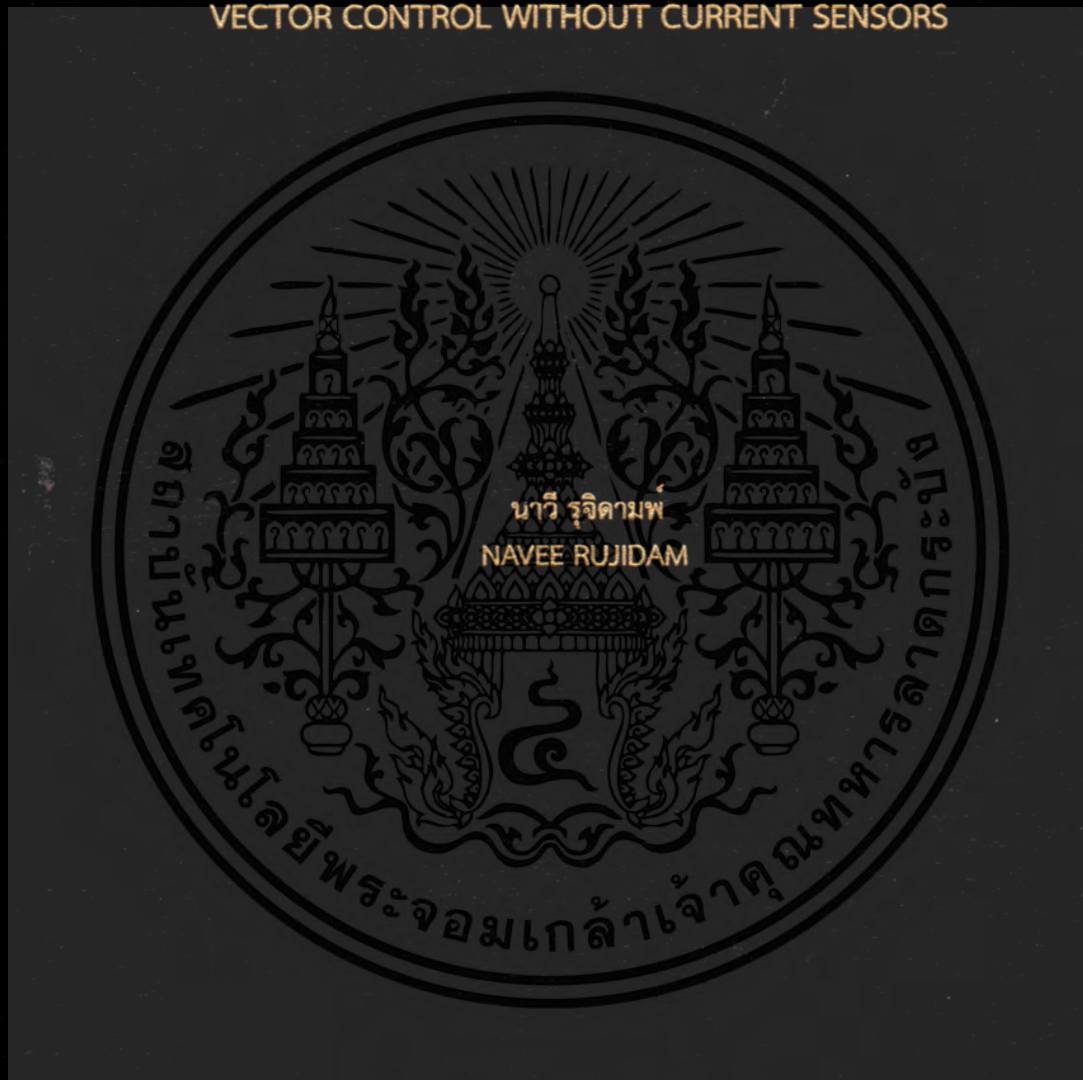


การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสโดยใช้การควบคุม
เวกเตอร์แบบเทียมที่ปราศจากตัวตรวจจับกระแส

SPEED CONTROL OF TWO-PHASE INDUCTION MOTOR USING PSEUDO
VECTOR CONTROL WITHOUT CURRENT SENSORS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2560

KMITL-2017-EN-M-020-185

การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสโดยใช้การควบคุม
เวกเตอร์แบบเทียมที่ปราศจากตัวตรวจจับกระแส

SPEED CONTROL OF TWO-PHASE INDUCTION MOTOR USING PSEUDO
VECTOR CONTROL WITHOUT CURRENT SENSORS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2560

KMITL-2017-EN-M-020-185

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SPEED CONTROL OF TWO-PHASE INDUCTION MOTOR USING PSEUDO
VECTOR CONTROL WITHOUT CURRENT SENSORS

NAVEE RUJIDAM

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2017

KMITL-2017-EN-M-020-185

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2017

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส โดยใช้การควบคุมเวกเตอร์แบบ
เทียบที่ปราศจากตัวตรวจจับกระแส

Thesis Title Speed Control of Two-Phase Induction Motor using Pseudo Vector Control
without Current Sensors

นักศึกษา นายนาวี รุจิตามพ์
รหัสประจำตัว 57601099
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

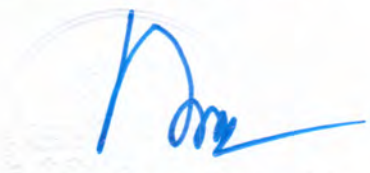
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.เฉลิมชาติ มานพ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม รศ.ดร.วิจิตร กิณเรศ
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2017-EN-M-020-185

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.เวคิน	ปิยรัตน์	
รศ.ดร.วิจิตร	กิณเรศ	
รศ.ดร.อนุวัฒน์	จางวนิชเลิศ	
ดร.ภพ	จันทร์เจริญสุข	
รศ.ดร.เฉลิมชาติ	มานพ	

วัน / เดือน/ ปี ที่สอบ วันพฤหัสบดีที่ 5 ตุลาคม พ.ศ. 2560 เวลา 10:30-12:30 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 3

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKPRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร.คมสัน มาลีสี)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 5 ตุลาคม พ.ศ. 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อยู่ภายใต้ลิขสิทธิ์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส โดยใช้การควบคุมเวกเตอร์แบบเทียบที่ปราศจากตัวตรวจจับ กระแส
นักศึกษา	นายนาวี รุจิตามพ์
รหัสประจำตัว	57601099
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2560
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.เฉลิมชาติ มานพ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์(ร่วม)	รศ.ดร.วิจิตร กิมเรศ

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอ การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสชนิด พารามิเตอร์ไม่สมมาตรโดยการเลียนแบบการควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกนโดยปราศจากตัวตรวจจับกระแสเพื่อลดความซับซ้อนของระบบควบคุม ระบบขับเคลื่อนประกอบด้วยคอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสชนิดเชื่อมต่อกรีด และอินเวอร์เตอร์ชนิดแรงดันสองเฟสสามกึ่งสำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสดังกล่าว โดยนำเสนอเป็นการจำลองผลโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink และการทดลองจริงโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ C2000 รุ่นTMS320F28335 2 ชุดสำหรับควบคุมคอนเวอร์เตอร์ฝั่งมอเตอร์ และคอนเวอร์เตอร์ฝั่งกริด จากการทดลองและจำลองผลพบว่า ผลตอบสนองของมอเตอร์ในช่วงการใส่โหลด ,ปลดโหลด และการเริ่มเดินเครื่องมีผลตอบสนองที่เร็ว เป็นที่น่าพอใจ นอกจากนี้แรงดันเชื่อมโยงไฟตรงของระบบนี้สามารถควบคุมให้คงที่ได้ที่ระดับ 570 โวลต์ โดยใช้คอนเวอร์เตอร์ตัวหน้าฝั่งเชื่อมต่อกรีดเป็นตัวควบคุมด้วยเทคนิคควบคุมกระแสด้วยแถบฮิสเตอร์รีซีคคองที่ซึ่งให้ข้อดีในแง่ของความง่ายและตอบสนองเร็ว โดยคอนเวอร์เตอร์ชนิดนี้สามารถปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าทางฝั่งกริดให้มีสัญญาณของกระแสกริดมีลักษณะเป็นสัญญาณไซน์ที่มีเฟสตรงกันกับสัญญาณแรงดันไฟฟ้าฝั่งกริดส่งผลให้ค่าตัวประกอบกำลังมีค่าใกล้เคียงกับหนึ่งและลดทอนกระแสฮาร์มอนิก และมีเฟสตรงข้ามในขณะที่เบรกคืนพลังงานย้อนกลับเข้าสู่กริด

Thesis	Speed Control of Two-Phase Induction Motor Using Pseudo Vector Control without Current Sensors
Student	Mr.Navee Rujidam
Student ID.	57601099
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2017
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Chalermchat Manop
Thesis Co Advisor	Assoc.Prof.Dr.Vijit Kinnares

ABSTRACT

This thesis proposes speed control of an asymmetrical parameter type two-phase induction motor using pseudo field oriented control without current sensors in order to reduce the complexity of a control system. The drive system consists of a single-phase grid connected converter and a two-phase three-legs voltage source inverter for driving such two-phase induction motor. The simulation using MATLAB/Simulink and the implementation by two C2000/TMS320F28335 microcontrollers to control a motor side converter and a grid side converter are given. The experimental results and the simulation results are found that the responses of motor in a step load condition, a removal load condition and a start up condition are satisfactory. Moreover, the dc link voltage of this system is able to keep voltage constant at 570 volt by the grid side converter with a fixed hysteresis band current control technique offering good advantages in terms of simplicity and fast response. In addition, this converter can improve power quality at the grid side because the grid current has nearly a sinusoidal waveform in phase with the grid voltage resulting in nearly unity grid power factor and harmonic current mitigation. Also it provides the grid current which is out of phase with respect to the grid voltage during regenerative braking.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความเมตตาและความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ. ดร.เฉลิมชาติ มานพ และอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม รศ.ดร.วิจิตร กิณเรศ ที่ได้ให้คำแนะนำและข้อคิดในแนวทางการทำวิจัยให้แก่ตัวข้าพเจ้าผู้เขียนในระยะเวลาที่ผู้เขียนได้ทำร่วมวิจัยอยู่ในห้องวิจัย ECC-405 ผู้เขียนจึงขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ สำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษาที่ให้เงินในการสนับสนุนการทำวิจัยในตลอดช่วงระยะเวลาที่ทำวิจัยตลอดมา

ขอขอบพระคุณ คุณวัชรินทร์ พรหมคุณ ที่ได้แนะนำแนวทางในการออกแบบวงจร รวมทั้งแนะนำความรู้เกี่ยวกับเทคนิคในการเก็บผลวิจัยเพื่อให้ได้ความชัดเจนในการนำเสนอผลทดสอบ และยังเป็นทีปรึกษาในการทำงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ พี่ๆ น้องๆ ทุกคน ในห้องวิจัย ECC-405 ที่ได้คอยช่วยเหลือและให้กำลังใจผู้เขียนจนประสบความสำเร็จได้ในวันนี้

ขอขอบพระคุณ บิดา และ มารดา ของข้าพเจ้าที่คอยให้ความช่วยเหลือและกำลังใจ รวมถึงคอยสนับสนุนผู้เขียนจนผู้เขียนสามารถเขียนเล่มวิทยานิพนธ์นี้ได้สำเร็จลุล่วง

นาวิ รุจิตามพ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูป.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	3
1.3 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	3
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสและมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสชนิด ไม่สมมาตร.....	5
2.1 บทนำ.....	5
2.2 มอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส.....	6
2.2.1 โครงสร้างและหลักการทำงาน.....	6
2.2.2 การวิเคราะห์สมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส.....	10
2.3 มอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสชนิดพารามิเตอร์ไม่สมมาตร.....	14
2.3.1 โครงสร้างและหลักการทำงาน.....	14
2.3.2 การวิเคราะห์สมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสชนิด พารามิเตอร์ไม่สมมาตร.....	17
2.3.3 แบบจำลองทางพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสชนิด พารามิเตอร์ไม่สมมาตร.....	21
2.4 สรุป.....	25
บทที่ 3 อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันสองเฟสสามกึ่งสำหรับการขับเคลื่อน มอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสพารามิเตอร์ไม่สมมาตร.....	26
3.1 บทนำ.....	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

3.2 หลักการมอดูเลทความกว้างพัลส์แบบสเปซเวกเตอร์ชนิดพาท	26
3.3 หลักการควบคุมมอเตอร์ด้วยการควบคุมสนามแม่เหล็กของโรเตอร์ ตามแนวแกน.....	32
3.4 หลักการควบคุมมอเตอร์ด้วยการควบคุมสนามแม่เหล็กของโรเตอร์ ตามแนวแกนโดยใช้หลักการป้อนไปข้างหน้าในกรอบอ้างอิงแกนนิ่ง	40
3.5 การวิเคราะห์ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงรอบความเร็วมอเตอร์ที่ใช้ควบคุม ความเร็วอินเวอร์เตอร์ที่ใช้วิธีการควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกน	42
3.6 หลักการควบคุมมอเตอร์ด้วยการควบคุมความเร็วแบบสเกลาร์	44
3.7 สรุป	45
บทที่ 4 คอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสชนิดเชื่อมต่อกรีด.....	46
4.1 บทนำ	46
4.2 วงจรคอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสชนิดเชื่อมต่อกรีด	46
4.2.1 โครงสร้างของวงจรคอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสชนิดเชื่อมต่อกรีด	46
4.2.2 วงจรการควบคุมคอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสชนิดเชื่อมต่อกรีด ด้วยวิธีฮิสเตอร์ซิส และ ทฤษฎีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้า	47
4.3 การวิเคราะห์ฟังก์ชันถ่ายโอนของคอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสชนิด เชื่อมต่อกรีดวงรอบของแรงดันเชื่อมโยงไฟตรง.....	59
4.4 สรุป	62
บทที่ 5 การออกแบบระบบควบคุม และวงจรตัวตรวจจับประเภทต่างๆ	63
5.1 บทนำ	63
5.2 การออกแบบระบบควบคุม.....	63
5.2.1 การออกแบบระบบควบคุมแรงดันไฟตรงเชื่อมโยง	63
5.2.2 การออกแบบระบบควบคุมความเร็วของวิธีการควบคุม สนามแม่เหล็กตามแนวแกน.....	64
5.2.3 การออกแบบระบบควบคุมความเร็วของวิธีการควบคุม สนามแม่เหล็กตามแนวแกน.....	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
5.3 การออกแบบวงจรตรวจจับ.....	66
5.3.1 การออกแบบวงจรตรวจจับกระแส	66
5.3.2 การออกแบบวงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้าที่กริด.....	67
5.3.3 การออกแบบวงจรตรวจจับแรงดันไฟตรงเชื่อมโยง.....	68
5.4 สรุป	68
บทที่ 6 การจำลองผล.....	70
6.1 บทนำ	70
6.2 การจำลองผลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสด้วยการควบคุมความเร็วรอบของ มอเตอร์ด้วยวิธีการต่างๆ.....	70
6.2.1 การจำลองผลการตอบสนองทางพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส ภายใต้เงื่อนไขของการเริ่มต้นเครื่องมอเตอร์โดยใช้วิธีการควบคุมทั้ง 3 วิธี โดยควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ให้มีค่า 1450 rpm ,1000 rpm และ500rpm ตามลำดับ.....	70
6.2.2 การจำลองผลการตอบสนองทางพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส ภายใต้เงื่อนไขของการกลับทิศทางความเร็วของมอเตอร์โดยใช้วิธีการ ควบคุมทั้ง 3 วิธี โดยควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ให้มีค่า 1450 rpm ,1000 rpm และ500 rpm ตามลำดับ.....	73
6.2.3 การจำลองผลการตอบสนองทางพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส ภายใต้เงื่อนไขของการใส่ภาระทางกลโดยใช้วิธีการควบคุมทั้ง 3 วิธี โดยควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ให้มีค่า 1450 rpm.....	78
6.2.4 การจำลองผลการตอบสนองทางพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส ภายใต้เงื่อนไขของการลดความเร็วมอเตอร์จาก 1450 rpm ไปยัง 1000 rpmโดยใช้วิธีการควบคุมทั้ง 3 วิธี.....	80

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

6.2.5 การจำลองผลที่สภาวะคงตัวของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสภายใต้เงื่อนไขของการใส่โหลดที่พิกัดที่ความเร็วมอเตอร์ 1450 rpm โดยใช้วิธีการควบคุมความเร็วด้วยวิธีการควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกนโดยปราศจากตัวตรวจจับสนามแม่เหล็ก.....	82
6.2.6 การจำลองผลของกระแสและแรงดันที่ฝั่งกริดที่สภาวะคงตัวของกรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสทำงานภายใต้เงื่อนไขของการใส่โหลดที่พิกัดที่ความเร็วมอเตอร์ 1450 rpm โดยใช้วิธีการควบคุมความเร็วด้วยวิธีการควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกนโดยปราศจากตัวตรวจจับสนามแม่เหล็ก.....	82
6.3 สรุป	83
บทที่ 7 การทดสอบการควบคุมความเร็วมอเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส.....	84
7.1 บทนำ	84
7.2 ผลการทดสอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสด้วยการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ด้วยวิธีการควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกนโดยปราศจากตัวตรวจจับสนามแม่เหล็ก.....	84
7.2.1 การทดสอบผลการตอบสนองทางพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสภายใต้เงื่อนไขของการเริ่มต้นเครื่องมอเตอร์โดยใช้วิธีการควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกนโดยปราศจากตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กโดยควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ให้มีค่า 1450 rpm ,1000 rpm และ 500rpm ตามลำดับ.....	84
7.2.2 การทดสอบผลการตอบสนองทางพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสภายใต้เงื่อนไขของการกลับทิศทางความเร็วของมอเตอร์โดยใช้วิธีการควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกนโดยปราศจากตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กโดยควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ให้มีค่า 1450 rpm ,1000 rpm และ500 rpm ตามลำดับ.....	86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

7.2.3 การทดสอบผลการตอบสนองทางพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส ภายใต้เงื่อนไขของการใส่ภาระทางกลโดยใช้วิธีการควบคุมสนามแม่เหล็ก ตามแนวแกนโดยปราศจากตัวตรวจจับกระแส โดยควบคุมความเร็วรอบ มอเตอร์ให้มีค่า 1450 rpm.....	90
7.2.4 การทดสอบผลการตอบสนองทางพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส ภายใต้เงื่อนไขของการลดความเร็วมอเตอร์จาก 1450 rpm ไปยัง 1000 rpmโดยใช้วิธีการควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกนโดยปราศจาก ตัวตรวจจับกระแส	91
7.2.5 การทดสอบผลที่สภาวะคงตัวของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสภายใต้ เงื่อนไขของการใส่โหลดที่พิกัดที่ความเร็วมอเตอร์ 1450 rpm โดย ใช้วิธีการควบคุมความเร็วด้วยวิธีการควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนว แกนโดยปราศจากตัวตรวจจับกระแส.....	92
7.2.6 การทดสอบผลของกระแสและแรงดันที่ฝั่งกริดที่สภาวะคงตัวของ กรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสทำงานภายใต้เงื่อนไขของการใส่ โหลดที่พิกัดที่ความเร็วมอเตอร์ 1450 rpm โดยใช้วิธีการควบคุม ความเร็วด้วยวิธีการควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกนโดยปราศจาก ตัวตรวจจับกระแส.....	93
7.2.7 การทดสอบผลของกระแสและแรงดันที่ฝั่งกริดที่สภาวะชั่วคราว เวลาการคืนพลังงานเนื่องมาจากการเบรก.....	95
7.3 สรุป	95
บทที่ 8 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	96
8.1 สรุปผลการวิจัย.....	96
8.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการต่อยอดงานวิจัย.....	97
เอกสารอ้างอิง.....	98

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ก. การทดสอบหาค่าพารามิเตอร์.....	101
ภาคผนวก ข. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์.....	110
ประวัติผู้เขียน.....	116



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ที่ได้นำเสนอ.....	4
2.1	มอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสกรณีมีแคชดลวดหลัก.....	8
2.2	มอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสกรณีมีขดลวดหลักและขดลวดช่วย.....	9
2.3	วงจรมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสชนิดแยกเฟส.....	9
2.4	กราฟการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสชนิดแยกเฟส.....	10
2.5	วงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสชนิดแยกเฟส.....	10
2.6	วงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสชนิดแยกเฟสอย่างง่าย.....	11
2.7	กราฟคุณลักษณะของความเร็วและแรงบิด.....	14
2.8	โครงสร้างมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสชนิดตัวเก็บประจุชนิดเริ่มหมุน และตัวเก็บประจุชนิดหมุน.....	15
2.9	โครงสร้างมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสชนิดพารามิเตอร์ไม่สมมาตร.....	15
2.10	วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสชนิดพารามิเตอร์ไม่สมมาตร.....	17
2.11	โครงสร้างมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสชนิดพารามิเตอร์ไม่สมมาตรใน กรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง.....	22
2.12	วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสชนิดพารามิเตอร์ไม่สมมาตรแกนดี.....	24
2.13	วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสชนิดพารามิเตอร์ไม่สมมาตรแกนคิว.....	24
3.1	อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันสองเฟสสองกึ่ง.....	27
3.2	อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันสองเฟสสามกึ่ง.....	27
3.3	อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันสองเฟสสี่กึ่ง.....	27
3.4	เวกเตอร์แรงดันอ้างอิงแบบเฟสไม่สมดุล.....	28
3.5	สัญญาณแรงดันที่ตกคร่อมขดลวดหลัก, ขดลวดช่วย, สัญญาณแรงดันแต่ละกึ่ง และ สัญญาณความถี่สวิตช์.....	31
3.6	ทางเดินแรงดันไฟฟ้าความถี่มูลฐานที่ตกคร่อมขดลวดหลักและขดลวดช่วย.....	32
3.7	ความสัมพันธ์ของดัชนีการมอดูเลท กับ แรงดันมูลฐานที่ตกคร่อมขดลวดหลัก และขดลวดช่วย.....	32
3.8	เวกเตอร์โตะแกรมการควบคุมสนามแม่เหล็กโรเตอร์ตามแนวแกน.....	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.9	วงจรมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสแกนตีในกรอบอ้างอิงหมุนสำหรับ FOC.....	35
3.10	วงจรมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสแกนควในกรอบอ้างอิงหมุนสำหรับ FOC.....	35
3.11	วงจรกำลังและวงจรควบคุมของการควบคุมสนามแม่เหล็กโรเตอร์ตามแนวแกน.....	39
3.12	วงจรกำลังและวงจรควบคุมของการควบคุมสนามแม่เหล็กโรเตอร์ตามแนวแกน โดยใช้หลักการป้อนไปข้างหน้าของสมการแรงดันที่สเตเตอร์กรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง.....	41
3.13	บล็อกไดอะแกรมการควบคุมของความเร็วมอเตอร์วิธีการควบคุมสนามแม่เหล็ก ตามแนวแกน.....	42
3.14	วงจรกำลังและวงจรควบคุมของการควบคุมความเร็วมอเตอร์ด้วยวิธีสเกลาร์.....	44
3.15	บล็อกไดอะแกรมการควบคุมของความเร็วมอเตอร์วิธีสเกลาร์.....	45
4.1	คอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสชนิดเชื่อมตอกริด.....	46
4.2	การเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อน กับ ขอบเขตของฮิสเตอร์รีซิส.....	47
4.3	วงจรของคอนเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมตอกริดที่มีการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า.....	48
4.4	การทำงานส่งผ่านกำลังไฟฟ้าของคอนเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมตอกริด ในโหมดวงจรเรียงกระแส.....	49
4.5	การทำงานส่งผ่านกำลังไฟฟ้าของคอนเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมตอกริด ในโหมดวงจรอินเวอร์เตอร์.....	50
4.6	การทำงานของคอนเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมตอกริดในโหมดที่ 1.....	51
4.7	การทำงานของคอนเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมตอกริดในโหมดที่ 2.....	52
4.8	การทำงานของคอนเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมตอกริดในโหมดที่ 3.....	53
4.9	การทำงานของคอนเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมตอกริดในโหมดที่ 4.....	54
4.10	การทำงานของคอนเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมตอกริดในโหมดที่ 5.....	55
4.11	การทำงานของคอนเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมตอกริดในโหมดที่ 6.....	56
4.12	การทำงานของคอนเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมตอกริดในโหมดที่ 7.....	57
4.13	การทำงานของคอนเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมตอกริดในโหมดที่ 8.....	58
4.14	วงจรกำลัง และวงจรควบคุมของคอนเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมตอกริด.....	59
4.15	บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแรงดันไฟตรงเชื่อมโยง.....	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.1	แผนภาพโบเตสำหรับการออกแบบระบบควบคุมแรงดันไฟตรงเชื่อมโยงของคอนเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกริด.....64
5.2	แผนภาพโบเตสำหรับการออกแบบระบบควบคุมความเร็วด้วยวิธีการควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกนของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสชนิดพารามิเตอร์ไม่สมมาตร.....65
5.3	แผนภาพโบเตสำหรับการออกแบบระบบควบคุมความเร็วด้วยวิธีสเกลาร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสชนิดพารามิเตอร์ไม่สมมาตร.....66
5.4	วงจรถวายจับกระแส.....67
5.5	วงจรถวายจับแรงดันกริด.....67
5.6	วงจรถวายจับแรงดันไฟตรงเชื่อมโยง.....68
6.1	ความเร็วของการเริ่มต้นเครื่องมอเตอร์โดยควบคุมความเร็วมอเตอร์ที่ 1450 rpm โดยใช้วิธีการควบคุมต่างๆ.....70
6.2	แรงบิดของการเริ่มต้นเครื่องมอเตอร์โดยควบคุมความเร็วมอเตอร์ที่ 1450 rpm โดยใช้วิธีควบคุมต่างๆ.....71
6.3	ความเร็วของการเริ่มต้นเครื่องมอเตอร์โดยควบคุมความเร็วมอเตอร์ที่ 1000 rpm โดยใช้วิธีการควบคุมต่างๆ.....71
6.4	แรงบิดของการเริ่มต้นเครื่องมอเตอร์โดยควบคุมความเร็วมอเตอร์ที่ 1000 rpm โดยใช้วิธีควบคุมต่างๆ.....72
6.5	ความเร็วของการเริ่มต้นเครื่องมอเตอร์โดยควบคุมความเร็วมอเตอร์ที่ 500 rpm โดยใช้วิธีการควบคุมต่างๆ.....72
6.6	แรงบิดของการเริ่มต้นเครื่องมอเตอร์โดยควบคุมความเร็วมอเตอร์ที่ 500 rpm โดยใช้วิธีควบคุมต่างๆ.....73
6.7	ความเร็วของมอเตอร์โดยที่ควบคุมความเร็วมอเตอร์ที่ 1450 rpm ในเงื่อนไขของการกลับมาทิศทาง ซึ่งใช้วิธีการควบคุมต่างๆ.....74

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.8	แรงบิดแม่เหล็กของมอเตอร์โดยที่ควบคุมความเร็วมอเตอร์ที่ 1450 rpm ในเงื่อนไขของการกลับมาทิศทาง ซึ่งใช้วิธีการควบคุมต่างๆ.....74
6.9	แรงดันเชื่อมโยงไฟตรงที่จ่ายให้อินเวอร์เตอร์สำหรับควบคุมมอเตอร์ที่ความเร็ว 1450 rpm ในเงื่อนไขของการกลับมาทิศทาง ซึ่งใช้วิธีการควบคุมต่างๆ.....75
6.10	ความเร็วของมอเตอร์โดยที่ควบคุมความเร็วมอเตอร์ที่ 1000 rpm ในเงื่อนไขของการกลับมาทิศทาง ซึ่งใช้วิธีการควบคุมต่างๆ.....75
6.11	แรงบิดแม่เหล็กของมอเตอร์โดยที่ควบคุมความเร็วมอเตอร์ที่ 1000 rpm ในเงื่อนไขของการกลับมาทิศทาง ซึ่งใช้วิธีการควบคุมต่างๆ.....76
6.12	แรงดันเชื่อมโยงไฟตรงที่จ่ายให้อินเวอร์เตอร์สำหรับควบคุมมอเตอร์ที่ความเร็ว 1000 rpm ในเงื่อนไขของการกลับมาทิศทาง ซึ่งใช้วิธีการควบคุมต่างๆ.....76
6.13	ความเร็วของมอเตอร์โดยที่ควบคุมความเร็วมอเตอร์ที่ 500 rpm ในเงื่อนไขของการกลับมาทิศทาง ซึ่งใช้วิธีการควบคุมต่างๆ.....77
6.14	แรงบิดแม่เหล็กของมอเตอร์โดยที่ควบคุมความเร็วมอเตอร์ที่ 500 rpm ในเงื่อนไขของการกลับมาทิศทาง ซึ่งใช้วิธีการควบคุมต่างๆ.....77
6.15	แรงดันเชื่อมโยงไฟตรงที่จ่ายให้อินเวอร์เตอร์สำหรับควบคุมมอเตอร์ที่ความเร็ว 500 rpm ในเงื่อนไขของการกลับมาทิศทาง ซึ่งใช้วิธีการควบคุมต่างๆ.....78
6.16	ความเร็วของมอเตอร์โดยที่ควบคุมความเร็วมอเตอร์ที่ 1450 rpm ในเงื่อนไขของการใส่ภาระทางกล ซึ่งใช้วิธีการควบคุมต่างๆ.....79
6.17	แรงบิดแม่เหล็กของมอเตอร์โดยที่ควบคุมความเร็วมอเตอร์ที่ 1450 rpm ในเงื่อนไขของการใส่ภาระทางกล ซึ่งใช้วิธีการควบคุมต่างๆ.....79
6.18	แรงดันเชื่อมโยงไฟตรงที่จ่ายให้อินเวอร์เตอร์สำหรับควบคุมความเร็วมอเตอร์ที่ 1450 rpm ในเงื่อนไขของการใส่ภาระทางกล ซึ่งใช้วิธีการควบคุมต่างๆ.....80
6.19	ความเร็วของมอเตอร์ ในเงื่อนไขของการลดความเร็วจาก 1450 rpm ไปยัง 1000 rpm ซึ่งใช้วิธีควบคุมต่างๆ.....81
6.20	แรงบิดแม่เหล็กของมอเตอร์ ในเงื่อนไขของการลดความเร็วจาก 1450 rpm ไปยัง 1000 rpm ซึ่งใช้วิธีควบคุมต่างๆ.....81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.21	แรงดันขดลวดหลัก ,แรงดันขดลวดช่วย ,กระแสขดลวดหลัก และกระแสของขดลวดช่วย.....82
6.22	แรงดันไฟฟ้าที่กริด และกระแสไฟฟ้าที่กริด.....83
7.1	ความเร็วและแรงบิดแม่เหล็กของการเริ่มต้นเดินเครื่องมอเตอร์โดย ควบคุมความเร็วมอเตอร์ที่ 1450 rpm โดยใช้วิธีการควบคุมสนาม แม่เหล็กตามแนวแกนโดยปราศจากตัวตรวจจับกระแส.....85
7.2	ความเร็วและแรงบิดแม่เหล็กของการเริ่มต้นเดินเครื่องมอเตอร์โดย ควบคุมความเร็วมอเตอร์ที่ 1000 rpm โดยใช้วิธีการควบคุมสนาม แม่เหล็กตามแนวแกนโดยปราศจากตัวตรวจจับกระแส.....85
7.3	ความเร็วและแรงบิดแม่เหล็กของการเริ่มต้นเดินเครื่องมอเตอร์โดย ควบคุมความเร็วมอเตอร์ที่ 500 rpm โดยใช้วิธีการควบคุมสนาม แม่เหล็กตามแนวแกนโดยปราศจากตัวตรวจจับกระแส.....86
7.4	ความเร็วและแรงบิดแม่เหล็กของมอเตอร์โดยที่ควบคุมความเร็ว มอเตอร์ที่ 1450 rpm ในเงื่อนไขของการกลับทิศทาง ซึ่งใช้วิธีการ ควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกนโดยปราศจากตัวตรวจจับกระแส.....87
7.5	แรงดันเชื่อมโยงไฟตรงที่จ่ายให้อินเวอร์เตอร์สำหรับควบคุมมอเตอร์ ที่ความเร็ว 1450 rpm ในเงื่อนไขของการกลับทิศทาง ซึ่งใช้วิธีการ ควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกนโดยปราศจากตัวตรวจจับกระแส.....87
7.6	ความเร็วและแรงบิดแม่เหล็กของมอเตอร์โดยที่ควบคุมความเร็ว มอเตอร์ที่ 1000 rpm ในเงื่อนไขของการกลับทิศทาง ซึ่งใช้วิธีการ ควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกนโดยปราศจากตัวตรวจจับกระแส.....88
7.7	แรงดันเชื่อมโยงไฟตรงที่จ่ายให้อินเวอร์เตอร์สำหรับควบคุมมอเตอร์ ที่ความเร็ว 1000 rpm ในเงื่อนไขของการกลับทิศทาง ซึ่งใช้วิธีการ ควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกนโดยปราศจากตัวตรวจจับกระแส.....88

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.8	ความเร็วและแรงบิดแม่เหล็กของมอเตอร์โดยที่ควบคุมความเร็ว มอเตอร์ที่ 500 rpm ในเงื่อนไขของการกลับทิศทาง ซึ่งใช้วิธีการ ควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกนโดยปราศจากตัวตรวจจับกระแส.....89
7.9	แรงดันเชื่อมโยงไฟตรงที่จ่ายให้อินเวอร์เตอร์สำหรับควบคุมมอเตอร์ ที่ความเร็ว 1000 rpm ในเงื่อนไขของการกลับทิศทาง ซึ่งใช้วิธีการ ควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกนโดยปราศจากตัวตรวจจับกระแส.....89
7.10	ความเร็วและแรงบิดแม่เหล็กของมอเตอร์โดยที่ควบคุมความเร็วมอเตอร์ที่ 1450 rpm ในเงื่อนไขของการใส่โหลด และปลดโหลด ซึ่งใช้วิธีการควบคุม สนามแม่เหล็กตามแนวแกนโดยปราศจากตัวตรวจจับกระแส.....90
7.11	แรงดันเชื่อมโยงไฟตรงที่จ่ายให้อินเวอร์เตอร์สำหรับควบคุมมอเตอร์ที่ความเร็ว 1450 rpm ในเงื่อนไขของการใส่โหลดและปลดโหลดที่ 10 Nm ซึ่งใช้วิธีการ ควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกนโดยปราศจากตัวตรวจจับกระแส.....91
7.12	ความเร็วและแรงบิดแม่เหล็กของมอเตอร์ ในเงื่อนไขของการลดความเร็วจาก 1450 rpm ไปยัง 1000 rpm ซึ่งใช้วิธีการควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกน โดยปราศจากตัวตรวจจับกระแส.....92
7.13	แรงดันขดลวดหลัก ,แรงดันขดลวดช่วย ,กระแสของขดลวดหลัก และกระแสของขดลวดช่วย.....93
7.14	แรงดันไฟฟ้าที่กริด และกระแสไฟฟ้าที่กริด.....93
7.15	สเปกตรัมฮาร์มอนิกของกระแสไฟฟ้าที่กริด.....94
7.16	แรงดันไฟฟ้าที่กริด และกระแสไฟฟ้าที่กริดช่วงมอเตอร์เบรก.....95

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสได้รับความนิยมใช้อย่างแพร่หลายในภาคครัวเรือนและภาคอุตสาหกรรมที่ต้องการกำลังงานที่ต่ำและขนาดไม่ใหญ่มาก เช่น เครื่องซักผ้า, เครื่องดูดฝุ่น, เครื่องเป่าผม, พัดลม, ตู้เย็น, เครื่องเป่าลม, ปั๊มน้ำ และเครื่องปรับอากาศ เป็นต้น ในอดีตที่ผ่านมาการปรับความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสใช้วิธีการปรับความเร็วของมอเตอร์ด้วยระบบทางกล โดยใช้เกียร์ทดหรือชุดสายพานในการปรับความเร็วรอบมอเตอร์ซึ่งการควบคุมความเร็วด้วยวิธีนี้ไม่สามารถควบคุมการใช้พลังงานได้อย่างเหมาะสมนอกจากนี้เครื่องจักรค่อนข้างใหญ่ ทำให้สิ้นเปลืองพลังงานมาก เป็นเหตุให้เกิดการพัฒนาชุดอินเวอร์เตอร์เพื่อปรับความเร็วรอบมอเตอร์ ให้มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้นและประหยัดพลังงาน โดยทำการถอดตัวเก็บประจุชนิดเริ่มหมุนและตัวเก็บประจุชนิดหมุนออกจากมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส หลังจากนั้นทำการดัดแปลงแยกขดลวดและขดลวดช่วยออกโดยใช้อินเวอร์เตอร์ชนิดแรงดันสองเฟสสามกึ่งจ่ายแรงดันให้ขดลวดทั้งสองชุดให้ขดลวดทั้งสองมีมุมต่างเฟสกัน 90 องศาทางไฟฟ้า โดยเรียกชื่อมอเตอร์นี้ใหม่ว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสชนิดพาราเมเตอร์ที่ไม่สมมาตรตามลักษณะพฤติกรรมของแหล่งจ่ายแรงดันที่จ่ายแรงดันให้กับมอเตอร์ชนิดนี้

ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกนโดยใช้หลักการป้อนไปข้างหน้าซึ่งคำนวณจากสมการแรงดันไฟฟ้าขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสชนิดพาราเมเตอร์ที่ไม่สมมาตรที่กรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง โดยมีการศึกษาค้นคว้าและรวบรวมข้อมูลงานวิจัยต่างๆในอดีตดังนี้

P.C. Krause (ค.ศ.1965) [1] ได้นำเสนอสมการพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสชนิดพาราเมเตอร์ที่ไม่สมมาตรและสมการพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสชนิดต่างๆโดยนำสมการพลวัตต่างๆของกรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสมาใช้จำลองผลผ่านโปรแกรมโดยแสดงผลตอบสนองของแรงบิดแม่เหล็ก, ความเร็ว, แรงดันและ กระแสพบว่าสามารถแสดงผลตอบสนองทางพลวัตได้ดี

Omar Stihl และ Boon – Teck Ooi (ค.ศ.1988) [2] ได้ทำวิจัยเกี่ยวกับคอนเวอเตอร์ฟูลบริดจ์หนึ่งเฟสชนิดเชื่อมต่อกิตโดยใช้หลักการควบคุมแรงดันเชื่อมโยงไฟตรงให้คงที่ด้วยตัวควบคุมพีไอ และใช้ตัวควบคุมชนิดฮิสเตอรีซิสควบคุมกระแส พบว่าสามารถควบคุมให้กระแสมีลักษณะเหมือนลูกคลื่นสัญญาณไซน์ที่มีเฟสตรงกันกับสัญญาณแรงดันกริด และ ยังสามารถควบคุมแรงดันเชื่อมโยงไฟตรงได้คงที่ตามที่ผู้วิจัยต้องการได้

D.G. Holmes และ A. Kotsopoulos (ค.ศ.1993) [3] ได้ทำการดัดแปลงมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสชนิดตัวเก็บประจุชนิดหมุนเปลี่ยนมาเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสชนิดพารามิเตอร์ที่ไม่สมมาตรโดยใช้อินเวอร์เตอร์ชนิดแรงจ่ายแรงดันสองเฟสสามกึ่งเป็นตัวจ่ายแรงดันให้ขดลวดหลักและขดลวดช่วยมีมุมต่างเฟสกัน 90 องศาทางไฟฟ้า พบว่าแรงดันขดลวดช่วยต้องมีค่ามากกว่าขดลวดหลักเสมอเป็นไปตามอัตราส่วนขดลวดช่วยต่อขดลวดหลัก เพื่อลดแรงบิดระลอก (Torque ripple) โดยทำให้ลดการกระเพื่อมของความเร็ว ,เพิ่มแรงบิดช่วงเริ่มหมุน และลดผลของเสียงรบกวนโดยอินเวอร์เตอร์ใช้หลักการสวิตช์แบบ Naturally samples sine-triangle modulation

M.B. de Rossiter Correa, C.B. Jacobina, A.M.N. Lima และ E.R.C. da Silva (ค.ศ.2000) [4] ได้ทำการวิจัยเรื่องการควบคุมสนามแม่เหล็กโรเตอร์ตามแนวแกนของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสโดยใช้อินเวอร์เตอร์ชนิดแรงดันสองเฟสสองกึ่งจ่ายให้มอเตอร์ซึ่งทำการจ่ายแยกขดลวดหลักกับขดลวดช่วย โดยมีจุดรวมอยู่ที่จุดกึ่งกลางของบัสแรงดันเชื่อมโยงไฟตรงโดยนำเสนอเปรียบเทียบกันระหว่างการควบคุมกระแสเดเตอร์ที่กรอบอ่างหมุนกับการควบคุมกระแสเดเตอร์ที่กรอบอ่างอิงหยุดนิ่งพบว่าการควบคุมกระแสเดเตอร์ที่กรอบอ่างอิงหยุดนิ่งมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าการควบคุมกระแสเดเตอร์ที่กรอบอ่างอิงหยุดนิ่งโดยสังเกตจากค่าความคลาดเคลื่อนของกระแสพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนของกระแสเดเตอร์ที่กรอบอ่างอิงหยุดนิ่งมีค่าต่ำกว่าค่าความคลาดเคลื่อนของกระแสเดเตอร์ที่กรอบอ่างอิงหยุดนิ่ง

U.A. Miranda, L.G.B. Rolim และ M. Aredes (ค.ศ.2005) [5] ได้นำเสนอคอนเวอร์เตอร์ฟูลบริดจ์หนึ่งเฟสชนิดเชื่อมต่อกิตโดยใช้วิธีการควบคุมแบบเวกเตอร์ระบบประกอบด้วยตัวควบคุมพีไอที่ทำหน้าที่ควบคุมแรงดันเชื่อมโยงไฟตรง และ ตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมกระแสกิตแกนดีและคิวที่กรอบอ่างอิงหยุดนิ่ง โดยพบว่าระบบสามารถควบคุมแรงดันเชื่อมโยงไฟตรงให้คงที่ได้ และกระแสที่กิตมีเฟสตรงกันกับแรงดันไฟฟ้าที่กิต ทำให้มีตัวประกอบกำลังมีค่าใกล้หนึ่ง

C. Charumit และ V. Kinnares (ค.ศ.2009) [6] ได้นำเสนอวิธีการมอดูเลทความกว้างพัลส์แบบสเปซเวกเตอร์แบบคลื่นพาร์ซชนิดแรงดันไม่สมดุลแบบแอนาล็อก กับ แบบดิจิทัล สำหรับอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันสองเฟสสามกึ่ง โดยพบว่าสามารถทำให้แรงดันขดลวดหลักกับแรงดันขดลวดช่วยมีมุมต่างเฟสกัน 90 องศาทางไฟฟ้า และผลที่ได้ช่วยเพิ่มสมรรถนะให้กับมอเตอร์ เนื่องจากลดแรงบิดกระเพื่อมได้ดีกว่าวิธีการจ่ายแรงดันที่สมดุล

W. Piyarat และ V. Kinnares (ค.ศ.2010) [7] ได้ทำการวิจัยเรื่องการประเมินสมรรถนะและการควบคุมความเร็วสลิปของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสชนิดพารามิเตอร์ไม่สมมาตรโดยใช้อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันสองเฟสสามกึ่งพบว่าระบบการขับเคลื่อนที่ได้นำเสนอสามารถควบคุมความเร็วได้ตามที่ต้องการในกรณีของการใส่ภาระทางกล,ลดความเร็วและ การกลับทิศทางการหมุน

1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

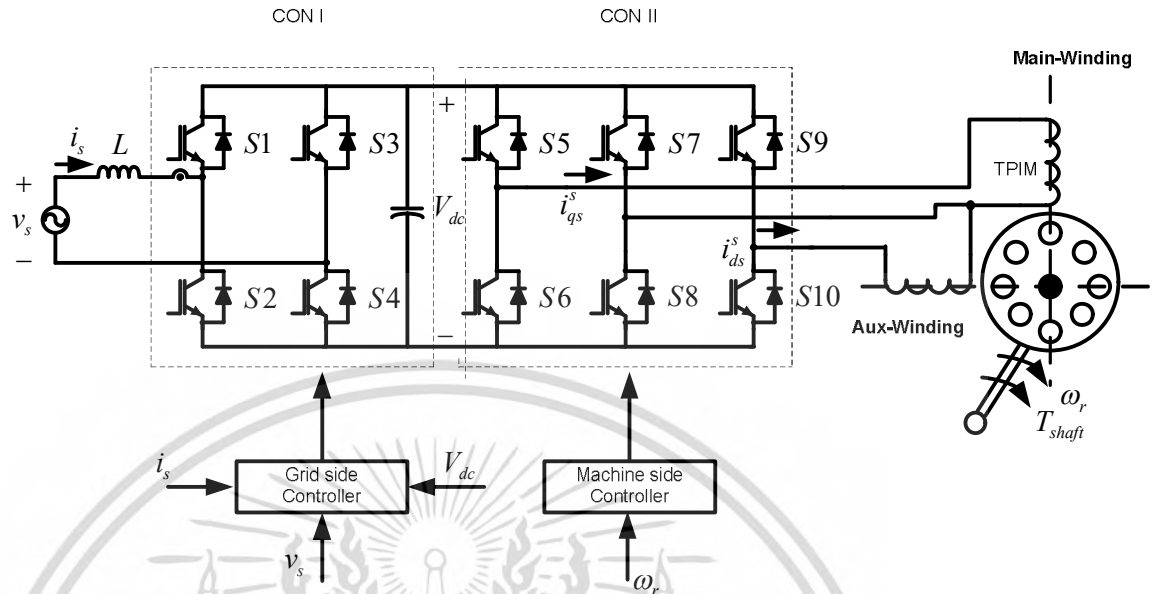
ต้องการศึกษาและทดสอบการควบคุมความเร็วมอเตอร์โดยวัตถุประสงค์เพื่อต้องการพัฒนาสมรรถนะของการขับเคลื่อนที่ดีขึ้นจากการขับเคลื่อนด้วยวิธีสเกลาร์ที่ได้ผลตอบสนองแรงบิดแม่เหล็กและความเร็วที่แม่นยำเป็นวิธีการควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกนแต่เนื่องจากต้องการลดความยุ่งยากและความซับซ้อนจึงได้ทำการลดตัวควบคุมป้อนกลับกระแสและตัวตรวจจับกระแสจึงเป็นที่มาของการควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกนโดยปราศจากตัวตรวจจับกระแสโดยวิธีการนำเสนอมานี้เหมาะกับการที่ต้องการผลตอบสนองที่รวดเร็วแต่ความถูกต้องอาจจะไม่ต้องการมากเท่ากับการควบคุมความเร็วด้วยสนามแม่เหล็กตามแนวแกน

1.3 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ใช้หลักการวิเคราะห์สมการพลวัตทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสและหลักการขับเคลื่อนมอเตอร์เช่น การควบคุมสเกลาร์ ,การควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกน และการควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกนโดยปราศจากตัวตรวจจับกระแส โดยระบบที่นำเสนอมีคอนเวอร์เตอร์ตัวหน้าที่ปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าของกริด และสามารถควบคุมแรงดันเชื่อมโยงไฟตรงให้คงที่ได้ โดยแนวคิดได้มาจากบทความ [1] ,[6] ,[8] ,[13] ,[15] ,[16] ,[19] และ[21]

1.4 ขอบเขตการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสโดยในที่นี้เลือกใช้อินเวอร์เตอร์ชนิดสองเฟสสามกึ่งมาขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสโดยการสร้างแรงดันเชื่อมโยงไฟตรงในที่นี้ได้จากการสร้างของคอนเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อกกริดที่สามารถควบคุมแรงดันเชื่อมโยงไฟตรงให้คงที่ที่ระดับแรงดัน 570 V โดยคอนเวอร์เตอร์ชนิดนี้สามารถคืนพลังงานกลับสู่ระบบได้ในช่วงของการเบรคหรือกลับทิศทางการหมุนของมอเตอร์ และยังสามารถปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้าฝั่งกริดได้โดยลักษณะวงจรของระบบรวมแสดงดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 ระบบการขับเคลื่อนมอเตอร์ที่นำเสนอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทฤษฎีมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสและมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส ชนิดไม่สมมาตร

2.1 บทนำ

ในบทนี้กล่าวถึง ทฤษฎีสนามแม่เหล็กหมุนคู่ (Double Revolving Field Theory) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ การเกิดสนามแม่เหล็กหมุน โดยสองทฤษฎีข้างต้นเป็นทฤษฎีที่อธิบายถึงความสมมาตรและไม่สมมาตรของมอเตอร์ นำไปสู่การสร้างสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการสร้างวงจรมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส และ มอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสชนิดพารามิเตอร์ไม่สมมาตร วงจรมูลทั้งสองแบบใช้ในการหาค่ากำลังไฟฟ้า, แรงบิดแม่เหล็ก, ประสิทธิภาพ ในสภาวะคงตัว และ การควบคุมมอเตอร์ที่ต้องการใช้ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ในการควบคุม

ในปัจจุบันมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสนิยมใช้งานในงานที่ต้องการกำลังงานที่ต่ำ และ ความเร็วรอบคงที่ มอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสสามารถแบ่งออกได้เป็น 5 ชนิด [8]

- 1.) มอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสชนิดแยกเฟส (Split Phase Induction Motor)
- 2.) มอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสชนิดเริ่มต้นหมุนด้วยตัวเก็บประจุ (Capacitor Start Induction Motor)
- 3.) มอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสชนิดหมุนด้วยตัวเก็บประจุ (Capacitor Run Induction Motor)
- 4.) มอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสชนิดเริ่มต้นหมุนด้วยตัวเก็บประจุ และ หมุนด้วยตัวเก็บประจุ (Capacitor Start and Capacitor Run Induction Motor)
- 5.) มอเตอร์แบบบังขั้ว (Shaded Pole Induction Motor)

โดยที่งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสชนิดเริ่มต้นหมุนด้วยตัวเก็บประจุ และ หมุนด้วยตัวเก็บประจุ (Capacitor Start and Capacitor Run) มาใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ แต่เนื่องจากต้องการเพิ่มสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสที่ใช้ จึงดำเนินการปรับแต่งมอเตอร์โดยถอดตัวเก็บประจุทั้งสองชนิดออกและ ทำการจ่ายแรงดันสองเฟสที่มีมุมต่างเฟสกัน 90 องศาทางไฟฟ้า ไปยังขดลวดหลัก (Main - Winding) และ ขดลวดช่วย (Aux Winding) ของมอเตอร์ โดยมอเตอร์ชนิดนี้มีชื่อเรียกว่า มอเตอร์สองเฟสชนิดพารามิเตอร์ไม่สมมาตร

2.2 มอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส

ในที่นี้จะกล่าวถึงในกรณีของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดแยกเฟส โดยใช้ ทฤษฎีสนามแม่เหล็กหมุนคู่ มาประกอบใช้วิเคราะห์เขียนสมการคณิตศาสตร์เพื่อนำไปสร้างวงจรมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส

2.2.1 โครงสร้างและหลักการทำงาน

สมการแรงเคลื่อนแม่เหล็กมีที่มาจากกฎของแอมแปร์ (Ampere 's law) โดยกฎของแอมแปร์ได้นิยามไว้ว่า ค่าปริมาณกระแสทั้งหมดมีค่าเท่ากับสนามแม่เหล็กที่เกิด (\vec{H}) ในแนวรอบวงปิด ($d\vec{l}$) โดยนำมาใช้ประกอบการอธิบายทฤษฎีสนามแม่เหล็กหมุนคู่ [8] - [12] เป็นที่มาของสมการที่ (2.1)

$$Ni = \oint \vec{H} \cdot d\vec{l} \quad (2.1)$$

ปริมาณกระแสทั้งหมดที่เกิดขึ้นคือค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (\mathcal{S}) ซึ่งเกิดจากจำนวนขดลวดคูณกับปริมาณกระแส มีหน่วยเป็น A*turn จากสมการที่ (2.1) สามารถเขียนสมการแรงเคลื่อนแม่เหล็กของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสกรณีขดลวดพันแบบกระจายได้ดังสมการที่ (2.2)

$$\mathcal{S}_{main,1} = \frac{4}{\pi} \left(\frac{k_w N_{ph}}{P} \right) i \cos \theta_{e1} \quad (2.2)$$

โดยที่

k_w คือ ผลของตัวประกอบขดลวดที่ต่ออนุกรมต่อเฟส

N_{ph} คือ จำนวนขดลวดที่ต่ออนุกรมต่อเฟส

P คือ จำนวนขั้วแม่เหล็ก

θ_{e1} คือ มุมทางไฟฟ้าของความถี่มูลฐาน

$\mathcal{S}_{main,1}$ คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าความถี่มูลฐานของขดลวดหลัก

เมื่อกำหนดให้กระแสที่ไหลในขดลวด i มีค่าเท่ากับ

$$i = I_{max} \cos \omega t \quad (2.3)$$

แทนค่าสมการที่ (2.3) ลงในสมการที่ (2.2)

$$\mathfrak{S}_{main,1} = \frac{4}{\pi} \left(\frac{k_w N_{ph} I_{max}}{P} \right) \cos \omega t \cos \theta_{e1} \quad (2.4)$$

ดังนั้น

$$\mathfrak{S}_{main,max} = \frac{4}{\pi} \left(\frac{k_w N_{ph} I_{max}}{P} \right) \quad (2.5)$$

เขียนลดรูปได้ดังนี้

$$\mathfrak{S}_{main,1} = \mathfrak{S}_{main,max} \cos \omega t \cos \theta_{e1} \quad (2.6)$$

$$\mathfrak{S}_{main,1} = \frac{\mathfrak{S}_{main,max}}{2} [\cos(\theta_{e1} - \omega t) + \cos(\theta_{e1} + \omega t)] \quad (2.7)$$

จากสมการที่ (2.7) พบว่า แรงเคลื่อนแม่เหล็กกรณีของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสมีองค์ประกอบของการเคลื่อนที่ในทิศทางบวกและ ในทิศทางลบ ดังสมการที่ (2.8) – (2.9)

$$\mathfrak{S}_{main,1}^+ = \frac{\mathfrak{S}_{main,max}}{2} \cos(\theta_{e1} - \omega t) \quad (2.8)$$

$$\mathfrak{S}_{main,1}^- = \frac{\mathfrak{S}_{main,max}}{2} \cos(\theta_{e1} + \omega t) \quad (2.9)$$

จากสมการที่ (2.8) – (2.9) กล่าวได้ว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสมีสนามแม่เหล็กหมุนไปทางข้างหน้าและ สนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหลัง ส่งผลให้เกิดค่าสลิปด้านบวก และ สลิปด้านลบ ในสมการที่ (2.10) – (2.11)

$$s_f = \frac{n_{syn} - n_r}{n_{syn}} = s \quad (2.10)$$

$$s_b = \frac{n_{syn} - (-n_r)}{n_{syn}}$$

$$s_b = \frac{2n_{syn} - n_{syn} + n_r}{n_{syn}} = 2 - s \quad (2.11)$$

โดยที่

s_f คือ สลิปด้านบวก

s_b คือ สลิปด้านลบ

n_{syn} คือ ความเร็วซิงโครนัส

n_r คือ ความเร็วโรเตอร์

มอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสกรณีมีขดลวดหลักเพียงขดเดียวพบว่าเส้นแรงแม่เหล็กสเตเตอร์มีทิศทางขนานกับเส้นแรงแม่เหล็กโรเตอร์ ดังรูปที่ 2.1 ค่าแรงบิดเหนี่ยวนำของมอเตอร์ [11] หาได้จากสมการที่ (2.12) แรงบิดที่หาได้มีค่าเท่ากับศูนย์ส่งผลให้มอเตอร์ไม่หมุน จึงทำการเพิ่มขดลวดช่วยให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสเพื่อช่วยให้มอเตอร์มีค่าแรงบิดเหนี่ยวนำที่เริ่มหมุนได้ดังรูปที่ 2.2 เนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กของโรเตอร์และเส้นแรงแม่เหล็กของสเตเตอร์ไม่ได้มีทิศทางที่ขนานกัน ส่งผลให้แรงบิดไม่เป็นศูนย์

$$T_e = k\phi_R \times \phi_S \quad (2.12)$$

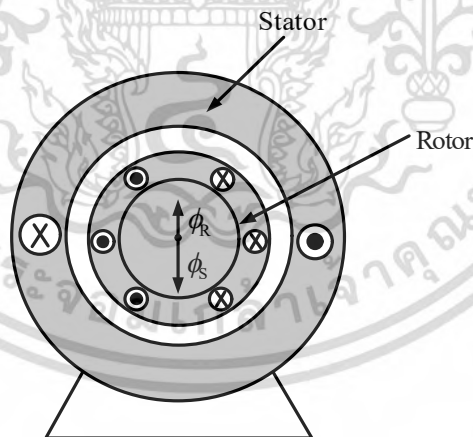
โดยที่

T_e คือ แรงบิดแม่เหล็ก

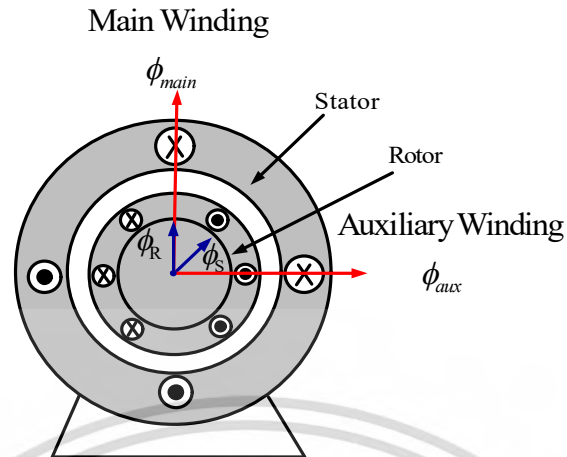
ϕ_R คือ เส้นแรงแม่เหล็กโรเตอร์

ϕ_S คือ เส้นแรงแม่เหล็กสเตเตอร์

k คือ ค่าคงที่

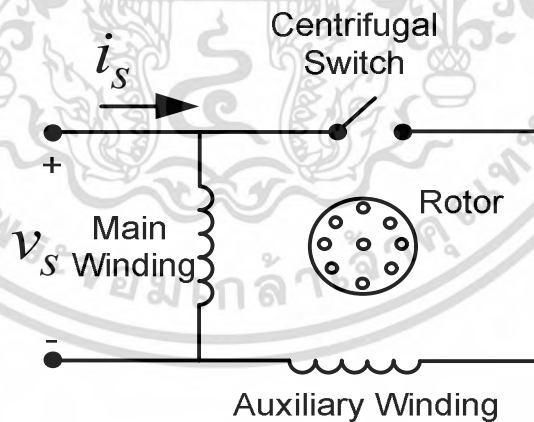


รูปที่ 2.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสกรณีมีแค่ขดลวดหลัก



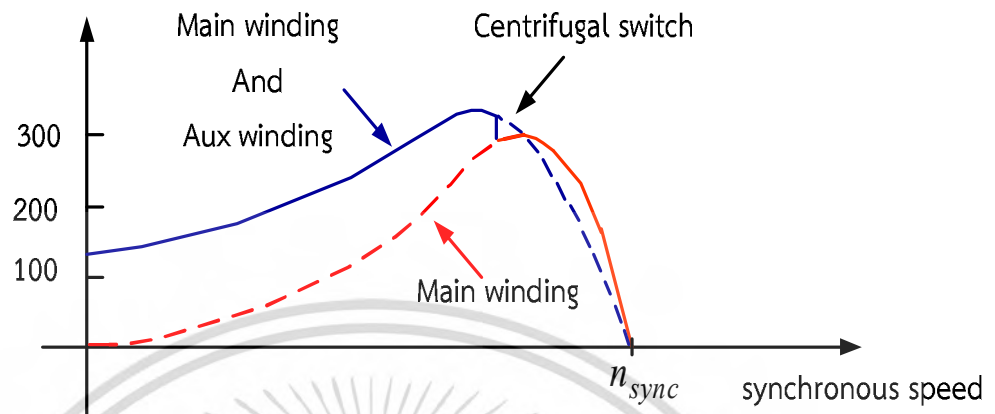
รูปที่ 2.2 มอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสกรณีมีขดลวดหลักและขดลวดช่วย

รูปที่ 2.3 และ 2.4 แสดงถึงวงจรของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสชนิดแยกเฟส และ กราฟการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสชนิดแยกเฟส [11] โดยกราฟอธิบายถึงการทำงานโดยเส้นสีน้ำเงินเป็นการทำงานช่วงเริ่มเนื่องจากมอเตอร์มีขดลวดขดเดียวจะไม่สามารถเริ่มหมุนออกตัวได้ โดยสวิตช์แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางอยู่ที่ตำแหน่งปิดวงจร พอถึงช่วงความเร็วประมาณ 75 % [12] ของพิกัดความเร็วซิงโครนัส สวิตช์แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางจะทำการเปิดวงจรเหลือเพียงขดลวดหลักกราฟการทำงานเปลี่ยนมาเป็นกราฟเส้นประสีแดงเนื่องจากการทำงานของขดลวดหลักเพียงขดเดียว



รูปที่ 2.3 วงจรมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสชนิดแยกเฟส

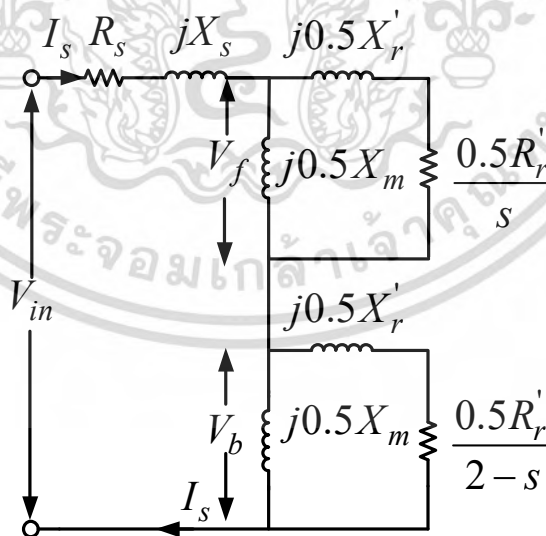
Percent torque (%)



รูปที่ 2.4 กราฟการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสชนิดแยกเฟส

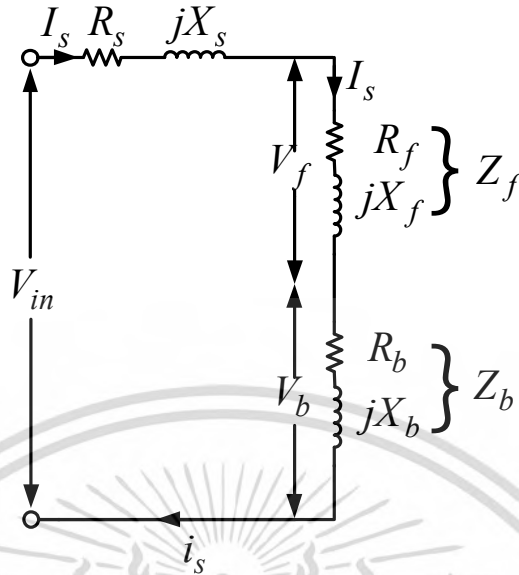
2.2.2 การวิเคราะห์สมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส

จากทฤษฎีสนามแม่เหล็กหมุนคู่ทำให้พบว่าจะเกิดแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เกิดจากการหมุนไปข้างหน้าและข้างหลังซึ่งสามารถนำหลักการนี้มาใช้วิเคราะห์และสร้างวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสชนิดแยกเฟสได้ดังรูปที่ 2.5 และ 2.6



รูปที่ 2.5 วงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสชนิดแยกเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 วงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสชนิดแยกเฟสอย่างง่าย

เมื่อกำหนดให้

- R_s คือ ความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์
- R_r' คือ ความต้านทานของขดลวดโรเตอร์ที่ถ่ายโอนไปยังฝั่งขดลวดสเตเตอร์
- R_f คือ ความต้านทานของขดลวดโรเตอร์เนื่องจากสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้า
- R_b คือ ความต้านทานของขดลวดโรเตอร์เนื่องจากสนามแม่เหล็กหมุนถอยหลัง
- X_s คือ รีแอกแตนซ์ของขดลวดสเตเตอร์
- X_m คือ รีแอกแตนซ์ทางแม่เหล็ก
- X_r' คือ รีแอกแตนซ์ของขดลวดโรเตอร์ที่ถ่ายโอนไปยังฝั่งขดลวดสเตเตอร์
- X_f คือ รีแอกแตนซ์ของขดลวดโรเตอร์เนื่องจากสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้า
- X_b คือ รีแอกแตนซ์ของขดลวดโรเตอร์เนื่องจากสนามแม่เหล็กหมุนถอยหลัง
- Z_f คือ อิมพีแดนซ์ของขดลวดโรเตอร์เนื่องจากสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้า
- Z_b คือ อิมพีแดนซ์ของขดลวดโรเตอร์เนื่องจากสนามแม่เหล็กหมุนถอยหลัง
- V_{in} คือ ค่าRMSของแรงดันไฟฟ้าขาเข้า
- V_f คือ ค่าRMSของแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมอิมพีแดนซ์ของโรเตอร์ทิศทางไปข้างหน้า
- V_b คือ ค่าRMSของแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมอิมพีแดนซ์ของโรเตอร์ทิศทางไปข้างหลัง
- I_s คือ ค่าRMSของกระแสไฟฟ้าของขดลวดสเตเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากวงจรสมมูลในรูปที่ 2.5 และ 2.6 สามารถนำมาประกอบการพิจารณาหาสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสชนิดแยกเฟสโดยคำนวณแรงบิดแม่เหล็กและกำลังไฟฟ้าในช่องอากาศ [9] – [13] ได้ดังนี้

$$P_{g,f} = I_s^2 R_f \quad (2.13)$$

$$P_{g,b} = I_s^2 R_b \quad (2.14)$$

$$P_g = P_{g,f} + P_{g,b} \quad (2.15)$$

$$P_g = I_s^2 (R_f + R_b) \quad (2.16)$$

$$T_e = \frac{P_g}{\omega_{syn}} \quad (2.17)$$

$$T_e = \frac{I_s^2 (R_f + R_b)}{\omega_{syn}} \quad (2.18)$$

เมื่อกำหนดให้

T_e คือ แรงบิดแม่เหล็ก

P_g คือ กำลังไฟฟ้าในช่องอากาศ

$P_{g,f}$ คือ กำลังไฟฟ้าในช่องอากาศเนื่องจากสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้า

$P_{g,b}$ คือ กำลังไฟฟ้าในช่องอากาศเนื่องจากสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหลัง

ω_{syn} คือ ความเร็วซิงโครนัส

โดยที่กระแสเตเตอร์หาได้จาก

$$I_s = \frac{V_{in}}{Z_{eq}} \quad (2.19)$$

โดยที่ Z_{eq} คือ อิมพีแดนซ์รวมของวงจรสมมูล

$$Z_{eq} = R_s + jX_s + Z_f + Z_b \quad (2.20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Z_f = R_f + jX_f = \frac{j0.5X_m \left(\left(\frac{0.5R_r'}{s} \right) + j0.5X_r' \right)}{\left(\frac{0.5R_r'}{s} \right) + j0.5 \left(j0.5(X_m + X_r') \right)} \quad (2.21)$$

$$Z_b = R_b + jX_b = \frac{j0.5X_m \left(\left(\frac{0.5R_r'}{(2-s)} \right) + j0.5X_r' \right)}{\left(\frac{0.5R_r'}{(2-s)} \right) + j0.5 \left(j0.5(X_m + X_r') \right)} \quad (2.22)$$

จากกราฟในรูปที่ 2.7 พบว่าแรงบิดแม่เหล็กเกิดจากผลรวมของกราฟแรงบิดแม่เหล็กที่เกิดจากสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้าและแรงบิดแม่เหล็กที่เกิดจากสนามแม่เหล็กหมุนกลับหลัง ทั้งนี้ยังพบว่าในทุกๆจุดของกราฟมีค่า $v_f \neq v_b$ และ $T_f \neq T_b$ เนื่องมาจากค่า $R_f \neq R_b$ ยกเว้นเพียงจุดเดียวที่ $v_f = v_b$ และ $T_f = T_b$ คือจุดที่ค่าความเร็วเท่ากับศูนย์ เนื่องจากค่า $R_f = R_b$ สมการแรงบิดแม่เหล็กที่เกิดจากสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้าและสนามแม่เหล็กหมุนไปทางข้างหลังแสดงในสมการที่ (2.23) – (2.24) โดยเกิดจากการนำสมการที่ (2.18) มาพิจารณา

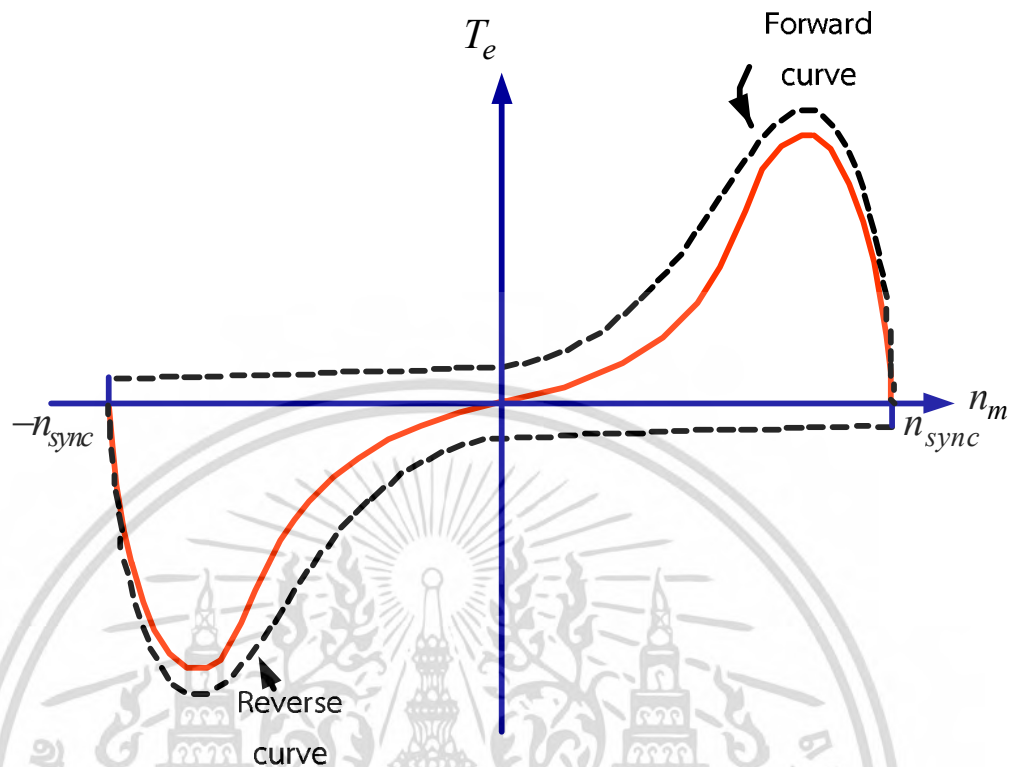
$$T_f = I_s^2 R_f \quad (2.23)$$

$$T_b = I_s^2 R_b \quad (2.24)$$

เมื่อกำหนดให้

T_f คือ แรงบิดแม่เหล็กที่เกิดจากสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้า

T_b คือ แรงบิดแม่เหล็กที่เกิดจากสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหลัง



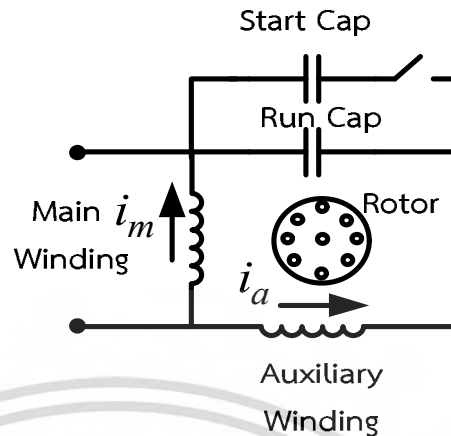
รูปที่ 2.7 กราฟคุณลักษณะของความเร็วและแรงบิด

2.3 มอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสชนิดพารามิเตอร์ไม่สมมาตร

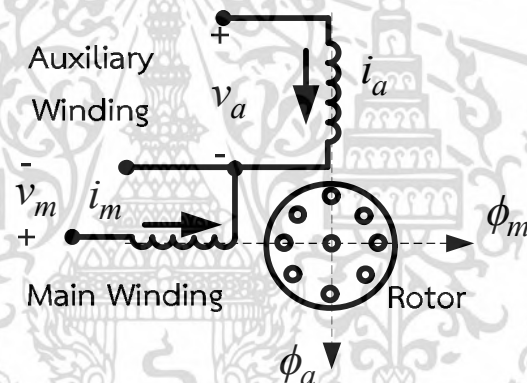
มอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสชนิดพารามิเตอร์ไม่สมมาตร (Asymmetrical Two-Phase Induction Motor) ที่นำเสนอมาในหัวข้อนี้ กล่าวถึงโครงสร้างลักษณะของมอเตอร์, การใช้ทฤษฎีสถาปัตยกรรมแม่เหล็กหมุนคู่เพื่อนำไปประกอบการพิจารณาสร้างวงจรสมมูลและวิเคราะห์สมรรถนะของมอเตอร์ และ นำเสนอสมการพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสชนิดพารามิเตอร์ไม่สมมาตร

2.3.1 โครงสร้างและหลักการทำงาน

มอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสชนิดพารามิเตอร์ไม่สมมาตรเป็นมอเตอร์ที่เกิดจากการดัดแปลงของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสซึ่งที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสชนิดตัวเก็บประจุชนิดเริ่มต้นหมุนและตัวเก็บประจุชนิดหมุนโดยทำการถอดตัวเก็บประจุทั้งสองชนิดออก ทำการต่อปลายขดลวดด้านหนึ่งของขดลวดหลักและขดลวดช่วยเข้าหากัน โดยจ่ายแรงดันจากอินเวอร์เตอร์ให้มีแรงดันตกคร่อมขดลวดหลักและขดลวดช่วยมีมุมต่างเฟส 90 องศาทางไฟฟ้า [3] ดังรูปที่ 2.8 และ 2.9



รูปที่ 2.8 โครงสร้างมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสชนิดตัวเก็บประจุชนิดเริ่มต้นหมุนและตัวเก็บประจุชนิดหมุน



รูปที่ 2.9 โครงสร้างมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสชนิดพารามิเตอร์ไม่สมมาตร

จากโครงสร้างในรูปที่ 2.9 พบว่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดหลักและขดลวดช่วยมีขนาดที่ต่างกันและมีมุมต่างเฟสอยู่ 90 องศาทางไฟฟ้า โดยสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$i_m = I_{m,\max} \cos(\omega t) \quad (2.25)$$

$$i_a = I_{a,\max} \cos(\omega t + 90^\circ) \quad (2.26)$$

พิจารณาแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในแต่ละขดลวดเพื่อหาแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เกิดจากสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้าและสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหลังสำหรับนำไปประกอบการพิจารณาการสร้าง

วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสชนิดพารามิเตอร์ที่ไม่สมมาตรโดยจะนำไปวิเคราะห์สมรรถนะในลำดับถัดไป เมื่อกำหนดให้ จำนวนของขดลวดหลัก คือ N_m และ จำนวนของขดลวดช่วย คือ N_a โดยการหาแรงเคลื่อนแม่เหล็กสามารถหาได้ดังนี้ [9],[12] และ [13]

$$\mathfrak{I}(\theta, t) = \mathfrak{I}_m(\theta, t) + \mathfrak{I}_a(\theta, t)$$

$$\mathfrak{I}(\theta, t) = N_m i_m \cos \theta + N_a i_a \cos(\theta + 90^\circ)$$

$$\mathfrak{I}(\theta, t) = N_m I_{m, \max} \cos(\omega t) \cos \theta + N_a I_{a, \max} \cos(\omega t + \theta_a) \cos(\theta + 90^\circ)$$

$$\mathfrak{I}(\theta, t) = N_m I_{m, \max} \cos(\omega t) \cos \theta + N_a I_{a, \max} \sin(\theta) \cos(\omega t + \theta_a)$$

$$\mathfrak{I}(\theta, t) = N_m I_{m, \max} \cos(\omega t) \cos \theta + N_a I_{a, \max} \sin(\theta) [\cos(\omega t) \cos \theta_a - \sin(\omega t) \sin \theta_a]$$

$$\mathfrak{I}(\theta, t) = N_m I_{m, \max} \cos(\omega t) \cos \theta + N_a I_{a, \max} \cos \theta_a \cos(\omega t) \sin(\theta) + N_a I_{a, \max} \sin \theta_a \sin(\omega t) \sin(\theta)$$

$$\mathfrak{I}(\theta, t) = \frac{1}{2} N_m I_{m, \max} [\cos(\omega t + \theta) + \cos(\omega t - \theta)] - \frac{1}{2} N_a I_{a, \max} [\sin(\omega t + \theta) + \sin(\omega t - \theta)] + \frac{1}{2} N_a I_{a, \max} \sin \theta_a [-\cos(\omega t + \theta) + \cos(\omega t - \theta)]$$

$$\mathfrak{I}(\theta, t) = \frac{1}{2} [(N_m I_{m, \max} - N_a I_{a, \max} \sin \theta_a) \cos(\omega t + \theta) - (N_a I_{a, \max} \cos \theta_a) \sin(\omega t + \theta)] + \frac{1}{2} [(N_m I_{m, \max} - N_a I_{a, \max} \sin \theta_a) \cos(\omega t - \theta) + (N_a I_{a, \max} \cos \theta_a) \sin(\omega t - \theta)]$$

เมื่อเขียนจัดรูปให้อยู่ในพจน์ที่เกิดจากสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้าและสนามแม่เหล็กหมุนกลับหลังได้ดังต่อไปนี้

$$\mathfrak{I}(\theta, t)_{Asym-TPIM} = \mathfrak{I}_{f, Asym-TPIM}(\theta, t) + \mathfrak{I}_{b, Asym-TPIM}(\theta, t) \quad (2.27)$$

เมื่อกำหนดให้

$$\mathfrak{I}(\theta, t)_{Asym-TPIM}$$

คือ แรงเคลื่อนแม่เหล็กหลักของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสชนิดพารามิเตอร์ไม่สมมาตร

$$\mathfrak{I}(\theta, t)_{f,Asym-TPIM}$$

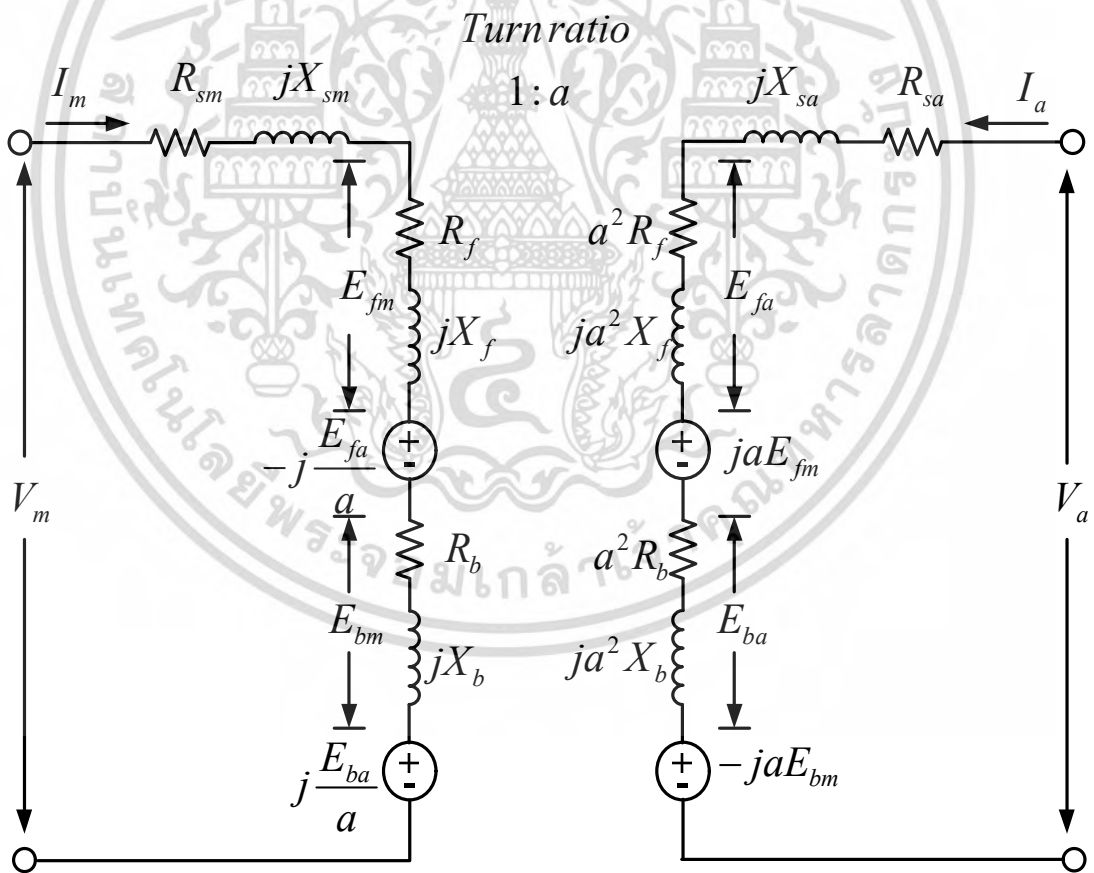
คือ แรงเคลื่อนแม่เหล็กหลักของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสชนิดพารามิเตอร์ไม่สมมาตรที่เกิดจากสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้า

$$\mathfrak{I}(\theta, t)_{b,Asym-TPIM}$$

คือ แรงเคลื่อนแม่เหล็กหลักของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสชนิดพารามิเตอร์ไม่สมมาตรที่เกิดจากสนามแม่เหล็กหมุนกลับหลัง

2.3.2 การวิเคราะห์สมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสชนิดไม่สมมาตร

จากสมการแรงเคลื่อนแม่เหล็กสามารถนำไปวิเคราะห์สร้างวงจรสมมูลให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสชนิดพารามิเตอร์ไม่สมมาตร [3],[8],[9] และ[13] ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสชนิดพารามิเตอร์ไม่สมมาตร

จากรูป 2.10 แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมขดลวดหลักและขดลวดช่วยเริ่มหมุนที่ฝั่งขดลวดสเตเตอร์ สามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$V_m = I_m (R_{sm} + jX_{sm} + Z_f + Z_b) - j \frac{E_{fa}}{a} + j \frac{E_{ba}}{a} \quad (2.28)$$

$$V_a = I_a (R_{sa} + jX_{sa} + a^2 Z_f + a^2 Z_b) + jaE_{fm} - jaE_{bm} \quad (2.29)$$

โดยที่

- V_m คือ ค่าRMSของแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมขดลวดหลักที่สเตเตอร์
- V_a คือ ค่าRMSของแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมขดลวดช่วยเริ่มหมุนที่สเตเตอร์
- I_m คือ ค่าRMSของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดหลักที่สเตเตอร์
- I_a คือ ค่าRMSของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดช่วยเริ่มหมุนที่สเตเตอร์
- R_{sm} คือ ความต้านทานของขดลวดหลักที่สเตเตอร์
- R_{sa} คือ ความต้านทานของขดลวดช่วยเริ่มหมุนที่สเตเตอร์
- X_{sm} คือ รีแอกแตนซ์ของขดลวดหลักที่สเตเตอร์
- X_{sa} คือ รีแอกแตนซ์ของขดลวดช่วยเริ่มหมุนที่สเตเตอร์

แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดหลักและขดลวดช่วยหมุนที่เกิดจากสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้าและสนามแม่เหล็กหมุนกลับหลังถูกแสดงดังสมการที่ (2.30) – (2.33)

$$E_{fm} = I_m (R_f + jX_f) \quad (2.30)$$

$$E_{bm} = I_m (R_b + jX_b) \quad (2.31)$$

$$E_{fa} = a^2 I_a (R_f + jX_f) \quad (2.32)$$

$$E_{ba} = a^2 I_a (R_b + jX_b) \quad (2.33)$$

โดยกำหนดให้

E_{fm} คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดหลักที่เกิดจากสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้า

E_{bm} คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดหลักที่เกิดจากสนามแม่เหล็กหมุนกลับหลัง

E_{fa} คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดช่วยเริ่มต้นหมุนที่เกิดจากสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้า

E_{ba} คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดช่วยเริ่มต้นหมุนที่เกิดจากสนามแม่เหล็กหมุนกลับหลัง

a คือ อัตราส่วนขดลวดระหว่างขดลวดช่วยหมุนต่อขดลวดหลัก

สมการแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าของ Asym – TPIM คำนวณได้ดังนี้คือ

$$T_{e,Asym-TPIM} = T_f - T_b = \frac{P_{g,Asym-TPIM}}{\omega_{syn}} = \frac{P_{gf} - P_{gb}}{\omega_{syn}} \quad (2.34)$$

โดยที่ กำลังไฟฟ้าในช่องอากาศเนื่องจากสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้าและสนามแม่เหล็กหมุนถอยหลัง แสดงได้ดังสมการที่ (2.35) – (2.36)

$$P_{gf} = P_{gfm} - P_{gfa} \quad (2.35)$$

$$P_{gb} = P_{gbm} - P_{gba} \quad (2.36)$$

และจากสมการที่ (2.37) – (2.40) แสดงความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าในช่องอากาศของขดลวดหลักและขดลวดช่วยเนื่องจากการหมุนของสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้า และ สนามแม่เหล็กหมุนถอยหลัง

$$P_{gfm} = I_m^2 R_f - j \frac{E_{fa}}{a} I_m^* \quad (2.37)$$

$$P_{gbm} = I_m^2 R_b + j \frac{E_{ba}}{a} I_m^* \quad (2.38)$$

$$P_{gfa} = I_a^2 a^2 R_f + ja E_{fm} I_a^* \quad (2.39)$$

$$P_{gba} = I_a^2 a^2 R_b - ja E_{bm} I_a^* \quad (2.40)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

P_{gfm} คือ กำลังไฟฟ้าในช่องอากาศของขดลวดหลักเนื่องจากสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้า

P_{gbm} คือ กำลังไฟฟ้าในช่องอากาศของขดลวดหลักเนื่องจากสนามแม่เหล็กหมุนถอยหลัง

P_{gfa} คือ กำลังไฟฟ้าในช่องอากาศของขดลวดช่วยเริ่มต้นหมุนเนื่องจากสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้า

P_{gba} คือ กำลังไฟฟ้าในช่องอากาศของขดลวดช่วยเริ่มต้นหมุนเนื่องจากสนามแม่เหล็กหมุนถอยหลัง

แทนค่าสมการที่ (2.37) – (2.40) ลงในสมการที่ (2.35) – (2.36) จะได้กำลังไฟฟ้าในช่องอากาศดังสมการ (2.41)

$$P_{g,Asym-TPIM} = \left(\begin{aligned} & \left((R_f - R_b) (I_m^2 + (aI_a)^2) + (R_f + R_b) 2aI_a I_m \sin(\theta_a - \theta_m) \right) \\ & + j(X_f - X_b) 2aI_a I_m \sin(\theta_a - \theta_m) \end{aligned} \right) \quad (2.41)$$

จากสมการที่ (2.41) สามารถนำมาคำนวณหาแรงบิดแม่เหล็กได้ดังสมการ (2.42)

$$T_{e,Asym-TPIM} = \frac{1}{\omega_{syn}} \left(\left((R_f - R_b) (I_m^2 + (aI_a)^2) + (R_f + R_b) 2aI_a I_m \sin(\theta_a - \theta_m) \right) \right) \quad (2.42)$$

โดยค่าขนาดสูงสุดของแรงบิดระลอกกำหนดได้ดังสมการที่ (2.43)

$$T_{e,Asym-TPIM} = \frac{1}{\omega_{syn}} \left(\frac{(I_m^4 + (aI_a)^4 + 2(aI_m I_a)^2 \cos 2(\theta_a - \theta_m))^{1/2}}{((R_f - R_b)^2 + (X_f - X_b)^2)} \right) \quad (2.43)$$

เมื่อพิจารณาสมการที่ (2.43) โดยมองเงื่อนไขที่ทำให้แรงบิดระลอกมีค่าเท่ากับศูนย์ที่สลิปใดๆ ได้ดังสมการที่ (2.44)

$$\cos 2(\theta_a - \theta_m) = -\frac{I_m^4 + (aI_a)^4}{2(aI_m I_a)^2} = -1 \quad (2.44)$$

เมื่อกำหนดให้ $\theta_a - \theta_m = 90^\circ$

$$\left(\frac{I_m}{aI_a}\right)^2 + \left(\frac{aI_a}{I_m}\right)^2 = 2 \quad (2.45)$$

จากสมการ (2.45) สามารถเขียนความสัมพันธ์อัตราส่วนระหว่างขดลวดช่วยหมุนต่อขดลวดหลักได้ ในรูปของแรงดันตกคร่อมขดลวดและกระแสไหลผ่านขดลวดได้ดังสมการที่ (2.46) – (2.47)

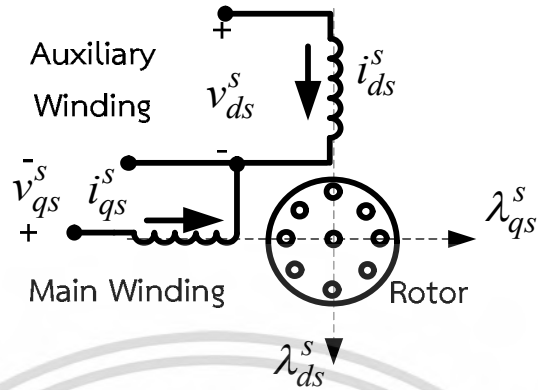
$$I_m = aI_a \quad (2.46)$$

$$V_a = aV_m \quad (2.47)$$

จากสมการที่ (2.47) พบว่าถ้าจ่ายแรงดันให้มอเตอร์ได้ตามสัดส่วนของอัตราส่วนขดลวดสามารถช่วยลดแรงบิดระลอกได้โดยเป็นแนวทางสำหรับการออกแบบอินเวอร์เตอร์สำหรับการจ่ายแรงดันสองเฟสไม่สมดุลเพื่อจ่ายให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสชนิดพารามิเตอร์ไม่สมมาตรได้โดยนำเสนอไว้ในบทที่ 3

2.3.3 แบบจำลองทางพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสชนิดพารามิเตอร์ไม่สมมาตร

สมการพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสชนิดพารามิเตอร์ไม่สมมาตร [1] , [14] เป็นสมการที่สามารถนำไปสร้างแบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสองเฟสชนิดพารามิเตอร์ไม่สมมาตรเพื่อนำไปใช้วิเคราะห์สมรรถนะเช่นกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดหลักและขดลวดช่วย, ความเร็วมอเตอร์ และ แรงบิดแม่เหล็กของมอเตอร์ และสามารถนำไปใช้ในการควบคุมมอเตอร์ที่ต้องการทราบค่าพารามิเตอร์อย่างเช่น การเรียงสนามแม่เหล็กตามแนวแกน (field oriented control) เป็นต้น ในรูปที่ 2.11 ได้แสดงถึงโครงสร้างของมอเตอร์ในกรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง โดยที่สมการพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสชนิดพารามิเตอร์ที่ไม่สมมาตรนี้ถูกแสดงในรูปของตัวแปรในกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งดังสมการที่ (2.48) – (2.57)



รูปที่ 2.11 โครงสร้างมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสชนิดพารามิเตอร์ไม่สมมาตรในกรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง

ความสัมพันธ์ของสมการแรงดันสเตเตอร์และแรงดันโรเตอร์ในแกนคิกวกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.48) – (2.49)

$$v_{qs}^s = R_{qs} i_{qs}^s + \frac{d\lambda_{qs}^s}{dt} \quad (2.48)$$

$$v_{ds}^s = R_{ds} i_{ds}^s + \frac{d\lambda_{ds}^s}{dt} \quad (2.49)$$

$$0 = R_{qr}' i_{qr}^{s'} + \frac{d\lambda_{qr}^{s'}}{dt} - \frac{1}{a} \omega_r \lambda_{dr}^{s'} \quad (2.50)$$

$$0 = R_{dr}' i_{dr}^{s'} + \frac{d\lambda_{dr}^{s'}}{dt} + a\omega_r \lambda_{qr}^{s'} \quad (2.51)$$

สมการเส้นแรงแม่เหล็กที่สเตเตอร์และเส้นแรงแม่เหล็กที่โรเตอร์ในแกนคิกวกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.52) – (2.55)

$$\lambda_{qs}^s = L_{qs} i_{qs}^s + L_{qm} i_{qr}^{s'} \quad (2.52)$$

$$\lambda_{ds}^s = L_{ds} i_{ds}^s + L_{dm} i_{dr}^{s'} \quad (2.53)$$

$$\lambda_{qr}^{s'} = L_{qr}' i_{qr}^{s'} + L_{qm} i_{qs}^s \quad (2.54)$$

$$\lambda_{dr}^{s'} = L_{dr}' i_{dr}^{s'} + L_{dm} i_{ds}^s \quad (2.55)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการแรงบิดแม่เหล็กทางในทอมปริมาณทางไฟฟ้าและทางกลแสดงดังสมการที่ (2.56) – (2.57)

$$T_e = \frac{P}{2} \left(a \lambda_{qr}^{s'} i_{dr}^{s'} - \frac{1}{a} \lambda_{dr}^{s'} i_{qr}^{s'} \right) \quad (2.56)$$

$$T_e = \frac{2}{P} \left(J \frac{d\omega_r}{dt} + B\omega_r \right) + T_L \quad (2.57)$$

โดยที่

v_{ds}^s, v_{qs}^s	คือ แรงดันสเตเตอร์แกนตีควในกรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง
i_{ds}^s, i_{qs}^s	คือ กระแสที่สเตเตอร์แกนตีควในกรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง
$i_{dr}^{s'}, i_{qr}^{s'}$	คือ กระแสที่โรเตอร์แกนตีควในกรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง
$i_{dm}^{s'}, i_{qm}^{s'}$	คือ กระแสแมกนีไทซิงแกนตีควในกรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง
$\lambda_{ds}^s, \lambda_{qs}^s$	คือ เส้นแรงแม่เหล็กสเตเตอร์แกนตีควในกรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง
$\lambda_{dr}^{s'}, \lambda_{qr}^{s'}$	คือ เส้นแรงแม่เหล็กโรเตอร์แกนตีควในกรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง
R_{ds}, R_{qs}	คือ ความต้านทานสเตเตอร์แกนตีคว
R_{dr}', R_{qr}'	คือ ความต้านทานโรเตอร์ที่มีการถ่ายโอนไปยังสเตเตอร์แกนตีคว
L_{ds}, L_{qs}	คือ ความเหนี่ยวนำสเตเตอร์แกนตีคว
L_{dr}', L_{qr}'	คือ ความเหนี่ยวนำโรเตอร์ที่มีการถ่ายโอนไปยังสเตเตอร์แกนตีคว
L_{dm}, L_{qm}	คือ ความเหนี่ยวนำร่วมแกนตีคว
ω_r	คือ ความเร็วโรเตอร์
T_e	คือ แรงบิดแม่เหล็ก
T_L	คือ แรงบิดโหลด
P	คือ จำนวนขั้วแม่เหล็ก
J	คือ ความเฉื่อย
B	คือ สัมประสิทธิ์ความหนืด

ความเหนี่ยวนำที่สเตเตอร์และโรเตอร์สามารถหาได้จากผลรวมของความเหนี่ยวนำรั่วไหลและความเหนี่ยวนำร่วมในสมการ (2.58) – (2.61)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$L_{ds} = L_{lds} + L_{dm} \tag{2.58}$$

$$L_{qs} = L_{lqs} + L_{qm} \tag{2.59}$$

$$L'_{dr} = L'_{ldr} + L_{dm} \tag{2.60}$$

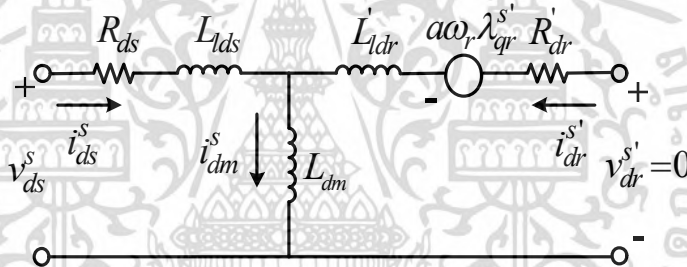
$$L'_{qr} = L'_{lqr} + L_{qm} \tag{2.61}$$

เมื่อ

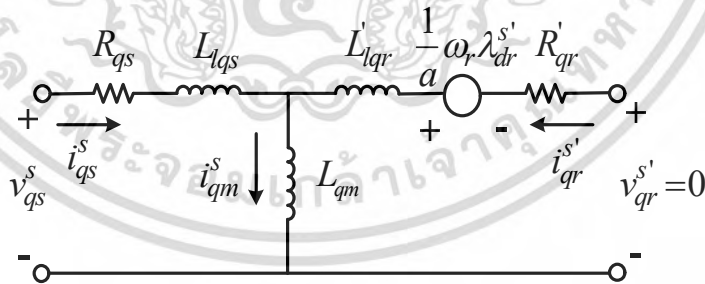
L_{lds}, L_{lqs} คือ ความเหนี่ยวนำรั่วไหลที่แกนคิกวที่สเตเตอร์

L'_{ldr}, L'_{lqr} คือ ความเหนี่ยวนำรั่วไหลที่แกนคิกวที่โรเตอร์

จากสมการที่ (2.48) - (2.61) สามารถนำไปสร้างวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสชนิดพารามิเตอร์ไม่สมมาตรทางพลวัตได้ดังรูปที่ 2.11 - รูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสชนิดพารามิเตอร์ไม่สมมาตรแกนดี



รูปที่ 2.13 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสชนิดพารามิเตอร์ไม่สมมาตรแกนคิก

2.4 สรุป

จากการวิเคราะห์แรงเคลื่อนแม่เหล็กมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสพบว่าเกิดแรงเคลื่อนแม่เหล็กเนื่องจากสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้า และ สนามแม่เหล็กหมุนถอยหลัง เป็นที่มาของทฤษฎีสนามแม่เหล็กหมุนคู่ซึ่งเกิดในมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสการเกิดสนามแม่เหล็กหมุนคู่ส่งผลให้เกิดแรงบิดระลอกขึ้น เป็นที่มาของการตัดแปลงมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสให้เป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสชนิดพารามิเตอร์ที่ไม่สมมาตรโดยใช้อินเวอร์เตอร์จ่ายแรงดันสองเฟสชนิดพารามิเตอร์ที่ไม่สมมาตรโดยแรงดันตกคร่อมขดลวดช่วยมีค่ามากกว่าขดลวดหลักเป็นจำนวนเท่าของค่าอัตราส่วนขดลวดช่วยต่อขดลวดหลัก และมีมุมเฟสหน้าหน้าแรงดันตกคร่อมขดลวดหลัก 90 องศาทางไฟฟ้า เพื่อลดแรงบิดระลอกลง



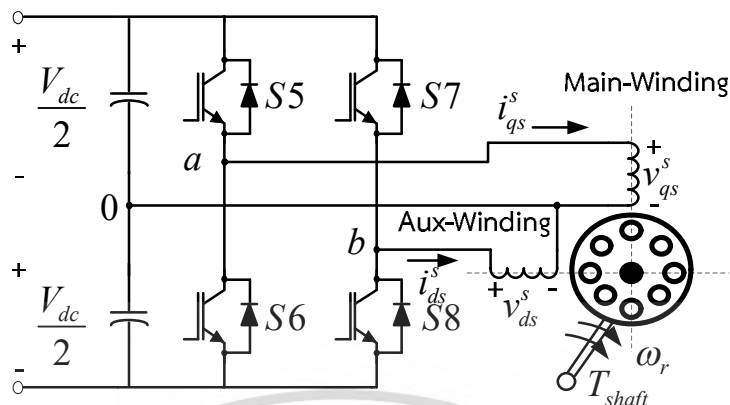
อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันสองเฟสสามกึ่งสำหรับการ ขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสพารามิเตอร์ไม่สมมาตร

3.1 บทนำ

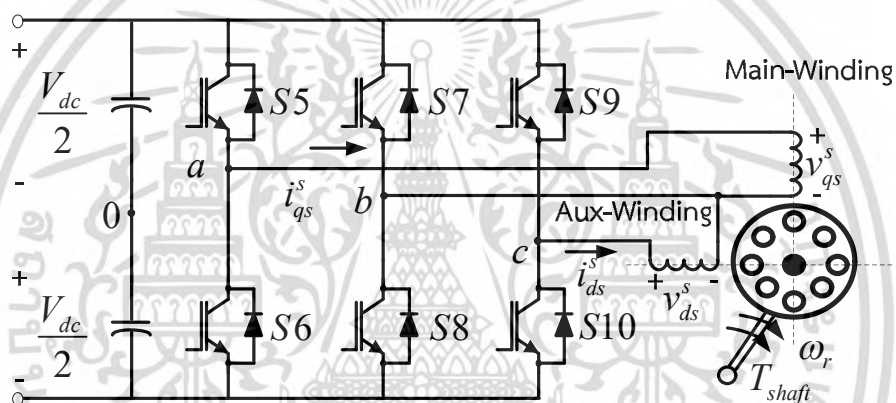
ในบทนี้กล่าวถึง การทำงานของอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันสองเฟสสามกึ่งสำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสชนิดพารามิเตอร์ไม่สมมาตร โดยจ่ายแรงดันสองเฟสไม่สมดุลด้วยการจ่ายแรงดันให้ขดลวดช่วยและขดลวดหลักเป็นไปตามอัตราส่วนของจำนวนขดลวดโดยใช้หลักการมอดูเลทความกว้างพัลส์แบบสเปซเวกเตอร์ชนิดคลื่นพาห์ (Carrier – Based Space Vector Pulse Width Modulation) ป้อนให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสชนิดพารามิเตอร์ไม่สมมาตร ในส่วนความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสชนิดพารามิเตอร์ไม่สมมาตรถูกควบคุมความเร็วด้วยหลักการควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกนโดยวิธีทางอ้อม (Indirect Field Oriented Control) เพื่อลดความยุ่งยากของการควบคุมลงในหัวข้อนี้ได้นำตัวควบคุมพีไอของกระแสแกนดีคิวออกโดยใช้การควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าด้วยสมการกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งแทน และนำเสนอการควบคุมความเร็วสลิป ซึ่งรายละเอียดต่างๆ ได้กล่าวในหัวข้อลำดับถัดไป

3.2 หลักการมอดูเลทความกว้างพัลส์แบบสเปซเวกเตอร์ชนิดคลื่นพาห์

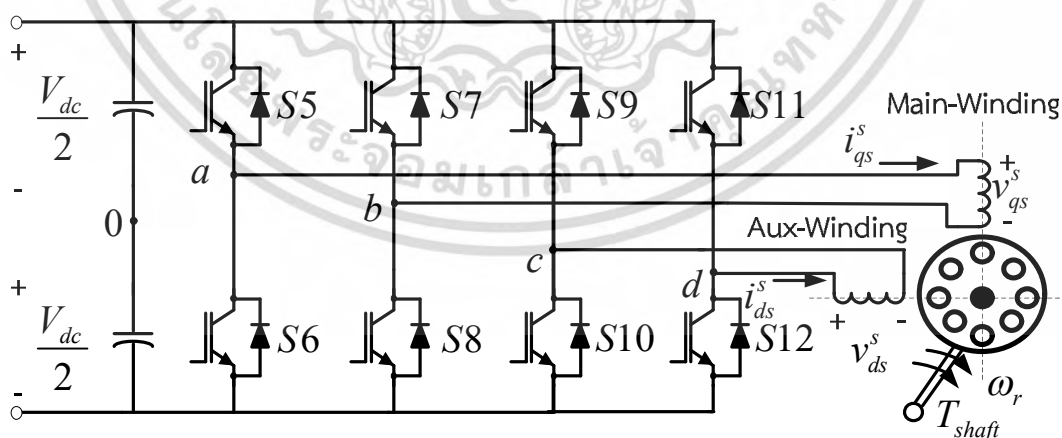
ในหัวข้อนี้แนะนำอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันสองเฟสสามกึ่ง (Three – leg Voltage Source Inverter) ที่จ่ายแรงดันสองเฟสไม่สมมาตรโดยแรงดันตกคร่อมขดลวดช่วยและหลักเป็นไปตามอัตราส่วนของจำนวนรอบขดลวด [6],[8],[9],[13] และ[15] โดยมีลักษณะของวงจรตามรูปที่ 3.2 โดยการใช้อินเวอร์เตอร์ชนิดนี้มีข้อดีเมื่อเปรียบเทียบกับ อินเวอร์เตอร์ชนิดสองเฟสสองกึ่ง ในรูปที่ 3.1 กับอินเวอร์เตอร์ชนิดสองเฟสสี่กึ่งในรูปที่ 3.3 ในเรื่องของการใช้ประโยชน์ของไฟตรงเชื่อมโยง การลดฮาร์มอนิกของกระแสของมอเตอร์ และสามารถใช้งานกับโมดูลไอจีบีทีซึ่งส่วนใหญ่ประกอบไปด้วยไอจีบีที 6 ตัว ซึ่งออกแบบมาไว้สำหรับใช้กับอินเวอร์เตอร์ชนิดสามกึ่ง โดยรวมอินเวอร์เตอร์สองเฟสสามกึ่งมีความเหมาะสมมากกว่าอินเวอร์เตอร์อีกสองชนิดที่ได้กล่าวมา



รูปที่ 3.1 อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันสองเฟสสองขั้ว



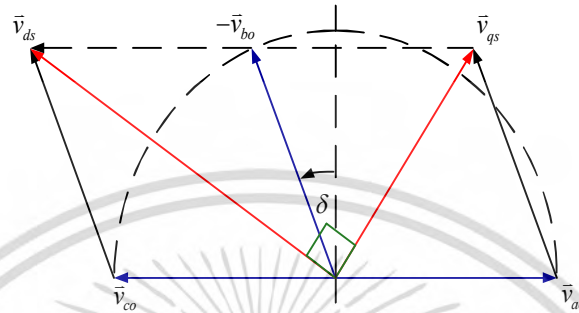
รูปที่ 3.2 อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันสองเฟสสามขั้ว



รูปที่ 3.3 อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันสองเฟสสี่ขั้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบสเปซเวกเตอร์ด้วยคลื่นพาหุชนิดแรงดันไม่สมดุลโดยการจ่ายแรงดันสองเฟสไม่สมมาตรสามารถทำได้โดยเลื่อนมุมเลื่อนเฟสของแรงดันกึ่ง b เวกเตอร์แรงดันสองเฟสแสดงได้ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 เวกเตอร์แรงดันอ้างอิงแบบเฟสไม่สมดุล

โดยมีสมการแรงดันแต่ละกึ่งดังสมการที่

$$\vec{v}_{ao} = V_o \sin(\omega t) = \frac{mV_{dc}}{2} \sin(\omega t) \quad (3.1)$$

$$\vec{v}_{bo} = V_o \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2} + \delta\right) = \frac{mV_{dc}}{2} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2} + \delta\right) \quad (3.2)$$

$$\vec{v}_{co} = V_o \sin(\omega t - \pi) = \frac{mV_{dc}}{2} \sin(\omega t - \pi) \quad (3.3)$$

มุมเลื่อนเฟส [15] สามารถหาได้จากสมการที่ (3.4)

$$\delta = \left(2 \tan^{-1}(a)\right) - \frac{\pi}{2} \quad (3.4)$$

โดย

- \vec{v}_{ao} คือ แรงดันไฟฟ้าที่กึ่ง a
- \vec{v}_{bo} คือ แรงดันไฟฟ้าที่กึ่ง b
- \vec{v}_{co} คือ แรงดันไฟฟ้าที่กึ่ง c
- V_o คือ ขนาดแรงดันขาออก
- V_{dc} คือ แรงดันไฟตรงเชื่อมโยง
- a คือ อัตราส่วนแรงดันขดลวดช่วยต่อขดลวดหลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

m คือ ดัชนีการมอดูเลท

δ คือ มุมเลื่อนเฟส

การทำการมอดูเลทความกว้างพัลส์แบบคลื่นพาห้ได้นำสัญญาณแรงดันลำดับศูนย์มาเพิ่มลงไปโนสัญญาณแรงดันทั้งสามกิ่งเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ในการสวิตช์เหมือนการมอดูเลทแบบค่านวนเวลาซึ่ง แรงดันลำดับศูนย์หาได้จากสมการที่ (3.5)

$$v_0 = -\left(\frac{\max(v_{ao}, v_{bo}, v_{co}) + \min(v_{ao}, v_{bo}, v_{co})}{2}\right) \quad (3.5)$$

โดยหลักการมอดูเลทดังกล่าวสามารถหาแรงดันตกคร่อมขดลวดหลักและขดลวดช่วย [6],[8],[9] และ[13] ได้ดังต่อไปนี้
แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมขดลวดหลักคือ

$$\begin{aligned} \bar{v}_{qs} &= \bar{v}_{ao} - \bar{v}_{bo} = \frac{mV_{dc}}{2} \sin(\omega t) - \frac{mV_{dc}}{2} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2} + \delta\right) \\ \bar{v}_{qs} &= \frac{mV_{dc}}{2} \left[\sin(\omega t) - \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2} + \delta\right) \right] \end{aligned} \quad (3.6)$$

จากสูตรตรีโกณมิติ $\sin A - \sin B = 2 \cos\left(\frac{A+B}{2}\right) \sin\left(\frac{A-B}{2}\right)$ ดังนั้น \bar{v}_{qs} ในสมการที่ (3.6) สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \bar{v}_{qs} &= \frac{mV_{dc}}{2} \left[2 \cos\left(\frac{\omega t + \omega t - \frac{\pi}{2} + \delta}{2}\right) \sin\left(\frac{\omega t + \omega t - \frac{\pi}{2} + \delta}{2}\right) \right] \\ \bar{v}_{qs} &= mV_{dc} \left[\cos\left(\omega t - \frac{\pi}{4} + \frac{\delta}{2}\right) \sin\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\delta}{2}\right) \right] \\ \bar{v}_{qs} &= \overbrace{mV_{dc} \sin\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\delta}{2}\right)}^{\text{Amplitude}} \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{4} + \frac{\delta}{2}\right) \end{aligned} \quad (3.7)$$

แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมขดลวดช่วยคือ

$$\begin{aligned}
\bar{v}_{ds} &= \bar{v}_{co} - \bar{v}_{bo} = \frac{mV_{dc}}{2} \sin(\omega t - \pi) - \frac{mV_{dc}}{2} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2} + \delta\right) \\
\bar{v}_{ds} &= \frac{mV_{dc}}{2} \left[\sin(\omega t - \pi) - \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2} + \delta\right) \right] \\
\bar{v}_{ds} &= \frac{mV_{dc}}{2} \left[2 \cos\left(\frac{\omega t - \pi + \omega t - \frac{\pi}{2} + \delta}{2}\right) \sin\left(\frac{\omega t - \pi - \omega t + \frac{\pi}{2} + \delta}{2}\right) \right] \\
\bar{v}_{ds} &= mV_{dc} \left[\cos\left(\omega t - \frac{3\pi}{4} + \frac{\delta}{2}\right) \sin\left(-\frac{\pi}{4} - \frac{\delta}{2}\right) \right] \\
\bar{v}_{ds} &= mV_{dc} \left[\sin\left(\frac{\overbrace{\pi}^A}{4} - \frac{\overbrace{\delta}^B}{2} - \frac{\overbrace{\pi}^C}{2}\right) \cos\left(\omega t + \frac{\overbrace{\pi}^D}{4} + \frac{\overbrace{\delta}^E}{2} - \frac{\overbrace{\pi}^F}{\pi}\right) \right] \quad (3.8)
\end{aligned}$$

โดย $\sin(A - B) = \sin A \cos B - \cos A \sin B$ และ $\cos(C - D) = \cos C \cos D - \sin C \sin D$ ซึ่งเป็นสูตรตรีโกณมิติ ดังนั้น \bar{v}_{ds} ในสมการที่ (3.8) สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
\bar{v}_{ds} &= mV_{dc} \left[\sin\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\delta}{2}\right) \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) - \cos\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\delta}{2}\right) \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) \right] \\
&\quad \times \left[\cos\left(\omega t + \frac{\pi}{4} + \frac{\delta}{2}\right) \cos \pi - \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{4} + \frac{\delta}{2}\right) \sin \pi \right] \\
\bar{v}_{ds} &= mV_{dc} \cos\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\delta}{2}\right) \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{4} + \frac{\delta}{2}\right) \\
\bar{v}_{ds} &= \underbrace{mV_{dc} \cos\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\delta}{2}\right)}_{\text{Amplitude}} \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{4} + \frac{\delta}{2}\right) \quad (3.9)
\end{aligned}$$

เมื่อ

$$\sqrt{|\bar{v}_{qs}|^2 + |\bar{v}_{ds}|^2} \leq V_{dc} \quad (3.10)$$

โดยที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

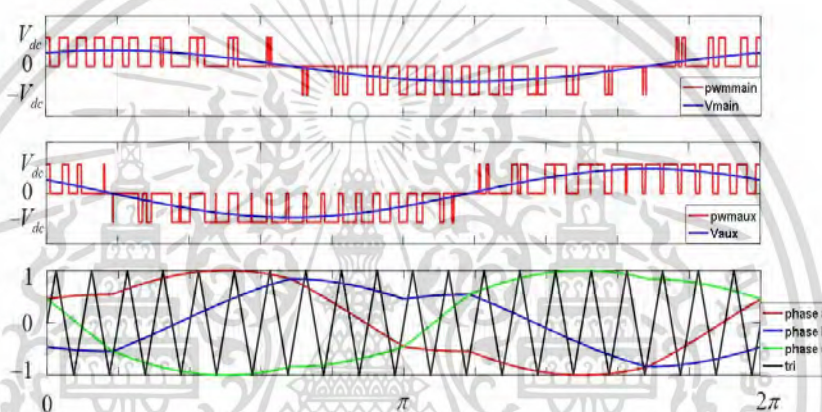
\bar{v}_{qs} คือ แรงดันตกคร่อมขดลวดหลัก

\bar{v}_{ds} คือ แรงดันตกคร่อมขดลวดช่วย

$|\bar{v}_{qs}|$ คือ ขนาดของแรงดันตกคร่อมขดลวดหลัก

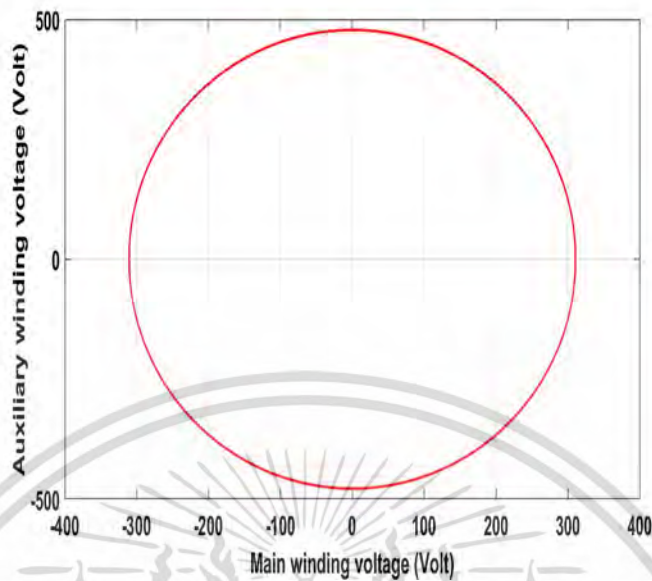
$|\bar{v}_{ds}|$ คือ ขนาดของแรงดันตกคร่อมขดลวดช่วย

สัญญาณแรงดันมูลฐานที่ตกคร่อมขดลวดหลักและขดลวดช่วย , สัญญาณแรงดันพีคดับลิแวมที่ตกคร่อมขดลวดหลักและขดลวดช่วย รวมถึงสัญญาณแรงดันแต่ละกึ่งและสัญญาณความถี่สวิตช์ถูกแสดงในรูปที่ 3.5

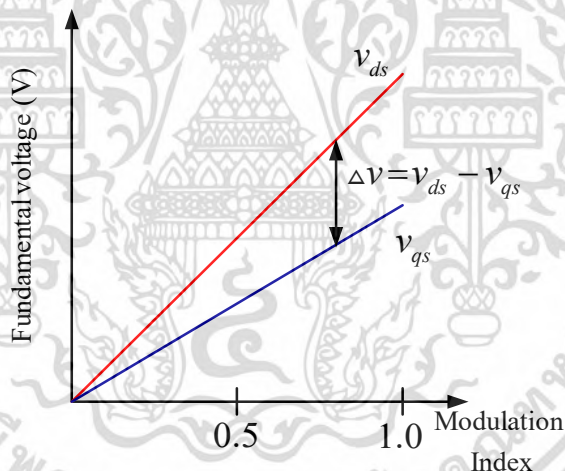


รูปที่ 3.5 สัญญาณแรงดันที่ตกคร่อมขดลวดหลัก,ขดลวดช่วย,สัญญาณแรงดันแต่ละกึ่ง และสัญญาณความถี่สวิตช์

ในรูปที่ 3.6 และ รูปที่ 3.7 แสดงให้เห็นว่าแรงดันไฟฟ้าความถี่มูลฐานที่ตกคร่อมขดลวดช่วยมีค่าเท่ากับผลคูณของอัตราส่วนของขดลวดกับแรงดันไฟฟ้าความถี่มูลฐานของขดลวดหลัก



รูปที่ 3.6 ทางเดินแรงดันไฟฟ้าความถี่มูลฐานที่ตกคร่อมขดลวดหลักและขดลวดช่วย

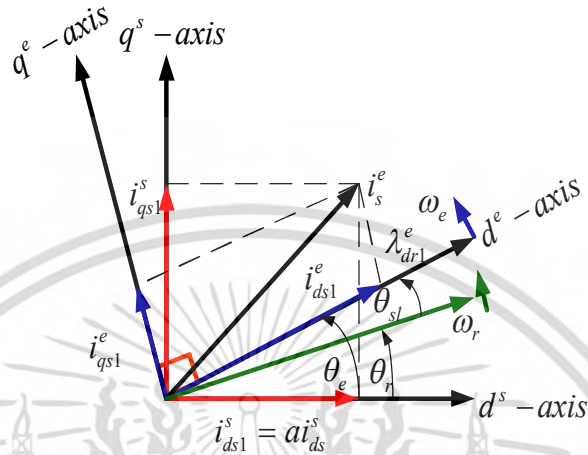


รูปที่ 3.7 ความสัมพันธ์ของดัชนีการมอดูเลท กับ แรงดันมูลฐานที่ตกคร่อมขดลวดหลัก และขดลวดช่วย

3.3 หลักการควบคุมมอเตอร์ด้วยการควบคุมสนามแม่เหล็กของโรเตอร์ตามแนวแกน

หลักการควบคุมสนามแม่เหล็กของโรเตอร์ตามแนวแกน (Field Oriented Control) หรือ (FOC) [4],[16] และ[17]เป็นหลักการที่แนวคิดคล้ายคลึงกับการควบคุมมอเตอร์ไฟตรงโดยมีการตัดแปลงมาใช้ควบคุมกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งใช้การแปลงแกนของกระแสที่สเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำจากกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งให้ไปอยู่ในกรอบอ้างอิงหมุนที่มีแต่ปริมาณกระแสเป็นค่าไฟตรง โดยมีกระแสเกิดขึ้น

สองค่า โดยในที่นี้ กระแสขดลวดหลักทำหน้าที่เป็นกระแสสร้างแรงบิดแม่เหล็ก ส่วนกระแสที่ขดลวดช่วยทำหน้าที่เป็นกระแสสร้างสนามแม่เหล็ก สามารถนำมาเขียนเป็นเวกเตอร์ไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 เวกเตอร์ไดอะแกรมการควบคุมสนามแม่เหล็กโรเตอร์ตามแนวแกน

การควบคุมสนามแม่เหล็กโรเตอร์ตามแนวแกนของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสชนิดพารามิเตอร์ไม่สมมาตรสามารถควบคุมได้โดยใช้หลักการทำการกระแสสองแกนให้สมมาตรซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (3.11) – (3.12)

$$i_{ds1}^s = a i_{ds}^s \quad (3.11)$$

$$i_{qs1}^s = i_{qs}^s \quad (3.12)$$

เมื่อ

i_{ds}^s คือ กระแสสเตเตอร์ของขดลวดช่วยที่รอบอ้างอิงหยุดนิ่ง

i_{qs}^s คือ กระแสสเตเตอร์ของขดลวดหลักที่รอบอ้างอิงหยุดนิ่ง

i_{ds1}^s คือ กระแสสเตเตอร์ของขดลวดช่วยที่รอบอ้างอิงหยุดนิ่งที่ถูกกระทำให้
กระแสสมมาตร

i_{qs1}^s คือ กระแสสเตเตอร์ของขดลวดหลักที่รอบอ้างอิงหยุดนิ่งที่ถูกกระทำให้
กระแสสมมาตร

a คือ อัตราส่วนของขดลวดช่วยต่อขดลวดหลัก

การควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกนโดยปกติพิจารณาจากสมการในกรอบอ้างอิงหมุน เนื่องจากต้องการให้เหลือค่าสนามแม่เหล็กของโรเตอร์เฉพาะที่แกนดีซึ่งการแปลงค่าปริมาณต่างๆจากกรอบอ้างอิงหยุดหนึ่งไปสู่กรอบอ้างอิงหมุนโดยใช้การแปลงพาร์ค (Park Transformation) ดังสมการที่ (3.13)

$$\begin{bmatrix} f_{ds}^e \\ f_{qs}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega_e t) & \sin(\omega_e t) \\ -\sin(\omega_e t) & \cos(\omega_e t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{ds}^s \\ f_{qs}^s \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

โดย

f_{ds}^s, f_{qs}^s คือ ค่าปริมาณในกรอบอ้างอิงหยุดหนึ่ง
 f_{ds}^e, f_{qs}^e คือ ค่าปริมาณในกรอบอ้างอิงหมุน
 $\omega_e t$ คือ มุมของการหมุนที่ซิงโครนัส

จากความสัมพันธ์ของสมการที่ (3.10) – (3.11) พบว่าเมื่อกระแสของสเตเตอร์ถูกกระทำให้เกิดความสมมาตร ทำให้พารามิเตอร์ของมอเตอร์สำหรับใช้ในการควบคุมสนามแม่เหล็กโรเตอร์ตามแนวแกนเกิดความสมมาตรเหมือนดังวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสดังนั้นสามารถเขียนสมการพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสที่กรอบอ้างอิงหมุนโดยใช้สำหรับการควบคุมได้ดังสมการที่ (3.14) – (3.23)

$$v_{ds1}^e = R_s i_{ds1}^e + \frac{d\lambda_{ds1}^e}{dt} - \omega_e \lambda_{qs1}^e \quad (3.14)$$

$$v_{qs1}^e = R_s i_{qs1}^e + \frac{d\lambda_{qs1}^e}{dt} + \omega_e \lambda_{ds1}^e \quad (3.15)$$

$$0 = v_{dr1}^{e'} = R_r i_{dr1}^{e'} + \frac{d\lambda_{dr1}^{e'}}{dt} - \omega_{sl} \lambda_{qr1}^{e'} \quad (3.16)$$

$$0 = v_{qr1}^{e'} = R_r i_{qr1}^{e'} + \frac{d\lambda_{qr1}^{e'}}{dt} + \omega_{sl} \lambda_{dr1}^{e'} \quad (3.17)$$

เมื่อเส้นแรงแม่เหล็กหาได้จากสมการ (3.17) – (3.20)

$$\lambda_{ds1}^e = L_s i_{ds1}^e + L_m i_{dr1}^{e'} \quad (3.18)$$

$$\lambda_{qs1}^e = L_s i_{qs1}^e + L_m i_{qr1}^{e'} \quad (3.19)$$

$$\lambda_{dr1}^{e'} = L_r i_{dr1}^{e'} + L_m i_{ds1}^e \quad (3.20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

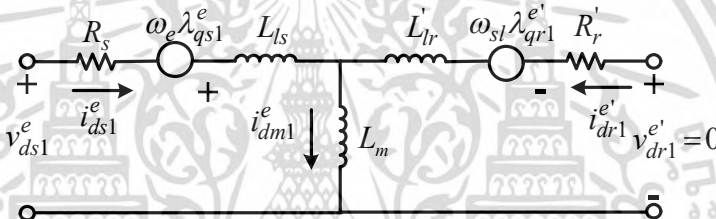
$$\lambda_{qr1}^{e'} = L_r' i_{qr1}^{e'} + L_m i_{qs1}^e \quad (3.21)$$

ค่าความเหนี่ยวนำที่สเตเตอร์และโรเตอร์หาได้จากสมการที่ (3.22) – (3.23)

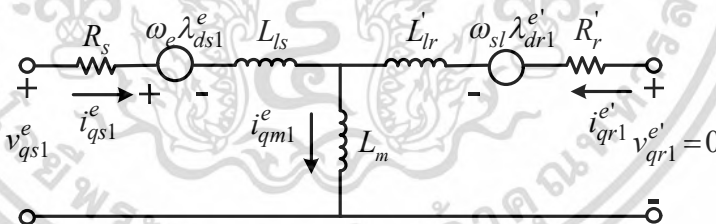
$$L_s = L_{ls} + L_m \quad (3.22)$$

$$L_r' = L_{lr}' + L_m \quad (3.23)$$

จากสมการที่ (3.13) – (3.22) สามารถสร้างวงจรสมมูลพลวัตในกรอบอ้างอิงหมุนเพื่อใช้ในการควบคุมสนามแม่เหล็กโรเตอร์ตามแนวแกนตั้งรูปที่ (3.9) – (3.10)



รูปที่ 3.9 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสแกนตีในกรอบอ้างอิงหมุนสำหรับ FOC



รูปที่ 3.10 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสแกนควในกรอบอ้างอิงหมุนสำหรับ FOC

โดยพารามิเตอร์ต่างๆคือ

i_{ds1}^e คือ กระแสสเตเตอร์ของขดลวดช่วยที่กรอบอ้างอิงหมุนที่ถูกกระทำให้กระแสสมมาตร

i_{qs1}^e คือ กระแสสเตเตอร์ของขดลวดหลักที่กรอบอ้างอิงหมุนที่ถูกกระทำให้กระแสสมมาตร

- v_{ds1}^e คือ แรงดันตกคร่อมสแตเตอร์ของขดลวดช่วยที่กรอบอ้างอิงหมุนที่ถูกกระทำให้แรงดันสมมาตร
- v_{qs1}^e คือ แรงดันตกคร่อมสแตเตอร์ของขดลวดหลักที่กรอบอ้างอิงหมุนที่ถูกกระทำให้แรงดันสมมาตร
- i_{dm1}^e คือ กระแสแมกนีไทซิ่งของขดลวดช่วยที่กรอบอ้างอิงหมุนที่ถูกกระทำให้กระแสสมมาตร
- i_{qm1}^e คือ กระแสแมกนีไทซิ่งของขดลวดหลักที่กรอบอ้างอิงหมุนที่ถูกกระทำให้กระแสสมมาตร
- $i_{dr1}^{e'}$ คือ กระแสโรเตอร์ของขดลวดช่วยที่กรอบอ้างอิงหมุนที่ถูกกระทำให้กระแสสมมาตรที่มีการถ่ายโอนไปยังสเตเตอร์
- $i_{qr1}^{e'}$ คือ กระแสโรเตอร์ของขดลวดหลักที่กรอบอ้างอิงหมุนที่ถูกกระทำให้กระแสสมมาตรที่มีการถ่ายโอนไปยังสเตเตอร์
- $v_{dr1}^{e'}$ คือ แรงดันตกคร่อมโรเตอร์ของขดลวดช่วยที่กรอบอ้างอิงหมุนที่ถูกกระทำให้แรงดันสมมาตรที่มีการถ่ายโอนไปยังสเตเตอร์
- $v_{qr1}^{e'}$ คือ แรงดันตกคร่อมโรเตอร์ของขดลวดหลักที่กรอบอ้างอิงหมุนที่ถูกกระทำให้แรงดันสมมาตรที่มีการถ่ายโอนไปยังสเตเตอร์
- λ_{ds1}^e คือ เส้นแรงแม่เหล็กสแตเตอร์ของขดลวดช่วยที่กรอบอ้างอิงหมุนที่ถูกกระทำให้เส้นแรงแม่เหล็กสมมาตร
- λ_{qs1}^e คือ เส้นแรงแม่เหล็กสแตเตอร์ของขดลวดหลักที่กรอบอ้างอิงหมุนที่ถูกกระทำให้เส้นแรงแม่เหล็กสมมาตร
- $\lambda_{dr1}^{e'}$ คือ เส้นแรงแม่เหล็กโรเตอร์ของขดลวดช่วยที่กรอบอ้างอิงหมุนที่ถูกกระทำให้เส้นแรงแม่เหล็กสมมาตรที่มีการถ่ายโอนไปยังสเตเตอร์
- $\lambda_{qr1}^{e'}$ คือ เส้นแรงแม่เหล็กโรเตอร์ของขดลวดหลักที่กรอบอ้างอิงหมุนที่ถูกกระทำให้เส้นแรงแม่เหล็กสมมาตรที่มีการถ่ายโอนไปยังสเตเตอร์
- R_s คือ ความต้านทานที่สแตเตอร์ที่ถูกกระทำให้สมมาตร
- R_r' คือ ความต้านทานที่โรเตอร์ที่ถูกกระทำให้สมมาตรที่มีการถ่ายโอนไปยังสเตเตอร์
- L_s คือ ความเหนี่ยวนำสแตเตอร์ที่ถูกกระทำให้สมมาตร
- L_r' คือ ความเหนี่ยวนำโรเตอร์ที่ถูกกระทำให้สมมาตรที่มีการถ่ายโอนไปยังสเตเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- L_m คือ ความเหนี่ยวนำร่วมที่ถูกกระทำให้สมมาตร
 L_{ls} คือ ความเหนี่ยวนำรั่วไหลที่สเตเตอร์ที่ถูกกระทำให้สมมาตร
 L_{lr} คือ ความเหนี่ยวนำรั่วไหลที่โรเตอร์ที่ถูกกระทำให้สมมาตร
 ω_e คือ ความเร็วเชิงโคโรนัส
 ω_{sl} คือ ความเร็วสลลิป

เมื่อนำสมการที่ (3.18) – (3.21) แทนลงในสมการที่ (3.14) – (3.17) จะได้ดังนี้

$$v_{ds1}^e = R_s i_{ds1}^e + L_s \frac{di_{ds1}^e}{dt} + \frac{L_m}{L_r} \frac{d\lambda_{dr1}^{e'}}{dt} - \frac{L_m^2}{L_r} \frac{di_{ds1}^e}{dt} - \omega_e L_s i_{qs1}^e - \frac{\omega_e L_m \lambda_{qr1}^{e'}}{L_r} + \frac{\omega_e L_m^2 i_{qs1}^e}{L_r} \quad (3.24)$$

$$v_{qs1}^e = R_s i_{qs1}^e + L_s \frac{di_{qs1}^e}{dt} + \frac{L_m}{L_r} \frac{d\lambda_{qr1}^{e'}}{dt} - \frac{L_m^2}{L_r} \frac{di_{qs1}^e}{dt} + \omega_e L_s i_{ds1}^e + \frac{\omega_e L_m \lambda_{dr1}^{e'}}{L_r} - \frac{\omega_e L_m^2 i_{ds1}^e}{L_r} \quad (3.25)$$

$$0 = \frac{R_r \lambda_{dr1}^{e'}}{L_r} - \frac{R_r L_m i_{ds1}^e}{L_r} + \frac{d\lambda_{dr1}^{e'}}{dt} - \omega_{sl} \lambda_{qr1}^{e'} \quad (3.26)$$

$$0 = \frac{R_r \lambda_{qr1}^{e'}}{L_r} - \frac{R_r L_m i_{qs1}^e}{L_r} + \frac{d\lambda_{qr1}^{e'}}{dt} + \omega_{sl} \lambda_{dr1}^{e'} \quad (3.27)$$

จัดรูป สมการ(3.23) – (3.26) เมื่อเกิดการควบคุมสนามแม่เหล็กโรเตอร์ตามแนวแกน (Field oriented control) โดยพิจารณาเงื่อนไข $\lambda_{qr1}^{e'} = 0$, $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$ และ $\tau_r = \frac{L_r}{R_r}$ ใน s - domain จะได้ความสัมพันธ์ต่างๆดังนี้

$$v_{ds1}^e = (R_s + \sigma L_s s) i_{ds1}^e + \frac{s L_m \lambda_{dr1}^{e'}}{L_r} - \omega_e \sigma L_s i_{qs1}^e \quad (3.28)$$

$$v_{qs1}^e = (R_s + \sigma L_s s) i_{qs1}^e + \omega_e \sigma L_s i_{ds1}^e + \frac{\omega_e L_m \lambda_{dr1}^{e'}}{L_r} \quad (3.29)$$

$$\lambda_{dr1}^{e'} = \frac{L_m i_{ds1}^e}{1 + s \tau_r} \quad (3.30)$$

$$\omega_{sl} = \frac{L_m i_{qs1}^e}{\tau_r \lambda_{dr1}^{e'}} \quad (3.31)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

σ คือ ค่าสัมประสิทธิ์รีวไหล

τ_r คือ ค่าคงที่ทางเวลาของโรเตอร์

จากสมการที่ (2.56) เมื่อพิจารณาการเกิดการควบคุมสนามแม่เหล็กโรเตอร์ตามแนวแกน (Field oriented control) โดยมีการชดเชยกระแสให้เกิดความสมมาตรพบว่า สมการความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับกระแสสเตเตอร์แกนคิ้วที่รอบอ้างอิงหมุนถูกแสดงไว้ดังสมการที่ (3.32)

$$T_e = \frac{P}{2} (\lambda_{qr1}^{e'} i_{dr1}^{e'} - \lambda_{dr1}^{e'} i_{qr1}^{e'})$$

$$T_e = \frac{P L_m}{2 L_r} \lambda_{dr1}^{e'} i_{qs1}^e \quad (3.32)$$

จัดรูปใหม่ สมการที่ (3.32) เพื่อ นำไปคำนวณหาค่ากระแสสเตเตอร์ที่แกนคิ้วได้ดังสมการที่ (3.33)

$$i_{qs1}^e = \frac{2 L_r T_e}{P L_m \lambda_{dr1}^{e'}} \quad (3.33)$$

เมื่อ

T_e คือ แรงบิดแม่เหล็ก

P คือ จำนวนขั้วแม่เหล็ก

มุมเชิงโคโรนัสสามารถหาได้จากสมการที่ (3.34)

$$\theta_e = \int (\omega_r + \omega_{sl}) dt = \int \omega_e dt \quad (3.34)$$

เมื่อ

θ_e คือ มุมการหมุนที่เชิงโคโรนัส

3.4 หลักการควบคุมมอเตอร์ด้วยการควบคุมสนามแม่เหล็กของโรเตอร์ตามแนวแกนโดยใช้หลักการป้อนไปข้างหน้าในกรอบอ้างอิงแกนนิ่ง

การควบคุมสนามแม่เหล็กของโรเตอร์ตามแนวแกนโดยใช้หลักการป้อนไปข้างหน้าในกรอบอ้างอิงแกนนิ่งโดยใช้สมการแรงดันสเตเตอร์ [18] – [19] ซึ่งแสดงดังสมการที่ (3.36) – (3.39)

$$v_{ds1}^{s*} = R_s i_{ds1}^{s*} + \frac{d\lambda_{ds1}^{s*}}{dt} \quad (3.36)$$

$$v_{qs1}^{s*} = R_s i_{qs1}^{s*} + \frac{d\lambda_{qs1}^{s*}}{dt} \quad (3.37)$$

$$\lambda_{ds1}^{s*} = L_s i_{ds1}^{s*} + L_m i_{dr1}^{s'*} \quad (3.38)$$

$$\lambda_{qs1}^{s*} = L_s i_{qs1}^{s*} + L_m i_{qr1}^{s'*} \quad (3.39)$$

การควบคุมวิธีนี้ใช้การสร้างกระแสคำสั่งขึ้นโดยแบ่งออกเป็นกระแสคำสั่งสเตเตอร์แกนดีคิวและกระแสคำสั่งโรเตอร์แกนดีคิว ซึ่งกระแสคำสั่งเหล่านี้อยู่ในกรอบอ้างอิงหมุนสามารถสร้างได้ดังสมการที่ (3.40) – (3.43) โดยใช้สมการ (3.16) , (3.20) , (3.21) และ (3.33)

$$i_{ds1}^{e*} = \frac{\lambda_{dr1}^{e*}}{L_m} \quad (3.40)$$

$$i_{qs1}^{e*} = \frac{2}{P} \frac{L_r T_e}{L_m \lambda_{dr1}^{e*}} \quad (3.41)$$

$$i_{dr1}^{e*} = -\frac{1}{R_r} \frac{d\lambda_{dr1}^{e*}}{dt} \quad (3.42)$$

$$i_{qr1}^{e*} = -\frac{L_m}{L_r} i_{qs1}^{e*} \quad (3.43)$$

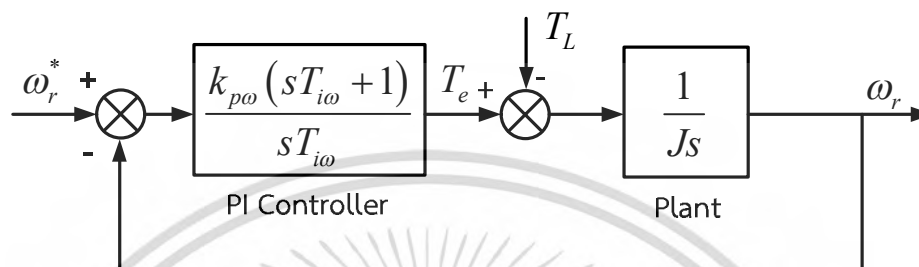
โดย

$v_{ds1}^{s*}, v_{qs1}^{s*}$	คือ แรงดันตกคร่อมสเตเตอร์คำสั่งขดลวดช่วยและขดลวดหลักที่กรอบอ้างอิงหยุดนิ่งที่ถูกกระทำให้ แรงดันสมมาตร
$\lambda_{ds1}^{s*}, \lambda_{qs1}^{s*}$	คือ เส้นแรงแม่เหล็กสเตเตอร์คำสั่งขดลวดช่วยและขดลวดหลักที่กรอบอ้างอิงหยุดนิ่งที่ถูกกระทำให้เส้นแรงแม่เหล็กสมมาตร
$i_{ds1}^{s*}, i_{qs1}^{s*}$	คือ กระแสสเตเตอร์คำสั่งขดลวดช่วยและขดลวดหลักที่กรอบอ้างอิงหยุดนิ่งที่ถูกกระทำให้กระแสสมมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การวิเคราะห์ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงรอบความเร็วมอเตอร์ที่ใช้ควบคุมความเร็วอินเวอร์เตอร์ที่ใช้วิธีการควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกน

การวิเคราะห์ระบบควบคุมความเร็วสามารถเขียนเป็นระบบป้อนกลับ [17] ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมของความเร็วมอเตอร์วิธีการควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกน

จากรูปที่ 3.13 สามารถเขียนฟังก์ชันถ่ายโอนได้ดังนี้

$$G(s) = \left(\frac{k_{p\omega}(sT_{i\omega} + 1)}{sT_{i\omega}} \right) \left(\frac{1}{Js} \right)$$

$$G(j\omega_o) = \left(\frac{k_{p\omega}(j\omega_o T_{i\omega} + 1)}{j^2 \omega_o^2 T_{i\omega}} \right) \left(\frac{1}{J} \right)$$

เมื่อพิจารณาขนาดและเฟสที่จุดความถี่เฟสตัดข้าม (Phase crossover frequency) โดยทั่วไปจุดที่เป็นความถี่ตัดข้ามมีค่าขนาด $|G(j\omega)| = 1$, มุมเฟสมาร์จิ้น (Phase Margin) มีค่าเท่ากับระยะระหว่างมุมที่มีค่าขนาดเท่ากับ 1 ถึงค่ามุม -180 องศา โดยขนาดที่ความถี่เฟสตัดข้าม กับ มุมเฟสมาร์จิ้น [20] สามารถหาได้ดังสมการที่ (3.44) และ (3.45)

$$|G(j\omega)| = \left(\frac{k_{p\omega} \left(\sqrt{(\omega_o T_{i\omega})^2 + 1} \right)}{J \omega_o^2 T_{i\omega}} \right) = 1 \quad (3.44)$$

$$\phi_m = \phi_n + 180 \quad (3.45)$$

จากระบบข้างต้นสามารถหาเวลาการปรีพันธ์และค่าตัวควบคุมเชิงสัดส่วนของตัวควบคุมความเร็วได้ดังสมการที่ (3.46) และ (3.47) ตามลำดับ

$$\phi_m - 180 = \tan^{-1}(\omega_o T_{i\omega}) - 180$$

$$T_{i\omega} = \frac{\tan(\phi_m)}{\omega_o} \quad (3.46)$$

$$k_{p\omega} = \frac{J\omega_o^2 T_{i\omega}}{\left(\sqrt{(\omega_o T_{i\omega})^2 + 1}\right)} \quad (3.47)$$

โดยที่อัตราส่วนความหน่วง , มุมเฟสมาร์จิน และ แบนด์วิดท์ สามารถหาได้จากสมการที่ (3.48) – (3.50)

$$\zeta = \frac{-\ln(\%OS/100)}{\sqrt{\pi^2 + \ln^2(\%OS/100)}} \quad (3.48)$$

$$\phi_m = \tan^{-1}\left(\frac{2\zeta}{\sqrt{-2\zeta^2 + \sqrt{1+4\zeta^4}}}\right) \quad (3.49)$$

$$\omega_{BW} = \frac{4}{T_s \zeta} \sqrt{(1-2\zeta^2) + \sqrt{4\zeta^4 - 4\zeta^2 + 2}} \quad (3.50)$$

โดยที่

ζ คือ อัตราส่วนความหน่วง

$\%OS$ คือ เปอร์เซนต์ค่าพุ่งเกิน

T_s คือ เวลาสู่จุดสมดุล

ϕ_m คือ มุมเฟสมาร์จิน

ϕ_n คือ มุมเฟสที่ตำแหน่งความถี่เฟสตัดข้ามของกราฟโบเด

ω_{BW} คือ แบนด์วิดท์

ω_o คือ แบนด์วิดท์ของวงรอบวงนอก

$T_{i\omega}$ คือ เวลาการปรีพันธ์ของตัวควบคุมความเร็ว

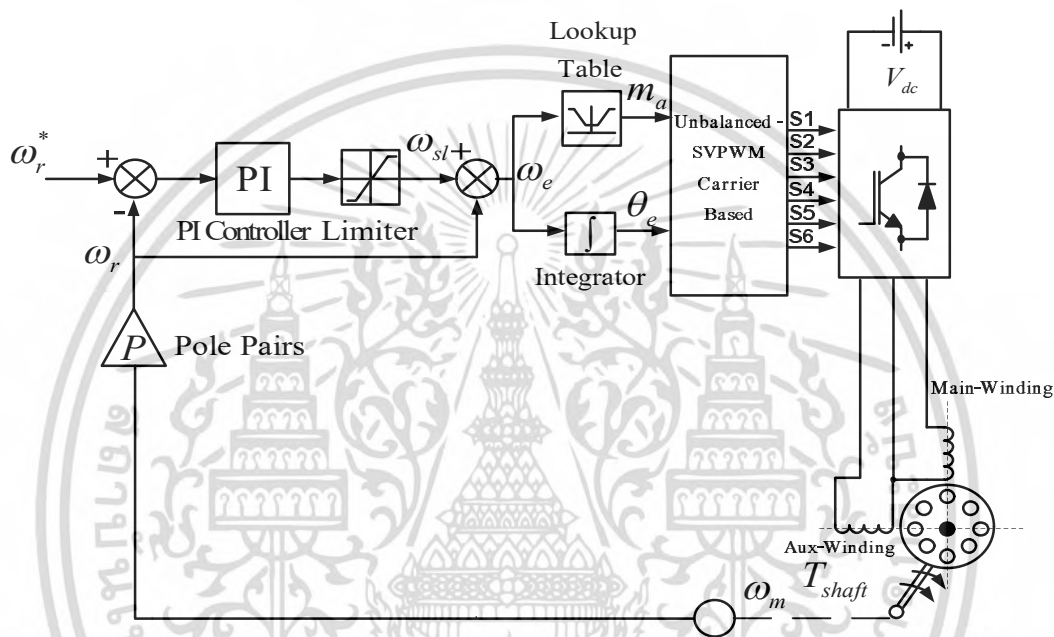
$k_{p\omega}$ คือ ตัวควบคุมเชิงสัดส่วนของตัวควบคุมความเร็ว

$k_{i\omega}$ คือ ตัวควบคุมเชิงปริพันธ์ของตัวควบคุมความเร็ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 หลักการควบคุมมอเตอร์ด้วยการควบคุมความเร็วแบบสเกลาร์

การควบคุมชนิดนี้อาศัยหลักการควบคุมความเร็วให้คงที่ โดยความเร็วที่ได้เป็นอัตราส่วนต่อแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ซึ่งเป็นค่าที่คงที่ ในหลักการนี้สามารถควบคุมความเร็วให้คงที่ได้ด้วยตัวควบคุมพีไอที่ใช้ค่าความเร็วสลิปที่ออกจากตัวควบคุมพีไอเป็นตัวชดเชยให้ความเร็วกลับเข้าสู่ค่าที่ควบคุม วิธีการควบคุมประเภทนี้จึงมีอีกชื่อเรียกหนึ่งว่า การควบคุมความเร็วสลิป ซึ่งมีวงจรกำลังและวงจรควบคุมตามในรูปที่ 3.14

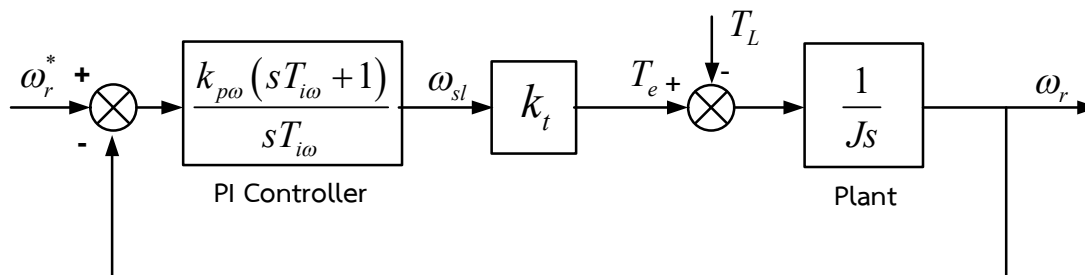


รูปที่ 3.14 วงจรกำลังและวงจรควบคุมของการควบคุมความเร็วมอเตอร์ด้วยวิธีสเกลาร์

ที่เส้นแรงแม่เหล็กที่พิกัดพบว่า แรงบิดแม่เหล็กที่พิกัดสามารถถูกสร้างด้วยค่าความถี่สลิปเล็กๆที่พิกัดซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (3.51)

$$T_{e,rated} = k_t \omega_{sl,rated} \quad (3.51)$$

จากสมการที่ 3.51 สามารถนำมาเขียนบล็อกไดอะแกรมการควบคุมความเร็ววิธีสเกลาร์ได้ดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมของความเร็วมอเตอร์วีธีสเกลาร์

สามารถหาเวลาการปรีพันธ์และค่าตัวควบคุมเชิงสัดส่วนของตัวควบคุมความเร็วได้ตั้งสมการที่

(3.52) และ (3.53) ตามลำดับ

$$\phi_m - 180 = \tan^{-1}(\omega_o T_{i\omega}) - 180 \quad (3.52)$$

$$T_{i\omega} = \frac{\tan(\phi_m)}{\omega_o} \quad (3.53)$$

$$k_{p\omega} = \frac{J\omega_o^2 T_{i\omega}}{\left(k_t \sqrt{(\omega_o T_{i\omega})^2 + 1}\right)} \quad (3.53)$$

3.7 สรุป

ในบทนี้กล่าวถึงการทำงานของชุดอินเวอร์เตอร์สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสชนิดพารามิเตอร์ไม่สมมาตรโดยใช้หลักการมอดูเลทความกว้างพัลส์แบบสเปซเวกเตอร์ชนิดคลื่นพาร์ต ส่วนการควบคุมความเร็วมอเตอร์ในที่นี้ได้เลือกใช้หลักการควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกนโดยมีการตัดแปลงเพื่อลดความซับซ้อนของระบบโดยใช้หลักการป้อนไปข้างหน้าของสมการแรงดันสเตเตอร์ที่กรอบอ้างอิงหยุดนิ่งส่งผลให้ลดค่าใช้จ่ายในการทำตัวตรวจจับกระแสและลดตัวควบคุมพีไอของกระแสได้ ช่วยให้การควบคุมมีความง่ายขึ้น และ นำเสนอทฤษฎีการควบคุมความเร็วมอเตอร์ด้วยวิธีสเกลาร์เพื่อทำการเปรียบเทียบสมรรถนะโดยแสดงในบทของการจำลองผล

บทที่ 4

คอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสชนิดเชื่อมต่อกริด

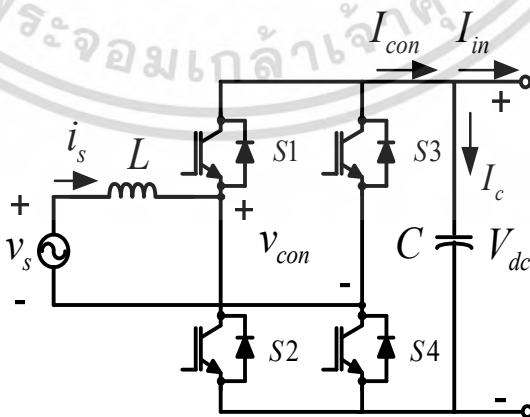
4.1 บทนำ

ในบทนี้กล่าวถึง การทำงานของคอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสชนิดเชื่อมต่อกริดสำหรับการปรับปรุงคุณภาพของกระแสฟักริดและควบคุมแรงดันไฟตรงเชื่อมโยงได้ตามที่ต้องการควบคุมเนื่องจากถ้าใช้วงจรฟูลบริดจ์ชนิดหนึ่งเฟสลูกคลื่นกระแสที่ฟักริดมีความผิดเพี้ยนจากรูปคลื่นไซน์ส่งผลให้คุณภาพไฟฟ้าฟักริดแย่มากและไม่สามารถควบคุมแรงดันไฟตรงเชื่อมโยงได้ตามต้องการเนื่องจากสามารถให้ค่าแรงดันสูงสุดแค่จำนวน 1.414 เท่าของขนาดค่ายอดแรงดันฟักริด โดยในที่นี้คอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสชนิดเชื่อมต่อกริดได้ใช้การควบคุมแรงดันไฟตรงเชื่อมโยงให้คงที่ด้วยหลักการควบคุมแบบพีไอ ส่วนหลักการสวิตช์ของคอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสชนิดเชื่อมต่อกริดในที่นี้ใช้หลักการสวิตช์แบบฮิสเตอร์รีซิส โดยรายละเอียดต่างๆได้กล่าวถึงในหัวข้อลำดับถัดไป

4.2 วงจรคอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสชนิดเชื่อมต่อกริด

4.2.1 โครงสร้างของวงจรคอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสชนิดเชื่อมต่อกริด

วงจรของคอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสชนิดเชื่อมต่อกริด [5] , [21] และ [22] ประกอบด้วย แหล่งจ่ายแรงดันกระแสสลับ, ตัวเหนี่ยวนำ, อุปกรณ์สวิตช์ไอจีบีที 4 ตัว และ ตัวเก็บประจุ ซึ่งมีลักษณะการต่อดังรูปที่ 4.1



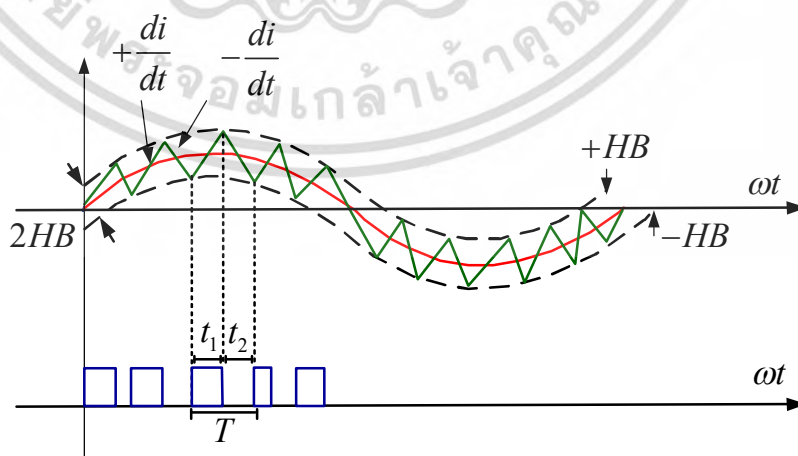
รูปที่ 4.1 คอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสชนิดเชื่อมต่อกริด

4.2.2 วงจรการควบคุมคอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสชนิดเชื่อมต่อกรีตด้วยวิธี ฮิสเตอร์รีซิส และ ทฤษฎีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้า

ในการควบคุมแบบฮิสเตอร์รีซิสของคอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสชนิดเชื่อมต่อกรีต ใช้หลักการของการติดตามของกระแสจริงโดยเปรียบเทียบกับค่ากระแสคำสั่งโดยได้ค่าความคลาดเคลื่อนผ่านตัวเปรียบเทียบฮิสเตอร์รีซิสซึ่งเป็นตัวกำหนดค่าให้ค่าความคลาดเคลื่อนไม่สามารถเกินค่าขอบเขตบนและขอบเขตล่างเพื่อเปลี่ยนค่าดังกล่าวเป็นสัญญาณขับเกตเพื่อนำไปสวิตช์ไอจีบีทีของคอนเวอร์เตอร์ โดยหลักการการเปรียบเทียบแสดงดังรูปที่ 4.2 ซึ่งความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าค่าขอบบนสัญญาณการสวิตช์ที่ได้มีค่าลอจิกคือ 1 (on) ในลำดับถัดไปเมื่อความคลาดเคลื่อนเท่ากับค่าขอบบนสัญญาณการสวิตช์ที่ได้มีค่าลอจิกคือ 0 (off) โดยเกิดสภาวะการ on ของสวิตช์อีกครั้งเมื่อค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าเท่ากับขอบล่างของฮิสเตอร์รีซิส โดยค่าความถี่สวิตช์สูงสุดของการควบคุมฮิสเตอร์รีซิสสามารถหาได้จากสมการที่ (4.1)

$$f_{sw,max} = \frac{f_{sampling}}{2} \quad (4.1)$$

เมื่อ $f_{sampling}$ คือ ความถี่ของการแซมปลิง



รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบค่าของความคลาดเคลื่อน กับ ขอบเขตของฮิสเตอร์รีซิส

ในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าระหว่างสองบัสอาศัยหลักการของสมการการไหลของกำลังไฟฟ้าดังสมการที่ (4.2) โดยวงจรแสดงดังรูปที่ 4.3

$$P = \frac{|v_s| |v_{conv}|}{X_L} \sin(\theta_1 - \theta_2) \quad (4.2)$$

เมื่อ

P คือ กำลังไฟฟ้าที่ส่งระหว่างบัส

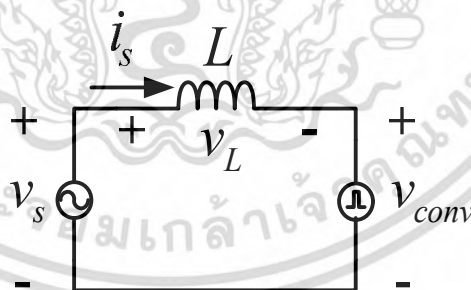
$|v_s|$ คือ ขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่กริด

$|v_{conv}|$ คือ ขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่คอนเวอร์เตอร์

X_L คือ รีแอกแตนซ์ของคอนเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกกริด

θ_1 คือ มุมของแรงดันไฟฟ้าที่กริด

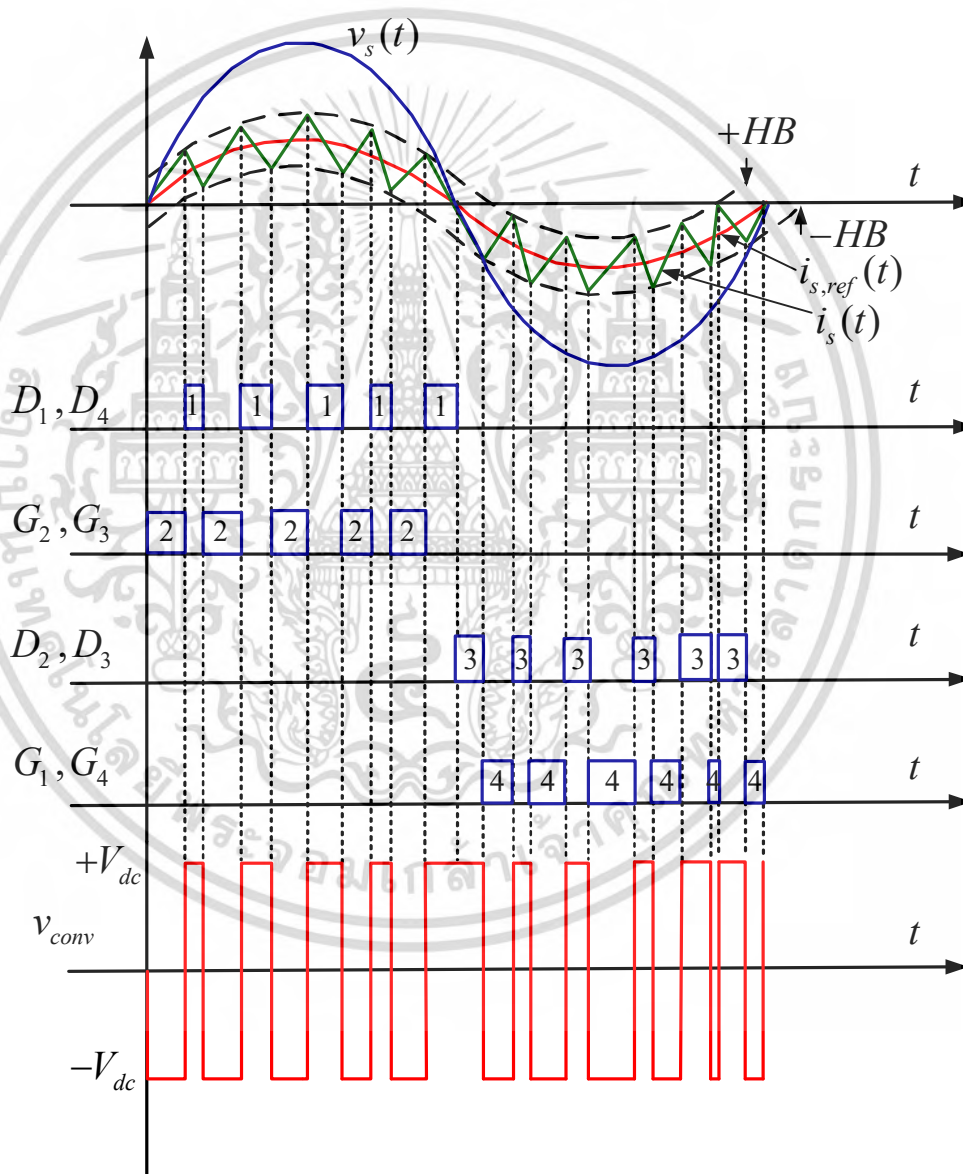
θ_2 คือ มุมของแรงดันไฟฟ้าที่กริด



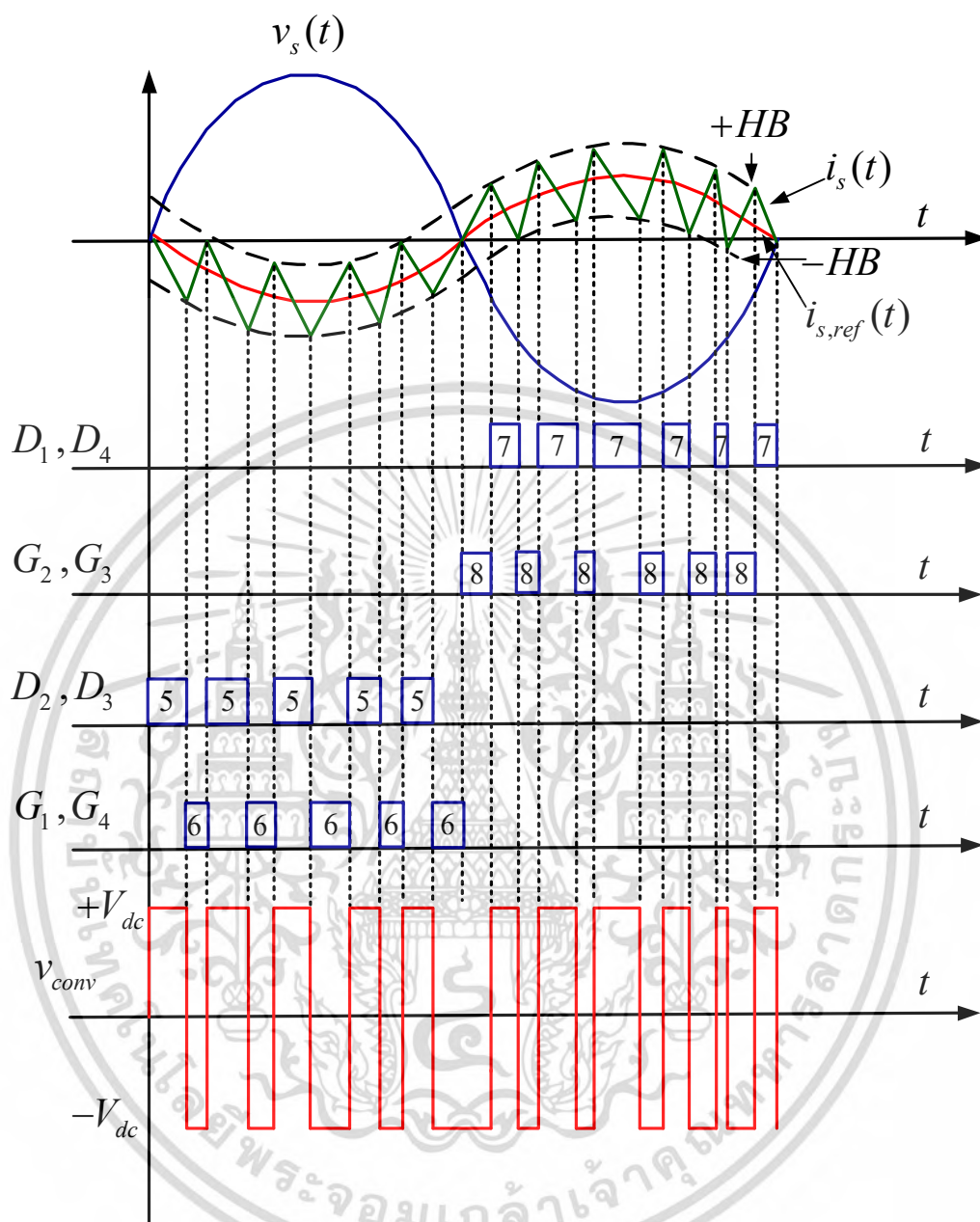
รูปที่ 4.3 วงจรของคอนเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อกกริดที่มีการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า

จากรูปที่ 4.3 และ สมการที่ (4.2) สามารถอธิบายการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าได้เป็น 2 กรณี โดยกรณี
ที่ 1 คือโหมดการทำงานของวงจรเรียงกระแสซึ่งเงื่อนไขเกิดขึ้นเมื่อแรงดันไฟฟ้ามูลฐานของคอนเวอร์
เตอร์ (v_{conv1}) มีมุมทางไฟฟ้าล่าหลังมุมของแรงดันไฟฟ้าที่กริด (v_s) ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าของกริดมีมุม
เฟสที่ตรงกันกับแรงดันไฟฟ้าที่กริด กำลังไฟฟ้ามีค่าบวก กระแสไฟฟ้าที่กริดไหลจากกริดไปยังบัสของ

แรงดันคอนเวอร์เตอร์ กรณีที่ 2 โหมดการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ ซึ่งเงื่อนไขนี้เกิดขึ้นเมื่อแรงดันไฟฟ้ามูลฐานของคอนเวอร์เตอร์ (v_{conv1}) มีมุมทางไฟฟ้านำหน้ามุมของแรงดันไฟฟ้าที่กริด (v_s) ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าของกริดมีมุมเฟสที่ตรงข้ามกับแรงดันไฟฟ้าที่กริด กำลังไฟฟ้ามักจะล้น กระแสไฟฟ้าที่กริดไหลจากบัสของแรงดันคอนเวอร์เตอร์ไปยังที่กริด โดยที่โหมดการทำงานของวงจรเรียงกระแส และโหมดการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์สามารถเขียนเป็นกราฟการเปิดปิดของสวิตช์ได้ดังรูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.5



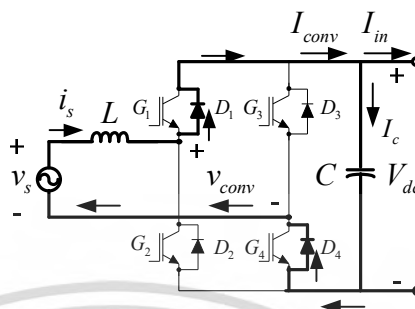
รูปที่ 4.4 การทำงานส่งผ่านกำลังไฟฟ้าของคอนเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อกกริดในโหมดวงจรเรียงกระแส



รูปที่ 4.5 การทำงานส่งผ่านกำลังไฟฟ้าของคอนเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อกรีดในโหมดวงจรอินเวอร์เตอร์

จากรูปที่ 4.4 ในกรณีของโหมดวงจรเรียงกระแสสามารถจำแนกเป็นโหมดย่อยได้ 4 โหมดการทำงาน สามารถเขียนได้ดังนี้

โหมดที่ 1



รูปที่ 4.6 การทำงานของคอนเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อกิริตในโหมดที่ 1

จากรูปที่ 4.4 และ รูปที่ 4.6 พบว่าโหมดนี้จะอยู่ในโหมดการทำงานของกระแสที่มุม 0° ถึง 180° โดยโหมดนี้ทำงานเป็นวงจรเรียงกระแส โดยกระแสกริดไหลผ่าน D_1 และ D_4 เพื่อชาร์จประจุที่ตัวเก็บประจุ ($+V_{dc}$) โดยที่แรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำลดลง ส่งผลให้อัตราการเปลี่ยนกระแสที่กริดลดลง $\left(-\frac{di_s}{dt}\right)$ ตามรูปที่ 4.4 โดยคำอธิบายดังกล่าวสามารถเขียนพิสูจน์เป็นสมการโดยใช้กฎแรงดันไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchoff's Voltage Law) และสมการของกฎฟาราเดย์ (Faraday's Law) ได้ดังสมการที่ (4.3),(4.4),(4.5) และ(4.6) เมื่อกำหนดให้ $v_{conv} = +V_{dc}$

$$-v_s + v_L + v_{conv} = 0 \quad (4.3)$$

$$v_L = v_s - V_{dc} \quad (4.4)$$

$$v_L = L \frac{di_s}{dt} \quad (4.5)$$

$$\frac{di_s}{dt} = \frac{v_s - V_{dc}}{L} \quad (4.6)$$

เมื่อ

v_s คือ แรงดันไฟฟ้าที่กริด

v_L คือ แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ

v_{conv} คือ แรงดันไฟฟ้าที่คอนเวอร์เตอร์

V_{dc} คือ แรงดันเชื่อมโยงไฟตรง

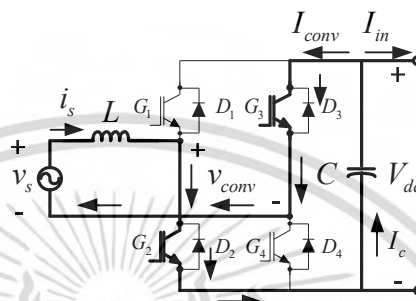
$\frac{di_s}{dt}$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสกริด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

L คือ ค่าความเหนี่ยวนำ

จากสมการที่ 4.6 พบว่าอัตราการเปลี่ยนของกระแสลดลงสอดคล้องตามรูปที่ 4.4

โหมดที่ 2



รูปที่ 4.7 การทำงานของคอนเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อกริดในโหมดที่ 2

จากรูปที่ 4.4 และ รูปที่ 4.7 พบว่าโหมดนี้จะอยู่ในโหมดการทำงานของกระแสที่มุม 0° ถึง 180° โดยโหมดนี้ทำงานเป็นวงจรเรียงกระแส ซึ่งสวิตช์ G_2 และ G_3 อยู่ในสถานะการ ON กระแสกริดไหลผ่าน G_2 และ G_3 เพื่อคายประจุที่ตัวเก็บประจุ ($-V_{dc}$) โดยที่แรงดันตัวเก็บประจุลดลง แต่แรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อัตราการเปลี่ยนกระแสที่กริดเพิ่มขึ้น $\left(+\frac{di_s}{dt}\right)$ ตามรูปที่ 4.4 โดยคำอธิบายดังกล่าวสามารถเขียนพิสูจน์เป็นสมการโดยใช้กฎแรงดันไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchoff's Voltage Law) และสมการของกฎฟาราเดย์ (Faraday's Law) ได้ตั้งสมการที่ (4.7),(4.8),(4.9) และ(4.10) เมื่อกำหนดให้ $v_{conv} = -V_{dc}$

$$-v_s + v_L + v_{conv} = 0 \quad (4.7)$$

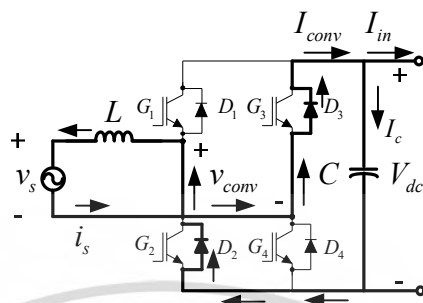
$$v_L = v_s + V_{dc} \quad (4.8)$$

$$v_L = L \frac{di_s}{dt} \quad (4.9)$$

$$\frac{di_s}{dt} = \frac{v_s + V_{dc}}{L} \quad (4.10)$$

จากสมการที่ 4.10 พบว่าอัตราการเปลี่ยนของกระแสเพิ่มขึ้นสอดคล้องตามรูปที่ 4.4

โหมดที่ 3



รูปที่ 4.8 การทำงานของคอนเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อกิริตในโหมดที่ 3

จากรูปที่ 4.4 และ รูปที่ 4.8 พบว่าโหมดนี้จะอยู่ในโหมดการทำงานของกระแสที่มุม 180° ถึง 360° โดยโหมดนี้ทำงานเป็นวงจรเรียงกระแส โดยกระแสกริดไหลออกจากแรงดันไฟฟ้าที่กริดด้านลบ ($-v_s$) ผ่าน D_2 และ D_3 เพื่อชาร์จประจุที่ตัวเก็บประจุ ($+V_{dc}$) โดยที่แรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำลดลง ส่งผลให้อัตราการเปลี่ยนกระแสที่กริดลดลง $\left(-\frac{di_s}{dt}\right)$ ตามรูปที่ 4.4 โดยคำอธิบายดังกล่าวสามารถเขียนพิสูจน์เป็นสมการโดยใช้กฎแรงดันไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchoff's Voltage Law) และสมการของกฎฟาราเดย์ (Faraday's Law) ได้ดังสมการที่ (4.11),(4.12),(4.13) และ(4.14) เมื่อกำหนดให้ $v_{conv} = +V_{dc}$

$$v_s - v_L - v_{conv} = 0 \quad (4.11)$$

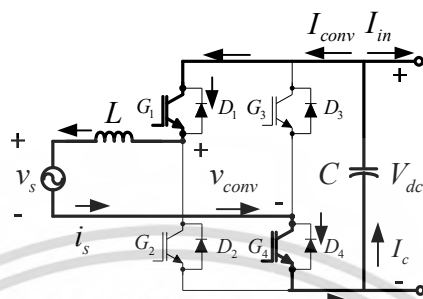
$$v_L = v_s - V_{dc} \quad (4.12)$$

$$v_L = L \frac{di_s}{dt} \quad (4.13)$$

$$\frac{di_s}{dt} = \frac{v_s - V_{dc}}{L} \quad (4.14)$$

จากสมการที่ 4.14 พบว่าอัตราการเปลี่ยนของกระแสลดลงสอดคล้องตามรูปที่ 4.4

โหมดที่ 4



รูปที่ 4.9 การทำงานของคอนเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อกิริตในโหมดที่ 4

จากรูปที่ 4.4 และ รูปที่ 4.9 พบว่าโหมดนี้จะอยู่ในโหมดการทำงานของกระแสที่มุม 180° ถึง 360° โดยโหมดนี้ทำงานเป็นวงจรเรียงกระแส ซึ่งสวิตช์ G_1 และ G_4 อยู่ในสภาวะการ ON กระแสกริดไหลผ่าน G_1 และ G_4 เพื่อคายประจุที่ตัวเก็บประจุ ($-V_{dc}$) โดยที่แรงดันตัวเก็บประจุลดลง แต่แรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อัตราการเปลี่ยนกระแสที่กริดเพิ่มขึ้น $\left(+\frac{di_s}{dt}\right)$ ตามรูปที่ 4.4 โดยคำอธิบายดังกล่าวสามารถเขียนพิสูจน์เป็นสมการโดยใช้กฎแรงดันไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchoff's Voltage Law) และสมการของกฎฟาราเดย์ (Faraday's Law) ได้ตั้งสมการที่ (4.15),(4.16),(4.17) และ(4.18) เมื่อกำหนดให้ $v_{conv} = -V_{dc}$

$$v_s - v_L - v_{conv} = 0 \quad (4.15)$$

$$v_L = v_s + V_{dc} \quad (4.16)$$

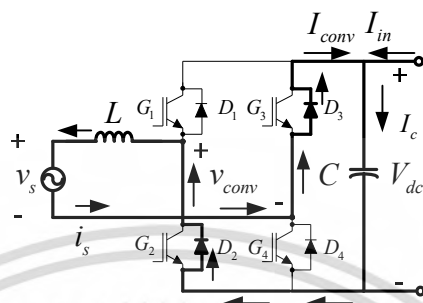
$$v_L = L \frac{di_s}{dt} \quad (4.17)$$

$$\frac{di_s}{dt} = \frac{v_s + V_{dc}}{L} \quad (4.18)$$

จากสมการที่ 4.18 พบว่าอัตราการเปลี่ยนของกระแสเพิ่มขึ้นสอดคล้องตามรูปที่ 4.4

จากรูปที่ 4.5 ในกรณีของโหมดวงจรอินเวอร์เตอร์สามารถจำแนกเป็นโหมดย่อยได้ 4 โหมดการทำงาน สามารถเขียนได้ดังนี้

โหมดที่ 5



รูปที่ 4.10 การทำงานของคอนเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อกรีดในโหมดที่ 5

จากรูปที่ 4.5 และ รูปที่ 4.10 พบว่าโหมดนี้จะอยู่ในโหมดการทำงานของกระแสที่มุม 0° ถึง 180° โดยโหมดนี้ทำงานเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ โดยกระแสกริดไหลผ่าน D_3 และ D_2 เพื่อชาร์จประจุที่ตัวเก็บประจุ ($+V_{dc}$) โดยที่แรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำลดลง ส่งผลให้อัตราการเปลี่ยนกระแสที่กริดลดลง $\left(-\frac{di_s}{dt}\right)$ ตามรูปที่ 4.5 โดยคำอธิบายดังกล่าวสามารถเขียนพิสูจน์เป็นสมการโดยใช้กฎแรงดันไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchoff's Voltage Law) และสมการของกฎฟาราเดย์ (Faraday's Law) ได้ดังสมการที่ (4.19),(4.20),(4.21) และ(4.22) เมื่อกำหนดให้ $v_{conv} = +V_{dc}$

$$v_s - v_L - v_{conv} = 0 \quad (4.19)$$

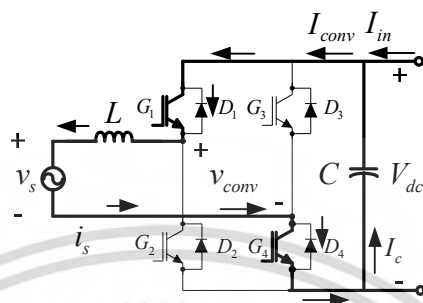
$$v_L = v_s - V_{dc} \quad (4.20)$$

$$v_L = L \frac{di_s}{dt} \quad (4.21)$$

$$\frac{di_s}{dt} = \frac{v_s - V_{dc}}{L} \quad (4.22)$$

จากสมการที่ 4.22 พบว่าอัตราการเปลี่ยนของกระแสลดลงสอดคล้องตามรูปที่ 4.5

โหมดที่ 6



รูปที่ 4.11 การทำงานของคอนเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อกิริตในโหมดที่ 6

จากรูปที่ 4.5 และ รูปที่ 4.11 พบว่าโหมดนี้จะอยู่ในโหมดการทำงานของกระแสที่มุม 0° ถึง 180° โดยโหมดนี้ทำงานเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ ซึ่งสวิตช์ G_1 และ G_4 อยู่ในสภาวะการ ON กระแสกริดไหลผ่าน G_1 และ G_4 เพื่อคายประจุที่ตัวเก็บประจุ ($-V_{dc}$) โดยที่แรงดันตัวเก็บประจุลดลง แต่แรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อัตราการเปลี่ยนกระแสที่กริดเพิ่มขึ้น $\left(+\frac{di_s}{dt}\right)$ ตามรูปที่ 4.5 โดยคำอธิบายดังกล่าวสามารถเขียนพิสูจน์เป็นสมการโดยใช้กฎแรงดันไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchoff's Voltage Law) และสมการของกฎฟาราเดย์ (Faraday's Law) ได้ตั้งสมการที่ (4.23),(4.24),(4.25) และ(4.26) เมื่อกำหนดให้ $v_{conv} = -V_{dc}$

$$v_s - v_L - v_{conv} = 0 \quad (4.23)$$

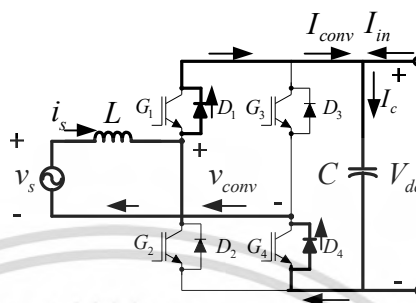
$$v_L = v_s + V_{dc} \quad (4.24)$$

$$v_L = L \frac{di_s}{dt} \quad (4.25)$$

$$\frac{di_s}{dt} = \frac{v_s + V_{dc}}{L} \quad (4.26)$$

จากสมการที่ 4.26 พบว่าอัตราการเปลี่ยนของกระแสเพิ่มขึ้นสอดคล้องตามรูปที่ 4.5

โหมดที่ 7



รูปที่ 4.12 การทำงานของคอนเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อกิริตในโหมดที่ 7

จากรูปที่ 4.5 และ รูปที่ 4.12 พบว่าโหมดนี้จะอยู่ในโหมดการทำงานของกระแสที่มุม 180° ถึง 360° โดยโหมดนี้ทำงานเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ โดยกระแสกิริตไหลผ่าน D_1 และ D_4 เพื่อชาร์จประจุที่ตัวเก็บประจุ ($+V_{dc}$) โดยที่แรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำลดลง ส่งผลให้อัตราการเปลี่ยนกระแสที่กิริตลดลง $\left(-\frac{di_s}{dt}\right)$ ตามรูปที่ 4.4 โดยคำอธิบายดังกล่าวสามารถเขียนพิสูจน์เป็นสมการโดยใช้กฎแรงดันไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchoff's Voltage Law) และสมการของกฎฟาราเดย์ (Faraday's Law) ได้ดังสมการที่ (4.27),(4.28),(4.29) และ(4.30) เมื่อกำหนดให้ $v_{conv} = +V_{dc}$

$$-v_s + v_L + v_{conv} = 0 \quad (4.27)$$

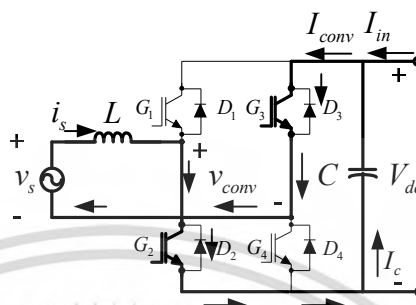
$$v_L = v_s - V_{dc} \quad (4.28)$$

$$v_L = L \frac{di_s}{dt} \quad (4.29)$$

$$\frac{di_s}{dt} = \frac{v_s - V_{dc}}{L} \quad (4.30)$$

จากสมการที่ 4.30 พบว่าอัตราการเปลี่ยนของกระแสลดลงสอดคล้องตามรูปที่ 4.5

โหมดที่ 8



รูปที่ 4.13 การทำงานของคอนเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อกิริตในโหมดที่ 8

จากรูปที่ 4.5 และ รูปที่ 4.13 พบว่าโหมดนี้จะอยู่ในโหมดการทำงานของกระแสที่มุม 180° ถึง 360° โดยโหมดนี้ทำงานเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ ซึ่งสวิตช์ G_2 และ G_3 อยู่ในสภาวะการ ON กระแสกิริตไหลผ่าน G_2 และ G_3 เพื่อคายประจุที่ตัวเก็บประจุ ($-V_{dc}$) โดยที่แรงดันตัวเก็บประจุลดลง แต่แรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อัตราการเปลี่ยนกระแสที่กิริตเพิ่มขึ้น $\left(+\frac{di_s}{dt}\right)$ ตามรูปที่ 4.5 โดยคำอธิบายดังกล่าวสามารถเขียนพิสูจน์เป็นสมการโดยใช้กฎแรงดันไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchoff's Voltage Law) และสมการของกฎฟาราเดย์ (Faraday's Law) ได้ตั้งสมการที่ (4.31),(4.32),(4.33) และ(4.34) เมื่อกำหนดให้ $v_{conv} = -V_{dc}$

$$-v_s + v_L + v_{conv} = 0 \quad (4.31)$$

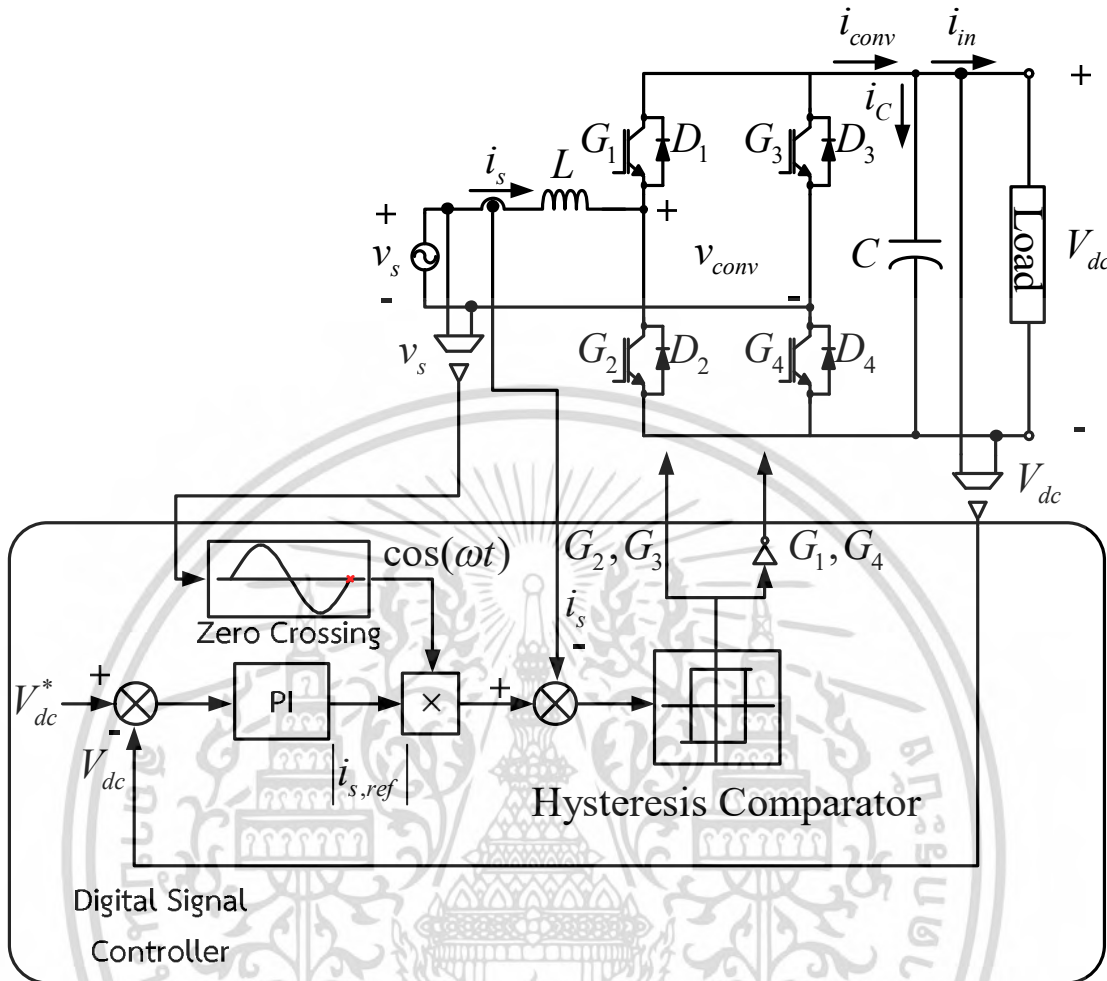
$$v_L = v_s + V_{dc} \quad (4.32)$$

$$v_L = L \frac{di_s}{dt} \quad (4.33)$$

$$\frac{di_s}{dt} = \frac{v_s + V_{dc}}{L} \quad (4.34)$$

จากสมการที่ 4.34 พบว่าอัตราการเปลี่ยนของกระแสเพิ่มขึ้นสอดคล้องตามรูปที่ 4.5

วงจรกำลัง และวงจรควบคุมของคอนเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อกิริตถูกแสดงไว้ในรูปที่ 4.14 โดยวงจรมีการควบคุมแรงดันเชื่อมโยงไฟตรงให้คงที่ และสวิตช์ด้วยหลักการฮิสเตอร์รีซิสโดยเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของกระแสที่กิริต



รูปที่ 4.14 วงจรกำลัง และวงจรควบคุมของคอนเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อกิต

4.3 การวิเคราะห์ฟังก์ชันถ่ายโอนของคอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสชนิดเชื่อมต่อกิต วงรอบของแรงดันเชื่อมโยงไฟตรง

จากความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าขาเข้ากับกำลังไฟฟ้าขาออกสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ (4.35)

$$\frac{V_{s,\max} I_{s,\max}}{2} = \frac{V_{dc}^2}{R} + CV_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} \quad (4.35)$$

$$\frac{V_{s,\max} I_{s,\max}}{2CV_{dc}} - \frac{V_{dc}}{RC} = \frac{dV_{dc}}{dt} \quad (4.36)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{V_{s,\max} I_{s,\max}}{2CV_{dc}} = \frac{dV_{dc}}{dt} + \frac{V_{dc}}{RC} \quad (4.37)$$

กำหนดให้ค่าตัวแปรด้านเข้าคือขนาดค่ายอดของกระแสที่กริด $I_{s,\max}$ และ V_{dc} ของฝั่งซ้ายมือของสมการเป็นตัวแปรด้านออก แปลงค่าไปยังโดเมนของลาปลาซได้ดังสมการที่ (4.38)

$$\frac{V_{s,\max} I_{s,\max}(s)}{2CV_{dc}} = sV_{dc}(s) + \frac{V_{dc}(s)}{RC} \quad (4.38)$$

$$\frac{V_{dc}(s)}{I_{s,\max}(s)} = \frac{V_{s,\max}}{2CV_{dc}} \left(\frac{1}{\left(s + \frac{1}{RC}\right)} \right) \quad (4.39)$$

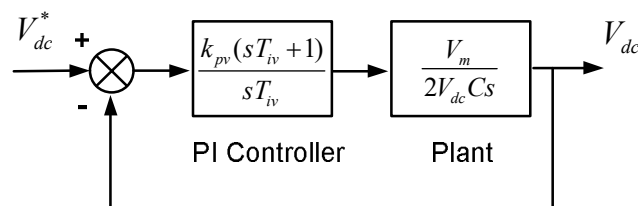
$$\frac{V_{dc}(s)}{I_{s,\max}(s)} = \frac{V_{s,\max}}{2V_{dc}} \left(\frac{R}{(sRC + 1)} \right) \quad (4.40)$$

$$\frac{V_{dc}(s)}{I_{s,\max}(s)} = \frac{V_{s,\max}}{2V_{dc}} \left(\frac{1}{\left(sC + \frac{1}{R}\right)} \right) \quad (4.41)$$

ถ้าพิจารณากำหนดให้ $V_{s,\max} = V_m$ และค่าความต้านทานของภาระทางไฟฟ้าที่ต่อขนานดีซีบัส (R) มีค่ามาก สามารถเขียนเป็นสมการฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบได้ดังสมการที่ (4.42)

$$\frac{V_{dc}(s)}{I_{s,\max}(s)} = \frac{V_m}{2V_{dc}Cs} \quad (4.42)$$

การวิเคราะห์ระบบควบคุมแรงดันไฟตรงเชื่อมโยงสามารถเขียนเป็นระบบป้อนกลับดังรูปที่ 4.15 โดยใช้สมการระบบจากสมการที่ (4.42)



รูปที่ 4.15 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแรงดันไฟตรงเชื่อมโยง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.15 สามารถเขียนฟังก์ชันถ่ายโอนได้ดังนี้

$$G(s) = \left(\frac{k_{pv}(sT_{iv} + 1)}{sT_{iv}} \right) \left(\frac{V_m}{2V_{dc}Cs} \right)$$

$$G(j\omega_o) = \left(\frac{k_{pv}(j\omega_o T_{iv} + 1)}{j^2 \omega_o^2 T_{iv}} \right) \left(\frac{V_m}{2V_{dc}C} \right)$$

เมื่อพิจารณาขนาดและเฟสที่จุดความถี่เฟสตัดข้าม (Phase crossover frequency) โดยทั่วไป จุดที่เป็นความถี่ตัดข้ามมีค่าขนาด $|G(j\omega)| = 1$, มุมเฟสมาร์จิ้น (Phase Margin) มีค่าเท่ากับระยะระหว่างมุมที่มีค่าขนาดเท่ากับ 1 ถึงค่ามุม -180 องศา โดยขนาดที่ความถี่เฟสตัดข้าม กับ มุมเฟสมาร์จิ้น สามารถหาได้ดังสมการที่ (4.43) และ (4.44)

$$|G(j\omega)| = \left(\frac{k_{pv}V_m \left(\sqrt{(\omega_o T_{iv})^2 + 1} \right)}{2V_{dc}C\omega_o^2 T_{iv}} \right) = 1 \quad (4.43)$$

$$\phi_m = \phi_n + 180 \quad (4.44)$$

จากระบบข้างต้นสามารถหาเวลาการปริพันธ์และค่าตัวควบคุมเชิงสัดส่วนของตัวควบคุม แรงดันไฟตรงเชื่อมโยงได้ดังสมการที่ (4.45) และ (4.46) ตามลำดับ

$$\phi_m - 180 = \tan^{-1}(\omega_o T_{iv}) - 180$$

$$T_{iv} = \frac{\tan(\phi_m)}{\omega_o} \quad (4.45)$$

$$k_{pv} = \frac{2V_{dc}C\omega_o^2 T_{iv}}{V_m \left(\sqrt{(\omega_o T_{iv})^2 + 1} \right)} \quad (4.46)$$

โดยที่

ϕ_m คือ มุมเฟสมาร์จิ้น

ϕ_n คือ มุมเฟสที่ตำแหน่งความถี่เฟสตัดข้ามของกราฟโบเด

ω_o คือ แบนด์วิดท์ของวงรอบปิดวงนอก

T_{iv} คือ เวลาการปรีพันธ์ของตัวควบคุมแรงดันไฟตรงเชื่อมโยง

k_{pv} คือ ตัวควบคุมเชิงสัดส่วนของตัวควบคุมแรงดันไฟตรงเชื่อมโยง

k_{iv} คือ ตัวควบคุมเชิงปริพันธ์ของตัวควบคุมแรงดันไฟตรงเชื่อมโยง

4.4 สรุป

ในบทนี้กล่าวถึงพื้นฐานของหลักการการควบคุมฮีสเตอร์รีซิส, หลักการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าระหว่างบัสสองบัสเพื่อใช้วิเคราะห์โหมดการทำงานของอินเวอร์เตอร์ และการทำงานของคอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสชนิดเชื่อมต่อกรีดซึ่งในที่นี้ใช้หลักการควบคุมแบบฮีสเตอร์รีซิสควบคุมการกระแสกรีด และควบคุมแรงดันไฟตรงเชื่อมโยงให้คงที่ตามที่แรงดันไฟตรงเชื่อมโยงคำสั่งกำหนดไว้โดยตัวควบคุมพีไอ รวมไปถึงการแสดงผลมาของสมการระบบแรงดันไฟตรงเชื่อมโยงของคอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสชนิดเชื่อมต่อกรีด



บทที่ 5

การออกแบบระบบควบคุม และวงจรตัวตรวจจับประเภทต่างๆ

5.1 บทนำ

ในบทนี้กล่าวถึง การออกแบบตัวควบคุมพีไอเพื่อใช้ในการควบคุมแรงดันไฟตรงเชื่อมโยง และความเร็วมอเตอร์ เพื่อให้ได้เสถียรภาพและผลตอบสนองที่เหมาะสม โดยระบบควบคุมแบ่งเป็นสองชุดใหญ่ๆ ชุดแรกคือระบบควบคุมของคอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสชนิดเชื่อมต่อกริด และชุดที่สองคือระบบควบคุมของอินเวอร์เตอร์สองเฟสสามกึ่งสำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์สองเฟสชนิดพารามิเตอร์ไม่สมมาตร โดยรายละเอียดต่างๆจะกล่าวในหัวข้อถัดถัดไป

5.2 การออกแบบระบบควบคุม

5.2.1 การออกแบบระบบควบคุมแรงดันไฟตรงเชื่อมโยง

จากรายละเอียดต่างๆได้ถูกกล่าวในหัวข้อที่ 4.3 ในที่นี้ขอยกสูตรสำเร็จจากสมการที่ (4.45) และ (4.46)

$$T_{iv} = \frac{\tan(\phi_m)}{\omega_o}$$
$$k_{pv} = \frac{2V_{dc} C \omega_o^2 T_{iv}}{V_m \left(\sqrt{(\omega_o T_{iv})^2 + 1} \right)}$$

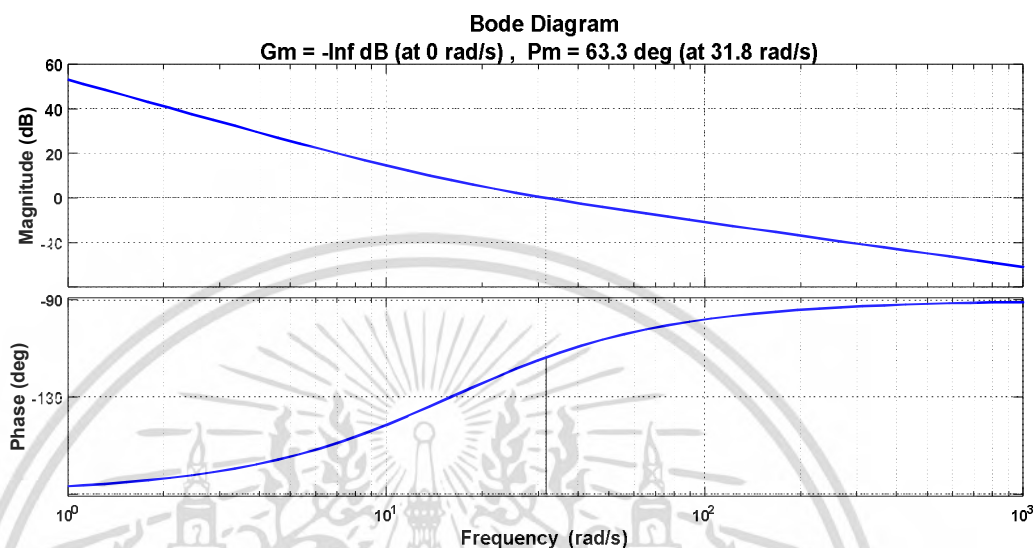
เมื่อค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ $\zeta = 0.667$, $T_s = 200$ ms, $\phi_m = 63.34^\circ$, $\omega_o = 31.67$ rad/s, $V_{dc} = 570$ V, $C = 5,000$ μ F และ $V_m = 220\sqrt{2}$ V นำไปคำนวณในสมการที่ (4.45) และ (4.46) จะได้ค่า T_{iv} , k_{pv} และ k_{iv} ได้ดังนี้

$$T_{iv} = 62.9 \text{ ms}$$

$$k_{pv} = 0.52$$

$$k_{iv} = 8.3$$

สามารถนำมาวาดแผนภาพโบเดได้ดังนี้



รูปที่ 5.1 แผนภาพโบเดสำหรับการออกแบบระบบควบคุมแรงดันไฟตรงเชื่อมโยงของคอนเวอเตอร์เชื่อมต่อกิริต

5.2.2 การออกแบบระบบควบคุมความเร็วของวิธีการควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกน

จากรายละเอียดต่างๆ ได้ถูกกล่าวในหัวข้อที่ 3.5 ในที่นี้ขอยกสูตรสำเร็จจากสมการที่ (3.46) และ

(3.47)

$$T_{iw} = \frac{\tan(\phi_m)}{\omega_o}$$

$$k_{pw} = \frac{J\omega_o^2 T_{iw}}{\left(\sqrt{(\omega_o T_{iw})^2 + 1}\right)}$$

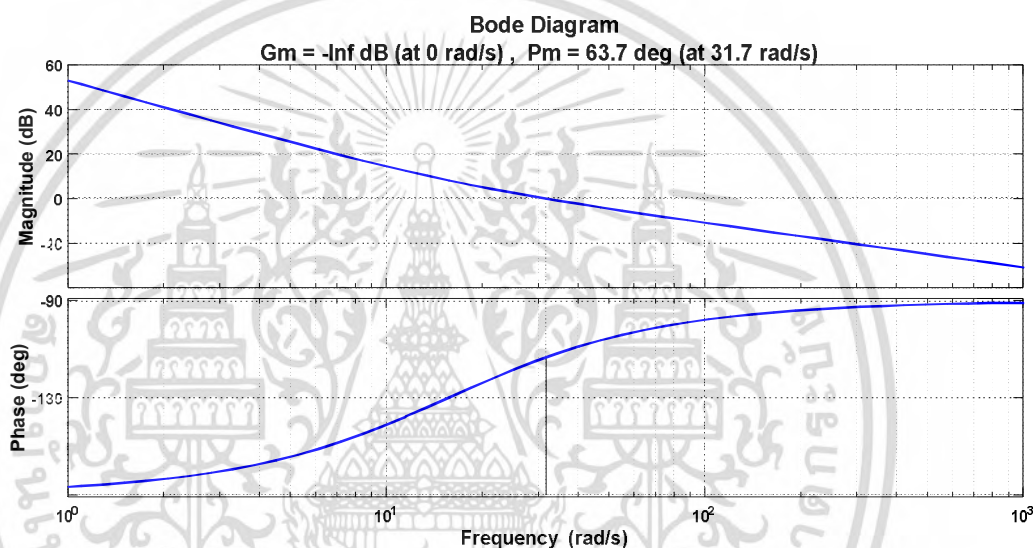
เมื่อค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ $\zeta = 0.667$, $T_s = 200$ ms, $\phi_m = 63.34^\circ$, $\omega_o = 31.67$ rad/s และ $J = 0.0246$ kg·m² นำไปคำนวณในสมการที่ (3.46) และ (3.47) จะได้ค่า T_{iw} , k_{pw} และ k_{iw} ได้ดังนี้

$$T_{i\omega} = 62.9 \text{ ms}$$

$$k_{p\omega} = 0.7$$

$$k_{i\omega} = 11$$

สามารถนำมาวาดแผนภาพโบเดได้ดังนี้



รูปที่ 5.2 แผนภาพโบเดสำหรับการออกแบบระบบควบคุมความเร็วด้วยวิธีการควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกนของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสชนิดพารามิเตอร์ไม่สมมาตร

5.2.3 การออกแบบระบบควบคุมความเร็วของวิธีการควบคุมแบบสเกลาร์

จากรายละเอียดต่างๆ ได้ถูกกล่าวในหัวข้อที่ 3.6 ในที่นี้ขอยกสูตรสำเร็จจากสมการที่ (3.52) และ (3.53)

$$T_{i\omega} = \frac{\tan(\phi_m)}{\omega_o}$$

$$k_{p\omega} = \frac{J\omega_o^2 T_{i\omega}}{\left(k_t \sqrt{(\omega_o T_{i\omega})^2 + 1}\right)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

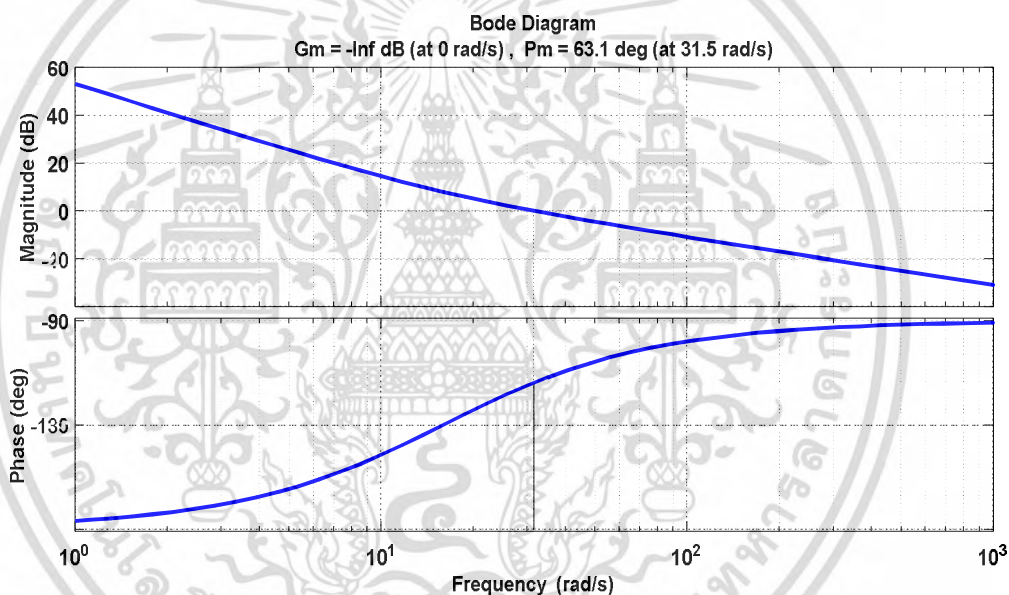
เมื่อค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ $\zeta = 0.667$, $T_s = 200$ ms, $\phi_m = 63.34^\circ$, $\omega_o = 31.67$ rad/s
 $J = 0.0246$ kg·m² และ $k_t = 1.87$ นำไปคำนวณในสมการที่ (3.52) และ (3.53) จะได้ค่า $T_{i\omega}$, $k_{p\omega}$
 และ $k_{i\omega}$ ได้ดังนี้

$$T_{i\omega} = 62.9 \text{ ms}$$

$$k_{p\omega} = 0.37$$

$$k_{i\omega} = 5.92$$

สามารถนำมาวาดแผนภาพโบเดได้ดังนี้



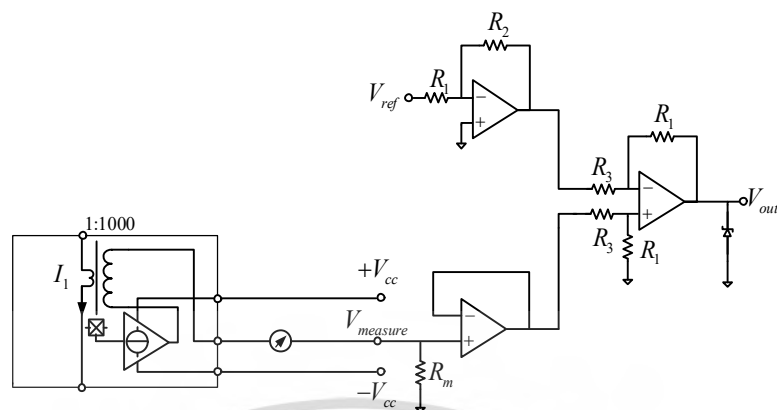
รูปที่ 5.3 แผนภาพโบเดสำหรับการออกแบบระบบควบคุมความเร็วด้วยวิธีสเกลาร์ของมอเตอร์
 เหนี่ยวนำสองเฟสชนิดพารามิเตอร์ไม่สมมาตร

5.3 การออกแบบวงจรตรวจจับ

5.3.1 การออกแบบวงจรตรวจจับกระแส

ในที่นี้ใช้ตัวตรวจจับกระแส LEM LA-25NP โดยเลือกใช้งานในอัตราส่วนกระแสขาออกต่อขาเข้า
 1:1000 และเลือกใช้ IC TL084 สำหรับนำมาใช้งานเป็น Op-amp โดยได้ออกแบบวงจร [13] ได้ดังรูปที่
 5.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



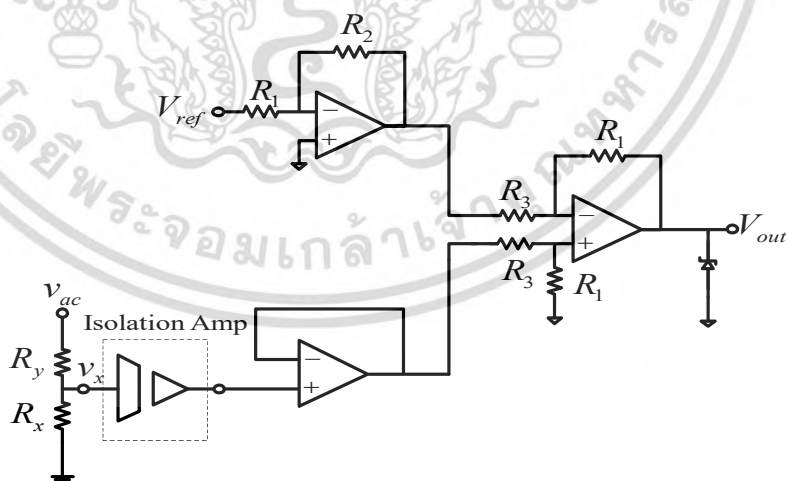
รูปที่ 5.4 วงจรตรวจจับกระแส

จากวงจรรูปที่ 5.4 สามารถหาแรงดันขาออกได้ดังสมการที่ (5.1)

$$V_{out} = \frac{I_1 R_m R_1}{1000 R_3} + V_{ref} \frac{R_2}{R_3} \quad (5.1)$$

5.3.2 การออกแบบวงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้าที่กริด

ในที่นี้ได้ใช้ IC แยกกราวด์ระหว่างวงจรกำลังกับวงจรควบคุมโดยใช้ ISO 124 และ Op-amp IC ชนิด TL-084 โดยวงจรสามารถออกแบบ [13] ได้ดังรูปที่ 5.5



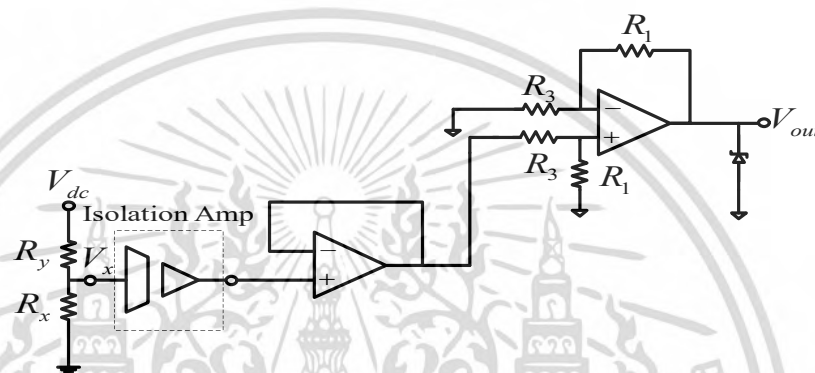
รูปที่ 5.5 วงจรตรวจจับแรงดันกริด

จากวงจรรูปที่ 5.5 สามารถหาแรงดันขาออกได้ดังสมการที่ (5.2)

$$V_{out} = \frac{V_{dc} R_x R_1}{(R_y + R_x) R_3} + V_{ref} \frac{R_2}{R_3} \quad (5.2)$$

5.3.3 การออกแบบวงจรตรวจจับแรงดันไฟตรงเชื่อมโยง

ในที่นี้ได้ใช้ IC แยกกราวด์ระหว่างวงจรกำลังกับวงจรควบคุมโดยใช้ ISO 124 และ Op -amp IC ชนิด TL - 084 โดยวงจรสามารถออกแบบได้ [13] ดังรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 วงจรตรวจจับแรงดันไฟตรงเชื่อมโยง

จากวงจรรูปที่ 5.6 สามารถหาแรงดันขาออกได้ดังสมการที่ (5.3)

$$V_{out} = \frac{V_{dc} R_x R_1}{(R_y + R_x) R_3} \quad (5.3)$$

5.4 สรุป

ในการออกแบบระบบควบคุมคอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสชนิดเชื่อมต่อกิตสามารถออกแบบในส่วน ของระบบควบคุมแรงดันไฟตรงเชื่อมโยงในการออกแบบกำหนดให้ใช้แบนด์วิดท์ของลูปนอกการออกแบบ โดยใช้ระบบการออกแบบระบบควบคุมแบบวงเปิด เพื่อระบบเกิดความเสถียรภาพ คอนเวอร์เตอร์หนึ่ง เฟสชนิดเชื่อมต่อกิต สามารถควบคุมกระแสไฟฟ้าที่กิตให้มีมุมเฟสตรงกันกับแรงดันไฟฟ้าที่กิต และ สามารถควบคุมแรงดันไฟตรงเชื่อมโยงได้คงที่ ในการออกแบบอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ ในที่นี้ใช้วิธีการออกแบบระบบควบคุมชนิดวงเปิดของวงรอบความเร็วโดยใช้แบนด์วิดท์ของลูปนอกโดยทำ ให้ระบบเกิดความเสถียรภาพสามารถรักษาความเร็วได้ตามที่ความเร็วคำสั่งได้สั่งค่า และยังรักษาระดับ ความเร็วได้เมื่อมีการใส่โหลดและปลดโหลด ในส่วนของการออกแบบวงจรในบทนี้ได้กล่าวถึงวงจร ตรวจจับแรงดันกิต , กระแสกิต และ แรงดันไฟตรงเชื่อมโยง เพื่อที่จะนำค่าที่ได้ป้อนกลับไปยังระบบ

ควบคุมเพื่อควบคุมระบบ โดยส่วนประกอบของวงจรตรวจจับมีดังนี้ Hall Effect, Isolation Amplifier และ Operation Amplifier



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

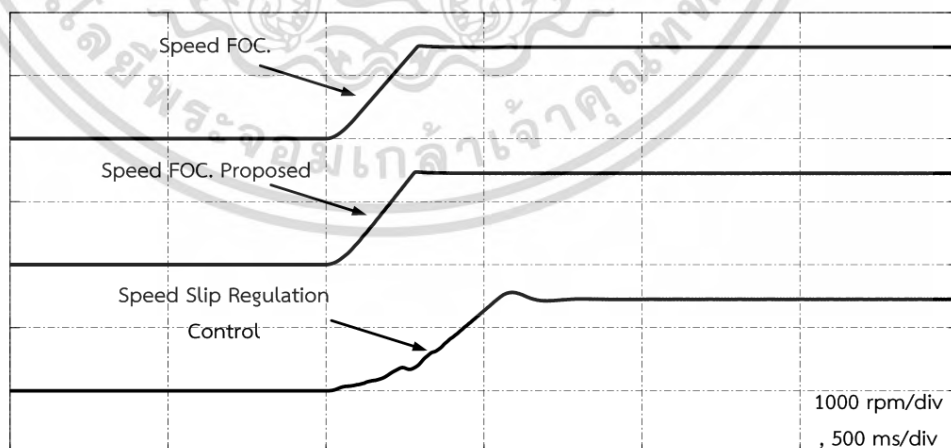
การจำลองผล

6.1 บทนำ

ในบทนี้กล่าวถึง การจำลองผลระบบการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส โดยใช้วิธีการควบคุมมอเตอร์สามวิธี ซึ่งวิธีการควบคุมมอเตอร์ทั้ง 3 วิธี สามารถแบ่งออกได้ดังนี้ 1.การควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกน 2.การควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกนโดยปราศจากตัวตรวจจับสนภูมิ 3. การควบคุมแบบสเกลาร์ เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส โดยจำลองภายใต้เงื่อนไข การเริ่มเดินเครื่องของมอเตอร์, การใส่ภาระทางกล, เปลี่ยนความเร็ว และกลับทิศทางความเร็วต่างๆ โดยใช้แหล่งจ่ายไฟตรงจากแรงดันเชื่อมโยงไฟตรงของคอนเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อกิริตที่สามารถควบคุมแรงดันเชื่อมโยงไฟตรงให้คงที่ได้ที่ 570 โวลต์ โดยการจำลองผลถูกแสดงในหัวข้อลำดับถัดไป

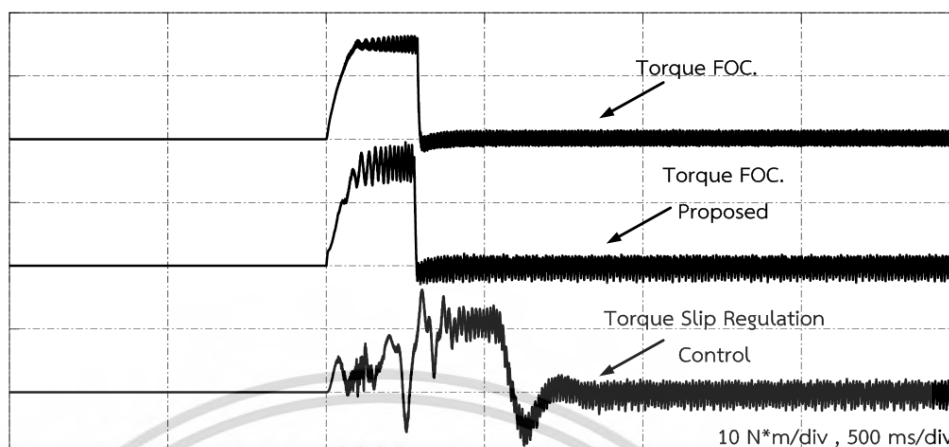
6.2 การจำลองผลการของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสด้วยการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ด้วยวิธีการต่างๆ

6.2.1 การจำลองผลการตอบสนองทางพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสภายใต้เงื่อนไขของการเริ่มเดินเครื่องมอเตอร์โดยใช้วิธีการควบคุมทั้ง 3 วิธี โดยควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ให้มีค่า 1450 rpm ,1000 rpm และ500 rpm ตามลำดับ

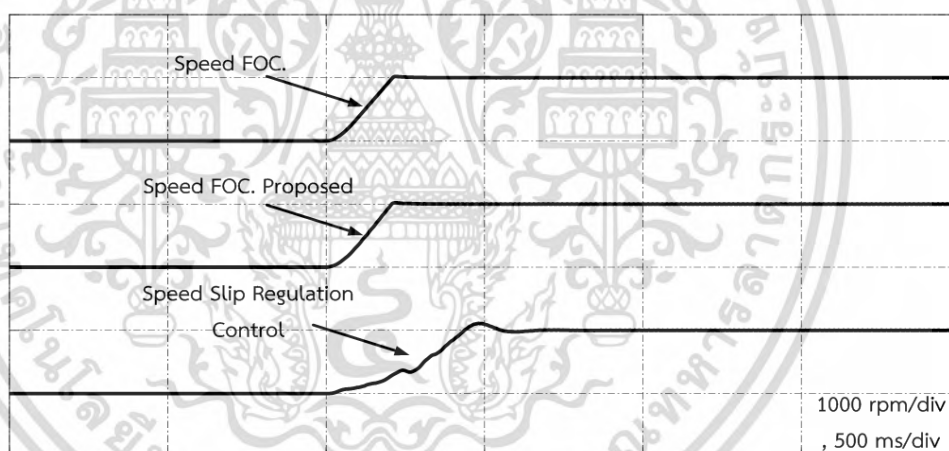


รูปที่ 6.1 ความเร็วของการเริ่มเดินเครื่องมอเตอร์โดยควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ที่ 1450 rpm โดยใช้วิธีการควบคุมต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

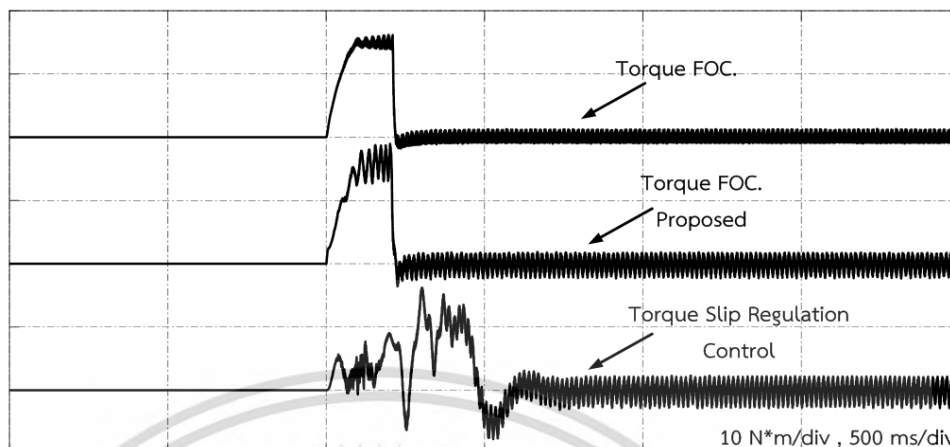


รูปที่ 6.2 แรงบิดของการเริ่มต้นเครื่องมอเตอร์โดยควบคุมความเร็วมอเตอร์ที่ 1450 rpm โดยใช้วิธีการควบคุมต่างๆ

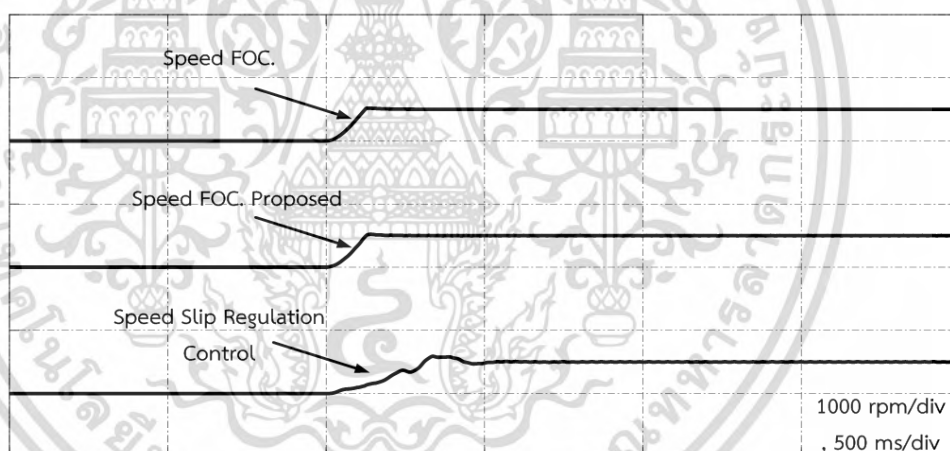


รูปที่ 6.3 ความเร็วของการเริ่มต้นเครื่องมอเตอร์โดยควบคุมความเร็วมอเตอร์ที่ 1000 rpm โดยใช้วิธีการควบคุมต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

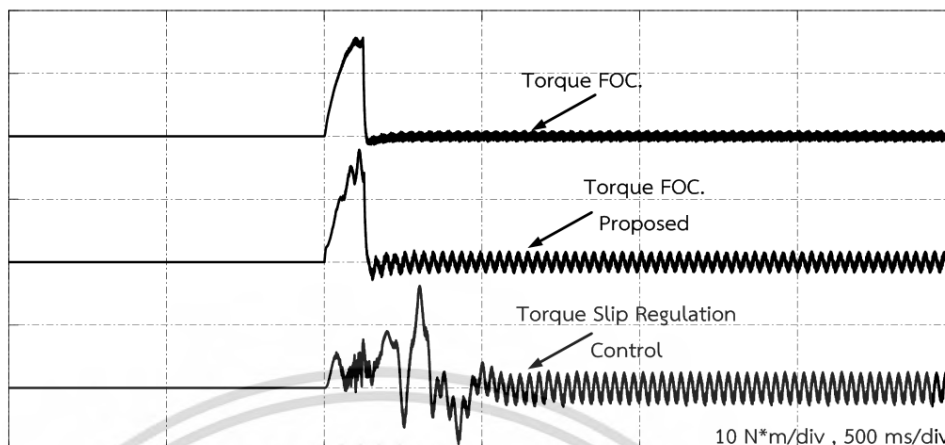


รูปที่ 6.4 แรงบิดของการเริ่มต้นเครื่องมอเตอร์โดยควบคุมความเร็วมอเตอร์ที่ 1000 rpm โดยใช้วิธีการควบคุมต่างๆ



รูปที่ 6.5 ความเร็วของการเริ่มต้นเครื่องมอเตอร์โดยควบคุมความเร็วมอเตอร์ที่ 500 rpm โดยใช้วิธีการควบคุมต่างๆ

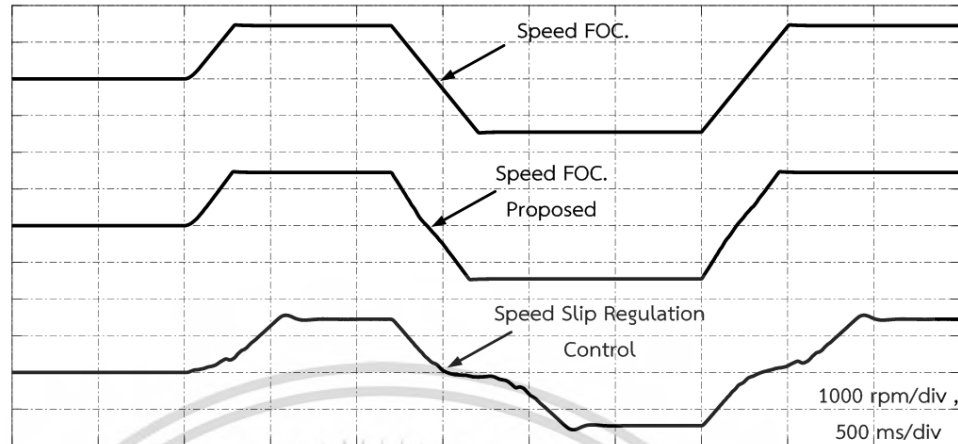
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



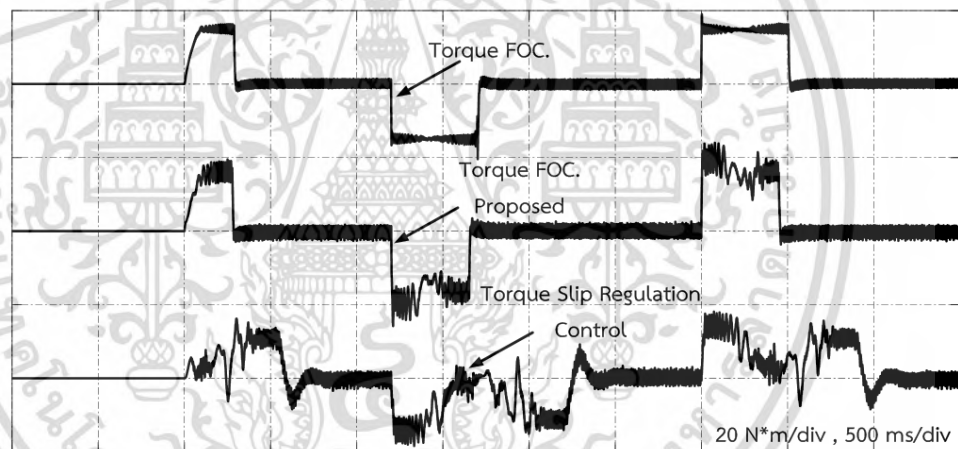
รูปที่ 6.6 แรงบิดของการเริ่มต้นเครื่องมอเตอร์โดยควบคุมความเร็วมอเตอร์ที่ 500 rpm โดยใช้วิธีการควบคุมต่างๆ

จากการเปรียบเทียบวิธีการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ทั้ง 3 วิธี โดยใช้เงื่อนไขในการจำลองที่ความเร็ว 1450 rpm , 1000 rpm , 500 rpm จากรูปที่ 6.1 - 6.6 พบว่าวิธีการควบคุมความเร็วด้วยวิธีการควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกนโดยปราศจากตัวตรวจจับกระแส มีผลตอบสนองที่เร็วและใกล้เคียงวิธีการควบคุมความเร็วด้วยวิธีการควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกนแบบปกติแต่มีค่าระลอกของแรงบิดที่สูงกว่าเนื่องมาจากวิธีการควบคุมนี้ไม่มีตัวป้อนกลับของกระแสสเตเตอร์ และมีผลตอบสนองของความเร็วมอเตอร์และแรงบิดแม่เหล็กที่รวดเร็วกว่าวิธีการควบคุมความเร็วแบบสเกลาร์

6.2.2 การจำลองผลการตอบสนองทางพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสภายใต้เงื่อนไขของการกลับทิศทางความเร็วของมอเตอร์โดยใช้วิธีการควบคุมทั้ง 3 วิธี โดยควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ให้มีค่า 1450 rpm , 1000 rpm และ 500 rpm ตามลำดับ

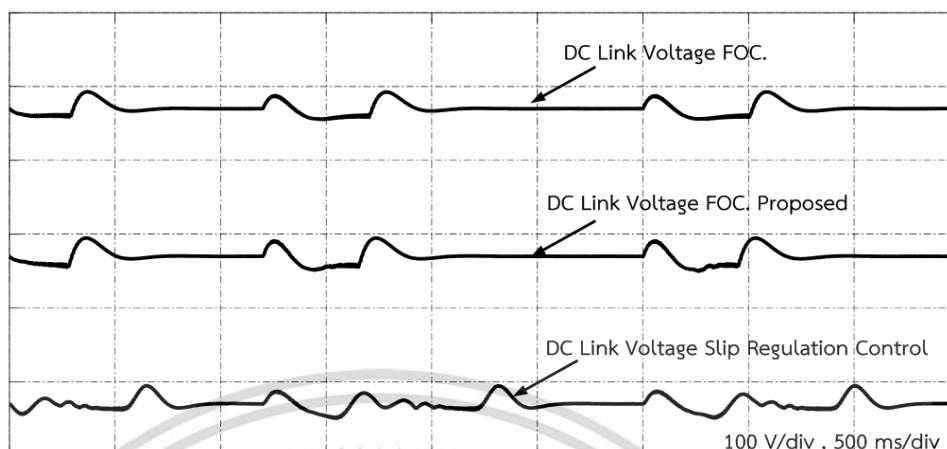


รูปที่ 6.7 ความเร็วของมอเตอร์โดยที่ควบคุมความเร็วมอเตอร์ที่ 1450 rpm ในเงื่อนไขของการกลับทิศทาง ซึ่งใช้วิธีการควบคุมต่างๆ

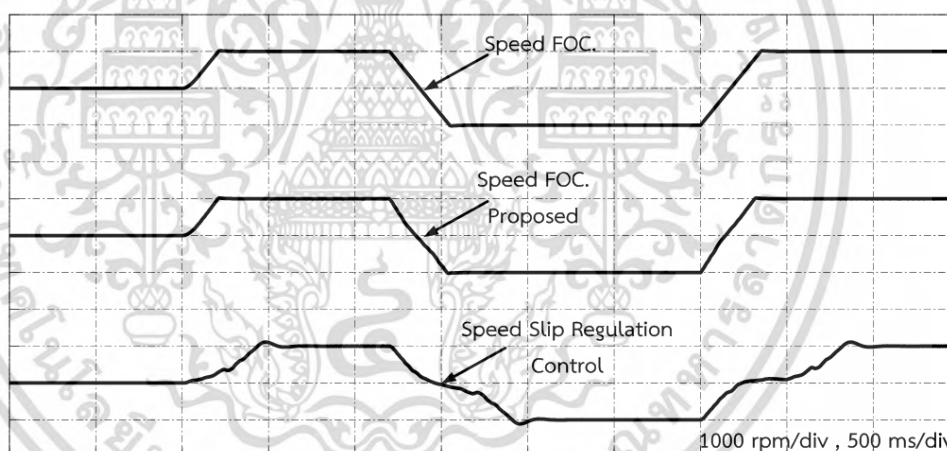


รูปที่ 6.8 แรงบิดแม่เหล็กของมอเตอร์โดยที่ควบคุมความเร็วมอเตอร์ที่ 1450 rpm ในเงื่อนไขของการกลับทิศทาง ซึ่งใช้วิธีการควบคุมต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

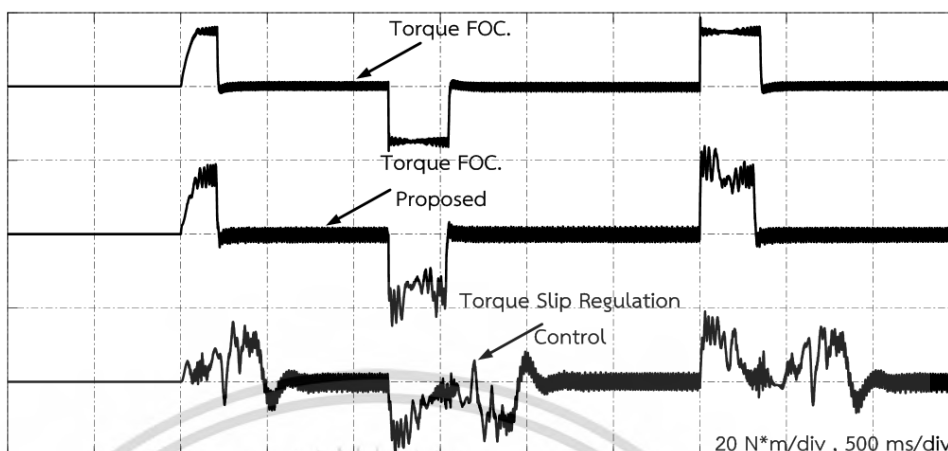


รูปที่ 6.9 แรงดันเชื่อมโยงไฟตรงที่จ่ายให้อินเวอร์เตอร์สำหรับควบคุมมอเตอร์ที่ความเร็ว 1450 rpm ในเงื่อนไขของการกลับทิศทาง ซึ่งใช้วิธีการควบคุมต่างๆ

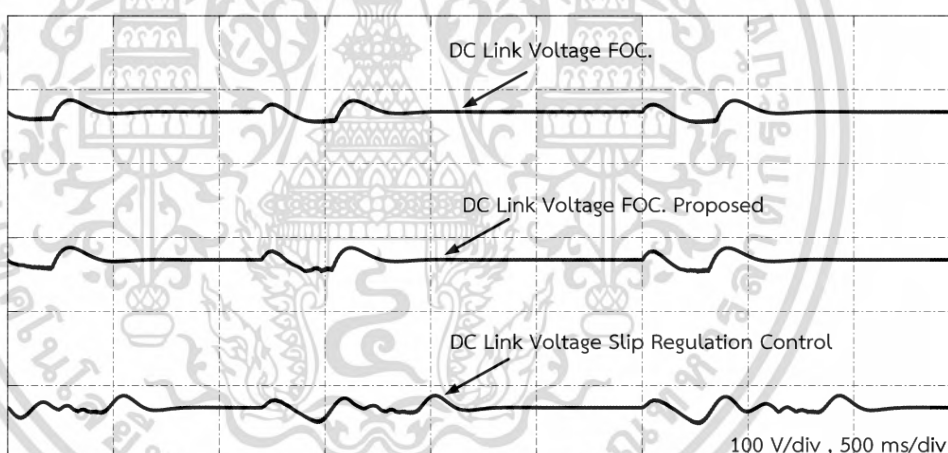


รูปที่ 6.10 ความเร็วของมอเตอร์โดยที่ควบคุมความเร็วมอเตอร์ที่ 1000 rpm ในเงื่อนไขของการกลับทิศทาง ซึ่งใช้วิธีการควบคุมต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

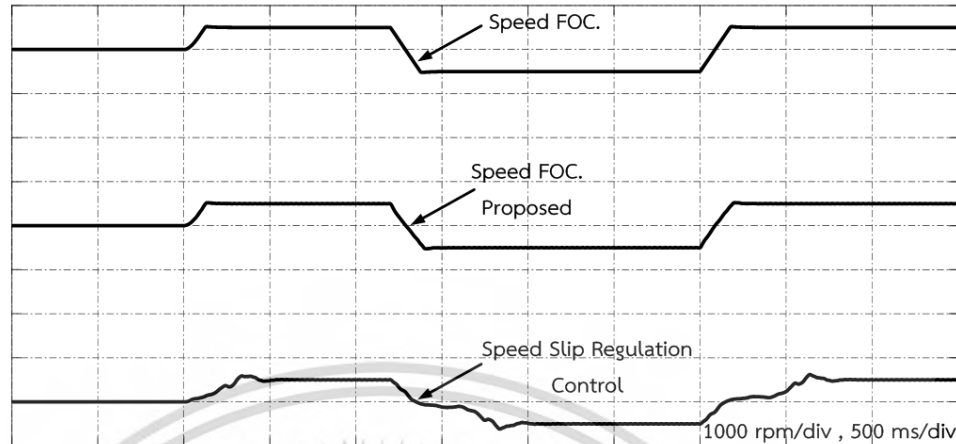


รูปที่ 6.11 แรงบิดแม่เหล็กของมอเตอร์โดยที่ควบคุมความเร็วมอเตอร์ที่ 1000 rpm ในเงื่อนไขของการกลับทิศทาง ซึ่งใช้วิธีการควบคุมต่างๆ

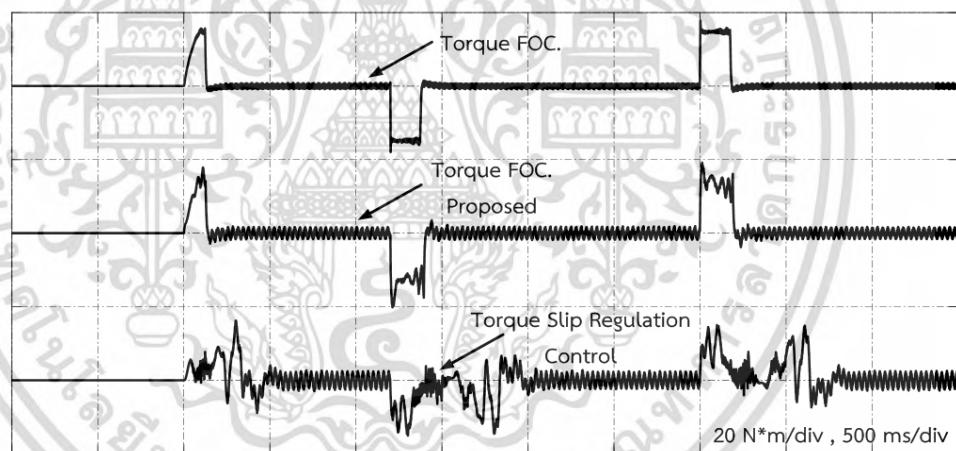


รูปที่ 6.12 แรงดันเชื่อมโยงไฟตรงที่จ่ายให้อินเวอร์เตอร์สำหรับควบคุมมอเตอร์ที่ความเร็ว 1000 rpm ในเงื่อนไขของการกลับทิศทาง ซึ่งใช้วิธีการควบคุมต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

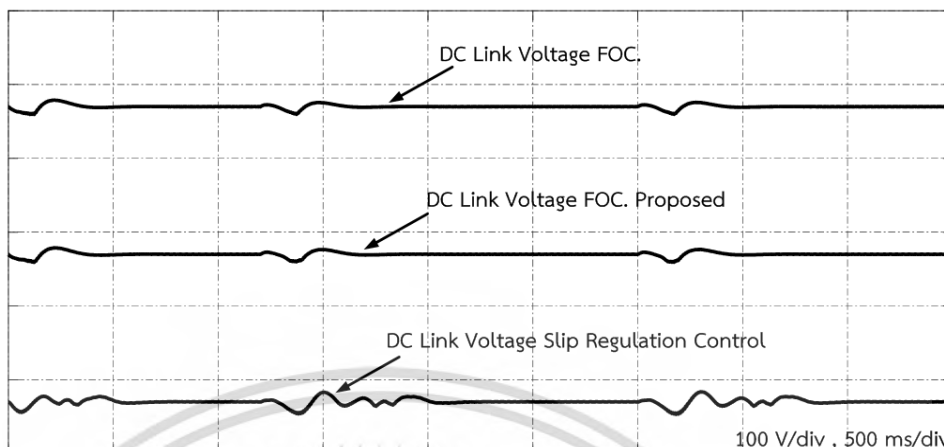


รูปที่ 6.13 ความเร็วของมอเตอร์โดยที่ควบคุมความเร็วมอเตอร์ที่ 500 rpm ในเงื่อนไขของการกลับทิศทาง ซึ่งใช้วิธีการควบคุมต่างๆ



รูปที่ 6.14 แรงบิดแม่เหล็กของมอเตอร์โดยที่ควบคุมความเร็วมอเตอร์ที่ 500 rpm ในเงื่อนไขของการกลับทิศทาง ซึ่งใช้วิธีการควบคุมต่างๆ

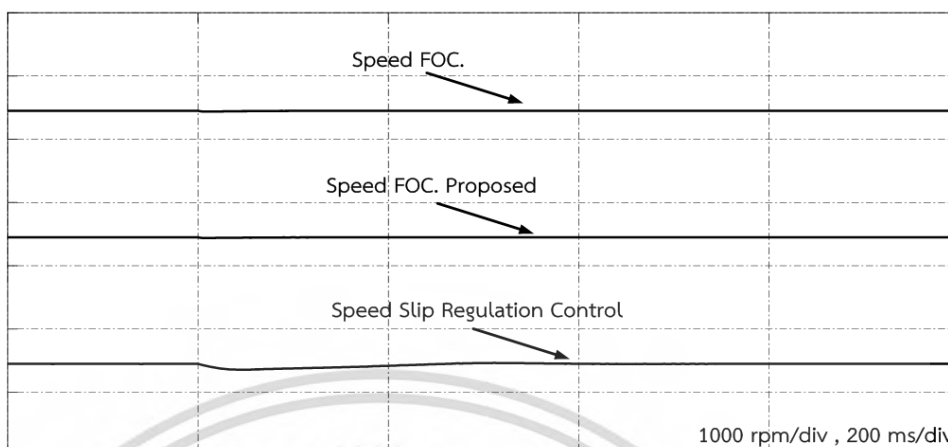
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



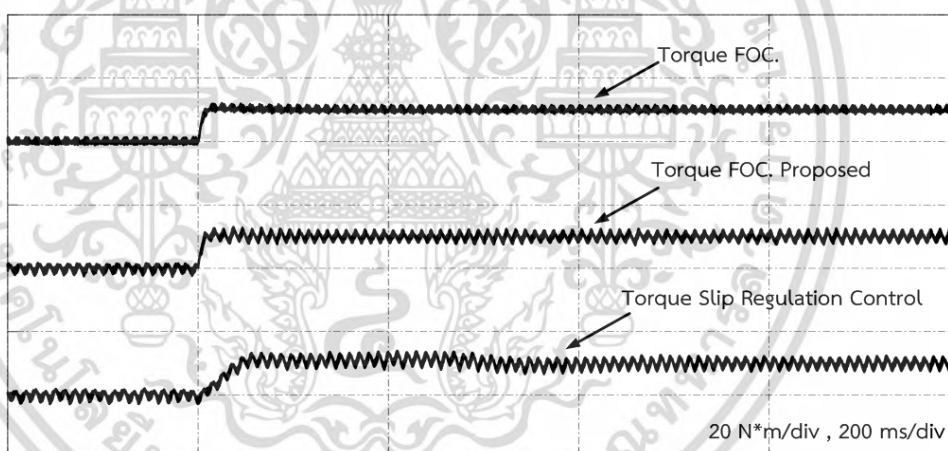
รูปที่ 6.15 แรงดันเชื่อมโยงไฟตรงที่จ่ายให้อินเวอร์เตอร์สำหรับควบคุมมอเตอร์ที่ความเร็ว 500 rpm ในเงื่อนไขของการกลับทิศทาง ซึ่งใช้วิธีการควบคุมต่างๆ

จากรูปที่ 6.7 – 6.15 เป็นการจำลองผลการกลับทิศทางการหมุนของมอเตอร์ที่ความเร็ว 1450 rpm ,1000 rpm และ 500 rpm พบว่าผลตอบสนองของความเร็วแรงบิดของการควบคุมความเร็วของการควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกนโดยปราศจากตัวตรวจจับสนภูมิผลตอบสนองที่รวดเร็วและใกล้เคียงกับวิธีการควบคุมความเร็วโดยการควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกนแบบวิธีปกติแต่จะมีปัญหาตรงช่วงความเร็วต่ำใกล้เคียงศูนย์เนื่องมาจากความคลาดเคลื่อนของการคำนวณเนื่องจากไม่มีตัวควบคุมป้องกันกระแสเตเตอร์ที่ช่วยชดเชยความผิดพลาดแบบวิธีปกติทั่วไป ผลที่ตามมาคือแรงบิดช่วงกลับทิศทางมีความผิดพลาดมากเช่นกันเมื่อเทียบกับวิธีทั่วไป แต่เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีสเกลาร์พบว่าวิธีการควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกนโดยปราศจากตัวตรวจจับสนภูมิให้ผลตอบสนองของความเร็วและแรงบิดแม่เหล็กที่ดีกว่า การเปรียบเทียบผลกระทบของค่าแรงดันเชื่อมโยงไฟตรงเชื่อมโยงทั้ง 3 วิธีพบว่าวิธีสเกลาร์มีผลตอบสนองของแรงดันเชื่อมโยงไฟตรงช้ากว่าวิธีการอื่น และยังเกิดค่าพุ่งเกินของแรงดันเชื่อมโยงไฟตรงมากกว่าวิธีการอื่นๆ โดยวิธีการควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกนทั้ง 2 วิธีการที่ได้นำเสนอพบว่ามีผลตอบสนองของแรงดันเชื่อมโยงไฟตรงที่รวดเร็วใกล้เคียงกัน

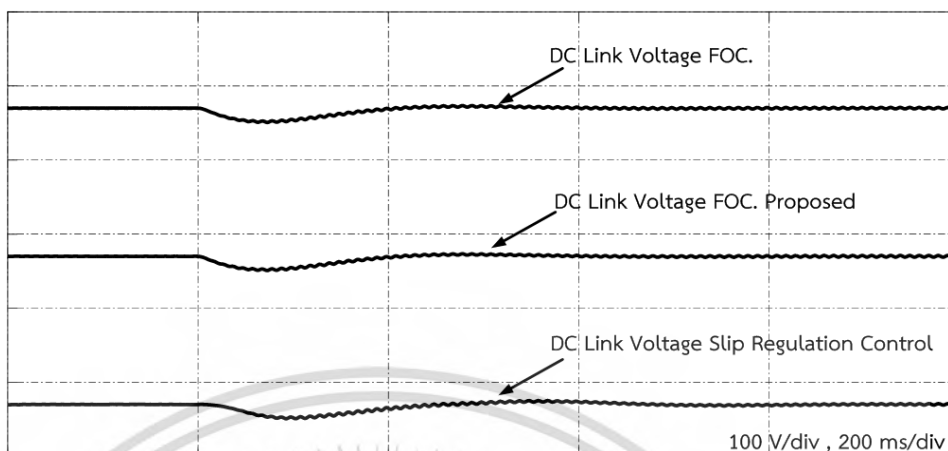
6.2.3 การจำลองผลการตอบสนองทางพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสภายใต้เงื่อนไขของการใส่ภาระทางกลให้กับมอเตอร์โดยใช้วิธีการควบคุมทั้ง 3 วิธี โดยควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ให้มีค่า 1450 rpm



รูปที่ 6.16 ความเร็วของมอเตอร์โดยที่ควบคุมความเร็วมอเตอร์ที่ 1450 rpm ในเงื่อนไขของการใส่ภาระทางกล ซึ่งใช้วิธีการควบคุมต่างๆ



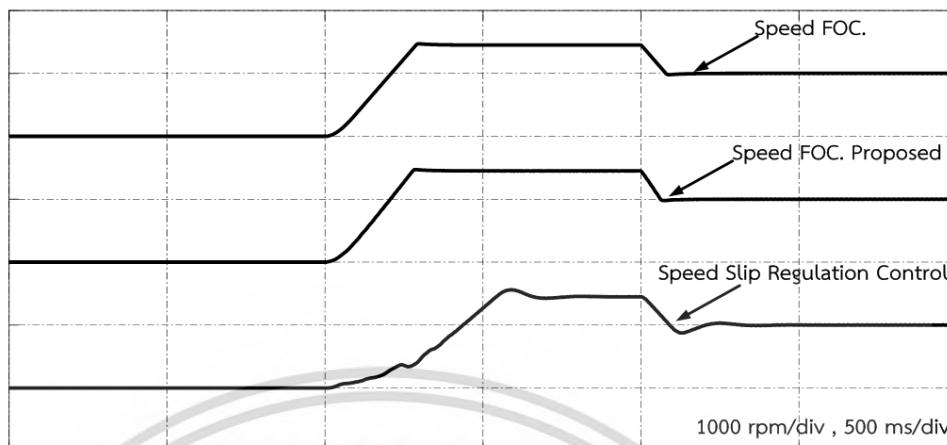
รูปที่ 6.17 แรงบิดแม่เหล็กของมอเตอร์โดยที่ควบคุมความเร็วมอเตอร์ที่ 1450 rpm ในเงื่อนไขของการใส่ภาระทางกล ซึ่งใช้วิธีการควบคุมต่างๆ



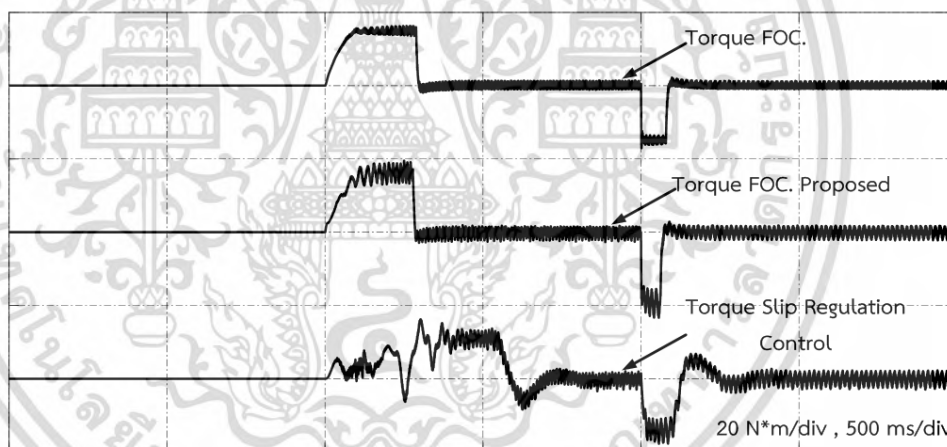
รูปที่ 6.18 แรงดันเชื่อมโยงไฟตรงที่จ่ายให้อินเวอร์เตอร์สำหรับควบคุมความเร็วมอเตอร์ที่ 1450 rpm ในเงื่อนไขของการใส่ภาระทางกล ซึ่งใช้วิธีการควบคุมต่างๆ

จากรูปที่ 6.16 – 6.18 เป็นการจำลองการใส่ภาระทางกลที่พิกัดโดยควบคุมความเร็วมอเตอร์ที่ 1450 rpm พบว่าวิธีการควบคุมความเร็วด้วยการควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกนทั้ง 2 วิธีมีผลตอบสนองที่ดีและใกล้เคียงกันโดยที่ความเร็วตกเพียงเล็กน้อยซึ่งแตกต่างจากวิธีสเกลาร์ที่ความเร็วตกลงมากกว่า รวมถึงผลตอบสนองของแรงบิดแม่เหล็กและแรงดันเชื่อมโยงไฟตรงที่แยกกว่าวิธีการควบคุมความเร็วด้วยการควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกนทั้งสองวิธีเนื่องจากผลตอบสนองที่ช้า

6.2.4 การจำลองผลการตอบสนองทางพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสภายใต้เงื่อนไขของการลดความเร็วมอเตอร์จาก 1450 rpm ไปยัง 1000 rpm โดยใช้วิธีการควบคุมทั้ง 3 วิธี



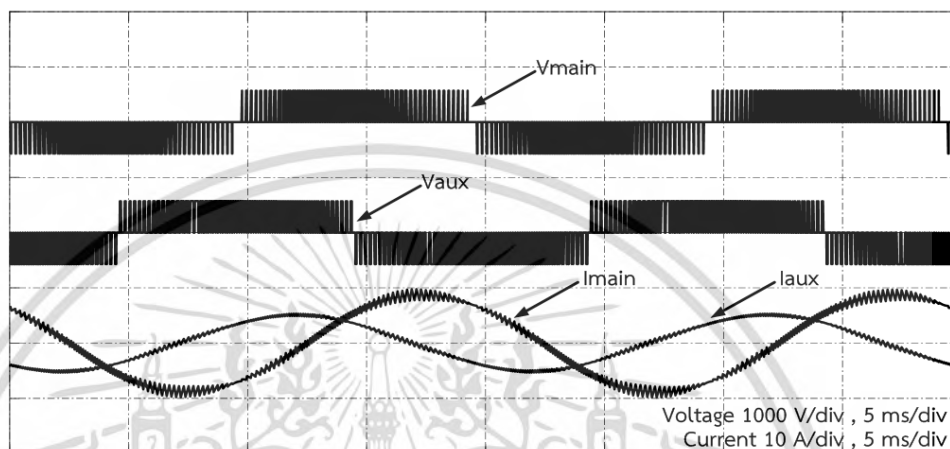
รูปที่ 6.19 ความเร็วของมอเตอร์ ในเงื่อนไขของการลดความเร็วจาก 1450 rpm ไปยัง 1000 rpm ซึ่งใช้วิธีการควบคุมต่างๆ



รูปที่ 6.20 แรงบิดแม่เหล็กของมอเตอร์ ในเงื่อนไขของการลดความเร็วจาก 1450 rpm ไปยัง 1000 rpm ซึ่งใช้วิธีการควบคุมต่างๆ

จากรูปที่ 6.19 – 6.20 พบว่าวิธีการควบคุมความเร็วด้วยวิธีควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกน โดยปราศจากตัวตรวจจับมีพบตอบสนองของแรงบิดแม่เหล็ก และความเร็วที่ใกล้เคียงกับการควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกนวิธีปกติทั่วไป แต่มีค่าระลอกของแรงบิดแม่เหล็กที่มากกว่าวิธีปกติ แต่เมื่อนำทั้งสองวิธีไปเปรียบเทียบกับวิธีสเกลาร์พบว่าวิธีสเกลาร์จะให้ผลตอบสนองของความเร็วและแรงบิดที่ช้ากว่าทั้ง 2 วิธีรวมถึงมีค่าพุ่งเกินของความเร็วที่สูงตอนช่วงเริ่มออกตัว

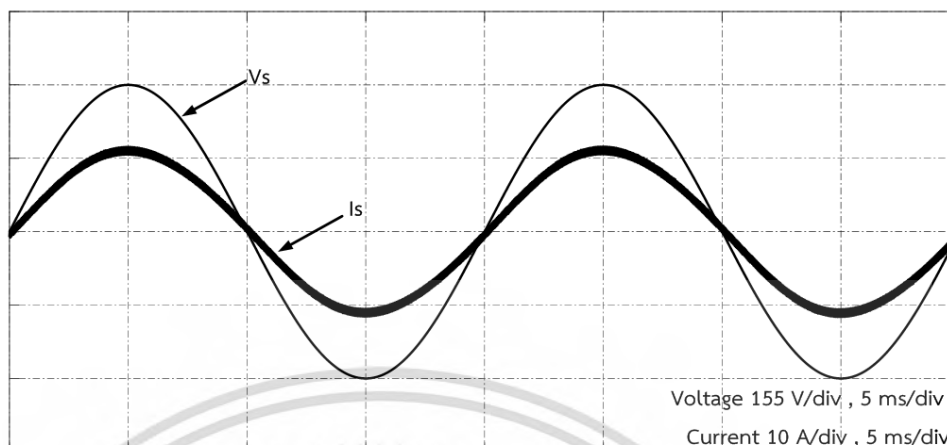
6.2.5 การจำลองผลที่สภาวะคงตัวของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสภายใต้เงื่อนไขของการใส่โหลดที่พิกัดที่ความเร็วมอเตอร์ 1450 rpm โดยใช้วิธีการควบคุมความเร็วด้วยวิธีควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกนโดยปราศจากตัวตรวจจับกระแส



รูปที่ 6.21 แรงดันขดลวดหลัก แรงดันขดลวดช่วย กระแสขดลวดหลัก และกระแสของขดลวดช่วย

จากรูปที่ 6.21 ได้ทำการวัดแรงดันที่ตกคร่อมขดลวดหลักและขดลวดช่วย รวมถึงกระแสขดลวดหลัก และขดลวดช่วย เพื่อแสดงให้เห็นว่ากระแสและแรงดันของขดลวดหลัก และขดลวดช่วยมีมุมเฟสที่ต่างกัน 90 องศาทางไฟฟ้า

6.2.6 การจำลองผลของกระแสและแรงดันที่ฝั่งกริดที่สภาวะคงตัวของกรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสทำงานภายใต้เงื่อนไขของการใส่โหลดที่พิกัดที่ความเร็วมอเตอร์ 1450 rpm โดยใช้วิธีการควบคุมความเร็วด้วยวิธีควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกนโดยปราศจากตัวตรวจจับกระแส



รูปที่ 6.22 แรงดันไฟฟ้าที่กริด และกระแสไฟฟ้าที่กริด

จากรูปที่ 6.22 พบว่า กระแสไฟฟ้าที่กริดมีคุณลักษณะรูปสัญญาณใกล้เคียงสัญญาณไซน์ซอซอดต์มีมุมเฟสที่ตรงกับแรงดันไฟฟ้าที่กริด และค่า PF. เข้าใกล้ 1

6.3 สรุป

จากการจำลองผลพบว่าวิธีการควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกนด้วยวิธีปราศจากตัวตรวจจับกระแสให้ผลตอบสนองที่รวดเร็วและใกล้เคียงกับวิธีการควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกนวิธีการปกติ แต่มีค่าระลอกของแรงบิดที่สูงกว่า และผลตอบสนองที่แย่กว่าในช่วงเวลากลับทิศทางความเร็วเมื่อเทียบกับวิธีควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกนแบบวิธีปกติทั่วไปเนื่องจากวิธีที่ควบคุมโดยปราศจากตัวตรวจจับกระแสนั้นไม่มีตัวควบคุมป้อนกลับกระแสส่งผลให้เกิดค่าความผิดพลาดเมื่อเทียบกับวิธีปกติที่มีตัวป้อนกลับกระแส แต่ถ้าเมื่อนำวิธีการควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกนโดยปราศจากตัวตรวจจับกระแสจะพบว่าให้ผลตอบสนองที่ดีกว่าวิธีสเกลาร์ทั้งตอนใส่โหลด,ปลดโหลด และกลับทิศทาง

บทที่ 7

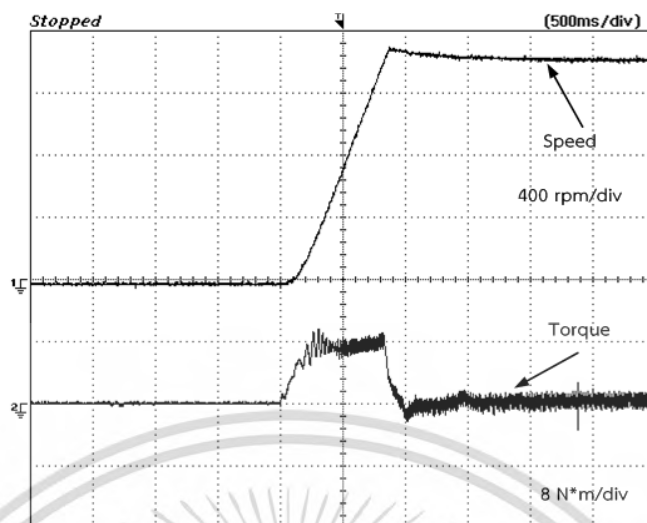
การทดสอบการควบคุมความเร็วมอเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส

7.1 บทนำ

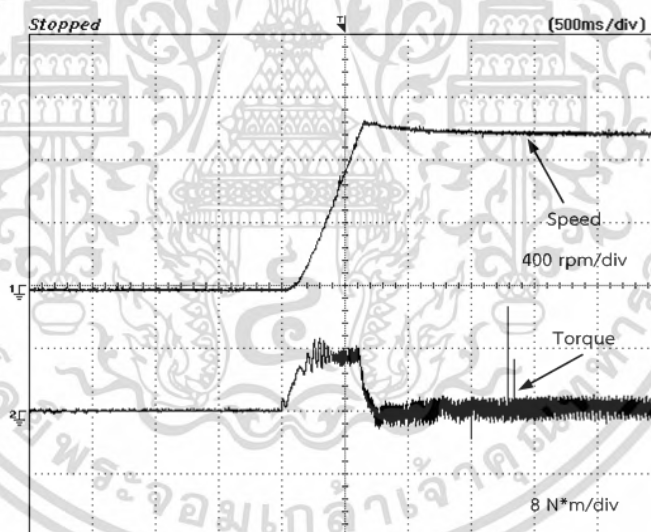
ในบทนี้กล่าวถึง การทดสอบผลระบบการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส โดยใช้วิธีการควบคุม สนามแม่เหล็กตามแนวแกนโดยปราศจากตัวตรวจจับกระแส เพื่อแสดงสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส โดยจำลองภายใต้เงื่อนไข การเริ่มเดินเครื่องของมอเตอร์ ,การใส่ภาระทางกล ,เปลี่ยนความเร็ว และกลับทิศทางความเร็วต่างๆ โดยใช้แหล่งจ่ายไฟตรงจากแรงดันเชื่อมโยงไฟตรงของคอนเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อกิริตที่สามารถควบคุมแรงดันเชื่อมโยงไฟตรงให้คงที่ได้ที่ 570 โวลต์ โดยผลการทดสอบถูกแสดงในหัวข้อลำดับถัดไป

7.2 ผลการทดสอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสด้วยการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ด้วยวิธีการควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกนโดยปราศจากตัวตรวจจับกระแส

7.2.1 การทดสอบผลการตอบสนองทางพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสภายใต้เงื่อนไขของการเริ่มเดินเครื่องมอเตอร์โดยใช้วิธีการควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกนโดยปราศจากตัวตรวจจับกระแส โดยควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ให้มีค่า 1450 rpm ,1000 rpm และ500 rpm ตามลำดับ

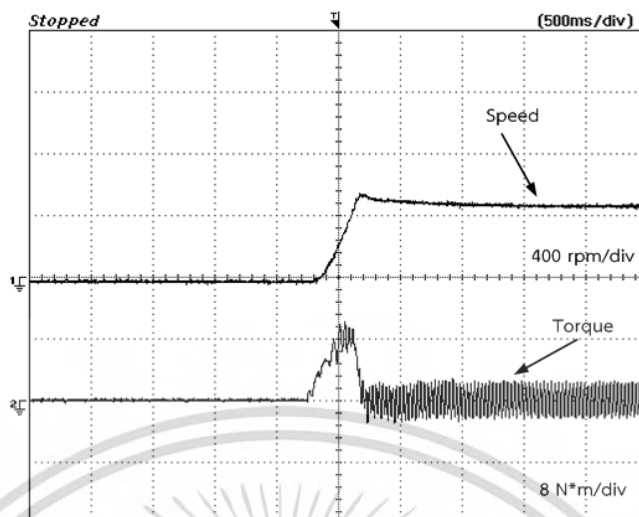


รูปที่ 7.1 ความเร็วและแรงบิดแม่เหล็กของการเริ่มเดินเครื่องมอเตอร์โดยควบคุมความเร็วมอเตอร์ที่ 1450 rpm โดยใช้วิธีการควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกนโดยปราศจากตัวตรวจจับสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 7.2 ความเร็วและแรงบิดแม่เหล็กของการเริ่มเดินเครื่องมอเตอร์โดยควบคุมความเร็วมอเตอร์ที่ 1000 rpm โดยใช้วิธีการควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกนโดยปราศจากตัวตรวจจับสนามแม่เหล็ก

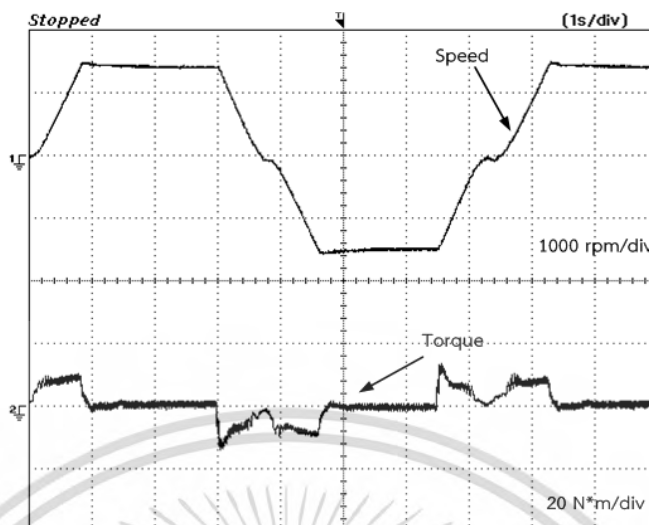
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



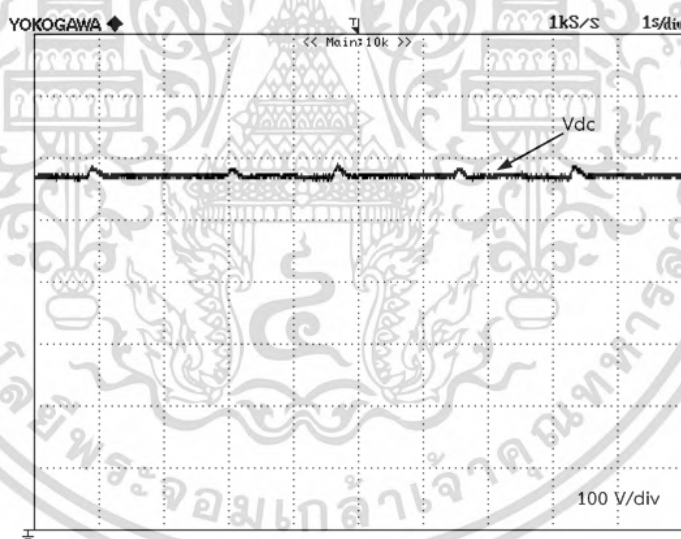
รูปที่ 7.3 ความเร็วและแรงบิดแม่เหล็กของการเริ่มต้นเครื่องมอเตอร์โดยควบคุมความเร็วมอเตอร์ที่ 500 rpm โดยใช้วิธีการควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกนโดยปราศจากตัวตรวจจับกระแส

จากรูปที่ 7.1 -7.3 แสดงผลตอบสนองของความเร็วมอเตอร์และแรงบิดแม่เหล็กของมอเตอร์พบว่าช่วงมอเตอร์เริ่มออกตัวมอเตอร์ได้สร้างแรงบิดแม่เหล็กที่ถูกจำกัดไว้ที่ขอบของค่าลิมิตแรงบิดเพื่อช่วยให้สามารถหมุนได้ความเร็วตามที่ความเร็วคำสั่งได้กำหนดไว้ เมื่อค่าความเร็วถึงตามค่าที่ความเร็วคำสั่งกำหนดไว้แรงบิดแม่เหล็กจะลดลงเหลือ 0 Nm

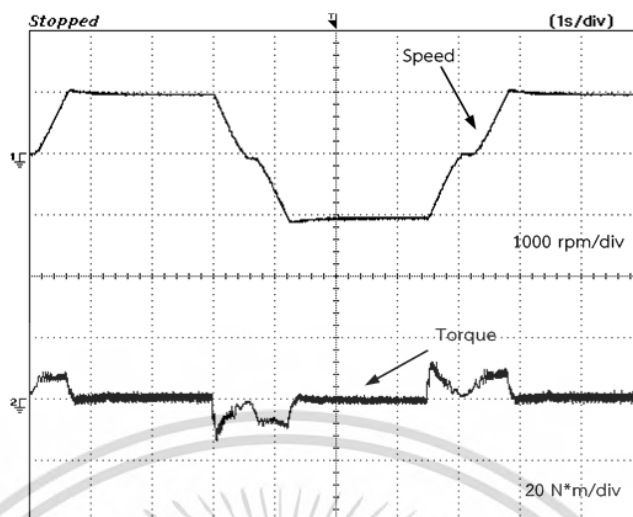
7.2.2 การทดสอบผลการตอบสนองทางพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสภายใต้เงื่อนไขของการกลับทิศทางความเร็วของมอเตอร์โดยใช้วิธีการควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกนโดยปราศจากตัวตรวจจับกระแสโดยควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ให้มีค่า 1450 rpm ,1000 rpm และ 500 rpm ตามลำดับ



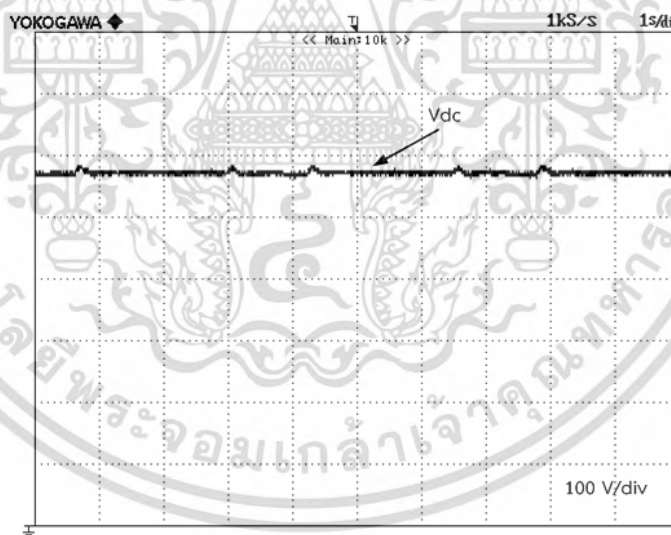
รูปที่ 7.4 ความเร็วและแรงบิดแม่เหล็กของมอเตอร์โดยที่ควบคุมความเร็วมอเตอร์ที่ 1450 rpm ในเงื่อนไขของการกลับทิศทาง ซึ่งใช้วิธีการควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกนโดยปราศจากตัวตรวจจับกระแส



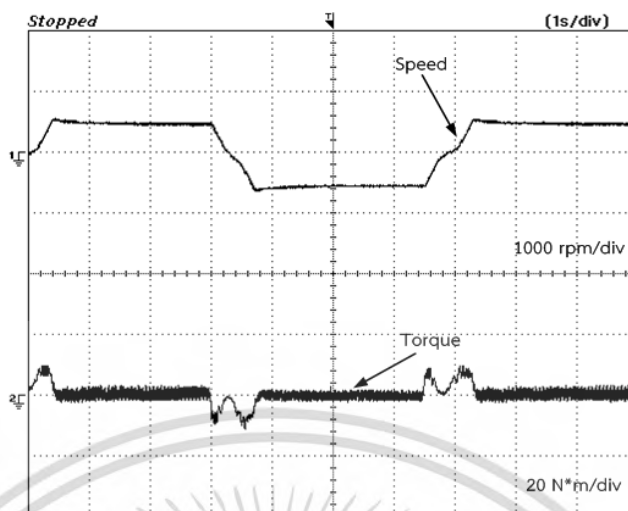
รูปที่ 7.5 แรงดันเชื่อมโยงไฟตรงที่จ่ายให้อินเวอร์เตอร์สำหรับควบคุมมอเตอร์ที่ความเร็ว 1450 rpm ในเงื่อนไขของการกลับทิศทาง ซึ่งใช้วิธีการควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกนโดยปราศจากตัวตรวจจับกระแส



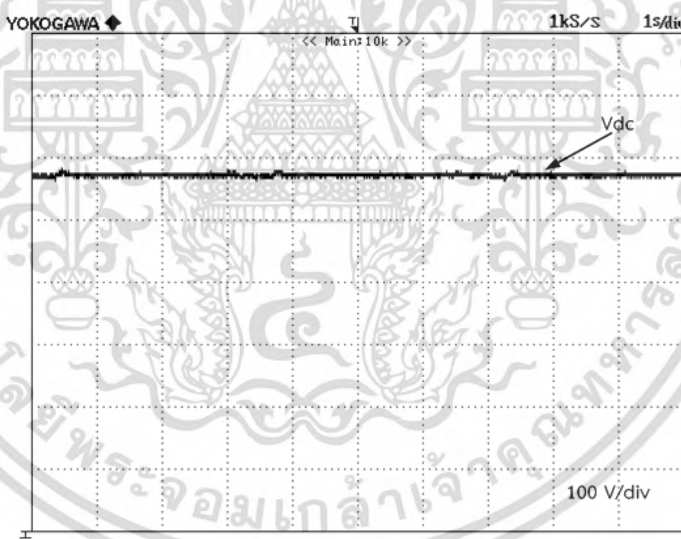
รูปที่ 7.6 ความเร็วและแรงบิดแม่เหล็กของมอเตอร์โดยที่ควบคุมความเร็วมอเตอร์ที่ 1000 rpm ในเงื่อนไขของการกลับทิศทาง ซึ่งใช้วิธีการควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกนโดยปราศจากตัวตรวจจับกระแส



รูปที่ 7.7 แรงดันเชื่อมโยงไฟตรงที่จ่ายให้อินเวอร์เตอร์สำหรับควบคุมมอเตอร์ที่ความเร็ว 1000 rpm ในเงื่อนไขของการกลับทิศทาง ซึ่งใช้วิธีการควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกนโดยปราศจากตัวตรวจจับกระแส



รูปที่ 7.8 ความเร็วและแรงบิดแม่เหล็กของมอเตอร์โดยที่ควบคุมความเร็วมอเตอร์ที่ 500 rpm ในเงื่อนไขของการกลับทิศทาง ซึ่งใช้วิธีการควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกนโดยปราศจากตัวตรวจจับกระแส



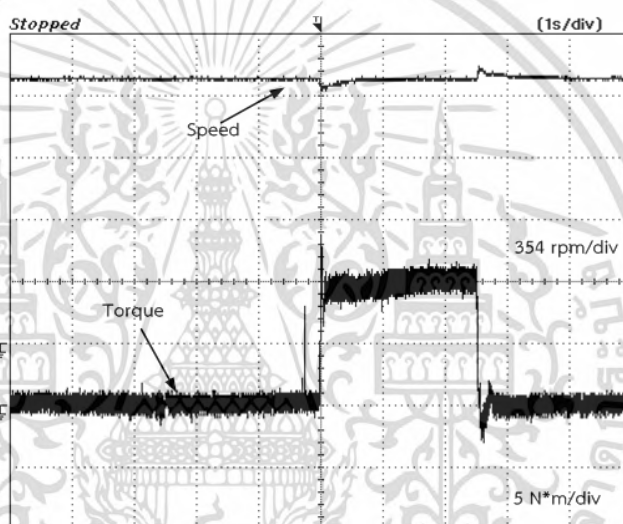
รูปที่ 7.9 แรงดันเชื่อมโยงไฟตรงที่จ่ายให้อินเวอร์เตอร์สำหรับควบคุมมอเตอร์ที่ความเร็ว 500 rpm ในเงื่อนไขของการกลับทิศทาง ซึ่งใช้วิธีการควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกนโดยปราศจากตัวตรวจจับกระแส

จากรูปที่ 7.4 -7.9 แสดงผลตอบสนองของความเร็วมอเตอร์,แรงบิดแม่เหล็กของมอเตอร์ และแรงดันเชื่อมโยงไฟตรงพบว่ามอเตอร์สามารถกลับทิศทางการหมุนได้ตามความเร็วคำสั่ง แต่พบว่ามีปัญหาช่วงความเร็วเป็น 0 rpm มีการหยุดหมุนชั่วคราวและทำการหมุนต่อไปยังความเร็วทิศทางตรงข้าม

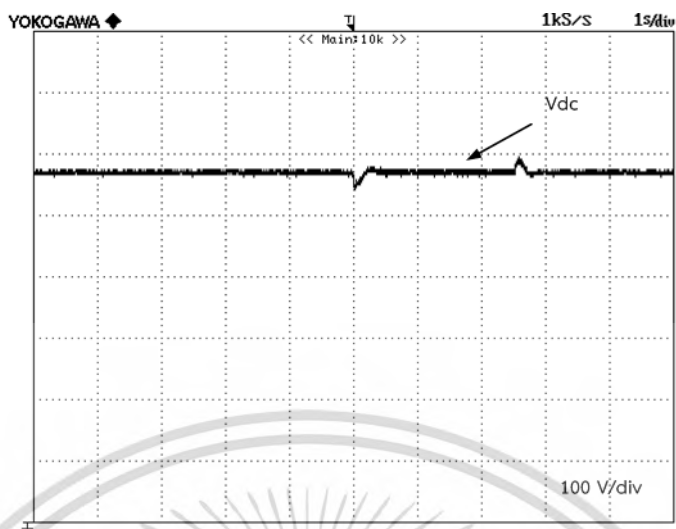
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องมาจากการคำนวณแรงบิดแม่เหล็กของการควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกนโดยปราศจากตัวควบคุมป้อนกลับชนิดกระแสเป็นผลให้มีความผิดพลาดเกิดขึ้นที่ความเร็วต่ำโดยปัญหานี้จะถูกขจัดไปโดยการใช้ระบบควบคุมป้อนกลับของกระแส ส่วนผลตอบสนองของแรงดันเชื่อมโยงไฟตรงพบว่ามีผลตอบสนองที่น่าพอใจและยังสามารถรักษาระดับแรงดันไฟตรงให้คงที่ 570 V ได้

7.2.3 การทดสอบผลการตอบสนองทางพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสภายใต้เงื่อนไขของการใส่ภาระทางกลให้กับมอเตอร์โดยใช้วิธีการควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกนโดยปราศจากตัวตรวจจับสนกระแส ซึ่งควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ให้มีค่า 1450 rpm



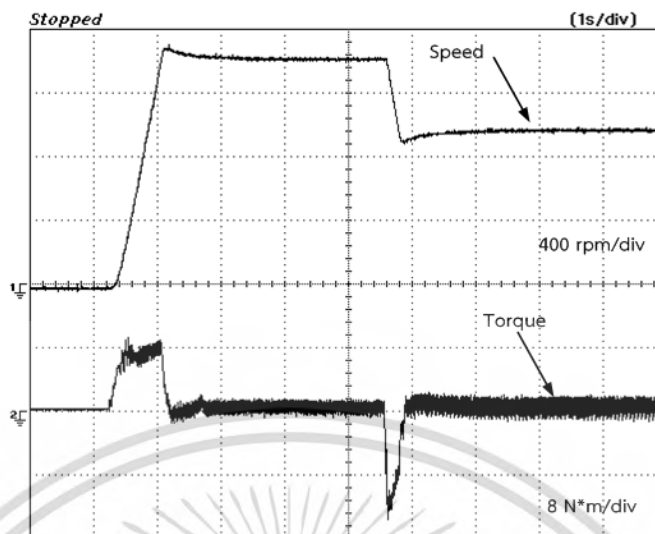
รูปที่ 7.10 ความเร็วและแรงบิดแม่เหล็กของมอเตอร์โดยที่ควบคุมความเร็วมอเตอร์ที่ 1450 rpm ในเงื่อนไขของการใส่โหลด และปลดโหลด ซึ่งใช้วิธีการควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกนโดย ปราศจากตัวตรวจจับสนกระแส



รูปที่ 7.11 แรงดันเชื่อมโยงไฟตรงที่จ่ายให้อินเวอร์เตอร์สำหรับควบคุมมอเตอร์ที่ความเร็ว 1450 rpm ในเงื่อนไขของการใส่โหลดและปลดโหลดที่ 10 Nm ซึ่งใช้วิธีการควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกนโดยปราศจากตัวตรวจจับสนะแสง

จากรูปที่ 7.10 -7.11 แสดงผลตอบสนองของความเร็วมอเตอร์และแรงบิดแม่เหล็กของมอเตอร์ พบว่าช่วงใส่ภาระทางกลมอเตอร์ความเร็วตกค่าความเร็วของมอเตอร์ค่อยๆปรับขึ้นพอปลดภาระทางกลความเร็วจะเพิ่มขึ้นจนค่อยๆปรับลดลงเข้าค่าปกติที่ความเร็วคำสั่ง (1450 rpm) ซึ่งแรงดันเชื่อมโยงไฟตรงก็จะมีพฤติกรรมเดียวกับความเร็วมอเตอร์เช่นเดียวกัน ส่วนของแรงบิดแม่เหล็กพบว่าเมื่อมีการใส่ภาระทางกลแรงบิดแม่เหล็กมีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งเท่ากับภาระทางกลที่ใส่ (10 Nm) พอปลดภาระทางกลแรงบิดแม่เหล็กจะลดลงเท่ากับ 0 Nm

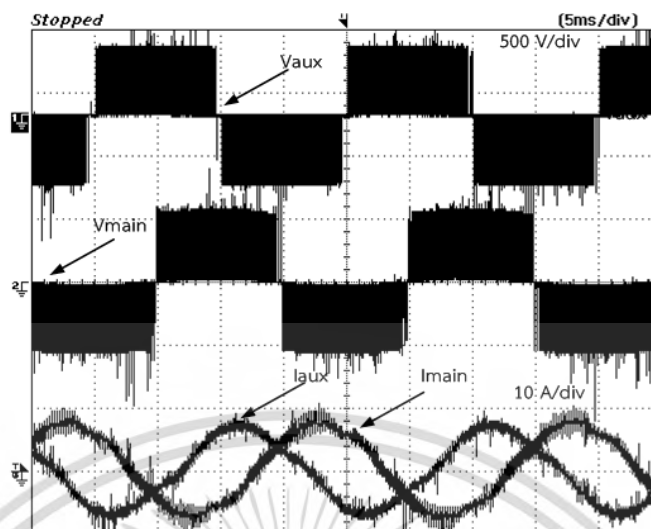
7.2.4 การทดสอบผลการตอบสนองทางพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสภายใต้เงื่อนไขของการลดความเร็วมอเตอร์จาก 1450 rpm ไปยัง 1000 rpm โดยใช้วิธีการควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกนโดยปราศจากตัวตรวจจับสนะแสง



รูปที่ 7.12 ความเร็วและแรงบิดแม่เหล็กของมอเตอร์ ในเงื่อนไขของการลดความเร็วจาก 1450 rpm ไปยัง 1000 rpm ซึ่งใช้วิธีการควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกนโดยปราศจากตัวตรวจจับกระแส

จากรูปที่ 7.12 พบว่าวิธีการควบคุมความเร็วด้วยวิธีการควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกนโดยปราศจากตัวตรวจจับมีผลตอบสนองของความเร็วมีการตอบสนองตามความเร็วคำสั่งได้ และแรงบิดแม่เหล็กของมอเตอร์ช่วงเริ่มออกตัวจะมีค่าประมาณไม่เกินแรงบิดแม่เหล็กที่ได้กำหนดไว้จนความเร็วเข้าสู่ค่าที่บังคับไว้แรงบิดแม่เหล็กจะลดลงเหลือ 0 Nm จนถึงช่วงความเร็วมอเตอร์เปลี่ยนจาก 1450 rpm ไปยัง 1000 rpm มอเตอร์จะสร้างแรงบิดแม่เหล็กที่เป็นลบเพื่อลดความเร็วมอเตอร์ลงเพื่อที่จะได้ความเร็วคำสั่งที่ต้องการ

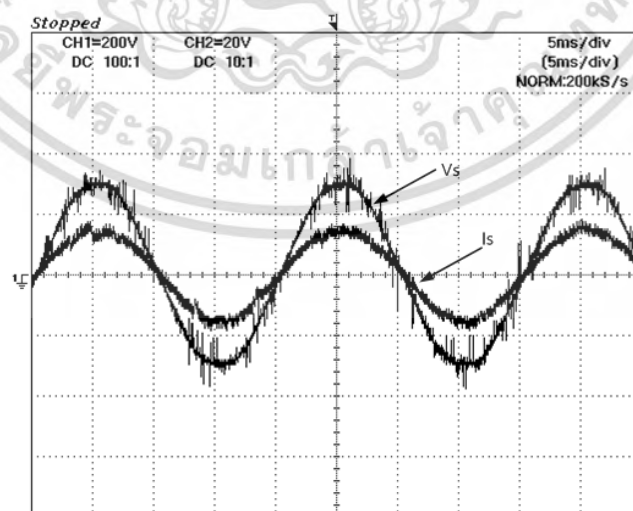
7.2.5 การทดสอบผลที่สภาวะคงตัวของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสภายใต้เงื่อนไขของการใส่โหลดที่พิกัดที่ความเร็วมอเตอร์ 1450 rpm โดยใช้วิธีการควบคุมความเร็วด้วยวิธีการควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกนโดยปราศจากตัวตรวจจับกระแส



รูปที่ 7.13 แรงดันขดลวดหลัก แรงดันขดลวดช่วย กระแสขดลวดหลัก และกระแสของขดลวดช่วย

จากรูปที่ 7.13 ได้ทำการวัดแรงดันที่ตกคร่อมขดลวดหลักและขดลวดช่วย รวมถึงกระแสขดลวดหลัก และขดลวดช่วย เพื่อแสดงให้เห็นว่ากระแสและแรงดันของขดลวดหลัก และขดลวดช่วยมีมุมเฟสที่ต่างกัน 90 องศาทางไฟฟ้า

7.2.6 การทดสอบผลของกระแสและแรงดันที่ฝังกริดที่สภาวะคงตัวของกรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสทำงานภายใต้เงื่อนไขของการใส่โหลดที่พิกัดที่ความเร็วมอเตอร์ 1450 rpm โดยใช้วิธีการควบคุมความเร็วด้วยวิธีควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกนโดยปราศจากตัวตรวจจับกระแส



รูปที่ 7.14 แรงดันไฟฟ้าที่กริด และกระแสไฟฟ้าที่กริด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 7.14 พบว่า กระแสไฟฟ้าที่กริดมีคุณลักษณะรูปสัญญาณใกล้เคียงสัญญาณไซน์ชอยด์มีมุมเฟสที่ตรงกับแรงดันไฟฟ้าที่กริด และค่า PF. เข้าใกล้ 1 เมื่อนำมาวิเคราะห์ FFT ,ขนาดกระแสกริดที่ความถี่มูลฐาน และ หาค่า $\%THD_i$ โดยเก็บค่าจากออสซิลโลสโคปได้ดังรูปที่ 7.15 พบว่าได้ค่า $\%THD_i = 8.1815\%$ เมื่อนำค่า $\%THD_i$ และ $I_{gridmax,1}$ ที่ได้มาคำนวณหา $I_{grid,rms}$, $DPF.$, ϕ และ $PF.$ ดังสมการที่ (7.1) – (7.4) ดังนี้

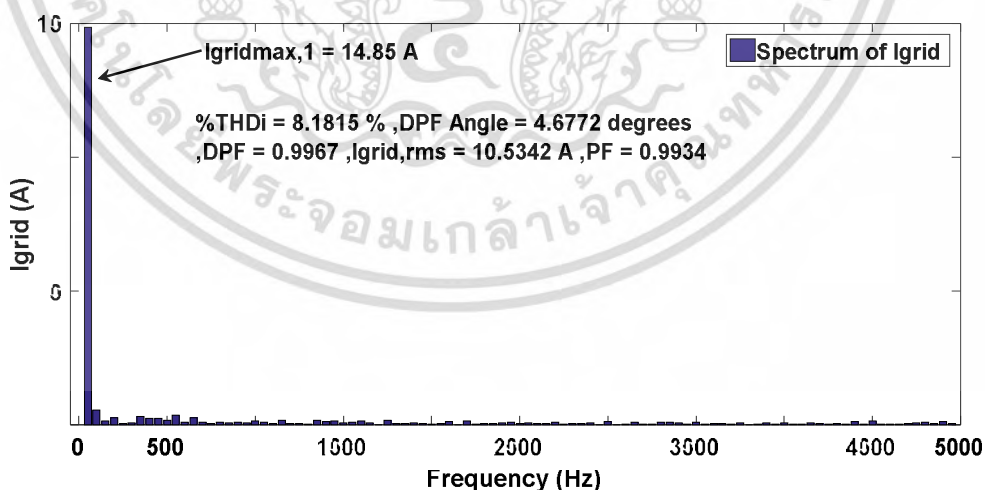
$$I_{grid,rms} = \frac{I_{gridmax,1}}{\sqrt{2}} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\%THD_i}{100} \right)^2} \right) \quad (7.1)$$

$$DPF. = \frac{1}{\left(\sqrt{1 + \left(\frac{\%THD_i}{100} \right)^2} \right)} \quad (7.2)$$

$$\phi = \cos^{-1}(DPF.) \quad (7.3)$$

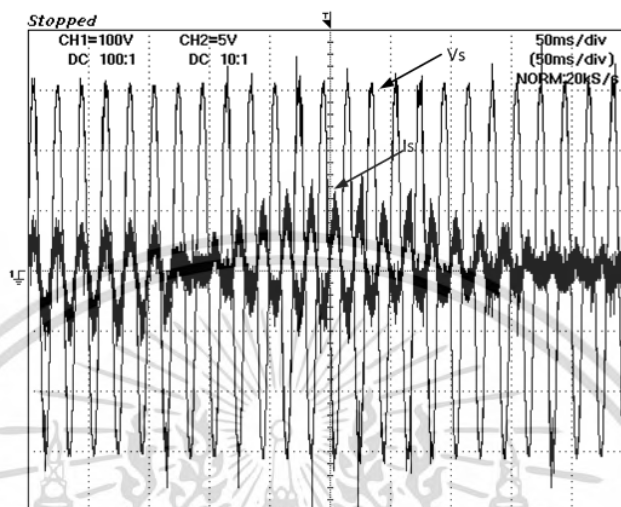
$$PF. = \frac{I_{gridrms,1}}{I_{gridrms}} \times DPF. \quad (7.4)$$

โดยได้ค่าดังนี้ $I_{grid,rms} = 10.5342 \text{ A}$, $DPF. = 0.9967$, $\phi = 4.6772^\circ$ และ $PF. = 0.9934$



รูปที่ 7.15 สเปกตรัมฮาร์มอนิกของกระแสไฟฟ้าที่กริด

7.2.7 การทดสอบผลของกระแสและแรงดันที่ฝั่งกริดที่สภาวะชั่วคราวช่วงเวลาการคืนพลังงาน เนื่องมาจากมอเตอร์เบรก



รูปที่ 7.16 แรงดันไฟฟ้าที่กริด และกระแสไฟฟ้าที่กริดช่วงมอเตอร์เบรก

จากรูปที่ 7.16 พบว่าคอนเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกกริดสามารถควบคุมให้กระแสไฟฟ้าคืนพลังงานกลับคืนสู่กริดได้เมื่อมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสเบรกซึ่งสังเกตได้จากรูปคลื่นกระแสมีเฟสที่ตรงข้ามกับแรงดันไฟฟ้าที่กริดซึ่งเป็นข้อดีของระบบนี้เมื่อทุกครั้งที่มีการเบรกมอเตอร์จะคืนพลังงานกลับคืนสู่กริดได้

7.3 สรุป

บทนี้นำเสนอการทดสอบผลด้วยวิธีการควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกนด้วยวิธีปราศจากตัวตรวจจับกระแสซึ่งดูผลตอบสนองของความเร็ว และแรงบิดแม่เหล็กพบว่าให้ผลการตอบสนองที่น่าพอใจในกรณีของการเริ่มเดินเครื่อง และ การใส่ภาระทางกลและปลดภาระทางกล แต่จะมีปัญหาในเงื่อนไขการกลับทิศทางการหมุนตอนช่วงความเร็วใกล้ 0 rpm พบว่าผลตอบสนองของแรงบิดมีปัญหาเนื่องมาจากความคลาดเคลื่อนจากการควบคุมเนื่องมาจากขาดตัวควบคุมป้องกันของกระแสส่งผลให้ความเร็วมีการหยุดชะงักชั่วขณะดังผลการทดสอบที่ได้นำเสนอไป ระบบการขับเคลื่อนที่น่าเสนอนี้ยังได้ทดสอบการควบคุมแรงดันเชื่อมโยงไฟตรงของคอนเวอร์เตอร์ตัวหน้าซึ่งพบว่าสามารถควบคุมแรงดันเชื่อมโยงไฟตรงให้คงที่ได้ และยังสามารถปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าของฝั่งกริดโดยกระแสที่ฝั่งกริดมีรูปคลื่นใกล้เคียงสัญญาณไซน์ซวยด์ที่มีเฟสตรงกันกับสัญญาณแรงดันกริดส่งผลให้มีค่า PF. ใกล้เคียง 1 และมีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนของกระแสที่ต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 8

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

8.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์โดยใช้วิธีการควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกนโดยปราศจากตัวตรวจจับตัวตรวจจับกระแสโดยทดสอบในเงื่อนไขของการเริ่มเดินเครื่อง, ไล่โหลด, ปลดโหลด และกลับทิศทางการหมุน พบว่า ในเงื่อนไขของการเริ่มเดินเครื่อง, ไล่โหลด และปลดโหลดให้ผลการตอบสนองที่รวดเร็ว และใกล้เคียงกับวิธีการควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกนโดยวิธีการปกติโดยได้จากการเปรียบเทียบกันโดยใช้โปรแกรมจำลองผล MATLAB/Simulink แต่มีค่าระลอกของแรงบิดที่มากกว่า โดยในงานวิจัยนี้ได้ลองทดลองจริงโดยใช้วิธีการควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกนโดยปราศจากตัวตรวจจับพบว่าผลตอบสนองที่ได้มีลักษณะของรูปสัญญาณความเร็วและแรงบิดแม่เหล็กที่คล้ายคลึงกัน ส่วนเงื่อนไขของการกลับทิศทางการหมุนในช่วงความเร็วที่เป็น 0 rpm ทั้งในการจำลองผล และการทดลอง พบว่ามีช่วงเวลาที่หยุดชะงักชั่วคราวของมอเตอร์ ซึ่งเนื่องมาจากผลตอบสนองของแรงบิดมอเตอร์ที่ขาดความถูกต้องอันเนื่องมาจากระบบขาดตัวควบคุมกระแสชนิดป้อนกลับเป็นผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการคำนวณแรงบิดแม่เหล็ก

นอกจากนี้ระบบนี้สามารถควบคุมแรงดันเชื่อมโยงไฟตรงให้คงที่ได้ 570 V โดยใช้คอนเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อกิตเป็นตัวควบคุมโดยอาศัยเทคนิคควบคุมกระแสด้วยแถบฮิสเตอร์รีซีตซึ่งให้ข้อดีในแง่ของความง่ายและความรวดเร็ว โดยคอนเวอร์เตอร์ชนิดนี้ยังสามารถปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้าและยังลดทอนกระแสฮาร์มอนิกที่กิตได้เนื่องจากกระแสที่กิตมีลักษณะที่มีเฟสตรงกันกับแรงดันไฟฟ้าที่กิตส่งผลให้มีค่าตัวประกอบกำลังใกล้เคียงหนึ่ง และยังสามารถคืนพลังงานกลับสู่กิตได้โดยกระแสกิตจะมีลักษณะเฟสตรงข้ามกับแรงดันไฟฟ้ากิต อันเนื่องมาจากช่วงการเบรกของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสชนิดพารามิเตอร์ที่ไม่สมมาตร

8.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการต่อยอดงานวิจัย

สำหรับงานวิจัยการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ด้วยวิธีควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกน โดยปราศจากตัวตรวจจับกระแส วิธีการนี้สามารถพัฒนาเพื่อต่อยอดได้ดังนี้

- 1.สามารถพัฒนาต่อยอดงานได้โดยลดตัวตรวจจับความเร็วแต่ไปเพิ่มตัวตรวจจับกระแสแทน เพื่อเป็นการขับเคลื่อนแบบควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกนแบบไร้เซนเซอร์ความเร็ว
- 2.สามารถพัฒนาปรับปรุงระบบในส่วนของคอนเวอร์เตอร์ฝั่งเชื่อมต่อกรีดได้โดยเปลี่ยนวิธีการควบคุมเป็นแบบชนิดเวกเตอร์เพื่อคุณภาพทางไฟฟ้าที่ดีขึ้น
- 3.สามารถพัฒนาระบบขับเคลื่อนที่ได้นำเสนอโดยการเปลี่ยนไปใช้หลักการการควบคุมแรงบิดโดยตรงเพื่อใช้กับงานที่ต้องการควบคุมแรงบิดโดยตรงสำหรับต่อยอดงานวิจัยนี้ได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] P.C. Krause, "Simulation of Unsymmetrical 2-Phase Induction Machines," **IEEE Trans. on Power Apparatus and System**, vol.84, no.11, Nov. 1965. pp. 1025-1037
- [2] O. Stihl and Boon-Teck Ooi, "A single-phase controlled-current PWM Rectifier," **IEEE Trans. on Power Electronics**, vol.3, no.4, Oct. 1988. pp.453-459
- [3] D.G. Holmes and A. Kotsopoulos, "Variable speed control of single and two phase induction motors using a three phase voltage source inverter," **IEEE Proc. Industry Applications Society Annual Meeting, Toronto, Ontario, Canada**, Oct. 1993. pp.613-620
- [4] M. B. de Rossiter Correa , C.B. Jacobina , A.M.N. Lima and E.R.C. da Silva, "Rotor-flux-oriented control of a single-phase induction motor drive," **IEEE Trans. on Industrial Electronics**, vol.47, no.4, Aug 2000. pp.832-841
- [5] U. A. Miranda, L. G. B. Rolim and M. Aredes , "A DQ Synchronous Reference Frame Current Control for Single-Phase Converters," **Conference on Power Electronics Specialists, Recife, Brazil**, June 2005. pp.1377-1381
- [6] C. Charumit and V. Kinnares , "Realization of a Carrier-Based Unbalanced Output Space Vector PWM Strategy Using Analogue and Digital Techniques for Three-Leg Voltage Source Inverter Fed Two-Phase Induction Motors," **IEEE Trans. on Industry Applications**, vol.129, no.6, 2009. pp.636-648
- [7] W. Piyarat and V. Kinnares , "Performance Evaluation and Slip Regulation Control of an Asymmetrical Parameter Type Two-Phase Induction Motor Drive Using a Three-Leg Voltage Source Inverter," **IEEE Trans. on Industry Applications**, vol.130, no.7, 2010. pp.858-867

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [8] จักรพงษ์ จารุมิทร์. “หลักการสเปซเวกเตอร์พัลส์วิตมอดูเลชันแบบแรงดันเฟสไม่สมดุลด้วยวิธีคลื่นพาร์สำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสแบบพารามิเตอร์ไม่สมมาตร.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2552.
- [9] เวคิน ปิยรัตน์. “การควบคุมแรงบิดโดยตรงด้วยหลักการสเปซเวกเตอร์พัลส์วิตมอดูเลชันแบบแรงดันเฟสไม่สมดุลสำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสแบบไม่สมมาตร.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2553.
- [10] A. E. Fitzgerald, Charles Kingsley, Jr. and Stephen D. Umans. **Electric Machinery**. 5th ED. London : Mc Graw-Hill Company, Inc. 1992.
- [11] Stephen J. Chapman . **Electric Machinery Fundamentals**. 5th ED. New York : Mc Graw-Hill Company, Inc. 2012.
- [12] P. C. Sen . **Principles of Electric Machines and Power Electronics**. 3th ED. USA : John Wiley & Sons, Inc. 2014
- [13] วชิรินทร์ พรหมคุณ. “การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสชนิดพารามิเตอร์ไม่สมมาตรด้วยการมอดูเลทความกว้างพัลส์แบบสเปซเวกเตอร์ชนิดพัลส์ไม่ต่อเนื่อง.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2557.
- [14] P. C. Krause, O. Wasynczuk and S. D. Sudhoff. **Analysis of Electric Machinery**. 2nd ED. New York : Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. 1995.
- [15] Y.Kumsuwan, S. Premrudeepreechacharn and V. Kinnares, “A Carrier-Based Unbalanced PWM Method for Four-Leg Voltage Source Inverter Fed Unsymmetrical Two-Phase Induction Motor,” **IEEE Trans on Industrial Electronics**, vol.60, no.5 , May 2013. pp.2031-2041

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [16] จักรพงษ์ จารุมิทร์. เทคนิคการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 2 เฟส และ 3 เฟส (ทฤษฎี การจำลองทางพลวัต และการทดสอบจริง).สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน,2558.
- [17] ณัฐพงศ์ เมืองจันทร์. “ระบบควบคุมแบบเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์วัดความเร็วสำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้การประมาณค่าความเร็วรอบจากระบบจำลองอ้างอิงแบบปรับตัว.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2552.
- [18] Z. S. Wang and S. L. Ho , “Indirect Rotor Field Orientation Vector Control for Induction Motor Drives in the Absence of Current Sensors,” **Conference on Power Electronics and Motion Control, Shanghai, China, Aug. 2006.**pp. 1-5
- [19] อิทธิพันธ์ สกุศลวันธนาศักดิ์. “การประยุกต์ใช้หลักการควบคุมแบบเวกเตอร์ทางอ้อมไม่ใช้เซนเซอร์กระแสโดยตัวควบคุมชนิดพีซีพีไอสำหรับระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำคู่ภาระเดี่ยว.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2559.
- [20] นพดล แชนหินตั้ง. การออกแบบระบบควบคุม. กรุงเทพมหานคร : ห้างหุ้นส่วนจำกัด มินเซอริวิส ซัพพลาย. 2550.
- [21] กำพล ศิริจันทร์พงศ์. “1 เฟส เอซี-ทู-ดีซี สวิตซ์โหมดคอนเวอร์เตอร์ที่มีการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าสองทิศทางสำหรับอินเวอร์เตอร์ขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส.” วิทยานิพนธ์ คณะวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2546.
- [22] ราชา อารีหะหมัด. “การออกแบบและวิเคราะห์สวิตซ์โหมดคอนเวอร์เตอร์ขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2547.



ภาคผนวก ก.

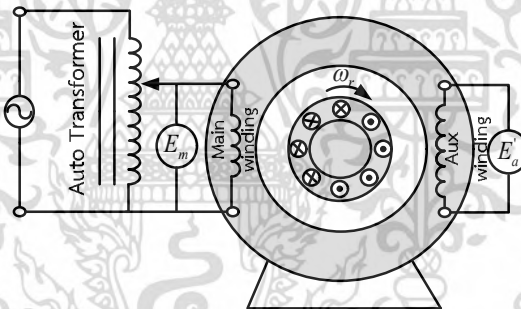
การทดสอบหาค่าพารามิเตอร์มอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

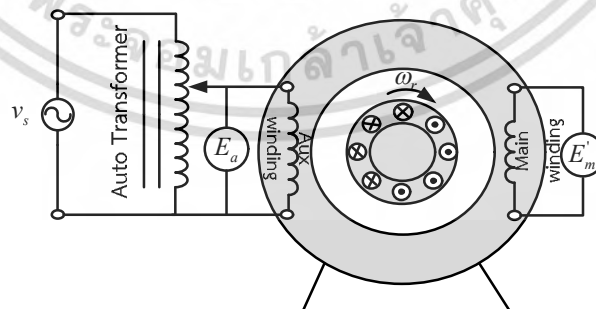
ค่าพิกัดของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสชนิดเริ่มต้นหมุนด้วยตัวเก็บประจุ และหมุนด้วยตัวเก็บประจุ

พิกัดกำลังไฟฟ้า	1.492	kW
พิกัดแรงดันไฟฟ้า	220	V_{rms}
พิกัดความถี่	50	Hz
พิกัดกระแส	9.8	A
พิกัดความเร็ว	1450	rpm
จำนวนขั้วแม่เหล็ก	4	Pole
ความเฉื่อยมอเตอร์	0.0246	kg.m^2
ตัวเก็บประจุเริ่มหมุน	150	μF
ตัวเก็บประจุหมุน	21.5	μF

1.1 การทดสอบหาอัตราส่วนจำนวนรอบ (Turn ratio Test)



(ก) การทดสอบจ่ายแรงดันเข้าขดลวดหลัก



(ข) การทดสอบจ่ายแรงดันเข้าขดลวดช่วย

รูปที่ ก-1 วงจรการทดสอบหาอัตราส่วนจำนวนรอบของขดลวดช่วยต่อขดลวดหลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดสอบพบว่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายขดลวดและแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ของขดลวดแต่ละขดลวดถูกแสดงในตารางที่ก-1

E_m (V)	E'_a (V)	E_a (V)	E'_m (V)
220.27	287.74	220.90	121.07

อัตราส่วนจำนวนรอบของขดลวดช่วยต่อขดลวดหลักสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ดังสมการต่อไปนี้

$$a = \sqrt{\frac{E'_a E_a}{E'_m E_m}}$$

แทนค่าลงในสมการได้ดังนี้

$$a = \sqrt{\frac{287.74 \times 220.90}{121.07 \times 220.27}} = 1.54$$

1.2 การทดสอบจ่ายแรงดันไฟตรงที่สเตเตอร์ของขดลวดหลัก และขดลวดช่วย

การทดสอบเพื่อหาค่าความต้านทานในขดลวดหลักและขดลวดช่วยที่สเตเตอร์ของมอเตอร์ โดยผลทดสอบถูกแสดงในตาราง ก-2 และ ก-3

ผลทดสอบการจ่ายแรงดันไฟตรงที่ขดลวดหลัก

ตารางที่ ก-2 ผลการทดสอบแรงดันไฟตรงที่ขดลวดหลัก

V (Volt)	2.00	4.44	6.39	8.69	10.08	12.18
A (Amp)	1.71	3.68	5.34	7.18	8.34	9.95
R_{sm} (Ω)	1.17	1.21	1.20	1.21	1.21	1.22

$$R_{sm} = \frac{(1.17 + 1.21 + 1.20 + 1.21 + 1.21 + 1.22)}{6} = 1.20 \Omega$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลทดสอบการจ่ายแรงดันไฟตรงที่ขดลวดช่วย

ตารางที่ ก-3 ผลการทดสอบแรงดันไฟตรงที่ขดลวดช่วย

V (Volt)	2.02	3.94	6.09	8.03	10.16	11.91
A (Amp)	0.42	0.77	1.18	1.60	1.97	2.32
R_{sm} (Ω)	4.81	5.12	5.16	5.02	5.16	5.13

$$R_{sa} = \frac{(4.81 + 5.12 + 5.16 + 5.02 + 5.16 + 5.13)}{6} = 5.07 \Omega$$

1.3 การทดสอบสถานะไม่มีโหลดที่ขดลวดหลัก (Main Winding No Load Test)

การทดสอบนี้ทดสอบโดยใช้ชุดขับมอเตอร์กระแสตรงขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงที่ต่อพ่วงกับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสที่เปิดวงจรฝั่งขดลวดช่วยโดยใช้ความเร็วที่ซิงโครนัส $\omega_r = 1500$ rpm (slip = 0) หลังจากนั้นทำการจ่ายแรงดันที่พิกัด 220 V ที่ขดลวดหลักมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสบันทึกค่าผลการทดสอบต่างๆได้ดังตารางที่ ก-4

ตารางที่ ก-4 ผลการทดสอบสถานะไม่มีโหลดที่ขดลวดหลัก

P (W)	V (Volt)	I (Amp)	ϕ (degree)	Power Factor	Speed (rpm)
264	220.81	8.15	-81.37	0.15 (lagging)	1,500

1.4 การทดสอบยึดตัวโรเตอร์ให้หยุดนิ่ง (Locked Rotor Test)

การทดสอบยึดตัวโรเตอร์ให้หยุดนิ่งนี้ทำการทดสอบพร้อมกันทั้งขดลวดช่วยและหลักโดยที่ยึดตัวโรเตอร์ให้หยุดนิ่งและทำการจ่ายแรงดันให้ได้กระแสรวมของขดลวดสองขดมีค่าเท่ากับค่ากระแสที่พิกัด โดยวงจรต่อได้ดังรูปที่ ก-2 และสามารถเขียนเป็นตารางบันทึกค่าได้ดังตารางที่ ก-5 และ ก-6

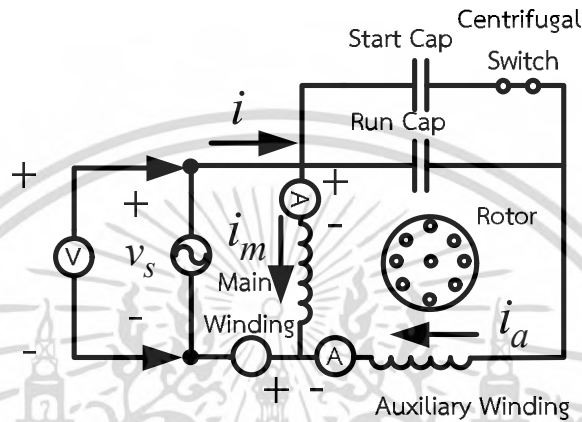
ตารางที่ ก-5 ผลการทดสอบยึดโรเตอร์ให้หยุดนิ่งของขดลวดหลัก

P (W)	V (Volt)	I (Amp)	ϕ (degree)	Power Factor
297.3	50.55	9.53	-51.68	0.62 (lagging)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-6 ผลการทดสอบยัดโรเตอร์ให้หยุดนิ่งของขดลวดช่วย

$P(W)$	$V(Volt)$	$I(Amp)$	$\phi(\text{degree})$	Power Factor
148.7	50.62	3.72	37.81	0.79 (leading)



รูปที่ ก-2 วงจรที่ใช้สำหรับการยัดโรเตอร์



รูปที่ ก-3 วงจรสมมูลของขดลวดหลักมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสกรณีการยัดโรเตอร์

จากตารางที่ ก-5 ผลการทดสอบยัดโรเตอร์ให้หยุดนิ่งของขดลวดหลัก และรูปที่ ก-3 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ขดลวดหลักกรณียัดโรเตอร์ให้หยุดนิ่ง สามารถนำมาคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Z_{lm} = \frac{V_{bm}}{I_{bm}}$$

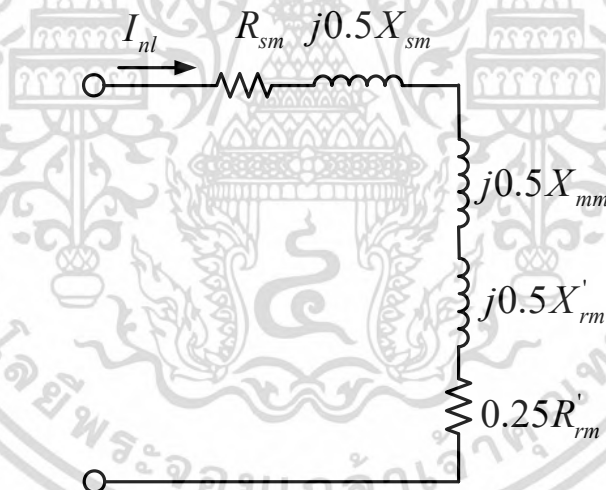
$$Z_{lm} = \frac{50.55 \angle 0^\circ}{9.53 \angle -51.68^\circ} = 3.29 + 4.16j \Omega$$

เมื่อ $X_{sm} = X'_{rm}$ สามารถคำนวณหาได้ดังนี้

$$X_{sm} = X'_{rm} = \frac{X_{lm}}{2}$$

$$X_{sm} = X'_{rm} = \frac{4.16}{2} = 2.08 \Omega$$

จากตารางที่ ก-4 ผลการทดสอบสภาวะไม่มีโหลดที่ขดลวดหลักและรูปที่ ก-4 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ขดลวดหลักกรณีสภาวะที่ไม่มีโหลด สามารถนำมาคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ได้ดังนี้



รูปที่ ก-4 วงจรสมมูลของขดลวดหลักมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสกรณีการทดสอบสภาวะไม่มีโหลด

$$Z_{nl} = \frac{V_{nl}}{I_{nl}}$$

$$Z_{nl} = \frac{220.81 \angle 0^\circ}{8.15 \angle -81.55^\circ} = 3.98 + 26.80j \Omega$$

$$X_{nl} = X_{sm} + \frac{X_{mm}}{2} + \frac{X'_{rm}}{2}$$

$$X_{mm} = 2X_{nl} - 2X_{sm} - X'_{rm}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่า $X_{sm} = X'_{rm} = 2.08\Omega$ ลงในสมการ

$$X_{mm} = 2(26.80) - 2(2.08) - 2.08 = 47.36\Omega$$

$$R'_{rm} = (R_{lm} - R_{sm}) \left(\frac{X_{sm} + X_{mm}}{X_{mm}} \right)^2$$

$$R'_{rm} = (3.29 - 1.20) \left(\frac{2.08 + 47.36}{47.36} \right)^2 = 2.28\Omega$$

คำนวณ Rotational loss

$$P_{rot} = P_{nl} - I_{nl}^2 (R_{sm} + 0.5R'_{rm})$$

$$P_{rot} = 297.3 - [(8.15)^2 \times (1.20 + 0.5 \times (2.28))] = 141.87\text{W}$$



รูปที่ ก-5 วงจรสมมูลของขดลวดช่วยมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสกรณีการยึดโรเตอร์

จากรูปที่ ก-5 สามารถรวมรีแอกแตนซ์ของตัวเก็บประจุทั้งสองได้ดังการคำนวณดังต่อไปนี้

$$C_{eq} = C_S + C_R = 150 + 21.5 = 171.5\mu\text{F}$$

$$X_{C,eq} = \frac{1}{j\omega C_{eq}}$$

$$X_{C,eq} = \frac{1}{j(100\pi) \times 171.5 \times 10^{-6}}$$

$$X_{C,eq} = \frac{1}{j(100\pi) \times 171.5 \times 10^{-6}} = -j18.56\Omega$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ ก-6 ผลการทดสอบยึดโรเตอร์ให้หยุดนิ่งของขดลวดช่วย และรูปที่ ก-5 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ขดลวดช่วยกรณียึดโรเตอร์ให้หยุดนิ่ง สามารถนำมาคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ได้ดังนี้

$$Z_{la} = \frac{V_{ba}}{I_{ba}}$$

$$Z_{la} = \frac{50.62 \angle 0^\circ}{3.72 \angle 37.81^\circ} = 10.75 - 8.34j \Omega$$

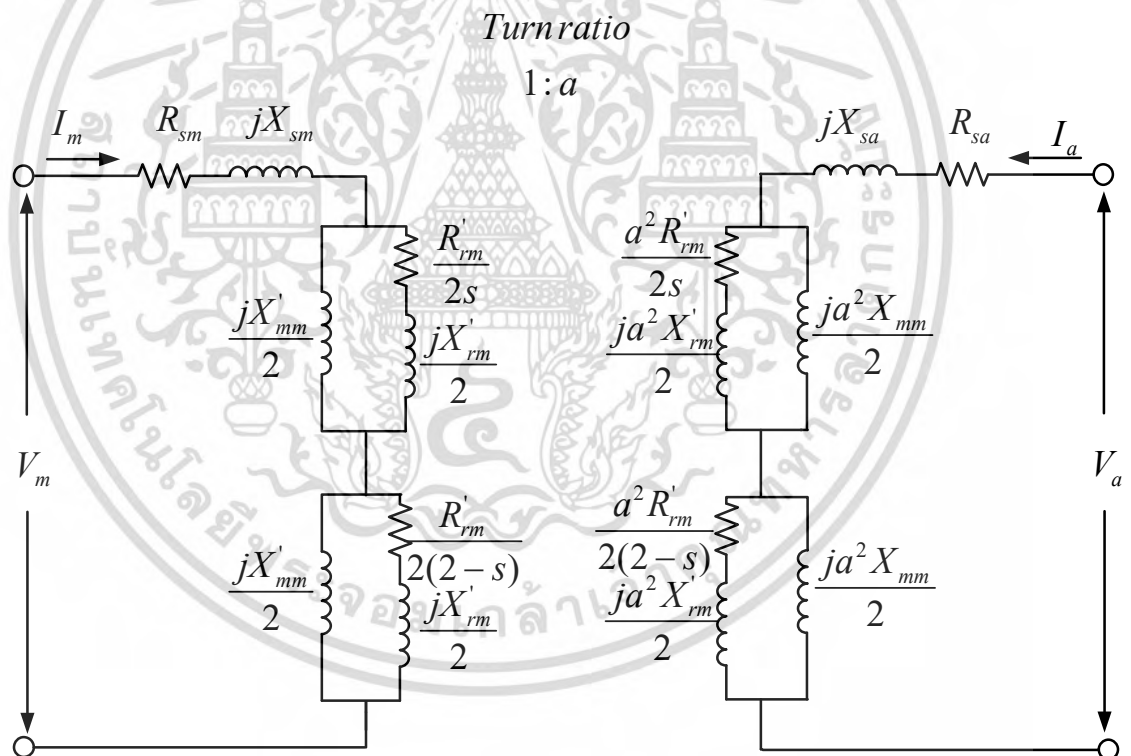
$$X_{la} = X_{sa} + X_{C,eq} + X'_{ra}$$

$$-8.34 = X_{sa} - 18.56 + X'_{ra}$$

$$10.22 = X_{sa} + X'_{ra}$$

$$X_{sa} = X'_{ra} = 5.11 \Omega$$

วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสสามารถแสดงได้ในรูปที่ ก-6

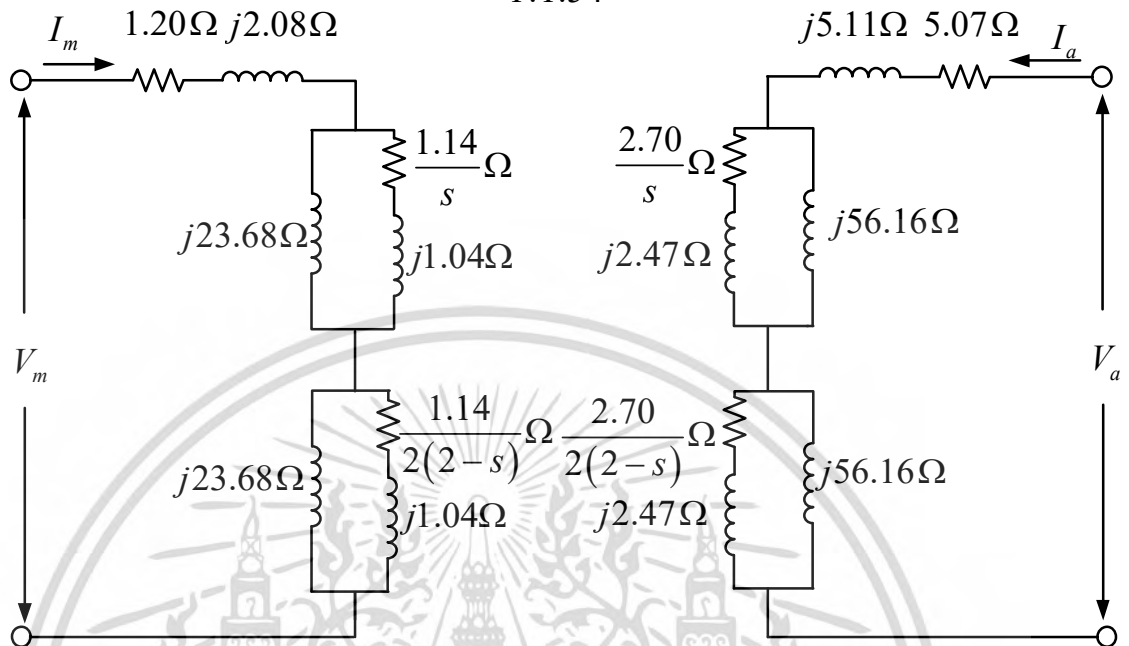


รูปที่ ก-6 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส

แทนค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ทำการหาลงในวงจรสมมูล รูปที่ ก-6 จะได้รูป ก-7

Turnratio

1:1.54

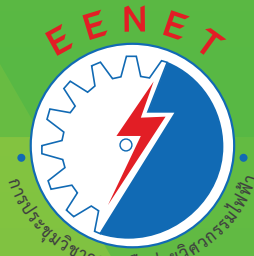


รูปที่ ก-7 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสที่ผ่านการแทนค่าพารามิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



The 9th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology

งานประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 9

EENET 2017

"การพัฒนานวัตกรรมเพื่ออุตสาหกรรมและการเกษตรอย่างยั่งยืน"

Sustainable Development of Innovation for Industry and Agriculture

2-4 May 2017, K.P. Grand Hotel Chanthaburi

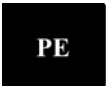
Conference Topics

- Electrical Power (PW)
- Power Electronics (PE)
- Energy and Energy Saving (ES)
- Control Systems and Instrumentation (CT)
- Computer and Information Technology (CP)
- Electric Communication (CM)
- Electronics (EL)
- Digital Signal Processing (DS)
- Innovation and Invention (IN)
- General Electrical Engineering (GN)



บริษัท เนโอ ไดแดคติก จำกัด
NEO DIDACTIC CO., LTD.





ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสชนิดพารามิเตอร์ไม่สมมาตรด้วยวิธีการควบคุมสนามแม่เหล็กตาม แนวแกนโดยปราศจากตัวตรวจจับสนามแม่เหล็ก

A Drive System of an Asymmetrical Two – phase Induction Motor Using Field Oriented Control Without Current Sensors

นาย วิจิตร วัฒนวิจิตร กิเลส และ ประหยัด กองสุข²

¹ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขที่ 1 ซอยฉลองกรุง 1 ถนนฉลองกรุง แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 095-0468448 E-mail: navee_25@hotmail.com

²สาขาวิชาเทคโนโลยีไฟฟ้า คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก

เลขที่ 131 หมู่ 10 ถนนบ่อราชนาคร ตำบลพลวง อำเภอเขาฉกรรจ์ จังหวัดจันทบุรี โทรศัพท์ 084-9766622 Email:pkongsuk@yahoo.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอเกี่ยวกับผลการจำลองผลของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสชนิดพารามิเตอร์ไม่สมมาตรด้วยวิธีการควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกนโดยปราศจากตัวตรวจจับสนามแม่เหล็ก ระบบประกอบด้วย แหล่งจ่ายแรงดันไฟตรงเชื่อมโยขนาด 650 โวลต์ อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันสองเฟสสามกึ่ง มอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสชนิดพารามิเตอร์ไม่สมมาตร จากการจำลองผลพบว่าเทคนิคที่นำเสนอมีผลตอบสนองความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสชนิดพารามิเตอร์ไม่สมมาตรที่เร็วเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกนที่มีการป้อนกลับกระแสภายใต้เงื่อนไขของการใส่ภาระทางกล ปลดภาระทางกล และ การกลับทางหมุน

คำสำคัญ: มอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสชนิดพารามิเตอร์ไม่สมมาตร, การควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกนด้วยวิธีทางอ้อม, อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันสองเฟสสามกึ่ง

Abstract

This paper presents the simulation of a drive system of an asymmetrical two – phase induction motor using field oriented control by absence of current sensors. This system consists of a DC – link voltage source at 650 Volts, a two phase three – legs voltage source inverter and an asymmetrical two – phase induction motor. From the simulation results, the proposed technique offers faster speed response of the asymmetrical two – phase induction motor over other techniques namely and field oriented control using feedback currents under various

conditions such as a step load change , a load removal and a speed reversal .

Keywords: asymmetrical two – phase induction motor, indirect field oriented control, two phase three – legs voltage source inverter

1. บทนำ

มอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสเป็นมอเตอร์ที่นิยมใช้งานในครัวเรือนและภาคอุตสาหกรรม เช่น พัดลม, เครื่องเป่าลม, คอมเพรสเซอร์แอร์และ ปั้มน้ำ เป็นต้น เพื่อเป็นการพัฒนาสมรรถนะของมอเตอร์ทำให้เกิดการคิดแปลงมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสชนิดพารามิเตอร์ไม่สมมาตร[1] โดยทำการถอดตัวเก็บประจุออกและใช้อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันสองเฟสสามกึ่งทำหน้าที่จ่ายสัญญาณแรงดันให้เกิดมุมต่างเฟส 90 องศา ระหว่างขดลวดหลักกับขดลวดช่วย

ในบทความนี้นำเสนอการควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกนของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสชนิดพารามิเตอร์ไม่สมมาตร[2] โดยการขับเคลื่อนประเภทนี้เป็นการขับเคลื่อนที่มีสมรรถนะที่สูง ผลตอบสนองของความเร็วและแรงบิดมอเตอร์ตอบสนองได้รวดเร็วและดีกว่าวิธีการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบควบคุมสลิป[3] แต่มีความยุ่งยากและซับซ้อนกว่า นำไปสู่การลดความยุ่งยากของการควบคุมโดยลดจำนวนตัวคอนโทรลเลอร์และตัวตรวจจับสนามแม่เหล็ก[4]เหมาะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในงานจริงอย่างยิ่ง

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 สมการพลวัตสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสชนิดพารามิเตอร์ไม่สมมาตร

สมการพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสชนิดพารามิเตอร์ไม่สมมาตร[5]นี้ใช้อธิบายถึง พฤติกรรมของมอเตอร์ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพ และ ยังใช้ในการควบคุมที่ต้องอาศัยหลักการคำนวณของพารามิเตอร์อย่างเช่น การควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกนเป็นต้น โดยสมการต่างๆกำหนดให้พารามิเตอร์แกนคือของขดลวดช่วยและพารามิเตอร์แกนคือของขดลวดหลัก สามารถแสดงได้สมการ (1)-(10)

$$v_{ds}^s = i_{ds}^s R_{ds} + \frac{d\lambda_{ds}^s}{dt} \tag{1}$$

$$v_{qs}^s = i_{qs}^s R_{qs} + \frac{d\lambda_{qs}^s}{dt} \tag{2}$$

$$0 = i_{dr}^{s'} R_{dr} + \frac{d\lambda_{dr}^{s'}}{dt} - a\omega_r \lambda_{qr}^{s'} \tag{3}$$

$$0 = i_{qr}^{s'} R_{qr} + \frac{d\lambda_{qr}^{s'}}{dt} + \frac{1}{a} \omega_r \lambda_{dr}^{s'} \tag{4}$$

$$\lambda_{ds}^s = L_{ds}^s i_{ds}^s + L_{dm}^s i_{dr}^{s'} \tag{5}$$

$$\lambda_{qs}^s = L_{qs}^s i_{qs}^s + L_{qm}^s i_{qr}^{s'} \tag{6}$$

$$\lambda_{dr}^{s'} = L_{ds}^s i_{dr}^{s'} + L_{dm}^s i_{ds}^s \tag{7}$$

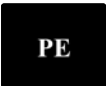
$$\lambda_{qr}^{s'} = L_{qs}^s i_{qr}^{s'} + L_{qm}^s i_{qs}^s \tag{8}$$

$$T_e = \frac{P}{2} (a\lambda_{qr}^{s'} i_{dr}^{s'} - \frac{1}{a} \lambda_{dr}^{s'} i_{qr}^{s'}) \tag{9}$$

$$\frac{2}{P} \omega_r = \frac{1}{J} \int (T_e - F \frac{2}{P} \omega_r - T_m) dt \tag{10}$$

โดย $v_{ds}^s, i_{ds}^s, \lambda_{ds}^s, i_{dr}^{s'}$ และ $\lambda_{dr}^{s'}$ คือ แรงดันไฟฟ้าที่สเตเตอร์แกนคิกวในกรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง, กระแสไฟฟ้าที่สเตเตอร์แกนคิกวในกรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง, เส้นแรงแม่เหล็กที่สเตเตอร์แกนคิกวในกรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง, กระแสไฟฟ้าที่โรเตอร์แกนคิกวในกรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง และ เส้นแรงแม่เหล็กที่โรเตอร์แกนคิกวในกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งตามลำดับ, $R_{ds}^s, R_{dr}^{s'}, L_{dqs}^s, L_{dqm}^s, L_{dqr}^{s'}$ คือ ความต้านทานที่สเตเตอร์แกนคิกว, ความต้านทานที่โรเตอร์แกนคิกว, ความเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่สเตเตอร์แกนคิกว, ความเหนี่ยวนำไฟฟ้าร่วมแกนคิกวและ ความเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่โรเตอร์แกนคิกว, a คือ อัตราส่วนของรอบขดลวดช่วยต่อขดลวดหลัก, P คือ จำนวนขั้วแม่เหล็ก, ω_r คือ ความเร็วโรเตอร์ทางไฟฟ้า, F คือ ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน, T_e คือ แรงบิดแม่เหล็ก, T_m คือ แรงบิดโหลดและ J คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์

โดยสมการทั้ง 10 สมการข้างต้นสามารถนำไปสร้างแบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสชนิดพารามิเตอร์แบบพลวัตและนำไปใช้กับการควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกนได้ซึ่งกล่าวในหัวข้อถัดไป



2.2 การควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกนด้วยวิธีทางอ้อม

การควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกนในกรณีของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสชนิดพารามิเตอร์ไม่สมมาตร[2],[4]จะแตกต่างจากกรณีของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสเนื่องจากมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสชนิดพารามิเตอร์ไม่สมมาตรนั้นมีพารามิเตอร์ที่ไม่สมมาตรคังนั้นต้องทำให้พารามิเตอร์ทั้งสองแกนนั้นเท่ากัน สามารถทำได้โดยสมการที่ (11)-(12)

$$i_{ds1}^s = a i_{ds}^s \tag{11}$$

$$i_{qs1}^s = i_{qs}^s \tag{12}$$

โดย i_{ds1}^s คือ กระแสสเตเตอร์แกนคิกวในกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งที่ผ่านการดำเนินการให้ความสมมาตร

จากสมการที่ (11)-(12) เป็นการกระทำที่กระแสที่สเตเตอร์ทั้งสองแกนมีความสมมาตรซึ่งส่งผลให้พารามิเตอร์ทั้งสองแกนมีค่าเท่ากัน โดยเท่ากับค่าพารามิเตอร์ที่ขดลวดหลัก ดังนั้นพารามิเตอร์จากสมการ(1)-(9)ของแกนคิกวมีค่าเท่ากัน คังนั้นค่าอัตราส่วนของขดลวดหลักต่อขดลวดช่วยมีค่าเท่ากับ 1

จากสมการพลวัตของมอเตอร์ในกรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง(1)-(9)สามารถแปลงไปยังกรอบอ้างอิงหมุนเพื่อจัดรูปและทำการหาค่ากระแสสเตเตอร์แกนคิกวกับกระแสโรเตอร์แกนคิกวได้คังสมการที่ (13)-(16)

$$i_{ds1}^e = \frac{\lambda_{dr1}^e}{L_{qm}} \tag{13}$$

$$i_{qs1}^e = \frac{2L_{qr}^e T_e}{PL_{qm} \lambda_{dr1}^e} \tag{14}$$

$$i_{dr1}^e = 0 \tag{15}$$

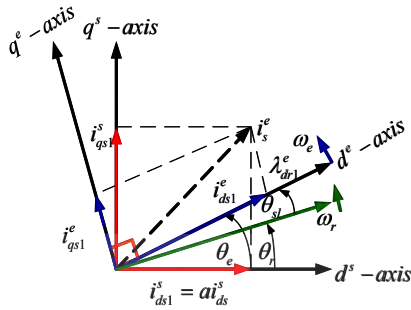
$$i_{qr1}^e = \frac{-L_{qm}^e i_{qs1}^e}{L_{qr}^e} \tag{16}$$

โดย i_{ds1}^e, i_{dr1}^e คือ กระแสสเตเตอร์แกนคิกวกรอบอ้างอิงหมุนที่ผ่านการดำเนินการให้สมมาตร และ กระแสโรเตอร์แกนคิกวกรอบอ้างอิงหมุนที่ผ่านการดำเนินการให้สมมาตร ตามลำดับ เวกเตอร์โอะแกรมของกระแสสเตเตอร์แสดงในรูปที่ 1

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 9

Proceedings of the 9th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2017 (EENET 2017)



รูปที่ 1 เวกเตอร์ไอโอะแกรมของกระแสเดอเตอร์แกนคิกิว

แปลงกระแสต่างๆในสมการที่ (13)-(16)จากกรอบอ้างอิงหมุนไปยังกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งแล้วแทนในสมการแรงดันสเตเตอร์จะได้ดังสมการที่(17)-(18)

$$V_{ds}^s = i_{ds1}^s R_{qs} + L_{qs} \frac{di_{ds1}^s}{dt} + L_{qm} \frac{di_{dr1}^s}{dt} \quad (17)$$

$$V_{qs1}^s = i_{qs1}^s R_{qs} + L_{qs} \frac{di_{qs1}^s}{dt} + L_{qm} \frac{di_{qr1}^s}{dt} \quad (18)$$

โดย v_{dqs1}^s , i_{dqs1}^s และ i_{dqr1}^s คือ แรงดันสเตเตอร์แกนคิกิวในกรอบอ้างอิงนิ่ง, กระแสเดอเตอร์แกนคิกิวในกรอบอ้างอิงนิ่งและกระแสโรเตอร์แกนคิกิวในกรอบอ้างอิงนิ่ง ซึ่งทั้งหมดนี้คือตัวแปรที่ผ่านการกระทำให้สมมาตร

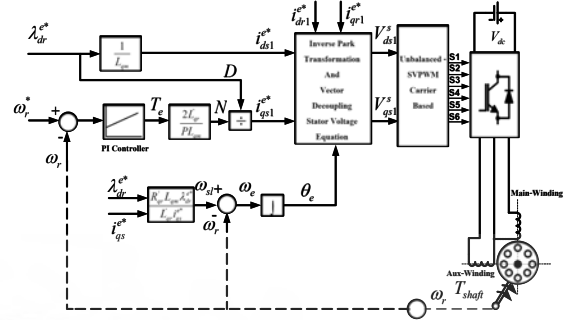
จากสมการที่(4)เมื่อนำไปแปลงในกรอบอ้างอิงหมุนสามารถหาความสัมพันธ์ของความเร็วสลิปความเร็วเชิงโรนัสได้ดังสมการที่ (19)-(20)

$$\omega_{sl} = \frac{R_{qr}' L_{qm} i_{qs1}^e}{L_{qr}' \lambda_{dr1}^e} \quad (19)$$

$$\omega_e = \omega_{sl} + \omega_r \quad (20)$$

โดย λ_{dr1}^e , ω_{sl} , ω_e คือ เส้นแรงแม่เหล็กที่โรเตอร์แกนคิกิวในกรอบอ้างอิงหยุดหมุนที่ผ่านการดำเนินการให้มีความสมมาตร, ความเร็วสลิปทางไฟฟ้าและ ความเร็วเชิงโรนัสทางไฟฟ้า

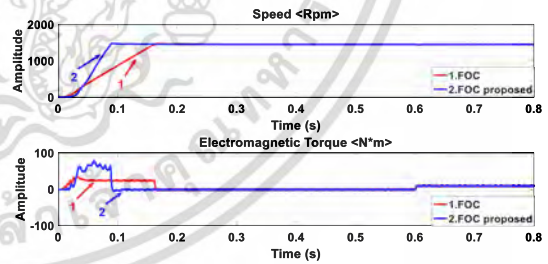
จากสมการที่กล่าวมาทั้งหมดข้างต้นสามารถสร้างเป็นระบบควบคุมขับเคลื่อนมอเตอร์ได้ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ระบบขับเคลื่อนด้วยวิธีควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกนวิธีทางอ้อมโดยปราศจากตัวตรวจจับกระแส

3 ผลการจำลอง

ในการจำลองผลนี้ เลือกใช้ความถี่สวิตซ์ 5 kHz และได้ทำการจำกัดค่าเอาท์พุทของตัวควบคุมความเร็วไว้ที่ +25 และ -25 ในทั้งสองกรณีการควบคุม จากผลการจำลองในเงื่อนไขของมอเตอร์สตาร์ทที่เริ่มต้นโดยทำการใส่ภาระทางกลที่กัก(10 นิวตัน - เมตร) ที่เวลา 0.6 วินาที จากรูปที่ 3 พบว่าระบบควบคุมที่ได้นำเสนอในบทความนี้มีผลตอบสนองของความเร็ว, ผลตอบสนองของแรงบิดที่เร็วและให้แรงบิดช่วงสตาร์ทที่สูงกว่าวิธีควบคุมเวกเตอร์โดยใช้ตัวตรวจจับกระแส แต่ข้อด้อยของวิธีที่นำเสนอนี้คือแรงบิดที่ได้เกิดการพุ่งเกินที่สูงกว่าวิธีควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกนที่มีตัวบ้อนกลับกระแส



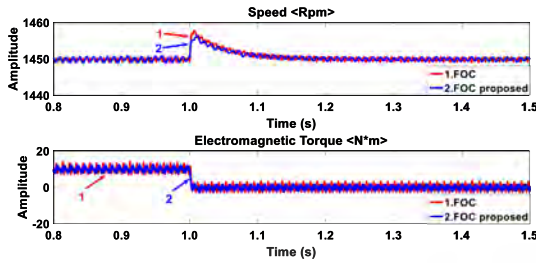
รูปที่ 3 ความเร็วและแรงบิด ของทั้งสามวิธีในช่วงเวลา 0 - 0.8 วินาที

จากรูปที่ 4 ช่วงเวลาที่ 1 วินาที ได้ทำการปลดภาระทางกลพบว่าความเร็วของมอเตอร์วิธีการที่นำเสนอกระเพื่อมขึ้นน้อย รวมทั้งมีค่าระลอกของแรงบิดน้อย เมื่อเทียบกับวิธีที่มีตัวตรวจจับกระแส

บทความวิจัย

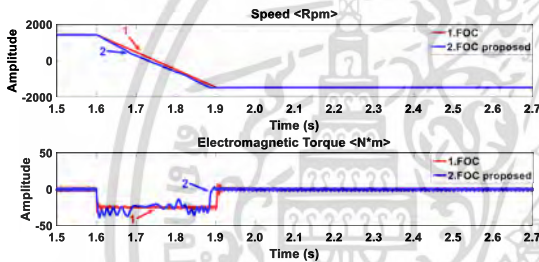
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 9

Proceedings of the 9th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2017 (EENET 2017)



รูปที่ 4 ความเร็วและแรงบิด ของทั้งสามวิธี ในช่วงเวลา 0.8 - 1.5 วินาที

จากรูปที่ 5 มอเตอร์กลับทิศทางการหมุนที่เวลา 1.6 วินาที พบว่าความเร็วและแรงบิดของระบบที่นำเสนอมีผลตอบสนองที่ไว แต่แรงบิดไม่เรียบเมื่อเทียบกับวิธีที่มีตัวตรวจจับสนะ



รูปที่ 5 ความเร็วและแรงบิด ของทั้งสามวิธี ในช่วงเวลา 1.5 - 2.7 วินาที

4 สรุปผลการทดลอง

ในบทความที่ได้นำเสนอพบว่าระบบควบคุมที่ได้นำเสนอมีสมรรถนะที่ดีในช่วงของการใส่ภาระทางกลและปลดภาระทางกลเนื่องจากให้ผลตอบสนองของแรงบิดและความเร็วที่ไว ส่วนของช่วงเริ่มเดินเครื่องของมอเตอร์พบว่าวิธีที่นำเสนอมีความไว แต่พบว่ามีค่าพุ่งเกินที่สูงกว่าวิธีการควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกนที่ใช้ตัวบ็อนกลับกระแส ในส่วนการจำลองการกลับทิศทางการหมุนพบว่าวิธีที่นำเสนอ ยังคงมีผลตอบสนองที่เร็ว แต่ ผลตอบสนองของความเร็วและแรงบิด ยังคงมีความผิดพลาดอยู่เล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกนแบบมีตัวบ็อนกลับกระแสเนื่องจากวิธีการดังกล่าวได้มีการชดเชยค่าความผิดพลาดของกระแสทำให้ค่ากระแสที่ได้มีความถูกต้อง

4. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษาที่ให้การสนับสนุนในทุนวิจัยสำหรับบทความวิจัยนี้

5. พารามิเตอร์มอเตอร์

มอเตอร์ 2 HP ความถี่ 50 Hz ความเร็วโรเตอร์ที่กัก 1450 rpm		
แรงดันที่กัก: ขดลวดหลัก 220 V _{rms} ขดลวดช่วย 339 V _{rms}		
$R_{gs} = 1.3597 \Omega$	$L_{gs} = 156.6168 \text{ mH}$	$L_{gm} = 150.4976 \text{ mH}$
$R'_{qr} = 1.4391 \Omega$	$L_{qr} = 156.6168 \text{ mH}$	$a = 1.5393$

PE

เอกสารอ้างอิง

- [1] Ch.Charumit and V.Kinnares, "Carrier-based unbalanced phase voltage space vector PWM strategy for asymmetrical parameter type two-phase induction motor drives," Electric Power Systems Research, 2009, vol. 79, pp. 1127-1135.
- [2] M.B. de Rossiter Correa, C.B. Jacobina, A.M.N. Lima and E.R.C. da Silva, "Rotor-flux-oriented control of a single-phase induction motor drive," IEEE Transaction on Industrial Electronics, vol. 47, pp. 832-841, August 2000.
- [3] Wekin Piyarat, P.Hothongkham, C.Charumit and V.Kinnares, "Simple speed control of an asymmetrical type two-phase induction motor drive," Electrical Engineering/Electronics Computer Telecommunication and Information Technology (ECTI-CON), Chiang Mai, 19-21 May 2010.
- [4] Z. S. Wang and S. L. Ho "Indirect Rotor Field Orientation Vector Control for Induction Motor Drives in the Absence of Current Sensors," Power Electronics and Motion Control, 14-16 August 2006.
- [5] P. C. Krause, "Simulation of Unsymmetrical 2-Phase Induction Machines," IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, vol. 84, pp. 1025-1037, November 1965.



ประวัติผู้เขียนบทความ

นาย นาวี รุจิคามพ์

ประวัติการศึกษา: กำลังศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์
ระดับมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบัน
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
สนใจศึกษา: การขับเคลื่อนมอเตอร์

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - นามสกุล นายนาวี รุจิตามพ์

วัน เดือน ปี เกิด 25 มกราคม 2534 ที่จังหวัด ชลบุรี

ที่อยู่ 645/1 ถ.พิพิธ ต.บ้านโชด อ.เมืองชลบุรี จ.ชลบุรี 20000

ประวัติการศึกษา สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง ปีการศึกษา 2555 (พ.ศ. 2552 - 2555)

ประวัติการทำงาน ทำงานในตำแหน่ง Test Engineer
บริษัท Maxim Integrated Products (Thailand) Co.,Ltd
(พ.ศ. 2556 - 2557)

ผลงานวิจัย

นาวี รุจิตามพ์, เฉลิมชาติ มานพ, วิจิตร กิมเรศ และ ประหยัด กองสุข, “ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสชนิดพารามิเตอร์ไม่สมมาตรด้วยวิธีการควบคุมสนามแม่เหล็กตามแนวแกนโดยปราศจากตัวตรวจจับสนแรงเสถ” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 9 - EENET 2017, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ตะวันออก วิทยาเขต จันทบุรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้