

การควบคุมความเร็วแบบปราศจากตัวตรวจนับอย่างประหยัด สำหรับมอเตอร์  
ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน โดยวิธีการค้นหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ต้านกลับ  
ลักษณะที่เรียบง่ายทุก

LOW COST SPEED SENSORLESS CONTROL FOR A BRUSHLESS DC  
MOTOR USING A TRAPEZOIDAL BACK-EMF DETECTION METHOD



วิทยานิพนธ์นี้เป็นผลงานที่เผยแพร่โดยภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

อำนวยการพิมพ์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2552

KJHTL-2009-EN-M-020-096

การควบคุมความเร็วแบบปราศจากตัวตรวจจับอย่างประหยัด สำหรับมอเตอร์  
ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน โดยวิธีการค้นหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ  
ลักษณะสี่เหลี่ยมคางหมู

LOW COST SPEED SENSORLESS CONTROL FOR A BRUSHLESS DC  
MOTOR USING A TRAPEZOIDAL BACK-EMF DETECTION METHOD



เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 105074  
วันเดือนปี..... 16 พ.ย. 2552

b. 12164859  
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2552

KMITL 2009-EN-M-020-096

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**LOW COST SPEED SENSORLESS CONTROL FOR A BRUSHLESS DC  
MOTOR USING A TRAPEZOIDAL BACK-EMF DETECTION METHOD**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN TELECOMMUNICATIONS ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**2009**

**KMITL 2009-EN-M-020-096**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2009**

**FACULTY OF ENGINEERING**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**คณะวิศวกรรมศาสตร์**  
**สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**  
**ใบรับรองวิทยานิพนธ์**

---

**หัวข้อวิทยานิพนธ์** การควบคุมความเร็วแบบปราศจากตัวตรวจจ็อย่างประหยัด สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน โดยวิธีการค้นหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ ลักษณะสี่เหลี่ยมคางหมู

**Thesis Title** Low Cost Speed Sensorless Control for a Brushless DC Motor Using a Trapezoidal Back - EMF Detection Method

**นักศึกษา** นายไตรภพ บัวระกอด

**รหัสประจำตัว** 47060202

**ปริญญา** วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

**สาขาวิชา** วิศวกรรมไฟฟ้า

**อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์** รศ.ดร.วิจิตร กิณเรศ

**หมายเลขวิทยานิพนธ์** KMITL-2009-EN-M-020-096

**คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์**

**ลายมือชื่อ**

รศ.ดร.สุพัฒน์

กิตติรัตน์สังจา

ดร.ภพ

จันทร์เจริญสุข

รศ.เวทิน

ปิยรัตน์

ผศ.ดร.อนุวัฒน์

จางวนิชเลิศ

รศ.ดร.วิจิตร

กิณเรศ

นายไตรภพ บัวระกอด

รศ.ดร.วิจิตร กิณเรศ

รศ.ดร.สุพัฒน์

ดร.ภพ

รศ.ดร.เวทิน

ผศ.ดร.อนุวัฒน์

**วัน / เดือน / ปี ที่สอบ** วันอังคารที่ 19 พฤษภาคม พ.ศ. 2552 เวลา 11.30 - 13.30 น.

**สถานที่สอบ** ณ อาคาร A ชั้น 3 ห้องประชุม 2

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

**คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว**



(รองศาสตราจารย์ ดร.กอบชัย เดชหาญ)

**คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์**

วันที่ 19 พฤษภาคม พ.ศ. 2552

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น มิใช่เพื่อเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การควบคุมความเร็วแบบปราศจากตัวตรวจจับอย่าง  
ประหยัด สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรง  
ถ่าน โดยวิธีการค้นหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับลักษณะ  
สี่เหลี่ยมคางหมู

นักศึกษา

นายไตรภพ บัวระกค

รหัสนักศึกษา

47060202

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

พ.ศ.

2552

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

รศ.ดร.วิจิตร กิณเรศ

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอ การควบคุมความเร็วมอเตอร์แบบปราศจากตัวตรวจจับอย่าง  
ประหยัด โดยอาศัยวิธีการค้นหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับลักษณะสี่เหลี่ยมคางหมู และวิธีการ  
ค้นหาตำแหน่งโรเตอร์ขณะเริ่มต้นที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับเป็นศูนย์ สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้า  
กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านพิกัดกำลัง 100 วัตต์ 30 โวลต์ และ 4,500 รอบต่อนาที สำหรับการ  
ควบคุมความเร็วแบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ ด้วยเทคนิคการกระตุ้นสนามแม่เหล็กที่  
ขดลวดสเตเตอร์ เพื่อค้นหาตำแหน่งโรเตอร์ขณะเริ่มต้น จากการกระตุ้นสนามแม่เหล็กทีละคู่เฟส  
ก่อน จากนั้นได้ขับเคลื่อนมอเตอร์แบบวงรอบเปิด โดยใช้เทคนิคแบบสัญญาณสี่เหลี่ยม 120 องศา  
เพื่อให้มอเตอร์เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับ และตรวจสอบแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับที่เกิดขึ้น  
โดยใช้วงจรรีโครอสซิง เพื่อใช้คำนวณหาตำแหน่งโรเตอร์ และความเร็วรอบจากความสัมพันธ์  
ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับ และคาบเวลาการเกิดรีโครอสซิง หลังจากนั้นได้ขับเคลื่อน  
มอเตอร์แบบวงรอบปิด ย่านความเร็วรอบ 500 ถึง 4,500 รอบต่อนาที และในวิทยานิพนธ์นี้ยังได้  
ทำการศึกษาหลักการทำงานของการควบคุมความเร็วรอบแบบปราศจากตัวตรวจจับ และเทคนิค  
การควบคุมพร้อมทั้งมีการจำลองการทำงานของระบบควบคุมมอเตอร์ด้วยโปรแกรม  
MATLAB/Simulink เพื่อเป็นแนวทางในการสร้างเครื่องต้นแบบ นอกจากนี้ยังได้พิจารณาการ  
กระจายสนามแม่เหล็กจากการกระตุ้นขณะเริ่มต้นด้วยการวิเคราะห์ทางด้านไฟไนท์อิเลเมนต์ 2 มิติ  
โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPEED ในระบบควบคุมทั้งหมดได้ถูกประมวลผลโดยใช้ dsPIC ซึ่งเป็น  
ตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัล (DSC) ขนาด 16 บิต

<b>Thesis Title</b>	Low Cost Speed Sensorless Control for a Brushless DC Motor Using a Trapezoidal Back-EMF Detection Method
<b>Student</b>	Mr. Traiphop Buarakod
<b>Student ID.</b>	47060202
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Electrical Engineering
<b>Year</b>	2009
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc. Prof. Dr.Vijit Kinnares

## ABSTRACT

This thesis presents a low cost speed sensorless control for brushless DC (BLDC) motor using a trapezoidal back-EMF detection method and initial rotor position detection method when the back emf is zero using a magnetic field winding excited technique for a 100W, 30V and 4500rpm BLDC motor without a position sensor for speed sensorless control. Using the magnetic field stator winding excited technique helps starting of the BLDC motor resulting in identifying the initial rotor position by exciting each dual winding. After that, the motor is controlled in open loop operation with a 120 degree rectangular wave technique in order to generate back electromotive force (back-EMF). The back-EMF is monitored by using a zero crossing circuit. The rotor position and speed are calculated from the relation between back-EMF and zero crossing periods. Then, the motor is driven in closed loop speed control operation with an operating speed range of 500 to 4500 rpm. In this thesis, the study of speed sensorless control operation and control techniques are provided in the simulation of the motor control system using MATLAB/Simulink in order to be a guide line for designing and constructing a prototype. Additionally, considering magnetic flux distribution resulting from the proposed initial stator excitation is given using 2D Finite Element Analysis (2-D FEA) by the SPEED software package. The overall control system is processed by a 16-bit dsPIC which is a Digital Signal Controller (DSC).

# กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีจากความกรุณาของ รศ.ดร.วิจิตร กิมเรศ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำปรึกษาตลอดจนช่วยแก้ปัญหาต่างๆ เกี่ยวกับการทำวิทยานิพนธ์แก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณ รศ.ดร.สุวัฒน์ กิตติรัตน์สัจจา และ ดร.ภพ จันท์เจริญสุข ประธานกรรมการและกรรมการสอบหัวข้อและโครงสร้างวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำตลอดจนชี้แนะแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลงได้

ขอขอบคุณประธานกรรมการและกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่ได้ชี้แนะแนวทาง และปรับปรุงแก้ไขในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกๆ ท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในห้องปฏิบัติการวิจัย ECC 405 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกคนที่คอยให้กำลังใจเสมอมา และให้คำแนะนำที่มีประโยชน์ในการทำวิจัย

ขอขอบคุณสำนักห้องสมุดกลาง และห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์ที่ได้สนับสนุนข้อมูลและหนังสือต่างๆ ที่ใช้ในการทำวิจัย

ขอขอบคุณศูนย์วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยี บริษัทกุลธรเคอร์บี้ จำกัด (มหาชน) แผนก/ฝ่าย: EES/TR ที่ได้สนับสนุนการทำวิจัย และเครื่องมือการทดสอบในการทำวิจัยนี้

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณพ่อ แม่ และญาติพี่น้อง ของข้าพเจ้าทุกคนที่เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุกๆ เรื่อง ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ย่อมเป็นผลมาจาก ความกรุณาของทุกท่าน ที่กล่าวมาข้างต้น จึงขอขอบพระคุณทุกท่านเป็นอย่างสูง ณ โอกาสนี้

ไตรภพ บัวระกุด

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญรูป.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.4.1 การนำเสนอหลักการใหม่.....	3
1.4.2 การเปรียบเทียบกับหลักการที่มีอยู่เดิม.....	4
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	6
1.6 ขั้นตอนของการศึกษาวิจัย.....	6
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย.....	7
1.8 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์.....	8
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการวิธีการควบคุมมอเตอร์.....	9
2.1 บทนำ.....	9
2.2 โครงสร้างพื้นฐานของมอเตอร์ในการพิจารณาสนามแม่เหล็ก.....	9
2.3 สนามแม่เหล็กทางด้านสเตเตอร์.....	12
2.4 แรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับทางด้านสเตเตอร์.....	14
2.5 แบบจำลองทางด้านพลวัตของมอเตอร์.....	16
2.6 ลักษณะการต่อมอเตอร์สำหรับการควบคุม.....	19
2.6.1 การควบคุมความเร็วแบบตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์.....	20
2.6.2 การควบคุมความเร็วแบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์.....	20
2.7 อัลกอริทึมของระบบขับเคลื่อนความเร็วรอบมอเตอร์.....	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และตี IV อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.8	การค้นหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับ .....	22
2.9	วงจรสำหรับการใช้งานความเร็วรอบต่ำ และแรงดันไฟฟ้าต่ำ .....	25
2.10	การคำนวณหาความเร็วรอบของมอเตอร์ .....	27
2.11	การวิเคราะห์การกระจายสนามแม่เหล็ก ขดลวดสเตเตอร์ .....	28
2.12	การออกแบบตัวควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ .....	30
2.12.1	ฟังก์ชันถ่ายโอนวงรอบของกระแสไฟฟ้า .....	33
2.12.2	ฟังก์ชันถ่ายโอนวงรอบของความเร็วรอบมอเตอร์ .....	34
2.12.3	การออกแบบตัวควบคุมมอเตอร์ .....	36
2.13	ระบบควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์แบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ .....	42
2.14	ลักษณะโหมคทำงานของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ .....	42
2.15	บทสรุป .....	46
บทที่ 3	การจำลองการทำงาน .....	47
3.1	บทนำ .....	47
3.2	ลักษณะการควบคุมความเร็วรอบแบบปราศจากตัวตรวจจับ .....	47
3.3	การจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม MATLAB .....	48
3.3.1	ข้อมูลมอเตอร์ในการจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม MATLAB .....	48
3.3.2	การจำลองขณะเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบมอเตอร์ .....	50
3.3.3	การจำลองขณะรับภาระแรงบิด ในแต่ละระดับความเร็วรอบ .....	52
3.4	การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น .....	55
3.5	บทสรุป .....	56
บทที่ 4	การออกแบบและการสร้างเครื่องต้นแบบที่นำเสนอ .....	57
4.1	บทนำ .....	57
4.2	การออกแบบวงจรเรียงกระแสไฟฟ้า .....	58
4.3	การออกแบบวงจรควบคุมโดยใช้ตัวควบคุมสัญญาณทางด้านดิจิทัล .....	60
4.3.1	อัลกอริทึมของการควบคุมแบบปราศจากตัวตรวจจับ .....	61
4.3.2	การทำงานของซอฟต์แวร์ ในการควบคุมมอเตอร์ .....	63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต่อVอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.3 ชุดคำสั่ง ISR (คำสั่งหลัก และคำสั่ง IC1) .....	64
4.3.4 ชุดคำสั่ง ISR (Timer1) .....	65
4.3.5 ชุดคำสั่ง ISR (PWM) .....	65
4.4 การออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส .....	66
4.5 การออกแบบวงจรบูทสเตร็ป สำหรับขับสัญญาณเกตมอสเฟส .....	67
4.5.1 ผลของตัวประกอบในแหล่งจ่าย วงจรบูทสเตร็ป .....	68
4.5.2 การคำนวณหาขนาดของตัวเก็บประจุ บูทสเตร็ป .....	68
4.5.3 การคำนวณหาค่าความจุของ วงจรบูทสเตร็ป .....	69
4.5.4 การเลือกไดโอดสำหรับวงจรบูทสเตร็ป .....	70
4.5.5 รูปแบบของวงจรบูทสเตร็ป .....	71
4.5.6 สัญญาณประวิงเวลา (Dead Time) .....	72
4.6 การออกแบบวงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง .....	72
4.7 การออกแบบวงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้าเฟส และวงจรซีโรครอสซิง .....	74
4.7.1 การออกแบบวงจรเลื่อนเฟส 90 องศา (90° Phase Shifting Design) .....	75
4.7.2 การออกแบบวงจรกรองผ่านสูง (High-Pass Filter Design) .....	76
4.7.3 การออกแบบวงจรกรองผ่านต่ำ (Low-Pass Filter Design) .....	77
4.7.4 ผลการออกแบบวงจร .....	78
4.8 การออกแบบวงจรสำหรับปรับความเร็วรอบมอเตอร์ .....	79
4.9 โครงสร้างมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน .....	80
4.10 บทสรุป .....	82
<b>บทที่ 5 การทดสอบและผลการทดสอบ .....</b>	<b>83</b>
5.1 บทนำ .....	83
5.2 การทดสอบขับเคลื่อนโดยไม่สนใจตำแหน่งโรเตอร์ .....	85
5.2.1 สัญญาณการขับเคลื่อนเกตมอสเฟส .....	85
5.2.2 การขับเคลื่อนมอเตอร์แบบไม่สนใจตำแหน่ง โรเตอร์ .....	86
5.2.3 สรุปผลการทดสอบ .....	87

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

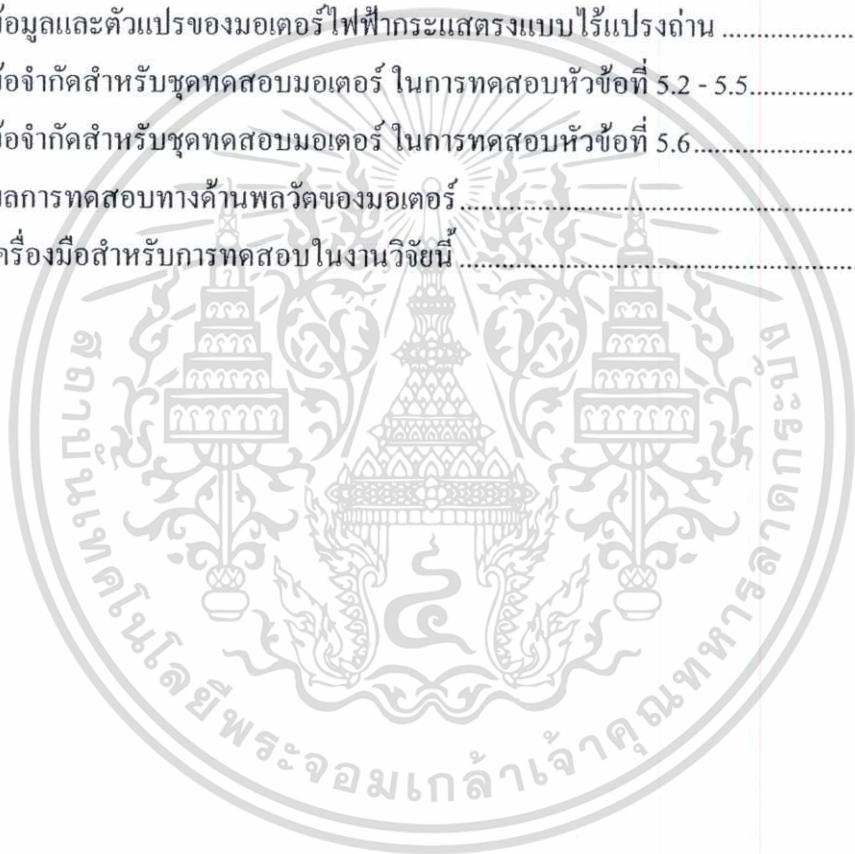
5.3	การทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์โดยใช้ตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ .....	87
5.3.1	สัญญาณการขับเคลื่อนเกตมอสเฟส.....	87
5.3.2	การขับเคลื่อนมอเตอร์ แบบใช้ตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ .....	88
5.3.3	สรุปผลการทดสอบ .....	89
5.4	การทดสอบขับเคลื่อน โดยใช้ PWM ขับเคลื่อนมอเตอร์ .....	89
5.4.1	สัญญาณการขับเคลื่อนเกตมอสเฟส.....	90
5.4.2	การขับเคลื่อนมอเตอร์ โดยใช้สัญญาณขับเคลื่อนแบบ PWM .....	90
5.4.3	สรุปผลการทดสอบ .....	92
5.5	การทดสอบควบคุมความเร็วของมอเตอร์โดยใช้ตัวตรวจจับตำแหน่ง.....	92
5.5.1	สัญญาณการขับเคลื่อนเกตมอสเฟส.....	93
5.5.2	การควบคุมความเร็วมอเตอร์ แบบใช้ตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ .....	93
5.5.3	สรุปผลการทดสอบ .....	94
5.6	การทดสอบควบคุมความเร็วมอเตอร์โดยปราศจากตัวตรวจจับ .....	95
5.6.1	สัญญาณการขับเคลื่อนเกตมอสเฟส.....	96
5.6.2	การค้นหาตำแหน่งโรเตอร์ ขณะเริ่มต้น .....	96
5.6.3	ระบบขับเคลื่อนในแต่ละช่วงเวลาควบคุม .....	98
5.6.4	การทดสอบเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบมอเตอร์ .....	99
5.6.5	การทดสอบควบคุมความเร็วรอบ เมื่อได้รับภาระแรงบิด .....	101
5.6.6	สรุปผลการทดสอบ .....	103
5.7	การทดสอบทางด้านพลวัตของมอเตอร์.....	103
5.7.1	ผลการทดสอบทางด้านพลวัต.....	104
5.7.2	สรุปผลการทดสอบ .....	105
5.8	เปรียบเทียบการควบคุมมอเตอร์ .....	106
5.8.1	การออกตัวขณะเริ่มต้นแบบใช้ตัวตรวจจับ .....	106
5.8.2	กระแสไฟฟ้าและความเร็วรอบผิดพลาดจากการควบคุม.....	106
5.9	บทสรุป.....	108

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 6 บทสรุปการวิเคราะห์ผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	109
6.1 สรุปผลการทำวิจัย .....	109
6.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง .....	110
6.2.1 การทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์โดยไม่สนใจตำแหน่งโรเตอร์.....	110
6.2.2 การทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์โดยใช้ตัวตรวจจับ .....	110
6.2.3 การทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์โดยใช้สัญญาณ PWM.....	110
6.2.4 การทดสอบควบคุมความเร็วมอเตอร์โดยใช้ตัวตรวจจับตำแหน่ง .....	111
6.2.5 การทดสอบควบคุมความเร็วมอเตอร์โดยปราศจากตัวตรวจจับ .....	111
6.2.6 การทดสอบทางด้านพลวัตของมอเตอร์.....	111
6.3 ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับวิทยานิพนธ์.....	112
เอกสารอ้างอิง .....	113
ภาคผนวก ก เครื่องต้นแบบ และภาพโครงการวิจัยโดยรวม.....	116
ภาคผนวก ข เครื่องมือสำหรับการทดสอบ .....	120
ภาคผนวก ค ผลงานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่ในวารสารทางวิชาการ.....	123
ประวัติผู้เขียน.....	137

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	สัญญาณที่ใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์แบบสัญญาณสี่เหลี่ยม 120 องศา ..... 43
3.1	ลักษณะสัญญาณในการขับเคลื่อนมอเตอร์ที่สัมพันธ์กับแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ..... 48
4.1	ข้อจำกัดของอุปกรณ์ และข้อจำกัดคุณลักษณะการควบคุมมอเตอร์ ..... 58
4.2	คุณสมบัติของอุปกรณ์ที่ควบคุมมอเตอร์ที่กำหนด ..... 60
4.3	ขนาดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน ..... 81
5.1	ข้อมูลและตัวแปรของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน ..... 83
5.2	ข้อจำกัดสำหรับชุดทดสอบมอเตอร์ ในการทดสอบหัวข้อที่ 5.2 - 5.5 ..... 84
5.3	ข้อจำกัดสำหรับชุดทดสอบมอเตอร์ ในการทดสอบหัวข้อที่ 5.6 ..... 95
5.4	ผลการทดสอบทางด้านพลวัตของมอเตอร์ ..... 104
ข1	เครื่องมือสำหรับการทดสอบในงานวิจัยนี้ ..... 121



# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	ไดอะแกรมการคำนวณหาความเร็วรอบ ..... 5
1.2	ไดอะแกรมสำหรับควบคุมความเร็วมอเตอร์ที่นำเสนอ.....5
1.3	(ก) ชุดทดลองเพื่อเป็นแนวทางออกแบบ และ (ข) เครื่องต้นแบบสำหรับ ขับเคลื่อนมอเตอร์.....7
2.1	โครงสร้างพื้นฐานของมอเตอร์สำหรับการพิจารณาทางด้านพลวัต ..... 9
2.2	แสดงตำแหน่งของขดลวดทางด้านสเตเตอร์ทั้ง 3 เฟส..... 10
2.3	ลักษณะของโรเตอร์ซึ่งประกอบด้วยขั้วแม่เหล็ก 2 ขั้ว..... 10
2.4	ทิศทางการกระจายสนามแม่เหล็กระหว่างช่องว่างอากาศ ..... 12
2.5	ลักษณะทั่วไปของสนามแม่เหล็กสเตเตอร์ทางด้านอุดมคติ..... 13
2.6	การกระจายสนามแม่เหล็กระหว่างช่องว่างอากาศ จากกระแสไฟฟ้าเฟสด้านสเตเตอร์..... 13
2.7	แรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับเฟส A ( $e_{as}$ ) เปรียบเทียบกับมุม $\theta_R$ ..... 15
2.8	แรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับเฟส B ( $e_{bs}$ ) เปรียบเทียบกับมุม $\theta_R$ ..... 15
2.9	แรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับเฟส C ( $e_{cs}$ ) เปรียบเทียบกับมุม $\theta_R$ ..... 16
2.10	ไดอะแกรมการต่อมอเตอร์แบบอาศัยตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์..... 20
2.11	ไดอะแกรมการต่อแบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่ง โรเตอร์..... 20
2.12	อัลกอริทึมของระบบขับเคลื่อนความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน ... 21
2.13	การค้นหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับระหว่างเวลาสัญญาณขับ PWM เปิด..... 22
2.14	แรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับแต่ละเฟส และแรงเคลื่อนไฟฟ้าฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 3..... 24
2.15	วงจรสำหรับการค้นหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับโดยตรง ..... 25
2.16	ไดอะแกรมการคำนวณหาความเร็วรอบจากคาบเวลาจากการเกิด ซีโรครอสซิง ..... 28
2.17	การกระตุ้นสนามแม่เหล็กในแต่ละคู่เฟส..... 28
2.18	การกระตุ้นสนามแม่เหล็ก (ก) ที่ขดลวด A-B (ข) ที่ขดลวด A-C เพื่อหาดำแหน่งเริ่มต้น ..... 29
2.19	สนามแม่เหล็กทางด้านไฟในทอิลิเมนต์ (ก) ที่คู่เฟส A-B, (ข) ที่คู่เฟส A-C ตามลำดับ..... 30
2.20	สนามแม่เหล็กที่ช่องว่างอากาศจากโปรแกรม SPEED และ โปรแกรม 2-D FEA เปรียบเทียบกับสนามแม่เหล็กด้านสเตเตอร์ทางอุดมคติ ..... 30
2.21	ไดอะแกรมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน..... 31
2.22	ไดอะแกรมของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงรอบกระแสไฟฟ้า..... 33
2.23	ไดอะแกรมของฟังก์ชันถ่ายโอนความเร็วรอบคำสั่ง ( $\omega_r^*$ ) และความเร็วรอบ ( $\omega_r$ ) ..... 34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และดัดแปลงอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.24 ผลตอบสนองของวงรอบกระแสไฟฟ้า ( $G_i$ ) .....	39
2.25 ผลตอบสนองของวงรอบกระแสไฟฟ้าในการประมาณค่า ( $G_{is}$ ) .....	39
2.26 ผลตอบสนองของการควบคุมในวงรอบความเร็วรอบ .....	41
2.27 ผลตอบสนองของการควบคุมในวงรอบความเร็วรอบที่ได้จากการประมาณค่าของ วงรอบกระแสไฟฟ้าที่ค่าขอมมากที่สุดไม่เกิน 10% (Maximum overshoot < 10 %) .....	41
2.28 ไคอะแกรมระบบขับเคลื่อนความเร็วรอบมอเตอร์โดยปราศจากการตรวจจับ .....	42
2.29 วงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์เบื้องต้น .....	43
2.30 กระแสไฟฟ้าเฟส และแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านในในแต่ละระดับการควบคุมตามสัญญาณขับ เคลื่อนเกิดตามตารางที่ 2.1 .....	44
2.31 สัญญาณกระแสไฟฟ้า และแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับเมื่อมอสเฟส (Q1, Q6) ทำงาน .....	44
2.32 สัญญาณกระแสไฟฟ้า และแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับเมื่อมอสเฟส (Q1, Q2) ทำงาน .....	45
2.33 สัญญาณกระแสไฟฟ้า และแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับเมื่อมอสเฟส (Q3, Q2) ทำงาน .....	45
2.34 สัญญาณกระแสไฟฟ้า และแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับเมื่อมอสเฟส (Q3, Q4) ทำงาน .....	45
2.35 สัญญาณกระแสไฟฟ้า และแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับเมื่อมอสเฟส (Q5, Q4) ทำงาน .....	46
2.36 สัญญาณกระแสไฟฟ้า และแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับเมื่อมอสเฟส (Q5, Q6) ทำงาน .....	46
3.1 ไคอะแกรมการทำงานของระบบควบคุมแบบปราศจากตัวตรวจจับ .....	47
3.2 (ก) สัญลัษณ์มอเตอร์ (ข) ไคอะแกรมตัวแปรของมอเตอร์ .....	48
3.3 (ก) $Emf_A = 0$ , (ข) $Emf_C = 0$ .....	49
3.4 (ก) $Emf_B = 0$ , (ข) $Emf_B = 0$ .....	49
3.5 (ก) $Emf_C = 0$ , (ข) $Emf_A = 0$ .....	49
3.6 (ก) กล้องไคอะแกรมการขับเคลื่อนสัญญาณเกิด (ข) ภายในกล้องไคอะแกรม .....	49
3.7 (ก) กล้องไคอะแกรมการเลื่อนเฟส 90 องศา กรองแบบผ่านสูง กรองแบบผ่านต่ำ และตรวจสอบ ซีโรครอสซิง (ข) ภายในกล้องไคอะแกรม .....	50
3.8 การจำลองเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบแต่ละระดับความเร็วที่เวลา 0.02, 0.05, 0.08 วินาที ....	50
3.9 แรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับเฟส A, B, C ที่ความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาที .....	51
3.10 แรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับเฟส A, B, C ที่ความเร็วรอบ 2,500 รอบต่อนาที .....	51
3.11 แรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับเฟส A, B, C ที่ความเร็วรอบ 4,500 รอบต่อนาที .....	52
3.12 ความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาที 10%, 50%, 100% แรงบิดพิกัด และกระแสเฟส A .....	53

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.13	ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที 10%, 50%, 100% แรงบิดพิกัด และกระแสเฟส A ..... 53
3.14	ความเร็วรอบ 2,500 รอบต่อนาที 10%, 50%, 100% แรงบิดพิกัด และกระแสเฟส A ..... 54
3.15	ความเร็วรอบ 4,500 รอบต่อนาที 10%, 50%, 100% แรงบิดพิกัด และกระแสเฟส A ..... 54
3.16	ทิศทางการกระจายสนามแม่เหล็กที่ถูกกระตุ้น (ก) คู่เฟส A-B (ข) คู่เฟส A-C ..... 55
3.17	เปรียบเทียบสนามแม่เหล็กที่ช่องว่างอากาศกับสนามแม่เหล็กสเตเตอร์ทางอุดมคติ..... 56
4.1	ไดอะแกรมการทำงานของระบบควบคุมมอเตอร์..... 57
4.2	(ก) วงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบเต็มคลื่น และ (ข) ชุดต้นแบบ ..... 60
4.3	ตัวควบคุมสัญญาณทางด้านดิจิทัล ..... 61
4.4	ตัวควบคุมสัญญาณทางด้านดิจิทัลของเครื่องต้นแบบ..... 61
4.5	อัลกอริทึมของระบบขับเคลื่อนความเร็วรอบมอเตอร์ ..... 62
4.6	(ก) แผนผังหลักการทำงานของซอฟต์แวร์ (ข) การคำนวณหา PWM..... 63
4.7	แผนผังชุดคำสั่งหลัก ISR (ISR_HIGH)..... 64
4.8	แผนผังชุดคำสั่ง IC1..... 64
4.9	แผนผังชุดคำสั่ง Timmer1 ..... 65
4.10	แผนผังชุดคำสั่งสัญญาณ PWM..... 65
4.11	อุปกรณ์มอสเฟสชนิดเอ็น-แชนเนล (ก) สัญลักษณ์ (ข) มอสเฟส ..... 66
4.12	วงจรพื้นฐานสำหรับอินเวอร์เตอร์ภาคกำลัง 3 เฟส..... 67
4.13	วงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ของเครื่องต้นแบบ..... 67
4.14	วงจรถูกตรึงสำหรับรับการขับสัญญาณเกตของมอสเฟส ..... 68
4.15	อุปกรณ์ไอซีขับสัญญาณเกต (ก) สัญลักษณ์ (ข) ไอซีขับสัญญาณเกต ..... 71
4.16	วงจรถูกตรึง สำหรับขับสัญญาณเกตมอสเฟสโดยใช้ไอซี IR2101 ..... 71
4.17	วงจรถูกตรึง สำหรับขับสัญญาณเกตของเครื่องต้นแบบ ..... 71
4.18	(ก) สัญญาณประวิงเวลา และ (ข) ตำแหน่งเกตของมอสเฟสด้านบน-ด้านล่าง ..... 72
4.19	วงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้า และป้องกันกระแสไฟฟ้าเกิน..... 73
4.20	วงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง..... 73
4.21	วงจรตรวจจับแรงดัน และกระแสไฟฟ้าของเครื่องต้นแบบ ..... 73
4.22	วงจรสำหรับตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับในแต่ละเฟส ..... 74
4.23	วงจรฟังก์ชันถ่านไอออนสำหรับตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับ ..... 74

# สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.24 วงจรฟังก์ชันถ่าน โอนสำหรับเลื่อนเฟส 90 องศา .....	75
4.25 วงจรฟังก์ชันถ่าน โอนสำหรับกรองแบบผ่านสูง .....	76
4.26 วงจรฟังก์ชันถ่าน โอนสำหรับกรองแบบผ่านต่ำ .....	77
4.27 ผลตอบสนองขนาด และผลตอบสนองเฟสของฟังก์ชันถ่าย โอน.....	78
4.28 วงจรสำหรับตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับ โดยตรง.....	79
4.29 วงจรสำหรับตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับ โดยตรงของเครื่องต้นแบบ .....	79
4.30 วงจรปรับความเร็วรอบมอเตอร์.....	80
4.31 โครงสร้างของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน (ก) ส่วนทางด้านสเตเตอร์ (ข) ส่วนทางด้านโรเตอร์ชนิดแม่เหล็กถาวรติดพื้นผิวโรเตอร์.....	80
4.32 พิกัดต่างๆ ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน.....	81
5.1 การขับเคลื่อนมอเตอร์ โดยไม่สนใจตำแหน่งโรเตอร์.....	85
5.2 สัญญาณขับมอสเฟตกึ่งด้านบน ( $G_{IH}$ ) และกึ่งด้านล่าง ( $G_{IL}$ ) .....	85
5.3 แรงดันเฟส ( $U_{as}$ ) กระแสเฟส ( $i_{as}$ ) และกระแสตรง ( $i_{dc}$ ) .....	86
5.4 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าเฟส ( $U_{as}$ ) และแรงดันไฟฟ้าไลน์ ( $U_{ab}$ ) .....	86
5.5 การขับเคลื่อนมอเตอร์ โดยใช้ตัวตรวจจับแบบปรากฏการณ์ฮอลล์ .....	87
5.6 สัญญาณขับเกตมอสเฟตกึ่งด้านบน ( $G_{IH}$ ) และกึ่งด้านล่าง ( $G_{IL}$ ) .....	88
5.7 แรงดันเฟส ( $U_{as}$ ) ตำแหน่งโรเตอร์ ( $H_{as}$ ) กระแสเฟส ( $i_{as}$ ) และกระแสตรง ( $i_{dc}$ ) .....	88
5.8 แรงดันไฟฟ้าเฟส ( $U_{as}$ ) และแรงดันไฟฟ้าไลน์ ( $U_{ab}$ ) .....	89
5.9 การขับเคลื่อนมอเตอร์ โดยใช้ PWM ขับมอสเฟส .....	90
5.10 สัญญาณขับเกตมอสเฟตกึ่งด้านบน ( $G_{IH}$ ) และกึ่งด้านล่าง ( $PWM\_G_{IL}$ ).....	90
5.11 แรงดันเฟส ( $U_{as}$ ) ตำแหน่งโรเตอร์ ( $H_{as}$ ) กระแสเฟส ( $i_{as}$ ) และกระแสตรง ( $i_{dc}$ ) .....	91
5.12 แรงดันเฟส ( $U_{as}$ ) ตำแหน่งโรเตอร์ ( $H_{as}$ ) กระแสเฟส ( $i_{as}$ ) และกระแสตรง ( $i_{dc}$ ) ขณะมอเตอร์รับโหลด .....	91
5.13 การควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์โดยใช้ตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ แบบปรากฏการณ์ฮอลล์ .....	92
5.14 สัญญาณขับเกตมอสเฟตกึ่งด้านบน ( $G_{IH}$ ) และกึ่งด้านล่าง ( $PWM\_G_{IL}$ ).....	93
5.15 แรงดันเฟส ( $U_{as}$ ) ตำแหน่งโรเตอร์ ( $H_{as}$ ) กระแสเฟส ( $i_{as}$ ) และกระแสตรง ( $i_{dc}$ ) .....	94
5.16 ความเร็วรอบจากการคำนวณ ( $\omega_r$ ) และการวัด ( $\omega_r$ ) และความเร็วรอบผิดพลาด ( $e_r$ ).....	94

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.17 ระบบขับเคลื่อนควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์แบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ ..	95
5.18 สัญญาณขับเคลื่อนมอเตอร์เฟสถึงด้านบน ( $PWM\_GIH$ ) และถึงด้านล่าง ( $PWM\_GIL$ ).....	96
5.19 การวัดสัญญาณขณะกระตุ้นสนามแม่เหล็กที่สเตเตอร์แต่ละคู่เฟสในสัญญาณขับเคลื่อนของมอเตอร์เฟส (ก) สัญญาณขับเคลื่อน PWM และความเร็วรอบมอเตอร์ ( $\omega_r$ ) และ (ข) ภาพขยายสัญญาณขณะออกตัวเริ่มต้นจากระดับที่ 1 ระดับที่ 2 และขับเคลื่อนแบบวงรอบเปิด .....	97
5.20 การวัดสัญญาณขณะกระตุ้นสนามแม่เหล็กที่สเตเตอร์แต่ละคู่เฟส (ก) แรงเคลื่อนไฟฟ้า ( $U_{as}$ ) ตำแหน่งของโรเตอร์ ( $ZX_A$ ) กระแสทางด้านสเตเตอร์ ( $i_{as}$ ) และความเร็วรอบ ( $\omega_r$ ) และ (ข) ภาพขยายสัญญาณขณะออกตัวเริ่มต้นจากระดับที่ 1 ระดับที่ 2 และขับเคลื่อนแบบวงรอบเปิด .....	98
5.21 ความเร็วรอบจากการคำนวณ ( $\omega_r$ ) และการวัด ( $\omega_r$ ) และความเร็วรอบผิดพลาด ( $e_r$ ) .....	99
5.22 ความเร็วรอบจากการคำนวณ ( $\omega_r$ ) การวัด ( $\omega_r$ ) ที่ความเร็วรอบ 500 2,500 และ 4,500 รอบต่อนาที และความเร็วรอบที่ผิดพลาด ( $e_r$ ) .....	100
5.23 ความเร็วรอบคำสั่ง ( $\omega_r^*$ ) การวัด ( $\omega_r$ ) การคำนวณ ( $\omega_r$ ) และความเร็วรอบผิดพลาด ( $e_r$ ).....	100
5.24 กระแสไฟฟ้าเฟส A ( $i_{as}$ ) ความเร็วรอบจากการวัด ( $\omega_r$ ) การคำนวณ ( $\omega_r$ ) และความเร็วรอบผิดพลาด ( $e_r$ ).....	101
5.25 ขณะรับภาระแรงบิด 10%, 50%, 100% ของพิกัด ที่ความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาที.....	102
5.26 ขณะรับภาระแรงบิด 10%, 50%, 100% ของพิกัด ที่ความเร็วรอบ 2,500 รอบต่อนาที.....	102
5.27 ขณะรับภาระแรงบิด 10%, 50%, 100% ของพิกัด ที่ความเร็วรอบ 4,500 รอบต่อนาที.....	102
5.28 ไดอะแกรมการทดสอบทางด้านพลวัตของมอเตอร์.....	103
5.29 ข้อมูลของตัวทดสอบทางด้านพลวัต.....	104
5.30 การเปรียบเทียบผลทดสอบแรงบิด และกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์จากโปรแกรมออกแบบ SPEED และจากผลทดสอบทางด้านพลวัต .....	105
5.31 การเปรียบเทียบผลทดสอบกำลังไฟฟ้าด้านเข้า และประสิทธิภาพของมอเตอร์จากโปรแกรมออกแบบ SPEED และจากผลทดสอบพลวัต .....	105
5.32 การเปรียบเทียบการควบคุมความเร็ว (ก) แบบใช้ตัวตรวจจับตำแหน่ง (ข) แบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่ง.....	106

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

5.33	การออกตัวเริ่มต้นของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ (ก) ใช้ตัวตรวจจับ (ข) ปราศจากตัวตรวจจับ	107
5.34	ความเร็วรอบ 4,500 รอบต่อนาที (ก) ใช้ตัวตรวจจับ (ข) ปราศจากตัวตรวจจับ .....	107
ก1	ชุดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ต้นแบบที่สร้างขึ้น (อัตราส่วน 1:1) .....	117
ก2	การทดสอบ และบันทึกค่าการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน .....	118
ก3	การทดสอบ และบันทึกค่าสัญญาณ .....	118
ก4	การทดสอบทางด้านพลวัตของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน .....	119
ก5	การทดสอบ และบันทึกค่าการทดสอบทางด้านพลวัต .....	119



- 1.2.5 เพื่อศึกษาและการประยุกต์นำไมโครคอนโทรลเลอร์มาใช้ควบคุมความเร็วมอเตอร์แบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ โดยมีจุดมุ่งหมายที่จะลดขนาดของวงจรทางด้านอุปกรณ์ควบคุมลง

### 1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

- 1.3.1 สามารถเข้าใจถึงหลักการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านได้ ทั้งนี้เพราะจากการศึกษา และค้นคว้ารวบรวมข้อมูลก่อนที่จะเริ่มทำงานวิจัย
- 1.3.2 สามารถเลือกใช้อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยได้ ซึ่งจากการศึกษาจะบ่งบอกถึงพิกัด และชนิดของอุปกรณ์ที่จะต้องใช้ในการทำงานวิจัย
- 1.3.3 สามารถเข้าใจถึงวิธีการเทคนิคการขับเคลื่อนสัญญาณสี่เหลี่ยม 120 องศา ด้วยสัญญาณ PWM และหลักการคำนวณหาตำแหน่งโรเตอร์จากการเกิดซีโรครอสซึ่งเพื่อใช้ในการคำนวณหาตำแหน่งโรเตอร์ และความเร็วรอบมอเตอร์
- 1.3.4 สามารถอธิบายถึงวิธีการควบคุมความเร็วรอบ แบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน ด้วยเทคนิคการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบสัญญาณสี่เหลี่ยม 120 องศา และการค้นหาตำแหน่งของโรเตอร์ขณะเริ่มต้นของมอเตอร์ ด้วยเทคนิคการกระตุ้นสนามแม่เหล็กที่ขดลวดด้านสเตเตอร์ในแต่ละคู่เฟส
- 1.3.5 สามารถวิเคราะห์สนามแม่เหล็กทางด้านสเตเตอร์ที่เกิดจากกระตุ้นสนามแม่เหล็กในแต่ละคู่เฟส ก่อนการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบวงรอบเปิด
- 1.3.6 สามารถสร้างระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน ขึ้นมาใช้ในงานวิจัยได้ หลังจากที่ได้ศึกษาค้นคว้าในการขับเคลื่อนมอเตอร์ และเทคนิคในการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน
- 1.3.7 สามารถใช้ตัวประมวลทางดิจิทัล มาประยุกต์ใช้กับงานทางด้านระบบขับเคลื่อนมอเตอร์แบบใช้ตัวตรวจจับตำแหน่ง และควบคุมความเร็วรอบแบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ โดยอาศัยคุณสมบัติ และความสามารถของตัวประมวลทางดิจิทัล ตระกูล dsPIC ขนาด 16 บิต

### 1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

จากการศึกษาหลักการทำงาน และวิธีการควบคุมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน จะเห็นว่าความจำเป็นการตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์มีส่วนสำคัญมากในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน หากการขับเคลื่อนมอเตอร์โดยไม่สนใจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตำแหน่งของโรเตอร์ ขับเคลื่อนแบบสัญญาณสี่เหลี่ยม 120 องศา ผลที่เกิดขึ้นจะทำให้กระแสไฟฟ้าขณะออกตัวเริ่มต้นสูง และเกิดความร้อนขึ้นเมื่อมอเตอร์หมุนได้ไม่นานนัก มอเตอร์มีการสั่น และเสียงดังผลจากการขับเคลื่อนมอเตอร์โดยไม่สนใจตำแหน่งโรเตอร์ จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องรู้ตำแหน่งของโรเตอร์ขณะเริ่มต้น สำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์ ดังนั้นการค้นหาตำแหน่งโรเตอร์ขณะเริ่มต้นนั้นมีความจำเป็นสำหรับการออกตัวเริ่มต้นของมอเตอร์ ดังนั้นมอเตอร์โดยทั่วไปแล้ว จะมีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์แบบปรากฏการณ์ฮอลล์ สำหรับการหาตำแหน่งของโรเตอร์ แต่มีข้อจำกัดสำหรับในงานบางประเภทไม่สามารถที่จะติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ได้ เช่น งานประเภทที่มีอุณหภูมิสูง และมีผลกระทบต่ออุปกรณ์ตรวจจับตำแหน่งหรือภายในมอเตอร์คอมเพรสเซอร์ชนิดแบบปิด จึงจำเป็นต้องใช้การควบคุมแบบปราศจากตัวตรวจจับ ซึ่งปัจจุบันก็ได้มีการนำมาใช้อย่างแพร่หลาย และได้มีการนำเสนอหลักการในการค้นหาตำแหน่งโรเตอร์ และเปรียบเทียบกับหลักการที่มีอยู่เดิม ดังนี้

#### 1.4.1 การนำเสนอหลักการใหม่

การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้อุปกรณ์ตรวจจับตำแหน่ง ในปัจจุบันยังคงมีปัญหาในข้อจำกัดของการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับตำแหน่ง ในงานบางประเภทไม่สามารถติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับได้ เช่นงานประเภทที่มีความร้อนสูง หรือภายในมอเตอร์คอมเพรสเซอร์ จึงเป็นเหตุผลหนึ่งในการใช้การควบคุมแบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่ง แต่ในปัจจุบันชุดอุปกรณ์สำหรับควบคุมมอเตอร์ยังมีราคาสูง และการออกตัวขณะเริ่มต้นของมอเตอร์ จะออกตัวทันทีทันใดจึงส่งผลให้กระแสไฟฟ้าขณะออกตัวเริ่มต้นนั้นสูงขณะที่มีโหลดอยู่ จึงจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับการรู้ตำแหน่งของโรเตอร์ขณะเริ่มต้นของมอเตอร์ โดยงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอการค้นหาตำแหน่งของโรเตอร์ขณะเริ่มต้น ด้วยเทคนิคการกระตุ้นสนามแม่เหล็กที่ขดลวดด้านสเตเตอร์ เพื่อทราบตำแหน่งโรเตอร์ที่แน่นอนก่อนการขับเคลื่อนสัญญาณแบบสี่เหลี่ยม 120 องศา ให้ตรงตามตำแหน่งของโรเตอร์ ทำให้ช่วยลดกระแสไฟฟ้าขณะออกตัวเริ่มต้น หลังจากนั้นจะขับเคลื่อนมอเตอร์แบบวงรอบเปิด ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับแล้วผ่านวงจรเลื่อนเฟส 90 องศา วงจรกรองความถี่ผ่านสูง วงจรกรองความถี่ผ่านต่ำ ใช้ตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับโดยตรงจากจุดต่อของมอเตอร์ ทำการเปรียบเทียบกับวงจรซีโรครอสซิง เพื่อหาตำแหน่งของแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับที่เกิดซีโรครอสซิงสำหรับใช้ในการคำนวณหาตำแหน่งของโรเตอร์ และความเร็วรอบมอเตอร์แบบวงรอบปิด โดยการควบคุมแบบพีไอ ด้วยเทคนิคการขับเคลื่อนแบบสัญญาณสี่เหลี่ยม 120 องศา ดังนั้นจึงได้นำหลักการดังกล่าวนี้ มาใช้ในระบบควบคุมความเร็วแบบปราศจากตัวตรวจจับสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน ทำให้ต้นทุนในการผลิตนั้นลดลง เนื่องจากใช้ตัวประมวลผลทาง

ดิจิทัลควบคุมทั้งระบบการขับเคลื่อนมอเตอร์ และลดขนาดของชุดควบคุมมอเตอร์ให้มีขนาดเล็กให้เหมาะสมกับการควบคุมต่อไป

#### 1.4.2 การเปรียบเทียบกับหลักการที่มีอยู่เดิม

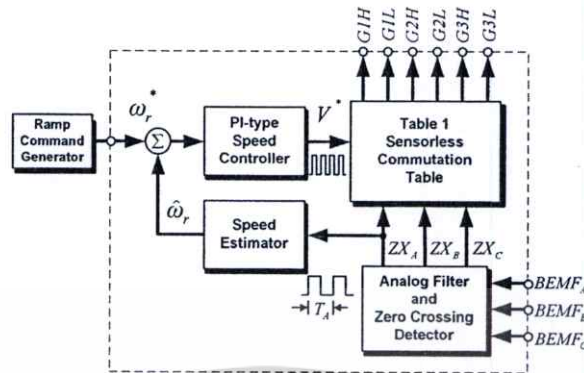
1. จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการนำเสนอการควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน ส่วนใหญ่จะใช้อุปกรณ์ตรวจจับตำแหน่งแบบปรากฏการณ์ฮอลล์ สำหรับตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ในการควบคุมมอเตอร์ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอการควบคุมความเร็วแบบปราศจากตัวตรวจจับอย่างประหยัด สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน โดยวิธีการค้นหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับลักษณะสี่เหลี่ยมคางหมู และทำการเปรียบเทียบการทดสอบที่มีอยู่ กับการควบคุมที่นำเสนอทั้งสองแบบ

2. การตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับโดยตรงโดยทั่วไป จะมีการตรวจจับตำแหน่งโดยตรง แต่ในงานวิจัยนี้จะใช้วงจรเลื่อนเฟส 90 องศา เพื่อบังคับให้เฟสที่ได้จากการตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับที่ได้นั้นมีมุมเฟสใกล้เคียง 90 องศา โดยใช้วงจรรองความถี่ผ่านต่ำ และวงจรรองความถี่ผ่านสูง สำหรับย่านความเร็วรอบ 500 ถึง 4,500 รอบต่อนาที สำหรับการคำนวณหาตำแหน่งของ โรเตอร์ และความเร็วรอบมอเตอร์ อาศัยการตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับลักษณะสี่เหลี่ยมคางหมู เปรียบเทียบกับตำแหน่งที่เกิดซีโรครอสซึ่ง จะได้คาบเวลาที่เกิดซีโรครอสซึ่ง สำหรับควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์โดยการควบคุมแบบพีโอ

3. การออกตัวขณะเริ่มต้นของมอเตอร์ทันทีทันใด จะทำให้กระแสไฟฟ้าขณะออกตัวเริ่มต้นนั้นสูง เนื่องจากตำแหน่งของโรเตอร์กับสัญญาณในการขับเคลื่อนมอเตอร์นั้นไม่สัมพันธ์กัน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอ การค้นหาตำแหน่งโรเตอร์ขณะเริ่มต้นด้วยเทคนิคการกระตุ้นสนามแม่เหล็กที่ขดลวดสเตเตอร์แต่ละคู่เฟส

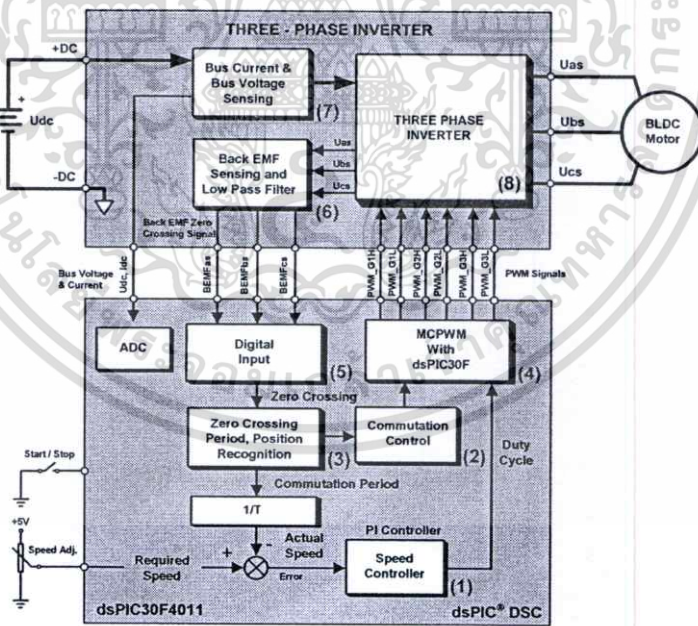
4. การคำนวณความเร็วรอบมอเตอร์ แสดงในไดอะแกรมการคำนวณความเร็วรอบ ( $\omega_r$ ) จากสัญญาณคาบเวลาการเกิดซีโรครอสซึ่ง ( $T_A$ ) ในวงรอบควบคุมความเร็วรอบแบบพีโอ สำหรับการคำนวณหาความเร็วรอบ จากความสัมพันธ์กันกับคาบเวลาที่เกิดซีโรครอสซึ่ง แสดงในสมการที่ (1.1) ผลจากการตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับโดยตรง ผ่านวงจรเลื่อนเฟส 90 องศา วงจรรองความถี่ผ่านสูง วงจรรองความถี่ผ่านต่ำ และวงจรซีโรครอสซึ่ง แล้วนำคาบเวลาที่เกิดซีโรครอสซึ่ง มาคำนวณหาตำแหน่งโรเตอร์ และความเร็วรอบมอเตอร์ เพื่อเลือกสัญญาณในการขับเคลื่อนของมอเตอร์ให้เป็นไปตามตำแหน่งของโรเตอร์ โดยมีการควบคุมแบบพีโอ สำหรับควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ให้คงที่ตามความเร็วรอบคำสั่ง การขับเคลื่อนแบบสัญญาณสี่เหลี่ยม 120 องศา แสดงในรูปที่ 1.1 เป็นไดอะแกรมของการคำนวณหาความเร็วรอบ ที่ได้จากคาบเวลาที่เกิดจากสัญญาณซีโรครอสซึ่ง

$$\hat{\omega}_r = \frac{1}{T_A} \times \frac{60}{(P/2)} = \frac{120}{PT_A} \tag{1.1}$$



รูปที่ 1.1 ไคอะแกรมการคำนวณหาความเร็วรอบ

และในรูปที่ 1.2 แสดงระบบควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ทั้งระบบ เป็นไคอะแกรมของระบบควบคุมต้นแบบที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ อธิบายรายละเอียดในส่วนต่างๆ ของไคอะแกรมการควบคุมในแต่ละบล็อกมีหน้าที่ดังต่อไปนี้



รูปที่ 1.2 ไคอะแกรมสำหรับควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ที่นำเสนอ

- (1) Speed Controller คือการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ด้วยการควบคุมแบบพีไอ
- (2) Commutation Control คือชุดควบคุมการขับเคลื่อนแบบสัญญาณสี่เหลี่ยม 120 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- (3) Zero Crossing Period คือส่วนของฟังก์ชันที่ทำงานร่วมกันกับ โปรแกรมเพื่อตรวจจับ สัญญาณแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับ สำหรับคำนวณหาตำแหน่ง โรเตอร์ และความเร็ว รอบมอเตอร์
- (4) MCPWM คือสัญญาณขับเคลื่อนแบบ PWM ส่วนของโปรแกรมที่ส่งสัญญาณขับ เคลื่อนชุดอินเวอร์เตอร์
- (5) Digital Input คือส่วนรับสัญญาณก่อนแปลงเป็นสัญญาณทางดิจิทัล
- (6) Back-EMF Sensing คือการตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับ โดยตรงจากจุดต่อ แรงดันไฟฟ้าที่มอเตอร์ ผ่านวงจรเลื่อนเฟส 90 องศา วงจรกรองความถี่ผ่านสูง และ วงจรกรองความถี่ผ่านต่ำ เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับวงจรซีโรครอสซิง
- (7) Bus Current, Bus Voltage Sensing คือส่วนของฟังก์ชันที่ทำงานร่วมกันกับ โปรแกรม เพื่อป้องกันแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าเกิดพิคก์ที่ป้องกันไว้ ในระบบป้องกัน
- (8) Three Phase Inverter คือส่วนผกผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส สำหรับเป็นตัวจ่ายแรงดันให้กับมอเตอร์ ประกอบด้วยมอสเฟส จำนวน 6 ตัว

## 1.5 ขอบเขตการวิจัย

งานวิจัยนี้มีขอบเขตอยู่ที่แนวทางในการพัฒนาใช้ความสามารถของ โปรแกรม และ เทคโนโลยีทางด้าน ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่จะทำให้ระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์แบบปราศจาก ตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ที่สร้างขึ้นนี้บรรลุวัตถุประสงค์ คือ การลดขนาดอุปกรณ์ของวงจร ควบคุม ซึ่งในงานวิจัยจะมีการสร้างเครื่องต้นแบบ ในส่วนการทดลองที่พิคค์มอเตอร์ ดังนี้

สำหรับทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน 3 เฟส พิกัดกำลัง 100 วัตต์ 30 โวลต์ 4,500 รอบต่อนาที ชนิดแม่เหล็กถาวรชนิดติดพื้นผิวโรเตอร์ การควบคุมในย่านความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาที ถึง 4,500 รอบต่อนาที

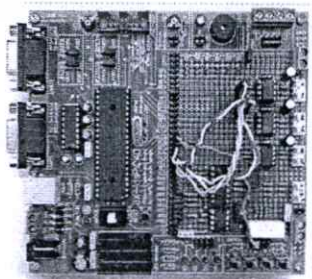
## 1.6 ขั้นตอนของการศึกษาวิจัย

- 1.6.1 การศึกษาโครงสร้าง การทำงาน และหลักการขับเคลื่อนของมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน
- 1.6.2 เปรียบเทียบการขับเคลื่อนมอเตอร์โดยไม่สนใจตำแหน่งโรเตอร์ การขับเคลื่อน มอเตอร์โดยใช้อุปกรณ์ตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ และการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบ ปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์

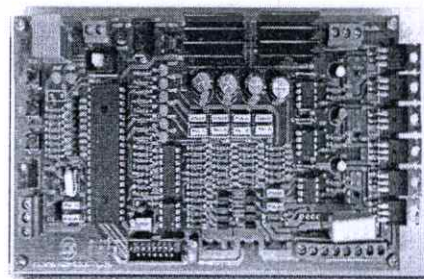
- 1.6.3 การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นที่ช่องว่างอากาศ และสนามแม่เหล็กด้านสเตเตอร์ทางอุดมคติ โดยใช้โปรแกรมสำหรับออกแบบมอเตอร์ (SPEED) และโปรแกรมวิเคราะห์ทางด้านไฟไนท์อีลิเมนต์ 2 มิติ (2-D FEA)
- 1.6.4 จำลองการควบคุมมอเตอร์โดยใช้โปรแกรม MATLAB จำลองการทำงานของมอเตอร์ และจำลองการควบคุมความเร็วมอเตอร์แบบปราศจากตัวตรวจจับ
- 1.6.5 ออกแบบอุปกรณ์ควบคุม และวิธีการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านแบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ ใช้ตัวประมวลผลทางดิจิทัล (DSC) ขนาด 16 บิต
- 1.6.6 ทดสอบทางด้านพลวัตของมอเตอร์ (Dynamometer test)
- 1.6.7 ทดสอบการค้นหาตำแหน่งขณะเริ่มต้น ด้วยเทคนิคการกระตุ้นสนามแม่เหล็กที่ขดลวดสเตเตอร์แต่ละคู่เฟส
- 1.6.8 ทดสอบการควบคุมความเร็วของมอเตอร์แบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์
- 1.6.9 สรุปผลการทดสอบ

## 1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

- 1.7.1 การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านขณะเริ่มต้นออกตัว และประหยัดต้นทุนในการผลิตชุดควบคุมมอเตอร์ เนื่องจากไม่จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ตรวจจับความเร็วของมอเตอร์ และอุปกรณ์ตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์
- 1.7.2 สามารถนำแนวคิดที่พัฒนาขึ้นไปใช้ในงานอุตสาหกรรม เพื่อทำให้ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน สำหรับยานการควบคุมความเร็วรอบ 500 ถึง 4,500 รอบต่อนาที
- 1.7.3 ช่วยให้เกิดทักษะในการวิจัยและพัฒนา อันเป็นพื้นฐานสำคัญในการพัฒนาอุตสาหกรรมแบบพึ่งพาตัวเองภายในประเทศ



(ก)



(ข)

รูปที่ 1.3 (ก) ชุดทดลองเพื่อเป็นแนวทางออกแบบ และ (ข) เครื่องต้นแบบสำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.8 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์

ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอเทคนิคการค้นหาตำแหน่งโรเตอร์ขณะเริ่มต้น ด้วยเทคนิคการกระตุ้นสนามแม่เหล็กที่ขดลวดด้านสเตเตอร์ เพื่อทราบตำแหน่งของโรเตอร์ที่แน่นอน ก่อนการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบวงรอบเปิด ใช้เทคนิคแบบสัญญาณสี่เหลี่ยม 120 องศา เพื่อให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับ เนื่องจากโรเตอร์เป็นแม่เหล็กถาวรหมุนตัดผ่านขดลวดทางด้านสเตเตอร์ จึงทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเกิดขึ้นที่ขดลวดด้านสเตเตอร์ นำสัญญาณที่เกิดขึ้นมาเปรียบเทียบกับสัญญาณที่เกิดซีโรครอสซิง สำหรับคำนวณหาตำแหน่งโรเตอร์ และความเร็วรอบมอเตอร์ เพื่อควบคุมความเร็วรอบแบบวงรอบปิด ด้วยการควบคุมแบบพีไอ อาศัยแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับโดยตรง ในการออกแบบ และสร้างเครื่องต้นแบบสำหรับย่านการควบคุมความเร็วรอบ 500 ถึง 4,500 รอบต่อนาที ซึ่งสามารถแบ่งรายละเอียดในวิทยานิพนธ์นี้เป็น 6 บท ดังต่อไปนี้

บทที่ 1 บทนำ กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมาย และวัตถุประสงค์ของการศึกษาวิจัย สมมติฐานของการศึกษา ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย ขอบเขตการวิจัย และโครงสร้างวิทยานิพนธ์ซึ่งกล่าวถึงเนื้อหาของแต่ละบท

บทที่ 2 ทฤษฎี และหลักการวิธีการควบคุมมอเตอร์ กล่าวถึงหลักการและทฤษฎีพื้นฐานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้

บทที่ 3 การจำลองการทำงาน กล่าวถึงการจำลองระบบควบคุมมอเตอร์ และวิเคราะห์สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นทางด้านสเตเตอร์

บทที่ 4 การออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบที่นำเสนอ กล่าวถึงการเลือกใช้อุปกรณ์ การออกแบบวงจรต่างๆ ที่นำมาใช้ในการสร้างเครื่องต้นแบบ ทั้งวงจรภาคกำลัง และวงจรควบคุมที่ใช้ในงานวิจัยนี้

บทที่ 5 การทดสอบและผลการทดสอบ กล่าวถึงการทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์แบบไม่สนใจตำแหน่งโรเตอร์ การทดสอบโดยใช้ตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์แบบปรากฏการณ์ฮอลล์ การขับเคลื่อนมอเตอร์แบบใช้สัญญาณ PWM การควบคุมความเร็วแบบใช้ตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์แบบปรากฏการณ์ฮอลล์ การควบคุมความเร็วแบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ และการทดสอบทางด้านพลวัตของมอเตอร์

บทที่ 6 บทสรุปการวิเคราะห์ผลทดลอง และข้อเสนอแนะ กล่าวถึงผลสรุปการทำวิจัย การวิเคราะห์ผลการทดลอง และข้อเสนอแนะเกี่ยวกับงานวิจัยในการพัฒนาการควบคุมความเร็วมอเตอร์แบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์

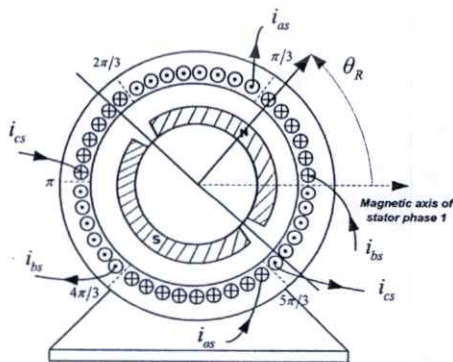
# ทฤษฎีและหลักการวิธีการควบคุมมอเตอร์

## 2.1 บทนำ

แบบจำลองทางพลวัตของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน (Brushless DC Motor) แรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับลักษณะสี่เหลี่ยมคางหมู การพัฒนาระบบควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน ที่ใช้แม่เหล็กถาวรเป็นสนามแม่เหล็กกระตุ้นแทนขดลวดกระตุ้น สนามแม่เหล็กเพื่อทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุน การกระจายของสนามแม่เหล็กที่ช่องว่างอากาศกระจายอย่างสม่ำเสมอจากการใช้แม่เหล็กถาวร (กรณีไม่เกิดการสูญเสียในช่องว่างอากาศ) เมื่อมอเตอร์หมุนด้วยความเร็วรอบคง [1]-[6] ผลที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของสนามแม่เหล็กหมุนตัดผ่านตัวนำทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับลักษณะสี่เหลี่ยมคางหมู ในแต่ละคาบเวลาจึงเรียกแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับลักษณะแบบสี่เหลี่ยมคางหมูนั่นเอง แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนั้นมีความสัมพันธ์กับความเร็วรอบของมอเตอร์ จากความสัมพันธ์ดังกล่าวนำมาใช้สำหรับประมาณความเร็วรอบมอเตอร์ จากคาบเวลาของแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับที่เกิดขึ้นในแต่ละเฟส ดังจะกล่าวรายละเอียดต่อไป

## 2.2 โครงสร้างพื้นฐานของมอเตอร์ในการพิจารณาสนามแม่เหล็ก

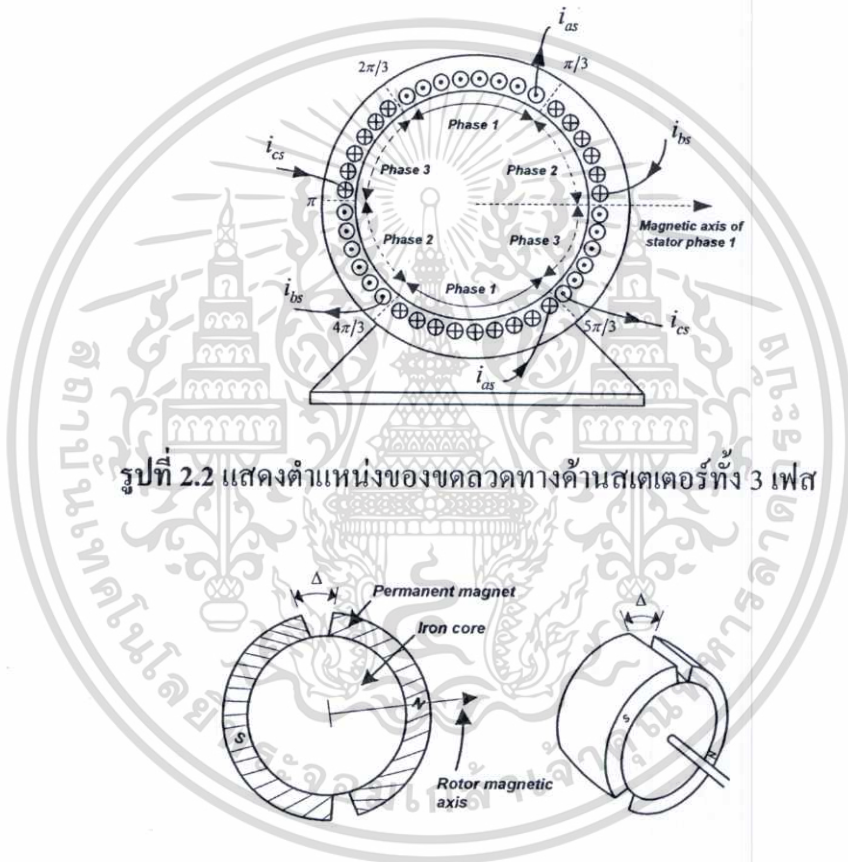
ลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน ใช้ในการพิจารณาระบบแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส ลักษณะของมอเตอร์จะประกอบด้วยจำนวนขั้วแม่เหล็ก 2 ขั้ว ตำแหน่งของขดลวดด้านสเตเตอร์แต่ละเฟส ทิศทางของกระแสไฟฟ้าแต่ละเฟส ตามพิกัดอ้างอิงของโรเตอร์ [1] เปรียบเทียบกับสนามแม่เหล็กทางด้านสเตเตอร์เฟส A แสดงในรูปที่ 2.1 เป็นโครงสร้างพื้นฐานของมอเตอร์สำหรับการพิจารณาทางด้านพลวัต



รูปที่ 2.1 โครงสร้างพื้นฐานของมอเตอร์สำหรับการพิจารณาทางด้านพลวัต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



รูปที่ 2.2 แสดงตำแหน่งของขดลวดทางด้านสเตเตอร์ทั้ง 3 เฟส

รูปที่ 2.3 ลักษณะของโรเตอร์ประกอบด้วยขั้วแม่เหล็ก 2 ขั้ว

ในแกนพิศดอ้างอิงทางด้านโรเตอร์ของสนามแม่เหล็กระหว่างขั้วเหนือ และขั้วใต้ กำหนดให้ระยะขั้วแม่เหล็กมีมุมต่างกัน ( $\Delta$ ) โดยลักษณะของแม่เหล็กถาวรจะเป็นแบบทรงกระบอกติดกับผิวของโรเตอร์ ตำแหน่งของโรเตอร์กำหนดให้อยู่ในทิศทางเดียวกับแม่เหล็กถาวรบนแกนพิศดอ้างอิงโรเตอร์ เพราะฉะนั้น การกระจายสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในช่องว่างอากาศ ให้เท่ากับสนามแม่เหล็กที่โรเตอร์ สามารถเขียนสมการได้ในสมการที่ (2.1) ตามทิศทางเวกเตอร์หนึ่งหน่วยของโรเตอร์ ( $\hat{r}$ ) ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

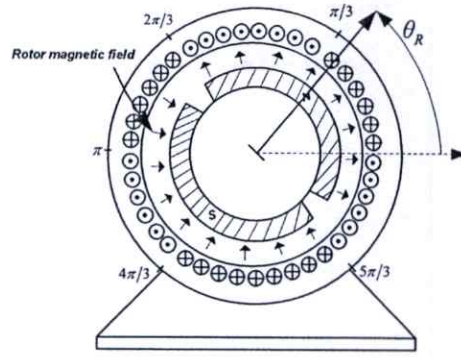
ถ้าหากไม่นำมุมระหว่างช่องว่างของขั้วแม่เหล็ก ( $\Delta$ ) มาพิจารณา หรือกำหนดให้มีค่าเท่ากับศูนย์ เพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณา และวิเคราะห์ผลของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นด้าน โรเตอร์ สามารถเขียนสมการได้ใหม่ ดังแสดงในสมการที่ (2.2) ดังนี้

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

เมื่อกำหนดให้

- $B_R$  คือสนามแม่เหล็กทางด้าน โรเตอร์ (T)
- $r, r_R$  คือรัศมีของสเตเตอร์ และรัศมีของโรเตอร์ (mm)
- $\theta, \theta_R$  คือมุมทางด้านสเตเตอร์ และมุมทางด้านโรเตอร์ (Degree)
- $B_{R0}$  คือสนามแม่เหล็กที่เกิดจากแม่เหล็กถาวรด้าน โรเตอร์ (T)
- $\hat{r}$  คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยของรัศมีโรเตอร์
- $\Delta$  คือมุมระหว่างขั้วแม่เหล็กถาวรขั้วเหนือ และขั้วใต้ (Degree)

ดังนั้นตัวประกอบ  $r_R/r$  จะเป็นอัตราส่วนระหว่างสนามแม่เหล็กด้านสเตเตอร์กับด้าน โรเตอร์ ระหว่างช่องว่างอากาศ (Air-Gap) ตามทิศทางของรัศมีหนึ่งหน่วยโรเตอร์ ( $\hat{r}$ ) ดังนั้น การกระจายสนามแม่เหล็กที่ช่องว่างอากาศ ระหว่างทางด้านโรเตอร์กับสเตเตอร์ ในรูปที่ 2.4 เป็นทิศทางเวกเตอร์ของการกระจายสนามแม่เหล็กทางด้าน โรเตอร์ที่ช่องว่างอากาศ



รูปที่ 2.4 ทิศทางการกระจายสนามแม่เหล็กระหว่างช่องว่างอากาศ

### 2.3 สนามแม่เหล็กทางด้านสเตเตอร์

สนามแม่เหล็กทางด้านสเตเตอร์ ( $B_s$ ) ที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าทางด้านสเตเตอร์ ( $i_s$ ) ในรูปที่ 2.1 แสดงทิศทางของกระแสไฟฟ้าในแต่ละเฟส สำหรับสร้างสนามแม่เหล็กด้านสเตเตอร์ เมื่อพิจารณาที่เฟส A ดังนั้น จะได้สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากกระแสไฟฟ้าเฟส A แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กสเตเตอร์เฟส A กระแสไฟฟ้าเฟส A และมุมทางด้านสเตเตอร์ ( $\theta$ ) ในสมการที่ (2.3) ตามทิศทางเวกเตอร์หนึ่งหน่วยของโรเตอร์ ( $\hat{r}$ ) ดังนี้

$$B_{as}(i_{as}, r, \theta) \hat{r} = \begin{cases} \frac{\mu_o N_s i_{as} r_R}{2g} \frac{r_R}{r} \hat{r} & ; -\frac{\pi}{3} \leq \theta \leq \frac{\pi}{3} \\ \frac{\mu_o N_s i_{as} r_R}{2g} \frac{r_R}{r} \frac{6}{\pi} (\pi/2 - \theta) \hat{r} & ; \frac{\pi}{3} \leq \theta \leq \frac{2\pi}{3} \\ -\frac{\mu_o N_s i_{as} r_R}{2g} \frac{r_R}{r} \hat{r} & ; \frac{2\pi}{3} \leq \theta \leq \frac{4\pi}{3} \\ \frac{\mu_o N_s i_{as} r_R}{2g} \frac{r_R}{r} \frac{6}{\pi} (\theta - 3\pi/2) \hat{r} & ; \frac{4\pi}{3} \leq \theta \leq \frac{5\pi}{3} \end{cases} \quad (2.3)$$

ในทำนองเดียวกันสนามแม่เหล็กทางด้านสเตเตอร์เฟสอื่นๆ สามารถแสดงได้ในสมการที่ (2.4)

$$\begin{aligned} B_{bs}(i_{bs}, r, \theta) &= B_{bs}(i_{bs}, r, \theta - 2\pi/3) \\ B_{cs}(i_{cs}, r, \theta) &= B_{cs}(i_{cs}, r, \theta - 4\pi/3) \end{aligned} \quad (2.4)$$

เมื่อกำหนดให้

$B_{as}, B_{bs}, B_{cs}$  คือสนามแม่เหล็กทางด้านสเตเตอร์แต่ละเฟส (T)

$i_{as}, i_{bs}, i_{cs}$  คือกระแสไฟฟ้าทางด้านสเตเตอร์แต่ละเฟส (Amp)

$r, r_R$  คือรัศมีของสเตเตอร์ และรัศมีของโรเตอร์ (mm)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\theta$  คือมุมทางด้านสเตเตอร์ (Degree)

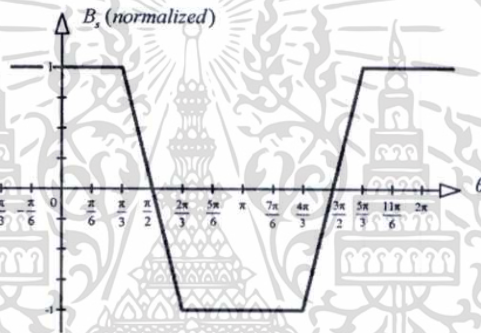
$\mu_o$  คือความซึมซาบ

$N_s$  คือจำนวนรอบขดลวดด้านสเตเตอร์ (Turn)

$g$  คือระยะช่องว่างอากาศ (mm)

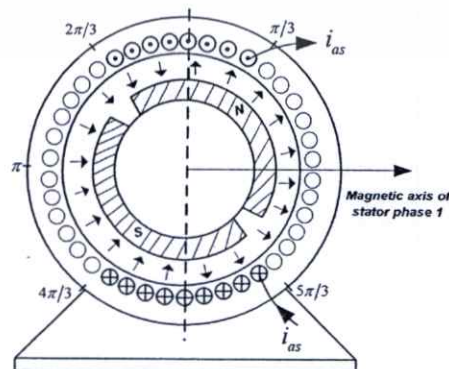
$\hat{r}$  คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยของรัศมีโรเตอร์

ดังนั้นสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นลักษณะทั่วไปทางด้านอุดมคติ จากสมการที่ (2.3) สามารถนำมาแสดงในรูปแบบของฟังก์ชัน  $B_s(i_s, r, \theta) / \left( \frac{\mu_o N_s i_s r_R}{2g r} \right)$  ระหว่างความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าเฟสด้านสเตเตอร์กับสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น ตามทิศทางมุมทางด้านสเตเตอร์ในช่วงมุมของสเตเตอร์  $(-\pi/3 \leq \theta \leq 2\pi)$  ในรูปที่ 2.5 แสดงลักษณะทั่วไปของสนามแม่เหล็กทางด้านสเตเตอร์ทางอุดมคติ



รูปที่ 2.5 ลักษณะทั่วไปของสนามแม่เหล็กสเตเตอร์ทางด้านอุดมคติ

จากลักษณะของสนามแม่เหล็กสเตเตอร์ทางด้านอุดมคติ สามารถแสดงทิศทางของการกระจายสนามแม่เหล็กที่สเตเตอร์เฟส A ( $B_{as}$ ) ระหว่างช่องว่างอากาศ ในแต่ละตำแหน่งของมุมทางด้านสเตเตอร์ ( $\theta$ ) ที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าเฟส A ( $i_{as}$ ) แสดงในรูปที่ 2.6 ดังนี้



รูปที่ 2.6 การกระจายสนามแม่เหล็กระหว่างช่องว่างอากาศจากกระแสไฟฟ้าเฟสด้านสเตเตอร์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 แรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับทางด้านสเตเตอร์

แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ต้านกลับ ( $e_s$ ) ที่เกิดขึ้นทางด้านสเตเตอร์ ผลจากการที่สนามแม่เหล็กทางด้านโรเตอร์ ซึ่งเป็นแม่เหล็กถาวรหมุนตัดผ่านตัวนำด้านสเตเตอร์ ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำของขดลวดสเตเตอร์ จากหลักการดังกล่าวจะเห็นว่าความเร็วรอบของมอเตอร์นั้นมีความสัมพันธ์กับแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับที่เกิดขึ้นจากการหมุนของมอเตอร์ ดังนั้นนำความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นมาช่วยในการคำนวณหาตำแหน่งโรเตอร์จากการตรวจสอบคาบเวลาการเกิดซีโรครอสซิง ของสัญญาณแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ สำหรับใช้ในการควบคุมความเร็วมอเตอร์แบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ ดังแสดงสมการแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านที่เกิดขึ้น จากการพิจารณาของฟาราเดย์ [1] ขดลวดที่เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับทางด้านสเตเตอร์แต่ละเฟส ในสมการที่ (2.5) ดังนี้

$$e_s = -\frac{d}{dt} M_{SR} \lambda_R(\theta_R)$$

$$= \begin{cases} +M_{SR} \frac{6\theta_R}{\pi} \omega_R & ; -\pi/6 \leq \theta_R \leq \pi/6 \\ +M_{SR} \omega_R & ; \pi/6 \leq \theta_R \leq 5\pi/6 \\ -M_{SR} \frac{6(\theta_R - \pi)}{\pi} \omega_R & ; 5\pi/6 \leq \theta_R \leq 7\pi/6 \\ -M_{SR} \omega_R & ; 7\pi/6 \leq \theta_R \leq 11\pi/6 \end{cases} \quad (2.5)$$

ขณะที่  $\omega_R = d\theta_R/dt$  และ  $e_p = M_{SR} = 2r_R l_1 N_s B_{R0}$

เมื่อกำหนดให้

- $e_s$  คือแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับด้านสเตเตอร์ต่อเฟส (V)
- $e_p$  คือค่ายอดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ (V)
- $M_{SR}$  คือความเหนี่ยวนำร่วม (mH)
- $\lambda_R$  คือเส้นแรงแม่เหล็กคล้องเกี่ยวทางด้านโรเตอร์ (Wb)
- $\theta_R$  คือมุมทางด้านโรเตอร์ (Degree)
- $\omega_R$  คือความเร็วรอบมอเตอร์เชิงมุม (rad/sec)
- $r_R$  คือรัศมีของโรเตอร์ (mm)
- $l_1$  คือความยาวของสเตเตอร์ (mm)
- $N_s$  คือจำนวนรอบขดลวดด้านสเตเตอร์ (Turn)
- $B_{R0}$  คือสนามแม่เหล็กที่เกิดจากแม่เหล็กถาวรด้านโรเตอร์ (T)

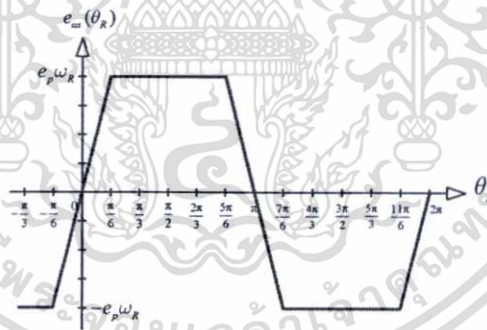
จากสมการแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับด้านสเตเตอร์ ( $e_s$ ) ที่เกิดขึ้นสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ระหว่างเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นทางด้านโรเตอร์ ( $\lambda_R$ ) และมุมของโรเตอร์ ( $\theta_R$ ) ดังสมการที่ (2.6) ดังนี้

$$e(\theta_R) = -\frac{e_s}{M_{SR} \omega_R} = \frac{\partial \lambda_R(\theta_R)}{\partial \theta_R} \quad (2.6)$$

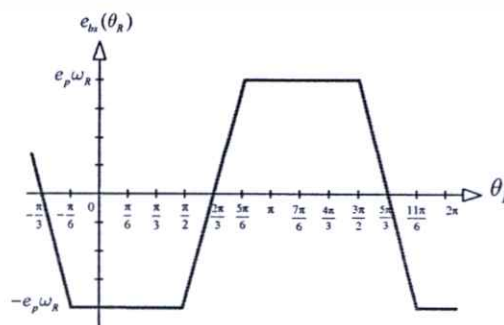
จากสมการที่ (2.6) จะได้สมการแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับที่เป็นฟังก์ชันของมุมด้านโรเตอร์ และความเร็วรอบในแต่ละเฟสดังแสดงในสมการที่ (2.7) ดังนี้

$$\begin{aligned} e_{as} &= e_p e(\theta_R) \omega_R \\ e_{bs} &= e_p e(\theta_R - 2\pi/3) \omega_R \\ e_{cs} &= e_p e(\theta_R - 4\pi/3) \omega_R \end{aligned} \quad (2.7)$$

ซึ่ง  $(-1 \leq e(\theta_R) \leq 1)$  และ  $e_p \omega_R$  เป็นค่ายอดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับ สามารถนำมาแสดงในรูปของแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับ  $e_{as}$ ,  $e_{bs}$  และ  $e_{cs}$  เปรียบเทียบกับมุมทางด้านโรเตอร์ ( $\theta_R$ ) ในรูป 2.7 - 2.9 ตามลำดับ มีลักษณะสัญญาณแบบสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal back-EMF)

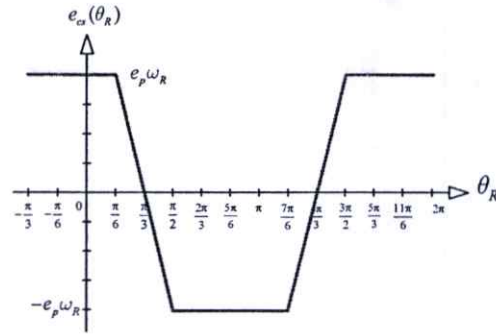


รูปที่ 2.7 แรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับเฟส A ( $e_{as}$ ) เปรียบเทียบกับมุม  $\theta_R$



รูปที่ 2.8 แรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับเฟส B ( $e_{bs}$ ) เปรียบเทียบกับมุม  $\theta_R$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 แรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับเฟส C ( $e_{cs}$ ) เปรียบเทียบกับมุม  $\theta_R$

## 2.5 แบบจำลองทางด้านพลวัตของมอเตอร์

จากสมการของเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวค้ำทางด้านสเตเตอร์ [4]-[5] นำมาพิจารณาหาแบบจำลองทางด้านพลวัตของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน จากความสัมพันธ์ของเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวค้ำทางด้านสเตเตอร์ในแต่ละเฟส เนื่องจากกระแสไฟฟ้าในแต่ละเฟส กับความเหนี่ยวนำของขดลวดด้านสเตเตอร์ และแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับที่เกิดขึ้นในแต่ละเฟส สามารถแสดงสมการความสัมพันธ์ได้ในสมการที่ (2.8) ดังนี้

$$\begin{aligned}\lambda_{as}(i_{as}, i_{bs}, i_{cs}) &= +L_s i_{as} - M i_{bs} - M i_{cs} + e_p \lambda_R(\theta_R) \\ \lambda_{bs}(i_{as}, i_{bs}, i_{cs}) &= -M i_{as} + L_s i_{bs} - M i_{cs} + e_p \lambda_R(\theta_R - 2\pi/3) \\ \lambda_{cs}(i_{as}, i_{bs}, i_{cs}) &= -M i_{as} - M i_{bs} + L_s i_{cs} + e_p \lambda_R(\theta_R - 4\pi/3)\end{aligned}\quad (2.8)$$

เมื่อกำหนดให้

$\lambda_{as}, \lambda_{bs}, \lambda_{cs}$  คือเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวค้ำทางด้านสเตเตอร์แต่ละเฟส (Wb)

$i_{as}, i_{bs}, i_{cs}$  คือกระแสไฟฟ้าด้านสเตเตอร์แต่ละเฟส (Amp)

$L_s$  คือความเหนี่ยวนำตัวเอง (mH)

$M$  คือความเหนี่ยวนำร่วม (mH)

$e_p$  คือค่ายอดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับ (V)

$\lambda_R$  คือเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวค้ำทางด้านโรเตอร์ (Wb)

$\theta_R$  คือมุมทางด้าน โรเตอร์ (Degree)

และแรงบิดของมอเตอร์ที่เกิดขึ้นในแต่ละเฟสของโรเตอร์ จากกระแสไฟฟ้าในแต่ละเฟส และแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับในแต่ละเฟสที่เกิดขึ้น ดังนั้นสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ได้ในสมการที่ (2.9) ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} T_{ar}(\theta_R, i_{as}) &= -T_p e(\theta_R) i_{as} \\ T_{br}(\theta_R, i_{bs}) &= -T_p e(\theta_R - 2\pi/3) i_{bs} \\ T_{cr}(\theta_R, i_{cs}) &= -T_p e(\theta_R - 4\pi/3) i_{cs} \end{aligned} \quad (2.9)$$

เมื่อกำหนดให้

- $T_{ar}, T_{br}, T_{cr}$  คือแรงบิดที่เกิดขึ้นในแต่ละเฟส (Nm)
- $i_{as}, i_{bs}, i_{cs}$  คือกระแสไฟฟ้าในแต่ละเฟส (Amp)
- $T_p, T, T_L$  คือค่าออกของแรงบิด แรงบิดรวมทั้งหมด และแรงบิดจากโหลด (Nm)
- $e_s$  คือแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับด้านสเตเตอร์ต่อเฟส (V)
- $\theta_R$  คือมุมทางด้านโรเตอร์ (Degree)

ขณะที่ความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ ( $R_s$ ) ในแต่ละเฟส และแรงดันไฟฟ้าในแต่ละเฟส สามารถแสดงในรูปของสมการได้ใหม่ใน สมการที่ (2.10) แต่ละเฟส ดังนี้

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \lambda_{as}(i_{as}, i_{bs}, i_{cs}) &= -R_s i_{as} + u_{as} \\ \frac{d}{dt} \lambda_{bs}(i_{as}, i_{bs}, i_{cs}) &= -R_s i_{bs} + u_{bs} \\ \frac{d}{dt} \lambda_{cs}(i_{as}, i_{bs}, i_{cs}) &= -R_s i_{cs} + u_{cs} \end{aligned} \quad (2.10)$$

เมื่อกำหนดให้

- $R_s$  คือความต้านทานขดลวดสเตเตอร์ในแต่ละเฟส ( $\Omega$ )
- $u_{as}, u_{bs}, u_{cs}$  คือแรงดันไฟฟ้าด้านสเตเตอร์ในแต่ละเฟส (V)

เมื่อนำแรงบิดที่ได้แต่ละเฟสมาเขียนในสมการแรงบิดที่เกิดขึ้นทางด้าน โรเตอร์ กับสมการแรงบิดทางกล จะได้ดังสมการที่ (2.11) - (2.13) ดังนี้

$$\begin{aligned} J \frac{d\omega}{dt} &= T_{ar}(\theta_R, i_{as}) + T_{br}(\theta_R, i_{bs}) + T_{cr}(\theta_R, i_{cs}) - T_L \\ J \frac{d\omega}{dt} &= T - T_L \end{aligned} \quad (2.11)$$

โดยที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T = -T_p e(\theta_R) i_{as} - T_p e(\theta_R - 2\pi/3) i_{bs} - T_p e(\theta_R - 4\pi/3) i_{cs} \quad (2.12)$$

$$\frac{d\theta_R}{dt} = \omega_R \quad (2.13)$$

เมื่อกำหนดให้

$T_p, T, T_L$  คือค่ายอดของแรงบิด แรงบิดรวมทั้งหมด และแรงบิดจากโหลด (Nm)

$J$  คือความเฉื่อยของโรเตอร์ ( $\text{kg.m}^2$ )

$e(\theta_R)$  คือฟังก์ชันของแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับแต่ละเฟส (V)

$\theta_R, \omega_R$  คือมุมทางด้าน โรเตอร์ (Degree) และความเร็วเชิงมุมโรเตอร์ (rad/sec)

เมื่อนำสมการของเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวกับคล็อง ในสมการที่ (2.8) มาแทนค่าในสมการที่ (2.10) จะได้สมการใหม่ ในสมการที่ (2.14) ดังนี้

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} (L_s i_{as} - M i_{bs} - M i_{cs} + e_p \lambda_R(\theta_R)) &= -R_s i_{as} + u_{as} \\ \frac{d}{dt} (-M i_{as} + L_s i_{bs} - M i_{cs} + e_p \lambda_R(\theta_R - 2\pi/3)) &= -R_s i_{bs} + u_{bs} \\ \frac{d}{dt} (-M i_{as} - M i_{bs} + L_s i_{cs} + e_p \lambda_R(\theta_R - 4\pi/3)) &= -R_s i_{cs} + u_{cs} \end{aligned} \quad (2.14)$$

นำสมการที่ (2.14) ข้างต้น มาเขียนเป็นสมการทางด้านพลวัตของมอเตอร์ ในรูปแบบสมการเมตริกส์ในฟังก์ชันของแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับ ( $e(\theta_R) = -\partial \lambda_R(\theta_R) / \partial \theta_R$ ) รูปแบบใหม่ในสมการที่ (2.15) ดังนี้

$$\begin{bmatrix} u_{as} \\ u_{bs} \\ u_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & -M & -M \\ -M & L_s & -M \\ -M & -M & L_s \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + R_s \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} - e_p \begin{bmatrix} e(\theta_R) \\ e(\theta_R - 2\pi/3) \\ e(\theta_R - 4\pi/3) \end{bmatrix} \omega_R \quad (2.15)$$

หรือเขียนสมการใหม่ ได้ในสมการที่ (2.16) จะได้

$$\begin{bmatrix} u_{as} \\ u_{bs} \\ u_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s + M & 0 & 0 \\ 0 & L_s + M & 0 \\ 0 & 0 & L_s + M \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + R_s \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} - e_p \begin{bmatrix} e(\theta_R) \\ e(\theta_R - 2\pi/3) \\ e(\theta_R - 4\pi/3) \end{bmatrix} \omega_R \quad (2.16)$$

และสมการแรงบิดที่เกิดขึ้น ในสมการที่ (2.17) ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 J \frac{d\omega_R}{dt} &= -T_p e(\theta_R) i_{as} - T_p e(\theta_R - 2\pi/3) i_{bs} - T_p e(\theta_R - 4\pi/3) i_{cs} - T_L \\
 \frac{d\theta_R}{dt} &= \omega_R
 \end{aligned} \tag{2.17}$$

เมื่อนำสมการเมตริกส์ ในสมการที่ (2.16) และสมการที่ (2.17) มาเขียนสมการใหม่ จะได้ในสมการที่ (2.18)-(2.19) ดังนี้

$$\begin{aligned}
 \frac{di_{as}}{dt} &= \frac{e_p}{L_s + M} \omega_R e(\theta_R) - \frac{R_s}{L_s + M} i_{as} + \frac{R_s}{L_s + M} u_{as} \\
 \frac{di_{bs}}{dt} &= \frac{e_p}{L_s + M} \omega_R e(\theta_R - 2\pi/3) - \frac{R_s}{L_s + M} i_{bs} + \frac{R_s}{L_s + M} u_{bs} \\
 \frac{di_{cs}}{dt} &= \frac{e_p}{L_s + M} \omega_R e(\theta_R - 4\pi/3) - \frac{R_s}{L_s + M} i_{cs} + \frac{R_s}{L_s + M} u_{cs}
 \end{aligned} \tag{2.18}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{d\omega_R}{dt} &= -(T_p/J) e(\theta_R) i_{as} - (T_p/J) e(\theta_R - 2\pi/3) i_{bs} - (T_p/J) e(\theta_R - 4\pi/3) i_{cs} - T_L/J \\
 \frac{d\theta_R}{dt} &= \omega_R
 \end{aligned} \tag{2.19}$$

จากสมการแบบจำลองทางด้านพลวัตของมอเตอร์ ในรูปแบบของแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับ ( $e(\theta_R) = -\partial \lambda_R(\theta_R) / \partial \theta_R$ ) สามารถใช้ความสัมพันธ์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับแต่ละเฟสที่เกิดขึ้น ( $e_{as}, e_{bs}, e_{cs}$ ) กับแรงดันไฟฟ้าทางคานสเตเตอร์แต่ละเฟส ( $u_{as}, u_{bs}, u_{cs}$ ) ซึ่งสอดคล้องกับกฎของฟาราเดย์ และลักษณะของแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะใช้ฟังก์ชันของแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับที่เกิดขึ้น วัดโดยตรงจากจุดต่อของมอเตอร์สำหรับการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์

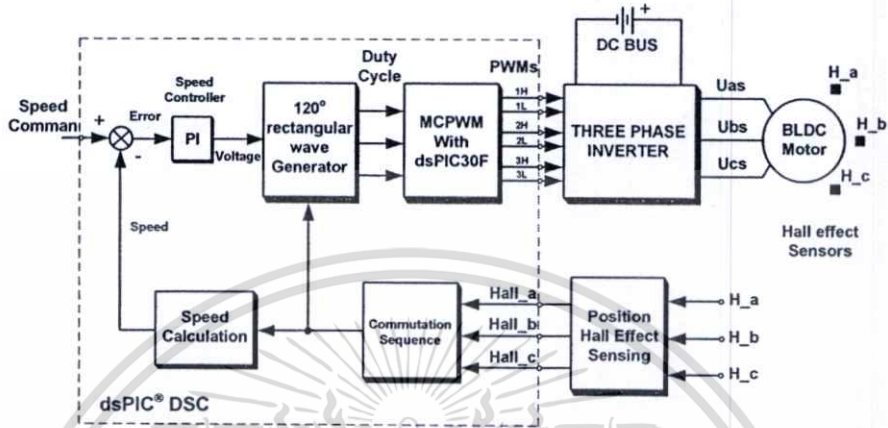
## 2.6 ลักษณะการต่อมอเตอร์สำหรับการควบคุม

ลักษณะการต่อของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน ปกติจะติดกับอุปกรณ์ตรวจจับตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์แบบปรากฏการณ์ฮอลล์ ลักษณะการนำไปใช้งานประเภทควบคุมความเร็วมอเตอร์ จะมีจุดต่อแรงดันไฟฟ้าสำหรับจ่ายเลี้ยงให้กับมอเตอร์ ชนิด 3 เฟส และสายสัญญาณสำหรับตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์แบบปรากฏการณ์ฮอลล์ ส่วนการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์แบบปราศจากตัวตรวจจับ ต่อกับจุดต่อแรงดันไฟฟ้าสำหรับจ่ายเลี้ยงให้กับมอเตอร์ ส่วนสัญญาณตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ ได้จากการวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับที่จุดต่อโดยตรง ทำให้ง่ายต่อการควบคุมความเร็วมอเตอร์ ดังจะกล่าวในรายละเอียดการต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.6.1 การควบคุมความเร็วแบบตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์

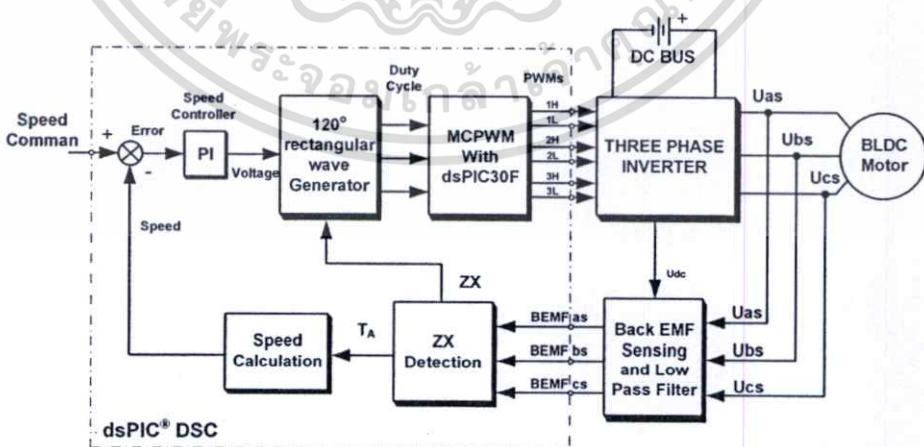
ในการควบคุมความเร็วรอบโดยอาศัยตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์แบบปรากฏการณ์ฮอลล์ (Position Hall Effect Sensors) แสดงในรูปที่ 2.10 เป็นไดอะแกรมของลักษณะการต่อควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ อาศัยตัวตรวจจับปรากฏการณ์ฮอลล์เพื่อควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์



รูปที่ 2.10 ไดอะแกรมการต่อมอเตอร์แบบอาศัยตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์

### 2.6.2 การควบคุมความเร็วแบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์

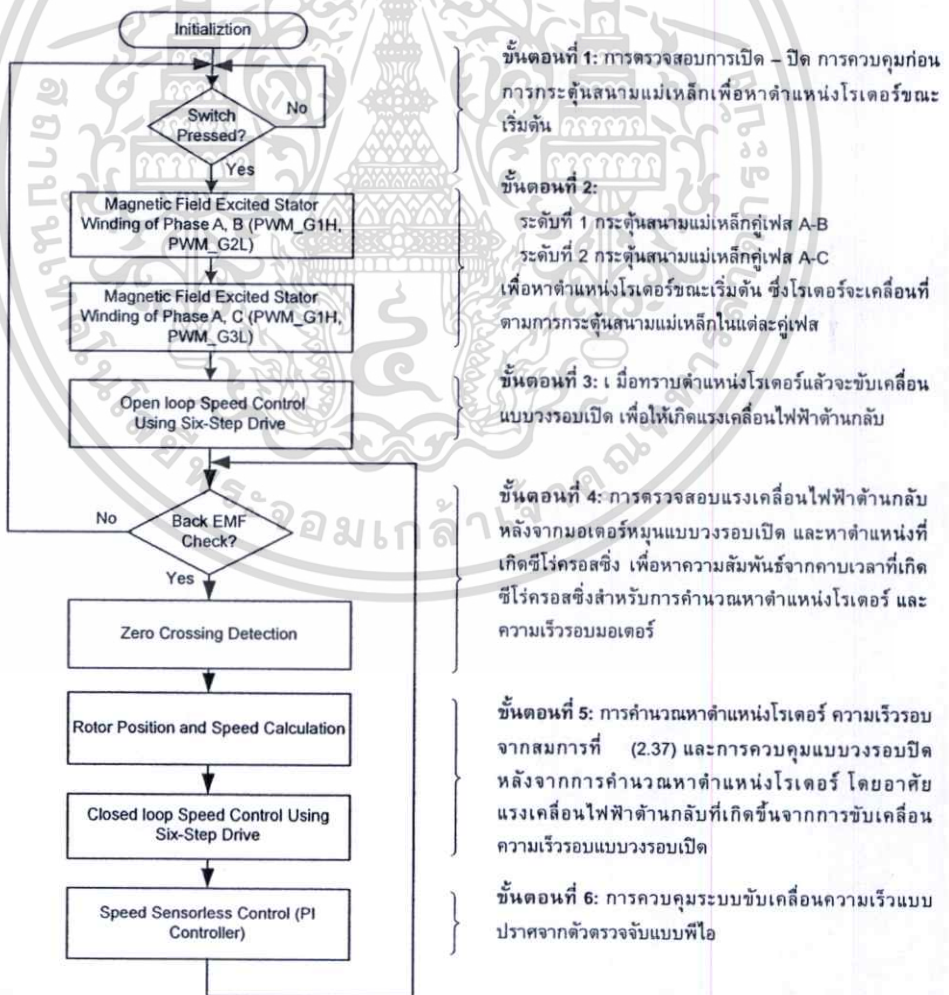
ในการควบคุมความเร็วรอบที่ผ่านมาเป็นแบบอาศัยตัวตรวจจับตำแหน่ง ส่วนการควบคุมความเร็วรอบแบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่ง ที่ใช้แรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับสำหรับการคำนวณหาตำแหน่งโรเตอร์ และความเร็วรอบ แสดงในรูปที่ 2.11 เป็นไดอะแกรมแสดงลักษณะของการต่อควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์แบบปราศจากตัวตรวจจับ



รูปที่ 2.11 ไดอะแกรมการต่อแบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์

## 2.7 อัลกอริทึมของระบบขับเคลื่อนความเร็วรอบมอเตอร์

อัลกอริทึมของระบบควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์จะเริ่มขึ้น ด้วยเทคนิคการกระตุ้นสนามแม่เหล็กที่ขดลวดด้านสเตเตอร์แต่ละคู่เฟส เพื่อทราบตำแหน่งของโรเตอร์ที่แน่นอนเพื่อใช้ในการออกตัวเริ่มต้นของมอเตอร์ [11]-[14] เมื่อได้ตำแหน่งของโรเตอร์แล้วจะทำการขับเคลื่อนความเร็วรอบมอเตอร์แบบวงรอบเปิด (Open loop speed control) โดยเทคนิคแบบสัญญาณสี่เหลี่ยม 120 องศา เพื่อให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ เมื่อมอเตอร์หมุนตัวควบคุมจะทำการตรวจสอบแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับที่วัดโดยตรงจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้น และทำการเปรียบเทียบกับวงจรรีโครอสซิง เพื่อทำการควบคุมความเร็วรอบแบบวงรอบปิด (Closed loop speed control) ตัวควบคุมจะทำการคำนวณหาตำแหน่งโรเตอร์ และความเร็วรอบมอเตอร์จากคาบเวลาที่เกิดรีโครอสซิงเพื่อควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ ในย่านความเร็วรอบ 500 ถึง 4,500 รอบต่อนาที โดยการควบคุมความเร็วแบบพีไอ แสดงในรูปที่ 2.12 แต่ละขั้นตอนสำหรับการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน ดังนี้

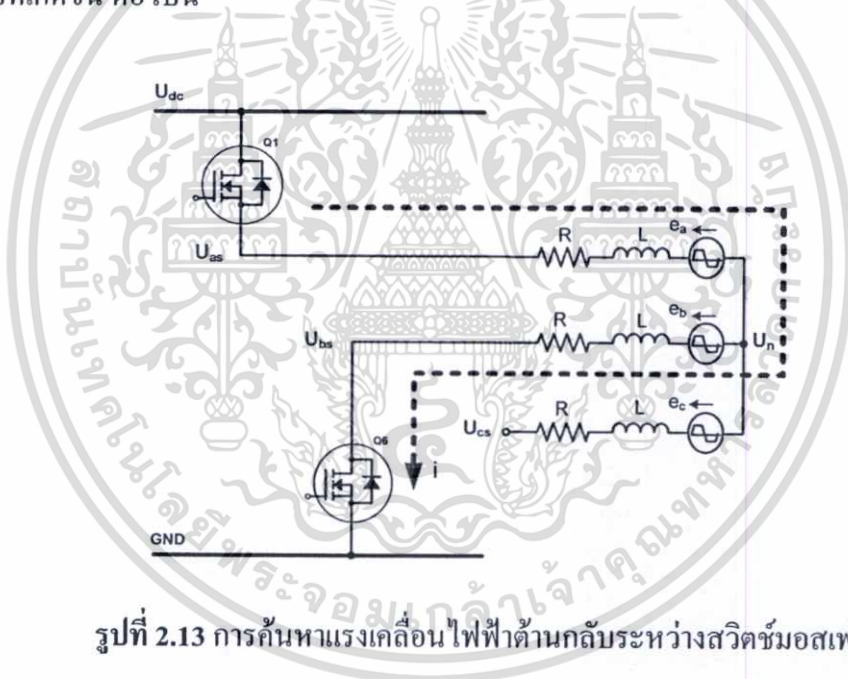


รูปที่ 2.12 อัลกอริทึมของระบบขับเคลื่อนความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.8 การค้นหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ

ในการค้นหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับระหว่างมอสเฟสเปิด เป็นการวัดสัญญาณที่เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับในแต่ละเฟส ในช่วงเวลาเปิดของการสวิตช์มอสเฟส [7]-[8] ดังนั้นการค้นหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับโดยตรง จากจุดต่อแรงดันไฟฟ้าในช่วงเปิดของการสวิตช์มอสเฟสระหว่างสัญญาณขับเคลื่อนด้วย PWM ขณะที่มีการแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดคู่เฟส หรือขณะที่มอสเฟสทำงานในช่วงโหมด (Q1, Q6) ปิด แสดงในรูปที่ 2.13 กระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านเฟส A ไปยังเฟส B ในวงจรชุดอินเวอร์เตอร์ในช่วงการสับเปลี่ยนสวิตช์ ขณะที่มอสเฟส Q1, Q6 ทำงาน ดังนั้นกระแสไฟฟ้าในแต่ละเฟสจะมีค่าเท่ากับ  $i$  หรือ ( $i_{as} = -i_{bs}$ ,  $i_{cs} = 0 A$ ) ดังนั้นการค้นหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับที่เกิดขึ้นในเฟส C จากจุดต่อแรงดันไฟฟ้าที่เฟส C ( $U_{cs}$ ) เนื่องจากกระแสไฟฟ้าเฟส C เป็นศูนย์ แรงดันไฟฟ้าที่จุด C จะเท่ากับแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับที่เกิดขึ้นที่เฟส C ดังจะอธิบายในสมการความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นจากการพิจารณาประกอบกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับที่เกิดขึ้น ต่อไปนี้



รูปที่ 2.13 การค้นหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับระหว่างสวิตช์มอสเฟสเปิด

โดยการพิจารณาที่เฟส A จะได้แรงดันไฟฟ้าที่จุดนิวตรอน ( $U_n$ ) ดังสมการที่ (2.20)

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

และจากการพิจารณาที่เฟส B จะได้แรงดันไฟฟ้าที่จุดนิวตรอน ( $U_n$ ) ดังสมการที่ (2.21)

$$U_n = U_{mos} + Ri + L \frac{di}{dt} - e_b \quad (2.21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อกำหนดให้

- $U_{mos}$  คือแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมที่มอสเฟส (Volt)
- $U_{dc}$  คือแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (Volt)
- $U_n$  คือแรงดันไฟฟ้าที่จุดนิวตรอน (Volt)
- $e_a, e_b, e_c$  คือแรงดันเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับในแต่ละเฟส (Volt)
- $i$  คือกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรอินเวอร์เตอร์ (Amp)
- $R$  คือความต้านทานด้านสเตเตอร์ต่อเฟส ( $\Omega$ )
- $L$  คือความเหนี่ยวนำด้านสเตเตอร์ต่อเฟส (mH)

จากสมการแรงดันไฟฟ้าที่จุดนิวตรอน ( $U_n$ ) เมื่อนำสมการที่ (2.20) รวมกับสมการที่ (2.21) จะได้สมการ  $U_n$  ใหม่ ในสมการที่ (2.22) ดังนี้

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

ดังนั้น เมื่อระบบไฟฟ้า 3 เฟส อยู่ในสภาวะสมดุลเนื่องจากโหลดสมดุลจะทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับที่ จุบรวมที่นิวตรอนเท่ากับศูนย์ ดังสมการที่ (2.23)

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

ถ้าหากสนใจ ฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 3 ( $3^{rd}$  Harmonics) จะทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับที่ จุบรวมนิวตรอน จะไม่เท่ากับศูนย์ดังแสดงในสมการที่ (2.24) ดังนี้

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

เมื่อ  $e_3$  คือแรงดันไฟฟ้าด้านกลับของฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 3

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

$$U_n = \frac{U_{dc}}{2} + \frac{e_c}{2} \quad (2.25)$$

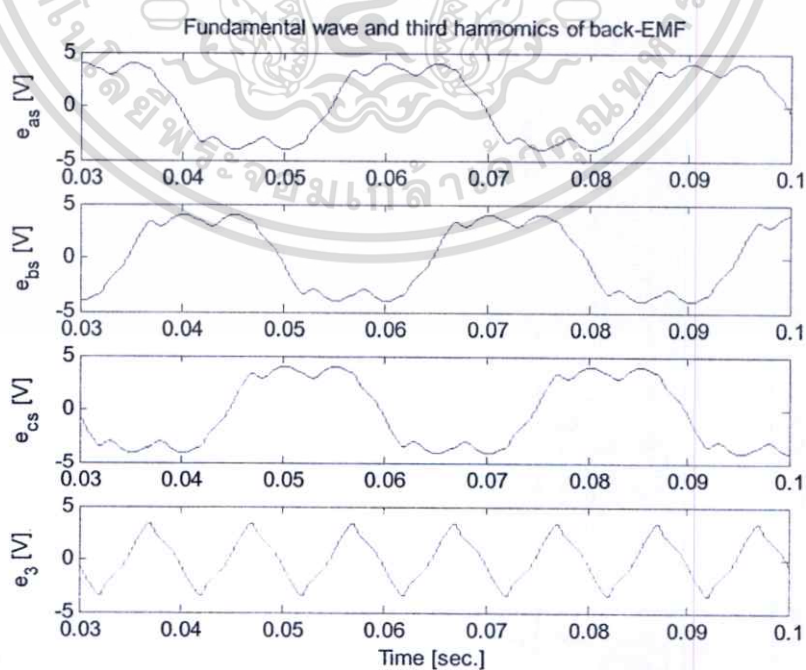
ดังนั้น แรงดันไฟฟ้าที่จุดต่อเฟส C ( $U_{cs}$ ) จะมีค่าเท่ากับ แรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับที่เฟส C ( $e_c$ ) รวมกับแรงดันไฟฟ้าที่จุดนิวตรอน ( $U_n$ ) แสดงสมการที่ (2.26) และเมื่อนำสมการที่ (2.25) แทนค่า  $U_n$  จะได้

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

ในการพิจารณาแรงดันไฟฟ้าที่จุดนิวตรอน จะไม่นำเอาแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับที่ฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 3 มาพิจารณา ดังนั้นจะได้  $U_{cs}$  ในสมการที่ (2.27) ดังนี้

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

จากสมการที่ (2.26) แรงดันไฟฟ้าที่จุดต่อเฟส C ( $U_{cs}$ ) จะเท่ากับแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับที่เฟส C ( $e_c$ ) จะเพิ่มขึ้นอีกครั้งหนึ่งของแรงดันไฟฟ้าด้านกลับเฟส C ( $e_c$ ) รวมกับครึ่งหนึ่งของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ( $U_{dc}$ ) เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับวงจรซีโรครอสซึ่ง ในคำนวณหาตำแหน่งของโรเตอร์ และความเร็วรอบมอเตอร์ซึ่งหลักการดังกล่าวมา จะนำไปใช้งานโดยตัวประมวลผลทางดิจิทัลตระกูล dsPIC เบอร์ dsPIC30F4011 ขนาด 16 บิต [9]-[12] และในรูปที่ 2.14 แสดงแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับในแต่ละเฟส และแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 3 ที่ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที

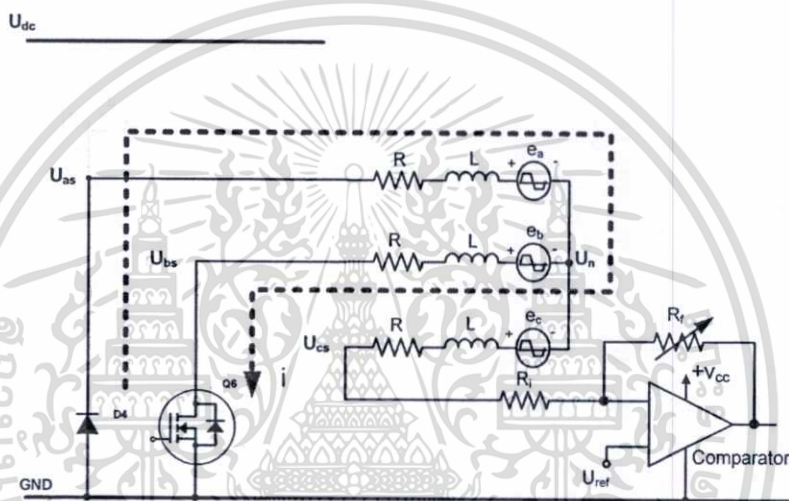


รูปที่ 2.14 แรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับแต่ละเฟส และแรงเคลื่อนไฟฟ้าฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.9 วงจรสำหรับการใช้งานความเร็วรอบต่ำ และแรงดันไฟฟ้าต่ำ

จากวงจรในรูปที่ 2.15 จะเห็นว่ากระแสไฟฟ้าไหลผ่านไดโอด ในช่วงสวิตช์ของมอสเฟส เปิด (Q1) ดังนั้นจึงไม่นำแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมไดโอด มาพิจารณาเนื่องจากเป็นไดโอดที่อยู่ภายในมอสเฟส ในกรณีทำหน้าที่เป็นสวิตช์ของมอสเฟสขณะเปิด เมื่อขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับที่มีขนาดสัญญาณขนาดต่ำ จะส่งผลกระทบต่อการค้นหาตำแหน่งซีโรครอสซิง ดังนั้นจะพิจารณาอัตราขยายของสัญญาณของสวิตช์ สำหรับแรงดันไฟฟ้าใช้งานต่ำในการสวิตช์ กรณีการใช้งานความเร็วรอบต่ำ สำหรับวงจรซีโรครอสซิงจะเพิ่มอัตราขยายของสัญญาณแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับที่มีขนาดเล็ก [15]-[17] เพื่อขยายสัญญาณแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับที่เกิดขึ้นในแต่ละเฟส



รูปที่ 2.15 วงจรสำหรับการค้นหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับโดยตรง

จากการพิจารณาที่เฟส A ขณะที่มอสเฟส (Q1) เปิดจะได้แรงดันไฟฟ้าที่จุดนิวตรอน ( $U_n$ ) ในสมการที่ (2.28) ดังนี้

$$U_n = 0 - U_d - Ri - L \frac{di}{dt} - e_a \quad (2.28)$$

และจากการพิจารณาที่เฟส B ขณะที่มอสเฟส (Q1) ไม่ทำงานจะได้แรงดันไฟฟ้าที่จุดนิวตรอน ( $U_n$ ) ในสมการที่ (2.29) ดังนี้

$$U_n = U_{mos} + Ri + L \frac{di}{dt} - e_b \quad (2.29)$$

เมื่อกำหนดให้

- $U_d$  คือแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมของไดโอด (Volt)
- $U_{mos}$  คือแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมที่มอสเฟส (Volt)
- $U_{dc}$  คือแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (Volt)
- $U_n$  คือแรงดันไฟฟ้าที่จุดนิวตรอน (Volt)
- $e_a, e_b, e_c$  คือแรงดันเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับในแต่ละเฟส (Volt)
- $i$  คือกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรอินเวอร์เตอร์ (Amp)
- $R$  คือความต้านทานด้านสเตเตอร์ต่อเฟส ( $\Omega$ )
- $L$  คือความเหนี่ยวนำด้านสเตเตอร์ต่อเฟส (mH)

จากสมการแรงดันไฟฟ้าที่จุดนิวตรอน ( $U_n$ ) เมื่อนำสมการที่ (2.28) รวมกับสมการที่ (2.29) จะได้สมการ  $U_n$  ใหม่ดังแสดงในสมการที่ (2.31) ดังนี้

$$2U_n = U_{mos} - U_d - (e_a + e_b) \quad (2.30)$$

หรือ

$$U_n = \frac{U_{mos} - U_d}{2} - \frac{e_a + e_b}{2} \quad (2.31)$$

ดังนั้น เมื่อระบบไฟฟ้า 3 เฟส อยู่ในสถานะสมดุลเนื่องจากโหลดสมดุล จะทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับที่จุดรวมที่นิวตรอนเท่ากับศูนย์ ดังสมการที่ (2.32) ดังนี้

$$e_a + e_b + e_c = 0 \quad (2.32)$$

ถ้าหากสนใจฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 3 (3<sup>rd</sup> Harmonics) จะทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับที่จุดรวมนิวตรอนไม่เท่ากับศูนย์ ดังแสดงในสมการที่ (2.33) ดังนี้

$$e_a + e_b + e_c = e_3 \quad (2.33)$$

เมื่อ  $e_3$  คือแรงดันไฟฟ้าด้านกลับฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 3

จากสมการที่ (2.32) จะได้แรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับที่เฟส C คือ  $e_c = -(e_a + e_b)$  นำ  $e_c$  ไปแทนค่าในสมการที่ (2.31) จะได้สมการ  $U_n$  ใหม่ดังแสดงในสมการที่ (2.34) ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$U_n = \frac{U_{mos} - U_d}{2} - \frac{e_c}{2} \quad (2.34)$$

ดังนั้น แรงดันไฟฟ้าที่จุดต่อเฟส C ( $U_{cs}$ ) จะมีค่าเท่ากับแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับที่เฟส C ( $e_c$ ) รวมกับแรงดันไฟฟ้าที่จุดนิวตรอน ( $U_n$ ) สมการที่ (2.35) และเมื่อนำสมการที่ (2.34) แทน  $U_n$  จะได้

$$U_{cs} = e_c + U_n = \frac{3}{2}e_c + \frac{U_{mos} - U_d}{2} \quad (2.35)$$

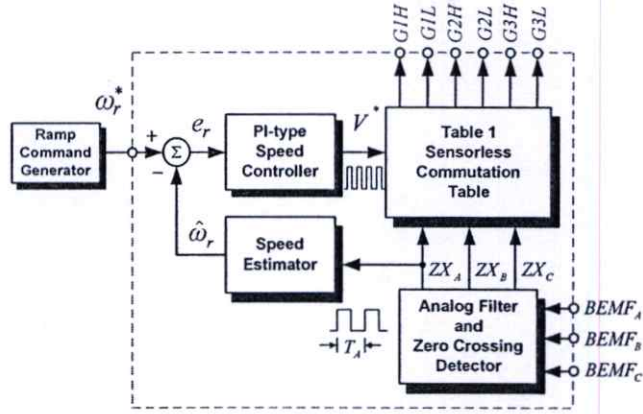
จากสมการที่ (2.35) แรงดันไฟฟ้าที่จุดต่อเฟส C ( $U_{cs}$ ) จะเท่ากับแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับที่เฟส C ( $e_c$ ) มีค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับมากกว่าครึ่งหนึ่ง ร่วมกับครึ่งหนึ่งของแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมมอสเฟส ( $U_{mos}$ ) ลบกับแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมไดโอด ( $U_d$ ) ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าที่จุดต่อเฟส C ( $U_{cs}$ ) จะได้สมการที่ (2.36) สำหรับแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับที่มีขนาดสัญญาณต่ำ ดังนี้

$$U_{cs} = e_c + U_n = \frac{3}{2}e_c - \frac{U_d}{2} \quad (2.36)$$

## 2.10 การคำนวณหาความเร็วรอบของมอเตอร์

ในรูปที่ 2.16 แสดงโคอะแกรมการคำนวณความเร็วรอบ ( $\hat{\omega}_r$ ) จากสัญญาณคาบเวลาการเกิดซีโรครอสซิง ( $T_A$ ) ในวงรอบควบคุมความเร็วแบบพีไอ การคำนวณหาความเร็วรอบจากความสัมพันธ์กับคาบเวลาซีโรครอสซิง [16] แสดงในสมการที่ (2.37) ผลจากการตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับโดยตรงผ่านวงจรเลื่อนเฟส 90 องศา ( $90^\circ$  Phase Shifting) ผ่านวงจรกรองความถี่ผ่านสูง (High-Pass Filter) ผ่านวงจรกรองความถี่ผ่านต่ำ (Low-Pass Filter) และวงจรซีโรครอสซิง (Zero Crossing Detected) แล้วนำคาบเวลาที่เกิดซีโรครอสซิง มาคำนวณหาตำแหน่งโรเตอร์ และความเร็วรอบมอเตอร์ เพื่อเลือกสัญญาณในการขับเกตของมอสเฟสให้เป็นไปตามตำแหน่งของโรเตอร์มีการควบคุมแบบพีไอ สำหรับควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ให้คงที่ตามความเร็วรอบคำสั่ง ( $\omega_r^*$ ) การขับเคลื่อนใช้เทคนิคแบบสัญญาณสี่เหลี่ยม 120 องศา สำหรับขับเคลื่อนสัญญาณให้ตรงตามตำแหน่งของโรเตอร์

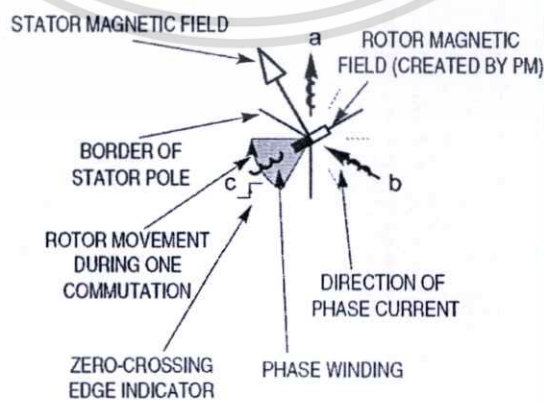
$$\hat{\omega}_r = \frac{1}{T_A} \times \frac{60}{(P/2)} = \frac{120}{PT_A} \quad (2.37)$$



รูปที่ 2.16 ไดอะแกรมการคำนวณหาความเร็วรอบจากคาบเวลาจากการเกิด ซีโรครอสซิง

### 2.11 การวิเคราะห์การกระจายสนามแม่เหล็กขดลวดสเตเตอร์

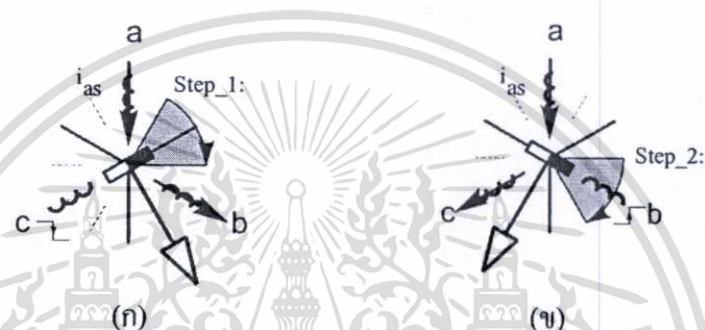
จากการกระตุ้นสนามแม่เหล็กที่ขดลวดสเตเตอร์เพื่อหาตำแหน่งของโรเตอร์ขณะเริ่มต้น ด้วยวิธีการกระตุ้นสนามแม่เหล็กให้กับขดลวดด้านสเตเตอร์ ในรูปที่ 2.17 แสดงทิศทางกระแสไฟฟ้าจากการกระตุ้นสนามแม่เหล็กในขดลวดในแต่ละคู่เฟส ตามสัญญาณในการขับเคลื่อนมอเตอร์ ทิศทางสนามแม่เหล็กทางด้านสเตเตอร์ และทิศทางเคลื่อนที่ของโรเตอร์ ผลจากการกระตุ้นสนามแม่เหล็กที่ขดลวดสเตเตอร์ ทำให้ทราบตำแหน่งของโรเตอร์ขณะเริ่มต้น ไม่ว่าจะตำแหน่งโรเตอร์จะอยู่ตำแหน่งไหนก็ตาม จะถูกกระตุ้นสนามแม่เหล็กเพื่อค้นหาตำแหน่งของโรเตอร์เริ่มต้น หลังจากทราบตำแหน่งเริ่มต้นแล้วจะขับเคลื่อนมอเตอร์แบบวงรอบเปิด โดยเทคนิคแบบสัญญาณสี่เหลี่ยม 120 องศา เพื่อให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับแล้วนำสัญญาณแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับตรวจสอบหาตำแหน่งซีโรครอสซิง เพื่อค้นหาตำแหน่งของโรเตอร์สำหรับการคำนวณหาตำแหน่งโรเตอร์ และความเร็วรอบมอเตอร์สำหรับการควบคุมความเร็วแบบปราศจากตัวตรวจจับ



รูปที่ 2.17 การกระตุ้นสนามแม่เหล็กในแต่ละคู่เฟส

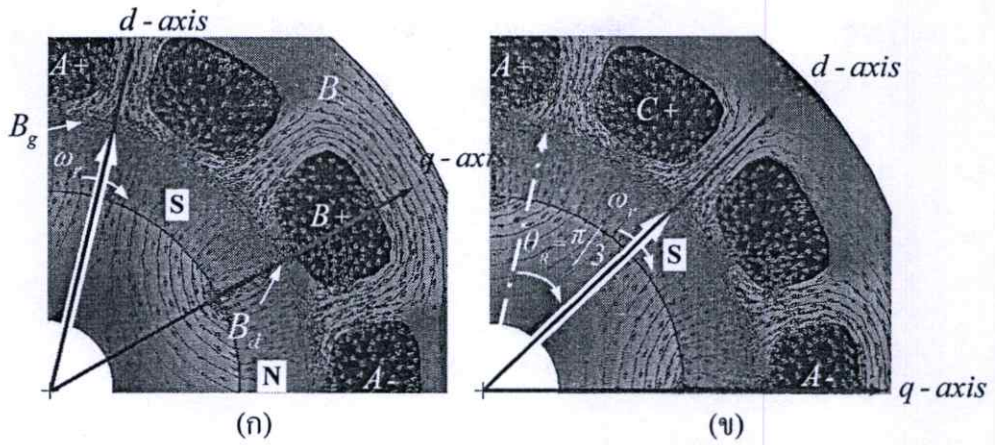
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 2.18 (ก) แสดงการกระตุ้นขณะเริ่มต้นในระดับที่ 1 (Step 1) เป็นการกระตุ้นสนามแม่เหล็กที่คู่เฟส A-B ทิศทางของกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเฟส A ไปยังเฟส B ผลจากการกระตุ้นขณะเริ่มต้นทำให้ทราบทิศทางของตำแหน่งโรเตอร์ขณะเริ่มต้น ไม่ว่าโรเตอร์จะอยู่ในตำแหน่งไหนก็ตามจะถูกกระตุ้นในขณะเริ่มต้นเพื่อให้ได้ตำแหน่งโรเตอร์ที่ต้องทราบก่อน และในรูปที่ 2.17 (ข) จะเป็นการกระตุ้นสนามแม่เหล็กที่คู่เฟส A-C ในระดับที่ 2 (Step 2) ให้ทำทราบตำแหน่งของโรเตอร์ที่แน่นอนก่อนจะขับเคลื่อนแบบวงรอบเปิด ดังนั้นจะเห็นว่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านเฟส A จะเป็นไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อที่จะสร้างสนามแม่เหล็กที่คงที่ ในการหาตำแหน่งของโรเตอร์ขณะเริ่มต้น

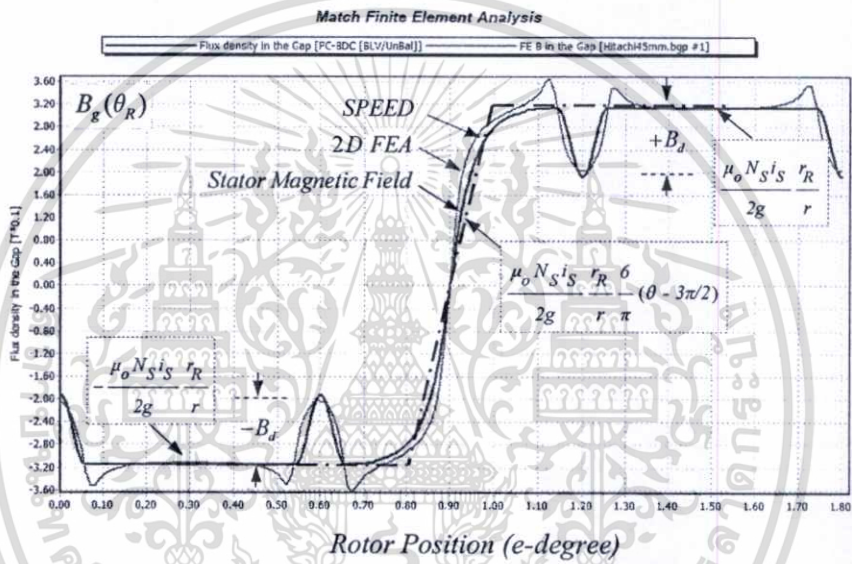


รูปที่ 2.18 การกระตุ้นสนามแม่เหล็ก (ก) ที่ขดลวด A-B (ข) ที่ขดลวด A-C เพื่อหาตำแหน่งเริ่มต้น

จากการกระตุ้นสนามแม่เหล็กที่ขดลวดด้านสเตเตอร์ รูปที่ 2.18 (ก),(ข) โดยใช้โปรแกรมออกแบบมอเตอร์ (SPEED) และ โปรแกรมวิเคราะห์ทางด้านวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 2 มิติ (2-D FEA) [13]-[14] ซึ่งจะแสดงทิศทางของสนามแม่เหล็กเมื่อถูกกระตุ้นสนามแม่เหล็ก และตำแหน่งโรเตอร์ที่เคลื่อนที่เนื่องจากสนามแม่เหล็กที่กระตุ้นทางด้านสเตเตอร์ในแต่ละระดับ แสดงในรูปที่ 2.19 (ก) ผลจากการกระตุ้นสนามแม่เหล็กที่คู่เฟส A-B และส่วนในรูปที่ 2.19 (ข) ผลจากการกระตุ้นสนามแม่เหล็กที่คู่เฟส A-C จะเห็นว่าตำแหน่งของโรเตอร์ หมุนตามเข็มนาฬิกากระยะมุมที่เคลื่อนที่ 60 องศา ( $\theta_R = \pi/3$ ) ตามทิศทางสนามแม่เหล็กที่ถูกกระตุ้น ในแกนพิกัดอ้างอิงด้านโรเตอร์ ( $dq$ -axis) ส่วนในรูปที่ 2.20 เป็นการเปรียบเทียบระหว่างสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นที่ช่องว่างอากาศ ( $B_g$ ) กับสนามแม่เหล็กสเตเตอร์ทางด้านอุดมคติ ( $B_s$ ) ซึ่งแสดงเป็นเส้นประ โดยใช้โปรแกรม SPEED และ โปรแกรมการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 2 มิติ ซึ่งลักษณะใกล้เคียงกันเมื่อเปรียบเทียบกับสมการของสนามแม่เหล็กที่สเตเตอร์ทางอุดมคติ ในสมการที่ (2.1) ผลที่เกิดจากสนามแม่เหล็กที่สล็อตเปิด ( $B_d$ : Magnetic field of open slots) ส่งผลให้สนามแม่เหล็กที่ช่องว่างอากาศลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับสนามแม่เหล็กทางอุดมคติทั้งทางด้านบวก และด้านลบ ( $\pm B_d$ )



รูปที่ 2.19 สนามแม่เหล็กทางด้านไฟไนท์อิลิเมนต์ (ก) ที่คู่เฟส A-B (ข) ที่คู่เฟส A-C ตามลำดับ



รูปที่ 2.20 สนามแม่เหล็กที่ช่องว่างอากาศจาก โปรแกรม SPEED และ โปรแกรม 2-D FEA เปรียบเทียบกับสนามแม่เหล็กด้านสเตเตอร์ทางอุดมคติ

### 2.12 การออกแบบตัวควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์

การออกแบบตัวควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์สิ่งที่สำคัญในการออกแบบตัวควบคุมสถานะเริ่มต้น และสถานะคงตัวสำหรับการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน การควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์จะควบคุมแบบพีไอ ในการเลือกอัตราขยาย และเวลาคงที่ของระบบการควบคุมแบบที่เหมาะสมสมมาตร (Symmetric optimum) เป็นหลักโดยการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่มีความสัมพันธ์กับความถี่สำหรับควบคุมความเร็วของสัญญาณในการขับเคลื่อนมอเตอร์ ซึ่งได้จากการสมการของมอเตอร์ ในการประมาณของวงรอบกระแสไฟฟ้า และการประมาณค่าของวงรอบความเร็วรอบมอเตอร์ เพื่อง่ายต่อการออกแบบตัวควบคุมมอเตอร์ดังแสดงในบล็อกของฟังก์ชันถ่ายโอนของการควบคุมมอเตอร์ ในรูปที่ 2.21 ประกอบด้วยวงรอบของกระแสไฟฟ้า และวงรอบของความเร็วรอบ สำหรับการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ [29][31] ซึ่งจะได้สมการแรงเคลื่อนไฟฟ้า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญาตเห็นาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของมอเตอร์ ดังแสดงในสมการที่ (2.38) และสมการแรงบิดทางกลของมอเตอร์ในสมการที่ (2.39) ดังนี้

$$V_s = (R_s + L_s p)I_s + \omega_r \lambda_{af} \quad (2.38)$$

$$\frac{P}{2}(T_e + L_l) = Jp\omega_r + B\omega_r \quad (2.39)$$

ดังนั้นจะได้สมการแรงบิดของมอเตอร์ในสมการที่ (2.40) และแรงบิดโหลดในสมการที่ (2.41) ดังนี้

$$T_e = \frac{3P}{2} \frac{\lambda_{af}}{2} I_s \quad (2.40)$$

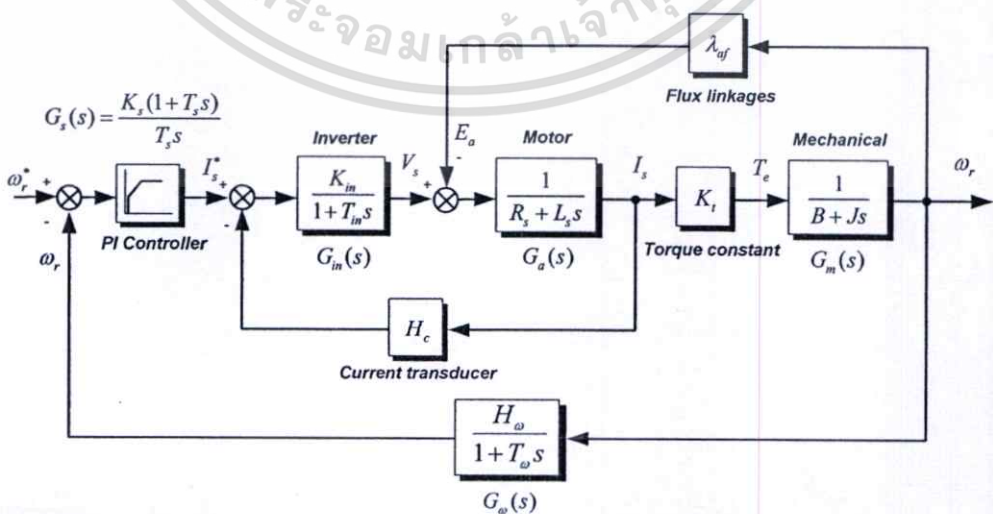
$$T_l = B_r \omega_m \quad (2.41)$$

การหาแรงบิดคงที่ ( $K_t$ ) จากความสัมพันธ์ที่ได้จากสมการทางกล และทางค่านไฟฟ้าได้ดังนี้

$$(Jp + B)\omega_r = \left[ \frac{3}{2} \left( \frac{P}{2} \right)^2 \lambda_{af} \right] I_s = K_t I_s \quad (2.42)$$

$$K_t = \frac{3}{2} \left( \frac{P}{2} \right)^2 \lambda_{af} \quad (2.43)$$

จากสมการที่ได้เมื่อนำมาเขียนในรูปของบล็อก ไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์ในรูปแบบฟังก์ชันถ่ายโอนของการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ ในวงรอบกระแสไฟฟ้า และวงรอบของความเร็วรอบมอเตอร์ แสดงในรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 ไดอะแกรมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับฟังก์ชันถ่ายโอนของแหล่งจ่ายอินเวอร์เตอร์ พิจารณาในสมการเชิงเส้นจะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนในสมการที่ (2.44) ดังนี้

$$G_{in}(s) = \frac{K_{in}}{1 + T_{in}s} \quad (2.44)$$

อัตราขยาย และเวลาคงที่ของฟังก์ชันอินเวอร์เตอร์ จะได้

$$K_{in} = 0.65 \frac{V_{dc}}{V_{cm}}, \quad T_{in} = \frac{1}{2f_c}$$

สำหรับฟังก์ชันของแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับที่เกิดจากเส้นแรงแม่เหล็ก และความเร็วรอบแสดงความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.45) ดังนี้

$$e_a = \lambda_{af} \omega_r (V) \quad (2.45)$$

เมื่อกำหนดให้

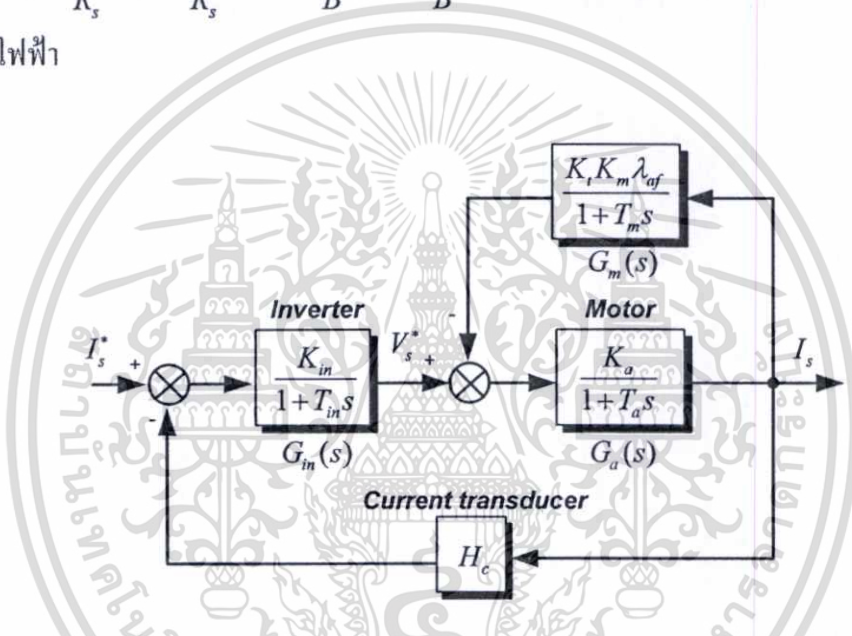
- $R_s$  คือความต้านทานทางด้านสเตเตอร์ต่อเฟส ( $\Omega$ )
- $L_s$  คือความเหนี่ยวนำทางด้านสเตเตอร์ต่อเฟส (mH)
- $K_r$  คือแรงบิดคงที่ (N-m/A)
- $B$  คือแรงเสียดทานของมอเตอร์ (Nm/(rad/sec))
- $J$  คือแรงเฉื่อยของมอเตอร์ ( $\text{kg-m}^2/\text{sec}^2$ )
- $I_s$  คือกระแสทางด้านสเตเตอร์ (A)
- $V_s$  คือแรงดันไฟฟ้าทางด้านสเตเตอร์ (V)
- $E$  คือแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับที่เหนี่ยวนำ (V)
- $T_e, T_l$  คือแรงบิดของมอเตอร์ และแรงบิดโหลด (Nm)
- $\lambda_{af}$  คือเส้นแรงแม่เหล็กทางด้าน โรเตอร์ (Wb-turn)
- $V_{dc}$  คือแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านอินพุทของอินเวอร์เตอร์ (V)
- $V_{cm}$  คือแรงดันไฟฟ้ามากที่สุดสำหรับควบคุม (V)
- $f_c$  คือความถี่สวิทช์ของอินเวอร์เตอร์ (Hz)

### 2.12.1 ฟังก์ชันถ่ายโอนวงรอบของกระแสไฟฟ้า

ในสมการฟังก์ชันถ่ายโอนกระแสไฟฟ้าสำหรับวงรอบปิด ( $G_i$ ) แสดงในสมการที่ (2.46) จะเป็นฟังก์ชันวงรอบปิดของกระแสไฟฟ้า ซึ่งได้จากล๊อคของวงรอบกระแสไฟฟ้าในรูปที่ 2.22 เป็นไดอะแกรมของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงรอบกระแสไฟฟ้า

$$\frac{I_s(s)}{I_s^*(s)} = \frac{K_{in}K_a(1+T_m s)}{H_c K_a K_{in}(1+T_{in} s) + (1+T_{in} s)[K_a K_b + (1+T_a s)(1+T_m s)]} \quad (2.46)$$

โดยที่  $K_a = \frac{1}{R_s}$ ;  $T_a = \frac{L_s}{R_s}$ ;  $K_m = \frac{1}{B}$ ;  $T_m = \frac{J}{B}$ ;  $K_b = K_t K_m \lambda_{af}$  จากฟังก์ชันของวงรอบปิดของกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 2.22 ไดอะแกรมของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงรอบกระแสไฟฟ้า

ในการพิจารณาของวงรอบของกระแสไฟฟ้าสำหรับการประมาณค่าของเวลาคงที่จะกำหนดให้

$$1 + T_r s \cong 1 \quad (2.47)$$

$$1 + T_m s \cong T_m s \quad (2.48)$$

$$(1 + T_a s)(1 + T_m s) \cong 1 + (T_a + T_m)s \cong 1 + T_{ar} s \quad (2.49)$$

เมื่อ

$$T_{ar} = T_a + T_m \quad (2.50)$$

ขณะที่ฟังก์ชันถ่ายโอนวงรอบปิดของกระแสไฟฟ้าที่ประมาณขึ้น จะได้ในสมการที่ (2.51) ดังนี้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{I_s(s)}{I_s^*(s)} \cong \frac{(K_a K_{in} T_m) s}{K_a K_b + (T_m + K_a K_{in} T_m H_c) s + (T_m T_{ar}) s^2} \quad (2.51)$$

$$\cong \left( \frac{T_m K_{in}}{K_b} \right) \frac{s}{(1 + T_1 s)(1 + T_2 s)}$$

ในการหาค่าเวลาคงที่นั้นจะได้  $T_1 < T_2 < T_m$ ; ในการประมาณค่าของฟังก์ชันถ่ายโอนวงรอบของกระแสไฟฟ้าจะกำหนดได้  $(1 + T_2 s) \cong T_2 s$  ดังนั้นจะได้สมการในวงรอบปิดของกระแสไฟฟ้าในสมการที่ (2.52) ดังนี้

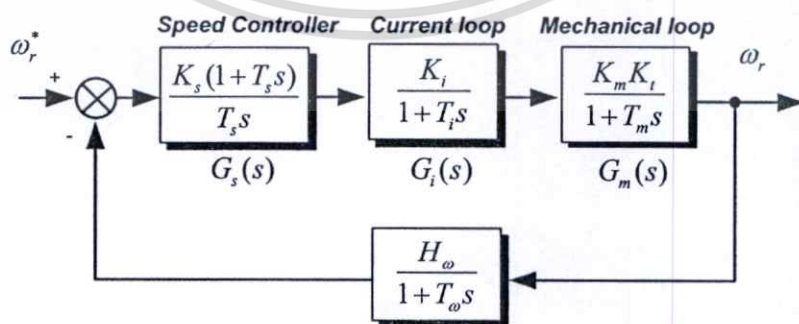
$$\frac{I_s(s)}{I_s^*(s)} \cong \frac{K_i}{(1 + T_1 s)} \quad (2.52)$$

อัตราขยาย และเวลาคงที่ของฟังก์ชันกระแสไฟฟ้า จะได้

$$K_i = \frac{T_m K_{in}}{T_2 K_b}, \quad T_i = T_1$$

### 2.12.2 ฟังก์ชันถ่ายโอนวงรอบของความเร็วรอบมอเตอร์

ในการออกแบบควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์สำหรับวงรอบปิด  $G_r(s)$  โดยเงื่อนไขการออกแบบกำหนดให้ไม่มีความผิดพลาดของตำแหน่งความเร็วรอบในสถานะอยู่ตัว ( $K_p = \infty$ ) ระยะเวลาเข้าสู่ความเร็วรอบควบคุมต้องไม่น้อยกว่าสองเท่า (200%) ของการควบคุมในวงรอบกระแสไฟฟ้า และเปอร์เซ็นต์ค่ายอดไม่เกิน 10% (Maximum overshoot < 10 %) และการพิจารณาจะเหมือนกับการพิจารณาในวงรอบของกระแสไฟฟ้า แสดงในรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 โดอะแกรมของฟังก์ชันถ่ายโอนความเร็วรอบคำสั่ง ( $\omega_r^*$ ) และความเร็วรอบ ( $\omega_r$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการพิจารณาของวงรอบของความเร็วยวรอบ สำหรับการประมาณค่าของเวลาคงที่จะกำหนดให้

$$1 + T_m s \cong T_m s \quad (2.53)$$

$$(1 + T_i s)(1 + T_\omega s) \cong 1 + T_{\omega i} s \quad (2.54)$$

$$1 + T_\omega s \cong 1 \quad (2.55)$$

เมื่อ

$$T_{\omega i} = T_\omega + T_i \quad (2.56)$$

ขณะที่ฟังก์ชันถ่ายโอนวงรอบเปิดของความเร็วยวรอบที่ประมาณขึ้น จะได้ในสมการที่ (2.57) ดังนี้

$$GH(s) \cong \frac{K_i K_m K_t H_\omega K_s (1 + T_s s)}{T_m T_s^2 (1 + T_{\omega i} s)} \quad (2.57)$$

จากฟังก์ชันถ่ายโอนวงรอบปิดของความเร็วยวรอบ จะได้ในสมการที่ (2.58) ดังนี้

$$\frac{\omega_r(s)}{\omega_r^*(s)} \cong \frac{1}{H_\omega} \left[ \frac{K_g \frac{K_s}{T_s} (1 + T_s s)}{T_{\omega i} s^3 + s^2 + K_g \frac{K_s}{T_s} (1 + T_s s)} \right] \quad (2.58)$$

เมื่อ

$$K_g = \frac{K_i K_m K_t H_\omega}{T_m}$$

จากสมการฟังก์ชันถ่ายโอนจัดรูปแบบให้อยู่ในสมการสมมาตรที่เหมาะสม โดยกำหนดให้อัตรา  
หน่วงเท่ากับ ( $\zeta$ ) 0.707 ดังนั้นฟังก์ชันถ่ายโอนวงรอบปิดของความเร็วยวรอบมอเตอร์จะได้ดัง  
สมการที่ (2.59) ดังนี้

$$\frac{\omega_r(s)}{\omega_r^*(s)} \cong \frac{1}{H_\omega} \frac{(1 + T_s s)}{1 + (T_s s) + \left(\frac{3}{8} T_s^2\right) s^2 + \left(\frac{1}{16} T_s^3\right) s^3} \quad (2.59)$$

ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการที่ (2.58) และ (2.59) สำหรับนำไปหาค่าอัตราขยาย และเวลาคงที่ของตัวควบคุมความเร็วมอเตอร์สำหรับการพิจารณาวงรอบความเร็วรอบในสมการที่ (2.60) ดังนี้

$$G_s(s) = \frac{K_s}{(1+T_s s)} \quad (2.60)$$

อัตราขยาย และเวลาคงที่ของฟังก์ชันความเร็วรอบ จะได้

$$T_s = 6T_{oi}, \quad K_s = \frac{4}{9K_g T_{oi}}$$

ดังนั้น จะได้อัตราขยาย และเวลาคงที่ของตัวควบคุมความเร็วรอบแบบพีโอ ในสมการที่ (2.61) และ (2.62) ดังนี้

$$K_{ps} = K_s = \frac{4}{9K_g T_{oi}} \quad (2.61)$$

$$K_{is} = \frac{K_s}{T_s} = \frac{2}{27K_g T_{oi}^2} \quad (2.62)$$

จากการออกแบบตัวควบคุมความเร็วรอบดังกล่าวนำมาคำนวณหาอัตราขยาย และเวลาคงที่ของตัวควบคุมสำหรับการประมาณค่าในการใช้งานจริง

### 2.12.3 การออกแบบตัวควบคุมมอเตอร์

พิกัดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน แรงดันไฟฟ้า ( $V_s$ ) 30 โวลต์ กระแสไฟฟ้า ( $I_s$ ) 1.2 แอมป์ ความเร็วรอบที่พิกัด ( $\omega_r$ ) 4,500 รอบต่อนาที ความต้านทานทางด้านสเตเตอร์ ( $R_s$ ) 1 โอห์ม ความเหนี่ยวนำทางด้านสเตเตอร์ ( $L_s$ ) 1 มิลลิเฮนรี่ แรงเฉื่อยทางด้านโรเตอร์ ( $J$ ) 0.12 กิโลกรัม-ตารางเซนติเมตร/วินาที<sup>2</sup> เส้นแรงแม่เหล็กคล้องเกี่ยว ( $\lambda_{af}$ ) 0.0216 เวเบอร์-รอบ แรงความเสียดทานทางด้านโรเตอร์ ( $B$ ) 0.001 นิวตัน/(เรเดียน/วินาที) ความต้านทานชั้นที่วัดกระแสไฟฟ้า ( $H_c$ ) 0.47 โวลต์/แอมป์ แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ( $V_{dc}$ ) 30 โวลต์ และแรงดันไฟฟ้าควบคุม ( $V_{cm}$ ) 3 โวลต์ ความถี่สวิตช์พาหะ ( $f_c$ ) 20 กิโลเฮิร์ตซ์

#### 1. ฟังก์ชันถ่ายโอนของอินเวอร์เตอร์, $G_{in}(s)$

อัตราขยายของอินเวอร์เตอร์,  $K_{in} = 0.65 \frac{V_{dc}}{V_{cm}} = 6.5 V/V$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลาคงที่ของอินเวอร์เตอร์,  $T_{in} = \frac{1}{2f_c} = 0.000025s$

จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของอินเวอร์เตอร์ ( $G_{in}$ ) แสดงในสมการที่ (2.63) ดังนี้

$$G_{in}(s) = \frac{K_{in}}{1+T_{in}s} = \frac{6.5}{(1+0.000025s)} \quad (2.63)$$

2. ฟังก์ชันถ่ายโอนของมอเตอร์,  $G_a(s)$

อัตราขยายของมอเตอร์,  $K_a = \frac{1}{R_s} = 1$

เวลาคงที่ของมอเตอร์,  $T_a = \frac{L_s}{R_s} = 0.001s$

จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของมอเตอร์ ( $G_a$ ) แสดงในสมการที่ (2.64) ดังนี้

$$G_a(s) = \frac{K_a}{1+T_a s} = \frac{1}{(1+0.001s)} \quad (2.64)$$

3. ฟังก์ชันถ่ายโอนของทางกล,  $G_m(s)$

วงรอบแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับหาแรงบิดคงที่,  $K_t = \frac{3}{2} \left( \frac{P}{2} \right)^2 \lambda_{af} = 0.13 Nm / A$

อัตราขยายทางกล,  $K_m = \frac{1}{B} = 1000 (rad / s) / Nm$

เวลาคงที่ของมอเตอร์,  $T_m = \frac{J}{B} = 0.012s$

จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ ( $G_b$ ) แสดงในสมการที่ (2.65) ดังนี้

$$G_b(s) = \frac{K_t K_m \lambda_{af}}{1+T_m s} = \frac{2.81}{(1+0.012s)} \quad (2.65)$$

จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของทางกล ( $G_m$ ) แสดงในสมการที่ (2.66) ดังนี้

$$G_m(s) = \frac{K_t K_m}{1+T_m s} = \frac{130}{(1+0.012s)} \quad (2.66)$$

จากเวลาคงที่ทางด้านไฟฟ้าของมอเตอร์ นำมาหาค่าสัมประสิทธิ์รากที่สองในรูปแบบสมการกำลังสอง  $as^2 + bs + c = 0$ , เมื่อค่าสัมประสิทธิ์ในแต่ละพจน์จะได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} a &= T_m T_{ar} \\ b &= T_m + K_a K_{in} T_m H_c \\ c &= K_a K_b \end{aligned}$$

เมื่อ

$$K_b = K_i K_m \lambda_{of} = 2.81$$

ดังนั้นสามารถหาค่าเวลาคงที่ของฟังก์ชันได้  $T_1, T_2$  ในสมการที่ (2.67) จะได้

$$-\frac{1}{T_1}, -\frac{1}{T_2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (2.67)$$

ดังนั้นจะได้

$$\begin{aligned} T_1 &= 0.00425 \text{ (sec)} \\ T_2 &= 0.013 \text{ (sec)} \end{aligned}$$

#### 4. ฟังก์ชันถ่ายโอนของทางกล, $G_{is}(s)$

อัตราขยายของกระแสไฟฟ้า,  $K_i = \frac{T_m K_{in}}{T_2 K_b} = 2.135$

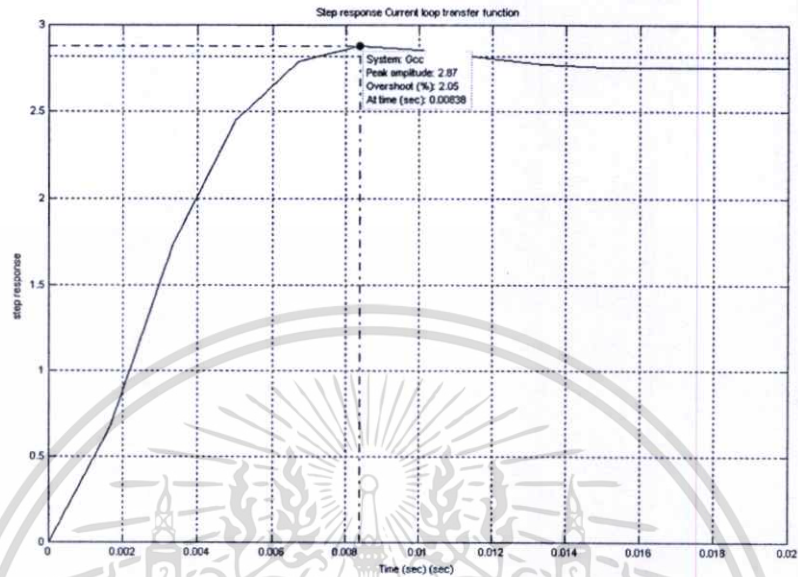
เวลาคงที่ของกระแสไฟฟ้า,  $T_i = T_1 = 0.00425 \text{ (s)}$

จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนวงรอบกระแสไฟฟ้า ( $G_{is}$ ) ที่ทำให้ง่ายในการออกแบบตัวควบคุม แสดงในสมการที่ (2.68) และสมการที่ (2.69) จะเป็นสมการฟังก์ชันถ่ายโอนของวงรอบกระแสไฟฟ้าที่แท้จริง ( $G_i$ ) ดังแสดงในสมการ

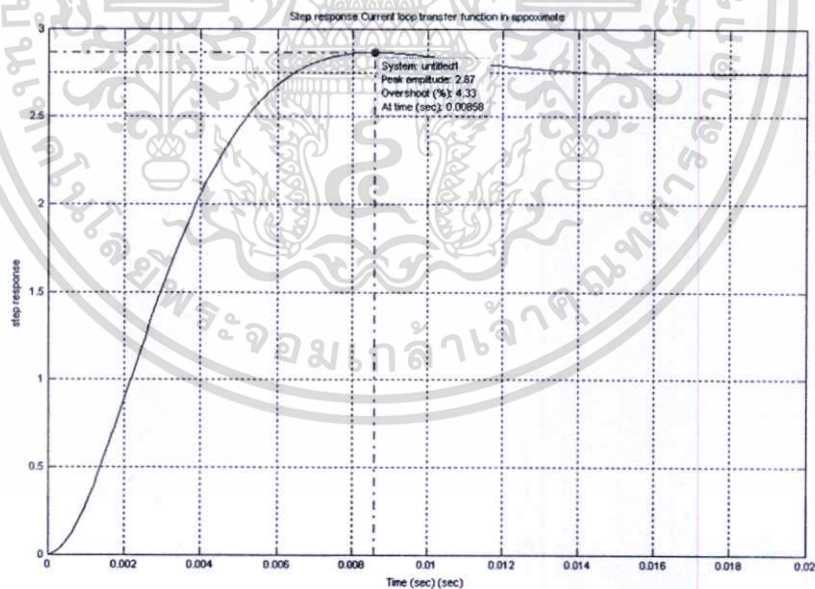
$$G_{is}(s) = \frac{K_i}{1 + T_i s} = \frac{2.135}{(1 + 0.00425s)} \quad (2.68)$$

$$G_i(s) = \frac{G_m(s)G_a(s)/[1 + G_a(s)G_b(s)]}{1 + H_c G_a(s)G_b(s)/[1 + G_a(s)G_b(s)]} \quad (2.69)$$

จากฟังก์ชันถ่ายโอนของวงรอบกระแสไฟฟ้าในรูปที่ 2.24 เป็นผลตอบสนองของวงรอบกระแสไฟฟ้า ( $G_I$ ) และรูปที่ 2.25 เป็นผลตอบสนองของวงรอบกระแสไฟฟ้าในการประมาณค่า ( $G_{Is}$ ) ดังแสดงในรูป



รูปที่ 2.24 ผลตอบสนองของวงรอบกระแสไฟฟ้า ( $G_I$ )



รูปที่ 2.25 ผลตอบสนองของวงรอบกระแสไฟฟ้าในการประมาณค่า ( $G_{Is}$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5. ฟังก์ชันถ่ายโอนของความเร็รรอบ, $G_s(s)$

การพิจารณาฟังก์ชันถ่ายโอนของความเร็รรอบก็เช่นเดียวกับฟังก์ชันถ่ายโอนของกระแสไฟฟ้าที่ได้กล่าวมาข้างต้นแล้ว เมื่อแทนค่าต่างๆ จะได้

$$K_g = K_i K_m K_t \frac{H_\omega}{T_m} = 5417.8$$

$$T_{\omega i} = T_\omega + T_i = 0.00625 (s)$$

$$T_s = 6T_{\omega i} = 0.0375 (s)$$

$$K_s = \frac{4}{9K_g T_{\omega i}} = 0.013$$

จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนวงรอบความเร็รรอบ ( $G_{ss}$ ) ที่ประมาณค่าเพื่อให้ง่ายในการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอ แสดงในสมการที่ (2.70) และสมการที่ (2.71) จะเป็นสมการฟังก์ชันถ่ายโอนของวงรอบความเร็รรอบที่แท้จริง ( $G_{se}$ ) ดังแสดงในสมการ

$$G_{ss}(s) \cong \frac{1}{H_\omega} \left[ \frac{K_g \frac{K_s}{T_s} (1+T_s s)}{(T_{\omega i}) s^3 + s^2 + K_g \frac{K_s}{T_s} (1+T_s s)} \right] \quad (2.70)$$

$$G_{se}(s) = \frac{G_m(s)G_i(s)G_s(s)}{1+G_\omega(s)G_m(s)G_i(s)G_s(s)} \quad (2.71)$$

การควบคุมความเร็รรอบเมื่อแทนค่าในวงรอบของความเร็รรอบจะได้ดังสมการที่ (2.72) ดังนี้

$$G_s(s) = \frac{K_s (1+T_s s)}{T_s s} = (560.2) \frac{(1+0.0155s)}{s} \quad (2.72)$$

$$G_\omega(s) = \frac{H_\omega}{1+T_\omega s} = \frac{0.05}{(1+0.002s)} \quad (2.73)$$

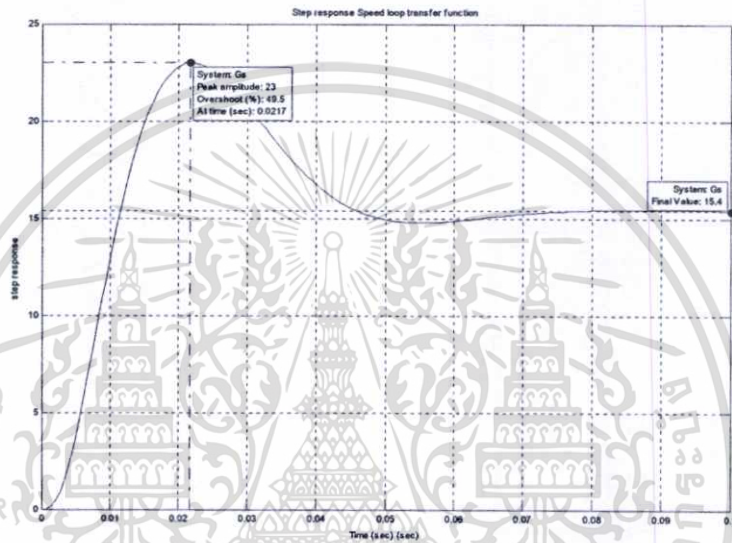
ดังนั้น จะได้อัตราขยาย และเวลาคงที่ของตัวควบคุมความเร็รรอบแบบพีไอ ในสมการที่ (2.74) และ (2.75) ดังนี้

$$K_{ps} = K_s = \frac{4}{9K_g T_{\omega i}} = 0.013 \quad (2.74)$$

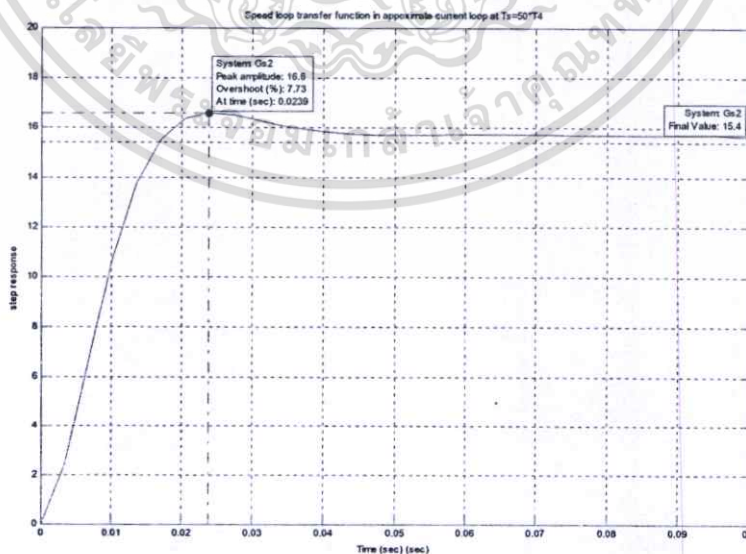
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$K_{is} = \frac{K_s}{T_s} = \frac{2}{27K_g T_{\omega i}^2} = 0.35 \quad (2.75)$$

จากการออกแบบตัวควบคุมความเร็วรอบดังกล่าวนำมาคำนวณหาอัตราขยาย และเวลาคงที่ของตัวควบคุมสำหรับการประมาณค่าในการใช้งานจริง ในรูปที่ 2.26 เป็นผลตอบสนองของการควบคุมในวงรอบความเร็วรอบ และรูปที่ 2.27 เป็นผลตอบสนองของการควบคุมในวงรอบความเร็วรอบที่ได้จากการประมาณค่าของวงรอบกระแสไฟฟ้าที่ค่าขอมมากที่สุดไม่เกิน 10%



รูปที่ 2.26 ผลตอบสนองของการควบคุมในวงรอบความเร็วรอบ



รูปที่ 2.27 ผลตอบสนองของการควบคุมในวงรอบความเร็วรอบที่ได้จากการประมาณค่าของวงรอบ

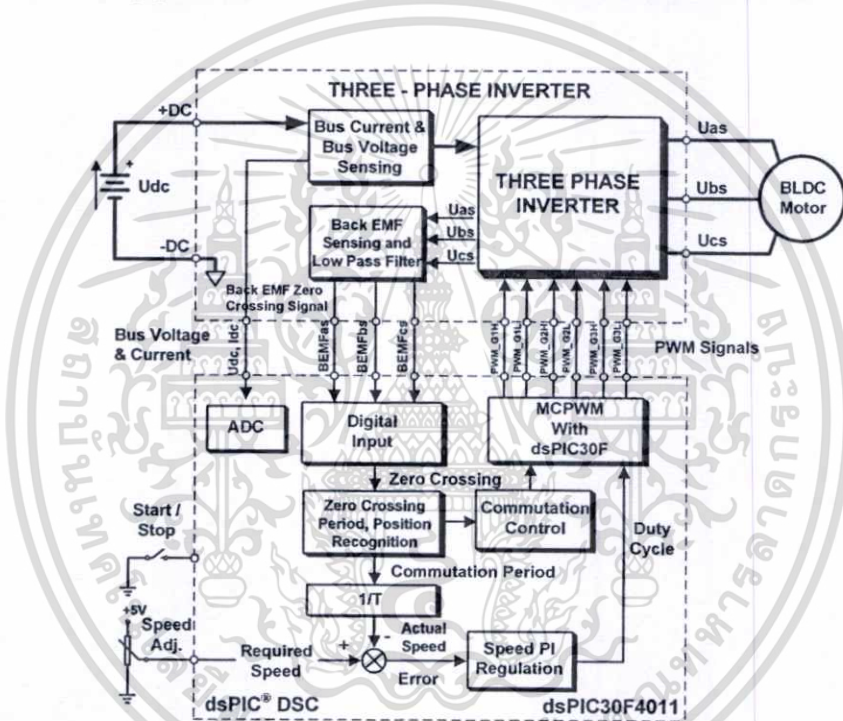
กระแสไฟฟ้าที่ค่าขอมมากที่สุดไม่เกิน 10% (Maximum overshoot < 10 %)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.13 ระบบควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์แบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์

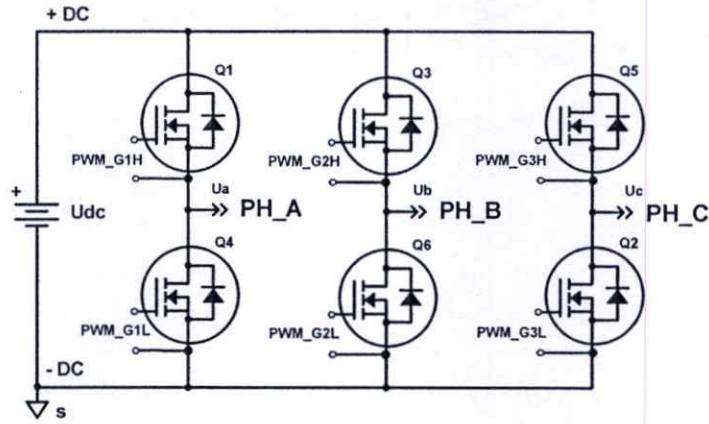
ในรูปที่ 2.31 แสดงไดอะแกรมระบบขับเคลื่อนความเร็วรอบแบบปราศจากตัวตรวจจับ ประกอบด้วย 2 ส่วน คือส่วนที่หนึ่งอินเวอร์เตอร์กำลังไฟฟ้า 3 เฟส วงจรตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้า ด้านกลับโดยตรง วงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง [8] ส่วนที่สองชุดควบคุมระบบจะใช้ตัวประมวลผลทางดิจิทัล dsPIC<sup>®</sup> ซึ่งเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 16 บิต ของบริษัท Microchip [11]-[12] เป็นอุปกรณ์ควบคุมสัญญาณในการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบเทคนิค สัญญาณสี่เหลี่ยม 120 องศา โดยใช้สัญญาณขับเคลื่อนแบบ PWM ที่ความถี่สวิตช์ ( $f_{PWM}$ ) 20 kHz จากผลการคำนวณหาตำแหน่ง โรเตอร์ขณะเริ่มต้น และควบคุมความเร็วของมอเตอร์ ที่มีความสัมพันธ์กับสัญญาณจากเวลาที่เก็ชโรครอสซึ่งในการขับเคลื่อนมอเตอร์



รูปที่ 2.28 ไดอะแกรมระบบขับเคลื่อนความเร็วรอบมอเตอร์โดยปราศจากการตรวจจับ

## 2.14 ลักษณะโหมดทำงานของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์

ลักษณะโหมดทำงานของระบบขับเคลื่อนสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน ซึ่งแสดงในทิศทางของการขับเคลื่อนแบบสัญญาณสี่เหลี่ยม 120 องศา ในแต่ละระดับการควบคุมตามตารางที่ 2.1 แต่ละขั้นของการสับเปลี่ยนของมอสเฟส และแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับของแต่ละเฟส ที่เกิดจากการขับเคลื่อนสัญญาณเกตของมอสเฟสแต่ละกิ่ง สำหรับชุดอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสในรูปที่ 2.32 สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์



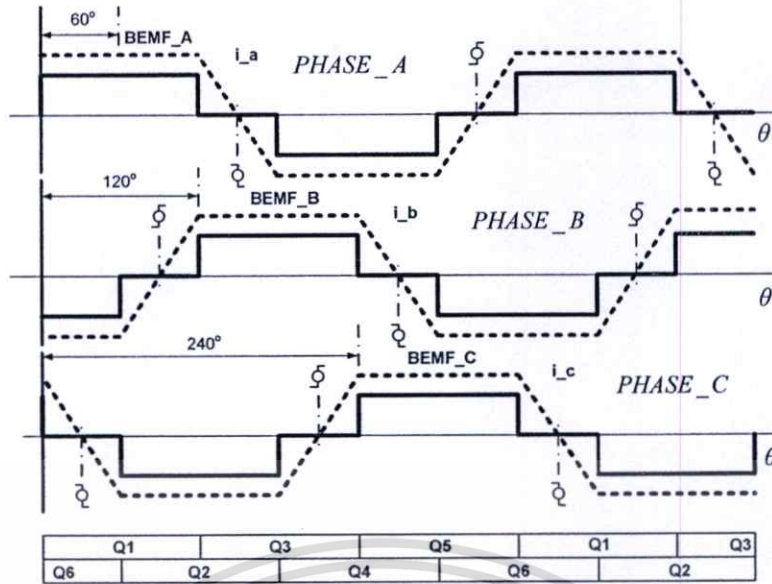
รูปที่ 2.29 วงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์เบื่องัด

ตารางที่ 2.1 สัญญาณที่ใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์แบบสัญญาณสี่เหลี่ยม 120 องศา

Sec.	G1H	G1L	G2H	G2L	G3H	G3L	U <sub>as</sub>	U <sub>bs</sub>	U <sub>cs</sub>
1	1	0	0	1	0	0	U <sub>dc</sub> /2	-U <sub>dc</sub> /2	0
2	1	0	0	0	0	1	U <sub>dc</sub> /2	0	-U <sub>dc</sub> /2
3	0	0	1	0	0	1	0	U <sub>dc</sub> /2	-U <sub>dc</sub> /2
4	0	1	1	0	0	0	-U <sub>dc</sub> /2	U <sub>dc</sub> /2	0
5	0	1	0	0	1	0	-U <sub>dc</sub> /2	0	U <sub>dc</sub> /2
6	0	0	0	1	1	0	0	-U <sub>dc</sub> /2	U <sub>dc</sub> /2

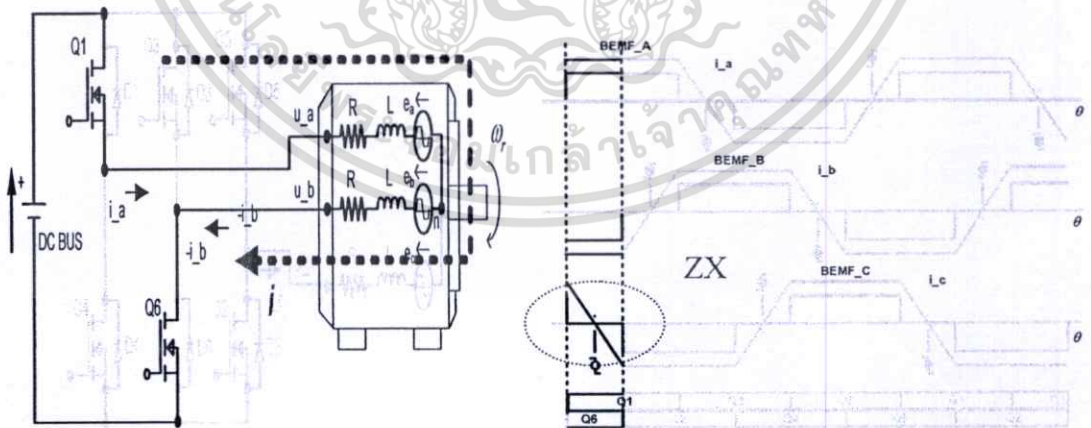
หมายเหตุ : "1": switch ON, (Using  $f_{PWM}$  20 kHz), "0": switch OFF

ในตารางที่ 2.1 แสดงสัญญาณการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบสัญญาณสี่เหลี่ยม 120 องศา สามารถแสดงรูปสัญญาณของแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับ และกระแสไฟฟ้าแต่ละเฟส ตามตำแหน่งของการสับเปลี่ยนทางเดินกระแสไฟฟ้าแต่ละกิ่งของชุดควบคุมอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับที่เกิดขึ้นในแต่ละเฟสจะห่างกัน 120 องศา จากสัญญาณขั้วเกดที่ห่างกัน 60 องศา ในรูปที่ 2.33 แสดงกระแสไฟฟ้าเฟส และแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับในแต่ละระดับการควบคุมตามสัญญาณขับเคลื่อนเกด เป็นไปตามตารางที่ 2.1 ดังนี้

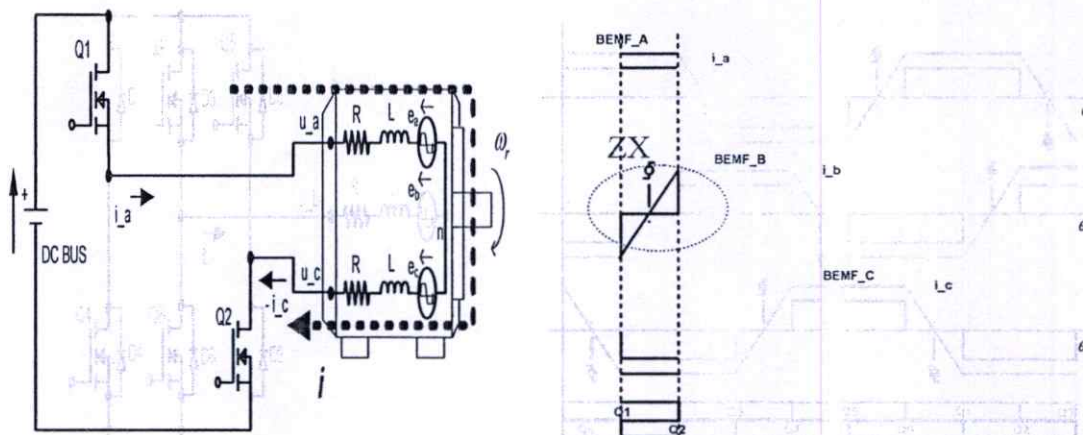


รูปที่ 2.30 กระแสไฟฟ้าเฟส และแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านในแต่ละระดับการควบคุมตามสัญญาณขับเคลื่อนเกิด ตามตารางที่ 2.1

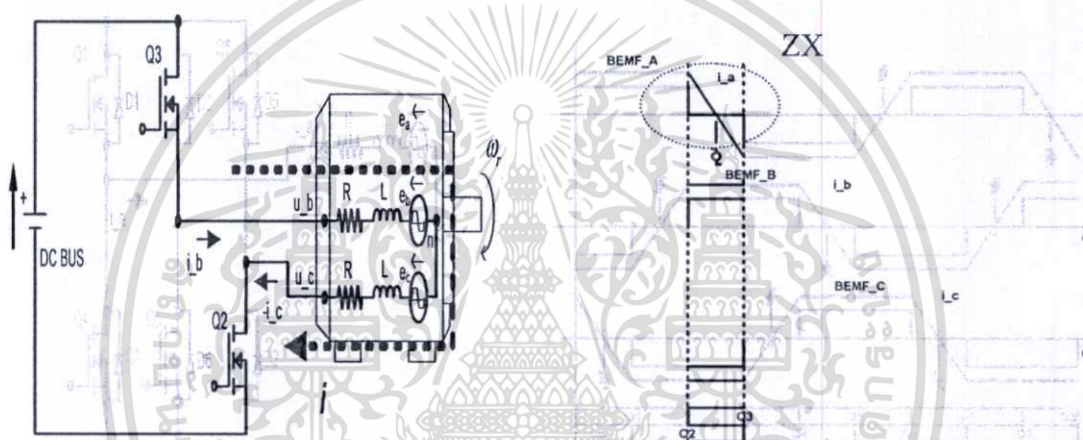
ทิศทางการสับเปลี่ยนสวิตช์ทางเดินของกระแสไฟฟ้าตามรูปแบบการขับเคลื่อนแบบสัญญาณสี่เหลี่ยม 120 องศา แต่ละขั้นการสับเปลี่ยนสวิตช์จะเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ และกระแสไฟฟ้าแต่ละเฟส แสดงในรูปที่ 2.31-2.36 ตามลำดับ การสับเปลี่ยนทิศทางของกระแสไฟฟ้าควบคุมมอเตอร์ที่จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับแต่ละเฟส และตำแหน่งที่เกิดซีโรครอสซิง (ZX) เมื่อมอเตอร์ทำงานตามสัญญาณขับมอสเฟส สำหรับหาตำแหน่งของโรเตอร์ที่เกิดขึ้น



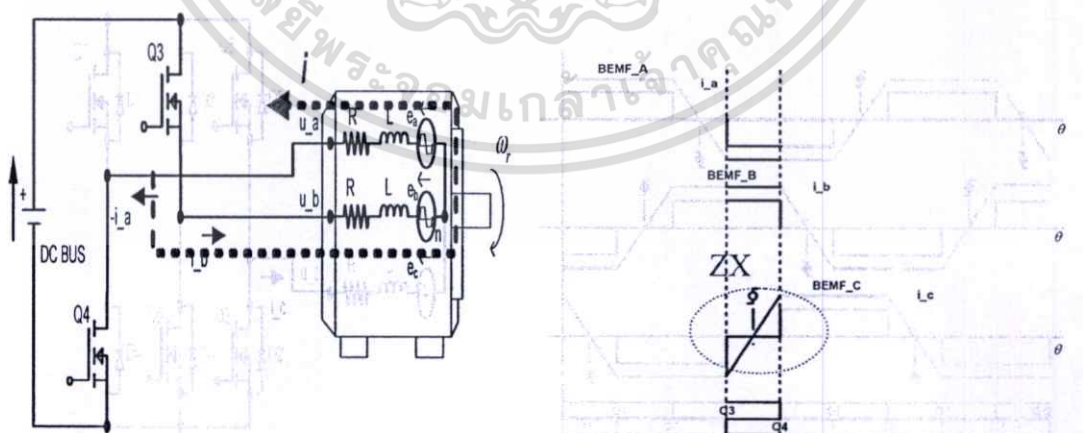
รูปที่ 2.31 สัญญาณกระแสไฟฟ้า และแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับเมื่อมอสเฟส (Q1, Q6) ทำงาน



รูปที่ 2.32 สัญญาณกระแสไฟฟ้า และแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับเมื่อมอสเฟต (Q1, Q2) ทำงาน

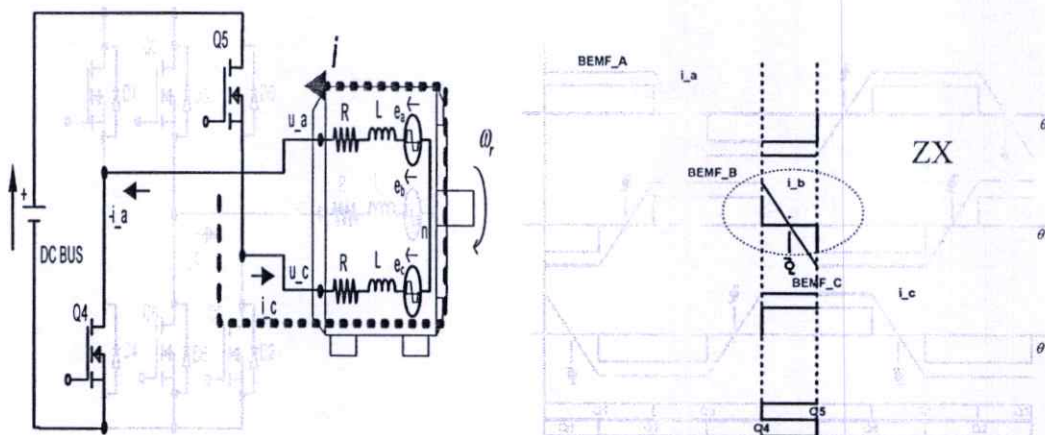


รูปที่ 2.33 สัญญาณกระแสไฟฟ้า และแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับเมื่อมอสเฟต (Q3, Q2) ทำงาน

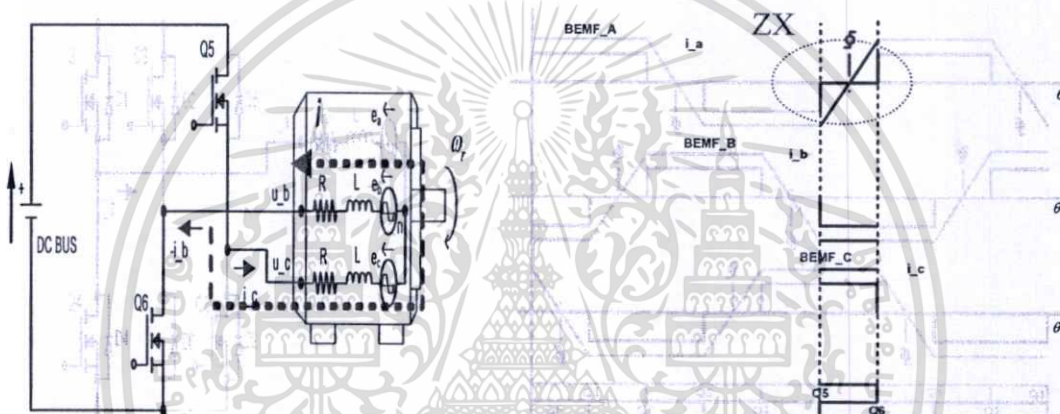


รูปที่ 2.34 สัญญาณกระแสไฟฟ้า และแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับเมื่อมอสเฟต (Q3, Q4) ทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.35 สัญญาณกระแสไฟฟ้า และแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับเมื่อมอสเฟต (Q5, Q4) ทำงาน



รูปที่ 2.36 สัญญาณกระแสไฟฟ้า และแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับเมื่อมอสเฟต (Q5, Q6) ทำงาน

## 2.15 บทสรุป

ทฤษฎีและหลักการวิธีควบคุมมอเตอร์เพื่อใช้เป็นแนวทางในการควบคุมมอเตอร์ จากผลการเปรียบเทียบโปรแกรม SPEED กับ โปรแกรม 2D-FEA สนามแม่เหล็กที่โรเตอร์จะมีลักษณะสี่เหลี่ยมคางหมู แสดงว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับในแต่ละขดลวดมีความสัมพันธ์กับการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ ดังนั้นแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับที่เกิดขึ้น นำมาค้นหาตำแหน่งของโรเตอร์ และคำนวณหาความเร็วรอบได้ แต่พบปัญหาว่าการเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับนั้น จะเกิดก็ต่อเมื่อโรเตอร์หมุนตัดผ่านขดลวด ดังนั้นการควบคุมมอเตอร์ในสภาวะออกตัวเริ่มต้นนั้นจะต้องรู้ตำแหน่งของโรเตอร์เสียก่อน โดยการค้นหาตำแหน่งโรเตอร์ด้วยเทคนิคการกระตุ้นสนามแม่เหล็กที่ขดลวดสเตเตอร์ เพื่อให้รู้ตำแหน่งของโรเตอร์ที่แน่นอนไม่ว่าโรเตอร์จะอยู่ตำแหน่งไหนก็ตามเมื่อรู้ตำแหน่งของโรเตอร์แล้ว ก็ขับเคลื่อนมอเตอร์แบบวงรอบเปิดให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ หลังจากนั้นก็จะควบคุมแบบวงรอบปิดเพื่อดำเนินการค้นหาตำแหน่งของโรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 3

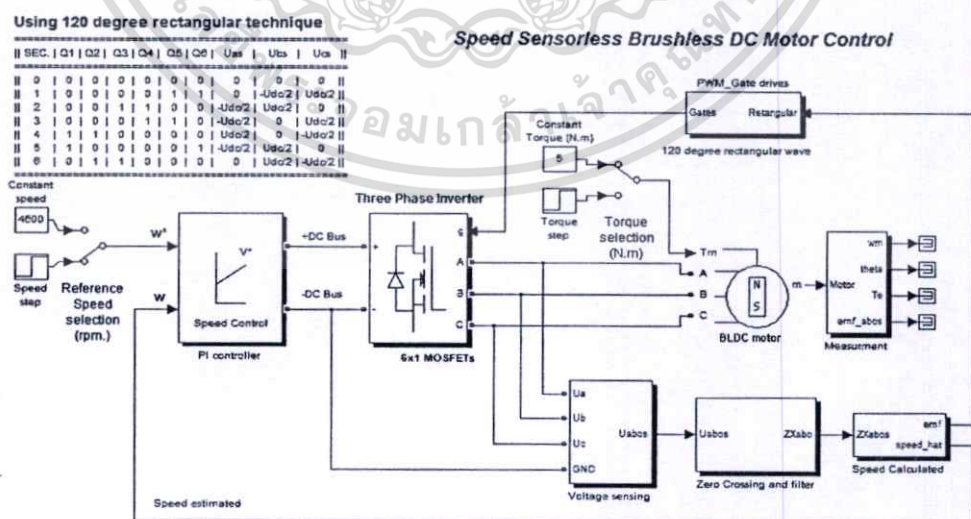
## การจำลองการทำงาน

### 3.1 บทนำ

บทนี้จะกล่าวถึงการจำลองการทำงานของระบบควบคุมความเร็วรอบแบบปราศจากตัวตรวจจับ โดยอาศัยแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับลักษณะสี่เหลี่ยมคางหมู เป็นลักษณะจำลองการทำงาน โดยใช้โปรแกรม MATLAB ช่วยในศึกษาพฤติกรรมการทำงานของมอเตอร์ และระบบควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ สำหรับการออกแบบตัวควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ จากแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับที่เกิดขึ้นทางด้านสเตเตอร์ และตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ เมื่ออุปกรณ์สวิตช์มอสเฟสไม่ทำงานจากการขับเคลื่อนมอเตอร์ เพื่อควบคุมสัญญาณเกตมอสเฟสให้สัมพันธ์กับตำแหน่งของโรเตอร์ และเปรียบเทียบสนามแม่เหล็กที่ช่องว่างอากาศกับสนามแม่เหล็กด้านสเตเตอร์ทางด้านอุคมคติ

### 3.2 ลักษณะการควบคุมความเร็วรอบแบบปราศจากตัวตรวจจับ

ในการจำลองลักษณะการควบคุมความเร็วรอบแบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ ที่อาศัยแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับลักษณะสี่เหลี่ยมคางหมู แสดงในรูปที่ 3.1 เป็นไคอะแกรมของระบบควบคุมความเร็วรอบแบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์ เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาเกี่ยวกับการทำงานของมอเตอร์ และหลักการควบคุมความเร็วรอบ



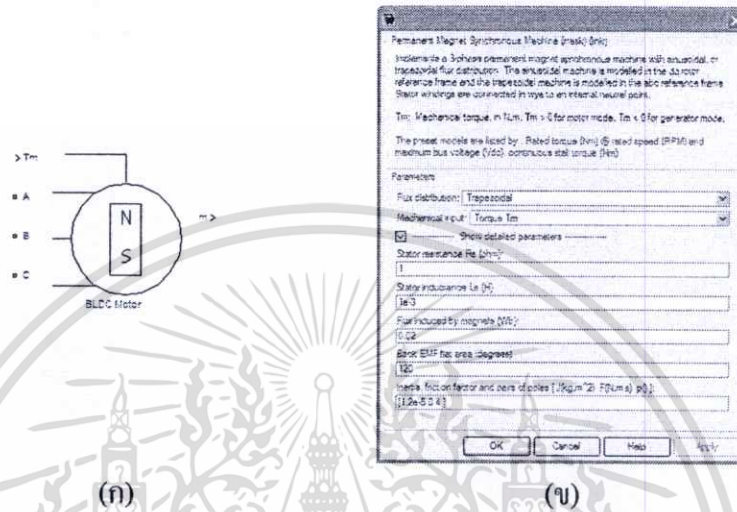
รูปที่ 3.1 ไคอะแกรมการทำงานของระบบควบคุมแบบปราศจากตัวตรวจจับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 การจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม MATLAB

#### 3.3.1 ข้อมูลมอเตอร์ในการจำลองการทำงานโดยโปรแกรม MATLAB

ข้อมูลของมอเตอร์สำหรับการจำลองการทำงานทางด้านพลวัตของมอเตอร์ แสดงในรูปที่ 3.2 (ก) เป็นสัญลักษณ์มอเตอร์ (ข) เป็นกล่องไดอะแกรมสำหรับปรับตั้งค่าตัวแปรมอเตอร์

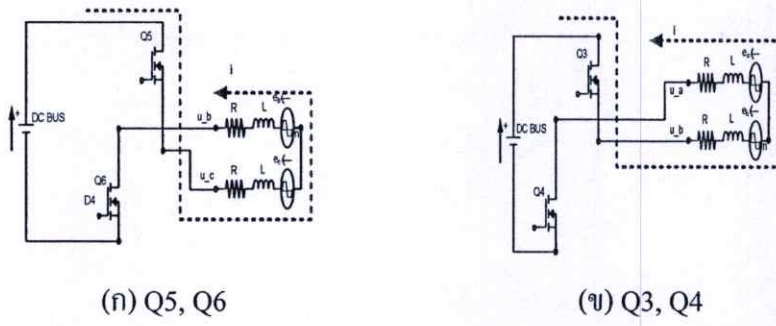


รูปที่ 3.2 (ก) สัญลักษณ์มอเตอร์ (ข) ไดอะแกรมตัวแปรของมอเตอร์

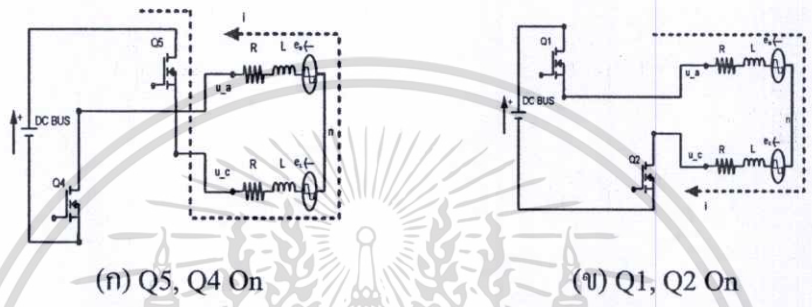
ตารางที่ 3.1 ลักษณะสัญญาณในการขับเคลื่อนมอเตอร์ที่สัมพันธ์กับแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้น

Sec.	Emf_A	Emf_B	Emf_C	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	-1	+1	0	0	0	0	1	1
2	-1	+1	0	0	0	1	1	0	0
3	-1	0	+1	0	0	0	1	1	0
4	+1	0	-1	1	1	0	0	0	0
5	+1	-1	0	1	0	0	0	0	1
6	0	+1	-1	0	1	1	0	0	0

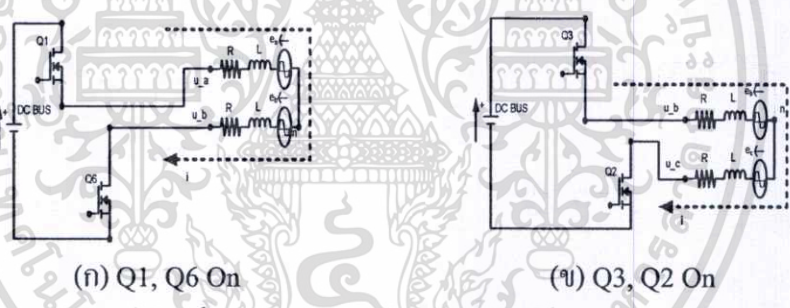
จากตารางที่ 3.1 สามารถเขียนลักษณะของโหมคการทำงานในแต่ละระดับเมื่อตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าเท่ากับศูนย์



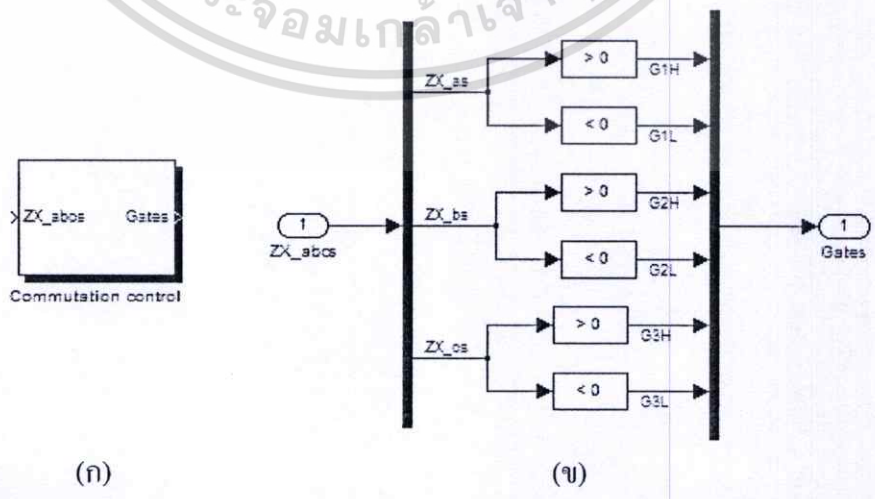
รูปที่ 3.3 (ก) Emf<sub>A</sub> = 0, (ข) Emf<sub>C</sub> = 0



รูปที่ 3.4 (ก) Emf<sub>B</sub> = 0 (ข) Emf<sub>B</sub> = 0

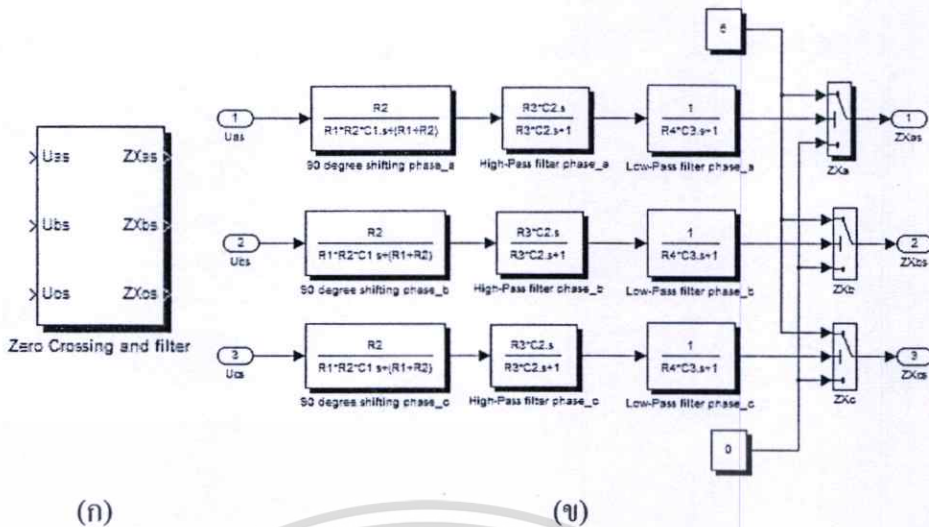


รูปที่ 3.5 (ก) Emf<sub>C</sub> = 0 (ข) Emf<sub>A</sub> = 0



รูปที่ 3.6 (ก) กลองไดอะแกรมการขับเคลื่อนสัญญาณเกต (ข) ภายในกลองไดอะแกรม

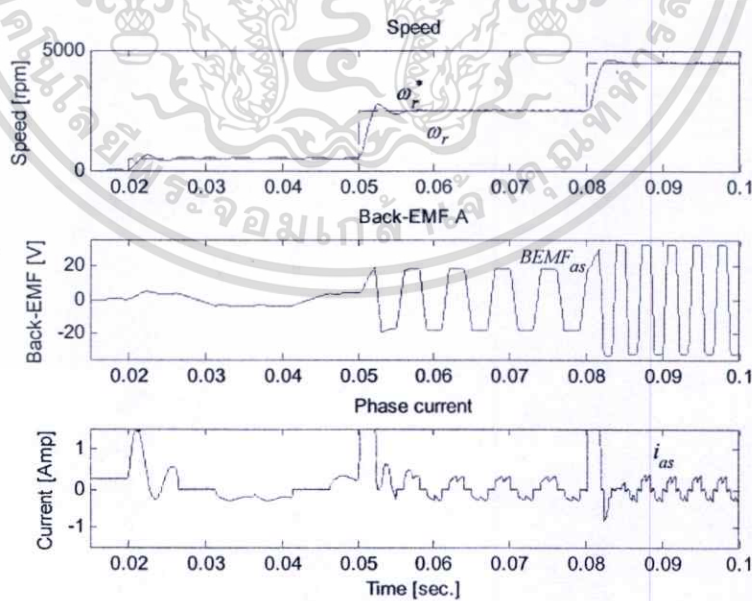
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 (ก) กล้องไดอะแกรมการเลื่อนเฟส 90 องศา กรองแบบผ่านสูง กรองแบบผ่านต่ำ และตรวจสอบซีโรครอสซิง (ข) ภายในกล้องไดอะแกรม

### 3.3.2 การจำลองขณะเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบมอเตอร์

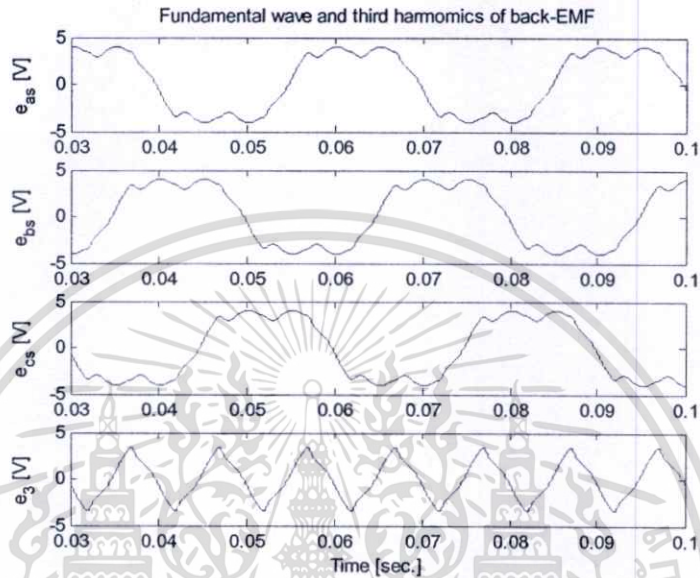
จำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม MATLAB ทดลองความเร็วรอบมอเตอร์เปลี่ยนแปลงตามความเร็วรอบคำสั่ง 500 2,500 และ 4,500 รอบต่อนาที ที่เวลา 0.02, 0.05, 0.08 วินาที ในรูปที่ 3.8 แสดงความเร็วรอบ 500 2,500 และ 4,500 รอบต่อนาที ที่เปลี่ยนแปลงตามความเร็วคำสั่ง ทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับเฟส A เปลี่ยนแปลงคาบเวลาตามความเร็วรอบที่สัมพันธ์กัน



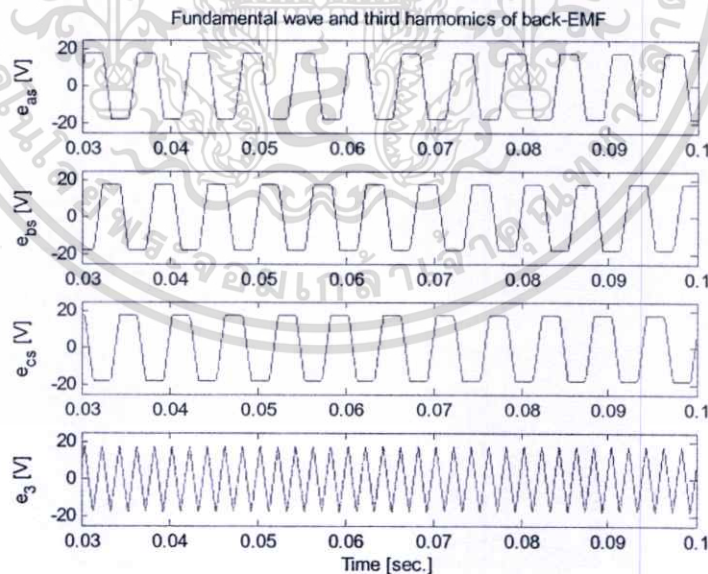
รูปที่ 3.8 การจำลองเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบแต่ละระดับความเร็วที่เวลา 0.02, 0.05, 0.08 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับที่เกิดขึ้นในแต่ละเฟส มีระยะมุมเฟสห่างกัน 120 องศา ตามสัญญาณการขับเคลื่อน ผลจากความเร็รรอบทำให้คาบเวลาของสัญญาณแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับที่เกิดขึ้นจากการทรงความถี่เปลี่ยนแปลงตามความเร็รรอบ แสดงในรูปที่ 3.9 ที่ความเร็รรอบ 500 รอบต่อนาที รูปที่ 3.10 ที่ความเร็รรอบ 2,500 รอบต่อนาที และรูปที่ 3.11 ที่ความเร็รรอบ 4,500 รอบต่อนาที

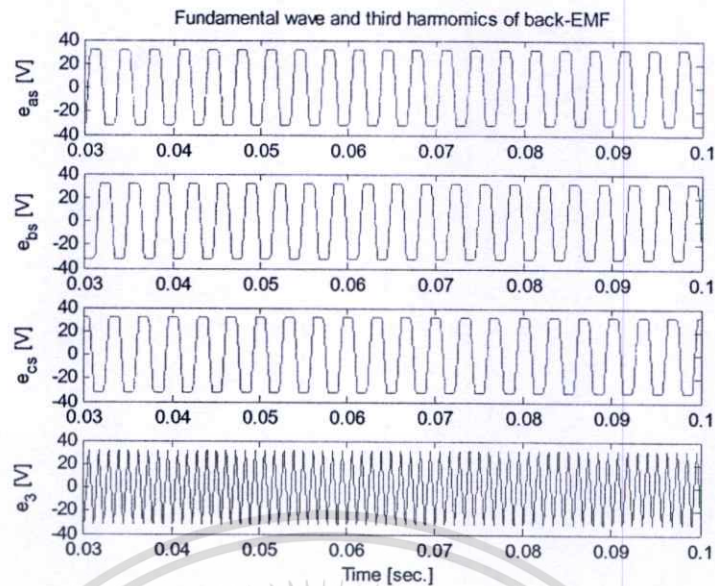


รูปที่ 3.9 แรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับเฟส A, B, C ที่ความเร็รรอบ 500 รอบต่อนาที



รูปที่ 3.10 แรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับเฟส A, B, C ที่ความเร็รรอบ 2,500 รอบต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

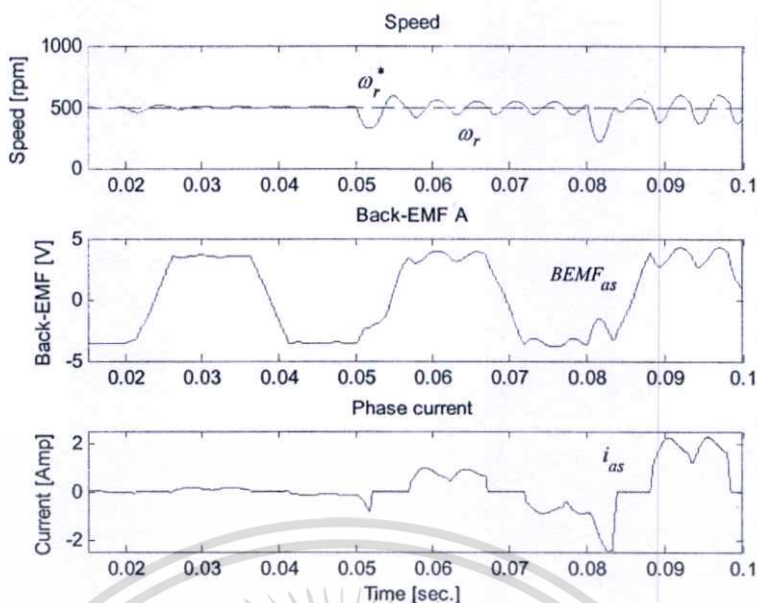


รูปที่ 3.11 แรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับเฟส A, B, C ที่ความเร็วรอบ 4,500 รอบต่อนาที

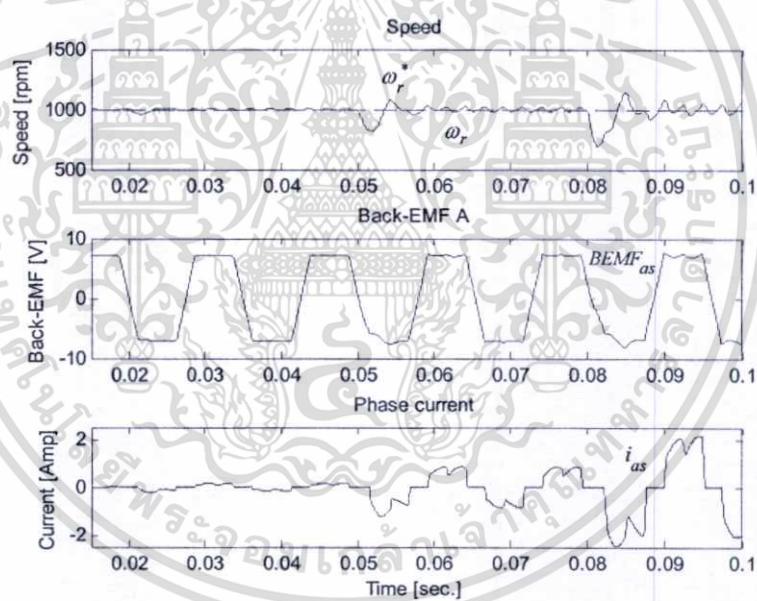
ผลการจำลองความเร็วรอบเปลี่ยนแปลง สำหรับย่านการควบคุมที่ความเร็วรอบ 500 ถึง 4,500 รอบต่อนาที ลักษณะของแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับที่เกิดขึ้นจะแปรผันตามความเร็วรอบที่เปลี่ยนแปลงทั้งขนาด และคาบเวลาของสัญญาณจะสังเกตได้จากการจำลองในรูปที่ 3.8 - 3.11 แต่ละระดับความเร็วรอบมอเตอร์

### 3.3.3 การจำลองขณะรับแรงบิดโหลด ในแต่ละระดับความเร็วรอบ

การทดสอบแรงบิดของโหลดที่ 10%, 50%, 100% ของแรงบิดพิกัด ที่เวลา 0.02, 0.05, 0.08 วินาที ตามลำดับ ในแต่ละระดับความเร็วรอบมอเตอร์แสดงความเร็วรอบคำสั่งเปรียบเทียบกับความเร็วรอบจากการคำนวณ แรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับเฟส A และกระแสไฟฟ้าเฟส A โดยเปลี่ยนแปลงแรงบิด โหลดแต่ละเวลา ในรูปที่ 3.12 ความเร็วรอบคำสั่ง 500 รอบต่อนาที รูปที่ 3.13 ความเร็วรอบคำสั่ง 1,000 รอบต่อนาที รูปที่ 3.14 ความเร็วรอบคำสั่ง 2,500 รอบต่อนาที และรูปที่ 3.15 ความเร็วรอบคำสั่ง 4,500 รอบต่อนาที

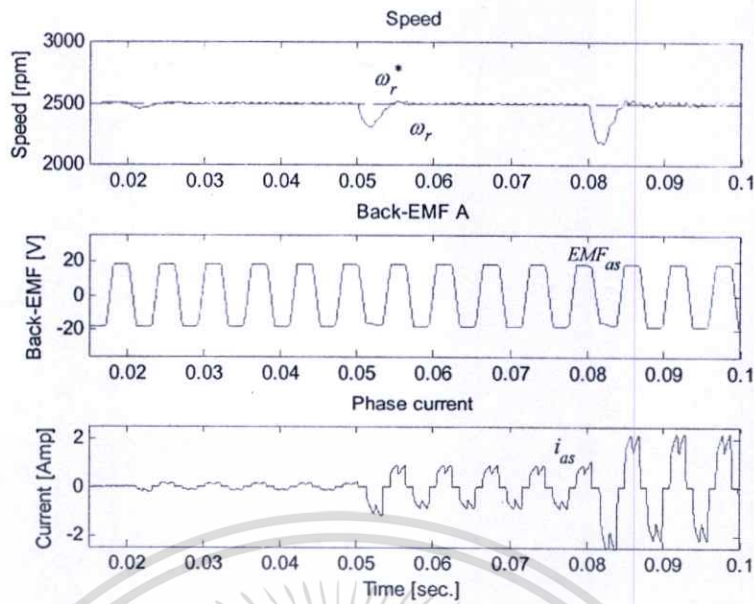


รูปที่ 3.12 ความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาที 10%, 50%, 100% ของแรงบิดพิกัด และกระแสเฟส A

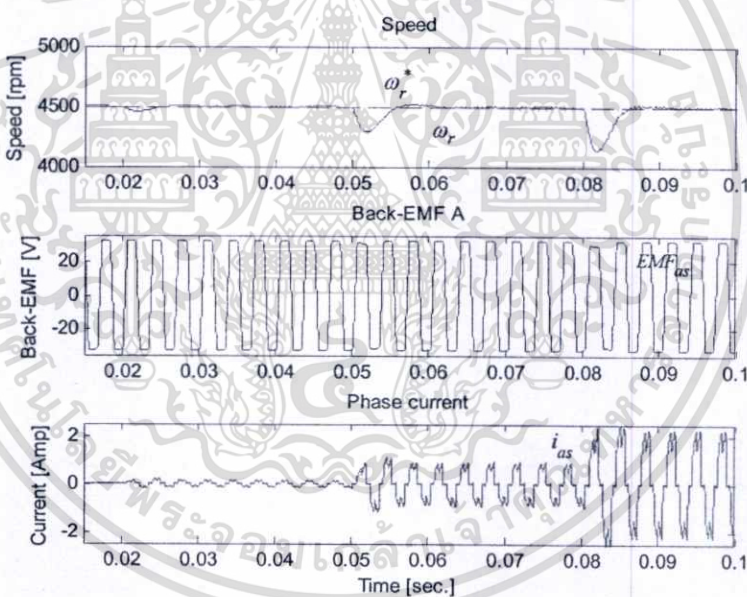


รูปที่ 3.13 ความเร็วรอบ 1000 รอบต่อนาที 10%, 50%, 100% ของแรงบิดพิกัด และกระแสเฟส A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 ความเร็วรอบ 2500 รอบต่อวินาที 10%, 50%, 100% ของแรงบิดพิกัด และกระแสเฟส A



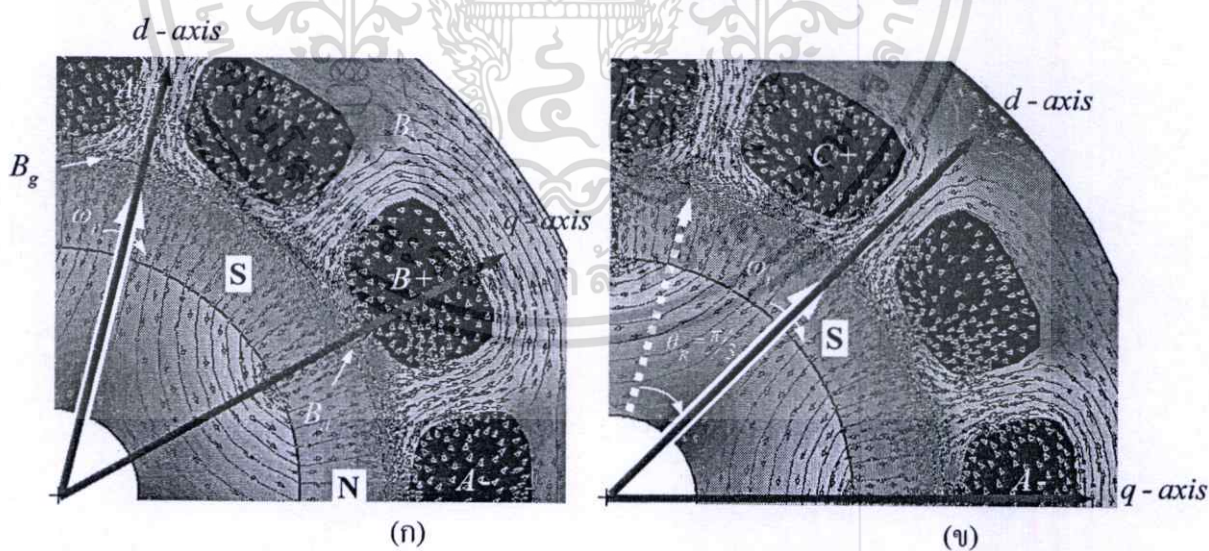
รูปที่ 3.15 ความเร็วรอบ 4500 รอบต่อวินาที 10%, 50%, 100% ของแรงบิดพิกัด และกระแสเฟส A

ผลการจำลองเมื่อมอเตอร์ได้รับแรงบิดโหลดในแต่ละระดับ จากผลการจำลองพบว่า ความเร็วรอบมอเตอร์จะยังคงรักษาระดับของความเร็วรอบมอเตอร์เอาไว้ แต่จะใช้กระแสไฟฟ้าเข้ามาช่วยทดแทนเพื่อรักษาระดับความเร็วรอบ ในย่านความเร็วรอบ 500 ถึง 4,500 รอบต่อวินาที และแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับที่เกิดขึ้นในแต่ละระดับความเร็วรอบยังแปรผันตามความเร็วรอบในแต่ละระดับความเร็วรอบ ส่งผลให้คาบเวลาของแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับที่เกิดขึ้นในแต่ละความเร็วรอบเปลี่ยนแปลงไปไม่มากนัก ทำให้การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ยังคงเสถียรภาพอยู่ในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

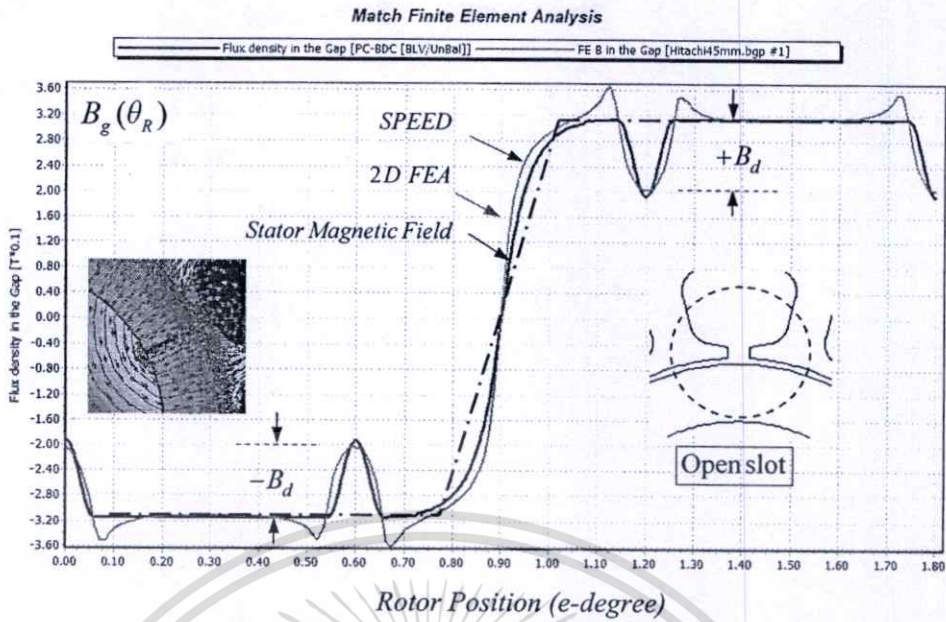
ระดับความเร็วรอบต่ำจะมีการเปลี่ยนแปลงของแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับส่งผลต่อคาบเวลาในการหาซีโรครอสซิง แต่อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติที่ความเร็วรอบของมอเตอร์ต่ำอยู่ในช่วงย่านการควบคุม จะทำการปรับอัตราขยายสัญญาณทางด้านวงจรซีโรครอสซิง ให้มีอัตราขยายสูงเพื่อการตรวจสอบสัญญาณที่เกิดขึ้นโรครอสซิง

### 3.4 การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น

การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากการกระตุ้นสนามแม่เหล็กที่ขดลวดสเตเตอร์ ในรูปที่ 2.17 (ก),(ข) โดยใช้โปรแกรม SPEED และ โปรแกรมวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อิลิเมนต์ 2 มิติ (Finite Element Analysis; 2-D FEA) [14], แสดงทิศทางของสนามแม่เหล็กเมื่อถูกกระตุ้นสนามแม่เหล็ก และตำแหน่งโรเตอร์ที่เคลื่อนที่ เนื่องจากสนามแม่เหล็กที่กระตุ้นทางด้านสเตเตอร์ในแต่ละระดับ แสดงในรูปที่ 3.16 (ก) ผลจากการกระตุ้นสนามแม่เหล็กที่เฟส A-B และในรูปที่ 3.16 (ข) ผลจากการกระตุ้นสนามแม่เหล็กที่เฟส A-C จะเห็นว่าตำแหน่งของโรเตอร์ หมุนตามเข็มนาฬิกาในระยะมุมที่เคลื่อนที่  $60^\circ$  ( $\theta_r = \pi/3$ ) ตามทิศทางสนามแม่เหล็กที่ถูกกระตุ้น ส่วนในรูปที่ 3.17 เป็นการเปรียบเทียบสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นที่ช่องว่างอากาศ กับสนามแม่เหล็กสเตเตอร์ทางด้านอุดมคติ แสดงเป็นเส้นประ โดยโปรแกรมออกแบบมอเตอร์ SPEED และ โปรแกรมไฟไนท์อิลิเมนต์ 2 มิติ (2-D FEA) ลักษณะใกล้เคียงกัน ซึ่งผลที่เกิดจากสนามแม่เหล็กที่สล๊อทเปิด  $B_d$  (Open Slot) ส่งผลให้สนามแม่เหล็กที่ช่องว่างอากาศลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับสนามแม่เหล็กทางอุดมคติ



รูปที่ 3.16 ทิศทางการกระจายสนามแม่เหล็กที่ถูกกระตุ้น (ก) คู่เฟส A-B (ข) คู่เฟส A-C



รูปที่ 3.17 เปรียบเทียบสนามแม่เหล็กที่ช่องว่างอากาศกับสนามแม่เหล็กสเตเตอร์ทางอุดมคติ

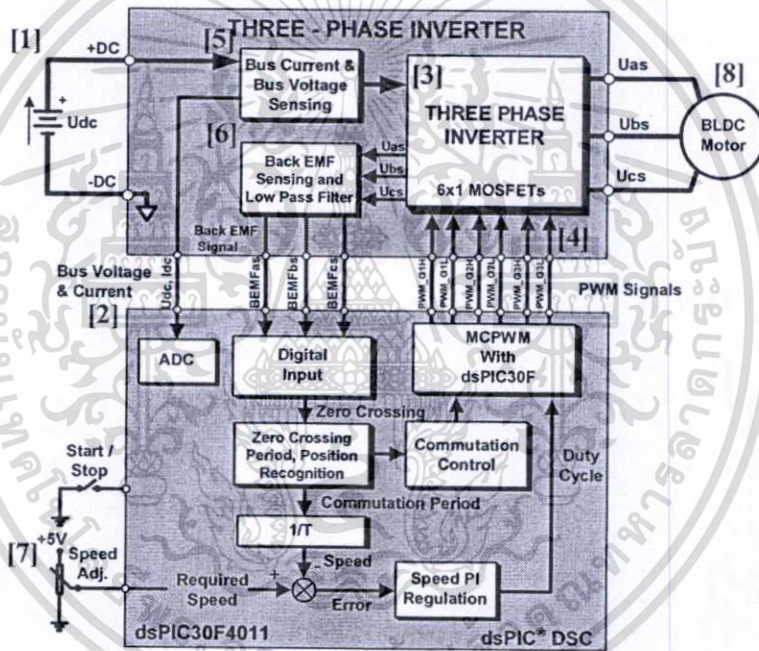
### 3.5 บทสรุป

บทสรุปในการจำลองการทำงานในการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ สำหรับควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน โดยการจำลองลักษณะการควบคุมความเร็วรอบแบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ อาศัยแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับที่เกิดขึ้นในย่านการควบคุมความเร็วรอบที่ 500 ถึง 4,500 รอบต่อนาที ซึ่งผลการจำลองขณะที่ความเร็วรอบต่ำๆ จะส่งผลกระทบต่อสัญญาณแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับที่เกิดขึ้น เนื่องจากความเร็วรอบต่ำ ดังนั้นในผลการจำลองจะพบว่าช่วงความเร็วรอบที่ 500 รอบต่อนาที นั้นความเร็วรอบจะแกว่ง ส่วนความเร็วรอบที่ความเร็วรอบสูงจะควบคุมได้ดี ดังแสดงในผลการจำลอง ระบบควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ และแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับที่เกิดขึ้นในแต่ละเฟส ของระดับความเร็วรอบซึ่งเปลี่ยนแปลงไปตามความเร็วรอบของมอเตอร์ และการควบคุมความเร็วรอบในแต่ละความเร็วรอบเมื่อมอเตอร์ได้รับแรงบิดโหลด ระบบควบคุมยังคงรักษาระดับความเร็วรอบของมอเตอร์คงที่อยู่ ในการวิเคราะห์ผลทางด้านไฟไนต์อีลิเมนต์ จากการกระตุ้นสนามแม่เหล็กที่ได้ จะทำการเปรียบเทียบกับสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นด้านสเตเตอร์ทางอุดมคติ กับสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นที่ช่องว่างอากาศ ซึ่งลักษณะที่ได้จะใกล้เคียงกัน แต่ผลกระทบจากสนามแม่เหล็กที่สล็อตเปิด จะทำให้สนามแม่เหล็กที่ช่องว่างอากาศนั้นลดลง ดังแสดงในผลการทดสอบแต่อย่างไรก็ตาม ในการจำลองการทำงานของระบบควบคุมความเร็วแบบปราศจากตัวตรวจจับ สามารถเป็นแนวทางในการออกแบบ และสร้างระบบควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ตามงานวิจัยนี้ได้

## การออกแบบและการสร้างเครื่องต้นแบบที่น่าเสนอ

### 4.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงลักษณะการออกแบบ และการสร้างเครื่องต้นแบบของวงจรการควบคุมความเร็วรอบสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน ในการควบคุมระบบจะใช้ตัวประมวลผลทางดิจิทัล (Digital Signal Controller, DSC) ตระกูล dsPIC ขนาด 16 บิต ในภาคส่วนของการควบคุม และส่วนของภาคกำลัง จะใช้อุปกรณ์มอสเฟตจำนวน 6 ตัว สำหรับชุดอินเวอร์เตอร์ แสดงในรูปที่ 4.1 เป็นไคอะแกรมของระบบควบคุมมอเตอร์ที่น่าเสนอต่อไปนี้



รูปที่ 4.1 ไคอะแกรมการทำงานของระบบควบคุมมอเตอร์

การออกแบบวงจรในแต่ละส่วนของภาคการควบคุม และส่วนของภาคกำลัง ในการวิจัยนี้ ประกอบด้วยวงจรภาคการทำงานหลักสำหรับการออกแบบ ในรูปที่ 4.1 ซึ่งเป็นไคอะแกรมของการควบคุมความเร็วแบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่ง โดยอาศัยแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับโดยตรงสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน ในส่วนของวงจรแต่ละภาคส่วนจะแสดงการออกแบบตามรายละเอียด ดังต่อไปนี้

- 1) การออกแบบวงจรเรียงกระแสไฟฟ้า
- 2) การออกแบบวงจรควบคุมโดยใช้ตัวควบคุมสัญญาณทางดิจิทัล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3) การออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส
- 4) การออกแบบวงจรบูทสเตร็ป สำหรับขับสัญญาณเกตมอสเฟต
- 5) การออกแบบวงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง
- 6) การออกแบบตัวตรวจจับแรงดันเฟส และวงจรซีโรครอสซิง
- 7) การออกแบบสำหรับวงจรปรับความเร็วรอบมอเตอร์
- 8) โครงสร้างของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน

ตารางที่ 4.1 ข้อกำหนดของอุปกรณ์ และข้อกำหนดคุณลักษณะการควบคุมมอเตอร์

<b>Hardware Boards Characteristics</b>	Max. DC-bus voltage :	50V
	Max. output current :	10A
	Max. output voltage :	50V
	Variable speed:	0 – 4,500 rpm
	Motor controlled:	3 PH. SPM-type BLDC motor
<b>Drive Characteristics</b>	Max. speed:	4,500 rpm
	Speed range controlled:	500 – 4,500 rpm
	Switching frequency:	20 kHz.
	Motor drive technique:	120° Rectangular wave
	Motor starting type:	Ramp starting
	Speed controller:	PI-Controller
	Protection :	I >, U > Protection

หมายเหตุ: I > คือระบบป้องกันกระแสไฟฟ้าเกิน (Over current protection)

U > คือระบบป้องกันแรงดันไฟฟ้าเกิน (Over voltage protection)

SPM-type คือชนิดแม่เหล็กติดพื้นผิว โรเตอร์ (Surface Permanent Magnet type)

## 4.2 การออกแบบวงจรเรียงกระแสไฟฟ้า

ในส่วนของวงจรเรียงกระแสไฟฟ้า จะทำหน้าที่เปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง โดยใช้ไดโอดเป็นตัวเปลี่ยนรูปพลังงาน ขนาดและพิกัดของไดโอดขึ้นอยู่กับพิกัดของโหลดที่ต้องการ ไดโอดประเภทนี้จะเป็นชนิดไดโอดเรียงกระแสไฟฟ้า (Rectifier Diode) ที่ไม่จำเป็นต้องมีความไวในการทำงานสูงมากนัก ถ้าพิกัดกำลังของโหลดมีค่าสูงๆ ไดโอดที่จะนำมาใช้จะต้องมีพิกัดสูงด้วยซึ่งไดโอดเหล่านั้นจะถูกเรียกว่า ไดโอดกำลัง (Power diode) [30] เนื่องจากชุดควบคุมมอเตอร์ในงานวิจัยนี้ ทดสอบกับมอเตอร์ที่พิกัดไม่สูงมากนักจึงถูกออกแบบให้รับเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำลังไฟฟ้าด้านขาออกขนาดพิกัด 100 วัตต์ 30 โวลต์ จึงเลือกวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบเต็มคลื่น (Full Wave Rectifier) ในรูปที่ 4.2 (ก) เป็นวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบเต็มคลื่น โดยมีลักษณะรูปร่างของอุปกรณ์ไดโอดแบบบริดจ์ ในรูปที่ 4.2 (ข) เป็นอุปกรณ์เรียงกระแสไฟฟ้าไดโอดแบบบริดจ์ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้เลือกวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าชนิดเต็มคลื่นแบบบริดจ์ 1 เฟส โดยข้อพิจารณาในการออกแบบวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าจะอยู่ที่การเลือกใช้ไดโอดกำลังซึ่งคุณสมบัติที่สำคัญ 5 ประการ ดังนี้คือ

1. ต้องสามารถทนกระแสไฟฟ้ากระชากได้ (Inrush Current:  $I_{FSM}$ ) กระแสไฟฟ้ากระชากจะเกิดขึ้นเมื่อเริ่มเปิดสวิตช์จ่ายไฟให้วงจร ซึ่งในขณะนั้นตัวเก็บประจุไม่มีประจุอยู่เลย ค่าความต้านทานของวงจรจะต่ำมาก คือมีความต้านทานแฝงในตัวเก็บประจุ (ESR) กับ  $R_{cs}$  เท่านั้น ดังนั้นกระแสไฟฟ้ากระชาก จะหาได้จากสมการที่ (4.1) ดังนี้

$$I_{FSM} = \frac{V_{out(DC)}}{R_{cs} + ESR} \quad (4.1)$$

อัตราการทนกระแสไฟฟ้ากระชาก  $I_{FSM}$  ของไดโอดจะต้องมีค่าไม่ต่ำกว่า  $I_{FSM}$  ที่คำนวณได้

2. ต้องสามารถทนกระแสไฟฟ้าสูงสุดได้ชั่วขณะ ( $I_{FRM}$ ) เป็นกระแสสูงสุดที่เกิดขึ้นขณะชาร์จตัวเก็บประจุฟิลเตอร์ก็จะทำให้มีกระแสไหลผ่านตัวไดโอด จะเกิดในระยะเวลาสั้นๆ โดยทั่วไปจะกำหนดจากรอบการทำงานของไฟกระแสสลับ (1/50 วินาที หรือ 20 มิลลิวินาที) กระแสไฟฟ้าจำนวนนี้มีค่าสูงมาก และไม่ใช้กระแสไฟฟ้าคอนปฏิบัติงานจริง

3. อัตราทนกระแสไฟฟ้าไบแอสตรง (Forward Bias:  $I_{FM}$ ) เป็นค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ไดโอดทนได้โดยไม่พังเสียก่อน โดยทั่วไปควรมีค่ามากกว่า 1.5 ถึง 2 เท่าของกระแสไฟฟ้าปกติ

4. อัตราการทนแรงดันไบแอสกลับสูงสุด (Peak Reverse Bias: PRB) หรืออัตราการทนแรงดันย้อนกลับสูงสุด (Peak Inverse Voltage: PIV) เมื่อเราต่อไดโอดแบบบริดจ์จะมีแรงดันตกคร่อมโหนดเมื่อไบแอสกลับเท่ากับแรงดันที่เอาท์พุทของวงจร แต่เมื่อต่อแบบเรกติไฟร์จะพบว่าแรงดันไบแอสกลับจะเป็น 2 เท่า ของแรงดันสูงสุดตามปกติ และเป็น 2.83 เท่าของแรงดัน RMS

5. กระแสไฟฟ้าวรัวไหล (Leakage Current) เป็นค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลเมื่อไดโอดในวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าได้รับไบแอสกลับ ซึ่งค่านี้โดยทั่วไปแล้วมีค่าน้อยมากเท่าใดก็จะดีมากเท่านั้น

ดังนั้นไดโอดที่ใช้ในงานวิจัยจะเป็นไดโอดกำลังชนิดเต็มคลื่นแบบบริดจ์ดังแสดง โดยพิกัดกำลังหาได้ตามสมการที่ (4.2)

$$P_{in} = V_{in} \cdot I_{in} \cdot \cos \phi \quad (4.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อกำหนดให้

$P_{in}$  คือกำลังไฟฟ้าทางด้านขาเข้า (วัตต์)

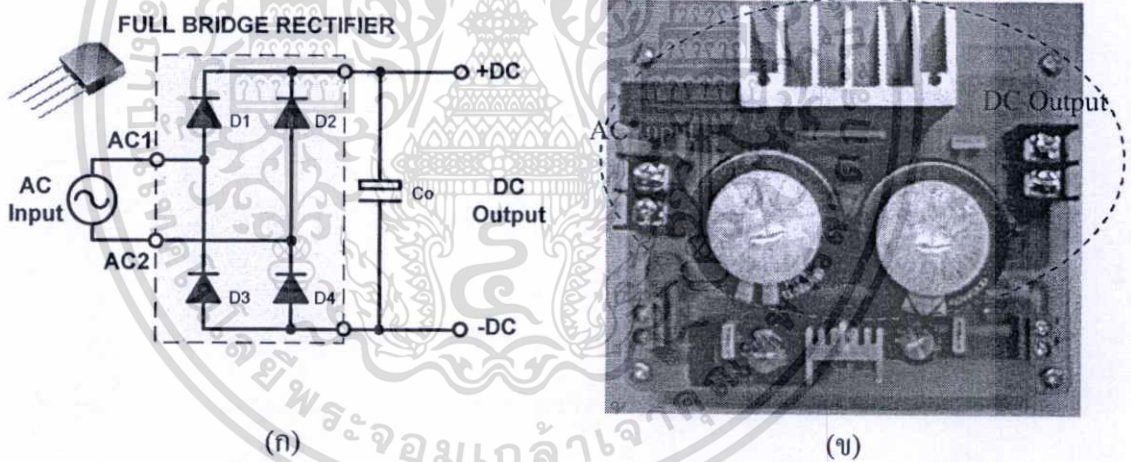
$V_{in}$  คือแรงดันไฟฟ้าทางด้านขาเข้า (โวลต์)

$I_{in}$  คือกระแสไฟฟ้าทางด้านขาเข้า (แอมป์)

$\cos \phi$  คือตัวประกอบกำลัง

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติของอุปกรณ์ที่ควบคุมมอเตอร์ที่กำหนด

รายละเอียด	ค่าที่กัก	หน่วย
พิกัดกำลังของมอเตอร์	100	วัตต์
แรงดันไฟฟ้าด้านขาเข้า รับไฟฟ้ากระแสสลับ	30	โวลต์
ตัวประกอบกำลัง	0.85	-
กระแสไฟฟ้าที่จะไหลผ่าน ไดโอด (จากสมการที่ (4.1))	1.96	แอมป์



รูปที่ 4.2 (ก) วงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบเต็มคลื่น และ (ข) ชุดต้นแบบ

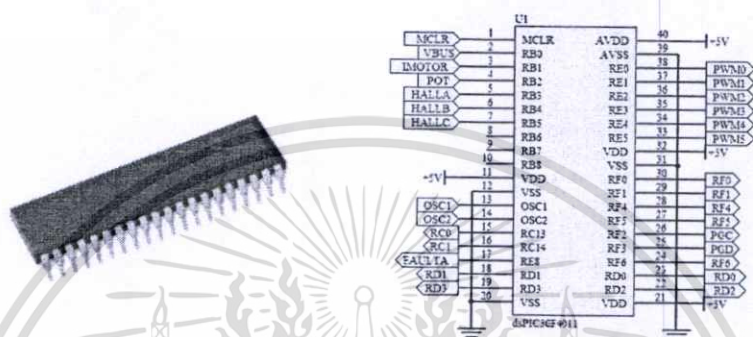
แต่เนื่องจากวงจรดังกล่าวมีการทำงานแบบสวิตชิ่ง ดังนั้นจึงกำหนดให้ไดโอดทำงานสูงสุดไม่เกิน 80% ของพิกัดตัวเอง และจะต้องรับแรงดันไฟฟ้าด้านขาเข้าเป็น 2 เท่าของแรงดันไฟฟ้าได้ พิกัดกระแสขั้นต่ำอยู่ที่ 1.5 แอมป์ ในที่นี้เลือกไดโอดแบบบริดจ์ เบอร์ KBU8A พิกัด 50V/8A

#### 4.3 การออกแบบวงจรควบคุมโดยใช้ตัวควบคุมสัญญาณทางด้านดิจิทัล

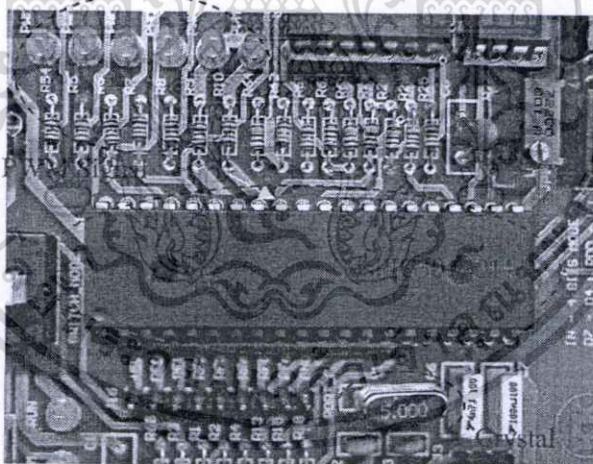
dsPIC คือ ชื่อของไมโครคอนโทรลเลอร์ 16 บิตจากบริษัท Microchip Technology Inc.

ผู้ผลิตไมโครคอนโทรลเลอร์ซึ่งรู้จักกันเป็นอย่างดีในแวดวง นักพัฒนาระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย Microchip ได้กำหนดชื่ออย่างเป็นทางการสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่นใหม่ี่ว่า Digital Signal Controller หรือ DSC นั้นหมายความว่า dsPIC เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ได้รับการออกแบบมาเป็นพิเศษเพื่อการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลสำหรับระบบควบคุมอัตโนมัติที่มีความสามารถสูง และมีฟังก์ชันสำหรับการควบคุมมอเตอร์ และชุดควบคุมสัญญาณ PWM สำหรับขับเคลื่อนเฟสถึง 6 ช่อง [11]-[12] หลักการออกแบบจะแสดงในอัลกอริทึมในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.3 ตัวควบคุมสัญญาณทางด้านดิจิทัล

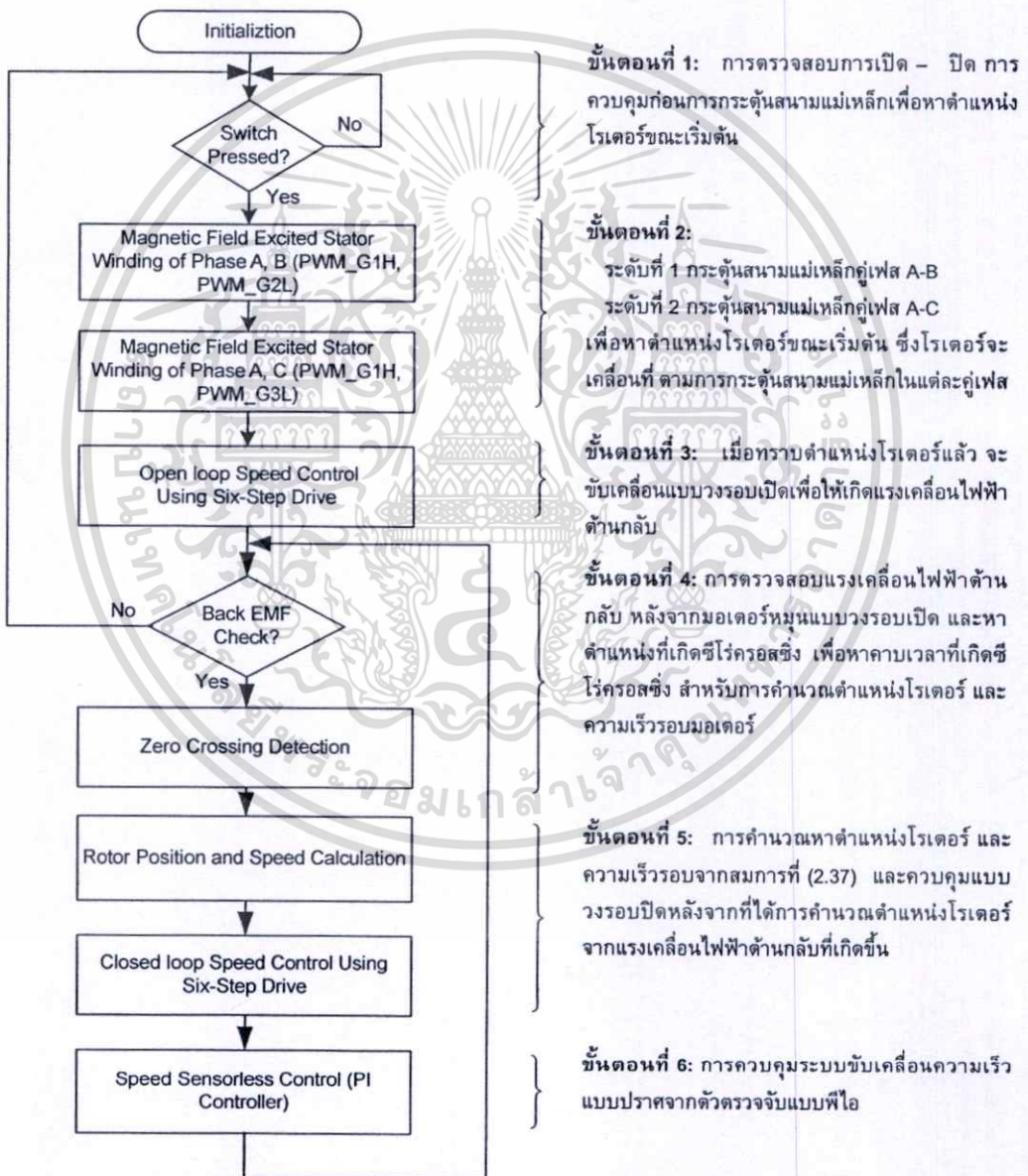


รูปที่ 4.4 ตัวควบคุมสัญญาณทางด้านดิจิทัล ของเครื่องต้นแบบ

#### 4.3.1 อัลกอริทึมของการควบคุมแบบปราศจากตัวตรวจจับ

อัลกอริทึมของระบบขับเคลื่อนความเร็วรอบมอเตอร์ ในการออกตัวขณะเริ่มต้นด้วยเทคนิคการกระตุ้นสนามแม่เหล็กที่ขดลวดทางด้านสเตเตอร์ในแต่ละคู่เฟส ดังแสดงผังในรูปที่ 4.5 จากการกระตุ้นสนามแม่เหล็กที่เฟส A-B และกระตุ้นสนามแม่เหล็กที่เฟส A-C เพื่อทราบตำแหน่งของโรเตอร์ที่แน่นอนเพื่อใช้ในการออกตัวเริ่มต้นของมอเตอร์ เมื่อทราบตำแหน่งของโรเตอร์แล้วเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะทำการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบวงรอบเปิด เพื่อให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับเมื่อมอเตอร์หมุนออกตัว ตัวควบคุมจะทำการตรวจสอบแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับที่วัดโดยตรงจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้น และทำการเปรียบเทียบกับวงจรีครอสซิง เพื่อทำการควบคุมแบบวงรอบปิด ตัวควบคุมจะทำการคำนวณหาตำแหน่งโรเตอร์ และความเร็วรอบมอเตอร์จากความสัมพันธ์ระหว่างคาบเวลาที่เกิดซีร็อกอสซิง กับความเร็วรอบมอเตอร์ [18]-[20] สำหรับการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ โดยควบคุมความเร็วรอบแบบพีไอ ตามอัลกอริทึมของระบบขับเคลื่อนความเร็วในรูปที่ 4.5 แสดงขั้นตอนการทำงานของระบบแต่ละขั้นตอนดังนี้

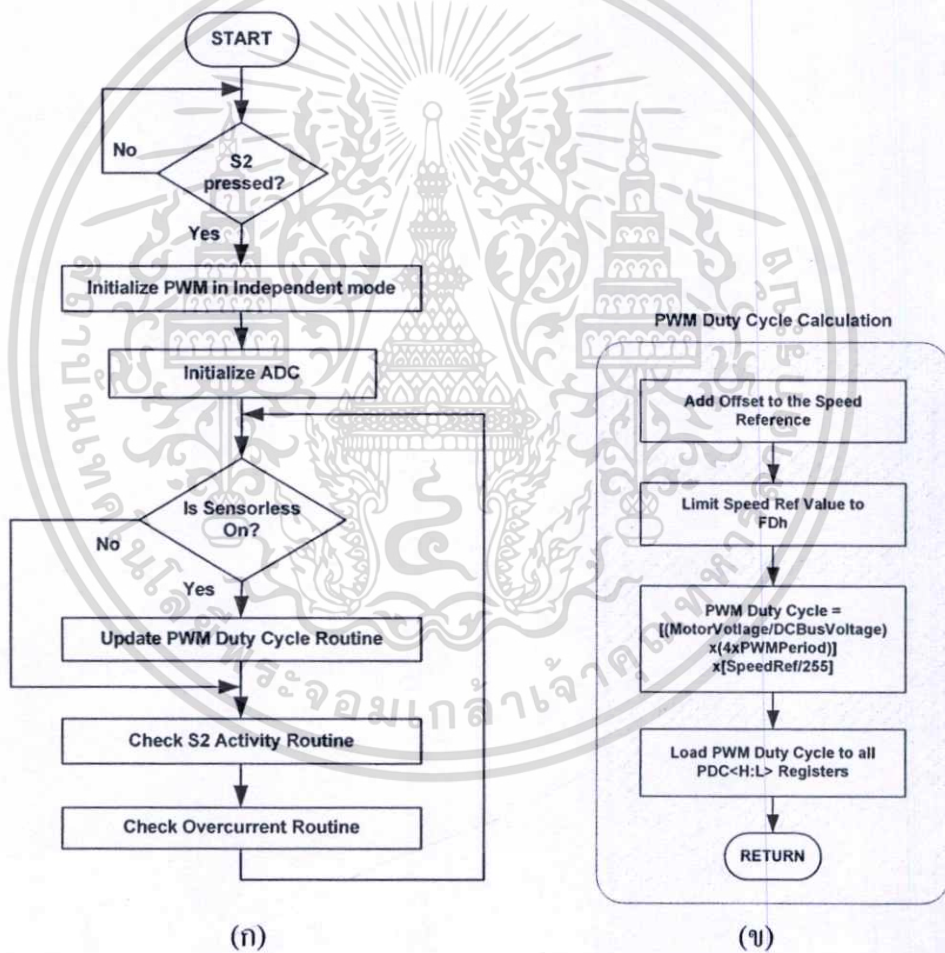


รูปที่ 4.5 อัลกอริทึมของระบบขับเคลื่อนความเร็วรอบมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3.2 การทำงานของซอฟต์แวร์ในการควบคุมมอเตอร์

แสดงการทำงานของซอฟต์แวร์ในการควบคุมมอเตอร์ในรูปที่ 4.6 (ก) แสดงการควบคุมของระบบโดยทำการตรวจสอบการเปิด-ปิด เพื่อให้ระบบทำงาน การเข้าสู่โหมดของสัญญาณการขับเคลื่อนมอเตอร์ และเข้าสู่โหมดของการรับค่าทางด้านสัญญาณตรวจจับต่างๆ เมื่อระบบทำงานจะมีการตรวจสอบการขับเคลื่อนแบบปราศจากตัวตรวจจับ เมื่อระบบมีการตรวจสอบจะทำการปรับค่าต่างๆ สำหรับระบบควบคุม หากระบบตรวจสอบยังไม่เข้ามีการควบคุมแบบปราศจากตัวตรวจจับจะเข้าสู่โหมดเริ่มต้นใหม่ ส่วนในรูปที่ 4.6 (ข) แสดงการปรับค่าของสัญญาณเมื่อระบบทำงานในโหมดของการควบคุมแบบปราศจากตัวตรวจจับ จะทำการปรับค่าตลอดเวลาสำหรับการควบคุมมอเตอร์ให้เป็นไปตามการควบคุมมอเตอร์

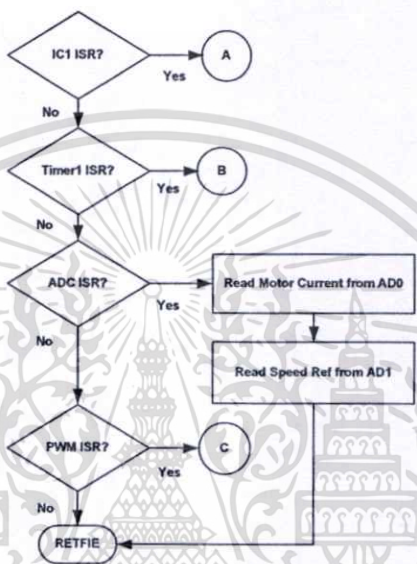


รูปที่ 4.6 (ก) แผนผังหลักการทำงานของซอฟต์แวร์ (ข) การคำนวณหา PWM

### 4.3.3 ชุดคำสั่ง ISR (คำสั่งหลัก และ คำสั่ง IC1)

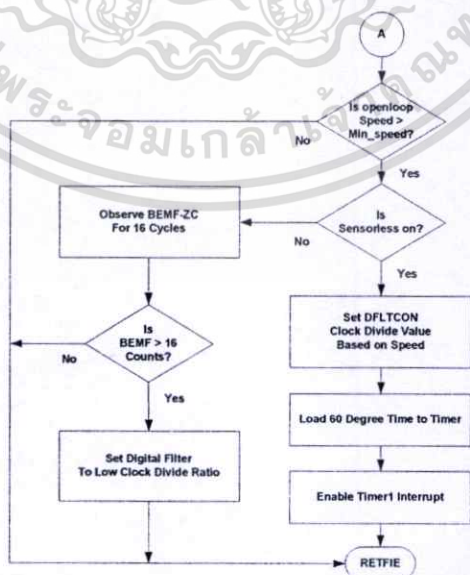
เป็นส่วนสำหรับการรับค่าและตรวจสอบการควบคุม แสดงในรูปที่ 4.7 จะมีการตรวจสอบในการควบคุมความเร็วมอเตอร์ เวลาในการคำนวณค่าต่างๆ และการตรวจจับสัญญาณสำหรับการประมวลผล ส่วนในรูปที่ 4.8 แสดงการค้นหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับ และการจับเคลื่อนเมื่อมีการตรวจจับสัญญาณที่เกิดซีโรครอสซึ่ง

Main ISR Service Routine (ISR\_HIGH)



รูปที่ 4.7 แผนผังชุดคำสั่งหลัก ISR (ISR\_HIGH)

IC1 Service Routine

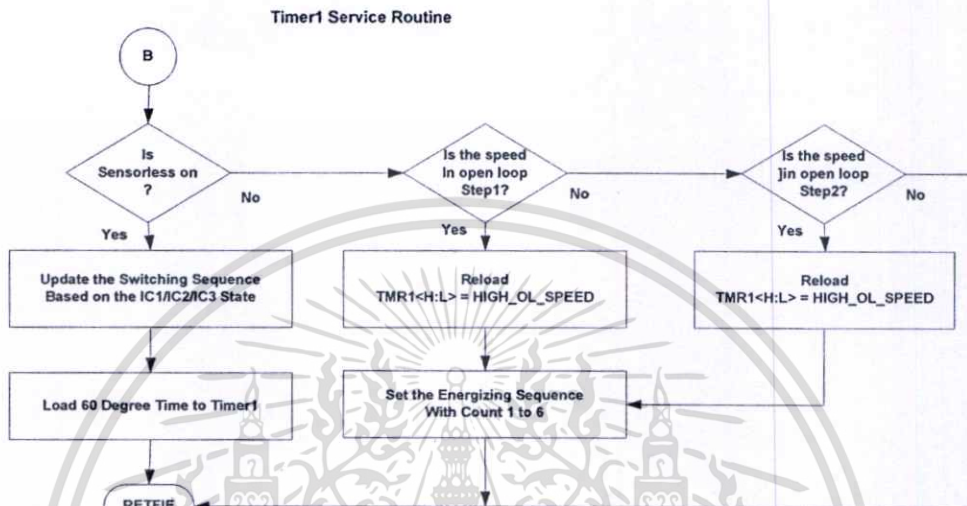


รูปที่ 4.8 แผนผังชุดคำสั่ง IC1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.4 ชุดคำสั่ง ISR (Timer1)

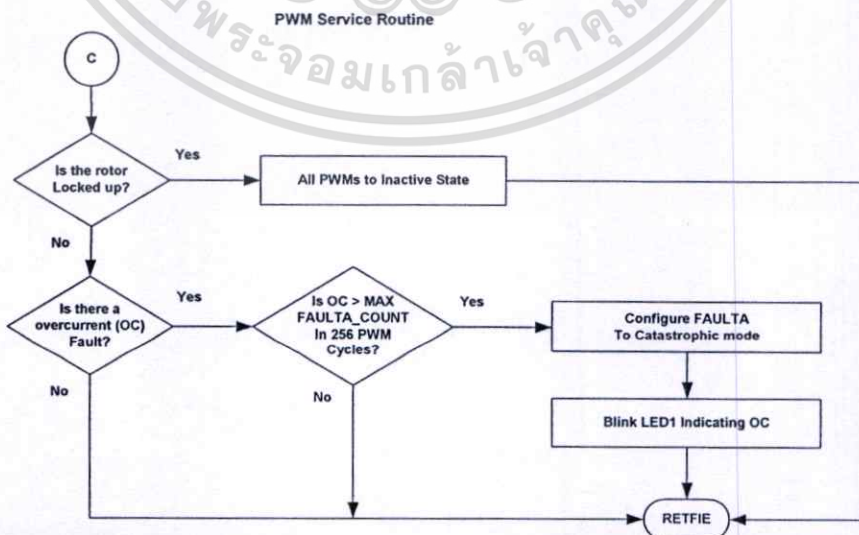
ในรูปที่ 4.9 เป็นชุดคำสั่งในส่วนสำหรับตรวจสอบการควบคุม และทำการปรับค่าเพื่อขับเคลื่อนมอเตอร์ตามตำแหน่งของ โรเตอร์ที่มีความสัมพันธ์กับสัญญาณในการขับเคลื่อนมอเตอร์ตามสัญญาณสี่เหลี่ยม 120 องศา



รูปที่ 4.9 แผนผังชุดคำสั่ง Timmer1

#### 4.3.5 ชุดคำสั่ง ISR (PWM)

ในรูปที่ 4.10 เป็นชุดคำสั่งในส่วนสำหรับตรวจสอบสัญญาณการขับเคลื่อนของระบบควบคุม มีการตรวจสอบกระแสไฟฟ้าขณะขับเคลื่อน และป้องกันระบบควบคุม



รูปที่ 4.10 แผนผังชุดคำสั่งสัญญาณ PWM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 การออกแบบวงจรชุดอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส

อินเวอร์เตอร์เป็นวงจรที่ใช้ในการแปลงไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ในการสลับเปลี่ยนทิศทางกระแสไฟฟ้าในแต่ละกิ่งของชุดอินเวอร์เตอร์ โหลดของชุดอินเวอร์เตอร์จะเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน 3 เฟส ในที่นี้จะกล่าวถึงการทำงานวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์ตามสัญญาณขับอุปกรณ์สวิตช์ และการออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์

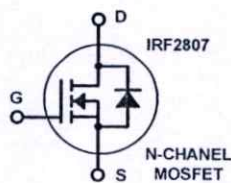
สำหรับงานวิจัยนี้เลือกอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ คือมอสเฟตกำลัง (Metal Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor, MOSFET) จุดเด่นของมอสเฟตกำลัง คือทำงานได้ดีที่ความถี่สูง ตั้งแต่ 10 kHz ถึงประมาณ 400 kHz ใช้เวลาในการเปลี่ยนสถานะค่อนข้างสั้น พิกัดการทำงานของแรงดันไฟฟ้าต่ำถึงแรงดันไฟฟ้าสูง แต่มีข้อจำกัดกระแสไฟฟ้าสูง และการพัฒนาในปัจจุบันมีแนวโน้มทำให้มอสเฟตกำลังทำงานที่ความถี่สูงมากขึ้นไปอีกซึ่งจะเป็นผลดีในการลดขนาดของอินเวอร์เตอร์ [26][28] และมอสเฟตกำลังจะไม่เกิด เซกันคาร์เรียบรคควาน์ เพราะค่าความต้านทานระหว่างขาเดรน (Drain) กับขาซอส (Source) ขณะนำกระแสไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านมีค่าน้อยลง กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดขึ้นในขณะที่มอสเฟตกำลังทำงาน จะเป็นไปได้ 2 ลักษณะ คือ

- 1) การสูญเสียขณะนำกระแสไฟฟ้า
- 2) การสูญเสียขณะสวิตช์

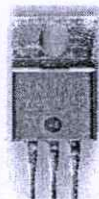
การหาพิกัดของมอสเฟตกำลัง เราสามารถหาค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสูงสุดได้จากสมการที่ (4.3)

$$I_p = \frac{2 \cdot \pi \cdot P_o}{V} \quad (4.3)$$

ในการใช้งานมอสเฟตจำเป็นต้องเผื่อพิกัดในการใช้งานไว้ที่ 70 % เพื่อป้องกันการกระชาก และการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นอย่างทันทีทันใด ดังนั้นจึงเลือกใช้งานมอสเฟตกำลังเบอร์ IRF2807 มีพิกัดเท่ากับ 82A, 100V แบบเอ็น-แชนเนล (N-Channel) ดังแสดงในรูปที่ 4.11 เป็นสัญลักษณ์ และมอสเฟตที่ใช้ในชุดอินเวอร์เตอร์



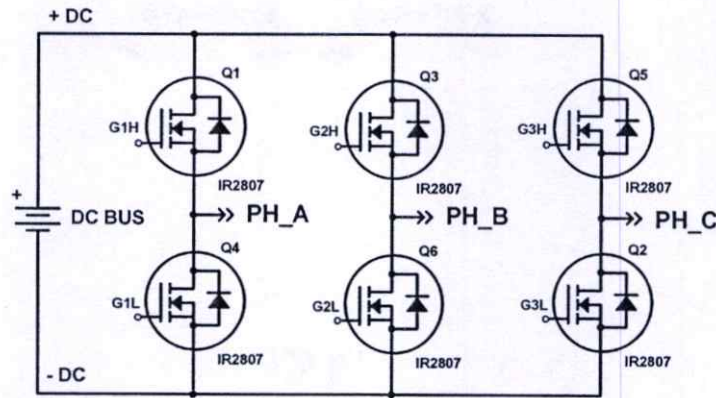
(ก)



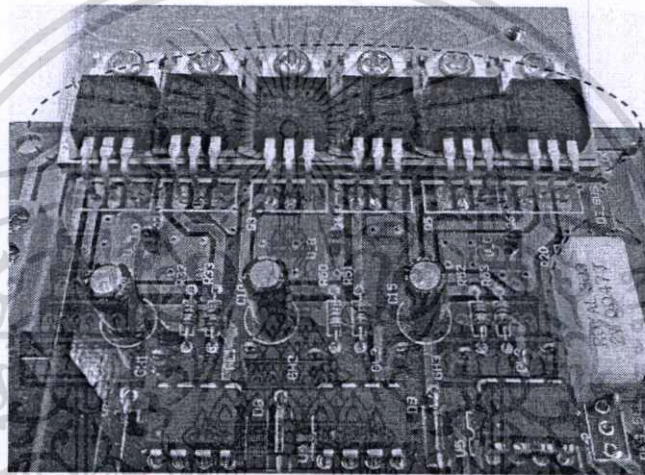
(ข)

รูปที่ 4.11 อุปกรณ์มอสเฟตชนิดเอ็น-แชนเนล (ก) สัญลักษณ์ (ข) มอสเฟต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 วงจรพื้นฐานสำหรับชุดอินเวอร์เตอร์ภาคกำลัง 3 เฟส

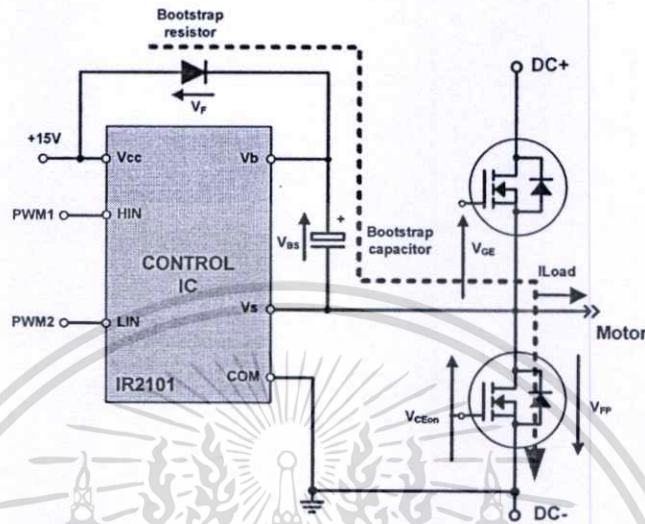


รูปที่ 4.13 วงจรอินเวอร์เตอร์ภาคกำลัง 3 เฟส ของเครื่องต้นแบบ

#### 4.5 การออกแบบวงจรบูทสเตร็ป สำหรับขับสัญญาณเกตมอสเฟส

การออกแบบวงจรบูทสเตร็ป (Bootstrap Circuit Design) สำหรับขับสัญญาณเกตของมอสเฟส เมื่อ  $V_{bs}$  คือความแตกต่างศักย์ระหว่างแรงดันที่  $V_b$  และ  $V_s$  ในตัวอุปกรณ์ไอซีขับสัญญาณเกต ดังแสดงในรูปที่ 4.14 ทำให้แรงดันไฟฟ้าทางด้านบน (High Side) ของไอซีขับสัญญาณเกต ที่มีความต้องการแรงดันไฟฟ้า สำหรับเป็นแหล่งจ่ายให้กับไอซีขับสัญญาณเกต ในระหว่างย่านการใช้งานที่ 10 - 20 โวลต์ [24]-[26] สำหรับการขับสัญญาณเกตของมอสเฟสก่อนการขับสัญญาณเกตจึงต้องการแรงดันไฟฟ้าที่ต่ำสุดสำหรับแรงดันไฟฟ้าที่  $V_{bs}$  ที่ไอซีขับสัญญาณเกตไม่สามารถจะขับสัญญาณให้มอสเฟสให้ทำงานได้ ถ้าหากแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อม  $V_{bs}$  ต่ำกว่าแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้มอสเฟสทำงานได้ ( $V_{bsuv}$ ) ซึ่งค่าของแรงดันไฟฟ้า  $V_{bsuv}$  สามารถหาได้จากข้อมูลเอกสารอุปกรณ์ของไอซี (Data sheet) เป็นการควบคุมสัญญาณขับเคลื่อนให้กับมอสเฟสทางด้านบน (High Side) ในช่วงที่มอสเฟสทางด้านล่าง (Low Side) ทำงานนั้น จะทำให้ตัวเก็บประจุบูทสเตร็ปทำหน้าที่เก็บเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประจุไว้ ทำให้แรงดันที่เท่ากับแหล่งจ่ายแรงดันให้กับไอซีนั่นเอง ซึ่งเป็นหลักการในการออกแบบ วงจรบูทสเตร็ป สำหรับขับสัญญาณเกิดของมอสเฟส โดยเลือกไอซีเบอร์ IR2101 สำหรับขับ สัญญาณเกิดมอสเฟส



รูปที่ 4.14 วงจรบูทสเตร็ปสำหรับการขับสัญญาณเกิดของมอสเฟส

#### 4.5.1 ผลของตัวประกอบในวงจร สำหรับวงจรบูทสเตร็ป

ตัวประกอบที่ส่งผลต่อวงจรบูทสเตร็ป ตามข้อกำหนดจากแรงดันไฟฟ้า  $V_{bs}$  ที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุบูทสเตร็ป ในรูปที่ 4.14 ประกอบด้วย 5 ตัวประกอบ ดังนี้

1. ประจุที่ต้องการที่ขาเกิด (Gate, G) ของมอสเฟส ( $Q_g$ )
2. กระแสไฟฟ้าสำหรับขับสัญญาณมอสเฟสทางด้านสูง ( $I_{qbs}$ )
3. กระแสไฟฟ้าภายในตัวไอซีควบคุมสัญญาณ ( $I_{lk}$ )
4. กระแสไฟฟ้าไบแอสที่ขาเกิด (Gate, G) และซอร์ส (Source, S) ของมอสเฟส ( $I_{lk\_ge}$ )
5. กระแสไฟฟ้าวไหลของ ตัวเก็บประจุบูทสเตร็ป (Bootstrap Capacitor) ( $I_{lk(cap)}$ )

#### 4.5.2 การคำนวณหาขนาดของตัวเก็บประจุ บูทสเตร็ป

การคำนวณหาขนาดของตัวเก็บประจุบูทสเตร็ป ซึ่งได้จากอัตราส่วนระหว่างประจุที่ต้องการรวมทั้งหมดช่วงเวลาการทำงาน ( $Q_{tot}$ ) สามารถหาได้จากสมการที่ (4.3) ต่อแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมที่ต่ำสุด ( $\Delta V_{bs}$ ) สามารถหาได้จากสมการที่ (4.4) สำหรับการคำนวณหาขนาดของตัวเก็บประจุบูทสเตร็ปต่ำสุด

$$Q_{tot} = Q_g + Q_{ls} + (I_{lk\_ge} + I_{qbs} + I_{lk(diode)} + I_{lk(cap)} + I_{ds}) \cdot T_{h(on)} \quad (4.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Delta V_{bs} \leq V_{cc} - V_f - V_{ge(\min)} - V_{ce(on)} \quad (4.4)$$

เมื่อกำหนดให้

- $Q_{tot}$  คือประจุที่ต้องการรวมทั้งหมดช่วงเวลาการทำงาน
- $Q_g$  คือประจุที่ต้องการที่ขาเกต (Gate, G) ของมอสเฟสช่วงเวลาการทำงาน
- $\Delta V_{bs}$  คือแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม  $V_{bs}$  ที่ต่ำสุด
- $I_{lk\_ge}$  คือกระแสไฟฟ้าวไหล ทางด้านขาเกต และขาซอร์สของมอสเฟส
- $I_{qbs}$  คือกระแสไฟฟ้าสำหรับขั้วสัญญาณมอสเฟส
- $I_{lk}$  คือกระแสไฟฟ้าวไหล
- $I_{lk(diode)}$  คือกระแสไฟฟ้าวไหลของไดโอดบูทสเตร็ป (Bootstrap Diode)
- $I_{ds}$  คือกระแสไฟฟ้าที่ทำให้ไดโอดทำงาน
- $Q_{ls}$  คือความต้องการประจุ โดยระดับเวลาประจุภายใน
- $I_{lk(cap)}$  คือกระแสไฟฟ้าวไหลของ ตัวเก็บประจุบูทสเตร็ป
- $T_{h(on)}$  คือเวลาเปิดทางด้านบน (High side)

ดังนั้นขนาดต่ำสุดของตัวเก็บประจุบูทสเตร็ป หาได้ในสมการที่ (4.5) ดังนี้

$$C_{boot(\min)} = \frac{Q_{tot}}{\Delta V_{bs}} \quad (4.5)$$

#### 4.5.3 การคำนวณหาค่าความจุของวงจรบูทสเตร็ป

ตามสมการในการเก็บประจุที่ต่ำสุดที่จำเป็นต้องใช้ในการเก็บแรงดัน ของค่าความจุบูทสเตร็ป หาได้จากสมการที่ (4.6)

$$Q_{bs} = 2Q_g + \frac{I_{qbs(\max)}}{f} + Q_{ls} + \frac{I_{Cbs(leak)}}{f} \quad (4.6)$$

เมื่อกำหนดให้

- $Q_{bs}$  คือค่าประจุของขาเกตมอสเฟสทางด้านสูง (High side)
- $f$  คือความถี่ที่ใช้งาน
- $I_{qbs(\max)}$  คือกระแสไฟฟ้าวไหลของตัวเก็บประจุบูทสเตร็ป

$Q_{ls}$  คือระดับช่วงเวลาเก็บประจุ ต่อรอบเก็บประจุ = 5nC (500V/600V IC's) หรือ 20nC (1200V IC's)

$$C \geq \frac{2 \left[ 2Q_g + \frac{I_{qbs(max)}}{f} + Q_{ls} + \frac{I_{Cbs(leak)}}{f} \right]}{V_{cc} - V_f - V_{ls} - V_{Min}} \quad (4.7)$$

เมื่อกำหนดให้

$V_f$  คือแรงดันไบแอสตกคร่อม ไดโอดนุทสเตรีย

$V_{ls}$  คือแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม มอสเฟสทางด้านล่าง (Low Side)

$V_{Min}$  คือแรงดันไฟฟ้าต่ำสุด ระหว่างแรงดันไฟฟ้า  $V_b$  และแรงดันไฟฟ้า  $V_s$

เลือกแรงดันสำหรับคาปาซิเตอร์นุทสเตรีย 25 โวลท์ ค่าประจุที่ใช้  $3.3 \mu F$  แบบอิเล็กทรอนิกส์

#### 4.5.4 การเลือกไดโอดสำหรับวงจรนุทสเตรีย

ไดโอดที่ใช้สำหรับวงจรนุทสเตรีย (Bootstrap Diode,  $D_{bs}$ ) จำเป็นจะต้องป้องกันกำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าของมอสเฟสทางด้านบน (High side) ของมอสเฟสขณะทำงาน จึงจำเป็นต้องใช้ไดโอด ที่มีการกลับคืนสภาพเดิมที่รวดเร็ว (Fast recovery device) สำหรับไดโอดนุทสเตรีย ค่าต่ำสุดที่ไดโอดสามารถทำงานได้ ก่อนการเก็บประจุ ของตัวเก็บประจุนุทสเตรีย ที่แรงดันไฟฟ้า ( $V_{cc}$ ) สำหรับแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงอุปกรณ์ไอซี และมีความสัมพันธ์กับกระแสไฟฟ้ามาก ในขณะที่ระยะเวลาในการเก็บประจุ ที่ต้องใช้ระยะเวลาเก็บประจุนานๆ ดังนั้นพิกัดกระแสไฟฟ้าของไดโอดนุทสเตรีย สามารถหาได้ในสมการที่ (4.8) แสดงความสัมพันธ์การเก็บประจุนุทสเตรีย กับความถี่ในการสวิตช์ ดังนี้

$$I_f = Q_{bs} \times f \quad (4.8)$$

โดยกำหนดที่คุณสมบัติของไดโอด ดังนี้

$$V_{RRM} = \text{แรงดันไฟฟ้าตามพิกัด}$$

$$\text{Max. } t_{rr} = 100 \text{ ns}$$

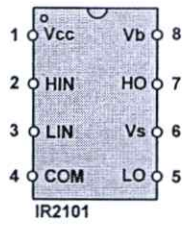
แรงดันไฟฟ้าทั้งหมดมากกว่าแรงดันไฟฟ้าด้านออก 200 V

ทนกระแสไฟฟ้าได้สองเท่าของกระแสไฟฟ้าด้านออก 1 Amp ดังนั้นจะได้ค่า  $I_{D_{rms}} = 0.29 \text{ A}$

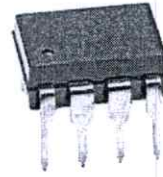
เลือกใช้ไดโอดเบอร์ MUR 120 พิกัด 200V/1A (ULTRAFAST RECTIFIERS)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5.5 รูปแบบของวงจรมอเตอร์แปรป

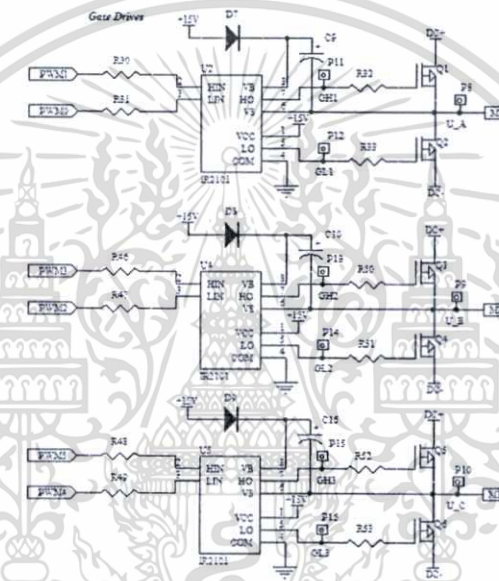


(ก)

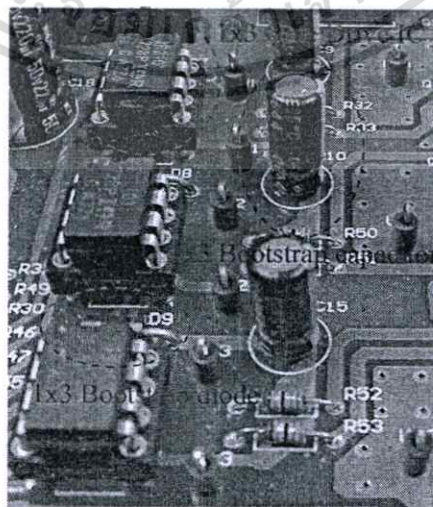


(ข)

รูปที่ 4.15 อุปกรณ์ไอซีขับสัญญาณเกต (ก) สัญลักษณ์ (ข) ไอซีขับสัญญาณเกต



รูปที่ 4.16 วงจรมอเตอร์แปรปสำหรับขับสัญญาณเกตมอเตอร์เฟส โดยใช้อิซี IR2101

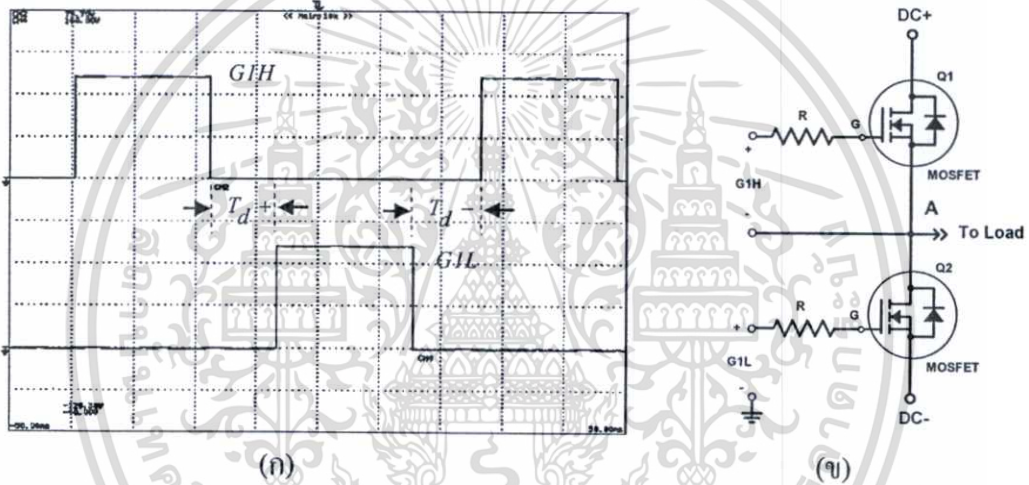


รูปที่ 4.17 วงจรมอเตอร์แปรป สำหรับขับสัญญาณเกตของเครื่องต้นแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่เสียค่าใช้จ่ายด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5.6 สัญญาณประวิงเวลา (Dead Time)

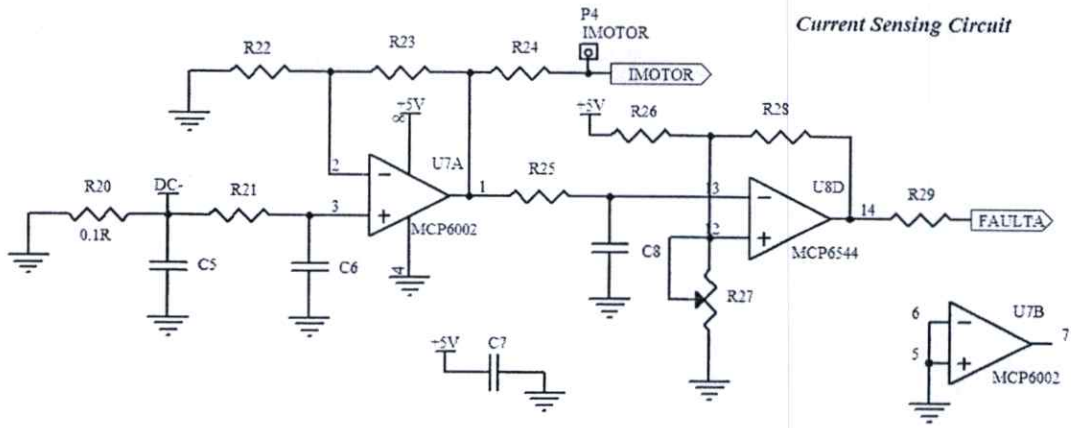
ในการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบเทคนิคสัญญาณสี่เหลี่ยม 120 องศา ( $120^\circ$  Rectangular wave technique) ในการออกแบบสัญญาณประวิงเวลา ( $T_d$  : Dead time) นั้นไม่จำเป็นต้องออกแบบวงจรประวิงเวลาสำหรับขับสัญญาณเกตมอสเฟส เนื่องจากสัญญาณที่ใช้ขับเกตของมอสเฟส ในแต่ละกึ่งของชุดกำลังอินเวอร์เตอร์นั้นจะมีสัญญาณขับเกตระหว่างมอสเฟสด้านบน และสัญญาณขับเกตมอสเฟสด้านล่างนั้นมีระยะห่างกันอยู่ 60 องศา ตามตารางสัญญาณสี่เหลี่ยม 120 องศา ดังนั้น จึงตัดปัญหาเรื่องสัญญาณประวิงเวลา ดังแสดงในรูปที่ 4.18 (ก) สัญญาณประวิงเวลาขาขึ้น ( $T_d +$ ) และสัญญาณประวิงเวลาลง ( $T_d -$ ) ส่วนในรูปที่ 4.18 (ข) สำหรับการขับสัญญาณเกตมอสเฟสทางด้านบน และด้านล่าง



รูปที่ 4.18 (ก) สัญญาณประวิงเวลา และ (ข) ตำแหน่งเกตของมอสเฟสด้านบน-ด้านล่าง

#### 4.6 การออกแบบวงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

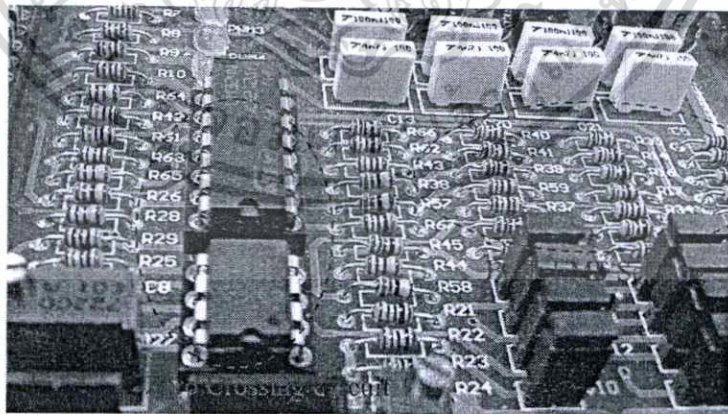
วงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้าเพื่อป้องกันกระแสไฟฟ้าเกิน โดยใช้ความต้านทานชั้นท์ (R20) แสดงในรูปที่ 4.19 เป็นตัวตรวจจับกระแสไฟฟ้าเพื่อป้องกันกระแสไฟฟ้าเกินที่ติดตั้งไว้ และเป็นวงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ในรูปที่ 4.20 โดยอาศัยแรงดันตกคร่อมความต้านทาน (R12) เป็นตัวตรวจจับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง [18]-[19]



รูปที่ 4.19 วงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้า และป้องกันกระแสไฟฟ้าเกิน



รูปที่ 4.20 วงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

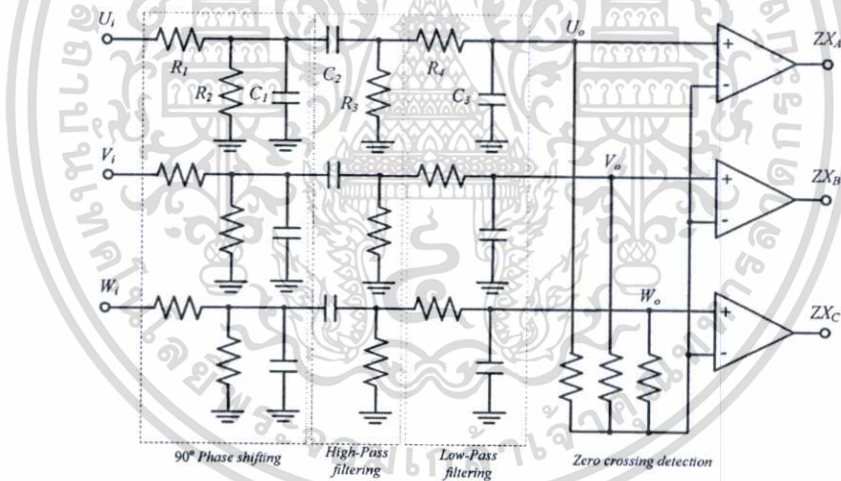


รูปที่ 4.21 วงจรตรวจจับแรงดัน และกระแสไฟฟ้าของเครื่องต้นแบบ

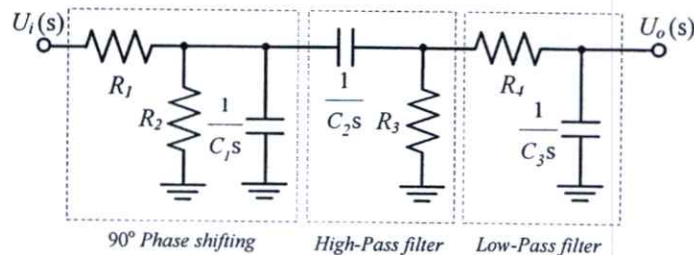
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.7 การออกแบบวงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้าเฟส และวงจรซีโรครอสซิง

วงจรสำหรับตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับในแต่ละเฟส ซึ่งต่อโดยตรงกับจุดต่อแรงดันไฟฟ้าของขดลวดแต่ละเฟส สามารถตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับที่เกิดขึ้นแต่ละเฟสได้ซึ่งเกิดจากการสังเกตการสับเปลี่ยนของสวิทช์ที่มอสเฟส ขณะไม่ทำงานในแต่ละกิ่งของอินเวอร์เตอร์ จะได้สัญญาณแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ แสดงในรูปที่ 4.22 ในแต่ละเฟส สำหรับวงจรตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ ส่วนของการออกแบบวงจรให้ใกล้เคียงเฟสเลื่อน 90 องศา ระหว่างย่านความถี่รอบต่ำ ( $\omega_{rLow}$ ) ถึงย่านความถี่รอบสูง ( $\omega_{rHigh}$ ) [21]-[23] ซึ่งสามารถแบ่งส่วนของการออกแบบวงจรตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ ได้แก่ ส่วนของวงจรเลื่อนเฟส 90 องศา ( $90^\circ$  Phase shifting) ส่วนของวงจรกรองผ่านสูง (High-Pass filter) ส่วนของวงจรกรองผ่านต่ำ (Low-Pass filter) และวงจรซีโรครอสซิง (Zero Crossing) แสดงในรูปที่ 4.23 โดยการพิจารณาจากฟังก์ชันถ่ายโอน ในแต่ละส่วนของการออกแบบจะแสดงความสัมพันธ์ของฟังก์ชันถ่ายโอน ( $F(s)$ ) ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับโดยตรง ( $U_i(s)$ ) และสัญญาณที่ได้ใหม่ ( $U_o(s)$ ) [16] เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบในวงจรซีโรครอสซิง ในรูปแบบฟังก์ชันถ่ายโอนในสมการที่ (4.9)



รูปที่ 4.22 วงจรสำหรับตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ ในแต่ละเฟส



รูปที่ 4.23 วงจรฟังก์ชันถ่ายโอนสำหรับตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากวงจรฟังก์ชันถ่ายโอน สามารถเขียนในรูปแบบฟังก์ชันถ่ายโอนได้ ดังนี้

$$F(s) = \frac{U_o(s)}{U_i(s)} = \frac{s}{d_3s^3 + d_2s^2 + d_1s + d_0} \quad (4.9)$$

เมื่อ

$$d_3 = R_1R_4C_1C_3$$

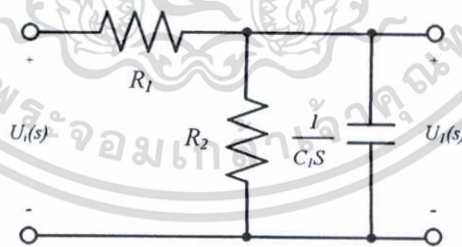
$$d_2 = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right)R_4C_3 + (R_1C_1 + R_1C_2)\left(1 + \frac{R_4C_3}{R_2C_3} + \frac{C_3}{C_2}\right) - R_1C_2$$

$$d_1 = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right)\left(1 + \frac{R_4C_3}{R_2C_3} + \frac{C_3}{C_2}\right) + \frac{R_1C_1 + R_1C_2}{R_2C_3}$$

$$d_0 = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right)\frac{1}{R_3C_2}$$

#### 4.7.1 การออกแบบวงจรเลื่อนเฟส 90 องศา (90° Phase Shifting Design)

การออกแบบวงจรเลื่อนเฟสให้ใกล้เคียง 90 องศา ที่เกิดขึ้นจะต้องน้อยกว่า 10 เท่าของความถี่พื้นฐาน ( $f$ ) เมื่อ  $f = P\omega_r / 120$  ซึ่งขึ้นอยู่กับจำนวนขั้วแม่เหล็ก ( $P$ ) และความเร็วรอบของมอเตอร์ ( $\omega_r$ ) จะกรองความถี่ต่ำผ่าน ด้วยความต้านทาน ( $R_1, R_2$ ) และคาปาซิเตอร์ ( $C_1$ ) เพื่อรักษาเฟสของสัญญาณให้ใกล้เคียงเฟส 90 องศา ดังแสดงในรูปที่ 4.24 เป็นวงจรฟังก์ชันถ่ายโอน สำหรับเลื่อนเฟส 90 องศา และสามารถหาความถี่ที่ตัดออก ( $f_{cut1}$ ) ในสมการที่ (4.12)



รูปที่ 4.24 วงจรฟังก์ชันถ่ายโอน สำหรับเลื่อนเฟส 90 องศา

$$F_1(s) = \frac{U_1(s)}{U_i(s)} = \frac{1}{R_1C_1s + \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right)} \quad (4.10)$$

ให้  $s = j\omega$  จะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

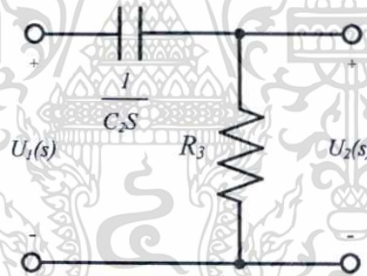
$$F_1(j\omega) = \frac{1/R_1C_1}{j\omega + \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1R_2C_1}\right)} \quad (4.11)$$

$$f_{cut1} = \frac{R_1 + R_2}{2\pi R_1R_2C_1} < \frac{1}{10} \left(\frac{P\omega_{rLow}}{120}\right) = \frac{P\omega_{rLow}}{1200} \quad (4.12)$$

ความเร็วรอบต่ำ ( $\omega_{rLow}$ ) = 500 รอบต่อนาที

#### 4.7.2 การออกแบบวงจรกรองผ่านสูง (High – Pass Filter Design)

ส่วนการออกแบบวงจรกรองความถี่สูงผ่าน ด้วยความต้านทาน ( $R_3$ ) และคาปาซิเตอร์ ( $C_2$ ) ปรากฏในสัญญาณในการกรอง ดังแสดงในรูปที่ 4.25 เป็นวงจรฟังก์ชันถ่านไอออน สำหรับกรองผ่านสูง เพราะฉะนั้น ส่วนในการกรองความถี่สูงผ่าน ควรจะเลือกความถี่ในการตัดออก ( $f_{cut2}$ ) จะต้องน้อยกว่า 10 เท่าของความถี่พื้นฐาน ( $f = P\omega_{rLow}/120$ ) ในการออกแบบย่านความเร็วรอบต่ำ ( $\omega_{rLow}$ ) สามารถหาได้ในสมการที่ (4.15)



รูปที่ 4.25 วงจรฟังก์ชันถ่านไอออน สำหรับกรองแบบผ่านสูง

$$F_2(s) = \frac{U_2(s)}{U_1(s)} = \frac{S}{S + \frac{1}{R_3C_2}} \quad (4.13)$$

ให้  $s = j\omega$  จะได้ว่า

$$F_2(j\omega) = \frac{j\omega}{j\omega + \left(\frac{1}{R_3C_2}\right)} \quad (4.14)$$

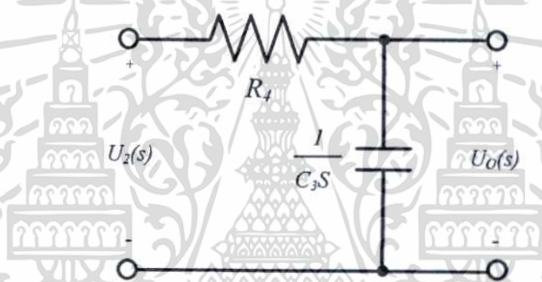
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f_{cut2} = \frac{1}{2\pi R_3 C_2} < \frac{1}{10} \left( \frac{P\omega_{rLow}}{120} \right) = \frac{P\omega_{rLow}}{1200} \quad (4.15)$$

ความเร็วรอบต่ำ ( $\omega_{rLow}$ ) = 500 รอบต่อนาที

#### 4.7.3 การออกแบบวงจรกรองผ่านต่ำ (Low – Pass Filter Design)

ขณะที่ความถี่ที่ใช้ในการสวิตช์ ( $f_{PWM}$ ) ความถี่สูง เมื่อย่านความเร็วรอบสูง จะเป็นฟังก์ชันสำหรับส่วนของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ด้วยความต้านทาน ( $R_4$ ) และคาปาซิเตอร์ ( $C_3$ ) ดังแสดงในรูปที่ 4.26 เป็นวงจรฟังก์ชันถ่ายโอน สำหรับกรองผ่านต่ำ ความถี่ในการตัดออก ( $f_{cut3}$ ) จะต้องมีระยะความถี่น้อยกว่าความถี่ที่ใช้ในการสวิตช์ ( $f_{PWM}$ ) และมากกว่าความถี่พื้นฐาน ( $f = P\omega_{rHigh} / 120$ ) ในการออกแบบย่านความเร็วรอบสูง สามารถหาได้ในสมการที่ (4.18)



รูปที่ 4.26 วงจรฟังก์ชันถ่ายโอน สำหรับกรองผ่านต่ำ

$$F_3(s) = \frac{U_O(s)}{U_2(s)} = \frac{1}{R_4 C_3 s + 1} \quad (4.16)$$

ให้  $s = j\omega$  จะได้ว่า

$$F_3(j\omega) = \frac{1/R_4 C_3}{j\omega + \left( \frac{1}{R_4 C_3} \right)} \quad (4.17)$$

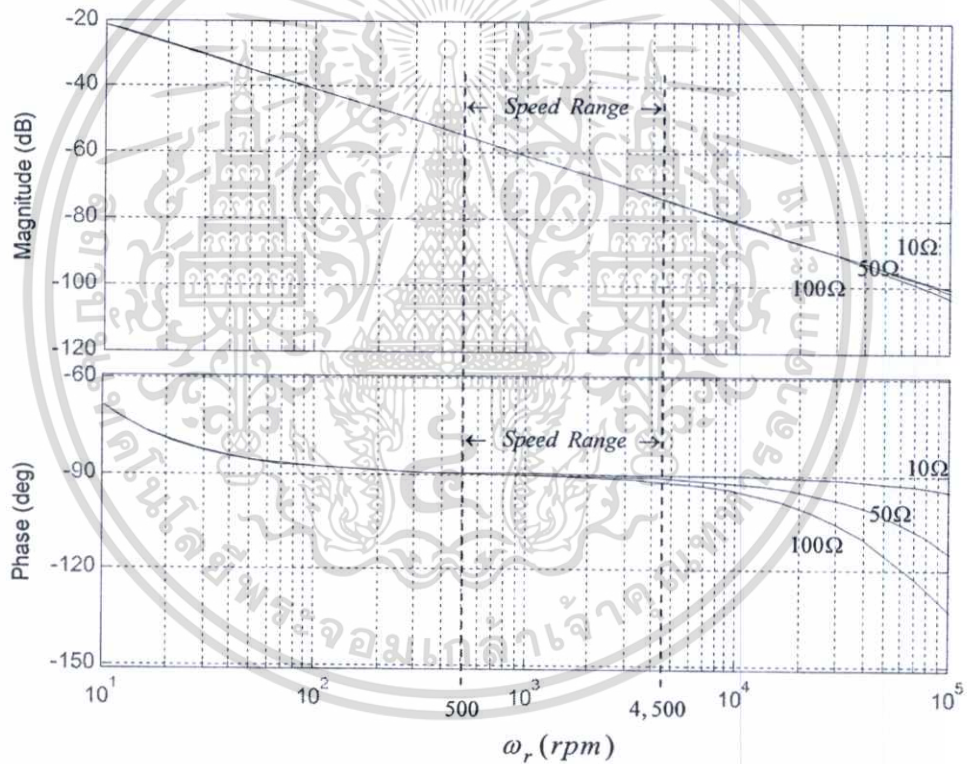
$$\frac{P\omega_{rHigh}}{120} < f_{cut3} = \frac{1}{2\pi R_4 C_3} \ll f_{PWM} \quad (4.18)$$

ความเร็วรอบสูง ( $\omega_{rHigh}$ ) = 4,500 รอบต่อนาที

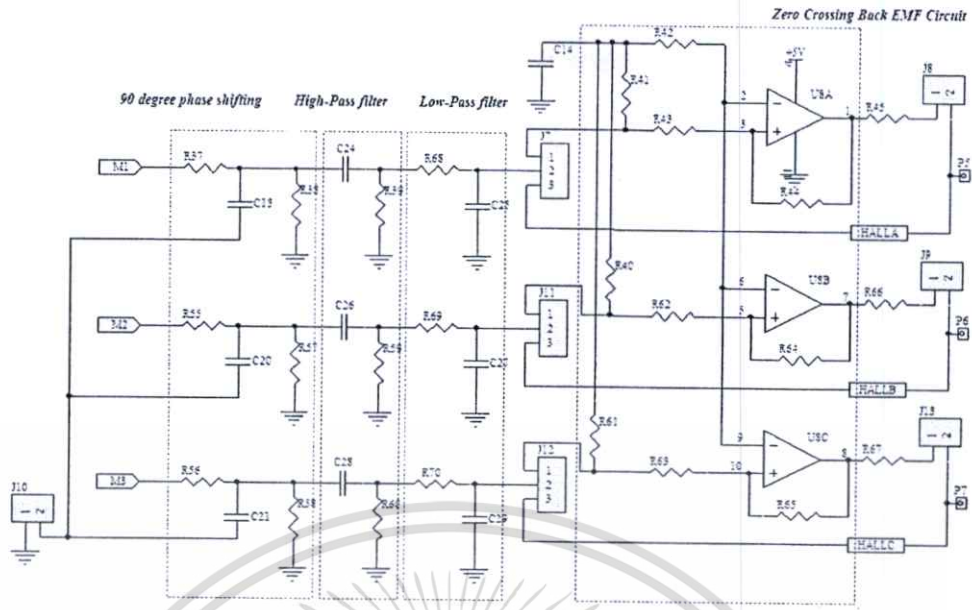
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.7.4 ผลจากการออกแบบวงจร

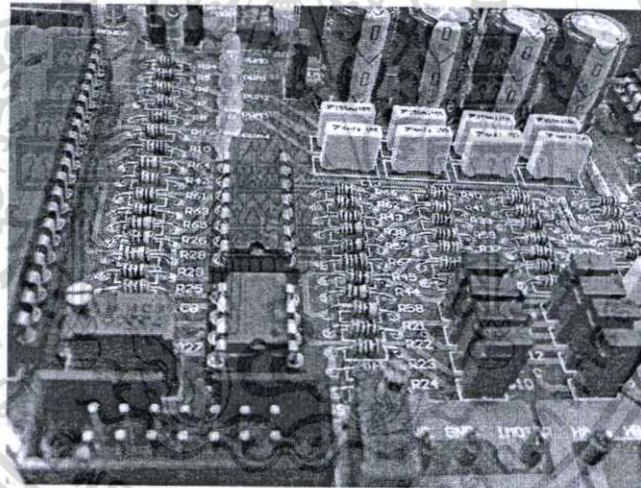
ความถี่ที่ใช้ในการสวิตช์ ( $f_{PWM}$ ) 20kHz และจำนวนขั้วแม่เหล็ก ( $P$ ) 4 ขั้ว ระหว่างย่านความเร็วควบคุมความเร็วรอบต่ำ ( $\omega_{rLow}$ ) = 500 รอบต่อนาที ถึงความเร็วรอบสูง ( $\omega_{rHigh}$ ) = 4,500 รอบต่อนาที จากสมการที่ (4.8)-(4.18) ตามลำดับ จะได้ค่าตัวแปรสำหรับวงจร ดังนี้  $R_1 = 1M\Omega, R_2 = 1M\Omega, R_3 = 1M\Omega, R_4 = 10\Omega, C_1 = C_2 = 1\mu F$  และ  $C_3 = 100nF$  ผลที่ได้ทำให้แน่ใจว่าเฟส ที่ถูกเลื่อนเฟสใกล้ 90 องศา ระหว่างย่านความเร็วรอบต่ำ ถึงย่านความเร็วรอบสูง แสดงในผลตอบสนองขนาด (Magnitude Response) และผลตอบสนองเฟส (Phase Response) ขณะที่ความแตกต่างระหว่างค่าความต้านทาน ( $R_4$ ) ในรูปแบบผลตอบสนองเชิงความถี่ (Frequency Domain) ในรูปที่ 4.27 ในย่านความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาที ถึง 4,500 รอบต่อนาที สำหรับวงจรตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับโดยตรง



รูปที่ 4.27 ผลตอบสนองขนาด และผลตอบสนองเฟสของฟังกชันถ่ายโอน



รูปที่ 4.28 วงจรสำหรับตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับโดยตรง

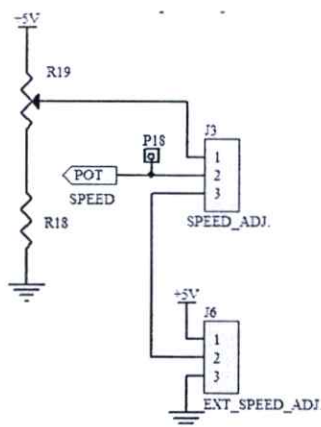


รูปที่ 4.29 วงจรสำหรับตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับโดยตรงของเครื่องต้นแบบ

#### 4.8 การออกแบบวงจรสำหรับปรับความเร็วรอบมอเตอร์

วงจรปรับความเร็วรอบมอเตอร์ในรูปที่ 4.30 อาศัยแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมความต้านทาน (R19) เป็นแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงสำหรับปรับความเร็วรอบมอเตอร์ กำหนดให้แรงดันที่ +5V เป็นแรงดันที่ความเร็วรอบมอเตอร์ที่พิกัดความเร็วรอบ 4,500 รอบต่อนาที และสามารถต่อความต้านทานภายนอก เพื่อปรับความเร็วรอบมอเตอร์ได้อีกทางเลือกหนึ่งสำหรับต่อกับกล่องควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์

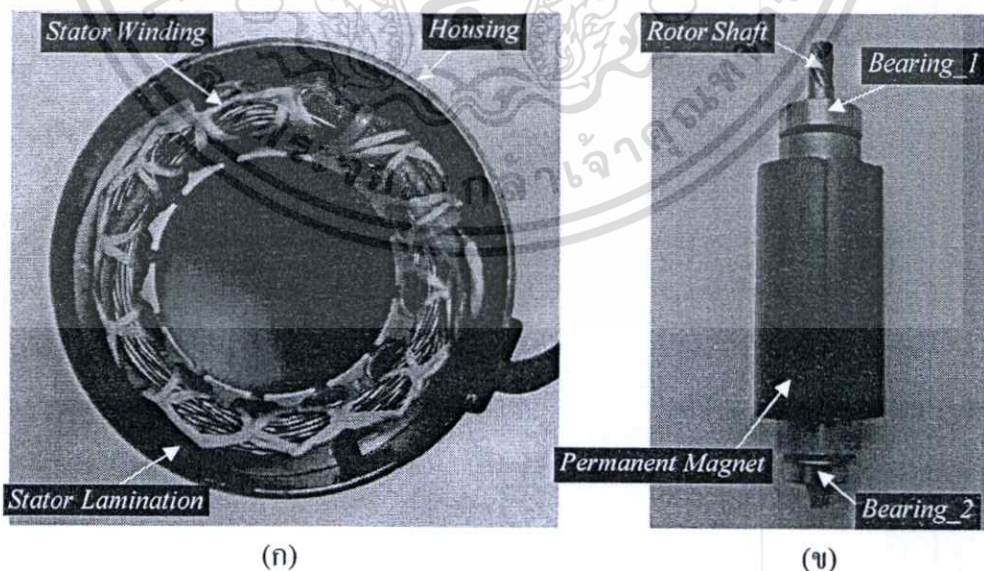
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.30 วงจรปรับความเร็วรอบมอเตอร์

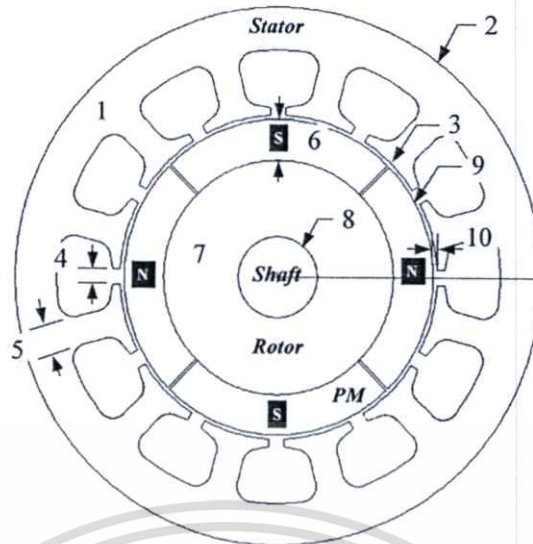
#### 4.9 โครงสร้างมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน

โครงสร้างของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน สำหรับใช้ในการทดลอง งานวิจัยนี้มีพิกัดกำลัง 100 วัตต์ 30 โวลต์ 4,500 รอบต่อนาที ซึ่งสามารถจำแนกออกเป็นสองส่วนได้คือ ส่วนที่อยู่กับที่ ในรูปที่ 4.31 (ก) ได้แก่ แผ่นสเตเตอร์ ฝาครอบหัว-ท้าย โครงของมอเตอร์ และขดลวดสเตเตอร์ในแต่ละเฟส ส่วนเคลื่อนที่ในรูปที่ 4.31 (ข) ได้แก่ โรเตอร์ แม่เหล็กถาวร และเพลารอเตอร์ ส่วนทางด้านโรเตอร์จะประกอบด้วยแม่เหล็กถาวรชนิดติดพื้นผิวโรเตอร์ พิกัดขนาดของมอเตอร์ ตามรูปที่ 4.32 ที่ชี้บ่งบอกขนาดของมอเตอร์ ตามข้อมูลพิกัดในตารางที่ 4.3 เป็นพิกัดขนาดต่างๆ ของมอเตอร์สำหรับการทดสอบ



รูปที่ 4.31 โครงสร้างของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน (ก) ส่วนทางด้านสเตเตอร์ (ข) ส่วนทางด้านโรเตอร์ชนิดแม่เหล็กถาวรติดพื้นผิวโรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.32 พิกัดต่างๆ ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน

ตารางที่ 4.3 ขนาดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน

รายการ	ขนาด	หน่วย
<b>ส่วนทางด้านสเตเตอร์</b>		
1. ความยาวของสเตเตอร์ (Stator stack length)	45	มม.
2. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอกสเตเตอร์ (Outside diameter stator)	66.5	มม.
3. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในสเตเตอร์ (Inside diameter stator)	40	มม.
4. ขนาดสลิตเปิด (Slots opening)	2	มม.
5. ขนาดความกว้างของฟันสลิต (Stator tooth width)	35	มม.
<b>ส่วนทางด้านโรเตอร์</b>		
6. ความหนาของแม่เหล็กถาวร (PM thickness)	5	มม.
7. ความยาวของโรเตอร์ (Rotor stack length)	45	มม.
8. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพลารอเตอร์ (Outside diameter shaft)	10	มม.
9. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอกของโรเตอร์ (Inside diameter rotor)	39	มม.
10. ระยะช่องว่างอากาศ (Air-gap length)	0.5	มม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.10 บทสรุป

การสร้างและออกแบบวงจรที่นำเสนอพื้จะกล่าวถึง ภาคการออกแบบวงจรแรง กระแสไฟฟ้า โดยการออกแบบจากกำลังไฟฟ้าที่ใช้งาน และประเภทงานที่ใช้งาน ที่พิกัดกำลังภาระ มอเตอร์ เพื่อเลือกอุปกรณ์ที่เหมาะสมในการออกแบบชุดวงจรแรงกระแสไฟฟ้าแบบเต็มคลื่น ภาค วงจรการควบคุมโดยใช้ตัวประมวลผลทางดิจิทัล ใช้ตัวประมวลผลทางดิจิทัล (DSC) ตระกูล dsPIC ขนาด 16 บิต เหมาะสำหรั้นำมาใช้ในการควบคุมมอเตอร์ และราคาประหยัดเมื่อเทียบกับ ประสิทธิภาพของตัวประมวลผลโดยเลือกเบอร์ที่ใช้งาน dsPIC30F4011 ภาคการออกแบบชุด อินเวอร์เตอร์ สำหรับผกผันแรงดันไฟฟ้าในการใช้งานวิจัยนี้จะออกแบบเป็นชุดอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ใช้มอสเฟส เป็นอุปกรณ์ในการทำน้ำที่สวิทช์ เบอร์ IRF2807 พิกัด 75V/82A (N-Chanel) ภาคการ ออกแบบวงจรทุตสแตรีป เป็นการออกแบบเพื่อหาอุปกรณ์สำหรับขับสัญญาณเกิดของมอสเฟส เลือกใช้ไอซี IR2101 ขับสัญญาณเกิดทางด้านบน และด้านล่าง ภาคการตรวจจับแรงดันไฟฟ้า กระแสตรง และแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อป้องกัน ภาควงจรตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับ และวงจรซีโรครอสซึ่งในการตรวจจับแรงเคลื่อน ไฟฟ้าด้านกลับที่เกิดขึ้นจากช่วงเวลาทีสวิทช์ มอสเฟสเปิด ในการออกแบบโดยอาศัยฟังก์ชันถ่าน โอนของวงจรตรวจจับในย่านความเร็วรอบ 500 ถึง 4,500 รอบต่อนาที ซึ่งจะประกอบไปด้วย วงจรเลื่อนเฟส 90 องศา วงจรกรองความถี่ผ่านสูง และวงจรกรองความถี่ผ่านต่ำ สำหรับสัญญาณแรงดันที่ได้ใหม่ เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับวงจรซี โรครอสซึ่ง ในการคำนวณหาตำแหน่ง โรเตอร์ และความเร็วรอบมอเตอร์ต่อไป

## บทที่ 5

### การทดสอบและผลการทดสอบ

#### 5.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดสอบ และผลการทดสอบของการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน แบบไม่สนใจตำแหน่งโรเตอร์ แบบใช้ตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ และแบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ ข้อมูลและตัวแปรของมอเตอร์ แสดงในตารางที่ 5.1 สำหรับใช้ในการทดสอบควบคุมแบบใช้ตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ ข้อจำกัดสำหรับชุดทดสอบ สำหรับการทดสอบในหัวข้อทดสอบที่ 5.3-5.5 จะแสดงในตารางที่ 5.2 และการทดสอบแบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ ข้อจำกัดสำหรับชุดทดสอบ สำหรับการทดสอบในหัวข้อทดสอบที่ 5.6 แสดงในตารางที่ 5.3 ในการทดสอบแบบต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. การทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์โดยไม่สนใจตำแหน่งโรเตอร์
2. การทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์โดยใช้ตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์
3. การทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์โดยใช้สัญญาณ PWM
4. การทดสอบควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์โดยใช้ตัวตรวจจับตำแหน่ง
5. การทดสอบควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์โดยปราศจากตัวตรวจจับ
6. การทดสอบทางด้านพลวัตของมอเตอร์
7. เปรียบเทียบการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์

ตารางที่ 5.1 ข้อมูลและตัวแปรของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน

รายละเอียด	สัญลักษณ์	ขนาด	หน่วย
พิกัดกำลังมอเตอร์	$P_{out}$	100	วัตต์
แรงดันไฟฟ้าใช้งาน	$U$	30	โวลต์
กระแสไฟฟ้าใช้งาน	$I$	1.2	แอมป์
จำนวนขั้วแม่เหล็ก	$P$	4	ขั้ว
แรงบิดมากที่สุด	$T_{max}$	0.05 (7.08)	นิวตัน-เมตร (ออนซ์-นิ้ว)
ความต้านทานสเตเตอร์ต่อเฟส	$R_s$	1	โอห์ม
ความเหนี่ยวนำสเตเตอร์ต่อเฟส	$L_s$	1	มิลลิเฮนรี่
แรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับคงที่	$K_E$	0.13	โวลต์/เรเดียน/วินาที
ความเฉื่อยโรเตอร์	$J$	0.12	กิโลกรัม-ตารางเซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.2 ข้อกำหนดสำหรับชุดทดสอบมอเตอร์ ในการทดสอบหัวข้อที่ 5.2 - 5.5

รายละเอียด	สัญลักษณ์	ขนาด	หน่วย
ข้อกำหนดสำหรับบอร์ดทดสอบ			
แรงดันไฟฟ้ามากที่สุด	$U_{dcmax}$	50	โวลต์
แรงดันไฟฟ้าบอร์ด	$U_{cc}$	15	โวลต์
แรงดันไฟฟ้าตัวตรวจจับ	$U_h$	5	โวลต์
กระแสไฟฟ้ามืดที่สุด	$I_{max}$	5	แอมป์
ความเร็วรอบพิกัด	$\omega_r$	4,500	รอบต่อนาที
การขับเคลื่อนสำหรับบอร์ดทดสอบ			
ชนิดตัวตรวจจับ	ปรากฏการณ์ฮอลล์		
เทคนิคการขับเคลื่อนสัญญาณ	แบบสี่เหลี่ยม 120 องศา		
การควบคุมความเร็ว	พีไอ		
ระบบการป้องกัน	ป้องกันกระแสไฟฟ้าเกิน ป้องกันแรงดันไฟฟ้าเกิน		

สำหรับเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ และบันทึกค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ จะประกอบด้วย ดังนี้

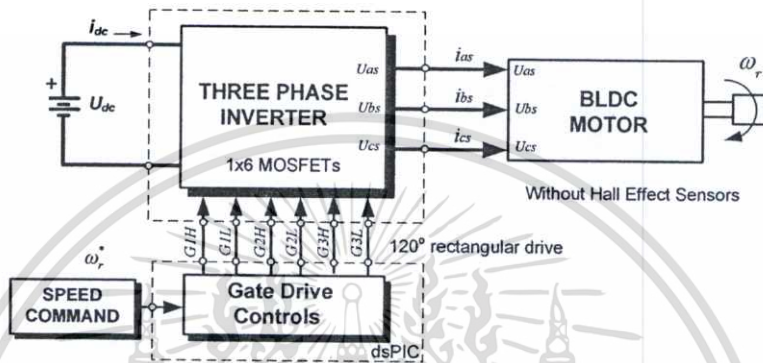
1. Digital Oscilloscope ยี่ห้อ Yokogawa รุ่น DL750
2. Digital Power Meter ยี่ห้อ Yokogawa รุ่น WT230
3. Digital Multi Meter ยี่ห้อ Fluke รุ่น 189 DMM (True RMS Meter)
4. Dynamometer ยี่ห้อ Magtrol รุ่น HD-700-6 (Hysteresis Dynamometer)
5. Dynamometer Controller ยี่ห้อ Magtrol รุ่น DSP6001
6. Three-Phase Power Analyzer ยี่ห้อ Magtrol รุ่น 6530
7. M-Test 4.0 (Motor Testing Software) สำหรับ Dynamometer test
8. PC-BDC V8.0 SPEED Software and PC-FEA V5.5 Software
9. Digital Multi Meter ยี่ห้อ Yokogawa รุ่น 7552 (5-1/2 digits)

ส่วนการทดสอบทางด้านพลวัตของมอเตอร์ทดสอบ ณ ห้องปฏิบัติการทดสอบไดนาโมมิเตอร์ บริษัททูลธรคอร์ปี้ จำกัด (มหาชน) นิคมอุตสาหกรรมลาดกระบัง แขวงลำปลาทิว เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 การทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์ โดยไม่สนใจตำแหน่งโรเตอร์

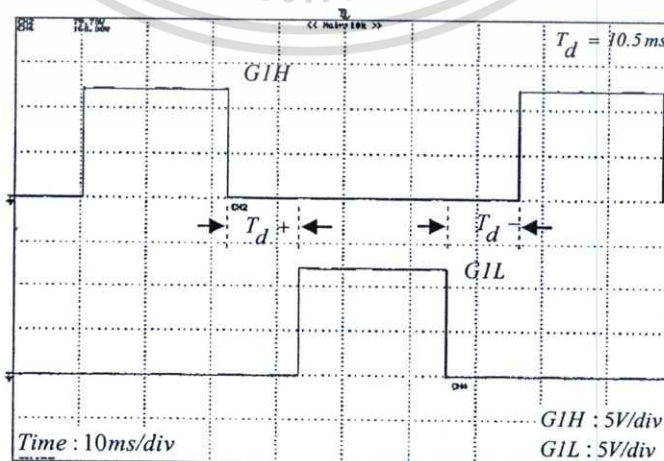
การทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน โดยไม่สนใจตำแหน่งของโรเตอร์ในรูปที่ 5.1 เป็นไดอะแกรมของการขับเคลื่อนมอเตอร์ จะใช้การขับเคลื่อนแบบวงรอบเปิด ด้วยสัญญาณสี่เหลี่ยม 120 องศา ไม่สนใจตำแหน่งของโรเตอร์ว่าอยู่ที่ตำแหน่งไหน จะขับเคลื่อนสัญญาณเกิด ตามลำดับในตารางที่ 2.1 ผลการทดสอบจะแสดงลักษณะของสัญญาณขับเคลื่อนมอสเฟส ผลการทดสอบ และบทสรุปผลการทดสอบ ดังต่อไปนี้



รูปที่ 5.1 การขับเคลื่อนมอเตอร์ โดยไม่สนใจตำแหน่งโรเตอร์

### 5.2.1 สัญญาณการขับเคลื่อนมอสเฟส

ในรูปที่ 5.2 แสดงสัญญาณในการขับเคลื่อนของมอสเฟส ในกิ่งของอินเวอร์เฟส A ลักษณะของสัญญาณในการขับเคลื่อนมอสเฟสด้านบน (High Side) และด้านล่าง (Low Side) จะมีระยะมูมห่างกันอยู่ 60 องศา ตามตารางที่ 2.1 ทำให้สัญญาณประวิงเวลาของขอบขาขึ้น ( $T_d +$ ) และขอบขาลง ( $T_d -$ ) จะมีระยะห่างเท่าๆ กันทั้งสองด้าน ซึ่งสัญญาณประวิงเวลาจะห่างกันอยู่ 10.5 มิลลิวินาที ( $T_d = 10.5ms$ ) ดังแสดงลักษณะของสัญญาณในรูป ต่อไปนี้

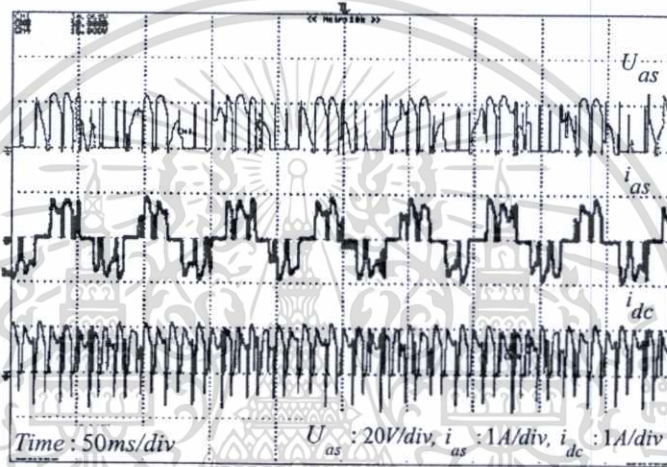


รูปที่ 5.2 สัญญาณขับเคลื่อนมอสเฟสกิ่งด้านบน (GIH) และกิ่งด้านล่าง (GIL)

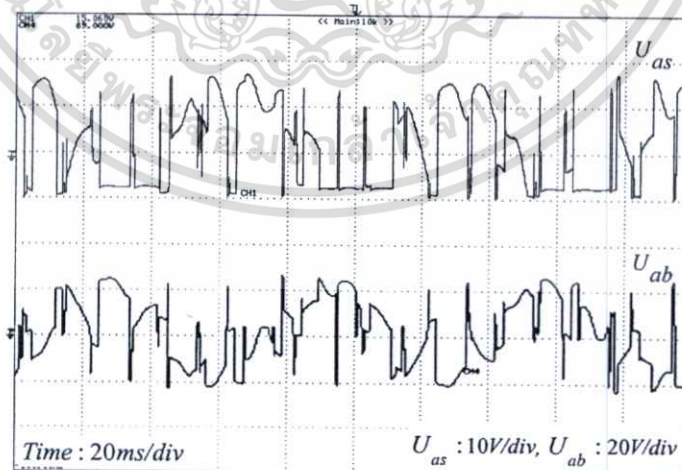
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นว่าเป็นประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.2.2 การขับเคลื่อนมอเตอร์แบบไม่สนใจตำแหน่งโรเตอร์

การทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์แบบไม่สนใจตำแหน่งโรเตอร์ จะแสดงผลการทดสอบในรูปที่ 5.3 – 5.4 ตามลำดับ ซึ่งในรูปที่ 5.3 จะแสดงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเฟส A กระแสไฟฟ้าเฟส A และไฟฟ้ากระแสตรง ส่วนในรูปที่ 5.4 จะแสดงแรงดันไฟฟ้าเฟส กับแรงดันไฟฟ้าจากไลต์ถึงไลต์ โดยการทดสอบจะขับสัญญาณแบบวงรอบเปิด ด้วยความถี่รอบเปิด 450 รอบต่ออนาที จะสังเกตได้ว่า กระแสไฟฟ้าของมอเตอร์จะสูง เกิดอาการสั่น เสียงดัง และเมื่อมอเตอร์หมุนได้สักพักหนึ่งมอเตอร์จะเริ่มร้อน จากรูปสัญญาณที่ได้จากการวัด ซึ่งไม่สอดคล้องกับตำแหน่งของโรเตอร์ ดังแสดงในรูป ผลการทดสอบ



รูปที่ 5.3 แรงดันเฟส ( $U_{as}$ ) กระแสเฟส ( $i_{as}$ ) และกระแสตรง ( $i_{dc}$ )



รูปที่ 5.4 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าเฟส ( $U_{as}$ ) และแรงดันไฟฟ้าสาย ( $U_{ab}$ )

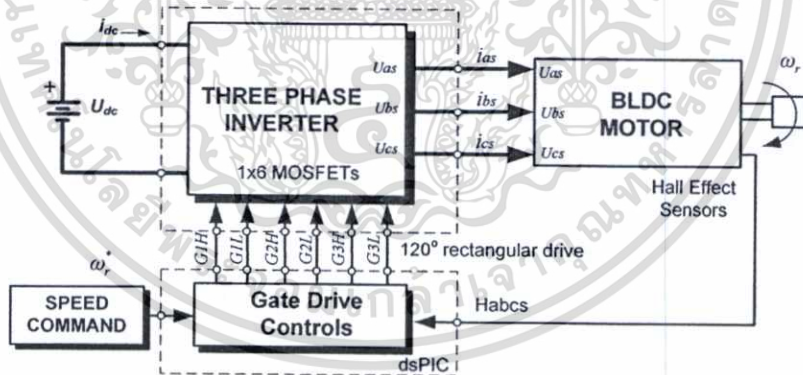
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.2.3 สรุปผลการทดสอบ

สรุปผลจากการผลทดสอบ จะพบว่าการขับเคลื่อนมอเตอร์ แบบไม่สนใจตำแหน่งโรเตอร์ นั้น จะสังเกตได้ว่ากระแสไฟฟ้าของมอเตอร์จะสูง เกิดอาการสั่น เสียงดัง และเมื่อมอเตอร์หมุนได้ สักพักหนึ่งมอเตอร์จะเริ่มร้อน ทำให้ไม่สามารถขับเคลื่อนมอเตอร์ต่อไปได้ จะทำให้มอเตอร์นั้น เสียหายได้ จากผลการทดสอบจะเห็นความสำคัญของตำแหน่งโรเตอร์ สำหรับมอเตอร์ที่ใช้แม่เหล็กถาวรแทนสนามแม่เหล็กกระตุ้นที่โรเตอร์ หากการขับเคลื่อนสัญญาณเกิดกับตำแหน่งของโรเตอร์ นั้น ไม่สัมพันธ์กัน จะส่งผลทำให้กระแสไฟฟ้าขณะมอสเฟสทำงานนั้นสูงตาม เกิดอาการมอเตอร์ สั่น และมอเตอร์ร้อนเนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่เกินพิกัด

### 5.3 การทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์โดยใช้ตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์

การทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านโดยใช้ตัวตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์ แบบปรากฏการณ์ฮอลล์ ในรูปที่ 5.5 จะแสดงโคอะแกรมของการขับเคลื่อนมอเตอร์ ตามตำแหน่งของโรเตอร์ โดยใช้เทคนิคการขับเคลื่อนแบบสัญญาณสี่เหลี่ยม 120 องศา ในตารางที่ 2.1 ในการตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์จากปรากฏการณ์ฮอลล์ เพื่อใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์เป็นไปตามตำแหน่งโรเตอร์ ซึ่งผลการทดสอบจะแสดงลักษณะของสัญญาณขับเคลื่อน มอสเฟส ผลการทดสอบ และบทสรุปผลการทดสอบ ดังต่อไปนี้



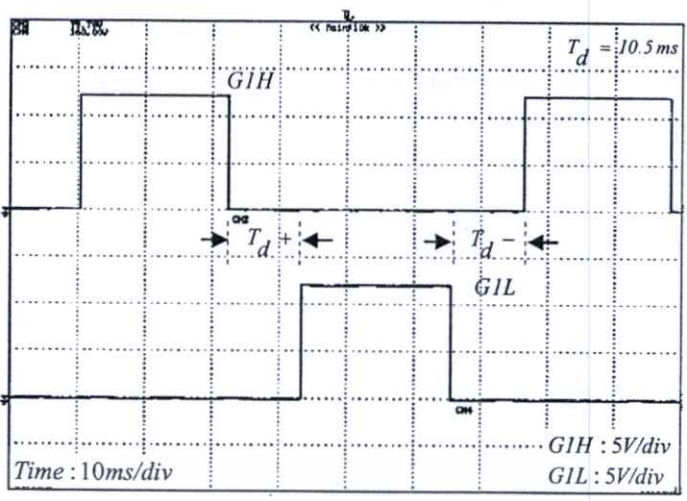
รูปที่ 5.5 การขับเคลื่อนมอเตอร์โดยใช้ตัวตรวจจับตำแหน่ง แบบปรากฏการณ์ฮอลล์

#### 5.3.1 สัญญาณการขับเคลื่อนเกตมอสเฟส

ในรูปที่ 5.6 แสดงสัญญาณในการขับเคลื่อนเกตมอสเฟส ในกิ่งของอินเวอร์ตเฟสที่ A ลักษณะของสัญญาณในการขับเคลื่อนเกตมอสเฟสด้านบน (High Side) และด้านล่าง (Low Side) จะมีระยะห่างมุมกันอยู่ 60 องศา ตามตารางที่ 2.1 ทำให้สัญญาณประวิงเวลาในขอบขาขึ้น ( $T_d +$ ) และสัญญาณขอบขาลง ( $T_d -$ ) จะมีระยะห่างเท่าๆ กันทั้งสองด้าน สัญญาณประวิงเวลาจะห่างกันอยู่

10.5 มิลลิวินาที ( $T_d = 10.5ms$ ) ดังแสดงลักษณะสัญญาณในรูปต่อไปนี้

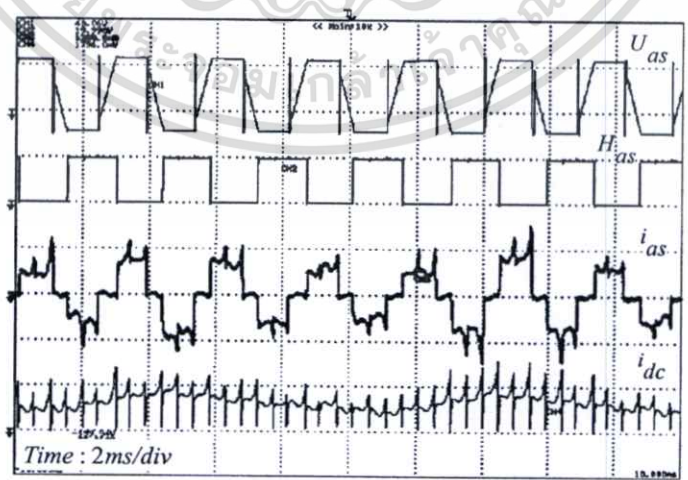
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.6 สัญญาณขับเคลื่อนอสเฟตกึ่งด้านบน (GIH) และกึ่งด้านล่าง (GIL)

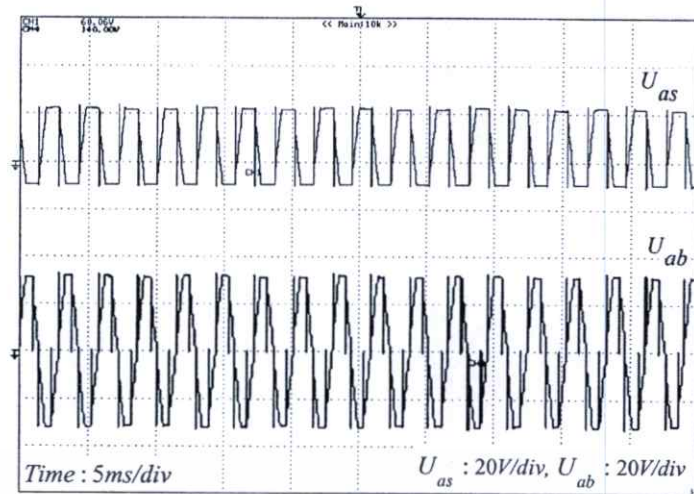
5.3.2 การขับเคลื่อนมอเตอร์ แบบใช้ตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์

การทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์ แบบใช้ตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ แบบปรากฏการณ์ฮอลล์ จะขับเคลื่อนมอเตอร์แบบวงรอบเปิด จะแสดงผลทดสอบในรูปที่ 5.7-5.8 ซึ่งในรูปที่ 5.7 จะแสดงลักษณะของแรงดันไฟฟ้าเฟส A สัญญาณปรากฏการณ์ฮอลล์ กระแสไฟฟ้าเฟส A และไฟฟ้ากระแสตรง จากการขับเคลื่อนด้วยเทคนิคสัญญาณสี่เหลี่ยม 120 องศา และในรูปที่ 5.8 จะแสดงแรงดันไฟฟ้าเฟส และแรงดันไฟฟ้าไลท์ลิ่งไลท์ ในการทดสอบจะใช้ความเร็วรอบที่ 1,000 รอบต่อนาที จะสังเกตผลที่เกิดขึ้นทำให้รูปแบบของแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าที่วัดได้ สอดคล้องกับตำแหน่งของโรเตอร์ จากการทดสอบพบว่ามอเตอร์เสียงเงียบกว่า การทดสอบแบบไม่สนใจตำแหน่งโรเตอร์ มอเตอร์มีการสั่นน้อยลง สามารถควบคุมการขับเคลื่อนได้



รูปที่ 5.7 แรงดันเฟส ( $U_{as}$ ) ตำแหน่งโรเตอร์ ( $H_{as}$ ) กระแสเฟส ( $i_{as}$ ) และกระแสตรง ( $i_{dc}$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



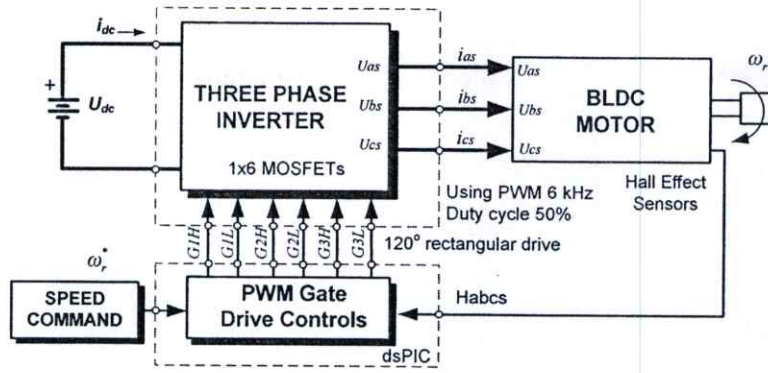
รูปที่ 5.8 แรงดันไฟฟ้าเฟส ( $U_{as}$ ) และแรงดันไฟฟ้าสาย ( $U_{ab}$ )

### 5.3.3 สรุปผลการทดสอบ

สรุปผลการทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์แบบใช้ตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ นั้นแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของตำแหน่งโรเตอร์ กับสัญญาณการขับเคลื่อนมอเตอร์ เมื่อมอเตอร์ถูกขับเคลื่อนสัญญาณขับเคลื่อนมอเตอร์เฟส ให้เป็นไปตามตำแหน่งของโรเตอร์แล้วนั้น ผลที่ได้จะทำให้อาการสั่น และเสียงดังของมอเตอร์นั้นน้อยลง อย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากความสัมพันธ์ของตำแหน่งโรเตอร์ และสัญญาณในการขับเคลื่อนมอเตอร์นั้นมีความสัมพันธ์กัน ซึ่งได้จากการใช้ตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ แบบปรากฏการณ์ฮอลล์ นั้นเอง

### 5.4 การทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์โดยใช้สัญญาณ PWM

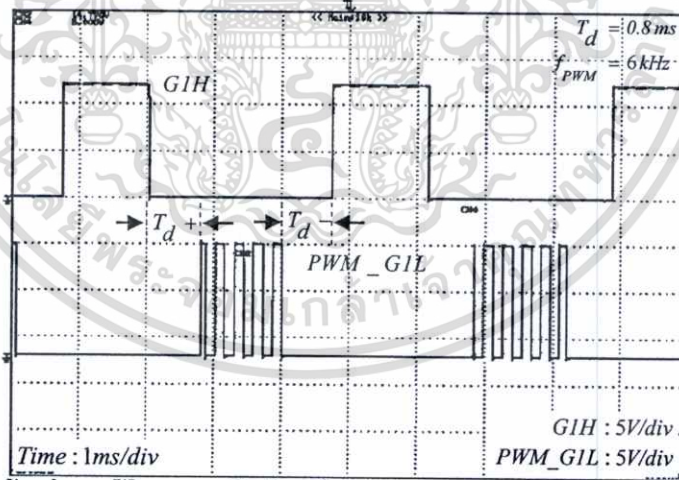
การทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน โดยใช้สัญญาณ PWM ขับเคลื่อนมอเตอร์ ในรูปที่ 5.9 จะแสดงโคแอมแกรมของการขับเคลื่อนมอเตอร์โดยใช้สัญญาณ PWM แบบสัญญาณสี่เหลี่ยม 120 องศา และใช้ตัวตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์แบบปรากฏการณ์ฮอลล์ เช่นเดียวกับการทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์แบบใช้ตัวตรวจจับ แต่ใช้สัญญาณในการขับเคลื่อนแบบ PWM มาขับสัญญาณเกตของมอเตอร์เฟส ซึ่งลักษณะสัญญาณจะแสดงในรูปที่ 5.10 ในการขับเคลื่อนมอเตอร์เฟส ทางด้านบน (High Side) ส่วนด้านล่าง (Low Side) จะขับเคลื่อนสัญญาณแบบ PWM ความถี่สวิตซ์ที่ 6 kHz, Duty cycle 50% ซึ่งผลการทดสอบจะแสดงลักษณะของสัญญาณขับเคลื่อนมอเตอร์เฟส ผลการทดสอบ และบทสรุปผลการทดสอบ ดังต่อไปนี้



รูปที่ 5.9 การขับเคลื่อนมอเตอร์โดยใช้ PWM ขับมอสเฟส

5.4.1 สัญญาณการขับเคลื่อนเกตมอสเฟส

ในรูปที่ 5.10 แสดงสัญญาณในการขับเคลื่อนของมอสเฟส ในกิ่งของอินเวอร์ตเฟสที่ A ลักษณะของสัญญาณในการขับเคลื่อนเกตมอสเฟสด้านบน (High Side) และด้านล่าง (Low Side) จะขับเคลื่อนด้วยสัญญาณแบบ PWM ที่ความถี่สวิตซ์ 6 kHz, Duty cycle 50% และมีระยะมุมห่างกันอยู่ 60 องศา ทำให้สัญญาณประวิงเวลาของขอบขาขึ้น ( $T_d+$ ) และสัญญาณของขอบขาลง ( $T_d-$ ) จะมีระยะห่างเท่าๆ กันทั้งสองด้าน สัญญาณประวิงเวลาจะห่างกันอยู่ 0.8 มิลลิวินาที ( $T_d = 0.8ms$ ) ดังแสดงลักษณะสัญญาณในรูป ต่อไปนี้

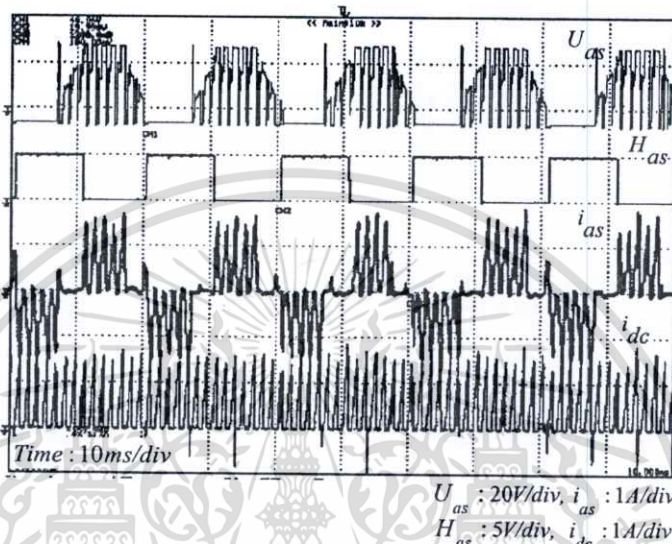


รูปที่ 5.10 สัญญาณขับเคลื่อนมอสเฟสกิ่งด้านบน (GIH) และกิ่งด้านล่าง (PWM\_GIL)

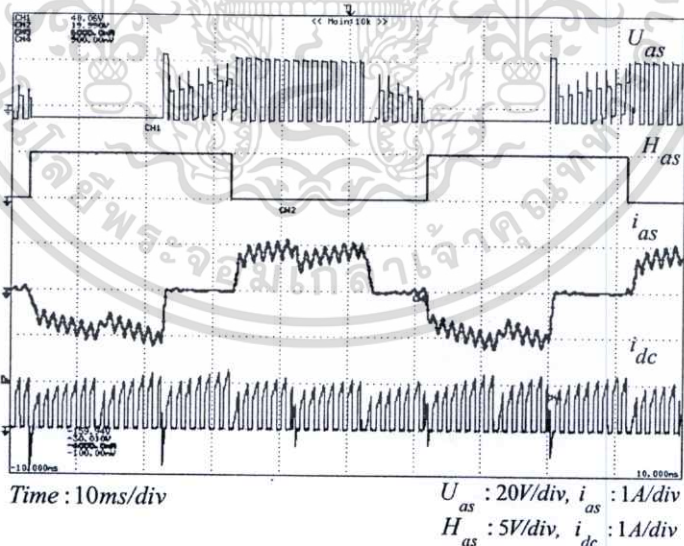
5.4.2 การขับเคลื่อนมอเตอร์ โดยใช้สัญญาณขับเคลื่อนแบบ PWM

การทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์ โดยใช้สัญญาณขับเคลื่อนแบบ PWM และใช้ตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ ขับเคลื่อนมอเตอร์แบบวงรอบเปิด จะแสดงผลทดสอบในรูปที่ 5.11-5.12 ซึ่งในรูปที่ 5.11 จะแสดงลักษณะของแรงดันไฟฟ้าเฟส A สัญญาณปรากฏการณ์ฮอลล์ กระแสไฟฟ้าเฟส A เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษาไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และไฟฟ้ากระแสตรง จากการจับเคลื่อนด้วยเทคนิคสัญญาณสี่เหลี่ยม 120 องศา โดยใช้ความถี่ สวิตซ์ที่ 6 kHz, Duty cycle 50% ส่วนในรูปที่ 5.12 จะแสดงสถานะเมื่อมอเตอร์รับภาระ ทำให้ ลักษณะของกระแสไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากภาระ ขณะที่ความเร็วรอบที่ 1,500 รอบต่อนาที จะ สังเกตผลที่เกิดขึ้นทำให้รูปแบบแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าที่วัดได้ ซึ่งสอดคล้องกับตำแหน่ง ของโรเตอร์ จากการจับสัญญาณแบบ PWM เพื่อควบคุมมอเตอร์ แสดงในรูปผลการทดสอบ



รูปที่ 5.11 แรงดันเฟส ( $U_{as}$ ), ตำแหน่งโรเตอร์ ( $H_{as}$ ) กระแสเฟส ( $i_{as}$ ) และกระแสตรง ( $i_{dc}$ )



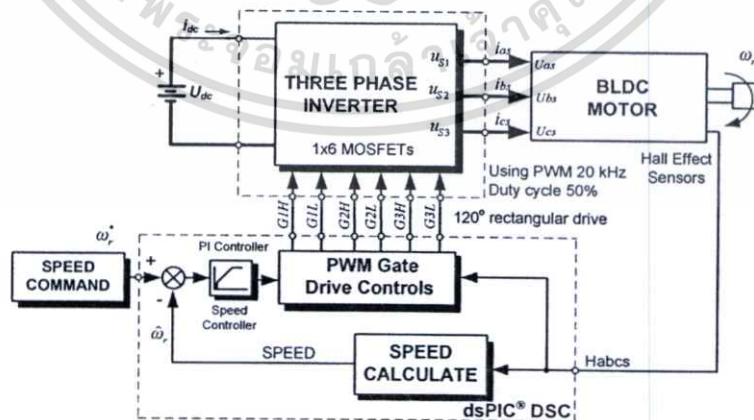
รูปที่ 5.12 แรงดันเฟส ( $U_{as}$ ) ตำแหน่งโรเตอร์ ( $H_{as}$ ) กระแสเฟส ( $i_{as}$ ) และกระแสตรง ( $i_{dc}$ ) ขณะ มอเตอร์รับภาระแรงบิด

### 5.4.3 สรุปผลการทดสอบ

สรุปผลการทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์แบบสัญญาณ PWM โดยใช้ตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ กับสัญญาณขับเคลื่อนมอเตอร์แบบ PWM เมื่อมอเตอร์ถูกขับเคลื่อนสัญญาณขับเคลื่อนมอเตอร์ให้เป็นไปตามตำแหน่งของโรเตอร์แล้วนั้น ผลที่ได้จะทำให้อาการสั่น และเสียงดังของมอเตอร์นั้นลดลง เนื่องจากความสัมพันธ์ของตำแหน่งโรเตอร์ กับสัญญาณการขับเคลื่อนมอเตอร์ ซึ่งสามารถนำเทคนิคการขับเคลื่อนแบบ PWM ไปหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับที่เกิดขึ้น ในช่วงมอสเฟส เปิดสำหรับการควบคุมแบบปราศจากตัวตรวจจับ เมื่อนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ได้ผ่านการกรองความถี่ออก สำหรับการค้นหาตำแหน่งโรเตอร์ ต่อไป

### 5.5 การทดสอบควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์โดยใช้ตัวตรวจจับตำแหน่ง

ผลจากการทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์ที่ทดสอบผ่านมานั้น พบว่าการจะขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านนั้น แสดงให้เห็นว่า ตำแหน่งของโรเตอร์นั้นมีความสำคัญมากต่อการขับเคลื่อนมอเตอร์ และการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ ดังนั้นจะเห็นได้ว่ามอเตอร์ที่ใช้แม่เหล็กถาวรทำเป็น โรเตอร์จะพบว่าจะต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับตำแหน่ง สำหรับการควบคุมมอเตอร์ ดังนั้นในการทดสอบควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์นี้จะอาศัยอุปกรณ์ตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์แบบปรากฏการณ์ฮอลล์ ช่วยในการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ สำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน ในรูปที่ 5.13 แสดงไดอะแกรมการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์โดยใช้ตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ สำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบสัญญาณสี่เหลี่ยม 120 องศา ด้วยความถี่สวิทช์ 20 kHz, Duty cycle 50% ซึ่งผลการทดสอบจะแสดงลักษณะของสัญญาณขับเคลื่อนมอสเฟส ผลการทดสอบ และบทสรุปผลการทดสอบ ดังต่อไปนี้

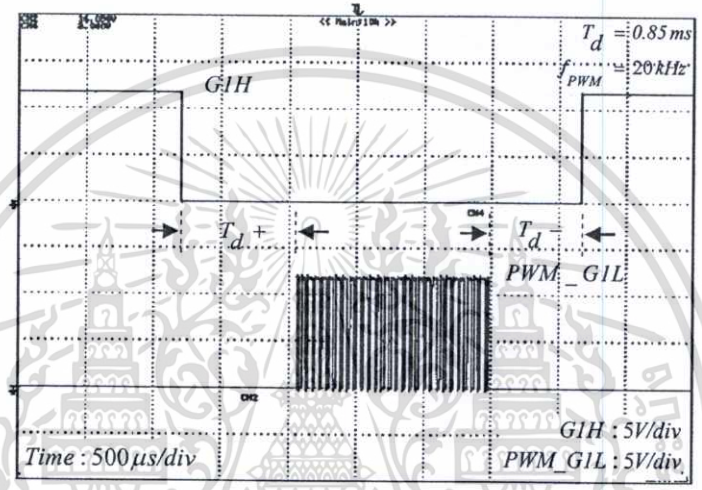


รูปที่ 5.13 การควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์โดยใช้ตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.5.1 สัญญาณการขับเคลื่อนเกตมอสเฟส

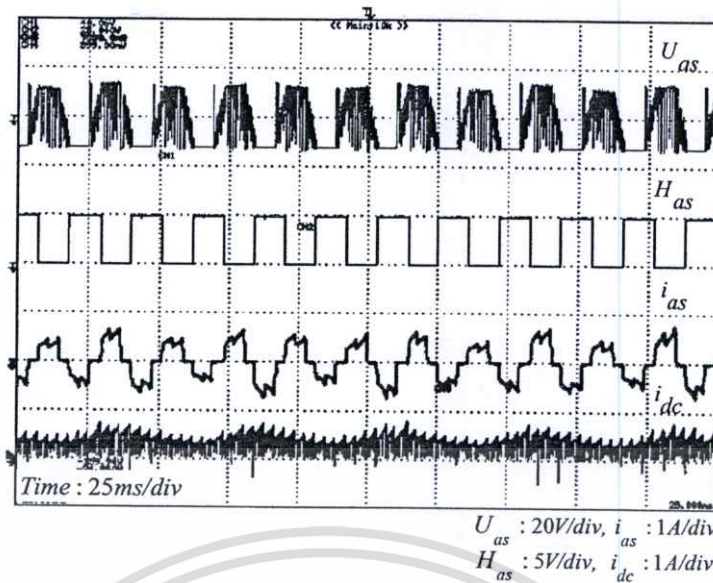
ในรูปที่ 5.14 แสดงสัญญาณในการขับเคลื่อนของมอสเฟส ในกิ่งของอินเวอร์ตที่ A ลักษณะของสัญญาณในการขับเคลื่อนเกตมอสเฟสด้านบน (High Side) และด้านล่าง (Low Side) จะขับเคลื่อนด้วยสัญญาณ PWM ที่ความถี่สวิตช์ 20 kHz, Duty cycle 50% และมีระยะมูทห่างกันอยู่ 60 องศา ตามตารางที่ 2.1 ทำให้สัญญาณประวิงเวลาของขอบขาขึ้น ( $T_d+$ ) และสัญญาณขอบขาลง ( $T_d-$ ) จะมีระยะห่างเท่าๆ กันทั้งสองด้าน สัญญาณประวิงเวลาห่างกันอยู่ 0.85 มิลลิวินาที ( $T_d = 0.85ms$ ) ดังแสดงลักษณะสัญญาณในรูป ต่อไปนี้



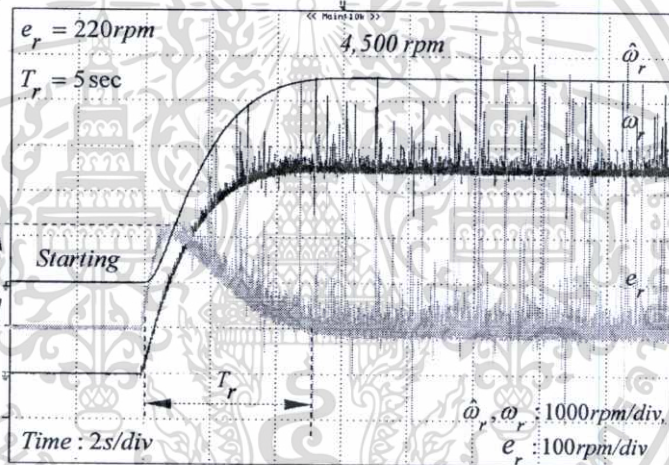
รูปที่ 5.14 สัญญาณขับเคลื่อนมอสเฟสกิ่งด้านบน (GIH) และกิ่งด้านล่าง (PWM\_GIL)

### 5.5.2 การควบคุมความเร็วมอเตอร์ แบบใช้ตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์

การทดสอบควบคุมความเร็วมอเตอร์ โดยใช้สัญญาณขับเคลื่อนแบบ PWM และใช้ตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ แบบวงรอบปิด ควบคุมความเร็วแบบพีโอ จะแสดงผลทดสอบในรูปที่ 5.15-5.16 ซึ่งในรูปที่ 5.15 จะแสดงลักษณะของแรงดันไฟฟ้าเฟส A สัญญาณปรากฏการณ์ฮอลล์ กระแสไฟฟ้าเฟส A และไฟฟ้ากระแสตรง จากการขับเคลื่อนด้วยเทคนิคสัญญาณสี่เหลี่ยม 120 องศา โดยใช้ความถี่สวิตช์ที่ 20 kHz, Duty cycle 50% ขณะที่ความเร็วรอบควบคุม 1,500 รอบต่อนาที ส่วนในรูปที่ 5.15 จะแสดงสถานะเริ่มออกตัวเริ่มแรกถึงความเร็วพิกัดที่ 4,500 รอบต่อนาที จากการควบคุมความเร็วแบบใช้อุปกรณ์ตรวจจับตำแหน่ง โรเตอร์ ดังแสดงในรูปผลการทดสอบ ดังต่อไปนี้



รูปที่ 5.15 แรงดันเฟส ( $U_{as}$ ) ตำแหน่งโรเตอร์ ( $H_{as}$ ) กระแสเฟส ( $i_{as}$ ) และกระแสตรง ( $i_{dc}$ )



รูปที่ 5.16 ความเร็วรอบจากการคำนวณ ( $\hat{\omega}_r$ ) และการวัด ( $\omega_r$ ) และความเร็วรอบผิดพลาด ( $e_r$ )

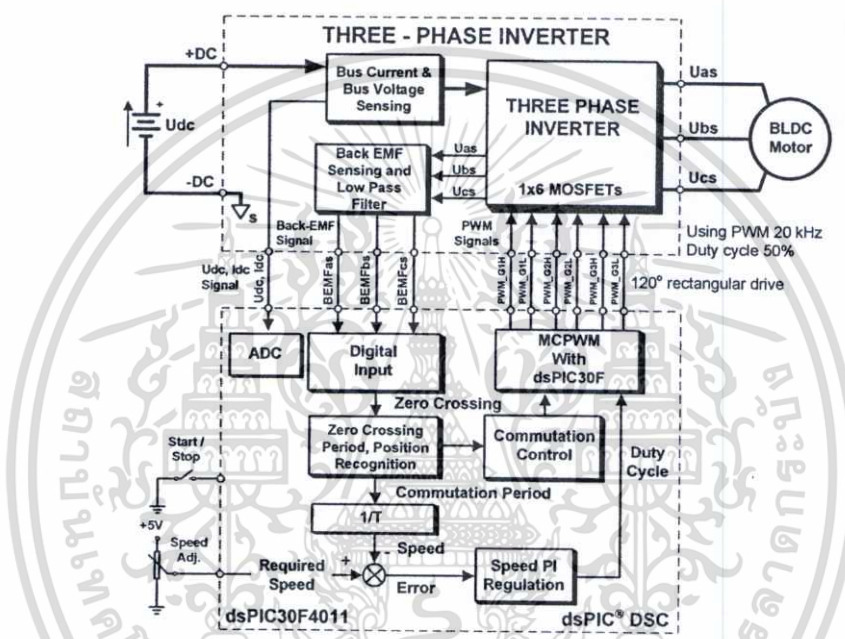
### 5.5.3 สรุปผลการทดสอบ

สรุปผลการทดสอบควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์แบบใช้ตัวตรวจจับตำแหน่ง แบบปรากฏการณ์ฮอลล์ นั้นจะควบคุมตามตำแหน่งโรเตอร์ซึ่งสอดคล้องกับสัญญาณในการขับเคลื่อนแบบสัญญาณสี่เหลี่ยม 120 องศา และผลการทดสอบเปรียบเทียบกับความเร็วรอบมอเตอร์จากการวัด ( $\omega_r$ ) กับความเร็วรอบจากการคำนวณ ( $\hat{\omega}_r$ ) ซึ่งได้จากสัญญาณของปรากฏการณ์ฮอลล์ ขณะเริ่มต้นจนถึงความเร็วพิกัด จะพบว่าความเร็วขณะเพิ่มขึ้นนั้นมีความผิดพลาด ( $e_r$ ) 220 รอบต่อนาที และระยะเวลาที่เข้าสู่ความเร็วพิกัด ( $e_r$ ) 5 วินาที จากการควบคุมตำแหน่งโรเตอร์กับสัญญาณการขับเคลื่อนมอเตอร์ จึงส่งผลให้ความเร็วผิดพลาด ( $e_r$ ) ขณะออกตัวเริ่มต้นนั้น แต่เมื่อถึงความเร็วในการควบคุมจะเห็นว่าความเร็วรอบที่ผิดพลาดนั้นลดลง ดังแสดงในรูปผลการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.6 การทดสอบควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์โดยปราศจากตัวตรวจจับ

ผลจากการทดสอบควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์โดยใช้ตัวตรวจจับตำแหน่งที่ผ่านมามีปัญหาเรื่องการติดตั้งตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ ในการทดสอบวิธีนี้เป็นการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์แบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่ง โดยอาศัยแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ ลักษณะสี่เหลี่ยมคางหมู ในรูปที่ 5.17 จะแสดงไคอะแกรมของการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์แบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ อาศัยจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับโดยตรง ข้อจำกัดสำหรับการทดสอบในตารางที่ 5.3 สำหรับชุดทดสอบ



รูปที่ 5.17 ระบบขับเคลื่อนควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์แบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์

ตารางที่ 5.3 ข้อจำกัดสำหรับชุดทดสอบมอเตอร์ ในการทดสอบหัวข้อที่ 5.6

รายละเอียด	สัญลักษณ์	ขนาด	หน่วย
ข้อจำกัดสำหรับบอร์ดทดสอบ			
แรงดันไฟฟ้ามากที่สุด	$U_{dmax}$	50	โวลท์
แรงดันไฟฟ้าบอร์ด	$U_{cc}$	15	โวลท์
แรงดันไฟฟ้าตัวตรวจจับ	$U_h$	5	โวลท์
กระแสไฟฟ้ามืดที่สุด	$I_{max}$	5	แอมป์
ความเร็วรอบพิกัด	$\omega_r$	4,500	รอบต่อนาที

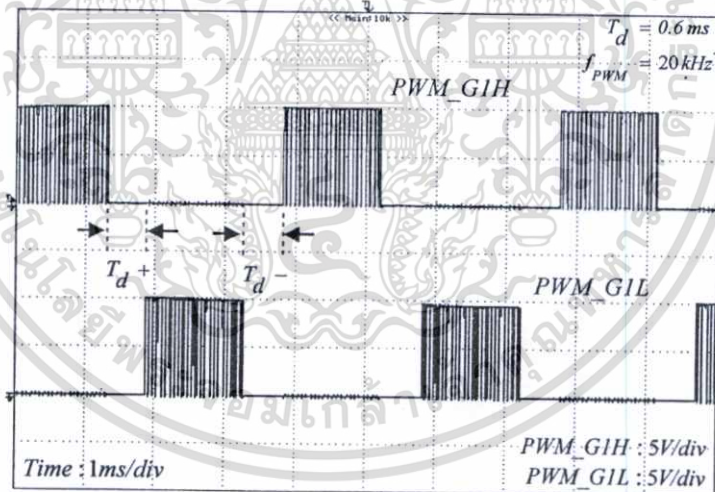
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.3 ข้อกำหนด สำหรับชุดทดสอบมอเตอร์ ในการทดสอบหัวข้อที่ 5.6 (ต่อ)

การขับเคลื่อนสำหรับบอร์ดทดสอบ	
เทคนิคการขับเคลื่อนสัญญาณ	แบบสี่เหลี่ยม 120 องศา
การออกตัวเริ่มต้น	ออกตัวแบบ แรมปี
การควบคุมความเร็ว	พีไอ
ระบบการป้องกัน	ป้องกันกระแสไฟฟ้าเกิน ป้องกันแรงดันไฟฟ้าเกิน

### 5.6.1 สัญญาณการขับเคลื่อนเกตมอสเฟส

ในรูปที่ 5.18 แสดงสัญญาณในการขับเคลื่อนของมอสเฟส ในกิ่งของอินเวอร์เตอร์เฟสที่ A ลักษณะของสัญญาณในการขับเคลื่อนเกตมอสเฟสด้านบน (High Side) และด้านล่าง (Low Side) ทั้งสองจะขับเคลื่อนสัญญาณเกิดด้วย PWM ที่ความถี่สวิตช์ 20 kHz, Duty cycle 50% และมีระยะมูมห่างกันอยู่ 60 องศา ทำให้สัญญาณประวิงเวลาของขอบขาขึ้น ( $T_d +$ ) และสัญญาณขอบขาลง ( $T_d -$ ) จะมีระยะห่างเท่าๆ กันทั้งสองด้าน สัญญาณประวิงเวลาห่างกันอยู่ 0.6 มิลลิวินาที ( $T_d = 0.6ms$ ) ดังแสดงลักษณะสัญญาณในรูป ต่อไปนี้



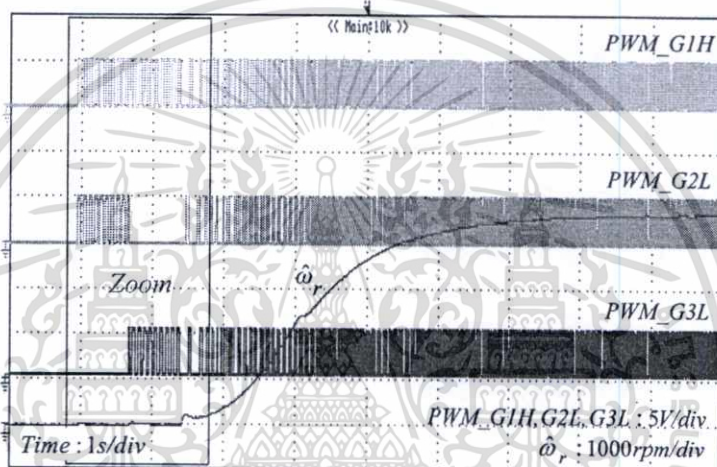
รูปที่ 5.18 สัญญาณขับเคลื่อนมอสเฟสทั้งด้านบน ( $PWM\_GIH$ ) และด้านล่าง ( $PWM\_GIL$ )

### 5.6.2 การค้นหาตำแหน่งโรเตอร์ ขณะเริ่มต้น

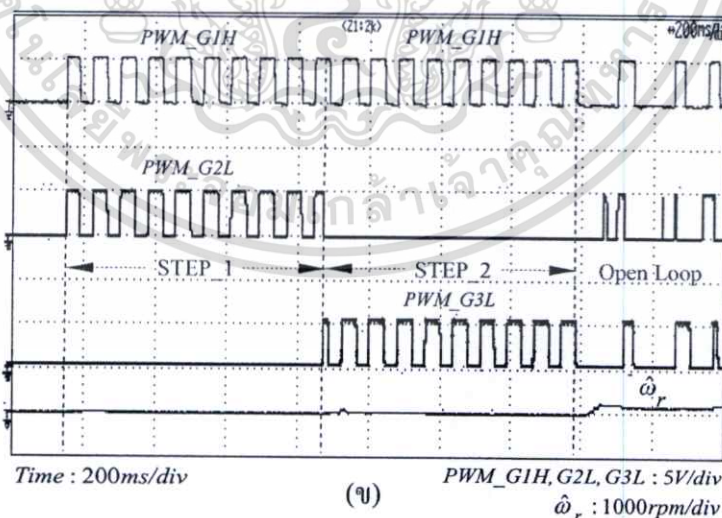
ผลการทดสอบในรูปที่ 5.19 (ก) แสดงสัญญาณขับเคลื่อน PWM (G1H, G2L, G3L) และความเร็วรอบ ( $\omega_r$ ) ขณะออกตัวเริ่มต้น โดยเทคนิคการกระตุ้นสนามแม่เหล็กที่ขดลวดด้านสเตเตอร์ที่นำเสนอ โดยระดับที่ 1 (Step\_1) เป็นการกระตุ้นสนามแม่เหล็กที่คู่เฟส A-B เพื่อหาตำแหน่งเริ่มต้นของโรเตอร์สภาวะแรกของการออกตัวของมอเตอร์ และระดับที่ 2 (Step\_2) เป็นการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระตุ้นสนามแม่เหล็กที่คู่เฟส A-C เพื่อทราบตำแหน่งของโรเตอร์ที่แน่นอน ก่อนจะส่งสัญญาณในการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบวงรอบเปิด (Open loop) โดยใช้เทคนิคแบบสัญญาณสี่เหลี่ยม 120 องศาด้วยความถี่สวิตช์ 20 kHz, Duty Circle 50% จากนั้นจะขับเคลื่อนความเร็วรอบแบบวงรอบเปิด หลังจากรู้ตำแหน่งโรเตอร์ เมื่อแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับเกิดขึ้น จะทำการตรวจสอบด้วยวงจรซีโรครอสซิง สำหรับการคำนวณหาตำแหน่งโรเตอร์ และความเร็วรอบมอเตอร์ เพื่อใช้สำหรับการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์แบบพีไอ แสดงในรูปที่ 5.19 (ข) เป็นภาพขยายเพื่อดูแต่ละช่วงการทำงานขณะกระตุ้นสนามแม่เหล็กที่ระดับ 1 และระดับที่ 2 สำหรับค้นหาตำแหน่งโรเตอร์เริ่มต้น และขับเคลื่อนสัญญาณให้สอดคล้องกันกับตำแหน่งโรเตอร์



(ก)



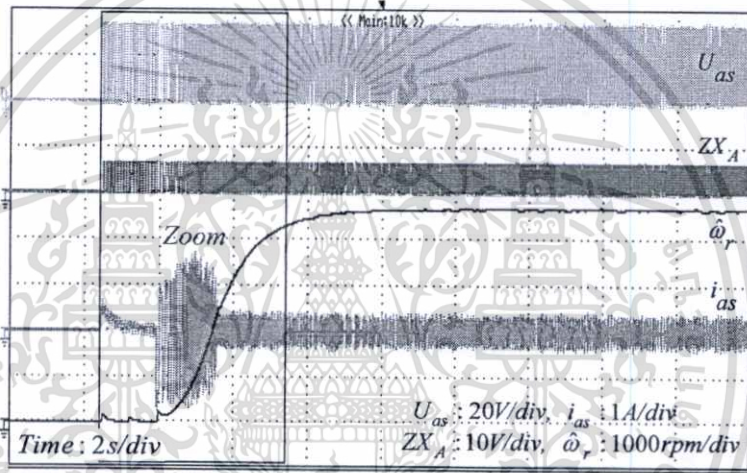
(ข)

รูปที่ 5.19 การวัดสัญญาณขณะกระตุ้นสนามแม่เหล็กที่สเตเตอร์แต่ละคู่เฟส (ก) สัญญาณขับเคลื่อน PWM และความเร็วรอบมอเตอร์ ( $\omega_r$ ) และ (ข) ภาพขยายสัญญาณขณะออกตัวเริ่มต้นจากระดับที่ 1 ระดับที่ 2 และขับเคลื่อนแบบวงรอบเปิด

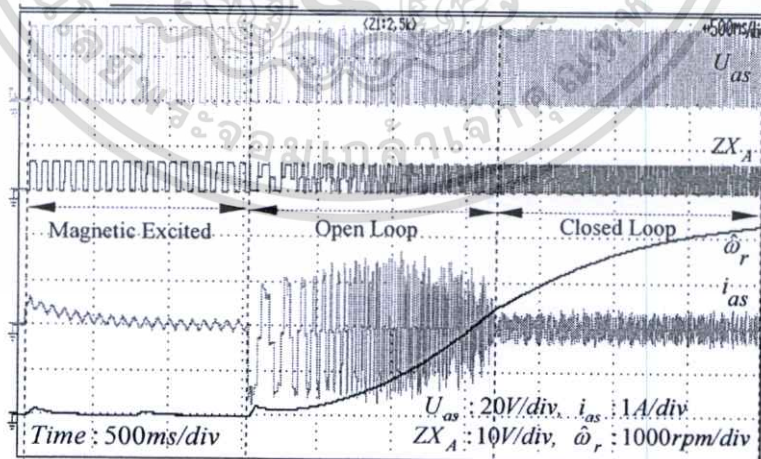
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.6.3 ระบบการขับเคลื่อนในแต่ละช่วงเวลาควคุม

ผลการทดสอบในรูปที่ 5.20 (ก) แสดงแรงดันไฟฟ้า ตำแหน่งโรเตอร์ กระแสไฟฟ้าด้านสเตเตอร์ และความเร็วรอบขณะออกตัวเริ่มต้นจากการกระตุ้นสนามแม่เหล็ก ก่อนการขับเคลื่อนแบบวงรอบเปิดด้วยสัญญาณสี่เหลี่ยม 120 องศา เพื่อทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลีบ และขับเคลื่อนแบบวงรอบปิดที่ควบคุมแบบพีไอ จะเห็นว่ากระแสไฟฟ้าขณะกระตุ้นเริ่มต้น จะเป็นกระแสตรงเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กให้คงที่ ในการหาค่าตำแหน่งโรเตอร์ขณะเริ่มต้น และกระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้น เมื่อแรงบิดของมอเตอร์เริ่มออกตัว จนถึงความเร็วรอบพิกัดกระแสไฟฟ้าก็ จะลดลง ส่วนในรูปที่ 5.20 (ข) แสดงภาพขยายสัญญาณในแต่ละขั้นตอนของการควบคุมมอเตอร์ ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน



(ก)



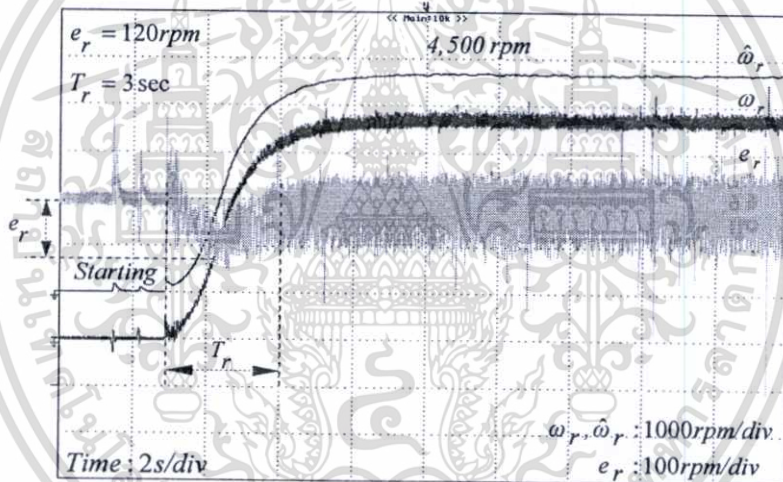
(ข)

รูปที่ 5.20 การวัดสัญญาณขณะกระตุ้นสนามแม่เหล็กที่สเตเตอร์แต่ละคู่เฟส (ก) แรงเคลื่อนไฟฟ้า ( $U_{as}$ ) ตำแหน่งโรเตอร์ ( $ZX_A$ ) กระแสด้านสเตเตอร์ ( $i_{as}$ ) และความเร็วรอบ ( $\omega_r$ ) และ

(ข) ภาพขยายสัญญาณขณะออกตัวเริ่มต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

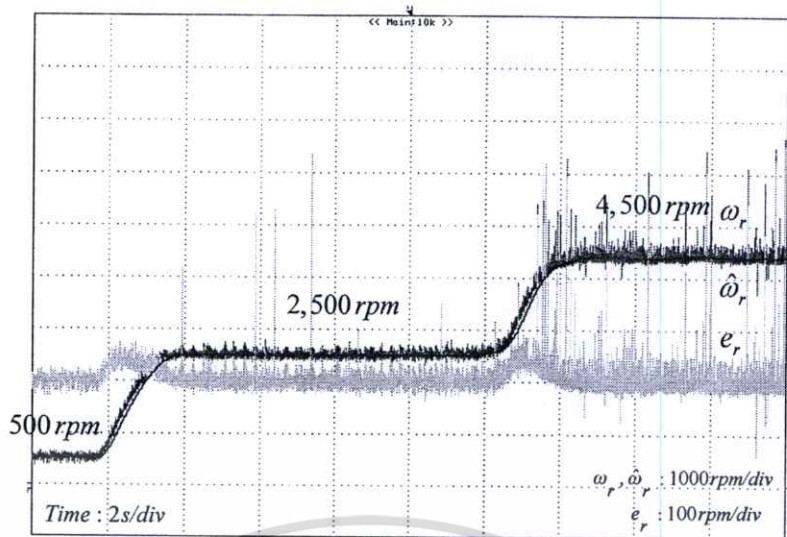
ในรูปที่ 5.21 เป็นการเปรียบเทียบความเร็วรอบจากการวัด ( $\omega_r$ ) การคำนวณจากคาบเวลา ( $\hat{\omega}_r$ ) และความเร็วรอบที่ผิดพลาด ( $e_r$ ) ที่ความเร็วรอบขณะเริ่มต้นถึงความเร็วรอบพิกัด จากผลการทดสอบจะเห็นว่าช่วงที่มอเตอร์ขับเคลื่อนแบบวงรอบเปิด ความเร็วรอบของมอเตอร์ กับความเร็วรอบจากการคำนวณนั้นมีความผิดพลาด ( $e_r$ ) 120 รอบต่อนาที และระยะเวลาที่เข้าสู่ความเร็วพิกัด ( $T_r$ ) 3 วินาที เนื่องจากการคำนวณหาตำแหน่งโรเตอร์ และความเร็วรอบมอเตอร์นั้นไม่สอดคล้องกัน จึงส่งผลทำให้ความเร็วผิดพลาดขณะเริ่มต้น เมื่อเปรียบเทียบกับ การควบคุมความเร็วแบบใช้ตัวตรวจจับตำแหน่ง จะพบว่าความเร็วผิดพลาดนั้นจะน้อยกว่า เนื่องตำแหน่งโรเตอร์กับสัญญาณการขับเคลื่อนนั้นเป็นไปตามตำแหน่งโรเตอร์ และมอเตอร์ยังขับเคลื่อนแบบวงรอบเปิดอยู่ เพื่อให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับเมื่อออกตัวแล้ว ถึงจะควบคุมความเร็วแบบวงรอบปิดต่อ โดยการควบคุมแบบพีไอ เมื่อถึงความเร็วรอบที่พิกัด 4,500 รอบต่อนาที แล้วระบบจะทำการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ให้เป็นไปตามความเร็วคำสั่ง ดังแสดงผลในรูปผลการทดสอบ



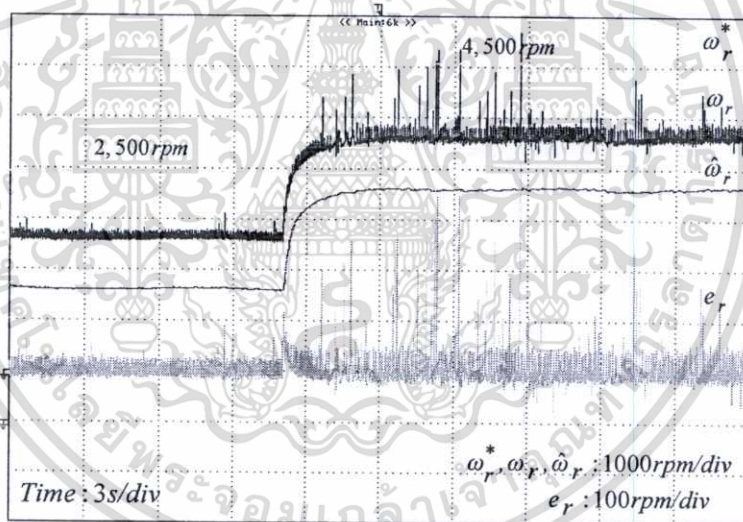
รูปที่ 5.21 ความเร็วรอบจากการคำนวณ ( $\hat{\omega}_r$ ) และการวัด ( $\omega_r$ ) และความเร็วรอบผิดพลาด ( $e_r$ )

### 5.6.4 การทดสอบเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบมอเตอร์

ในการทดสอบเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบของมอเตอร์ ในแต่ละขั้นระดับความเร็วรอบ ตามความเร็วรอบคำสั่ง สำหรับการควบคุมความเร็วมอเตอร์แบบพีไอ ดังแสดงผลการทดสอบในรูปที่ 5.22 เป็นการทดสอบความเร็วรอบในย่านการควบคุมที่ความเร็วรอบมอเตอร์ 500 รอบต่อนาที ถึงความเร็วรอบที่พิกัด 4,500 รอบต่อนาที โดยการทดสอบที่ความเร็วรอบ 500 2,500 และ 4,500 รอบต่อนาที ตามลำดับ แสดงผลจากการคำนวณความเร็วรอบ ( $\hat{\omega}_r$ ) จากการวัดความเร็วรอบที่เพลาโรเตอร์ ( $\omega_r$ ) และเปรียบเทียบความเร็วรอบที่วัดได้กับความเร็วรอบจากการคำนวณ ซึ่งเป็นความเร็วรอบที่ผิดพลาด ( $e_r = \omega_r - \hat{\omega}_r$ ) ส่วนในรูปที่ 5.23 จะแสดงผลการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบจาก 2,500 เป็น 4,500 รอบต่อนาที ดังแสดงในรูปผลการทดสอบ

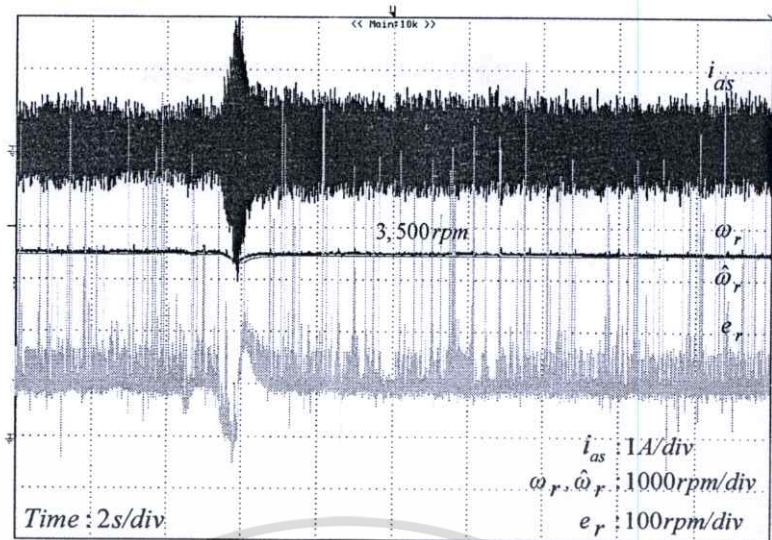


รูปที่ 5.22 ความเร็วรอบจากการคำนวณ ( $\hat{\omega}_r$ ) การวัด ( $\omega_r$ ) ที่ความเร็วรอบ 500 2,500 และ 4,500 รอบต่อนาที และความเร็วนรอบที่ผิดพลาด ( $e_r$ )



รูปที่ 5.23 ความเร็วรอบคำสั่ง ( $\omega_r^*$ ) ความเร็วรอบจากการวัด ( $\omega_r$ ) ความเร็วรอบจากการคำนวณ ( $\hat{\omega}_r$ ) และความเร็วนรอบผิดพลาด ( $e_r$ )

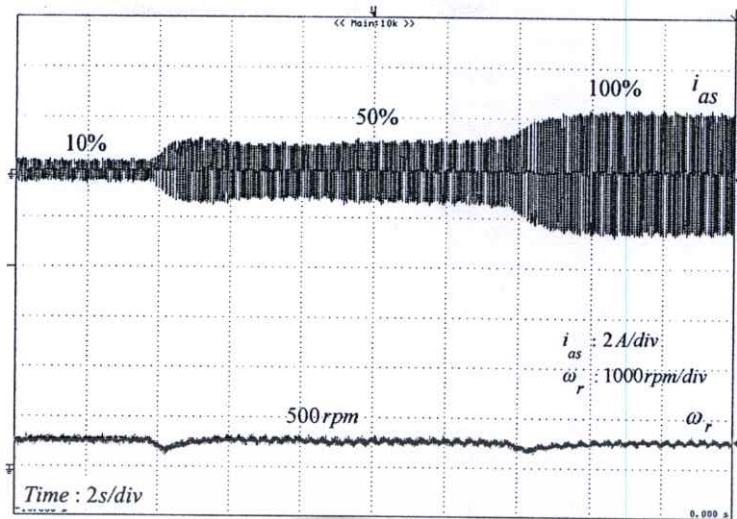
ขณะที่ความเร็วรอบมอเตอร์ 3,500 รอบต่อนาที เมื่อได้รับภาระแรงบิด ในรูปที่ 5.24 แสดงการควบคุมความเร็วรอบแบบพีไอ ที่ความเร็วรอบคำสั่ง 3,500 รอบต่อนาที เปรียบเทียบความเร็วรอบจากการวัด ( $\omega_r$ ) และความเร็วรอบจากการคำนวณ ( $\hat{\omega}_r$ ) และความเร็วรอบที่ผิดพลาด ( $e_r$ ) ซึ่งเมื่อมอเตอร์รับภาระแรงบิดแล้วยังรักษาระดับความเร็วรอบไว้คงที่ ตามความเร็วรอบคำสั่ง



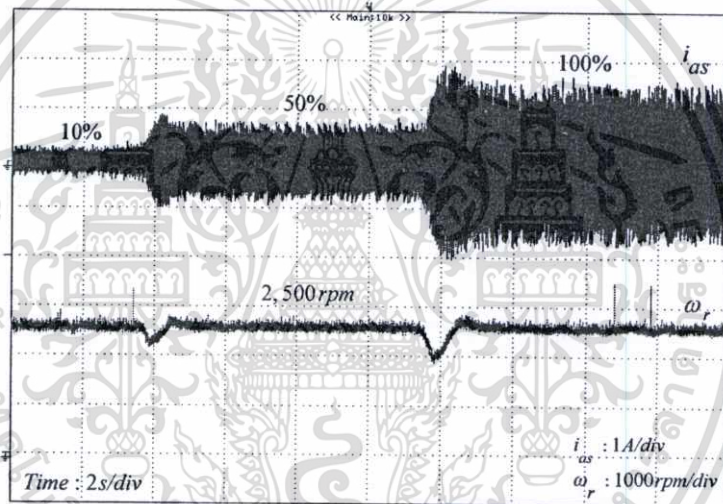
รูปที่ 5.24 กระแสไฟฟ้าเฟส A ( $i_{as}$ ) ความเร็วรอบจากการวัด ( $\omega_r$ ) ความเร็วรอบจากการคำนวณ ( $\hat{\omega}_r$ ) และความเร็วย้อนทิศทาง ( $e_r$ )

#### 5.6.5 การทดสอบควบคุมความเร็วรอบ เมื่อได้รับภาระแรงบิด

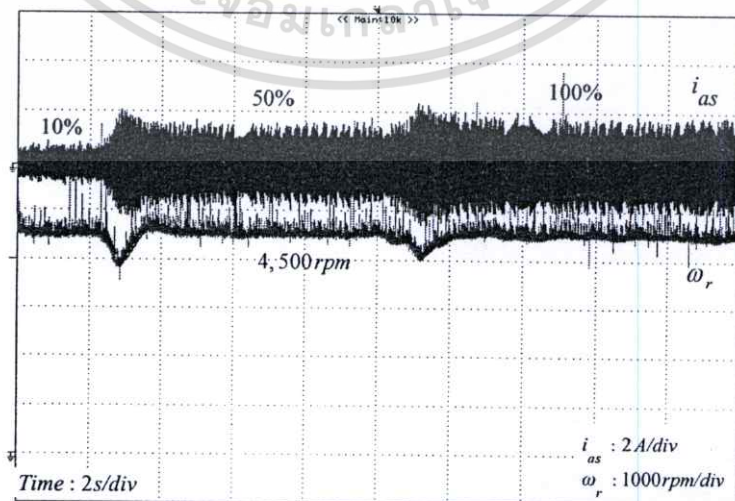
การทดสอบควบคุมความเร็วรอบ เมื่อได้รับภาระแรงบิด ในแต่ละความเร็วรอบมอเตอร์ที่ความเร็วรอบคำสั่ง เมื่อมอเตอร์รับภาระแรงบิด มอเตอร์จะรักษาระดับความเร็วรอบให้คงที่ โดยการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ แสดงผลของกระแสไฟฟ้าเฟส A ( $i_{as}$ ) ความเร็วรอบจากการวัด ( $\omega_r$ ) เมื่อมอเตอร์รับภาระแรงบิด ในแต่ละระดับแรงบิด ในรูปที่ 5.25 ที่ความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาที ในรูปที่ 5.26 ที่ความเร็วรอบ 2,500 รอบต่อนาที และในรูปที่ 5.27 ที่ความเร็วรอบ 4,500 รอบต่อนาที ในแต่ละระดับภาระแรงบิดที่ 10%, 50%, 100% ของพิกัดแรงบิด หรือ 0.005, 0.025, 0.05 นิวตัน-เมตร (0.7, 3.5, 7.08 ออนซ์-นิ้ว) ตามลำดับ จากการควบคุมความเร็วรอบแบบพีไอ กระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเมื่อมอเตอร์รับภาระ และความเร็วรอบคงที่ ดังแสดงในรูปผลการทดสอบแต่ละความเร็วรอบสำหรับย่านการควบคุมความเร็วที่ 500 ถึง 4,500 รอบต่อนาที ตามที่ออกแบบไว้



รูปที่ 5.25 ขณะรับภาระแรงบิด 10%, 50%, 100% ของพิกัด ที่ความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาที



รูปที่ 5.26 ขณะรับภาระแรงบิด 10%, 50%, 100% ของพิกัด ที่ความเร็วรอบ 2,500 รอบต่อนาที



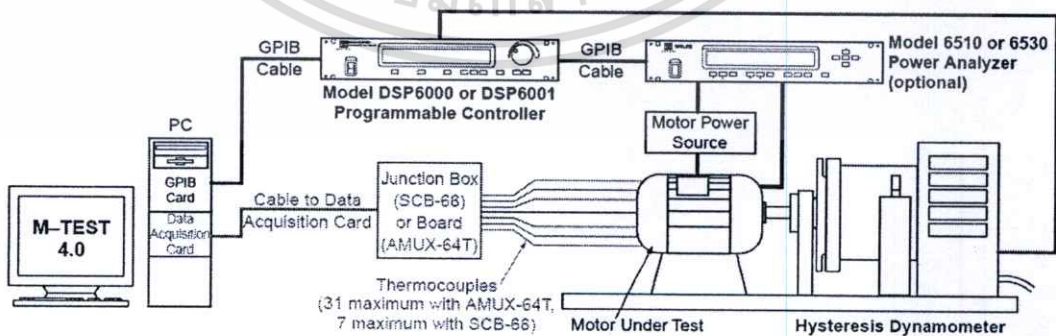
รูปที่ 5.27 ขณะรับภาระแรงบิด 10%, 50%, 100% ของพิกัด ที่ความเร็วรอบ 4,500 รอบต่อนาที  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ขออนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.6.6 สรุปผลการทดสอบ

สรุปผลการทดสอบในการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์แบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ โดยอาศัยแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับที่เกิดขึ้น เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับวงจรถูกตั้งไว้ครอสซึ่งในการคำนวณหาตำแหน่งโรเตอร์ และความเร็วรอบมอเตอร์สำหรับการผลการทดสอบจะแสดงสัญญาณขับเคลื่อนแบบ PWM และการค้นหาตำแหน่งโรเตอร์ขณะเริ่มต้นด้วยการกระตุ้นสนามแม่เหล็กที่ขดลวดสเตเตอร์ เมื่อรู้ตำแหน่งโรเตอร์เริ่มต้นแล้วจะทำการขับเคลื่อนตามตำแหน่งโรเตอร์ ซึ่งการรู้ตำแหน่งโรเตอร์ทำให้กระแสไฟฟ้าขณะออกตัวเริ่มต้นลดลง และผลการทดสอบเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบ สำหรับย่านการควบคุมความเร็วรอบที่ 500 ถึง 4,500 รอบต่อนาที ในแต่ละระดับความเร็วรอบ สามารถควบคุมความเร็วได้เป็นไปตามความเร็วรอบคำสั่ง และการทดสอบขณะมอเตอร์รับภาระแรงบิด ในแต่ละระดับความเร็วรอบ การควบคุมยังคงรักษาระดับความเร็วรอบให้คงที่

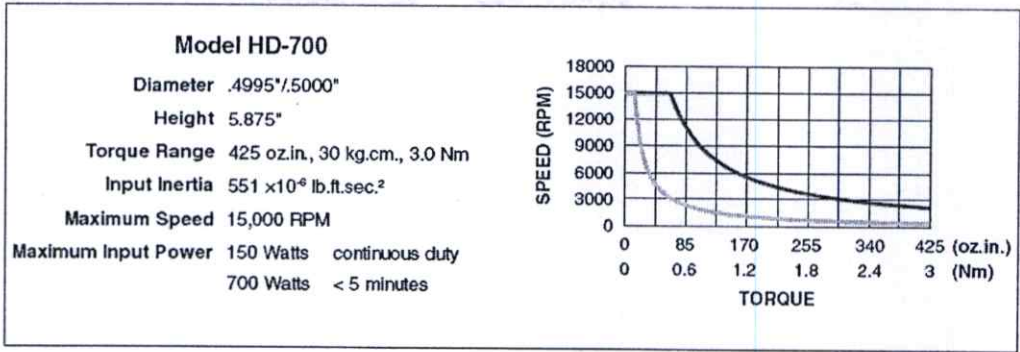
### 5.7 การทดสอบทางด้านพลวัตของมอเตอร์

การทดสอบทางด้านพลวัต เพื่อหาสมรรถนะของมอเตอร์ โดยทำการทดสอบแต่ละระดับความเร็วรอบในย่านการควบคุม ตั้งแต่ 500 รอบต่อนาที ถึง 4,500 รอบต่อนาที เพิ่มขึ้นทีละ 500 รอบต่อนาที ลักษณะการทดสอบในรูปที่ 5.28 ซึ่งจะประกอบด้วยตัวควบคุมชุดทดสอบ (DSP6001) ชุดทดสอบทางด้านพลวัต (HD-700) ชุดควบคุมกำลังไฟฟ้า (6530) โปรแกรมควบคุมชุดทดสอบทางด้านพลวัต (M-TEST 4.0) และเครื่องควบคุมมอเตอร์ต้นแบบ โดยการทดสอบทางด้านพลวัตของมอเตอร์ใช้การทดสอบแบบ Hysteresis รุ่น HD-700 บริษัท Magtrol [27] แรงบิดมากสุดของเครื่อง 425 อนุช-นิว (3.0 นิวตัน-เมตร) ดังแสดงข้อมูลของเครื่องทดสอบในรูปที่ 5.29 แสดงแรงบิดกับความเร็วรอบของเครื่องทดสอบทางด้านพลวัต สำหรับการทดสอบ



รูปที่ 5.28 โดอะแกรมการทดสอบทางด้านพลวัตของมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.29 ข้อมูลของตัวทดสอบทางด้านพลวัต

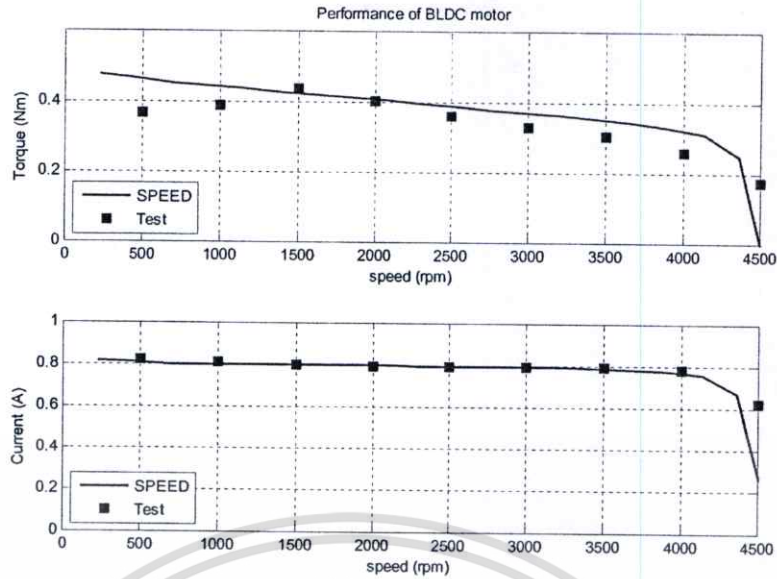
### 5.7.1 ผลการทดสอบทางด้านพลวัต

ในตารางที่ 5.4 แสดงผลการทดสอบจากการวัดทางด้านสมรรถนะของมอเตอร์ ในแต่ละความเร็วรอบมอเตอร์ ซึ่งจะประกอบด้วยแรงบิด กระแสไฟฟ้าเฟส กำลังไฟฟ้าทางด้านเข้า และประสิทธิภาพ เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบมาเปรียบเทียบกับ โปรแกรมการออกแบบมอเตอร์ SPEED ในรูปที่ 5.30-5.31 โดยเปรียบเทียบแรงบิด กระแสไฟฟ้าเฟส กำลังไฟฟ้าทางด้านเข้า และประสิทธิภาพของมอเตอร์

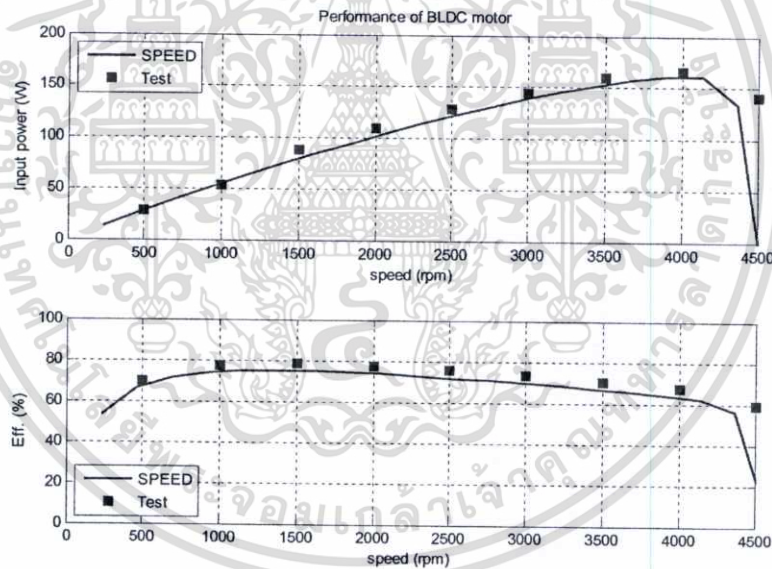
ตารางที่ 5.4 ผลการทดสอบทางด้านพลวัตของมอเตอร์

Speed (rpm)	Torque (Nm)	Current (A)	Input power (W)	Efficiency (%)
500	0.37	0.82	28.1	69.65
1,000	0.39	0.81	53.6	77.6
1,500	0.44	0.8	88.6	78.68
2,000	0.41	0.79	109.8	77.4
2,500	0.36	0.79	128	75.46
3,000	0.33	0.79	145	73.13
3,500	0.307	0.79	160	70.4
4,000	0.26	0.78	165	67.4
4,500	0.176	0.62	141	60.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.30 การเปรียบเทียบผลทดสอบแรงบิด และกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์จากโปรแกรม ออกแบบ SPEED และผลทดสอบทางด้านพลวัต



รูปที่ 5.31 การเปรียบเทียบผลทดสอบกำลังไฟฟ้าด้านเข้า และประสิทธิภาพของมอเตอร์จาก โปรแกรมออกแบบ SPEED และผลทดสอบพลวัต

### 5.7.2 สรุปผลการทดสอบ

สรุปผลการทดสอบทางด้านพลวัต เมื่อเปรียบเทียบกับ โปรแกรมการออกแบบมอเตอร์ในแต่ละระดับความเร็วรอบมอเตอร์ ดังแสดงในรูปผลการทดสอบ ทางด้านประสิทธิภาพของมอเตอร์ ในแต่ละความเร็วรอบมอเตอร์ผลที่ได้ ใกล้เคียงกับ โปรแกรม สำหรับการทดสอบหาสมรรถนะของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

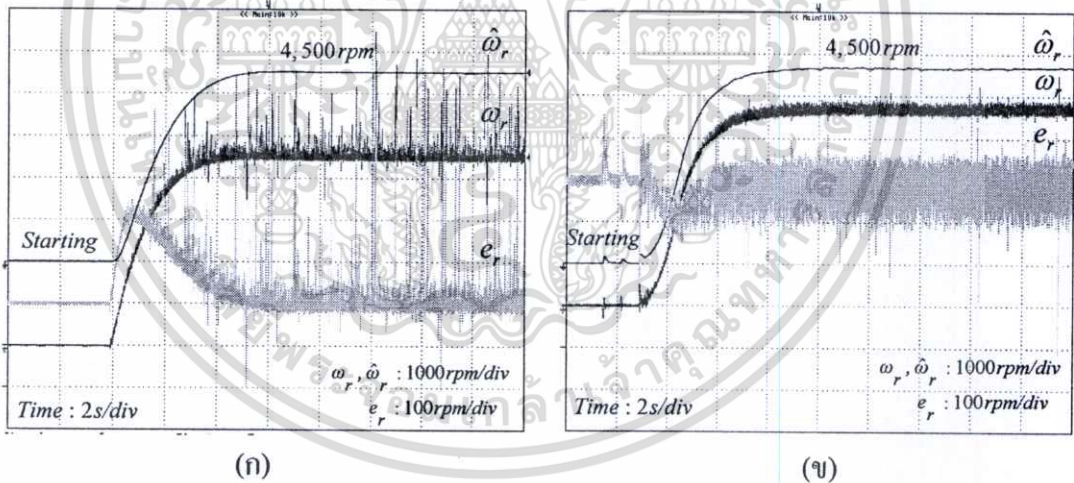
มอเตอร์ที่ใช้สำหรับการทดสอบในงานวิจัยนี้ ซึ่งแสดงถึงผลการวิเคราะห์สนามแม่เหล็ก กับผลการทดสอบที่ได้จริง

## 5.8 เปรียบเทียบการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์

การเปรียบเทียบในการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ จากผลการทดสอบจะเปรียบเทียบระหว่างการควบคุมมอเตอร์แบบใช้ตัวตรวจจับตำแหน่งกับการควบคุมแบบปราศจากตัวตรวจจับ แสดงรายละเอียดตามหัวข้อการเปรียบเทียบ ดังต่อไปนี้

### 5.8.1 การออกตัวขณะเริ่มต้นแบบใช้ตัวตรวจจับ

ผลจากการทดสอบเปรียบเทียบการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ ระหว่างการควบคุมแบบใช้ตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ ในรูปที่ 5.32 (ก) เป็นแบบใช้ตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ และการควบคุมความเร็วแบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ และในรูปที่ 5.32 (ข) เป็นแบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ สำหรับการทดสอบเปรียบเทียบความเร็วรอบ ขณะเริ่มต้นถึงความเร็วพิกัดมอเตอร์ แสดงผลในการทดสอบทั้งสองระบบควบคุม ดังนี้

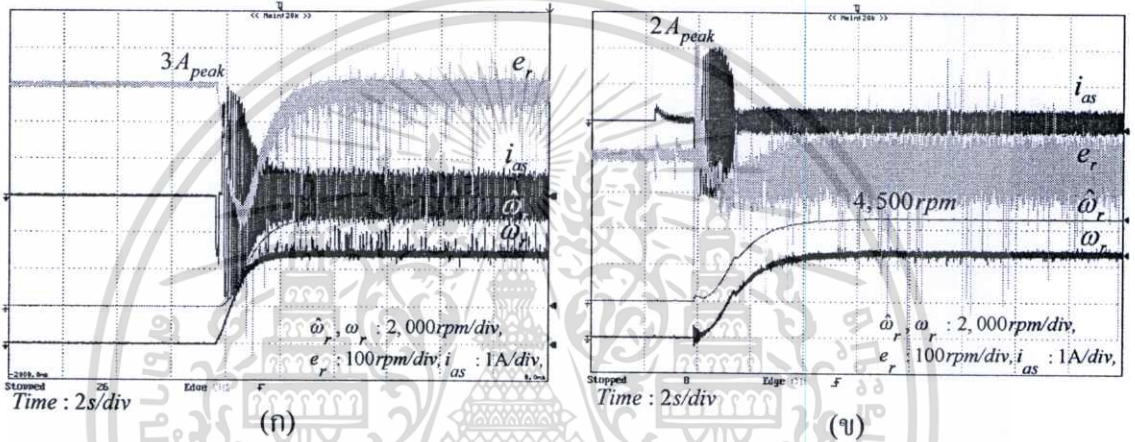


รูปที่ 5.32 การเปรียบเทียบการควบคุมความเร็ว (ก) แบบใช้ตัวตรวจจับตำแหน่ง (ข) แบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่ง

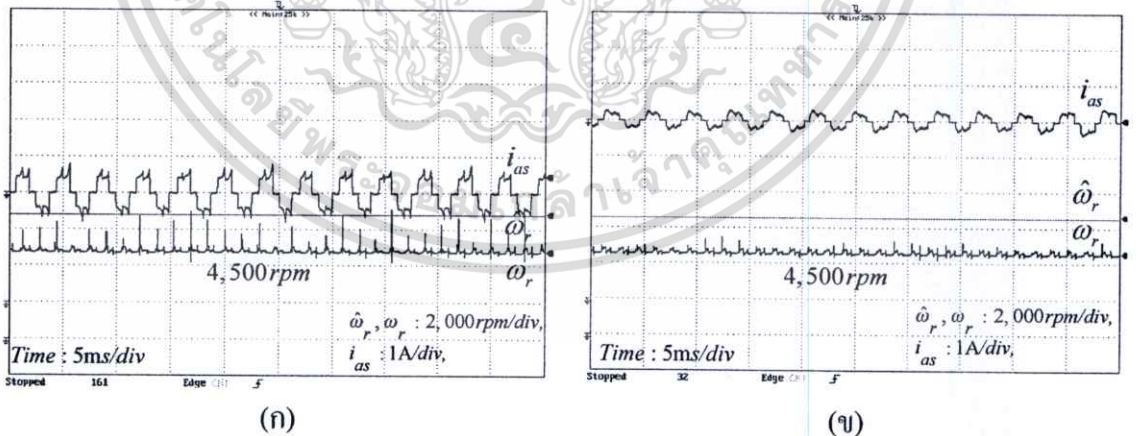
### 5.8.2 กระแสไฟฟ้าและความเร็วรอบผิดพลาดจากการควบคุม

ผลจากการทดสอบเปรียบเทียบการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์แบบใช้ตัวตรวจจับตำแหน่งแบบปรากฏการณ์ฮอลล์ และแบบปราศจากตัวตรวจจับขณะออกตัวเริ่มต้น ซึ่งการออกตัวทันทีทันใด ทำให้กระแสไฟฟ้าขณะเริ่มต้นสูงถึงค่ายอดคลื่น 3 แอมป์ แสดงในรูปที่ 5.33 (ก) ความเร็วรอบจะเข้าสู่ความเร็วพิกัดเร็วกว่า แต่ทำให้ความเร็วรอบผิดพลาดมากกว่าเนื่องจากเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตำแหน่งของโรเตอร์นั้นไม่สัมพันธ์กันสัญญาณการขับเคลื่อนจึงส่งผลให้ความเร็วรอบเริ่มต้นจากการออกตัวแบบทันทีทันใดนั้นสูงกว่าการออกตัวแบบปราศจากตัวตรวจจับ ส่วนการควบคุมของเครื่องต้นแบบจะใช้เทคนิคการกระตุ้นสนามแม่เหล็กที่ขดลวดสเตเตอร์ขณะเริ่มต้นก่อน แล้วขับเคลื่อนแบบวงรอบเปิด และวงรอบเปิดตามลำดับ ซึ่งจะทำให้กระแสไฟฟ้าขณะออกตัวเริ่มต้นนั้นน้อยกว่า เพียงแค่ค่ายอดคลื่น 2 แอมป์ แสดงในรูปที่ 5.33 (ก) และการทดสอบขณะสภาวะคงตัวจะแสดงในรูป 5.34 (ก) แบบใช้ตัวตรวจจับ และในรูป 5.34 (ข) แบบปราศจากตัวตรวจจับ แสดงลักษณะของกระแสไฟฟ้าเฟส ความเร็วรอบมอเตอร์ที่พิกัด 4,500 รอบต่อนาที และกระแสไฟฟ้าเฟส ระหว่างชุดควบคุมแบบใช้ตัวตรวจจับกับชุดควบคุมต้นแบบ



รูปที่ 5.33 การออกตัวเริ่มต้นของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ (ก) ใช้ตัวตรวจจับ (ข) ปราศจากตัวตรวจจับ



รูปที่ 5.34 ความเร็วรอบ 4,500 รอบต่อนาที (ก) ใช้ตัวตรวจจับ (ข) ปราศจากตัวตรวจจับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.9 บทสรุป

ในบทสรุปผลการทดสอบในบทนี้แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของตำแหน่งโรเตอร์ กับการควบคุมมอเตอร์ที่ใช้แม่เหล็กถาวรเป็นสนามแม่เหล็กกระตุ้นแทนขดลวด เนื่องจากการขับเคลื่อนสัญญาณกับตำแหน่งของโรเตอร์นั้นจะต้องมีความสัมพันธ์กันเพื่อที่จะควบคุมมอเตอร์ การทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์แบบไม่สนใจตำแหน่งโรเตอร์ การทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์แบบใช้ตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์แบบปรากฏการณ์ฮอลล์ และการควบคุมความเร็วรอบแบบใช้ตัวตรวจจับเปรียบเทียบกับ การควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์แบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่ง โดยอาศัยแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับที่เกิดขึ้น จากความสัมพันธ์กับความเร็วรอบมอเตอร์ ในการค้นหาตำแหน่งโรเตอร์ขณะเริ่มต้น และเปรียบเทียบกับ การออกตัวเริ่มต้นขณะการควบคุมแบบใช้ตัวตรวจจับตำแหน่งแบบปรากฏการณ์ฮอลล์ และแบบปราศจากตัวตรวจจับ จะเห็นว่าขณะออกตัวเริ่มต้นของการควบคุมแบบใช้ตัวตรวจจับ กระแสไฟฟ้าขณะเริ่มต้นจะสูงกว่า และความเร็วรอบผิดพลาดขณะเริ่มต้นมากกว่า เนื่องจากการขับเคลื่อนขณะเริ่มต้นนั้น ตำแหน่งของโรเตอร์กับสัญญาณการขับเคลื่อนมอเตอร์นั้นไม่สัมพันธ์กัน จึงทำให้กระแสไฟฟ้า และความเร็วรอบขณะเริ่มต้นนั้นสูงกว่า การขับเคลื่อนแบบปราศจากตัวตรวจจับ แต่ความเร็วในการเข้าสู่ความเร็วพิกัดนั้นเร็วกว่า เนื่องจากสัญญาณตำแหน่งของโรเตอร์จะถูกส่งผ่านตัวตรวจจับตำแหน่งแบบปรากฏการณ์ฮอลล์ จึงทำให้การรับค่าของตำแหน่งโรเตอร์นั้นเร็วกว่า ทำให้การควบคุมความเร็วแบบใช้ตัวตรวจจับตำแหน่งเข้าสู่ความเร็วพิกัดได้เร็วกว่าแบบปราศจากตัวตรวจจับ

## บทสรุปการวิเคราะห์ผลทดลองและข้อเสนอแนะ

ในการศึกษาทดลอง และออกแบบวงจรสำหรับควบคุมความเร็วมอเตอร์แบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ ความจำเป็นในการรู้ตำแหน่งของโรเตอร์ขณะเริ่มต้น มีความสัมพันธ์กันระหว่างสัญญาณในการขับเคลื่อนมอเตอร์กับตำแหน่งของ โรเตอร์ ขณะที่ขับเคลื่อนมอเตอร์นั้น หากขับเคลื่อนสัญญาณกับตำแหน่งของ โรเตอร์ไม่สัมพันธ์กัน จะส่งผลทำให้การควบคุมมอเตอร์ นั้นขาดเสถียรภาพในระบบควบคุมมอเตอร์ ทำให้กระแสไฟฟ้าขณะออกตัวเริ่มต้นนั้นสูงไป ด้วย เนื่องจากไม่ทราบตำแหน่งของ โรเตอร์ขณะเริ่มต้น และการขับเคลื่อนมอเตอร์โดยไม่สนใจ ตำแหน่งของ โรเตอร์นั้น ส่งผลให้มอเตอร์เกิดการสั่นตัว และความร้อนจากกระแสไฟฟ้าที่ไม่สัมพันธ์กันกับสนามแม่เหล็กทางด้าน โรเตอร์

### 6.1 สรุปผลการทำวิจัย

การวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอ การควบคุมความเร็วแบบปราศจากตัวตรวจจับ ตำแหน่งอย่างประหยัด สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน พิกัดกำลัง 100 วัตต์ 30 โวลต์ 4500 รอบต่อนาที ชนิดแม่เหล็กถาวรติดพื้นผิวโรเตอร์ นำเสนอหลักการ และวิธีการ ขับเคลื่อนมอเตอร์ขณะเริ่มต้น ด้วยเทคนิคการกระตุ้นสนามแม่เหล็กที่ขดลวดสเตเตอร์ ขับเคลื่อน แบบวงรอบเปิด ด้วยเทคนิคสัญญาณสี่เหลี่ยม 120 องศา และขับเคลื่อนแบบวงรอบเปิด โดยการ ควบคุมความเร็วแบบพีไอ ส่วนผลการทดสอบแสดงถึงความสำคัญของตำแหน่ง โรเตอร์ กับการ ควบคุมมอเตอร์ที่ใช้แม่เหล็กถาวรเป็นสนามแม่เหล็กกระตุ้นแทนขดลวด เนื่องจากการขับเคลื่อน สัญญาณกับตำแหน่งของ โรเตอร์นั้นจะต้องมีความสัมพันธ์กันสำหรับควบคุมมอเตอร์ การทดสอบ ขับเคลื่อนมอเตอร์โดยไม่สนใจตำแหน่งของ โรเตอร์ การทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์โดยใช้ตัว ตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ และการควบคุมความเร็วรอบแบบใช้ตัวตรวจจับ เปรียบเทียบกับการ ควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์แบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่ง ที่อาศัยแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับ ที่เกิดขึ้นจากความสัมพันธ์กันของความเร็วรอบมอเตอร์ และค้นหาตำแหน่ง โรเตอร์ขณะเริ่มต้น เพื่อช่วยในการขับเคลื่อนมอเตอร์ขณะออกตัว ในชุดควบคุมต้นแบบช่วยลดกระแสไฟฟ้าขณะออก ตัวเริ่มต้น เนื่องจากทราบตำแหน่งของ โรเตอร์เริ่มต้นด้วยเทคนิคการกระตุ้นสนามแม่เหล็กที่ ขดลวดสเตเตอร์ และขับเคลื่อนสัญญาณตามตำแหน่งของ โรเตอร์ที่สัมพันธ์กัน

## 6.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดสอบในงานวิจัยของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะเริ่มทดสอบตั้งแต่การขับเคลื่อนมอเตอร์โดยไม่สนใจตำแหน่งของโรเตอร์ การขับเคลื่อนมอเตอร์โดยใช้ตัวตรวจจับตำแหน่ง และการควบคุมแบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่ง ตามการทดสอบในบทที่ 5 ดังจะแสดงรายละเอียดในแต่ละการทดสอบต่อไปนี้

### 6.2.1 การทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์โดยไม่สนใจตำแหน่งโรเตอร์

ผลจากการผลทดสอบจะเห็นว่า การขับเคลื่อนมอเตอร์ โดยไม่สนใจตำแหน่งโรเตอร์นั้น สังเกตกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์จะสูง เกิดอาการสั่น เสียงดัง และเมื่อมอเตอร์หมุนได้สักพัก มอเตอร์จะเริ่มร้อนขึ้น ทำให้ไม่สามารถขับเคลื่อนมอเตอร์ต่อไปได้ จะส่งผลทำให้มอเตอร์นั้นเสียหายได้ จากการทดสอบจะเห็นได้ว่าตำแหน่งของโรเตอร์กับการขับเคลื่อนมอเตอร์นั้นไม่สัมพันธ์กัน ส่งผลทำให้กระแสไฟฟ้าสูงตาม เกิดอาการมอเตอร์สั่น และมอเตอร์ร้อนเนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่สูง

### 6.2.2 การทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์โดยใช้ตัวตรวจจับ

การทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์โดยใช้ตัวตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์ ทำการทดสอบเปรียบเทียบกับ การทดสอบโดยไม่สนใจตำแหน่งแล้ว จะเห็นว่าลักษณะการขับเคลื่อนมอเตอร์นั้นแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ดังจะสังเกตได้จากสัญญาณของแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้น แสดงให้เห็นว่าการขับเคลื่อนมอเตอร์กับตำแหน่งของโรเตอร์นั้นมีความสัมพันธ์กันอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน จำเป็นต้องมีอุปกรณ์ตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์ สำหรับการควบคุมมอเตอร์ โดยทั่วไปจะใช้อุปกรณ์ตรวจจับตำแหน่งแบบปรากฏการณ์ฮอลล์

### 6.2.3 การทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์โดยใช้สัญญาณ PWM

สรุปผลการทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์แบบสัญญาณ PWM โดยใช้ตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ กับสัญญาณขับเคลื่อนมอเตอร์แบบ PWM เมื่อมอเตอร์ถูกขับเคลื่อนสัญญาณขับเคลื่อนมอเตอร์ให้เป็นไปตามตำแหน่งของโรเตอร์ ผลที่ได้จะทำให้อาการสั่น และเสียงดังของมอเตอร์นั้นลดลง เนื่องจากความสัมพันธ์ของตำแหน่งโรเตอร์กับสัญญาณการขับเคลื่อนมอเตอร์ ซึ่งสามารถนำเทคนิคการขับเคลื่อนแบบ PWM ไปหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับที่เกิดขึ้น ในช่วงที่มอเตอร์เปิด สำหรับการควบคุมแบบปราศจากตัวตรวจจับ เมื่อนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ได้ผ่านการกรองความถี่ออก สำหรับค้นหาตำแหน่งโรเตอร์ ในแต่ละความเร็รรอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 6.2.4 การทดสอบควบคุมความเร็วมอเตอร์โดยใช้ตัวตรวจจับตำแหน่ง

การทดสอบควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ ที่ใช้ตัวตรวจจับตำแหน่งแบบปรากฏการณ์ฮอลล์นั้น จะควบคุมตามตำแหน่งโรเตอร์ซึ่งสอดคล้องกับสัญญาณในการขับเคลื่อนแบบสัญญาณสี่เหลี่ยม 120 องศา และผลการทดสอบเปรียบเทียบกับความเร็วรอบมอเตอร์จากการวัด ( $\omega_r$ ) กับความเร็วรอบจากการคำนวณ ( $\hat{\omega}_r$ ) ซึ่งได้จากสัญญาณของปรากฏการณ์ฮอลล์ ขณะเริ่มต้นจนถึงความเร็วพิกัด จะพบว่าความเร็วขณะเพิ่มขึ้นนั้นมีความผิดพลาดจากการควบคุมตำแหน่งโรเตอร์กับสัญญาณการขับเคลื่อนมอเตอร์ ส่งผลให้ความเร็วรอบผิดพลาด ( $e_r$ ) ขณะออกตัวเริ่มต้นนั้น แต่เมื่อเข้าสู่ความเร็วรอบพิกัดแล้ว จะเห็นว่าความเร็วรอบที่ผิดพลาดนั้นลดลง

#### 6.2.5 การทดสอบควบคุมความเร็วมอเตอร์โดยปราศจากตัวตรวจจับ

การทดสอบในการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์แบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ โดยอาศัยแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับที่เกิดขึ้น เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับวงจรถักโครสซึ่ง สำหรับคำนวณหาตำแหน่งของโรเตอร์ และความเร็วรอบมอเตอร์ ในผลการทดสอบแสดงสัญญาณขับเคลื่อนแบบ PWM และการค้นหาตำแหน่งโรเตอร์ขณะเริ่มต้นด้วยเทคนิคการกระตุ้นสนามแม่เหล็กที่ขดลวดสเตเตอร์ เมื่อรู้ตำแหน่งของโรเตอร์แล้วจะทำการขับเคลื่อนสัญญาณตามตำแหน่งโรเตอร์ ผลจากการทราบตำแหน่งโรเตอร์จะทำให้กระแสไฟฟ้าขณะออกตัวเริ่มต้นนั้นลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับการออกตัวแบบทันทีทันใด และผลการทดสอบเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบในย่านของการควบคุมความเร็วที่ 500 ถึง 4500 รอบต่อนาที ในแต่ละระดับความเร็วรอบสามารถควบคุมความเร็วได้เป็นไปตามความเร็วรอบคำสั่ง และการทดสอบขณะมอเตอร์รับโหลด ในแต่ละระดับความเร็วรอบ การควบคุมยังคงรักษาระดับความเร็วรอบให้คงที่จากการควบคุมความเร็วรอบด้วยการควบคุมแบบพีไอ

#### 6.2.6 การทดสอบทางด้านพลวัตของมอเตอร์

การทดสอบทางด้านพลวัตทำการเปรียบเทียบกับ โปรแกรมการออกแบบมอเตอร์ในแต่ละระดับความเร็วรอบมอเตอร์ แสดงในรูปผลการทดสอบ ทางด้านประสิทธิภาพของมอเตอร์ในแต่ละความเร็วรอบมอเตอร์ผลที่ได้ ใกล้เคียงกันกับ โปรแกรมออกแบบ สำหรับการทดสอบเพื่อหาสมรรถนะของมอเตอร์ สำหรับการทดสอบในงานวิจัยนี้ ซึ่งแสดงถึงผลการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กกับผลการทดสอบที่ได้จริงนั้นมีความสอดคล้องกัน

### 6.3 ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับวิทยานิพนธ์

1. เพื่อให้ได้ประโยชน์อย่างยิ่งในการนำเสนองานวิจัย ควรมีขยายพิสัยกำลังของมอเตอร์ให้ มีกำลังมากขึ้น และสามารถนำไปใช้กับงานควบคุมความเร็วมอเตอร์แบบปราศจากตัวตรวจจับ ตำแหน่งโรเตอร์ ทางด้านงานอุตสาหกรรม เครื่องใช้ในครัวเรือน งานทางด้านการควบคุมอัตโนมัติ
2. เพื่อให้ชุดควบคุมความเร็วมอเตอร์มีความยืดหยุ่นในการใช้งาน ควรมีการพัฒนาให้ สามารถใช้กับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน ชนิดแม่เหล็กฝังภายในโรเตอร์ได้ด้วย และอาศัยหลักการเดียวกันที่นำเสนอในงานวิจัยต่อไป
3. การนำไปใช้งานจริงควรคำนึงถึง เรื่องการประหยัดพลังงานสำหรับระบบควบคุม ระดับ แรงดันไฟฟ้าที่ใช้กับอุปกรณ์ในระดับแรงดันต่ำ ซึ่งมีอุปกรณ์ตัวใหม่ของ dsPIC ที่สนับสนุนเรื่อง การประหยัดพลังงาน โดยลดระดับของแรงดันไฟฟ้าที่ใช้งานในอุปกรณ์ชุดควบคุม
4. จากชุดควบคุมต้นแบบที่นำเสนอสามารถย่อส่วนให้มีขนาดเล็กกว่าเดิม เพื่อลดขนาดให้ เหมาะสมในเรื่องของต้นทุนการผลิต และการใช้งานในการติดตั้งกับระบบควบคุมมอเตอร์
5. มีการพัฒนาชุดควบคุมมอเตอร์ให้สามารถควบคุมความเร็วรอบทั้งหมดตามเข็ม และ ทวนเข็มนาฬิกา

## บรรณานุกรม

- [1] John Chiasson, "**Modeling and High - Performance Control of Electric Machines**", IEEE Press series on power engineering, John Wiley & Sons, 2005.
- [2] J.R. Hendershot, TJE. Miller, "**Design of brushless Permanent Magnet Motor**", Oxford University Press, Monographs in Electrical and Electronic Engineering No. 37, 1994.
- [3] TJE. Miller, "**SPEED Electric Motors**", University of Glasgow in Electrical and Electronic Engineering, 2004.
- [4] Peter VAS, "**Vector Control of AC Machines**", Clarendon press, OXFORD, 1990.
- [5] Peter VAS, "**Parameter Estimation, Condition Monitoring, and Diagnosis of Electrical Machines**", Clarendon press, OXFORD, 1993.
- [6] Peter Vas, "**Sensorless Vector and Direct Torque Control**", OXFORD University, 1998.
- [7] Tae-Hyung Kim, Mehrdad Ehsani, "**An Error Analysis of the Sensorless Position Estimation for BLDC Motor**", Industry Applications Conference, IAS Con., Vol.1, pp.611-617, 2003.
- [8] P. Damodharan, K. Vasudrean, "**Indirect Back-EMF Zero Crossing Detection for Sensorless BLDC Motor Operating**", Power Electronics and Drive Systems Conference, PEDS Con., Vol.2, pp.1107-1111, 2005.
- [9] Li Qiang, Lin Mingyao et al., "**Research on Filters for Back EMF Zero-Crossing Detecting in Sensorless BLDC Motor Drive**", International Conference on Electrical Machines and Systems, ICEMS, Vol.2, pp.1899-1902, 2005.
- [10] 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.
- [11] Microchip Technology Inc, "**MPLAB**", Available 2007, ([www.microchip.com](http://www.microchip.com)).
- [12] Microchip Technology Inc, "**dsPIC30F4011**", Available 2007, ([www.microchip.com](http://www.microchip.com)).
- [13] SPEED Consortium, "**PC-BDC User's Manual**", University of Glasgow in Electrical and Electronic Engineering, 2008.
- [14] SPEED Consortium, "**PC-BDC 8.0.1**", University of Glasgow in Electrical and Electronic Engineering, 2008.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [15] Jianwen Shao, Dennis Nolan et al., “**A Novel Microcontroller-based Sensorless Brushless DC (BLDC) Motor Drive for Automotive Fuel Pump**”, IEEE Transaction on Industry Applications, Vol.39, No.6, pp.1734-1740, 2003.
- [16] H.C. Chen, Y.C. Chang and C.K. Huang, “**Practical Sensorless Control for Inverter- fed BDCM Compressor**”, IET Electric Power Application, Vol.1, No.1, pp.127-132, 2007.
- [17] J. Shao, D. Nolan, “**Further Improvement of Direct Back EMF Detection for Sensorless Brushless DC (BLDC) Motor Drives**”, Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC, Vol.2, pp.933-937, 2005.
- [18] Zezhong Xia, Wen Li et al., “**Design of a Control System for Sensorless Brushless DC Motor Using the dsPIC**”, Industrial Electronics and Applications, ICIEA, pp.551-556, 2008.
- [19] K.S. Rama Rao, Nagadeven et al., “**Sensorless Control of a BLDC Motor with Back EMF Detection Method using DSPIC**”, Power and Energy Conference, PECon, pp.243-248, 2008.
- [20] Kwang-woon Lee, Dae-kyong Kim et al., “**A Novel Starting Method of the Surface Permanent Magnet BLDC Motors without Position Sensor for Reciprocating Compressor**”, IEEE Transaction on Industry Applications, Vol.44, No.1, pp.85-92, 2008.
- [21] Tae-Hyung Kim, Mehrdad Ehsani, “**Sensorless Control of the BLDC Motors From Near-Zero to High Speeds**”, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.19, No.6, pp.1635-1645, 2004.
- [22] J. Wisniewski, W. Kaczara, “**The Sensorless Rotor Position Identification and Low Speed Operation of the Axial Flux Permanent Magnet Motor Controlled by the Novel PIPCRM Method**”, Power Electronics Specialists Conference, PESC, pp.1502-1507, 2008.
- [23] Chuanyang Wang, Longya Xu, “**A Novel Approach for Sensorless Control of PM Machines Down to Zero Speed without Signal Injection or Special PWM Technique**”, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.19, No.6, pp.1601-1607, 2004.
- [24] Jonathan Adams, “**Bootstrap Component Selection For Control IC’s**”, Design tip, DT 98-2a, (www.irf.com).
- [25] A. Merello, A. Rugginenti et al., “**Using monolithic high voltage gate drivers**”, Design tip, DT04-4, (www.irf.com).

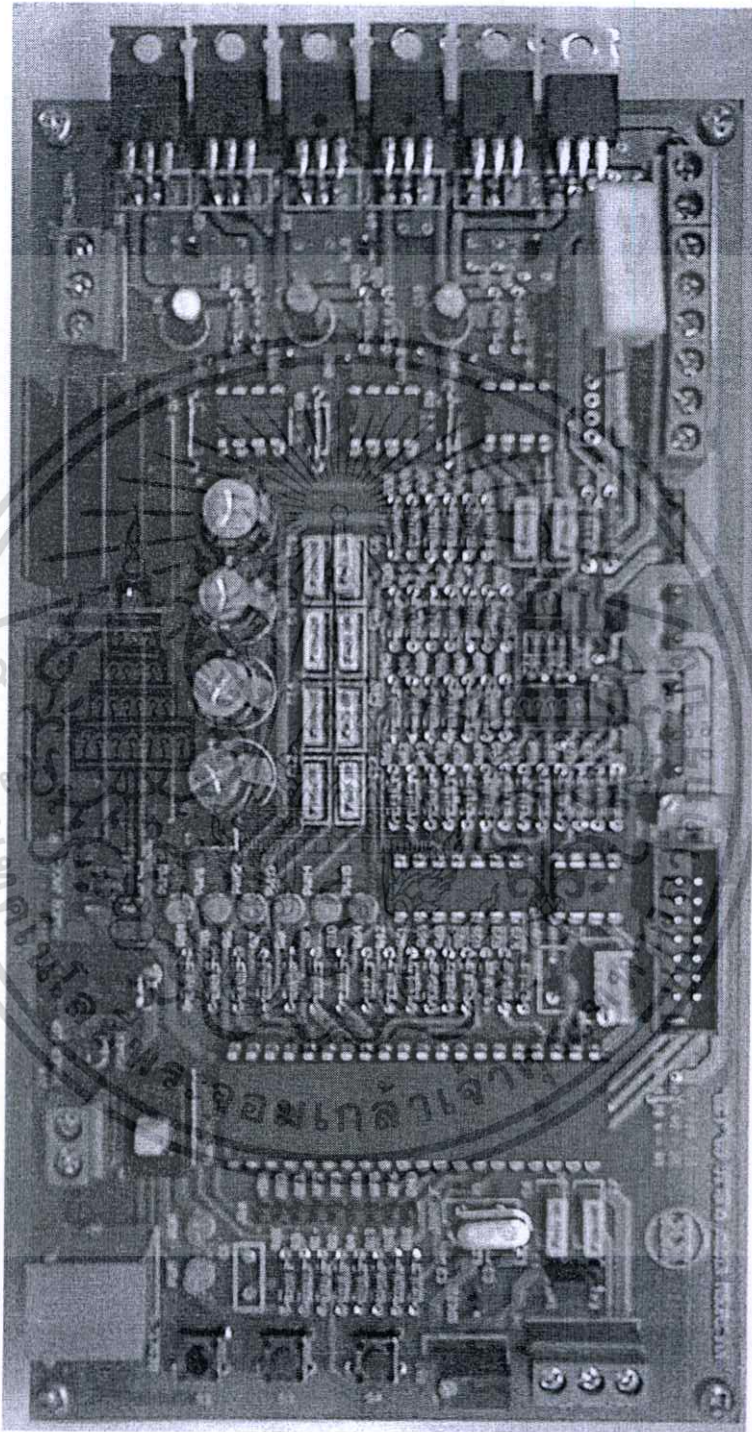
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [26] International Rectifier, “HV Floating MOS-Gate Driver ICs”, Application Note, AN-978, (www.irf.com).
- [27] Magtrol, “HD-700 Series Hysteresis Dynamometers”, HD-700 Data sheet, (www.magtrol.com).
- [29] R.Krishnan, “Electric Motor Drives Modeling, Analysis, and Control”, Virginia Tech, Blacksburg, VA, 2001.
- [30] วีระเชษฐ์ ชันเงิน, วุฒิพล ธาราธิรเศรษฐ์ “อิเล็กทรอนิกส์กำลัง” คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2547
- [31] วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ “การควบคุมระบบพลศาสตร์” คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538



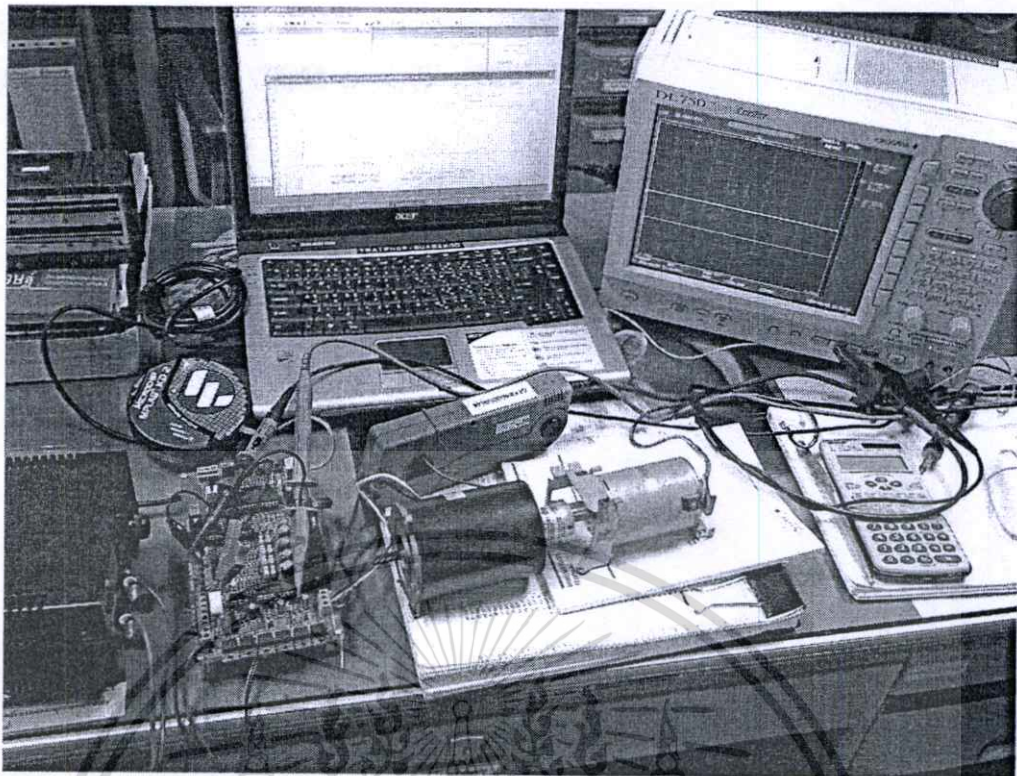


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก1 ชุดควบคุมความเร็วมอเตอร์ต้นแบบที่สร้างขึ้น (อัตราส่วน 1:1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

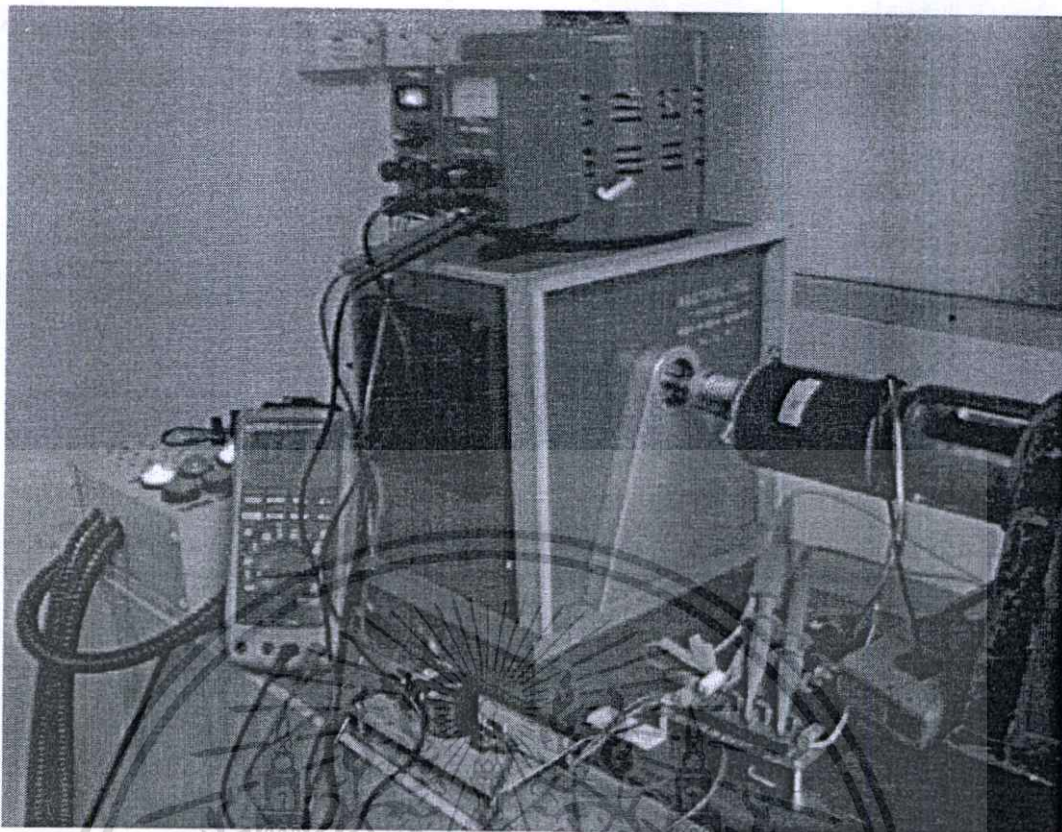


รูปที่ ก2 การทดสอบ และบันทึกค่าการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน

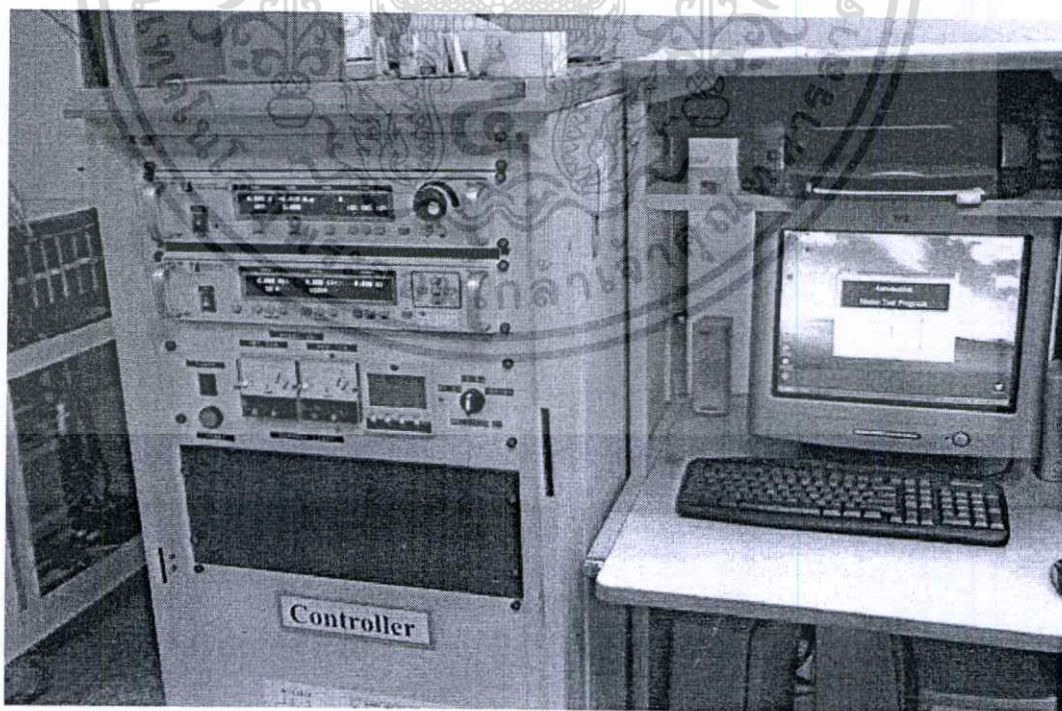


รูปที่ ก3 การทดสอบ และบันทึกค่าสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก4 การทดสอบทางด้านพลวัต ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน





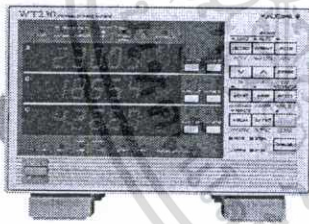
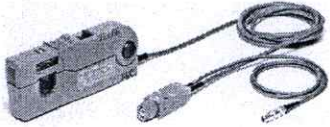
รูปที่ ก5 การทดสอบ และบันทึกค่าการทดสอบทางด้านพลวัต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



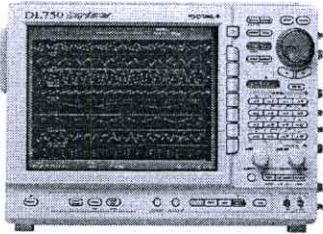


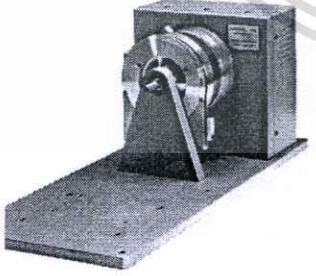
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข1 เครื่องมือสำหรับการทดสอบในงานวิจัยนี้

	<p><b>ผลิตภัณฑ์</b> Multimeter (FLUKE)</p> <p><b>รุ่น</b> Fluke 189 DMM</p> <p><b>รายละเอียด</b> True RMS Multimeter, 100 kHz Bandwidth</p> <p><math>\pm 0.025\%</math> of DC Voltage Accuracy</p> <p><math>\pm 0.04\%</math> of AC Voltage Accuracy</p> <p><math>\pm 0.05\%</math> of Resistance Accuracy</p> <p><math>\pm 1.00\%</math> of Capacitance Accuracy</p>
	<p><b>ผลิตภัณฑ์</b> Digital Multimeter (YOKOGAWA)</p> <p><b>รุ่น</b> 7552 (5-1/2 Digits)</p> <p><b>รายละเอียด</b> 4-Wire Resistance Measurement (OHM)</p> <p><math>\pm 0.003\%</math> Accuracy of Span</p>
	<p><b>ผลิตภัณฑ์</b> Power Meter (YOKOGAWA)</p> <p><b>รุ่น</b> WT230</p> <p><b>รายละเอียด</b> Three Phase Model (3P3W, 3P4W)</p> <p>(<math>\pm 0.1\%</math> of rdg+0.1% of rng) Power Accuracy</p> <p>DC, 0.5Hz to 100kHz Power Measurement</p> <p>Frequency Range</p> <p>0.5/1/2/5/10/20 Arms Input Current Range</p> <p>15/30/60/150/300/600Vrms Input Voltage Range</p> <p>Math Function, GP-IB or RS-232 Interface</p>
	<p><b>ผลิตภัณฑ์</b> Current Probe (YOKOGAWA)</p> <p><b>รุ่น</b> 701930</p> <p><b>รายละเอียด</b> DC to 10 MHz Analog Bandwidth</p> <p>150 Arms Input Current Range</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข1 เครื่องมือสำหรับการทดสอบในงานวิจัยนี้ (ต่อ)

	<p><b>ผลิตภัณฑ์</b> Digital Oscilloscope (YOKOGAWA)</p> <p><b>รุ่น</b> DL750</p> <p><b>รายละเอียด</b> Compact, 16ch isolated inputs (8 module slots) 150 MHz Analog Bandwidth 10 MS/s, 12-bit A/D Resolution Dual Capture Function, GIGA Zoom Function</p>
	<p><b>ผลิตภัณฑ์</b> Power Analyzers (MAGTROL)</p> <p><b>รุ่น</b> 6530</p> <p><b>รายละเอียด</b> Three Phase Power Measurements 0.1% of Power Accuracy DC to 100kHz, Bandwidth 120/240Vrms, 60/50 Hz, Input Voltage</p>
	<p><b>ผลิตภัณฑ์</b> Dynamometer Controller (MAGTROL)</p> <p><b>รุ่น</b> DSP6001</p> <p><b>รายละเอียด</b> 0.01% of Speed Accuracy 0.02% of Range (<math>\pm 5V</math>) of Torque Accuracy 120/240Vrms, 60/50Hz, Input Voltage</p>
	<p><b>ผลิตภัณฑ์</b> Hysteresis Dynamometer (MAGTROL)</p> <p><b>รุ่น</b> HD-700-6</p> <p><b>รายละเอียด</b> 25 to 55 lb-in (3.0 to 6.5 Nm) Maximum Torque <math>\pm 0.25\%</math> to <math>\pm 0.25\%</math> (Full Scale) Accuracy 15,000RPM Maximum Speed 700 Watts Max. Power Ratings</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ค  
ผลงานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่ในวารสารทางวิชาการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 50200  
 โทร.(053)944176-7 โทรสาร (053)217287

Engineering Journal Chiang Mai University, Thailand.  
 Tel.+66(53)944176-7 Fax.+66(53)217287

ที่ ศธ 6393(14).1(5)/ 156

๕ เมษายน 2552

เรื่อง คอบรับบทความทางวิชาการ

เรียน คุณ ไครภพ บัวระกอด

ตามที่ ท่าน ได้ส่งบทความทางวิชาการ เรื่อง "วิธีการค้นหาตำแหน่งโรเตอร์ขณะเริ่มต้น ที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับเป็นศูนย์ ด้วยเทคนิคการกระตุ้นสนามแม่เหล็กที่ขดลวด สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน" เพื่อนำพิมพ์เผยแพร่ในวารสารวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ นั้น

ทางบรรณาธิการ ได้พิจารณา และมีความเห็นว่าบทความของท่านมีความเหมาะสมที่จะลงพิมพ์เผยแพร่ในวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ปีที่ 16 เล่มที่ 2 พฤษภาคม – สิงหาคม 2552 ทั้งนี้ หากการพิมพ์วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่เป็นที่เรียบร้อย จะได้นำวารสารดังกล่าวให้ท่านต่อไป

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบ

ขอแสดงความนับถือ

  
 (ศาสตราจารย์ ดร.ทองเกียรติ เกียรติศิริโรจน์)

บรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

วิธีการค้นหาตำแหน่งโรเตอร์ขณะเริ่มต้น ที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าต้าน  
กลับเป็นศูนย์ ด้วยเทคนิคการกระตุ้นสนามแม่เหล็กที่ขดลวด  
สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน  
**An Initial Rotor Position Detection Method with  
Zero Back-EMF Using a Magnetic Field Winding  
Excited Technique for a Brushless DC Motor**

ไตรภพ บัวระกอด และ วิจิตร คิณเรศ  
Traiphop Buarakod and Vijit Kinnares  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอ วิธีการค้นหาตำแหน่งโรเตอร์ขณะเริ่มต้น ที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับเป็นศูนย์ สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านพิกัดกำลัง 100 วัตต์ 30 โวลต์ และ 4,500 รอบต่อนาที สำหรับการควบคุมความเร็วแบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ ด้วยเทคนิคการกระตุ้นสนามแม่เหล็กที่ขดลวดสเตเตอร์ ทำให้ค้นหาตำแหน่งโรเตอร์ขณะเริ่มต้น จากการกระตุ้นสนามแม่เหล็กที่ขดลวดสเตเตอร์ จากนั้นได้ขมุดลัดมอเตอร์แบบขดขั้วเปิด โดยใช้เทคนิคแบบสัญญาณสี่เหลี่ยม 120 องศา เพื่อให้มอเตอร์เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ และตรวจสอบแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับที่เกิดขึ้น โดยใช้วงจร ซีโรครอสซิง เพื่อใช้คำนวณหาตำแหน่งโรเตอร์ และความเร็วรอบ จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ และคาบเวลาการเกิด ซีโรครอสซิง หลังจากนั้นได้ขับเคลื่อนมอเตอร์แบบขดขั้วเปิด ด้วยความเร็วรอบ 500 ถึง 4,500 รอบต่อนาที นอกจากนี้ยังได้พิจารณาการกระจายสนามแม่เหล็กจากการกระตุ้น ขณะเริ่มต้นด้วยการวิเคราะห์ทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์ 2 มิติ โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPEED ในระบบควบคุมทั้งหมดได้ถูกประมวลผลโดยใช้ dsPIC ซึ่งเป็นตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัล (DSC) ขนาด 16 บิต

ABSTRACT

This paper presents an initial rotor position detection method when the back emf is zero using a magnetic field winding excited technique for a 100W, 30V and 4500rpm brushless DC (BLDC) motor without a position sensor for speed sensorless control. Using the magnetic field stator winding excited technique helps starting of the BLDC motor resulting in identifying the initial rotor position by exciting each dual winding. After that, the motor is controlled in open loop operation with a 120 degree rectangular wave technique in order to generate back electromotive force (back-EMF). The back-EMF is monitored by using zero crossing. The rotor position and speed are calculated from the relation between back-EMF and zero crossing periods. Then, the motor is driven in closed loop speed control, with an operating speed range of 500 to 4500rpm. Additionally, considering magnetic flux distribution resulting from the proposed initial stator excitation is given using 2-D Finite Element Analysis (2-D FEA) by the SPEED software package. The overall control system is processed by a 16-bit dsPIC which is a Digital Signal Controller (DSC).

**Keywords:** Sensorless Control, Brushless DC Motor, Digital Signal Controller (DSC).

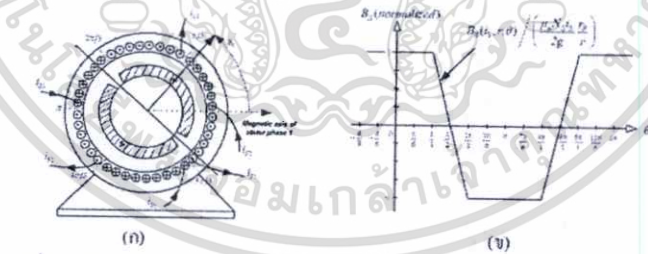
1. บทนำ

ในปัจจุบันนี้ได้มีการนำเอามอเตอร์ที่มีแม่เหล็กถาวรมาใช้กันอย่างทั่วไป อาทิเช่น ในงานด้านอุตสาหกรรม เครื่องใช้ไฮดรอลิก และอุตสาหกรรมการทำความชื้น ในการควบคุมมอเตอร์ให้ได้ประสิทธิภาพสูง ซึ่งมีความจำเป็นในการรู้ตำแหน่งโรเตอร์ขณะเริ่มต้น ฉะนั้นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านทั่วไป จะใช้ตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์แบบตัวตรวจจับปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effects) สำหรับหาตำแหน่งโรเตอร์ขณะเริ่มต้น [1]-[4]. หากการขับเคลื่อนมอเตอร์ที่ไม่ตรงตามตำแหน่งของโรเตอร์จะส่งผลทำให้กระแสไฟฟ้าขณะเริ่มต้น และช่วงทำงาน มอเตอร์ร้อน และเกิดการสั่น ผลจากการขับเคลื่อนสัญญาณไม่ตรงตามตำแหน่งโรเตอร์ ซึ่งความจำเป็นในการรู้ตำแหน่งโรเตอร์นั้นมีความสำคัญมากในการควบคุมมอเตอร์ แต่ข้อจำกัดในการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับปรากฏการณ์ฮอลล์ ในวงบางประเภทไม่สามารถติดตั้งอุปกรณ์ได้ อาทิเช่น งานที่มีอุณหภูมิสูง และมอเตอร์คอมเพรสเซอร์แบบปิด ซึ่งในบทความนี้จะนำเสนอวิธีการค้นหาตำแหน่งโรเตอร์ขณะเริ่มต้น ที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านหลังเป็นศูนย์ ด้วยเทคนิคการกระตุ้นสนามแม่เหล็กที่ขดลวดสเตเตอร์ สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน โดยใช้เทคนิคการกระตุ้นสนามแม่เหล็กที่ขดลวดสเตเตอร์แต่ละคู่ที่สลับกัน เพื่อชดเชยกับหาตำแหน่งโรเตอร์ขณะเริ่มต้น เมื่อทราบตำแหน่งเริ่มต้นแน่นอนแล้ว จากนั้นจะส่งสัญญาณขับเคลื่อนมอเตอร์ตามตำแหน่งของ

โรเตอร์แบบรูปเปิด โดยเทคนิคเบนสัญญาณที่เชื่อม 120 องศา ( $120^\circ$  rectangular-wave technique) เพื่อให้ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านหลัง และตรวจสอบแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านหลัง โดยใช้วงจรซีโรครอสซิง [2]-[4]. และเวลาที่เกิดซีโรครอสซิง นี้มีความสัมพันธ์กับความเร็วรอบมอเตอร์ เพื่อใช้ในการกำหนดตำแหน่งโรเตอร์และความเร็วรอบ สำหรับการควบคุมความเร็วแบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ ด้วยการควบคุมความเร็วแบบฟีดแบ็ค

2. ลักษณะสนามแม่เหล็กสเตเตอร์

จากโครงสร้างพื้นฐานของมอเตอร์ในรูปที่ 1 (ก) สำหรับใช้ในการพิจารณาลักษณะสนามแม่เหล็กทางด้านสเตเตอร์ ( $B_s$ ) ที่เกิดจากระแสไฟฟ้าทางด้านสเตเตอร์ที่มีความสัมพันธ์กันจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กจากการกระตุ้นสนามแม่เหล็กที่สเตเตอร์ สามารถแสดงความสัมพันธ์ในรูปที่ 1 (ข) เป็นความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กสเตเตอร์ที่เกิดจากระแสไฟฟ้าทางด้านสเตเตอร์ทางขั้วขั้ว จะมีลักษณะคล้ายสี่เหลี่ยมผืนผ้าเปรียบเทียบกับมุมองศาทางด้านสเตเตอร์ในแต่ละองศา สามารถเขียน สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น และกระแสไฟฟ้าในแต่ละองศา [5]-[6]. ในสมการที่ (1)



รูปที่ 1 (ก) โครงสร้างของมอเตอร์ (ข) ความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กสเตเตอร์ทางขั้วขั้ว

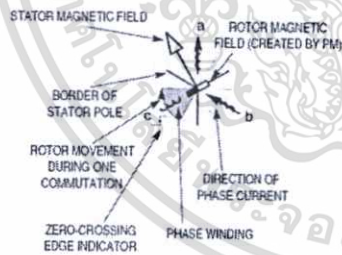
$$\vec{B}_s(i_s, r, \theta) = \begin{cases} \frac{\mu_0 N_s i_s r_s}{2g} \hat{r} & ; -\frac{\pi}{3} \leq \theta \leq \frac{\pi}{3} \\ \frac{\mu_0 N_s i_s r_s}{2g} \frac{6}{r \pi} (\pi/2 - \theta) \hat{r} & ; \frac{\pi}{3} \leq \theta \leq \frac{2\pi}{3} \\ -\frac{\mu_0 N_s i_s r_s}{2g} \hat{r} & ; \frac{2\pi}{3} \leq \theta \leq \frac{4\pi}{3} \\ \frac{\mu_0 N_s i_s r_s}{2g} \frac{6}{r \pi} (\theta - 3\pi/2) \hat{r} & ; \frac{4\pi}{3} \leq \theta \leq \frac{5\pi}{3} \end{cases} \quad (1)$$

เมื่อกำหนดให้

- $B_s$  = ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กสเตเตอร์ (T)
- $\mu_0$  = ความซึมซาอากาศ
- $N_s$  = จำนวนรอบขดลวดสเตเตอร์ต่อเฟส (Turn)
- $i_s$  = กระแสทางขั้วสเตเตอร์ต่อเฟส (Amp)
- $\theta$  = มุมทางด้านสเตเตอร์ (Degree)
- $r, r_s$  = รัศมีของช่องว่างอากาศ และ โรเตอร์ (mm)
- $g$  = ช่องว่างอากาศ (mm)
- $\hat{r}$  = เวกเตอร์ตามทิศทาง โรเตอร์ ต่อหนึ่งหน่วย

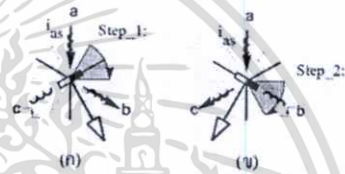
### 3. วิเคราะห์สนามแม่เหล็กสเตเตอร์

ในรูปที่ 2 แสดงทิศทางกระแสไฟฟ้าจากการกระตุ้นสนามแม่เหล็กในขดลวดแต่ละคู่เฟสตามสัญญาณในวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ ที่สแกนสนามแม่เหล็กทางด้านสเตเตอร์ และทิศทางการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ ผลจากการกระตุ้นสนามแม่เหล็กที่ขดลวดสเตเตอร์



รูปที่ 2 ทิศทางสนามแม่เหล็ก, กระแสไฟฟ้า, แรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านหลัง และการเคลื่อนที่ของโรเตอร์

ในรูปที่ 3 (ก) แสดงการกระตุ้นขดลวดเริ่มต้น ในระดับที่ 1 เป็นการกระตุ้นสนามแม่เหล็กที่เฟส A-B ทิศทางของกระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านเฟส A ไปเฟส B ผลจากการกระตุ้นขดลวดเริ่มต้นทำให้ทราบทิศทางของตำแหน่งโรเตอร์ขดลวดเริ่มต้น ไม่ว่าโรเตอร์จะอยู่ในตำแหน่งไหนก็ตาม จะถูกกระตุ้นในขดลวดเริ่มต้นเพื่อให้ได้ตำแหน่งโรเตอร์ที่ต้องการทราบก่อน และในรูปที่ 3 (ข) จะเป็นการกระตุ้นสนามแม่เหล็กที่เฟส A-C ในระดับที่ 2 เพื่อให้ทราบตำแหน่งของโรเตอร์ที่แน่นอนก่อนจะขับเคลื่อนแบบรูปเปิด ดังนั้นจะเห็นว่ากระแสที่ไหลผ่านเฟส A จะเป็นกระแสไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กที่คงที่ เพื่อต้องการทราบตำแหน่งโรเตอร์ที่ต้องการ

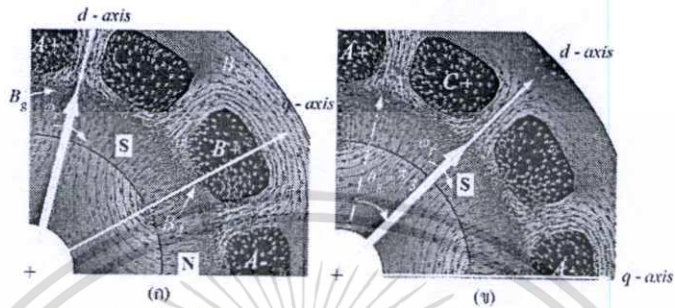


รูปที่ 3 การกระตุ้นสนามแม่เหล็กจากขดลวดสเตเตอร์ (ก) กระตุ้นเฟส A-B และ (ข) กระตุ้นเฟส A-C เพื่อหาตำแหน่งของโรเตอร์เริ่มต้น

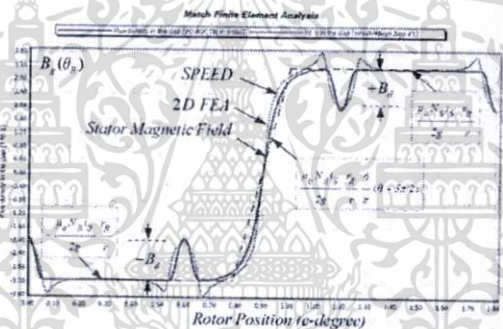
จากการกระตุ้นสนามแม่เหล็กที่ขดลวดสเตเตอร์ ในรูปที่ 3 (ก),(ข) โค้ดใช้โปรแกรม SPEED และโปรแกรมการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 2 มิติ (2-D FEA) [6], ซึ่งจะแสดงทิศทางของสนามแม่เหล็กเมื่อถูกกระตุ้นสนามแม่เหล็กที่กระตุ้นทางด้านสเตเตอร์ในแต่ละระดับ ดังแสดงในรูปที่ 4 (ก) ผลจากการกระตุ้นสนามแม่เหล็กที่คู่เฟส A-B และส่วนในรูปที่ 4 (ข) ผลจากการกระตุ้นสนามแม่เหล็กที่คู่เฟส A-C จะเห็นว่าตำแหน่งของโรเตอร์หมุนตามเข็มนาฬิกาที่ละรอบที่เคลื่อนที่ 60° ตามทิศทางสนามแม่เหล็กที่ถูกกระตุ้นในแกนอ้างอิงทางด้านโรเตอร์ (dq-axis) ส่วนในรูปที่ 5 เป็นการเปรียบเทียบระหว่างสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นที่ช่องว่างอากาศ ( $B_g$ ) กับ

สนามแม่เหล็กสเตเตอร์ทางด้านอุดมคติ ( $B_s$ ) ซึ่งแสดงเป็นเส้นประ โดยใช้โปรแกรม SPEED และ โปรแกรม 2-D FEA ลักษณะใกล้เคียงกันเมื่อเปรียบเทียบกับผลการของสนามแม่เหล็กที่สเตเตอร์ทางอุดมคติ โดยสมการที่ (1)

ซึ่งผลที่เกิดจากสนามแม่เหล็กที่สล็อตเปิด ( $B_j$ : Open Slots) ส่งผลให้สนามแม่เหล็กที่ช่องว่างอากาศลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับสนามแม่เหล็กทางอุดมคติ ทั้งทางด้านบวกและด้านลบ ( $\pm B_j$ )



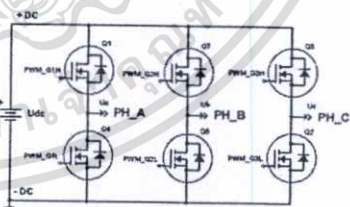
รูปที่ 4 เส้นแรงแม่เหล็ก ที่ทางการเคลื่อนที่โรเตอร์ และที่ทางการกระจายของสนามแม่เหล็กที่อุกกระตุ้นขดลวดสเตเตอร์ (ก) กระตุ้นสนามแม่เหล็กที่เฟส A-B และ (ข) กระตุ้นสนามแม่เหล็กที่เฟส A-C ตามลำดับ



รูปที่ 5 สนามแม่เหล็กที่ช่องว่างอากาศ จากโปรแกรมออกแบบมอเตอร์ (SPEED) และ โปรแกรมวิเคราะห์ไฟไนท์อีลิเมนต์ 2 มิติ (2-D FEA) เปรียบเทียบกับสนามแม่เหล็กสเตเตอร์ทางอุดมคติ

4. การควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์

การควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟที่กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน จะใช้การควบคุมแบบสวิตชิ่งด้วยสวิตช์ที่เปลี่ยน 120 องศา [7]-[8] ซึ่งแสดงในตารางที่ 1 เป็นสัญญาณสำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์ในแต่ละระดับ เพื่อขับชุดเกดมอสเฟตแต่ละกิ่ง แสดงในรูปที่ 6 เป็นวงจรพื้นฐานอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส

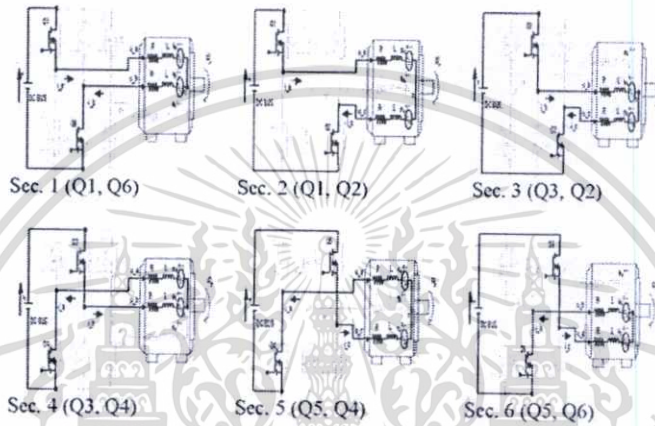


รูปที่ 6 ชุดขับเคลื่อนอินเวอร์เตอร์ภาคกำลัง 3 เฟส

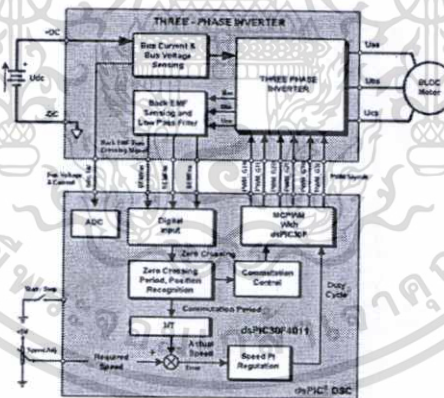
ตารางที่ 1 สัญญาณขับเคลื่อนมอเตอร์แบบเทคนิคสัญญาณสี่เหลี่ยม 120 องศา (120° rectangular-wave technique)

SEC.	1H	1L	2H	2L	3H	3L	U <sub>as</sub>	U <sub>bs</sub>	U <sub>cs</sub>
1	1	0	0	1	0	0	U <sub>dc</sub> /2	-U <sub>dc</sub> /2	0
2	1	0	0	0	0	1	U <sub>dc</sub> /2	0	-U <sub>dc</sub> /2
3	0	0	1	0	0	1	0	U <sub>dc</sub> /2	-U <sub>dc</sub> /2
4	0	1	1	0	0	0	-U <sub>dc</sub> /2	U <sub>dc</sub> /2	0
5	0	1	0	0	1	0	-U <sub>dc</sub> /2	0	U <sub>dc</sub> /2
6	0	0	0	1	1	0	0	-U <sub>dc</sub> /2	U <sub>dc</sub> /2

หมายเหตุ: "1": switch ON (using  $f_{pwm} = 20kHz$ .), "0": switch OFF



รูปที่ 7 สัญญาณการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบเทคนิคสัญญาณสี่เหลี่ยม 120 องศา ในแต่ละระดับ



รูปที่ 8 การควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน

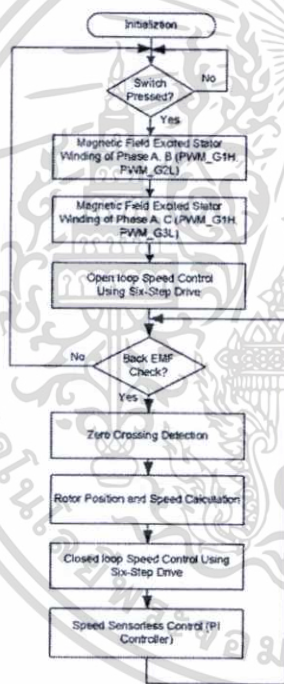
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 8 แสดงระบบควบคุมความเร็วแบบปราศจากตัวตรวจขั้ว โดยอาศัย การค้นหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านหลังโดยตรง คาบเวลาการเกิดซีโรครอสซึ่ง สำหรับค้นหาตำแหน่งโรเตอร์ และควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์โดยใช้ตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัล (DSC), dsPIC<sup>1</sup> ขนาด 16 บิตของบริษัท Microchip [9]-[12].

5. อัลกอริทึมการควบคุมมอเตอร์

อัลกอริทึมของการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ขณะเริ่มต้นด้วยเทคนิคการกระตุ้นสามแม่เหล็กที่ขดลวดค้ำานสเตเตอร์แต่ละคู่เฟส เพื่อทราบตำแหน่งของ โรเตอร์ที่แน่นอนเพื่อใช้ในการถอดค้นเริ่มต้นของมอเตอร์ [11]-[13].

เมื่อได้ตำแหน่งของ โรเตอร์แล้วจะทำการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบรูปเปิด โดยเทคนิคแบบสัญญาณสี่เหลี่ยม 120 องศา เพื่อให้ได้แรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านหลังเมื่อมอเตอร์หมุน ตัวควบคุมจะทำการตรวจสอบแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านหลังที่วัดโดยตรงจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้น และทำการเปรียบเทียบกับวงจรีโรครอสซึ่ง เพื่อทำการควบคุมแบบรูปเปิด ตัวควบคุมจะทำการค้นหาตำแหน่งโรเตอร์และความเร็วรอบมอเตอร์ จากคาบเวลาที่เกิด ซีโรครอสซึ่ง เพื่อควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ ในย่านความเร็วรอบ 500 ถึง 4,500 รอบต่อนาที โดยการควบคุมความเร็วแบบฟีดแบคแบบปิดแบบ 3 ขั้นตอนในรูปที่ 9 ในแต่ละขั้นตอนสำหรับการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน



ขั้นตอนที่ 1: การตรวจสอบการเปิด - ปิด การควบคุมก่อนการกระตุ้นสามแม่เหล็กเพื่อหาตำแหน่งโรเตอร์ด้วยแรงดัน

ขั้นตอนที่ 2: ระดับที่ 1 กระตุ้นสามแม่เหล็กคู่เฟส A-B ระดับที่ 2 กระตุ้นสามแม่เหล็กคู่เฟส A-C เพื่อหาตำแหน่งโรเตอร์ด้วยแรงดัน ซึ่งโรเตอร์จะเคลื่อนที่ตามการกระตุ้นสามแม่เหล็กในสองคู่เฟส

ขั้นตอนที่ 3: เนื่องจากระบบเปิดโวลต์แล้ว ระบบเคลื่อนแบบรูปเปิด เพื่อให้ได้แรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านหลัง

ขั้นตอนที่ 4: การตรวจสอบแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านหลังคือจากมอเตอร์แบบรูปเปิด และหาตำแหน่งที่เกิดซีโรครอสซึ่ง เพื่อหาความสัมพันธ์จากคาบเวลาที่เกิดซีโรครอสซึ่ง สำหรับการคำนวณตำแหน่งโรเตอร์และความเร็วรอบมอเตอร์

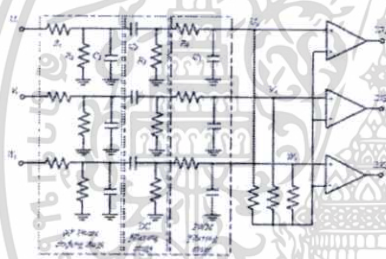
ขั้นตอนที่ 5: การคำนวณหาตำแหน่งโวลต์ ความเร็วรอบจากสมการที่ (8) และการควบคุมแบบรูปเปิดหลังจากการคำนวณหาตำแหน่งโวลต์ โดยอาศัยแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านหลังที่สร้างขึ้น จากการขับเคลื่อนแบบรูปเปิด

ขั้นตอนที่ 6: การควบคุมระบบปิดหรือความเร็วแบบป้อนกลับด้วยตัวควบคุมแบบ PI

รูปที่ 9 อัลกอริทึมของระบบขับเคลื่อนความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน

6. การออกแบบวงจรจذبแรงเคลื่อนไฟฟ้า  
ด้านกลับโดยตรง

วงจรสำหรับตัวตรวจจذبแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับ  
แสดงในรูปที่ 10 ในแต่ละเฟส สำหรับวงจรจذب  
แรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับโดยตรง ในส่วนการออกแบบให้  
ใกล้เคียงเฟสเลื่อน 90 องศา ระหว่างย่านความถี่รอบต่ำ  
( $\omega_{Low}$ ) ถึงย่านความถี่รอบสูง ( $\omega_{High}$ ) [14]-[16], ซึ่ง  
สามารถแบ่งส่วนของารออกแบบวงจรจذبไว้แก่  
ส่วนของวงจรถ่ายเฟส 90 องศา ( $90^\circ$  Phase shifting)  
ส่วนของวงจรถ่ายสูงผ่าน (High-Pass filter) และส่วน  
ของวงจรถ่ายต่ำผ่าน (Low-Pass filter) ดังแสดงในรูป  
ที่ 11 โดยพิจารณาจากฟังก์ชันถ่ายโอน ในแต่ละส่วนของ  
การออกแบบ จะแสดงความสัมพันธ์ของฟังก์ชันถ่ายโอน  
( $F(s)$ ) ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับโดยตรง  
( $U_1(s)$ ) และสัญญาณที่ได้ใหม่ ( $U_0(s)$ ) [17]. ในรูปแบบ  
ฟังก์ชันถ่ายโอน ดังแสดงความสัมพันธ์ในสมการที่ (2)



รูปที่ 10 วงจรตรวจจذبแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับโดยตรง



รูปที่ 11 วงจรฟังก์ชันถ่ายโอนสำหรับตรวจจذبแรงเคลื่อน  
ไฟฟ้าด้านกลับโดยตรง

$$F(s) = \frac{U_0(s)}{U_1(s)} = \frac{s}{d_1 s^3 + d_2 s^2 + d_3 s + d_0} \quad (2)$$

เมื่อ

$$d_1 = R_1 R_2 C_1 C_2$$

$$d_2 = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) R_1 C_2 + (R_1 C_1 + R_2 C_1) \left(1 + \frac{R_1 C_2}{R_2 C_2} + \frac{C_1}{C_2}\right) - R_1 C_2$$

$$d_3 = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \left(1 + \frac{R_1 C_1}{R_2 C_2} + \frac{C_1}{C_2}\right) + \frac{R_1 C_1 + R_2 C_1}{R_2 C_2}$$

$$d_0 = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \frac{1}{R_2 C_2}$$

6.1 ขั้นตอนการออกแบบวงจร

การออกแบบวงจรเลื่อนเฟสให้ใกล้เคียง 90 องศา ที่  
เกิดขึ้นจะตั้งน้อยกว่า 10 เท่าของค่าความถี่พื้นฐาน ( $f$ )  
( $f = P\omega_c / 120$ ) ซึ่งขึ้นอยู่กับจำนวนขั้วแม่เหล็ก ( $P$ )  
และความถี่รอบมอเตอร์ ( $\omega_c$ ) จะกรองความถี่ต่ำผ่าน  
ด้วยความต้านทาน ( $R_1, R_2$ ) และคาปาซิเตอร์ ( $C_1$ ) เพื่อ  
รักษาเฟสของสัญญาณให้ใกล้เคียง 90 องศา สามารถหา  
ความถี่ที่ตัดออก ( $f_{cut1}$ ) ในสมการที่ (3)

$$f_{cut1} = \frac{R_1 + R_2}{2\pi R_1 R_2 C_1} < \frac{1}{10} \left(\frac{P\omega_{cmax}}{120}\right) = \frac{P\omega_{cmax}}{1200} \quad (3)$$

ส่วนการออกแบบวงจรถ่ายความถี่สูงผ่าน ด้วยความ  
ต้านทาน ( $R_3$ ) และคาปาซิเตอร์ ( $C_2$ ) ความถี่ในการตัด  
ออก ( $f_{cut2}$ ) ต้องน้อยกว่า 10 เท่าของค่าความถี่พื้นฐาน  
สามารถหาได้ในสมการที่ (4)

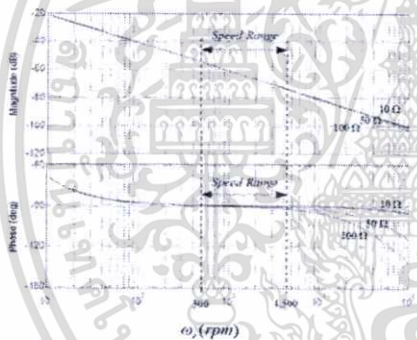
$$f_{cut2} = \frac{1}{2\pi R_3 C_2} < \frac{1}{10} \left(\frac{P\omega_{cmax}}{120}\right) = \frac{P\omega_{cmax}}{1200} \quad (4)$$

ขณะที่ความถี่ที่ใช้ในการสวิตช์ ( $f_{PWM}$ ) ความถี่สูง เมื่อ  
ย่านความถี่รอบสูง จะเป็นฟังก์ชันสำหรับส่วนของวงจ  
กรองความถี่ต่ำผ่าน ด้วยความต้านทาน ( $R_4$ ) และคาปาซิ  
เตอร์ ( $C_3$ ) ดังนั้น ความถี่ในการตัดออก ( $f_{cut3}$ ) จะต้องมี  
ระะความถี่น้อยกว่าความถี่ที่ใช้ในการสวิตช์ ( $f_{PWM}$ )  
และมากกว่าความถี่พื้นฐาน สามารถหาได้ในสมการที่ (5)

$$\frac{P\omega_{High}}{120} < f_{cut} = \frac{1}{2\pi R_1 C_3} \ll f_{pwm} \quad (5)$$

6.2 ผลจากการออกแบบ

ความถี่ที่ใช้ในการสวิตซ์ ( $f_{pwm}$ ) 20kHz และจำนวนขั้วแม่เหล็ก (P) 4 ขั้ว ระหว่างย่านความเร็วควบคุมความเร็วรอบต่ำ ( $\omega_{Low}$ ) 500 รอบต่อนาที ถึงความเร็วรอบสูง ( $\omega_{High}$ ) 4,500 รอบต่อนาที จากสมการ (2)-(5) จะได้ค่าตัวแปรสำหรับวงจร คือ  $R_1 = 1.M\Omega$ ,  $R_2 = 1.M\Omega$ ,  $R_3 = 1.M\Omega$ ,  $R_4 = 10\Omega$ ,  $C_1, C_2 = 1\mu F$  และ  $C_3 = 100nF$  ผลที่ได้ทำให้แน่ใจว่าเฟสที่จุดเปลี่ยนเฟสให้ใกล้ 90 องศา ระหว่างย่านความเร็วรอบควบคุม มสลงในผลตอบสนองขนาด (Magnitude Response) และผลตอบสนองเฟส (Phase Response) ขณะที่ความแตกต่างกำลังความต้านทาน ( $R_1$ ) ในรูปที่ 12 ในย่านความเร็วรอบ 500 ถึง 4,500 รอบต่อนาที สำหรับวงจรตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ต้านกลับโดยตรง



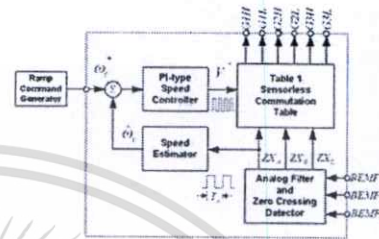
รูปที่ 12 ผลตอบสนองขนาด และเฟสของทั้งรับถ่ายโอนแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ

6.3 การกำหนดหาความเร็วรอบมอเตอร์

รูปที่ 13 แสดงไครมการกำหนดหาความเร็วรอบ จากคาบเวลาการเกิดซีโรครอสซิง ในรูปควบคุมความเร็วแบบ ฟีโอ และสัญญาณในการขับเคลื่อนของสวิตซ์ ซึ่ง

สัญญาณคาบเวลาของ ซีโรครอสซิง ( $T_z$ ) จะใช้ในการคำนวณความเร็วรอบ ( $\omega_r$ ) สามารถหาได้โดยสมการที่ (6)

$$\omega_r = \frac{1}{T_z} \times \frac{60}{(P/2)} = \frac{120}{PT_z} \quad (6)$$

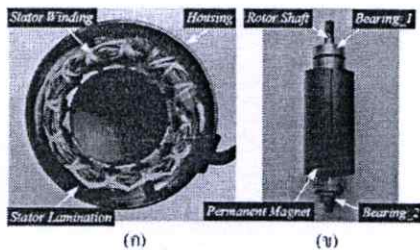


รูปที่ 13 ไครมการกำหนดหาความเร็วรอบมอเตอร์

ตารางที่ 2 จะแสดงข้อจำกัด และตัวแปรของมอเตอร์ ไฟฟ้ากระแสรวมแบบไร้แปรงถ่าน สำหรับการควบคุมความเร็วรอบ ในส่วนของข้อจำกัดชุดควบคุม, ตัวแปรมอเตอร์ และ ข้อจำกัดในการควบคุมมอเตอร์ สำหรับการทดสอบมอเตอร์ และแสดงโครงสร้างของมอเตอร์ที่ใช้ทดสอบรูปที่ 14 ประกอบด้วยส่วนของสเตเตอร์ และส่วนของโรเตอร์ที่เป็นแม่เหล็กถาวรชนิดโรเตอร์แม่เหล็กถาวรที่ขั้ว

ตารางที่ 2 ข้อจำกัด และตัวแปรในการควบคุมมอเตอร์

Hardware Boards	Max. voltage:	50 VDC
Characteristics	Max. Current:	10 A
	Motor Type:	3PH BLDC Motor
Motor Characteristics	Rate Motor Speed:	100W, 30V, 1.2A, 4P
	Max. Torque:	0.05 Nm (7.08 oz-in)
	Resistance ( $R_s$ ):	1 ohm
	Inductance ( $L_s$ ):	1 mH
	EMF Constant ( $K_e$ ):	0.13 Vs-rad
	Rotor Inertia ( $J$ ):	0.12 kg.cm.s <sup>2</sup>
Drive Characteristics	Max. Speed range:	4,500 rpm
	Frequency switching:	20 kHz
	Motor Starting:	Ramp Starting
	Speed Controller:	PI - Control
Protection:	I >, U > Protection.	



รูปที่ 14 โครงสร้าง (ก) ส่วนของสเตเตอร์, (ข) ส่วนของโรเตอร์แม่เหล็กถาวรแบบลึกรัดที่หนีโรเตอร์

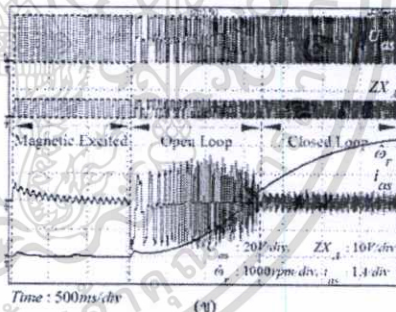
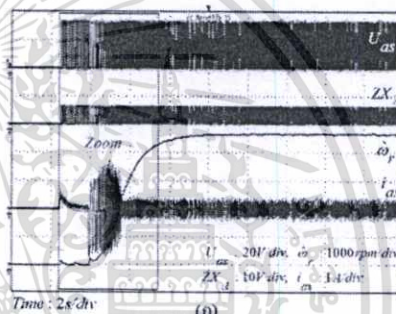
7. ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบในรูปที่ 15 แสดงสัญญาณขับเคลื่อน (G1H, G2L, G3L) และความเร็วยุทธ (ω<sub>r</sub>) ขณะออกตัวเริ่มต้น โดยเทคนิคการกระตุ้นสนามแม่เหล็กที่ขดลวดทางด้านสเตเตอร์ที่นำเสนอบนโดยระดับที่ 1 (Step\_1) เป็นการกระตุ้นเฟส A-B เพื่อหาตำแหน่งเริ่มต้นของโรเตอร์สถานะแรกของการออกตัวของมอเตอร์ และระดับที่ 2 (Step\_2) เป็นการกระตุ้นเฟส A-C เพื่อทราบตำแหน่งของโรเตอร์ที่แน่นอน ก่อนที่จะส่งสัญญาณในการขับเคลื่อนแบบลูปเปิด โดยใช้เทคนิคสัญญาณที่เลือกขึ้น 120 องศา ด้วยความถี่ตัวชี้ (f<sub>ref</sub>) 20kHz, Duty Circle 50% และขับเคลื่อนแบบลูปเปิด หลังจากตำแหน่งของโรเตอร์ คำนวณสัญญาณขับเคลื่อนในตารางที่ 1



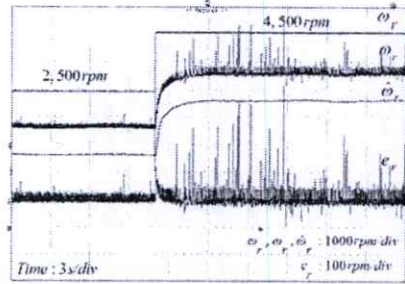
รูปที่ 15 สัญญาณขับเคลื่อนเกต PWM (G1H, G2L, G3L) และความเร็วยุทธ (ω<sub>r</sub>) ขณะออกตัวเริ่มต้น

ผลการทดสอบในรูปที่ 16 (ก) แสดงแรงดันไฟฟ้า, ตำแหน่งของโรเตอร์, กระแสไฟฟ้าด้านสเตเตอร์ และความเร็วยุทธขณะออกตัวเริ่มต้นด้วยการกระตุ้นสนามแม่เหล็ก ก่อนการขับเคลื่อนแบบลูปเปิด เพื่อทำให้เกิดแรงกลย้อนไฟฟ้าด้านกลับ และขับเคลื่อนมอเตอร์แบบลูปเปิดเพื่อควบคุมแบบ หูใจ จะเห็นว่ากระแสไฟฟ้าขณะกระตุ้นเริ่มต้น จะเป็นกระแสตรงเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กให้คงที่ ในการหาตำแหน่งโรเตอร์ขณะเริ่มต้น และกระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้น เมื่อแรงบิดของมอเตอร์เริ่มออกตัว จนถึงความเร็วที่คิดกระแสจะลดลง ส่วนในรูปที่ 16 (ข) แสดงภาพขยายสัญญาณของรูปที่ 16 (ก) ในแต่ละขั้นตอนของการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน

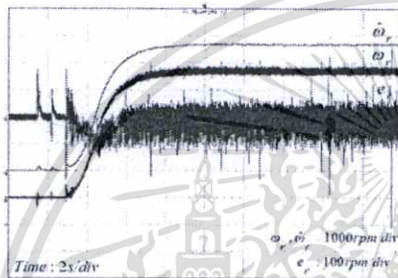


รูปที่ 16 แรงดันไฟฟ้า Line to line (U<sub>as</sub>), ตำแหน่งของโรเตอร์ (ZX<sub>r</sub>), กระแสด้านสเตเตอร์เฟส A (i<sub>as</sub>) และความเร็วยุทธ (ω<sub>r</sub>) (ก) การขับเคลื่อนขณะเริ่มต้น และ (ข) ภาพขยายสัญญาณ

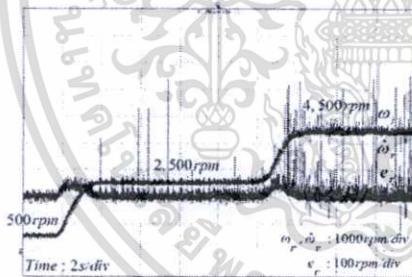
ส่วนในรูปที่ 17 เป็นการเปรียบเทียบความเร็วรอบจากการวัด ( $\omega_r$ ), การคำนวณจากคาบเวลา ( $\dot{\omega}_r$ ) และความเร็วรอบที่ผิดพลาด ( $e_r = \omega_r - \dot{\omega}_r$ ) ที่ความเร็วรอบขณะเริ่มต้น ถึงความเร็วรอบที่กัก 4,500 รอบต่อนาที ส่วนในรูปที่ 18 แสดงความเร็วรอบที่เปลี่ยนแปลงจากความเร็วรอบ 500 2,500 และ 4,500 รอบต่อนาที ตามลำดับ ขณะไว้ภาระแรงบิด ส่วนในรูปที่ 19 แสดงความเร็วรอบที่เปลี่ยนแปลงจากความเร็วรอบจาก 2,500 เป็น 4,500 รอบต่อนาที ตามความเร็วรอบคำสั่ง ( $\omega_r^*$ ) ขณะไว้ภาระแรงบิด



รูปที่ 19 ความเร็วคำสั่ง ( $\omega_r^*$ ), การวัด ( $\omega_r$ ), การคำนวณ ( $\dot{\omega}_r$ ) และความเร็วรอบที่ผิดพลาด ( $e_r$ )

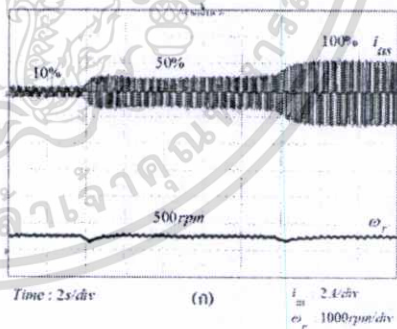


รูปที่ 17 ความเร็วรอบจากการคำนวณ ( $\dot{\omega}_r$ ), การวัด ( $\omega_r$ ) และความเร็วรอบที่ผิดพลาด ( $e_r$ )



รูปที่ 18 ความเร็วรอบจากการคำนวณ ( $\dot{\omega}_r$ ), การวัด ( $\omega_r$ ) ที่ความเร็วรอบ 500 2,500 และ 4,500 รอบต่อนาที และความเร็วรอบที่ผิดพลาด ( $e_r$ )

ในรูปที่ 20 แสดงการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ที่ความเร็วรอบคำสั่ง เมื่อมอเตอร์รับภาระแรงบิด มอเตอร์จะรักษาระดับความเร็วรอบให้คงที่โดยการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ ในรูปที่ 20 (ข) ที่ความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาที รูปที่ 20 (ข) ที่ความเร็วรอบ 2,500 รอบต่อนาที และรูปที่ 20 (ค) ที่ความเร็วรอบ 4,500 รอบต่อนาที ในแต่ละภาระแรงบิดที่ 10%, 50%, 100% ของที่กักแรงบิด หรือ 0.005, 0.025, 0.05 Nm (0.7, 3.5, 7.08 oz-in) ตามลำดับ จากการควบคุมความเร็วรอบแบบ ที่ 10 กระแสไฟที่จะเพิ่มขึ้นเมื่อมอเตอร์รับภาระ และความเร็วก็ยังคงแสดงในรูปผลหารทดสอบ ในแต่ละความเร็วรอบ ในด้านการควบคุมความเร็ว 500 ถึง 4,500 รอบต่อนาทีก็ถือกลับมาไว้





## เอกสารอ้างอิง

- [1] JR Hendershot, TJE Miller. Design of brushless Permanent Magnet Motor. Oxford University Press, Monographs in Electrical and Electronic Engineering, 1994.
- [2] P. Damodharan, K. Vasudrean. Indirect Back-EMF Zero Crossing Detection for Sensorless BLDC Motor Operating. Power Electronics and Drive Systems Conference, PEDS 2005; Vol.2: 1107-1111.
- [3] Li Qiang, Lin Mingyao et al. Research on Filters for Back EMF Zero-Crossing Detecting in Sensorless BLDC Motor Drive. International Conference on Electrical Machines and Systems, ICEMS 2005; Vol.2: 1899-1902.
- [4] J. Shao, D. Nolan. Further Improvement of Direct Back EMF Detection for Sensorless Brushless DC (BLDC) Motor Drives. Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC 2005; Vol.2: 933-937.
- [5] John Chiasson. Modeling and High-Performance Control of Electric Machines. IEEE Press series on power engineering. John Wiley & Sons, 2005.
- [6] PC-BDC 8.0.1, SPEED Consortium, University of Glasgow, 2008.
- [7] Jianwen shao. An Improved Microcontroller-base Sensorless Brushless DC (BLDC) Motor Drive for Application. Industry Application Conference, IAS 2005; Vol.4: 2512-2517.
- [8] Jianwen Shao, Dennis Nolan et al. A Novel Microcontroller-based Sensorless Brushless DC (BLDC) Motor Drive for Automotive Fuel Pump. IEEE Transaction on Industry Applications, 2003; Vol.39, No.6: 1734-1740.
- [9] Microchip Technology Inc. MPLAB. Available, 2007 (www.microchip.com).
- [10] Microchip Technology Inc. dsPIC30F4011. Available, 2007 (www.microchip.com).
- [11] Zezhong Xia, Wen Li et al. Design of a Control System for Sensorless Brushless DC Motor Using the dsPIC. Industrial Electronics and Applications, ICEA 2008; 551-556.
- [12] K.S. Rama Rao, Nagadeven et al. Sensorless Control of a BLDC Motor with Back EMF Detection Method using DSPIC. Power and Energy Conference, PECon 2008; 243-248.
- [13] Kwang-woon Lee, Dae-kyong Kim et al. A Novel Starting Method of the Surface Permanent Magnet BLDC Motors without Position Sensor for Reciprocating Compressor. IEEE Transaction on Industry Applications, 2008; Vol.44, No.1: 85-92.
- [14] Tae-Hyung Kim, Mehrdad Ehsani. Sensorless Control of the BLDC Motors From Near-Zero to High Speeds. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004; Vol.19, No.6: 1635-1645.
- [15] J. Wisniewski, W. Kaczara. The Sensorless Rotor Position Identification and Low Speed Operation of the Axial Flux Permanent Magnet Motor Controlled by the Novel PIPCRM Method. Power Electronics Specialists Conference, PESC 2008; 1502-1507.
- [16] Chuanyang Wang, Longya Xu. A Novel Approach for Sensorless Control of PM Machines Down to Zero Speed without Signal Injection or Special PWM Technique. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004; Vol.19, No.6: 1601-1607.
- [17] H.C. Chen, Y.C. Chang et al. Practical Sensorless Control for Inverter-fed BDCM Compressors. IET Electric Power Application, 2007; Vol.1, No.1: 127-132.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายไทรภพ บัวระกด  
 วัน เดือน ปีเกิด 18 ตุลาคม พ.ศ.2519 ที่จังหวัดเชียงราย  
 ที่อยู่ 403 หมู่ 13 บ้านนางแล ตำบลนางแล อำเภอเมือง จังหวัดเชียงราย 57100  
 E-mail: amd2000\_1@yahoo.com

### ประวัติการศึกษา

- 2540 ประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.) สาขาไฟฟ้ากำลัง วิทยาลัยเทคนิคเชียงใหม่ เชียงใหม่
- 2542 ประกาศนียบัตรวิชาชีพ ชั้นสูง (ปวส.) สาขาไฟฟ้ากำลัง สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตภาคพายัพ เชียงใหม่
- 2545 ปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (เกียรตินิยมอันดับ 2) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพมหานคร

### ประสบการณ์การทำงานและประวัติการทำงาน

- 2546 – ปัจจุบัน ตำแหน่งวิศวกรไฟฟ้า แผนกวิศวกรรมไฟฟ้า ฝ่ายศูนย์วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยี บริษัท กุลธรเคอร์บี จำกัด (มหาชน) นิคมอุตสาหกรรมลาดกระบัง กรุงเทพฯ