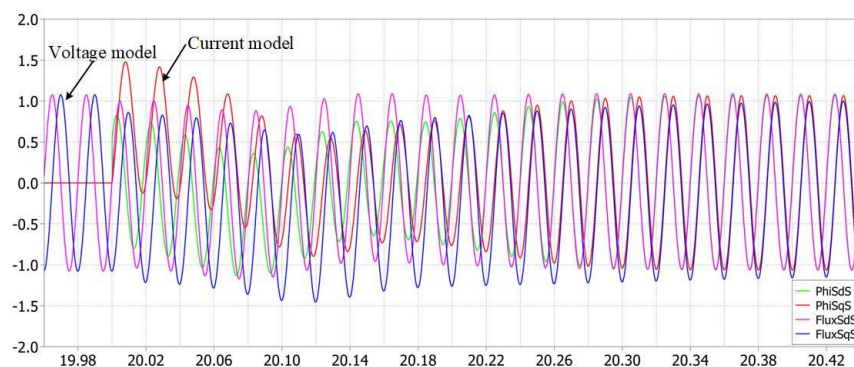
4.1 บทนำ

ในบทนี้จะแสดงผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์และผลการทดลองการประมาณฟลักซ์เกี่ยวกับคล็องที่สเตเตอร์ของแบบจำลองกระแสและแบบจำลองแรงดันเพื่อเปรียบเทียบการตอบสนองของทั้งสองแบบจำลอง

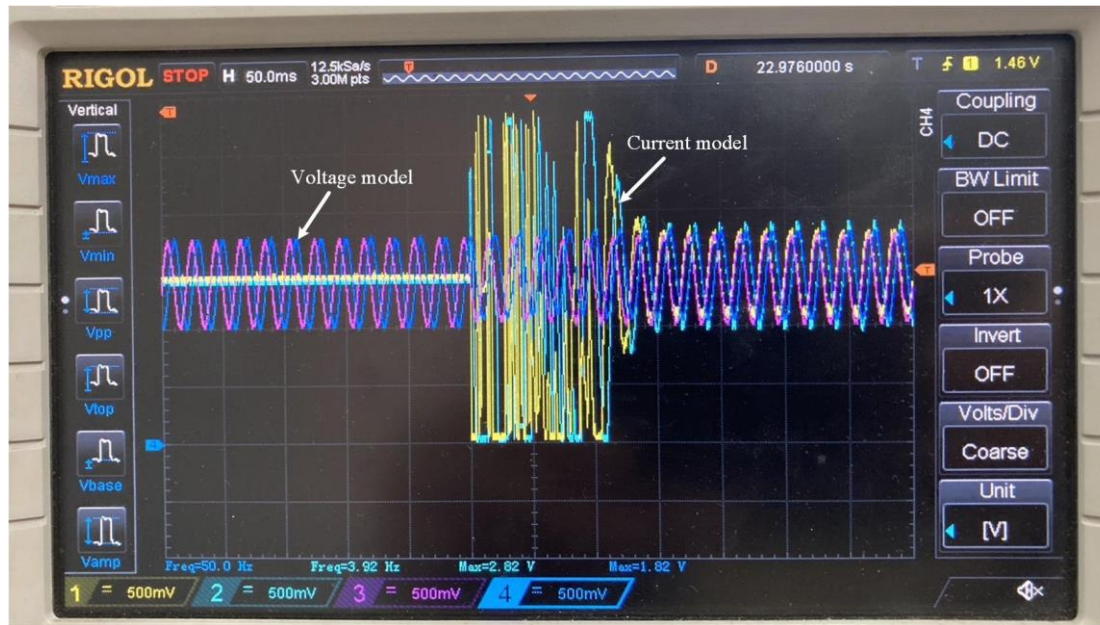
4.2 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์และผลการทดลอง

การทดลองประมาณฟลักซ์เกี่ยวกับคล็องที่สเตเตอร์โดยแบบจำลองกระแส (Current model) และ การประมาณฟลักซ์เกี่ยวกับคล็องที่สเตเตอร์โดยแบบจำลองแรงดัน (Voltage model) เป็นการปรับแรงดันของหม้อแปลงปรับค่าได้ให้ได้ขนาดแรงดันไลน์ 400 โวลต์ จากนั้นทำการสตาร์ทมอเตอร์โดยการสตาร์ทตรง ผลการจำลองและผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.1 และ รูปที่ 4.2

จากรูปที่ 4.1 แสดงผลการจำลองการประมาณฟลักซ์เกี่ยวกับคล็องที่สเตเตอร์โดยแบบจำลองกระแสและแบบจำลองแรงดัน และ จากรูปที่ 4.2 แสดงผลการทดลองการประมาณฟลักซ์เกี่ยวกับคล็องที่สเตเตอร์โดยแบบจำลองกระแสและแบบจำลองแรงดัน จะเห็นได้ว่าทั้งการจำลองและการทดลองแนวโน้มทางเดียวกันนั่นคือ การประมาณฟลักซ์เกี่ยวกับคล็องที่สเตเตอร์โดยใช้แบบจำลองกระแสนั้นมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องมาจากเป็นผลทั้งกระแสโรเตอร์และสเตเตอร์ แต่สำหรับการประมาณฟลักซ์โดยแบบจำลองแรงดันนั้นจะเห็นว่าฟลักซ์เกี่ยวกับคล็องที่สเตเตอร์ในแนวแกน d และ q มีการเปลี่ยนแปลงน้อยเนื่องจากไม่มีผลกระทบของกระแสโรเตอร์

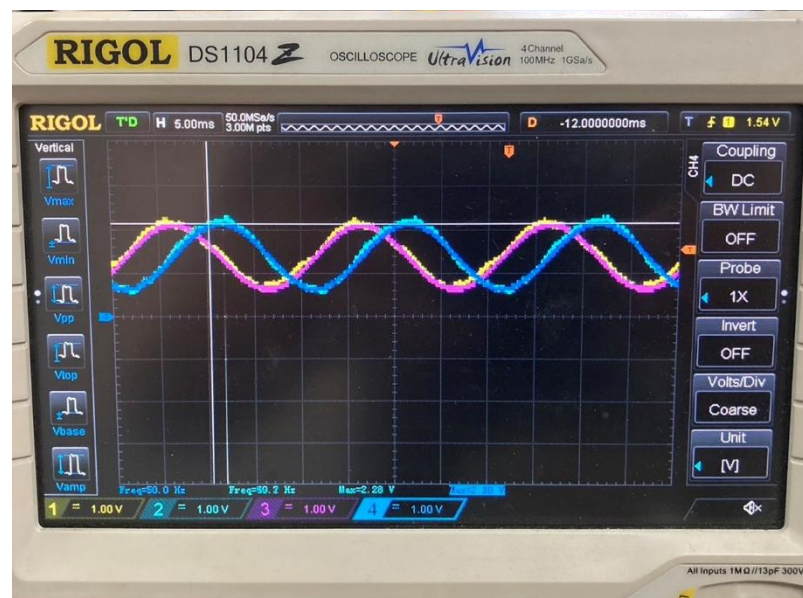


รูปที่ 4.1 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงการประมาณฟลักซ์เกี่ยวกับคล็องที่สเตเตอร์โดยแบบจำลองกระแสและแบบจำลองแรงดัน ขณะทำการสตาร์ทตรง



รูปที่ 4.2 ผลการทดลองแสดงรูปคลื่นพัลส์เกี่ยวกับคัลลิ่งที่สเตเตอร์โดยแบบจำลองกระแสและแบบจำลองแรงดันภายใต้การสตาร์ทตรง

จากรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นเส้นโค้งของการประมาณพัลส์โดยแบบจำลองกระแสและแบบจำลองแรงดันทับกันแต่ต่างที่เส้นโค้งการประมาณพัลส์โดยแบบจำลองกระแสจะไม่เรียบเนื่องจากกระแสโรเตอร์



รูปที่ 4.3 ผลการทดลองแสดงรูปคลื่นพัลส์เกี่ยวกับคัลลิ่งที่สเตเตอร์จากการประมาณพัลส์โดยแบบจำลองกระแสและแบบจำลองแรงดันภายใต้สภาวะคงตัว

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์และการทดลองการประมาณพลาซมาที่เกี่ยวข้องที่สเตเตอร์โดยแบบจำลองกระแสและการประมาณพลาซมาที่เกี่ยวข้องที่สเตเตอร์โดยแบบจำลองแรงดัน พบว่าการประมาณโดยใช้แบบจำลองกระแสที่มีความเรียบง่ายแต่เนื่องจากมีผลของกระแสของโรเตอร์ส่งผลให้เส้นโค้งพลาซมาที่เกี่ยวข้องที่สเตเตอร์ไม่เรียบ ทั้งยังการประมาณโดยใช้แบบจำลองกระแสจำเป็นต้องมีอุปกรณ์เพื่อหามุมของโรเตอร์จำเป็นต้องมีเซนเซอร์เพิ่มขึ้นหนึ่งชุดนั่นคือ เอนโคเดอร์ สำหรับการใช้ในการแปลงแกนของกรอบอ้างอิงโรเตอร์สู่กรอบอ้างอิงสเตเตอร์ ดังนั้นการประมาณพลาซมาที่เกี่ยวข้องที่สเตเตอร์โดยแบบจำลองแรงดันจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง แต่การประมาณโดยแบบจำลองแรงดันในระบบจริงนี้จะพบปัญหาคือสัญญาณที่จะทำการอินทิเกรตมีผลของแรงดันออฟเซต ส่งผลให้สัญญาณเอาต์พุตเพิ่มหรือลดไม่มีที่สิ้นสุด ดังนั้นการอินทิเกรตด้วยการป้อนกลับเชิงลบด้วยค่าอัตราขยายป้อนกลับค่าต่ำๆ จึงถูกปรับใช้ จากรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าเส้นโค้งการประมาณพลาซมาโดยแบบจำลองกระแสไม่เรียบ สำหรับเส้นโค้งการประมาณพลาซมาโดยแบบจำลองแรงดันมีความเรียบเนื่องจากว่าใช้แรงดันเป็นหลักในการประมาณ และจะเห็นได้ชัดว่าการประมาณพลาซมาโดยแบบจำลองแรงดันไม่จำเป็นต้องใช้เอนโคเดอร์ เนื่องจากมีเพียงองค์ประกอบของตัวแปรสเตเตอร์เพียงอย่างเดียว

เอกสารอ้างอิง

- [1] Warachart Suwan-ngam , เอกสารประกอบการสอนวิชา 01026324 Electric Drives
- [2] Xibo Yuan, Jianyou Chai, Youngdong Li, “A Converter-Based Starting Method and Speed Control of Doubly Fed Induction Machine With centrifugal Loads,” IEEE Transactions on industry application, vol.47, no3 May/June 2011
- [3] Joachim Holtz, “Sensorless Control of Induction Motor Drives,” Proceeding of the IEEE., Vol. 90, no.8, August 2002
- [4] G. Tapia,G. Santamaria, M. Telleria, and A. Susperregui, “Methodology for Smooth Connection of Doubly Fed Induction Generators to the Grid,” IEEE Trans. Energy Convers., Vol. 24, no.4 pp. 959-971, December 2009
- [5] Joachim Holtz, “Methods for Speed Sensorless Control of AC Drives,” IEEE Press Book, 1996
- [6] Guojia Peng, Kai Ni, Chun Gan, Ronghai Qu, “A Direct Starting Method of Doubly-Fed Induction Machine for Shipboard Propulsion System Application,” *ICEMS, 2021*

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
บทความทางวิชาการ

การประมาณฟลักซ์ที่สเตเตอร์สำหรับการควบคุมเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง

STATOR FLUX ESTIMATION FOR CONTROL OF A DOUBLY-FED INDUCTION MACHINE

จิราวัฒน์ คชพร¹

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง

¹ ซอย ฉลองกรุง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-329-8000 ต่อ 3925 E-Mail: job_jirawat@hotmail.com

บทคัดย่อ

โครงการนี้มีเป้าหมายเพื่อการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง โดยใช้การควบคุมเวกเตอร์ของฟลักซ์ที่สเตเตอร์ การควบคุมจะมุ่งไปยังการควบคุมคอนเวอร์เตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้า โดยโปรเจกต์ทำการตรวจสอบความถูกต้องผ่านโปรแกรมจำลองทางคอมพิวเตอร์ PLEXIM ก่อนที่จะนำอัลกอริทึมมาใช้กับอุปกรณ์จริงภายใต้บอร์ดการควบคุมโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F4 ในกรณีระบบที่นำมาใช้งานจริง จะมุ่งเป้าไปที่ การประมาณฟลักซ์สเตเตอร์เท่านั้น ทั้งนี้จำเป็นต้องสอบเทียบของเอนโคเดอร์ ก่อนที่จะนำระเบียบวิธีการมาใช้กับระบบจริง

คำสำคัญ: มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง, การควบคุมเวกเตอร์ของฟลักซ์ที่สเตเตอร์, PLEXIM, STM32F4, การฟลักซ์ที่สเตเตอร์

Abstract

This project aims at control of a doubly-fed-induction motor using stator flux vector control. The control is focusing on the machine-side converter of the system. The project is validated by computer simulation using PLEXIM software. The actual system is then implemented using the STM32F4 microcontroller. In the case of system implementation, only the stator flux estimation is focused. Therefore, encoder calibration is required. The algorithm is also validated in the software and then implemented.

Keywords: Doubly-fed-induction motor, Stator flux vector control, PLEXIM, STM32F4, Stator flux estimation

1. บทนำ

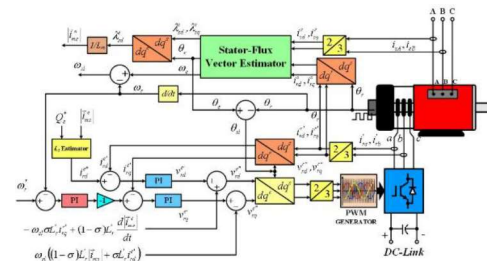
เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง (DFIM) โดยทั่วไปถูกใช้ในการผลิตไฟฟ้า อย่างไรก็ตาม DFIM ถูกนำมาใช้ในโหมดมอเตอร์ [1] สามารถทำงานที่ความเร็วรอบใดๆ รอบๆความเร็วซิงโครนัส แต่ต้องการฟีดแบ็คคอนเวอร์เตอร์เพียงกำลังสลิป โครงการนี้มุ่งไปที่การจำลองการควบคุมคอนเวอร์เตอร์ฝั่งเครื่องจักรเพื่อควบคุมมอเตอร์และการประมาณฟลักซ์ที่สเตเตอร์ ในระบบจริง เนื่องจากเป็น

การประยุกต์ใช้เอนโคเดอร์ จึงจำเป็นต้องมีการสอบเทียบเอนโคเดอร์ ระบบทั้งหมดถูกจำลองผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ PLEXIM ก่อนนำระเบียบวิธีการใช้ในระบบจริง

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1. เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง

เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง สามารถทำงานได้ทั้งโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและโหมดมอเตอร์ โดยการประยุกต์ใช้งานในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้รับความนิยมนอย่างมากในการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานลม เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดโรเตอร์ขดลวดเมื่อถูกควบคุมที่วงจรรอเตอร์ ทำให้ทำงานได้ที่ความเร็วรอบใดๆ รอบๆความเร็วซิงโครนัส ในส่วนของการทำงานในโหมดมอเตอร์จะนิยมใช้ในโหลดที่ต้องการแรงบิดออกตัวสูง เนื่องจากสามารถควบคุมผ่านความต้านทานภายนอกที่อยู่ขั้วของโรเตอร์ นอกจากนี้ในการทำงานในโหมดมอเตอร์ที่ความเร็วใดๆ รอบความเร็วซิงโครนัส เช่นเดียวกับโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ในโครงการนี้จะมุ่งประเด็นไปการควบคุมเวกเตอร์ของวงจรรอเตอร์ในโหมดมอเตอร์ โดยการควบคุมที่วงจรรอเตอร์โดยคอนเวอร์เตอร์ฝั่งเครื่องจักรกลไฟฟ้าซึ่งมีหน้าที่ควบคุมแรงบิดและความเร็วรอบของเครื่องจักรกลดังกล่าวในรูปที่ 1



รูปที่ 1 โดอะแกรมการควบคุมคอนเวอร์เตอร์ฝั่งเครื่องจักรกลไฟฟ้า

2.2. การประมาณฟลักซ์เกี่ยวกับเครื่องที่สเตเตอร์โดยโมเดลกระแสและโมเดลแรงดัน

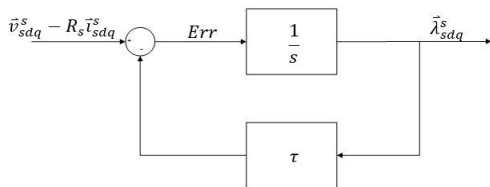
การประมาณฟลักซ์เกี่ยวกับเครื่องที่สเตเตอร์โดยโมเดลกระแสและโมเดลแรงดันทั้งสองวิธีนี้จะกระทำบนกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งเทียบสเตเตอร์ โดยฟลักซ์เกี่ยวกับเครื่องที่สเตเตอร์ของโมเดลกระแสซึ่งเป็นการประมาณอย่างง่ายแต่จะมืองค้ประกอบของกระแสโรเตอร์ในสมการส่งผลให้ฟลักซ์เกี่ยวกับเครื่องที่สเตเตอร์ขึ้นอยู่กัค่ากระแสที่โรเตอร์ด้วยดังสมการ (1)

$$\vec{\lambda}_{sdq}^s = L_s \vec{i}_{sdq}^s + L_m \vec{i}_{rdq}^s \quad (1)$$

โดยที่ L_s แทน ค่าความเหนี่ยวนำตัวเองของวงจรถะเตอร์ และ L_m แทน ค่าความเหนี่ยวนำแมกเนไตซึ่งสามเฟส ดังนั้นจึงเพื่อจะหลีกเลี่ยงองค้ประกอบของตัวแปรโรเตอร์จึงใช้การประมาณฟลักซ์เกี่ยวกับเครื่องที่สเตเตอร์โดยโมเดลแรงดันดังสมการที่(2)

$$\vec{\lambda}_{sdq}^s = \int (\vec{v}_{sdq}^s - R_s \vec{i}_{sdq}^s) dt \quad (2)$$

ในสมการที่(2)ไม่สามารถนำมาใช้กับระบบจริงได้เนื่องจากในระบบจริงมีการชดเชย ส่งผลให้การอินทิเกรตสะสมค่าเหล่านี้ เนื่องจากการอินทิเกรตนี้ไม่มีการป้อนกลับค่าเอาต์พุตกลับอินพุต ผลลัพธ์คือสัญญาณเอาต์พุตรันอเวย์ ซึ่งเป็นปัญหาพื้นฐานของอินทิเกรตวงรอบแบบเปิด เมื่อใช้การป้อนกลับเชิงลบด้วยค่าเกณฑ์ต่างๆ เพื่อความเสถียรของการอินทิเกรตและหลีกเลี่ยงเอาต์พุตเพิ่มขึ้นไร้ขอบเขต [4] ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 โดอะแกรมการอินทิเกรตด้วยการป้อนกลับเชิงลบ

จากรูปที่ 2 สามารถเขียนสมการได้ดังสมการที่ 3

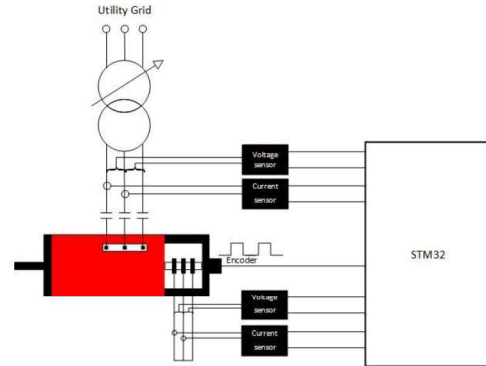
$$\vec{\lambda}_{sdq}^s = \frac{1}{(s + \tau)} (\vec{v}_{sdq}^s - R_s \vec{i}_{sdq}^s) \quad (3)$$

โดยที่ $\tau = \frac{1}{f_c}$ และ $f_c \approx 1 \text{ Hz}$. [5]

3. ระบบของการทดลอง

ระบบของการทดลองประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้าสามเฟสแมกเนติกคอนแทคเตอร์รุ่น A30-30-10 ของบริษัท ABB และเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำดังแสดงในรูปที่ 3 การคำนวณแอมพลิจูดของระบบใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F407VGT6 ของบริษัท

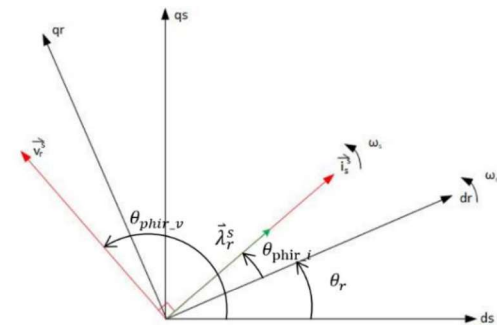
STMicroelectronics เซนเซอร์วัดกระแสใช้ของบริษัท LEM เบอร์ LA 55-P เป็นเซนเซอร์ชนิด Hall Effect แบบวงรอบปิด ส่วนเซนเซอร์วัดแรงดันใช้ของบริษัท LEM เบอร์ LV 25-P เซนเซอร์วัดมุมคือ Encoder 755 ของบริษัท British Encoder โดยกำหนดให้ความถี่แซมปลิงเท่ากับ 8.0 kHz



รูปที่ 3 โดอะแกรมการทดลองการประมาณฟลักซ์เกี่ยวกับเครื่องที่สเตเตอร์

3.1. การหาตำแหน่งโรเตอร์เริ่มต้น

การประมาณฟลักซ์เกี่ยวกับเครื่องที่สเตเตอร์โดยใช้โมเดลกระแส นั้นจำเป็นต้องใช้ข้อมูลตำแหน่งของโรเตอร์เพื่อใช้สำหรับการเปลี่ยนกรอบอ้างอิงของโรเตอร์สู่กรอบอ้างอิงใดๆ สำหรับอินคริเมนทอลเอนโค้ดเดอร์ (incremental encoder) ค่ามุมที่วัดได้จะเป็นสัมพัทธ์ของมุมที่หมุนกับตำแหน่งเริ่มต้นของโรเตอร์ θ_{ri} ส่งผลให้มุมที่ได้จากการวัดจะเท่ากับ θ_r ก็ต่อเมื่อมุม $\theta_{ri} = 0$ [6] การพิจารณามุมทำขณะที่โรเตอร์เปิดวงจรและจ่ายไฟกระแสลับเข้าที่สเตเตอร์ ณ สภาวะคงตัวสามารถแสดงเวกเตอร์ได้ดังรูป 4



รูปที่ 4 ตำแหน่งเวกเตอร์ของ \vec{i}_s^s , $\vec{\lambda}_r^s$ และ $\vec{\lambda}_r^s$ ขณะกระแสที่โรเตอร์เป็นศูนย์

การพิจารณาตำแหน่งเริ่มต้นของโรเตอร์จำเป็นต้องหาค่าก่อนทำการใช้ข้อมูลตัวแปรที่อยู่ในกรอบอ้างอิงโรเตอร์ มุมที่วัดมาได้จากเอนโคเดอร์ $\Delta\theta_r(t)$ ซึ่งเทียบกับ $\theta_{ri}(t)$ และ $\theta_r(t)$ [4] ดังนั้นมุมเริ่มต้นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4

$$\theta_{ri} = \theta_{phir_v} - 90^\circ - \theta_{phir_i} \quad (5)$$

โดยที่ $\theta_{phir_v} = \tan^{-1}\left(\frac{v_{rq}^s}{v_{rd}^s}\right)$ และ $\theta_{phir_i} = \tan^{-1}\left(\frac{i_{sq}^s}{i_{sd}^s}\right)$

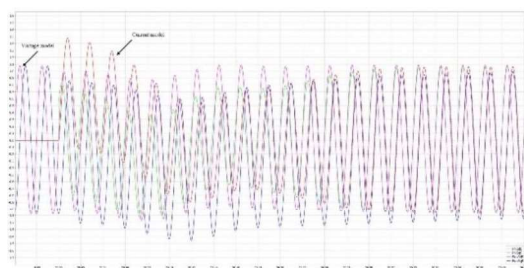
3.2. การทดลองการประมาณพลาซึ่มที่เกี่ยวข้องที่สเตเตอร์

การทดลองประมาณพลาซึ่มที่เกี่ยวข้องที่สเตเตอร์โดยโมเดลกระแส (Current model) และการประมาณพลาซึ่มที่เกี่ยวข้องที่สเตเตอร์โดยโมเดลแรงดัน (Voltage model) เป็นการปรับแรงดันของหม้อแปลงปรับค่าได้ให้ได้นขนาดแรงดันไลน์ 400 โวลท์ จากนั้นทำการสตาร์ทมอเตอร์โดยตรง (Direct online start) แล้วทำการเปรียบเทียบการตอบสนองของการประมาณพลาซึ่มที่เกี่ยวข้องที่สเตเตอร์ทั้งสองแบบ

4. ผลการทดลองจำลองทางคอมพิวเตอร์และผลการทดลอง

การทดลองประมาณพลาซึ่มที่เกี่ยวข้องที่สเตเตอร์โดยโมเดลกระแส (Current model) และการประมาณพลาซึ่มที่เกี่ยวข้องที่สเตเตอร์โดยโมเดลแรงดัน (Voltage model) เป็นการปรับแรงดันของหม้อแปลงปรับค่าได้ให้ได้นขนาดแรงดันไลน์ 400 โวลท์ จากนั้นทำการสตาร์ทมอเตอร์โดยตรง (Direct online start) ผลการจำลองและผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 5 และ รูปที่ 6

จากรูปที่ 5 แสดงผลการจำลองการประมาณพลาซึ่มที่เกี่ยวข้องที่สเตเตอร์โดยโมเดลกระแสและโมเดลแรงดัน และ จากรูปที่ 6 แสดงผลการทดลองการประมาณพลาซึ่มที่เกี่ยวข้องที่สเตเตอร์โดยโมเดลกระแสและโมเดลแรงดัน จะเห็นได้ว่าการจำลองและการทดลองแนวโน้มนั้นเหมือนกันคือ การประมาณพลาซึ่มที่เกี่ยวข้องที่สเตเตอร์โดยใช้โมเดลกระแสจะมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องมาจากเป็นผลทั้งกระแสโรเตอร์และสเตเตอร์ แต่สำหรับการประมาณพลาซึ่มโดยโมเดลแรงดันนั้นจะเห็นได้ว่าพลาซึ่มที่เกี่ยวข้องที่สเตเตอร์ในแนวแกน d และ q มีการเปลี่ยนแปลงน้อยเนื่องจากไม่มีผลกระทบของกระแสโรเตอร์

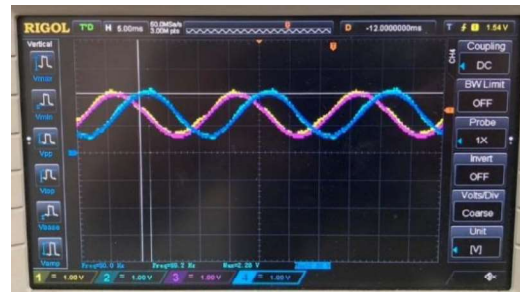


รูปที่ 5 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงการประมาณพลาซึ่มที่เกี่ยวข้องที่สเตเตอร์โดยแบบจำลองกระแสและแบบจำลองแรงดัน ขณะทำการสตาร์ทตรง



รูปที่ 6 ผลการทดลองแสดงรูปคลื่นพลาซึ่มที่เกี่ยวข้องที่สเตเตอร์โดยแบบจำลองกระแสและแบบจำลองแรงดันภายใต้การสตาร์ทตรง

จากรูปที่ 7 แสดงให้เห็นเส้นโค้งของการประมาณพลาซึ่มโดยโมเดลกระแสและโมเดลแรงดันทับกันแต่ต่างที่เส้นโค้งการประมาณพลาซึ่มโดยโมเดลกระแสจะไม่เรียบเนื่องมาจากกระแสโรเตอร์



รูปที่ 7 ผลการทดลองแสดงรูปคลื่นพลาซึ่มที่เกี่ยวข้องที่สเตเตอร์จากการประมาณพลาซึ่มโดยแบบจำลองกระแสและแบบจำลองแรงดันภายใต้สภาวะคงตัว

5. สรุป

จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์และการทดลองการประมาณพลาซึ่มที่เกี่ยวข้องที่สเตเตอร์โดยแบบจำลองกระแสและการประมาณพลาซึ่มที่เกี่ยวข้องที่สเตเตอร์โดยแบบจำลองแรงดัน พบว่าการประมาณโดยใช้แบบจำลองกระแสนั้นมีความเรียบง่ายแต่เนื่องจากมีผลของกระแสของโรเตอร์ส่งผลให้เส้นโค้งพลาซึ่มที่เกี่ยวข้องที่สเตเตอร์ไม่เรียบ ทั้งยังการประมาณโดยใช้แบบจำลองกระแสนี้จำเป็นต้องมีอุปกรณ์เพื่อหามุมของโรเตอร์จำเป็นต้องมีเซนเซอร์เพิ่มขึ้นหนึ่งชุดนั่นคือ เอนโคเดอร์ สำหรับการแปลงแกนของกรอบอ้างอิงโรเตอร์สู่กรอบอ้างอิงสเตเตอร์ ดังนั้นการประมาณพลาซึ่มที่เกี่ยวข้องที่สเตเตอร์โดยแบบจำลองแรงดันจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง แต่การประมาณโดยแบบจำลองแรงดันในระบบจริงนี้จะพบปัญหาคือสัญญาณที่จะทำการอินทิเกรตมีผลของแรงดันออฟเซต ส่งผลให้สัญญาณเอาต์พุตเพิ่มหรือลดไม่มีที่สิ้นสุด ดังนั้นการอินทิเกรตด้วยการบ่อนกลับเชิงลบด้วยค่าอัตราขยายบ่อนกลับค่าต่างๆ จึงถูกปรับใช้จากรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าเส้นโค้งการประมาณพลาซึ่มโดยแบบจำลองกระแสไม่เรียบ สำหรับเส้นโค้งการประมาณพลาซึ่มโดยแบบจำลองแรงดันมีความเรียบเนื่องจากว่าใช้แรงดันเป็นหลักในการประมาณ และจะเห็นได้

ชี้ว่าการประมาณฟลักซ์โดยแบบจำลองแรงดันไม่จำเป็นต้องใช้เอนโคดเดอร์ เนื่องจากมีเพียงองค์ประกอบของตัวแปรสเตรเตอร์เพียงอย่างเดียว

เอกสารอ้างอิง

- [1] Guojia Peng, Kai Ni, Chun Gan, Ronghai Qu, "A Direct Starting Method of Doubly-Fed Induction Machine for Shipboard Propulsion System Application," *ICEMS, 2021*
- [2] Warachart Suwan-ngam , เอกสารประกอบการสอนวิชา 01026324 Electric Drives
- [3] Xibo Yuan, Jianyou Chai, Youngdong Li, "A Converter-Based Starting Method and Speed Control of Doubly Fed Induction Machine With centrifugal Loads," *IEEE Transactions on industry application*, vol.47, no3 May/June 2011
- [4] Joachim Holtz, "Sensorless Control of Induction Motor Drives," *Proceeding of the IEEE.*, Vol. 90, no.8, August 2002
- [5] Joachim Holtz, "Methods for Speed Sensorless Control of AC Drives," *IEEE Press Book*, 1996
- [6] G. Tapia, G. Santamaria, M. Telleria, and A. Susperregui, "Methodology for Smooth Connection of Doubly Fed Induction Generators to the Grid," *IEEE Trans. Energy Convers.*, Vol. 24, no.4 pp. 959-971, December 2009



ประวัติผู้เขียน

ชื่อนาม สกุล นายจิราวัฒน์ คชพร

วัน เดือน ปี เกิด 26 กันยายน 2543

งานวิจัยที่สนใจ : การควบคุมและปัญหาประคิษฐ์

ประวัติผู้เขียน



ชื่อนามสกุล : นายจิราวัฒน์ คชพร

วัน เดือน ปี เกิด : 26 กันยายน 2543

สถานที่ฝึกงาน : BLCP

งานวิจัยที่สนใจ : การควบคุมและปัญญาประดิษฐ์