

วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน
BRUSHLESS DC MOTOR DRIVER



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2558

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน

BRUSHLESS DC MOTOR DRIVER



คลัง วิชาพัฒนกุล
เตชินท์ ศิริเตชะวงศ์

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 144408
รับเดือนปี 24 พ.ย. 2559

12818550
b.....
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

BRUSHLESS DC MOTOR DRIVER



THIS THESIS IS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF

BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHATRONICS ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2558

ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง


เรื่อง วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน

BRUSHLESS DC MOTOR DRIVER

ผู้จัดทำ นายชลัท วิภาวัฒนกุล 55010250

นายเตชินท์ ศิริเตชะวงศ์ 55010442



 อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นนทวัฒน์ จุลเดชะ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรถับมอเตอร์กระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน

โดย

นายชลัท วิชาวัฒน์กุล 55010250

นายเตชินท์ ศิริเดชะวงศ์ 55010442

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นนทวัฒน์ จุลเดชะ

ปีการศึกษา 2558

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้จัดทำขึ้นเพื่อสร้างวงจรถับมอเตอร์กระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน ที่มีราคาถูกกว่าท้องตลาด แต่ยังคงมีสมรรถนะเทียบเท่า มอเตอร์กระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านนั้นมีสมรรถนะที่ดีกว่ามอเตอร์แบบอื่นๆ แต่มีความซับซ้อนในวิธีการขับ ส่งผลให้ราคาของวงจรถับนั้นค่อนข้างสูง ปริญญานิพนธ์เล่มนี้แรกเริ่มจะทำการศึกษาวิธีการขับมอเตอร์กระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน โดยใช้ข้อมูลตำแหน่งของโรเตอร์ที่มาจาก Hall-sensor จากนั้นได้ทำการพัฒนางจรเพื่อใช้ข้อมูลที่มาจากสัญญาณ Back EMF แทน Hall-sensor ด้วยวิธีการ Zero-crossing ทำยที่สุด ในการปรับความเร็วมอเตอร์ จะใช้วิธีการ Pulse Width Modulation เพื่อเป็นการปรับแรงดันไฟฟ้าเข้ามอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

BRUSHLESS DC MOTOR DRIVER

By

Mr. Chalot Vipawatanakul 55010250

Mr. Techin Siritechavong 55010442

Advisor

Asst.Prof.Dr.Nontawat Chuladaycha

Academic Year 2015

ABSTRACT

The aim of this thesis is to make the Brushless DC Motor driver that have the same feature as using in industrial but have lower price. Brushless DC Motors have a better performance than the other type. The only one problem of using it is the driver price. For this reason, the author decided to make it by ourselves. This thesis first examines the way to drive motor with six-step commutation and use Hall-sensors to detect the rotor position. Second, The Back EMF signals are used to detect rotor position instead Hall-sensors by the method called “Zero-crossing”. Motor can be operated without Hall-sensor known as “sensorless control” The back EMF signals are detected by Back EMF detection circuit. Starting the motor is also described in this thesis. Finally, controlling speed of motor, Pulse Width Modulation (PWM) is necessary for varying the voltage input of motor.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เรื่องวงจรขับมอเตอร์กระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านนี้ สำเร็จลุล่วงเนื่องจากความอนุเคราะห์จาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นันทวัฒน์ จุลเดชะ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษาและความรู้ พร้อมทั้งชี้แนะแนวทางให้ปฏิบัติอย่างถูกต้องตามขั้นตอน จนปริญญานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์

ขอขอบคุณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่เป็นแหล่งประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ รวมทั้งห้องปฏิบัติการควบคุมการแปลงรูปกำลังงานไฟฟ้า (Power Conversion Control Lab) ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ พร้อมทั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ขอขอบคุณ พี่ๆ น้องๆ ในห้องปฏิบัติการควบคุมการแปลงรูปกำลังงานไฟฟ้า (Power Conversion Control Lab) ทั้งที่จบไปแล้วก็ดียังไม่จบก็ดี ที่ให้คำแนะนำในการทำปริญญานิพนธ์ และให้กำลังใจในการทำปริญญานิพนธ์ตลอดมา

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณ บิดา มารดา และครอบครัว ที่อบรมเลี้ยงดู สนับสนุนในด้านการศึกษา และให้กำลังใจ จนกระทั่งบรรลุในสิ่งที่มุ่งหวังไว้ คุณค่าอันพึงมีจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ขอมอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ผู้จัดทำ

นายชลัท วิภาวัฒนกุล

นายเตชินท์ ศิริเดชะวงศ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VI
สารบัญตาราง	X
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของโครงการ	2
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	3
2.1 Brushless DC Motor (BLDC Motor)	3
2.1.1 โครงสร้างพื้นฐาน	3
2.1.2 หลักการทำงาน	4
2.2 Bootstrap Technique	6
2.3 Pulse Width Modulation (PWM)	6
2.4 การขับ BLDC Motor โดยไม่ใช้ Hall-sensor (Sensorless)	7
2.4.1 สัญญาณ Back EMF ของ BLDC Motor	7
2.4.2 การนำสัญญาณ Back EMF ไปใช้ในการระบุตำแหน่งของโรเตอร์	8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.4.3 การเริ่มทำงานของมอเตอร์	9
บทที่ 3 ออกแบบวงจรและโปรแกรมควบคุม	11
3.1 เลือกมอเตอร์กระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านเพื่อใช้สำหรับการทดลอง	11
3.2 การออกแบบบอร์ดไดร์ฟมอเตอร์	13
3.3 คำสั่งในการควบคุมการหมุนของมอเตอร์	16
3.3.1 การขับมอเตอร์ไร้แปรงถ่านแบบใช้เซ็นเซอร์ระบุตำแหน่งโรเตอร์	16
3.3.2 การขับมอเตอร์ไร้แปรงถ่านแบบไม่ใช้เซ็นเซอร์ระบุตำแหน่งโรเตอร์	17
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	19
4.1 ตรวจวัดสัญญาณจาก Hall-sensor	19
4.2 ทดลองใช้โปรแกรมที่เขียนขึ้นมา นำมาทดสอบกับหลอดไฟ LED ก่อนที่จะนำไปทดสอบจริงกับ BLDC Motor	20
4.3 ทำการทดลองบอร์ดไดร์ฟและโปรแกรม กับ BLDC Motor	21
4.4 ปรับความเร็วของ BLDC Motor โดยใช้สัญญาณ PWM	25
4.5 ตรวจจับสัญญาณ Zero Crossing ของแรงดันไฟฟ้าบ้อนกลับ (Back EMF)	27
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	30
5.1 สรุปผลการทดลอง	30
5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนาต่อ	30
เอกสารอ้างอิง	31
ภาคผนวก	32
ภาคผนวก ก โปรแกรมคำสั่งที่ใช้ในการเขียนให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ให้ทำงาน	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แผนภาพอย่างของ Brushless DC Motor	3
2.2 ภาพตัดของ Rotor ทั้งสามแบบ	3
2.3 Flow Chart แสดงการทำงาน BLDC Motor	4
2.4 ลำดับการกระตุ้นขดลวดบน Stator	5
2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างสถานะ Hall-sensor และศักย์ไฟฟ้าของขดลวด	5
2.6 การทำงานของ Bootstrap	6
2.7 สัญญาณ PWM ที่ Duty Cycle ต่างๆ	7
2.8 สัญญาณ Back EMF ของ BLDC Motor	8
2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณ Hall-sensor และ Zero Crossing ของ Back EMF	9
2.10 Flow Chart แสดงการทำงานในการเริ่มหมุนมอเตอร์	10
3.1 มอเตอร์ไร้แปรงถ่านที่ใช้ในการทดลอง	11
3.2 ขนาดของมอเตอร์ไร้แปรงถ่านที่ใช้ในการทดลอง	11
3.3 วงจรพื้นฐานที่ใช้ในการขับมอเตอร์	13
3.4 Mini Smart Power Module	14
3.5 ตัวอย่างการต่อวงจรเพิ่มเติมของ Mini SPM	15
3.6 Schematic ของบอร์ดไดร์ฟมอเตอร์ไร้แปรงถ่าน	15
3.7 PCB ของ Board Drive	16
3.8 ลำดับขั้นตอนในการทำงานของการสั่งงานมอเตอร์ไร้แปรงถ่าน	17
3.9 วงจรตรวจจับสัญญาณแรงดันไฟฟ้าป้อนกลับ	18
3.10 Schematic ของวงจรตรวจจับสัญญาณแรงดันไฟฟ้าป้อนกลับ	18

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 ขับมอเตอร์ไร้แปรงถ่านจากมอเตอร์กระแสตรงภายนอก	19
4.2 สัญญาณจาก Hall-sensor วัดสัญญาณโดย Oscilloscope	20
4.3 ทดลองต่อบอร์ดไดร์ฟกับหลอด LED	20
4.4 ทดลองต่อบอร์ดไดร์ฟกับมอเตอร์	21
4.5 High-side U (ไมโครคอนโทรลเลอร์ขาที่ 9)	22
4.6 High-side V (ไมโครคอนโทรลเลอร์ขาที่ 10)	22
4.7 High-side W (ไมโครคอนโทรลเลอร์ขาที่ 11)	23
4.8 Low-side U (ไมโครคอนโทรลเลอร์ขาที่ 3)	23
4.9 Low-side V (ไมโครคอนโทรลเลอร์ขาที่ 5)	24
4.10 Low-side W (ไมโครคอนโทรลเลอร์ขาที่ 6)	24
4.11 สัญญาณ Back EMF ของเฟส U และ V	25
4.12 สัญญาณ Back EMF ของเฟส V และ W	26
4.13 สัญญาณ Back EMF ของเฟส W และ U	26
4.14 ความสัมพันธ์ของสัญญาณที่มาจากเซนเซอร์ระบุตำแหน่งโรเตอร์กับ บอร์ดเปรียบเทียบสัญญาณแรงดันไฟฟ้าป้อนกลับของเฟส U	27
4.15 ความสัมพันธ์ของสัญญาณที่มาจากเซนเซอร์ระบุตำแหน่งโรเตอร์กับ บอร์ดเปรียบเทียบสัญญาณแรงดันไฟฟ้าป้อนกลับของเฟส V	28
4.16 ความสัมพันธ์ของสัญญาณที่มาจากเซนเซอร์ระบุตำแหน่งโรเตอร์กับ บอร์ดเปรียบเทียบสัญญาณแรงดันไฟฟ้าป้อนกลับของเฟส W	28
4.17 สัญญาณที่เฟส U และ V ของมอเตอร์ไร้แปรงถ่าน	29

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่

หน้า

4.18 สัญญาณที่เฟส U-V, V-W และ W-U ของมอเตอร์ไร้แปรงถ่าน

29

โดยปรับ Duty Cycle ของสัญญาณที่ไปให้บอร์ดขับมอเตอร์



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 การเปรียบเทียบลักษณะทั่วไปของ BLDC Motor และ Brushed DC Motor	1
3.1 แสดงคุณสมบัติของมอเตอร์ไร้แปรงถ่าน	12



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการ

มอเตอร์กระแสตรงชนิดไม่มีแปรงถ่าน (Brushless DC Motor : BLDC Motor) นั้นเป็นมอเตอร์ที่ใช้งานอย่างแพร่หลาย เนื่องด้วยสมรรถนะ และอายุการใช้งานที่ยาวนาน เมื่อเทียบกับมอเตอร์กระแสตรงชนิดมีแปรงถ่าน (Brushed DC Motor) และเพื่อให้ตัวมอเตอร์ชนิดนี้หมุนได้ จำเป็นต้องมีวงจรรีบ ซึ่งตัววงจรรีบนั้นมีราคาที่สูงประมาณ 2-3 เท่าของราคามอเตอร์ จึงเกิดความคิดที่จะสร้างตัวจรรีบ ที่มีราคาขยับเยา แต่มีความสามารถในการควบคุมมอเตอร์ได้เหมือนอย่างวงจรราคาแพง เพื่อเป็นการลดต้นทุนในการประยุกต์ใช้ Brushless DC Motor ต่อไปในอนาคต

ตารางที่ 1.1 การเปรียบเทียบลักษณะทั่วไปของ BLDC Motor และ Brushed DC Motor

คุณสมบัติ	BLDC Motor	Brushed DC Motor
การซ่อมบำรุง	น้อย	ต้องการการซ่อมบำรุง
อายุการใช้งาน	นานกว่า	สั้นกว่า
ลักษณะของความเร็ว/แรงบิด	คงที่ สามารถทำงานได้ทุกช่วง ความเร็วที่พิกัดโหลด	ค่อนข้างคงที่ ที่ความเร็วสูงขึ้น แรงเสียดทานที่แปรงถ่าน เพิ่มขึ้น เกิดการสูญเสียเพิ่มขึ้น
ประสิทธิภาพ	สูง ไม่มี Voltage Drop ที่ แปรงถ่าน	ปานกลาง
กำลัง/ขนาด	สูง	ปานกลาง ถึง ต่ำ
โมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์	ต่ำ	มากกว่า
ช่วงความเร็ว	สูงกว่า	ต่ำกว่า
Electric Noise	ต่ำ	มีสัญญาณรบกวน เนื่องจาก การ Arcs ที่แปรงถ่าน
ราคา	แพงกว่า	ถูกกว่า
การควบคุม	ซับซ้อน	ธรรมดา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการขับ BLDC Motor จำเป็นต้องรู้ตำแหน่งของโรเตอร์ สามารถทำได้ด้วยกัน 2 วิธีคือ การใช้ Hall-effect Sensor และ การใช้สัญญาณ Back EMF ซึ่งในปริมาณที่เล็มนิ่งเน้นไปที่การทำงานโดยใช้สัญญาณ Back EMF ในการหาตำแหน่งโรเตอร์ หรือที่เรียกว่า “Sensorless Control” ซึ่งวิธีการนี้จะทำให้ BLDC Motor ไม่ต้องการ Hall-sensor ส่งผลให้ราคาของมอเตอร์ต่ำลง และไม่ต้องการการทำความสะอาด Sensor เป็นการยืดระยะเวลาซ่อมบำรุงมอเตอร์ไปในตัว

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการทำงานของ BLDC Motor
2. เพื่อศึกษาการขับ BLDC Motor โดยไม่ใช้ Hall-sensor
3. เพื่อสร้างวงจรขับที่มีราคาถูกลงกว่าท้องตลาด
4. เพื่อสามารถนำ Brushless DC Motor ไปใช้งานต่อยอดได้ โดยใช้วงจรที่สร้างขึ้นเอง

1.3 ขอบเขตของโครงการ

1. สร้างวงจรขับ Brushless DC Motor
2. สามารถขับ Brushless DC Motor ที่มี Hall-sensor และแบบ ไม่มี Hall-sensor ได้
3. สามารถควบคุมความเร็วของมอเตอร์ได้

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. ความรู้ความเข้าใจในการทำงานของ Brushless DC Motor
2. วงจรขับ Brushless DC Motor ที่สามารถนำไปใช้งานได้จริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

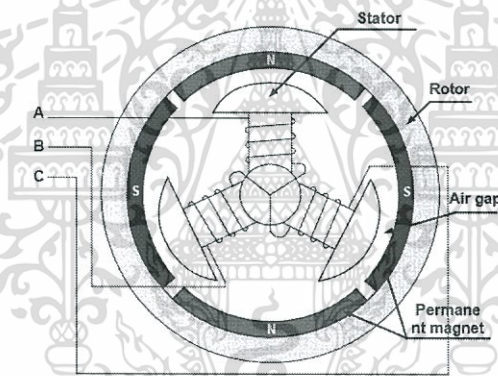
ทฤษฎีและหลักการ

2.1 Brushless DC Motor

BLDC Motor เป็นมอเตอร์ประเภท ซึ่งหมายความว่า สนามแม่เหล็กที่ถูกสร้างขึ้นโดย Stator และสนามแม่เหล็กที่ถูกสร้างขึ้นโดย Rotor จะหมุนด้วยความถี่เดียวกัน

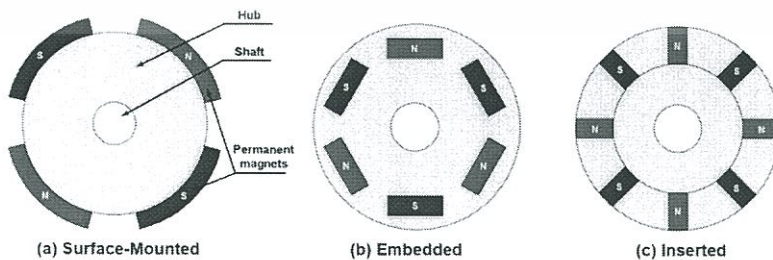
2.1.1 โครงสร้างพื้นฐาน

1. Stator คือ ส่วนที่หยุดนิ่ง และเป็นที่อยู่ของขดลวด ซึ่ง BLDC Motor ส่วนใหญ่จะมีขดลวดที่ Stator อยู่สามชุด หรือที่เรียกว่า สามเฟส ต่อกันแบบ Star Connected ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แผนภาพอย่างของ Brushless DC Motor

2. Rotor คือ ส่วนที่หมุนของมอเตอร์ ทำมาจากแม่เหล็กถาวร ซึ่งมีตั้งแต่ 2 ถึง 8 คู่ขั้วและสามารถจัดเรียงได้ 3 แบบ ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ภาพตัดของ Rotor ทั้งสามแบบ

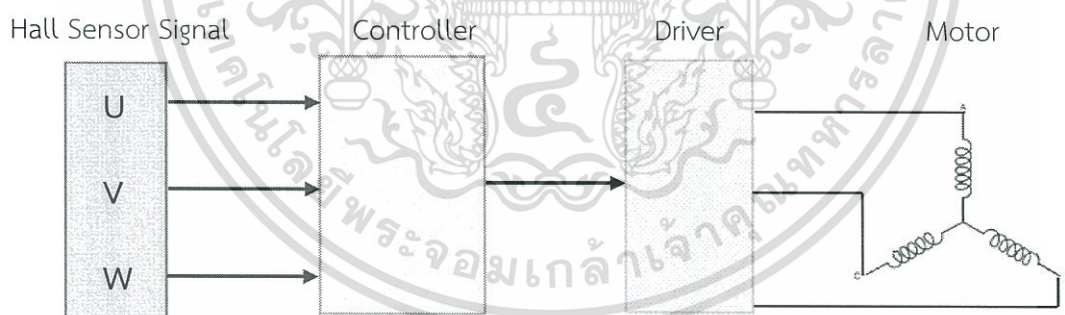
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 หลักการทำงาน

อาศัยการวัดและการผลักระหว่างขั้วแม่เหล็กของ Stator และ Rotor โดยจำเป็นต้องทราบตำแหน่งของ Rotor ก่อน เพื่อที่จะจ่ายไฟไปยังขดลวดบน Stator ได้ถูกต้องลำดับ ซึ่งการตรวจหาตำแหน่งของ Rotor นั้นจะใช้ Hall-sensor 3 ตัว (a, b และ c) ซึ่งติดตั้งบน Stator ตำแหน่งห่างกัน 120° ในกรณีที่ Rotor มีขั้วเพียง 2 ขั้ว หรือ 1 คู่ สัญญาณของ Hall-sensor จะเปลี่ยนสถานะทุกๆ การหมุน 60° ดังนั้น Hall-sensor ทั้งสามจึงมีการเปลี่ยนสถานะ 6 ชั้นในการทำให้การหมุนครบหนึ่งรอบ ซึ่งในแต่ละชั้น จะสั่งให้ไฟเข้าและออกขดลวดบน Stator แตกต่างกันไป โดยสั่งจากสวิทช์ 6 ตัว เรียกการหมุนครบรอบในกรณีนี้ว่า “รอบทางไฟฟ้า (Electrical Cycle)”

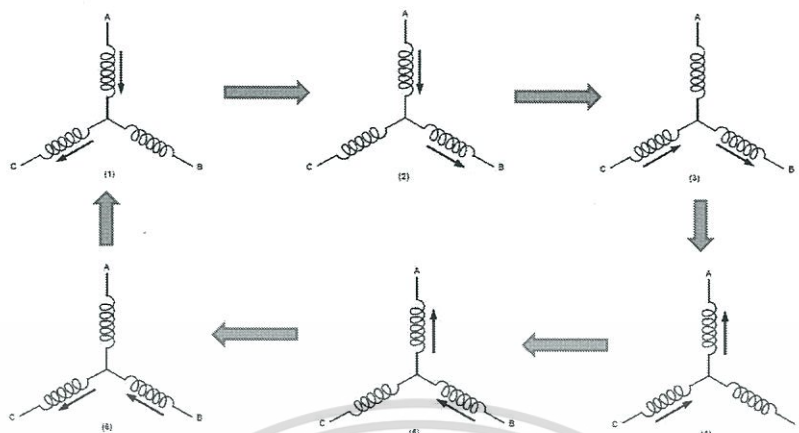
ในกรณีที่ขั้วของ Rotor มีมากกว่า 1 คู่ 1 รอบทางไฟฟ้าไม่สามารถทำให้ Rotor หมุนครบรอบได้ แต่จะใช้เท่ากับจำนวนคู่ของขั้วบน Rotor ยกตัวอย่างเช่น Rotor มีขั้วทั้งหมด 2 คู่ จะใช้รอบทางไฟฟ้า 2 รอบ ในการหมุนให้ครบ 1 รอบ

ในแต่ละลำดับ จะมีขดลวดสองขดถูกกระตุ้น ขดลวดหนึ่งจะถูกกระตุ้นให้กระแสไฟฟ้าไหลเข้า และอีกขดจะถูกกระตุ้นให้กระแสไฟฟ้าไหลออก ส่วนอีกหนึ่งขดที่เหลือจะไม่ถูกกระตุ้น ซึ่งขดลวดนี้จะเป็นสาเหตุของ Back EMF

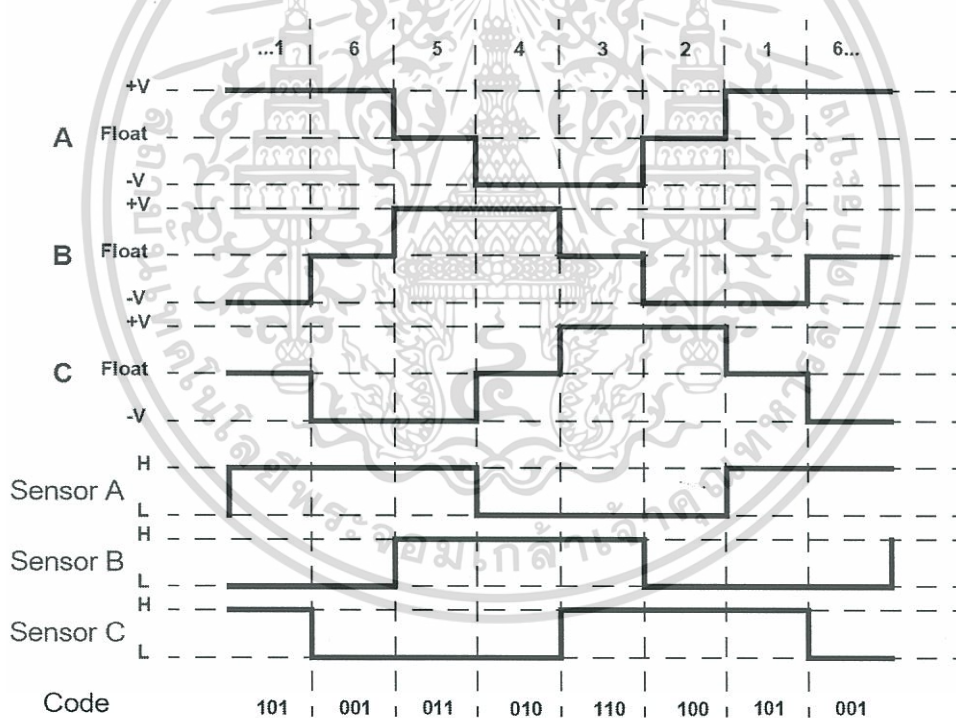


รูปที่ 2.3 Flow Chart แสดงการทำงาน BLDC Motor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



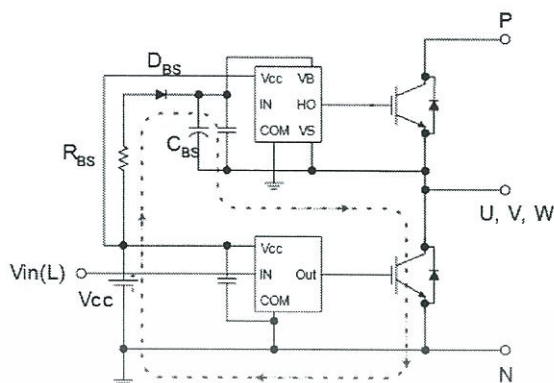
รูปที่ 2.4 ลำดับการกระตุ้นขดลวดบน Stator



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างสถานะ Hall-sensor และศักย์ไฟฟ้าของขดลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 Bootstrap Technique



รูปที่ 2.6 การทำงานของ Bootstrap

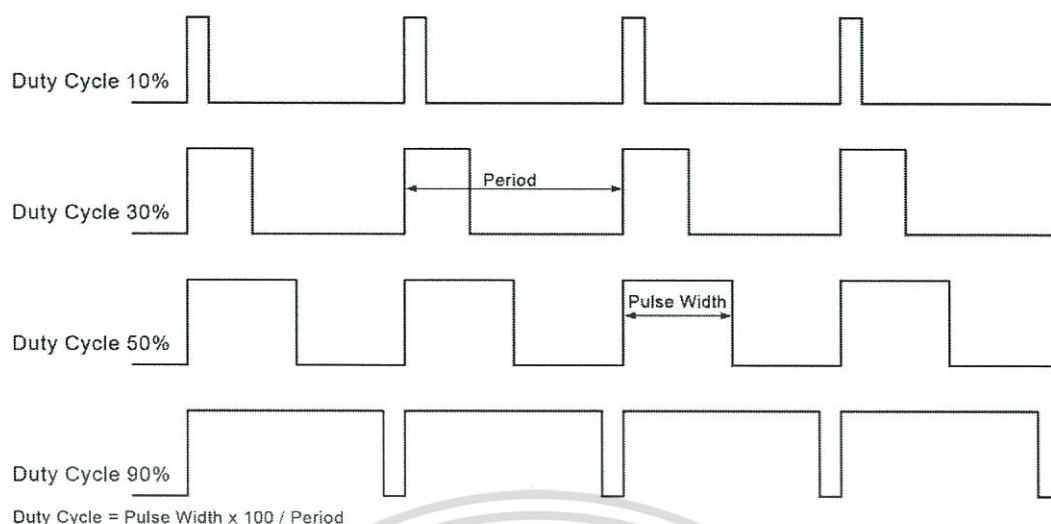
ในการขับ Brushless DC Motor นั้น จะใช้อุปกรณ์จำพวก Semiconductor มาเป็นสวิตช์ ซึ่งในโครงงานนี้จะใช้ IGBT จากรูปที่ 2.3 สังเกตว่าสวิตช์ของฝั่ง High Side (1,3 และ 5) ขาด้านล่างของสวิตช์แต่ละตัวจะไม่ต่อกัน ซึ่งเมื่อใช้ IGBT แทนสวิตช์แล้วนั้น หมายความว่าขา Emitter ของฝั่ง High Side ก็จะไม่เชื่อมถึงกันด้วย แต่ในการใช้งาน IGBT ขา Emitter จะต้องต่อลงกราวด์ของแหล่งจ่ายที่เข้าขา Gate เพื่อให้กระแสไหลได้ครบวงจร แต่เมื่อขา Emitter ไม่เชื่อมถึงกัน นั่นก็หมายความว่า จะต้องมีส่วนจ่ายแยกของฝั่ง High Side ซึ่งเป็นเรื่องที่ยุ่งยาก ปัญหานี้สามารถแก้ไขโดยเทคนิค Bootstrap คือจะใช้ Capacitor แทนแหล่งจ่าย ดังรูปที่ 2.5 C_{BS} จะถูกชาร์จจิกต่อเมื่อ IGBT ฝั่ง Low Side ทำงาน แล้ว C_{BS} ตัวนี้จะเป็นแหล่งจ่ายให้ขา Gate ของ IGBT ของฝั่ง High Side เพื่อ Bias ให้ IGBT ทำงาน

2.3 Pulse Width Modulation (PWM)

เนื่องจากในการใช้งานจริงของมอเตอร์ แหล่งจ่ายจะจ่าย Voltage ออกมาเป็นค่าคงที่ค่าหนึ่ง ไม่สามารถปรับได้ เช่น แบตเตอรี่ การใช้เทคนิค PWM จะทำให้สามารถปรับค่าของ Voltage ที่จะเข้ามอเตอร์ได้ โดยการปรับช่วงเวลาในการเปิดและปิดของสวิตช์ ซึ่งอัตราส่วนระหว่างช่วงเวลาที่ใช้ในการเปิด กับคาบเวลาหนึ่งลูกคลื่น จะเรียกว่า Duty Cycle มีค่าระหว่าง 0 – 1 และ Voltage จะแปรผันตรงกับ Duty Cycle ซึ่งมีค่าตามสมการด้านล่าง

$$V_{out} = D \times V_{source}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



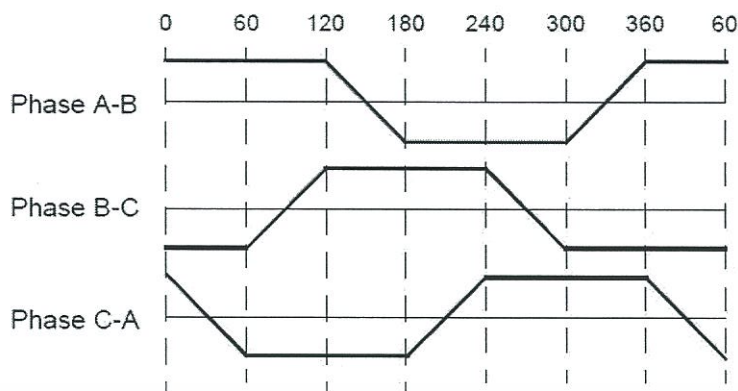
รูปที่ 2.7 สัญญาณ PWM ที่ Duty Cycle ต่างๆ

2.4 การขับ BLDC Motor โดยไม่ใช้ Hall-sensor (Sensorless)

ดังที่ได้กล่าวไปข้างต้น การขับ BLDC Motor ต้องทราบถึงตำแหน่งของโรเตอร์ ทั้งนี้การตรวจหาตำแหน่งของโรเตอร์สามารถใช้สัญญาณ Back EMF แทนการใช้ Hall-sensor ได้

2.4.1 สัญญาณ Back EMF ของ BLDC Motor

เมื่อมอเตอร์หมุน ขดลวดแต่ละเฟสจะสร้างแรงดันไฟฟ้าที่มีทิศทางตรงกันข้ามกับแหล่งจ่าย ซึ่งเป็นไปตาม Lenz's Law ขนาดของสัญญาณ Back EMF นั้นขึ้นอยู่กับสามปัจจัย ความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์ สนามแม่เหล็กจากโรเตอร์ และจำนวนขดลวดใน Stator แต่สนามแม่เหล็กของโรเตอร์ และจำนวนขดลวด Stator ขึ้นอยู่กับการออกแบบมอเตอร์ ดังนั้นสองค่านี้จึงเป็นค่าคงที่ Back EMF จึงขึ้นกับความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์เพียงอย่างเดียว รูปแบบสัญญาณ Back EMF ของ BLDC Motor จะมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมคางหมู ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.8 สัญญาณ Back EMF ของ BLDC Motor

2.4.2 การนำสัญญาณ Back EMF ไปใช้ในการระบุตำแหน่งของโรเตอร์

จากรูปที่ 2.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณจาก Hall-sensor และสัญญาณ Back EMF ของมอเตอร์ ความกว้างของสัญญาณ Hall-sensor มีค่าเท่ากับ 120 องศา และจะเปลี่ยนสถานะทุกๆ 60 องศา

เมื่อพิจารณาสัญญาณ Back EMF จะเห็นว่า ความกว้างของช่วงบวกของสัญญาณ โดยอิงจากจุดตัดแกนนอน หรือที่เรียกว่า “Zero Crossing” นั้นมีค่าเท่ากับ 120 องศา และเปลี่ยนสถานะทุกๆ 60 องศาเช่นเดียวกับสัญญาณจาก Hall-sensor เพียงแต่สัญญาณ Back EMF จะนำหน้า Hall-sensor อยู่ประมาณ 30 องศา เนื่องจากคุณลักษณะของขดลวด ดังนั้นความต่างกัน 60 องศา นี้ จะถูกชดเชยโดยการปรับ Delay Time จาก Microcontroller ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$Delay\ time = \frac{30}{RPM \times Pole\ pair \times 6}$$

สังเกตว่า Delay Time จะขึ้นอยู่กับค่าความเร็วรอบมอเตอร์ และจำนวนคู่ขั้วของโรเตอร์ แต่จำนวนคู่ขั้วนั้นเป็นค่าคงที่ของมอเตอร์แต่ละตัว ดังนั้น Delay Time จึงขึ้นกับค่าความเร็วรอบมอเตอร์เพียงค่าเดียว

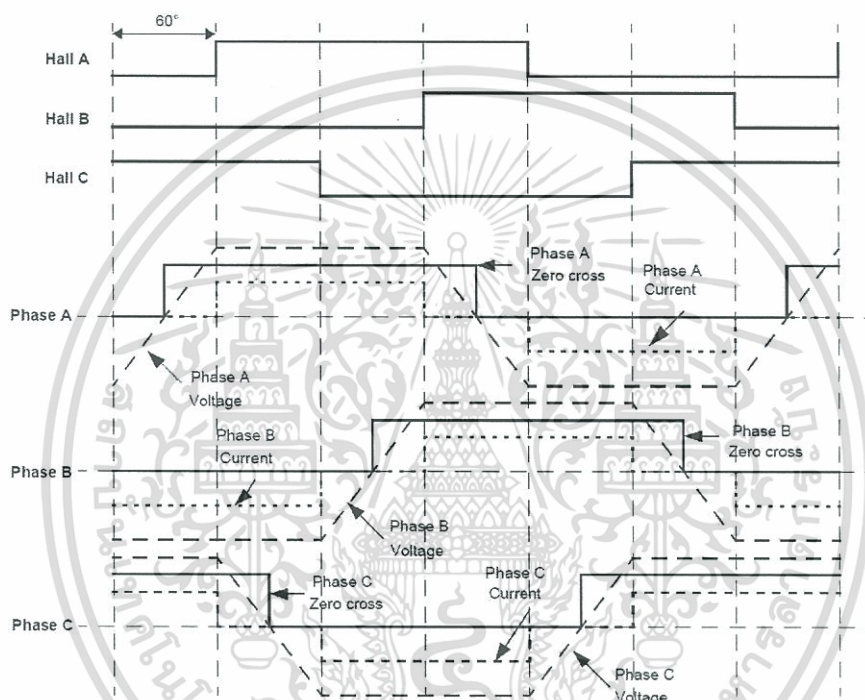
จากสมการข้างต้น Delay Time จะแปรผกผันกับค่าความเร็วรอบมอเตอร์ หมายความว่า ยิ่งรอบสูง Delay Time จะยิ่งน้อยลง ซึ่งความเร็วรอบจะสามารถวัดได้จากสัญญาณ Back EMF ด้วย

เช่นกัน โดยการนับการเปลี่ยนสถานะของสัญญาณ Back EMF ภายในหนึ่งวินาที แล้วนำมาแทนสมการต่อไปนี้

$$RPM = \frac{c \times 60}{6 \times \text{pole pair}}$$

เมื่อ c = จำนวนการเปลี่ยนสถานะของสัญญาณ Back EMF ภายในหนึ่งวินาที

ซึ่งค่า C สามารถจับได้ด้วย Microcontroller

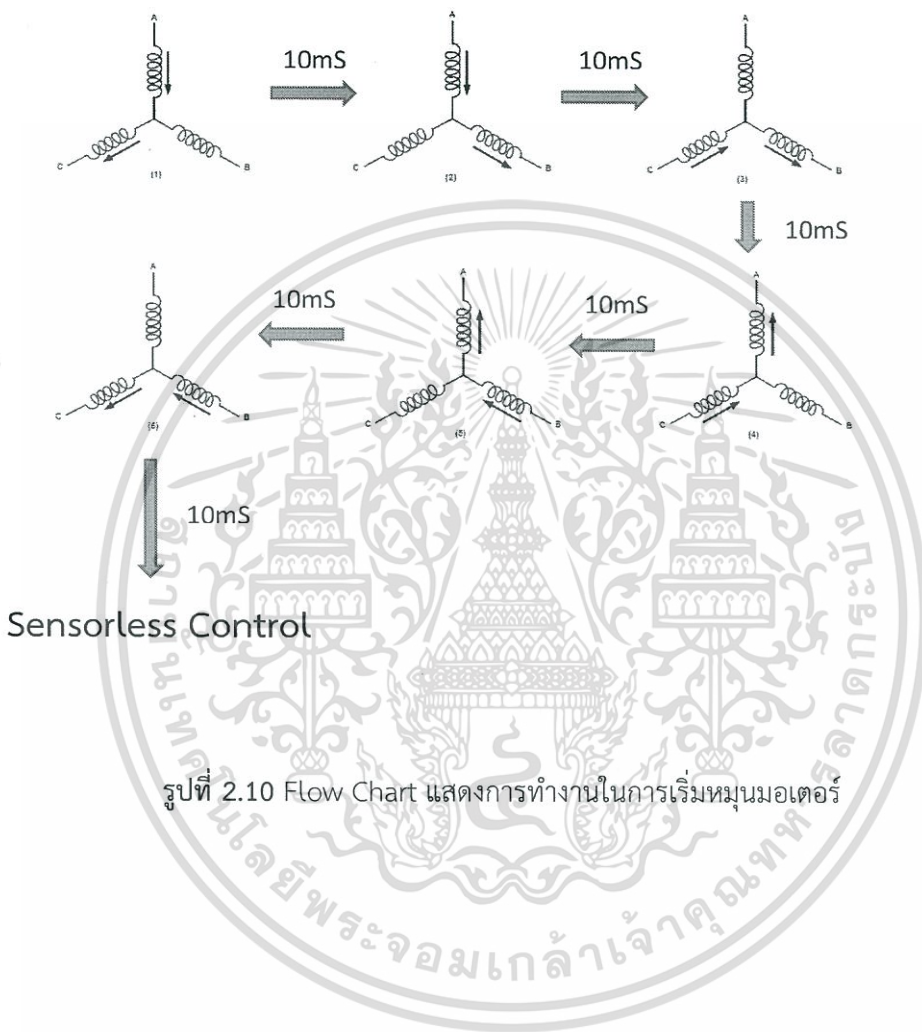


รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณ Hall-sensor และ Zero Crossing ของ Back EMF

2.4.3 การเริ่มทำงานของมอเตอร์

จากหัวข้อที่ผ่านมา สัญญาณ Back EMF จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมอเตอร์มีการหมุน ในขณะที่มอเตอร์ยังไม่เริ่มทำงาน จึงยังไม่มีสัญญาณ Back EMF ส่งผลให้ไม่สามารถหาตำแหน่งที่ถูกต้องของโรเตอร์ได้ การเริ่มทำงานของมอเตอร์ในรูปแบบที่ไม่ใช้ Hall-sensor จึงไม่สามารถทำได้ เพราะไม่มีข้อมูลของตำแหน่งโรเตอร์เป็นตัวสั่งการกระตุ้นขดลวด

การแก้ไขปัญหาทำได้โดยจำลองลำดับการกระตุ้นขดลวดขึ้นมาเป็นช่วงเวลาสั้นๆ เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กหมุนที่ Stator ซึ่งจะไปเหนี่ยวนำให้ Rotor เริ่มหมุน เมื่อ Rotor หมุนจนสัญญาณ Back EMF เกิดขึ้น ก็จะสามารถระบุตำแหน่งที่แน่นอนของ Rotor ได้ดังปกติ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ออกแบบวงจรและคำสั่งในการควบคุมมอเตอร์ไร้แปรงถ่าน

3.1 เลือกมอเตอร์ไร้แปรงถ่านเพื่อใช้สำหรับการทดลอง

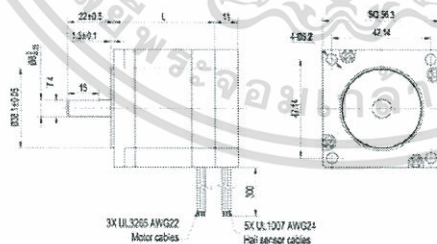
เลือกหามอเตอร์ไร้แปรงถ่านเพื่อใช้ในการทดลอง เพื่อที่จะมาออกแบบวงจรที่สามารถขับมอเตอร์ไร้แปรงถ่านได้จะต้องเลือกมอเตอร์ที่บอกคุณสมบัติต่างๆ อย่างเช่น กระแสไฟฟ้าสูงสุด, แรงบิด, ความเร็ว และแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ เป็นต้น



รูปที่ 3.1 มอเตอร์ไร้แปรงถ่านที่ใช้ในการทดลอง

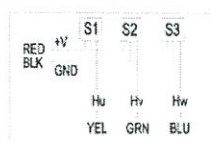
* Caution 1: Peak (Stall) Torque is provided for the purpose of performance calculations only. Operate near, or at, a stalled condition will result in motor damaged.
Note: We can also manufacture products according to customer's requirements.

Mechanical Dimensions

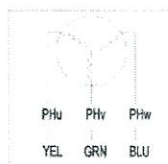


Wiring Diagram

Connection diagram:



Hall sensor cables
Note: hall sensor power supply voltage +5 to +20VDC



Wiring cables

รูปที่ 3.2 ขนาดของมอเตอร์ไร้แปรงถ่านที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 แสดงคุณสมบัติของมอเตอร์ไร้แปรงถ่าน

Model	57BLF01	57BLF02	57BLF03
Number of Poles	8		
Number of Phases	3		
Nominal Voltage VDC (Volt)	24		
Rated speed (RPM)	3000		
Continuous Torque (N-m)	0.2	0.4	0.6
Output Power (Watts)	63	125	188
Peak (Stall) Torque1 (N-m)	0.6	1.2	1.8
Peak Current (Amps)	9.6	18.6	27.8
Line to line Resistance (Ohms)	0.6	0.3	0.2
Line to line Inductance (mH)	0.75	0.42	0.31
Torque constant (N-m/Amps)	0.065	0.066	0.066
Back EMF (V/kRPM)	6.23	6.3	6.3
Rotor inertia (g-cm ²)	120	170	220
Body Length (L) (mm)	48	69	90
Mass (kg)	0.65	1	1.4

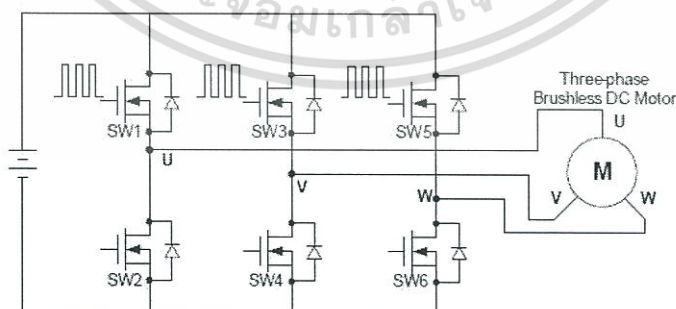
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอเตอร์ไร้แปรงถ่าน ที่ใช้สำหรับการทดลองนั้น 8 ขั้วแม่เหล็ก มีสายไฟ 3 เฟส ทำงานที่แรงดันไฟฟ้า 24 ใช้กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ 9.6 แอมป์ สามารถสร้างแรงบิด ได้ 0.2 นิวตัน-เมตร มีเซนเซอร์ 3 ตัว เพื่อใช้ในการบอกตำแหน่งของโรเตอร์ เพื่อใช้ในการขับมอเตอร์ไร้แปรงถ่านในเบื้องต้น

3.2 การออกแบบวงจรขับมอเตอร์

เมื่อได้มอเตอร์ไร้แปรงถ่านที่จะใช้ในการทดลองแล้ว จากนั้นจะมาออกแบบวงจรที่ใช้ในการขับมอเตอร์ไร้แปรงถ่าน โดยวงจรพื้นฐานนั้นจะใช้ มอสเฟต 6 ตัวในการขับมอเตอร์ไร้แปรงถ่านให้ทำงานตามคำสั่งจากไมโครคอนโทรลเลอร์ดังรูปที่ 3.3 ในวงจรที่ใช้ออกแบบในการขับมอเตอร์ไร้แปรงถ่านนั้นต้องใช้เทคนิคที่เรียกว่า Bootstrap ในการสร้างแหล่งพลังงานแยกขึ้นมา เพื่อเป็นการแยกกราวด์ร่วม ระหว่างมอสเฟตชุดบนกับชุดล่าง โดยใช้ตัวเก็บประจุ เพื่อความสะดวกในการออกแบบวงจรขับ จะใช้โมดูลสำเร็จโดยภายในโมดูลนั้นจะประกอบไปด้วย IGBT 6 ตัว (ทำหน้าที่คล้ายมอสเฟตในวงจรพื้นฐาน) โดยโมดูลนี้เรียกว่า Mini Smart Power Module : SPM ซึ่งด้านใน SPM จะมี Gate Drive 4 ชุด โดย 3 ชุด สำหรับ Drive IGBT ด้านบน 3 ตัว และอีกชุดหนึ่ง สำหรับขับ IGBT 3 ตัวด้านล่าง และง่ายต่อการทำเทคนิค Bootstrap และต่อวงจรเพิ่มเติม โดยสามารถศึกษาจาก Application Note คำนวณหาขนาดของ Capacitor สำหรับการทำ Bootstrap และกรองสัญญาณรบกวน

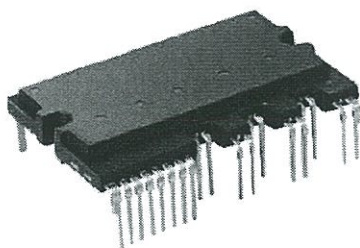
สำหรับ Mini SPM รุ่นที่เลือกใช้นั้น เป็นรุ่น FSBF10CH60BT ซึ่งสามารถขับกระแสได้ 10A และ สามารถทนแรงดันไฟฟ้าได้ 600V



(b) Three-phase bridge

รูปที่ 3.3 วงจรพื้นฐานที่ใช้ในการขับมอเตอร์

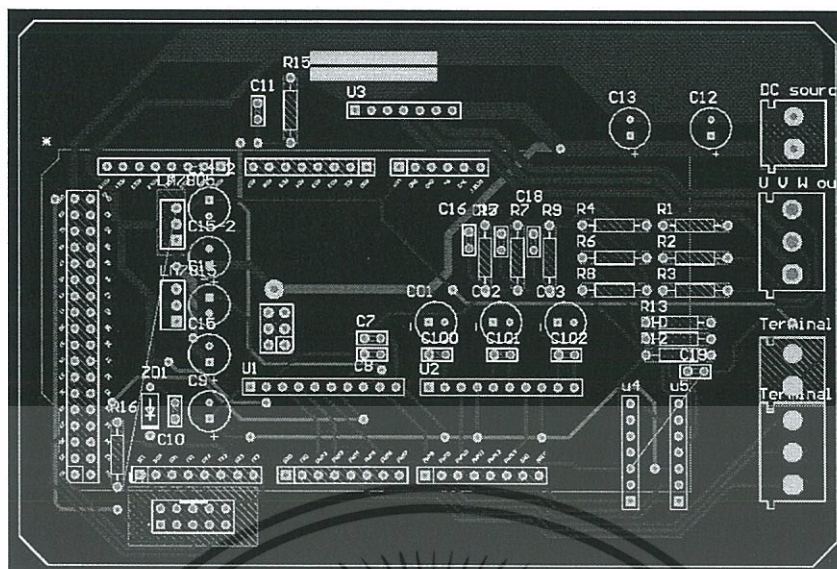
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 Mini Smart Power Module

จากการศึกษาจาก Application Note ของ SPM นั้น ต้องมาต่อวงจรเพิ่มเติมคือ

1. ต่อแหล่งจ่ายไฟ สำหรับเลี้ยงบอร์ด 15V
2. คำนวณค่าของ Capacitor ที่ใช้ในการทำเทคนิค Bootstrap เพื่อให้ค่าสอดคล้องต่อการทำงานของ Brushless Motor ก็กับการชาร์จของ Capacitor ที่นำมาใส่
3. ต่อแหล่งจ่าย 5V สำหรับ Pull-up ในขา Fault Output
4. ต่อ Resistor ในขา Source ของ IGBT 3 ชุดล่าง เพื่อจะคำนวณหาแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมจากการขับมอเตอร์ ในสถานะปกติแล้ว จะใช้ IGBT 2 ตัว สำหรับการสั่งงานของมอเตอร์ และ 2 ตัว นั้นก็จะไม่ได้อยู่ชุดสายไฟเฟสเดียวกัน เพราะฉะนั้นแล้วกระแสที่ไหลผ่านไม่เกิน Peak Current ของมอเตอร์ ถ้าเมื่อไหร่กระแสถูกใช้เกิน แสดงว่ามีความผิดพลาดเกิดขึ้น อาจเกิดจาก IGBT ชุดสายไฟเฟสเดียวกันทำงานพร้อมกัน ทำให้ Shot Circuit ขึ้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องต่อตัวต้านทาน เพื่อวัดแรงดันตกคร่อมตัวต้านทานเนื่องจากกระแส เข้าไปที่ขา C_{sc} (Short Current Detection Pins) และต่อ RC Filter ให้เหมาะสมเพื่อกรองสัญญาณรบกวน

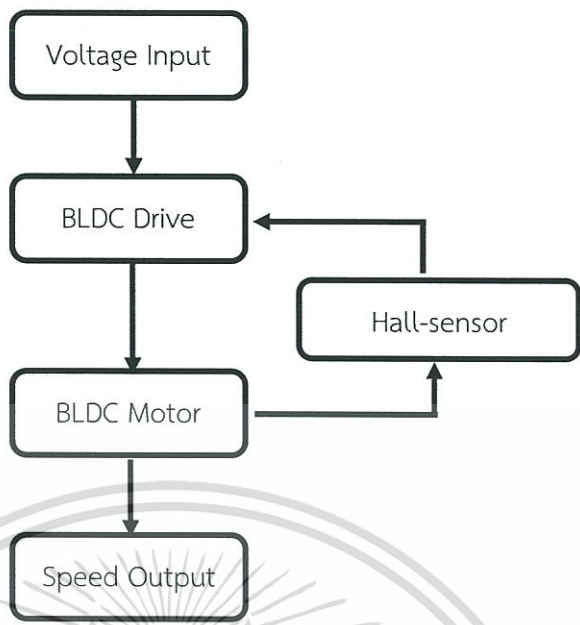


รูปที่ 3.7 PCB ของ Board Drive

3.3 คำสั่งในการควบคุมการหมุนของมอเตอร์

3.3.1 การขับมอเตอร์ไร้แปรงถ่านแบบใช้เซนเซอร์ระบุตำแหน่งโรเตอร์

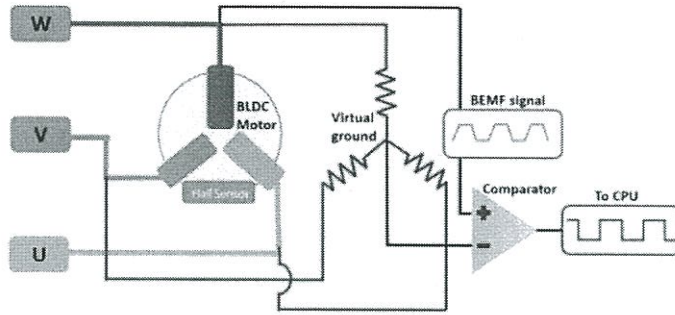
การเขียนคำสั่งในการควบคุมการหมุนของมอเตอร์ไร้แปรงถ่านนั้น ใช้ขั้นตอนแรกจะใช้สัญญาณอ้างอิงที่มาจากเซนเซอร์ระบุตำแหน่งของโรเตอร์ หากทราบว่า ณ ตอนนั้นโรเตอร์ทำมุมอย่างไรกับสเตเตอร์ จะสามารถจ่ายไฟฟ้าไปที่ชุดขดลวดได้ถูกต้องตามตำแหน่งการขับดังเช่นบทที่ 2 ตัวอย่างเช่น ถ้าตรวจจับสัญญาณของเซนเซอร์ตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ $a = 0$, $b = 0$ และ $c = 1$ จะสั่งให้ IGBT1 และ IGBT4 ทำงาน โดยในการทดลองขั้นแรกใช้คำสั่งที่เป็นสัญญาณดิจิตอลจากไมโครคอนโทรลเลอร์ และใช้การปรับแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายเพื่อปรับความเร็วของมอเตอร์ไร้แปรงถ่าน



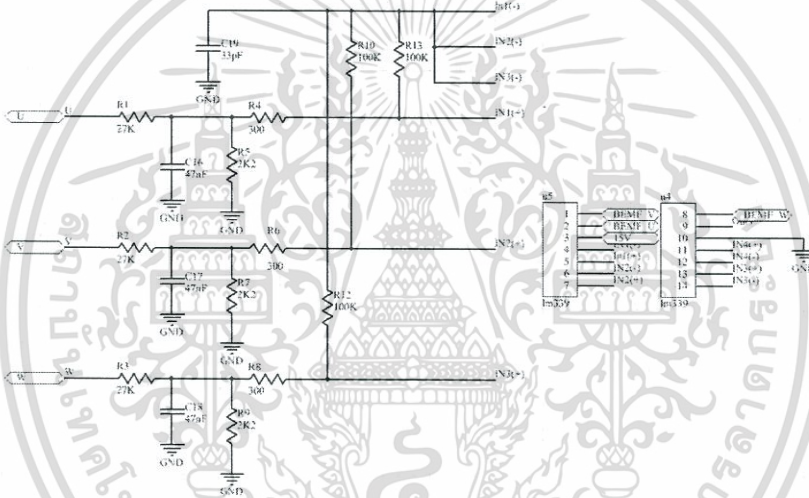
รูปที่ 3.8 ลำดับขั้นตอนในการทำงานของการสั่งงานมอเตอร์ไร้แปรงถ่าน

3.3.2 การขับมอเตอร์ไร้แปรงถ่านแบบไม่ใช้เซนเซอร์ระบุตำแหน่งโรเตอร์

เมื่อสามารถขับมอเตอร์ไร้แปรงถ่านโดยใช้เซนเซอร์ได้แล้วนั้นต่อไปจะเป็นการขับมอเตอร์ไร้แปรงถ่านแบบไม่ใช้เซนเซอร์ระบุตำแหน่ง โดยจะใช้สัญญาณแรงดันไฟฟ้าป้อนกลับ (Back EMF) โดยการจับสัญญาณที่เส้นสายไฟ 3 เฟส ที่เข้ามอเตอร์ นำมาต่อเข้ากับบอร์ดตรวจจับสัญญาณแรงดันไฟฟ้าป้อนกลับ โดยวงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้าป้อนกลับจะเป็นการเปรียบเทียบสัญญาณที่เข้ามาจากไฟ 3 เฟสของมอเตอร์กับกราวด์เสมือนที่สร้างขึ้นมา โดยกราวด์เสมือนที่สร้างขึ้นมานั้นจะเป็นลักษณะคล้ายๆ กับรูปที่ 3.9 นำสัญญาณทั้งสองเส้นที่มาจากกราวด์เสมือนกับสายไฟ 1 เฟสเข้าไปเปรียบเทียบสัญญาณกันโดยใช้ IC LM339N ทำแบบเดียวกันกับอีก 2 เฟสที่เหลือ สุดท้ายสัญญาณที่ได้ออกมาจะเป็นสัญญาณคล้ายๆ กับสัญญาณที่มาจากเซนเซอร์ระบุตำแหน่งโรเตอร์ แต่จะมีการเคลื่อนของสัญญาณนำมา 30 องศา ใช้ฟังก์ชันหน่วยเวลาไมโครคอนโทรลเลอร์



รูปที่ 3.9 วงจรตรวจจับสัญญาณแรงดันไฟฟ้าป้อนกลับ



รูปที่ 3.10 Schematic ของวงจรตรวจจับสัญญาณแรงดันไฟฟ้าป้อนกลับ

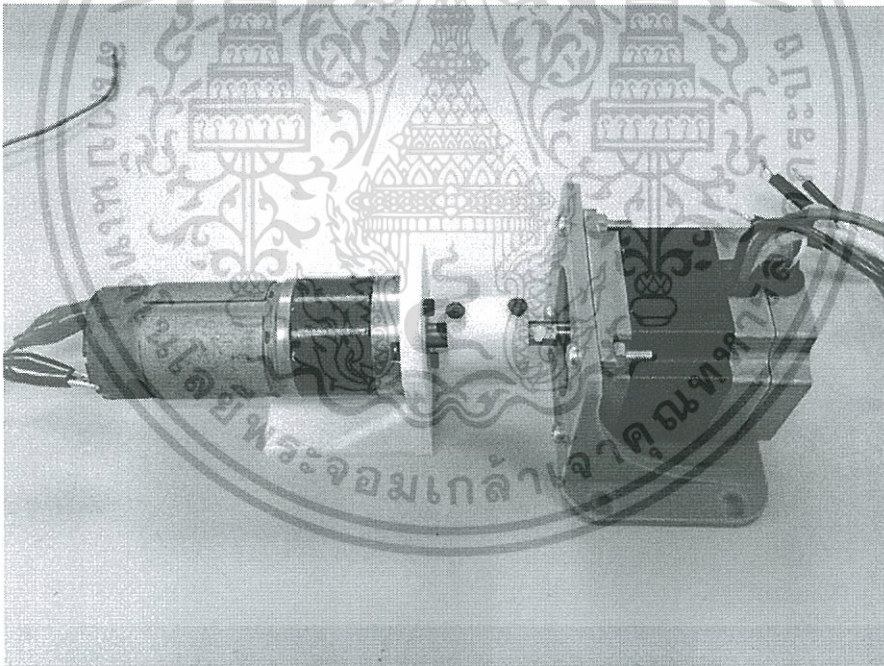
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

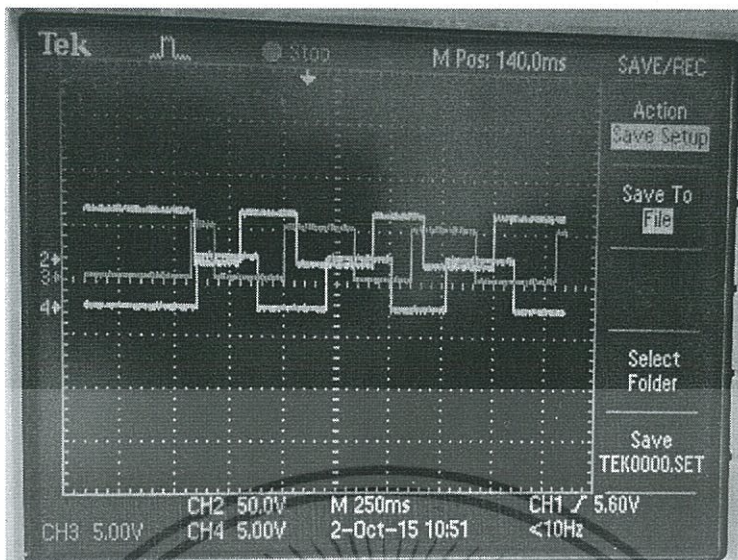
4.1 ตรวจวัดสัญญาณจาก Hall-sensor

เริ่มต้นก่อนที่จะสร้างสัญญาณมาเพื่อขับมอเตอร์ ให้หมุนได้แบบใช้เซนเซอร์ระบุตำแหน่งโรเตอร์ได้นั้น จะต้องทำการตรวจจับและตรวจสอบสัญญาณที่มาจากเซนเซอร์ระบุตำแหน่งโรเตอร์เสียก่อน ว่าลำดับการทำงานของเซนเซอร์นั้นถูกต้องทำหลักการหรือเปล่า ในการทดลองนี้จะนำมอเตอร์กระแสตรงมีแปรงถ่านมาต่อเพื่อขับให้มอเตอร์ไร้แปรงถ่าน ที่ทำการทดลองภายนอกเพื่อขับให้หมุนจะเกิดสัญญาณจากเซนเซอร์เกิดขึ้น สัญญาณที่เกิดขึ้นมานั้นเป็นสัญญาณที่โรเตอร์ได้ตัดผ่านเซนเซอร์ เมื่อนำ Oscilloscope มาตรวจจับจะได้สัญญาณตามรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ขับมอเตอร์ไร้แปรงถ่านจากมอเตอร์กระแสตรงภายนอก

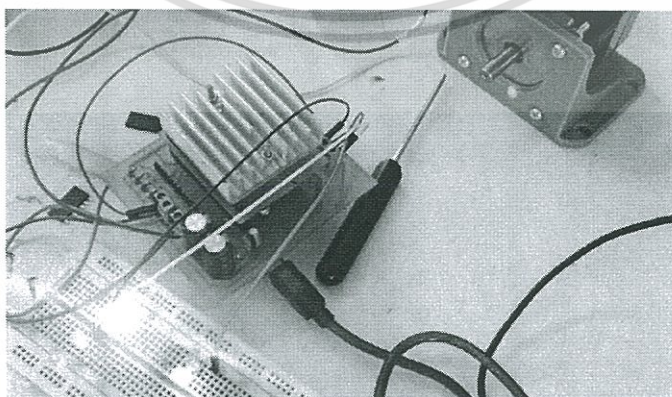
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 สัญญาณจาก Hall-sensor วัดสัญญาณโดย Oscilloscope

สัญญาณที่ได้รับจาก Hall-sensor นั้น เมื่อใช้ Oscilloscope ตรวจสอบสัญญาณได้ผลออกมาตามรูปที่ 4.1 โดยเส้นสีฟ้าเป็นเส้นเซนเซอร์ระบุตำแหน่งโรเตอร์ a เส้นสีม่วงเป็นเส้นเซนเซอร์ระบุตำแหน่งโรเตอร์ b และเส้นสีเขียวเป็นเส้นเซนเซอร์ระบุตำแหน่งโรเตอร์ c โดยลำดับการทำงานเมื่อนำมาเทียบกับทฤษฎีที่ได้อ่านข้างต้นในบทที่ 2 นั้น มีลำดับการทำงานถูกต้องคือ มีลำดับการทำงานสอดคล้องกันทั้งสามเส้น สามารถนำสัญญาณที่มาจากเซนเซอร์ระบุตำแหน่งโรเตอร์มาใช้ในการสั่งงานมอเตอร์ไร้แปรงถ่านให้ทำงาน

4.2 ทดลองใช้โปรแกรมที่เขียนขึ้นมา นำมาทดสอบกับหลอดไฟ LED ก่อนที่จะนำไปทดสอบจริงกับ BLDC Motor

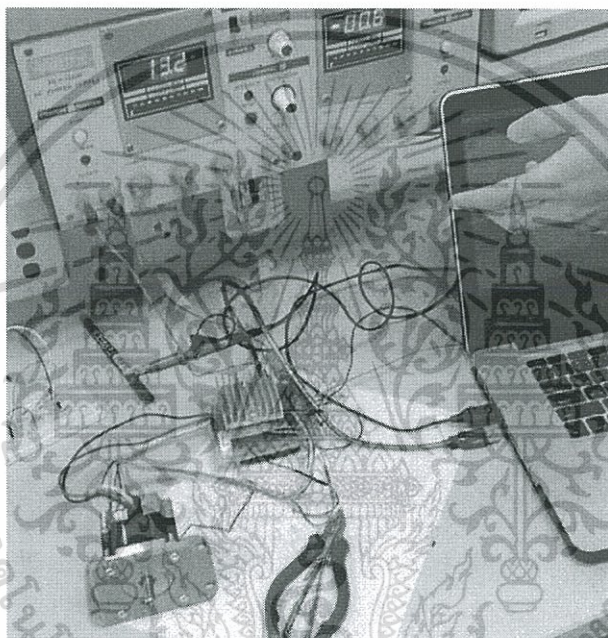


รูปที่ 4.3 ทดลองต่อวงจรขับมอเตอร์กับหลอด LED

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

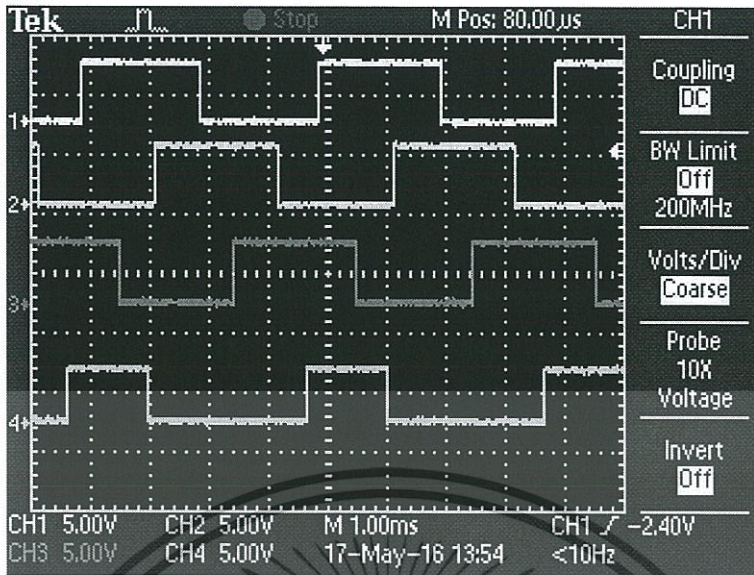
จากโปรแกรมที่กล่าวไปในบทที่ 3 นั้น สามารถนำสัญญาณจาก Hall-sensor นำมาสร้างเป็นเงื่อนไขในการสั่งให้ IGBT ให้เปิดทำงานตามที่ต้องการ จากการตรวจสอบการทำงานของ LED นั้นที่จำลองสายไฟ 3 เฟส ของ BLDC Motor ขึ้นมา มีการทำงานที่ถูกต้อง การติด-ดับ สลับกัน และทำการตรวจสอบรวมกับการ Monitor ที่โปรแกรมตรวจสอบการทำงานที่สอดคล้องกันระหว่างสัญญาณจาก Hall-sensor และการติด-ดับ ของหลอด LED

4.3 ทำการทดลองวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์และโปรแกรมกับ BLDC Motor

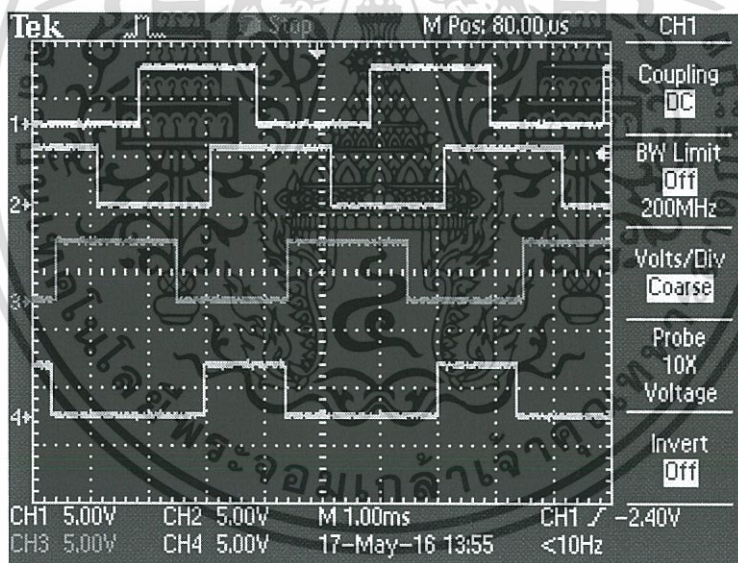


รูปที่ 4.4 ทดลองต่อวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์กับมอเตอร์

เมื่อนำ BLDC Motor มาทดสอบกับวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์และโปรแกรมที่ได้ทำการเขียนเอาไว้ หลังจากนั้นทำการวัดสัญญาณโดยใช้ Oscilloscope วัดการทำงานที่ขาของไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ส่งไปยังวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ แต่ละขากับสัญญาณของ Hall-sensor ว่ามีการทำงานที่สอดคล้อง และถูกต้องหรือไม่ ผลการวัดที่ได้มีดังต่อไปนี้

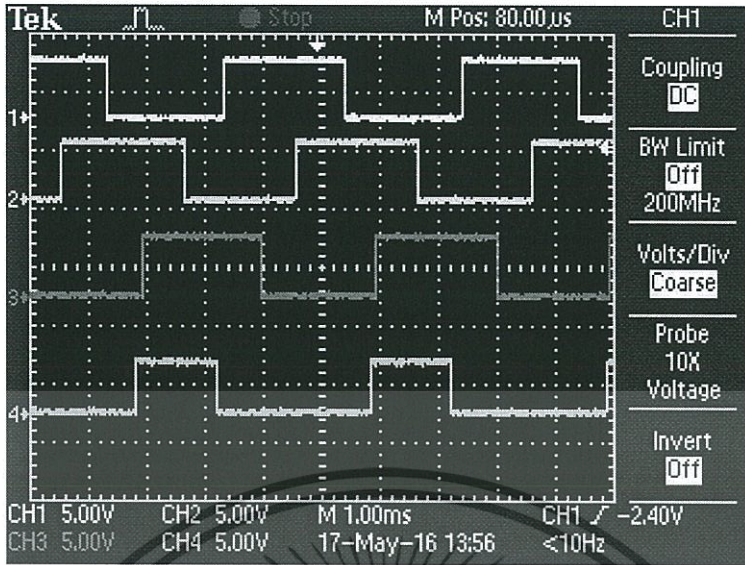


รูปที่ 4.5 High-side U (ไมโครคอนโทรลเลอร์ชาติ 9)

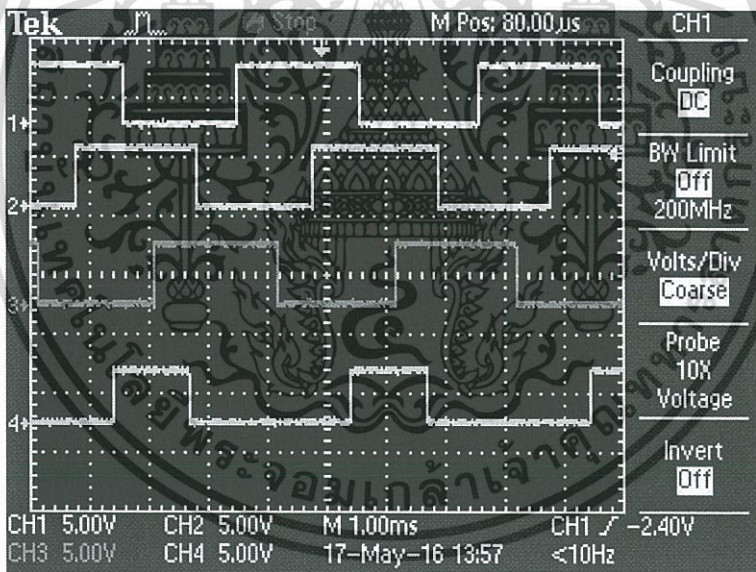


รูปที่ 4.6 High-side V (ไมโครคอนโทรลเลอร์ชาติ 10)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

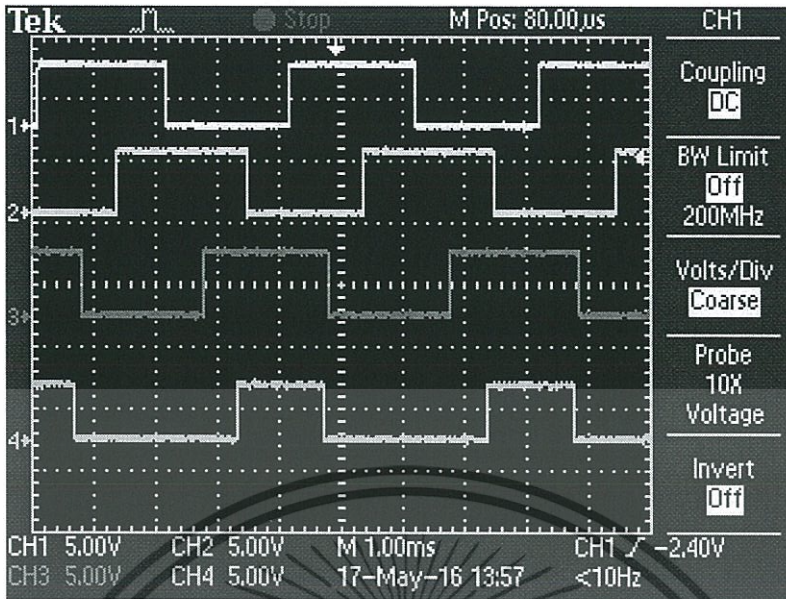


รูปที่ 4.7 High-side W (ไมโครคอนโทรลเลอร์ชาติ 11)

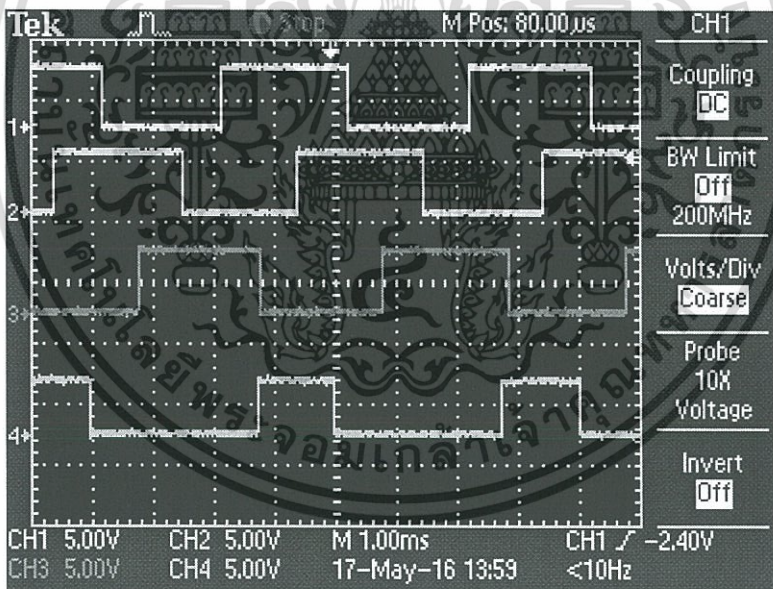


รูปที่ 4.8 Low-side U (ไมโครคอนโทรลเลอร์ชาติ 3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 Low-side V (ไมโครคอนโทรลเลอร์ชาติ 5)



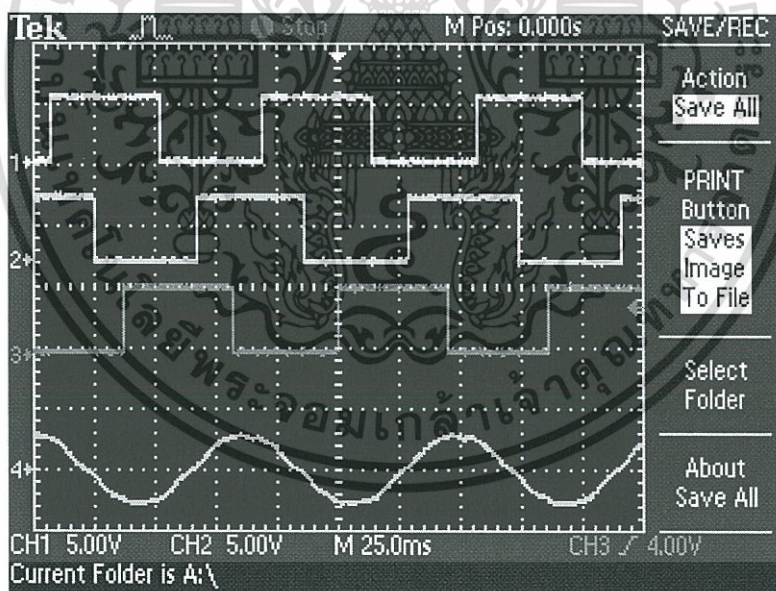
รูปที่ 4.10 Low-side W (ไมโครคอนโทรลเลอร์ชาติ 6)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.5 ถึง รูปที่ 4.10 ที่ได้จากการทดลองนั้น เมื่อนำมาตรวจเช็คความสัมพันธ์ของ Hall-sensor กับสัญญาณของไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ส่งออกไปแต่ละขา เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับรูปที่ 2.4 ปรากฏว่าตรงกัน อย่างเช่น ที่ Hall-sensor Code 001 เฟส U เป็นแรงดันบวก เฟส V เป็นแรงดันลบ ส่วนเฟส W แรงดันเป็นศูนย์ แสดงว่าต้องมีสัญญาณจากไมโครคอนโทรลเลอร์มาสั่งให้ขา High-side U และ Low-side V ทำงานพร้อมกัน เป็นต้น

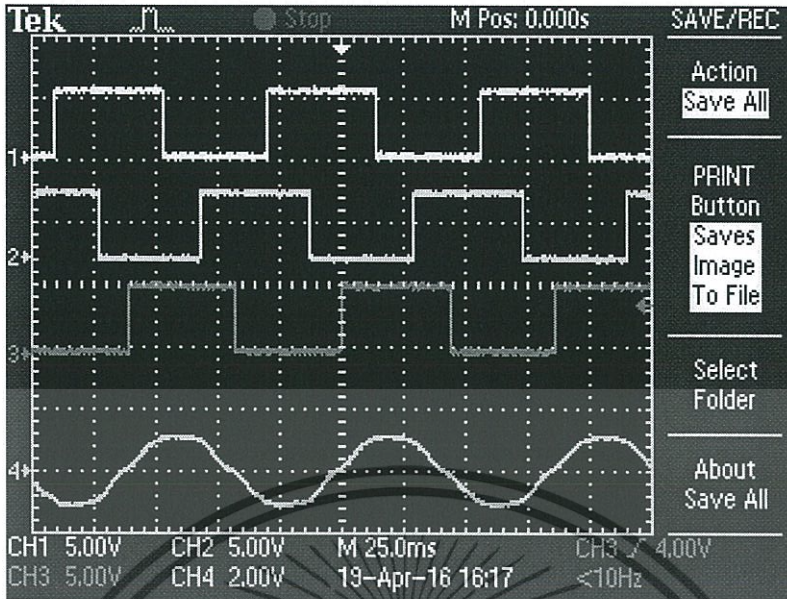
4.4 ตรวจจับสัญญาณ Zero Crossing ของแรงดันไฟฟ้าป้อนกลับ (Back EMF)

ตรวจจับสัญญาณของแรงดันไฟฟ้าป้อนกลับที่จะใช้ในการระบุตำแหน่งของโรเตอร์แทนเซนเซอร์ระบุตำแหน่งโรเตอร์ เพื่อหาช่วงที่กราฟตัดผ่านเส้น 0 เรียกว่า Zero Crossing ทำการตรวจสอบทั้ง 3 เฟสเพื่อความถูกต้องว่าสัญญาณที่จะใช้ว่าตรงกับขอบขาขึ้นของสัญญาณเซนเซอร์ระบุตำแหน่ง a, b และ c ดังรูปที่ 4.11, รูปที่ 4.12 และรูปที่ 4.13

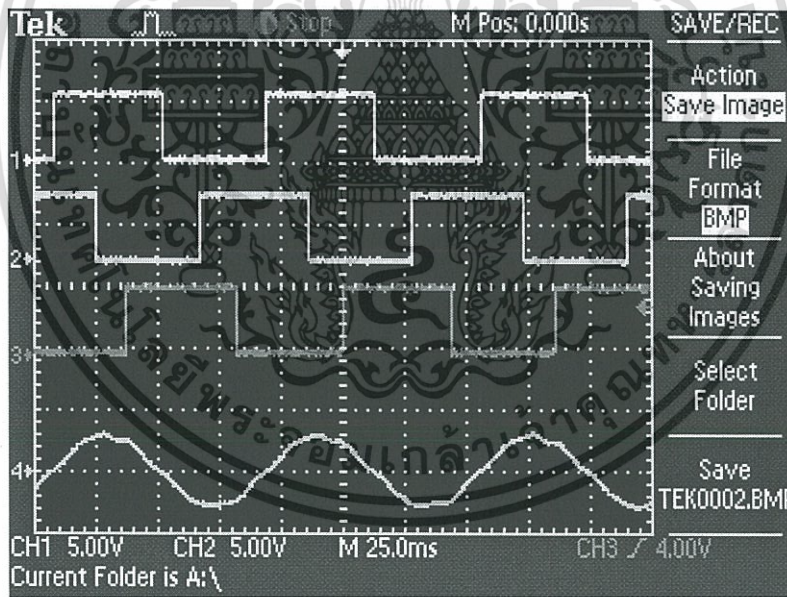


รูปที่ 4.11 สัญญาณ Back EMF ของเฟส U และ V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 สัญญาณ Back EMF ของเฟส V และ W

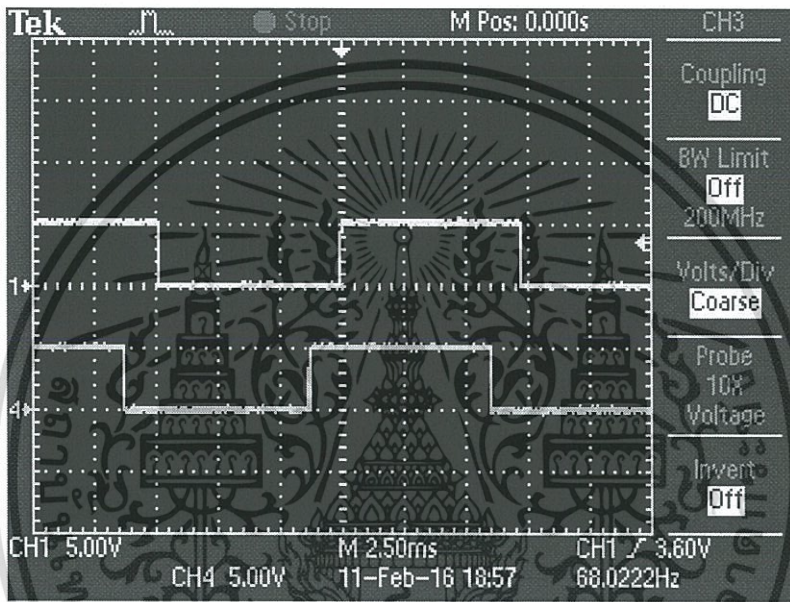


รูปที่ 4.13 สัญญาณ Back EMF ของเฟส W และ U

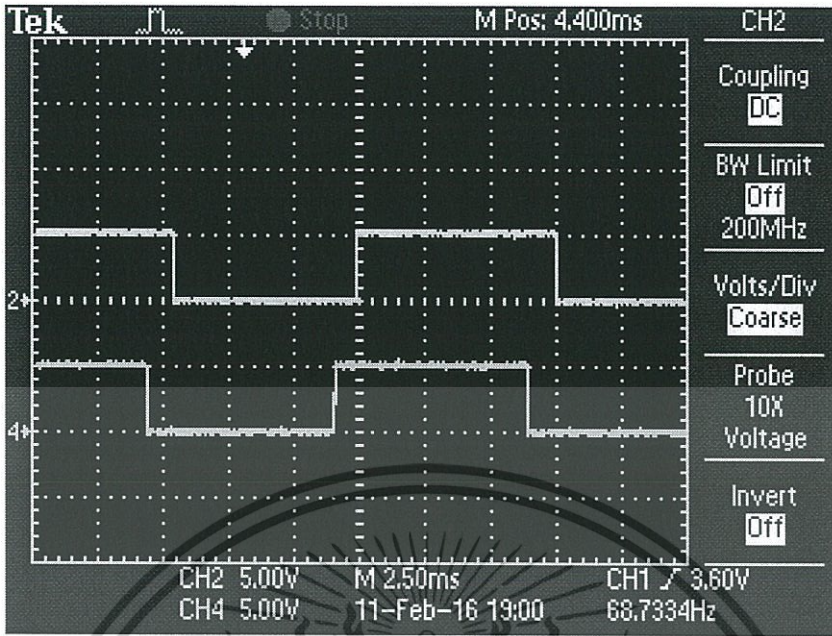
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 ตรวจสอบสัญญาณของแรงดันไฟฟ้าป้อนกลับที่ออกมาจากบอร์ดเปรียบสัญญาณแรงดันไฟฟ้าป้อนกลับ

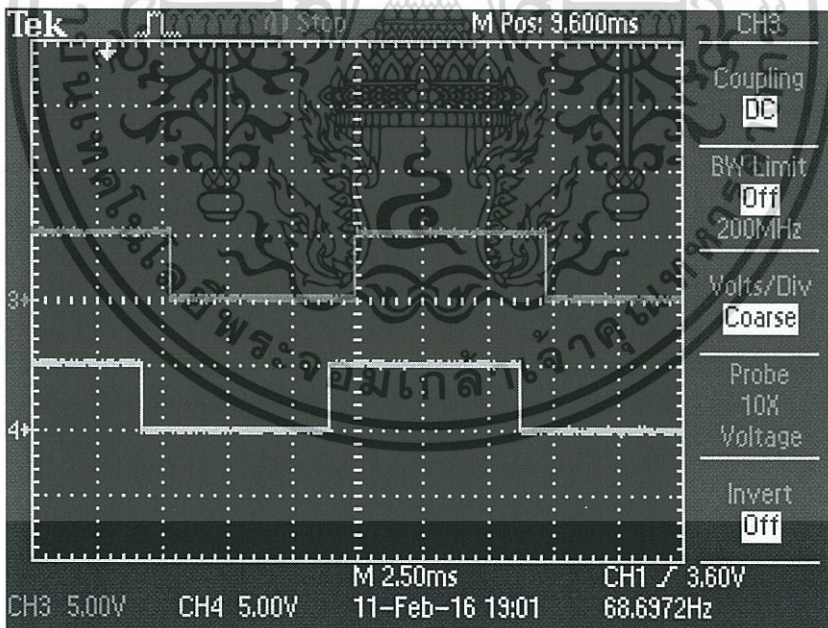
เมื่อตรวจสอบสัญญาณแรงดันไฟฟ้าป้อนกลับแต่ละเฟสแล้วมีความถูกต้อง สามารถนำมาใช้ได้ในกระบวนการระบุตำแหน่งของโรเตอร์ นำสัญญาณทั้ง 3 เฟสมาเข้าบอร์ดตรวจสอบแรงดันไฟฟ้าป้อนกลับ ดังที่ได้กล่าวมาในบทที่ 3 และนำสัญญาณที่ได้มาเปรียบเทียบกับสัญญาณที่มาจากเซนเซอร์ระบุตำแหน่งโรเตอร์แต่ละเฟสว่าสัญญาณที่ออกมานั้นมีความถูกต้องหรือแตกต่างกันอย่างไร



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ของสัญญาณที่มาจากเซนเซอร์ระบุตำแหน่งโรเตอร์กับบอร์ดเปรียบเทียบสัญญาณแรงดันไฟฟ้าป้อนกลับ ของเฟส U



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ของสัญญาณที่มาจากเซนเซอร์ระบุตำแหน่งโรเตอร์กับบอร์ดเปรียบเทียบสัญญาณแรงดันไฟฟ้าป้อนกลับของเฟส V

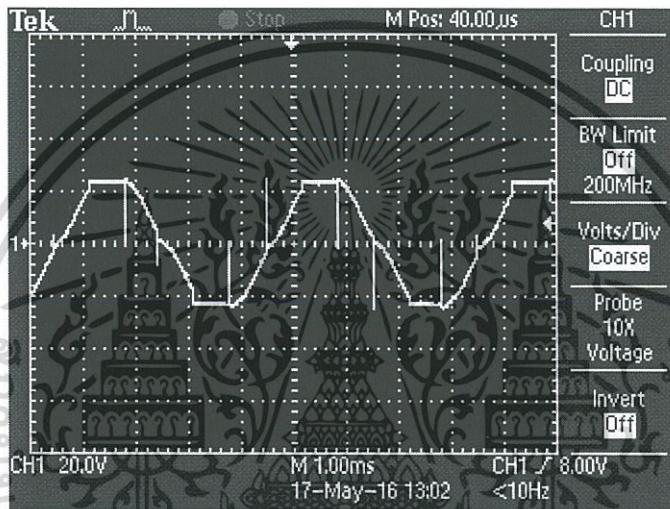


รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ของสัญญาณที่มาจากเซนเซอร์ระบุตำแหน่งโรเตอร์กับบอร์ดเปรียบเทียบสัญญาณแรงดันไฟฟ้าป้อนกลับของเฟส W

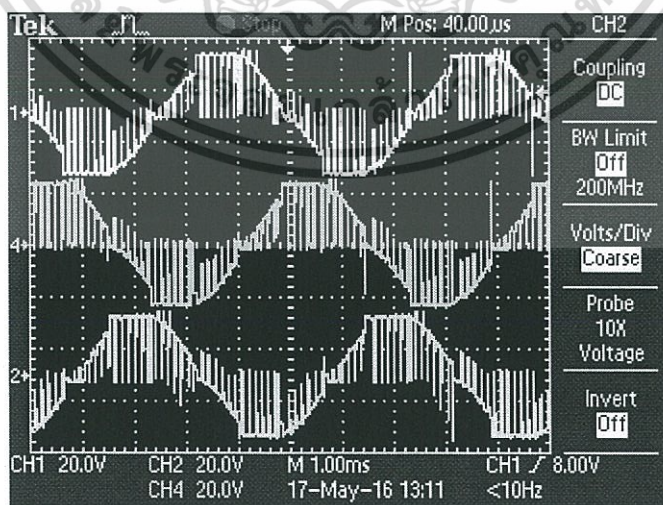
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสัญญาณที่เปรียบระหว่างเซนเซอร์ระบุตำแหน่งโรเตอร์กับบอร์ดเปรียบเทียบสัญญาณแรงดันไฟฟ้าป้อนกลับออกมานั้น จะสังเกตได้ว่าสัญญาณที่ได้จากบอร์ดเปรียบเทียบสัญญาณแรงดันไฟฟ้าป้อนกลับจะนำสัญญาณที่มาจากเซนเซอร์ระบุตำแหน่งโรเตอร์ 30 องศา

เมื่อนำสัญญาณที่ได้จากบอร์ดเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าป้อนกลับมาเขียนคำสั่งในการห้วงเวลาในไมโครคอนโทรลเลอร์ และเขียนคำสั่งขับมอเตอร์ให้มอเตอร์ไร้แปรงถ่านทำงาน และทำการตรวจจับสัญญาณจะได้ผลดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.17 สัญญาณที่เฟส U และ V ของมอเตอร์ไร้แปรงถ่าน



รูปที่ 4.18 สัญญาณที่เฟส U-V, V-W และ W-U ของมอเตอร์ไร้แปรงถ่าน

โดยปรับ Duty Cycle ของสัญญาณที่ไปให้บอร์ดขับมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้ศึกษาการทำงานและวิธีการขับของมอเตอร์กระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน (BLDC Motor) เพื่อสร้างวงจรขับที่มีราคาถูกลงกว่าท้องตลาด แต่ยังคงประสิทธิภาพได้เทียบเท่า ผลจากการศึกษาในปริญญานิพนธ์สามารถสรุปได้ดังนี้

1. วงจรขับที่สร้างขึ้นเองนั้น สามารถขับมอเตอร์ให้หมุนได้จริง
2. ในการระบุตำแหน่งโรเตอร์ สามารถใช้สัญญาณ Back EMF แทนการใช้ Hall-sensor นอกจากนี้ยังสามารถใช้สัญญาณ Back EMF ในการวัดความเร็วรอบมอเตอร์ได้
3. ในการปรับความเร็วของมอเตอร์ สามารถปรับได้โดยเทคนิค Pulse Width Modulate (PWM) เพื่อปรับแรงดันสำหรับจ่ายให้มอเตอร์

5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนาต่อ

วงจรขับ BLDC Motor นี้ยังข้อจำกัดหลายๆ อย่าง ได้แก่ วงจรขับนี้สามารถทำได้เพียง First Quadrant Operation ซึ่งหมายความว่าสามารถสั่งงานให้ให้มอเตอร์หมุนไปได้แค่ทิศทางใดทิศทางหนึ่งเท่านั้น ไม่สามารถสั่งให้มอเตอร์หมุนไปกลับได้ และการควบคุมยังทำได้เพียง Open-loop Control คือ เมื่อโหลดเปลี่ยนแปลง รอบมอเตอร์ก็จะเปลี่ยนไปด้วย ไม่สามารถรักษาระดับความเร็วให้คงที่ได้

ในการพัฒนาต่อ จะเป็นการแก้ปัญหาเหล่านี้ เพื่อให้วงจรขับมีความสามารถเทียบเท่าท้องตลาด และสามารถประยุกต์ใช้ BLDC Motor ในทางปฏิบัติได้อย่างสมบูรณ์

เอกสารอ้างอิง

- [1] Padmaraja Yedamale, Microchip Technology Inc., “Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals”
- [2] Jianwen Shao, “Direct Back EMF Detection Method for Sensorless Brushless DC (BLDC) Motor Drives” [dissertation], VA: Virginia Polytechnic Institute and the University, 2000
- [3] Joseph Julicher, Dieter Peter , Microchip Technology Inc., “Sensorless Brushless DC Motor control with PIC16”



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

โปรแกรมคำสั่งที่ใช้ในการเขียนให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ให้ทำงาน โดยใช้โปรแกรม Atmel Studio 6.2

```

#include<avr/io.h>
#include<avr/interrupt.h>
#include<util/delay.h>

#define in1 4
#define in2 5
#define in3 6
#define in4 30

int state,timecount=0,timecountpre=500;
int sp=50,flag=0,m=0,de=50;
int speedmotor;
volatile unsigned int change_flag = 0 ,next_flag = 0,changeflag = 0 ;
unsigned long current_time,hz_count=0;
unsigned long next_time = 0;
unsigned long currentMillis;
const long interval = 1000;
char tmp[10];

unsigned char a;
unsigned char b;
unsigned char c;
int d=0,speedva=0,e=0;

int ana=50,anaj=0;
unsigned char prerun;
int step=0;

void hi_1(unsigned char speed);
void hi_2(unsigned char speed);
void hi_3(unsigned char speed);
void low_1(unsigned char speed);
void low_2(unsigned char speed);
void low_3(unsigned char speed);

uint8_t adc_read(uint8_t ch)
{
    ADMUX=ch | (0x60 & 0xff);
    // Start the AD conversion
    ADCSRA|=0x40;
    // Wait for the AD conversion to complete
    while ((ADCSRA & 0x10)==0);
    ADCSRA|=0x10;
    return ADCH;
}

void ADC_inti(){

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

// Analog Comparator initialization
// Analog Comparator: Off
// Analog Comparator Input Capture by Timer/Counter 1: Off
ACSR=0x80;

// ADC initialization
// ADC Clock frequency: 1000.000 kHz
// ADC Voltage Reference: AREF pin
ADMUX=0x60 & 0xff;
ADCSRA=0x83;
}

int main(){

ADC_inti();

pinMode(in1,INPUT_PULLUP);
pinMode(in2,INPUT_PULLUP);
pinMode(in3,INPUT_PULLUP);
pinMode(in4,INPUT_PULLUP);

pinMode(10,INPUT_PULLUP); //BEMFU
pinMode(9,INPUT_PULLUP); //BEMFV
pinMode(13,INPUT_PULLUP); //BEMFW

//pinMode(8,OUTPUT); Hi_in1
//pinMode(11,OUTPUT); Hi_in2
//pinMode(12,OUTPUT); Hi_in3
//pinMode(2,OUTPUT); Low_in1
//pinMode(3,OUTPUT); Low_in2
//pinMode(7,OUTPUT); Low_in3

DDRB |= 0b01100000;
DDRD |= 0b00000000;
DDRE |= 0b00110000;
DDRH |= 0b00110000;

TCCR0A |= 0b00000011;
TCCR0B |= 0b00000010;

TCCR1A |= 0b00000010;
TCCR1B |= 0b00011010;
TCCR3A |= 0b00000010;
TCCR3B |= 0b00011010;
TCCR4A |= 0b00000010;
TCCR4B |= 0b00011010;
TCCR5A |= 0b00000010;
TCCR5B |= 0b00011010;

TCCR2A |= 0b00000011;
TCCR2B |= 0b00000010;
ICR1 = 0xFF;
ICR3 = 0xFF;
ICR4 = 0xFF;
ICR5 = 0xFF;
//
TCNT0 = 0;
TCNT1 = 0;
TCNT2 = 0;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

TCNT3 = 0;
TCNT4 = 0;
TCNT5 = 0;

int n=0;

while(1)
{
    a = digitalRead(in1);
    b = digitalRead(in2);
    c = digitalRead(in3);
    d = analogRead(A8);

//    if(ana<40) n=100;
//    if(ana>41 && ana<45) n=0;
//

    if(e==0)
    {
        if(timecount-timecountpre==20)
        {
            timecountpre=timecount;
            if(ana<d/4) ana++;
            if(ana==d/4) e++;
        }
    }
    if(e>=1)
    {
        ana=d/4;
        if(ana<30) ana=30;
    }

    prerun = 40;

    int BEMF1=digitalRead(10);
    int BEMF2=digitalRead(9);
    int BEMF3=digitalRead(13);

    float delaytime = 85*30000.0/(speedmotor*4.0*6.0) ;

    if(flag == 1)
    {
        change_flag++;
        flag = 0;
    }

    if(change_flag == next_flag)
    {
        hz_count++;
        next_flag = change_flag + 1 ;
    }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

if(next_flag >= 7) next_flag = 1;

current_time = millis();

if(current_time - next_time >= interval) // if it's complete 1 second
{
    speedmotor = hz_count*60/24;
    next_time = current_time;
    hz_count = 0;
}

if(n<1)
{
    if( changeflag = 0 ) // sensor=001
    {
        hi_1(0);
        hi_2(0);
        hi_3(prerun);
        low_1(0);
        low_2(255);
        low_3(0);
        changeflag = 1;
        _delay_ms(10);
    }
    if( changeflag = 1 ) // sensor=101
    {
        hi_1(prerun);
        hi_2(0);
        hi_3(0);
        low_1(0);
        low_2(255);
        low_3(0);
        changeflag = 2;
        _delay_ms(10);
    }
    if( changeflag = 2 ) // sensor=100
    {
        hi_1(prerun);
        hi_2(0);
        hi_3(0);
        low_1(0);
        low_2(0);
        low_3(255);
        changeflag = 3;
        _delay_ms(10);
    }
    if( changeflag = 3 ) // sensor=110
    {
        hi_1(0);
        hi_2(prerun);
        hi_3(0);
        low_1(0);
        low_2(0);
        low_3(255);
        changeflag = 4;
    }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        _delay_ms(10);

    }
    if( changeflag = 4 ) // sensor=010
    {
        hi_1(0);
        hi_2(prerun);
        hi_3(0);
        low_1(255);
        low_2(0);
        low_3(0);
        changeflag = 5;
        _delay_ms(10);
    }
    if( changeflag = 5 ) // sensor=011
    {
        hi_1(0);
        hi_2(0);
        hi_3(prerun);
        low_1(255);
        low_2(0);
        low_3(0);
        changeflag = 0;
        _delay_ms(10);

        //if(speedmotor>=sp && speedmotor<=sp+500)
        n++;
        // Serial.print("
n===== ");
        // Serial.println(n);
    }
}
{
    if(n>=1 && n<=20)

        if(BEMF1==1 && BEMF2==0 && BEMF3==1) state=1;
        if(BEMF1==1 && BEMF2==0 && BEMF3==0) state=2;
        if(BEMF1==1 && BEMF2==1 && BEMF3==0) state=3;
        if(BEMF1==0 && BEMF2==1 && BEMF3==0) state=4;
        if(BEMF1==0 && BEMF2==1 && BEMF3==1) state=5;
        if(BEMF1==0 && BEMF2==0 && BEMF3==1) state=6;
        //*****state1*****

        if(state==1)
        {
            delay(delaytime);
            hi_1(ana);
            hi_2(0);
            hi_3(0);
            low_1(0);
            low_2(255);
            low_3(0);
            change_flag = 1;
        }

        //*****state2*****
        if(state==2)
        {

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        delay(delaytime);
        hi_1(ana);
        hi_2(0);
        hi_3(0);
        low_1(0);
        low_2(0);
        low_3(255);
        change_flag = 2;
    }

//*****state3*****
if(state==3)
{
    delay(delaytime);
    hi_1(0);
    hi_2(ana);
    hi_3(0);
    low_1(0);
    low_2(0);
    low_3(255);
    change_flag = 3;
}

//*****state4*****
if(state==4)
{
    delay(delaytime);
    hi_1(0);
    hi_2(ana);
    hi_3(0);
    low_1(255);
    low_2(0);
    low_3(0);
    change_flag = 4;
}

//*****state5*****
if(state==5)
{
    delay(delaytime);
    hi_1(0);
    hi_2(0);
    hi_3(ana);
    low_1(255);
    low_2(0);
    low_3(0);
    change_flag = 5;
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

//*****state6*****
                                if(state==6)
                                {
                                    delay(delaytime);
                                    hi_1(0);
                                    hi_2(0);
                                    hi_3(ana);
                                    low_1(0);
                                    low_2(255);
                                    low_3(0);
                                    change_flag = 6;

                                    if(timecount<10000) timecount++;
                                }
}

else{
    hi_1(0);
    hi_2(0);
    hi_3(0);
    low_1(0);
    low_2(0);
    low_3(0);
}
}
}

void hi_1(unsigned char speed){
    if(speed > 0){
        PORTH |= (1<<5);
        TCCR4A |= 0b00001000;
        OCR4C = speed;
    }
    else{
        PORTH &= ~(1<<5);
        TCCR4A &= ~(0b00001000);
        OCR4C = 0;
    }
}

void hi_2(unsigned char speed){
    if(speed > 0){
        PORTB |= (1<<5);
        TCCR1A |= 0b10000000;
        OCR1A = speed;
    }
    else{
        PORTB &= ~(1<<5);
        TCCR1A &= ~(0b10000000);
        OCR2A = 0;
    }
}

void hi_3(unsigned char speed){

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

if(speed > 0){
    PORTB |= (1<<6);
    TCCR1A |= 0b00100000;
    OCR1B = speed;
}
else{
    PORTB &= ~(1<<6);
    TCCR1A &= ~(0b00100000);
    OCR1B = 0;
}
}

void low_1(unsigned char speed){
    if(speed > 0){
        PORTE |= (1<<4);
        TCCR3A |= 0b00100000;
        OCR3B = speed;
    }
    else{
        PORTE &= ~(1<<4);
        TCCR3A &= ~(0b00100000);
        OCR3B = 0;
    }
}

void low_2(unsigned char speed){
    if(speed > 0){
        PORTE |= (1<<5);
        TCCR3A |= 0b00001000;
        OCR3C = speed;
    }
    else{
        PORTE &= ~(1<<5);
        TCCR3A &= ~(0b00001000);
        OCR3C = 0;
    }
}

void low_3(unsigned char speed){
    if(speed > 0){
        PORTH |= (1<<4);
        TCCR4A |= 0b00100000;
        OCR4B = speed;
    }
    else{
        PORTH &= ~(1<<4);
        TCCR4A &= ~(0b00100000);
        OCR4B = 0;
    }
}
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้