

การออกแบบควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านปราศจากเซนเซอร์
ด้วยเทคนิคการตรวจจับสัญญาณผ่านศูนย์

DESIGN OF SENSORLESS CONTROL FOR A BRUSHLESS DC MOTOR
USING BACK EMF ZERO CROSSING DETECTION TECHNIQUE

กฤตภาส มินสันเทียะ
KITAPAS PINSUNTIA

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2558
KMITL-2015-EN-M-020-060

การออกแบบควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านปราศจากเซนเซอร์
ด้วยเทคนิคการตรวจจับสัญญาณผ่านศูนย์

DESIGN OF SENSORLESS CONTROL FOR A BRUSHLESS DC MOTOR
USING BACK EMF ZERO CROSSING DETECTION TECHNIQUE



T138782

กฤตภาส ผินสันเทียะ
KITAPAS PINSUNTIA

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 138782
วันเดือนปี 16 ต.ค. 2558



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2558

KMITL-2015-EN-M-020-060

DESIGN OF SENSORLESS CONTROL FOR A BRUSHLESS DC MOTOR
USING BACK EMF ZERO CROSSING DETECTION TECHNIQUE

KITTAPAS PINSUNTIA

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR THE
DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG 2015
KMITL-2015-EN-M-020-060

COPYRIGHT 2015

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การออกแบบควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านปราศจากเซนเซอร์
ด้วยเทคนิคการตรวจจับสัญญาณผ่านศูนย์

Thesis Title Design of Sensorless Control for a Brushless DC Motor Using Back EMF Zero
Crossing Detection Technique

นักศึกษา นายกฤตภาส ผินสันเทียะ

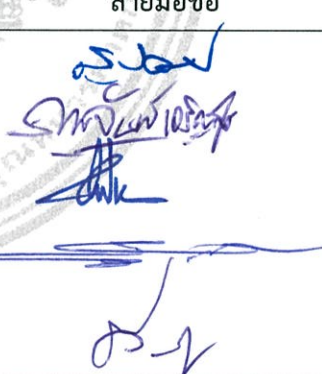
รหัสประจำตัว 55610733

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ร.อ.ดร.วีระเชษฐ์ ชันเงิน

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2015-EN-M-020-060

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.สุพัฒน์	กิตติรัตน์สัจจา	
ดร.ภพ	จันทร์เจริญสุข	
รศ.ดร.วิบูลย์	ชินแขก	
ผศ.ดร.วรชาติ	สุวรรณงาม	
รศ.ร.อ.ดร.วีระเชษฐ์	ชันเงิน	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันศุกร์ที่ 8 พฤษภาคม พ.ศ. 2558 เวลา 09.30-11.30 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 2

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 8 พฤษภาคม พ.ศ. 2558

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านปราศจาก เซนเซอร์ ด้วยเทคนิคการตรวจจับสัญญาณผ่านศูนย์
นักศึกษา	นายกฤตภาส ผินสันเทียะ
รหัสประจำตัว	55610733
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2558
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ร.อ.ดร.วีระเชษฐ ชื่นเงิน

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการออกแบบควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน (Brushless DC Motor) พิกัดกำลัง 100 วัตต์ 24 โวลต์ และ 700 รอบต่อนาที โดยปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์ ซึ่งการทำงานของมอเตอร์ชนิดนี้ จำเป็นต้องมีการตรวจสอบตำแหน่งของโรเตอร์ขณะหมุน นั่นก็คือเซนเซอร์ตรวจจับทิศทางของขั้วแม่เหล็ก แต่ถ้าหากสายสัญญาณเซนเซอร์ที่ใช้มีระยะทางไกล หรือมีข้อจำกัดของสภาพแวดล้อมที่ไม่เอื้ออำนวย เช่นอุณหภูมิ สายชำรุด ฯลฯ อาจทำให้มอเตอร์ทำงานผิดปกติได้ ดังนั้นวิธีการควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไม่มีแปรงถ่านแบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่ง จะช่วยลดความสัมพันธ์และข้อจำกัดของระบบได้ ซึ่งจะนำเสนอบนหลักการของแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับที่ตัดผ่านศูนย์ของขั้วมอเตอร์ ซึ่งอาศัยวงจรตรวจจับสัญญาณผ่านศูนย์ โดยระบบการควบคุมจะถูกประมวลผลด้วยสัญญาณดิจิทัล ทำการเลื่อนเฟส 30 องศาจากตำแหน่งซีโรครอสซิง แล้วแปลงสัญญาณ ฟีดแบ็ควีเอ็มเพื่อขับอินเวอร์เตอร์แบบหกระดับ นำไปใช้ในการควบคุมการหมุนของโรเตอร์ โดยย่านการควบคุมที่ได้ในช่วง 100 – 700 รอบต่อนาที จากการทดลองพบว่าการเมื่อเปรียบเทียบคุณลักษณะของการควบคุมด้วยเทคนิคปราศจากตัวตรวจจับ และวิธีการควบคุมโดยใช้ตัวตรวจจับขั้วแม่เหล็ก มีค่าความผิดพลาดการตรวจจับในแต่ละช่วงความเร็วไม่เกิน 1.8 % ลักษณะของแรงเคลื่อนไฟฟ้าของมอเตอร์แตกต่างกันไม่เกิน 3 % และการควบคุมด้วยเทคนิคปราศจากตัวตรวจจับมีประสิทธิภาพรวมของระบบมากกว่า 2 % เมื่อทดสอบภาระทางกลแบบต่อเนื่องและทันทีทันใด

Thesis	Design of Sensorless Control for a Brushless DC Motor Using Back EMF Zero Crossing Detection Technique
Student	Mr. Kitttapas Pinsuntia
Student ID.	55610733
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2015
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Cpt. Dr. Werachet Khan-ngern

ABSTRACT

This thesis presents the sensorless BLDC motor controller designing. The 100 watts at 24 V and 700rpm without the hall effect sensors BLDC motor was used in this experiment. But the controller must detect the magnetic pole of rotor position to control the motor. Then the data from all sensors have to transfer via wire. This is one of weakness in the controller which is affected on wiring connection. The sensorless BLDC motor controller mitigates this problem. The sensorless BLDC motor controller uses the back EMF from crossing zero of the pole in motor. The zero crossing was detected by the digital signal controller (DSC) detection system which the phase is shifted by 30° from zero crossing position. The controller will transform these signals to PWM signals for driving the six step inverter to drive motor. From the experimental this kind of controller can apply to the BLDC motor speed range 100 – 700 rpm. The performance comparison between sensorless and sensor control are as follows: the error of position sensor at various speed up to 1.8 % while the motor voltage are different less than 3 %. System efficiency of sensorless control shows 2 % better than that of sensor control for both continuous load and step load.

กิตติกรรมประกาศ

บทความวิจัยเรื่องการการออกแบบควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านปราศจากเซนเซอร์ด้วยการตรวจจับสัญญาณผ่านศูนย์ ได้รับความร่วมมือจากหลายท่านทำให้บทความนี้ประสบความสำเร็จและด้วยความวิริยะอุตสาหะของผู้จัดทำเองจึงทำให้ประสบความสำเร็จ คำแนะนำและการสนับสนุน ทางผู้จัดทำจึงขอขอบพระคุณในความอนุเคราะห์ดังกล่าว ดังมีรายนามต่อไปนี้

ผู้จัดทำขอขอบพระคุณในความกรุณาของ รศ.ร.อ.ดร.วิระเชษฐ์ ชันเงิน ผู้ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้ให้คำแนะนำชี้แนวทางของปัญหาและนำไปสู่ความสำเร็จและยังได้อนุเคราะห์ห้องทำงานและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง ขอขอบคุณนายนครศักดิ์แสงศรี เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าที่ให้เบิกใช้เครื่องมือในการทดลอง ขอขอบคุณนายณัฐวรราช จำปาศรีที่ได้ช่วยในเรื่องของการเขียนโปรแกรมควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ ขอขอบพระคุณนาวาตรีเทวิน นิลสาคร ที่ได้ช่วยเหลือและให้คำแนะนำในการทำเล่มและภาษาอังกฤษ ขอขอบคุณนายกวีพจน์ วรรณตรสุทธิกุลช่วยวิเคราะห์หาสาเหตุแก้ปัญหาต่างๆ ขอขอบคุณคุณไตรภพ บัวระกตที่ได้แนะนำแนวทางการและแก้ปัญหาผู้จัดทำของกราบขอขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่ง

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดาและครอบครัวอันเป็นที่รักยิ่งของข้าพเจ้า ด้วยความรักและการช่วยเหลือทุกอย่างทั้งทางด้านค่าเล่าเรียนค่ากินค่าใช้ ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณอย่างหาที่สุดมิได้

กฤตภาส ผินสันเทียะ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	I
ABSTRACT.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูป.....	VIII
สารบัญตาราง.....	XII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ขอบเขต และข้อกำหนดของการศึกษาวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนของการศึกษาวิจัย.....	2
1.5 ทฤษฎีแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	3
1.5.1 การนำเสนอวิธีการใหม่.....	3
1.5.2 การเปรียบเทียบกับหลักการเดิมที่มีอยู่.....	5
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการศึกษา.....	5
1.7 การจัดโครงสร้างเนื้อหาภายในวิทยานิพนธ์.....	6
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการวิธีการควบคุมมอเตอร์.....	7
2.1 บทนำ.....	7
2.2 โครงสร้างพื้นฐานของมอเตอร์ในการพิจารณาสนามแม่เหล็ก.....	7
2.3 วิธีการการควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน.....	10
2.3.1 การควบคุมความเร็วแบบตัวตรวจจับตำแหน่ง.....	10
2.3.2 การควบคุมความเร็วแบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์.....	11
2.4 อัลกอริทึมระบบขับเคลื่อนความเร็วรอบมอเตอร์แบบปราศจากตัวตรวจจับ.....	11
2.5 เสนอวิธีการวิเคราะห์แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับด้วยการตัดผ่านศูนย์.....	13
2.6 การค้นหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ.....	14
2.7 วงจรสำหรับการใช้งานความเร็วรอบต่ำ และแรงดันไฟฟ้าต่ำ.....	17
2.8 การคำนวณหาความเร็วรอบของมอเตอร์.....	19
2.9 การวิเคราะห์การกระจายสนามแม่เหล็กขดลวดสเตเตอร์.....	19
2.10 การควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์แบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์.....	21
2.11 ลักษณะโหมดทำงานของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์.....	22

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.11.1 ลำดับการทำงานของอินเวอร์เตอร์แบบสัญญาณสี่เหลี่ยม 120 องศา.....	24
2.12 เสนอวิธีการตรวจจับตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ.....	27
2.12.1 แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับเปรียบเทียบกับแรงดันครึ่งหนึ่งของแรงดันดีซี.....	27
2.12.2 แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับเทียบกับจุดนิวตรอนเสมือน.....	28
2.12.3 แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับตรวจจับด้วยอนาล็อกเปลี่ยนเป็นดิจิตอล.....	28
2.12.4 ซิงโครนัสสัญญาณตัวอย่างของแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ.....	29
2.13 วิธีการทำงานและวิเคราะห์แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ.....	29
บทที่ 3 การออกแบบและสร้างระบบการขับเคลื่อนที่นำเสนอ.....	31
3.1 บทนำ.....	31
3.2 โครงสร้างของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน.....	32
3.3 การออกแบบแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงป้อนวงจร.....	33
3.4 การออกแบบควบคุมโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์.....	34
3.4.1 วงจรแสดงผลผ่าน LCD (LCD Monitoring).....	35
3.5 การออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส.....	35
3.5.1 การคำนวณหาพิกัดแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์.....	36
3.5.2 หาพิกัดกระแสไฟฟ้านำออก.....	36
3.5.3 หาพิกัดกำลังไฟฟ้านำเข้า.....	37
3.5.4 หาพิกัดกระแสไฟฟ้านำเข้าของอินเวอร์เตอร์.....	37
3.6 การออกแบบวงจรบูทสแตร์ป สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์.....	37
3.7 การออกแบบวงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง.....	39
3.7.1 วงจรตรวจจับกระแส (Current sensor).....	39
3.7.2 วงจรตรวจจับแรงดัน (Voltage divider sensor).....	39
3.8 การออกแบบวงจรตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับที่ตัดผ่านศูนย์.....	40
3.8.1 การออกแบบวงจรเปรียบเทียบแรงดัน.....	41
3.9. การออกแบบสำหรับวงจรปรับความเร็วมอเตอร์.....	43
3.10. การออกแบบสำหรับการกำหนดทิศทางหมุนตามเข็มและทวนเข็มนาฬิกา.....	44
บทที่ 4 ผลการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และผลจากการทดลอง.....	45
4.1 บทนำ.....	45
4.2 ลักษณะการควบคุมความเร็วรอบแบบปราศจากตัวตรวจจับ.....	46
4.3 การจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม Power sim.....	47
4.3.1 ข้อมูลมอเตอร์ในการจำลองการทำงานโดยโปรแกรม Power sim.....	47

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.2 การจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	47
4.3.3 ผลการจำลองและการวิเคราะห์.....	48
4.4 ผลการทดลองการขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน.....	50
4.4.1 ผลกระทบจากอุปกรณ์ตรวจจับขั้วแม่เหล็กขัดข้อง.....	50
4.5 ผลของสัญญาณควบคุมที่ใช้ในการทำงานแบบปราศจากตัวตรวจจับ.....	51
4.5.1 แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับจากขั้วมอเตอร์.....	51
4.5.2 เปรียบเทียบสัญญาณตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์และ สัญญาณตัดผ่านศูนย์.....	52
4.5.3 ความสัมพันธ์ของแรงดันอ้างอิงกับช่วงการควบคุม ความเร็วตัวตีไซเคิล.....	53
4.5.4 ความสัมพันธ์ของค่าหน่วงเวลากับช่วงการควบคุม ความเร็วตัวตีไซเคิล.....	53
4.5.5 สัญญาณพีดับบิวเอ็มที่ใช้ควบคุมการขับเคลื่อน.....	55
4.5.6 สัญญาณการขับนำสวิตซ์วงจรบูทสเตร็ป.....	56
4.6 ผลการขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบปราศจากตัวตรวจจับ.....	56
4.6.1 สัญญาณแรงเคลื่อนไฟฟ้าระหว่างขั้วมอเตอร์ทั้งสามเฟส.....	57
4.6.2 เปรียบเทียบสัญญาณแรงเคลื่อนไฟฟ้าระหว่าง มีตัวตรวจจับตำแหน่งและปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์.....	57
4.6.3 เปรียบเทียบฮาร์มอนิกของแรงดันไฟฟ้าระหว่างมีตัวตรวจจับ ตำแหน่งและปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์.....	60
4.6.4 เปรียบเทียบความค่าความผิดพลาดการตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์.....	66
4.6.5 เปรียบเทียบการทดสอบภาระทางกลระหว่าง มีตัวตรวจจับและปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่ง.....	69
4.6.6 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของการควบคุมแบบ มีตัวตรวจจับและปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์.....	71
4.6.7 ผลของสัญญาณตรวจจับกับทิศทางการหมุนตามเข็ม และทวนเข็มนาฬิกา.....	76
4.7 ผลการทดสอบขณะทดลอง.....	81

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง ข้อเสนอแนะ และแนวทางการพัฒนา.....	82
5.1 บทนำ.....	82
5.2 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	82
5.2.1 การทดสอบการขับเคลื่อนแบบเกิดความผิดปกติ ของสัญญาณตรวจจับตำแหน่ง.....	82
5.2.2 การทดสอบผลการตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ.....	82
5.2.3 ผลการทดสอบการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบปราศจากตัวตรวจจับ.....	83
5.2.4 ผลการทดสอบเปรียบเทียบประสิทธิภาพการขับเคลื่อน แบบปราศจากตัวตรวจจับ.....	83
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	83
5.4 แนวทางการพัฒนา.....	84
เอกสารอ้างอิง.....	85
ภาคผนวก ก อุปกรณ์ประมวลผลและโปรแกรมการทำงาน.....	87
ภาคผนวก ข เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	110
ภาคผนวก ค อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการทดลอง.....	114

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ความสัมพันธ์สนามแม่เหล็กระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ และแรงดันหลักกับส่วนประกอบของฮาร์มอนิกที่สาม.....	4
1.2 จุดตัดผ่านศูนย์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับมอเตอร์.....	4
2.1 โครงสร้างพื้นฐานของมอเตอร์สำหรับการพิจารณาทางด้านพลวัต.....	7
2.2 แสดงตำแหน่งของขดลวดทางด้านสเตเตอร์ทั้ง 3 เฟส.....	8
2.3 ลักษณะของโรเตอร์ประกอบด้วยขั้วแม่เหล็ก 2 ขั้ว.....	8
2.4 ทิศทางการกระจายสนามแม่เหล็กระหว่างช่องว่างอากาศ.....	10
2.5 ไดอะแกรมการต่อมอเตอร์แบบอาศัยตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์.....	10
2.6 ไดอะแกรมการต่อแบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์.....	11
2.7 อัลกอริทึมการขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงโรแปรงถ่านปราศจากตัวตรวจจับ.....	12
2.8 ความสัมพันธ์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับเมื่อคู่เฟส A- C นำกระแส.....	14
2.9 การค้นหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับระหว่างสวิตช์มอสเฟสเปิด.....	15
2.10 วงจรสำหรับการตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ.....	17
2.11 ไดอะแกรมการคำนวณหาความเร็วรอบจากคาบเวลาจากการเกิดซีโรครอสซิง.....	19
2.12 การกระตุ้นสนามแม่เหล็กในแต่ละคู่เฟส.....	20
2.13 การกระตุ้นสนามแม่เหล็ก (ก) ที่ขดลวด A-B (ข) ที่ขดลวด A-C เพื่อหาตำแหน่งเริ่มต้น.....	20
2.14 ไดอะแกรมระบบขับเคลื่อนความเร็วรอบมอเตอร์โดยปราศจากตัวตรวจจับ.....	21
2.15 วงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์ต่อโหลดแบบสตาร์.....	22
2.16 กระแสไฟฟ้าและแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับในแต่ละระดับการควบคุมตาม สัญญาณขับเคลื่อนเกิดตามตารางที่ 2.1.....	23
2.17 สัญญาณกระแสไฟฟ้า และแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกับเมื่อมอสเฟส (Q1,Q6) ทำงาน.....	24
2.18 สัญญาณกระแสไฟฟ้า และแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกับเมื่อมอสเฟส (Q1,Q2) ทำงาน.....	25
2.19 สัญญาณกระแสไฟฟ้า และแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกับเมื่อมอสเฟส (Q3,Q2) ทำงาน.....	25
2.20 สัญญาณกระแสไฟฟ้า และแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกับเมื่อมอสเฟส (Q3,Q4) ทำงาน.....	26
2.21 สัญญาณกระแสไฟฟ้าและแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกับเมื่อมอสเฟส (Q5,Q4) ทำงาน.....	26
2.22 สัญญาณกระแสไฟฟ้า และแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกับเมื่อมอสเฟส (Q5,Q6) ทำงาน.....	27
2.23 แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับเทียบกับครึ่งหนึ่งของแรงดันดีซี (DC/2).....	27
2.24 แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับเทียบกับจุดนิวตรอนเสมือน.....	28
2.25 แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับตรวจจับด้วยอนาล็อกเปลี่ยนเป็นดิจิตอล.....	28
2.26 ซิงโครนัสสัญญาณตัวอย่างของแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ.....	29

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.27 จุดตัดสัญญาณผ่านศูนย์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับของมอเตอร์.....	30
2.28 เปรียบเทียบเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับกับตำแหน่งการสวิตช์ของกระแส.....	30
3.1 ไดอะแกรมการทำงานของระบบควบคุมมอเตอร์.....	31
3.2 โครงสร้างของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน.....	33
3.3 วงจรไฟเลี้ยง 5 โวลต์และ 12 โวลต์.....	33
3.4 ตำแหน่งพอร์ตต่างๆที่ใช้ในการขับเคลื่อนการทำงานของ dsPIC30F4011.....	34
3.5 ตัวอย่างตัวประมวลผลทางดิจิทัล dsPIC30F4011.....	34
3.6 วงจรแสดงผลผ่านหน้าจอ LCD.....	35
3.7 วงจรอินเวอร์เตอร์กำลัง 3 เฟส.....	36
3.8 วงจรบูทสแตร์ปสำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์.....	38
3.9 วงจรบูทสแตร์ป สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์ในชุดทดลอง.....	38
3.10 วงจรตรวจจับกระแส.....	39
3.11 วงจรตรวจจับแรงดันแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง.....	40
3.12 วงจรตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับในแต่ละเฟส.....	41
3.13 วงจรแบบเทียบแรงดันสำหรับแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ตัดผ่านศูนย์ของมอเตอร์.....	42
3.14 (ก) ผลของสัญญาณรบกวนต่อการทำงานของวงจรเปรียบเทียบ (ข) วงจรเปรียบเทียบที่มีฮิสเตอร์ริซิส.....	42
3.15 วงจรสำหรับตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับที่ใช้ทดลอง.....	43
3.16 วงจรปรับความเร็วมอเตอร์.....	43
4.1 จำลองวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์การตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ.....	46
4.2 จำลองวงจรของระบบควบคุมความเร็วรอบแบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์.....	46
4.3 (ก) สัญลักษณ์มอเตอร์ (ข) ค่าตัวแปรพารามิเตอร์ของมอเตอร์.....	47
4.4 ลักษณะสัญญาณการควบคุมการขับเคลื่อนด้วยการจำลอง.....	48
4.5 การจำลองสัญญาณแรงดันระหว่างขั้วมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน.....	49
4.6 การจำลองสัญญาณกระแสขั้วมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน.....	49
4.7 จำลองการเปรียบเทียบสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากับสัญญาณซีโรครอสซิง.....	49
4.8 จำลองการเปรียบเทียบความเร็วรอบของมอเตอร์ แบบมีตัวตรวจจับขั้วแม่เหล็ก และปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่ง.....	50

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 ลักษณะต้นและกระแสไฟฟ้ากรณีเกิดความผิดปกติจาก Hall Effect sensor (ก) ดิวตี้ไซเคิล 60 % และ (ข) ดิวตี้ไซเคิล 100 %.....	50
4.10 ลักษณะแรงดันและกระแสไฟฟ้าในสภาวะทำงานปกติ.....	51
4.11 แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับจากขั้วมอเตอร์กับซอส (V phaseA - source).....	51
4.12 เปรียบเทียบแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับและสัญญาณตรวจจับผ่านศูนย์.....	52
4.13 เปรียบเทียบสัญญาณตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์และสัญญาณผ่านศูนย์.....	52
4.14 ความสัมพันธ์ของแรงดันอ้างอิงจุดตัดผ่านศูนย์กับช่วงควบคุมความเร็วดิวตี้ไซเคิล.....	53
4.15 ความสัมพันธ์คาบเวลาที่เกิดซีโรครอสซิง (T_0) กับช่วงการควบคุมความเร็วดิวตี้ไซเคิล.....	54
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าหน่วงเวลา (Time Delay) 30 องศาจากจุดตัดผ่าน ศูนย์กับช่วงการควบคุมความเร็วดิวตี้ไซเคิล.....	54
4.17 เปรียบเทียบ (ก) ยังไม่หน่วงเวลาสวิตซิง และ (ข) หน่วงเวลาสวิตซิงแล้ว 30 องศาจากจุดตัดผ่านศูนย์.....	55
4.18 สัญญาณขับเกตมอสเฟตกึ่งด้านบน (PWM_1H) และกึ่งด้านล่าง (PWM_G1L).....	55
4.19 สัญญาณการขับนำสวิตช์มอสเฟตด้านบนและด้านล่างของวงจรถูกสแตร์ป.....	56
4.20 สัญญาณแรงเคลื่อนไฟฟ้าระหว่างขั้วมอเตอร์ทั้งสามเฟส.....	57
4.21 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วมอเตอร์เฟส A,B ที่ความเร็ว150 ต่อนาที.....	58
4.22 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วมอเตอร์เฟส A,B ที่ความเร็ว320 ต่อนาที.....	58
4.23 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วมอเตอร์เฟส A,B ที่ความเร็ว450 ต่อนาที.....	59
4.24 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วมอเตอร์เฟส A,B ที่ความเร็ว545 ต่อนาที.....	59
4.25 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วมอเตอร์เฟส A,B ที่ความเร็ว690 ต่อนาที.....	60
4.26 เปรียบเทียบสเปกตรัมของแรงเคลื่อนไฟฟ้าและค่าความผิดพลาดรูปคลื่นไซน์ (ก) วิธีการควบคุมแบบตัวตรวจจับ (ข) ปรากฏจากตัวตรวจจับตำแหน่งช่วงดิวตี้ไซเคิล 40%..	61
4.27 เปรียบเทียบสเปกตรัมของแรงเคลื่อนไฟฟ้าและค่าความผิดพลาดรูปคลื่นไซน์ (ก) วิธีการควบคุมแบบตัวตรวจจับ (ข) ปรากฏจากตัวตรวจจับตำแหน่งช่วงดิวตี้ไซเคิล 60%..	62
4.28 เปรียบเทียบสเปกตรัมของแรงเคลื่อนไฟฟ้าและค่าความผิดพลาดรูปคลื่นไซน์ (ก) วิธีการควบคุมแบบตัวตรวจจับ (ข) ปรากฏจากตัวตรวจจับตำแหน่งช่วงดิวตี้ไซเคิล 80%..	63
4.29 เปรียบเทียบสเปกตรัมของแรงเคลื่อนไฟฟ้าและค่าความผิดพลาดรูปคลื่นไซน์ (ก) วิธีการควบคุมแบบตัวตรวจจับ (ข) ปรากฏจากตัวตรวจจับตำแหน่งช่วงดิวตี้ไซเคิล 100..	64
4.30 เปรียบเทียบสเปกตรัมของแรงเคลื่อนไฟฟ้าระหว่างวิธีการควบคุมแบบตัวตรวจจับ และปรากฏจากตัวตรวจจับตำแหน่ง ที่ช่วงดิวตี้ไซเคิล (ก) 100 % และ (ข) 80 %.....	65

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.31 เปรียบเทียบสัญญาณตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์กับสัญญาณเสมือน จากสัญญาณผ่านศูนย์ ที่ความเร็ว 689 รอบต่อนาที.....	66
4.32 เปรียบเทียบสัญญาณตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์กับสัญญาณเสมือน จากสัญญาณผ่านศูนย์ ที่ความเร็ว 416 รอบต่อนาที.....	66
4.33 เปรียบเทียบสัญญาณตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์กับสัญญาณเสมือน จากสัญญาณผ่านศูนย์ ที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที.....	67
4.34 เปรียบเทียบสัญญาณตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์กับสัญญาณตรวจจับเสมือน จากสัญญาณผ่านศูนย์ ในแต่ละย่านความเร็วรอบ.....	68
4.35 เปรียบเทียบแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าขณะทดสอบภาระทางกลแบบต่อเนื่อง ระหว่าง (ก) แบบตัวตรวจจับตำแหน่ง (ข) แบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่ง.....	69
4.36 เปรียบเทียบแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าขณะทดสอบภาระทางกลแบบทันทีทันใด ระหว่าง (ก) แบบตัวตรวจจับตำแหน่ง (ข) แบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่ง.....	70
4.37 ไดอะแกรมการทดสอบกำลังไฟฟ้าเพื่อใช้ในการคำนวณหาประสิทธิภาพ.....	71
4.38 สัญญาณแรงเคลื่อนและกระแสไฟฟ้าระหว่างวิธีใช้ตัวตรวจจับตำแหน่งและปราศจากตัว- ตรวจจับตำแหน่ง ที่ภาระทางกล 2 กิโลกรัม ความเร็วคงที่ 550 รอบต่อนาที.....	72
4.39 ประสิทธิภาพของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ระหว่างมีตัวตรวจจับและปราศจากตัวตรวจจับ.....	75
4.40 ประสิทธิภาพของมอเตอร์ระหว่างมีตัวตรวจจับและปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์... 75	75
4.41 ประสิทธิภาพของมอเตอร์ระหว่างมีตัวตรวจจับและปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์... 76	76
4.42 สัญญาณตรวจจับตำแหน่ง Hall effect sensor (CBA) ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา.....	77
4.43 สัญญาณตรวจจับ Zero crossing (CBA) ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา.....	78
4.44 สัญญาณตรวจจับตำแหน่ง Hall effect sensor (CBA) ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา.....	79
4.45 สัญญาณตรวจจับ Zero crossing (CBA) ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา.....	80
4.46 (ก) ชุดวงจรต้นแบบควบคุมมอเตอร์แบบปราศจากตัวตรวจจับ (ข) ชุดอุปกรณ์และเครื่องมือในการทดลอง.....	81
4.47 เปรียบเทียบการออกตัวของมอเตอร์ระหว่างตัวตรวจจับและปราศจากตัวตรวจจับ.....	81

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สัญญาณที่ใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์แบบสัญญาณสี่เหลี่ยม 120 องศา	23
3.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง	32
3.2 ลำดับสำหรับหมุนมอเตอร์ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา	44
3.3 ลำดับสำหรับหมุนมอเตอร์ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา	44
4.1 รายการทดลองการออกแบบวิจัยพัฒนาชุดควบคุมมอเตอร์	45
4.2 ความสัมพันธ์แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับและการขับนำสวิตซ์ในแต่ละคู่เฟส	47
4.3 ผลทดสอบเปรียบเทียบคาบเวลาความผิดพลาดระหว่างวิธีการตรวจจับตำแหน่ง และปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์	67
4.4 ผลทดสอบชุดควบคุมมอเตอร์แบบมีตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์	73
4.5 ประสิทธิภาพชุดความขับเคลื่อนมอเตอร์และมอเตอร์แบบมีตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์	73
4.6 ผลทดสอบชุดความขับเคลื่อนมอเตอร์แบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์	74
4.7 ผลทดสอบประสิทธิภาพชุดขับเคลื่อนมอเตอร์แบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์	74
4.8 ลำดับการเรียงกระแสแต่ละคู่เฟสแบบ Hall effect sensor ทิศทางทวนเข็มนาฬิกา	77
4.9 ลำดับการเรียงกระแสแต่ละคู่เฟสแบบ Zero crossing ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา	78
4.10 ลำดับการเรียงกระแสแต่ละคู่เฟสแบบ Hall effect sensor ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา	79
4.11 ลำดับการเรียงกระแสแต่ละคู่เฟสแบบ Zero crossing ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา	80

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันนี้มีการนำเอามอเตอร์กระแสตรงแบบแม่เหล็กถาวรไร้แปรงถ่านมาใช้ประโยชน์มากมายในอุตสาหกรรมและเครื่องใช้ในชีวิตประจำวัน เพราะเป็นมอเตอร์ที่มีพิกัดกำลังและประสิทธิภาพสูง จากการทำงานที่ไร้แปรงถ่านนั้น จึงเป็นข้อได้เปรียบมากกว่ามอเตอร์กระแสตรงที่มีแปรงถ่านในเรื่องการบำรุงรักษา แต่ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ชนิดนี้จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังคืออินเวอร์เตอร์ ในการควบคุมในการขับเคลื่อน ความนิยมในท้องตลาดทั่วไปมีมากขึ้น เช่น การนำไปใช้กับรถยนต์ไฟฟ้า จักรยานไฟฟ้า หรือมอเตอร์คอมเพรสเซอร์ มอเตอร์ดังกล่าวนี้ยังคงใช้ชุดควบคุมที่มีราคาค่อนข้างสูง โดยวงจรควบคุมความเร็วยังต้องใช้การทำงานร่วมกับเซนเซอร์ในการตรวจจับตำแหน่งของขั้วแม่เหล็กที่โรเตอร์ เพื่อให้ทราบถึงตำแหน่งเริ่มต้นในการขับเคลื่อน สัญญาณที่ใช้ในการขับเคลื่อนจะได้เป็นสัญญาณสี่เหลี่ยม 120 องศา ขับเคลื่อนแบบอินเวอร์เตอร์หกขั้ว อย่างไรก็ตามเป็นที่รู้กันดีว่าเซนเซอร์ตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์เหล่านี้มีขีดจำกัดในงานบางประเภทเช่น งานที่มีอุณหภูมิสูง หรือความดันภายในระบบสูงอย่างมอเตอร์คอมเพรสเซอร์ งานที่สายเซนเซอร์เข้าถึงได้ยากลำบากคับแคบ หรืออาจจะเกิดจากสายเซนเซอร์ที่ใช้ตรวจจับหลวมหลุด เนื่องจากกลไกการทำงานที่ยุ่งยาก และจำนวนสายไฟที่มีจำนวนมากตามมาอีกด้วย โดยทั้งหมดนี้จะส่งผลกระทบต่อการทำงานของมอเตอร์ก่อให้เกิดความผิดพลาด มอเตอร์จะไม่สามารถทำงานได้ตามปกติ และระบบควบคุมมอเตอร์แบบพิเศษในท้องตลาดทั่วไปยังสูงจากการเพิ่มอุปกรณ์ตรวจจับ ดังนั้นจึงได้นำเสนอการออกแบบควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ จะสามารถช่วยลดขีดจำกัดและต้นทุนการผลิต เพราะไม่ต้องมีอุปกรณ์ในการตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ วิธีการตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ หรือ Back EMF ลักษณะรูปคลื่นคางหมู ระหว่างความสัมพันธ์ของคาบเวลาที่เกิดจุดตัดผ่านศูนย์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ จำเป็นต้องอาศัยการควบคุมแบบป้อนกลับ เพื่อให้มอเตอร์ควบคุมความเร็วได้ตามคำสั่ง และมีสมรรถนะที่ใกล้เคียงกับการใช้ตัวตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์

วิธีการควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่ง จะอยู่บนพื้นฐานของการตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ ลักษณะสี่เหลี่ยมคางหมู ที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของสนามแม่เหล็กหมุนตัดผ่านตัวนำ ในแต่ละคาบเวลา แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนั้นมีความสัมพันธ์กับความเร็วรอบมอเตอร์ สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านที่ใช้มีขนาดพิกัดกำลัง 100 วัตต์ 24 โวลต์ 700 รอบต่อนาที ย่านควบคุมความเร็วรอบ 100 ถึง 700 รอบต่อนาที โดยอาศัยการตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับที่ตัดผ่านศูนย์ป้อนกลับ สำหรับการขับเคลื่อนแบบวงรอบปิด

อาศัยตัวประมวลผลทางดิจิทัล ตระกูล dsPIC ขนาด 16 บิต โดยสามารถเลือกทิศทางการหมุนและความเร็วได้ด้วยชุดคำสั่งไปยังอุปกรณ์ขับเคลื่อนอินเวอร์เตอร์สามเฟส

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

จุดมุ่งหมายในการออกแบบวิจัย การควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ มีวัตถุประสงค์ดังนี้

- 1.2.1 เพื่อศึกษาการทำงานและออกแบบชุดควบคุมของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน
- 1.2.2 เพื่อศึกษาถึงการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์แบบปราศจากตัวตรวจจับ
- 1.2.3 เพื่อศึกษาถึงการออกแบบระบบอย่างง่าย ลดความสัมพันธ์ของระบบควบคุม
- 1.2.4 เพื่อศึกษาผลกระทบของสัญญาณรบกวนฮาร์มอนิกจากการควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบปราศจากตัวตรวจจับ
- 1.2.5 เพื่อศึกษาการทำงานของอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กถาวร (Hall Effect Sensors)
- 1.2.6 เพื่อศึกษาการควบคุมทิศทางการหมุนแบบปราศจากตัวตรวจจับของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านได้

1.3 ขอบเขต และข้อกำหนดของการศึกษาวิจัย

งานวิจัยนี้มีขอบเขตอยู่ที่แนวทางการพัฒนาความสามารถของโปรแกรมและเทคโนโลยีทางด้านไมโครคอนโทรลเลอร์ที่จะทำให้ระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์แบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์ อันเป็นแนวทางในขับเคลื่อนมอเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูง โดยมีขอบเขตดังนี้

- 1.3.1 ออกแบบและสร้างชุดควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน ขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้า 100 วัตต์ 24 โวลต์ ความเร็วรอบ 700 รอบต่อนาที
- 1.3.2 ออกแบบให้สามารถควบคุมทิศทางการขับเคลื่อนของมอเตอร์แบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์ได้
- 1.3.3 ศึกษาผลกระทบของฮาร์มอนิกที่เกิดจากการควบคุมแบบตัวตรวจจับเทียบกับการควบคุมแบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์
- 1.3.4 ศึกษาการทำงานของวงจรตรวจจับสัญญาณผ่านศูนย์กับความสัมพันธ์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับจากแรงดันไลน์ของมอเตอร์

1.4 ขั้นตอนของการศึกษาวิจัย

- 1.4.1 ศึกษาโครงสร้างการทำงาน และหลักการขับเคลื่อนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน

1.4.2 เปรียบเทียบการขับเคลื่อนมอเตอร์กรณีเกิดข้อผิดพลาดของตัวตรวจจับตำแหน่ง กรณีที่ใช้การขับเคลื่อนแบบมีตัวตรวจจับตำแหน่งและปราศจากตัวตรวจตำแหน่งโรเตอร์

1.4.3 จำลองการควบคุมมอเตอร์โดยใช้โปรแกรม Power Sim 10.0 จำลองการทำงานของมอเตอร์และจำลองการควบคุมความเร็วมอเตอร์แบบปราศจากตัวตรวจจับ

1.4.4 ออกแบบอุปกรณ์ควบคุมวงจรตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ และวิธีการควบคุมความเร็วและทิศทางการหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์

1.4.5 ทดสอบการการกระตุ้นขดลวดแต่ละคู่เฟสในการค้นหาตำแหน่งและกำหนดทิศทางการหมุน

1.4.6 ทดสอบเปรียบเทียบการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์แบบมีตัวตรวจจับและแบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์

1.4.7 สรุปผลการทดสอบ

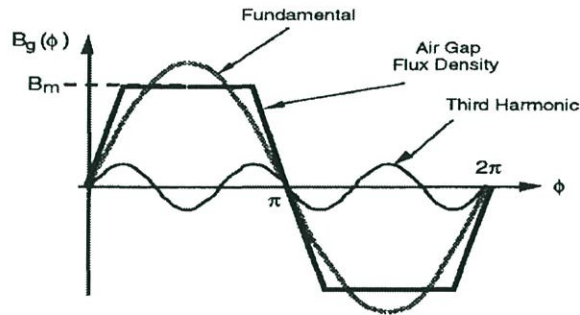
1.5 ทฤษฎีแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

มอเตอร์กระแสตรงชนิดแม่เหล็กถาวรโดยทั่วไปแล้วจะมีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์แบบปรากฏการณ์ฮอลล์ สำหรับการหาตำแหน่งของโรเตอร์ แต่มีข้อจำกัดในงานบางประเภทที่ไม่สามารถติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับได้ เช่นงานที่มีอุณหภูมิสูงและมีผลกระทบต่ออุปกรณ์ตรวจจับตำแหน่ง ส่งผลทำให้มอเตอร์ขับเคลื่อนมีกระแสสูงเสียงดังและเกิดความร้อน ดังนั้นจึงได้เสนอวิธีการขับเคลื่อนแบบปราศจากตรวจจับตำแหน่งและความเร็ว จะช่วยลดความสัมพันธ์ของระบบลง และยังประหยัดอุปกรณ์ตรวจจับตำแหน่งแบบเดิม วิธีนี้อาศัยหลักการพื้นฐานของแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับของมอเตอร์ การตรวจจับสถานะการทำงานของมอเตอร์ของไดโอดที่อยู่ ในเฟสที่ไม่ได้กระตุ้น นั่นก็คือแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับจะเป็นการรวมกันของแรงดันองค์ประกอบฮาร์มอนิกที่สามของสเตเตอร์

1.5.1 การนำเสนอวิธีการใหม่

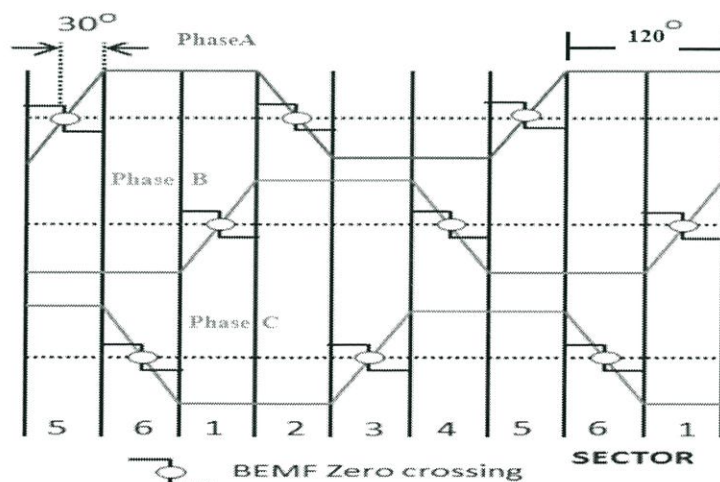
การประมาณค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ โดยจะใช้การตรวจจับแรงดันตัดผ่านศูนย์ (Zero crossing) ของรูปคลื่นแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ (Back EMF) ผลจากการที่สนามแม่เหล็กทางด้านโรเตอร์ ซึ่งเป็นแม่เหล็กถาวรหมุนตัดผ่านตัวนำด้านสเตเตอร์และการสวิตซ์ซิงของมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านที่ถูกต้องแบบสตาร์ จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำของขดลวดสเตเตอร์ แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับจะประมาณค่าได้ด้วยองค์ประกอบฮาร์มอนิกที่สามของรูปคลื่น ดังแสดงในรูปที่ 1.1 แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ คือผลรวมของแรงดันที่ชั่วสายโดยจะมีองค์ประกอบฮาร์มอนิกที่สามของแรงดันหลัก (Fundamental) โดยการรวมกันของฮาร์มอนิกที่สามของเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้อง

มีคาบเวลาที่ตัดผ่านศูนย์มีที่สอดคล้องกัน ซึ่งแนวทางของแรงดันฮาร์มอนิกจะมีข้อจำกัดในด้านของขนาดแอมพลิจูดและเฟสขององค์ประกอบฮาร์มอนิก ซึ่งจะมีขนาดที่เปลี่ยนแปลงไปตามการอิมิตัวของแม่เหล็ก ในย่านความเร็วต่ำจะมีขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าต่ำ เนื่องจากความสัมพันธ์ของขนาดแอมพลิจูดจะต่ำมาก ซึ่งจะทำให้ไม่สามารถตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับได้ที่เกิดขึ้นได้



รูปที่ 1.1 ความสัมพันธ์สนามแม่เหล็กระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ และแรงดันหลักกับส่วนประกอบของฮาร์มอนิกที่สาม [10]

การขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน จะใช้การขับเคลื่อนด้วยวงอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสแบบขั้นบันได จะประกอบด้วยสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ 6 ตัว การควบคุมใช้วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ด้วยสัญญาณพีดับบีเอ็ม โดยจะควบคุมให้สวิตช์แต่ละตัวทำงานเป็นแบบนำกระแส 120 องศา ซึ่งจะรับสัญญาณจากตัวตรวจจับขั้วแม่เหล็กจากมอเตอร์ ให้ระบบการขับเคลื่อนเป็นแบบ 6 step ในหนึ่งรูปคลื่นทางไฟฟ้า (1 Electrical Cycle) โดยจะพบว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับจะเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู (trapezoidal) ตำแหน่งที่เกิดจุดตัดผ่านศูนย์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับจะนำอยู่ที่มุม 30 องศาของตำแหน่งที่ตัวตรวจจับขั้วแม่เหล็กจริง ดังแสดงในรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 จุดตัดผ่านศูนย์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับมอเตอร์

ในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีกำหนดเวลาจากจุดตัดผ่านศูนย์ออกไป 30 องศาทางไฟฟ้า เพื่อให้ได้ตำแหน่งที่ตรงกับสัญญาณตรวจจับตำแหน่งจริงของขั้วแม่เหล็ก โดยใช้อุปกรณ์และการประมวลผลทางดิจิทัล สามารถคำนวณหาตำแหน่งและความเร็วรอบมอเตอร์โดยการควบคุมแบบวงรอบปิด

1.5.2 การเปรียบเทียบกับหลักการเดิมที่มีอยู่

1. จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการนำเสนอการควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน ส่วนใหญ่จะใช้อุปกรณ์ตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ในการควบคุมมอเตอร์ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอการควบคุมความเร็วแบบปราศจากตัวตรวจจับ สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน โดยวิธีการค้นหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับลักษณะสี่เหลี่ยมคางหมู และทำการเปรียบเทียบการทดสอบที่มีอยู่ กับการควบคุมที่นำเสนอทั้งสองแบบ

2. การตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับโดยตรงทั่วไปแล้ว จะมีการตรวจจับตำแหน่งโดยตรง แต่ในงานวิจัยนี้จะใช้วงจรตรวจจับสัญญาณผ่านศูนย์แล้วคำนวณอัลกอริทึมในการควบคุม โดยจะทำการเลื่อนเฟส 30 องศาจากจุดที่เกิดจุดตัดผ่านศูนย์ โดยใช้วงจรรองความถี่ต่ำกรองแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ ในย่านความเร็ว 100 ถึง 700 รอบต่อนาที สำหรับการคำนวณหาตำแหน่งของโรเตอร์ และความเร็วรอบมอเตอร์ อาศัยการตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับลักษณะสี่เหลี่ยมคางหมู เปรียบเทียบกับตำแหน่งที่เกิดจุดตัดผ่านศูนย์ จะได้คาบเวลาที่เกิดสัญญาณจุดตัดผ่านศูนย์ สำหรับควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์

3. การออกตัวขณะเริ่มต้นของมอเตอร์ทันทีทันใด จะทำให้กระแสไฟฟ้าขณะออกตัวเริ่มต้นนั้นสูง เนื่องจากตำแหน่งของโรเตอร์กับสัญญาณในการขับเคลื่อนนั้นไม่มีความสัมพันธ์กัน จึงได้เสนอวิธีการกระตุ้นสนามแม่เหล็กที่ขดลวดสเตเตอร์แต่ละคู่เฟส

4. การคำนวณความเร็วรอบมอเตอร์ แสดงในรูป 2.11 ไดอะแกรมการคำนวณความเร็วรอบ (ω) จากสัญญาณคาบเวลาการเกิดซีโรครอสซิง (T_0) จำนวนขั้วแม่เหล็ก (P) สำหรับการควบคุมความเร็วรอบได้จากสมการความสัมพันธ์กับคาบเวลาที่เกิดซีโรครอสซิง แสดงในสมการที่ 1.1

$$\omega = \frac{1}{T_0} \times \frac{60}{(P/2)} = \frac{120}{PT_0} \quad (1.1)$$

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการศึกษา

1.6.1 โครงการวิจัยนี้มุ่งเน้นถึงการออกแบบควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่ง และสามารถเข้าใจหลักการการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน ได้โดยละเอียด

1.6.2 ทำให้สามารถออกแบบ สร้าง และพัฒนาชุดควบคุมมอเตอร์ที่ลดข้อจำกัดและความสัมพันธ์ของระบบให้เล็กลง และมีความประหยัดต้นทุนในการผลิตชุดควบคุม เนื่องจากไม่ต้องใช้ตัวตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์

1.6.3 สามารถนำแนวคิดที่ได้ไปพัฒนาการขับเคลื่อนมอเตอร์ในงานอุตสาหกรรมเช่น อุตสาหกรรมมอเตอร์คอมเพรสเซอร์

1.6.4 ทำให้สามารถเข้าใจการทำงานของอุปกรณ์ตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์เปรียบเทียบกับจุดตัดผ่านศูนย์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ สามารถปรับปรุงเพื่อให้เพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งานมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านได้

1.6.5 ช่วยให้เกิดทักษะในการวิจัยพัฒนา และปรับปรุงประสิทธิภาพชุดควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน นำไปประยุกต์ใช้งานได้กับพาหนะชนิดต่างๆ เช่น รถไฟฟ้า

1.7 การจัดโครงสร้างเนื้อหาภายในวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วยรายละเอียดการออกแบบควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบปราศจากตัวตรวจจับ ขนาดพิกัดกำลัง 100 วัตต์โดยมีหลักการพื้นฐานของแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับที่จัดผ่านศูนย์ นำมาวิเคราะห์ค้นหาตำแหน่งของโรเตอร์ โดยเปรียบเทียบกับหลักการที่มีอยู่เดิม ซึ่งสามารถแบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บทดังต่อไปนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการศึกษาวิจัย โดยมีขอบเขตและข้อกำหนดในการดำเนินงานวิจัย ขั้นตอนของการศึกษา ทฤษฎีแนวคิดที่ใช้ และประโยชน์ที่ได้รับจากการศึกษาวิจัย

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีและหลักการวิธีการควบคุมมอเตอร์ โดยการศึกษาโครงสร้างพื้นฐานของมอเตอร์ในการพิจารณาสนามแม่เหล็ก วิธีการควบคุมแบบหลักการเดิมและเสนอวิธีการใหม่ที่ใช้อัลกอริทึมระบบขับเคลื่อนแบบปราศจากตัวตรวจจับ จากการค้นหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับที่ตัดผ่านศูนย์ ที่มีความสัมพันธ์กับตำแหน่งโรเตอร์ และวิเคราะห์การทำงานของแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ

บทที่ 3 กล่าวถึงการออกแบบและสร้างชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ ประกอบไปด้วยวงจรแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงวงจร วงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส วงจรบูทสแตร์ปขับเคลื่อนมอเตอร์ วงจรตรวจจับกระแสแรงดัน วงจรตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ วงจรปรับระดับความเร็วและทิศทางการหมุนของมอเตอร์

บทที่ 4 กล่าวถึงผลการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และผลจากอุปกรณ์ทดลอง ประกอบไปด้วย การจำลองผ่านโปรแกรม Power sim และผลการทดลองขับเคลื่อนแบบใช้อุปกรณ์ตรวจจับที่เกิดความบกพร่อง ผลการเปรียบเทียบทดสอบแบบหลักการเดิมและหลักการใหม่ที่ทำเสนอในสภาวะการใช้งานแบบ ไม่มีภาระทางกลและมีภาระทางกล เปรียบเทียบคุณลักษณะของสัญญาณทั้งแบบใช้ตัวตรวจจับและปราศจากตัวตรวจจับ แรงดัน กระแส สเต็ปเร่งแรงดันและฮาร์มอนิก

บทที่ 5 กล่าวถึงบทสรุปที่ได้จากการศึกษาค้นคว้า และจากการดำเนินการวิจัยสรุปผลการวิจัยที่ได้ตลอดจนข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนาที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยนี้

ภาคผนวก สำหรับในส่วนของภาคผนวกนี้จะประกอบไปด้วย BLDC อุปกรณ์ประมวลผล และโปรแกรมการทำงานรายละเอียดอุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในการวัด รายละเอียดของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ทั้งหมด ตลอดจนบทความทางวิชาการ 1 บทความ

บทที่ 2

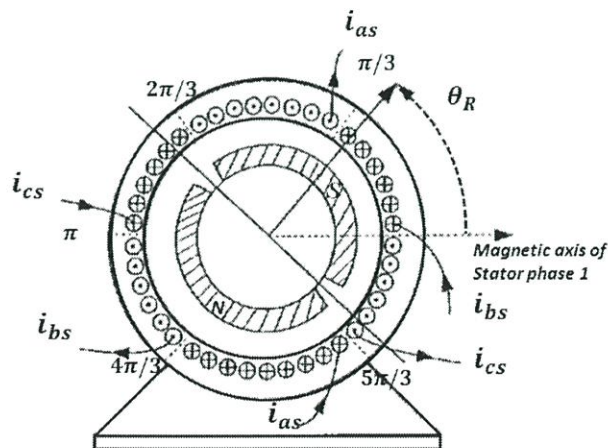
ทฤษฎีและหลักการวิธีการควบคุมมอเตอร์

2.1 บทนำ

แบบจำลองทางพลวัตของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน (Brushless DC Motor) แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับลักษณะสี่เหลี่ยมคางหมู การพัฒนาระบบควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านที่ใช้แม่เหล็กถาวรเป็นสนามแม่เหล็กกระตุ้นแทนขดลวดกระตุ้นสนามแม่เหล็กเพื่อให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุน การกระจายของสนามแม่เหล็กที่ช่องอากาศกระจายอย่างสม่ำเสมอจากการใช้แม่เหล็กถาวร (กรณีไม่คิดการสูญเสียในช่องว่างอากาศ) เมื่อมอเตอร์หมุนด้วยความเร็วรอบคงที่ [1-3] ผลที่เกิดจากแรงเคลื่อนที่ของสนามแม่เหล็กหมุนตัดผ่านตัวนำทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับลักษณะสี่เหลี่ยมคางหมู ในแต่ละคาบเวลาจึงเรียกแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับลักษณะแบบสี่เหลี่ยมคางหมูนั่นเอง แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนั้นมีความสัมพันธ์กับความเร็วรอบของมอเตอร์ จากความสัมพันธ์ดังกล่าวนำมาใช้สำหรับประมาณความเร็วรอบมอเตอร์ จากคาบเวลาของแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับที่เกิดขึ้นในแต่ละเฟส ดังจะกล่าวในรายละเอียดต่อไป

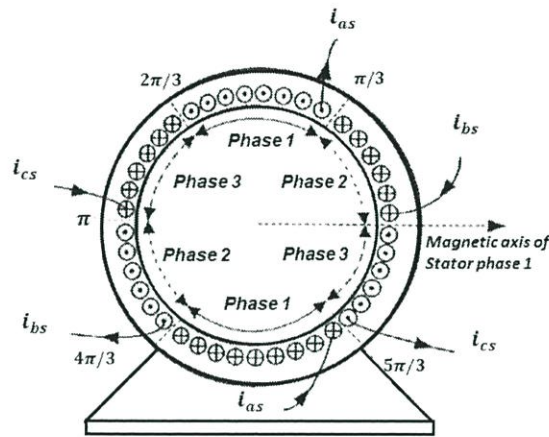
2.2 โครงสร้างพื้นฐานของมอเตอร์ในการพิจารณาสนามแม่เหล็ก

ลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน ใช้ในการพิจารณา ระบบแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส ลักษณะของมอเตอร์จะประกอบไปด้วยจำนวนขั้วแม่เหล็ก 2 ขั้ว ตำแหน่งของขดลวดด้านสเตเตอร์แต่ละเฟส ทิศทางของกระแสไฟฟ้าแต่ละเฟส ตามพิกัดอ้างอิงของโรเตอร์ เปรียบเทียบกับสนามแม่เหล็กทางด้านสเตเตอร์เฟส A แสดงในรูปที่ 2.1 เป็นโครงสร้างพื้นฐานของมอเตอร์สำหรับพิจารณาทางด้านพลวัต

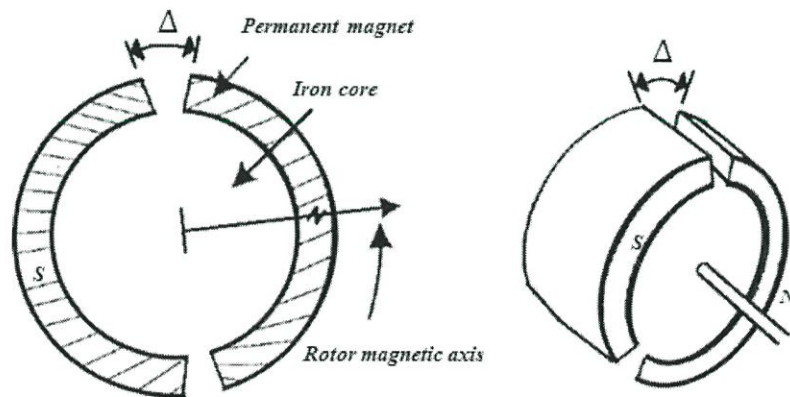


รูปที่ 2.1 โครงสร้างพื้นฐานของมอเตอร์สำหรับการพิจารณาทางด้านพลวัต [3]

ในรูปที่ 2.2 แสดงตำแหน่งของขดลวดทางด้านสเตเตอร์ทั้ง 3 เฟส โดยกำหนดให้ i_{as} คือ กระแสไฟฟ้าเฟส A ระหว่างมุมทางด้านสเตเตอร์ ตั้งแต่ $\pi/3$ ถึง $2\pi/3$ ในด้านที่หนึ่ง ส่วนด้านที่สอง ระหว่างมุมทางด้านสเตเตอร์ ตั้งแต่ $4\pi/3$ ถึง $5\pi/3$, i_{bs} คือ กระแสไฟฟ้าเฟส B ระหว่างมุมทางด้านสเตเตอร์ ตั้งแต่ $\pi/3$ ถึง $4\pi/3$ ในด้านที่หนึ่ง ส่วนที่สอง ระหว่างมุมทางด้านสเตเตอร์ ตั้งแต่ 0 ถึง $\pi/3$ และ i_{cs} คือ กระแสไฟฟ้าเฟส c ระหว่างมุมทางด้านสเตเตอร์ ตั้งแต่ $2\pi/3$ ถึง $2\pi/3$ ในด้านที่หนึ่ง ส่วนด้านที่สองระหว่างมุมทางด้านสเตเตอร์ ตั้งแต่ $5\pi/3$ ถึง 2π และลักษณะของโรเตอร์ที่ใช้ในการพิจารณาสนามแม่เหล็ก แสดงในรูปที่ 2.3 ลักษณะของโรเตอร์ประกอบด้วยแม่เหล็กถาวรจำนวน 2 ขั้ว โรเตอร์สำหรับยึดติดกับแม่เหล็กถาวร และเพลลาตามพิกัดอ้างอิงโรเตอร์



รูปที่ 2.2 แสดงตำแหน่งของขดลวดทางด้านสเตเตอร์ทั้ง 3 เฟส



รูปที่ 2.3 ลักษณะของโรเตอร์ประกอบด้วยขั้วแม่เหล็ก 2 ขั้ว

ในแกนพิกัดอ้างอิงทางด้านโรเตอร์ของสนามแม่เหล็กระหว่างขั้วเหนือ และขั้วใต้ กำหนดให้ ระยะขั้วแม่เหล็กมีมุมต่างกัน (Δ) โดยลักษณะของแม่เหล็กถาวรจะเป็นแบบทรงกระบอกติดกับผิวของโรเตอร์ ตำแหน่งของโรเตอร์กำหนดให้อยู่ในทิศทางเดียวกับแม่เหล็กถาวรบนแกนพิกัดอ้างอิง

โรเตอร์ เพราะฉะนั้น การกระจายสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในช่องว่างอากาศให้เท่ากับสนามแม่เหล็กที่โรเตอร์ สามารถเขียนสมการได้ในสมการที่ (2.1) ตามทิศทางเวกเตอร์หนึ่งหน่วยของโรเตอร์ (\hat{r}) ดังนี้

$$B_R(r, \theta - \theta_R) \hat{r} = \begin{cases} B_{R0} \frac{r_R}{r} \hat{r} & ; -\frac{\pi}{2} + \frac{\Delta}{2} \leq \theta - \theta_R \leq \frac{\pi}{2} - \frac{\Delta}{2} \\ -B_{R0} \frac{r_R}{r} \left(\frac{\theta - \theta_R - \pi/2}{\Delta/2} \right) \hat{r} & ; \frac{\pi}{2} - \frac{\Delta}{2} \leq \theta - \theta_R \leq \frac{\pi}{2} + \frac{\Delta}{2} \\ -B_{R0} \frac{r_R}{r} \hat{r} & ; \frac{\pi}{2} + \frac{\Delta}{2} \leq \theta - \theta_R \leq \frac{3\pi}{2} - \frac{\Delta}{2} \\ B_{R0} \frac{r_R}{r} \left(\frac{\theta - \theta_R - 3\pi/2}{\Delta/2} \right) \hat{r} & ; \frac{3\pi}{2} + \frac{\Delta}{2} \leq \theta - \theta_R \leq \frac{3\pi}{2} - \frac{\Delta}{2} \end{cases} \quad (2.1)$$

ถ้าหากไม่นำมุมระหว่างช่องว่างของขั้วแม่เหล็ก (Δ) มาพิจารณา หรือกำหนดให้มีค่าเท่ากับศูนย์เพื่อง่ายต่อการพิจารณา และวิเคราะห์ผลของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นด้านโรเตอร์ สามารถเขียนสมการได้ใหม่ ดังแสดงในสมการที่ 2.2 ดังนี้

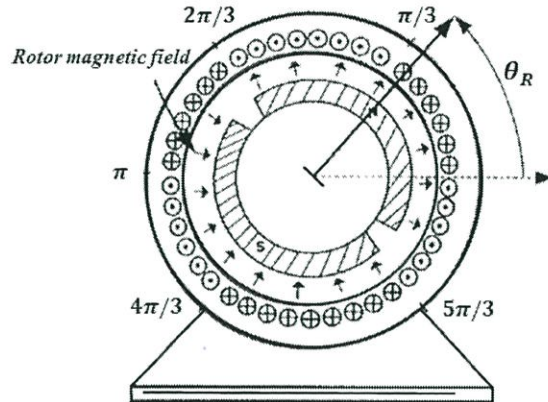
$$B_R(r, \theta - \theta_R) \hat{r} = \begin{cases} B_{R0} \frac{r_R}{r} \hat{r} & ; -\frac{\pi}{2} \leq \theta - \theta_R \leq \frac{\pi}{2} \\ -B_{R0} \frac{r_R}{r} \hat{r} & ; \frac{\pi}{2} \leq \theta - \theta_R \leq \frac{3\pi}{2} \end{cases} \quad (2.2)$$

เมื่อกำหนดให้

- B_R คือสนามแม่เหล็กทางด้านโรเตอร์ (T)
- r, r_R คือรัศมีของสเตเตอร์ และรัศมีของโรเตอร์ (mm)
- θ, θ_R คือมุมทางด้านสเตเตอร์ และมุมทางด้านของโรเตอร์ (Degree)
- B_{R0} คือสนามแม่เหล็กที่เกิดจากแม่เหล็กถาวรด้านโรเตอร์ (T)
- \hat{r} คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยของรัศมีโรเตอร์
- Δ คือมุมระหว่างขั้วแม่เหล็กถาวรขั้วเหนือ และขั้วใต้ (Degree)

ดังนั้นตัวประกอบ r_R/r จะเป็นอัตราส่วนระหว่างสนามแม่เหล็กด้านสเตเตอร์กับด้านโรเตอร์ระหว่างช่องอากาศ (Air-gap) ตามทิศทางของรัศมีหนึ่งหน่วยโรเตอร์ (\hat{r}) ดังนั้นการกระจายสนามแม่เหล็กที่

ช่องว่างอากาศ ระหว่างทางด้านโรเตอร์กับสเตเตอร์ ในรูปที่ 2.4 เป็นทิศทางเวกเตอร์ของการกระจายสนามแม่เหล็กทางด้านโรเตอร์ที่ช่องว่างอากาศ



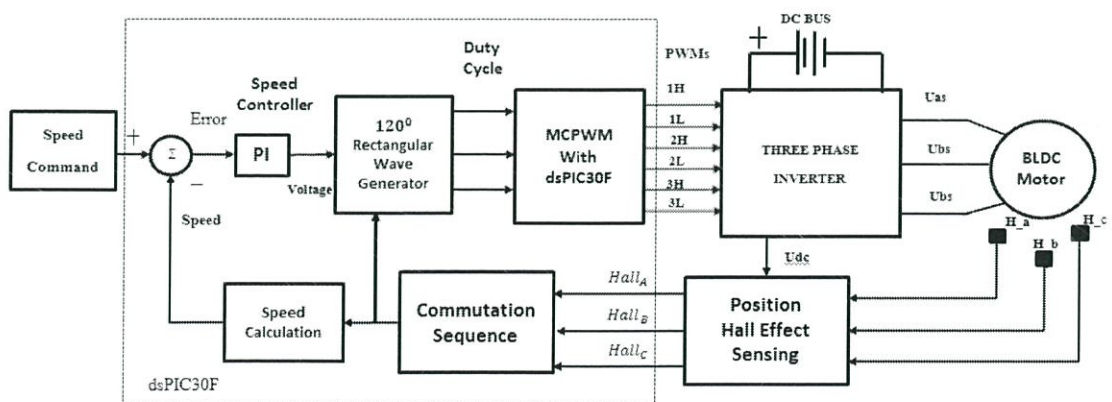
รูปที่ 2.4 ทิศทางการกระจายสนามแม่เหล็กระหว่างช่องว่างอากาศ

2.3 วิธีการควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

ลักษณะการต่อมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน ปกติแล้วจะมีอุปกรณ์ในการตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์แบบปรากฏการณ์ฮอลล์ ลักษณะการนำไปใช้งานประเภทนี้จะต้องประกอบไปด้วยวงจรควบคุมสำหรับขับเคลื่อนอินเวอร์เตอร์สามเฟส แต่ยังมีอีกวิธีสำหรับขับเคลื่อนโดยไม่ต้องอาศัยการตรวจจับตำแหน่ง โดยใช้แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับมาควบคุม ดังจะกล่าวต่อไปนี้

2.3.1 การควบคุมความเร็วแบบตัวตรวจจับตำแหน่ง

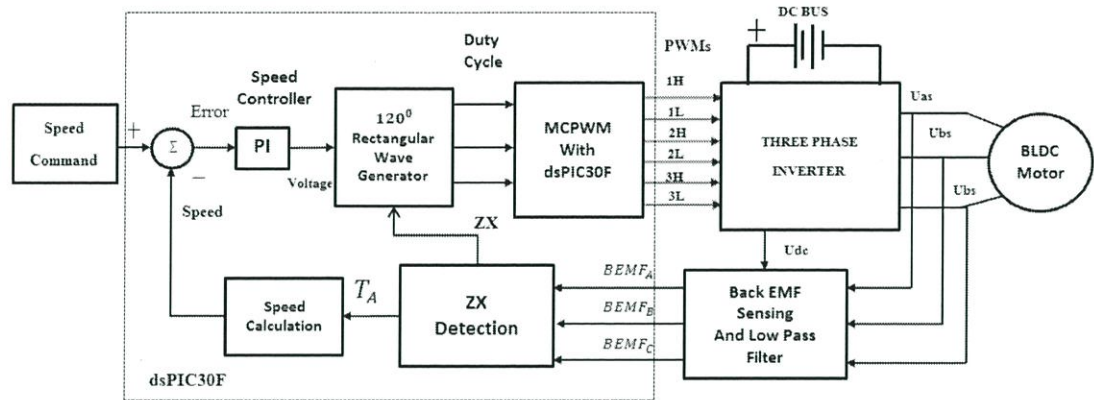
การควบคุมความเร็วรอบโดยอาศัยตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์แบบปรากฏการณ์ฮอลล์ (Position hall effect sensor) ดังแสดงในรูปที่ 2.5 เป็นไดอะแกรมของลักษณะการต่อควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ อาศัยตัวตรวจจับปรากฏการณ์ฮอลล์เพื่อเป็นความคุมความเร็วรอบมอเตอร์



รูปที่ 2.5 ไดอะแกรมการต่อมอเตอร์แบบอาศัยตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์

2.3.2 การควบคุมความเร็วแบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์

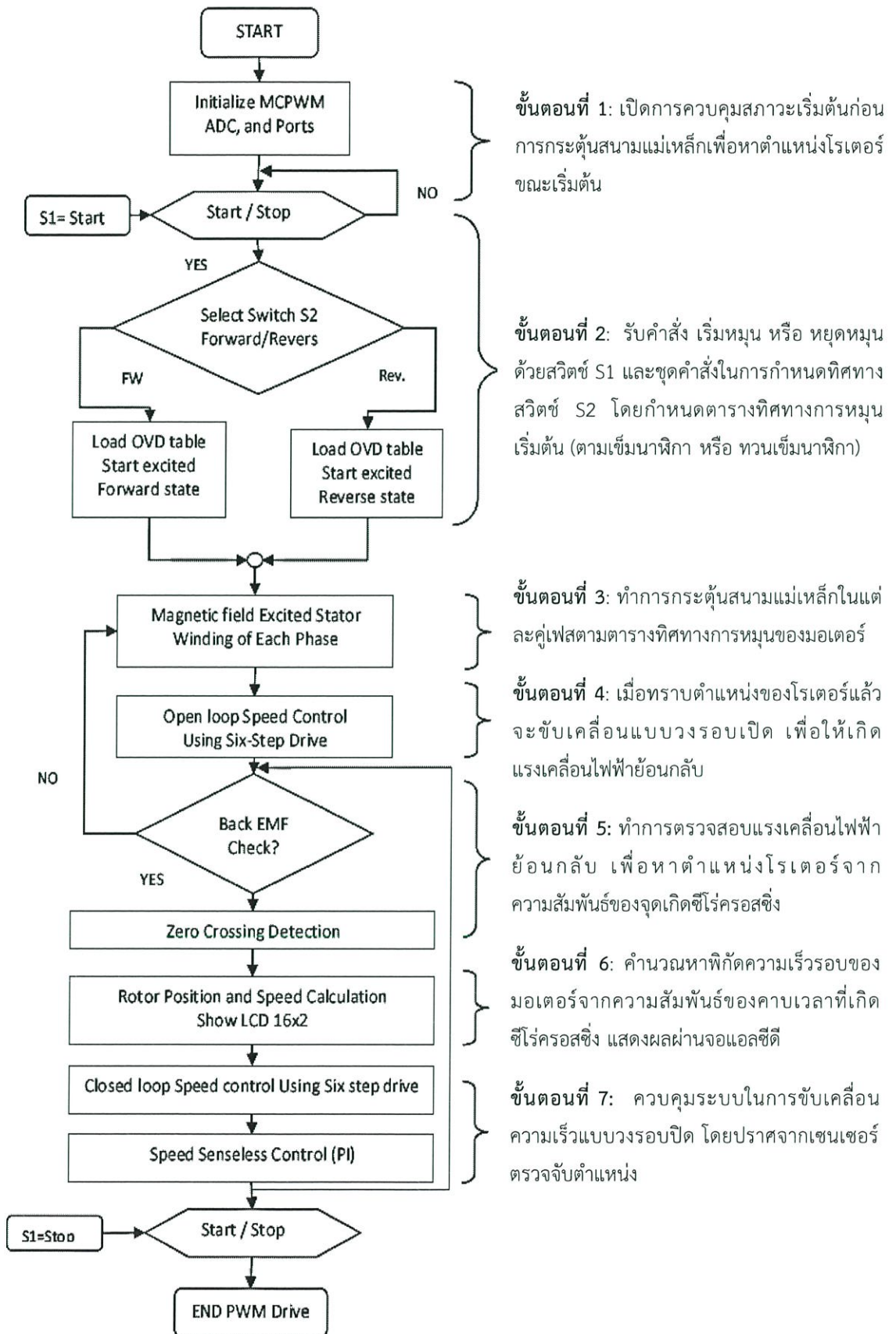
ในการควบคุมความเร็วรอบที่ผ่านมาเป็นแบบอาศัยตัวตรวจจับตำแหน่ง ส่วนการควบคุมความเร็วรอบแบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่ง ที่ใช้แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับสำหรับการคำนวณตำแหน่งโรเตอร์ และความเร็วรอบ แสดงในรูปที่ 2.6 เป็นไดอะแกรมแสดงลักษณะของการต่อการควบคุมมอเตอร์แบบปราศจากตัวตรวจจับ



รูปที่ 2.6 ไดอะแกรมการต่อแบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์

2.4 อัลกอริทึมระบบขับเคลื่อนความเร็วรอบมอเตอร์แบบปราศจากตัวตรวจจับ

อัลกอริทึมของการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่ง โดยอาศัยเทคนิคในการตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับที่ตัดผ่านศูนย์ โดยเริ่มจากรับคำสั่งการควบคุมสถานะเริ่มต้นก่อนการกระตุ้นสนามแม่เหล็ก โหลดข้อมูลตารางกระตุ้นแต่ละคู่เฟสเพื่อกำหนดทิศทางการกระตุ้นแบบตามเข็มหรือทวนเข็มนาฬิกา เมื่อทราบตำแหน่งของโรเตอร์จะขับเคลื่อนแบบวงรอบเปิด ด้วยเทคนิคแบบสัญญาณสี่เหลี่ยม 120 องศา เพื่อให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ เมื่อมอเตอร์กำลังหมุนจะเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับที่สามารถวัดได้โดยตรงด้วยวงจรตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าฟ้าย้อนกลับ และทำการเปรียบเทียบกับวงจรซีโรครอสซิง จะได้สัญญาณสำหรับส่งไปยังอุปกรณ์ประมวลผลเพื่อหาความสัมพันธ์ความเร็วรอบจากคาบเวลาที่เกิดจุดตัดผ่านศูนย์ ซึ่งจะใช้เวลาในการสวิตซิงไป 30 องศาจากจุดตัดผ่านศูนย์ เพื่อให้ตรงกับตำแหน่งของโรเตอร์ที่ตรวจจับได้จริง ทำการควบคุมความเร็วรอบแบบวงรอบปิดแบบพีโอ ในย่านความเร็ว 100 ถึง 700 รอบต่อนาที แสดงผลความเร็วรอบได้ในรูปแบบของจอแอลซีดี โดยการควบคุมแต่ละขั้นตอนสามารถแสดงได้ในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 อัลกอริทึมการขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านปราศจากตัวตรวจจับ

2.5 เสนอวิธีการวิเคราะห์แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับด้วยการตัดผ่านศูนย์

พิจารณามอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน (BLDC) ที่มีขดลวดไม่เคลื่อนที่อยู่กับที่สเตเตอร์ที่อยู่แบบสตาร์ โดยมีแม่เหล็กถาวรอยู่ที่ตัวหมุนโรเตอร์ มอเตอร์จะถูกขับด้วยอินเวอร์เตอร์สามเฟส ซึ่งจะมีอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างสัญญาณสวิตช์ โดยได้จากการตรวจจับตำแหน่งการหมุนของโรเตอร์ดังรูปที่ 1 โดยแรงดันที่เฟส A จะต่อที่จุดแบบสตาร์ของสเตเตอร์ V_{an} กำหนดให้ในสมการที่ (2.3)

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

โดย R_a คือค่าความต้านทานของสเตเตอร์ L_a คือค่าขดลวดตัวนำ e_{an} คือ back EMF และ i_a คือกระแสเฟส A

โดยจะเหมือนกันอีกสองเฟสที่เหลือสามารถเขียนเป็นสมการได้ ดังสมการที่ (2.4) และ (2.5)

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

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

โดยสัญลักษณ์มีความหมายเช่นเดียวกันกับข้างต้น

จากนั้น แรงดันไลน์ V_{ab} อาจจะอธิบายได้ดังสมการต่อไปนี้

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

จะเหมือนกับ

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

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

อย่างไรก็ตามแรงดันไลน์นี้สามารถประมาณค่าจากการไม่มีจุดต่อสตาร์ โดยวัดความต่างของชั่วแรงดันต่างๆ กับส่วนของบัสดีซีลบบ

จากสมการที่ (2.6) ลบด้วยสมการที่ (2.7)

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

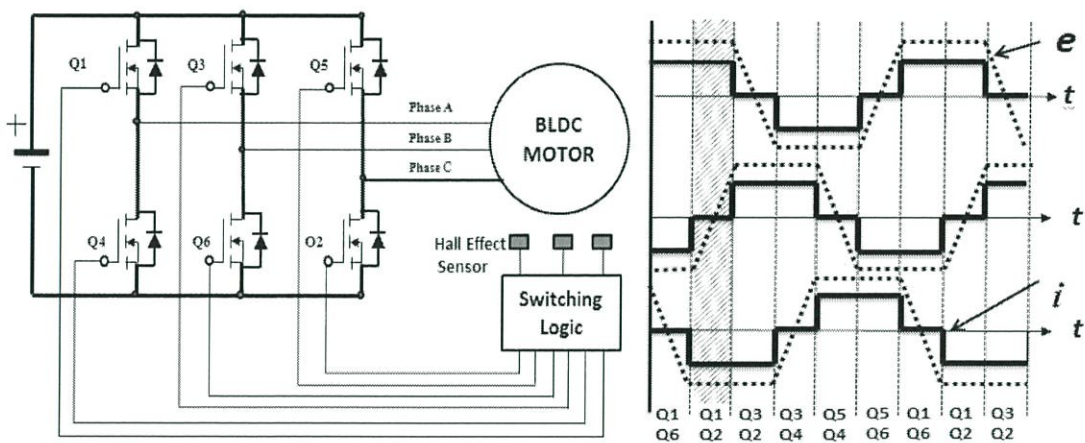
พิจารณาโดยรวมแล้วเมื่อเฟส A และ C นำกระแส และเฟส B ไม่นำกระแส โดยแสดงในรูปที่ 1 ด้วยระยะห่างที่ขดลวดเฟส A ต่อกับชั่วบวกกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง เฟส C ต่อกับชั่วลบของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง เฟส B ไม่ได้ต่อ ดังนั้น $i_a = -i_c$ และ $i_b = 0$ ดูได้ในรูปที่ 2.8

บริเวณพื้นที่แรงจางคือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับในเฟส A และ C แต่กระแสตรงข้ามกัน ดังนั้นในสมการที่ (2.9) สามารถเขียนใหม่ได้เป็นสมการที่ (2.10)

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

โดย V_{abbc} คือแรงดันไลน์เฟส A กับเฟส C โดยจุดต่อร่วมที่เฟส B, e_{an} คือ back EMF ของแต่ละเฟสใดๆ

ความสัมพันธ์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับเมื่อคู่เฟส A - C นำกระแสมีมุมทางไฟฟ้า 60 องศา ในแต่ละคู่เฟส มีจำนวนกระดပ်ในหนึ่งลูกคลื่นไฟฟ้า (1 electrical cycle) จะได้ลักษณะแรงเคลื่อนไฟฟ้าแบบสี่เหลี่ยมคางหมู ขณะเฟสที่ A ต่อกับขั้วบวกกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง เฟส C ต่อกับขั้วลบของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง เฟส B ไม่ได้ต่อ ดังนั้น $i_a = -i_c$ และ $i_b = 0$ บริเวณพื้นที่แรงจางคือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับในเฟส A และ C (V_{abbc})

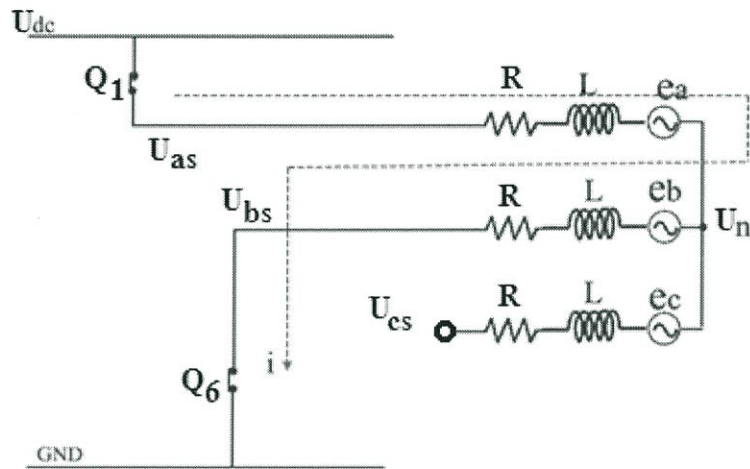


รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับเมื่อคู่เฟส A - C นำกระแส [9]

2.6 การค้นหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ

ในการค้นหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับระหว่างมอสเฟสเปิด เป็นการวัดสัญญาณที่เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับในแต่ละเฟส ในช่วงเวลาเปิดของสวิตช์มอสเฟส [7]-[8] ดังนั้นการค้นหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับโดยตรง จากจุดต่อแรงดันไฟฟ้าในช่วงเปิดของสวิตช์มอสเฟสระหว่างสัญญาณขับเคลื่อนด้วย PWM ขณะที่กระแสไหลผ่านขดลวดคู่เฟส หรือขณะที่มอสเฟสทำงานในโหมด (Q1, Q6) ปิด แสดงในรูปที่ 2.9 กระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านเฟส A ไปยังเฟส B ในวงจรชุดอินเวอร์เตอร์ในช่วงการสับเปลี่ยนสวิตช์ ขณะที่มอสเฟส Q1, Q6 ทำงาน ดังนั้นกระแสไฟฟ้าในแต่ละเฟสจะมีค่าเท่ากับ i หรือ ($i_{as} = i_{bs}, i_{cs} = 0$ A) ดังนั้นการหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับที่เกิดขึ้นใน

เฟส C จากจุดต่อแรงดันไฟฟ้าที่เฟส C (U_{cs}) เนื่องจากกระแสไฟฟ้าเฟส C เป็นศูนย์ แรงดันไฟฟ้าที่จุด C จะเท่ากับแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับที่เกิดขึ้นที่เฟส C ดังนั้นจะอธิบายในสมการความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นจากการพิจารณาประกอบกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับที่เกิดขึ้นต่อไปนี้



รูปที่ 2.9 การค้นหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับระหว่างสวิตช์มอสเฟสเปิด [2]

โดยการพิจารณาที่เฟส A จะได้แรงดันไฟฟ้าที่จุดนิวตรอน (U_n) ดังสมการที่ (2.11)

$$U_n = U_{dc} - U_{mos} - Ri - L \frac{di}{dt} - e_a \quad (2.11)$$

และหากพิจารณาที่เฟส B จะได้แรงดันไฟฟ้าที่จุดนิวตรอน (U_n) ดังสมการที่ (2.12)

$$U_n = U_{mos} + Ri - L \frac{di}{dt} - e_b \quad (2.12)$$

เมื่อกำหนดให้

- U_{mos} คือ แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมที่มอสเฟส (Volt)
- U_{dc} คือ แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (Volt)
- U_n คือ แรงดันไฟฟ้าที่จุดนิวตรอน (V)
- e_a, e_b, e_c คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับในแต่ละเฟส (V)
- i คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรรินเวอร์เตอร์ (A)
- R คือ ความต้านทานทางด้านสแตเตอร์ต่อเฟส (Ω)
- L คือ ความเหนี่ยวนำด้านสแตเตอร์ต่อเฟส (mH)

จากสมการแรงดันไฟฟ้าที่จุดนิวตรอน (U_n) เมื่อนำสมการที่ 2.11 รวมกับสมการที่ 2.12 จะได้สมการ U_n ใหม่ในสมการที่ (2.13) ดังนี้

$$U_n = \frac{U_{dc}}{2} - \frac{e_a - e_b}{2} \quad (2.13)$$

ดังนั้น เมื่อระบบไฟฟ้า 3 เฟสอยู่ในสภาวะสมดุลเนื่องจากโหลดสมดุลจะทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับที่จุดรวมที่นิวตรอนเท่ากับศูนย์ ดังสมการที่ (2.14)

$$e_a + e_b + e_c = 0 \quad (2.14)$$

ถ้าหากสนใจ ฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 (3^{rd} harmonics) จะทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับที่จุดรวมนิวตรอน จะไม่เท่ากับศูนย์ดังแสดงในสมการที่ (2.15)

$$e_a + e_b + e_c = e_3 \quad (2.15)$$

เมื่อ e_3 คือแรงดันไฟฟ้าต้านกลับของฮาร์โมนิกลำดับที่ 3

จากสมการที่ (2.14) จะได้แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับที่เฟส C คือ $e_c = -(e_a + e_b)$ นำ e_c ไปแทนค่าในสมการที่ (2.13) จะได้สมการ U_n ใหม่ดังแสดงในสมการที่ (2.16) ดังนี้

$$U_n = \frac{U_{dc}}{2} + \frac{e_c}{2} \quad (2.16)$$

ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าที่จุดต่อเฟส C (U_{cs}) จะมีค่าเท่ากับแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับที่เฟส C (e_c) รวมกับแรงดันไฟฟ้าที่จุดนิวตรอน (U_n) แสดงสมการที่ (2.17) และเมื่อนำสมการที่ 2.16 แทนค่า U_n จะได้

$$U_{cs} = e_c + U_n = \frac{3}{2}e_c + \frac{U_{dc}}{2} \quad (2.17)$$

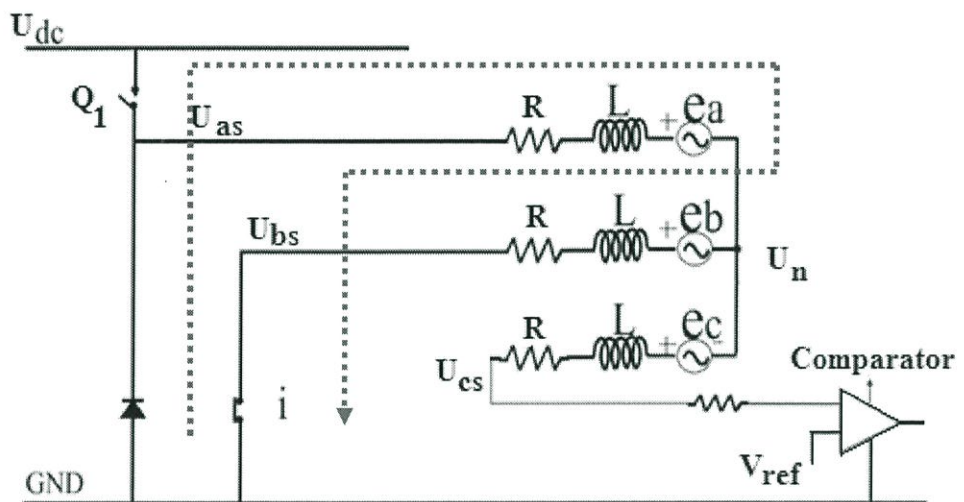
ในการพิจารณาแรงดันไฟฟ้าที่จุดนิวตรอน จะไม่นำเอาแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับที่ฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 มาพิจารณา ดังนั้นจะได้ (U_{cs}) ในสมการที่ (2.18)

$$U_{cs} = e_c + U_n = \frac{3}{2}e_c \quad (2.18)$$

จากสมการที่ (2.17) แรงดันไฟฟ้าที่จุดต่อเฟส C (U_{cs}) จะเท่ากับแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับที่เฟส C (e_c) จะเพิ่มขึ้นอีกครั้งหนึ่งของแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับเฟส C (e_c) รวมกลับครั้งหนึ่งของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (U_{dc}) เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับวงจรซีโรครอสซึ่งในการคำนวณหาตำแหน่ง และความเร็วรอบมอเตอร์ซึ่งหลักการดังกล่าวมา จะนำไปใช้งานโดยการคำนวณหาตำแหน่งของโรเตอร์ และความเร็วรอบมอเตอร์ โดยใช้ตัวประมวลผลทางดิจิทัลไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F4011

2.7 วงจรสำหรับการใช้งานความเร็วรอบต่ำ และแรงดันไฟฟ้าต่ำ

จากรูปที่ 2.10 จะเห็นว่ากระแสไฟฟ้าไหลผ่านไดโอด ในช่วงสวิตช์ของมอสเฟสเปิด (Q1) ดังนั้นจึงไม่มีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมไดโอด มาพิจารณาเนื่องจากเป็นไดโอดที่อยู่ภายในมอสเฟส ในกรณีทำหน้าที่เป็นสวิตช์ของมอสเฟสขณะเปิด เมื่อขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับที่มีขนาดสัญญาณขนาดต่ำ จะส่งผลกระทบต่อการทำงานของตำแหน่งจุดตัดผ่านศูนย์ ดังนั้นจะพิจารณาอัตราขยายสัญญาณของสวิตช์ สำหรับแรงดันไฟฟ้าใช้งานต่ำในการสวิตช์ กรณีการใช้งานที่ความเร็วรอบต่ำ สำหรับวงจรซีโรครอสซึ่งจะเพิ่มอัตราขยายของสัญญาณแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับที่มีขนาดเล็ก [14]-[16] เพื่อขยายสัญญาณแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับที่เกิดขึ้นในแต่ละเฟส



รูปที่ 2.10 วงจรสำหรับการตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ

จากการพิจารณาที่เฟส A ขณะที่มอสเฟส Q1 เปิด จะได้แรงดันไฟฟ้าที่จุดนิวตรอน (U_n) ในสมการที่ (2.19)

$$U_n = 0 - U_d - Ri - L \frac{di}{dt} - e_a \quad (2.19)$$

และจากการพิจารณาที่เฟส B ขณะที่มอสเฟส Q1 เปิดจะได้แรงดันไฟฟ้าที่จุดนิวตรอน (U_n) ในสมการที่ (2.20) ดังนี้

$$U_n = U_{mos} - Ri - L \frac{di}{dt} - e_b \quad (2.20)$$

เมื่อกำหนดให้

U_d คือ แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมของไดโอด (V)

U_{mos} คือ แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมมอสเฟส (V)

- U_{dc} คือ แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (V)
- U_n คือ แรงดันไฟฟ้าที่จุดนิวตรอน (V)
- e_a, e_b, e_c คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับในแต่ละเฟส (V)
- i คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรรินเวอร์เตอร์ (A)
- R คือ ความต้านทานทางด้านสแตเตอร์ต่อเฟส (Ω)
- L คือ ความเหนี่ยวนำด้านสแตเตอร์ต่อเฟส (mH)

จากสมการแรงดันไฟฟ้าที่จุดนิวตรอน (U_n) เมื่อนำสมการที่ (2.19) รวมกับสมการที่ (2.20) จะได้สมการ (U_n) ใหม่ดังแสดงในสมการที่ (2.21) ดังนี้

$$2U_n = U_{mos} - U_d - (e_a - e_b) \quad (2.21)$$

หรือ

$$U_n = \frac{U_{dc}}{2} - \frac{e_a - e_b}{2} \quad (2.22)$$

ดังนั้น เมื่อระบบไฟฟ้า 3 เฟสอยู่ในสภาวะสมดุลเนื่องจากโหลดสมดุลจะทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับที่จุดรวมที่นิวตรอนเท่ากับศูนย์ ดังสมการที่ (2.23)

$$e_a + e_b + e_c = 0 \quad (2.23)$$

หากสนใจ ฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 (3^{rd} Harmonics) จะทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับที่จุดรวมนิวตรอนจะไม่เท่ากับศูนย์ดังแสดงในสมการที่ (2.24)

$$e_a + e_b + e_c = e_3 \quad (2.24)$$

เมื่อ e_3 คือแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับของฮาร์โมนิกลำดับที่ 3

จากสมการที่ (2.23) จะได้แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับที่เฟส C คือ $e_c = -(e_a + e_b)$ นำ e_c ไปแทนค่าในสมการที่ (2.22) จะได้สมการ U_n ใหม่ดังแสดงในสมการที่ (2.25) ดังนี้

$$U_n = \frac{U_{mos} - U_d}{2} - \frac{e_c}{2} \quad (2.25)$$

ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าที่จุดต่อเฟส C (U_{cs}) จะมีค่าเท่ากับแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับที่เฟส C (e_c) รวมกับแรงดันไฟฟ้าที่จุดนิวตรอน (U_n) สมการที่ (2.26) และเมื่อนำสมการที่ (2.25) แทนค่า U_n จะได้

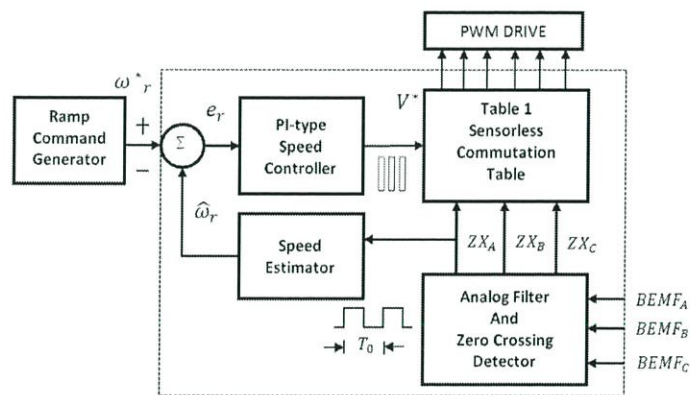
$$U_{cs} = e_c + U_n = \frac{3}{2}e_c + \frac{U_{mos} - U_d}{2} \quad (2.26)$$

จากสมการที่ (2.26) แรงดันไฟฟ้าที่จุดต่อเฟส C (U_{cs}) จะมีค่าเท่ากับแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับที่เฟส C e_c มีค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับมากกว่าครึ่งหนึ่ง ร่วมกับครึ่งหนึ่งของแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมมอสเฟส (U_{mos}) ลบกับแรงดันไฟฟ้ตกคร่อมไดโอด (U_d) ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าที่จุดต่อเฟส C (U_{cs}) จะได้สมการ (2.27) สำหรับแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับที่มีขนาดสัญญาณต่ำ ดังนี้

$$U_{cs} = e_c + U_n = \frac{3}{2}e_c - \frac{U_d}{2} \quad (2.27)$$

2.8 การคำนวณหาความเร็วรอบของมอเตอร์

ในรูปที่ 2.11 แสดงไดอะแกรมการคำนวณหาความเร็วรอบ (ω) จากสัญญาณคาบเวลาการเกิดซีโรครอสซิง (T_0) ในวงรอบควบคุมความเร็วรอบแบบพีไอ การคำนวณหาความเร็วรอบจากความสัมพันธ์กับคาบเวลาซีโรครอสซิง [16] แสดงในสมการที่ (1.1) ผลจากการตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ ผ่านวงจรตรวจจับสัญญาณผ่านศูนย์ นำคาบเวลาที่เกิดซีโรครอสซิง มาคำนวณหาตำแหน่งโรเตอร์และความเร็วรอบมอเตอร์ เพื่อสร้างสัญญาณในการขับเคลื่อนของมอสเฟสให้ เป็นไปตามตำแหน่งของโรเตอร์มีการควบคุมแบบวงรอบปิด ใช้เทคนิคแบบสัญญาณสี่เหลี่ยม 120 องศา สำหรับขับเคลื่อนสัญญาณให้ตรงตามตำแหน่งของโรเตอร์

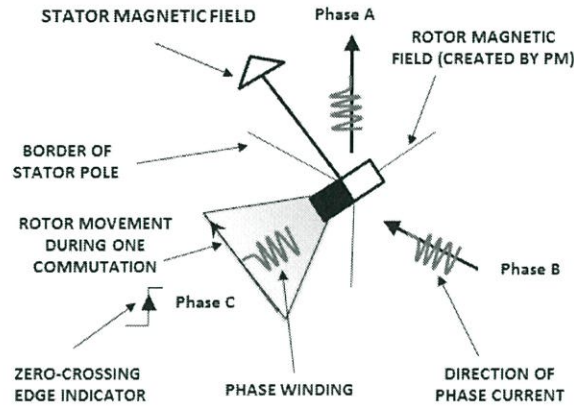


รูปที่ 2.11 ไดอะแกรมการคำนวณหาความเร็วรอบจากคาบเวลาจากการเกิดซีโรครอสซิง

2.9 การวิเคราะห์การกระจายสนามแม่เหล็กขดลวดสเตเตอร์

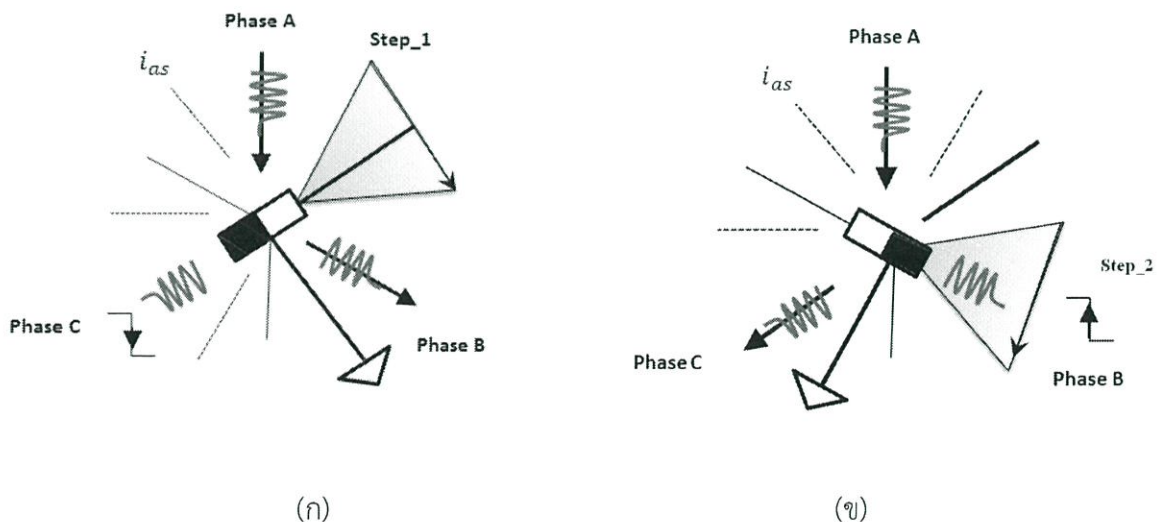
จากการกระตุ้นสนามแม่เหล็กที่ขดลวดสเตเตอร์เพื่อหาตำแหน่งของโรเตอร์ขณะเริ่มต้นด้วยวิธีการกระตุ้นสนามแม่เหล็กให้กับขดลวดด้านสเตเตอร์ ในรูปที่ 2.12 แสดงทิศทางการกระจายไฟฟ้าจากการกระตุ้นสนามแม่เหล็กในขดลวดในแต่ละคู่เฟส ตามสัญญาณในการขับเคลื่อนมอเตอร์ ทิศทางสนามแม่เหล็กทางด้านสเตเตอร์ และทิศทางการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ ผลจากการกระตุ้นสนามแม่เหล็กที่ขดลวดสเตเตอร์ ทำให้ทราบตำแหน่งของโรเตอร์ขณะเริ่มต้น ไม่ว่าจะตำแหน่งโรเตอร์จะอยู่ตำแหน่งไหนก็ตาม จะถูกกระตุ้นสนามแม่เหล็กเพื่อค้นหาตำแหน่งของโรเตอร์เริ่มต้น หลังจาก

ทราบตำแหน่งเริ่มต้นแล้วจะขับเคลื่อนมอเตอร์แบบวงรอบเปิด โดยเทคนิคแบบสัญญาณสี่เหลี่ยม 120 องศา เพื่อให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับแล้วนำสัญญาณแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับตรวจสอบตำแหน่งจุดซีโรครอสซิง เพื่อคำนวณหาตำแหน่งโรเตอร์และความเร็วรอบมอเตอร์ สำหรับการควบคุมความเร็วแบบปราศจากตัวตรวจจับ



รูปที่ 2.12 การกระตุ้นสนามแม่เหล็กในแต่ละคู่เฟส

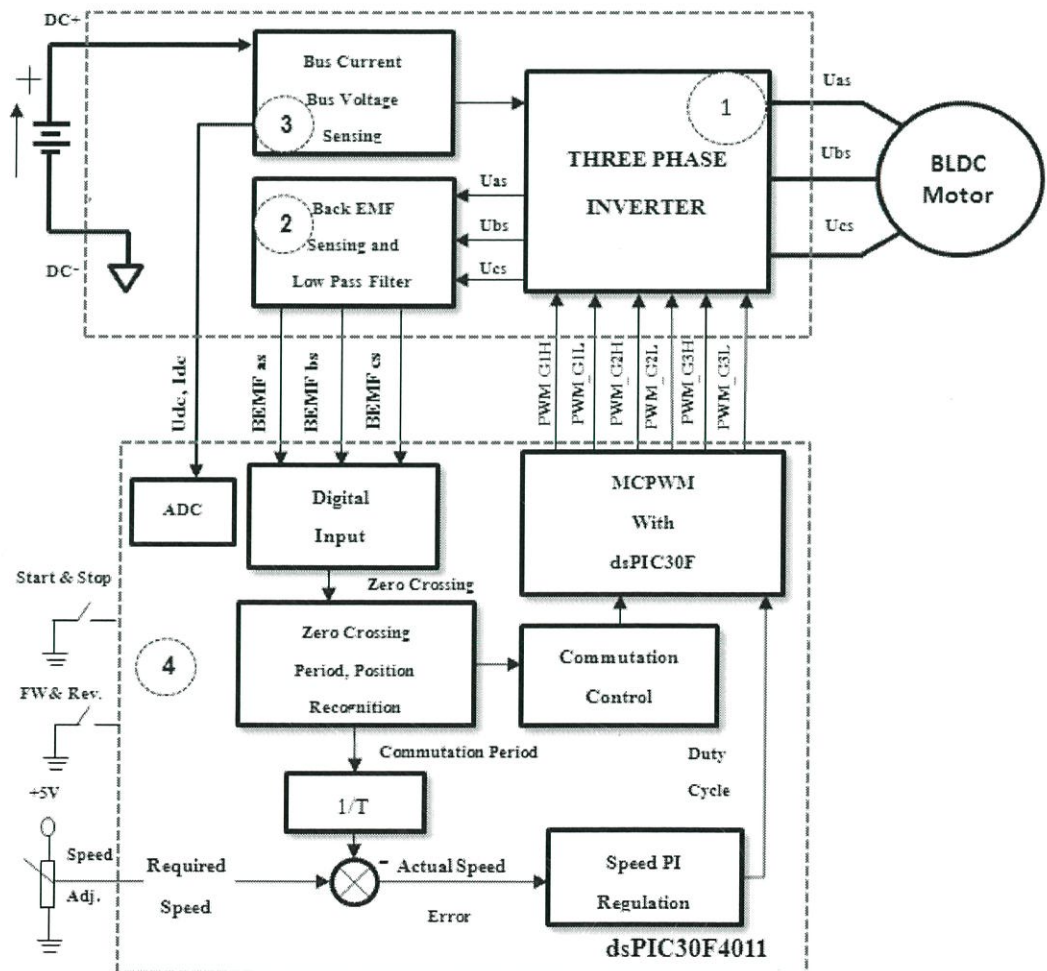
ในรูปที่ 2.13 (ก) แสดงการกระตุ้นขณะเริ่มต้นในระดับที่ 1 (step) เป็นการกระตุ้นสนามแม่เหล็กคู่เฟส A-B ทิศทางของกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเฟส A ไปยัง เฟส B ผลจากการกระตุ้นขณะเริ่มต้นทำให้ทราบทิศทางของตำแหน่งโรเตอร์ขณะเริ่มต้น ไม่ว่าโรเตอร์จะอยู่ในตำแหน่งไหนก็ตามจะถูกกระตุ้นในขณะเริ่มต้นเพื่อให้ได้ตำแหน่งโรเตอร์ที่ต้องทราบก่อน และในรูปที่ 2.13 (ข) จะเป็นการกระตุ้นสนามแม่เหล็กที่คู่เฟส A-C ในระดับที่ 2 (step 2) ทำให้ทราบตำแหน่งของโรเตอร์ที่แน่นอนก่อนจะขับเคลื่อนแบบวงรอบเปิด ดังนั้นจะเห็นได้ว่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านเฟส A จะเป็นไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อที่จะสร้างสนามแม่เหล็กที่คงที่ ในการหาตำแหน่งของโรเตอร์ขณะเริ่มต้น



รูปที่ 2.13 การกระตุ้นสนามแม่เหล็ก (ก) ที่ขดลวด A-B (ข) ที่ขดลวด A-C เพื่อหาตำแหน่งเริ่มต้น

2.10 การควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์แบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์

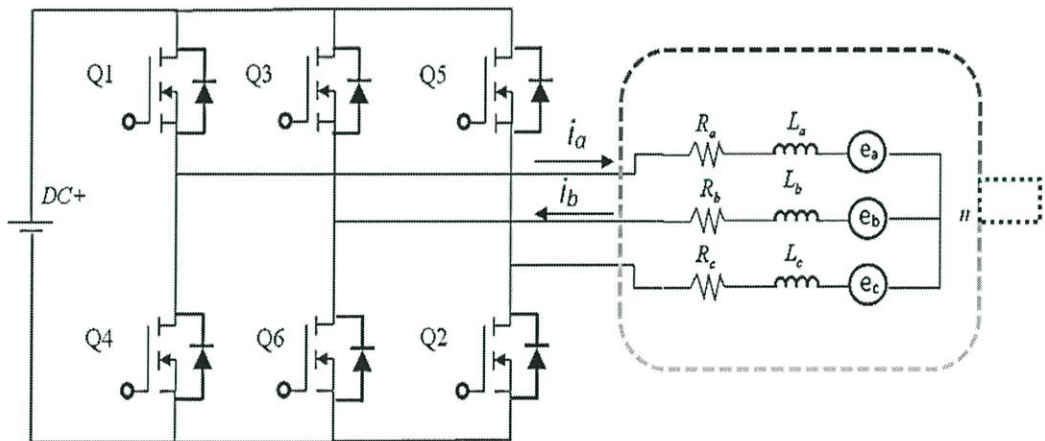
ในรูปที่ 2.14 แสดงไดอะแกรมระบบขับเคลื่อนความเร็วรอบแบบปราศจากตัวตรวจจับประกอบด้วย 4 ภาคส่วน ส่วนที่หนึ่ง อินเวอร์เตอร์กำลังไฟฟ้า 3 เฟสที่ใช้อุปกรณ์สวิตช์ซึ่งมอสเฟสกำลังในการเรียงกระแสไฟฟ้าในแต่ละคู่เฟส ทำงานแบบอินเวอร์เตอร์ขั้นบันไดหกระดับ ส่วนที่สองวงจรตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ อาศัยความสัมพันธ์ของคาบเวลาการเกิดจุดตัดผ่านศูนย์โดยอุปกรณ์อ้อมแอมป์เปรียบเทียบแรงดันกับแรงดันอ้างอิง ส่วนที่สามวงจรตรวจจับกระแสและป้องกัน แรงดันเกินสำหรับการควบคุมการทำงานแบบวงรอบปิดให้มีประสิทธิภาพ และส่วนที่สี่วงจรควบคุมประมวลผลระบบดิจิทัล dsPIC® ซึ่งเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 16 บิตของบริษัท Microchip [21] เบอร์ dsPIC30F4011 เป็นอุปกรณ์ควบคุมสัญญาณในการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบเทคนิคสัญญาณสี่เหลี่ยม 120 องศา โดยใช้สัญญาณขับเคลื่อนแบบ PWM ที่ความถี่สวิตช์ (f_{pwm}) 40 kHz ในการควบคุมการขับเคลื่อนและกำหนดทิศทาง การหมุน แสดงผลความเร็วรอบผ่าน LCD 16x2 บิต จากการคำนวณคาบเวลาที่เกิดสัญญาณตัดผ่านศูนย์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับที่บริเวณขั้วสายมอเตอร์ ดังแสดงได้ดังรูปต่อไปนี้



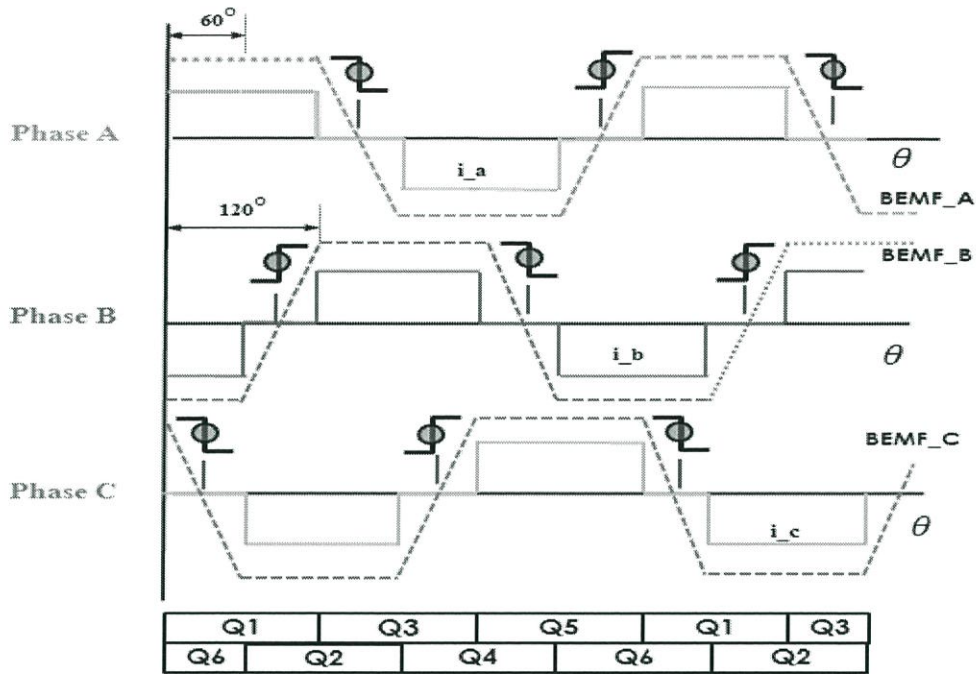
รูปที่ 2.14 ไดอะแกรมระบบขับเคลื่อนความเร็วรอบมอเตอร์โดยปราศจากตัวตรวจจับ

2.11 ลักษณะโหมตทำงานของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์

ลักษณะการขับเคลื่อนอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ประกอบไปด้วยสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง 6 ตัว คือ สวิตช์ Q_1 และ Q_4 ต่ออยู่กับเอาต์พุตเฟสที่ 1 (L_1) สวิตช์ Q_3 และ Q_6 ต่อกับเอาต์พุตของเฟสที่ 2 (L_2) และสวิตช์ Q_5 และ Q_2 ต่อกับเอาต์พุตเฟสที่ 3 (L_3) โหลดทางไฟฟ้าชนิด 3 เฟสจะต่อด้านเอาต์พุตที่ ขั้ว L_1 , L_2 และ L_3 ดังแสดงในรูปที่ 2.14 สัญญาณสำหรับควบคุมการเปิด-ปิดสวิตช์ Q_1 ถึง Q_6 สามารถควบคุมให้สวิตช์แต่ละตัวทำงานได้ 2 แบบ คือ แบบนำกระแส 180° (180° Conduction) และแบบการนำกระแส 120° (120° Conduction) สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในวงจรในรูปที่ 2.16 คือ มอสเฟส (Q_1 ถึง Q_6) และไดโอด (D_1 ถึง D_6) ซึ่งการทำงานของอินเวอร์เตอร์ทั้ง 2 แบบมี แต่วิธีขับเคลื่อนในงานวิจัยนี้จะใช้เทคนิคแบบนำกระแส 120° ควบคุมให้สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังแต่ละตัวนำกระแสตัวละ 120° โดยใช้สัญญาณควบคุมการเปิด-ปิดเกิดของมอสเฟสตามลำดับ Q_1 ถึง Q_6 ดังรูปที่ 2.15 จะพบว่ามีมอสเฟส 2 ตัวทำงานพร้อมกันในแต่ละช่วงตามลำดับดังนี้ คือ Q_1Q_6 , Q_1Q_2 , Q_3Q_2 , Q_3Q_4 , Q_5Q_4 , Q_5Q_6 และ Q_1Q_6 จึงได้รูปคลื่นแรงดันคร่อมโหลดระหว่างเฟส V_{1N} , V_{2N} และ V_{3N} ดังแสดงในรูปที่ 2.16 ลักษณะโหมตการทำงานของระบบขับเคลื่อนสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน ซึ่งแสดงในทิศทางของการขับเคลื่อนแบบสัญญาณสี่เหลี่ยม 120 องศา ในแต่ละระดับการควบคุมดังตารางที่ 2.1 แต่ละขั้นของการสับเปลี่ยนของมอสเฟส และแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับของแต่ละเฟสที่เกิดจากการขับเคลื่อนสัญญาณเกิดของมอสเฟส แต่ละกิ่ง สำหรับชุดกำลังอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ในรูปที่ 2.16 สำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์ดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.15 วงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์ต่อโหลดแบบสตาร์



รูปที่ 2.16 กระแสไฟฟ้าและแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับในแต่ละระดับการควบคุมตามสัญญาณ
 ชับเคลื่อนเกิดตามตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สัญญาณที่ใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์แบบสัญญาณสี่เหลี่ยม 120 องศา

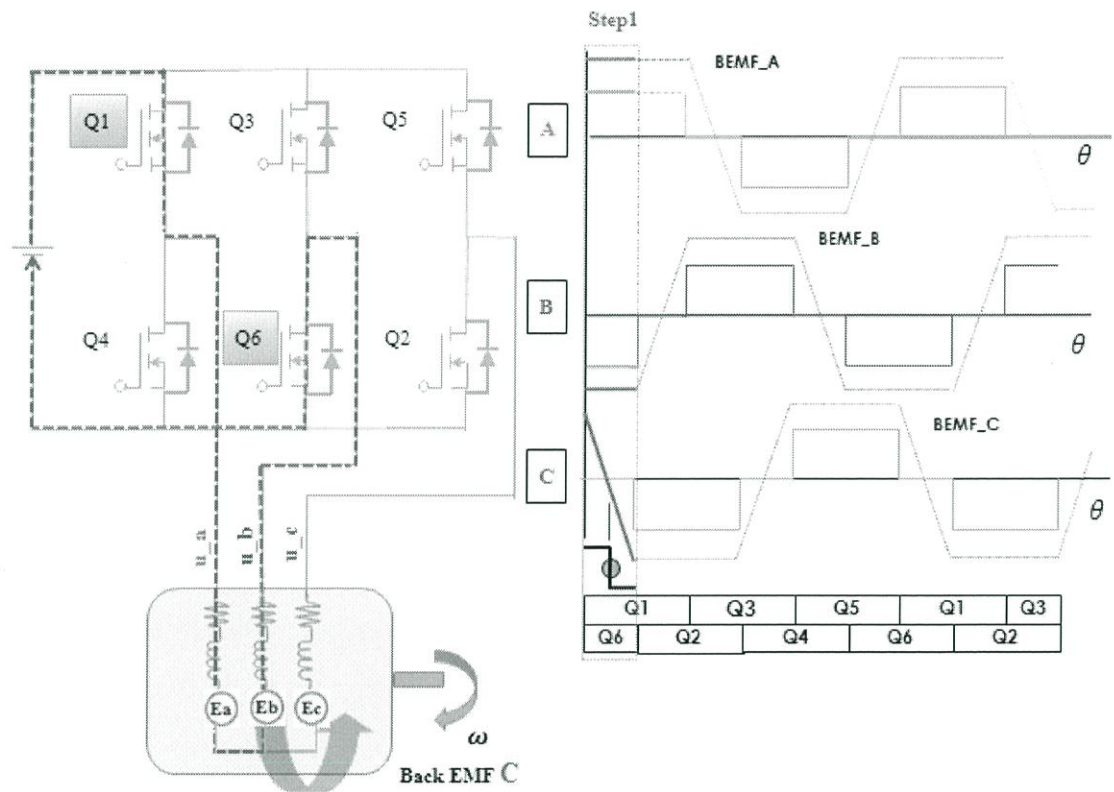
Section	Q ₁	Q ₃	Q ₅	Q ₄	Q ₆	Q ₂	U _{as}	U _{bs}	U _{cs}
1	1	0	0	0	1	0	U _{dc} /2	-U _{dc} /2	0
2	1	0	0	0	0	1	U _{dc} /2	0	-U _{dc} /2
3	0	1	0	0	0	1	0	U _{dc} /2	-U _{dc} /2
4	0	1	0	1	0	0	-U _{dc} /2	U _{dc} /2	0
5	0	0	1	1	0	0	-U _{dc} /2	0	U _{dc} /2
6	0	0	1	0	1	0	0	-U _{dc} /2	U _{dc} /2

หมายเหตุ : “1” คือ สวิตซ์ทำงาน, “0” คือสวิตซ์ไม่ทำงาน

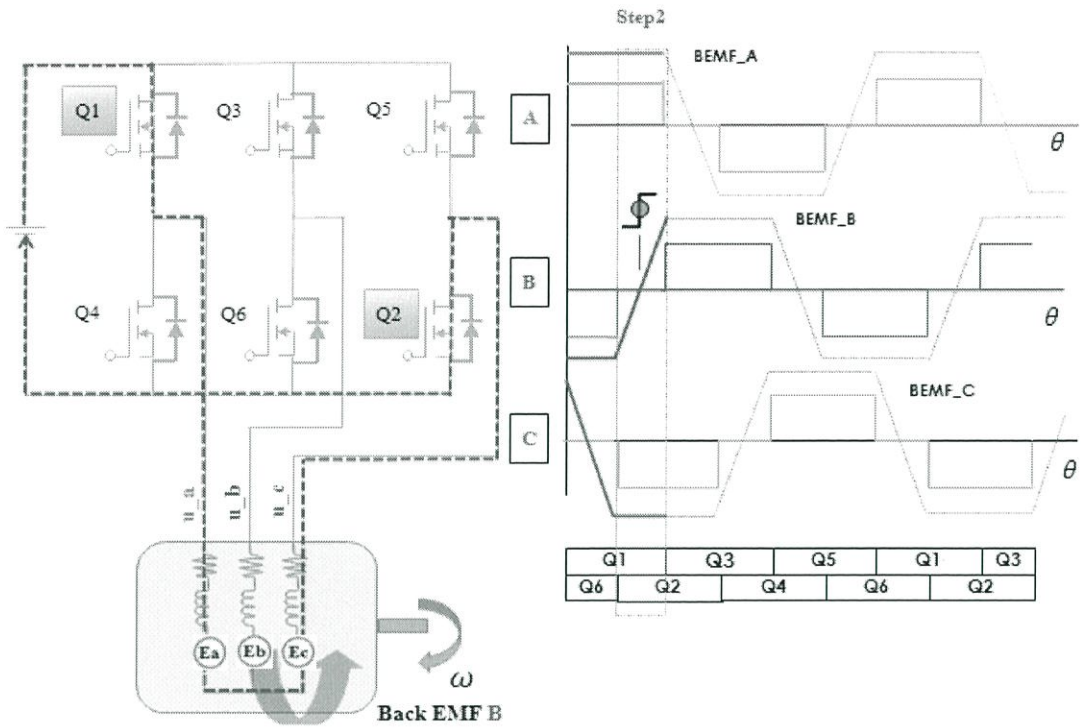
จากตารางที่ 2.1 แสดงสัญญาณการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบสัญญาณสี่เหลี่ยม 120 องศา สามารถแสดงรูปสัญญาณแรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสไฟฟ้าแต่ละเฟส ตามตำแหน่งของการสับเปลี่ยนทางเดินกระแสไฟฟ้าแต่ละกิ่งของชุดควบคุมอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสดัง รูปที่ 2.16 แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในแต่ละเฟสจะห่างกัน 120 องศา มีมุนนำกระแส 120 องศา จากวิธีการขับเคลื่อนอินเวอร์เตอร์แบบ 6 ลำดับ (Six step Inverter) จะประกอบไปด้วย จากสัญญาณชับเคลื่อนที่ห่างกัน 60 องศาในแต่ละลำดับคู่สวิตซ์ Q₁Q₆, Q₁Q₂, Q₃Q₂, Q₃Q₄, Q₅Q₄, Q₅Q₆ และ Q₁Q₆

2.11.1 ลำดับการทำงานของอินเวอร์เตอร์แบบสัญญาณสี่เหลี่ยม 120 องศา

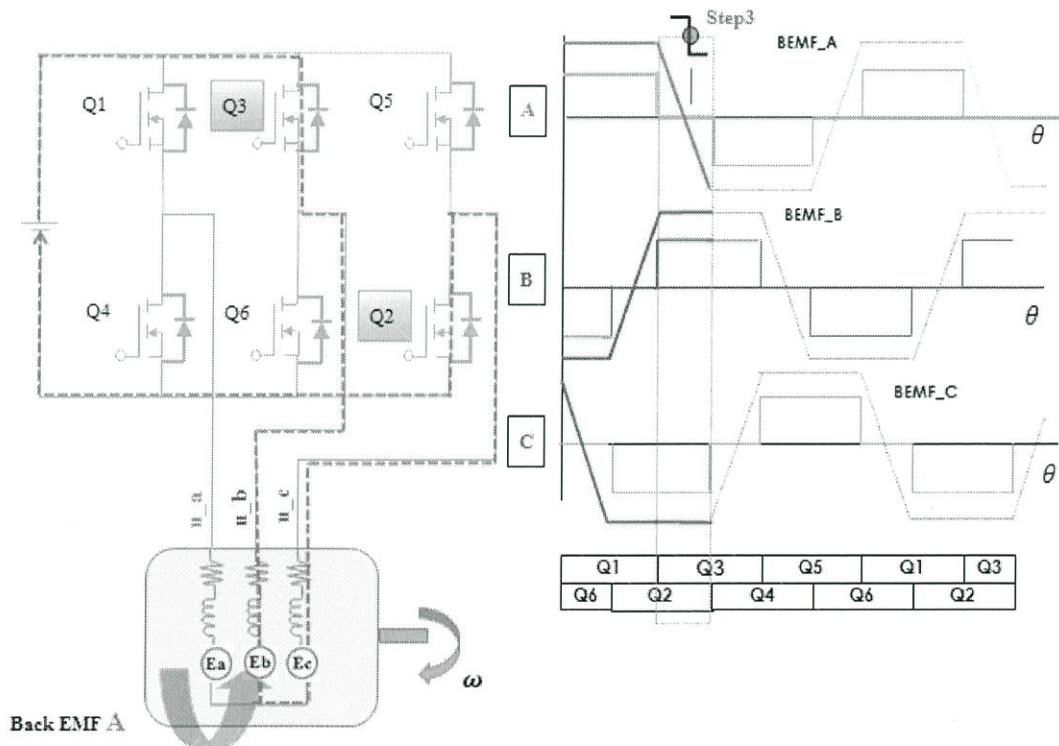
ทิศทางการสับเปลี่ยนสวิตช์ทางเดินของกระแสไฟฟ้าตามรูปแบบการขับเคลื่อนแบบสัญญาณสี่เหลี่ยม 120 องศา แต่ละขั้นการสับเปลี่ยนสวิตช์จะเกิดแรงเคลื่อนฟ้าย้อนกลับและกระแสไฟฟ้าแต่ละคู่เฟส โดยจะกล่าวถึงลำดับการทำงานทั้ง 6 ลำดับการสวิตช์แสดงในรูปที่ 2.17 - 2.22 ตามลำดับการสับเปลี่ยนทิศทางการของกระแสไฟฟ้าควบคุมมอเตอร์ที่จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนฟ้าย้อนกลับแต่ละเฟส และตำแหน่งที่เกิดซีโรครอสซิงเมื่อมอสเฟตทำงานตามสัญญาณขับพีดีบีวีเอ็ม สำหรับค้นหาตำแหน่งของโรเตอร์ที่เกิดขึ้น จะแสดงลักษณะขั้นตอนการทำงานดังรูปต่อไปนี้



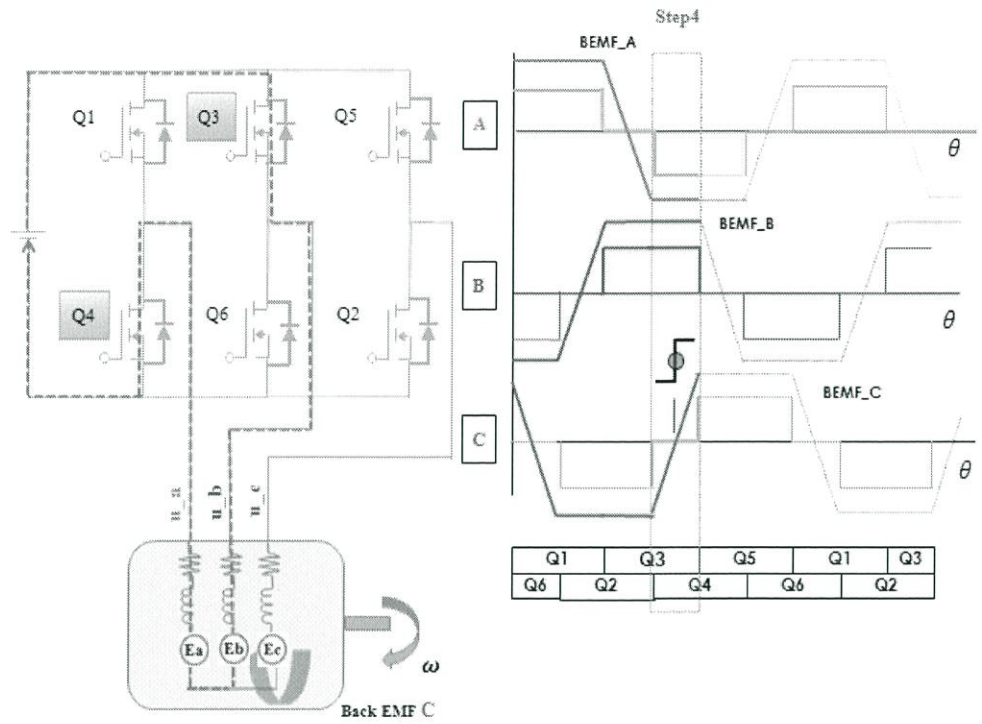
รูปที่ 2.17 สัญญาณกระแสไฟฟ้าและแรงเคลื่อนฟ้าย้อนกับเมื่อมอสเฟต (Q1,Q6) ทำงาน



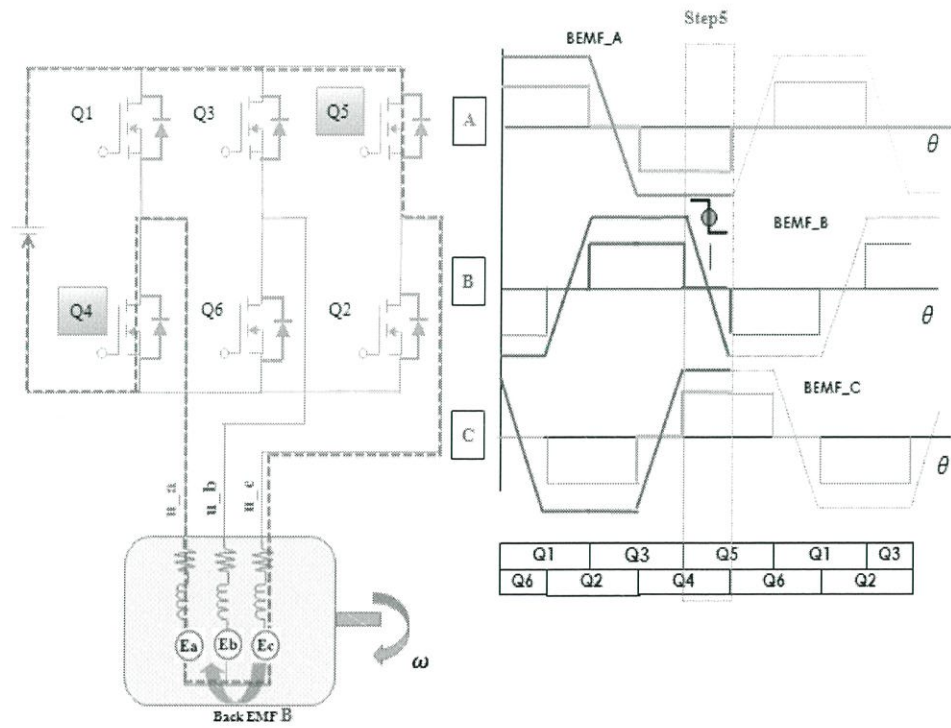
รูปที่ 2.18 สัญญาณกระแสไฟฟ้า และแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกับเมื่อมอสเฟส (Q1,Q2) ทำงาน



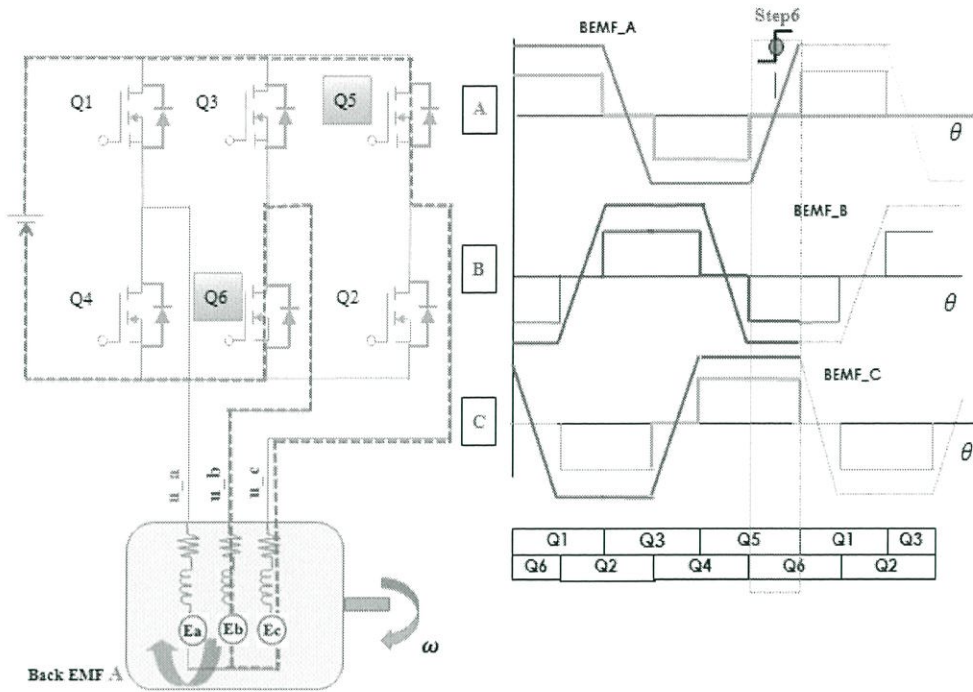
รูปที่ 2.19 สัญญาณกระแสไฟฟ้า และแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกับเมื่อมอสเฟส (Q3,Q2) ทำงาน



รูปที่ 2.20 สัญญาณกระแสไฟฟ้า และแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกับเมื่อมอสเฟส (Q3,Q4) ทำงาน



รูปที่ 2.21 สัญญาณกระแสไฟฟ้า และแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกับเมื่อมอสเฟส (Q5,Q4) ทำงาน



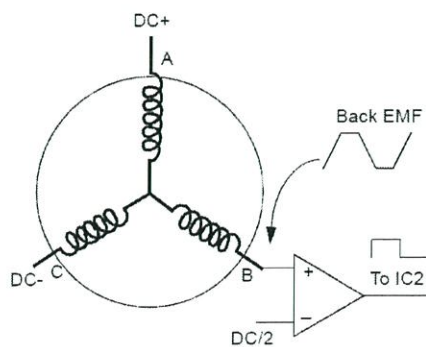
รูปที่ 2.22 สัญญาณกระแสไฟฟ้า และแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกับเมื่อมอสเฟส (Q5,Q6) ทำงาน

2.12 เสนอวิธีการตรวจจับสนแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ

การตรวจจับสนแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับมีหลายวิธีที่นิยมใช้ โดยจะนำเสนอความแตกต่างในการตรวจจับสนแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับที่ตัดผ่านศูนย์ ดังต่อไปนี้

2.12.1 แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับเปรียบเทียบกับแรงดันครึ่งหนึ่งของแรงดันดีซี (DC/2)

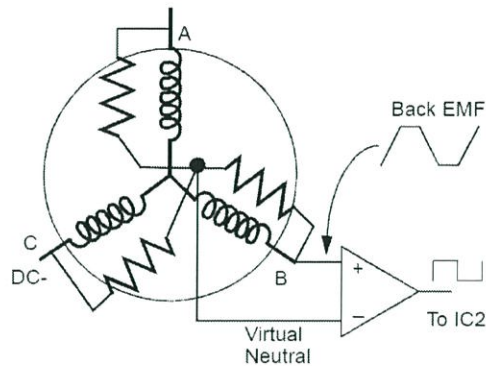
วิธีแรกการเปรียบเทียบแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับกับแรงดันครึ่งหนึ่งของแรงดันดีซี (DC/2) โดยเฟส A จะถูกต่อกับแรงดันด้านบวกทางด้านแหล่งจ่าย (DC+) เฟส C จะถูกต่อกับทางด้านลบ (DC-) และเฟส B จะเปิดวงจรอยู่ แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับจะถูกบ่อนให้กับเฟส B โดยแรงดันที่ได้จะเปรียบเทียบกับจุดกึ่งกลางของแรงดัน (DC/2) จะทำให้ได้สัญญาณแรงดันที่ตัดจุดกึ่งกลางของแรงดันเฟส A-C ได้ วิธีนี้จะง่ายเพียงแค้ใช้อุปกรณ์ออปแอมป์เปรียบเทียบ ดังแสดงในรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับเทียบกับครึ่งหนึ่งของแรงดันดีซี (DC/2)

2.12.2 แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับเทียบกับจุดนิวตรอนเสมือน

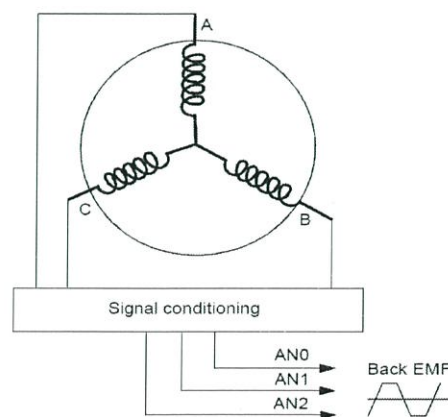
การตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับด้วยการเปรียบเทียบจับจุดนิวตรอนเสมือน โดยการนำเอาความต้านทานมาต่อเป็นแบบสตาร์ ค่าความต้านทานมีความสำคัญมากในการออกแบบ มีผลต่อกระแสของมอเตอร์ ในกรณีนี้แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับจะถูกเปรียบเทียบกับจุดนิวตรอนเสมือนแล้วจะส่งสัญญาณการเปลี่ยนแปลงเป็นออกเป็น ต่ำ – สูง ใช้ในการเรียงลำดับการขับเคลื่อนมอเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับเทียบกับจุดนิวตรอนเสมือน

2.12.3 แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับตรวจจับด้วยอนาล็อกเปลี่ยนเป็นดิจิตอล

การตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับโดยอาศัยความสามารถของไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณอนาล็อกเปลี่ยนเป็นดิจิตอลสูง (High-speed A/D) โดยสัญญาณตัวอย่างที่ได้จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าดิจิตอลที่จุดตัดผ่านศูนย์อย่างเหมาะสม ดังรูปที่ 2.25

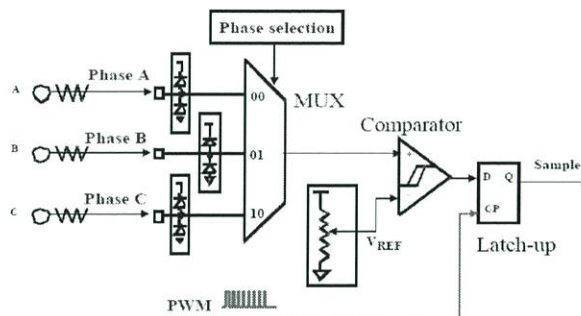


รูปที่ 2.25 แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับตรวจจับด้วยอนาล็อกเปลี่ยนเป็นดิจิตอล

2.12.4 ซิงโครนัสสัญญาณตัวอย่างของแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ

วงจรที่ใช้ในการตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับด้วยวงจรที่ถูกพัฒนาแบบซิงโครนัสการสุ่มตัวอย่างของสัญญาณผ่านศูนย์ ได้รับการพัฒนาเทคโนโลยีแบบ ไอซี สัญญาณผสม (IC mixed signal) มีความแม่นยำในการประมาณผลสูง มีความน่าเชื่อถือสูงใช้เทคโนโลยีประมวลผลของ ST7 ไมโครคอนโทรลเลอร์ ดังรูปที่ 2.26 แสดงให้เห็นถึงการสุ่มตัวอย่างของซิงโครนัสแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ ผ่าน Multiplexer แรงเคลื่อนไฟฟ้าจะถูกเปรียบเทียบกับจุดอ้างอิงที่เปลี่ยนไปตามพีดับวีเอ็ม โดยลำดับการทำงานดังนี้

1. ตรวจจับตัวอย่างแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับซิงโครนัสสัญญาณตัวอย่าง
2. จัดการหน่วงเวลากับสัญญาณอย่างเหมาะสม ด้วยโปรแกรมการคำนวณจากสัญญาณตัดผ่านศูนย์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ
3. จัดการควบคุมโหมด PWM โดยเลือกโหมดการควบคุมการควบคุมโหมดกระแสหรือโหมดแรงดัน



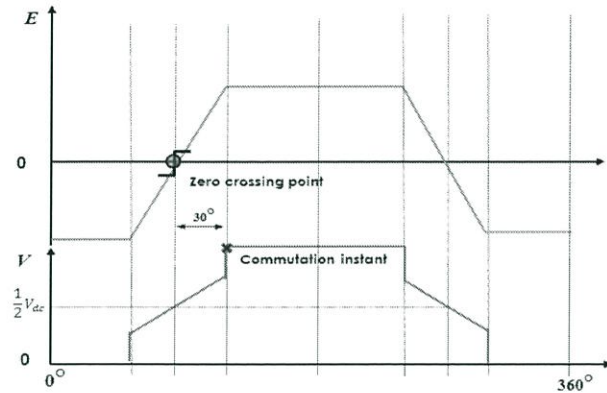
รูปที่ 2.26 ซิงโครนัสสัญญาณตัวอย่างของแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ

2.13 วิธีการทำงานและวิเคราะห์แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ

พิจารณามอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน (BLDC) มีโครงสร้างหลักๆ สามส่วน คือ ส่วนที่หนึ่ง สเตเตอร์ (Stator) ประกอบด้วยขดลวดอะเมเจอร์ที่ต่ออยู่แบบสตาร์ ส่วนที่สองโรเตอร์ (Rotor) ประกอบด้วยแม่เหล็กถาวร และส่วนสุดท้ายคือ ตัวตรวจจับตำแหน่งขั้วแม่เหล็ก (Hall sensor) ซึ่งการขับเคลื่อนจะใช้อินเวอร์เตอร์สามเฟสร่วมกับการอุปกรณ์ตรวจจับตำแหน่งขั้วแม่เหล็ก แสดงได้ดัง ไดอะแกรมวงจรควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงไม่มีแปรงถ่านแบบใช้ตัวตรวจจับตำแหน่ง ดังรูปที่ 2.5 โดยใช้เทคนิคแบบสัญญาณสี่เหลี่ยม 120 องศา เพื่อให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับแล้วนำสัญญาณแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับตรวจสอบตำแหน่งจุดซีโรครอสซึ่ง สำหรับใช้ในคำนวณหาตำแหน่งโรเตอร์และความเร็วรอบมอเตอร์

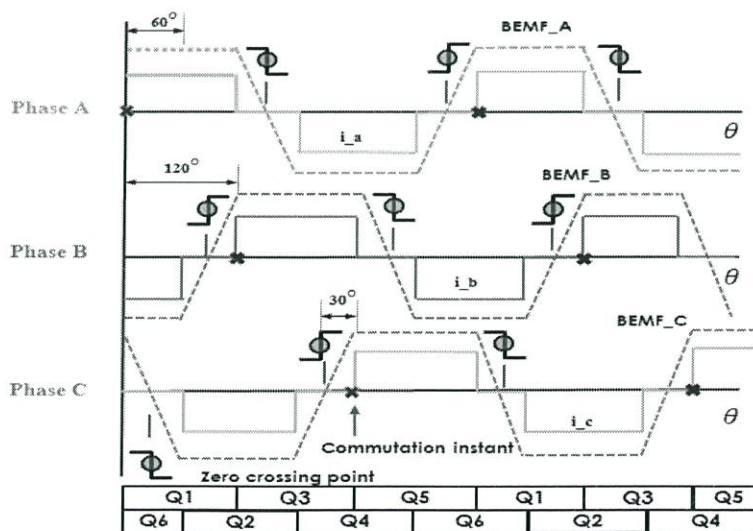
วิธีการเปรียบเทียบแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับและแรงดันครึ่งหนึ่งของแรงดันดีซีบัส (DC/2) ในหนึ่งลูกคลื่นทางไฟฟ้าบริเวณจุดตัดผ่านศูนย์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับจะมีตำแหน่งเวลา

ที่เกิดขึ้นก่อน 30 องศาทางไฟฟ้า ก่อนที่จะถึงการสับสวิตช์เรียงกระแสจากจุดตำแหน่งการตรวจจับโรเตอร์จริง ทำให้การควบคุมมอเตอร์ด้วยวิธีการปราศจากตัวตรวจจับจะต้องอาศัยการกำหนดความสัมพันธ์ของเวลาการเรียงกระแสให้ตรงกับสัญญาณตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์จริง ดังรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 จุดตัดสัญญาณผ่านศูนย์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับของมอเตอร์

ในรูปที่ 2.27 การประมาณค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับกับตำแหน่งการสวิตช์ของกระแส โดยทั่วไป จะใช้การตรวจจับแรงดันตัดผ่านศูนย์ (Zero crossing) ของรูปคลื่น Back EMF ที่มีองค์ประกอบของฮาร์โมนิกที่สาม [8] แรงดันฮาร์โมนิกจะมีข้อจำกัดของแอมพลิจูดและเฟสที่เปลี่ยนไปตามความถี่ของแม่เหล็ก ซึ่งจะไม่เหมาะสมกับย่านความเร็วต่ำ เนื่องจากมีแอมพลิจูดของ Back EMF มีค่าต่ำการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยอินเวอร์เตอร์กระแส มุมนำกระแส 120 องศา แต่ระดับการสวิตช์จะมีค่า 60 องศา ดังรูปที่ 2.28 แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับที่ตัดผ่านศูนย์จะมีความสัมพันธ์กับตำแหน่งการสวิตช์เรียงกระแส โดยจุดตัดผ่านศูนย์จะเปรียบเทียบกับแรงดันครึ่งหนึ่งของดีซีบัส (DC/2) มีค่าที่ตรงกับตำแหน่งของจุดซีโรครอสซิง โดยมีค่ามุมทางไฟฟ้านำอยู่ 30 องศา จากจุดสัญญาณตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์จริง



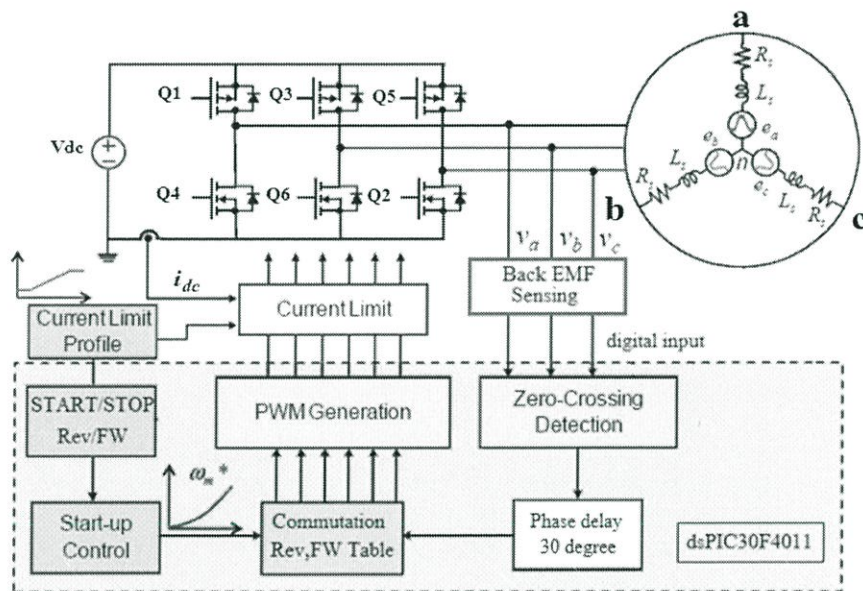
รูปที่ 2.28 เปรียบเทียบแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับกับตำแหน่งการสวิตช์ของกระแส

บทที่ 3

การออกแบบและสร้างระบบการขับเคลื่อนที่นำเสนอ

3.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงลักษณะการออกแบบ และสร้างชุดขับเคลื่อนวงจรควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน ในการควบคุมการขับเคลื่อนจะใช้ตัวประมวลผลทางดิจิทัลตระกูล dsPIC30F4011 ขนาด 16 บิต ในส่วนของวงจรถูกำลังจะใช้อุปกรณ์มอสเฟสจำนวน 6 ตัว สำหรับชุดอินเวอร์เตอร์ ในส่วนของวงจรตรวจจับสัญญาณผ่านศูนย์หรือวงจรซีโรครอสซิง จะใช้อุปกรณ์ออปแอมป์เปรียบเทียบสำหรับออกแบบการตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ และออกแบบในส่วนของวงจรถ่วงกันกระแสและแรงดัน เพื่อสมรรถนะการทำงานที่ดี โดยมีไดอะแกรมของระบบควบคุมมอเตอร์ที่นำเสนอต่อไปนี้



รูปที่ 3.1 ไดอะแกรมการทำงานของระบบควบคุมมอเตอร์

การออกแบบวงจรในแต่ละภาคการควบคุมนี้ จะเป็นไปตามหลักการดังรูปที่ 3.1 เป็นไดอะแกรมสำหรับการควบคุมความเร็วแบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่ง โดยอาศัยหลักการพื้นฐานของแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับที่ตัดผ่านศูนย์ หนึ่งวงเฟสไป 30 องศา เมื่อตรวจจับสัญญาณผ่านศูนย์พบ ตำแหน่งที่ได้จะหน่วงเวลาออกไปเพื่อให้ตรงกับสัญญาณตัวตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์ โดยการทำงานจะสามารถกำหนดทิศทางการขับเคลื่อนได้ด้วยสวิตช์เลือกทิศทางการหมุนได้ทั้งแบบตามเข็มและทวนเข็มนาฬิกา โดยภาคประมวลผลจะสามารถแสดงผลความเร็วรอบของมอเตอร์ได้จากการคำนวณความสัมพันธ์ของคาบเวลาที่เกิดจุดตัดผ่านศูนย์ ซึ่งในแต่ละส่วนจะแสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. โครงสร้างของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน
2. การออกแบบวงจรไฟเลี้ยง
3. การออกแบบควบคุมโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F4011
4. การออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส
5. การออกแบบวงจรบูทสเตร็ป สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์
6. การออกแบบวงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง
7. การออกแบบวงจรตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับที่ตัดผ่านศูนย์
8. การออกแบบสำหรับวงจรปรับความเร็วมอเตอร์
9. การออกแบบสำหรับการกำหนดทิศทางหมุนตามเข็มและทวนเข็มนาฬิกา

3.2 โครงสร้างของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน

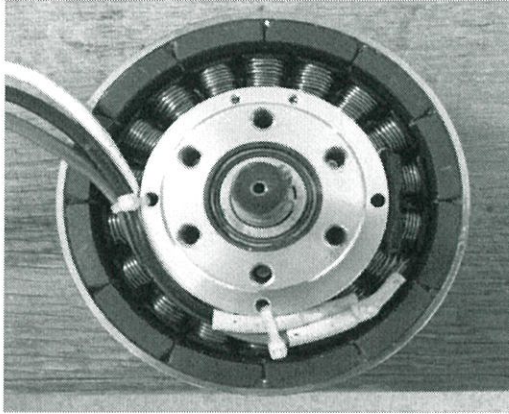
โครงสร้างของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน ผลิตภัณฑ์ของ Mitsuba สำหรับใช้ในการทดลองงานวิจัยนี้มีพิกัดกำลัง 100 วัตต์ 24 โวลต์ 700 รอบต่อนาที ซึ่งจะแบ่งออกเป็นสามส่วนหลักๆ คือ ส่วนที่หนึ่งทางด้านสเตเตอร์ที่อยู่ฝั่งที่มีขดลวดอาร์มาเจอร์พัดอยู่ ส่วนที่สองของโรเตอร์ที่เคลื่อนที่จะมีแม่เหล็กถาวรติดอยู่ ส่วนที่สามเป็นวงจรตรวจจับขั้วแม่เหล็ก (Hall effect sensors) โดยมีข้อมูลพิกัดมอเตอร์ดังแสดงในตารางที่ 3.1 เป็นพิกัดขนาดต่างๆของมอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

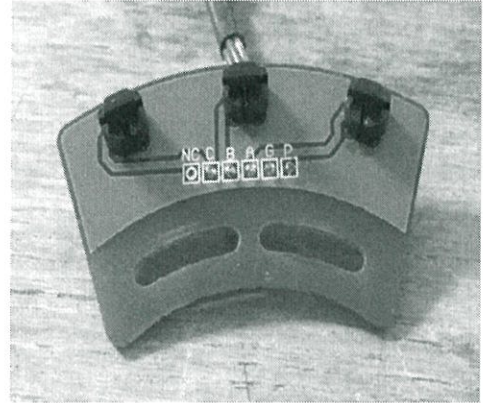
รายการ	ขนาด	หน่วย
1.แรงดัน	24	โวลต์
2.พิกัดกำลัง	100	วัตต์
3.ประสิทธิภาพ	95	เปอร์เซ็นต์
4.ความเร็วรอบสูงสุด	700	รอบต่อนาที
5.จำนวนขั้วแม่เหล็ก	12	โพล
6.น้ำหนัก	3.5	กิโลกรัม
7.ความยาว	45	มิลลิเมตร
8.เส้นผ่านศูนย์กลาง	115	มิลลิเมตร

มอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านของ Mitsuba ที่ใช้ในการทดลองเป็นมอเตอร์ประเภทฮับมอเตอร์ซึ่งจะมีส่วนเคลื่อนที่หรือโรเตอร์ติดตั้งแม่เหล็กถาวรอยู่ด้านภายนอก ส่วนสเตเตอร์จะอยู่ด้านในไม่เคลื่อนที่ โดยจะมีสายไฟออกจากตัวมอเตอร์สองชุด คือ ชุดของขดลวดอาร์มาเจอร์สามเฟส และชุดตรวจจับสนามแม่เหล็ก (Hall effect sensor) เนื่องจากมอเตอร์แบบฮับชนิดนี้ไม่มีแปรงถ่าน

และซีคอมมิวเตเตอร์ จึงไม่มีความสูญเสียจากการเสียดทาน มอเตอร์ชนิดนี้จึงมีประสิทธิภาพสูงกว่า และเป็นที่ยอมรับนำมาใช้ทำรถจักรยานไฟฟ้า แสดงรูปมอเตอร์ที่ใช้ทดลองดังรูปที่ 3.2



(ก)

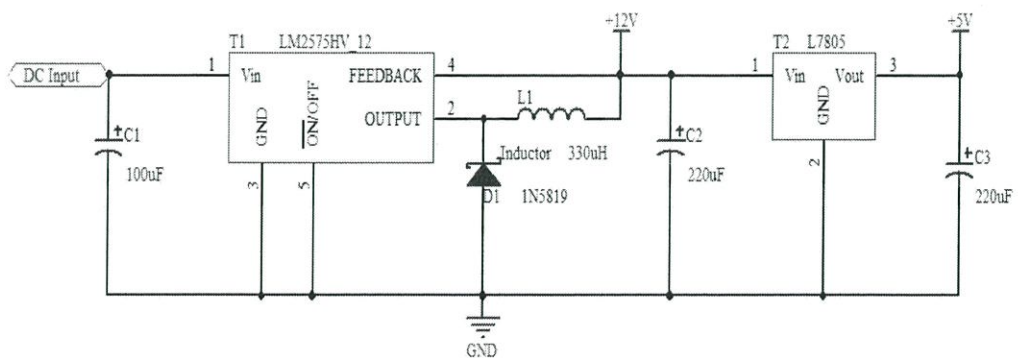


(ข)

รูปที่ 3.2 โครงสร้างของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน (ก) โรเตอร์ที่มีแม่เหล็กถาวร และสเตเตอร์ (ข) วงจรตรวจจับขั้วแม่เหล็ก (Hall effect sensor)

3.3 การออกแบบแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงป้อนวงจร

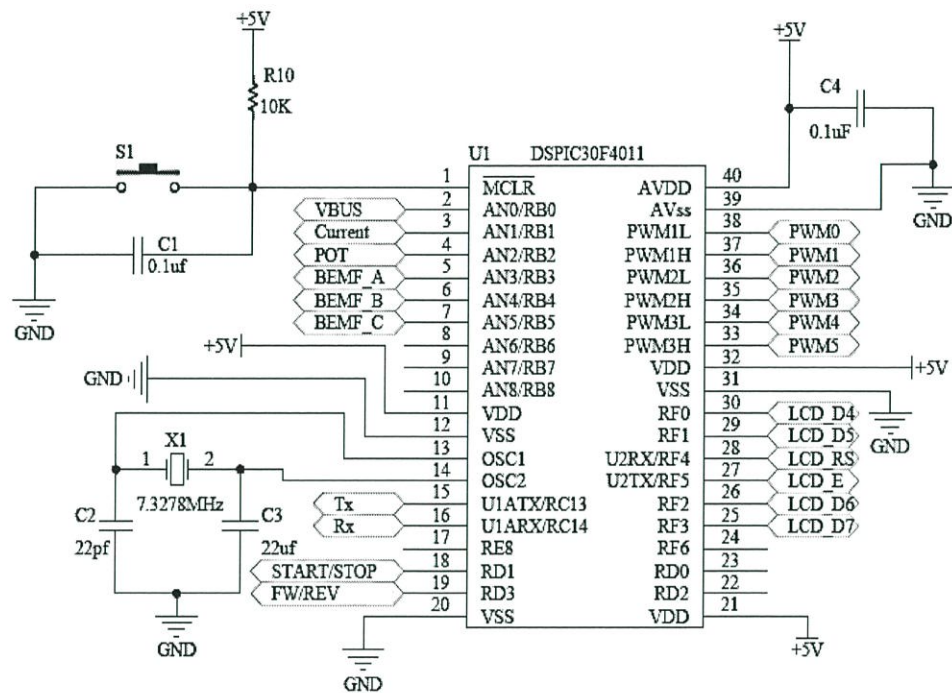
การออกแบบวงจรควบคุมมอเตอร์จะต้องมีไฟเลี้ยงเพื่อใช้ในการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ และสำหรับขับเคลื่อนของมอเตอร์ ซึ่งจะแบ่งเป็นสองระดับสำหรับไฟป้อนวงจร คือที่ 12 โวลต์ และ 5 โวลต์ ตามลำดับ โดยออกแบบชุดควบคุมแรงดันแบบสวิตชิงเบอร์ LM2575HV-12 (Switching regulators step down) ที่มีประสิทธิภาพสูงและพลังงานสูญเสียต่ำ ทำหน้าที่แปลงแรงดันขาเข้าจากแบตเตอรี่ 24 โวลต์ให้เหลือเพียง 12 โวลต์ และใช้ L7805 (Linear regulators) ทำหน้าที่แปลงแรงดันขาเข้าจาก 12 โวลต์ ให้เหลือเพียง 5 โวลต์ สำหรับไฟป้อนให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์วงจรตรวจจับกระแส วงจรแสดงผลผ่านแอลซีดีพิกัดกระแสด้านนอกไม่เกิน 1 แอมป์ โดยวงจรแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงสำหรับเลี้ยงวงจรแสดงได้ดังรูปที่ 3.3



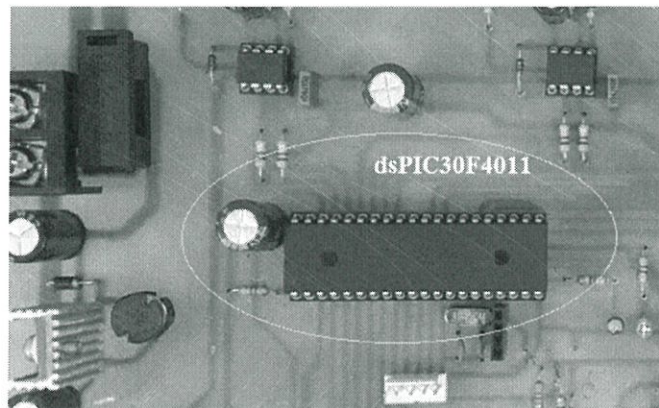
รูปที่ 3.3 วงจรไฟเลี้ยง 5 โวลต์และ 12 โวลต์

3.4 การออกแบบควบคุมโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์

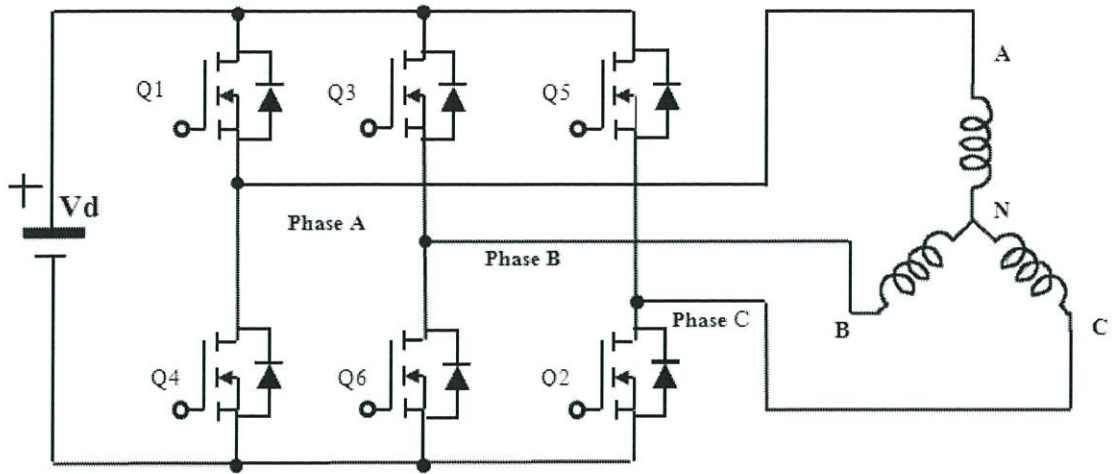
ไมโครคอนโทรลเลอร์ 16 บิตที่ใช้ในการทดลองเป็นชนิด dsPIC30F4011 เป็นที่รู้จักกันดี และนิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ด้วยความสามารถในการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลสำหรับระบบควบคุมอัตโนมัติที่มีความสามารถสูง และมีฟังก์ชันสำหรับการควบคุมมอเตอร์ และชุดควบคุมสัญญาณพีดับบีเอ็ม สำหรับขับเคลื่อนอินเวอร์เตอร์ โดยชุดประมวลผลจะประกอบไปด้วยภาคอินพุตรับคำสั่งและตรวจสอบสัญญาณ และส่งการทำงานไปยังภาคเอาต์พุต เพื่อสั่งการและแสดงผล ดังแสดงได้ย้งรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ตำแหน่งพอร์ตต่างๆที่ใช้ในการขับเคลื่อนการทำงานของdsPIC30F4011



รูปที่ 3.5 ตัวอย่างตัวประมวลผลทางดิจิทัล dsPIC30F4011



รูปที่ 3.7 วงจรอินเวอร์เตอร์กำลัง 3 เฟส

3.5.1 การคำนวณหาพิกัดแรงดันต้นด้านออกของอินเวอร์เตอร์

เมื่อกำหนดแรงดันต้นด้านเข้า ประมาณแรงดันแหล่งจ่าย $V_d = 24$ โวลต์

$$\begin{aligned} \hat{V}_{LL1} &= \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} (\hat{V}_{LL})_1 = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \frac{V_d}{2} \\ &= \frac{\sqrt{6}}{\pi} V_d \\ &= 0.78 V_d \end{aligned} \quad (3.1)$$

$$\hat{V}_{LL1} = 0.78 \times 24 = 18.72 \text{ V}$$

$$\begin{aligned} V_{LLrms} &= \frac{\hat{V}_{LL1}}{\sqrt{2}} \\ &= \frac{18.72}{\sqrt{2}} \\ &= 13.23 \text{ V} \end{aligned} \quad (3.2)$$

3.5.2 หาพิกัดกระแสไฟฟ้าด้านออก

เมื่อกำหนดให้พิกัดกำลังด้านออกเท่ากับ 100 วัตต์ค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.8

$$P_{LL1} = \sqrt{3} V_{LL1} I_{LL1} \cos \phi \quad (3.3)$$

$$I_{LL1} = \frac{P_{LL1}}{\sqrt{3} V_{LL1} \cos \phi}$$

$$\begin{aligned} I_{LL1} &= \frac{100}{\sqrt{3} \times 13.23 \times 0.8} \\ &= 5.45 \text{ A} \end{aligned}$$

$$\hat{I}_{LLrms} = \sqrt{2} \times 5.45 = 7.71 \text{ A} \quad (3.4)$$

3.5.3 หาพิกัดกำลังไฟฟ้าด้านเข้า

เมื่อกำหนดให้พิกัดกำลังด้านออกเท่ากับ 100 วัตต์ค่าประสิทธิภาพมอเตอร์ 83 %

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \% \quad (3.5)$$

$$P_{in} = \frac{100}{83} \times 100$$

$$= 120 \text{ W}$$

3.5.4 หาพิกัดกระแสไฟฟ้าด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์

$$P_d = V_d I_d \quad (3.6)$$

$$I_d = \frac{P_d}{V_d}$$

$$= \frac{120}{24}$$

$$= 5 \text{ A}$$

จากการคำนวณเบื้องต้น สามารถสรุปพิกัดกำลังของอินเวอร์เตอร์ได้

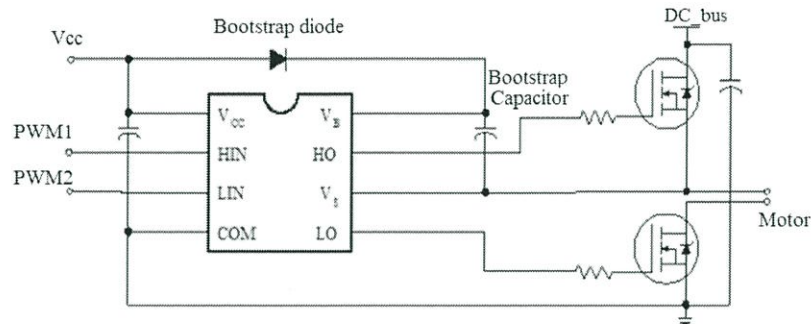
แรงดันกระแสตรงด้านเข้า (V_d)	24	V
กระแสไฟฟ้าด้านเข้า (I_d)	5	A
กำลังไฟฟ้าจริงด้านเข้า (P_d)	120	W
แรงดันไฟฟ้าด้านออก (V_{out})	13.2	V
กระแสไฟฟ้าด้านออก (I_{o1})	7.71	A
กำลังไฟฟ้าจริงด้านออก (P_o)	100	W
ประสิทธิภาพ (eff.)	83 %	(โดยประมาณ)
ตัวประกอบกำลัง (PF)	0.8	(โดยประมาณ)

ในการเลือกใช้งานมอสเฟสจำเป็นต้องเผื่อพิกัดในการใช้งานไว้ที่ 70 % เพื่อป้องกันการกระชาก และการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นอย่างทันทีทันใด ดังนั้นจึงเลือกใช้มอสเฟสกำลังเบอร์ IRF2807 มีพิกัดเท่ากับ 82 แอมป์ 75 โวลต์ แบบเอ็นแชนเนล (N-channel) โดยมีค่าความต้านทานขณะนำกระแส ($R_{ds(on)}$ อยู่ที่ 0.013โอห์ม)

3.6 การออกแบบวงจรบูทสแตร์ป สำหรับขับเกตมอสเฟส

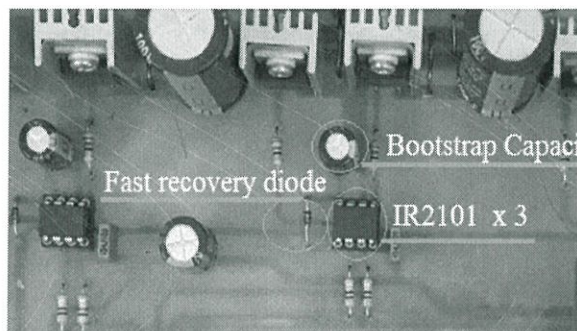
การออกแบบวงจรสำหรับขับเกตมอสเฟสจะต้องใช้สัญญาณขับเกตมอสเฟสช่วงแรงดัน 12 - 20 โวลต์ ตามข้อมูลเอกสารของอุปกรณ์ แต่สัญญาณที่ได้จากไมโครคอนโทรลเลอร์อยู่ที่ระดับ 3.3 - 5 โวลต์ จึงต้องยกระดับ 5 โวลต์ เป็น 12 โวลต์ การออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟสนั้นจะประกอบไปด้วยมอสเฟสหกตัว แบ่งเป็นสามคู่แยกในแต่ละเฟส หรือในกิ่งเฟส ซึ่งจะต้องแยกกราวด์ออกจากระบบทางด้านบน (High side) อาจจะต้องใช้หม้อแปลงแยกกราวด์ออกจากระบบ

สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้เทคนิคของวงจรบูทสเตร็ป (Bootstrap circuit) ในช่วงขณะที่มอสเฟสทางด้านล่าง (Low side) ทำงานนั้น ตัวเก็บประจุบูทสเตร็ปทำหน้าที่เก็บประจุไว้ ทำให้แรงดันมีค่าเท่ากับแหล่งจ่ายแรงดันของไอซี IR2101 สำหรับขับเกตมอสเฟสทางด้านบน ขณะมอสเฟสทำงานจำเป็นต้องมีไดโอดที่สามารถกลับคืนสภาพเดิมที่รวดเร็ว (Fast recovery diode) เพื่อป้องกันกำลังไฟฟ้าขณะทำงาน แสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 วงจรบูทสเตร็ปสำหรับขับเกตมอสเฟส

วงจรขับนำเกตมอสเฟสจะรับสัญญาณขับนำสวิตช์มาจากไมโครคอนโทรลเลอร์ซึ่งสัญญาณที่ใช้เป็นลักษณะสัญญาณพัลส์พีดับบีวเอ็ม เมื่อรับสัญญาณจะมีช่วง HIN กับ ช่วง LIN ทั้งสองช่วงนี้จะทำงานสลับกัน ไม่สามารถทำงานพร้อมกันได้เพราะจะทำให้เกิดการช็อตวงจรของกิ่งของมอสเฟสกำลัง ซึ่งวงจรบูทสเตร็ปจะใช้ความสามารถของ IC เบอร์ IR2101 ที่มีคุณสมบัติในการสับสวิตช์ HIN และ LIN ที่ความถี่สูง ใช้ไฟเลี้ยงในวงจร $V_{cc} + 12\text{ V}$ เมื่อช่วง HIN ทำงาน สัญญาณจะถูกขับออกไปที่ ขา HO ส่งไปที่ อุปกรณ์มอสเฟสกำลัง โดยพิจารณาทางด้านบน (High side) จะถูกขับด้วยการยกระดับแรงดันจากตัวเก็บประจุบูทสเตร็ป จะทำให้ขาเกตมีแรงดันสูงขึ้นถึง 12 โวลต์เมื่อเทียบกับ (V_b) เราใช้ไดโอด เบอร์ 1N4007 เป็นตัวป้องกันไม่ให้เกิดกระแสไหลกลับเข้าแหล่งจ่าย ส่วนในกรณีการขับเกตทางด้านล่าง (Low side) เกิดจากการได้รับสัญญาณพีดับบีวเอ็มด้าน LIN จากนั้นสัญญาณจะถูกขับออกจากขา LO มีขนาดแรงดัน 12 โวลต์ เมื่อเทียบกับกราวด์ระบบ โดยมีชุดวงจรบูทสเตร็ปจำนวนสามชุด สำหรับการทำงานขับสวิตช์ในแต่ละเฟสดังรูปที่ 3.9



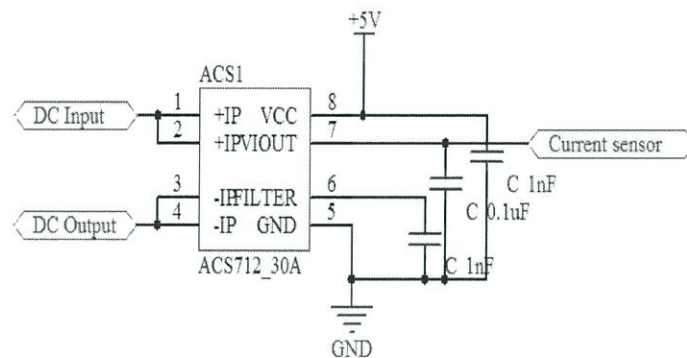
รูปที่ 3.9 วงจรบูทสเตร็ป สำหรับขับเกตมอสเฟสในชุดทดลอง

3.7 การออกแบบวงจรตรวจจ็ับกระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

วงจรที่ใช้ในการออกแบบการตรวจจ็ับกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง เป็นวงจรสำหรับป้องกันแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเกิน โดยมีลักษณะของวงจрдังต่อไปนี้

3.7.1 วงจรตรวจจ็ับกระแส (Current sensor)

วงจรตรวจจ็ับกระแสที่ใช้เป็น IC เบอร์ ACS712-20A สามารถตรวจจ็ับกระแสอยู่ในช่วง 0 – 5 แอมป์ซึ่งหลักการทำงานของ IC เบอร์นี้จะเป็นการตรวจจ็ับการไหลของประจุที่เกิดขึ้นซึ่งจะมี Hall effect sensor ทำหน้าที่ในการตรวจจ็ับอัตราการไหลของประจุไฟฟ้า สามารถตรวจวัดได้ทั้งกระแส AC และ DC แปลงค่าที่ได้ออกมาในรูปของสัญญาณ DC 0 – 5 โวลต์ไฟเลี้ยงที่ใช้งานจะอยู่ที่ 5 โวลต์ซึ่งจะทำให้เมื่อไม่มีค่ากระแสเกิดขึ้นสัญญาณที่ถูกส่งออกมาจะอยู่ที่ 2.5 โวลต์และจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงแล้วแต่ทิศทางของกระแสซึ่งค่ากระแสในแต่ละแอมป์จะเป็น 100 mV/A แสดงวงจรดังรูปที่ 3.10 วงจรตรวจจ็ับกระแส



รูปที่ 3.10 วงจรตรวจจ็ับกระแส

3.7.2 วงจรตรวจจ็ับแรงดัน (Voltage divider sensor)

วงจรตรวจจ็ับแรงดันจะเป็นการนำตัวต้านทานสองตัวมาต่ออนุกรมกันและเป็นการแบ่งแรงดันออกไปเป็นสัญญาณ ซึ่งมีสูตรที่ใช้ในการคำนวณหาค่าตัวต้านทานหนึ่งและสองดังสมการ

$$V_{out} = V_{in} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (3.6)$$

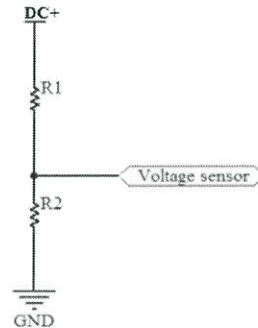
เช่น กำหนด $V_{in} = 24 \text{ V}$, $R_1 = 50 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 3 \text{ k}\Omega$

แทนค่าในสมการจะได้

$$V_{out} = 24 \times \frac{3}{50+3}$$

$$V_{out} = 1.35 \text{ V}$$

นำค่าที่ได้ในแต่ละช่วงของแรงดันขาเข้าแหล่งจ่าย (DC+) สำหรับการตรวจจับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อใช้ในการควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ต่อไป ซึ่งไมโครคอนโทรลเลอร์จะสามารถรับแรงดันได้อยู่ในช่วง 0 - 5 โวลต์ ต้องคำนวณค่าสัญญาณแรงดันให้ดี เพื่อไม่ให้เกินค่าตามที่ต้องการ ซึ่งจะเห็นว่าหากกำหนดพิกัดไม่เกิด 5 โวลต์ จะสามารถตรวจจับแรงดันขาเข้าได้มากที่สุดถึง 24 โวลต์ ซึ่งค่าความต้านทานที่ใช้ควรจะเป็นหลักกิโลโอห์ม

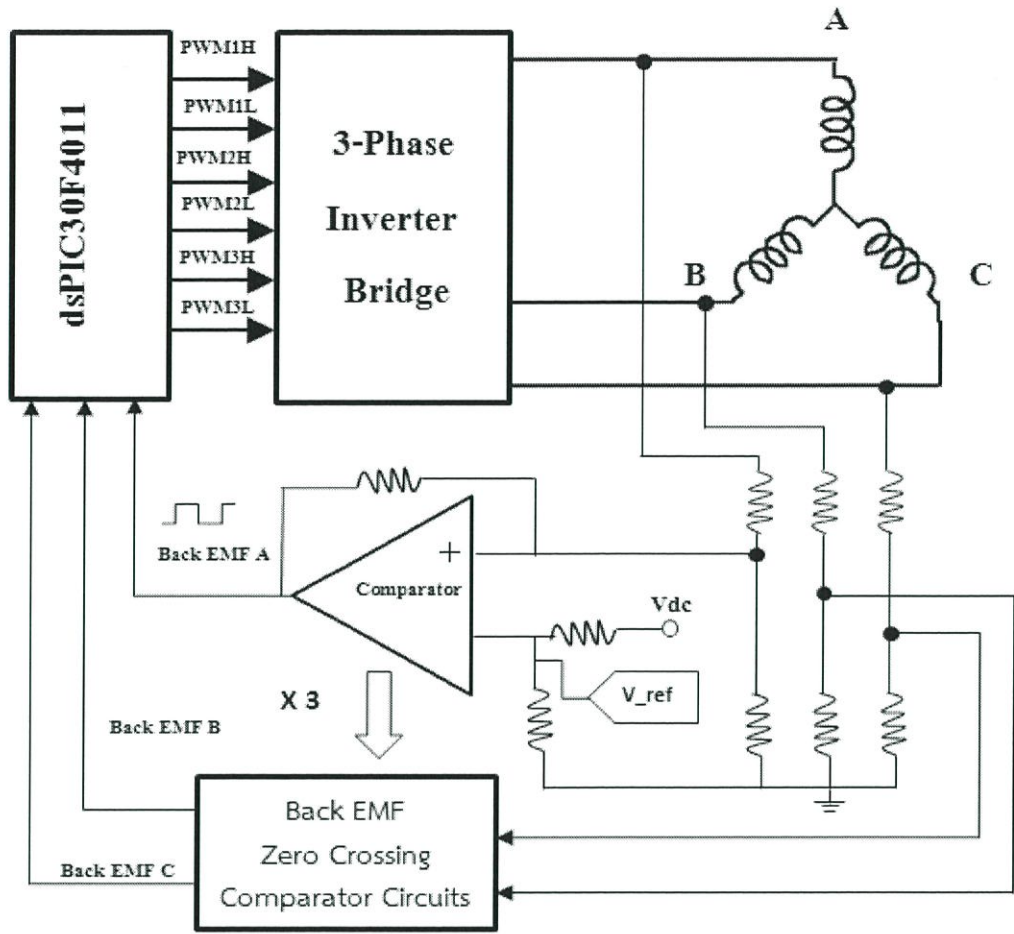


รูปที่ 3.11 วงจรตรวจจับแรงดันแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

จากรูปที่ 3.11 เป็นวงจรตรวจจับแรงดันของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับป้องกันแรงดันไฟฟ้าเกิน และแรงดันไฟฟ้าตกของแหล่งจ่ายไฟ เพื่อป้องกันการดำเนินงานที่ผิดพลาดสำหรับการควบคุมการทำงานใช้ย่านแรงดัน 24 โวลต์

3.8 การออกแบบวงจรตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับที่ตัดผ่านศูนย์

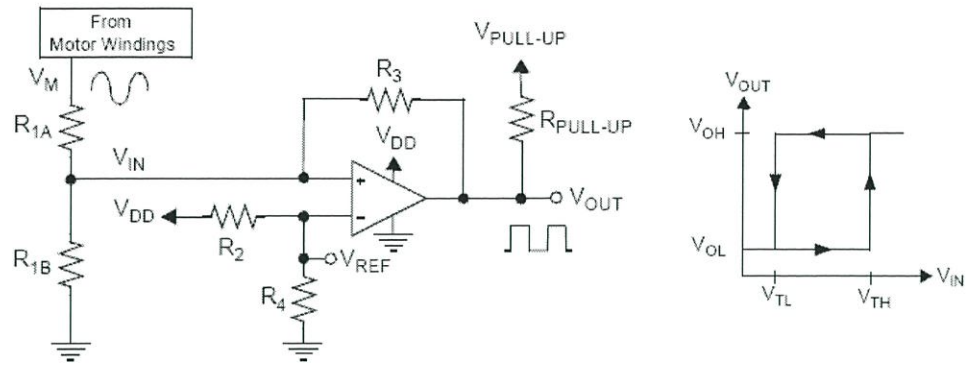
วิธีการตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านสำหรับการควบคุมแบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่ง โดยแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับจะมีลักษณะรูปคลื่นเป็นสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal waveform) จากบริเวณขั้วสายของมอเตอร์ ซึ่งแรงดันนี้จะต้องถูกแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัล โดยใช้วงจรเปรียบเทียบ (Comparator circuit) เทียบกับแรงดันครึ่งหนึ่งของดีซีบัส (DC/2) แรงดันจากขั้วสายของมอเตอร์แต่ละสายจะถูกจำกัดแรงดันและกระแสด้วยค่าความต้านทานสูงๆ เพื่อป้องกันกระแสของมอเตอร์ขณะทำงาน ด้วยวิธีการต่อความต้านทานแบ่งแรงดันผ่านวงจรรองความถี่ต่ำ เพื่อจัดการแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่มีสัญญาณรบกวนขณะที่มีความเร็วรอบต่ำๆ ให้มีความแม่นยำและตรงกับจุดตัดผ่านศูนย์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับได้ถูกต้อง อุปกรณ์ที่ใช้เปรียบเทียบกับจุดอ้างอิง (V_{ref}) คือออปป์แอมป์คอมพาราเตอร์สำหรับเปรียบเทียบสัญญาณแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ตัดผ่านจุดอ้างอิงหรือตัดผ่านศูนย์ ใช้การออกแบบวงจรเปรียบเทียบที่มีฮีสเตอร์ซิสเพื่อป้องกันการเกิดจุดตัดผ่านศูนย์ที่เกิดซ้ำก่อนที่เก็ทขึ้นจริงๆ ไดอะแกรมการทำงานของวงจรตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับที่ตัดผ่านศูนย์แต่ละเฟส ดังแสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 วงจรตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับในแต่ละเฟส

3.8.1 การออกแบบวงจรเปรียบเทียบแรงดัน

การออกแบบวงจรเปรียบเทียบแรงดันสำหรับเปรียบเทียบแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับที่ตัดผ่านศูนย์ จำเป็นต้องอาศัยไอซีเปรียบเทียบ (LM324 Comparator) เป็นอุปกรณ์ออปแอมป์ที่มีจำนวนสี่ช่องคู่สัญญาณราคาถูกและเหมาะกับการทำงานของมอเตอร์สามเฟส โดยจะทำหน้าที่แปลงสัญญาณแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับที่ตัดผ่านศูนย์ออกมาในรูปแบบสัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยมเพื่อส่งไปยังตัวประมวลผล dsPIC สำหรับวงจรเปรียบเทียบจะใช้เทคนิคแบบฮิสเตอร์ริซิสเพื่อป้องกันการเกิดสัญญาณรบกวน ซึ่งอาจทำให้การตรวจจับทำงานผิดพลาด โดยแสดงได้ดังรูปที่ 3.13 เป็นวงจรเปรียบเทียบแรงดันสำหรับแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ตัดผ่านศูนย์



รูปที่ 3.13 วงจรแบบเทียบแรงดันสำหรับแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ตัดผ่านศูนย์ของมอเตอร์

โดยเราสามารถสร้างฮิสเตอร์รีซิสโดยการป้อนกลับแบบบวกได้โดยกำหนดให้

ให้ $V_{OH} = V_{DD}, V_{OL} = 0, R_3 \gg R_1$ และ $R_3 \gg R_{PULL-UP}$ จะได้ว่า

แรงดัน Back EMF;
$$V_{IN} = \left(\frac{R_{1B}}{R_{1A} + R_{1B}} \right) \times V_M R_1 = R_{1A} \parallel R_{1B} \tag{3.7}$$

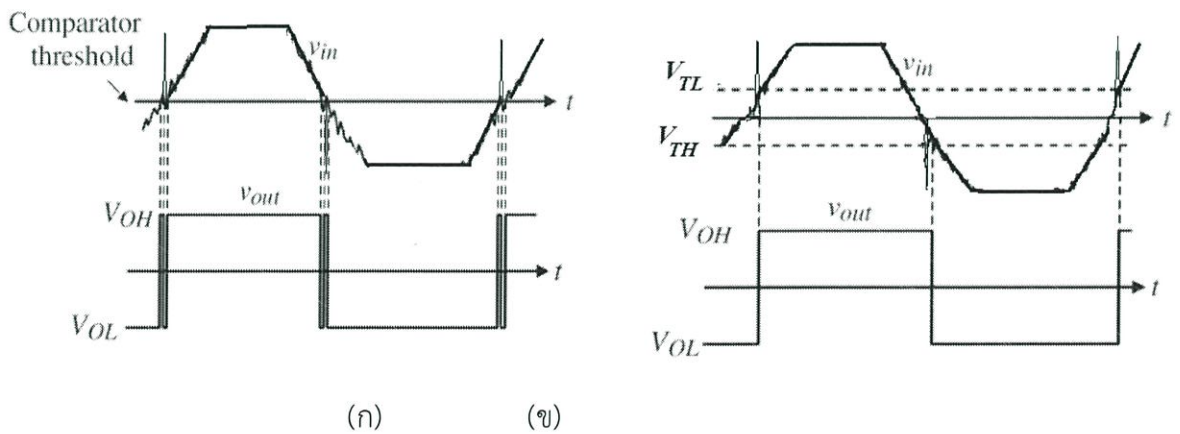
แรงดันที่ถูกอ้างอิงตัดผ่านศูนย์;
$$V_{REF} = V_{DD} \times \left(\frac{R_4}{R_2 + R_4} \right) \tag{3.8}$$

แรงดันที่ขอบลง;
$$V_{TL} \cong \frac{(R_1 + R_3)V_{REF} - (R_1 \times V_{DD})}{R_3} \tag{3.9}$$

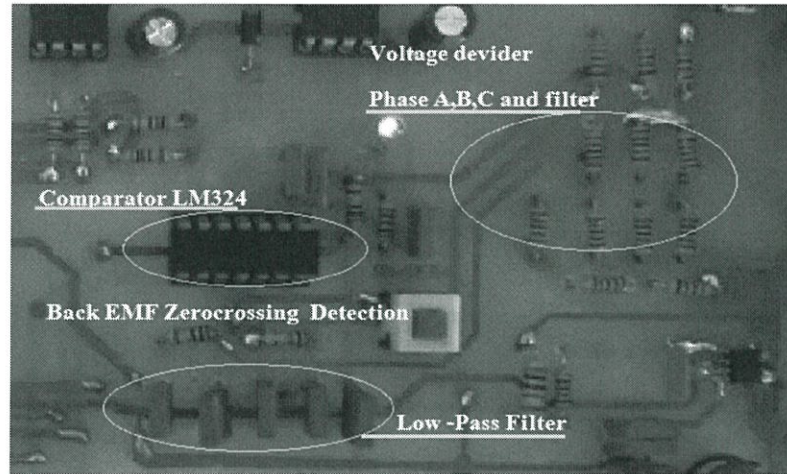
แรงดันที่ขอบขึ้น;
$$V_{TH} = \frac{(R_1 + R_3)V_{REF}}{R_3} \tag{3.10}$$

ฮิสเตอร์รีซิสแรงดัน;
$$V_{HYS} = V_{TH} - V_{TL} \tag{3.11}$$

$$V_{HYS} \cong \left(\frac{R_1}{R_3} \right) V_{DD}$$



รูปที่ 3.14 (ก) ผลของสัญญาณรบกวนต่อการทำงานของวงจรเปรียบเทียบ (ข) วงจรเปรียบเทียบที่มีฮิสเตอร์รีซิส

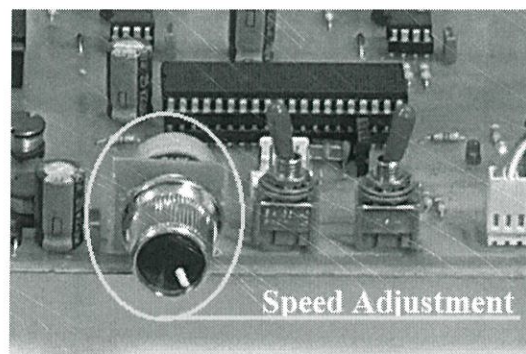
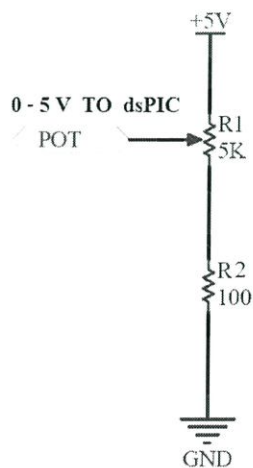


รูปที่ 3.15 วงจรสำหรับตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับที่ใช้ทดลอง

ในรูปที่ 3.15 วงจรสำหรับตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับจะเริ่มต้นจากการแบ่งแรงดันแต่ละเฟสของขั้วมอเตอร์ด้วยค่าความต้านทานเพื่อลดขนาด แล้วกรองความถี่ด้วยวงจรกรองความถี่ต่ำสัญญาณที่ได้จะสามารถนำมาเปรียบเทียบกับแรงดันอ้างอิงจุดตัดผ่านศูนย์ด้วยไอซีเปรียบเทียบแรงดัน จะได้สัญญาณตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับเอาท์พุทเป็นลักษณะพัลส์สี่เหลี่ยม

3.9 การออกแบบสำหรับวงจรปรับความเร็วมอเตอร์

วงจรปรับความเร็วรอบมอเตอร์จะอาศัยรับค่าแรงดันตกคร่อมความต้านทานโดยวงจรจะถูกต่อกับแหล่งจ่ายแรงดัน 5 โวลต์ รวมกับความต้านทานปรับค่าได้ เพื่อแบ่งแรงดันได้ให้อยู่ในช่วง 0 ถึง 5 โวลต์ แล้วจึงแปลงสัญญาณระดับแรงดันแบบอนาล็อกเป็นค่าทางดิจิทัล สำหรับป้อนให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุมความเร็วมอเตอร์ โดยวงจรดังแสดงได้ในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 วงจรปรับความเร็วมอเตอร์

3.10 การออกแบบสำหรับการกำหนดทิศทางการหมุนตามเข็มและทวนเข็มนาฬิกา

การออกแบบสำหรับการกำหนดทิศทางการหมุนมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านนั้น ปกติแล้วจะมีตัวตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์ด้วยเซนเซอร์ตรวจจับ โดยพบว่ามีความสัมพันธ์ในการหมุนเป็นแบบลำดับคือ หกลำดับการขับสวิตซ์ในแต่ละคู่เฟส การหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา และทวนเข็มนาฬิกาจะใช้ลำดับการสวิตซ์ที่แตกต่างกัน แสดงได้ดังตารางที่ 3.2 และ 3.3

ตารางที่ 3.2 ลำดับสำหรับหมุนมอเตอร์ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา

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

จากตารางที่ 3.2 การขับเคลื่อนมอเตอร์ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา จะอาศัยการทำงานของอุปกรณ์สวิตซ์ตามลำดับ 6 ถึง 1 ในการสวิตซ์เรียงกระแสแต่ละเฟสให้มีทิศทางตามหมุนของสนามแม่เหล็กโดยเรียงลำดับการสวิตซ์ คือ $Q_1Q_2, Q_3Q_2, Q_3Q_4, Q_5Q_4, Q_5Q_6$, และ Q_1Q_6 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.3 ลำดับสำหรับหมุนมอเตอร์ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา

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

จากตารางที่ 3.3 การขับเคลื่อนมอเตอร์ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกานั้นจะอาศัยการทำงานของอุปกรณ์สวิตซ์ตามลำดับ 1 ถึง 6 ในการสวิตซ์เรียงกระแสแต่ละเฟสให้มีทิศทางตามหมุนของสนามแม่เหล็กโดยเรียงลำดับการสวิตซ์ คือ $Q_1Q_6, Q_5Q_6, Q_5Q_4, Q_3Q_4, Q_3Q_2$ และ Q_1Q_2 ตามลำดับ

บทที่ 4

ผลการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และผลจากการทดลอง

4.1 บทนำ

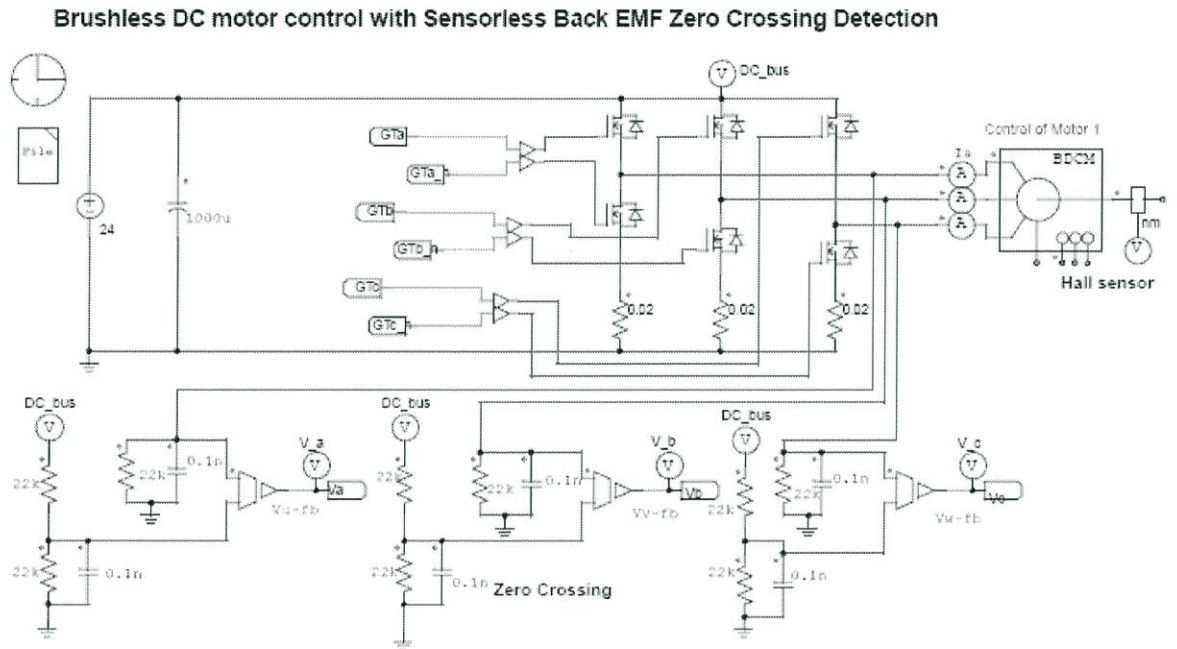
ในบทนี้จะกล่าวถึงการจำลองการทำงานของระบบควบคุมความเร็วรอบแบบปราศจากตัวตรวจจับโดยอาศัยแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับลักษณะสี่เหลี่ยมคางหมู เป็นการจำลองโดยใช้โปรแกรม Power Sim ช่วยในการศึกษาพฤติกรรมการทำงานของมอเตอร์ และระบบการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์เพื่อทำการวิจัยกับอุปกรณ์ชุดต้นแบบที่พัฒนาขึ้น นำผลการทดลองที่ได้ทั้งหมดมาเปรียบเทียบกันระหว่างสองวิธีการควบคุมโดยแสดงตาราง 4.1 รายละเอียดหลักๆ ของผลแต่ละการทดลองดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.1 รายการทดลองการออกแบบวิจัยพัฒนาชุดควบคุมมอเตอร์

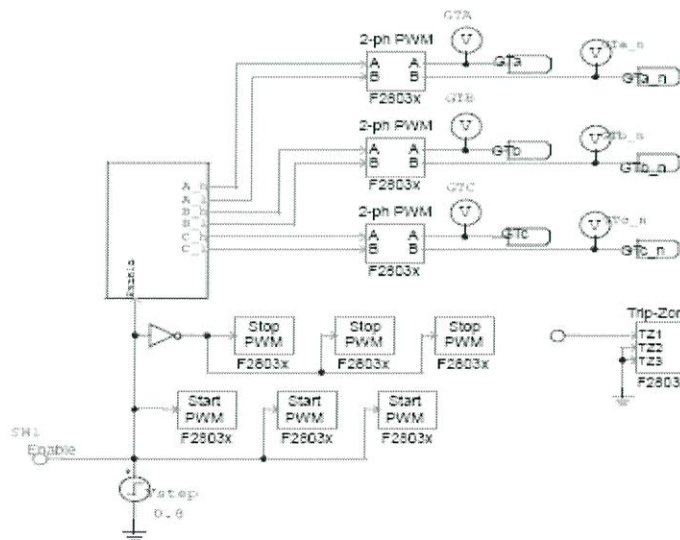
การทดลอง	รายละเอียดการทดสอบ	
1. ผลการจำลองการทำงาน	- ใช้โปรแกรม Power sim ทดสอบเปรียบเทียบการทำงานและแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับในการออกแบบ	
2. ผลกระทบจากอุปกรณ์ตรวจจับขั้วแม่เหล็กขัดข้อง	- ทดสอบในสภาวะสัญญาณขาดหาย ในช่วงการควบคุมความเร็วตัวที่ไซเคิล 60 และ 100 %	
3. ผลของสัญญาณควบคุมของการทำงาน	- แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับจากขั้วมอเตอร์ - เปรียบเทียบสัญญาณ Hall effect sensor และ ซีโรครอสซิง - ความสัมพันธ์ของแรงดันอ้างอิงกับช่วงควบคุมตัวที่ไซเคิล ไซเคิลและการหน่วงเวลาสวิตซิ่ง - สัญญาณ PWM ที่ใช้ในการควบคุมการขับเคลื่อน - สัญญาณการขับนำสวิตซ์วงจรทุตสแตรรัป	
4. ผลการทดลองการขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านด้วยวิธีการทดสอบต่างๆ	เปรียบเทียบการทดลองการขับเคลื่อน	
	ทดสอบแบบใช้อุปกรณ์ตรวจจับ (Hall effect sensor)	ทดสอบแบบปราศจากตัวตรวจจับ (Sensorless)
	- ไม่มีภาระทางกล - แรงเคลื่อนไฟฟ้าทั้งสามเฟสเพสเปกตรัมและ THD _v ค่าความผิดพลาดแต่ละความเร็วรอบมอเตอร์	
- มีภาระทางกลด้วยลูกตุ้มน้ำหนัก - แรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแส ที่โหลดต่อเนื่องและช่วงขณะประสิทธิภาพการทำงาน THD _v ความเร็วรอบมอเตอร์		

4.2 ลักษณะการควบคุมความเร็วรอบแบบปราศจากตัวตรวจจับ

ในการจำลองลักษณะการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์แบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ด้วยเทคนิคการตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับลักษณะสี่เหลี่ยมคางหมู แสดงในรูปที่ 4.1 และ 4.2 เป็นการจำลองวงจรของระบบควบคุมความเร็วรอบแบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์ เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาเกี่ยวกับการทำงานของมอเตอร์และหลักการควบคุมความเร็วรอบ



รูปที่ 4.1 จำลองวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์การตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ

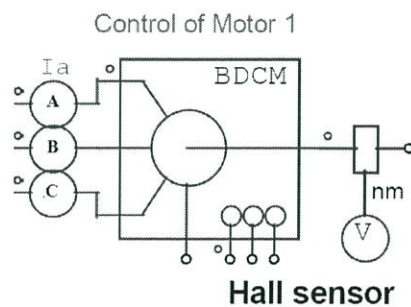


รูปที่ 4.2 จำลองวงจรของระบบควบคุมความเร็วรอบแบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์

4.3 การจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม Power sim

4.3.1 ข้อมูลมอเตอร์ในการจำลองการทำงานโดยโปรแกรม Power sim

ข้อมูลของมอเตอร์สำหรับการจำลองการทำงานทางด้านพลวัตของมอเตอร์แสดงในรูปที่ 4.3 (ก) เป็นสัญลักษณ์มอเตอร์ (ข) เป็นกล่องค่าตัวแปรพารามิเตอร์ของมอเตอร์



(ก)

Brushless DC Machine : BLDC				
Parameters		Other Info	Color	Help
Brushless dc machine (trapezoidal)				
Name	BLDC			<input type="checkbox"/>
R (stator resistance)	11.9			<input type="checkbox"/>
L (stator self ind.)	0.00207			<input type="checkbox"/>
M (stator mutual ind.)	-0.00069			<input type="checkbox"/>
Vpk / krpm	32.3			<input type="checkbox"/>
Vrms / krpm	22.9			<input type="checkbox"/>
No. of Poles P	12			<input type="checkbox"/>
Moment of Inertia	7E-006			<input type="checkbox"/>
Shaft Time Constant	0.006			<input type="checkbox"/>
theta_0 (deg.)	0			<input type="checkbox"/>
theta_advance (deg.)	0			<input type="checkbox"/>
Conduction Pulse Width	120			<input type="checkbox"/>

(ข)

รูปที่ 4.3 (ก) สัญลักษณ์มอเตอร์ (ข) ค่าตัวแปรพารามิเตอร์ของมอเตอร์

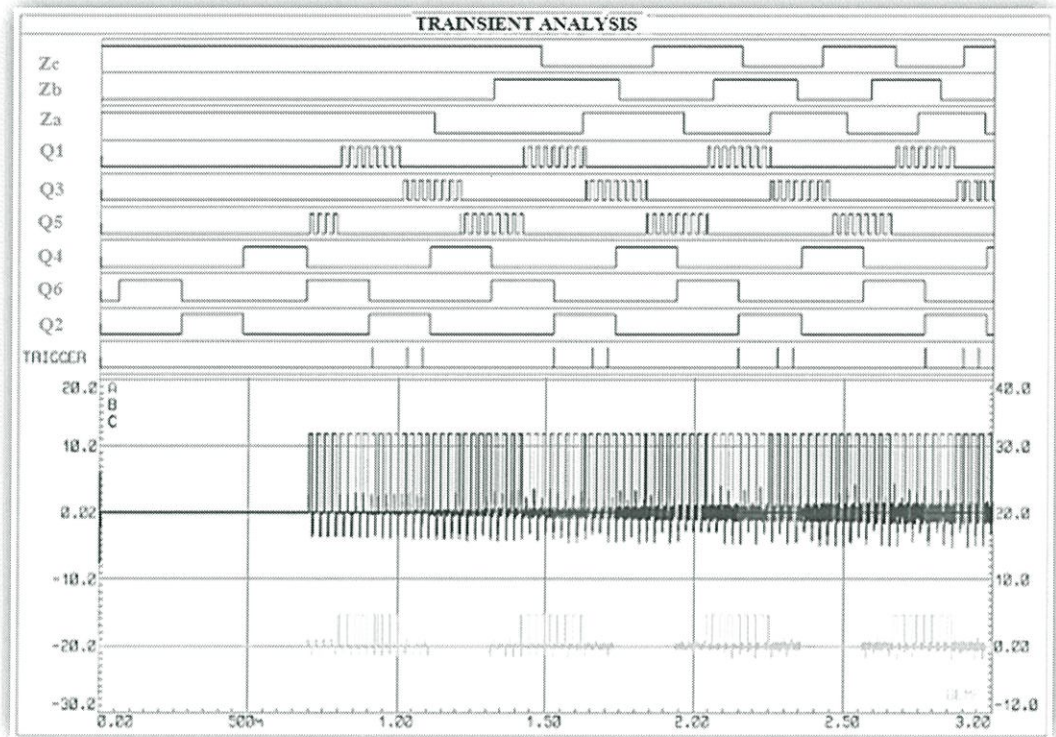
4.3.2 การจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

การจำลองด้วยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ Power sim จะจำลองการทำงานมอเตอร์ในการขับเคลื่อนแบบสัญญาณสี่เหลี่ยม 120 โดยจะเรียงกระแสเป็นอินเวอร์เตอร์หกขั้วสำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านปราศจากตัวตรวจจับ แสดงดังตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.4

ตารางที่ 4.2 ความสัมพันธ์แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับและการขับนำสวิตซ์ในแต่ละคู่เฟส

Step	Zero crossing			Commutation Switching	Phase		
	Zc	Zb	Za		A	B	C
0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	Q1,Q6	DC+	DC-	0
2	1	0	1	Q5,Q6	0	DC-	DC+
3	0	0	1	Q5,Q4	DC-	0	C+
4	0	1	1	Q3,Q4	DC-	DC+	0
5	0	1	0	Q3,Q2	0	DC+	DC-
6	1	1	0	Q1,Q2	DC+	0	DC-

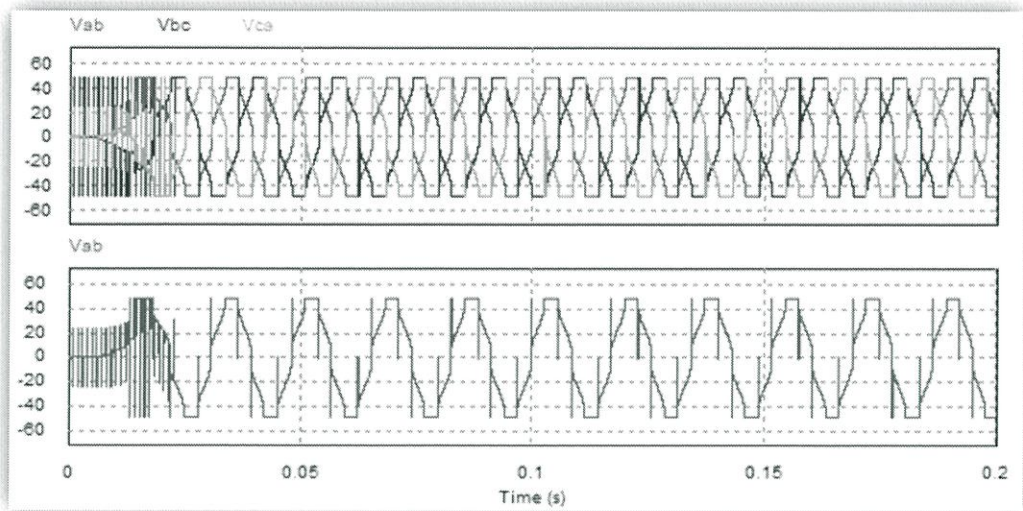
จากตารางที่ 4.2 สามารถเขียนลักษณะของโหมดการทำงานในแต่ละลำดับขั้นของสัญญาณตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับผ่านศูนย์แสดงได้ดังรูปที่ 4.4



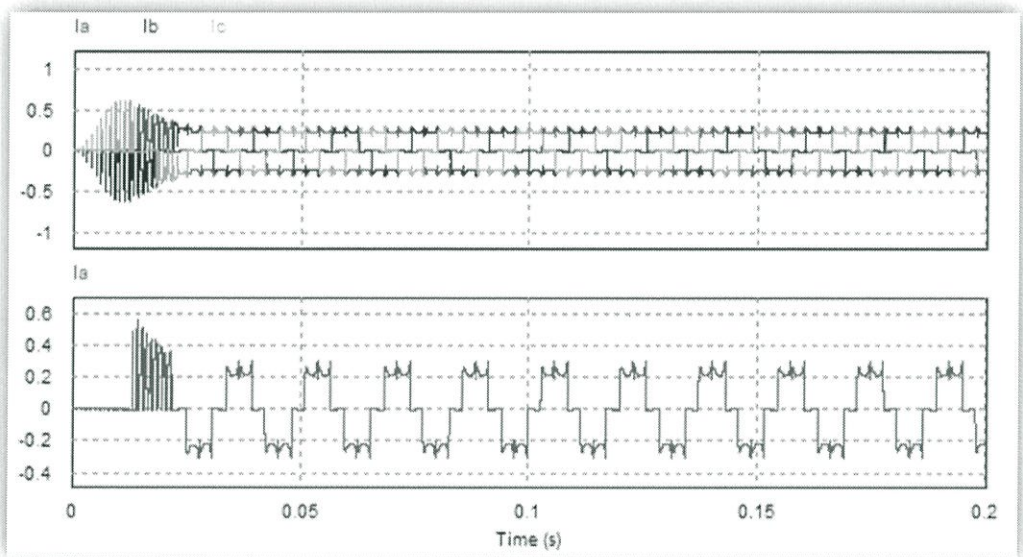
รูปที่ 4.4 ลักษณะสัญญาณการควบคุมการขับเคลื่อนด้วยการจำลอง

4.3.3 ผลการจำลองและการวิเคราะห์

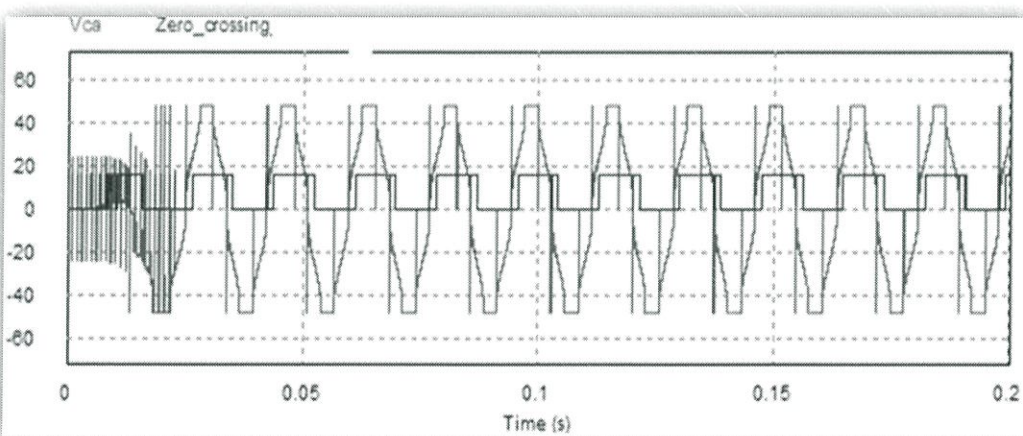
การจำลองในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Power sim จะกำหนดเงื่อนไขการจำลองเพื่อให้มีลักษณะใกล้เคียงกับในอุปกรณ์จริงเช่น กำหนดให้ระบบจำลองมีแหล่งจ่ายพลังงานที่ 24 โวลต์ ระบบมีความถี่สวิตซ์ 40 kHz เนื่องจากกำหนดให้ไมโครคอนโทรลเลอร์สร้างสัญญาณ PWM ที่มีความถี่ดังกล่าว โดยใช้ช่วงการควบคุมการทำงานที่ Duty cycle 100% เพื่อต้องการให้รูปคลื่นและสัญญาณตรวจจับ แสดงผลที่จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์แรงเคลื่อนไฟฟ้ากับจุดตัดผ่านศูนย์ของแรงดันจากขั้วมอเตอร์แต่ละเฟส อุปกรณ์ที่ใช้ในการจำลองจะเป็นมอเตอร์ที่มีพิกัดแรงดัน 24 โวลต์ 12 ขั้วแม่เหล็ก อุปกรณ์สวิตซ์มอสเฟสกำลัง Mosfet มีค่า $R_{ds(on)}$ คือ 13 m Ω เนื่องจากเป็นค่าของมอสเฟสกำลัง IFR2807 ซึ่งจะใช้ในการสร้างอุปกรณ์จริงสำหรับการออกแบบชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านปราศจากตัวตรวจจับชุดต้นแบบต่อไป โดยผลการจำลองแสดงได้ดังรูปที่ 4.5 ถึง 4.8 ลักษณะสัญญาณการขับเคลื่อน แรงดันระหว่างขั้วมอเตอร์ กระแสมอเตอร์ จำลองการเปรียบเทียบสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากับสัญญาณซีโรครอสซิง และจำลองการเปรียบเทียบความเร็วรอบของมอเตอร์แบบมีตัวตรวจจับขั้วแม่เหล็กและปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งตามลำดับ



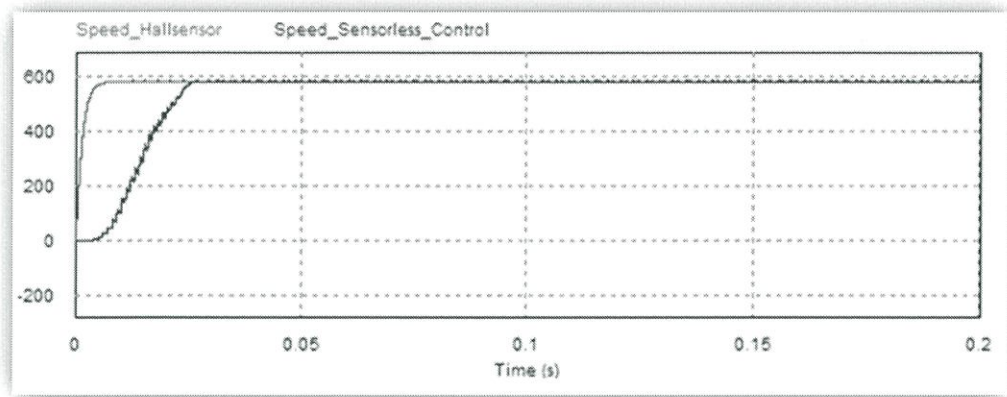
รูปที่ 4.5 การจำลองสัญญาณแรงดันระหว่างขั้วมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน



รูปที่ 4.6 การจำลองสัญญาณกระแสขั้วมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน



รูปที่ 4.7 จำลองการเปรียบเทียบสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากับสัญญาณซีโร่ครอสซิง



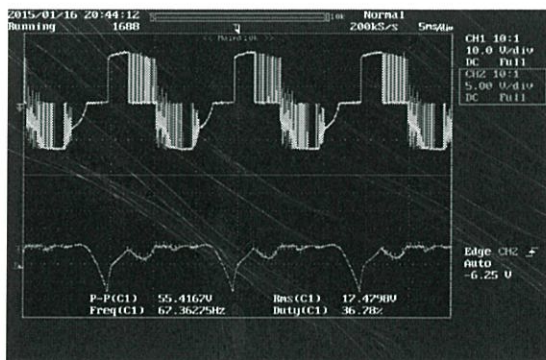
รูปที่ 4.8 จำลองการเปรียบเทียบความเร็วรอบของมอเตอร์แบบมีตัวตรวจจับขั้วแม่เหล็กและปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่ง

4.4 ผลการทดลองการขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

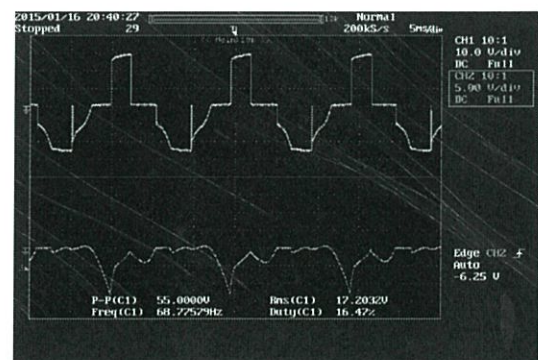
จากการออกแบบวงจรควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน จะทำการทดสอบเปรียบเทียบผลการทดลองและการใช้งาน โดยจะแสดงผลกระทบจากอุปกรณ์ตรวจจับขั้วแม่เหล็กขัดข้อง และผลของการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบใช้ตัวตรวจจับขั้วแม่เหล็ก (Hall effect sensor) ผลการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบปราศจากตัวจับ (Sensorless control) ดังจะกล่าวต่อไปนี้

4.4.1 ผลกระทบจากอุปกรณ์ตรวจจับขั้วแม่เหล็กขัดข้อง

การขับเคลื่อนมอเตอร์กรณีเกิดปัญหาเกี่ยวกับอุปกรณ์ตรวจจับขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์เสียหายจากสายขาด หรืออุณหภูมิทำให้อุปกรณ์ตรวจจับเสียหาย ซึ่งปกติแล้วจะทำหน้าที่ตรวจจับขั้วแม่เหล็กเหนือ (N) ใต้ (S) และระหว่างขั้ว N กับ S โดยจะวางทำมุมห่างกัน 180 องศาทางไฟฟ้า ทำให้มีการทำงานเป็นหกลำดับการสวิตช์ หากขาดไปเส้นใดเส้นหนึ่งจะทำให้จับสัญญาณได้แค่สองขั้ว ส่งผลให้ลำดับการสวิตช์ไม่ครบหก โดยหายไปสองลำดับจะเหลือเพียงแคสี่ลำดับการสวิตช์ ดังแสดงในรูปที่ 4.9

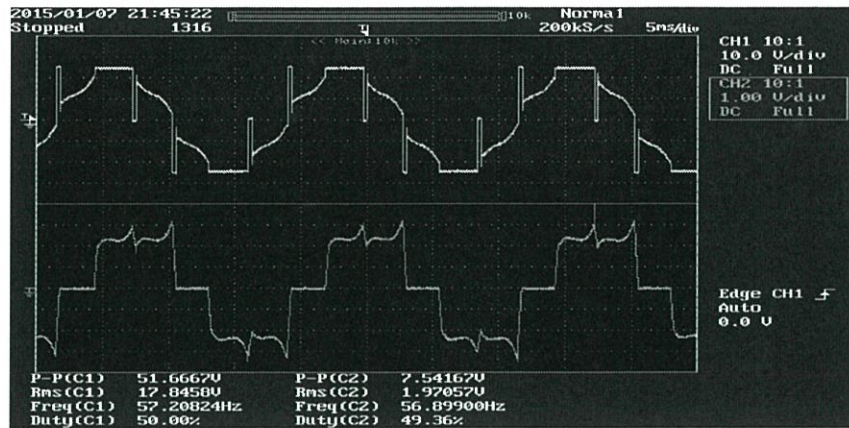


(ก) ดิวตี้ไซเคิล 60 %



(ข) ดิวตี้ไซเคิล 100 %

รูปที่ 4.9 ลักษณะแรงเคลื่อนและกระแสไฟฟ้ากรณีเกิดความผิดปกติจาก Hall effect sensor



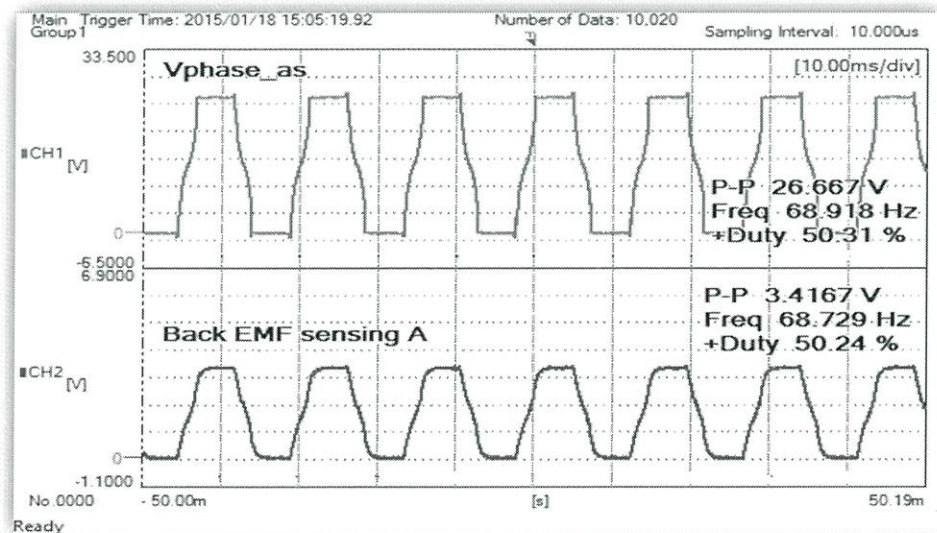
รูปที่ 4.10 ลักษณะแรงเคลื่อนและกระแสไฟฟ้าในสภาวะทำงานปกติ

4.5 ผลของสัญญาณควบคุมที่ใช้ในการทำงานแบบปราศจากตัวตรวจจับ

สัญญาณที่ใช้ในควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบปราศจากตัวตรวจจับบนชุดทดลองจะประกอบได้ด้วย สัญญาณตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับเปรียบเทียบกับจุดตัดผ่านศูนย์ สัญญาณพีดับบิวเอ็มจากไมโครคอนโทรลเลอร์ และสัญญาณชุดขับนำสวิตช์มอสเฟสกำลัง โดยผลการทดลองนำเสนอในย่านความเร็วพิกัด ดิวตี้ไซเคิล 100 เปอร์เซ็นต์ จะมีความเร็วรอบที่พิกัด 700 รอบต่อนาที ดังจะกล่าวตามลำดับต่อไปนี้

4.5.1 แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับจากขั้วมอเตอร์

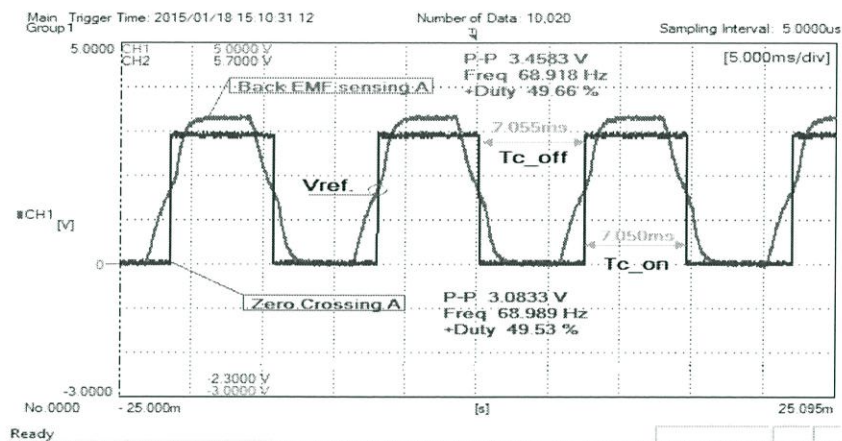
แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับจากขั้วของมอเตอร์เทียบกับซอส (VphaseA-source) แรงเคลื่อนไฟฟ้าของมอเตอร์จะถูกแบ่งเพื่อลดระดับแรงดันลงจาก (CH1) 24 โวลต์ ผ่านวงจรแบ่งแรงดันและวงจรกรองแบบ Low pass filter ให้เหลือขนาดแรงดันสำหรับป้อนให้ dsPIC ในระดับแรงดัน (CH2) 3.4 โวลต์ โดยผลทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับจากขั้วมอเตอร์กับซอส (V phase A-source)

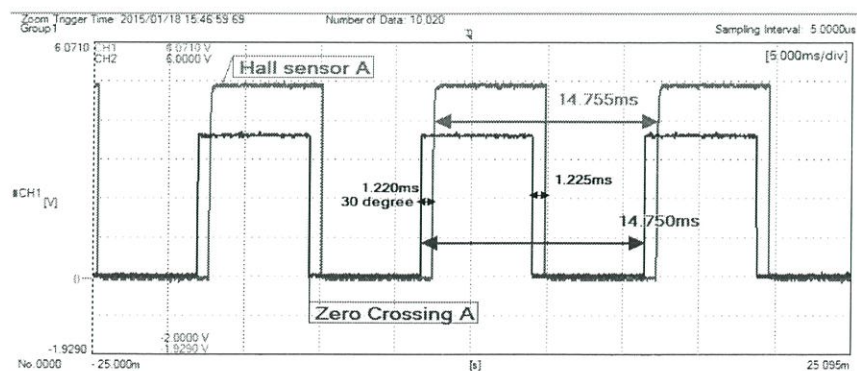
4.5.2 เปรียบเทียบสัญญาณตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์และสัญญาณตัดผ่านศูนย์

การตรวจจับสัญญาณตำแหน่งโรเตอร์ (Hall effect sensor) และการตรวจจับสัญญาณผ่านศูนย์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ (Zero crossing) มีวิธีการทำงานที่แตกต่างกัน โดยวิธีการตรวจจับด้วยฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์ ใช้หลักการตรวจจับขั้วแม่เหล็กที่อยู่ภายในตัวมอเตอร์ สัญญาณเอาต์พุตมีลักษณะเป็นสัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยมที่มีความสมมาตร 180 องศา ส่วนอีกเทคนิควิธีที่นำเสนอจะอาศัยแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับที่ตัดผ่านศูนย์ โดยเปรียบเทียบกับแรงดันอ้างอิง (V_{ref}) ในการเปรียบเทียบจะได้สัญญาณเอาต์พุตที่มีลักษณะพัลส์สี่เหลี่ยมที่มีความสมมาตร 180 องศาเช่นกัน ช่วงเวลาของสัญญาณขณะขึ้นลง T_{c_on} และ T_{c_off} เท่ากับ 7.055 ms มีค่าดีวตีไซเคิลของสัญญาณอยู่ที่ 49.66 % ดังแสดงในรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 เปรียบเทียบแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับและสัญญาณตรวจจับผ่านศูนย์

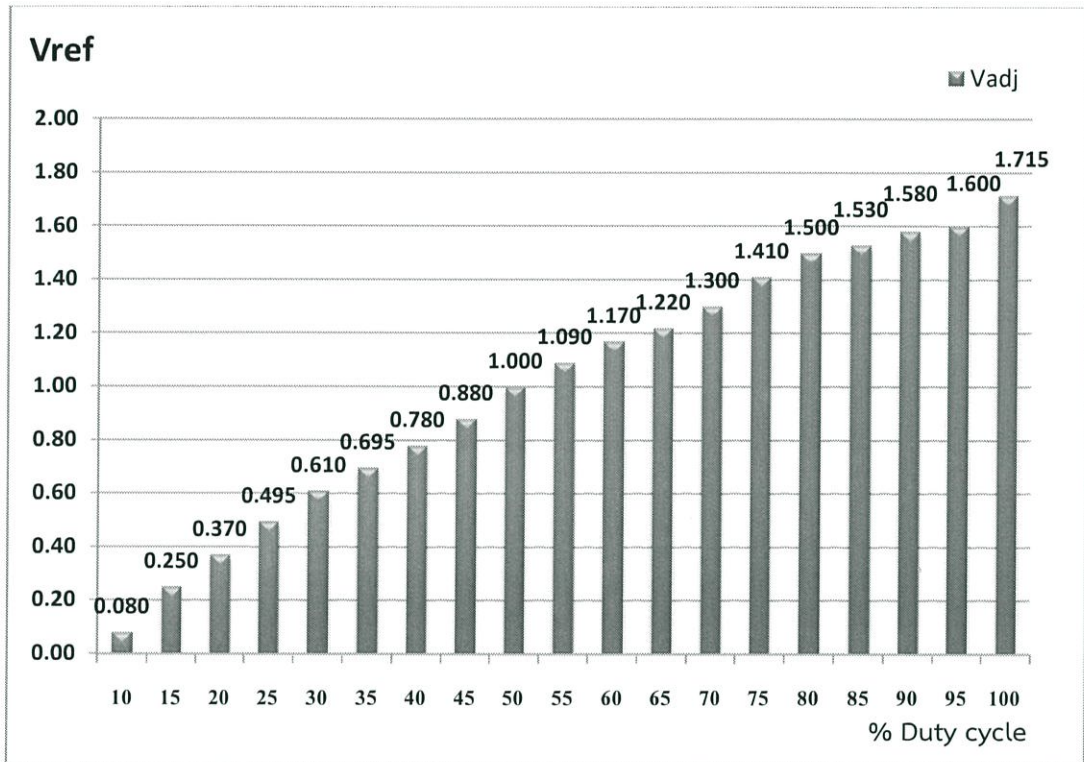
จากรูป 4.12 การเปรียบเทียบแรงดันอ้างอิงนั้นอาศัยความสัมพันธ์กับครึ่งหนึ่งของแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับแทนแรงดันที่ผ่านศูนย์ของมอเตอร์ที่ไม่มีสายนิวทรัล ดังแสดงในรูปที่ 4.13 พบว่าความแตกต่างของตำแหน่งเวลาการตรวจจับจุดตัดผ่านศูนย์จะเกิดก่อนตำแหน่งฮอลล์เซนเซอร์อยู่ 30 องศาทางไฟฟ้า เปรียบเทียบสัญญาณตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์และสัญญาณผ่านศูนย์พบว่าคาบเวลาของสัญญาณตรวจจับตำแหน่งและสัญญาณผ่านศูนย์เท่ากับ 14.755 ms และ 14.750 ms ตามลำดับ ดังแสดงได้ดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 เปรียบเทียบสัญญาณตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์และสัญญาณผ่านศูนย์

4.5.3 ความสัมพันธ์ของแรงดันอ้างอิงกับช่วงการควบคุมความเร็วดีวีซีเคิล

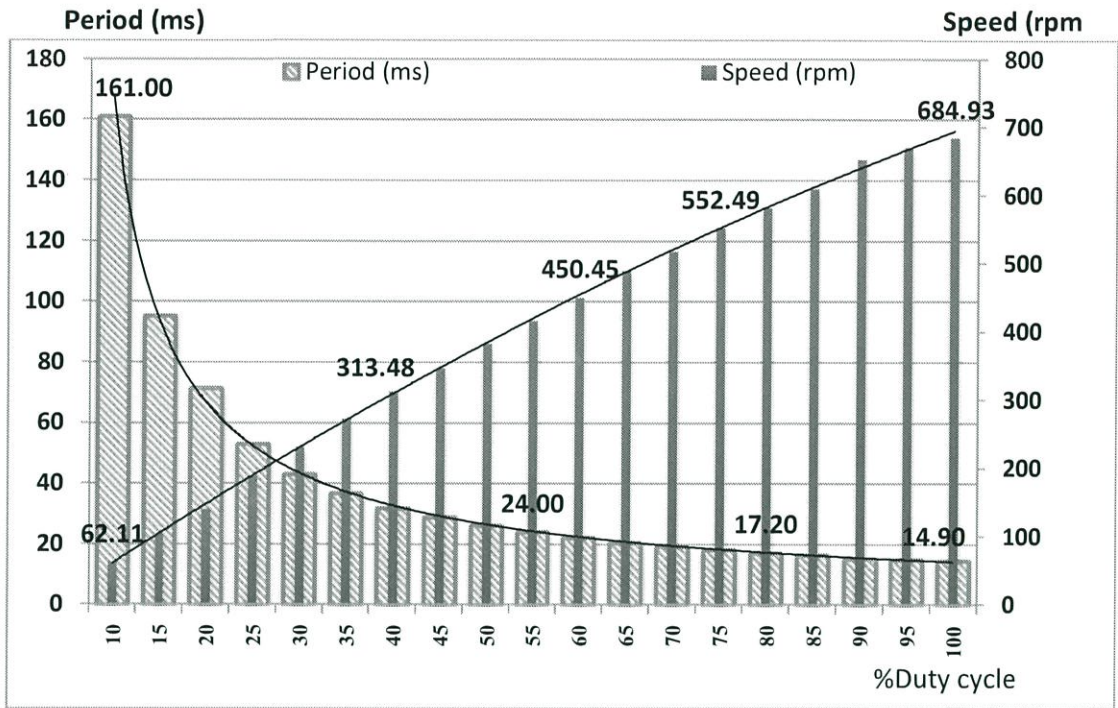
ในการเปรียบเทียบแรงดันอ้างอิงนั้นอาศัยความสัมพันธ์กับครึ่งหนึ่งของแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับแทนแรงดันที่ผ่านศูนย์กลางของมอเตอร์ที่ไม่มีสายนิวทรัล เพื่อให้สัญญาณที่ได้จากการตรวจจับมีลักษณะที่สมมาตรดังรูปที่ 4.13 ผลของแรงดันอ้างอิงจุดตัดผ่านศูนย์กลาง (V_{ref}) จะมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับความเร็วรอบที่ควบคุมด้วยดีวีซีเคิล พบว่าค่าผลของแรงดันอ้างอิงจุดตัดผ่านศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 0.08 ถึง 1.715 โวลต์ แสดงได้ดังรูปที่ 4.14



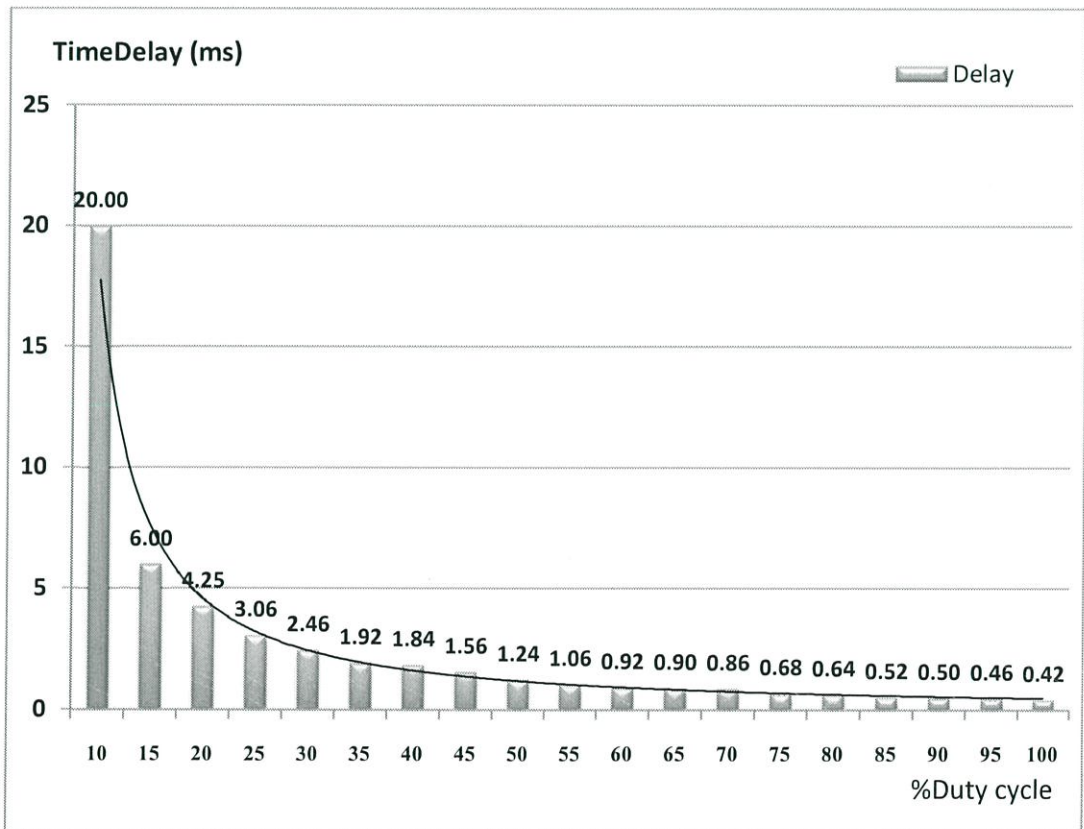
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ของแรงดันอ้างอิงจุดตัดผ่านศูนย์กลางกับช่วงควบคุมความเร็วดีวีซีเคิล

4.5.4 ความสัมพันธ์ของค่าหน่วงเวลากับช่วงการควบคุมความเร็วดีวีซีเคิล

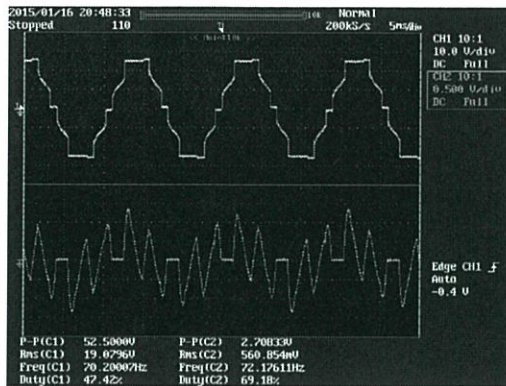
ความแตกต่างของสัญญาณตรวจจับผ่านศูนย์กลางจะเกิดขึ้นก่อนตำแหน่งฮอลล์เซนเซอร์อยู่ 30 องศาทางไฟฟ้าจึงต้องอาศัยการหน่วงเวลาทางดิจิทัลจากการคำนวณ สมการ (1.1) โดยความเร็วรอบมอเตอร์ที่มีความสัมพันธ์กับคาบเวลาที่เกิดซีโรครอสซิง (T_0) ดังแสดงได้ดังรูปที่ 4.15 เพื่อคำนวณหาเวลาที่ต้องหน่วงก่อนการสวิตช์เรียงกระแสให้ถูกต้องตามตำแหน่งโรเตอร์จริง โดยจากการทดลองพบว่าเวลาที่ใช้น่วง 30 องศาทางไฟฟ้าจากจุดตัดผ่านศูนย์กลางของแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับจะมีความสัมพันธ์เป็นแบบเอกซ์โพเนนเชียลกับความเร็วรอบที่เพิ่มขึ้นตามการควบคุมดีวีซีเคิล ในช่วงดีวีซีเคิล 20 % ,40 % ,60% และ 100 % มีค่าหน่วงเวลา 4.25 ,1.84 , 0.92 , และ 0.42 ms ตามลำดับ ดังแสดงได้ในรูป 4.16



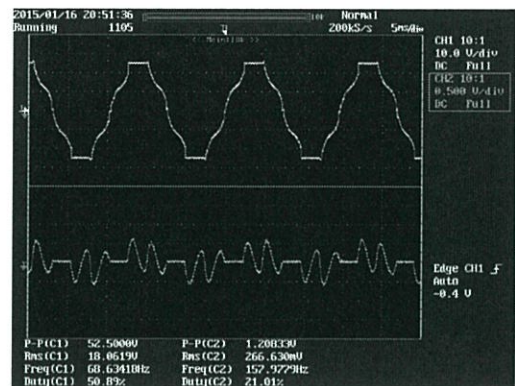
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์คาบเวลาที่เกิดซีโรครอสซิง (T_0) กับช่วงการควบคุมความเร็วตัวตีเซเคิล



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าหน่วงเวลา (Time Delay)30 องศาจากจุดตัดผ่านศูนย์กับช่วงการควบคุมความเร็วตัวตีเซเคิล



(ก) ยังไม่หน่วงเวลาสวิตซ์



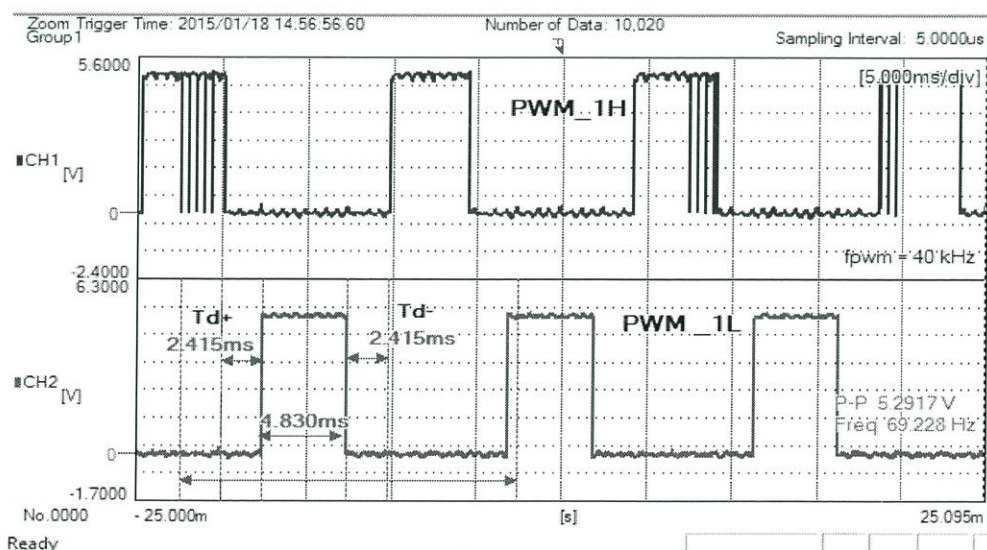
(ข) หน่วงเวลาสวิตซ์

รูปที่ 4.17 เปรียบเทียบ (ก) ยังไม่หน่วงเวลาสวิตซ์ และ (ข) หน่วงเวลาสวิตซ์แล้ว 30 องศาจากจุดตัดผ่านศูนย์

จากรูปที่ 4.17 (ก) การขับนำสวิตซ์ที่ยังไม่หน่วงเวลา และ (ข) การขับนำสวิตซ์ที่หน่วงเวลาจากจุดตัดผ่านศูนย์จากการทดลองพบว่าแบบ (ก) สัญญาณแรงดันจะมีความผิดเพี้ยนและมีค่ากระแสที่สูงกว่าแบบ (ข) ดังนั้นวิธีการหน่วงเวลาจะช่วยให้ได้รูปคลื่นสัญญาณดีกว่า ดังแสดงได้ดังรูปต่อไปนี้

4.5.5 สัญญาณพีดับบิวเอ็มที่ใช้ควบคุมการขับเคลื่อน

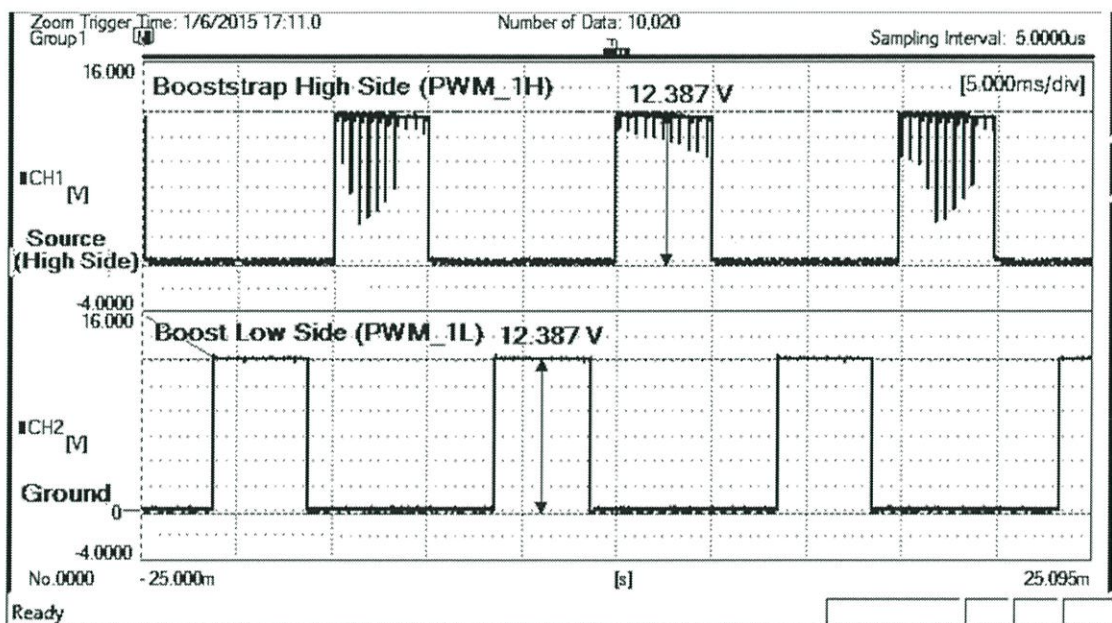
ในรูปที่ 4.18 แสดงสัญญาณในการขับเคลื่อนของมอเตอร์เฟส ในกึ่งของอินเวอร์เตอร์ที่เฟส A ลักษณะของสัญญาณในการขับเคลื่อนเกตมอสเฟสด้านบน (High side) และด้านล่าง (Low side) ทั้งสองจะขับเคลื่อนสัญญาณเกิดด้วย PWM ที่ความถี่สวิตซ์ 40 kHz โดยมีระยะมุมห่างกันอยู่ที่ 60 องศา ทำให้สัญญาณประวิงเวลา (T_d : Dead time) ขอบขาขึ้น (T_{d+}) และขอบขาลง (T_{d-}) จะมีระยะห่างเท่าๆกันทั้งสองด้าน อยู่ที่ 2.415 ms ดังแสดงลักษณะสัญญาณในรูปต่อไปนี้



รูปที่ 4.18 สัญญาณขับเคลื่อนมอสเฟสทั้งด้านบน (PWM_1H) และด้านล่าง (PWM_G1L)

4.5.6 สัญญาณการขับนำสวิตช์วงจรมอสเฟต

ในรูปที่ 4.19 แสดงสัญญาณขับนำสวิตช์มอสเฟส โดยรับสัญญาณพีดับบิวเอ็มมาจากไมโครคอนโทรลเลอร์ระดับแรงดัน 5 โวลต์ ทำการยกระดับแรงดันด้วยไอซี IR2101 โดยมีแหล่งจ่าย Vcc สำหรับยกระดับแรงดัน 12 โวลต์ หากพิจารณาทางด้านบน (High side) จะถูกยกระดับแรงดันจากตัวเก็บประจุทอสแตร์ปให้มีสัญญาณขับนำสวิตช์สูงขึ้นถึง 12 โวลต์เมื่อเทียบกับขาซอสของมอสเฟสด้านบน (Source high side) โดยมีไดโอดเบอร์ 1N4007 เป็นตัวป้องกันไม่ให้เกิดกระแสไหลกลับเข้าแหล่งจ่าย ส่วนในกรณีการขับเกตทางด้านล่าง (Low side) สัญญาณขับนำสวิตช์จะยกระดับแรงดันเพียง 12 โวลต์ เมื่อเทียบกับขาซอสที่ต่อกับกราวด์ของระบบ (Ground) โดยจะแสดงลักษณะสัญญาณสัญญาณขับนำสวิตช์ทั้งด้านบนและล่าง ดังรูปต่อไปนี้



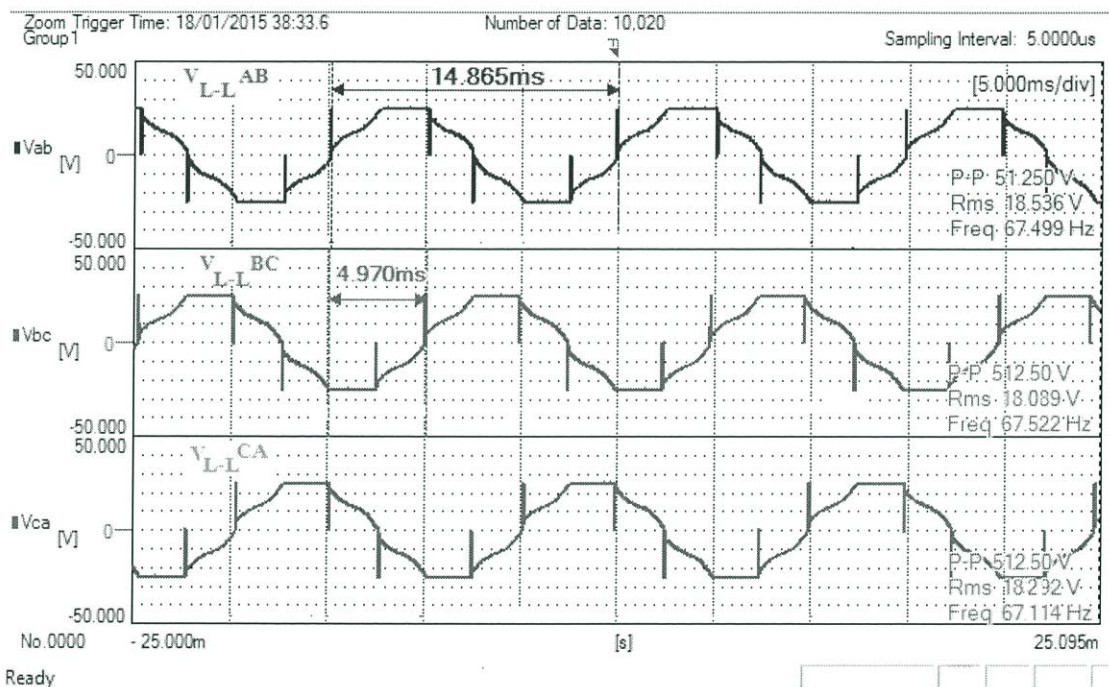
รูปที่ 4.19 สัญญาณการขับนำสวิตช์มอสเฟสด้านบนและด้านล่างของวงจรมอสเฟต

4.6 ผลการขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบปราศจากตัวตรวจจับ

ผลการขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านด้วยวิธีการตรวจจับสัญญาณผ่านศูนย์แทนวิธีการตรวจจับตำแหน่งขั้วแม่เหล็กบนโรเตอร์ จะแสดงผลการทดลองในส่วนของลักษณะสัญญาณแรงเคลื่อนไฟฟ้าระหว่างขั้วมอเตอร์ทั้งสามเฟส เปรียบเทียบแรงเคลื่อนไฟฟ้าของมอเตอร์ ความผิดเพี้ยนของแรงดันฮาร์มอนิก การทดสอบภาระทางกลแบบต่อเนื่องและแบบทันทีทันใด เปรียบเทียบประสิทธิภาพของการควบคุมทั้งสองวิธี โดยใช้อุปกรณ์ตรวจจับตำแหน่งและปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่ง ผลการทดลองดังต่อไปนี้

4.6.1 สัญญาณแรงเคลื่อนไฟฟ้าระหว่างขั้วมอเตอร์ทั้งสามเฟส

ในรูปที่ 4.20 แรงเคลื่อนไฟฟ้าบริเวณขั้วสายของมอเตอร์ทั้งสามเฟสที่ถูกต้องอยู่แบบสตาร์จะมีทั้งหมดสามขั้วสายคือ A, B และ C โดยนิวตรอนจะต่ออยู่ภายในมอเตอร์ไม่สามารถวัดค่าได้ ดังนั้นจึงวัดระหว่างขั้วแรงดัน V_{ab} V_{bc} และ V_{ca} โดยสัญญาณที่ได้จะมีลักษณะสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal waveform) มีคาบเวลาเท่ากับ 14.86 ms แต่ละเฟสจะเลื่อนกันไป 4.97 ms จะมีค่าเท่ากับ 120 องศาทางไฟฟ้าแรงดันยอดถึงยอด (V_{p-p}) เท่ากับ 50 โวลต์ ค่าแรงดันอาร์เอ็มเอส (V_{rms}) เท่ากับ 18.53 โวลต์ ความถี่มูลฐาน (f_0) เท่ากับ 67.5 Hz ดังแสดงลักษณะสัญญาณในรูปต่อไปนี้



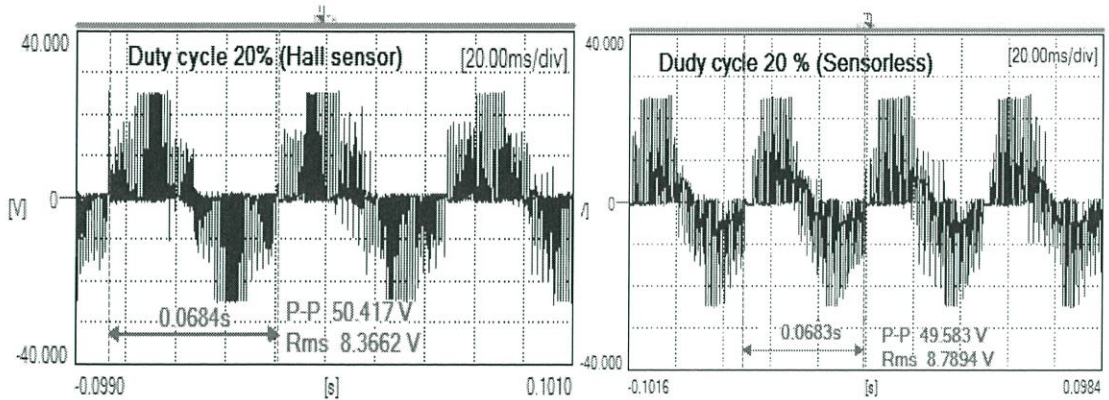
รูปที่ 4.20 แรงเคลื่อนไฟฟ้าระหว่างขั้วมอเตอร์ทั้งสามเฟส

4.6.2 เปรียบเทียบสัญญาณแรงเคลื่อนไฟฟ้าระหว่างมีตัวตรวจจับตำแหน่งและปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์

การขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านด้วยวิธีการตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์และปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่ง ด้วยวิธีที่แตกต่างกันนั้น จะแสดงผลของสัญญาณแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ได้จากการทดลองทั้งสองวิธี โดยเปรียบเทียบกันในแต่ละช่วงของดิวิตีไซเคิล 20, 40, 60, 80, และ 100 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.21 ถึง 4.25 โดยทำการวัดแรงดันระหว่างขั้วของมอเตอร์ V_{ab} ดังแสดงลักษณะสัญญาณดังรูปต่อไปนี้

4.6.2.1 แรงเคลื่อนไฟฟ้าระหว่างขั้วมอเตอร์ A-B ช่วงดิวตี้ไซเคิล 20 %

ในรูปที่ 4.21 (ก) แรงเคลื่อนไฟฟ้าแบบมีตัวตรวจจับ และ (ข) แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ปราศจากตัวตรวจจับ จะมีคาบเวลาของแรงดันอยู่ที่ 0.0684 และ 0.0683 วินาที ตามลำดับ แรงดันอาร์เอ็มเอส (V_{rms}) เท่ากับ 8.36 และ 8.78 โวลต์ ตามลำดับ ความเร็วอยู่ในช่วง 150 รอบต่อนาที จากการทดลองพบว่าสัญญาณทั้งสองวิธีมีลักษณะค่าทางไฟฟ้าใกล้เคียงกัน มีความแตกต่างค่า แรงดันอาร์เอ็มเอสอยู่ที่ 5 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงลักษณะสัญญาณเปรียบเทียบในรูปต่อไปนี้



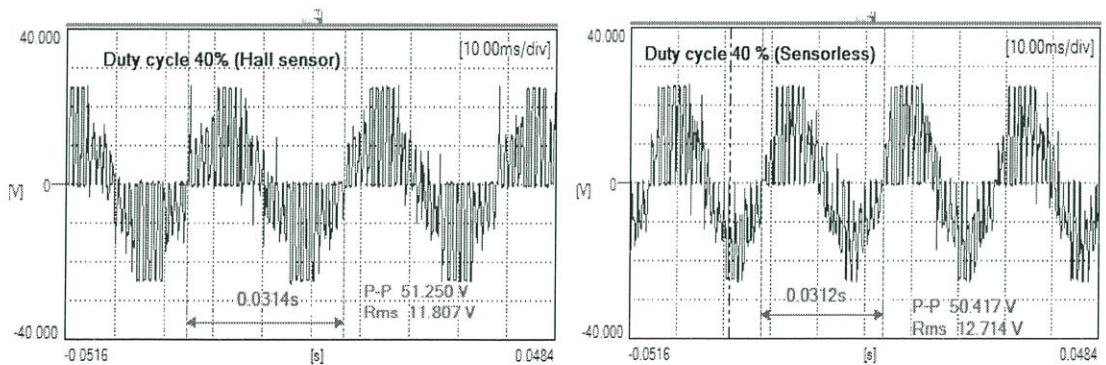
(ก) มีตัวตรวจจับตำแหน่ง

(ข) ปราศจากตัวตรวจจับ

รูปที่ 4.21 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วมอเตอร์เฟส A , B ที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที

4.6.2.2 แรงเคลื่อนไฟฟ้าระหว่างขั้วมอเตอร์ A-B ช่วงดิวตี้ไซเคิล 40 %

ในรูปที่ 4.22 (ก) แรงเคลื่อนไฟฟ้าแบบมีตัวตรวจจับ และ (ข) แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ปราศจากตัวตรวจจับ จะมีคาบเวลาของแรงดัน ที่ 0.0314 และ 0.0312 วินาที ตามลำดับ แรงดัน อาร์เอ็มเอส (V_{rms}) เท่ากับ 11.80 และ 12.714 โวลต์ ตามลำดับ ความเร็วอยู่ในช่วง 320 รอบต่อนาที จากการทดลองพบว่าสัญญาณทั้งสองวิธีมีลักษณะค่าทางไฟฟ้าใกล้เคียงกัน มีความแตกต่างค่า แรงดันอาร์เอ็มเอสอยู่ที่ 7 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงลักษณะสัญญาณเปรียบเทียบในรูปต่อไปนี้



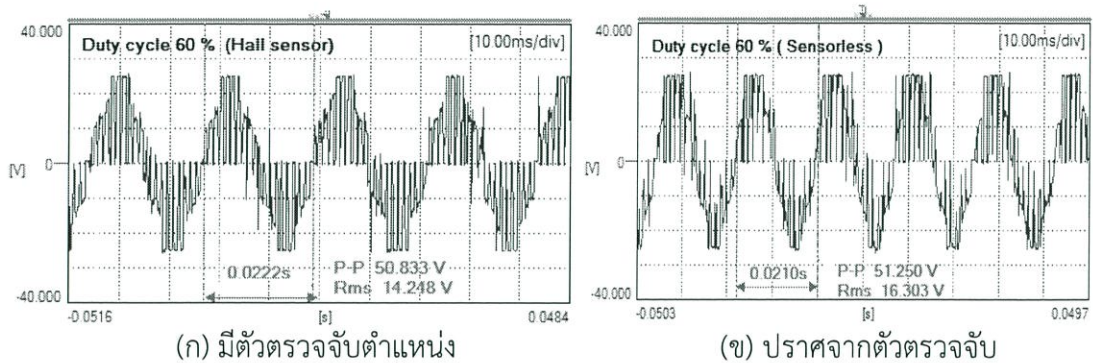
(ก) มีตัวตรวจจับตำแหน่ง

(ข) ปราศจากตัวตรวจจับ

รูปที่ 4.22 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วมอเตอร์เฟส A, B ที่ความเร็ว 320 รอบต่อนาที

4.6.2.3 แรงเคลื่อนไฟฟ้าระหว่างขั้วมอเตอร์ A-B ช่วงดิวตี้ไซเคิล 60 %

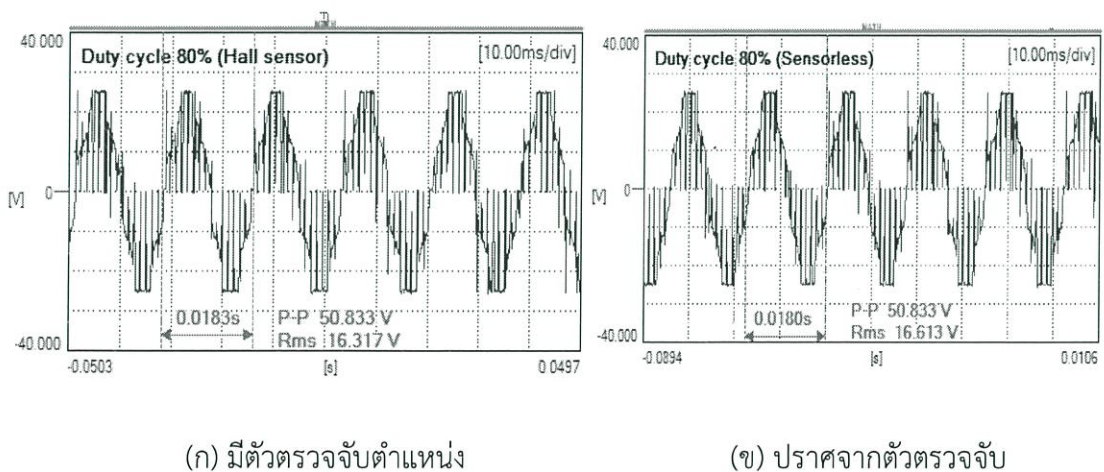
ในรูปที่ 4.23 (ก) แรงเคลื่อนไฟฟ้าแบบมีตัวตรวจจับ และ (ข) แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ปราศจากตัวตรวจจับ จะมีคาบเวลาของแรงดัน ที่ 0.0222 และ 0.0210 วินาที ตามลำดับ แรงดันอาร์เอ็มเอส (V_{rms}) เท่ากับ 14.248 และ 16.303 โวลต์ ตามลำดับ ความเร็วอยู่ในช่วง 450 รอบต่อนาที จากการทดลองพบว่าสัญญาณทั้งสองวิธีมีลักษณะค่าทางไฟฟ้าใกล้เคียงกัน มีความแตกต่างค่าแรงดันอาร์เอ็มเอส อยู่ที่ 12 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงลักษณะสัญญาณเปรียบเทียบในรูปต่อไปนี้



รูปที่ 4.23 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วมอเตอร์เฟส A, B ที่ความเร็ว 450 รอบต่อนาที

4.6.2.4 แรงเคลื่อนไฟฟ้าระหว่างขั้วมอเตอร์ A-B ช่วงดิวตี้ไซเคิล 80 %

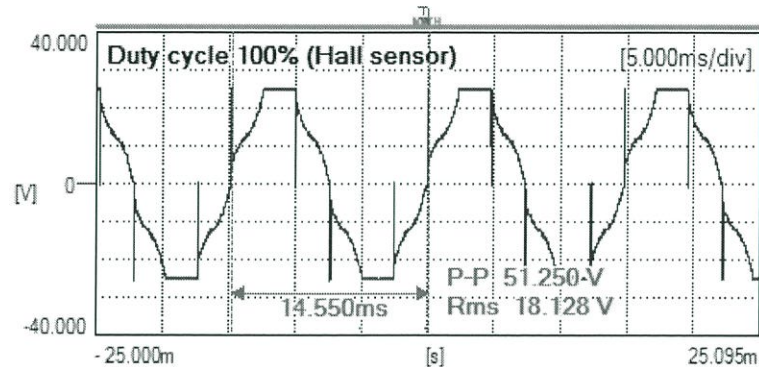
ในรูปที่ 4.24 (ก) แรงเคลื่อนไฟฟ้าแบบมีตัวตรวจจับ และ (ข) แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ปราศจากตัวตรวจจับ จะมีคาบเวลาของแรงดัน ที่ 0.0183 และ 0.0180 วินาที ตามลำดับ แรงดันอาร์เอ็มเอส (V_{rms}) เท่ากับ 16.317 และ 16.613 โวลต์ ตามลำดับ ความเร็วอยู่ในช่วง 545 รอบต่อนาที จากการทดลองพบว่าสัญญาณทั้งสองวิธีมีลักษณะค่าทางไฟฟ้าใกล้เคียงกัน มีความแตกต่างค่าแรงดันอาร์เอ็มเอสอยู่ที่ 8 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงลักษณะสัญญาณเปรียบเทียบในรูปต่อไปนี้



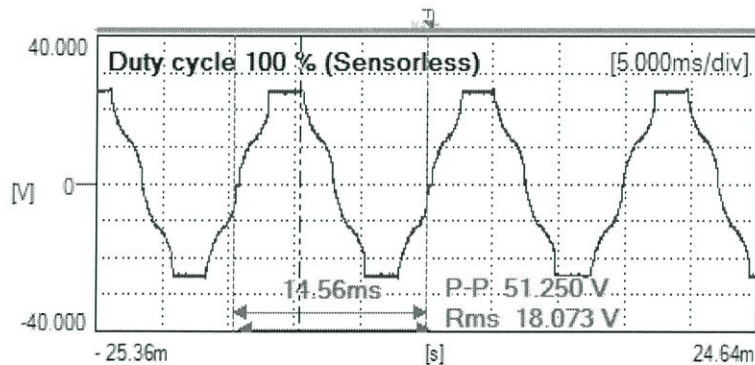
รูปที่ 4.24 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วมอเตอร์เฟส A, B ที่ความเร็ว 545 รอบต่อนาที

4.6.2.5 แรงเคลื่อนไฟฟ้าระหว่างขั้วมอเตอร์ A-B ช่วงดิวิตีไซเคิล 100 %

ในรูปที่ 4.25 (ก) แรงเคลื่อนไฟฟ้าแบบมีตัวตรวจจับ และ (ข) แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ปราศจากตัวตรวจจับจะมีคาบเวลาของแรงดัน ที่ 0.0183 และ 0.0180 วินาที ตามลำดับ แรงดันอาร์เอ็มเอส (V_{rms}) เท่ากับ 14.550 และ 14.56 โวลต์ ตามลำดับ ความเร็วอยู่ในช่วง 690 รอบต่อนาที จากการทดลองพบว่าสัญญาณทั้งสองวิธีมีลักษณะค่าทางไฟฟ้าใกล้เคียงกัน มีความแตกต่างค่าแรงดันอาร์เอ็มเอสอยู่ที่ 1 เปอร์เซ็นต์ โดยสัญญาณสไปค์ที่เกิดจากการสวิตซ์ซิงของแบบ (ข) ได้ลดลงไปดังแสดงลักษณะสัญญาณเปรียบเทียบในรูปต่อไปนี้



(ก) มีตัวตรวจจับตำแหน่ง



(ข) ปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่ง

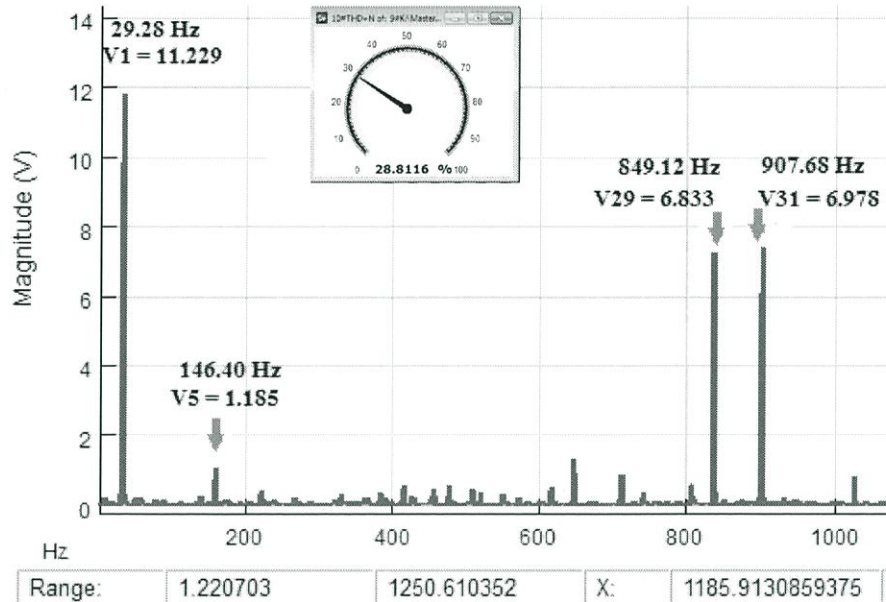
รูปที่ 4.25 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วมอเตอร์เฟส A, B ที่ความเร็ว 690 รอบต่อนาที

4.6.3 เปรียบเทียบฮาร์มอนิกของแรงดันไฟฟ้าระหว่างมีตัวตรวจจับตำแหน่งและปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์

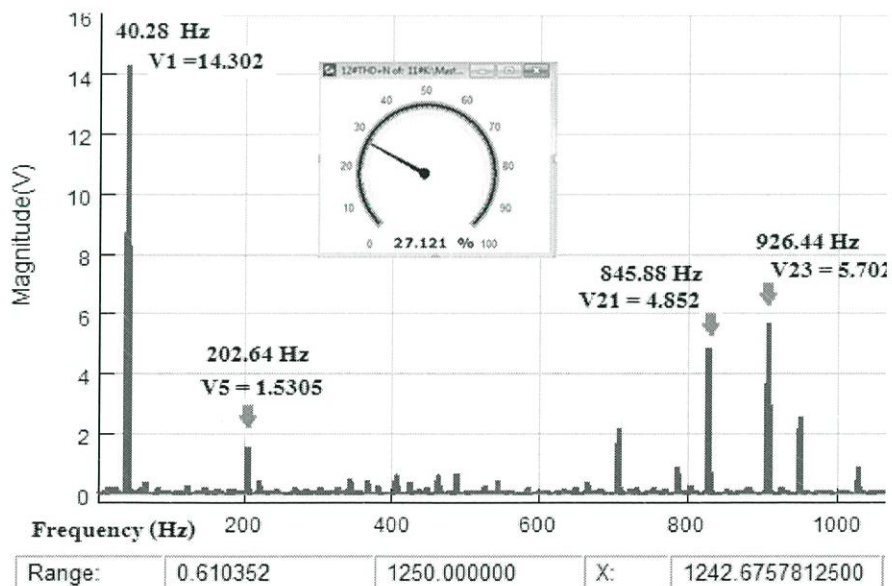
ผลการขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านด้วยอินเวอร์เตอร์สามเฟส จากการขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านด้วยวิธีตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์และปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่ง ด้วยวิธีที่แตกต่างกันนั้น จะแสดงผลของฮาร์มอนิกสเปกตรัมของสัญญาณแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ได้จากการทดลองทั้งสองวิธี โดยเปรียบเทียบกันในแต่ละช่วงของดิวิตีไซเคิล 40, 60, 80, และ 100 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.26 ถึง 4.29 โดยทำการวัดแรงดันระหว่างขั้วของมอเตอร์ V_{ab} แสดงลักษณะสัญญาณฮาร์มอนิกสเปกตรัมได้ดังต่อไปนี้

4.6.3.1 ฮาร์มอนิกสเปกตรัมของแรงเคลื่อนไฟฟ้า ช่วงดิวิตีไซเคิล 40 %

ในรูปที่ 4.26 (ก) ฮาร์มอนิกสเปกตรัมแบบมีตัวตรวจจับ และ (ข) ฮาร์มอนิกสเปกตรัมที่ปราศจากตัวตรวจจับ ตัวอย่างลำดับที่ 5 สเปกตรัมความถี่ 146.40 Hz , 202.64 Hz มีค่าขนาดแรงดันอยู่ที่ 1.185 V , 1.530 V ฮาร์มอนิกแรงเคลื่อนไฟฟ้า (THD_v) 28.81 % และ 27.12 % โดยแสดงได้ดังรูป (ก) และ (ข) ตามลำดับ



(ก) วิธีการควบคุมแบบตัวตรวจจับ

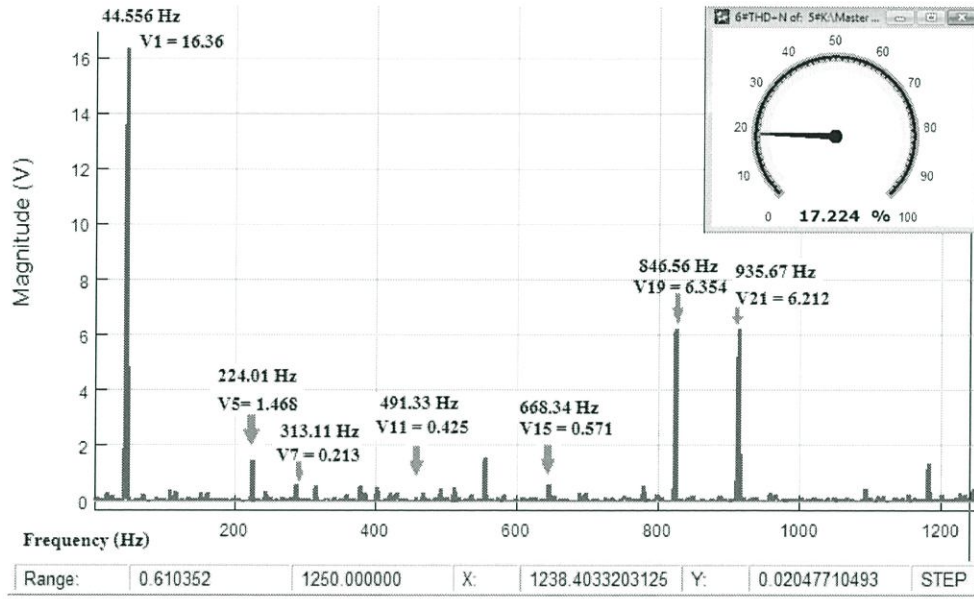


(ข) ปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่ง

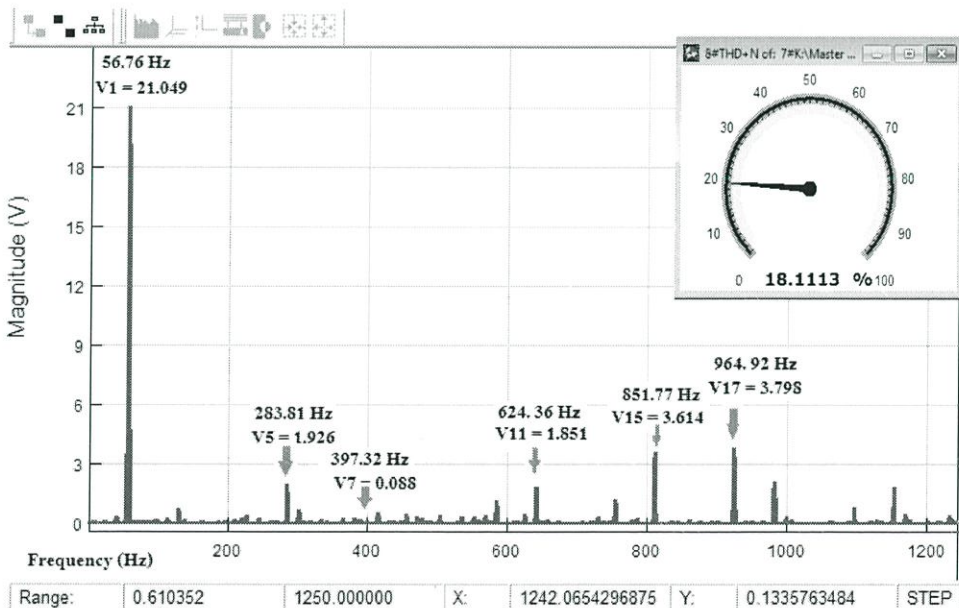
รูปที่ 4.26 เปรียบเทียบสเปกตรัมของแรงเคลื่อนไฟฟ้าและค่าความผิดเพี้ยนรูปคลื่นไซน์ ที่ช่วงดิวิตีไซเคิล 40 %

4.6.3.2 ฮาร์มอนิกสเปกตรัมของแรงเคลื่อนไฟฟ้า ช่วงดิวิตีเซเคิล 60 %

ในรูปที่ 4.27 (ก) ฮาร์มอนิกสเปกตรัมแบบมีตัวตรวจจับ และ (ข) ฮาร์มอนิกสเปกตรัมที่ปราศจากตัวตรวจจับ ตัวอย่างลำดับที่ 5 สเปกตรัมความถี่ 224.01 Hz , 283.81Hz มีค่าขนาดแรงดันอยู่ที่ 1.468 V , 1.926 V ฮาร์มอนิกแรงเคลื่อนไฟฟ้า (THD_v) 17.224 % และ 18.113 % โดยแสดงได้ดังรูป (ก) และ (ข) ตามลำดับ



(ก) วิธีการควบคุมแบบตัวตรวจจับ

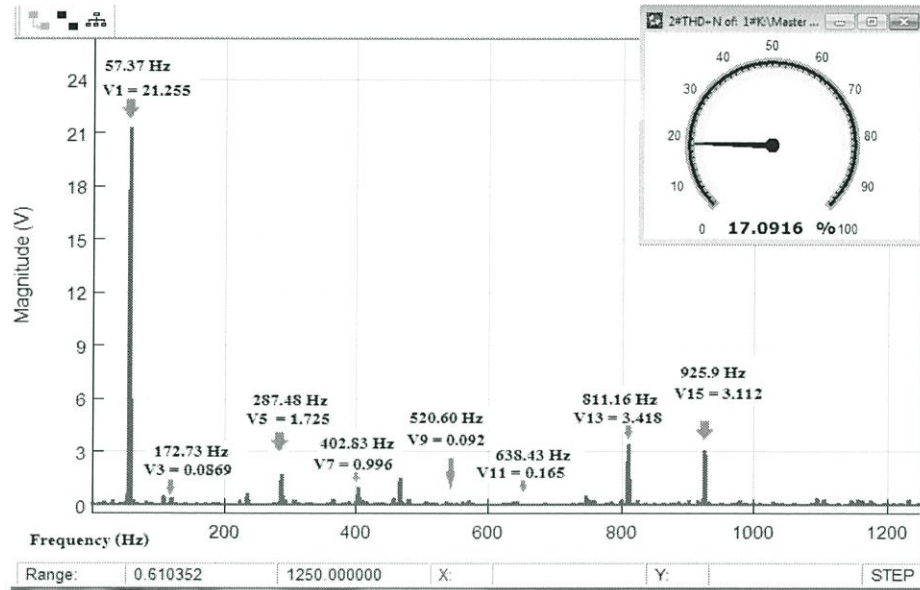


(ข) ปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่ง

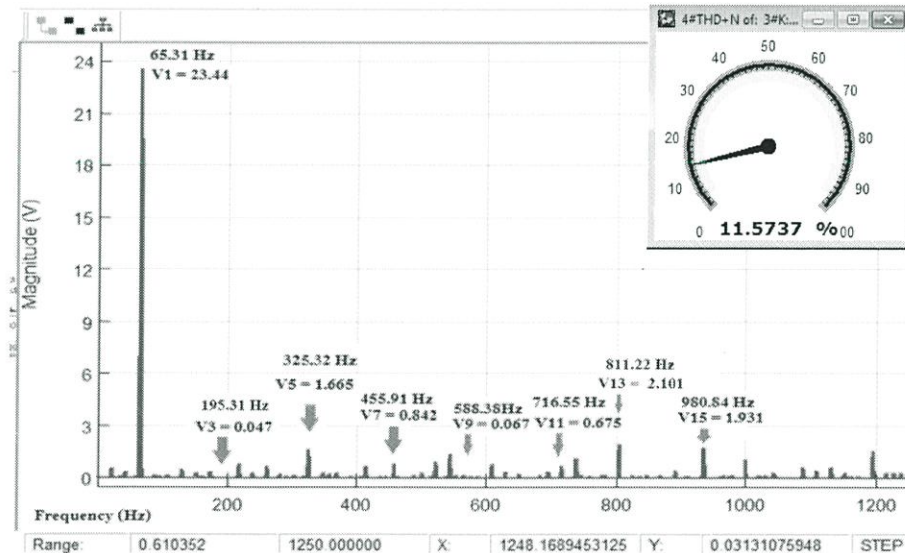
รูปที่ 4.27 เปรียบเทียบสเปกตรัมของแรงเคลื่อนไฟฟ้าและค่าความผิดเพี้ยนรูปคลื่นไซน์ ที่ช่วงดิวิตีเซเคิล 60 %

4.6.3.3 ฮาร์มอนิกสเปกตรัมของแรงเคลื่อนไฟฟ้า ช่วงดิวิตีเซเคิล 80 %

ในรูปที่ 4.28 (ก) ฮาร์มอนิกสเปกตรัมแบบมีตัวตรวจจับ และ (ข) ฮาร์มอนิกสเปกตรัมที่ปราศจากตัวตรวจจับ ตัวอย่างลำดับที่ 5 สเปกตรัมความถี่ 287.48 Hz , 325.32 Hz มีค่าขนาดแรงดันอยู่ที่ 1.725 V , 1.665 V ฮาร์มอนิกแรงเคลื่อนไฟฟ้า (THD_v) 17.09 % และ 11.57 % โดยแสดงได้ดังรูป (ก) และ (ข) ตามลำดับ



(ก) วิธีการควบคุมแบบตัวตรวจจับ

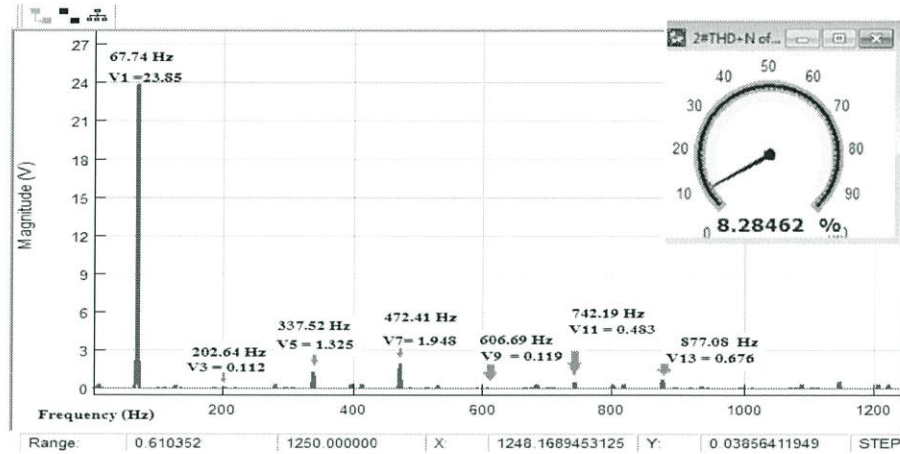


(ข) ปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่ง

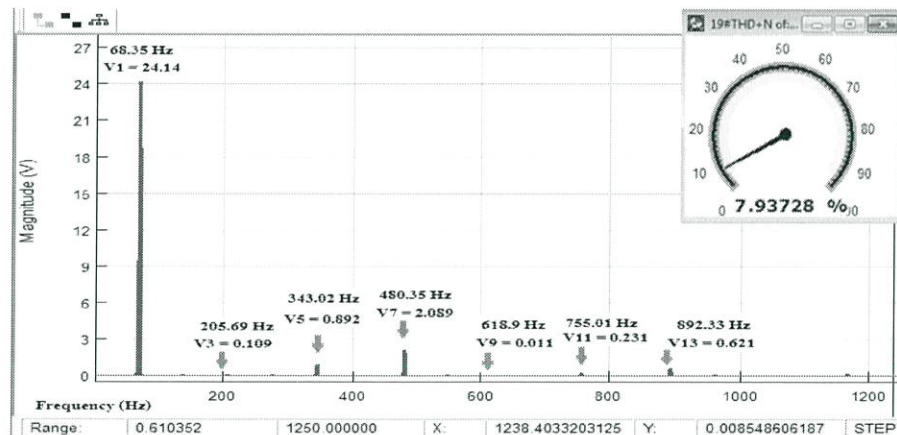
รูปที่ 4.28 เปรียบเทียบสเปกตรัมของแรงเคลื่อนไฟฟ้าและค่าความผิดเพี้ยนรูปคลื่นไซน์ ที่ช่วงดิวิตีเซเคิล 80 %

4.6.3.4 ฮาร์มอนิกสเปกตรัมของแรงเคลื่อนไฟฟ้า ช่วงดิวิตี่ไซเคิล 100 %

ในรูปที่ 4.29 (ก) ฮาร์มอนิกสเปกตรัมแบบมีตัวตรวจจับ และ (ข) ฮาร์มอนิกสเปกตรัมที่ปราศจากตัวตรวจจับ ตัวอย่างลำดับที่ 5 สเปกตรัมความถี่ 337.52 Hz , 343.02 Hz มีค่าขนาดแรงดันอยู่ที่ 1.235 V , 0.892 V ฮาร์มอนิกแรงเคลื่อนไฟฟ้า (THD_V) 8.284 % และ 7.937 % โดยแสดงได้ดังรูป (ก) และ (ข) ตามลำดับ



(ก) วิธีการควบคุมแบบตัวตรวจจับ



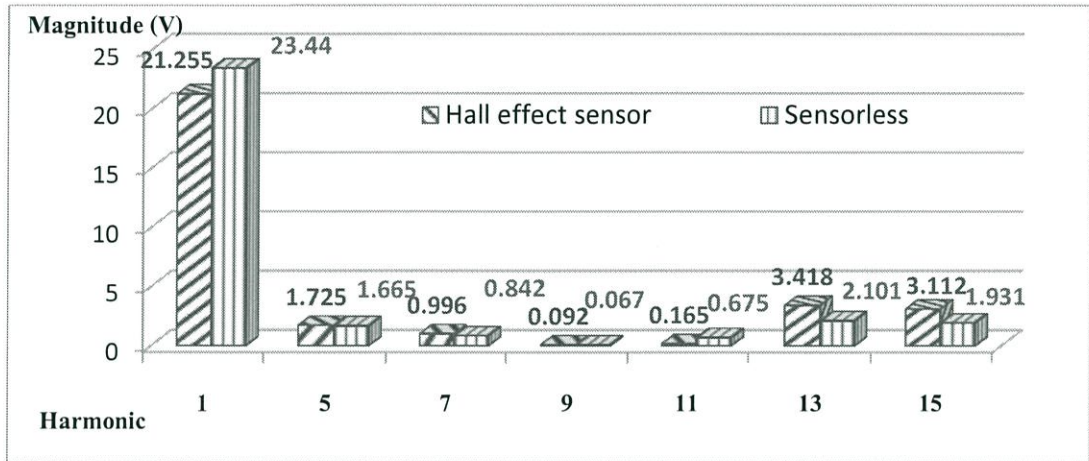
(ข) ปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่ง

รูปที่ 4.29 เปรียบเทียบสเปกตรัมของแรงเคลื่อนไฟฟ้าและค่าความผิดเพี้ยนรูปคลื่นในช่วงดิวิตี่ไซเคิล 100 %

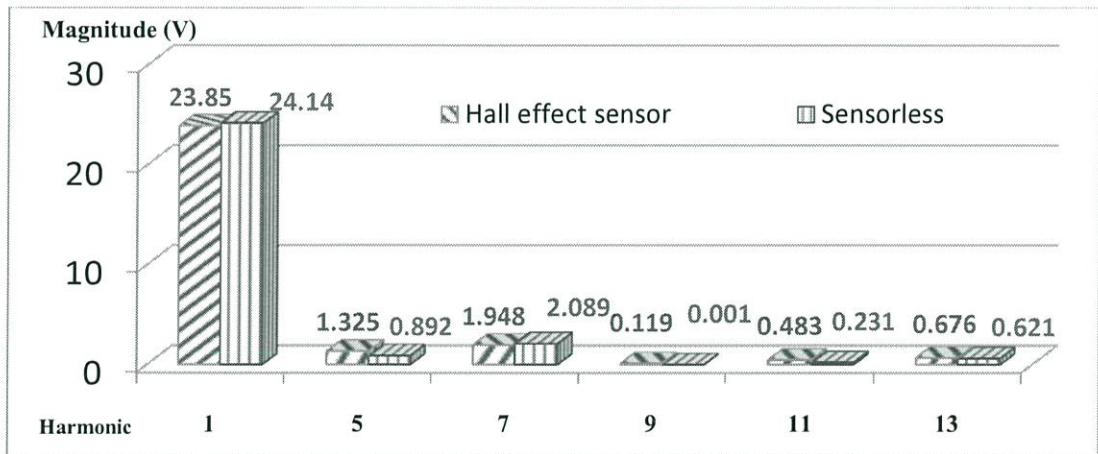
จากผลการทดลองจะพบว่าลักษณะสเปกตรัมของแรงเคลื่อนไฟฟ้าในแต่ละช่วงดิวิตี่ไซเคิลจะมีขนาดที่ใกล้เคียงกัน แสดงว่าลักษณะของแรงเคลื่อนไฟฟ้าแบบวิธีปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งมีลักษณะที่ถูกต้องเช่นเดียวกับแบบวิธีการใช้ตัวตรวจจับตำแหน่งและเมื่อพิจารณาการปรับช่วงดิวิตี่ไซเคิลเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ขนาดของสเปกตรัมของในลำดับเช่น 9 , 11 ,13, 15 มีขนาดลดลงและหายไป ในลำดับที่มากกว่า 15 ดังรูปที่ 4.30 ซึ่งส่งผลให้ค่าความผิดเพี้ยนรูปคลื่นมีขนาดลดลงตามไปด้วย

4.6.3.5 เปรียบเทียบความแตกต่างสเปกตรัมแรงเคลื่อนไฟฟ้า

ในรูปที่ 4.30 เปรียบเทียบความแตกต่างสเปกตรัมแรงเคลื่อนไฟฟ้าแบบมีตัวตรวจจับและปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่ง ที่ความถี่สเปกตรัมลำดับ 5, 7, 9, 11, 13 และ 15 ตามลำดับ พิจารณาช่วงดิฟฟ์ไซเคิล 80 % และ 100 % ดังรูป (ก) และ (ข) ตามลำดับ พบว่าเมื่อปรับช่วงดิฟฟ์ไซเคิลเพิ่มขึ้นจะทำให้ลำดับฮาร์โมนิกลำดับสูงลดลงไป



(ก)



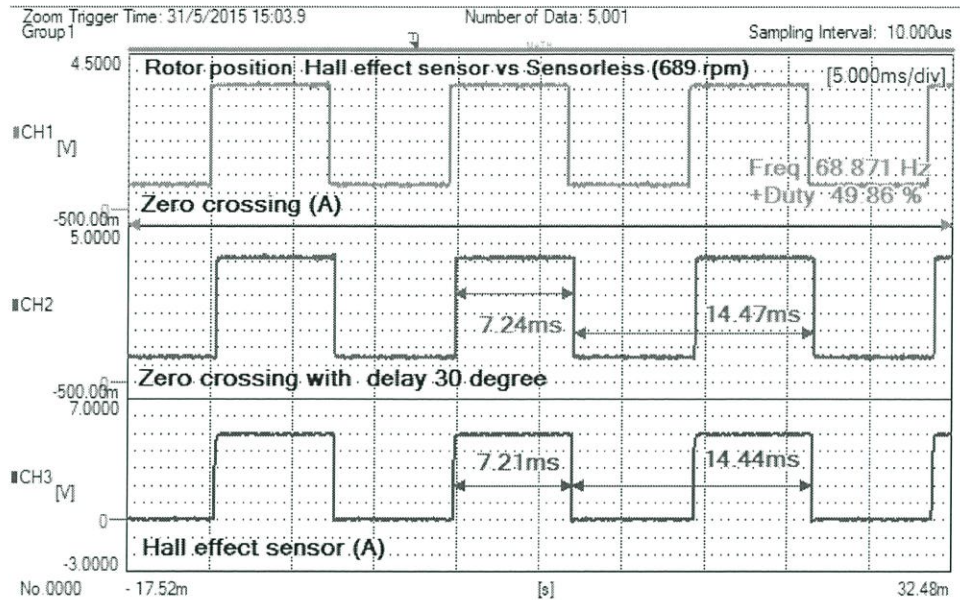
(ข)

รูปที่ 4.30 เปรียบเทียบสเปกตรัมของแรงเคลื่อนไฟฟ้าระหว่างวิธีการควบคุมแบบตัวตรวจจับและปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งที่ช่วงดิฟฟ์ไซเคิล (ก) 80 % และ (ข) 100 %

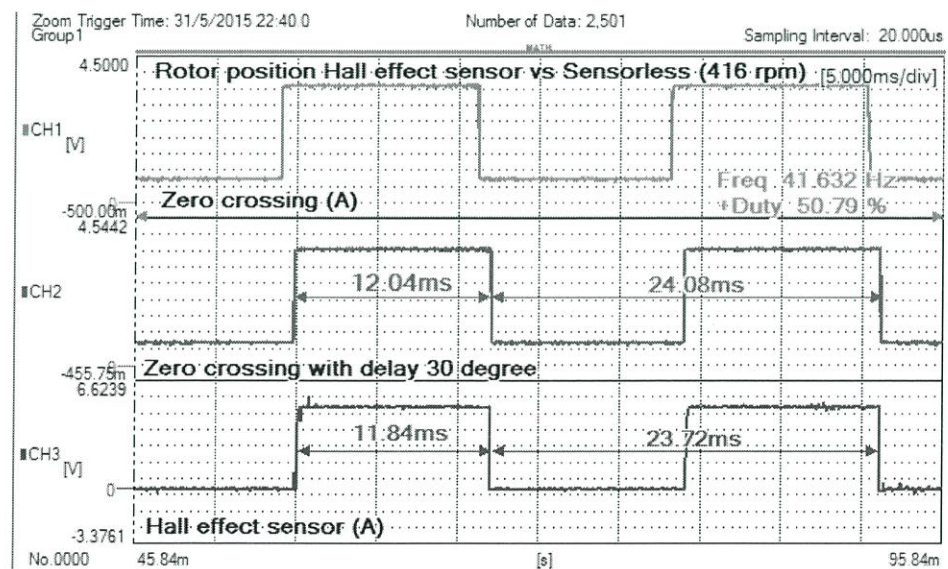
ในรูปที่ 4.30 เทคนิคการขับเคลื่อนแบบ Hall effect sensor และเทคนิควิธีแบบ Sensorless จะพบว่าที่ความถี่ฮาร์โมนิกลำดับที่ 1 วิธีปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งจะมีสเปกตรัมแรงเคลื่อนไฟฟ้า 24.14 โวลต์ ใกล้เคียงกันมากวิธีใช้ตัวตรวจจับตำแหน่ง 23.85 โวลต์ และในลำดับฮาร์โมนิก 5, 7, 9, 11, 13 และ 15 มีค่าที่ไม่แตกต่างกัน ผลของสัญญาณแรงเคลื่อนไฟฟ้ามีลักษณะที่เหมือนกันทั้งสองเทคนิคการควบคุม

4.6.4 เปรียบเทียบความค่าความผิดพลาดการตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์

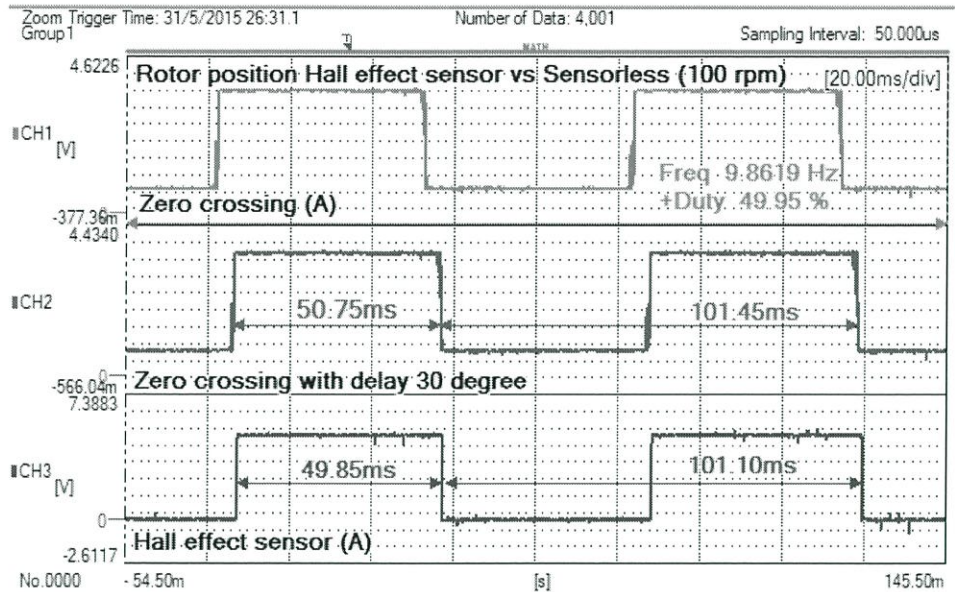
จากผลการทดลองทำการวัดค่าความถูกต้องของตำแหน่งตรวจจับขั้วแม่เหล็กจริงเทียบกับสัญญาณตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับที่ตัดผ่านศูนย์จากอัลกอริทึมที่ใช้ควบคุม (สัญญาณเสมือน) ที่ความเร็วรอบ 689, 416 และ 100 รอบต่อนาที โดยแสดงได้ดังรูป 4.31 ถึง 4.33 และตาราง 4.3



รูปที่ 4.31 เปรียบเทียบสัญญาณตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์กับสัญญาณเสมือนจากสัญญาณผ่านศูนย์ที่ความเร็ว 689 รอบต่อนาที



รูปที่ 4.32 เปรียบเทียบสัญญาณตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์กับสัญญาณเสมือนจากสัญญาณผ่านศูนย์ที่ความเร็ว 416 รอบต่อนาที

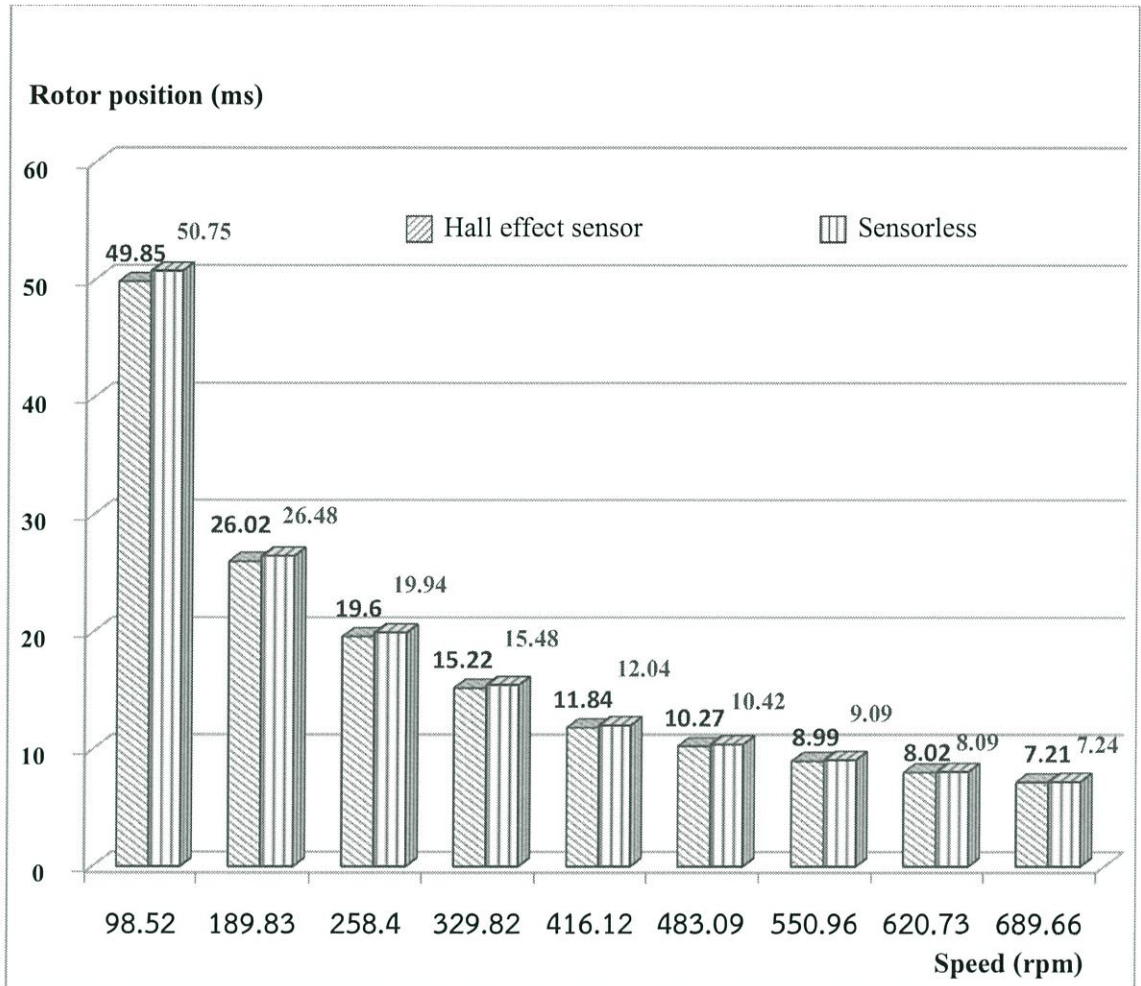


รูปที่ 4.33 เปรียบเทียบสัญญาณตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์กับสัญญาณเสมือนจากสัญญาณผ่านศูนย์ ที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที

ตารางที่ 4.3 ผลทดสอบเปรียบเทียบคาบเวลาความผิดพลาดระหว่างวิธีการตรวจจับตำแหน่ง และปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์

Speed (rpm)	Period(ms)	T _{on} hall(ms)	T _{on} Zero (ms)	%error
689.66	14.44	7.21	7.24	0.42
620.73	16.11	8.02	8.09	0.90
550.96	18.15	8.99	9.09	1.20
483.09	20.70	10.27	10.42	1.49
416.12	23.72	11.84	12.04	1.68
329.82	30.32	15.22	15.48	1.72
258.40	38.70	19.60	19.94	1.74
189.83	52.68	26.02	26.48	1.78
98.52	101.50	49.85	50.75	1.80

จากตารางที่ 4.3 ผลการทดลองเปรียบเทียบการตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์จริงเทียบกับการตรวจจับสัญญาณผ่านศูนย์จากการหน่วงเวลา 30 องศา จะได้สัญญาณตรวจจับตำแหน่งเสมือนเทียบกับตำแหน่งตรวจจับขั้วแม่เหล็กจริง โดยในแต่ละระดับความเร็วมีค่าความผิดพลาด 0.42 เปอร์เซ็นต์ที่ความเร็วสูง (698 รอบต่อนาที) และจะมีความผิดพลาดเพิ่มขึ้น 1.8 เปอร์เซ็นต์ที่ความเร็วต่ำ (98 รอบต่อนาที)

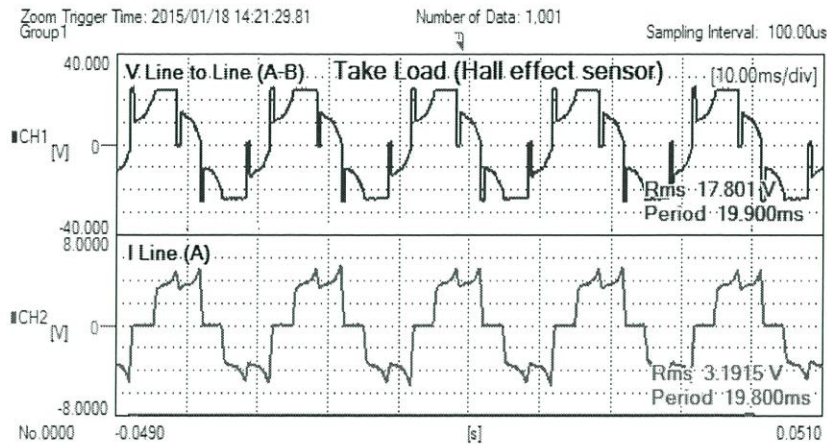


รูปที่ 4.34 เปรียบเทียบสัญญาณตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์กับสัญญาณตรวจจับเสมือนจากสัญญาณผ่านศูนย์ ในแต่ละย่านความเร็วรอบ

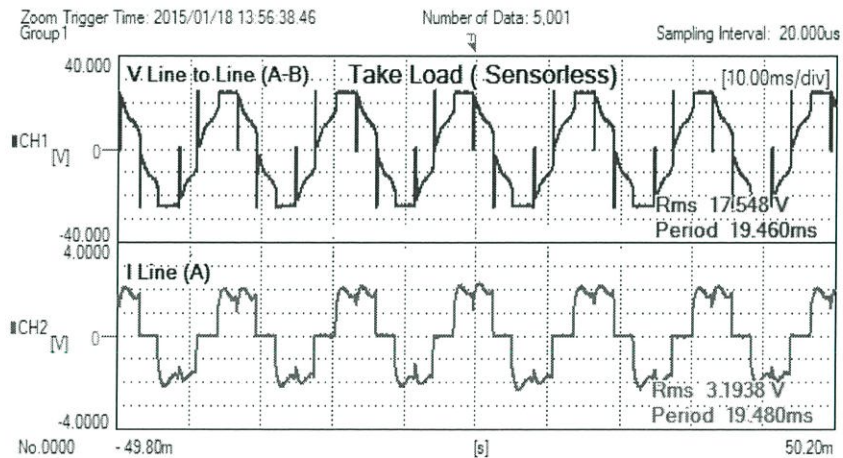
ในรูปที่ 4.34 ทำการเปรียบเทียบการตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ทั้งสองวิธีระหว่างการใช้ตัวตรวจจับและปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งในแต่ละย่านความเร็วรอบพบว่าที่ย่านความเร็วต่ำจะมีค่าความผิดพลาดมากกว่าย่านความเร็วสูง เนื่องการตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับจะมีขนาดแอมพลิจูดที่มากและสามารถตรวจจับได้แม่นยำกว่าในย่านความเร็วสูง แต่ในทางกลับกันย่านความเร็วต่ำจะมีขนาดของแอมพลิจูดที่น้อยกว่า ทำให้ความแม่นยำในการตรวจจับมีความคลาดเคลื่อนประมาณ 1.8 เปอร์เซ็นต์ที่ความเร็วรอบ 98 รอบต่อนาที ส่วนย่านความเร็วกลาง 416 รอบต่อนาที มีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ประมาณ 1.68 เปอร์เซ็นต์ และย่านความเร็วสูง 689 รอบต่อนาที มีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ประมาณ 0.42 เปอร์เซ็นต์

4.6.5 เปรียบเทียบการทดสอบภาระทางกลระหว่างมีตัวตรวจจับและปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่ง

ทดสอบภาระทางกลระหว่างใช้ตัวตรวจจับตำแหน่งและปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโดยทดสอบภาระทางกลแบบต่อเนื่อง ดังรูปที่ 4.35 และทดสอบภาระทางกลแบบทันทีทันใด ดังรูปที่ 4.36



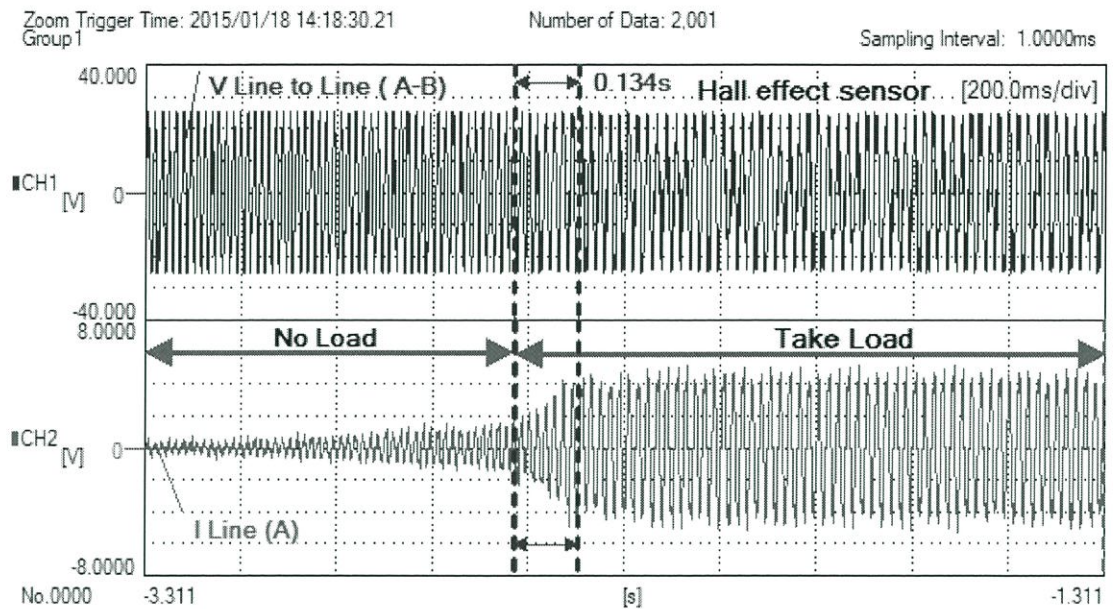
(ก) แบบตัวตรวจจับตำแหน่ง



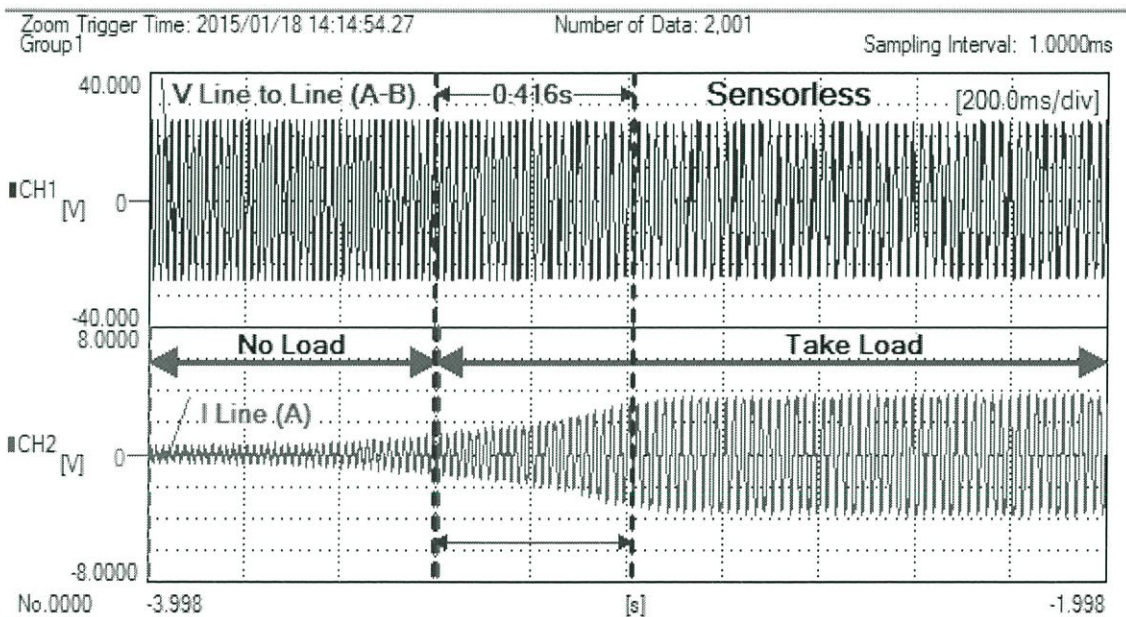
(ข) แบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่ง

รูปที่ 4.35 เปรียบเทียบแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าขณะทดสอบภาระทางกลแบบต่อเนื่อง

ในรูปที่ 4.34 (ก) แรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสแบบมีตัวตรวจจับ (ข) แรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสแบบปราศจากตัวตรวจจับทดสอบภาระทางกลแบบต่อเนื่องถ่วงน้ำหนัก 5 กิโลกรัมจะมีคาบเวลาของแรงดัน ที่ 0.0199 และ 0.01946 วินาที ตามลำดับ มีค่าแรงดันอาร์เอ็มเอส (V_{rms}) เท่ากับ 17.801 และ 17.548 โวลต์ ตามลำดับ กระแสมอเตอร์ มีค่า 3.1915 และ 3.1938 แอมป์ ตามลำดับ ความเร็วอยู่ในช่วง 505 รอบต่อนาที จากการทดลองพบว่าสัญญาณทั้งสองวิธีมีลักษณะค่าทางไฟฟ้าใกล้เคียงกัน



(ก) แบบตัวตรวจจับตำแหน่ง



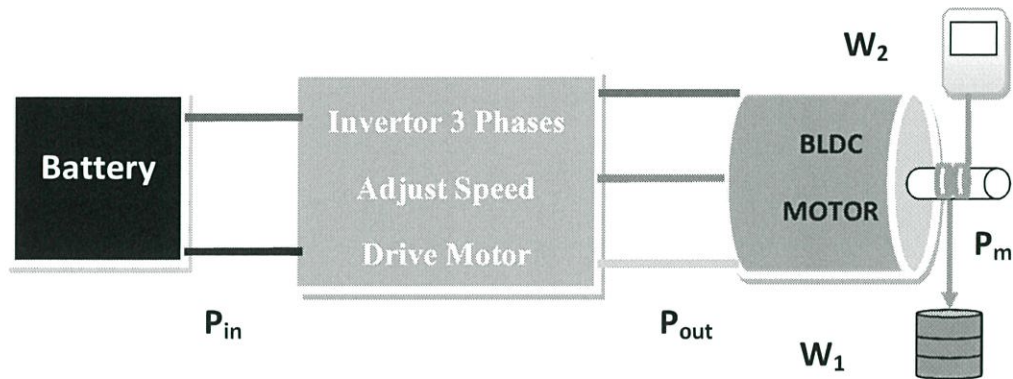
(ข) แบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่ง

รูปที่ 4.36 เปรียบเทียบแรงเคลื่อนและกระแสไฟฟ้าขณะทดสอบภาระทางกลแบบทันทีทันใด

ในรูปที่ 4.35 (ก) แรงเคลื่อนและกระแสไฟฟ้าแบบมีตัวตรวจจับ (ข) แรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสแบบปราศจากตัวตรวจจับ ทดสอบภาระทางกลแบบทันทีทันใดถ่วงน้ำหนัก 5 กิโลกรัม พบว่าค่าเวลาในช่วงใส่โหลดทันทีทันใด ด้วยวิธีการขับเคลื่อนแบบใช้ตัวตรวจจับตำแหน่งมีช่วงเวลากการตอบสนอง 0.134 วินาที น้อยกว่าวิธีขับเคลื่อนแบบปราศจากตัวตรวจจับใช้เวลา 0.416 วินาที

4.6.6 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการควบคุมแบบมีตัวตรวจจับตำแหน่งและปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์

ในรูปที่ 4.37 วิธีการทดสอบกำลังไฟฟ้าของการขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน ประกอบไปด้วย แบตเตอรี่ 24 โวลต์ ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน มอเตอร์ขนาดพิกัด 100 วัตต์ 24 โวลต์ ชุดตราซิ่งและลูกตุ้มถ่วงน้ำหนัก สำหรับวัดกำลังทางกลของมอเตอร์ (P_m) แสดงได้ดัง ไดอะแกรมต่อไปนี้



รูปที่ 4.37 ไดอะแกรมการทดสอบกำลังไฟฟ้าเพื่อใช้ในการคำนวณหาประสิทธิภาพ

จากไดอะแกรมการทดสอบภาระทางกลเพื่อหาประสิทธิภาพจากการคำนวณ และการตรวจวัดจาก เครื่องมือวัดในการหาค่ากำลังขาเข้า (P_{in}) และกำลังขาออกอินเวอร์เตอร์ (P_{out}) ในส่วนการหาค่า กำลังทางกลของมอเตอร์ (P_m) จะได้จากเครื่องมือวัดบางส่วน และการคำนวณโดยมีสมการที่เกี่ยวข้องดังนี้

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

เมื่อ	τ	คือ แรงบิดที่เพลามอเตอร์ (นิวตัน/เมตร)
	W_1	คือ มวลที่ใช้ถ่วง (กิโลกรัม)
	W_2	คือ มวลที่อ่านได้จากตาชั่ง (กิโลกรัม)
	r	คือ รัศมีของเพลามอเตอร์ (เมตร)

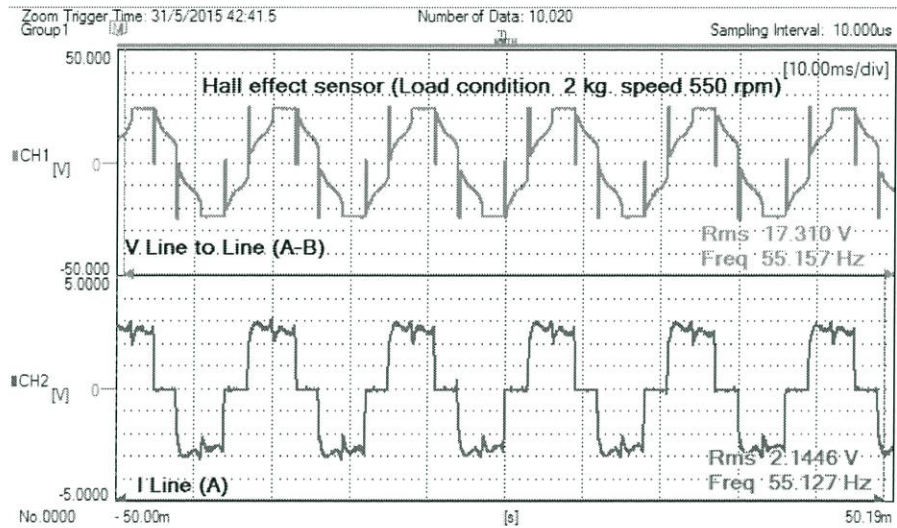
$$\omega = \frac{2\pi N_r}{60} \quad (4.2)$$

เมื่อ	ω	คือ ความเร็วเชิงมุมของเพลามอเตอร์ (องศา/นาที)
	N_r	คือ ความเร็วรอบของเพลามอเตอร์ (รอบ/นาที)

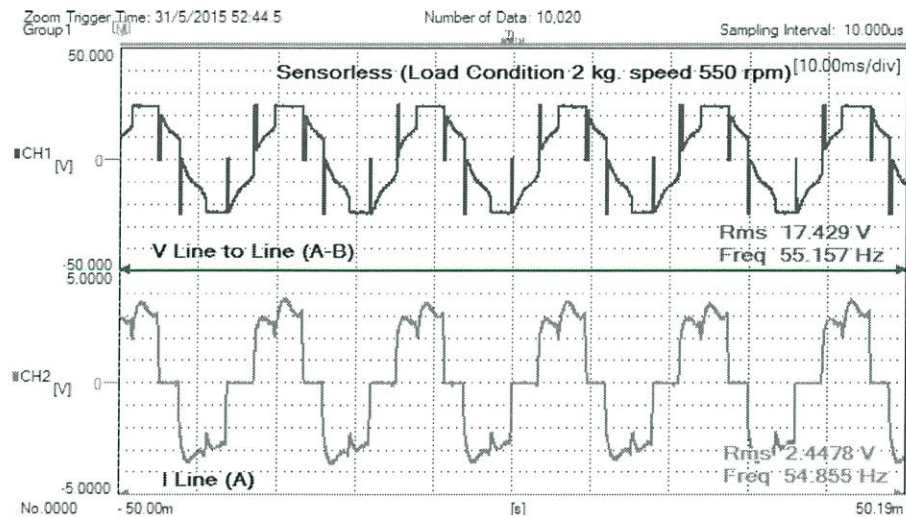
$$P = \tau\omega \quad (4.3)$$

เมื่อ	P_m	คือ กำลังที่เพลามอเตอร์ (วัตต์)
-------	-------	---------------------------------

จากผลการทดสอบเปรียบเทียบแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสดังรูปที่ 4.38 ด้วยวิธี (ก) ตัวตรวจจับตำแหน่งและ (ข) ปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่ง ทดสอบภาระทางกลถ่วงน้ำหนัก 2 กิโลกรัมคงที่ความเร็วรอบเท่ากับ 550 รอบต่อนาที ความถี่อยู่ที่ 55.15 เฮิรตซ์ พบว่าแรงดันอาร์เอ็มเอสทั้งสองวิธีมีค่าเท่ากับ 17.310 และ 17.429 โวลต์ ตามลำดับ กระแสมอเตอร์มีค่าเท่ากับ 2.145 และ 2.448 แอมป์ ตามลำดับโดยสัญญาณทั้งสองวิธีมีลักษณะค่าทางไฟฟ้าที่ใกล้เคียงกันดังแสดงลักษณะสัญญาณต่อไปนี้



(ก) ใช้ตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์



(ข) ปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์

รูปที่ 4.38 สัญญาณแรงเคลื่อนและกระแสไฟฟ้าระหว่างวิธีใช้ตัวตรวจจับตำแหน่งและปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งที่ภาระทางกล 2 กิโลกรัม ความเร็วคงที่ 550 รอบต่อนาที

ผลการทดสอบภาระทางกลที่ความเร็วรอบมอเตอร์เดียวกันจากรูปที่ 4.37 มีลักษณะสัญญาณของแรงเคลื่อนไฟฟ้าแบบสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal wave) และกระแสไฟฟ้าแบบกึ่งสี่เหลี่ยม (Quasi-Square Wave) มีขนาดที่เหมือนกันทั้งสองเทคนิคการขับเคลื่อน

4.6.6.1 ทดสอบภาระทางกล 1 ถึง 10 กิโลกรัม ด้วยวิธีตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์
ทดสอบภาระทางกลด้วยวิธีการลูกตุ้มน้ำหนัก 1, 2, 5, 7 และ 10 กิโลกรัม โดยคงที่ความเร็วรอบ
มอเตอร์ 550 รอบต่อนาที แสดงดังตารางที่ 4.4 และ 4.5

ตารางที่ 4.4 ผลทดสอบชุดควบคุมมอเตอร์แบบมีตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์

Load (kg)	V _{in} (V)	I _{in} (A)	P _{in} (W)	P _{out} (W)	V _{out} (V)	I _{out} (A)	(Pf.)	Speed (rpm)	THD _v (%)
1	24.9	2.46	61.25	48.00	17.8	1.78	0.98	550.81	26.5
2	24.9	3.36	83.66	61.00	17.31	2.15	0.98	551.60	29.1
5	24.9	4.2	104.58	78.00	17.16	2.82	0.98	550.41	33.2
7	24.9	4.48	111.55	85.00	17.55	3.37	0.98	550.52	34.6
10	24.9	5.56	138.66	115.00	17.41	4.19	0.98	550.20	36.1

ตารางที่ 4.5 ประสิทธิภาพชุดควบคุมขับเคลื่อนมอเตอร์และมอเตอร์แบบมีตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์

W ₁ (kg)	W ₂ (kg)	τ (N.m)	ω (rad)	f ₁ (Hz)	P _{in} (W)	P _{out} (W)	P _m (W)	(P _{out} /P _{in}) Drive (% η)	(P _m /P _{out}) Motor (% η)
2	0.72	0.72	57.76	55.16	83.66	61	41.49	72.91	68.02
5	3.33	0.94	57.63	55.04	104.58	78	53.95	74.58	69.16
7	5.14	1.05	57.65	55.05	111.55	85	60.71	76.20	71.42
10	7.18	1.59	57.62	55.02	138.66	115	91.89	82.94	79.90

จากตารางที่ 4.4 ถึง 4.5 แสดงผลการทดสอบชุดควบคุมมอเตอร์แบบมีตัวตรวจจับตำแหน่ง
โรเตอร์ และประสิทธิภาพของเทคนิคการควบคุมแบบ (Hall effect sensor) การทดสอบภาระทาง
กลด้วยลูกตุ้มน้ำหนัก 2 ถึง 10 kg ผลการทดลองพบว่าที่ ภาระทางกล 10kg มีกำลังอินพุท (P_{in})
138 วัตต์ กำลังเอาต์พุท (P_{out}) 115 วัตต์ ที่ความเร็วรอบ 550รอบต่อนาที ค่าความผิดเพี้ยน
รูปคลื่นไซน์ (%THD_v) 36.1 เปอร์เซนต์แรงบิดที่ (τ) 1.59 นิวตัน.เมตร ประสิทธิภาพชุดควบคุม
มอเตอร์ (% η drive) 82.94 เปอร์เซนต์และประสิทธิภาพมอเตอร์ (% η motor) 79.90 เปอร์เซนต์

4.6.6.2 ทดสอบภาระทางกล 1 ถึง 10 กิโลกรัม ด้วยวิธีปราศจากตัวตรวจจับ

ทดสอบภาระทางกลด้วยวิธีการลูกตุ้มน้ำหนัก 1, 2, 5, 7 และ 10 กิโลกรัม โดยคงที่ความเร็วรอบมอเตอร์ 550 รอบต่อนาที แสดงดังตารางที่ 4.6 และ 4.7

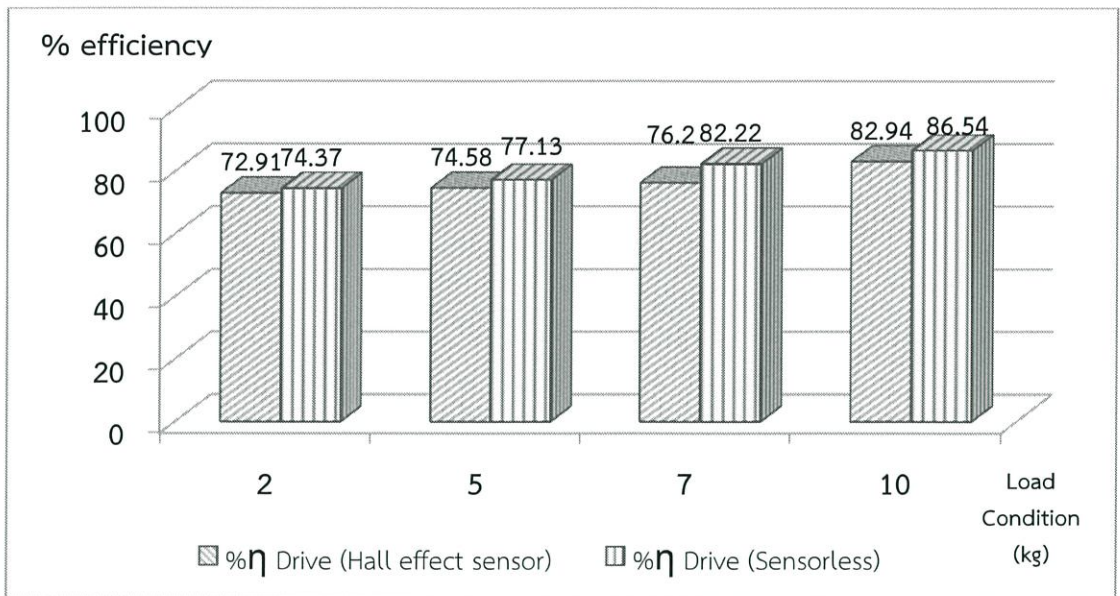
ตารางที่ 4.6 ผลทดสอบชุดความขับเคลื่อนมอเตอร์แบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์

Load (kg)	V _{in} (V)	I _{in} (A)	P _{in} (W)	P _{out} (W)	V _{out} (V)	I _{out} (A)	(Pf.)	Speed (rpm)	THD _v (%)
1	24.9	2.01	50.05	32.00	17.87	1.78	0.99	551.69	22.4
2	24.9	3.24	80.68	60.00	17.43	2.44	0.98	551.57	22.7
5	24.9	4.27	106.32	82.00	17.60	2.82	0.90	550.50	32.2
7	24.9	4.64	115.54	95.00	17.54	3.37	0.90	550.46	34.4
10	24.9	5.43	135.20	117.00	17.54	4.19	0.98	550.24	35.2

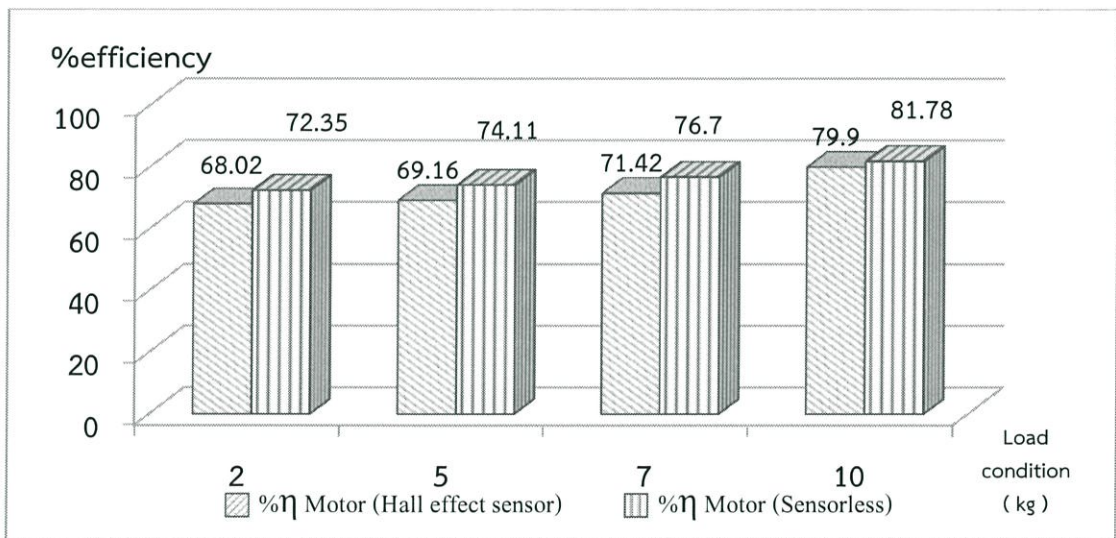
ตารางที่ 4.7 ผลทดสอบประสิทธิภาพชุดขับเคลื่อนมอเตอร์แบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์

W ₁ (kg)	W ₂ (kg)	τ (N.m)	ω (rad)	f ₁ (Hz)	P _{in} (W)	P _{out} (W)	P _m (W)	(P _{out} /P _{in}) Drive (% η)	(P _m /P _{out}) Motor (% η)
2	0.67	0.75	57.76	55.16	80.68	60	43.41	74.37	72.35
5	3.14	1.05	57.64	55.05	106.32	82	60.77	77.13	74.11
7	4.76	1.26	57.64	55.04	115.54	95	72.86	82.22	76.70
10	7.05	1.66	57.62	55.02	135.20	117	95.68	86.54	81.78

โดยตารางที่ 4.6 ถึง 4.7 แสดงผลการทดสอบชุดควบคุมมอเตอร์แบบมีปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ และประสิทธิภาพของเทคนิคการควบคุมแบบ (Sensorless control) การทดสอบภาระทางกลด้วยลูกตุ้มน้ำหนัก 2 ถึง 10 kg ผลการทดลองพบว่าที่ ภาระทางกล 10kg มีกำลังอินพุท (P_{in}) 135 วัตต์ กำลังเอาต์พุท(P_{out}) 117 วัตต์ ที่ความเร็วรอบ 550รอบต่อนาที ค่าความผิดเพี้ยนรูปคลื่นไซน์ (%THD_v) 35.2 เปอร์เซ็นต์แรงบิดที่ (τ) 1.66นิวตันเมตร ประสิทธิภาพชุดควบคุมมอเตอร์(% η drive) 86.54 เปอร์เซ็นต์และประสิทธิภาพมอเตอร์ (% η motor) 81.78เปอร์เซ็นต์ โดยสามารถแสดงเป็นกราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพทั้งสองวิธีดังรูปที่ 4.39 และ 4.40

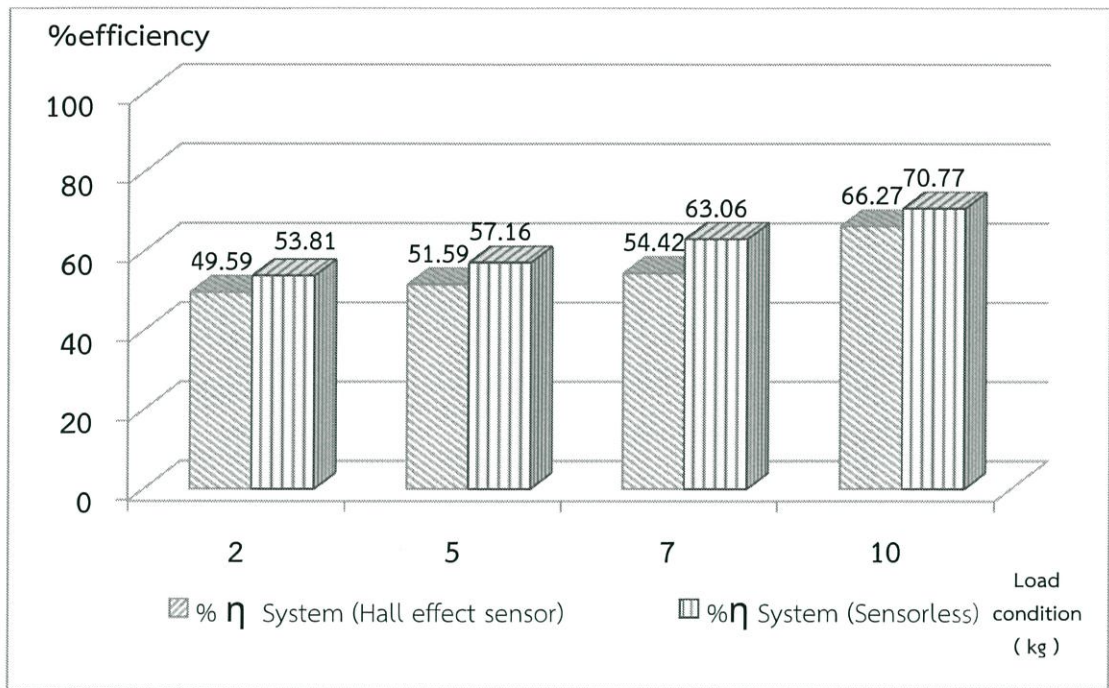


รูปที่ 4.39 ประสิทธิภาพของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ระหว่างมีตัวตรวจจับและปราศจากตัวตรวจจับ



รูปที่ 4.40 ประสิทธิภาพของมอเตอร์ระหว่างมีตัวตรวจจับและปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์

จากรูปที่ 4.39 ถึง 4.40 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ (Drive efficiency) และประสิทธิภาพของมอเตอร์ (Motor efficiency) ระหว่างมีตัวตรวจจับและปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ พบว่าประสิทธิภาพของการขับเคลื่อนแบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์จะมีประสิทธิภาพที่มากกว่ามีตัวตรวจจับ 3 เปอร์เซ็นต์ ในช่วงพิกัดขนาดภาระทางกล 95.68 วัตต์ เนื่องจากสามารถปรับแต่งสัญญาณการควบคุมจากสัญญาณตัดผ่านศูนย์เพื่อลดการเกิดสไปคของแรงดันขณะสวิตชิง โดยหน่วงเวลาก่อนการเรียงกระแสให้มีความสัมพันธ์กับความเร็วมอเตอร์ส่งผลให้มีประสิทธิภาพที่มากกว่าเทคนิคที่ใช้ตัวตรวจจับแบบฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์



รูปที่ 4.41 ประสิทธิภาพของมอเตอร์ระหว่างมีตัวตรวจจับและปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์

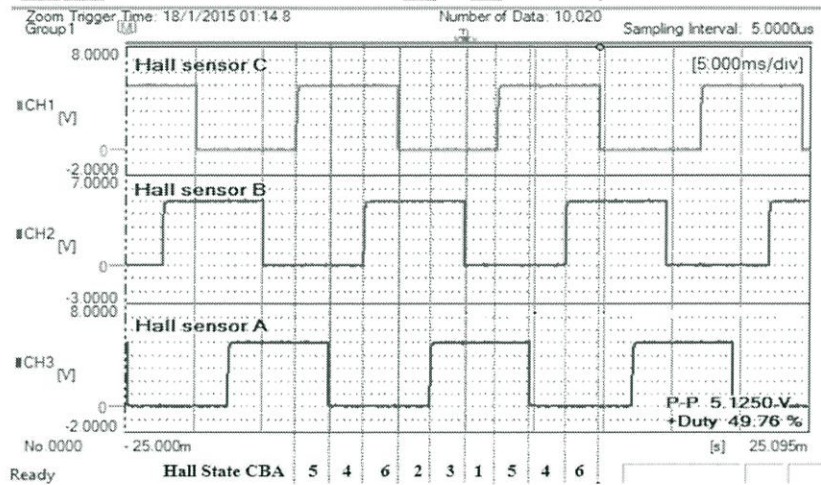
ในรูปที่ 4.41 เปรียบเทียบประสิทธิภาพรวมของระบบ (Total system) พบว่าวิธีการขับเคลื่อนแบบปราศจากตัวตรวจจับด้วยเทคนิคตรวจจับสัญญาณผ่านศูนย์มีประสิทธิภาพสูงกว่าวิธีที่ใช้เทคนิคแบบฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์ประมาณ 2 ถึง 5 เปอร์เซ็นต์ ในแต่ละภาระทางกลต่างๆ เนื่องจากการลดความสัมพันธ์ของระบบการควบคุมลงจะช่วยให้การใช้พลังงานมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น

4.6.7 ผลของสัญญาณตรวจจับกับทิศทางการหมุนตามเข็มและทวนเข็มนาฬิกา

การควบคุมมอเตอร์ให้หมุนในทิศทางที่ต้องการนั้นปกติแล้วจะต้องสลับเฟสที่ขั้วสายของมอเตอร์คู่ใดคู่หนึ่ง จะทำให้มอเตอร์สามารถกลับทิศทางการหมุนได้ แต่สำหรับมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน อาศัยวิธีการควบคุมทิศทางการหมุนได้ด้วยการตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ สำหรับกำหนดลำดับการสวิตช์ของแต่ละคู่เฟส จากการกำหนดสัญญาณพีดับบีวเอาท์พุทการในการควบคุมการหมุน (Override control register; OVDCON) โดยตาราง OVDCON table state จะใช้ในการกำหนดสัญญาณพีดับบีวเอ็มเอาท์พุทให้มีความสัมพันธ์ในแต่ละทิศทางการหมุน โดยการรับสัญญาณอินพุทจากการตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ (Hall effect sensor state ; Hall state) และ (Zero crossing state; Zc state) ผลของการสัญญาณตรวจจับตำแหน่งฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์ และสัญญาณตรวจจับจุดตัดผ่านศูนย์ จะแสดงความสัมพันธ์ของการจัดเรียงลำดับในแต่ละคู่เฟสการสวิตช์ของมอเตอร์ ทั้งในทิศทางตามเข็มและทวนเข็มนาฬิกา ผลของสัญญาณการตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ทั้งสองวิธีจะทำการเปรียบเทียบได้ดังรูปที่ 4.42 ถึง 4.45 ใช้ในการกำหนดทิศทางการหมุนในแต่ละวิธีการควบคุมทั้งแบบมีตัวตรวจจับตำแหน่งและปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์

4.6.7.1 ทิศทางหมุนทวนเข็มนาฬิกาด้วยวิธีตัวตรวจจับตำแหน่งฮอลล์เซนเซอร์

ในรูปที่ 4.42 ผลของสัญญาณตรวจจับตำแหน่งฮอลล์เซนเซอร์ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา พบว่าจะมีสถานะของสัญญาณฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์ ทั้งสามคือ C,B,A (Hall state CBA) จะมีลำดับการตรวจจับสัญญาณดังแสดงได้ในตารางที่ 4.8 แสดงผลการตรวจจับสัญญาณตำแหน่งคือ 6 , 2, 3 , 1, 5 และ 4 ตามลำดับ โดยใช้ลำดับการสวิตช์ในแต่ละคู่เฟส (Sequence) คือ 6 , 5 , 4 , 3 , 2 และ 1 ในการจัดเรียงกระแส ผลแสดงได้ดังรูปและตารางต่อไปนี้



รูปที่ 4.42 สัญญาณตรวจจับตำแหน่ง Hall effect sensor (CBA) ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา

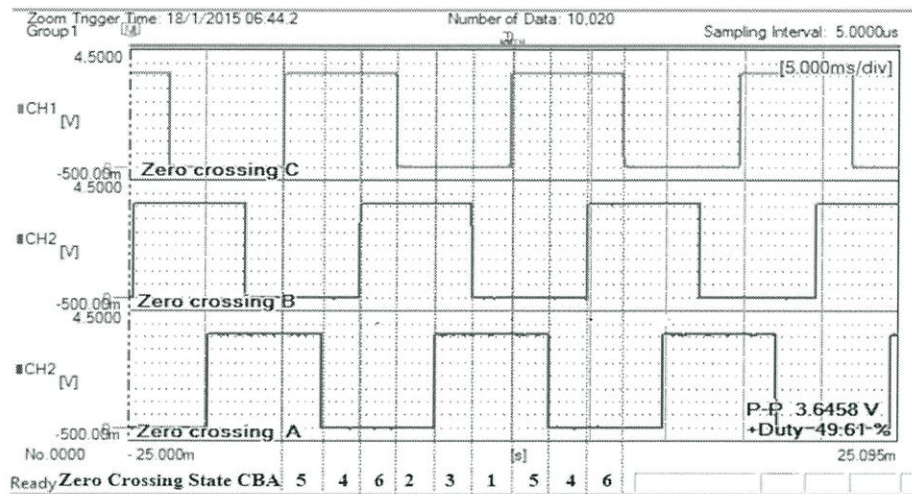
ตารางที่ 4.8 ลำดับการเรียงกระแสแบบเทคนิค Hall effect sensor ทิศทางทวนเข็มนาฬิกา

Hall State	Hall sensor(Rev)			sequence	OVDCON Table State (Rev)	Phase			Comutation
	HC	HB	HA			A	B	C	
6	1	1	0	6	x0210	A+		C-	Q1,Q2
2	0	1	0	5	x0810		B+	C-	Q3,Q2
3	0	1	1	4	x0801	A-	B+		Q3,Q4
1	0	0	1	3	x2001	A-		C+	Q5,Q4
5	1	0	1	2	x2004		B-	C+	Q5,Q6
4	1	0	0	1	x0204	A+	B-		Q1,Q6

จากตารางที่ 4.8 ลำดับการเรียงกระแสแต่ละคู่สวิตช์สำหรับการหมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาด้วยเทคนิคการขับเคลื่อนแบบ Hall effect sensor คือ Q_1Q_2 , Q_3Q_2 , Q_3Q_4 , Q_5Q_4 , Q_5Q_6 และ Q_1Q_6 ตามลำดับ

4.6.7.2 ทิศทางหมุนทวนเข็มนาฬิกาด้วยวิธีตัวปราศจากตรวจจับตำแหน่ง

ในรูปที่ 4.43 ผลของสัญญาณตรวจจับซีโรครอสซิงของแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา พบว่าจะมีสถานะของสัญญาณจุดตัดผ่านศูนย์ทั้งสามคือ C,B,A (Zero crossing state CBA) จะมีลำดับการตรวจจับสัญญาณดังแสดงได้ในตารางที่ 4.9 แสดงผลการตรวจจับสัญญาณตำแหน่งคือ 6 , 2, 3 , 1 , 5 และ 4 ตามลำดับ โดยใช้ลำดับการสวิตซ์ในแต่ละคู่เฟส (Sequence) คือ 6 , 5 , 4 , 3 , 2 และ 1 ในการจัดเรียงกระแส ผลแสดงได้ดังรูปและตารางต่อไปนี้



รูปที่ 4.43 สัญญาณตรวจจับ Zero crossing (CBA) ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา

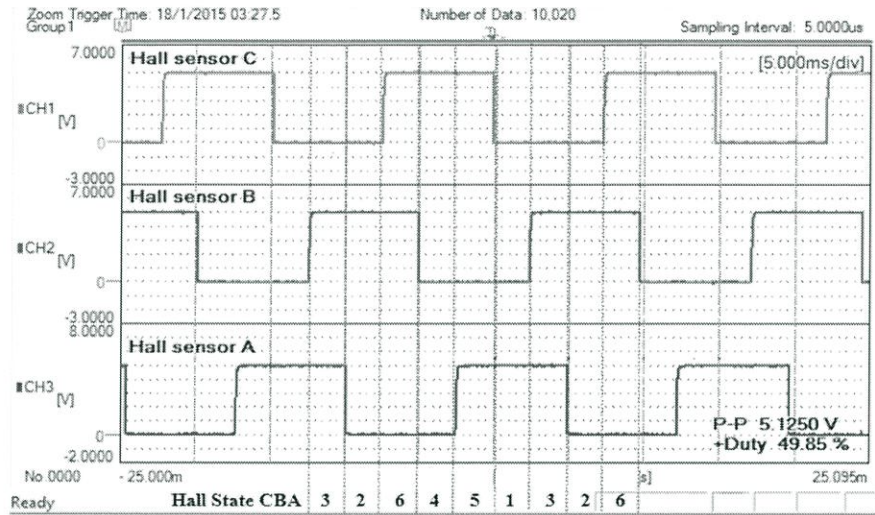
ตารางที่ 4.9 ลำดับการเรียงกระแสแต่ละคู่เฟสแบบ Zero crossing ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา

Zc State	Zerocrossing (Rev)			sequence	OVDCON Table State (Rev)	Phase			Comutation
	ZC	ZB	ZA			A	B	C	
6	1	1	0	6	0210	A+		C-	Q1,Q2
2	0	1	0	5	0810		B+	C-	Q3,Q2
3	0	1	1	4	0801	A-	B+		Q3,Q4
1	0	0	1	3	2001	A-		C+	Q5,Q4
5	1	0	1	2	2004		B-	C+	Q5,Q2
4	1	0	0	1	0204	A+	B-		Q1,Q6

จากตารางที่ 4.9 ลำดับการเรียงกระแสแต่ละคู่สวิตซ์สำหรับการหมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาด้วยเทคนิคการขับเคลื่อนแบบ Sensorless control คือ Q_1Q_2 , Q_3Q_2 , Q_3Q_4 , Q_5Q_4 , Q_5Q_2 และ Q_1Q_6 ตามลำดับ

4.6.7.3 ทิศทางหมุนตามเข็มนาฬิกาด้วยวิธีตัวตรวจจับตำแหน่งฮอลล์เซนเซอร์

ในรูปที่ 4.44 ผลของสัญญาณตรวจจับตำแหน่งฮอลล์เซนเซอร์ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา พบว่าจะมีสถานะของสัญญาณฮอลล์เซนเซอร์ทั้งสามคือ C,B,A (Hall state CBA) จะมีลำดับการตรวจจับสัญญาณดังแสดงได้ในตารางที่ 4.10 แสดงผลการตรวจจับสัญญาณตำแหน่งคือ 4 , 5 , 1 , 3 , 2 และ 6 ตามลำดับ โดยใช้ลำดับการสวิตช์ในแต่ละคู่เฟส (Sequence) คือ 1 , 2 , 3 , 4 , 5 และ 6 ในการจัดเรียงกระแส ผลแสดงได้ดังรูปและตารางต่อไปนี้



รูปที่ 4.44 สัญญาณตรวจจับตำแหน่ง Hall effect sensor (CBA) ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา

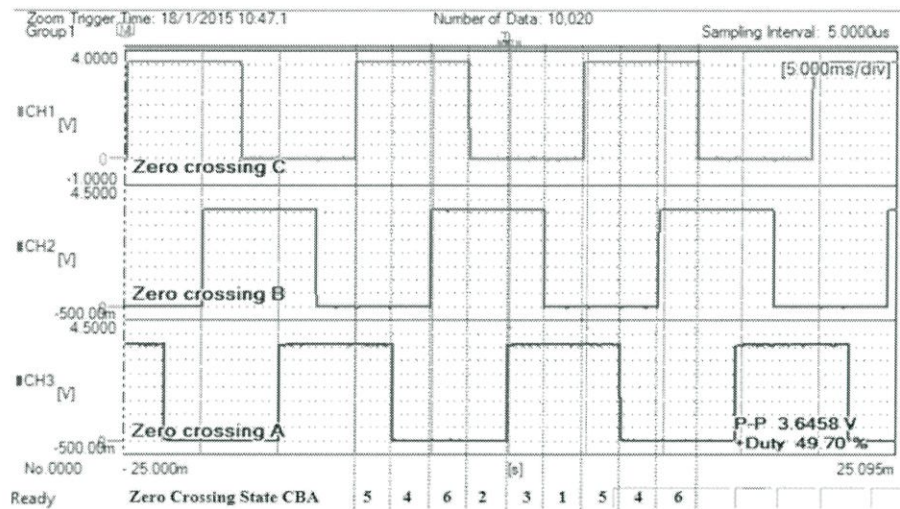
ตารางที่ 4.10 ลำดับการเรียงกระแสแต่ละคู่เฟสแบบ Hall effect sensor ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา

Hall state	Hall sensor (FW)			sequence	OVDCON Table State (Rev)	Phase			Comutation
	HC	HB	HA			A	B	C	
4	1	0	0	1	0204	A+	B-		Q1,Q6
5	1	0	1	2	2004		B-	C+	Q5,Q6
1	0	0	1	3	2001	A-		C+	Q5,Q4
3	0	1	1	4	0801	A-	B+		Q3,Q4
2	0	1	0	5	0810		B+	C-	Q3,Q2
6	1	1	0	6	0210	A+		C-	Q1,Q2

จากตารางที่ 4.10 ลำดับการเรียงกระแสแต่ละคู่สวิตช์สำหรับการหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกาด้วยเทคนิคการขับเคลื่อนแบบ Hall effect sensor คือ Q_1Q_6 , Q_5Q_6 , Q_5Q_4 , Q_3Q_4 , Q_3Q_2 และ Q_1Q_2 ตามลำดับ

4.6.7.4 ทิศทางหมุนตามเข็มนาฬิกาด้วยวิธีตัวปราศจากตรวจจับตำแหน่ง

ในรูปที่ 4.45 ผลของสัญญาณตรวจจับซีโรครอสซิงของแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับในทิศทางตามเข็มนาฬิกา พบว่าจะมีสถานะของสัญญาณซีโรครอสซิงทั้งสามคือ C,B,A (Zero crossing state CBA) จะมีลำดับการตรวจจับสัญญาณดังแสดงได้ในตารางที่ 4.11 แสดงผลการตรวจจับสัญญาณตำแหน่งคือ 6 , 2 , 3 , 1 , 5 และ 4 ตามลำดับ โดยใช้ลำดับการสวิตช์ในแต่ละคู่เฟส (Sequence) คือ 4 , 1 , 5 , 2 , 6 และ 3 ในการจัดเรียงกระแส ผลแสดงได้ดังรูปและตารางต่อไปนี้



รูปที่ 4.45 สัญญาณตรวจจับ Zero crossing (CBA) ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา

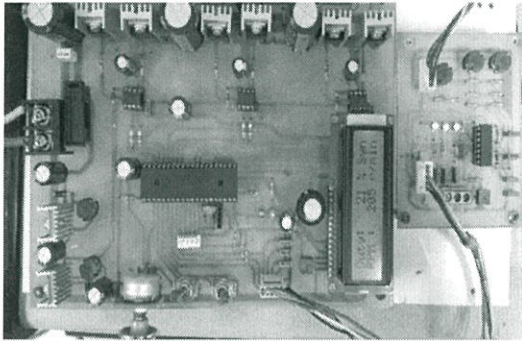
ตารางที่ 4.11 ลำดับการเรียงกระแสแต่ละคู่เฟสแบบ Zero crossing ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา

Zc state	Zerocrossing(Fw)			sequenc	OVDCON Table State (Fw)	Phase			Comutation
	ZC	ZB	ZA			A	B	C	
6	1	0	0	4	0204	A+	B-		Q1,Q6
2	1	0	1	1	2001	A-		C+	Q5,Q4
3	0	0	1	5	2004		B-	C+	Q5,Q6
1	0	1	1	2	0810		B+	C-	Q3,Q2
5	0	1	0	6	0210	A+		C-	Q1,Q2
4	1	1	0	3	0801	A-	B+		Q3,Q4

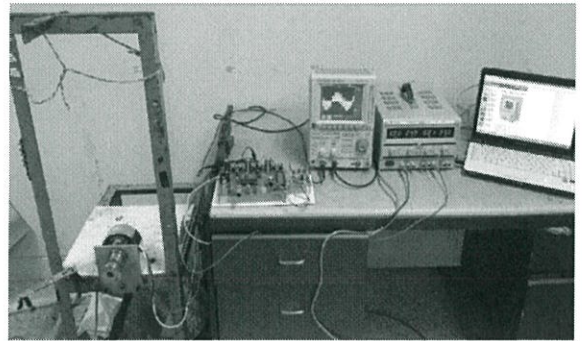
จากตารางที่ 4.11 พบว่าการตรวจจับสถานะของสัญญาณผ่านศูนย์ (Zc state) มีสถานะตรงกันทั้งสองทิศทาง ทวนเข็มและตามเข็มนาฬิกาแบบปราศจากตัวตรวจจับ คือ 6,2,3,1,5 และ 4 ตามลำดับ จึงจำเป็นต้องสลับการเรียงกระแสในทิศทางตามเข็มนาฬิกาด้วยเทคนิคการขับเคลื่อนแบบ Sensorless control คือ Q_1Q_6 , Q_5Q_4 , Q_5Q_6 , Q_3Q_2 , Q_1Q_2 และ Q_3Q_4 ตามลำดับ จะสามารถกลับทิศทางการหมุนได้ด้วยวิธีการทางโปรแกรมแทนการสลับขั้วสายของมอเตอร์คู่ใดคู่หนึ่ง

4.7 ผลจากทดสอบขณะทดลอง

วงจรที่ใช้ทดลองการขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ ด้วยวิธีตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับที่ตัดผ่านศูนย์ของขั้วมอเตอร์ อุปกรณ์ในการทดลองประกอบไปด้วย มอเตอร์ BLDC 24 โวลต์ 12 ขั้วแม่เหล็ก ชุดต้นแบบควบคุมมอเตอร์แบบปราศจากตัวตรวจจับ Oscilloscope DL1620 สำหรับเก็บผล แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC Power Supply 24 Volt) ดังรูปที่ 4.46



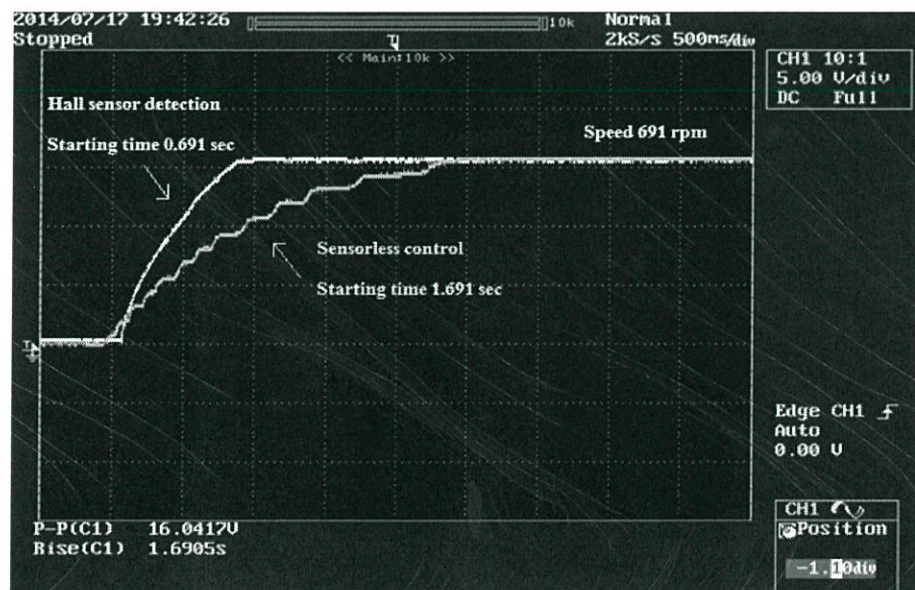
(ก)



(ข)

รูปที่ 4.46 (ก) ชุดวงจรต้นแบบควบคุมมอเตอร์แบบปราศจากตัวตรวจจับ (ข) ชุดอุปกรณ์และเครื่องมือในการทดลอง

ผลการทดสอบการช่วงเวลาการออกตัวของมอเตอร์ เปรียบเทียบระหว่างการใช้ตัวตรวจจับตำแหน่ง (Hall effect sensor) และไม่ใช้ตัวตรวจจับตำแหน่ง มีค่าเวลาการออกตัว 0.691 วินาที และ 1.691 วินาทีตามลำดับ ซึ่งมีช่วงเวลาที่ห่างกันมากนัก ดังรูปที่ 4.47



รูปที่ 4.47 เปรียบเทียบการออกตัวของมอเตอร์ระหว่างตัวตรวจจับและปราศจากตัวตรวจจับ

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง ข้อเสนอแนะ และแนวทางการพัฒนา

5.1 บทนำ

ในการศึกษาออกแบบการทดลองวงจรสำหรับควบคุมความเร็วมอเตอร์แบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ อาศัยหลักการแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับที่ตัดผ่านศูนย์บริเวณขั้วสายของมอเตอร์สามเฟส โดยพิจารณาความแตกต่างของการตัดผ่านศูนย์มาใช้ในการสร้างอัลกอริทึม ซึ่งจะสามารถสร้างสัญญาณเสมือนขึ้นมาแทนเซนเซอร์จริง ด้วยวิธีการหน่วงเวลา 30 องศาทางไฟฟ้าจากจุดตัดผ่านศูนย์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ จากการวิเคราะห์ทดลองในช่วงเปลี่ยนแปลงชั่วขณะ 30 องศาที่หน่วงเวลาจากจุดตัดผ่านศูนย์ พบว่ามอเตอร์สามารถที่จะเริ่มหมุนแบบไม่มีเซนเซอร์ได้ และช่วงเวลาในการออกตัวของมอเตอร์ 1.69 วินาที วิธีการนี้จึงเป็นแนวทางที่ควรนำมาใช้ จะสามารถช่วยลดความสัมพันธ์และข้อจำกัดบางประการของระบบการขับเคลื่อน

5.2 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดสอบในงานวิจัยนี้จะวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของการตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับที่ตัดผ่านศูนย์เปรียบเทียบกับตำแหน่งที่ตรวจจับจริงของอุปกรณ์ตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ เพื่อหาความสัมพันธ์ในการสร้างสัญญาณควบคุมเสมือนแทนการตรวจจับตำแหน่งแบบฮอลล์เซนเซอร์ แสดงผลการทดลองในบทที่ 4 ประกอบไปด้วยการขับเคลื่อนแบบเกิดความผิดปกติของสัญญาณตรวจจับ เปรียบเทียบการทำงานของหลักการเดิมแบบใช้ตัวตรวจจับและปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่ง การทดสอบแบบไม่มีภาระทางกล มีภาระทางกล และภาระทางกลทันทีทันใด วิเคราะห์ลักษณะรูปคลื่น สเปกตรัมของแรงดัน THD_v ในแต่ละช่วงการควบคุมความเร็วด้วยตัวที่ไซเคิลต่างๆ ดังรายละเอียดการทดสอบต่อไปนี้

5.2.1 การทดสอบการขับเคลื่อนแบบเกิดความผิดปกติของสัญญาณตรวจจับตำแหน่ง

การขับเคลื่อนมอเตอร์กรณีเกิดปัญหากับอุปกรณ์ตรวจจับขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์ เสียหายจากสายขาด หรืออุณหภูมิทำให้อุปกรณ์ตรวจจับเสียหาย ซึ่งปกติแล้วจะทำหน้าที่ตรวจจับขั้วแม่เหล็กเหนือ (N) ใต้ (S) และระหว่างขั้ว (N) กับ (S) ส่งผลให้เกิดความผิดปกติของแรงเคลื่อนไฟฟ้า มอเตอร์มีกระแสสูง เกิดอาการสั่น เสียงดัง และมอเตอร์เกิดความร้อนเพิ่มขึ้น

5.2.2 การทดสอบผลการตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ

การตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับโดยผ่านการกรองความถี่ออกสำหรับการค้นหาตำแหน่งโรเตอร์ในแต่ละความเร็วรอบ แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับที่ตัดผ่านศูนย์ในช่วงที่มอเตอร์เปิดสำหรับการควบคุมปราศจากตัวตรวจจับ ผลของสัญญาณระหว่างตัวตรวจจับตำแหน่งจริงและ

สัญญาณซีโรครอสซึ่งมีความแตกต่างกันที่ 30 องศาทางไฟฟ้าแต่ละความเร็วรอบ ผลของการหน่วงเวลาในการเรียงกระแสมีความสัมพันธ์เป็นแบบเอกซ์โพเนนเชียลกับช่วงควบคุมความเร็วตัวตีเซเคลิล

5.2.3 ผลการทดสอบการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบปราศจากตัวตรวจจับ

การทดสอบการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์แบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์โดยอาศัยแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับที่ตัดผ่านศูนย์ เพื่อนำมาคำนวณหาตำแหน่งของโรเตอร์ขณะเริ่มต้นด้วยการกระตุ้นแบบแรมป์สำหรับแต่ละคู่เฟสในทิศทางตามเข็มหรือทวนเข็มนาฬิกา เพราะขณะเริ่มหมุนจะไม่มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับเกิดขึ้น ผลการทดสอบจะตรวจจับความเร็วเริ่มต้นได้ที่ 100 รอบต่อนาที สามารถควบคุมความเร็วรอบได้ถึง 700 รอบต่อนาที ในแต่ละระดับความเร็วการควบคุมยังรักษาความเร็วรอบให้คงที่จากการควบคุมความเร็วรอบแบบพีโอ

5.2.4 ผลการทดสอบเปรียบเทียบประสิทธิภาพการขับเคลื่อนแบบปราศจากตัวตรวจจับ

ผลการทดสอบการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบปราศจากตัวตรวจจับ การทดสอบแบบไม่มีภาระทางกลเพื่อศึกษาลักษณะของรูปคลื่นแรงดัน พบว่าความเร็วรอบแต่ละระดับมีลักษณะรูปคลื่นที่ใกล้เคียงกับเทคนิคการใช้ตัวตรวจจับตำแหน่ง และมีค่าสเปกตรัมแรงดันที่ใกล้เคียงกันทั้งสองวิธี แต่วิธีควบคุมแบบปราศจากตัวจับจะสามารถควบคุมตำแหน่งให้ยืดหยุ่นกว่าหลักการเดิม โดยการหน่วงเวลาจากตำแหน่งโรเตอร์จริงเพียงเล็กน้อยจะช่วยลดสไปค์ของแรงดันขณะสวิตซ์ ซึ่งมีความผิดพลาดที่ความเร็วต่ำ 1.8 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเร็วสูง 0.42 เปอร์เซ็นต์ ส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนรูปคลื่นไซน์ (THD_v) มีค่าที่ลดลงจาก 11.12 เหลือ 9.7 สำหรับการทดสอบภาระทางกลโดยการทดสอบด้วยลูกตุ้มน้ำหนัก ทดสอบในช่วง 10, 20, 50, 70 และ 100 เปอร์เซ็นต์ของพิกัดมอเตอร์ พบว่ามีประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกันทั้งวิธีการควบคุมแบบมีตัวตรวจจับตำแหน่งและปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่ง โดยที่พิกัดโหลด 100 เปอร์เซ็นต์ มีประสิทธิภาพของการขับเคลื่อนอินเวอร์เตอร์ 82.94 และ 86.54 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 การกำหนดขนาดและชนิดของอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบควบคุมควรมีความเหมาะสมกับขนาดของมอเตอร์เพื่อการประหยัดพลังงานของการวางจรมีประสิทธิภาพ กับพลังงานอินพุทที่นำมาใช้งาน

5.3.2 การออกแบบวงจรรองความถี่ต่ำ สำหรับกรองความถี่ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ จะมีต่อความสมมาตรของสัญญาณในความเร็วรอบต่ำๆ จึงควรออกแบบให้เหมาะสมต่อการใช้งาน

5.3.3 การออกแบบจัดวางอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในระบบควบคุมการขับเคลื่อนควรมีการคำนึงถึงความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic compatibility: EMC) เพื่อเป็นการลดสัญญาณรบกวนอื่นๆ ช่วยให้สามารถตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับได้แม่นยำ

5.3.4 การห้วงเวลาอย่างเหมาะสมก่อนการสวิตชิ่งจากตำแหน่งสัญญาณตรวจจับตำแหน่ง โรเตอร์จริงจะช่วยให้ลดการเกิดสไปค์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าได้

5.3.5 การทดสอบหาประสิทธิภาพควรทดสอบบนแท่นทดสอบที่ได้มาตรฐาน เนื่องจากการทดสอบโดยการถ่วงน้ำหนักอาจมีผลของแรงเสียดทานที่ไม่สามารถควบคุมได้ขณะทดสอบเข้ามาเกี่ยวข้องหรืออาจทดสอบด้วย Dynamometer ที่แม่นยำกว่า

5.4 แนวทางการพัฒนา

5.4.1 เพื่อให้เกิดประโยชน์ควรนำงานวิจัยนี้ ออกแบบวิจัยให้มีพิกัดแรงดันที่สูงขึ้น เพื่อนำไปใช้สำหรับการควบคุมมอเตอร์ที่มีกำลังและความเร็วรอบสูง วิธีการควบคุมแบบปราศจากตัวตรวจจับนี้ จะสามารถใช้ในงานอย่างเช่น มอเตอร์คอมเพรสเซอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านได้

5.4.2 เพื่อให้การตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับได้ง่ายและประหยัด ควรเลือกตัวประมวลผลที่สามารถรับค่า A/D ที่มีแม่นยำและความเร็วสูง

5.4.3 เพื่อให้ชุดควบคุมความเร็วมีประสิทธิภาพและมีประโยชน์ต่อการใช้งานอย่างเต็มที่ควรเพิ่มโหมดการตรวจจับตำแหน่งและโหมดปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งในชุดเดียวกัน เพื่อการใช้งานอย่างคุ้มค่าและมีทางเลือกการใช้งาน

5.4.4 นำระบบขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ดังกล่าวไปประยุกต์ใช้กับงานประเภทต่างๆ เช่น พานนะไฟฟ้า เครื่องปั้มน้ำ เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] K. Iizuka, H. Uzuhashi, M. Kano, T. Endo, and K. Mohri, "Microcomputer control for sensorless brushless motor," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. IA-21, no. 4, pp. 595–601, May. 1985.
- [2] J. Shao, D. Nolan, M. Teissier, and D. Swanson, "A novel microcontroller-based sensorless brushless DC (BLDC) motor drive for automotive fuel pumps," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 39, no. 6, pp. 1–83, Nov./Dec. 2003.
- [3] John Chiasson, "Modeling and High-Performance Control of Electric Machines", I IEEE Press series on power engineering, John Wiley & Sons, 2005.
- [4] Jianwen Shao, Teissier, and D. Swanson, "Direct Back EMF Detection Method for Sensorless Brushless DC (BLDC) Motor Drives," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 39, no. 6, pp. 1734–1740, Nov./Dec. 2003.
- [5] T.-H. Kim and M. Ehsani, "Sensorless control of BLDC motors from near-zero to high speeds," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 19, no. 6, pp. 1635–1645, Nov. 2004.
- [6] R. C. Becerra, T. M. Jahns, and M. Ehsani, "Four-quadrant sensorless brushless ECM drive," in *Proc. IEEE APEC*, Mar. 1991, pp. 202–209.
- [7] G.-J. Su and J. W. McKeever, "Low cost sensorless control of brushless DC motors with improved speed range," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 19, no. 2, pp. 296–302, Mar. 2004.
- [8] A. Tashakori, "Stability Analysis of Sensorless BLDC Motor Drive Using Digital PWM Technique for Electric Vehicles" *IEEE*, pp. 4898–4903, 2012
- [9] P. Damodharm, K. Vasudhram, "Sensorless Brushless DC motor Drive based on the Zero-crossing detection of back EMF," *IEEE Trans. Energy Conv.*, Vol. 25, no. 3, pp. 661–667, Sep 2010
- [10] J. C. Moreira, "Indirect sensing for rotor flux position of permanent magnet AC motor operating over a wide speed range," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 32, no. 6, pp. 1394–1401, Dec 1996
- [11] P. Pillay and R. Krishnan, "Modeling, simulation, and analysis of permanent magnet motor drives," Part II. The brushless dc motor drive" *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 25, no. 2, pp. 274–279, Mar.–Apr. 1989.

- [12] K.S. Rama Rao, Nagadeven et al., “Sensorless Control of a BLDC Motor with BackEMF Detection Method using DSPIC”, Power and Energy Conference, PECon, pp.243-248, 2008
- [13] Jianwen shao, “An Improved Microcontroller-base Sensorless Brushless DC (BLDC) Motor Drive for Application”, Industry Application Conference, IAS Con., Vol.4, pp.2512-2517, 2005
- [14] Taeyon Kim , “A New Sensorless Drive Scheme for aBLDC Motor Based on the Terminal Voltage Diffence” IEEE pp.1710-1715, 2011
- [15] Kai-Sheng Kan “Adaptive Soft Starting Method with Current Limit Strategy for Sensorless BLDC Motor” IEEE pp.605-610, 2012
- [16] Merin John, “Position Sensorless Control of BLDC Motor Based on Back EMF Difference Estimation Method,” Power and Energy Systems Towards Sustainable Energy, pp. 478-481, 2014
- [17] Yan Wei Sheng, “Sensorless Direct Torque Controlled Drive of Brushless DC Motor based on Fuzzy Logic”, IEEE, pp. 3411-3416, 2009
- [18] Quang Vinh Tran, “Simple Starting-up Method of BLDC Sensorless Control System for Vehicle Fuel Pump,” International Power Electronics Conference, pp. 2244-2248, 2010
- [19] Li Qiang, Lin Mingyao et al., “Research on Filters for Back EMF Zero-Crossing Detection in Sensorless BLDC Motor Drive,” International Conference on Electrical Machines and Systems, ICEMS, Vol.2, pp.1899-1902, 2005
- [20] Jonathan Adams, “Bootstrap Component Selection For Control IC’s”, Design tip, DT98-2a, (www.irf.com).
- [21] Microchip Technology Inc, “dsPIC30F4011” Available 2007, (www.microchip.com)
- [22] วีระเชษฐ ชันเงิน และวุฒิพล ธาราธีรเศรษฐ์, “อิเล็กทรอนิกส์กำลัง,” พิมพ์ครั้งที่ 15, หน้า 455-470, พ.ศ.2558.
- [23] ประจัน พลังสันติกุล, “การเขียนโปรแกรมควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F ด้วยคอมไพเลอร์ MPLAB C,” หน้า 309-342, พ.ศ.2551

ภาคผนวก ก

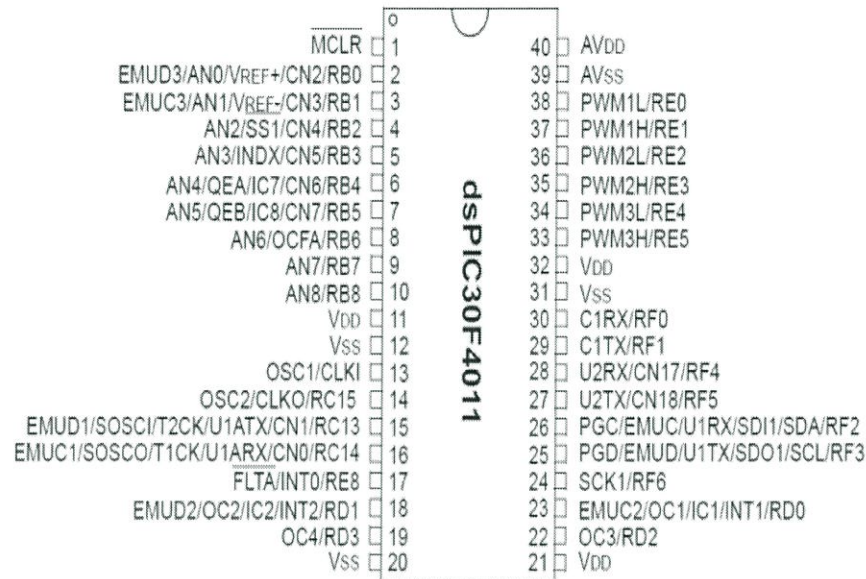
อุปกรณ์ประมวลผลและโปรแกรมการทำงาน

1. ไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F4011/2010[23]

dsPIC30F เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ในตระกูล 4011/2010dsPIC30F ซึ่งเลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น 28 Pin เบอร์ dsPIC30F40 หรือ รุ่น 2010 Pin เบอร์ dsPIC30F ของ 4011 Microchips เป็น MCU ประจำบอร์ด โดย dsPIC30F เป็น 4011/2010MCU ซึ่งใช้การประมวลผลข้อมูลแบบ บิต จากค่า 16ย Microchips ซึ่งมีจุดเด่นในด้านของความสามารถในการประมวลผลข้อมูลสัญญาณแบบดิจิทัลเหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในงานควบคุมต่างๆ โดยโครงสร้างภายในจะเป็นการผสมผสานระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์ (MCU) และวงจร DSP (Digital Signal Processing) รวมเข้าไว้ด้วยกัน หรืออาจเรียก MCU ตระกูล dsPIC30F ว่าเป็น DSC หรือ Digital Signal Controller ก็ได้ โดยโครงสร้างของบอร์ด ET-BASE dsPIC30Fได้รับการ 4011/2010 ออกแบบให้บอร์ดมีขนาดเล็ก เหมาะต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นหลัก โดยภายในบอร์ดได้บรรจุเอาวงจรที่จำเป็นต่อการใช้งาน และสะดวกต่อการพัฒนาโปรแกรม มีความยืดหยุ่น สามารถปรับเปลี่ยนสัญญาณ I/O เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานในลักษณะต่างๆให้สอดคล้องและเหมาะสมกับความต้องการใช้งานได้ในหลายๆลักษณะตามต้องการคุณสมบัติของบอร์ด เลือกใช้ MCU ตระกูล dsPIC30F หรือ 2010dsPIC30F ของ 4011Microchips เป็น MCU ประจำบอร์ด โดยคุณสมบัติเด่นๆของ MCU ได้แก่

1. หน่วยความจำ Flash 12Kbyte(dsPIC20F2010) หรือ 48Kbyte(dsPIC30F4011)
2. มีหน่วยความจำ RAM ขนาด 512Byte(dsPIC30F2010) หรือ 2Kbyte(dsPIC30F40)
3. มีหน่วยความจำ EEPROM ขนาด 1Kbyte สำหรับเก็บข้อมูลใช้งาน
4. มีพอร์ต I/O ขนาด 19 Bit(dsPIC30F2010) หรือ 29 Bit(dsPIC30F4011)
5. มี 16Bit Timer/Counter จำนวน 3 ชุด(dsPIC30F2010) หรือ 5 ชุด(dsPIC30F4011)
6. มี Input Capture จำนวน 4 ช่อง
7. มี Output Compare จำนวน 2 ช่อง(dsPIC30F2010) หรือ 4 ช่อง(dsPIC30F4011)
8. มี ADC10Bit/500Ksps จำนวน 6 ช่อง(dsPIC30F2010) หรือ 9 ช่อง(dsPIC30F4011)
9. มี PWM Motor Control จำนวน 6 ช่อง พร้อม Quadrature Encode Interface(QEI)
10. มี UART จำนวน 1 ช่อง(dsPIC30F2010) หรือ 2 ช่อง (dsPIC30F4011)
11. มี SPI จำนวน 1 ช่อง และ มี I2C จำนวน 1 ช่อง
12. มีวงจร Watchdog, Power-ON Reset, PWM
13. ใช้ Crystal ความถี่ 7.3728MHz สามารถใช้ PLLคูณความถี่เพื่อ Run ความถี่ 29.491MHz
14. มีพอร์ตสื่อสารอนุกรม UART แบบ RS232 จำนวน 1ช่องสำหรับdsPIC30F2010และ2 ช่อง สำหรับ dsPIC30F4011 พร้อม Jumper สำหรับเลือกใช้งาน UART หรือ GPIO ได้ตามต้องการ โดยใช้ขั้วต่อ UART แบบ CPA-4 Pin มาตรฐาน อีทีที
15. มีขั้ว ICSP มาตรฐาน ICD2 แบบ RJ11 สำหรับใช้ร่วมกับชุดพัฒนาโปรแกรมและ Debugger ที่รองรับการทำงานตามมาตรฐาน ICD2 ของ Microchips เช่น ICD2 หรือ Pickit2 ได้
16. มี Switch สำหรับสลับสัญญาณระหว่าง Program/Debug(PGM) และ ใช้งานปรกติ (RUN) พร้อม LED แสดงโหมดการทำงานของบอร์ด
17. มีขั้วต่อสัญญาณ I/O แบบ Header ขนาด 2x5 จำนวน 3ชุดและHeader 1x8 Pinอีก 1 ชุด

18. มี Header 14Pin สำหรับ Character LCD พร้อม VR ปรับความสว่าง
19. มี Switch Reset สำหรับสั่ง Reset การทำงานของ MCU ภายในบอร์ด
20. มี LED สำหรับทดสอบการทำงาน โดยใช้ RBO ในการควบคุม พร้อม Jumper ตัดต่อสัญญาณ
21. Power AC/DC Input พร้อม Regulate แบบ Switching เบอร์ LM2575 ขนาด 5V/1A ลดปัญหาความร้อนจากวงจร Regulate และ LED แสดงสถานะแหล่งจ่าย Power
22. ขนาด PCB Size เล็กเพียง 8 x 6 cm.



โมดูลแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นดิจิทัลโมดูลแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นดิจิทัลขนาด 10 บิต (10-bit high-speed analog-to-digital converter) หรือโมดูล ADC เป็นโมดูลรับแรงดันอะนาล็อกแปลงสัญญาณเป็นตัวเลขความละเอียดขนาด 10 บิต โมดูล ADC ของ dsPIC30F4011 มีจำนวน 9 ช่องสัญญาณ ประกอบไปด้วยขา AN0/RB0, AN1/RB1, AN2/RB2, AN3/RB3, AN4/RB4, AN5/RB5, AN6/RB6, AN7/RB7 และ AN8/RB8 บล็อกไดอะแกรมและวงจรการทำงานของโมดูล ADC

รีจิสเตอร์ควบคุมการทำงานของโมดูล 10-bit ADC การทำงานของโมดูลแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นดิจิทัลจะเกี่ยวข้องกับรีจิสเตอร์ 2 กลุ่มด้วยกันคือ รีจิสเตอร์ควบคุมและรีจิสเตอร์บัฟเฟอร์ข้อมูล โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. รีจิสเตอร์บัฟเฟอร์ข้อมูล (ADC Data Buffer) รีจิสเตอร์บัฟเฟอร์ข้อมูลจำนวน 16 ตัว ขนาด 10 บิต ใช้ในการเก็บข้อมูลที่ได้จากการแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นดิจิทัล (อ่านได้อย่างเดียว) ประกอบไปด้วย ADCBUF0 ถึง ADCBUFF (ADC Buffers 0 – ADC Buffers F)
2. รีจิสเตอร์ควบคุมโมดูล ADC โมดูล ADC มีรีจิสเตอร์ควบคุมและแสดงสถานะการทำงานของโมดูล 6 ตัวดังนี้
 - 2.1 รีจิสเตอร์ควบคุม ADCON1 (ADC Control Register 1)
 - 2.2 รีจิสเตอร์ควบคุม ADCON2 (ADC Control Register 2)
 - 2.3 รีจิสเตอร์ควบคุม ADCON3 (ADC Control Register 3) รีจิสเตอร์ ADCON1 ถึง ADCON3 เป็นรีจิสเตอร์ควบคุมและกำหนดการทำงานของโมดูล ADC

2.4 ADCHS (ADC Input Channel Select Register) รีจิสเตอร์เลือกขาอินพุตสำหรับเชื่อมต่อกับวงจร S/H (Sample and Hold amplifiers)

2.5 ADPCFG (ADC Port Configuration) รีจิสเตอร์กำหนดเงื่อนไขการทำงานของขาพอร์ตอินพุตเป็นอินพุตอะนาล็อก หรืออินพุตเอาต์พุตสัญญาณดิจิทัล

2.6 ADCSSL (ADC Input Scan Select Register) เป็นรีจิสเตอร์เลือกขาอินพุตสำหรับการเรียงลำดับการอ่านสัญญาณอะนาล็อก

การใช้งานโมดูล ADC มีขั้นตอนดังนี้

1. การเปิดใช้งานโมดูล ADC

- เลือกขาพอร์ตสำหรับอินพุตอะนาล็อกผ่านทางรีจิสเตอร์ ADPCFG<15:0>บิตที่ 0 ถึงบิตที่ 15
- เลือกแหล่งแรงดันอ้างอิงสำหรับอินพุตอะนาล็อกผ่านทางรีจิสเตอร์ ADCON2<15:13>บิตที่ 13 ถึงบิตที่ 15
- เลือกสัญญาณนาฬิกาสำหรับใช้ในการแปลงสัญญาณอะนาล็อกผ่านทางรีจิสเตอร์ ADCON3<5:0>บิตที่ 0 ถึงบิตที่ 5
- กำหนดจำนวนช่องสุ่มเก็บสัญญาณ (S/H) ผ่านทางรีจิสเตอร์ ADCON2<9:8>บิตที่ 8 ถึงบิตที่ 9 ควบคู่กับรีจิสเตอร์ ADPCFG<15:0>
- กำหนดช่องสุ่มสัญญาณ (Sampling) ผ่านทางรีจิสเตอร์ ADCON1<3>บิตที่ 3 ควบคู่กับการสแกนสัญญาณอินพุตผ่านทางรีจิสเตอร์ ADCSSL<15:0>บิตที่ 0 ถึงบิตที่ 15

2. เปิดใช้งานโมดูล ADC ผ่านทางรีจิสเตอร์ ADCON1<15>บิตที่ 15

- การเปิดใช้งานอินเตอร์รัปต์ (หากต้องการ)
- เคลียร์บิต ADIF อินเตอร์รัปต์แฟล็ก
- เลือกระดับความสำคัญของอินเตอร์รัปต์

โมดูล MCPWM โมดูล Motor Control PWM (MCPWM) เป็นโมดูลพื้นฐานสำหรับสร้างสัญญาณ PWM (pulse width modulated) เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ชนิดต่างๆ เช่น

- มอเตอร์แบบเฟสเดียว
- มอเตอร์กระแสสลับแบบสามเฟส (Three-Phase AC Induction Motor)
- มอเตอร์แบบสวิตช์ต้านทานแม่เหล็ก SR (Switched Reluctance Motor)
- มอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน BLDC (Brushless DC Motor)

คุณสมบัติที่สำคัญของโมดูล MCPWM

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

7. สร้างสัญญาณกระตุ้นพิเศษสำหรับโมดูลแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นดิจิทัลได้ dsPIC30F ได้เตรียมโมดูลสร้างสัญญาณ MCPWM จำนวนเอาต์พุต 6 และ 8 ช่อง โดยมีคุณสมบัติแสดงดังตารางที่ xx สำหรับ dsPIC30F4011 จะมีจำนวนเอาต์พุต 6 ช่อง และอินพุต 1 ช่องประกอบไปด้วย

1. ขาพอร์ตเอาต์พุตควบคุมสัญญาณ PWM ได้แก่
 - เอาต์พุต PWM ชุดที่ 1: ขาพอร์ต PWM1L/RE0, PWM1H/RE1
 - เอาต์พุต PWM ชุดที่ 2: ขาพอร์ต PWM2L/RE2, PWM2H/RE3
 - เอาต์พุต PWM ชุดที่ 3: ขาพอร์ต PWM3L/RE4, PWM3H/RE5
2. ขาพอร์ตอินพุตตรวจสอบความผิดพลาด ได้แก่ ขาพอร์ต FLTA/RE8 สำหรับโมดูล MCPWM แบบ 6 ช่องเอาต์พุต ถูกใช้ในงานควบคุมแบบ 3 เฟส ขณะที่ 8 ช่องเอาต์พุต จะถูกใช้ในงานมอเตอร์แบบ 4 เฟส

รีจิสเตอร์ควบคุมการทำงาน รีจิสเตอร์ควบคุมการทำงานของโมดูล MCPWM มีรายละเอียดดังนี้

1. รีจิสเตอร์ PTCON (PWM Time Base Control register) รีจิสเตอร์กำหนดโหมดการทำงานและควบคุมของโมดูล MCPWM เช่น เปิด/ปิดการทำงานของโมดูล กำหนดค่าการนับ (ค่าโพสสเกลเลอร์) ต่อการเกิดอินเตอร์รัปต์ ค่าปริสเกลเลอร์สำหรับฐานเวลาและโหมดการทำงานของโมดูล MCPWM
2. รีจิสเตอร์ PTMR (PWM Time Base register) รีจิสเตอร์ฐานเวลาการนับของโมดูล MCPWM นับเวลาได้สูงสุดเท่ากับ 32768 ค่า (ใช้เพียง 15 บิตในการนับ) โดยบิตสูงสุดบิตที่ 15 บิต PTDIR เป็นบิตตรวจสอบการนับของฐานเวลาว่าเป็นการนับขึ้น (PTDIR = 0) หรือเป็นการนับลง (PTDIR = 1)
3. รีจิสเตอร์ PTPER (PWM Time Period register) รีจิสเตอร์ควบคุมการนับของรีจิสเตอร์ PTMR เป็นรีจิสเตอร์กำหนดคาบเวลาหรือความถี่ของโมดูล MCPWM
4. รีจิสเตอร์ SEVCMP (PWM Special Event Compare register) จะกำหนดค่าเวลาเพื่อกระตุ้นการทำงานโมดูลแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นดิจิทัล (A/D)
5. รีจิสเตอร์ PWMCON1 (PWM Control register #1) กำหนดหน้าที่การทำงานของขาขับสัญญาณ PWM ให้ทำงานอิสระหรือทำงานเป็นคู่และกำหนดให้เป็นขาขับสัญญาณเอาต์พุต PWM หรือเป็นขาอินพุต/เอาต์พุตดิจิทัลปกติ
6. รีจิสเตอร์ PWMCON2 (PWM Control register #2) เป็นรีจิสเตอร์กำหนดค่าโพสสเกลเลอร์ (Post scale) สำหรับกระตุ้นการทำงานของโมดูล A/D, กำหนดโหมดการทำงานของสัญญาณสัมพันธ์กับ PWM หรือสัญญาณนาฬิกา (Tcy), เปิด/ปิดการแปลงสัญญาณ PWM กับรีจิสเตอร์บัฟเฟอร์คาบเวลาและรีจิสเตอร์กำหนดดิวิตีไซเคิล

ไดอะแกรมการทำงานของโมดูล MCPWM รายละเอียดบล็อกไดอะแกรมโมดูล MCPWM โดยแบ่งชุดควบคุมและทำงานออกเป็นดังนี้

1. รีจิสเตอร์ควบคุมเวลานับ (PTMR period register)
รีจิสเตอร์ PTMR นำไปเปรียบเทียบกับรีจิสเตอร์ PTPER เพื่อกำหนดคาบเวลาหรือความถี่ให้กับสัญญาณ MCPWM และเปรียบเทียบกับรีจิสเตอร์ PDC1 ถึง PDC4
2. ชุดสร้างสัญญาณ PWM (PWM Generator)

โมดูล MCPWM สามารถที่จะสร้างสัญญาณ PWM ได้มากถึง 4 ชุดเอาต์พุต ที่มีคาบเวลาเดียวกันแต่มีค่าดิวตี้ไซเคิลที่แตกต่างกันได้ โดยที่ชุดสร้างสัญญาณเอาต์พุต PWM จำนวน 4 ชุดจะพบได้ใน dsPIC30F ที่มีจำนวนขาพอร์ตตั้งแต่ 64 ขาเป็นต้นไป การสร้างดิวตี้ไซเคิลใน PWM Generator นั้นจะผ่านชุดควบคุมการสร้างค่าเวลาวิกฤตและชุดควบคุมลอจิก (Dead Time Generator and Override Logic) โดยสัญญาณเอาต์พุตจะผ่านไปยังชุดควบคุมลอจิกก่อนที่จะให้สัญญาณเอาต์พุต PWM ไปที่ขา MCPWM ที่เปิดใช้งานและให้สัญญาณเอาต์พุตเป็นคู่ (PWMxH และ PWMxL) เพื่อความสะดวกในการขับสัญญาณทางด้านต่ำและทางด้านสูงของอุปกรณ์จำพวก Power Half-Bridge

เอาต์พุต PWM โดยตรง (PWM Output Override) โหมดขับสัญญาณเอาต์พุต PWM โดยตรง ในโหมดนี้สามารถขับสัญญาณ PWM, ขับสัญญาณแอกทีฟหรือขับสัญญาณอินแอกทีฟได้ ควบคุมการทำงานผ่านบิต POVDxH และ POVDxL เมื่อต้องการควบคุมการทำงานด้วยการกำหนดค่าโดยตรง และกำหนดค่าผ่านบิต POUTxH และ POUTxL เมื่อต้องการควบคุมผ่านส่วนสร้างสัญญาณ PWM แสดงรูปแบบการควบคุมของโหมดนี้ ในการควบคุมความเร็วการหมุนของมอเตอร์ สัญญาณเอาต์พุต PWM จะถูกขับทางทรานซิสเตอร์ด้านสูง (high side transistors) และในส่วนของดิวตี้ไซเคิลจะเป็นตัวกำหนดขนาดแรงดันปานกลางให้กับมอเตอร์และความเร็ว

ขาตรวจสอบข้อผิดพลาด (PWM Fault Pins) ขาอินพุต Fault A (FLTA) และ B (FLTB) เป็นขาอินพุตตรวจสอบความผิดพลาดของสัญญาณเอาต์พุต PWM เมื่อกำหนดให้ขา PWMxL และ PWMxH ทำงานในโหมดเอาต์พุตสัญญาณ PWM การทำงานของขาอินพุตสัญญาณ Fault A และ B จะอยู่นอกเหนือการควบคุมของซอฟต์แวร์ทำให้ตอบสนองต่อความผิดพลาดของสัญญาณเอาต์พุต PWM ได้อย่างรวดเร็วและปลอดภัยขาอินพุต Fault A และ B จะทำงานที่ลอจิก '0' (Active Low) โดยที่ขา Fault A จะควบคุมผ่านทางรีจิสเตอร์ FLTACON และ Fault B ควบคุมผ่านทางรีจิสเตอร์ FLTBCON รูปแบบการควบคุมสัญญาณตรวจสอบความผิดพลาด

การซิงโครไนส์กับโมดูล ADC (A/D Synchronization) โมดูล MCPWM สามารถนำไปใช้ในการกระตุ้นการทำงานของโมดูล A/D ได้ ผ่านทางความสัมพันธ์ของฐานเวลาของโมดูล MCPWM การกระตุ้นการทำงานของโมดูล A/D ค่าเวลาวิกฤตต่ำสุดจะอยู่ระหว่างการได้ผลลัพธ์ของการแปลงสัญญาณ A/D และการปรับปรุงค่าดิวตี้ไซเคิล

การกระตุ้นการทำงานของโมดูล A/D จะเริ่มต้นเมื่อค่าในรีจิสเตอร์ฐานเวลา PTMR มีค่าตรงกันกับค่าในรีจิสเตอร์ SEVTCMP โดยกำหนดโหมดการเปรียบเทียบนับขึ้นหรือนับลง ผ่านทางบิต SEVTDIR (SEVTCMP < 15) และบิตนี้จะไม่มีการผล หากกำหนดให้โมดูล MCPWM ทำงานในโหมดนับขึ้นลง คุณสมบัติการทำงานในโหมดกระตุ้นสัญญาณนี้ จะถูกใช้มากเพื่อให้เกิดความสัมพันธ์ของช่วงการขับสัญญาณเพื่ออ่านค่าการแบ่งกระแส (shunt currents) หรืออ่านค่ากลับของแรงเคลื่อนไฟฟ้า (emf) ในการควบคุมมอเตอร์แบบ sensorless BLDC มอเตอร์

2. โค้ดโปรแกรมสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์

```
//-----:Include

#include <p30fxxx.h> // generic header file for dsPIC

#include <stdio.h> // for sprintf();

#include <pwm.h> // use MCPWM Module

#include <adc10.h> // 10bit ADC module library functions

#include <timer.h> // timer1 module

#include <incap.h> // Input Capture module

//-----:Config fuses

_FOSC(CSW_FSCM_OFF & XT_PLL4); // Sw Disabled, Mon Disabled,XT w/PLL 1x

_FWDT(WDT_OFF); // Watchdog timer off

#define BACKWARD 1

#define FORWARD 0

#define START _RB2

#define START_TIMER1 T1CONbits.TON=1

#define STOP_TIMER1 T1CONbits.TON=0

#define START_IC2 IC2CONbits.ICM=3

#define STOP_IC2 IC2CONbits.ICM=0

#define STOPT3 T3CONbits.TON=0

#define STARTT3 T3CONbits.TON=1

#define AUTOSTART 0

#define SENSERLESS 1

#define TIMECONST 0.000016

//-----:Library

#include "LCD16x2.c"

//-----:Global variables
```

```

//ตารางOVDแบบauto start
unsigned int OVTable[2][8]=
    {{0x0000, 0x0210, 0x0810, 0x0801, 0x2001, 0x2004, 0x0204, 0x0000}, //ทวนเข็ม
    {0x0000, 0x0204, 0x2004, 0x2001, 0x0801, 0x0810, 0x0210, 0x0000}}; //ตามเข็ม

//ตารางเวลาการเปลี่ยน step ที่10,12,14,16,18,20 เปอร์เซนต์ duty cycle
unsigned int DelayTable[6]={12000,10167,9167,7167,6250,5416};

//ตาราง duty cycle ที่ 10,12,14,16,18,20 เปอร์เซนต์
unsigned int DutyTable[6] = {73 , 88 , 103, 118, 132, 147};

//ตารางโอวีดีแบบ senserless control
unsigned int StateLoTableClk[2][8]=
    {{0x0000, 0x0210, 0x2004, 0x0204, 0x0801, 0x0810, 0x2001, 0x0000}, //Rev
    {0x0000, 0x0204, 0x2001, 0x2004, 0x0810, 0x0210, 0x0801, 0x0000}}; //FW

unsigned int HallValue; //ตัวแปรเก็บค่า hall sencer
unsigned direction; //ตัวแปรเก็บค่าทิศทาง 0 โวลต์ คือทวนเข็ม 5 โวลต์ คือตามเข็ม
char buf[16]; //buffer สำหรับส่งข้อมูลไปยัง lcd
unsigned update_lcd=0;
unsigned blinking_LED=0;
int rpm=0;
double freq=0;
char Int_flag=0; // Interrupt flag
unsigned int time=0;
unsigned tick=0;
unsigned int pot=0;
unsigned state=0;
unsigned first=1;
unsigned int tick_t3=0;
unsigned int i=0;

```

```

unsigned poten_ready=0;

//-----:Delay MS
void Delay_MS(unsigned int ms)
{
    unsigned int i;
    for(; ms>0; ms--)
        for(i=0; i<728; i++)
            Nop();
}

//-----:Timer1 Interrupt
void __attribute__((interrupt, no_auto_psv)) _T1Interrupt(void)
{
    if(blinking_LED==1)          //ถ้าทิศทางตามเข็มนาฬิกาให้หลอดไฟ D3 กะพริบ
        _LATD3 = !_LATD3;
    update_lcd = 1;              //เมื่อครบ 200 ms ให้อัปเดต lcd
    _T1IF = 0; // Clear Timer1 Interrupt flag
}

//-----:Timer3 Interrupt
void __attribute__((interrupt, no_auto_psv)) _T3Interrupt(void)
{
    if(state==AUTOSTART)        //ถ้าเป็น โหมด auto start
    {
        tick_t3++;
        if(tick_t3>200)         //ทำซ้ำ200ครั้งจึงเปลี่ยนค่า duty cycle และค่า delay
        {
            tick_t3=0;
            i++;
        }
    }
}

```

```

        if(i>5)                //ถ้าduty cycle ถึง 20% แล้ว
        {
            if(poten_ready) //ถ้า poten อยู่ในช่วงที่กำหนด ให้เปลี่ยนเป็นโหมด senserless
control
            {
                T3CONbits.TON=0;

                state=SENERLESS;

                PWMCON1 = 0x0000;

                OVDCON = 0x0000;

                Delay_MS(100);

            }else
            {
                i=5;
            }
        }

        PR3=DelayTable[i];

        PDC1=DutyTable[i];

        PDC2=DutyTable[i];

        PDC3=DutyTable[i];

    }

    HallValue++;

    if(HallValue>6) HallValue = 1;

    OVDCON = OVDTTable[direction][HallValue];

}else //(state==SENERLESS)//ถ้าเป็นโหมด senserless ให้อัปเดต ตาราง OVD โดย ดีเลย์ 40 ms
{

    STOPT3;

    HallValue = PORTB & 0x0038;

```

```

        HallValue    = HallValue >> 3;

        OVDCON      = StateLoTableClk[direction][HallValue];

    }

    _T3IF = 0; // Clear Timer1 Interrupt flag
}

//-----:IC1 ISR

void __attribute__((interrupt, no_auto_psv)) _IC2Interrupt(void)
{
    // _LATD0=!_LATD0;

    if(tick==0){

        TMR2=0;

        T2CONbits.TON=1;

        tick=1;

    }else{

        T2CONbits.TON=0;

        time=(TMR2+time)>>1;

        tick=0;

        STOP_IC2;

        Int_flag=1;

    }

    //DisableIntIC2;

    _IC2IF = 0;      // Clear Interrupt flag
}

//-----:CN Interrupt

void __attribute__((interrupt, no_auto_psv)) _CNInterrupt (void)
{

    IFS0bits.CNIF = 0;

```

```

    TMR3=0;

    PR3=200;

    STARTT3;

}

//-----:Timer2 ISR

void __attribute__((interrupt, no_auto_psv)) _T2Interrupt(void)

{

    tick=0;

    //          1234567890123456

    LCDPrintxy(1,2,0,"RPM : 0 r/min");//ถ้าเกินเวลาที่กำหนดแสดงว่ามอเตอร์หยุดหมุน RPM จะเท่ากับ 0

    _T2IF = 0;          // Clear Interrupt flag

}

//-----:Initialize ADC 10bit

void ADC10_Init(void)

{

    unsigned int config1, config2, config3;

    unsigned int configport, configscan;

    unsigned int channel;

    CloseADC10(); // Turn off A/D

    // Configure ADCON1 register

    config1 = ADC_MODULE_OFF &          // A/D Converter off

        ADC_IDLE_CONTINUE &          // A/D Operate in Idle mode

        ADC_FORMAT_INTG &          // A/D data format integer

        ADC_CLK_MPWM &          // sampling/conversion (Auto convert)

        ADC_SAMPLE_INDIVIDUAL & // sequence sampling

        ADC_AUTO_SAMPLING_ON & // Auto sampling Select

        ADC_SAMP_ON;          // sample / hold amplifiers are sampling

```

```

        // Configure ADCON2 register

config2 = ADC_VREF_AVDD_AVSS & // Vref+ is AVdd and Vref- is AVss

        ADC_SCAN_OFF & // Do notScan Input

        ADC_CONVERT_CH_0ABC & // A/D channels utilised

        ADC_SAMPLES_PER_INT_4 & // interrupt at 4th sample

        ADC_ALT_BUF_OFF & // Buffer 16-word buffer

        ADC_ALT_INPUT_OFF; // use MUXA only

// Configure ADCON2 register

config3 = ADC_SAMPLE_TIME_3 & // A/D Auto Sample Time 3 Tad

        ADC_CONV_CLK_SYSTEM & // Clock Source Clock derived from system clock

        ADC_CONV_CLK_3Tcy2; // A/D Conversion Clock Select bits

// Configure ADCHS register

channel = ADC_CH0_POS_SAMPLEA_AN0 & // A/D Chan 0 pos i/p sel for SAMPLE A is AN3

        ADC_CH0_NEG_SAMPLEA_NVREF & // A/D Chan 0 neg i/p sel for SAMPLE A is -Vref

        ADC_CHX_POS_SAMPLEA_AN0AN1AN2 & // A/D Chan A B C pos i/p sel for SAMPLE A are
AN0, 1 and 2

        ADC_CHX_NEG_SAMPLEA_NVREF; // A/D CHA, CHB, CHC neg input is VREF-

configport = 0xFFFE; // ADPCFG register //RB0//ใช้ขา RB0 -> poten

// Configure ADCSSL register

configscan = SCAN_NONE; // Skip AN0-AN15 for Input Scan

// configures the ADC

OpenADC10(config1, config2, config3, configport, configscan);

// sets the positive and negative inputs for the sample multiplexers

SetChanADC10(channel);

IFS0bits.ADIF = 0;

//IEC0bits.ADIE = 1;

_ADON = 1;

```

```

}

//-----:Init_MCPWM

// Initialize MCPWM

void Init_MCPWM(void)
{
    unsigned int period, sptime;

    unsigned int config1, config2, config3;

    period = 367;          // Set to PTPER register//ความถี่ PWM = 20kHz

    sptime = 367;         // Set to SEVTCMP register

    config1 = (PWM_EN &          // Module enable
               PWM_OP_SCALE1 &  // Out put post scaler 1:1
               PWM_IPCLK_SCALE1 & // Input pre scaler 1:1
               PWM_MOD_FREE      // Mode of operation Free Running
            );

    config2 = (PWM_MOD1_COMP &    // 1th channel in independant mode
               PWM_MOD2_COMP &
               PWM_MOD3_COMP &
               PWM_PDIS1H &      // H of channel 1 works as PWM
               PWM_PDIS2H &
               PWM_PDIS3H &
               PWM_PDIS1L &
               PWM_PDIS2L &
               PWM_PDIS3L
            );

    config3 = (PWM_SEVOPS1 &     // Special event post scaler 1:1
               PWM_OSYNC_PWM &  // over ride synchronised with PWM clk
               PWM_UEN           // Update of PDCs and PTPER enabled
    );
}

```

```

    );

    OpenMCPWM(period, sptime, config1, config2, config3);

    // Configure PWM to generate square wave of 0% duty cycle

    PDC1 = 73;//duty cycle เริ่มต้น = 10%

    PDC2 = 73;

    PDC3 = 73;

    OVDCON = 0x0000;
}

//-----:Initialize

void Timer1Init(void)
{
    unsigned int config, period;

    CloseTimer1();                // Close Timer1

    ConfigIntTimer1(T1_INT_ON);    // Config Int Timer1

    // Timer1 Control Register (T1CON) Bit Defines

    config = T1_OFF &                // Timer1 ON

        T1_IDLE_STOP &                // stop operation during sleep

        T1_GATE_OFF &                // Timer Gate time accumulation disabled

        T1_PS_1_256 &                // Prescaler 1:256

        T1_SYNC_EXT_OFF &            // Do not synch external clk input

        T1_SOURCE_INT;                // Internal clock source

    period = 5760;                  // Set PR1 Register = 0.2s

    OpenTimer1(config,period);      // Open Timer1

    IPC0bits.T1IP = 1;

}

//-----:Initialize

```

```

void Timer3Init(void)
{
    unsigned int config, period;

    CloseTimer3();          // Close Timer3

    ConfigIntTimer3(T3_INT_ON); // Timer3 Interrupt Enable

    // Timer3 Control Register (T3CON) Bit Defines

    config = T3_OFF &      // Timer3 ON
            T3_IDLE_STOP & // stop operation during sleep
            T3_GATE_OFF & // Timer Gate time accumulation disabled
            T3_PS_1_8 &    // Prescaler 1:8
            //T3_32BIT_MODE_OFF & // Timer 32 bit Timer OFF
            T3_SOURCE_INT; // Internal clock source

    period = 12000;        // PR3 Register //ค่า ดีเลย์ ของ duty cycle 10%

    OpenTimer3(config,period); // Open Timer3

    IPC1bits.T3IP = 2;

}

//-----:IC1_Init

// Initialize Input Capture1

void IC2_Init(void)
{
    unsigned int config, period;

    CloseCapture2();      // CloseCapture 2

    // ConfigIntCapture2

    ConfigIntCapture2(IC_INT_ON); // Input Capture Enable

    // OpenCapture2

    config = IC_IDLE_CON & // IC operate in sleep mode

```

```

    IC_TIMER2_SRC &    // Timer2 is the clock source for Capture

    IC_INT_1CAPTURE & // Interrupt on first Capture

    IC_INPUTCAP_OFF;   // Every falling edge

OpenCapture2(config);

CloseTimer2();        // Close Timer2

ConfigIntTimer2(T2_INT_ON); // Timer2 Interrupt Enable

// Timer2 Control Register (T2CON) Bit Defines

config = T2_OFF &    // Timer2 ON

    T2_IDLE_STOP &    // stop operation during sleep

    T2_GATE_OFF &    // Timer Gate time accumulation disabled

    T2_PS_1_64 &     // Prescaler 1:64

    T2_32BIT_MODE_OFF & // Timer 32 bit Timer OFF

    T2_SOURCE_INT;    // Internal clock source

period = 0xFFFF;    // PR2 Register

OpenTimer2(config,period); // Open Timer2

IPC1bits.IC2IP = 3;

}

//-----:Main

int main(void)

{

    unsigned runMotor;

    _TRISB1 = 1;    // RB1 input from Forward/Reward button

    _TRISB2 = 1;    // RB2 is START/STOP

    _TRISB3 = 1;    // RB3 input from HallA

    _TRISB4 = 1;    // RB4 input from HallB

    _TRISB5 = 1;    // RB5 input from HallC

    _LATD0 = 0;

```

```

_LATD3 = 0;

_TRISD0 = 0;          // LED for START/STOP

_TRISD3 = 0;        // LED for FORWARD/BACKWARD

_TRISD1 = 1;        // Set RD1 input for IC2

LCDInit();

LCDPrintxy(1,1,0," Motor Control ");

LCDPrintxy(1,2,0," By MoZo  ");

Delay_MS(2000);

LCDClrscr();

LATE = 0x0000;

TRISE = 0xFFC0;

//ประกาศเริ่มต้นการทำงานของฟังก์ชัน

Init_MCPWM(); // Initialize MCPWM

Timer1Init(); // Initialize TIMER

Timer3Init(); // Initialize TIMER3

ADC10_Init(); // Initialize ADC10bit

IC2_Init(); // Initialize INPUTCAPTURE

//loop infinity

while(1)

{

_LATD0 = 0;          //หลอดไฟD0 และ D3 ดับ

_LATD3 = 0;

while(!START);      //รอ สวิตช์ start

_LATD0 = 1;          //หลอดไฟ D0 ติด

TMR1 = 0;

START_TIMER1;       //เริ่มต้นนับเวลา อัปเดต LCD

direction = _RB1;

```

```

if(direction==BACKWARD)//เช็คทิศทาง
{
    blinking_LED=1; //ถ้าทิศทางตามเข็มให้ D3 กระพริบ
}else
{
    blinking_LED=0;
    _LATD3=1; //ถ้าทิศทางทวนเข็ม ให้ D3 ติดตลอด
}

HallValue = 1; //เริ่มต้นหมุนมอเตอร์แบบ auto start duty 10%
OVDCON = OVTable[direction][HallValue];
TMR3=0;
T3CONbits.TON=1;
PWMCON1 = 0x0077;
runMotor = 1;
START_IC2; // Enable IC2//เริ่มต้นวัดค่า RPM
while(runMotor) {
    if(state == SENSERLESS && first)//ถ้าเป็นโหมด senserless ในครั้งแรกให้เปิด ฟังก์ชัน
    CN(เปิดการอ่านค่าจากขา RB3,4,5)
    {
        first = 0;
        // Hall Sener to CNInt
        CNEN1 = 0x00E0;
        IFS0bits.CNIF = 0;
        IEC0bits.CNIE = 1;
        IPC3bits.CNIP = 3;

        HallValue = PORTB & 0x0038;
    }
}

```

```

HallValue = HallValue >> 3;

OVDCON = StateLoTableClk[direction][HallValue];

PWMCON1 = 0x0077;

// Enable ADC10bit

//_ADON = 1;

}

if(update_lcd)

{

    _DONE = 0; //อ่านค่าจาก poten

    while(!_DONE);

    pot = (ADCBUF0+pot)>>1;

    int duty = 0.89688*pot-91.75;

    if(duty>734) duty=734; //จำกัดค่าที่ 0-100% duty cycle

    else if(duty<0) duty=0;

    else;

    if(state==AUTOSTART)//ถ้าเป็นโหมด auto start

    {

if(140<duty && duty<150)//ถ้า poten อยู่ในช่วง 19-20% ให้ ชิงค์เข้าสู่โหมดsensorless control

        {

            poten_ready=1;

            // 1234567890123456

            sprintf(buf,"Duty: %4d %% OK",(int)(duty/7.34));

            LCDPrintxy(1,1,0,buf);

        }else//ถ้า poten ไม่อยู่ในช่วง 19-20% ไม่ต้อง ชิงค์

        {

            sprintf(buf,"Duty: %4d %% ",(int)(duty/7.34));

            LCDPrintxy(1,1,0,buf);

        }

    }

}

```

```

    }
}

else //(state==SENERLESS)ถ้าเป็นโหมด senserless ให้ปรับค่า duty cycle ตาม poten
{
    PDC1 = duty;

    PDC2 = duty;

    PDC3 = duty;

    //          1234567890123456

sprintf(buf,"Duty: %4d %% Syn",(int)(duty/7.34));//แสดงข้อความว่า Syn ที่ จอLCD

    LCDPrintxy(1,1,0,buf);

}

if(Int_flag)
{
    freq = 1.0/(time*TIMECONST);//วัดค่า RPM โดยมอเตอร์ = 12 pole

    rpm = 120.0*freq/12.0;

    sprintf(buf,"RPM : %4d r/min",rpm);

    LCDPrintxy(1,2,0,buf);

Int_flag = 0;

START_IC2;

}

}

if(direction != _RB1) { //ถ้าทิศทางเปลี่ยนแปลงให้ รีเซ็ต ระบบ

    STOP_TIMER1; //รีเซ็ตระบบ

    T2CONbits.TON=0;

    STOP_IC2;

    PWMCON1 = 0x0000;

    OVDCON = 0x0000;

```

```

state = AUTOSTART;

first = 1;

CNEN1 = 0x0000;

tick_t3=0;

T3CONbits.TON=0;

PR3=12000;

i=0;

poten_ready=0;

LCDPrintxy(1,1,0,"Duty:  0 %  ");

LCDPrintxy(1,2,0,"RPM :  0 r/min");

PDC1 = 73;

PDC2 = 73;

PDC3 = 73;

runMotor = 0;

}

if(!START) {                                     //ถ้าสวิตช์ start off ให้รีเซ็ตระบบ

    STOP_TIMER1;                                 //รีเซ็ตระบบ

    T2CONbits.TON=0;

    STOP_IC2;

    PWMCON1 = 0x0000;

    OVDCON = 0x0000;

    state = AUTOSTART;

    first = 1;

    CNEN1 = 0x0000;

    tick_t3=0;

    T3CONbits.TON=0;

    PR3=12000;

```

```
        i=0;

        poten_ready=0;

        //                                1234567890123456

        LCDPrintxy(1,1,0,"Duty:  0 %  ");

        LCDPrintxy(1,2,0,"RPM :  0 r/min");

        PDC1 = 73;

        PDC2 = 73;

        PDC3 = 73;

        runMotor = 0;

    }

}

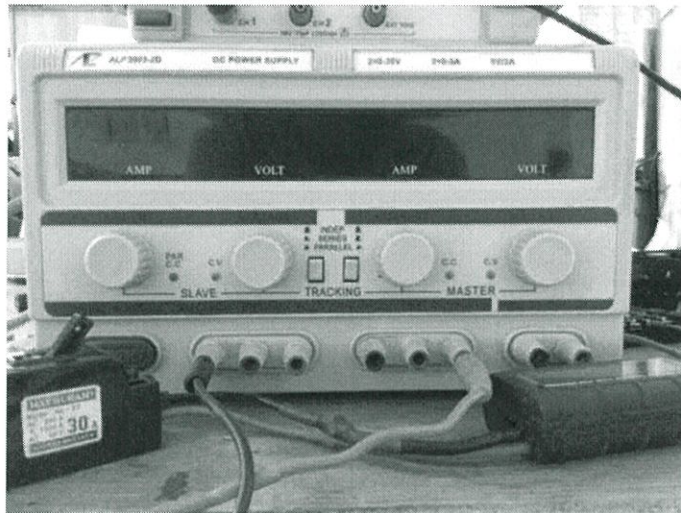
return 0;

}
```

ภาคผนวก

เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดทั้งหมด

1. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง แรงดันสูงสุด 30 V กระแส 6 A

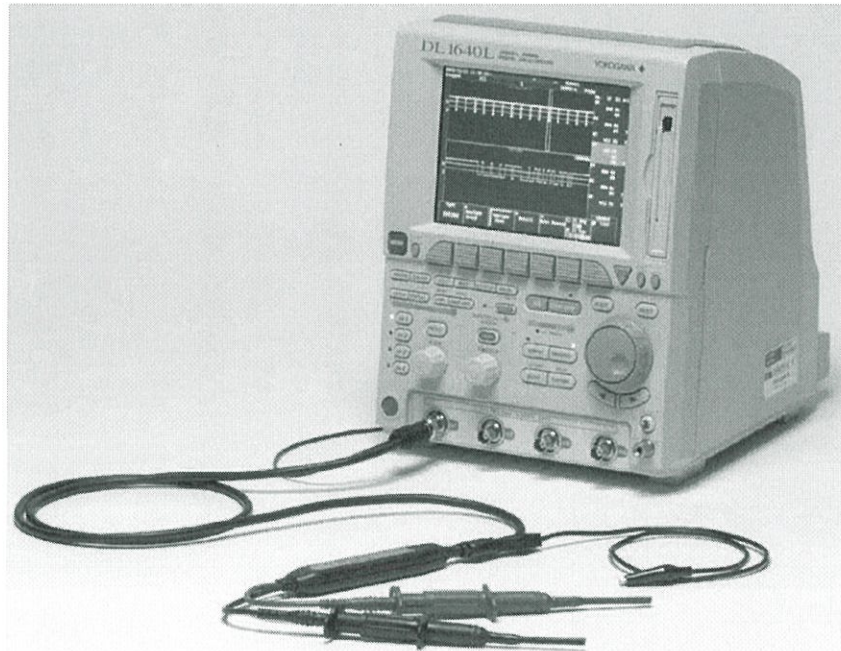


2. เครื่องมือวัดระดับสัญญาณฮามอนิกส์



เครื่องมือวัดระดับสัญญาณฮามอนิกส์ Fluke 43b

3. Oscilloscope



Oscilloscope Yokogawa D1620

4. ตาชั่งแบบแขวนสำหรับการทดสอบภาระทางกล



ตาชั่งแบบแขวน

ตาชั่งแบบแขวน OEM มีช่วงน้ำหนักทำงานตั้งแต่ 10 g ถึง 45 kg ความละเอียดตาชั่ง 10 g

5 เครื่องมือวัดความเร็วรอบมอเตอร์



เครื่องมือวัดความเร็วรอบมอเตอร์ Digicon DT-250 TP

วัดได้ 2 แบบคือ แบบใช้แสง และแบบหัวหมุน ในการวัดแบบใช้แสงมีขนาดช่วงความเร็วรอบตั้งแต่ 5 - 99,999 รอบต่อนาที ถ้าใช้แบบหัวหมุนจะมีช่วงความเร็วรอบตั้งแต่ 0.5 - 20,000 รอบต่อนาที ค่าความผิดพลาดไม่เกิน 0.02% ระยะในการวัดที่แน่นอนควรอยู่ในช่วง 80 mm

ภาคผนวก

อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการทดลอง

2. LM2575HVT-12



LM1575, LM2575-N, LM2575HV

www.ti.com

SNVS106E-MAY 1999-REVISED APRIL 2013

LM1575/LM2575/LM2575HV SIMPLE SWITCHER® 1A Step-Down Voltage Regulator

Check for Samples: LM1575, LM2575-N, LM2575HV

FEATURES

- 3.3V, 5V, 12V, 15V, and Adjustable Output Versions
- Adjustable Version Output Voltage Range,
 - 1.23V to 37V (57V for HV Version) ±4% Max Over
 - Line and Load Conditions
- Specified 1A Output Current
- Wide Input Voltage Range, 40V up to 60V for HV Version
- 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
- P* Product Enhancement Tested

DESCRIPTION

The LM2575 series of regulators are monolithic integrated circuits that provide all the active functions for a step-down (buck) switching regulator, capable of driving a 1A load with excellent line and load regulation. These devices are available in fixed output voltages of 3.3V, 5V, 12V, 15V, and an adjustable output version.

Requiring a minimum number of external components, these regulators are simple to use and include internal frequency compensation and a fixed-frequency oscillator.

The LM2575 series offers a high-efficiency replacement for popular three-terminal linear regulators. It substantially reduces the size of the heat sink, and in many cases no heat sink is required.

A standard series of inductors optimized for use with the LM2575 are available from several different manufacturers. This feature greatly simplifies the design of switch-mode power supplies.

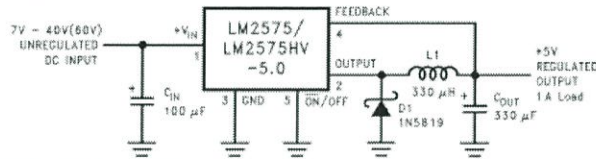
Other features include a specified ±4% tolerance on output voltage within specified input voltages and output load conditions, and ±10% on the oscillator frequency. External shutdown is included, featuring 50 µA (typical) standby current. The output switch includes cycle-by-cycle current limiting, as well as thermal shutdown for full protection under fault conditions.

APPLICATIONS

- Simple High-Efficiency Step-Down (Buck) Regulator
- Efficient Pre-Regulator for Linear Regulators
- On-Card Switching Regulators
- Positive to Negative Converter (Buck-Boost)

Typical Application

(Fixed Output Voltage Versions)



Pin numbers are for the TO-220 package.



LM1575, LM2575-N, LM2575HV

www.ti.com

SNVS106E-MAY 1999-REVISED APRIL 2013

Connection Diagrams

(XX indicates output voltage option.)

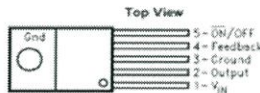


Figure 2. Straight Leads 5-Lead TO-220 Package LM2575T-XX or LM2575HVT-XX See Package Number KC0005A

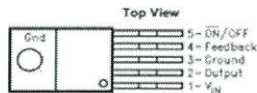


Figure 3. Bent, Staggered Leads 5-Lead TO-220 Package See Package Number NDH0005D

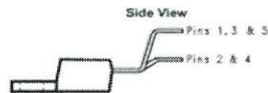
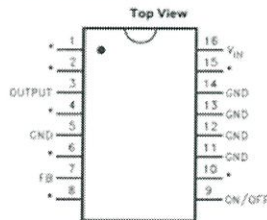
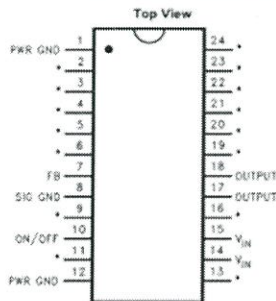


Figure 4. LM2575T-XX Flow LB03 or LM2575HVT-XX Flow LB03 See Package Number NDH0005D



*No Internal Connection

Figure 5. 16-Lead CDIP and PDIP Packages LM2575N-XX or LM2575HVN-XX LM1575J-XX-QML See Package Numbers NFE0016A and NBG



*No Internal Connection

Figure 6. 24-Lead Surface Mount SOIC Package LM2575M-XX or LM2575HVM-XX See Package Number DW0024B

1. ไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F4011 [21]



dsPIC30F4011/4012

High-Performance, 16-Bit Digital Signal Controllers

Note: This data sheet summarizes features of this group of dsPIC30F devices and is not intended to be a complete reference source. For more information on the CPU, peripherals, register descriptions and general device functionality, refer to the "dsPIC30F Family Reference Manual" (DS70046). For more information on the device instruction set and programming, refer to the "16-bit MCU and DSC Reference Manual" (DS70157).

High-Performance, Modified RISC CPU:

- Modified Harvard architecture
- C compiler optimized instruction set architecture with flexible addressing modes
- 83 base instructions
- 24-bit wide instructions, 16-bit wide data path
- 48 Kbytes on-chip Flash program space (16K instruction words)
- 2 Kbytes of on-chip data RAM
- 1 Kbyte of nonvolatile data EEPROM
- Up to 30 MIPS operation:
 - DC to 40 MHz external clock input
 - 4 MHz-10 MHz oscillator input with PLL active (4x, 8x, 16x)
- 30 interrupt sources:
 - Three external interrupt sources
 - Eight user-selectable priority levels for each interrupt source
 - Four processor trap sources
- 16 x 16-bit working register array

DSP Engine Features:

- Dual data fetch
- Accumulator write-back for DSP operations
- Modulo and Bit-Reversed Addressing modes
- Two, 40-bit wide accumulators with optional saturation logic
- 17-bit x 17-bit single-cycle hardware fractional/integer multiplier
- All DSP instructions are single cycle
- ± 16 -bit, single-cycle shift

Peripheral Features:

- High-current sink/source I/O pins: 25 mA/25 mA
- Timer module with programmable prescaler:
 - Five 16-bit timers/counters; optionally pair 16-bit timers into 32-bit timer modules
- 16-bit Capture input functions
- 16-bit Compare/PWM output functions
- 3-wire SPI modules (supports 4 Frame modes)
- I²C™ module supports Multi-Master/Slave mode and 7-bit/10-bit addressing
- Two UART modules with FIFO Buffers
- CAN module, 2.0B compliant

Motor Control PWM Module Features:

- Six PWM output channels:
 - Complementary or Independent Output modes
 - Edge and Center-Aligned modes
- Three duty cycle generators
- Dedicated time base
- Programmable output polarity
- Dead-time control for Complementary mode
- Manual output control
- Trigger for A/D conversions

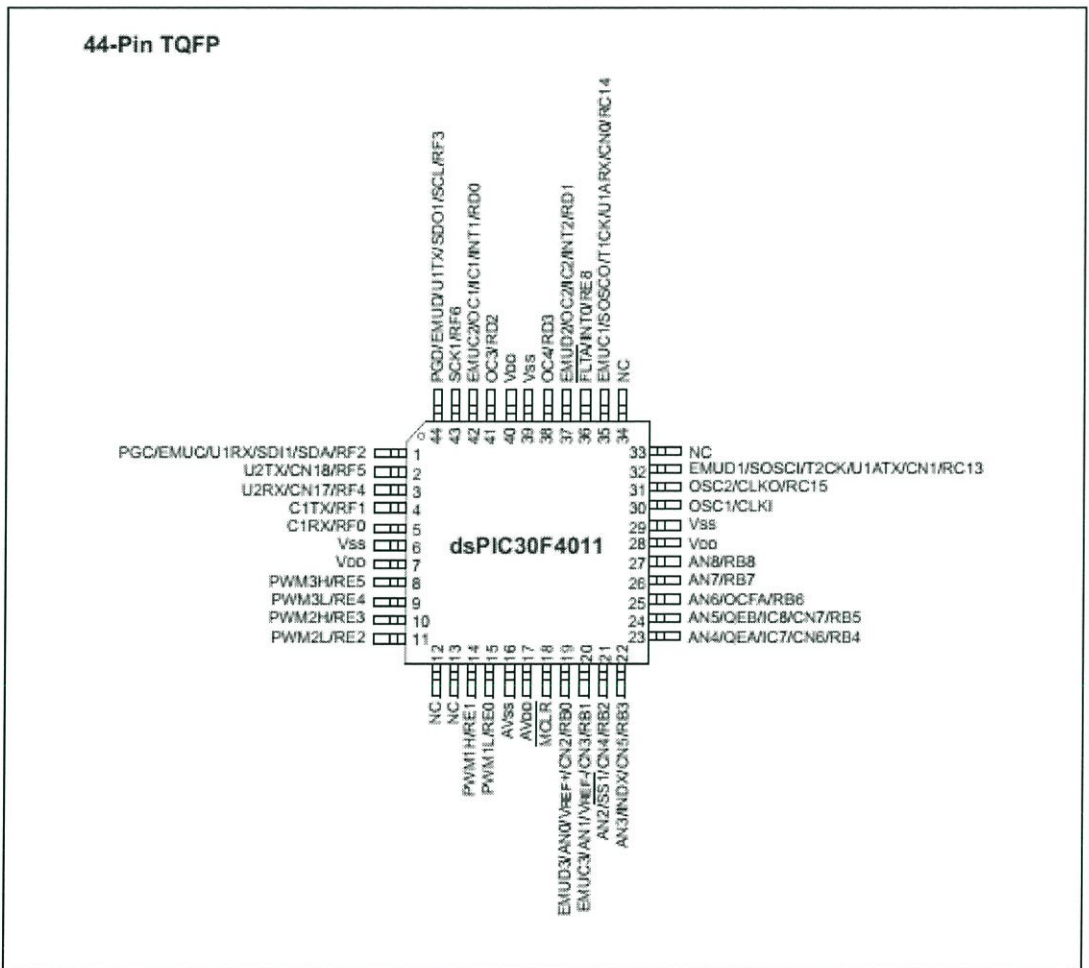
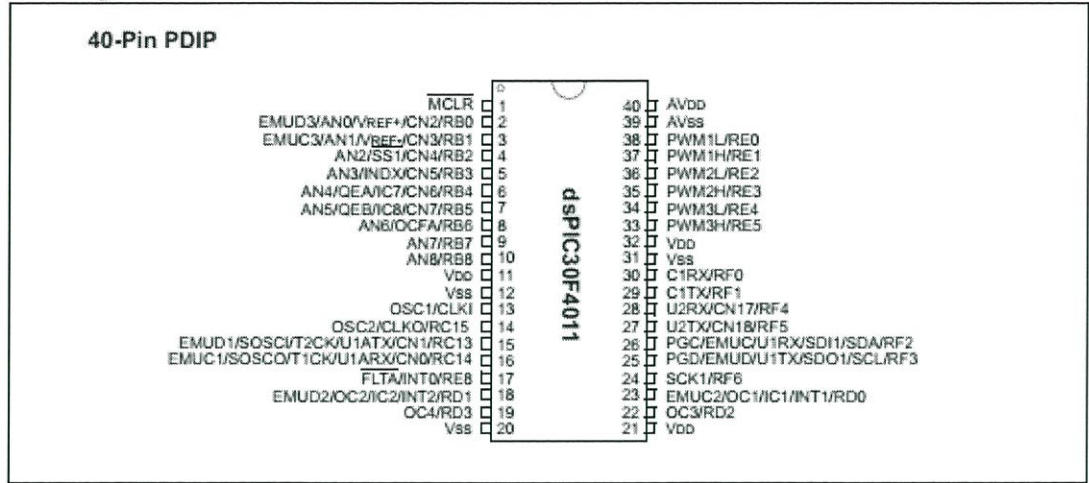
Quadrature Encoder Interface Module Features:

- Phase A, Phase B and Index Pulse input
- 16-bit up/down position counter
- Count direction status
- Position Measurement (x2 and x4) mode
- Programmable digital noise filters on inputs
- Alternate 16-bit Timer/Counter mode
- Interrupt on position counter rollover/underflow

Analog Features:

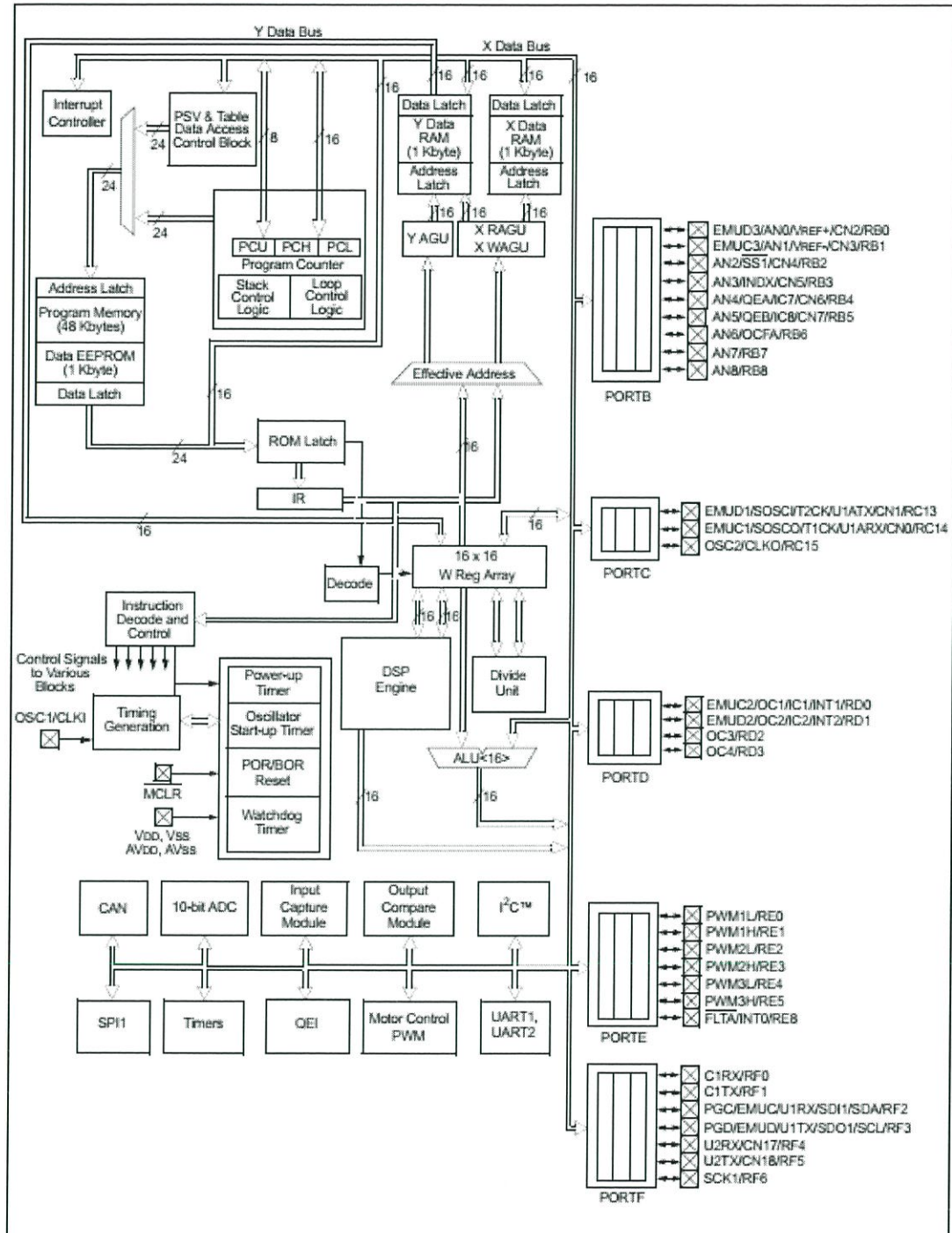
- 10-bit Analog-to-Digital Converter (ADC) with four Sample and Hold (S&H) inputs:
 - 1 Msps conversion rate
 - Nine input channels
 - Conversion available during Sleep and Idle
- Programmable Brown-out Reset

Pin Diagrams



dsPIC30F4011/4012

FIGURE 1-1: dsPIC30F4011 BLOCK DIAGRAM



3. LM324



LM124
LM224 - LM324

LOW POWER QUAD OPERATIONAL AMPLIFIERS

- WIDE GAIN BANDWIDTH : 1.3MHz
- INPUT COMMON-MODE VOLTAGE RANGE INCLUDES GROUND
- LARGE VOLTAGE GAIN : 100dB
- VERY LOW SUPPLY CURRENT/AMPLI : 375µA
- LOW INPUT BIAS CURRENT : 20nA
- LOW INPUT OFFSET VOLTAGE : 5mV max.
(for more accurate applications, use the equivalent parts LM124A-LM224A-LM324A, which feature 3mV max)
- LOW INPUT OFFSET CURRENT : 2nA
- WIDE POWER SUPPLY RANGE :
SINGLE SUPPLY : +3V TO +30V
DUAL SUPPLIES : ±1.5V TO ±15V



DESCRIPTION

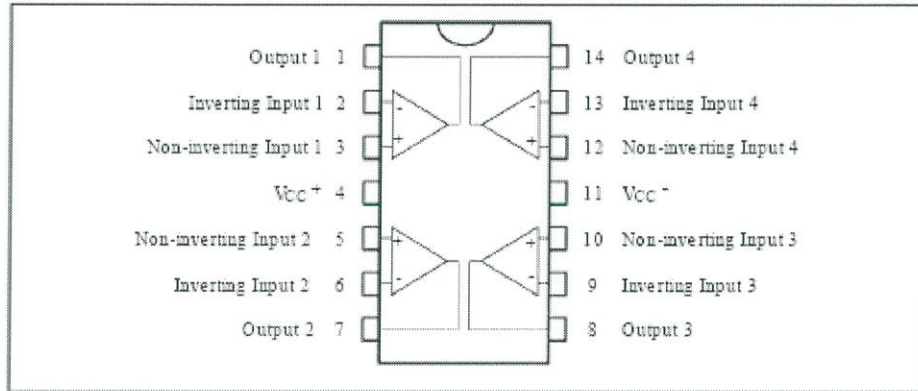
These circuits consist of four independent, high gain, internally frequency compensated operational amplifiers. They operate from a single power supply over a wide range of voltages. Operation from split power supplies is also possible and the low power supply current drain is independent of the magnitude of the power supply voltage.

ORDER CODES

Part Number	Temperature Range	Package		
		N	D	P
LM124	-55°C, +125°C	•	•	•
LM224	-40°C, +105°C	•	•	•
LM324	0°C, +70°C	•	•	•

Example : LM224N

PIN CONNECTIONS (top view)



4. IR2101

International
IR Rectifier

Data Sheet No. PD60043 Rev.O

IR2101(S)/IR2102(S) &(PbF)**HIGH AND LOW SIDE DRIVER****Product Summary**

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

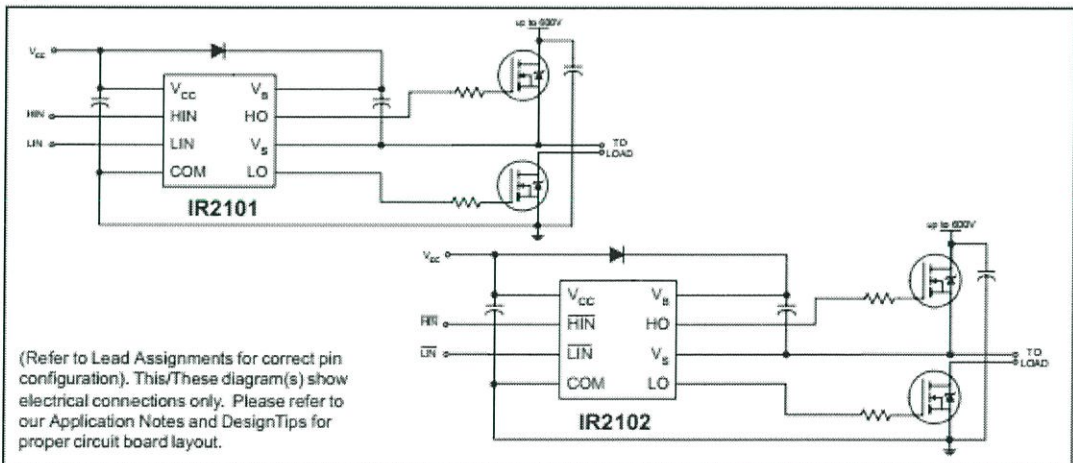
Features

- 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

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.

Packages8-Lead SOIC
IR2101S/IR2102S8-Lead PDIP
IR2101/IR2102**Typical Connection**

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

International
IOR Rectifier

Absolute Maximum Ratings

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

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

Recommended Operating Conditions

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

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

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

5. IRF2807

International
IR Rectifier

PD-91517A

IRF2807

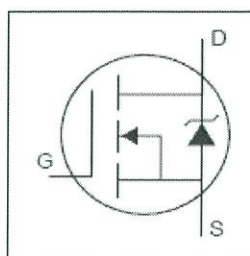
HEXFET® Power MOSFET

- Advanced Process Technology
- Dynamic dv/dt Rating
- 175°C Operating Temperature
- Fast Switching
- Fully Avalanche Rated

Description

Fifth Generation HEXFETs 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.

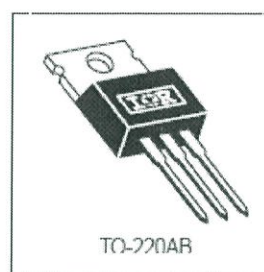
The TO-220 package is universally preferred for all commercial-industrial applications at power dissipation levels to approximately 50 watts. The low thermal resistance and low package cost of the TO-220 contribute to its wide acceptance throughout the industry.



$$V_{DSS} = 75V$$

$$R_{DS(on)} = 0.013\Omega$$

$$I_D = 82A^{\text{①}}$$

**Absolute Maximum Ratings**

	Parameter	Max.	Units
$I_D @ T_C = 25^\circ C$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10V$	82 ^①	A
$I_D @ T_C = 100^\circ C$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10V$	58	
I_{DM}	Pulsed Drain Current ^①	280	
$P_D @ T_C = 25^\circ C$	Power Dissipation	200	W
	Linear Derating Factor	1.3	W/°C
V_{GS}	Gate-to-Source Voltage	± 20	V
E_{AS}	Single Pulse Avalanche Energy ^②	570	mJ
I_{AR}	Avalanche Current ^①	43	A
E_{AR}	Repetitive Avalanche Energy ^①	20	mJ
dv/dt	Peak Diode Recovery dv/dt ^③	5.0	V/ns
T_J	Operating Junction and	-55 to + 175	°C
T_{STG}	Storage Temperature Range		
	Soldering Temperature, for 10 seconds		
	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	—	0.75	°C/W
$R_{\theta CS}$	Case-to-Sink, Flat, Greased Surface	0.50	—	
$R_{\theta JA}$	Junction-to-Ambient	—	62	

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	—	0.078	—	V/°C	Reference to 25°C , $I_D = 1\text{mA}$
$R_{DS(on)}$	Static Drain-to-Source On-Resistance	—	—	0.013	Ω	$V_{GS} = 10V, I_D = 43A$ 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	30	—	—	S	$V_{DS} = 50V, I_D = 43A$
I_{DSS}	Drain-to-Source Leakage Current	—	—	25	μA	$V_{DS} = 75V, V_{GS} = 0V$ $V_{DS} = 60V, V_{GS} = 0V, T_J = 150^\circ\text{C}$
I_{GSS}	Gate-to-Source Forward Leakage	—	—	100	nA	$V_{GS} = 20V$
	Gate-to-Source Reverse Leakage	—	—	-100	nA	$V_{GS} = -20V$
Q_g	Total Gate Charge	—	—	150	nC	$I_D = 43A$
Q_{gs}	Gate-to-Source Charge	—	—	24	nC	$V_{DS} = 60V$
Q_{gd}	Gate-to-Drain ("Miller") Charge	—	—	55	nC	$V_{GS} = 10V$, See Fig. 6 and 13 ④
$t_{d(on)}$	Turn-On Delay Time	—	14	—	ns	$V_{DD} = 38V$ $I_D = 43A$ $R_G = 2.5\Omega$ $R_D = 0.87\Omega$, See Fig. 10 ④
t_r	Rise Time	—	62	—		
$t_{d(off)}$	Turn-Off Delay Time	—	47	—		
t_f	Fall Time	—	58	—		
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	—	3400	—	pF	$V_{GS} = 0V$ $V_{DS} = 25V$ $f = 1.0\text{MHz}$, See Fig. 5
C_{oss}	Output Capacitance	—	830	—		
C_{rss}	Reverse Transfer Capacitance	—	240	—		

Source-Drain Ratings and Characteristics

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
I_S	Continuous Source Current (Body Diode)	—	—	82 ⑤	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	—	—	1.3	V	$T_J = 25^\circ\text{C}$, $I_S = 43A$, $V_{GS} = 0V$ ④
t_{rr}	Reverse Recovery Time	—	120	190	ns	$T_J = 25^\circ\text{C}$, $I_F = 43A$
Q_{rr}	Reverse Recovery Charge	—	510	760	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 $T_J = 25^\circ\text{C}$, $L = 620\mu H$
 $R_G = 25\Omega$, $I_{AS} = 43A$. (See Figure 12)
- ③ $I_{SD} \leq 43A$, $di/dt \leq 330A/\mu s$, $V_{DD} \leq V_{(BR)DSS}$,
 $T_J \leq 175^\circ\text{C}$
- ④ Pulse width $\leq 300\mu s$; duty cycle $\leq 2\%$.
- ⑤ Calculated continuous current based on maximum allowable junction temperature; for recommended current-handling of the package refer to Design Tip # 93-4

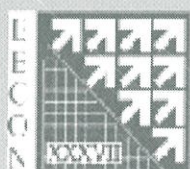
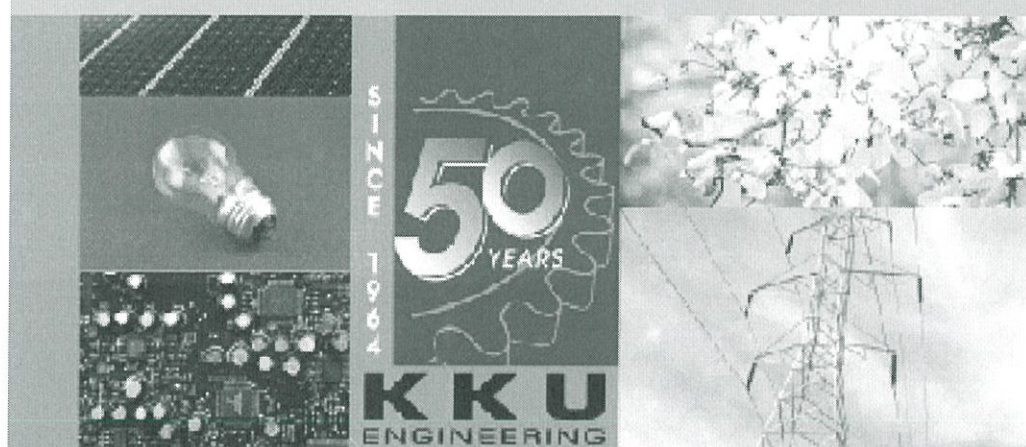
ภาคผนวก

บทความทางวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 37
 The 37th Electrical Engineering Conference
 (EECON-37)

วันที่ 19-21 พฤศจิกายน 2557 ณ โรงแรมพูลแมน ขอนแก่น ราชา ออคิด

Vol.1
 PW, PE



ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
 มหาวิทยาลัยขอนแก่น
 KHON KAEN UNIVERSITY



การออกแบบควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านปราศจากเซนเซอร์ ด้วยการตรวจจับสัญญาณผ่านศูนย์ Design Technique of brushless DC motor control with Sensorless Back EMF Zero Crossing Detection

กฤตภาส มินสันทีชะ, นัฐวรรษ จำปาศรี, กวีพงษ์ วรนครสุทธิกุล, เหวิน นิลสาคร และวีระเชษฐ์ ชันเงิน
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขที่ 1 ซอยฉลองกรุง 1 ถนนฉลองกรุง แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 โทรศัพท์ 0-2329-8321 E-mail: s5610733@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอการออกแบบควบคุมมอเตอร์กระแสตรง ไร้แปรงถ่าน (BLDC) ที่ใช้กำลัง 100 วัตต์ 24 โวลต์ และ 4,000 รอบต่อ นาที โดยปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์ ซึ่งการทำงานของ มอเตอร์ชนิดนี้ จำเป็นต้องมีการตรวจสอบตำแหน่งของโรเตอร์ขณะหมุน นั่นก็คือเซนเซอร์ตรวจจับทิศทางของขั้วแม่เหล็ก แต่ถ้าหากสายสัญญาณ เซนเซอร์ที่ใช้มีระยะทางไกล หรือมีข้อจำกัดของสภาพแวดล้อมที่ไม่ เอื้ออำนวยเช่นอุณหภูมิ สายขั้วรด ฯลฯ อาจทำให้มอเตอร์ทำงานผิดปกติ ได้ ดังนั้นวิธีการควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบปราศจาก ตัวตรวจจับตำแหน่ง จะช่วยลดความสับสนและข้อจำกัดของระบบได้ ซึ่งจะนำเสนอบนหลักการของแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ (BackEMF) ที่ ตัดผ่านศูนย์ของขั้วมอเตอร์ ซึ่งอาศัยวงจรตรวจจับสัญญาณผ่านศูนย์ โดยระบบการควบคุมจะถูกประมวลผลด้วยสัญญาณดิจิทัล (DSC) ทำการเลื่อนเฟส 30 องศาจากตำแหน่งตัดผ่านศูนย์ แล้วแปลงสัญญาณ ที่ดับบิวเอมเพื่อขับอินเวอร์เตอร์แบบหกขั้ว (Six Step) นำไปใช้ในการ ควบคุมการหมุนของโรเตอร์ โดยขบวนการควบคุมที่ได้ในช่วง 500 - 4,000 รอบต่อนาที จากการทดลองพบว่า การใช้สัญญาณของ แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับสามารถนำมาใช้ในการขับมอเตอร์กระแสตรง แบบไม่มีแปรงถ่านได้

คำสำคัญ: แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ, มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไม่มี แปรงถ่าน, การควบคุมแบบไม่มีเซนเซอร์, สัญญาณตัดผ่านศูนย์

Abstract

This paper presents the sensorless BLDC motor controller designing. The 100 Watts at 24 V and 4000 rpm without the Hall Effect Sensors BLDC motor was used in this experimental. But this kind of controller must detect the magnetic pole of rotor position to controlled motor. So the data from all sensors have to transfer by wire. This is one of weakness in the controller which is making the distortion. So the sensorless BLDC motor controller mitigate these problems. The sensorless BLDC motor controller uses the back EMF that crossing zero of the pole in motor. The zero crossing was detected by the

detection system (DSC) then shift phase 30° from zero crossing position. After that the controller will transform these signals to PWM signal for drive the six step inverter and send to drive motor. From the experimental this kind of controller can apply to the BLDC motor speed range 500 – 4,000 rpm.

Keywords: Back EMF, BLDC motor, Senseless control, Zero crossing

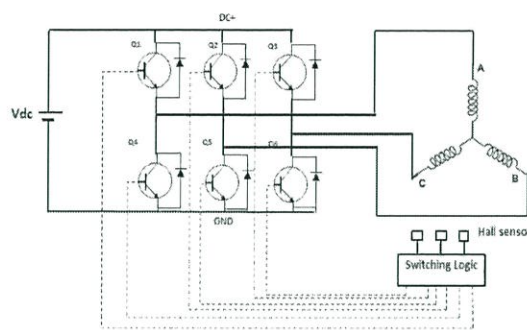
1. บทนำ

ในปัจจุบันนี้มีการนำเอามอเตอร์กระแสตรงแบบแม่เหล็กถาวร ไร้แปรงถ่านมาใช้ประโยชน์มากมายในอุตสาหกรรมและ เครื่องใช้ในครัวเรือนต่างๆ เพราะเป็นมอเตอร์ที่มีกำลังและ ประสิทธิภาพสูง จากการทำงานที่ไร้แปรงถ่านนั้น จึงเป็นข้อได้เปรียบ กว่ามอเตอร์กระแสตรงที่มีแปรงถ่านในเรื่องการบำรุงรักษา แต่ในการ ขับเคลื่อนมอเตอร์ชนิดนี้จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังคือ อินเวอร์เตอร์ และยังเป็นต้องใช้การทำงานร่วมกับเซนเซอร์ในการ ตรวจจับตำแหน่งของขั้วแม่เหล็กในการใช้สังขวิทซ์ซึ่ง ซึ่งเป็น สัญญาณหกขั้วในการขับอินเวอร์เตอร์ อย่างไรก็ตามเป็นที่รู้กันดีว่า เซนเซอร์เหล่านี้มีขีดจำกัดในงานบางประเภทไม่สามารถติดตั้งได้ เช่น งานที่มีอุณหภูมิสูง สายสัญญาณเข้าถึงได้ยากกับแคบ หรือถ้าหากเกิดสาย เซนเซอร์หลุดขาดไปสายใดสายหนึ่ง มอเตอร์ก็ไม่สามารถทำงานได้ ซึ่ง อาจจะต้องมีการป้องกันแต่จะทำให้ราคาสูงขึ้นอีก ในบทความนี้จะ นำเสนอการออกแบบควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน ด้วย เทคนิคการตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับที่ตัดผ่านศูนย์โดยใช้วงจร ตรวจจับสัญญาณผ่านศูนย์ [1] เพื่อช่วยในการหาตำแหน่งของโรเตอร์ เมื่อทราบตำแหน่งของโรเตอร์แล้วจะทำกรประมวลผลด้วยตัวควบคุม สัญญาณดิจิทัล dsPIC ขนาด 16 บิต โดยจะส่งสัญญาณที่ดับบิวเอมใน การขับเคลื่อนอินเวอร์เตอร์แบบหกขั้ว (Six – step inverter) คาบเวลา ที่เกิดจากสัญญาณผ่านศูนย์ จะมีความสัมพันธ์กับความถี่รอบในการ คำวนหาตำแหน่งของโรเตอร์ การควบคุมความเร็วโดยปราศจากตัว ตรวจจับตำแหน่งด้วยวิธีนี้ สามารถลดความสับสนข้อจำกัดของการ ขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านนี้ได้

2. การควบคุมแบบไม่มีเซนเซอร์และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

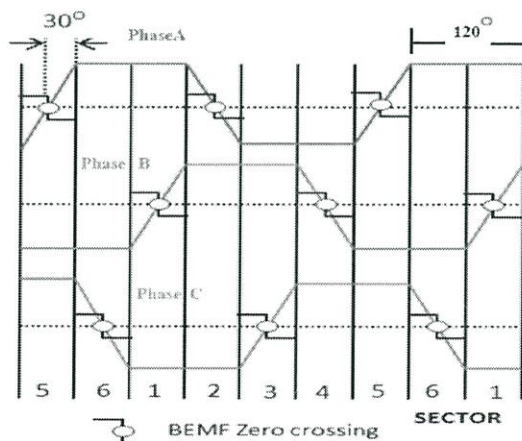
2.1 วิธีการทำงานและวิเคราะห์แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ

พิจารณามอเตอร์กระแสตรงไม่มีแปรงถ่าน (BLDC) มีโครงสร้างหลัก ๆ สามส่วน คือ ส่วนที่หนึ่งสเตเตอร์ (Stator) ประกอบด้วยขดลวดสามเฟสที่ต่ออยู่แบบสตาร์ ส่วนที่สองโรเตอร์ (Rotor) ประกอบด้วยแม่เหล็กถาวร และส่วนสุดท้ายคือ ตัวตรวจจับตำแหน่งขั้วแม่เหล็ก (Hall sensor) ซึ่งการขับเคลื่อนจะใช้อินเวอร์เตอร์สามเฟสร่วมกับการตรวจจับตำแหน่งขั้วแม่เหล็ก โค้ดแอมวงจรถวลการขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงไม่มีแปรงถ่านแบบใช้ตัวตรวจจับตำแหน่ง ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 โค้ดแอมวงจรถวลการขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงไม่มีแปรงถ่านแบบตัวตรวจจับตำแหน่งขั้วแม่เหล็ก

การประมาณค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ โดยทั่วไปจะใช้การตรวจจับแรงดันตัดผ่านศูนย์ (Zero crossing) ของรูปคลื่น Back EMF ที่มีองค์ประกอบของฮาร์มอนิกที่สาม [2] แรงดันฮาร์มอนิกจะมีข้อจำกัดของแอมพลิจูดและเฟสที่เปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ของแม่เหล็ก ซึ่งจะไม่เหมาะสมกับย่านความเร็วต่ำ เนื่องจากมีแอมพลิจูดของ Back EMF ต่ำ การขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยอินเวอร์เตอร์หกขั้ว มุมนำกระแส 120 องศา โดยที่จุดตัดของซีโรครอสซิงจะนำอยู่ที่มุม 30 องศา ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ซีโรครอสซิงของแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับมอเตอร์

แรงดันที่เฟส A จะคือที่จุดแบบสตาร์ของสเตเตอร์ V_{an} กำหนดให้ในสมการที่ (1)

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

โดย R_a คือค่าความต้านทานของสเตเตอร์ L_a คือค่าขดขดตัวนำ e_{an} คือ back EMF และ i_a คือกระแสเฟส A

ในทำนองเดียวกันกับอีกสองเฟสที่เหลือสามารถเขียนเป็นสมการได้

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

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

โดยสัญลักษณ์มีความหมายเช่นเดียวกันกับข้างต้น

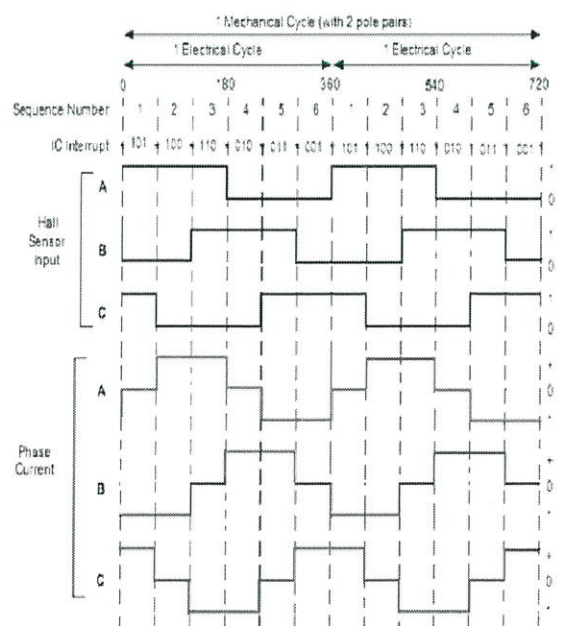
หากพิจารณาโดยรวมแล้วเมื่อเฟส A และ C นำกระแส และเฟส B ไม่นำกระแส โดยแสดงในรูปที่ 1 ด้วยระยะห่างที่ขดลวดเฟส A ต่อกับขั้วบวกกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง เฟส C ต่อกับขั้วลบของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง เฟส B ไม่ได้ต่อ ดังนั้น $i_a = -i_c$ และ $i_b = 0$ แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับในเฟส A และ C แต่กระแสตรงข้ามกัน เขียนสมการได้ดังสมการที่ (4)

$$V_{abbc} = V_{ab} - V_{bc} = e_{an} - 2e_{bn} + e_{cn} = -2e_{bn} \quad (4)$$

โดย V_{abbc} คือแรงดันไลน์เฟส A กับเฟส C โดยจุดต่อร่วมที่เฟส B e_{an} คือ back EMF ของเฟส A , e_{bn} คือ back EMF ของเฟส B และ e_{cn} คือ back EMF ของเฟส C

2.2 ลำดับการทำงานของอินเวอร์เตอร์

อินเวอร์เตอร์ 3 เฟสแบบขั้วบนได จะประกอบด้วยสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ 6 ตัว โดยจะควบคุมให้สวิตช์แต่ละตัวทำงานเป็นแบบนำกระแส 120 องศา โดยจะรับสัญญาณตรวจจับขั้วแม่เหล็กจากมอเตอร์ โดยการทำงานจะเป็นแบบ 6 step จากรูปที่ 3

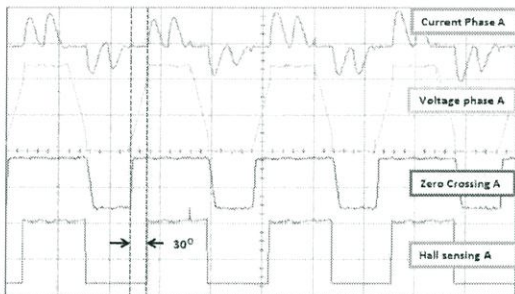


รูปที่ 3 สัญญาณ Hall sensor และกระแส Six Step Inverter

ชุดทดลองนี้มีแหล่งจ่ายไฟฟ้า 5 และ 15 โวลต์สำหรับ dsPIC และสำหรับขับเคลื่อนตามลำดับ การปรับความเร็วจะใช้ A/D ในการควบคุม วงจรตรวจจับกระแสด้วย ACS712 และวงจรซีโรครอสซิงออฟแอมป์ตรวจจับ

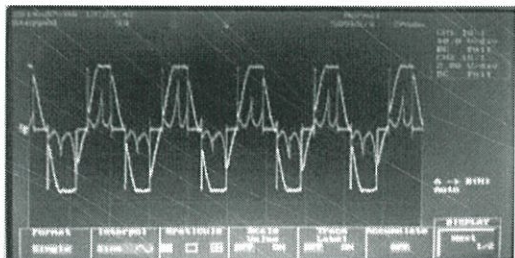
3. ผลการทดลองและวิเคราะห์

จากการทดสอบควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ที่ไม่ใช้ตัวตรวจจับตำแหน่งฮอลล์เซ็นเซอร์นั้น จะพบว่า รูปคลื่นกระแสเฟส A จะมีตำแหน่งเดียวกัน (In phases) กับรูปคลื่นแรงดันเฟส A ในลักษณะการทำงานที่ถูกต้อง โดยพบว่าตำแหน่งที่เกิดซีโรครอสซิงนั้นจะเกิดขึ้นก่อนสัญญาณฮอลล์เซ็นเซอร์อยู่ 30 องศา ดังรูปที่ 7

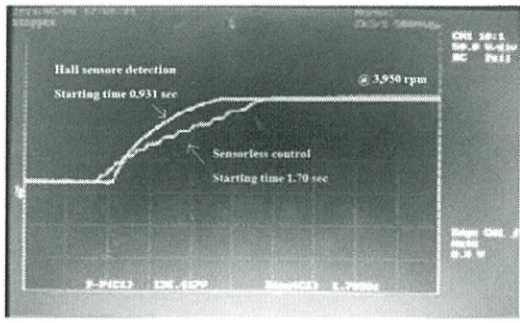


รูปที่ 7 สัญญาณกระแส แรงดัน ซีโรครอสซิง และฮอลล์เซ็นเซอร์ A

เมื่อมอเตอร์หมุนในรูปแบบไร้ตัวตรวจจับตำแหน่ง สัญญาณสวิตซ์ซึ่งต้องหน่วงไป 30 องศา จากจุดตัดผ่านศูนย์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ รูปแบบการคำนวณจะถูกใช้ใน โพลซาร์ตการขับเคลื่อนดังรูปที่ 5 ด้วยดิจิทัลดีเลย์ ในย่านความเร็วสูงสุดคือได้ไหลเกิด 100 เปรี่เซนส์ จะพบว่ารูปคลื่นแรงเคลื่อนไฟฟ้าจะมีสัญญาณเป็นลักษณะสี่เหลี่ยม 120 องศา (120° rectangular wave) จากรูปที่ 8 วัดค่าความถี่หลัก 265 เฮิร์ตซ์ ความเร็วรอบที่ 3,965 รอบต่อนาที ยังคงได้สัญญาณรูปคลื่นของแรงดันและกระแสที่ถูกต้อง



รูปที่ 8 สัญญาณแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสของมอเตอร์ ที่ความเร็ววัดผลการทดสอบการช่วงเวลากการออกตัวของมอเตอร์เปรียบเทียบระหว่างการใช้ตัวตรวจจับตำแหน่ง (Hall sensor) และไม่ใช้ตัวตรวจจับตำแหน่ง มีค่าเวลากการออกตัว 0.931 วินาที และ 1.70 วินาทีตามลำดับ ซึ่งมีช่วงเวลาที่ห่างกันมากนัก ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 เปรียบเทียบการออกตัวของมอเตอร์ ระหว่าง Hall sensor และ Sensorless control

4. สรุป

การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไม่มีแปรงถ่านแบบไร้ตัวตรวจจับตำแหน่งนี้ ใช้วิธีของหลักการแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับที่ตัดผ่านศูนย์บริเวณขั้วสายของมอเตอร์สามเฟส โดยพิจารณาความแตกต่างของการตัดผ่านศูนย์มาใช้ในการสร้างอัลกอริทึม ซึ่งจะสร้างสัญญาณเสมือนขึ้นมาแทนเซ็นเซอร์จริง ด้วยวิธีการเลื่อนเฟส 30 องศา จากจุดตัดผ่านศูนย์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ จากการวิเคราะห์ทดลองในช่วงเปลี่ยนเปลี่ยนช่วง 30 องศา ที่หน่วงเวลาจากจุดตัดผ่านศูนย์พบว่ามอเตอร์สามารถที่จะเริ่มหมุนแบบไม่มีเซ็นเซอร์ได้ และช่วงเวลาในการออกตัวของมอเตอร์ 1.70 วินาที วิธีการนี้จึงเป็นแนวทางที่ควรนำมาใช้ จะสามารถช่วยลดความสั่นพั่นและข้อจำกัดบางประการของระบบการขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงไม่มีแปรงถ่านได้

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] P.Damodharam, K.Vasudrean, "Sensorless Brushless DC motor Drive based on the Zero-crossing detection of back EMF," IEEE Trans.Energy Conv., Vol.25,no.3 pp.661-667, Sep 2010
- [2] J.C.Moreira, "Indirect sensing for rotor flux position of permanent magnet AC motor operating over a wide speed range," IEEE Trans. Ind.Appl., Vol 32, no. 6 pp.1394-1401, Nov./Dec 1996
- [3] วีระเชษฐ ชันเงิน และ วุฒิพล สารศิริเศรษฐ์, "อิเล็กทรอนิกส์กำลัง," พิมพ์ครั้งที่ 13 , พ.ศ.2548 หน้า 455-470.
- [4] ประจัน พลังสันติกุล, "การเขียนโปรแกรมควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F ด้วยคอมไพเลอร์ MPLAB C," พ.ศ.2551 หน้า 309-342

ประวัติผู้เขียนบทความ



นาย กฤตลาส มินสันติเดช สาขา วิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง งานวิจัย Design technique of high performance brushless DC motor control using dspic30f2010 controller

ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-นามสกุล นายกฤตภาส ผินสันเทียะ

วัน เดือน ปีเกิด 6 ตุลาคม 2532

ที่อยู่ 184 ม.1 ต. วังใหญ่ อ. วิเชียรบุรี จ.เพชรบูรณ์ 67180

ประวัติการศึกษา 2554 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาไฟฟ้ากำลัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ความชำนาญเฉพาะด้าน

- 1.) ระบบไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์กำลัง
- 2.) การออกแบบลายวงจร
- 3.) ชุดควบคุมมอเตอร์ BLDC 3 เฟส

ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย

พ.ศ. 2553-2553 นักศึกษาฝึกงาน บริษัท รูเบียวอุตสาหกรรมจำกัด

พ.ศ. 2554-2555 ตำแหน่งนักวิจัยการประดิษฐ์เครื่องมือที่ใช้ในการติดตามกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ร่วมกับบริษัท IEC

พ.ศ. 2556-2558 วิศวกรออกแบบและวิจัยพัฒนามอเตอร์คอมเพรสเซอร์ บริษัทกุลธรเคอร์บี้ จำกัดมหาชน

ปัจจุบัน วิศวกร R&D และนักศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาไฟฟ้ากำลัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง