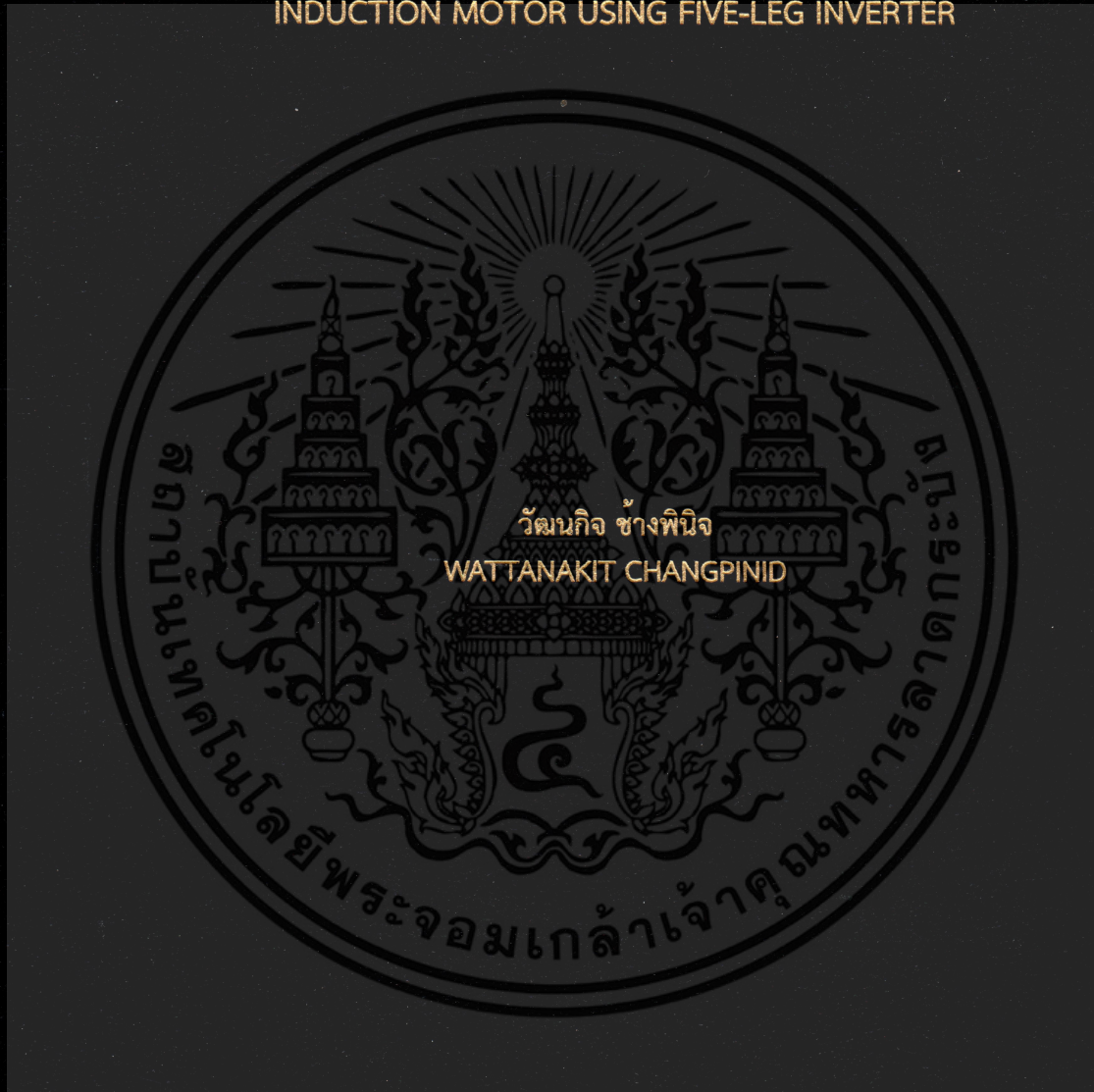


การควบคุมความเร็วรอบอิสระต่อกันของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส
และสองเฟสโดยอินเวอร์เตอร์แบบห้ากึ่ง

INDEPENDENT SPEED CONTROL OF THREE-PHASE AND TWO-PHASE
INDUCTION MOTOR USING FIVE-LEG INVERTER



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2560

KMITL-2017-EN-M-020-184

การควบคุมความเร็วรอบอิสระต่อกันของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส
และสองเฟสโดยอินเวอร์เตอร์แบบห้ากึ่ง

INDEPENDENT SPEED CONTROL OF THREE-PHASE AND TWO-PHASE
INDUCTION MOTOR USING FIVE-LEG INVERTER



วัฒนกิจ ช่างพินิจ

WATTANAKIT CHANGPINID

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2560

KMITL-2017-EN-M-020-184

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INDEPENDENT SPEED CONTROL OF THREE-PHASE AND TWO-PHASE
INDUCTION MOTOR USING FIVE-LEG INVERTER



WATTANAKIT CHANGPINID

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-020-184

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2017

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การควบคุมความเร็วรอบอิสระต่อกันของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสและสองเฟสโดยอินเวอร์เตอร์แบบห้ากึ่ง

Thesis Title Independent Speed Control of Three-Phase and Two-Phase Induction Motor using Five-Leg Inverter

นักศึกษา นายวัฒนกิจ ช้างพินิจ

รหัสประจำตัว 57601120

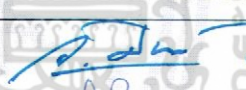


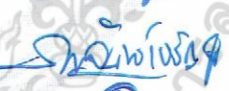

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.เฉลิมชาติ มานพ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม รศ.ดร.วิจิตร กิณเรศ

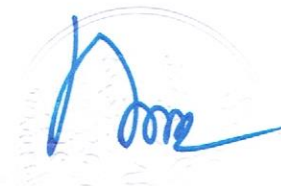
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2017-EN-M-020-184

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

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพฤหัสบดีที่ 5 ตุลาคม พ.ศ. 2560 เวลา 08.30-10.30 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 3

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร.คมสัน มาลีสี)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 5 ตุลาคม พ.ศ. 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือใช้ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การควบคุมความเร็วรอบอิสระต่อกันของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสและสองเฟสโดยอินเวอร์เตอร์แบบห้ากึ่ง
นักศึกษา	นายวัฒนกิจ ช่างพินิจ
รหัสประจำตัว	57601120
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2560
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.เฉลิมชาติ มานพ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์(ร่วม)	รศ.ดร.วิจิตร กิณเรศ

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการออกแบบ, ประกอบสร้าง และเทคนิคการควบคุมอินเวอร์เตอร์แบบห้ากึ่งสำหรับควบคุมความเร็วรอบให้คงที่และเป็นอิสระต่อกันของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสและมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสชนิดพารามอเตอร์ไม่สามารถกัน โดยใช้เทคนิคสเปซเวกเตอร์พัลส์วิดมอดูเลชัน ซึ่งมอเตอร์ทั้งสองมีการใช้กึ่งหนึ่งของอินเวอร์เตอร์ร่วมกัน เป็นผลให้สามารถลดจำนวนสวิตช์จาก 12 ตัวเหลือ 10 ตัว การจำลองผลการทำงานจะทำการสร้างโมเดลจำลองผ่านโปรแกรม MATLAB/Simulink จากนั้นทำการเขียนโมเดลดังกล่าวลงสู่มicrocontroller C2000 รุ่น TMS320F28335 เพื่อทำการทดลองควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองตัวโดยใช้อินเวอร์เตอร์แบบห้ากึ่ง จากผลการจำลองและผลการทดลองได้แสดงให้เห็นว่าสามารถควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำทั้งสองให้คงที่ด้วยความเร็วที่แตกต่างตามที่ต้องการได้ในสถานะต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นการเพิ่มภาระทางกล การปลดภาระทางกล การเปลี่ยนแปลงความเร็ว หรือการกลับทิศทางการหมุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	Independent Speed Control of Three-Phase and Two-Phase Induction Motor using Five-Leg Inverter
Student	Mr.Wattanakit Changpinid
Student ID.	57601120
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 presents design, construction and control technique of five-legs voltage source inverter (VSI), based on space vector pulse width modulation (SVPWM), for independently driving of three-phase and unbalanced two-phase induction motors. One of inverter leg being common to both machine, lead to reduce the number of power electronics devices (IGBT) required in multi-motor drive systems from 12 to 10. The simulation model has been created by MATLAB/Simulink, then writes that model to C2000/TMS320F28335 microcontroller, for driving two induction motors via the five-legs inverter. The simulation & experimentation results confirm that both induction motors are able to operate at differently constant speed as speed command in any state, such as step change in mechanical load, a speed change or reversal.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.เฉลิมชาติ มานพ และ รศ.ดร.วิจิตร กิณเรศ ที่ให้ความช่วยเหลือ แก้ปัญหา ตลอดจนให้ความรู้และประการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้าเป็นระยะเวลาปี ข้าพเจ้ามีความซาบซึ้งใจอย่างยิ่ง จึงขอกล่าวคำขอบคุณและแสดงความนับถือมา ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือ อนุเคราะห์ทางด้านสถานที่ วัสดุและอุปกรณ์ทางการศึกษา

ขอขอบคุณ คุณวัชรินทร์ พรหมคุณ ที่คอยให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางการออกแบบ รวมถึงการแก้ไขปรับปรุงอุปกรณ์การทดลอง

ขอขอบคุณ คุณนาวี รุจิตามภ์ รวมถึงเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในปฏิบัติการ PMC Lab ทุกคน ที่คอยให้ความช่วยเหลือคำแนะนำและข้อคิดตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา

สุดท้ายนี้ สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดาซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

วัฒนกิจ ช่างพินิจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.4 แผนการดำเนินงาน.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและความรู้ที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 อินเวอร์เตอร์ (Inverter).....	5
2.1.1 การสวิตซ์แบบพีดีดับเบิลยูเอ็ม (PWM).....	6
2.1.1.1 การสวิตซ์แบบไปโพลาร์.....	6
2.1.1.2 การสวิตซ์แบบยูนิโพลาร์.....	8
2.2 มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส.....	10
2.2.1 วงจรสมมูลมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	11
2.3 มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว.....	13
2.4 การควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	13
2.5 เทคนิคสเปซเวกเตอร์พัลส์วิดมอดูเลชัน (SVPWM).....	15
2.6 การเชื่อมต่ออินเวอร์เตอร์แบบห้ากึ่ง.....	17
2.7 รูปแบบสัญญาณควบคุมแบบห้ากึ่ง.....	18
2.7.1 สัญญาณไซน์อ้างอิงสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส.....	18
2.7.2 สัญญาณไซน์อ้างอิงสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส.....	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.7.2.1 การชดเชยมุมต่างเฟส.....	19
2.7.3 การรวมสัญญาณมอดูเลตสำหรับห้ากึ่ง.....	20
2.7.4 การจำลองสัญญาณควบคุมอินเวอร์เตอร์แบบห้ากึ่ง.....	21
2.8 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ.....	28
2.8.1 การควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional Control).....	29
2.8.2 การควบคุมแบบปริพันธ์ (Integral Control).....	29
2.8.3 การควบคุมแบบอนุพันธ์ (Derivative Control).....	30
2.8.4 การควบคุมแบบผสม.....	30
บทที่ 3 การออกแบบและประกอบสร้าง.....	32
3.1 การออกแบบตัวควบคุม.....	32
3.1.1 การออกแบบฮาร์ดแวร์ของตัวควบคุม.....	32
3.1.1.1 ชุดสร้างไฟเลี้ยงสำหรับวงจรควบคุม (Power Supply).....	32
3.1.1.2 วงจรปรับระดับความเร็วสำหรับมอเตอร์ตัวที่หนึ่งและสอง (Speed Commander 1&2).....	33
3.1.1.3 วงจรตัวรับค่าความเร็วจากมอเตอร์ (Speed Receiver).....	35
3.1.1.4 การเชื่อมต่อไมโครคอนโทรลเลอร์ (Overview).....	36
3.1.2 การออกแบบฮาร์ดแวร์ของอินเวอร์เตอร์แบบห้ากึ่ง.....	37
3.1.2.1 ชุดสร้างไฟเลี้ยงขนาด +15 และ -15 Vdc.....	38
3.1.2.2 ชุดสร้างไฟเลี้ยงขนาด +5 และ +12 Vdc.....	38
3.1.2.3 ชุดสร้างไฟเลี้ยง Optocoupler แบบแยกกราวด์ (Isolated DC Supply) -15 ถึง +15 Vdc.....	39
3.1.2.4 วงจรขับสวิตช์ (IGBT gate drive).....	40
3.1.2.5 การออกแบบวงจรตรวจจับกระแส.....	41
3.1.2.6 วงจรเซ็ทและรีเซ็ทสัญญาณ.....	42
3.1.2.7 วงจรรับและส่งสัญญาณ PWM.....	43
3.1.3 การออกแบบซอฟต์แวร์ควบคุมการทำงาน.....	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.1.3.1 ภาพรวมของซอฟต์แวร์ควบคุม.....	45
3.1.3.2 ชุดปรับความเร็วมอเตอร์ (Speed Commander 1&2).....	45
3.1.3.3 ชุดควบคุมแบบวงรอบปิด (Closed-loop Control 1&2).....	47
3.1.3.4 ชุดควบคุมแรงดันต่อความถี่ (V/F Speed control 1&2).....	48
3.1.3.5 ชุดสร้างแรงดันอ้างอิง (Voltage Reference 1&2).....	49
3.1.3.6 ชุดแปลงสัญญาณสเปซเวกเตอร์ (Space Vector Box).....	50
3.1.3.7 ชุดรวมสัญญาณมอดูเลต (Merging Box).....	51
3.1.3.8 ชุดเปรียบเทียบสัญญาณขับสวิตช์ (PWM Box).....	52
บทที่ 4 การจำลองผลการทำงาน.....	53
4.1 ตัวแปรควบคุมสำหรับการจำลองผลการทำงาน.....	53
4.2 การจำลองผลการทำงาน.....	53
4.3 สรุปผลการจำลองการทำงาน.....	59
บทที่ 5 ผลการทดลอง.....	60
5.1 ตัวแปรควบคุมสำหรับการทดลองผลการทำงาน.....	60
5.2 การควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ 2 ตัว แบบไม่มีภาระทางกล.....	61
5.2.1 ขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ 1500 rpm (100%) และมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสที่ 1500 rpm (100%).....	62
5.2.2 ขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ 900 rpm (60%) และมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสที่ 1350 rpm (90%).....	67
5.2.3 ขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ 1200 rpm (80%) และมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสที่ 0 rpm (0%).....	71
5.2.4 ขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ 0 rpm (0%) และมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสที่ 1050 rpm (70%).....	75
5.3 การควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ 2 ตัว แบบมีภาระทางกล.....	79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
5.3.1 ขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ 1500 rpm (100%) และมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสที่ 1500 rpm (100%) แบบมีภาระทางกล.....	80
5.3.2 ขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ 900 rpm (60%) และมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสที่ 1350 rpm (90%) แบบมีภาระทางกล.....	85
5.3.3 ขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ 1200 rpm (80%) และมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสที่ 0 rpm (0%) แบบมีภาระทางกล.....	90
5.3.4 ขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ 0 rpm (0%) และมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสที่ 1050 rpm (70%) แบบมีภาระทางกล.....	95
5.4 การทดลองเปลี่ยนแปลงความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	102
5.5 การทดสอบการกลับทางหมุนของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	104
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	107
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	107
6.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการต่อยอดงานวิจัย.....	108
บรรณานุกรม.....	109
ภาคผนวก.....	111
ภาคผนวก ก. งานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	112
EENET 2017.....	113
EECON 38.....	118
ภาคผนวก ข. ฮาร์ดแวร์สำหรับงานวิจัย.....	123
ภาคผนวก ค. พารามิเตอร์มอเตอร์เหนี่ยวนำสำหรับการจำลองและทดลองการทำงาน.....	127
ประวัติผู้เขียน.....	132

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1	แผนการดำเนินงานวิจัย.....3
2.1	ผลของการเพิ่มค่าตัวแปรอิสระ.....31
3.1	การทำงานของ NAND gates (SN74HC00N).....43
3.2	พอร์ตการใช้งานสำหรับตัวควบคุมความเร็วตัวที่ 1 และ 2.....47
4.1	พิกัดมอเตอร์เหนี่ยวนำสำหรับการจำลองผล.....53
5.1	พิกัดมอเตอร์เหนี่ยวนำและการตั้งค่าอุปกรณ์การทดลอง.....60
5.2	ค่าแรงดันและกระแสในขณะมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ 1500 rpm (100%) และ มอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส 1500 rpm (100%) แบบไม่มีภาระทางกล.....66
5.3	ค่าแรงดันและกระแสในขณะมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ 900 rpm (60%) และ มอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส 1350 rpm (90%) แบบไม่มีภาระทางกล.....71
5.4	ค่าแรงดันและกระแสในขณะมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ 1200 rpm (80%) และ มอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส 0 rpm (0%) แบบไม่มีภาระทางกล.....75
5.5	ค่าแรงดันและกระแสในขณะมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ 0 rpm (0%) และ มอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส 1050 rpm (70%) แบบไม่มีภาระทางกล.....79
5.6	ค่าแรงดันและกระแสในขณะมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ 1500 rpm (100%)และ มอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส 1500 rpm (100%) แบบมีภาระทางกล.....84
5.7	ค่าแรงดันและกระแสในขณะมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ 900 rpm (60%) และ มอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส 1350 rpm (90%) แบบมีภาระทางกล.....89
5.8	ค่าแรงดันและกระแสในขณะมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ 1200 rpm (80%) และ มอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส 0 rpm (0%) แบบมีภาระทางกล.....94
5.9	ค่าแรงดันและกระแสในขณะมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ 0 rpm (0%) และ มอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส 1050 rpm (70%) แบบมีภาระทางกล.....99
5.10	สรุปค่ากระแสและแรงดันในกรณีที่มีและไม่มีภาระเพิ่มภาระทางกล.....101

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	อินเวอร์เตอร์สามกึ่งพร้อมชุดควบคุมสองชุดสำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งตัว.....	1
1.2	อินเวอร์เตอร์ห้ากึ่งพร้อมชุดควบคุมสำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสองตัว.....	2
2.1	ส่วนประกอบของอินเวอร์เตอร์.....	5
2.2	วงจร H-Bridge Inverter.....	6
2.3	จำลองการทำงานของสวิตช์แบบไบโพลาร์.....	7
2.4	จำลองการทำงานของสวิตช์แบบยูนิโพลาร์.....	9
2.5	วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	12
2.6	โครงสร้างมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟส.....	13
2.7	การสร้างสัญญาณสเปซเวกเตอร์อ้างอิงสามเฟส.....	15
2.8	การสร้างมอดูเลตสำหรับสัญญาณสามเฟส.....	15
2.9	แรงดันอ้างอิงสามเฟส.....	16
2.10	ค่าสูงสุดและต่ำสุดของสัญญาณอ้างอิงสามเฟส.....	16
2.11	สัญญาณลำดับศูนย์.....	16
2.12	สัญญาณสเปซเวกเตอร์อ้างอิงสามเฟส.....	17
2.13	การเชื่อมต่อมอเตอร์เหนี่ยวนำสองตัวกับอินเวอร์เตอร์แบบห้ากึ่ง.....	17
2.14	การรวมสัญญาณมอดูเลตให้เหลือ 5 สัญญาณ.....	21
2.15	สัญญาณอ้างอิงไซน์สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส 30 hz Modulation Index = 0.5.....	22
2.16	สัญญาณอ้างอิงไซน์สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส 20 hz Modulation Index = 0.5.....	22
2.17	สัญญาณสเปซเวกเตอร์อ้างอิงไซน์สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส 30 hz Modulation Index = 0.5.....	23
2.18	สัญญาณสเปซเวกเตอร์อ้างอิงไซน์สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส 20 hz Modulation Index = 0.5.....	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.19	สัญญาณมอดูเลตสำหรับกึ่งทั้งห้าของอินเวอร์เตอร์.....	23
2.20	การเปรียบเทียบเพื่อสร้างสัญญาณควบคุมสวิตช์ตัวบนของกึ่ง A.....	24
2.21	สัญญาณการควบคุมสวิตช์ตัวบนของกึ่ง A.....	24
2.22	การเปรียบเทียบเพื่อสร้างสัญญาณควบคุมสวิตช์ตัวบนของกึ่ง B.....	24
2.23	สัญญาณการควบคุมสวิตช์ตัวบนของกึ่ง B.....	25
2.24	การเปรียบเทียบเพื่อสร้างสัญญาณควบคุมสวิตช์ตัวบนของกึ่ง C.....	25
2.25	สัญญาณการควบคุมสวิตช์ตัวบนของกึ่ง C.....	26
2.26	การเปรียบเทียบเพื่อสร้างสัญญาณควบคุมสวิตช์ตัวบนของกึ่ง D.....	26
2.27	สัญญาณการควบคุมสวิตช์ตัวบนของกึ่ง D.....	26
2.28	การเปรียบเทียบเพื่อสร้างสัญญาณควบคุมสวิตช์ตัวบนของกึ่ง E.....	27
2.29	สัญญาณการควบคุมสวิตช์ตัวบนของกึ่ง E.....	27
2.30	สัญญาณพีคดับเบิ้ลยูเอ็มระหว่างกึ่ง A-B.....	27
2.31	สัญญาณพีคดับเบิ้ลยูเอ็มระหว่างกึ่ง C-D.....	28
2.32	สัญญาณพีคดับเบิ้ลยูเอ็มระหว่างกึ่ง E-D.....	28
2.33	ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ.....	29
3.1	ชุดสร้างไฟเลี้ยงสำหรับวงจรควบคุม.....	33
3.2	วงจรปรับระดับความเร็วสำหรับมอเตอร์ตัวที่หนึ่ง.....	34
3.3	วงจรปรับระดับความเร็วสำหรับมอเตอร์ตัวที่สอง.....	35
3.4	วงจรรับค่าความเร็วมอเตอร์.....	36
3.5	ภาพรวมการเชื่อมต่อของไมโครคอนโทรลเลอร์.....	37
3.6	ชุดสร้างไฟเลี้ยงขนาด +15 และ -15 V _{dc}	38
3.7	ชุดสร้างไฟเลี้ยงขนาด 5 V _{dc}	39
3.8	ชุดสร้างไฟเลี้ยงขนาด 12 V _{dc}	39
3.9	ชุดสร้างไฟเลี้ยง Optocoupler แบบแยกกราวด์.....	40
3.10	วงจรขับสวิตช์กึ่ง A ของอินเวอร์เตอร์แบบห้ากึ่ง.....	41
3.11	วงจรตรวจจับกระแส.....	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.12	วงจรถูกและรีเซ็ตสัญญาณ.....	43
3.13	วงจรรับส่งสัญญาณ PWM.....	44
3.14	ภาพรวมของซอฟต์แวร์ควบคุม.....	45
3.15	ชุดปรับความเร็วมอเตอร์ตัวที่ 1 (Speed Commander 1).....	46
3.16	ชุดควบคุมวงรอบปิด.....	47
3.17	ชุดแปลงสัญญาณพัลส์เป็นค่าความเร็วรอบ.....	48
3.18	ชุดควบคุมแรงดันต่อความถี่.....	49
3.19	ชุดสร้างสัญญาณอ้างอิงสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส (ก) และมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส (ข).....	50
3.20	ชุดแปลงสัญญาณสเปกเตอร์สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส (ก) และมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส (ข).....	51
3.21	การรวมสัญญาณมอดูเลต.....	51
3.22	ชุดเปรียบเทียบสัญญาณับสวิทช์ (PWM Box).....	52
4.1	ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่สภาวะต่างๆ.....	54
4.2	แรงดันเฟส U-V ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ขณะมีความเร็ว 1500 rpm	54
4.3	องค์ประกอบแรงดันเฟส U-V ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ขณะมีความเร็ว 1500 rpm	55
4.4	แรงดันขดลวดช่วยและขดลวดหลักของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส ขณะมีความเร็ว 750 rpm.....	55
4.5	แรงดันขดลวดช่วยและขดลวดหลักของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส ขณะมีความเร็ว 750 rpm.....	56
4.6	องค์ประกอบแรงดันขดลวดช่วยของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส ขณะมีความเร็ว 750 rpm.....	56
4.7	องค์ประกอบแรงดันขดลวดหลักของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส ขณะมีความเร็ว 750 rpm.....	57
4.8	กระแสเฟส U ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส.....	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.9	กระแสเฟส U ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ขณะมีความเร็ว 1500 rpm.....	58
4.10	กระแสขดลวดช่วยและขดลวดหลักของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส.....	58
4.11	กระแสขดลวดช่วยและขดลวดหลักของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส ขณะมีความเร็ว 750 rpm.....	59
5.1	การเชื่อมต่ออุปกรณ์วัดค่าแรงดันและกระแส.....	61
5.2	แรงดันขั้ว U-V ที่ความเร็ว 1500 rpm แบบไม่มีภาระทางกล.....	62
5.3	แรงดันขดลวดช่วยและขดลวดหลักที่ความเร็ว 1500 rpm แบบไม่มีภาระทางกล.....	63
5.4	องค์ประกอบแรงดันขั้ว U-V ที่ความเร็ว 1500 rpm แบบไม่มีภาระทางกล.....	63
5.5	องค์ประกอบแรงดันขดลวดช่วยที่ความเร็ว 1500 rpm แบบไม่มีภาระทางกล.....	64
5.6	องค์ประกอบแรงดันขดลวดหลักที่ความเร็ว 1500 rpm แบบไม่มีภาระทางกล.....	64
5.7	กระแสเฟส U ที่ความเร็ว 1500 rpm แบบไม่มีภาระทางกล.....	65
5.8	กระแสที่ขดลวดช่วยและขดลวดหลักที่ 1500 rpm แบบไม่มีภาระทางกล.....	65
5.9	กระแสทั้งรวมขณะมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ 1500 rpm และมอเตอร์ เหนี่ยวนำสองเฟสที่ 1500 rpm แบบไม่มีภาระทางกล.....	66
5.10	แรงดันขั้ว U-V ที่ความเร็ว 900 rpm แบบไม่มีภาระทางกล.....	67
5.11	แรงดันขดลวดช่วยและขดลวดหลักที่ความเร็ว 1350 rpm แบบไม่มีภาระทางกล.....	68
5.12	องค์ประกอบแรงดันขั้ว U-V ที่ความเร็วรอบ 900 rpm แบบไม่มีภาระทางกล.....	68
5.13	องค์ประกอบแรงดันขดลวดช่วยที่ความเร็ว 1350 rpm แบบไม่มีภาระทางกล.....	68
5.14	องค์ประกอบแรงดันขดลวดหลักที่ความเร็ว 1350 rpm แบบไม่มีภาระทางกล.....	69
5.15	กระแสเฟส U ที่ความเร็ว 900 rpm แบบไม่มีภาระทางกล.....	69
5.16	กระแสที่ขดลวดช่วยและขดลวดหลักที่ 1350 rpm แบบไม่มีภาระทางกล.....	70
5.17	กระแสทั้งรวมขณะมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ 900 rpm และมอเตอร์ เหนี่ยวนำสองเฟสที่ 1350 rpm แบบไม่มีภาระทางกล.....	70
5.18	แรงดันขั้ว U-V ที่ความเร็ว 1200 rpm แบบไม่มีภาระทางกล.....	71
5.19	แรงดันขดลวดช่วยและขดลวดหลักที่ความเร็ว 0 rpm แบบไม่มีภาระทางกล.....	72
5.20	องค์ประกอบแรงดันขั้ว U-V ที่ความเร็วรอบ 1200 rpm แบบไม่มีภาระทางกล.....	72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
5.21	องค์ประกอบแรงดันขดลวดช่วยที่ความเร็ว 0 rpm แบบไม่มีภาระทางกล.....	73
5.22	องค์ประกอบแรงดันขดลวดหลักที่ความเร็ว 0 rpm แบบไม่มีภาระทางกล.....	73
5.23	กระแสเฟส U ที่ความเร็ว 1200 rpm แบบไม่มีภาระทางกล.....	74
5.24	กระแสที่ขดลวดช่วยและขดลวดหลักที่ 0 rpm แบบไม่มีภาระทางกล.....	74
5.25	กระแสกึ่งร่วมขณะมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ 1200 rpm และมอเตอร์ เหนี่ยวนำสองเฟสที่ 0 rpm แบบไม่มีภาระทางกล.....	75
5.26	แรงดันขั้ว U-V ที่ความเร็ว 0 rpm แบบไม่มีภาระทางกล.....	76
5.27	แรงดันขดลวดช่วยและขดลวดหลักที่ความเร็ว 1050 rpm แบบไม่มีภาระทางกล.....	76
5.28	องค์ประกอบแรงดันขั้ว U-V ที่ความเร็วรอบ 0 rpm แบบไม่มีภาระทางกล.....	77
5.29	องค์ประกอบแรงดันขดลวดช่วยที่ความเร็ว 1050 rpm แบบไม่มีภาระทางกล.....	77
5.30	องค์ประกอบแรงดันขดลวดหลักที่ความเร็ว 1050 rpm แบบไม่มีภาระทางกล.....	77
5.31	กระแสเฟส U ที่ความเร็ว 0 rpm แบบไม่มีภาระทางกล.....	78
5.32	กระแสที่ขดลวดช่วยและขดลวดหลักที่ 1050 rpm แบบไม่มีภาระทางกล.....	78
5.33	กระแสกึ่งร่วมขณะมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ 0 rpm และมอเตอร์ เหนี่ยวนำสองเฟสที่ 1050 rpm แบบไม่มีภาระทางกล.....	79
5.34	แรงดันขั้ว U-V ที่ความเร็ว 1500 rpm แบบมีภาระทางกล.....	80
5.35	แรงดันขดลวดช่วยและขดลวดหลักที่ความเร็ว 1500 rpm แบบมีภาระทางกล.....	81
5.36	องค์ประกอบแรงดันขั้ว U-V ที่ความเร็ว 1500 rpm แบบมีภาระทางกล.....	81
5.37	องค์ประกอบแรงดันขดลวดช่วยที่ความเร็ว 1500 rpm แบบมีภาระทางกล.....	82
5.38	องค์ประกอบแรงดันขดลวดช่วยที่ความเร็ว 1500 rpm แบบมีภาระทางกล.....	82
5.39	กระแสเฟส U ที่ความเร็ว 1500 rpm แบบมีภาระทางกล.....	83
5.40	กระแสที่ขดลวดช่วยและขดลวดหลักที่ 1500 rpm แบบมีภาระทางกล.....	83
5.41	กระแสกึ่งร่วมขณะมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ 1500 rpm และมอเตอร์ เหนี่ยวนำสองเฟสที่ 1500 rpm แบบมีภาระทางกล.....	84
5.42	ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ 1500 rpm และสองเฟส ที่ความเร็ว 1500 rpm แบบมีภาระทางกล.....	85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
5.43	แรงดันขั้ว U-V ที่ความเร็ว 900 rpm แบบมีภาระทางกล.....	86
5.44	แรงดันขดลวดช่วยและขดลวดหลักที่ความเร็ว 1350 rpm แบบมีภาระทางกล.....	86
5.45	องค์ประกอบแรงดันขั้ว U-V ที่ความเร็วรอบ 900 rpm แบบมีภาระทางกล.....	87
5.46	องค์ประกอบแรงดันขดลวดช่วยที่ 1350 rpm แบบมีภาระทางกล.....	87
5.47	องค์ประกอบแรงดันขดลวดหลักที่ความเร็วรอบ 1350 rpm แบบมีภาระทางกล.....	87
5.48	กระแสเฟส U ที่ความเร็ว 900 rpm แบบมีภาระทางกล.....	88
5.49	กระแสที่ขดลวดช่วยและขดลวดหลักที่ 1350 rpm แบบมีภาระทางกล.....	88
5.50	กระแสที่ร่วมขณะมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ 900 rpm และมอเตอร์ เหนี่ยวนำสองเฟสที่ 1350 rpm แบบมีภาระทางกล.....	89
5.51	ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ 900 rpm และสองเฟสที่ ความเร็ว 1350 rpm แบบมีภาระทางกล.....	90
5.52	แรงดันขั้ว U-V ที่ความเร็ว 1200 rpm แบบมีภาระทางกล.....	91
5.53	แรงดันขดลวดช่วยและขดลวดหลักที่ความเร็ว 0 rpm แบบมีภาระทางกล.....	91
5.54	องค์ประกอบแรงดันขั้ว U-V ที่ความเร็วรอบ 1200 rpm แบบมีภาระทางกล.....	92
5.55	องค์ประกอบแรงดันขดลวดช่วยที่ความเร็ว 0 rpm แบบมีภาระทางกล.....	92
5.56	องค์ประกอบแรงดันขดลวดหลักที่ความเร็ว 0 rpm แบบมีภาระทางกล.....	92
5.57	กระแสเฟส U ที่ความเร็ว 1200 rpm แบบมีภาระทางกล.....	93
5.58	กระแสที่ขดลวดช่วยและขดลวดหลักที่ 0 rpm แบบมีภาระทางกล.....	93
5.59	กระแสที่ร่วมขณะมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ 1200 rpm และมอเตอร์ เหนี่ยวนำสองเฟสที่ 0 rpm แบบมีภาระทางกล.....	94
5.60	ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ 1200 rpm และสองเฟส ที่ความเร็ว 0 rpm แบบมีภาระทางกล.....	95
5.61	แรงดันขั้ว U-V ที่ความเร็ว 0 rpm แบบมีภาระทางกล.....	96
5.62	แรงดันขดลวดช่วยและขดลวดหลักที่ความเร็ว 1050 rpm แบบมีภาระทางกล.....	96
5.63	องค์ประกอบแรงดันขั้ว U-V ที่ความเร็วรอบ 0 rpm แบบมีภาระทางกล.....	97
5.64	องค์ประกอบแรงดันขดลวดช่วยที่ความเร็ว 1050 rpm แบบมีภาระทางกล.....	97

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
5.65	องค์ประกอบแรงดันขดลวดหลักที่ความเร็ว 1050 rpm แบบมีภาระทางกล.....	97
5.66	กระแสเฟส U ที่ความเร็ว 0 rpm แบบมีภาระทางกล.....	98
5.67	กระแสที่ขดลวดช่วยและขดลวดหลักที่ 1050 rpm แบบมีภาระทางกล.....	98
5.68	กระแสที่รวมขณะที่มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสมีความเร็ว 0 rpm และมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส 1050 rpm แบบมีภาระทางกล.....	99
5.69	ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ 1200 rpm และสองเฟสที่ความเร็ว 0 rpm แบบมีภาระทางกล.....	100
5.70	ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบ.....	102
5.71	กระแสเฟส U ขณะมีการเปลี่ยนแปลงความเร็ว.....	103
5.72	กระแสที่ขดลวดช่วยและขดลวดหลักขณะมีการเปลี่ยนแปลงความเร็ว.....	103
5.73	ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อมีการกลับทิศทางหมุน.....	104
5.74	กระแสเฟส U ขณะมีการกลับทิศทางหมุน.....	105
5.75	กระแสที่ขดลวดช่วยและขดลวดหลักขณะมีการกลับทิศทางหมุน.....	105

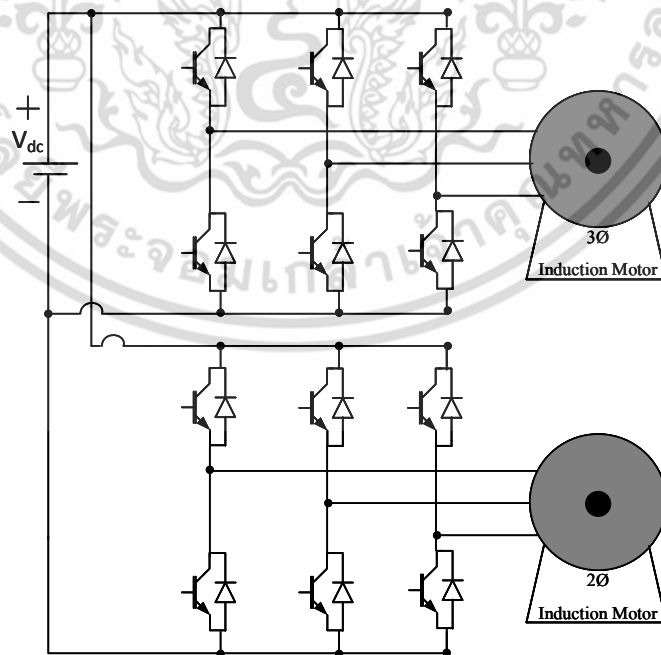
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

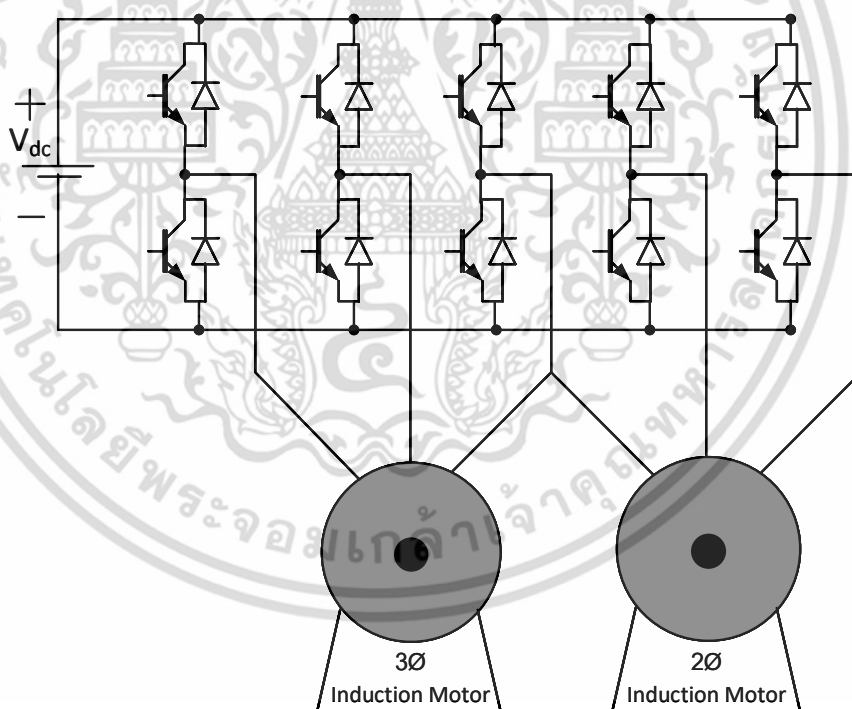
ปัจจุบันไม่สามารถปฏิเสธได้ว่ามอเตอร์ได้มีบทบาทสำคัญในการดำรงชีวิตเป็นอย่างมาก ไม่ว่าจะมองในส่วนของโรงงานอุตสาหกรรม เช่น เครื่องปั้มน้ำ เครื่องม้วนกระดาษ เครื่องกลึง เครื่องเจาะ เป็นต้น หรือตามครัวเรือนที่พุกอาศัย มอเตอร์เหนี่ยวนำมักจะเป็นส่วนประกอบหนึ่งของเครื่องใช้ไฟฟ้าเสมอ เช่น เครื่องปรับอากาศ เครื่องซักผ้า ตู้เย็น เป็นต้น ซึ่งหากพิจารณาจะพบว่าเครื่องใช้ไฟฟ้าที่มีมอเตอร์เป็นส่วนประกอบมากกว่าหนึ่งตัว อย่างเช่นเครื่องม้วนกระดาษที่ต้องใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำสองตัวเพื่อควบคุมการดึงและการคายกระดาษ หรือใน คอยล์ร้อนของเครื่องปรับอากาศ มอเตอร์ตัวหนึ่งทำหน้าที่เป็นตัวอัดน้ำยาแอร์และมอเตอร์อีกตัวหนึ่งซึ่งทำหน้าที่เป็นพัดลมระบายอากาศ ดังนั้นการพัฒนาระบบอินเวอร์เตอร์เพื่อควบคุมมอเตอร์สองตัวให้หมุนด้วยความเร็วที่แตกต่างกันได้อย่างอิสระจึงเป็นสิ่งสำคัญต่อชีวิตประจำวันเป็นอย่างยิ่ง โดยทั่วไปการควบคุมความเร็วของมอเตอร์สองตัวทำได้โดยการใช้ชุดควบคุมและอินเวอร์เตอร์แบบสามกึ่งแยกกันสำหรับมอเตอร์แต่ละตัวดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 อินเวอร์เตอร์สามกึ่งพร้อมชุดควบคุมสองชุดสำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานวิจัยนี้ได้สังเกตเห็นว่ามีความเป็นไปได้ที่จะพัฒนาการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสองตัวพร้อมกัน จึงได้แสดงการออกแบบวงจรควบคุมและการสร้างอินเวอร์เตอร์แบบห้ากึ่ง เพื่อใช้เป็นแหล่งจ่ายแรงดันให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสและมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสซึ่งมีโครงสร้างดังรูปที่ 1.2 โดยมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสที่ใช้ในงานวิจัยนี้เดิมเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสที่มีการดัดแปลงโดยการเชื่อมต่อปลายที่ขั้วหนึ่งของขดลวดหลักและขดลวดช่วยเข้าด้วยกัน และทำการจ่ายแรงดันให้ขดลวดทั้งสองทำมุมต่อกับ 90 องศาทางไฟฟ้า เพื่อเป็นการเพิ่มสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส อีกทั้งยังเป็นข้อพิสูจน์ว่าอินเวอร์เตอร์แบบห้ากึ่งในงานวิจัยนี้ไม่มีความจำเป็นต้องขับเคลื่อนโหลดชนิดเดียวกัน ซึ่งเมื่อพิจารณาแล้วจะพบว่าอินเวอร์เตอร์แบบห้ากึ่งมีการใช้เพียงหนึ่งดีซีบัส หนึ่งชุดควบคุม และมีการใช้จำนวนสวิตช์ลดลง 2 ตัว เหลือเพียง 10 ตัว เมื่อเทียบกับการใช้อินเวอร์เตอร์แบบสามกึ่งสองชุดที่ต้องใช้สวิตช์จำนวน 12 ตัว ซึ่งอาจรวมถึงตัวควบคุมหรือจำนวนดีซีบัสที่ต้องใช้มากกว่าหนึ่งชุดด้วย อินเวอร์เตอร์แบบห้ากึ่งจึงเป็นทางเลือกที่ดีที่สุดสำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสองตัวพร้อมกันด้วยเหตุผลดังกล่าว



รูปที่ 1.2 อินเวอร์เตอร์ห้ากึ่งพร้อมชุดควบคุมสำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสองตัว

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาหลักการการทำงานของอินเวอร์เตอร์แบบห้ากึ่ง
2. เพื่อศึกษาผลจำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์แบบห้ากึ่งสำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสองตัวพร้อมกันโดยใช้ Simulink จากโปรแกรม MATLAB 2014a
3. เพื่อศึกษาการเขียนโปรแกรมสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ C2000 รุ่น TMS320F28335 สำหรับควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์แบบห้ากึ่ง
4. ใช้อินเวอร์เตอร์แบบห้ากึ่งควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองตัวให้คงที่

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. จำลองผลการทำงานของอินเวอร์เตอร์แบบห้ากึ่งสำหรับควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำสองตัว
2. ออกแบบและประกอบสร้างอินเวอร์เตอร์แบบห้ากึ่ง
3. ใช้ตัวควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ C2000 รุ่น TMS320F28335 ทำงานร่วมกับ MATLAB/Simulink ควบคุมการทำงานของสวิตช์
4. ทดสอบการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสองตัวพร้อมกันด้วยอินเวอร์เตอร์แบบห้ากึ่งโดยใช้หนึ่งดีซีบัล
5. ทดสอบการควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อมีการเพิ่มภาระทางกล


1.4 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

หัวข้อดำเนินการ	2558				2559				2560	
	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2
1. กำหนดหัวข้อแลขอบเขตงานวิจัย										
2. ศึกษาและค้นคว้าจากวารสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง										
3. จำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์แบบห้ากึ่งด้วย										

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปเผยแพร่ภายนอก กรุณา
 ไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MATLAB/Simulink										
4.ออกแบบและประกอบ สร้างอินเวอร์เตอร์ชนิดจ่าย แรงดันแบบห้ากึ่ง										
5.ทดสอบ ปรับปรุง สรุปผล และจัดทำวิทยานิพนธ์										

หมายเหตุ  คือ ช่วงเวลาที่ใช้ดำเนินงาน

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เข้าใจหลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์แบบห้ากึ่ง
2. เป็นแนวทางในการพัฒนาและออกแบบอินเวอร์เตอร์รูปแบบต่างๆ
3. นำความรู้ที่ได้จากการออกแบบตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัล ไปประยุกต์ใช้กับงานวิจัยที่ใกล้เคียงกันได้
4. ได้รับความรู้เชิงลึกและจุดอ่อนของงานวิจัยที่ศึกษา ทำให้ผู้สนใจสามารถพัฒนาและต่อยอดได้สมบูรณ์ยิ่งขึ้นในอนาคต
5. เป็นตัวเลือกหนึ่งในด้านอุตสาหกรรม สำหรับการลดจำนวนสวิทช์ในระบบเพื่อการขับเคลื่อนมอเตอร์สองตัว

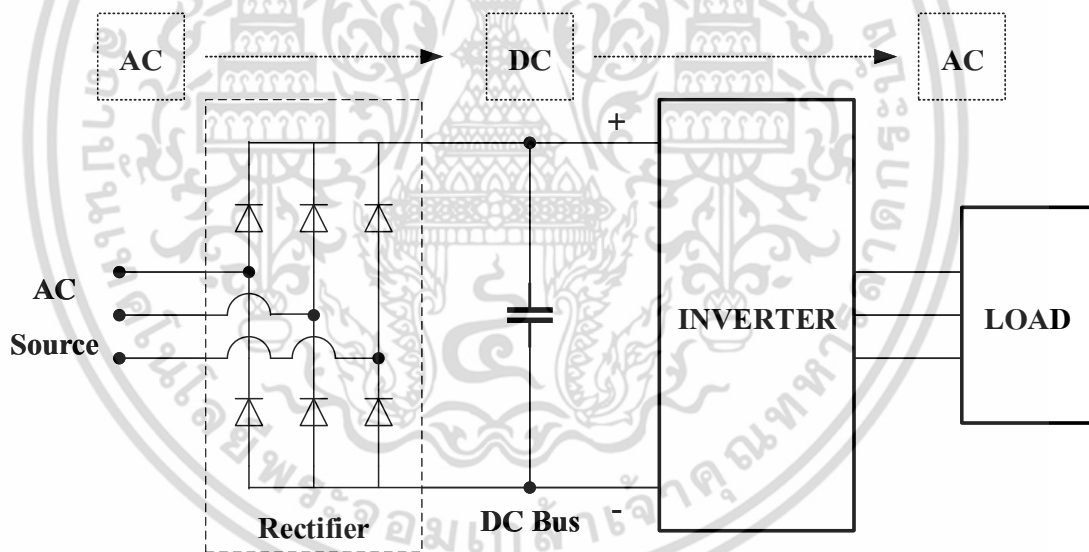
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและความรู้ที่เกี่ยวข้อง

2.1 อินเวอร์เตอร์ (Inverter)

อินเวอร์เตอร์ คือ อุปกรณ์ที่จะแปลงไฟกระแสสลับ (AC) จากแหล่งจ่ายไฟทั่วไปที่มีแรงดันและความถี่คงที่ ให้เป็นไฟกระแสตรง (DC) โดยวงจรเรียงกระแส (Rectifier Circuit) จากนั้นไฟฟ้กระแสตรงจะถูกแปลงเป็นไฟกระแสสลับที่สามารถปรับขนาดแรงดันและความถี่ได้โดยวงจรอินเวอร์เตอร์ (Inverter Circuit) วงจรทั้งสองนี้จะเป็นวงจรหลักที่ทำหน้าที่แปลงรูปคลื่น และผ่านพลังงานของอินเวอร์เตอร์ โดยทั่วไปแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับมีรูปคลื่นไซน์ แต่เอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์อาจมีรูปคลื่นแตกต่างจากรูปไซน์ได้ ให้เหมาะสมกับคุณสมบัติของโหลดที่ต้องการ โครงสร้างโดยทั่วไปก็มีส่วนประกอบดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของอินเวอร์เตอร์

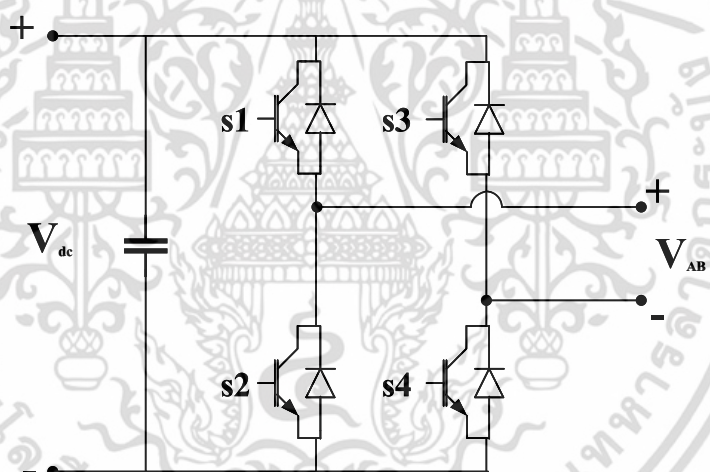
- ชุดเรียงกระแส (Rectifier Circuit) ทำหน้าที่ แปลงไฟฟ้กระแสสลับจากแหล่งจ่ายไฟ AC Power Supply (50 Hz) ให้เป็นไฟฟ้กระแสตรงตรง (DC Voltage)
- ดีซีบัส (DC Bus) ทำหน้าที่ ลดค่าการกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้กระแสตรงที่ผ่านการเรียงกระแสมาแล้ว ให้มีความเป็นแรงดันกระแสตรงที่มากขึ้น
- ชุดอินเวอร์เตอร์ (Inverter Circuit) ซึ่งทำหน้าที่ แปลงไฟฟ้กระแสตรงตรง ให้เป็นไฟฟ้กระแสสลับ ที่สามารถเปลี่ยนแปลงแรงดันและความถี่ได้ตามที่ควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานวิจัยฉบับนี้ใช้อินเวอร์เตอร์ชนิดจ่ายแรงดัน (Voltage Source Inverter : VSI) ที่มีการควบคุมการสวิตช์แบบพีดับเบิลยูเอ็ม (Pulse Width Modulation Inverter : PWM) เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดฮาร์โมนิกอันดับต่ำ และเหมาะสมสำหรับชิ้นงานที่ใช้กำลังไฟฟ้าไม่สูงมาก [1]

2.1.1 การสวิตช์แบบพีดับเบิลยูเอ็ม (PWM)

การควบคุมการสวิตช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์ทั่วไปต้องการสัญญาณแรงดันเป็นรูปคลื่นไซน์ วิธีการควบคุมการสวิตช์แบบพีดับเบิลยูเอ็มจึงเป็นวิธีที่นิยมใช้กัน โดยใช้วิธีการสร้างสัญญาณควบคุมรูปไซน์มาเปรียบเทียบกับสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยม วิธีนี้เป็นวิธีที่ง่ายในการสร้างแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ การสวิตช์แบบพีดับเบิลยูเอ็มแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ แบบไบโพลาร์ (Bipolar Voltage Switching) และแบบยูนิโพลาร์ (Unipolar Voltage Switching) โดยการจำลองผลการสวิตช์ทั้งสองแบบจะใช้วงจรดังรูปที่ 2.2

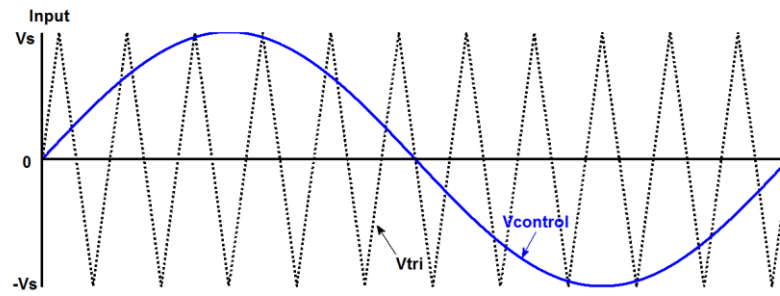


รูปที่ 2.2 วงจร H-Bridge Inverter

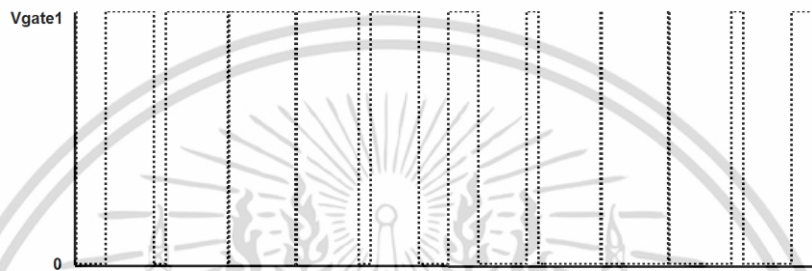
2.1.1.1 การสวิตช์แบบไบโพลาร์

การสวิตช์แรงดันแบบไบโพลาร์คือการควบคุมให้สวิตช์แบบฟูลบริดจ์ทำงานพร้อมกันเป็นคู่ การทำงานของสวิตช์ S1 ทำงานพร้อมกับ S4 และสวิตช์ S2 ทำงานพร้อมกับ S3 เมื่อสัญญาณควบคุมรูปไซน์มีค่ามากกว่าสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยม สวิตช์ S1 และ S4 จะนำกระแส ขนาดแรงดันเอาต์พุต V_{AB} มีค่าเท่ากับ V_{dc} หากสัญญาณควบคุมรูปไซน์มีค่าน้อยกว่าสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยม สวิตช์ S2 และ S3 จะนำกระแส ขนาดแรงดันเอาต์พุต V_{AB} มีค่าเท่ากับ $-V_{dc}$ การจำลองสัญญาณการสวิตช์แสดงดังรูปที่ 2.3

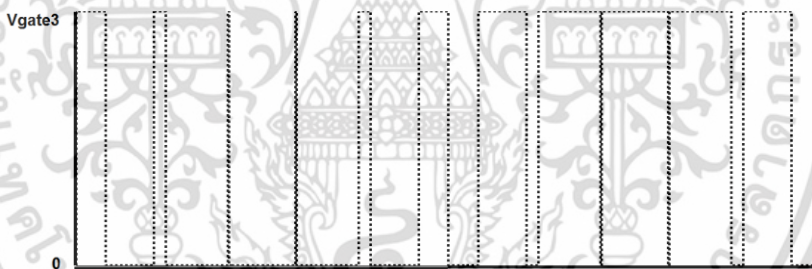
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



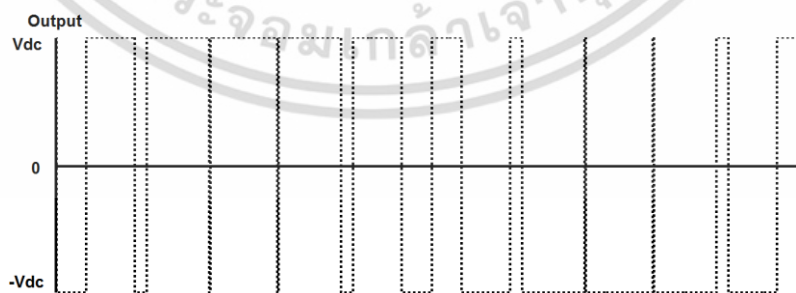
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 2.3 จำลองการทำงานของสวิตช์แบบไบโพลาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.3(ก) เป็นสัญญาณไซน์ที่เราต้องการสร้างให้เป็นสัญญาณในลักษณะของสัญญาณไซน์แบบพีดับเบิลยูเอ็ม จากนั้นนำมาเปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยม เมื่อสัญญาณไซน์มีค่ามากกว่าสัญญาณสามเหลี่ยมสวิตช์ S1 และ S4 จะทำการ on จะได้ค่าแรงดันเอาต์พุตมีค่าเท่ากับ V_{dc} ดังรูปที่ 2.3(ข) ในทางตรงกันข้ามหากสัญญาณไซน์มีค่ามากกว่าสัญญาณสามเหลี่ยมสวิตช์ S2 และ S3 จะทำการ on จะได้ค่าแรงดันเอาต์พุตมีค่าเท่ากับ $-V_{dc}$ ดังรูปที่ 2.3(ค) เมื่อมองตลอดช่วงเวลา สวิตช์ทุกตัวมีการทำงานค่าแรงดันเอาต์พุตรวมของการสร้างสัญญาณไซน์ในรูปแบบพีดับเบิลยูเอ็ม แสดงดังรูปที่ 2.3(ง)

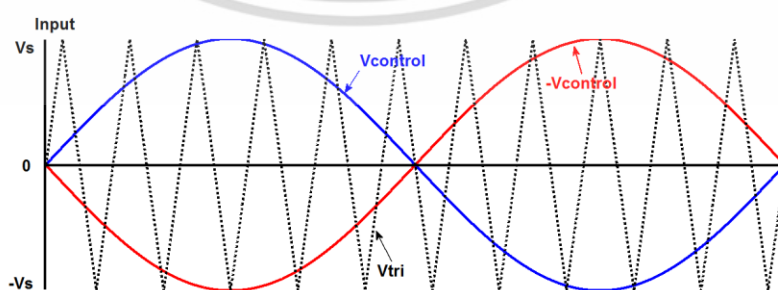
2.1.1.2 การสวิตช์แบบยูนิโพลาร์

ข้อแตกต่างระหว่างการสวิตช์แรงดันไฟฟ้าแบบไบโพลาร์กับยูนิโพลาร์ คือ แบบยูนิโพลาร์การควบคุมสวิตช์ในกึ่ง A กับกึ่ง B จะแยกสัญญาณควบคุมออกจากกัน คือ สวิตช์ในกึ่ง A ถูกควบคุมจากสัญญาณ $V_{control}$ เทียบกับสัญญาณรูปสามเหลี่ยม V_{tri} ขณะที่สวิตช์ในกึ่ง B ถูกควบคุมจากสัญญาณ $-V_{control}$ เทียบกับสัญญาณรูปสามเหลี่ยม V_{tri} การสวิตช์มีเงื่อนไขดังนี้

- เมื่อ $V_{control} > V_{tri}$ สวิตช์ S1 นำกระแส $V_{AN} = V_s$
- เมื่อ $V_{control} < V_{tri}$ สวิตช์ S3 นำกระแส $V_{AN} = 0$
- เมื่อ $-V_{control} > V_{tri}$ สวิตช์ S2 นำกระแส $V_{BN} = V_s$
- เมื่อ $-V_{control} < V_{tri}$ สวิตช์ S4 นำกระแส $V_{BN} = 0$

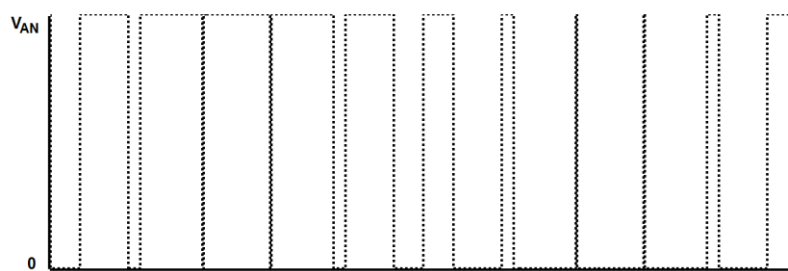
การเปลี่ยนสถานะของแรงดันระหว่างสาย (V_o หรือ V_{AN}) เป็นการเปลี่ยนแปลงแรงดันอยู่ระหว่างศูนย์ไปยังบวกหรือศูนย์ไปยังลบ ทำให้ไม่เกิดการเปลี่ยนระดับแรงดันจากสวิตช์สูง เช่น กรณีของไบโพลาร์

จุดเด่นของยูนิโพลาร์ คือการเกิดความถี่ด้านออกมีความถี่เป็นสองเท่าของความถี่สวิตช์ ผลของความถี่ที่เพิ่มเป็นสองเท่านี้ ทำให้การออกแบบวงจรกรองความถี่ เล็ก ง่าย และประหยัดสัญญาณการสวิตช์แบบยูนิโพลาร์แสดงในรูปที่ 2.4



(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 2.4 จำลองการทำงานของสวิตช์แบบยูนิโพลาร์

จากรูปที่ 2.4(ก) เมื่อสัญญาณไซน์อ้างอิงที่ต้องการสร้างมากกว่าค่าสัญญาณสามเหลี่ยม ทำให้ช่วงเวลานั้นค่าแรงดัน V_{AN} (จุดกึ่งกลางของสวิตช์ S1 และ S2 เทียบกับนิวทรัล) มีค่าเท่ากับ V_{dc} และเมื่อสัญญาณไซน์อ้างอิงน้อยกว่าสัญญาณสามเหลี่ยม ค่าแรงดัน V_{AN} มีค่าเท่ากับ 0 ดังรูปที่ 2.4(ข) ในส่วนของแรงดัน V_{BN} (จุดกึ่งกลางของสวิตช์ S3 และ S4 เทียบกับนิวทรัล) จะทำการเปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยมเช่นกัน แต่จะใช้ค่าลบของสัญญาณไซน์อ้างอิง แสดงดังรูปที่ 2.4(ค) เมื่อเราพิจารณาแรงดันไลน์-ไลน์ของเอาต์พุต V_{AB} จะมีค่าดังรูปที่ 2.4(ง) ซึ่งเกิดจากการลบกัน

ของสัญญาณในรูปที่ 2.4(ข) และ 2.4(ค) [2], [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส แบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ แบบโรเตอร์กรงกระรอกและแบบโรเตอร์พันขดลวด ซึ่งทั้งสองแบบนี้มีส่วนประกอบที่เหมือนกัน คือ ส่วนที่อยู่กับที่ (Stationary Part) จะแตกต่างกันเฉพาะส่วนที่เคลื่อนที่ (Rotational Part) เท่านั้น โดยส่วนประกอบต่างๆ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำมีดังนี้ [4]

ส่วนที่อยู่กับที่ ประกอบด้วย

- โครงมอเตอร์
- แกนเหล็กสเตเตอร์
- ขดลวดสเตเตอร์
- ฝาปิดหัวท้าย

ส่วนที่เคลื่อนที่ ประกอบด้วย

- แกนเหล็กโรเตอร์และเพลลา
- ขดลวดโรเตอร์

การทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส อาศัยหลักการสนามแม่เหล็กหมุนโดยจ่ายกระแสไฟฟ้าสามเฟสให้กับมอเตอร์ เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กที่สเตเตอร์ โดยการหมุนตัดผ่านกับขดลวดตัวนำในโรเตอร์ที่วางอยู่ใกล้กัน ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นที่ขดลวดตัวนำในโรเตอร์ แต่ถ้าขดลวดตัวนำของโรเตอร์ถูกต่อให้ครบวงจรจะทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลในตัวนำ และเกิดสนามแม่เหล็กขึ้นที่โรเตอร์ ผลรวมของเส้นแรงแม่เหล็กที่สเตเตอร์กับเส้นแรงแม่เหล็กในตัวนำที่โรเตอร์ทำให้เกิดแรงบิดขึ้นกับตัวนำทำให้โรเตอร์หมุนไปตามทิศทางของสนามแม่เหล็กหมุน ความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุนจะถูกเรียกว่า ความเร็วซิงโครนัส (Synchronous Speed) มีค่าขึ้นอยู่กับความถี่ของระบบไฟฟ้าและจำนวนขั้วแม่เหล็กของสเตเตอร์ ดังสมการที่ 2.1

$$N_s = \frac{120f}{P} \quad (2.1)$$

เมื่อ N_s คือ ความเร็วซิงโครนัส (rpm)

f คือ ความถี่ (Hz)

P คือ จำนวนขั้วแม่เหล็ก (Pole)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเหนี่ยวนำระหว่างสนามแม่เหล็กหมุนกับตัวนำโรเตอร์ เกิดขึ้นได้เนื่องจากความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุนสูงกว่าความเร็วรอบของโรเตอร์ ความเร็วที่แตกต่างกันนี้ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำขึ้น ซึ่งจะเรียกค่าส่วนต่างความเร็วนี้ว่า ความเร็วสลิป (Slip Speed) หากคิดเป็นรูปแบบต่อหนึ่งหน่วย (Per Unit) จะเรียกค่านี้ว่าสลิป (Slip) ดังแสดงในสมการที่ 2.2

$$S = \frac{N_s - N_R}{N_s} \quad (2.2)$$

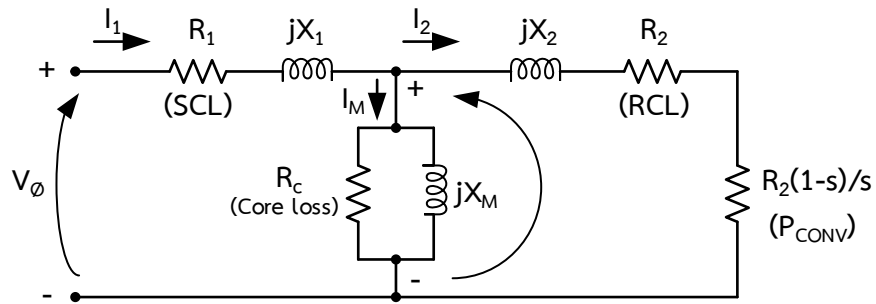
เมื่อ S คือ สลิป (slip)
 N_s คือ ความเร็วซิงโครนัส (rpm)
 N_R คือ ความเร็วโรเตอร์ (rpm)

หากพิจารณาในรูปของความเร็วโรเตอร์จะได้ดังสมการที่ 2.3

$$N_R = (1 - S)N_s \quad (2.3)$$

2.2.1 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Equivalent Circuit of Induction Motor)

เป็นการเปรียบเทียบกำลังทางกลให้อยู่ในรูปแบบของกำลังทางไฟฟ้า โดยอาศัยควาต้านทานและกระแสเป็นตัวแปรที่ทำให้เกิดพลังงานทางกล ซึ่งจะกำหนดให้วงจรสมมูลของมอเตอร์ ส่วนที่เป็นโรเตอร์จะอยู่ทางด้านขวามือ ประกอบด้วยตัวต้านทานที่สามารถคำนวณค่ากำลังอินพุตของโรเตอร์กำลังผ่านช่องว่างอากาศ กำลังสูญเสียเนื่องจากความต้านทานของโรเตอร์ และกำลังทางกลที่เกิดขึ้นจากโรเตอร์ได้ ดังแสดงได้จากวงจรสมมูลดังรูปที่ 2.5 [5]



รูปที่ 2.5 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

จากวงจรสมมูลกำลังไฟฟ้าที่อยู่ในโรเตอร์ทั้งหมดมีดังสมการที่ 2.4 ถึง 2.7

$$P_{CONV} = I_2^2 \frac{R_2(1-S)}{S} \quad (2.4)$$

$$P_{RCL} = I_2^2 R_2 \quad (2.5)$$

$$P_{AG} = I_2^2 \frac{R_2}{S} \quad (2.6)$$

$$P_{AG} = P_{CONV} + P_{RCL} \quad (2.7)$$

เมื่อ	I_2	คือ	กระแสโรเตอร์ (A)
	R_2	คือ	ความต้านทานสมมูลของโรเตอร์ (ohm)
	P_{CONV}	คือ	กำลังทางกลที่เกิดขึ้นในโรเตอร์ (W)
	P_{RCL}	คือ	กำลังสูญเสียเนื่องจากความต้านทานของโรเตอร์ (W)
	P_{AG}	คือ	กำลังอินพุตของโรเตอร์ (W)

กำลังทางกลทุกชนิดที่เกิดขึ้นที่เพลลาของมอเตอร์ สามารถเขียนได้ในรูปแบบความสัมพันธ์กับแรงบิดได้ดังสมการที่ 2.8

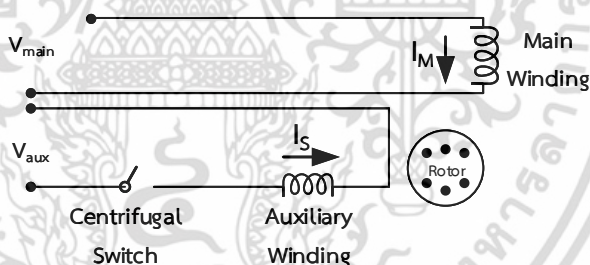
$$T = \frac{60P}{2\pi N_R} \quad (2.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว (Single-Phase Induction Motors)

มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวมีโครงสร้างเช่นเดียวกับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบกรงกระรอกเพียงแต่ที่สเตเตอร์จะมีขดลวดเพียงเฟสเดียว ซึ่งเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเฟสเดียว จะทำให้เกิดจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนในทิศทางตรงข้าม ทำให้แรงบิดที่สเตเตอร์ทั้งสองทิศทาง มีขนาดเท่ากัน ทำให้โรเตอร์ไม่สามารถเกิดแรงบิดเริ่มหมุนได้ จึงจำเป็นที่จะต้องมียุทธวิธีที่ทำให้มอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสนี้สามารถเกิดแรงบิดเริ่มต้นหมุนได้ด้วยตัวเอง ซึ่งมีวิธีการเริ่มหมุนดังนี้

มอเตอร์แบบแยกเฟส (Split-Phase Motor) หรือเรียกว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส ประกอบด้วย ขดลวดเริ่มหมุน หรือในงานวิจัยนี้ให้ชื่อว่า ขดลวดช่วย (Auxiliary Winding) และ ขดลวดหลัก (Main Winding) ซึ่งจะต้องสร้างให้มีมุมทางไฟฟ้าระหว่างขดลวดทั้งสองเท่ากับ 90 องศา โดยขดลวดหลักจะเป็นขดลวดที่มีความต้านทานต่ำ แต่จะมีจำนวนรอบมากทำให้ค่าความต้านทานเสมือนมีค่าสูง ส่วนขดลวดช่วยจะเป็นตัวนำขนาดเล็กมีจำนวนรอบขดลวดที่น้อยกว่าทำให้มีความต้านทานสูงและมีความต้านทานเสมือนต่ำ โดยโครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟส แสดงดังรูปที่ 2.26 [6]



รูปที่ 2.6 โครงสร้างมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแยกเฟส

2.4 การควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าและความถี่ที่ให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ ความเร็วรอบ (Slip Speed) ของมอเตอร์จะมีการเปลี่ยนแปลงไม่มาก เมื่อมีการจ่ายภาระทางกล ในการทำงานที่ต้องมีการปรับเปลี่ยนค่าความเร็ว การปรับความเร็วจะมีอยู่ 2 วิธีที่นิยม คือ การควบคุมความเร็วเชิงครอนส์ และการควบคุมค่าสลิปโดยที่ความเร็วเชิงครอนส์คงที่ โดยที่การควบคุมความเร็วเชิงครอนส์จะทำได้โดยการเปลี่ยนจำนวนขั้วแม่เหล็ก ส่วนการควบคุมค่าความเร็วสลิปทำได้โดยการควบคุมแรงดันหรือความถี่ที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จ่ายให้กับมอเตอร์ หรือการควบคุมความต้านทานของวงจรมอเตอร์ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้การควบคุมความถี่ของสเตเตอร์ รวมถึงการควบคุมแรงดันต่อความถี่ให้คงที่ ดังสมการที่ 2.9 [7]

$$\frac{V}{f} = 4.44 N_{ph} A_c B_m = k_m B_m \quad (2.9)$$

เมื่อ	V	คือ	ค่าแรงดันไฟฟ้า (V)
	f	คือ	ความถี่ไฟฟ้า (Hz)
	N_{ph}	คือ	จำนวนรอบขดลวดต่อเฟส (รอบ)
	A_c	คือ	พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก (m^2)
	B_m	คือ	ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (T)

โดยการควบคุมความเร็วโดยใช้วิธีนี้มีข้อดีที่ไม่จำเป็นต้องทราบค่าพารามอเตอร์ของมอเตอร์มากนัก อีกทั้งยังสามารถปรับแต่งค่าแรงดันต่อความถี่ในแต่ละความเร็วรอบตามความเหมาะสมได้

2.5 เทคนิคสเปซเวกเตอร์พัลส์วิดมอดูเลชัน (SVPWM)

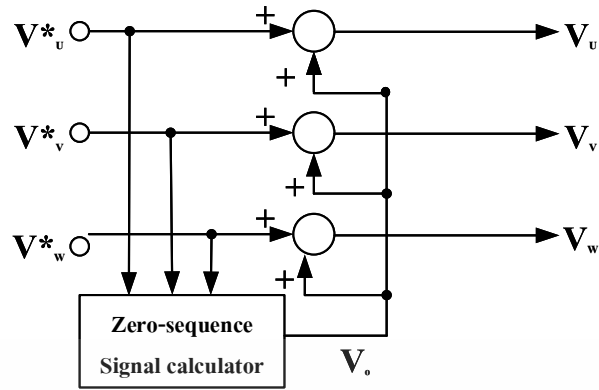
เทคนิคสเปซเวกเตอร์พัลส์วิดมอดูเลชัน คือ การรวมความถี่ลำดับที่สามของระบบหรืออาจเรียกว่าสัญญาณลำดับศูนย์ (Zero Sequence Component) เข้าไปรวมกับสัญญาณไซน์อ้างอิงในการมอดูเลชันด้วย เป็นผลทำให้ในกรณีของแรงดันสามเฟสสามารถเพิ่มความถี่มูลฐานได้อีกประมาณ 15% ก่อนที่จะเกิดการ Over Modulation โดยจะช่วยลดค่าฮาร์มอนิกของแรงดันและกระแส หลังจากรวมสัญญาณลำดับศูนย์เข้าไปแล้ว จะเรียกสัญญาณนั้นว่าสัญญาณสเปซเวกเตอร์อ้างอิง โดยการสร้างสัญญาณสเปซเวกเตอร์อ้างอิงมีสมการดังต่อไปนี้ [8]

$$v_i(t) = v_i^*(t) + v_o(t) \quad (2.10)$$

เมื่อ	i	คือ	เฟสของสัญญาณอ้างอิงไซน์
	$v_i^*(t)$	คือ	สัญญาณอ้างอิง
	$v_i^*(t)$	คือ	สัญญาณสเปซเวกเตอร์อ้างอิง
	$v_o(t)$	คือ	สัญญาณลำดับศูนย์

การสร้างสัญญาณสเปซเวกเตอร์อ้างอิงสามารถแสดงเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 2.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



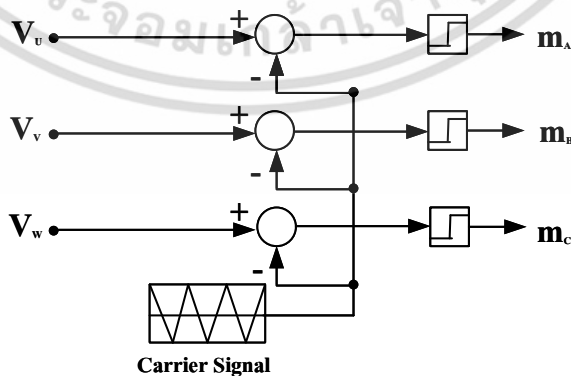
รูปที่ 2.7 การสร้างสัญญาณสเปซเวกเตอร์อ้างอิงสามเฟส

โดยสัญญาณลำดับศูนย์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้สามารถหาได้จากสมการที่ 2.11

$$v_o(t) = -\frac{1}{2}(v_{\max} + v_{\min}) \tag{2.11}$$

เมื่อ v_{\max} คือ ค่าสัญญาณที่สูงที่สุดจากกลุ่มของสัญญาณไซน์อ้างอิงขณะนั้น
 v_{\min} คือ ค่าสัญญาณที่สูงที่สุดจากกลุ่มของสัญญาณไซน์อ้างอิงขณะนั้น

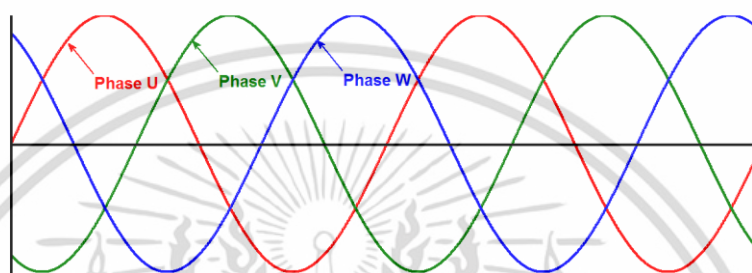
หลังจากได้สัญญาณสเปซเวกเตอร์อ้างอิงสามเฟสสามารถสร้างสัญญาณมอดูเลตเพื่อนำไปใช้ในการควบคุมสวิตซ์ที่กึ่งต่างๆ สำหรับอินเวอร์เตอร์แบบสามกึ่งสำหรับควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส โดยแผนภาพการสร้างสัญญาณมอดูเลตแสดงดังภาพที่ 2.8



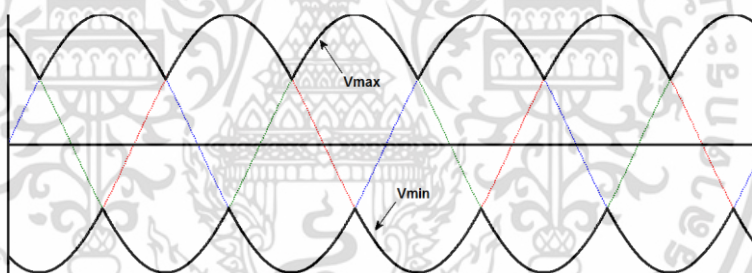
รูปที่ 2.8 การสร้างมอดูเลตสำหรับสัญญาณสามเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

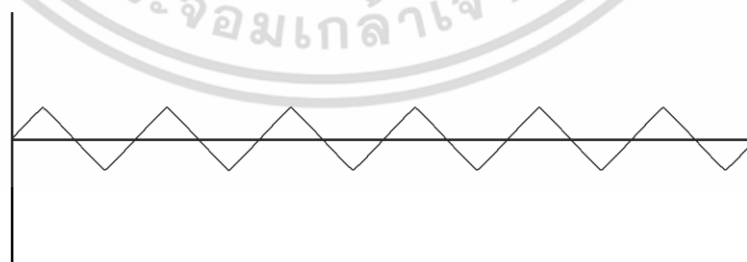
การจำลองการสร้างสัญญาณควบคุมโดยใช้เทคนิคสเปซเวกเตอร์จะใช้แรงดันอ้างอิงสามเฟส ดังรูปที่ 2.9 การหาสัญญาณลำดับศูนย์เพื่อเพิ่มเข้าไปในสัญญาณอ้างอิงสามเฟสแสดงดังรูปที่ 2.10 และ 2.11 เมื่อรวมสัญญาณอ้างอิงสามเฟสเข้ากับสัญญาณลำดับศูนย์จะได้สัญญาณสเปซเวกเตอร์อ้างอิงสามเฟสแสดงดังรูปที่ 2.12 โดยสามารถนำสัญญาณดังกล่าวไปเปรียบเทียบกับสัญญาณพาหะเพื่อสร้างสัญญาณอ้างอิงเพื่อควบคุมการทำงานของสวิตช์โดยใช้วิธีเปรียบเทียบแบบไปโพลาร์หรือยูนิโพลาร์ ดังที่ได้กล่าวมาในหัวข้อที่แล้ว



รูปที่ 2.9 แรงดันอ้างอิงสามเฟส

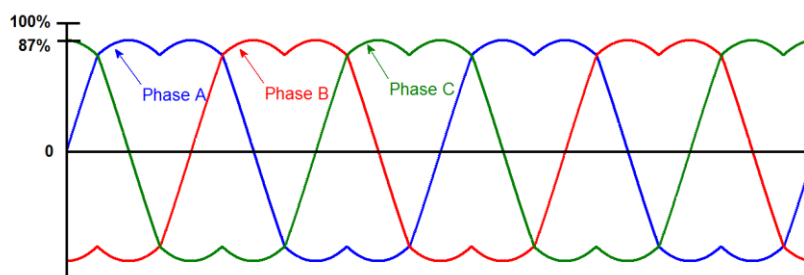


รูปที่ 2.10 ค่าสูงสุดและต่ำสุดของสัญญาณอ้างอิงสามเฟส



รูปที่ 2.11 สัญญาณลำดับศูนย์

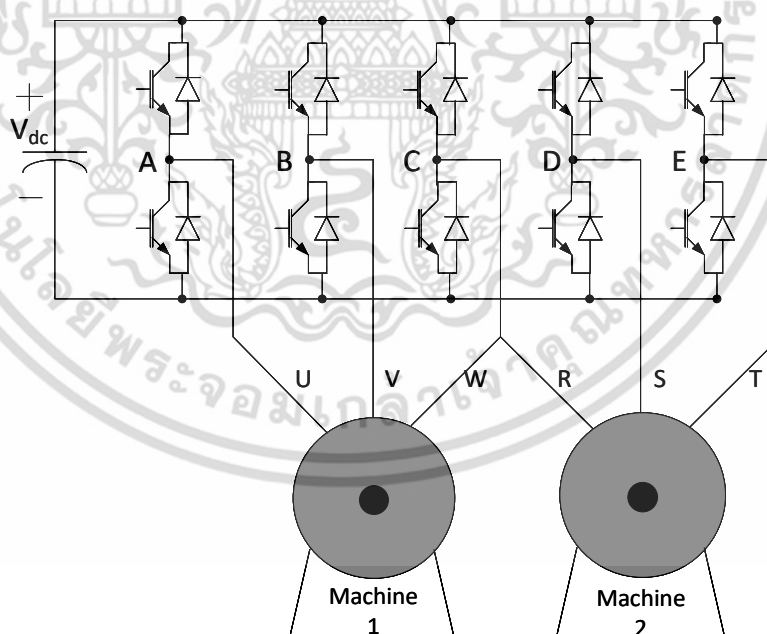
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 สัญญาณสเปซเวกเตอร์อ้างอิงสามเฟส

2.6 การเชื่อมต่ออินเวอร์เตอร์แบบห้ากึ่ง

การวิจัยฉบับนี้จะกำหนดให้มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสเป็นมอเตอร์ตัวที่หนึ่ง และมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสเป็นมอเตอร์ตัวที่สอง โดยลักษณะการเชื่อมต่อของมอเตอร์เหนี่ยวนำทั้งสองกับอินเวอร์เตอร์แบบห้ากึ่งจะมีการเชื่อมต่อกันดังรูปที่ 2.13 [9]



รูปที่ 2.13 การเชื่อมต่อมอเตอร์เหนี่ยวนำสองตัวกับอินเวอร์เตอร์แบบห้ากึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส เฟส U, V และ W เชื่อมต่อกับกึ่ง A, B และ C ของอินเวอร์เตอร์ตามลำดับ ในส่วนของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส ขดลวดหลัก (Main winding) ในที่นี้ใช้สัญลักษณ์แทนคือเฟส T เชื่อมต่อกับกึ่ง E ของอินเวอร์เตอร์ ขดลวดช่วย (Auxiliary) ซึ่งในที่นี้ใช้สัญลักษณ์แทนคือเฟส R เชื่อมต่อร่วมกับเฟส W ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่กึ่ง C ของอินเวอร์เตอร์ ขั้วลบของขดลวดหลักและขั้วลบของขดลวดช่วยใช้สัญลักษณ์แทนคือขั้ว S จะเชื่อมต่อกันที่กึ่ง D ของอินเวอร์เตอร์

2.7 รูปแบบสัญญาณควบคุมแบบห้ากึ่ง

การสร้างสัญญาณควบคุมการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์แบบห้ากึ่งสำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสองตัว ซึ่งงานวิจัยฉบับนี้จะใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสและมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส โดยการสร้างสัญญาณควบคุมอินเวอร์เตอร์แบบห้ากึ่งจะมีลำดับดังหัวข้อต่อไปนี้

2.7.1 สัญญาณไซน์อ้างอิงสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

การสร้างสัญญาณไซน์อ้างอิงสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส จะต้องสร้างสัญญาณตามลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของมอเตอร์ คือ จะต้องสร้างสัญญาณอ้างอิงให้มีเฟสที่แตกต่างกันแต่ละเฟส 120 องศา ซึ่งจะสามารถสร้างสัญญาณอ้างอิงสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสได้ดังต่อไปนี้

$$v_U^*(t) = M_1 \sin(\omega_1 t) \quad (2.12)$$

$$v_V^*(t) = M_1 \sin(\omega_1 t - \frac{2}{3} \pi) \quad (2.13)$$

$$v_W^*(t) = M_1 \sin(\omega_1 t - \frac{4}{3} \pi) \quad (2.14)$$

เมื่อ v_U^* , v_V^* , v_W^* แทนค่าแรงดันชั่วขณะทีเฟส U, V และ W ของสัญญาณไซน์อ้างอิงสามเฟส
 $i = 1, 2$ แทนของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสและมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส ตามลำดับ
 M_i แทนขนาดมอดูเลชันของสัญญาณไซน์อ้างอิง
 ω_i แทนค่าความถี่ของสัญญาณไซน์อ้างอิง (rad/s)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.2 สัญญาณไซน์อ้างอิงสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส

การสร้างสัญญาณไซน์อ้างอิงสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส จะต้องสร้างสัญญาณตามลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของมอเตอร์เช่นกัน แตกต่างกันที่มอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสที่มีการแยกจากกันระหว่างขดลวดหลักและขดลวดช่วย โดยจะต้องสร้างสัญญาณไซน์อ้างอิงให้ขดลวดหลักและขดลวดช่วยมีองศาทางไฟฟ้าที่แตกต่างกัน 90 องศา ซึ่งจะสามารถสร้างสัญญาณอ้างอิงสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสได้ดังต่อไปนี้ [10]

$$v_R^*(t) = M_2 \sin(\omega_2 t) \quad (2.15)$$

$$v_S^*(t) = M_2 \sin(\omega_2 t - \frac{1}{2}\pi - \delta) \quad (2.16)$$

$$v_T^*(t) = M_2 \sin(\omega_2 t - \pi) \quad (2.17)$$

เมื่อ v_R^* แทนค่าแรงดันอ้างอิงชั่วขณะที่ขดลวดช่วยของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส
 v_S^* แทนค่าแรงดันอ้างอิงชั่วขณะที่ขั้วลบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส
 v_T^* แทนค่าแรงดันอ้างอิงชั่วขณะที่ขดลวดหลักของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส
 δ แทนค่ามุมต่างเฟส (Phase angle) มีหน่วยเป็นเรเดียน

2.7.2.1 การขดเชยมุมต่างเฟส

สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสที่มีการรับแรงดันระหว่างขดลวดหลักและขดลวดช่วยแยกออกจากกันจำเป็นต้องพิจารณาว่าขดลวดทั้งสองนั้นมีการพันขดลวดให้รับแรงดันได้สมมาตรกัน (Symmetrical Winding) หรือมีการรับแรงดันที่ไม่สมมาตรกัน (Asymmetrical Winding) ซึ่งหากมีการรับแรงดันที่ไม่สมมาตรกันระหว่างขดลวดหลักและขดลวดช่วย อาจทำให้ค่าแรงดันตกคร่อมระหว่างขดลวดทั้งสองไม่เป็นจำนวนเท่าของจำนวนขดลวดที่พันไว้ ตามลักษณะโครงสร้างที่ได้ถูกออกแบบมาทำให้สมรรถนะในการทำงานต่ำลง การเพิ่มสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสที่มีโครงสร้างไม่สมมาตรกัน ทำได้โดยการเพิ่มค่ามุมต่างเฟส (δ) เข้าไปที่สัญญาณไซน์อ้างอิงขั้วลบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสดังสมการที่ 2.16 โดยค่าของมุมต่างเฟสมีค่าดังสมการที่

2.18 ทั้งนี้หากเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสที่มีความสมมาตรกันของจำนวนรอบขดลวดช่วยและขดลวดหลักแล้วไม่จำเป็นต้องเพิ่มค่ามุมต่างเฟสนี้เข้าไปในสมการที่ 2.16

$$\delta = 2 \tan^{-1}(a) - \frac{\pi}{2} \quad (2.18)$$

เมื่อ a แทนอัตราส่วนจำนวนรอบขดลวดช่วยต่อจำนวนรอบขดลวดหลัก

2.7.3 การรวมสัญญาณมอดูเลตสำหรับห้ากิ่ง

การรวมสัญญาณควบคุมการสวิตช์จาก 6 สัญญาณให้เหลือ 5 สัญญาณเพื่อจ่ายให้กับอินเวอร์เตอร์แบบห้ากิ่งเพื่อควบคุมมอเตอร์แบบสองตัวนั้น จะใช้หลักการสร้างแรงดันโวลต์ระหว่างกิ่งให้ได้โครงสร้างของมอเตอร์ โดยในงานวิจัยนี้จะนำสัญญาณก่อนการเปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยม หรือสัญญาณสเปซเวกเตอร์อ้างอิงของแต่ละมอเตอร์มารวมกันตามสมการต่อไปนี้ [11]

$$V_A(t) = V_U(t) + V_R(t) \quad (2.19)$$

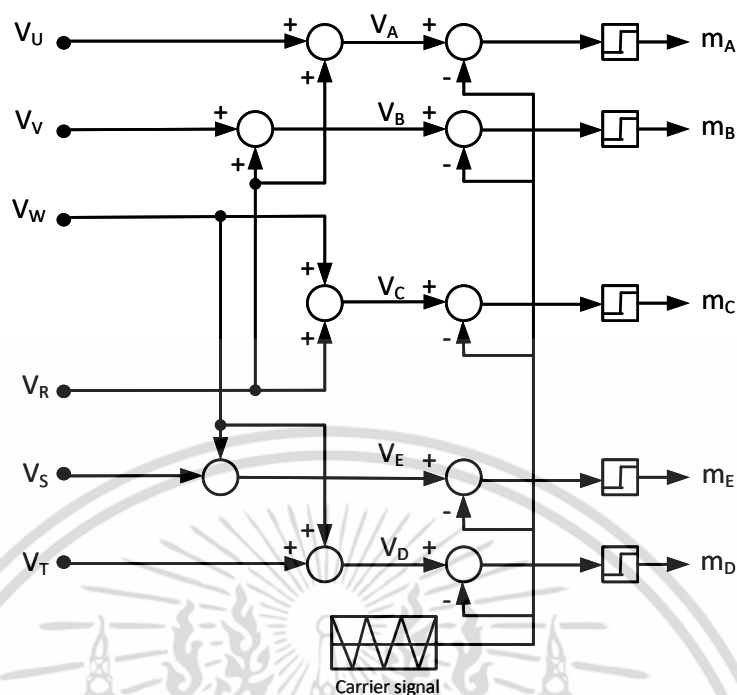
$$V_B(t) = V_V(t) + V_R(t) \quad (2.20)$$

$$V_C(t) = V_W(t) + V_R(t) \quad (2.21)$$

$$V_D(t) = V_S(t) + V_W(t) \quad (2.22)$$

$$V_E(t) = V_T(t) + V_W(t) \quad (2.23)$$

และแสดงดังรูปที่ 2.14 จากนั้นจึงนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยมเพื่อสร้างสัญญาณการควบคุมสวิตช์แบบ PWM



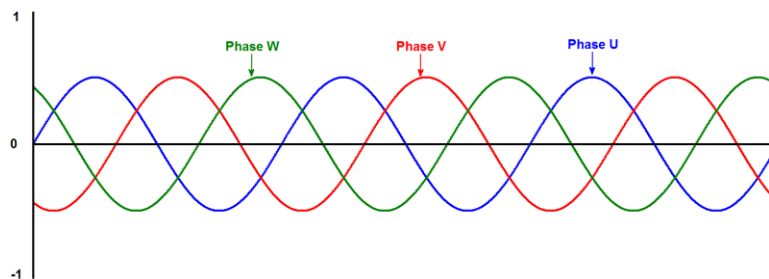
รูปที่ 2.14 การรวมสัญญาณมอดูเลตให้เหลือ 5 สัญญาณ

2.7.4 การจำลองสัญญาณควบคุมอินเวอร์เตอร์แบบห้ากึ่ง

การจำลองสัญญาณควบคุมจะกำหนดให้

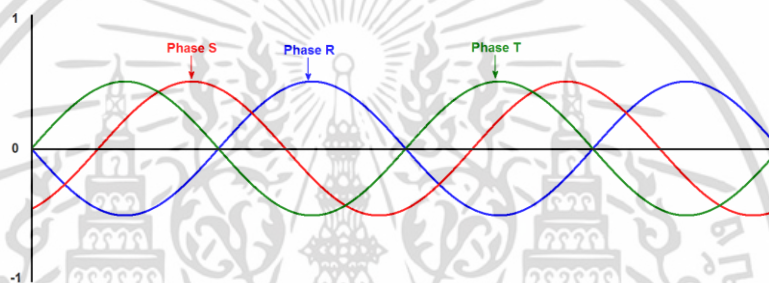
- มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสทำงานที่ความถี่ 30 Hz และ Modulation Index เท่ากับ 0.5
- มอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสทำงานที่ความถี่ 20 Hz และ Modulation Index เท่ากับ 0.5

ผลการจำลองสัญญาณควบคุมอินเวอร์เตอร์แบบห้ากึ่งแสดงสัญญาณอ้างอิงไซน์สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสและมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสดังรูปที่ 2.15 และ 2.16 ตามลำดับ



รูปที่ 2.15 สัญญาณไซน์อ้างอิงสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส 30 Hz

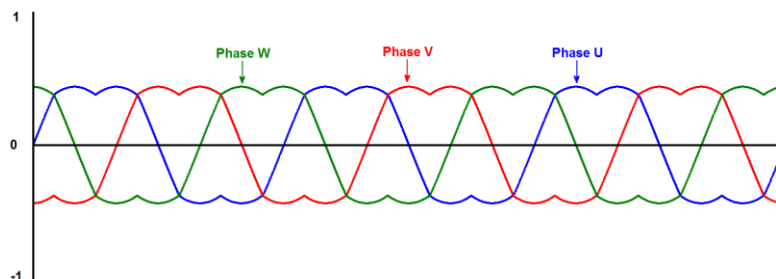
Modulation Index = 0.5



รูปที่ 2.16 สัญญาณไซน์อ้างอิงสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส 20 Hz

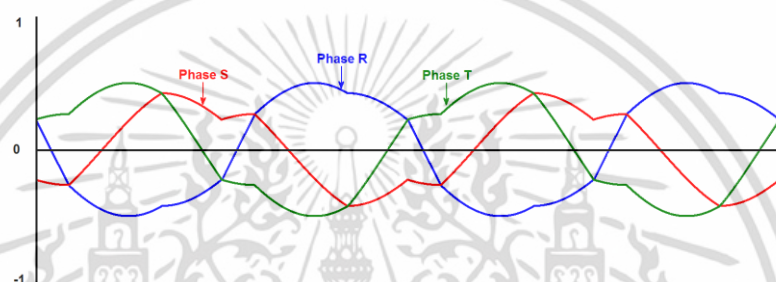
Modulation Index = 0.5

หลังจากนำสัญญาณอ้างอิงสามเฟสและสองเฟสจากรูปที่ 2.15 และ 2.16 มาสร้างสัญญาณแบบสเปซเวกเตอร์อ้างอิงโดยนำมารวมกับสัญญาณลำดับศูนย์ของตัวเอง (สัญญาณอ้างอิงสามเฟสรวมกับสัญญาณลำดับศูนย์ของสามเฟส, สัญญาณอ้างอิงสองเฟสรวมกับสัญญาณลำดับศูนย์ของสองเฟส) จะได้สัญญาณสเปซเวกเตอร์อ้างอิงสามเฟสและสัญญาณสเปซเวกเตอร์อ้างอิงสองเฟสแสดงดังรูปที่ 2.17 และ 2.18 ตามลำดับ



รูปที่ 2.17 สัญญาณสเปซเวกเตอร์อ้างอิงไซน์สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส 30 Hz

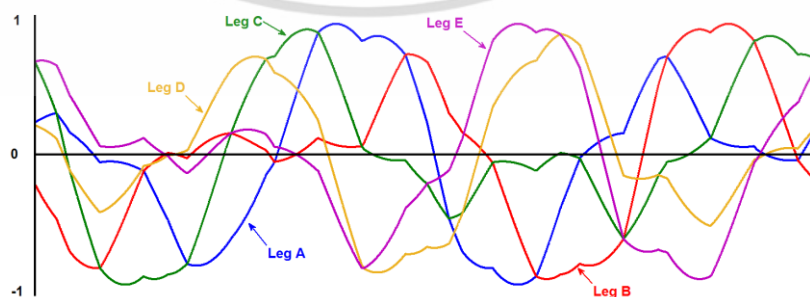
Modulation Index = 0.5



รูปที่ 2.18 สัญญาณสเปซเวกเตอร์อ้างอิงไซน์สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส 20 Hz

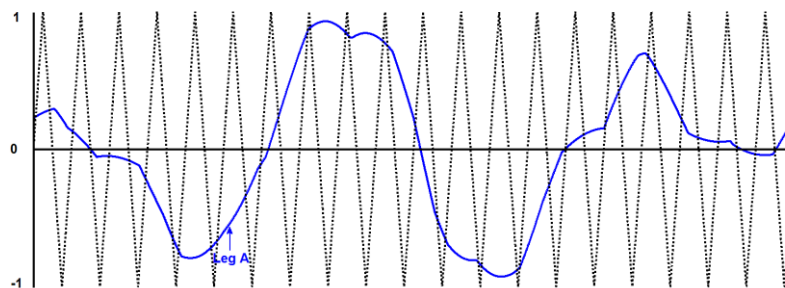
Modulation Index = 0.5

ใช้เทคนิคการรวมสัญญาณสำหรับอินเวอร์เตอร์แบบห้ากึ่งดิ้งแผนภาพในรูปที่ 2.14 จะได้สัญญาณมอดูเลตสำหรับกึ่งทั้งห้าของอินเวอร์เตอร์แสดงดังภาพ 2.19 เมื่อยกตัวอย่าง การนำสัญญาณที่กึ่ง A มาทำการเปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยมแสดงดังภาพ 2.20 จะได้สัญญาณควบคุมการสวิตช์ตัวบนของกึ่ง A แสดงดังภาพที่ 2.21 [12]

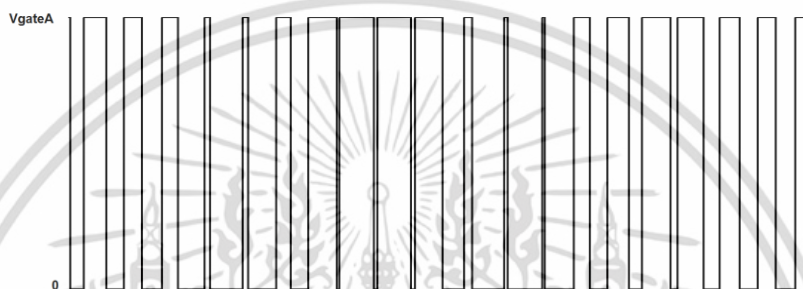


รูปที่ 2.19 สัญญาณมอดูเลตสำหรับกึ่งทั้งห้าของอินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

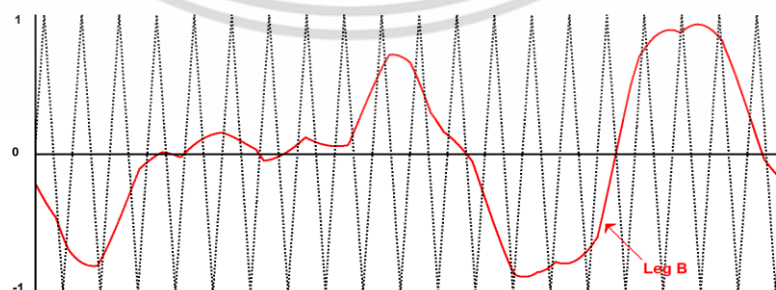


รูปที่ 2.20 การเปรียบเทียบเพื่อสร้างสัญญาณควบคุมสวิตช์ตัวบนของกึ่ง A



รูปที่ 2.21 สัญญาณการควบคุมสวิตช์ตัวบนของกึ่ง A

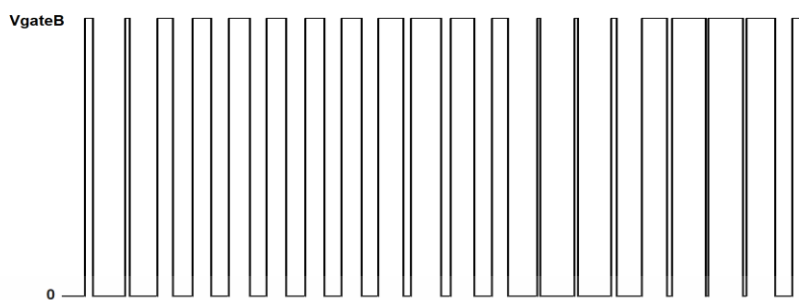
ในส่วนของกึ่งอื่นๆ เช่นกัน การเปรียบเทียบสัญญาณจะทำด้วยวิธีเดียวกันกับกึ่ง A ที่ได้แสดงมาดังรูปที่ 2.20 และ 2.21 เมื่อพิจารณาในส่วนของแรงดันพีค-ท๊อปเบิ้ลยูเอ็มแบบไลน์-ไลน์ ที่ป้อนให้กับขั้ว U-V ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส หรือการรับแรงดันไลน์-ไลน์จากกึ่ง A-B ของอินเวอร์เตอร์แบบห้ากึ่ง จากสัญญาณมอดูเลตแบบห้ากึ่งในรูปที่ 2.19 จะได้สัญญาณการควบคุมการทำงานของสวิตช์ในกึ่ง B แสดงดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 การเปรียบเทียบเพื่อสร้างสัญญาณควบคุมสวิตช์ตัวบนของกึ่ง B

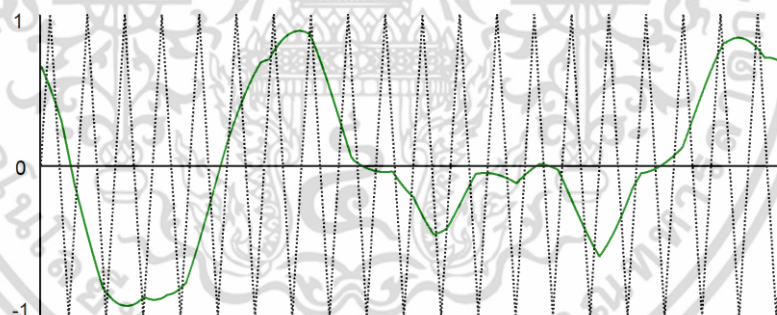
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้สัญญาณควบคุมการทำงานของสวิตช์ตัวบนของกึ่ง B ดังรูปที่ 2.23



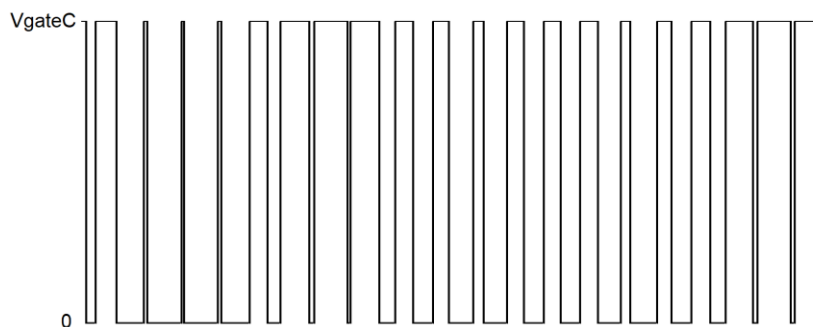
รูปที่ 2.23 สัญญาณการควบคุมสวิตช์ตัวบนของกึ่ง B

การเปรียบเทียบสัญญาณควบคุมการทำงานของสวิตช์กับสัญญาณสามเหลี่ยมในกึ่ง C, D และ E แสดงดังรูปที่ 2.24, 2.26 และ 2.28 ตามลำดับ หลังจากทำการเปรียบเทียบสัญญาณแล้วจะได้สัญญาณการทำงานของสวิตช์ตัวบนของกึ่ง C, D และ E แสดงดังรูปที่ 2.25, 2.27 และ 2.29 ตามลำดับ

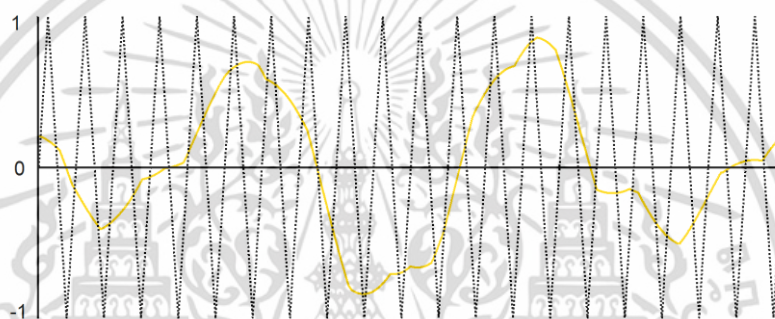


รูปที่ 2.24 การเปรียบเทียบเพื่อสร้างสัญญาณควบคุมสวิตช์ตัวบนของกึ่ง C

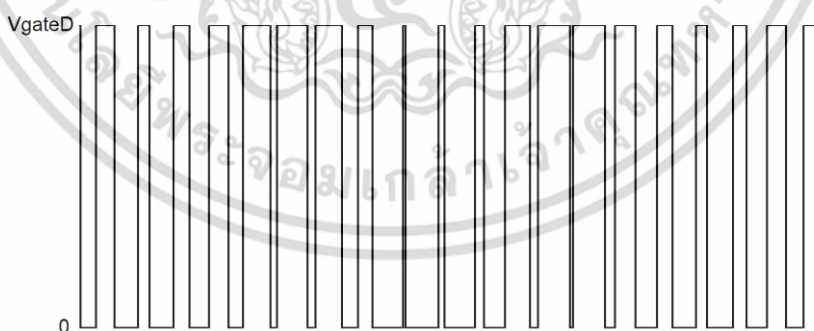
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.25 สัญญาณการควบคุมสวิตช์ตัวบนของกิ่ง C

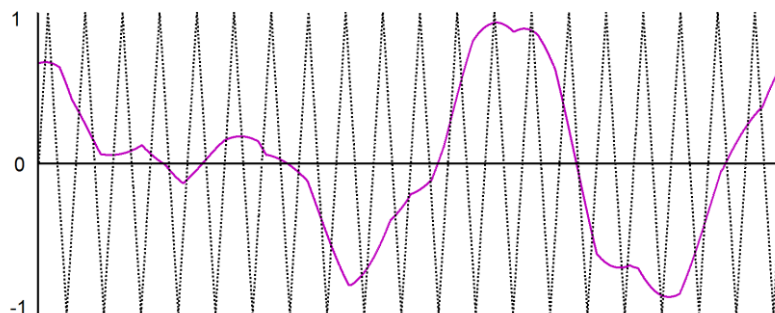


รูปที่ 2.26 การเปรียบเทียบเพื่อสร้างสัญญาณควบคุมสวิตช์ตัวบนของกิ่ง D

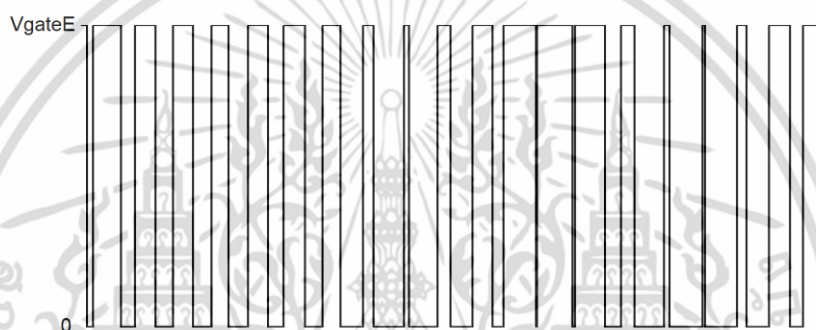


รูปที่ 2.27 สัญญาณการควบคุมสวิตช์ตัวบนของกิ่ง D

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

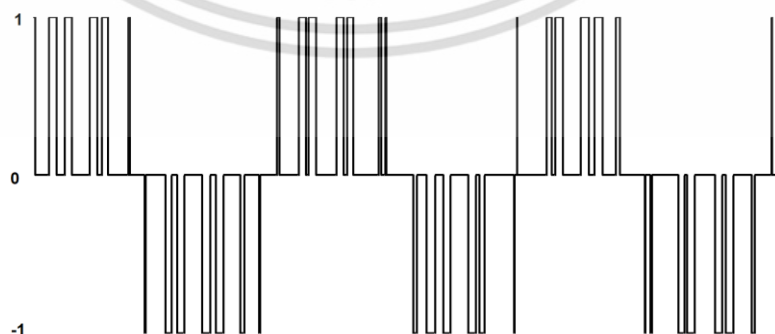


รูปที่ 2.28 การเปรียบเทียบเพื่อสร้างสัญญาณควบคุมสวิตช์ตัวบนของกึ่ง E



รูปที่ 2.29 สัญญาณการควบคุมสวิตช์ตัวบนของกึ่ง E

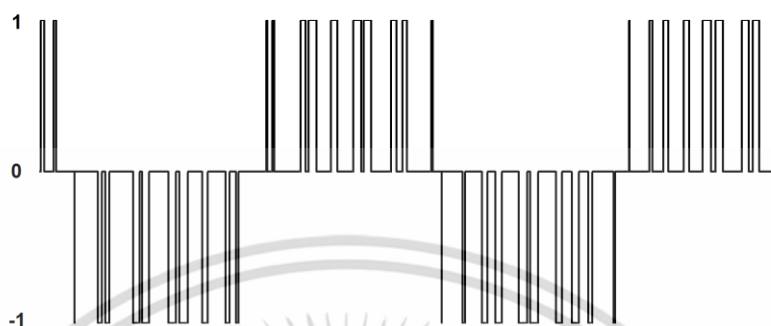
สัญญาณการควบคุมสวิตช์เมื่อมองในลักษณะไลน์-ไลน์จะได้สัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มเพื่อควบคุมการทำงานของสวิตช์ให้กับเฟส U ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแสดงดังรูปที่ 2.30 ซึ่งเกิดจากการหาแรงดันตกคร่อมระหว่างกึ่ง A-B



รูปที่ 2.30 สัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มระหว่างกึ่ง A-B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสแรงดันที่ตกคร่อมขดลวดช่วยเกิดจากแรงดันที่ตกคร่อมระหว่างกึ่ง C และ D แสดงสัญญาณแรงดันได้ดังรูปที่ 2.31 ในส่วนของแรงดันที่ตกคร่อมขดลวดหลักจะเกิดจากแรงดันที่กึ่ง E และ D แสดงดังรูปที่ 2.32



รูปที่ 2.31 สัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มระหว่างกึ่ง C-D

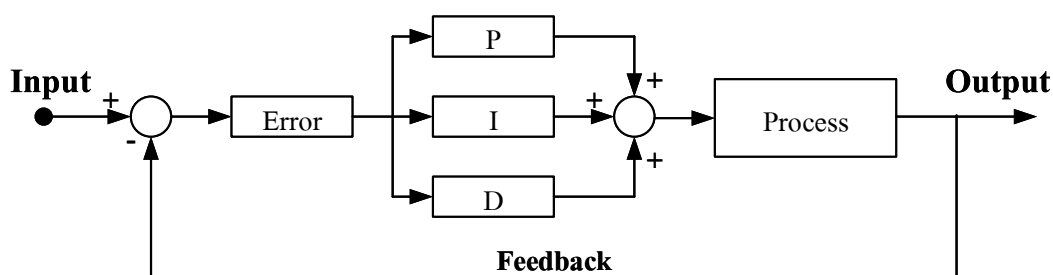


รูปที่ 2.32 สัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มระหว่างกึ่ง E-D

2.8 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ

ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback Control System) เป็นระบบควบคุมใช้กันอย่างกว้างขวาง ซึ่งค่าที่นำไปใช้ในการคำนวณเป็นค่าความผิดพลาดที่หามาจากความแตกต่างของตัวแปรในกระบวนการและค่าที่ต้องการ ตัวควบคุมจะพยายามลดค่าผิดพลาดให้เหลือน้อยที่สุดด้วยการปรับค่าสัญญาณขาเข้าของกระบวนการ ค่าตัวแปรของ PID ที่ใช้จะปรับเปลี่ยนตามธรรมชาติของระบบ แสดงดังรูปที่ 2.33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.33 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ

ประเภทของการควบคุมแบ่งออกเป็นประเภทหลักๆได้ดังหัวข้อต่อไปนี้

2.8.1 การควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional Control)

เทอมของสัดส่วน หรือ P บางครั้งเรียกว่า "อัตราขยาย" จะเปลี่ยนแปลงเป็นสัดส่วนของค่าความผิดพลาด การตอบสนองของสัดส่วนสามารถทำได้โดยการคูณค่าความผิดพลาดด้วยค่าคงที่ K_p , หรือที่เรียกว่าอัตราขยายสัดส่วน ผลจากการใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วนจะให้ผลดังสมการที่ 2.24

$$P_{out} = K_p e(t) \quad (2.24)$$

เมื่อ P_{out} คือ ค่าเอาต์พุตจากผลของการใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วน
 K_p คือ อัตราขยายสัดส่วน, ตัวแปรปรับค่าได้
 $e(t)$ คือ ค่าความผิดพลาด

2.8.2 การควบคุมแบบปริพันธ์ (Integral Control)

เทอมของปริพันธ์ หรือ I เป็นสัดส่วนของขนาดความผิดพลาดและระยะเวลาของความผิดพลาด ผลรวมของความผิดพลาดในทุกช่วงเวลา (ปริพันธ์ของความผิดพลาด) จะให้ออฟเซ็ตสะสมที่ควรจะเป็นในก่อนหน้า ความผิดพลาดสะสมจะถูกคูณโดยอัตราขยายปริพันธ์ ขนาดของผลของเทอมปริพันธ์จะกำหนดโดยอัตราขยายปริพันธ์หรือ K_i ผลจากการใช้ตัวควบคุมแบบปริพันธ์จะให้ผลดังสมการที่ 2.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_{out} = K_I \int_0^t e(t) dt \quad (2.25)$$

เมื่อ I_{out} คือ ค่าเอาต์พุตจากผลของการใช้ตัวควบคุมแบบปริพันธ์
 K_I คือ อัตราขยายปริพันธ์, ตัวแปรปรับค่าได้

2.3.3 การควบคุมแบบอนุพันธ์ (Derivative Control)

เทอมของอนุพันธ์ หรือ D : อัตราการเปลี่ยนแปลงของความผิดพลาดจากกระบวนการนั้น คำนวณจากความชันของความผิดพลาดทุกๆเวลา (นั่นคือ เป็นอนุพันธ์อันดับหนึ่งสัมพันธ์กับเวลา) และคูณด้วยอัตราขยายอนุพันธ์ K_D ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์นี้จะช่วยเพิ่มค่าความหน่วง (Damping) ให้กับระบบที่ต้องการจะ ควบคุม นั่นคือ ทำให้ระบบมีเสถียรภาพมากขึ้นในขณะเดียวกันจะเห็นว่า สัญญาณเอาต์พุตที่ออกจากตัวควบคุมแบบอนุพันธ์นี้ เป็นสัญญาณที่เกิดจากการหาอนุพันธ์ของ สัญญาณความผิดพลาด ดังนั้นถ้า สัญญาณความผิดพลาดนี้มีสัญญาณ ระบายมาก สัญญาณเอาต์พุต ที่ออกมาจากตัวควบคุมแบบอนุพันธ์นี้จะกระเพื่อม (Fluctuate) ค่อนข้างมาก ผลจากการใช้ตัว ควบคุมแบบอนุพันธ์จะให้ผลดังสมการที่ 2.26

$$D_{out} = K_D \frac{d}{dt} e(t) \quad (2.26)$$

เมื่อ D_{out} คือ ค่าเอาต์พุตจากผลของการใช้ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์
 K_D คือ อัตราขยายอนุพันธ์, ตัวแปรปรับค่าได้

2.3.4 การควบคุมแบบผสม

การควบคุมระบบแบบป้อนกลับหากใช้ตัวควบคุมชนิดเดียวอาจมีข้อบกพร่องบางประการ ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในระบบการเลือกใช้ตัวควบคุมหลายชนิดอาจลบลข้อบกพร่องได้โดย ผลของการเพิ่มค่าของตัวควบคุมชนิดต่าง ๆ จะมีผลต่อระบบดังตารางที่ 2.1 ทั้งนี้สามารถปรับใช้ เพื่อให้ได้ระบบที่ต้องการตามความเหมาะสมกับชนิดของงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 ผลของการเพิ่มค่าตัวแปรอิสระ

ตัวแปร	เวลาขาขึ้น (Rise time)	ค่าการพุ่งเกิน (Overshoot)	เวลาสู่สมดุล (Setting Time)	ความผิดพลาดคง ตัว (Steady-State Error)	เสถียรภาพ (Stability)
K_p	ลด	เพิ่ม	เปลี่ยนแปลง เล็กน้อย	ลด	ลด
K_i	ลด	เพิ่ม	เพิ่ม	ลดลงอย่างมี นัยสำคัญ	ลด
K_D	ลดลง เล็กน้อย	ลดลง เล็กน้อย	ลดลงเล็กน้อย	ตามทฤษฎีไม่มีผล	ดีขึ้นถ้า K_D มีค่าน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบและประกอบสร้าง

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการออกแบบวงจรควบคุม วงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดจ่ายแรงดันแบบห้ากึ่ง โดยครอบคลุมทั้งในส่วนของฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ รวมถึงผลการจำลองการทำงานการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสองตัวที่สภาวะต่าง ๆ

3.1 การออกแบบตัวควบคุม

3.1.1 การออกแบบฮาร์ดแวร์ของตัวควบคุม

งานวิจัยฉบับนี้ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ Delphi C2000 รุ่น TMS320F28335 เป็นตัวควบคุมหลักในการรับส่งสัญญาณ โดยในส่วนของฮาร์ดแวร์ตัวควบคุมจะแบ่งเป็นส่วนประกอบหลักๆดังต่อไปนี้

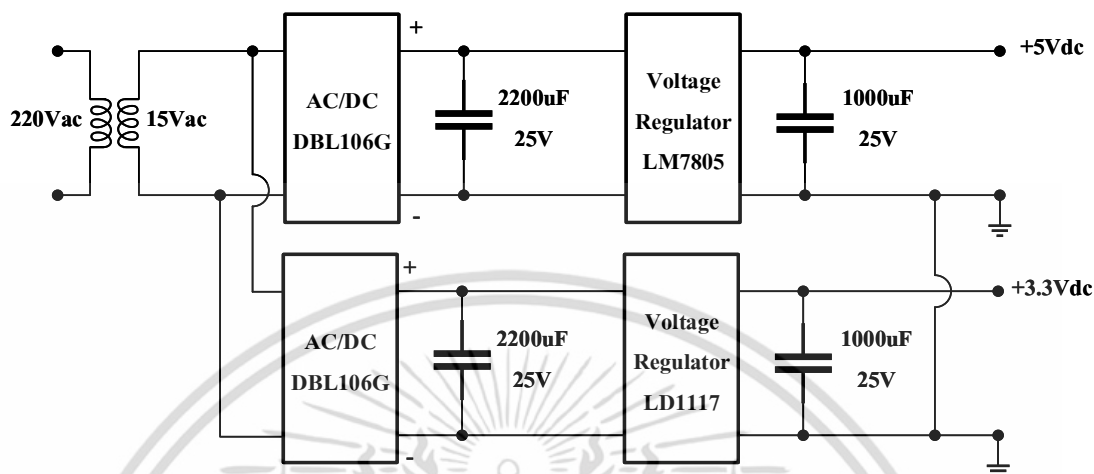
- ชุดสร้างไฟเลี้ยงสำหรับวงจรควบคุม (Power Supply)
- ตัวปรับความเร็วสำหรับมอเตอร์ตัวที่หนึ่ง (Speed Commander 1)
- ตัวปรับความเร็วสำหรับมอเตอร์ตัวที่สอง (Speed Commander 2)
- ตัวรับค่าความเร็วจากมอเตอร์ (Speed Receiver)
- การเชื่อมต่อไมโครคอนโทรลเลอร์ (Overview)

3.1.1.1 ชุดสร้างไฟเลี้ยงสำหรับวงจรควบคุม (Power Supply)

ชุดไฟเลี้ยงของวงจรควบคุมสร้างเพื่อป้อนไฟเลี้ยงขนาด 5V ให้กับวงจรรับค่าความเร็วมอเตอร์โดยวิธีการรับไฟฟ้ากระแสสลับ 15V จากหม้อแปลง ลำดับต่อไปใช้ Diode Bridge Rectifier (DBL106G) เรียงกระแสให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง จากนั้นใช้ Voltage Regulator (LM7805) ลดระดับแรงดันไฟฟ้าลงเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 5V ในส่วนของฮาร์ดแวร์สร้างไฟเลี้ยงขนาด 3.3V จะใช้วิธีการเดียวกับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 5V เพียงแต่เปลี่ยน Voltage Regulator จากเบอร์ LM7805 เป็นเบอร์ LD1117 ทั้งนี้เพื่อการสร้างไฟเลี้ยงที่มีประสิทธิภาพควรใส่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คาปาซิเตอร์ขนาด 2200 μ F, 25V หลังจากการเรียงกระแสและคาปาซิเตอร์ขนาด 1000 μ F, 25V ที่เอาท์พุทของไฟเลี้ยง



รูปที่ 3.1 ชุดสร้างไฟเลี้ยงสำหรับวงจรควบคุม

3.1.1.2 วงจรปรับระดับความเร็วสำหรับมอเตอร์ตัวที่หนึ่งและสอง (Speed Commander 1&2)

การออกแบบตัวปรับความเร็วมอเตอร์จะใช้หลักการส่งสัญญาณลอจิกไปยังพอร์ต GPIO ของไมโครคอนโทรลเลอร์โดยการเชื่อมต่อไฟเลี้ยงขนาด 3.3V เข้ากับตัวต้านทานขนาด 2 กิโลโอห์มและสวิตช์ปรับแรงดัน (งานวิจัยฉบับนี้ใช้โรตารีสวิตช์เป็นสวิตช์ปรับความเร็ว) และใช้สวิตช์แบบคันโยกเป็นตัวควบคุมการกลับทิศทางหมุน เมื่อพิจารณาจากวงจรเมื่อสวิตช์ตัวใดทำงานจะมีเป็นการส่งลอจิก 0 (วงจรปิด, แรงดันระหว่างพอร์ต GPIO นั้นๆ เทียบกับกราวด์เท่ากับศูนย์) ไปที่พอร์ต GPIO ไมโครคอนโทรลเลอร์ ในทางกลับกันหากสวิตช์ที่ตำแหน่งใดไม่มีการทำงานจะส่งลอจิก 1 (วงจรเปิด, แรงดันระหว่างพอร์ต GPIO นั้นๆ เทียบกับกราวด์เท่ากับ 3.3V) ไปที่พอร์ต GPIO ไมโครคอนโทรลเลอร์ งานวิจัยฉบับนี้ได้ออกแบบให้สวิตช์สามารถปรับความเร็วได้ 5 ระดับโดยกำหนดพอร์ตการควบคุมแต่ละระดับความเร็วของมอเตอร์ตัวที่หนึ่งดังต่อไปนี้

- | | |
|---------------------------|-------------------------------|
| - Speed Level 0 (0 rpm) | ควบคุมการทำงานโดยพอร์ต GPIO62 |
| - Speed Level 1 (300 rpm) | ควบคุมการทำงานโดยพอร์ต GPIO63 |
| - Speed Level 2 (600 rpm) | ควบคุมการทำงานโดยพอร์ต GPIO60 |

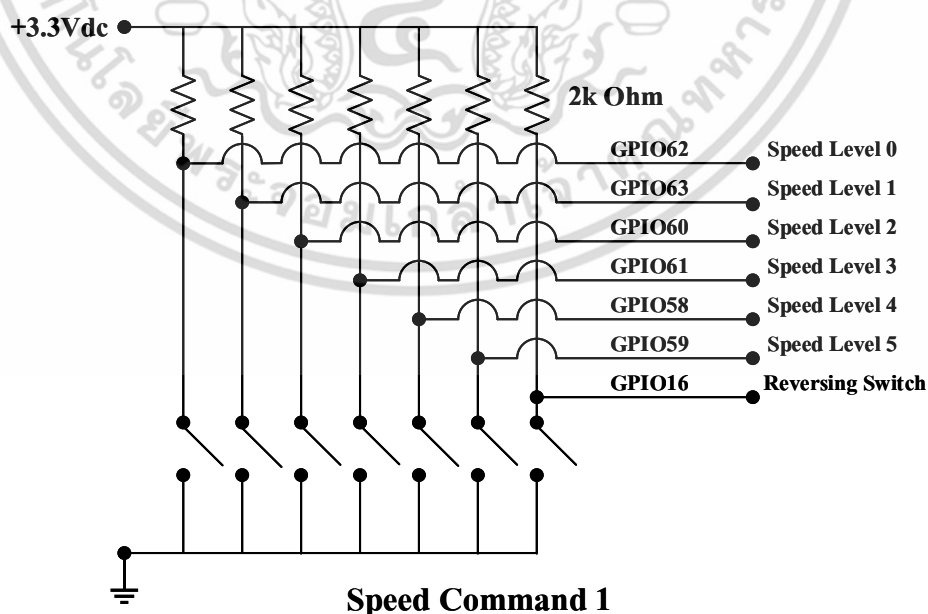
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Speed Level 3 (900 rpm) ควบคุมการทำงานโดยพอร์ต GPIO61
- Speed Level 4 (1200 rpm) ควบคุมการทำงานโดยพอร์ต GPIO58
- Speed Level 5 (1500 rpm) ควบคุมการทำงานโดยพอร์ต GPIO59
- Reversing Switch (สวิตช์กลับทิศทางหมุน) ควบคุมการทำงานโดยพอร์ต GPIO16

ในส่วนของตัวปรับความเร็วของมอเตอร์ตัวที่สองกำหนดพอร์ตการควบคุมแต่ละระดับความเร็วดังต่อไปนี้

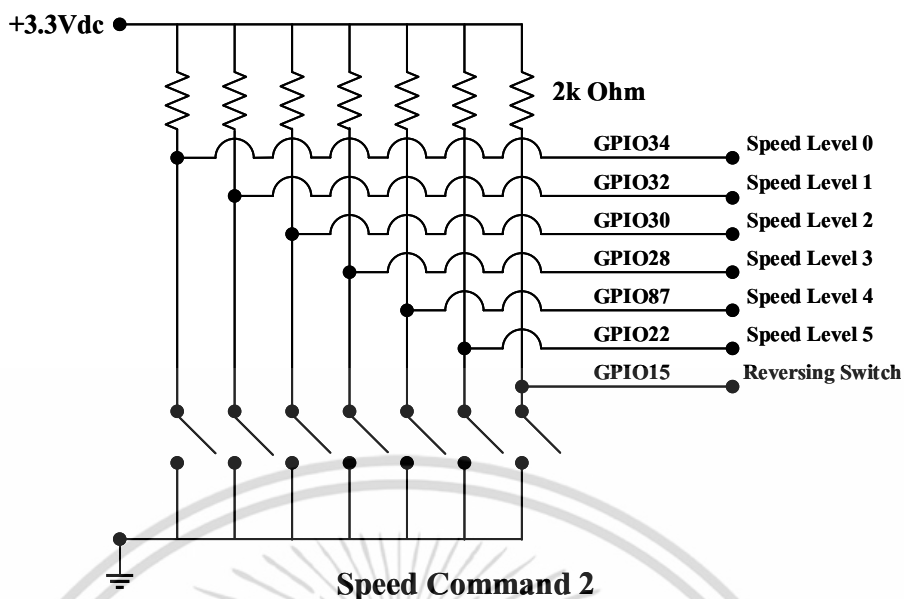
- Speed Level 0 (0 rpm) ควบคุมการทำงานโดยพอร์ต GPIO34
- Speed Level 1 (300 rpm) ควบคุมการทำงานโดยพอร์ต GPIO32
- Speed Level 2 (600 rpm) ควบคุมการทำงานโดยพอร์ต GPIO30
- Speed Level 3 (900 rpm) ควบคุมการทำงานโดยพอร์ต GPIO28
- Speed Level 4 (1200 rpm) ควบคุมการทำงานโดยพอร์ต GPIO87
- Speed Level 5 (1500 rpm) ควบคุมการทำงานโดยพอร์ต GPIO22
- Reversing Switch (สวิตช์กลับทิศทางหมุน) ควบคุมการทำงานโดยพอร์ต GPIO15

วงจรปรับระดับความเร็วสำหรับมอเตอร์ตัวที่หนึ่งและมอเตอร์ตัวที่สองแสดงได้ดังรูปที่ 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ



รูปที่ 3.2 วงจรปรับระดับความเร็วสำหรับมอเตอร์ตัวที่หนึ่ง

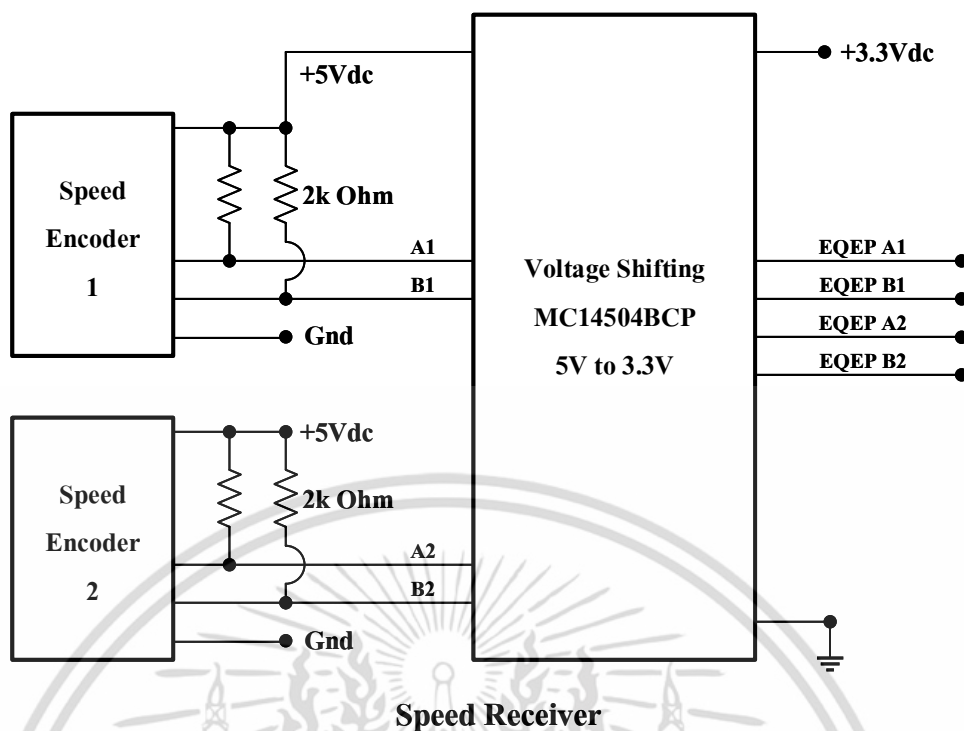
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 วงจรปรับระดับความเร็วสำหรับมอเตอร์ตัวที่สอง

3.1.1.3 วงจรตัวรับค่าความเร็วจากมอเตอร์ (Speed Receiver)

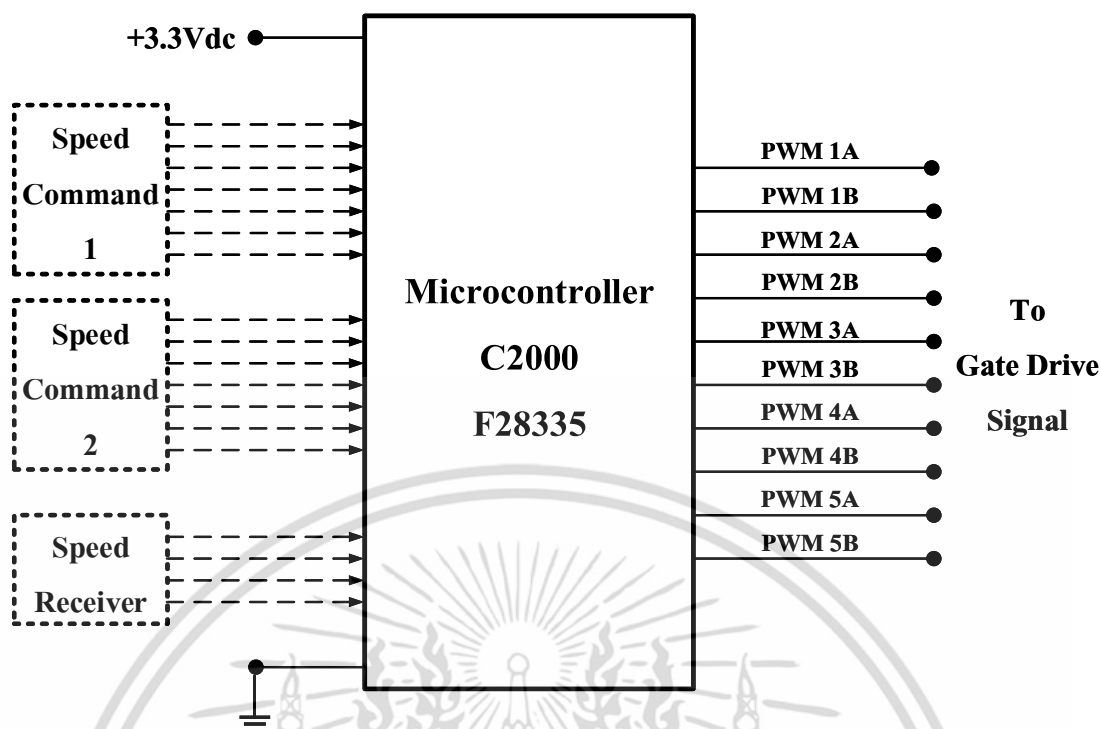
ตัวรับค่าความเร็วที่ใช้ในงานวิจัยฉบับนี้ใช้ Rotary Speed Encoder เชื่อมต่อในลักษณะของการคัปปลิงกับมอเตอร์ ทั้งนี้จะต้องจ่ายไฟเลี้ยงขนาด $5V_{DC}$ ให้กับ Speed Encoder และทำการเชื่อมต่อตัวต้านทานขนาด 2 กิโลโอห์ม แบบ Pull-up เพื่อป้องกันการทำงานที่ผิดพลาด ค่าเอาต์พุตที่ได้จาก Speed Encoder แต่ละตัวจะออกมาเป็นสัญญาณ A และ B มีลักษณะเป็นสัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยมซึ่งมีมุมเฟสต่างกัน 90 องศา โดยมุมเฟสนี้จะเป็นตัวกำหนดทิศทางการหมุน คือ หากสัญญาณพัลส์ A นำหน้าสัญญาณพัลส์ B แสดงว่ามอเตอร์กำลังหมุนในทิศตามเข็มนาฬิกา ในทางกลับกันหากสัญญาณพัลส์ B นำหน้าสัญญาณพัลส์ A แสดงว่ามอเตอร์กำลังหมุนในทิศทวนเข็มนาฬิกา จากนั้นสัญญาณพัลส์ A, B ของ Speed Encoder ทั้งสองจะถูกส่งเข้าไอซี Voltage Shifting (MC14504BCP) ปรับระดับแรงดันของสัญญาณพัลส์ A, B จาก 5V เหลือ 3.3V เพื่อให้สามารถส่งไปใช้งานได้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ C2000 ตามพอร์ต EQEP A1, B1 สำหรับมอเตอร์ตัวแรก และพอร์ต EQEP A2, B2 สำหรับมอเตอร์ตัวที่สอง ตามลำดับ การเชื่อมต่อวงจรรับค่าความเร็วจากมอเตอร์แสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 วงจรรับค่าความเร็วมอเตอร์

3.1.1.4 การเชื่อมต่อไมโครคอนโทรลเลอร์ (Overview)

ภาพรวมของการเชื่อมต่อไมโครคอนโทรลเลอร์ C2000 ซึ่งต้องการไฟเลี้ยงขนาด 3.3V สรุปลงในส่วนของสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตแสดงดังรูปที่ 3.5 สัญญาณเอาต์พุตทั้ง 10 สัญญาณจะถูกส่งไปควบคุมการสวิทช์ที่ขาทั้งห้าของอินเวอร์เตอร์ (A คือสวิทช์ที่กึ่งบน, B คือสวิทช์ที่กึ่งล่าง) ทั้งนี้การทำงานของระบบควบคุมเป็นลักษณะของการส่งสัญญาณที่เป็นแรงดันจึงจำเป็นต้องเชื่อมต่อกราวด์ของระบบควบคุมทั้งหมดเข้าด้วยกัน



รูปที่ 3.5 ภาพรวมการเชื่อมต่อของไมโครคอนโทรลเลอร์

3.1.2 การออกแบบฮาร์ดแวร์ของอินเวอร์เตอร์แบบห้ากึ่ง

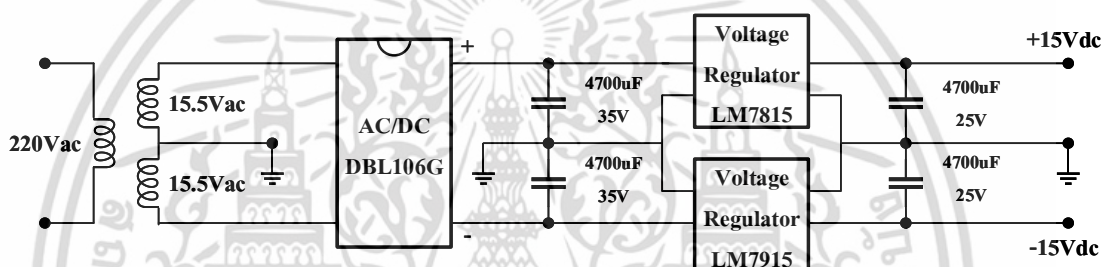
เนื้อหาในส่วนนี้เป็นการนำเสนอการออกแบบวงจรขับโดยใช้ IGBT เป็นตัวสวิตช์ซึ่งสัญญาณขับเคลื่อนมอเตอร์ โดยการรับสัญญาณควบคุมสวิตช์แต่ละตัวจากไมโครคอนโทรลเลอร์ในรูปที่ 3.5 ผ่าน optocoupler เพื่อขยายสัญญาณขับเคลื่อนให้ IGBT โดยการออกแบบอินเวอร์เตอร์แบบห้ากึ่งนี้มีส่วนประกอบหลักและลำดับการออกแบบดังนี้

- ชุดสร้างไฟเลี้ยง (Power Supply) ขนาด +15 และ -15V_{dc}
- ชุดสร้างไฟเลี้ยง (Power Supply) ขนาด +12 และ +5V_{dc}
- ชุดสร้างไฟเลี้ยงแบบแยกกราวด์ (Isolated DC Supply) -15 ถึง +15V_{dc}
- วงจรขับสวิตช์ (IGBT gate drive)
- วงจรตรวจจับกระแสเกิน (Over Current Detector)
- วงจรเซ็ตและรีเซ็ตสัญญาณ (Preset and reset)
- วงจรรับส่งสัญญาณ PWM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2.1 ชุดสร้างไฟเลี้ยงขนาด +15 และ -15V_{dc}

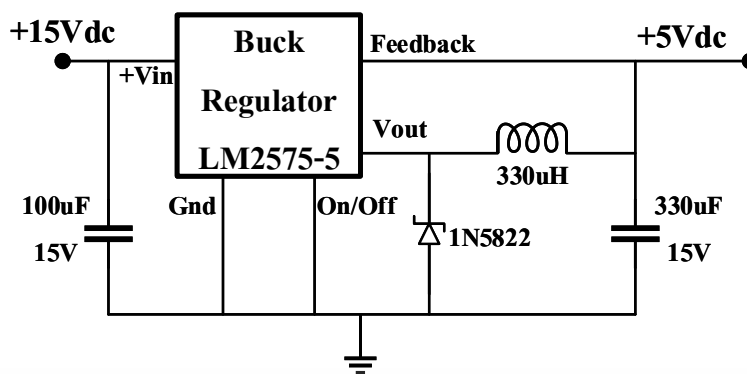
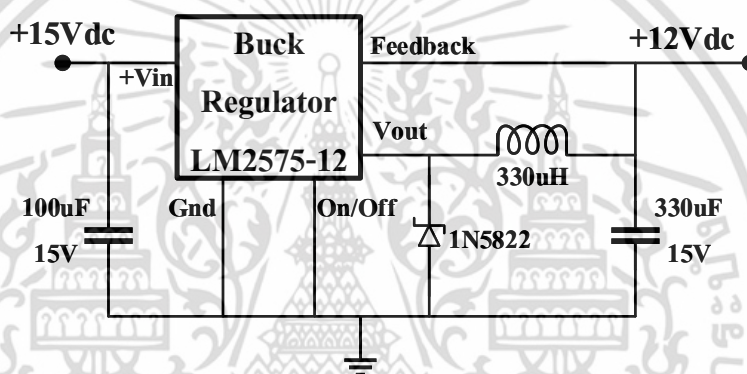
วงจรอินเวอร์เตอร์แบบทำกึ่งต้องใช้ไฟเลี้ยงกระแสตรงเพื่อจ่ายให้อุปกรณ์ต่างๆ เป็นจำนวนมากโดยวงจรไฟเลี้ยงขนาด +15 และ -15V_{dc} มีโครงสร้างดังรูปที่ 3.6 โดยการแปลงแรงดันไฟฟ้าขนาด 220V_{ac} เป็น 15.5V_{ac} (ต่อกราวด์ร่วมกัน) จำนวนสองชุด จากนั้นนำแรงดันดังกล่าวมาเรียงให้เป็นแรงดันกระแสตรงผ่านบริดจ์เรกติไฟเออร์ (DBL106G) จากนั้นนำมาเข้า Voltage Regulator เพื่อปรับระดับแรงดันให้ได้แรงดันขนาด +15V_{dc} (ใช้ LM7815) และ -15V_{dc} (ใช้ LM7915) ทั้งนี้แนะนำให้ใส่คาปาซิเตอร์ขนาด 4700uF, 35V ไว้หลังจากทำการเรียงกระแส และใส่คาปาซิเตอร์ขนาด 4700uF, 25V ไว้ที่ขั้วเอาต์พุตเพื่อจะได้แรงดันกระแสตรงที่เรียบยิ่งขึ้น



รูปที่ 3.6 ชุดสร้างไฟเลี้ยงขนาด +15 และ -15 V_{dc}

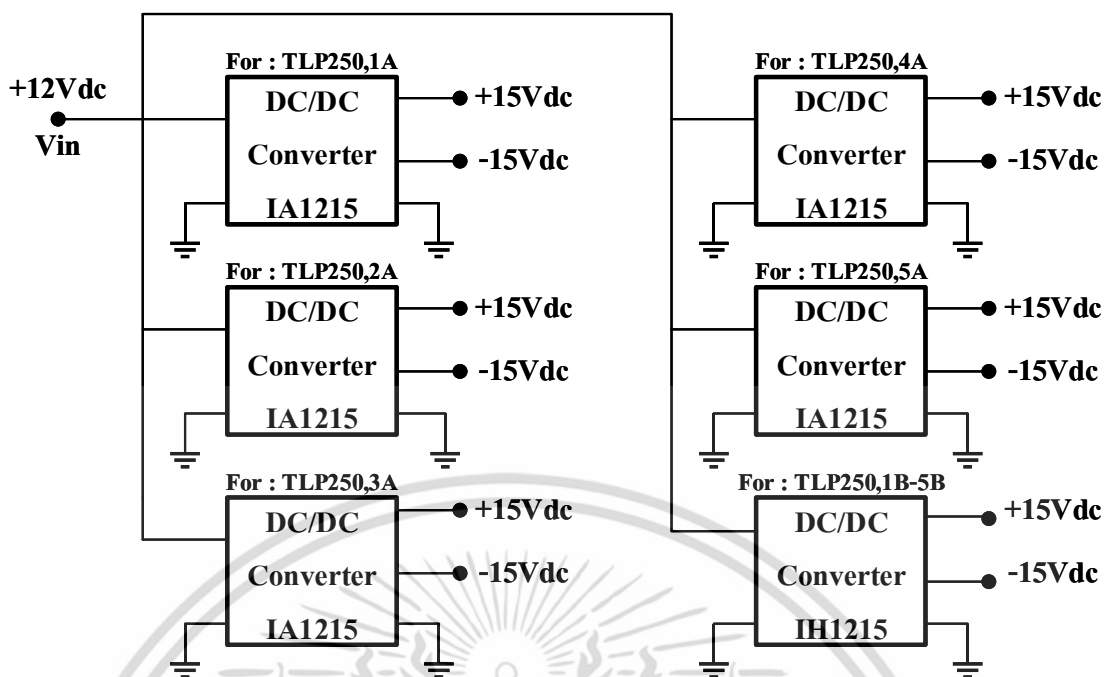
3.1.2.2 ชุดสร้างไฟเลี้ยงขนาด +5 และ +12 V_{dc}

ไฟเลี้ยงขนาด +5V_{dc} นั้นจะสร้างเพื่อใช้เป็นไฟเลี้ยงให้กับไอซีต่าง ๆ ส่วนขนาด +12V_{dc} ทำไว้สำหรับเป็นทางผ่านไปสร้างชุดไฟเลี้ยงแบบแยกกราวด์ให้ optocoupler อีกลำดับหนึ่ง โดยวงจรจะรับไฟอินพุตขนาด +15V_{dc} จากนั้นจะปรับระดับแรงดันลงด้วย Buck Regulator เบอร์ LM2575-5 สำหรับไฟขนาด +5V_{dc} และ LM2575-12 สำหรับไฟขนาด +12V_{dc} วงจรแสดงดังรูปที่ 3.8 และ 3.9 ตามลำดับ

รูปที่ 3.7 ชุดสร้างไฟเลี้ยงขนาด 5V_{dc}รูปที่ 3.8 ชุดสร้างไฟเลี้ยงขนาด 12V_{dc}

3.1.2.3 ชุดสร้างไฟเลี้ยง Optocoupler แบบแยกกราวด์ (Isolated DC Supply) -15 ถึง +15 V_{dc}

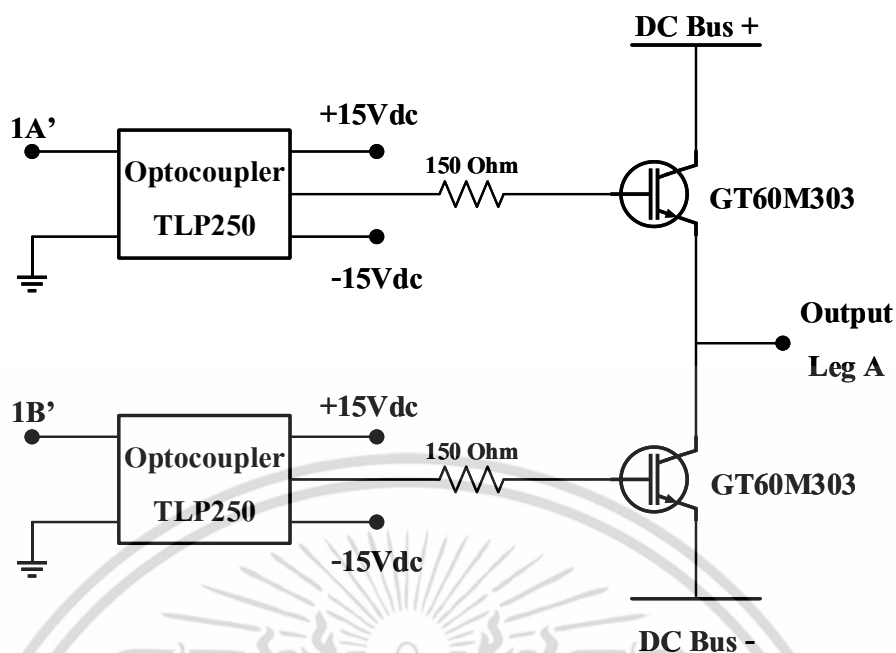
สร้างชุดไฟเลี้ยงแบบแยกกราวด์กับวงจรควบคุม ขนาด -15 ถึง +15V_{dc} เพื่อจ่ายให้กับ Optocoupler โดยการรับไฟเลี้ยงขนาด +12V_{dc} จากวงจรในรูปที่ 3.8 โดยในงานวิจัยนี้จะใช้ DC/DC converter เบอร์ IA1215 แปลงไฟจาก 12V_{dc} เป็น +15V_{dc} จำนวน 5 ชุดเพื่อจ่ายให้กับ Optocoupler ทั้ง 5 ตัวที่ควบคุมการสวิตช์กึ่งบนของอินเวอร์เตอร์ และใช้ DC/DC converter เบอร์ IH1215 จำนวน 1 ชุดเพื่อจ่ายให้กับ Optocoupler ทุกตัวที่ควบคุมการสวิตช์กึ่งล่างของอินเวอร์เตอร์ โดยวงจรดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ชุดสร้างไฟเลี้ยง Optocoupler แบบแยกกราวด์

3.1.2.4 วงจรขับสวิตช์ (IGBT gate drive)

งานวิจัยฉบับนี้ใช้สวิตช์ คือ IGBT เบอร์ GT60M303 โดยใช้ Optocoupler เป็นตัวขับสัญญาณเพื่อส่งให้ IGBT ในการควบคุมการเปิดปิดสวิตช์ โดยมีหลักการคือ Optocoupler รับไฟเลี้ยง +15V_{dc} และ -15V_{dc} จากวงจรในรูปที่ 3.9 จากนั้นรับสัญญาณ PWM และส่งออกไปที่ขาเกตของ IGBT ผ่านตัวต้านทานขนาด 150 โอห์ม จะได้แรงดันเอาท์พุทสำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์ตั้งวงจรการขับสัญญาณถึง A ที่แสดงในรูปที่ 3.10 กิ่งที่เหลืออีก 4 กิ่งจะใช้วงจรในลักษณะเดียวกัน



รูปที่ 3.10 วงจรขับสวิตซ์กึ่ง A ของอินเวอร์เตอร์แบบห้ากึ่ง

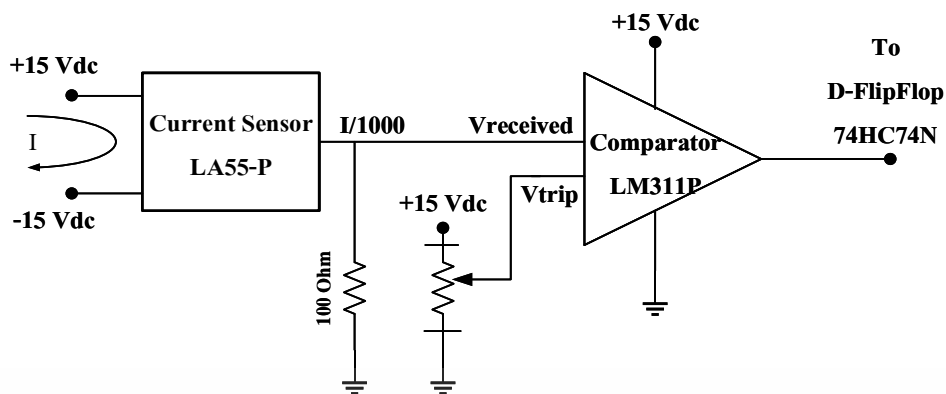
3.1.2.5 การออกแบบวงจรตรวจจับกระแส

วงจรป้องกันถือเป็นสิ่งสำคัญที่ขาดไม่ได้ในระบบไฟฟ้า เพื่อป้องกันความผิดพลาดในระบบ เช่น กระแสสูงเกิน เป็นต้น สำหรับวงอินเวอร์เตอร์แบบห้ากึ่งนี้ได้ทำการออกแบบวงจรป้องกันไว้โดยมีหลักการทำงานดังต่อไปนี้ คือ วัดค่ากระแสจากดีซีบัส ผ่านตัวตรวจจับกระแส (LA55-P) โดยกระแสที่ตรวจจับได้จะถูกส่งออกมาเป็นค่าของแรงดันในอัตราส่วน 1000/100 A/V หรือเมื่อตรวจจับกระแสได้ 10 A จะส่งสัญญาณออกมา 1 V ค่าของแรงดัน(กระแส) ที่ส่งออกมานี้จะนำมาเปรียบเทียบกับค่าของแรงดันทริป(กระแส) ที่ได้ทำการตั้งค่าไว้จากการใช้ตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ในการแบ่งแรงดัน ด้วย Comparator (LM311P) และส่งออกไปสู่ตัวรีเซ็ตวงจรในลำดับต่อไป ซึ่งมีเงื่อนไขการทำงานดังต่อไปนี้

- ถ้าแรงดัน(กระแส) ที่วัดได้ น้อยกว่า แรงดันทริป(กระแส) แสดงว่าวงจรมีสภาวะปกติ Comparator ส่งสัญญาณเป็นลอจิก 1 เข้าสู่ตัวรีเซ็ตสัญญาณ

- ถ้าแรงดัน(กระแส) ที่วัดได้ มากกว่า แรงดันทริป(กระแส) แสดงว่าวงจรมีสภาวะผิดปกติ อาจมี fault หรือกระแสเกินเกิดขึ้น Comparator ส่งสัญญาณเป็นลอจิก 0 เข้าสู่ตัวรีเซ็ตสัญญาณวงจรตรวจจับสัญญาณแสดงดังรูปที่ 3.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



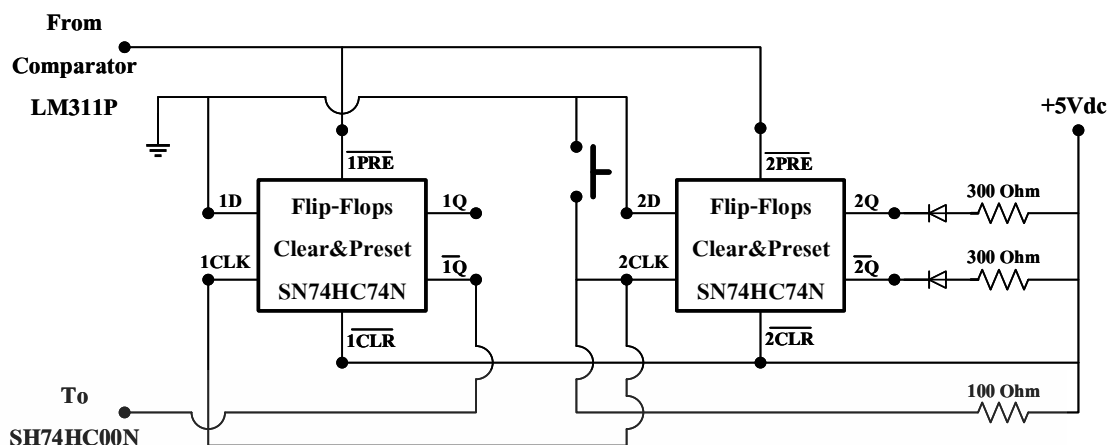
รูปที่ 3.11 วงจรตรวจจับกระแส

3.1.2.6 วงจรเซ็ทและรีเซ็ทสัญญาณ

หลังจากที่ได้ทำการเปรียบเทียบสัญญาณเพื่อหาความผิดพลาดในระบบแล้ว สัญญาณดังกล่าวจากในหัวข้อ 3.1.1.5 จะถูกมาที่ Clear&Preset Flipflop (SN74HC74N) แสดงการเชื่อมต่อวงจรดังรูปที่ 3.12 โดยมีหลักการทำงานคือ

- หาก Comparator ส่งสัญญาณเป็นลอจิก 0 (มีความผิดปกติ) Clear&Preset Flipflop จะทำส่งค่าลอจิก 0 ออกไปที่ NAND gates (SN74HC00N) และคงค่าเป็นลอจิก 0 ไว้จนกว่าจะกดสวิตช์รีเซ็ทสัญญาณ

- หาก Comparator ส่งสัญญาณเป็นลอจิก 1 (สภาวะปกติ) Clear&Preset Flipflop จะทำส่งค่าลอจิก 1 ออกไปที่ NAND gates (SN74HC00N)



รูปที่ 3.12 วงจรเซตและรีเซ็ตสัญญาณ

3.1.2.7 วงจรรับและส่งสัญญาณ PWM

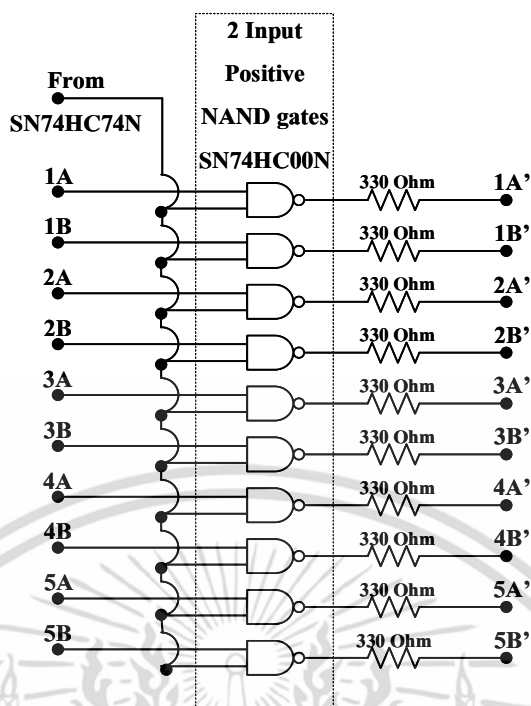
หลักจากที่ทำการตรวจสอบความผิดพลาดในระบบมาแล้ววงจร NAND gates (SN74HC00N) ในส่วนนี้จะทำหน้าที่ในการรับสัญญาณ PWM จากวงจรควบคุมในหัวข้อที่ 3.1.1.4 มารวมกับสัญญาณตรวจสอบความผิดปกติจากหัวข้อที่ 3.1.2.6 และส่งสัญญาณออกไปสู่วงจรขับสวิตซ์ในหัวข้อ 3.1.2.4 ซึ่งมีเงื่อนไขดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.1 การทำงานของ NAND gates (SN74HC00N)

Inputs		Output
A	B	Y
H	H	L
L	x	H
x	L	H

โดยวงจรรับส่งสัญญาณ PWM แสดงดังรูปที่ 3.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 วงจรรับส่งสัญญาณ PWM

3.1.3 การออกแบบซอฟต์แวร์ควบคุมการทำงาน

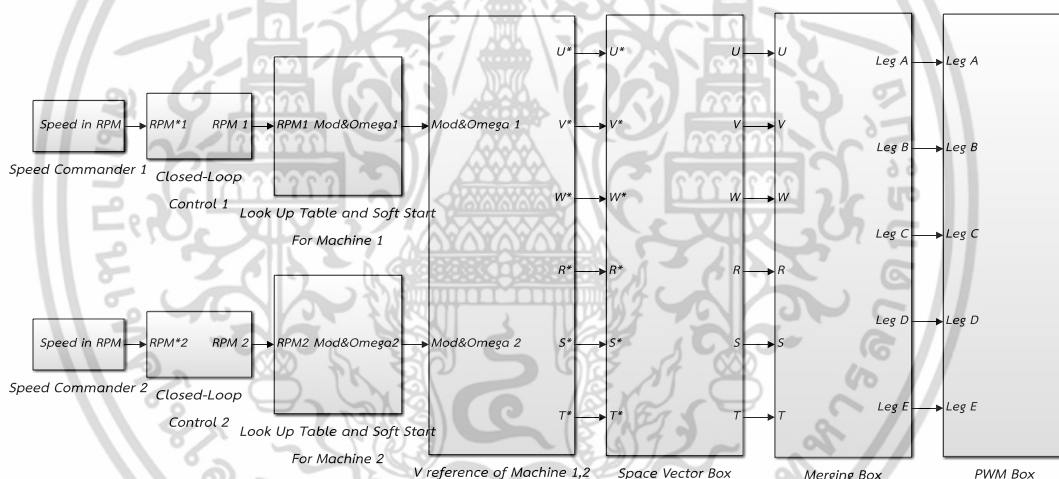
งานวิจัยฉบับนี้ทำการสร้างซอฟต์แวร์การควบคุมจากโปรแกรม MATLAB 2014a ในส่วนของ Simulink และใช้โปรแกรม Code Composer Studio ในการเขียนโปรแกรมหาลงสู่ไมโครคอนโทรลเลอร์ ลำดับของการสร้างซอฟต์แวร์จาก Simulink จะนำเสนอตามลำดับดังต่อไปนี้

- ภาพรวมของซอฟต์แวร์ควบคุม
- ชุดปรับความเร็วมอเตอร์ (Speed Commander 1&2)
- ชุดควบคุมแบบวงรอบปิด (Closed-loop Control 1&2)
- ชุดควบคุมแรงดันต่อความถี่ (V/F Speed control Box 1&2)
- ชุดสร้างแรงดันอ้างอิง (Voltage Reference 1&2)
- ชุดแปลงสัญญาณสเปซเวกเตอร์ (Space Vector Box)
- ชุดรวมสัญญาณมอดูเลต (Merging Box)
- ชุดเปรียบเทียบสัญญาณขับสวิตช์ (PWM Box)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3.1 ภาพรวมของซอฟต์แวร์ควบคุม

ภาพรวมของระบบมีการทำงานเป็นระบบดังต่อไปนี้ คือ ทำการกำหนดความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำทั้งสองจากบล็อก Speed Commander จากนั้นทำการควบคุมแบบวงรอบปิดโดยการเปรียบเทียบกับค่าความเร็วจริงที่วัดได้จากมอเตอร์เหนี่ยวนำที่บล็อก Closed-loop Control แล้วจึงส่งค่าความเร็วรอบมาเข้าระบบการควบคุมแบบแรงดันต่อความเร็วที่บล็อก Look Up Table and Soft Start จากนั้นจึงได้ค่าของขนาดและมุมเฟสสำหรับป้อนให้แรงดันอ้างอิงที่บล็อก Voltage Reference หลังจากนั้นจะใช้เทคนิคสเปซเวกเตอร์กับสัญญาณอ้างอิงดังกล่าวที่ Space Vector Box และทำการรวมสัญญาณจาก 6 สัญญาณที่เหลือ 5 สัญญาณที่ Merging Box แล้วสัญญาณนี้จะถูกส่งต่อไปเปรียบเทียบเพื่อสร้างสัญญาณควบคุมการทำงานของสวิทช์ที่ PWM Box โดยแสดงดังแผนภาพที่ 3.14 รายละเอียดของซอฟต์แวร์ควบคุมในบล็อกต่างจะแสดงในหัวข้อต่อไป



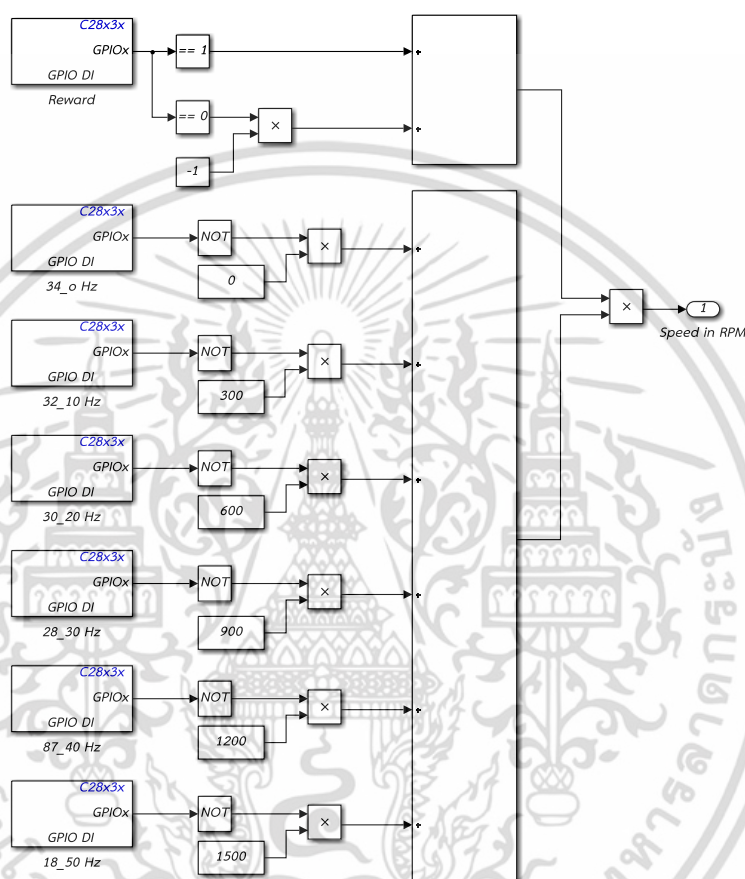
รูปที่ 3.14 ภาพรวมของซอฟต์แวร์ควบคุม

3.1.3.2 ชุดปรับความเร็วมอเตอร์ (Speed Commander 1&2)

การออกแบบซอฟต์แวร์ในส่วนของชุดปรับความเร็วงานวิจัยฉบับนี้ได้ออกแบบให้ปรับความเร็วเป็นระดับละ 10 Hz หรือทีละ 300 rpm ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับฮาร์ดแวร์ของตัวปรับระดับความเร็วมอเตอร์ในหัวข้อที่ 3.1.1.2 จะเห็นว่าหากเลือกสวิทช์ไปที่ระดับความเร็วใดวงจรจะปิด GPIO จะมีการส่งสัญญาณเป็นลอจิก 0 เข้าสู่ระบบเพื่อทำการอินเวิร์สให้กลายเป็นลอจิก 1 แล้วคูณกับค่าความเร็วรอบที่ได้ทำการตั้งค่าไว้ ได้ค่าความเร็วรอบส่งเข้าไปสู่ขั้นตอนต่อไป สวิทช์ในตำแหน่งที่ไม่ได้

เลือกให้ทำงานสวิทช์จะเปิดวงจร GPIO จะส่งสัญญาณลอจิก 1 เข้าสู่ระบบ เมื่อถูกอินเวิร์สกลายเป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลอจิก 0 ทำให้ไม่มีผลในการคูณกับค่าความเร็วที่ตั้งค่าไว้ ส่วนของการกลับทิศการหมุนจะใช้หลักการ
 ออกแบบคือ ทำการเปรียบเทียบลอจิกจาก GPIO หากเป็นลอจิก 1 จะส่งค่า 1 เข้าไปคูณกับความเร็ว
 รอบ ถ้าหากเป็นลอจิก 0 จะส่งค่า -1 เข้าไปคูณกับความเร็วรอบทำให้มอเตอร์หมุนในทิศทางตรงกัน
 ซ้ำม การออกแบบซอฟต์แวร์ตัวปรับความเร็วแสดงดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 ชุดปรับความเร็วมอเตอร์ตัวที่ 1 (Speed Commander 1)

สำหรับซอฟต์แวร์ชุดปรับความเร็วมอเตอร์ตัวที่ 2 ใช้หลักการเดียวกับตัวแรก
 ต่างกันที่ GPIO ที่ใช้ โดยแสดงพอร์ตการใช้งานที่ความเร็วต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

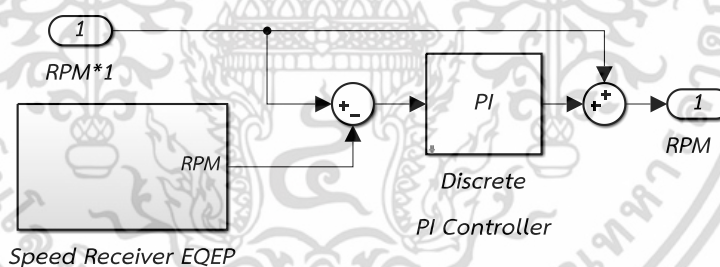
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 พอร์ตการใช้งานสำหรับตัวควบคุมความเร็วตัวที่ 1 และ 2

ความเร็ว (rpm)	พอร์ตที่ใช้สำหรับมอเตอร์ตัวที่ 1	พอร์ตใช้สำหรับมอเตอร์ตัวที่ 2
0	GPIO 34	GPIO 62
300	GPIO 32	GPIO 63
600	GPIO 30	GPIO 60
900	GPIO 28	GPIO 61
1200	GPIO 87	GPIO 58
1500	GPIO 18	GPIO 59
กลับทิศทางหมุน	GPIO 16	GPIO 15

3.1.3.3 ชุดควบคุมแบบวงรอบปิด (Closed-loop Control 1&2)

บล็อกชุดควบคุมแบบวงรอบปิดจะทำการนำค่าความเร็วรอบ (rpm *) ที่ได้ทำการกำหนดไว้จากชุดปรับความเร็วรอบในหัวข้อที่ผ่านมา มาทำการเปรียบเทียบกับค่าความเร็วจริงของมอเตอร์ (rpm) และเข้าใช้ตัวควบคุมแบบ PI ก่อนส่งค่าความเร็วเพื่อใช้ในขั้นตอนต่อไป โดยแสดงดังแผนภาพที่ 3.16



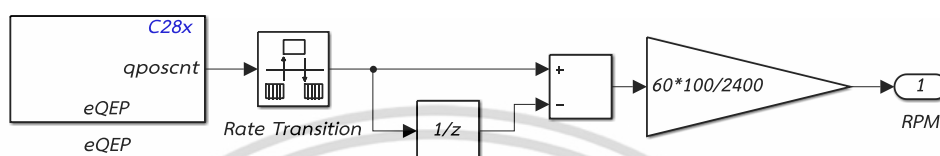
รูปที่ 3.16 ชุดควบคุมวงรอบปิด

สำหรับตัว Speed Receiver ทำการรับค่าสัญญาณจาก Speed Encoder ตามที่ได้กล่าวมาในหัวข้อที่ 3.1.1.3 โดย Speed Encoder ที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะส่งสัญญาณออกมาเป็นพัลส์แรงดันที่มีความละเอียด 600 พัลส์/รอบ โดยรับสัญญาณพัลส์จากพอร์ต eQEP จากนั้นใช้เครื่องมือ Rate Transition และดีเลย์ เพื่อต้องการหาจำนวนของสัญญาณพัลส์ในช่วงเวลาหนึ่ง (ในงานวิจัยนี้เลือกเป็น 0.01 วินาที) จากนั้นนำมาคูณค่าคงที่จากสมการที่ 3.1 เพื่อแปลงหน่วยมาเป็น rpm ดังแผนภาพที่ 3.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$gain = \frac{60 \times \left(\frac{1}{Rate\ Transition\ Time} \right)}{4 \times Speed\ Encoder\ Resolution} \quad (3.1)$$

โดยชุดควบคุมแบบวงรอบปิดชุดที่ 2 ก็ใช้หลักการเดียวกันทั้งหมด ต่างกันที่ตัวรับค่าความเร็วเท่านั้น

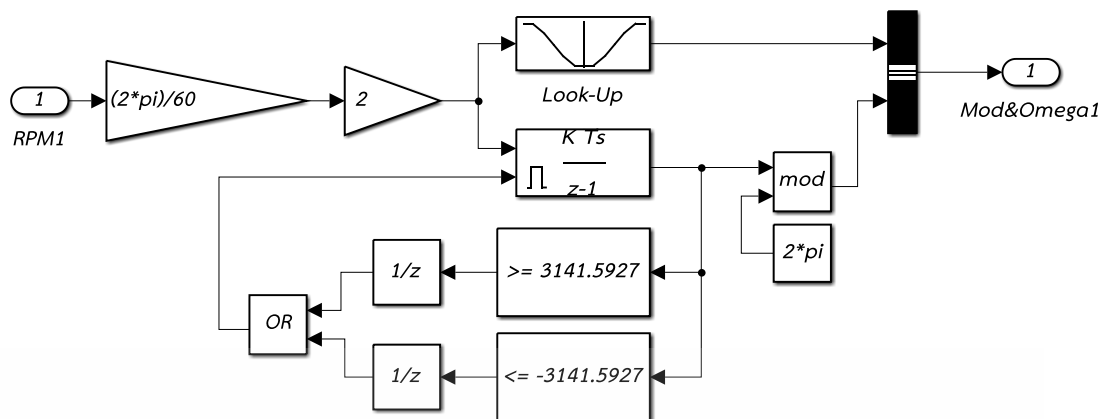


รูปที่ 3.17 ชุดแปลงสัญญาณพัลส์เป็นค่าความเร็วรอบ

3.1.3.4 ชุดควบคุมแรงดันต่อความถี่ (V/F Speed control 1&2)

หลักจากการทำการควบคุมแบบวงรอบปิด จะมีการส่งค่าความเร็วรอบทางกลเข้ามาแล้ว จะถูกแปลงเป็นค่าความเร็วทางไฟฟ้า จากนั้นจะสร้างค่า Modulation Index จากบล็อก Look-up Table โดยค่าแรงดันต่อความถี่นี้สามารถกำหนดค่าได้ตามความเหมาะสมตามการใช้งาน โดยงานวิจัยฉบับนี้ได้กำหนดให้ใช้ Modulation Index เท่ากับ 0.5 ที่ความถี่ 50 Hz เนื่องจากป้องกันการเกิด Over Modulate ในกรณีที่มอเตอร์สองตัวพร้อมกันที่ความเร็วสูงๆ ส่วนค่าของมุมเฟสที่ส่งออกไปจะใช้หลักการคือจะรีเซ็ตสัญญาณให้เริ่มใหม่เมื่อ มุมเฟสถึงค่า 2π เรเดียน หรือครบหนึ่งคาบ ทั้งนี้ชุดควบคุมแรงดันต่อความถี่ของมอเตอร์เหนี่ยวนำตัวที่หนึ่งและตัวที่สองไม่มีความจำเป็นที่จะต้องใช้ค่าของ Look-up Table เหมือนกัน สามารถกำหนดค่าตามความเหมาะสมของมอเตอร์แต่ละตัวได้ โดยชุดควบคุมนี้มีข้อควรระวังคือควรทำตัวรีเซ็ตค่าของตัวอินทิเกรตมุมเฟสไว้ด้วย เพื่อป้องกันการหยุดการทำงานกะทันหันในกรณีที่หน่วยความจำของไมโครคอนโทรลเลอร์ในส่วนตัวอินทิเกรตเก็บค่าจนเกินลิมิต ดังแสดงวงจรทั้งหมดดังรูปที่ 3.18

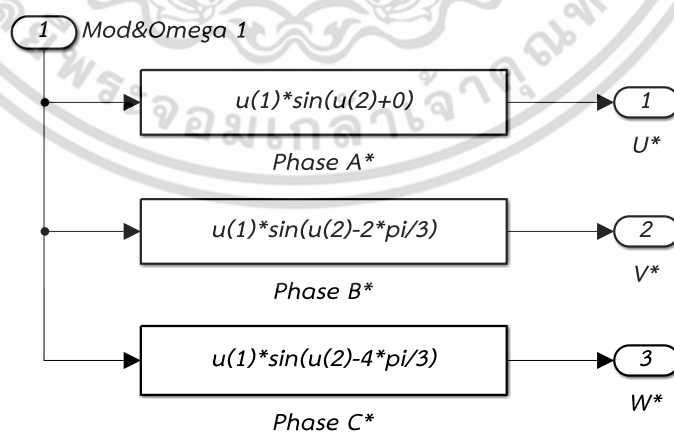
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.18 ชุดควบคุมแรงดันต่อความถี่

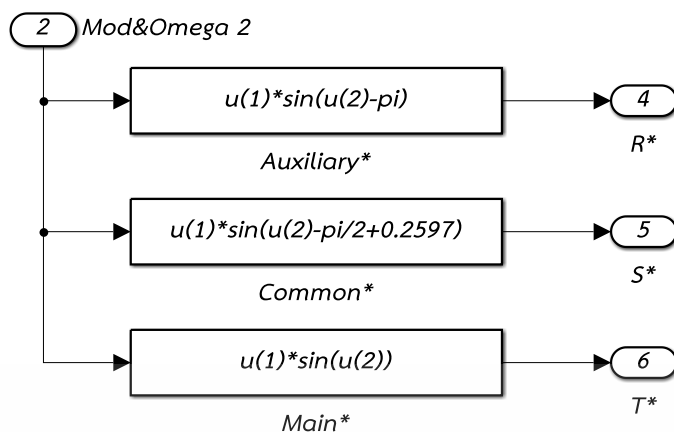
3.1.3.5 ชุดสร้างแรงดันอ้างอิง (Voltage Reference 1&2)

หลังจากรับค่า Modulation Index และมุมเฟสที่เหมาะสมสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำแต่ละตัวแล้วจะนำค่า Modulation Index และมุมเฟสมาแทนค่าในสมการของสัญญาณอ้างอิงที่ได้สร้างไว้ โดยเลือกใช้สัญญาณอ้างอิงให้เหมาะสมกับชนิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.5 โดยงานวิจัยนี้ใช้งานมอเตอร์ตัวที่หนึ่งเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสและมอเตอร์ตัวที่สองเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส จึงแสดงการสร้างบล็อกสำหรับสัญญาณอ้างอิงทั้งสองได้รูปที่ 3.19(ก) และ 3.19(ข)



(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

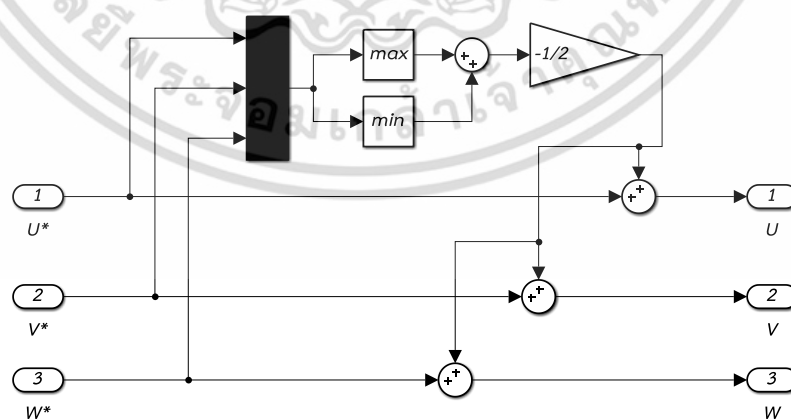


(จ)

รูปที่ 3.19 ชุดสร้างสัญญาณอ้างอิงสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส (ก) และมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส (ข)

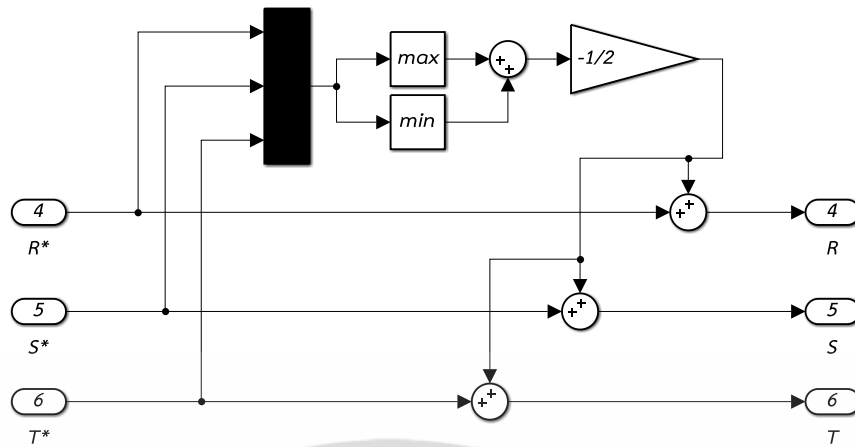
3.1.3.6 ชุดแปลงสัญญาณสเปซเวกเตอร์ (Space Vector Box)

ตามที่ได้กล่าวมาในหัวข้อที่ 2.2 การใช้เทคนิคสเปซเวกเตอร์จะมีส่วนช่วยในเรื่องของการลดค่าฮาร์มอนิกของแรงดันและกระแส รวมถึงในส่วนของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสยังสามารถเพิ่มค่า Modulation Index ได้อีกประมาณ 15% การเกิด Over Modulate โดยการทำงานของบล็อกนี้จะทำการรับค่าสัญญาณไซน์อ้างอิงของมอเตอร์เหนี่ยวนำทั้งสอง จากนั้นจะเข้าสู่บล็อกการใช้เทคนิคสเปซเวกเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.20



(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

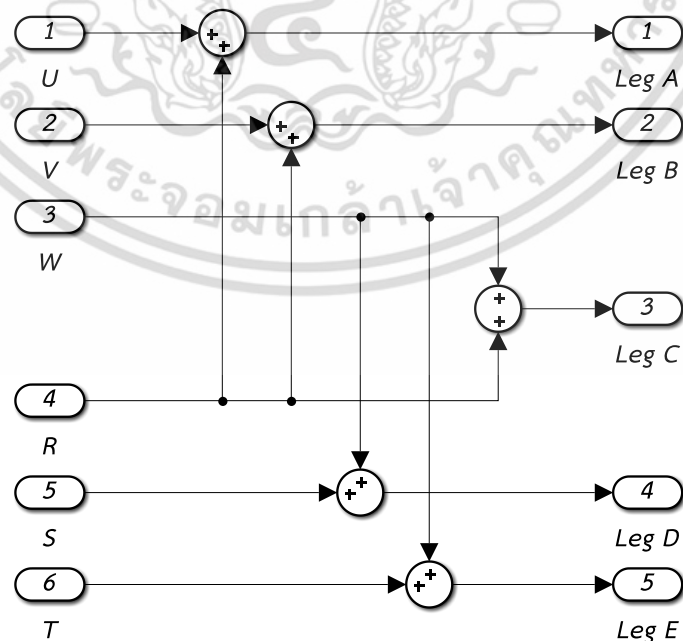


(ข)

รูปที่ 3.20 ชุดแปลงสัญญาณสเปกเตอร์สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส (ก)
และมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส (ข)

3.1.3.7 ชุดรวมสัญญาณมอดูเลต (Merging Box)

บล็อกรวมสัญญาณมอดูเลตจะทำการรวมสัญญาณจาก 6 ให้เหลือ 5 สัญญาณ โดยคุณสมบัติของสัญญาณระหว่างกึ่งยังคงเดิมตามโครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ ดังสมการการที่ 2.13 ถึง 2.17 ที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.5.3 บล็อกการรวมสัญญาณจากโปรแกรม Simulink แสดงได้ดังรูปที่ 3.21

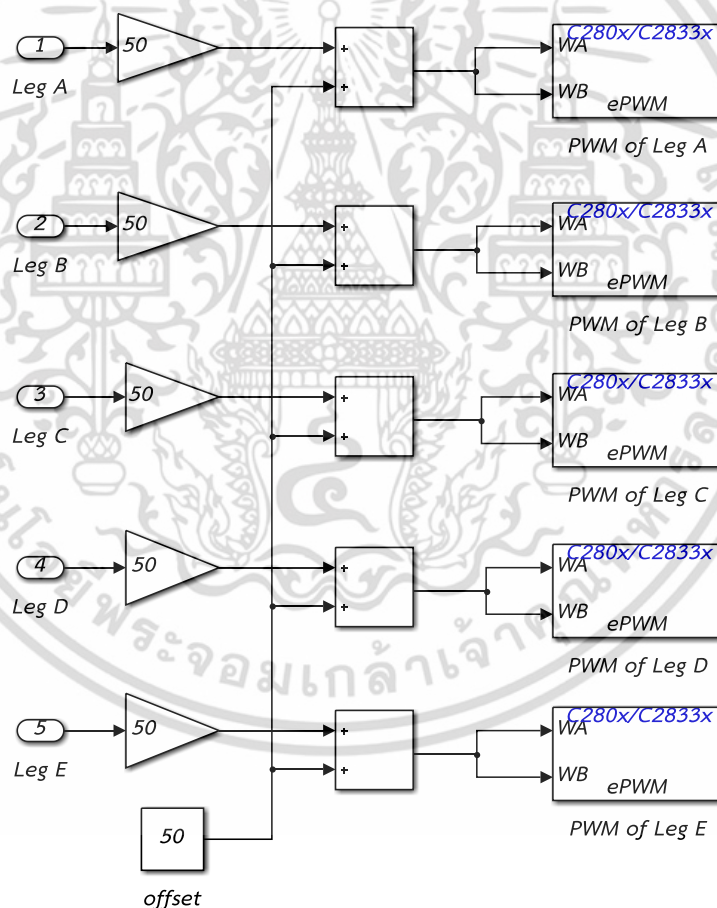


รูปที่ 3.21 การรวมสัญญาณมอดูเลต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3.8 ชุดเปรียบเทียบสัญญาณขับสวิตช์ (PWM Box)

หลังจากทำการรวมสัญญาณมอดูเลตให้เหลือเพียง 5 สัญญาณแล้ว สัญญาณดังกล่าว จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยม โดยฟังก์ชัน ePWM ไมโครคอนโทรเลอร์ C2000 ที่ ใช้ในงานวิจัยฉบับนี้ จะรับค่าสัญญาณมอดูเลตเป็น Percentage หรือค่าของสัญญาณต้องอยู่ระหว่าง 0 ถึง 100 แต่เนื่องสัญญาณมอดูเลตที่รับมามีค่าตั้งแต่ -1 ถึง 1 ถึงต้องทำการคูณ กับ 50 แล้วบวก ด้วย 50 เพื่อให้สัญญาณดังกล่าวมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 100 จากนั้นจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับกับ สัญญาณพาหะสามเหลี่ยม แล้วจึงได้สัญญาณควบคุมการทำงานสวิตช์แต่ละตัวส่งออกสู่วงจรรีบส่ง สัญญาณ PWM ที่แสดงในหัวข้อ 3.1.2.7 โดยแผนภาพการสร้างบล็อกเปรียบเทียบสัญญาณขับสวิตช์ PWM แสดงดังรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 ชุดเปรียบเทียบสัญญาณขับสวิตช์ (PWM Box)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การจำลองผลการทำงาน

4.1 ตัวแปรควบคุมสำหรับการจำลองผลการทำงาน

เนื้อหาในทำนนี้เป็นการจำลองผลการทำงานของอินเวอร์เตอร์แบบห้ากึ่ง เพื่อยืนยันว่ามีความเป็นไปได้ตามทฤษฎีว่าสามารถควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองตัวในเวลาเดียวกันได้ในสภาวะต่าง ๆ โดยใช้การจำลองผลผ่านโปรแกรม MATLAB/Simulink เวอร์ชัน 2014a โดยค่าพารามิเตอร์สำหรับการจำลองผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 พิกัดมอเตอร์เหนี่ยวนำสำหรับการจำลองผล

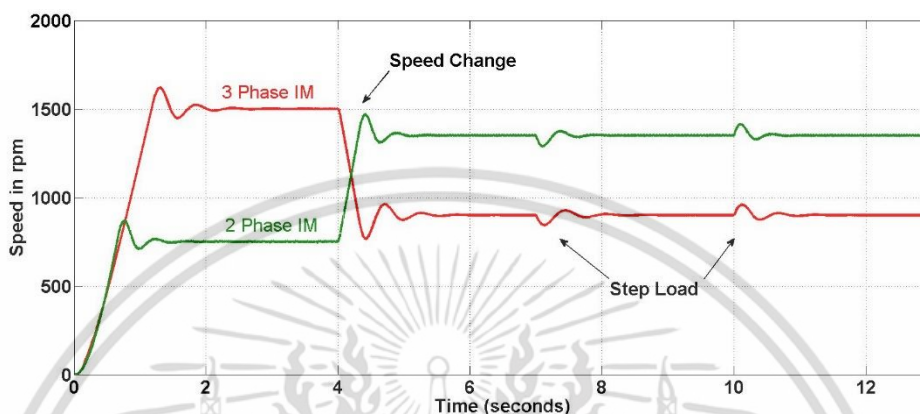
ชนิดของมอเตอร์	มอเตอร์ตัวที่ 1	มอเตอร์ตัวที่ 2
	มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส	มอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส
พิกัดกำลัง (W)	250	370
พิกัดแรงดัน (V)	400/230	230
ความเร็วที่พิกัด (rpm)	1350	1400
จำนวนขั้ว (pole), ความถี่ (Hz)	4, 50	4, 50
อัตราส่วนขดลวดช่วยต่อขดลวดหลัก	-	1.304
ค่าแรงดันดีซีบัส (V)	600	
ความถี่สวิตซ์ (Hz)	5000	

4.2 การจำลองผลการทำงาน

การจำลองผลการทำงานจะเป็นการควบคุมให้มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสเริ่มต้นขับเคลื่อนที่ความเร็วรอบ 1500 rpm (100%) แล้วจึงทำการลดความเร็วเหลือ 900 rpm (60%) จากนั้นทำการเพิ่มภาระทางกลขนาด 1 Nm และปลดภาระทางกลในเวลาต่อมา ในส่วนของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสจะเริ่มต้นขับเคลื่อนที่ความเร็ว 750 rpm (50%) จากนั้นทำการเพิ่มความเร็วเป็น 1350 rpm (90%) และมีการเพิ่มและปลดภาระทางกลขนาด 0.5 Nm

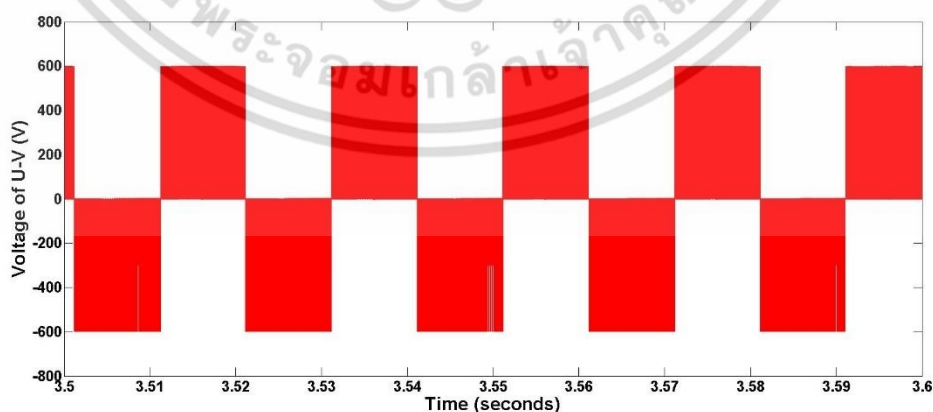
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสและมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสที่จำลองผลได้แสดงดังรูปที่ 4.1 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสและสองเฟสด้วยอินเวอร์เตอร์แบบห้ากึ่งสามารถทำได้ ไม่ว่าจะเป็นการเปลี่ยนแปลงความเร็ว การกลับทิศทาง การหมุน การเพิ่มหรือปลดภาระทางกลออก



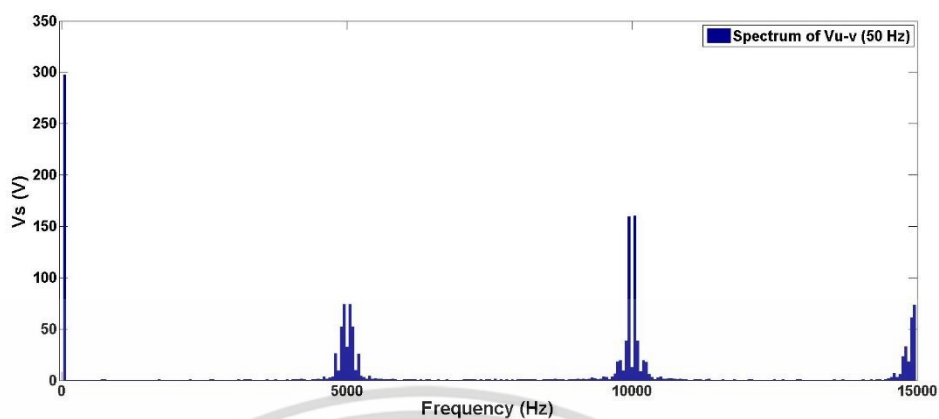
รูปที่ 4.1 ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่สภาวะต่างๆ

เมื่อพิจารณาค่าของแรงดันที่ตกคร่อมมอเตอร์ที่เฟส U-V จะได้ผลของแรงดันขณะที่มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วคงที่ที่ 1500 rpm แสดงดังรูปที่ 4.2 และเมื่อนำไปพล็อตสเปกตรัมเพื่อหาองค์ประกอบของแรงดันจะต้องค้ประกอบของแรงดันเฟส U-V ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.2 แรงดันเฟส U-V ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ขณะมีความเร็ว 1500 rpm (100%)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

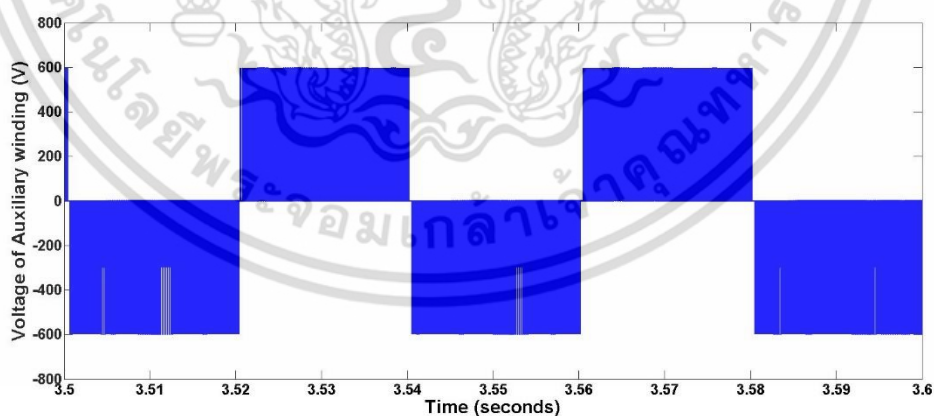


รูปที่ 4.3 องค์ประกอบแรงดันเฟส U-V ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

ขณะมีความเร็ว 1500 rpm (100%)

ผลการหาค่าองค์ประกอบแรงดันเฟส U-V ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสพบว่ามีค่าของแรงดันพื้นฐานเท่ากับ 297 V

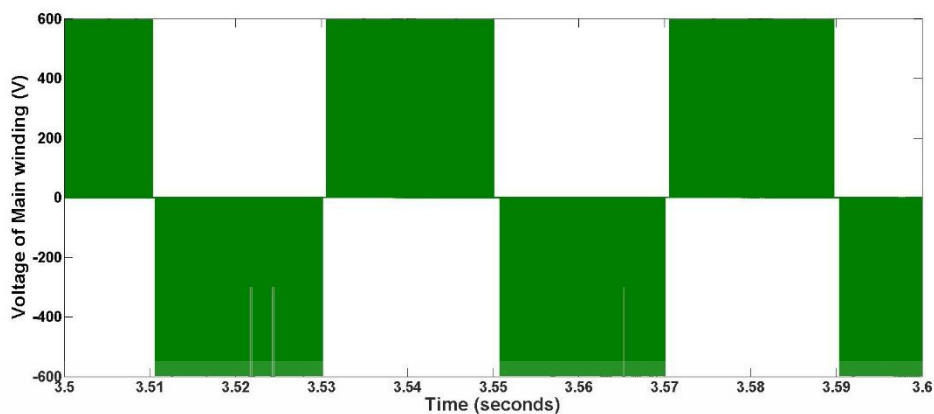
ในส่วนของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส ผลการจำลองค่าแรงดันตกคร่อมขดลวดช่วยและขดลวดหลักแสดงดังรูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.4 แรงดันขดลวดช่วยและขดลวดหลักของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส

ขณะมีความเร็ว 750 rpm (50%)

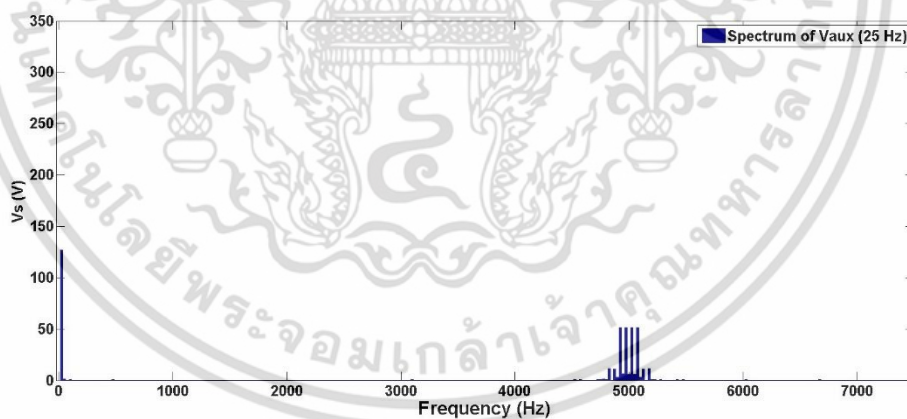
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 แรงดันขดลวดช่วยและขดลวดหลักของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส

ขณะมีความเร็ว 750 rpm (50%)

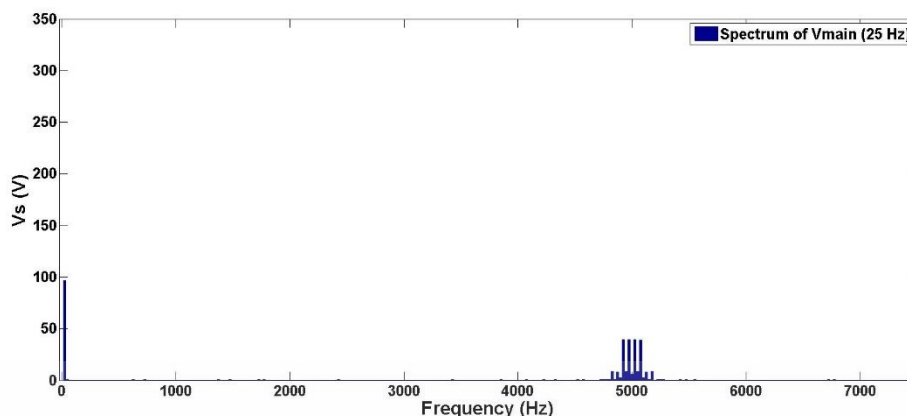
และเมื่อนำไปพล็อตสเปกตรัมเพื่อหาค่าประกอบของแรงดันจะได้องค์ประกอบของแรงดันขดลวดช่วยและขดลวดหลักของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสแสดงดังรูปที่ 4.6 และ 4.7 ตามลำดับ



รูปที่ 4.6 องค์ประกอบแรงดันขดลวดช่วยของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส

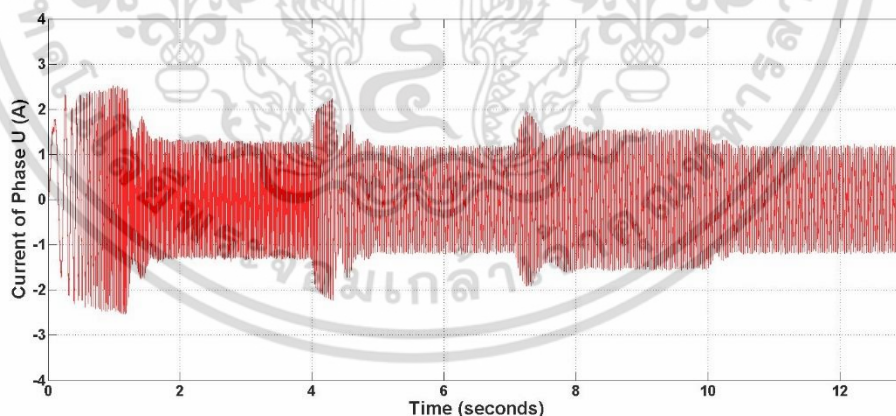
ขณะมีความเร็ว 750 rpm (50%)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 องค์ประกอบแรงดันขดลวดหลักของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส
ขณะมีความเร็ว 750 rpm (50%)

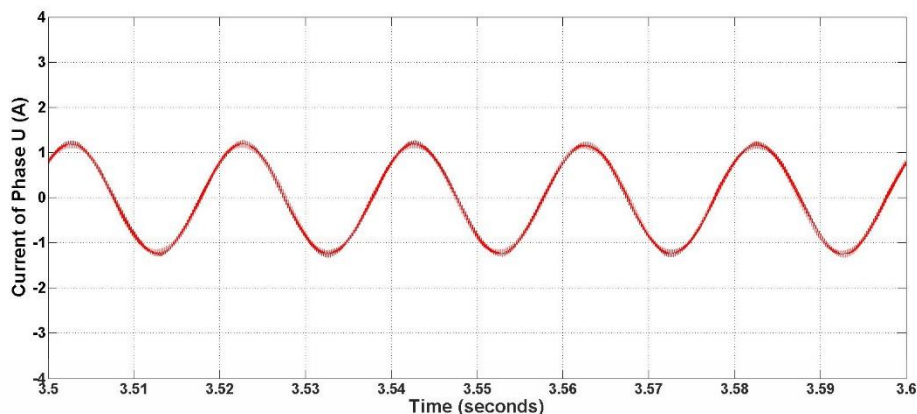
จากผลองค์ประกอบของแรงดันของขดลวดช่วยและขดลวดหลักที่แสดงดังในรูปที่ 4.6 และ 4.7 มีค่าแรงดันพื้นฐานเท่ากับ 126 V และ 97 V ตามลำดับ ซึ่งมีสัดส่วนของแรงดันที่ขดลวดช่วยต่อขดลวดหลักประมาณ 1.3 เท่า เป็นไปตามที่ได้ทำการกำหนดจากค่ามุมต่างเฟส ดังหัวข้อที่ 2.5.2.1 ซึ่งได้แสดงให้เห็นว่าค่าของมุมต่างเฟสสามารถเป็นตัวกำหนดอัตราส่วนของขดลวดทั้งสองได้ ค่าของกระแสที่เฟส U ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่สถานะต่างๆตลอดการทำงานแสดงดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 กระแสเฟส U ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

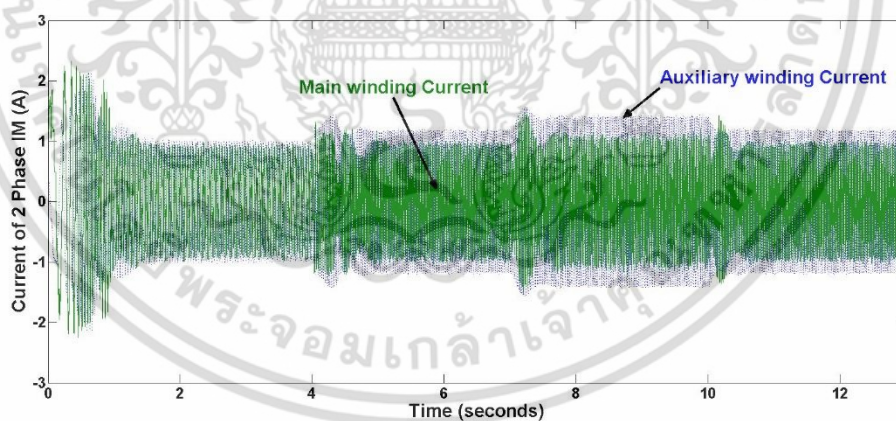
จากรูปที่ 4.8 พิจารณาเฉพาะช่วงเวลาที่ 4 วินาที (มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสหมุนด้วยความเร็ว 1500 rpm, 50Hz) รูปกระแสเฟส U ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบขยายแสดงดังรูปที่ 4.9 พบว่ากระแสมีความถี่เท่ากับ 50 Hz (1 คาบเวลาเท่ากับ 20 ms หรือ 2 ช่อง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



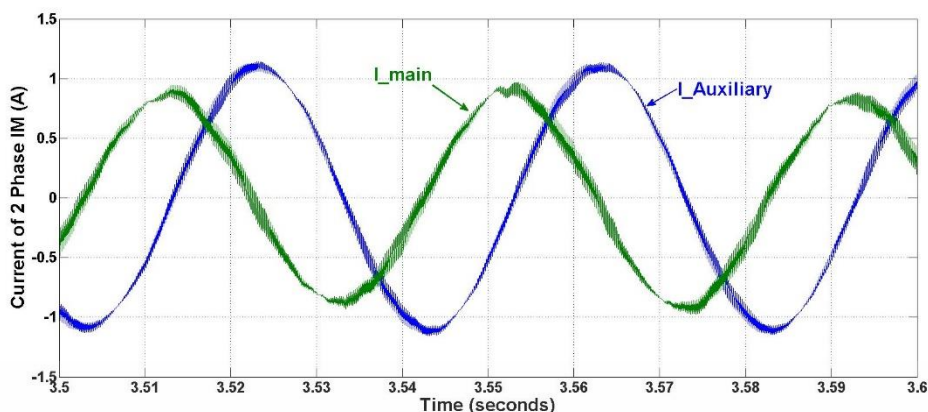
รูปที่ 4.9 กระแสเฟส U ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ขณะมีความเร็ว 1500 rpm (100%)

ค่าของกระแสขดลวดช่วยและกระแสขดลวดหลักของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสตลอดการทำงานที่แสดงดังรูปที่ 4.10 เมื่อพิจารณาเฉพาะช่วงเวลา 4 วินาที (มอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสหมุนด้วยความเร็ว 750 rpm, 25Hz) รูปกระแสขดลวดช่วยและขดลวดหลักแบบขยายแสดงดังรูปที่ 4.11 ซึ่งจะพบว่ากระแสมีความถี่เท่ากับ 25 Hz (1 คาบเวลาเท่ากับ 40 ms หรือ 4 ช่อง)



รูปที่ 4.10 กระแสขดลวดช่วยและขดลวดหลักของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 กระแสขดลวดช่วยและขดลวดหลักของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส
ขณะมีความเร็ว 750 rpm (50%)

4.3 สรุปผลการจำลองการทำงาน

จากผลการจำลองการทำงานข้างต้นแสดงให้เห็นว่าหลักการควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสองตัวพร้อมกันผ่านอินเวอร์เตอร์แบบห้ากึ่งโดยใช้หลักการการรวมสัญญาณมอดูเลตจาก 6 สัญญาณให้เหลือ 5 สัญญาณ สามารถควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองตัวให้มีความเร็วคงที่ได้ที่สภาวะเริ่มออกตัว การเปลี่ยนแปลงความเร็ว รวมถึงการเพิ่มและลดภาระทางกล มอเตอร์เหนี่ยวนำทั้งสองก็ยังสามารถควบคุมความเร็วให้คงที่ตามค่าที่ต้องการได้

บทที่ 5

ผลการทดลอง

5.1 ตัวแปรควบคุมสำหรับการทดลองผลการทำงาน

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสองตัวรวมถึงความสามารถในการควบคุมความเร็วรอบให้คงที่ ที่สภาวะต่าง ๆ โดยการทดลองจะใช้อุปกรณ์และการควบคุมตัวแปรดังตารางที่ 5.1

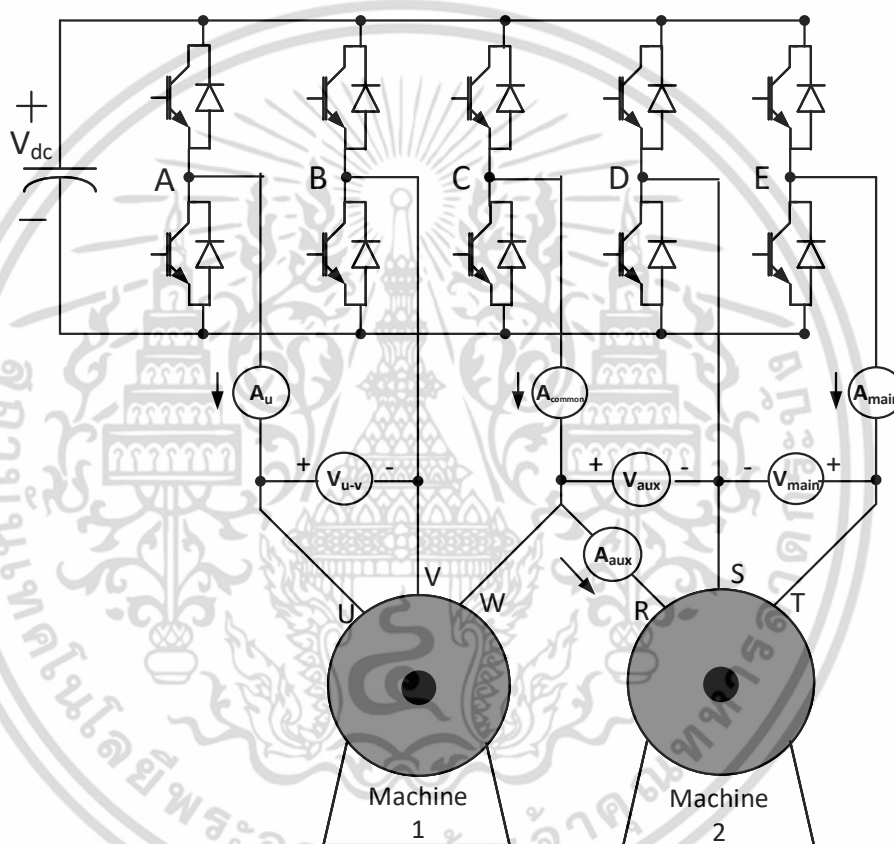
ตารางที่ 5.1 พิกัดมอเตอร์เหนี่ยวนำและการตั้งค่าอุปกรณ์การทดลอง

ชนิดของมอเตอร์	มอเตอร์ตัวที่ 1	มอเตอร์ตัวที่ 2
	มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส	มอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส
พิกัดกำลัง (W)	250	370
พิกัดแรงดัน (V)	400/200	230
พิกัดกระแส (A)	0.76/1.32	2.6
ความเร็วที่พิกัด (rpm)	1350	1400
จำนวนขั้ว (pole), ความถี่ (Hz)	4, 50	4, 50
ความละเอียดของ Speed Encoder (Pulse/loop)	600	600
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของมูเลอร์รับโพล (mm)	88	88
ค่าแรงดันดีซีบัส (V)	600	
ความถี่สวิทชิง (Hz)	5000	
Oscilloscope	DL1602 จำนวน 3 ตัว	
Amp meter	LEM LA55-p จำนวน 4 ชุด	

โดยการทดลองจะทำการต่อมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบเดลต้า และการเชื่อมต่อวงจรทั้งหมดจะเป็นดังรูปที่ 5.1 ซึ่งในส่วนของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสจะมีการวัดค่าของกระแสที่ไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เข้ามอเตอร์ในเฟส U และวัดแรงดันที่กึ่ง A-B ซึ่งเป็นการวัดแรงดันไลน์-ไลน์ ที่ขั้ว U-V ของมอเตอร์ เหนี่ยวนำสามเฟส ในส่วนของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสจะทำการวัดค่าแรงดันและกระแสที่ไหลเข้า มอเตอร์ที่ขั้วขดลวดช่วยและขดลวดหลัก ซึ่งเป็นการวัดแรงดันตกคร่อมระหว่างกึ่ง C-D และ E-D ตามลำดับ สุดท้ายได้ทำการวัดค่ากระแสที่กึ่งร่วมของมอเตอร์ทั้งสองที่กึ่ง C ซึ่งเป็นการรวมกันของ กระแสเฟส W ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสและกระแสที่ขดลวดช่วยของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส ผลการทดลองการควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำสองตัวโดยใช้อินเวอร์เตอร์แบบห้ากึ่ง ที่สภาวะ ต่างๆ เป็นดังต่อไปนี้



รูปที่ 5.1 การเชื่อมต่ออุปกรณ์วัดค่าแรงดันและกระแส

5.2 การควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ 2 ตัว แบบไม่มีภาระทางกล

การทดลองควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสและสองเฟสแบบไม่มีภาระทางกล นั้นจะทำการทดลองโดยการปรับความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำแต่ละตัวไปที่ระดับความเร็วต่างๆ ดังต่อไปนี้

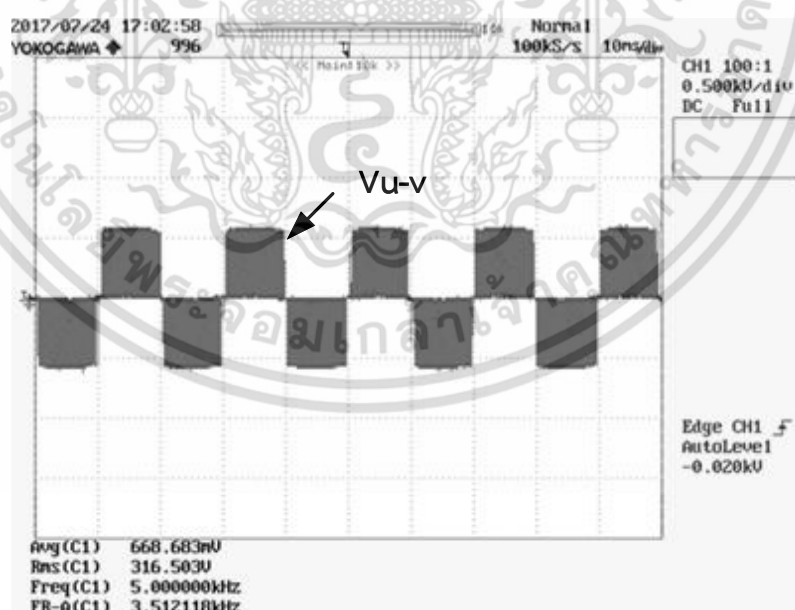
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ 1500 rpm และมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส 1500 rpm
- มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ 900 rpm และมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส 1350 rpm
- มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ 1200 rpm และมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส 0 rpm
- มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ 0 rpm และมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส 1050 rpm

จากนั้นทำการวัดผลของแรงดันและกระแสที่เกิดขึ้นและทำการเปรียบเทียบกับกรณีที่มีการเพิ่มภาระทางกลในลำดับต่อไป

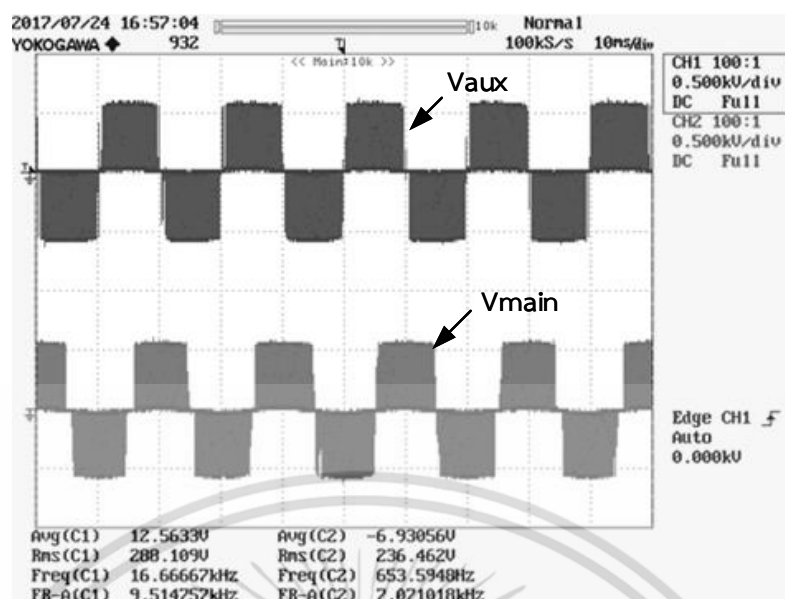
5.2.1 ชับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ 1500 rpm (100%) และมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสที่ 1500 rpm (100%)

เมื่อมอเตอร์เหนี่ยวนำทั้งสองขับเคลื่อนที่ความเร็ว 1500 rpm (100%) ผลของแรงดันที่ระดับเบิ้ลยูเอ็มที่ตกร่อมขดลวด U-V ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแสดงดังรูปที่ 5.2 และผลของแรงดันที่ระดับเบิ้ลยูเอ็มที่ตกร่อมขดลวดช่วยและขดลวดหลักของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสแสดงดังรูปที่ 5.3



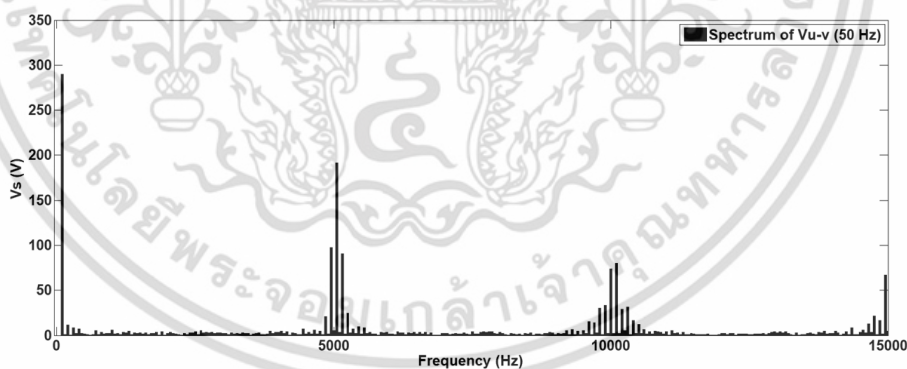
รูปที่ 5.2 แรงดันชั่ว U-V ที่ความเร็ว 1500 rpm (100%) แบบไม่มีภาระทางกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



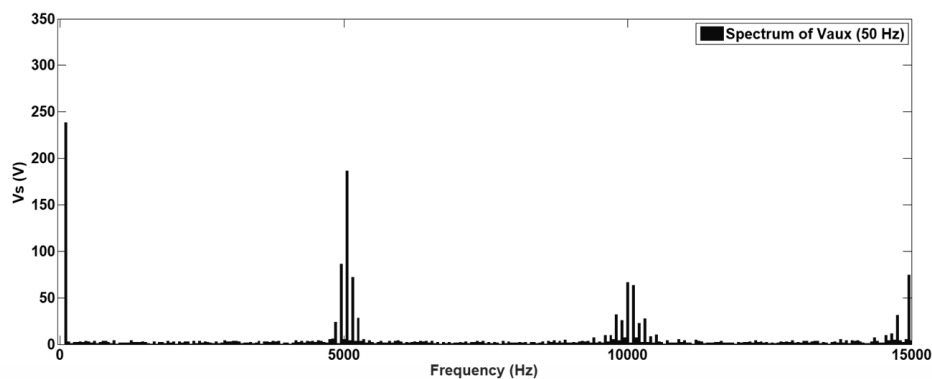
รูปที่ 5.3 แรงดันขดลวดช่วยและขดลวดหลักที่ความเร็ว 1500 rpm (100%) แบบไม่มีภาระทางกล

เมื่อนำค่าแรงดันที่ชั่ว U-V และแรงดันตกคร่อมขดลวดช่วยและขดลวดหลักไปพล็อตสเปกตรัมเพื่อหาค่าประกอบที่มีความถี่ต่างๆ จะได้ผลดังต่อไปนี้

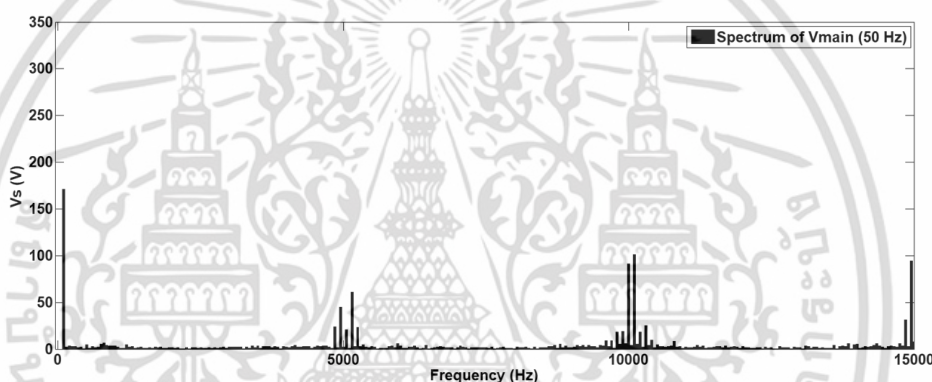


รูปที่ 5.4 องค์ประกอบแรงดันชั่ว U-V ที่ความเร็ว 1500 rpm (100%) แบบไม่มีภาระทางกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



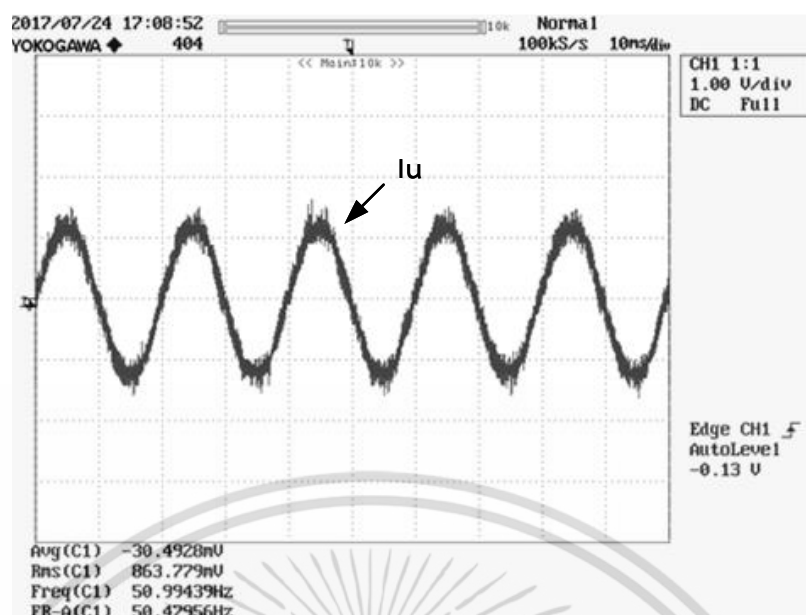
รูปที่ 5.5 องค์ประกอบแรงดันขดลวดช่วยที่ความเร็ว 1500 rpm (100%) แบบไม่มีภาระทางกล



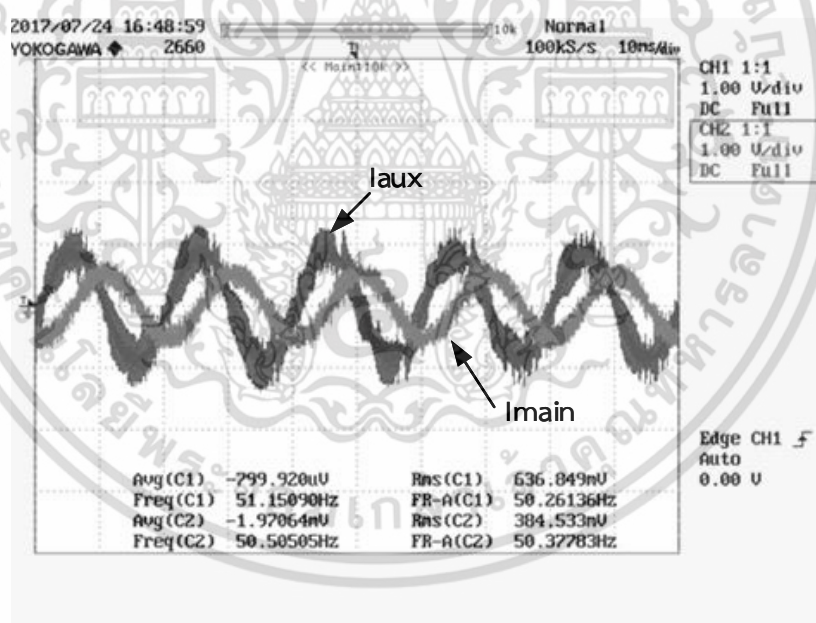
รูปที่ 5.6 องค์ประกอบแรงดันขดลวดหลักที่ความเร็ว 1500 rpm (100%) แบบไม่มีภาระทางกล

ค่ากระแสที่เกิดขึ้นที่เฟส U ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแสดงดังรูปที่ 5.7 กระแสที่ขดลวดช่วยและขดลวดหลักของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสแสดงดังรูปที่ 5.8 ค่ากระแสที่กึ่งร่วมของมอเตอร์ทั้งสองแสดงดังรูปที่ 5.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

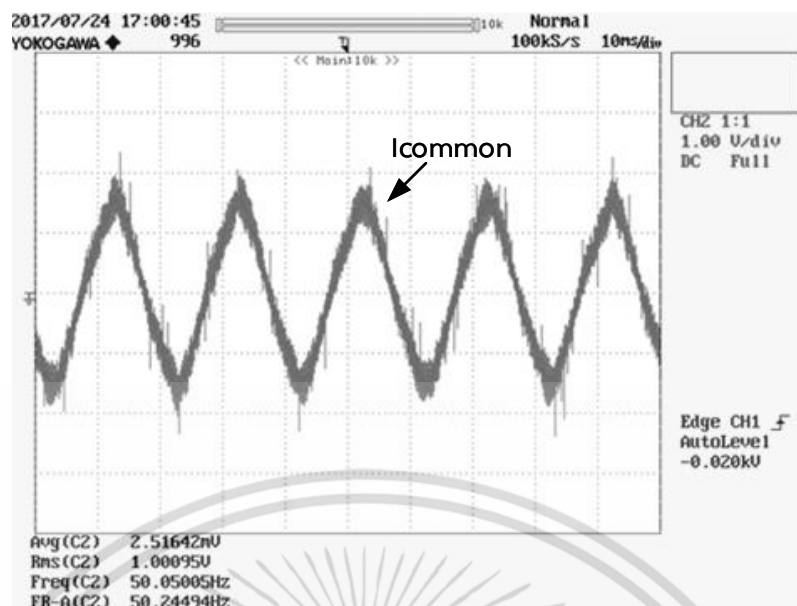


รูปที่ 5.7 กระแสเฟส U ที่ความเร็ว 1500 rpm (100%) แบบไม่มีภาระทางกล



รูปที่ 5.8 กระแสที่ขดลวดช่วยและขดลวดหลักที่ 1500 rpm (100%) แบบไม่มีภาระทางกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.9 กระแสทั้งรวมขณะมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ 1500 rpm (100%) และมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสที่ 1500 rpm (100%) แบบไม่มีภาระทางกล

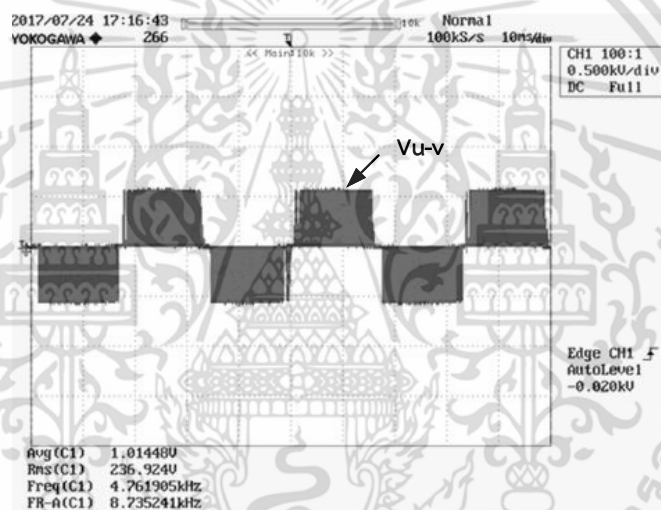
จากผลการทดลองดังกล่าวสามารถนำมาสรุปค่ากระแสและแรงดันได้ดังตารางที่ 5.2 ตารางที่ 5.2 ค่าแรงดันและกระแสในขณะมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ 1500 rpm (100%) และมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส 1500 rpm (100%) แบบไม่มีภาระทางกล

แรงดัน (V)	เฟส U-V	ขดลวดช่วย	ขดลวดหลัก	
	290.16	238.08	170.58	
กระแส (A)	เฟส U	ขดลวดช่วย	ขดลวดหลัก	ทั้งหมด
	0.863	0.799	0.636	1.0

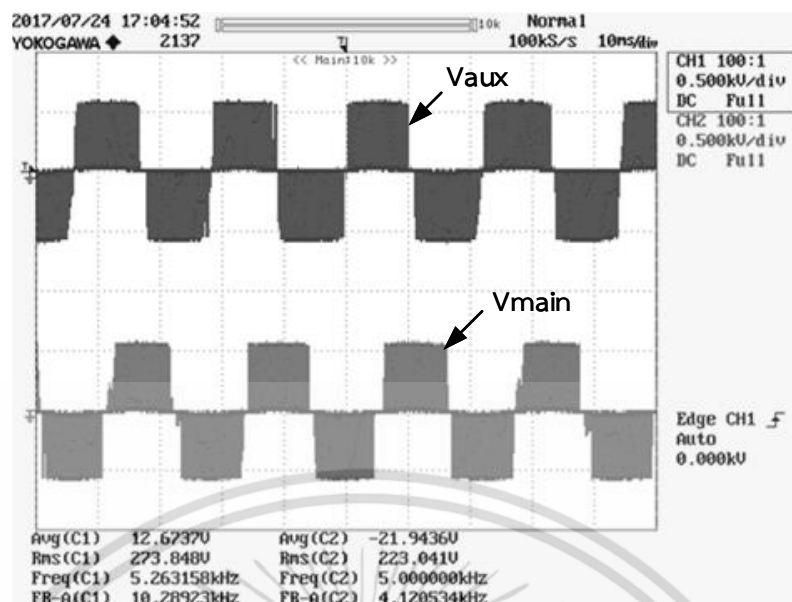
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.2 ขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ 900 rpm (60%) และมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสที่ 1350 rpm (90%)

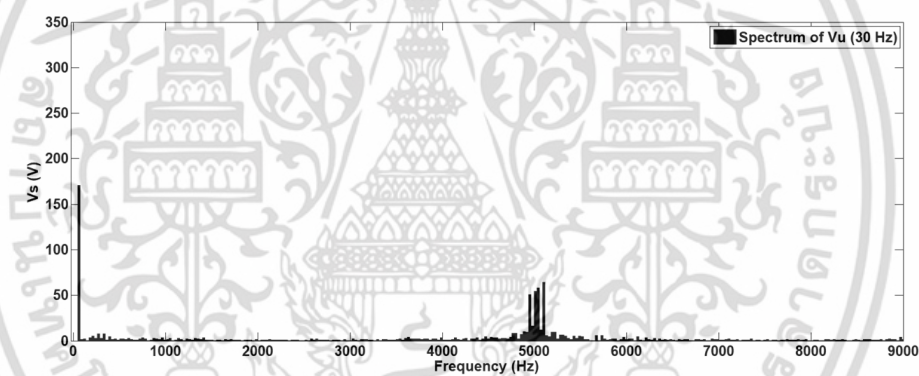
เมื่อมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขับเคลื่อนที่ความเร็ว 900 rpm (60%) ผลของแรงดันที่ระดับเบ็ลยูเอ็มที่ตกคร่อมขดลวด U-V ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแสดงดังรูปที่ 5.10 และเมื่อมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสขับเคลื่อนที่ความเร็ว 1350 rpm (90%) ผลของแรงดันที่ระดับเบ็ลยูเอ็มที่ตกคร่อมขดลวดช่วยและขดลวดหลักของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสแสดงดังรูปที่ 5.11 เมื่อนำค่าแรงดันที่ขั้ว U-V และแรงดันตกคร่อมขดลวดช่วยและขดลวดหลักไปพล็อตสเปกตรัมเพื่อหาค่าประกอบที่มีความถี่ต่าง ๆ จะได้ผลดังรูปที่ 5.12 และ 5.13 ตามลำดับ



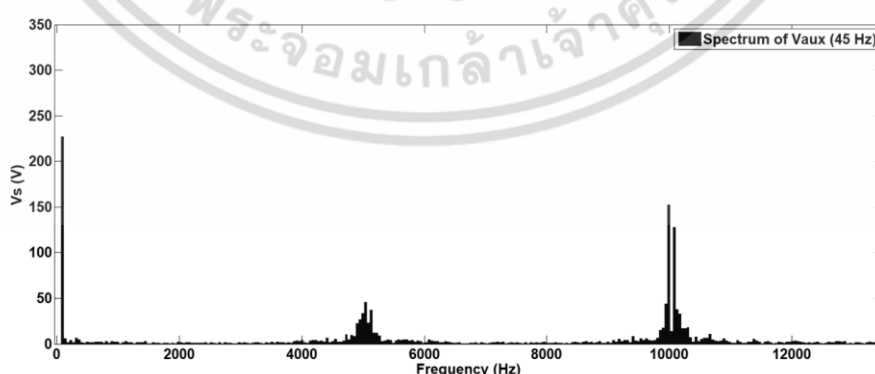
รูปที่ 5.10 แรงดันขั้ว U-V ที่ความเร็ว 900 rpm (60%) แบบไม่มีภาระทางกล



รูปที่ 5.11 แรงดันขดลวดช่วยและขดลวดหลักที่ความเร็ว 1350 rpm (90%) แบบไม่มีภาระทางกล

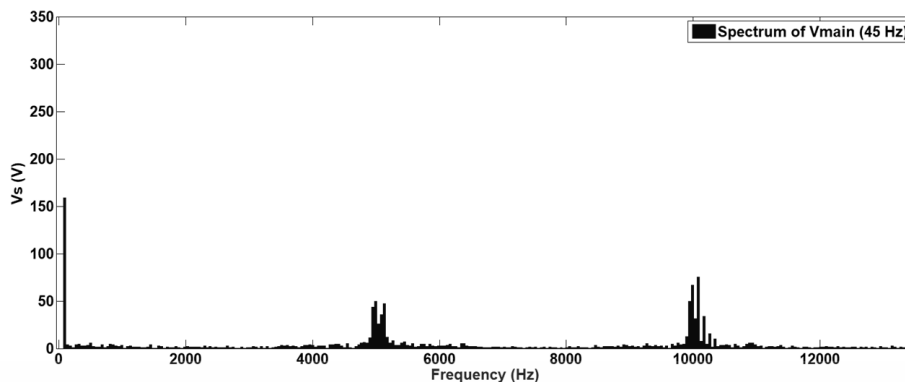


รูปที่ 5.12 องค์ประกอบแรงดันขั้ว U-V ที่ 900 rpm (60%) แบบไม่มีภาระทางกล



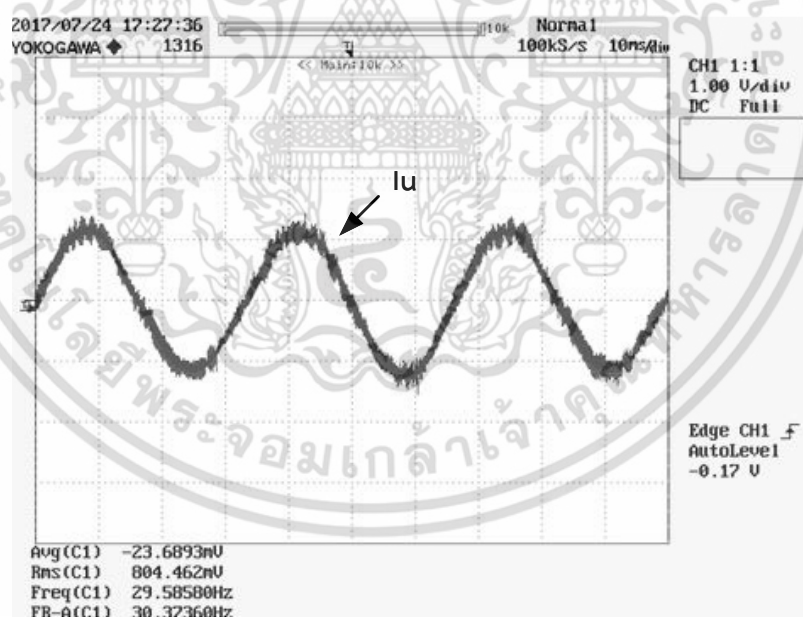
รูปที่ 5.13 องค์ประกอบแรงดันขดลวดช่วยของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสที่ 1350 rpm (90%) แบบไม่มีภาระทางกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



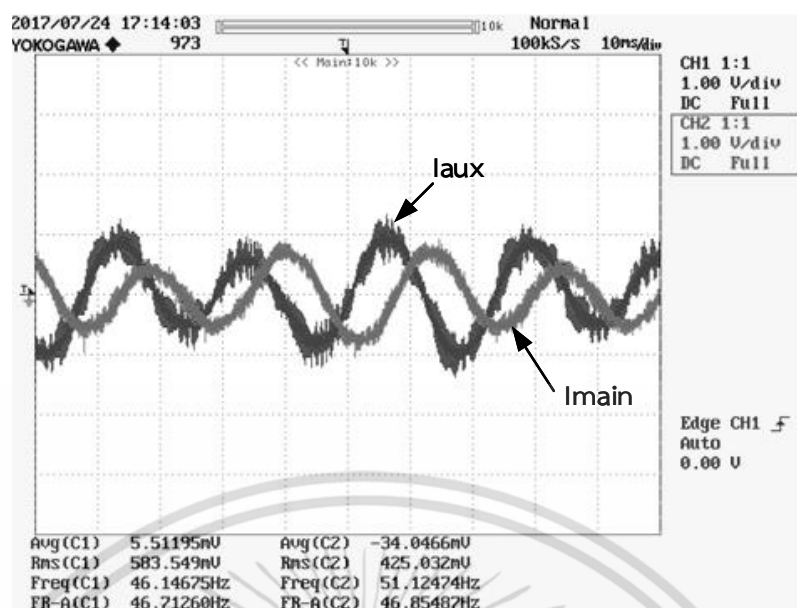
รูปที่ 5.14 องค์ประกอบแรงดันขดลวดหลักที่ความเร็วรอบ 1350 rpm (90%) แบบไม่มีภาระทางกล

ค่ากระแสที่เกิดขึ้นที่เฟส U ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแสดงดังรูปที่ 5.15 กระแสที่ขดลวดช่วยและขดลวดหลักของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสแสดงดังรูปที่ 5.16 ค่ากระแสที่กึ่งร่วมของมอเตอร์ทั้งสองแสดงดังรูปที่ 5.17

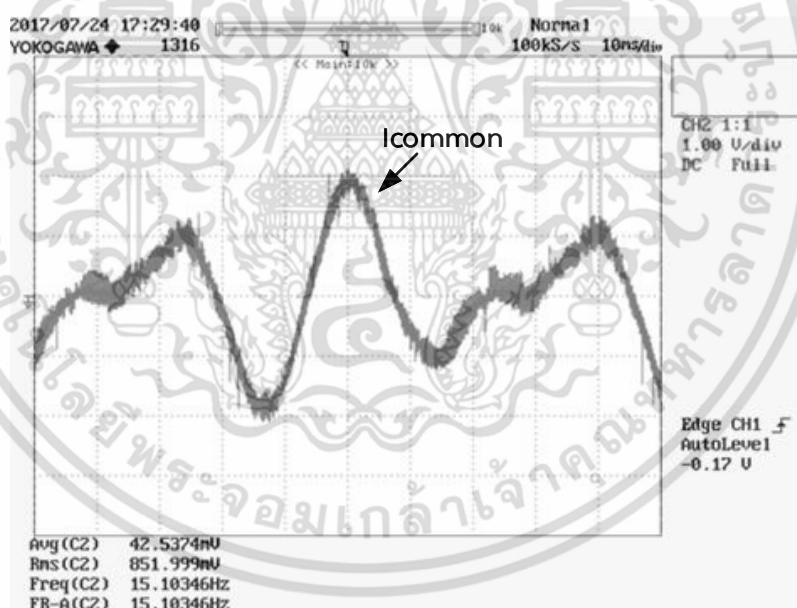


รูปที่ 5.15 กระแสเฟส U ที่ความเร็ว 900 rpm (60%) แบบไม่มีภาระทางกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.16 กระแสที่ขดลวดช่วยและขดลวดหลักที่ 1350 rpm (90%) แบบไม่มีภาระทางกล



รูปที่ 5.17 กระแสที่ร่วมขณะมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ 900 rpm (60%) และมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสที่ 1350 rpm (90%) แบบไม่มีภาระทางกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

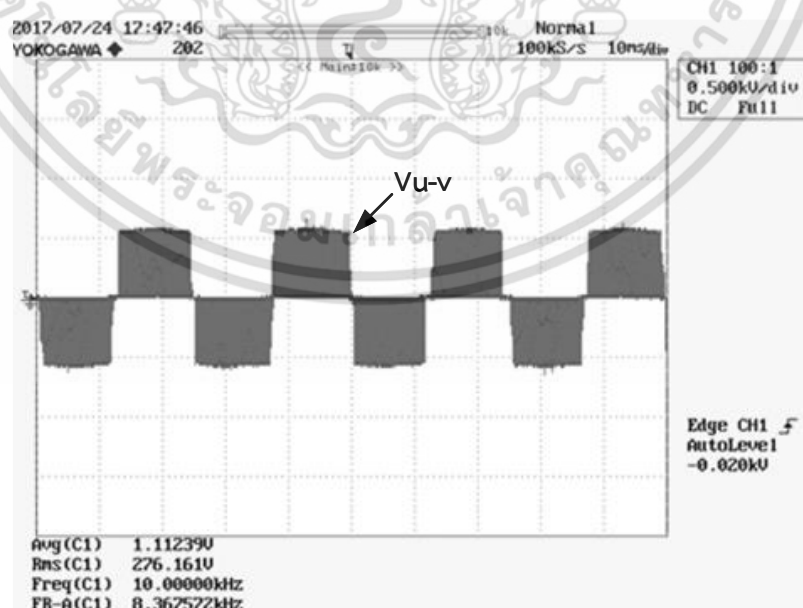
จากผลการทดลองดังกล่าวสามารถนำมาสรุปค่ากระแสและแรงดันได้ดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ค่าแรงดันและกระแสในขณะมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ 900 rpm (60%) และมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส 1350 rpm (90%) แบบไม่มีภาระทางกล

แรงดัน (V)	เฟส U-V	ขดลวดช่วย	ขดลวดหลัก	
	170.55	227.09	158.83	
กระแส (A)	เฟส U	ขดลวดช่วย	ขดลวดหลัก	กิ่งร่วม
	0.804	0.583	0.425	0.851

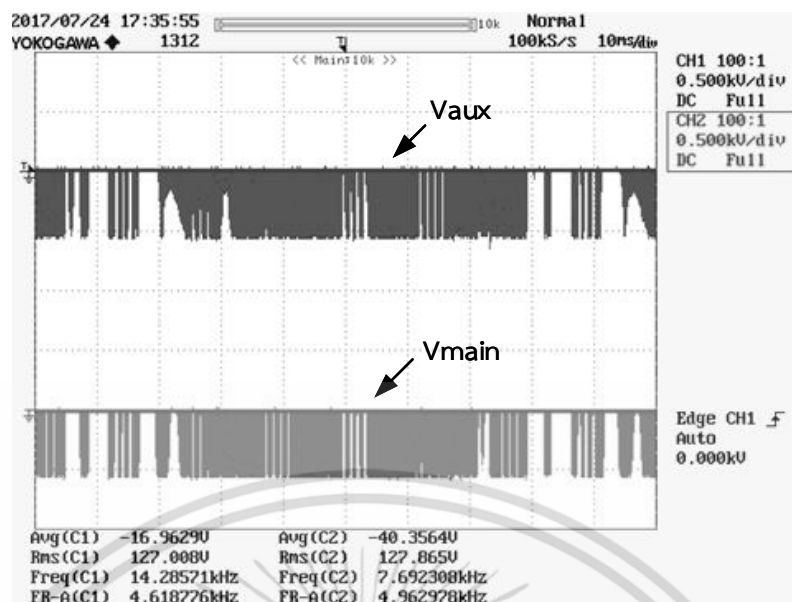
5.2.3 ขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ 1200 rpm (80%) และมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสที่ 0 rpm (0%)

เมื่อมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขับเคลื่อนที่ความเร็ว 1200 rpm (80%) ผลของแรงดันที่ระดับเบิ้ลยูเอ็มที่ตกรวมขดลวด U-V ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแสดงดังรูปที่ 5.18 และเมื่อมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสขับเคลื่อนที่ความเร็ว 0 rpm (0%) ผลของแรงดันที่ระดับเบิ้ลยูเอ็มที่ตกรวมขดลวดช่วยและขดลวดหลักของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสแสดงดังรูปที่ 5.19



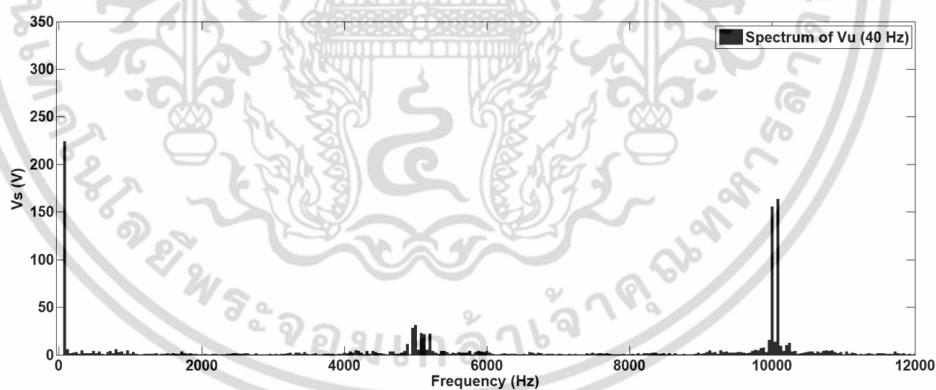
รูปที่ 5.18 แรงดันชั่ว U-V ที่ความเร็ว 1200 rpm (80%) แบบไม่มีภาระทางกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



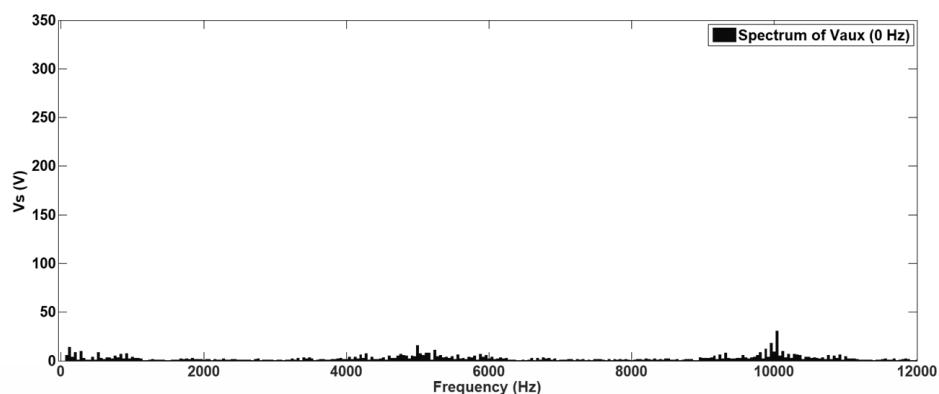
รูปที่ 5.19 แรงดันขดลวดช่วยและขดลวดหลักที่ความเร็ว 0 rpm (0%) แบบไม่มีภาระทางกล

เมื่อนำค่าแรงดันที่เฟส U-V และแรงดันตกคร่อมขดลวดช่วยและขดลวดหลักไปพล็อตสเปกตรัมเพื่อหาค่าประกอบที่มีความถี่ต่างๆได้ผลดังต่อไปนี้

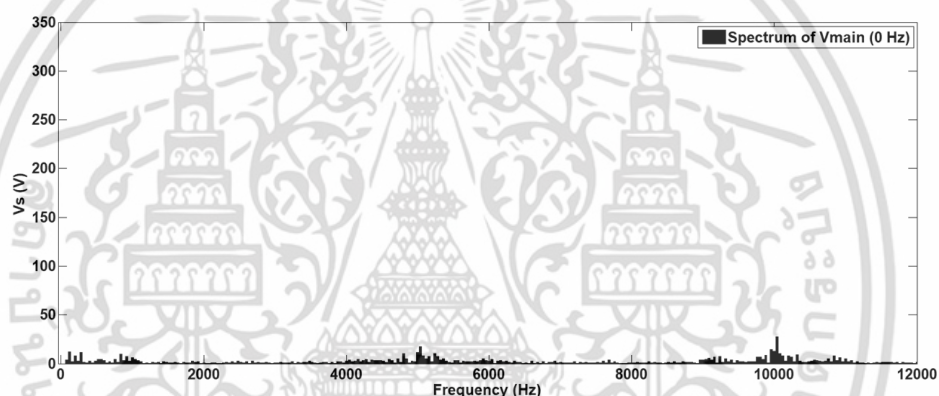


รูปที่ 5.20 องค์ประกอบแรงดันชั่ว U-V ที่ความเร็วรอบ 1200 rpm (80%) แบบไม่มีภาระทางกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



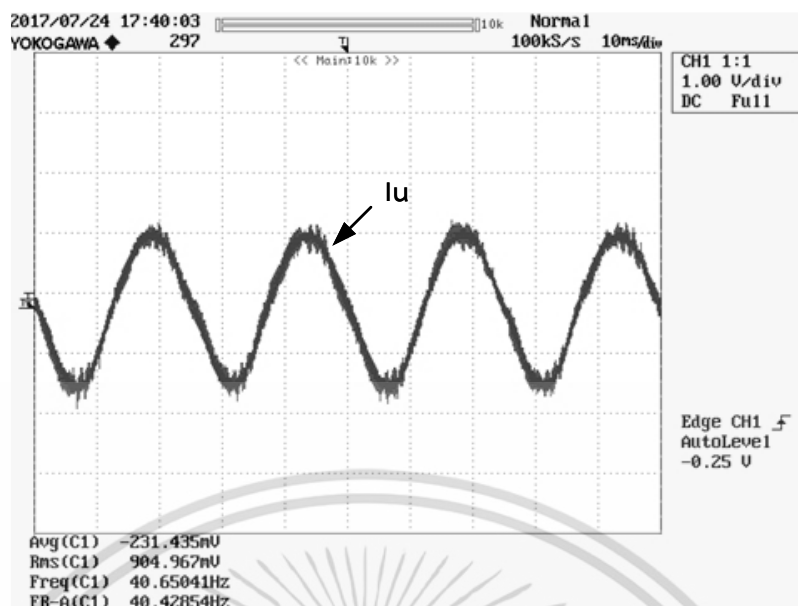
รูปที่ 5.21 องค์ประกอบแรงดันขดลวดช่วยที่ความเร็ว 0 rpm (0%) แบบไม่มีภาระทางกล



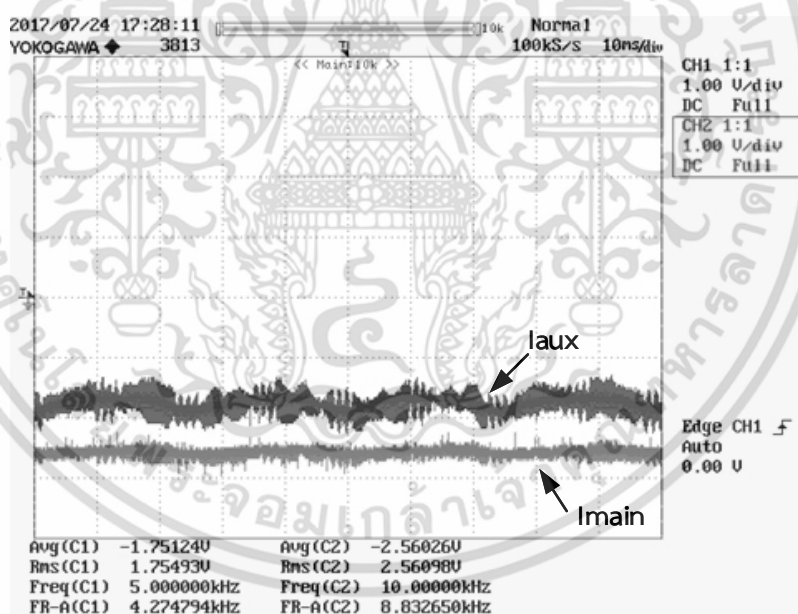
รูปที่ 5.22 องค์ประกอบแรงดันขดลวดหลักที่ความเร็ว 0 rpm (0%) แบบไม่มีภาระทางกล

ค่ากระแสที่เกิดขึ้นที่เฟส U ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแสดงดังรูปที่ 5.23 กระแสที่ขดลวดช่วยและขดลวดหลักของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสแสดงดังรูปที่ 5.24 ค่ากระแสที่กึ่งร่วมของมอเตอร์ทั้งสองแสดงดังรูปที่ 5.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

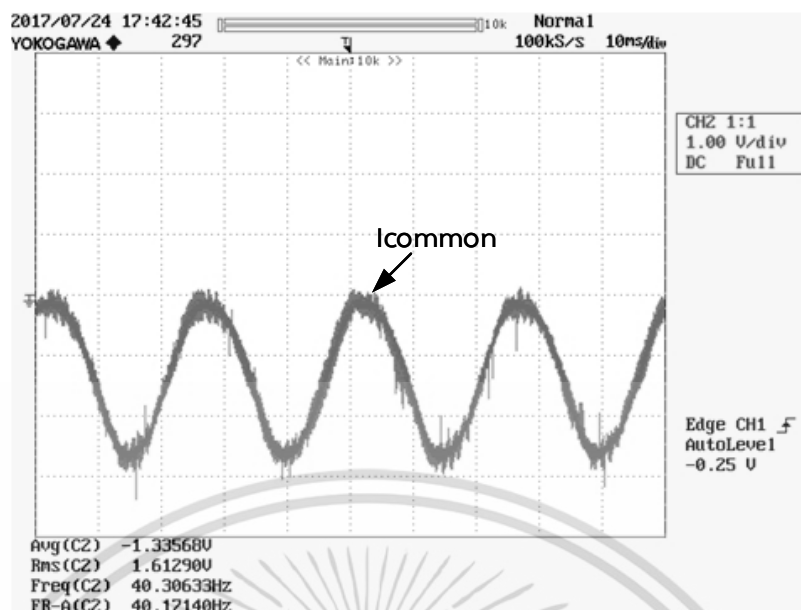


รูปที่ 5.23 กระแสเฟส U ที่ความเร็ว 1200 rpm (80%) แบบไม่มีภาระทางกล



รูปที่ 5.24 กระแสที่ขดลวดช่วยและขดลวดหลักที่ 0 rpm (0%) แบบไม่มีภาระทางกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.25 กระแสกึ่งร่วมขณะมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ 1200 rpm (80%) และมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสที่ 0 rpm (0%) แบบไม่มีภาระทางกล

จากผลการทดลองดังกล่าวสามารถนำมาสรุปค่ากระแสและแรงดันได้ดังตารางที่ 5.4

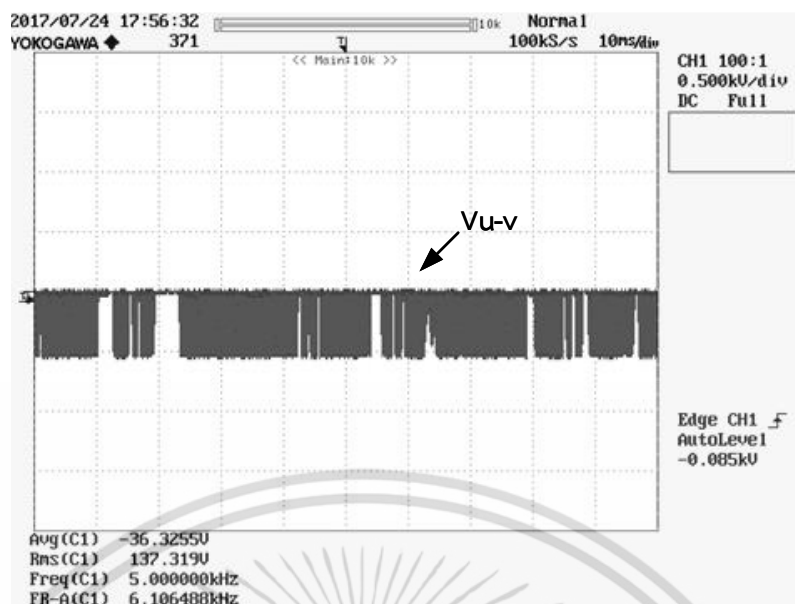
ตารางที่ 5.4 ค่าแรงดันและกระแสในขณะมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ 1200 rpm (80%) และมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส 0 rpm (0%) แบบไม่มีภาระทางกล

แรงดัน (V)	เฟส U-V	ขดลวดช่วย	ขดลวดหลัก	กึ่งร่วม
	223.97	0	0	
กระแส (A)	เฟส U	ขดลวดช่วย	ขดลวดหลัก	กึ่งร่วม
	0.804	0.583	0.425	

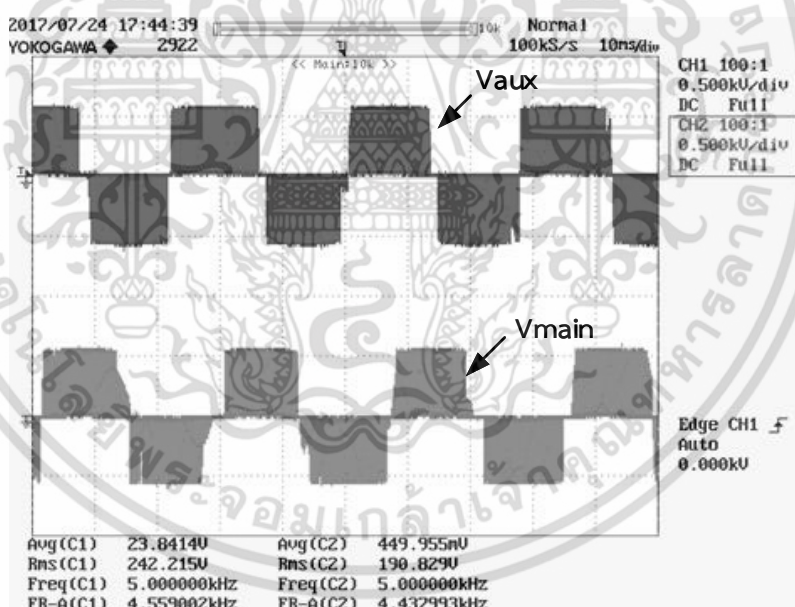
5.2.4 ขั้วเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ 0 rpm (0%) และมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสที่ 1050 rpm (70%)

เมื่อมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขั้วเคลื่อนที่ความเร็ว 0 rpm (0%) ผลของแรงดันที่ดับเบิ้ลยูเอ็มที่ตกรวมขดลวด U-V ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแสดงดังรูปที่ 5.26 และเมื่อมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสขั้วเคลื่อนที่ความเร็ว 1050 rpm (70%) ผลของแรงดันที่ดับเบิ้ลยูเอ็มที่ตกรวมขดลวดช่วยและขดลวดหลักของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสแสดงดังรูปที่ 5.27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



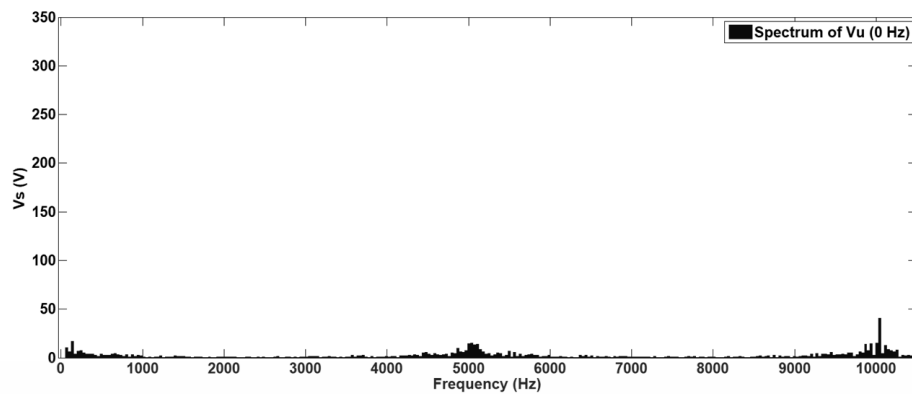
รูปที่ 5.26 แรงดันขั้ว U-V ที่ความเร็ว 0 rpm (0%) แบบไม่มีภาระทางกล



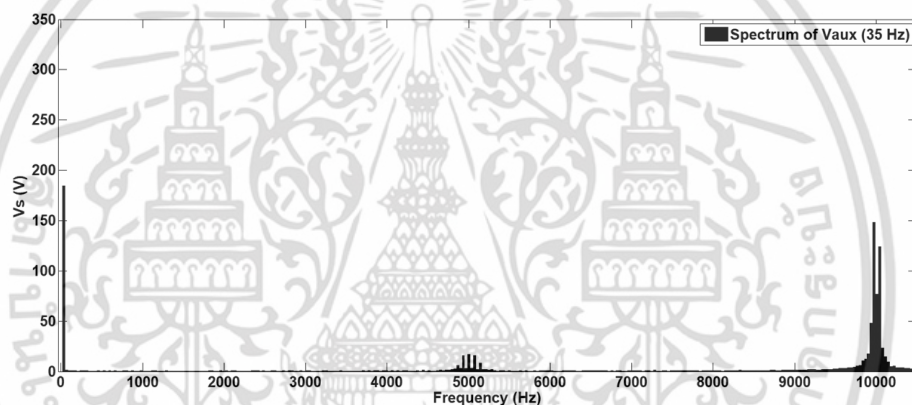
รูปที่ 5.27 แรงดันขดลวดช่วยและขดลวดหลักที่ความเร็ว 1050 rpm (70%) แบบไม่มีภาระทางกล

เมื่อนำค่าแรงดันที่เฟส U-V และแรงดันตกคร่อมขดลวดช่วยและขดลวดหลักไปพล็อตสเปกตรัมเพื่อหาค่าประกอบที่มีความถี่ต่าง ๆ จะได้ผลดังต่อไปนี้

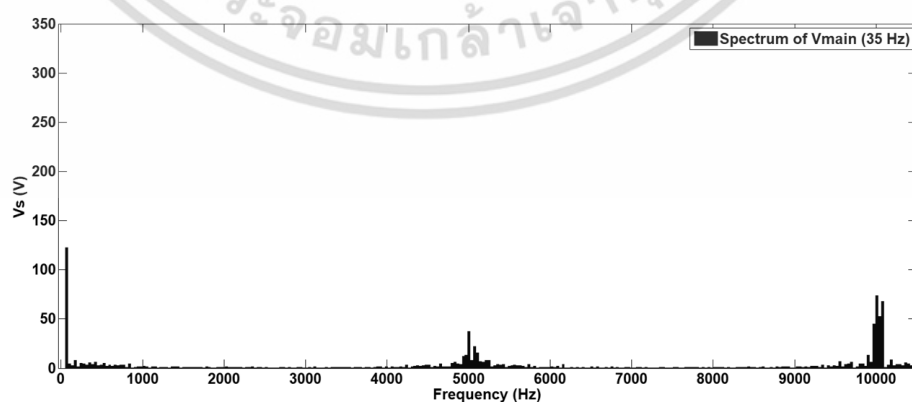
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.28 องค์ประกอบแรงดันชั่ว U-V ที่ความเร็วรอบ 0 rpm (0%) แบบไม่มีภาระทางกล



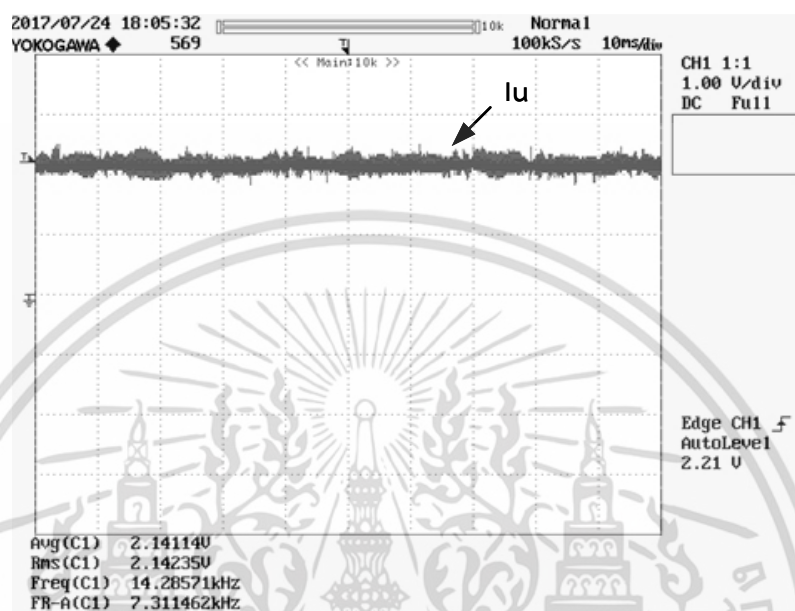
รูปที่ 5.29 องค์ประกอบแรงดันขดลวดช่วยที่ความเร็ว 1050 rpm (70%) แบบไม่มีภาระทางกล



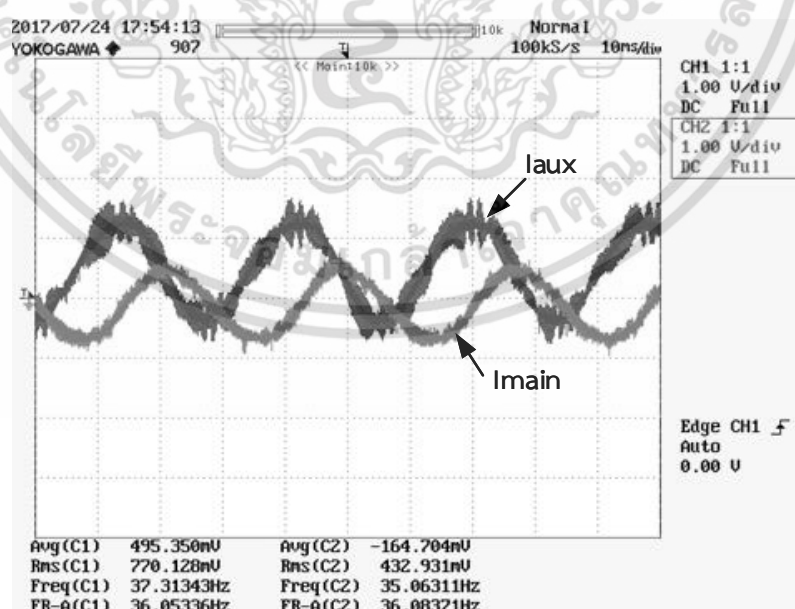
รูปที่ 5.30 องค์ประกอบแรงดันขดลวดหลักที่ความเร็ว 1050 rpm (70%) แบบไม่มีภาระทางกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่ากระแสที่เกิดขึ้นที่เฟส U ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแสดงดังรูปที่ 5.31 กระแสที่
 ขดลวดช่วยและขดลวดหลักของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสแสดงดังรูปที่ 5.32 ค่ากระแสที่กึ่งร่วมของ
 มอเตอร์ทั้งสองแสดงดังรูปที่ 5.33

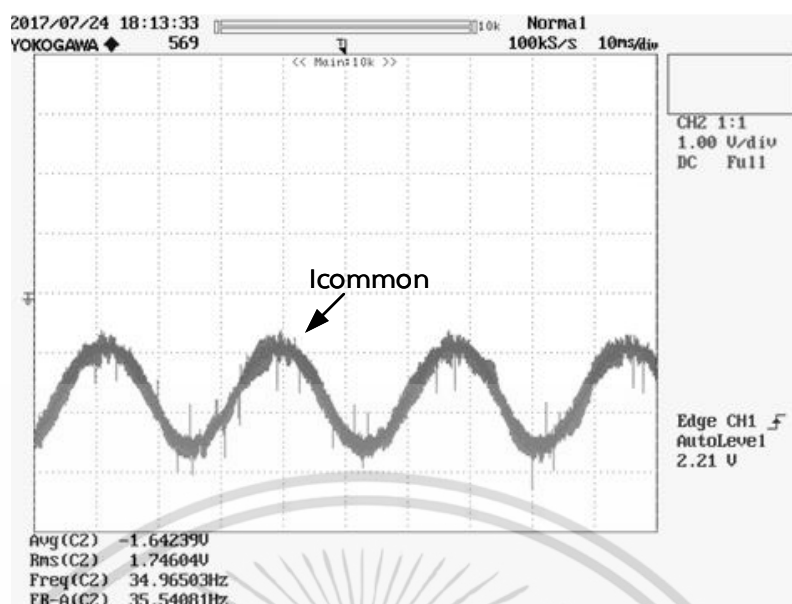


รูปที่ 5.31 กระแสเฟส U ที่ความเร็ว 0 rpm (0%) แบบไม่มีภาระทางกล



รูปที่ 5.32 กระแสที่ขดลวดช่วยและขดลวดหลักที่ 1050 rpm (70%) แบบไม่มีภาระทางกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.33 กระแสกึ่งร่วมขณะมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ 0 rpm (0%) และมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสที่ 1050 rpm (70%) แบบไม่มีภาระทางกล

จากผลการทดลองดังกล่าวสามารถนำมาสรุปค่ากระแสและแรงดันได้ดังตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.5 ค่าแรงดันและกระแสในขณะมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ 0 rpm (0%) และมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส 1050 rpm (70%) แบบไม่มีภาระทางกล

แรงดัน (V)	เฟส U-V	ขดลวดช่วย	ขดลวดหลัก	
	0	114.12	122.59	
กระแส (A)	เฟส U	ขดลวดช่วย	ขดลวดหลัก	กึ่งร่วม
	0.804	0.583	0.425	0.851

5.3 การควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ 2 ตัว แบบมีภาระทางกล

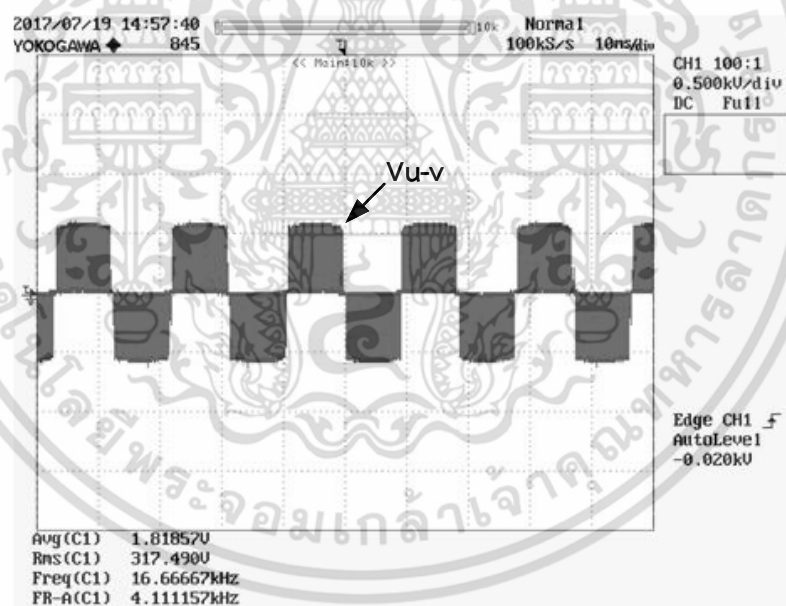
ในหัวข้อนี้จะทำการทดสอบความสามารถในการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำทั้งสองขณะที่มีการรับและปลดภาระทางกล ความเร็วที่ใช้ในการทดลองในแต่ละกรณีจะเป็นความเร็วเดียวกันกับการควบคุมความเร็วแบบไม่มีภาระทางกลในหัวข้อที่ 5.2 ซึ่งจะใช้ภาระทางกลเป็นตุ้ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำหนักคล้องผ่านมู่เลย์ ให้มอเตอร์ทั้งสองรับโหลดขนาดเล็กน้อย โดยมีขนาด 1 Nm สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส และขนาด 0.5 Nm สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส

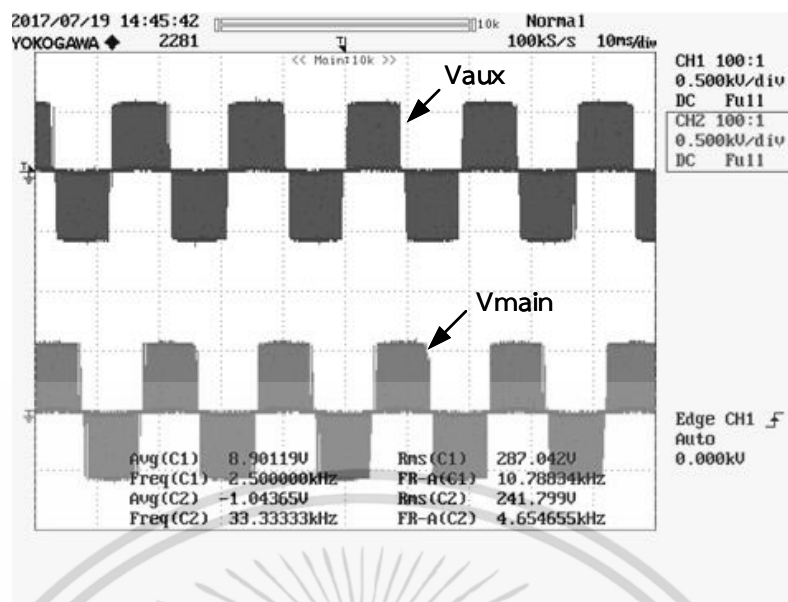
5.3.1 ขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ 1500 rpm (100%) และมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสที่ 1500 rpm (100%) แบบมีภาระทางกล

เมื่อมอเตอร์เหนี่ยวนำทั้งสองขับเคลื่อนที่ความเร็ว 1500 rpm (100%) ทำการเพิ่มภาระทางกลขนาด 1 และ 0.5 Nm ให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสและสองเฟส ตามลำดับ ผลของแรงดันที่ระดับเบิ้ลยูเอ็มที่ตกคร่อมขดลวด U-V ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแสดงดังรูปที่ 5.34 และผลของแรงดันที่ระดับเบิ้ลยูเอ็มที่ตกคร่อมขดลวดช่วยและขดลวดหลักของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสแสดงดังรูปที่ 5.35



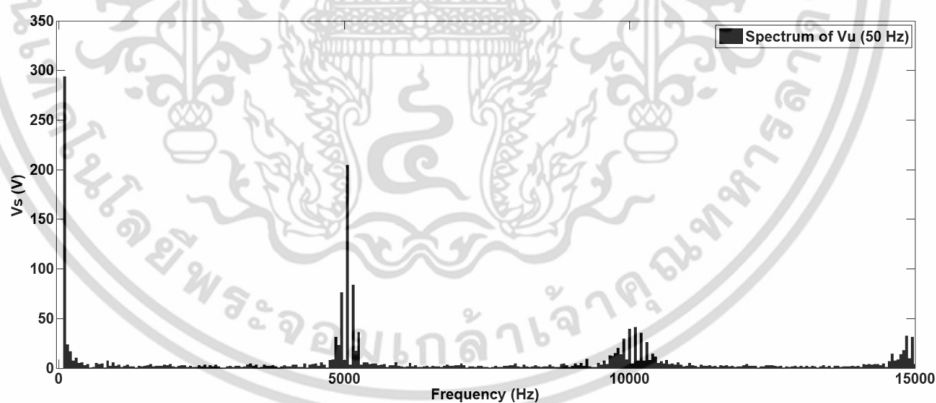
รูปที่ 5.34 แรงดันชั่ว U-V ที่ความเร็ว 1500 rpm (100%) แบบมีภาระทางกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



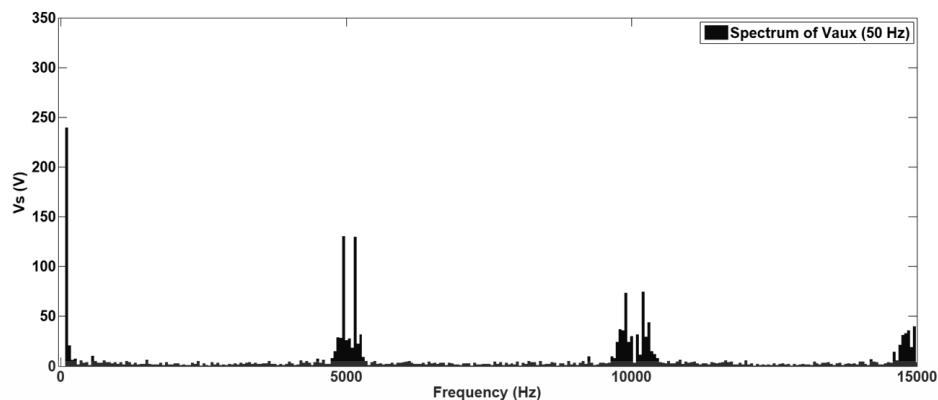
รูปที่ 5.35 แรงดันขดลวดช่วยและขดลวดหลักที่ความเร็ว 1500 rpm (100%) แบบมีภาระทางกล

เมื่อนำค่าแรงดันที่ขั้ว U-V และแรงดันตกคร่อมขดลวดช่วยและขดลวดหลักไปพล็อตสเปกตรัมเพื่อหาค่าประกอบที่มีความถี่ต่าง ๆ จะได้ผลดังต่อไปนี้



รูปที่ 5.36 องค์ประกอบแรงดันขั้ว U-V ที่ความเร็ว 1500 rpm (100%) แบบมีภาระทางกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



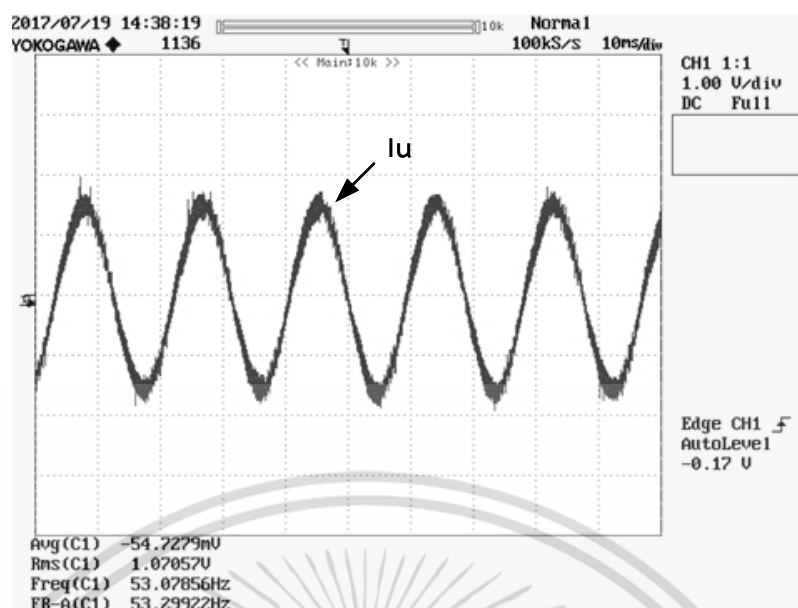
รูปที่ 5.37 องค์ประกอบแรงดันขดลวดช่วยที่ความเร็ว 1500 rpm (100%) แบบมีภาระทางกล



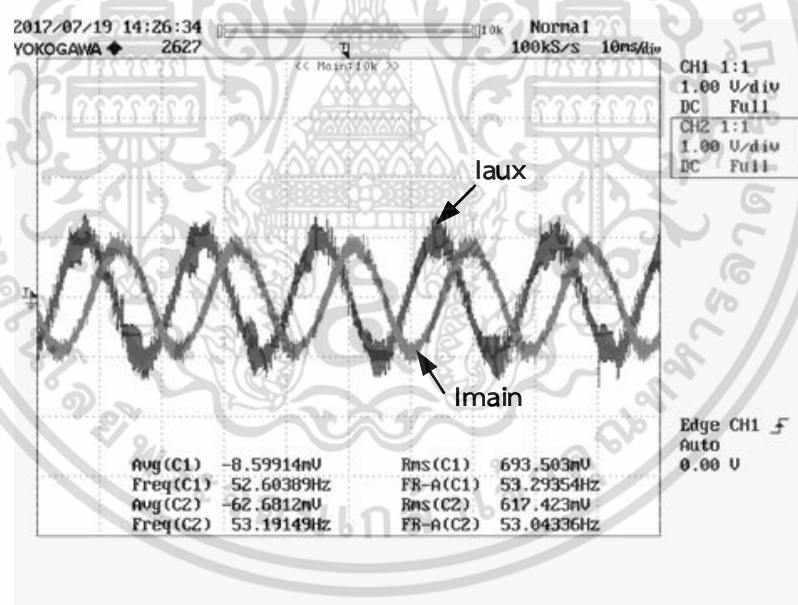
รูปที่ 5.38 องค์ประกอบแรงดันขดลวดช่วยที่ความเร็ว 1500 rpm (100%) แบบมีภาระทางกล

ค่ากระแสที่เกิดขึ้นที่เฟส U ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแสดงดังรูปที่ 5.39 กระแสที่ขดลวดช่วยและขดลวดหลักของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสแสดงดังรูปที่ 5.40 ค่ากระแสที่กิ่งร่วมของมอเตอร์ทั้งสองแสดงดังรูปที่ 5.41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

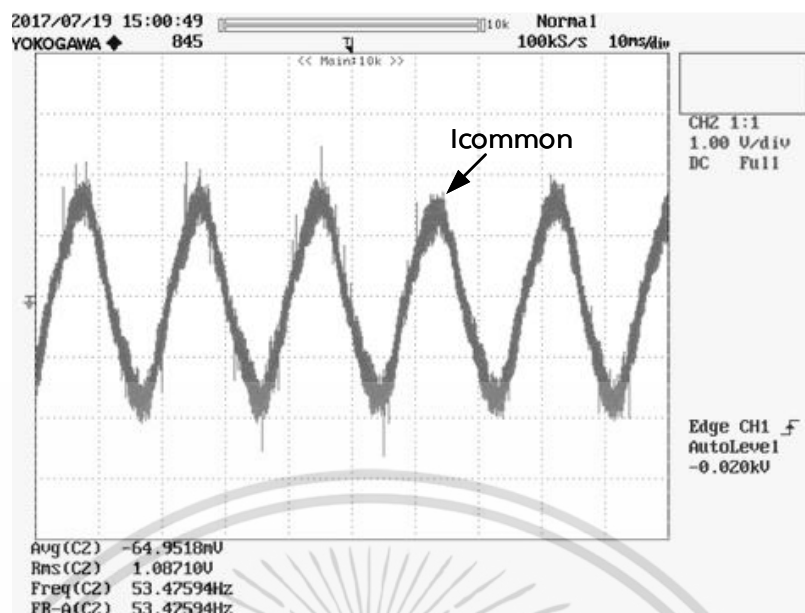


รูปที่ 5.39 กระแสเฟส U ที่ความเร็ว 1500 rpm (100%) แบบมีภาระทางกล



รูปที่ 5.40 กระแสที่ขดลวดช่วยและขดลวดหลักที่ 1500 rpm (100%) แบบมีภาระทางกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.41 กระแสกึ่งร่วมขณะมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ 1500 rpm (100%) และมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสที่ 1500 rpm (100%) แบบมีภาระทางกล

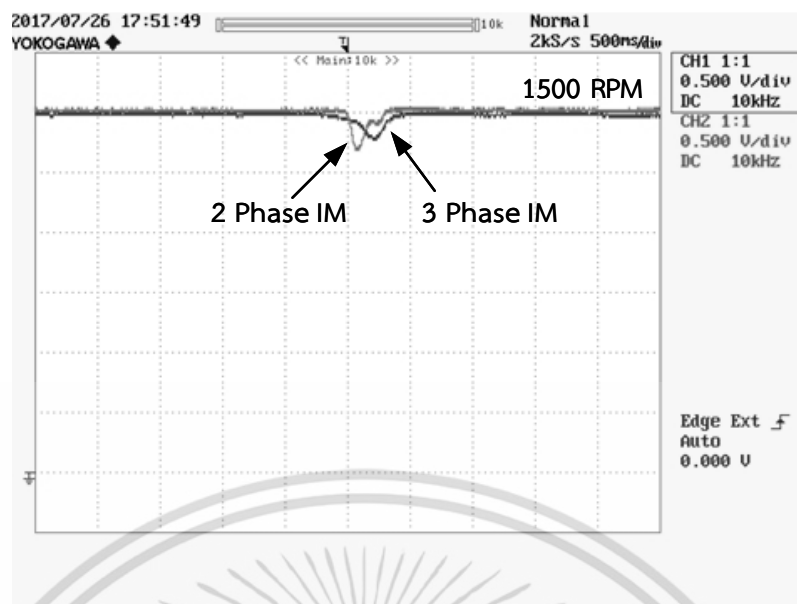
จากผลการทดลองดังกล่าวสามารถนำมาสรุปค่ากระแสและแรงดันได้ดังตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.6 ค่าแรงดันและกระแสในขณะมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ 1500 rpm (100%) และมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส 1500 rpm (100%) แบบมีภาระทางกล

แรงดัน (V)	เฟส U-V	ขดลวดช่วย	ขดลวดหลัก	
	293.69	239.46	167.50	
กระแส (A)	เฟส U	ขดลวดช่วย	ขดลวดหลัก	กึ่งร่วม
	1.070	0.693	0.617	1.087

ผลตอบสนองทางด้านการควบคุมความเร็วรอบจากการเพิ่มภาระทางกลให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสและมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส แสดงดังรูปที่ 5.42 จะเห็นว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำทั้งสองสามารถควบคุมความเร็วให้คงที่ตามค่าที่กำหนดไว้ได้

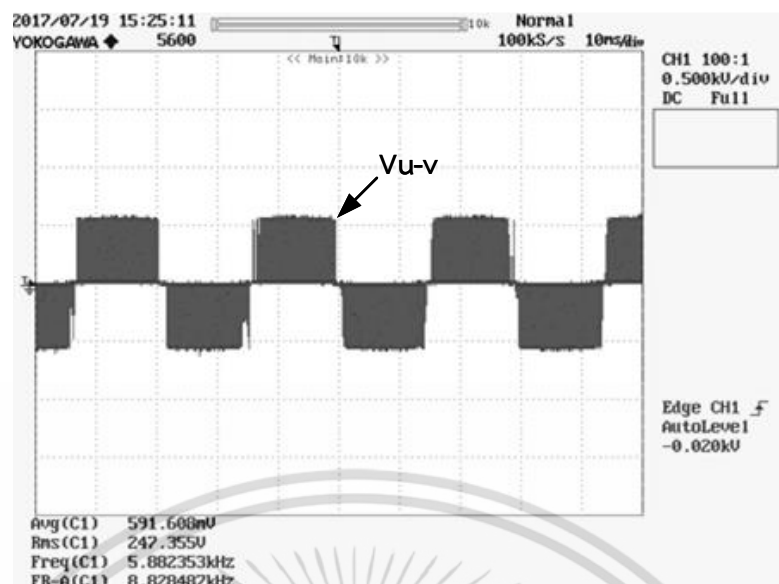
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



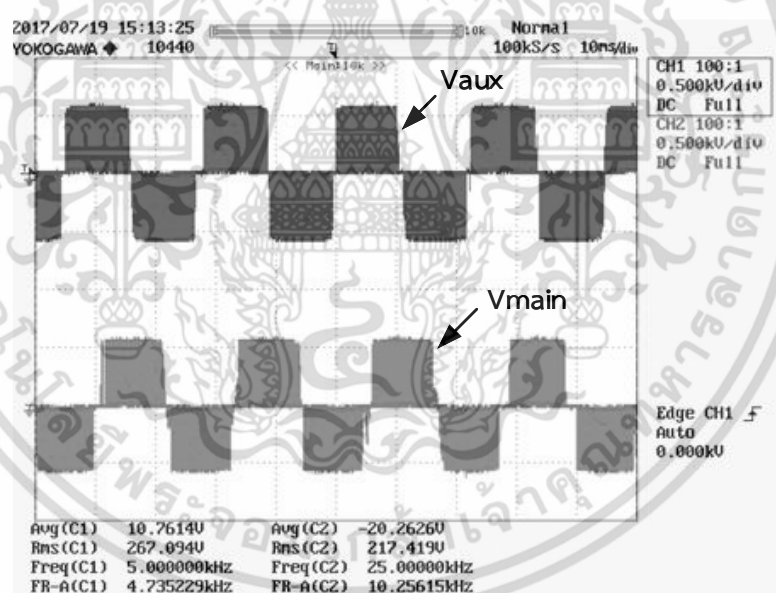
รูปที่ 5.42 ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ 1500 rpm (100%) และสองเฟสที่ความเร็ว 1500 rpm (100%) แบบมีภาระทางกล

5.3.2 ขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ 900 rpm (60%) และมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสที่ 1350 rpm (90%) แบบมีภาระทางกล

เมื่омอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขับเคลื่อนที่ความเร็ว 900 rpm (60%) และมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสที่ความเร็ว 1350 rpm (90%) ทำการเพิ่มภาระทางกลขนาด 1 และ 0.5 Nm ให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสและสองเฟส ตามลำดับ ผลของแรงดันพีดับเบิลยูเอ็มที่ตกคร่อมขดลวด U-V ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแสดงดังรูปที่ 5.43 และผลของแรงดันพีดับเบิลยูเอ็มที่ตกคร่อมขดลวดช่วยและขดลวดหลักของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสแสดงดังรูปที่ 5.44



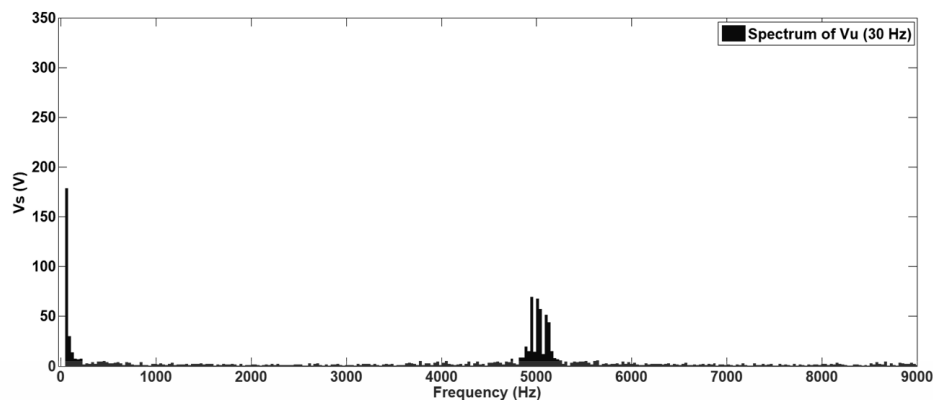
รูปที่ 5.43 แรงดันขั้ว U-V ที่ความเร็ว 900 rpm (60%) แบบมีภาระทางกล



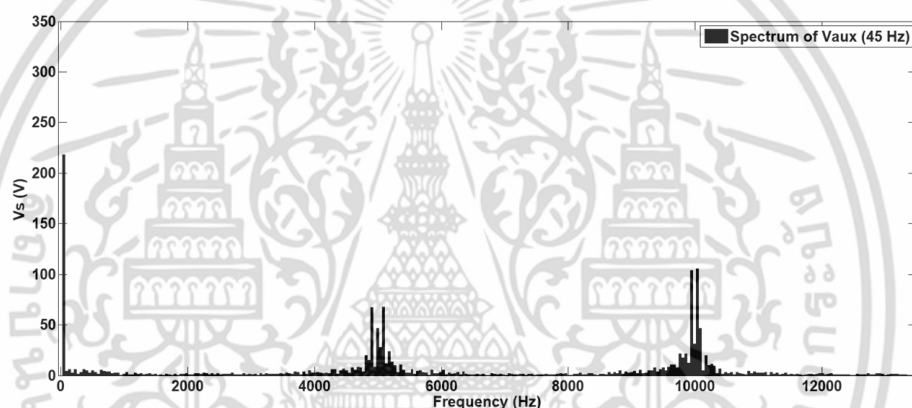
รูปที่ 5.44 แรงดันขดลวดช่วยและขดลวดหลักที่ความเร็ว 1350 rpm (90%) แบบมีภาระทางกล

เมื่อนำค่าแรงดันที่เฟส U-V และแรงดันตกร่วมขดลวดช่วยและขดลวดหลักไปพล็อตสเปกตรัมเพื่อหาค่าประกอบที่มีความถี่ต่างๆ จะได้ผลดังต่อไปนี้

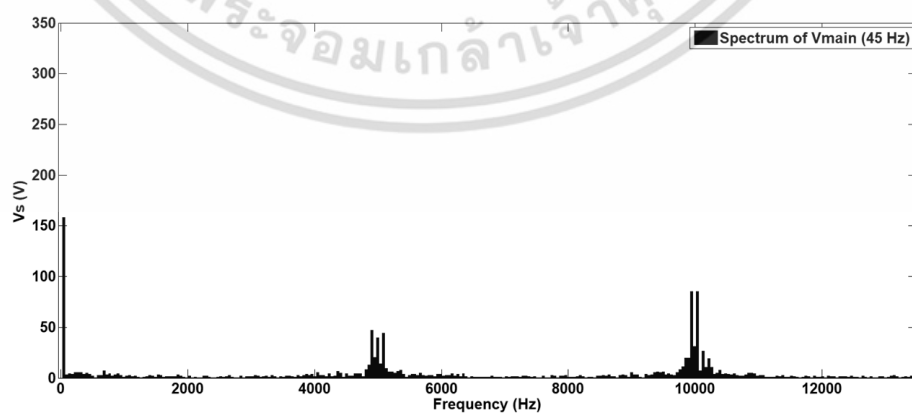
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.45 องค์ประกอบแรงดันชั่ว U-V ที่ความเร็วรอบ 900 rpm (60%) แบบมีภาระทางกล



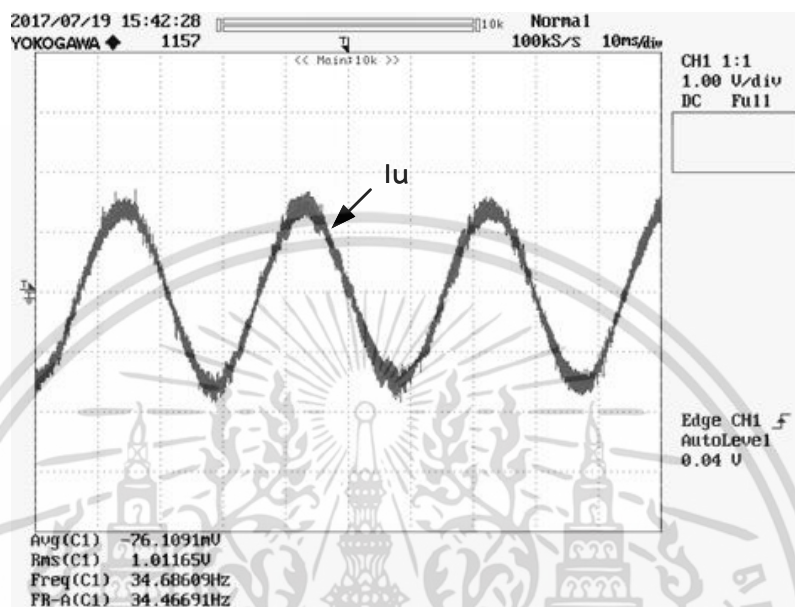
รูปที่ 5.46 องค์ประกอบแรงดันขดลวดช่วยที่ 1350 rpm (90%) แบบมีภาระทางกล



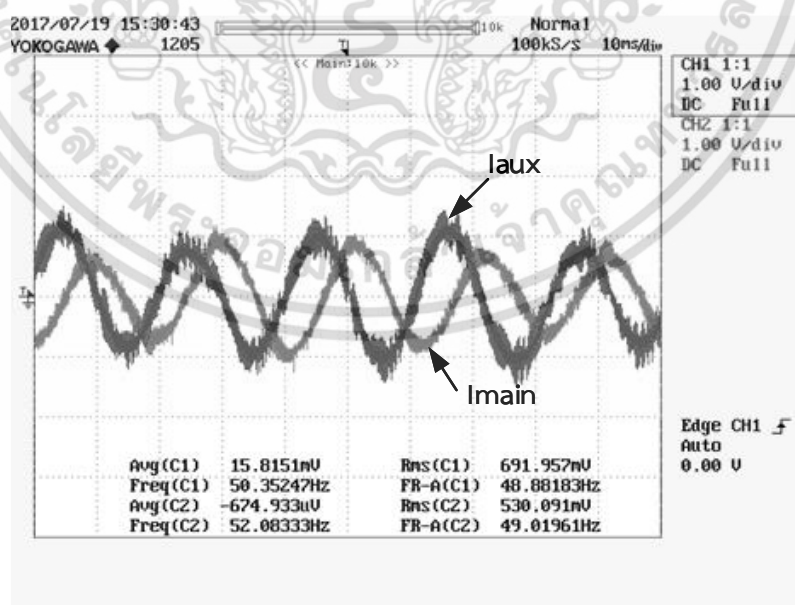
รูปที่ 5.47 องค์ประกอบแรงดันขดลวดหลักที่ความเร็วรอบ 1350 rpm (90%) แบบมีภาระทางกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่ากระแสที่เกิดขึ้นที่เฟส U ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแสดงดังรูปที่ 5.48 กระแสที่
 ขดลวดช่วยและขดลวดหลักของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสแสดงดังรูปที่ 5.49 ค่ากระแสที่กึ่งร่วมของ
 มอเตอร์ทั้งสองแสดงดังรูปที่ 5.50

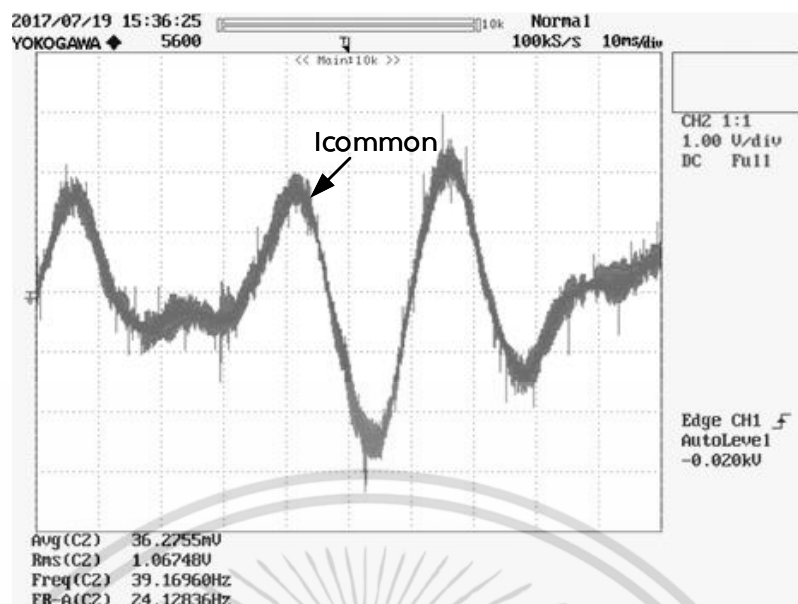


รูปที่ 5.48 กระแสเฟส U ที่ความเร็ว 900 rpm (60%) แบบมีภาระทางกล



รูปที่ 5.49 กระแสที่ขดลวดช่วยและขดลวดหลักที่ 1350 rpm (90%) แบบมีภาระทางกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



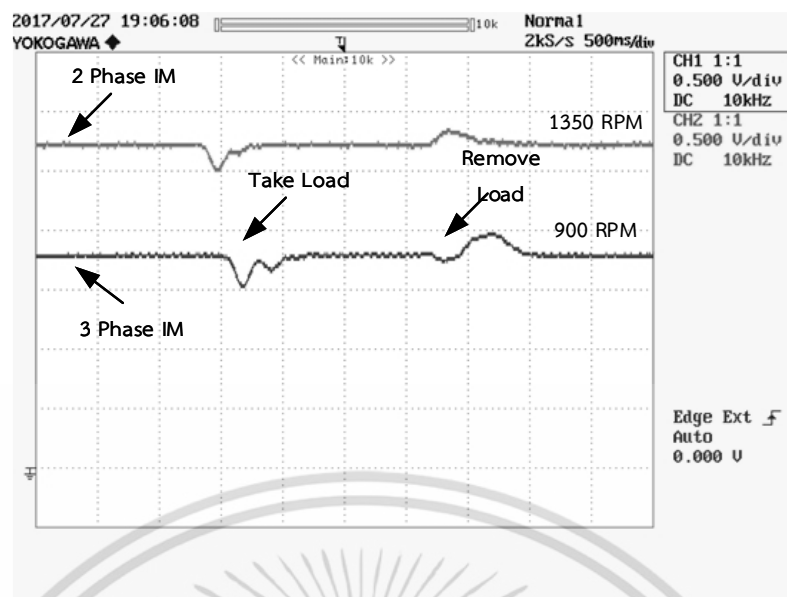
รูปที่ 5.50 กระแสกึ่งร่วมขณะมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ 900 rpm (60%) และมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสที่ 1350 rpm (90%) แบบมีภาระทางกล

จากผลการทดลองดังกล่าวสามารถนำมาสรุปค่ากระแสและแรงดันได้ดังตารางที่ 5.7 ตารางที่ 5.7 ค่าแรงดันและกระแสในขณะมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ 900 rpm (60%) และมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส 1350 rpm (90%) แบบมีภาระทางกล

แรงดัน (V)	เฟส U-V	ขดลวดช่วย	ขดลวดหลัก	
	178.60	122.33	118.41	
กระแส (A)	เฟส U	ขดลวดช่วย	ขดลวดหลัก	กึ่งร่วม
	1.011	0.691	0.530	1.067

ผลตอบสนองทางด้านการควบคุมความเร็วรอบจากการเพิ่มภาระทางกลให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสและมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส จะพบว่ามอเตอร์ทั้งสองมีความเร็วลดลงเล็กน้อย และเมื่อทำการปลดภาระทางกลออกมอเตอร์ทั้งสองมีความเร็วเพิ่มขึ้นเล็กน้อยแล้วจึงปรับความเร็วคืนสู่ค่าความเร็วที่ได้กำหนดไว้ แสดงดังรูปที่ 5.51

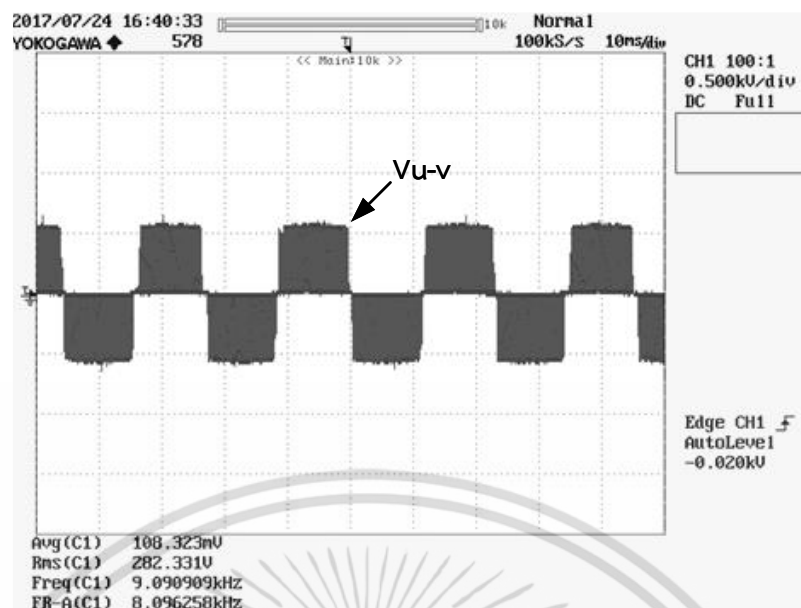
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



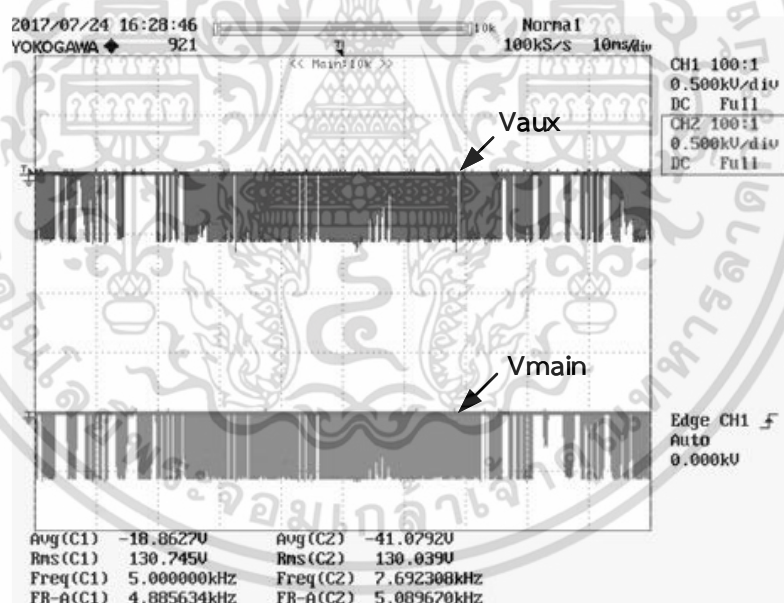
รูปที่ 5.51 ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ 900 rpm (60%) และสองเฟสที่ความเร็ว 1350 rpm (90%) แบบมีภาระทางกล

5.3.3 ชับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ 1200 rpm (80%) และมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสที่ 0 rpm (0%) แบบมีภาระทางกล

เมื่อมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขับเคลื่อนที่ความเร็ว 1200 rpm (80%) ทำการเพิ่มภาระทางกลขนาด 1 Nm ให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ผลของแรงดันที่ดับเบิ้ลยูเอ็มที่ตกคร่อมขดลวด U-V ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแสดงดังรูปที่ 5.52 และผลของแรงดันที่ดับเบิ้ลยูเอ็มที่ตกคร่อมขดลวดช่วยและขดลวดหลักของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสแสดงดังรูปที่ 5.53



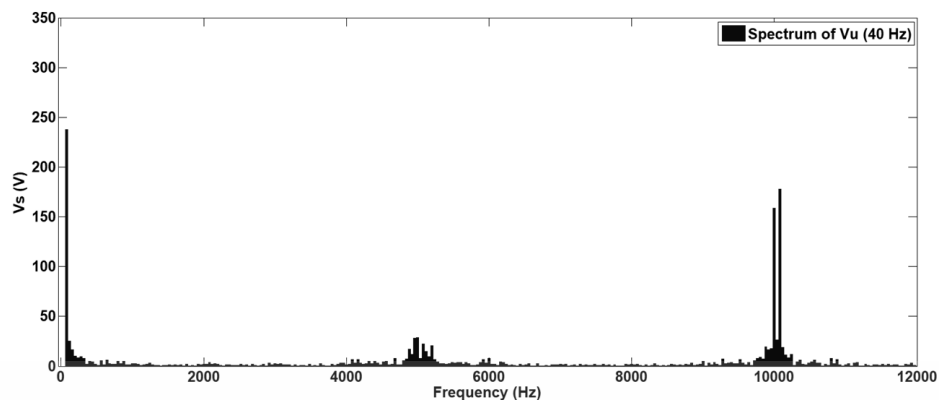
รูปที่ 5.52 แรงดันขั้ว U-V ที่ความเร็ว 1200 rpm (80%) แบบมีภาระทางกล



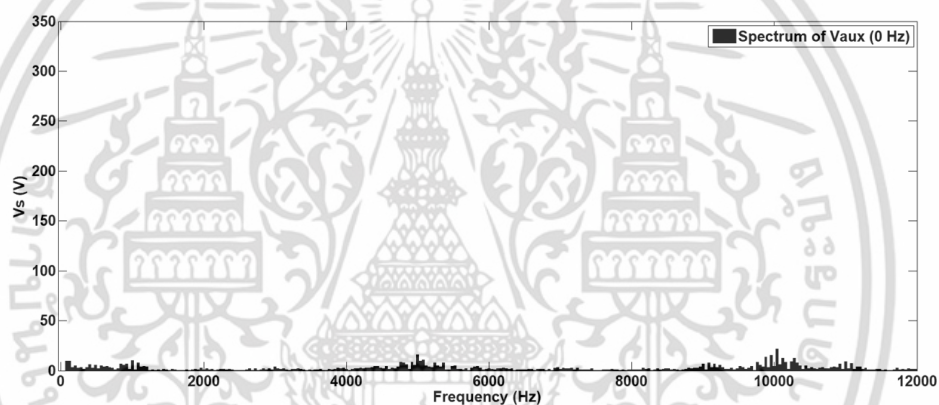
รูปที่ 5.53 แรงดันขดลวดช่วยและขดลวดหลักที่ความเร็ว 0 rpm (0%) แบบมีภาระทางกล

เมื่อนำค่าแรงดันที่เฟส U-V และแรงดันตกรวมขดลวดช่วยและขดลวดหลักไปพล็อตสเปกตรัมเพื่อหาค่าประกอบที่มีความถี่ต่างๆจะได้ผลดังต่อไปนี้

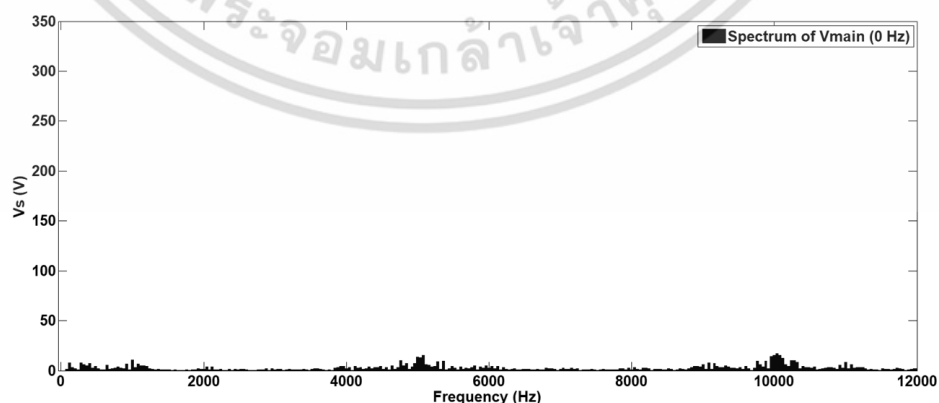
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.54 องค์ประกอบแรงดันชั่ว U-V ที่ความเร็วรอบ 1200 rpm (80%) แบบมีภาระทางกล



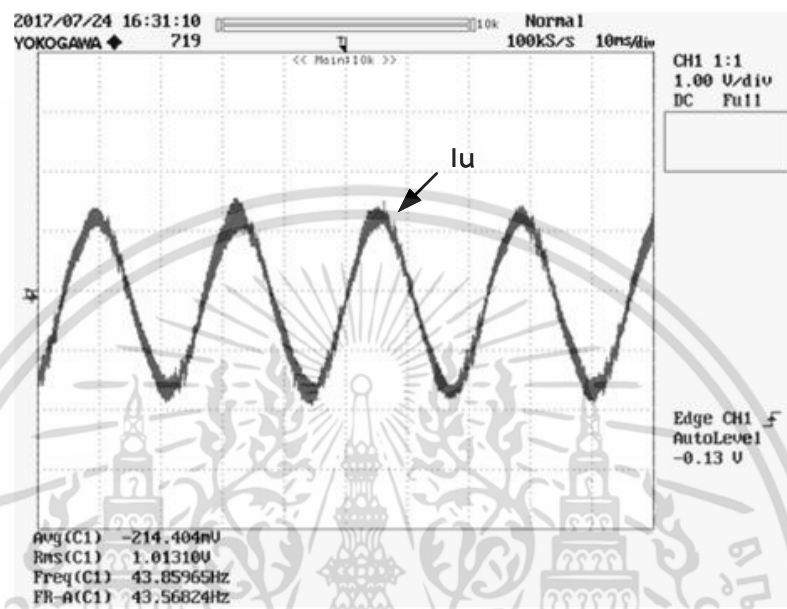
รูปที่ 5.55 องค์ประกอบแรงดันขดลวดช่วยที่ความเร็ว 0 rpm (0%) แบบมีภาระทางกล



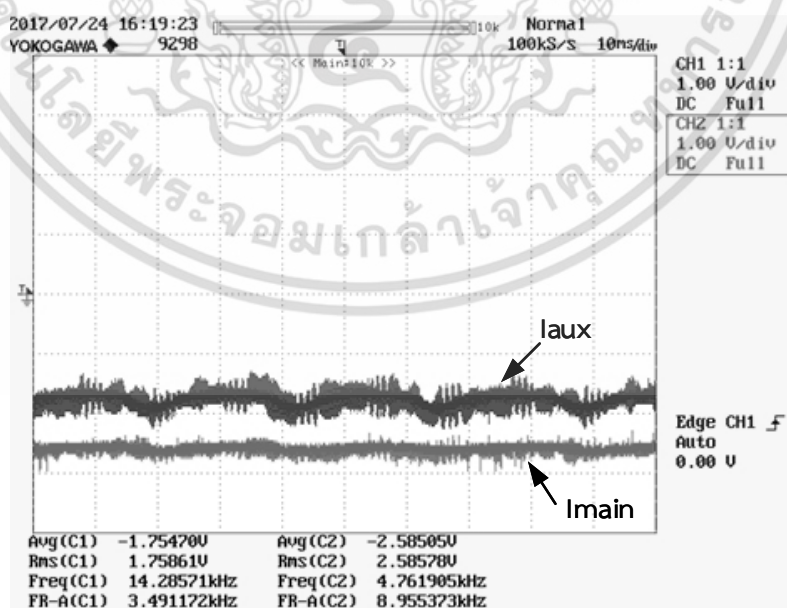
รูปที่ 5.56 องค์ประกอบแรงดันขดลวดหลักที่ความเร็ว 0 rpm (0%) แบบมีภาระทางกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่ากระแสที่เกิดขึ้นที่เฟส U ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแสดงดังรูปที่ 5.57 กระแสที่
 ขดลวดช่วยและขดลวดหลักของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสแสดงดังรูปที่ 5.58 ค่ากระแสที่กึ่งร่วมของ
 มอเตอร์ทั้งสองแสดงดังรูปที่ 5.59

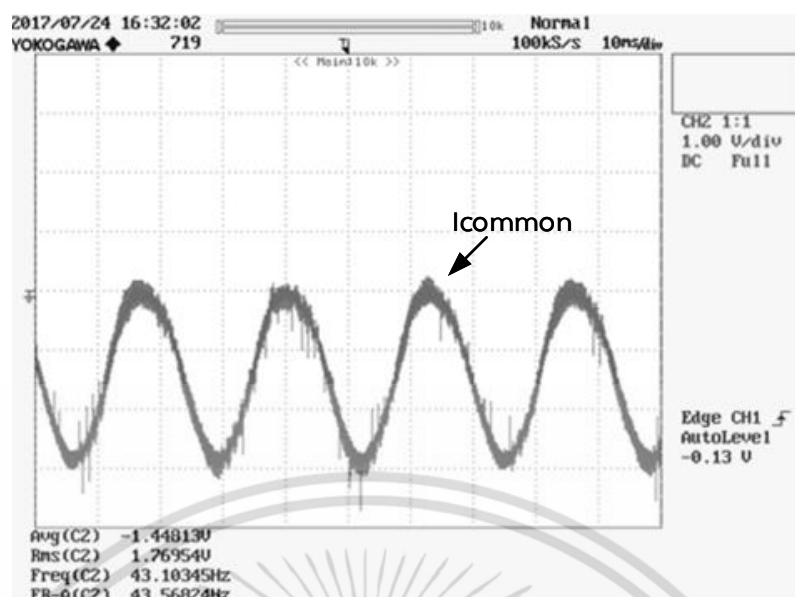


รูปที่ 5.57 กระแสเฟส U ที่ความเร็ว 1200 rpm (80%) แบบมีภาระทางกล



รูปที่ 5.58 กระแสที่ขดลวดช่วยและขดลวดหลักที่ 0 rpm (0%) แบบมีภาระทางกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.59 กระแสกึ่งร่วมขณะมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ 1200 rpm (0%) และมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสที่ 0 rpm (0%) แบบมีภาระทางกล

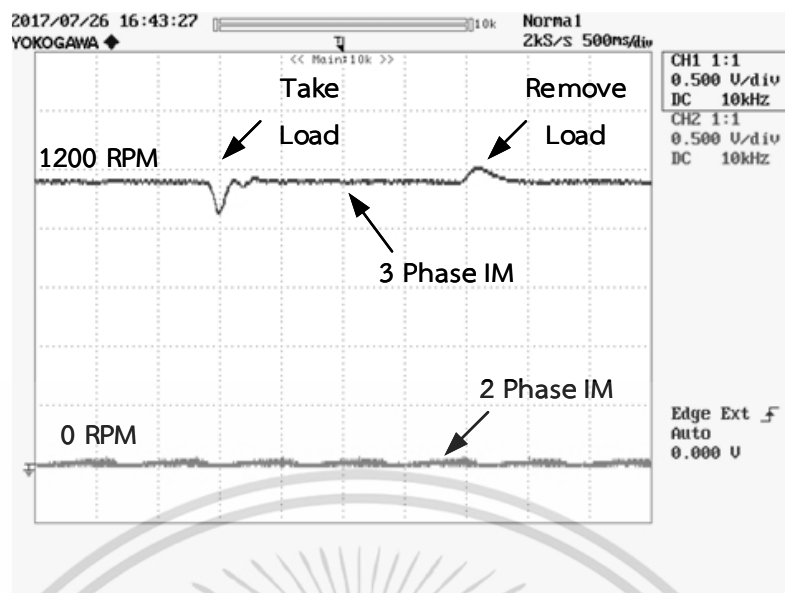
จากผลการทดลองดังกล่าวสามารถนำมาสรุปค่ากระแสและแรงดันได้ดังตารางที่ 5.8

ตารางที่ 5.8 ค่าแรงดันและกระแสขณะขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ความเร็วรอบ 1200 rpm (80%) และมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสที่ความเร็วรอบ 0 rpm (0%)

แรงดัน (V)	เฟส U-V	ขดลวดช่วย	ขดลวดหลัก	
	237.67	0	0	
กระแส (A)	เฟส U	ขดลวดช่วย	ขดลวดหลัก	กึ่งร่วม
	1.013	1.7586	2.585	1.769

ผลตอบสนองทางด้านการควบคุมความเร็วรอบจากการเพิ่มภาระทางกลให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส จะพบว่ามอเตอร์ทั้งสองมีความเร็วลดลงเล็กน้อย และเมื่อทำการปลดภาระทางกลออกมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสมีความเร็วเพิ่มขึ้นเล็กน้อยแล้วจึงปรับความเร็วคืนสู่ค่าความเร็วที่ได้กำหนดไว้ แสดงดังรูปที่ 5.60

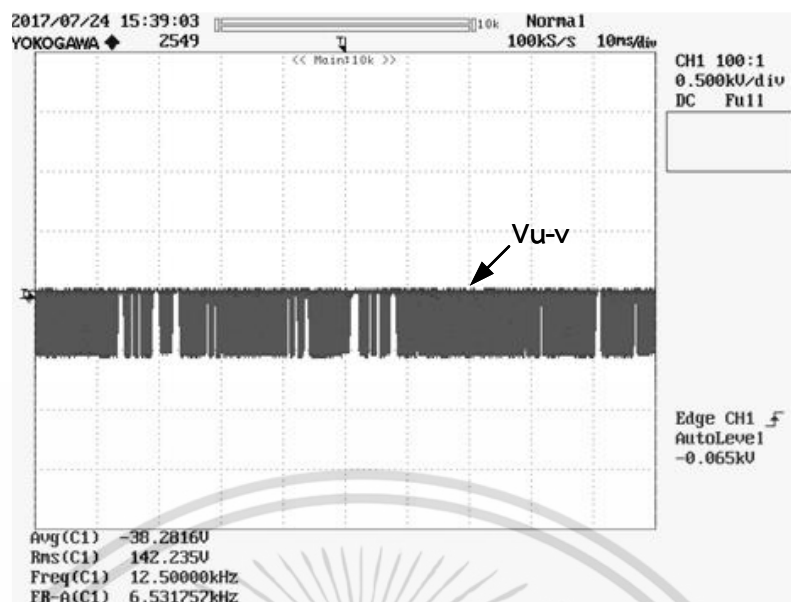
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



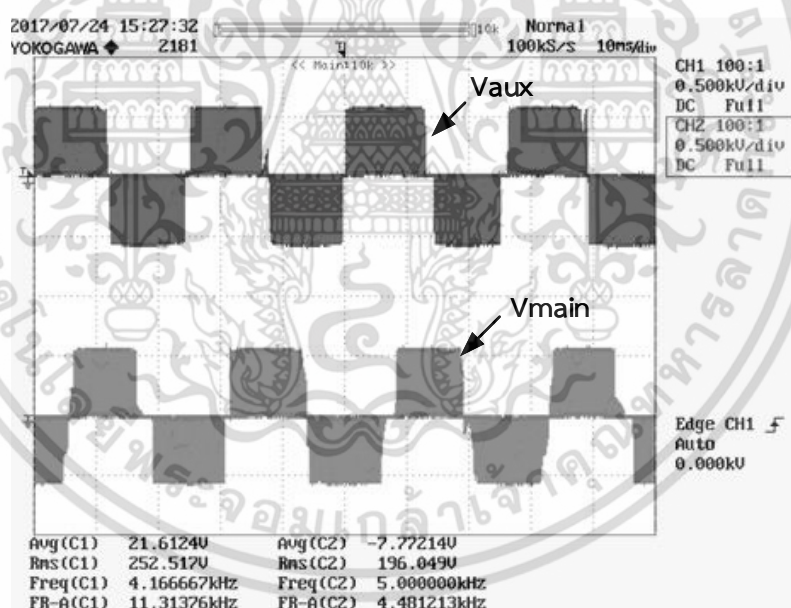
รูปที่ 5.60 ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ 1200 rpm (80%) และสองเฟสที่ความเร็ว 0 rpm (0%) แบบมีภาระทางกล

5.3.4 ขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ 0 rpm (0%) และมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสที่ 1050 rpm (70%) แบบมีภาระทางกล

เมื่омอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขับเคลื่อนที่ความเร็ว 0 rpm (0%) และมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสที่ 1050 rpm (70%) ทำการเพิ่มภาระทางกลขนาด 0.5 Nm ให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส ผลของแรงดันพีคดับเบิลยูเอ็มที่ตกคร่อมขดลวด U-V ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแสดงดังรูปที่ 5.61 และผลของแรงดันพีคดับเบิลยูเอ็มที่ตกคร่อมขดลวดช่วยและขดลวดหลักของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสแสดงดังรูปที่ 5.62



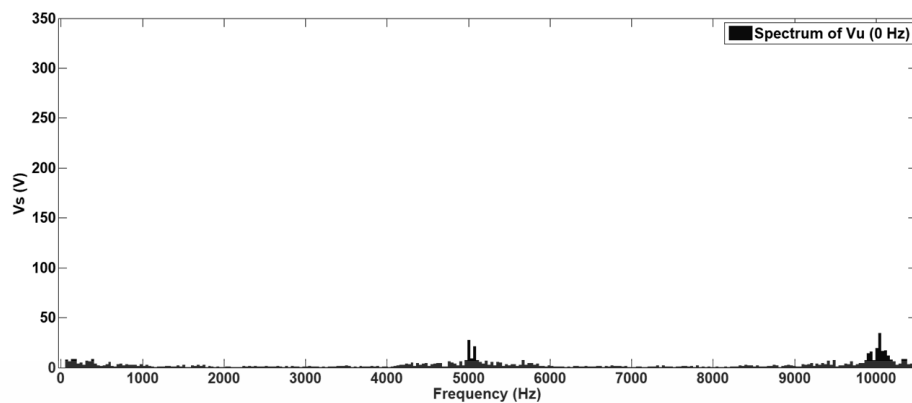
รูปที่ 5.61 แรงดันขั้ว U-V ที่ความเร็ว 0 rpm (0%) แบบมีภาระทางกล



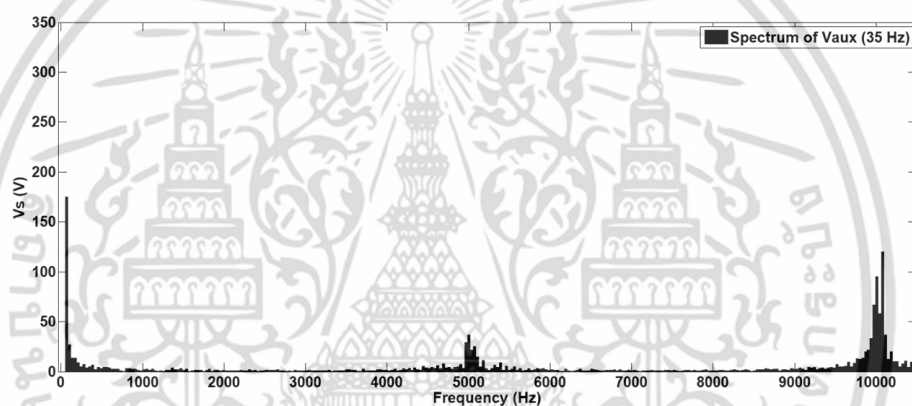
รูปที่ 5.62 แรงดันขดลวดช่วยและขดลวดหลักที่ความเร็ว 1050 rpm (70%) แบบมีภาระทางกล

เมื่อนำค่าแรงดันที่เฟส U-V และแรงดันตกรวมขดลวดช่วยและขดลวดหลักไปพล็อตสเปกตรัมเพื่อหาค่าประกอบที่ความถี่ต่างๆ จะได้ผลดังต่อไปนี้

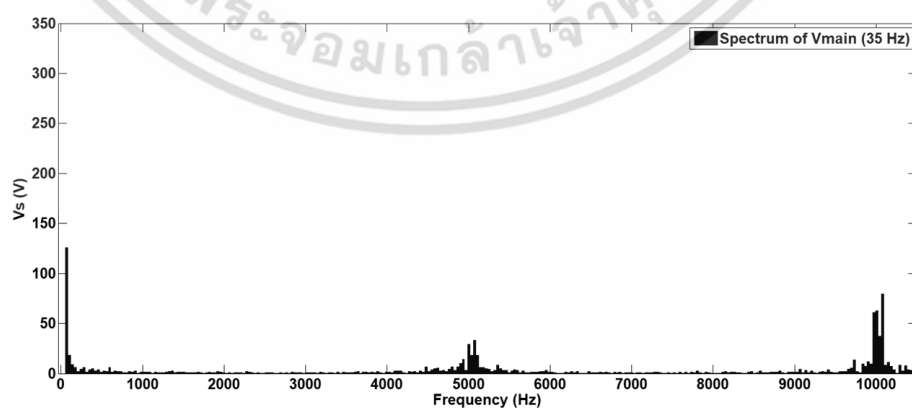
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.63 องค์ประกอบแรงดันชั่ว U-V ที่ความเร็วรอบ 0 rpm (0%) แบบมีภาระทางกล



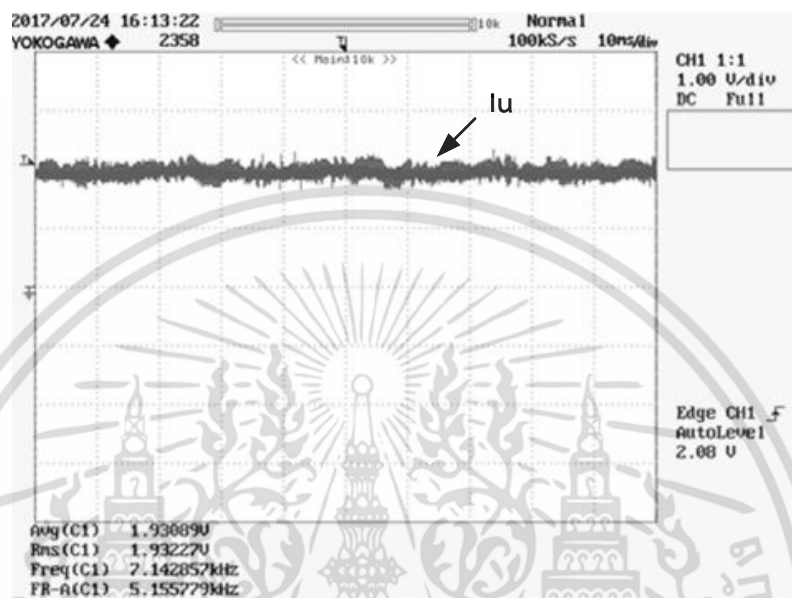
รูปที่ 5.64 องค์ประกอบแรงดันขดลวดช่วยที่ความเร็ว 1050 rpm (70%) แบบมีภาระทางกล



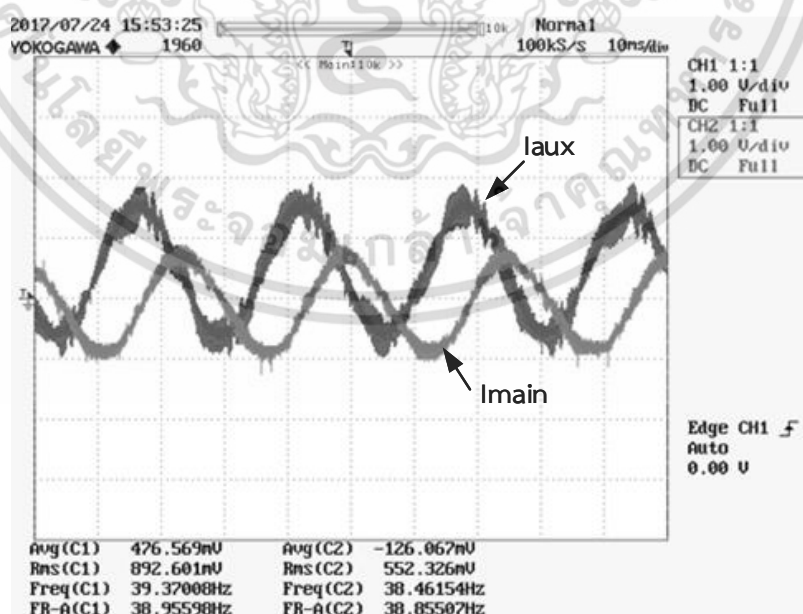
รูปที่ 5.65 องค์ประกอบแรงดันขดลวดหลักที่ความเร็ว 1050 rpm (70%) แบบมีภาระทางกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่ากระแสที่เกิดขึ้นที่เฟส U ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแสดงดังรูปที่ 5.66 กระแสที่
 ขดลวดช่วยและขดลวดหลักของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสแสดงดังรูปที่ 5.67 ค่ากระแสที่กึ่งร่วมของ
 มอเตอร์ทั้งสองแสดงดังรูปที่ 5.78

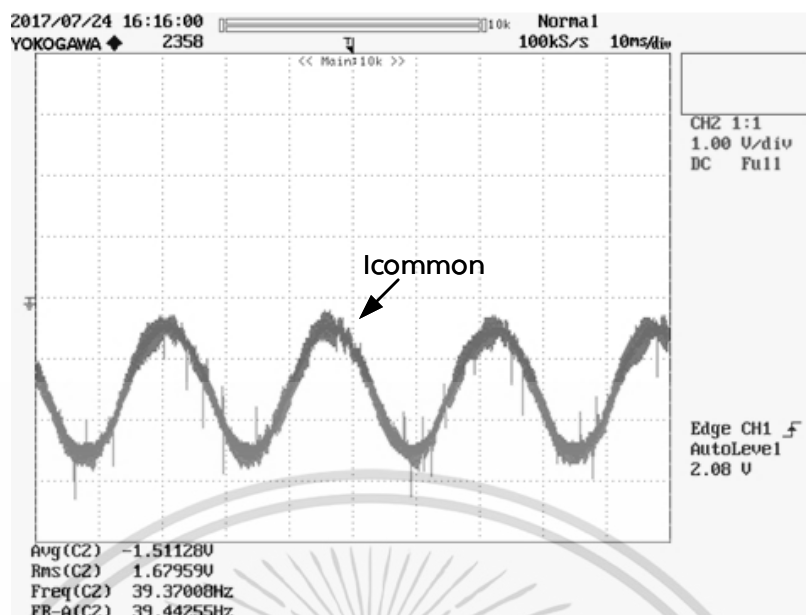


รูปที่ 5.66 กระแสเฟส U ที่ความเร็ว 0 rpm (0%) แบบมีภาระทางกล



รูปที่ 5.67 กระแสที่ขดลวดช่วยและขดลวดหลักที่ 1050 rpm (70%) แบบมีภาระทางกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



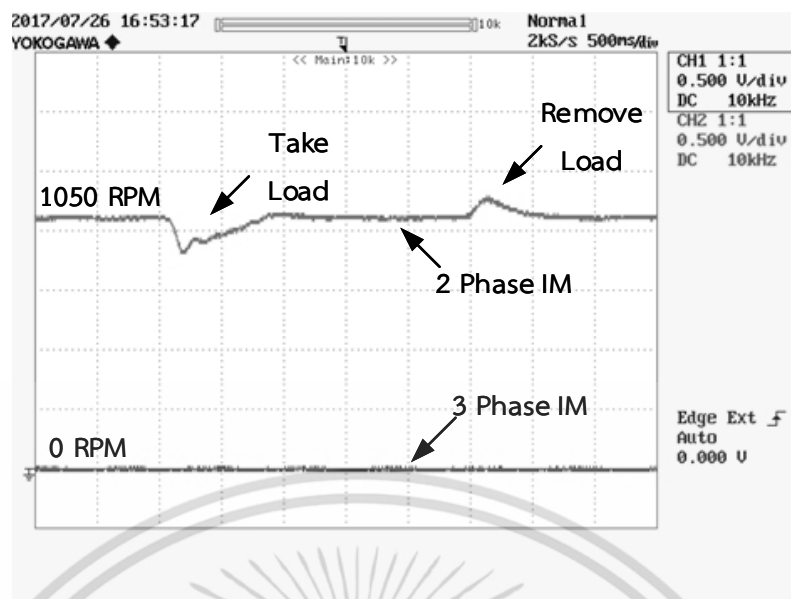
รูปที่ 5.68 กระแสกึ่งร่วมขณะที่มีมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสมีความเร็ว 0 rpm (0%) และมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส 1050 rpm (70%) แบบมีภาระทางกล

จากผลการทดลองดังกล่าวสามารถนำมาสรุปค่ากระแสและแรงดันได้ดังตารางที่ 5.9

ตารางที่ 5.9 ค่าแรงดันและกระแสขณะขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ความเร็วรอบ 0 rpm (0%) และมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสที่ความเร็วรอบ 1050 rpm (70%)

แรงดัน (V)	เฟส U-V	ขดลวดช่วย	ขดลวดหลัก	
	0		175.15	
กระแส (A)	เฟส U	ขดลวดช่วย	ขดลวดหลัก	กึ่งร่วม
	1.932	0.892	0.552	1.679

ผลตอบสนองทางด้านการควบคุมความเร็วรอบจากการเพิ่มภาระทางกลให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส จะพบว่ามอเตอร์ทั้งสองมีความเร็วลดลงเล็กน้อย และเมื่อทำการปลดภาระทางกลออกมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสมีความเร็วเพิ่มขึ้นเล็กน้อยแล้วจึงปรับความเร็วคืนสู่ค่าความเร็วที่ได้กำหนดไว้ แสดงดังรูปที่ 5.69



รูปที่ 5.69 ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ 0 rpm (0%) และสองเฟสที่
ความเร็ว 1050 rpm (70%) แบบมีภาระทางกล

จากผลการทดลองในหัวข้อ 5.1 และ 5.2 จะสามารถสรุปค่ากระแสและแรงดันที่ใช้ในการ
ขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำทั้งสองที่สภาวะต่างๆ ได้ดังตาราง ที่ 5.10

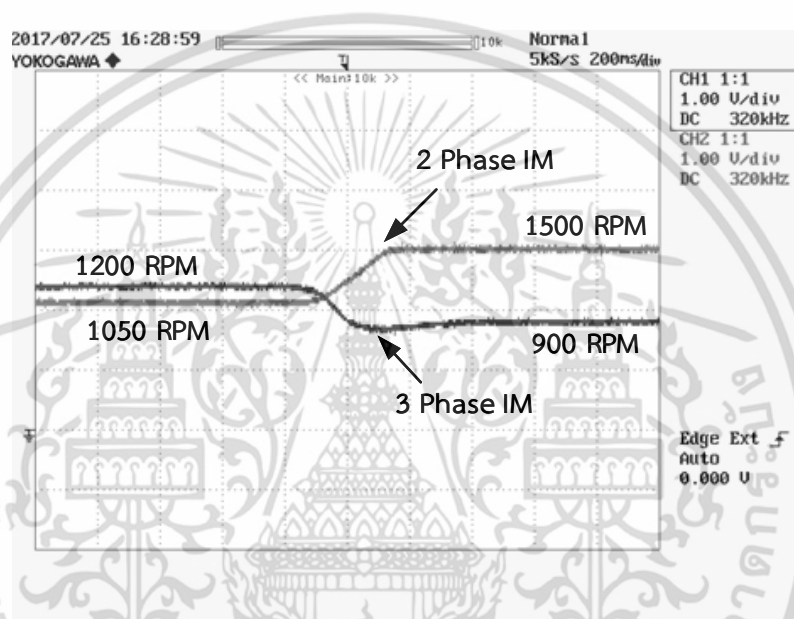
ตารางที่ 5.10 สรุปค่ากระแสและแรงดันในการเดินที่มีและไม่มีภาระทางกล

Speed motor	3&2 phase (rpm)	Vu (V)	Vaux (V)	Vmain (V)	Iu (A)	Iaux (A)	Imain (A)
1500 & 1500 (100% & 100%)	No-load	290.16	238.08	170.68	0.863	0.636	0.384
	Load 1&0.5 Nm	293.69	239.46	167.50	1.07	0.693	0.617
900 & 1350 (60% & 90%)	No-load	170.55	227.09	158.83	0.804	0.583	0.425
	Load 1&0.5 Nm	178.60	218.03	118.41	1.01	0.691	0.530
1200 & 0 (80% & 0%)	No-load	223.97	0	0	0.904	1.754(dc)	2.56(dc)
	Load 1&0.5 Nm	237.67	0	0	1.01	1.74(dc)	2.58(dc)
0 & 1050 (0% & 70%)	No-load	0	184.16	127.33	2.14(dc)	0.770(dc)	0.432(dc)
	Load 1&0.5 Nm	0	175.15	128.19	1.93(dc)	0.892(dc)	0.552(dc)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

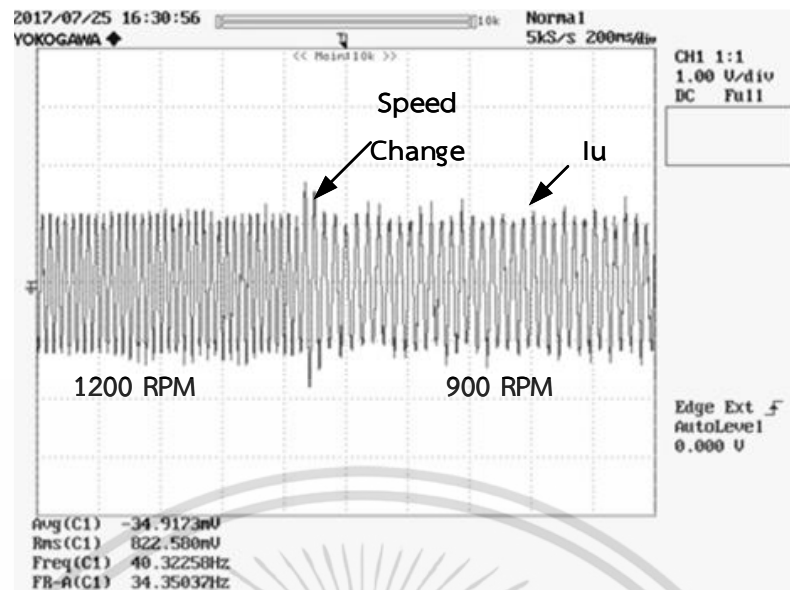
5.4 การทดลองเปลี่ยนแปลงความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ในส่วนนี้จะเป็นการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ให้คงที่ตามค่าความเร็วที่ต้องการ โดยมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสเปลี่ยนแปลงความเร็วจาก 1200 rpm (80%) เป็น 900 rpm (90%) และมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสเปลี่ยนแปลงความเร็วจาก 1050 rpm (70%) เป็น 1500 rpm (100%) โดยผลการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ แสดงดังต่อไปนี้

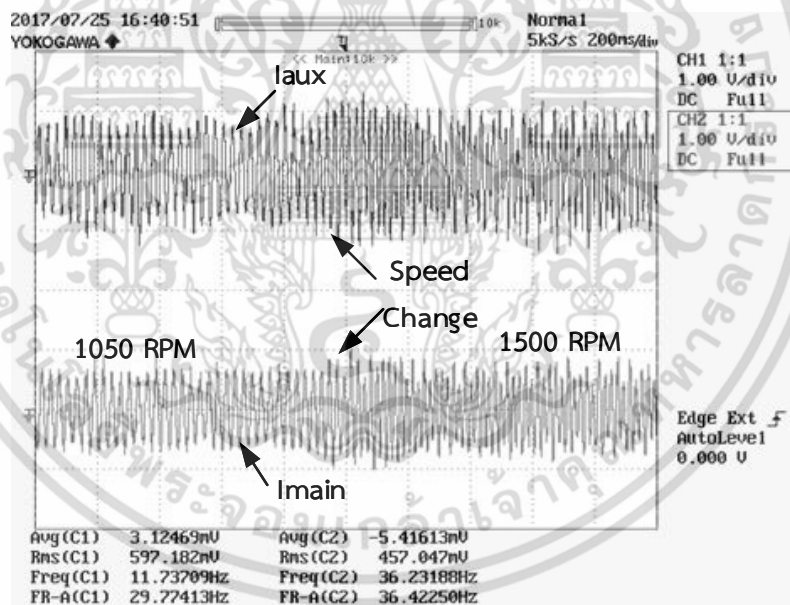


รูปที่ 5.70 ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบ

ผลของกระแสที่เฟส U ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส กระแสที่ขดลวดช่วยและขดลวดหลักของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสขณะก่อน ระหว่าง และหลังทำการเปลี่ยนแปลงความเร็ว มีการตอบสนองของกระแสดังรูปที่ 5.71 และ 5.72 ตามลำดับ



รูปที่ 5.71 กระแสเฟส U ขณะมีการเปลี่ยนแปลงความเร็ว

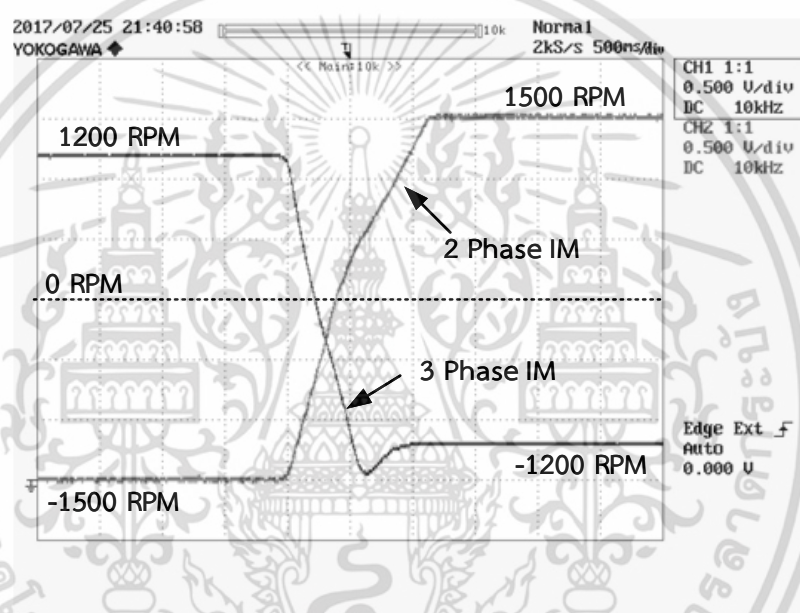


รูปที่ 5.72 กระแสที่ขดลวดช่วยและขดลวดหลักขณะมีการเปลี่ยนแปลงความเร็ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

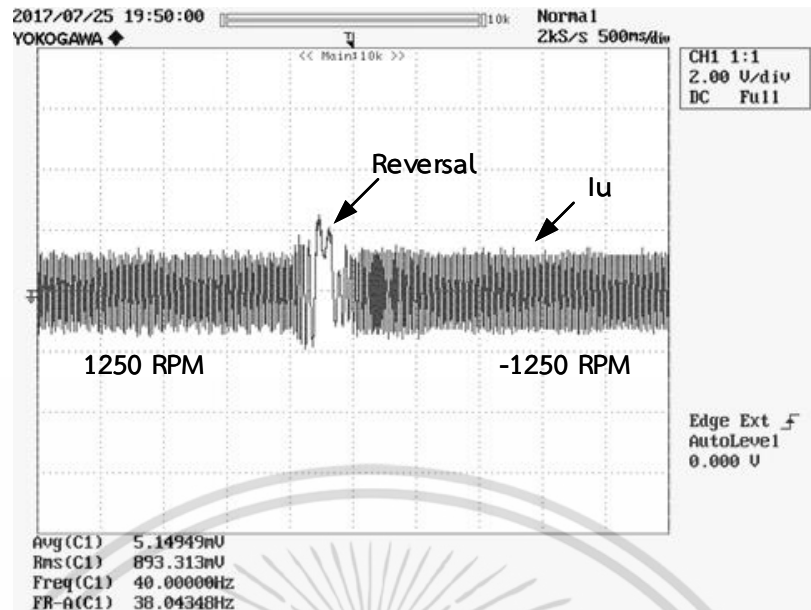
5.5 การทดสอบการกลับทางหมุนของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

การทดสอบการกลับทางหมุนของมอเตอร์จะทำการทดสอบโดยให้มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขับเคลื่อนที่ความเร็วรอบ 1200 rpm (80%) และมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสขับเคลื่อนที่ความเร็วรอบ -1500 rpm (-100%) จากนั้นทำการกลับทางหมุนมอเตอร์เหนี่ยวนำทั้งสองไปยังทิศทางตรงกันข้ามด้วยความเร็วเดิมคือ -1200 rpm (-80%) และ 1500 rpm (100%) ตามลำดับ ผลการตอบสนองทางด้านความเร็วจากการกลับทิศทางหมุนของมอเตอร์เหนี่ยวนำทั้งสองเป็นดังรูปที่ 5.73

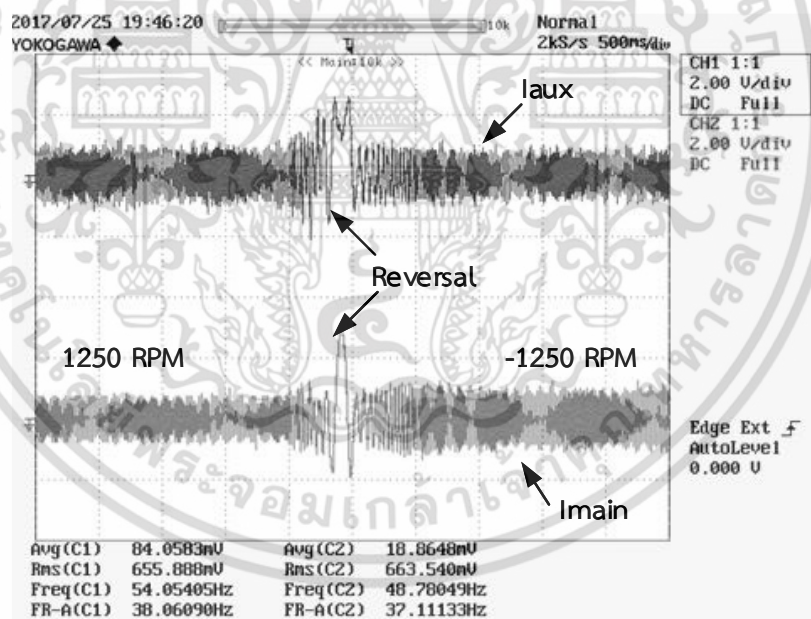


รูปที่ 5.73 ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อมีการกลับทิศทางหมุน

ผลของกระแสที่เฟส U ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส กระแสที่ขดลวดช่วยและขดลวดหลักของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสขณะก่อน ระหว่าง และหลังทำการกลับทิศทางหมุน มีการตอบสนองของกระแสดังรูปที่ 5.74 และ 5.75 ตามลำดับ



รูปที่ 5.74 กระแสเฟส U ขณะมีการกลับทางหมุน



รูปที่ 5.75 กระแสที่ขดลวดช่วยและขดลวดหลักขณะมีการกลับทางหมุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.6 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 5.2 ถึง 5.6 แสดงให้เห็นว่าสามารถควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสและมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสด้วยอินเวอร์เตอร์แบบห้ากึ่งไดโอดในสถานะต่างๆ ทั้งนี้เมื่อพิจารณาผลการทดลองในขณะที่มีการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำเพียงตัวเดียว ในหัวข้อที่ 5.2.3, 5.2.4, 5.3.3 และ 5.3.4 จะพบว่าจะเกิดค่ากระแสที่เป็นค่ากระแสตรงเกิดขึ้นที่มอเตอร์เหนี่ยวนำตัวที่ไม่ได้มีการขับเคลื่อน (0 rpm) ทั้งนี้มีสาเหตุจากการสร้างสัญญาณความถี่ 0 Hz ให้กับมอเตอร์ตัวที่บังคับให้มีความเร็วเป็น 0 rpm รวมถึงค่าความผิดเพี้ยนของแรงดันที่เกิดจากค่า dead time ของสวิตช์ ทำให้การสั่งการเปิดปิดสวิตช์มีความผิดเพี้ยน จึงเกิดค่ากระแสตรงขึ้น แต่แรงดันที่ตกคร่อมเฟสดังกล่าวมีค่าน้อยมากเป็นผลให้เกิดค่าความสูญเสียเล็กน้อย ซึ่งอาจถือเป็นข้อเสียของเทคนิคที่ได้นำเสนอมาในงานวิจัยนี้ การลดผลกระทบดังกล่าว สามารถทำได้โดยการลดช่วงเวลา dead time หรือลดความถี่ของการสวิตซ์ซึ่งลง

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยฉบับนี้ได้นำเสนอการออกแบบและประกอบสร้างอินเวอร์เตอร์แบบห้ากึ่งสำหรับจำลองและทดลองการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองตัวให้คงที่และเป็นอิสระต่อกันในเวลาเดียวกัน จากนั้นพิจารณาสมรรถนะในการควบคุมความเร็วรอบให้คงที่ตามค่าความเร็วรอบที่ต้องการ ในสภาวะต่างๆ เช่น การเพิ่มและลดภาระทางกล การเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบ และการกลับทิศทางการหมุน

การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสและมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสด้วยอินเวอร์เตอร์แบบห้ากึ่งที่นำเสนอในงานวิจัยฉบับนี้ จะควบคุมความเร็วรอบแบบวงรอบปิด โดยอาศัยหลักการรวมสัญญาณอ้างอิงของแรงดันและต่อร่วมกันระหว่างกึ่งของมอเตอร์เพื่อลดจำนวนสัญญาณอ้างอิงจาก 6 สัญญาณเหลือ 5 สัญญาณ และจ่ายเป็นแรงดันในลักษณะของแรงดันไลน์-ไลน์ให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำทั้งสองตามลักษณะโครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำนั้นๆ การจำลองผลการทำงานได้ใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ในการเขียนโมเดลการควบคุมและจำลองผลการทำงานในสภาวะที่กล่าวมาข้างต้น ในส่วนของการทดลอง ได้ใช้โปรแกรม Code Composer Studio (CCS) เวอร์ชัน 6 ในการเขียนโมเดลการควบคุมลงสู่ไมโครคอนโทรลเลอร์ C2000 รุ่น TMS320F28335 ไปกำหนดสัญญาณการทำงานของสวิตช์ที่กึ่งทั้งห้าของอินเวอร์เตอร์ เพื่อควบคุมการทำงานของมอเตอร์ให้เป็นไปตามที่ต้องการ

จากผลการจำลองและผลการทดลองการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสและมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสโดยใช้อินเวอร์เตอร์แบบห้ากึ่ง แสดงให้เห็นว่าหลักการรวมสัญญาณควบคุมดังกล่าวสามารถควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองตัวให้คงที่ได้และเป็นอิสระต่อกันในสภาวะต่างๆ ทั้งนี้มีข้อจำกัดบางประการซึ่งสามารถแก้ไขและดัดแปลงได้ดังข้อเสนอแนะในลำดับต่อไป

6.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการต่อยอดงานวิจัย

1. พัฒนาสัญญาณอ้างอิงเพื่อใช้ได้กับมอเตอร์ชนิดต่างๆ เช่น มอเตอร์สแต็ป มอเตอร์กระแสตรง หรือโหลดชนิดอื่นๆ
2. สามารถให้เป็นแนวทางสำหรับการออกแบบเทคนิคควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ 4 ตัวโดยใช้อินเวอร์เตอร์แบบเก้ากิ่ง เพื่อใช้ในงานแกะสลักแบบสามมิติ เป็นต้น
3. เนื่องจากข้อจำกัดจากการต้องแบ่งแรงดันดีซีบัลหรือค่ามอดูเลตไปให้มอเตอร์เหนี่ยวนำแต่ละตัว อาจเพิ่มแรงดันดีซีบัลหากต้องการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีภาระทางกลสูง
4. จากข้อจำกัดที่ต้องแบ่งค่ามอดูเลตให้มอเตอร์เหนี่ยวนำแต่ละตัวทั้งนี้ อาจทำการลดพิกัดทางด้านแรงดันของมอเตอร์ลง หากไม่ต้องการใช้แรงดันดีซีบัลที่สูงมากหรือต้องการขับเคลื่อนมอเตอร์ที่พิกัด เช่น ใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำ 110 V, 60 Hz เป็นต้น
5. นำอินเวอร์เตอร์แบบห้ากิ่งไปประยุกต์ใช้ในเชิงพาณิชย์ เช่น ใช้กับพัดลมเครื่องปรับอากาศและคอมเพรสเซอร์ หรืองานที่มีการใช้โหลดหนักหนึ่งตัว และโหลดขนาดเล็กหนึ่งตัว เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] N. H. Rashid, “Power Electronics Handbook” Academic Press
- [2] D. G. Holmes, Thomas A. Lipo: “Pulse Width Modulation for Power Converters”, Wiley Interscience, IEEE Press, pp.259-270, 2003
- [3] N. Mohan, Tore M. Underland and William P. Robbins, “Power Electronics: Converters Applications and Design, Second edition”, John Wiley & Sons, Inc, 1995.
- [4] A. E. Fitzgerald, Charles Kingsley Jr., Stephen D. Umans, “Electric Machinery”, McGraw-Hill Book Co., 2003.
- [5] B. K. Bose, “Modern Power Electronics and AC Drives”, PrenticeHall PTR, 2002.
- [6] P. C. Krause, O. Wasynczuk and S. D. Sudhoff, “Analysis of Electric Machinery and Drive Systems”, IEEE press series on Power Engineering, John Wiley & Sons, Inc. Publication, 2002.
- [7] ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย. 25582, “มอเตอร์เหนี่ยวนำ” กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. เอกสารอัดสำเนา
- [8] วีระเชษฐ์ ชันเงิน และ วุฒิพล ธาราธีรเศรษฐ์, “อิเล็กทรอนิกส์กำลัง”, กรุงเทพมหานคร, ห้างหุ้นส่วนจำกัด วี.เจ. พรินต์ติ้ง, 2555
- [9] M. Jones, S.N. Vukosavic, D. Dujic, E Levi and P. Wright, “Five-leg inverter PWM technique for reduced switch count two-motor constant power application”, IET Electr. Power Appl., 2008, vol. 2, No. 5, pp.275-287
- [10] Kumsuwan Y., Premrudeepreechacharn S., Kinnares V., “A Carrier Based Unbalanced PWM Method for Four-Leg Voltage Source Inverter Fed Unsymmetrical Two-Phase Induction Motor”, Industrial Electronics IEEE Trans on Volume 60, Issue 5, Nov 2012, page 2031-2041

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [12] สาธิต สมญาดี และ วิจิตร กิณเรศ, “การออกแบบควบคุมอินเวอร์เตอร์แบบห้ากึ่งเพื่อขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสสองตัวโดยวิธีการควบคุมแรงบิดโดยตรง”, วิศวกรรมสาร มข., ปีที่ 36, ฉบับที่ 2 (107-116), เม.ย.-มิ.ย. 2552
- [13] วัฒนกิจ ช้างพินิจ และ วิจิตร กิณเรศ, “อินเวอร์เตอร์แบบห้ากึ่งโดยใช้เทคนิคสเปซเวกเตอร์สำหรับควบคุมความเร็วให้คงที่เป็นอิสระต่อกันของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสและสองเฟส”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 38 (EECON-38) 18 - 20 พฤศจิกายน 2558 มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

งานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

1. EENET 2017

วัฒนกิจ ช้างพินิจ เฉลิมชาติ มานพ และ วิจิตร กิณเรศ, “การสร้างสัญญาณควบคุมอินเวอร์เตอร์แบบห้ากึ่งสำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสและสองเฟสชนิดพารามิเตอร์ไม่สมมาตรที่เป็นอิสระต่อกัน”, การประชุมวิชาการเครือข่ายไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 9 วันที่ 2-4 พฤษภาคม 2560

2. EECON 38

วัฒนกิจ ช้างพินิจ และ วิจิตร กิณเรศ, “อินเวอร์เตอร์แบบห้ากึ่งโดยใช้เทคนิคสเปซเวกเตอร์สำหรับควบคุมความเร็วให้คงที่เป็นอิสระต่อกันของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสและสองเฟส”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 38 หน้า 465-468 วันที่ 18-20 พฤศจิกายน 2558



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

งานประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 9

EENET-2017

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

Conference Topics

- 1). Electrical power (PW)
- 2). Electronics (EL)
- 3). Electric communication (CM)
- 4). Power electronics (PE)
- 5). Computer and Information Technology (CP)
- 6). Control Systems and Instrumentation (CT)
- 7). Digital signal processing (DS)
- 8). Energy and Energy Saving (ES)
- 9). Innovation and Invention (IN)
- 10). General Electrical Engineering (GN)

Logos at the top: WENET, Rajamangala University of Technology, EENET 2017, and a ribbon symbol.

Logos at the bottom: B Solution Company Limited, AI SOLUTION, NEO DIDACTIC CO.,LTD., phelps dodge, PTS Combination, ThaiEasyElec Education, PRIMUS COMPANY LIMITED, and SAT.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 9

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



การสร้างสัญญาณควบคุมอินเวอร์เตอร์แบบห้ากึ่งสำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส และสองเฟสชนิดพารามิเตอร์ไม่สมมาตรที่เป็นอิสระต่อกัน
Implementation of Five-leg Inverter Controlling Signals for Independently Driving of Three Phase and Unbalanced Two Phase Induction Motors

วัฒน์กิจ ช่างทีนิจ เณนิษาคี มานพ และ วิจิตร กิณเรศ

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เลขที่ 1 ซอยฉลองกรุง 1 ถนนฉลองกรุง แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10520

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอเทคนิคการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสและมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสชนิดพารามิเตอร์ไม่สมมาตรด้วยอินเวอร์เตอร์ชนิดห้ากึ่ง โดยการต่อร่วมขั้วหนึ่งของมอเตอร์เหนี่ยวนำทั้งสองร่วมกัน และขับเคลื่อนด้วยเทคนิคสเปซเวกเตอร์พัลส์วิดมอดูเลชันที่มีการรวมเพื่อลดสัญญาณมอดูเลตให้เหลือห้ากึ่งเป็นผลทำให้สามารถลดจำนวนสวิตช์ลง หรือทั้งควบคุมความเร็วด้วยระบบวงรอบปิด จากผลการทดลองได้แสดงให้เห็นว่าเทคนิคดังกล่าวสามารถควบคุมมอเตอร์ทั้งสองตัวให้หมุนด้วยความเร็วคงที่ที่แตกต่างกันได้ตามที่ต้องการ

คำสำคัญ: อินเวอร์เตอร์แบบห้ากึ่ง, การมอดูเลตความกว้างพัลส์ด้วยวิธีสเปซเวกเตอร์, การควบคุมความเร็วแบบวงรอบปิด

Abstract

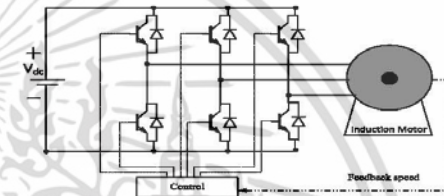
This paper presents a three-phase and asymmetrical parameter type two-phase induction machine drive technique using a five-leg voltage source inverter (VSI), with one inverter leg being common to both machines. Space vector pulse width modulation (SVPWM) and merging technique are made to reduce the number of power electronic devices required in multi-motor drive systems. The experimental results confirm that both motors are able to operate at differently constant speed as speed command.

Key words: Five-leg inverter, Space vector pulse width modulation, Closed-loop speed control

1. บทนำ

ในปัจจุบันการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งตัวจะต้องใช้อินเวอร์เตอร์แบบสามกึ่ง ชุดควบคุม และ DC Link ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งหากมองในภาคอุตสาหกรรมไม่ว่าจะเป็นอุตสาหกรรมขนาดเล็กหรืออุตสาหกรรมขนาดใหญ่ มอเตอร์เหนี่ยวนำจึงมีบทบาทในกระบวนการ

ผลิตเป็นอย่างมาก การลดต้นทุนในการผลิตทางด้านเครื่องจักรกลจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ

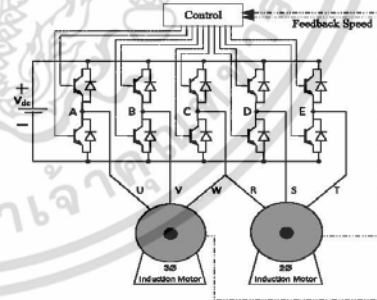


รูปที่ 1 อินเวอร์เตอร์แบบสามกึ่งสำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์หนึ่งตัว

บทความนี้นำเสนอการออกแบบอินเวอร์เตอร์แบบห้ากึ่ง ที่มีความสามารถในการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำสองตัวพร้อมกัน โดยใช้ชุดควบคุมและ DC Link เพียงหนึ่งชุด ทั้งนี้ยังเป็นการลดจำนวนสวิตช์ลงจาก 12 ตัว เหลือเพียง 10 ตัวอีกด้วย [1]

2. การเชื่อมต่ออินเวอร์เตอร์แบบห้ากึ่ง

การเชื่อมต่อมอเตอร์เหนี่ยวนำสองตัวเข้ากับอินเวอร์เตอร์แบบห้ากึ่ง มอเตอร์ทั้งสองจะมีการใช้กึ่งหนึ่งของอินเวอร์เตอร์ร่วมกันดังรูปที่ 2 โดยไม่มีข้อจำกัดว่าจะใช้ร่วมกันที่กึ่งใดหรือใช้ขั้วใดของมอเตอร์



รูปที่ 2 อินเวอร์เตอร์แบบห้ากึ่งสำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์สองตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 9

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

ร่วมกันก็ตาม ซึ่งบทความนี้มีการเชื่อมต่อ มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสดังนี้ คือ เฟส U V และ W ต่อเข้ากับกึ่ง AB และ C ของอินเวอร์เตอร์สามตัว ในส่วนของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสจะทำารเชื่อมต่อขั้ว auxiliary(R) ร่วมกับเฟส W ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่กึ่ง C เชื่อมต่อขั้ว common(S) และขั้ว main(T) เข้าที่กึ่ง D และ E ของอินเวอร์เตอร์สามตัว

3. การสร้างสัญญาณควบคุม

การสร้างสัญญาณพัลส์วิดุมอเตอร์สำหรับควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ เริ่มต้นด้วยการกำหนดสัญญาณคาบสมุทรของมอเตอร์ โดยมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสตัวแรกกำหนดให้มีสัญญาณอ้างอิง ซึ่งสามารถเขียนได้ดังนี้

$$v_u^*(t) = M_1 \sin(\omega_1 t) \tag{1}$$

$$v_v^*(t) = M_1 \sin(\omega_1 t - \frac{2}{3}\pi) \tag{2}$$

$$v_w^*(t) = M_1 \sin(\omega_1 t - \frac{4}{3}\pi) \tag{3}$$

เมื่อ M เป็นดัชนีการมอดูเลชันของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสตัวแรก และ ω_1 เป็นค่ามุมเฟสทางไฟฟ้าของมอเตอร์ ในส่วนของการกำหนดสัญญาณอ้างอิงให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสตัวที่สองที่มีพหุคูณมอเตอร์ไม่สมมาตรสามารถปรับปรุงสมรรถนะโดยการป้อนแรงดันที่มีขนาดไม่เท่ากันของแต่ละเฟส เป็นดังต่อไปนี้

$$v_u^*(t) = M_2 \sin(\omega_2 t) \tag{4}$$

$$v_s^*(t) = M_2 \sin(\omega_2 t - \frac{1}{2}\pi - \delta) \tag{5}$$

$$v_r^*(t) = M_2 \sin(\omega_2 t - \pi) \tag{6}$$

โดยที่ δ เป็นค่ามุมต่างเฟส (phase angle) สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส จะทำการเพิ่มมุมนี้ที่สัญญาณอ้างอิงที่ขั้ว common โดยมีสมการดังต่อไปนี้

$$\delta = 2 \tan^{-1}(a) - \frac{\pi}{2} \tag{7}$$

และ a เป็นอัตราส่วนจำนวนรอบของขดลวด auxiliary ต่อขดลวด main ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส หลังจากทำการกำหนดสัญญาณอ้างอิงให้มอเตอร์เหนี่ยวนำให้มอเตอร์เหนี่ยวนำให้แต่ละตัว ลำดับต่อไปจะเป็นการเพิ่มสัญญาณลำดับศูนย์ $v_o(t)$ เข้าไปที่สัญญาณอ้างอิงในแต่ละตัว แยกกันแต่ละมอเตอร์ ซึ่งเป็นตัวช่วยในด้านประสิทธิภาพของแรงดันดีซีบัส

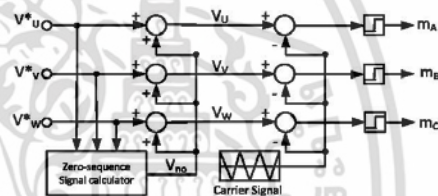
ลดค่าารมอดูของกระแส จะได้สัญญาณมอดูเลตของมอเตอร์แต่ละตัวแสดงดังสมการที่ (4)

$$v_i(t) = v_i^*(t) + v_o(t) \tag{8}$$

เมื่อ $v_o(t)$ คือ สัญญาณไซน์อ้างอิงสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสตัวแรก การเลือกรูปแบบสัญญาณลำดับศูนย์ที่แตกต่างกันนำไปสู่ความแตกต่างกันในวิธีการเปรียบเทียบกับสัญญาณพาหะ PWM โดยในบทความนี้เลือกใช้สัญญาณลำดับศูนย์ $v_o(t)$ ที่ทำการเพิ่มเข้าไปมีรูปแบบคือ

$$V_o(t) = -\frac{1}{2}(V_{max} + V_{min}) \tag{9}$$

โดยที่ V_{max} และ V_{min} คือค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของสัญญาณไซน์อ้างอิง ซึ่งคิดแยกกันแต่ละตัวมอเตอร์ สัญญาณมอดูเลตสามกึ่งที่ได้จากสมการที่ (8) จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับสัญญาณพาหะสำหรับควบคุมตัวขับให้กับอินเวอร์เตอร์แบบสามกึ่งดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 โครงสร้างสร้างสัญญาณขับตัวขับแบบสามกึ่ง

สำหรับอินเวอร์เตอร์แบบห้ากึ่งจะนำสัญญาณมอดูเลตจากสมการที่ (8) มารวมกันเพื่อสร้างสัญญาณโวลต์ระหว่างกึ่งให้ตรงตามลักษณะโครงสร้างของทั้งสองมอเตอร์ โดยรวมสัญญาณมอดูเลตของมอเตอร์ทั้งสองดังสมการที่ (10) ถึง (14)

$$V_A(t) = V_U(t) + V_R(t) \tag{10}$$

$$V_B(t) = V_V(t) + V_R(t) \tag{11}$$

$$V_C(t) = V_W(t) + V_S(t) \tag{12}$$

$$V_D(t) = V_S(t) + V_W(t) \tag{13}$$

$$V_E(t) = V_U(t) + V_W(t) \tag{14}$$

สัญญาณมอดูเลตทั้งห้ากึ่งของอินเวอร์เตอร์จากสมการที่ (10) ถึง (14) จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับสัญญาณพาหะสำหรับควบคุมตัวขับให้กับอินเวอร์เตอร์แบบห้ากึ่ง [2] ดังแสดงในรูปที่ 4

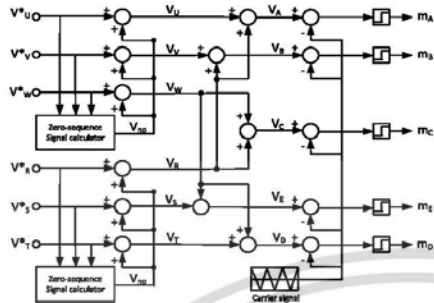
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 9

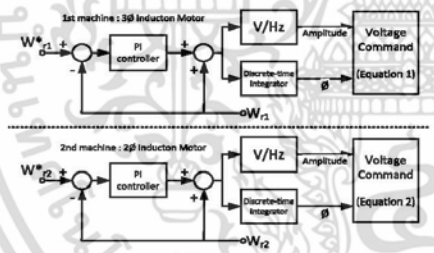
Proceedings of the 9th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2017 (EENET 2017)

PE



รูปที่ 4 โครงสร้างสัญญาณขับเคลื่อนแบบหกเฟส

การควบคุมความเร็วมอเตอร์จะใช้การควบคุมความเร็วแบบวงรอบปิดและมีการสลับโหมดมอเตอร์แบบซอท์สตรัทเพื่อลดกระแสเริ่มต้นไม่ให้มีค่าสูงมาก โดการควบคุมความเร็วมอเตอร์จะใช้จุดตรวจจัมและควบคุมความเร็วของมอเตอร์แต่ละตัวดังรูปที่ 5 โดยทำการปรับค่าความเร็วของมอเตอร์ (ω_r) จากนั้นนำไปเปรียบเทียบกับความเร็วที่เรื่อต้องการ (ω_r^*) ผ่านตัวควบคุมแบบ PI จากนั้นจะเข้าที่บล็อก V/Hz และ Discrete-time Integrator เพื่อทำการสร้างแอมพลิจูด (M) และมุมเฟส (ω_f) ที่ใช้ควบคุมอินเวอร์เตอร์แบบห้ากึ่งให้กับสัญญาณอ้างอิงของมอเตอร์แต่ละตัวของสมการที่ (1) ถึง (3) และ (4) ถึง (6) ตามลำดับ [3]



รูปที่ 5 การควบคุมความเร็วมอเตอร์

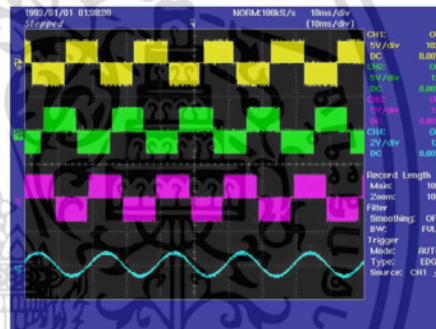
4. ผลการทดลอง

ทำการเชื่อมต่อชุดทดลองดังรูปที่ 2 สร้างแรงดัน DC Link จาก แบตเตอรี่ไฟเบอร์สามเฟสควบคุมไฟแรงดันไฟตรงขนาด 540 V โดยใช้จุดควบคุมสัญญาณเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ C2000 รุ่น f28335 กำหนดให้มีสัญญาณพาหะ 10 kHz ซึ่งมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสและมอเตอร์สองเฟสที่ใช้ในการทดลองมีค่าที่คิดค้นแสดงในตารางที่ 1

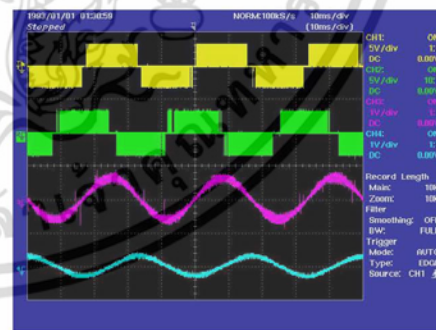
ตารางที่ 1 พิกัดของมอเตอร์ที่ใช้ในการจำลอง

ชนิดของมอเตอร์	3Ø IM	2Ø IM
พิกัดกำลัง	0.25 kW	0.37 kW
พิกัดแรงดัน	400/200V, 50Hz	230V, 50Hz
ความเร็วพิกัด	1350 rpm, 4 pole	1400 rpm, 4 pole

การทดลองจะทำการสร้างสัญญาณควบคุมสำหรับสั่งการขาเกด โดยสร้างแรงดันอ้างอิงระหว่างกึ่งของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสจากสมการที่ (1) ให้ได้ความเร็ว 1500RPM (50Hz) จะได้แรงดันควบคุมที่กึ่ง A-B, B-C, C-A และสัญญาณอ้างอิงกึ่ง C-A ที่ผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 6 สร้างสัญญาณอ้างอิงแรงดันระหว่างขั้วของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสจากสมการที่ (2) ให้ได้ความเร็ว 900RPM (30Hz) แรงดันควบคุมที่กึ่ง C-D (auxiliary), E-D (main) และสัญญาณอ้างอิงกึ่ง C-D (auxiliary) และ E-D (main) ที่ผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 7



รูปที่ 6 สัญญาณอ้างอิงระหว่างกึ่งของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส



รูปที่ 7 สัญญาณอ้างอิงระหว่างกึ่งของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส

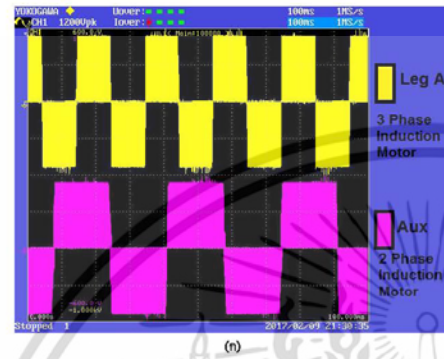
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 9

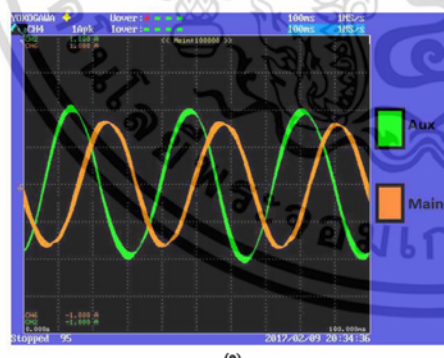
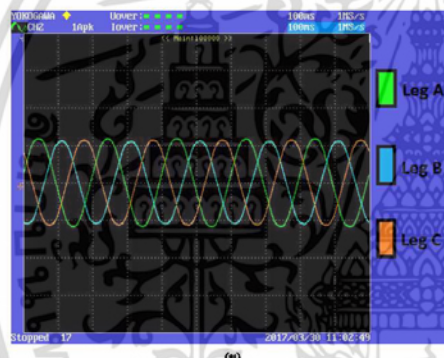
Proceedings of the 9th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2017 (EENET 2017)

สัญญาณควบคุมจากรูปที่ 6 และ 7 ถูกนำมาจ่ายให้สวิตช์ (IGBT) เพื่อขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำทั้งสองซึ่งแรงดันระหว่างกึ่งจากอินเวอร์เตอร์ที่แสดงดังรูปที่ 8(ก) กระแสมอเตอร์เหนี่ยวนำแต่ละตัวแสดงดังรูปที่ 8(ข), (ค) และกระแสที่กึ่งร่วมแสดงดังรูปที่ 8(ง)



รูปที่ 8 แรงดันและกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

- (ก.) แรงดันจากอินเวอร์เตอร์แบบห้ากึ่งที่
- (ข.) กระแสจากมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส (กึ่ง A,B,C)
- (ค.) กระแสจากมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส (กึ่ง C,E)
- (ง.) กระแสที่กึ่งร่วมจากทั้งสองมอเตอร์ (กึ่ง C)



5. สรุป

งานวิจัยนี้ได้ทำเสนอเทคนิคพัลส์สวิตมอดูเลชั่นและการรวมสัญญาณมอดูเลตเพื่อควบคุมอินเวอร์เตอร์แบบห้ากึ่งสำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสและสองเฟสด้วยความเร็วที่แตกต่างกันได้ พิจารณาจากผลการทดลองจึงสรุปได้ว่าชุดควบคุมอินเวอร์เตอร์แบบห้ากึ่งที่กล่าวมาข้างต้นสามารถควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำสองตัวได้อย่างอิสระต่อกันทดแทนการใช้อินเวอร์เตอร์สามกึ่ง ชุดควบคุม และ DC Link จำนวนสองชุดซึ่งเป็นการลดต้นทุนและความยุ่งยากในการควบคุม



6. เอกสารอ้างอิง

- [1] สาทิศ สมญาดี และ วิจิตร กิษเรศ, “การออกแบบควบคุมอินเวอร์เตอร์แบบห้ากึ่งเพื่อขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสสองตัวโดยวิธีการควบคุมแรงบิดโดยตรง”, วิศวกรรมสาร มช., ปีที่ 36
- [2] M.Jones, S.N.Vukosavic, D.Dujic, E.Levi, P.Wright, “Five-leg inverter PWM technique for reduced switch count two-motor constant power applications”, *IET Electr. Power Appl.*, 2008
- [3] วัฒนกิจ ช้างพินิจ และ วิจิตร กิษเรศ, “อินเวอร์เตอร์แบบห้ากึ่งโดยใช้เทคนิคสเปซเวกเตอร์สำหรับควบคุมความเร็วให้กึ่งที่เป็นอิสระต่อกันของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสและสองเฟส”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 38 (EECON-38) 18 - 20 พฤศจิกายน 2558 มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ ๓๘
 The 38th Electrical Engineering Conference (EECON-38)


UTCC University of
the Thai Chamber
of Commerce

มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย


อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)
 ไฟฟ้าสื่อสาร (CM)
 ระบบควบคุมและการวัดคุม (CT)
 อิเล็กทรอนิกส์ (EL)
 การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DS)
 ไฟโตนิคส์ (PH)
 วิศวกรรมชีวการแพทย์ (BE)
 คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (CP)

Volume II
AEC Synergy


วันที่ ๑๘ - ๒๐ พฤศจิกายน พ.ศ. ๒๕๕๘
 โรงแรมบุรี อโยธยา คอนเวนชั่น รีสอร์ท จังหวัดพระนครศรีอยุธยา




UTCC
School of Engineering
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย




MAN
MANAGEABLE
INSULATOR




QTC
QTC ENERGY PCL.




CROWN
CERAMICS



Trinity



RITTA



EEFAT
Electrical Engineering Academic Association (Thailand)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อินเวอร์เตอร์แบบห้ากึ่งโดยใช้เทคนิคสเปซเวกเตอร์สำหรับควบคุมความเร็วให้คงที่เป็นอิสระต่อกันของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส และสองเฟส

Five-Legs Space Vector PWM Inverter for Independently Controlling Constant Speed of Three Phase and Two Phase Induction Motors

วัฒนกิจ ช่างพิณ วิจิตร กิณรศ

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอเทคนิคการควบคุมอินเวอร์เตอร์แบบห้ากึ่งเพื่อควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสและมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสให้มีความเร็วคงที่ที่อิสระต่อกัน โดยใช้เทคนิคสเปซเวกเตอร์พัลส์สวิตมอดูเลชัน(SVPWM) ซึ่งจะมีขั้วของมอเตอร์แต่ละตัวที่ใช้กึ่งของอินเวอร์เตอร์ร่วมกัน เพื่อลดจำนวนสวิตซ์ลง จากผลการจำลองด้วย Matlab/Simulink ยืนยันได้ว่าสามารถควบคุมให้มอเตอร์ทั้งสองตัวหมุนด้วยความเร็วคงที่ที่แตกต่างกันตามที่ต้องการ

คำสำคัญ: อินเวอร์เตอร์แบบห้ากึ่ง, มอเตอร์เหนี่ยวนำ, การมอดูเลตความกว้างพัลส์ด้วยวิธีสเปซเวกเตอร์

Abstract

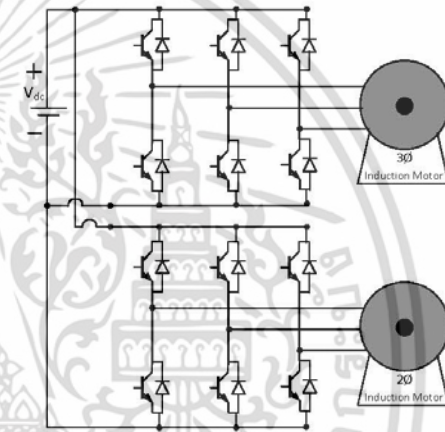
This paper presents a control technique of a five-leg voltage source inverter based on a space vector pulse width modulation(SVPWM) technique for independently controlling constant speed of three phase and two phase induction motors. There is a common leg for a common terminal of both motors in order to reduce the number of switching devices. The simulation results obtained from Matlab/Simulink confirm that both motors are able to operate at differently constant speed as speed command.

Key words: Five-leg inverter, Induction motor, Space vector pulse width modulation

1. บทนำ

ปัจจุบันภาคอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ ใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นองค์ประกอบหลักในโรงงาน เพื่อลดต้นทุน พลังงาน หรือทรัพยากรในการผลิต สามารถทำได้หลากหลายวิธี หนึ่งในนั้นคือ การลดจำนวนของอุปกรณ์สวิตซ์ในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ อีกทั้งยังจะช่วยลดพลังงานสูญเสียที่เกิดจากการสวิตซ์(Switching loss) ลงด้วย เดิมทีการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสหรือสามเฟสจะใช้อินเวอร์เตอร์แบบสามกึ่ง

และตัวควบคุมสองชุดในการขับเคลื่อนแสดงคั้งรูปที่ 1 ซึ่งใช้สวิตซ์เป็นจำนวน 12 ตัว และได้มีการพัฒนาเป็นอินเวอร์เตอร์แบบห้ากึ่งสำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสสองคั้ง[1]



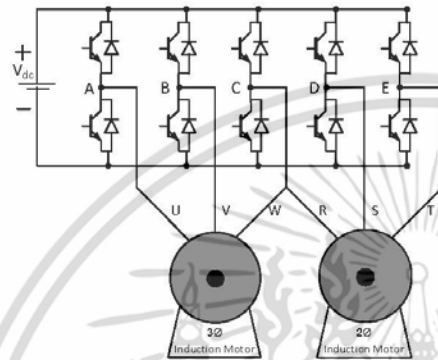
รูปที่ 1 อินเวอร์เตอร์แบบสามกึ่งสองชุดสำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์สองคั้ง

บทความนี้นำเสนอการออกแบบอินเวอร์เตอร์แบบห้ากึ่งที่สามารถควบคุมมอเตอร์พร้อมกันสองคั้งได้อย่างอิสระต่อกัน โดยลดการใช้สวิตซ์ลงจากเดิม 12 ตัว เหลือเพียง 10 ตัว และมีการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ให้คงที่ โดยใช้เทคนิคการควบคุมความเร็วแบบวงรอบปิดและมีการสตาร์ทมอเตอร์แบบซอฟต์สตาร์ท(soft start)

2. รูปแบบของอินเวอร์เตอร์แบบห้ากึ่ง

การขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสองคั้งโดยการใช้อินเวอร์เตอร์แบบห้ากึ่ง เป็นการลดจำนวนสวิตซ์ลง 2 ตัว เมื่อเทียบกับการต้องใช้ชุดขับเคลื่อนที่เป็นอินเวอร์เตอร์แบบสามกึ่ง 2 ชุด ความยุ่งยากของอินเวอร์เตอร์จึงลดลงเนื่องจากสามารถใช้ตัวควบคุมเพียงตัวเดียว โดย

การขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสองตัวโดยใช้อินเวอร์เตอร์แบบห้ากึ่งแสดงดังรูปที่ 2 จะเห็นว่ามอเตอร์ทั้งสองมีการใช้กิ่งของอินเวอร์เตอร์ร่วมกัน โดยเชื่อมต่อกับ U, V ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส เข้าที่กิ่ง A, B เชื่อมต่อขั้ว common(S), ขดลวด main(T) ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส เข้าที่กิ่ง D, E ตามลำดับ และต่อเฟส W ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส เข้ากับขดลวด auxiliary(R) ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสที่กิ่ง C



รูปที่ 2 อินเวอร์เตอร์แบบห้ากึ่งสำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์

3. การควบคุมโดยการมอดูเลตความกว้างพัลส์

เพื่อความสะดวก ทิศทางจาก โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์แบบสามกึ่ง มอเตอร์ตัวแรกต่อเข้ากับกิ่ง A B C ของอินเวอร์เตอร์ โครงสร้างทั่วไปของสัญญาณอ้างอิงโวลเตจสามเฟส เมื่อรวมสัญญาณลำดับศูนย์เข้าไปด้วย แสดงดังรูปที่ 3(ก) ซึ่งสามารถเขียนได้ดังนี้

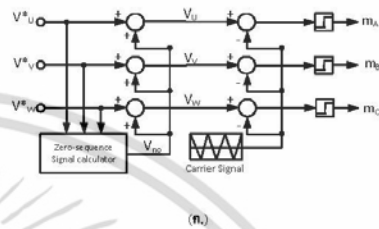
$$v_i(t) = v_i^*(t) + v_o(t) \tag{1}$$

เมื่อ $v_o(t)$ เป็นสัญญาณลำดับศูนย์ และ $v_i^*(t)$ คือ สัญญาณอ้างอิงสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสตัวแรก กำหนดเป็นดังนี้

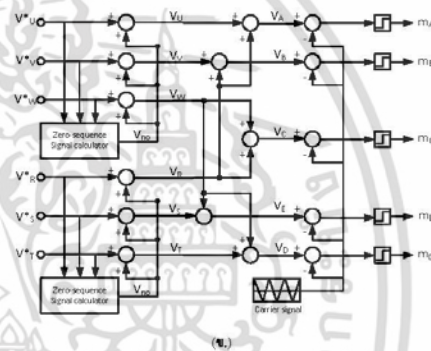
$$\begin{aligned} v_u^*(t) &= M_1 \sin(\omega_1 t) \\ v_v^*(t) &= M_1 \sin(\omega_1 t - \frac{2}{3}\pi) \\ v_w^*(t) &= M_1 \sin(\omega_1 t - \frac{4}{3}\pi) \end{aligned} \tag{2}$$

โดยที่ M_1 เป็นอัตราส่วนของค่าสูงสุดของแรงดันกับครึ่งหนึ่งของแรงดันคิซีบัส [$M_1 = V_i / (0.5V_{dc})$]

สัญญาณลำดับศูนย์สามารถเลือกใช้ได้หลายรูปแบบซึ่งเป็นตัวช่วยในด้านเสถียรภาพของแรงดันคิซีบัสและช่วยลดค่าฮาร์มอนิกของกระแสที่มีการสูญเสียจากสัญญาณพาหะ ความแตกต่างจากการเลือกสัญญาณลำดับศูนย์ $v_o(t)$ ในสมการที่ 1 จะนำไปสู่ความแตกต่างในวิธีการเปรียบเทียบกับสัญญาณพาหะ PWM คือ



(ก.)



(ข.)

รูปที่ 3 โครงสร้างสัญญาณพาหะพัลส์ตัวมอดูเลชัน

- (ก.) โครงสร้างมาตรฐานสำหรับอินเวอร์เตอร์แบบสามกึ่ง
- (ข.) โครงสร้างที่พัฒนาขึ้นสำหรับอินเวอร์เตอร์แบบห้ากึ่งเพื่อขับเคลื่อนมอเตอร์สองตัว

การขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสตัวที่สองที่มีพารามิเตอร์ไม่สมมาตรตามการปรับปรุงสมรรถนะด้วยการเปลี่ยนแรงดันไม่เท่ากันของแต่ละเฟส ทำได้โดยต่อขั้ว R(auxiliary), S(common), T(main) ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสเข้ากับที่กิ่ง C D และ E ตามลำดับ กำหนดให้สัญญาณอ้างอิงสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสเป็นดังนี้

$$\begin{aligned} V_r^*(t) &= M_2 \sin(\omega_2 t) \\ V_s^*(t) &= M_2 \sin(\omega_2 t - \frac{1}{2}\pi - \delta) \\ V_t^*(t) &= M_2 \sin(\omega_2 t - \pi) \end{aligned} \tag{3}$$

เมื่อ δ เป็นค่ามุมต่างเฟส (phase angle) สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส จะทำการเพิ่มมุมนี้ที่สัญญาณอ้างอิงที่ขั้ว common โดยมีสมการดังต่อไปนี้

$$\delta = 2 \tan^{-1}(a) - \frac{\pi}{2} \quad (4)$$

โดยที่ a เป็นอัตราส่วนจำนวนรอบของขดลวด auxiliary ต่อขดลวด main ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส[2]

โครงสร้างสำหรับอินเวอร์เตอร์แบบห้ากึ่งเพื่อขับเคลื่อนมอเตอร์สองตัวแสดงดังรูปที่ 3(ข) โดยสัญญาณไซน์อ้างอิงของมอเตอร์ทั้งสองนี้ (2), (3) สามารถกำหนดความถี่และมุมเฟสได้อย่างอิสระต่อกัน เมื่อนำสัญญาณเอาต์พุตจากสมการที่ (1) มารวมสัญญาณเพื่อลดจำนวนสัญญาณมอดูเลตจาก 6 เหลือเพียง 5 จึงจะได้สัญญาณมอดูเลตที่ขาทั้งห้าเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณพาหะเป็นดังต่อไปนี้ [3]

$$\begin{aligned} V_a(t) &= V_U(t) + V_R(t) \\ V_b(t) &= V_V(t) + V_R(t) \\ V_c(t) &= V_W(t) + V_R(t) \\ V_D(t) &= V_S(t) + V_W(t) \\ V_E(t) &= V_T(t) + V_W(t) \end{aligned} \quad (5)$$

สัญญาณลำดับศูนย์ $v_o(t)$ ที่ทำการเพิ่มเข้าไปจะมีรูปแบบคือ

$$V_o(t) = -\frac{1}{2}(V_{max} + V_{min}) \quad (6)$$

4. การจำลองผลการทำงาน

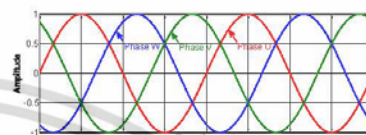
การจำลองผลจะทำการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink โดยกรับแรงดัน 220V 3 เฟส จากนั้นใช้บริดจ์เรกติไฟเออร์เพื่อแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง มอเตอร์แต่ละตัวที่ใช้มีพิกัดดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 1 พิกัดของมอเตอร์ที่ใช้ในการจำลอง

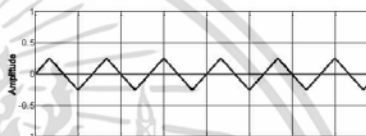
ชนิดของมอเตอร์	3Ø IM	2Ø IM
พิกัดกำลัง	4 แรงม้า	2 แรงม้า
พิกัดแรงดัน	380 V (line-line), 50Hz	220V, 50Hz
ความเร็วพิกัด	1415 rpm, 4 pole	1430 rpm, 4 pole

ในการจำลองจะใช้แรงดันคิซีบิต 540V ความถี่พาหะ 10 kHz เมื่อทำการกำหนดค่า M เท่ากับ 1 ผลการจำลองของสัญญาณบางตัวที่ใช้ขับ

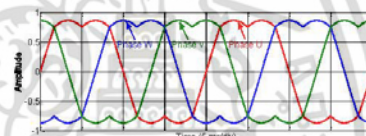
ขาเกตของสวิตช์ แสดงดังรูปที่ 4(ก), (ข), (ค) ซึ่งเป็นสัญญาณจากมอเตอร์ตัวแรกซึ่งเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ (2), (6) และ (1) ตามลำดับ เมื่อทำการรวมสัญญาณจาก 6 ให้เหลือ 5 สัญญาณตามสมการที่ (6) จะได้สัญญาณมอดูเลตเพื่อใช้เปรียบเทียบกับสัญญาณพาหะให้ได้สัญญาณ PWM ควบคุมการทำงานของสวิตช์ทั้งห้า กิ่งแสดงดังรูปที่ 4(ง)



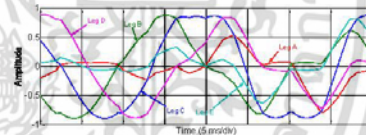
(ก)



(ข)



(ค)

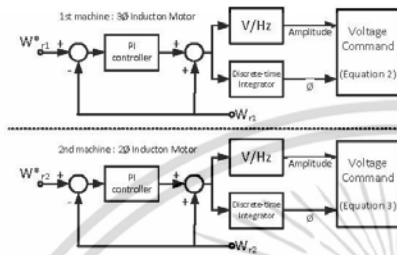


(ด)

รูปที่ 4 สัญญาณที่ใช้ควบคุมการทำงานของสวิตช์ (ก) สัญญาณ ไซน์อ้างอิงของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส (ข) สัญญาณลำดับศูนย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส (ค) สัญญาณอ้างอิงของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสเมื่อเพิ่มสัญญาณลำดับศูนย์ (ง) สัญญาณอ้างอิงสำหรับเปรียบเทียบกับสัญญาณพาหะ 5 กิ่ง

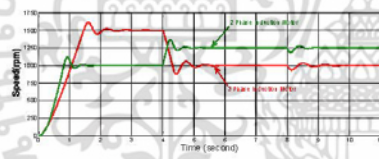
ในส่วนของการควบคุมความเร็วมอเตอร์จะใช้การควบคุมความเร็วแบบวงรอบปิดและมีคาร์สคาร์ทมอเตอร์แบบซอท์สคาร์ทเพื่อลดกระแสเริ่มต้นไม่ให้มีค่าสูงมาก โดยการควบคุมความเร็วมอเตอร์จะใช้ชุดตรวจจับและควบคุมความเร็วของมอเตอร์แต่ละตัวดังรูปที่ 5 โดยที่

การรับค่าความเร็วของมอเตอร์ (ω) จากนั้นนำไปเปรียบเทียบกับความเร็วที่เรากำลัง (ω^*) ผ่านตัวควบคุมแบบ PI จากนั้นจะเข้าที่บล็อก V/Hz และ Discrete-time Integrator เพื่อทำการสร้างแอมพลิจูด (M) และมุมเฟส (θ) ที่ใช้ควบคุมอินเวอร์เตอร์แบบห้ากึ่งให้กับสัญญาณอ้างอิงของมอเตอร์แต่ละตัวของสมการที่ (2),(3)

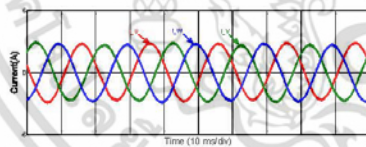


รูปที่ 5 การควบคุมความเร็วมอเตอร์

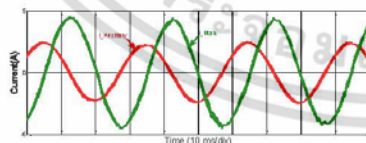
โดยการจำลองจะเริ่มโดยการให้มอเตอร์เหนี่ยวนำตามเฟสหมุนไปที่ความเร็ว 1500 rpm จากนั้นทำการลดระดับความเร็วมาที่ 1000 rpm ในส่วนของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสจะเริ่มหมุนที่ความเร็ว 1000 rpm จากนั้นทำการเพิ่มระดับความเร็วมาที่ 1250 rpm และทำการเพิ่มโหลดขนาด 3 Nm ให้กับมอเตอร์ทั้งสอง ซึ่งผลการควบคุมความเร็วมอเตอร์แต่ละกระแสในแต่ละเฟสแสดงในรูปที่ 6



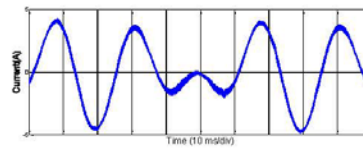
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 6 ความเร็วรอบและกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

- (ก.) ความเร็วของมอเตอร์ทั้งสอง
- (ข.) กระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส (ถึง A,B,C)
- (ค.) กระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส (ถึง C,E)
- (ง.) กระแสที่ถูกรวมจากทั้งสองมอเตอร์ (ถึง C)

5. สรุป

งานวิจัยนี้ได้ถูกออกแบบ และทำการจำลองการควบคุมอินเวอร์เตอร์แบบห้ากึ่งเพื่อ ขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส และมอเตอร์เหนี่ยวนำตามเฟสพร้อมกัน โดยใช้เทคนิคของเวกเตอร์ตัดสวิตช์มอดูเลชันและวิธีการรวมสัญญาณสำหรับการมอดูเลตความกว้างพัลส์

จากผลการจำลองการทำงานจึงสรุปได้ว่า สามารถควบคุมมอเตอร์สองตัวพร้อมกันโดยใช้อินเวอร์เตอร์แบบห้ากึ่งทดแทนการใช้อินเวอร์เตอร์แบบสามกึ่งสองชุดได้ ซึ่งมีข้อได้เปรียบในการใช้จำนวนสวิตช์และตัวควบคุมจำนวนน้อยกว่า

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] สานิต สมญาดี และ วิจิตร กิมเมต, "การออกแบบควบคุมอินเวอร์เตอร์แบบห้ากึ่งเพื่อขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสสองตัวโดยวิธีการควบคุมแรงบิดโดยตรง", วิศวกรรมสาร ม.ช. ปีที่ 36, ฉบับที่ 2 (107-116), เม.ย. - มิ.ย. 2552
- [2] Kumsuwan, Y., Premrudeeprachachem, S., Kimares, V., "A Carrier Based Unbalanced PWM Method for Four-Leg Voltage Source Inverter Fed Unsymmetrical Two-Phase Induction Motor", Industrial Electronics IEEE Trans on Volume 60, Issue 5, Nov 2012, page 2031-2041
- [3] M.Jones, S.N.Vukoarvic, D.Dujic, E.Levi, P.Wright, "Five-leg inverter PWM technique for reduced switch count two-motor constant power applications", IET Electr. Power Appl., 2008, Vol. 2, No. 5, pp. 275-287

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

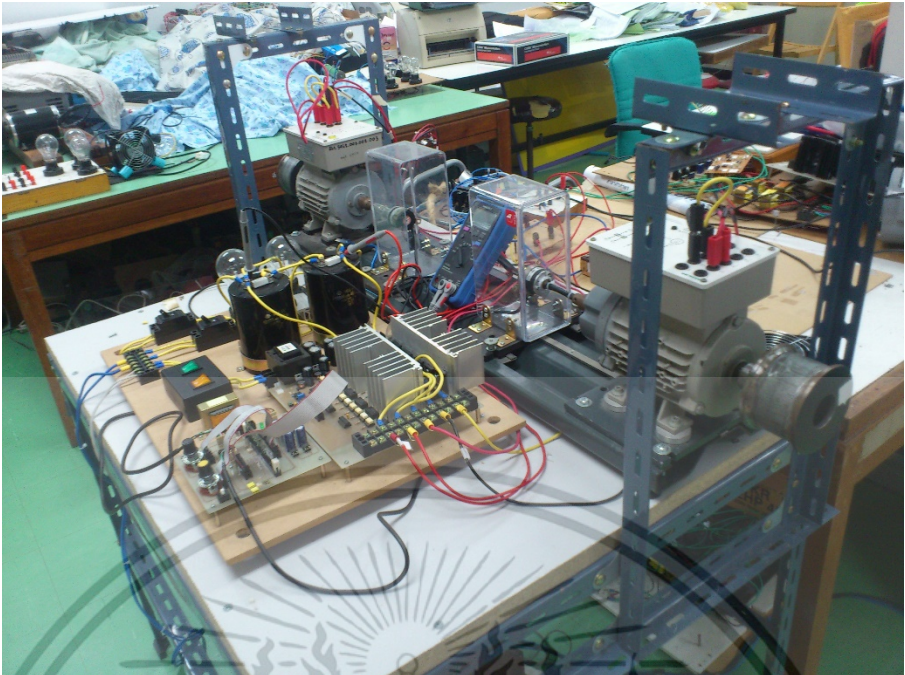
ฮาร์ดแวร์สำหรับงานวิจัย

ประมวลภาพสำหรับงานวิจัย

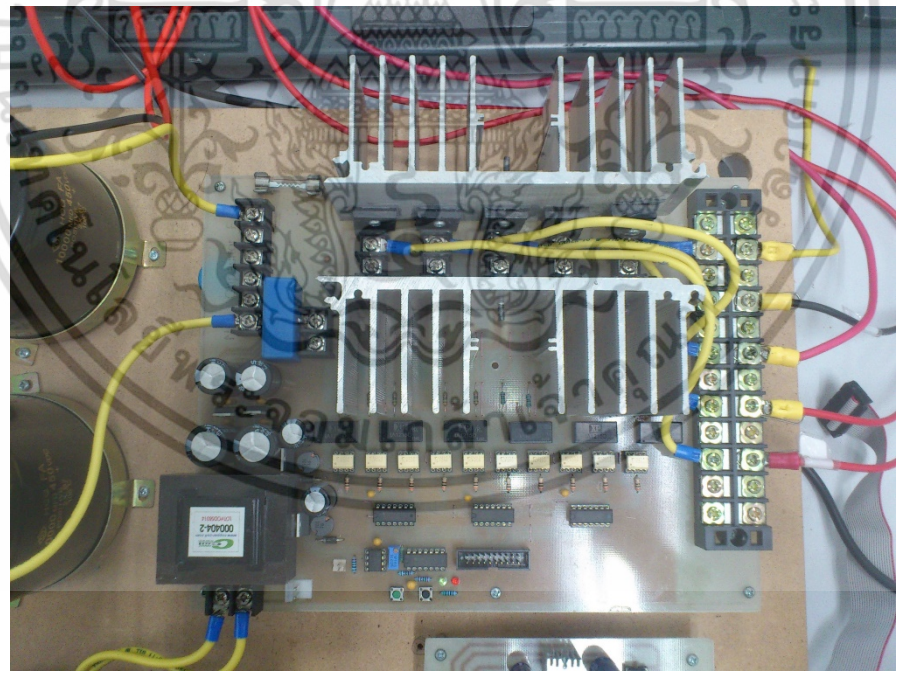
- ภาพรวมชุดฮาร์ดแวร์
- อินเวอร์เตอร์แบบห้ากึ่ง
- ชุดสร้างสัญญาณควบคุม
- ไมโครคอนโทรลเลอร์ Delfino C2000/TMS320F28335
- ตัวเก็บประจุสำหรับดีซีบัล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

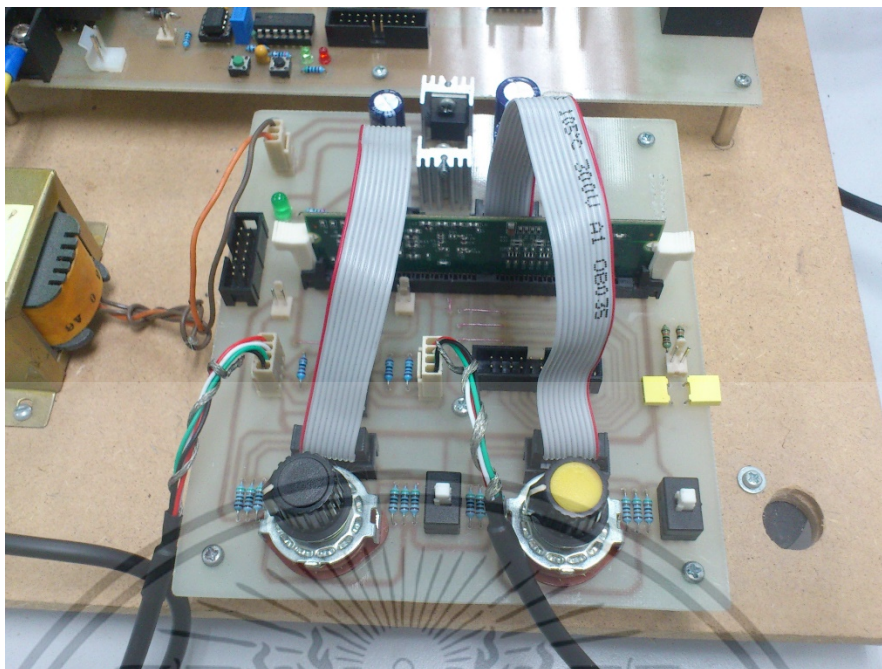


- ภาพรวมชุดฮาร์ดแวร์

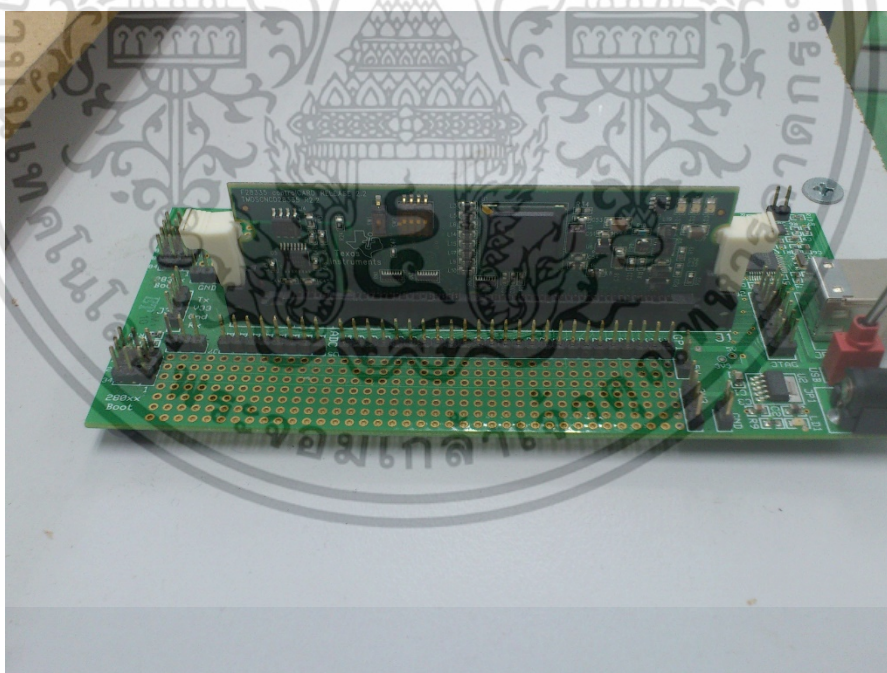


- อินเวอร์เตอร์แบบห้ากึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

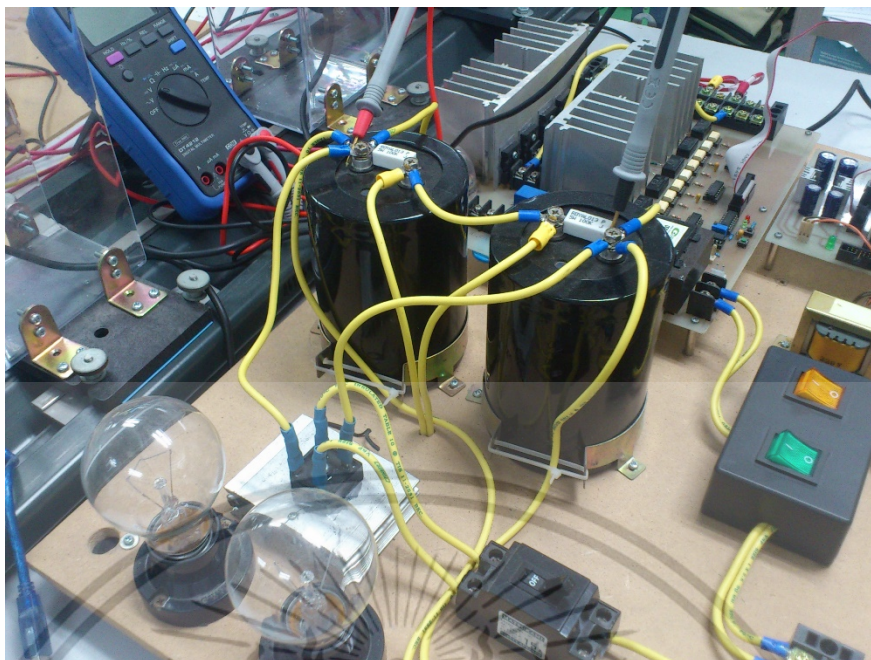


- ชุดสร้างสัญญาณควบคุม



- ไมโครคอนโทรเลอร์ Delfino C2000/TMS320F28335

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



- ตัวเก็บประจุสำหรับดีซีบัล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค.

พารามิเตอร์มอเตอร์เหนี่ยวนำสำหรับการจำลองและทดลองการทำงาน

1. มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

พิกัดกำลัง	250	W
พิกัดแรงดัน	400/230	V
พิกัดกระแส	1.32/0.76	A
ความเร็วพิกัด	1350	rpm
ความถี่	50	hz
จำนวนขั้วแม่เหล็ก	4	pole

- มอเตอร์อยู่นิ่ง

วัดค่าความต้านทานสเตเตอร์ R_s ของมอเตอร์เหนี่ยวนำจากขดลวดแต่ละขดขณะหยุดนิ่ง
ได้ตั้ง $R_s = 44.5 \Omega$

- มอเตอร์ทำงานที่สถานะไม่มีโหลด

ประมาณค่าว่า $s = 0$ และ $R_s \ll X_{LM}$ ผลการทำงานได้ดังนี้
ตารางที่ ค.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขณะไม่มีภาระทางกล

Voltage (V)	Current (A)	Power (W)	Power Factor
229.4	0.56	-	0.19

$$\text{จะได้ } L_M = \frac{V_{sn}}{I_{sn} 2\pi f} = \frac{229.4}{0.56 \times 2\pi \times 50} = 1.3073 H$$

- มอเตอร์ทำงานสภาวะที่ถูกยึดไม่ให้หมุน

ได้ค่า $s = 1$ โดยจะทำการเพิ่มแรงดันจนได้ค่ากระแสถึงค่ากระแสพิกัด ได้ผลดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.2 มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขณะยึดไม่ให้หมุน

Voltage (V)	Current (A)	Power (W)	Power Factor
150	1.32	-	0.77

คำนวณค่าต่างๆได้ดังนี้

$$R_{eq} = \frac{V_{sn}}{I_{sn}} \cos \theta = \frac{150}{1.32} \cos(39.64) = 87.50 \Omega$$

$$X_{eq} = \frac{V_{sn}}{I_{sn}} \sin \theta = \frac{150}{1.32} \sin(39.64) = 72.50 \Omega$$

$$R_r = R_{eq} - R_s = 87.50 - 44.50 = 43 \Omega$$

$$L_{eq} = \frac{X_{eq}}{2\pi f} = \frac{72.50}{2\pi(50)} = 0.2308$$

$$L_{ls} = L_{lr} = L_{eq} / 2 = 0.2308 / 2 = 0.1154 H$$

2. มอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส

พิกัดกำลัง	370	W
พิกัดแรงดัน	230	V
พิกัดกระแส	2.6	A
ความเร็วพิกัด	1400	rpm
ความถี่	50	hz
จำนวนขั้วแม่เหล็ก	4	pole
อัตราส่วนขดลวดช่วยต่อขดลวดหลัก	1.3004	

- การทดสอบหาอัตราส่วนจำนวนรอบขดลวดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

จะทำการจ่ายแรงดันให้มอเตอร์เหนี่ยวนำทำงาน โดยจ่ายที่ขดลวดใดขดลวดหนึ่งแล้ว วัดผลของแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นกับขดลวดอีกขดหนึ่ง โดยผลของการจ่ายแรงดันที่พิกัดให้ขดลวดหลักแล้วจัดค่าแรงดันที่เกิดขึ้นที่ขดลวดช่วย และการจ่ายแรงดันให้ขดลวดช่วยแล้ววัดแรงดันที่เกิดขึ้นที่ขดลวดหลักได้ผลดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จ่ายแรงดัน	$E_m = 230V$	วัดได้	$E'_a = 219V$
จ่ายแรงดัน	$E_a = 230V$	วัดได้	$E'_m = 129.5V$

$$\text{จะได้อัตราส่วนจำนวนรอบ } \alpha = \sqrt{\frac{E_m E'_a}{E_a E'_m}} = \sqrt{\frac{230 \times 219}{230 \times 129.5}} = 1.3004$$

- การทดสอบจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

ทำการจ่ายแรงดันกระแสตรงให้กับขดลวดหลักและขดลวดช่วยเพื่อหาค่าความต้านทาน โดยผลการได้ดังนี้

ตารางที่ ค.3 ผลการทดสอบด้วยไฟตรงที่ขดลวดหลัก

Voltage(V)	1.88	2.77	4.93	8.45	12.44	15.76	17.54	21.04
Current(A)	0.15	0.223	0.399	0.682	0.997	1.261	1.399	1.669
$R_{sm}(\text{ohm})$	12.53	12.42	12.35	12.39	12.47	12.49	12.53	12.60

ตารางที่ ค.4 ผลการทดสอบด้วยไฟตรงที่ขดลวดช่วย

Voltage(V)	3.00	4.97	8.49	11.62	14.71	17.30	20.82	25.06
Current(A)	0.149	0.246	0.418	0.572	0.721	0.846	1.014	1.216
$R_{sa}(\text{ohm})$	20.13	20.20	20.31	20.31	20.40	20.44	20.53	20.60

จากตารางที่ ค.3 และ ค.4 สามารถหาค่าความต้านทานสเตเตอร์โดยการเฉลี่ยได้ดังนี้

$$R_{sm} = 12.5 \Omega , R_{sa} = 20.4 \Omega$$

- มอเตอร์ทำงานสภาวะที่ถูกยึดไม่ให้หมุน (s=1)

แบ่งการทดสอบเป็น 2 ส่วน คือ ในส่วนของการยึดโรเตอร์ที่ขดลวดหลักจะทำการยึดโรเตอร์และจ่ายแรงดันให้ขดลวดหลักจนกว่าจะถึงค่ากระแสพิกัด โดยมีการเปิดวงจรที่ขดลวดช่วยและอีกส่วนหนึ่งคือ การยึดโรเตอร์ที่ขดลวดช่วยจะทำการยึดโรเตอร์และจ่ายแรงดันให้ขดลวดช่วยโดยที่มีการเปิดวงจรที่ขดลวดหลักด้วยการเพิ่มแรงดันขึ้นไปเรื่อยๆจนกว่าจะถึงค่า Power Factor เท่ากับการทดสอบในส่วนของขดลวดหลัก โดยผลการทดสอบการยึดโรเตอร์ได้ผลดังต่อไปนี้

ตารางที่ ค.5 การทดสอบการยึดโรเตอร์ให้อยู่หนึ่งที่ขดลวดหลัก

Voltage (V)	Current (A)	Power (W)	Power Factor
119	<u>2.6</u>	230	<u>0.76</u>

ตารางที่ ค.6 การทดสอบการยึดโรเตอร์ให้อยู่หนึ่งที่ขดลวดช่วย

Voltage (V)	Current (A)	Power (W)	Power Factor
73.1	0.87	40	<u>0.76</u>

จากการทดสอบดังกล่าวสามารถหาค่ารีแอกแตนซ์ X_s , X_m และความต้านทานโรเตอร์

R_r ส่วนของขดลวดหลักได้ดังนี้

$$Z_{bm} = \frac{V_{bm}}{I_{bm}} = \frac{119}{2.6} = 45.769 \Omega$$

$$R_{bm} = \frac{P_{bm}}{I_{bm}^2} = \frac{230}{2.6^2} = 34.023 \Omega$$

$$X_{bm} = \sqrt{Z_{bm}^2 - R_{bm}^2} = \sqrt{45.769^2 - 34.023^2} = 31.614 \Omega$$

เมื่อกำหนดให้

$$X_{bm} = X_{1m} + X_{2m}$$

และ

$$X_{sm} = X_{rm} = X_{1m} = X_{2m} = 0.5 X_{bm} = 0.5 \times 30.64 = 15.307 \Omega$$

$$R_{rm} = R_{2m} = R_{bm} - R_{1m} = 34.023 - 12.5 = 21.523 \Omega$$

ส่วนของขดลวดช่วยได้ดังต่อไปนี้

$$Z_{ba} = \frac{V_{ba}}{I_{ba}} = \frac{73.1}{0.87} = 84.022 \Omega$$

$$R_{ba} = \frac{P_{ba}}{I_{ba}^2} = \frac{40}{0.87^2} = 52.847 \Omega$$

$$X_{ba} = \sqrt{Z_{ba}^2 - R_{ba}^2} = \sqrt{84.022^2 - 52.847^2} = 65.321 \Omega$$

เมื่อกำหนดให้

$$X_{ba} = X_{1a} + X_{2a}$$

และ

$$X_{sa} = X_{ra} = X_{1a} = X_{2a} = 0.5 X_{ba} = 0.5 \times 65.321 = 32.660 \Omega$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- มอเตอร์ทำงานสภาวะไม่โหลดที่ขีดลวดหลัก (s=0)

ให้มอเตอร์ทำงานโดยการจ่ายแรงดันที่พิกัดให้ขีดลวดหลักและเปิดวงจรที่ขีดลวดช่วยโดยกำหนดให้ค่าความสูญเสีย (Core loss) มีค่าน้อยมาก และค่าสลิปที่ค่าใกล้ศูนย์ ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ ค.7

ตารางที่ ค.7 การทดสอบขณะไม่มีภาระทางกลที่ขีดลวดหลัก

Voltage (V)	Current (A)	Power (W)	Power Factor	Speed (rpm)
230	2.18	170	0.34	1439

จากผลการทดสอบดังกล่าวสามารถหาค่า X_m ได้ดังนี้

$$Z_{nl} = \frac{V_{nl}}{I_{nl}} = \frac{230}{2.18} = 105.50 \Omega$$

$$R_{nl} = \frac{P_{nl}}{I_{nl}^2} = \frac{170}{2.18^2} = 35.77 \Omega$$

$$X_{nl} = \sqrt{Z_{nl}^2 - R_{nl}^2} = \sqrt{105.50^2 - 35.77^2} = 99.25 \Omega$$

$$X_m = 2X_{nl} - 1.5X_{bm} = (2 \times 99.25) - (1.5 \times 30.61) = 152.587 \Omega$$

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายวัฒนกิจ ช่างพินิจ
วัน เดือน ปีเกิด	25 สิงหาคม 2534 ที่จังหวัดพิษณุโลก
ที่อยู่	46/1 หมู่ 3 ตำบลไผ่ยอดอน อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก
ประวัติการศึกษา	2547 – 2552 จบการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาจาก โรงเรียน จุฬารณราชวิทยาลัยพิษณุโลก จังหวัดพิษณุโลก 2553 - 2556 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2560 สำเร็จการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา ไฟฟ้าสื่อสาร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1.) อินเวอร์เตอร์ 2.) การขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3.) การออกแบบวงจรควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์
ความสนใจ	1.) การควบคุมหุ่นยนต์และแขนกล 2.) CNC สำหรับงานแกะสลัก 3.) อุปกรณ์ทางการแพทย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้