

การขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน โดยปราศจากตัวตรวจจับ
SENSORLESS BRUSHLESS DC MOTOR DRIVE



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

การขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน โดยปราศจากตัวตรวจจับ
SENSORLESS BRUSHLESS DC MOTOR DRIVE



โดย

นายพัชรวิ

วิระศิลป์

นายพิทยุตม์

ทรัพย์สมบูรณ์

นายพิสิทธิ์

บุญรอด

นายยุวรัตน์

สัมภาวะคุปต์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SENSORLESS BRUSHLESS DC MOTOR DRIVE



PATCHARAVEE VEERASILP
PITTAYUT SUPSOMBOON
PHISIT BOONROD
YUWARAT SAMPAWAKUP

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

2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2559

การขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน โดยปราศจากตัวตรวจจับ

SENSORLESS BRUSHLESS DC MOTOR DRIVE



อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร. วิจิตร

กนิษเรศ

อ. ชัยทัต

มณีอินทร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2559

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน โดยปราศจากตัวตรวจจับ

ผู้จัดทำ



1. นายพัชรวิ วีระศิลป์
2. นายพิทยุตม์ ทรัพย์สมบูรณ์
3. นายพิสิทธิ์ บุญรอด
4. นายยุวรัตน์ สัมภาวะคุปต์

.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิจิตร กิณเรศ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(อาจารย์ ชัยหัต มณีอินทร์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน โดยปราศจากตัวตรวจจับ

นายพัชรวี	วีระศิลป์
นายพิทยุตม์	ทรัพย์สมบูรณ์
นายพิสิทธิ์	บุญรอด
นายยุวรัตน์	สัมภาวะคุปต์
รศ.ดร.วิจิตร	กิณเรศ อาจารย์ที่ปรึกษา
อาจารย์ชัยทัต	มณีอินทร์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เสนอการศึกษาเกี่ยวกับ การขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน โดยปราศจากตัวตรวจจับ เนื่องจากมอเตอร์ชนิดนี้มีคุณสมบัติที่ดีหลายอย่างเมื่อเทียบกับมอเตอร์กระแสตรงทั่วไป ต้องการการบำรุงรักษาน้อย ผู้ศึกษาจึงมีความสนใจที่จะศึกษาและออกแบบระบบชุดขับเคลื่อนมอเตอร์นี้ และในด้านการพัฒนาต่อขั้นทางผู้ศึกษาได้ทำการศึกษาและออกแบบวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านที่ปราศจากตัวตรวจจับ โดยอาศัยวิธีการค้นหาจุดตัดผ่านศูนย์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับในลักษณะสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal back EMF) และเปรียบเทียบประสิทธิภาพทั้งสองวิธี สำหรับมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านพิกัดกำลัง 350 วัตต์ 24 โวลต์ 46 ขั้วแม่เหล็ก

SENSORLESS BRUSHLESS DC MOTOR DRIVE

Mr.Patcharavee Veerasilp

Mr.Pittayut Supsomboon

Mr.Phisit Boonrod

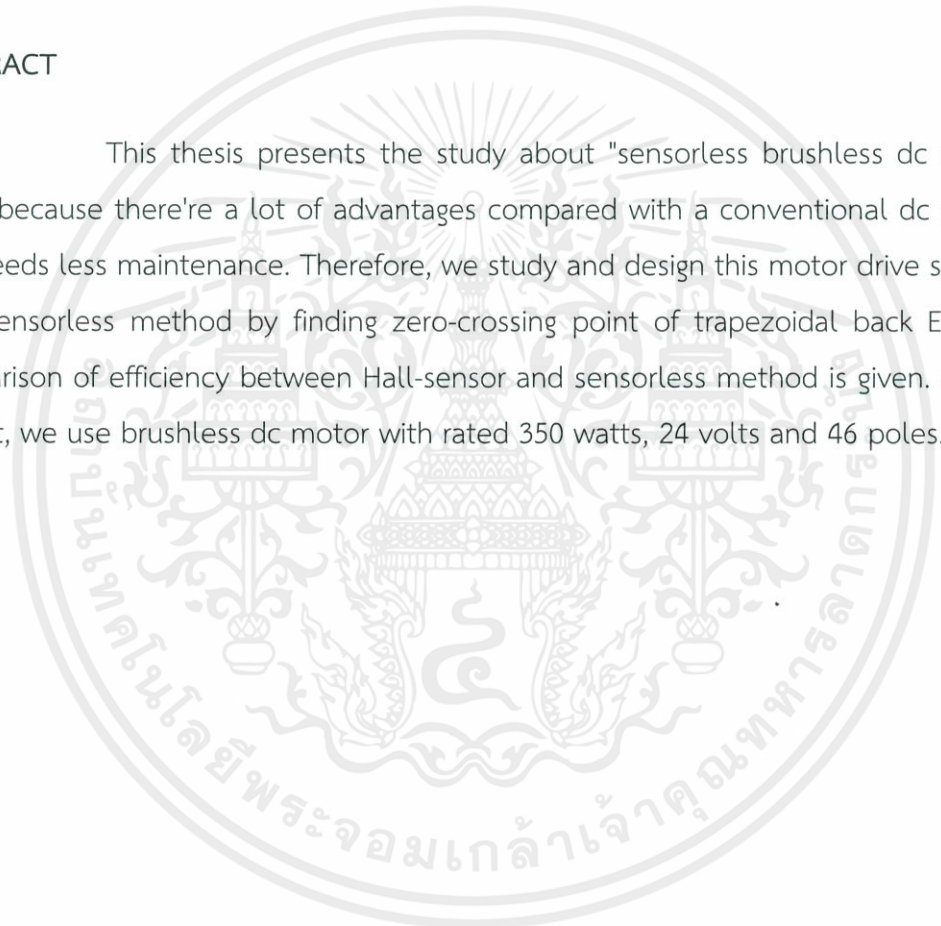
Mr.Yuwarat Sumpavakup

Assoc.Prof.Dr.Vijit Kinnares Advisor

Lecturer Chaitat Maneeinn Co-advisor

ABSTRACT

This thesis presents the study about "sensorless brushless dc motor drive" because there're a lot of advantages compared with a conventional dc motor and needs less maintenance. Therefore, we study and design this motor drive system with sensorless method by finding zero-crossing point of trapezoidal back EMF. A comparison of efficiency between Hall-sensor and sensorless method is given. In this project, we use brushless dc motor with rated 350 watts, 24 volts and 46 poles.



กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยการช่วยจากหลายท่านโดยเฉพาะอย่างยิ่งต้องขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.วิจิตร กิณเรศ และอาจารย์ชัยทัต มณีอินทร์ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้กรุณาให้ข้อเสนอแนะและข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการมาด้วยดีตลอด และได้กรุณาตรวจแก้ไข ปริญญาานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อยเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณสำนักหอสมุดกลาง และห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์ที่ได้สนับสนุนข้อมูลและหนังสือต่างๆ ที่ใช้ในการทำวิจัย

ขอขอบคุณกรรมการในการสอบปริญญาานิพนธ์ทุกท่าน ที่ได้ชี้แนะแนวทาง และปรับปรุงแก้ไขในการทำปริญญาานิพนธ์

ขอขอบคุณพี่ๆ ป.เอก และ ป.โท ห้อง ECC-405 ที่ให้คำปรึกษาต่อปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างการทดสอบมาโดยตลอด

นอกจากนั้นผู้จัดทำต้องขอขอบคุณ คุณนครศักดิ์ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการที่ให้เปิดใช้เครื่องมือ ตลอดจนคุณกมลวรรณ เจ้าหน้าที่ห้องธุรการที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับการเบิกใบเสร็จของโครงการ

ท้ายนี้คณะผู้จัดทำ ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา และครอบครัวซึ่งให้การสนับสนุนในด้านการเงินและให้กำลังใจอีกทั้งเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ที่ให้ความช่วยเหลือในการจัดหาอุปกรณ์ต่างๆ ในการทำโครงการครั้งนี้จนสำเร็จได้ด้วยดี จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูปภาพ	VII
สารบัญตาราง	X
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ	2
1.4 วิธีการใช้ในโครงการ	2
1.5 แผนการดำเนินงาน	3
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ทฤษฎีทางไฟฟ้า	5
2.1.1 มอเตอร์	5
2.1.2 โครงสร้างของมอเตอร์	5
2.2 ทฤษฎีขงโครน์สามเฟสเบื้องต้น	6
2.3 การเปรียบเทียบมอเตอร์กระแสตรงธรรมดา กับ ไร้แปรงถ่าน	7
2.4 ทฤษฎีมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน	8
2.5 โครงสร้างและหลักการของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน	11
2.6 วิธีการควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน	12
2.6.1 การควบคุมความเร็วแบบตัวตรวจจับตำแหน่ง	12
2.6.2 การควบคุมความเร็วแบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์	12
2.7 กลไกการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน	12
2.8 การสร้างชุดขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบขดลวด 3 ชุด	14
2.9 การควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์	14
2.10 ลักษณะโหมดการทำงานของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์	15
2.11 ลำดับการทำงานของอินเวอร์เตอร์แบบสัญญาณสี่เหลี่ยม 120 องศา	17
2.12 วิธีการตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ	19

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.12.1 แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับเปรียบเทียบกับแรงดันครึ่งหนึ่งของแรงดันดีซี (DC/2)	19
2.12.2 แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับเทียบกับจุดนิวตรอนเสมือน	20
2.12.3 แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับตรวจจับด้วยอนาล็อกเปลี่ยนเป็นดิจิทัล	20
2.12.4 การตรวจจับสัญญาณผ่านศูนย์ของแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับจากผลต่างแรงดันระหว่างขั้ว	21
2.13 วิธีการทำงานและวิเคราะห์แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ	23
บทที่ 3 การจำลองการทำงานและการออกแบบ	25
3.1 บทนำ	25
3.2 ผลการจำลอง	26
3.3 ชนิดและโครงสร้างของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน	29
3.4 การออกแบบระบบควบคุมโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์	30
3.4.1 ระบบควบคุมโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ (ฮอลล์เซ็นเซอร์)	32
3.4.2 ระบบควบคุมโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ (ปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์)	32
3.5 การออกแบบวงจรเรียงกระแสแบบเต็มลูกคลื่น	32
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	39
4.1 บทนำ	39
4.2 สัญญาณตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์และสัญญาณตัดผ่านศูนย์	40
4.3 เปรียบเทียบสัญญาณตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์และสัญญาณตัดผ่านศูนย์	41
4.4 สัญญาณพีดับลิวิตีเอ็มที่ใช้ควบคุมการขับเคลื่อนที่ตัวตีต่างๆ	44
4.5 เปรียบเทียบแรงดันเฟสระหว่างมีตัวตรวจจับและปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งที่ตัวตีต่างๆ	47
4.6 ลักษณะสัญญาณแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วกับกระแสมอเตอร์	49
4.7 เวลาที่ตอบสนองต่อภาระทางกล	50
4.8 เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่เปลี่ยนรูปคลื่นไซน์ที่ภาระทางกลต่างๆ	51
4.9 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการควบคุมแบบมีตัวตรวจจับและปราศจากตัวตรวจจับ	52
4.9.1 การทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบมีตัวตรวจจับ	55

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.9.2 การทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบปราศจาก ตัวตรวจจับ	56
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง ข้อเสนอแนะ และแนวทางการพัฒนา	60
5.1 บทนำ	60
5.2 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง	60
5.2.1 การทดสอบความผิดปกติของสัญญาณตรวจจับตำแหน่ง ที่น้ำหนัก 0 กิโลกรัม	60
5.2.2 เปรียบเทียบการตอบสนองต่อภาระทางกลแบบทันทีทันใด	60
5.2.3 วิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ค่าความผิดเพี้ยนรูปคลื่นไซน์ (%THDv) ที่ภาระทางกลต่างๆ	60
5.2.4 วิเคราะห์สัญญาณแรงดันระหว่างขั้วมอเตอร์และกระแสไฟฟ้าที่โหลดต่างๆ	61
5.2.5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของการควบคุมมอเตอร์ทั้งสองกรณี	61
5.3 ข้อเสนอแนะ	61
5.4 แนวทางการพัฒนา	62
เอกสารอ้างอิง	63
ภาคผนวก	64
ภาคผนวก ก ข้อมูลอุปกรณ์	65
ภาคผนวก ข บทความทางวิชาการ	95
ประวัติผู้เขียน	100

สารบัญรูปร่างภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 มุมมองการถอดชิ้นส่วนของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน	8
2.2 ภาพตัดขวางของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน	11
2.3 การทำงานของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน	13
2.4 มอเตอร์กระแสตรงและมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน	13
2.5 ลำดับการคอมมิวเตชันใน 1 รอบทางไฟฟ้า	14
2.6 วงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์ต่อโหลดแบบสตาร์	15
2.7 กระแสไฟฟ้าและแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับในแต่ละระดับการควบคุมตามสัญญาณขับเคลื่อนเกิดตามตารางที่ 2.21	16
2.8 กระแสไฟฟ้าและแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับเมื่อมอสเฟต (Q1, Q6) ทำงาน	17
2.9 กระแสไฟฟ้าและแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับเมื่อมอสเฟต (Q1, Q2) ทำงาน	17
2.10 กระแสไฟฟ้าและแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับเมื่อมอสเฟต (Q3, Q2) ทำงาน	18
2.11 กระแสไฟฟ้าและแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับเมื่อมอสเฟต (Q3, Q4) ทำงาน	18
2.12 กระแสไฟฟ้าและแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับเมื่อมอสเฟต (Q5, Q4) ทำงาน	18
2.13 กระแสไฟฟ้าและแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับเมื่อมอสเฟต (Q5, Q6) ทำงาน	19
2.14 แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับเทียบกับครึ่งหนึ่งของแรงดันดีซี (DC/2)	19
2.15 แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับเทียบกับจุดนิวตรอนเสมือน	20
2.16 แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับตรวจจับด้วยอนุภาคเปลี่ยนเป็นดิจิตอล	20
2.17 การทำงานของวงจรควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านและกระแสเฟสและแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ	21
2.18 จุดตัดสัญญาณ Zero Crossing ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับของมอเตอร์	23
2.19 เปรียบเทียบแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับกับตำแหน่งการสวิตช์ของกระแส	24
3.1 ไดอะแกรมวงจรควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่ง	25
3.2 ไดอะแกรมวงจรตรวจจับจุดตัดผ่านศูนย์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ	26
3.3 ผลการจำลองแรงดันระหว่างขั้วของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน	26
3.4 ผลการจำลองการเปรียบเทียบรูปกราฟระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับในแต่ละเฟสและผลต่างแรงดันระหว่างขั้ว	27
3.5 ผลการเปรียบเทียบสัญญาณที่ได้จากการตรวจจับจุดตัดผ่านศูนย์ และสัญญาณที่ได้จากฮอลล์เซ็นเซอร์	27
3.6 ผลการจำลองสัญญาณขาเกิดในแต่ละเฟสที่ค่า Duty Ratio = 0.8	27

สารบัญรูปรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.7 ผลการจำลองรูปรูปกราฟกระแส, ความเร็ว (รอบต่อนาที) และแรงบิดของมอเตอร์ เมื่อใส่ภาระทางกล 2 N.m ที่เวลา 1 วินาที	28
3.8 ผลการจำลองรูปรูปกราฟกระแส, ความเร็ว (รอบต่อนาที) และแรงบิดของมอเตอร์ เมื่อใส่ภาระทางกล 3 N.m ที่เวลา 1 วินาที	29
3.9 โครงสร้างของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน	30
3.10 ไมโครคอนโทรลเลอร์ C2000 TMS320F28377S	30
3.11 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ C2000 แบบไรต์ตัวตรวจจับ	31
3.12 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ C2000 แบบใช้ฮอลล์เซ็นเซอร์	31
3.13 วงจรไฟเลี้ยงสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ C2000 และวงจรจับสัญญาณฮอลล์	32
3.14 วงจรเรียงกระแสแบบเต็มลูกคลื่น	32
3.15 แรงดันหลังจากผ่านบริดจ์ไดโอดและแรงดันเมื่อใส่ค่าตัวเก็บประจุ	33
3.16 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่จ่ายให้กับวงจร	33
3.17 Schematic และแผนผังวงจรของระบบป้องกันกระแสเกินจากมอเตอร์	34
3.18 วงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส	35
3.19 ลายแผนผังวงจรที่ใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์	35
3.20 แผนผังวงจรที่ใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์	35
3.21 วงจรบูทสเตรปที่ใช้สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์	36
3.22 วงจรบูทสเตรปที่ใช้สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์ที่ได้ออกแบบ	36
3.23 วงจรโวลต์เตจเซ็นเซอร์	37
3.24 แสดงการกระตุ้นคู่เฟสลำดับแรก	38
3.25 แสดงการกระตุ้นคู่เฟสลำดับที่สอง	38
4.1 สัญญาณตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ทั้ง 3 เฟส	40
4.2 สัญญาณตัดผ่านศูนย์ทั้ง 3 เฟส	40
4.3 ลำดับขั้นการแก้ความผิดพลาดของสัญญาณตัดผ่านศูนย์	42
4.4 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วที่ได้จากการแก้ความผิดพลาดของสัญญาณตัดผ่านศูนย์	43
4.5 สัญญาณพีดับบลิวเอ็มที่ใช้ขับเคลื่อน High - Low ที่ดีวีดี 1	45
4.6 สัญญาณพีดับบลิวเอ็มที่ใช้ขับเคลื่อน High - Low ที่ดีวีดี 0.8	46
4.7 สัญญาณพีดับบลิวเอ็มที่ใช้ขับเคลื่อน High - Low ที่ดีวีดี 0.6	47
4.8 แรงดันเฟสแบบมีตัวตรวจจับกับปราศจากตัวตรวจจับที่ดีวีดี 1	47
4.9 แรงดันเฟสแบบมีตัวตรวจจับกับปราศจากตัวตรวจจับที่ดีวีดี 0.8	48

สารบัญรูปรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10 แรงดันเฟสแบบมีตัวตรวจจับกับปราศจากตัวตรวจจับที่ค่านิวต์ 0.6	48
4.11 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วกับกระแสมอเตอร์แบบมีตัวตรวจจับ	49
4.12 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วกับกระแสมอเตอร์แบบปราศจากตัวตรวจจับ	49
4.13 เปรียบเทียบแรงเคลื่อนและกระแสไฟฟ้าขณะทดสอบภาระทางกลแบบทันทีทันใด	50
4.14 เปรียบเทียบค่า %THDv ระหว่างมีตัวตรวจจับและปราศจากตัวตรวจจับ ที่ภาระทางกลตั้งแต่ 0 - 5 กิโลกรัม	51
4.15 ไดอะแกรมการต่อวงจรทดสอบมอเตอร์	52
4.16 การต่อเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลอง	53
4.17 การทดสอบมอเตอร์แบบมีตัวตรวจจับ	55
4.18 การทดสอบมอเตอร์แบบปราศจากตัวตรวจจับ	56
4.19 สัญญาณแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าระหว่างแบบมีตัวตรวจจับตำแหน่งและ แบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งที่ภาระทางกล 0 และ 5 กิโลกรัม ที่ค่าค่านิวต์ 1	57
4.20 กราฟเปรียบเทียบแรงบิดระหว่างมีตัวตรวจจับกับปราศจากตัวตรวจจับ	58
4.21 กราฟเปรียบเทียบกระแสระหว่างมีตัวตรวจจับกับปราศจากตัวตรวจจับ	58
4.22 กราฟเปรียบเทียบความเร็วรอบระหว่างมีตัวตรวจจับกับปราศจากตัวตรวจจับ	59
4.23 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพไคร์ระหว่างมีตัวตรวจจับกับปราศจากตัวตรวจจับ	59

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ระยะเวลาดำเนินงานของการวิจัย	3
2.1 เปรียบเทียบมอเตอร์กระแสตรงกับมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน	8
2.2 สัญญาณที่ใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์แบบสัญญาณสี่เหลี่ยม 120 องศา	16
3.1 ค่าพารามิเตอร์และข้อมูลโครงสร้างของมอเตอร์	29
4.1 รายการการทดลองชุดควบคุมมอเตอร์	39
4.2 ผลการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบมีตัวตรวจจับ	55
4.3 ผลการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบปราศจากตัวตรวจจับ	56



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ในปัจจุบันมอเตอร์กระแสตรงมีบทบาทอย่างมากในวงการอุตสาหกรรมอันเนื่องมาจาก คุณสมบัติต่างๆ ของมอเตอร์ที่สามารถควบคุมความเร็วได้ตามที่ต้องการ และมีแรงบิดเริ่มต้นที่ดีมาก แต่มอเตอร์กระแสตรงก็ยังมีข้อเสีย เรื่องการมีแปรงถ่านที่ต้องเสียดสีกับคอมมิวเตเตอร์ ซึ่งทำให้เกิดประกายไฟและเกิดการสูญเสียพลังงานไป และข้อเสียอีกอย่างหนึ่งคือเกิดเสียงดังขณะมอเตอร์ทำงาน ด้วยข้อเสียต่างๆ ที่เกิดขึ้นจึงทำให้มีการดัดแปลงมอเตอร์กระแสตรงใหม่โดยวิธีการกำจัดแปรงถ่านโดยมีการพัฒนาและปรับปรุงมอเตอร์กระแสตรงนี้มาโดยตลอดจนเป็นมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน โดยมอเตอร์ชนิดนี้จะมีชิ้นส่วนหลักๆ คือ สเตเตอร์, โรเตอร์, ฮอลล์เซ็นเซอร์

มอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน (BLDC Motor) จำเป็นต้องมีวงจรที่ใช้สำหรับควบคุมมอเตอร์ชนิดนี้ ในปัจจุบันจะมีการนำเอาอุปกรณ์ควบคุมมอเตอร์นี้จากต่างประเทศเป็นส่วนมาก ซึ่งจะทำให้ราคาของอุปกรณ์นี้ค่อนข้างสูง ดังนั้นในการออกแบบที่ได้นำเสนอในการใช้ควบคุมมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านจะมีต้นทุนในการผลิตที่ต่ำ เนื่องจากออกแบบขึ้นมาโดยลดอุปกรณ์ติดตั้งที่ตรวจจับในสำหรับการควบคุม อย่างไรก็ตามการควบคุมมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านจำเป็นต้องอาศัยการควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback Control) เพื่อในการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ให้เป็นไปตามชุดคำสั่งตั้งนั้นจึงได้นำเสนอการควบคุมมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านโดยปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์โดยใช้วิธีการตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ (Back EMF) ในลักษณะคลื่นคางหมู โดยการหาความสัมพันธ์ของคาบเวลาที่เกิดจุดตัดผ่านเส้นศูนย์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับของรูปคลื่นสี่เหลี่ยมคางหมูเพื่อนำมาสร้างสัญญาณแทนฮอลล์เซ็นเซอร์ที่นำไปเพื่อนำมาคำนวณใช้ควบคุมมอเตอร์ โดยมีสมรรถนะใกล้เคียงกับการใช้ตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์

วิธีการควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์จะอยู่บนพื้นฐานของการตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับลักษณะสี่เหลี่ยมคางหมูแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีความสัมพันธ์กับความเร็วรอบของมอเตอร์ สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านพิกัด 350 วัตต์ 24 โวลต์ 310 รอบต่อนาที ย่านควบคุมความเร็ว 0 ถึง 310 รอบต่อนาทีโดยอาศัยตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับที่ตัดผ่านศูนย์ที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของสนามแม่เหล็กหมุนตัดผ่านตัวนำ หลังจากนั้นขับเคลื่อนมอเตอร์แบบวงรอบเปิดเพื่อให้ตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับได้ไปคำนวณสัญญาณเพื่อใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ การประมวลผลทางดิจิทัลในการขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านนี้จะใช้ C2000 Microcontroller

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน
2. เพื่อศึกษาการออกแบบชุดควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านเพื่อศึกษาการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์แบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์
3. ศึกษาการทำงานวงจรตรวจจับสัญญาณผ่านศูนย์กับความสัมพันธ์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับจากแรงดันระหว่างขั้วของมอเตอร์
4. เพื่อศึกษาวงจรป้องกันมอเตอร์ที่มีกระแสสูงโดยผลมาจากการทำงานผิดปกติของมอเตอร์

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ

1. สามารถเข้าใจในหลักการหมุนของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านและ รวบรวมข้อมูลเพื่อที่ใช้ในการทำงานวิจัย
2. สามารถศึกษาการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส และนำมาประยุกต์สร้างชุดอินเวอร์เตอร์ให้เหมาะสมกับการใช้งาน
3. สามารถนำโปรแกรม MATLAB/SIMULINK มาจำลองแรงบิดและความเร็วรอบของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน
4. สามารถเข้าใจถึงหลักการตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ ที่เส้นตัดผ่านที่ศูนย์ที่เข้ามาเป็นสัญญาณที่จะจ่ายให้ตัวไมโครแทนฮอลล์เซ็นเซอร์

1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการ

1. ศึกษาโครงสร้างการทำงานและหลักการขับเคลื่อนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน
2. ศึกษาการขับเคลื่อนมอเตอร์โดยใช้อุปกรณ์ตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์
3. จำลองการควบคุมมอเตอร์โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink จำลองการทำงานของมอเตอร์และจำลองควบคุมความเร็วมอเตอร์
4. ออกแบบชุดขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน
5. สร้างชุดขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน
6. ทำการทดสอบกับมอเตอร์ กระแสตรงไร้แปรงถ่าน โดยทดสอบประสิทธิภาพและศึกษาพฤติกรรมของมอเตอร์ที่ความเร็วต่างๆ ได้แก่ แรงบิด แรงดัน และกระแส
7. สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ

1.5 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 ระยะเวลาดำเนินงานของการวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงาน	ระยะเวลาในการดำเนินงาน							
	พ.ศ. 2559					พ.ศ. 2560		
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.
1. ศึกษาโครงสร้างการทำงานและหลักการขับเคลื่อนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน	↔							
2. ศึกษาการขับเคลื่อนมอเตอร์โดยใช้อุปกรณ์ตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์		↔						
3. จำลองการควบคุมมอเตอร์โดยใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK จำลองการทำงานของมอเตอร์และจำลองควบคุมความเร็วมอเตอร์			↔					
4. ออกแบบชุดขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน				↔				
5. สร้างชุดขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน					↔			
6. ทำการทดสอบกับมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน โดยทดสอบประสิทธิภาพและศึกษาพฤติกรรมของมอเตอร์ที่ความเร็วต่างๆ ได้แก่ แรงบิด แรงดัน และกระแส							↔	
7. สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ								↔

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. เข้าใจโครงสร้าง หลักการทำงาน และการควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน
2. สามารถเขียนโปรแกรมในการควบคุมความเร็วมอเตอร์ได้
3. ทำให้สามารถสร้างชุดควบคุมและชุดขับเคลื่อนของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านได้
4. ได้รับความรู้จากการทดสอบการทำงานของชุดควบคุมและชุดขับเคลื่อนของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน



บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีทางไฟฟ้า

2.1.1 มอเตอร์

มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่แปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล ในโหมดการทำงานปกติมอเตอร์ไฟฟ้าส่วนใหญ่ทำงานผ่านการมีปฏิสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กในตัวมอเตอร์และสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสในขดลวดทำให้เกิดแรงดูดและแรงผลักของสนามแม่เหล็กทั้งสองในการใช้งานบางอย่าง เช่น ในอุตสาหกรรมการขนส่งที่ใช้มอเตอร์ดูดลาก มอเตอร์ไฟฟ้าสามารถทำงานได้ทั้งการสร้างพลังงานกลและการผลิตพลังงานไฟฟ้าโดยที่ในขณะที่มอเตอร์ไฟฟ้ายังผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานกล

มอเตอร์ไฟฟ้าถูกนำไปใช้งานที่หลากหลาย เช่น พัดลมอุตสาหกรรม เครื่องเป่า บีม เครื่องมือเครื่องใช้ในครัวเรือนและดิสก์ไดรฟ์มอเตอร์ไฟฟ้าสามารถขับเคลื่อนโดยแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง(DC) เช่น จากแบตเตอรี่ยานยนต์ วงจรเรียงกระแสหรือจากแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับ (AC) เช่น จากไฟบ้านอินเวอร์เตอร์หรือเครื่องปั่นไฟ มอเตอร์ขนาดเล็กอาจพบในนาฬิกาไฟฟ้า มอเตอร์ทั่วไปที่มีขนาดและคุณลักษณะมาตรฐานสูงจะให้พลังงานกลที่สะดวกสำหรับใช้ในอุตสาหกรรม มอเตอร์ไฟฟ้าที่ใหญ่ที่สุดใช้สำหรับการใช้งานลากจูงเรือ และการบีบอัดท่อส่งน้ำมันและปั๊มสูบน้ำดิบ น้ำดื่มซึ่งมีกำลังถึง 100 เมกะวัตต์ มอเตอร์ไฟฟ้าอาจจำแนกตามประเภทของแหล่งที่มาของพลังงานไฟฟ้าหรือตามโครงสร้างภายในหรือตามการใช้งานหรือตามการเคลื่อนไหวของเอาต์พุต และอื่นๆ

อุปกรณ์เช่นขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าและลำโพงที่แปลงกระแสไฟฟ้าให้เป็นการเคลื่อนไหว แต่ไม่ได้สร้างพลังงานกลที่ใช้งานได้ จะเรียกกันว่า Actuator และ Transducer ตามลำดับ มอเตอร์ไฟฟ้าใช้สร้างแรงเชิงเส้นหรือแรงบิดหรือ Rotary

2.1.2 โครงสร้างของมอเตอร์

โรเตอร์ในมอเตอร์ไฟฟ้าส่วนที่เคลื่อนที่คือ โรเตอร์ ซึ่งจะหมุนเพลาเพื่อจ่ายพลังงานกล โรเตอร์มักจะมีขดลวดตัวนำพันอยู่โดยรอบ ซึ่งเมื่อมีกระแสไหลผ่านจะเกิดอำนาจแม่เหล็กที่จะไปทำปฏิกิริยากับสนามแม่เหล็กถาวรของสเตเตอร์ขับเคลื่อนให้หมุนได้ อย่างไรก็ตามโรเตอร์บางตัวจะเป็นแม่เหล็กถาวรและสเตเตอร์จะมีขดลวดตัวนำสลับที่กัน

ช่องว่างอากาศ ระหว่างโรเตอร์และสเตเตอร์จะเป็นช่องว่างอากาศ ซึ่งจะต้องมีขนาดเล็กที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ช่องว่างขนาดใหญ่จะมีผลกระทบทางลบอย่างมากต่อประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้า

ขดลวด ขดลวดจะพันโดยรอบเป็นคอยล์ ปกติจะพันรอบแกนแม่เหล็กอ่อนที่เคลื่อนวน เพื่อให้เป็นขั้วแม่เหล็กเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน

มอเตอร์ไฟฟ้ามีขั้วสนามแม่เหล็กในสองรูปแบบ ได้แก่ แบบขั้วที่เห็นได้ชัดเจนและแบบขั้วที่เห็นได้ไม่ชัดเจน ในขั้วที่ชัดเจนสนามแม่เหล็กของขั้วจะถูกผลิตโดยขดลวดพันรอบแกนด้านข้าง ในขั้วที่ไม่ชัดเจนหรือเรียกว่า แบบสนามแม่เหล็กกระจาย หรือแบบรอบๆ โรเตอร์ ขดลวดจะกระจายอยู่ในช่องบนแกนรอบโรเตอร์ มอเตอร์แบบขั้วแฝงมีขดลวดรอบส่วนหนึ่งของขั้วเพื่อหน่วงเฟสของสนามแม่เหล็กของขั้วนั้นให้ช้าลง

มอเตอร์บางตัวขดลวดเป็นโลหะหนักกว่า เช่น แท่งหรือแผ่นโลหะที่มักจะเป็นทองแดง บางทีก็เป็นอะลูมิเนียม มอเตอร์เหล่านี้โดยปกติจะถูกขับเคลื่อนโดยการเหนี่ยวนำของแม่เหล็กไฟฟ้า

ตัวสับเปลี่ยน ตัวสับเปลี่ยนเป็นกลไกที่ใช้ในการสลับอินพุทของมอเตอร์กระแสสลับและกระแสตรง เพื่อให้กระแสที่ไหลในขดลวดในโรเตอร์ไหลทางเดียวตลอดเวลาในระหว่างการหมุน ประกอบด้วยวงแหวนลื่น (Slip rings) ชิ้นเล็กๆ แยกจากกันด้วยฉนวน วงแหวนนี้ยังแยกจากเพลลาของมอเตอร์ด้วยฉนวนอีกด้วย วงแหวนแต่ละคู่ที่อยู่ตรงข้ามกันจะเป็นขดลวดหนึ่งชุด กระแสที่จ่ายให้มัดขั้วต้ม หรือที่เรียกว่า อาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ จะถูกส่งผ่านแปรงถ่าน (Brush) สองตัวที่แตะอยู่กับตัวสับเปลี่ยนแต่ละด้านที่กำลังหมุนอยู่ ซึ่งจะทำให้กระแสจากแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับที่ไหลกลับทางไหลในขดลวดทิศทางเดียว ในขณะที่โรเตอร์หมุนจากขั้วหนึ่งไปอีกขั้วหนึ่ง ในกรณีที่ไม่มีกระแสแหล่งจ่ายไม่กลับทางมอเตอร์จะเบรกหยุดอยู่กับที่ ในแง่ของความก้าวหน้าที่สำคัญในช่วงไม่กี่ทศวรรษที่ผ่านมา อันเนื่องมาจากเทคโนโลยีที่ดีขึ้นในการควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ มอเตอร์เหนี่ยวนำที่ควบคุมโดยไม่ใช่เซ็นเซอร์ และมอเตอร์ที่มีสนามแม่เหล็กถาวร มอเตอร์ที่มีตัวสับเปลี่ยนแบบกลไกไฟฟ้า กำลังถูกแทนที่เพิ่มขึ้นด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ตัวสับเปลี่ยนภายนอกและมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวร

2.2 ทฤษฎีซิงโครนัสสามเฟสเบื้องต้น

เครื่องจักรกลซิงโครนัสเกือบทั้งหมดมีขดลวดอาร์มาเจอร์อยู่บนสเตเตอร์และขดลวดสนามอยู่บนโรเตอร์ กระแสอาร์มาเจอร์เป็นกระแสสลับ กระแสสนามเป็นกระแสตรง ระบบป้อนกระแสสนาม (Excitation) มีสองระบบ คือ

2.2.1 ในเครื่องจักรกลรุ่นเก่าจะใช้เจนเนอเรเตอร์กระแสตรงซึ่งโรเตอร์จะต่อรวมเพลลาเดียวกันกับโรเตอร์ของเครื่องจักรซิงโครนัส ป้อนกระแสเข้าขดลวดสนามโดยผ่านวงแหวนสลิป (Slip rings) และแปรงถ่าน (Carbon brush) เจเนอเรเตอร์กระแสตรงที่ทำหน้าที่นี้เรียกว่า Exciter จึงเป็นระบบป้อนกระแสสนามที่ใช้แปรงถ่าน

2.2.2 ในเครื่องจักรกลรุ่นใหม่ใช้เอ็กไซเตอร์กระแสสลับและเร็กติไฟเออร์โซลิตสเทท ป้อนกระแสเข้าขดลวด โดยที่ขดลวดอาร์มาเจอร์ของเอ็กไซเตอร์กระแสสลับกับเร็กติไฟเออร์โซลิตสเททติดตั้งอยู่บนเพลลาเดียวกันกับโรเตอร์ของเครื่องจักรกลซิงโครนัส จึงเป็นระบบป้อนกระแสสนามที่ไม่มีแปรงถ่าน (Brushless Excitation)

สมการแรงดันสำหรับซิงโครนัสเจนเนอเรเตอร์

$$E_{rms} = \sqrt{2}\pi f_{me} K_w N_{ph} \Phi_p \quad (2.1)$$

- E_{rms} คือ แรงดันกำเนิดประสิทธิผล (rms) ต่อหนึ่งเฟส
 f_{me} คือ ความเร็วเชิงไฟฟ้าของโรเตอร์ในหน่วย Hz
 K_w คือ ตัวประกอบขดลวดของขดลวดอาร์มาเจอร์ (Winding factor)
 Φ_p คือ ฟลักซ์แม่เหล็กถาวรต่อหนึ่งขั้วของขดลวดสนาม

สมการแรงบิดสำหรับซิงโครนัสมอเตอร์

$$T = \frac{\pi}{2} \left(\frac{P}{2}\right)^2 \Phi_R F_f \sin \delta_{RF} \quad (2.2)$$

- Φ_R คือ ฟลักซ์ของอากาศลัพท์ต่อหนึ่งขั้ว
 F_f คือ แรงเคลื่อนแม่เหล็กต่อหนึ่งขั้วของขดลวดสนาม
 P คือ จำนวนขั้วแม่เหล็ก
 δ_{RF} คือ มุมสเปซเฟสในหน่วยองศาไฟฟ้า

ซึ่งในมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน มุมสเปซเฟสจะมีค่า 90 องศา ทำให้เกิดแรงบิดสูงสุด

2.3 การเปรียบเทียบมอเตอร์กระแสตรงธรรมดาและไร้แปรงถ่าน

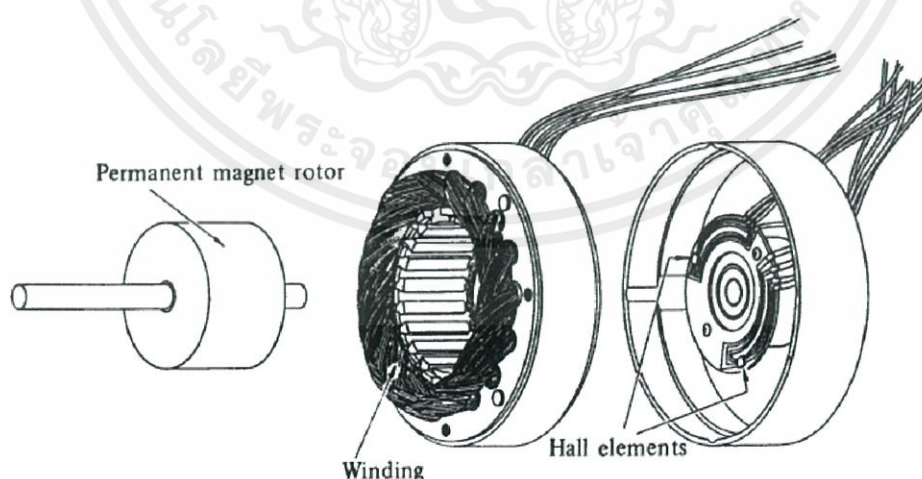
ถึงแม้ว่า Brushless DC Motor และมอเตอร์ฟ้ากระแสตรงจะคล้ายกันในคุณลักษณะที่อยู่กับที่เป็นจริงจะมีความแตกต่างกันบางอย่างทางรูปร่างของโครงสร้าง ตารางที่ 2.1 จะเปรียบเทียบจุดเด่นและข้อเสียของมอเตอร์ทั้งสองชนิด เมื่อก้าวถึงฟังก์ชันของมอเตอร์ไฟฟ้าไม่ควรลืมความสำคัญของการพันขดลวดและการเปลี่ยนกระแสไฟฟ้า (Commutation) จะอ้างอิงถึงกระบวนการการเปลี่ยนการเข้าไปของกระแสไฟฟ้าจากไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ และจะต้องมีความเหมาะสมการกระจายในการพันขดลวดแต่ละขดในอาร์มาเจอร์ในมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าด้วยแปรงถ่านและคอมมิวเตเตอร์ แต่ใน Brushless DC Motor จะใช้อุปกรณ์เซมิคอนดักเตอร์ เช่น ทรานซิสเตอร์

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบมอเตอร์กระแสตรงกับมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

เปรียบเทียบ	BRUSHED DC MOTOR	BLDC MOTOR
โครงสร้างทางกล	สนามแม่เหล็กบนสเตเตอร์	สนามแม่เหล็กบนโรเตอร์
วิธีการคอมมิวเตชัน	ใช้หน้าสัมผัสทางกลระหว่างแปรงถ่านและคอมมิวเตเตอร์	ใช้สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์เพื่อควบคุมอุปกรณ์สวิตซ์ซิ่ง
วิธีการตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์	ตรวจจับอัตโนมัติด้วยแปรงถ่าน	ใช้ Hall Element หรือ Optical Encoder จัดเรียงซีควเอนซ์ของ commutation ใหม่
วิธีการกลับทางหมุน	สลับสายแรงดันที่ terminal	Rearranging logic sequencer

2.4 ทฤษฎีมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

ความหมายของ Brushless ไม่ว่าจะ เป็น Brushless DC Motor หรือ Permanent Magnet Synchronous Motor นั้น จะใช้แม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet) ในส่วนหมุนโรเตอร์ ดังนั้นจึงไม่ต้องการแปรงถ่านหรือสลิปริง เพื่อรับกระแสไฟฟ้าไปจ่ายให้เตอร์ เพราะถูกแทนด้วยแม่เหล็กถาวร ทำให้มอเตอร์ชนิดนี้มีข้อดีกว่ามอเตอร์ทั่วไป (DC Motor, Synchronous Motor, Asynchronous Motor) ตรงที่ไม่ต้องการพลังงานไฟฟ้าจากภายนอกจ่ายเข้าที่โรเตอร์ จึงไม่มีส่วนสูญเสียในโรเตอร์ ไม่มีส่วนสูญเสียจากการดรอปของแปรงถ่าน การเสียดสี และลดการบำรุงรักษา ไม่มีประกายไฟสามารถนำไปใช้ในสถานที่อันตราย (น้ำมัน เคมี เป็นต้น)



รูปที่ 2.1 มุมมองการถอดชิ้นส่วนของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

อันที่จริงแล้วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน (Brushless DC หรือ BLDC) เป็นมอเตอร์ไฟฟ้าแบบซิงโครนัส (AC Synchronous) สามเฟส หรือจะเป็นแบบ Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) ซึ่งต้องใช้ไฟสามเฟสในการขับ ซึ่งในอดีตจะเห็นการใช้งานมอเตอร์ซิงโครนัสในโรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากมีแหล่งจ่ายไฟสามเฟส มอเตอร์จะหมุนด้วยความเร็วที่เป็นจำนวนเท่า ของความถี่ของไฟสามเฟสที่จ่าย (เช่น 50 Hz) ข้อจำกัดในการปรับความเร็วรอบจึงทำให้มอเตอร์ประเภทนี้ไม่ถูกใช้งานมากนักในอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าทั่วไปในครัวเรือน ด้วยเทคโนโลยีในปัจจุบัน เราสามารถควบคุมความเร็วรอบที่ค่าต่างๆ โดยไม่ต้องซิงค์ กับ 50 Hz ได้ไม่ยาก ด้วยอุปกรณ์การขับที่เรียกว่า อินเวอร์เตอร์ (Inverter) ซึ่งทำงานโดยการรับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงมาสร้างเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสจ่ายให้กับมอเตอร์ ซึ่งจริงๆแล้วมอเตอร์กระแสตรงก็ใช้วิธีสลับทิศทางการจ่ายกระแส (Commute) จากแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงจ่ายให้ขดลวดผ่าน คอมมิวเตเตอร์ (Commutator) ซึ่งใช้แปรงถ่านในการทำหน้าที่นี้ แต่ในกรณีของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านจะออกแบบให้ขดลวดอยู่นิ่ง (Stator) และมีแม่เหล็กถาวรหมุนได้ แล้วใช้วิธีการสลับทิศทางการจ่ายให้ขดลวดด้วยวงจรไฟฟ้าแทนการใช้แปรงถ่านจึงกลายเป็นที่มาของชื่อ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน

มอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านที่มีประสิทธิภาพสูงในแง่ของการใช้พลังงานแน่นอนว่าสูงกว่า มอเตอร์กระแสตรงที่ใช้แปรงถ่าน หรือพูดง่าย ๆ ว่าให้พลังเชิงกลเยอะกว่าเมื่อใช้พลังงานไฟฟ้าเท่าๆกัน และยังให้แรงบิดสูงในความเร็วรอบที่สูงเช่นกัน รวมทั้งมีความเฉื่อยหรือการต้านการหมุนที่ต่ำ BLDC เหมาะในการนำมาใช้งานแทนมอเตอร์กระแสตรงแบบเก่า รวมทั้งมอเตอร์เหนี่ยวนำ (AC Induction Motor) โดยเฉพาะอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ต้องการประสิทธิภาพในการใช้พลังงานสูงๆ เช่น พวกที่ใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ หรือจะเป็นอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าทั่วไป เช่น Hard Disk Drive, เครื่องเล่น CD/DVD, บีม พัดลม เครื่องดูดฝุ่น เครื่องชงกาแฟ เครื่องบินบังคับด้วยวิทยุ เครื่องมือทางการแพทย์ และพวกเครื่องมือช่างที่ใช้แบตเตอรี่ แต่ข้อด้อยที่สำคัญของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน ก็คือความยุ่งยากในการขับ และการควบคุมความเร็ว

1. แหล่งจ่ายไฟกระแสตรง (DC Supply)
2. อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ทำหน้าที่จ่ายกระแสสลับสามเฟสให้กับมอเตอร์ (ส่วนใหญ่เป็น MOSFET)
3. ชุดควบคุมในการสร้างไฟกระแสสลับสามเฟสและควบคุมความเร็ว

จากองค์ประกอบหลักข้างต้น ชุดควบคุมในการสร้างไฟกระแสสลับสามเฟสน่าจะเป็นส่วนที่ยากที่สุด ที่ทำให้การใช้งานมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน ไม่ได้รับความนิยมในการใช้งานทั่วไปที่ไม่ได้ต้องการประสิทธิภาพสูงนัก ในการสร้างไฟกระแสสลับสามเฟสดังกล่าว จะต้องมียุติโพลที่เข้าจังหวะกับแกนหมุนของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านที่เป็นแม่เหล็ก ที่จะหมุนตามสนามแม่เหล็กไฟฟ้าหมุนที่สร้างจากขดลวด คล้ายๆ กับหลักการจุดระเบิดหัวเทียนในเครื่องยนต์สันดาปภายใน ที่จะต้องจุดระเบิดให้ตรงจังหวะของตำแหน่งของลูกสูบในกระบอกสูบ

หลักการในการหาเฟสที่พอดีในการสร้างไฟกระแสสลับสามเฟสนั้น เริ่มต้นจากการติดตั้งเซ็นเซอร์วัดตำแหน่งเชิงมุมของแกนหมุน (Rotor) (จะอยู่ภายในหรือภายนอก ขึ้นกับโครงสร้างของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน) เทียบกับส่วนที่อยู่นิ่ง (Stator) โดยทั่วไปจะใช้เซ็นเซอร์ที่ใช้หลักการ Hall Effect เมื่อได้จังหวะหรือองศาทางไฟฟ้าแล้ว ก็จะทำการจ่ายกระแสให้ขดลวดแต่ละเฟส และสามารถควบคุมความเร็วโดยการควบคุมปริมาณกระแสในขดลวด ซึ่งจะสัมพันธ์กับแรงบิด วิธีการที่นิยมใช้กันคือวิธีการของ Pulse Width Modulation (PWM) เมื่อกระแสเพิ่มแรงบิดก็จะเพิ่มทำให้ความเร็วรอบเพิ่มขึ้น จังหวะการสร้างสัญญาณกระแสสลับสามเฟสก็จะถี่ขึ้น เป็นเช่นนี้ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งได้ความเร็วรอบที่ต้องการ

ต่อมา ได้มีการพัฒนาวิธีการใหม่ ที่ไม่ต้องใช้เซ็นเซอร์ในการหาตำแหน่งเชิงมุมของโรเตอร์ โดยใช้วิธีการวัดค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ (Back EMF) ซึ่งเป็นแรงดันที่เกิดขึ้นเมื่อมอเตอร์หมุนแล้ว อันเป็นหลักการเดียวกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) ซึ่งเป็นไปตามกฎของ Faraday ด้วยเหตุที่ไม่จำเป็นต้องมีเซ็นเซอร์ในการวัดตำแหน่งเชิงมุมนี้ วิธีการดังกล่าวนี้จึงได้ชื่อว่า Sensorless สัญญาณแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับนี้จะเป็นสัญญาณกระแสสลับ ซึ่งสามารถนำมาหาจังหวะในการสลับการจ่ายไฟในแต่ละเฟสได้ โดยสัญญาณแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ นี้สามารถวัดได้จากแรงดันและกระแสที่จ่ายให้มอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านในแต่ละเฟส ตามความเป็นจริงแล้วหลักการดังกล่าวก็ไม่ใช่ว่าจะไม่มีเซ็นเซอร์ เพราะใช้เซ็นเซอร์ในการวัดแรงดันและกระแสในแต่ละเฟส เพียงแต่เซ็นเซอร์ดังกล่าวเป็นสิ่งที่ใช้ในวงจรขับ จึงเสมือนไม่ต้องมีเซ็นเซอร์

ปัจจุบันมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน (Brushless DC Motor) เป็นที่นิยมมากในปัจจุบันเนื่องจากมีข้อดีกว่ามอเตอร์กระแสตรงแบบธรรมดาทั่วไป เช่น ความเร็วและแรงบิดสูง, อายุการใช้งานยืนยาวกว่า เป็นต้น โครงการนี้จะนำเสนอการทำงานของมอเตอร์ชนิดนี้และจะออกแบบการสร้างวงจรถับมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน

ในมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน บางส่วนของปัญหาของมอเตอร์กระแสตรงที่ใช้แปรงถ่านจะถูกตัดทิ้งไป แทนที่ "สวิตช์หมุน" หรือตัวสับเปลี่ยนแบบกลไกไปเป็นแบบสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ภายนอกที่จะซิงโครไนซ์กับตำแหน่งของโรเตอร์ มอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านมักจะมีประสิทธิภาพประมาณ 85-90% และสูงได้ถึง 96.5% ในขณะที่มอเตอร์กระแสตรงที่ใช้แปรงถ่านมักจะมีประสิทธิภาพเพียง 75-80% เท่านั้น

รูปคลื่นสี่เหลี่ยมคางหมูของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน ซึ่งเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับจะได้บางส่วนมาจากขดลวดของสเตเตอร์ และบางส่วนได้จากการจัดตำแหน่งของแม่เหล็กถาวรของ โรเตอร์ ฮอลล์เซ็นเซอร์จะถูกติดตั้งอยู่บนขดลวดของสเตเตอร์เพื่อการตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ เพื่อให้วงจรควบคุมจ่ายกระแสให้ขดเฟสของขดลวดชุดใดชุดหนึ่งหรือมากกว่าหนึ่งชุดเพื่อให้โรเตอร์ หมุนตามความเร็วที่ต้องการมอเตอร์กระแสตรง ที่มีตัวสับเปลี่ยนแบบอิเล็กทรอนิกส์จะเป็นเหมือนมอเตอร์กระแสตรง ที่เอาข้างในออกข้างนอก

มอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน ถูกใช้กันโดยทั่วไปในที่สุดซึ่งการควบคุมความเร็วอย่างแม่นยำเป็นสิ่งจำเป็น อย่างเช่น ในดิสก์ไดรฟ์ของเครื่องคอมพิวเตอร์หรือเครื่องบันทึกวีดิโอเทป, ไดร์ฟภายใน CD, CD-ROM และกลไกภายในผลิตภัณฑ์สำนักงาน เช่น พัดลม เครื่องพิมพ์เลเซอร์และเครื่องถ่ายเอกสาร พวกมันมีข้อดีหลายอย่างมากกว่ามอเตอร์ธรรมดา เช่น

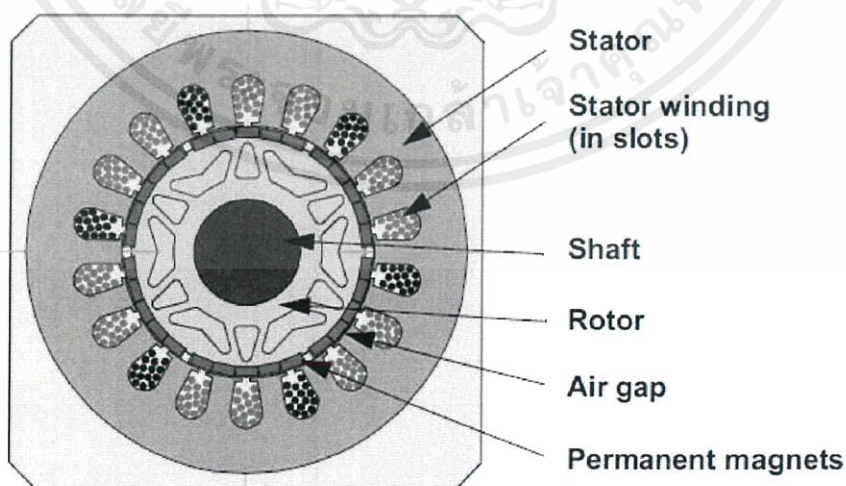
1. เมื่อเทียบกับพัดลม โดยใช้มอเตอร์ กระแสสลับทั่วไป มอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านมีขดลวดอยู่บนสเตเตอร์ที่ติดอยู่กับโครงสร้างของมอเตอร์ ทำให้การระบายอากาศทำได้จากภายนอก การทำงานในอากาศที่เย็นจึงทำให้มีประสิทธิภาพมากกว่า ตัวมอเตอร์สามารถทำเป็นโครงสร้างปิด ทำให้ไม่มีฝุ่นละอองผ่านเข้าไปได้ ทำให้สามารถควบคุมการทำงานได้แม่นยำตลอดอายุการใช้งาน

2. เนื่องจากไม่มีตัวสับเปลี่ยนที่สึกหรอได้ อายุการใช้งานของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านจึงยาวนานกว่ามอเตอร์ที่ใช้แปรงถ่านและตัวสับเปลี่ยนอย่างมีนัยสำคัญ ตัวสับเปลี่ยนยังสร้างคลื่นรบกวนและเมื่อไม่มีตัวสับเปลี่ยนและแปรงถ่าน มอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านอาจถูกใช้ในอุปกรณ์ที่ไวต่อสัญญาณไฟฟ้า เช่น เครื่องเสียงและคอมพิวเตอร์

3. ฮอลล์เซ็นเซอร์ ยังสามารถใช้ส่งสัญญาณของเครื่องวัดความเร็วสำหรับการควบคุมแบบวงรอบปิด รวมทั้งให้สัญญาณแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับของความเร็วที่มอเตอร์กำลังหมุนอยู่

2.5 โครงสร้างและหลักการของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

มอเตอร์กระแสตรงแบบทั่วไปหรือแบบธรรมดาที่มีประสิทธิภาพสูง และคุณลักษณะที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นเซอร์โวมอเตอร์ อย่างไรก็ตามมอเตอร์กระแสตรง ยังมีจุดบกพร่องตรงที่ต้องใช้คอมมิวเตเตอร์และแปรงถ่าน ทำให้ดูแลรักษาและซ่อมบำรุงบ่อยครั้ง เมื่อหน้าที่ของคอมมิวเตเตอร์และแปรงถ่านถูกแทนด้วย Solid-State Switch ก็คือ ทรานซิสเตอร์ 3 ชุด ทำให้เราไม่จำเป็นต้องบำรุงรักษา มอเตอร์เหล่านี้ก็คือมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน



รูปที่ 2.2 ภาพตัดขวางของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

ในมอเตอร์กระแสตรงอาร์มาเจอร์ คือ โรเตอร์ และสนามแม่เหล็กจะอยู่ที่สเตเตอร์ โครงสร้างของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านจะออกแบบยาก การสร้างมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านสมัยใหม่จะเหมือนกับมอเตอร์กระแสตรง ที่รู้จักกันคือ Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) ขดลวดอาร์มาเจอร์จะอยู่ที่สเตเตอร์ และโรเตอร์ประกอบด้วยแม่เหล็กถาวร 1 คู่ขั้ว หรือหลายคู่ขั้วก็ได้การพันในขดลวดมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน จะเหมือนกันในมอเตอร์กระแสสลับหลายเฟส แต่โดยมากจะพันขดลวด 3 ชุด (ชุดละเฟส) หรือ 3 เฟสนั่นเอง และจะทำการกระตุ้นที่ละคู่ มอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน จะมีการตรวจสอบตำแหน่งส่วนที่หมุนของโรเตอร์ (หรือขั้วแม่เหล็ก) โดยการกำหนดสัญญาณเพื่อควบคุมสวิตช์ อิเล็กทรอนิกส์ โดยส่วนมากจะติดตั้ง 1 ตำแหน่งต่อขั้ว ในการตรวจจับอุปกรณ์ที่ใช้ คือ Hall Sensor แต่มอเตอร์บางตัวอาจใช้ Optical Sensor คือ โฟโตทรานซิสเตอร์ เป็นตัวตรวจจับมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

2.6 วิธีการควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

ลักษณะการต่อมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน ปกติแล้วจะมีอุปกรณ์ในการตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์แบบปรากฏการณ์ฮอลล์ ลักษณะการนำไปใช้งานประเภทนี้จะต้องประกอบไปด้วยวงจรควบคุมสำหรับขับเคลื่อนอินเวอร์เตอร์สามเฟส แต่ยังมีอีกวิธีสำหรับขับเคลื่อนโดยไม่ต้องอาศัยการตรวจจับตำแหน่ง โดยใช้แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับมาควบคุม ดังจะกล่าวต่อไปนี้

2.6.1 การควบคุมความเร็วแบบตัวตรวจจับตำแหน่ง

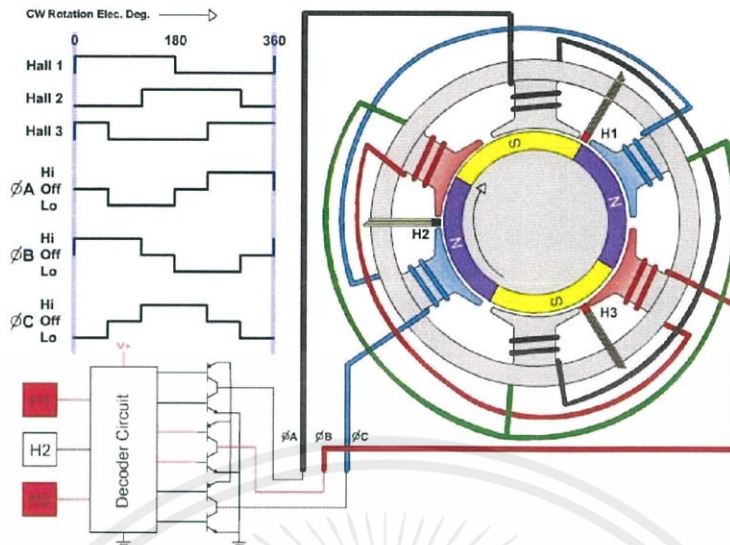
การควบคุมความเร็วรอบโดยอาศัยตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์แบบปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Sensor) เป็นไดอะแกรมของลักษณะการต่อควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ อาศัยตัวตรวจจับปรากฏการณ์ฮอลล์เพื่อเป็นตัวควบคุมความเร็วมอเตอร์

2.6.2 การควบคุมความเร็วแบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์

ในการควบคุมความเร็วรอบที่ผ่านมาเป็นแบบอาศัยตัวตรวจจับตำแหน่ง ส่วนการควบคุมความเร็วรอบแบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่ง ที่ใช้แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับสำหรับการคำนวณตำแหน่งโรเตอร์ และความเร็วรอบ

2.7 กลไกการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

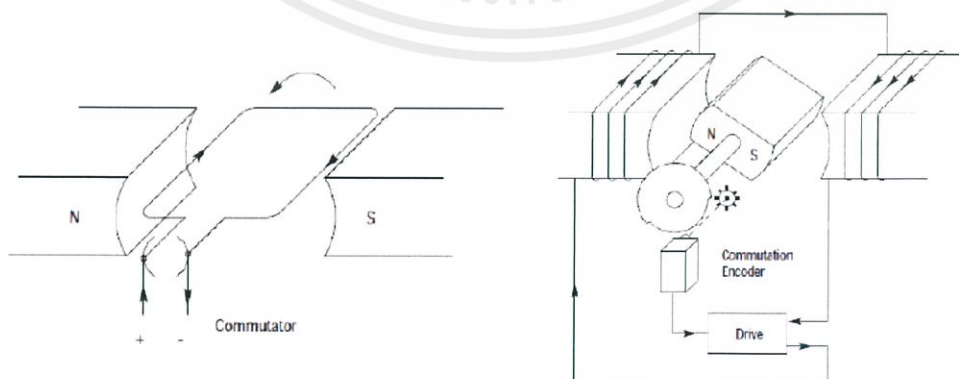
โดยทฤษฎีแล้วในเครื่องจักรกลกระแสตรง ตำแหน่งของขดลวดสนามและของขดลวดอาร์มาเจอร์อาจจะกลับกันได้ กล่าวคือ ขดลวดสนามอยู่บนโรเตอร์ และขดลวดอาร์มาเจอร์อยู่บนสเตเตอร์ก็ได้ อย่างไรก็ตามมอเตอร์กระแสตรงไม่มีแปรงถ่านจะใช้ตัววัดตำแหน่งของโรเตอร์ (Hall Sensor) และอินเวอร์เตอร์ในการควบคุมกระแสในขดลวดสเตเตอร์ ดังนั้นตัววัดตำแหน่งของโรเตอร์และสวิตช์ซิลิคอนเตตกำลังในอินเวอร์เตอร์จะทำหน้าที่เหมือนกับแปรงถ่านและคอมมิวเตเตอร์ทางกลของมอเตอร์กระแสตรง



รูปที่ 2.3 การทำงานของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

มาตรฐานความเร็วของสนามแม่เหล็กของสเตเตอร์จะเท่ากับความเร็วของโรเตอร์ตลอดเวลา (Synchronism) เนื่องจากความถี่ของการตัดต่อของสวิตช์โซลิตสเตตกำลังถูกควบคุมให้เท่ากับความเร็วของโรเตอร์โดยอัตโนมัติ เพราะวารับสัญญาณจากตัววัดตำแหน่งของโรเตอร์

จริงๆ แล้วมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน เป็นวิวัฒนาการของมอเตอร์กระแสตรงแบบใช้แปรงถ่านที่มีข้อจำกัดทางด้านการใช้วิธีการคอมมิวเตชันทางกล (Mechanical Commutation) ซึ่งทำให้มีปัญหาในการทำให้เกิดประกายไฟและเกิดการสึกหรอจากการคอมมิวเตชัน ซึ่งไม่เหมาะกับการนำไปใช้งานที่ต้องหลีกเลี่ยงประกายไฟและต้องมีเวลาในการซ่อมบำรุงที่แน่นอนด้วยความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ได้เปลี่ยนวิธีการคอมมิวเตชันทางกลเป็นการคอมมิวเตชันโดยใช้เทคโนโลยีทางอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Commutation) ซึ่งไม่มีส่วนของการสัมผัสทางกลและนี่ก็คือที่มาของคำว่า “ไร้แปรงถ่าน” ซึ่งแสดงให้เห็นได้ชัดดังรูปข้างล่าง



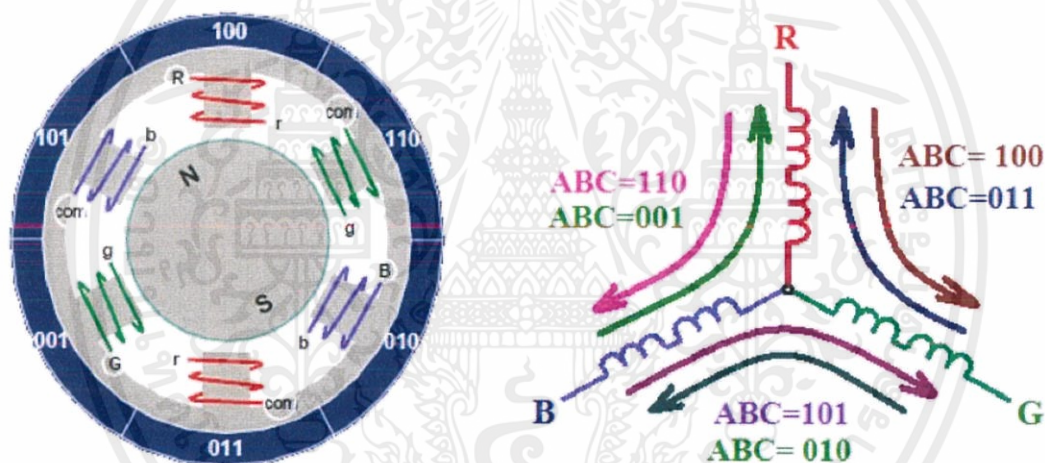
รูปที่ 2.4 มอเตอร์กระแสตรงและมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปเป็นการเปรียบเทียบให้เห็นได้อย่างชัดเจนระหว่างมอเตอร์กระแสตรงแบบใช้แปรงถ่าน (Brush DC Motor) กับมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน (Brushless DC Motor)

2.8 การสร้างชุดขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบขดลวด 3 ชุด

ปัจจุบันมอเตอร์ดีซีแบบไร้แปรงถ่านที่ผลิตออกมาใช้กันมากจะเป็นแบบที่ประกอบด้วยชุดขดลวดอยู่กับที่ 3 ชุดต่อกันแบบสตาร์ แต่ละชุดจะวางทำมุมกัน 120 องศา ทางไฟฟ้าส่วนตัวหมุนซึ่งใช้แม่เหล็กถาวรจะมีคู่ (Polepairs) นั้นขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ออกแบบ คุณลักษณะของมอเตอร์ให้ตอบสนองทางด้านแรงบิดและความเร็วของมอเตอร์ รูปข้างล่างแสดงให้เห็นถึงองค์ประกอบของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านที่ประกอบด้วยชุดขดลวดอยู่กับที่ 3 ชุดและตัวหมุนเป็นแม่เหล็กถาวร 1 คู่ (1 Polepairs) และแสดงการสลับทิศทางการไหลของกระแสในขดลวดแต่ละชุดจะเป็นไปตามตำแหน่งของตัวหมุนซึ่งใช้ฮอลล์เซ็นเซอร์เป็นตัวชี้ตำแหน่ง



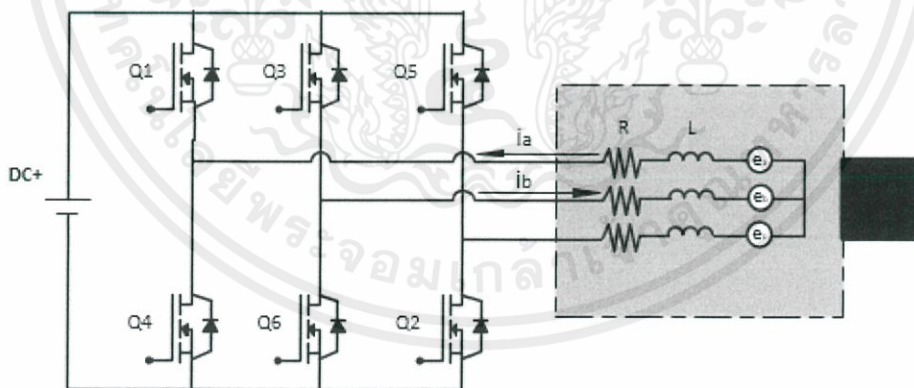
รูปที่ 2.5 ลำดับการคอมมิวเตชันใน 1 รอบทางไฟฟ้า

2.9 การควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์แบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์

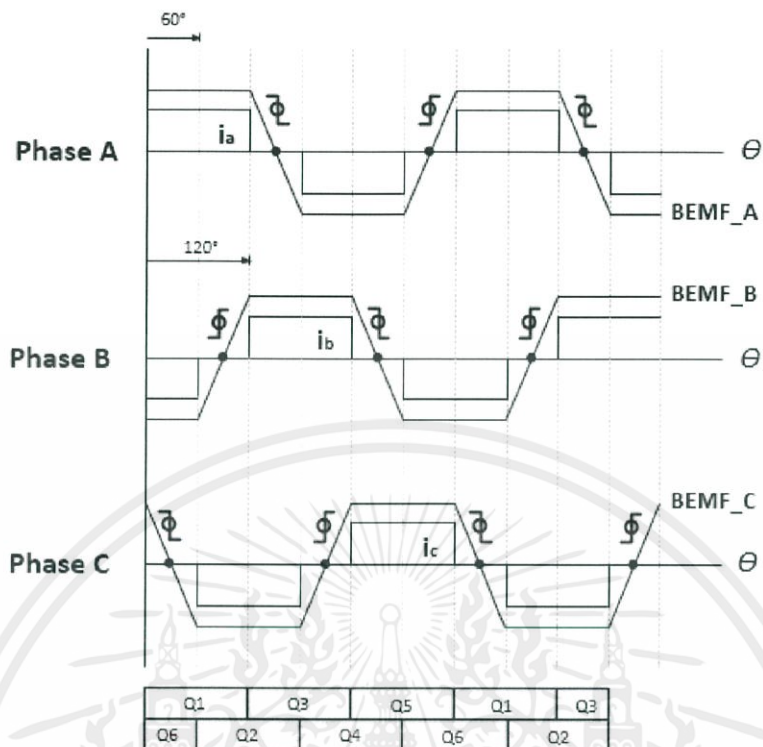
ระบบขับเคลื่อนความเร็วรอบแบบปราศจากตัวตรวจจับประกอบด้วย 4 ภาคส่วน ส่วนที่หนึ่ง อินเวอร์เตอร์กำลังไฟฟ้า 3 เฟสที่ใช้อุปกรณ์สวิตชิงมอสเฟตกำลังในการเรียงกระแสไฟฟ้า ในแต่ละคู่เฟสทำงานแบบอินเวอร์เตอร์ขั้นบันไดหกระดับ ส่วนที่สองวงจรตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ อาศัยความสัมพันธ์ของคาบเวลาการเกิดจุดตัดผ่านศูนย์โดยอุปกรณ์ออปแอมป์เปรียบเทียบแรงดันอ้างอิง ส่วนที่สามวงจรตรวจจับกระแสป้องกันแรงดันเกินสำหรับการควบคุมการทำงานแบบวงรอบปิดให้มีประสิทธิภาพ และส่วนที่สี่วงจรควบคุมประมวลผลระบบดิจิทัล ซึ่งเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ เป็นอุปกรณ์ควบคุมสัญญาณในการขับเคลื่อนมอเตอร์

2.10 ลักษณะโหมดการทำงานจากระบบขับเคลื่อนมอเตอร์

ลักษณะการขับเคลื่อนอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสประกอบไปด้วยสวิทช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังกำลัง 6 ตัว คือสวิทช์ Q1 และ Q4 ต่ออยู่กับเอาต์พุตเฟสที่ 1 (L1) สวิทช์ Q3 และ Q6 ต่อกับเอาต์พุตเฟสที่ 2 (L2) และสวิทช์ S5 และ S2 ต่อกับเอาต์พุตเฟสที่ 3 (L3) โหลดทางไฟฟ้าชนิด 3 เฟส จะต่อด้านเอาต์พุตที่ขั้ว L1,L2 และ L3 สัญญาณสำหรับควบคุมการเปิด-ปิดสวิทช์ Q1 ถึง Q6 สามารถควบคุมให้สวิทช์แต่ละตัวทำงานได้ 2 แบบคือ แบบนำกระแส 180 องศา (180° Conduction) และแบบนำกระแส 120 องศา (120° Conduction) สวิทช์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในวงจรในรูปที่ 2.7 คือ มอสเฟต (Q1 ถึง Q6) และไดโอด (D1 ถึง D6) ซึ่งการทำงานของอินเวอร์เตอร์ทั้ง 2 แบบ มีแต่วิธีขับเคลื่อนจะใช้เทคนิคนำกระแส 120 องศา ควบคุมให้สวิทช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังแต่ละตัวนำกระแสแต่ละ 120 องศา โดยใช้สัญญาณควบคุมการเปิด-ปิดเกตของมอสเฟตตามลำดับ Q1 ถึง Q6 ดังรูปที่ 2.6 จะพบว่ามอสเฟต 2 ตัวทำงานพร้อมกันในแต่ละช่วงตามลำดับดังนี้คือ Q1Q6, Q1Q2, Q3Q2, Q3Q4, Q5Q4, Q5Q6 และ Q1Q6 จึงได้รูปคลื่นแรงดันคร่อมโหลดระหว่างเฟส V1N, V2N และ V3N ลักษณะโหมดการทำงานจากระบบขับเคลื่อนสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน ซึ่งแสดงในทิศทางของการขับเคลื่อนแบบสัญญาณสี่เหลี่ยม 120 องศา ในแต่ละระดับการควบคุมดังตารางที่ 2.2 แต่ละขั้นของการสับเปลี่ยนของมอสเฟตและแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับของแต่ละเฟสที่เกิดจากการขับเคลื่อนสัญญาณเกตของมอสเฟตแต่ละกิ่งสำหรับชุดกำลังอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ในรูปที่ 2.7 สำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์



รูปที่ 2.6 วงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์ต่อโหลดแบบสตาร์



รูปที่ 2.7 กระแสไฟฟ้าและแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับในแต่ละระดับการควบคุมตามสัญญาณขับเคลื่อนเกิดตามตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สัญญาณที่ใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์แบบสัญญาณสี่เหลี่ยม 120 องศา

Section	Q ₁	Q ₃	Q ₅	Q ₄	Q ₆	Q ₂	U _{as}	U _{bs}	U _{cs}
1	1	0	0	0	1	0	U _{dc} /2	-U _{dc} /2	0
2	1	0	0	0	0	1	U _{dc} /2	0	-U _{dc} /2
3	0	1	0	0	0	1	0	U _{dc} /2	-U _{dc} /2
4	0	1	0	1	0	0	-U _{dc} /2	U _{dc} /2	0
5	0	0	1	1	0	0	-U _{dc} /2	0	U _{dc} /2
6	0	0	1	0	1	0	0	-U _{dc} /2	U _{dc} /2

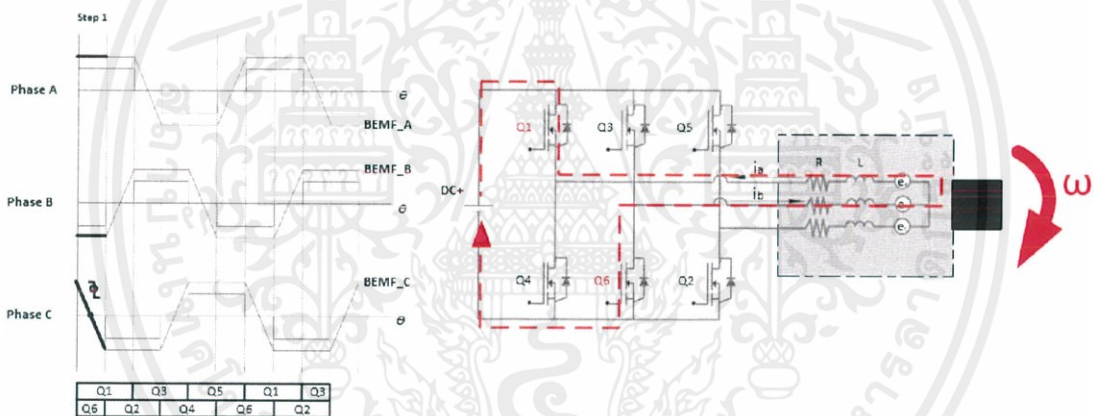
หมายเหตุ 1 คือ สวิตซ์ทำงาน 0 คือ สวิตซ์ไม่ทำงาน

จากตารางที่ 2.2 แสดงสัญญาณการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบสัญญาณสี่เหลี่ยม 120 องศาสามารถแสดงรูปสัญญาณแรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสไฟฟ้าแต่ละเฟส ตามตำแหน่งของการสับเปลี่ยนทางเดินกระแสไฟฟ้าแต่ละกิ่งของชุดควบคุมอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ดังรูปที่ 2.7

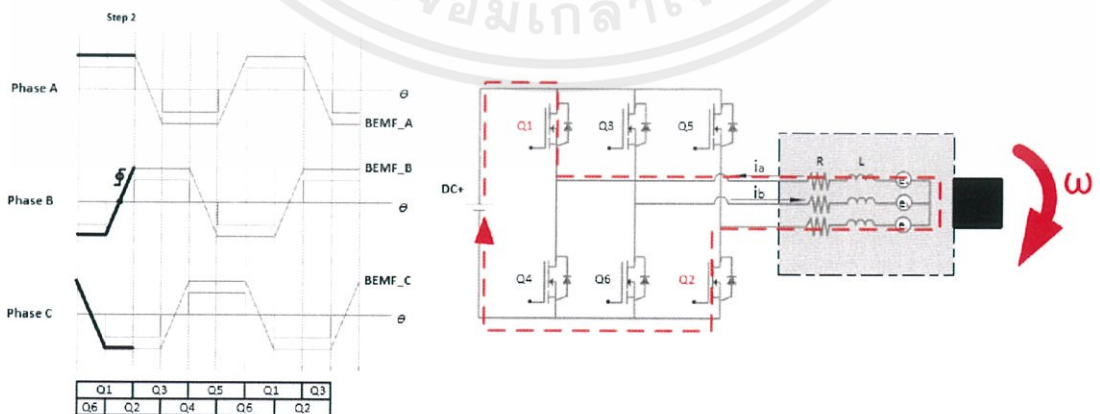
แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในแต่ละเฟสจะห่างกัน 120 องศา มีมูมนำกระแส 120 องศา จากวิธีการขับเคลื่อนอินเวอร์เตอร์แบบ 6 ลำดับ (Six Step Inverter) จะประกอบไปด้วยสัญญาณขับเกตที่ห่างกัน 60 องศา ในแต่ละลำดับคู่สวิตช์ Q1Q6, Q1Q2, Q3Q2, Q3Q4, Q5Q4, Q5Q6 และ Q1Q6

2.11 ลำดับการทำงานของอินเวอร์เตอร์แบบสัญญาณสี่เหลี่ยม 120 องศา

ทิศทางการสับเปลี่ยนสวิตช์ทางเดินของกระแสไฟฟ้าตามรูปแบบการขับเคลื่อนแบบสัญญาณสี่เหลี่ยม 120 องศา แต่ละขั้นการสับเปลี่ยนสวิตช์จะเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับและกระแสไฟฟ้าแต่ละคู่เฟส โดรนจะกล่าวถึงลำดับการทำงานทั้ง 6 ลำดับการสวิตช์แสดงในรูปที่ 2.8 – 2.13 ตามลำดับการสับเปลี่ยนทิศทางการของกระแสไฟฟ้าควบคุมมอเตอร์ ที่จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับแต่ละเฟส และตำแหน่งที่เกิดซีโรครอสซึ่งเมื่อมอเตอร์ทำงานตามสัญญาณขับพีดีบีเอ็ม สำหรับค้นหาตำแหน่งของโรเตอร์ที่เกิดขึ้น จะแสดงลักษณะขั้นตอนการทำงานดังรูปต่อไปนี้

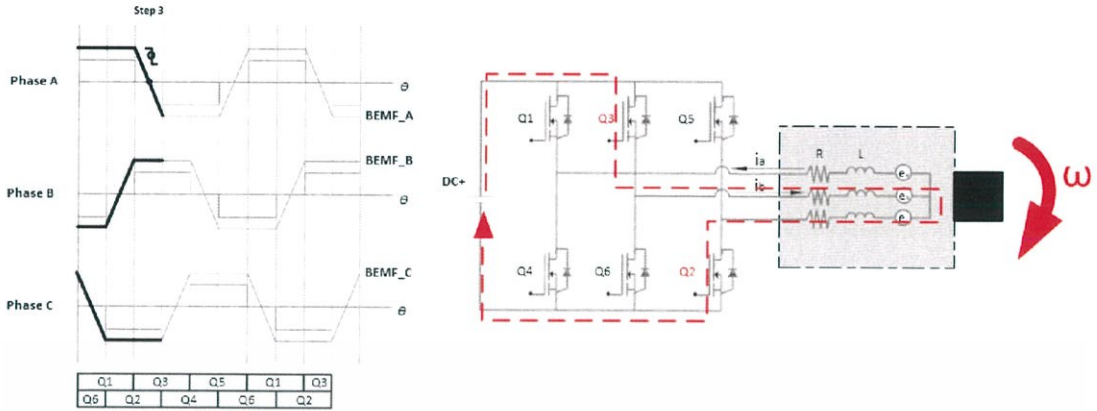


รูปที่ 2.8 กระแสไฟฟ้าและแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับเมื่อมอเตอร์ (Q1, Q6) ทำงาน

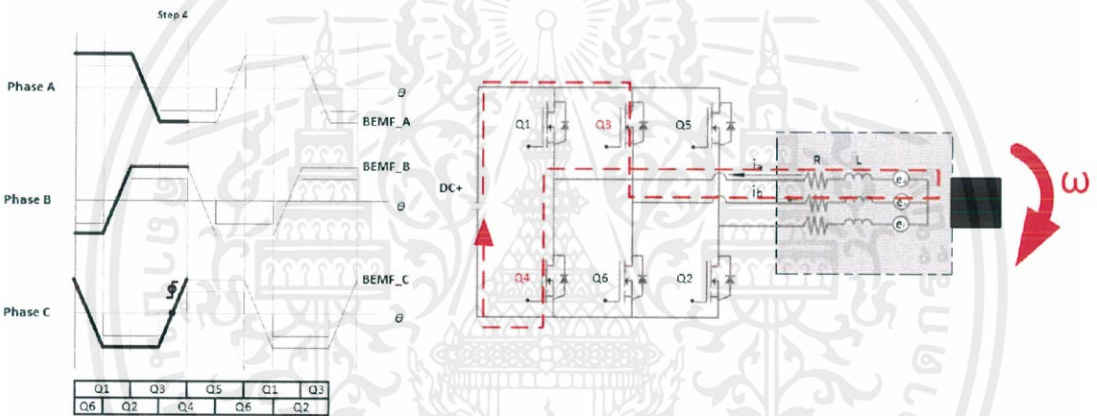


รูปที่ 2.9 กระแสไฟฟ้าและแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับเมื่อมอเตอร์ (Q1, Q2) ทำงาน

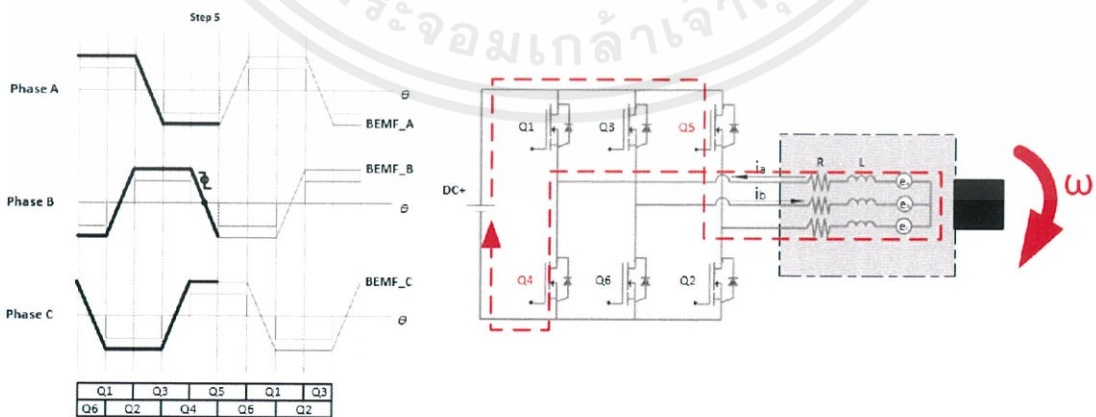
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 กระแสไฟฟ้าและแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับเมื่อมอสเฟต (Q3, Q2) ทำงาน

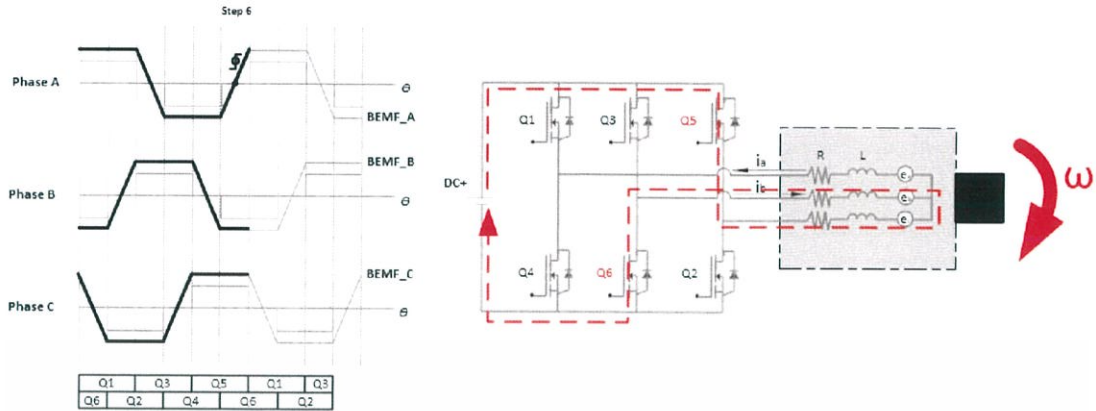


รูปที่ 2.11 กระแสไฟฟ้าและแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับเมื่อมอสเฟต (Q3, Q4) ทำงาน



รูปที่ 2.12 กระแสไฟฟ้าและแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับเมื่อมอสเฟต (Q5, Q4) ทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

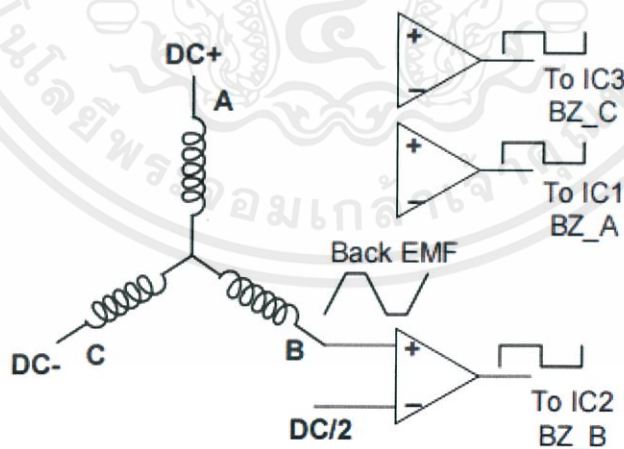


รูปที่ 2.13 กระแสไฟฟ้าและแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับเมื่อมอเตอร์ (Q5, Q6) ทำงาน

2.12 วิธีการตรวจจับสนแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ

2.12.1 แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับเปรียบเทียบกับแรงดันครึ่งหนึ่งของแรงดันดีซี (DC/2)

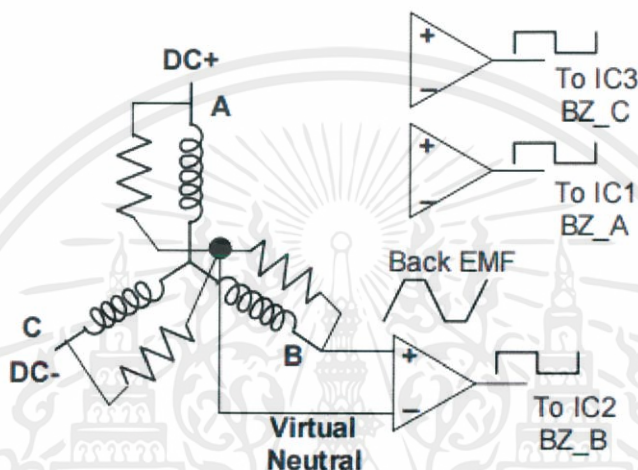
วิธีการเปรียบเทียบแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับแรงดันครึ่งหนึ่งของแรงดันดีซีบัส (DC/2) โดยเฟส A จะถูกต่อกับแรงดันด้านบวกทางด้านแหล่งจ่าย (DC+) เฟส C จะถูกต่อกับทางด้านลบ (DC-) และเฟส B จะเปิดวงจรอยู่ แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับจะถูกป้อนให้กับเฟส B โดยแรงดันที่ได้เปรียบเทียบกับจุดกึ่งกลางของแรงดัน (DC/2) จะทำให้ได้สัญญาณแรงดันที่ตัดจุดกึ่งกลางของแรงดันเฟส A-C ได้ วิธีนี้จะง่ายเพียงแค่อุปกรณ์ออปแอมป์เปรียบเทียบดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับเทียบกับครึ่งหนึ่งของแรงดันดีซี (DC/2)

2.12.2 แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับเทียบกับจุดนิวตรอนเสมือน

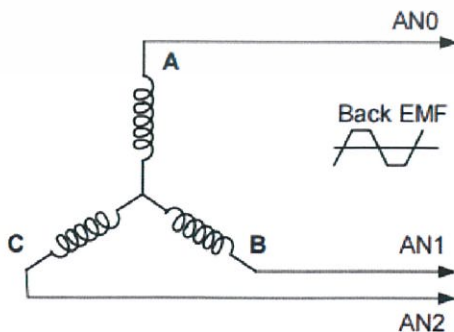
การตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับด้วยการเปรียบเทียบกับจุดนิวตรอนเสมือน โดยการนำเอาความต้านทานมาต่อเป็นแบบสตาร์ ค่าความต้านทานมีความสำคัญมากในการออกแบบ มีผลต่อกระแสของมอเตอร์ ในกรณีนี้แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับจะถูกเปรียบเทียบกับจุดนิวตรอนเสมือนแล้วจะส่งสัญญาณการเปลี่ยนแปลงออกเป็น ต่ำ-สูง ใช้ในการเรียงลำดับการขับเคลื่อนมอเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับเทียบกับจุดนิวตรอนเสมือน

2.12.3 แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับตรวจจับด้วยอนาล็อกเปลี่ยนเป็นดิจิตอล

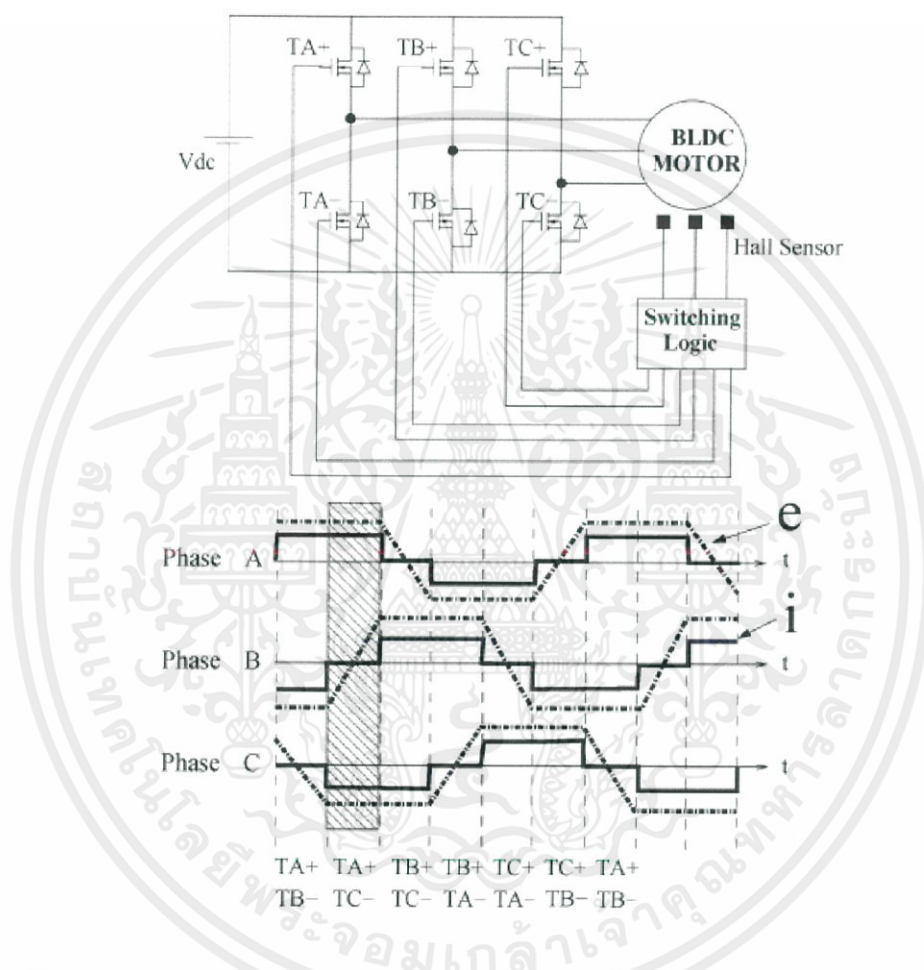
การตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับโดยอาศัยความสามารถของ ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณอนาล็อกเปลี่ยนเป็นดิจิตอลสูง (High-speed A/D) โดยสัญญาณตัวอย่างที่ได้จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าดิจิตอลที่จุดตัดผ่านศูนย์อย่างเหมาะสม ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับตรวจจับด้วยอนาล็อกเปลี่ยนเป็นดิจิตอล

2.12.4 การตรวจจับสัญญาณผ่านศูนย์ของแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับจากผลต่างแรงดันระหว่างขั้ว

เมื่อพิจารณามอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านซึ่งมีขดลวดสามเฟสต่อแบบสตาร์ และมีแม่เหล็กถาวรยึดอยู่กับโรเตอร์ มอเตอร์ชนิดนี้ถูกขับด้วยอินเวอร์เตอร์สามเฟสซึ่งถูกกำหนดลำดับในการทำงานจากตำแหน่งของโรเตอร์ซึ่งถูกแสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 การทำงานของวงจรควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านและกระแสเฟสและแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ

โดยสมการของแรงดันเฟส A เมื่อเทียบกับจุดสตาร์ของขดลวดสเตเตอร์ถูกแสดงในสมการที่ (2.3)

$$V_{an} = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + e_{an} \quad (2.3)$$

โดย R_a คือค่าความต้านทานสเตเตอร์, L_a คือค่าความเหนี่ยวนำเฟส, e_{an} คือแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ และ i_a คือกระแสที่ไหลในเฟส A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทำนองเดียวกัน สมการของแรงดันเฟส B และเฟส C สามารถแสดงในสมการที่ (2.4), (2.5)

$$V_{bn} = R_b i_b + L_b \frac{di_b}{dt} + e_{bn} \quad (2.4)$$

$$V_{cn} = R_c i_c + L_c \frac{di_c}{dt} + e_{cn} \quad (2.5)$$

จากสมการแรงดันเฟสข้างต้น สามารถหาค่าแรงดันระหว่างขั้วโดย

$$V_{ab} = V_{an} - V_{bn} = R(i_a - i_b) + L \frac{d(i_a - i_b)}{dt} + e_{an} - e_{bn} \quad (2.6)$$

ในทำนองเดียวกัน

$$V_{bc} = R(i_b - i_c) + L \frac{d(i_b - i_c)}{dt} + e_{bn} - e_{cn} \quad (2.7)$$

$$V_{ca} = R(i_c - i_a) + L \frac{d(i_c - i_a)}{dt} + e_{cn} - e_{an} \quad (2.8)$$

แรงดันระหว่างขั้วเหล่านี้สามารถหาค่าได้โดยไม่ต้องวัดค่าแรงดันเทียบกับจุดสตาร์ของขดลวดด้วยการวัดผลต่างของแรงดันระหว่างขั้ว

เมื่อนำแรงดันระหว่างขั้วในสมการที่ (2.6) ลบออกจากสมการที่ (2.7) จะได้

$$V_{abbc} = R(i_a - 2i_b + i_c) + L \frac{d(i_a - 2i_b + i_c)}{dt} + e_{an} - 2e_{bn} + e_{cn} \quad (2.9)$$

เมื่อพิจารณาในช่วงที่เฟส A และเฟส C นำกระแส และเฟส B นั้นเปิดวงจรตามส่วนที่แรงงาในรูปที่ 1 ในช่วงเวลานี้ขดลวดเฟส A ถูกต่อกับบัสแรงดันด้านบวกของแหล่งจ่ายกระแสตรง เฟส C ถูกต่อกับบัสแรงดันด้านลบ และเฟส B ถูกเปิดวงจร ดังนั้น $i_a = -i_c$ และ $i_b = 0$ จากส่วนที่แรงงาในรูปที่ 1 จะเห็นได้ว่าแรงดันไฟฟ้าต้านกลับของเฟส A และเฟส C มีขนาดเท่ากัน แต่ทิศตรงข้ามกัน ดังนั้นสมการของผลต่างแรงดันระหว่างขั้วในช่วงเวลานี้สามารถแสดงได้ดังนี้

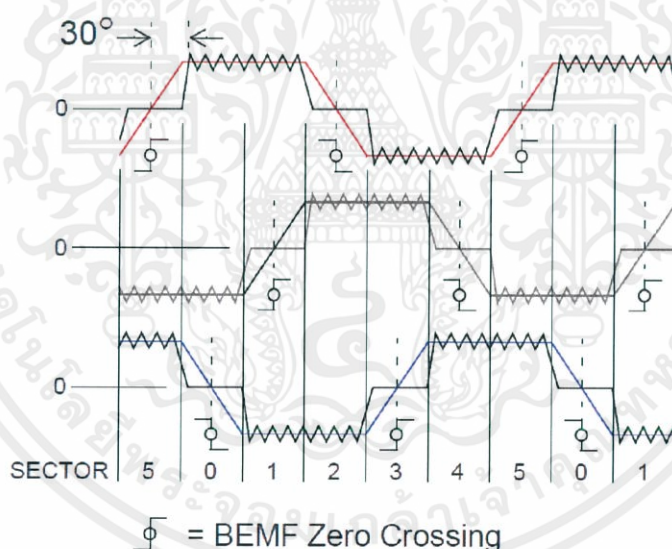
$$V_{abbc} = V_{ab} - V_{bc} = e_{an} - 2e_{bn} + e_{cn} = -2e_{bn} \quad (2.10)$$

รูปคลื่นผลต่างแรงดันระหว่างขั้วนั้นจะกลับด้านกับรูปคลื่นของแรงดันต้านกลับและมีขนาดเป็นสองเท่า จากรูปที่ 1 ในช่วงที่แรงงา แรงดันต้านกลับ e_{bn} เปลี่ยนจากด้านลบไปยังด้านบวกเกิดสัญญาณผ่านศูนย์ (Zero Crossing) ดังนั้นจะได้ว่าผลต่างแรงดันระหว่างขั้ว $V_{ab} - V_{bc} = (V_{abbc})$ สามารถนำมาใช้ตรวจจับสัญญาณผ่านศูนย์ของแรงดันต้านกลับเฟส B ได้ และในทำนองเดียวกัน V_{bcca} และ V_{caab} ก็สามารนำมาใช้ตรวจจับสัญญาณผ่านศูนย์ของแรงดันต้านกลับของเฟส C และเฟส A ได้ตามลำดับ

2.13 วิธีการทำงานและวิเคราะห์แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ

พิจารณามอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน (BLDC) มีโครงสร้างหลักๆ สามส่วนคือ ส่วนที่หนึ่ง สเตเตอร์ (Stator) ประกอบด้วยขดลวดอามาเจอร์ที่ต่ออยู่แบบสตาร์ ส่วนที่สองโรเตอร์ (Rotor) ประกอบด้วยแม่เหล็กถาวรและส่วนสุดท้ายคือ ตัวตรวจจับตำแหน่งขั้วแม่เหล็ก (Hall sensor) ซึ่งการขับเคลื่อนจะใช้อินเวอร์เตอร์สามเฟสร่วมกับอุปกรณ์ตรวจจับตำแหน่งขั้วแม่เหล็ก โดยใช้เทคนิคแบบสัญญาณสี่เหลี่ยม 120 องศา เพื่อให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับแล้วนำสัญญาณแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับตรวจสอบตำแหน่งจุดซีโรครอสซึ่ง สำหรับใช้คำนวณหาตำแหน่งโรเตอร์และความเร็วมอเตอร์

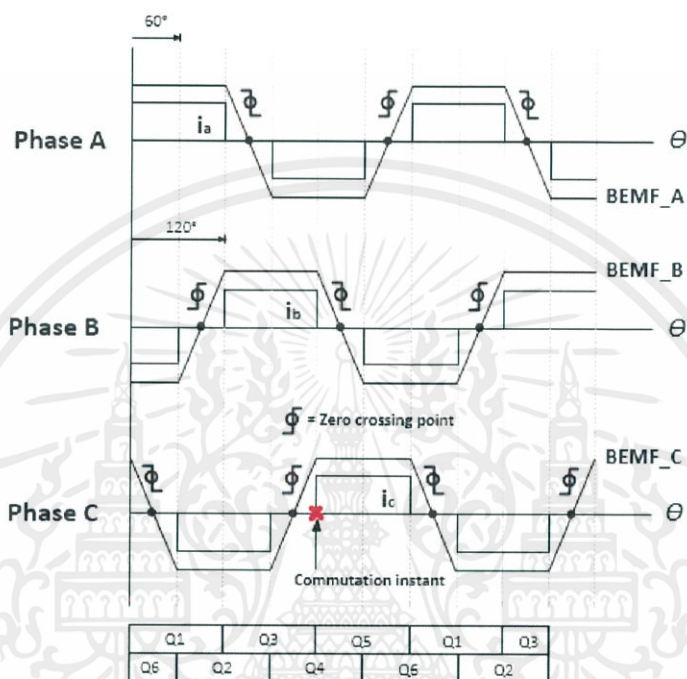
วิธีการเปรียบเทียบแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับและแรงดันครึ่งหนึ่งของแรงดันดีซีบัส (DC/2) ในหนึ่งลูกคลื่นทางไฟฟ้าบริเวณจุดตัดผ่านศูนย์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับจะมีตำแหน่งเวลาที่เกิดก่อน 30 องศา ทางไฟฟ้าก่อนที่จะถึงการสับสวิตซ์เรียงกระแสจากจุดตำแหน่งการตรวจจับโรเตอร์จริง ทำให้การควบคุมมอเตอร์ด้วยวิธีการปราศจากตัวตรวจจับจะต้องอาศัยการกำหนดความสัมพันธ์ของเวลาการเรียงกระแสให้ตรงกับสัญญาณตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์จริง ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 จุดตัดสัญญาณ Zero Crossing ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับของมอเตอร์

ในรูปที่ 2.18 การประมาณค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับกับตำแหน่งการสวิตซ์ของกระแส โดยทั่วไปจะใช้การตรวจสอบแรงดันตัดผ่านศูนย์ (Zero Crossing) ของรูปคลื่น แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ ที่มีองค์ประกอบของฮาร์มอนิกที่สาม แรงดันฮาร์มอนิกจะมีข้อจำกัดของแอมพลิจูดและเฟสที่เปลี่ยนไปตามความถี่ของแม่เหล็ก ซึ่งจะไม่เหมาะสมกับย่านความเร็วต่ำ เนื่องจากมีแอมพลิจูดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับมีค่าต่ำ การขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยอินเวอร์เตอร์หกเฟสแบบ

นำกระแส 120 องศา แต่ระดับการสวิตช์จะมีค่า 60 องศา ดังรูปที่ 2.19 แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับที่ตัดผ่านศูนย์จะมีความสัมพันธ์กับตำแหน่งการสวิตช์ซึ่งเรียงกระแส โดยจุดตัดผ่านศูนย์จะเปรียบเทียบกับแรงดันครึ่งหนึ่งของดีซีบัส (DC/2) มีค่าที่ตรงกับตำแหน่งของจุดซีโรครอสซิง โดยมีค่ามุมทางไฟฟ้านำอยู่ 30 องศา จากจุดสัญญาณตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์จริง



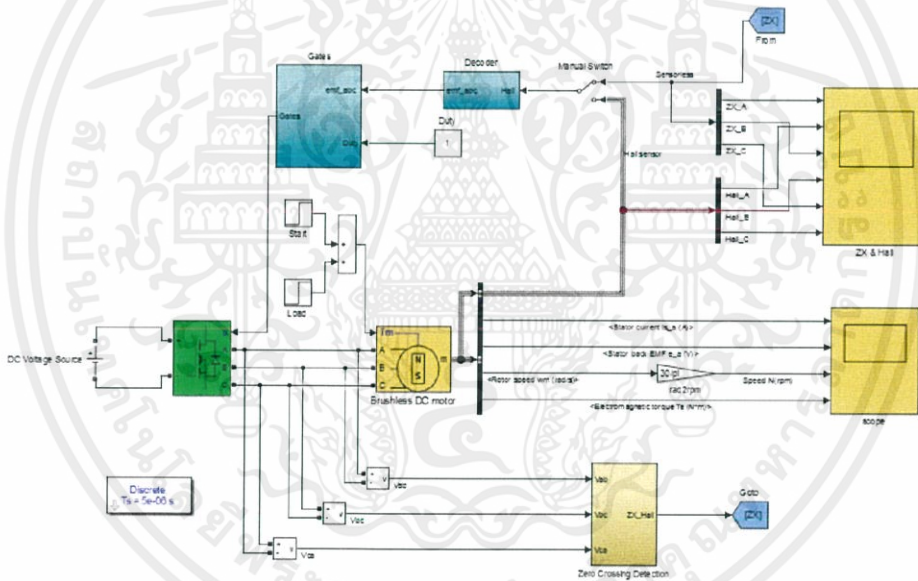
รูปที่ 2.19 เปรียบเทียบแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับกับตำแหน่งการสวิตช์ของกระแส

บทที่ 3

การจำลองการทำงานและการออกแบบ

3.1 บทนำ

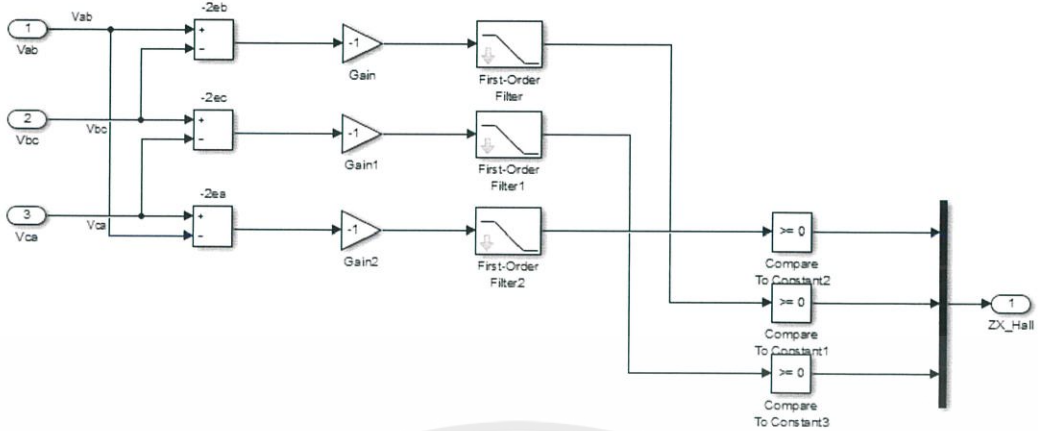
ในบทนี้จะอธิบายถึงการจำลองลักษณะการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านโดยใช้ฮอลล์เซ็นเซอร์ และแบบไม่ใช้ฮอลล์เซ็นเซอร์ โดยการจำลองการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านนี้จะใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK จำลองค่าต่างๆของพารามิเตอร์มอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านเพื่อให้ได้ผลของกราฟกระแส แรงดัน แรงบิดและความเร็วรอบเพื่อใช้ในการออกแบบระบบควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน และจำลองการทำงานของสัญญาณฮอลล์เซ็นเซอร์เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับสัญญาณที่เกิดจากการตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับที่ตัดผ่านศูนย์เพื่อนำไปออกแบบวงจรควบคุมมอเตอร์



รูปที่ 3.1 ไดอะแกรมวงจรควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่ง

จากรูปที่ 3.1 เป็นไดอะแกรมวงจรที่ใช้สำหรับควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโดยมีหลักการที่ใช้เป็นหลักการพื้นฐานของแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ ด้วยวิธีผลต่างแรงดันระหว่างขั้วซึ่งได้นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 2.11.4

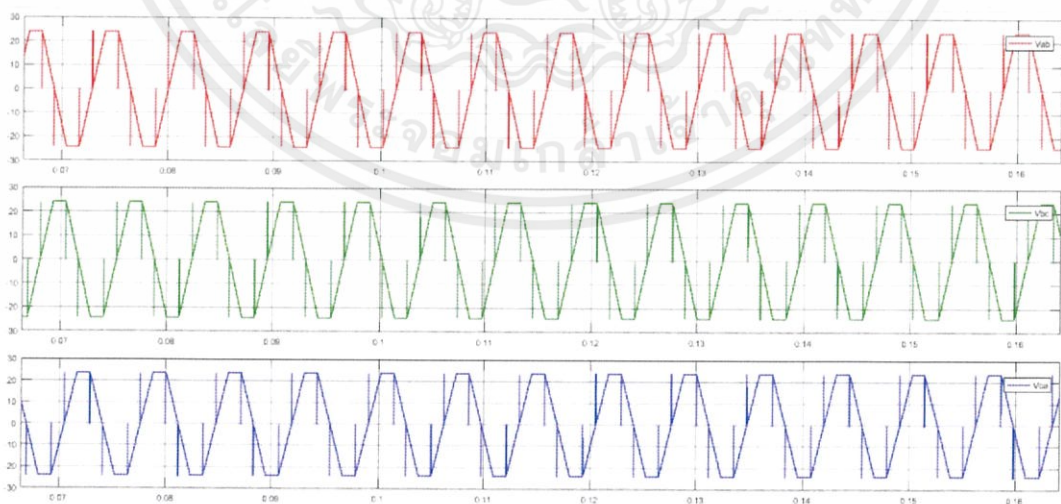
การออกแบบระบบควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านนี้เป็นการออกแบบที่ได้จากการจำลองในโปรแกรมข้างต้น และใช้พื้นฐานทางวิชาเพาเวอร์อิเล็กทรอนิกส์ช่วยในการออกแบบระบบควบคุมนี้โดยมีส่วนที่ออกแบบ แสดงดังต่อไปนี้



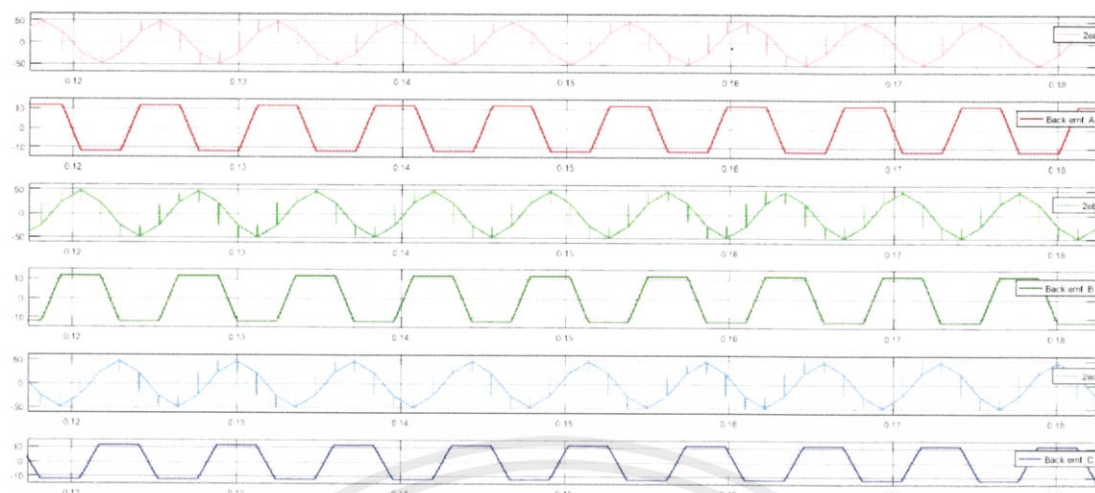
รูปที่ 3.2 ไดอะแกรมวงจรตรวจจับจุดตัดผ่านศูนย์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ

3.2 ผลการจำลอง

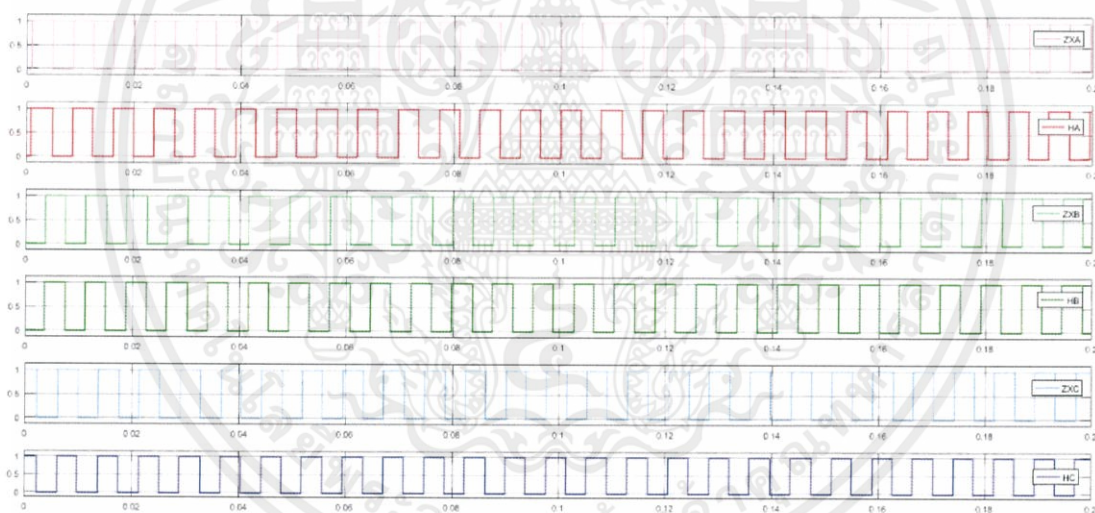
จากการจำลองการทำงานของวงจรควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ซึ่งกำหนดค่าเงื่อนไขและพารามิเตอร์ของมอเตอร์ ให้ใกล้เคียงกับอุปกรณ์จริง มีแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 24 โวลต์ จ่ายให้กับอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส โดยใช้อุปกรณ์สวิตชิงมอสเฟตกำลังความถี่สวิตชิง 5 kHz ใช้สัญญาณ PWM ควบคุมโดยใช้ค่าดิวตี้ 80% - 100% ขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน 46 ขั้วแม่เหล็ก โดยใช้วิธีผลต่างแรงดันระหว่างขั้วในการตรวจหาจุดตัดผ่านศูนย์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ และนำสัญญาณที่ได้มาใช้ในการขับเคลื่อนแทนสัญญาณที่ได้จากฮอลล์เซ็นเซอร์ โดยผลการจำลองได้แสดงในรูปที่ 3.3 - 3.8 ซึ่งจะนำไปใช้ในการสร้างชุดควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านต่อไป



รูปที่ 3.3 ผลการจำลองแรงดันระหว่างขั้วของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

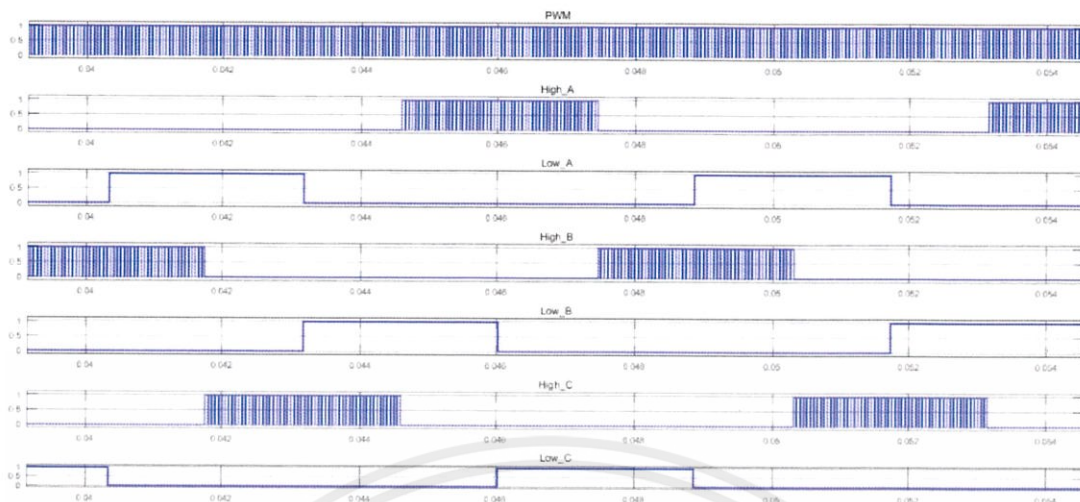


รูปที่ 3.4 ผลการจำลองการเปรียบเทียบรูปกราฟระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับในแต่ละเฟสและผลต่างแรงดันระหว่างขั้ว

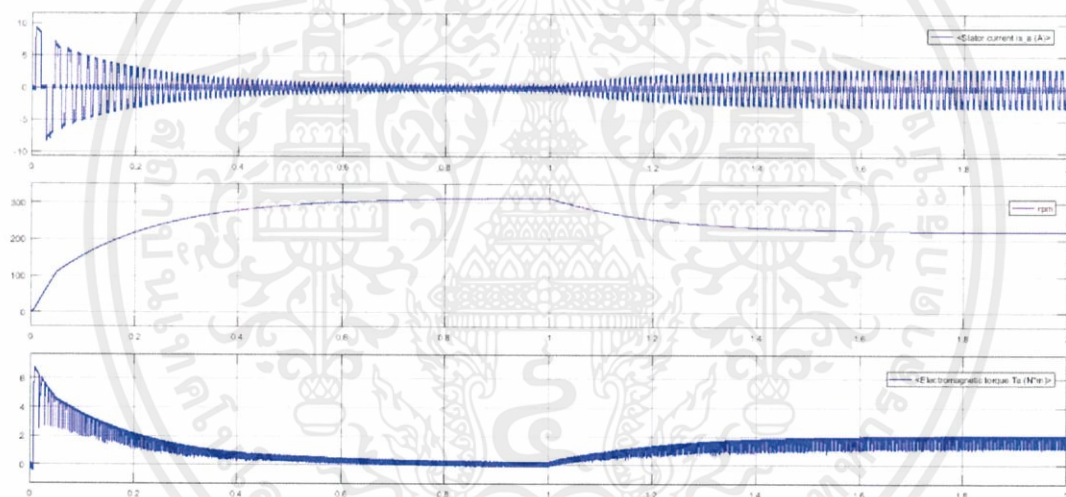


รูปที่ 3.5 ผลการเปรียบเทียบสัญญาณที่ได้จากการตรวจจับจุดตัดผ่านศูนย์ และสัญญาณที่ได้จากฮอลล์เซ็นเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

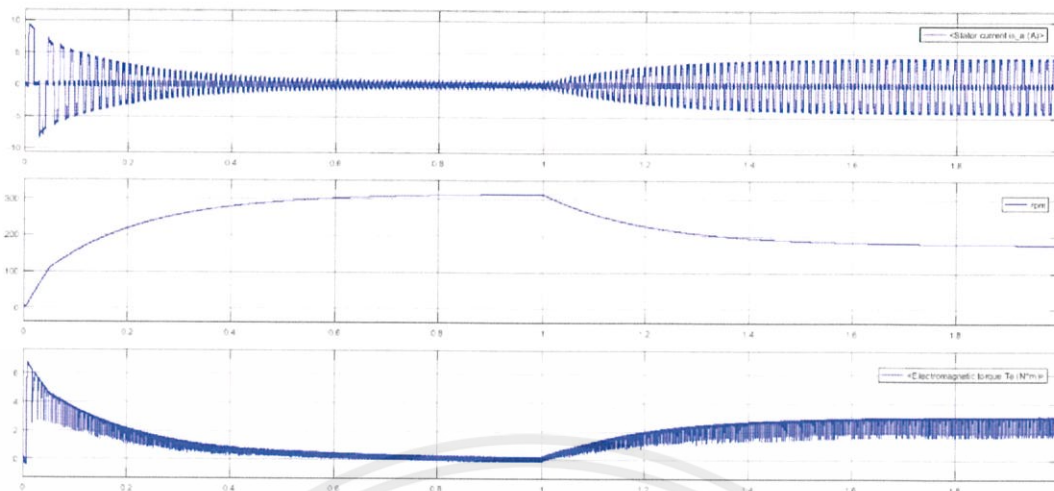


รูปที่ 3.6 ผลการจำลองสัญญาณขาเกิดในแต่ละเฟสที่ค่า Duty Ratio = 0.8



รูปที่ 3.7 ผลการจำลองรูปกราฟกระแส, ความเร็ว (รอบต่อนาที) และแรงบิดของมอเตอร์เมื่อใส่ภาระทางกล 2 N.m ที่เวลา 1 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 ผลการจำลองรูปกราฟกระแส ความเร็ว (รอบต่อนาที) และแรงบิดของมอเตอร์เมื่อใส่ภาระทางกล 3 N.m ที่เวลา 1 วินาที

3.3 ชนิดและโครงสร้างของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

ฮับมอเตอร์เป็นมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน มอเตอร์ชนิดนี้จะอยู่ที่จุดศูนย์กลางของล้อซึ่งเรียกว่า ฮับ จึงนิยมเรียกว่าฮับมอเตอร์ โดยภายในมอเตอร์มีขดลวด 3 ชุด แต่จะมีหลายขดและมีการป้อนกลับของสัญญาณจากฮอลล์เซ็นเซอร์ทั้งหมด 3 ตัว โดยฮอลล์เซ็นเซอร์จะวางใกล้กัน (เฟสจะต่างกันอยู่ 2 แบบ คือ 60 องศา หรือ 120 องศา) โดยจะติดตั้งใกล้กับขบล้อติดกับแม่เหล็กในตัวมอเตอร์เอง ซึ่งโดยรวมแล้วจะมีสายไฟทั้งส่วนของสายเซ็นเซอร์และขดลวดออกจากมอเตอร์ทั้งหมด 8 เส้น เป็นฮอลล์เซ็นเซอร์ 5 เส้นและสายเฟส 3 เส้น

มอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านที่ใช้เป็นชนิดฮับ มีพิกัดกำลังที่ 350 วัตต์ มีพิกัดแรงดันที่ 24 โวลต์ และมีพิกัดความเร็วรอบที่ 310 รอบต่อนาที ซึ่งค่าพารามิเตอร์และข้อมูลโครงสร้างของมอเตอร์แสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์และข้อมูลโครงสร้างของมอเตอร์

รายการ	ขนาด	หน่วย
1.แรงดัน	24	โวลต์
2.พิกัดกำลัง	350	วัตต์
3.ความเร็วรอบสูงสุด	310	รอบต่อนาที
4.จำนวนขั้วแม่เหล็ก	46	โพล
5.น้ำหนัก	5.8	กิโลกรัม
6.ความยาว	12.4	มิลลิเมตร
7.เส้นผ่านศูนย์กลาง	243	มิลลิเมตร

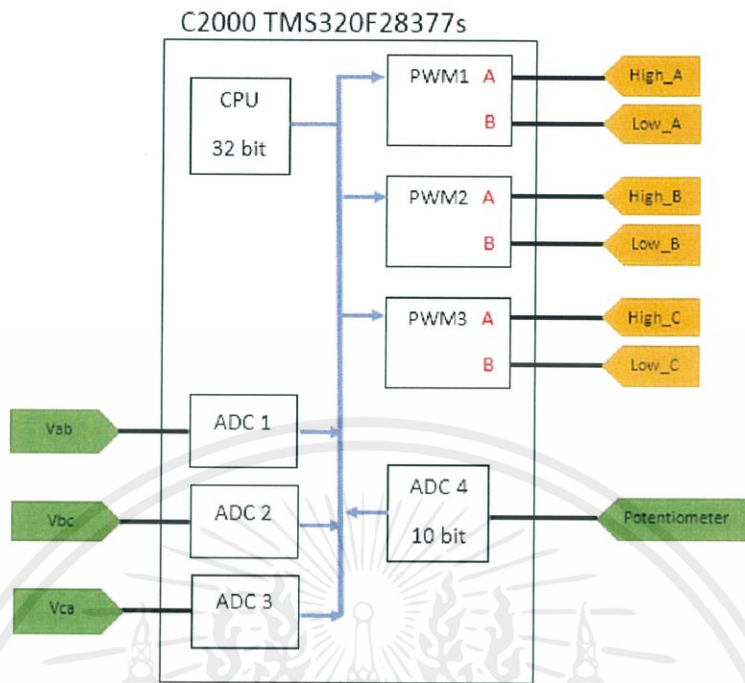


รูปที่ 3.9 โครงสร้างของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

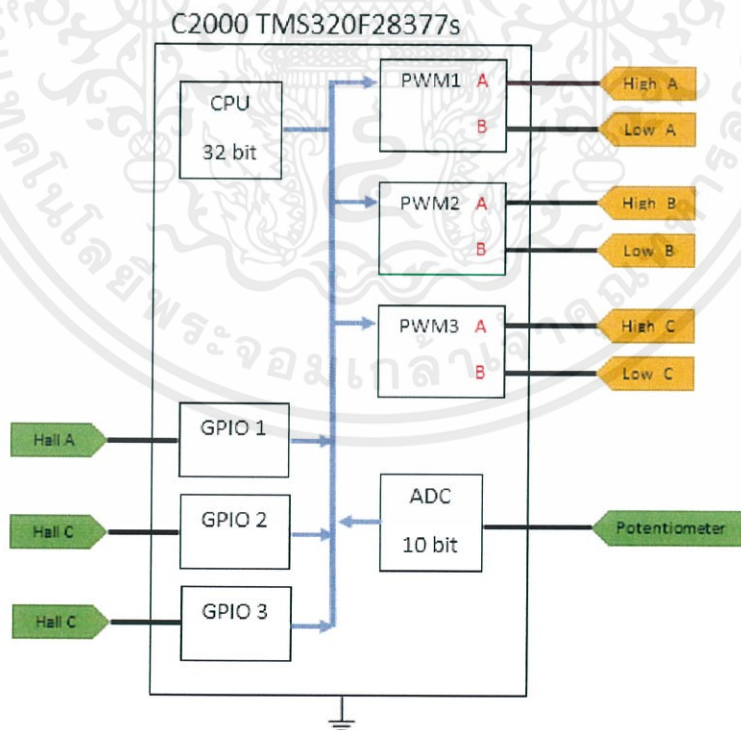
3.4 การออกแบบระบบควบคุมโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ C2000 TMS320F28377S



รูปที่ 3.10 ไมโครคอนโทรลเลอร์ C2000 TMS320F28377S



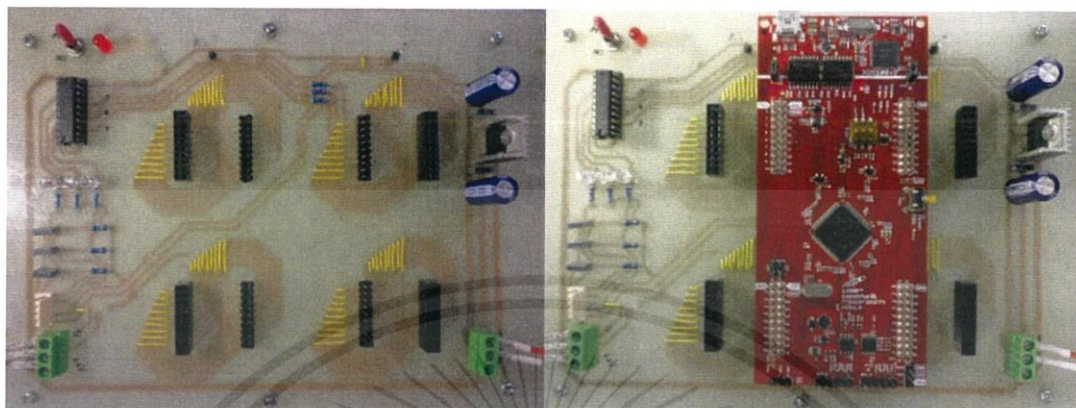
รูปที่ 3.11 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ C2000 แบบไร้ตัวตรวจจับ



รูปที่ 3.12 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ C2000 แบบใช้ฮอลล์เซ็นเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.1 ระบบควบคุมโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ C2000 TMS320F28377S (ฮอลล์เซ็นเซอร์)

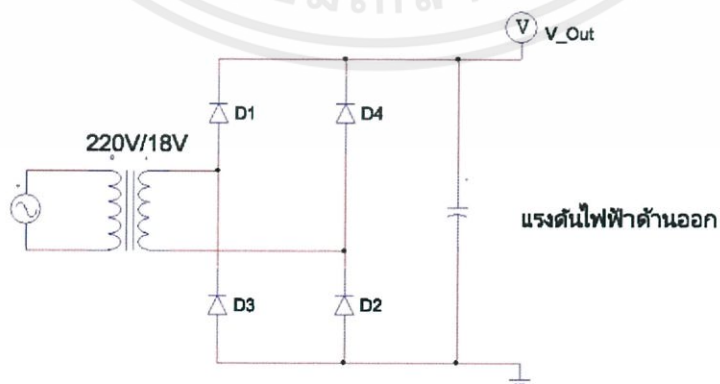


รูปที่ 3.13 วงจรไฟเลี้ยงสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ C2000 และวงจรจับสัญญาณฮอลล์

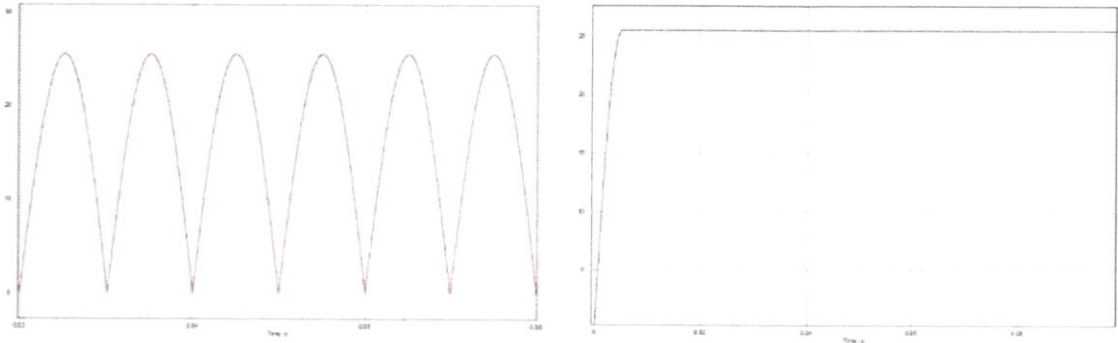
3.4.2 ระบบควบคุมโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ C2000 TMS320F28377S (ปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์)

3.5 การออกแบบวงจรเรียงกระแสแบบเต็มลูกคลื่น

การออกแบบวงจรเรียงกระแสแบบเต็มลูกคลื่นเพื่อใช้แปลงแรงดันไฟฟ้าสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อใช้จ่ายให้กับชุดอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส โดยวงจรเรียงกระแสนี้จะใช้หม้อแปลงแรงดันลดแรงดันจาก 220 โวลต์เป็น 18 โวลต์ก่อนต่อเข้ากับบริดจ์ไดโอด บริดจ์ไดโอดที่ใช้คือเบอร์ GBPC3501/W เนื่องจากสามารถทนกระแสได้ 35 แอมป์ จึงเหมาะต่อการนำไปออกแบบชุดวงจรเรียงกระแสนี้ แล้วจะใช้ตัวเก็บประจุขนาด 5000 ไมโครฟารัด เพื่อทำให้กระแสเรียบขึ้น ก่อนนำไปจ่ายให้กับชุดอินเวอร์เตอร์



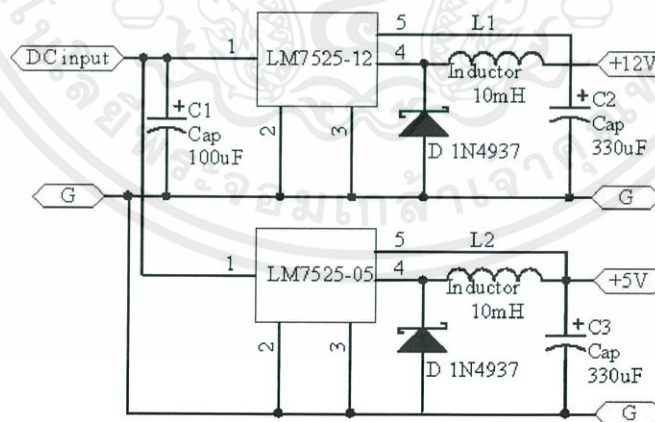
รูปที่ 3.14 วงจรเรียงกระแสแบบเต็มลูกคลื่น



รูปที่ 3.15 แรงดันหลังจากผ่านบริดจ์ไดโอดและแรงดันเมื่อใส่ค่าตัวเก็บประจุ

3.6 การออกแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่ป้อนวงจร

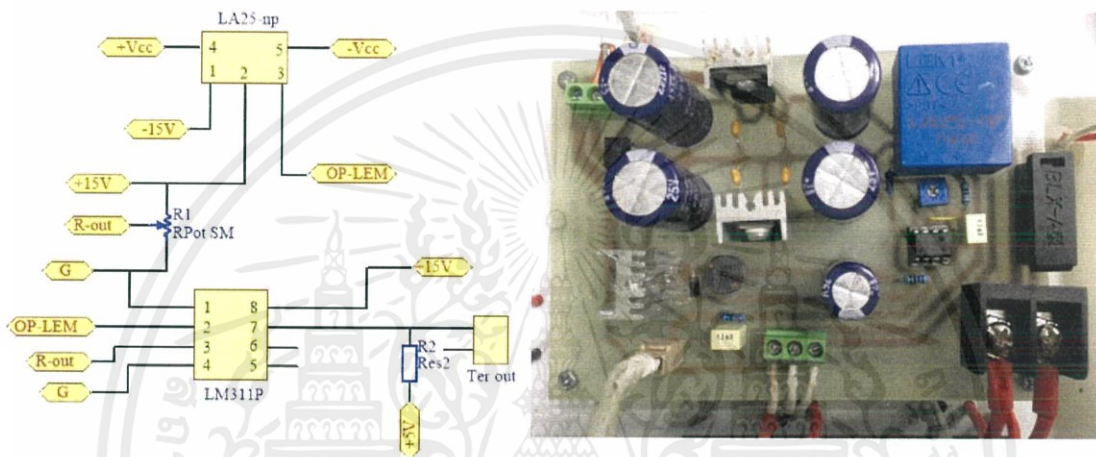
การออกแบบชุดควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านนี้จำเป็นต้องมีวงจรแหล่งจ่าย 5 โวลต์ และ 12 โวลต์ ที่ใช้กับไอซีต่างๆในวงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส โดยวงจรจ่ายกระแสตรงนี้จะทำให้แรงดันที่จ่ายให้กับไอซีมีค่าสม่ำเสมอจะใช้ชุดควบคุมแรงดันแบบสวิตชิ่งเบอร์ LM7525HV-12 ทำหน้าที่ในการแปลงแรงดันจาก DC Input ให้เหลือแรงดันขาออกที่ 12 โวลต์ เพื่อจ่ายแรงดันให้กับ IR2101 ที่ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ และใช้ชุดควบคุมแรงดันแบบสวิตชิ่งเบอร์ LM7525HV-05 ทำหน้าที่ในการแปลงแรงดันจาก DC Input ให้เหลือแรงดันขาออกที่ 5 โวลต์ เพื่อใช้จ่ายแรงดันให้กับ SN74HC74 ที่ใช้ในการเป็นตัวควบคุมขาแอนด์เกตและแนนด์เกต และยังใช้จ่ายแรงดันให้กับไฟเลี้ยงของ SN74HC00, SN74HC08



รูปที่ 3.16 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่จ่ายให้กับวงจร

3.7 การออกแบบระบบป้องกันกระแสเกินจากมอเตอร์

การออกแบบระบบป้องกันกระแสเกินจากมอเตอร์เพื่อป้องกันไม่ให้อมอเตอร์เกิดการเสียหายจากกระแส และเพื่อป้องกันระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ไม่ให้เกิดการเสียหายโดยวงจรที่ออกแบบจะมี LA25-NP เป็นเซ็นเซอร์ที่ใช้ในการส่งสัญญาณเพื่อนำสัญญาณมาเปรียบเทียบกับสัญญาณที่ไอซี LM311P โดยสัญญาณอ้างอิงจะตั้งค่าจากผู้ใช้งานให้สอดคล้องกับพิกัดของมอเตอร์ สัญญาณที่ได้จากการเปรียบเทียบนั้นจะถูกส่งไปประมวลผลที่ SN74HC74 (ฟลิปฟล็อป)

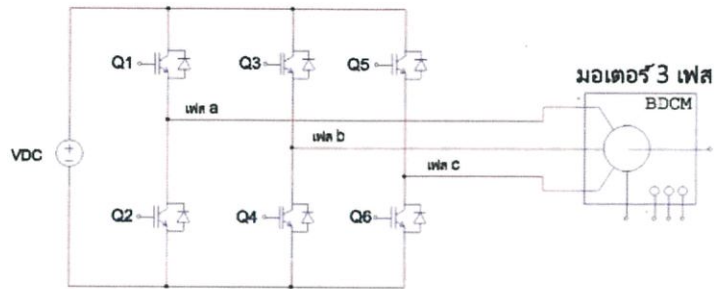


รูปที่ 3.17 Schematic และแผงวงจรของระบบป้องกันกระแสเกินจากมอเตอร์

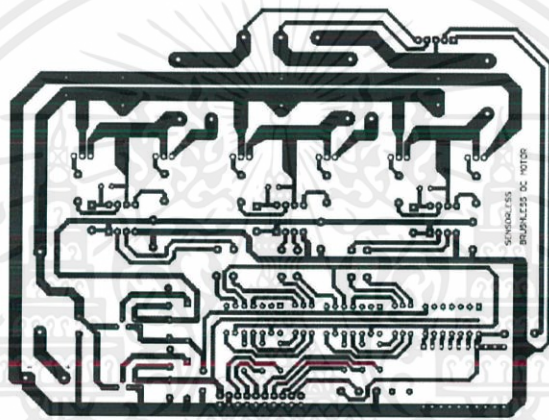
3.8 การออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส

วงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสเป็นวงจรที่รับไฟกระแสตรงจากวงจรเรียงกระแสแบบเต็ม ลูกคลื่นที่ได้ออกแบบไว้ข้างต้น วงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส จะเป็นวงจรที่ทำหน้าที่แปลงแรงดันกระแสตรงไปเป็นแรงดันกระแสสลับเพื่อจ่ายให้กับมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

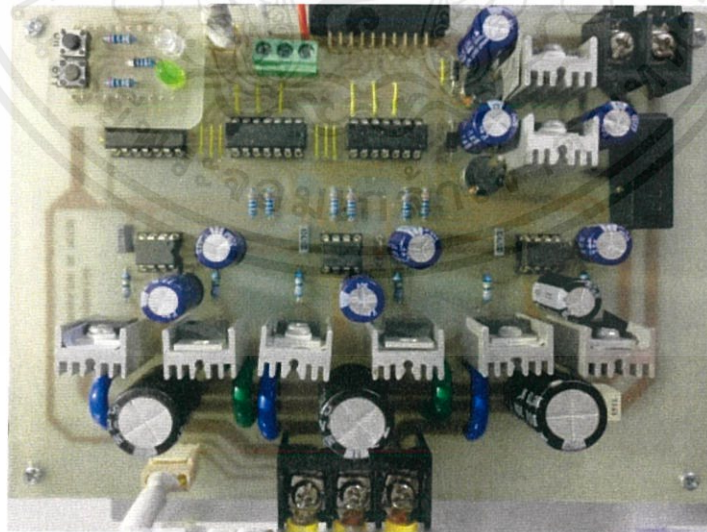
สวิตช์ที่ใช้ในวงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส คือ มอสเฟตกำลังทั้งหมด 6 ตัว โดยมอสเฟตที่ใช้ในชุดอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส เป็นเบอร์ IRF 2807 โดยมอสเฟตกำลังมีจุดเด่นคือ สามารถทำงานที่ความถี่สวิตชิ่งสูงได้ดีซึ่งการเลือกความถี่ของการสวิตชิ่งนั้นในชุดอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสนี้จะเลือกที่ 5 kHz ซึ่งเป็นค่ากลางของช่วงความถี่สวิตชิ่งที่มอสเฟตสามารถทำงานได้ การเลือกความถี่สวิตชิ่งควรเลือกตามความถี่ที่เหมาะสมกับการใช้งานถ้าเลือกความถี่สวิตชิ่งสูงเกินไปจะทำให้การสูญเสียในการสวิตชิ่งสูงขึ้นไปด้วยแต่ถ้าความถี่ในการสวิตชิ่งน้อยเกินไปจะทำให้สวิตช์ของมอสเฟตทำงานช้าเกินไปอาจทำให้เกิดการทำงานผิดพลาดได้



รูปที่ 3.18 วงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส



รูปที่ 3.19 สายแผงวงจรที่ใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์

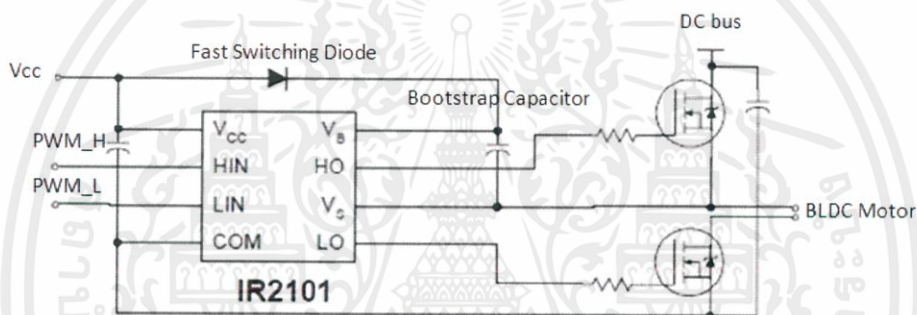


รูปที่ 3.20 แผงวงจรที่ใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7 การออกแบบวงจรบูทสเตรปที่ใช้สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์

การออกแบบวงจรบูทสเตรปที่ใช้สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์ซึ่งแรงดันที่ใช้ขับเคลื่อนเทียบขา ซอร์สของมอเตอร์จะอยู่ในช่วงแรงดันที่สามารถทำงานได้ 10-20 โวลต์ แต่สัญญาณที่ไม่โคจรคอนโทรลเลอร์จ่ายออกมานั้นมีแรงดันที่ 3.3 โวลต์ซึ่งไม่เพียงพอต่อช่วงแรงดันที่มอเตอร์สามารถทำงานได้ จึงอาศัยวงจรบูทสเตรปเป็นวงจรยกระดับแรงดันจาก 3.3 โวลต์ เป็น 12 โวลต์ โดยใช้ไอซีเบอร์ IR2101 จากวงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสที่ออกแบบจะประกอบด้วยมอเตอร์จำนวน 6 ตัวแบ่งเป็น 3 กิ่งหรือ 3 เฟสซึ่งอาจจะต้องแยกกราวด์ออกจากวงจรของมอเตอร์ High ของทั้ง 3 กิ่ง ซึ่งจากรูปวงจรที่ 3.15 ในช่วงขณะที่มอเตอร์ทางด้านล่างทำงานตัวเก็บประจุบูทสเตรป ทำหน้าที่เก็บประจุไว้ทำให้แรงดันมีค่าเท่ากับแหล่งจ่ายของแรงดันไอซี IR2101 เพื่อใช้สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์ทางด้านบน

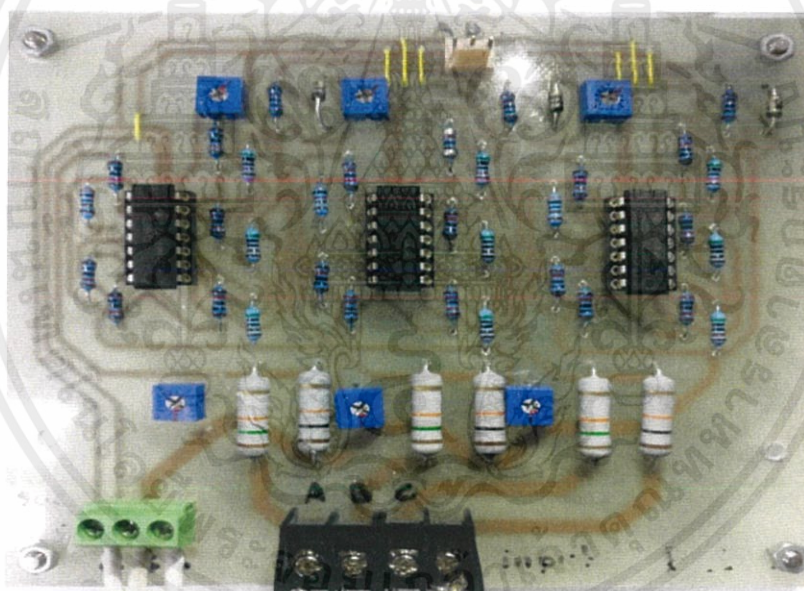
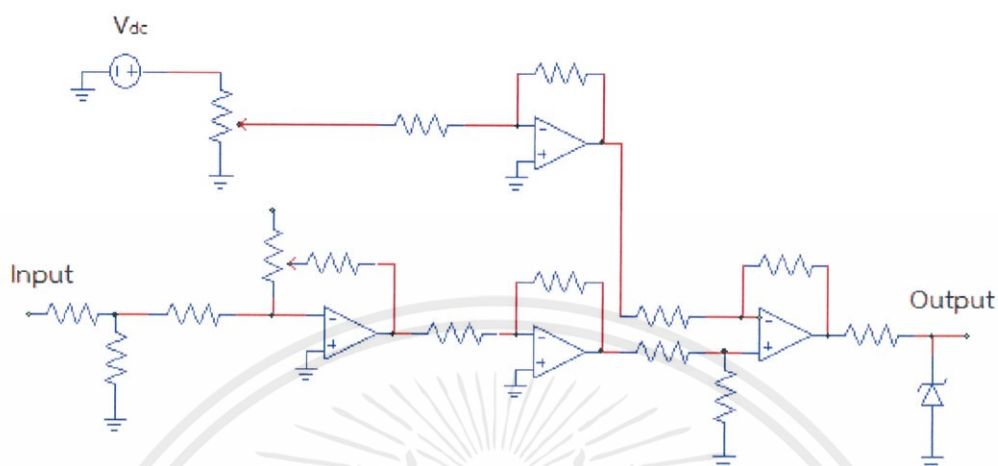


รูปที่ 3.21 วงจรบูทสเตรปที่ใช้สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์



รูปที่ 3.22 วงจรบูทสเตรปที่ใช้สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์ที่ได้ออกแบบ

3.8 การออกแบบวงจรโวลต์เตจเซ็นเซอร์



รูปที่ 3.23 วงจรโวลต์เตจเซ็นเซอร์

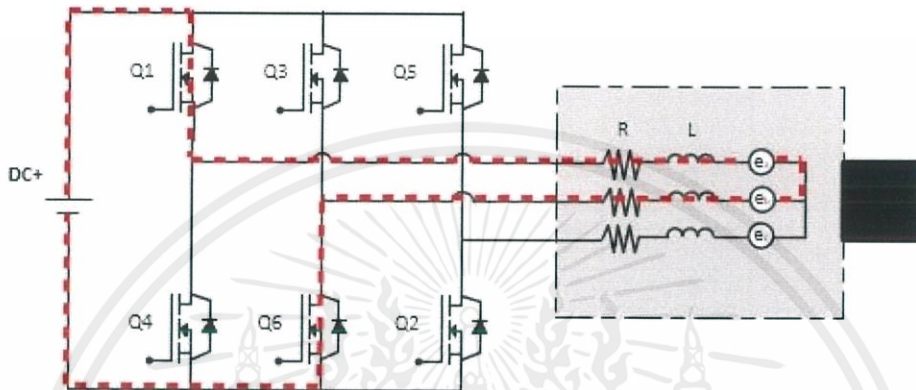
3.9 วิธีการเริ่มต้นการหมุนของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบปราศจากตัวตรวจจับ

สำหรับเครื่องจักรกลประเภทกระแสตรงไร้แปรงถ่านนั้น แรงดันไฟฟ้าย้อนกลับเป็นตัวบ่งบอกถึงตำแหน่งโรเตอร์ ณ ขณะนั้น แต่การวัดแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับเป็นสิ่งที่ทำได้ยากเนื่องจากการในช่วงเริ่มต้นการทำงานของมอเตอร์นั้นแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับมีขนาดไม่เพียงพอสำหรับการตรวจจับแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับเพื่อนำไปกำหนดจังหวะการกระตุ้นขดลวด จึงต้องมีวิธีการกระตุ้นในช่วงแรกเพื่อให้มอเตอร์มีความเร็วและสามารถตรวจจับแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับได้โดยการกระตุ้นคู่เฟส

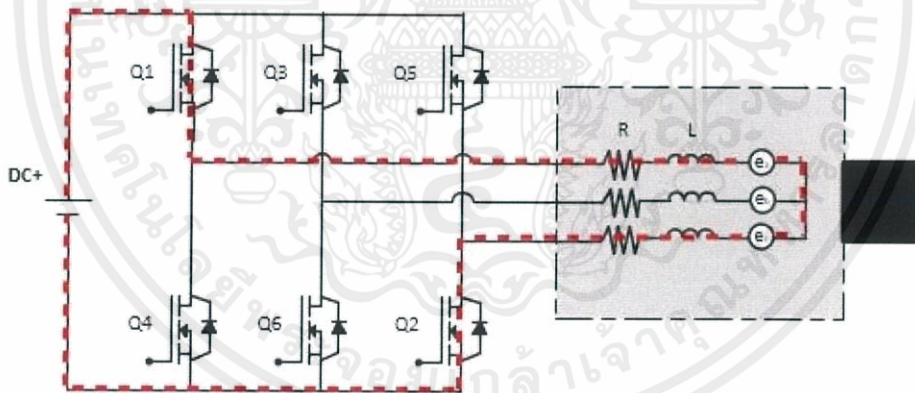
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใดคู่หนึ่งของสเตเตอร์ จากนั้นกระตุ้นคู่เฟสลำดับถัดไป เมื่อสามารถตรวจจับสัญญาณแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับได้จึงทำการตรวจจับสัญญาณผ่านศูนย์เพื่อนำไปควบคุมการทำงานของมอเตอร์

อย่างไรก็ตามวิธีนี้เสี่ยงต่อการสูญเสียสภาพความเป็นแม่เหล็ก (Demagnetization) ของแม่เหล็กถาวรเนื่องจากกระแสเริ่มต้นที่มีค่าสูง



รูปที่ 3.24 แสดงการกระตุ้นคู่เฟสลำดับแรก



รูปที่ 3.25 แสดงการกระตุ้นคู่เฟสลำดับที่สอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

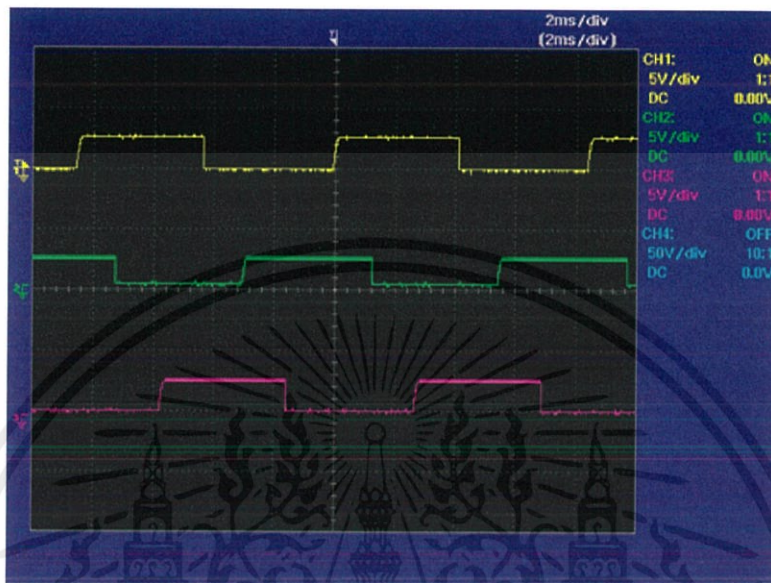
4.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านที่ทำงานร่วมกับระบบควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ทั้งแบบมีตัวตรวจจับและทำงานร่วมกับชุดควบคุมความเร็วแบบปราศจากตัวตรวจจับที่แรงดัน 24 โวลต์ โดยจะใช้ประโยชน์จากแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมคางหมู มาช่วยในการใช้สร้างสัญญาณที่นำมาใช้แทนสัญญาณตัวตรวจจับ เพื่อให้มอเตอร์สามารถทำงานได้ โดยการทดลองนี้จะนำผลการทดลองที่ได้จากการทำงานของมอเตอร์ทั้งแบบมีตัวตรวจจับและแบบปราศจากตัวตรวจจับมาเปรียบเทียบข้อมูลต่างๆ โดยแสดงในตารางที่ 4.1 รายละเอียดการทดลองต่างๆเป็นไปตามตารางดังนี้

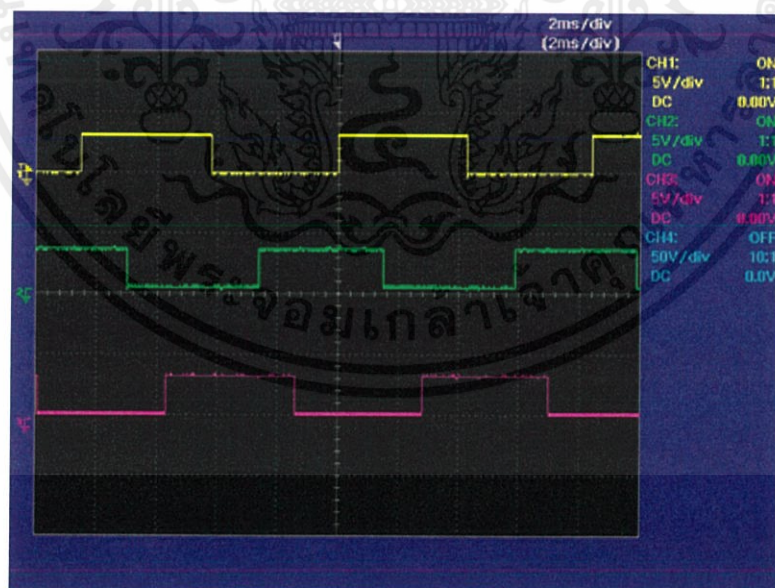
ตารางที่ 4.1 รายการการทดลองชุดควบคุมมอเตอร์

การทดลอง	รายละเอียดการทดลอง
1. ผลของสัญญาณที่เกี่ยวกับระบบควบคุม	<ul style="list-style-type: none">- สัญญาณตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์และสัญญาณตัดผ่านศูนย์- เปรียบเทียบสัญญาณตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์กับสัญญาณตัดผ่านศูนย์- สัญญาณพีดับลิวเอ็มที่ใช้ควบคุมการขับเคลื่อนที่ตัวตีต่างๆ- เปรียบเทียบแรงดันเฟสระหว่างมีตัวตรวจจับและปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งที่ตัวตีต่างๆ- ลักษณะสัญญาณแรงดันไฟฟ้าระหว่างขับเคลื่อนกระแสมอเตอร์
2. ผลการทดลองที่ได้จากการทดลองการขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านทั้งแบบมีตัวตรวจจับและปราศจากตัวตรวจจับ	<ul style="list-style-type: none">- เวลาที่ตอบสนองต่อภาระทางกล- เปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนรูปคลื่นไซน์ที่ภาระทางกลต่างๆ- เปรียบเทียบประสิทธิภาพการควบคุมแบบมีตัวตรวจจับและปราศจากตัวตรวจจับ

จากรูปที่ 4.1 คือ สัญญาณตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ทั้ง 3 เฟส เป็นสัญญาณจริงที่ได้จาก Hall sensor และจากรูปที่ 4.2 จะเป็นสัญญาณตัดผ่านศูนย์ที่ได้จากการประมวลผลภายในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ (C2000) ซึ่งสัญญาณทั้งสองจะมีความใกล้เคียงกัน



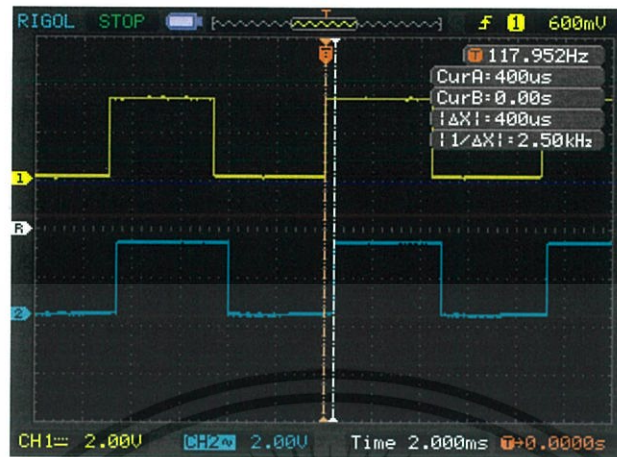
รูปที่ 4.1 สัญญาณตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ทั้ง 3 เฟส



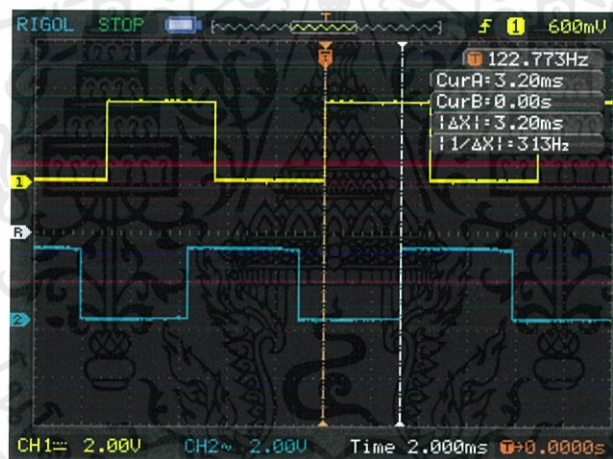
รูปที่ 4.2 สัญญาณตัดผ่านศูนย์ทั้ง 3 เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

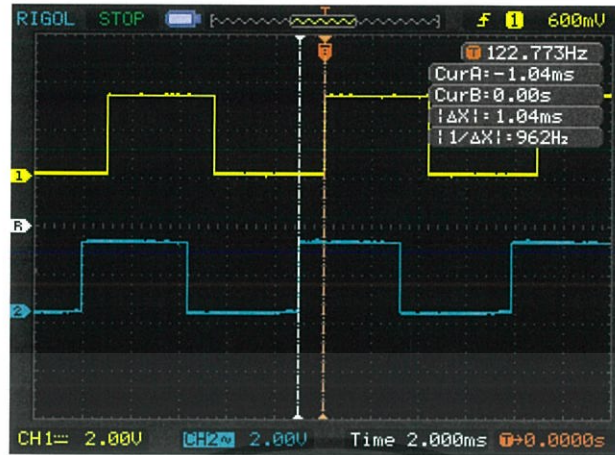
4.3 เปรียบเทียบสัญญาณตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์และสัญญาณตัดผ่านศูนย์



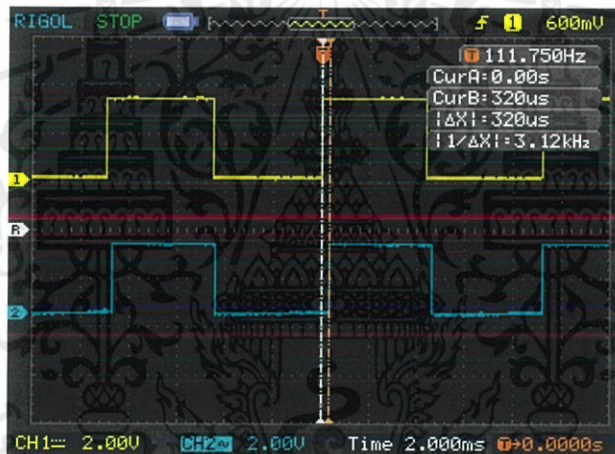
(ก) รูปสัญญาณตัวตรวจจับ A นำสัญญาณตัดผ่านศูนย์ A



(ข) รูปสัญญาณตัวตรวจจับ A นำสัญญาณตัดผ่านศูนย์ B



(ค) สัญญาณตัวตรวจจับ A ตามสัญญาณตัดผ่านศูนย์ B ที่กลับด้าน



(ง) สัญญาณตรวจจับ A นำสัญญาณตัดผ่านศูนย์ B

รูปที่ 4.3 ลำดับขั้นการแก้ความผิดพลาดของสัญญาณตัดผ่านศูนย์

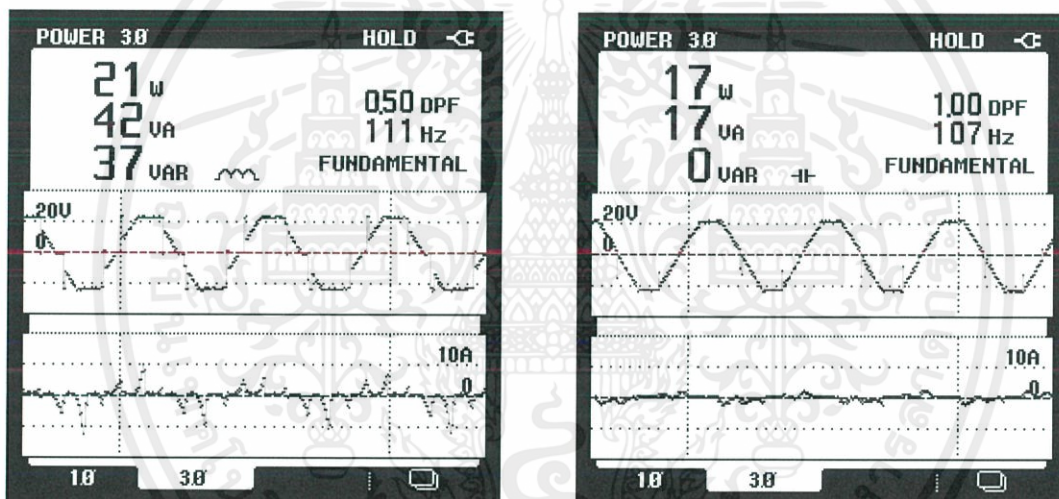
ในรูป (ก) แสดงรูปสัญญาณตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ เฟส A (สัญญาณด้านบน) และสัญญาณตัดผ่านศูนย์ เฟส A (สัญญาณด้านล่าง) ที่ได้จากการประมวลผลภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ (C2000) ซึ่งสัญญาณตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ A ที่ได้จะนำสัญญาณตัดผ่านศูนย์เฟส A อยู่ เป็นเวลา 400 us

ในรูป (ข) แสดงรูปสัญญาณตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ เฟส A (สัญญาณด้านบน) สัญญาณตัดผ่านศูนย์ เฟส B (สัญญาณด้านล่าง) ที่ได้จากการประมวลผลภายในไมโครคอนโทรลเลอร์

(C2000) ซึ่งสัญญาณตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ เฟส A จะนำสัญญาณตัดผ่านศูนย์เฟส B อยู่เป็นเวลา 3.2 ms

ในรูป (ค) แสดงรูปสัญญาณตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ เฟส A (สัญญาณด้านบน) สัญญาณตัดผ่านศูนย์ เฟส B ที่กลับด้าน (สัญญาณด้านล่าง) ที่ได้จากการประมวลผลภายใน ไมโครคอนโทรลเลอร์ (C2000) ซึ่งสัญญาณตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ เฟส A จะตามสัญญาณตัดผ่านศูนย์เฟส B อยู่เป็นเวลา 1.04 ms

ในรูป (ง) แสดงรูปสัญญาณตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ เฟส A (สัญญาณด้านบน) และสัญญาณตัดผ่านศูนย์ เฟส B (สัญญาณด้านล่าง) โดยที่สัญญาณตัดผ่านศูนย์ที่ได้นั้น ได้ทำการเลื่อนตำแหน่งให้ใกล้เคียงกับเคียงกับสัญญาณตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์มากที่สุด โดยสัญญาณทั้งสองห่างกันอยู่เป็นเวลา 320 us



(ก) ก่อนแก้ความผิดเพี้ยนของสัญญาณ

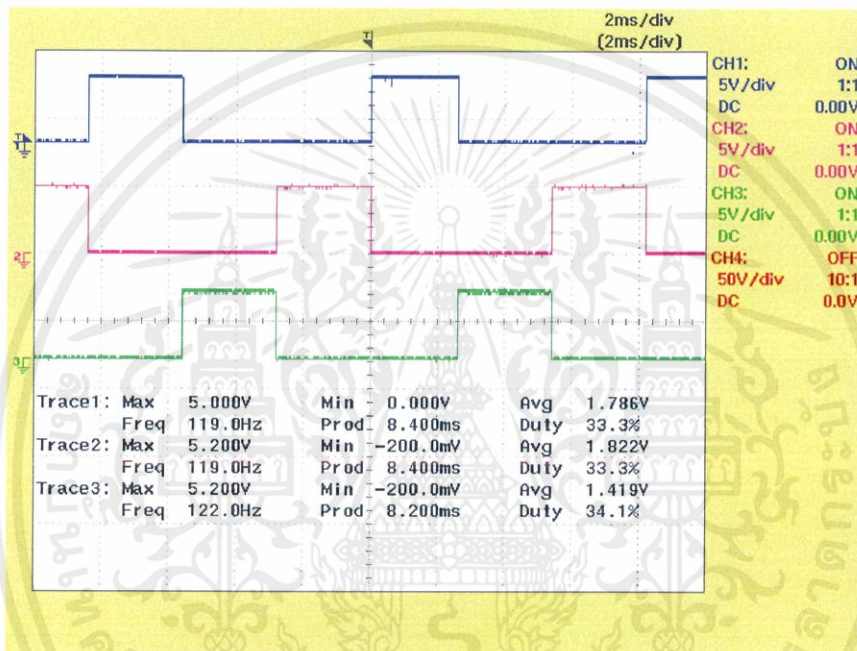
(ข) หลังแก้ความผิดเพี้ยนของสัญญาณ

รูปที่ 4.4 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วที่ได้จากการแก้ความผิดเพี้ยนของสัญญาณตัดผ่านศูนย์

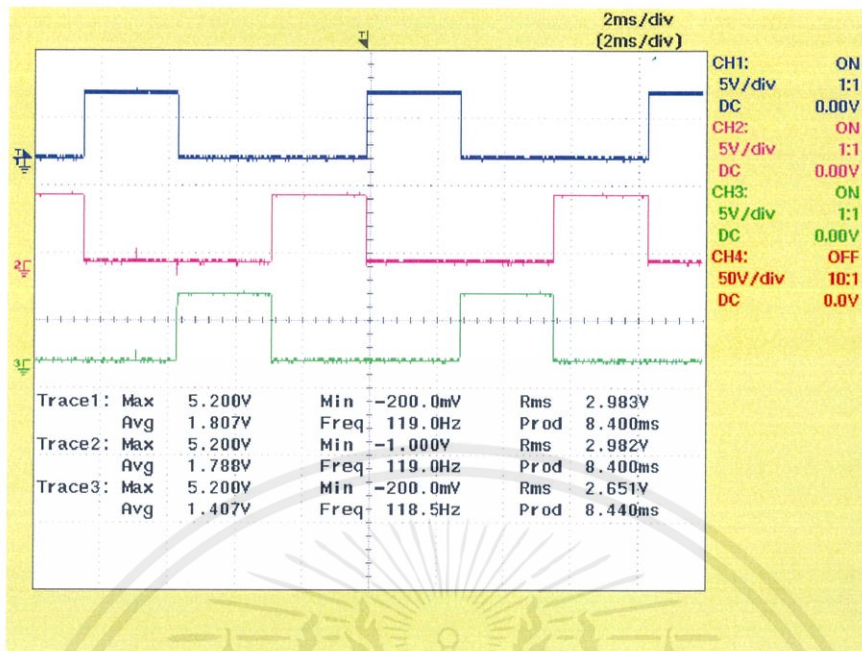
หลังจากทำการแก้ความผิดเพี้ยนของสัญญาณตัดผ่านศูนย์เสร็จแล้ว ได้ทำการนำสัญญาณตัดผ่านศูนย์ก่อนแก้ความผิดเพี้ยนของสัญญาณ และสัญญาณตัดผ่านศูนย์หลังแก้ความผิดเพี้ยนของสัญญาณ ไปขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ ผลที่ออกมาเป็นไปดังรูปที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าสัญญาณแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วมอเตอร์ มีสไปค์ลดลง และสัญญาณกระแสที่ได้กระเพื่อมน้อยลง จึงส่งผลให้ค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้มีค่าลดลง

4.4 สัญญาณพีดับบลิวเอ็มที่ใช้ควบคุมการขับเคลื่อนที่ตัวตีต่างๆ

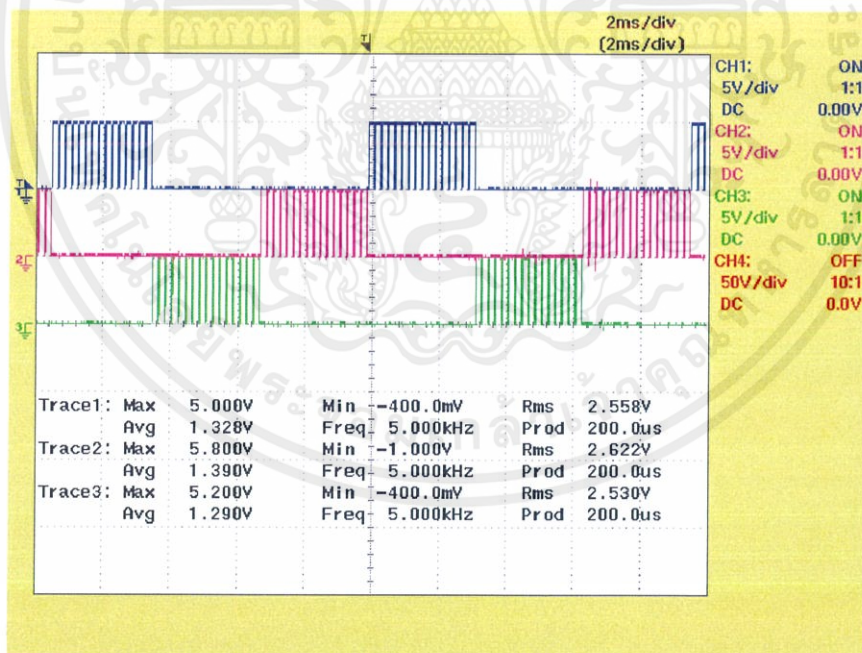
ในรูปที่ 4.5-4.7 แสดงสัญญาณพีดับบลิวเอ็มที่ใช้ควบคุมการขับเคลื่อนของมอเตอร์ทั้งสามกึ่ง ที่ตัวตี 1 0.8 และ 0.6 ตามลำดับ โดยสัญญาณขับเคลื่อน High จะขับเคลื่อนเกดโดยใช้สัญญาณ PWM ที่ความถี่สวิทซ์ 5 kHz และสัญญาณขับเคลื่อน Low จะขับเคลื่อนเกดโดยใช้สัญญาณดีซี (DC) ผลที่ได้จากการลดความเร็วจะทำให้สัญญาณขับเคลื่อน High มีค่าแรงดันเฉลี่ยลดลงและจะมีค่าลดลงตามลำดับ จะเห็นได้ว่าแรงดันที่ขั้วมอเตอร์นั้นจะขึ้นอยู่กับตัวตี โดยมีค่าสูงสุดที่ตัวตีเท่ากับ 1



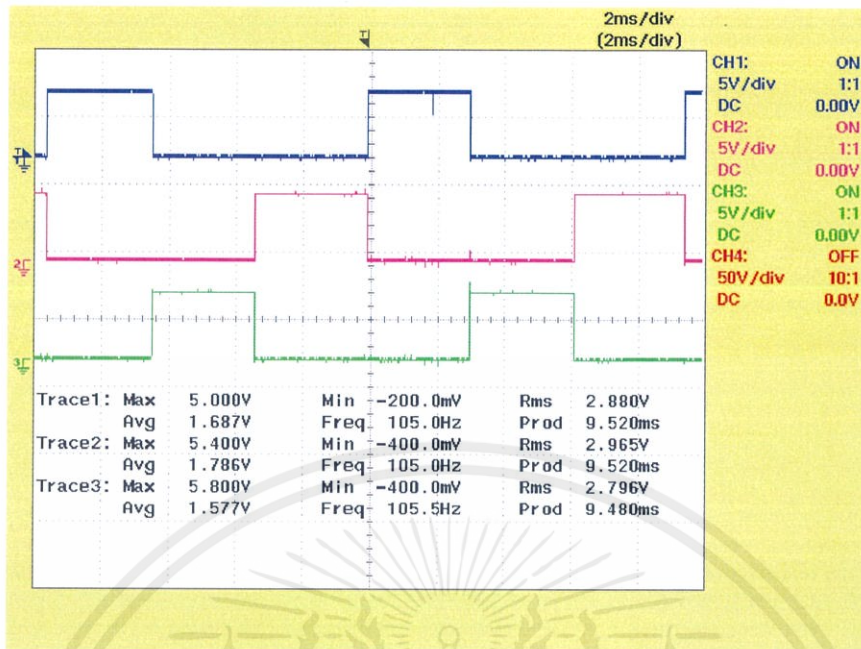
(ก) สัญญาณพีดับบลิวเอ็มที่ใช้ขับเคลื่อน High ที่ตัวตี 1



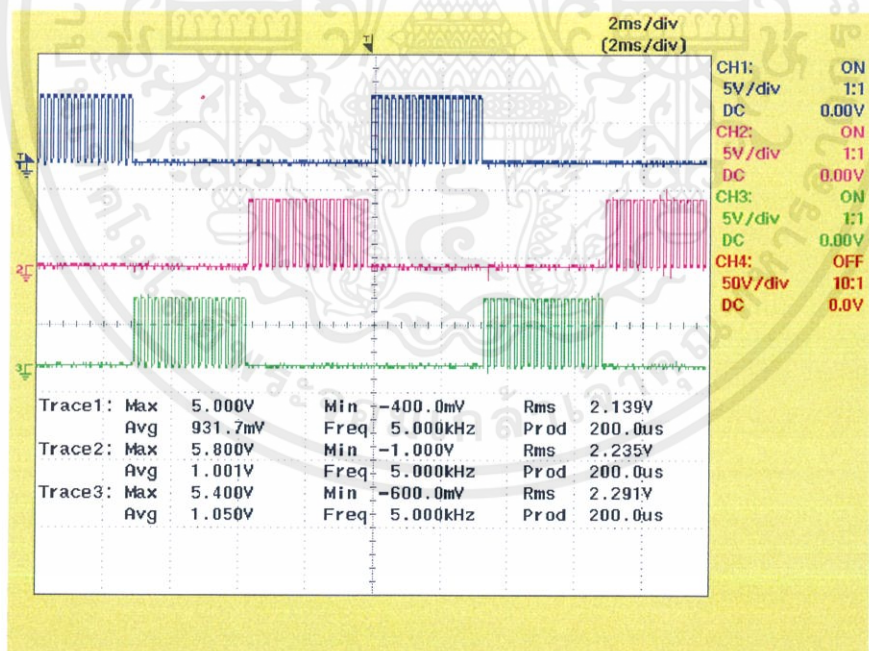
(ข) สัญญาณพีดับบลิวเอ็มที่ใช้ขั้วเกิด Low ที่ติวดี 1
 รูปที่ 4.5 สัญญาณพีดับบลิวเอ็มที่ใช้ขั้วเกิด High - Low ที่ติวดี 1



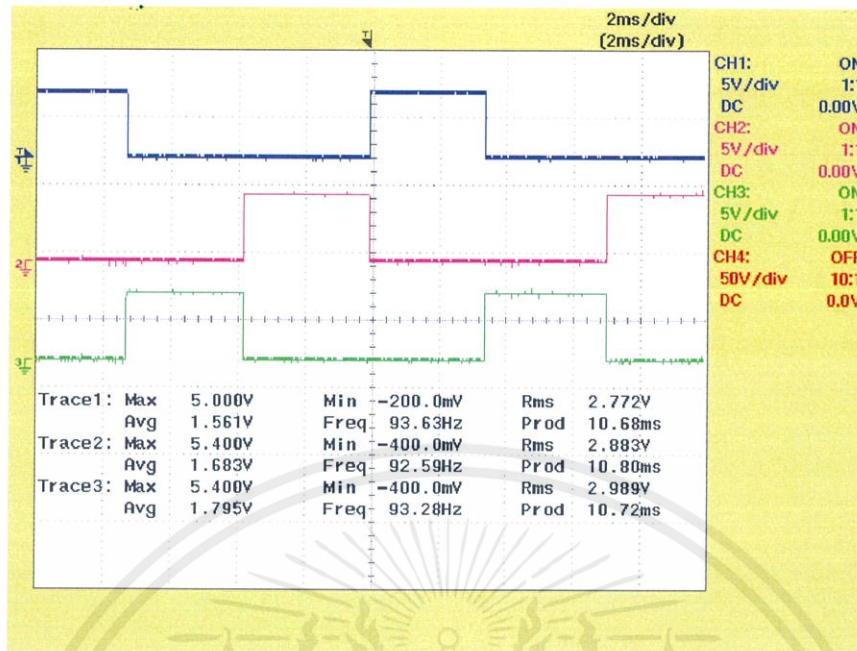
(ก) สัญญาณพีดับบลิวเอ็มที่ใช้ขั้วเกิด High ที่ติวดี 0.8



(ข) สัญญาณพัลบลิวเอ็่มที่ใช้ขั้วเกต Low ที่คิวตี้ 0.8
รูปที่ 4.6 สัญญาณพัลบลิวเอ็่มที่ใช้ขั้วเกต High - Low ที่คิวตี้ 0.8



(ก) สัญญาณพัลบลิวเอ็่มที่ใช้ขั้วเกต High ที่คิวตี้ 0.6



(ข) สัญญาณพีดับบิวเอ็มที่ใช้ขั้วเกต Low ที่ดิวตี้ 0.6
รูปที่ 4.7 สัญญาณพีดับบิวเอ็มที่ใช้ขั้วเกต High - Low ที่ดิวตี้ 0.6

4.5 เปรียบเทียบแรงดันเฟสระหว่างมีตัวตรวจจับและปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งที่ดิวตี้ต่างๆ

ในรูปที่ 4.8 - 4.10 แสดงแรงดันเฟสที่ขับเคลื่อนแบบมีตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์กับปราศจากตัวตรวจจับที่ดิวตี้ 1 0.8 และ 0.6 ตามลำดับ โดยสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเฟสมอเตอร์ที่ลำดับดิวตี้ต่างๆ มีความใกล้เคียงกัน



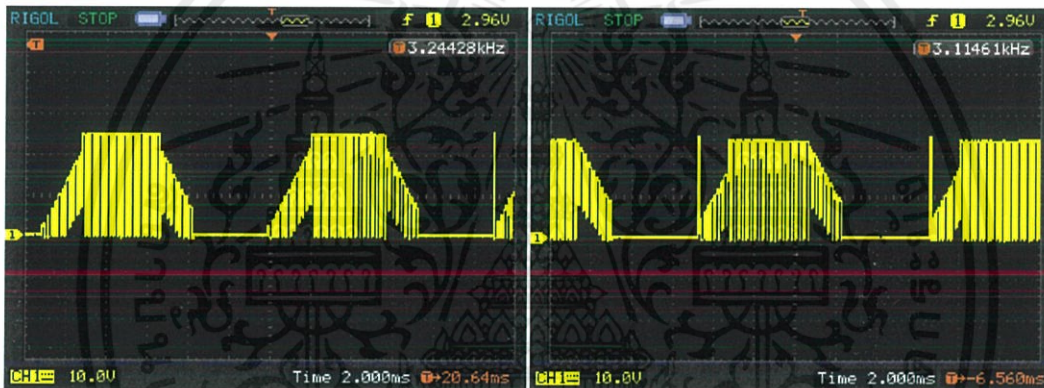
(ก) มีตัวตรวจจับ

(ข) ปราศจากตัวตรวจจับ

รูปที่ 4.8 แรงดันเฟสแบบมีตัวตรวจจับกับปราศจากตัวตรวจจับที่ดิวตี้ 1



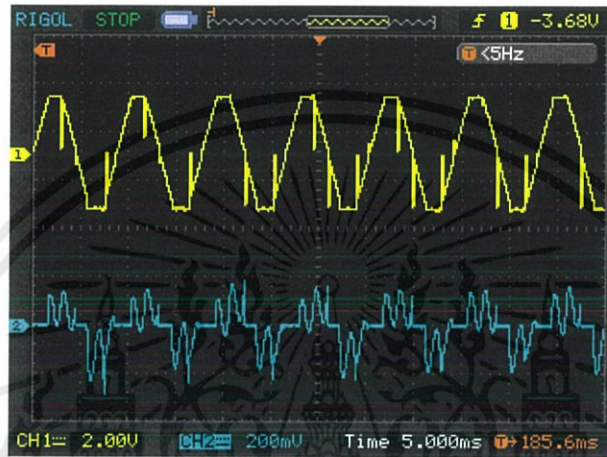
(ก) มีตัวตรวจจับ (ข) ปราศจากตัวตรวจจับ
รูปที่ 4.9 แรงดันเฟสแบบมีตัวตรวจจับกับปราศจากตัวตรวจจับที่คิวตี้ 0.8



(ก) มีตัวตรวจจับ (ข) ปราศจากตัวตรวจจับ
รูปที่ 4.10 แรงดันเฟสแบบมีตัวตรวจจับกับปราศจากตัวตรวจจับที่คิวตี้ 0.6

4.6 ลักษณะสัญญาณแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วกับกระแสมอเตอร์

จากรูปที่ 4.11 - 4.12 แสดงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วกับกระแสมอเตอร์แบบมีตัวตรวจจับตำแหน่งครีเตอร์ และสัญญาณแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วกับกระแสมอเตอร์แบบปราศจากตัวตรวจจับ ซึ่งผลที่ได้คือ สามารถลดสไปค์ของแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วมอเตอร์ได้ ซึ่งการลดสไปค์ของแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วส่งผลให้ตอนขับเคลื่อนมอเตอร์มีเสียงดังน้อยลง และประสิทธิภาพการขับเคลื่อนดีขึ้น

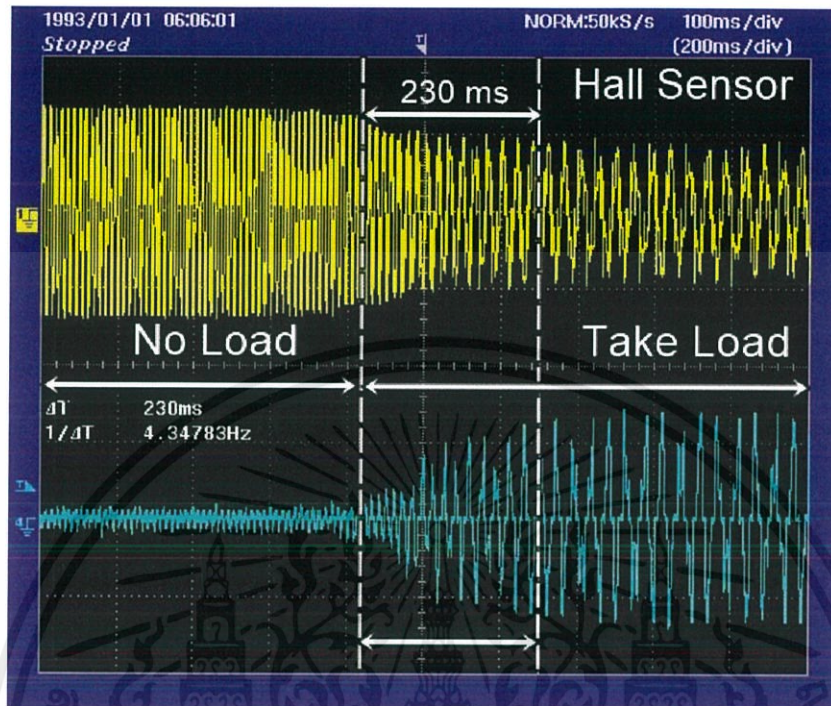


รูปที่ 4.11 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วกับกระแสมอเตอร์แบบมีตัวตรวจจับ

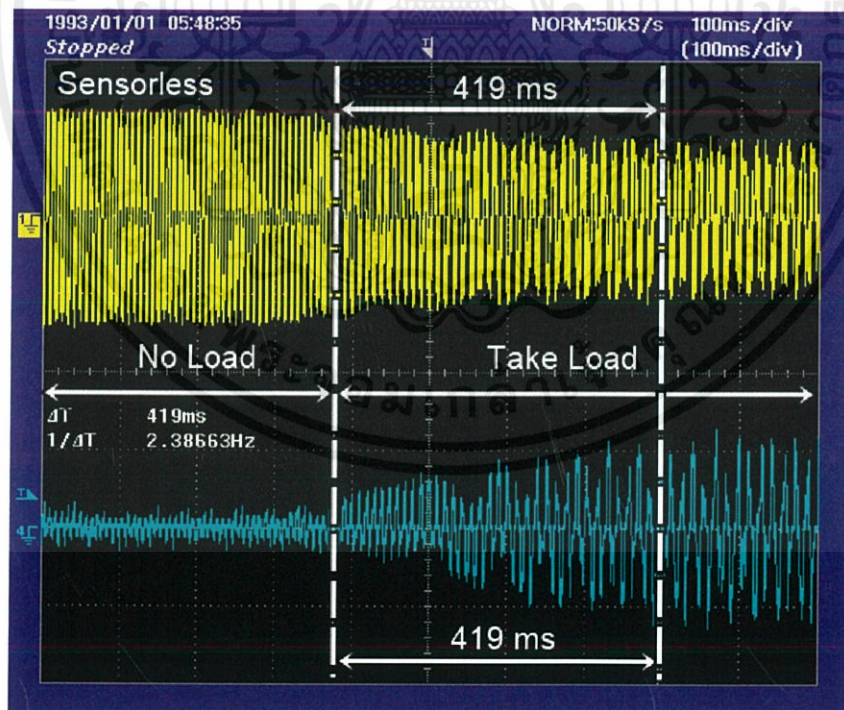


รูปที่ 4.12 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วกับกระแสมอเตอร์แบบปราศจากตัวตรวจจับ

4.7 เวลาที่ตอบสนองต่อภาระทางกล



(ก) แบบมีตัวตรวจจับตำแหน่ง



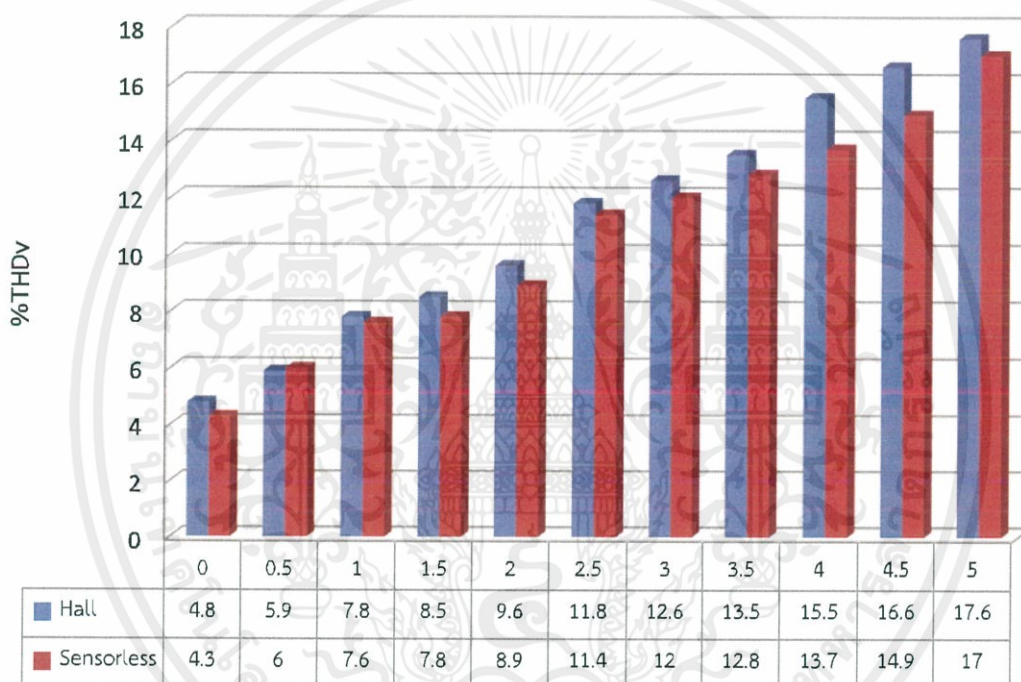
(ข) แบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่ง

รูปที่ 4.13 เปรียบเทียบแรงเคลื่อนและกระแสไฟฟ้าขณะทดสอบภาระทางกลแบบทันทีทันใด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 4.13 (ก) แรงเคลื่อนและกระแสไฟฟ้าแบบมีตัวตรวจจับตำแหน่ง (ข) แรงเคลื่อนและกระแสไฟฟ้าแบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่ง ทดสอบภาระทางกลแบบทันทีทันใดโดยการถ่วงน้ำหนัก 5 กิโลกรัม จะพบว่าค่าเวลาในช่วงที่ใส่โหลดทันทีทันใดด้วยวิธีการขับเคลื่อนแบบใช้ตัวตรวจจับตำแหน่งมีช่วงเวลาของการตอบสนองที่ 0.23 วินาที และช่วงเวลาที่ใช้ใส่โหลดทันทีทันใดด้วยวิธีการขับเคลื่อนแบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งมีช่วงเวลาการตอบสนองที่ 0.419 วินาที โดยมีค่าผลต่างของเวลา 0.189 วินาที

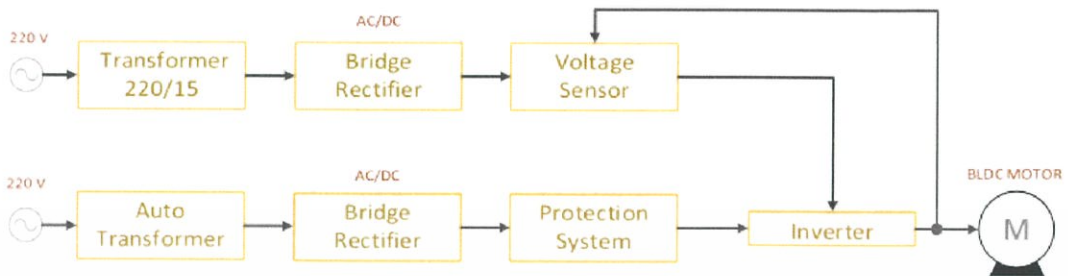
4.8 เปรียบเทียบความผิดพลาดเพี้ยนรูปคลื่นไซน์ที่ภาระทางกลต่างๆ



รูปที่ 4.14 เปรียบเทียบค่า %THDv ระหว่างมีตัวตรวจจับและปราศจากตัวตรวจจับที่ภาระทางกลตั้งแต่ 0 - 5 กิโลกรัม

จากรูปที่ 4.14 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ค่าความผิดพลาดเพี้ยนรูปคลื่นไซน์ที่ภาระทางกลตั้งแต่ 0-5 กิโลกรัม โดยเพิ่มภาระทางกลครั้งละ 0.5 กิโลกรัม พบว่ามีลักษณะของแรงเคลื่อนไฟฟ้ามีลักษณะใกล้เคียงกันเมื่อเทียบระหว่างมีตัวตรวจจับและปราศจากตัวตรวจจับ และเปอร์เซ็นต์ค่าความผิดพลาดเพี้ยนรูปคลื่นไซน์มีค่าเพิ่มมากขึ้นในแต่ละช่วงของการเพิ่มน้ำหนัก

4.9 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการควบคุมแบบมีตัวตรวจจับและปราศจากตัวตรวจจับ



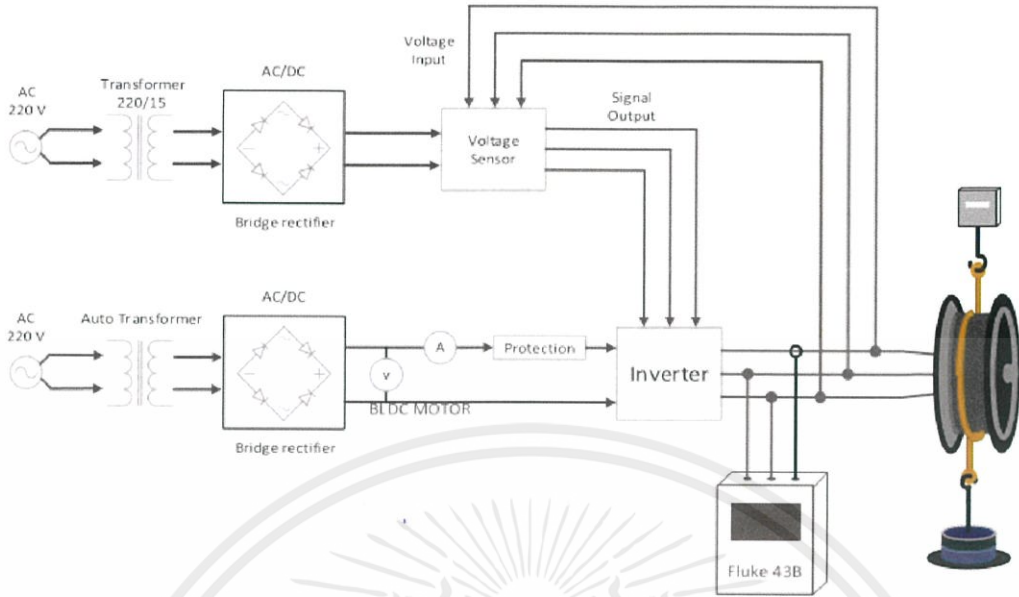
รูปที่ 4.15 ไตอะแกรมการต่อวงจรทดสอบมอเตอร์

อุปกรณ์และเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดสอบ

1. Multi meter แบบดิจิตอล ใช้ในการวัดแรงดันไฟฟ้า
2. Fluke 43B ใช้ในการวัดกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้า
3. Tachometer ใช้วัดความเร็วมอเตอร์
4. DC Amp meter ใช้วัดกระแสที่เข้าสู่คอนโทรล
5. Digital Oscilloscope 4 channel
6. Current probe
7. เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล

วิธีการทดลอง

1. ต่ออุปกรณ์ ตามรูปที่ 4.15
2. บันทึกค่าน้ำหนักของมวล (W_1) และน้ำหนักที่อ่านจากเครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล (W_2)
3. วัดค่าแรงดันไฟฟ้าขาเข้าและกระแสไฟฟ้าขาเข้า
4. วัดค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ (รอบต่ออนาที)
5. บันทึกค่ากำลังไฟฟ้าและรูปสัญญาณจาก Fluke 43B



รูปที่ 4.16 การต่อเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลอง

สมการที่ใช้ในการคำนวณ

จากการทดสอบมอเตอร์ดีซีไร้แปรงถ่านแบบมีภาระทางกล ทำการเพิ่มขนาดของมวลตั้งแต่ 0 กิโลกรัม ถึง 5 กิโลกรัม โดยจะทำการเพิ่มขนาดของมวลทีละ 0.5 กิโลกรัม

สมการที่ใช้ในการคำนวณ

$$\tau = 9.8 \times (W_1 - W_2) \times r \quad (4.2)$$

$$\omega = \frac{2\pi N_r}{60} \quad (4.3)$$

$$P_m = \tau \omega \quad (4.4)$$

$$P_{in} = V_{in} I_{in} \quad (4.5)$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \quad (4.6)$$

เมื่อ

W_1 = มวลของตุ้มน้ำหนัก + มวลของเชือก + ฐานวางตุ้มน้ำหนัก (กิโลกรัม)

W_2 = มวลที่อ่านได้จากตาชั่งสปริง (กิโลกรัม)

r = ระยะจากจุดศูนย์กลางมอเตอร์ถึงตำแหน่งเชือก (เมตร)

N_r = ความเร็วมอเตอร์ (รอบต่อนาที)

V_{in} = แรงดันไฟฟ้าขาเข้า (โวลต์)

I_{in} = กระแสขาเข้า (แอมแปร์)

P_{in} = กำลังไฟฟ้าขาเข้า (วัตต์)

P_{out} = กำลังไฟฟ้าขาออก (วัตต์)

P_m = กำลังไฟฟ้าทางกล (วัตต์)

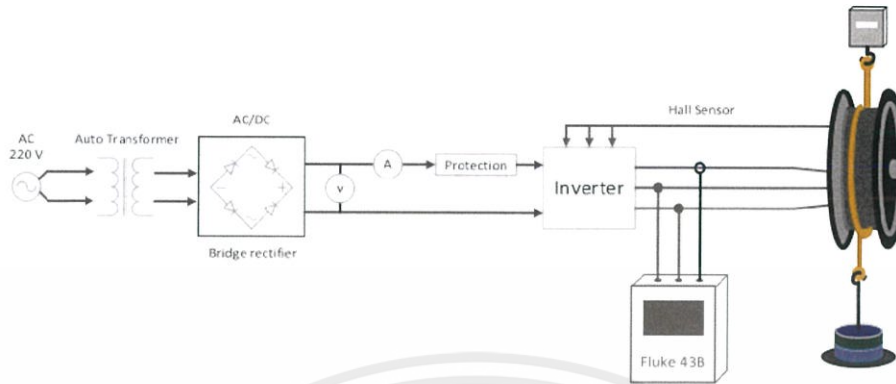
η = ประสิทธิภาพ (เปอร์เซ็นต์)

โดย

$r = 0.12$ (เมตร)



4.9.1 การทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบมีตัวตรวจจับ

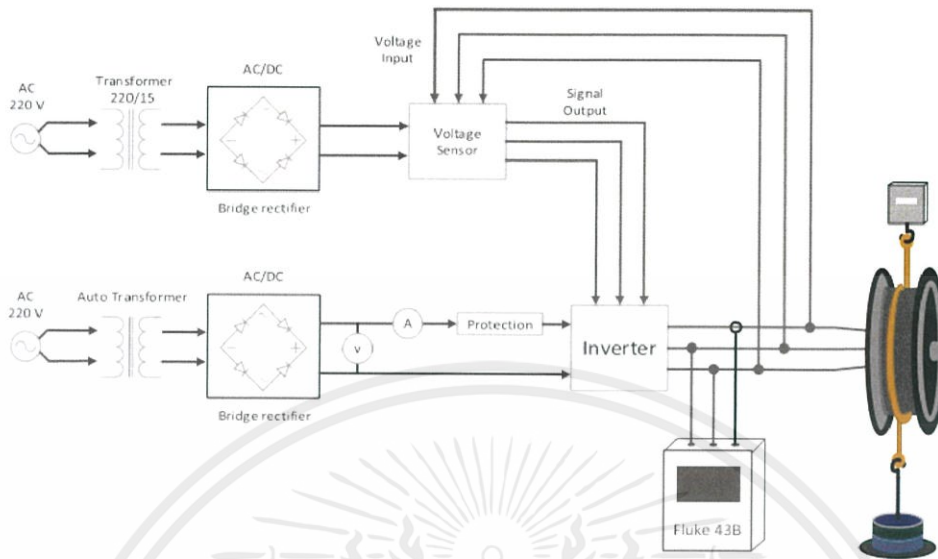


รูปที่ 4.17 การทดสอบมอเตอร์แบบมีตัวตรวจจับ

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบมีตัวตรวจจับ

W_1 (kg)	W_2 (kg)	N_r (rpm)	V_{in} (V)	I_{in} (A)	P_{in} (W)	P_{out} (W)	P_m (W)	τ (N-m)	P_{out}/P_{in} Drive (% η)	P_m/P_{out} Motor (% η)
0	0	310.8	24.35	0.85	20.70	18	0.00	0.00	86.97	0.00
0.86	0.150	303.5	24.70	2.00	49.40	45	26.57	0.83	91.09	59.05
1.36	0.250	297.0	24.70	2.65	65.46	59	40.65	1.31	90.14	68.91
1.86	0.360	294.0	24.73	3.20	79.14	72	54.38	1.76	90.98	75.53
2.36	0.520	290.0	24.73	3.70	91.50	83	65.80	2.16	90.71	79.28
2.86	0.665	282.0	24.53	4.25	104.25	92	76.33	2.58	88.25	82.97
3.36	0.895	278.0	24.30	4.75	115.43	103	84.51	2.90	89.24	82.05
3.86	1.050	269.0	24.60	5.40	132.84	118	93.22	3.30	88.83	79.00
4.36	1.180	268.0	24.57	5.80	142.51	124	105.10	3.74	87.01	84.76
4.86	1.430	266.0	24.70	6.20	153.14	133	112.51	4.03	86.85	84.60
5.36	1.620	262.0	24.68	6.65	164.12	143	120.84	4.40	87.13	84.50

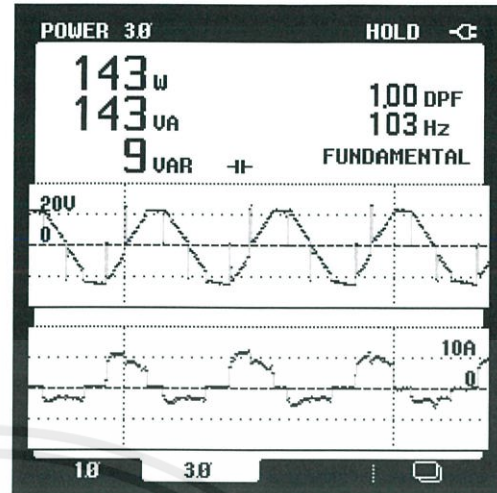
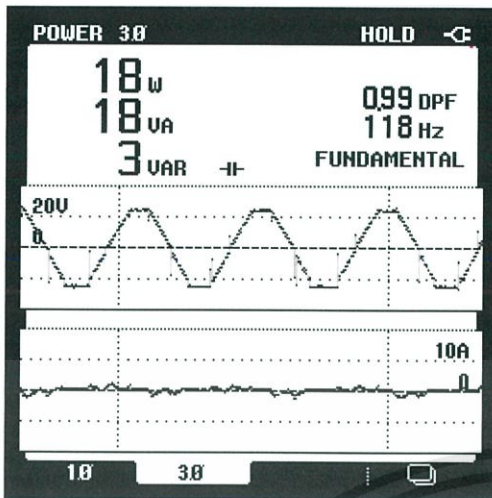
4.9.2 การทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบปราศจากตัวตรวจจับ



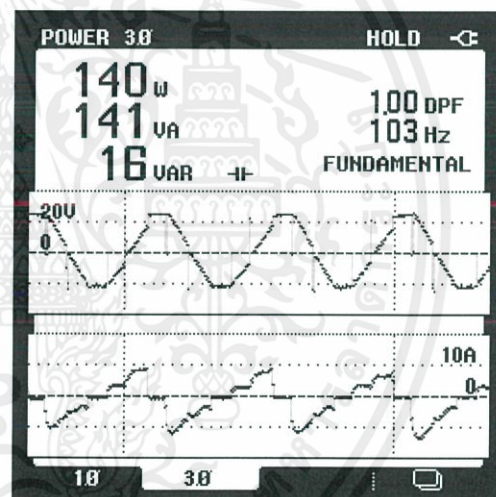
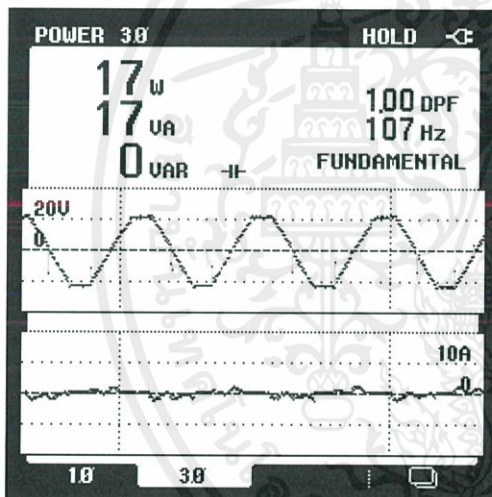
รูปที่ 4.18 การทดสอบมอเตอร์แบบปราศจากตัวตรวจจับ

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบปราศจากตัวตรวจจับ

W_1 (kg)	W_2 (kg)	N_r (rpm)	V_{in} (V)	I_{in} (A)	P_{in} (W)	P_{out} (W)	P_m (W)	τ (N-m)	P_{out}/P_{in} Drive (% η)	P_m/P_{out} Motor (% η)
0	0	310.0	24.35	0.80	19.48	17	0.00	0	87.27	0.00
0.86	0.150	303.0	24.20	2.00	48.40	44	26.53	0.83	90.91	60.29
1.36	0.275	300.0	24.60	2.55	62.73	57	40.14	1.28	90.87	70.42
1.86	0.430	299.0	24.65	3.00	73.95	67	52.73	1.68	90.60	78.70
2.36	0.570	296.0	24.50	3.55	86.98	79	65.34	2.11	90.83	82.71
2.86	0.705	293.0	24.67	4.20	103.61	92	77.87	2.53	88.79	84.64
3.36	0.915	287.0	24.30	4.75	115.43	103	86.53	2.88	89.24	84.01
3.86	1.120	286.0	24.56	5.30	130.17	116	96.64	3.22	89.12	83.31
4.36	1.265	277.0	24.43	5.70	139.25	123	105.72	3.64	88.33	85.95
4.86	1.540	277.0	24.32	6.00	145.92	127	113.41	3.90	87.03	89.30
5.36	1.720	273.0	24.30	6.60	160.38	140	122.54	4.28	87.29	87.53



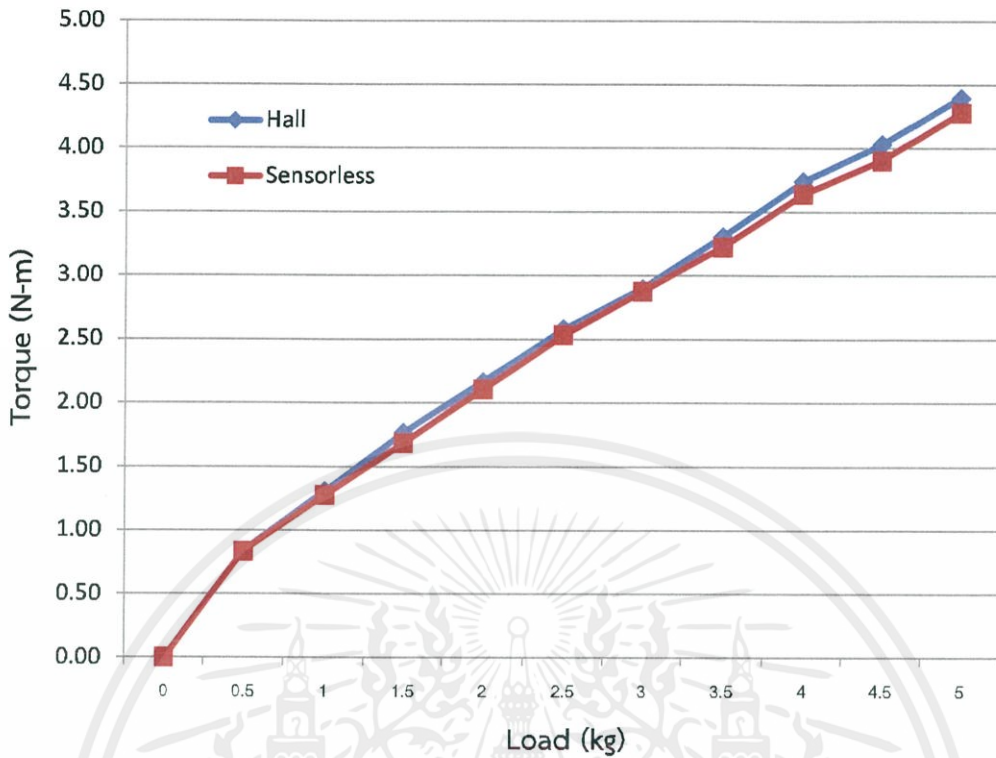
(ก) แบบมีตัวตรวจจับตำแหน่ง



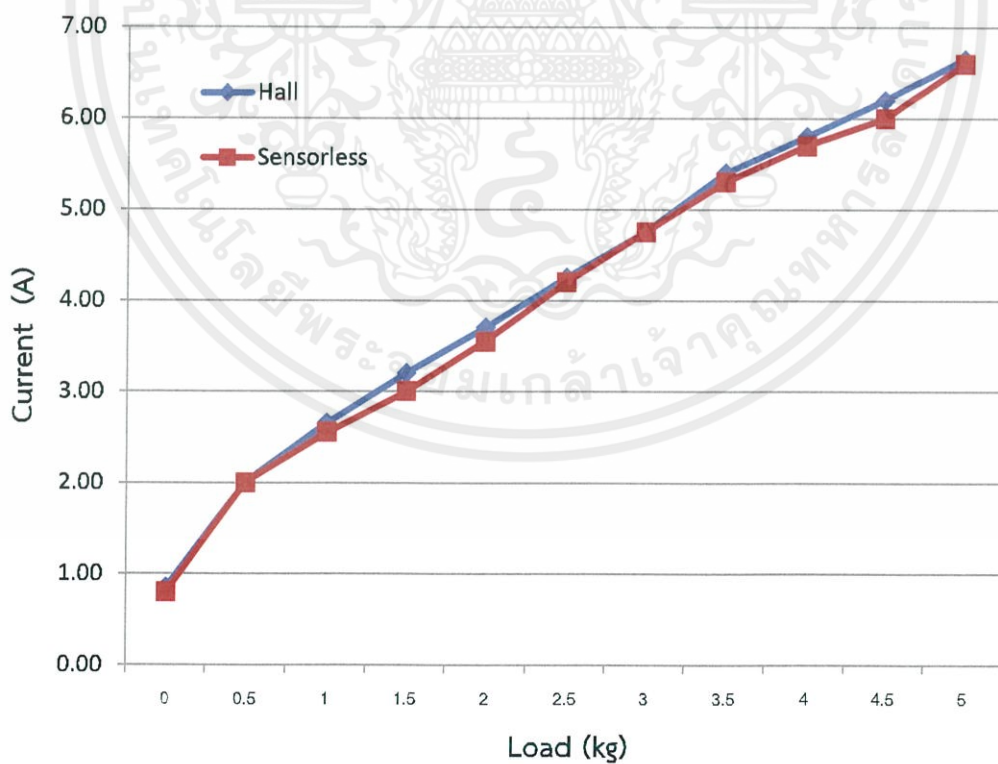
(ข) แบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่ง

รูปที่ 4.19 สัญญาณแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าระหว่างแบบมีตัวตรวจจับตำแหน่งและแบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งที่ภาระทางกล 0 และ 5 กิโลกรัม ที่ค่าตัวดี 1

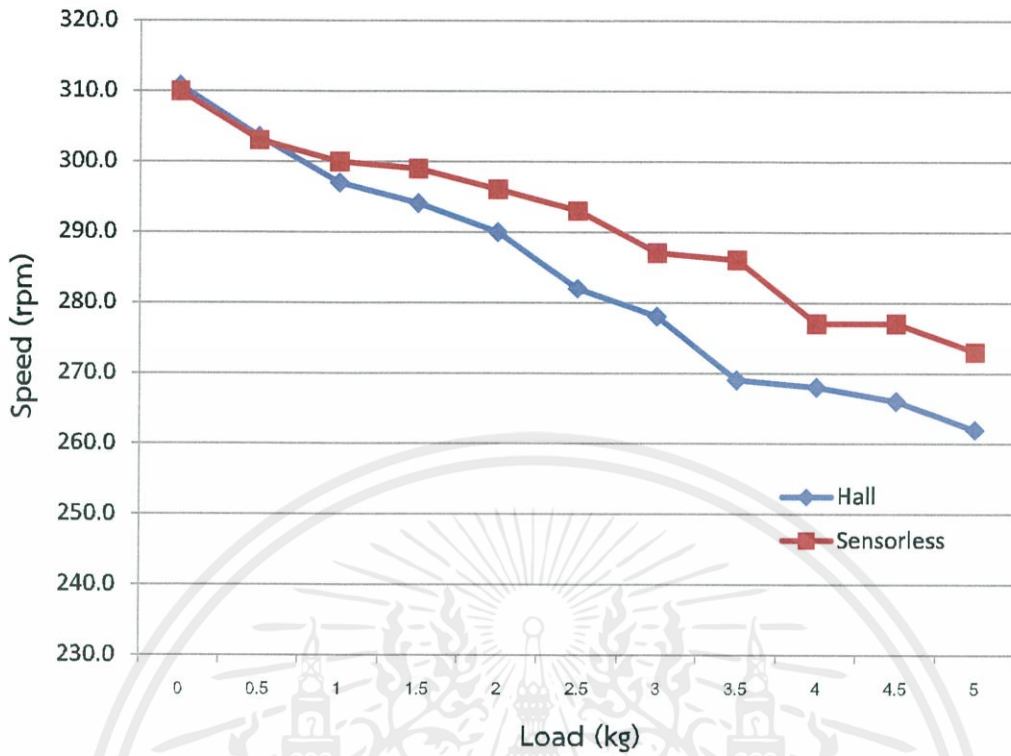
จากผลการทดสอบที่ภาระทางกลเท่ากันตามรูปที่ 4.19 สัญญาณของแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วมอเตอร์ และกระแสไฟฟ้า มีขนาดสัญญาณใกล้เคียงกัน



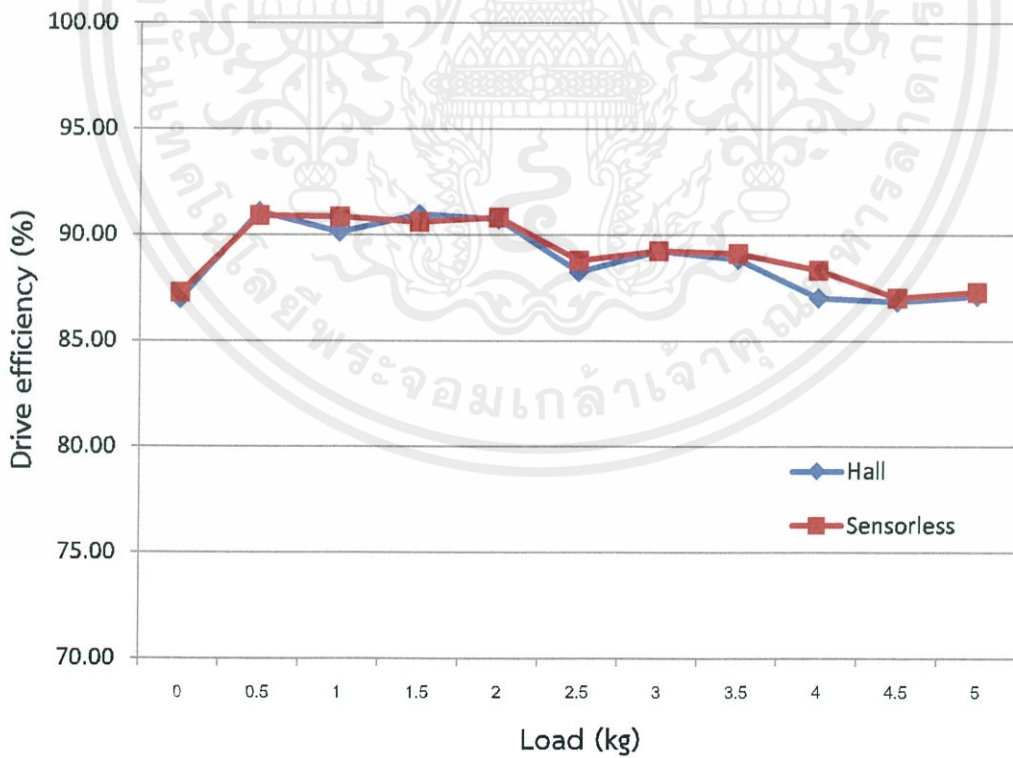
รูปที่ 4.20 กราฟเปรียบเทียบแรงบิดระหว่างมีตัวตรวจจับกับปราศจากตัวตรวจจับ



ที่ 4.21 กราฟเปรียบเทียบกระแสระหว่างมีตัวตรวจจับกับปราศจากตัวตรวจจับ



รูปที่ 4.22 กราฟเปรียบเทียบความเร็วรอบระหว่างมีตัวตรวจจับกับปราศจากตัวตรวจจับ



รูปที่ 4.23 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพไดร์ฟระหว่างมีตัวตรวจจับกับปราศจากตัวตรวจจับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง ข้อเสนอแนะ และแนวทางการพัฒนา

5.1 บทนำ

ในการศึกษาการออกแบบการทดลองวงจรสำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ โดยอาศัยหลักการตรวจจับสัญญาณผ่านศูนย์ของผลต่างแรงดันระหว่างขั้วมอเตอร์ (V_{LL}) ซึ่งจะได้เป็นสัญญาณเสมือน (Zero crossing) เพื่อใช้แทนสัญญาณจริงจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ (Hall Sensor)

5.2 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองในงานวิจัยนี้จะวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของการควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์เปรียบเทียบกับแบบมีตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ โดยผลการทดลองแสดงในบทที่ 4 ซึ่งหัวข้อการทดสอบจะประกอบไปด้วย การทดสอบความผิดปกติของสัญญาณตรวจจับตำแหน่งที่น้ำหนัก 0 กิโลกรัม เปรียบเทียบการตอบสนองต่อภาระทางกลแบบทันทีทันใด วิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ค่าความผิดเพี้ยนรูปคลื่นไซน์ (%THDV) ที่ภาระทางกลต่างๆ วิเคราะห์สัญญาณแรงดันระหว่างขั้วมอเตอร์ (V_{LL}) และกระแสไฟฟ้าที่โหลดต่างๆ เปรียบเทียบประสิทธิภาพของการควบคุมมอเตอร์แบบมีตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์กับแบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ โดยผลสรุปแต่ละหัวข้อการทดลองมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.2.1 การทดสอบความผิดปกติของสัญญาณตรวจจับตำแหน่งที่น้ำหนัก 0 กิโลกรัม

ในกรณีที่เกิดค่าความผิดเพี้ยนจากความเป็นจริงของสัญญาณตรวจจับตำแหน่งไม่ว่าจะเกิดจากสายหลวม สายขาด หรือตำแหน่งของสัญญาณคลาดเคลื่อนซึ่งโดยปกติแล้วหน้าที่ของตัวตรวจจับตำแหน่งคือตรวจจับขั้วของแม่เหล็ก ถ้าเกิดปัญหาอย่างใดอย่างหนึ่งจากที่กล่าวมาข้างต้นจะส่งผลให้มอเตอร์มีกระแสสูง เกิดการกระเพื่อมของแรงบิด เกิดเสียงดัง เกิดความร้อนสูงภายในมอเตอร์ และเกิดการสูญเสียในมอเตอร์สูง

5.2.2 เปรียบเทียบการตอบสนองต่อภาระทางกลแบบทันทีทันใด

จากผลทดสอบมอเตอร์โดยการเพิ่มภาระทางกลแบบทันทีทันใดแบบมีตัวตรวจจับตำแหน่งกับปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่ง จะพบว่าเมื่อเพิ่มโหลดแบบทันทีทันใดแล้วกราฟสัญญาณแรงดันจะลดลงมาที่ค่าๆ หนึ่งซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน และช่วงเวลาการเปลี่ยนแปลงของกราฟกระแสตั้งแต่เริ่มเปลี่ยนภาระทางกลจนถึงสภาวะสมดุล เมื่อนำมาเปรียบเทียบกันจะพบว่าช่วงเวลาการตอบสนองต่อโหลดของแบบมีตัวตรวจจับเร็วกว่าแบบปราศจากตัวตรวจจับ 0.189 วินาที

5.2.3 วิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ค่าความผิดเพี้ยนรูปคลื่นไซน์ (%THDV) ที่ภาระทางกลต่างๆ

จากผลการทดสอบเมื่อเพิ่มค่าภาระทางกล เปอร์เซ็นต์ค่าความผิดเพี้ยนรูปคลื่นไซน์ (%THDV) จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นโดยที่การควบคุมมอเตอร์แบบมีตัวตรวจจับมีค่า %THDV สูงกว่าการ

ควบคุมมอเตอร์แบบปราศจากตัวตรวจจับเล็กน้อยในทุกน้ำหนักภาระทางกลส่งผลให้กระแสในขณะมอเตอร์ทำงานแบบมีตัวตรวจจับตำแหน่งสูงกว่าแบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่ง

5.2.4 วิเคราะห์สัญญาณแรงดันระหว่างขั้วมอเตอร์และกระแสไฟฟ้าที่โหลดต่างๆ

จากผลการทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านที่โหลดต่างๆพบว่าสัญญาณแรงดันระหว่างขั้วมอเตอร์แบบมีตัวตรวจจับและแบบปราศจากตัวตรวจจับนั้นมีรูปสัญญาณและขนาดที่ใกล้เคียงกันทั้งขณะมีภาระทางกลและไม่มีภาระทางกล ส่วนกระแสไฟฟ้าขณะไม่มีภาระทางกลพบว่าขนาดกระแสใกล้เคียงกัน และเมื่อเพิ่มภาระทางกล กระแสจะเพิ่มขึ้นโดยขนาดกระแสแบบมีตัวตรวจจับ จะสูงกว่าแบบปราศจากตัวตรวจจับเล็กน้อย

5.2.5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของการควบคุมมอเตอร์ทั้งสองกรณี

จากผลการทดสอบการควบคุมมอเตอร์แบบมีตัวตรวจจับกับแบบปราศจากตัวตรวจจับ ที่การทดสอบโดยเพิ่มภาระทางกลในแต่ละค่า พบว่าลักษณะกราฟแรงดันของเทคนิคปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งมีค่าใกล้เคียงกันกับเทคนิคการใช้ตัวตรวจจับตำแหน่ง ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดรูปคลื่นไซน์มีค่าน้อยกว่าเล็กน้อย แรงบิดแบบมีตัวตรวจจับสูงกว่าแบบปราศจากตัวตรวจจับเล็กน้อย ความเร็วรอบแบบมีตัวตรวจจับน้อยกว่าแบบปราศจากตัวตรวจจับเมื่อเพิ่มภาระทางกลสูงขึ้น กระแสไฟฟ้ามอเตอร์แบบมีตัวตรวจจับมีค่าสูงกว่าแบบปราศจากตัวตรวจจับเล็กน้อย แต่วิธีการควบคุมมอเตอร์แบบปราศจากตัวตรวจจับจะสามารถควบคุมตำแหน่งของสัญญาณได้ โดยการหน่วงเวลาจากตำแหน่งโรเตอร์จริงเล็กน้อยทำให้สามารถลดสไปค์ของแรงดันไฟฟ้าขณะสวิตซ์ซึ่งซึ่งวิธีการควบคุมมอเตอร์แบบปราศจากตัวตรวจจับสามารถควบคุมตำแหน่งของสัญญาณได้ สำหรับการทดสอบภาระทางกลโดยการทดสอบด้วยตุ้มน้ำหนักในช่วงน้ำหนัก 0 ถึง 5 กิโลกรัม ประสิทธิภาพการขับเคลื่อนอินเวอร์เตอร์มีความใกล้เคียงกัน จากการเฉลี่ยประสิทธิภาพชุดควบคุมมอเตอร์ของแต่ละน้ำหนักในแต่ละภาระทางกล จะได้ว่าประสิทธิภาพของชุดควบคุมมอเตอร์แบบมีตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์มีค่าเท่ากับ 88.84 เปอร์เซ็นต์ และประสิทธิภาพของชุดควบคุมมอเตอร์แบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์มีค่าเท่ากับ 89.12 เปอร์เซ็นต์

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 การทดสอบภาระทางกลเพื่อหาประสิทธิภาพ ควรทดสอบบนแท่นทดสอบที่ได้มาตรฐาน เนื่องจากการทดสอบโดยการถ่วงน้ำหนักอาจมีผลของแรงเสียดทานซึ่งเป็นตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้มาเกี่ยวข้อง

5.3.2 ควรเพิ่มอุปกรณ์สำหรับบันทึกความเร็วรอบเพื่อดูผลการตอบสนองในด้านความเร็วของมอเตอร์ในสถานะต่างๆ

5.3.3 การใช้วงจรกรองความถี่ต่ำมีผลต่อการตอบสนองในด้านมุมเฟสที่ตัวตีต่างๆ ไม่เท่ากัน จึงควรมีการออกแบบอย่างเหมาะสม

5.3.4 ควรมีการจัดวางอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในวงจรกำลังและวงจรควบคุมโดยคำนึงถึงความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อเป็นการลดสัญญาณรบกวนที่อาจส่งผลให้วงจรมีการทำงานผิดปกติ

5.4 แนวทางการพัฒนา

5.4.1 ควรมีการเพิ่มการควบคุมความเร็วรอบแบบวงรอบปิด เพื่อให้เป็นทางเลือกในการทำงานที่ต้องการความเร็วรอบคงที่

5.4.2 ควรมีการพัฒนาชุดควบคุมให้สามารถทำงานได้ทั้ง 4 จตุภาค

5.4.3 ควรพัฒนาชุดควบคุมให้มีพิกัดกำลังที่สูงขึ้นเพื่อนำไปใช้สำหรับการควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านที่มีกำลังและความเร็วรอบสูง เพื่อนำไปใช้งานทางด้านอุตสาหกรรม งานด้านการควบคุมอัตโนมัติ

5.4.4 ควรมีการออกแบบชุดควบคุมให้มีขนาดเล็กลง เพื่อให้เหมาะสมต่อการใช้งานที่มีขนาดพื้นที่จำกัดและต้องการความสะดวกในการเคลื่อนย้าย



เอกสารอ้างอิง

- [1] ไตรภพ บัระภท, “การควบคุมความเร็วแบบปราศจากตัวตรวจจับอย่างประหยัดสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านโดยวิธีการค้นหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับลักษณะสี่เหลี่ยมคางหมู”, **วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต**, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2552
- [2] กฤตภาส ผินสันเทียะ, “การออกแบบควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านปราศจากเซนเซอร์ด้วยเทคนิคการตรวจจับสัญญาณผ่านศูนย์”, **วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต**, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2558
- [3] P. Damodharan and Krishna Vasudevan, “Sensorless Brushless DC Motor Drive Based on the Zero-Crossing Detection of Back Electromotive Force (EMF) From the Line Voltage Difference” , **IEEE Transactions on Energy Conversion**, Vol.25 No.3, 2010, pp. 661 - 668
- [4] Adrian Lita and Mihai Cheles, AN1160, “Sensorless BLDC Control with Back-EMF Filtering Using a Majority Function”, **Microchip Technology Inc.**, 2008



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A closer look at your new LaunchPad Development Kit

Featured microcontroller: TMS320F28377S

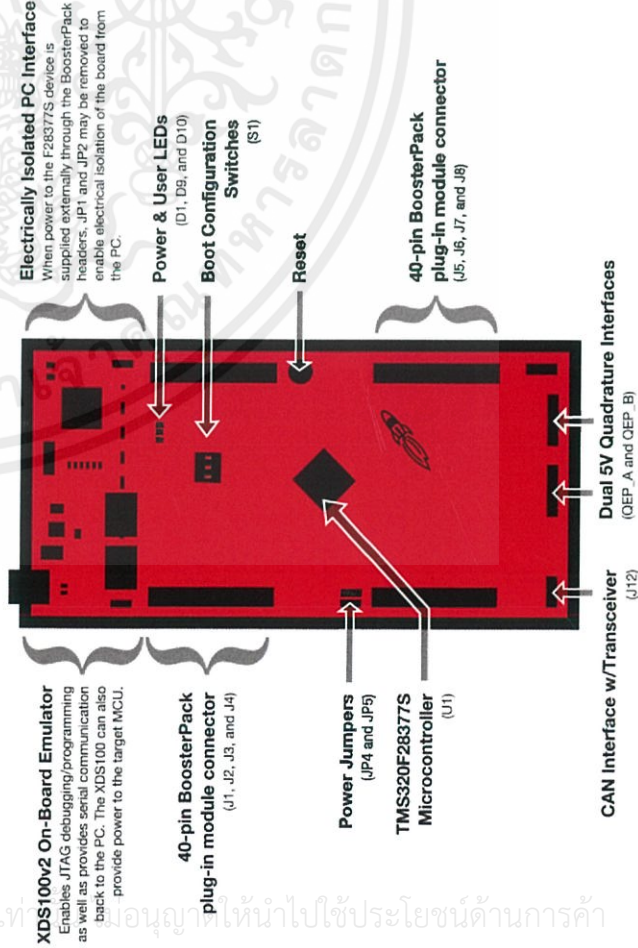
This LaunchPad is great for...

- Evaluation of motor control algorithms, including encoder and sensorless based torque, velocity, and servo position control
- Experimentation with power conversion control including DC-AC, AC-DC, DC-DC, and MPPT algorithms
- Power Line Communications and Metering
- Industrial sensing and interface
- Digital Signal Processing, sensing, and capture applications including radar, Doppler, infrared, and time-of-flight

What comes in the box?



LAUNCHXL-F28377S Overview



Out-of-box Demo

For more detailed instructions refer to the user's guide @ ti.com/launchxl-f28377s

1. Connecting to the Computer

Connect the LaunchPad using the included mini-USB cable to a computer. Two green power LEDs should illuminate. For proper operation, drivers are needed. It is recommended to get drivers by installing an IDE such as TI's CCS. Drivers are also available at ti.com/xds100drivers.

2. Running the Out-of-box Demo

When connected to your computer, the LaunchPad will power up and flash the red and blue LEDs for approximately 3 seconds. After the LEDs complete flashing the LaunchPad goes into an ADC sample mode.

ADC Sample Mode

This mode provides a simple example of how to sample the ADC and display the sampled data. ADCIN14 (Pin 23) is sampled once per second.

If the sample is above mid-scale (2048) the red LED (D9) will light.

Conversely, if the sample is below mid-scale the blue LED (D10) will light.

Sample data is also sent serially to the PC through the USB cable using a virtual COM port. The data can be viewed in a terminal using these settings: 115200 baud, 8 data, no parity, and 1 stop bit.

Software Tools

TI's software tools make it easy to get started building your control application.

controlSUITE™

controlSUITE for C2000™ microcontrollers is a cohesive set of software infrastructure and software tools designed to minimize software development time. From device-specific drivers and support software to complete system examples in sophisticated system applications, controlSUITE provides libraries and examples at every stage of development and evaluation. Go beyond simple code snippets - jump start your real-time system with real-world software.

powerSUITE

Within controlSUITE, you'll find powerSUITE, a suite of tools designed to make your life as a digital power supply designer easier. The Adaptation GUI allows you to modify existing code examples provided by TI for your custom hardware using a GUI instead of writing the control code from scratch. The Compensation Designer GUI paired with the Software Frequency Analyzer GUI allows you to modify the necessary control loop parameters required to design and tune your control loop.

Getting Started

To get started download controlSUITE from www.ti.com/controlsuite. After controlSUITE is installed, run ControlSUITE.exe and follow the User's Guide for the F28377S LaunchPad.

Find more information @ ti.com/controlsuite

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำ ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ควรนำ ไปใช้เพื่อการค้า และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

GBPC35005/W - GBPC3510/W

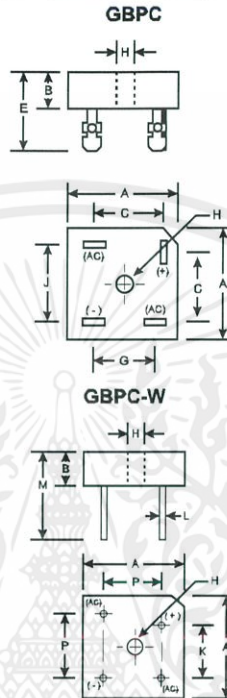
35A GLASS PASSIVATED BRIDGE RECTIFIER

Features

- Glass Passivated Die Construction
- Diffused Junction
- Low Reverse Leakage Current
- Low Power Loss, High Efficiency
- Surge Overload Rating to 400A Peak
- Electrically Isolated Metal Base for Maximum Heat Dissipation
- Case to Terminal Isolation Voltage 1500V
- UL Listed Under Recognized Component Index, File Number E94661

Mechanical Data

- Case: Molded Plastic with Heatsink Internally Mounted in the Bridge Encapsulation
- Terminals: Plated Leads Solderable per MIL-STD-202, Method 208
- Polarity: As Marked on Case
- Mounting: Through Hole for #10 Screw
- Mounting Torque: 8.0 Inch-pounds Maximum
- GBPC Weight: 20 grams (approx.)
- GBPC-W Weight: 14 grams (approx.)
- Mounting Position: Any



GBPC / GBPC-W		
Dim	Min	Max
A	28.30	28.80
B	7.40	8.25
C	16.10	17.10
E	18.80	21.30
G	13.80	14.80
H	Hole for #10 screw	
	5.08 \varnothing	5.59 \varnothing
J	17.60	18.60
K	10.90	11.90
L	0.97 \varnothing	1.07 \varnothing
M	31.80	—
P	17.60	18.60
All Dimensions in mm		

"W" Suffix Designates Wire Leads
No Suffix Designates Faston Terminals

Maximum Ratings and Electrical Characteristics @ T_A = 25°C unless otherwise specified

Single phase, 60Hz, resistive or inductive load.
For capacitive load, derate current by 20%.

Characteristic	Symbol	GBPC35005/W	GBPC3501/W	GBPC3502/W	GBPC3504/W	GBPC3506/W	GBPC3508/W	GBPC3510/W	Unit
Peak Repetitive Reverse Voltage	V _{RRM}	50	100	200	400	600	800	1000	V
Working Peak Reverse Voltage	V _{RWM}								
DC Blocking Voltage	V _R								
RMS Reverse Voltage	V _{R(RMS)}	35	70	140	280	420	560	700	V
Average Rectified Output Current @ T _C = 50°C	I _O				35				A
Non-Repetitive Peak Forward Surge Current 8.3ms single half sine-wave superimposed on rated load (JEDEC Method)	I _{FSM}				400				A
Forward Voltage (per element) @ I _F = 17.5A	V _{FM}				1.1				V
Peak Reverse Current at Rated DC Blocking Voltage @ T _C = 25°C @ T _C = 125°C	I _R				5.0				μA
I ² t Rating for Fusing (Note 1)	I ² t				660				A ² s
Typical Junction Capacitance (Note 2)	C _J				300				pF
Typical Thermal Resistance per leg (Note 3)	R _{θJC}				1.2				°C/W
Operating and Storage Temperature Range	T _J , T _{STG}				-65 to +150				°C

- Notes:
1. Non-repetitive, for t > 1.0ms and t < 8.3ms.
 2. Measured at 1.0MHz and applied reverse voltage of 4.0V DC.
 3. Thermal resistance junction to case mounted on heatsink.

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

HIGH AND LOW SIDE DRIVER Product Summary

Features

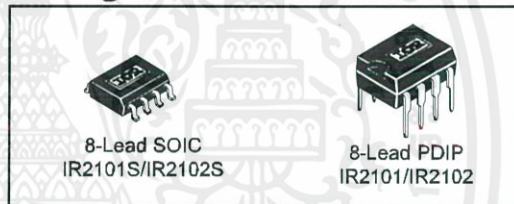
- Floating channel designed for bootstrap operation Fully operational to +600V Tolerant to negative transient voltage dV/dt immune
- Gate drive supply range from 10 to 20V
- Undervoltage lockout
- 3.3V, 5V, and 15V logic input compatible
- Matched propagation delay for both channels
- Outputs in phase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

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

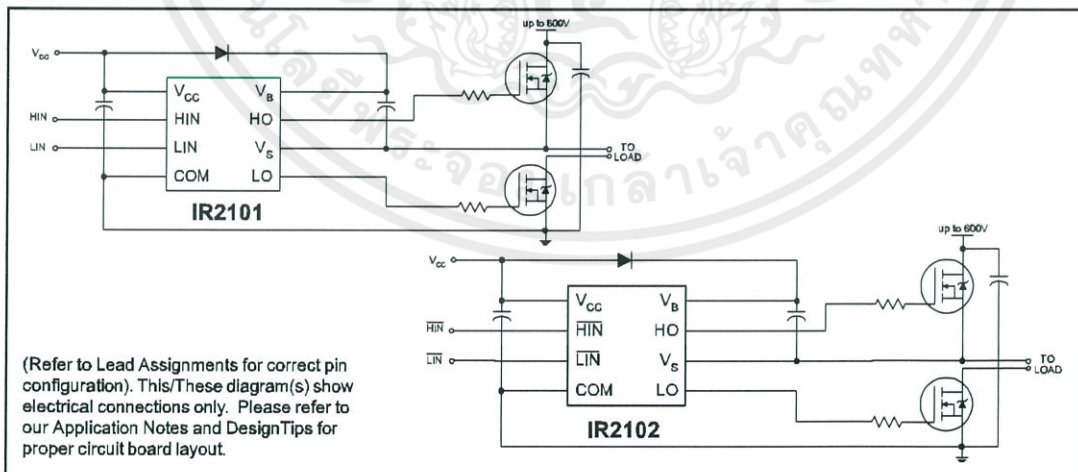
Description

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.

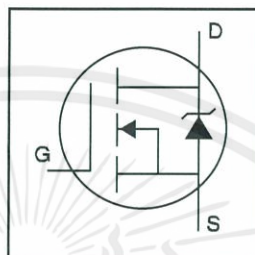
Symbol	Definition	Min.	Max.	Units
V _B	High side floating supply absolute voltage	V _S + 10	V _S + 20	V
V _S	High side floating supply offset voltage	Note 1	600	
V _{HO}	High side floating output voltage	V _S	V _B	
V _{CC}	Low side and logic fixed supply voltage	10	20	
V _{LO}	Low side output voltage	0	V _{CC}	
V _{IN}	Logic input voltage (HIN & LIN) (IR2101) & ($\overline{\text{HIN}}$ & $\overline{\text{LIN}}$) (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).

IRF2807PbF

HEXFET® Power MOSFET

- Advanced Process Technology
- Ultra Low On-Resistance
- Dynamic dv/dt Rating
- 175°C Operating Temperature
- Fast Switching
- Fully Avalanche Rated
- Lead-Free



$V_{DSS} = 75V$
$R_{DS(on)} = 13m\Omega$
$I_D = 82A \text{ } \textcircled{7}$

Description

Advanced HEXFET® Power MOSFETs from International Rectifier utilize advanced processing techniques to achieve extremely low on-resistance per silicon area. This benefit, combined with the fast switching speed and ruggedized device design that HEXFET power MOSFETs are well known for, provides the designer with an extremely efficient and reliable device for use in a wide variety of applications.

The TO-220 package is universally preferred for all commercial-industrial applications at power dissipation levels to approximately 50 watts. The low thermal resistance and low package cost of the TO-220 contribute to its wide acceptance throughout the industry.



Absolute Maximum Ratings

	Parameter	Max.	Units
$I_D @ T_C = 25^\circ C$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10V$	82 $\text{ } \textcircled{7}$	A
$I_D @ T_C = 100^\circ C$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10V$	58	
I_{DM}	Pulsed Drain Current $\text{ } \textcircled{1}$	280	
$P_D @ T_C = 25^\circ C$	Power Dissipation	230	W
	Linear Derating Factor	1.5	W/°C
V_{GS}	Gate-to-Source Voltage	± 20	V
I_{AR}	Avalanche Current $\text{ } \textcircled{1}$	43	A
E_{AR}	Repetitive Avalanche Energy $\text{ } \textcircled{1}$	23	mJ
dv/dt	Peak Diode Recovery dv/dt $\text{ } \textcircled{3}$	5.9	V/ns
T_J	Operating Junction and	-55 to + 175	°C
T_{STG}	Storage Temperature Range		
	Soldering Temperature, for 10 seconds	300 (1.6mm from case)	
	Mounting torque, 6-32 or M3 screw	10 lbf•in (1.1N•m)	

Thermal Resistance

	Parameter	Typ.	Max.	Units
$R_{\theta JC}$	Junction-to-Case	—	0.65	°C/W
$R_{\theta CS}$	Case-to-Sink, Flat, Greased Surface	0.50	—	
$R_{\theta JA}$	Junction-to-Ambient	—	62	

IRF2807PbF

International
IOR Rectifier

Electrical Characteristics @ $T_J = 25^\circ\text{C}$ (unless otherwise specified)

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
$V_{(BR)DSS}$	Drain-to-Source Breakdown Voltage	75	—	—	V	$V_{GS} = 0V, I_D = 250\mu A$
$\Delta V_{(BR)DSS}/\Delta T_J$	Breakdown Voltage Temp. Coefficient	—	0.074	—	$V/^\circ\text{C}$	Reference to $25^\circ\text{C}, I_D = 1\text{mA}$
$R_{DS(on)}$	Static Drain-to-Source On-Resistance	—	—	13	$m\Omega$	$V_{GS} = 10V, I_D = 43A$ ④
$V_{GS(th)}$	Gate Threshold Voltage	2.0	—	4.0	V	$V_{DS} = V_{GS}, I_D = 250\mu A$
g_{fs}	Forward Transconductance	38	—	—	S	$V_{DS} = 50V, I_D = 43A$ ④
I_{DSS}	Drain-to-Source Leakage Current	—	—	25	μA	$V_{DS} = 75V, V_{GS} = 0V$
		—	—	250		$V_{DS} = 60V, V_{GS} = 0V, T_J = 150^\circ\text{C}$
I_{GSS}	Gate-to-Source Forward Leakage	—	—	100	nA	$V_{GS} = 20V$
	Gate-to-Source Reverse Leakage	—	—	-100		$V_{GS} = -20V$
Q_g	Total Gate Charge	—	—	160	nC	$I_D = 43A$
Q_{gs}	Gate-to-Source Charge	—	—	29		$V_{DS} = 60V$
Q_{gd}	Gate-to-Drain ("Miller") Charge	—	—	55		$V_{GS} = 10V$, See Fig. 6 and 13
$t_{d(on)}$	Turn-On Delay Time	—	13	—	ns	$V_{DD} = 38V$
t_r	Rise Time	—	64	—		$I_D = 43A$
$t_{d(off)}$	Turn-Off Delay Time	—	49	—		$R_G = 2.5\Omega$
t_f	Fall Time	—	48	—		$V_{GS} = 10V$, See Fig. 10 ④
L_D	Internal Drain Inductance	—	4.5	—	nH	Between lead, 6mm (0.25in.) from package and center of die contact
L_S	Internal Source Inductance	—	7.5	—		
C_{iss}	Input Capacitance	—	3820	—	pF	$V_{GS} = 0V$
C_{oss}	Output Capacitance	—	610	—		$V_{DS} = 25V$
C_{rss}	Reverse Transfer Capacitance	—	130	—		$f = 1.0\text{MHz}$, See Fig. 5
E_{AS}	Single Pulse Avalanche Energy ⑦	—	1280	③340	mJ	$I_{AS} = 50A, L = 370\mu H$

Source-Drain Ratings and Characteristics

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
I_S	Continuous Source Current (Body Diode)	—	—	82	A	MOSFET symbol showing the integral reverse p-n junction diode.
I_{SM}	Pulsed Source Current (Body Diode) ①	—	—	280		
V_{SD}	Diode Forward Voltage	—	—	1.2	V	$T_J = 25^\circ\text{C}, I_S = 43A, V_{GS} = 0V$ ④
t_{rr}	Reverse Recovery Time	—	100	150	ns	$T_J = 25^\circ\text{C}, I_F = 43A$
Q_{rr}	Reverse Recovery Charge	—	410	610	nC	$di/dt = 100A/\mu s$ ④
t_{on}	Forward Turn-On Time	Intrinsic turn-on time is negligible (turn-on is dominated by $L_S + L_D$)				

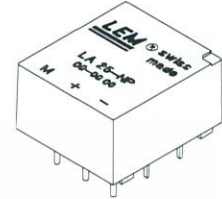
Notes:

- ① Repetitive rating; pulse width limited by max. junction temperature. (See fig. 11)
- ② Starting $T_J = 25^\circ\text{C}, L = 370\mu H$
 $R_G = 25\Omega, I_{AS} = 43A, V_{GS} = 10V$ (See Figure 12)
- ③ $I_{SD} \leq 43A, di/dt \leq 300A/\mu s, V_{DD} \leq V_{(BR)DSS}, T_J \leq 175^\circ\text{C}$
- ④ Pulse width $\leq 400\mu s$; duty cycle $\leq 2\%$.
- ⑤ This is a typical value at device destruction and represents operation outside rated limits.
- ⑥ This is a calculated value limited to $T_J = 175^\circ\text{C}$.
- ⑦ Calculated continuous current based on maximum allowable junction temperature. Package limitation current is 75A.

Current Transducer LA 25-NP

$I_{PN} = 5-6-8-12-25 A$

For the electronic measurement of currents : DC, AC, pulsed, mixed, with a galvanic isolation between the primary circuit (high power) and the secondary circuit (electronic circuit).



Electrical data

I_{PN}	Primary nominal r.m.s. current	25	At
I_P	Primary current, measuring range	0 .. ± 36	At
R_M	Measuring resistance with $\pm 15 V$	R_{Mmin}	R_{Mmax}
		@ $\pm 25 At_{max}$	100 320 Ω
		@ $\pm 36 At_{max}$	100 190 Ω
I_{SN}	Secondary nominal r.m.s. current	25	mA
K_N	Conversion ratio	1-2-3-4-5	: 1000
V_C	Supply voltage ($\pm 5 \%$)	± 15	V
I_C	Current consumption	$10 + I_S$	mA
V_d	R.m.s. voltage for AC isolation test, 50 Hz, 1 mn	2.5	kV
V_b	R.m.s. rated voltage ¹⁾ , safe separation basic isolation	600	V
		1700	V

Features

- Closed loop (compensated) multi-range current transducer using the Hall effect
- Insulated plastic case recognized according to UL 94-V0.

Advantages

- Excellent accuracy
- Very good linearity
- Low temperature drift
- Optimized response time
- Wide frequency bandwidth
- No insertion losses
- High immunity to external interference
- Current overload capability.

Accuracy - Dynamic performance data

X	Accuracy @ $I_{PN}, T_A = 25^\circ C$	± 0.5	%
ϵ_L	Linearity	< 0.2	%
I_O	Offset current ²⁾ @ $I_P = 0, T_A = 25^\circ C$	Typ	Max
		± 0.05	± 0.15 mA
I_{OM}	Residual current ³⁾ @ $I_P = 0$, after an overload of $3 \times I_{PN}$	± 0.05	± 0.15 mA
I_{OT}	Thermal drift of I_O	0°C .. + 25°C	± 0.06 ± 0.25 mA
		+ 25°C .. + 70°C	± 0.10 ± 0.35 mA
t_r	Response time ⁴⁾ @ 90 % of I_{Pmax}	< 1	μs
di/dt	di/dt accurately followed	> 50	A/ μs
f	Frequency bandwidth (- 1 dB)	DC .. 150	kHz

Applications

- AC variable speed drives and servo motor drives
- Static converters for DC motor drives
- Battery supplied applications
- Uninterruptible Power Supplies (UPS)
- Switched Mode Power Supplies (SMPS)
- Power supplies for welding applications.

General data

T_A	Ambient operating temperature	0 .. + 70	$^\circ C$
T_S	Ambient storage temperature	- 25 .. + 85	$^\circ C$
R_P	Primary resistance per turn @ $T_A = 25^\circ C$	< 1.25	m Ω
R_S	Secondary coil resistance @ $T_A = 70^\circ C$	110	Ω
R_{IS}	Isolation resistance @ 500 V, $T_A = 25^\circ C$	> 1500	M Ω
m	Mass	22	g
	Standards ⁵⁾	EN 50178	

Notes : ¹⁾ Pollution class 2

²⁾ Measurement carried out after 15 mn functioning

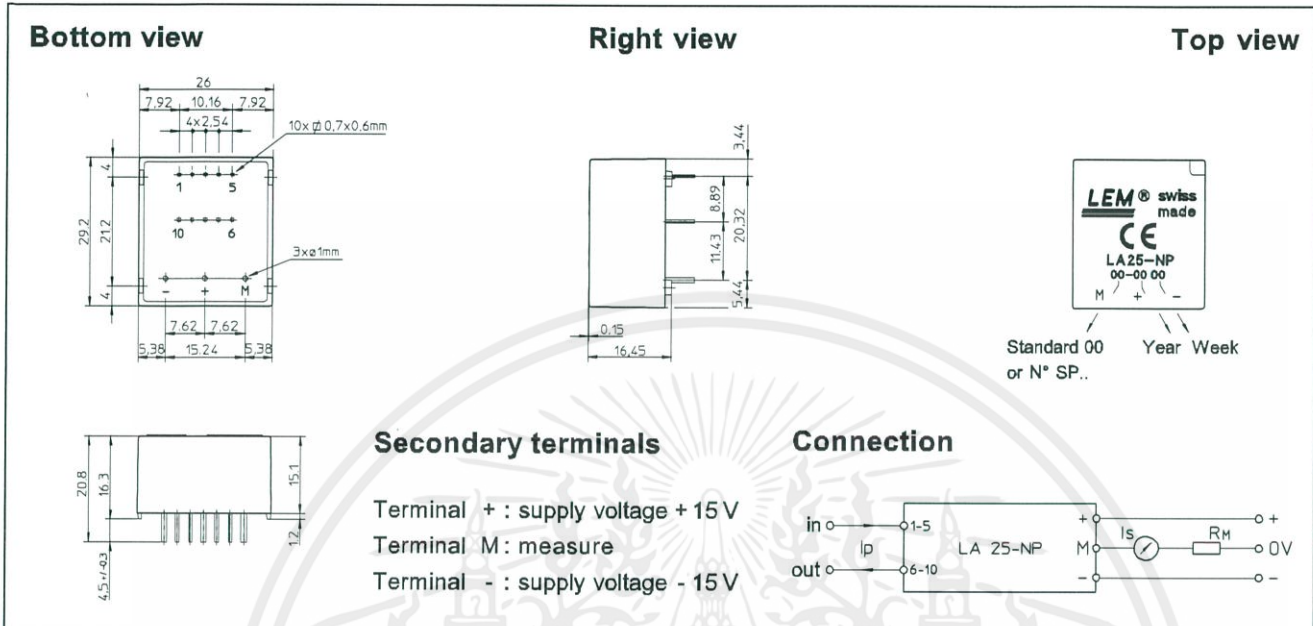
³⁾ The result of the coercive field of the magnetic circuit

⁴⁾ With a di/dt of 100 A/ μs

⁵⁾ A list of corresponding tests is available

980909/8

Dimensions LA 25-NP (in mm. 1 mm = 0.0394 inch)



Number of primary turns	Primary current		Nominal output current I_{SN} [mA]	Turns ratio K_N	Primary resistance R_p [$m\Omega$]	Primary insertion inductance L_p [μH]	Recommended connections
	nominal I_{PN} [A]	maximum I_p [A]					
1	25	36	25	1/1000	0.3	0.023	5 4 3 2 1 IN ○ ○ ○ ○ ○ OUT 6 7 8 9 10
2	12	18	24	2/1000	1.1	0.09	5 4 3 2 1 IN ○ ○ ○ ○ ○ OUT 6 7 8 9 10
3	8	12	24	3/1000	2.5	0.21	5 4 3 2 1 IN ○ ○ ○ ○ ○ OUT 6 7 8 9 10
4	6	9	24	4/1000	4.4	0.37	5 4 3 2 1 IN ○ ○ ○ ○ ○ OUT 6 7 8 9 10
5	5	7	25	5/1000	6.3	0.58	5 4 3 2 1 IN ○ ○ ○ ○ ○ OUT 6 7 8 9 10

Mechanical characteristics

- General tolerance ± 0.2 mm
- Fastening & connection of primary 10 pins 0.7 x 0.6 mm
- Fastening & connection of secondary 3 pins $\varnothing 1$ mm
- Recommended PCB hole 1.2 mm

Remarks

- I_s is positive when I_p flows from terminals 1, 2, 3, 4, 5 to terminals 10, 9, 8, 7, 6
- This is a standard model. For different versions (supply voltages, turns ratios, unidirectional measurements...), please contact us.

LEM reserves the right to carry out modifications on its transducers, in order to improve them, without previous notice.

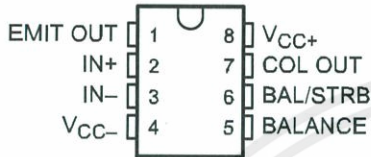
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LM111, LM211, LM311 DIFFERENTIAL COMPARATORS WITH STROBES

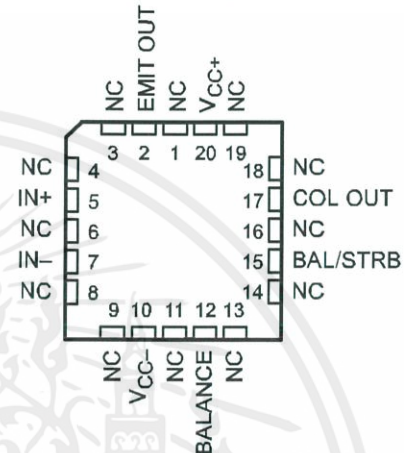
SLCS007H – SEPTEMBER 1973 – REVISED AUGUST 2003

- **Fast Response Times**
- **Strobe Capability**
- **Maximum Input Bias Current . . . 300 nA**
- **Maximum Input Offset Current . . . 70 nA**
- **Can Operate From Single 5-V Supply**
- **Available in Q-Temp Automotive**
 - High-Reliability Automotive Applications
 - Configuration Control/Print Support
 - Qualification to Automotive Standards

LM111 . . . JG PACKAGE
LM211 . . . D, P, OR PW PACKAGE
LM311 . . . D, P, PS, OR PW PACKAGE
(TOP VIEW)



LM111 . . . FK PACKAGE
(TOP VIEW)



NC – No internal connection

description/ordering information

The LM111, LM211, and LM311 are single high-speed voltage comparators. These devices are designed to operate from a wide range of power-supply voltages, including ± 15 -V supplies for operational amplifiers and 5-V supplies for logic systems. The output levels are compatible with most TTL and MOS circuits. These comparators are capable of driving lamps or relays and switching voltages up to 50 V at 50 mA. All inputs and outputs can be isolated from system ground. The outputs can drive loads referenced to ground, V_{CC+} or V_{CC-} . Offset balancing and strobe capabilities are available, and the outputs can be wire-OR connected. If the strobe is low, the output is in the off state, regardless of the differential input.



Please be aware that an important notice concerning availability, standard warranty, and use in critical applications of Texas Instruments semiconductor products and disclaimers thereto appears at the end of this data sheet.

PRODUCTION DATA Information is current as of publication date. Products conform to specifications per the terms of Texas Instruments standard warranty. Production processing does not necessarily include testing of all parameters.

**TEXAS
INSTRUMENTS**

POST OFFICE BOX 655303 • DALLAS, TEXAS 75265

Copyright © 2003, Texas Instruments Incorporated
On products compliant to MIL-PRF-38535, all parameters are tested unless otherwise noted. On all other products, production processing does not necessarily include testing of all parameters.

LM111, LM211, LM311 DIFFERENTIAL COMPARATORS WITH STROBES

SLCS007H – SEPTEMBER 1973 – REVISED AUGUST 2003

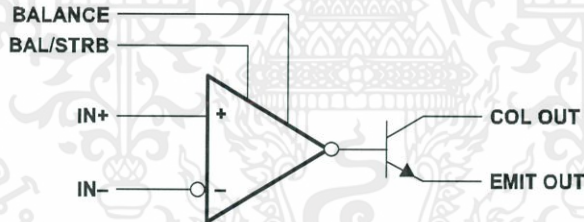
description/ordering information

ORDERING INFORMATION

TA	V _{IO} max AT 25°C	PACKAGE†		ORDERABLE PART NUMBER	TOP-SIDE MARKING
-0°C to 70°C	7.5 mV	PDIP (P)	Tube of 50	LM311P	LM311P
		SOIC (D)	Tube of 75	LM311D	LM311
			Reel of 2500	LM311DR	
		SOP (PS)	Reel of 2000	LM311PSR	L311
		TSSOP (PW)	Reel of 150	LM311PW	L311
Tube of 2000	LM311PWR				
-40°C to 85°C	3 mV	PDIP (P)	Tube of 50	LM211P	LM211P
		SOIC (D)	Tube of 75	LM211D	LM211
			Reel of 2500	LM211DR	
		TSSOP (PW)	Reel of 150	LM211PW	L211
Reel of 2000	LM211PWR				
-40°C to 125°C	3 mV	SOIC (D)	Tube of 75	LM211QD	LM211Q
			Reel of 2500	LM211QDR	
-55°C to 125°C	3 mV	CDIP (JG)	Tube of 50	LM111JG	LM111JG
		LCCC (FK)	Tube of 55	LM111FK	LM111FK

† Package drawings, standard packing quantities, thermal data, symbolization, and PCB design guidelines are available at www.ti.com/sc/package.

functional block diagram



 **TEXAS
INSTRUMENTS**

POST OFFICE BOX 655303 • DALLAS, TEXAS 75265

FEATURES

- Output Current up to 1 A
- Low Dropout Voltage (700mV at 1A Output Current)
- Three Terminal Adjustable or Fixed 1.5V, 1.8V, 2.5V, 2.85V, 3.0V, 3.3V, 5.0V
- 2.85V Device for SCSI-II Active Terminator
- 0.04% Line Regulation, 0.1% Load Regulation
- Very Low Quiescent Current
- Internal Current and Terminal Limit
- Logic-Controlled Electronics Shutdown
- Surface Mount Package SOT-223 & TO-263 (D2-Pack)
- 100% Thermal Limit Burn-In

APPLICATION

- Active SCSI Terminators
- Portable/Plan Top/Notebook Computers
- High Efficiency Linear Regulators
- SMPS Post Regulators
- Mother B/D Clock Supplies
- Disk Drives
- Battery Chargers

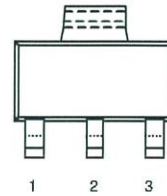
DESCRIPTION

The LM1117 is a low power positive-voltage regulator designed to meet 1A output current and comply with SCSI-II specifications with a fixed output voltage of 2.85V. This device is an excellent choice for use in battery-powered applications, as active terminators for the SCSI bus, and portable computers.

The LM1117 features very low quiescent current and very low dropout voltage of 700mV at a full load and lower as output current decreases. LM1117 is available as an adjustable or fixed 1.5V, 1.8V, 2.5V, 2.85V, 3.0V, 3.3V, and 5.0V output voltages.

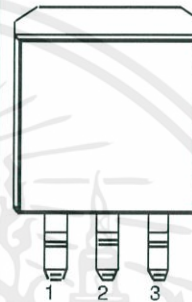
The LM1117 is offered in a 3-pin surface mount package SOT-223 & TO-263. The output capacitor of 10 μ F or larger is needed for output stability of LM1117 as required by most of the other regulator circuits.

SOT-223 PKG (FRONT VIEW)



PIN FUNCTION
1. Adj/Gnd
2. Vout
3. Vin

TO-263 (D2 PKG, FRONT VIEW)



PIN FUNCTION
1. Adj/Gnd
2. Vout
3. Vin

ORDERING INFORMATION

Device (Marking)	Package
LM1117S	SOT-223
LM1117S-XX	
LM1117T	TO-263 (D2)
LM1117T-XX	

(X=Output Voltage=1.5V, 1.8V, 2.5V, 2.85V, 3.0V, 3.3V, 5.0V, Adjustable=AD)

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

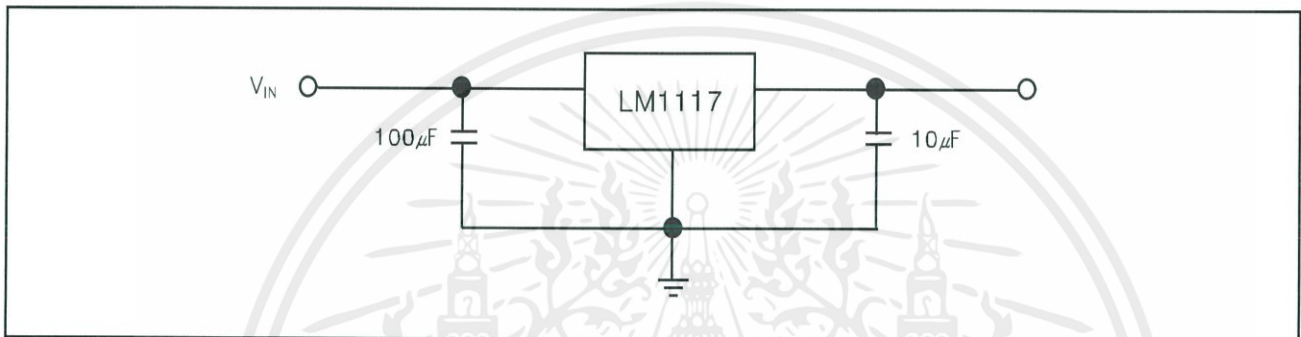
CHARACTERISTIC	SYMBOL	MIN.	MAX.	UNIT
DC Input Voltage	V_{IN}		7	V
Lead Temperature (Soldering, 5 Seconds)	T_{SOL}		260	$^{\circ}$ C
Storage Temperature Range	T_{STG}	-65	150	$^{\circ}$ C
Operating Junction Temperature Range	T_{OPR}	0	125	$^{\circ}$ C

HTC

THERMAL DATA

PARAMETER	SYMBOL	SOT-223	TO-263	UNIT
Thermal Resistance Junction-Case	$R_{THJ-CASE}$	15	3	$^{\circ}C$

TYPICAL APPLICATION


ELECTRICAL CHARACTERISTICS FOR LM1117 S/T-AD(ADJUSTABLE)
 (Refer to the test circuits, $T_J=0$ to $125^{\circ}C$ $C_O=10\mu F$ unless otherwise specified)

PARAMETER	SYMBOL	TEST CONDITION	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
Reference Voltage	V_{REF}	$V_{IN} - V_O = 2V, I_O = 100mA, T_J = 25^{\circ}C$	1.238	1.25	1.262	V
Reference Voltage	V_{REF}	$I_O = 10$ to $1A, V_{IN} - V_O = 1.4$ to $10V$	1.230		1.270	V
Line Regulation	ΔV_O	$V_{IN} - V_O = 1.5$ to $13.75V, I_O = 10mA$		0.035	0.2	%
Load Regulation	ΔV_O	$V_{IN} - V_O = 3V, I_O = 10mA$ to $1A$		0.1	0.4	%
Temperature Stability	ΔV_O			0.5		%
Long Term Stability	ΔV_O	1000 hrs, $T_J = 125^{\circ}C$		0.3		%
Operating Input Voltage	V_{IN}				7	V
Adjustment Pin Current	I_{ADJ}	$V_{IN} \leq 15V, I_{Load} = 10mA$		50	120	μA
Adjustment Pin Current Change	ΔI_{ADJ}	$V_{IN} - V_O = 1.4$ to $10V, I_O = 10mA$ to $1A$		1	5	μA
Minimum Load Current	$I_{O(MIN)}$	$V_{IN} = 15V$		1.7	5	mA
Output Current	I_O	$V_{IN} - V_O = 5V, T_J = 25^{\circ}C$	800	950	1200	mA
Output Noise ($\%V_O$)	e_N	$B = 10Hz$ to $10kHz, T_J = 25^{\circ}C$		0.003		%
Supply Voltage Rejection	SVR	$I_O = 40mA, f = 120Hz, T_J = 25^{\circ}C$ $V_{IN} - V_O = 3V, V_{NIPPLE} = 1V_{PP}$	60	75		dB
Dropout Voltage	V_D	$I_O = 100mA, V_{IN} = V_{OUT} + 0.8V$		1	1.1	V
		$I_O = 500mA, V_{IN} = V_{OUT} + 0.8V$		1.00	1.15	V
		$I_O = 1A, V_{IN} = V_{OUT} + 0.8V$		1.0	1.3	V
Thermal Regulation		$T_A = 25^{\circ}C$ 30ms Pulse		0.003		%/W


MOTOROLA

LM2575

Easy Switcher™ 1.0 A Step-Down Voltage Regulator

The LM2575 series of regulators are monolithic integrated circuits ideally suited for easy and convenient design of a step-down switching regulator (buck converter). All circuits of this series are capable of driving a 1.0 A load with excellent line and load regulation. These devices are available in fixed output voltages of 3.3 V, 5.0 V, 12 V, 15 V, and an adjustable output version.

These regulators were designed to minimize the number of external components to simplify the power supply design. Standard series of inductors optimised for use with the LM2575 are offered by several different inductor manufacturers.

Since the LM2575 converter is a switch-mode power supply, its efficiency is significantly higher in comparison with popular three-terminal linear regulators, especially with higher input voltages. In many cases, the power dissipated by the LM2575 regulator is so low, that no heatsink is required or its size could be reduced dramatically.

The LM2575 features include a guaranteed $\pm 4\%$ tolerance on output voltage within specified input voltages and output load conditions, and $\pm 10\%$ on the oscillator frequency ($\pm 2\%$ over 0°C to 125°C). External shutdown is included, featuring $80\ \mu\text{A}$ typical standby current. The output switch includes cycle-by-cycle current limiting, as well as thermal shutdown for full protection under fault conditions.

Features

- 3.3 V, 5.0 V, 12 V, 15 V, and Adjustable Output Versions
- Adjustable Version Output Voltage Range of 1.23 V to 37 V $\pm 4\%$ Maximum Over Line and Load Conditions
- Guaranteed 1.0 A Output Current
- Wide Input Voltage Range: 4.75 V to 40 V
- Requires Only 4 External Components
- 52 kHz Fixed Frequency Internal Oscillator
- TTL Shutdown Capability, Low Power Standby Mode
- High Efficiency
- Uses Readily Available Standard Inductors
- Thermal Shutdown and Current Limit Protection

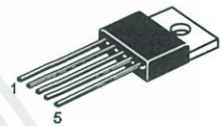
Applications

- Simple and High-Efficiency Step-Down (Buck) Regulators
- Efficient Pre-Regulator for Linear Regulators
- On-Card Switching Regulators
- Positive to Negative Converters (Buck-Boost)
- Negative Step-Up Converters
- Power Supply for Battery Chargers

EASY SWITCHER™ 1.0 A STEP-DOWN VOLTAGE REGULATOR

SEMICONDUCTOR TECHNICAL DATA

T SUFFIX
PLASTIC PACKAGE
CASE 314D



Pin 1. V_{in}
2. Output
3. Ground
4. Feedback
5. ON/OFF

TV SUFFIX
PLASTIC PACKAGE
CASE 314B



Heatsink surface
connected to Pin 3.

D2T SUFFIX
PLASTIC PACKAGE
CASE 936A
(D²PAK)



Heatsink surface (shown as terminal 6 in case outline drawing) is connected to Pin 3.

DEVICE TYPE/NOMINAL OUTPUT VOLTAGE

LM2575-3.3	3.3 V
LM2575-5	5.0 V
LM2575-12	12 V
LM2575-15	15 V
LM2575-Adj	1.23 V to 37 V

ORDERING INFORMATION

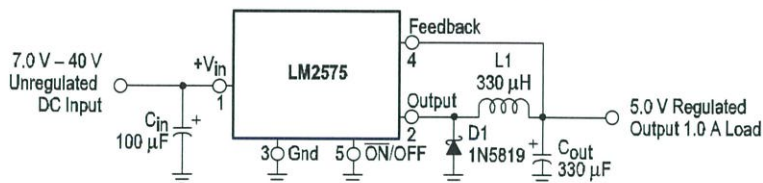
Device	Operating Temperature Range	Package
LM2575T-**	$T_J = -40^\circ$ to $+125^\circ\text{C}$	Straight Lead
LM2575TV-**		Vertical Mount
LM2575D2T-**		Surface Mount

** = Voltage Option, ie. 3.3, 5.0, 12, 15 V and Adjustable Output.

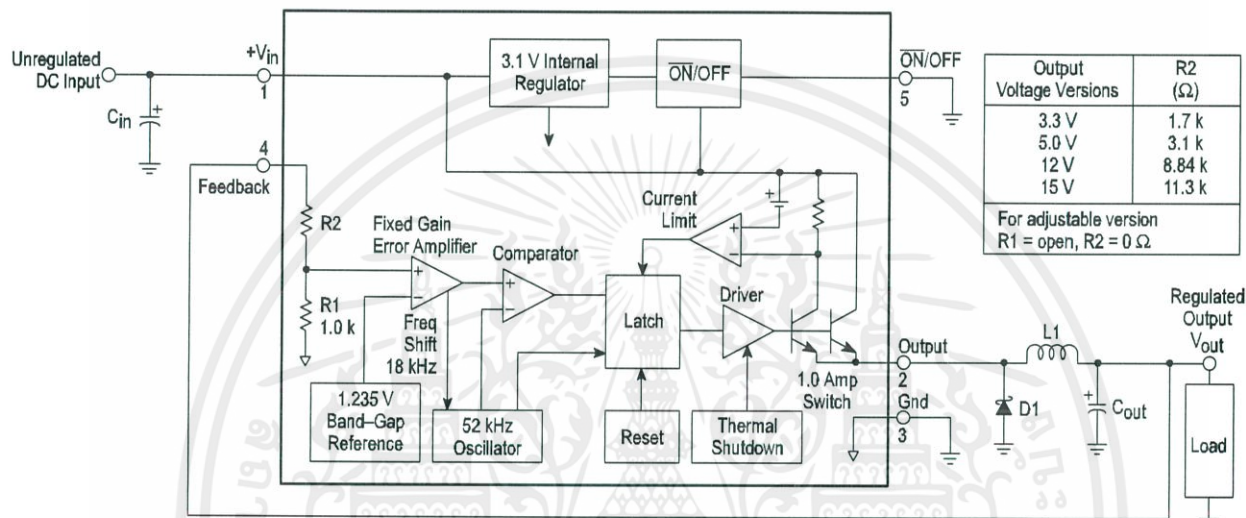
LM2575

Figure 1. Block Diagram and Typical Application

Typical Application (Fixed Output Voltage Versions)



Representative Block Diagram and Typical Application



This device contains 162 active transistors.

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS (Absolute Maximum Ratings indicate limits beyond which damage to the device may occur.)

Rating	Symbol	Value	Unit
Maximum Supply Voltage	V_{in}	45	V
ON/OFF Pin Input Voltage	—	$-0.3 \text{ V} \leq V \leq +V_{in}$	V
Output Voltage to Ground (Steady-State)	—	-1.0	V
Power Dissipation			
Case 314B and 314D (TO-220, 5-Lead)	P_D	Internally Limited	W
Thermal Resistance, Junction-to-Ambient	$R_{\theta JA}$	65	°C/W
Thermal Resistance, Junction-to-Case	$R_{\theta JC}$	5.0	°C/W
Case 936A (D ² PAK)	P_D	Internally Limited	W
Thermal Resistance, Junction-to-Ambient (Figure 34)	$R_{\theta JA}$	70	°C/W
Thermal Resistance, Junction-to-Case	$R_{\theta JC}$	5.0	°C/W
Storage Temperature Range	T_{stg}	-65 to +150	°C
Minimum ESD Rating (Human Body Model: C = 100 pF, R = 1.5 kΩ)	—	3.0	kV
Lead Temperature (Soldering, 10 s)	—	260	°C
Maximum Junction Temperature	T_J	150	°C

NOTE: ESD data available upon request.

LM79XX

LINEAR INTEGRATED CIRCUIT

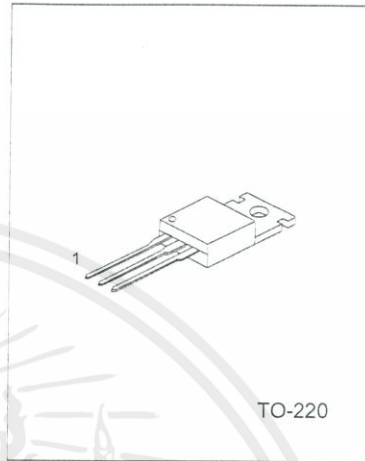
3 TERMINAL 1A NEGATIVE VOLTAGE REGULATOR

DESCRIPTION

The Contek LM79XX series of three-terminal negative regulators are available in TO-220 package and with several fixed output voltage, making them useful in a wide range of application. Each type employs internal current limiting, thermal shut-down and safe area protection, making it essentially indestructible.

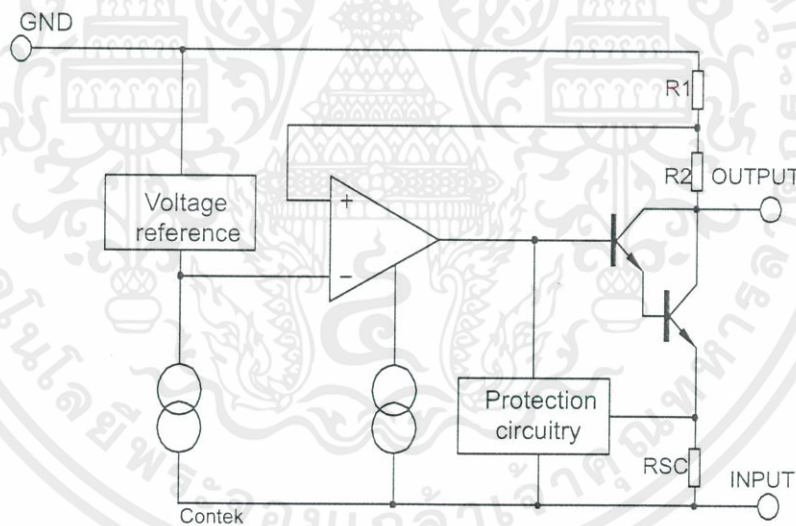
FEATURES

- *Output current up to 1A
- *-5V;-6V;-8V;-12V;-15V;-18V;-24V output voltage available
- *Thermal overload protection
- *Short circuit protection



1:GND 2:Input 3:Output

BLOCK DIAGRAM



Contek Microelectronics Co.,Ltd.

<http://www.contek-ic.com> E-mail:sales@contek-ic.com

LM79XX

LINEAR INTEGRATED CIRCUIT

Contek7924 ELECTRICAL CHARACTERISTICS

(Refer to test circuits, $0 < T_j < 125$ C, $I_o = 500$ mA, $V_i = -33$ V, $C_i = 2.2$ μF, $C_o = 1$ μF, unless otherwise specified)

PARAMETER	SYMBOL	TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNIT
Output voltage	V_o	$T_j = 25$ C	-23	-24	-25	V
		5.0 mA $< I_o < 1.0$ A, $P_o < 15$ W $V_i = -27$ V to -38 V	-22.8	-24	-25.2	V
Line regulation	ΔV_o	$T_j = 25$ C, $V_i = -27$ V to -38 V		15	480	mV
		$T_j = 25$ C, $V_i = -30$ V to -36 V		8	240	mV
Load regulation	ΔV_o	$T_j = 25$ C, $I_o = 5.0$ mA to 1.5 A		15	480	mV
		$T_j = 25$ C, $I_o = 250$ mA to 750 mA		5.0	240	mV
Quiescent current	I_q	$T_j = 25$ C		3	6	mA
Quiescent current change	ΔI_q	$I_o = 5$ mA to 1.0 A			0.5	mA
		$V_i = -27$ V to -38 V			1.0	mA
Output voltage drift	$\Delta V_o / \Delta T$	$I_o = 5$ mA		-1		mV/ C
Output noise voltage	V_N	$f = 10$ Hz to 100 kHz, $T_a = 25$ C		400		μV
Ripple rejection	RR	$f = 120$ Hz, $V_i = -28$ V to -38 V	54	60		dB
Dropout voltage	V_o	$I_o = 1.0$ A, $T_j = 25$ C		2		V
Short circuit current	I_{sc}	$V_i = -35$ V, $T_a = 25$ C		300		mA
peak current	I_{pk}	$T_j = 25$ C		2.2		A

APPLICATION CIRCUITS

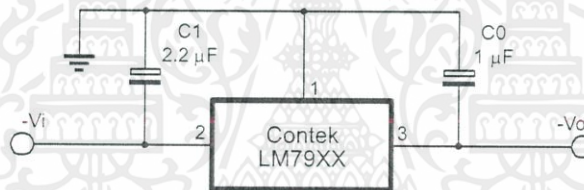


Fig.1 Fixed output regulator

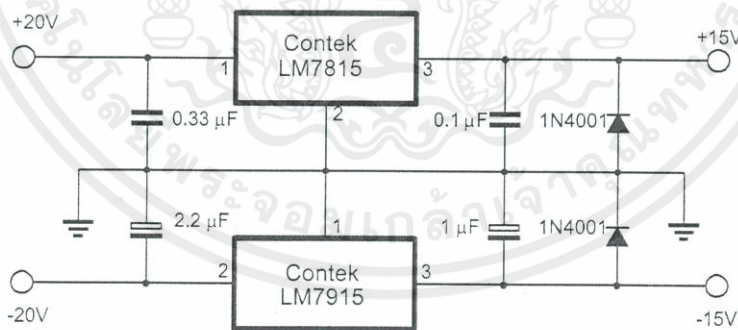


Fig.2 Split power supply(+15V,1A)



Contek Microelectronics Co.,Ltd.

<http://www.contek-ic.com> E-mail:sales@contek-ic.com

LM79XX Series 3-Terminal Negative Regulators

Check for Samples: LM7905, LM7912, LM7915

FEATURES

- Thermal, Short Circuit and Safe Area Protection
- High Ripple Rejection
- 1.5A Output Current
- 4% Tolerance on Preset Output Voltage

DESCRIPTION

The LM79XX series of 3-terminal regulators is available with fixed output voltages of -5V, -12V, and -15V. These devices need only one external component—a compensation capacitor at the output. The LM79XX series is packaged in the TO-220 power package and is capable of supplying 1.5A of output current.

These regulators employ internal current limiting safe area protection and thermal shutdown for protection against virtually all overload conditions.

Low ground pin current of the LM79XX series allows output voltage to be easily boosted above the preset value with a resistor divider. The low quiescent current drain of these devices with a specified maximum change with line and load ensures good regulation in the voltage boosted mode.

For applications requiring other voltages, see LM137 datasheet.

Connection Diagram

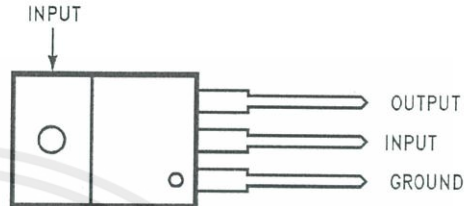
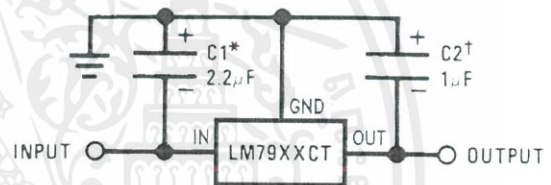


Figure 1. TO-220 Package Front View
See Package Number NDE0003B

Typical Applications



*Required if regulator is separated from filter capacitor by more than 3". For value given, capacitor must be solid tantalum. 25µF aluminum electrolytic may be substituted.

†Required for stability. For value given, capacitor must be solid tantalum. 25µF aluminum electrolytic may be substituted. Values given may be increased without limit.

For output capacitance in excess of 100µF, a high current diode from input to output (1N4001, etc.) will protect the regulator from momentary input shorts.

Figure 2. Fixed Regulator

⚠ Please be aware that an important notice concerning availability, standard warranty, and use in critical applications of Texas Instruments semiconductor products and disclaimers thereto appears at the end of this data sheet.
All trademarks are the property of their respective owners.

PRODUCTION DATA information is current as of publication date. Products conform to specifications per the terms of the Texas Instruments standard warranty. Production processing does not necessarily include testing of all parameters.

Copyright © 1999–2013, Texas Instruments Incorporated

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



These devices have limited built-in ESD protection. The leads should be shorted together or the device placed in conductive foam during storage or handling to prevent electrostatic damage to the MOS gates.

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS⁽¹⁾

Input Voltage	
($V_o = -5V$)	-25V
($V_o = -12V$ and $-15V$)	-35V
Input-Output Differential	
($V_o = -5V$)	25V
($V_o = -12V$ and $-15V$)	30V
Power Dissipation ⁽²⁾	Internally Limited
Operating Junction Temperature Range	0°C to +125°C
Storage Temperature Range	-65°C to +150°C
Lead Temperature (Soldering, 10 sec.)	230°C

(1) Absolute Maximum Ratings indicate limits beyond which damage to the device may occur. Operating Ratings indicate conditions for which the device is intended to be functional, but do not ensure Specific Performance limits. For ensured specifications and test conditions, see the Electrical Characteristics.

(2) Refer to DESIGN CONSIDERATIONS for details.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Conditions unless otherwise noted: $I_{OUT} = 500mA$, $C_{IN} = 2.2\mu F$, $C_{OUT} = 1\mu F$, $0^\circ C \leq T_J \leq +125^\circ C$, Power Dissipation $\leq 1.5W$.

Part Number		LM7905C			Units	
Output Voltage		-5V				
Input Voltage (unless otherwise specified)		-10V				
Symbol	Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	
V_o	Output Voltage	$T_J = 25^\circ C$	-4.8	-5.0	-5.2	V
		$5mA \leq I_{OUT} \leq 1A$, $P \leq 15W$	-4.75		-5.25	V
				($-20 \leq V_{IN} \leq -7$)		V
ΔV_o	Line Regulation	$T_J = 25^\circ C$, ⁽¹⁾		8	50	mV
				($-25 \leq V_{IN} \leq -7$)		V
				2	15	mV
		($-12 \leq V_{IN} \leq -8$)			V	
ΔV_o	Load Regulation	$T_J = 25^\circ C$, ⁽¹⁾				
		$5mA \leq I_{OUT} \leq 1.5A$ $250mA \leq I_{OUT} \leq 750mA$		15	100	mV
I_Q	Quiescent Current	$T_J = 25^\circ C$		5	50	mV
ΔI_Q	Quiescent Current Change	With Line		1	2	mA
		With Load, $5mA \leq I_{OUT} \leq 1A$				0.5
V_n	Output Noise Voltage	$T_A = 25^\circ C$, $10Hz \leq f \leq 100Hz$		125		μV
		Ripple Rejection $f = 120Hz$	54	66		dB
	Dropout Voltage	$T_J = 25^\circ C$, $I_{OUT} = 1A$		($-18 \leq V_{IN} \leq -8$)		V
I_{OMAX}	Peak Output Current	$T_J = 25^\circ C$		2.2		A
	Average Temperature Coefficient of Output Voltage	$I_{OUT} = 5mA$, $0^\circ C \leq T_J \leq 100^\circ C$		0.4		mV/°C

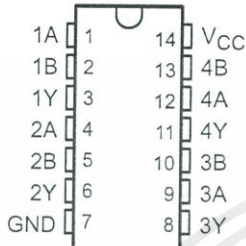
(1) Regulation is measured at a constant junction temperature by pulse testing with a low duty cycle. Changes in output voltage due to heating effects must be taken into account.

SN54HC08, SN74HC08 QUADRUPLE 2-INPUT POSITIVE-AND GATES

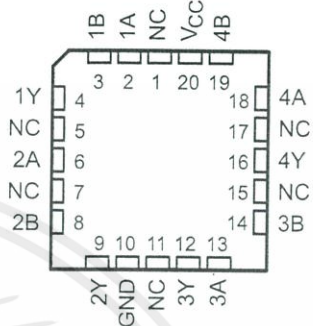
SCLS081E – DECEMBER 1982 – REVISED JULY 2003

- Wide Operating Voltage Range of 2 V to 6 V
- Outputs Can Drive Up To 10 LSTTL Loads
- Low Power Consumption, 20- μ A Max I_{CC}
- Typical $t_{pd} = 8$ ns
- ± 4 -mA Output Drive at 5 V
- Low Input Current of 1 μ A Max

SN54HC08 ... J OR W PACKAGE
SN74HC08 ... D, N, NS, OR PW PACKAGE
(TOP VIEW)



SN54HC08 ... FK PACKAGE
(TOP VIEW)



NC – No internal connection

description/ordering information

The 'HC08 devices contain four independent 2-input AND gates. They perform the Boolean function $Y = A \cdot B$ or $Y = \overline{A} + \overline{B}$ in positive logic.

ORDERING INFORMATION

T _A	PACKAGE†	ORDERABLE PART NUMBER	TOP-SIDE MARKING	
-40°C to 85°C	PDIP – N	Tube of 25	SN74HC08N	
		Tube of 50	SN74HC08D	
	SOIC – D	Reel of 2500	SN74HC08DR	HC08
		Reel of 250	SN74HC08DT	
	SOP – NS	Reel of 2000	SN74HC08NSR	HC08
	TSSOP – PW	Tube of 90	SN74HC08PW	HC08
Reel of 2000		SN74HC08PWR		
Reel of 250		SN74HC08PWT		
-55°C to 125°C	CDIP – J	Tube of 25	SNJ54HC08J	
	CFP – W	Tube of 150	SNJ54HC08W	
	LCCC – FK	Tube of 55	SNJ54HC08FK	

† Package drawings, standard packing quantities, thermal data, symbolization, and PCB design guidelines are available at www.ti.com/sc/package.



Please be aware that an important notice concerning availability, standard warranty, and use in critical applications of Texas Instruments semiconductor products and disclaimers thereto appears at the end of this data sheet.

PRODUCTION DATA information is current as of publication date. Products conform to specifications per the terms of Texas Instruments standard warranty. Production processing does not necessarily include testing of all parameters.

**TEXAS
INSTRUMENTS**

POST OFFICE BOX 655303 • DALLAS, TEXAS 75265

Copyright © 2003, Texas Instruments Incorporated
On products compliant to MIL-PRF-38535, all parameters are tested unless otherwise noted. On all other products, production processing does not necessarily include testing of all parameters.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SN54HC08, SN74HC08 QUADRUPLE 2-INPUT POSITIVE-AND GATES

SCLS081E – DECEMBER 1982 – REVISED JULY 2003

FUNCTION TABLE
(each gate)

INPUTS		OUTPUT
A	B	Y
H	H	H
L	X	L
X	L	L

logic diagram (positive logic)



absolute maximum ratings over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)†

Supply voltage range, V_{CC}	-0.5 V to 7 V
Input clamp current, I_{IK} ($V_I < 0$ or $V_I > V_{CC}$) (see Note 1)	± 20 mA
Output clamp current, I_{OK} ($V_O < 0$ or $V_O > V_{CC}$) (see Note 1)	± 20 mA
Continuous output current, I_O ($V_O = 0$ to V_{CC})	± 25 mA
Continuous current through V_{CC} or GND	± 50 mA
Package thermal impedance, θ_{JA} (see Note 2): D package	86°C/W
N package	80°C/W
NS package	76°C/W
PW package	113°C/W
Storage temperature range, T_{stg}	-65°C to 150°C

† Stresses beyond those listed under "absolute maximum ratings" may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, and functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated under "recommended operating conditions" is not implied. Exposure to absolute-maximum-rated conditions for extended periods may affect device reliability.

NOTES: 1. The input and output voltage ratings may be exceeded if the input and output current ratings are observed.
2. The package thermal impedance is calculated in accordance with JESD 51-7.

recommended operating conditions (see Note 3)

		SN54HC08			SN74HC08			UNIT
		MIN	NOM	MAX	MIN	NOM	MAX	
V_{CC}	Supply voltage	2	5	6	2	5	6	V
V_{IH}	High-level input voltage	$V_{CC} = 2$ V	1.5		1.5			V
		$V_{CC} = 4.5$ V	3.15		3.15			
		$V_{CC} = 6$ V	4.2		4.2			
V_{IL}	Low-level input voltage	$V_{CC} = 2$ V		0.5		0.5		V
		$V_{CC} = 4.5$ V		1.35		1.35		
		$V_{CC} = 6$ V		1.8		1.8		
V_I	Input voltage	0		V_{CC}	0		V_{CC}	V
V_O	Output voltage	0		V_{CC}	0		V_{CC}	V
$\Delta t/\Delta v$	Input transition rise/fall time	$V_{CC} = 2$ V		1000		1000		ns
		$V_{CC} = 4.5$ V		500		500		
		$V_{CC} = 6$ V		400		400		
T_A	Operating free-air temperature	-55		125	-40		85	°C

NOTE 3: All unused inputs of the device must be held at V_{CC} or GND to ensure proper device operation. Refer to the TI application report, *Implications of Slow or Floating CMOS Inputs*, literature number SCBA004.

 **TEXAS
INSTRUMENTS**

POST OFFICE BOX 655303 • DALLAS, TEXAS 75265

SN54LS240, SN54LS241, SN54LS244, SN54S240, SN54S241, SN54S244 SN74LS240, SN74LS241, SN74LS244, SN74S240, SN74S241, SN74S244 OCTAL BUFFERS AND LINE DRIVERS WITH 3-STATE OUTPUTS

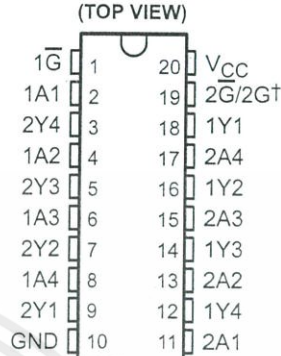
SDLS144B – APRIL 1985 – REVISED FEBRUARY 2002

- 3-State Outputs Drive Bus Lines or Buffer Memory Address Registers
- PNP Inputs Reduce DC Loading
- Hysteresis at Inputs Improves Noise Margins

description

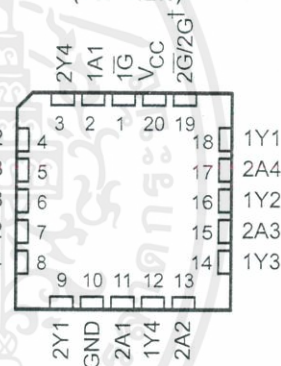
These octal buffers and line drivers are designed specifically to improve both the performance and density of three-state memory address drivers, clock drivers, and bus-oriented receivers and transmitters. The designer has a choice of selected combinations of inverting and noninverting outputs, symmetrical, active-low output-control (\overline{G}) inputs, and complementary output-control (G and \overline{G}) inputs. These devices feature high fan-out, improved fan-in, and 400-mV noise margin. The SN74LS' and SN74S' devices can be used to drive terminated lines down to 133 Ω .

SN54LS', SN54S' ... J OR W PACKAGE
SN74LS240, SN74LS244 ... DB, DW, N, OR NS PACKAGE
SN74LS241 ... DW, N, OR NS PACKAGE
SN74S' ... DW OR N PACKAGE



† 2G for 'LS241 and 'S241 or 2 \overline{G} for all other drivers.

SN54LS', SN54S' ... FK PACKAGE
(TOP VIEW)



† 2G for 'LS241 and 'S241 or 2 \overline{G} for all other drivers.



Please be aware that an important notice concerning availability, standard warranty, and use in critical applications of Texas Instruments semiconductor products and disclaimers thereto appears at the end of this data sheet.

PRODUCTION DATA information is current as of publication date. Products conform to specifications per the terms of Texas Instruments standard warranty. Production processing does not necessarily include testing of all parameters.

**TEXAS
INSTRUMENTS**

POST OFFICE BOX 655303 • DALLAS, TEXAS 75265

Copyright © 2002, Texas Instruments Incorporated
On products compliant to MIL-PRF-38535, all parameters are tested unless otherwise noted. On all other products, production processing does not necessarily include testing of all parameters.

**SN54LS240, SN54LS241, SN54LS244, SN54S240, SN54S241, SN54S244
SN74LS240, SN74LS241, SN74LS244, SN74S240, SN74S241, SN74S244
OCTAL BUFFERS AND LINE DRIVERS WITH 3-STATE OUTPUTS**

SDLS144B – APRIL 1985 – REVISED FEBRUARY 2002

absolute maximum ratings over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)†

Supply voltage, V_{CC} (see Note 1)	7 V
Input voltage, V_I : 'LS	7 V
'S	5.5 V
Off-state output voltage	5.5 V
Package thermal impedance, θ_{JA} (see Note 2): DB package	70°C/W
DW package	58°C/W
N package	69°C/W
NS package	60°C/W
Storage temperature range, T_{stg}	-65°C to 150°C

† Stresses beyond those listed under "absolute maximum ratings" may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, and functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated under "recommended operating conditions" is not implied. Exposure to absolute-maximum-rated conditions for extended periods may affect device reliability.

- NOTES: 1. Voltage values are with respect to network ground terminal.
2. The package thermal impedance is calculated in accordance with JESD 51-7.

recommended operating conditions

		SN54LS*			SN74LS*			UNIT
		MIN	NOM	MAX	MIN	NOM	MAX	
V_{CC}	Supply voltage (see Note 1)	4.5	5	5.5	4.75	5	5.25	V
V_{IH}	High-level input voltage	2			2			V
V_{IL}	Low-level input voltage			0.7			0.8	V
I_{OH}	High-level output current			-12			-15	mA
I_{OL}	Low-level output current			12			24	mA
T_A	Operating free-air temperature	-55		125	0		70	°C

NOTE 1: Voltage values are with respect to network ground terminal.



POST OFFICE BOX 655303 • DALLAS, TEXAS 75265

DUAL D-TYPE POSITIVE-EDGE-TRIGGERED FLIP-FLOPS WITH PRESET AND CLEAR

SDLS119 - DECEMBER 1983 - REVISED MARCH 1988

- Package Options Include Plastic "Small Outline" Packages, Ceramic Chip Carriers and Flat Packages, and Plastic and Ceramic DIPs
- Dependable Texas Instruments Quality and Reliability

description

These devices contain two independent D-type positive-edge-triggered flip-flops. A low level at the preset or clear inputs sets or resets the outputs regardless of the levels of the other inputs. When preset and clear are inactive (high), data at the D input meeting the setup time requirements are transferred to the outputs on the positive-going edge of the clock pulse. Clock triggering occurs at a voltage level and is not directly related to the rise time of the clock pulse. Following the hold time interval, data at the D input may be changed without affecting the levels at the outputs.

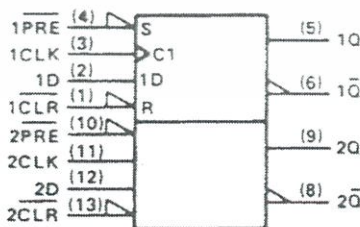
The SN54' family is characterized for operation over the full military temperature range of -55°C to 125°C. The SN74' family is characterized for operation from 0°C to 70°C.

FUNCTION TABLE

INPUTS				OUTPUTS	
PRE	CLR	CLK	D	Q	\bar{Q}
L	H	X	X	H	L
H	L	X	X	L	H
L	L	X	X	H [†]	H [†]
H	H	↑	H	H	L
H	H	↑	L	L	H
H	H	L	X	Q ₀	\bar{Q}_0

[†] The output levels in this configuration are not guaranteed to meet the minimum levels in V_{OH} if the lows at preset and clear are near V_{IL} maximum. Furthermore, this configuration is nonstable; that is, it will not persist when either preset or clear returns to its inactive (high) level.

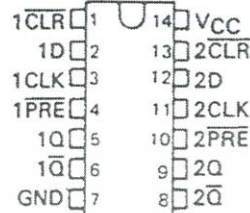
logic symbol[‡]



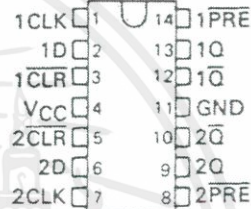
[‡] This symbol is in accordance with ANSI/IEEE Std 91-1984 and IEC Publication 617-12.

Pin numbers shown are for D, J, N, and W packages.

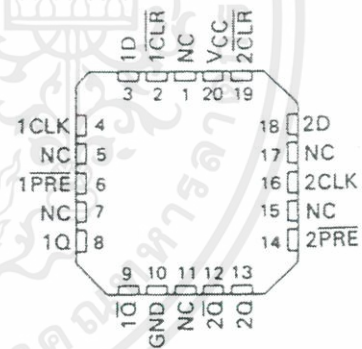
SN5474 . . . J PACKAGE
SN54LS74A, SN54S74 . . . J OR W PACKAGE
SN7474 . . . N PACKAGE
SN74LS74A, SN74S74 . . . D OR N PACKAGE
(TOP VIEW)



SN5474 . . . W PACKAGE
(TOP VIEW)

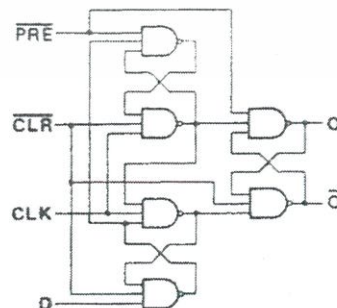


SN54LS74A, SN54S74 . . . FK PACKAGE
(TOP VIEW)



NC - No internal connection

logic diagram (positive logic)



PRODUCTION DATA information is current as of publication date. Products conform to specifications per the terms of Texas Instruments standard warranty. Production processing does not necessarily include testing of all parameters.

**TEXAS
INSTRUMENTS**

POST OFFICE BOX 655303 • DALLAS, TEXAS 75265

Copyright © 1988, Texas Instruments Incorporated

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการเชิงงานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SN5474, SN54LS74A, SN54S74

SN7474, SN74LS74A, SN74S74

DUAL D-TYPE POSITIVE-EDGE-TRIGGERED FLIP-FLOPS WITH PRESET AND CLEAR

SDLS119 - DECEMBER 1983 - REVISED MARCH 1988

recommended operating conditions

		SN5474			SN7474			UNIT
		MIN	NOM	MAX	MIN	NOM	MAX	
V _{CC}	Supply voltage	4.5	5	5.5	4.75	5	5.25	V
V _{IH}	High-level input voltage	2			2			V
V _{IL}	Low-level input voltage	0.8			0.8			V
I _{OH}	High-level output current	-0.4			-0.4			mA
I _{OL}	Low-level output current	16			16			mA
t _w	Pulse duration	CLK high		30	30		ns	
		CLK low		37	37			
		PRE or CLR low		30	30			
t _{SU}	Input setup time before CLK †	20			20			ns
t _H	Input hold time-data after CLK †	5			5			ns
T _A	Operating free-air temperature	-55		125	0		70	°C

electrical characteristics over recommended operating free-air temperature range (unless otherwise noted)

PARAMETER	TEST CONDITIONS ¹	SN5474			SN7474			UNIT
		MIN	TYP ²	MAX	MIN	TYP ²	MAX	
V _{IK}	V _{CC} = MIN, I _I = -12 mA	-1.5			-1.5			V
V _{OH}	V _{CC} = MIN, I _{OH} = -0.4 mA, V _{IH} = 2 V, V _{IL} = 0.8 V	2.4	3.4		2.4	3.4		V
V _{OL}	V _{CC} = MIN, I _{OL} = 16 mA, V _{IH} = 2 V, V _{IL} = 0.8 V	0.2		0.4	0.2		0.4	V
I _I	V _{CC} = MAX, V _I = 5.5 V	1			1			mA
I _{IH}	D	40			40			μA
	CLR	120			120			
	All Other	80			80			
I _{IL}	D	-1.6			-1.6			mA
	PRE ³	-1.6			-1.6			
	CLR ³	-3.2			-3.2			
	CLK	-3.2			-3.2			
I _{OS} ⁴	V _{CC} = MAX	-20	-57		-18	-57	mA	
I _{CC} [#]	V _{CC} = MAX, See Note 2	8.5		15	8.5		15	mA

¹For conditions shown as MIN or MAX, use the appropriate value specified under recommended operating conditions.

²All typical values are at V_{CC} = 5 V, T_A = 25°C.

³Clear is tested with preset high and preset is tested with clear high.

⁴Not more than one output should be shown at a time.

[#]Average per flip-flop.

NOTE 2: With all outputs open, I_{CC} is measured with the Q and Q̄ outputs high in turn. At the time of measurement, the clock input is grounded.

switching characteristics, V_{CC} = 5 V, T_A = 25°C (see note 3)

PARAMETER	FROM (INPUT)	TO (OUTPUT)	TEST CONDITIONS		MIN	TYP	MAX	UNIT	
f _{max}					15	25		MHz	
t _{PLH}	PRE or CLR	Q or Q̄	R _L = 400 Ω,	C _L = 15 pF	25			ns	
t _{PHL}					40			ns	
t _{PLH}	CLK	Q or Q̄			14			25	ns
t _{PHL}					20			40	ns

NOTE 3: Load circuits and voltage waveforms are shown in Section 1.



POST OFFICE BOX 655303 • DALLAS, TEXAS 75265

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



JFET Input Operational Amplifiers

These low-cost JFET input operational amplifiers combine two state-of-the-art linear technologies on a single monolithic integrated circuit. Each internally compensated operational amplifier has well matched high voltage JFET input devices for low input offset voltage. The BIFET technology provides wide bandwidths and fast slew rates with low input bias currents, input offset currents, and supply currents.

These devices are available in single, dual and quad operational amplifiers which are pin-compatible with the industry standard MC1741, MC1458, and the MC3403/LM324 bipolar products.

- Input Offset Voltage Options of 6.0 mV and 15 mV Max
- Low Input Bias Current: 30 pA
- Low Input Offset Current: 5.0 pA
- Wide Gain Bandwidth: 4.0 MHz
- High Slew Rate: 13 V/ μ s
- Low Supply Current: 1.4 mA per Amplifier
- High Input Impedance: $10^{12} \Omega$

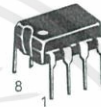
ORDERING INFORMATION

Op Amp Function	Device	Operating Temperature Range	Package
Single	TL081CD	$T_A = 0^\circ \text{ to } +70^\circ \text{C}$	SO-8
	TL081ACP		Plastic DIP
Dual	TL082CD	$T_A = 0^\circ \text{ to } +70^\circ \text{C}$	SO-8
	TL082ACP		Plastic DIP
Quad	TL084CN, ACN	$T_A = 0^\circ \text{ to } +70^\circ \text{C}$	Plastic DIP

TL081C,AC TL082C,AC TL084C,AC

JFET INPUT OPERATIONAL AMPLIFIERS

SEMICONDUCTOR TECHNICAL DATA

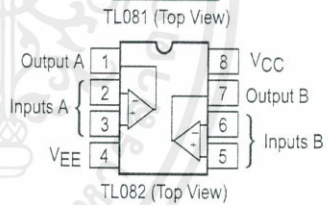
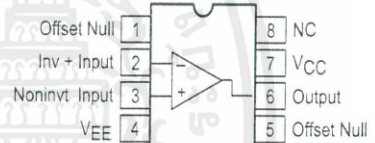


P SUFFIX
PLASTIC PACKAGE
CASE 626

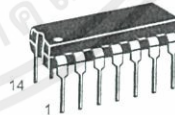
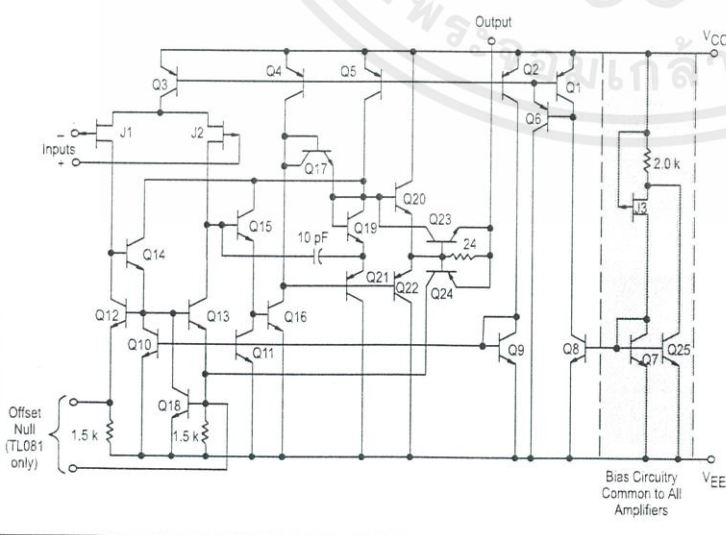


D SUFFIX
PLASTIC PACKAGE
CASE 751
(SO-8)

PIN CONNECTIONS

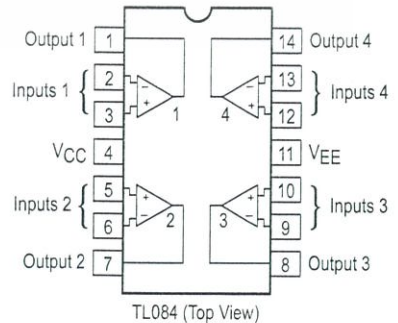


Representative Circuit Schematic (Each Amplifier)



N SUFFIX
PLASTIC PACKAGE
CASE 646

PIN CONNECTIONS



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TL081C,AC TL082C,AC TL084C,AC

MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	Value	Unit
Supply Voltage	V_{CC} V_{EE}	18 -18	V
Differential Input Voltage	V_{ID}	± 30	V
Input Voltage Range (Note 1)	V_{IDR}	± 15	V
Output Short Circuit Duration (Note 2)	t_{SC}	Continuous	
Power Dissipation Plastic Package (N, P) Derate above $T_A = +47^\circ\text{C}$	P_D $1/\theta_{JA}$	680 10	mW mW/ $^\circ\text{C}$
Operating Ambient Temperature Range	T_A	0 to +70	$^\circ\text{C}$
Storage Temperature Range	T_{stg}	-65 to +150	$^\circ\text{C}$

- NOTES:** 1. The magnitude of the input voltage must not exceed the magnitude of the supply voltage or 15 V, whichever is less.
2. The output may be shorted to ground or either supply. Temperature and/or supply voltages must be limited to ensure that power dissipation ratings are not exceeded.
3. ESD data available upon request.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($V_{CC} = 15\text{ V}$, $V_{EE} = -15\text{ V}$, $T_A = T_{low}$ to T_{high} [Note 1].)

Characteristics	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Input Offset Voltage ($R_S \leq 10\text{ k}$, $V_{CM} = 0$) TL081C, TL082C TL084C TL08_AC	V_{IO}	- - -	- - -	20 20 7.5	mV
Input Offset Current ($V_{CM} = 0$) (Note 2) TL08_C TL08_AC	I_{IO}	- -	- -	5.0 3.0	nA
Input Bias Current ($V_{CM} = 0$) (Note 2) TL08_C TL08_AC	I_{IB}	- -	- -	10 7.0	nA
Large-Signal Voltage Gain ($V_O = \pm 10\text{ V}$, $R_L \geq 2.0\text{ k}$) TL08_C TL08_AC	A_{VOL}	15 25	- -	- -	V/mV
Output Voltage Swing (Peak-to-Peak) ($R_L \geq 10\text{ k}$) ($R_L \geq 2.0\text{ k}$)	V_O	24 20	- -	- -	V

- NOTES:** 1. $T_{low} = 0^\circ\text{C}$ for TL081AC,C $T_{high} = 70^\circ\text{C}$ for TL081AC
TL082AC,C TL082AC,C
TL084AC,C TL084AC,C

2. Input Bias currents of JFET input op amps approximately double for every 10°C rise in Junction Temperature as shown in Figure 3. To maintain junction temperature as close to ambient temperature as possible, pulse techniques must be used during testing.

Figure 1. Unity Gain Voltage Follower

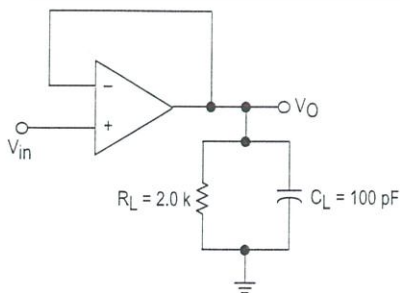
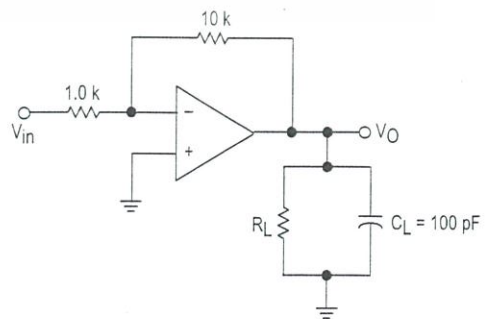


Figure 2. Inverting Gain of 10 Amplifier





ภาคผนวก ข
บทความทางวิชาการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน โดยปราศจากตัวตรวจจับ

SENSORLESS BRUSHLESS DC MOTOR DRIVE

พีชรี วีระศิลป์ พิทยุทธ์ ทรัพย์สมบูรณ์ พิลิทธิ บุนรอด และ ยัวร์ตัน สัมภาวะคุปต์

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ซอย ฉลองกรุง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-329-8000 ต่อ 3925 E-Mail: samboonrod@gmail.com

บทคัดย่อ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ได้ศึกษาเกี่ยวกับ การขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน โดยปราศจากตัวตรวจจับ เนื่องจากมอเตอร์ชนิดนี้มีคุณสมบัติที่ดีหลายอย่างเมื่อเทียบกับมอเตอร์กระแสตรงทั่วไป ต้องการการบำรุงรักษาน้อย ผู้ศึกษาจึงมีความสนใจที่จะศึกษาและออกแบบระบบชุดขับเคลื่อนมอเตอร์นี้ และในด้านการพัฒนาต่อนี้ทางผู้ศึกษาได้ทำการศึกษาและออกแบบวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านที่ปราศจากตัวตรวจจับ โดยอาศัยวิธีการค้นหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับในลักษณะสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal back emf) และใช้วิธีการค้นหาตำแหน่งของโรเตอร์ในขณะที่เริ่มต้นแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับมีค่าเป็นศูนย์แทนการใช้ Hall effect sensors สำหรับมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านที่กักกำลัง 350 วัตต์ 24 โวลต์ 46 ขั้วแม่เหล็ก

ABSTRACT

This thesis study about "sensorless BLDC motor drive" because there're a lot of advantages compared with conventional dc motor and need less maintenance. Therefore, we study and design this motor drive system with Hall effect sensor and develop to sensorless by trapezoidal back emf method. In this project we use brushless dc motor with rated 350 watt, 24 volt and 46 poles.

1.บทนำ

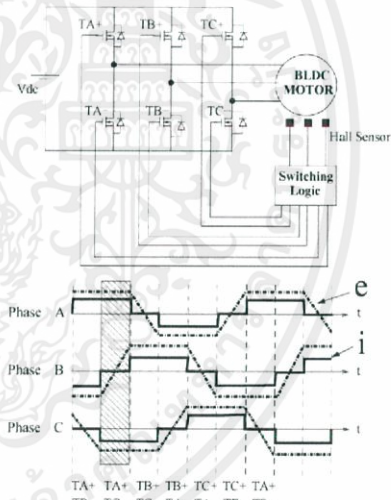
ในปัจจุบันมอเตอร์กระแสตรงมีบทบาทอย่างมากในวงการอุตสาหกรรมอันเนื่องมาจาก คุณสมบัติต่างๆ ของมอเตอร์ที่สามารถควบคุมความเร็วได้ตามที่ต้องการ และมีแรงบิดเริ่มต้นที่ต่ำมาก แต่มอเตอร์กระแสตรงก็ยังยังมีข้อเสีย เรื่องการมีแปรงถ่านที่ต้องเสียดสีกับคอมมิวเตเตอร์ ซึ่งทำให้เกิดประกายไฟและเกิดการสูญเสียพลังงานไป และข้อเสียอีกอย่างหนึ่งคือ เกิดเสียงดังขณะมอเตอร์ทำงาน ด้วยข้อเสียต่างๆ ที่เกิดขึ้นจึงทำให้มีการดัดแปลงมอเตอร์กระแสตรงใหม่โดยวิธีการกำจัดแปรงถ่านโดยมีการพัฒนาและปรับปรุงมอเตอร์กระแสตรงนี้มาโดยตลอดจนเป็นมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน โดยมอเตอร์ชนิดนี้จะมีชิ้นส่วนหลักๆ คือ สเตเตอร์โรเตอร์, ฮอลล์เซ็นเซอร์

วิธีการควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์จะอยู่บนพื้นฐานของการตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับลักษณะสี่เหลี่ยมคางหมูหลังจากนั้นขับเคลื่อน

มอเตอร์แบบวงรอบเปิดเพื่อให้ตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับได้ไปคำนวณสัญญาณเพื่อใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ การประมวลผลทางดิจิทัลในการขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านนี้จะใช้ C2000 Microcontroller

2. วิธีการตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ

2.1 การตรวจจับสัญญาณผ่านศูนย์ของแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับจากผลต่างแรงดันระหว่างขั้ว เมื่อพิจารณามอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านซึ่งมีขดลวดสามเฟสต่อแบบสตาร์ และมีแม่เหล็กถาวรยึดอยู่กับโรเตอร์มอเตอร์ชนิดนี้ถูกขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์สามเฟสซึ่งถูกกำหนดลำดับในการทำงานจากตำแหน่งของโรเตอร์ซึ่งถูกแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 การทำงานของวงจรควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านและกระแสเฟสและแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ

โดยสมการของแรงดันเฟส A เมื่อเทียบกับขั้วสตาร์ของขดลวดสเตเตอร์ถูกแสดงในสมการที่ 1

$$V_{an} = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + e_{an} \quad (1)$$

โดย R_a คือค่าความต้านทานสเตเตอร์, L_a คือค่าความเหนี่ยวนำเฟส, e_{an} คือแรงดันไฟฟ้าต้านกลับและ i_a คือกระแสที่ไหลในเฟส A ในทำนองเดียวกัน สมการของแรงดันเฟส B และเฟส C สามารถแสดงในสมการที่ (2),(3)

$$V_{bn} = R_b i_b + L_b \frac{di_b}{dt} + e_{bn} \quad (2)$$

$$V_{cn} = R_c i_c + L_c \frac{di_c}{dt} + e_{cn} \quad (3)$$

จากสมการแรงดันเฟสข้างต้น สามารถหาค่าแรงดันระหว่างขั้วโดย

$$V_{ab} = V_{an} - V_{bn} = R(i_a - i_b) + L \frac{d(i_a - i_b)}{dt} + e_{an} - e_{bn} \quad (4)$$

ในทำนองเดียวกัน

$$V_{bc} = R(i_b - i_c) + L \frac{d(i_b - i_c)}{dt} + e_{bn} - e_{cn} \quad (5)$$

$$V_{ca} = R(i_c - i_a) + L \frac{d(i_c - i_a)}{dt} + e_{cn} - e_{an} \quad (6)$$

แรงดันระหว่างขั้วเหล่านี้สามารถหาค่าได้โดยไม่ต้องวัดค่าแรงดันเทียบกับจุดสตาร์ของขดลวดด้วยการวัดผลต่างของแรงดันระหว่างขั้ว

เมื่อนำแรงดันระหว่างขั้วในสมการที่ (4) ลบออกจากสมการที่

(5) จะได้

$$V_{abbc} = R(i_a - 2i_b + i_c) + L \frac{d(i_a - 2i_b + i_c)}{dt} + e_{an} - 2e_{bn} + e_{cn} \quad (7)$$

เมื่อพิจารณาในช่วงที่เฟส A และเฟส C นำกระแส และเฟส B นั้นเปิดวงจรตามส่วนที่แรงในรูปที่ 1 ในช่วงเวลานี้ขดลวดเฟส A ถูกต่อกับบัสแรงดันด้านบวกของแหล่งจ่ายกระแสตรง เฟส C ถูกต่อกับบัสแรงดันด้านลบ และเฟส B ถูกเปิดวงจร ดังนั้น $i_a = -i_c$ และ $i_b = 0$ จากส่วนที่แรงในรูปที่ 1 จะเห็นได้ว่าแรงดันไฟฟ้าต้านกลับของเฟส A และเฟส C มีขนาดเท่ากัน แต่ทิศตรงข้ามกัน ดังนั้นสมการของผลต่างแรงดันระหว่างขั้วในช่วงเวลานี้สามารถแสดงได้ดังนี้

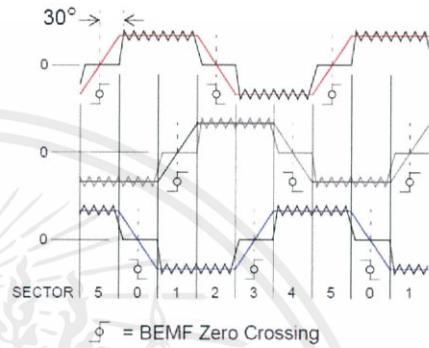
$$V_{abbc} = V_{ab} - V_{bc} = e_{an} - 2e_{bn} + e_{cn} = -2e_{bn} \quad (8)$$

รูปคลื่นผลต่างแรงดันระหว่างขั้วนั้นจะกลับด้านกับรูปคลื่นของแรงดันต้านกลับและมีขนาดเป็นสองเท่า จากรูปที่ 1 ในช่วงที่แรงต้านด้านกลับ e_{bn} เปลี่ยนจากด้านลบไปยังด้านบวกเกิดสัญญาณผ่านศูนย์ (Zero Crossing) ดังนั้นจะได้ว่าผลต่างแรงดันระหว่างขั้ว $V_{ab} - V_{bc} = (V_{abbc})$ สามารถนำมาใช้ตรวจจับสัญญาณผ่านศูนย์ของแรงดันต้านกลับเฟส B ได้ และในทำนองเดียวกัน V_{bcca} และ V_{caab} ก็สามารถนำมาใช้ตรวจจับสัญญาณผ่านศูนย์ของแรงดันต้านกลับของเฟส C และเฟส A ได้ตามลำดับ

2.2 วิธีการทำงานและวิเคราะห์แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ

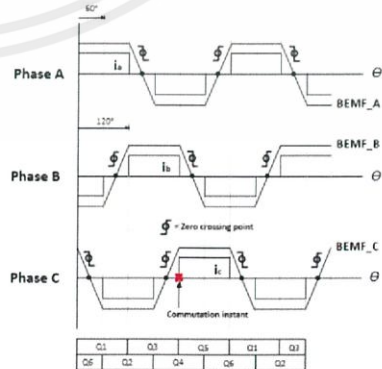
พิจารณามอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน (BLDC) มีโครงสร้างหลักๆ สามส่วนคือ ส่วนที่หนึ่ง สเตเตอร์ (Stator) ประกอบด้วยขดลวดอามาเจอร์ที่ต่ออยู่แบบสตาร์ ส่วนที่สองโรเตอร์ (Rotor) ประกอบด้วยแม่เหล็กถาวรและส่วนสุดท้ายคือ ตัวตรวจจับตำแหน่งขั้วแม่เหล็ก (Hall sensor) ซึ่งการขับเคลื่อนจะใช้อินเวอร์เตอร์สามเฟสร่วมกับอุปกรณ์ตรวจจับตำแหน่งขั้วแม่เหล็ก โดยใช้เทคนิคแบบสัญญาณสี่เหลี่ยม 120 องศา เพื่อให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับแล้วนำสัญญาณแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับตรวจสอบตำแหน่งจุดซิงโครสซิง สำหรับใช้คำนวณหาตำแหน่ง โรเตอร์และความเร็วมอเตอร์

วิธีการเปรียบเทียบแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ และแรงดันครึ่งหนึ่งของแรงดันดีซีบัส (DC/2) ในหนึ่งลูกคลื่นทางไฟฟ้าบริเวณจุดตัดผ่านศูนย์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับจะมีตำแหน่งเวลาที่เกิดก่อน 30 องศา ทางไฟฟ้าก่อนที่จะถึงการสลับวิตซ์เรียงกระแสจากจุดตำแหน่งการตรวจจับโรเตอร์จริง ทำให้การควบคุมมอเตอร์ด้วยวิธีการปราศจากตัวตรวจจับจะต้องอาศัยการกำหนดความสัมพันธ์ของเวลาการเรียงกระแสให้ตรงกับสัญญาณตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์จริง ดังรูปที่ 2.18



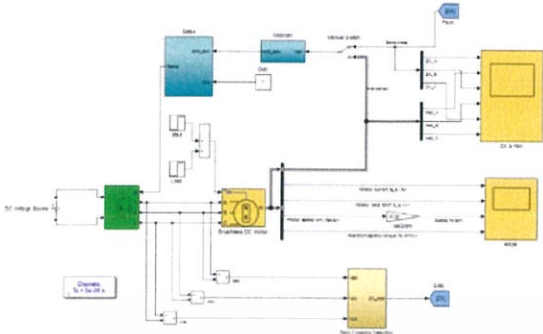
รูปที่ 2 จุดตัดสัญญาณ Zero Crossing ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับของมอเตอร์

ในรูปที่ 2.5 การประมาณค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับกับตำแหน่งการสวิตซ์ของกระแสโดยทั่วไปจะใช้การตรวจสอบแรงดันตัดผ่านศูนย์ (Zero Crossing) ของรูปคลื่น แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ ที่มีองค์ประกอบของฮาร์มอนิกที่สาม แรงดันฮาร์มอนิกจะมีข้อจำกัดของแอมพลิจูดและเฟสที่เปลี่ยนไปตามความถี่ของแม่เหล็ก ซึ่งจะไม่เหมาะสมกับยานความเร็วต่ำ เนื่องจากมีแอมพลิจูดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับมีค่าต่ำ การขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยอินเวอร์เตอร์หกขั้วมุมนำกระแส 120 องศา แต่ระดับการสวิตซ์จะมีค่า 60 องศา ดังรูปที่ 2.19 แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับที่ตัดผ่านศูนย์จะมีความสัมพันธ์กับตำแหน่งการสวิตซ์เรียงกระแส โดยจุดตัดผ่านศูนย์จะเปรียบเทียบได้กับแรงดันครึ่งหนึ่งของดีซีบัส (DC/2) มีค่าที่ตรงกับตำแหน่งของจุดซิงโครสซิง โดยมีค่ามุมทางไฟฟ้าภายในอยู่ 30 องศา จากจุดสัญญาณตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์

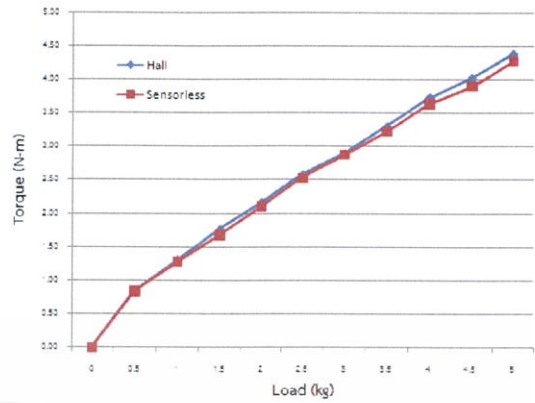


รูปที่ 3 เปรียบเทียบแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับกับตำแหน่งการสวิตซ์ของกระแส

3. การออกแบบและการจำลองผล



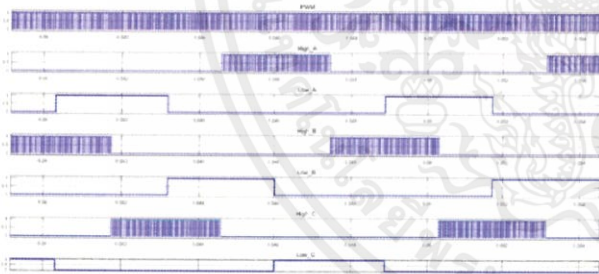
รูปที่ 4 โดอะแกรมวงจรควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่ง



รูปที่ 7 กราฟเปรียบเทียบแรงบิดระหว่างมีตัวตรวจจับกับปราศจากตัวตรวจจับ

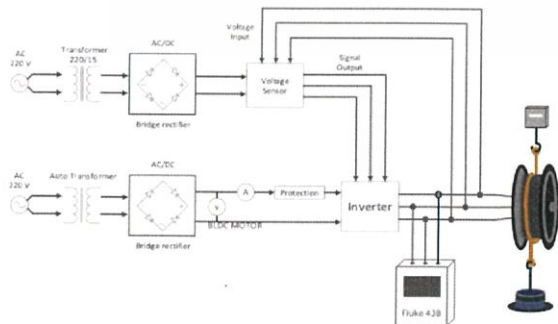
ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์และข้อมูลโครงสร้างของมอเตอร์

รายการ	ขนาด	หน่วย
1.แรงดัน	24	โวลต์
2.พิกัดกำลัง	350	วัตต์
3.ความเร็วรอบสูงสุด	310	รอบต่อนาที
4.จำนวนขั้วแม่เหล็ก	46	โพล
5.น้ำหนัก	5.8	กิโลกรัม
6.ความยาว	12.4	มิลลิเมตร
7.เส้นผ่านศูนย์กลาง	243	มิลลิเมตร

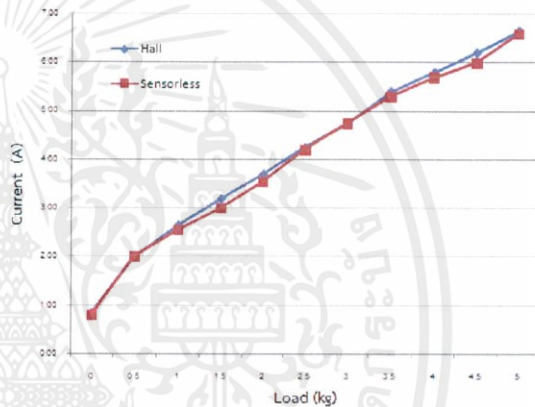


รูปที่ 5 ผลการจำลองสัญญาณขาเกิดในแต่ละเฟสที่ค่า Duty Ratio = 0.8

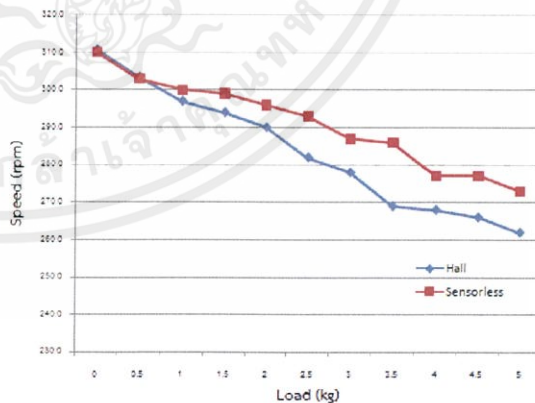
4. การทดลองและผลการทดลอง



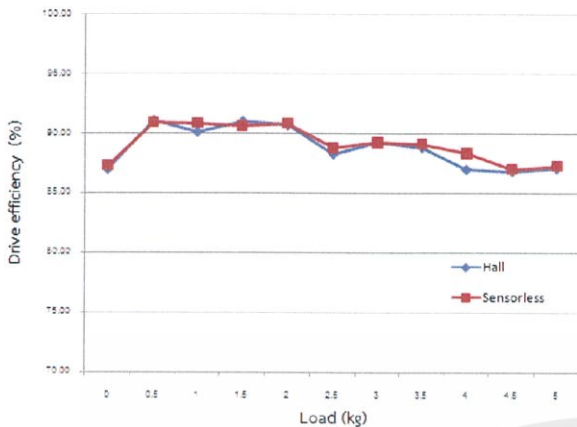
รูปที่ 6 การต่อเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 8 กราฟเปรียบเทียบกระแสระหว่างมีตัวตรวจจับกับปราศจากตัวตรวจจับ



รูปที่ 9 กราฟเปรียบเทียบความเร็วรอบระหว่างมีตัวตรวจจับกับปราศจากตัวตรวจจับ



รูปที่ 10 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพไดรฟ์ระหว่างมีตัวตรวจจับกับปราศจากตัวตรวจจับ

5. สรุป

จากผลการทดสอบการควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ สัญญาณตัดผ่านศูนย์ที่ได้มีค่าความผิดพลาดของสัญญาณตรวจจับทำให้มอเตอร์มีกระแสขณะทำงานสูง เกิดเสียงดัง เกิดความร้อนสูงภายในมอเตอร์และประสิทธิภาพของระบบต่ำ หลังจากปรับแก้สัญญาณตัดผ่านศูนย์ทำให้สามารถลดสไปค์ของแรงดันไฟฟ้าขณะสวิตซ์ได้ ทำให้ประสิทธิภาพของระบบสูงขึ้นเมื่อเทียบกับการควบคุมมอเตอร์แบบมีตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์

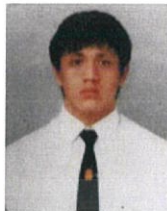
จากผลการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ค่าความผิดพลาดรูปคลื่นไซน์ (%THDv) พบว่าเมื่อเพิ่มภาระทางกลให้กับมอเตอร์มากขึ้นตามลำดับจะส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ค่าความผิดพลาดรูปคลื่นไซน์สูงขึ้นตามไปด้วย โดยเปอร์เซ็นต์ค่าความผิดพลาดรูปคลื่นไซน์ของการควบคุมมอเตอร์แบบปราศจากตัวตรวจจับมีค่าต่ำกว่าการควบคุมมอเตอร์แบบมีตัวตรวจจับเล็กน้อยที่ภาระทางกลเท่ากัน

เอกสารอ้างอิง

- [1] ไตรภพ บัวระกุด, “การควบคุมความเร็วแบบปราศจากตัวตรวจจับอย่างประหยัดสำหรับ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านโดยวิธีการค้นหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับลักษณะสี่เหลี่ยมคางหมู”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2552
- [2] กฤตภาส ผินสันเทียะ, “การออกแบบควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านปราศจากเซนเซอร์ด้วยเทคนิคการตรวจจับสัญญาณผ่านศูนย์”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2558
- [3] P. Damodharan and Krishna Vasudevan, “Sensorless Brushless DC Motor Drive Based on the Zero-Crossing Detection of Back Electromotive Force (EMF) From the Line

Voltage Difference”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.25 No.3, 2010, pp. 661 - 668

ประวัติผู้เขียนบทความ



นายชัชวรี วีระศิลป์
สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจาก
โรงเรียนวิสุทธรังษี
ปริญญาตรีวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยี พระ
จอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



นายทิพุดม ทรัพย์สมบูรณ์
สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจาก
โรงเรียนนครนายกวิทยาคม
ปริญญาตรีวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระ
จอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



นายทิลิธี บุญรอด
สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจาก
โรงเรียนองครักษ์
ปริญญาตรีวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระ
จอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



นายยุวรัตน์ สัมภวคุปต์
สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจาก
โรงเรียนรัตนวิเชียร
ปริญญาตรีวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระ
จอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประวัติผู้เขียน



นายพีชวี วีระศิลป์

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจาก

โรงเรียนวิสุทธิรังษี

ปริญญาตรีวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



นายพิทยุทธ์ ทรัพย์สมบูรณ์

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจาก

โรงเรียนนครนายกวิทยาคม

ปริญญาตรีวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



นายพิสิทธิ์ บุญรอด

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจาก

โรงเรียนองครักษ์

ปริญญาตรีวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



นายยุรัตน์ สัมภวคุปต์

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจาก

โรงเรียนรัตนาธิเบศร์

ปริญญาตรีวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง