

ระบบควบคุมมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร
CONTROL SYSTEM FOR PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

ระบบควบคุมมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร

CONTROL SYSTEM FOR PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CONTROL SYSTEM FOR PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR



THIS PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILMENT OF THE REQUIREMENT
FOR THE BACHELOR DEGREE IN ELECTRICAL ENGINEERING
DERARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2559

ระบบควบคุมมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร

CONTROL SYSTEM FOR PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR



อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.สมยศ เกียรติวนิชวิไล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ 2559

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ระบบควบคุมมอเตอร์ซึ่งโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร

ผู้จัดทำ

1. นางสาวดวงดาว ลอมไธสง
2. นางสาวภัทรวดี จันทกุล
3. นายสิทธิพันธ์ สังข์ทอง



.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร.สมยศ เกียรติวนิชวิไล)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบควบคุมมอเตอร์ซึ่งโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร

นางสาวดวงดาว ลอมไธสง

นางสาวภัทรวดี จันทกุล

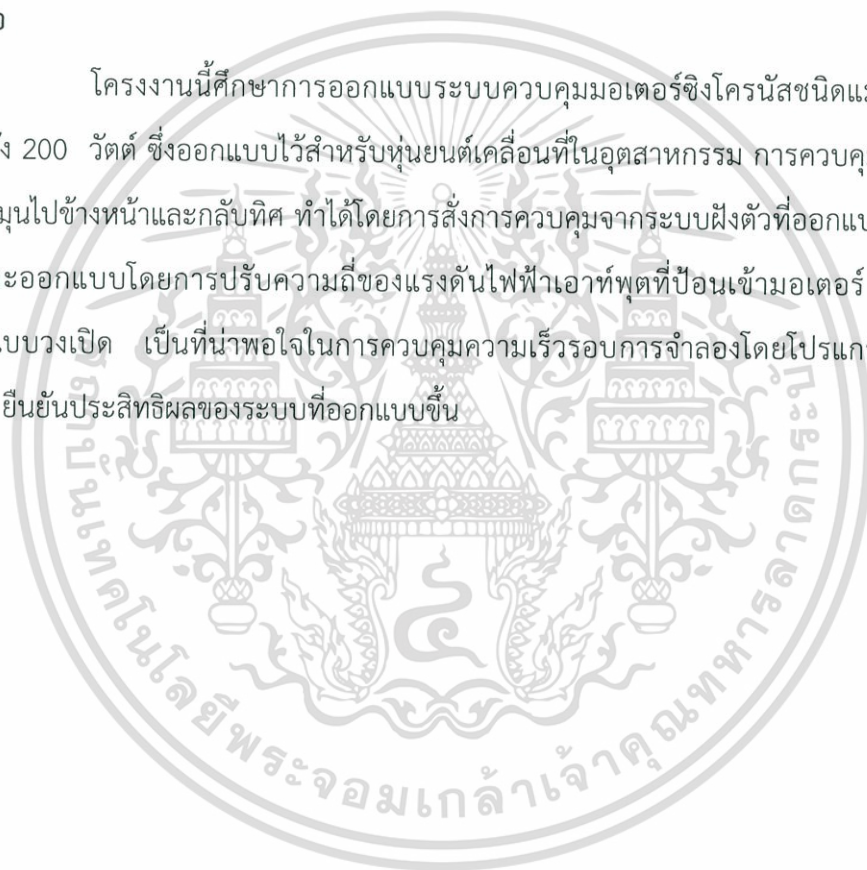
นายสิทธิพันธ์ สังข์ทอง

รศ.ดร.สมยศ เกียรติวนิชวิไล อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2559

บทคัดย่อ

โครงการนี้ศึกษาการออกแบบระบบควบคุมมอเตอร์ซึ่งโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร พิกัดกำลัง 200 วัตต์ ซึ่งออกแบบไว้สำหรับหุ่นยนต์เคลื่อนที่ในอุตสาหกรรม การควบคุมมอเตอร์ในทิศทางหมุนไปข้างหน้าและกลับทิศ ทำได้โดยการสั่งการควบคุมจากระบบฝังตัวที่ออกแบบไว้ ในการควบคุมจะออกแบบโดยการปรับความถี่ของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ป้อนเข้ามอเตอร์ โดยผลการทดสอบแบบวงเปิด เป็นที่น่าพอใจในการควบคุมความเร็วรอบการจำลองโดยโปรแกรมเมทแลป ซิมมูลิงค์ ยืนยันประสิทธิผลของระบบที่ออกแบบขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CONTROL SYSTEM FOR PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR

Ms. Duangdaw Lomthaisong

Ms. Pattaravadee Juntakun

Mr. Sitthinon Sungthong

Assoc.Prof.Dr.Somyot Kiatwanidvilai Advisor

2016

ABSTRACT

This project studies the design of control system for Permanent magnet synchronous motor, 200 W which is designed for a mobile robot used in industry. The direction control of the motor to rotate the shaft in both directions is done by using the embedded system. In the control system, the adjusting of speed is carried out by changing the frequency of the output voltage of the motor. The experimental results show the satisfied performance of speed control. Simulation using MATLAB SIMULINK verifies the effectiveness of the design system.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาโทฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับการช่วยเหลือจาก อาจารย์ที่ปรึกษา และรุ่นพี่หลายๆท่าน พร้อมกับเพื่อนๆภาควิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยเฉพาะอย่างยิ่งอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. สมยศ เกียรติวนิชวิไล รุ่นพี่ปริญญาเอก นายภูมิ คงห้วยรอบ และรุ่นพี่ปริญญาโทที่คอยดูแลให้ คำแนะนำและเป็นพี่ปรึกษาในด้านต่างๆเป็นอย่างดี ที่มีประโยชน์อย่างยิ่งต่อการทำโครงการนี้ให้เป็น ผลสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีตลอดมา

ณ โอกาสนี้ทางคณะผู้จัดทำขอขอบคุณทุกๆท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือ คำปรึกษา พร้อมคำแนะนำต่างๆเป็นอย่างมาก ที่ทำให้โครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และหวังว่าคงจะได้รับความอนุเคราะห์อีกในโอกาสต่อไป จึงขอขอบคุณไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

สุดท้ายนี้ทางคณะผู้จัดทำหวังเป็นอย่างยิ่งว่าโครงการนี้จะเป็นประโยชน์แก่ผู้ที่ศึกษาต่อไป ไม่นานก็น้อย

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	i
ABSTRACT	ii
กิตติกรรมประกาศ.....	iii
สารบัญ.....	iv
สารบัญรูป	viii
สารบัญตาราง.....	xi
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ.....	3
1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการ	3
1.5 แผนการดำเนินงาน	4
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	6
2.1 เซอร์โวมอเตอร์	6
2.1.1 ประเภทของเซอร์โวมอเตอร์	6
2.1.1.1 AC Servomotor.....	7
2.1.2 ข้อดี ข้อเสีย ของเซอร์โวมอเตอร์	9
2.2 เซนเซอร์ตรวจจับระยะการหมุน (Encoder).....	9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3 การควบคุมแบบ Scalar	11
2.3.1 การควบคุมแบบ v/f constant	11
2.4 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ	15
2.4.1 ตัวควบคุมแบบพี พีไอ พีดีและพีไอดี (P, PI, PD และ PID).....	18
2.5 อินเวอร์เตอร์สามเฟส	20
2.5.1 อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสามเฟสแบบพีดับเบิลยูเอ็ม	20
2.6 ไอจีบีที (Isulated Gate Biopolar Transistors : IGBT)	24
2.6.1 สภาวะนำกระแส.....	26
2.6.2 สภาวะหยุดนำกระแส.....	27
2.7 ไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F4011	28
2.7.1 รายละเอียดและคุณสมบัติ.....	29
2.7.2 ฟังก์ชันที่ใช้งาน.....	29
2.7.2.1 โมดูลแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอลขนาด 10 บิต.....	29
2.7.2.2 โมดูลไทมเมอร์.....	29
2.7.2.3 โมดูล MCPWM (Motor Control Pulse Width Modulated).....	31
2.8 ภาษาที่ใช้เขียนโปรแกรมควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์	32
2.8.1 ภาษา C	39
2.9.2 ภาษา Assembly	32
2.9.3 ภาษา Basic.....	32
2.9.4 ภาษา Pascal	33
2.9.5 ภาษา Java.....	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

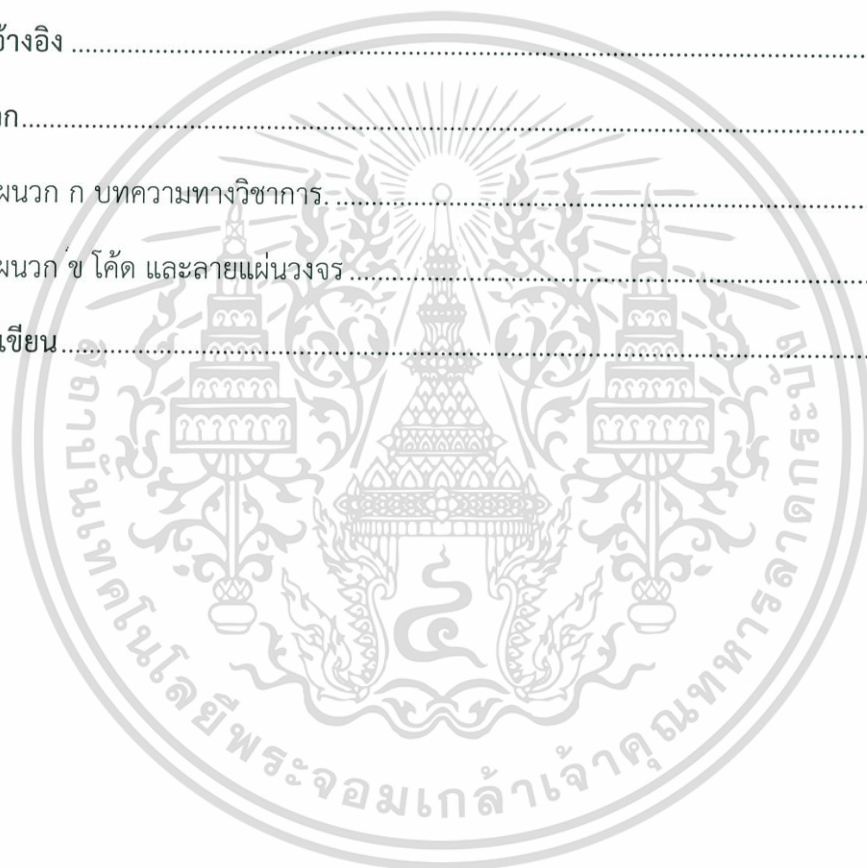
หน้า

บทที่ 3 การออกแบบและการสร้างวงจรควบคุมเอซีเซอร์โวมอเตอร์	34
3.1 ส่วนประกอบของวงจรควบคุมเอซีเซอร์โวมอเตอร์	34
3.2 วงจรกำลังของอินเวอร์เตอร์	34
3.3 การออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส	35
3.3.1 วงจรประยุกต์การใช้งานไอซีเบอร์ FSBS10CH60	36
3.3.1.1 Bootstrap Circuit	36
3.3.1.2 วงจรป้องกันการลัดวงจร	37
3.4 จอแสดงผล LCD	38
3.4.1 การควบคุมการแสดงผลของ LCD	38
3.4.2 การเชื่อมต่อสัญญาณขาข้อมูลระหว่าง Microcontroller กับ LCD Controller	39
3.5 การจำลองทาง MATLAB ของ Permanent Magnet Synchronous Motor	40
บทที่ 4 การทดสอบและการประมวลผล	47
4.1 บทนำ	47
4.2 อุปกรณ์และเครื่องมือวัดทางไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบมอเตอร์	49
4.3 การทดสอบมอเตอร์	49
4.3.1 จุดประสงค์การทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับแบบเซอร์โวมอเตอร์	49
4.3.2 การทดสอบ	49
4.3.3 ผลการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้า หมุนไปด้านหน้า	51
4.3.4 ผลการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้า หมุนไปด้านหลัง	53
4.4 สรุปผลการทดลอง	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	57
5.1 สรุปผลการทดลอง	57
5.2 ปัญหาที่พบและข้อเสนอแนะ	57
5.3 แนวทางการพัฒนา.....	57
เอกสารอ้างอิง	58
ภาคผนวก.....	60
ภาคผนวก ก บทความทางวิชาการ.....	61
ภาคผนวก ข โค้ด และลายแผ่นวงจร	66
ประวัติผู้เขียน.....	84



สารบัญรูป

หน้า

2.1 ชนิดของเซอร์โวมอเตอร์	6
2.2 แรงดันเหนี่ยวนำต้านกลับ (Back EMF) กับกระแสเฟสของ Brushless DC motor	8
2.3 ส่วนประกอบของเอ็นโค้ดเดอร์	9
2.4 แสดงแสงที่กระทบและสัญญาณเอาต์พุตของ Photodiode	10
2.5 Open loop volts/hertz control	12
2.6 acceleration and deceleration characteristics	13
2.7 Closed-loop volts/hertz speed control	14
2.8 Constant volts/hertz speed control with slip regulation.....	15
2.9 ไดอะแกรมทั่วไปของระบบควบคุมแบบป้อนกลับ	16
2.10 วงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส	20
2.11 รูปคลื่นและฮาร์โมนิกส์เปคตรัมของอินเวอร์เตอร์สามเฟส	21
2.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง กับ ในอินเวอร์เตอร์สามเฟส	22
2.13 สัญลักษณ์และคุณลักษณะของไอจีบีที.....	24
2.14 ภาพตัดขวางโครงสร้างพื้นฐานของ IGBT	24
2.15 ทิศทางการไหลของอิเล็กตรอนและโฮลในขณะนำกระแส	26
2.16 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ เบอร์ dsPIC30F4011	28
2.17 ขาสัญญาณของ dsPIC30F4011	28
3.1 ไดอะแกรมวงจรขับ PMSM	34
3.2 วงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส.....	34
3.3 ไอซีเบอร์ FSBS10CH60.....	35
3.4 รายละเอียดของไอซีเบอร์ FSBS10CH60.....	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
3.5 วงจรประยุกต์การใช้งานไอซีเบอร์ FSBS10CH60	36
3.6 วงจร Bootstrap	37
3.7 วงจรป้องกันการลัดวงจร	37
3.8 จอแสดงผล LCD	38
3.9 การจำลองของ Permanent Magnet Synchronous Motor Drive	40
3.10 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์.....	40
3.11 แรงดันระหว่าง Vab,Vbc และ Vca (50Hz).....	42
3.12 แรงดัน Vdc.(50Hz).....	42
3.13 Electromagnetic Torque กับ Rotor Speed (50Hz).....	43
3.14 แรงดันระหว่าง Vab,Vbc และ Vca (40Hz).....	43
3.15 แรงดัน Vbc (40Hz).....	44
3.16 Electromagnetic Torque กับ Rotor Speed (40Hz).....	44
3.17 แรงดันระหว่าง Vab,Vbc และ Vca (60Hz).....	45
3.18 แรงดัน Vdc (60Hz).....	45
3.19 Electromagnetic Torque กับ Rotor Speed (60 Hz)	46
4.1 ผลการจำลอง แบบ Open loop	47
4.2 ผลการจำลอง แบบ Close loop	47
4.3 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับแบบเซอร์โวมอเตอร์	48
4.4 วงจรการทดลอง	50
4.5 ค่าความเร็วอ้างอิงและความเร็วจริงบนจอแสดงผล LCD	50

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบ (rpm) กับความถี่ (Hz) หมุนไปด้านหน้า.....	51
4.7 รูปแสดงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่เข้ามอเตอร์ในแต่ละความถี่.....	53
4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบ (rpm) กับความถี่ (Hz) หมุนไปด้านหลัง	54
4.9 แสดงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่เข้ามอเตอร์ในแต่ละความถี่	55



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

หน้า

1.1 ตารางแผนการดำเนินงาน	4
2.1 ตัวควบคุมแบบพี พีไอ พีดี พีไอดี (P, Pi, PD และ PID)	19
2.2 กำหนดการทำงานของไทเมอร์ โดยผ่านรีจิสเตอร์ TxCON.....	30
4.1 ผลการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับแบบเซอร์โวมอเตอร์ หมุนไปด้านหน้า.....	51
4.2 ผลการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับแบบเซอร์โวมอเตอร์ หมุนไปด้านหลัง	53



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันหลายประเทศทั่วโลก รวมถึงประเทศไทยประสบปัญหาเชิงโครงสร้างมากขึ้นเป็นลำดับ ความต้องการใช้หุ่นยนต์หรือเครื่องจักรมีโอกาที่จะปรับตัวเพิ่มขึ้นอีกเกือบ 2 เท่า เป็นผลมาจากพฤติกรรมของผู้บริโภคที่เริ่มเปลี่ยนไป ประกอบกับภาคอุตสาหกรรมต้องการที่จะแก้ปัญหาแรงงานขาดแคลนและพัฒนาขีดความสามารถในการแข่งขันผ่านการเพิ่มผลิตภาพอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะปัญหาด้านแรงงาน ทั้งการขาดแคลนแรงงาน ค่าจ้างแรงงานสูงขึ้น แรงงานมีทักษะไม่ตรงกับความต้องการของตลาด เป็นต้น [14] ปัจจัยดังกล่าวทำให้หลายประเทศ โดยเฉพาะประเทศพัฒนาแล้วได้พยายามหาทางออกด้วยการพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อทดแทนแรงงานและยกระดับประสิทธิภาพการผลิตให้สูงขึ้นซึ่งหนึ่งในนวัตกรรมที่ถูกสร้างขึ้นก็คือ "หุ่นยนต์"

ทั้งนี้ ในส่วนของประเทศไทยก็เริ่มต้นตัวกับนวัตกรรมดังกล่าวมากขึ้น โดยภาครัฐได้กำหนดให้ "อุตสาหกรรมหุ่นยนต์" (Robotics) เป็น 1 ใน 10 อุตสาหกรรมเป้าหมาย (S-Curve) ซึ่งถูกคาดหวังว่าจะเป็นเครื่องยนต์ตัวใหม่ที่จะช่วยผลักดันให้เศรษฐกิจไทยก้าวข้ามกับดักรายได้ปานกลาง (Middle Income Trap) ตามแนวคิดประเทศไทย 4.0 ได้ในที่สุด [5] ประเทศไทย 4.0 คือ การที่ต้องการปรับเปลี่ยนโครงสร้างเศรษฐกิจ ไปสู่ "Value-Based Economy" หรือ "เศรษฐกิจที่ขับเคลื่อนด้วยนวัตกรรม" กล่าวคือ ในปัจจุบัน เรายังติดอยู่ในโมเดลเศรษฐกิจแบบ "ทำมาก ได้ น้อย" เราต้องการปรับเปลี่ยนเป็น "ทำน้อย ได้มาก" นั้นหมายถึงการขับเคลื่อนให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างน้อยใน 3 มิติสำคัญ คือ

1. เปลี่ยนจากการผลิตสินค้า "โภคภัณฑ์" ไปสู่สินค้าเชิง "นวัตกรรม"
2. เปลี่ยนจากการขับเคลื่อนประเทศด้วยภาคอุตสาหกรรม ไปสู่การขับเคลื่อนด้วยเทคโนโลยี ความคิดสร้างสรรค์ และนวัตกรรม
3. เปลี่ยนจากการเน้นภาคการผลิตสินค้า ไปสู่การเน้นภาคบริการมากขึ้น "ประเทศไทย 4.0" จึงเป็นการเปลี่ยนผ่านทั้งระบบใน 4 องค์ประกอบสำคัญ คือ

3.1 เปลี่ยนจากการเกษตรแบบดั้งเดิม (Traditional Farming) ในปัจจุบัน ไปสู่การเกษตรสมัยใหม่ ที่เน้นการบริหารจัดการและเทคโนโลยี (Smart Farming) โดยเกษตรกรต้อง ร่ำรวยขึ้น และเป็นเกษตรกรแบบเป็นผู้ประกอบการ (Entrepreneur)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 เปลี่ยนจาก Traditional SMES หรือ SMES ที่มีอยู่ที่รัฐต้องให้ความช่วยเหลือ อยู่ตลอดเวลา ไปสู่การเป็น Smart Enterprises และ Startups ที่มีศักยภาพสูง

3.3 เปลี่ยนจาก Traditional Services ซึ่งมีการสร้างมูลค่าค่อนข้างต่ำ ไปสู่ High Value Services ที่มีศักยภาพสูง

3.4 เปลี่ยนจากแรงงานทักษะต่ำไปสู่แรงงานที่มีความรู้ ความเชี่ยวชาญ และทักษะสูง ด้วยเหตุนี้หุ่นยนต์จึงเป็นเทคโนโลยีที่สำคัญคือหุ่นยนต์คอยช่วยให้เกิดความก้าวหน้า ในอุตสาหกรรมมากกว่า 30 ปีแล้ว โดยรุ่นต่างๆ ที่มีค่าใช้จ่ายสูงในอดีต ได้กลายเป็นต้นแบบของ หุ่นยนต์ไฮเทคที่ออกแบบประสงคและนำเชื่อถือในปัจจุบัน จากการพัฒนาหุ่นยนต์รุ่นใหม่แต่ละรุ่น หุ่นยนต์จึง ค่อยๆ สร้างกำไรมากขึ้นเรื่อยๆ ในปัจจุบัน การสร้างผลตอบแทนจากการลงทุนในหุ่นยนต์นั้นรวดเร็ว กว่าในอดีตมาก

โดยเฉพาะหุ่นยนต์เคลื่อนที่ จึงมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องและเพื่อการทำงานที่มี ศักยภาพนี้ ส่งผลให้ระบบขับเคลื่อนไฟฟ้า (Drive) ถูกพัฒนาไปอย่างรวดเร็วด้วย เพื่อที่จะทำให้ มอเตอร์ขับเคลื่อนหุ่นยนต์ได้ตามที่ต้องการเช่น ปรับทิศทาง หมุน ปรับความเร็ว ควบคุมแรงบิด กำหนดแรงบิดและมีความเที่ยงตรงถูกต้องสูง เป็นต้น ดังนั้นการเลือกระบบขับเคลื่อนไฟฟ้าที่มี คุณสมบัติครบ ฟังก์ชันการทำงานที่ดี และเหมาะสมในงานอุตสาหกรรมจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง เพราะจะทำให้งานและระบบการผลิตนั้นมีประสิทธิภาพ

สรุปประเด็นปัญหา

- 1.ปัญหาการขาดแคลนแรงงาน คือแรงงานยังขาดทักษะที่ตรงตามความต้องการของตลาด และปัญหาเรื่องค่าแรงที่ค่อนข้างสูง
- 2.ปัญหาด้านผลผลิตสินค้าที่ยังมีขีดจำกัดในเรื่องของคุณภาพและปริมาณ
- 3.ปัญหาความก้าวหน้าของเศรษฐกิจในประเทศไทย

ด้วยปัญหาและอุปสรรคเหล่านี้ ทำให้หุ่นยนต์เป็นทางเลือกที่ดีสำหรับงานใน ภาคอุตสาหกรรมแต่ปัญหาและอุปสรรคหนึ่งของการใช้งานหุ่นยนต์คือ เรื่องของราคาที่ค่อนข้างมี ราคาสูงมาก ส่งผลให้อุตสาหกรรมมีต้นทุนสูง งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาเกี่ยวกับระบบควบคุมมอเตอร์ ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร (Control System For Permanent Magnet Synchronous Motor) โดยการออกแบบวงจรชุดควบคุมให้มีประสิทธิภาพ ขับเคลื่อนมอเตอร์ได้ และที่สำคัญเป็นทางเลือก หนึ่งที่จะช่วยลดต้นทุนในการผลิตหุ่นยนต์ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาการทำงานของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ (Motor Drive) มอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร (Control System For Permanent Magnet Synchronous Motor)
2. เพื่อศึกษาวิธีการขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสสลับด้วยอินเวอร์เตอร์สามเฟส
3. เพื่อสร้างเป็นต้นแบบของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร (Control System For Permanent Magnet Synchronous Motor) สำหรับ ใช้แทนระบบขับเคลื่อนที่ราคาสูง
4. เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาระบบควบคุมหุ่นยนต์เคลื่อนที่

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ

1. ระบบขับเคลื่อนสามารถขับเคลื่อนมอเตอร์ได้
2. ระบบขับเคลื่อนสามารถควบคุมความเร็วรอบได้

1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการ

1. ศึกษาข้อมูลทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร ทฤษฎีการควบคุมบทความ โครงการและงานวิจัยต่างๆ
2. ศึกษาสัญญาณของมอเตอร์ วงจรและอุปกรณ์ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์และทดลองใช้โปรแกรม Simulink เขียน โปรแกรมคำสั่งระบบขับเคลื่อนมอเตอร์
3. ออกแบบวงจรระบบขับเคลื่อนและเลือกอุปกรณ์สำหรับทำวงจร
4. จัดหาอุปกรณ์และจัดทำวงจรระบบขับเคลื่อนมอเตอร์โดยการเขียนคำสั่งให้สามารถควบคุมความเร็วได้
5. ทดสอบวงจรกับมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร และทำการปรับปรุง และควบคุมให้สามารถทำการควบคุมความเร็วได้อย่างมีประสิทธิภาพ
6. บันทึก วิเคราะห์ผล สรุปผลโครงการ และจัดทำรูปเล่มพร้อมนำเสนอโครงการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 ตารางแผนการดำเนินงาน

แผนงาน	ระยะเวลาดำเนินงาน									
	ภาคเรียนที่ 1					ภาคเรียนที่ 2				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1. กำหนดหัวข้อโครงการงาน										
2. ศึกษาข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับหัวข้อโครงการงานและเขียนแผนการดำเนินการ										
3. ศึกษาสัญญาณ ของมอเตอร์ วงจรและอุปกรณ์ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ และทดลองใช้โปรแกรม Simulink เขียน โปรแกรมคำสั่งระบบขับเคลื่อนมอเตอร์										
4. จัดทำรูปเล่มบทที่ 1 ถึง บทที่ 3 เติมนำเสนอโครงการ										
5. จัดหาอุปกรณ์และจัดทำวงจรระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ โดยเขียนคำสั่งให้ควบคุมความเร็วได้										
6. บันทึกสรุปผลและจัดทำรูปเล่มโครงการ										
7. เติมนำเสนอโครงการ										

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. ได้ศึกษาวงจรควบคุมมอเตอร์ และการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์
2. สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้จริงและพัฒนาต่อยอด สำหรับระบบควบคุมมอเตอร์เพื่อใช้ขับเคลื่อนหุ่นยนต์เคลื่อนที่และสำหรับงานอื่นๆ ในเชิงพาณิชย์
3. ช่วยลดต้นทุนการผลิตในงานด้านอุตสาหกรรม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

ในบทนี้จะกล่าวถึง ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องดังนี้

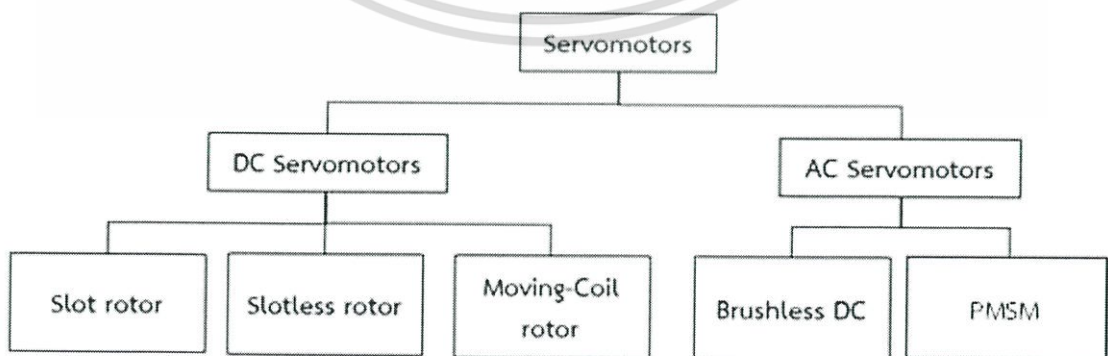
2.1 เซอร์โวมอเตอร์ (Servomotors)

มอเตอร์ไฟฟ้านับว่าได้มีบทบาทและมีความสำคัญอย่างยิ่งในงานอุตสาหกรรม ปัจจุบัน โดยเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของเครื่องจักรและในส่วนต่างๆของกระบวนการผลิต มอเตอร์ไฟฟ้าทำหน้าที่เป็นเครื่องจักรต้นกำลังขับเคลื่อนภาระที่เป็นเครื่องจักรกลประเภทต่างๆ ด้วยการขับโดยตรง ผ่านชุดเฟืองทด หรือสายพาน เป็นต้น

มอเตอร์เป็นเครื่องจักรกลที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล ซึ่งพลังงานกลที่ได้ออกมาในลักษณะของแรงบิด (Torque) ความเร็วรอบ (Speed) และตำแหน่ง (Position) งานที่นำมอเตอร์ไปใช้เป็นอุปกรณ์ต้นกำลังต้องการความเร็วรอบที่เปลี่ยนแปลงได้ หรือต้องการควบคุมตำแหน่ง ซึ่งเครื่องจักรกลนั้นก็ต้องการลักษณะสมบัติการเคลื่อนที่ที่ต้องการลักษณะทางไดนามิกสูง ปกติมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับทั่วไปไม่สามารถตอบสนองต่อความต้องการของเครื่องจักรกลที่ต้องการไดนามิกสูงๆได้ ดังนั้นได้มีการออกแบบมอเตอร์ขึ้นมาเพื่อให้เป็นลักษณะสมบัติ (Characteristics) ที่มีไดนามิกสูง ควบคุมตำแหน่งและความเร็วรอบได้ จึงได้เรียกมอเตอร์ชนิดนี้ว่า เซอร์โวมอเตอร์ [13]

2.1.1 ประเภทของเซอร์โวมอเตอร์

เซอร์โวมอเตอร์แบ่งออกได้ 2 ชนิดดังรูป



รูปที่ 2.1 ชนิดของเซอร์โวมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1.1 AC Servomotor

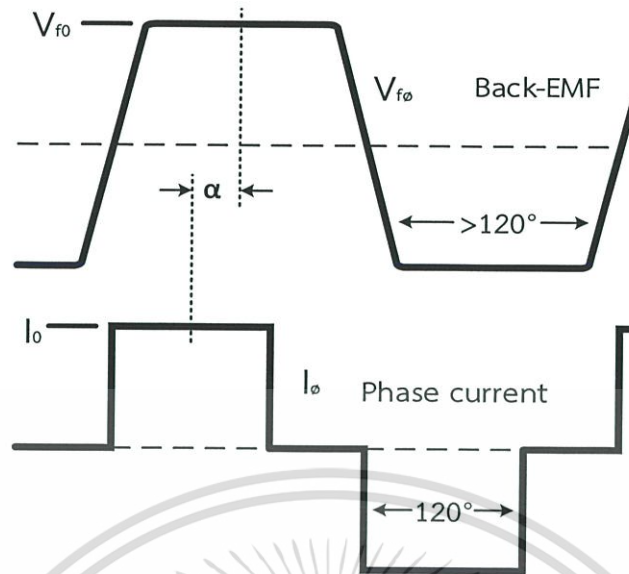
AC Servomotor คือ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับที่ถูกรอกแบบให้มีลักษณะสมบัติเป็นเซอร์โวมอเตอร์ (Servo Characteristics) มีขั้วแม่เหล็กเป็นแม่เหล็กถาวร แบ่งออกได้ 2 ชนิดดังรูปที่ 2.1

1) Brushless DC Motor

จากลักษณะสมบัติซึ่งเป็นข้อเสียของ DC Servomotor ที่ชัดเจนที่สุดคือ DC Servomotor มีแปรงถ่าน มีการสัมผัสกันทางกระแสระหว่างสเตเตอร์กับโรเตอร์ ดังนั้นได้มีการออกแบบเพื่อทำให้มอเตอร์ไม่มีแปรงถ่าน (Brushless) แต่ลักษณะสมบัติอื่นของ DC Servomotor ยังเหมือนเดิม นั่นคือสามารถควบคุมแรงบิดให้คงที่ได้ทุกย่านความเร็ว ดังนั้นมอเตอร์ชนิดนี้จึงเรียกว่า “Brushless DC Motor” เมื่อออกแบบให้ไม่มีแปรงถ่านดังนั้นต้องให้ขดลวดอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์อยู่ที่สเตเตอร์และขั้วแม่เหล็กถาวรอยู่ที่โรเตอร์นั่นเอง ใน DC Servomotor ฟลักซ์แม่เหล็กของสเตเตอร์กับฟลักซ์แม่เหล็กของโรเตอร์ตัดตั้งฉากกันทำให้โรเตอร์หมุน ถึงแม้โรเตอร์จะหมุนไปอย่างไรฟลักซ์แม่เหล็กทั้ง 2 ก็ตัดตั้งฉากกันเสมอทำให้แรงบิดคงที่ทุกความเร็ว เช่นเดียวกันใน Brushless DC มอเตอร์จึงต้องมีเฟสของขดลวดในสเตเตอร์เพื่อควบคุมให้ฟลักซ์แม่เหล็กของสเตเตอร์ตัดตั้งฉากกับฟลักซ์ของโรเตอร์ เพื่อให้ฟลักซ์แม่เหล็กตัดกัน

ใน Brushless DC มอเตอร์มีสเตเตอร์เหมือนกับอินดักชันมอเตอร์ มีการวางขดลวดที่สเตเตอร์เช่นเดียวกันแต่ในอินดักชันมอเตอร์เมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับให้มอเตอร์ก็จะหมุนได้ แต่ใน Brushless DC มอเตอร์ถึงแม้ขดลวดที่สเตเตอร์จะเหมือนกันแต่ที่โรเตอร์ของ Brushless DC เป็นแม่เหล็กถาวรดังนั้นจะต้องมีตัว Hall sensors ดักจับตำแหน่งขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์เพื่อควบคุมทำให้สนามแม่เหล็กที่โรเตอร์และสเตเตอร์ตัดกันทำให้โรเตอร์หมุนไปได้

เมื่อมอเตอร์หมุนทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้านกลับมีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal) ดังนั้น Brushless DC อาจเรียกอีกอย่างได้ว่า “Trapezoidal PMAC Motor”



รูปที่ 2.2 แรงดันเหนี่ยวนำต้านกลับ (Back EMF) กับกระแสเฟสของ Brushless DC Motor

2) PMSM Motor

ขณะที่อินดักชันมอเตอร์และมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยกมีการนำไปใช้งานมากแต่ปัจจุบันมอเตอร์ที่เป็นขั้วแม่เหล็กถาวรถูกนำมาใช้งานเพิ่มมากขึ้น เพราะแม่เหล็กถาวรผลิตสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้มากกว่าสนามแม่เหล็กที่เกิดจากการผลิตจากขดลวดที่เป็นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยกหรือสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสสร้างสนามแม่เหล็ก (Magnetizing Current) ในสเตเตอร์ของอินดักชันมอเตอร์ ทำให้การนำแม่เหล็กถาวรมาใช้งานมีข้อดีที่ลดการสูญเสียอันเกิดจากขดลวดทำให้เพิ่มประสิทธิภาพของมอเตอร์

ดังนั้นได้มีการออกแบบซิงโครนัสมอเตอร์ (Synchronous Motor) ที่มีโรเตอร์เป็นแม่เหล็กถาวร ปกติซิงโครนัสมอเตอร์มีสเตเตอร์เหมือนกับอินดักชันมอเตอร์ทุกอย่างมีขดลวด 3 เฟสที่สเตเตอร์ ส่วนที่โรเตอร์มีขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กซึ่งต้องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้กับขดลวด ต้องมีแปรงถ่านกับสลิปริงคล้ายกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีแปรงถ่านกับ Commutator เมื่อมอเตอร์ชนิดนี้เปลี่ยนโรเตอร์เป็นแม่เหล็กถาวร จึงเรียกว่า “Brushless AC Motor” การวางขดลวดเหมือนอินดักชันมอเตอร์ทุกอย่าง ซึ่งตำแหน่งการวางขดลวดทำให้สนามแม่เหล็กหมุนเป็นวงกลมดังนั้นขดลวดจึงต้องการกระแสที่มีรูปคลื่นเป็น Sinusoidal (Sinewave)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 ข้อดี ข้อเสีย ของเซอร์โวมอเตอร์

ข้อดีของ Servo motor ได้แก่

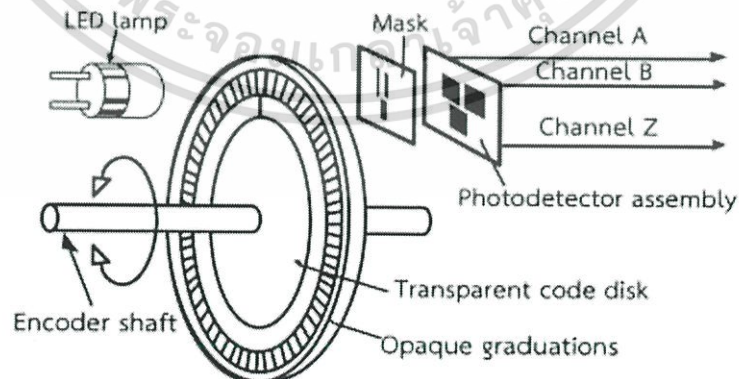
- สามารถให้ค่าแรงบิดสูง
- สามารถเคลื่อนที่ความเร็วสูง
- ใช้งานกับการควบคุมความเร็วได้ดี
- มีหลากหลายขนาดให้เลือก

ข้อเสียของ Servo Motor ได้แก่

- ราคาแพง
- ไม่สามารถทำงานโดยการควบคุมแบบเปิด
- ต้องมีการจูนค่าในการควบคุม
- ในกรณีที่ใช้ DC motor ต้องมีการบำรุงรักษา เนื่องจากแปรงถ่านอาจสึก

2.2 เซนเซอร์ตรวจวัดระยะการหมุน (Encoder)

ในการควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์ ส่วนสำคัญคือต้องมีอุปกรณ์ป้อนกลับ (Feedback Device) หรือเซนเซอร์ เซนเซอร์ตรวจวัดระยะการหมุนหรือเอ็นโคดเดอร์ (Encoder) ทำหน้าที่ วัดความเร็ว (Speed) วัดตำแหน่ง (Position) และทิศทางการหมุนให้ถูกต้องและแม่นยำ ส่วนประกอบพื้นฐานของเอ็นโคดเดอร์แสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ส่วนประกอบของเอ็นโคดเดอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

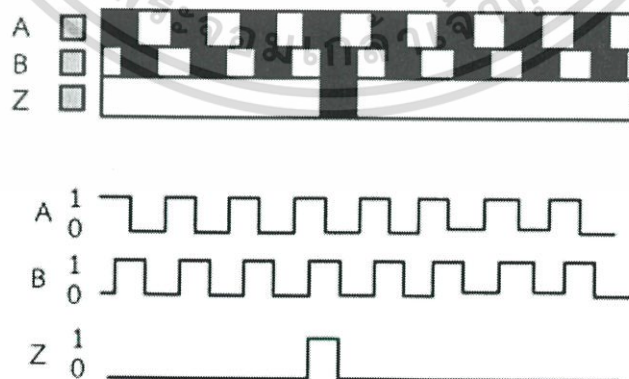
1. Absolute Encoder

เอ็นโคดเดอร์ชนิดนี้จะใช้เทคโนโลยีสูงกว่าชนิด Incremental ตัวเอ็นโคดเดอร์จะมีแผ่นดิสก์พิเศษที่ไม่ใช่มีแค่ร่อง (Track) แสงขนาดที่โปร่งแสงกับทึบแสงเท่านั้น แต่มันจะมีร่องหลายแถวที่ใช้แทนค่า Binary Code แต่ละแถวจะแทนเลขไบนารี 1 บิต แต่ละร่องจะมีช่องโปร่งแสงกับทึบแสงของมันเองซึ่งจะทำให้เกิดสัญญาณ ON/OFF ดังนั้นเอ็นโคดเดอร์ 12 บิต จะมีร่อง 12 แถวอิสระจากกัน แต่ละแถวจะทำงานเหมือนกับเอ็นโคดเดอร์ชนิด Incremental แต่เอ็นโคดเดอร์ชนิด Absolute จะให้สัญญาณโค้ดไบนารีสำหรับแต่ละองศาที่เพลลาหมุน เพราะว่าแต่ละตำแหน่งจะมีค่าสัญญาณหรือเลขไบนารีเพียงค่าเดียวเท่านั้น ค่าข้อมูลซึ่งเป็นเลขไบนารีจะไม่สูญหายเมื่อไฟดับ และมันจะทราบตำแหน่งของมันเสมอ

แม้ว่า Absolute Encoder จะสามารถอ่านค่าตำแหน่งปัจจุบันของเพลลาได้ แต่เอ็นโคดเดอร์ชนิดนี้ค่อนข้างมีความซับซ้อนในการใช้งาน สร้างได้ยากและความละเอียดจำกัด

2. Incremental Encoder

หลักการการทำงานเบื้องต้นของเอ็นโคดเดอร์จะเหมือนกันหมด โดยแสงที่กำเนิดจาก LED จะส่องผ่านเลนส์ (Convex Lens) ซึ่งจะปรับโฟกัสให้ลำแสงขนาดเท่ากัน ลำแสงนี้จะส่องผ่าน Grid Diaphragm ซึ่งจะแยกแสงเป็น 2 ส่วนที่มีเฟสต่างกัน 90 องศา เราจะเรียกแสงเดิมว่าเฟส A และลำแสงใหม่ว่าเฟส B ซึ่งแสงนี้จะส่องผ่านไปที่ Photodiode ซึ่งจะคล้ายกับโฟโตอิเล็กทริกเซ็นเซอร์แบบตัวรับส่งแยกกัน (Through-Beam) แผ่นดิสก์ (Disc) ที่ยึดกับเพลลาเพื่อตรวจสอบการหมุนของเพลลาจะมีแตร็คที่โปร่งแสงกับทึบแสงเพื่อสร้างรูปแบบการส่องมืดและสว่างเมื่อหมุนเพลลา



รูปที่ 2.4 แสดงแสงที่กระทบและสัญญาณเอาต์พุตของ Photodiode

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากลำแสง A และ B มีเฟสต่างกัน 90 องศา ซึ่ง Photo diode 2 ตัว จะแปลงแสงที่รับได้นี้ไปเป็นสัญญาณรูปสี่เหลี่ยม (Square Wave) ดังแสดงในรูป 2.4 ซึ่งสัญญาณที่ได้นี้สามารถต่อเข้ากับ PLC, Microcontroller หรือ วงจรนับ (Counter Circuit) เพื่อแสดงตำแหน่งหรือความเร็ว

ร่องหนึ่งร่องจะทำให้เกิดสัญญาณ Pulse 1 ลูกโดยความละเอียดจะถูกกำหนดจากจำนวน Pulse ในการหมุน 1 รอบ (Pulse Per Revolution : ppr)

Incremental Encoder ก็มีข้อเสียคือข้อมูลตำแหน่งจะหายไปเมื่อไม่มีไฟจ่ายให้ระบบ เพราะเอ็นโคดเดอร์ชนิดนี้มีสัญญาณเอาต์พุตเป็นสัญญาณ Pulse ซึ่งจะบอกได้แค่ว่าสัญญาณ Pulse 1 ลูกหมายความว่าเคลื่อนที่ไป 1 ร่อง อาจเป็นตามเข็มนาฬิกาหรือทวนเข็มนาฬิกา แต่ไม่สามารถบอกตำแหน่งปัจจุบันก็งานเอ็นโคดเดอร์ได้ ดังนั้น PLC หรือ Microcontroller ที่ใช้ Module จับสัญญาณ Pulse ก็จะไม่ระบุได้แค่ตำแหน่งเคลื่อนที่ขึ้นหรือลงเท่าไร ไม่สามารถระบุตำแหน่งปัจจุบันได้ แต่ปัญหานี้สามารถแก้ไขได้โดยการติดตั้งฟร็อกซ์มิตี้เซนเซอร์ (Proximity Sensor) หรือ ลิมิทสวิตช์ (Limit Switch) คือเซนเซอร์ชนิดนี้สามารถระบุตำแหน่งเมื่อวัตถุเคลื่อนผ่านหรือสัมผัสได้ จึงถูกใช้เพื่อระบุตำแหน่ง Home ก่อนที่จะเริ่มวัดด้วยเอ็นโคดเดอร์ เมื่อปัญหาหมดไปเอ็นโคดเดอร์ชนิดนี้ถูกใช้งานอย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรมและการศึกษาเพราะมีราคาถูกและด้วยงานหมุนที่ไม่ซับซ้อนจึงสามารถสร้างงานหมุนที่มีความละเอียดสูงได้ง่ายและต้นทุนต่ำ[12]

2.3 การควบคุมแบบ Scalar [10]

ซึ่งเป็นวิธีที่ควบคุมเฉพาะขนาดของฟลักซ์หรือสนามแม่เหล็ก โดยการควบคุมอัตราส่วนระหว่างแรงดันกับความถี่ให้คงที่ (V/F) วิธีนี้จะสามารถควบคุมฟลักซ์ให้มีค่าคงที่และจะส่งผลทำให้มอเตอร์สร้างแรงบิดได้คงที่

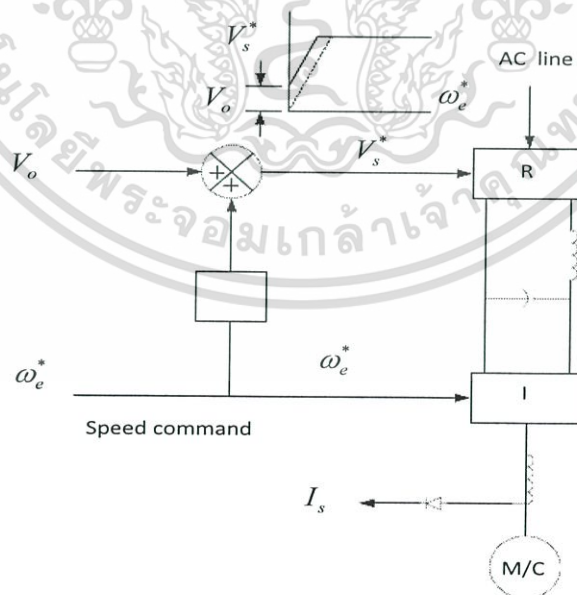
2.3.1 การควบคุมแบบ V/F Constant

Volts/hertz Constant Control เป็นวิธีที่ใช้ในโครงการนี้ใช้สำหรับการควบคุมมอเตอร์คือการควบคุมความเร็วแบบ Open-loop และ Close-loop Volts/Hertz ตัวอย่างในรูปที่ 2.5 วงจรกำลังประกอบไปด้วยวงจรเรียงกระแสแบบควบคุมเฟส (Phase-Controlled Rectifier) โดยจะมี แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) 1 เฟส หรือ 3 เฟสป้อนเข้าไป วงจรกรองกระแสแบบ LC Filter และ Six Step Inverter ความถี่ ω^* คือตัวแปรอ้างอิงและมันมีค่าใกล้กับความถี่มอเตอร์ เพราะทำงานที่ความถี่ Slip ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การควบคุมแบบ Volts/Hertz จะใช้กระแสอ้างอิง (Rectifier Voltage Command) V_s^* ที่สร้างขึ้นแล้วผ่านอัตราขยาย Volts/Hertz ของ G การทำงานแบบนี้จะทำให้ Air gap flux ของมอเตอร์ ψ_m มีค่าประมาณเท่ากับอัตราส่วนของ V_m / ψ_m ดังนั้นแรงบิดต่อกระแสทางด้าน Stator มีค่าสูงสุดซึ่งคล้ายกับเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง (DC Machine) เมื่อความถี่เข้ามาใกล้ศูนย์ ความเร็วของมอเตอร์เข้าใกล้ศูนย์เช่นกัน แรงดันทางด้านขดลวดสเตเตอร์ (Stator) จะเข้าสู่ศูนย์เพราะมันจะตกคร่อมตัวต้านทานของ Stator เกือบหมด ดังนั้นแรงดันช่วย V_o จึงถูกเพิ่มเข้ามา เพื่อให้มีค่าสูงเกินความต้านทานของ Stator เพื่อให้สนามแม่เหล็กของช่องอากาศ Air Gap Flux (ψ_m) และ Torque เต็มพิกัดถ้า Load Torque เพิ่มขึ้นค่าของ Slip จะเพิ่มขึ้นจนถึงสมดุลที่ทำให้แรงบิดมอเตอร์ (Developed Torque) เท่ากับแรงบิดของโหลด Load Torque

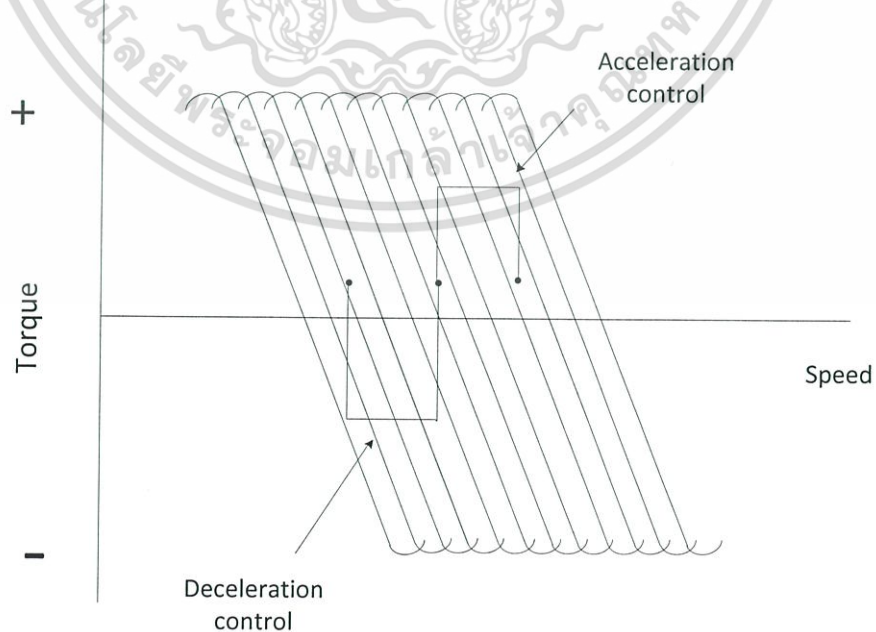
เมื่อเพิ่มความเร็วอ้างอิงเกินความถี่พื้นฐานของมอเตอร์ Rectifier voltage จะเข้าสู่สภาวะอิมตัวและมอเตอร์จะทำงานในช่วงการลดค่าสนามแม่เหล็ก (Field Weakening) ซึ่งแรงบิดมอเตอร์ (Developed Torque) จะลดลงในขณะที่กระแสทางด้านขดลวดสเตเตอร์ (Stator) เท่าเดิม การควบคุมแรงดันแบบ Open-Loop นี้การกระเพื่อมของแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับ (AC) และความต้านทานตกคร่อมเป็นเหตุให้ Air Gap Flux กระเพื่อมได้ซึ่งการกระเพื่อมนี้อาจป้องกันได้จากการทำการควบคุมแรงดันแบบ Close-Loop ในวงจร Rectifier ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.5 Open Loop Volts/Hertz Control [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 2.6 แสดงลักษณะคุณสมบัติของการเร่งและการหน่วงความเร็วขณะทำงานที่สภาวะคงตัว (จุดที่1) ถ้าเพิ่มความเร็วอ้างอิงเป็น ω_c^* ขึ้นเป็นขั้นๆ Slip ก็จะมีค่ามากขึ้นจนกระทั่งถึงแรงบิดสูงสุด (Breakdown Torque) และมอเตอร์จะไม่มีเสถียรภาพ ในทางเดียวกันระบบจะไม่มีเสถียรภาพถ้าลดความเร็วอ้างอิงลงเป็นขั้นๆ ดังนั้นระหว่างที่มีการเร่ง (Acceleration) และการหน่วงความเร็ว (Deceleration) จะต้องปรับความถี่อ้างอิงให้สอดคล้องกับความเร็วเพื่อไม่ให้ค่า slip เกินแรงบิดสูงสุด (Breakdown Torque) การควบคุมแบบปรับขีดจำกัดกระแสช่วยให้การเร่งและการหน่วงความเร็วเป็นไปได้ดังรูปที่ 2.6 สำหรับการเพิ่มความถี่อ้างอิงแบบเป็นขั้นๆ (Step-Up) Slip จะมีค่าเพิ่มขึ้นและกระแสเดเตอร์ (I_s) จะเพิ่มขึ้นจนถึงขีดจำกัด ซึ่งสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงจากจุด 1 ไปยังจุดที่ 2 ในกราฟคุณสมบัติ Torque-Speed ต่อจากนั้นความถี่จะเพิ่มในอัตราคงที่เพื่อให้แรงบิดคงที่ตลอดช่วงที่ 2 ถึง 3 ระหว่างจุด 3 และ 4 กระแสจะลดลงต่ำกว่าขีดจำกัดและถึงสภาวะสมดุลของแรงบิดในจุดที่ 4 ซึ่ง Slip มีค่าต่ำลงสำหรับการลดความเร็วอ้างอิงแบบเป็นขั้นๆ (Step Down) การเปลี่ยนจุดทำงานเป็นไปตามเส้นทางจากจุด 1-5-6-7 ดังรูปที่ 2.6 ระหว่างที่การหน่วงความเร็ว ความถี่สเตรเตอร์จะลดลงต่ำกว่าความเร็วมอเตอร์และพลังงานไฟฟ้าจากมอเตอร์จะถูกป้อนเข้าสู่ DC link ทำให้แรงดัน DC link เพิ่มขึ้น ถ้าตัวเรียงกระแสไม่สามารถรับกระแสย้อนกลับได้จำเป็นต้องมีตัวต้านทานกับสวิตช์ที่ต้องทำให้วงจรสับเพื่อรับพลังงานเบรกแบบไดนามิกส์และการควบคุมแรงดัน DC link ไม่ให้สูงเกินไป



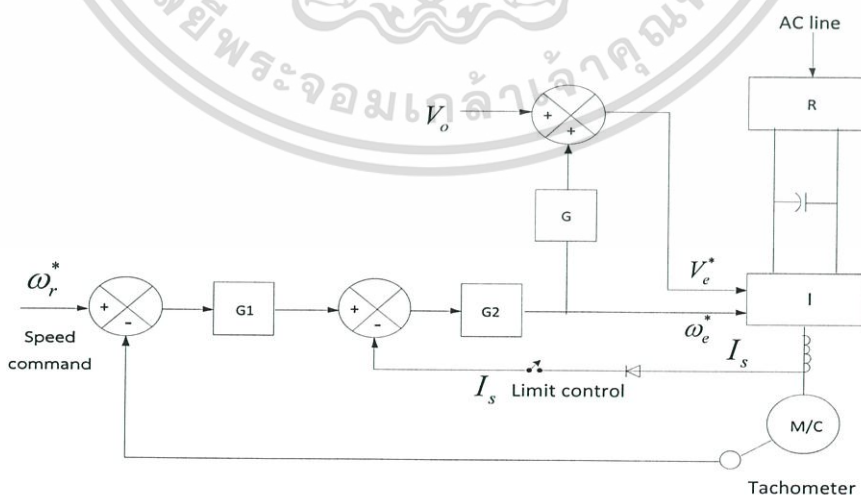
รูปที่ 2.6 Acceleration And Deceleration Characteristics [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการควบคุมแบบ Open Loop นี้ความเร็วมีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงตาม Load Torque และการกระเพื่อมของแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับ ถ้าการควบคุมแบบ Open Loop นี้ทำให้ความเร็วมีการกระเพื่อมจนยอมรับไม่ได้ ก็สามารถควบคุมแบบ Closed-Loop Speed Control ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ได้เช่นกัน ค่า Error ของลูปสัญญาณความเร็วจะเป็นสัญญาณควบคุมความถี่ PWM Inverter โดยผ่าน Current-Limit Controller

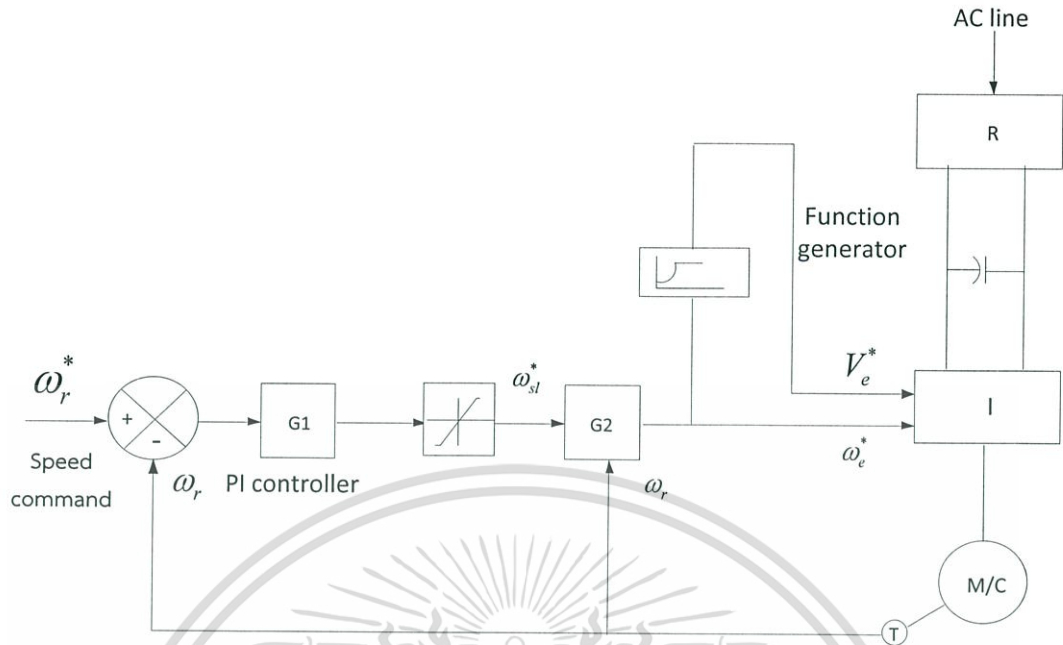
การควบคุม Volts/Hertz อีกวิธีหนึ่งคือการควบคุมสลลิป (Slip Regulation) ดังแสดงในรูปที่ 2.8 Error ที่เกิดจาก Loop ที่ควบคุมความเร็วจะสร้างสลลิปอ้างอิง (Slip Command) ω_s^* โดยผ่าน PI Controller และ Limiter ค่า Slip อ้างอิงจะรวมกับ Speed Signal ω_r เพื่อสร้างความถี่อ้างอิง (Frequency Command ω_e^*) ซึ่งความถี่อ้างอิงนั้นจะสร้างแรงดันอ้างอิง (Voltage Command V_e^*) โดยผ่าน Volts/Hertz Function Generator ซึ่งรวมเข้าด้วยกันกับการชดเชยแรงดันที่ความถี่ต่ำไว้ด้วยเนื่องจาก Slip แปรผันตามแรงบิดมอเตอร์ (Developed Torque) ดังนั้นอาจจะพูดได้ว่าเราสามารถควบคุม Torque ภายใต้การควบคุมของ Loop ความเร็วได้ซึ่งต่างกับวิธีก่อนที่ Torque Limit Control สามารถทำได้โดยอ้อมจาก Stator Current Limit Control ข้อดีของวิธีการนี้คือไม่ต้องใช้ตัว Sensor กระแสราคาแพงแต่ใช้สัญญาณความเร็วในการควบคุมทั้ง 2 Loop

ในการเปลี่ยนแปลงความเร็วอ้างอิงแบบ Step Up มอเตอร์จะเร่งความเร็วอย่างอิสระโดย Slip ถูกจำกัดโดย Torque สูงสุดและที่สภาวะคงตัว Slip จะขึ้นอยู่กับ Load Torque ถ้าความเร็วอ้างอิง (ω^*) ลดลง ค่า Slip กลายเป็นค่าลบและมอเตอร์จะอยู่ในสภาวะ Breaking Mode ซึ่งได้อธิบายไว้ในตอนแรกแล้ว



รูปที่ 2.7 Closed-Loop Volts/Hertz Speed Control [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 Constant Volts/Hertz Speed Control With Slip Regulation [10]

หากควบคุม Slip ให้คงที่ได้ Error ที่เกิดจากลู่ความเร็วอาจจะใช้ควบคุมเพียงแค่ แรงดัน Output ของ Inverter อย่างเดียว การเปลี่ยนแปลงในรูปอัตราส่วน Volts/Hertz อาจเป็นเหตุให้ Air Gap Flux และ Torque เปลี่ยนแปลงตามไปด้วยที่ Light-Load การลด Air Gap Flux จะช่วยให้ประสิทธิภาพดีขึ้นเพราะเป็นการลดการสูญเสียในแกน (Core Loss) กับ Copper Loss ลงแต่ข้อเสียของมันก็คือการตอบสนองของ Flux จะช้าลงทำให้มอเตอร์ไม่มีเสถียรภาพ (Unstable) เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของ Load Torque แบบทันทีทันใด ตัวอย่างการควบคุมแสดงในรูปที่ 2.8

2.4 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ [9]

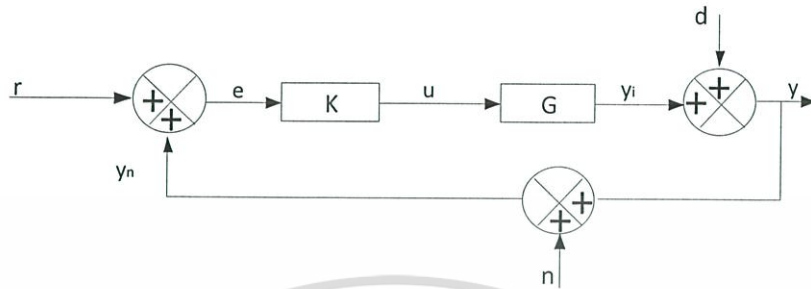
โดยทั่วไประบบควบคุมแบบป้อนกลับเป็นระบบควบคุมที่มีการป้อนกลับสัญญาณเอาท์พุทไปเปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิงเพื่อสร้างสัญญาณผิดพลาด (Error) จากนั้นจะนำสัญญาณผิดพลาดนี้ไปใช้ในระบบควบคุม ข้อดีของระบบควบคุมแบบป้อนกลับเมื่อเปรียบเทียบกับระบบควบคุมแบบวงรอบเปิดคือ

- ก. ลดผลของพารามิเตอร์ระบบเปลี่ยนแปลง
- ข. ปรับปรุงการกำจัดผลของการรบกวน (Disturbance) ในระบบ
- ค. ปรับปรุงการลดผลของสัญญาณรบกวนที่ตัวตรวจจับ (Noise) ต่อระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ง. ปรับปรุงค่าสมรรถนะของระบบควบคุม เช่น ค่าผิดพลาดในสภาวะคงตัว (Steady State Error) เป็นต้น

จ. การปรับปรุงสภาวะชั่วขณะและสมรรถนะของระบบทำงาน



รูปที่ 2.9 ไตอะแกรมทั่วไปของระบบควบคุมแบบป้อนกลับ [9]

จากรูปตัวแปรต่างๆในระบบได้แก่

G คือ ระบบหรือพลานต์ที่ต้องการควบคุม

K คือ ตัวควบคุม (Controller)

r คือ สัญญาณเข้าอ้างอิงหรือคำสั่ง (Command)

y_i คือ เอาท์พุทของระบบ (Output)

d คือ การรบกวน (Disturbance)

y คือ เอาท์พุทของระบบที่รวมการรบกวนเข้าไปด้วย

n คือ สัญญาณรบกวนที่ตัวตรวจจับ (Noise)

e คือ ค่าความผิดพลาด (Error) ระหว่างสิ่งที่ต้องการให้ระบบตอบสนองกับ y_n ซึ่ง คือ เอาท์พุทของระบบรวมตัวรบกวนและสัญญาณรบกวนจากตัวตรวจจับอยู่ด้วย

y_n คือ เอาท์พุทของระบบที่รวมการรบกวน (Disturbance) และสัญญาณรบกวน (Noise) จากตัวตรวจจับสัญญาณ (Sensor) เข้าไปด้วย

u คือ อินพุทของระบบ (Input)

พิจารณาระบบควบคุมแบบป้อนกลับในรูปที่ 2.9 จะได้

$$e = r - y - n \quad (2.1)$$

$$y_i = eKG \quad (2.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อแทนค่าความคาดเคลื่อน (e) จากสมการที่ 2.1 ลงในสมการ 2.2 จะได้

$$y_i = KG(r - y - n) \quad (2.3)$$

เมื่อพิจารณาเอาต์พุตของระบบที่รวมการรบกวนแล้ว (y) จะได้

$$\begin{aligned} y &= y_i + d \\ y &= KG(r - y - n) + d \\ y &= KGr - KGy - KGn + d \\ y + KGy &= KGr - KGn + d \\ y(1 + KG) &= KGr - KGn + d \\ y &= \frac{KGr}{1 + KG} - \frac{KGn}{1 + KG} + \frac{d}{1 + KG} \end{aligned} \quad (2.4)$$

เมื่อพิจารณาอัตราส่วนระหว่างเอาต์พุตของระบบ (y) และสิ่งที่ต้องการในระบบตอบสนอง (r) จะได้

$$\frac{y}{r} = \frac{KG}{1 + KG} - \frac{KGn}{r(1 + KG)} + \frac{d}{r(1 + KG)} \quad (2.5)$$

ระบบควบคุมที่สมบูรณ์ในอุดมคติ (Perfect Control) คือระบบที่เอาต์พุตเป็นไปตามสัญญาณอ้างอิง นั่นคือ $\frac{y}{r} = 1$ จากสมการที่ 2.5 พบว่าการออกแบบตัวควบคุมที่ทำให้ใกล้เคียงกับระบบควบคุมที่สมบูรณ์พิจารณาในแต่ละเทอมคือ

เทอมที่ 1: $\frac{KG}{1 + KG}$ หากค่า KG มีค่าสูงจะทำให้เทอมนี้มีค่าประมาณ 1 ผลตอบสนองตามสัญญาณอ้างอิงจะทำงานได้ดี

เทอมที่ 2: $\frac{KGn}{r(1 + KG)}$ หากค่า KG มีค่าต่ำจะทำให้เทอมนี้มีค่าประมาณ 0 ซึ่งเป็นการลดผลของสัญญาณที่การตรวจจับ

เทอมที่ 3: $\frac{d}{r(1 + KG)}$ หากค่า KG มีค่าสูงจะทำให้เทอมนี้มีค่าประมาณ 0 ซึ่งเป็นการลดผลของการรบกวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาเทอม $\frac{KG}{(1+KG)}$ และ $\frac{1}{(1+KG)}$ ซึ่งเป็นเทอมสัมประสิทธิ์ของเทอมที่ 2 และเทอมที่ 3 ตามลำดับของสมการที่ 2.5 โดยกำหนดให้ฟังก์ชันความไว (Sensitivity Function) คือ

$$s = \frac{1}{(1+KG)} \quad (2.6)$$

และคอมพลีเมนต์ของฟังก์ชันความไว (Complementary Sensitivity Function) คือ

$$T = \frac{KG}{(1+KG)} \quad (2.7)$$

จากการพิจารณาสองฟังก์ชันข้างต้นพบว่า $S+T=1$

นั่นหมายความว่าสัมประสิทธิ์ในเทอมที่ 2 และเทอมที่ 3 ของสมการที่ 2.5 จะเป็นศูนย์พร้อมกันไม่ได้ ดังนั้นการลดผลของการรบกวนและการลดผลของสัญญาณรบกวนที่ตัวตรวจจับพร้อมกันนั้นทำไม่ได้

ตัวควบคุม K สามารถออกแบบได้หลายประเภท ซึ่งในโครงการนี้จะควบคุมแบบ PI

2.4.1 ตัวควบคุมแบบพี พีไอ พีดีและพีไอดี (P, PI, PD และ PID)

ตัวควบคุมแบบพีไอดีเป็นตัวควบคุมที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมเนื่องจากมีโครงสร้างไม่ซับซ้อน คุณสมบัติของตัวควบคุมเหมาะสมกับระบบหลายระบบและมีสมรรถนะการควบคุมที่ดีในหลายระบบ รูปทั่วไปของระบบควบคุมแบบพีไอดีแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$u_{PID} = K_p e + K_i \int_0^t e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (2.8)$$

หรือเมื่อเขียนในรูปของลาปลาซ

$$U_{PID}(s) = (K_p + \frac{Ki}{s} + K_D s) E(s) \quad (2.9)$$

ในกรณีตัวควบคุมแบบสัดส่วนหรือแบบพี ค่า $K_i=0, K_D=0$

ในกรณีตัวควบคุมแบบสัดส่วนหรือแบบพี ค่า $K_D=0$

ในกรณีตัวควบคุมแบบสัดส่วนหรือแบบพี ค่า $K_i=0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 ตัวควบคุมแบบพี พีไอ พีดี พีไอดี (P, Pi, PD และ PID) [9]

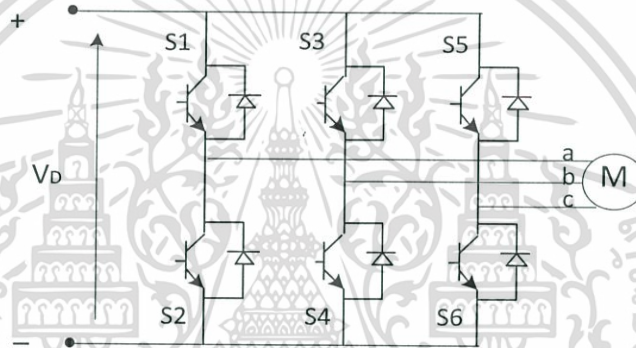
ชนิดตัวควบคุม	ฟังก์ชันถ่ายโอน	วงจรรวมแอมป์
P	$\frac{R_4 R_2}{R_3 R_1}$	
I	$\frac{R_4}{R_3} \frac{1}{R_1 C_2 s}$	
PD	$\frac{R_4 R_2}{R_3 R_1} (R_1 C_1 s + 1)$	
PI	$\frac{R_4 R_2 (R_2 C_2 s + 1)}{R_3 R_1 R_2 C_2 s}$	
PID	$\frac{R_4 R_2 (R_1 C_1 s + 1)(R_2 C_2 s + 1)}{R_3 R_1 R_2 C_2 s}$	

การออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอดีสามารถออกแบบได้ทั้งแบบดิจิตอลและแบบแอนะล็อก ในกรณีแบบดิจิตอลสามารถปรับอัตราการขยายได้โดยการเขียนโปรแกรม ในกรณีการออกแบบตัวควบคุมแบบแอนะล็อก การออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอดีสามารถทำได้โดยการสร้างวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 อินเวอร์เตอร์สามเฟส

การแปลงผันกำลังไฟฟ้าจากแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับให้กับโหลดสามเฟส นิยมแปรผันกำลังไฟฟ้าผ่านอินเวอร์เตอร์สามเฟสซึ่งจะเหมาะกับงานที่ต้องการกำลังไฟฟ้าสูง เพราะถ้าหากใช้อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวแบบฟลูบริดจ์จำนวนสามชุดก็ได้ แต่ต้องใช้สวิตช์จำนวนถึง 12 ตัวนอกจากนั้นยังต้องอาศัยวงจรควบคุมที่ทำให้แต่ละเฟสต่างกัน 120 องศาของความถี่หลักมูลจึงไม่เหมาะที่เลือกใช้อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวแบบฟลูบริดจ์จำนวนสามตัว จึงมีการพัฒนาอินเวอร์เตอร์สามเฟสขึ้นมาใช้ที่ควบคุมแรงดันไฟฟ้าด้านออกได้ทั้งขนาดและความถี่ในรูปที่ 2.10 จะเห็นได้ว่ามีจำนวนสวิตช์และไดโอดจำนวนอย่างละ 6 ตัวและประกอบไปด้วยสามกิ่งหรือสามเฟส



รูปที่ 2.10 วงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส [11]

2.5.1 อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสามเฟสแบบพีดับเบิลยูเอ็ม

อินเวอร์เตอร์สามเฟสจะคล้ายกับอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวคือ ต้องการแรงดันไฟฟ้าด้านออกที่ควบคุมได้ทั้งขนาดและความถี่ เพื่อที่จะให้ได้แรงดันไฟฟ้าด้านสมมูลและมีเฟสต่างกัน 120 องศาของความถี่หลักมูล จึงต้องใช้รูปคลื่นสามเหลี่ยม เปรียบเทียบกับแรงดันควบคุมรูปไซน์สามเหลี่ยมคลื่นที่เฟสต่างกัน 120 องศา ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ที่มีค่า $m_f = 15$ ค่าแรงดันเฟส V_{AN}, V_{BN} จะวัดเทียบกับบัสลบที่เป็นอ้างอิง ส่วนค่าแรงดันไลน์ V_{AB} ค่าที่เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจะถูกหักล้างไป ดังที่แสดงในรูปที่ 2.11 เป็นการสวิตซ์แบบพีดับเบิลยูเอ็ม

ในอินเวอร์เตอร์สามเฟสจะพิจารณาฮาร์มอนิกเน้นเฉพาะค่าแรงดันไฟฟ้าระหว่างสาย (line-to-line voltage) เริ่มจากฮาร์มอนิกของแรงดันเฟส (V_{AB}) ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ซึ่งจะมีค่าฮาร์มอนิกเลขคี่เกิดขึ้นที่ค่าไซด์แบนด์ของ m_f และที่จำนวนเท่าของ m_f โดยค่าแรงดันเฟส

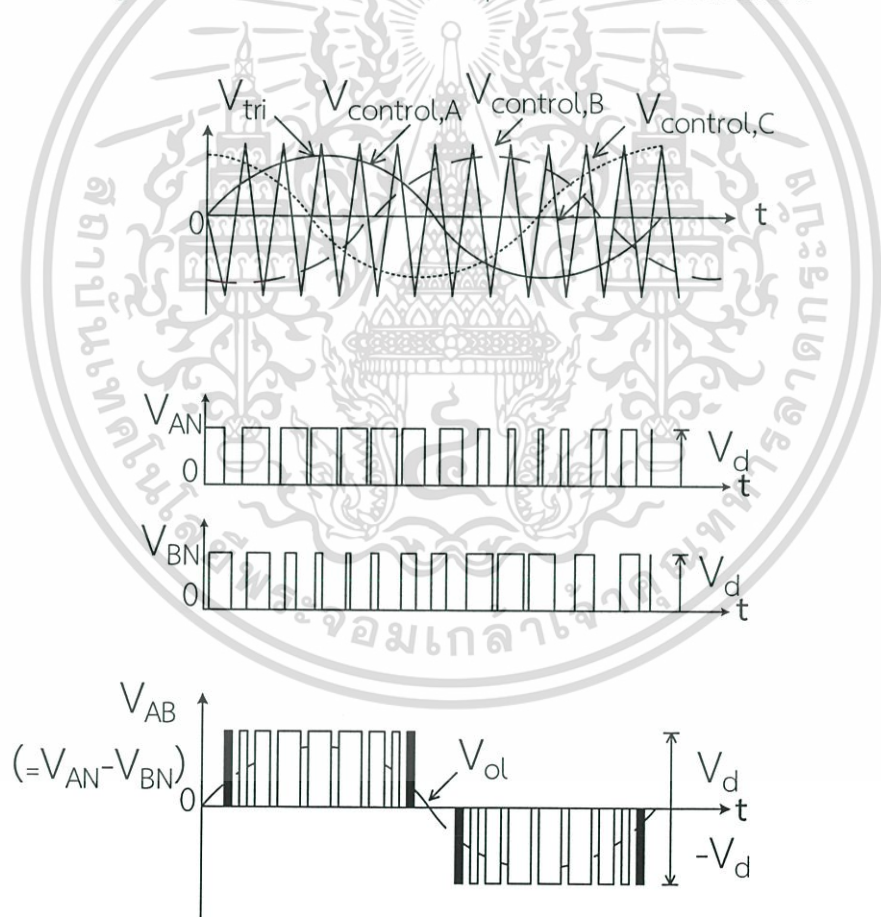
V_{AN}, V_{BN} จะมีเฟสต่างกัน 120 องศา ดังนั้นเฟสจะเท่ากันหรือความต่างเฟสเป็นศูนย์ทุกๆ $3m_f$ ทำให้แรงดันไฟฟ้าจะไม่มีฮาร์มอนิกลำดับที่สามหารลงตัวที่เป็นเลขคี่ เช่น ฮาร์มอนิกที่ 3, 9, 15, 21 เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้น นอกจากนี้สำหรับในกรณีแรงดันเฟสที่มีโพลสมมูล ค่าแรงดันระหว่างสายจะไม่มีฮาร์มอนิกเลขคู่ เช่นฮาร์มอนิกลำดับที่ 2,4,6,8 เป็นต้น

สามารถสรุปประเด็นสำคัญของอินเวอร์เตอร์สามเฟสได้ดังนี้

1. ที่ค่า $m_f \leq 21$ หากต้องการกำจัดฮาร์มอนิกเลขคู่จะต้องใช้การสวิตซ์แบบพีดับเบิลยูเอ็มที่ซิงโครไนส์ หมายถึง m_f ต้องเป็นจำนวนเต็มและความถี่หลักมูล จะเริ่มและจบคาบพร้อมกับการสวิตซ์ของรูปคลื่นสามเหลี่ยมดูในรูปที่ 2.11 และ m_f ต้องเป็นจำนวนเลขคู่
2. ที่ค่า $m_f \geq 21$ ฮาร์มอนิกส้อยย่ที่เกิดจากการสวิตซ์แบบพีดับเบิลยูเอ็มที่ไม่ซิงโครไนส์ (m_f ต้องไม่เป็นจำนวนเต็ม) จะมีค่าน้อยแต่ต้องตระหนักว่าควรหลีกเลี่ยงการสวิตซ์แบบพีดับเบิลยูเอ็มที่ไม่ซิงโครไนส์ เพราะจะทำให้เกิดฮาร์มอนิกส้อยย่ที่ใกล้ความถี่หลักมูล
3. ที่ค่า $m_a > 1$ หากไม่พิจารณา ค่าของ m_f จะมีผลเช่นเดียวกับกรณีที่ 1



รูปที่ 2.11 รูปคลื่นและฮาร์มอนิกสเปกตรัมของอินเวอร์เตอร์สามเฟส [11]

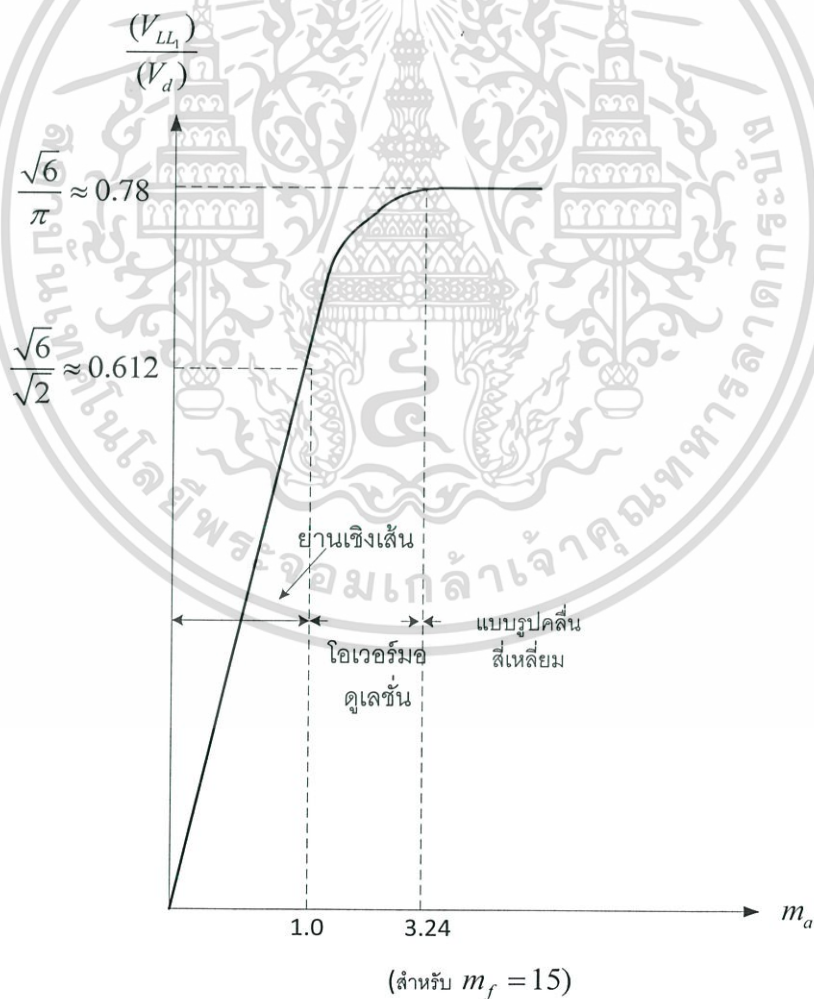
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) อินเวอร์เตอร์สามเฟสเมื่อทำงานในย่านมอดูเลชันเชิงเส้น ($m_a \leq 1$)

ในย่าน ($m_a \leq 1$) ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่หลักมูลในหนึ่งกึ่งหรือหนึ่งเฟส จะเท่ากับ สมการที่ 2.10 ส่วนค่ารากของกำลังสองเฉลี่ยของแรงดันแรงดันไฟฟ้าระหว่างสายของความถี่หลักมูล ในสมการที่ 2.11 จะมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับค่า m_a แสดงในรูปที่ 2.12 ข้อสังเกตค่าแกนตั้งจะ แตกต่างจากอินเวอร์เตอร์เฟสเดียว คือ จะเป็นอัตราส่วนแรงดันไฟฟ้าระหว่างสายที่ความถี่หลักมูล ทหารกับค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (V_{LL1}/V_d)

$$\hat{v}_{AN1} = m_a \cdot \frac{V_d}{2} \quad \text{เมื่อ } m_a \leq 1.0 \quad (2.10)$$

$$V_{LL1} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \hat{v}_{AB1} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \cdot m_a \cdot \frac{V_d}{2} = 0.612 \cdot m_a \cdot V_d \quad (2.11)$$



รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง V_{LL1}/V_d กับ m_a ในอินเวอร์เตอร์สามเฟส [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหมายของการทำงานในย่านมอดูเลชัน เช่นในรูปที่ 2.12 หากมีแหล่งจ่ายแรงดันเชื่อมโยงมีค่า 311 V เมื่อปรับ $m_a = 0.5$ จะได้แรงดันระหว่างสายของระบบไฟเฟสเดียวคือ $0.612 \times 0.5 \times 311 = 95.17$ V หมายถึงแรงดันที่ความถี่หลักมูล = 95.17 เมื่อปรับ m_a จาก 0.5 เป็น 1 จำนวน 2 เท่า แรงดันก็เพิ่มเป็น 2 เท่าเช่นกัน

2) อินเวอร์เตอร์สามเฟสเมื่อทำงานในย่านโอเวอร์มอดูเลชัน ($m_a > 1$)

ในย่าน $m_a > 1$ อธิบายการทำงานเช่นเดียวกับในอินเวอร์เตอร์เฟสเดียว อัตราส่วนแรงดันไฟฟ้าระหว่างสายที่ความถี่หลักมูลหารกับค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (V_{LL} / V_d) จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.612 ถึง 0.78 แสดงในรูปที่ 2.12 สำหรับการทำงานในโหมด โอเวอร์มอดูเลชันมีข้อดีคือขนาดแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่หลักมูล จะมีค่าสูงกว่าในกรณีย่านเชิงเส้น ($m_a \leq 1$) แต่การเพิ่มขึ้นของแรงดันไฟฟ้าจะไม่เป็นเชิงเส้นจนถึงค่าคงที่ค่าหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 2.12 ข้อเสียของการทำงานย่านโอเวอร์มอดูเลชันคือ ทำให้เกิดฮาร์โมนิกอันดับต่ำๆ ที่อยู่ใกล้ฮาร์โมนิกอันดับหนึ่ง

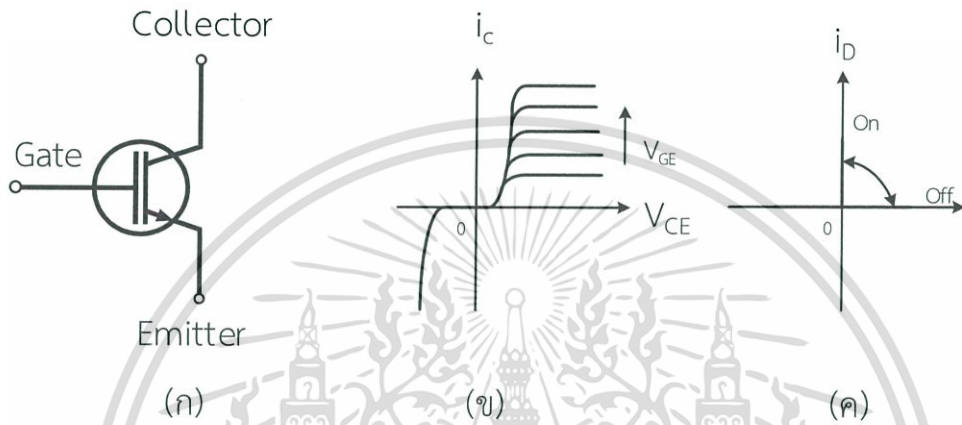
3) อินเวอร์เตอร์สามเฟสเมื่อทำงานในย่านรูปคลื่นสี่เหลี่ยม

อินเวอร์เตอร์สามเฟสที่ทำงานในย่านรูปคลื่นสี่เหลี่ยม จะเหมาะสำหรับใช้กับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงสามารถป้อนระดับแรงดันไฟฟ้าระหว่างสาย เพื่อใช้ในการปรับค่าระดับแรงดันไฟฟ้าด้านนอก รูปที่ 2.13 (ข) แสดงรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่มีช่วงนำกระแส 180 องศา ในทำนองเดียวกับการรีเฟสเดียวจะสามารถหาค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของแรงดันไฟฟ้าด้านออกที่ความถี่หลักมูลที่ทำงานในย่านรูปคลื่นสี่เหลี่ยมจะหาได้จากสมการที่ 2.12

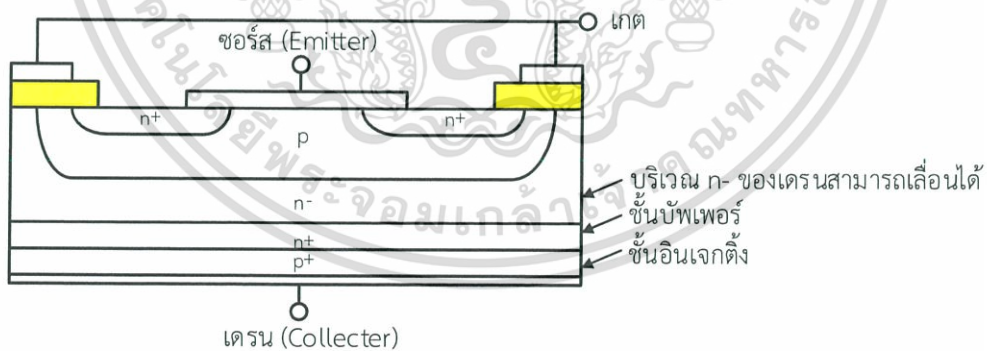
$$V_{LL1} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} (\hat{V}_{AB})_1 = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \frac{v_d}{2} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \cdot v_d = 0.78v_d \quad (2.12)$$

2.6 ไอจีบีที (Isulated Gate Bipolar Transistors : IGBT) [4]

ไอจีบีทีจัดเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่สามารถควบคุมให้นำกระแส และควบคุมให้หยุดนำกระแสได้โดยการควบคุมจากแรงดันไฟฟ้าที่ขาเกต ไอจีบีทีมีสัญลักษณ์และคุณลักษณะของกระแสและแรงดันไฟฟ้าขณะสภาวะอยู่ตัว คุณลักษณะของกระแสและแรงดันไฟฟ้าในอุดมคติ ดังแสดงในรูปที่ 2.13 (ก) – (ค) ตามลำดับ



รูปที่ 2.13 (ก) สัญลักษณ์พื้นฐานของไอจีบีที (ข) คุณลักษณะของกระแสแรงดันไฟฟ้า (ค) คุณลักษณะในอุดมคติ [4]



รูปที่ 2.14 ภาพตัดขวางโครงสร้างพื้นฐานของ IGBT [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างของ IGBT ชนิดเอ็นแชนเนลแสดงเป็นภาพตัดขวางได้ดังรูปที่ 2.14 โครงสร้างโดยรวมส่วนใหญ่มีลักษณะคล้ายกับโครงสร้างของมอสเฟตมาก จะแตกต่างกันตรงที่ IGBT จะมีชั้น P^+ หรือชั้นอินเจกต์ติ้ง (Injecting) ต่ออยู่ระหว่างขาเดรน ซึ่งในมอสเฟตนั้นไม่มี จากการที่ขาเกตถูกกั้นด้วยชั้นของซิลิคอนออกไซด์ (SiO_2) เป็นผลทำให้ความต้านทานอินพุตที่ขาเกตมีค่าสูงมาก เหมือนกับเพาเวอร์มอสเฟต โดยทั่วไปจะมีค่าอยู่ในช่วง 109 โอห์ม

ไอจีบีทีได้รวมข้อดีของมอสเฟตกำลัง ทรานซิสเตอร์กำลัง (บีเจที) และจีทีโอไธริสเตอร์ มีรวมอยู่ด้วยกัน กล่าวคือ ไอจีบีทีมีค่าอิมพีแดนซ์ขาเกตที่มีค่าสูงคล้ายมอสเฟตกำลัง ซึ่งต้องการพลังงานน้อยมากในการควบคุมสวิตช์ ควบคุมการนำและหยุดนำกระแสด้วยแรงดันไฟฟ้าที่ขาเกต รวมทั้งสามารถใช้งานการสวิตช์ซึ่งที่ความถี่สูง

ไอจีบีทีจะมีแรงดันไฟฟ้าตกร่วมขณะนำกระแสต่ำคล้ายทรานซิสเตอร์กำลัง ซึ่งมีค่า 2-3 โวลต์สำหรับพิกัดแรงดันไฟฟ้า 1,000 โวลต์ นอกจากนี้ ไอจีบีทีจะออกแบบให้ทนแรงดันไฟฟ้านับได้คล้ายกับจีทีโอไธริสเตอร์

ไอจีบีทีจะมีช่วงเวลานำกระแสและหยุดนำกระแสมีค่าประมาณ 1 ไมโครวินาที มีขนาดพิกัดกระแสไฟฟ้าถึง 2,000 แอมแปร์ และพิกัดแรงดันถึง 5,000 โวลต์

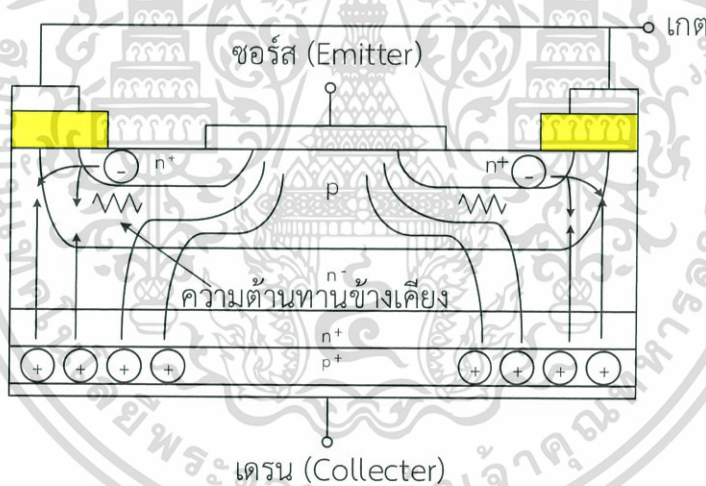
ลักษณะของกราฟแสดงคุณสมบัติของกระแสและแรงดันของ IGBT มีลักษณะคล้ายกราฟของทรานซิสเตอร์ แต่การควบคุมกระแสเดรน จะอาศัยการควบคุมแรงดันระหว่างขาเกตกับขาซอร์ส มากกว่า การควบคุมกระแสที่ขาเอ็นเหมือนกันทรานซิสเตอร์ ซึ่งกราฟแสดงคุณสมบัติของกระแสและแรงดันของ IGBT แสดงไว้ในรูปที่ 2.13 (ข) และสำหรับรูปที่ 2.13 (ค) เป็นกราฟคุณสมบัติการถ่ายโอนกระแสและแรงดัน

รูปกราฟแสดงให้เห็นว่าส่วนใหญ่ของเส้นกราฟจะมีลักษณะเป็นเส้นตรงแต่จะเริ่มโค้งที่กระแสเดรนมีค่าต่ำ ๆ นั่นก็คือจุดที่แรงดันระหว่างขาเกตและขาซอร์สต่ำลง ใกล้แรงดันจุดเริ่มเปลี่ยนสถานะการทำงาน (จุด Threshold Voltage : $V_{gs(th)}$) โดยถ้าแรงดันระหว่างหยุดนำกระแสหรือคัทออฟ ในกรณีของ IGBT ชนิดพีแชนเนลนั้น คุณสมบัติจะคล้ายกับเอ็นแชนเนล แต่โครงสร้างและสัญลักษณ์จะมีลักษณะตรงกันข้ามกับเอ็นแชนเนล เช่น ชนิดของสารที่ได้มาจากเอ็นแชนเนล ก็จะเปลี่ยนเป็นตรงกันข้าม สัญลักษณ์ลูกศรก็จะกลับเอาหัวลูกศรกลับไปในทางตรงกันข้าม

2.6.1 สถานะนำกระแส

เมื่อขาเดรนได้รับแรงดันไบแอสตรงคือเป็นบวกเทียบกับซอร์ส และแรงดันระหว่างเกตกับซอร์สมีค่าเกิน $V_{gs(th)}$ ประจุไฟฟ้าบวกที่เกิดจากแรงดันที่ขาเกตจะดึงเอาอิเล็กตรอน ให้มารวมกันอยู่ในบริเวณภายใต้เกต ทำให้ชั้นบอดี้ (Body Layer) ตรงส่วนใต้เกตแปรสภาพเป็น n ทำให้เกิดการต่อกันของบริเวณ n^- (Drift Region) เข้ากับบริเวณ n^+ (Source Region) ซึ่งลักษณะเช่นนี้ เหมือนกับการทำงานของ โมสเฟต

กระแสอิเล็กตรอนที่ไหลจากขาซอร์สผ่านบริเวณใต้เกตมายังบริเวณลอยเลื่อน n^- จะรวมกับโฮล ที่เป็นพาหะข้างน้อยที่ถูกฉีดมาจากชั้นอินเจกต์ติ้ง p^+ เพราะรอยต่อ J1 ได้รับแรงดันไบแอสตรง ทำให้ JGBT อยู่ในสถานะนำกระแส เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าจากเดรนไปซอร์สได้ การรวมกันของโฮสและอิเล็กตรอนภายในบริเวณ n^- เรียกว่า การมอดูเลตสภาพนำ (Conductivity Modulation)



รูปที่ 2.15 ทิศทางการไหลของอิเล็กตรอนและโฮลในขณะนำกระแส [4]

ผลของการมอดูเลตนี้จะทำให้ความต้านทานของบริเวณ n^- มีค่าต่ำลงเป็นการเพิ่มความสามารถ ในการขับผ่านกระแสได้สูงขึ้น ซึ่งจะมีลักษณะเหมือนกับทรานซิสเตอร์กำลัง ผลของความต้านทานที่ลดลง ทำให้แรงดันตกคร่อมที่สถานะนำกระแสลดลง การสูญเสียกำลังงานขณะนำกระแสจึงลดลงด้วย ทิศทางการไหลของอิเล็กตรอนและโฮล

2.6.2 สภาวะหยุดนำกระแส

เมื่อแรงดันระหว่างเกตและซอร์สลดลงต่ำกว่าแรงดัน $V_{gs(th)}$ จะทำให้มีแรงดันไม่เพียงพอ สำหรับการแปรสภาพชั้นบอดี p เป็น n ได้ ทำให้บริเวณ n^- ไม่ต่อกับบริเวณซอร์ส n^+ IGBT จึงอยู่ในสภาวะหยุดนำกระแส ในสภาวะนี้รอยต่อ J2 ที่ได้รับแรงดันไบแอสกลับ จะทำให้เกิดกระแสรั่วไหลเพียงเล็กน้อยเท่านั้น นอกจากนี้ยังทำให้เกิดบริเวณปลอดพาหะ (Depletion Region) ขึ้นที่รอยต่อ J2 ด้วย

บริเวณปลอดพาหะนี้จะขยายบริเวณกว้างขึ้นจนเกินเข้ามายังบริเวณ n^- มากกว่า ที่ จะขยายไปยังบริเวณชั้นบอดี p ทั้งนี้เพราะชั้นบอดี p มีความหนาแน่นในการโด๊ปสารมากกว่า ถ้า ความหนาแน่นของสารที่โด๊ปในบริเวณลอยเลื่อน n^- มากเพียงพอ ก็จะทำให้การขยายของบริเวณ ปลอดพาหะ ไม่สามารถแตะกับชั้นอินเจ็กต์ได้ ชั้นบัฟเฟอร์ n^+ (Buffer Layer)

ทั้งนี้เพราะการแตะกันของบริเวณทั้งสองจะทำให้เกิดการพังทลายทางด้านไบแอส ตรง สำหรับ IGBT ที่ไม่มีการโด๊ปสารในชั้นบัฟเฟอร์ n^+ นี้ จะเรียกว่า IGBT แบบสมมาตร ซึ่งจะมี อัตราทนแรงดันย้อนกลับ (V_{rm} หรือ BV_{sds}) สูงพอ ๆ กับค่าอัตราทนแรงดันไหลตรง (BV_{dss}) เหมาะ สำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ

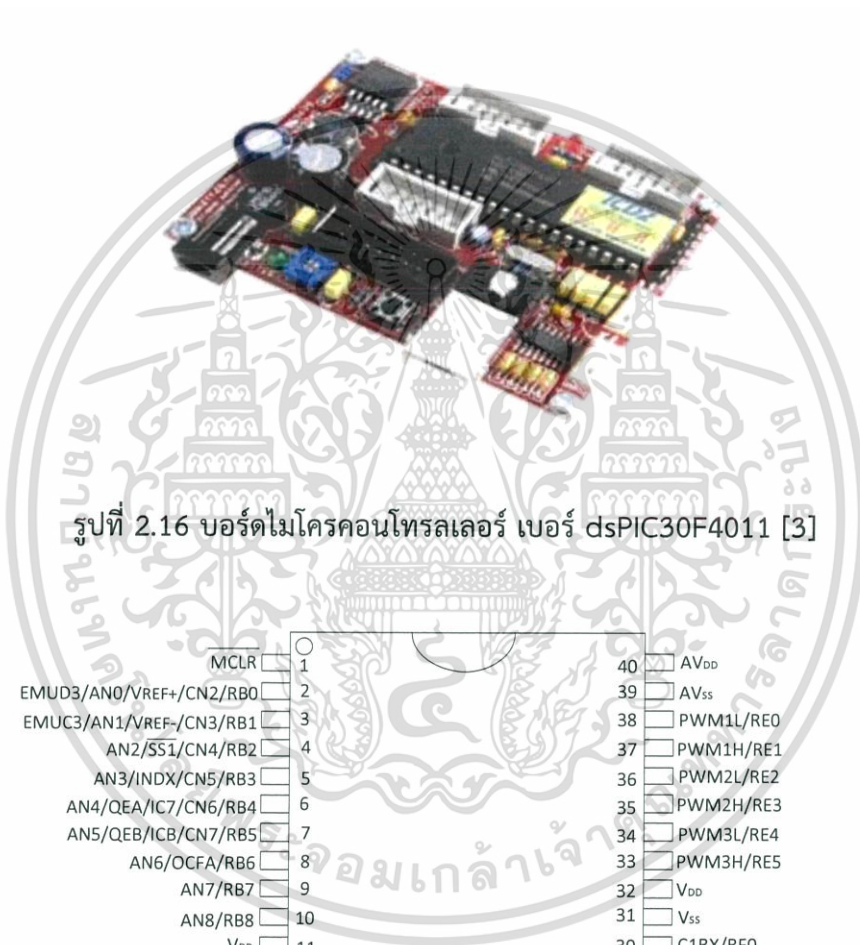
การลดความหนาของบริเวณ n^- ลงแต่ยังคงความสามารถของอัตราทนแรงดันไหล ตรงไว้ สามารถทำได้โดยเพิ่มชั้นบัฟเฟอร์ n^+ เข้าไปเพื่อป้องกันการแตะกันของบริเวณปลอดพาหะ กับบริเวณอินเจ็กต์ p^+ ซึ่งจะเรียก IGBT ชนิดนี้ว่า IGBT แบบไม่สมมาตร และจากการลดความหนา ของบริเวณลอยเลื่อน n^- ลง จะช่วยส่งผลให้เกิดข้อดีสองประการคือ

- ทำให้แรงดันตกคร่อมขณะนำกระแสต่ำลง เป็นผลให้การสูญเสียกำลังงานลดน้อยลงด้วย
- ช่วยลดช่วงเวลาหยุดนำกระแสให้สั้นลงด้วย

แต่ข้อเสียของการเพิ่มชั้นบัฟเฟอร์ n^+ คือจะลดความสามารถของอัตราทนแรงดันย้อน กลับให้ น้อยลงไม่ถึงสิบโวลต์ ทั้งนี้เพราะเมื่อ IGBT ได้รับแรงดันไบแอสกลับ ที่ขาเดรน รอยต่อ J1 ซึ่งทั้งสอง ข้างมีความหนาแน่นในการโด๊ปของสารมาก จะไม่สามารถทนแรงดันย้อนกลับได้สูง ดังนั้น IGBT ชนิด นี้ไม่เหมาะที่จะนำไปใช้ในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ

2.7 ไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F4011 [1]

ไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F4011 เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 16 บิต ที่รวมความสามารถของไมโครคอนโทรลเลอร์ (MCU) เข้ากับตัวควบคุมการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (Digital Signal Controller) หรือที่เรียกว่า DSC ส่งผลให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในตระกูล dsPIC นอกจากจะมีประสิทธิภาพในการควบคุมอุปกรณ์ภายนอกแล้ว ยังสามารถนำมาใช้งานด้านประมวลผลสัญญาณดิจิทัลที่เรียกว่า DSP (Digital Signal Processing) ได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 2.16 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ เบอร์ dsPIC30F4011 [3]

MCLR	1	40	AV _{DD}
EMUD3/AN0/VREF+/CN2/RB0	2	39	AV _{SS}
EMUC3/AN1/VREF-/CN3/RB1	3	38	PWM1L/RE0
AN2/SS1/CN4/RB2	4	37	PWM1H/RE1
AN3/INDX/CN5/RB3	5	36	PWM2L/RE2
AN4/QEA/IC7/CN6/RB4	6	35	PWM2H/RE3
AN5/QEB/ICB/CN7/RB5	7	34	PWM3L/RE4
AN6/OCFA/RB6	8	33	PWM3H/RE5
AN7/RB7	9	32	V _{DD}
AN8/RB8	10	31	V _{SS}
V _{DD}	11	30	C1RX/RFO
V _{SS}	12	29	U2RX/CN17/RF4
OSC1/CLK1	13	28	U2TX/CN18/RF5
OSC2/CLKO/RC15	14	27	PGC/EMUC/U1RX/SDI1/SDA/RF2
EMUD1/SOSCI/T2CK/U1ATX/CN1/RC13	15	26	PGD/EMUD/U1TX/SDO1/SCL/RF3
EMUC1/SOSCO/T1CK/U1ARX/CN0/RC14	16	25	PGD/EMUD/U1TX/SDO1/SCL/RF3
FLTA/INT0/RE8	17	24	SCK1/RF6
EMUD2/OC2/IC2/INT2/RD1	18	23	EMUC2/OC1/IC1/INT1/RD0
OC4/RD3	19	22	OC3/RD2
V _{SS}	20	21	V _{DD}

รูปที่ 2.17 ขาสัญญาณของ dsPIC30F4011 [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการเขียนโปรแกรมรับอินพุตกระแสไฟฟ้า (กระแสไฟฟ้าอ้างอิงและค่าจริง) และส่งสัญญาณเอาต์พุตควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ โดยในที่นี้จะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F4011 แสดงในรูปที่ 2.16 และ 2.17

2.7.1 รายละเอียดและคุณสมบัติ

- หน่วยความจำ FLASH 48KBYTE, RAM 2KBYTE
- หน่วยความจำ EEPROM ขนาด 1 KBYTE
- 16 bit TIMER/COUNTER 5 ชุด
- Input CAPTURE จำนวน 4 ช่อง
- A to D ขนาด 10 bit/500KSPS จำนวน 9 ช่อง
- UART จำนวน 2 ช่อง
- มีวงจร SPI, I2C, WATCHDOG, POWER-ON RESET, PWM

2.7.2 ฟังก์ชันที่ใช้งาน

2.7.2.1 โมดูลแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลขนาด 10 บิต

โมดูลแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลขนาด 10 บิต (10 bit High-Speed Analog-to-Digital Convert หรือโมดูล ADC) เป็นโมดูลรับแรงดันอนาลอกแปลงสัญญาณเป็นตัวเลขความละเอียดขนาด 10 บิต โมดูลแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลของ dsPIC30F4011 ประกอบไปด้วยขา AN0/RB0, AN1/RB1, AN2/RB2, AN3/RB3, AN4/RB4, AN5/RB5, AN6/RB6, AN7/RB7 และ AN8/RB8

2.7.2.2 โมดูลไทมเมอร์

โมดูลไทมเมอร์ภายใน dsPIC30F4011 เป็นไทมเมอร์ขนาด 16 บิต ประกอบไปด้วย Timer1, Timer2, Timer3, Timer4 และ Timer5 แต่ละโมดูลไทมเมอร์จะมี รีจิสเตอร์ขนาด 16 บิต โดยมีรีจิสเตอร์สามารถอ่านเขียนได้ ดังนี้

1. รีจิสเตอร์ TMRx ใช้ในการนับค่าขนาด 16 บิต
2. รีจิสเตอร์ PRx เป็นรีจิสเตอร์คาบเวลา (Period Register) ใช้กำหนดขอบเขตของการนับของรีจิสเตอร์ TMRx

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. รีจิสเตอร์ TxCON ใช้กำหนดคุณสมบัติและควบคุมการทำงานของไทมเมอร์ แต่ละโมดูลไทมเมอร์ จะมีบิตที่เกี่ยวข้องกับอินเทอร์รัปต์ของโมดูลไทมเมอร์ดังนี้

1. บิต TxIE (Interrupt Enable Control bit) ควบคุมการเปิดใช้งานอินเทอร์รัปต์ของไทมเมอร์
2. บิต TxIF (Interrupt Flag Status bit) แสดงสถานะการเปิด
3. บิต TxIP (Interrupt Priority Control bits) ขนาด 3 บิต (TxIP<2:0>) ใช้กำหนดระดับความสำคัญของอินเทอร์รัปต์ของไทมเมอร์

ตารางที่ 2.2 กำหนดการทำงานของไทมเมอร์ โดยผ่านรีจิสเตอร์ TxCON

Upper Byte:							
R/W-0	U-0	R/W-0	U-0	U-0	U-0	U-0	U-0
TON	-	TSIDL	-	-	-	-	-
Bit 15							Bit 0

Lower Byte:							
U-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	U-0	R/W-0	R/W-0	U-0
-	TGATE	TCKPS<1:0>		-	TSYNC	TCS	-
Bit 15							Bit 0

บิตที่ 15 TON (Timer On control bit)

1=เปิดการทำงานของโมดูลไทมเมอร์

บิตที่ 13 TSIDL (Stop in IDLE Mode bit)

0=ไทมเมอร์ยังคงทำงานต่อเนื่องเมื่อเข้าสู่โหมดไฮเดิล

บิตที่ 6 TGATE (Timer Gated Time Accumulation Enable bit)

0=ปิดการควบคุมการนับของไทมเมอร์จากภายนอก

บิตที่ 5-4 TCKPS<1:0> (Timer Input Clock Prescale Select bits)

บิตกำหนดค่าพรีสเกลเลอร์หรือตัวหารความถี่ออสซิลเลเตอร์ที่ใช้งาน

11=กำหนดค่าพรีสเกลเลอร์ในอัตราส่วน 1:256

10=กำหนดค่าพรีสเกลเลอร์ในอัตราส่วน 1:64

01=กำหนดค่าพรีสเกลเลอร์ในอัตราส่วน 1:8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

00=กำหนดค่าปริสเกลเลอร์ในอัตราส่วน 1:1

บิตที่ 2 TSYNC (Timer External Clock Input Synchronization Select bit)

0=สัญญาณนาฬิกาภายนอกไม่สัมพันธ์กับระบบ

บิตที่ 1 TCS (Timer Clock Source Select bit)

1=ใช้สัญญาณนาฬิกาภายนอก (TxCK)

2.7.2.3 โมดูล MCPWM (Motor Control Pulse Width Modulated)

เป็นโมดูลพื้นฐานสำหรับสร้างสัญญาณ PWM เพื่อนำมาประยุกต์ใช้งานในการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ชนิดต่างๆ สำหรับ dsPIC30F4011 จะมีจำนวนเอาต์พุตควบคุมสัญญาณ PWM 6 ช่อง ได้แก่

เอาต์พุต PWM ชุดที่ 1 : ขาพอร์ต PWM1L/RE0,PWM1H/RE1

เอาต์พุต PWM ชุดที่ 2 : ขาพอร์ต PWM2L/RE2,PWM2H/RE3

เอาต์พุต PWM ชุดที่ 3 : ขาพอร์ต PWM3L/RE4,PWM3H/RE5

รีจิสเตอร์ควบคุมการทำงานของโมดูล MCPWM มายระเอียด ดังนี้

1. รีจิสเตอร์ PTCN (PWM Timer Base Control Register) รีจิสเตอร์กำหนดโหมดการทำงานและควบคุมของโมดูล MCPWM
2. รีจิสเตอร์ PTPER (PWM Timer Period Register) รีจิสเตอร์กำหนดค่าเวลาและความถี่ของโมดูล MCPWM
3. รีจิสเตอร์ PWMCON1 (PWM Control Register#1) กำหนดหน้าที่การทำงานของขาสัญญาณ PWM และกำหนดให้เป็นขาขับสัญญาณของเอาต์พุต PWM หรือเป็นขาอินพุต /เอาต์พุต ดิจิตอลปกติ
4. รีจิสเตอร์ PWMCON2 (PWM Control Register#2) เป็นรีจิสเตอร์กำหนดโหมดการทำงานของสัญญาณสัมพันธ์กับ PWM หรือสัญญาณนาฬิกา
5. รีจิสเตอร์ DTCON1 (Dead Time Control Register) มีหน้าที่กำหนดค่า Dead Time และค่าปริสเกลเลอร์ของสัญญาณนาฬิกา

2.8 ภาษาที่ใช้เขียนโปรแกรมควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ [7]

2.8.1 ภาษา C

ภาษาซีจัดเป็นภาษาระดับกลางที่มีลักษณะเป็นภาษาโครงสร้าง สามารถประยุกต์ใช้ได้กับงานในลักษณะต่างๆ เป็นภาษาที่ใกล้เคียงกับภาษาแอสเซมบลี ผู้เขียนโปรแกรมจะสามารถเขียนโปรแกรมได้อย่างคล่องตัวโดยไม่มีข้อจำกัดในการวางตำแหน่งฟังก์ชันโปรแกรมภาษาซีจึงเป็นภาษาที่ง่ายต่อการเข้าใจและการนำไปใช้งาน การสร้างโปรแกรมภาษาซีจะเริ่มจากการเขียนโปรแกรมต้นกำเนิด แล้วนำไปทำการแปลด้วยตัวแปลภาษาซีเกิดเป็นโปรแกรมประสมค์ หลังจากนั้นจึงนำโปรแกรมประสมค์ไปทำการเชื่อมโยง เพื่อให้เกิดเป็นโปรแกรมที่สามารถทำงานได้อย่างรวดเร็ว

2.8.2 ภาษา Assembly

ภาษาแอสเซมบลีใช้รหัสเป็นคำแทนคำสั่งภาษาเครื่อง ทำให้นักเขียนโปรแกรมสามารถเขียนโปรแกรมได้ง่ายขึ้น ถึงแม้ว่าการเขียนโปรแกรมจะไม่สะดวกเท่ากับการเขียนโปรแกรมภาษาอื่นๆ ในสมัยนี้ แต่ถ้าเปรียบเทียบสมัยนั้นก็ถือว่าเป็นการพัฒนาไปสู่ยุคของการเขียนโปรแกรมแบบใหม่ คือใช้สัญลักษณ์แทนเลข 0 กับ 1 ของภาษาเครื่อง ซึ่งสัญลักษณ์ที่ใช้จะเป็นคำสั่งสั้นๆที่จะได้ง่าย เรียกว่า นิโมนิกโค้ด (Nemonic Code)

2.8.3 ภาษา Basic

คำว่า BASIC ย่อมาจากคำว่า Beginner's All-purpose Symbolic Instruction Code ซึ่งถูกคิดค้นโดย John George Kemeny และ Thomas Eugene Kurtz ตอนนั้นทั้งคู่ทำงานที่ Dartmouth College ในอเมริกา เมื่อปี ค.ศ. 1963 (พ.ศ. 2506) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้นักศึกษาที่ไม่มีพื้นฐานทางคอมพิวเตอร์ หรือคณิตศาสตร์ ได้ใช้เพื่อสั่งงานคอมพิวเตอร์เมนเฟรม (G.E.225) ได้ง่ายขึ้น โดยพัฒนามาจากภาษา FORTRAN II และภาษา ALGOL 60 รุ่นแรกของภาษา ถูกเรียกว่า Dartmouth BASIC

กฎในการออกแบบตัวแปลภาษา BASIC ในยุคเริ่มต้น

1. ง่ายสำหรับผู้เริ่มต้นเขียนโปรแกรม
2. มีลักษณะภาษาแบบ General-Purpose Programming Language หรือ Domain-Specific Language (DSL) เหมือนภาษา C
3. สามารถเพิ่มความสามารถขั้นสูง สำหรับผู้เชี่ยวชาญขั้นสูงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ทำงานร่วมกันได้ (Interactive)
5. มี Error Messages ที่เข้าใจง่าย ไม่เชิงเทคนิค
6. ต้องทำงานอย่างรวดเร็วกับโปรแกรมขนาดเล็ก
7. ผู้ใช้ไม่ต้องเข้าใจเรื่องอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ (Computer Hardware)
8. ไม่ให้ผู้ใช้ติดต่อโดยตรงกับระบบปฏิบัติการ (Operating System)

2.8.4 ภาษา Pascal

ภาษาปาสกาล เป็นภาษาโปรแกรมที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะในวงการศึกษา ซึ่งคิดค้นขึ้นโดย นิโคลาส์ แวร์ท (Niklaus Wirth) นักวิทยาการคอมพิวเตอร์ชาวสวิสเซอร์แลนด์ ในปี ค.ศ. 1970 เพื่อช่วยในการเรียนการสอนการเขียนโปรแกรมโครงสร้าง (Structured Programming) ภาษาปาสกาลนั้นพัฒนาขึ้นมาจาก ภาษาอัลกอล (Algol) และชื่อปาสกาลนั้น ตั้งขึ้นเป็นเกียรติแก่ แบลส ปาสกาล (Blaise Pascal) นอกเหนือจากภาษาปาสกาลแล้ว แวร์ทได้พัฒนา ภาษาโมดูลาทู (Modula-2) และ โอเบอรอน (Oberon) ซึ่งมีโครงสร้างคล้ายกับภาษาปาสกาล แต่สามารถรองรับการเขียนโปรแกรมเชิงวัตถุ (Object-Oriented Programming)

โปรแกรมภาษาปาสกาลทุกอัน จะเริ่มต้นด้วยคีย์เวิร์ด Program และส่วนของโค้ดจะอยู่ระหว่างคีย์เวิร์ด Begin และ End ภาษาปาสกาลนั้นไม่สนใจความแตกต่างระหว่างตัวพิมพ์ใหญ่และตัวพิมพ์เล็ก (“end” มีผลเท่ากับ “End”) เซมิโคลอน (;) ใช้เพื่อแบ่งคำสั่ง และมหัพภาค (.) ใช้เมื่อจบโปรแกรม (หรือยูนิต)

2.8.5 ภาษา Java

ภาษาจาวา เป็นภาษาโปรแกรมเชิงวัตถุ (Object Oriented Programming) พัฒนาโดย เจมส์ กอสลิง และวิศวกรคนอื่นๆที่ ซัน ไมโครซิสเต็มส์ ภาษาจาวาถูกพัฒนาขึ้นในปี พ.ศ. 2534 (ค.ศ. 1991) โดยเป็นส่วนหนึ่งของ โครงการกรีน (the Green Project) และสำเร็จออกสู่สาธารณะในปี พ.ศ. 2538 (ค.ศ. 1995) ซึ่งภาษานี้มีจุดประสงค์เพื่อใช้แทนภาษาซีพลัสพลัส (C++) โดยรูปแบบที่เพิ่มเติมขึ้นคล้ายกับภาษาอ็อบเจกต์ทีฟซี (Objective-C) แต่เดิมภาษานี้เรียกว่า ภาษาโอ๊ก (Oak) ซึ่งตั้งชื่อตามต้นโอ๊กใกล้ที่ทำงานของ เจมส์ กอสลิง แต่ว่ามีปัญหาทางลิขสิทธิ์ จึงเปลี่ยนไปใช้ชื่อ “จาวา” ซึ่งเป็นชื่อกาแฟแทน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

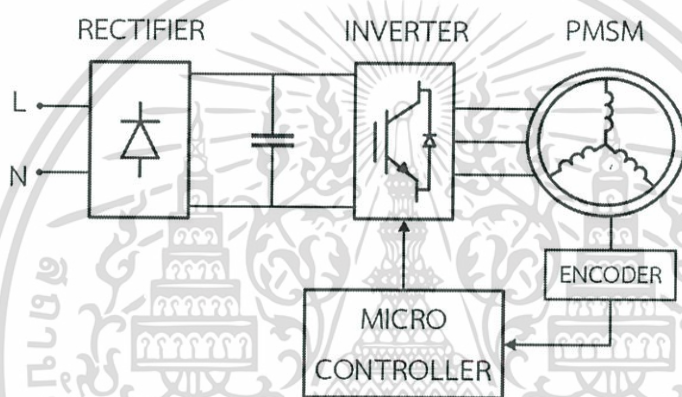
บทที่ 3

การออกแบบและการสร้างวงจรควบคุมเอซีเซอร์ไวมอเตอร์

3.1 ส่วนประกอบของวงจรควบคุมเอซีเซอร์ไวมอเตอร์

ส่วนประกอบของวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์แบ่งเป็น

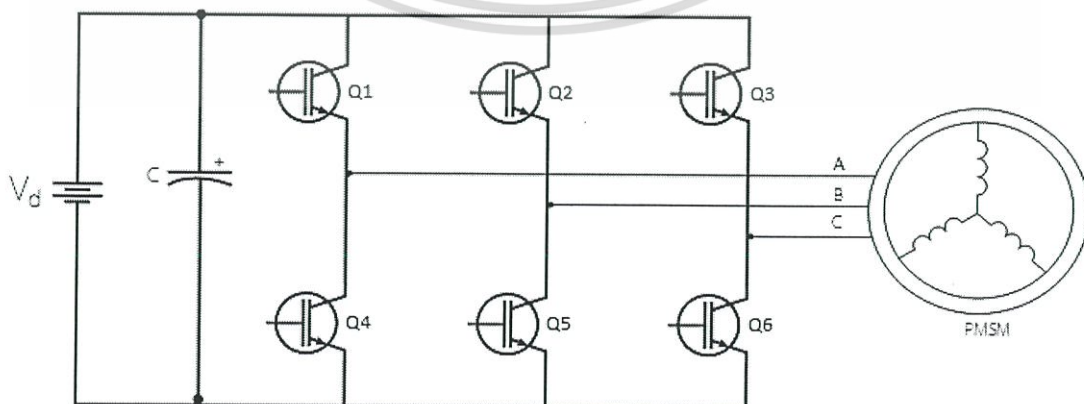
1. วงจรเรียงกระแส (Rectifier) ทำหน้าที่เปลี่ยนกระแสสลับให้เป็นกระแสตรง
2. วงจรกำลังอินเวอร์เตอร์ ทำหน้าที่เปลี่ยนกระแสตรงเป็นกระแสสลับ
3. ไมโครคอนโทรลเลอร์ให้เขียนโปรแกรมควบคุม



รูปที่ 3.1 ไดอะแกรมวงจรขับเคลื่อน PMSM

3.2 วงจรกำลังของอินเวอร์เตอร์

เป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส อุปกรณ์ที่ใช้ในการสวิตช์คือ IGBT เบอร์ FSBS10CH60 ที่มีพิกัดแรงดัน 600 V กระแส 10 A 3 Phase

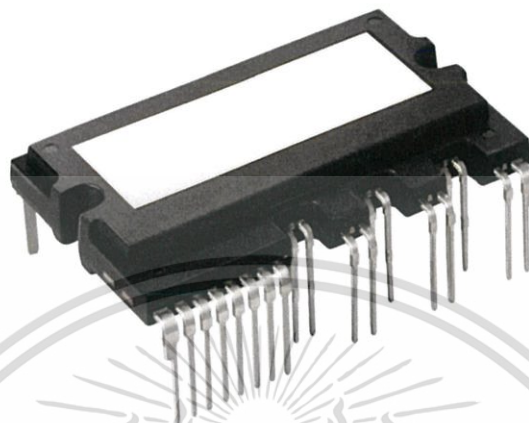


รูปที่ 3.2 วงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส

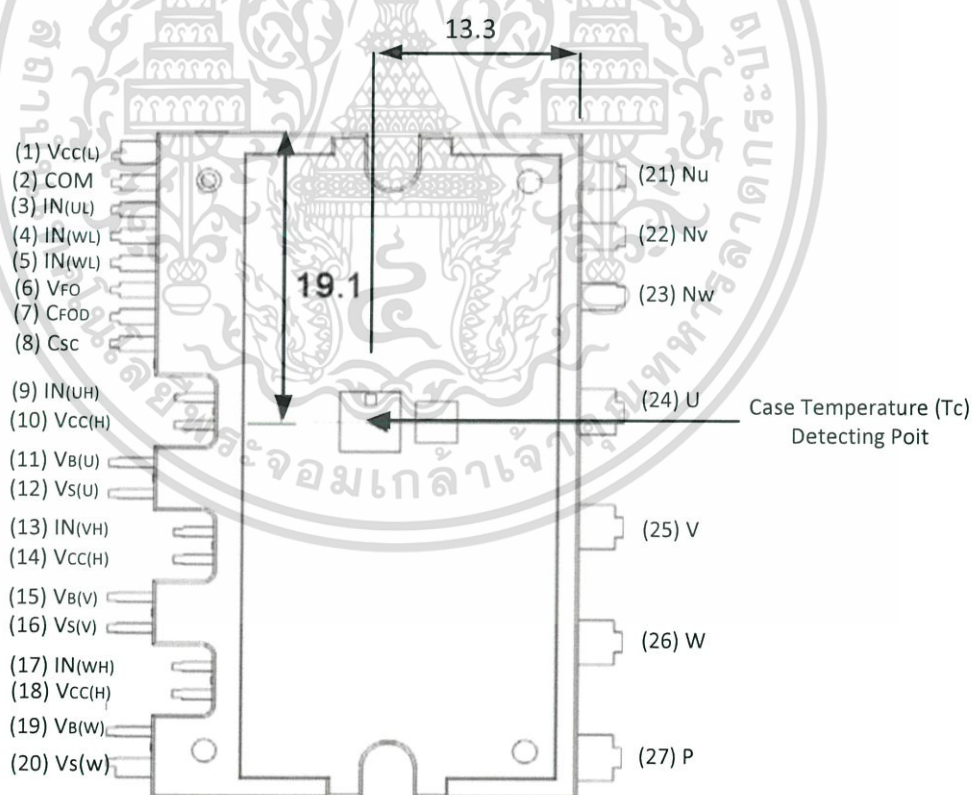
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส

ในโครงการนี้ได้เลือกใช้ไอซีเบอร์ FSBS10CH60 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้ รูปที่ 3.3-3.4 แสดงรูปไอซีที่นำมาใช้โดยสามารถขั้ววงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสได้



รูปที่ 3.3 ไอซีเบอร์ FSBS10CH60 [2]

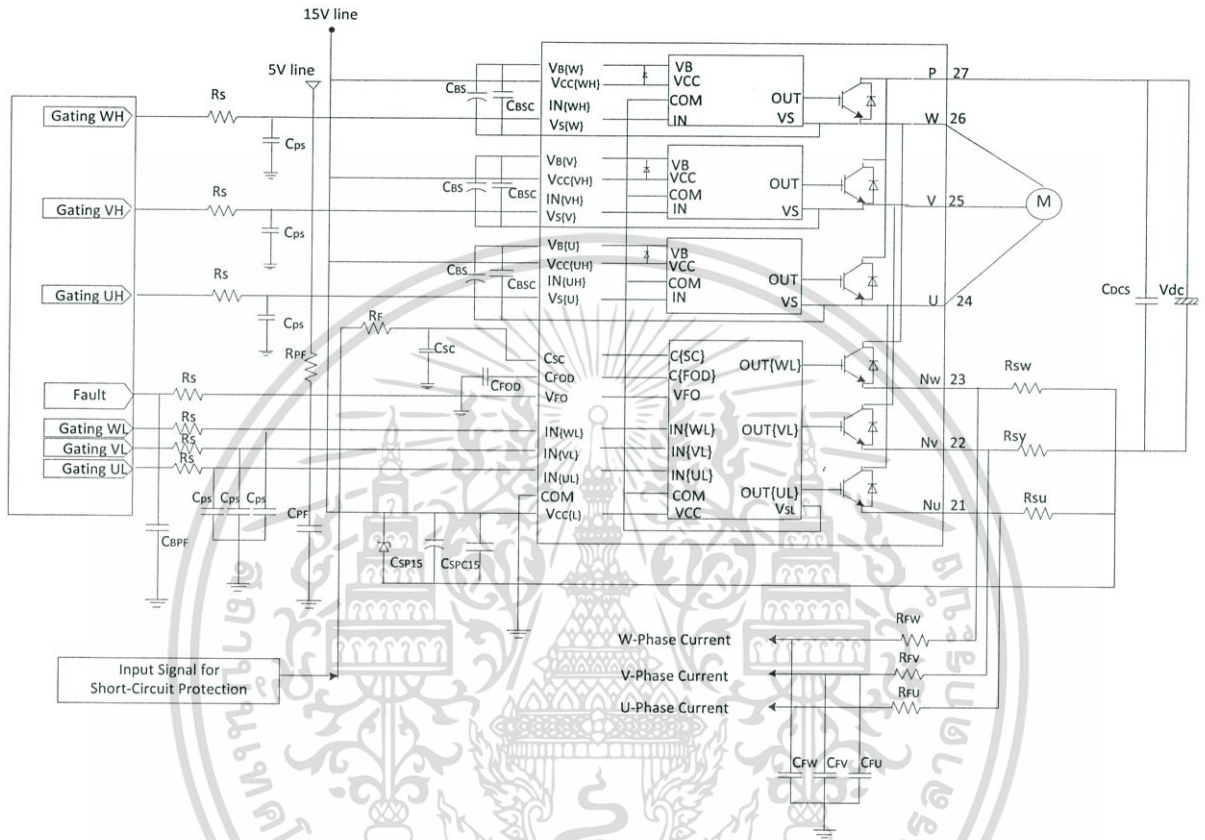


รูปที่ 3.4 รายละเอียดของไอซีเบอร์ FSBS10CH60 [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.1 วงจรประยุกต์การใช้งานไอซีเบอร์ FSBS10CH60

โครงการนี้ได้นำไอซีเบอร์นี้มาสร้างวงจร อินเวอร์เตอร์ โดยใช้สัญญาณ PWM ควบคุมการลำดับสวิตช์เพื่อให้เกิดสถานะนำกระแสไฟฟ้าและหยุดนำกระแสไฟฟ้า ซึ่งทำงานแบบ Bootstrap โดยอะแกรมของไอซีแสดงดังรูปที่ 3.5

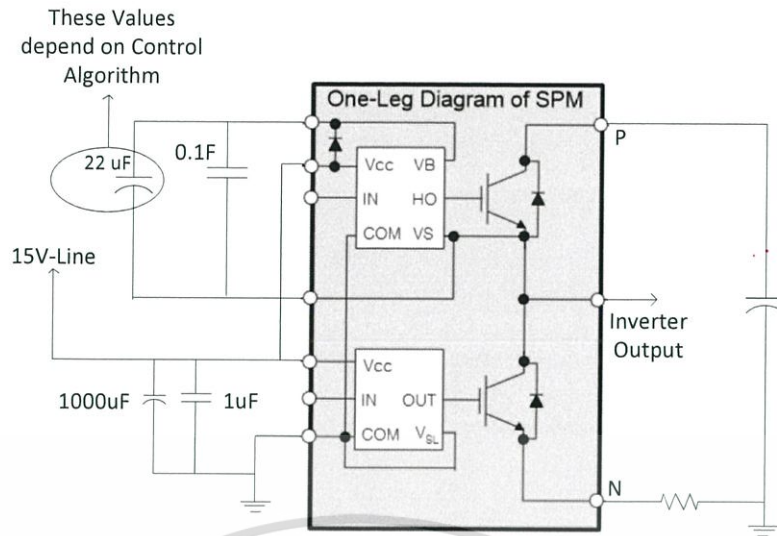


รูปที่ 3.5 วงจรประยุกต์การใช้งานไอซีเบอร์ FSBS10CH60

3.3.1.1 Bootstrap Circuit

รูปที่ 3.6 แสดงการทำงานของ Bootstrap ของไอซีเป็นวงจรที่ทำหน้าที่ป้องกันการช็อตที่ด้าน High-Voltage และ Low-Voltage เนื่องจากการใช้กราวด์ร่วมกัน โดยที่ HVIC (High-Voltage Gate Driver IC) กับ LVIC (Low Voltage Gate Driver IC) จะทำงานสลับกัน ซึ่งตัวเก็บประจุ (C_{BS}) จะถูกชาร์จเข้ามาจนกระทั่ง LVIC ON เพื่อที่จะทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้กับ HVIC ในรอบต่อไป เมื่อ HVIC ON ซึ่งจะมีตัวต้านทาน (R_{BS}) ทำหน้าที่จำกัดกระแสไฟฟ้าเริ่มต้นที่จะเข้าไปชาร์จที่ C_{BS} ไม่ให้มีค่าสูงไป ซึ่งอาจทำให้ C_{BS} เสียหายได้

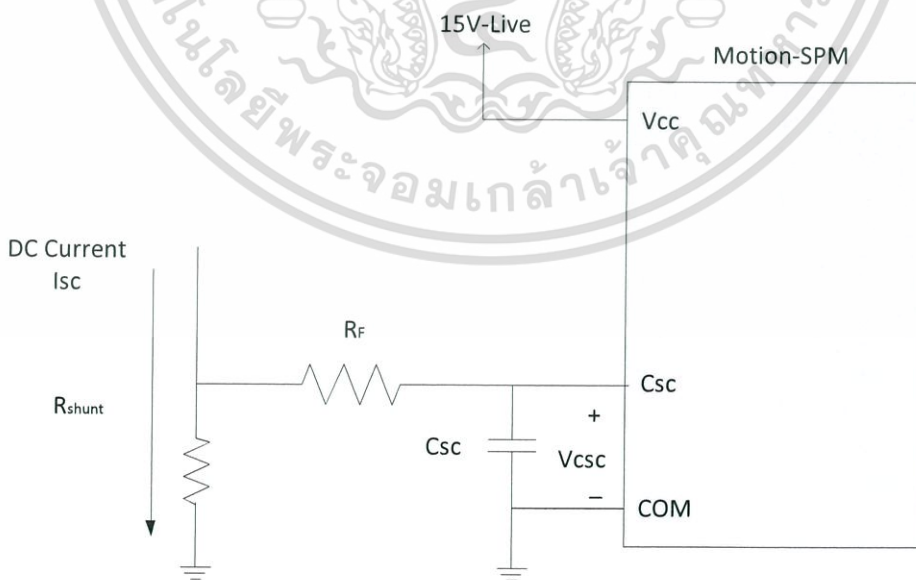
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 วงจร Bootstrap [2]

3.3.1.2 วงจรป้องกันการลัดวงจร

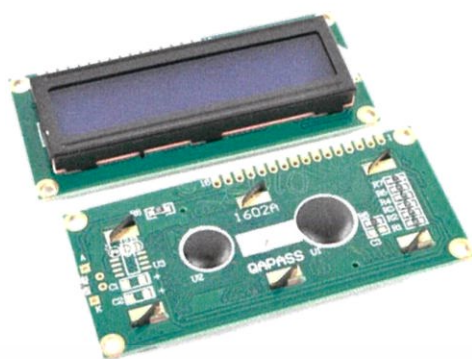
รูปที่ 3.7 เป็นวงจรป้องกันการไหลเกินที่แรงดันไฟฟ้าที่ขา C (V_{CSC}) เพื่อไม่ให้อุปกรณ์อื่นๆภายในวงจรอินเวอร์เตอร์เกิดความเสียหาย ซึ่งวงจร Protection นี้จะทำงานที่ช่วง -0.3 V ถึง 0.3 V โดยถ้าอยู่นอกช่วงนี้ขา C_{SC} จะส่งสัญญาณไปบอกให้ขา Fault (V_{FO}) แล้วจะไปสั่งไมโครคอนโทรลเลอร์ส่งสัญญาณทำให้อินเวอร์เตอร์หยุดทำงาน



รูปที่ 3.7 วงจรป้องกันการลัดวงจร [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 จอแสดงผล LCD



รูปที่ 3.8 จอแสดงผล LCD [6]

3.4.1 การควบคุมการแสดงผลของ LCD [6]

ในการควบคุมหรือสั่งงาน ตัวจอ LCD นั้นมีส่วนควบคุม (Controller) รวมไว้ในตัวแล้ว ซึ่งสามารถส่งรหัสคำสั่งควบคุมการทำงานของจอ LCD ผ่าน Controller ว่าต้องการใช้แสดงผลอย่างไร โดย LCD ขาในการเชื่อมต่อระหว่าง LCD กับ Microcontroller มีดังนี้

1. GND เป็นกราวด์ใช้ต่อระหว่าง Ground ของระบบ Microcontroller กับ LCD
2. VCC เป็นไฟเลี้ยงวงจรที่ป้อนให้กับ LCD ขนาด +5VDC
3. VO ใช้ปรับความสว่างของหน้าจอ LCD
4. RS ใช้บอกให้ LCD Controller ทราบว่า Code ที่ส่งมาจากขา Data เป็นคำสั่งหรือข้อมูล
5. R/W ใช้กำหนดว่าจะอ่านหรือเขียนข้อมูลกับ LCD Controller
6. E เป็นขา Enable หรือ Chips Select เพื่อกำหนดการทำงานให้กับ LCD Controller
- 7-14. DB0-DB7 เป็นขาสัญญาณ Data ใช้สำหรับเขียนหรืออ่านข้อมูล/คำสั่ง กับ LCD Controller

วิธีการสั่งงานโดย LCD Controller สามารถรับรหัสคำสั่งจาก Microcontroller ได้จากสัญญาณ RS R/W และ DB0-DB7 ในขณะที่สัญญาณ E มีค่า Logic เป็น “1” ซึ่งสัญญาณเหล่านี้จะใช้ร่วมกันเพื่อกำหนดเป็นรหัสคำสั่งสำหรับสั่งงาน LCD โดยหน้าที่ของแต่ละสัญญาณพอสรุปได้ดังนี้

- E เป็นสัญญาณ Enable เมื่อมีค่าเป็น

“1” เป็นการบอกให้ LCD ทราบว่าอุปกรณ์ภายนอกต้องการติดต่ออ่านหรือเขียนข้อมูล

“0” ให้ LCD ไม่สนใจสัญญาณ RS R/W และ DB7-DB0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- RS เป็นสัญญาณสำหรับกำหนดให้ LCD ทราบว่าอุปกรณ์ภายนอกต้องการติดต่อกับ LCD ในขณะนั้นเป็นรหัสคำสั่งหรือข้อมูล โดยถ้า

RS = "0" หมายถึง คำสั่ง

RS = "1" หมายถึง ข้อมูล

- R/W เป็นสัญญาณสำหรับบอกให้ LCD ทราบว่าอุปกรณ์ภายนอกต้องการอ่านหรือเขียนกับ LCD โดยถ้า

R/W = "0" หมายถึง เขียน

R/W = "1" หมายถึง อ่าน

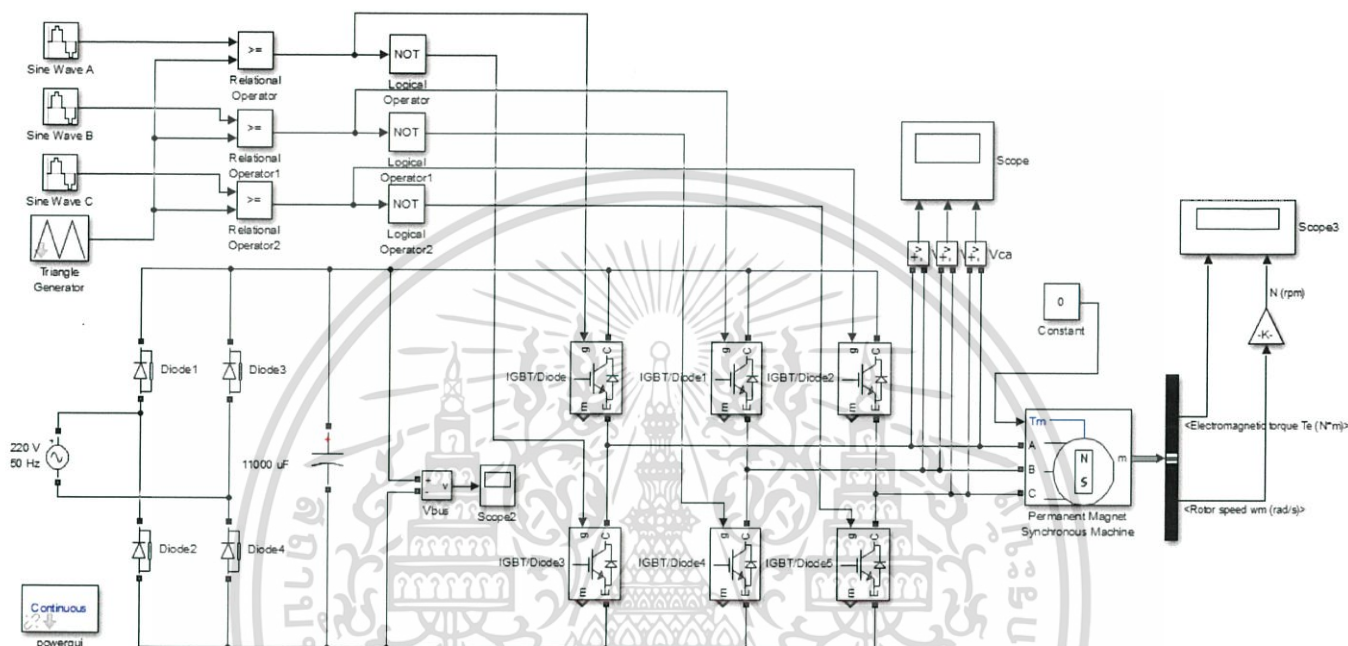
- DB0-DB7 เป็นสัญญาณแบบ 2 ทิศทาง โดยจะสัมพันธ์กับสัญญาณ R/W ใช้สำหรับรับส่ง คำสั่งและข้อมูลระหว่าง LCD กับอุปกรณ์ภายนอก โดยถ้า R/W = "0" สัญญาณ DB7-DB0 จะส่ง จากอุปกรณ์ภายนอกมาที่ LCD แต่ถ้า R/W = "1" สัญญาณ DB7-DB0 จะส่งจาก LCD ไปยัง อุปกรณ์ภายนอก

3.4.2 การเชื่อมต่อสัญญาณขาข้อมูลระหว่าง Microcontroller กับ LCD Controller

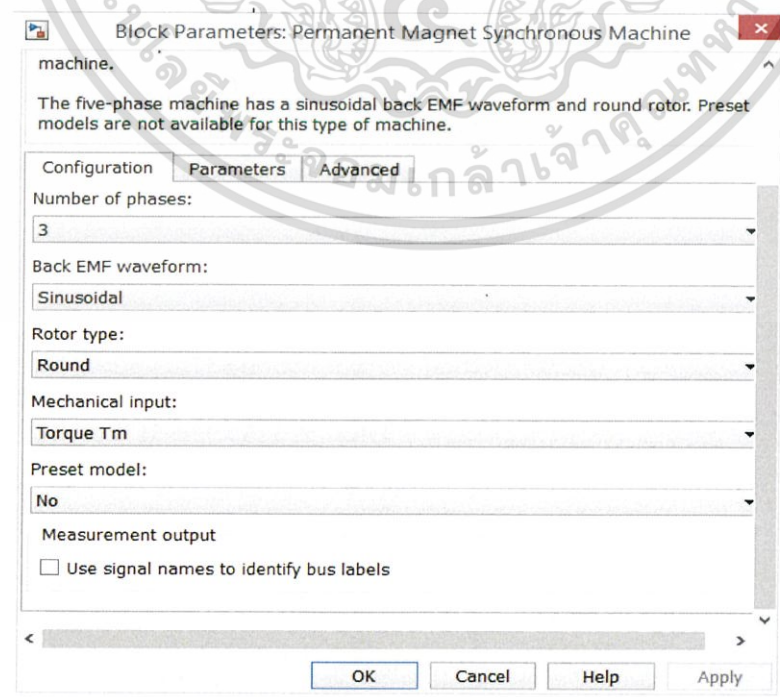
การเชื่อมต่อสัญญาณขาข้อมูลระหว่าง Microcontroller กับ LCD Controller สามารถทำได้ 2 ลักษณะ คือ การเชื่อมต่อแบบ 8 บิต (DB0-DB7) และการเชื่อมต่อแบบ 4 บิต (DB4-DB7) ทั้งสองแบบแตกต่างกันเพียงจำนวนขาที่ใช้คือ 8 หรือ 4 ขา และยังสามารถทำงานได้เหมือนกัน แต่ทั้งนี้การส่งข้อมูลแบบ 4 ขา จะทำให้ส่งข้อมูลได้ช้ากว่า 8 ขา

3.5 การจำลองทาง MATLAB ของ Permanent Magnet Synchronous Motor

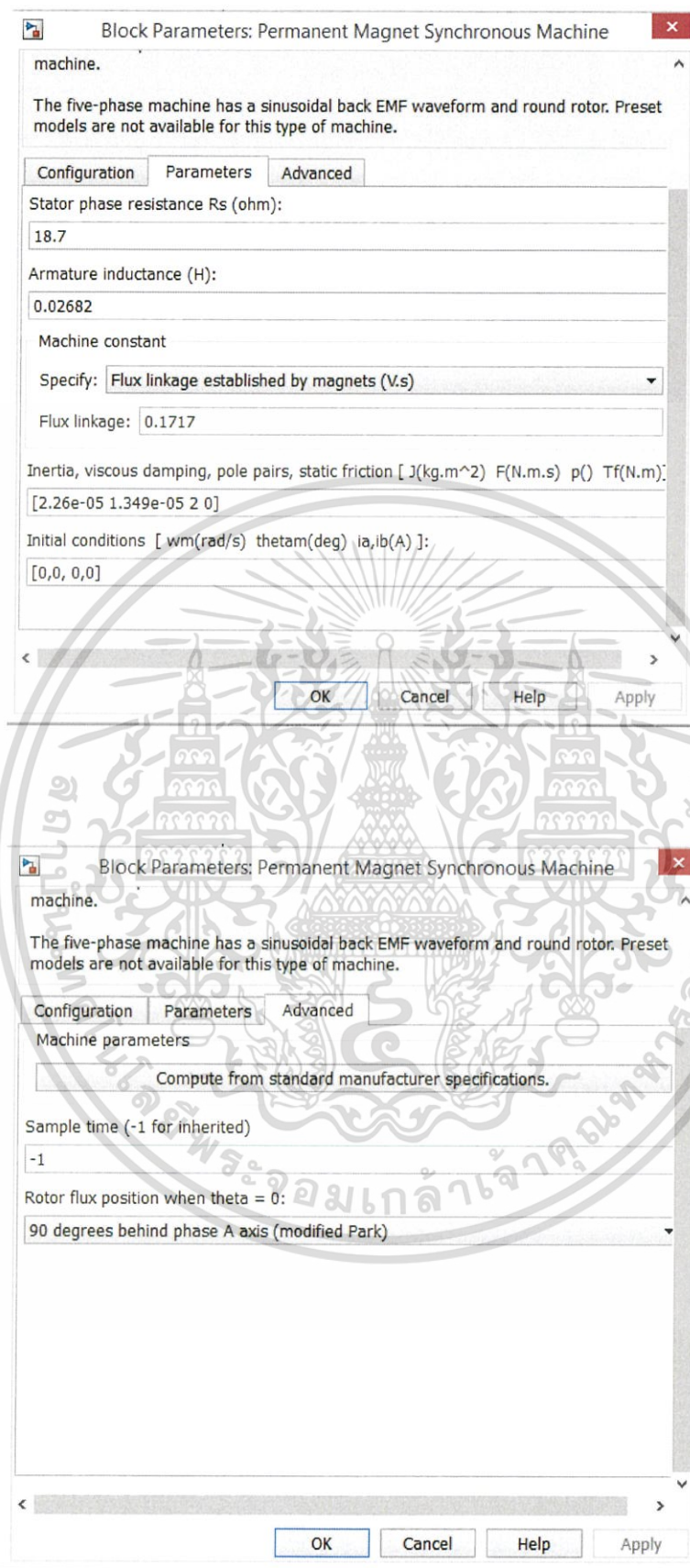
ในโครงงานนี้ทำการสร้างบล็อกจำลองการทำงานในโปรแกรม Matlab ดังแสดงในรูปที่ 3.9 พารามิเตอร์ต่างๆถูกกำหนดให้เป็นไปตามการออกแบบอาทิเช่น พารามิเตอร์ของมอเตอร์แสดงในรูปที่ 3.10 จากพารามิเตอร์ดังกล่าวจะสอดคล้องกับมอเตอร์จริงที่ออกแบบและใช้ในโครงงาน



รูปที่ 3.9 การจำลองของ Permanent Magnet Synchronous Motor Drive



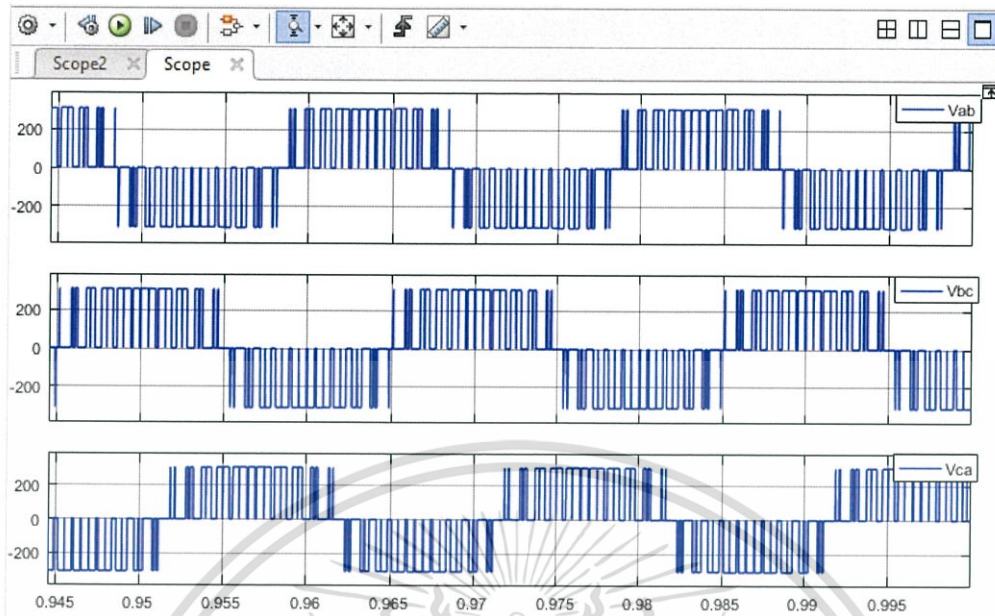
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



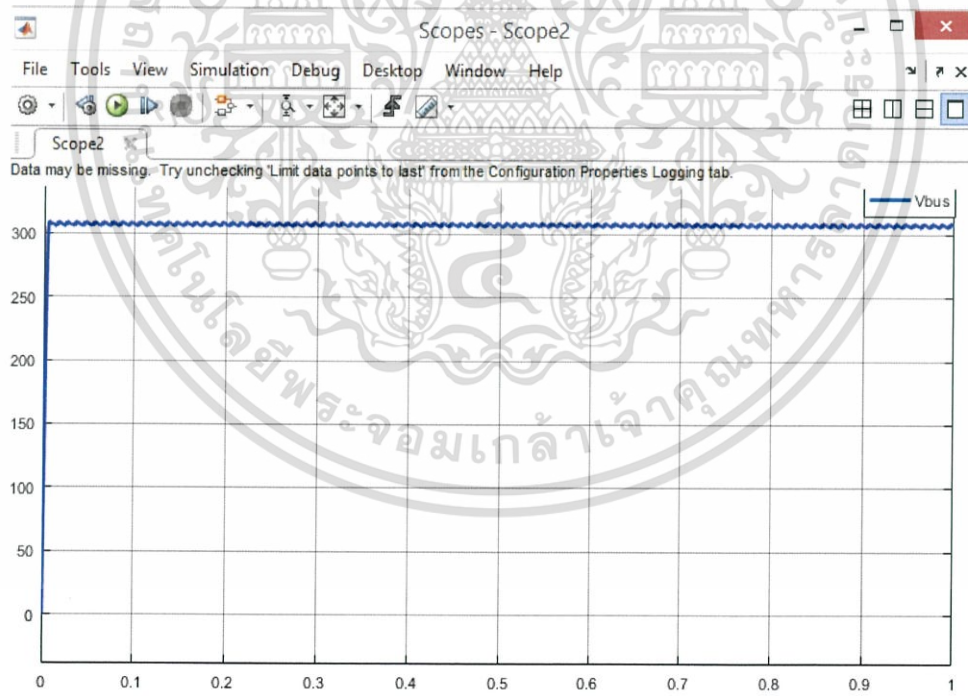
รูปที่ 3.10 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการจำลอง ที่สัญญาณ PWM ที่ความถี่ 50 Hz



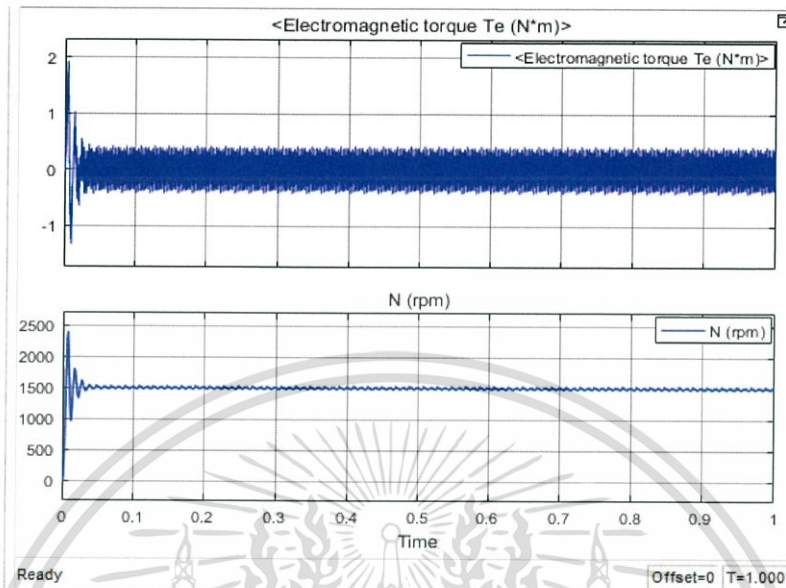
รูปที่ 3.11 แรงดันระหว่าง Vab, Vbc และ Vca (50Hz)



รูปที่ 3.12 แรงดัน Vdc (50Hz)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

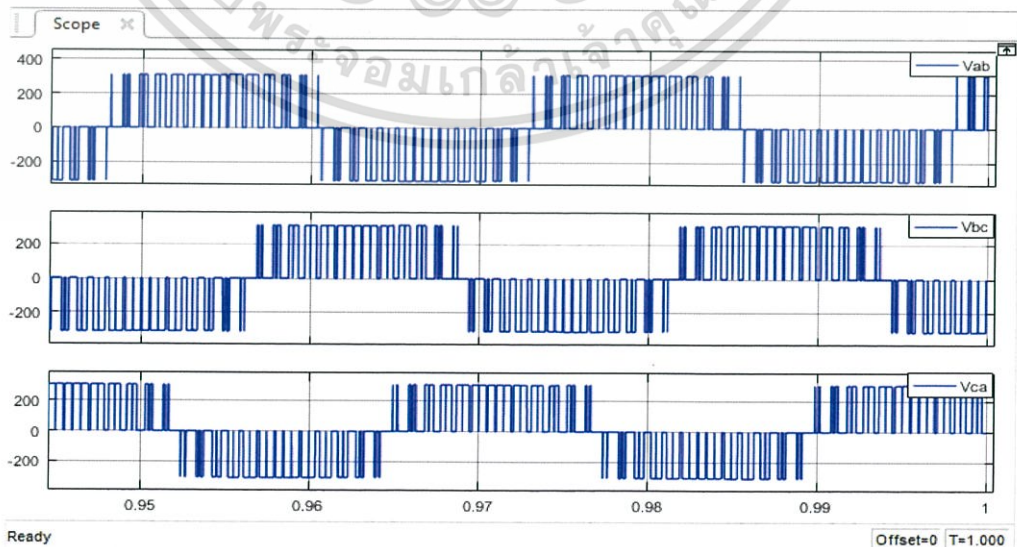
รูปที่ 3.11-3.12 แสดงแรงดันเอาต์พุตที่ 50 Hz และผลตอบสนองเชิงเวลาของแรงดันกระแสตรงจะเพิ่มจาก 0 ไปถึง 311 โวลต์คงที่ สัญญาณเอาต์พุตเป็นแบบพีดับเบิลยูเอ็ม



รูปที่ 3.13 Electromagnetic Torque กับ Rotor Speed (50Hz)

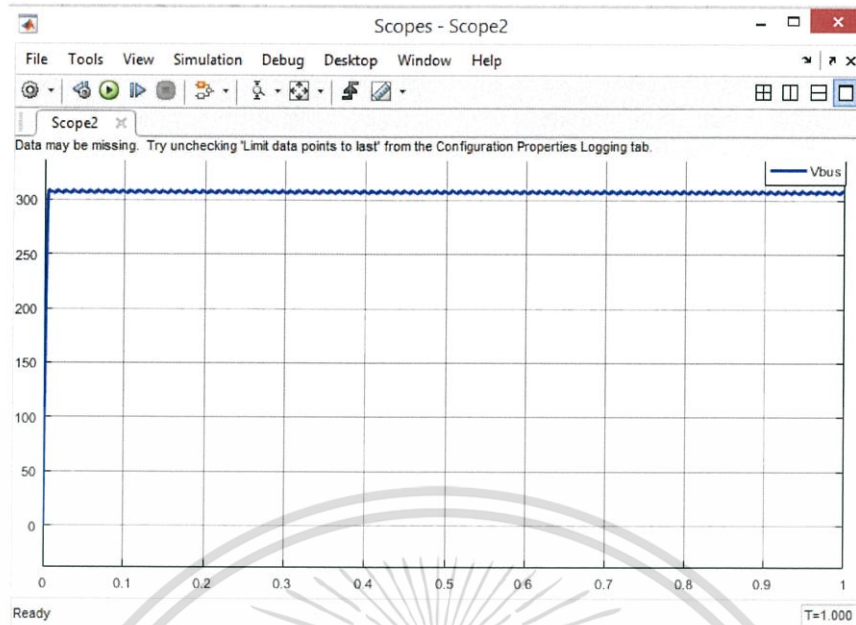
จากรูป 3.13 พบว่าความเร็วรอบของมอเตอร์มีการสวingleเล็กน้อยในช่วงต้นไปถึงประมาณ 2400 rpm จากนั้นจะแกว่งและกลับมาคงที่ที่ 1500 rpm ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎี ส่วนแรงบิดจะเป็นไปตามการเคลื่อนที่ของมอเตอร์

จากการจำลอง ที่สัญญาณ PWM ที่ความถี่ 40 Hz



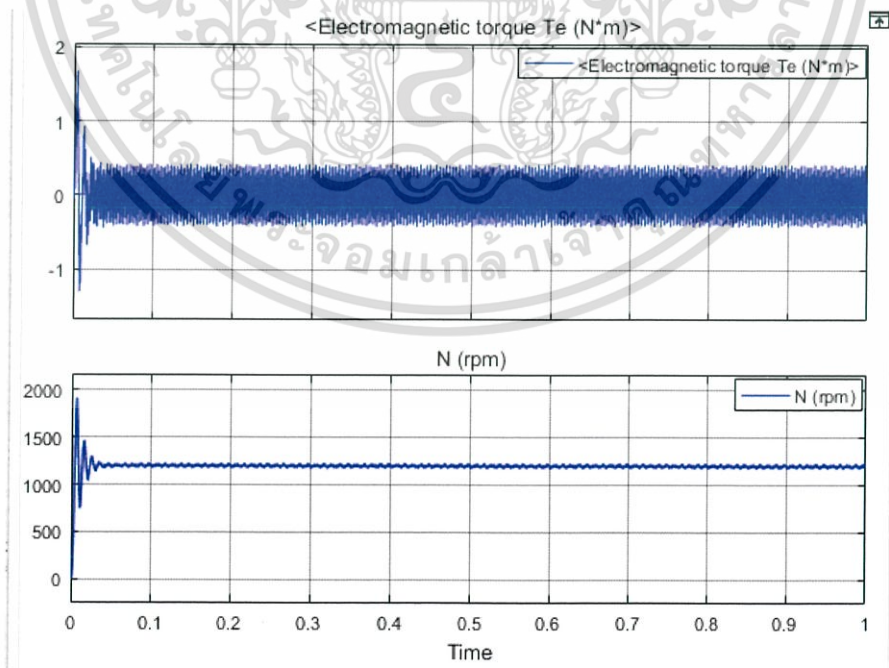
รูปที่ 3.14 แรงดันระหว่าง Vab, Vbc และ Vca (40Hz)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 แรงดัน V_{bc} (40Hz)

รูปที่ 3.14-3.15 แสดงแรงดันเอาต์พุตที่ 40 Hz และผลตอบสนองเชิงเวลาของแรงดันกระแสตรงจะเพิ่มจาก 0 ไปถึง 311 โวลต์คิงที่ สัญญาณเอาต์เป็นแบบพีคดับเบิลยูเอ็ม

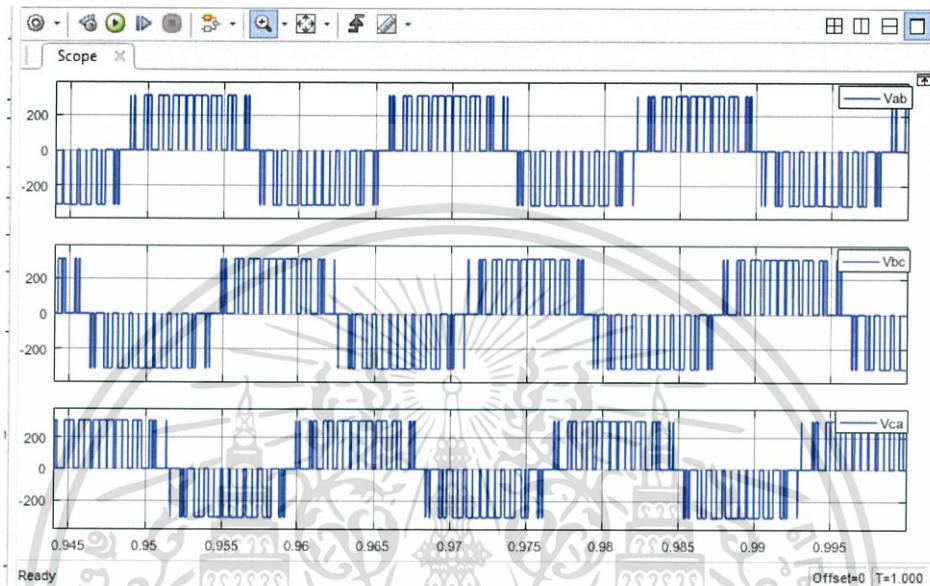


รูปที่ 3.16 Electromagnetic Torque กับ Rotor Speed (40Hz)

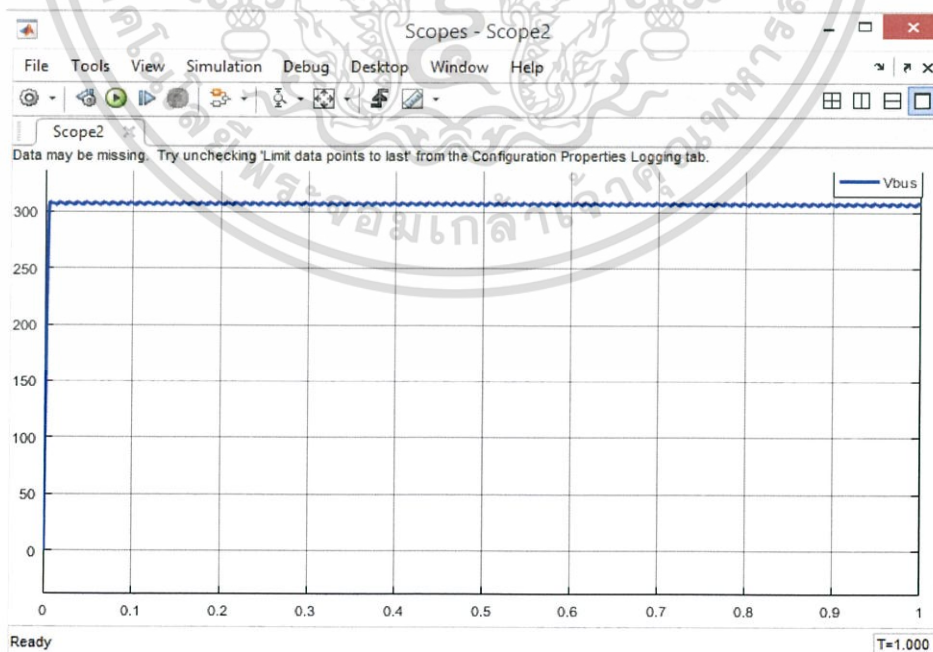
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 3.16 พบว่าความเร็วรอบของมอเตอร์มีการสวิงเล็กน้อยในช่วงต้นไปถึงประมาณ 1900 rpm จากนั้นจะแกว่งและกลับมาคงที่ที่ 1200 rpm ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎี ส่วนแรงบิดจะเป็นไปตามการเคลื่อนที่ของมอเตอร์

การจำลอง ที่สัญญาณ PWM ที่ความถี่ 60 Hz



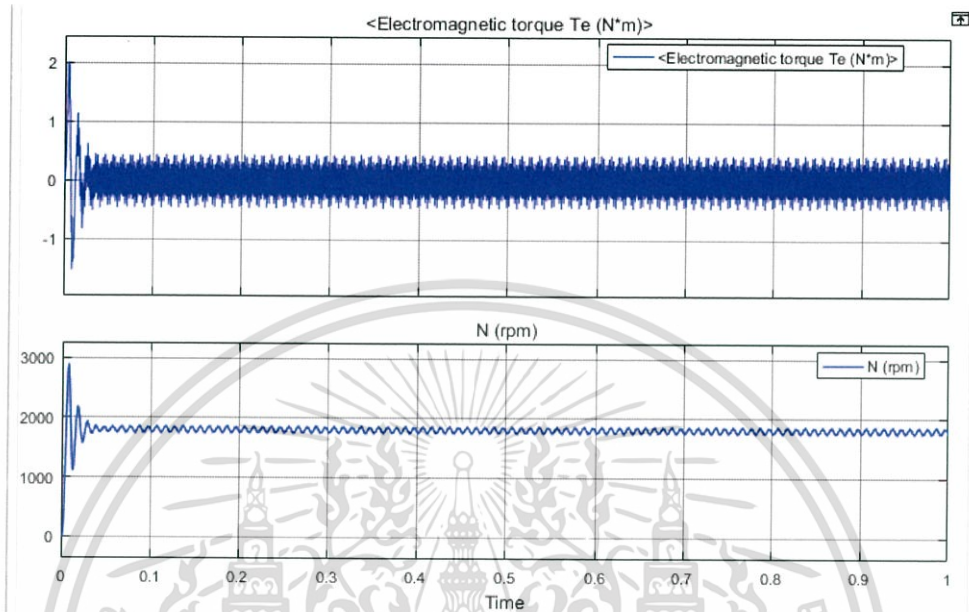
รูปที่ 3.17 แรงดันระหว่าง Vab, Vbc และ Vca (60Hz)



รูปที่ 3.18 แรงดัน Vdc (60Hz)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.17-3.18 แสดงแรงดันเอาต์พุตที่ 40 Hz และผลตอบสนองเชิงเวลาของแรงดันกระแสตรงจะเพิ่มจาก 0 ไปถึง 311 โวลต์คงที่ สัญญาณเอาต์พุตเป็นแบบพีคดับเบิลยูเอ็ม



รูปที่ 3.19 Electromagnetic Torque กับ Rotor Speed (60 Hz)

จากรูป 3.19 พบว่าความเร็วรอบของมอเตอร์มีการสวิตช์เล็กน้อยในช่วงต้นไปถึงประมาณ 2900 rpm จากนั้นจะแกว่งและกลับมากคงที่ที่ 1800 rpm ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎี ส่วนแรงบิดจะเป็นไปตามการเคลื่อนที่ของมอเตอร์

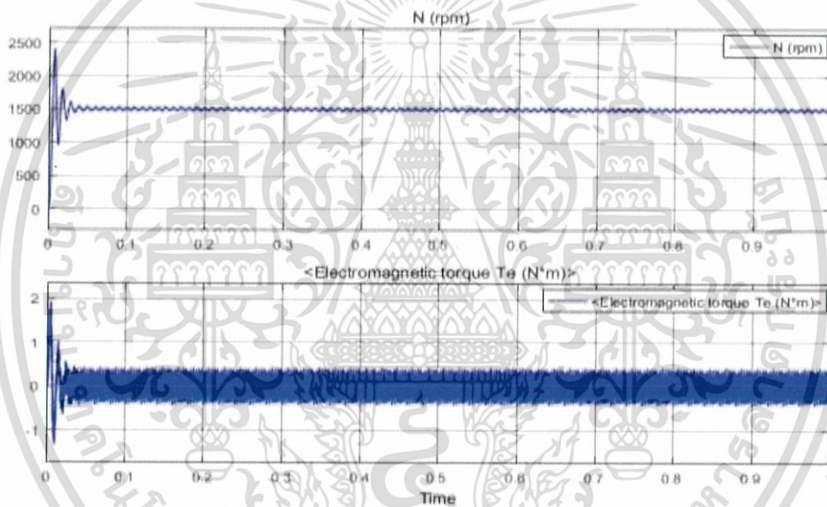
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

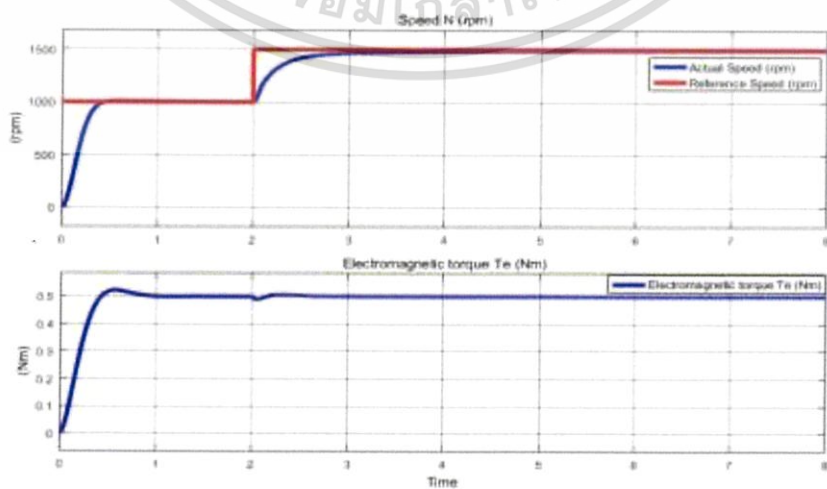
การทดสอบและการประมวลผล

4.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับแบบเซอร์โวมอเตอร์ซึ่งเป็นการทดสอบโดยควบคุมความเร็ว การทดสอบการจำลองทาง Matlab Simulink โดยผลการควบคุมแบบ Close loop ของมอเตอร์ซึ่งโครนส์ชนิดแม่เหล็กถาวร เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเร็ว ความเร็วที่แท้จริงเมื่อเทียบกับความเร็วอ้างอิง จะไม่มีการสั่น ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการควบคุมแบบ Close loop จะมีสมรรถนะมากกว่าแบบ Open loop แสดงดังรูปที่ 4.1 และ 4.2



รูปที่ 4.1 ผลการจำลอง แบบ Open loop



รูปที่ 4.2 ผลการจำลอง แบบ Close loop

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับแบบเซอร์โวมอเตอร์จะทำการทดสอบแบบวงปิดซึ่งเป็นการทดสอบโดยควบคุมความเร็ว มีรูปแบบการทดสอบคือ

- การทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับเซอร์โวมอเตอร์ หมุนไปด้านหน้า
- การทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับเซอร์โวมอเตอร์ หมุนไปด้านหลัง



รูปที่ 4.3 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับแบบเซอร์โวมอเตอร์

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับเซอร์โวมอเตอร์ที่นำมาทดลอง มีข้อมูลจำเพาะดังนี้

- เป็นมอเตอร์มีขั้วแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet AC motor)
- ชนิด 3 เฟส 120 องศา ทางไฟฟ้า
- พิกัดแรงดันไฟฟ้า 111 โวลต์
- พิกัดกำลังเอาต์พุต 200 วัตต์
- มวลเฉพาะ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับแบบเซอร์โวมอเตอร์ 0.94 กิโลกรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 อุปกรณ์และเครื่องมือวัดทางไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบมอเตอร์

อุปกรณ์และเครื่องมือวัดทางไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบการทำงานของชุดควบคุมและการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับแบบเซอร์โวมอเตอร์

1. Multimeter ใช้สำหรับวัดแรงดันไฟฟ้า
2. Current probe ใช้วัดกระแสที่เข้ามอเตอร์
3. Photo/contact tachometer ใช้วัดความเร็วของมอเตอร์
4. แหล่งจ่ายแรงดัน 15 โวลต์ ใช้ในการจ่ายแรงดันให้กับอินเวอร์เตอร์
5. หม้อแปลงปรับค่าได้ (Variable Voltage transformer)
6. กล้องฟิวส์
7. Diode Bridge Rectifier Panel
8. Oscilloscope ของ Rigol ใช้วัดสัญญาณขั้วมอเตอร์
9. จอแสดง LCD ใช้แสดงผลความเร็วอ้างอิงและความเร็วจริงของมอเตอร์

4.3 การทดสอบมอเตอร์

4.3.1 จุดประสงค์การทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับแบบเซอร์โวมอเตอร์

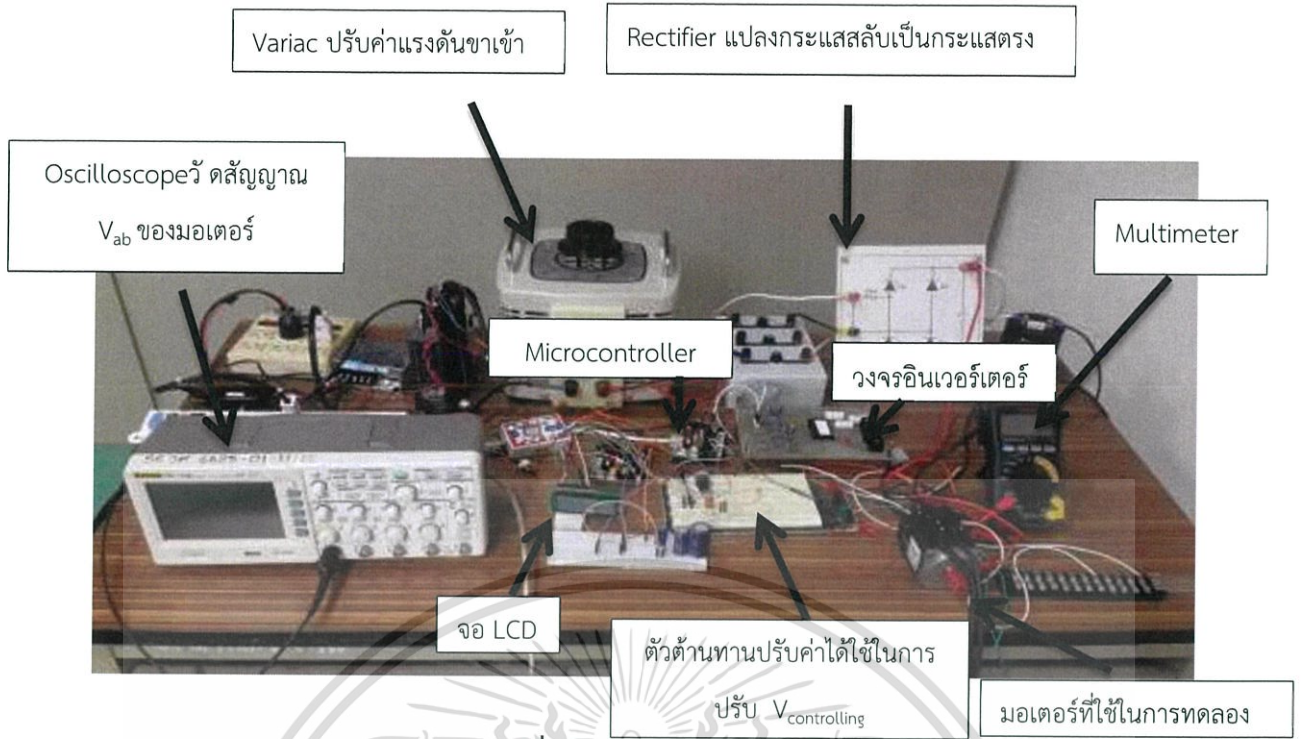
1. เพื่อศึกษาสมรรถนะของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับแบบเซอร์โวมอเตอร์
2. เพื่อศึกษารูปคลื่นสัญญาณของแรงดันและกระแสที่จ่ายให้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับแบบ

เซอร์โวมอเตอร์

4.3.2 การทดสอบ

วงจรการทดสอบประกอบด้วยแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 111 โวลต์ ต่อเข้ากับอินเวอร์เตอร์ ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส จ่ายให้กับมอเตอร์ไฟฟ้ามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับแบบเซอร์โวมอเตอร์ต่อเครื่องมือวัดแรงดัน กระแส วัดความเร็วรอบโดยใช้ Tachometer และมีจอ LCD ที่รับค่าจากไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อแสดงค่าความเร็วอ้างอิงกับความเร็วจริง โดยในการทดสอบได้มีการปรับค่าความถี่และความเร็วที่ป้อนเข้าไป เพื่อให้ได้ค่าความเร็วอ้างอิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 วงจรการทดลอง

รูปตัวอย่างการแสดงค่าความเร็วอ้างอิงและความเร็วจริงบนจอแสดงผล LCD



รูปที่ 4.5 ค่าความเร็วอ้างอิงและความเร็วจริงบนจอแสดงผล LCD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

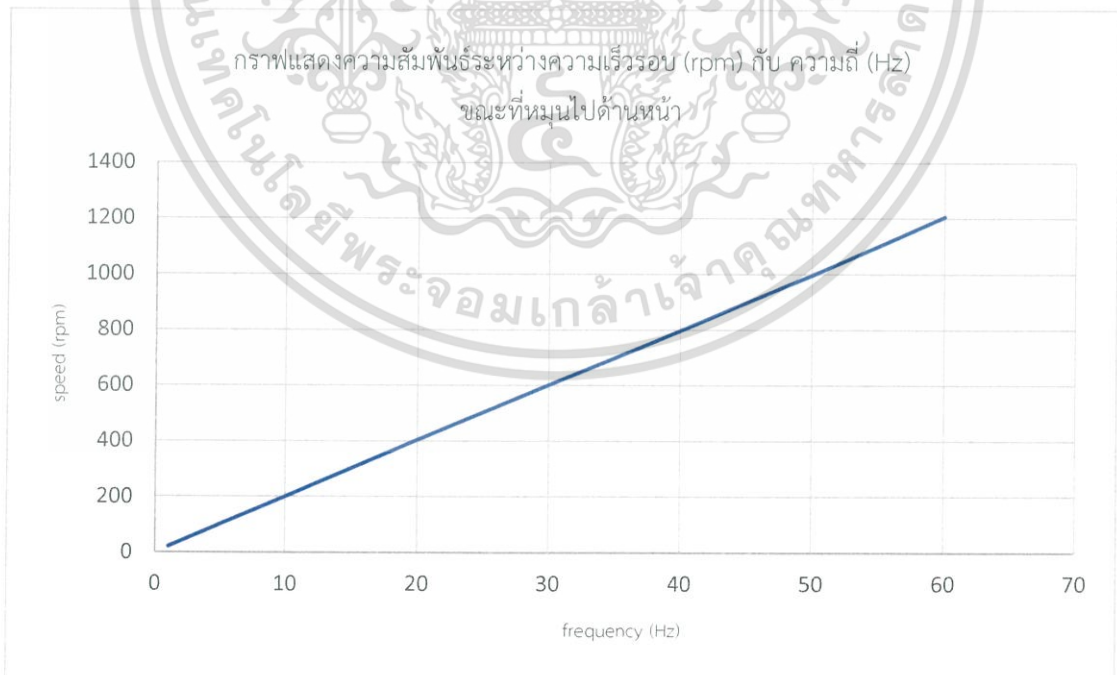
4.3.3 ผลการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับแบบเซอร์โวมอเตอร์ โดยหมุนไปด้านหน้า

จากการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับแบบเซอร์โวมอเตอร์ หมุนไปด้านหน้า
พิกัด 111 โวลต์ได้ผลการทดลองดังนี้

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับแบบเซอร์โวมอเตอร์ หมุนไปด้านหน้า

ความถี่ (Hz)	$V_{out}(V_{ab})$ (V)	$I_{out}(I_a)$ (A)	ความเร็วอ้างอิง (rpm)	ความเร็วจริง (rpm)
1	28.5	1.60	20	21.5
5	31.9	1.58	100	102
10	32.5	1.13	200	200
20	33.6	1.17	400	405
30	37.7	1.17	600	602
40	40.5	1.10	800	798
50	45.3	1.33	1000	997
60	51.4	1.34	1200	1207

นำข้อมูลที่ได้มาพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ ดังนี้

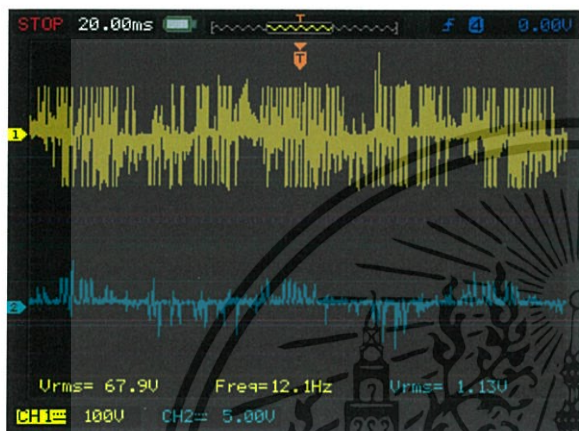


รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบ (rpm) กับความถี่ (Hz) หมุนไป

ด้านหน้า
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าความถี่เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น ความเร็วรอบจะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนคงที่ โดยจากรูปจะเห็นได้ว่าความเร็วรอบ (rpm) ต่อความถี่ (Hz) = $1200/60=20$ rpm/Hz

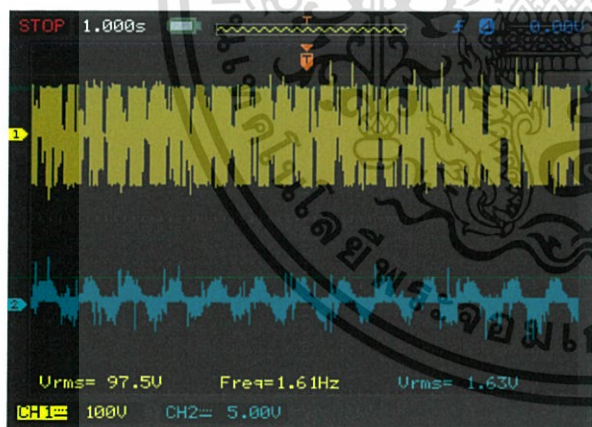
รูปแสดงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่เข้ามอเตอร์ในแต่ละความถี่ หมุนไปด้านหน้า จากรูปแสดงให้เห็นว่าสัญญาณที่ความถี่ต่างๆเป็นดังนี้



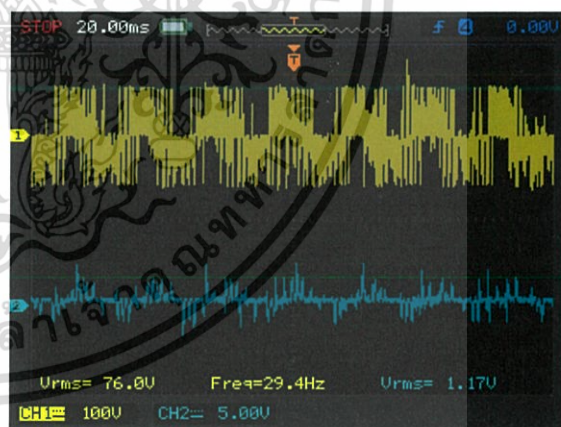
ความถี่ 1 Hz



ความถี่ 5 Hz



ความถี่ 10 Hz

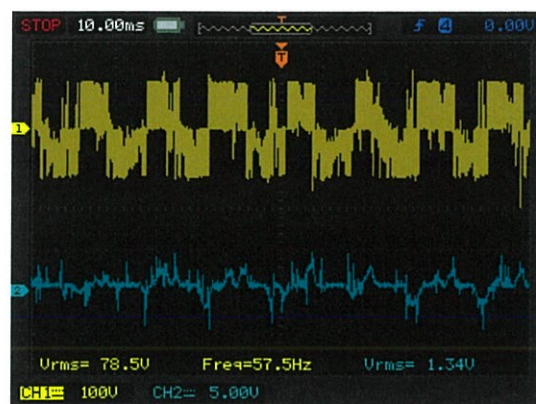


ความถี่ 30 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ความถี่ 50 Hz



ความถี่ 60 Hz

รูปที่ 4.7 รูปแสดงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่เข้ามอเตอร์ในแต่ละความถี่ (สัญญาณสีเหลือง คือ สัญญาณแรงดันไฟฟ้า V_{ab} , สีฟ้าคือสัญญาณกระแสไฟฟ้า I_a)

4.3.4 ผลการทดลองมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับแบบเซอร์โวมอเตอร์ หมุนไปด้านหลัง

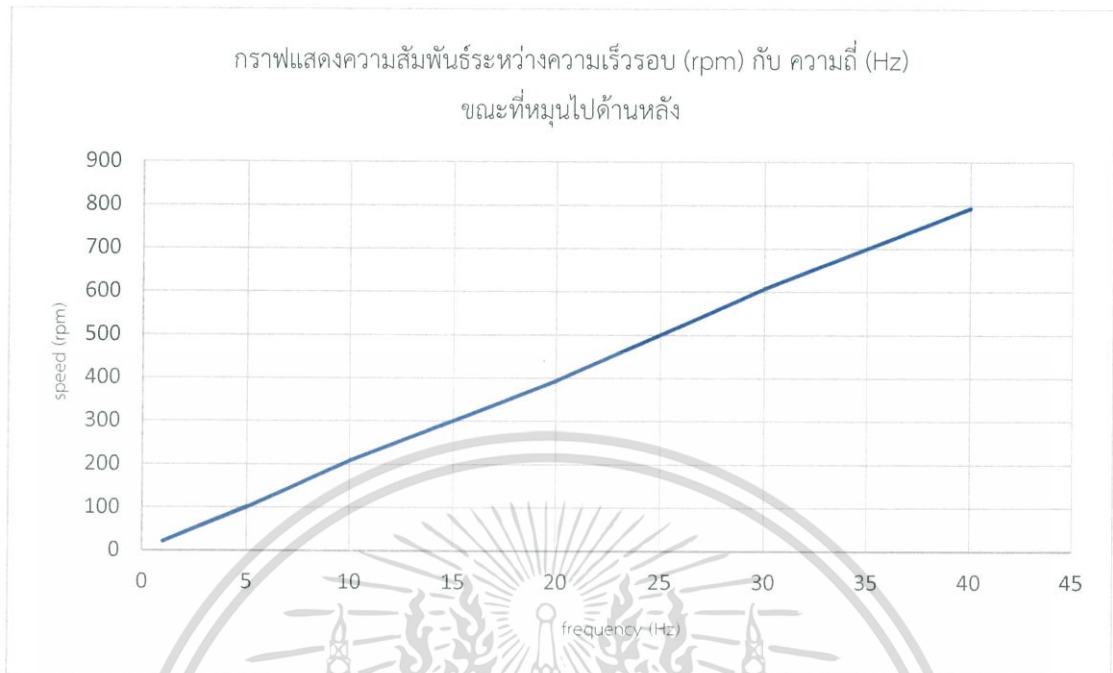
จากการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับแบบเซอร์โวมอเตอร์ หมุนไปด้านหลัง พิกัด 111 โวลต์ได้ผลการทดลองดังนี้

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับแบบเซอร์โวมอเตอร์ หมุนไปด้านหลัง

ความถี่ (Hz)	$V_{out}(V_{ab})$ (V)	$I_{out}(I_a)$ (A)	ความเร็วอ้างอิง (rpm)	ความเร็วจริง (rpm)
1	28.7	1.67	20	21
5	30.43	1.63	100	101
10	31.8	1.60	200	208
20	33.5	1.10	400	394
30	36.6	1.20	600	608
40	40.6	1.20	800	794
50	45.5	1.10	1000	1005
60	50.2	1.18	1200	1207

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

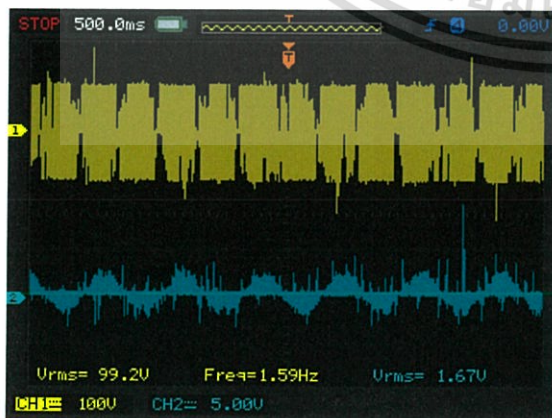
นำข้อมูลที่ได้อาพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ ดังนี้



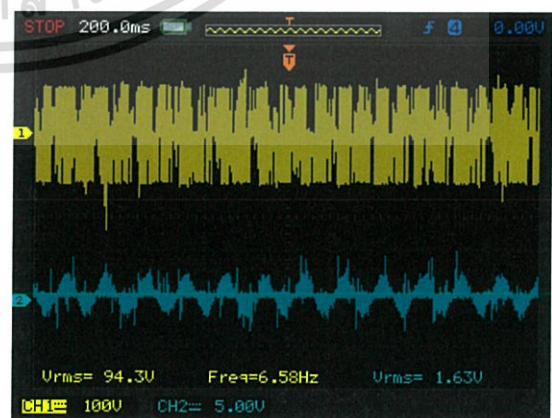
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบ (rpm) กับความถี่ (Hz) หมุนไป
ด้านหลัง

จากรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าความถี่เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น ความเร็วรอบจะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วน
คงที่ โดยจากรูปจะเห็นได้ว่าความเร็วรอบ (rpm) ต่อความถี่ (Hz) = $1200/60=20$ rpm/Hz

รูปแสดงกราฟแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่เข้ามอเตอร์ในแต่ละความถี่ทางกล
หมุนไปด้านหลัง

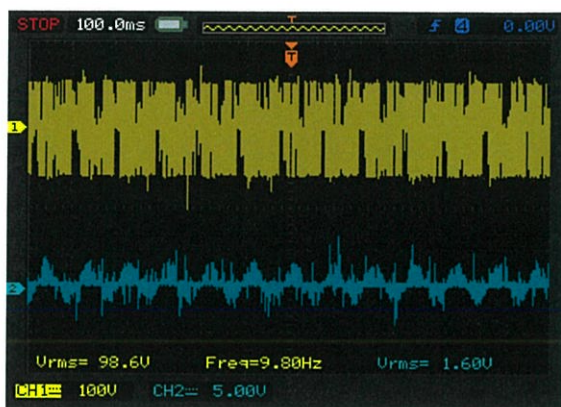


ความถี่ 1 Hz

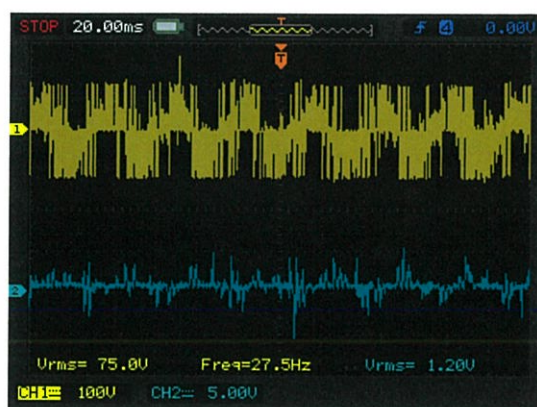


ความถี่ 5 Hz

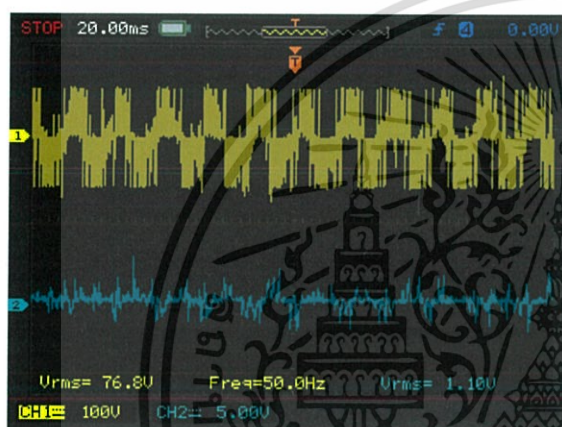
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



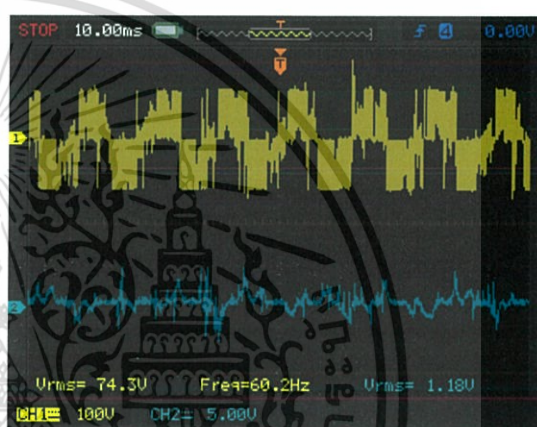
ความถี่ 10 Hz



ความถี่ 30 Hz



ความถี่ 50 Hz



ความถี่ 60 Hz

รูปที่ 4.9 แสดงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่เข้ามอเตอร์ในแต่ละความถี่ (สัญญาณสีเหลือง คือ สัญญาณแรงดันไฟฟ้า V_{ab} , สีฟ้าคือสัญญาณกระแสไฟฟ้า I_a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 สรุปผลการทดลอง

จากการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับแบบเซอร์โวมอเตอร์หมุนไปด้านหน้า ที่พิกัด 111 V โดยปรับความถี่ วัด V_{out} (V_{ab}) และค่าความเร็วรอบจะเห็นได้ว่า ความถี่เพิ่มขึ้น ค่า V_{out} (V_{ab}) จะเพิ่มขึ้น และค่าความเร็วรอบจะเพิ่มขึ้นโดยที่ 1 Hz ได้ค่าความเร็วรอบประมาณ 21.5 rpm. เพิ่มความถี่จนถึง 60 Hz ได้ความเร็วรอบประมาณ 1207 rpm.

จากการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับแบบเซอร์โวมอเตอร์หมุนไปด้านหลัง ที่พิกัด 111 V โดยปรับความถี่ วัด V_{out} (V_{ab}) และค่าความเร็วรอบจะเห็นได้ว่า ความถี่เพิ่มขึ้น ค่า V_{out} (V_{ab}) จะเพิ่มขึ้น และค่าความเร็วรอบจะเพิ่มขึ้น ที่ความถี่เดียวกัน ค่าที่ได้จะใกล้เคียงกับแบบหมุนไปด้านหน้า โดยที่ 1 Hz ได้ค่าความเร็วรอบประมาณ 21.5 rpm. จนถึง 60 Hz ได้ความเร็วรอบประมาณ 1207 rpm.



บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

การขับเคลื่อนมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร (Control System For Permanent Magnet Synchronous Motor) ควบคุมความเร็วด้วยวงจรรีเลย์อินเวอร์เตอร์ โดยใช้เทคนิคการควบคุมแบบ สเกลาร์ (Scalar control) เพื่อควบคุมความเร็วของมอเตอร์

จากผลการทดลองควบคุมแบบสเกลาร์โดยใช้เทคนิค V/F Constant จะสังเกตได้ว่าเมื่อใช้แรงดันป้อนเข้า 111 volt และทำการปรับค่าความถี่ที่ระดับต่างๆ จะได้ความเร็วรอบของมอเตอร์ที่เปลี่ยนไป คือเมื่อเพิ่มความถี่ ความเร็วรอบก็จะเพิ่มขึ้นด้วย ตามสูตรความเร็วรอบมอเตอร์

$$n_s = \frac{120f}{p}$$
 และนอกจากการปรับความเร็วแล้ว ยังสามารถกลับทางหมุนมอเตอร์ด้วยการสลับเฟสที่ละเฟสได้

5.2 ปัญหาที่พบและข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากมอเตอร์ที่นำมาทำการทดสอบเป็นมอเตอร์ที่ยังถือว่าไม่ค่อยใช้งานกันทั่วไป แต่จะนิยมใช้ในส่วนของภาคอุตสาหกรรมเครื่องจักร จึงทำให้การศึกษาข้อมูลของมอเตอร์ค่อนข้างจะใช้เวลาาน ทำให้การทดสอบล่าช้า
2. เนื่องจากแกนหมุนของมอเตอร์มีขนาดเล็ก ทำให้ขณะที่ใช้เครื่องวัดรอบมีการวัดผิดพลาด
3. ผู้ปฏิบัติงานไม่มีความเชี่ยวชาญในการใช้อุปกรณ์ และการเขียนคำสั่งควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ ทำให้ต้องใช้เวลาในการศึกษานาน

5.3 แนวทางการพัฒนา

โครงการวิจัยนี้สามารถทำการพัฒนาและเพิ่มความสามารถในการทำงานได้มากขึ้นดังนี้

1. จากการทดสอบนอกจากจะทำการควบคุมความเร็วของมอเตอร์แล้ว ยังสามารถควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์ได้อีกด้วย
2. เมื่อสามารถควบคุมได้ทั้งความเร็วและตำแหน่งของมอเตอร์ได้แล้ว สามารถนำไปต่อยอดทดสอบใช้งานกับหุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Datasheet dsPIC30F4011 [ออนไลน์]. <http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/70135C.pdf>
- [2] Datasheet FSBS10CH60 [ออนไลน์]. <http://www.mouser.com/ds/2/149/FSBS10CH60-1010004.pdf>
- [3] ET-BEST dsPIC30F4011 [ออนไลน์]. http://ett.co.th/product2009/ET-PIC/ET-BASE_dsPIC30F4011.html
- [4] IGBT [ออนไลน์]. <http://www.nawattakam.com/talk/index.php?topic=604.0>
- [5] ไชรหัตถ์ “ประเทศไทย 4.0”สร้างเศรษฐกิจใหม่ [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.thairath.co.th/content/613903>.
- [6] จอแสดงผล LCD [ออนไลน์]. <http://thaieasyelec.com/article-wiki/review-product->
- [7] ชพร พหุวนิช, วศพล ดิษฐ์เสถียร, พิธา พจมานพิมล และ พีรวิชญ์ ดิถีสวัสดิ์เวทย์ “โมดูล เซ็นเซอร์อัจฉริยะสำหรับตรวจจัดการเจริญเติบโตของพืชปัจจัยแวดล้อมในโรงเพาะปลูก ,”วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2557.
- [8] ไชยันต์ สุวรรณชีวะศิริ “เทคโนโลยี IGBT,” วารสาร SEMICONDUCTER, ฉบับที่ 134, 2536.
- [9] ผศ.ดร.สมยศ เกียรติวนิชวิไล, ระบบควบคุม, พิมพ์ครั้งที่ 2 , กรุงเทพมหานคร, มินิเซอริวิส ซัพพลาย, 2555.
- [10] พื้นฐานการควบคุมมอเตอร์ [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก <http://www.dockyard.navy.mi.th/doc2/km/4.pdf>
- [11] รศ.ดร.วีระเชษฐ์ ชันเงิน และ วุฒิพล ธาราธิ์เรษฐ, อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power Electronics), พิมพ์ครั้งที่10, กรุงเทพ, วี.เจ. พรินตติ้ง, 2553.
- [12] ศรุธา ยรรยง “ตัวควบคุมแรงอิมพีแดนซ์ปรับตัวได้แบบผสมผสานด้วยเทคนิคแบ่งแบ่ง และการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาค,”วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขา วิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง, 2557.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13] สมชาย อออิงทรัพย์ และ อุดม เพียรรงภา “ชุดควบคุมเอซีเซอร์โวมอเตอร์,” ปรินูญานินพนธ์
หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์, คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2546.
- [14] หุ่นยนต์ไทย ความท้าทายใหม่ที่น่าจับตามอง [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : [https://www.scbeic.com /th/detail/product/2708](https://www.scbeic.com/th/detail/product/2708).



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบควบคุมมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร

CONTROL SYSTEM FOR PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR

ดวงดาว ลอมไธสง ภัทรวดี จันทกุลและสิทธิรินท์ สังข์ทอง

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 ซอย ฉลองกรุง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 โทรศัพท์ 02-329-8000 ต่อ3925 electrical.power.kmitl@gmail.com

บทคัดย่อ

โครงการนี้ศึกษาการออกแบบระบบควบคุมมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรพิกัดกำลัง 200 วัตต์ ซึ่งออกแบบไว้สำหรับหุ่นยนต์เคลื่อนที่ในอุตสาหกรรม การควบคุมมอเตอร์ในทิศทางหมุนไปข้างหน้าและกลับทิศทำได้โดยการสั่งการควบคุมจากระบบฝังตัวที่ออกแบบไว้ในการควบคุมจะออกแบบโดยการปรับความถี่ของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ป้อนเข้ามอเตอร์ โดยผลการทดสอบแบบวงเปิดเป็นที่น่าพอใจในการควบคุมความเร็วรอบการจำลองโดยโปรแกรมเมทแล็บซิมูลิงค์ ยืนยันประสิทธิภาพของระบบที่ออกแบบขึ้น

Abstract

This project studies the design of control system for Permanent magnet synchronous motor, 200 W which is designed for a mobile robot used in industry. The direction control of the motor to rotate the shaft in both directions is done by using the embedded system. In the control system, the adjusting of speed is carried out by changing the frequency of the output voltage of the motor. The experimental results show the satisfied performance of speed control. Simulation using MATLAB SIMULINK verifies the effectiveness of the design system.

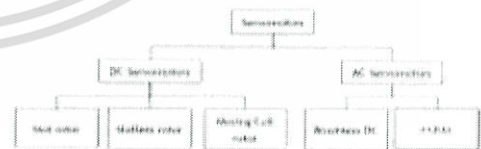
1. บทนำ

ระบบควบคุมมอเตอร์มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องและเพื่อการทำงานที่มีศักยภาพนี้ ส่งผลให้ระบบขับเคลื่อนไฟฟ้า (Drive) ถูกพัฒนาไปอย่างรวดเร็วด้วย เพื่อที่จะทำให้มอเตอร์ขับเคลื่อนหุ่นยนต์ได้ตามที่ต้องการเช่น ปรับทิศทาง หมุน ปรับความเร็ว ควบคุมแรงบิด กำหนดแรงบิดและมีความเที่ยงตรง ถูกต้องสูง เป็นต้น ดังนั้นการเลือกระบบขับเคลื่อนไฟฟ้าที่มีคุณสมบัติครบ พังค์ชันการทำงานที่ดี และเหมาะสมในงานอุตสาหกรรมจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง เพราะจะทำให้งานและระบบการผลิตนั้นมีประสิทธิภาพ

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 เซอร์โวมอเตอร์ (Servomotors) [5]

เซอร์โวมอเตอร์แบ่งออกได้ 2 ชนิดดังรูป



รูปที่ 2.1 ชนิดของเซอร์โวมอเตอร์

โดยโครงการนี้ได้ศึกษา AC Servomotor คือมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับที่ออกแบบให้มีลักษณะสมบัติเป็นเซอร์โวมอเตอร์ มีขั้วแม่เหล็กเป็นแม่เหล็กถาวร แบ่งออกได้ 2 ชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึก1) Brushless DC Motor 2) PMSM motor ขอสงวนสิทธิ์ในข้อนี้
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

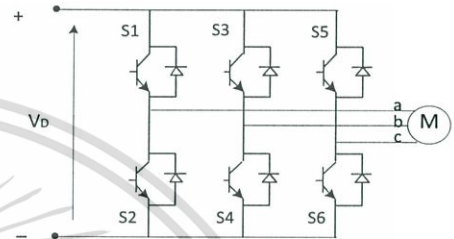
2.2 การควบคุมแบบ Scalar [3]

ซึ่งเป็นวิธีที่ควบคุมเฉพาะขนาดของฟลักซ์หรือสนามแม่เหล็ก โดยการควบคุมอัตราส่วนระหว่างแรงดันกับความถี่ให้คงที่ (v/f) วิธีนี้จะสามารถควบคุมฟลักซ์ให้มีค่าคงที่และจะส่งผลทำให้มอเตอร์สร้างแรงบิดได้คงที่

2.2.1 การควบคุมแบบ v/f constant

Volts/hertz constant control เป็นวิธีที่ใช้ในการทดสอบสำหรับการควบคุมมอเตอร์คือการควบคุมความเร็วแบบ open-loop และ close-loop การควบคุมแบบ Volts/Hertz จะใช้กระแสอ้างอิง (Rectifier Voltage Command) ที่สร้างขึ้นแล้วผ่านอัตราขยาย Volts/Hertz

อาศัยวงจรควบคุมที่ทำให้แต่ละเฟสต่างกัน 120 องศาของความถี่หลักมูลจึงไม่เหมาะที่เลือกใช้อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวแบบฟลูบริดจ์จำนวนสามตัว จึงมีการพัฒนาอินเวอร์เตอร์สามเฟสขึ้นมาใช้ที่ควบคุมแรงดันไฟฟ้าด้านออกได้ทั้งขนาดและความถี่ในรูปที่ 2.2 จะเห็นได้ว่ามีจำนวนสวิตช์และไดโอดจำนวนอย่างละ 6 ตัวและประกอบไปด้วยสามกิ่งหรือ สามเฟส



รูปที่ 2.2 วงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส [4]

2.3 ตัวควบคุมแบบพี ไอ อี พีดีและพี ไอ ดี [2]

ตัวควบคุมแบบพี ไอ ดีเป็นตัวควบคุมที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมเนื่องจากมีโครงสร้างไม่ซับซ้อน คุณลักษณะของตัวควบคุมเหมาะสมกับระบบหลายระบบและมีสมรรถนะการควบคุมที่ดีในหลายระบบ รูปทั่วไปของระบบควบคุมแบบพี ไอ ดีแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$u_{PID} = K_p e + K_i \int_0^t e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (2.1)$$

หรือเมื่อเขียนในรูปของลาปลาซ

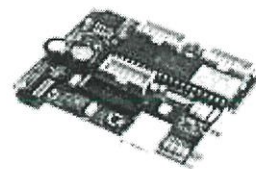
$$U_{PID}(s) = (K_p + \frac{K_i}{s} + K_D s) E(s) \quad (2.2)$$

2.4 อินเวอร์เตอร์สามเฟส [4]

การแปลงผันกำลังไฟฟ้าจากแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับให้กับโหลดสามเฟส นิยมแปรผันกำลังไฟฟ้าผ่านอินเวอร์เตอร์สามเฟสซึ่งจะเหมาะสมกับงานที่ต้องการกำลังไฟฟ้าสูง เพราะถ้าหากใช้อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวแบบฟลูบริดจ์จำนวนสามชุดก็ได้

2.5 ไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F4011

ไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F4011 เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 16 บิต ที่รวมความสามารถของไมโครคอนโทรลเลอร์ (MCU) เข้ากับตัวควบคุมการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (Digital Signal Controller) หรือที่เรียกว่า DSC ส่งผลให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในตระกูล dsPIC นอกจากจะมีที่ประสิทธิภาพในการควบคุมอุปกรณ์ภายนอกแล้ว ยังสามารถนำมาใช้งานด้านประมวลผลสัญญาณดิจิทัลที่เรียกว่า DSP (Digital Signal Processing) ได้เป็นอย่างดี



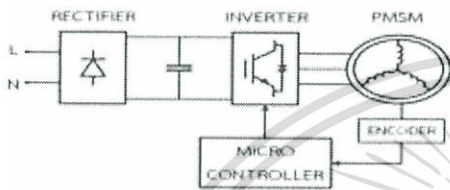
รูปที่ 2.3 ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ dsPIC30F4011 [1]

แต่ต้องใช้สวิตช์จำนวนถึง 12 ตัวนอก จากนั้นยังต้อง การศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การออกแบบและการสร้างวงจรควบคุมเอซีเซอร์โวมอเตอร์

3.1 ส่วนประกอบของวงจรควบคุมเอซีเซอร์โวมอเตอร์

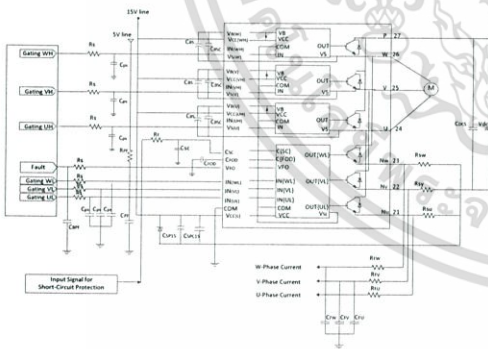
1. วงจรเรียงกระแส (Rectifier)
2. วงจรกำลังอินเวอร์เตอร์
3. ไมโครคอนโทรลเลอร์



รูปที่ 3.1 ไลอะแกรมวงจรขับ PMSM

3.2 วงจรประยุกต์การใช้งานไอซีเบอร์ FSBS10CH60

นำไอซีเบอร์ FSBS10CH60 มาสร้างวงจรอินเวอร์เตอร์ โดยใช้สัญญาณ PWM ควบคุมการลำดับสวิตช์เพื่อให้เกิดสถานะนำกระแสไฟฟ้าและหยุดนำกระแสไฟฟ้า

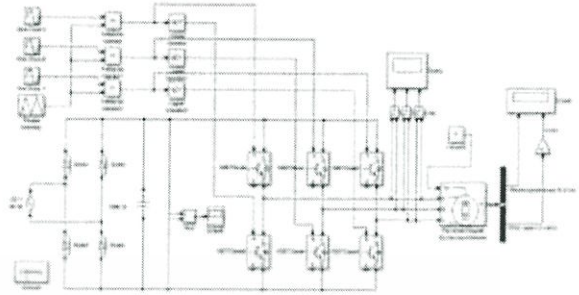


รูปที่ 3.2 วงจรประยุกต์การใช้งาน

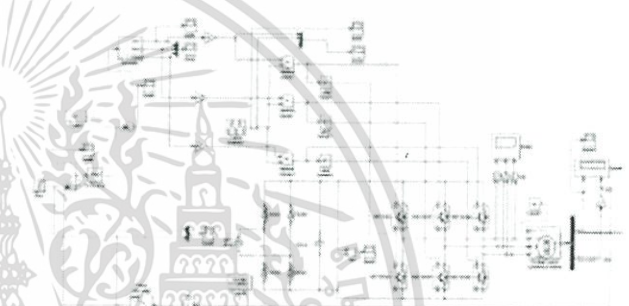
3.3 การจำลองทาง MATLAB ของ Permanent Magnet Synchronous Motor

ในโครงการนี้ทำการสร้างบล็อกจำลองการทำงานในโปรแกรม Matlab ดังที่แสดงในรูปที่ 3.3 และรูปที่ 3.4 พารามิเตอร์ต่างๆถูกกำหนดให้เป็นไปตามการ

ออกแบบ ซึ่งพารามิเตอร์ต่างๆจะสอดคล้องกับมอเตอร์จริงที่ออกแบบและใช้ในโครงการ



รูปที่ 3.3 การจำลองของ Permanent Magnet Synchronous Motor Drive แบบ Open loop



รูปที่ 3.4 การจำลองของ Permanent Magnet Synchronous Motor Drive แบบ Close loop

บทที่ 4 การทดสอบและการประมวลผล

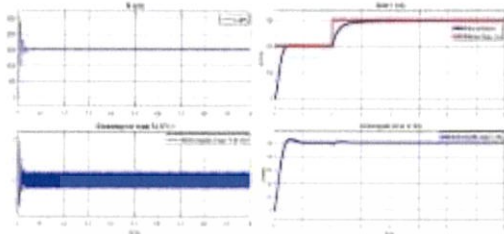
ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับแบบเซอร์โวมอเตอร์ มีรูปแบบการทดสอบคือแบบ Open loop และแบบ Close loop ในที่นี้จะแสดงผลการจำลองการทำงานโดยโปรแกรม Matlab Simulink และผลการทดสอบมอเตอร์แบบ close loop โดยการเปลี่ยนความเร็วของมอเตอร์ ทดสอบแบบหมุนไปด้านหน้าและไปด้านหลัง

4.1 ผลการทดลอง

จากผลการทดสอบการจำลองทาง Matlab Simulink โดยผลการควบคุมแบบ Close loop ของมอเตอร์ซึ่งโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร เมื่อมีการ

ไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปลี่ยนแปลงความเร็ว ความเร็วที่แท้จริงเมื่อเทียบกับความเร็วอ้างอิง จะไม่มีการสั่น ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการควบคุมแบบ Close loop จะมีสมรรถนะมากกว่าแบบ Open loop แสดงดังรูป



รูปที่ 4.1 ผลการจำลอง แบบ Open loop และ ผลการจำลอง แบบ Close loop

และผลการทดสอบมอเตอร์ซึ่ง โครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร โดยการเปลี่ยนแปลงความเร็ว จะเห็นได้ว่าความถี่เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น ความเร็วรอบจะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนคงที่



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบ (rpm) กับความถี่ (Hz) หมุนไปด้านหน้าและหลัง

บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาได้มีการวิเคราะห์ระบบควบคุมความเร็วของมอเตอร์ซึ่ง โครนัสแม่เหล็กถาวรด้วย V / F control การควบคุม PWM โดยการสวิตซ์ซึ่งของ IGBT จะสร้างแหล่งจ่ายกระแสสลับ จากอินเวอร์เตอร์ซึ่งสามารถเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าและความถี่ได้ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่ ความเร็วมอเตอร์จะเปลี่ยนไป และประสิทธิภาพการทำงานของระบบควบคุมทำได้โดยการควบคุมแบบ วงรอบปิด (Close loop) ที่เป็นการ

ควบคุมแบบป้อนกลับ จะเปรียบเทียบกับความเร็วอ้างอิง ซึ่งเป็นประสิทธิภาพของการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ที่แสดงผลลัพธ์และตรวจสอบประสิทธิภาพของระบบที่พัฒนาขึ้น

5.2 แนวทางการพัฒนา

โครงการวิจัยนี้สามารถทำการพัฒนาและเพิ่มความสามารถในการทำงานได้มากขึ้นดังนี้

1. จากการทดลองนอกจากจะทำการควบคุมความเร็วของมอเตอร์แล้ว ยังสามารถควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์ได้อีกด้วย
2. เมื่อสามารถควบคุมได้ทั้งความเร็วและตำแหน่งของมอเตอร์ได้แล้ว ก็สามารถนำไปต่อยอดทดลองใช้งานกับหุ่นยนต์ได้

เอกสารอ้างอิง

[1] Datasheet dsPIC30F4011 [ออนไลน์]. <http://www.microchip.com/downloads/en/devicedoc/70135C.pdf>

[2] ศศ.ดร.สมยศ เกียรติวนิชวิไล, ระบบควบคุม, พิมพ์ครั้งที่ 2, กรุงเทพฯ, มิน เซอร์วิส ซัพพลาย, 2555.

[3] พื้นฐานการควบคุมมอเตอร์ [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก <http://www.dockyard.navy.mi.th/doc2/km/4.pdf>

[4] รศ.ดร.วีระเชษฐ ชันเงิน และ วุฒิพล ชาราธิ์เศรษฐ์, อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power Electronics), พิมพ์ครั้งที่ 10, กรุงเทพฯ, วิ.เจ. พรินติ้ง, 2553.

[5] สมชาย อออิงทรัพย์ และ อุดม เพียรภูงา “ชุดควบคุมเอซีเซอร์โวมอเตอร์,” ปริญญาานิพนธ์หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์, คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2546.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โค้ดสำหรับควบคุมมอเตอร์

```
#include <p30f4011.h>
#include <math.h>
#include <pwm.h>
#include <stdlib.h>
#include <adc10.h>
```

```
_FOSC(CSW_FSCM_OFF & FRC_PLL16);
```

```
_FWDT(WDT_OFF);
```

```
_FBORPOR(MCLR_DIS);
```

```
#define FPWM 100000
```

```
#define FCY 29491200
```

```
#define DEADTIME
```

```
#define Period 3000
```

```
#define PI 3.1415926536
```

```
void Init_PWM(void);
```

```
void Init_ADC10(void);
```

```
void ADC_pool(void);
```

```
unsigned int v1;
```

```
volatile int addr,addr2,b,c;
```

```
volatile double volt;
```

```
double dc_min=0.0, dc_max=0.8;
```

```
void Delay_MS(unsigned int ms)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

{
    unsigned int i;
    for (; ms>0; ms--)
        for (i=0; i<828; i++)
            Nop();
}

int main()
{
    TRISB =1;
    IPC9bits.PWMIP = 4;
    INTCON1bits.NSTDIS = 0;
    IFS2bits.PWMIF = 0;
    IEC2bits.PWMIE = 1;
    Init_PWM();
    Init_ADC10();
    ADCON1bits.ADON=1;
    for(;;);
}

void Init_PWM(void)
{
    TRISE=0;

    PTCNbits.PTEN=0;

    PWMCON1=0x0077;

    PTCNbits.PTCKPS = 0;
    PTCNbits.PTOPS = 0;

    PTCNbits.PTSIDL = 1;

    PTCNbits.PTMOD = 0;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

PTPER=Period;
PDC1=Period;
    PDC2=Period;
    PDC3=Period;
    PTCONbits.PTEN = 1;
}
void __attribute__((interrupt, no_auto_psv)) _PWMInterrupt(void)
{
int b,c,f;
    unsigned int n,v1;
double dc,dc1,dc2, sine_term,sine_term1,sine_term2;
    double mod;
    ADC_pool();
    v1 = (0.000043137*addr2)+(0.011398*addr)+43.32;
f = (-0.029297*addr)+50;
    if (v1>70 ) v1 = 70;
    if (f<30) f = 30;
    mod = (0.7*f)/50;
    n = n + 1;
    if (n >= v1) n = 0;
    sine_term = (1 + mod*sin(2 * PI * n /v1));
    sine_term1 = (1 + mod*sin((2 * PI * n /v1)+(2*PI/3)));
    sine_term2 = (1 + mod*sin((2 * PI * n /v1)+(4*PI/3)));
    dc = sine_term * dc_min + (2 - sine_term) * dc_max;
    dc1 = sine_term1 * dc_min + (2 - sine_term1) * dc_max;
    dc2 = sine_term2 * dc_min + (2 - sine_term2) * dc_max;
    PDC1 = dc * PTPER;
    PDC2 = dc1 * PTPER;
    PDC3 = dc2 * PTPER;
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

}
void Init_ADC10(void)
{
    ADCON1bits.ADON = 0;
    ADCON1bits.ADSIDL = 1;
    ADCON1bits.FORM = 0;
    ADCON1bits.SSRC = 0;
    ADCON1bits.SIMSAM = 0;
    ADCON1bits.ASAM = 1;
    ADCON1bits.SAMP = 0;
    ADCON1bits.DONE = 0;
    ADCON2bits.VCFG = 0b000;
    ADCON2bits.CSCNA = 0;
    ADCON2bits.CHPS = 0;
    ADCON2bits.BUFS = 0;
    ADCON2bits.SMPI = 0;
    ADCON2bits.BUFM = 0;
    ADCON2bits.ALTS = 0;
    ADCON3bits.SAMC = 0b00001;
    ADCON3bits.ADRC = 0;
    ADCON3bits.ADCS = 0x0007;

    ADCHS = 0b0000000000000000;
    ADPCFG = 0b1111111111111110;
    ADCSSL = 0;
}
void ADC_pool(void)
{
    ADCON1bits.SAMP = 0;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    ConvertADC10();
    ReadADC10(10);
addr = ADCBUF0;
    addr2 = addr*addr;
    TRISDbits.TRISD0=0;
    LATDbits.LATD0 =~ LATDbits.LATD0;
}

```

Code for QEI, PI and LCD

```

#include <libpic30.h>
#include <p30f4011.h>
#include <math.h>
#include <timer.h>
#include <qei.h>

_FOSC(CSW_FSCM_OFF & FRC_PLL16);
_FWDT(WDT_OFF);

#define TRIS_DATA_PIN_4    TRISFbits.TRISF0
#define TRIS_DATA_PIN_5    TRISFbits.TRISF1
#define TRIS_DATA_PIN_6    TRISFbits.TRISF4
#define TRIS_DATA_PIN_7    TRISFbits.TRISF5
#define TRIS_RS            TRISDbits.TRISD2
#define TRIS_E            TRISDbits.TRISD0
#define DATA_PIN_4        LATFbits.LATF0
#define DATA_PIN_5        LATFbits.LATF1

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

#define DATA_PIN_6      LATFbits.LATF4
#define DATA_PIN_7      LATFbits.LATF5
#define RS_PIN           LATDbits.LATD2
#define E_PIN            LATDbits.LATD0

```

```
void lcd_delay(unsigned int mss)
```

```
{
```

```
    unsigned int x,a;
```

```
    for(x=0;x<mss;x++)
```

```
    {
```

```
        for(a=0;a<816;a++);
```

```
    }
```

```
}
```

```
#define DON      0x0F
```

```
#define DOFF    0x0B
```

```
#define CURSOR_ON  0x0F
```

```
#define CURSOR_OFF 0x0D
```

```
#define BLINK_ON   0x0F
```

```
#define BLINK_OFF  0x0E
```

```
#define SHIFT_CUR_LEFT  0x13
```

```
#define SHIFT_CUR_RIGHT 0x17
```

```
#define SHIFT_DISP_LEFT 0x1B
```

```
#define SHIFT_DISP_RIGHT 0x1F
```

```
void Initial_4bitLCD(void);
```

```
void SetCGRamAddr(unsigned char);
```

```
void SetDDRamAddr(unsigned char);
```

```
void WriteCmdLCD(unsigned char);
```

```
void WriteDataLCD(unsigned char);
```

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินทางปัญญาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

void PutsLCD(unsigned char*);
void Delay_tW_LCD(void);

void Busy_LCD(void);
void Delay(unsigned long int);
void setup();
void InitQEI(void);
void rpmCal(void);
void Init_PID(void);
#define PI 3.1415926536
unsigned int POSCNT_POS[2]={0,0}, i,RPM[9],RPM_MOTOR;
unsigned int sum_pulse=0, rpm_motor=0, SHOW=0, pos_value=0, speed;
double d=0.5;
struct pidParameters
{
float Kp;
float Ki;
float Kd;
double error;
double output;
double outmax;
double setpoint;
double feedback;
double integral;
double derivate;
double previous_error;
double saturated;
} pid;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

void InitQEI(void)
{
    ADPCFG |= 0x0038;
    QEICONbits.QEIM = 0;
    QEICONbits.CNTERR = 0;
    QEICONbits.QEISIDL = 0;
    QEICONbits.SWPAB = 0;
    QEICONbits.PCDOUT = 0;
    QEICONbits.POSRES = 1;
    DFLTCONbits.CEID = 1;
    DFLTCONbits.QEOUT = 1;
    DFLTCONbits.QECK = 5;
    POSCNT = 0;
    QEICONbits.QEIM = 6;
    return;
}

int main()
{
    setup();

    InitQEI();
    Init_PID();
    Initial_4bitLCD();

    char result[6];
    while(1)
    {
        sprintf( result, "%d", speed);
        SetDDRamAddr(0x00);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

SetDDRamAddr(0x08);
PutsLCD(result);
sprintf( result, "%u", RPM_MOTOR);
SetDDRamAddr(0x40);
PutsLCD((unsigned char *)"Actual= ");
SetDDRamAddr(0x48);
PutsLCD((unsigned char *)"    ");
SetDDRamAddr(0x48);
PutsLCD(result);
lcd_delay(500);
}
return 0;
}
void Initial_4bitLCD(void)
{
    TRIS_DATA_PIN_4 = 0;
    TRIS_DATA_PIN_5 = 0;
    TRIS_DATA_PIN_6 = 0;
    TRIS_DATA_PIN_7 = 0;
    TRIS_RS = 0;
    TRIS_E = 0;

    RS_PIN = 0;

    E_PIN = 0;
    Delay(50000);
    WriteCmdLCD(0x33);
    WriteCmdLCD(0x32);
    WriteCmdLCD(0x28);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

WriteCmdLCD(0x0C);
WriteCmdLCD(0x06);
WriteCmdLCD(0x01);
}
void SetCGRamAddr(unsigned char address)

```

```

{
    RS_PIN = 0;
    DATA_PIN_7 = 0;
    DATA_PIN_6 = 1;
    DATA_PIN_5 = ((address & 0x20)>>5);
    DATA_PIN_4 = ((address & 0x10)>>4);
    E_PIN = 1;
    Delay_tW_LCD();
    E_PIN = 0;
    Busy_LCD();
    RS_PIN = 0;
    DATA_PIN_7 = ((address & 0x08)>>3);
    DATA_PIN_6 = ((address & 0x04)>>2);
    DATA_PIN_5 = ((address & 0x02)>>1);
    DATA_PIN_4 = ((address & 0x01)>>0);
    E_PIN = 1;
    Delay_tW_LCD();
    E_PIN = 0;
    Busy_LCD();
}

```

```

void SetDDRamAddr(unsigned char address)

```

```

{
    RS_PIN = 0;
    DATA_PIN_7 = 1;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

DATA_PIN_6 = ((address & 0x40)>>6);
    DATA_PIN_5 = ((address & 0x20)>>5);
    DATA_PIN_4 = ((address & 0x10)>>4);
    E_PIN = 1;
    Delay_tW_LCD();

```

```

E_PIN = 0;
    Busy_LCD();
    RS_PIN = 0;
    DATA_PIN_7 = ((address & 0x08)>>3);
    DATA_PIN_6 = ((address & 0x04)>>2);
    DATA_PIN_5 = ((address & 0x02)>>1);
    DATA_PIN_4 = ((address & 0x01)>>0);
    E_PIN = 1;
    Delay_tW_LCD();

```

```

E_PIN = 0;

```

```

    Busy_LCD();

```

```

}

```

```

void WriteCmdLCD(unsigned char cmd)

```

```

{

```

```

    RS_PIN = 0;

```

```

    DATA_PIN_7 = ((cmd & 0x80)>>7);

```

```

    DATA_PIN_6 = ((cmd & 0x40)>>6);

```

```

    DATA_PIN_5 = ((cmd & 0x20)>>5);

```

```

    DATA_PIN_4 = ((cmd & 0x10)>>4);

```

```

    E_PIN = 1;

```

```

    Delay_tW_LCD();

```

```

    E_PIN = 0;

```

```

    Busy_LCD();

```

```

    RS_PIN = 0;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

DATA_PIN_7 = ((cmd & 0x08)>>3);
DATA_PIN_6 = ((cmd & 0x04)>>2);
DATA_PIN_5 = ((cmd & 0x02)>>1);
DATA_PIN_4 = (cmd & 0x01);
E_PIN = 1;
Delay_tW_LCD();
E_PIN = 0;
Busy_LCD();
Delay(50000);
}
void WriteDataLCD(unsigned char data)
{
    RS_PIN = 1;
    DATA_PIN_7 = ((data & 0x80)>>7);
    DATA_PIN_6 = ((data & 0x40)>>6);
    DATA_PIN_5 = ((data & 0x20)>>5);
    DATA_PIN_4 = ((data & 0x10)>>4);
    E_PIN = 1;
    Delay_tW_LCD();
    E_PIN = 0;
    Busy_LCD();
    RS_PIN = 1;
    DATA_PIN_7 = ((data & 0x08)>>3);
    DATA_PIN_6 = ((data & 0x04)>>2);
    DATA_PIN_5 = ((data & 0x02)>>1);
    DATA_PIN_4 = (data & 0x01);
    E_PIN = 1;
    Delay_tW_LCD();

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    Busy_LCD();
}
void PutsLCD(unsigned char* buffer)
{
    while(*buffer != '\0')
    {
        WriteDataLCD(*buffer);
        buffer++;
    }
}
void Delay_tW_LCD(void)
{
    int j;
    for(j=0;j<18;j++);
}
void Busy_LCD(void)
{
    unsigned int j;
    for(j=0;j<1800;j++);
}
void Delay(unsigned long int count1)
{
    while(count1 > 0) {count1--;}
}
void __attribute__((__interrupt__, __auto_psv__)) _T1Interrupt(void)
{
    IFS0bits.T1IF = 0;
    rpmCal();

```

เอกสารนี้เป็น RPM[i]=rpm_motor; การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

i++;
if(i>10)
{ i=0;
RPM_MOTOR=(RPM[0]+RPM[1]+RPM[2]+RPM[3]+RPM[4]+RPM[5]+RPM[6]+RPM[7
]+RPM[8]+RPM[9])/10;
}
PDC1 = d*(2*PTPER);
speed = 750;
pid.feedback= RPM_MOTOR;
pid.error = pid.setpoint - pid.feedback;
pid.integral += pid.error;
pid.derivative = pid.error - pid.previous_error;
pid.output = (pid.Kp*pid.error)+(pid.Ki*pid.integral)+(pid.Kd*pid.derivative);
if (pid.output > pid.outmax)
{
pid.saturated = 1;
pid.output = pid.outmax;
}
else if (pid.output < -1)
{
pid.saturated = 1;
pid.output = -1;
}
else
pid.saturated = 0;
pid.previous_error = pid.error;
d = d + pid.output;
if (d>1) d=1;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

}
void setup()
{
    PWMCON1 = 0x00FF;
    PTCN = 0;
    _PTCKPS = 0;
    PTPER = 3000;
    PDC1 = PTPER;
    PDC2 = PTPER;
    PDC3 = PTPER;
    PTMR = 0;
    _PTEN = 1;
    T1CON = 0;
    TMR1 = 0;
    PR1 = 46000;
    T1CONbits.TCS = 0;
    T1CONbits.TCKPS = 1;
    _T1IP = 1;
    _T1IF = 0;
    _T1IE = 1;
    T1CONbits.TON = 1;
}

```

```

void rpmCal(void)

```

```

{
    POSCNT_POS[1] = POSCNT_POS[0];
    POSCNT_POS[0]=POSCNT;
    if (POSCNT_POS[0] < POSCNT_POS[1])
    {

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ sum_pulse = (65535-POSCNT_POS[1]) + POSCNT_POS[0]; ซึ่งประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    }

    else sum_pulse = POSCNT_POS[0]-POSCNT_POS[1];

    pos_value=POSCNT_POS[0];

    rpm_motor = sum_pulse*4.8;

}

void Init_PID(void)
{

    pid.Kp = 0.0001;

    pid.Ki = 0.0001;

    pid.Kd = 0;

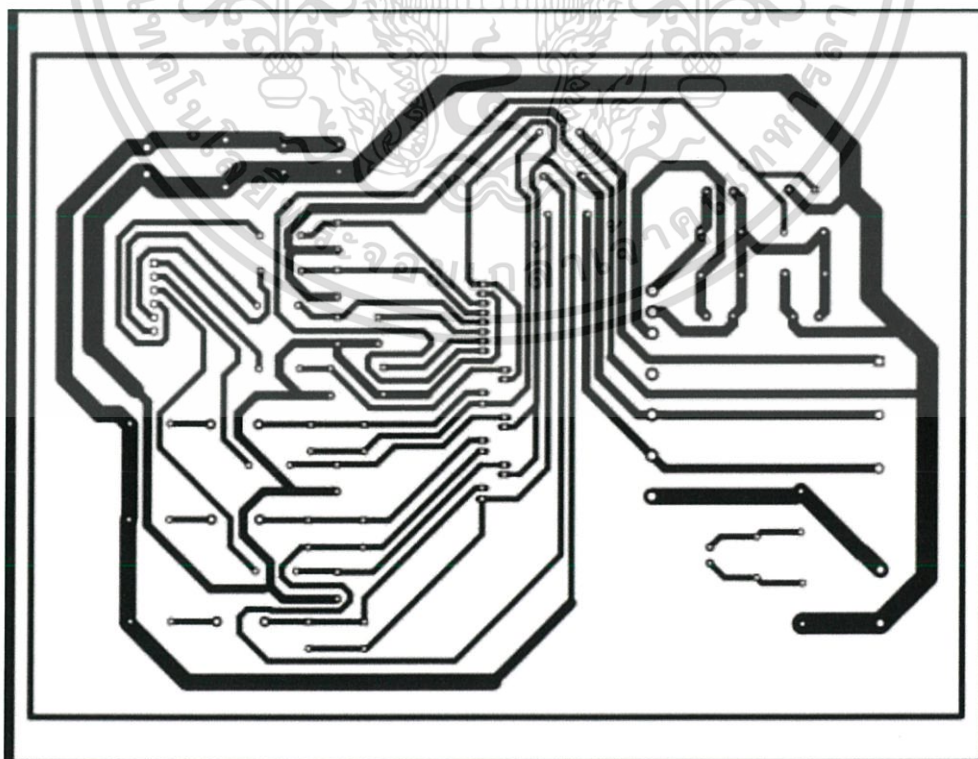
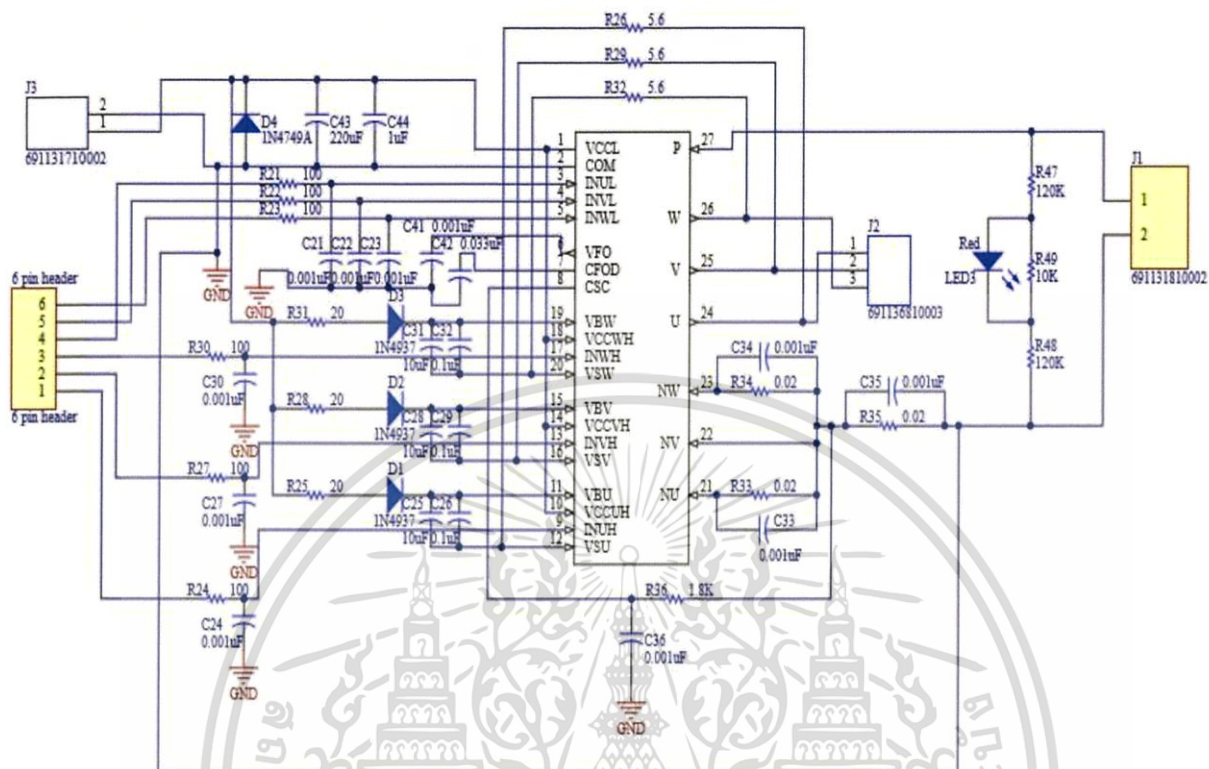
pid.outmax = 1;
pid.setpoint = speed;
pid.feedback = 0;
pid.integral = 0;
pid.derivative = 0;
pid.previous_error = 0;
pid.saturated = 0;

}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลายวงจร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-นามสกุล นางสาวดวงดาว ลอมไธสง
วัน เดือน ปี 13 พฤษภาคม 2537
ที่อยู่ 1 หมู่ 4 ตำบล นนงบัว อำเภอ พยัคฆภูมิพิสัย
จังหวัด มหาสารคาม 44110

ประวัติการศึกษา

ปีการศึกษา 2555 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนพยัคฆภูมิวิทยาคาร
จังหวัดมหาสารคาม

ปีการศึกษา 2559 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง

ฝึกงานภาคฤดูร้อน การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคจังหวัดมหาสารคาม แผนก ปฏิบัติการและซ่อมบำรุง



ชื่อ-นามสกุล นางสาวภัทรวดี จันทกุล
วัน เดือน ปี 30 เมษายน 2538
ที่อยู่ 864 หมู่ 1 ตำบล วะตะแบก อำเภอ เทพสถิต
จังหวัด ชัยภูมิ 36230

ประวัติการศึกษา

ปีการศึกษา 2555 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนชัยภูมิภักดีชุมพล
จังหวัดชัยภูมิ

ปีการศึกษา 2559 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง

ฝึกงานภาคฤดูร้อน บริษัทเทอร์โมเทรเซอร์ จำกัด แผนก วิศวกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



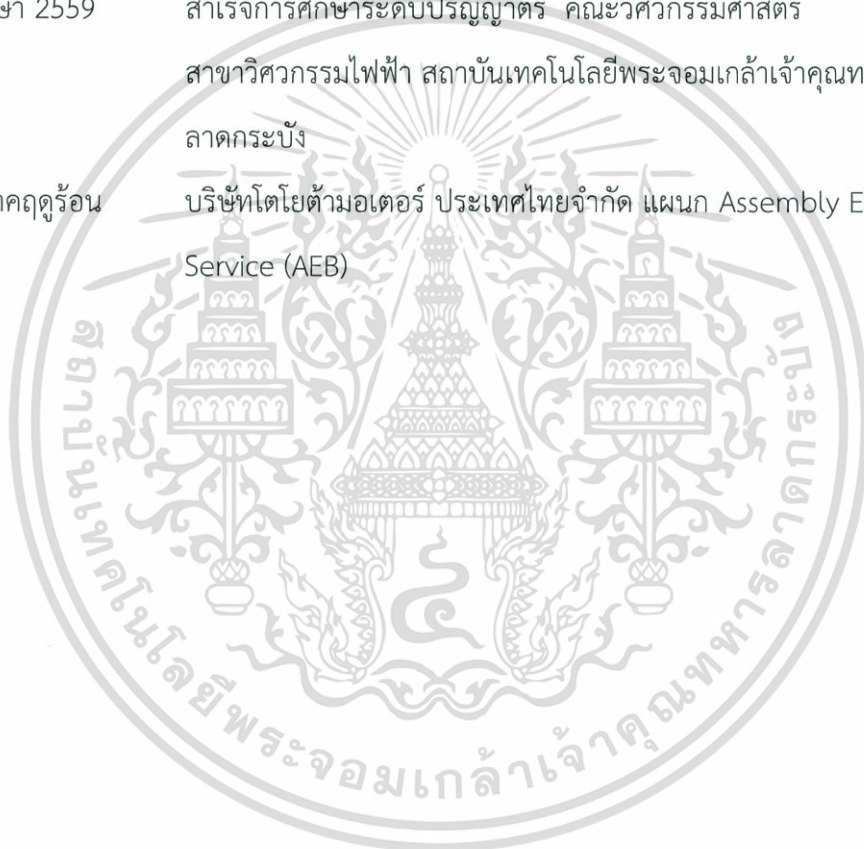
ชื่อ-นามสกุล นายสิทธิพนธ์ สังข์ทอง
 วัน เดือน ปี 15 ตุลาคม 2537
 ที่อยู่ 66/61 หมู่ 5 ถนนเทพารักษ์ ตำบล บางเมือง
 อำเภอ เมือง จังหวัด สมุทรปราการ 10270

ประวัติการศึกษา

ปีการศึกษา 2555 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนอัสสัมชัญ-สมุทรปราการ จังหวัดสมุทรปราการ

ปีการศึกษา 2559 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฝึกงานภาคฤดูร้อน บริษัทโตโยต้ามอเตอร์ ประเทศไทยจำกัด แผนก Assembly Engineering Service (AEB)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้