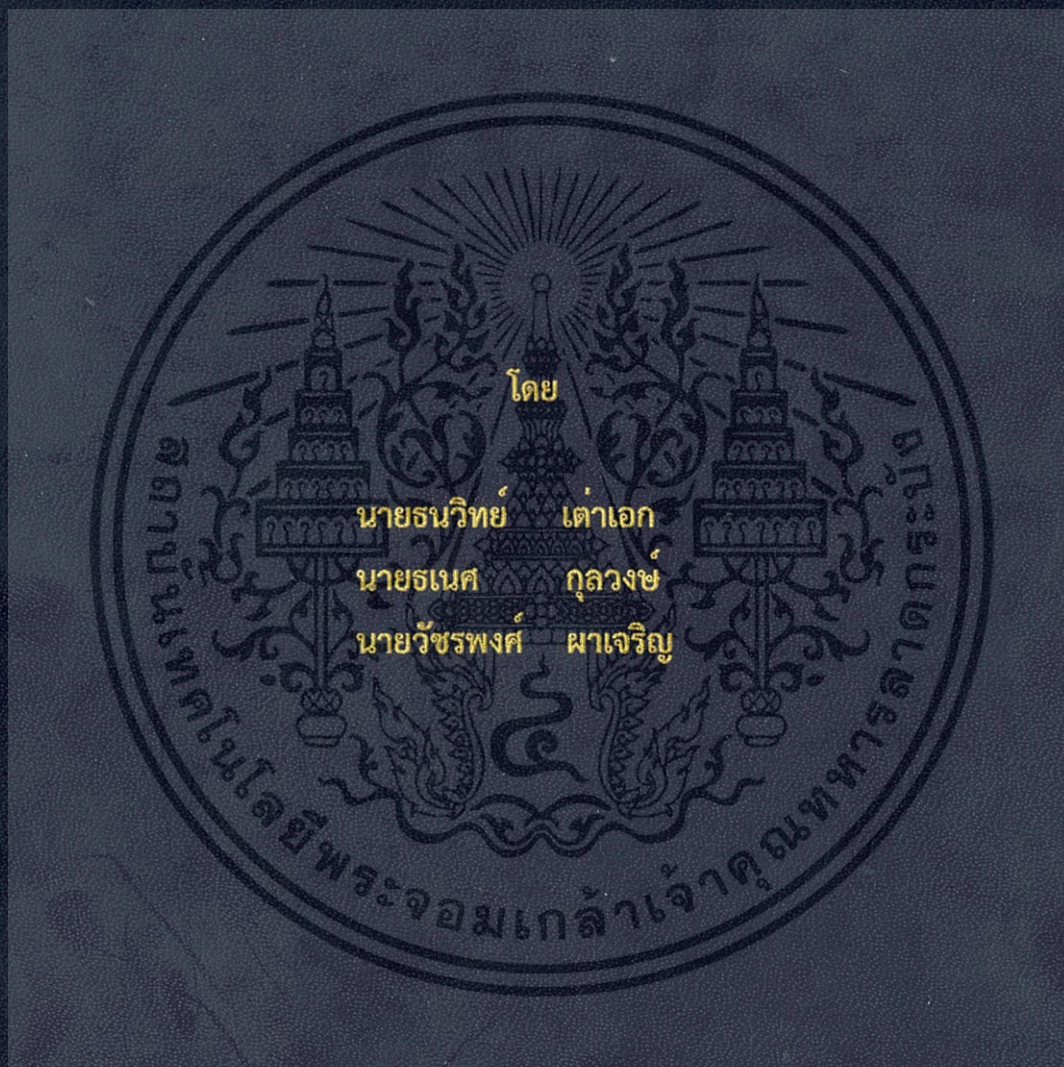


การแสดงผลแบบตอบสนองอย่างรวดเร็วของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน
FAST RESPONSE BLDC MONITORING SYSTEM



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2557

การแสดงผลแบบตอบสนองอย่างรวดเร็วของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน
FAST RESPONSE BLDC MONITORING SYSTEM



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FAST RESPONSE BLDC MONITORING SYSTEM



A PAPER SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF ELECTRICAL ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2014

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2557

การแสดงผลแบบตอบสนองอย่างรวดเร็วของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน
FAST RESPONSE BLDC MONITORING SYSTEM



อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ร.อ.ดร. วีระเชษฐ์ ชันเงิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2557

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การแสดงผลแบบตอบสนองอย่างรวดเร็วของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

ผู้จัดทำ

1. นาย ธนวิทย์ เต่าเอก
2. นาย ธเนศ กุลวงษ์
3. นาย วัชรพงศ์ ผาเจริญ



..........อาจารย์ที่ปรึกษา
(รศ.ร.อ.ดร. วีระเชษฐ์ ชันเงิน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแสดงผลแบบตอบสนองอย่างรวดเร็วของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

นาย ธนวิทย์	เต่าเอก
นาย ธเนศ	กุลวงษ์
นาย วัชรพงศ์	ผาเจริญ
รศ.ร.อ.ดร.วีระเชษฐ์	ชั้นเงิน อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2557	

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของการจัดทำโครงการนี้เพื่อนำเสนอการออกแบบและสร้างชุดควบคุม และแสดงผลการตอบสนองแบบรวดเร็วสำหรับมอเตอร์กระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน (Brushless DC Motor) สามารถใช้ทดสอบประสิทธิภาพมอเตอร์และเก็บข้อมูลโดยใช้อุปกรณ์ทดสอบเพียงชุดเดียว ซึ่งก็คือชุดทดสอบการตอบสนองแบบรวดเร็วของมอเตอร์กระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน ซึ่งมอเตอร์กระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านมีจุดเด่นคือประสิทธิภาพสูงกว่ามอเตอร์กระแสตรงทั่วไป ซึ่งมอเตอร์กระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านมีพารามิเตอร์ที่ต้องใช้ในการวิเคราะห์จำนวนมาก เช่น สัญญาณแรงดันเฟส (Phase Voltage), แรงดันระหว่างเฟส (Line-Line Voltage) เป็นต้น ซึ่งต้องใช้อุปกรณ์ในการวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆจำนวนมาก ทำให้ยุ่งยากต่อการเคลื่อนย้ายและทดสอบ จึงได้มีการคิดค้นและสร้างชุดทดสอบที่สามารถเก็บค่าพารามิเตอร์ได้ภายในชุดทดสอบเดียว ง่ายต่อการเคลื่อนย้ายและสะดวกต่อการทดลอง และมีความแม่นยำใกล้เคียงกับเครื่องมือวัดที่ขายตามท้องตลาด อีกทั้งยังสามารถแสดงคุณลักษณะของสัญญาณได้อย่างแม่นยำ

FAST RESPONSE BLDC MONITORING SYSTEM

Thanawit Tao-ek
Tanet Kulwong
Watcharapong Phacharoen
Assoc.Prof.Dr.WerachetKhan-ngern
AdvisorYear 2014

ABSTRACT

The objective of this paper aims to provide the design of controller and show the fast response of Brushless DC Motor. In addition, it can use to test the efficiency of motor and collect data by only one tool. That is that is a fast response BLDC monitoring tool. The strength of this motor has higher ability than others and it can have many parameters to analyze such as Phase Voltage, Line-Line Voltage and etc. We found that it was difficult and complicated to measure too many parameters, in order to do so, many equipments are needed. So we created and made up the tool that can memorize all parameters which is accessible and convenient to use, also the accuracy and reliability monitoring were almost equal to the tools that available in market.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือจากหลายๆท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง รศ.ร.อ.ดร.วีระเชษฐ์ ชันเงิน อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้กรุณาให้ข้อเสนอแนะและข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อโครงงานมาด้วยดีตลอด และได้กรุณาตรวจแก้ไข ปริญญานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อยเป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณ อาจารย์และเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำที่ดีมาโดยตลอด

ท้ายนี้คณะผู้จัดทำ ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา และครอบครัวซึ่งให้การสนับสนุนในด้านการเงินและให้กำลังใจอีกทั้งเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านการจัดหาอุปกรณ์ต่างๆ ในการทำโครงงานครั้งนี้จนสำเร็จได้ด้วยดี จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูปภาพ	VII
สารบัญตาราง	X
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	1
1.3 ขอบเขตการดำเนินงาน	1
1.4 แผนการดำเนินโครงการ	2
1.5 ตารางการดำเนินงาน	2
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ทฤษฎีมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไม่มีแปรงถ่าน	3
2.1.1 Stator ของ BLDC	3
2.1.2 Rotor ของ BLDC	4
2.1.3 Hall effect sensor	5
2.1.4 ลักษณะของแรงบิดและความเร็วมอเตอร์กระแสตรงชนิดไม่มีแปรงถ่าน	6
2.1.5 หลักการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงชนิดไม่มีแปรงถ่าน	6
2.1.6 สรุปข้อดีข้อเสียของมอเตอร์กระแสตรงชนิดไม่มีแปรงถ่าน	11
2.1.7 ข้อจำกัดของมอเตอร์กระแสตรงชนิดไม่มีแปรงถ่าน	11
2.2 อินเวอร์เตอร์	12
2.2.1 แนวคิดพื้นฐานของสวิตซ์โหมดอินเวอร์เตอร์	12
2.2.2 การสวิตซ์แบบพีดับเบิลยูเอ็ม	14
2.2.3 การสวิตซ์แรงดันไฟฟ้าแบบยูนิโพลาร์	14
2.2.4 อินเวอร์เตอร์สามเฟสเมื่อทำงานในย่านรูปคลื่นสี่เหลี่ยม	15
2.2.5 อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบขั้นบันได	16
2.2.6 วงจรกำลังของอินเวอร์เตอร์	18
2.2.7 วงจรขับ	22
2.2.8 การออกแบบวงจรขับเกตสำหรับมอสเฟตกำลัง	22
2.2.9 Voltage Divider	27
2.2.10 Current Sensor	27
2.3 ไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F2010	28
2.3.1 อินเทอร์รัปต์ภายนอกและคุณสมบัติ CN	28
2.3.2 การใช้งานโมดูลแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอล	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3	การใช้งานโมดูล MCPWM	30
2.3.3.1	คุณสมบัติที่สำคัญของโมดูล MCPWM	30
2.4	ไมโครคอนโทรลเลอร์ ATmega 2560	30
2.4.1	การใช้งาน Atmega 2560 ในโมดูล Arduino Mega 2560	31
บทที่ 3	การออกแบบและสร้างระบบการทำงานของชุดการแสดงผลแบบเรียลไทม์ของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน	33
3.1	ขั้นตอนการทำงานของชุดการแสดงผลแบบเรียลไทม์ของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน	33
3.1.1	ลักษณะการออกแบบ	33
3.1.2	การแสดงผลข้อมูล	34
3.2	โมเดลจำลองการทำงานของชุดขับมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน	34
3.3	การออกแบบวงจรขับมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านและวงจรเซ็นเซอร์	38
3.3.1	วงจรไฟเลี้ยง	38
3.3.2	วงจรเซ็นเซอร์	39
3.3.2.1	การออกแบบเซ็นเซอร์แรงดัน	40
3.3.2.2	การออกแบบวงจรเซ็นเซอร์กระแส	41
3.3.3	วงจรขับมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน	42
3.4	การออกแบบส่วนประมวลผลและแสดงผล	44
3.4.1	การแสดงผลผ่านจอ LCD 20 x 4	45
3.4.2	การแสดงผลผ่านคอมพิวเตอร์	45
3.4.3	การประมวลผล	46
3.4.4	การคำนวณพารามิเตอร์ที่ใช้แสดงผล	48
3.4.4.1	การคำนวณค่าพารามิเตอร์โดยการแสดงผลผ่านจอแอลซีดี	48
3.4.4.2	การคำนวณค่าพารามิเตอร์ที่แสดงผลผ่านคอมพิวเตอร์	49
3.5	ชุดแสดงผลแบบตอบสนองฉับไวของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน	50
บทที่ 4	ผลการทดลอง	51
4.1	การออกแบบการทดสอบมอเตอร์กระแสตรง	51
4.1.1	อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวัดประสิทธิภาพของวงจรขับมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน	51
4.1.2	การออกแบบวิธีการทดสอบ	51
4.2	การทดสอบความแม่นยำด้วยการแสดงผลจากจอแอลซีดี	53
4.3	การทดสอบความแม่นยำในการแสดงผลผ่านคอมพิวเตอร์	55
4.3.1	การทดสอบความแม่นยำในการแสดงผลผ่านคอมพิวเตอร์โดยใช้ภาระทางกล 3 กิโลกรัม	56
4.4	การทดสอบหาค่าคุณสมบัติของมอเตอร์เพื่อดูแนวโน้มคุณสมบัติแรงบิดและประสิทธิภาพของมอเตอร์	61
4.5	การทดสอบเพื่อหาประสิทธิภาพของวงจรขับมอเตอร์	64

บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	66
เอกสารอ้างอิง	68
ภาคผนวก	69
ภาคผนวก ก บทความทางวิชาการ	70
ภาคผนวก ข พื้นฐานเกี่ยวกับมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน	75
ภาคผนวก ค การควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านด้วย dspic30F2010	96
ภาคผนวก ง การใช้ไอซีขับเคลื่อนมอเตอร์ IRF2907	117
ประวัติผู้เขียน	132



สารบัญรูปร่างภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างภายในของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไม่มีแปรงถ่าน	3
2.2 Stator ของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน	4
2.3 Back EMF แบบ Trapezoidal	4
2.4 Rotor	5
2.5 อุปกรณ์ตรวจจับ สนามแม่เหล็ก (Hall effect sensor)	5
2.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็ว	6
2.7 ลำดับการทำงานของมอเตอร์ชนิดไม่มีแปรงถ่านใน step ที่1	7
2.8 ลำดับการทำงานของมอเตอร์ชนิดไม่มีแปรงถ่านใน step ที่2	8
2.9 ลำดับการทำงานของมอเตอร์ชนิดไม่มีแปรงถ่านใน step ที่3	8
2.10 ลำดับการทำงานของมอเตอร์ชนิดไม่มีแปรงถ่านใน step ที่ 4	9
2.11 ลำดับการทำงานของมอเตอร์ชนิดไม่มีแปรงถ่านใน step ที่5	10
2.12 ลำดับการทำงานของมอเตอร์ชนิดไม่มีแปรงถ่านใน step ที่6	10
2.13 สวิตช์โหมคอินเวอร์เตอร์เฟสเดียว	13
2.14 การสวิตซ์แรงดันไฟฟ้าแบบยูนิโพลาร์	15
2.15 วงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ต่อโหลดแบบสตาร์	17
2.16 รูปคลื่นสัญญาณควบคุมอินเวอร์เตอร์แบบนำกระแส 120° และรูปคลื่นแรงดันเฟส (V_p) และแรงดันระหว่างสาย (V_L)	18
2.17 วงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส	19
2.18 การทำงานของมอเตอร์ใน 1cycle	20
2.19 ทิศทางสนามแม่เหล็กของโรเตอร์ เมื่อ $H_A = H_C = 1$ และ $H_B = 0$	21
2.20 ทิศทางสนามแม่เหล็กของโรเตอร์ เมื่อ $A_{out} = H$ และ $B_{out} = L$	21
2.21 ทิศทางสนามแม่เหล็กของโรเตอร์ เมื่อ $A_{out} = H$ และ $C_{out} = L$	21
2.22 (ก) วงจรขับเคลื่อนของมอเตอร์สเฟตกำลัง	23
(ข) วงจรขับเคลื่อนแบบโทเท็มโพล	23
(ค) ไอซีของวงจรขับเคลื่อนที่มีฟเฟออร์แบบโทเท็มโพล	24
2.23 (ก) วงจรบุตสเตรปสำหรับวงจรขับเคลื่อนบัสบวคของมอเตอร์สเฟตกำลัง	25
(ข) วงจรขับเคลื่อนเบอร์ IR2110 สำหรับไอจีบีทีที่ใช้ในวงจรฮาร์ฟบริดจ์คอน เวอร์เตอร์ (Courtesy of International Rectifier Corporation)	25
2.24 (ก) การแยกจากกันทางไฟฟ้าระหว่างวงจรควบคุมและวงจรถูกำลัง ด้วยหม้อแปลงไฟฟ้า	26
(ข) แรงดันไฟฟ้าด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า	26
(ค) การแยกจากกันทางไฟฟ้าระหว่างวงจรควบคุมและ วงจรถูกำลังด้วยการเชื่อมต่อทางแสง	26
2.25 วงจร Voltage Divider	27
2.26 วงจร Current Sensor	27

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.27 ไตอะแกรมโมดูล ADC ของ dsPIC30F2010	29
2.28 ไมโครโปรเซสเซอร์ ATmega 2560	31
2.29 Arduino Mega 2560	32
2.30 การเชื่อมต่อ Arduino Mega 2560 กับ จอแสดงผล LCD	32
3.1 การทำงานของชุดแสดงผลแบบเรียลไทม์ของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน	33
3.2 โมเดลจำลองการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านโดยใช้โปรแกรม PSIM	35
3.3 สัญญาณแรงดันไลน์ของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน	35
3.4 สัญญาณกระแสแต่ละเฟสของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน	36
3.5 สัญญาณแรงดันเฟสของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน	36
3.6 สัญญาณแรงดันไลน์และกระแสของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน	37
3.7 ไตอะแกรมการทำงานเบื้องต้นของโมดูล MCPWM เมื่อทำงานแบบคอมพลีเม็นตารี	37
3.8 Schematic ของวงจรไฟเลี้ยง	38
3.9 การออกแบบ PCB ของวงจรไฟเลี้ยง	38
3.10 Schematic ของวงจรเซ็นเซอร์	38
3.11 การออกแบบ PCB ของวงจรเซ็นเซอร์	40
3.12 การใช้งานเซ็นเซอร์กระแส ACS 712 -20	41
3.13 Schematic ของวงจรขับมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน	42
3.14 PCB ของวงจรขับมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน	43
3.15 ไตอะแกรมของวงจรขับมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน	43
3.16 มอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านที่ใช้ในการทดสอบ	44
3.17 LCD 20 x 4 ที่ใช้ในการแสดงผล	45
3.18 หน้าต่างเริ่มต้นของโปรแกรม Serial Oscilloscope	45
3.19 ขั้นตอนการใช้โปรแกรม Serial Oscilloscope	46
3.20 หน้าต่างโปรแกรมที่ใช้ในการพล็อตกราฟของโปรแกรม Serial Oscilloscope	47
3.21 Arduino MEGA 2560	47
3.22 กราฟตัวอย่างที่แสดงด้วยโปรแกรม Serial Oscilloscope	50
3.23 ชุดแสดงผลแบบตอบสนองฉับไวของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน	50
4.1 โมเดลชุดทดสอบการให้ภาระทางไฟฟ้าแก่มอเตอร์	52
4.2 วิธีการทดสอบการให้ภาระทางกลของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน	52
4.3 แผนผังการวางแผนการทดสอบความแม่นยำด้วยการแสดงผลผ่านจอแอลซีดี	53
4.4 (ก) สัญญาณที่ได้จากการวัดด้วยออสซิลโลสโคป Van (เขียว) และ Ia (เหลือง)	56
(ข) สัญญาณที่ได้จากการวัดด้วยคอมพิวเตอรื Van (แดง) และ Ia (เขียว)	56
4.5 (ก) สัญญาณที่ได้จากการวัดด้วยออสซิลโลสโคป Vb (เขียว) และ Ia (เหลือง)	57
(ข) สัญญาณที่ได้จากการวัดด้วยคอมพิวเตอรื Vb (แดง) และ Ia (เขียว)	57

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
4.6 (ก) สัญญาณที่ได้จากการวัดด้วยออสซิลโลสโคป Vab (เขียว) และ Ia (เหลือง)	58
(ข) สัญญาณที่ได้จากการวัดด้วยคอมพิวเตอร် Vab (แดง) และ Ia (เขียว)	58
4.7 (ก) สัญญาณที่ได้จากการวัดด้วยออสซิลโลสโคป Vab (เขียว) และ Ib (เหลือง)	59
(ข) สัญญาณที่ได้จากการวัดด้วยคอมพิวเตอร် Vab (แดง) และ Ib (เขียว)	59
4.8 (ก) สัญญาณที่ได้จากการวัดด้วยออสซิลโลสโคปของสัญญาณกำลังไฟฟ้าเฟส A	60
(ข) สัญญาณที่ได้จากการวัดด้วยคอมพิวเตอร်ของกำลังไฟฟ้าเฟส A	60
4.9 การทดสอบประสิทธิภาพของมอเตอร์โดยการใช้ลูกตุ้ม	61
4.10 แนวโน้มของประสิทธิภาพของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน	63
4.11 กราฟแสดงค่าประสิทธิภาพของวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ที่ได้จากมิเตอร์และจ่อแอลซีดี	64



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ลำดับการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงชนิดไม่มีแปรงถ่าน	7
2.2 ลำดับการทำงานของมอเตอร์แบบฮับ	7
2.3 ลำดับสำหรับหมุนมอเตอร์ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา	19
2.4 ลำดับสำหรับหมุนมอเตอร์ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา	19
2.5 ตารางแตรรี่ปเวกเตอร์	28
2.6 แสดงค่าข้อมูลของไมโครโปรเซสเซอร์ตระกูล ATmega	31
3.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่แสดงผลผ่านตัวแสดงผล	34
3.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการแสดงผล	44
4.1 เปรียบเทียบค่าระหว่างจอ LCD,Power Meter และ Power Analyzer Fluke 43B	53
4.2 เปรียบเทียบค่าระหว่างจอ LCD,Power Meter และ Power Analyzer Fluke 43B	54
4.3 เปรียบเทียบค่าระหว่างจอ LCD,Power Meter และ Power Analyzer Fluke 43B	54
4.4 เปรียบเทียบค่าระหว่างจอ LCD,Power Meter และ Power Analyzer Fluke 43B	55
4.5 เปรียบเทียบค่าระหว่างจอ LCD,Power Meter และ Power Analyzer Fluke 43B	55
4.6 ความเร็วรอบของมอเตอร์เมื่อทำการใส่ภาระทางกล	62
4.7 ประสิทธิภาพของมอเตอร์เมื่อทำการทดสอบโดยใช้ภาระทางกล	62
4.8 ค่ากำลังไฟฟ้าขาเข้าและขาออกของวงจรขับมอเตอร์	64

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากในปัจจุบันในงานอุตสาหกรรมต่างๆ มีการใช้ระบบอัตโนมัติและเครื่องจักรกลแพร่หลายเป็นอย่างมาก มอเตอร์ก็เป็นที่ยอมรับใช้เช่นเดียวกัน ไม่ว่าจะเป็นอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ ขนาดกลาง และขนาดเล็ก ล้วนต้องมีมอเตอร์เข้ามาเกี่ยวข้องทั้งสิ้น ดังนั้นการเลือกใช้มอเตอร์ควรต้องเลือกที่มีประสิทธิภาพสูง ใช้งานได้ง่าย และอายุการใช้งานมาก ซึ่งทำให้มีราคาสูงขึ้นตามมาด้วย ดังนั้นการเลือกใช้มอเตอร์ที่เหมาะสม มีประสิทธิภาพสูง ราคาเหมาะสม จึงเป็นเรื่องจำเป็นอย่างยิ่ง ซึ่งการจะทำการเลือกมอเตอร์ที่ดีได้นั้น ผู้เลือกจำเป็นต้องมีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับตัวมอเตอร์เป็นอย่างดี ไม่ว่าจะเป็นเรื่องรูปแบบการใช้งาน ประสิทธิภาพการใช้งาน อายุการใช้งาน เพื่อประโยชน์สูงสุด

โดยเหตุผลข้างต้นจึงได้เริ่มคิดค้นหาวิธีที่จะทำให้สามารถทราบถึงคุณลักษณะของมอเตอร์ได้ จึงได้ทำการเลือกมอเตอร์ชนิดมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านมาทำเป็นชุดแสดงผลแบบตอบสนองอย่างรวดเร็ว เนื่องจากมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านเป็นมอเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงและเริ่มถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย ซึ่งจะทำเป็นชุดขับเคลื่อนมอเตอร์และชุดแสดงผลแบบตอบสนองอย่างรวดเร็ว เพื่อสามารถนำมาทดสอบมอเตอร์ได้ในชุดเดียวกันและยังสามารถนำมาใช้เป็นชุดประกอบการเรียนรู้เพื่อให้นักศึกษาเข้าใจถึงหลักการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านได้ดียิ่งขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อการศึกษา ทดสอบประสิทธิภาพและเสถียรภาพของมอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้เป็นต้นกำลัง
2. เพื่อออกแบบวงจรขับมอเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงสุด
3. เพื่อศึกษาคุณลักษณะของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน
4. เพื่อออกแบบวงจรจับสัญญาณและแสดงผลให้มีเสถียรภาพและความแม่นยำ

1.3 ขอบเขตและค่ากำหนดของโครงการ

1. ออกแบบวงจรขับมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน 1 ชุด
2. ออกแบบวงจรจับสัญญาณและประมวลผล 1 ชุด
3. ศึกษาและออกแบบวิธีการรับและส่งสัญญาณจากชุดวงจรควบคุมให้มีเสถียรภาพมากที่สุด
4. ออกแบบชุดแสดงผลแบบตอบสนองอย่างรวดเร็ว 1 ชุด
5. ทำการทดสอบโดยใช้แรงดัน 48 โวลต์ และโหลดสูงสุด 5 กิโลกรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการงาน

1. ศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส
2. ศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน
3. ศึกษาเกี่ยวกับวิธีการควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน รวมถึงการออกแบบชุดควบคุม
4. ศึกษาการใช้งานของออสซิลโลสโคปวิธีการจับค่าและวิธีการส่งค่าเข้าคอมพิวเตอร์
5. ทำการทดลองชุดควบคุมมอเตอร์ และชุดประมวลผลและแสดงค่า และปรับปรุงให้มีเสถียรภาพมากที่สุด

1.5 แผนการดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินงาน	พ.ศ.2557					พ.ศ.2558				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1.สืบค้นข้อมูลที่เกี่ยวข้อง	←-----→									
2.ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	←-----→									
3.สร้างชุดขับเคลื่อนมอเตอร์	←-----→									
4.สร้างชุดประมวลผลและรับส่งค่า	←-----→									
5.นำไปทดสอบกับมอเตอร์และบันทึกค่า						←-----→				
6.ปรับปรุงและพัฒนา						←-----→				

←-----→ วางแผน

←-----→ ดำเนินการจริง

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. เข้าใจการทำงานของชุดควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน
2. เข้าใจระบบของการประมวลผลข้อมูล รับค่าข้อมูล ส่งค่าข้อมูล โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์
3. สามารถนำระบบทั้งหมดไปใช้ได้จริงและมีเสถียรภาพ
4. สามารถทำเป็นชุดการเรียนรู้ให้แก่นักศึกษาและผู้สนใจได้

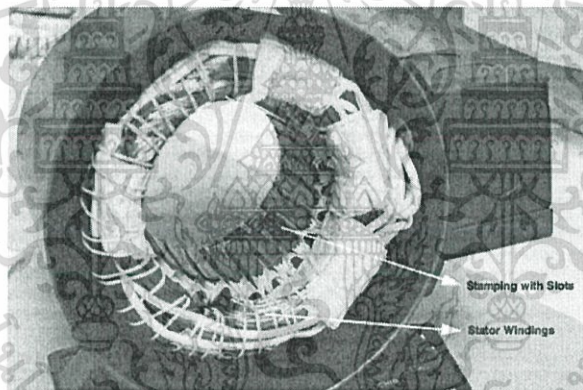
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 ทฤษฎีและความรู้ที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไม่มีแปรงถ่าน

Brushless DC motor (BLDC) คือ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยอาศัยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเป็นสวิตซ์ในการสับเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดของมอเตอร์แทนที่ของแปรงถ่าน โดยจะมีเซ็นเซอร์ตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์อย่างละเอียดเพื่อที่จะได้จ่ายกระแสไฟฟ้าได้อย่างถูกต้องโดยที่การจ่ายกระแสไฟฟ้าจะสร้างขั้วแม่เหล็กที่สเตเตอร์ทำให้เกิดการดึงดูดระหว่างขั้วแม่เหล็กที่เกิดขึ้นกับฟลักซ์ที่โรเตอร์สร้างขึ้นโดยที่โดยที่กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดสเตเตอร์นั้นจะเป็นไฟฟ้ากระแสสลับส่วนที่โรเตอร์นั้นเป็นแม่เหล็กถาวร(Permanent magnet)

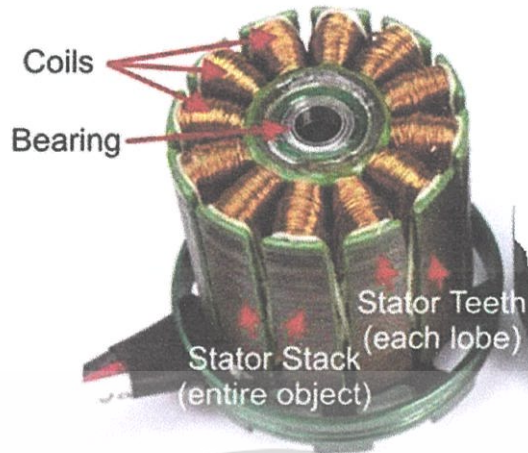
โครงสร้างภายในของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไม่มีแปรงถ่านเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดหนึ่ง ซึ่งสนามแม่เหล็กที่ถูกสร้างโดยโรเตอร์นั้นหมุนด้วยความถี่เดียวกันและไม่มี Slip ดังเช่นที่มีอยู่ใน Induction Motor BLDC มีทั้งในแบบ 1-phase, 2-phase และ 3-phase ชนิดที่ได้รับความนิยมคือ 3-phase



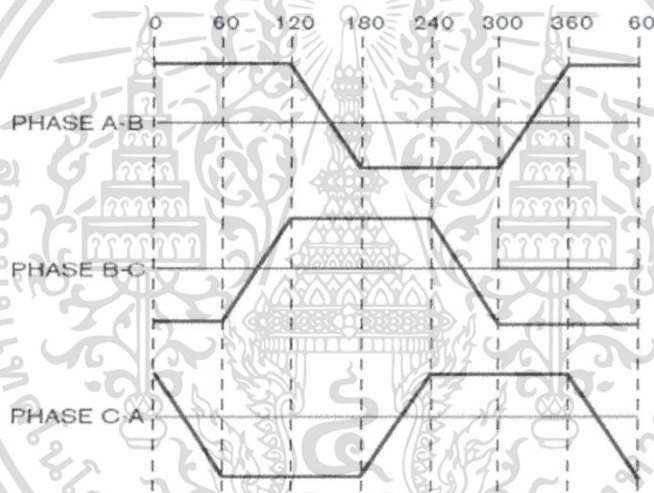
รูปที่ 2.1 โครงสร้างภายในของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไม่มีแปรงถ่าน

2.1.1 Stator ของ BLDC

Stator ประกอบด้วยแผ่นเหล็กที่ซ้อนกันและมีขดลวดพันอยู่ในช่อง slot โดยที่ Stator จะคล้ายกับ Induction motor แต่การวางขดลวดแตกต่างกัน โดยทั่วไปแล้ว BLDC เป็นแบบ 3-phase ซึ่งมีขดลวด 3 ชุดและส่วนใหญ่ต่อแบบวาย ขดลวดแต่ละชุดประกอบขึ้นจาก coils หลาย coils ต่อกันซึ่งแต่ละ coils สอดไว้ใน slot และแต่ละชุดของขดลวดพันกระจายทั่วทั้ง stator เพื่อที่จะสร้างขั้วแม่เหล็กขึ้นมา



รูปที่ 2.2 Stator ของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน



รูปที่ 2.3 Back EMF แบบ Trapezoidal

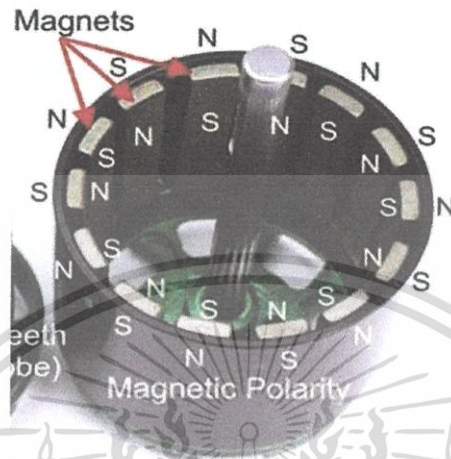
และยิ่งไปกว่านั้นกระแสและแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส ยังเป็นแบบ Trapezoidal และ sinusoidal ตามชนิดของ EMF ของมอเตอร์นั้น ซึ่งขึ้นอยู่กับประเภทของมอเตอร์และการพันขดลวดมอเตอร์ โดยแต่ละแบบก็จะมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันไป โดย Back EMF แบบ Sinusoidal จะให้แรงบิดที่เรียกว่า ฮาร์มอนิกส์ต่ำกว่า ประสิทธิภาพดีกว่าแบบ Back EMF แบบ Trapezoidal แต่จะมีขนาดใหญ่กว่าและแพงกว่ามาก

2.1.2 Rotor ของ BLDC

Rotor สร้างขึ้นจาก permanent magnet และมี pole pair โดยแบ่งเป็นแบบขั้วเหนือและขั้วใต้ โดยจากการที่ต้องการความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กเราสามารถเลือกวัสดุที่เป็นแม่เหล็กที่เหมาะสมได้คือ Ferrite Magnets ถูกใช้มาสร้างเป็นแม่เหล็กถาวร เมื่อเทคโนโลยีพัฒนาขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

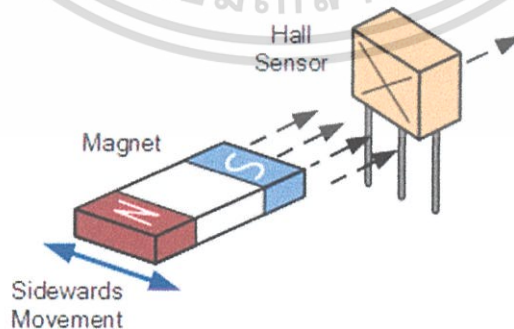
เกิดการสร้าง Alloy magnets ซึ่งเป็นวัสดุที่หายากได้ถูกสร้างขึ้นอย่าง Ferrite magnet ราคาไม่แพง แต่ให้ปริมาณความหนาแน่นของฟลักซ์ที่สูง และยังทำให้สามารถลดขนาดของโรเตอร์ได้ในพิกัดแรงบิดที่เท่ากัน ทำให้สามารถใช้งานกับวัสดุที่มีน้ำหนักมากขึ้นและให้แรงบิดที่สูงกว่าในมอเตอร์ขนาดที่เท่ากันในที่ใช้ ferrite magnets



รูปที่ 2.4 Rotor

2.1.3 Hall effect sensor

Hall Effect ใช้สำหรับตรวจจับตำแหน่งขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์ เพื่อสับเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าที่จ่ายเข้าไปเพื่อใช้ในการหมุนมอเตอร์ โดยลำดับของการจ่ายกระแสไฟฟ้านั้น จะขึ้นอยู่กับตำแหน่งของโรเตอร์ด้วย ดังนั้นจำเป็นที่จะต้องรู้ตำแหน่งของ Rotor Hall sensor จะติดอยู่กับสเตเตอร์ เมื่อโรเตอร์หมุนไปนั้นจะหมุนผ่านตำแหน่งของ Hall effect sensor ซึ่งทำหน้าที่ตรวจจับสัญญาณเพื่อบอกว่าสัญญาณเป็นลอจิก high หรือ low เพื่อเป็นลำดับในการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับ motor ต่อไป



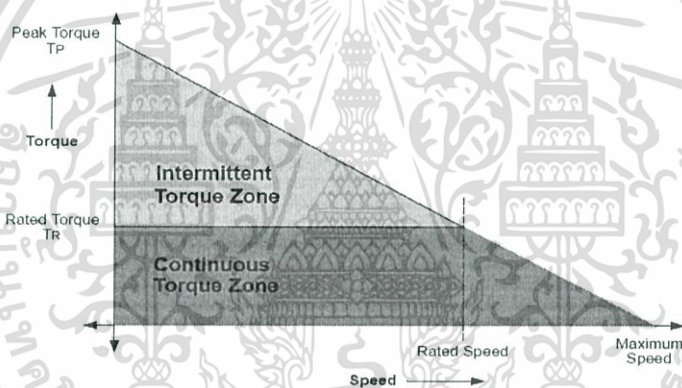
รูปที่ 2.5 อุปกรณ์ตรวจจับ สนามแม่เหล็ก (Hall effect sensor)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์ตรวจจับ สนามแม่เหล็ก (Hall effect sensor) โดยหลักการของ Hall Effect sensor คือ เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำที่มีความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก B ตลอดทั้งตัวนำจะเกิด Voltage ขึ้นที่ทั้งด้านของแผ่นตัวนำ (VH) ซึ่ง Voltage ที่พบนี้พบจากการทดลอง E.H.Hall ในปี ค.ศ. 1879 การติดตั้ง Hall effect sensor มีทั้งแบบที่ stator และ Rotor เพื่อที่จะวัดตำแหน่งของ Rotor จากตำแหน่งการวาง Hall effect sensor ทางกายภาพแล้ว output ที่ได้มี 2 ลักษณะคือ มี phase shift กัน 60 องศาและ 120 องศา ของ output a,b,c

2.1.4 ลักษณะของแรงบิดและความเร็วมอเตอร์กระแสตรงชนิดไม่มีแปรงถ่าน

จากรูปที่ 2.6 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็ว สำหรับแรงบิดมี พารามิเตอร์สองตัวในการอธิบาย คือ แรงบิดสูงสุด (Tp) และแรงบิดเฉลี่ย (Tr) โดย แรงบิดสูงสุดจะเกิดขึ้นเมื่อมอเตอร์มีความเร่งหรือความเฉื่อย และแรงบิดเฉลี่ยจะเกิดขึ้นเมื่อมอเตอร์มีความเร็วคงที่ ทำนองเดียวกันในด้านของความเร็วเมื่อไม่มีการเพิ่มภาระทางกล มอเตอร์จะหมุนด้วยความเร็วเฉลี่ย และโดยทั่วไปแล้วความเร็วของมอเตอร์สามารถเพิ่มขึ้นเกินพิกัดได้ประมาณ 150 % แต่จะทำให้แรงบิดลดลง



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็ว

2.1.5 หลักการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงชนิดไม่มีแปรงถ่าน

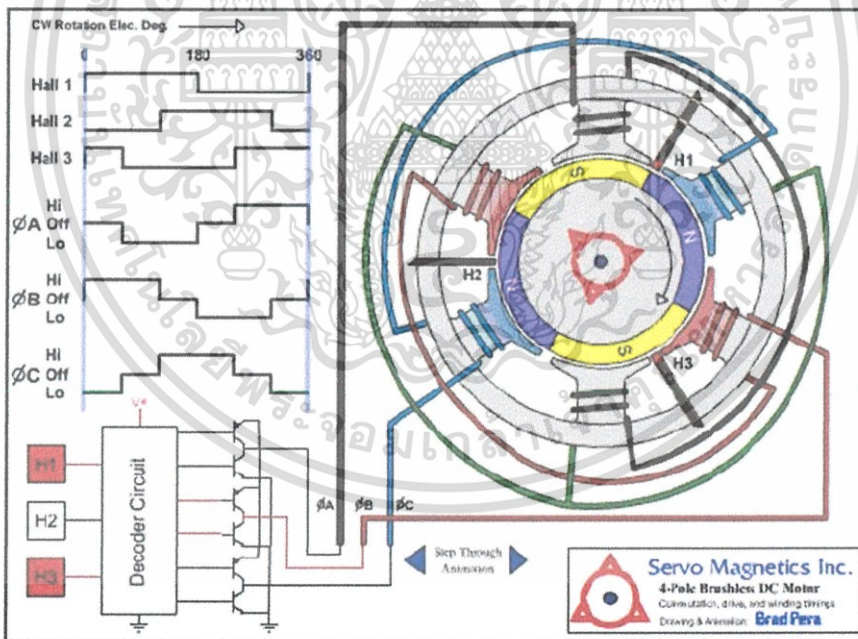
มีหลักการทำงานเหมือนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำทั่วไปโดยมีสนามแม่เหล็กหมุนสองสนาม หมุนตามกันไปเพียงแค่นี้ไม่มีค่า slip ปัจจัยที่ทำให้มอเตอร์ชนิดนี้ทำงานหรือหมุนได้นั้น นอกจากขดลวด 3 เฟส ที่สเตเตอร์และแท่งแม่เหล็กถาวรที่โรเตอร์แล้ว ยังมีอุปกรณ์ที่สำคัญ ซึ่งทำหน้าที่แทนแปรงถ่านและซีคอมมิวเตเตอร์คือ อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กอีก 3 ชุด (Hall Effect Sensor) ติดตั้งเป็นส่วนหนึ่งของสเตเตอร์ โดยจะคอยตรวจจับสนามแม่เหล็กชั่วขณะ-ใต้ ของแม่เหล็กถาวรที่โรเตอร์ โดนขณะที่มอเตอร์หมุนจะส่งสัญญาณ (Sensor Phasing หรือ Code) ที่เปลี่ยนแปลงไปยังกล่องควบคุมมอเตอร์ เพื่อทำการเปลี่ยนแปลง (Decode) และส่ง Output Voltage ไปยังขดลวดสเตเตอร์แต่ละเฟส เพื่อให้เกิดการดูดและผลักกันระหว่างสนามแม่เหล็กในขดลวดสเตเตอร์ และสนามแม่เหล็กถาวรของโรเตอร์ ในการทำงานของมอเตอร์ 1 รอบจะมีการทำงานเป็น 6 ขั้นตอน ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ลำดับการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงชนิดไม่มีแปรงถ่าน

state	Hall-1	Hall-2	Hall-3	Phase A	Phase B	Phase C
1	1	0	1	0	+Vdc	-Vdc
2	1	0	0	-Vdc	+Vdc	0
3	1	1	0	-Vdc	0	+Vdc
4	0	1	0	0	-Vdc	+Vdc
5	0	1	1	+Vdc	-Vdc	0
6	0	0	1	+Vdc	0	-Vdc

จากตารางที่ 2.1 ลำดับการทำงานของมอเตอร์ชนิดไม่มีแปรงถ่านจะเห็นได้ว่า Latching Hall Effect Sensor ทั้ง 3 ตัว ทำหน้าที่เหมือนคอมมิวเตเตอร์ โดยส่งสัญญาณเพื่อให้กล่องควบคุมทำการตัดต่อและสลับขั้วบวกและขั้วลบของ แรงดันที่เข้า ขดลวดสเตเตอร์แต่ละเฟส และทำให้มอเตอร์เกิดการหมุนไปตามการควบคุมดังกล่าวได้

การทำงานของ Hall Sensor step ที่ 1 คือ Hall-1 และ Hall-3 จะตรวจเจอขั้วแม่เหล็ก จากนั้นจะส่งผลการตรวจจับไปยังส่วน Controller ทำการประมวลผลจ่ายไฟ +Vdc ให้กับ Phase-B และจ่ายไฟ -Vdc ให้กับ Phase-C

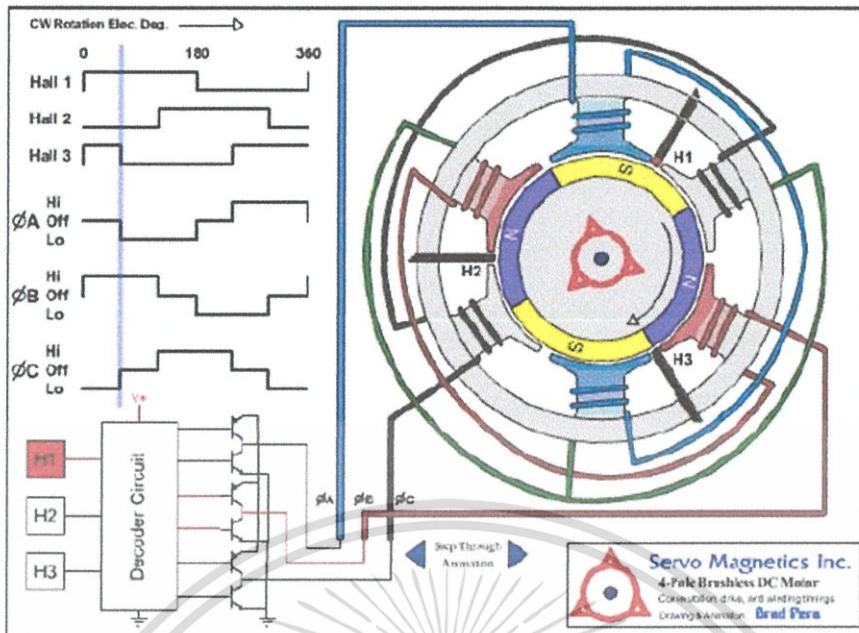


(ที่มา <http://letsmakerobots.com>)

รูปที่ 2.7 ลำดับการทำงานของมอเตอร์ชนิดไม่มีแปรงถ่านใน step ที่ 1

การทำงานของ Hall Sensor step ที่ 2 คือ Hall-1 จะตรวจเจอขั้วแม่เหล็ก จากนั้นจะส่งผลการตรวจจับไปยังส่วน Controller ทำการประมวลผลจ่ายไฟ -Vdc ให้กับ Phase-A และจ่ายไฟ +Vdc ให้กับ Phase-B

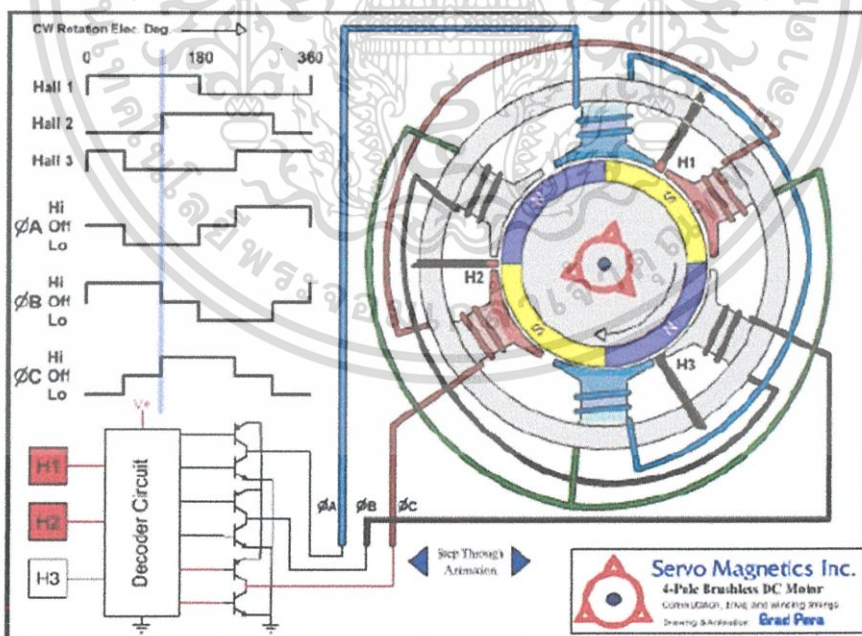
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ที่มา <http://letsmakerobots.com>)

รูปที่ 2.8 ลำดับการทำงานของมอเตอร์ชนิดไม่มีแปรงถ่านใน step ที่ 2

การทำงานของ Hall Sensor step ที่ 3 คือ Hall-1 และ Hall-2 จะตรวจเจอขั้วแม่เหล็ก จากนั้นจะส่งผลการตรวจจับไปยังส่วน Controller ทำการประมวลผลจ่ายไฟ -Vdc ให้กับ Phase-A และจ่ายไฟ +Vdc ให้กับ Phase-C

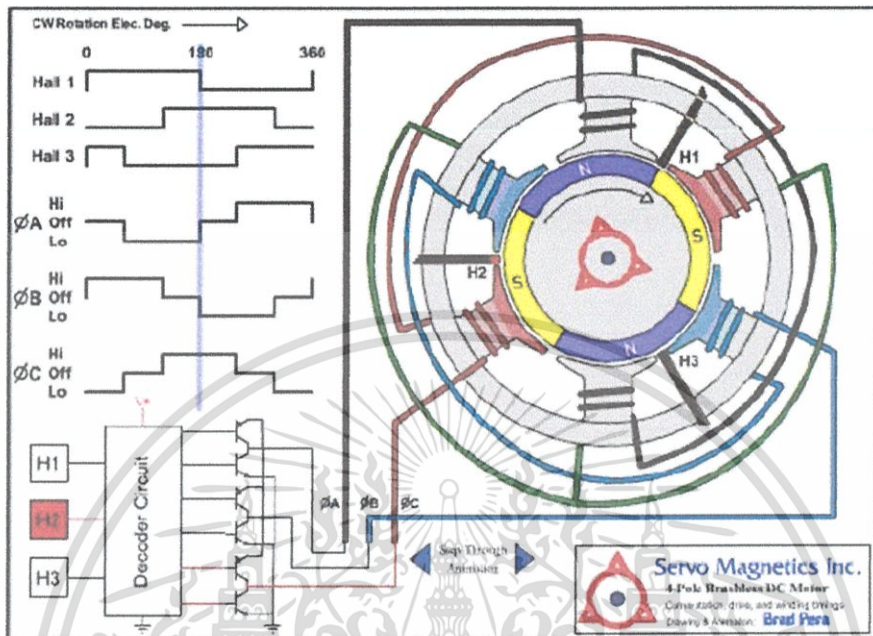


(ที่มา <http://letsmakerobots.com>)

รูปที่ 2.9 ลำดับการทำงานของมอเตอร์ชนิดไม่มีแปรงถ่านใน step ที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำงานของ Hall Sensor step ที่ 4 คือ Hall-2 จะตรวจเจอขั้วแม่เหล็ก จากนั้นจะส่งผลการตรวจจับไปยังส่วน Controller ทำการประมวลผลจ่ายไฟ -Vdc ให้กับ Phase-B และจ่ายไฟ +Vdc ให้กับ Phase-C

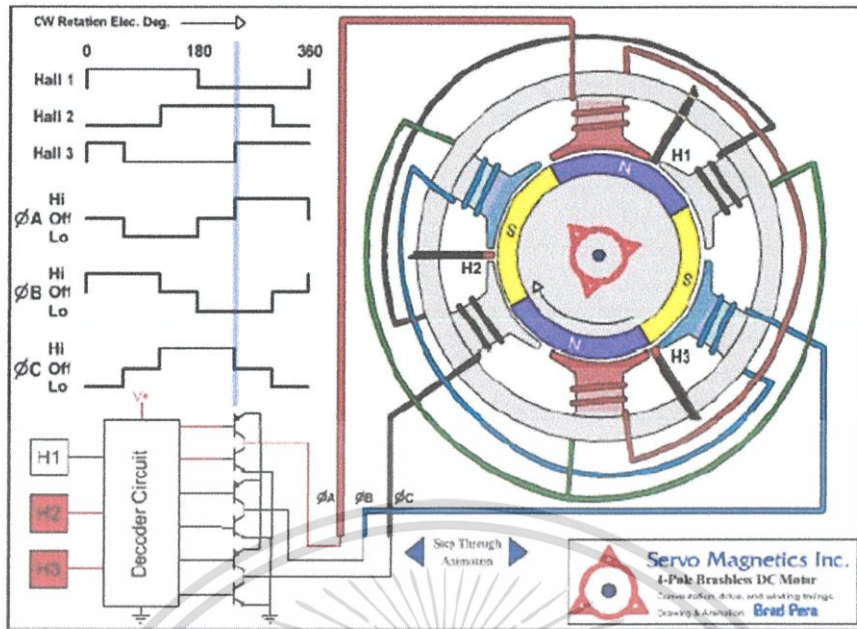


(ที่มา <http://letsmakerobots.com>)

รูปที่ 2.10 ลำดับการทำงานของมอเตอร์ชนิดไม่มีแปรงถ่านใน step ที่ 4

การทำงานของ Hall Sensor step ที่ 5 คือ Hall-2 และ Hall-3 จะตรวจเจอขั้วแม่เหล็ก จากนั้นจะส่งผลการตรวจจับไปยังส่วน Controller ทำการประมวลผลจ่ายไฟ +Vdc ให้กับ Phase-A และจ่ายไฟ -Vdc ให้กับ Phase-B

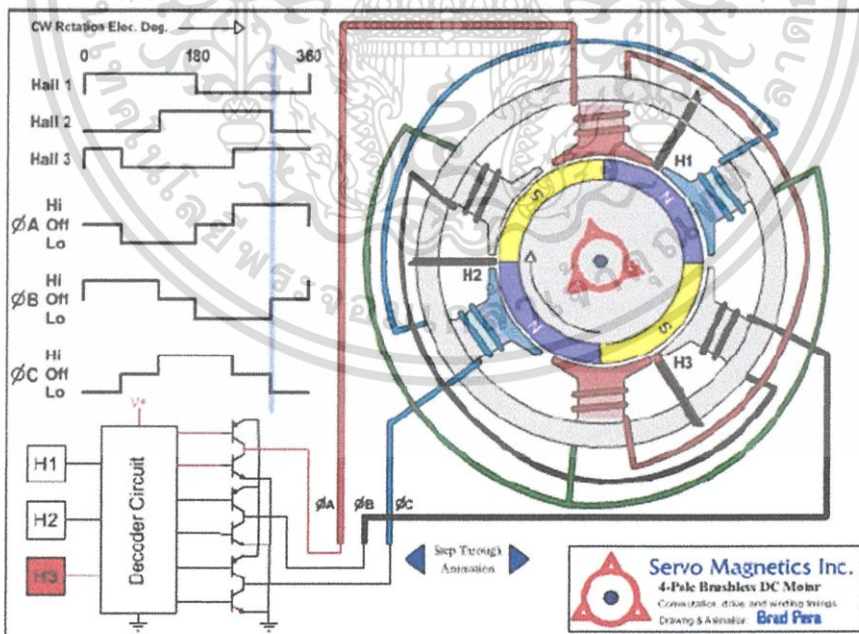
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ที่มา <http://letsmakerobots.com>)

รูปที่ 2.11 ลำดับการทำงานของมอเตอร์ชนิดไม่มีแปรงถ่านใน step ที่ 5

การทำงานของ Hall Sensor step ที่ 6 คือ Hall-3 จะตรวจเจอขั้วแม่เหล็ก จากนั้นจะส่งผลการตรวจจับไปยังส่วน Controller ทำการประมวลผลจ่ายไฟ +Vdc ให้กับ Phase-A และจ่ายไฟ -Vdc ให้กับ Phase-C



(ที่มา <http://letsmakerobots.com>)

รูปที่ 2.12 ลำดับการทำงานของมอเตอร์ชนิดไม่มีแปรงถ่านใน step ที่ 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.6 สรุปข้อดีข้อเสียของมอเตอร์กระแสตรงชนิดไม่มีแปรงถ่าน

2.1.6.1 ประสิทธิภาพ มอเตอร์กระแสตรงชนิดไม่มีแปรงถ่าน (Brushless DC Motor) สามารถลดความสูญเสียที่เกิดจากการเสียดสีกันระหว่างแปรงถ่านกับซี่คอมมิวเตเตอร์ ซึ่งผลจากการเสียดสีกันระหว่างแปรงถ่านกับซี่คอมมิวเตเตอร์ยังทำให้เกิดความร้อนเกิดประกายไฟและยังก่อให้เกิดคลื่นรบกวนสนามแม่เหล็กอีกด้วย

2.1.6.2 ปราศจากมลพิษ เนื่องจากมอเตอร์กระแสตรงชนิดไม่มีแปรงถ่าน ไร้ไฟฟ้ากระแสตรงจากแบตเตอรี่และไม่ใช่เครื่องยนต์สันดาปภายใน เมื่อนำไปประกอบเป็นยานพาหนะไฟฟ้า จึงไม่เกิดมลพิษอีกทั้งยังช่วยลดสภาวะโลกร้อนได้อีกด้วย

2.1.6.3 ประหยัดค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงาน เนื่องจากการประจุแบตเตอรี่จุ่มเต็มในแต่ละครั้ง ใช้พลังงานไฟฟ้าไปเพียงเล็กน้อยซึ่งคิดเป็นจำนวนเงินเพียงเล็กน้อย โดยจะประหยัดมากเมื่อเทียบกับยานพาหนะที่ใช้เครื่องยนต์สันดาปภายใน

2.1.6.4 มีเสถียรภาพในการทำงานสูง เป็นมอเตอร์กระแสตรงชนิดไม่มีแปรงถ่าน เป็นมอเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงในขณะความเร็วคงที่ ทำให้การใช้งานประหยัดพลังงานและมีเสถียรภาพในการทำงานและมีความน่าเชื่อถือสูง เนื่องจากมอเตอร์กระแสตรงชนิดไม่มีแปรงถ่าน เป็นมอเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงปราศจากมลพิษ สะดวกสบายในการใช้งาน อีกทั้งยังมีเสถียรภาพในการทำงานที่ดี ประหยัดค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงาน ทำให้มอเตอร์กระแสตรงชนิดไม่มีแปรงถ่านมีความน่าเชื่อถือสูง และนิยมนำมาใช้ประกอบเป็นต้นกำลังของยานพาหนะไฟฟ้ากันอย่างแพร่หลาย

2.1.7 ข้อจำกัดของมอเตอร์กระแสตรงชนิดไม่มีแปรงถ่าน

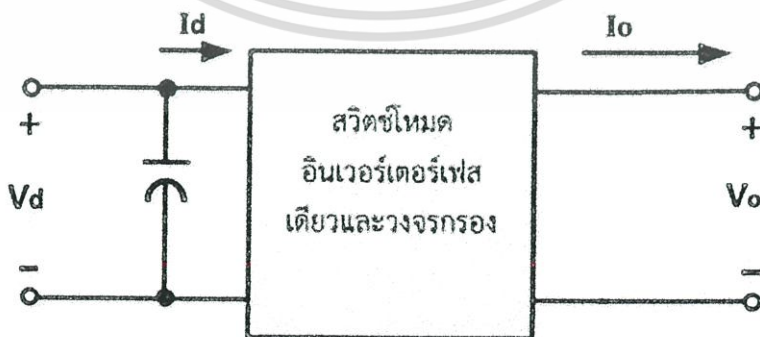
ข้อจำกัดของยานพาหนะที่ใช้มอเตอร์กระแสตรงชนิดไม่มีแปรงถ่านที่สำคัญคือ แหล่งจ่ายพลังงานให้กับตัวมอเตอร์หรือแบตเตอรี่ ซึ่งในปัจจุบันเทคโนโลยีทางด้านแบตเตอรี่ยังมีราคาแพง สามารถจ่ายพลังงานที่แรงดันคงที่ได้ไม่มากนัก อีกทั้งยังมีปัญหาทางด้านน้ำหนักมาก ค่าความจุพลังงานน้อย ทำให้อายุการใช้งานของมอเตอร์กระแสตรงชนิดไม่มีแปรงถ่าน สามารถวิ่งได้ในระยะทางที่ไม่ไกลมากนักต่อการประจุแบตเตอรี่หนึ่งครั้ง และมี starting torque ต่ำ

2.2 อินเวอร์เตอร์ (Inverter)

อินเวอร์เตอร์ (Inverter) คือวงจรแปลงผันพลังงานไฟตรงให้เป็นไฟสลับ เรียกอีกชื่อหนึ่งว่าเครื่องผกผันเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่มีค่าแรงดันคงที่หรือปรับค่าได้เพื่อให้ได้ความถี่ไฟสลับเอาต์พุตที่มีค่าคงที่หรือปรับค่าได้ โดยใช้หลักการปรับค่าแรงดันไฟตรงด้านอินพุตหรือใช้หลักการควบคุมเทคนิคการสวิตช์ภายในตัวอินเวอร์เตอร์ เช่น เทคนิคแบบมอดูเลต ความกว้างพัลส์ (PWM) เป็นต้น หรืออาจใช้วิธีปรับค่าแรงดันไฟตรงด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์ก็ได้เช่นกัน สำหรับอินเวอร์เตอร์ที่ใช้งานควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส จะใช้หลักการควบคุมอัตราส่วนของแรงดันเอาต์พุตและความถี่เอาต์พุตให้คงที่ (V/f Constant) เพื่อให้สามารถควบคุมให้แรงบิดคงที่ได้ แต่สำหรับอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในงานควบคุมอื่นๆที่ต้องการความถี่เอาต์พุตคงที่ก็อาจใช้อินเวอร์เตอร์ที่ควบคุมการปิด-เปิด สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังด้วยวิธีที่ไม่ซับซ้อน เช่นวิธีมอดูเลตแบบ 180 องศา และ 120 องศา เป็นต้น สำหรับลูกคลื่นของแรงดันเอาต์พุตไฟสลับของอินเวอร์เตอร์ในอุดมคติคือรูปคลื่นไซน์ แต่ในทางปฏิบัติจะไม่ใช่รูปคลื่นไซน์ แต่จะเป็นรูปกึ่งสี่เหลี่ยมซึ่งมีฮาร์โมนิกปะปนอยู่มาก ซึ่งด้วยเทคนิคการสวิตช์แบบ PWM จะทำให้ฮาร์โมนิกดังกล่าวลดลง และทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของอินเวอร์เตอร์สูงขึ้น เนื่องจากอินเวอร์เตอร์มีอินพุตเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งมาจาก (แบตเตอรี่) แหล่งจ่ายไฟตรง หรือได้มาจากการแปลงจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ (Rectification) ดังนั้น เมื่อพิจารณาการเชื่อมโยงด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์ จึงแบ่งออกได้ 3 รูปแบบ คืออินเวอร์เตอร์แบบป้อนด้วยแรงดัน (Voltage – Fed Inverter , VFI หรือ Voltage Source Inverter, VSI) อินเวอร์เตอร์ แบบป้อนด้วยกระแส (Current – Fed Inverter , CFI หรือ Current Source Inverter , CSI) และอินเวอร์เตอร์แบบป้อนแรงดันแบบไฟตรงปรับค่าได้ (Variable DC Linked Inverter)

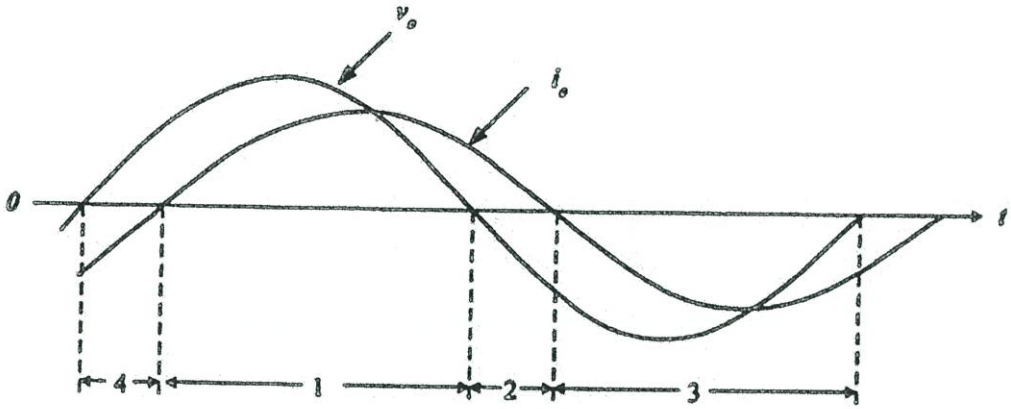
2.2.1 แนวคิดพื้นฐานของสวิตช์โหมดอินเวอร์เตอร์

การแปลงผันกำลังไฟฟ้าจากแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับในรูป (ก) สมมติว่าแรงดันไฟฟ้าด้านออก (v_o) และกระแสไฟฟ้าด้านออก (i_o) ผ่านวงจรกรองความถี่สูงออกไปเหลือเฉพาะความถี่ต่ำ ดังนั้นแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่จะได้เป็นรูปไซน์ กรณีที่แสดงในรูป (ก) โหลดจะเป็นค่าความต้านทานและความเหนี่ยวนำ ดังนั้นกระแสไฟฟ้าจะล่าหลังแรงดันไฟฟ้า สำหรับในรูป (ข) กำลังไฟฟ้าด้านออก (P_o) จะพิจารณาเป็นผลคูณของแรงดันและกระแสไฟฟ้าด้านออกดังนี้



(ก) แรงดันและกระแสด้านเข้าและด้านออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) รูปคลื่นแรงดันและกระแสด้านเข้าและด้านออก



(ค) โหมดการทำงาน 4 จตุภาค

รูปที่ 2.13 สวิตช์โหมดอินเวอร์เตอร์เฟสเดียว

โหมดที่ 1 โหมดอินเวอร์เตอร์

v_o เป็นบวก i_o เป็นบวก p_o เป็นบวก คือ กำลังไฟฟ้าจะถูกส่งจากด้านไฟฟ้ากระแสตรง (V_d) ไปด้านไฟฟ้ากระแสสลับ (v_o)

โหมดที่ 2 โหมดเรียงกระแส

v_o เป็นลบ i_o เป็นบวก p_o เป็นลบ คือ กำลังไฟฟ้าจะถูกส่งจากด้านไฟฟ้าไฟฟ้ากระแสสลับ (v_o) ไปด้าน กระแสตรง (V_d)

โหมดที่ 3 โหมดอินเวอร์เตอร์

v_o เป็นลบ i_o เป็นลบ p_o เป็นบวก คือ กำลังไฟฟ้าจะถูกส่งจากด้านไฟฟ้ากระแสตรง (V_d) ไปด้านไฟฟ้ากระแสสลับ (v_o)

โหมดที่ 4 โหมดเรียงกระแส

v_o เป็นบวก i_o เป็นลบ p_o เป็นลบ คือ กำลังไฟฟ้าจะถูกส่งจากด้านไฟฟ้าไฟฟ้ากระแสกลับ (v_o) ไปด้าน กระแสตรง

สรุปรูปแบบในการทำงานดังแสดงในรูปที่ 2.11(ค) โหมดในควอดแรนต์ (จุดภาค) เพื่อความเข้าใจการทำงานของอินเวอร์เตอร์ ในรูปที่ 2.12 จะแสดงเพียงหนึ่งกึ่งของวงจรอินเวอร์เตอร์ คือ กิ่ง A หรือ เฟส A ที่สมมติให้แรงดันไฟฟ้าด้านเข้ามีค่าคงที่และกำหนดให้การสวิตช์ทำงานเป็นแบบพีดับเบิลยูเอ็ม

2.2.2 การสวิตช์แบบพีดับเบิลยูเอ็ม

ในวงจรอินเวอร์เตอร์ ต้องการจะสร้างแรงดันไฟฟ้าด้านออกเป็นรูปไซน์ที่สามารถปรับขนาดและความถี่ตามต้องการได้ โดยจะใช้สัญญาณควบคุมรูปไซน์ (sinusoidal control signal) ตามความถี่ที่ต้องการนำมาเปรียบเทียบกับรูปคลื่นสามเหลี่ยม (triangular waveform) ความถี่ของการสวิตช์ (f_s) จะเท่ากับความถี่ของรูปคลื่นสามเหลี่ยม

2.2.3 การสวิตช์แรงดันไฟฟ้าแบบยูนิโพลาร์

ข้อแตกต่างระหว่างการสวิตช์แรงดันไฟฟ้าแบบไบโพลาร์กับยูนิโพลาร์ คือ ในแบบยูนิโพลาร์การควบคุมสวิตช์ในกิ่ง A กับกิ่ง B จะแยกสัญญาณควบคุมออกจากกัน คือสวิตช์ในกิ่ง A จะถูกควบคุมจากสัญญาณ $V_{control}$ เทียบกับสัญญาณรูปสามเหลี่ยม (V_{tri}) ขณะที่สวิตช์ในกิ่ง B จะถูกควบคุมจากสัญญาณ $-V_{control}$ เทียบกับสัญญาณรูปสามเหลี่ยม (V_{tri}) การสวิตช์จะมีเงื่อนไขดังนี้

เมื่อ $V_{control} > V_{tri}$: สวิตช์ T_{A+} จะนำกระแส $V_{AN} = V_d$

เมื่อ $V_{control} < V_{tri}$: สวิตช์ T_{A-} จะนำกระแส $V_{AN} = 0$

เมื่อ $-(V_{control}) > V_{tri}$: สวิตช์ T_{B+} จะนำกระแส $V_{BN} = V_d$

เมื่อ $-(V_{control}) < V_{tri}$: สวิตช์ T_{B-} จะนำกระแส $V_{BN} = 0$

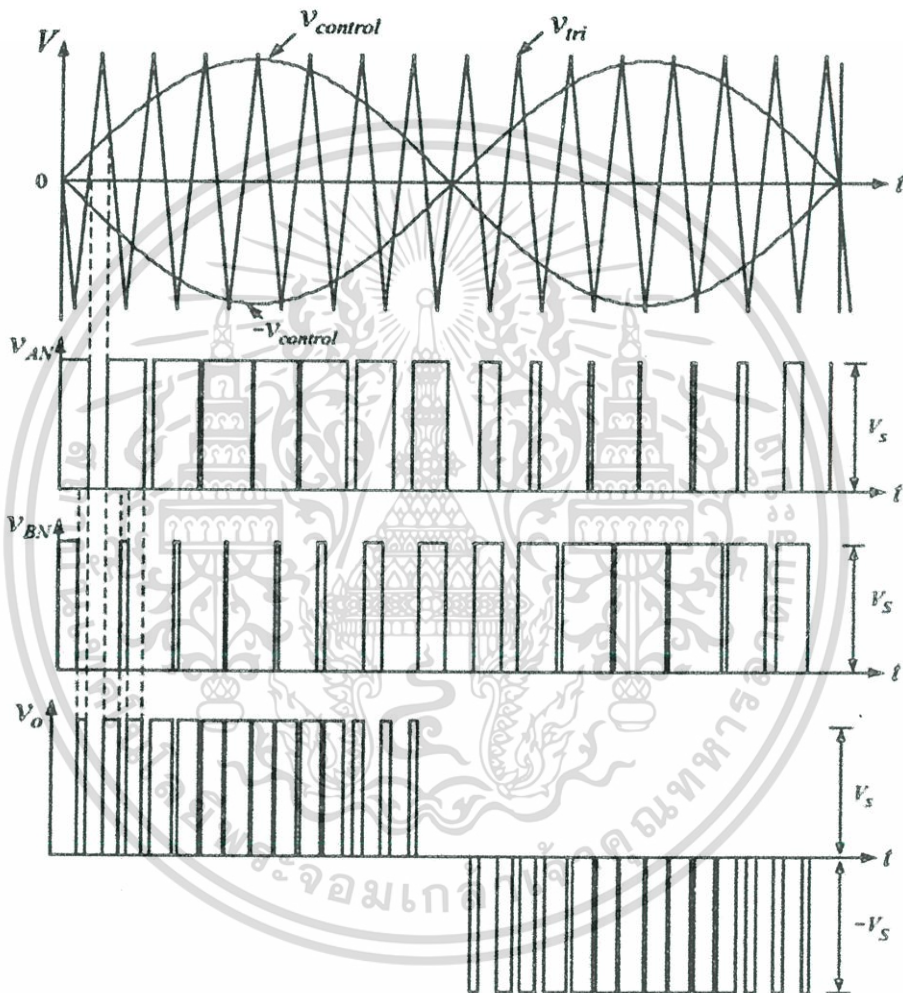
ตารางที่ 2.2 เงื่อนไขการสวิตช์แรงดันเฟสและแรงดันไฟฟ้าด้านออกของอินเวอร์เตอร์แบบยูนิโพลาร์

เงื่อนไข	สวิตช์ นำกระแส	สวิตช์ นำกระแส	V_{AN}	V_{BN}	V_o
1	T_{A+}	T_{B-}	V_d	0	V_d
2	T_{A-}	T_{B+}	0	V_d	V_d
3	T_{A+}	T_{B+}	V_d	V_d	0
4	T_{A-}	T_{B-}	0	0	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 2.2 การเปลี่ยนแปลงสถานะของแรงดันระหว่างสาย (V_0 หรือ V_{AB}) จะเป็นการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันอยู่ระหว่างศูนย์ไปยังบวก หรือศูนย์ไปยังลบ จึงทำให้ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันจากการสวิตซ์ซิงสูง เช่นกรณีไบโพลาร์

จุดเด่นของยูนิโพลาร์ คือ การเกิดความถี่ด้านออกจะมีความถี่เป็นสองเท่าของความถี่สวิตซ์ซิงของแต่ละเฟส เช่น ความถี่สวิตซ์ซิงของอุปกรณ์เป็น 10 kHz หากเป็นการทำงานแบบยูนิโพลาร์ ค่าแรงดันออกจะประกอบไปด้วยสัญญาณที่ดับเบิ้ลยูเอ็ม ที่มีความถี่หลักมูลและความถี่ฮาร์โมนิกลำดับที่ 2 ของไบโพลาร์ ที่ 20 kHz สอดคล้องกับสเปคตราของรูปที่ โดยเกิดความถี่ขึ้นรอบข้างผลของความถี่ไหลเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า ทำให้การออกแบบวงจรกรองความถี่ง่าย เล็กและประหยัด



รูปที่ 2.14 การสวิตซ์ซิงแรงดันไฟฟ้าแบบยูนิโพลาร์

2.2.4 อินเวอร์เตอร์สามเฟสเมื่อทำงานในย่านรูปคลื่นสี่เหลี่ยม

อินเวอร์เตอร์สามเฟสที่ทำงานในย่านรูปคลื่นสี่เหลี่ยม จะเหมาะสำหรับใช้กับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่สามารถปรับแรงดันไฟฟ้าระหว่างสาย เพื่อใช้ในการปรับค่าระดับแรงดันไฟฟ้าด้านออก รูปที่ (2.13) แสดงรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่มีช่วงเวลานำกระแส 180 องศา ในทำงานอง

เดียวกับกรณีเฟสเดียวจะสามารถหาค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของแรงดันไฟฟ้าด้านออกที่ความถี่หลักมูลที่ทำงานในย่านรูปคลื่นสี่เหลี่ยมจะหาได้จากสมการ

$$V_{LL1} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} (V_{AN})_1 = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \times \frac{4}{\pi} \times \frac{V_d}{\pi} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \times V_d = 0.78V_d \quad (2.1)$$

รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าระหว่างสายที่ทำงานในย่านรูปคลื่นสี่เหลี่ยมจะไม่ขึ้นกับโหลด และจะมีฮาร์โมนิกประกอบด้วย

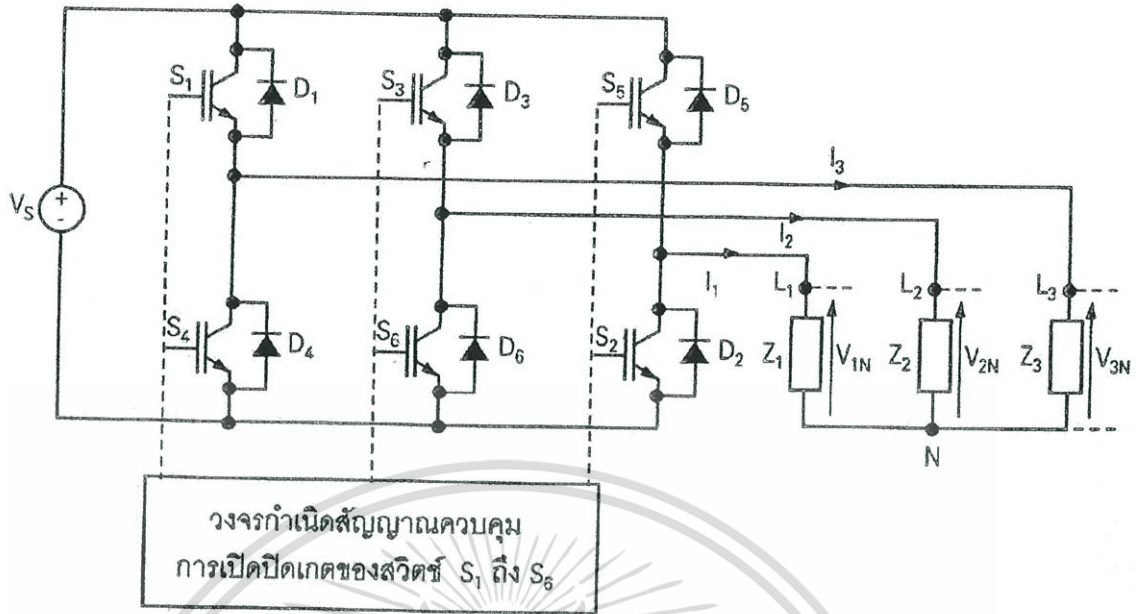
$$V_{LL1} = 0.78 \times \frac{V_d}{h} \quad \text{เมื่อ } h = 6n \pm 1, n = 1, 2, 3, \dots \quad (2.2)$$

ฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นในอินเวอร์เตอร์สามเฟสกรณีแรงดันไฟฟ้าด้านออกและโหลดสมดุล จะเกิดที่ลำดับ $h = 5, 7, 11, \dots$

ดังนั้นฮาร์โมนิกที่มีขนาดมากที่สุดและอยู่ใกล้ความถี่หลักมูลมากที่สุดคือฮาร์โมนิกลำดับที่ 5

2.2.5 อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบขับเคลื่อน

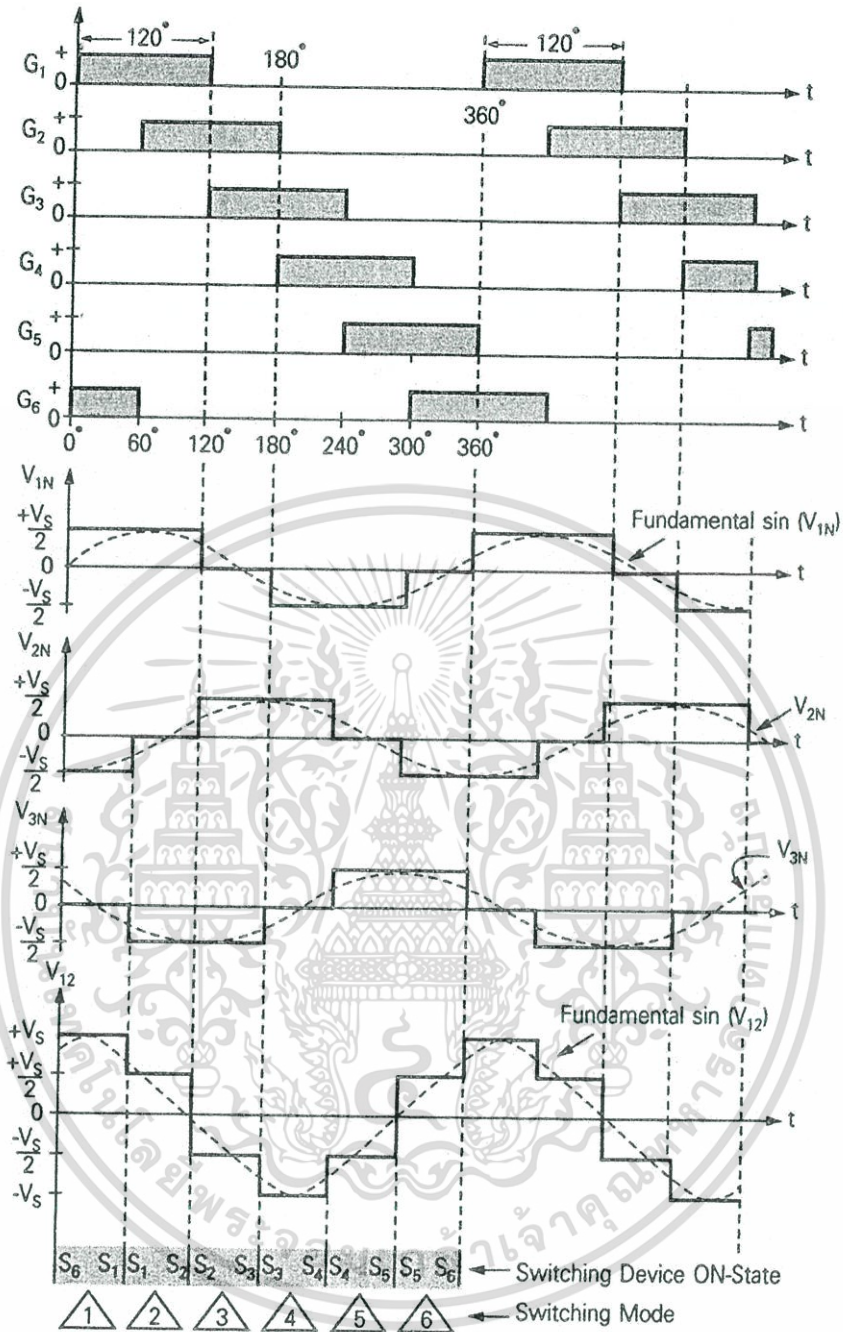
อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ประกอบไปด้วยสวิทช์อินเล็กทรอนิกส์กำลัง 6 ตัว คือ สวิทช์ S_1 และ S_4 ต่ออยู่กับเอาต์พุตเฟสที่ 1 (L_1) สวิทช์ S_3 และ S_6 ต่อกับเอาต์พุตของเฟสที่ 2 (L_2) และสวิทช์ S_5 และ S_2 ต่อกับเอาต์พุตเฟสที่ 3 (L_3) โหลด 3 เฟสต่อด้านเอาต์พุตที่ขั้ว L_1, L_2, L_3 ดังแสดงในรูปที่ 2.14 สัญญาณสำหรับควบคุมการเปิด-ปิดสวิทช์ S_1 ถึง S_6 สามารถควบคุมให้สวิทช์แต่ละตัวทำงานได้ 2 แบบ คือ แบบนำกระแส 180° (180° Conduction) และแบบการนำกระแส 120° (120° Conduction) สวิทช์อินเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในวงจรในรูปที่ 2.14 คือ ไอจีบีที (S_1 ถึง S_6) และไดโอด (D_1 ถึง D_6)



รูปที่ 2.13 วงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ต่อโหลดแบบสตาร์

อินเวอร์เตอร์ 3 เฟสแบบนำกระแส 120° จากวงจรในรูปที่ 2.14 เมื่อควบคุมให้ สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังแต่ละตัวนำกระแสตัวละ 120° โดยใช้สัญญาณควบคุมการเปิด - ปิดเกตของ ไอจีบีทีตามลำดับ G_1 ถึง G_6 ดังรูปที่ 11.4 จะพบว่า มีไอจีบีที 2 ตัวทำงานพร้อมกันในแต่ละช่วง ตามลำดับดังนี้ คือ S_6S_1 , S_1S_2 , S_2S_3 , S_3S_4 , S_4S_5 , S_5S_6 และ S_6S_1 จึงได้รูปคลื่นแรงดันคร่อมโหลด ระหว่างเฟส V_{1N} , V_{2N} และ V_{3N} ดังแสดงในรูปที่ 2.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

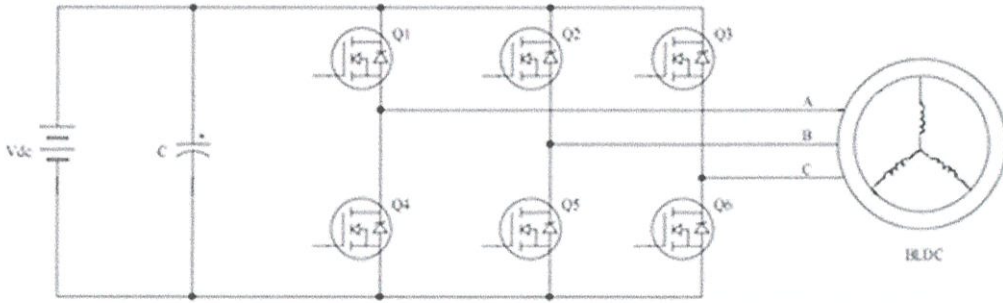


รูปที่ 2.16 รูปคลื่นสัญญาณควบคุมอินเวอร์เตอร์แบบนำกระแส 120° และรูปคลื่นแรงดันเฟส (V_p) และแรงดันระหว่างสาย (V_L)

2.2.6 วงจรกำลังของอินเวอร์เตอร์

เป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส อุปกรณ์ที่ใช้ในการสวิตช์คือ Mosfetเบอร์ IRF2907

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 วงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส

หาพิกัดแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์เมื่อกำหนดแรงดันด้านเข้า ประมาณ $V_d = 40$ โวลต์

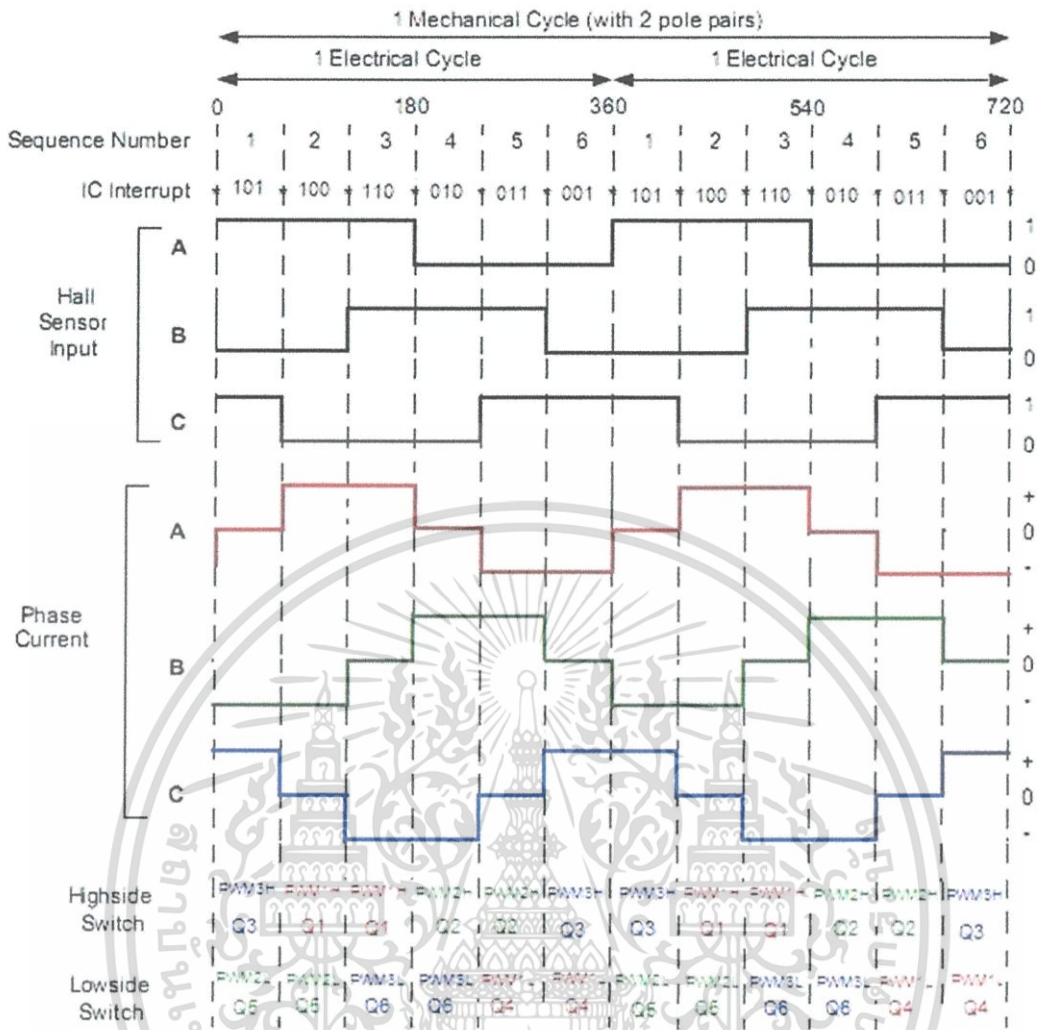
ตารางที่ 2.3 ลำดับสำหรับหมุนมอเตอร์ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา(หมุนขวา)

Sequence Number	Hall Sensor Input			Active PWMs	Phase Current		
	A	B	C		A	B	C
1	1	0	1	PWM3H(Q3) PWM2L(Q5)	Off	DC-	DC+
2	1	0	0	PWM1H(Q1) PWM2L(Q5)	DC+	DC-	Off
3	1	1	0	PWM1H(Q1) PWM3L(Q6)	DC+	Off	DC-
4	0	1	0	PWM2H(Q2) PWM3L(Q6)	Off	DC+	DC-
5	0	1	1	PWM2H(Q2) PWM1L(Q4)	DC-	DC+	Off
6	0	0	1	PWM3H(Q3) PWM1L(Q4)	DC-	Off	DC+

ตารางที่ 2.4 ลำดับสำหรับหมุนมอเตอร์ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา(หมุนซ้าย)

Sequence Number	Hall Sensor Input			Active PWMs	Phase Current		
	A	B	C		A	B	C
1	0	0	1	PWM1H(Q1) PWM3L(Q6)	DC+	Off	DC-
2	0	1	1	PWM1H(Q1) PWM2L(Q5)	DC+	DC-	Off
3	0	1	0	PWM3H(Q3) PWM2L(Q5)	Off	DC-	DC+
4	1	1	0	PWM3H(Q3) PWM1L(Q4)	DC-	Off	DC+
5	1	0	0	PWM2H(Q2) PWM1L(Q4)	DC-	DC+	Off
6	1	0	1	PWM2H(Q2) PWM3L(Q6)	Off	DC+	DC-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

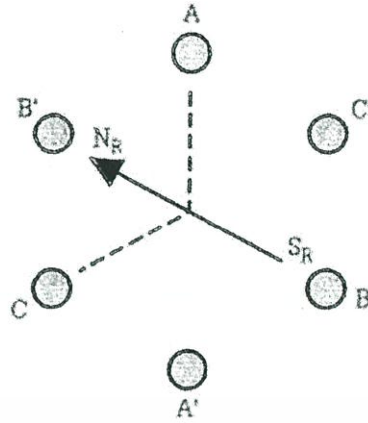


รูปที่ 2.18 การทำงานของมอเตอร์ใน 1cycle

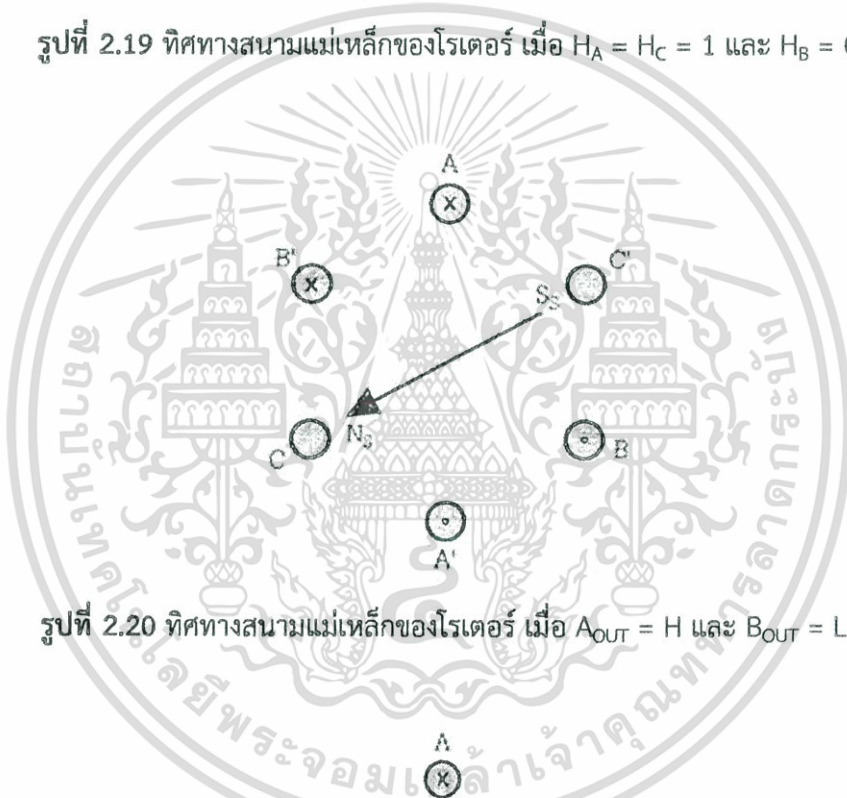
สำหรับลอจิกการทำงานของชุดอินเวอร์เตอร์จะเป็นไปตามตารางที่ 2.3 และ 2.4 ซึ่งสามารถอธิบายการทำงานได้ดังนี้
กรณีหมุนขวา

ขั้นที่ 1 $H_A = H_C = 1$, $H_B = 0$ แสดงว่าทิศทางสนามแม่เหล็กของโรเตอร์มีทิศดังรูปที่ 2.17 ลอจิกที่ได้จากการตรวจวัด hall effect จะถูกนำมา decode เพื่อสร้างสัญญาณ trig ให้กับอินเวอร์เตอร์เพื่อให้มอเตอร์หมุนไปในทิศทางที่ต้องการ ซึ่งในกรณีนี้ decoder จะสั่งให้ $A_{OUT} = H$ และ $B_{OUT} = L_6$ ซึ่งจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กในทิศทางดังรูปที่ 2.18

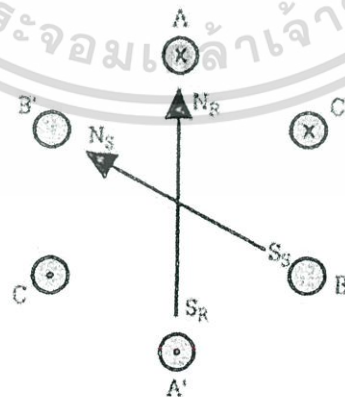
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 ทิศทางสนามแม่เหล็กของโรเตอร์ เมื่อ $H_A = H_C = 1$ และ $H_B = 0$



รูปที่ 2.20 ทิศทางสนามแม่เหล็กของโรเตอร์ เมื่อ $A_{OUT} = H$ และ $B_{OUT} = L$



รูปที่ 2.21 ทิศทางสนามแม่เหล็กของโรเตอร์ เมื่อ $A_{OUT} = H$ และ $C_{OUT} = L$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.17 และ 2.18 จะเห็นว่าขั้วเหนือของสนามแม่เหล็กบนโรเตอร์จะใกล้กับขั้วเหนือของสนามแม่เหล็กบนสเตเตอร์ และขั้วใต้ก็จะเป็นเช่นเดียวกัน จึงทำให้เกิดแรงผลักระหว่างขั้วแม่เหล็กของสเตเตอร์กับโรเตอร์ ทำให้มอเตอร์หมุนไปทางขวา

ขั้นที่ 2 $H_A = 1$, $H_B = H_C = 0$ แสดงว่าขั้วเหนือของโรเตอร์ชี้มาที่ A (หมุนขวามาจากตำแหน่งของรูปที่ 10) อินเวอร์เตอร์ก็จะทำงานในตำแหน่งที่ $A_{OUT} = H$ และ $C_{OUT} = L$ เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กให้ผลักดันโรเตอร์ให้หมุนขวาต่อไป ดังรูปที่ 2.19

การทำงานจะวนไปอย่างนี้จนถึงขั้นที่ 6 แล้วกลับมาเริ่มต้นที่ขั้นที่ 1 ใหม่ ถ้าต้องการให้มอเตอร์หมุนเร็วขึ้นก็เพิ่มแรงดัน V_{motor} ซึ่งเป็นแรงดันกระแสตรง ก็จะไปทำให้สนามแม่เหล็ก N_S-N_R ผลักกันแรงขึ้นในช่วงแรกเพื่อเร่งความเร็วรอบให้มากขึ้น

ในกรณีหมุนกลับทางก็ยังคงเหมือนเดิม เพียงแต่เปลี่ยนทิศทางของสนามแม่เหล็กบนสเตเตอร์ เพื่อให้เกิดแรงผลักที่กลับทิศกับของเดิม

2.2.7 วงจรขับ

การทำงานของสวิตช์ จะทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง โดยขณะที่สวิตช์นำกระแสจะเกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะนำกระแส ซึ่งเกิดจากการที่แรงดันคร่อมสวิตช์มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ และอีกกรณีหนึ่งคือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการเปลี่ยนสถานะของสวิตช์ (หรือกำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการสวิตช์) ซึ่งโดยทั่วไป สำหรับวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการสวิตช์มีค่าสูงกว่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะนำกระแสมา

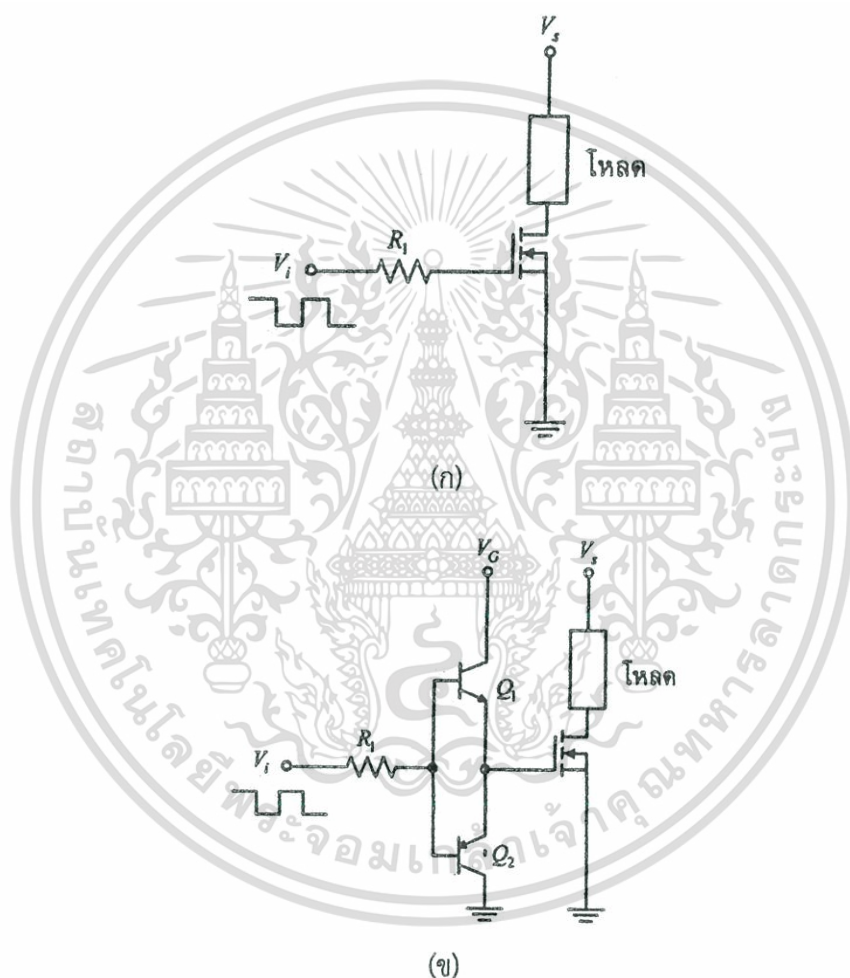
2.2.8 การออกแบบวงจรขับเคลื่อนสำหรับมอสเฟตกำลัง

มอสเฟตกำลังเป็นสวิตช์ที่ควบคุมด้วยแรงดัน (voltage-controlled) ทำให้ง่ายต่อการควบคุมให้เริ่มนำกระแสหรือเริ่มหยุดนำกระแส ซึ่งจะเป็นข้อดีที่เหนือกว่ากรณีของทรานซิสเตอร์กำลัง มอสเฟตกำลังจะนำกระแสก็ต่อเมื่อแรงดันดักคร่อมขาเกตเทียบกับขาซอส (V_{GS}) มีค่าสูงกว่าค่าแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยน (threshold voltage) และเมื่อระดับแรงดัน V_{GS} สูงกว่าแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยน จะเป็นผลทำให้มอสเฟตกำลังเข้าสู่การทำงานในโหมดโอห์มมิก (ohmic region) ซึ่งโดยทั่วไป แรงดัน V_{GS} เพื่อให้สวิตช์เริ่มนำกระแสจะมีค่าอยู่ระหว่าง 10 ถึง 20 โวลต์ และเพื่อให้สวิตช์ไม่นำกระแสสามารถกระทำได้โดยการทำให้ V_{GS} มีค่าต่ำกว่าแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยน และในขณะที่สวิตช์นำกระแสและไม่นำกระแส กระแสที่ป้อนเข้าขาเกตจะมีค่าเท่ากับศูนย์ อย่างไรก็ตาม ความเร็วในการสวิตช์ จะสามารถหาได้จากความเร็วในการเก็บและคายประจุของค่าตัวเก็บประจุแผ่นด้านเข้าของมอสเฟตกำลัง (parasitic input capacitance) ซึ่งตัวเก็บประจุจะต้องทำการสะสมประจุเพื่อให้สวิตช์นำกระแส และจะต้องทำการคายประจุเพื่อทำให้สวิตช์ไม่นำกระแส สำหรับวงจรขับของ ไอจีบีที (IGBT) จะคล้ายกับกรณีมอสเฟตกำลังโดยมีรายละเอียด ดังนี้

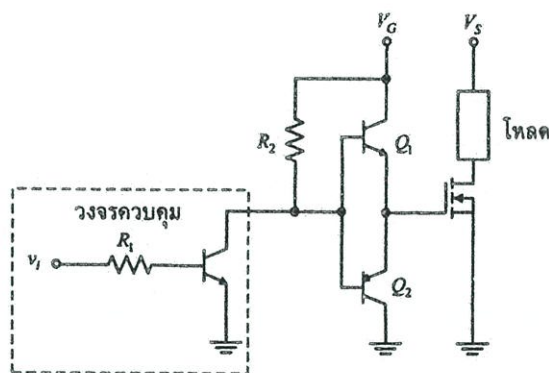
วงจรขับเคลื่อนของมอสเฟตกำลังจะต้องสามารถจ่ายกระแส (sourcing) และดึงกระแส (sinking) ได้อย่างรวดเร็วเพื่อให้มอสเฟตกำลังสามารถทำงานได้ที่ความถี่สูง รูปที่ 2.20(ก) แสดงตัวอย่างของวงจรขับที่ใช้ในการขับมอสเฟตกำลัง ซึ่งจะไม่เหมาะสมกับงานที่ต้องการความถี่สวิตช์สูงๆ และนอกจากนั้น ถ้าสัญญาณด้านเข้าได้รับแรงดันจากอุปกรณ์ลอจิกดิจิทัลแรงดันต่ำ (low-voltage digital device) แรงดันด้านออกอาจจะไม่เพียงพอที่จะขับให้มอสเฟตกำลังนำกระแสได้ จึงต้องมีการปรับปรุงวงจรขับ ดังแสดงในรูปที่ 2.20 (ข) ด้วยการใส่คู่ของวงจรมิตเตอร์ตาม (double emitter-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

follower) หรือ โทเท็มโพล (totem pole) ซึ่งเป็นวงจรที่ประกอบด้วยคู่อุปกรณ์ทรานซิสเตอร์แบบ NPN และ PNP สำหรับการทำงานของวงจรขั้วเกต เมื่อแรงดันด้านเข้าของวงจรขั้วเกตมีค่าสูง ทรานซิสเตอร์ Q_1 จะเริ่มนำกระแส และ ทรานซิสเตอร์ Q_2 ไม่นำกระแส เป็นผลทำให้มอสเฟตกำลังเริ่มนำกระแส และเมื่อแรงดันด้านเข้าของวงจรขั้วเกตมีค่าต่ำ ทรานซิสเตอร์ Q_1 จะไม่นำกระแสและ ทรานซิสเตอร์ Q_2 นำกระแส ซึ่งจะเป็นการย้ายประจุจากขาเกต เป็นผลทำให้มอสเฟตกำลังเริ่มหยุดนำกระแสได้ นอกจากนี้สัญญาณด้านเข้าอาจจะมาจากวงจร คอลเลกเตอร์แบบเปิด (open collector TTL) ที่ประกอบด้วย โทเท็มโพล ซึ่งจะใช้เป็นบัฟเฟอร์ (buffer) สำหรับแหล่งจ่ายกระแส (source) และดึงกระแส (sink) ที่ขาเกต ดังแสดงในรูปที่ 2.20 (ค)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค)

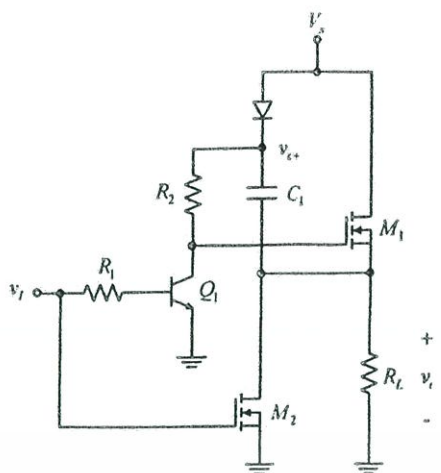
รูปที่ 2.22 (ก) วงจรขับเคลื่อนของมอสเฟตกำลัง

(ข) วงจรขับเคลื่อนแบบโตะเต็มโพล

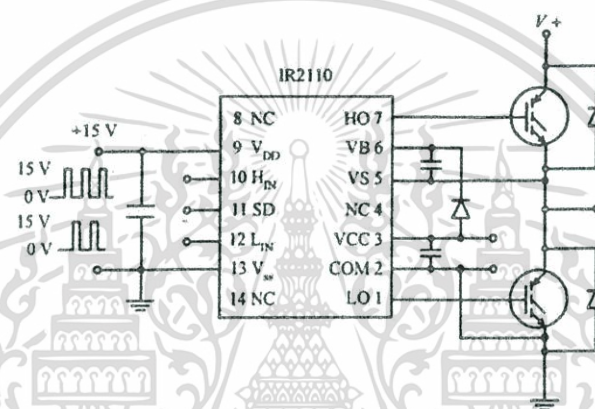
(ค) ไอซีของวงจรขับเคลื่อนที่มีบัฟเฟอร์แบบโตะเต็มโพล

นอกจากนี้ยังมีคอนเวอร์เตอร์บางชนิด เช่น วงจรขับเคลื่อนเวอร์เตอร์ ที่ใช้มอสเฟตกำลังแบบ n-channel ซึ่งจะเป็นวงจรที่ต้องการวงจรขับเคลื่อนมอสเฟตกำลังที่มีกราวด์ลอย (floating ground) เมื่อเทียบกับกราวด์ของวงจร (circuit ground) โดยวงจรขับเคลื่อนสำหรับวงจรดังกล่าวจะเรียกว่า วงจรขับเคลื่อนด้านบัสบวก (high-side drivers) โดยจะมีโครงสร้างของวงจรที่เรียกว่า “บูตสเตรป (bootstrap)” ดังแสดงในรูปที่ 2.21 (ก)

หลักการทำงานของวงจรบูตสเตรป จะเริ่มจากเมื่อแรงดัน v_i มีค่าสูง (high) ทรานซิสเตอร์ Q_1 และมอสเฟต M_2 จะนำกระแส และเมื่อมอสเฟต M_2 นำกระแส จะทำให้ตัวเก็บประจุ C_1 สวมประจุผ่านทางไดโอดโดยจะมีแรงดันเท่ากับ V_S ในทำนองกลับกัน เมื่อแรงดัน v_i มีค่าต่ำ (low) ทรานซิสเตอร์ Q_1 จะไม่นำกระแส ทำให้มีแรงดันที่ขาเกตของมอสเฟต M_1 เพิ่มขึ้นเท่ากับ V_{C+} ทำให้มอสเฟต M_1 นำกระแสและเมื่อมอสเฟต M_1 นำกระแส แรงดันด้านออก v_o จะมีค่าเท่ากับ V_S โดยที่แรงดันขาเกตของมอสเฟต M_1 จะมีค่าเท่ากับ $2V_S$ เพราะพลังงานที่สะสมในตัวเก็บประจุ C_1 ทำให้แรงดันขาเกต-ซอส (gate-to-source voltage : V_{GS}) ของมอสเฟต M_1 ยังคงมีค่าเท่ากับ V_S ขณะที่มอสเฟต M_1 นำกระแสและเมื่อ v_i กลับมีค่าสูงอีกครั้ง ทำให้ทรานซิสเตอร์ Q_1 นำกระแส แรงดันขาเกตของมอสเฟต M_1 จะมีค่าลดต่ำลง จนกระทั่งมอสเฟต M_1 ไม่นำกระแสในที่สุด



(ก)



(ข)

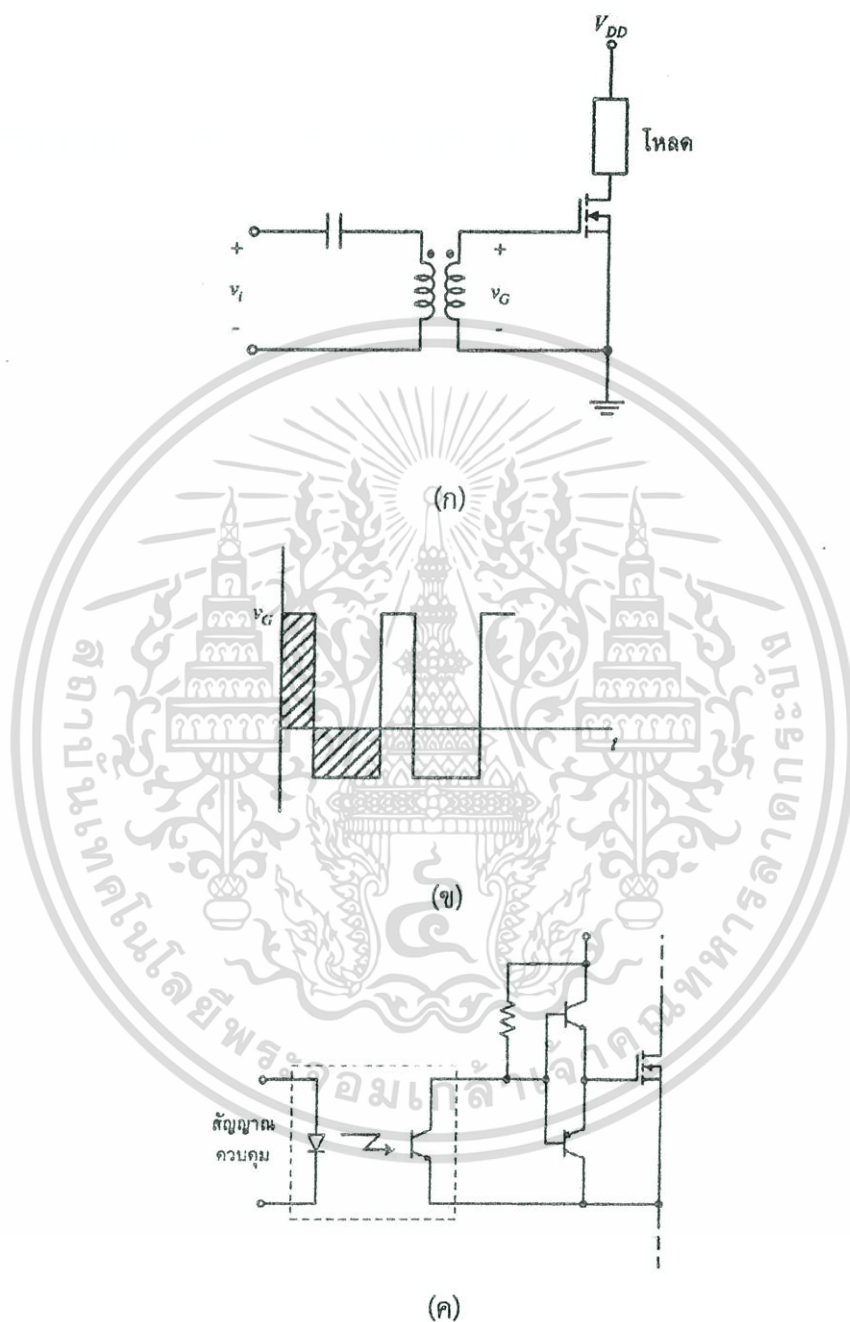
รูปที่ 2.23 (ก) วงจรบูตสเตรปสำหรับวงจรขับเคลื่อนด้านบัสบวกของมอสเฟตกำลัง
(ข) วงจรขับเคลื่อนเบอร์ IR2110 สำหรับไอซีบีทีที่ใช้ในวงจรฮาร์ดพริตจ์คอนเวอร์เตอร์ (Courtesy of International Rectifier Corporation)

วงจรขับเคลื่อนของมอสเฟตจะมีอยู่ในรูปของไอซี (Integrated-Circuit : IC) ดังแสดงตัวอย่างไอซีเบอร์ IR2210 ในรูปที่ 2.21 (ข) ซึ่งเป็นของ บริษัท International Rectifier ซึ่งเป็นไอซีที่ใช้สำหรับการออกแบบได้ทั้งวงจรขับเคลื่อนสำหรับสวิตช์ด้านบัสบวก (high-side switch) และบัสลบ (low-side switch) เช่น กรณีวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์ จะใช้วงจรขับเคลื่อนด้านบัสบวก วงจรฮาร์ดพริตจ์คอนเวอร์เตอร์จะใช้วงจรขับเคลื่อนทั้งด้านบัสบวกและบัสลบ ดังแสดงในรูปที่ 2.21(ข) โดยที่วงจรขับเคลื่อนด้านบัสบวกจะใช้วิธีการบูตสเตรป

การแยกจากกันทางไฟฟ้า (Electrical Isolation) ระหว่างมอสเฟตกับวงจรควบคุม (control circuit) โดยมากจะมีความจำเป็น เพราะระดับแรงดันที่แตกต่างกันอย่างมากระหว่างวงจรควบคุมกับวงจรกำลัง (power circuit) เช่น สำหรับมอสเฟตกำลังด้านบัสบวกของวงจรฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์หรือของวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์ เป็นต้น สำหรับวงจรที่ใช้ในการแยกจากกันทางไฟฟ้า โดยมากจะได้แก่แบบการการเชื่อมต่อทางแม่เหล็ก (magnetically coupled) และการเชื่อมต่อทางแสง (optically coupled circuit) รูปที่ 2.22(ก) แสดงวงจรควบคุมและวงจรกำลังที่แยกจากกันทางไฟฟ้าโดยอาศัยการเชื่อมต่อทางแม่เหล็กด้วยหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งตัวเก็บประจุที่ต่ออยู่กับหม้อแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

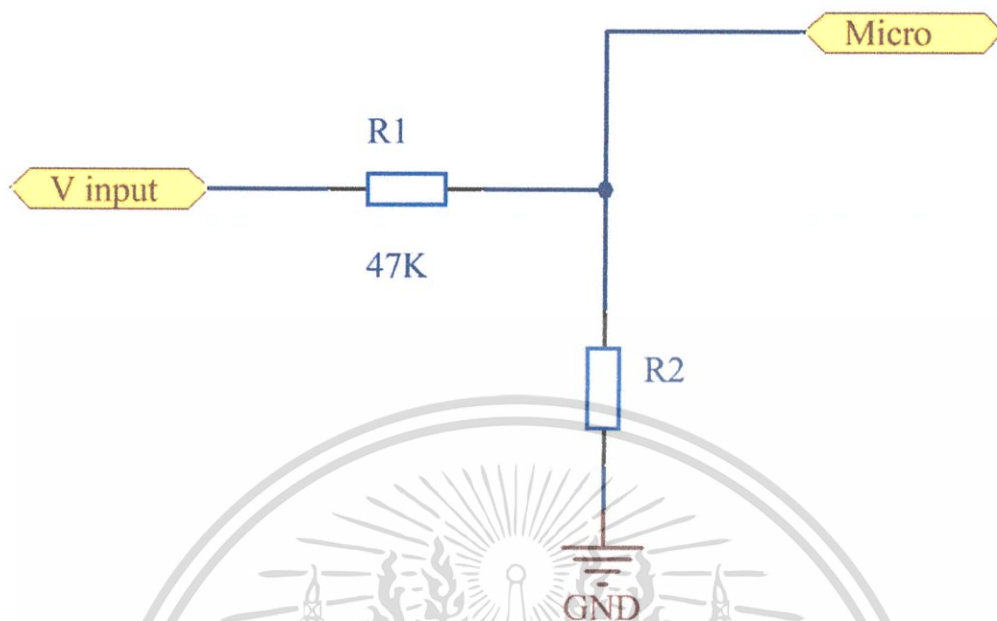
ไฟฟ้าจะใช้สำหรับป้องกันไฟฟ้ากระแสตรงหรือดีซีออฟเซต (dc offset) สำหรับตัวอย่างรูปคลื่นสัญญาณเข้าขาเกตได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.22 (ข) ตามลำดับ และสำหรับตัวอย่างของการแยกจากกันทางไฟฟ้าโดยอาศัยการเชื่อมต่อทางแสงได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.22 (ค)



รูปที่ 2.24 (ก) การแยกจากกันทางไฟฟ้าระหว่างวงจรควบคุมและวงจรกำลังด้วยหม้อแปลงไฟฟ้า
 (ข) แรงดันไฟฟ้าด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า
 (ค) การแยกจากกันทางไฟฟ้าระหว่างวงจรควบคุมและวงจรกำลังด้วยการเชื่อมต่อทางแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.9 Voltage Divider



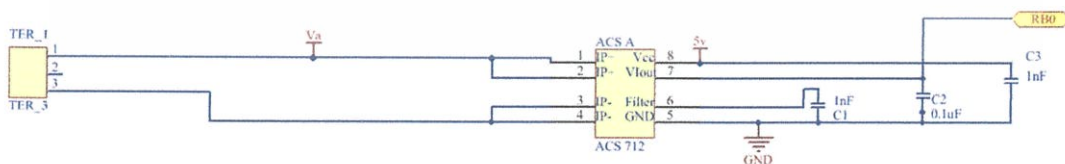
รูปที่ 2.25 วงจร Voltage Divider

ใช้แบ่งแรงดันอินพุต เพื่อนำไปใช้ในไมโครคอนโทรลเลอร์โดยจำกัดแรงดันไม่เกิน 5V โดยคำนวณจาก

$$V_{\text{micro}} = V_{\text{in}} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} \tag{2.3}$$

โดย R_1 มีค่า 47K โอห์ม, R_2 หาได้จากการคำนวณค่า V_{micro} ที่ต้องการใช้

2.2.10 Current Sensor



รูปที่ 2.26 วงจร Current Sensor

ใช้ Sensor ACS 712 ตรวจสอบวัดสัญญาณกระแส rms และส่งค่าไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F2010

2.3.1 อินเทอร์รัปต์ภายนอกและคุณสมบัติ CN

อินเทอร์รัปต์ (Interrupt) คือกระบวนการขัดจังหวะการทำงานของโปรแกรมหลักที่กำลังทำงานอยู่แล้วไปทำงานในส่วนของฟังก์ชันบริการอินเทอร์รัปต์ที่เรียกว่า Interrupt Service Routine (ISR) สำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F2010 มีแหล่งสัญญาณอินเทอร์รัปต์ 44 ช่อง ดังตารางที่ 2.5 และมีอินเทอร์รัปต์เนื่องจากข้อผิดพลาดของ CPU (processor exceptions) จำนวน 4 ช่อง อินเทอร์รัปต์ 4 ช่องนี้ เรียกว่า แทร็ป (Trap) หรือ นอนมาส์กเอเบิลแทร็ป (non-maskable trap) โดยอินเทอร์รัปต์พวกนี้ผู้ใช้งานไม่สามารถปิดการใช้งานอินเทอร์รัปต์ได้ การอินเทอร์รัปต์จะมีการตอบสนองทันทีเมื่อ CPU ส่งสัญญาณมาให้ ประกอบไปด้วย อินเทอร์รัปต์แทร็ป เนื่องจากความผิดพลาดทางด้านคณิตศาสตร์ (Math Error Trap) , ความผิดพลาดเนื่องจากตำแหน่งแอดเดรส (Address Error Trap) , ความผิดพลาดเนื่องจากสแต็ก (Stack Error Trap) และ ความผิดพลาดจากออสซิลเลเตอร์ (Oscillator Fail Trap) แสดงดังตารางที่ 2.5 ส่วนอินเทอร์รัปต์ที่ผู้ใช้งานสามารถเปิดหรือปิดการใช้งานอินเทอร์รัปต์ได้ตามความต้องการ คือ อินเทอร์รัปต์เวกเตอร์ (Interrupt Vector) ซึ่งแสดงรายละเอียดไว้ดังตารางที่ 2.6

หน่วยประมวลผล (CPU) จะทำหน้าที่ในการอ่านข้อมูลจากตารางอินเทอร์รัปต์เวกเตอร์ (Interrupt Vector Table) หรือ IVT และจัดการส่งแอดเดรสอินเทอร์รัปต์เวกเตอร์ให้กับโปรแกรมเคอร์เนลเมื่อเกิดอินเทอร์รัปต์ขึ้น จากตารางที่ 2.6 อินเทอร์รัปต์เนื่องจากสัญญาณภายนอก (External Interrupt 0) หรือ INTO จะมีระดับความสำคัญสูงสุดและอินเทอร์รัปต์ตรวจสอบความผิดพลาดของสัญญาณ PWM ช่อง A (PWM Fault A หรือ FLTA) มีระดับความสำคัญต่ำสุด จากตารางอินเทอร์รัปต์เวกเตอร์ดังกล่าวสามารถแบ่งอินเทอร์รัปต์เนื่องจากสัญญาณได้ 2 ประเภท คือ อินเทอร์รัปต์เนื่องจากสัญญาณภายใน (Internal Interrupt) และอินเทอร์รัปต์เนื่องจากสัญญาณภายนอก (External Interrupt)

เนื้อหาจะกล่าวถึงเฉพาะอินเทอร์รัปต์เนื่องจากสัญญาณภายนอกช่องที่ 0 ถึง 2 ประกอบไปด้วย

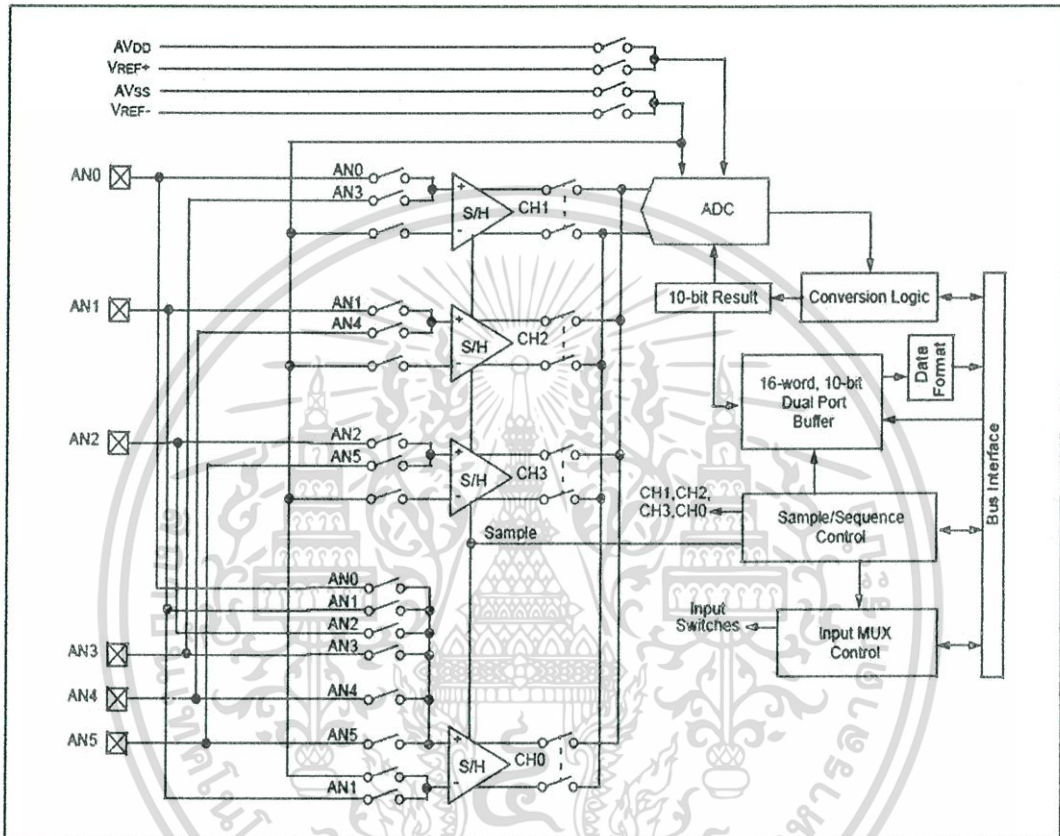
- INTO (External Interrupt 0) ที่ขาพอร์ต RE8
- INT1 (External Interrupt 1) ที่ขาพอร์ต RD0
- INT2 (External Interrupt 2) ที่ขาพอร์ต RD1

ตารางที่ 2.5 ตารางแทร็ปเวกเตอร์

Vector Number	IVT Address	AIVT Adress	Trap Source
0	0x000004	0x000084	Reserved
1	0x000006	0x000086	Oscillator Failure
2	0x000008	0x000088	Address Error
3	0x00000A	0x00008A	Stack Error
4	0x00000C	0x00008C	Arithmetic Error
5	0x00000E	0x00008E	Reserved
6	0x000010	0x000090	Reserved
7	0x000012	0x000092	Reserved

2.3.2 การใช้งานโมดูลแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิทัล

โมดูลแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิทัลขนาด 10 บิต (10-bit high-speed analog-to-digital convert) หรือโมดูล ADC เป็นโมดูลรับแรงดันอนาลอกแปลงสัญญาณเป็นตัวเลขความละเอียดขนาด 10 บิต โมดูล ADC ของ dsPIC30F2010 มีจำนวน 6 ช่องสัญญาณประกอบไปด้วย AN0/RB0 , AN1/RB1 , AN2/RB2 , AN3/RB3 , AN4/RB4 และ AN5/RB5 บล็อกไดอะแกรมและวงจรการทำงานของโมดูล ADC แสดงดังรูปที่ 2.34



รูปที่ 2.27 ไดอะแกรมโมดูล ADC ของ dsPIC30F2010

โดยมีคุณสมบัติพื้นฐานของโมดูลดังนี้

- แปลงสัญญาณข้อมูลแบบประมาณค่าหรือซัดเซสซีฟ แอปพร็อกซิเมชัน (Successive Approximation : SAR)
- ความเร็วในการแปลงสัญญาณมากถึง 500 ksps (500,000 จุดตัวอย่างต่อวินาที)
- มีช่องอินพุตสัญญาณอนาลอก 6 ช่อง
- อินพุตรับแรงดันอ้างอิงจากภายนอกได้
- มีวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณ (S/H amplifiers) 4 ชุด
- สุ่มเก็บสัญญาณได้มากถึง 4 ช่องอินพุตสัญญาณอนาลอก
- กำหนดช่องการอ่านค่าสัญญาณอนาลอกได้อัตโนมัติ
- เลือกแหล่งกระตุ้นการแปลงสัญญาณอนาลอกได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- มีบัฟเฟอร์เก็บข้อมูลสัญญาณ 16 ตัว ขนาด 16 บิต
- เลือกโหมดการเก็บข้อมูลแบบเต็มบัฟเฟอร์ได้
- กำหนดการแสดงข้อมูลสัญญาณดิจิทัลได้ 4 รูปแบบ
- กำหนดให้ทำงานได้ในโหมดสลีปและโอเดิล

2.3.3 การใช้งานโมดูล MCPWM

โมดูล Motor Control PWM (MCPWM) เป็นโมดูลพื้นฐานสำหรับสร้างสัญญาณ PWM (Pulse width modulated) เพื่อนำมาประยุกต์ใช้งานในการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ชนิดต่างๆ เช่น

- มอเตอร์แบบเฟสเดียว (dsPIC30F2010 ใช้ขับมอเตอร์แบบนี้ได้ 3 ตัว)
- มอเตอร์แบบกระแสสลับแบบสามเฟส (Three-Phase AC Induction Motor)
- มอเตอร์แบบสวิตช์ต้านทานแม่เหล็ก SR (Switched Reluctance Motor)
- มอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน BLDC (Brushless DC Motor)
- UPS (Uninterruptable Power Supply) เครื่องสำรองไฟฉุกเฉิน

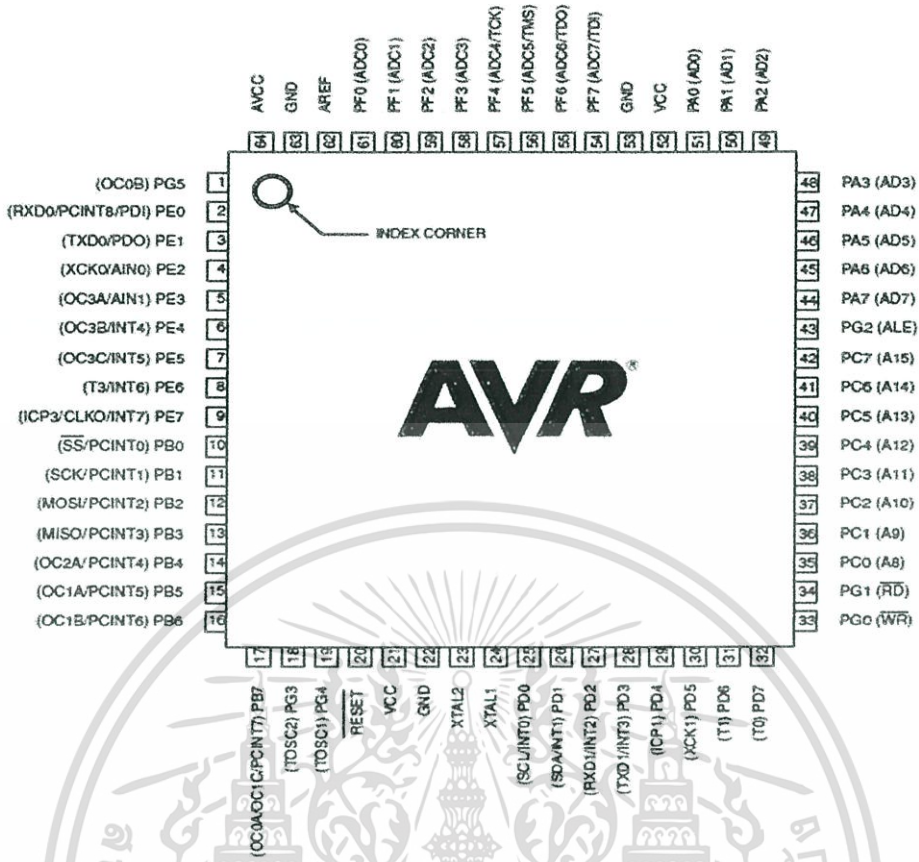
2.3.3.1. คุณสมบัติที่สำคัญของโมดูล MCPWM

- ฐานเวลาที่ใช้มีความละเอียด $T_{cy}/2$ ของขอบสัญญาณ PWM
- เลือกให้ทำงานในโหมดเอาต์พุตพร้อมกัน (Complementary Output Mode) หรือทำงานในโหมดเอาต์พุตอิสระ (Independent Output) ได้
- ฮาร์ดแวร์สามารถสร้างค่าความวิฤต (dead time) ได้
- กำหนดสัญญาณเอาต์พุตได้ด้วยกระบวนการทางซอฟต์แวร์ (Configuration bit)
- กำหนดโหมดเอาต์พุตคู่ได้
- มีฮาร์ดแวร์อินพุตตรวจสอบความผิดพลาด (fault) ได้ด้วยโปรแกรม
- สร้างสัญญาณกระตุ้นพิเศษสำหรับโมดูลแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นดิจิทัลได้

2.4 ไมโครคอนโทรลเลอร์ ATmega 2560

ไมโครคอนโทรลเลอร์ ATmega 2560 เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ 8 บิต นิยมใช้ร่วมกับโมดูล Arduino ซึ่งเป็นที่นิยมอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ซึ่งมีข้อมูลเฉพาะที่ควรทราบดังนี้

- 54/86 พอร์ต I/O สำหรับใช้งาน
- สัญญาณนาฬิกาตั้งแต่ 16 Mhz ขึ้นไป
- แรงดันที่ใช้งาน 4.5 – 5.5 โวลต์
- อุณหภูมิใช้งาน -40 ถึง 85 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2.28 ไมโครโปรเซสเซอร์ ATmega 2560

ตารางที่ 2.6 แสดงค่าข้อมูลของไมโครโปรเซสเซอร์ตระกูล ATmega

Device	Flash	EEPROM	RAM	General Purpose I/O pins	16 bits resolution PWM channels	Serial USARTs	ADC Channels
ATmega640	64KB	4KB	8KB	86	12	4	16
ATmega1280	128KB	4KB	8KB	86	12	4	16
ATmega1281	128KB	4KB	8KB	54	6	2	8
ATmega2560	256KB	4KB	8KB	86	12	4	16
ATmega2561	256KB	4KB	8KB	54	6	2	8

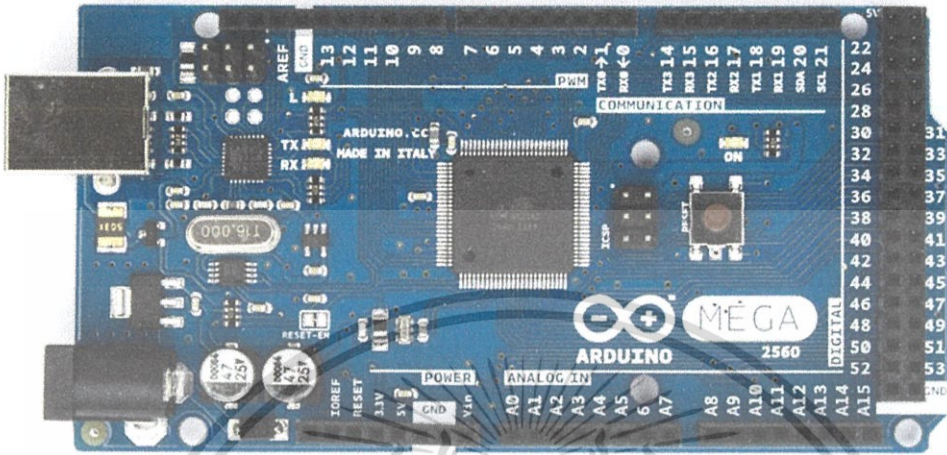
2.4.1 การใช้งาน Atmega 2560 ในโมดูล Arduino Mega 2560

เพื่อให้่ายต่อการใช้งาน ได้มีผู้พัฒนาการใช้งาน ATmega 2560 มาใช้ในโมดูลของ Arduino เนื่องจากมีการพัฒนาฟังก์ชันโกลบอลหลักเพื่อใช้งาน ซึ่งจะใช้ร่วมกับโปรแกรม Arduino IDE ในการป้อนคำสั่งหรือควบคุมการทำงานในรูปแบบต่างๆ Arduino Mega 2560 มีข้อมูลโดยสังเขปดังนี้

- ไมโครคอนโทรลเลอร์ ATmega 2560
- 54 พอร์ตดิจิตอล อินพุต/เอาพุต (15พอร์ตสำหรับการทำงานแบบ PWM)
- 16 พอร์ตอนาล็อกอินพุต

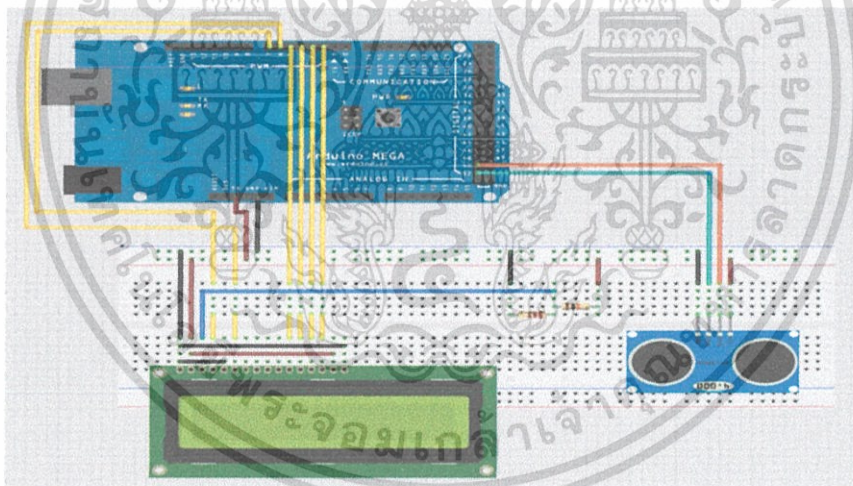
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- แรงดันใช้งาน 5 โวลต์
- กระแสใช้งานของพอร์ตดิจิทัล 40มิลลิแอมป์
- Clock speed 16Mhz



(ที่มา <http://www.electroschematics.com>)

รูปที่ 2.29 Arduino Mega 2560



(ที่มา <http://www.electroschematics.com>)

รูปที่ 2.30 การเชื่อมต่อ Arduino Mega 2560 กับ จอแสดงผล LCD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

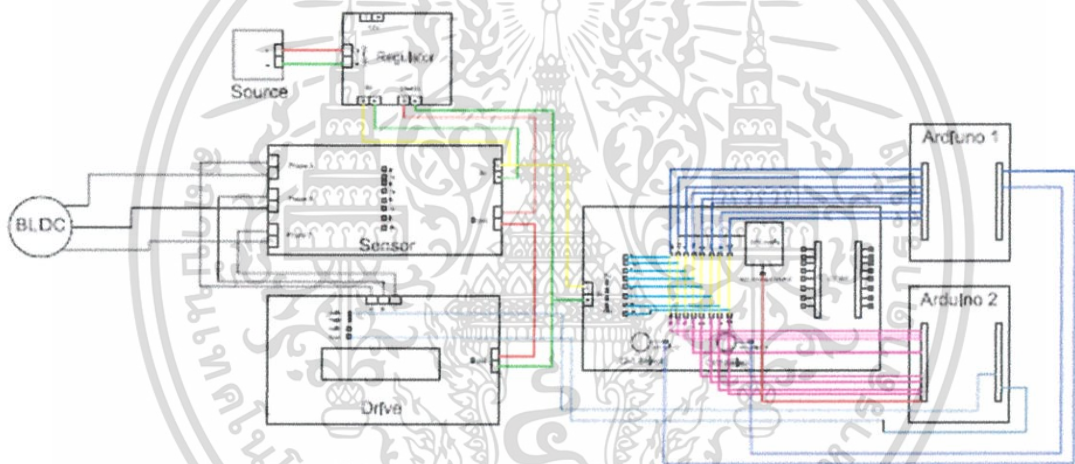
การออกแบบและสร้างระบบการทำงานของชุดการแสดงผลแบบตอบสนองอย่างรวดเร็วของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

ในบทนี้จะกล่าวถึงเฉพาะรายละเอียดต่างๆของการสร้างระบบขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านและการออกแบบโปรแกรมแสดงผลบนคอมพิวเตอร์

3.1 ขั้นตอนการทำงานของชุดการแสดงผลแบบตอบสนองอย่างรวดเร็วของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

3.1.1 ลักษณะการออกแบบ

ในการออกแบบระบบ จำเป็นจะต้องมีการแสดงถึงการทำงานในส่วนต่างๆของระบบโดยละเอียด เพื่อความเข้าใจและใช้งานได้อยู่ถูกต้องซึ่งรายละเอียดขั้นตอนการทำงานของระบบมีดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.1 การทำงานของชุดแสดงผลแบบเรียลไทม์ของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

จากรูปที่ 3.1 เป็นแผนผังในการออกแบบชิ้นงานแต่ละส่วนในการทำงาน โดยแบ่งเป็น 5 ส่วน คือ

- Regulator ทำหน้าที่แปลงแรงดันและส่งผ่านแรงดันไปยังวงจรต่างๆ โดยส่งสัญญาณสี่เหลี่ยม (5 โวลต์) สัญญาณสีแดง (24 โวลต์) และสัญญาณสีเขียว (Ground)
- Sensor ทำหน้าที่รับข้อมูลจากวงจรอื่นๆ เช่น แรงดัน กระแส เป็นต้น เพื่อเป็นต้นทางในการแปลงข้อมูลแล้วส่งไปยังวงจรกระจายข้อมูล
- Drive คือวงจรขับมอเตอร์ ใช้ในการขับมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน
- วงจรกระจายข้อมูล ทำหน้าที่รับข้อมูลจากแหล่งต่างๆไม่ว่าจะเป็น Drive , Sensor , Regulator เพื่อส่งผ่านไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-ไมโครคอนโทรลเลอร์ ใช้ Arduino Mega 2560 สองตัว โดยตัวเลขที่เป็นสัญญาณสีน้ำเงินเป็นวงจรสำหรับแสดงค่าผ่านจอแอลซีดี ส่วนสัญญาณสีชมพูเป็นวงจรที่ใช้สำหรับแสดงค่าผ่านคอมพิวเตอร์

3.1.2 การแสดงข้อมูล

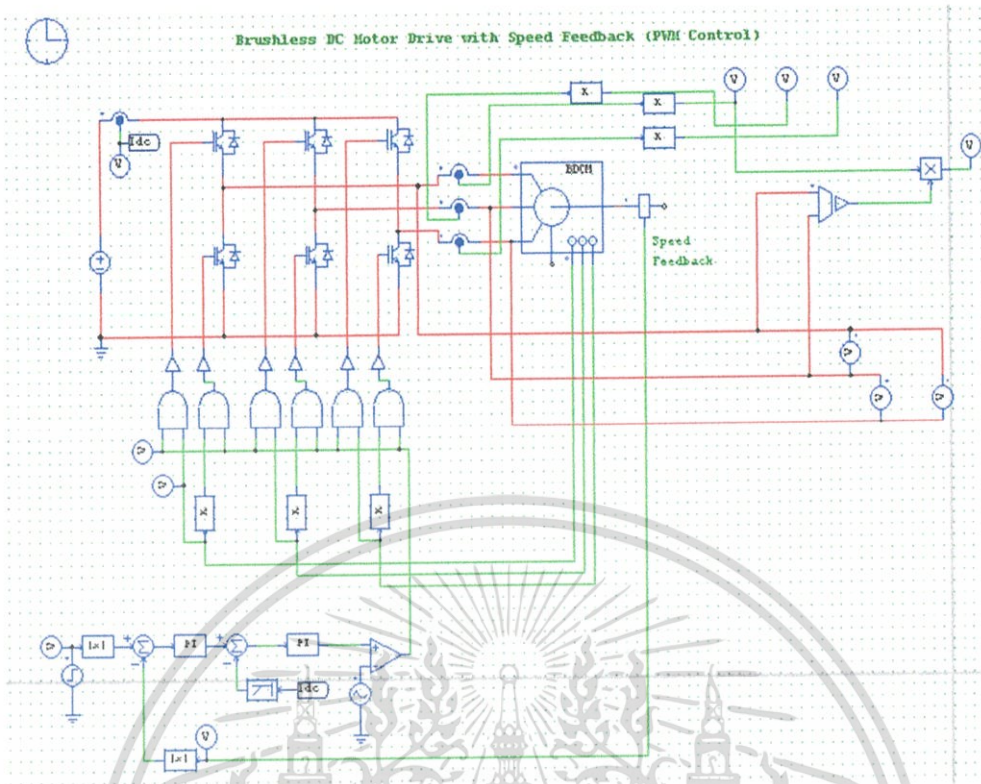
ในการแสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆจะนำค่าที่ถูกนำส่งเข้ามาประมวลผล ภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งจะนำมาแสดงผ่านจอ LCD และคอมพิวเตอร์ โดยมีพารามิเตอร์ต่างๆดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่แสดงผลผ่านตัวแสดงผล

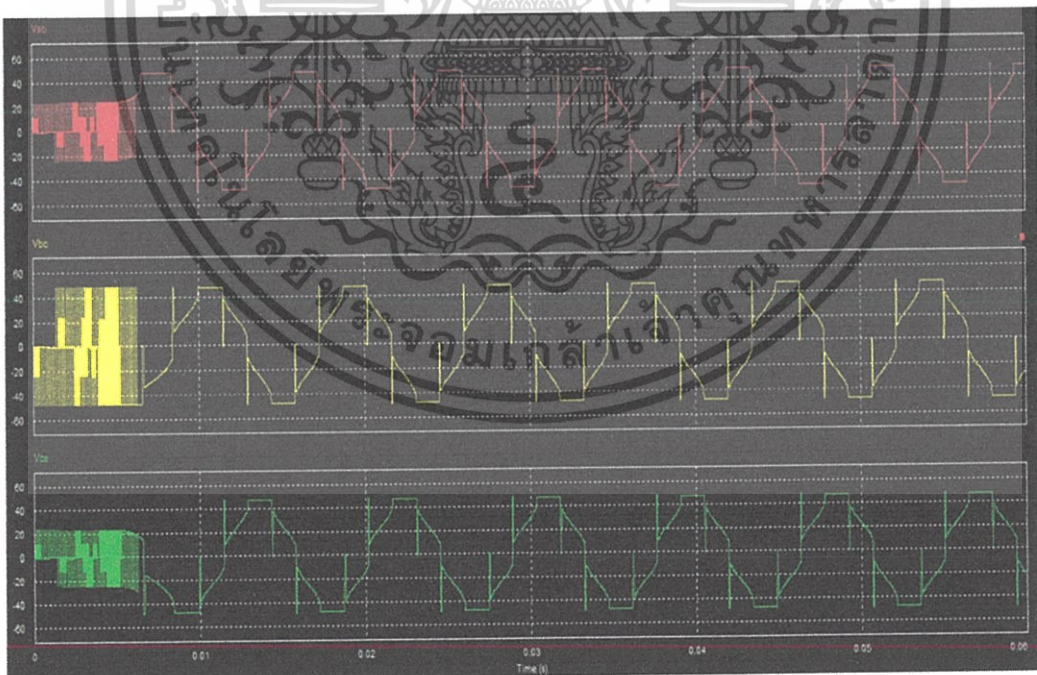
พารามิเตอร์	ความหมาย
V(in)	แรงดันด้านเข้า
I(in)	กระแสด้านเข้า
P(in)	กำลังไฟฟ้าด้านเข้า
V(ab)	แรงดันระหว่างสายเฟสเอและเฟสบี
V(bc)	แรงดันระหว่างสายเฟสบีและเฟสซี
V(ca)	แรงดันระหว่างสายเฟสซีและเฟสเอ
I(a)	กระแสเฟสเอ
I(b)	กระแสเฟสบี
I(c)	กระแสเฟสซี
P(out)	กำลังไฟฟ้าขาเข้าด้านออก
Efficiency	ประสิทธิภาพ
RPM	ความเร็วรอบของมอเตอร์
Frequency	ความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าที่ใช้ขับมอเตอร์

3.2 โมเดลจำลองการทำงานของชุดขับมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

ในการออกแบบระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน การทราบถึงข้อมูลและค่าพารามิเตอร์ต่างๆในระบบเป็นเรื่องที่สำคัญมาก ไม่ว่าจะเป็นค่ากระแส แรงดันทางด้านกำลังด้านออกล้วนเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง เพื่อเป็นข้อมูลอ้างอิงให้สามารถออกแบบระบบได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ

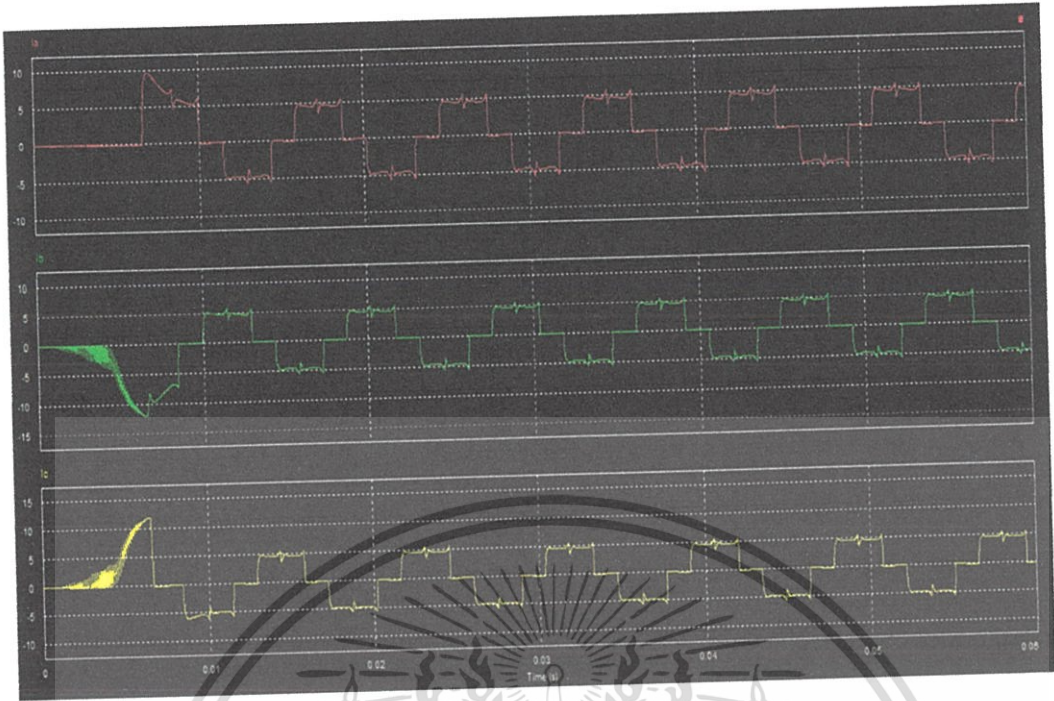


รูปที่ 3.2 โมเดลจำลองการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านโดยใช้โปรแกรม PSIM

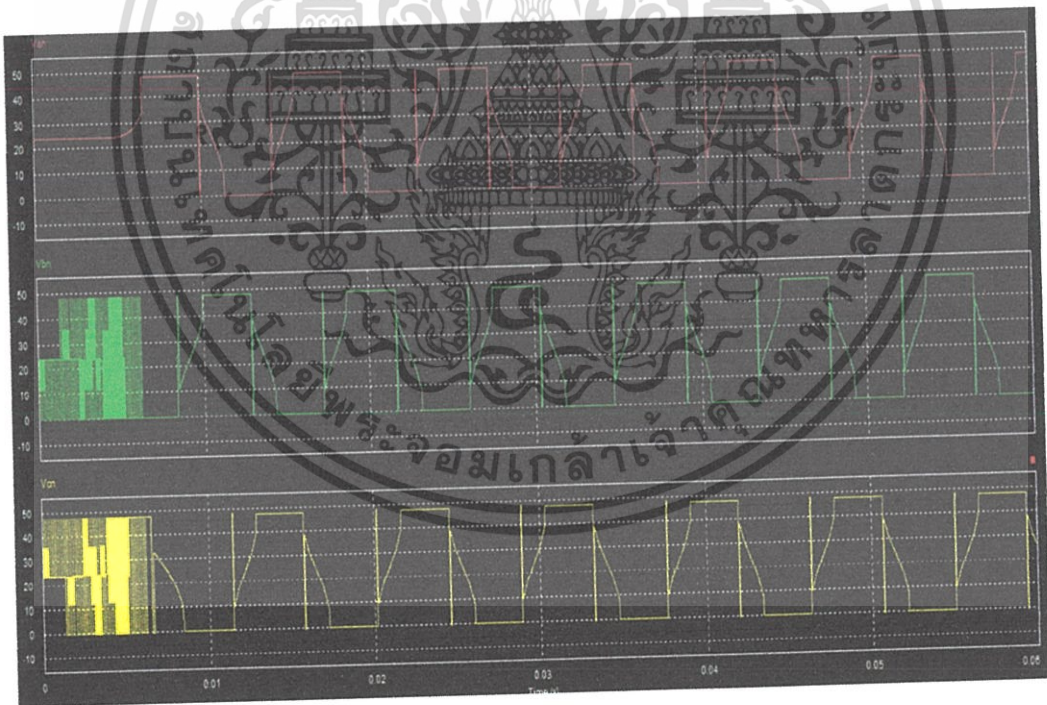


รูปที่ 3.3 สัญญาณแรงดันไลน์ของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

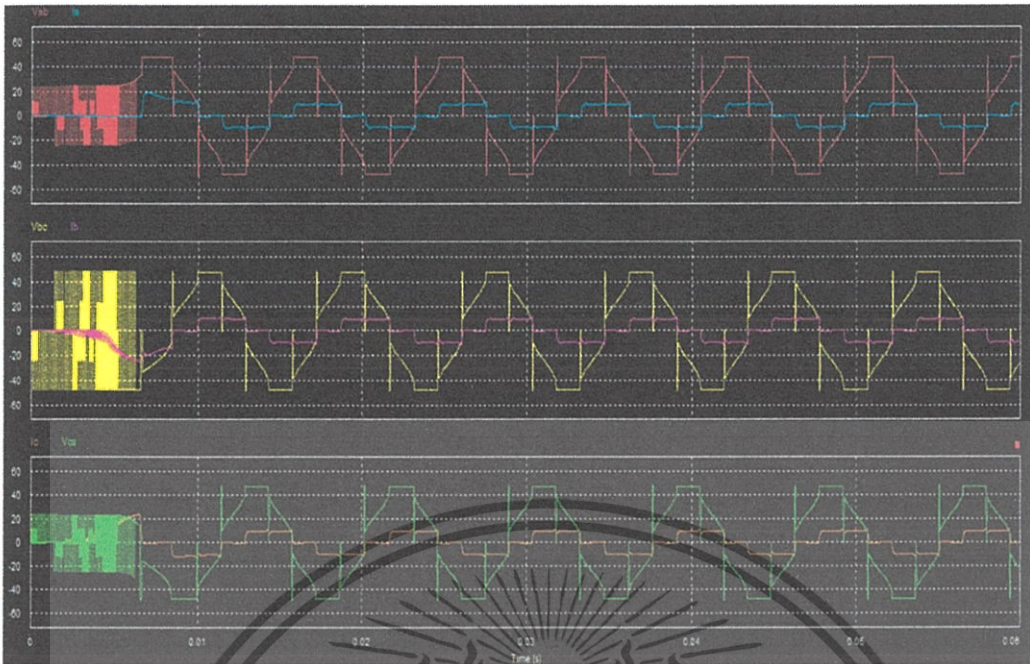


รูปที่ 3.4 สัญญาณกระแสแต่ละเฟสของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน



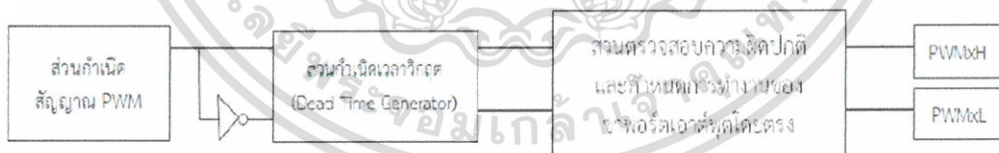
รูปที่ 3.5 สัญญาณแรงดันเฟสของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 สัญญาณแรงดันไลน์และกระแสของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

จากผลการจำลอง จะทำให้สามารถนำไปสร้างชุดขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านที่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพได้ จำเป็นที่ต้องใช้อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส โดยแหล่งจ่ายเป็น Voltage Regulator โดยการทำงานจะเป็นไปแบบขั้นบันได (Six Step) ซึ่งหลักการการทำงานของมอเตอร์จะเป็นแบบ คอมพลิเมนต์รารี วงจรเอาต์พุตของโมดูล PWM ในคู่ที่ถูกนำมาใช้งานนั้นไม่สามารถกำหนดให้ทำงานได้พร้อมกัน นั่นคือ PWMxH และ PWMxL ต้องมีสถานะตรงกันข้ามกัน ทำให้มอเตอร์สลับการทำงาน โดยมีไดอะแกรมการทำงานดังต่อไปนี้



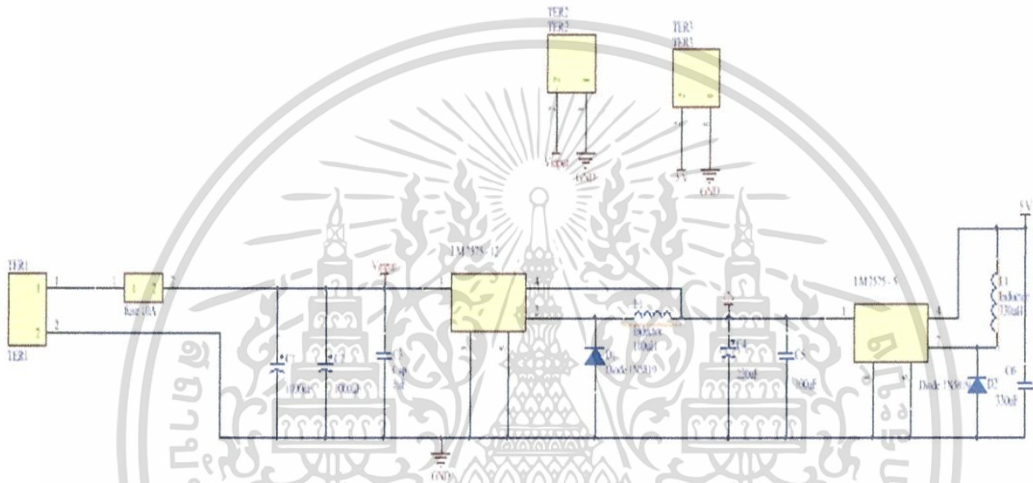
รูปที่ 3.7 ไดอะแกรมการทำงานเบื้องต้นของโมดูล MCPWM เมื่อทำงานแบบคอมพลิเมนต์รารี

3.3 การออกแบบวงจรขับมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านและวงจรเซ็นเซอร์

ในการออกแบบวงจรขับมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน จะแบ่งการออกแบบเป็นสามส่วนใหญ่ๆ ได้แก่ วงจรไฟเลี้ยง วงจรไฟขับมอเตอร์ และวงจรควบคุม ซึ่งทุกวงจรต้องทำงานร่วมกันได้

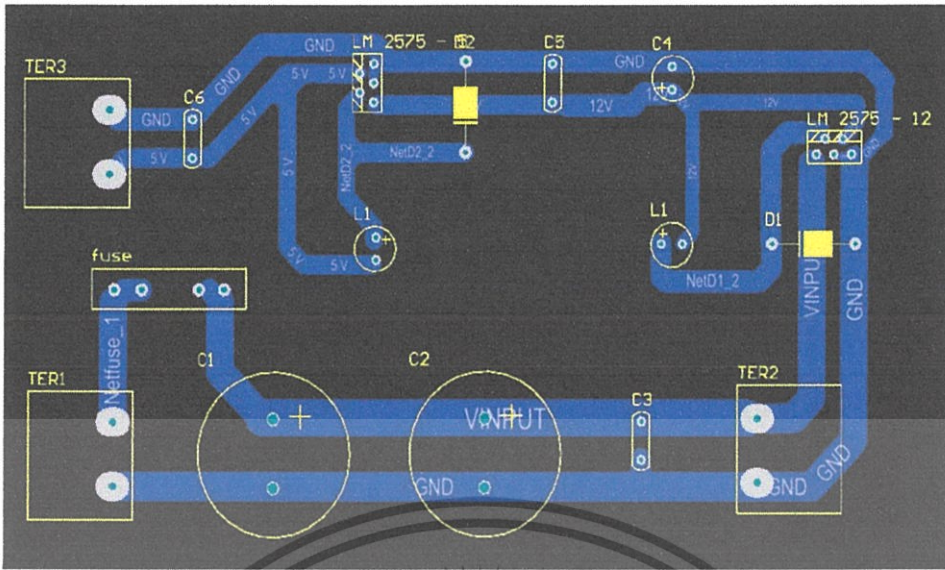
3.3.1 วงจรไฟเลี้ยง

วงจรไฟเลี้ยงจะทำหน้าที่เป็นไฟเลี้ยงให้กับวงจรเซ็นเซอร์และตัวไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับการแสดงผลและคำนวณผล ประกอบไปด้วย INPUT (48 Volt) และ OUTPUT (5 Volt , 48 Volt)



รูปที่ 3.8 Schematic ของวงจรไฟเลี้ยง

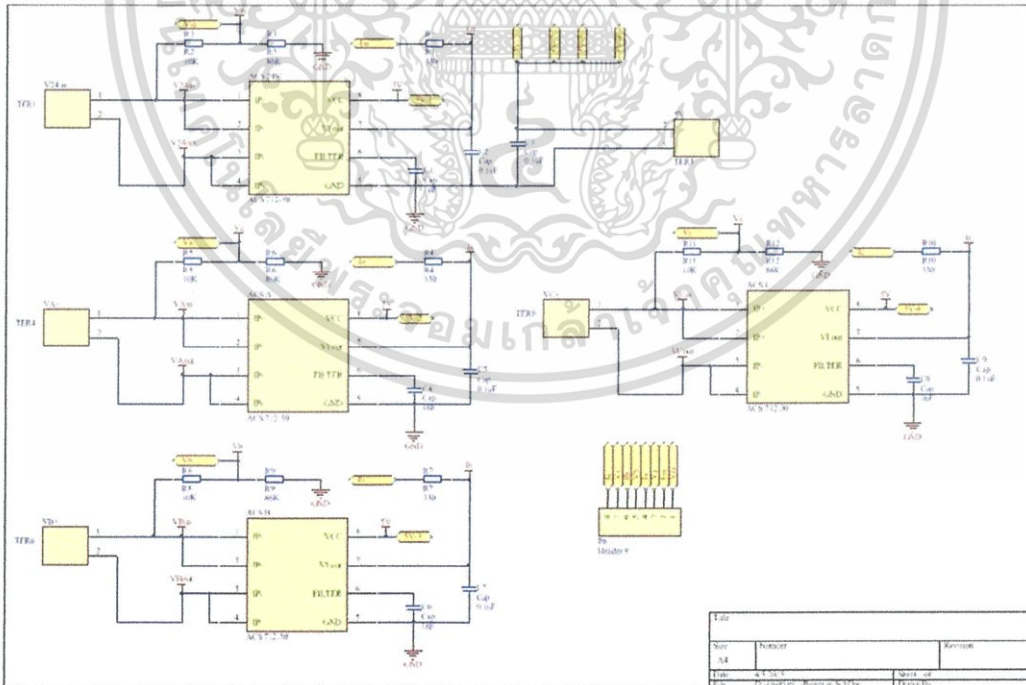
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 การออกแบบ PCB ของวงจรไฟเลี้ยง

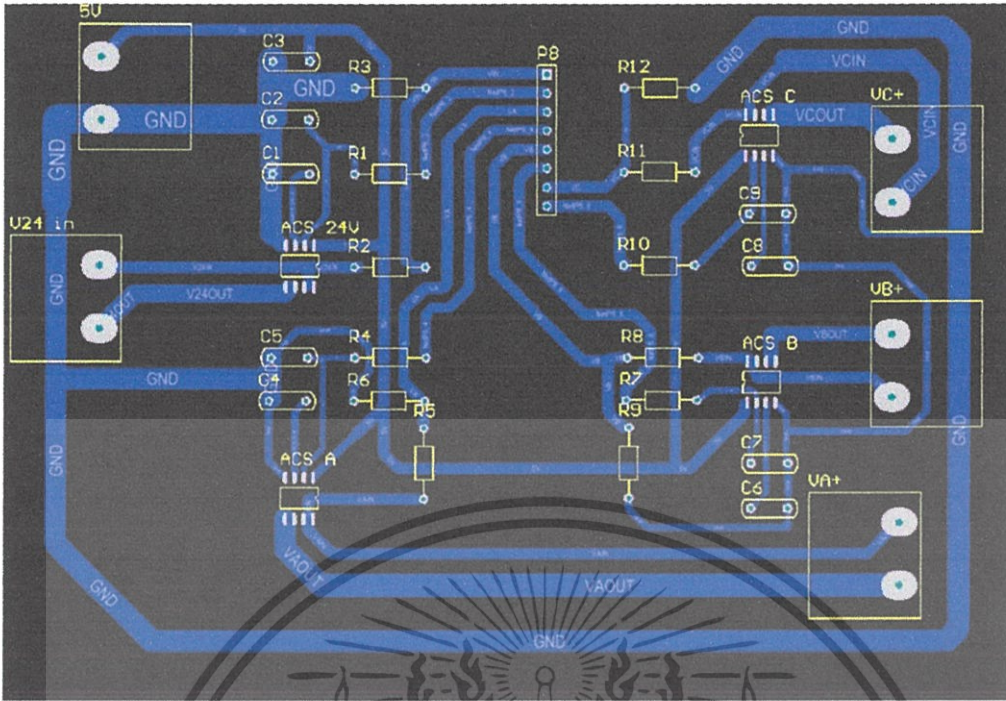
3.3.2 วงจรเซ็นเซอร์

วงจรเซ็นเซอร์ เป็นวงจรที่นำผลของค่ากระแสและแรงดันที่ได้จากวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ มาแปลงเป็นค่าที่สามารถให้ตัวไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถคำนวณและวิเคราะห์ได้ องค์ประกอบหลักๆได้แก่ เซ็นเซอร์แรงดัน (Voltage divider) และเซ็นเซอร์กระแส (ACS 712 - 20)



รูปที่ 3.10 Schematic ของวงจรเซ็นเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 การออกแบบ PCB ของวงจรเซ็นเซอร์

การออกแบบวงจรเซ็นเซอร์จำเป็นต้องออกแบบให้ถูกต้องตามหลักการ เนื่องจากถ้าออกแบบผิดพลาดอาจจะก่อความเสียหายให้กับส่วนของไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ ซึ่งในการออกแบบจะประกอบด้วยเซ็นเซอร์แรงดันและเซ็นเซอร์กระแส

3.3.2.1 การออกแบบเซ็นเซอร์แรงดัน

ในการออกแบบเซ็นเซอร์แรงดัน จะใช้หลักการของโวลต์เตจดิไวเดอร์ในการแปลงแรงดันจากค่ามากเป็นค่าน้อยเพื่อให้ไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยแรงดันด้านออกของโวลต์เตจดิไวเดอร์จะมีค่าไม่เกิน 5 โวลต์ โดยคำนวณได้จากสมการที่ 2.3 ที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น

$$V_{\text{micro}} = V_{\text{in}} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (2.3)$$

V_{in} = ค่าแรงดันกระแสที่รับเข้ามา ในที่นี้ใช้ 48 โวลต์

R_1 = ตัวต้านทานด้านแรงสูง ใช้ 50 กิโลโอห์ม

R_2 = ตัวต้านทานทางด้านแรงต่ำ

V_{micro} = แรงดันด้านออกสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 2.3 เราสามารถแทนค่าได้ดังนี้

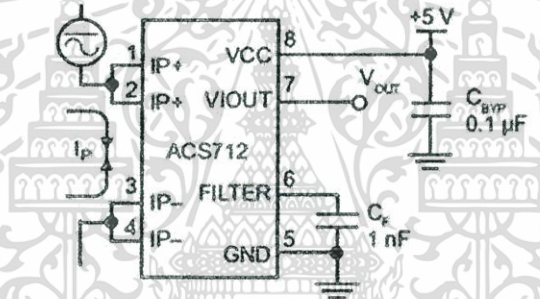
$$5 = 48 \times \frac{R2}{(50 \times 1000) + R2}$$

ดังนั้น ค่า R2 ในวงจรต้องมีค่า 5.813 กิโลโอห์ม (ถ้าค่าที่คำนวณไม่มีขายตามท้องตลาด สามารถใช้ค่าที่มากกว่าได้เล็กน้อย)

โดยค่าพารามิเตอร์ที่ต้องใช้โวลต์เตจดีไวเดอร์ ได้แก่ Van , Vbn , Vcn , Vin ส่วนค่า Vab สามารถหาได้จากการนำค่า Van – Vbn

3.3.2.2 การออกแบบวงจรเซ็นเซอร์กระแส

การออกแบบวงจรเซ็นเซอร์กระแส จะใช้เซ็นเซอร์เบอร์ ACS 712 – 20 มีพิกัดกระแสที่ 20 แอมป์ โดยจะให้สัญญาณออกมาเป็นสัญญาณแรงดันโดยถ้ากระแสมีค่าเป็นศูนย์ ตัวเซ็นเซอร์จะให้แรงดันออกมาที่ 2.5 โวลต์ และที่พิกัดจะให้ 5 โวลต์ และ 0 โวลต์ ในการวัดกระแสสลับ และจะให้ 5 โวลต์ที่กระแสสูงสุดเมื่อใช้วัดกระแสตรง

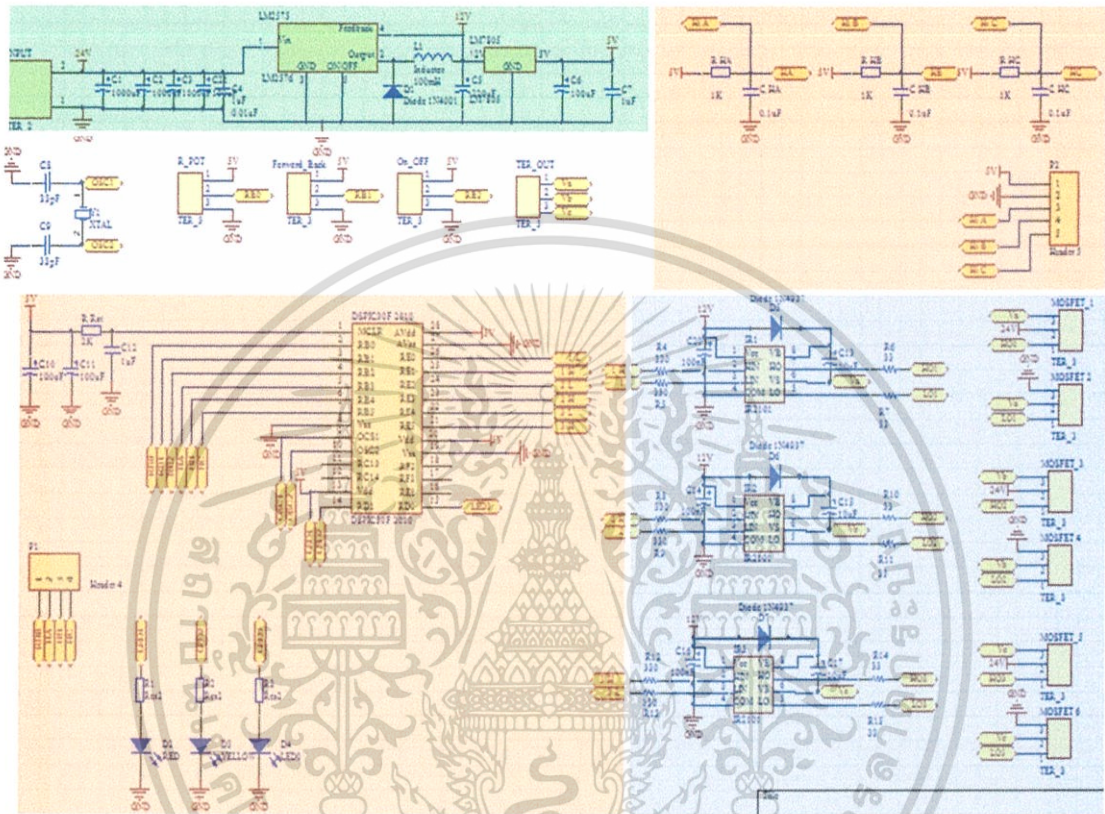


รูปที่ 3.12 การใช้งานเซ็นเซอร์กระแส ACS 712 -20

พารามิเตอร์ที่ใช้เซ็นเซอร์กระแส ACS 712 -20 ได้แก่ Ia , Ib , Ic , lin

3.3.3 วงจรขับมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

วงจรขับมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านจะประกอบด้วยสามส่วนคือ วงจรไฟเลี้ยง วงจรขับ และวงจรควบคุม ซึ่งเป็นวงจรที่มีความซับซ้อนมาก ต้องใช้ความชำนาญในการออกแบบ โดยวงจรขับจะใช้หลักการของอินเวอร์เตอร์สามเฟสในการทำงานโดยทำงานเป็นลำดับในแต่ละเฟส ผ่านอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งมีองค์ประกอบดังนี้

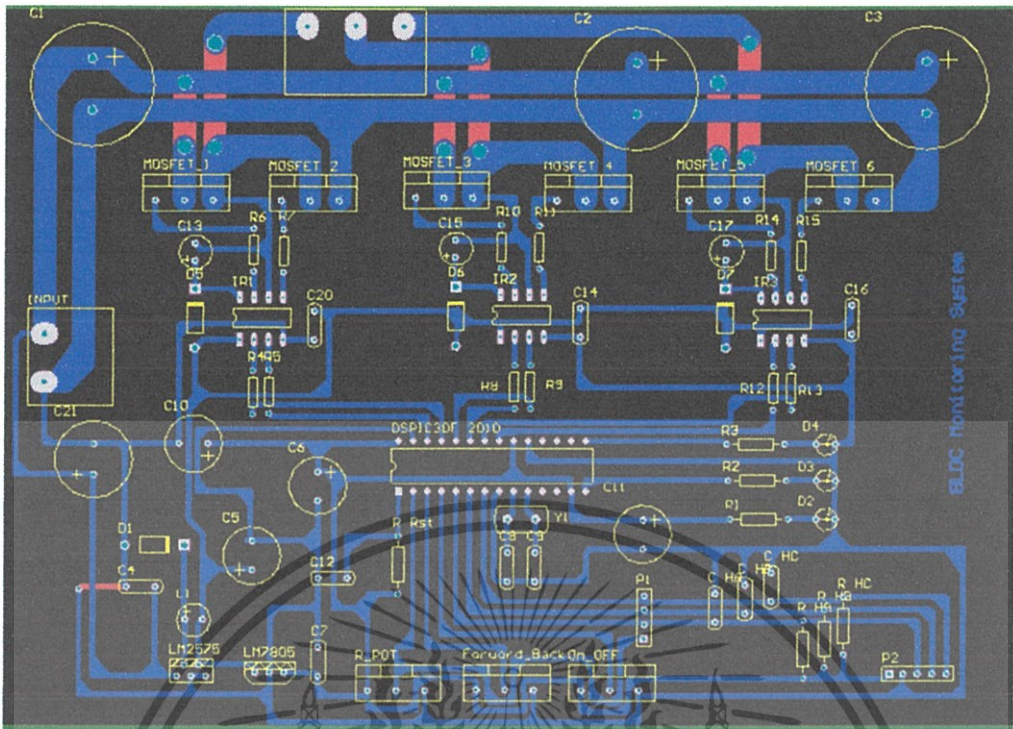


รูปที่ 3.13 Schematic ของวงจรขับมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

วงจรขับมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านประกอบด้วยสามส่วนที่สำคัญคือ

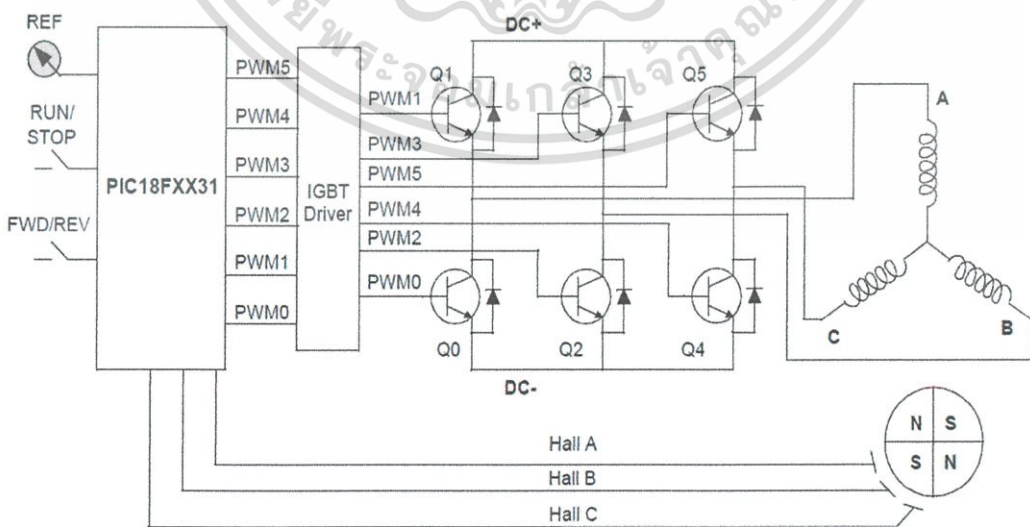
- ส่วนบริเวณกรอบสีเขียวคือส่วนของไฟเลี้ยง ประกอบด้วยไอซีเบอร์ LM2575-HV สำหรับให้แรงดันขาออก 12 โวลต์ และ LM 7805 สำหรับให้แรงดันขาออกเป็น 5 โวลต์
- ส่วนบริเวณกรอบสีแดงคือส่วนของวงจรควบคุมการทำงานของวงจร จะประกอบด้วยส่วนที่รับสัญญาณ Hall Sensor มาจากมอเตอร์ ส่วนที่รับค่า A/D สำหรับควบคุมการทำงาน และตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยใช้เบอร์ dsPIC30f2010 สร้างสัญญาณ PWM ให้กับส่วนของวงจรขับเกต
- ส่วนบริเวณสีน้ำเงิน คือส่วนแสดงวงจรขับมอเตอร์ โดยจะประกอบด้วยไอซีเบอร์ IR 2101 ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ขับขาเกตให้แก่อุปกรณ์สวิตซ์ซึ่ง โดยใช้การทำงานเป็นแบบบูสต์แตรป ส่วนอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งจะใช้เบอร์ IRFP-2907 เนื่องจากมี Rds-ON ต่ำ และมีพิกักระแสใช้งานสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



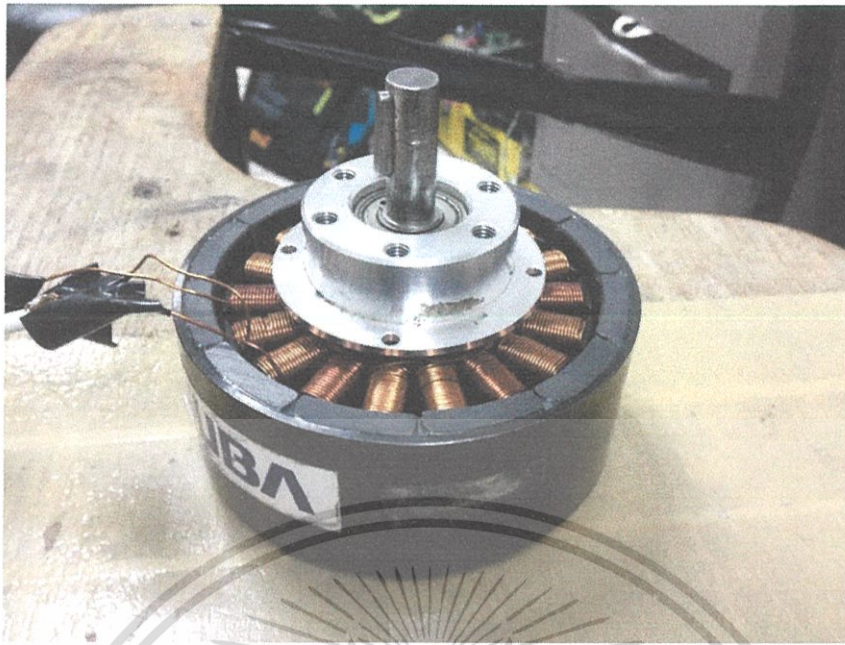
รูปที่ 3.14 PCB ของวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

ภายในวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน ได้ทำการเพิ่มฟังก์ชันในการหมุนในทิศทางเข็มนาฬิกาและทิศตามเข็มนาฬิกา เพื่อให้สามารถใช้งานได้อย่างครอบคลุม ซึ่งทำได้โดยการกำหนดลำดับการควบคุมการทำงานของอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งดังตารางที่ 2.3 และตารางที่ 2.4 ซึ่งในการทำงานของวงจรจะใช้กับมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบโรเตอร์ภายนอก 12 pole และพิกัด 300 W



รูปที่ 3.15 ไตอะแกรมของวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 มอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านที่ใช้ในการทดสอบ

3.4 การออกแบบส่วนประมวลผลและแสดงผล

ในส่วนแสดงผลจะประกอบด้วยสองส่วนได้แก่ จอ LCD 20 x 4 จำนวน 1 แผง และโปรแกรมสำหรับพลอตกราฟจากพอร์ตอนุกรม โดยจะแบ่งข้อมูลในการแสดงผลออกเป็นสามกลุ่ม กลุ่มแรกเรียกว่า Ch1 และ กลุ่มที่สองเรียกว่า Ch2 และกลุ่มที่สามจะเป็นข้อมูลที่สามสามารถแสดงผ่านได้เฉพาะบน LCD 20 x 4 เท่านั้น โดยจำแนกข้อมูลตามแต่ละกลุ่มได้ดังนี้

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการแสดงผล

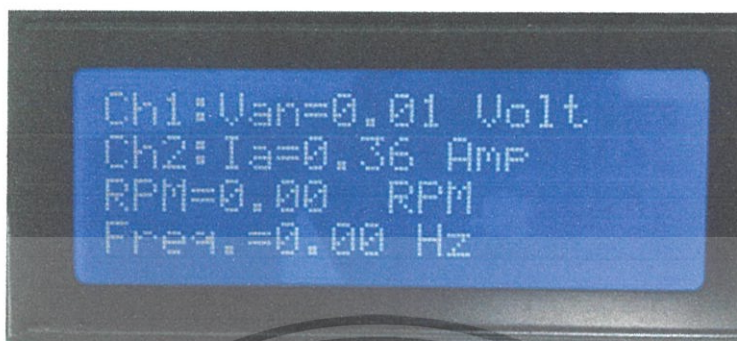
กลุ่ม 1 (Ch1)	กลุ่ม 2 (Ch2)	กลุ่มที่ 3 (LCD only)
Van (แรงดันเฟส A)	Ia (กระแสเฟส A)	RPM (ความเร็วรอบมอเตอร์)
Vbn (แรงดันเฟส B)	Ib (กระแสเฟส B)	Freq.(ความถี่ของสัญญาณฮอลล์)
Vcn (แรงดันเฟส C)	Ic (กระแสเฟส C)	
Vab (แรงดันไลน์ A-B)	Iin (กระแสขาเข้า)	
Vbc (แรงดันไลน์ B-C)	Wout (กำลังไฟฟ้าขาออก)	
Vca (แรงดันไลน์ C-A)	Eff (ประสิทธิภาพของวงจรขับ)	
Vin (แรงดันดินพูด)		
Win (กำลังไฟฟ้าขาเข้า)		

โดยการแสดงผลของข้อมูลในกลุ่มที่หนึ่งและกลุ่มที่สอง สามารถเปลี่ยนข้อมูลให้ไปตามที่ต้องการได้โดยการหมุนตัวต้านทานปรับค่าได้ตามที่ได้ออกแบบไว้ และค่าที่แสดงทั้งหมดเป็นค่า RMS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.1 การแสดงผลผ่านจอ LCD 20 x 4

ในการแสดงผลผ่านจอ LCD 20 x 4 จะออกแบบให้ทำการแสดงผลทั้งหมด 4 บรรทัด บรรทัดแรกได้แก่ Ch1 บรรทัดที่สองคือ Ch2 บรรทัดที่สามคือ RPM บรรทัดที่สี่คือ Freq.

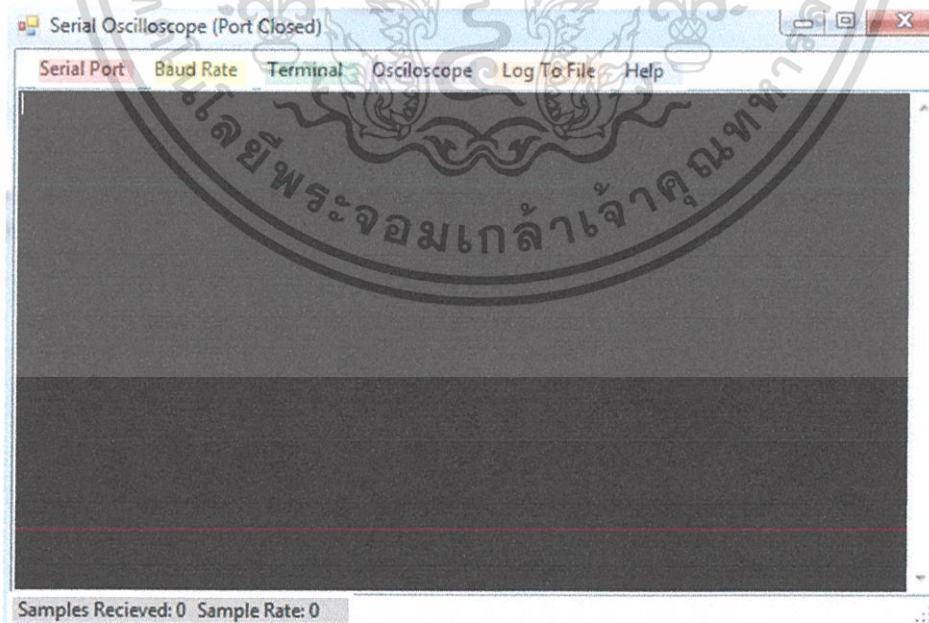


รูปที่ 3.17 LCD 20 x 4 ที่ใช้ในการแสดงผล

โดยการแสดงผลจะใช้ Arduino Mega 2560 ในการประมวลผลและส่งข้อมูลมายัง LCD 20 x 4

3.4.2 การแสดงผลผ่านคอมพิวเตอร์

ในการแสดงผลผ่านคอมพิวเตอร์ ออกแบบให้แสดงผลเป็นกราฟของข้อมูลแต่ละตัว โดยใช้ Arduino MEGA 2560 ในการประมวลผลข้อมูล และทำการส่งข้อมูลผ่านพอร์ตอนุกรม เชื่อมต่อกับพอร์ตอนุกรมของคอมพิวเตอร์อีกที แล้วแสดงผลโดยใช้โปรแกรม Serial oscilloscope

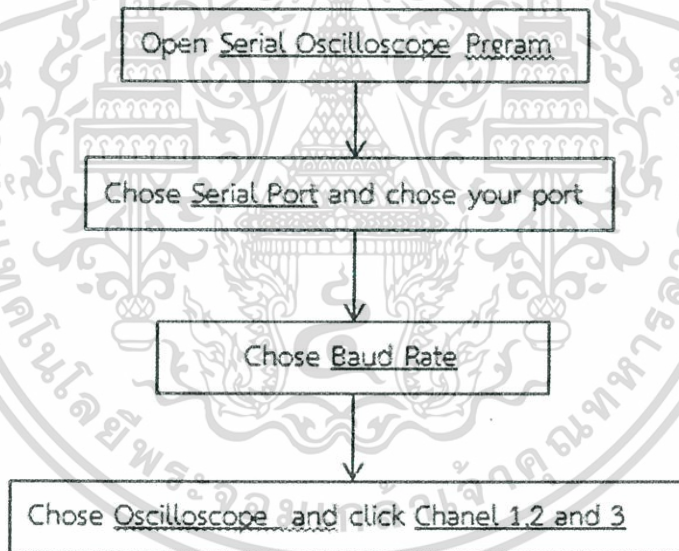


รูปที่ 3.18 หน้าต่างเริ่มต้นของโปรแกรม Serial Oscilloscope

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

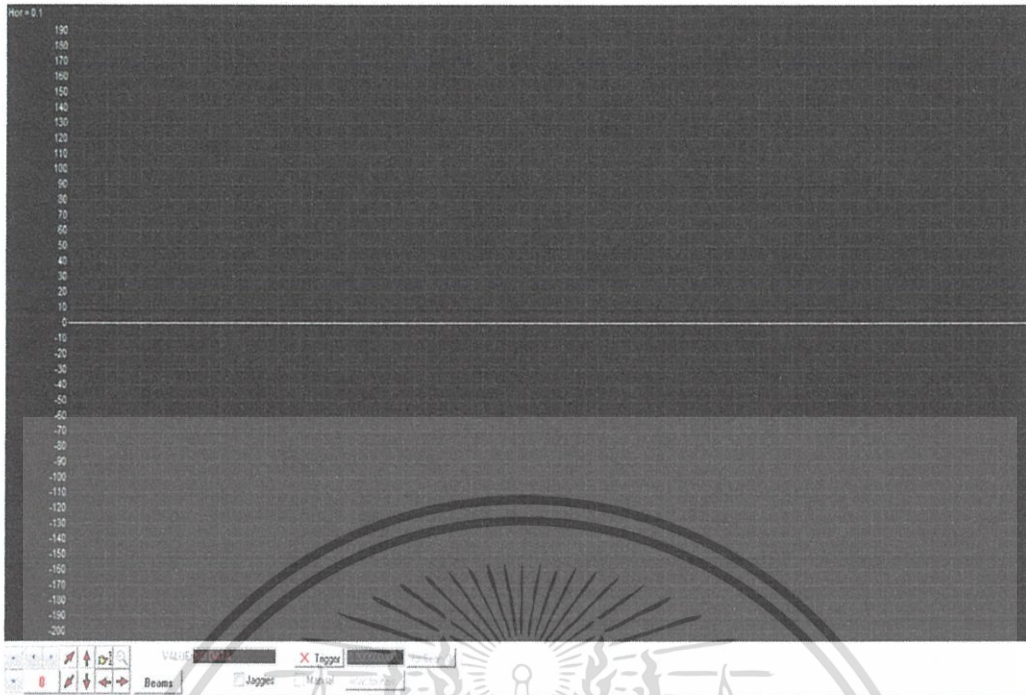
- กรอบสีแดง : Serial Port ใช้สำหรับเลือกพอร์ตเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์
 - กรอบสีเหลือง : Baud Rate ใช้สำหรับกำหนดค่าอัตราการส่งข้อมูลระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์กับคอมพิวเตอร์
 - กรอบสีเขียว : Terminal ใช้สำหรับรีเซ็ตโปรแกรมเพื่อหาพอร์ตอนุกรม
 - กรอบสีม่วง : Oscilloscope ใช้สำหรับการเพิ่มหน้าต่างเพื่อดูกราฟที่ได้จากการ
- แฮมปลิง
- กรอบสีส้ม : Log To File ใช้สำหรับบันทึกค่าที่ได้รับ
 - กรอบสีฟ้า : Help ใช้สำหรับหาคำช่วยเหลือ
 - กรอบสีดำ : Samples Received จำนวนข้อมูลที่ได้รับ , Sample Rate อัตรา
- การรับข้อมูล

เมื่อต้องการใช้โปรแกรม ต้องตรวจสอบก่อนว่าพอร์ตของไมโครคอนโทรลเลอร์กับพอร์ตของคอมพิวเตอร์เชื่อมต่อกันด้วยพอร์ตได้ แล้วเลือกที่ Serial Port จากนั้นกำหนดค่า Baud Rate ให้ตรงกับไมโครคอนโทรลเลอร์ แล้วเลือกที่ Oscilloscope สรุปการใช้งานโปรแกรมได้ดังนี้



รูปที่ 3.19 ขั้นตอนการใช้โปรแกรม Serial Oscilloscope

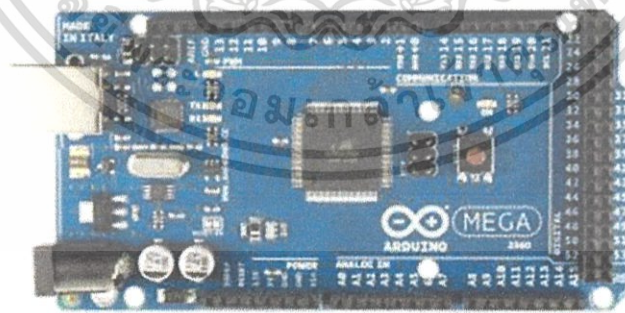
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.20 หน้าต่างโปรแกรมที่ใช้ในการพลอตกราฟของโปรแกรม Serial Oscilloscope

3.4.3 การประมวลผล

ในการประมวลผลและแสดงข้อมูลทั้งสองช่องทาง ไม่ว่าจะเป็นทางจอ LCD 20 x 4 และ ทางคอมพิวเตอร์ เราจะใช้ไมโครโปรเซสเซอร์ Arduino MEGA 2560 ทั้งหมดสองตัว โดยแยกการทำงานออกเป็นสองตัว โดยตัวที่หนึ่งจะทำการประมวลผลและส่งค่าไปแสดงยัง LCD 20 x 4 ส่วนตัวที่สองจะทำการประมวลผลและส่งค่าไปแสดงยังคอมพิวเตอร์ เหตุผลที่ใช้ Arduino MEGA 2560 เนื่องจากมีพอร์ต A/D ให้เลือกใช้หลายพอร์ตเพียงพอต่อความต้องการของระบบ



รูปที่ 3.21 Arduino MEGA 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.4 การคำนวณพารามิเตอร์ที่ใช้แสดงผล

ในการคำนวณค่าพารามิเตอร์เราจะทำการรับค่าแรงดันจากเซ็นเซอร์แรงดันและเซ็นเซอร์กระแส แล้วนำมาวิเคราะห์ความถูกต้องโดยเทียบกับเพาเวอร์มิเตอร์รุ่น Metrix PX 120 , Power Analyzer FLUK 43 B และ Oscilloscope เพื่อดูความถูกต้อง โดยแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ การแสดงผลด้วย LCD 20 x 4 และการแสดงผลด้วยคอมพิวเตอร์ ซึ่งแต่ละวิธีจะมีการคำนวณแตกต่างกัน

3.4.4.1 การคำนวณค่าพารามิเตอร์โดยการแสดงผลผ่านจอแอลซีดี

ในการแสดงผลผ่านจอ LCD 20 x 4 ค่าทั้งหมดที่แสดงจะเป็นค่ารูทมีสแควร์ (RMS) ซึ่งเกิดจากการนำข้อมูลดิบจากเซ็นเซอร์มาสังเคราะห์จนออกมาเป็นตัวเลข

หาได้จากสมการ

$$X_{rms} = \sqrt{\frac{1}{n}(x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + \dots + x_n^2)} \quad (3.1)$$

X_{rms} = ค่าแรงดันหรือกระแสที่ทำการคำนวณเป็นค่า RMS

X_n^2 = ค่าแรงดันในแต่ละการแซมปริง

พารามิเตอร์ที่ต้องทำการแปลงข้อมูลดิบเป็นค่ารูทมีสแควร์ได้แก่ V_{an} , V_{bn} , V_{cn} , V_{ab} , V_{bc} , V_{ca} , V_{in} , I_a , I_b , I_c และสามารถนำค่า RMS ไปคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าและประสิทธิภาพได้

ในการคำนวณกำลังไฟฟ้าทั้งด้านเข้าและด้านออกจะทำได้ดังนี้

กำลังไฟฟ้านำเข้า

$$P_{in} = V_{in} \times I_{in} \quad (3.2)$$

P_{in} = กำลังไฟฟ้านำเข้า (RMS) มีหน่วยเป็น W

V_{in} = แรงดันไฟฟ้านำเข้า (RMS) มีหน่วยเป็น V

I_{in} = กระแสด้านเข้า (RMS) มีหน่วยเป็น A

กำลังไฟฟ้าด้านออก

$$P_{out} = \sqrt{3} \times V_{line} \times I_{line} \times P.F \quad (3.3)$$

P_{out} = กำลังไฟฟ้าด้านออก (RMS) มีหน่วยเป็น W

V_{line} = แรงดันไลน์ (RMS) มีหน่วยเป็น V

I_{line} = กระแสไลน์ (RMS) มีหน่วยเป็น A

P.F = ค่าชดเชยกำลังไฟฟ้า

การหาค่าชดเชยกำลังไฟฟ้า หรือค่าพาวเวอร์แฟกเตอร์ของระบบหาได้โดยกระบวนการตัดจุดศูนย์ (Zero Crossing) โดยใช้ LM 358 ในการหาช่วงเวลาที่ตัดจุดศูนย์ของแรงดันไลน์เพื่อเทียบกับขอบขาขึ้นของ Hall Sensor

ในการคำนวณประสิทธิภาพของระบบ ทำได้ดังนี้

$$\%EFF = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (3.4)$$

%EFF = ค่าประสิทธิภาพ

P_{out} = ค่ากำลังไฟฟ้าขาออก

P_{in} = ค่ากำลังไฟฟ้าขาเข้า

ในการคำนวณหาความเร็วรอบ ทำได้ดังนี้

$$n_s = \frac{120f}{p} \quad (3.5)$$

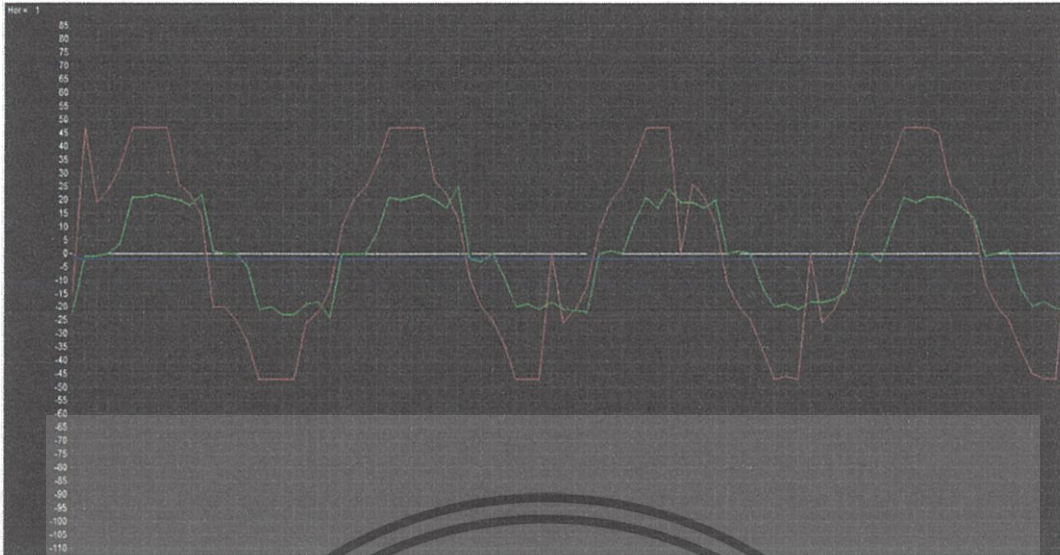
n_s = ความเร็วรอบ มีหน่วยเป็น RPM

f = ความถี่ของสัญญาณไฟฟ้า มีหน่วยเป็น Hz

p = โพลของมอเตอร์

3.4.4.2 การคำนวณค่าพารามิเตอร์ที่แสดงผลผ่านคอมพิวเตอร์

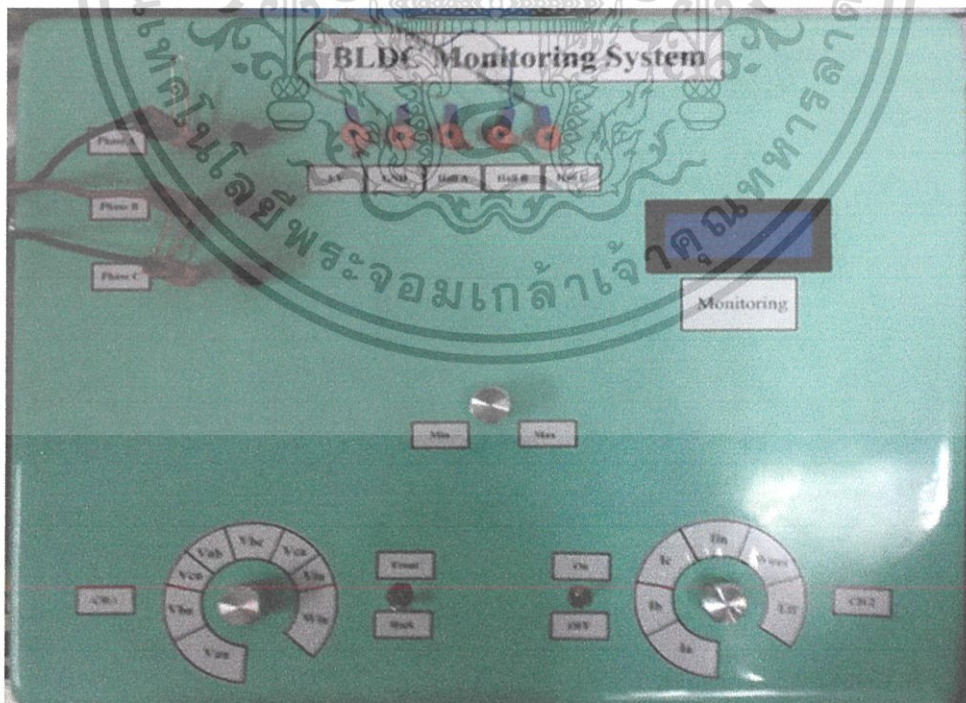
ในการแสดงผลผ่านคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม Serial Oscilloscope นั้น จะทำการพล็อตกราฟเป็นจุดจากข้อมูลที่ทำกรการแซมปริงได้แล้วลากเส้นเชื่อมต่อระหว่างจุด โดยพารามิเตอร์แต่ละตัวจะถูกเก็บไว้ในตัวแปรอาเรย์ทั้งหมด 225 ค่า จากนั้นไมโครคอนโทรลเลอร์ก็จะทำการส่งค่าข้อมูลที่ทำการเก็บไว้ทั้งไว้ทั้งหมดให้โปรแกรมทำการพล็อตกราฟ



รูปที่ 3.22 กราฟตัวอย่างที่แสดงด้วยโปรแกรม Serial Oscilloscope

3.5 ชุดแสดงผลแบบตอบสนองฉับไวของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

ในการนำไปใช้งานจะทำการประกอบส่วนของวงจรได้แก่ วงจรขับมอเตอร์ วงจรเซ็นเซอร์กระแสและแรงดัน วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ และวงจรแสดงผลไว้ในส่วนเดียวกัน คือ ประกอบกันไว้ในบอร์ดจูนนิ่ง ดังนั้นการออกแบบกล่องบรรจุเพื่อให้ง่ายต่อการใช้งานจึงเป็นสิ่งสำคัญ โดยมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 3.23 ชุดแสดงผลแบบตอบสนองฉับไวของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดลองทั้งหมด 3 ส่วนด้วยกัน คือการทดสอบประสิทธิภาพของวงจรขับมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน การทดสอบความแม่นยำในการแสดงผลด้วย LCD 20 x 4 และการทดสอบความแม่นยำในการแสดงผลในคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม Serial Oscilloscope มีการนำเสนอตารางข้อมูลของพารามิเตอร์ต่างๆทางไฟฟ้าที่ใช้เปรียบเทียบกับระหว่างการใช้เครื่องวัด Power meter Metrix 120 การเปรียบเทียบกับเครื่องวัด Power Analyzer Fluke 43B และการวัดโดยใช้ออสซิลโลสโคป

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านมีข้อมูลจำเพาะดังนี้

- กำลังขาออกที่พิกัด (Rate output Power) = 300 W
- แรงดันพิกัด (Rate Voltage) = 48 Volt
- ความเร็วที่พิกัด (Rate Speed) = 1200 RPM
- จำนวนโพล (Pole) = 12 โพล

4.1 การออกแบบการทดสอบมอเตอร์กระแสตรง

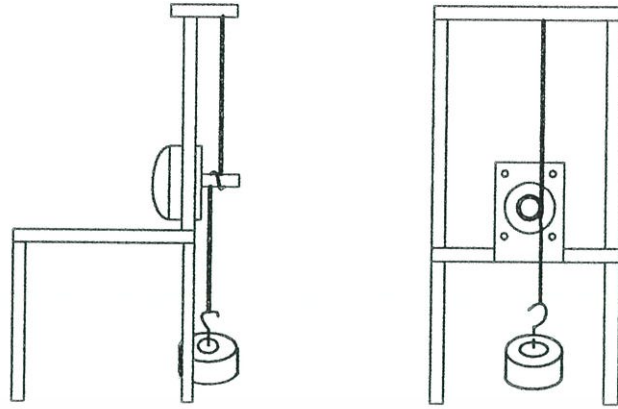
4.1.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวัดประสิทธิภาพของวงจรขับมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้สำหรับวัดประสิทธิภาพของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านมีดังนี้

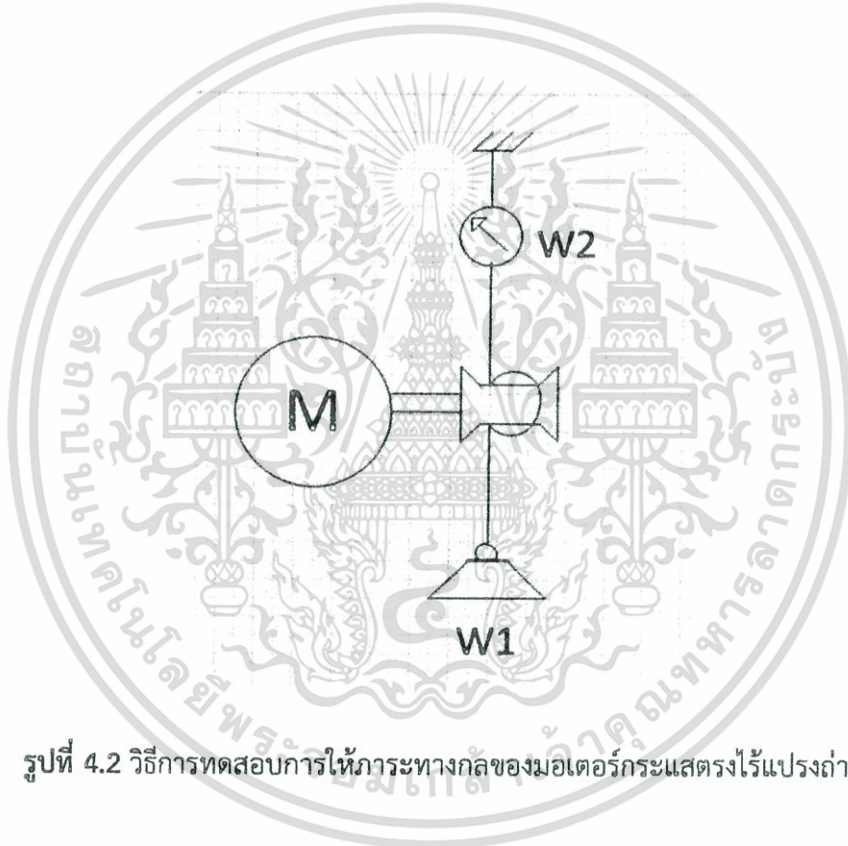
1. ชุดทดสอบการแสดงผลแบบเรียลไทม์ของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน
2. มอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน
3. Power meter
4. Power analyzer meter
5. เครื่องวัดความเร็วรอบ
6. ชุดทดสอบการเพิ่มภาระทางกลให้มอเตอร์
7. ออสซิลโลสโคป
8. คอมพิวเตอร์

4.1.2 การออกแบบวิธีการทดสอบ

ออกแบบการทดสอบด้วยวิธีการให้โหลดทางกลกับมอเตอร์เพื่อวัดค่ากระแสที่ใช้ โดยชุดทดสอบประกอบด้วยแท่นยึดมอเตอร์ ลูกตุ้มน้ำหนัก เชือก มุเลย์ โดยทำการทดสอบด้วยลูกตุ้มน้ำหนัก 1kg 1.5kg 2kg 2.5kg 3kg 3.5kg 4kg 4.5kg และ 5 kg ยึดไว้โดยเชือกที่ร้อยผ่านมุเลย์ที่ยึดติดกับมอเตอร์ จากนั้นทำการวัดแรงดันขาเข้า กระแสเข้า และ แรงดันขาเข้าด้วยเพาเวอร์มิเตอร์ ส่วนทางด้านแรงดันขาออก กระแสขาออก และกำลังไฟฟ้าขาออกวัดโดยใช้ Power Analyzer Fluke 43B ทำการจับค่ากราฟด้วยออสซิลโลสโคป เพื่อเปรียบเทียบกับค่ากราฟที่ได้จากคอมพิวเตอร์ จากนั้นหาค่าประสิทธิภาพโดยเฉลี่ยของจากมิเตอร์ทั้งสองและจากชุดทดสอบเพื่อเปรียบเทียบค่า



รูปที่ 4.1 โมเดลชุดทดสอบการให้ภาระทางไฟฟ้าแก่มอเตอร์



รูปที่ 4.2 วิธีการทดสอบการให้ภาระทางกลของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การทดสอบความแม่นยำด้วยการแสดงผลจากจอแอลซีดี

ในหัวข้อนี้จะทำการทดสอบและแสดงผลค่าที่วัดได้จาก Power Meter และ Power Analyzer Fluke 43B เพื่อเปรียบเทียบความแม่นยำกับค่าที่แสดงผ่านจอแอลซีดีของชุดทดสอบ โดยทำการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์และค่าความคลาดเคลื่อนโดยทำการเพิ่มภาระทางกลจาก 1 ถึง 5 kg โดยเพิ่มทีละ 0.5 kg และเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์



รูปที่ 4.3 แผนผังการวางแผนการทดสอบความแม่นยำด้วยการแสดงผลผ่านจอแอลซีดี

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบค่าระหว่างจอ LCD , Power Meter และ Power Analyzer Fluke 43B

load	Power Meter			LCD			% ความคลาดเคลื่อน		
	Vin	lin	Win	Vin	lin	Win	Vin	lin	Win
1	48.1	1.06	47.05	47.86	0.92	51.3	0.50	13.21	9.03
1.5	48.1	1.27	58.9	47.46	1.2	54.77	1.33	5.51	7.01
2	48.2	1.55	73.4	48	1.45	70.4	0.41	6.45	4.09
2.5	48.2	1.75	86.2	47.86	1.7	84.27	0.71	2.86	2.24
3	48.1	1.88	91.8	47.76	1.82	87.66	0.71	3.19	4.51
3.5	48.1	2.17	103.8	47.4	2.17	100.64	1.46	0.00	3.04
4	48	2.39	115.8	47.42	2.35	113.93	1.21	1.67	1.61
4.5	48	2.51	123.7	47.3	2.59	122.51	1.46	3.19	0.96
5	47.9	2.91	138.1	47.3	2.79	136.4	1.25	4.12	1.23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบค่าระหว่างจอ LCD , Power Meter และ Power Analyzer Fluke 43B

load	Power Analyzer Fluke 43B			LCD			% ความคลาดเคลื่อน		
	Van	Vbn	Vcn	Van	Vbn	Vcn	Van	Vbn	Vcn
1	30.62	30.78	30.23	30.65	31.67	30.55	0.10	2.89	1.06
1.5	30.44	30.87	31.08	30.35	30.89	30.65	0.30	0.06	1.38
2	30.8	31.01	30.66	30.78	30.12	30.15	0.06	2.87	1.66
2.5	30.8	30.56	30.46	30.51	29.81	30.64	0.94	2.45	0.59
3	30.15	30.96	30.78	30.33	30.03	30.47	0.60	3.00	1.01
3.5	30.02	30.45	30.89	30.18	30.65	30.21	0.53	0.66	2.20
4	30.18	30.81	30.14	30.06	30.53	30.56	0.40	0.91	1.39
4.5	29.8	30.25	30.2	30.5	30.78	30.59	2.35	1.75	1.29
5	29.84	30.45	29.92	30.29	30.83	30.67	1.51	1.25	2.51

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบค่าระหว่างจอ LCD , Power Meter และ Power Analyzer Fluke 43B

load	Power Analyzer Fluke 43B			LCD			% ความคลาดเคลื่อน		
	Vab	Vbc	Vca	Vab	Vbc	Vca	Vab	Vbc	Vca
1	33.6	33.12	33.42	34.07	33.76	33.89	1.40	1.93	1.41
1.5	33.6	33.25	33.37	33.52	33.45	33.8	0.24	0.60	1.29
2	33.9	33.78	33.51	33.49	33.8	33.12	1.21	0.06	1.16
2.5	33.54	33.26	33.63	33.51	32.78	33.97	0.09	1.44	1.01
3	33.4	33.68	33.42	33.29	33.12	33.45	0.33	1.66	0.09
3.5	33.2	33.34	32.89	33.57	33.65	33.78	1.11	0.93	2.71
4	33.08	33.12	33.45	33.33	33.89	33.36	0.76	2.32	0.27
4.5	32.9	33.76	32.98	33.51	33.16	32.78	1.85	1.78	0.61
5	33.12	33.46	33.02	33.7	33.87	33.15	1.75	1.23	0.39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบค่าระหว่างจ้อ LCD , Power Meter และ Power Analyzer Fluke 43B

load	Power Analyzer Fluke 43B			LCD			% ความคลาดเคลื่อน		
	la	lb	lc	la	lb	lc	la	lb	lc
1	0.84	0.92	0.87	0.87	0.83	0.83	3.57	9.78	4.60
1.5	0.91	0.89	0.98	0.97	0.88	0.94	6.59	1.12	4.08
2	1.22	1.31	1.4	1.29	1.2	1.23	5.74	8.4	12.14
2.5	1.46	1.48	1.51	1.47	1.43	1.52	0.68	3.38	0.66
3	1.6	1.68	1.67	1.67	1.7	1.68	4.37	1.19	0.60
3.5	1.7	1.73	1.76	1.69	1.77	1.8	0.59	2.31	2.27
4	1.91	1.9	1.87	1.91	1.95	1.89	0.00	2.63	1.07
4.5	2.05	2.12	2.16	2.08	2.14	2.13	1.46	0.94	1.39
5	2.43	2.56	2.49	2.41	2.43	2.45	0.82	5.08	1.61

ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบค่าระหว่างจ้อ LCD , Power Meter และ Power Analyzer Fluke 43B

load	Power Analyzer Fluke 43B			LCD			% ความคลาดเคลื่อน		
	Wout	Freq	RPM	Wout	Freq	RPM	Wout	Freq	RPM
1	39	122.67	1238	42.13	123.8	1236.8	8.03	0.92	0.10
1.5	47	120.7	1215	48.9	121.5	1220.4	4.04	0.66	0.44
2	62	118.31	1186.9	62.29	118.69	1186.3	0.47	0.32	0.05
2.5	72	116.92	1167	72.47	116.7	1168.5	0.65	0.19	0.13
3	80	115.23	1156.5	79.4	115.65	1156.2	0.75	0.36	0.03
3.5	88	114.9	1143.6	85.2	114.36	1140.7	3.18	0.47	0.25
4	95	112.6	1124	93.33	112.4	1125.1	1.76	0.18	0.10
4.5	104	110.75	1108.8	101.28	110.88	1108.8	2.62	0.12	0.00
5	118	108.97	1093.3	116.58	109.33	1098.7	1.20	0.33	0.49

4.3 การทดสอบความแม่นยำในการแสดงผลผ่านคอมพิวเตอร์

ในการแสดงผลผ่านคอมพิวเตอร์ จะทำการทดสอบเพื่อเทียบกับออสซิลโลสโคปเพื่อเปรียบเทียบค่ากราฟที่อ่านได้จากโปรแกรม Serial Oscilloscope โดยมีขั้นตอนดังนี้

- ทำการเปิดการใช้งานชุดทดสอบ
- ทำการเชื่อมต่อชุดทดสอบเข้ากับคอมพิวเตอร์โดยผ่านทาง การเชื่อมต่อผ่านพอร์ต

อนุกรม

- เปิดโปรแกรม Serial oscilloscope ทำการบันทึกค่า
- ในการทดสอบจะทำการทดสอบที่ภาระทางกล 3 กิโลกรัม ความแม่นยำ

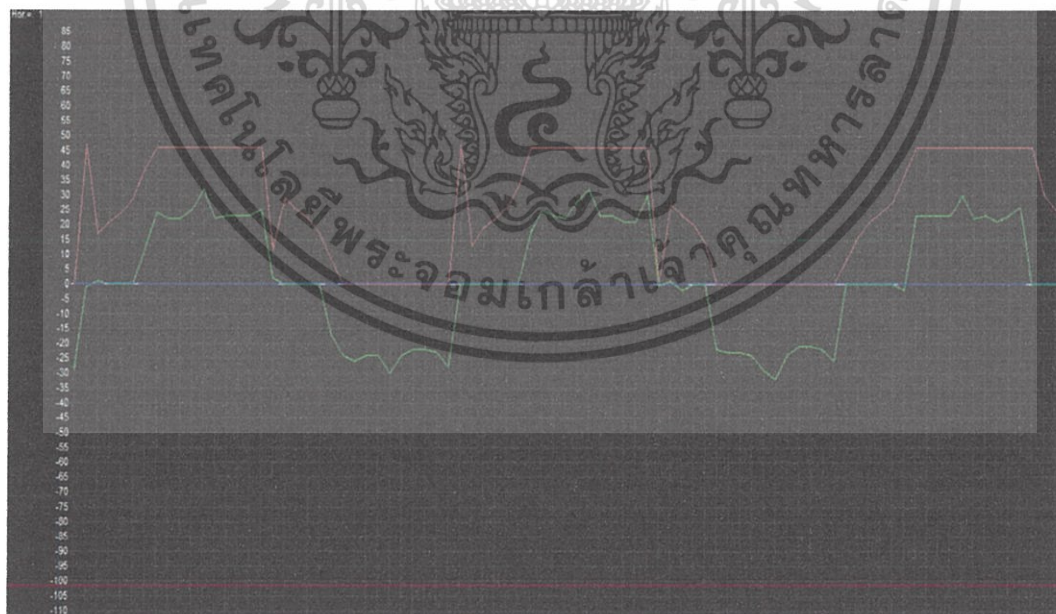
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.1 การทดสอบความแม่นยำในการแสดงผลผ่านคอมพิวเตอร์โดยใช้ภาระทางกล 3 กิโลกรัม

ทำการเปิดชุดทดสอบโดยภาระทางกลมีค่า 3 กิโลกรัม แล้วทำการให้มอเตอร์หมุนที่ความเร็วสูงสุด โดยแบ่งเป็น 2 ซาแนล ซาแนลที่ 1 เป็นการแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าขาเข้า ส่วนซาแนลที่ 2 แสดงค่ากระแสและกำลังไฟฟ้าด้านออก (กระแสไฟฟ้าค่าที่ได้จากกราฟต้องนำมาหาร 10 ทุกครั้ง) ทำการวัดค่าได้ดังนี้



(ก)

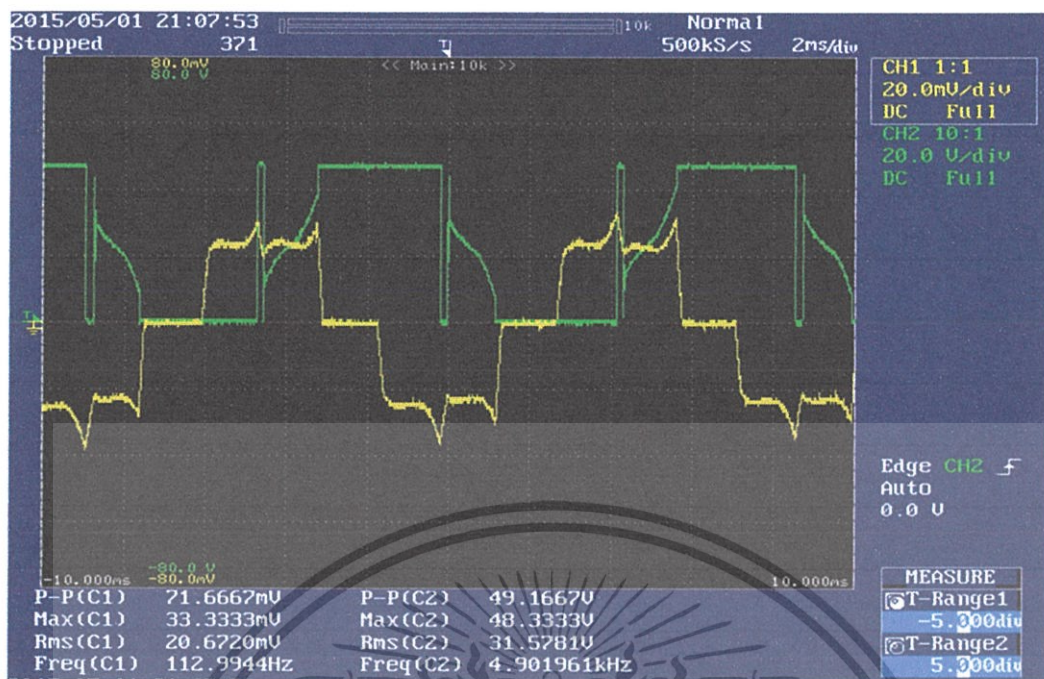


(ข)

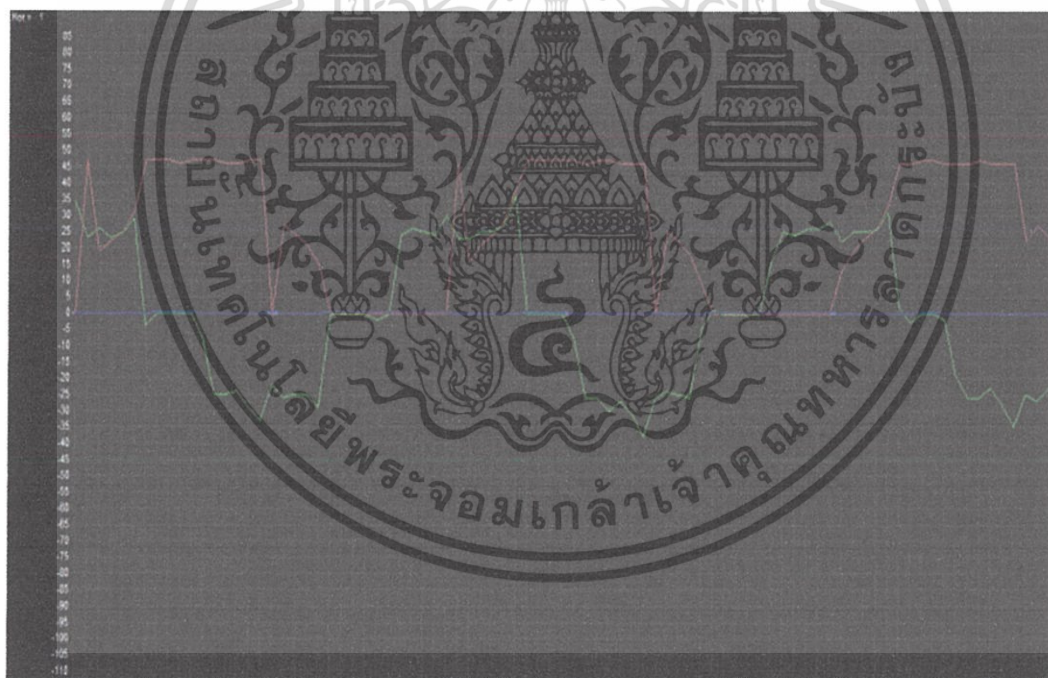
รูปที่ 4.4 (ก) สัญญาณที่ได้จากการวัดด้วยออสซิลโลสโคป Van (เขียว) และ Ia (เหลือง)

(ข) สัญญาณที่ได้จากการวัดด้วยคอมพิวเตอร์ Van (แดง) และ Ia (เขียว)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



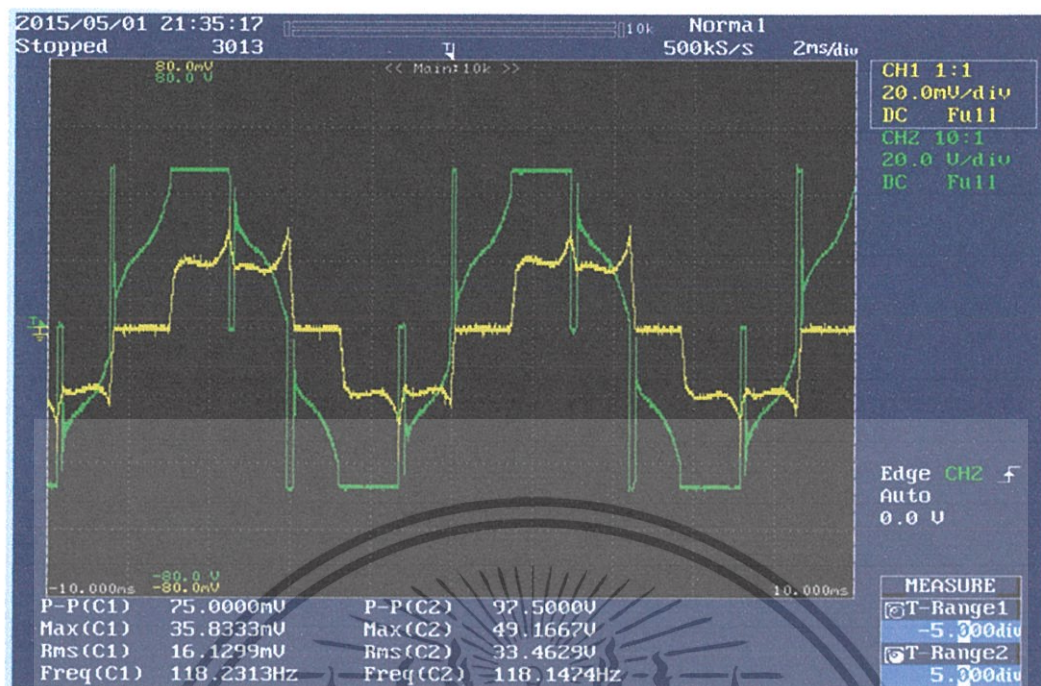
(ก)



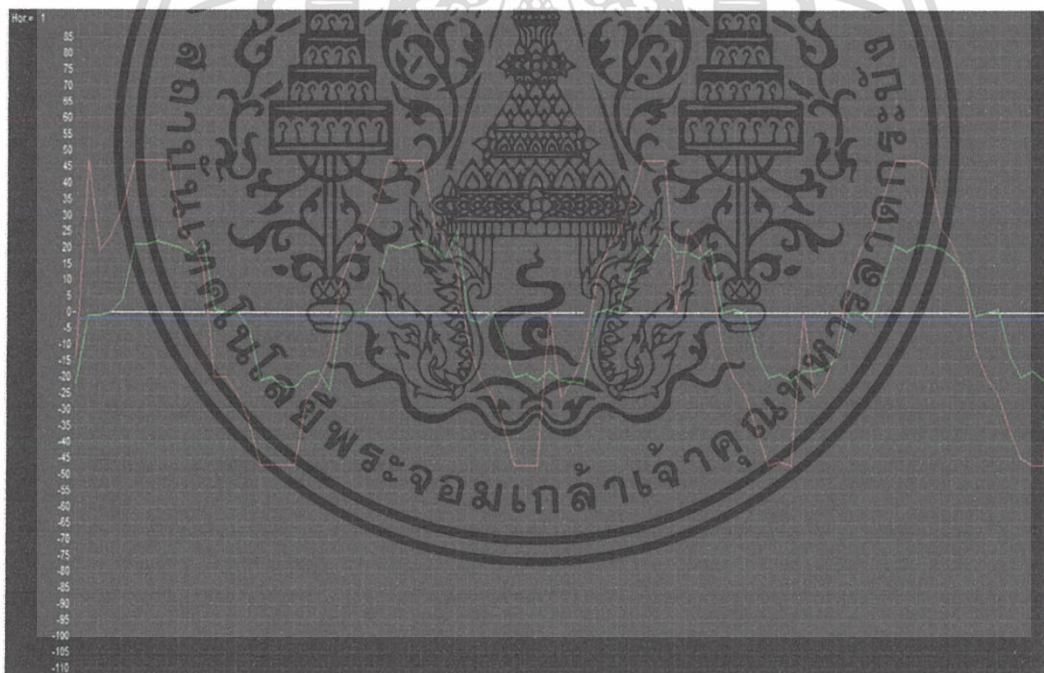
(ข)

รูปที่ 4.5 (ก) สัญญาณที่ได้จากการวัดด้วยออสซิลโลสโคป V_b (เขียว) และ I_a (เหลือง)
(ข) สัญญาณที่ได้จากการวัดด้วยคอมพิวเตอร์ V_b (แดง) และ I_a (เขียว)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



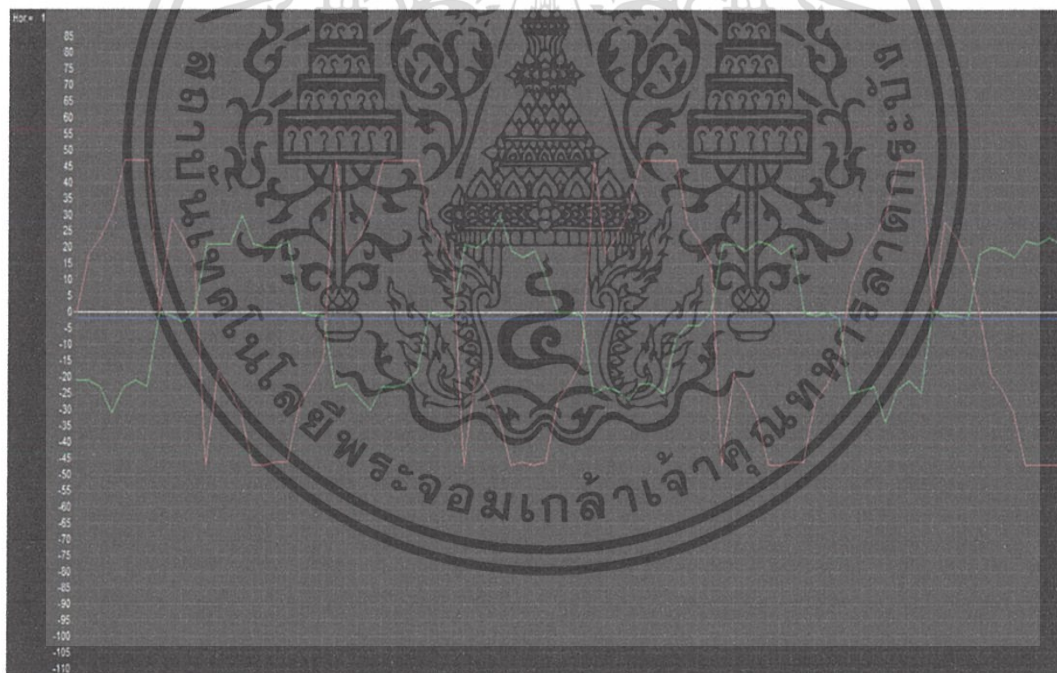
(ข)

รูปที่ 4.6 (ก) สัญญาณที่ได้จากการวัดด้วยออสซิลโลสโคป Vab (เขียว) และ Ia (เหลือง)
 (ข) สัญญาณที่ได้จากการวัดด้วยคอมพิวเตอรื Vab (แดง) และ Ia (เขียว)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



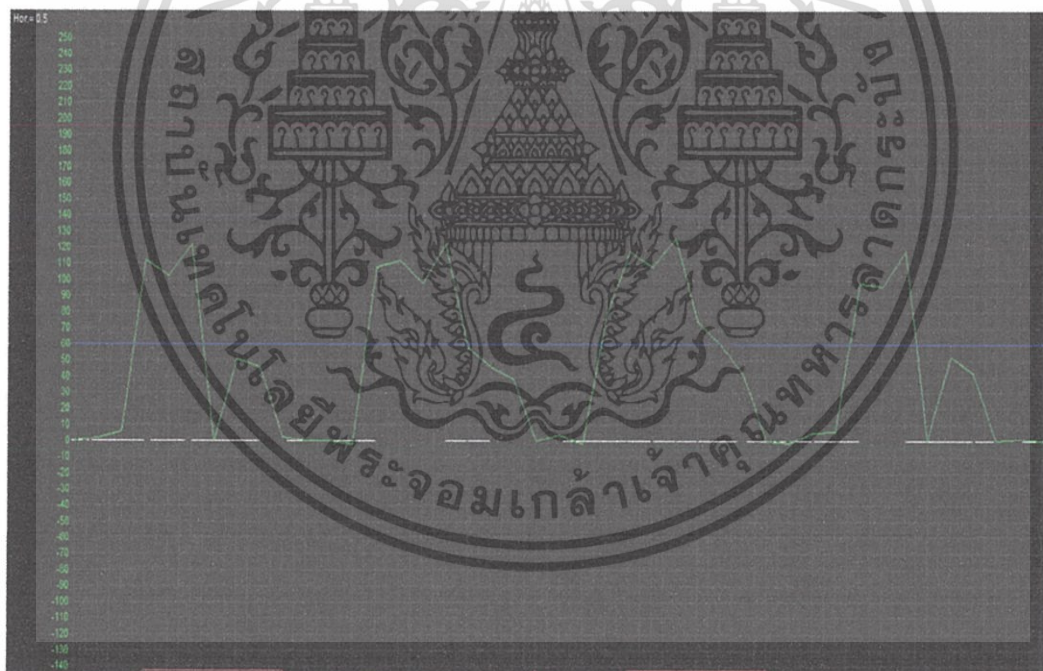
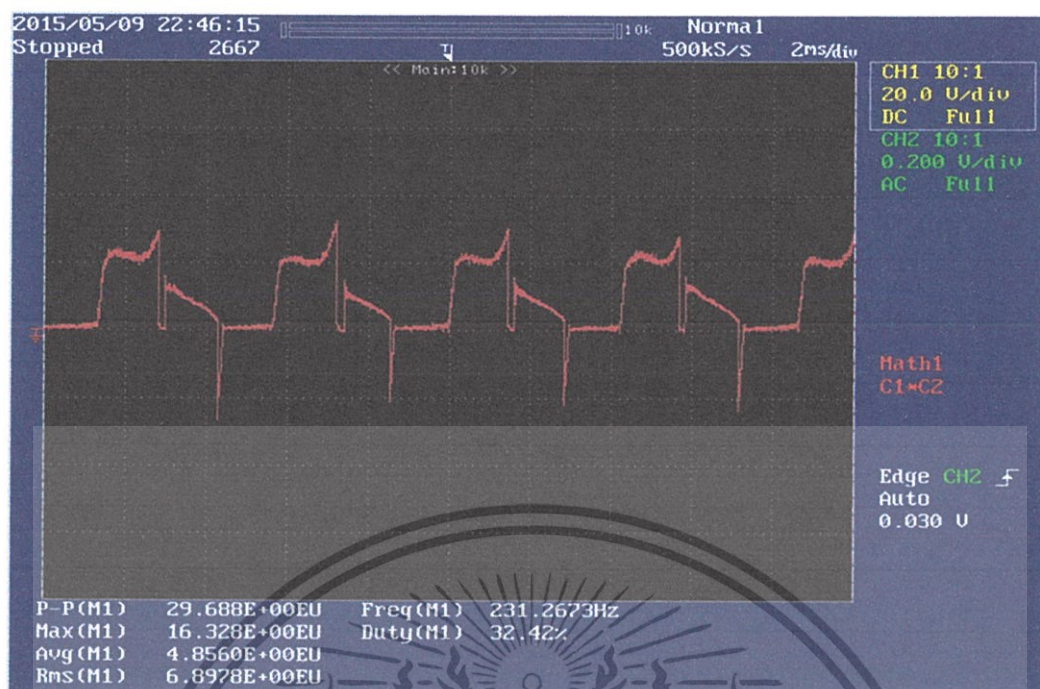
(ก)



(ข)

รูปที่ 4.7 (ก) สัญญาณที่ได้จากการวัดด้วยออสซิลโลสโคป V_{ab} (เขียว) และ I_b (เหลือง)
 (ข) สัญญาณที่ได้จากการวัดด้วยคอมพิวเตอร์ V_{ab} (แดง) และ I_b (เขียว)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



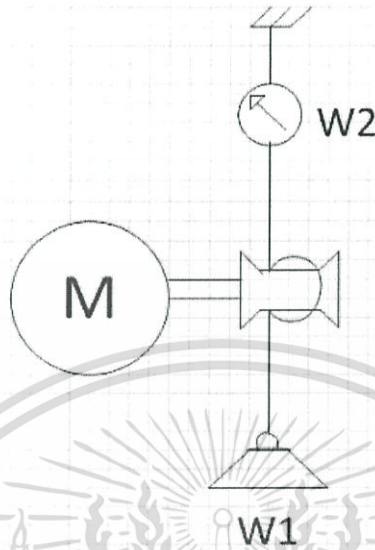
(ข)

รูปที่ 4.8 (ก) สัญญาณที่ได้จากการวัดด้วยออสซิลโลสโคปของสัญญาณกำลังไฟฟ้าเฟส A
 (ข) สัญญาณที่ได้จากการวัดด้วยคอมพิวเตอร์ของกำลังไฟฟ้าเฟส A

หมายเหตุ*** การอ่านค่ากระแสในกราฟจากคอมพิวเตอร์จะเป็นสเกลคูณ 10 เสมอ
 ดังนั้นค่าที่แท้จริงคือค่าที่อ่านได้จากกราฟแล้วหารด้วย 10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การทดสอบหาคุณสมบัติของมอเตอร์เพื่อดูแนวโน้มคุณสมบัติแรงบิดและประสิทธิภาพของมอเตอร์



รูปที่ 4.9 การทดสอบประสิทธิภาพของมอเตอร์โดยใช้ลูกตุ้มน้ำหนัก

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไม่มีแปรงถ่านแบบมีสภาวะทางกลทดสอบโดยใช้เชือกพันรอบมอเตอร์ ปลายเชือกด้านบนผูกติดกับตาชั่งสปริงซึ่งเกี่ยวยึดไว้กับคานด้านบนปลายเชือกอีกด้านถ่วงด้วยมวลและทำการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วรอบสูงสุด จนเกิดแรงกระทำระหว่างมอเตอร์และเชือก ทำให้เกิดแรงจุดดึงมวลขึ้นบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า ค่าที่อ่านได้จากตราชั่งสปริง และความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง โดยที่เพิ่มขนาดของมวลทีละ 0.5 กิโลกรัม บันทึกข้อมูลที่ได้จากเครื่องมือวัดที่ค่าน้ำหนักต่างๆ

สมการที่ใช้ในการคำนวณ

$$\tau = 9.8(W_1 - W_2) * r \quad (4.1)$$

$$\omega = 2\pi N_r / 60 \quad (4.2)$$

$$P_3 = \tau\omega \quad (4.3)$$

$$P_1 = V_1 I_1 \quad (4.4)$$

$$\eta = \frac{P_{out} - P_{in}}{P_{out}} * 100 \quad (4.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

 W_1 = มวลของตุ้มน้ำหนัก (kg) W_2 = มวลที่อ่านจากตาชั่งสปริง (kg) r = ระยะจากจุดศูนย์กลางมอเตอร์ถึงตำแหน่งเชือก (m) N_r = ความเร็วมอเตอร์ (rpm) V_1 = แรงดันไฟฟ้าอินพุต I_1 = กระแสไฟฟ้าอินพุต η = ประสิทธิภาพ

โดย

 $r = 0.02175 \text{ m}$

ตาราง 4.6 ความเร็วรอบของมอเตอร์เมื่อทำการใส่ภาระทางกล

	Power Meter	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		เฉลี่ย	
		W2	Rpm	W2	Rpm	W2	Rpm	Wavg	Rpm
W1	Pout								
1	39	0.36	1246.6	0.31	1245.6	0.31	1254.4	0.33	1248.87
1.5	47	0.41	1230.1	0.44	1230.4	0.44	1231.1	0.43	1230.53
2	62	0.60	1211.3	0.54	1212.1	0.55	1211	0.56	1211.47
2.5	72	0.62	1193	0.66	1104.7	0.70	1190	0.66	1162.57
3	80	0.83	1171.3	0.88	1170.3	0.88	1171	0.86	1170.87
3.5	88	1.05	1171.1	0.98	1166.6	1.00	1155.5	1.01	1164.73
4	95	1.07	1143.4	1.11	1154.5	1.13	1143.8	1.10	1147.23
4.5	104	1.27	1132.6	1.33	1131.6	1.37	1130.6	1.32	1131.60
5	118	1.42	1120.6	1.54	1112.8	1.50	1111.9	1.48	1115.10

ตารางที่ 4.7 ประสิทธิภาพของมอเตอร์เมื่อทำการทดสอบโดยใช้ภาระทางกล

W1	Wavg	Rpm	T N.m.	W rad/s	Pmotor(W)	Pdrive(W)	eff
1	0.33	1248.87	0.14	130.78	18.82	42.13	44.66
1.5	0.43	1230.53	0.23	128.86	29.48	48.90	60.29
2	0.56	1211.47	0.31	126.86	38.94	62.29	62.51
2.5	0.66	1162.57	0.39	121.74	47.83	72.47	66.01
3	0.86	1170.87	0.46	122.61	55.84	79.40	70.33
3.5	1.01	1164.73	0.53	121.97	64.82	85.20	76.08
4	1.10	1147.23	0.62	120.14	74.26	93.33	79.57
4.5	1.32	1131.60	0.68	118.50	80.32	101.28	79.31
5	1.48	1115.10	0.75	116.77	87.53	116.58	77.75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างการคำนวณที่ภาระทางกล 3 กิโลกรัม

จากสมการ

$$\begin{aligned} P_1 &= V_1 I_1 \\ &= 48.1 \times 1.88 \\ &= 90.428 \text{ W} \end{aligned}$$

จากสมการ

$$\begin{aligned} \tau &= 9.8 |W_1 - W_2| * r \\ &= 9.8 \times |3 - 0.863| \times 0.02175 \\ &= 0.4554 \text{ N.m.} \end{aligned}$$

จากสมการ

$$\begin{aligned} \omega &= 2\pi N_r / 60 \\ &= 2\pi \times 1170.867 / 60 \\ &= 122.6129 \text{ รอบต่อวินาที} \end{aligned}$$

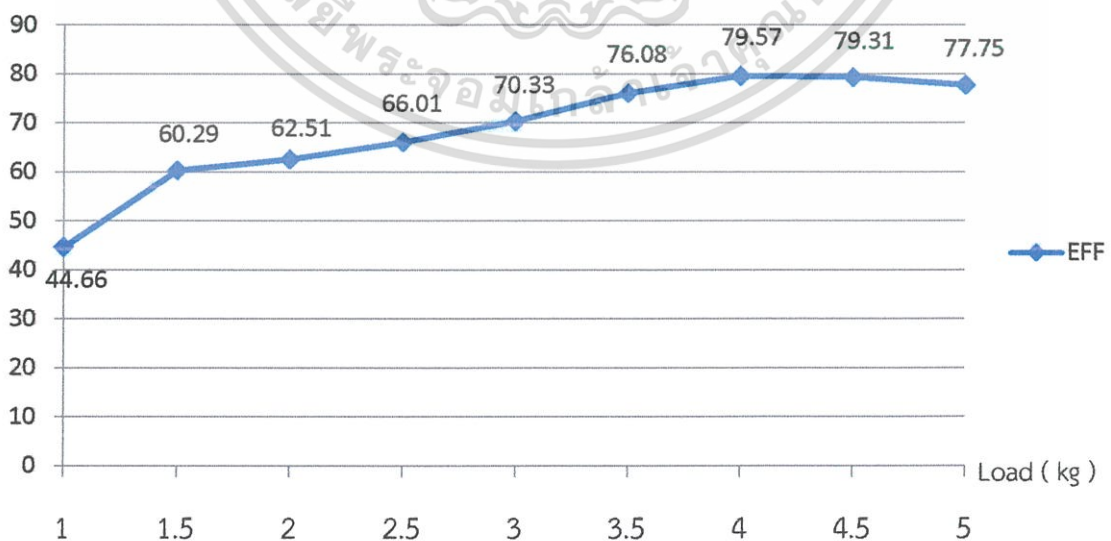
จากสมการ

$$\begin{aligned} P_3 &= \tau \omega \\ &= 0.4554 \times 122.6129 \\ &= 55.8416 \text{ W} \end{aligned}$$

ประสิทธิภาพมอเตอร์

$$\begin{aligned} &= (\text{กำลังไฟฟ้าขาออกจากวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์} / \text{กำลังทางกล} \\ &\quad \text{ได้จากมอเตอร์}) \times 100 \\ &= (55.8416 / 79.4) \times 100 \\ &= 70.33 \% \end{aligned}$$

ประสิทธิภาพของมอเตอร์ (%)



รูปที่ 4.10 แนวโน้มของประสิทธิภาพของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

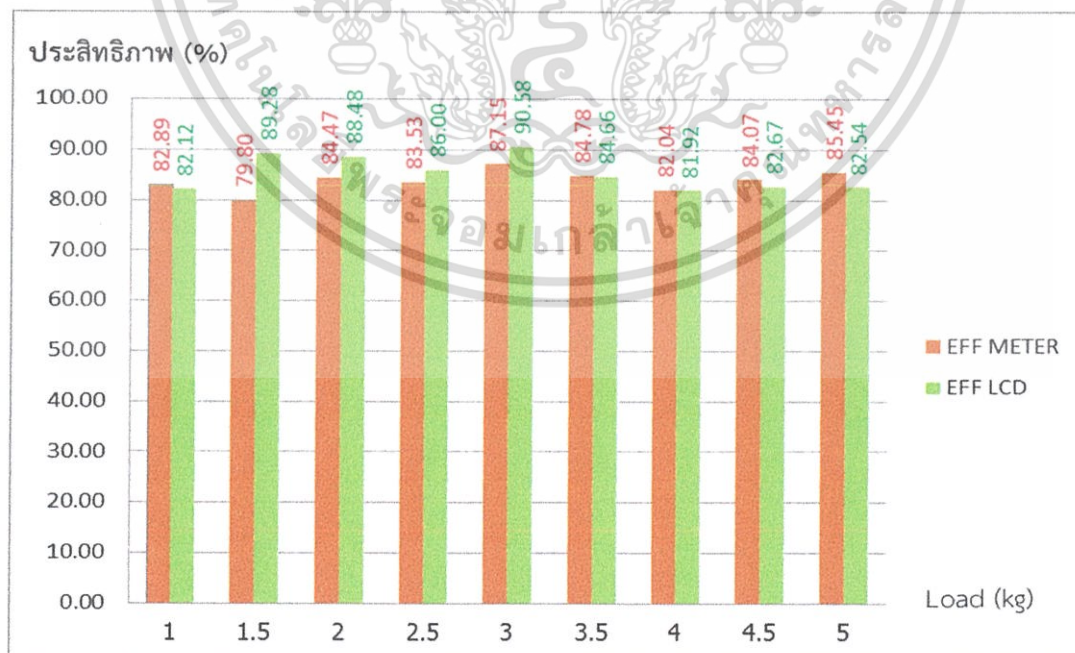
ประสิทธิภาพสูงสุดของมอเตอร์ = 79.57 % ที่โหลด 4 กิโลกรัม
 ประสิทธิภาพโดยเฉลี่ยของมอเตอร์ = 68.50 %

4.5 การทดสอบเพื่อหาประสิทธิภาพของวงจรขั้วมอเตอร์

ในการทดสอบประสิทธิภาพของวงจรขั้วมอเตอร์จะใช้วิธีการทดสอบเช่นเดียวกันกับการทดสอบประสิทธิภาพของมอเตอร์ แต่จะวัดค่าพารามิเตอร์จากแหล่งจ่ายเปรียบเทียบกับส่วนขาออกของชุดทดสอบเท่านั้น และทำการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากมิเตอร์และค่าที่ได้จากชุดทดสอบ

ตารางที่ 4.8 ค่ากำลังไฟฟ้าขาเข้าและขาออกของวงจรขั้วมอเตอร์

Meter				LCD			
Load	Win	Wout	EFF	Load	Win	Wout	EFF
1	47.05	39	82.89	1	51.3	42.13	82.12
1.5	58.9	47	79.80	1.5	54.77	48.9	89.28
2	73.4	62	84.47	2	70.4	62.29	88.48
2.5	86.2	72	83.53	2.5	84.27	72.47	86.00
3	91.8	80	87.15	3	87.66	79.4	90.58
3.5	103.8	88	84.78	3.5	100.64	85.2	84.66
4	115.8	95	82.04	4	113.93	93.33	81.92
4.5	123.7	104	84.07	4.5	122.51	101.28	82.67
5	138.1	118	85.45	5	136.4	112.58	82.54



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงค่าประสิทธิภาพของวงจรขั้วมอเตอร์ที่ได้จากมิเตอร์และจอแอลซีดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าประสิทธิภาพสูงสุดของวงจรขั้วมอเตอร์ที่อ่านได้จากมิเตอร์	= 87.15 %
ค่าประสิทธิภาพโดยเฉลี่ยของวงจรขั้วมอเตอร์ที่ได้จากมิเตอร์	= 83.8 %
ค่าประสิทธิภาพสูงสงของวงจรขั้วมอเตอร์ที่อ่านได้จากแอลซีดี	= 90.58 %
ค่าประสิทธิภาพโดยเฉลี่ยของวงจรขั้วมอเตอร์ที่อ่านได้จากแอลซีดี	= 85.36 %
ค่าความคลาดเคลื่อนของประสิทธิภาพสูงสุด	= 2.05 %
ค่าความคลาดเคลื่อนของประสิทธิภาพโดยเฉลี่ย	= 1.827 %



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดสอบ

จากการศึกษา ออกแบบ และสร้างชุดแสดงผลแบบเรียลไทม์ของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน โดยออกแบบให้มีความแม่นยำและถูกต้องในการวัด ใช้งานง่าย สามารถนำผลไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพได้ โดยการออกแบบให้สามารถใช้งานกับไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 220 โวลต์

ในด้านของการทดสอบและวัดค่าพารามิเตอร์ จากการทดสอบในห้องทดลองโดยการใช้ไฟฟ้าบ้าน 220 โวลต์ ผ่านเพาเวอร์ซัพพลาย 48 โวลต์ โดยการเริ่มใส่มวลให้กับระบบตั้งแต่ 1 กิโลกรัม เพื่อยืนยันที่ละ 0.5 กิโลกรัมจนถึงขนาด 5 กิโลกรัม ในการทดสอบเพื่อหาความแม่นยำของการแสดงผลผ่านจอแอลซีดีของชุดทดสอบ พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จากมิเตอร์โดยมีค่าคลาดเคลื่อนเฉลี่ยทุกพารามิเตอร์เท่ากับ 1.98 % และในการทดสอบวัดความแม่นยำโดยการอ่านค่าผ่านคอมพิวเตอร์ที่แสดงค่าเป็นกราฟของพารามิเตอร์เทียบกับออสซิลโลสโคป โดยการวัดจากการใส่ภาระทางกล 3 กิโลกรัมให้กับมอเตอร์พบว่า เมื่อเปรียบเทียบการวัดระหว่าง V_a ที่ชาแนล 1 และ I_a ที่ชาแนล 2 มีรูปคลื่นในลักษณะที่คล้ายกันวิเคราะห์ได้จากขอบขาขึ้นและขาลงของสัญญาณทั้งสอง โดยที่ค่ากระแสของสัญญาณที่ได้จากคอมพิวเตอร์เป็นสัญญาณที่มีค่าเป็น 10 เท่าของสัญญาณจริง เนื่องจากสัญญาณกระแสจริงมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับสัญญาณแรงดัน จึงจำเป็นต้องยกระดับมาเพื่อให้สามารถวิเคราะห์ได้ง่ายขึ้น เช่นเดียวกับค่า V_{ab} ที่ชาแนล 1 และ I_b ที่ชาแนล 2 สังเกตดูที่บริเวณขอบขาขึ้นของทั้งสองสัญญาณจะพบว่ามีจุดตัดศูนย์ที่จุดเดียวกันกับสัญญาณจากออสซิลโลสโคป

ในส่วนของการทดสอบประสิทธิภาพของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน ทำการทดสอบโดยใช้วิธีการเดียวกันกับการทดสอบความแม่นยำในการแสดงผลด้วยค่าตัวเต็มที่สุดเพื่อหาค่ากระแสและแรงดันขาออกจากวงจรขับมอเตอร์เพื่อใช้เป็นอินพุตสำหรับมอเตอร์ จากนั้นทำการคำนวณค่ากำลังทางกลตามสมการที่ 4.3 เพื่อหาภาระทางกลเทียบกับภาระทางไฟฟ้า ได้ค่าประสิทธิภาพสูงสุดของมอเตอร์อยู่ที่การให้ภาระทางกลที่ 4 กิโลกรัม ซึ่งมีค่ากำลังไฟฟ้าเท่ากับ 93.33 วัตต์ และมีค่ากำลังทางกลที่ได้จากมอเตอร์เท่ากับ 74.2615 วัตต์ ซึ่งมีประสิทธิภาพเท่ากับ 79.57 % และประสิทธิภาพทางกลเฉลี่ยของมอเตอร์เท่ากับ 68.50 %

ในส่วนของการทดสอบประสิทธิภาพของวงจรขับมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านทำการทดสอบโดยใช้วิธีการเดียวกันกับการทดสอบประสิทธิภาพของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านด้วยค่าตัวเต็มที่สุดโดยทำการวัดค่าของพารามิเตอร์ด้านอินพุตก่อนเข้าวงจรขับมอเตอร์และด้านเอาต์พุตของวงจรขับมอเตอร์ โดยเปรียบเทียบกันระหว่างการเก็บค่าจากมิเตอร์และการเก็บค่าจากส่วนแสดงผลจอแอลซีดี พบว่าในการเก็บค่าจากมิเตอร์และส่วนแสดงผลแอลซีดีมีค่าประสิทธิภาพสูงสุดอยู่ที่ 87.15 และ 90.58 ตามลำดับที่ภาระทางกล 3 กิโลกรัม ซึ่งการเก็บค่าจากแอลซีดีมีความคลาดเคลื่อนจากมิเตอร์ที่ 2.05 % และมีค่าประสิทธิภาพโดยเฉลี่ย 83.8 และ 85.36 ตามลำดับ ค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 1.827 %

วิจารณ์ผลการทดลอง

ค่าพารามิเตอร์ที่มีความคลาดเคลื่อนจากการแสดงผลด้วยจอแอลซีดีมีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อยและมีความคลาดเคลื่อนสูงในบางพารามิเตอร์ เนื่องจากการแสดงค่าเป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณที่มีฮาร์โมนิกส์เกิดขึ้นมาก การจับค่าอาจจะไปจับโดนจุดที่เป็นสัญญาณรบกวนของวงจร และในการทดสอบกับมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านเป็นมอเตอร์ที่พันขึ้นเอง ดังนั้นค่าพีคคของมอเตอร์อาจมีความคลาดเคลื่อน จึงทำการทดสอบโดยใช้ภาระทางกลสูงสุด 5 กิโลกรัม เพื่อป้องกันการไม่ให้มอเตอร์มีความเสียหาย

ในส่วนของการกราฟที่แสดงผลผ่านคอมพิวเตอร์ มีบางจุดที่มีความคลาดเคลื่อนเมื่อเทียบกับออสซิลโลสโคป เนื่องจากบางจุดเป็นสัญญาณที่มีความถี่สูงทำให้การจับค่าที่บริเวณนั้นเกิดปัญหา เนื่องจากไมโครโปรเซสเซอร์ที่ใช้มีความถี่ในการจับสัญญาณอยู่ที่ 10 kHz ดังนั้นสัญญาณที่มีความถี่มากกว่า 5 kHz จะไม่ทำการจับค่าได้หรือจับได้แค่บางส่วน เป็นผลทำให้รูปของสัญญาณมีความคลาดเคลื่อน

ในส่วนของการทดสอบประสิทธิภาพของมอเตอร์และวงจรขับมอเตอร์โดยการใช้ภาระทางกลค่าที่ได้อาจมีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการเสียดสีของเชือกที่ยึดตุ้มน้ำหนัก ทำให้มีการสูญเสียที่บริเวณนี้ด้วยเช่นกัน

ปัญหาที่เกิดขึ้นและแนวทางแก้ไข

ในส่วนของการแสดงผลผ่านคอมพิวเตอร์ เพื่อให้ได้กราฟที่สมบูรณ์มากขึ้นในอนาคตอาจจะเปลี่ยนไปใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีความเร็วมากขึ้น

ในการใช้งานควรระบุเฟสของมอเตอร์ให้ชัดเจน เนื่องจากใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์เป็นแหล่งจ่าย การต่อผิดเฟสอาจจะทำให้เกิดความเสียหายต่อวงจรภายในได้ ควรทำความเข้าใจในระบบก่อนใช้งานทุกครั้ง เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการวัดค่าและความถูกต้องในการนำไปประมวลผล

แนวทางการดำเนินงานต่อไป

ออกแบบให้มีขนาดเล็กลงเพื่ออำนวยความสะดวกการใช้งานและพกพา พัฒนาระบบแสดงผลด้วยคอมพิวเตอร์ด้วยการเขียนซอฟต์แวร์สำหรับแสดงผลขึ้นมาเองและเปลี่ยนไปใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีความสามารถมากขึ้น พัฒนางจรขับมอเตอร์ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นโดยการเปลี่ยนอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งที่มีกำลังไฟฟ้าสูญเสียต่ำกว่าในปัจจุบัน

เอกสารอ้างอิง

- [1] วีระเชษฐ์ ชันเงิน และ วุฒิพล ธาราธีรเศรษฐ์, อิเล็กทรอนิกส์กำลัง, กรุงเทพมหานคร, ห้างหุ้นส่วนจำกัด วี.เจ. พรีนติ้ง , 2555
- [2] รณกฤษณ์ จิตแจ่มใสและคณะ,ระบบการทำงาน ของรถในรถไฟฟ้าสะเทินน้ำสะเทินบก, ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2555
- [3] กฤตภาส ผิวสันเทียะ และคณะ,การออกแบบและควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าแบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่าน,ปริญญานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแสดงผลแบบตอบสนองอย่างรวดเร็วของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

Fast Response BLDC Monitoring System

ธนวิทย์ เต่าเอก ธนศ กุลวงษ์ และวัชรพงศ์ ผาเจริญ

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ถนนฉลองกรุง แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 โทร/โทรสาร. 027392478 Email.Tanet0596@gmail.com

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของการจัดทำโครงการนี้เพื่อนำเสนอการออกแบบและสร้างชุดควบคุมและแสดงผลการตอบสนองแบบรวดเร็วสำหรับมอเตอร์กระแสตรงชนิดไม่มีแปรงถ่าน (Brushless DC Motor) สามารถใช้ทดสอบประสิทธิภาพมอเตอร์และเก็บข้อมูลโดยใช้อุปกรณ์ทดสอบเพียงชุดเดียว ซึ่งก็คือชุดทดสอบการตอบสนองแบบรวดเร็วของมอเตอร์กระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน ซึ่งมอเตอร์กระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านมีจุดเด่นคือประสิทธิภาพสูงกว่ามอเตอร์กระแสตรงทั่วไป ซึ่งมอเตอร์กระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านมีพารามิเตอร์ที่ต้องใช้ในการวิเคราะห์จำนวนมาก เช่น สัญญาณแรงดันเฟส (Phase Voltage), แรงดันระหว่างเฟส (Line-Line Voltage) เป็นต้น ซึ่งต้องใช้อุปกรณ์ในการวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆจำนวนมาก ทำให้ยุ่งยากต่อการเคลื่อนย้ายและทดสอบ จึงได้มีการคิดค้นและสร้างชุดทดสอบที่สามารถเก็บค่าพารามิเตอร์ได้ภายในชุดทดสอบเดียว ง่ายต่อการเคลื่อนย้ายและสะดวกต่อการทดลอง และมีความแม่นยำใกล้เคียงกับเครื่องมือวัดที่ขายตามท้องตลาด อีกทั้งยังสามารถแสดงผลคุณลักษณะของสัญญาณได้อย่างแม่นยำ (Monitoring)

คำสำคัญ: มอเตอร์กระแสตรงชนิดไม่มีแปรงถ่าน, การแสดงผล

Abstract

The objective of this paper aims to provide the design of controller and show the fast response of Brushless DC Motor. In addition, it can use to test the efficiency of motor and collect data by only one tool. That is that is a fast response bldc monitoring tool. The strength of this motor has higher ability than others and it can have many parameters to analyze such as Phase Voltage, Line-Line Voltage and etc. We found that it was difficult and complicated to measure too many parameters, in order to do so, many equipments are needed. So we created and made up the tool that can memorize all parameters which is accessible and convenient to use, also the accuracy and

reliability monitoring were almost equal to the tools that available in market.

Keyword: Brushless DC Motor , Monitoring

1. บทนำ

เนื่องจากในปัจจุบันในงานอุตสาหกรรมต่างๆ มีการใช้ระบบอัตโนมัติและเครื่องจักรกลแพร่หลายเป็นอย่างมาก มอเตอร์ก็เป็นที่นิยมใช้เช่นเดียวกัน ไม่ว่าจะเป็นอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ ขนาดกลาง และขนาดเล็ก ล้วนต้องมีมอเตอร์เข้ามาเกี่ยวข้องทั้งสิ้น ดังนั้นการเลือกใช้มอเตอร์ควรต้องเลือกที่มีประสิทธิภาพสูง ใช้งานได้ง่าย และอายุการใช้งานมาก ซึ่งทำให้มีราคาสูงขึ้นตามมาด้วย ดังนั้นการเลือกใช้มอเตอร์ให้เหมาะสม มีประสิทธิภาพสูง ราคาเหมาะสม จึงเป็นเรื่องจำเป็นอย่างยิ่ง ซึ่งการจะทำการเลือกมอเตอร์ที่ดีได้นั้น ผู้เลือกจำเป็นต้องมีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับตัวมอเตอร์เป็นอย่างดี ไม่ว่าจะเป็นเรื่องรูปแบบการใช้งาน ประสิทธิภาพการใช้งาน อายุการใช้งาน เพื่อประโยชน์สูงสุด

โดยเหตุผลข้างต้นจึงได้เริ่มคิดค้นหาวิธีที่จะทำให้สามารถทราบถึงคุณลักษณะของมอเตอร์ได้ จึงได้ทำการเลือกมอเตอร์ชนิดมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านมาทำเป็นชุดแสดงผลแบบตอบสนองอย่างรวดเร็ว เนื่องจากมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านเป็นมอเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงและเริ่มถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย ซึ่งจะทำให้เป็นชุดขับเคลื่อนมอเตอร์และชุดแสดงผลแบบตอบสนองอย่างรวดเร็ว เพื่อสามารถนำมาทดสอบมอเตอร์ได้ในชุดเดียวกันและยังสามารถนำมาใช้เป็นชุดประกอบการเรียนรู้เพื่อให้นักศึกษาเข้าใจถึงหลักการการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านได้ดียิ่งขึ้น

2. ทฤษฎีและความรู้ที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไม่มีแปรงถ่าน

Brushless DC motor (BLDC) คือ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง โดยอาศัยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเป็นสวิทซ์ในการสับเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดของมอเตอร์แทนที่ของแปรงถ่าน โดยจะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

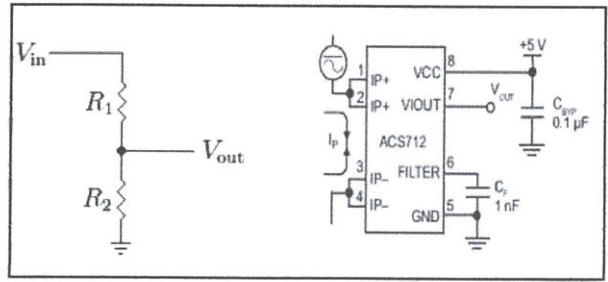
มี Sensor ตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์อย่างละเอียดเพื่อที่จะได้จ่ายกระแสไฟฟ้าได้อย่างถูกต้องโดยที่การจ่ายกระแสไฟฟ้าจะสร้างขั้วแม่เหล็กที่สเตเตอร์ทำให้เกิดการดึงดูดระหว่างขั้วแม่เหล็กที่เกิดขึ้นกับฟลักซ์ที่โรเตอร์สร้างขึ้นโดยที่โดยที่กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดสเตเตอร์ นั้นจะเป็นไฟฟ้ากระแสสลับส่วนที่โรเตอร์นั้นเป็นแม่เหล็กถาวร(Permanent magnet)

2.2 อินเวอร์เตอร์

อินเวอร์เตอร์ (Inverter) ก็คือวงจรแปลงผันพลังงานไฟตรงให้เป็นไฟสลับ เรียกอีกชื่อหนึ่งว่าเครื่องผกผันเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่มีค่าแรงดันคงที่หรือปรับค่าได้เพื่อให้ได้ความถี่ไฟสลับเอาท์พุทมีค่าคงที่หรือปรับค่าได้ โดยใช้ หลักการปรับค่าแรงดันไฟตรงด้านอินพุทหรือ ใช้หลักการควบคุมเทคนิคการสวิตซ์ภายในตัวอินเวอร์เตอร์ เช่น เทคนิคแบบมอดูเลต ความกว้างพัลส์ (PWM) เป็นคลื่นหรืออาจใช้วิธีปรับค่าแรงดันไฟตรงด้านอินพุทของอินเวอร์เตอร์ก็ได้เช่นกัน สำหรับอินเวอร์เตอร์ที่ใช้งานควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส จะใช้หลักการควบคุมอัตราส่วนของแรงดันเอาท์พุทและความถี่เอาท์พุทให้คงที่ (V/f Constant) เพื่อให้สามารถควบคุมให้แรงบิดคงที่ได้ แต่สำหรับอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในงานควบคุมอื่นๆที่ต้องการความถี่เอาท์พุทคงที่ก็อาจใช้อินเวอร์เตอร์ที่ควบคุมการเปิด-ปิด สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังด้วยวิธีที่ไม่ซับซ้อน เช่นวิธีมอดูเลตแบบ 180 องศา และ 120 องศา เป็นต้น สำหรับลูกคลื่นของแรงดันเอาท์พุทไฟสลับของอินเวอร์เตอร์ในอุดมคติคือรูปคลื่นไซน์ แต่ในทางปฏิบัติจะไม่ใช่รูปคลื่นไซน์ แต่จะเป็นรูปกึ่งสี่เหลี่ยมซึ่งมีฮาร์โมนิกเป่าปนอยู่มาก ซึ่งด้วยเทคนิคการสวิตซ์แบบ PWM จะทำให้ฮาร์โมนิกดังกล่าวลดลง และทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของอินเวอร์เตอร์สูงขึ้น

2.3 เซ็นเซอร์

ในการทำการวัดค่าพารามิเตอร์จะทำการวัดค่าแรงดันโดยใช้โวลต์เตจดีไวเดอร์ (Voltage divider) ทำการแปรแรงดันจากสัญญาณจริงให้อยู่ในช่วงที่ไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถรับได้โดยระดับแรงดันที่ต้องการจะอยู่ที่ 0-5 โวลต์ โดยใช้พิคอัพแรงดันสูงสุดที่ 48 โวลต์ เป็นแรงดันที่ต้องการแปลงค่า ในส่วนของกระแสไฟฟ้าจะใช้เซ็นเซอร์เบอร์ ACS712-20 ซึ่งจะทำการวัดค่ากระแสออกมาเป็นสัญญาณแรงดันตั้งแต่ 0-5 โวลต์ โดยสามารถใช้ได้ทั้งกระแสตรงและกระแสสลับ โดยจะให้แรงดันอ้างอิงที่ 2.5 โวลต์ เมื่อมีค่ากระแสเป็น 0 แอมป์โดยพารามิเตอร์ที่ใช้โวลต์เตจดีไวเดอร์ได้แก่ แรงดันเฟส A, แรงดันเฟส B, แรงดันเฟส C และแรงดันขาเข้า ส่วนเซ็นเซอร์กระแส ACS712-20 จะใช้กับพารามิเตอร์กระแสเฟส A, กระแสเฟส B, กระแสเฟส C, และกระแสขาเข้า



(ก)

(ข)

รูปที่ 1(ก) โวลต์เตจดีไวเดอร์และ (ข) เซ็นเซอร์กระแส ACS712-20

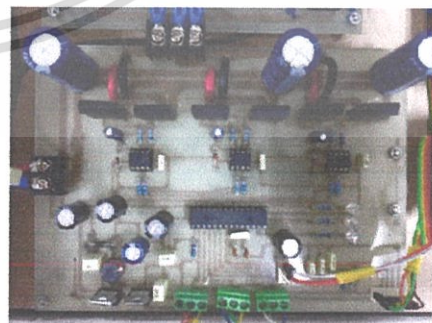
3. การออกแบบและสร้าง

3.1 วงจรเซ็นเซอร์

ออกแบบโดยแบ่งเซ็นเซอร์เป็นสองส่วนได้แก่ เซ็นเซอร์แรงดันและเซ็นเซอร์กระแส โดยเซ็นเซอร์แรงดันจะทำการแปลงแรงดันจาก 0-48 โวลต์ เป็น 0-5 โวลต์ออกแบบโดยใช้ค่า $R_1 = 50\text{ k}\Omega$ และ $R_2 = 5.813\text{ k}\Omega$ โดยใช้ในการวัดแรงดันขาเข้าและแรงดันเฟสทั้ง 3 เฟส ส่วนของการวัดกระแสโดยใช้ ACS712-20 ใช้กับกระแสขาเข้าและกระแสขาออกทั้ง 3 เฟสเช่นกัน

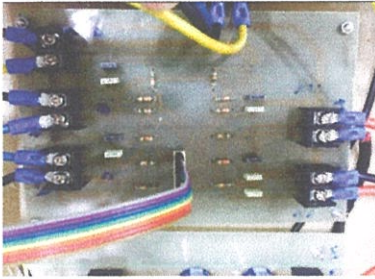
3.2 วงจรขับมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

ในวงจรขับมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน ออกแบบให้ใช้ได้กับแรงดันสูงสุดได้ 48 โวลต์ โดยใช้แหล่งจ่ายเป็นสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลาย ออกแบบด้วยการใช้มอสเฟตกำลังเป็นอุปกรณ์สวิตชิงเนื่องจากควบคุมได้ง่ายและมีค่า Rds-on ต่ำ โดยควบคุมผ่าน IR - 2101 ควบคุมการทำงานของอุปกรณ์สวิตชิงในแต่ละกิ่ง และใช้การควบคุมแบบความกว้างพัลส์แบบยูนิโพลาร์(Unipolar PWM) เนื่องจากมีฮาร์โมนิกส์ที่ต่ำกว่าแบบอื่นๆ



รูปที่ 2 วงจรขับมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



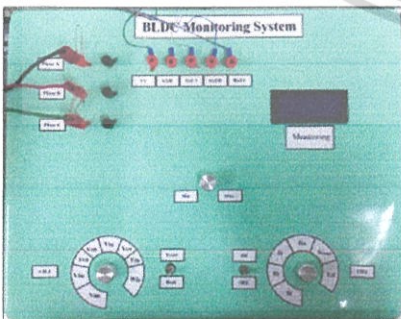
รูปที่ 3 วงจรเซ็นเซอร์กระแสและเซ็นเซอร์แรงดัน

3.3 การออกแบบส่วนแสดงผล

การออกแบบการแสดงผล จะมีการแสดงผลผ่านคอมพิวเตอรื และจอแอลซีดีขนาด 20 x 4 โดยแบ่งการแสดงผลเป็น 2 กลุ่ม หรือ 2 ชาญแนล โดยมีพารามิเตอร์ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยการแสดงผลผ่านจอแอลซีดีจะแสดงผลเป็นค่ารูทมีนสแควร์(RMS Value) ส่วนการแสดงผลผ่านคอมพิวเตอรืจะแสดงผลเป็นรูปสัญญาณของพารามิเตอร์นั้นๆ ผ่านโปรแกรม Serial Oscilloscope โดยใช้ไมโครโปรเซสเซอร์ Arduino MEGA 2560

3.4 ชุดแสดงผลแบบตอบสนองอย่างรวดเร็วของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

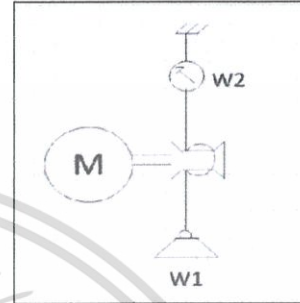
เพื่อให้ง่ายต่อการทำการทดสอบและการนำไปใช้จริง ชุดทดสอบได้ถูกออกแบบให้มีฟังก์ชันการใช้งานที่ไม่ซับซ้อน และสามารถเข้าการทำงานได้อย่างง่ายดาย โดยออกแบบให้มีการเลือกพารามิเตอร์ที่ต้องการแสดงผลได้ตามต้องการ มีการระบุเฟสของมอเตอร์อย่างชัดเจน และมีอุปกรณ์ป้องกันเพื่อความปลอดภัยต่อผู้ใช้งานโดยภายในจะประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้าสวิทช์ซึ่งเพาเวอร์สัพพลาย, วงจรไฟเลี้ยงเซ็นเซอร์, วงจรขั้วมอเตอร์, และ Arduino MEGA 2560



รูปที่ 4 ชุดทดสอบการแสดงผลแบบตอบสนองอย่างรวดเร็วของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

4. การทดสอบ

ในการทดสอบจะแบ่งการทดสอบออกเป็นสามการทดสอบ ได้แก่ การทดสอบความแม่นยำในการแสดงผลด้วยจอแอลซีดี การทดสอบความแม่นยำในการแสดงผลด้วยคอมพิวเตอร์ และการทดสอบเพื่อหาประสิทธิภาพของมอเตอร์และวงจรขั้วมอเตอร์โดยใช้การทดสอบด้วยการให้ภาระทางกลแก่มอเตอร์ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 การทดสอบมอเตอร์ด้วยการให้ภาระทางกล

4.1 การทดสอบความแม่นยำในการแสดงผลด้วยจอแอลซีดี

ในส่วนนี้จะทำการทดสอบการวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อเปรียบเทียบกับมิเตอร์ที่มีขายตามท้องตลาด

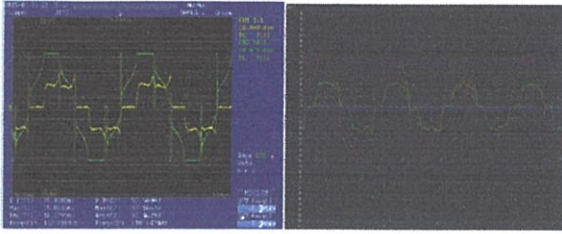
ตารางที่ 2เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการวัดระหว่างมิเตอร์และจอแอลซีดี

Load	Power meter	LCD	%คลาดเคลื่อน
	Vab	Vab	
1	33.6	34.07	1.40
2	33.9	33.49	1.21
3	33.4	33.29	0.33
4	33.08	33.33	0.76
5	33.12	33.7	1.75

4.2 การทดสอบความแม่นยำด้วยการแสดงผลผ่านคอมพิวเตอร์

ทำการทดสอบโดยใช้ภาระทางกลที่ 3 กิโลกรัม โดยทำการเปรียบเทียบสัญญาณระหว่างออสซิลโลสโคปกับสัญญาณที่วัดได้จากคอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

รูปที่ 6 (ก) สัญญาณที่จับได้จากออสซิลโลสโคป

(ข)

(ข) สัญญาณที่จับได้จากคอมพิวเตอร์

4.3 การทดสอบประสิทธิภาพของมอเตอร์และวงจรขับ

มอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

ทดสอบประสิทธิภาพของมอเตอร์และวงจรขับมอเตอร์โดยใช้ภาระทางกลตั้งแต่ 1-5 กิโลกรัม โดยเพิ่มขึ้นทีละ 0.5 กิโลกรัม ได้ความสัมพันธ์ดังนี้

ตารางที่ 3 ประสิทธิภาพของมอเตอร์และวงจรขับมอเตอร์

Load	Win (W)	Pdrive	Pmotor	%Eff _{drive}	%Eff _{motor}
1	47.05	39	18.82	82.89	44.66
2	73.4	62	38.94	84.47	62.51
3	91.8	80	55.84	87.15	70.33
4	115.8	95	74.26	82.04	79.57
5	138.1	118	87.53	85.45	77.75

5. สรุป

ในการทดสอบพบว่า ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนของพารามิเตอร์ที่วัดได้จากออสซิลโลสโคปเทียบกับมิเตอร์อยู่ที่ 1.98 % และความแม่นยำจากการวัดสัญญาณจากคอมพิวเตอร์มีความใกล้เคียงกันโดยวัดจากขอบขาขึ้นและจุดยอดของสัญญาณ ในส่วนของการทดสอบประสิทธิภาพของมอเตอร์มีประสิทธิภาพสูงสุดอยู่ที่ 79.57 % และประสิทธิภาพสูงสุดของวงจรขับมอเตอร์อยู่ที่ 87.15 %

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รศ.ร.อ.ดร.วิระเชษฐ ชันเงิน ที่ได้กรุณาให้ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ต่อโครงงานด้วยดีโดยตลอดอาจารย์และเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, พี่ๆ นักศึกษาปริญญาโทและเพื่อนๆ ของห้องปฏิบัติการทางแม่เหล็กไฟฟ้า ที่ให้คำปรึกษาอย่างดีมากต่อชิ้นงานมาโดยตลอด

ท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาและครอบครัวซึ่งให้การสนับสนุนในด้านการเงินและให้กำลังใจจึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

7. อ้างอิง

- [1] วิระเชษฐ ชันเงิน และ วุฒิพล ชารินทร์เศรษฐ์, “อิเล็กทรอนิกส์กำลัง”, กรุงเทพมหานคร, ห้างหุ้นส่วนจำกัด วิ.เจ. พรินต์ติ้ง, 2555
- [2] รณกฤษณ์ จิตแจ่มใสและคณะ, “ระบบการทำงานของรถในรถไฟฟ้าสะเทินน้ำสะเทินบก”, ปริญญาโทวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2555
- [3] กฤตภาส สิวสันเทียะ และคณะ, “การออกแบบและควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าแบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่าน”, ปริญญาโทวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



นายธนวิทย์ เต่าเอก

เกิดวันที่ 31 สิงหาคม 2534

ภูมิลำเนาอยู่จังหวัดสมุทรปราการ

ศึกษาในระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนสตรีสมุทรปราการ

ศึกษาในระดับปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยสนใจงานวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง



นายธนศ กุลวงษ์

เกิดวันที่ 9 กุมภาพันธ์ 2536

ภูมิลำเนาอยู่จังหวัดมุกดาหาร

ศึกษาในระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนมุกดาหาร

ศึกษาในระดับปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยสนใจงานวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง



นายวัชรพงศ์ ศาเจริญ

เกิดวันที่ 14 ตุลาคม 2535

ภูมิลำเนาอยู่จังหวัดหนองคาย

ศึกษาในระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนปทุมเทพวิทยาคาร

ศึกษาในระดับปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยสนใจงานวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข
พื้นฐานเกี่ยวกับมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



AN885

Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals

Author: Padmaraja Yedamale
Microchip Technology Inc.

INTRODUCTION

Brushless Direct Current (BLDC) motors are one of the motor types rapidly gaining popularity. BLDC motors are used in industries such as Appliances, Automotive, Aerospace, Consumer, Medical, Industrial Automation Equipment and Instrumentation.

As the name implies, BLDC motors do not use brushes for commutation; instead, they are electronically commutated. BLDC motors have many advantages over brushed DC motors and induction motors. A few of these are:

- Better speed versus torque characteristics
- High dynamic response
- High efficiency
- Long operating life
- Noiseless operation
- Higher speed ranges

In addition, the ratio of torque delivered to the size of the motor is higher, making it useful in applications where space and weight are critical factors.

In this application note, we will discuss in detail the construction, working principle, characteristics and typical applications of BLDC motors. Refer to **Appendix B: "Glossary"** for a glossary of terms commonly used when describing BLDC motors.

CONSTRUCTION AND OPERATING PRINCIPLE

BLDC motors are a type of synchronous motor. This means the magnetic field generated by the stator and the magnetic field generated by the rotor rotate at the same frequency. BLDC motors do not experience the "slip" that is normally seen in induction motors.

BLDC motors come in single-phase, 2-phase and 3-phase configurations. Corresponding to its type, the stator has the same number of windings. Out of these, 3-phase motors are the most popular and widely used. This application note focuses on 3-phase motors.

Stator

The stator of a BLDC motor consists of stacked steel laminations with windings placed in the slots that are axially cut along the inner periphery (as shown in Figure 3). Traditionally, the stator resembles that of an induction motor; however, the windings are distributed in a different manner. Most BLDC motors have three stator windings connected in star fashion. Each of these windings are constructed with numerous coils interconnected to form a winding. One or more coils are placed in the slots and they are interconnected to make a winding. Each of these windings are distributed over the stator periphery to form an even numbers of poles.

There are two types of stator windings variants: trapezoidal and sinusoidal motors. This differentiation is made on the basis of the interconnection of coils in the stator windings to give the different types of back Electromotive Force (EMF). Refer to the "What is Back EMF?" section for more information.

As their names indicate, the trapezoidal motor gives a back EMF in trapezoidal fashion and the sinusoidal motor's back EMF is sinusoidal, as shown in Figure 1 and Figure 2. In addition to the back EMF, the phase current also has trapezoidal and sinusoidal variations in the respective types of motor. This makes the torque output by a sinusoidal motor smoother than that of a trapezoidal motor. However, this comes with an extra cost, as the sinusoidal motors take extra winding interconnections because of the coils distribution on the stator periphery, thereby increasing the copper intake by the stator windings.

Depending upon the control power supply capability, the motor with the correct voltage rating of the stator can be chosen. Forty-eight volts, or less voltage rated motors are used in automotive, robotics, small arm movements and so on. Motors with 100 volts, or higher ratings, are used in appliances, automation and in industrial applications.



AN885

Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals

Author: Padmaraja Yedamale
Microchip Technology Inc.

INTRODUCTION

Brushless Direct Current (BLDC) motors are one of the motor types rapidly gaining popularity. BLDC motors are used in industries such as Appliances, Automotive, Aerospace, Consumer, Medical, Industrial Automation Equipment and Instrumentation.

As the name implies, BLDC motors do not use brushes for commutation; instead, they are electronically commutated. BLDC motors have many advantages over brushed DC motors and induction motors. A few of these are:

- Better speed versus torque characteristics
- High dynamic response
- High efficiency
- Long operating life
- Noiseless operation
- Higher speed ranges

In addition, the ratio of torque delivered to the size of the motor is higher, making it useful in applications where space and weight are critical factors.

In this application note, we will discuss in detail the construction, working principle, characteristics and typical applications of BLDC motors. Refer to **Appendix B: "Glossary"** for a glossary of terms commonly used when describing BLDC motors.

CONSTRUCTION AND OPERATING PRINCIPLE

BLDC motors are a type of synchronous motor. This means the magnetic field generated by the stator and the magnetic field generated by the rotor rotate at the same frequency. BLDC motors do not experience the "slip" that is normally seen in induction motors.

BLDC motors come in single-phase, 2-phase and 3-phase configurations. Corresponding to its type, the stator has the same number of windings. Out of these, 3-phase motors are the most popular and widely used. This application note focuses on 3-phase motors.

Stator

The stator of a BLDC motor consists of stacked steel laminations with windings placed in the slots that are axially cut along the inner periphery (as shown in Figure 3). Traditionally, the stator resembles that of an induction motor; however, the windings are distributed in a different manner. Most BLDC motors have three stator windings connected in star fashion. Each of these windings are constructed with numerous coils interconnected to form a winding. One or more coils are placed in the slots and they are interconnected to make a winding. Each of these windings are distributed over the stator periphery to form an even numbers of poles.

There are two types of stator windings variants: trapezoidal and sinusoidal motors. This differentiation is made on the basis of the interconnection of coils in the stator windings to give the different types of back Electromotive Force (EMF). Refer to the "What is Back EMF?" section for more information.

As their names indicate, the trapezoidal motor gives a back EMF in trapezoidal fashion and the sinusoidal motor's back EMF is sinusoidal, as shown in Figure 1 and Figure 2. In addition to the back EMF, the phase current also has trapezoidal and sinusoidal variations in the respective types of motor. This makes the torque output by a sinusoidal motor smoother than that of a trapezoidal motor. However, this comes with an extra cost, as the sinusoidal motors take extra winding interconnections because of the coils distribution on the stator periphery, thereby increasing the copper intake by the stator windings.

Depending upon the control power supply capability, the motor with the correct voltage rating of the stator can be chosen. Forty-eight volts, or less voltage rated motors are used in automotive, robotics, small arm movements and so on. Motors with 100 volts, or higher ratings, are used in appliances, automation and in industrial applications.

AN885

FIGURE 1: TRAPEZOIDAL BACK EMF

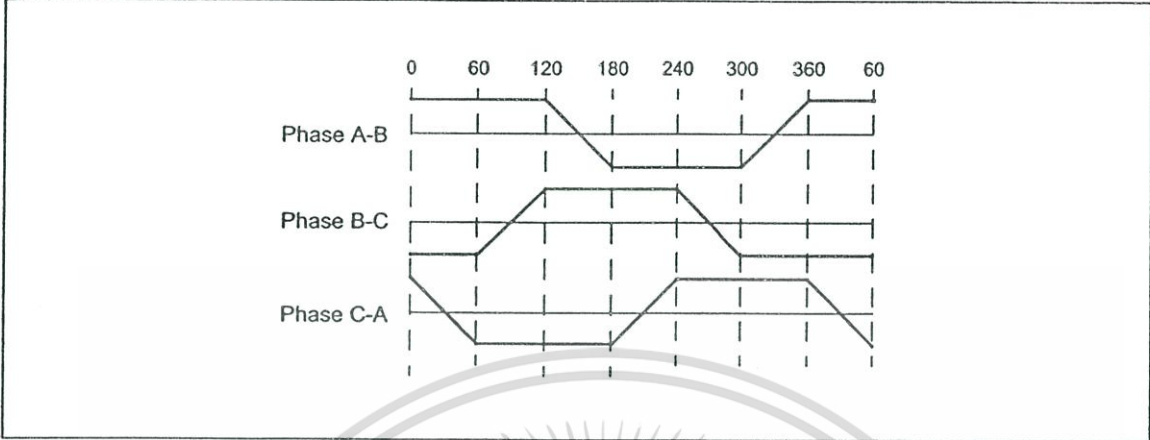


FIGURE 2: SINUSOIDAL BACK EMF

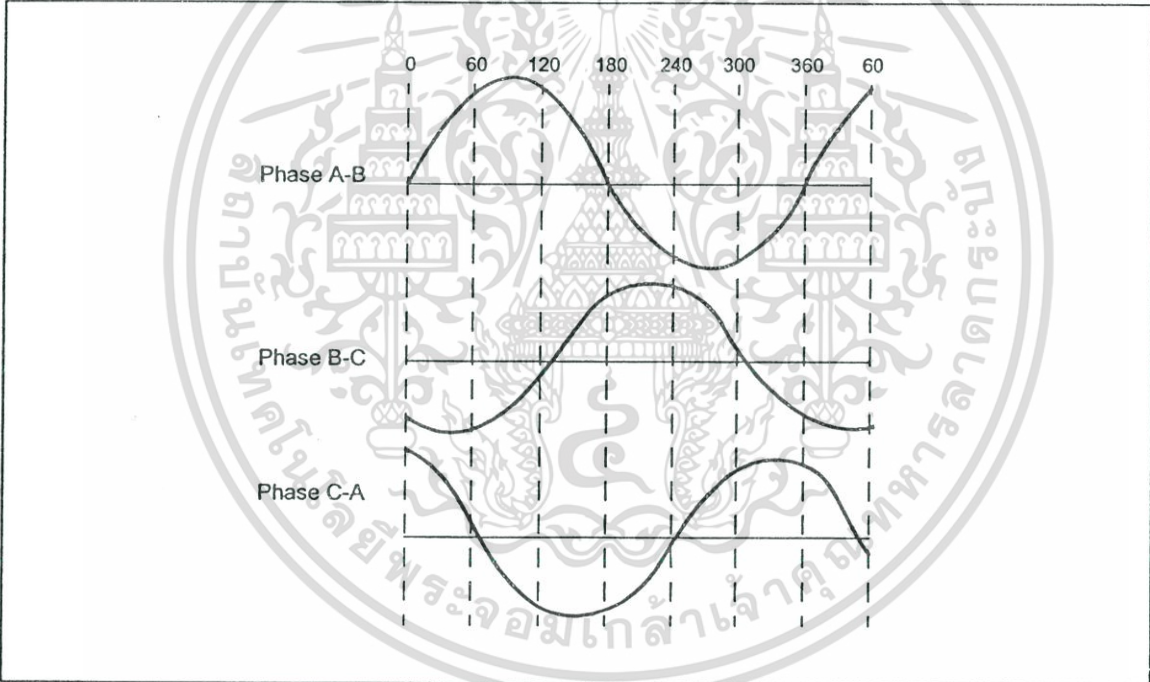
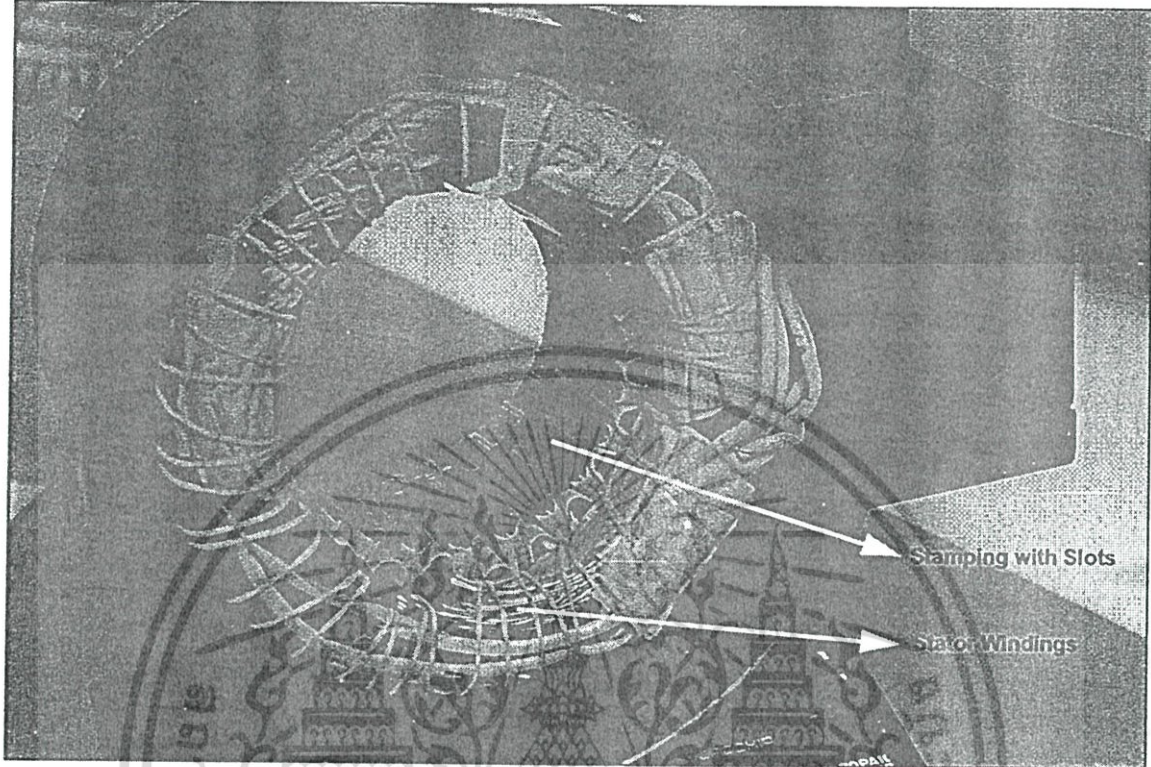


FIGURE 3: STATOR OF A BLDC MOTOR

AN885

Rotor

The rotor is made of permanent magnet and can vary from two to eight pole pairs with alternate North (N) and South (S) poles.

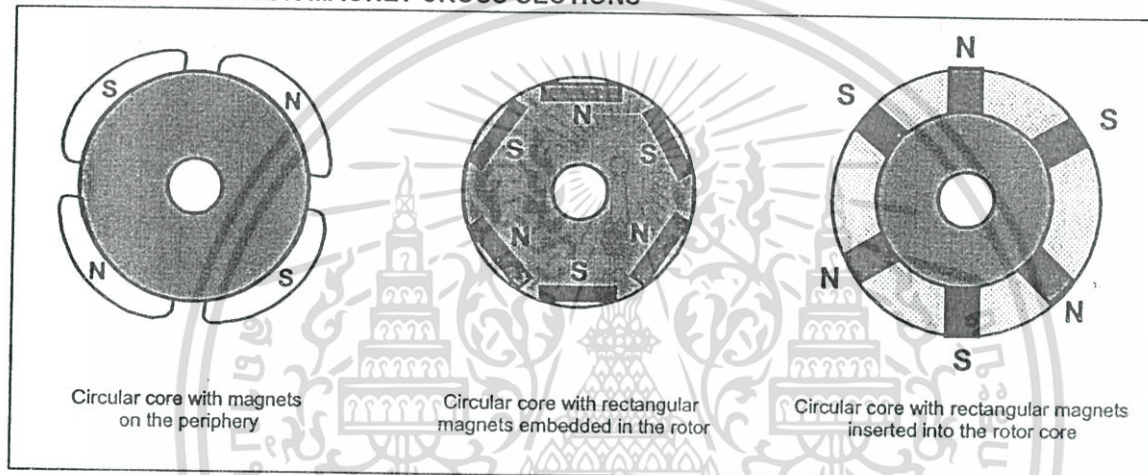
Based on the required magnetic field density in the rotor, the proper magnetic material is chosen to make the rotor. Ferrite magnets are traditionally used to make permanent magnets. As the technology advances, rare earth alloy magnets are gaining popularity. The ferrite magnets are less expensive but they have the disadvantage of low flux density for a given volume. In contrast, the alloy material has high magnetic density per

volume and enables the rotor to compress further for the same torque. Also, these alloy magnets improve the size-to-weight ratio and give higher torque for the same size motor using ferrite magnets.

Neodymium (Nd), Samarium Cobalt (SmCo) and the alloy of Neodymium, Ferrite and Boron (NdFeB) are some examples of rare earth alloy magnets. Continuous research is going on to improve the flux density to compress the rotor further.

Figure 4 shows cross sections of different arrangements of magnets in a rotor.

FIGURE 4: ROTOR MAGNET CROSS SECTIONS



Hall Sensors

Unlike a brushed DC motor, the commutation of a BLDC motor is controlled electronically. To rotate the BLDC motor, the stator windings should be energized in a sequence. It is important to know the rotor position in order to understand which winding will be energized following the energizing sequence. Rotor position is sensed using Hall effect sensors embedded into the stator.

Most BLDC motors have three Hall sensors embedded into the stator on the non-driving end of the motor.

Whenever the rotor magnetic poles pass near the Hall sensors, they give a high or low signal, indicating the N or S pole is passing near the sensors. Based on the combination of these three Hall sensor signals, the exact sequence of commutation can be determined.

Note: Hall Effect Theory: If an electric current carrying conductor is kept in a magnetic field, the magnetic field exerts a transverse force on the moving charge carriers which tends to push them to one side of the conductor. This is most evident in a thin flat conductor. A buildup of charge at the sides of the conductors will balance this magnetic influence, producing a measurable voltage between the two sides of the conductor. The presence of this measurable transverse voltage is called the Hall effect after E. H. Hall who discovered it in 1879.

FIGURE 5: BLDC MOTOR TRANSVERSE SECTION

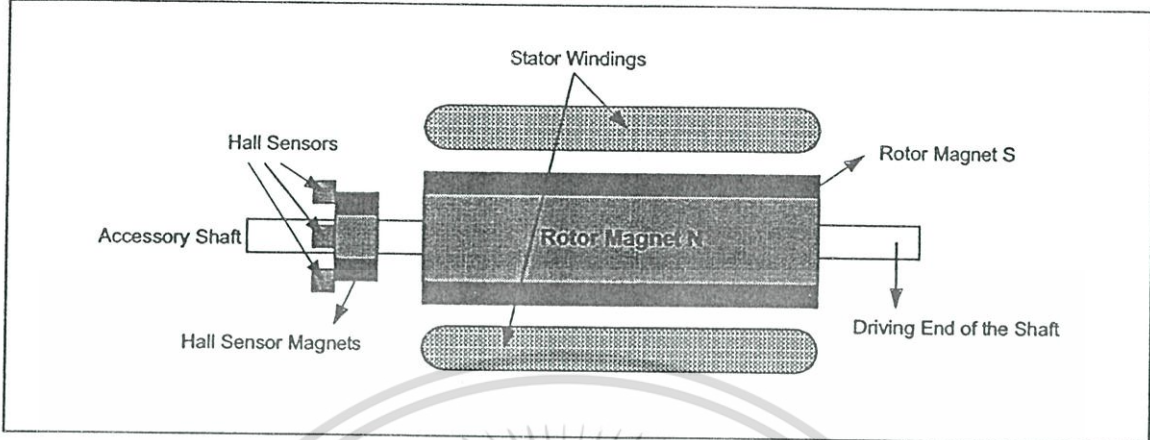


Figure 5 shows a transverse section of a BLDC motor with a rotor that has alternate N and S permanent magnets. Hall sensors are embedded into the stationary part of the motor. Embedding the Hall sensors into the stator is a complex process because any misalignment in these Hall sensors, with respect to the rotor magnets, will generate an error in determination of the rotor position. To simplify the process of mounting the Hall sensors onto the stator, some motors may have the Hall sensor magnets on the rotor, in addition to the main rotor magnets. These are a scaled down replica version of the rotor. Therefore, whenever the rotor rotates, the Hall sensor magnets give the same effect as the main magnets. The Hall sensors are normally mounted on a PC board and fixed to the enclosure cap on the non-driving end. This enables users to adjust the complete assembly of Hall sensors, to align with the rotor magnets, in order to achieve the best performance.

Based on the physical position of the Hall sensors, there are two versions of output. The Hall sensors may be at 60° or 120° phase shift to each other. Based on this, the motor manufacturer defines the commutation sequence, which should be followed when controlling the motor.

Note: The Hall sensors require a power supply. The voltage may range from 4 volts to 24 volts. Required current can range from 5 to 15 mAmps. While designing the controller, please refer to the respective motor technical specification for exact voltage and current ratings of the Hall sensors used. The Hall sensor output is normally an open-collector type. A pull-up resistor may be required on the controller side.

See the “Commutation Sequence” section for an example of Hall sensor signals and further details on the sequence of commutation.

Theory of Operation

Each commutation sequence has one of the windings energized to positive power (current enters into the winding), the second winding is negative (current exits the winding) and the third is in a non-energized condition. Torque is produced because of the interaction between the magnetic field generated by the stator coils and the permanent magnets. Ideally, the peak torque occurs when these two fields are at 90° to each other and falls off as the fields move together. In order to keep the motor running, the magnetic field produced by the windings should shift position, as the rotor moves to catch up with the stator field. What is known as “Six-Step Commutation” defines the sequence of energizing the windings. See the “Commutation Sequence” section for detailed information and an example on six-step commutation.

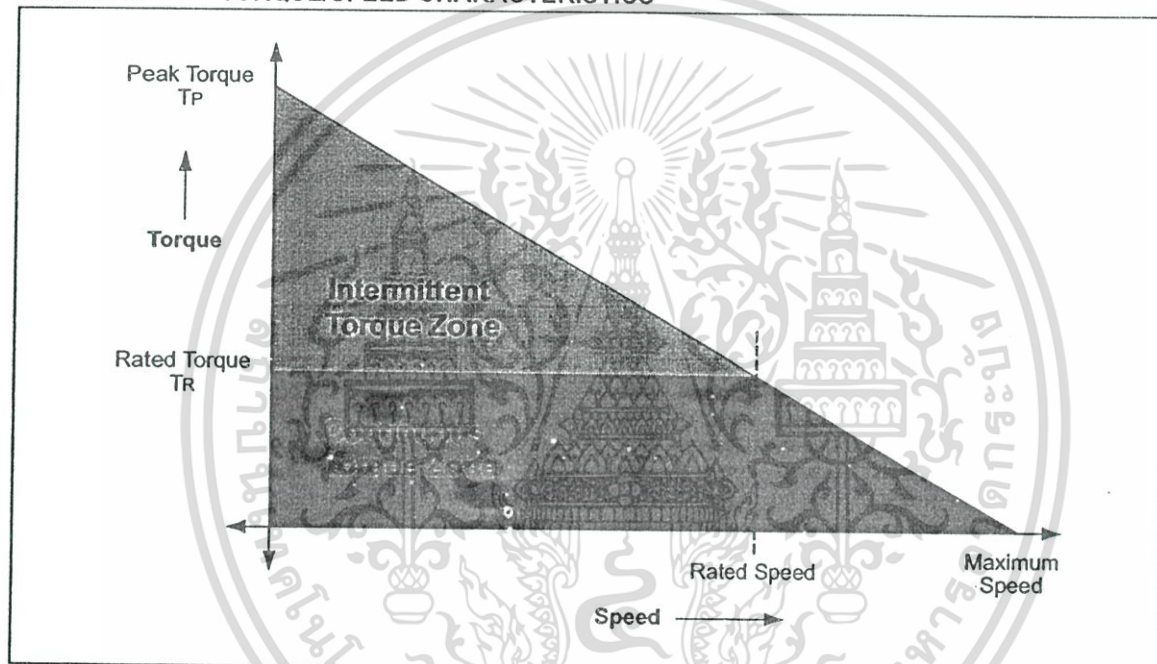
AN885

TORQUE/SPEED CHARACTERISTICS

Figure 6 shows an example of torque/speed characteristics. There are two torque parameters used to define a BLDC motor, peak torque (TP) and rated torque (TR). (Refer to **Appendix A: "Typical Motor Technical Specification"** for a complete list of parameters.) During continuous operations, the motor can be loaded up to the rated torque. As discussed earlier, in a BLDC motor, the torque remains constant for a speed range up to the rated speed. The motor can be run up to the maximum speed, which can be up to 150% of the rated speed, but the torque starts dropping.

Applications that have frequent starts and stops and frequent reversals of rotation with load on the motor, demand more torque than the rated torque. This requirement comes for a brief period, especially when the motor starts from a standstill and during acceleration. During this period, extra torque is required to overcome the inertia of the load and the rotor itself. The motor can deliver a higher torque, maximum up to peak torque, as long as it follows the speed torque curve. Refer to the **"Selecting a Suitable Motor Rating for the Application"** section to understand how to select these parameters for an application.

FIGURE 6: TORQUE/SPEED CHARACTERISTICS



COMPARING BLDC MOTORS TO OTHER MOTOR TYPES

Compared to brushed DC motors and induction motors, BLDC motors have many advantages and few disadvantages. Brushless motors require less maintenance, so they have a longer life compared with brushed DC motors. BLDC motors produce more output power per frame size than brushed DC motors and induction motors. Because the rotor is made of permanent magnets, the rotor inertia is less, compared with other types of motors. This improves acceleration and deceleration characteristics, shortening operating

cycles. Their linear speed/torque characteristics produce predictable speed regulation. With brushless motors, brush inspection is eliminated, making them ideal for limited access areas and applications where servicing is difficult. BLDC motors operate much more quietly than brushed DC motors, reducing Electromagnetic Interference (EMI). Low-voltage models are ideal for battery operation, portable equipment or medical applications.

Table 1 summarizes the comparison between a BLDC motor and a brushed DC motor. Table 2 compares a BLDC motor to an induction motor.

TABLE 1: COMPARING A BLDC MOTOR TO A BRUSHED DC MOTOR

Feature	BLDC Motor	Brushed DC Motor
Commutation	Electronic commutation based on Hall position sensors.	Brushed commutation.
Maintenance	Less required due to absence of brushes.	Periodic maintenance is required.
Life	Longer.	Shorter.
Speed/Torque Characteristics	Flat – Enables operation at all speeds with rated load.	Moderately flat – At higher speeds, brush friction increases, thus reducing useful torque.
Efficiency	High – No voltage drop across brushes.	Moderate.
Output Power/ Frame Size	High – Reduced size due to superior thermal characteristics. Because BLDC has the windings on the stator, which is connected to the case, the heat dissipation is better.	Moderate/Low – The heat produced by the armature is dissipated in the air gap, thus increasing the temperature in the air gap and limiting specs on the output power/frame size.
Rotor Inertia	Low, because it has permanent magnets on the rotor. This improves the dynamic response.	Higher rotor inertia which limits the dynamic characteristics.
Speed Range	Higher – No mechanical limitation imposed by brushes/commutator.	Lower – Mechanical limitations by the brushes.
Electric Noise Generation	Low.	Arcs in the brushes will generate noise causing EMI in the equipment nearby.
Cost of Building	Higher – Since it has permanent magnets, building costs are higher.	Low.
Control	Complex and expensive.	Simple and inexpensive.
Control Requirements	A controller is always required to keep the motor running. The same controller can be used for variable speed control.	No controller is required for fixed speed; a controller is required only if variable speed is desired.

TABLE 2: COMPARING A BLDC MOTOR TO AN INDUCTION MOTOR

Features	BLDC Motors	AC Induction Motors
Speed/Torque Characteristics	Flat – Enables operation at all speeds with rated load.	Nonlinear – Lower torque at lower speeds.
Output Power/ Frame Size	High – Since it has permanent magnets on the rotor, smaller size can be achieved for a given output power.	Moderate – Since both stator and rotor have windings, the output power to size is lower than BLDC.
Rotor Inertia	Low – Better dynamic characteristics.	High – Poor dynamic characteristics.
Starting Current	Rated – No special starter circuit required.	Approximately up to seven times of rated – Starter circuit rating should be carefully selected. Normally uses a Star-Delta starter.
Control Requirements	A controller is always required to keep the motor running. The same controller can be used for variable speed control.	No controller is required for fixed speed; a controller is required only if variable speed is desired.
Slip	No slip is experienced between stator and rotor frequencies.	The rotor runs at a lower frequency than stator by slip frequency and slip increases with load on the motor.

AN885

COMMUTATION SEQUENCE

Figure 7 shows an example of Hall sensor signals with respect to back EMF and the phase current. Figure 8 shows the switching sequence that should be followed with respect to the Hall sensors. The sequence numbers on Figure 7 correspond to the numbers given in Figure 8.

Every 60 electrical degrees of rotation, one of the Hall sensors changes the state. Given this, it takes six steps to complete an electrical cycle. In synchronous, with every 60 electrical degrees, the phase current switching should be updated. However, one electrical cycle may not correspond to a complete mechanical revolution of the rotor. The number of electrical cycles to be repeated to complete a mechanical rotation is determined by the rotor pole pairs. For each rotor pole pairs, one electrical cycle is completed. So, the number of electrical cycles/rotations equals the rotor pole pairs.

Figure 9 shows a block diagram of the controller used to control a BLDC motor. Q0 to Q5 are the power switches controlled by the PIC18FXX31 microcontroller. Based on the motor voltage and current ratings, these switches can be MOSFETs, or IGBTs, or simple bipolar transistors.

Table 3 and Table 4 show the sequence in which these power switches should be switched based on the Hall sensor inputs, A, B and C. Table 3 is for clockwise rotation of the motor and Table 4 is for counter clockwise motor rotation. This is an example of Hall sensor signals having a 60 degree phase shift with respect to each other. As we have previously discussed in the "Hall Sensors" section, the Hall sensors may be at 60° or 120° phase shift to each other. When deriving a controller for a particular motor, the sequence defined by the motor manufacturer should be followed.

Referring to Figure 9, if the signals marked by PWMx are switched ON or OFF according to the sequence, the motor will run at the rated speed. This is assuming that the DC bus voltage is equal to the motor rated voltage, plus any losses across the switches. To vary the speed, these signals should be Pulse Width Modulated (PWM) at a much higher frequency than the motor frequency. As a rule of thumb, the PWM frequency should be at least 10 times that of the maximum frequency of the motor. When the duty cycle of PWM is varied within the sequences, the average voltage supplied to the stator reduces, thus reducing the speed. Another advantage of having PWM is that, if the DC bus voltage is much higher than the motor rated voltage, the motor can be controlled by limiting the percentage of PWM duty cycle corresponding to that of the motor rated voltage. This adds flexibility to the controller to hook up motors with different rated voltages and match the average voltage output by the controller, to the motor rated voltage, by controlling the PWM duty cycle.

There are different approaches of controls. If the PWM signals are limited in the microcontroller, the upper switches can be turned on for the entire time during the corresponding sequence and the corresponding lower switch can be controlled by the required duty cycle on PWM.

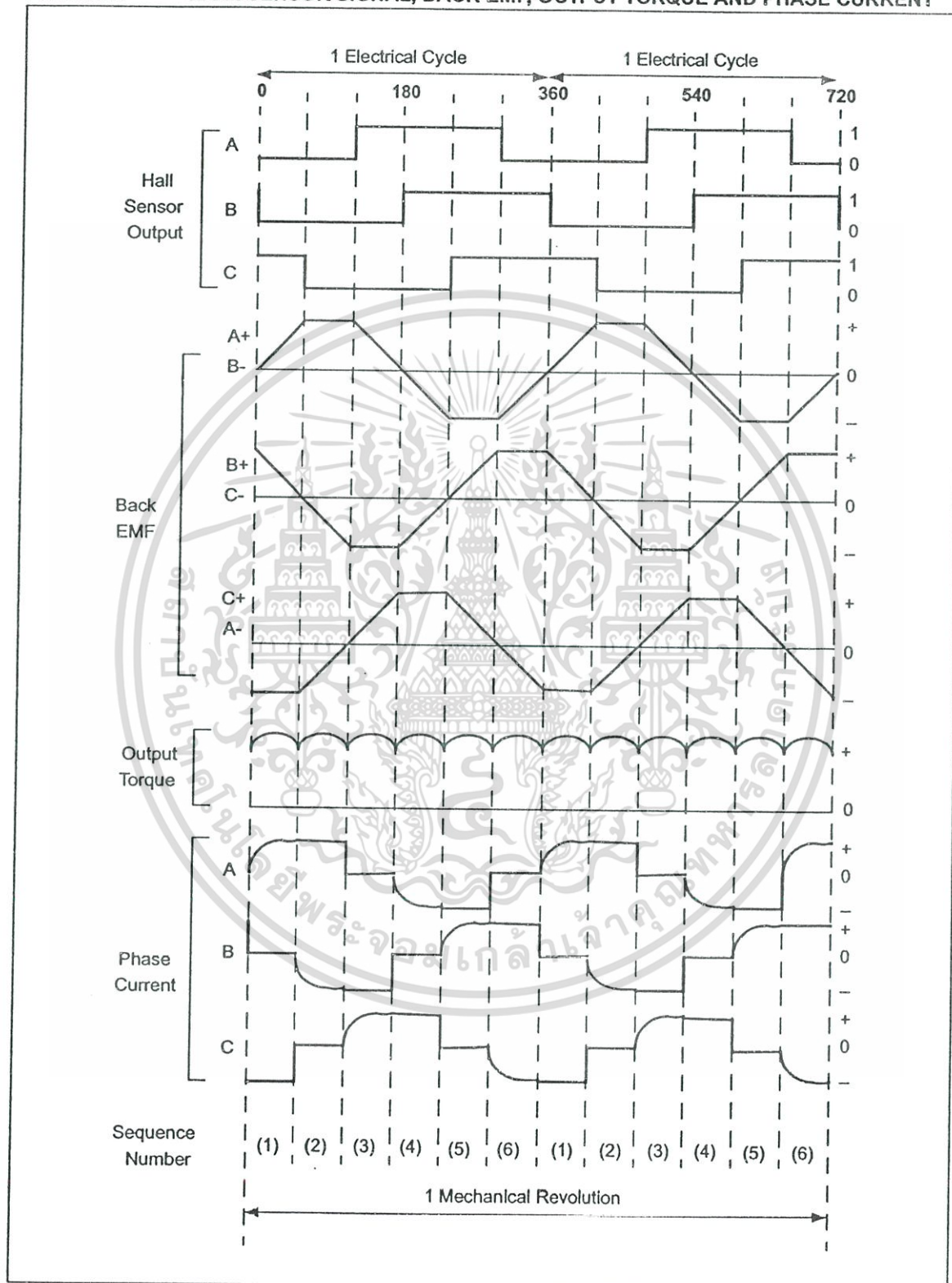
The potentiometer, connected to the analog-to-digital converter channel in Figure 9, is for setting a speed reference. Based on this input voltage, the PWM duty cycle should be calculated.

Closed-Loop Control

The speed can be controlled in a closed loop by measuring the actual speed of the motor. The error in the set speed and actual speed is calculated. A Proportional plus Integral plus Derivative (P.I.D.) controller can be used to amplify the speed error and dynamically adjust the PWM duty cycle.

For low-cost, low-resolution speed requirements, the Hall signals can be used to measure the speed feedback. A timer from the PIC18FXX31 can be used to count between two Hall transitions. With this count, the actual speed of the motor can be calculated.

For high-resolution speed measurements, an optical encoder can be fitted onto the motor, which gives two signals with 90 degrees phase difference. Using these signals, both speed and direction of rotation can be determined. Also, most of the encoders give a third index signal, which is one pulse per revolution. This can be used for positioning applications. Optical encoders are available with different choices of Pulse Per Revolution (PPR), ranging from hundreds to thousands.

FIGURE 7: HALL SENSOR SIGNAL, BACK EMF, OUTPUT TORQUE AND PHASE CURRENT


AN885

FIGURE 8: WINDING ENERGIZING SEQUENCE WITH RESPECT TO THE HALL SENSOR

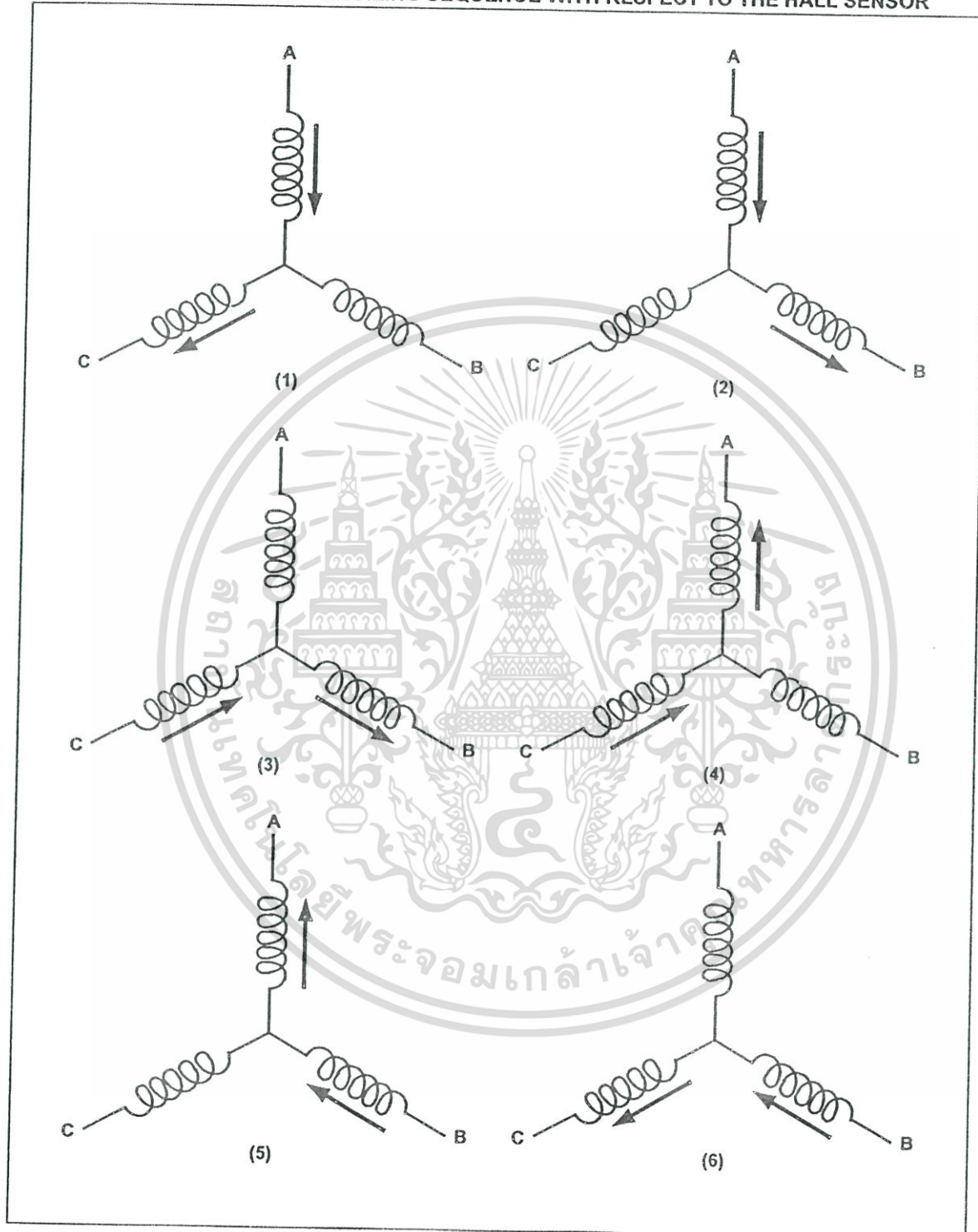


FIGURE 9: CONTROL BLOCK DIAGRAM

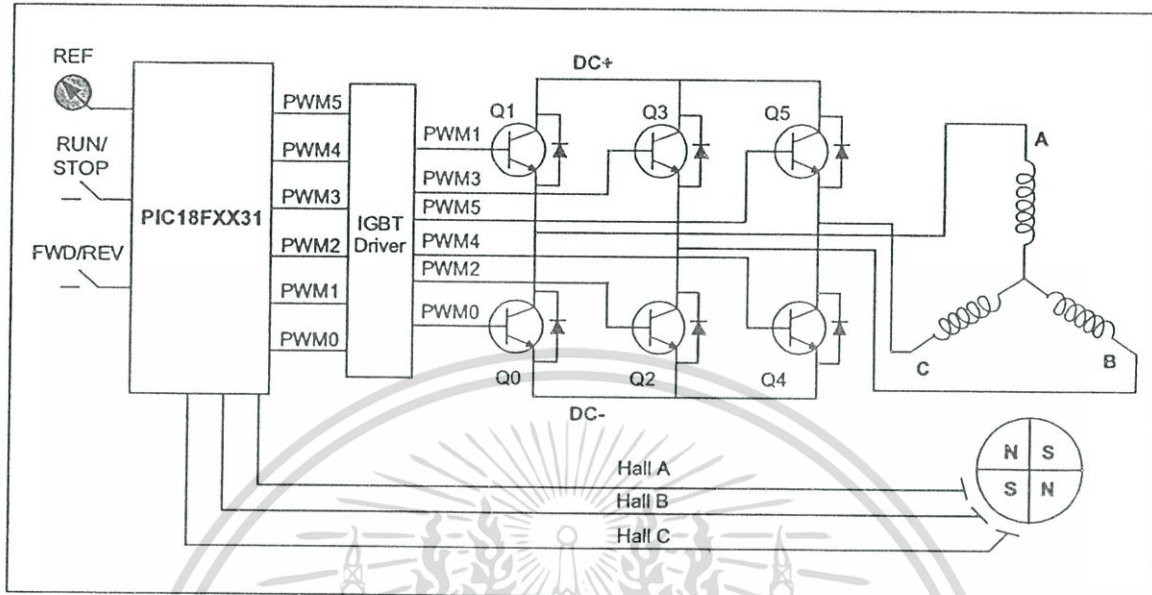


TABLE 3: SEQUENCE FOR ROTATING THE MOTOR IN CLOCKWISE DIRECTION WHEN VIEWED FROM NON-DRIVING END

Sequence #	Hall Sensor Input			Active PWMs	Phase Current		
	A	B	C		A	B	C
1	0	0	1	PWM1(Q1) PWM4(Q4)	DC+	Off	DC-
2	0	0	0	PWM1(Q1) PWM2(Q2)	DC+	DC-	Off
3	1	0	0	PWM5(Q5) PWM2(Q2)	Off	DC-	DC+
4	1	1	0	PWM5(Q5) PWM0(Q0)	DC-	Off	DC+
5	1	1	1	PWM3(Q3) PWM0(Q0)	DC-	DC+	Off
6	0	1	1	PWM3(Q3) PWM4(Q4)	Off	DC+	DC-

TABLE 4: SEQUENCE FOR ROTATING THE MOTOR IN COUNTER-CLOCKWISE DIRECTION WHEN VIEWED FROM NON-DRIVING END

Sequence #	Hall Sensor Input			Active PWMs	Phase Current		
	A	B	C		A	B	C
1	0	1	1	PWM5(Q5) PWM2(Q2)	Off	DC-	DC+
2	1	1	1	PWM1(Q1) PWM2(Q2)	DC+	DC-	Off
3	1	1	0	PWM1(Q1) PWM4(Q4)	DC+	Off	DC-
4	1	0	0	PWM3(Q3) PWM4(Q4)	Off	DC+	DC-
5	0	0	0	PWM3(Q3) PWM0(Q0)	DC-	DC+	Off
6	0	0	1	PWM5(Q5) PWM0(Q0)	DC-	Off	DC+

AN885

WHAT IS BACK EMF?

When a BLDC motor rotates, each winding generates a voltage known as back Electromotive Force or back EMF, which opposes the main voltage supplied to the windings according to Lenz's Law. The polarity of this back EMF is in opposite direction of the energized voltage. Back EMF depends mainly on three factors:

- Angular velocity of the rotor
- Magnetic field generated by rotor magnets
- The number of turns in the stator windings

EQUATION 1:

$$\text{Back EMF} = (E) \propto NlrB\omega$$

where:

N is the number of winding turns per phase,
 l is the length of the rotor,
 r is the internal radius of the rotor,
 B is the rotor magnetic field density and
 ω is the motor's angular velocity

Once the motor is designed, the rotor magnetic field and the number of turns in the stator windings remain constant. The only factor that governs back EMF is the angular velocity or speed of the rotor and as the speed increases, back EMF also increases. The motor technical specification gives a parameter called, back EMF constant (refer to Appendix A: "Typical Motor Technical Specification"), that can be used to estimate back EMF for a given speed.

The potential difference across a winding can be calculated by subtracting the back EMF value from the supply voltage. The motors are designed with a back EMF constant in such a way that when the motor is running at the rated speed, the potential difference between the back EMF and the supply voltage will be sufficient for the motor to draw the rated current and deliver the rated torque. If the motor is driven beyond the rated speed, back EMF may increase substantially, thus decreasing the potential difference across the winding, reducing the current drawn which results in a drooping torque curve. The last point on the speed curve would be when the supply voltage is equal to the sum of the back EMF and the losses in the motor, where the current and torque are equal to zero.



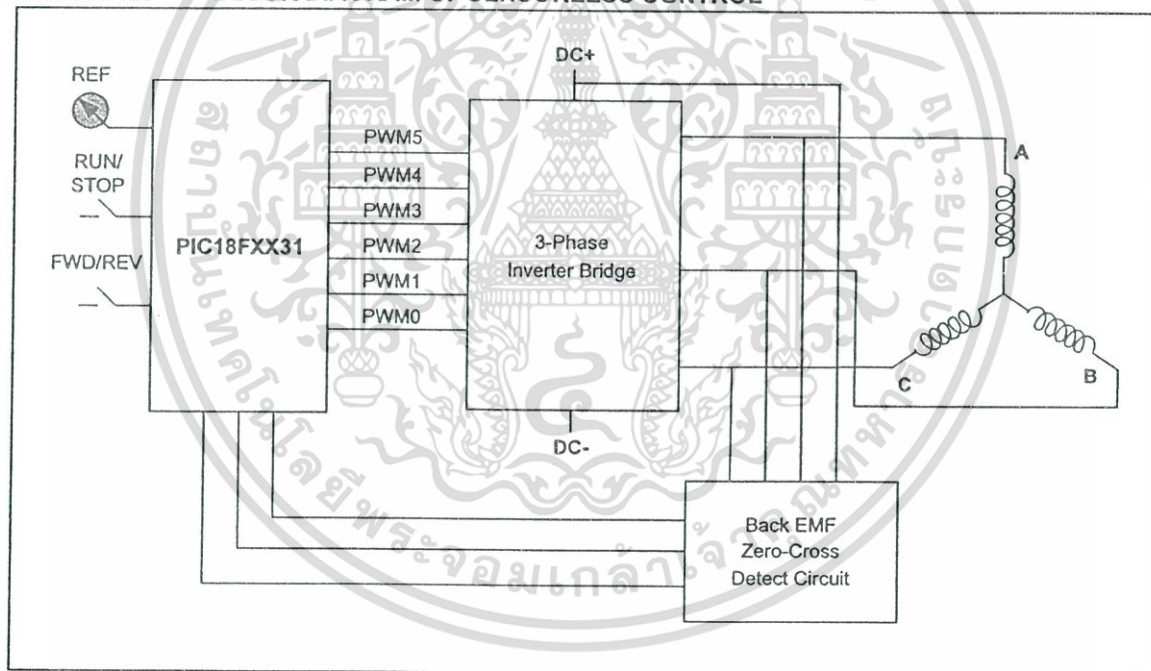
Sensorless Control of BLDC Motors

Until now we have seen commutation based on the rotor position given by the Hall sensor. BLDC motors can be commutated by monitoring the back EMF signals instead of the Hall sensors. The relationship between the Hall sensors and back EMF, with respect to the phase voltage, is shown in Figure 7. As we have seen in earlier sections, every commutation sequence has one of the windings energized positive, the second negative and the third left open. As shown in Figure 7, the Hall sensor signal changes the state when the voltage polarity of back EMF crosses from a positive to negative or from negative to positive. In ideal cases, this happens on zero-crossing of back EMF, but practically, there will be a delay due to the winding characteristics. This delay should be compensated by the microcontroller. Figure 10 shows a block diagram for sensorless control of a BLDC motor.

Another aspect to be considered is very low speeds. Because back EMF is proportional to the speed of rotation, at a very low speed, the back EMF would be at a very low amplitude to detect zero-crossing. The motor has to be started in open loop, from standstill and when sufficient back EMF is built to detect the zero-cross point, the control should be shifted to the back EMF sensing. The minimum speed at which back EMF can be sensed is calculated from the back EMF constant of the motor.

With this method of commutation, the Hall sensors can be eliminated and in some motors, the magnets for Hall sensors also can be eliminated. This simplifies the motor construction and reduces the cost as well. This is advantageous if the motor is operating in dusty or oily environments, where occasional cleaning is required in order for the Hall sensors to sense properly. The same thing applies if the motor is mounted in a less accessible location.

FIGURE 10: BLOCK DIAGRAM OF SENSORLESS CONTROL



AN885

SELECTING A SUITABLE MOTOR RATING FOR THE APPLICATION

Selecting the right type of motor for the given application is very important. Based on the load characteristics, the motor must be selected with the proper rating. Three parameters govern the motor selection for the given application. They are:

- Peak torque required for the application
- RMS torque required
- The operating speed range

Peak Torque (TP) Requirement

The peak, or maximum torque required for the application, can be calculated by summing the load torque (TL), torque due to inertia (TJ) and the torque required to overcome the friction (TF).

There are other factors which will contribute to the overall peak torque requirements. For example, the windage loss which is contributed by the resistance offered by the air in the air gap. These factors are complicated to account for. Therefore, a 20% safety margin is given as a rule of thumb when calculating the torque.

EQUATION 2:

$$\therefore T_P = (T_L + T_J + T_F) * 1.2$$

The torque due to inertia (TJ) is the torque required to accelerate the load from standstill or from a lower speed to a higher speed. This can be calculated by taking the product of load inertia, including the rotor inertia and load acceleration.

EQUATION 3:

$$T_J = J_L + M * \alpha$$

where:

JL + M is the sum of the load and rotor inertia and
 α is the required acceleration

The mechanical system coupled to the motor shaft determines the load torque and the frictional torque.

RMS Torque Requirement (TRMS)

The Root Mean Square (RMS) torque can be roughly translated to the average continuous torque required for the application. This depends upon many factors. The peak torque (TP), load torque (TL), torque due to inertia (TJ), frictional torque (TF) and acceleration, deceleration and run times.

The following equation gives the RMS torque required for a typical application where TA is the acceleration time, TR is the run time and TD is the deceleration time.

EQUATION 4:

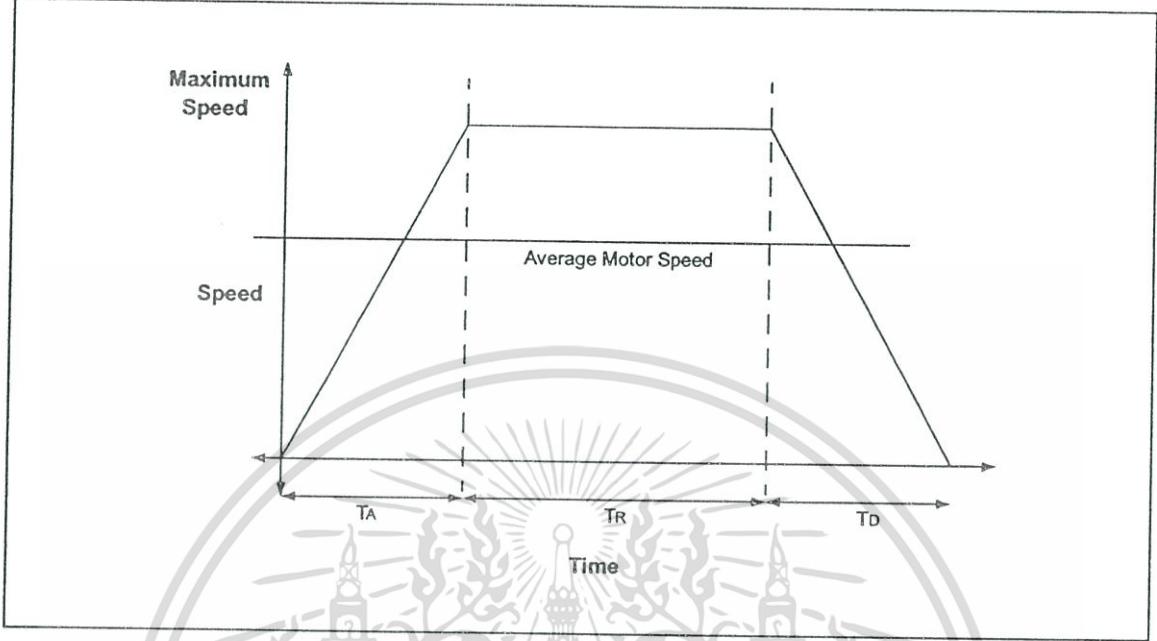
$$T_{RMS} = \sqrt{[(T_P^2 T_A + (T_L + T_F)^2 T_R + (T_J - T_L - T_F)^2 T_D) / (T_A + T_R + T_D)]}$$

Speed Range

This is the motor speed required to drive the application and is determined by the type of application. For example, an application like a blower where the speed variation is not very frequent and the maximum speed of the blower can be the average motor speed required. Whereas in the case of a point-to-point positioning system, like in a high-precision conveyer belt movement or robotic arm movements, this would require a motor with a rated operating speed higher than the average movement speed. The higher operating speed can be accounted for the components of the trapezoidal speed curve, resulting in an average speed equal to the movement speed. The trapezoidal curve is shown in Figure 11.

It is always suggested to allow a safety margin of 10%, as a rule of thumb, to account for miscellaneous factors which are beyond our calculations.

FIGURE 11: TRAPEZOIDAL SPEED CURVE



AN885

TYPICAL BLDC MOTOR APPLICATIONS

BLDC motors find applications in every segment of the market. Automotive, appliance, industrial controls, automation, aviation and so on, have applications for BLDC motors. Out of these, we can categorize the type of BLDC motor control into three major types:

- Constant load
- Varying loads
- Positioning applications

Applications With Constant Loads

These are the types of applications where a variable speed is more important than keeping the accuracy of the speed at a set speed. In addition, the acceleration and deceleration rates are not dynamically changing. In these types of applications, the load is directly coupled to the motor shaft. For example, fans, pumps and blowers come under these types of applications. These applications demand low-cost controllers, mostly operating in open-loop.

Applications With Varying Loads

These are the types of applications where the load on the motor varies over a speed range. These applications may demand a high-speed control accuracy and good dynamic responses. In home appliances, washers, dryers and compressors are good examples. In automotive, fuel pump control, electronic steering control, engine control and electric vehicle control are good examples of these. In aerospace, there are a number of applications, like centrifuges, pumps, robotic arm controls, gyroscope controls and so on. These applications may use speed feedback devices and may run in semi-closed loop or in total closed loop. These applications use advanced control algorithms, thus complicating the controller. Also, this increases the price of the complete system.

Positioning Applications

Most of the industrial and automation types of application come under this category. The applications in this category have some kind of power transmission, which could be mechanical gears or timer belts, or a simple belt driven system. In these applications, the dynamic response of speed and torque are important. Also, these applications may have frequent reversal of rotation direction. A typical cycle will have an accelerating phase, a constant speed phase and a deceleration and positioning phase, as shown in Figure 11. The load on the motor may vary during all of these phases, causing the controller to be complex. These systems mostly operate in closed loop. There could be three control loops functioning simultaneously: Torque Control Loop, Speed Control Loop and Position Control Loop. Optical encoder or synchronous resolvers are used for measuring the actual speed of the motor. In some cases, the same sensors are used to get relative position information. Otherwise, separate position sensors may be used to get absolute positions. Computer Numeric Controlled (CNC) machines are a good example of this. Process controls, machinery controls and conveyer controls have plenty of applications in this category.

SUMMARY

In conclusion, BLDC motors have advantages over brushed DC motors and induction motors. They have better speed versus torque characteristics, high dynamic response, high efficiency, long operating life, noiseless operation, higher speed ranges, rugged construction and so on. Also, torque delivered to the motor size is higher, making it useful in applications where space and weight are critical factors. With these advantages, BLDC motors find wide spread applications in automotive, appliance, aerospace, consumer, medical, instrumentation and automation industries.

APPENDIX A: TYPICAL MOTOR TECHNICAL SPECIFICATION

The following table shows a few of the parameters that can be found in the technical specification of a motor and explains how each parameter is useful to the application. In addition, a physical name plate can usually be found on a motor that lists many of the same parameters.

TABLE A-1: TYPICAL MOTOR TECHNICAL SPECIFICATION PARAMETERS

Electrical Parameter	Typical Symbol	Unit	Definition
Reference Voltage	V	Volts	This is the rated terminal voltage.
Rated Current	I_r	Amps	Current drawn by the motor when it delivers the rated torque.
Peak Current (stall)	I_{pk}	Amps	This is the maximum current allowed to be drawn by the motor.
No Load Current	I_{NL}	Amps	Current drawn by the motor when there is no load on the motor shaft.
Back EMF Constant	K_E	V/RPM or V/rad/s	Using this parameter, back EMF can be estimated for a given speed.
Resistance	R	Ohms	Resistance of each stator winding.
Inductance	L	mH	Winding inductance. This, along with resistance, can be used to determine the total impedance of the winding to calculate the electrical time constant of the motor.
Motor Constant	K_M	Oz-in/ \sqrt{W} or NM/ \sqrt{W}	This gives the ratio of torque to the power.
Electrical Time Constant	τ_E	ms	Calculated based on the R and L of the windings.

Mechanical Parameter	Typical Symbol	Unit	Definition
Speed	N	RPM or rad/s	Rated speed of the motor.
Continuous Torque	T_C	Oz-in or N-M	This is the torque available on the shaft for the given speed range.
Peak Torque or Stall Torque	T_{pk}	Oz-in or N-M	This is the maximum torque that motor can deliver for a short duration of time. This torque may not be available for all the speed ranges.
Torque Constant	K_t	Oz-in/A or N-M/A	This is the torque produced for every ampere of current drawn by the motor. Since the torque varies linear with current, this parameter can be used to interpolate the torque delivered for a given current and vice versa.
Friction Torque	T_f	Oz-in or N-M	This is the torque loss due to friction which includes mainly the bearing friction.
Rotor Inertia	JM	Oz-in-s ² /N-M-s ²	Rotor moment of inertia. This is useful to determine the acceleration and deceleration rates, the dynamic response of the system and to calculate the mechanical time constant of the rotor.
Viscous Damping	D	Oz-in/RPM or N-M-s	
Damping Constant	K_D	Oz-in/RPM or N-M-s	
Temperature	T	°F or °C	Operating ambient temperature.
Maximum Winding Temperature	θ_{max}	°F or °C	Maximum allowed winding temperature. If the winding temperature exceeds this limit, winding leakage current may increase or there are chances of winding breakdown.
Thermal Impedance	R_{TH}	°F/W or °C/W	This is the thermal impedance posed by the motor to the ambient.
Thermal Time Constant	τ_{TH}	min	Time constant based on the thermal impedance. A motor with a heat sink will have a higher time constant than a motor without a heat sink.

AN885

APPENDIX B: GLOSSARY

Air Gap

Uniform gap between the stator and rotor.

Angular Velocity

Velocity in radians ($2\pi \times$ frequency).

Asynchronous Motor

Type of motor in which the flux, generated by the stator and rotor, have different frequencies.

EMF

Electromotive Force. The potential generated by a current carrying conductor when it is exposed to magnetic field. EMF is measured in volts.

IGBT

Insulated Gate Bipolar Transistor.

Lenz's Law

The Electromotive Force (EMF), induced in a conductor moving perpendicular to a magnetic field, tends to oppose that motion.

MOSFET

Metal Oxide Silicon Field Effect Transistor.

Rated Speed

Speed specified on the name plate of a motor.

Rotor

Rotating part of the motor.

Slip Speed

Defined by the corresponding frequency difference between the stator and rotor magnetic fields (applies only to induction motors).

Stator

Stationary part of the motor.

Synchronous Motor

Type of motor in which the flux generated by the stator and rotor have the same frequencies. The phase may be shifted.

Synchronous Speed

Speed of the motor corresponding to the rated frequency.

Torque

Rotating force in Newton-Meters or Pound-Inches.

Note the following details of the code protection feature on Microchip devices:

- Microchip products meet the specification contained in their particular Microchip Data Sheet.
- Microchip believes that its family of products is one of the most secure families of its kind on the market today, when used in the intended manner and under normal conditions.
- There are dishonest and possibly illegal methods used to breach the code protection feature. All of these methods, to our knowledge, require using the Microchip products in a manner outside the operating specifications contained in Microchip's Data Sheets. Most likely, the person doing so is engaged in theft of intellectual property.
- Microchip is willing to work with the customer who is concerned about the integrity of their code.
- Neither Microchip nor any other semiconductor manufacturer can guarantee the security of their code. Code protection does not mean that we are guaranteeing the product as "unbreakable."

Code protection is constantly evolving. We at Microchip are committed to continuously improving the code protection features of our products. Attempts to break microchip's code protection feature may be a violation of the Digital Millennium Copyright Act. If such acts allow unauthorized access to your software or other copyrighted work, you may have a right to sue for relief under that Act.

Information contained in this publication regarding device applications and the like is intended through suggestion only and may be superseded by updates. It is your responsibility to ensure that your application meets with your specifications. No representation or warranty is given and no liability is assumed by Microchip Technology Incorporated with respect to the accuracy or use of such information, or infringement of patents or other intellectual property rights arising from such use or otherwise. Use of Microchip's products as critical components in life support systems is not authorized except with express written approval by Microchip. No licenses are conveyed, implicitly or otherwise, under any intellectual property rights.

Trademarks

The Microchip name and logo, the Microchip logo, Accuron, dsPIC, KEELoq, MPLAB, PIC, PICmicro, PICSTART, PRO MATE and PowerSmart are registered trademarks of Microchip Technology Incorporated in the U.S.A. and other countries.

AmpLab, FilterLab, microID, MXDEV, MXLAB, PICMASTER, SEEVAL and The Embedded Control Solutions Company are registered trademarks of Microchip Technology Incorporated in the U.S.A.

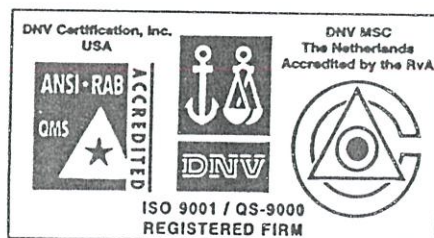
Application Maestro, dsPICDEM, dsPICDEM.net, ECAN, ECONOMONITOR, FanSense, FlexROM, fuzzyLAB, In-Circuit Serial Programming, ICSP, ICEPIC, microPort, Migratable Memory, MPASM, MPLIB, MPLINK, MPSIM, PICKit, PICDEM, PICDEM.net, PowerCal, PowerInfo, PowerMate, PowerTool, rLAB, rPIC, Select Mode, SmartSensor, SmartShunt, SmartTel and Total Endurance are trademarks of Microchip Technology Incorporated in the U.S.A. and other countries.

Serialized Quick Turn Programming (SQTP) is a service mark of Microchip Technology Incorporated in the U.S.A.

All other trademarks mentioned herein are property of their respective companies.

© 2003, Microchip Technology Incorporated, Printed in the U.S.A., All Rights Reserved.

 Printed on recycled paper.



Microchip received QS-9000 quality system certification for its worldwide headquarters, design and wafer fabrication facilities in Chandler and Tempe, Arizona in July 1999 and Mountain View, California in March 2002. The Company's quality system processes and procedures are QS-9000 compliant for its PICmicro® 8-bit MCUs, KEELoq® code hopping devices, Serial EEPROMs, microperipherals, non-volatile memory and analog products. In addition, Microchip's quality system for the design and manufacture of development systems is ISO 9001 certified.

ภาคผนวก ค
การควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านด้วย dsPIC30F2010



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



AN957

Sensored BLDC Motor Control Using dsPIC30F2010

*Author: Stan D'Souza
Microchip Technology*

encoder or, more often, by Hall effect sensors that detect the rotor magnet position. For a typical three-phase, sensored BLDC motor there are six distinct regions or sectors in which two specific windings are excited. These are as shown in Figure 1.

INTRODUCTION

The dsPIC30F2010 is a 28-pin 16-bit MCU specifically designed for embedded motor control applications. AC Induction Motors (ACIM), Brushless DC (BLDC) and DC are some typical motor types for which the dsPIC30F2010 has been specifically designed. Some of the key features on the dsPIC30F2010 are:

- 6 independent or 3 complementary pairs of dedicated Motor Control PWM outputs.
- 6 input, 500Ksps ADC with up to 4 simultaneous sampling capability.
- Multiple serial communications: UART, I²C™ and SPI
- Small package: 6 x 6 mm QFN for embedded control applications
- DSP engine for fast response in control loops.

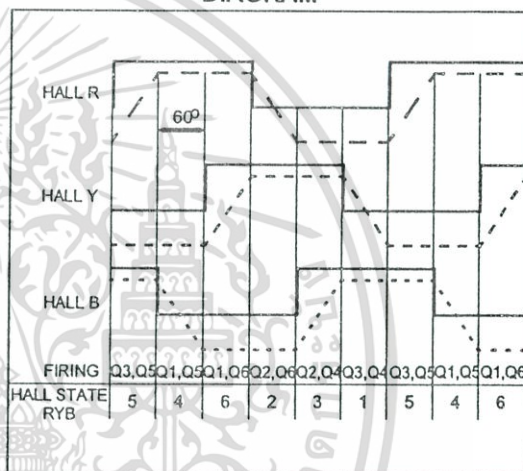
In this application note we discuss how the dsPIC30F2010 is used to control a sensored BLDC motor. Please refer to AN901 for details on how BLDC motors operate and general information on what needs to be done to run and control BLDC motors. This application note discusses the specific implementation using the dsPIC30F2010. It touches only briefly on BLDC motor details

BLDC MOTORS

BLDC motors are basically inside-out DC motors. In a DC motor the stator is a permanent magnet. The rotor has the windings, which are excited with a current. The current in the rotor is reversed to create a rotating or moving electric field by means of a split commutator and brushes. On the other hand, in a BLDC motor the windings are on the stator and the rotor is a permanent magnet. Hence the term inside-out DC motor.

To make the rotor turn, there must be a rotating electric field. Typically a three-phase BLDC motor has three stator phases that are excited two at a time to create a rotating electric field. This method is fairly easy to implement, but to prevent the permanent magnet rotor from getting locked with the stator, the excitation on the stator must be sequenced in a specific manner while knowing the exact position of the rotor magnets. Position information can be gotten by either a shaft

FIGURE 1: BLDC COMMUTATION DIAGRAM



By reading the Hall effect sensors, a 3-bit code can be obtained with values ranging from 1 to 6. Each code value represents a sector on which the rotor is presently located. Each code value, therefore, gives us information on which windings need to be excited. Thus a simple lookup table can be used by the program to determine which two specific windings to excite and, thus, turn the rotor.

Note that state '0' and '7' are invalid states for Hall effect sensors. Software should check for these values and appropriately disable the PWM.

Change Notification Inputs

Taking this technique a step further, the Hall effect sensors can be connected to dsPIC30F2010 inputs that detect a change (Change Notification (CN) Inputs). An input change on these pins generates an interrupt. In the CN Interrupt Service Routine (ISR) the user application program reads the Hall effect sensor value and uses it to generate an offset in the lookup table for driving the windings of the BLDC motor.

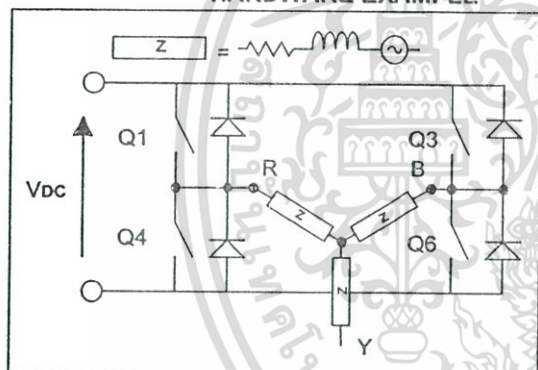
AN957

MOTOR CONTROL PULSE WIDTH MODULATION (MCPWM)

Using the above method, you can get full speed rotation of the BLDC motor. However, to get variable speed of the BLDC motor, you must apply a variable voltage to the terminals of the windings. Putting this in digital terms, the variable voltage can be obtained by different duty cycles of a PWM signal going to the windings of the BLDC motor.

The dsPIC30F2010 has six PWM outputs that can be driven with the PWM signal. As shown in Figure 2, the three windings can be driven ON High, driven ON Low or not driven at all by using six switches, IGBTs or MOSFETs. When one leg of the winding is connected for example, to the high side, the variable duty cycle signal PWM can be injected on the low side driver. This has the same effect as having a PWM signal on the high side and connecting the low side to VSS or GND. When driving the PWM signal, low side drivers are preferred over high side drivers.

FIGURE 2: BEMF SENSING HARDWARE EXAMPLE

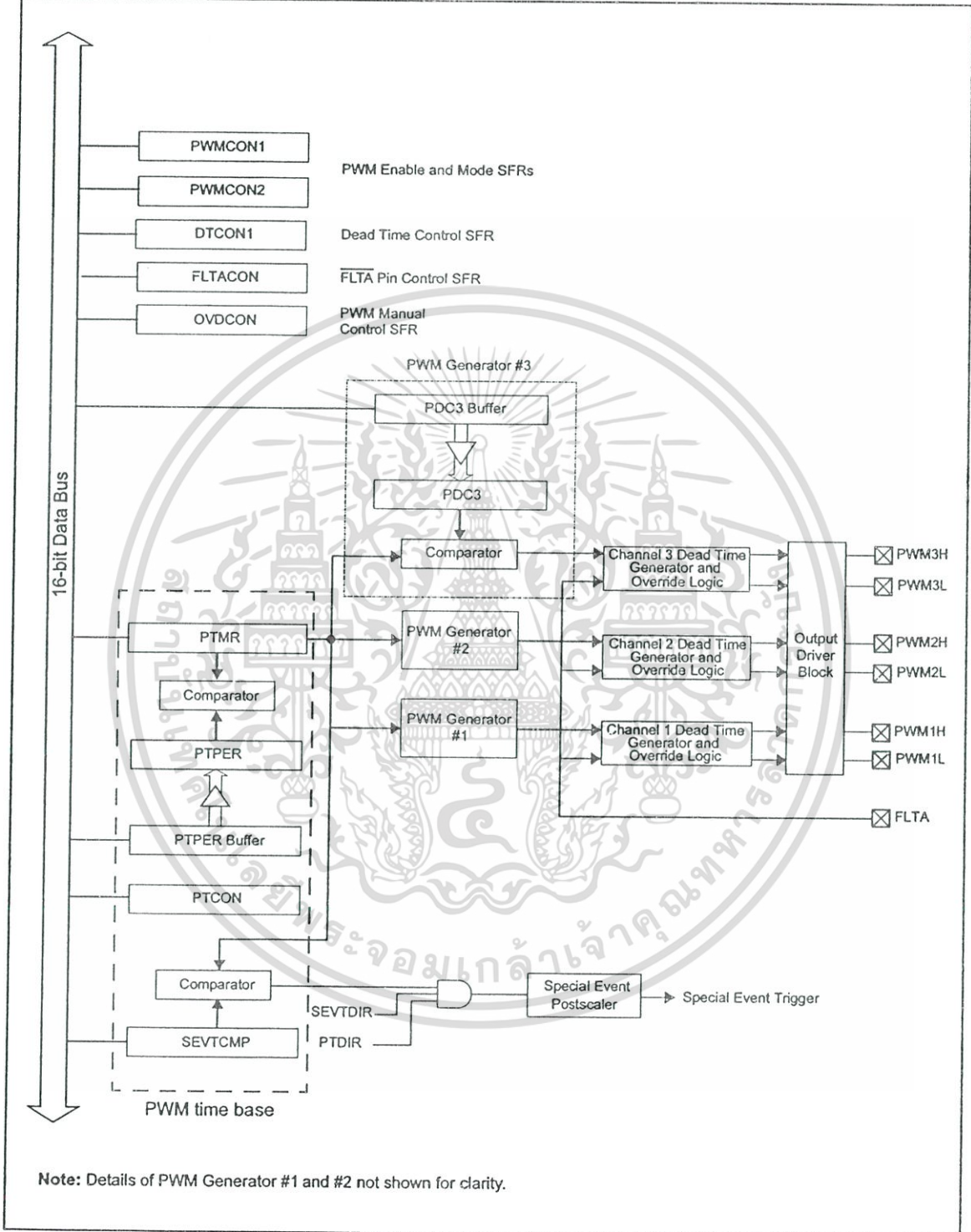


PWM is provided by the dsPIC30F2010's dedicated Motor Control (MC) PWM. The MCPWM module has been designed specifically for motor control applications. (Please refer to Figure 3 as you follow this discussion of the MCPWM module.)

The MCPWM has a dedicated 16-bit PTMR time base register. This timer is incremented by a user defined clock tick, which can be as low as T_{CY} . The user also decides the period required for the PWM by selecting a value and loading it in the PTPER registers. The PTMR is compared to the PTPER value at every T_{CY} . When there is a match, a new period is started.

The duty cycle is controlled similarly, by loading a value in the three duty cycle registers. Unlike the period compare, the value in the duty cycle register is compared at every $T_{CY}/2$ interval (i.e., twice as fast as the period compare). If there is a match between the PTMR value and the PDCx value, then the corresponding duty cycle output is driven low or high as dictated by the PWM mode selected. The three outputs from the duty cycle compare are channeled to a complementary output pair where one output is high while the other is low, and vice versa. The two outputs can also be configured as independent outputs. When driven as complementary outputs, a dead time can be inserted between the time the high level goes low and the low level goes high. This dead time is hardware configured and has a minimum value of T_{CY} . Dead time insertion prevents inadvertent shoot-thru in output drivers.

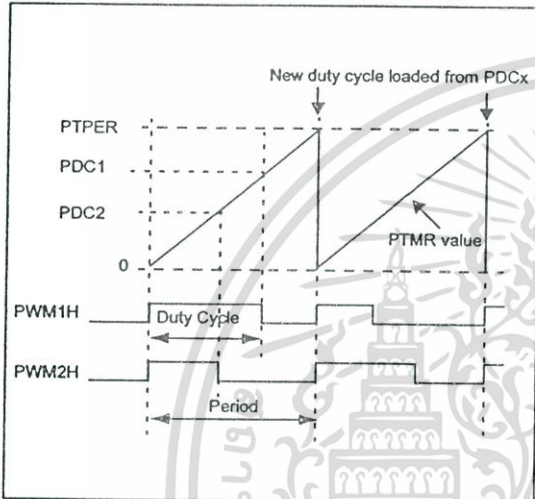
FIGURE 3: PWM BLOCK DIAGRAM



AN957

There are several modes in which the MCPWM module can be configured. Edge aligned output is probably the most common mode. Figure 4 depicts the operation of an edge aligned PWM. At the start of the period, the outputs are all driven high. As the PTMR increments, a match with the duty cycle registers causes the corresponding duty cycle output to go low thereby marking the end of the duty cycle. The PTMR match with PTPER register caused a new period to start and all outputs go high to start a whole new cycle.

FIGURE 4: EDGE-ALIGNED PWM



The other modes that the MCPWM can be set up for are center-aligned PWM and single-shot PWM. These modes are not discussed here because they were not used for controlling the BLDC motor. For details on these modes, please refer to the *dsPIC30F Family Reference Manual (DS70046)*.

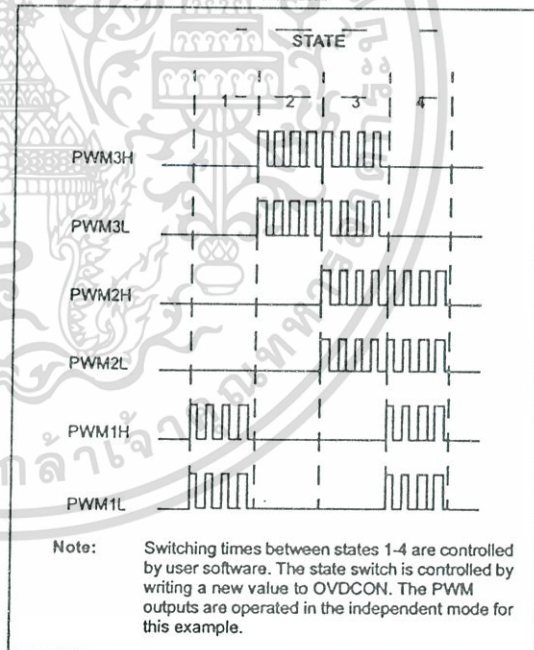
The important feature of the MCPWM used in this application is the Override Control. The Override Control is the last stage of the MCPWM module. It allows the user to directly write to the OVDCON register and control the output pins. The OVDCON register has two 6 bit fields in it. Each of the six bit fields corresponds to an output pin. The high byte portion of the OVDCON register, determines if the corresponding output pin is driven by a PWM signal (when set to 1) or (when set to 0) driven Active/Inactive by the corresponding bit field in the low byte portion of the OVDCON register. This feature allows the user to have PWM signals available, but not driving, at all output stages of the pins. For BLDC motors, the same value is written to all PDCx registers.

Depending on the value in the OVDCON register, the user can select which pin gets the PWM signal and which pin is driven active or inactive. When controlling the BLDC sensed motor it is necessary to excite two winding pairs depending on where the rotor is located and dictated by the value of the hall sensors. In the CN Interrupt Service routine the hall sensors are read and then the value of the sensors is used as an offset in a lookup table which corresponds to the value which will be loaded in the OVDCON register. Table 1 and Figure 5 show how different values are loaded in the OVDCON register depending on which sector the rotor is located in and thereby which windings need to be excited.

TABLE 1: PWM OUTPUT OVERRIDE EXAMPLE

State	OVDCON<15:8>	OVDCON<7:0>
1	00000011b	00000000b
2	00110000b	00000000b
3	00111100b	00000000b
4	00001111b	00000000b

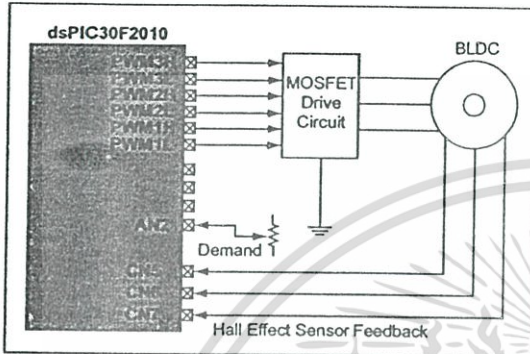
FIGURE 5: PWM OUTPUT OVERRIDE EXAMPLE



HARDWARE DESCRIPTION

The block diagram in Figure 6 depicts how the BLDC motor is driven using a dsPIC30F2010. For a detailed schematic please refer to Appendix C.

FIGURE 6: HARDWARE BLOCK DIAGRAM



The six MCPWM outputs are connected to three MOSFET driver pairs (IR2101S), which in turn are connected to six MOSFETs (IRFR2407). These MOSFETs are connected in a three-phase bridge format to the three BLDC motor windings. In the current implementation, the maximum MOSFET voltage is 70 Volts, and the maximum MOSFET current is 18 Amps.

It is important to note that adequate heat dissipation must be provided if the maximum capabilities are being used. MOSFET drivers also require a higher voltage (15V) to operate, so this voltage level needs to be provided. The motor is a 24V BLDC motor so the DC+ to DC- bus voltage is 24V. A regulated 5V is provided to drive the dsPIC30F2010. The three Hall effect sensor inputs are connected to input pins that have Change Notification circuits associated with them. These inputs are enabled along with their interrupt. If a change occurs on any of these three pins, an interrupt is generated. To provide a speed demand, a potentiometer is connected to an ADC input (RB2).

To start and stop the motor, a push button switch is provided at RC14. To provide some current feedback to the motor, a low value resistor (25 milliohms) is connected between the DC- bus voltage and ground or Vss. The voltage generated by this resistor is amplified by an external op amp (MCP6002) and fed to an ADC input (RB1).

FIRMWARE DESCRIPTION

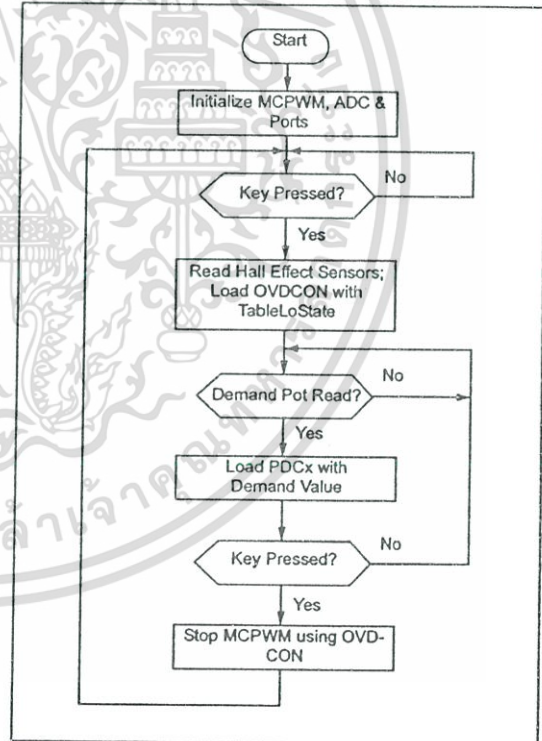
Two firmware programs are included in Appendix A and Appendix B to illustrate the methods described in the Application Note. One program uses open-loop speed control. The other uses proportional and integral feedback for closed loop speed control.

The open-loop method is generally not practical for actual applications. It is included here primarily to illustrate the BLDC motor drive methodology.

Open-Loop Control

In open-loop control, the MCPWM directly controls motor speed based on the voltage input from the Speed Pot. After initializing the MCPWM, ADC, Ports and the Change Notification inputs, the program waits for an activation signal (e.g., a key press) to indicate a start (see Figure 7). When the key is pressed, the Hall sensors are read. Based on their value, a corresponding value is retrieved from the table and written to the OVDCON. At this point the motor starts spinning.

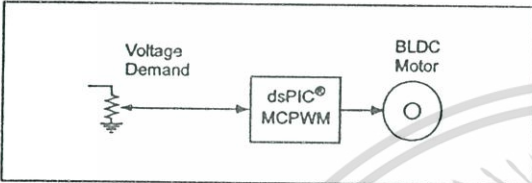
FIGURE 7: OPEN-LOOP FLOW



AN957

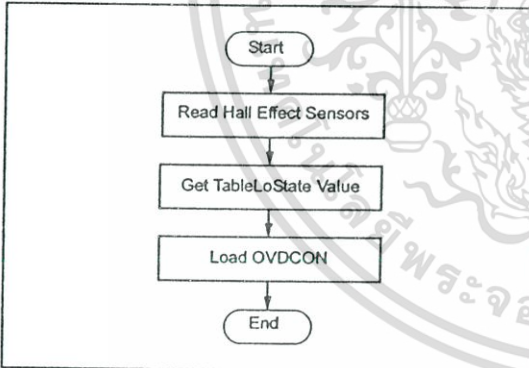
At first the duty cycle value is held at a default 50%. On the very next loop of main program, however, the potentiometer is read and its value (i.e., the correct demand value) is inserted as the duty cycle. This determines the speed of the motor. The higher the duty cycle value the faster the motor will spin. The speed is controlled by the voltage control pot, as shown in Figure 8.

FIGURE 8: OPEN VOLTS CONTROL MODE



The Hall effect sensors are connected to the Change Notification Pin. The CN interrupt is enabled. As the rotor spins, the position of the rotor magnet changes, and the rotor enters a different sector. Each new position is signaled by a CN Interrupt. In the CN Interrupt routine, which is shown in Figure 9, the Hall effect sensors are read and based on the value, a table lookup value is got and written to the OVDCON register. This action will insure that the correct windings are excited in the right sector and the motor will continue to spin.

FIGURE 9: CN INTERRUPT FLOW



Phase Advance

For details on Phase Advance and how to implement, please refer to AN901.

Closed-Loop Control

In the closed-loop control version of the firmware, the main difference is that the pot is used for setting the demand. The control loop provides Proportional and Integral (PI) control of the speed. To measure the actual speed, TMR3 is used as a timer to gate a complete electrical cycle. Since we are using a 10-pole motor, five electrical cycles result in one mechanical cycle. If T seconds is the time for one electrical cycle then the speed $S = 60/(P/2 \cdot T)$ rpm, where P is the number of poles of the motor. The control is as shown in Figure 10. A closed-loop control flow chart is shown in Figure 11.

FIGURE 10: CLOSED VOLTS CONTROL MODE

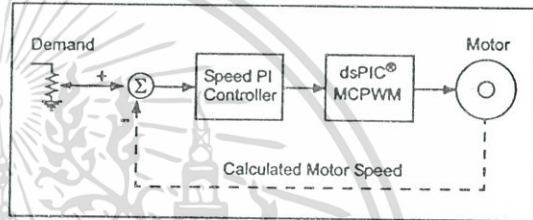
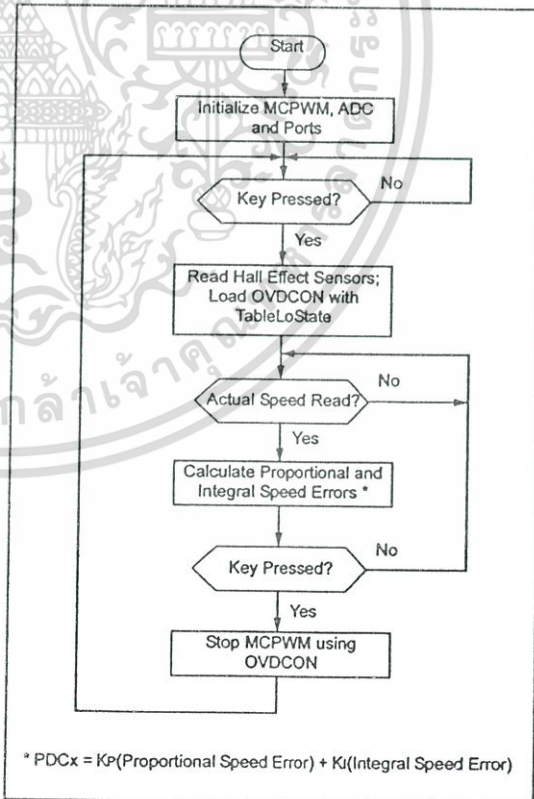


FIGURE 11: CLOSED-LOOP CONTROL FLOW



* $PDCx = Kp(\text{Proportional Speed Error}) + Ki(\text{Integral Speed Error})$

AN957

CONCLUSION

The dsPIC30F2010 is well suited for closed-loop control of a sensored BLDC motor. The peripherals and DSP engine provide an excellent bandwidth for a sensored BLDC applications with sufficient code space available for the customer's application program.

REFERENCES

- AN885 – Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals
- AN901 – Using the dsPIC30F for Sensorless BLDC Control
- AN857 – Brushless DC Motor Control Made Easy
- AN889 – Brushless DC Motor Control Using PIC18FXX31 MCUs



AN957

APPENDIX A: SOURCE CODE LISTING FOR OPEN-LOOP CONTROL

This appendix contains the source code listing for open-loop control.

Software License Agreement

The software supplied herewith by Microchip Technology Incorporated (the "Company") is intended and supplied to you, the Company's customer, for use solely and exclusively with products manufactured by the Company.

The software is owned by the Company and/or its supplier, and is protected under applicable copyright laws. All rights are reserved. Any use in violation of the foregoing restrictions may subject the user to criminal sanctions under applicable laws, as well as to civil liability for the breach of the terms and conditions of this license.

THIS SOFTWARE IS PROVIDED IN AN "AS IS" CONDITION. NO WARRANTIES, WHETHER EXPRESS, IMPLIED OR STATUTORY, INCLUDING, BUT NOT LIMITED TO, IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY AND FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE APPLY TO THIS SOFTWARE. THE COMPANY SHALL NOT, IN ANY CIRCUMSTANCES, BE LIABLE FOR SPECIAL, INCIDENTAL OR CONSEQUENTIAL DAMAGES, FOR ANY REASON WHATSOEVER.

```
//-----
//
//                               Software License Agreement
//
// The software supplied herewith by Microchip Technology Incorporated
// (the "Company") is intended and supplied to you, the Company's customer,
// for use solely and exclusively with products manufacture by the Company.
// The software is owned by the Company and/or its supplier, and is protected under
// applicable copyright laws. All rights are reserved. Any use in violation of the
// foregoing restrictions may subject the user to criminal sanctions under applicable
// laws, as well as to civil liability for the breach of the terms and conditions of
// this license.
//
// THIS SOFTWARE IS PROVIDED IN AN "AS IS" CONDITION. NO WARRANTIES, WHETHER EXPRESS,
// IMPLIED OR STATUTORY, INCLUDING, BUT NOT LIMITED TO, IMPLIED WARRANTIES OF
// MERCHANTABILITY AND FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE APPLY TO THIS SOFTWARE.
// THE COMPANY SHALL NOT, IN ANY CIRCUMSTANCES, BE LIABLE FOR SPECIAL, INCIDENTAL OR
// CONSEQUENTIAL DAMAGES, FOR ANY REASON WHATSOEVER.
//-----
// File: ClosedLoopSenBLDC.c
//
// Written By: Stan D'Souza, Microchip Technology
//
// The following files should be included in the MPLAB project:
//
//   ClosedLoopSenBLDC.c-- Main source code file
//   p30f2010.gld-- Linker script file
//
//-----
//
// Revision History
//
// 10/01/04 -- first version
//-----
//*****
// Low side driver table is as below. In this StateLoTable,
// the Low side driver is PWM while the high side driver is
// either on or off. This table is used in this exercise
//*****/

unsigned int StateLoTable[] = {0x0000, 0x0210, 0x2004, 0x0204,
                              0x0801, 0x0810, 0x2001, 0x0000};
//*****
// Interrupt vector for Change Notification CN5, 6 and 7 is as below.
// When a Hall sensor changes states, an interrupt will be caused
// which will vector to the routine below.
// The user has to then read the PORTB, mask bits 3, 4 and 5,
// shift and adjust the value to read as 1, 2 ... 6. This
// value is then used as an offset in the lookup table StateLoTable
// to determine the value loaded in the OCDCON register
//*****/
```

AN957

```

void _ISR_CNInterrupt(void)
{
    IFS0bits.CNIF = 0;           // clear flag
    HallValue = PORTB & 0x0038; // mask RB3,4 & 5
    HallValue = HallValue >> 3; // shift right 3 times
    OVDCON = StateLoTable[HallValue];
}

/*****
The ADC interrupt loads the PDCx registers with the demand pot value.
This is only done when the motor is running.
*****/

void _ISR_ADCInterrupt(void)
{
    IFS0bits.ADIF = 0;
    if (Flags.RunMotor)
    {
        PDC1 = ADCBUF0; // get value ...
        PDC2 = PDC1;    // and load all three PWMs ...
        PDC3 = PDC1;    // duty cycles
    }
}

int main(void)
{
    LATE = 0x0000;
    TRISE = 0xFFC0; // PWMs are outputs
    CNEN1 = 0x00E0; // CN5,6 and 7 enabled
    CNPU1 = 0x00E0; // enable internal pullups
    IFS0bits.CNIF = 0; // clear CNIF
    IEC0bits.CNIE = 1; // enable CN interrupt
    InitMCPWM();
    InitADC10();
    while(1)
    {
        while (!S2); // wait for start key hit
        while (S2) // wait till key is released
            DelayNmSec(10);
        // read hall position sensors on PORTB
        HallValue = PORTB & 0x0038; // mask RB3,4 & 5
        HallValue = HallValue >> 3; // shift right to get value 1, 2 ... 6
        OVDCON = StateLoTable[HallValue]; // Load the override control register
        PWMCON1 = 0x0777; // enable PWM outputs
        Flags.RunMotor = 1; // set flag
        while (Flags.RunMotor) // while motor is running
            if (S2) // if S2 is pressed
            {
                PWMCON1 = 0x0700; // disable PWM outputs
                OVDCON = 0x0000; // override PWM low.
                Flags.RunMotor = 0; // reset run flag
                while (S2) // wait for key release
                    DelayNmSec(10);
            }
    } // end of while (1)
}

```

AN957

```

/*****
Below is the code required to setup the ADC registers for :
1. 1 channel conversion (in this case RB2/AN2)
2. PWM trigger starts conversion
3. Pot is connected to CH0 and RB2
4. Manual Stop Sampling and start converting
5. Manual check of Conversion complete
*****/
void InitADC10(void)
{
    ADPCFG = 0xFFFF;           // all PORTB = Digital;RB0 to RB2 = analog
    ADCON1 = 0x0064;           // PWM starts conversion
    ADCON2 = 0x0200;           // simulataneous sample 4 channels
    ADCHS = 0x0002;           // Connect RB2/AN2 as CH0 = pot ..
                                // ch1 = Vbus, Ch2 = Motor, Ch3 = pot
    ADCON3 = 0x0080;           // Tad = internal RC (4uS)
    IFSObits.ADIF = 0;
    IECObits.ADIE = 1;

    ADCON1bits.ADON = 1;      // turn ADC ON
}

/*****
InitMCPWM, initializes the PWM as follows:
1. FPWM = 16000 hz
2. Independant PWMs
3. Control outputs using OVDCON 2
4. Set Duty Cycle with the ADC value read from pot
5. Set ADC to be triggered by PWM special trigger
*****/
void InitMCPWM(void)
{
    PTPER = FCY/FPWM - 1;

    PWMCON1 = 0x0700;         // disable PWMs
    OVDCON = 0x0000;         // allow control using OVD
    PDC1 = 100;              // init PWM 1, 2 and 3 to 100
    PDC2 = 100;
    PDC3 = 100;
    SEVTCMP = PTPER;
    PWMCON2 = 0x0F00;         // 16 postscale values
    PTCON = 0x8000;          // start PWM
}

//-----
// This is a generic lms delay routine to give a 1mS to 65.5 Seconds delay
// For N = 1 the delay is 1 mS, for N = 65535 the delay is 65,535 mS.
// Note that FCY is used in the computation. Please make the necessary
// Changes(PLLx4 or PLLx8 etc) to compute the right FCY as in the define
// statement above.

void DelayNmSec(unsigned int N)
{
    unsigned int j;
    while(N-->0)
        for(j=0;j < MILLISEC;j++);
}

```

APPENDIX B: SOURCE CODE LISTING FOR CLOSED LOOP CONTROL

This appendix contains the source code listing for closed loop control.

```

//-----
//
//                               Software License Agreement
//
//
// The software supplied herewith by Microchip Technology Incorporated
// (the "Company") is intended and supplied to you, the Company's customer,
// for use solely and exclusively with products manufacture by the Company.
// The software is owned by the Company and/or its supplier, and is protected under
// applicable copyright laws. All rights are reserved. Any use in violation of the
// foregoing restrictions may subject the user to criminal sanctions under applicable
// laws, as well as to civil liability for the breach of the terms and conditions of
// this icense.
//
// THIS SOFTWARE IS PROVIDED IN AN "AS IS" CONDITION. NO WARRANTIES, WHETHER EXPRESS,
// IMPLIED OR STATUTORY, INCLUDING, BUT NOT LIMITED TO, IMPLIED WARRANTIES OF
// MERCHANTABILITY AND FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE APPLY TO THIS SOFTWARE.
// THE COMPANY SHALL NOT, IN ANY CIRCUMSTANCES, BE LIABLE FOR SPECIAL, INCIDENTAL OR
// CONSEQUENTIAL DAMAGES, FOR ANY REASON WHATSOEVER.
//-----
// File: ClosedLoopSenBLDC.c
//
// Written By: Stan D'Souza, Microchip Technology
//
// The following files should be included in the MPLAB project:
//
//   ClosedLoopSenBLDC.c-- Main source code file
//   p30f2010.gld-- Linker script file
//
//-----
// Revision History
//
// 10/01/04 -- first version
//-----
//*****
ClosedLoopSenBLDC.c is a sensored Closed Loop Control for a BLDC motor.
The task consists of the following:
Sense changes in the Hall Sensors connected to CNS,6 & 7 (PortB)
During the CNInterrupt, read the sensors input by reading PortB
Mask and determine the state of the position 1, 2, ... 6.
Use the StateLoTable and the lookup table provided to determine the
Overload Control Register value. Set the OVDCON to this value.

The PWM is initialized to generate independant continuous PWMs.
The value of the Pot REF is used to determine the demand or desired
speed of the Motor. The desired speed value is then used with the
actual speed value to determine the Proportional Speed Error and the
Integral Speed Error. With these two values the new DutyCycle is determined
as: NewDutyCycle = Kp*(Portportional Speed Error) + Ki*(Integral Speed Error)
All 3 PWM Duty cycles are then loaded with the NewDutyCycloe 10-bit value.

The FPWM = 16000hz

The ADC is setup for a PWM trigger to start the conversion
//*****

```

AN957

```

#define __dsPIC30F2010__
#include "c:\pic30_tools\support\h\p30F2010.h"

#define FCY 10000000// xtal = 5.0Mhz; PLLx8
#define MILLISEC FCY/10000// 1 mSec delay constant
#define FPWM 16000
#define Ksp1200
#define Ksi10
#define RPMConstant60*(FCY/256)

#define S2!PORTCbits.RC14

void InitTMR3(void);
void InitADC10(void);
void AverageADC(void);
void DelayNmSec(unsigned int N);
void InitMCPWM(void);
void CalculateDC(void);
void GetSpeed(void);

struct {
    unsigned RunMotor : 1;
    unsigned Minus : 1;
    unsigned unused : 14;
} Flags;

unsigned int HallValue;
int Speed;
unsigned int Timer3;
unsigned char Count;
unsigned char SpeedCount;
int DesiredSpeed;
int ActualSpeed;
int SpeedError;
int DutyCycle;
int SpeedIntegral;

/*****
    Low side driver table is as below. In this StateLoTable,
    the Low side driver is PWM while the high side driver is
    either on or off. This table is used in this exercise
*****/

unsigned int StateLoTable[] = {0x0000, 0x1002, 0x0420, 0x0402,
                               0x0108, 0x1008, 0x0120, 0x0000};

/*****
Interrupt vector for Change Notification CN5, 6 and 7 is as below.
When a Hall sensor changes states, an interrupt will be caused which
will vector to the routine below.
The user has to then read the PORTB, mask bits 3, 4 and 5,
shift and adjust the value to read as 1, 2 ... 6. This
value is then used as an offset in the lookup table StateLoTable
to determine the value loaded in the OCDCON register
*****/

```

AN957

```

void _ISR_CNInterrupt(void)
{
    IFS0bits.CNIF = 0;           // clear flag
    HallValue = PORTB & 0x0038; // mask RB3,4 & 5
    HallValue = HallValue >> 3; // shift right 3 times
    OVDCON = StateLoTable[HallValue]; // Load the override control register
}

/*****
The ADC interrupt loads the DesiredSpeed variable with the demand pot
value. This is then used to determining the Speed error. When the motor
is not running, the PDC values use the direct Demand value from the pot.
*****/
void _ISR_ADCInterrupt(void)
{
    IFS0bits.ADIF = 0;
    DesiredSpeed = ADCBUF0;
    if (!Flags.RunMotor)
    {
        PDC1 = ADCBUF0;           // get value ...
        PDC2 = PDC1;             // and load all three PWMs ...
        PDC3 = PDC1;             // duty cycles
    }
}

/*****
The main routine controls the initialization, and the keypress to start
and stop the motor.
*****/

int main(void)
{
    LATE = 0x0000;
    TRISE = 0xFFC0;             // PWMs are outputs
    CNEN1 = 0x00E0;             // CN5,6 and 7 enabled
    CNPU1 = 0x00E0;             // enable internal pullups
    IFS0bits.CNIF = 0;          // clear CNIF
    IEC0bits.CNIE = 1;          // enable CN interrupt
    SpeedError = 0;
    SpeedIntegral = 0;
    InitTMR3();
    InitMCPWM();
    InitADC10();
    while(1)
    {
        while (!S2);             // wait for start key hit
        while (S2)               // wait till key is released
            DelayNmSec(10);
        // read hall position sensors on PORTB
        HallValue = PORTB & 0x0038; // mask RB3,4 & 5
        HallValue = HallValue >> 3; // shift right to get value 1, 2 ... 6
        OVDCON = StateLoTable[HallValue]; // Load the override control register
        PWMCON1 = 0x0777;        // enable PWM outputs
        Flags.RunMotor = 1;      // set flag
        T3CON = 0x8030;          // start TMR3
        while (Flags.RunMotor)   // while motor is running
            if (!S2)             // if S2 is not pressed

```

AN957

```

{
    if (HallValue == 1)          //IF in sector 1
    {
        HallValue = 0xFF;      // force a new value as a sector
        if (++Count == 5)      // do this for 5 electrical revolutions or 1
                                // mechanical revolution for a 10 pole motor
        {
            Timer3 = TMR3; // read latest tmr3 value
            TMR3 = 0;
            Count = 0;
            GetSpeed(); // determine speed
        }
    }
}
else // else S2 is pressed to stop motor
{
    PWMCON1 = 0x0700; // disable PWM outputs
    OVDCON = 0x0000; // override PWM low
    Flags.RunMotor = 0; // reset run flag
    while (S2) // wait for key release
        DelayNmSec(10);
}
} // end of while (1)
}

/*****
Below is the code required to setup the ADC registers for :
1. 1 channel conversion (in this case RB2/AN2)
2. PWM trigger starts conversion
3. Pot is connected to CH0 and RB2
4. Manual Stop Sampling and start converting
5. Manual check of Conversion complete
*****/
void InitADC10(void)
{
    ADPCFG = 0xFFFF; // all PORTB = Digital; RB0 to RB2 = analog
    ADCON1 = 0x0064; // PWM starts conversion
    ADCON2 = 0x0000; // sample CH0 channel
    ADCHS = 0x0002; // Connect RB2/AN2 as CH0 = pot.
    ADCON3 = 0x0080; // Tad = internal RC (4uS)
    IFS0bits.ADIF = 0; // clear flag
    IEC0bits.ADIE = 1; // enable interrupt

    ADCON1bits.ADON = 1; // turn ADC ON
}

```

AN957

```

/*****
InitMCPWM, initializes the PWM as follows:
1. FPWM = 16000 hz
2. Independant PWMs
3. Control outputs using OVDCON
4. Set Duty Cycle using PI algorithm and Speed Error
5. Set ADC to be triggered by PWM special trigger
*****/

void InitMCPWM(void)
{
    PTPER = FCY/FPWM - 1;

    PWMCON1 = 0x0700;           // disable PWMs
    OVDCON = 0x0000;           // allow control using OVD
    PDC1 = 100;                 // init PWM 1, 2 and 3 to 100
    PDC2 = 100;
    PDC3 = 100;
    SEVTCMP = PTPER;           // special trigger is 16 period values
    PWMCON2 = 0x0F00;           // 16 postscale values
    PTCON = 0x8000;             // start PWM
}

/*****
Tmr3 is used to determine the speed so it is set to count using Tcy/256
*****/

void InitTMR3(void)
{
    T3CON = 0x0030;             // internal Tcy/256 clock
    TMR3 = 0;
    PR3 = 0x8000;
}

/*****
GetSpeed, determines the exact speed of the motor by using the value in
TMR3 for every mechanical cycle.
*****/

void GetSpeed(void)
{
    if (Timer3 > 23000)         // if TMR3 is large ignore reading
        return;
    if (Timer3 > 0)
        Speed = RPMConstant/(long)Timer3;// get speed in RPM
    ActualSpeed += Speed;
    ActualSpeed = ActualSpeed >> 1;
    if (++SpeedCount == 1)
        {SpeedCount = 0;CalculateDC();}
}

```

AN957

```

/*****
CalculateDC, uses the PI algorithm to calculate the new DutyCycle value which
will get loaded into the PDCx registers.
*****/

void CalculateDC(void)
{
    DesiredSpeed = DesiredSpeed*3;
    Flags.Minus = 0;
    if (ActualSpeed > DesiredSpeed)
        SpeedError = ActualSpeed - DesiredSpeed;
    else
    {
        SpeedError = DesiredSpeed - ActualSpeed;
        Flags.Minus = 1;
    }
    SpeedIntegral += SpeedError;
    if (SpeedIntegral > 9000)
        SpeedIntegral = 0;
    DutyCycle = (((long)Ksp*(long)SpeedError + (long)Ksi*(long)SpeedIntegral) >> 12);
    DesiredSpeed = DesiredSpeed/3;
    if (Flags.Minus)
        DutyCycle = DesiredSpeed + DutyCycle;
    else DutyCycle = DesiredSpeed - DutyCycle;
    if (DutyCycle < 100)
        DutyCycle = 100;
    if (DutyCycle > 1250)
        {DutyCycle = 1250;SpeedIntegral = 0;}
    PDC1 = DutyCycle;
    PDC2 = PDC1;
    PDC3 = PDC1;
}

//-----
// This is a generic 1ms delay routine to give a 1mS to 65.5 Seconds delay
// For N = 1 the delay is 1 mS, for N = 65535 the delay is 65,535 mS.
// Note that FCY is used in the computation. Please make the necessary
// Changes(PLLx4 or PLLx8 etc) to compute the right FCY as in the define
// statement above.

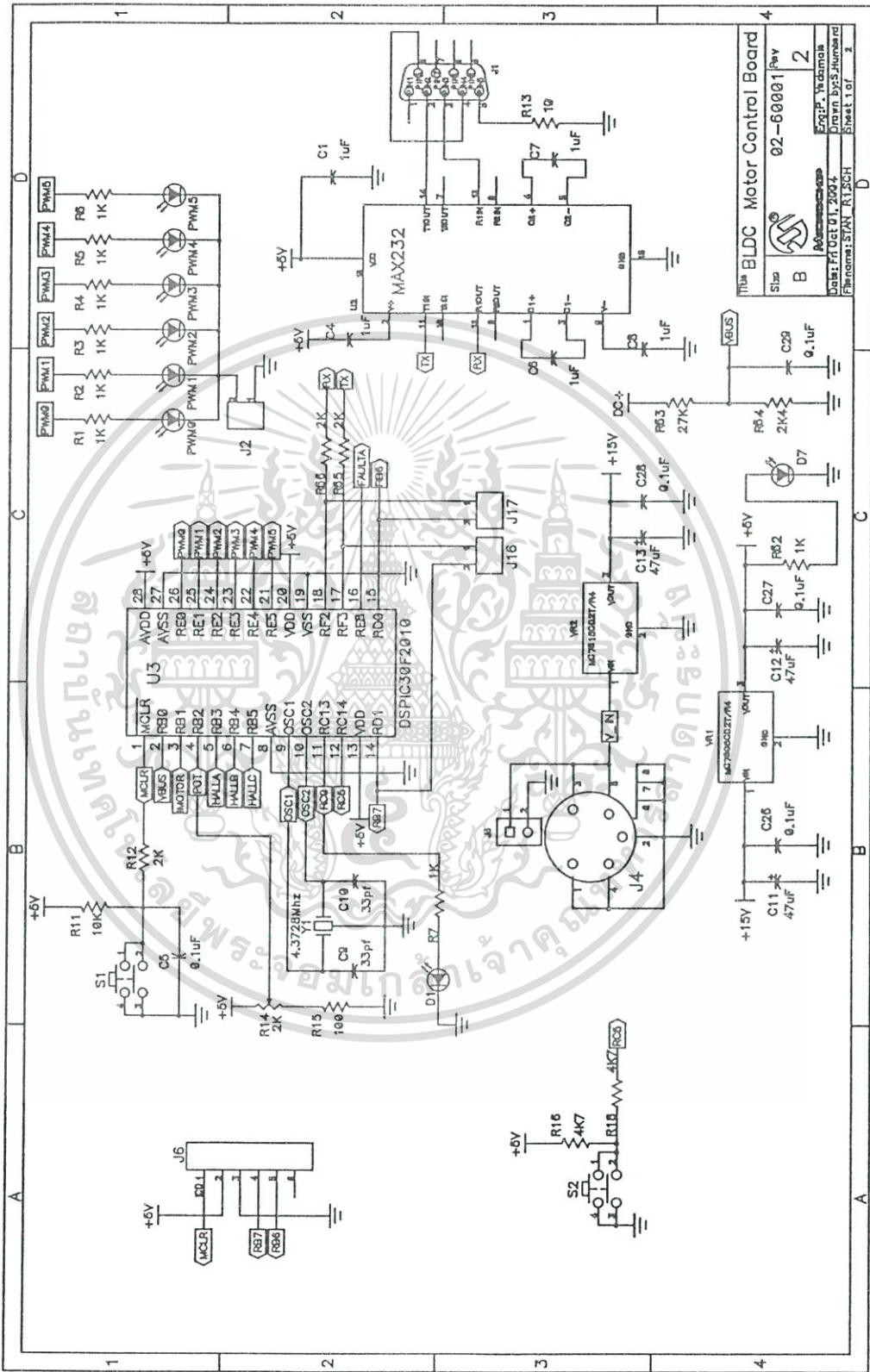
void DelayNmSec(unsigned int N)
{
    unsigned int j;
    while(N--)
        for(j=0;j < MILLISEC;j++);
}

```

APPENDIX C: SCHEMATICS

This appendix contains schematic diagrams for using the dsPIC30F2010 to control a sensored BLDC motor.

FIGURE C-1: MOTOR CONTROL SCHEMATIC 1



Mitsumi BLDC Motor Control Board	
Size	02-60001 Rev 2
Eng'g.	Y. Chomola
Drawn by:	S. Jumbard
Date:	FRI OCT 01, 2004
Flt normal:	STAN RTSCH
Sheet 1 of	3

Note the following details of the code protection feature on Microchip devices:

- Microchip products meet the specification contained in their particular Microchip Data Sheet.
- Microchip believes that its family of products is one of the most secure families of its kind on the market today, when used in the intended manner and under normal conditions.
- There are dishonest and possibly illegal methods used to breach the code protection feature. All of these methods, to our knowledge, require using the Microchip products in a manner outside the operating specifications contained in Microchip's Data Sheets. Most likely, the person doing so is engaged in theft of intellectual property.
- Microchip is willing to work with the customer who is concerned about the integrity of their code.
- Neither Microchip nor any other semiconductor manufacturer can guarantee the security of their code. Code protection does not mean that we are guaranteeing the product as "unbreakable."

Code protection is constantly evolving. We at Microchip are committed to continuously improving the code protection features of our products. Attempts to break Microchip's code protection feature may be a violation of the Digital Millennium Copyright Act. If such acts allow unauthorized access to your software or other copyrighted work, you may have a right to sue for relief under that Act.

Information contained in this publication regarding device applications and the like is provided only for your convenience and may be superseded by updates. It is your responsibility to ensure that your application meets with your specifications. MICROCHIP MAKES NO REPRESENTATIONS OR WARRANTIES OF ANY KIND WHETHER EXPRESS OR IMPLIED, WRITTEN OR ORAL, STATUTORY OR OTHERWISE, RELATED TO THE INFORMATION, INCLUDING BUT NOT LIMITED TO ITS CONDITION, QUALITY, PERFORMANCE, MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR PURPOSE. Microchip disclaims all liability arising from this information and its use. Use of Microchip's products as critical components in life support systems is not authorized except with express written approval by Microchip. No licenses are conveyed, implicitly or otherwise, under any Microchip intellectual property rights.

Trademarks

The Microchip name and logo, the Microchip logo, Accuron, dsPIC, KEELoQ, microID, MPLAB, PIC, PICmicro, PICSTART, PRO MATE, PowerSmart, rPIC, and SmartShunt are registered trademarks of Microchip Technology Incorporated in the U.S.A. and other countries.


AmpLab, FilterLab, MXDEV, MXLAB, PICMASTER, SEEVAL, SmartSensor and The Embedded Control Solutions Company are registered trademarks of Microchip Technology Incorporated in the U.S.A.

Analog-for-the-Digital Age, Application Maestro, dsPICDEM, dsPICDEM.net, dsPICworks, ECAN, ECONOMONITOR, FanSense, FlexROM, fuzzyLAB, In-Circuit Serial Programming, ICSP, ICEPIC, Migratable Memory, MPASM, MPLIB, MPLINK, MPSIM, PICKit, PICDEM, PICDEM.net, PICLAB, PICtail, PowerCal, PowerInfo, PowerMate, PowerTool, rLAB, rPICDEM, Select Mode, Smart Serial, SmartTel and Total Endurance are trademarks of Microchip Technology Incorporated in the U.S.A. and other countries.

SQTP is a service mark of Microchip Technology Incorporated in the U.S.A.

All other trademarks mentioned herein are property of their respective companies.

© 2004, Microchip Technology Incorporated, Printed in the U.S.A., All Rights Reserved.

 Printed on recycled paper.

QUALITY MANAGEMENT SYSTEM
CERTIFIED BY DNV
== ISO/TS 16949:2002 ==

Microchip received ISO/TS-16949:2002 quality system certification for its worldwide headquarters, design and wafer fabrication facilities in Chandler and Tempe, Arizona and Mountain View, California in October 2003. The Company's quality system processes and procedures are for its PICmicro® 8-bit MCUs, KEELoQ® code hopping devices, Serial EEPROMs, microperipherals, nonvolatile memory and analog products. In addition, Microchip's quality system for the design and manufacture of development systems is ISO 9001:2000 certified.



WORLDWIDE SALES AND SERVICE

AMERICAS

Corporate Office
2355 West Chandler Blvd.
Chandler, AZ 85224-6199
Tel: 480-792-7200
Fax: 480-792-7277
Technical Support:
<http://support.microchip.com>
Web Address:
www.microchip.com

Atlanta
Alpharetta, GA
Tel: 770-640-0034
Fax: 770-640-0307

Boston
Westford, MA
Tel: 978-692-3848
Fax: 978-692-3821

Chicago
Itasca, IL
Tel: 630-285-0071
Fax: 630-285-0075

Dallas
Addison, TX
Tel: 972-818-7423
Fax: 972-818-2924

Detroit
Farmington Hills, MI
Tel: 248-538-2250
Fax: 248-538-2260

Kokomo
Kokomo, IN
Tel: 765-864-8360
Fax: 765-864-8387

Los Angeles
Mission Viejo, CA
Tel: 949-462-9523
Fax: 949-462-9608

San Jose
Mountain View, CA
Tel: 650-215-1444
Fax: 650-961-0286

Toronto
Mississauga, Ontario,
Canada
Tel: 905-673-0699
Fax: 905-673-6509

ASIA/PACIFIC

Australia - Sydney
Tel: 61-2-9868-6733
Fax: 61-2-9868-6755

China - Beijing
Tel: 86-10-8528-2100
Fax: 86-10-8528-2104

China - Chengdu
Tel: 86-28-8676-6200
Fax: 86-28-8676-6599

China - Fuzhou
Tel: 86-591-8750-3506
Fax: 86-591-8750-3521

China - Hong Kong SAR
Tel: 852-2401-1200
Fax: 852-2401-3431

China - Shanghai
Tel: 86-21-5407-5533
Fax: 86-21-5407-5066

China - Shenyang
Tel: 86-24-2334-2829
Fax: 86-24-2334-2393

China - Shenzhen
Tel: 86-755-8203-2660
Fax: 86-755-8203-1760

China - Shunde
Tel: 86-757-2839-5507
Fax: 86-757-2839-5571

China - Qingdao
Tel: 86-532-502-7355
Fax: 86-532-502-7205

ASIA/PACIFIC

India - Bangalore
Tel: 91-80-2229-0061
Fax: 91-80-2229-0062

India - New Delhi
Tel: 91-11-5160-8632
Fax: 91-11-5160-8632

Japan - Kanagawa
Tel: 81-45-471-6166
Fax: 81-45-471-6122

Korea - Seoul
Tel: 82-2-554-7200
Fax: 82-2-558-5932 or
82-2-558-5934

Singapore
Tel: 65-6334-8870
Fax: 65-6334-8850

Taiwan - Kaohsiung
Tel: 886-7-536-4818
Fax: 886-7-536-4803

Taiwan - Taipei
Tel: 886-2-2500-6610
Fax: 886-2-2508-0102

Taiwan - Hsinchu
Tel: 886-3-572-9526
Fax: 886-3-572-6459

EUROPE

Austria - Wels
Tel: 43-7242-2244-399
Fax: 43-7242-2244-393

Denmark - Ballerup
Tel: 45-4420-9895
Fax: 45-4420-9910

France - Massy
Tel: 33-1-69-53-63-20
Fax: 33-1-69-30-90-79

Germany - Ismaning
Tel: 49-89-627-144-0
Fax: 49-89-627-144-44

Italy - Milan
Tel: 39-0331-742611
Fax: 39-0331-466781

Netherlands - Drunen
Tel: 31-416-690399
Fax: 31-416-690340

England - Berkshire
Tel: 44-118-921-5869
Fax: 44-118-921-5820

10/20/04



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IR2101(S)/IR2102(S) &(PbF)

HIGH AND LOW SIDE DRIVER
Product Summary

Features

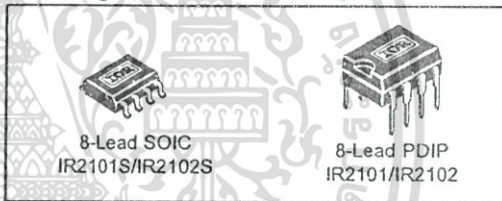
- Floating channel designed for bootstrap operation Fully operational to +600V
 Tolerant to negative transient voltage
 dV/dt immune
- Gate drive supply range from 10 to 20V
- Undervoltage lockout
- 3.3V, 5V, and 15V logic input compatible
- Matched propagation delay for both channels
- Outputs in phase with inputs (IR2101) or out of phase with inputs (IR2102)
- Also available LEAD-FREE

V_{OFFSET}	600V max.
$I_{O+/-}$	130 mA / 270 mA
V_{OUT}	10 - 20V
$t_{on/off} (typ.)$	160 & 150 ns
Delay Matching	50 ns

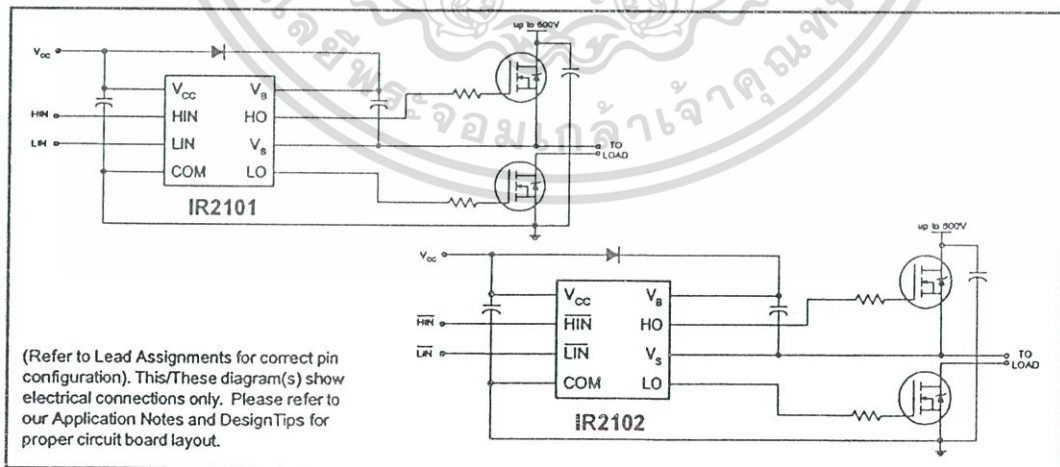
Description

The IR2101(S)/IR2102(S) are high voltage, high speed power MOSFET and IGBT drivers with independent high and low side referenced output channels. Proprietary HVIC and latch immune CMOS technologies enable ruggedized monolithic construction. The logic input is compatible with standard CMOS or LSTTL output, down to 3.3V logic. The output drivers feature a high pulse current buffer stage designed for minimum driver cross-conduction. The floating channel can be used to drive an N-channel power MOSFET or IGBT in the high side configuration which operates up to 600 volts.

Packages



Typical Connection



IR2101(S)/IR2102(S) & (PbF)

International
IR Rectifier

Absolute Maximum Ratings

Absolute maximum ratings indicate sustained limits beyond which damage to the device may occur. All voltage parameters are absolute voltages referenced to COM. The thermal resistance and power dissipation ratings are measured under board mounted and still air conditions.

Symbol	Definition	Min.	Max.	Units
V _B	High side floating supply voltage	-0.3	625	V
V _S	High side floating supply offset voltage	V _B - 25	V _B + 0.3	
V _{HO}	High side floating output voltage	V _S - 0.3	V _B + 0.3	
V _{CC}	Low side and logic fixed supply voltage	-0.3	25	
V _{LO}	Low side output voltage	-0.3	V _{CC} + 0.3	
V _{IN}	Logic input voltage (HIN & LIN)	-0.3	V _{CC} + 0.3	
dV _S /dt	Allowable offset supply voltage transient	—	50	V/ns
P _D	Package power dissipation @ T _A ≤ +25°C	(8 lead PDIP) —	1.0	W
		(8 lead SOIC) —	0.625	
R _{thJA}	Thermal resistance, junction to ambient	(8 lead PDIP) —	125	°C/W
		(8 lead SOIC) —	200	
T _J	Junction temperature	—	150	°C
T _S	Storage temperature	-55	150	
T _L	Lead temperature (soldering, 10 seconds)	—	300	

Recommended Operating Conditions

The input/output logic timing diagram is shown in figure 1. For proper operation the device should be used within the recommended conditions. The V_S offset rating is tested with all supplies biased at 15V differential.

Symbol	Definition	Min.	Max.	Units
V _B	High side floating supply absolute voltage	V _S + 10	V _S + 20	V
V _S	High side floating supply offset voltage	Note 1	600	
V _{HO}	High side floating output voltage	V _S	V _B	
V _{CC}	Low side and logic fixed supply voltage	10	20	
V _{LO}	Low side output voltage	0	V _{CC}	
V _{IN}	Logic input voltage (HIN & LIN) (IR2101) & (HIN & LIN) (IR2102)	0	V _{CC}	
T _A	Ambient temperature	-40	125	°C

Note 1: Logic operational for V_S of -5 to +600V. Logic state held for V_S of -5V to -V_{BS}. (Please refer to the Design Tip DT97-3 for more details).

International
IR Rectifier

IR2101(s)/IR2102(s) & (PbF)

Dynamic Electrical Characteristics

V_{BIAS} (V_{CC} , V_{BS}) = 15V, C_L = 1000 pF and T_A = 25°C unless otherwise specified.

Symbol	Definition	Min.	Typ.	Max.	Units	Test Conditions
t_{on}	Turn-on propagation delay	—	160	220	ns	$V_S = 0V$
t_{off}	Turn-off propagation delay	—	150	220		$V_S = 600V$
t_r	Turn-on rise time	—	100	170		
t_f	Turn-off fall time	—	50	90		
MT	Delay matching, HS & LS turn-on/off	—	—	50		

Static Electrical Characteristics

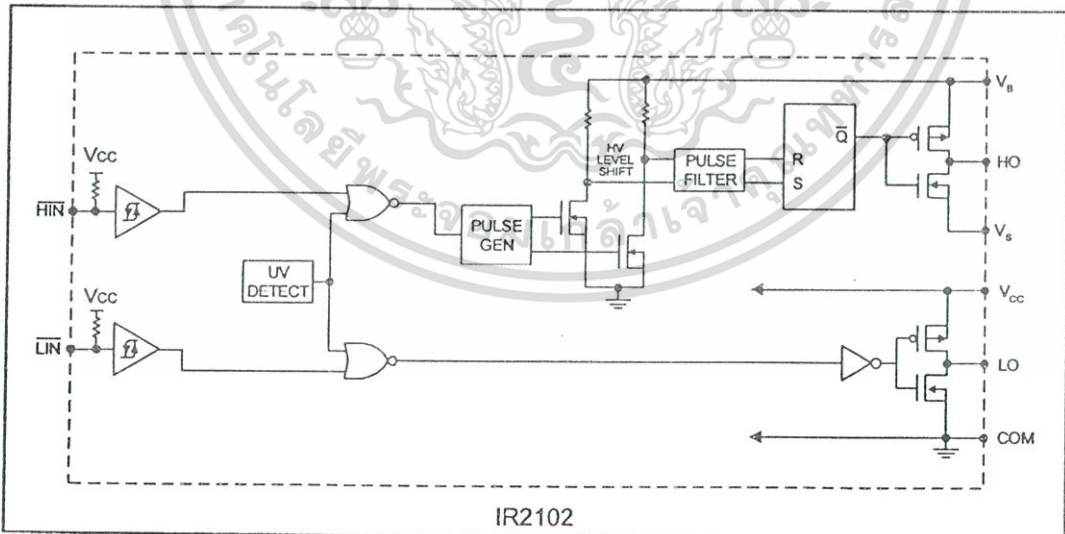
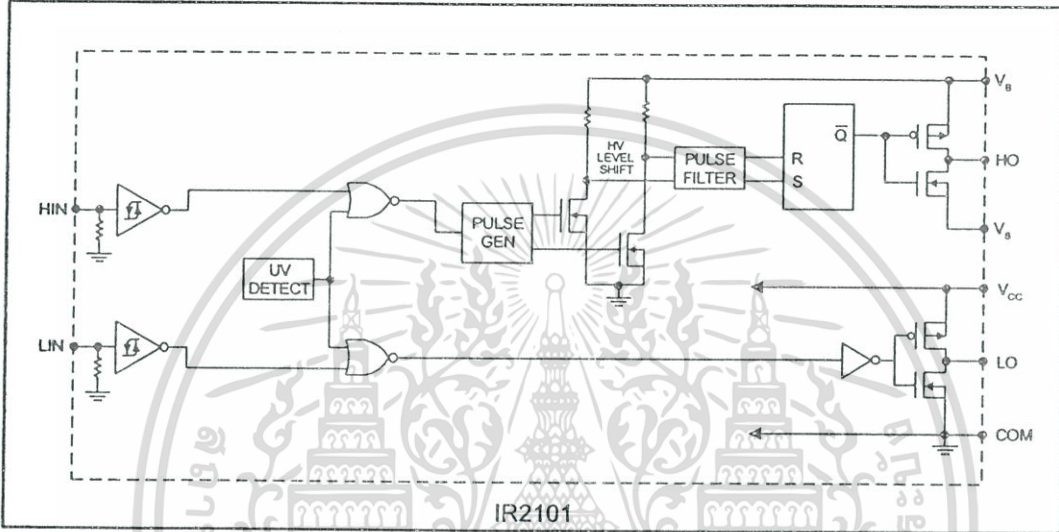
V_{BIAS} (V_{CC} , V_{BS}) = 15V and T_A = 25°C unless otherwise specified. The V_{IH} , V_{TH} and I_{IN} parameters are referenced to COM. The V_O and I_O parameters are referenced to COM and are applicable to the respective output leads: HO or LO.

Symbol	Definition	Min.	Typ.	Max.	Units	Test Conditions
V_{IH}	Logic "1" input voltage (IR2101) Logic "0" input voltage (IR2102)	3	—	—	V	$V_{CC} = 10V$ to 20V
V_{IL}	Logic "0" input voltage (IR2101) Logic "1" input voltage (IR2102)	—	—	0.8		$V_{CC} = 10V$ to 20V
V_{OH}	High level output voltage, $V_{BIAS} - V_O$	—	—	100	mV	$I_O = 0A$
V_{OL}	Low level output voltage, V_O	—	—	100		$I_O = 0A$
I_{LK}	Offset supply leakage current	—	—	50	μA	$V_B = V_S = 600V$
I_{QBS}	Quiescent V_{BS} supply current	—	30	55		$V_{IN} = 0V$ or 5V
I_{QCC}	Quiescent V_{CC} supply current	—	150	270	μA	$V_{IN} = 0V$ or 5V
I_{IN+}	Logic "1" input bias current	—	3	10		$V_{IN} = 5V$ (IR2101) $V_{IN} = 0V$ (IR2102)
I_{IN-}	Logic "0" input bias current	—	—	1	μA	$V_{IN} = 0V$ (IR2101) $V_{IN} = 5V$ (IR2102)
V_{CCUV+}	V_{CC} supply undervoltage positive going threshold	8	8.9	9.8		V
V_{CCUV-}	V_{CC} supply undervoltage negative going threshold	7.4	8.2	9		
I_{O+}	Output high short circuit pulsed current	130	210	—	mA	$V_O = 0V$ $V_{IN} = \text{Logic "1"}$ $PW \leq 10 \mu s$
I_{O-}	Output low short circuit pulsed current	270	360	—		$V_O = 15V$ $V_{IN} = \text{Logic "0"}$ $PW \leq 10 \mu s$

IR2101(s)/IR2102(s) & (PbF)

International
IR Rectifier

Functional Block Diagram



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

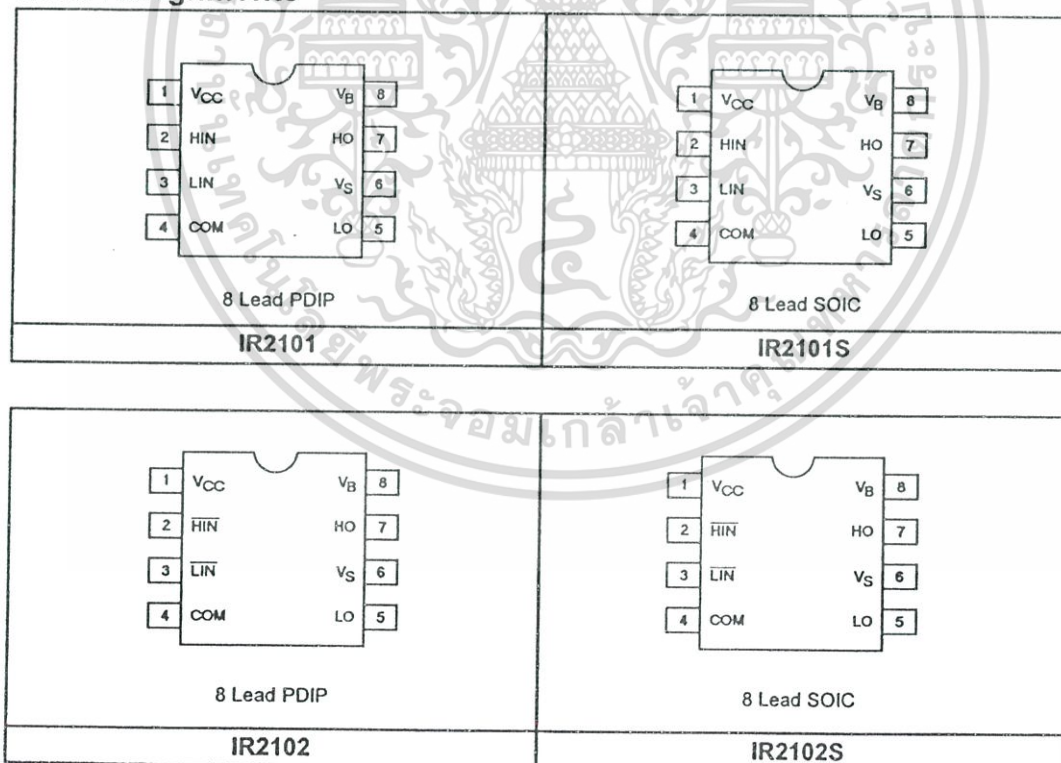
International
IR Rectifier

IR2101(S)/IR2102(S) & (PbF)

Lead Definitions

Symbol	Description
HIN	Logic input for high side gate driver output (HO), in phase (IR2101)
$\overline{\text{HIN}}$	Logic input for high side gate driver output (HO), out of phase (IR2102)
LIN	Logic input for low side gate driver output (LO), in phase (IR2101)
$\overline{\text{LIN}}$	Logic input for low side gate driver output (LO), out of phase (IR2102)
V _B	High side floating supply
HO	High side gate drive output
V _S	High side floating supply return
V _{CC}	Low side and logic fixed supply
LO	Low side gate drive output
COM	Low side return

Lead Assignments



IR2101(S)/IR2102(S) & (PbF)

International
IR Rectifier

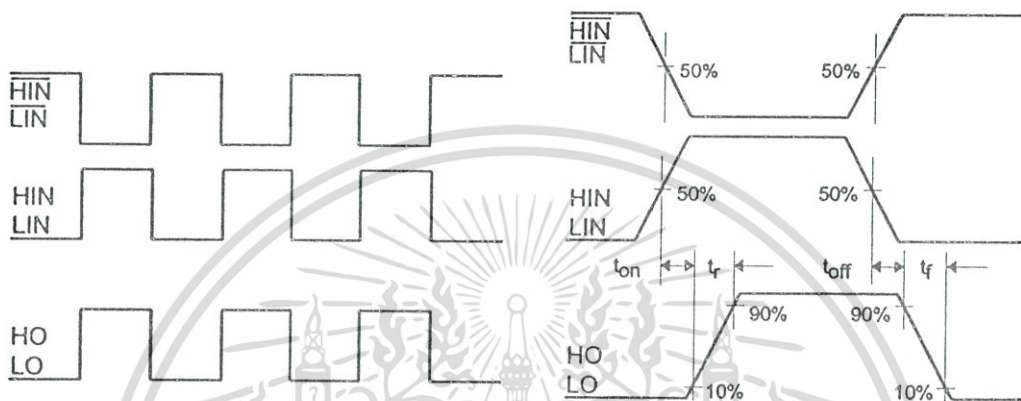


Figure 1. Input/Output Timing Diagram

Figure 2. Switching Time Waveform Definitions

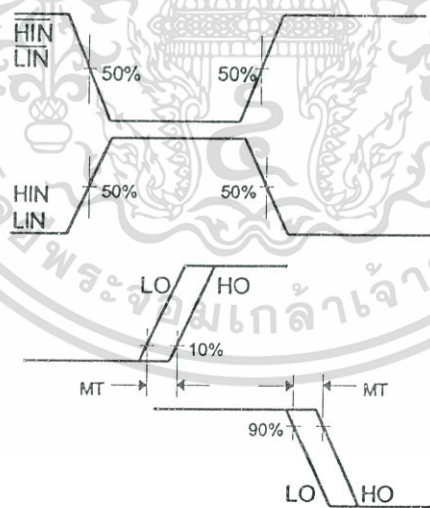


Figure 3. Delay Matching Waveform Definitions

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

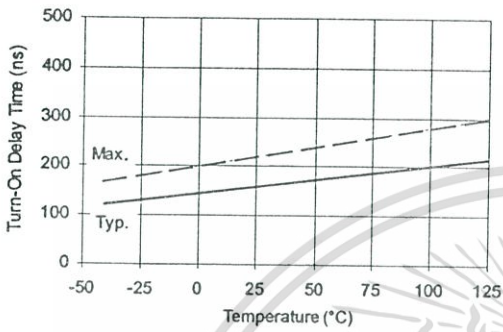


Figure 6A. Turn-On Time vs Temperature

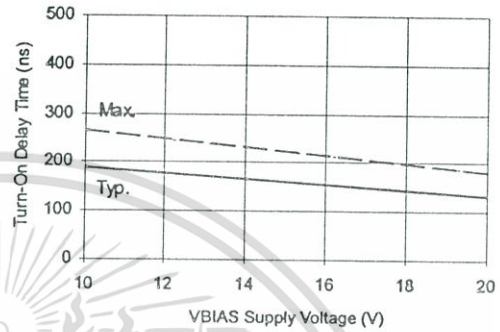


Figure 6B. Turn-On Time vs Supply Voltage

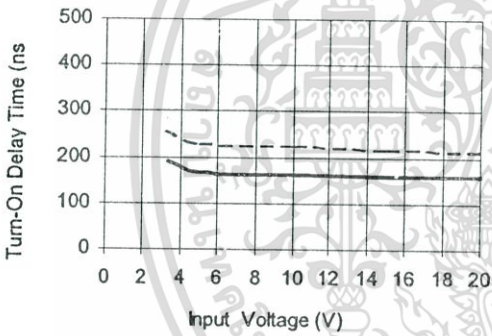


Figure 6C. Turn-On Time vs Input Voltage

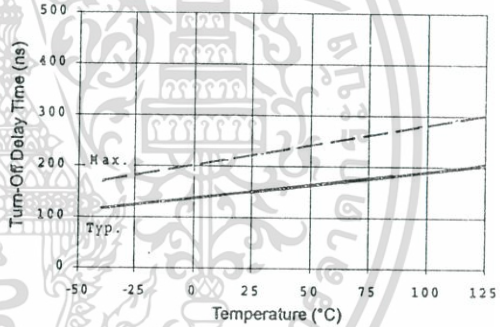


Figure 7A. Turn-Off Time vs Temperature

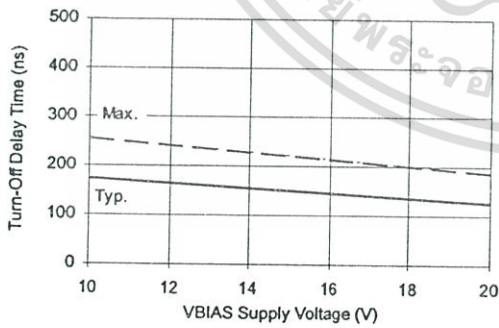


Figure 7B. Turn-Off Time vs Supply Voltage

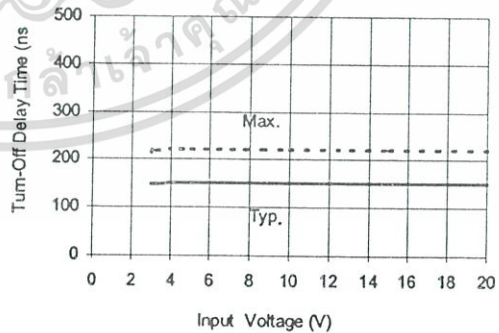


Figure 7C. Turn-Off Time vs Input Voltage

IR2101(s)/IR2102(s) & (PbF)

International
IOR Rectifier

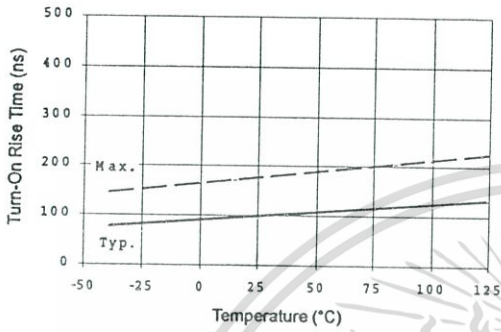


Figure 9A. Turn-On Rise Time vs Temperature

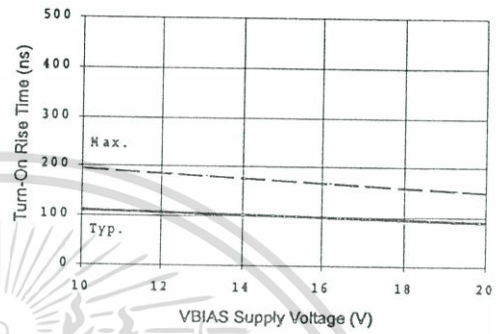


Figure 9B. Turn-On Rise Time vs Voltage

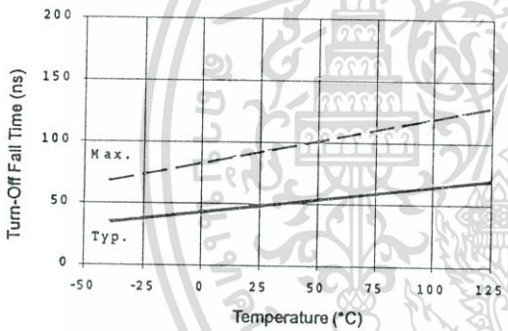


Figure 10A. Turn-Off Fall Time vs Temperature

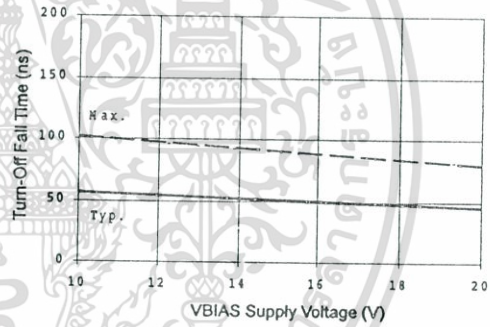


Figure 10B. Turn-Off Fall Time vs Voltage

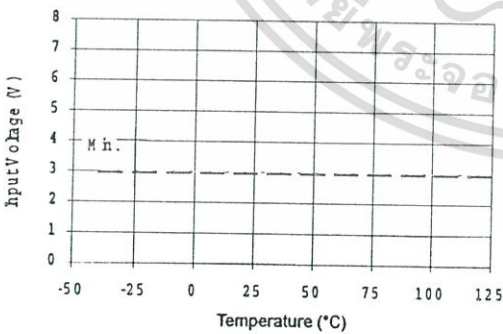


Figure 12A. Logic "1" Input Voltage (IR2101)
Logic "0" Input Voltage (IR2102)
vs Temperature

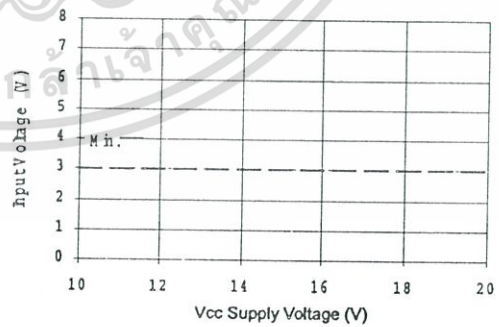


Figure 12B. Logic "1" Input Voltage (IR2101)
Logic "0" Input Voltage (IR2102)
vs Voltage

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IR2101(S)/IR2102(S) & (PbF)

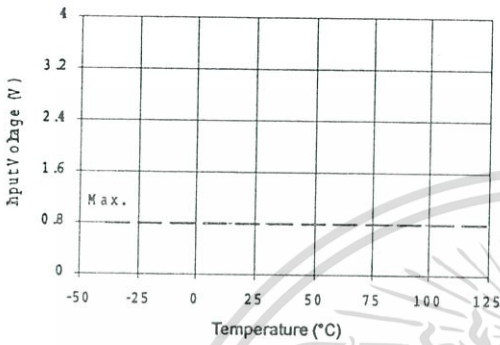


Figure 13A. Logic "0" Input Voltage (IR2101) Logic "1" Input Voltage (IR2102) vs Temperature

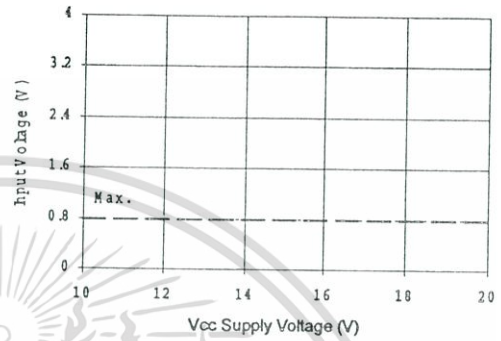


Figure 13B. Logic "0" Input Voltage (IR2101) Logic "1" Input Voltage (IR2102) vs Voltage

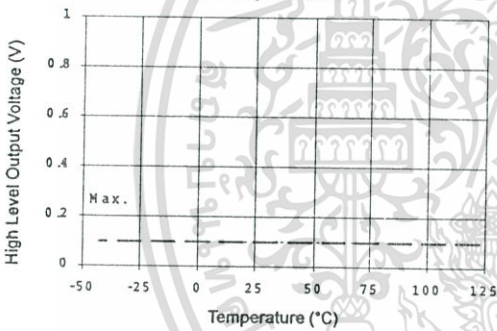


Figure 14A. High Level Output vs Temperature

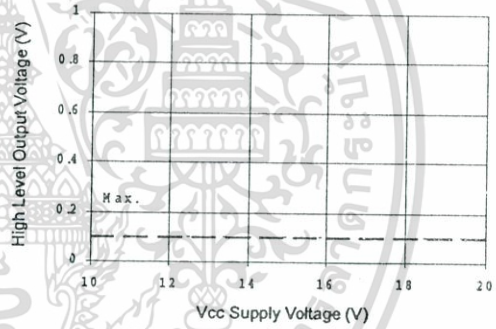


Figure 14B. High Level Output vs Voltage

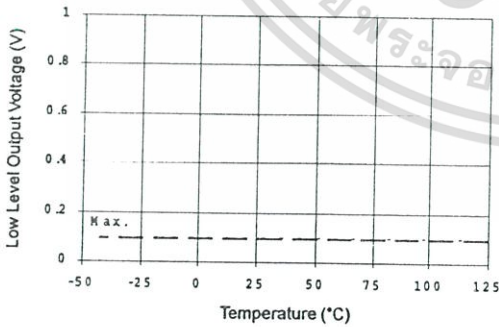


Figure 15A. Low Level Output vs Temperature

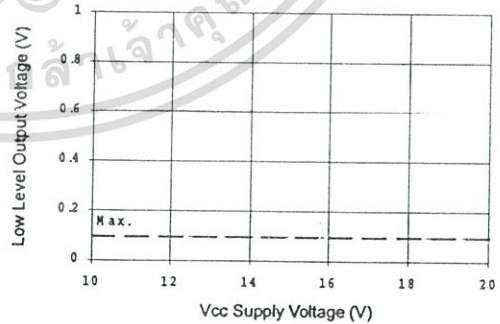


Figure 15B. Low level Output vs Voltage

IR2101(S)/IR2102(S) & (PbF)

International
IR Rectifier

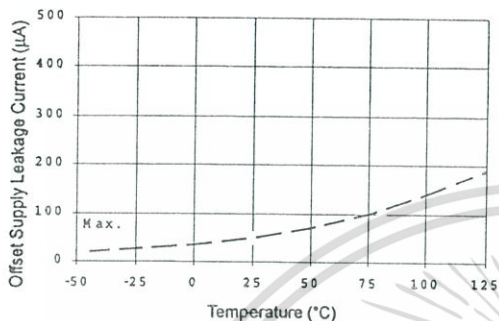


Figure 16A. Offset Supply Current vs Temperature

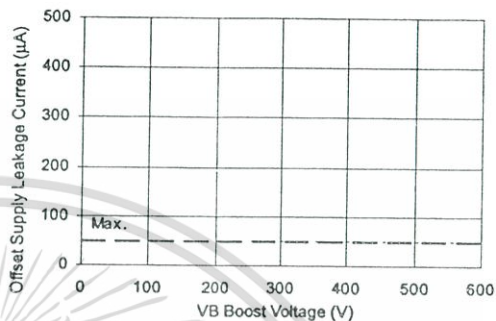


Figure 16B. Offset Supply Current vs Voltage

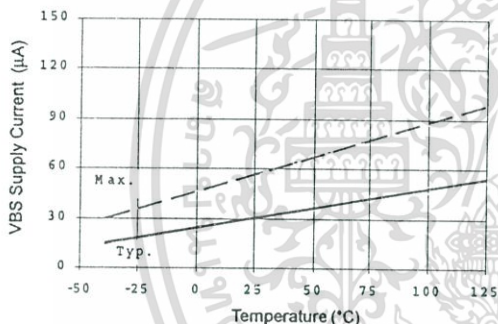


Figure 17A. Vbs Supply Current vs Temperature

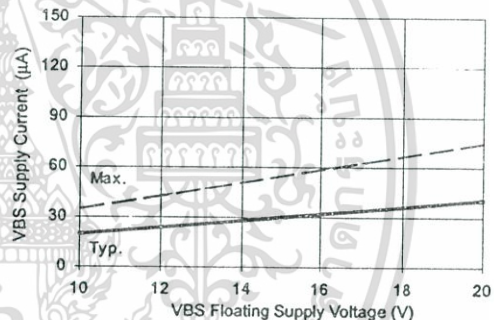


Figure 17B. Vbs Supply Current vs Voltage

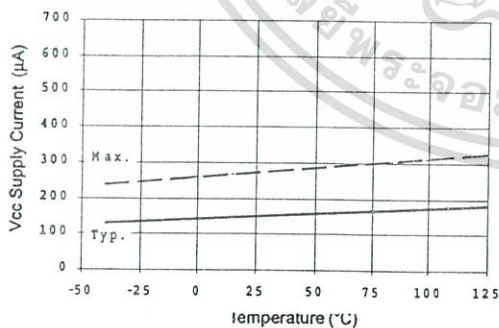


Figure 18A. Vcc Supply Current vs Temperature

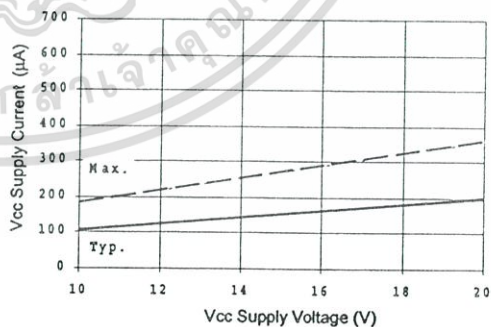


Figure 18B. Vcc Supply Current vs Voltage

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IR2101(S)/IR2102(S) & (PbF)

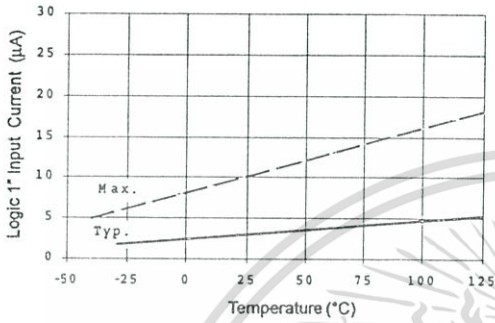


Figure 19A. Logic "1" Input Current vs Temperature

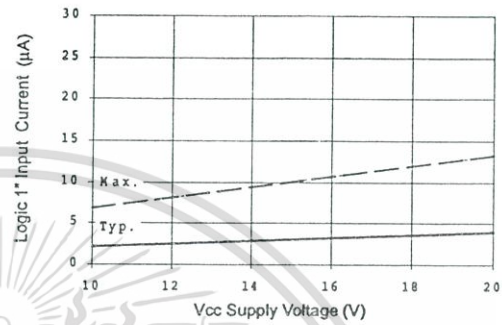


Figure 19B. Logic "1" Input Current vs Voltage

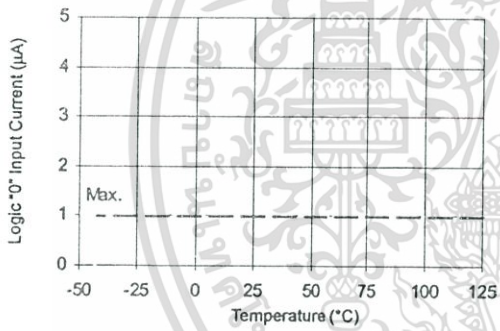


Figure 20A. Logic "0" Input Current vs Temperature

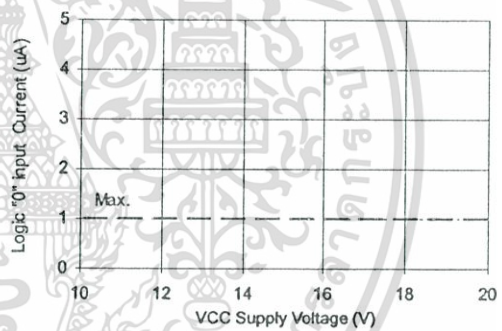


Figure 20B. Logic "0" Input Current vs Voltage

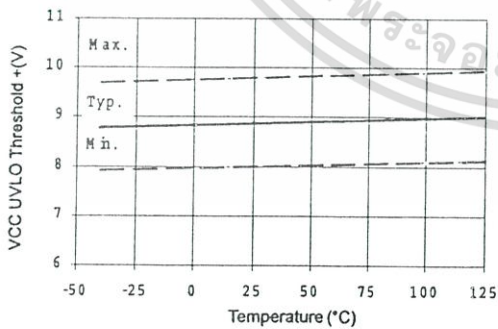


Figure 21A. Vcc Undervoltage Threshold(+) vs Temperature

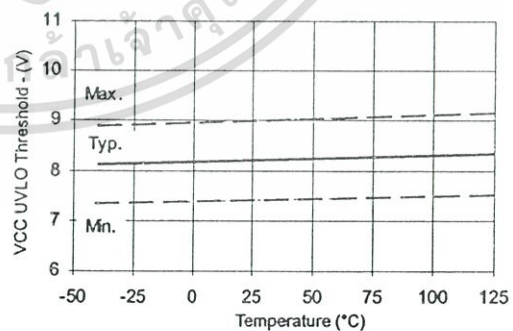


Figure 21B. Vcc Undervoltage Threshold(-) vs Temperature

IR2101(S)/IR2102(S) & (PbF)

International
IR Rectifier

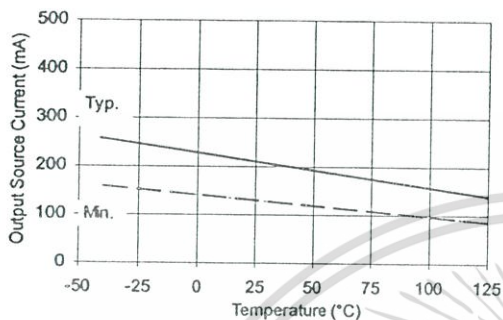


Figure 22A. Output Source Current vs Temperature

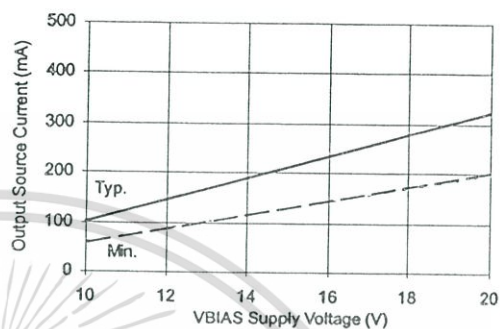


Figure 22B. Output Source Current vs Voltage

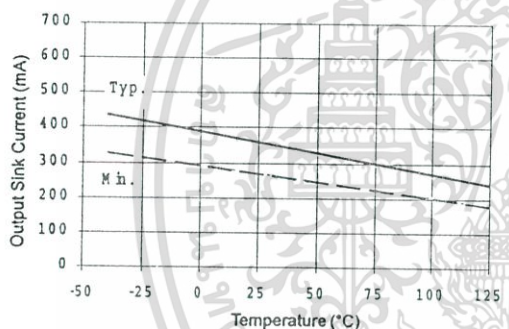


Figure 23A. Output Sink Current vs Temperature

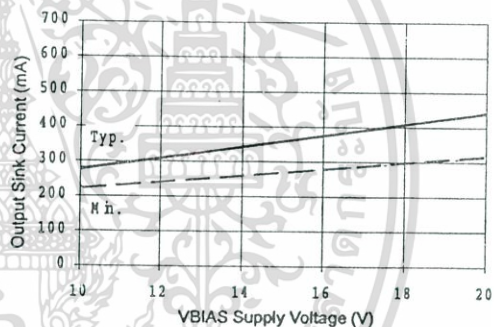


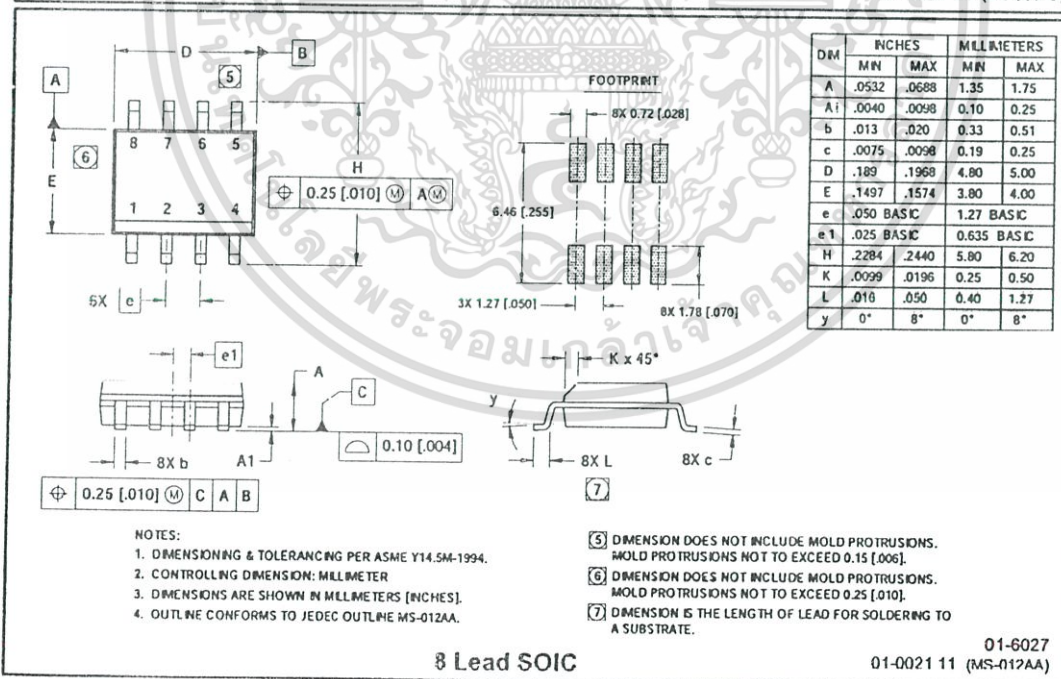
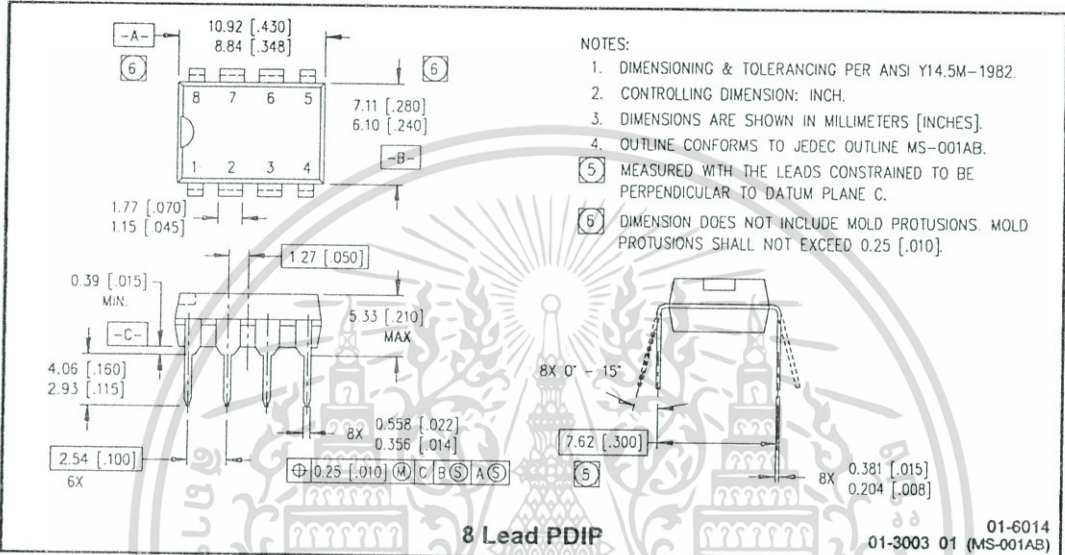
Figure 23B. Output Sink Current vs Voltage

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

International
IR Rectifier

IR2101(S)/IR2102(S) & (PbF)

Case outlines

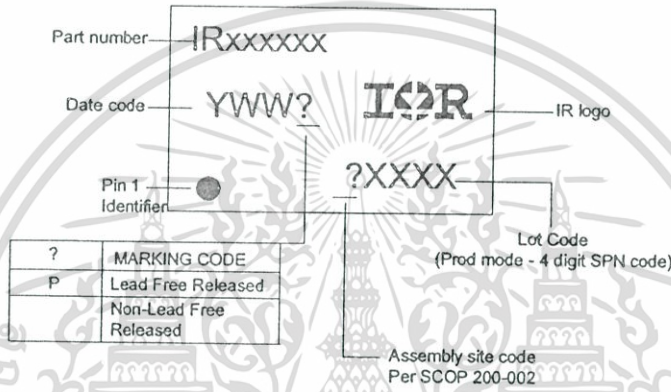


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IR2101(S)/IR2102(S) & (PbF)

International
IR Rectifier

LEADFREE PART MARKING INFORMATION



ORDER INFORMATION

Basic Part (Non-Lead Free)

8-Lead PDIP IR2101 order IR2101
 8-Lead SOIC IR2101S order IR2101S
 8-Lead PDIP IR2102 order IR2102
 8-Lead SOIC IR2102S order IR2102S

Leadfree Part

8-Lead PDIP IR2101 order IR2101PbF
 8-Lead SOIC IR2101S order IR2101SPbF
 8-Lead PDIP IR2102 order IR2102PbF
 8-Lead SOIC IR2102S order IR2102SPbF

International
IR Rectifier

IR WORLD HEADQUARTERS: 233 Kansas St., El Segundo, California 90245 Tel: (310) 252-7105
 This product has been qualified per industrial level
 Data and specifications subject to change without notice. 4/2/2004

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน



นายธนวิทย์ เต่าเอก

เกิดวันที่ 31 สิงหาคม 2534

ภูมิลำเนาอยู่จังหวัดสมุทรปราการการศึกษาในระดับมัธยมศึกษาโรงเรียนสตรีสมุทรปราการ
ศึกษาในระดับปริญญาตรีภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยสนใจงานวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง



นายธนศ กุลวงษ์

เกิดวันที่ 9 กุมภาพันธ์ 2536

ภูมิลำเนาอยู่จังหวัดมุกดาหารศึกษาในระดับมัธยมศึกษาโรงเรียนมุกดาหาร
ศึกษาในระดับปริญญาตรีภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยสนใจงานวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง



นายวัชรพงศ์ ผาเจริญ

เกิดวันที่ 14 ตุลาคม 2535

ภูมิลำเนาอยู่ที่จังหวัดหนองคายศึกษาในระดับมัธยมศึกษาโรงเรียนปทุมเทพวิทยาคาร
ศึกษาในระดับปริญญาตรีภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยสนใจงานวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้