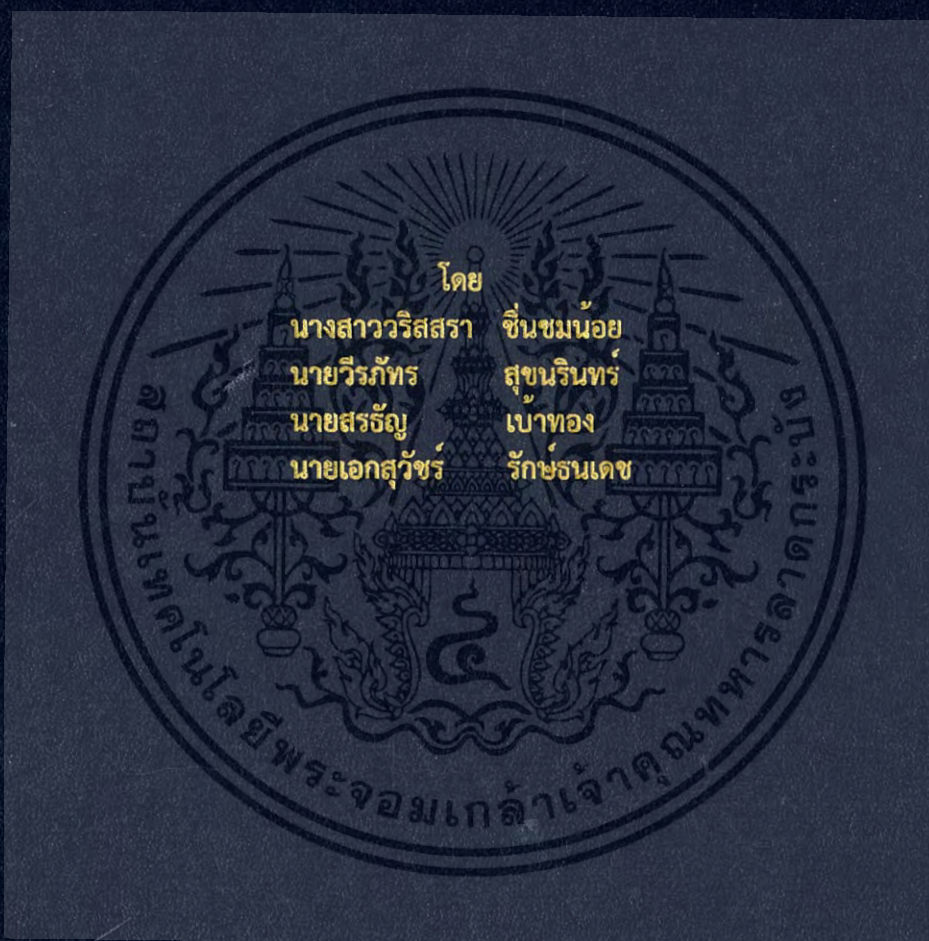


การศึกษามอเตอร์แบบฮับที่ใช้สำหรับการขับเคลื่อนจักรยานไฟฟ้า
A Study of Hub Motor for Driving Electric Bicycle



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

การศึกษามอเตอร์แบบฮับที่ใช้สำหรับการขับเคลื่อนจักรยานไฟฟ้า
A Study of Hub Motor for Driving Electric Bicycle



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A Study of Hub Motor for Driving Electric Bicycle



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

2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2560

การศึกษามอเตอร์แบบฮับที่ใช้สำหรับการขับเคลื่อนจักรยานไฟฟ้า

A study of Hub motor for Driving Electric Bicycle

โดย

นางสาววิรสรา ชื่นขมน้อย
นายวีรภัทร สุขนรินทร์
นายสรธัญ เป้าทอง
นายเอกสุวัชร รักษ์ธนเดช



อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร. เปี่ยมภูมิ สฤกพฤกษ์

รองศาสตราจารย์ พิชิต ลำยอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2560

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง


เรื่อง การศึกษามอเตอร์แบบสับที่ใช้สำหรับจักรยานไฟฟ้า

ผู้จัดทำ

- | | |
|------------------|------------|
| 1. นางสาววิสิสรา | ชื่นชมน้อย |
| 2. นายวีรภัทร | สุขนรินทร์ |
| 3. นายสรธัญ | เข้าทอง |
| 4. นายเอกสุวัชร | รักษันเดช |




..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ดร.เปี่ยมภูมิ สฤกพฤกษ์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(รองศาสตราจารย์ พิชิต ลำยอง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษามอเตอร์แบบฮับที่ใช้สำหรับการขับเคลื่อนจักรยานไฟฟ้า

นางสาววิรสรา ชื่นชมน้อย

นายวีรภัทร สุขนรินทร์

นายสรธัญ เบ้าทอง

นายเอกสุวัชร รัชชธนเดช

ดร. เปี่ยมภูมิ สฤกพฤกษ์ อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ. พิชิต ล้ายอง อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

ปีการศึกษา 2560

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้นำเสนอการศึกษามอเตอร์แบบฮับพิกัด 1000 W ที่ใช้สำหรับการขับเคลื่อนจักรยานไฟฟ้า โดยเริ่มต้นจะทำการศึกษาคู่มือของมอเตอร์แบบฮับ หลังจากนั้นได้ออกแบบและสร้างวงจรขับมอเตอร์แบบฮับ เพื่อศึกษาทฤษฎีหลักการทำงานของมอเตอร์แบบฮับ ได้แก่ สนามแม่เหล็กและทิศทางสนามแม่เหล็ก การเกิดสนามแม่เหล็กหมุน ความสัมพันธ์ระหว่างมุมทางกลกับมุมทางไฟฟ้า การทำงานของตัวตรวจจับสนามแม่เหล็ก (Hall sensor) สุดท้ายจะทำการออกแบบสร้างแท่นทดสอบ เพื่อทดสอบสมรรถนะของมอเตอร์แบบฮับ โดยพิจารณา กระแสไฟฟ้า มุมของโรเตอร์ และแรงบิดทางกลที่พิกัดกำลังของมอเตอร์ที่แตกต่างกัน จากผลการทดสอบมอเตอร์แบบฮับ พบว่าจำนวนขั้วแม่เหล็กที่สเตเตอร์และโรเตอร์มีค่าเท่ากับ 46 ขั้ว และพบว่าค่าแรงบิดของมอเตอร์จะขึ้นอยู่กับกระแสป้อนเข้าและมุมของโรเตอร์ โดยความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดของมอเตอร์แบบฮับกับมุมของโรเตอร์จะเป็นฟังก์ชันไซน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A Study of Hub Motor for Driving Electric Bicycle

Ms.Waritsara	Chuenchomnoi	
Mr.Weeraphat	Suknarin	
Mr.Sorathan	Baothong	
Mr.Aeksuwat	Raktanadech	
Dr.Piampoom	Sarikprueck	Advisor
Assoc.Prof.Pichit	Lumyoung	Co-Advisor

2017

Abstract

This project presents a study of 1000 W Hub motor for driving electric bicycle. First of all, the structure of this Hub motor is investigated. Then, a 6 patterns Hub motor drive is designed and built to suitably study the main principle operations of Hub motor including magnetic field, magnetic field direction, cause of rotating magnetic field, the relationship between mechanical angle and electrical angle, and Hall sensor operation. Finally, the performance of Hub motor including motor current, rotor angle and mechanical torque at different input power is tested by the test stand. Based on the experimental results, the number of poles of this motor both in stator and rotor are 46 poles. In addition, it is founded that the motor torque strongly depends on the applied current and the rotor angle which the relationship between motor torque and rotor angle is a sinusoidal function.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือจากหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งต้องขอขอบคุณ ดร. เปี่ยมภูมิ สฤกพฤกษ์ อาจารย์ที่ปรึกษา และ รศ. พิชิต ล้ำยอง อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม รวมไปถึงคุณ ปุณยวีร์ ฉายศิริ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ แนวคิด ความช่วยเหลือ ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำปริญญานิพนธ์ด้วยดีมาตลอด

ขอขอบคุณคุณพชร กลิ่นวิจิต, คุณชาญปกรณ์ ณ นิโรจน์ พี่ๆ ปริญญาโทในห้องปฏิบัติการวิจัยเครื่องจักรกลไฟฟ้า ที่ช่วยให้ข้อเสนอแนะ ข้อคิดเห็นในการปฏิบัติงาน รวมถึงยังเสียสละเวลาช่วยเหลือในเรื่องของการทดสอบมาโดยตลอด นอกจากนี้ ยังคอยสอนข้อปฏิบัติของการใช้อุปกรณ์ และดูแลความปลอดภัยให้เป็นอย่างดี

ขอขอบคุณเพื่อนๆในห้องปฏิบัติการทุกคนโดยเฉพาะอย่างยิ่ง นายวาทิต ผึ้งผาย ที่ช่วยประดิษฐ์ชิ้นงาน เพื่อใช้ในการทดลองทำให้การทดลองเป็นไปได้อย่างสะดวกสบายยิ่งขึ้น , นายภูรินทร์ แก้วผลึก ที่ช่วยทำการทดสอบในการทดสอบแรงบิดของมอเตอร์แบบฮับ, นายพริษฐ์พงศ์ ทวีชัยยุทธ ที่ให้คำแนะนำในด้านภาษาอังกฤษที่ดี

นอกจากนี้คณะผู้จัดทำต้องขอขอบคุณคุณนครศักดิ์และเจ้าหน้าที่ในห้องปฏิบัติงาน ECC 103/1 ที่ให้บริการเบิกใช้เครื่องมือด้วยดีมาตลอด

สุดท้ายนี้คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาและครอบครัวซึ่งให้การสนับสนุนในด้านการเงินและให้กำลังใจ อีกทั้งเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านการจัดหาอุปกรณ์ต่างๆ ในการทำโครงการครั้งนี้จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VII
สารบัญตาราง	XI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์และจุดมุ่งหมายของโครงการ	2
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงาน	2
1.5 แผนการดำเนินงาน	3
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 มอเตอร์แบบฮับ	4
2.1.1 ประวัติความเป็นมา	4
2.1.2 หลักการและส่วนประกอบพื้นฐานของมอเตอร์แบบฮับ	4
2.1.3 โครงสร้างของมอเตอร์แบบฮับ	5
2.1.4 องศาทางไฟฟ้าและองศาทางกล	5
2.2 สนามแม่เหล็กหมุน	6
2.3 ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็ก (Hall Sensor)	8
2.3.1 หลักการทำงานของตัวตรวจจับสนามแม่เหล็ก	9
2.3.2 ปราบกฎการณ์ฮอลล์ (Hall Effect)	9
2.4 อินเวอร์เตอร์ (Inverter)	12
2.4.1 หลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์	12
2.4.2 โครงสร้างภายในของอินเวอร์เตอร์	12
2.4.2.1 วงจรเรียงกระแส (Rectifier circuit)	12
2.4.2.2 วงจรเชื่อมโยงทางดีซี (DC link)	13
2.4.2.3 วงจรอินเวอร์เตอร์ (Inverter circuit)	13
2.4.2.4 วงจรควบคุม (Control circuit)	13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ IV ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5 วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์แบบฮับ	13
2.5.1 ส่วนประกอบหลักของวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์แบบฮับ	13
2.5.1.1 ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller)	13
2.5.1.2 ไอจีบีที (IGBT)	14
2.5.2 ลำดับการทำงานของวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์แบบฮับ	16
2.6 กำลังและแรงบิดของมอเตอร์	20
2.6.1 แรงบิดจากสนามแม่เหล็ก (Electromagnetic Torque)	20
2.6.2 การทดสอบภาระทางกล (Load Test)	21
บทที่ 3 การศึกษามอเตอร์แบบฮับ	23
3.1 การศึกษาโครงสร้างของมอเตอร์แบบฮับ	23
3.1.1 การศึกษาการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบฮับด้วยสัญญาณแรงดัน 6 รูปแบบ	23
3.1.2 วงจรที่ออกแบบเพื่อใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบฮับ	24
3.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์แบบฮับ	25
3.1.4 ชุดวงจรที่ใช้จริงในการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบฮับ	25
3.1.5 โค้ดที่ใช้ในวงจรควบคุมการจ่ายแรงดันให้กับมอเตอร์แบบฮับ	26
3.1.5.1 โค้ดวัดมุม (คำสั่งการทำงานครั้งละรูปแบบ)	26
3.1.5.2 โค้ดวัดแรงดัน	28
3.1.6 สัญญาณที่ใช้ในการทดสอบ	30
3.2 การทดสอบมอเตอร์แบบฮับ	32
3.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ	32
3.2.2 การทดสอบมุมของมอเตอร์แบบฮับ	33
3.2.3 การทดสอบผลของตัวตรวจจับสนามแม่เหล็ก	34
3.3 การศึกษาแรงบิดของมอเตอร์แบบฮับ	34
3.3.1 การศึกษาแรงบิดของมอเตอร์แบบฮับ	34
3.3.2 แทนทดสอบที่ได้รับการออกแบบ	34
3.3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างแทนทดสอบมอเตอร์แบบฮับ	35
3.3.4 แทนทดสอบจริงที่ใช้ในการทดสอบ	35
3.4 การทดสอบแรงบิดของมอเตอร์แบบฮับ	36
3.4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบแรงบิดของมอเตอร์แบบฮับ	36
3.4.2 การทดสอบแรงบิดของมอเตอร์แบบฮับ	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการศึกษามอเตอร์แบบฮับ	39
4.1 การเกิดขึ้นของขั้วแม่เหล็กในแต่ละร่องสล็อตของสเตเตอร์ เมื่อจ่ายสัญญาณแรงดัน 6 รูปแบบ	40
4.2 ตำแหน่งของโรเตอร์ เมื่อจ่ายสัญญาณแรงดัน 6 รูปแบบ	46
4.3 ผลการทดสอบวัดมุมทางกลของมอเตอร์แบบฮับ	49
4.4 สรุปผลการทดสอบวัดมุมทางกลของมอเตอร์แบบฮับ	53
4.5 ผลการทดสอบตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กของมอเตอร์แบบฮับ	54
4.6 สรุปผลการทดสอบตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กของมอเตอร์แบบฮับ	60
4.7 ผลการทดสอบแรงบิดของมอเตอร์แบบฮับ	60
4.8 สรุปผลการทดสอบแรงบิดของมอเตอร์แบบฮับ	68
บทที่ 5 สรุปผลการทดสอบ และข้อเสนอแนะ	69
เอกสารอ้างอิง	71
ภาคผนวก	72
ภาคผนวก ก รูปภาพขณะดำเนินการ	73
ภาคผนวก ข ตารางบันทึกผลการทดสอบ	79
ภาคผนวก ค บทความทางวิชาการ	105
ประวัติผู้เขียน	110

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า	
2.1	มอเตอร์แบบฮับ	5
2.2	ตัวอย่างโครงสร้างของมอเตอร์แบบฮับชนิดสองขั้ว	5
2.3	เวกเตอร์กระแสไฟฟ้า	6
2.4	ไดอะแกรมกระแสไฟฟ้า	6
2.5	การเกิดสนามแม่เหล็กหมุน	7
2.6	ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบอนาล็อก (ซ้าย) และตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบดิจิทัล (ขวา)	8
2.7	การเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์	9
2.8	การวัดความต่างศักย์ฮอลล์ (V_H)	10
2.9	บล็อกไดอะแกรมพื้นฐานของอินเวอร์เตอร์	12
2.10	โครงสร้างโดยทั่วไปของไมโครคอนโทรลเลอร์	14
2.11	รูปแบบทั่วไปของไอจีบีที (IGBT)	15
2.12	โครงสร้างของไอจีบีที (IGBT)	15
2.13	ตัวอย่างการทำงานของมอเตอร์แบบฮับชนิดสองขั้ว รูปแบบที่ 1	17
2.14	ตัวอย่างการทำงานของมอเตอร์แบบฮับชนิดสองขั้ว รูปแบบที่ 2	17
2.15	ตัวอย่างการทำงานของมอเตอร์แบบฮับชนิดสองขั้ว รูปแบบที่ 3	18
2.16	ตัวอย่างการทำงานของมอเตอร์แบบฮับชนิดสองขั้ว รูปแบบที่ 4	18
2.17	ตัวอย่างการทำงานของมอเตอร์แบบฮับชนิดสองขั้ว รูปแบบที่ 5	19
2.18	ตัวอย่างการทำงานของมอเตอร์แบบฮับชนิดสองขั้ว รูปแบบที่ 6	19
2.19	ทิศทางแรงเคลื่อนสนามแม่เหล็กของอาร์เมเจอร์และขดลวดกระตุ้นสนามแม่เหล็ก	20
2.20	การทดสอบภาระทางกลของมอเตอร์แบบฮับ	21
3.1	เวกเตอร์ของสัญญาณ 6 รูปแบบ	24
3.2	ส่วนวงจรกำลังไอจีบีที (IGBT)	24
3.3	ส่วนวงจรควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์	24
3.4	ชุดวงจรที่ใช้จริงในการขับมอเตอร์แบบฮับ	25
3.5	โค้ดที่ใช้ในการวัดมุมส่วนที่ 1 (คำสั่งการทำงานครั้งละรูปแบบ)	26
3.6	โค้ดที่ใช้ในการวัดมุมส่วนที่ 2 (คำสั่งการทำงานครั้งละรูปแบบ)	26
3.7	โค้ดที่ใช้ในการวัดมุมส่วนที่ 3 (คำสั่งการทำงานครั้งละรูปแบบ)	27
3.8	โค้ดที่ใช้ในการวัดมุมส่วนที่ 4 (คำสั่งการทำงานครั้งละรูปแบบ)	27
3.9	โค้ดที่ใช้ในการวัดแรงดันส่วนที่ 1	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ VII ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
3.10	โค้ดที่ใช้ในการวัดแรงดันส่วนที่ 2	28
3.11	โค้ดที่ใช้ในการวัดแรงดันส่วนที่ 3	29
3.12	โค้ดที่ใช้ในการวัดแรงดันส่วนที่ 4	29
3.13	โค้ดที่ใช้ในการวัดแรงดันส่วนที่ 5	30
3.14	ตัวอย่างรูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสในรูปแบบที่ 1	30
3.15	ตัวอย่างรูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสในรูปแบบที่ 2	31
3.16	ตัวอย่างรูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสในรูปแบบที่ 3	31
3.17	ตัวอย่างรูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสในรูปแบบที่ 4	31
3.18	ตัวอย่างรูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสในรูปแบบที่ 5	32
3.19	ตัวอย่างรูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสในรูปแบบที่ 6	32
3.20	มอเตอร์แบบฮับที่ใช้ในการทดสอบ	33
3.21	การวัดมุมที่เปลี่ยนไปในแต่ละรูปแบบของมอเตอร์แบบฮับ	33
3.22	แท่นทดสอบที่ได้ออกแบบ	34
3.23	แท่นทดสอบจริงที่ใช้ในการทดสอบ	35
3.24	สเกลที่ใช้ในการอ่านมุมที่เปลี่ยนแปลงไปของโรเตอร์	35
3.25	การเก็บบันทึกข้อมูลขณะทำการทดสอบ	37
3.26	การเตรียมการสำหรับการทดสอบแรงบิดของมอเตอร์แบบฮับ	38
3.27	ขณะทำการทดสอบแรงบิดของมอเตอร์แบบฮับ	38
4.1	รูปแบบการผันขดลวดเฟส A	39
4.2	รูปแบบการผันขดลวดเฟส B	39
4.3	รูปแบบการผันขดลวดเฟส C	39
4.4	การเกิดขึ้นของขั้วแม่เหล็กในแต่ละร่องสลิตของสเตเตอร์เมื่อจ่ายแรงดันในรูปแบบที่ 1	41
4.5	การเกิดขึ้นของขั้วแม่เหล็กในแต่ละร่องสลิตของสเตเตอร์เมื่อจ่ายแรงดันในรูปแบบที่ 2	41
4.6	การเกิดขึ้นของขั้วแม่เหล็กในแต่ละร่องสลิตของสเตเตอร์เมื่อจ่ายแรงดันในรูปแบบที่ 3	42
4.7	การเกิดขึ้นของขั้วแม่เหล็กในแต่ละร่องสลิตของสเตเตอร์เมื่อจ่ายแรงดันในรูปแบบที่ 4	42
4.8	การเกิดขึ้นของขั้วแม่เหล็กในแต่ละร่องสลิตของสเตเตอร์เมื่อจ่ายแรงดันในรูปแบบที่ 5	43
4.9	การเกิดขึ้นของขั้วแม่เหล็กในแต่ละร่องสลิตของสเตเตอร์เมื่อจ่ายแรงดันในรูปแบบที่ 6	43
4.10	การเกิดขึ้นของขั้วแม่เหล็กที่สเตเตอร์เมื่อจ่ายแรงดันในรูปแบบที่ 1	44
4.11	การเกิดขึ้นของขั้วแม่เหล็กที่สเตเตอร์เมื่อจ่ายแรงดันในรูปแบบที่ 2	44
4.12	การเกิดขึ้นของขั้วแม่เหล็กที่สเตเตอร์เมื่อจ่ายแรงดันในรูปแบบที่ 3	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา VIII อ่างอ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.13	การเกิดขึ้นของขั้วแม่เหล็กที่สเตเตอร์เมื่อจ่ายแรงดันในรูปแบบที่ 4	45
4.14	การเกิดขึ้นของขั้วแม่เหล็กที่สเตเตอร์เมื่อจ่ายแรงดันในรูปแบบที่ 5	45
4.15	การเกิดขึ้นของขั้วแม่เหล็กที่สเตเตอร์เมื่อจ่ายแรงดันในรูปแบบที่ 6	46
4.16	ตำแหน่งของโรเตอร์ในการจ่ายแรงดันรูปแบบที่ 1 ในรอบที่ 1 ทางไฟฟ้า	46
4.17	ตำแหน่งของโรเตอร์ในการจ่ายแรงดันรูปแบบที่ 2 ในรอบที่ 1 ทางไฟฟ้า	47
4.18	ตำแหน่งของโรเตอร์ในการจ่ายแรงดันรูปแบบที่ 3 ในรอบที่ 1 ทางไฟฟ้า	47
4.19	ตำแหน่งของโรเตอร์ในการจ่ายแรงดันรูปแบบที่ 4 ในรอบที่ 1 ทางไฟฟ้า	47
4.20	ตำแหน่งของโรเตอร์ในการจ่ายแรงดันรูปแบบที่ 5 ในรอบที่ 1 ทางไฟฟ้า	48
4.21	ตำแหน่งของโรเตอร์ในการจ่ายแรงดันรูปแบบที่ 6 ในรอบที่ 1 ทางไฟฟ้า	48
4.22	ตำแหน่งของโรเตอร์ในการจ่ายแรงดันรูปแบบที่ 1 ในรอบที่ 2 ทางไฟฟ้า	48
4.23	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดทางกลกับมุมที่เปลี่ยนแปลงไปของโรเตอร์ ในรูปแบบที่ 1 ที่กระแส 15 A	62
4.24	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดทางกลกับมุมที่เปลี่ยนแปลงไปของโรเตอร์ ในรูปแบบที่ 2 ที่กระแส 19 A	62
4.25	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดทางกลกับมุมที่เปลี่ยนแปลงไปของโรเตอร์ ในรูปแบบที่ 1 ที่กระแส 1 ถึง 21 A	63
4.26	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดทางกลกับมุมที่เปลี่ยนแปลงไปของโรเตอร์ ในรูปแบบที่ 2 ที่กระแส 1 ถึง 21 A	63
4.27	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดทางกลกับมุมที่เปลี่ยนแปลงไปของโรเตอร์ ในรูปแบบที่ 3 ที่กระแส 1 ถึง 21 A	64
4.28	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดทางกลกับมุมที่เปลี่ยนแปลงไปของโรเตอร์ ในรูปแบบที่ 4 ที่กระแส 1 ถึง 21 A	64
4.29	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดทางกลกับมุมที่เปลี่ยนแปลงไปของโรเตอร์ ในรูปแบบที่ 5 ที่กระแส 1 ถึง 21 A	65
4.30	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดทางกลกับมุมที่เปลี่ยนแปลงไปของโรเตอร์ ในรูปแบบที่ 6 ที่กระแส 1 ถึง 21 A	65
4.31	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดทางกลกับมุมที่เปลี่ยนแปลงไปของโรเตอร์ ในแต่ละรูปแบบที่กระแส 11 A	66
4.32	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดทางกลกับมุมที่เปลี่ยนแปลงไปของโรเตอร์ ในแต่ละรูปแบบที่กระแส 21 A	66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
ก.1	การเชื่อมเหล็กระหว่างส่วนฐานเพื่อใช้ทำแทนทดสอบมอเตอร์แบบฮับ	74
ก.2	การเชื่อมเหล็กระหว่างส่วนเสาและส่วนฐานของแทนทดสอบมอเตอร์แบบฮับ	74
ก.3	เจียรนัยเหล็กเพื่อใช้ทำแทนทดสอบมอเตอร์แบบฮับโดยใช้เครื่องเจียรเหล็ก	75
ก.4	ปรับค่าแรงดันทำการทดสอบมอเตอร์แบบฮับโดยใช้ 3 Phase Variable A.C. Supply	75
ก.5	ทำการวัดและอ่านค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าขณะทำการทดสอบเพื่อใช้บันทึกผลการทดสอบ	76
ก.6	ทำการบันทึกค่าขณะทำการทดสอบด้วยไมโครซอฟท์เอ็กเซล	76
ก.7	ทำการทดสอบเพื่อหามุมของโรเตอร์โดยการใส่น้ำหนักถ่วงให้กับมอเตอร์แบบฮับ	77
ก.8	ทำการเชียดโค้ดให้กับอาคูโนกับส่วนวงจรควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบฮับ	77
ก.9	ชุดวงจรที่ใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์แบบฮับในการทำการทดสอบ	78
ก.10	แทนทดสอบมอเตอร์แบบฮับ	78



สารบัญญัตราสาร

ตารางที่		หน้า
1.1	แผนการดำเนินงาน	3
2.1	รูปแบบการทำงานของวงจรขั้วมอเตอร์	16
3.1	สัญญาณการจ่ายแรงดัน 6 รูปแบบสำหรับมอเตอร์แบบฮับ	23
4.1	สัญญาณการจ่ายแรงดัน 6 รูปแบบสำหรับมอเตอร์แบบฮับ	40
4.2	ผลการทดสอบวัดมุมทางกลของมอเตอร์แบบฮับ	49
4.3	ผลการทดสอบตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กของมอเตอร์แบบฮับ	54
4.4	รูปแบบเอาต์พุตของตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กเมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบการจ่ายแรงดัน	59
4.5	ตัวอย่างผลการทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับที่รูปแบบที่ 1	60
4.6	ตัวอย่างผลการทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับที่รูปแบบที่ 2	61
ข.1	ผลการทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับรูปแบบที่ 1 ที่การทดสอบประมาณ 5%	80
ข.2	ผลการทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับรูปแบบที่ 2 ที่การทดสอบประมาณ 5%	80
ข.3	ผลการทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับรูปแบบที่ 3 ที่การทดสอบประมาณ 5%	81
ข.4	ผลการทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับรูปแบบที่ 4 ที่การทดสอบประมาณ 5%	81
ข.5	ผลการทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับรูปแบบที่ 5 ที่การทดสอบประมาณ 5%	82
ข.6	ผลการทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับรูปแบบที่ 6 ที่การทดสอบประมาณ 5%	82
ข.7	ผลการทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับรูปแบบที่ 1 ที่การทดสอบประมาณ 25%	83
ข.8	ผลการทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับรูปแบบที่ 2 ที่การทดสอบประมาณ 25%	84
ข.9	ผลการทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับรูปแบบที่ 3 ที่การทดสอบประมาณ 25%	85
ข.10	ผลการทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับรูปแบบที่ 4 ที่การทดสอบประมาณ 25%	86
ข.11	ผลการทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับรูปแบบที่ 5 ที่การทดสอบประมาณ 25%	86
ข.12	ผลการทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับรูปแบบที่ 6 ที่การทดสอบประมาณ 25%	87
ข.13	ผลการทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับรูปแบบที่ 1 ที่การทดสอบประมาณ 50%	88
ข.14	ผลการทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับรูปแบบที่ 2 ที่การทดสอบประมาณ 50%	89
ข.15	ผลการทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับรูปแบบที่ 3 ที่การทดสอบประมาณ 50%	90
ข.16	ผลการทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับรูปแบบที่ 4 ที่การทดสอบประมาณ 50%	91
ข.17	ผลการทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับรูปแบบที่ 5 ที่การทดสอบประมาณ 50%	92
ข.18	ผลการทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับรูปแบบที่ 6 ที่การทดสอบประมาณ 50%	93
ข.19	ผลการทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับรูปแบบที่ 1 ที่การทดสอบประมาณ 75%	94
ข.20	ผลการทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับรูปแบบที่ 2 ที่การทดสอบประมาณ 75%	94

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากทางวิชาการ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
ข.21	ผลการทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับรูบบนที่ 3 ที่การทดสอบประมาณ 75%	95
ข.22	ผลการทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับรูบบนที่ 4 ที่การทดสอบประมาณ 75%	97
ข.23	ผลการทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับรูบบนที่ 5 ที่การทดสอบประมาณ 75%	97
ข.24	ผลการทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับรูบบนที่ 6 ที่การทดสอบประมาณ 75%	98
ข.25	ผลการทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับรูบบนที่ 1 ที่การทดสอบประมาณ 100%	99
ข.26	ผลการทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับรูบบนที่ 2 ที่การทดสอบประมาณ 100%	100
ข.27	ผลการทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับรูบบนที่ 3 ที่การทดสอบประมาณ 100%	101
ข.28	ผลการทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับรูบบนที่ 4 ที่การทดสอบประมาณ 100%	102
ข.29	ผลการทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับรูบบนที่ 5 ที่การทดสอบประมาณ 100%	103
ข.30	ผลการทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับรูบบนที่ 6 ที่การทดสอบประมาณ 100%	104



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันมอเตอร์ไฟฟ้าถูกพัฒนาและนำมาประยุกต์ใช้กับยานพาหนะต่างๆ เช่น รถยนต์ รถจักรยานไฟฟ้า รถไฟฟ้า แทนการใช้น้ำมัน เนื่องจากการสันดาปของเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมัน เป็นเชื้อเพลิง เป็นปัญหาหลักที่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม รวมถึงราคาน้ำมันที่มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ จึงทำให้นานพาหนะที่ขับเคลื่อนด้วยพลังงานไฟฟ้าเริ่มเป็นที่นิยมมากขึ้น

มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่นิยมใช้งานกันอย่างแพร่หลายในงานอุตสาหกรรม หรือ ยานพาหนะ มอเตอร์ที่นิยมใช้ในรถไฟฟ้ามี่ 2 แบบหลักๆ คือ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบมีแปรงถ่าน และไม่มีแปรงถ่าน มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบมีแปรงถ่าน ภายในประกอบด้วย ขดลวดสนาม (Field Winding) อยู่บนส่วนหยุดนิ่งหรือสเตเตอร์ (Stator) และขดลวดอาร์มาเจอร์ (Armature Winding) อยู่บนส่วนเคลื่อนที่หรือโรเตอร์ (Rotor) โดยอาศัยแปรงถ่าน (Brush) และซีคอมมิวเตเตอร์ (Commutator) ทำหน้าที่แปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล การเสียดสีของแปรงถ่านกับซีคอมมิวเตเตอร์ทำให้เกิดความร้อนและการสึกหรอ จึงจำเป็นต้องมีการบำรุงรักษาแปรงถ่านและซีคอมมิวเตเตอร์ ซึ่งเป็นข้อเสียของมอเตอร์ชนิดนี้ แต่ในปัจจุบันความก้าวหน้าของเทคโนโลยีทางด้านมอเตอร์ ทำให้มีการพัฒนามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน (Brushless DC Motor) มาแทนมอเตอร์กระแสตรงแบบเดิม ซึ่งภายในประกอบด้วย ขดลวดสนามอยู่บนโรเตอร์ และขดลวดอาร์มาเจอร์ อยู่บนสเตเตอร์ โดยที่สเตเตอร์จะมีตัวตรวจจับสนามแม่เหล็ก (Hall Sensor) สามตัว ซึ่งทำหน้าที่ตรวจจับตำแหน่งของสนามแม่เหล็กจากโรเตอร์ มอเตอร์ชนิดนี้มีข้อดี คือ ไม่เกิดความร้อนหรือการสึกหรอ เนื่องจากการเสียดสีของแปรงถ่านกับซีคอมมิวเตเตอร์ จึงไม่จำเป็นต้องมีการบำรุงรักษาแปรงถ่านและซีคอมมิวเตเตอร์ อีกทั้งยังมีข้อดีในเรื่องของคุณลักษณะ แรงบิดกับความเร็ว มีการตอบสนองทางพลวัตเร็ว ประสิทธิภาพและสมรรถนะการทำงานสูง เมื่อเทียบกับมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดอื่น นอกจากนี้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านนี้สามารถนำมาใช้กับรถจักรยานไฟฟ้า ซึ่งถูกเรียกอีกอย่างว่า มอเตอร์แบบฮับ (Hub Motor) โดยมอเตอร์นี้จะอยู่ที่ศูนย์กลางของล้อจักรยาน ที่เรียกว่าฮับ (Hub) จึงนิยมเรียกกันว่า มอเตอร์แบบฮับ

อย่างไรก็ตาม ยานพาหนะไฟฟ้าในปัจจุบันได้ให้ความสนใจต่อการประยุกต์ใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน (Brushless DC Motor) กันมากขึ้น รวมถึงการทำงานร่วมกันของมอเตอร์ไฟฟ้ากับเครื่องยนต์แบบสันดาปด้วยเช่นกัน จึงมีการวิจัยค้นคว้าเพื่อพัฒนามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านอย่างต่อเนื่อง ในโครงการนี้จึงขอเสนอการศึกษาโครงสร้างและหลักการทำงานของมอเตอร์แบบฮับ ชนิดที่เป็นแบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน เพื่อทำความเข้าใจและใช้งานมอเตอร์แบบฮับได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์และจุดมุ่งหมายของโครงการงาน

1. เพื่อให้มีความรู้และความเข้าใจในหลักการทำงานของมอเตอร์แบบฮับ
2. เพื่อทดสอบสมรรถนะของมอเตอร์แบบฮับ

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการงาน

1. ศึกษาโครงสร้างและหลักการทำงานของมอเตอร์แบบฮับเบื้องต้นจากมอเตอร์แบบฮับขนาดพิกัด 1000 W, 48 V และความเร็รรอบ 480 rpm
2. ออกแบบและสร้างวงจรขับมอเตอร์ เพื่อประกอบการศึกษาการทำงานของมอเตอร์แบบฮับ โดยพิจารณาจากโครงสร้างจริงที่ได้ศึกษามาเบื้องต้น
3. ศึกษาหลักการทำงานที่สำคัญของมอเตอร์แบบฮับ ได้แก่ ทิศทางสนามแม่เหล็ก การเกิดสนามแม่เหล็กหมุน การทำงานของตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กภายในมอเตอร์แบบฮับที่นำมาทดสอบ
4. ออกแบบและสร้างแท่นทดสอบสมรรถนะของมอเตอร์แบบฮับ
5. ทดสอบสมรรถนะของมอเตอร์แบบฮับ โดยพิจารณากระแสไฟฟ้า มุมของโรเตอร์ และแรงบิดทางกลที่พิกัดกำลังของมอเตอร์ที่แตกต่างกัน

1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงาน

1. ศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับโครงสร้างและหลักการทำงานของมอเตอร์แบบฮับ
2. ออกแบบและสร้างวงจรขับมอเตอร์ โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ร่วมกับไอจีบีที (IGBT)
3. นำวงจรขับมอเตอร์ที่สร้างมาทำการทดสอบมอเตอร์แบบฮับ
4. ศึกษาหลักการทำงานที่สำคัญของมอเตอร์แบบฮับ ได้แก่ ทิศทางสนามแม่เหล็ก การเกิดสนามแม่เหล็กหมุน การทำงานของตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กภายในมอเตอร์แบบฮับที่นำมาทดสอบ
5. ออกแบบและสร้างแท่นทดสอบสมรรถนะของมอเตอร์แบบฮับ
6. ทดสอบสมรรถนะของมอเตอร์แบบฮับ
7. สรุปผลการทดสอบสมรรถนะ
8. รวบรวมข้อมูลการศึกษาและจัดทำปริญญานิพนธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน

การดำเนินงาน	ภาคเรียนที่ 1/2560				ภาคเรียนที่ 2/2560		
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.
1. ศึกษาค้นคว้าโครงสร้างของมอเตอร์แบบฮับ และศึกษาวงจรขับมอเตอร์แบบฮับ	↔						
2. ออกแบบและสร้างวงจรขับมอเตอร์แบบฮับ		↔					
3. ทำการทดสอบมอเตอร์แบบฮับเพื่อศึกษาหลักการการทำงานที่สำคัญของมอเตอร์			↔				
4. ออกแบบแทนทดสอบสมรรถนะของมอเตอร์แบบฮับ					↔		
5. ทดสอบสมรรถนะของมอเตอร์แบบฮับ						↔	↔
6. รวบรวมข้อมูลและจัดทำปริญญานิพนธ์							↔

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ

1. มีความรู้ความเข้าใจในหลักการการทำงานของตัวตรวจจับสนามแม่เหล็ก
2. มีความรู้ความเข้าใจในโครงสร้างและหลักการการทำงานของมอเตอร์แบบฮับ
3. สามารถออกแบบวงจรขับมอเตอร์ เพื่อประกอบการศึกษาการทำงานของมอเตอร์แบบฮับ
4. สามารถออกแบบและทำการทดสอบสมรรถนะของมอเตอร์แบบฮับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 มอเตอร์แบบฮับ

2.1.1 ประวัติความเป็นมา

มอเตอร์แบบฮับ (Hub Motor) ถูกคิดค้นขึ้นในปี ค.ศ.1884 โดย Wellington Adams ได้นำมอเตอร์ไฟฟ้าไปขับเคลื่อนในล้อรถโดยตรง แต่เนื่องจากมอเตอร์ยังต้องเชื่อมต่อกับระบบเฟืองเกียร์ของเครื่องยนต์อยู่ ต่อมาในปี ค.ศ.1890 Albert Parcellle ได้มีการพัฒนามอเตอร์ให้เป็นมอเตอร์แบบฮับครั้งแรก และตั้งชื่อว่า Electro-Motor Traction Wheel ในปีเดียวกัน Edward Parkhurst ได้สร้างมอเตอร์แบบฮับที่มีแรงบิดสูงแต่มีความเร็วรอบต่ำ โดยได้รวมมอเตอร์กับล้อเข้าด้วยกันแต่ไม่มีชุดเฟืองเกียร์ ถือว่าเป็นครั้งแรกที่มอเตอร์แบบฮับถูกสร้างและใช้งานได้จริงอย่างมีประสิทธิภาพ มอเตอร์แบบฮับยังคงถูกพัฒนามาตลอด ทำให้ในปัจจุบันมีการสร้างมอเตอร์แบบฮับที่มีประสิทธิภาพสูงและเหมาะแก่การใช้งานตามความต้องการของผู้ใช้งาน

2.1.2 หลักการและส่วนประกอบพื้นฐานของมอเตอร์แบบฮับ

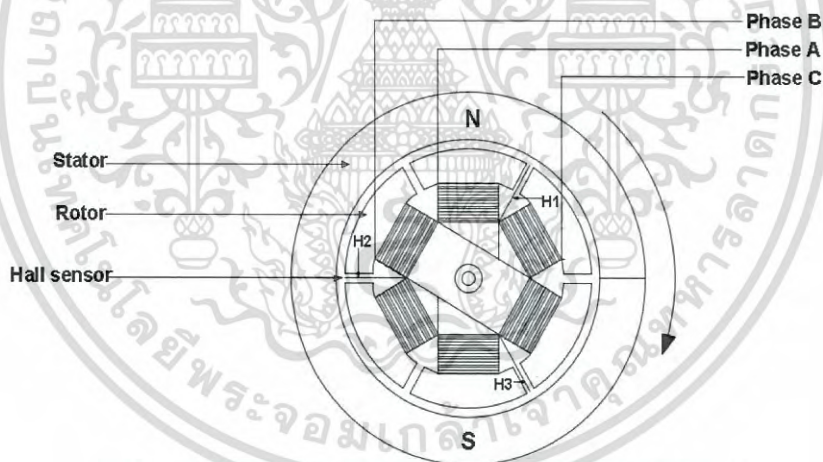
มอเตอร์แบบฮับเป็นมอเตอร์กระแสตรงที่ไม่มีแปรงถ่านและซีคอมมิวเตเตอร์ ถูกนำมาใช้ในจักรยานไฟฟ้า โดยมอเตอร์จะติดอยู่ที่ศูนย์กลางของล้อ หรือที่เรียกว่า ฮับ (Hub) มอเตอร์ชนิดนี้แตกต่างจากมอเตอร์ธรรมดาเพราะส่วนที่หมุนหรือโรเตอร์จะอยู่ด้านนอก ดังรูปที่ 2.1 โดยภายในโรเตอร์จะมีแม่เหล็กถาวรแรงสูง (Rare Earth Magnet) และส่วนที่อยู่กับที่หรือสเตเตอร์ภายในประกอบด้วยขดลวดอาร์มาเจอร์ยึดติดอยู่กับแกนล้อ ซึ่งมีทั้งหมดสามชุด และมีชุดตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบดิจิทัล (Digital Hall Sensor) จำนวนสามตัว ซึ่งทำหน้าที่บ่อนกลับสัญญาณเป็นค่า Low (0) กับ High (1) ตามสนามแม่เหล็กที่ตรวจพบ สำหรับวงจรกำลัง ณ ตำแหน่งชุดขดลวดอาร์มาเจอร์ มีสายไฟสามเส้น (สีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน) และวงจรควบคุมสำหรับตรวจจับสนามแม่เหล็ก มีสายไฟจำนวนห้าเส้น คือสายไฟเลี้ยงตัวตรวจจับจำนวนสองเส้น (สีดำและแดง) และสายไฟตรวจจับสัญญาณจำนวนสามเส้น (สีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน) มอเตอร์แบบฮับมีข้อเสีย คือ ชุดควบคุมที่มีความยุ่งยากซับซ้อนและมีราคาแพง อีกทั้งยังมีแรงบิดขณะออกตัวต่ำ ทำให้มีการออกตัวช้า แต่ด้วยเหตุนี้จึงไม่เกิดการกระชากขึ้น และเนื่องจากเป็นมอเตอร์ชนิดที่ไม่มีแปรงถ่านและซีคอมมิวเตเตอร์ จึงไม่เกิดการสูญเสียจากการเสียดสี ทำให้มีอายุการใช้งานยาวนานขึ้น นอกจากนี้ยังไม่ก่อให้เกิดความร้อน มีโครงสร้างที่มิดชิด ทำให้ลดสัญญาณรบกวน ลดการสิ้นเปลือง และมีความน่าเชื่อถือสูง มอเตอร์ชนิดนี้จึงมีประสิทธิภาพสูงและเป็นที่ยอมรับนำมาสร้างรถจักรยานไฟฟ้า



รูปที่ 2.1 มอเตอร์แบบฮับ

2.1.3 โครงสร้างของมอเตอร์แบบฮับ

โครงสร้างของมอเตอร์แบบฮับประกอบด้วยสามส่วนหลัก คือ ส่วนที่หมุนหรือโรเตอร์มีแม่เหล็กถาวรกระจายสม่ำเสมอโดยรอบ, ส่วนที่อยู่กับที่หรือสเตเตอร์ ภายในประกอบด้วยขดลวดอาร์มาเจอร์ และส่วนที่เป็นชุดตรวจจับสนามแม่เหล็ก ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ตัวอย่างโครงสร้างของมอเตอร์แบบฮับชนิดสองขั้ว

2.1.4 องศาทางไฟฟ้าและองศาทางกล

เมื่อโรเตอร์เคลื่อนที่เป็นระยะหนึ่งคู่ขั้ว (เป็นระยะขั้วแม่เหล็กถาวรเหนือ-ใต้ที่โรเตอร์) จะเท่ากับเคลื่อนที่ครบ 360 องศาทางไฟฟ้า

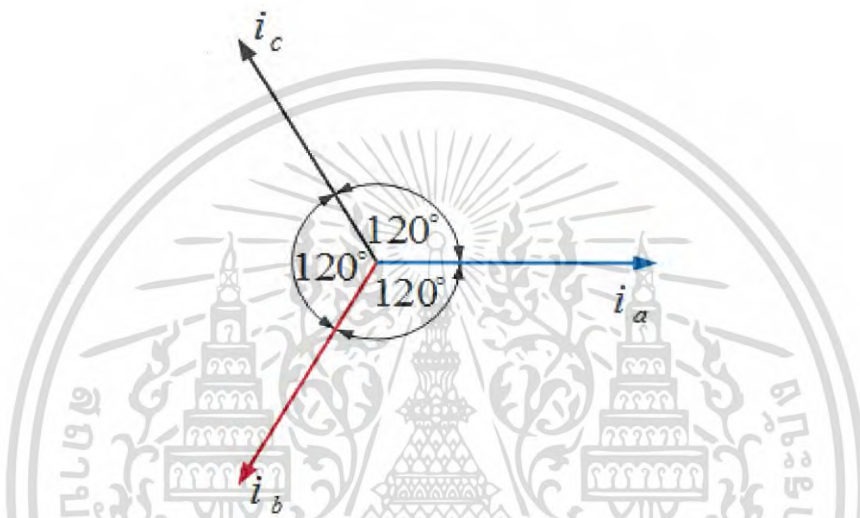
ดังนั้น องศาทางไฟฟ้า = จำนวนคู่ขั้วของแม่เหล็ก x องศาทางกล

หรือ
$$\theta_e = \frac{P}{2} \theta_m \quad (2.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

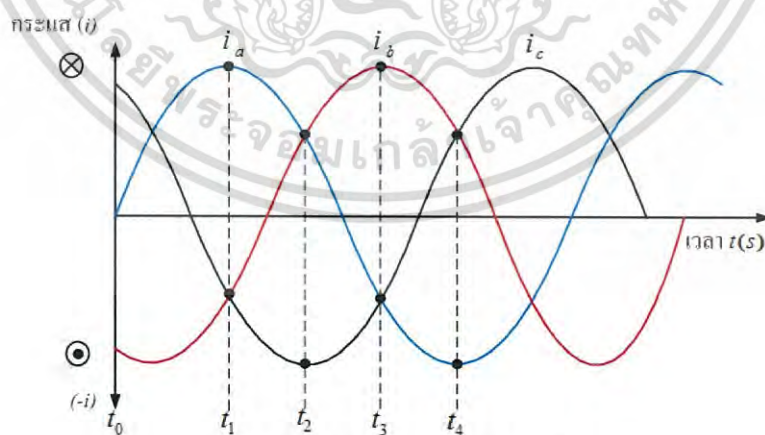
2.2 สนามแม่เหล็กหมุน

สนามแม่เหล็กหมุนที่สเตเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส เกิดจากการจ่ายไฟฟ้า กระแสสลับ 3 เฟส ให้กับขดลวด 3 ชุด คือ ชุด A, ชุด B และชุด C ที่พันอยู่ในร่องแกนเหล็กที่ สเตเตอร์ โดยวางมุมห่างกัน 120 องศาไฟฟ้าซึ่งกันและกัน มีการต่อใช้งานได้ทั้งแบบสตาร์และ เดลต้า นอกจากนี้ ขดลวดทั้ง 3 ชุด จะมีคุณลักษณะทั้งขนาด ความต้านทาน และรีแอกแตนซ์ของ ขดลวดที่เหมือนกันทุกประการ ดังนั้น เมื่อจ่ายไฟให้กับขดลวดจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลใน ขดลวดทั้ง 3 ชุด ทำมุมห่างกัน 120 องศาไฟฟ้าเช่นเดียวกัน ดังรูปที่ 2.3 และรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.3 เวกเตอร์กระแสไฟฟ้า

(Source: <http://xn-m.blogspot.com/2011/10/blog-post.html>)



รูปที่ 2.4 ไดอะแกรมกระแสไฟฟ้า

(Source: <http://xn-m.blogspot.com/2011/10/blog-post.html>)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(Source: <http://xn-m.blogspot.com/2011/10/blog-post.html>)

สนามแม่เหล็กหมุนที่เกิดขึ้นที่สเตเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส แสดงดังรูปที่ 2.4 และรูปที่ 2.5 ที่มีความสัมพันธ์กันของรูปคลื่นกระแสไฟฟ้ากับเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นที่สเตเตอร์ตามการเปลี่ยนแปลงของเวลา ในการพิจารณารูปคลื่นกับกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดสเตเตอร์ มีหลักการคือ ถ้าพบรูปคลื่นของกระแสไฟฟ้าอยู่ในครึ่งบวกแสดงว่ากระแสไฟฟ้าไหลเข้าที่ต้นและออกทางปลายของขดลวด ในทางตรงกันข้ามถ้าพบรูปคลื่นของกระแสไฟฟ้าอยู่ในครึ่งลบ แสดงว่า กระแสไฟฟ้าไหลเข้าที่ปลายและออกที่ต้นของขดลวดนั่นเอง

เมื่อพิจารณาที่เวลา t_1 พบว่ารูปคลื่นของกระแสไฟฟ้า i_a มีค่าอยู่ในครึ่งบวก กระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดจะเข้าที่ต้น (A) และออกที่ปลาย (A') ส่วนรูปคลื่นของกระแสไฟฟ้า i_b และ i_c มีค่าเท่ากันอยู่ในครึ่งลบ กระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดจะเข้าที่ปลาย (B',C') และออกที่ต้น (B,C) ดังนั้น เมื่อรวมเส้นแรงแม่เหล็กครบตัวมาแล้ว เส้นแรงแม่เหล็กรวมจะวิ่งจากด้านขวามือไปทางด้านซ้ายมือตามลูกศร แสดงดังรูปที่ 2.5,(1)

เมื่อพิจารณาที่เวลา t_2 พบรูปคลื่นของกระแสไฟฟ้า i_a และ i_b มีค่าเท่ากันอยู่ในครึ่งบวก กระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดทั้ง 2 ชุด จะเข้าที่ต้น (A,B) และออกที่ปลาย (A',B') ส่วนรูปคลื่นของกระแสไฟฟ้า i_c พบอยู่ในครึ่งลบ กระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดจะเข้าที่ปลาย (C') และออกที่ต้น (C) เมื่อรวมเส้นแรงแม่เหล็กครบตัวมาแล้ว เส้นแรงแม่เหล็กรวมจะวิ่งจากด้านล่างเฉียงขึ้นด้านบนตามลูกศร แสดงดังรูปที่ 2.5,(2)

เมื่อพิจารณาที่เวลา t_3 พบรูปคลื่นของกระแสไฟฟ้า i_b มีค่าเท่ากันอยู่ในครึ่งบวก กระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวด จะเข้าที่ต้น (B) และออกที่ปลาย (B') ส่วนรูปคลื่นของกระแสไฟฟ้า i_a และ i_c มีค่าเท่ากันอยู่ในครึ่งลบ กระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดทั้ง 2 ชุดจะเข้าที่ปลาย (A',C') และออกที่ต้น (A,C) ดังนั้นเมื่อรวมเส้นแรงแม่เหล็กครบตัวมาแล้ว เส้นแรงแม่เหล็กรวมจะวิ่งจากด้านล่างเฉียงขึ้นด้านบนตามลูกศร แสดงดังรูปที่ 2.5,(3)

เมื่อพิจารณาที่เวลา t_4 พบรูปคลื่นของกระแสไฟฟ้า i_b และ i_c มีค่าเท่ากันอยู่ในครึ่งบวก กระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดทั้ง 2 ชุด จะเข้าที่ต้น (B,C) และออกที่ปลาย (B',C') ส่วนรูปคลื่นของกระแสไฟฟ้า i_a พบอยู่ในครึ่งลบ กระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดจะเข้าที่ปลาย (A') และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกที่ต้น (A) เมื่อรวมเส้นแรงแม่เหล็กรอบตัวนำแล้ว เส้นแรงแม่เหล็กจะวิ่งจากด้านซ้ายมือไปด้านขวามือตามลูกศรนั่นเอง แสดงดังรูปที่ 2.5,(4)

ดังนั้น เมื่อพิจารณาเส้นแรงแม่เหล็กที่เพิ่มขึ้นตามทิศทางของลูกศร ที่เปลี่ยนแปลงของเวลาจาก $t_1 - t_4$ จะเห็นว่าเส้นแรงแม่เหล็กจะหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกาดังรูปที่ 2.5

2.3 ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็ก (Hall Sensor)

แม่เหล็ก (Magnet) เป็นวัตถุที่มีสนามแม่เหล็กอยู่บริเวณโดยรอบ แม่เหล็กในอดีตสามารถตรวจสอบว่าบริเวณใดมีสนามแม่เหล็กโดยใช้เข็มทิศ แต่ไม่สามารถทราบขนาดของสนามแม่เหล็กได้ นักวิทยาศาสตร์จึงพยายามหาวิธีการวัดสนามแม่เหล็ก ซึ่งในปัจจุบันสามารถวัดสนามแม่เหล็กได้สะดวกและรวดเร็ว โดยใช้ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็ก (Hall sensor) ซึ่งทำงานโดยอาศัยหลักการของปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall effect) ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กเป็นวงจรรวมที่ทำให้เกิดความต่างศักย์ซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ผ่านในแนวตั้ง เมื่อนำตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กไปต่อกับโวลต์มิเตอร์ และนำไปวางใกล้บริเวณที่มีสนามแม่เหล็กจะทำให้ทราบค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กได้

ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ ตัวตรวจจับแบบอนาล็อก (Analog Hall Sensor) และตัวตรวจจับแบบดิจิทัล (Digital Hall Sensor) โดยแบบอนาล็อกจะให้ผลของค่าความเข้มสนามแม่เหล็กออกมาตามขนาดแรงดันที่วัดได้ ส่วนแบบดิจิทัลจะให้ผลของค่าความเข้มสนามแม่เหล็กออกมา 2 ค่า คือ ค่าต่ำ (Low) และค่าสูง (High)



รูปที่ 2.6 ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบอนาล็อก (ซ้าย)

และตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบดิจิทัล (ขวา)

Source: <http://www.theorycircuit.com/hall-effect-sensor-arduino-program/>

ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กเป็นวงจรรวม มีลักษณะดังรูปที่ 2.6 และมีคุณสมบัติดังนี้

- input voltage 4.5-6 V
- offset voltage 2.5 V (โดยประมาณ)
- Sensitivity 13 V/T

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1 หลักการทำงานของตัวตรวจจับสนามแม่เหล็ก

เมื่อต่อแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงหรือเซลล์ไฟฟ้า 4.5-6 V เข้ากับขา 5V+ และขา GND จากนั้นทำการต่อโวลต์มิเตอร์เข้ากับขา GND และขา Analog output โวลต์มิเตอร์จะแสดงค่าประมาณ 2.5 V ค่านี้เป็นความต่างศักย์ขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็ก เรียกว่า แรงดันออฟเซต (Offset voltage) ซึ่งเป็นค่าที่ผู้ผลิตกำหนดขึ้นมา ซึ่งแล้วแต่แต่ละบริษัท ค่านี้อาจเปลี่ยนแปลงได้เล็กน้อยขึ้นอยู่กับแรงดันของแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงที่ต่อกับขา 5V+ และขา GND

เมื่อนำแม่เหล็กเข้าใกล้บริเวณกระตุ้น (Active area) ของตัวตรวจจับสนามแม่เหล็ก ความต่างศักย์จะมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงขึ้นอยู่กับทิศของสนามแม่เหล็ก กล่าวคือ ถ้านำขั้วใต้เข้าใกล้ค่าความต่างศักย์จะมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ถ้านำขั้วเหนือเข้าใกล้ค่าความต่างศักย์จะมีค่าลดลง ความต่างศักย์ที่เปลี่ยนไปมีความสัมพันธ์กับความเข้มของสนามแม่เหล็กหรือความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic flux density) ดังนี้

$$B = (V_{out}(B) - V_{out}(0)) * S^{-1} \quad (2.2)$$

เมื่อ $V_{out}(0)$ คือ ความต่างศักย์ขณะไม่มีสนามแม่เหล็ก มีหน่วย โวลต์ (V)

$V_{out}(B)$ คือ ความต่างศักย์ขณะมีสนามแม่เหล็ก มีหน่วย โวลต์ (V)

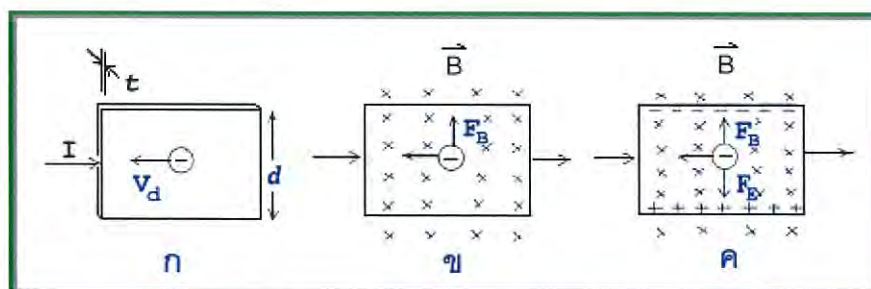
S คือ สัมประสิทธิ์ความไว มีหน่วย โวลต์ต่อเทสลา (V/T)

และ B คือ ความเข้มของสนามแม่เหล็กหรือความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก มีหน่วย เทสลา (T)

ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กสามารถวัดสนามแม่เหล็กในบริเวณใกล้แม่เหล็กถาวร, สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นบริเวณปลายโซเลนอยด์ และสนามแม่เหล็กใกล้เส้นลวดตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้

2.3.2 ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect)

ใน ค.ศ. 1879 เอ็ดวิน ฮอลล์ (Edwin Hall) นักศึกษามหาวิทยาลัยจอห์น ฮอปคินส์ ได้พบว่า เมื่อนำแผ่นตัวนำบางที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน วางในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็ก พาหะประจุในแผ่นตัวนำจะเกิดการเบี่ยงเบน และการเบี่ยงเบนนี้มีผลทำให้เกิดสนามไฟฟ้าในตัวนำบาง ในทิศตั้งฉากกับทั้งกระแสไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก การค้นพบนี้เรียกว่า ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect)



รูปที่ 2.7 การเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์

(Source: <https://web.ku.ac.th/schoolnet/snet3/saowalak/hall/hall.htm>)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์อธิบายได้ด้วยรูปที่ 2.7 ก-ค ดังนี้

รูป 2.7 ก แสดงแผ่นตัวนำบางที่มีความกว้าง d หนา t และมีกระแสไฟฟ้า (Conventional current), I ไหลผ่านในทิศทางจากด้านซ้ายไปด้านขวา พหุประจุคืออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ (ด้วยอัตราเร็วลอยเลื่อน V_d) ในทิศตรงข้ามกับกระแสไฟฟ้า จากด้านขวาไปด้านซ้าย

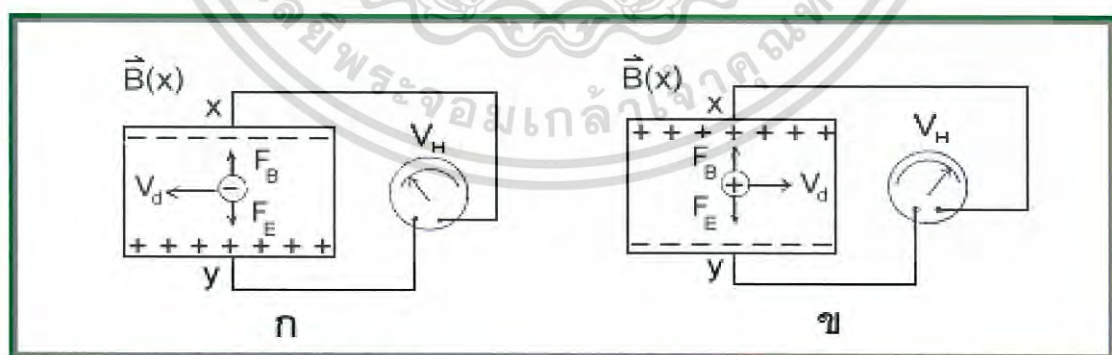
รูป 2.7 ข เมื่อใส่สนามแม่เหล็ก B ในทิศพุ่งเข้าหาและตั้งฉากกับระนาบแผ่นตัวนำบางหรือกระดาษ จะเกิดแรงแม่เหล็ก F_B กระทำกับอิเล็กตรอน ทำให้อิเล็กตรอนเบนไปทางขอบด้านบนของแผ่นตัวนำบาง

รูป 2.7 ค เมื่อเวลาผ่านไปจะมีอิเล็กตรอนถูกผลักไปที่ขอบด้านบนจำนวนมาก ส่วนขอบด้านล่างจะเกิดประจุไฟฟ้าบวกจำนวนมากเช่นกัน การที่มีประจุไฟฟ้าต่างชนิดกันที่ขอบทั้งสองทำให้เกิดสนามไฟฟ้า เรียกว่า สนามไฟฟ้าฮอลล์ (Hall Field), E_H ในแผ่นตัวนำบางมีทิศจากขอบด้านล่างไปขอบด้านบน สนามไฟฟ้าจะทำให้เกิดแรงไฟฟ้า F_E กระทำกับอิเล็กตรอน ซึ่งจะให้อิเล็กตรอนถูกผลักไปทางขอบด้านล่าง เมื่อแรงไฟฟ้าและแรงแม่เหล็กมีขนาดเท่ากัน อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ในทิศไปทางซ้าย และไม่เกิดการเบี่ยงเบน สนามไฟฟ้าที่เกิดในแผ่นตัวนำบางมีความสัมพันธ์กับความต่างศักย์หรือแรงดัน (V) ดังนี้

$$E_H = \frac{V_H}{d} \quad (2.3)$$

ความต่างศักย์หรือแรงดันที่เกิดขึ้นนี้ เรียกว่า ความต่างศักย์ฮอลล์ (Hall Potential Difference หรือ Hall Voltage), V_H พบว่า ความต่างศักย์ฮอลล์มีค่ามากที่สุด เมื่อแผ่นตัวนำบางทำจากสารกึ่งตัวนำ เช่น ซิลิกอน และเจอร์เมเนียม ส่วนตัวนำไฟฟ้าที่ดี ความต่างศักย์ฮอลล์จะมีค่าน้อยกว่ามาก จากสมการ (2.3) จะได้ว่า

$$V_H = E_H d \quad (2.4)$$



รูปที่ 2.8 การวัดความต่างศักย์ฮอลล์ (V_H)

(Source: <https://web.ku.ac.th/schoolnet/snet3/saowalak/hall/hall.htm>)

เราสามารถวัด V_H ได้ โดยต่อโวลต์มิเตอร์เข้ากับจุด x และจุด y ดังรูปที่ 2.8 ก สภาพชี้ของ V_H ทราบได้จากเครื่องหมายที่อ่านได้จากโวลต์มิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 2.8 ก พาหะประจุ คือ อิเล็กตรอนซึ่งมีประจุลบ ถ้าพาหะประจุมีประจุบวกทิศของ V_d และ V_H จะตรงข้ามกันในรูป 2.8 ก แต่ทิศของ F_B และ F_E ยังคงเดิม ดังแสดงในรูป 2.8 ข ทำให้ประจุบวกถูกผลักไปที่ขอบด้านขวา ส่วนประจุลบถูกผลักไปที่ขอบด้านซ้าย และสภาพชี้ของ V_H จะตรงข้ามกับกรณีที่พาหะประจุมีประจุลบ

จากรูป 2.8 ก ขณะที่แรงแม่เหล็กและแรงไฟฟ้ามีขนาดเท่ากัน

จะได้ว่า
$$(-e)E_H = (-e)V_d B \quad (2.5)$$

ดังนั้น
$$E_H = V_d B \quad (2.6)$$

จากสมการ (2.4) และ (2.6)

จะได้
$$V_H = V_d B d \quad (2.7)$$

เนื่องจากอัตราเร็วเลื่อนลอย V_d มีค่า
$$V_d = \frac{I}{neA} \quad (2.8)$$

เมื่อ n คือ จำนวนพาหะประจุต่อลูกบาศก์เมตรหรือความหนาแน่นของพาหะประจุ

$-e$ คือ ประจุอิเล็กตรอน

และ A คือ พื้นที่หน้าตัดของแผ่นตัวนำบาง

แทนสมการ (2.8) ลงในสมการ (2.7) จะได้

$$V_H = \frac{IBd}{neA} \quad (2.9)$$

เนื่องจาก $t = \frac{A}{d}$ คือ ความหนาของแผ่นตัวนำบาง

ดังนั้น
$$V_H = \frac{IB}{net} \quad (2.10)$$

จากสมการ (2.10)

จะได้
$$B = netI^{-1}V_H \quad (2.11)$$

ปริมาณ $V_H I$ และ t ในสมการ (2.11) หาได้จากการวัด วัสดุที่เป็นสารกึ่งตัวนำจะมีจำนวนพาหะประจุน้อยกว่าตัวนำไฟฟ้าที่ดี แต่ก็ยังมีค่ามากพอที่จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าที่สามารถวัดได้ ส่วนฉนวนมีจำนวนพาหะประจุน้อยมาก แต่ก็ยอมให้กระแสไฟฟ้าปริมาณเล็กน้อยผ่านจากการศึกษาพบว่า สารกึ่งตัวนำที่เจือสิ่งเจือปนมีค่า $n = 10^{22} m^{-3}$ และโลหะทั่วไปมีค่า $n = 10^{28} m^{-3}$ ดังนั้น เราจึงสามารถหาความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ไม่ทราบค่าจากสมการ (2.11) ได้ ความเข้มของสนามแม่เหล็กมีหน่วยในระบบเอสไอเป็นเทสลา (Tesla) แทนด้วยสัญลักษณ์ T และหน่วยเดิมของความเข้มของสนามแม่เหล็ก คือ เกาส์ (Gauss) แทนด้วยสัญลักษณ์ G โดยที่ $1 T = 10^4 G$

2.4 อินเวอร์เตอร์ (Inverter)

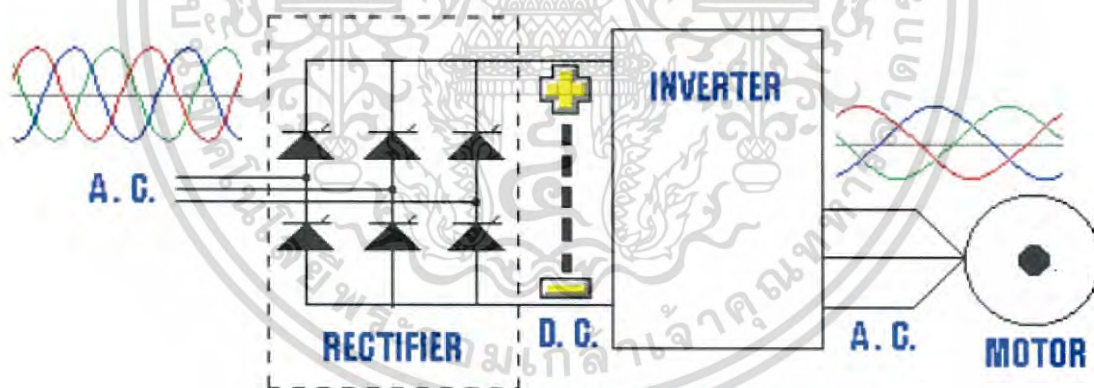
ในภาคอุตสาหกรรมนิยมใช้แหล่งจ่ายไฟกระแสสลับ ที่ส่วนใหญ่ใช้ในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า ซึ่งการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพสูงนั้น สามารถใช้อินเวอร์เตอร์ในการควบคุมแรงบิดและความเร็วรอบ ในปัจจุบันอินเวอร์เตอร์ได้พัฒนาไปอย่างมาก และมีการใช้งานในภาคอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลายมากขึ้น

2.4.1 หลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์

การแปลงไฟกระแสสลับ (AC) จากแหล่งจ่ายไฟทั่วไปที่มีแรงดันและความถี่คงที่ ให้เป็นไฟกระแสตรง (DC) โดยวงจรคอนเวอร์เตอร์ (Converter Circuit) จากนั้นไฟกระแสตรงจะถูกแปลงเป็นไฟกระแสสลับที่สามารถปรับขนาดแรงดัน และความถี่ได้โดยวงจรอินเวอร์เตอร์ (Inverter Circuit) วงจรทั้งสองนี้จะเป็นวงจรหลักที่ทำหน้าที่แปลงรูปคลื่น และผ่านพลังงานของอินเวอร์เตอร์

โดยทั่วไปแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับมีรูปคลื่นไซน์ แต่เอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์จะมีรูปคลื่นแตกต่างจากรูปไซน์ นอกจากนั้นยังมีชุดวงจรควบคุม (Control Circuit) ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของวงจรคอนเวอร์เตอร์และวงจรอินเวอร์เตอร์ให้เหมาะสมกับคุณสมบัติของมอเตอร์แบบ 3 เฟส

2.4.2 โครงสร้างภายในของอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 2.9 บล็อกไดอะแกรมพื้นฐานของอินเวอร์เตอร์

(Source: http://www.9engineer.com/index.php?m=article&a=print&article_id=751)

จากรูปที่ 2.9 โครงสร้างภายในของอินเวอร์เตอร์จะประกอบด้วยส่วนที่สำคัญดังนี้

2.4.2.1 วงจรเรียงกระแส (Rectifier circuit) เป็นวงจรที่มีคุณสมบัติในการแปลงกระแสไฟฟ้า จากไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง หรืออาจเรียกได้ว่าวงจรเรียงกระแสเป็นวงจรที่ยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง โดยนิยมใช้อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำเป็นตัวควบคุมทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า สำหรับอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่นิยมใช้ทั่วไป คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไดโอด (Diode) ซึ่งไดโอดที่นิยมใช้และขายทั่วไปตามท้องตลาด คือ ไดโอดชนิดซิลิกอน (Si) ซึ่งมีความต่างศักย์ 0.7 V และชนิดเจอร์เมเนียม (Ge) ซึ่งมีความต่างศักย์ 0.3 V

2.4.2.2 วงจรเชื่อมโยงทางดีซี (DC link) เป็นวงจรเชื่อมโยงระหว่างวงจรเรียงกระแสและวงจรอินเวอร์เตอร์ ซึ่งประกอบด้วยคาปาซิเตอร์ที่มีขนาดใหญ่ พักักแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 400 V หรือ 800 V โดยขึ้นอยู่กับแรงดันอินพุตว่าเป็นแบบเฟสเดียวหรือสามเฟส ทำหน้าที่กรองแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากวงจรเรียงกระแสให้เรียบยิ่งขึ้น และทำหน้าที่เก็บประจุไฟฟ้า ขณะที่มอเตอร์ทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในช่วงสั้น เนื่องจากการเบรคหรือมีการลดความเร็วรอบลงอย่างรวดเร็ว (สำหรับกรณีที่ใช้ร่วมกับโหลดที่มีแรงเฉื่อยมากๆ และต้องการหยุดอย่างรวดเร็ว จะเกิดแรงดันสูงย้อนกลับมาตกคร่อมคาปาซิเตอร์และทำให้คาปาซิเตอร์เสียหายได้ ดังนั้นในทางปฏิบัติจะมีวงจรชอปเปอร์ โดยต่อความต้านอนุกรมกับทรานซิสเตอร์ และต่อขนานกับคาปาซิเตอร์ไว้ โดยทรานซิสเตอร์จะทำหน้าที่เป็นสวิตช์ตัดต่อควบคุมให้กระแสไหลผ่านความต้านทานเพื่อลดพลังงานที่เกิดขึ้น

2.4.2.3 วงจรอินเวอร์เตอร์ (Inverter circuit) เป็นวงจรที่ทำหน้าที่แปลงจากแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (ที่ผ่านการกรองจากวงจรเชื่อมโยงทางดีซี) เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ วงจรจะประกอบด้วยทรานซิสเตอร์กำลัง 6 ชุด (ปัจจุบันส่วนใหญ่จะใช้ IGBT) ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ตัดต่อกระแสไฟฟ้าเพื่อแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ โดยอาศัยเทคนิคที่นิยมใช้กันทั่วไปคือ PWM (Pulse Width Modulation)

2.4.2.4 วงจรควบคุม (Control circuit) ทำหน้าที่รับข้อมูลจากผู้ใช้ เช่น รับข้อมูลความเร็วรอบที่ต้องการเข้าไปทำการประมวลผล และส่งนำเอาท์พุทออกไปควบคุมการทำงานของทรานซิสเตอร์เพื่อจ่ายแรงดันและความถี่ให้ได้ความเร็วรอบและแรงบิดตามที่ผู้ใช้งานต้องการ

2.5 วงจรขับมอเตอร์แบบฮับ

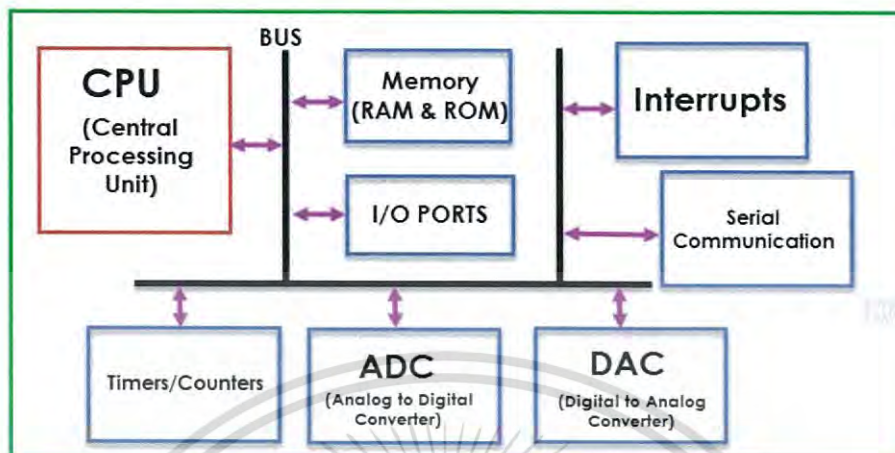
ในการศึกษามอเตอร์แบบฮับ จำเป็นต้องมีวงจรขับมอเตอร์ ซึ่งสามารถใช้วงจรขับสัญญาณแบบ 6 รูปแบบ ซึ่งประกอบด้วยส่วนหลักๆ คือ ส่วนวงจรกำลังไอจีบีที (IGBT) และส่วนวงจรควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

2.5.1 ส่วนประกอบหลักของวงจรขับมอเตอร์แบบฮับ

2.5.1.1 ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller)

ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) คือ อุปกรณ์ควบคุมขนาดเล็ก มีความสามารถคล้ายคลึงกับคอมพิวเตอร์ ซึ่งรวมเอาซีพียู (CPU), หน่วยความจำและพอร์ตเข้าไว้ในแผ่นเดียวกัน ดังรูปที่ 2.10 มีความสามารถในการประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย โดยการเขียนโปรแกรมคำสั่งเพื่อควบคุมการทำงานที่ขาอินพุตและเอาท์พุต ซึ่งนับว่าเป็นระบบที่สามารถ

ประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายทั้งด้าน อนาล็อกและดิจิทัล เช่น ระบบตอกบัตร ระบบบัตรคิว ในปัจจุบันไมโครคอนโทรลเลอร์ยังสามารถเชื่อมต่อกับระบบอินเทอร์เน็ตได้อีกด้วย



รูปที่ 2.10 โครงสร้างโดยทั่วไปของไมโครคอนโทรลเลอร์

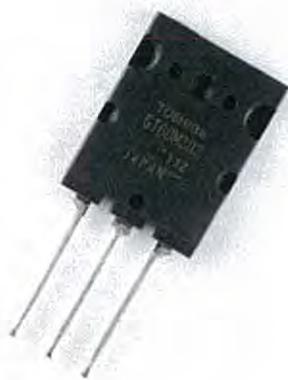
(Source: [https:// www.electronicshub.org](https://www.electronicshub.org))

อาดูโน้ (Arduino) เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ดแบบสำเร็จรูปในยุคปัจจุบัน ซึ่งถูกสร้างมาจากคอนโทรลเลอร์ ตระกูล ARM ของ ATMEL ข้อดีของไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ด คือ เรื่องของ Open Source ที่สามารถนำไป พัฒนาต่อเป็นอุปกรณ์ต่างๆได้ และความสามารถในการเพิ่ม Boot Loader เข้าไปที่ตัว ARM จึงทำให้การ Upload Code เข้าตัวบอร์ดสามารถทำได้ง่ายขึ้น และยังมีการพัฒนาซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการควบคุมตัวบอร์ดของอาดูโน้ มีลักษณะเป็นภาษา C++ ที่โปรแกรมเมอร์มีความคุ้นเคยในการทำงาน ตัวบอร์ดสามารถนำโมดูลมาต่อเพิ่ม ซึ่งทางอาดูโน้ เรียกว่าเป็น Shield เพื่อเพิ่มความสามารถเพิ่มขึ้น

2.5.1.2 ไอจีบีที (IGBT)

ไอจีบีที (IGBT) เป็นอุปกรณ์ที่เกิดจากการนำส่วนที่ดีที่สุดของทรานซิสเตอร์สองชนิด คือ MOSFET โดยใช้ประโยชน์จากการมีค่า Input impedance และ Switching speeds ที่สูง กับ BJT โดยใช้ประโยชน์ของการมีค่าแรงดันอิมิตต์ที่ต่ำ เพื่อที่จะสร้างทรานซิสเตอร์รูปแบบใหม่ที่มีกระแสควบคุมได้ที่ Collector,(C)-Emitter,(E) สูง กับกระแสที่ต้องใช้ในการขับ Gate ที่ต่ำมาก กระแสที่ C-E สูง จะสามารถขับโหลดขนาดหนักได้ และ กระแสที่ใช้ในการขับ Gate ต่ำทำให้ออกแบบวงจรภาค Gate driver จากสัญญาณ PWM ง่าย การควบคุมก็การเปิด-ปิด IGBT ก็จะไปด้วย Typical IGBT แสดงดังรูปที่ 2.11

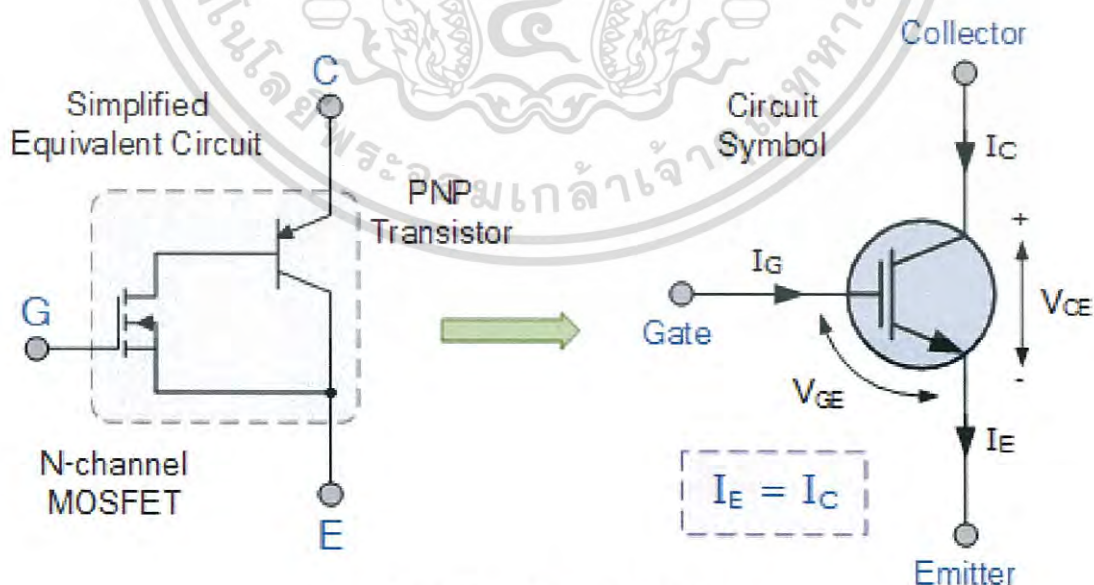
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 รูปแบบทั่วไปของไอจีบีที (IGBT)

(Source: <http://wkb-electric.com>)

ไอจีบีที (IGBT) มีส่วนที่เกิดจาก Insulated gate เทคโนโลยีจากการผลิต MOSFET (IG = Insulated gate) กับคุณสมบัติของทางด้าน Output จาก BJT (BT = Bipolar Transistor) จึงถูกเรียกว่า ไอจีบีที (IGBT) มักถูกใช้ในอุปกรณ์เพาเวอร์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น Inverter Converter Power Supply แทนที่ใช้ MOSFETs และ BJT เมื่อต้องการงานที่มีกระแสและแรงดันที่สูงและมีความสามารถในการรับความถี่ของการสวิตช์ที่ค่อนข้างสูง จากการที่ไอจีบีที (IGBT) รวมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หลักไว้ทั้งสองชนิด ทำให้มีกำลังขยายที่สูงและสามารถใช้งานที่แรงดันสูง (BJT) และการมีกำลังสูญเสียที่ภาค Gate driver ที่ต่ำ ในรูปที่ 2.12 แสดงให้เห็นว่า IGBT นั้นเกิดจากการต่อแบบดาร์ลิงตันกันของสองอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หลัก



รูปที่ 2.12 โครงสร้างของไอจีบีที IGBT

(Source: <http://wkb-electric.com>)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.12 จะสามารถเห็นว่า ไอจีบีที(IGBT) มีทั้งหมดสามขาตามรูปที่แสดง เรียกว่า Collector(C), Emitter(E) และ Gate(G) โดย C-E จะเป็นขาที่ส่งผ่านกระแส C และ G ซึ่งเป็นขาสำหรับควบคุม โดยการขยายของ BJT จะขึ้นกับค่า β ไอจีบีที(IGBT) จะถูกสั่งให้ทำงาน ON หรือ OFF จากการกระตุ้นที่ขั้ว Gate(G) ซึ่งถ้าจ่ายแรงดันบวกอินพุตระหว่าง Gate(G) กับ Emitter(E) จะเป็นการสั่งการให้ไอจีบีที (IGBT) ทำงาน ON แต่ในทางกลับกัน ถ้าจ่ายแรงดันศูนย์หรือ เป็นแรงดันลบเข้าที่ขั้วดังกล่าวจะทำให้ไอจีบีที(IGBT) ทำงาน OFF ลักษณะการทำงานแบบเดียวกับ BJT หรือ eMOSFET แต่ประโยชน์ที่แตกต่างของมันก็คือ การมี R_{on} ที่ ต่ำมากเช่นเดียวกับคุณสมบัติของ MOSFET

2.5.2 ลำดับการทำงานของวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์แบบฮับ

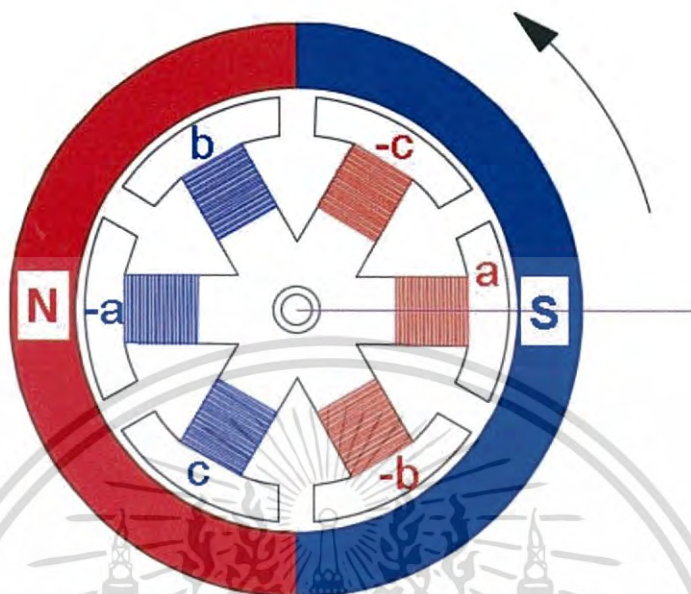
การสั่งการวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ สามารถทำได้โดยการแบ่งการทำงานออกเป็น 6 รูปแบบ เพื่อให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนเช่นเดียวกับสนามแม่เหล็กหมุนในเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสดังที่ได้กล่าวถึงในหัวข้อที่ 2.3 ข้างต้น แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 รูปแบบการทำงานของวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์

Patterns	Phase A	Phase B	Phase C	Hall 1	Hall 2	Hall 3
1	$+V_a$	$-V_b$	$-V_c$	H	L	L
2	$+V_a$	$+V_b$	$-V_c$	H	H	L
3	$-V_a$	$+V_b$	$-V_c$	L	H	L
4	$-V_a$	$+V_b$	$+V_c$	L	H	H
5	$-V_a$	$-V_b$	$+V_c$	L	L	H
6	$+V_a$	$-V_b$	$+V_c$	H	L	H

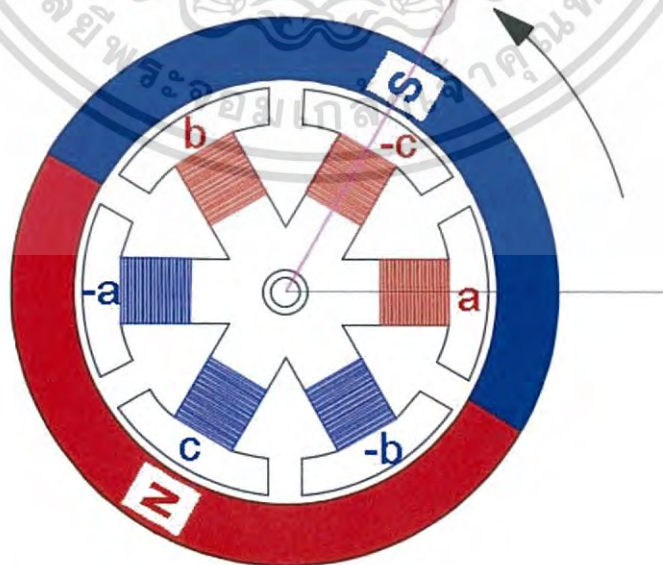
จากตารางที่ 2.1 รูปแบบการทำงานของมอเตอร์แบบฮับ จะเริ่มจากการที่ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็ก (Hall Sensor) ทำการตรวจวัดสนามแม่เหล็กที่ผ่านเฟสนั้นๆ และทำหน้าที่เหมือนคอมพิวเตอร์ ส่งสัญญาณไปที่ส่วนควบคุมให้ทำการจ่ายแรงดันบวกลบเข้าที่ขั้วลวดแต่ละเฟส เพื่อให้มอเตอร์หมุนตามรูปแบบดังกล่าว

การทำงานในรูปแบบที่ 1 ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็ก Hall 1 ตรวจพบสนามแม่เหล็ก ส่งผลให้ส่งสัญญาณไปที่ส่วนควบคุม ทำให้วงจรทำการจ่ายแรงดัน $+V_{dc}$ ให้เฟส A ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ตัวอย่างการทำงานของมอเตอร์แบบฮับชนิดสองขั้ว รูปแบบที่ 1

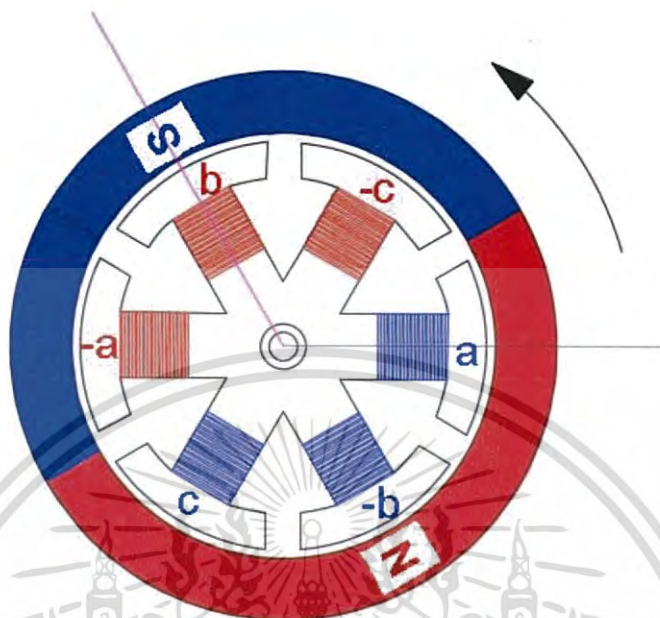
การทำงานในรูปแบบที่ 2 ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็ก Hall 1 และ Hall 2 ตรวจพบสนามแม่เหล็ก ส่งผลให้ส่งสัญญาณไปที่ส่วนควบคุม ทำให้วงจรทำการจ่ายแรงดัน $+V_{dc}$ ให้เฟส A และจ่ายแรงดัน $+V_{dc}$ ให้เฟส B ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ตัวอย่างการทำงานของมอเตอร์แบบฮับชนิดสองขั้ว รูปแบบที่ 2

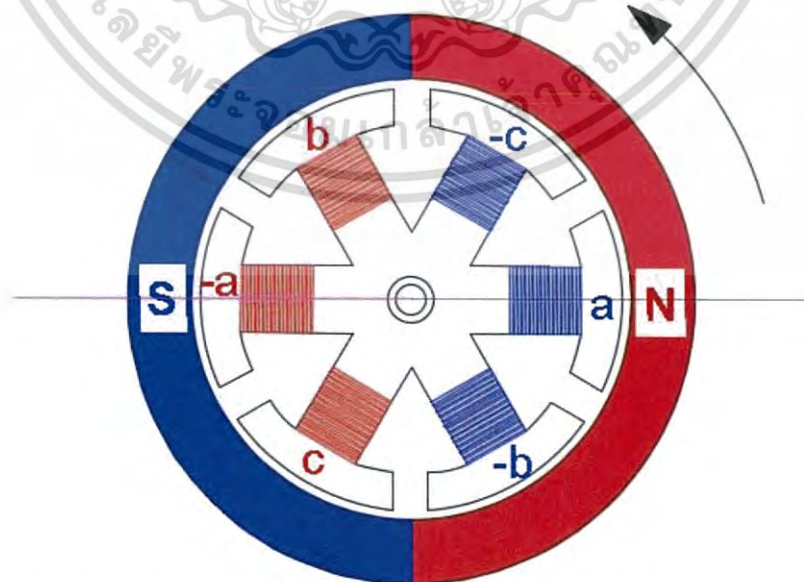
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำงานในรูปแบบที่ 3 ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็ก Hall 2 ตรวจพบสนามแม่เหล็ก ส่งผลให้ส่งสัญญาณไปที่ส่วนควบคุม ทำให้วงจรทำการจ่ายแรงดัน $-V_{dc}$ ให้เฟส B ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ตัวอย่างการทำงานของมอเตอร์แบบฮับชนิดสองขั้ว รูปแบบที่ 3

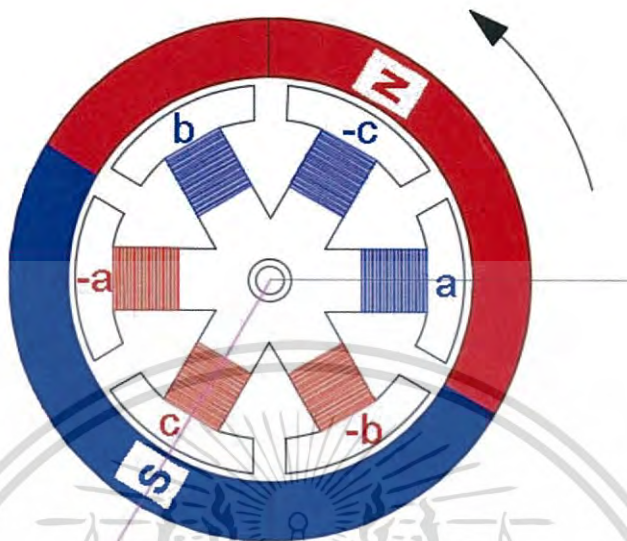
การทำงานในรูปแบบที่ 4 ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็ก Hall 2 และ Hall 3 ตรวจพบสนามแม่เหล็ก ส่งผลให้ส่งสัญญาณไปที่ส่วนควบคุม ทำให้วงจรทำการจ่ายแรงดัน $+V_{dc}$ ให้เฟส B และจ่ายแรงดัน $+V_{dc}$ ให้เฟส C ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 ตัวอย่างการทำงานของมอเตอร์แบบฮับชนิดสองขั้ว รูปแบบที่ 4

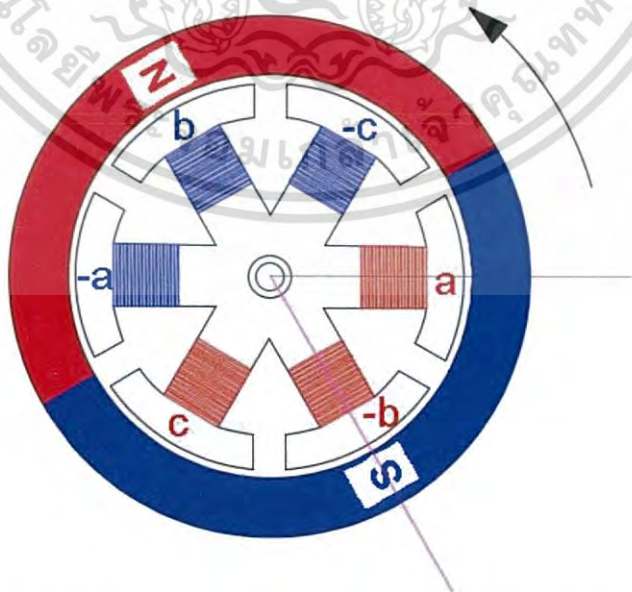
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำงานในรูปแบบที่ 5 ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็ก Hall 3 ตรวจพบสนามแม่เหล็ก ส่งผลให้ส่งสัญญาณไปที่ส่วนควบคุม ทำให้วงจรทำการจ่ายแรงดัน $+V_{dc}$ ให้เฟส C ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 ตัวอย่างการทำงานของมอเตอร์แบบฮับชนิดสองขั้ว รูปแบบที่ 5

การทำงานในรูปแบบที่ 6 ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็ก Hall 1 และ Hall 3 ตรวจพบสนามแม่เหล็ก ส่งผลให้ส่งสัญญาณไปที่ส่วนควบคุม ทำให้วงจรทำการจ่ายแรงดัน $+V_{dc}$ ให้เฟส A และจ่ายแรงดัน $+V_{dc}$ ให้เฟส C ดังรูปที่ 2.18



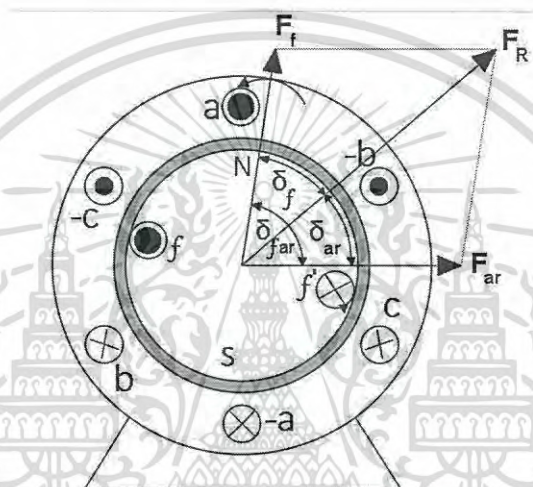
รูปที่ 2.18 ตัวอย่างการทำงานของมอเตอร์แบบฮับชนิดสองขั้ว รูปแบบที่ 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 กำลังและแรงบิดของมอเตอร์

2.6.1 แรงบิดจากสนามแม่เหล็ก (Electromagnetic Torque)

การเกิดแรงบิดจากสนามแม่เหล็กในเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับแบบที่ตัวโรเตอร์เป็นแบบทรงกระบอก (Cylindrical rotor) นั้น เกิดจากแรงเคลื่อนสนามแม่เหล็กจากขดลวดอาร์เมเจอร์ 3 เฟสที่ตัวสเตเตอร์ (\vec{F}_{ar}) ทำมุมกับแรงเคลื่อนสนามแม่เหล็กจากตัวโรเตอร์ที่เกิดจากขดลวดกระตุ้นสนามแม่เหล็ก (\vec{F}_f) ดังรูปที่ 2.19 แสดงสนามแม่เหล็กจากตัวโรเตอร์และสนามแม่เหล็กหมุนจากตัวสเตเตอร์ต่างก็เคลื่อนตัวในทิศทางบวก (ทวนเข็มนาฬิกา)



รูปที่ 2.19 ทิศทางแรงเคลื่อนสนามแม่เหล็กของอาร์เมเจอร์และขดลวดกระตุ้นสนามแม่เหล็ก

การหาแรงบิดสนามแม่เหล็กทำได้จากการทำอนุพันธ์ย่อย (Partial derivative) ของ Coenergy of magnetic field

$$T_{fld} = \frac{\partial W'_f(i_{ar}, i_f, \theta)}{\partial \theta} \quad (2.12)$$

ซึ่งสามารถหาค่าแรงบิดจากสนามแม่เหล็ก

$$T_{fld} = -\left(\frac{P}{2}\right) \left(\frac{\mu_0 \pi D l}{2g}\right) F_R F_f \sin \delta_f \quad (2.13)$$

หรือ เขียนให้อยู่ในรูปที่สัมพันธ์กับเส้นแรงแม่เหล็กลัพธ์ต่อขั้ว (Resultant magnetic flux per pole: ϕ_r)

$$T_e = -\left(\frac{\pi}{2}\right) \left(\frac{P}{2}\right)^2 \phi_r F_f \sin \delta_f \quad (2.14)$$

เมื่อ $F_R^2 = F_f^2 + F_{ar}^2 + 2F_f F_{ar} \cos \delta_{far}$

$$\phi_r = \left(\frac{2\mu_0 D l}{gP}\right) F_R$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

F_R คือ ค่าสูงสุดของแรงเคลื่อนสนามแม่เหล็กลัพธ์ในช่องอากาศ (Resultant mmf in air gap)

F_f คือ ค่าสูงสุดของแรงเคลื่อนแม่เหล็กจากขดลวดกระตุ้นสนาม (Field winding mmf)

δ_{far} คือ มุมระหว่างแรงเคลื่อนสนามแม่เหล็กจากขดลวดสนามกับสนามแม่เหล็กลัพธ์

l คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของช่องอากาศ

g คือ ความยาวของอาร์เมเจอร์

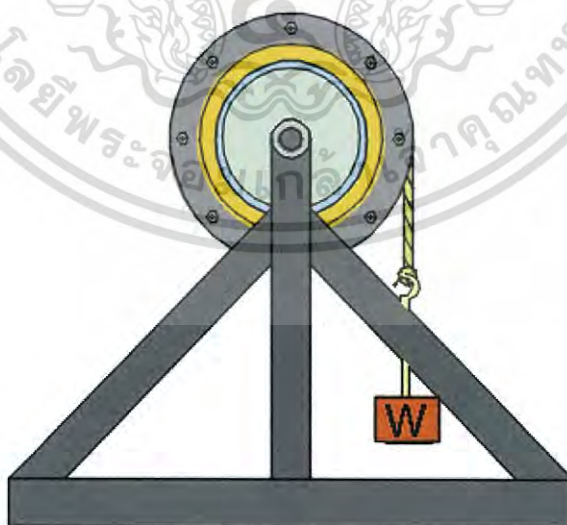
P คือ ความกว้างของช่องอากาศ

ซึ่งสามารถหาค่าแรงบิดที่เกิดจากแรงเคลื่อนสนามแม่เหล็กได้จากสมการที่ (2.14) ถ้าใช้แรงจากภายนอกมาลากตัวโรเตอร์ให้แรงเคลื่อนแม่เหล็กตัวโรเตอร์ให้แรงเคลื่อนสนามแม่เหล็กตัวโรเตอร์นำหน้าสนามแม่เหล็กจากอาร์เมเจอร์ดังรูปที่ 2.19 เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับจะทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แต่ถ้าสนามแม่เหล็กของอาร์เมเจอร์จากตัวสเตเตอร์นำหน้าสนามแม่เหล็กโรเตอร์ เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับจะทำงานเป็นมอเตอร์

โดยค่าเส้นแรงแม่เหล็กลัพธ์ต่อขั้ว (ϕ_R) จะขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดแต่ละเฟส (E_{ph}) ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับแรงดันฟ้าที่ขั้ว (V_{st}) และแรงเคลื่อนสนามแม่เหล็กจากขดลวดกระตุ้นสนาม (F_f) จะมีความสัมพันธ์กับกระแสกระตุ้นสนาม (I_f)

2.6.2 การทดสอบภาระทางกล (Load Test)

เป็นการทดสอบการขับภาระทางกลของมอเตอร์ ดังรูปที่ 2.20 โดยใช้หลักการการเพิ่มภาระทางกล ทำการเพิ่มลูกน้ำหนัก (W) ซึ่งจะเป็นการเพิ่มแรงบิดให้กับมอเตอร์



รูปที่ 2.20 การทดสอบภาระทางกลของมอเตอร์แบบฮับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการทดสอบภาระทางกล

ถ้า $n_s = 0$ rpm และแรงดึงในเส้นเชือกเท่ากันตลอดทั้งเส้น

ทำให้ได้ว่า

$$F = W = mg \quad (2.15)$$

โดย F คือ แรง มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)

W คือ น้ำหนัก มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)

m คือ มวลของลูกตุ้ม มีหน่วยเป็น กิโลกรัม (kg)

และ g คือ ความโน้มถ่วงพื้นผิว มีหน่วยเป็น เมตรต่อวินาทีกำลังสอง (m/s^2)

แรงบิด หรือ ทอร์ก (T) หรือ โมเมนต์ของแรง (Moment of a force) คือ ความพยายามของแรงที่จะหมุนวัตถุรอบแกนหรือจุดหมุนหรือก็คือ โมเมนต์ของวัตถุที่เคลื่อนที่แบบหมุน มีหน่วยเป็น นิวตัน·เมตร (N·m) เกิดจากผลคูณเชิงเวกเตอร์ของเวกเตอร์ตำแหน่ง r กับแรง F

$$T = r \times F \quad (2.16)$$

โดย T คือ ทอร์กของแรง มีหน่วยเป็น นิวตัน·เมตร (N·m)

r คือ รัศมีการหมุนของวัตถุ มีหน่วยเป็น เมตร (m)

F คือ แรงที่กระทำต่อวัตถุในทิศตั้งฉากกับรัศมีของการหมุน มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)

จากสมการที่ (2.15) และ (2.16) ทำให้สามารถหาแรงบิดที่ซับซ้อนทางกล ได้จากสมการที่ (2.17)

$$T = r \times mg \quad (2.17)$$

บทที่ 3

การศึกษามอเตอร์แบบฮับ

ในบทนี้จะกล่าวถึงอุปกรณ์และเครื่องมือวัดทางไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบมอเตอร์แบบฮับ และวิธีการทดสอบมอเตอร์แบบฮับพิกัด 1000 W, 48 V และความเร็วรอบ 480 rpm ซึ่งการทดสอบจะเริ่มจากการศึกษาโครงสร้างของมอเตอร์แบบฮับ การจำลองการจ่ายแรงดันด้วยสัญญาณ 6 รูปแบบ เพื่อดูผลของสนามแม่เหล็กที่สเตเตอร์ ทำการออกแบบและสร้างวงจรขับมอเตอร์แบบฮับ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างมุมทางกลกับมุมทางไฟฟ้า และเพื่อศึกษาผลของตัวตรวจจับสนามแม่เหล็ก ภายในมอเตอร์แบบฮับ อีกทั้งจะทำการศึกษาแรงบิดของมอเตอร์แบบฮับด้วยการทำแท่นทดสอบมอเตอร์แบบฮับขึ้นมา เพื่อดูผลของแรงบิดกับกระแสและมุมโรเตอร์

3.1 การศึกษาโครงสร้างของมอเตอร์แบบฮับ

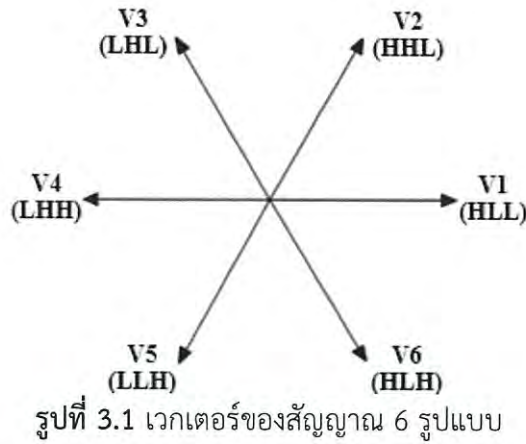
3.1.1 การศึกษาการขับมอเตอร์แบบฮับด้วยสัญญาณแรงดัน 6 รูปแบบ

เนื่องจากสัญญาณที่ใช้ในการขับมอเตอร์แบบฮับ จะใช้การควบคุมด้วยสัญญาณ 6 รูปแบบ ดังนั้น อันดับแรกในการศึกษาโครงสร้างของมอเตอร์แบบฮับ จึงจำลองการจ่ายแรงดันแต่ละรูปแบบ ตามตารางที่ 3.1 เพื่อทำการศึกษาสถาปัตยกรรมแม่เหล็กที่เกิดขึ้นที่สเตเตอร์ โดยที่สัญญาณการจ่ายแรงดัน 6 รูปแบบ จะทำให้เกิดสเปซเวกเตอร์ดังรูปที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สัญญาณการจ่ายแรงดัน 6 รูปแบบสำหรับมอเตอร์แบบฮับ

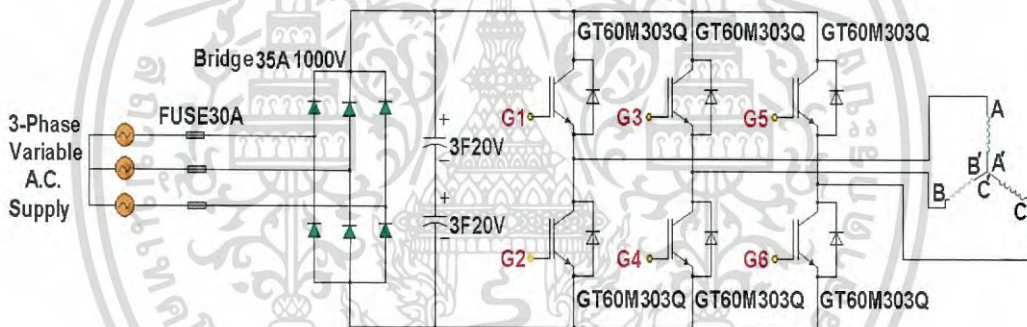
Patterns	Phase A	Phase B	Phase C
1	$+V_a$	$-V_b$	$-V_c$
2	$+V_a$	$+V_b$	$-V_c$
3	$-V_a$	$+V_b$	$-V_c$
4	$-V_a$	$+V_b$	$+V_c$
5	$-V_a$	$-V_b$	$+V_c$
6	$+V_a$	$-V_b$	$+V_c$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

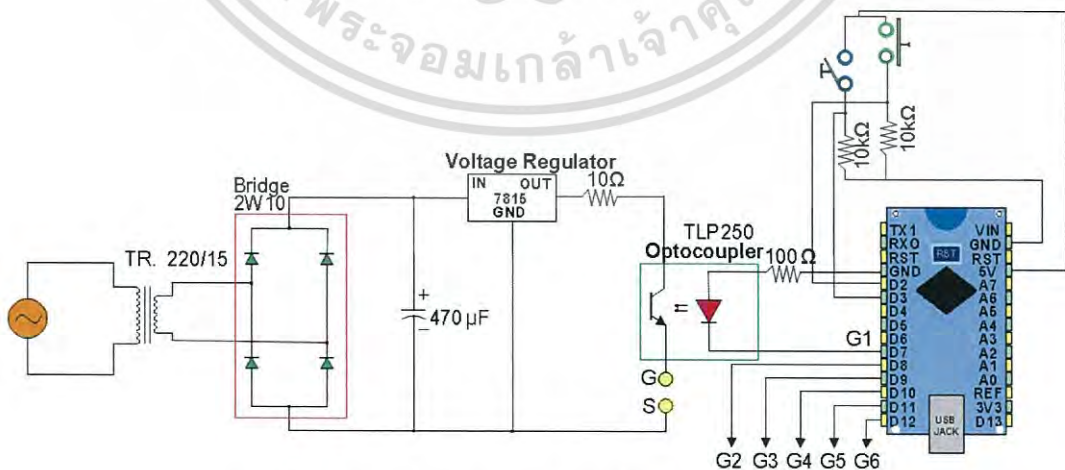


3.1.2 วงจรที่ออกแบบเพื่อใช้ในการขับมอเตอร์แบบซิป

วงจรขับมอเตอร์ประกอบด้วยส่วนหลักๆ คือ ส่วนวงจรกำลังไอจีบีที (IGBT) และ ส่วนวงจรควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งเป็นวงจรขับแบบ 6 สวิตช์ ดังรูปที่ 3.2 และรูปที่ 3.3 ตามลำดับ



รูปที่ 3.2 ส่วนวงจรกำลังไอจีบีที (IGBT)



รูปที่ 3.3 ส่วนวงจรควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์แบบฮับ

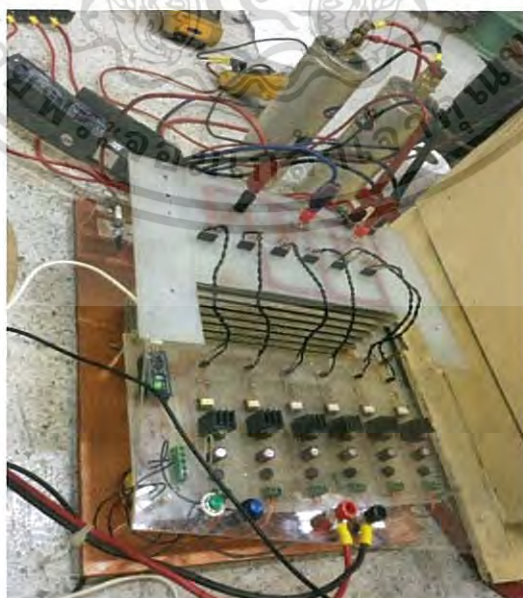
- | | |
|----------------------------|-------------|
| 1) ฟิวส์ขนาด 30 A | จำนวน 3 ตัว |
| 2) สวิตช์ แบบกดติดปล่อยดับ | จำนวน 1 ตัว |
| 3) สวิตช์ แบบกดค้าง | จำนวน 1 ตัว |
- 4) ชุดวงจรกำลัง เป็นวงจรที่เชื่อมต่อกับขาคอลเล็กเตอร์และขาคิมิตเตอร์ของไอจีบีที เพื่อเป็นแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์แบบฮับ ประกอบด้วย

- | | | |
|--------------------|----------------|-------------|
| - Bridge Rectifier | 35 A, 1000 V | จำนวน 2 ตัว |
| - Capacitor ขนาด | 3 F, 20 V | จำนวน 2 ตัว |
| - ไอจีบีที (IGBT) | รุ่น GT60M303Q | จำนวน 6 ตัว |

- 5) ชุดวงจรควบคุม เป็นวงจรที่เชื่อมต่อกับขาเกตและขาคิมิตเตอร์ของไอจีบีทีเพื่อควบคุมการจ่ายแรงดันไฟฟ้าของไอจีบีทีให้กับมอเตอร์แบบฮับ ประกอบด้วย

- | | | |
|--------------------|--------------|-------------|
| - หม้อแปลง | 220/15 V | จำนวน 6 ตัว |
| - Bridge Rectifier | รุ่น 2W10 | จำนวน 6 ตัว |
| - Capacitor ขนาด | 470 μ F | จำนวน 6 ตัว |
| - Regulator | รุ่น L7815CV | จำนวน 6 ตัว |
| - Opto isolator | รุ่น TLP250 | จำนวน 6 ตัว |
| - ตัวต้านทาน ขนาด | 10 Ω | จำนวน 6 ตัว |
| - ตัวต้านทาน ขนาด | 100 Ω | จำนวน 6 ตัว |

3.1.4 ชุดวงจรที่ใช้จริงในการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบฮับ



รูปที่ 3.4 ชุดวงจรที่ใช้จริงในการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบฮับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.5 โค้ดที่ใช้ในวงจรควบคุมการจ่ายแรงดันให้กับมอเตอร์แบบฮับ

3.1.5.1 โค้ดวัดมุม (คำสั่งการทำงานครั้งละรูปแบบ)

```

int s=0;
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode(2, INPUT);
  pinMode(12, OUTPUT);
  pinMode(11, OUTPUT);
  pinMode(10, OUTPUT);
  pinMode(9, OUTPUT);
  pinMode(8, OUTPUT);
  pinMode(7, OUTPUT);
  digitalWrite(10, LOW);
  digitalWrite(7, LOW);
  digitalWrite(12, LOW);
  digitalWrite(11, LOW);
  digitalWrite(9, LOW);
  digitalWrite(8, LOW);
}
boolean T=0;
void loop() {
  while (digitalRead(2) == LOW);
  while (digitalRead(2) == HIGH) {
    T=1;
  }
}

```

รูปที่ 3.5 โค้ดที่ใช้ในการวัดมุมส่วนที่ 1 (คำสั่งการทำงานครั้งละรูปแบบ)

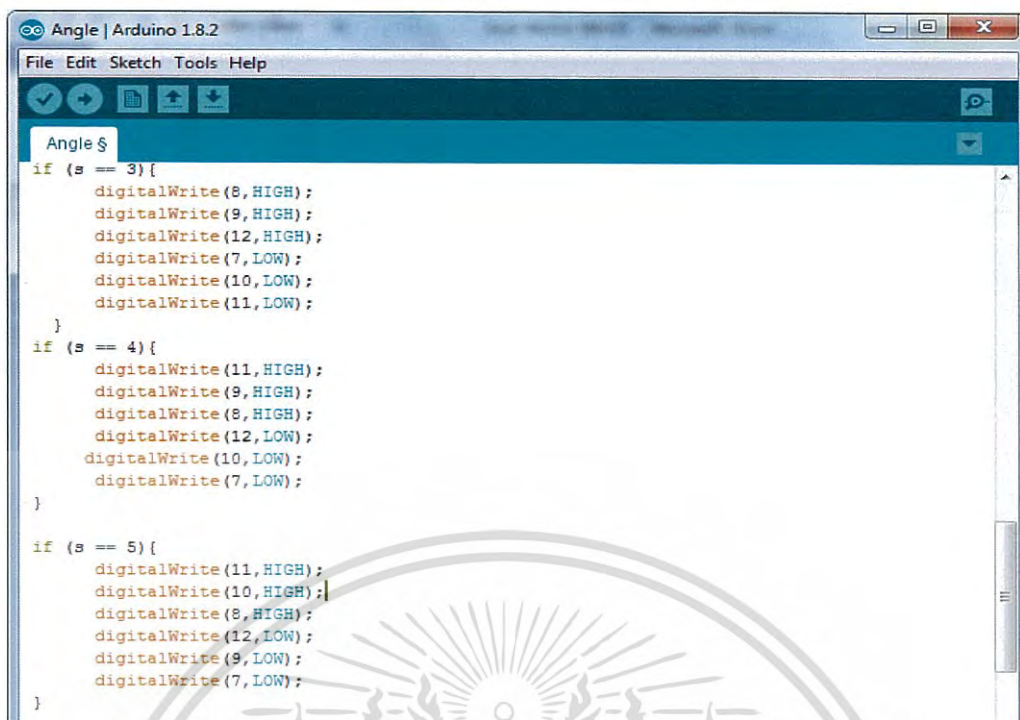
```

if (T==1) {
  s=s+1;
  if (s==7) {
    s=1;
  }
}
T=0;
Serial.println(s);
if (s == 1) {
  digitalWrite(7, HIGH);
  digitalWrite(10, HIGH);
  digitalWrite(12, HIGH);
  digitalWrite(11, LOW);
  digitalWrite(9, LOW);
  digitalWrite(8, LOW);
}
if (s == 2) {
  digitalWrite(9, HIGH);
  digitalWrite(12, HIGH);
  digitalWrite(7, HIGH);
  digitalWrite(11, LOW);
  digitalWrite(10, LOW);
  digitalWrite(8, LOW);
}
}

```

รูปที่ 3.6 โค้ดที่ใช้ในการวัดมุมส่วนที่ 2 (คำสั่งการทำงานครั้งละรูปแบบ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

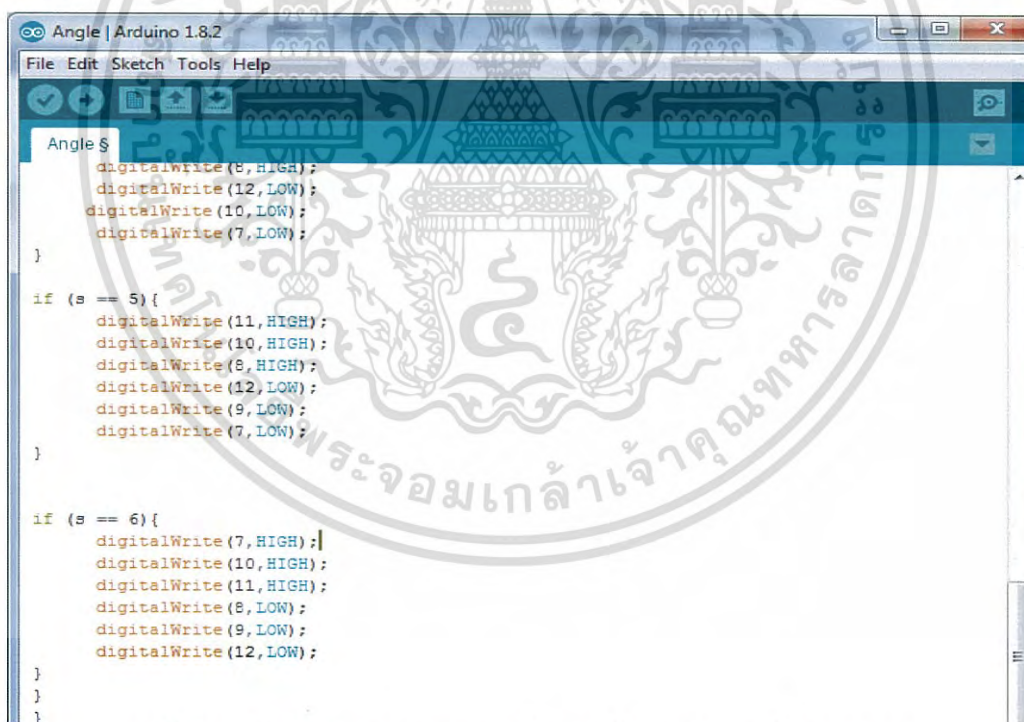


```

Angle | Arduino 1.8.2
File Edit Sketch Tools Help
Angle $
if (s == 3){
  digitalWrite(8, HIGH);
  digitalWrite(9, HIGH);
  digitalWrite(12, HIGH);
  digitalWrite(7, LOW);
  digitalWrite(10, LOW);
  digitalWrite(11, LOW);
}
if (s == 4){
  digitalWrite(11, HIGH);
  digitalWrite(9, HIGH);
  digitalWrite(8, HIGH);
  digitalWrite(12, LOW);
  digitalWrite(10, LOW);
  digitalWrite(7, LOW);
}
}
if (s == 5){
  digitalWrite(11, HIGH);
  digitalWrite(10, HIGH);
  digitalWrite(8, HIGH);
  digitalWrite(12, LOW);
  digitalWrite(9, LOW);
  digitalWrite(7, LOW);
}
}

```

รูปที่ 3.7 โค้ดที่ใช้ในการวัดมุมส่วนที่ 3 (คำสั่งการทำงานครั้งละรูปแบบ)



```

Angle | Arduino 1.8.2
File Edit Sketch Tools Help
Angle $
digitalWrite(8, HIGH);
digitalWrite(12, LOW);
digitalWrite(10, LOW);
digitalWrite(7, LOW);
}
if (s == 5){
  digitalWrite(11, HIGH);
  digitalWrite(10, HIGH);
  digitalWrite(8, HIGH);
  digitalWrite(12, LOW);
  digitalWrite(9, LOW);
  digitalWrite(7, LOW);
}
}
if (s == 6){
  digitalWrite(7, HIGH);
  digitalWrite(10, HIGH);
  digitalWrite(11, HIGH);
  digitalWrite(8, LOW);
  digitalWrite(9, LOW);
  digitalWrite(12, LOW);
}
}
}
}

```

รูปที่ 3.8 โค้ดที่ใช้ในการวัดมุมส่วนที่ 4 (คำสั่งการทำงานครั้งละรูปแบบ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.5.2 โค้ดวัดแรงดัน

```

Voltage | Arduino 1.8.2
File Edit Sketch Tools Help
Voltage $
float V1,V2,V3;
int s=0,rob;
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode(2,INPUT);
  pinMode(3,INPUT);
  pinMode(12,OUTPUT);
  pinMode(11,OUTPUT);
  pinMode(10,OUTPUT);
  pinMode(9,OUTPUT);
  pinMode(8,OUTPUT);
  pinMode(7,OUTPUT);
  digitalWrite(10,LOW);
  digitalWrite(7,LOW);
  digitalWrite(12,LOW);
  digitalWrite(11,LOW);
  digitalWrite(9,LOW);
  digitalWrite(8,LOW);
}
void loop() {
  if (digitalRead(3) == HIGH){
    delay(500);
    for (int r=1; r <= 138; r++){
      s=s+1;
    }
  }
}

```

รูปที่ 3.9 โค้ดที่ใช้ในการวัดแรงดันส่วนที่ 1

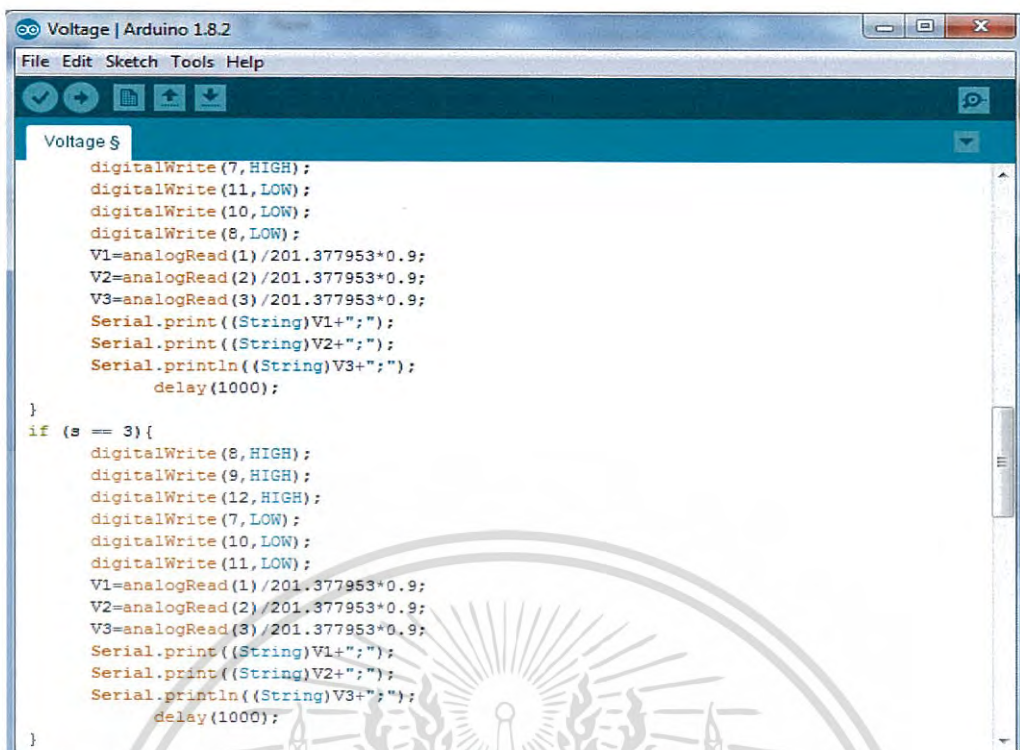
```

Voltage | Arduino 1.8.2
File Edit Sketch Tools Help
Voltage $
if (s==7){
  s=1;
}
rob = 1+(r-1)/12;
Serial.print((String)rob + "");
Serial.print((String)s + "");
if (s == 1){
  digitalWrite(7,HIGH);
  digitalWrite(10,HIGH);
  digitalWrite(12,HIGH);
  digitalWrite(11,LOW);
  digitalWrite(9,LOW);
  digitalWrite(8,LOW);
  V1=analogRead(1)/201.377953*0.9;
  V2=analogRead(2)/201.377953*0.9;
  V3=analogRead(3)/201.377953*0.9;
  Serial.print((String)V1+"");
  Serial.print((String)V2+"");
  Serial.println((String)V3+"");
  delay(1000);
}
if (s == 2){
  digitalWrite(9,HIGH);
  digitalWrite(12,HIGH);
  digitalWrite(7,HIGH);
}

```

รูปที่ 3.10 โค้ดที่ใช้ในการวัดแรงดันส่วนที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

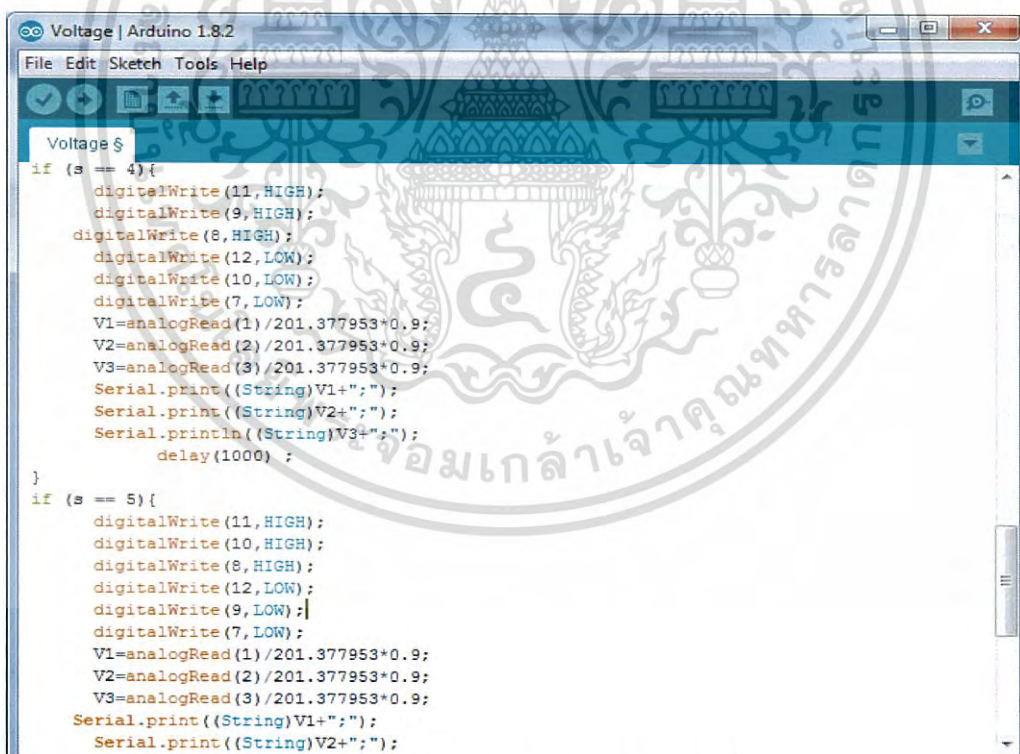


```

Voltage | Arduino 1.8.2
File Edit Sketch Tools Help
Voltage $
digitalWrite(7, HIGH);
digitalWrite(11, LOW);
digitalWrite(10, LOW);
digitalWrite(8, LOW);
V1=analogRead(1)/201.377953*0.9;
V2=analogRead(2)/201.377953*0.9;
V3=analogRead(3)/201.377953*0.9;
Serial.print((String)V1+"");
Serial.print((String)V2+"");
Serial.println((String)V3+"");
delay(1000);
}
if (s == 3){
digitalWrite(8, HIGH);
digitalWrite(9, HIGH);
digitalWrite(12, HIGH);
digitalWrite(7, LOW);
digitalWrite(10, LOW);
digitalWrite(11, LOW);
V1=analogRead(1)/201.377953*0.9;
V2=analogRead(2)/201.377953*0.9;
V3=analogRead(3)/201.377953*0.9;
Serial.print((String)V1+"");
Serial.print((String)V2+"");
Serial.println((String)V3+"");
delay(1000);
}

```

รูปที่ 3.11 โค้ดที่ใช้ในการวัดแรงดันส่วนที่ 3



```

Voltage | Arduino 1.8.2
File Edit Sketch Tools Help
Voltage $
if (s == 4){
digitalWrite(11, HIGH);
digitalWrite(9, HIGH);
digitalWrite(8, HIGH);
digitalWrite(12, LOW);
digitalWrite(10, LOW);
digitalWrite(7, LOW);
V1=analogRead(1)/201.377953*0.9;
V2=analogRead(2)/201.377953*0.9;
V3=analogRead(3)/201.377953*0.9;
Serial.print((String)V1+"");
Serial.print((String)V2+"");
Serial.println((String)V3+"");
delay(1000);
}
if (s == 5){
digitalWrite(11, HIGH);
digitalWrite(10, HIGH);
digitalWrite(8, HIGH);
digitalWrite(12, LOW);
digitalWrite(9, LOW);
digitalWrite(7, LOW);
V1=analogRead(1)/201.377953*0.9;
V2=analogRead(2)/201.377953*0.9;
V3=analogRead(3)/201.377953*0.9;
Serial.print((String)V1+"");
Serial.print((String)V2+"");
}

```

รูปที่ 3.12 โค้ดที่ใช้ในการวัดแรงดันส่วนที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Voltage | Arduino 1.8.2
File Edit Sketch Tools Help
Voltage $
V1=analogRead(1)/201.377953*0.9;
V2=analogRead(2)/201.377953*0.9;
V3=analogRead(3)/201.377953*0.9;
Serial.print((String)V1+");");
Serial.print((String)V2+");");
Serial.println((String)V3+");");
delay(1000);
}
if (s == 6) {
digitalWrite(7, HIGH);
digitalWrite(10, HIGH);
digitalWrite(11, HIGH);
digitalWrite(8, LOW);
digitalWrite(9, LOW);
digitalWrite(12, LOW);
V1=analogRead(1)/201.377953*0.9;
V2=analogRead(2)/201.377953*0.9;
V3=analogRead(3)/201.377953*0.9;
Serial.print((String)V1+");");
Serial.print((String)V2+");");
Serial.println((String)V3+");");
delay(1000);
}
}
}
}

```

รูปที่ 3.13 โค้ดที่ใช้ในการวัดแรงดันส่วนที่ 5

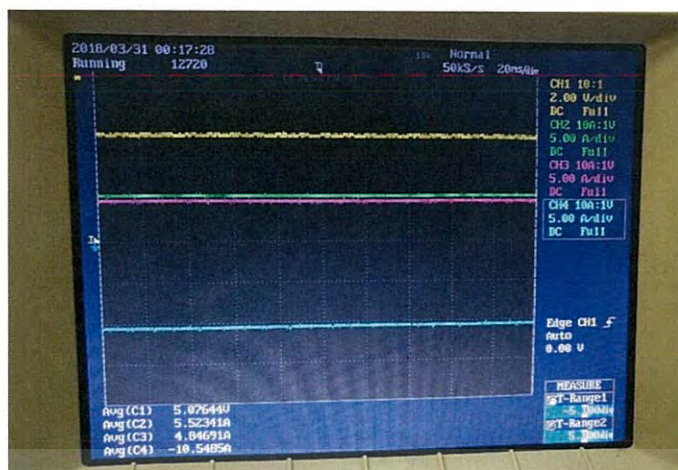
3.1.6 สัญญาณที่ใช้ในการทดสอบ

รูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสจากออสซิลโลสโคป โดยที่ CH1 เป็นสัญญาณแรงดัน และ CH2, CH3, CH4 เป็นสัญญาณกระแสเฟส A, B, C ตามลำดับ

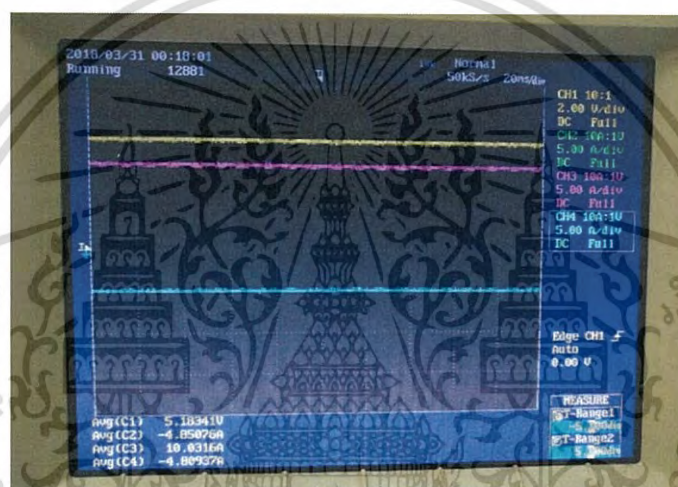


รูปที่ 3.14 ตัวอย่างรูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสในรูปแบบที่ 1

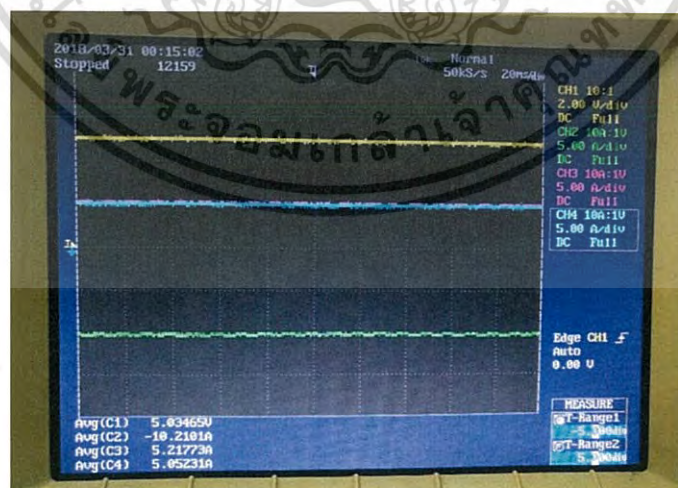
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 ตัวอย่างรูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสในรูปแบบที่ 2

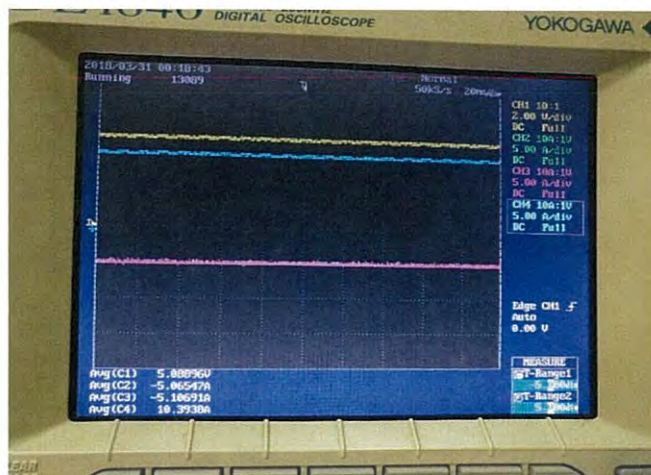


รูปที่ 3.16 ตัวอย่างรูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสในรูปแบบที่ 3



รูปที่ 3.17 ตัวอย่างรูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสในรูปแบบที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.18 ตัวอย่างรูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสในรูปแบบที่ 5



รูปที่ 3.19 ตัวอย่างรูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสในรูปแบบที่ 6

3.2 การทดสอบมอเตอร์แบบฮับ

3.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบมอเตอร์แบบฮับ

- | | |
|---------------------------------------|-----------------|
| 1) Variable A.C. Supply | จำนวน 1 ชุด |
| 2) ชุดวงจรขับมอเตอร์แบบฮับ | จำนวน 1 ชุด |
| - วงจรกำลัง | จำนวน 1 ชุด |
| - วงจรควบคุม | จำนวน 1 ชุด |
| 3) มอเตอร์แบบฮับขนาดพิกัด 1000 W 48 V | จำนวน 1 เครื่อง |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.20 มอเตอร์แบบฮับที่ใช้ในการทดสอบ

3.2.2 การทดสอบมุมของมอเตอร์แบบฮับ

ขั้นตอนการทดสอบ

- 1) เชื่อมต่อมอเตอร์แบบฮับกับชุดวงจรกำลังทั้ง 3 เฟส
- 2) ทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้วย Variable A.C. Supply ให้กับวงจรกำลังขนาด 5 V โดยมี Bridge Rectifier เป็นวงจรเรียงกระแสให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และมี Capacitor ช่วยกรองแรงดันไฟฟ้าก่อนจะเข้าขาคอลเล็กเตอร์ และขาอิมิตเตอร์ของไอจีบีที (IGBT)
- 3) จ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้กับวงจรควบคุมขนาด 220 V ให้กับวงจรควบคุม ซึ่งมีหม้อแปลงลดระดับแรงดันไฟฟ้าจาก 220 V เป็น 15 V โดยมี Bridge rectifier เป็นวงจรเรียงกระแส มี Capacitor ช่วยกรองแรงดันไฟฟ้า และ Regulator ทำหน้าที่รักษาระดับแรงดันก่อนจะเข้าที่ขาเกต และขาอิมิตเตอร์ของไอจีบีที (IGBT) โดยมี Opto isolator เป็นอุปกรณ์แยกแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงของขาเกตและขาอิมิตเตอร์ของไอจีบีที (IGBT) กับไมโครคอนโทรลเลอร์
- 4) เขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานของมอเตอร์แบบฮับให้ทำงานเป็นสัญญาณ 6 รูปแบบ โดยกดปุ่มสวิตช์แบบกดติดบดปล่อยดับเพื่อให้มอเตอร์แบบฮับทำงานทีละรูปแบบ
- 5) ทำการวัดมุมที่หมุนไปในแต่ละรูปแบบของมอเตอร์แบบฮับ ดังรูปที่ 3.21 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างองศาทางกลและองศาทางไฟฟ้า



รูปที่ 3.21 การวัดมุมที่เปลี่ยนไปในแต่ละรูปแบบของมอเตอร์แบบฮับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 การทดสอบผลของตัวตรวจจับสนามแม่เหล็ก

ขั้นตอนการทดสอบ

1) เชื่อมต่อมอเตอร์แบบฮับกับชุดวงจรกำลังทั้ง 3 เฟส และทำการต่อสายไฟของตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กทั้ง 3 ตัว เข้ากับช่องอนาล็อกอินพุตของอาดูโน่ เพื่อวัดแรงดันของตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กแต่ละเฟส ในแต่ละรูปแบบการทำงานของมอเตอร์แบบฮับ

2) จ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้วย Variable A.C. Supply ให้กับวงจรกำลังขนาด 5 V โดยมี Bridge Rectifier เป็นวงจรเรียงกระแสให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และมี Capacitor ช่วยกรองแรงดันไฟฟ้าก่อนจะเข้าที่ขาคอลเล็กเตอร์ และขาอิมิตเตอร์ของไอจีบีที (IGBT)

3) จ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้กับวงจรควบคุมขนาด 220 V ให้กับวงจรควบคุมซึ่งจะมีหม้อแปลงลดระดับแรงดันไฟฟ้าจาก 220 V เป็น 15 V โดยมี Bridge rectifier เป็นวงจรเรียงกระแส มี Capacitor ช่วยกรองแรงดันไฟฟ้า และ Regulator ทำหน้าที่รักษาระดับแรงดันก่อนจะเข้าที่ขาเกต และขาอิมิตเตอร์ของไอจีบีที (IGBT) โดยมี Opto isolator เป็นอุปกรณ์แยกแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงของขาเกตและขาอิมิตเตอร์ของไอจีบีที (IGBT) กับไมโครคอนโทรลเลอร์

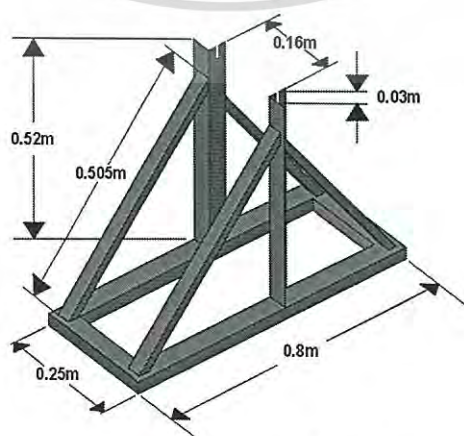
4) เขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานของมอเตอร์แบบฮับให้ทำงานตามสัญญา 6 รูปแบบ อย่างต่อเนื่องและบันทึกค่าแรงดันในแต่ละรูปแบบ

3.3 การศึกษาแรงบิดของมอเตอร์แบบฮับ

3.3.1 การศึกษาแรงบิดของมอเตอร์แบบฮับด้วยการสร้างแท่งทดสอบมอเตอร์

เนื่องจากในการหาแรงบิด หรือ ทอร์ก (τ) จะหาได้จากผลคูณเชิงเวกเตอร์ของเวกเตอร์ตำแหน่ง r มีหน่วยเป็น เมตร (m) กับแรง F มีหน่วยเป็น นิวตัน (N) จะได้ว่าแรงบิด มีหน่วยเป็น นิวตัน-เมตร (N·m) ดังนั้น จึงทำการสร้างแท่งทดสอบที่สามารถหาแรง (F) และ ตำแหน่ง (r) ขึ้นมา

3.3.2 แท่งทดสอบที่ได้รับการออกแบบ



รูปที่ 3.22 แท่งทดสอบที่ได้ออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกิจกรรมการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างแท่นทดสอบมอเตอร์แบบฮับ

1) เหล็กกล่อง ขนาด 1 ¼ x1 ตารางนิ้ว	ขนาด	3	เมตร
และขนาด 1 ½ X1 ½ ตารางนิ้ว	ขนาด	3	เมตร
2) เหล็กฉาก ขนาด 1 ¼ นิ้ว	ขนาด	2	เมตร
3) เครื่องเชื่อมเหล็กไฟฟ้า	จำนวน	1	เครื่อง
4) เครื่องตัดเหล็กไฟฟ้าและเครื่องทึนเจียร์ไฟฟ้า	จำนวน	1	เครื่อง
5) อุปกรณ์ช่วยในการจับยึด			
- ซีแคลม (C-clamp)	จำนวน	3	อัน
- ปากกาจับยึดชิ้นงาน	จำนวน	1	อัน
6) อุปกรณ์ช่วยในการเจาะ			
- สว่านมือ	จำนวน	1	เครื่อง

3.3.4 แท่นทดสอบจริงที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 3.23 แท่นทดสอบจริงที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 3.24 สเกลที่ใช้ในการอ่านมุมที่เปลี่ยนแปลงไปของโรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การทดสอบแรงบิดของมอเตอร์แบบฮับ

3.4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบแรงบิดของมอเตอร์แบบฮับ

1) 3 Phase Variable A.C. Supply	จำนวน	1	เครื่อง
2) ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์แบบฮับ	จำนวน	1	ชุด
3) ตัวเก็บประจุ ขนาด 3 F 20 V	จำนวน	2	ตัว
4) มอเตอร์แบบฮับขนาด 1000 W 48 V	จำนวน	1	เครื่อง
5) ออสซิลโลสโคป	จำนวน	1	เครื่อง
6) โพรบวัดแรงดัน	จำนวน	1	อัน
7) โพรบวัดกระแส	จำนวน	1	อัน
8) มัดติมิเตอร์	จำนวน	1	อัน
9) ดิจิตอลแคลคูลิเตอร์	จำนวน	1	อัน
10) แท่นทดสอบ	จำนวน	1	แท่น
11) แวนชยาย	จำนวน	1	อัน
12) ลูกตุ้มน้ำหนักขนาด 50 g	จำนวน	1	อัน
ขนาด 100 g	จำนวน	2	อัน
ขนาด 250 g	จำนวน	4	อัน
ขนาด 500 g	จำนวน	2	อัน
ขนาด 1000 g	จำนวน	4	อัน
ขนาด 2000 g	จำนวน	3	อัน
ขนาด 10 kg	จำนวน	1	อัน

3.4.2 การทดสอบแรงบิดของมอเตอร์แบบฮับ

ขั้นตอนการเตรียมการทดสอบ

- 1) ทำการติดตั้งกลวัดองศาทางกลที่มอเตอร์แบบฮับ เพื่อใช้เป็นมุมอ้างอิงวัดค่าองศาที่เปลี่ยนไป
- 2) นำแหล่งจ่ายแรงดัน 3 Phase Variable A.C. Supply ต่อเข้ากับชุดวงจรขับมอเตอร์แบบฮับ และนำตัวเก็บประจุต่อขนานเข้ากับชุดวงจรขับมอเตอร์แบบฮับ โดยตัวเก็บประจุที่ต่อกับวงจร จะใช้ตัวเก็บประจุจำนวน 2 ตัว ทำการต่ออนุกรมกันเพื่อเพิ่มแรงดันให้กับตัวเก็บประจุ
- 3) ทำการต่อสายไฟของมอเตอร์แบบฮับทั้งสามเฟสเข้ากับชุดวงจรควบคุมมอเตอร์
- 4) การอ่านค่าฝั่งแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง จะทำการวัดค่าแรงดันที่ตกคร่อมที่ตัวเก็บประจุ และกระแสไฟฟ้าตรง โดยใช้โพรบวัดแรงดันและโพรบวัดกระแส เพื่อทำการอ่านค่าจากออสซิลโลสโคป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5) การอ่านค่าฝั่งแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ จะทำการวัดโดยใช้มัลติมิเตอร์ และวัดไฟฟ้ากระแสสลับจากแคลมป์มิเตอร์

ขั้นตอนการทดสอบ

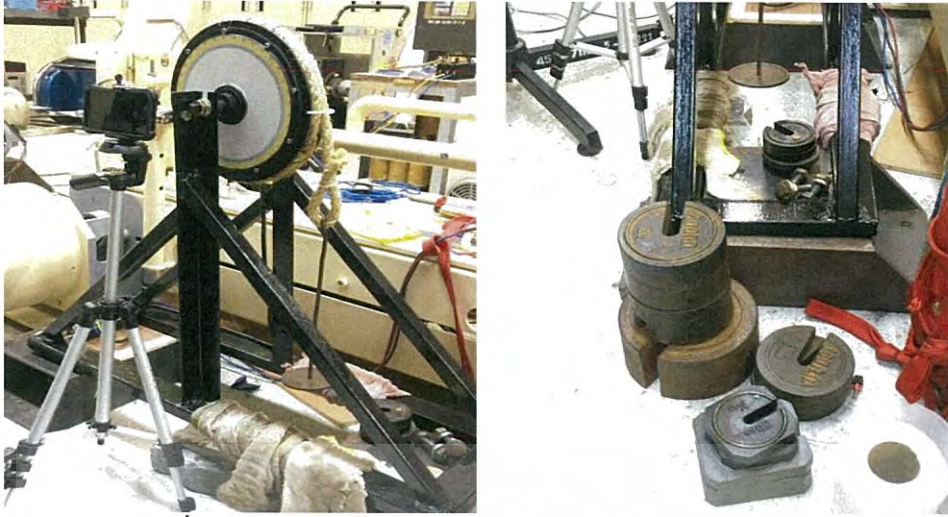
- 1) ทำการทดสอบหาแรงบิดมอเตอร์แบบฮับในแต่ละรูปแบบของสัญญาณ 6 รูปแบบ โดยเริ่มจากให้วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ทำงานในรูปแบบที่ 1
- 2) ทำการปรับแรงดันที่ 3 Phase Variable A.C. Supply เพื่อให้ได้ค่าไฟฟ้ากระแสตรงที่อ่านได้จากออสซิลโลสโคปเป็นไปตามที่ต้องการ โดยเริ่มจาก 1 A
- 3) ทำการจดบันทึกค่าของมุมเริ่มต้นของมอเตอร์แบบฮับเพื่อใช้เป็นมุมอ้างอิง และบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า ทั้งทางด้านไฟฟ้ากระแสสลับและทางด้านไฟฟ้ากระแสตรง



รูปที่ 3.25 การเก็บบันทึกข้อมูลขณะทำการทดสอบ

- 4) จากนั้นทำการเพิ่มภาระทางกลให้กับฮับมอเตอร์ โดยการใส่ตุ้มน้ำหนักถ่วงมอเตอร์แบบฮับ และทำการจดบันทึกค่าน้ำหนักที่ใส่และองศาทางกลที่เปลี่ยนไป โดยจะทำการเพิ่มภาระทางกลไปเรื่อยๆ จนกระทั่งมอเตอร์ไม่สามารถเอาชนะภาระทางกลที่เพิ่มขึ้นนั้นได้
- 5) ทำการทดสอบเช่นเดียวกันกับข้อที่ 1 ถึงข้อที่ 4 โดยทำการเพิ่มกระแสไฟฟ้าขึ้นทีละ 1 A จนกระทั่งถึงที่กระแสไฟฟ้า 21 A เนื่องจากมอเตอร์แบบฮับมีพิกัดกำลังที่ 1000 W และพิกัดแรงดันที่ 48 V จะมีกระแสพิกัด 20.83 A
- 6) ทำการทดสอบเช่นเดียวกันกับข้อที่ 1 ถึงข้อที่ 5 จนกระทั่งครบทั้ง 6 รูปแบบ
- 7) ทำการเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและมุมที่เปลี่ยนแปลงไปของโรเตอร์ที่กระแสต่างๆจาก 1 A จนถึงที่กระแสไฟฟ้า 21 A
- 8) ทำการเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและมุมของโรเตอร์ในแต่ละรูปแบบที่กระแสเท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.26 การเตรียมการสำหรับการทดสอบแรงบิดของมอเตอร์แบบฮับ



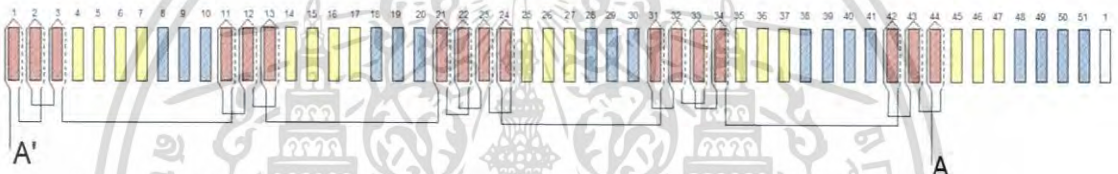
รูปที่ 3.27 ขณะทำการทดสอบแรงบิดของมอเตอร์แบบฮับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

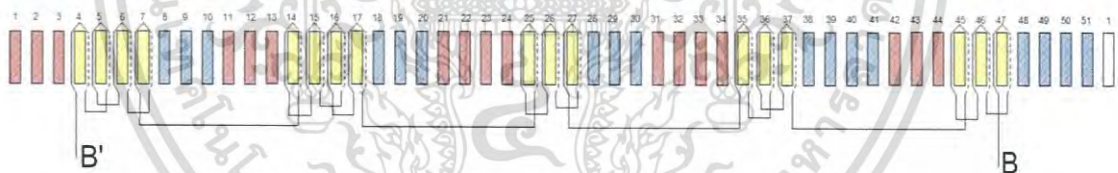
บทที่ 4

ผลการศึกษามอเตอร์แบบฮับ

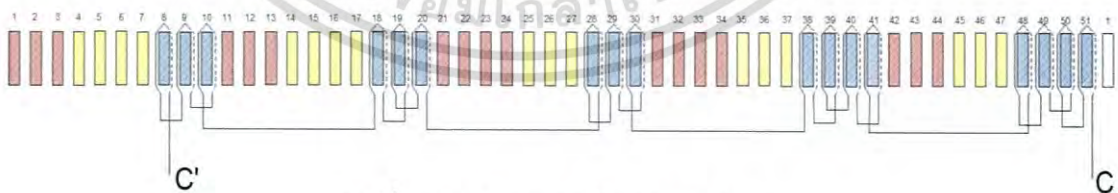
เมื่อทำการศึกษาโครงสร้างของมอเตอร์แบบฮับที่ใช้ในการศึกษาจะพบว่าที่สเตเตอร์จะมีร่องสล๊อตทั้งหมด 51 ร่องสล๊อต แบ่งสำหรับขดลวดเฟสละ 17 ร่องสล๊อตโดยมีปลายด้านหนึ่งของขดลวดแต่ละเฟสไว้สำหรับจ่ายแรงดันสามเฟส และปลายอีกด้านหนึ่งจะเชื่อมติดกันไว้ โดยจะมีตัวตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 ตัว อยู่ที่ตำแหน่งร่องสล๊อตที่ 23 ตำแหน่งระหว่างร่องสล๊อตที่ 24 กับ 25 และตำแหน่งร่องสล๊อตที่ 26 โดยจะมีสายสำหรับตัวตรวจจับสนามแม่เหล็ก 5 เส้นเป็นสายไฟเลี้ยงตัวตรวจจับสนามแม่เหล็ก 2 เส้น และสายสัญญาณเอาต์พุตของตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กแต่ละตัวละ 1 เส้น ส่วนในโรเตอร์จะเป็นแม่เหล็กถาวร 46 ขั้วแม่เหล็กแบ่งเป็นขั้วเหนือ 23 ขั้วแม่เหล็กและขั้วใต้ 23 ขั้วแม่เหล็ก โดยเมื่อศึกษาการพันขดลวดในสเตเตอร์ในร่องสล๊อต จะได้การพันขดลวดแต่ละเฟสมีรูปแบบดังรูปที่ 4.1, 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 รูปแบบการพันขดลวดเฟส A



รูปที่ 4.2 รูปแบบการพันขดลวดเฟส B



รูปที่ 4.3 รูปแบบการพันขดลวดเฟส C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

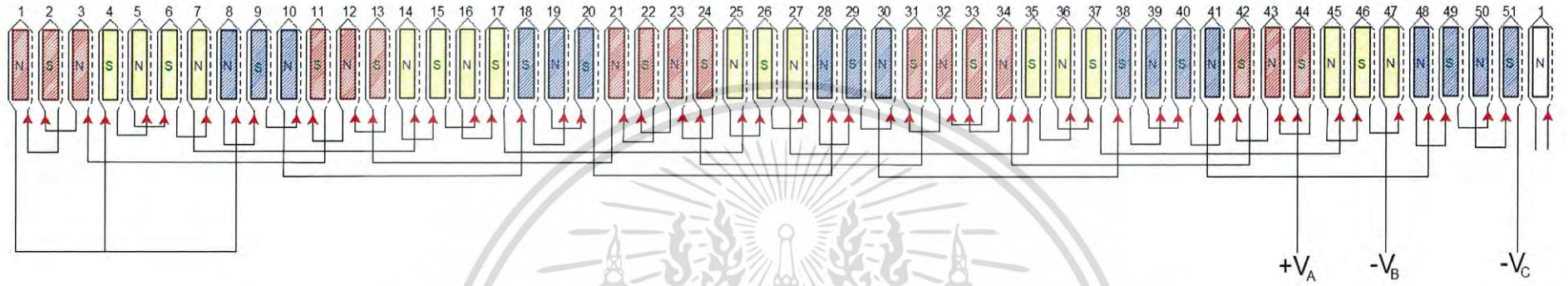
ในการจ่ายแรงดันให้ขดลวดที่สเตเตอร์สำหรับมอเตอร์แบบฮับ จะใช้แหล่งจ่ายแรงดัน 6 รูปแบบ เพื่อให้มอเตอร์ทำงานโดยจะมีลำดับการจ่ายแรงดันเป็น 6 รูปแบบ ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 สัญญาณการจ่ายแรงดัน 6 รูปแบบสำหรับมอเตอร์แบบฮับ

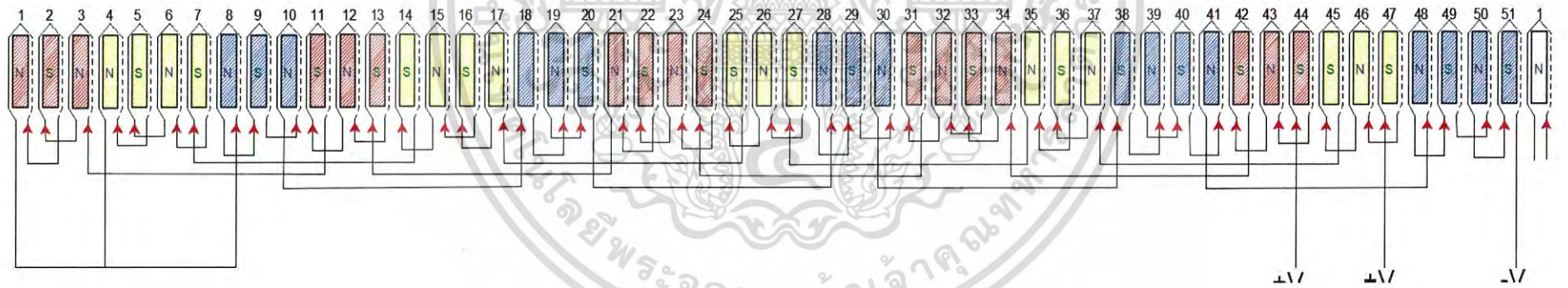
รูปแบบ	เฟส A	เฟส B	เฟส C
1	$+V_a$	$-V_b$	$-V_c$
2	$+V_a$	$+V_b$	$-V_c$
3	$-V_a$	$+V_b$	$-V_c$
4	$-V_a$	$+V_b$	$+V_c$
5	$-V_a$	$-V_b$	$+V_c$
6	$+V_a$	$-V_b$	$+V_c$

4.1 การเกิดขึ้นของขั้วแม่เหล็กในแต่ละร่องสลิตของสเตเตอร์ เมื่อจ่ายสัญญาณแรงดัน 6 รูปแบบ

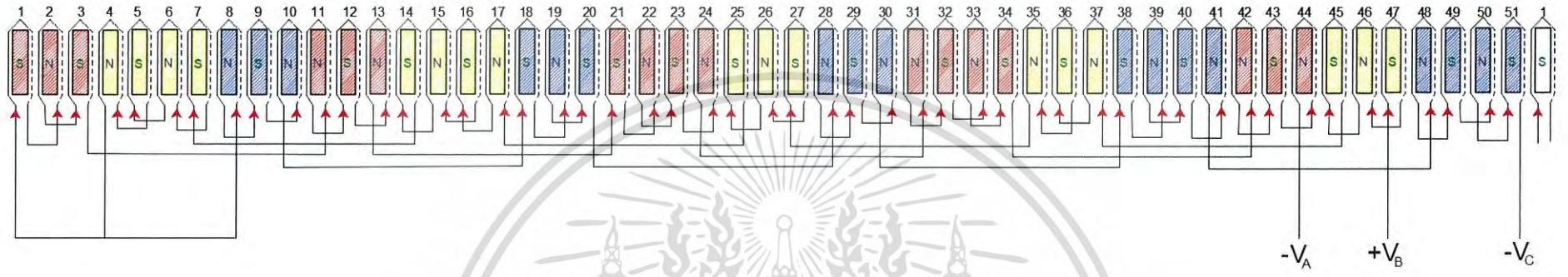
เมื่อทำการจำลองจ่ายสัญญาณแรงดัน 6 รูปแบบให้กับสเตเตอร์เพื่อดูการเกิดขั้วแม่เหล็กที่สเตเตอร์จะได้ การเกิดขึ้นของขั้วแม่เหล็กในแต่ละร่องสลิตของสเตเตอร์เมื่อจ่ายแรงดันในแต่ละรูปแบบดังนี้



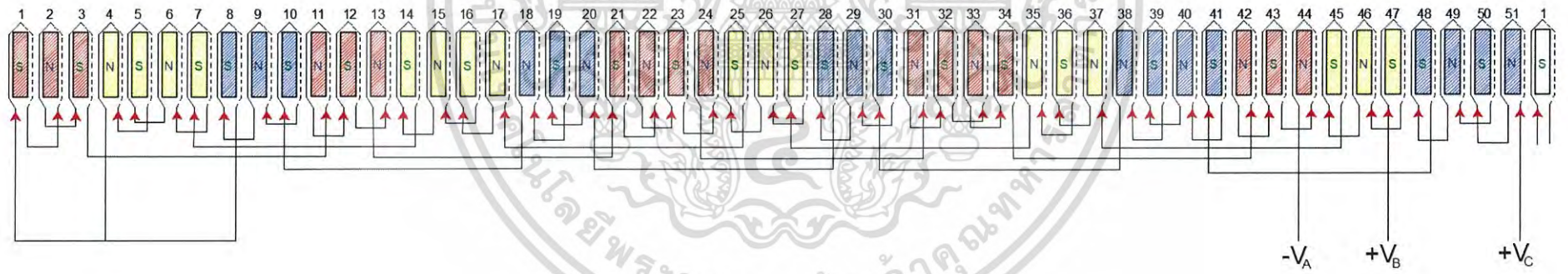
รูปที่ 4.4 การเกิดขึ้นของขั้วแม่เหล็กในแต่ละร่องสลิตของสเตเตอร์เมื่อจ่ายแรงดันในรูปแบบที่ 1



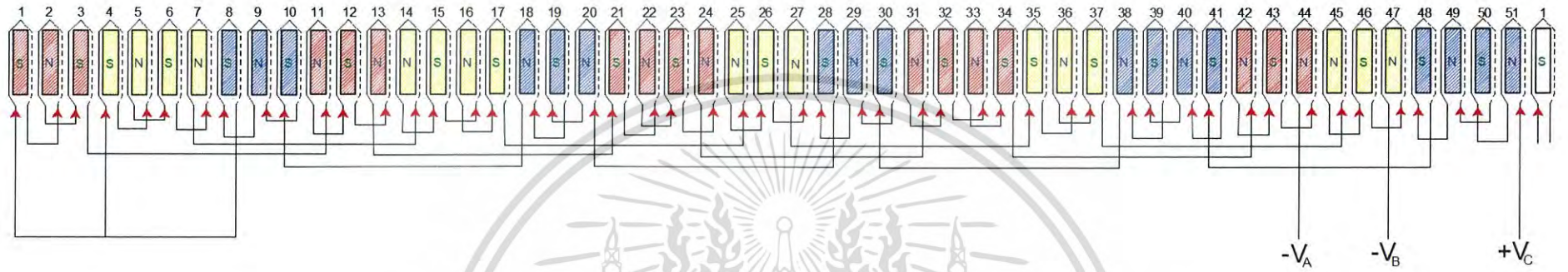
รูปที่ 4.5 การเกิดขึ้นของขั้วแม่เหล็กในแต่ละร่องสลิตของสเตเตอร์เมื่อจ่ายแรงดันในรูปแบบที่ 2



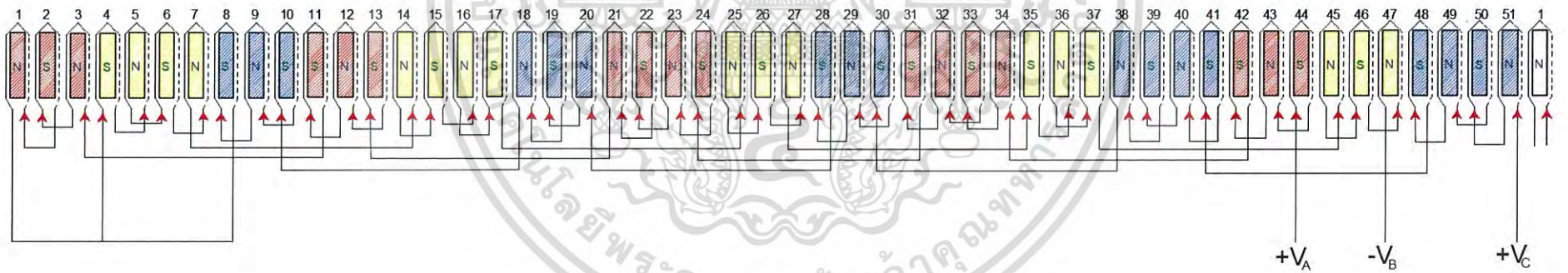
รูปที่ 4.6 การเกิดขึ้นของขั้วแม่เหล็กในแต่ละร่องสลิตของสเตเตอร์เมื่อจ่ายแรงดันในรูปแบบที่ 3



รูปที่ 4.7 การเกิดขึ้นของขั้วแม่เหล็กในแต่ละร่องสลิตของสเตเตอร์เมื่อจ่ายแรงดันในรูปแบบที่ 4



รูปที่ 4.8 การเกิดขึ้นของขั้วแม่เหล็กในแต่ละร่องสลิตของสเตเตอร์เมื่อจ่ายแรงดันในรูปแบบที่ 5



รูปที่ 4.9 การเกิดขึ้นของขั้วแม่เหล็กในแต่ละร่องสลิตของสเตเตอร์เมื่อจ่ายแรงดันในรูปแบบที่ 6

จากรูปการเกิดขึ้นของขั้วแม่เหล็กในแต่ละร่องสลิตของสเตเตอร์เมื่อจ่ายแรงดันในแต่ละรูปแบบจะเห็นได้ว่าจะมีร่องสลิต 2 ร่องสลิตที่มีขั้วแม่เหล็กเกิดขึ้นเป็นขั้วเดียวกัน จำนวนทั้งหมด 5 คู่ในแต่ละรูปแบบ ทำให้มีขั้วแม่เหล็กเกิดขึ้นที่สเตเตอร์ทั้งหมด 46 ขั้วแม่เหล็ก ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปด้านล่างนี้

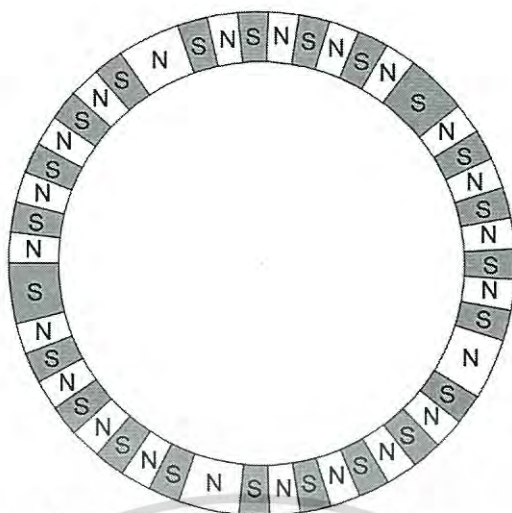


รูปที่ 4.10 การเกิดขึ้นของขั้วแม่เหล็กที่สเตเตอร์เมื่อจ่ายแรงดันในรูปแบบที่ 1



รูปที่ 4.11 การเกิดขึ้นของขั้วแม่เหล็กที่สเตเตอร์เมื่อจ่ายแรงดันในรูปแบบที่ 2

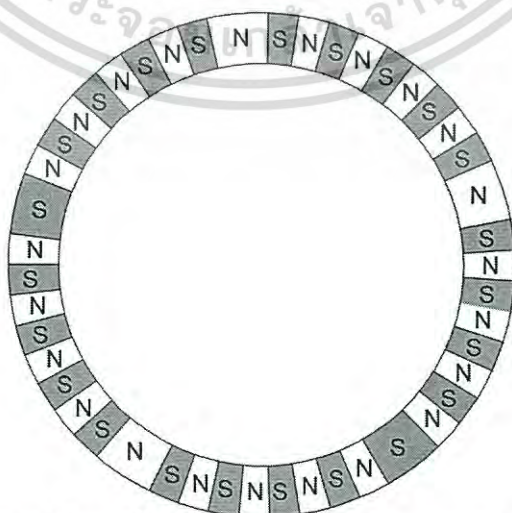
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 การเกิดขึ้นของขั้วแม่เหล็กที่สเตเตอร์เมื่อจ่ายแรงดันในรูปแบบที่ 3

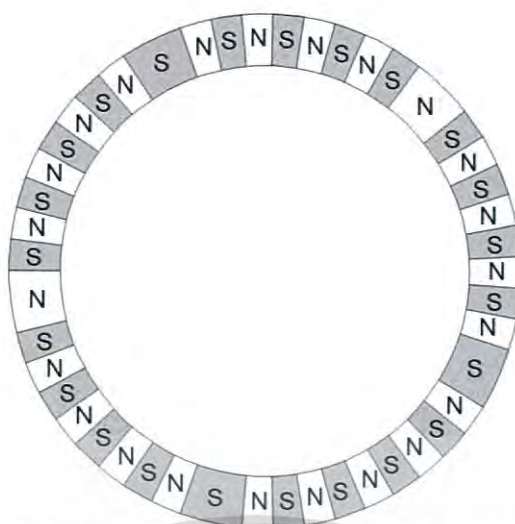


รูปที่ 4.13 การเกิดขึ้นของขั้วแม่เหล็กที่สเตเตอร์เมื่อจ่ายแรงดันในรูปแบบที่ 4



รูปที่ 4.14 การเกิดขึ้นของขั้วแม่เหล็กที่สเตเตอร์เมื่อจ่ายแรงดันในรูปแบบที่ 5

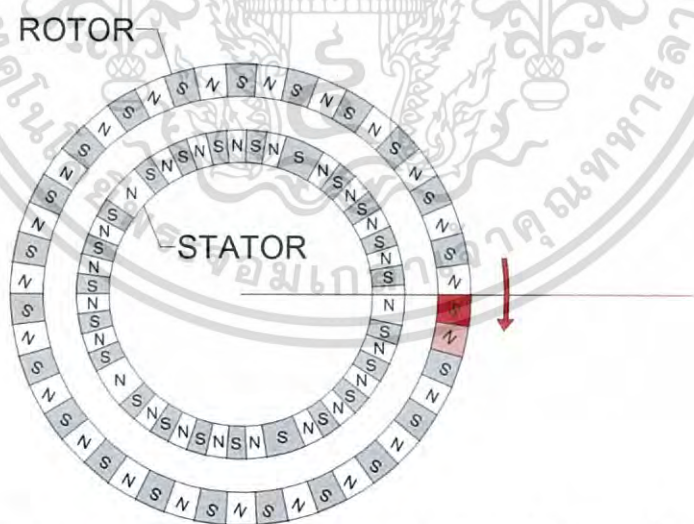
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 การเกิดขึ้นของขั้วแม่เหล็กที่สเตเตอร์เมื่อจ่ายแรงดันในรูปแบบที่ 6

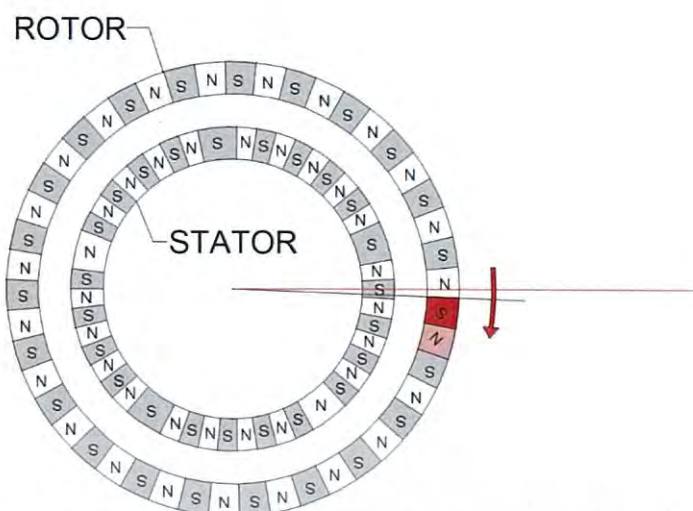
4.2 ตำแหน่งของโรเตอร์ เมื่อจ่ายสัญญาณแรงดัน 6 รูปแบบ

เมื่อนำขั้วแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในสเตเตอร์ในการจ่ายแรงดันแต่ละรูปแบบไปหาความสัมพันธ์กับขั้วแม่เหล็กในโรเตอร์จะเห็นว่าโรเตอร์จะหมุนโดยแรงดึงดูดระหว่างขั้วแม่เหล็กที่สเตเตอร์และโรเตอร์ไปอยู่ในตำแหน่งต่างๆดังนี้ เมื่อให้ตำแหน่งของโรเตอร์ในการจ่ายแรงดันรูปแบบที่ 1 ในรอบที่ 1 ทางไฟฟ้าเป็นจุดอ้างอิง โดยในการจ่ายแรงดันครบ 6 รูปแบบ 1 รอบ จะนับเป็น 1 รอบทางไฟฟ้า

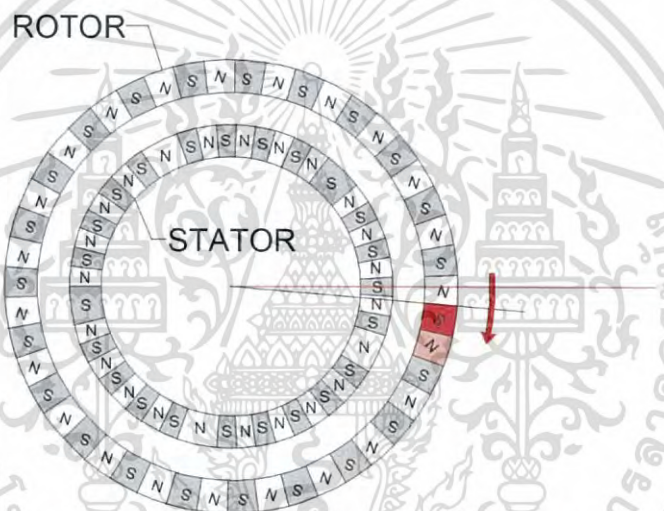


รูปที่ 4.16 ตำแหน่งของโรเตอร์ในการจ่ายแรงดันรูปแบบที่ 1 ในรอบที่ 1 ทางไฟฟ้า

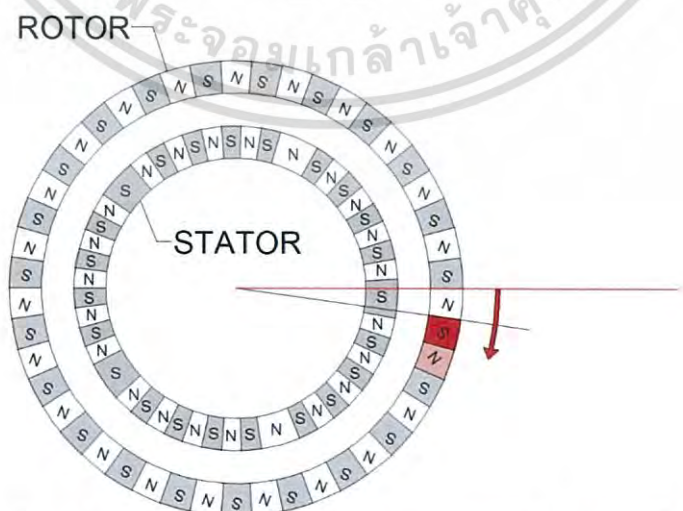
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 ตำแหน่งของโรเตอร์ในการจ่ายแรงดันรูปแบบที่ 2 ในรอบที่ 1 ทางไฟฟ้า

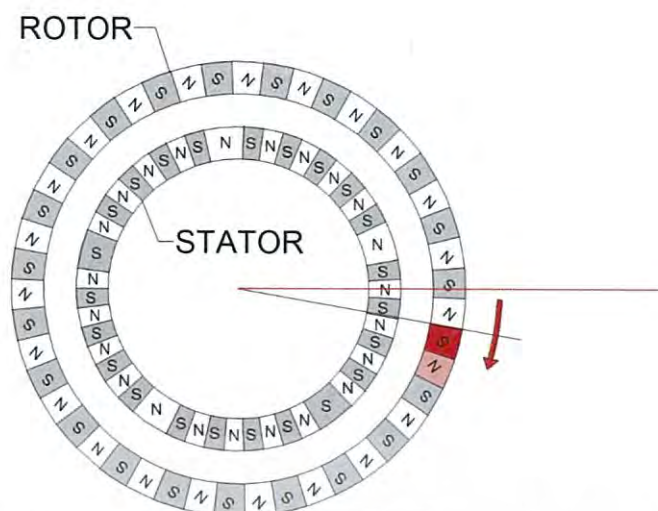


รูปที่ 4.18 ตำแหน่งของโรเตอร์ในการจ่ายแรงดันรูปแบบที่ 3 ในรอบที่ 1 ทางไฟฟ้า

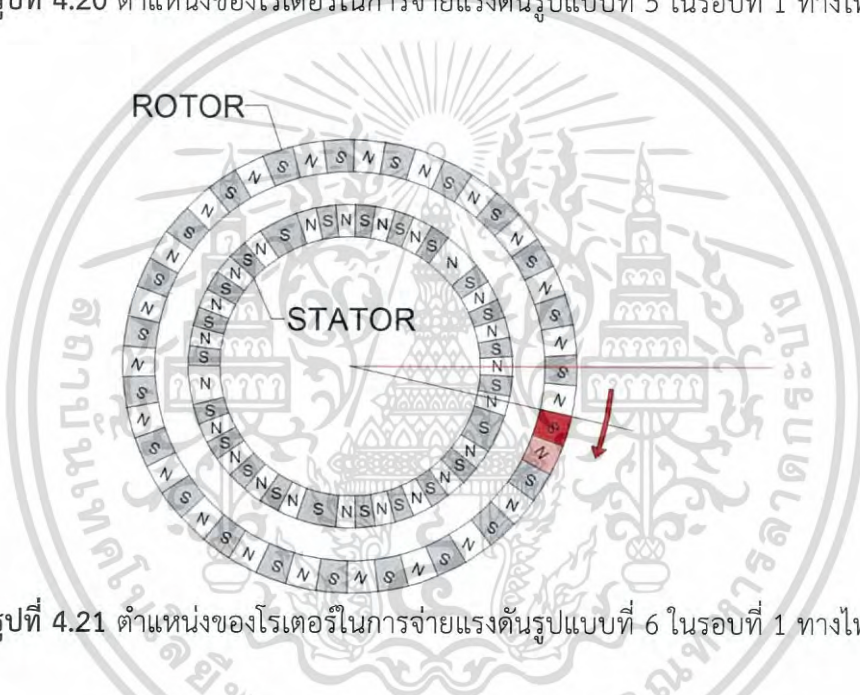


รูปที่ 4.19 ตำแหน่งของโรเตอร์ในการจ่ายแรงดันรูปแบบที่ 4 ในรอบที่ 1 ทางไฟฟ้า

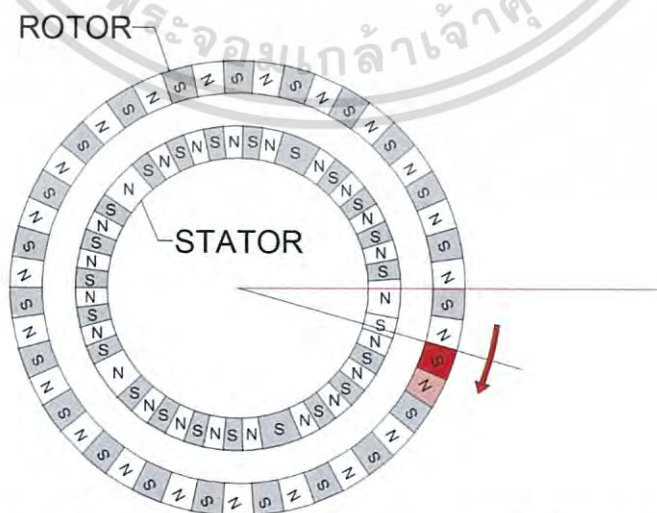
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 ตำแหน่งของโรเตอร์ในการจ่ายแรงดันรูปแบบที่ 5 ในรอบที่ 1 ทางไฟฟ้า



รูปที่ 4.21 ตำแหน่งของโรเตอร์ในการจ่ายแรงดันรูปแบบที่ 6 ในรอบที่ 1 ทางไฟฟ้า



รูปที่ 4.22 ตำแหน่งของโรเตอร์ในการจ่ายแรงดันรูปแบบที่ 1 ในรอบที่ 2 ทางไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นได้ว่า ตำแหน่งของโรเตอร์ในการจ่ายแรงดันรูปแบบที่ 1 ในรอบที่ 2 ทางไฟฟ้า และตำแหน่งของโรเตอร์ในการจ่ายแรงดันรูปแบบที่ 1 ในรอบที่ 1 ทางไฟฟ้าเคลื่อนไปเป็นระยะทาง 2 ขั้วแม่เหล็ก หรือ 1 คู่ขั้วแม่เหล็ก ซึ่งจะต้องจ่ายแรงดันครบ 23 รอบทางไฟฟ้าจึงจะทำให้โรเตอร์หมุนไปเป็นระยะทางครบทั้ง 46 ขั้วแม่เหล็ก หรือ 23 คู่ขั้วแม่เหล็ก และนับเป็น 1 รอบทางกล

4.3 ผลการทดสอบวัดมุมทางกลของมอเตอร์แบบฮับ

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบวัดมุมทางกลของมอเตอร์แบบฮับ

รอบทางไฟฟ้า	รูปแบบ	มุมทางกล	มุมทางกลต่อรอบทางไฟฟ้า
1	1	2.5	15.5
	2	5.5	
	3	8	
	4	10.5	
	5	13	
	6	15.5	
2	1	18.5	16
	2	21	
	3	23.5	
	4	26.5	
	5	29	
	6	31.5	
3	1	34	15.5
	2	36.5	
	3	39.5	
	4	42	
	5	44.5	
	6	47	
4	1	49.5	15.5
	2	52.5	
	3	54.5	
	4	57	
	5	60	
	6	62.5	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้วยประการใดๆ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รอบทางไฟฟ้า	รูปแบบ	มุมทางกล	มุมทางกลต่อรอบทางไฟฟ้า
5	1	65	15
	2	67.5	
	3	70	
	4	72.5	
	5	75	
	6	77.5	
6	1	80.5	15
	2	83	
	3	85.5	
	4	88	
	5	90.5	
	6	92.5	
7	1	95.5	15.5
	2	98	
	3	100.5	
	4	103	
	5	105.5	
	6	108	
8	1	110.5	15
	2	113	
	3	115.5	
	4	118	
	5	120.5	
	6	123	
9	1	125.5	14.5
	2	128	
	3	130	
	4	133	
	5	135.5	
	6	137.5	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รอบทางไฟฟ้า	รูปแบบ	มุมทางกล	มุมทางกลต่อรอบทางไฟฟ้า
10	1	140.5	15
	2	143	
	3	145	
	4	148	
	5	150	
	6	152.5	
11	1	155.5	15
	2	157.5	
	3	160	
	4	162.5	
	5	165	
	6	167.5	
12	1	170	15
	2	172.5	
	3	175	
	4	177.5	
	5	180	
	6	182.5	
13	1	185	16
	2	187.5	
	3	190	
	4	192.5	
	5	195.5	
	6	198.5	
14	1	200.5	14.5
	2	203	
	3	205.5	
	4	208	
	5	210.5	
	6	213	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รอบทางไฟฟ้า	รูปแบบ	มุมทางกล	มุมทางกลต่อรอบทางไฟฟ้า
15	1	216	16
	2	218.5	
	3	221	
	4	224	
	5	226.5	
	6	229	
16	1	232	16
	2	234.5	
	3	237	
	4	239.5	
	5	242.5	
	6	245	
17	1	247.5	16.5
	2	250.5	
	3	253.5	
	4	256	
	5	258.5	
	6	261.5	
18	1	264.5	16.5
	2	267	
	3	270	
	4	272.5	
	5	276	
	6	278	
19	1	281	17
	2	284	
	3	287	
	4	289.5	
	5	292	
	6	295	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รอบทางไฟฟ้า	รูปแบบ	มุมทางกล	มุมทางกลต่อรอบทางไฟฟ้า
20	1	298	17
	2	300.5	
	3	303	
	4	306.5	
	5	309	
	6	312	
21	1	314.5	16
	2	317	
	3	320	
	4	322.5	
	5	325	
	6	328	
22	1	330.5	16
	2	333.5	
	3	336	
	4	339	
	5	341.5	
	6	344	
23	1	347	16
	2	349.5	
	3	352	
	4	355	
	5	357.5	
	6	360	

4.4 สรุปผลการทดสอบวัดมุมทางกลของมอเตอร์แบบฮับ

จากทฤษฎีเรื่ององศาทางกลและองศาทางไฟฟ้าจะได้ว่ามอเตอร์แบบฮับที่มี 46 ขั้วแม่เหล็ก เมื่อทำงานครบ 1 รอบทางไฟฟ้า มอเตอร์ $\theta_e = \frac{P}{2} \theta_m$ จะหมุนไป 15.65217 องศาทางกล และเมื่อทำงานครบ 23 รอบทางไฟฟ้า มอเตอร์จะหมุนไป 360 องศาทางกลหรือ 1 รอบทางกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดสอบเรื่องมุมตั้งตารางที่ 4.2 จะได้ว่าในแต่ละรูปแบบการทำงานมอเตอร์ จะหมุนไปอยู่ในช่วง 2.5-3 องศาทางกล และเมื่อทำงานครบ 6 รูปแบบ หรือ 1 รอบทางไฟฟ้ามอเตอร์ จะหมุนไปได้ประมาณ 15-17 องศาทางกล และเมื่อทำงานครบ 23 รอบทางไฟฟ้าจะทำให้มอเตอร์ หมุนไปได้ 360 องศา หรือ 1 รอบทางกล ซึ่งจะเห็นได้ว่าผลจากการทดสอบของมอเตอร์แบบฮับ เป็นไปตามทฤษฎีขององศาทางกลและองศาทางไฟฟ้า

4.5 ผลการทดสอบตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กของมอเตอร์แบบฮับ

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กของมอเตอร์แบบฮับ

รอบทาง ไฟฟ้า	รูปแบบ	แรงดันเอาต์พุตตัว ตรวจจับสนาม แม่เหล็กเฟส A	แรงดันเอาต์พุตตัว ตรวจจับสนาม แม่เหล็กเฟส B	แรงดันเอาต์พุตตัว ตรวจจับสนาม แม่เหล็กเฟส C
1	1	4.49	0.02	0
	2	4.56	4.56	0.01
	3	0.01	4.57	0.01
	4	0.01	4.55	4.57
	5	0.01	0.01	4.56
	6	4.57	0.01	4.57
2	1	4.54	0.02	0.01
	2	4.52	4.57	0.01
	3	0.01	4.57	0.02
	4	0.02	4.57	4.57
	5	0.02	0.01	4.5
	6	4.57	0.01	4.57
3	1	4.55	0.01	0.01
	2	4.57	4.57	0.01
	3	0.02	4.57	0.01
	4	0.01	4.57	4.57
	5	0.02	0.01	4.56
	6	4.57	0.01	4.57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รอบทาง ไฟฟ้า	รูปแบบ	แรงดันเอาต์พุตตัว ตรวจจับสนาม แม่เหล็กเฟส A	แรงดันเอาต์พุตตัว ตรวจจับสนาม แม่เหล็กเฟส B	แรงดันเอาต์พุตตัว ตรวจจับสนาม แม่เหล็กเฟส C
4	1	4.57	0.01	0.02
	2	4.57	4.55	0.01
	3	0.01	4.55	0.01
	4	0.01	4.57	4.55
	5	0.01	0.01	4.57
	6	4.57	0.01	4.53
5	1	4.52	0.01	0.01
	2	4.57	4.57	0.01
	3	0.01	4.57	0.01
	4	0.01	4.57	4.53
	5	0.01	0.01	4.5
	6	4.57	0.01	4.57
6	1	4.57	0.01	0.02
	2	4.57	4.57	0.01
	3	0.02	4.55	0.02
	4	0.02	4.55	4.57
	5	0.01	0.01	4.57
	6	4.55	0.01	4.51
7	1	4.56	0.02	0.01
	2	4.57	4.57	0.01
	3	0.01	4.57	0.02
	4	0.01	4.57	4.57
	5	0.02	0.01	4.47
	6	4.53	0.01	4.52
8	1	4.55	0.01	0.01
	2	4.56	4.57	0.01
	3	0.01	4.57	0.01
	4	0.01	4.56	4.56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รอบทาง ไฟฟ้า	รูปแบบ	แรงดันเอาต์พุตตัว ตรวจจับสนาม แม่เหล็กเฟส A	แรงดันเอาต์พุตตัว ตรวจจับสนาม แม่เหล็กเฟส B	แรงดันเอาต์พุตตัว ตรวจจับสนาม แม่เหล็กเฟส C
8	5	0.01	0.02	4.55
	6	4.57	0.01	4.57
9	1	4.57	0.01	0.01
	2	4.56	4.57	0.01
	3	0.01	4.55	0.02
	4	0.01	4.57	4.57
	5	0.01	0.01	4.57
	6	4.57	0.01	4.57
10	1	4.57	0.01	0.01
	2	4.56	4.56	0.01
	3	0.01	4.57	0.02
	4	0.01	4.57	4.57
	5	0.01	0.01	4.57
	6	4.57	0.01	4.57
11	1	4.57	0.01	0.02
	2	4.57	4.57	0.01
	3	0.02	4.57	0.01
	4	0.01	4.5	4.57
	5	0.02	0.01	4.51
	6	4.55	0.01	4.55
12	1	4.52	0.02	0.01
	2	4.55	4.57	0.01
	3	0.02	4.57	0.01
	4	0.01	4.55	4.57
	5	0.02	0.01	4.49
	6	4.57	0.01	4.57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รอบทาง ไฟฟ้า	รูปแบบ	แรงดันเอาต์พุตตัว ตรวจจับสนาม แม่เหล็กเฟส A	แรงดันเอาต์พุตตัว ตรวจจับสนาม แม่เหล็กเฟส B	แรงดันเอาต์พุตตัว ตรวจจับสนาม แม่เหล็กเฟส C
13	1	4.57	0.01	0.02
	2	4.57	4.56	0.02
	3	0.02	4.57	0.01
	4	0.01	4.56	4.57
	5	0.01	0.01	4.54
	6	4.54	0.01	4.57
14	1	4.54	0.01	0.02
	2	4.57	4.53	0.02
	3	0.02	4.57	0.02
	4	0.01	4.52	4.57
	5	0.02	0.01	4.57
	6	4.55	0.01	4.5
15	1	4.56	0.01	0.02
	2	4.51	4.57	0.01
	3	0.01	4.57	0.02
	4	0.01	4.57	4.57
	5	0.02	0.01	4.57
	6	4.57	0.01	4.57
16	1	4.57	0.01	0.02
	2	4.57	4.57	0.02
	3	0.02	4.55	0.01
	4	0.01	4.57	4.57
	5	0.02	0.01	4.55
	6	4.56	0.01	4.57
17	1	4.54	0.01	0.01
	2	4.57	4.57	0.01
	3	0.01	4.57	0.01
	4	0.02	4.54	4.57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รอบทาง ไฟฟ้า	รูปแบบ	แรงดันเอาต์พุตตัว ตรวจจับสนาม แม่เหล็กเฟส A	แรงดันเอาต์พุตตัว ตรวจจับสนาม แม่เหล็กเฟส B	แรงดันเอาต์พุตตัว ตรวจจับสนาม แม่เหล็กเฟส C
17	5	0.01	0.01	4.57
	6	4.57	0.01	4.57
18	1	4.56	0.02	0.02
	2	4.53	4.57	0.01
	3	0.01	4.57	0.01
	4	0.02	4.57	4.57
	5	0.01	0.01	4.51
	6	4.56	0.01	4.55
19	1	4.53	0.01	0.01
	2	4.55	4.57	0.01
	3	0.02	4.55	0.01
	4	0.02	4.57	4.57
	5	0.02	0.01	4.57
	6	4.57	0.01	4.57
20	1	4.57	0.01	0.01
	2	4.56	4.57	0.01
	3	0.02	4.57	0.02
	4	0.02	4.57	4.56
	5	0.01	0.01	4.57
	6	4.54	0.01	4.56
21	1	4.55	0.02	0.01
	2	4.52	4.53	0.01
	3	0.01	4.54	0.01
	4	0.02	4.56	4.55
	5	0.02	0.01	4.57
	6	4.52	0.01	4.57
22	1	4.52	0.01	0.01
	2	4.54	4.57	0.01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รอบทาง ไฟฟ้า	รูปแบบ	แรงดันเอาต์พุตตัว ตรวจจับสนาม แม่เหล็กเฟส A	แรงดันเอาต์พุตตัว ตรวจจับสนาม แม่เหล็กเฟส B	แรงดันเอาต์พุตตัว ตรวจจับสนาม แม่เหล็กเฟส C
22	3	0.02	4.57	0.02
	4	0.02	4.57	4.57
	5	0.02	0.02	4.54
	6	4.57	0.01	4.57
23	1	4.52	0.02	0.02
	2	4.57	4.57	0.01
	3	0.02	4.56	0.02
	4	0.02	4.54	4.56
	5	0.02	0.01	4.57
	6	4.57	0.02	4.57

จากผลการทดสอบตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กของมอเตอร์แบบฮับดังตารางที่ 4.3 จะพบว่าแรงดันเอาต์พุตของตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กจะมีค่าอยู่ 2 ช่วงคือ ช่วงที่มีค่าประมาณ 0 V และค่าประมาณ 4.55 V ซึ่งจะแสดงให้เห็นว่าตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กที่มีในมอเตอร์แบบฮับเป็นแบบดิจิตอลและให้ค่าออกมาเป็น Low กับ High

โดยในการทำงานแต่ละรอบทางไฟฟ้า แรงดันเอาต์พุตของตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กจะได้ผลออกมาในรูปแบบเดียวกันทุกรอบทางไฟฟ้า ซึ่งเมื่อนำรูปแบบเอาต์พุตของตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กใน 1 รอบทางไฟฟ้ามาเปรียบเทียบกับรูปแบบการจ่ายแรงดันให้มอเตอร์ทั้ง 6 รูปแบบ จะเห็นได้ว่าในช่วงที่เฟสไหนมีการจ่ายแรงดัน (เป็นบวก) ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กของเฟสนั้นจะให้เอาต์พุตเป็น High และในช่วงที่เฟสไหนไม่มีการจ่ายแรงดัน (เป็นลบ) ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กของเฟสนั้นจะให้เอาต์พุตเป็น Low ซึ่งผลสรุปที่ได้จะแสดงได้ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 รูปแบบเอาต์พุตของตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กเมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบการจ่ายแรงดัน

รูปแบบ	เฟส A	เฟส B	เฟส C	แรงดันเอาต์พุตตัว ตรวจจับสนาม แม่เหล็กเฟส A	แรงดันเอาต์พุต ตัวตรวจจับสนาม แม่เหล็กเฟส B	แรงดันเอาต์พุต ตัวตรวจจับสนาม แม่เหล็กเฟส C
1	+V _A	-V _B	-V _C	High	Low	Low
2	+V _A	+V _B	-V _C	High	High	Low

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3	$-V_A$	$+V_B$	$-V_C$	Low	High	Low
4	$-V_A$	$+V_B$	$+V_C$	Low	High	High
5	$-V_A$	$-V_B$	$+V_C$	Low	Low	High
6	$+V_A$	$-V_B$	$+V_C$	High	Low	High

4.6 สรุปผลการทดสอบตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กของมอเตอร์แบบฮับ

จากผลสรุปที่ได้ จะสามารถนำเอาต์พุตของตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กทั้งสาม ป้อนกลับไปยังคอนโทรลเลอร์เพื่อควบคุมการเปลี่ยนรูปแบบการจ่ายแรงดันให้เป็นไปอย่างอัตโนมัติ ถูกต้อง รวดเร็ว และสามารถวัดความเร็วรอบได้โดยใช้คอนโทรลเลอร์คำนวณ

4.7 ผลการทดสอบแรงบิดของมอเตอร์แบบฮับ

จากการทดสอบมอเตอร์แบบฮับโดยการเพิ่มภาระทางกลให้กับมอเตอร์ จากนั้นทำการวัดน้ำหนักที่ใส่เข้าไปกับมุมที่เปลี่ยนไปของโรเตอร์ เมื่อนำน้ำหนักที่ใส่เข้าไปมาคำนวณเป็นแรงบิด โดยใช้ความสัมพันธ์ $T = r \times F$ โดย $F = mg$; m คือ น้ำหนักถ่วงที่ใส่เข้าไป มีหน่วยเป็น (kg), g คือ ความโน้มถ่วงพื้นผิว ซึ่งเท่ากับ 9.80665 m/s^2 และ r คือ รัศมีของมอเตอร์แบบฮับ ซึ่งเท่ากับ 0.1225 m โดยจะทำการเพิ่มภาระทางกลไปเรื่อยๆ จนกระทั่งมอเตอร์ไม่สามารถเอาชนะภาระทางกลที่เพิ่มขึ้นนั้นได้ ตัวอย่างผลการทดสอบที่กระแส 15 และ 19 A ดังตารางที่ 4.5 และตารางที่ 4.6 (ผลการทดสอบทั้งหมด แสดงในภาคผนวก ข.)

ตารางที่ 4.5 ตัวอย่างผลการทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับที่รูปแบบที่ 1

การทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับที่กระแส : 15 A		รูปแบบที่ : 1	
$V_{A.C.} = 5.61 \text{ V}_{L-L}$, $I_{A.C.} = 10.4 \text{ A}$, $V_{D.C.} = 4.49 \text{ V}$, $I_{A.D.C.} = 14.7 \text{ A}$, $I_{B.D.C.} = 7.40 \text{ A}$, $I_{C.D.C.} = 7.19 \text{ A}$			
น้ำหนัก(kg)	แรงบิด (Nm)	มุมที่เปลี่ยนแปลงไป (องศา)	มุมทางไฟฟ้า(องศา)
0.20	0.2403	0.0	0.0
1.20	1.4416	0.2	4.6
2.20	2.6429	0.4	9.2
3.20	3.8442	0.7	16.1
4.20	5.0455	0.9	20.7
5.20	6.2468	1.1	25.3
6.20	7.4482	1.4	32.2
7.20	8.6495	1.7	39.1
8.20	9.8508	1.8	41.4
9.20	11.0521	2.3	52.9

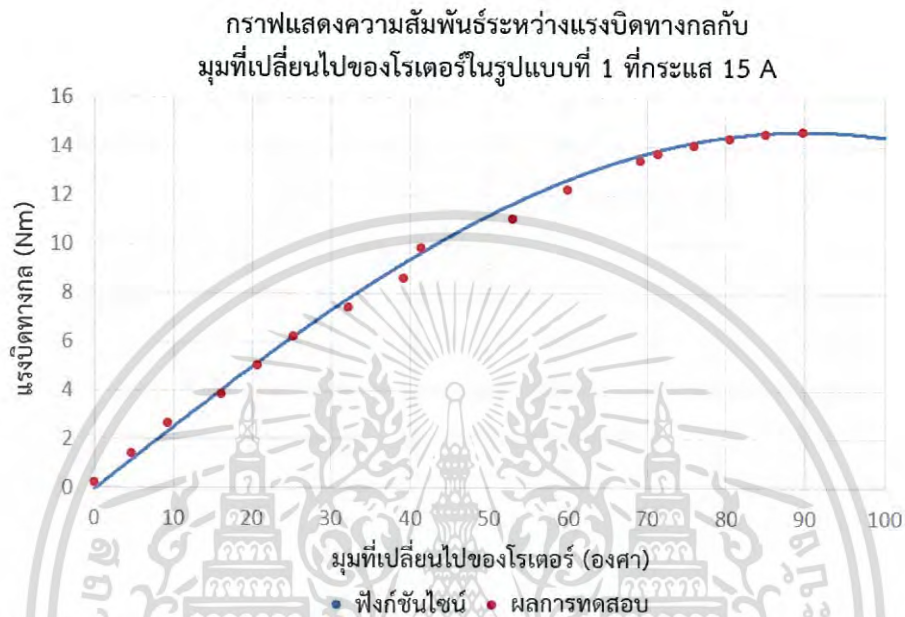
น้ำหนัก(kg)	แรงบิด (Nm)	มุมที่เปลี่ยนแปลงไป (องศา)	มุมทางไฟฟ้า(องศา)
10.20	12.2534	2.6	59.8
11.20	13.4547	3.0	69.0
11.45	13.7551	3.1	71.3
11.70	14.0554	3.3	75.9
11.95	14.3557	3.5	80.5
12.00	14.4158	3.5	80.5
12.05	14.4758	3.5	80.5
12.10	14.5359	3.7	85.1
12.15	14.5960	3.7	85.1
12.20	14.6560	3.9	89.7

ตารางที่ 4.6 ตัวอย่างผลการทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับที่รูปแบบที่ 2

การทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับที่กระแส : 19 A รูปแบบที่ : 2			
$V_{A.C.} = 7.5 V_{L-L}$, $I_{A.C.} = 12.1 A$, $V_{D.C.} = 7.20 V$, $I_{A.D.C.} = 9.6 A$, $I_{B.D.C.} = 9.3 A$, $I_{C.D.C.} = 19.1 A$			
น้ำหนัก(kg)	แรงบิด (Nm)	มุมที่เปลี่ยนแปลงไป (องศา)	มุมทางไฟฟ้า(องศา)
0.20	0.2403	0.00	0.0
2.20	2.6429	0.30	6.9
4.20	5.0455	0.70	16.1
6.20	7.4482	1.10	25.3
8.20	9.8508	1.50	34.5
10.20	12.2534	2.00	46.0
12.20	14.6560	2.50	57.5
13.20	15.8574	2.80	64.4
13.70	16.4580	3.00	69.0
14.20	17.0587	3.30	75.9
14.45	17.3590	3.40	78.2
14.70	17.6593	3.70	85.1
14.75	17.7194	3.70	85.1
14.80	17.7795	3.80	87.4
14.85	17.8395	3.90	89.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำผลการทดสอบที่ได้จากตารางที่ 4.5 และ 4.6 มาพล็อตเป็นกราฟระหว่างมุมทางไฟฟ้า (องศา) กับแรงบิด (Nm) มาเปรียบเทียบกับกราฟ sine จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดทางกลกับมุมที่เปลี่ยนแปลงไปของโรเตอร์มีความเป็นฟังก์ชันไซน์ ดังรูปที่ 4.23 และ 4.24



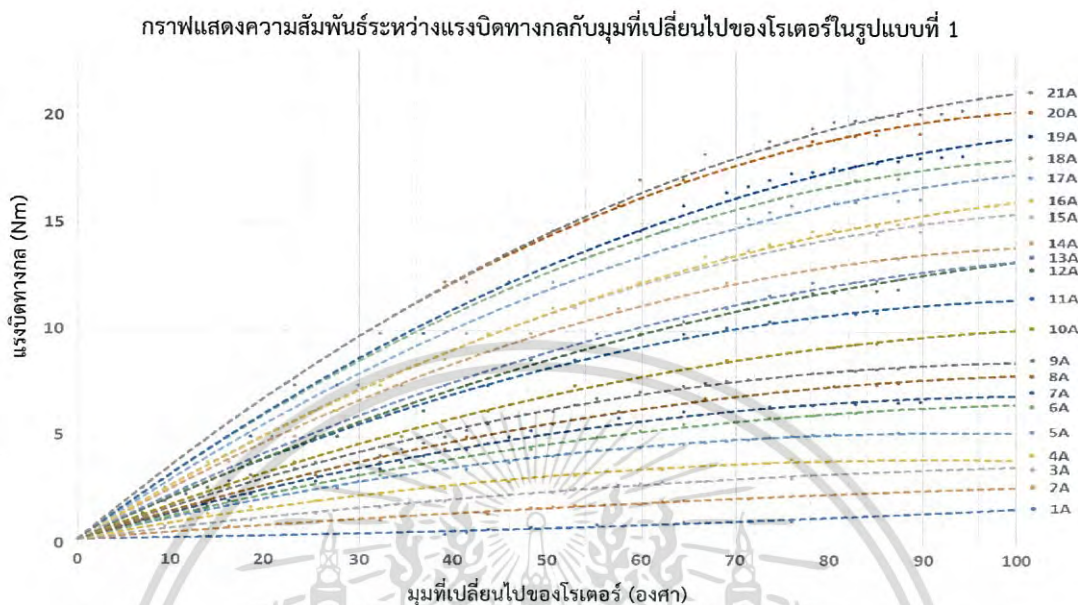
รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดทางกลกับมุมที่เปลี่ยนแปลงไปของโรเตอร์ในรูปแบบที่ 1 ที่กระแส 15 A



รูปที่ 4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดทางกลกับมุมที่เปลี่ยนแปลงไปของโรเตอร์ในรูปแบบที่ 2 ที่กระแส 19 A

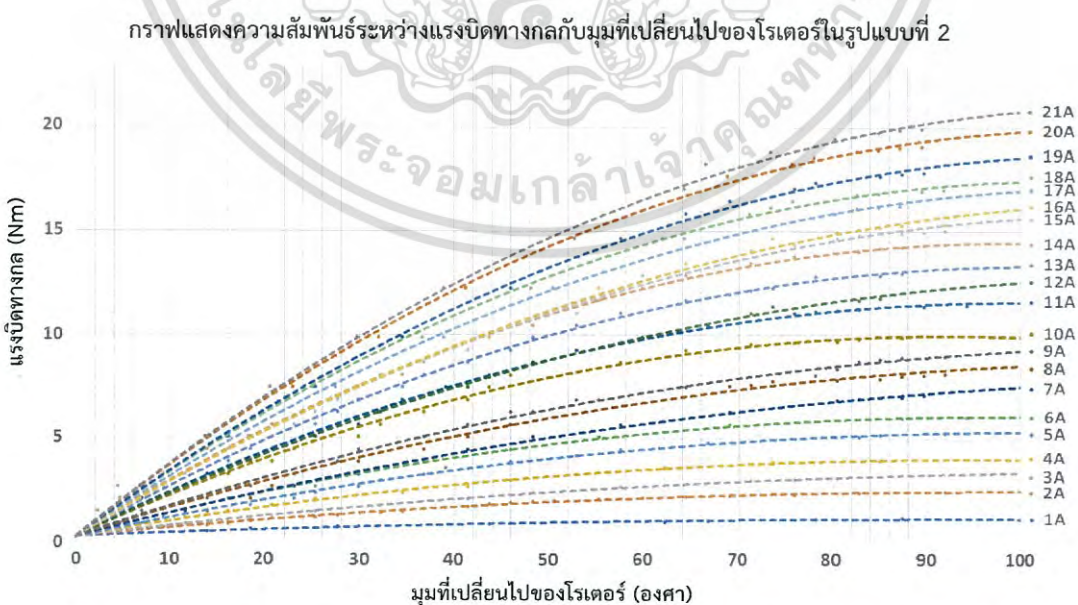
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำผลการทดสอบที่ทุกกระแสดั้งแต่ 1-21 A ในรูปแบบที่ 1 มาพล็อตเป็นกราฟจะได้ ดังรูปที่ 4.25



รูปที่ 4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดทางกลกับมุมที่เปลี่ยนแปลงไปของโรเตอร์ในรูปแบบที่ 1 ที่กระแส 1 ถึง 21 A

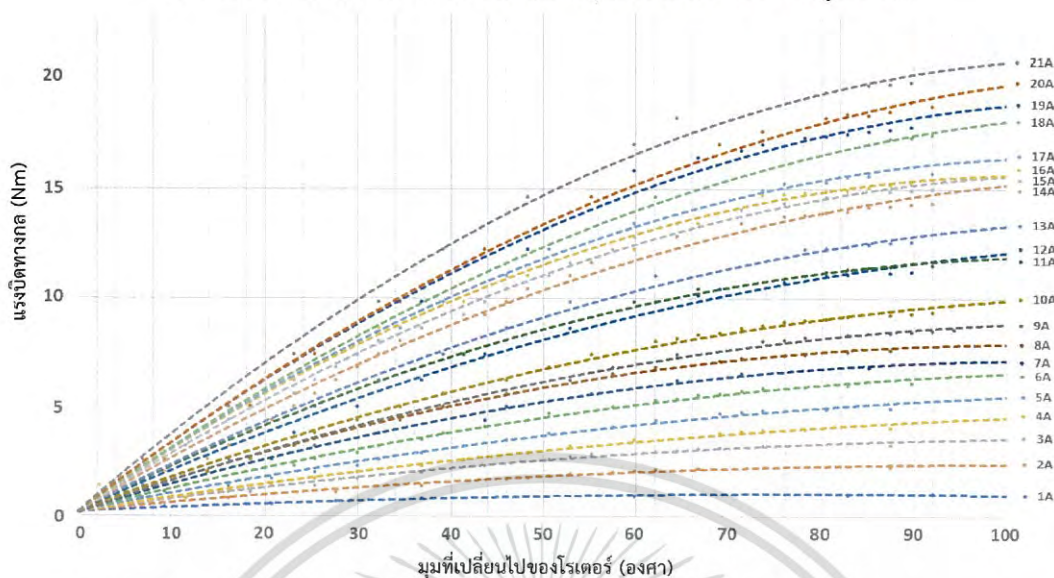
จากรูปที่ 4.25 จะเห็นได้ว่าเมื่อกระแสเพิ่มขึ้นแรงบิดทางกลจะเพิ่มขึ้น สำหรับรูปแบบอื่นๆ ก็ให้ผลเช่นเดียวกัน ดังรูปที่ 4.26, 4.27, 4.28, 4.29 และ 4.30



รูปที่ 4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดทางกลกับมุมที่เปลี่ยนแปลงไปของโรเตอร์ในรูปแบบที่ 2 ที่กระแส 1 ถึง 21 A

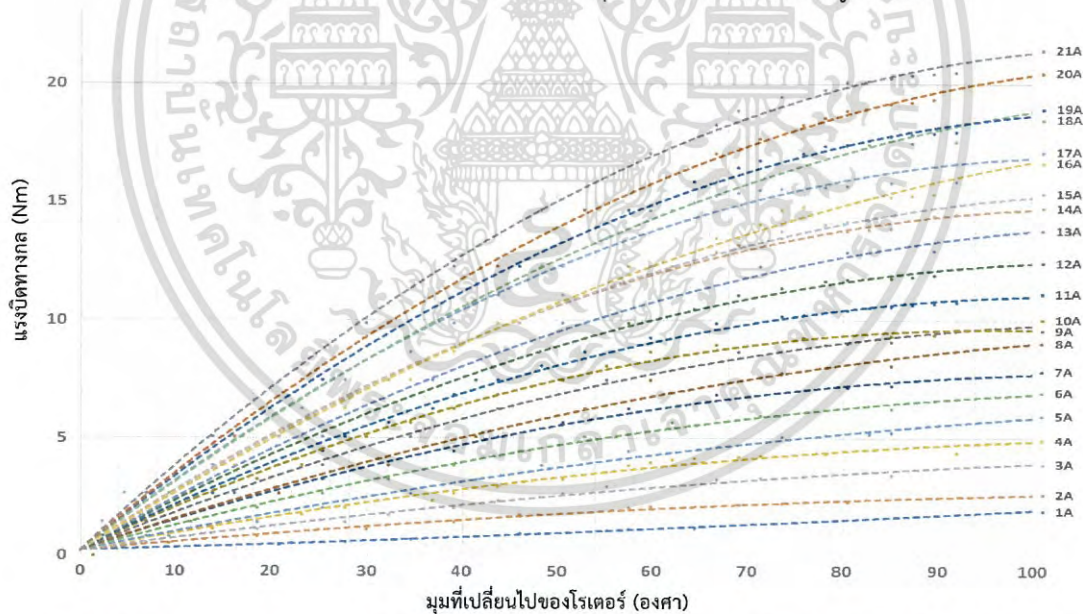
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดทางกลกับมุมที่เปลี่ยนไปของโรเตอร์ในรูปแบบที่ 3



รูปที่ 4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดทางกลกับมุมที่เปลี่ยนแปลงไปของโรเตอร์ในรูปแบบที่ 3 ที่กระแส 1 ถึง 21 A

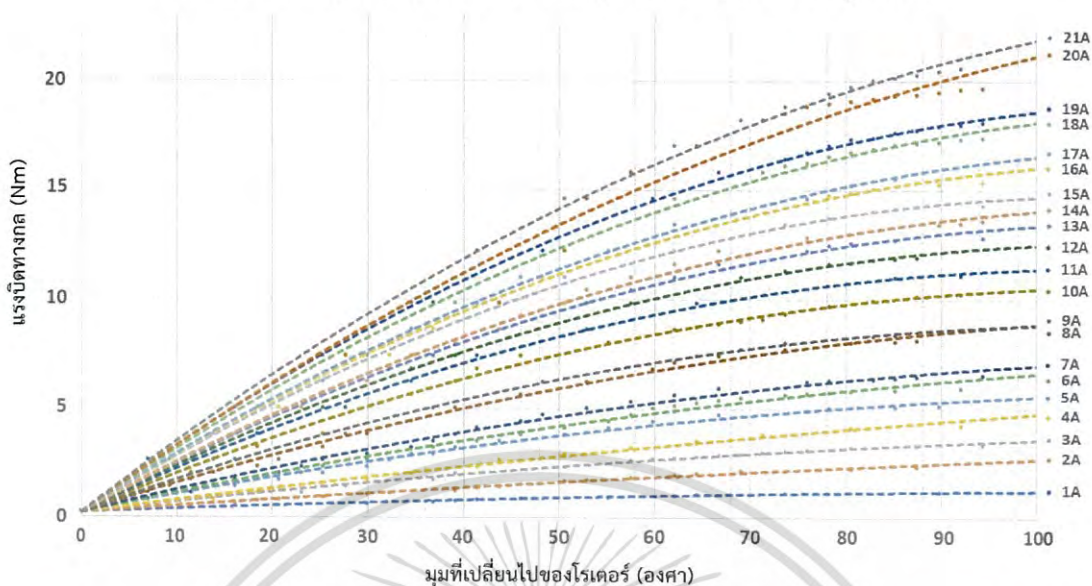
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดทางกลกับมุมที่เปลี่ยนไปของโรเตอร์ในรูปแบบที่ 4



รูปที่ 4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดทางกลกับมุมที่เปลี่ยนแปลงไปของโรเตอร์ในรูปแบบที่ 4 ที่กระแส 1 ถึง 21 A

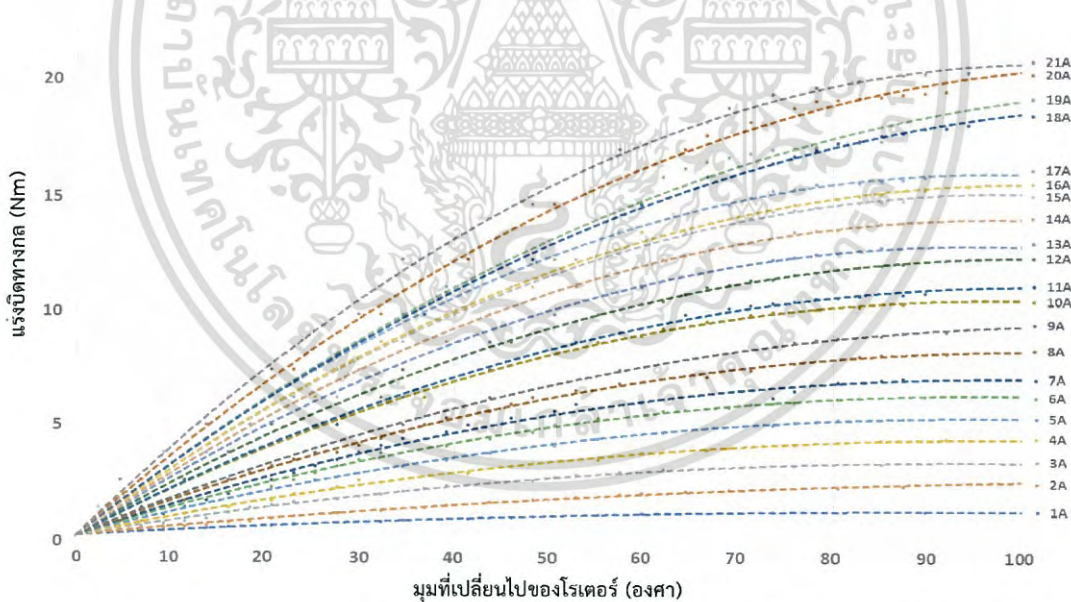
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดทางกลกับมุมที่เปลี่ยนไปของโรเตอร์ในรูปแบบที่ 5



รูปที่ 4.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดทางกลกับมุมที่เปลี่ยนแปลงไปของโรเตอร์ในรูปแบบที่ 5 ที่กระแส 1 ถึง 21 A

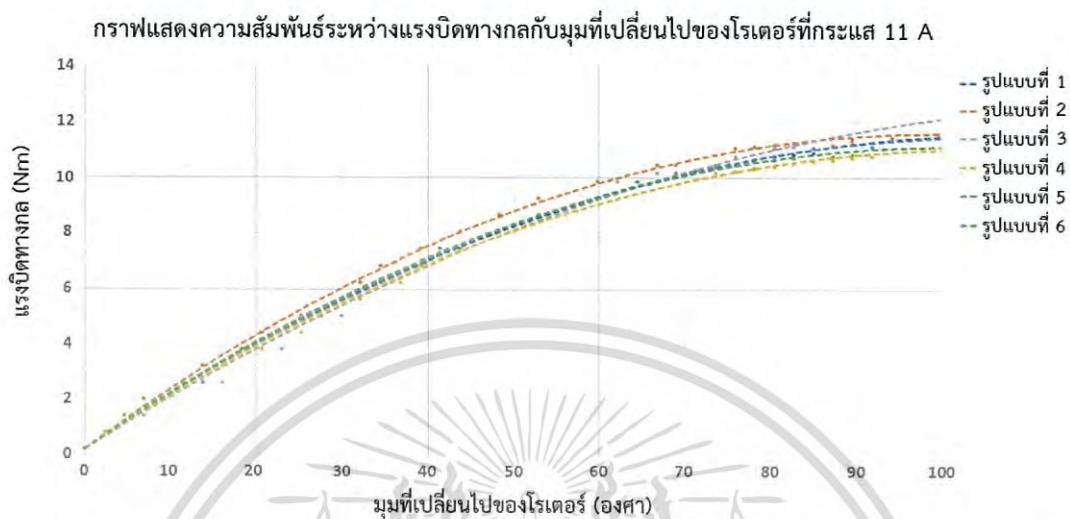
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดทางกลกับมุมที่เปลี่ยนไปของโรเตอร์ในรูปแบบที่ 6



รูปที่ 4.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดทางกลกับมุมที่เปลี่ยนแปลงไปของโรเตอร์ในรูปแบบที่ 6 ที่กระแส 1 ถึง 21 A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาที่กระแส 11 และ 21 A ของสัญญาณทั้ง 6 รูปแบบ จะให้กราฟ ดังรูปที่ 4.31 และ 4.32



รูปที่ 4.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดทางกลกับมุมที่เปลี่ยนแปลงไปของโรเตอร์ในแต่ละรูปแบบที่กระแส 11 A



รูปที่ 4.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดทางกลกับมุมที่เปลี่ยนแปลงไปของโรเตอร์ในแต่ละรูปแบบที่กระแส 21 A

จากรูปที่ 4.31 และ 4.32 แสดงให้เห็นว่า สัญญาณทั้ง 6 รูปแบบ ให้ผลการทดสอบที่ใกล้เคียงกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาที่ค่าสูงสุดของแรงบิดในแต่ละกระแสของทุกรูปแบบ

ตารางที่ 4.7 แรงบิดสูงสุดที่แต่ละกระแสของทุกรูปแบบ

Patterns Current	1	2	3	4	5	6
1	1.14	1.14	1.08	1.20	1.20	1.32
2	2.16	2.40	2.28	2.28	2.34	2.40
3	3.12	3.06	3.30	3.42	3.36	3.36
4	4.02	3.90	4.08	4.38	4.32	4.44
5	5.29	5.23	4.99	5.23	5.17	5.35
6	6.19	6.01	6.13	6.25	5.95	6.31
7	6.73	7.09	6.85	7.21	6.55	7.09
8	7.57	8.11	7.63	8.05	8.17	8.23
9	8.29	8.95	8.59	9.07	8.41	9.13
10	9.43	9.85	9.37	9.37	10.27	10.33
11	10.87	11.41	11.23	10.75	11.11	10.81
12	11.95	11.77	11.53	11.89	11.95	12.13
13	12.43	13.09	12.67	12.91	12.85	12.79
14	13.39	14.36	14.36	13.88	13.63	13.88
15	14.42	15.08	15.08	14.48	14.48	14.84
16	15.08	15.32	15.38	15.32	15.38	15.44
17	16.16	16.22	15.80	15.86	15.86	15.86
18	17.12	17.00	17.48	17.54	17.42	17.42
19	18.20	17.84	17.84	17.96	18.20	18.14
20	19.22	19.10	18.80	19.40	19.70	19.58
21	20.30	20.00	20.54	20.48	20.60	20.42

จะเห็นได้ว่า แรงบิดสูงสุดที่กระแสเดียวกันของแต่ละรูปแบบ จะมีค่าใกล้เคียงกัน โดยที่ 21 A จะมีค่าเฉลี่ยของแรงบิดเป็น 20.3924 N·m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.8 สรุปผลการทดสอบแรงบิดของมอเตอร์แบบฮับ

สำหรับมอเตอร์แบบฮับที่ได้นำมาทดสอบมีพิกัดกำลังขาออกเป็น 1000 W 48 V 480 rpm จาก $P = VI$ จะได้กระแสพิกัดเป็น 20.83 A และจาก $P = T \times \omega$ โดย $\omega = \frac{2\pi N_r}{60}$ จะได้แรงบิดที่พิกัดเป็น 19.9045 N·m ซึ่งใกล้เคียงกับผลการทดสอบที่ 21 A ซึ่งมีค่าสูงสุดเฉลี่ยเป็น 20.3924 N·m



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดสอบ และข้อเสนอแนะ

สรุปผลการทดสอบ

จากการศึกษามอเตอร์แบบฮับที่มีขนาดพิกัด 1000 W, 48 V และความเร็วรอบ 480 rpm พบว่ามีจำนวนแม่เหล็กถาวรที่โรเตอร์ 46 ขั้ว และมีตัวตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 ตัว ติดตั้งอยู่ที่สเตเตอร์ ผลจากการศึกษาโครงสร้างและทดสอบจำลองการจ่ายแรงดัน 6 รูปแบบให้ขดลวดสเตเตอร์พบว่า จะเกิดขั้วแม่เหล็กที่สเตเตอร์ 46 ขั้ว ในทุกรูปแบบของการจ่ายแรงดัน ซึ่งเป็นจำนวนที่เท่ากับขั้วแม่เหล็กที่โรเตอร์ และจากการทดสอบวัดมุมทางกลของมอเตอร์แบบฮับ จะได้ว่า การหมุนของมอเตอร์แบบฮับจะหมุนไปเป็นมุมประมาณ 2.6 องศาทางกลต่อ 1 รูปแบบของการจ่ายแรงดัน จะได้ว่าเมื่อจ่ายแรงดันครบ 6 รูปแบบจะถือเป็น 1 รอบทางไฟฟ้าของมอเตอร์ ดังนั้นมอเตอร์แบบฮับจะหมุนไปประมาณ 15.6 องศาทางกล และเมื่อจ่ายแรงดันครบ 23 รอบทางไฟฟ้า มอเตอร์แบบฮับจะหมุนครบ 1 รอบทางกลพอดี ซึ่งการหมุนของมอเตอร์แบบฮับนั้นเป็นไปตามทฤษฎีของศาทางกลและองศาทางไฟฟ้าของมอเตอร์ที่มี 46 ขั้วแม่เหล็ก สำหรับการทดสอบตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กของมอเตอร์แบบฮับพบว่า ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กทั้ง 3 ตัวที่สเตเตอร์จะทำหน้าที่ตรวจสอบสนามแม่เหล็กของขดลวดสเตเตอร์แต่ละเฟส โดยที่เมื่อขดลวดเฟสใดก็ตามมีการจ่ายแรงดันเป็นค่าบวก (+) ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กของขดลวดเฟสนั้นจะให้ผลลัพธ์ออกมาเป็น High และเมื่อขดลวดเฟสใดก็ตามมีการจ่ายแรงดันเป็นค่าลบ (-) ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กของขดลวดเฟสนั้นจะให้ผลลัพธ์ออกมาเป็น Low ซึ่งเราสามารถนำผลลัพธ์จากตัวตรวจสอบสนามแม่เหล็กไปใช้ในการควบคุมมอเตอร์แบบฮับได้

นอกจากนี้ ในส่วนการทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับพบว่า แรงบิดของมอเตอร์แบบฮับเมื่อเพิ่มภาระทางกลขึ้นเรื่อยๆ มุมที่เปลี่ยนไปของโรเตอร์จะเพิ่มขึ้นตาม ซึ่งเป็นไปในลักษณะของฟังก์ชันไซน์ และแรงบิดของมอเตอร์แบบฮับจะเพิ่มขึ้นตามกระแสที่จ่ายให้มอเตอร์แบบฮับ โดยพบว่า รูปแบบของการจ่ายแรงดันทั้ง 6 รูปแบบให้กับมอเตอร์แบบฮับ จะให้ผลการทดสอบแรงบิดเช่นเดียวกัน โดยให้แรงบิดสูงสุดที่กระแส 21 A และค่าเฉลี่ยของแรงบิดทั้ง 6 รูปแบบของการจ่ายแรงดันเป็น 20.3924 N·m ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับเมื่อพิจารณาที่พิกัดของมอเตอร์แบบฮับที่หมุนที่ความเร็วพิกัด แรงดันพิกัด จะมีกระแส 20.83 A และแรงบิดที่พิกัดเป็น 19.9045 N·m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษามอเตอร์แบบฮับมีข้อเสนอแนะดังนี้

1. ในการทดสอบแรงบิดของมอเตอร์แบบฮับที่ทำการเพิ่มภาระทางกลเรื่อยๆ ให้กับฮับมอเตอร์ เพื่อพิจารณามุมที่เปลี่ยนแปลงไปของโรเตอร์ ซึ่งการอ่านค่ามุมของโรเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงไปมีความละเอียดมากที่สุด คือ 0.2 องศา ทำให้อาจเกิดความคลาดเคลื่อนในการอ่านค่าขึ้นได้หากมีการปรับปรุงวิธีการวัดมุมก็จะทำให้ผลการทดสอบมีความถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้น
2. น้ำหนักถ่วงที่ใช้ในการทดสอบมีความละเอียดมากที่สุด คือ 50 g หากน้ำหนักถ่วงมีความละเอียดมากกว่าที่มีอยู่ จะทำให้สามารถทดสอบหาค่าแรงบิดสูงสุดที่ได้ใกล้เคียงความถูกต้องมากยิ่งขึ้น
3. การศึกษาในอนาคต ควรมีการทดสอบหาความสัมพันธ์ของแรงบิดมอเตอร์ที่ความเร็วต่างๆกัน ซึ่งจะช่วยให้เห็นพฤติกรรมขณะที่ใช้งานจริง เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบที่ได้ในปฏิญานพินธ์นี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] พิเชิต ล้ายอง, เครื่องจักรกลไฟฟ้า 1, กรุงเทพฯ, งานบริการการเรียนการสอน คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2553.
- [2] วีระเชษฐ์ ชั้นเงิน, วุฒิพล ธาราธิ์เศรษฐ์, อิเล็กทรอนิกส์กำลัง, พิมพ์ครั้งที่ 10, กรุงเทพฯ : สนพ. ห้างหุ้นส่วนจำกัด วิ.เจ. พรินตติ้ง, 2553
- [3] B. Jayant Baliga, The IGBT Device: Physics, Design and Applications of the Insulated Gate Bipolar Transistor, 1st Ed., New York :William Andrew, 2015
- [4] Austin Hughes, William Drury, Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types and Applications, 4th Ed., UK :Newnes , 2013
- [5] T. J. E. MILLER, Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motor Drives, New York :Oxford University Press, 1989
- [6] William H. Hayt, Jr , Jack E. Kemmerly , Steven M. Durbin, Engineering Circuit Analysis, 8th Ed., USA, 2012
- [7] Chang-liang Xia, Permanent Magnet Brushless DC Motor Drives and Controls, 1st Ed., USA :Wiley, 2012
- [8] R. Krishnan, Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives, 1st Ed., USA :CRC Press, 2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก

รูปภาพขณะดำเนินการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก
 รูปภาพขณะดำเนินการ



รูปที่ ก.1 การเชื่อมเหล็กระหว่างส่วนฐานเพื่อใช้ทำแทนทดสอบมอเตอร์แบบฮับ



รูปที่ ก.2 การเชื่อมเหล็กระหว่างส่วนเสาและส่วนฐานของแท่นทดสอบมอเตอร์แบบฮับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

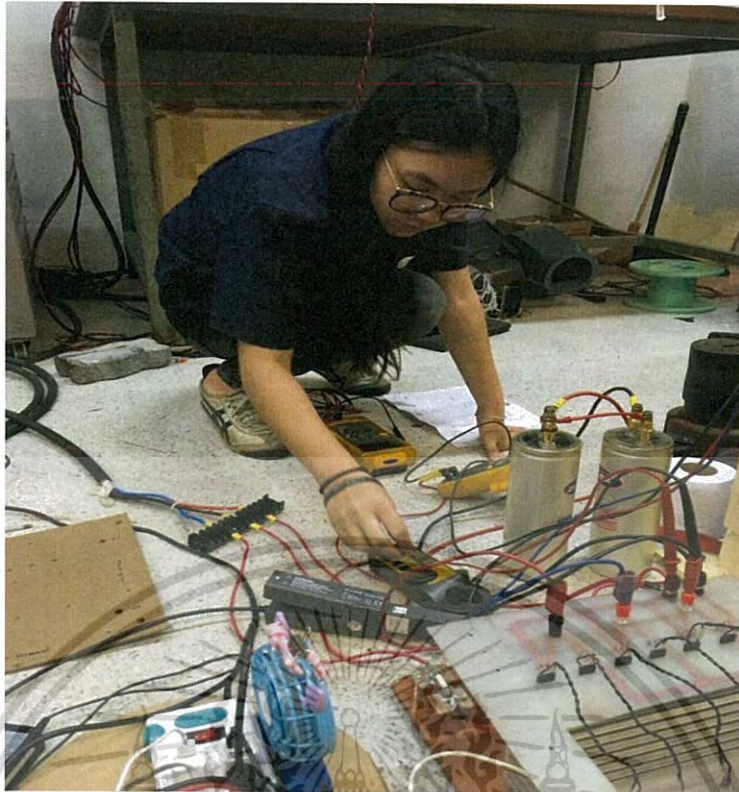


รูปที่ ก.3 เจียรระไนเหล็กเพื่อใช้ทำแท่นทดสอบมอเตอร์แบบฮับโดยใช้เครื่องเจียรเหล็ก

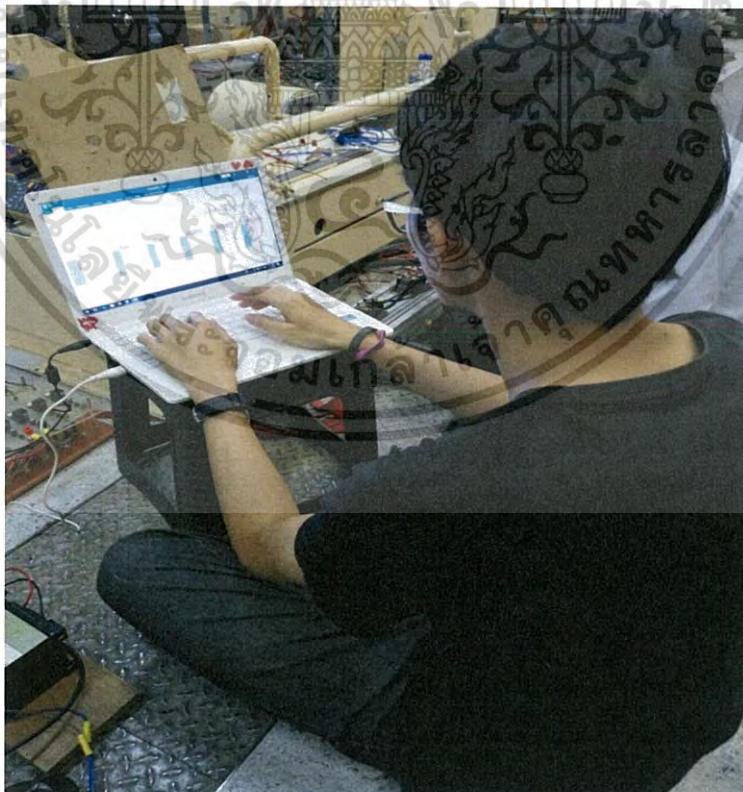


รูปที่ ก.4 ปรับค่าแรงดันทำการทดสอบมอเตอร์แบบฮับโดยใช้ 3 Phase Variable A.C. Supply

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.5 ทำการวัดและอ่านค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าขณะทำการทดสอบ เพื่อใช้บันทึกผลการทดสอบ



รูปที่ ก.6 ทำการบันทึกค่าขณะทำการทดสอบด้วยไมโครซอฟท์เอ็กเซล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

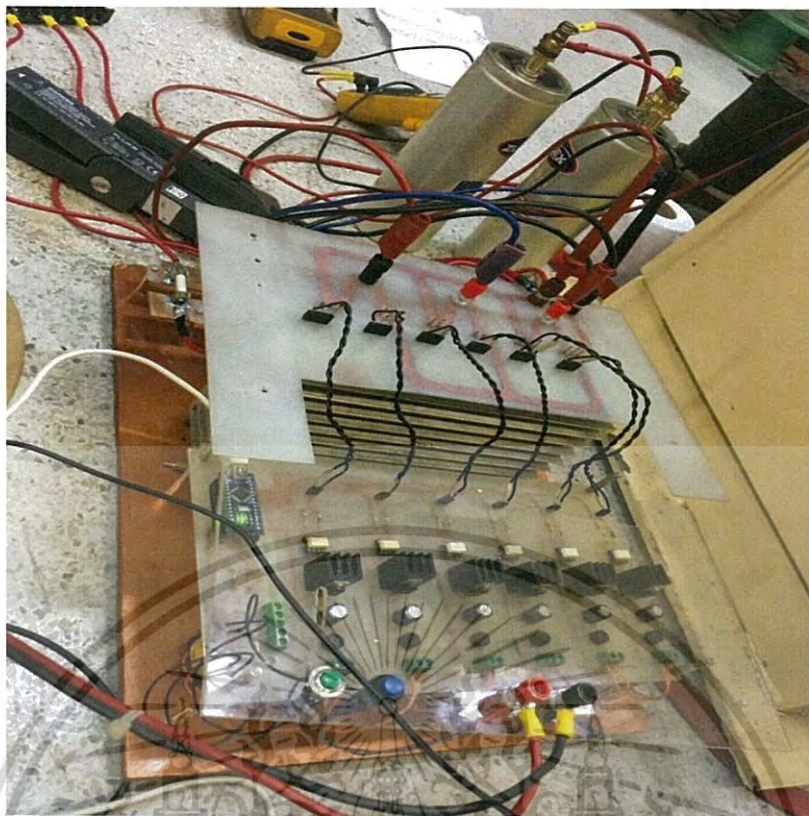


รูปที่ ก.7 ทำการทดสอบเพื่อหามุมของโรเตอร์โดยการใส่น้ำหนักถ่วงให้กับมอเตอร์แบบฮับ



รูปที่ ก.8 ทำการเชื่อมต่อโค้ดให้กับอาดูโน่กับส่วนวงจรควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบฮับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.9 ชุดวงจรที่ใช้ขับมอเตอร์แบบฮับในการทำการทดสอบ



รูปที่ ก.10 แท่นทดสอบมอเตอร์แบบฮับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข

ตารางบันทึกผลการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข
ตารางบันทึกผลการทดสอบ

ตารางที่ ข.1 ผลการทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับรูปแบบที่ 1 ที่การทดสอบประมาณ 5%

การทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับที่กระแส : 1 A			รูปแบบที่ : 1
$V_{A.C.} = 1.50 V_{L-L}$, $I_{A.C.} = 1.07 A$, $V_{D.C.} = 0.38 V$, $I_{A.D.C.} = 1.15 A$, $I_{B.D.C.} = 0.36 A$, $I_{C.D.C.} = 0.40 A$			
น้ำหนัก(kg)	แรงบิด (Nm)	มุมที่เปลี่ยนแปลงไป (องศา)	มุมทางไฟฟ้า(องศา)
0.20	0.24	0.0	0.0
0.30	0.36	0.1	2.3
0.40	0.48	1.7	39.1
0.50	0.60	1.8	41.4
0.60	0.72	1.9	43.7
0.70	0.84	2.1	48.3
0.80	0.96	2.4	55.2
0.90	1.08	2.8	64.4
0.95	1.14	3.3	75.9

ตารางที่ ข.2 ผลการทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับรูปแบบที่ 2 ที่การทดสอบประมาณ 5%

การทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับที่กระแส : 1 A			รูปแบบที่ : 2
$V_{A.C.} = 1.50 V_{L-L}$, $I_{A.C.} = 1.06 A$, $V_{D.C.} = 0.38 V$, $I_{A.D.C.} = 0.46 A$, $I_{B.D.C.} = 0.56 A$, $I_{C.D.C.} = 1.15 A$			
น้ำหนัก(kg)	แรงบิด (Nm)	มุมที่เปลี่ยนแปลงไป (องศา)	มุมทางไฟฟ้า(องศา)
0.20	0.24	0.0	0.0
0.30	0.36	0.3	6.9
0.40	0.48	0.6	13.8
0.50	0.60	0.8	18.4
0.60	0.72	1.2	27.6
0.70	0.84	1.9	43.7
0.80	0.96	2.7	62.1
0.85	1.02	2.9	66.7
0.90	1.08	3.4	78.2
0.95	1.14	3.8	87.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.3 ผลการทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับรูปแบบที่ 3 ที่การทดสอบประมาณ 5%

การทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับที่กระแส : 1 A			รูปแบบที่ : 3
$V_{A.C.} = 1.64 V_{L-L}$, $I_{A.C.} = 1.20 A$, $V_{D.C.} = 0.46 V$, $I_{A.D.C.} = 0.50 A$, $I_{B.D.C.} = 0.21 A$, $I_{C.D.C.} = 0.60 A$			
น้ำหนัก(kg)	แรงบิด (Nm)	มุมที่เปลี่ยนแปลงไป (องศา)	มุมทางไฟฟ้า(องศา)
0.20	0.24	0.0	0.0
0.30	0.36	0.1	2.3
0.40	0.48	0.4	9.2
0.50	0.60	0.9	20.7
0.60	0.72	1.2	27.6
0.70	0.84	1.6	36.8
0.80	0.96	2.6	59.8
0.85	1.02	3.6	82.8
0.90	1.08	4.0	92.0

ตารางที่ ข.4 ผลการทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับรูปแบบที่ 4 ที่การทดสอบประมาณ 5%

การทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับที่กระแส : 1 A			รูปแบบที่ : 4
$V_{A.C.} = 1.56 V_{L-L}$, $I_{A.C.} = 1.06 A$, $V_{D.C.} = 0.45 V$, $I_{A.D.C.} = 1.12 A$, $I_{B.D.C.} = 0.45 A$, $I_{C.D.C.} = 0.55 A$			
น้ำหนัก(kg)	แรงบิด (Nm)	มุมที่เปลี่ยนแปลงไป (องศา)	มุมทางไฟฟ้า(องศา)
0.20	0.24	0.0	0.0
0.30	0.36	0.2	4.6
0.40	0.48	0.9	20.7
0.50	0.60	1.2	27.6
0.60	0.72	1.5	34.5
0.70	0.84	1.8	41.4
0.80	0.96	2.0	46.0
0.90	1.08	2.4	55.2
0.95	1.14	2.5	57.5
1.00	1.20	2.8	64.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.5 ผลการทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับรูปแบบที่ 5 ที่การทดสอบประมาณ 5%

การทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับที่กระแส : 1 A			รูปแบบที่ : 5
$V_{A.C.} = 1.43 V_{L-L}$, $I_{A.C.} = 0.77 A$, $V_{D.C.} = 0.27 V$, $I_{A.D.C.} = 0.48 A$, $I_{B.D.C.} = 0.55 A$, $I_{C.D.C.} = 1.05 A$			
น้ำหนัก(kg)	แรงบิด (Nm)	มุมที่เปลี่ยนแปลงไป (องศา)	มุมทางไฟฟ้า(องศา)
0.20	0.24	0.0	0.0
0.25	0.30	0.1	2.3
0.30	0.36	0.1	2.3
0.35	0.42	0.2	4.6
0.40	0.48	0.3	6.9
0.45	0.54	0.7	16.1
0.50	0.60	1.0	23.0
0.55	0.66	1.3	29.9
0.60	0.72	1.6	36.8
0.65	0.78	1.7	39.1
0.70	0.84	1.8	41.4
0.75	0.90	2.0	46.0
0.80	0.96	2.4	55.2
0.85	1.02	2.7	62.1
0.90	1.08	2.8	64.4
0.95	1.14	3.2	73.6
1.00	1.20	3.9	89.7

ตารางที่ ข.6 ผลการทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับรูปแบบที่ 6 ที่การทดสอบประมาณ 5%

การทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับที่กระแส : 1 A			รูปแบบที่ : 6
$V_{A.C.} = 1.48 V_{L-L}$, $I_{A.C.} = 0.60 A$, $V_{D.C.} = 0.32 V$, $I_{A.D.C.} = 0.48 A$, $I_{B.D.C.} = 1.35 A$, $I_{C.D.C.} = 0.55 A$			
น้ำหนัก(kg)	แรงบิด (Nm)	มุมที่เปลี่ยนแปลงไป (องศา)	มุมทางไฟฟ้า(องศา)
0.20	0.24	0.0	0.0
0.25	0.30	0.1	2.3
0.30	0.36	0.1	2.3
0.35	0.42	0.3	6.9
0.40	0.48	0.4	9.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำหนัก(kg)	แรงบิด (Nm)	มุมที่เปลี่ยนแปลงไป (องศา)	มุมทางไฟฟ้า(องศา)
0.45	0.54	0.6	13.8
0.50	0.60	0.7	16.1
0.55	0.66	0.9	20.7
0.60	0.72	1.0	23.0
0.65	0.78	1.2	27.6
0.70	0.84	1.4	32.2
0.75	0.90	1.5	34.5
0.80	0.96	1.8	41.4
0.85	1.02	2.0	46.0
0.90	1.08	2.1	48.3
0.95	1.14	2.4	55.2
1.00	1.20	2.6	59.8
1.05	1.26	3.2	73.6
1.10	1.32	3.9	89.7

ตารางที่ ข.7 ผลการทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับรูปร่างที่ 1 ที่การทดสอบประมาณ 25%

การทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับที่กระแส : 5 A		รูปร่างที่ : 1	
$V_{A.C.} = 2.6 \text{ V}_{L-L}$, $I_{A.C.} = 3.58 \text{ A}$, $V_{D.C.} = 1.38 \text{ V}$, $I_{A.D.C.} = 4.89 \text{ A}$, $I_{B.D.C.} = 2.46 \text{ A}$, $I_{C.D.C.} = 2.45 \text{ A}$			
น้ำหนัก(kg)	แรงบิด (Nm)	มุมที่เปลี่ยนแปลงไป (องศา)	มุมทางไฟฟ้า(องศา)
0.20	0.24	0.0	0.0
0.45	0.54	0.1	2.3
0.70	0.84	0.2	4.6
0.95	1.14	0.3	6.9
1.20	1.44	0.5	11.5
1.45	1.74	0.6	13.8
1.70	2.04	0.7	16.1
1.95	2.34	0.9	20.7
2.20	2.64	1.2	27.6
2.45	2.94	1.3	29.9
2.70	3.24	1.5	34.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำหนัก(kg)	แรงบิด (Nm)	มุมที่เปลี่ยนแปลงไป (องศา)	มุมทางไฟฟ้า(องศา)
2.95	3.54	1.8	41.4
3.20	3.84	2.0	46.0
3.45	4.14	2.2	50.6
3.70	4.44	2.4	55.2
3.75	4.50	2.5	57.5
3.80	4.56	2.6	59.8
3.90	4.68	2.7	62.1
3.95	4.74	2.8	64.4
4.00	4.80	2.9	66.7
4.10	4.92	3.1	71.3
4.15	4.98	3.1	71.3
4.20	5.04	3.2	73.6
4.25	5.10	3.3	75.9
4.30	5.16	3.4	78.2
4.35	5.22	3.5	80.5
4.40	5.28	3.8	87.4

ตารางที่ ข.8 ผลการทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับรูปแบบที่ 2 ที่การทดสอบประมาณ 25%

การทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับที่กระแส : 5 A		รูปแบบที่ : 2	
$V_{AC} = 2.60 V_{L-L}$, $I_{AC} = 3.64 A$, $V_{D.C.} = 1.38 V$, $I_{A.D.C.} = 2.46 A$, $I_{B.D.C.} = 2.45 A$, $I_{C.D.C.} = 4.89 A$			
น้ำหนัก(kg)	แรงบิด (Nm)	มุมที่เปลี่ยนแปลงไป (องศา)	มุมทางไฟฟ้า(องศา)
0.20	0.24	0.0	0.0
0.45	0.54	0.1	2.3
0.70	0.84	0.3	6.9
0.95	1.14	0.4	9.2
1.20	1.44	0.6	13.8
1.45	1.74	0.8	18.4
1.70	2.04	1.0	23.0
1.95	2.34	1.1	25.3
2.20	2.64	1.3	29.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำหนัก(kg)	แรงบิด (Nm)	มุมที่เปลี่ยนแปลงไป (องศา)	มุมทางไฟฟ้า(องศา)
2.45	2.94	1.4	32.2
2.70	3.24	1.6	36.8
2.95	3.54	1.7	39.1
3.20	3.84	2.0	46.0
3.45	4.14	2.3	52.9
3.70	4.44	2.5	57.5
3.95	4.75	2.9	66.7
4.20	5.05	3.6	82.8
4.30	5.17	3.7	85.1
4.35	5.23	4.0	92.0

ตารางที่ ข.9 ผลการทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับรูปแบบที่ 3 ที่การทดสอบประมาณ 25%

การทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับที่กระแส : 5 A		รูปแบบที่ : 3	
$V_{A.C.} = 2.95 \text{ V}_{L-L}$, $I_{A.C.} = 4.10 \text{ A}$, $V_{D.C.} = 1.73 \text{ V}$, $I_{A.D.C.} = 2.27 \text{ A}$, $I_{B.D.C.} = 5.15 \text{ A}$, $I_{C.D.C.} = 2.60 \text{ A}$			
น้ำหนัก(kg)	แรงบิด (Nm)	มุมที่เปลี่ยนแปลงไป (องศา)	มุมทางไฟฟ้า(องศา)
0.20	0.24	0.0	0.0
0.45	0.54	0.1	2.3
0.70	0.84	0.3	6.9
0.95	1.14	0.4	9.2
1.20	1.44	0.7	16.1
1.45	1.74	0.9	20.7
1.70	2.04	1.1	25.3
1.95	2.34	1.3	29.9
2.20	2.64	1.4	32.2
2.45	2.94	1.6	36.8
2.70	3.24	1.8	41.4
2.95	3.54	2.0	46.0
3.20	3.84	2.2	50.6
3.45	4.14	2.5	57.5
3.70	4.44	2.7	62.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำหนัก(kg)	แรงบิด (Nm)	มุมที่เปลี่ยนแปลงไป (องศา)	มุมทางไฟฟ้า(องศา)
3.95	4.75	3.0	69.0
4.00	4.81	3.1	71.3
4.05	4.87	3.2	73.6
4.10	4.93	3.5	80.5
4.15	4.99	3.8	87.4

ตารางที่ ข.10 ผลการทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับรูปแบบที่ 4 ที่การทดสอบประมาณ 25%

การทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับที่กระแส : 5 A			รูปแบบที่ : 4
$V_{A.C.} = 2.67 V_{L-L}$, $I_{A.C.} = 3.61 A$, $V_{D.C.} = 1.61 V$, $I_{A.D.C.} = 4.93 A$, $I_{B.D.C.} = 2.20 A$, $I_{C.D.C.} = 2.57 A$			
น้ำหนัก(kg)	แรงบิด (Nm)	มุมที่เปลี่ยนแปลงไป (องศา)	มุมทางไฟฟ้า(องศา)
0.20	0.24	0.0	0.0
0.70	0.84	0.4	9.2
1.20	1.44	0.8	18.4
1.70	2.04	1.1	25.3
2.20	2.64	1.5	34.5
2.70	3.24	1.8	41.4
3.20	3.84	2.1	48.3
3.70	4.44	2.5	57.5
4.20	5.05	3.2	73.6
4.25	5.11	3.4	78.2
4.30	5.17	3.6	82.8
4.35	5.23	3.7	85.1

ตารางที่ ข.11 ผลการทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับรูปแบบที่ 5 ที่การทดสอบประมาณ 25%

การทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับที่กระแส : 1 A			รูปแบบที่ : 5
$V_{A.C.} = 1.43 V_{L-L}$, $I_{A.C.} = 0.77 A$, $V_{D.C.} = 0.27 V$, $I_{A.D.C.} = 0.48 A$, $I_{B.D.C.} = 0.55 A$, $I_{C.D.C.} = 1.05 A$			
น้ำหนัก(kg)	แรงบิด (Nm)	มุมที่เปลี่ยนแปลงไป (องศา)	มุมทางไฟฟ้า(องศา)
0.20	0.24	0.0	0.0
0.25	0.30	0.1	2.3
0.30	0.36	0.1	2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำหนัก(kg)	แรงบิด (Nm)	มุมที่เปลี่ยนแปลงไป (องศา)	มุมทางไฟฟ้า(องศา)
0.35	0.42	0.2	4.6
0.40	0.48	0.3	6.9
0.45	0.54	0.7	16.1
0.50	0.60	1.0	23.0
0.55	0.66	1.3	29.9
0.60	0.72	1.6	36.8
0.65	0.78	1.7	39.1
0.70	0.84	1.8	41.4
0.75	0.90	2.0	46.0
0.80	0.96	2.4	55.2
0.85	1.02	2.7	62.1
0.90	1.08	2.8	64.4
0.95	1.14	3.2	73.6
1.00	1.20	3.9	89.7

ตารางที่ ข.12 ผลการทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับรูปแบบที่ 6 ที่การทดสอบประมาณ 25%

การทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับที่กระแส : 5 A		รูปแบบที่ : 6	
$V_{A.C.} = 2.73 V_{L-L}$, $I_{A.C.} = 3.94 A$, $V_{D.C.} = 1.51 V$, $I_{A.D.C.} = 2.47 A$, $I_{B.D.C.} = 5.07 A$, $I_{C.D.C.} = 2.59 A$			
น้ำหนัก(kg)	แรงบิด (Nm)	มุมที่เปลี่ยนแปลงไป (องศา)	มุมทางไฟฟ้า(องศา)
0.20	0.24	0.0	0.0
0.45	0.54	0.1	2.3
0.70	0.84	0.1	2.3
0.95	1.14	0.4	9.2
1.20	1.44	0.5	11.5
1.45	1.74	0.6	13.8
1.70	2.04	0.8	18.4
1.95	2.34	0.9	20.7
2.20	2.64	1.1	25.3
2.45	2.94	1.3	29.9
2.70	3.24	1.5	34.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำหนัก(kg)	แรงบิด (Nm)	มุมที่เปลี่ยนแปลงไป (องศา)	มุมทางไฟฟ้า(องศา)
2.95	3.54	1.7	39.1
3.20	3.84	1.9	43.7
3.45	4.14	2.2	50.6
3.70	4.44	2.4	55.2
3.95	4.75	2.7	62.1
4.20	5.05	3.2	73.6
4.25	5.11	3.2	73.6
4.30	5.17	3.3	75.9
4.35	5.23	3.4	78.2
4.40	5.29	3.5	80.5
4.45	5.35	3.8	87.4

ตารางที่ ข.13 ผลการทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับรูปแบบที่ 1 ที่การทดสอบประมาณ 50%

การทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับที่กระแส : 10 A		รูปแบบที่ : 1	
$V_{A.C.} = 3.94 V_{L-L}$, $I_{A.C.} = 7.22 A$, $V_{D.C.} = 2.97 V$, $I_{A.D.C.} = 9.76 A$, $I_{B.D.C.} = 4.75 A$, $I_{C.D.C.} = 4.95 A$			
น้ำหนัก(kg)	แรงบิด (Nm)	มุมที่เปลี่ยนแปลงไป (องศา)	มุมทางไฟฟ้า(องศา)
0.20	0.24	0.0	0.0
1.20	1.44	0.3	6.9
2.20	2.64	0.7	16.1
3.20	3.84	1.0	23
4.20	5.04	1.5	34.5
5.20	6.24	1.9	43.7
6.20	7.44	2.3	52.9
7.20	8.64	3.0	69.0
7.70	9.25	3.5	80.5
7.75	9.31	3.5	80.5
7.80	9.37	3.6	82.8
7.85	9.43	3.7	85.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.14 ผลการทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับรูปแบบที่ 2 ที่การทดสอบประมาณ 50%

การทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับที่กระแส : 10 A		รูปแบบที่ : 2	
$V_{A.C.} = 3.97 V_{L-L}$, $I_{A.C.} = 7.55 A$, $V_{D.C.} = 2.88 V$, $I_{A.D.C.} = 5.07 A$, $I_{B.D.C.} = 4.85 A$, $I_{C.D.C.} = 9.90 A$			
น้ำหนัก(kg)	แรงบิด (Nm)	มุมที่เปลี่ยนแปลงไป (องศา)	มุมทางไฟฟ้า(องศา)
0.20	0.24	0.0	0.0
0.70	0.84	0.1	2.3
1.20	1.44	0.2	4.6
1.70	2.04	0.3	6.9
2.20	2.64	0.5	11.5
2.70	3.24	0.7	16.1
3.20	3.84	0.9	20.7
3.70	4.44	1.0	23.0
4.20	5.05	1.3	29.9
4.70	5.65	1.4	32.2
5.20	6.25	1.6	36.8
5.70	6.85	1.8	41.4
6.20	7.45	1.9	43.7
6.70	8.05	2.0	46.0
7.20	8.65	2.5	57.5
7.70	9.25	2.8	64.4
7.95	9.55	3.1	71.3
8.00	9.61	3.3	75.9
8.05	9.67	3.5	80.5
8.10	9.73	3.5	80.5
8.15	9.79	3.6	82.8
8.20	9.85	3.8	87.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.15 ผลการทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับรูปแบบที่ 3 ที่การทดสอบประมาณ 50%

การทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับที่กระแส : 10 A		รูปแบบที่ : 3	
$V_{A.C.} = 4.63 V_{L-L}$, $I_{A.C.} = 7.75 A$, $V_{D.C.} = 3.60 V$, $I_{A.D.C.} = 4.30 A$, $I_{B.D.C.} = 10.15 A$, $I_{C.D.C.} = 5.16 A$			
น้ำหนัก(kg)	แรงบิด (Nm)	มุมที่เปลี่ยนแปลงไป (องศา)	มุมทางไฟฟ้า(องศา)
0.20	0.24	0.0	0.0
0.70	0.84	0.1	2.3
1.20	1.44	0.4	9.2
1.70	2.04	0.6	13.8
2.20	2.64	0.8	18.4
2.70	3.24	1.0	23.0
3.20	3.84	1.1	25.3
3.70	4.44	1.3	29.9
4.20	5.05	1.5	34.5
4.70	5.65	1.7	39.1
5.20	6.25	2.0	46.0
5.70	6.85	2.2	50.6
6.20	7.45	2.4	55.2
6.70	8.05	2.7	62.1
6.80	8.17	2.8	64.4
6.90	8.29	2.8	64.4
6.95	8.35	2.9	66.7
7.00	8.41	3.0	69.0
7.05	8.47	3.0	69.0
7.10	8.53	3.0	69.0
7.15	8.59	3.0	69.0
7.20	8.65	3.1	71.3
7.25	8.71	3.1	71.3
7.30	8.77	3.2	73.6
7.35	8.83	3.2	73.6
7.40	8.89	3.2	73.6
7.45	8.95	3.3	75.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำหนัก(kg)	แรงบิด (Nm)	มุมที่เปลี่ยนแปลงไป (องศา)	มุมทางไฟฟ้า(องศา)
7.50	9.01	3.4	78.2
7.55	9.07	3.5	80.5
7.60	9.13	3.5	80.5
7.65	9.19	3.6	82.8
7.70	9.25	3.8	87.4
7.75	9.31	3.9	89.7
7.80	9.37	4.0	92.0

ตารางที่ ข.16 ผลการทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับรูปแบบที่ 4 ที่การทดสอบประมาณ 50%

การทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับที่กระแส : 10 A		รูปแบบที่ : 4	
$V_{A.C.} = 4.52 V_{L-L}$, $I_{A.C.} = 6.94 A$, $V_{D.C.} = 3.59 V$, $I_{A.D.C.} = 9.96 A$, $I_{B.D.C.} = 4.80 A$, $I_{C.D.C.} = 4.59 A$			
น้ำหนัก(kg)	แรงบิด (Nm)	มุมที่เปลี่ยนแปลงไป (องศา)	มุมทางไฟฟ้า(องศา)
0.20	0.24	0.0	0.0
0.70	0.84	0.1	2.3
1.20	1.44	0.2	4.6
1.70	2.04	0.4	9.2
2.20	2.64	0.6	13.8
2.70	3.24	0.8	18.4
3.20	3.84	1.0	23
3.70	4.44	1.1	25.3
4.20	5.05	1.3	29.9
4.70	5.65	1.5	34.5
5.20	6.25	1.7	39.1
5.70	6.85	1.9	43.7
6.20	7.45	2.2	50.6
6.70	8.05	2.4	55.2
7.20	8.65	2.6	59.8
7.45	8.95	2.9	66.7
7.70	9.25	3.3	75.9
7.75	9.31	3.7	85.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำหนัก(kg)	แรงบิด (Nm)	มุมที่เปลี่ยนแปลงไป (องศา)	มุมทางไฟฟ้า(องศา)
7.80	9.37	3.9	89.7

ตารางที่ ข.17 ผลการทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับรูปแบบที่ 5 ที่การทดสอบประมาณ 50%

การทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับที่กระแส : 10 A			รูปแบบที่ : 5
$V_{A.C.} = 4.42$ V _{L-L} , $I_{A.C.} = 7.30$ A, $V_{D.C.} = 3.26$ V, $I_{A.D.C.} = 4.75$ A, $I_{B.D.C.} = 5.26$ A, $I_{C.D.C.} = 10.20$ A			
น้ำหนัก(kg)	แรงบิด (Nm)	มุมที่เปลี่ยนแปลงไป (องศา)	มุมทางไฟฟ้า(องศา)
0.20	0.24	0.0	0.0
1.20	1.44	0.4	9.2
2.20	2.64	0.6	13.8
3.20	3.84	1.1	25.3
4.20	5.05	1.2	27.6
4.70	5.65	1.5	34.5
5.20	6.25	1.7	39.1
5.70	6.85	1.8	41.4
6.20	7.45	2.0	46.0
6.70	8.05	2.4	55.2
7.20	8.65	2.7	62.1
7.30	8.77	2.8	64.4
7.40	8.89	2.9	66.7
7.50	9.01	3.0	69.0
7.60	9.13	3.1	71.3
7.70	9.25	3.1	71.3
7.80	9.37	3.2	73.6
7.90	9.49	3.2	73.6
8.00	9.61	3.2	73.6
8.10	9.73	3.4	78.2
8.20	9.85	3.4	78.2
8.25	9.91	3.4	78.2
8.30	9.97	3.6	82.8
8.35	10.03	3.6	82.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำหนัก(kg)	แรงบิด (Nm)	มุมที่เปลี่ยนแปลงไป (องศา)	มุมทางไฟฟ้า(องศา)
8.40	10.09	3.6	82.8
8.45	10.15	3.8	87.4
8.50	10.21	3.8	87.4
8.55	10.27	4.0	92.0

ตารางที่ ข.18 ผลการทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับรูปแบบที่ 6 ที่การทดสอบประมาณ 50%

การทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับที่กระแส : 10 A		รูปแบบที่ : 6	
$V_{A.C.} = 4.34 V_{L-L}$, $I_{A.C.} = 7.63 A$, $V_{D.C.} = 3.05 V$, $I_{A.D.C.} = 4.74 A$, $I_{B.D.C.} = 10.01 A$, $I_{C.D.C.} = 5.00 A$			
น้ำหนัก(kg)	แรงบิด (Nm)	มุมที่เปลี่ยนแปลงไป (องศา)	มุมทางไฟฟ้า(องศา)
0.20	0.24	0.0	0.0
1.20	1.44	0.2	4.6
2.20	2.64	0.5	11.5
3.20	3.84	0.8	18.4
4.20	5.05	1.2	27.6
5.20	6.25	1.6	36.8
6.20	7.45	1.9	43.7
7.20	8.65	2.4	55.2
7.45	8.95	2.6	59.8
7.70	9.25	2.7	62.1
7.95	9.55	2.9	66.7
8.20	9.85	3.1	71.3
8.25	9.91	3.1	71.3
8.30	9.97	3.2	73.6
8.35	10.03	3.2	73.6
8.40	10.09	3.4	78.2
8.45	10.15	3.4	78.2
8.50	10.21	3.6	82.8
8.55	10.27	3.6	82.8
8.60	10.33	3.8	87.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.19 ผลการทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับรูปแบบที่ 1 ที่การทดสอบประมาณ 75%

การทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับที่กระแส : 15 A		รูปแบบที่ : 1	
$V_{A.C.} = 5.61 V_{L-L}$, $I_{A.C.} = 10.97 A$, $V_{D.C.} = 4.49 V$, $I_{A.D.C.} = 14.7 A$, $I_{B.D.C.} = 7.40 A$, $I_{C.D.C.} = 7.19 A$			
น้ำหนัก(kg)	แรงบิด (Nm)	มุมที่เปลี่ยนแปลงไป (องศา)	มุมทางไฟฟ้า(องศา)
0.20	0.24	0.0	0.0
1.20	1.44	0.2	4.6
2.20	2.64	0.4	9.2
3.20	3.84	0.7	16.1
4.20	5.04	0.9	20.7
5.20	6.24	1.1	25.3
6.20	7.44	1.4	32.2
7.20	8.64	1.7	39.1
8.20	9.85	1.8	41.4
9.20	11.05	2.3	52.9
10.20	12.25	2.6	59.8
11.20	13.45	3.0	69.0
11.45	13.75	3.1	71.3
11.70	14.05	3.3	75.9
11.95	14.35	3.5	80.5
12.00	14.41	3.5	80.5
12.05	14.47	3.5	80.5
12.10	14.53	3.7	85.1
12.15	14.59	3.7	85.1
12.20	14.65	3.9	89.7

ตารางที่ ข.20 ผลการทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับรูปแบบที่ 2 ที่การทดสอบประมาณ 75%

การทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับที่กระแส : 15 A		รูปแบบที่ : 2	
$V_{A.C.} = 5.63 V_{L-L}$, $I_{A.C.} = 11.22 A$, $V_{D.C.} = 4.74 V$, $I_{A.D.C.} = 7.72 A$, $I_{B.D.C.} = 7.42 A$, $I_{C.D.C.} = 14.94 A$			
น้ำหนัก(kg)	แรงบิด (Nm)	มุมที่เปลี่ยนแปลงไป (องศา)	มุมทางไฟฟ้า(องศา)
0.20	0.24	0.0	0.0
1.20	1.44	0.2	4.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำหนัก(kg)	แรงบิด (Nm)	มุมที่เปลี่ยนแปลงไป (องศา)	มุมทางไฟฟ้า(องศา)
2.20	2.64	0.4	9.2
3.20	3.84	0.6	13.8
4.20	5.05	0.8	18.4
5.20	6.25	1.1	25.3
5.70	6.85	1.2	27.6
6.20	7.45	1.3	29.9
6.70	8.05	1.4	32.2
7.20	8.65	1.6	36.8
7.70	9.25	1.8	41.4
8.20	9.85	1.9	43.7
8.70	10.45	2.0	46.0
9.20	11.05	2.3	52.9
9.70	11.65	2.3	52.9
10.20	12.25	2.5	57.5
10.70	12.85	2.6	59.8
11.20	13.45	2.8	64.4
11.70	14.06	3.1	71.3
11.95	14.36	3.3	75.9
12.20	14.66	3.5	80.5
12.30	14.78	3.6	82.8
12.40	14.90	3.8	87.4
12.45	14.96	3.9	89.7
12.50	15.02	4.0	92.0
12.55	15.08	4.0	92.0

ตารางที่ ข.21 ผลการทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับรูปแบบที่ 3 ที่การทดสอบประมาณ 75%

การทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับที่กระแส : 15 A		รูปแบบที่ : 3	
$V_{AC} = 5.63 V_{L-L}$, $I_{AC} = 11.10 A$, $V_{DC} = 4.74 V$, $I_{A,DC} = 7.72 A$, $I_{B,DC} = 6.72 A$, $I_{C,DC} = 14.94 A$			
น้ำหนัก(kg)	แรงบิด (Nm)	มุมที่เปลี่ยนแปลงไป (องศา)	มุมทางไฟฟ้า(องศา)
0.20	0.24	0.0	0.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำหนัก(kg)	แรงบิด (Nm)	มุมที่เปลี่ยนแปลงไป (องศา)	มุมทางไฟฟ้า(องศา)
0.70	0.84	0.1	2.3
1.20	1.44	0.2	4.6
1.70	2.04	0.2	4.6
2.20	2.64	0.4	9.2
2.70	3.24	0.5	11.5
3.20	3.84	0.6	13.8
3.70	4.44	0.7	16.1
4.20	5.05	0.8	18.4
4.70	5.65	1.0	23.0
5.20	6.25	1.1	25.3
5.70	6.85	1.2	27.6
6.20	7.45	1.3	29.9
6.70	8.05	1.4	32.2
7.20	8.65	1.6	36.8
7.70	9.25	1.8	41.4
8.20	9.85	1.9	43.7
8.70	10.45	2.0	46.0
9.20	11.05	2.2	50.6
9.70	11.65	2.3	52.9
10.20	12.25	2.5	57.5
10.70	12.85	2.6	59.8
11.20	13.45	2.8	64.4
11.70	14.06	3.1	71.3
11.95	14.36	3.3	75.9
12.20	14.66	3.5	80.5
12.30	14.78	3.6	82.8
12.40	14.90	3.8	87.4
12.45	14.96	3.9	89.7
12.50	15.02	4.0	92.0
12.55	15.08	4.0	92.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.22 ผลการทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับรูปแบบที่ 4 ที่การทดสอบประมาณ 75%

การทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับที่กระแส : 15 A			รูปแบบที่ : 4
$V_{A.C.} = 5.89 V_{L-L}$, $I_{A.C.} = 10.92 A$, $V_{D.C.} = 5.48 V$, $I_{A.D.C.} = 14.97 A$, $I_{B.D.C.} = 7.47 A$, $I_{C.D.C.} = 7.52 A$			
น้ำหนัก(kg)	แรงบิด (Nm)	มุมที่เปลี่ยนแปลงไป (องศา)	มุมทางไฟฟ้า(องศา)
0.20	0.24	0.0	0.0
1.20	1.44	0.2	4.6
2.20	2.64	0.4	9.2
3.20	3.84	0.7	16.1
4.20	5.05	1.0	23.0
5.20	6.25	1.2	27.6
6.20	7.45	1.4	32.2
7.20	8.65	1.7	39.1
8.20	9.85	1.9	43.7
9.20	11.05	2.2	50.6
10.20	12.25	2.6	59.8
11.20	13.45	3.0	69.0
11.45	13.76	3.2	73.6
11.70	14.06	3.4	78.2
11.75	14.12	3.4	78.2
11.80	14.18	3.5	80.5
11.85	14.24	3.6	82.8
11.90	14.30	3.6	82.8
11.95	14.36	3.6	82.8
12.00	14.42	3.9	89.7
12.05	14.48	4.0	92.0

ตารางที่ ข.23 ผลการทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับรูปแบบที่ 5 ที่การทดสอบประมาณ 75%

การทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับที่กระแส : 15 A			รูปแบบที่ : 5
$V_{A.C.} = 6.20 V_{L-L}$, $I_{A.C.} = 11.2 A$, $V_{D.C.} = 5.07 V$, $I_{A.D.C.} = 7.47 A$, $I_{B.D.C.} = 7.63 A$, $I_{C.D.C.} = 15.02 A$			
น้ำหนัก(kg)	แรงบิด (Nm)	มุมที่เปลี่ยนแปลงไป (องศา)	มุมทางไฟฟ้า(องศา)
0.20	0.24	0.0	0.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำหนัก(kg)	แรงบิด (Nm)	มุมที่เปลี่ยนแปลงไป (องศา)	มุมทางไฟฟ้า(องศา)
1.20	1.44	0.2	4.6
2.20	2.64	0.4	9.2
3.20	3.84	0.7	16.1
4.20	5.05	0.9	20.7
5.20	6.25	1.1	25.3
6.20	7.45	1.4	32.2
7.20	8.65	1.6	36.8
8.20	9.85	1.9	43.7
9.20	11.05	2.2	50.6
10.20	12.25	2.7	62.1
11.20	13.45	3.2	73.6
11.45	13.76	3.4	78.2
11.70	14.06	3.6	82.8
11.80	14.18	3.7	85.1
11.90	14.30	3.8	87.4
11.95	14.36	4.1	94.3
12.00	14.42	4.1	94.3
12.05	14.48	4.1	94.3

ตารางที่ ข.24 ผลการทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับรูปแบบที่ 6 ที่การทดสอบประมาณ 75%

การทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับที่กระแส : 15 A		รูปแบบที่ : 6	
$V_{A.C.} = 5.87 V_{L-L}$, $I_{A.C.} = 11.25 A$, $V_{D.C.} = 4.96 V$, $I_{A.D.C.} = 7.51 A$, $I_{B.D.C.} = 15.00 A$, $I_{C.D.C.} = 7.52 A$			
น้ำหนัก(kg)	แรงบิด (Nm)	มุมที่เปลี่ยนแปลงไป (องศา)	มุมทางไฟฟ้า(องศา)
0.20	0.24	0.0	0.0
1.20	1.44	0.1	2.3
2.20	2.64	0.2	4.6
3.20	3.84	0.4	9.2
4.20	5.05	0.7	16.1
5.20	6.25	1.2	27.6
6.20	7.45	1.3	29.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำหนัก(kg)	แรงบิด (Nm)	มุมที่เปลี่ยนแปลงไป (องศา)	มุมทางไฟฟ้า(องศา)
7.20	8.65	1.5	34.5
8.20	9.85	1.7	39.1
9.20	11.05	2.0	46.0
10.20	12.25	2.3	52.9
11.20	13.45	2.8	64.4
11.70	14.06	3.1	71.3
11.95	14.36	3.2	73.6
12.00	14.42	3.3	75.9
12.05	14.48	3.3	75.9
12.10	14.54	3.4	78.2
12.15	14.60	3.4	78.2
12.20	14.66	3.5	80.5
12.25	14.72	3.6	82.8
12.30	14.78	3.7	85.1
12.35	14.84	3.8	87.4

ตารางที่ ข.25 ผลการทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับรูปแบบที่ 1 ที่การทดสอบประมาณ 100%

การทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับที่กระแส : 21 A		รูปแบบที่ : 1	
$V_{AC} = 8.29 V_{L-L}$, $I_{AC} = 15.1 A$, $V_{DC} = 7.88 V$, $I_{A.D.C.} = 21.3 A$, $I_{B.D.C.} = 10.17 A$, $I_{C.D.C.} = 10.17 A$			
น้ำหนัก(kg)	แรงบิด (Nm)	มุมที่เปลี่ยนแปลงไป (องศา)	มุมทางไฟฟ้า(องศา)
0.20	0.24	0.0	0.0
2.20	2.64	0.4	9.2
4.20	5.04	0.7	16.1
6.20	7.44	1.0	23.0
8.20	9.85	1.4	32.2
10.20	12.25	1.8	41.4
12.20	14.65	2.2	50.6
14.20	17.05	2.6	59.8
15.20	18.26	2.9	66.7
15.70	18.86	3.2	73.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำหนัก(kg)	แรงบิด (Nm)	มุมที่เปลี่ยนแปลงไป (องศา)	มุมทางไฟฟ้า(องศา)
16.20	19.46	3.4	78.2
16.45	19.76	3.5	80.5
16.50	19.82	3.6	82.8
16.55	19.88	3.6	82.8
16.60	19.94	3.6	82.8
16.65	20.00	3.7	85.1
16.70	20.06	3.8	87.4
16.75	20.12	3.9	89.7
16.80	20.18	4.0	92.0
16.85	20.24	4.0	92.0
16.90	20.30	4.1	94.3

ตารางที่ ข.26 ผลการทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับรูปแบบที่ 2 ที่การทดสอบประมาณ 100%

การทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับที่กระแส : 21 A		รูปแบบที่ : 2	
$V_{A.C.} = 8.17V_{L-L}$, $I_{A.C.} = 14.70A$, $V_{D.C.} = 7.70V$, $I_{A.D.C.} = 10.71A$, $I_{B.D.C.} = 10.37 A$, $I_{C.D.C.} = 21.09A$			
น้ำหนัก(kg)	แรงบิด (Nm)	มุมที่เปลี่ยนแปลงไป (องศา)	มุมทางไฟฟ้า(องศา)
0.20	0.24	0.0	0.0
2.20	2.64	0.3	6.9
4.20	5.04	0.7	16.1
6.20	7.44	0.9	20.7
8.20	9.85	1.3	29.9
10.20	12.25	1.7	39.1
12.20	14.65	2.3	52.9
14.20	17.05	2.8	64.4
15.20	18.26	2.9	66.7
15.70	18.86	3.2	73.6
16.20	19.46	3.5	80.5
16.45	19.76	3.7	85.1
16.50	19.82	3.7	85.1
16.55	19.88	3.8	87.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำหนัก(kg)	แรงบิด (Nm)	มุมที่เปลี่ยนแปลงไป (องศา)	มุมทางไฟฟ้า(องศา)
16.60	19.94	3.9	89.7
16.65	20.00	3.9	89.7

ตารางที่ ข.27 ผลการทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับรูปแบบที่ 3 ที่การทดสอบประมาณ 100%

การทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับที่กระแส : 21 A		รูปแบบที่ : 3	
$V_{A.C.} = 8.38 V_{L-L}$, $I_{A.C.} = 15.50 A$, $V_{D.C.} = 8.25 V$, $I_{A.D.C.} = 10.80 A$, $I_{B.D.C.} = 21.06 A$, $I_{C.D.C.} = 10.90 A$			
น้ำหนัก(kg)	แรงบิด (Nm)	มุมที่เปลี่ยนแปลงไป (องศา)	มุมทางไฟฟ้า(องศา)
0.20	0.24	0.0	0.0
2.20	2.64	0.3	6.9
4.20	5.04	0.7	16.1
6.20	7.44	1.0	23.0
8.20	9.85	1.4	32.2
10.20	12.25	1.7	39.1
12.20	14.65	2.1	48.3
14.20	17.05	2.6	59.8
15.20	18.26	2.8	64.4
16.20	19.46	3.5	80.5
16.45	19.76	3.7	85.1
16.50	19.82	3.8	87.4
16.55	19.88	3.9	89.7
16.60	19.94	3.9	89.7
16.65	20.00	3.9	89.7
16.70	20.06	3.9	89.7
16.75	20.12	3.9	89.7
16.80	20.18	3.9	89.7
16.85	20.24	3.9	89.7
16.90	20.30	3.9	89.7
16.95	20.36	3.9	89.7
17.00	20.42	3.9	89.7
17.05	20.48	3.9	89.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำหนัก(kg)	แรงบิด (Nm)	มุมที่เปลี่ยนแปลงไป (องศา)	มุมทางไฟฟ้า(องศา)
17.10	20.54	3.9	89.7

ตารางที่ ข.28 ผลการทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับรูปแบบที่ 4 ที่การทดสอบประมาณ 100%

การทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับที่กระแส : 21 A			รูปแบบที่ : 4
$V_{A.C.} = 8.20$ V _{L-L} , $I_{A.C.} = 15.30$ A, $V_{D.C.} = 8.03$ V, $I_{A.D.C.} = 21.03$ A, $I_{B.D.C.} = 10.49$ A, $I_{C.D.C.} = 10.79$ A			
น้ำหนัก(kg)	แรงบิด (Nm)	มุมที่เปลี่ยนแปลงไป (องศา)	มุมทางไฟฟ้า(องศา)
0.20	0.24	0.0	0.0
2.20	2.64	0.3	6.9
4.20	5.05	0.6	13.8
6.20	7.45	1.0	23.0
8.20	9.85	1.3	29.9
10.20	12.25	1.7	39.1
12.20	14.66	2.1	48.3
14.20	17.06	2.6	59.8
15.20	18.26	2.9	66.7
15.70	18.86	3.0	69.0
16.20	19.46	3.2	73.6
16.45	19.76	3.4	78.2
16.70	20.06	3.5	80.5
16.75	20.12	3.6	82.8
16.80	20.18	3.6	82.8
16.85	20.24	3.7	85.1
16.90	20.30	3.7	85.1
16.95	20.36	3.8	87.4
17.00	20.42	3.9	89.7
17.05	20.48	4.0	92.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.29 ผลการทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับรูปแบบที่ 5 ที่การทดสอบประมาณ 100%

การทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับที่กระแส : 21 A		รูปแบบที่ : 5	
$V_{A.C.} = 8.14 V_{L-L}$, $I_{A.C.} = 14.9 A$, $V_{D.C.} = 7.79 V$, $I_{A.D.C.} = 10.68 A$, $I_{B.D.C.} = 10.45 A$, $I_{C.D.C.} = 21.08 A$			
น้ำหนัก(kg)	แรงบิด (Nm)	มุมที่เปลี่ยนแปลงไป (องศา)	มุมทางไฟฟ้า(องศา)
0.20	0.24	0.0	0.0
2.20	2.64	0.4	9.2
4.20	5.05	0.7	16.1
6.20	7.45	1.1	25.3
8.20	9.85	1.5	34.5
10.20	12.25	1.8	41.4
12.20	14.66	2.2	50.6
14.20	17.06	2.7	62.1
15.20	18.26	3.0	69.0
15.70	18.86	3.2	73.6
16.20	19.46	3.4	78.2
16.45	19.76	3.5	80.5
16.70	20.06	3.6	82.8
16.75	20.12	3.6	82.8
16.80	20.18	3.7	85.1
16.85	20.24	3.7	85.1
16.90	20.30	3.8	87.4
16.95	20.36	3.8	87.4
17.00	20.42	3.8	87.4
17.05	20.48	3.9	89.7
17.10	20.54	3.9	89.7
17.15	20.60	4.0	92.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.30 ผลการทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับรูปแบบที่ 6 ที่การทดสอบประมาณ 100%

การทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับที่กระแส : 21 A		รูปแบบที่ : 6	
$V_{A.C.} = 8.34 V_{L-L}$, $I_{A.C.} = 15.1 A$, $V_{D.C.} = 8.00 V$, $I_{A.D.C.} = 10.49 A$, $I_{B.D.C.} = 21.05A$, $I_{C.D.C.} = 10.79A$			
น้ำหนัก(kg)	แรงบิด (Nm)	มุมที่เปลี่ยนแปลงไป (องศา)	มุมทางไฟฟ้า(องศา)
0.20	0.24	0.0	0.0
2.20	2.64	0.2	4.6
4.20	5.05	0.6	13.8
6.20	7.45	0.9	20.7
8.20	9.85	1.3	29.9
10.20	12.25	1.5	34.5
12.20	14.66	2.1	48.3
14.20	17.06	2.5	57.5
15.20	18.26	2.9	66.7
15.70	18.86	3.0	69.0
16.20	19.46	3.2	73.6
16.45	19.76	3.4	78.2
16.70	20.06	3.6	82.8
16.75	20.12	3.6	82.8
16.80	20.18	3.7	85.1
16.85	20.24	3.7	85.1
16.90	20.30	3.8	87.4
16.95	20.36	3.9	89.7
17.00	20.42	4.1	94.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ค
บทความทางวิชาการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษามอเตอร์แบบฮับที่ใช้สำหรับการขับเคลื่อนจักรยานไฟฟ้า

A Study of Hub Motor for Driving Electric Bicycle

วิรสรา ชื่นชมน้อย วิรภัทร สุขนรินทร์ สรชัย เบ้าทอง และ เอกสุวัชร รัชชณรงค์

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

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

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้นำเสนอการศึกษามอเตอร์แบบฮับพิกัด 1000 W ที่ใช้สำหรับขับเคลื่อนจักรยานไฟฟ้า โดยเริ่มต้นจะทำการศึกษาคู่มือของมอเตอร์แบบฮับ หลังจากนั้นได้ออกแบบและสร้างวงจรขับมอเตอร์แบบฮับเพื่อศึกษาทฤษฎีหลักการทำงานที่สำคัญ ได้แก่ สนามแม่เหล็กและทิศทางสนามแม่เหล็ก การเกิดสนามแม่เหล็กหมุน ความสัมพันธ์ระหว่างมุมทางกลกับมุมทางไฟฟ้า การทำงานของตัวตรวจจับสนามแม่เหล็ก สุดท้ายจะทำการออกแบบสร้างแท่นทดสอบเพื่อทดสอบสมรรถนะของมอเตอร์แบบฮับ โดยพิจารณา กระแสไฟฟ้า มุมของโรเตอร์ และแรงบิดทางกลที่พิกัดกำลังของมอเตอร์ที่แตกต่างกัน จากผลการทดสอบมอเตอร์แบบฮับ พบว่าจำนวนขั้วแม่เหล็กที่สเตเตอร์และโรเตอร์มีค่าเท่ากับ 46 ขั้ว และพบว่าค่าแรงบิดของมอเตอร์จะขึ้นอยู่กับกระแสที่จ่ายให้กับมุมโรเตอร์ที่เปลี่ยนไป โดยความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดของมอเตอร์แบบฮับกับมุมโรเตอร์จะเป็นฟังก์ชันไซน์

คำสำคัญ: มอเตอร์แบบฮับ, ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็ก

Abstract

This project presents a study of 1000 W Hub motor for driving electric bicycle. First of all, the structure of this Hub motor is investigated. Then, a 6 patterns Hub motor drive is designed and built to suitably study the main principle operations of Hub motor including magnetic field, magnetic field direction, cause of rotating magnetic field, the relationship between mechanical angle and electrical angle, and Hall sensor operation. Finally, the performance of Hub motor including motor current, rotor angle and mechanical torque at different input power is tested by the test stand. Based on the experimental results, the number of poles of this motor both in stator and rotor are 46 poles. In addition, it is founded that the motor torque strongly depends on the applied current and the rotor angle which the relationship between motor torque and rotor angle is a sinusoidal function.

Keyword: Hub motor, Hall sensor

1. บทนำ

ในปัจจุบันมอเตอร์ไฟฟ้าถูกพัฒนาและนำมาประยุกต์ใช้กับยานพาหนะต่างๆเช่น รถยนต์ รถจักรยานไฟฟ้า รถไฟฟ้า แทนการใช้น้ำมัน เนื่องจากการสันดาปของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิง เป็นปัญหาหลักที่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม รวมถึงราคาน้ำมันที่มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ จึงทำให้ยานพาหนะที่ขับเคลื่อนด้วยพลังงานไฟฟ้าเริ่มเป็นที่นิยมมากขึ้น ซึ่งมอเตอร์ไฟฟ้าที่ในปัจจุบันถูกให้ความสำคัญคือมอเตอร์แบบฮับ (Hub Motor) เป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน (Brushless DC Motor) ในโครงการนี้จึงขอเสนอการศึกษาโครงสร้างและหลักการทำงานของมอเตอร์แบบฮับ เพื่อทำความเข้าใจและใช้งานมอเตอร์แบบฮับได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ขอบเขตการดำเนินงาน

โครงการนี้เป็นการศึกษาโครงสร้างและหลักการทำงานของมอเตอร์แบบฮับเบื้องต้นจากมอเตอร์แบบฮับพิกัด 1000 W โดยออกแบบและสร้างวงจรขับมอเตอร์ เพื่อประกอบการศึกษาการทำงานของมอเตอร์แบบฮับ โดยพิจารณาจาก โครงสร้างจริงที่ได้ศึกษามาเบื้องต้น และออกแบบและสร้างแท่นทดสอบสมรรถนะของมอเตอร์แบบฮับ เพื่อใช้ในการทดสอบสมรรถนะของมอเตอร์แบบฮับ

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 โครงสร้างของมอเตอร์แบบฮับ

มอเตอร์แบบฮับเป็นมอเตอร์กระแสตรงที่ไม่มีแปรงถ่านและซีคอมมิวเตเตอร์ ถูกนำมาใช้ในจักรยานไฟฟ้า โดยมอเตอร์จะติดอยู่ที่ศูนย์กลางของล้อ หรือที่เรียกว่า ฮับ (Hub) โครงสร้างของมอเตอร์แบบฮับประกอบด้วยสามส่วนหลัก คือ ส่วนที่หมุนหรือโรเตอร์ มีแม่เหล็กถาวรกระจายสม่ำเสมอโดยรอบ ส่วนที่อยู่กึ่งที่หรือสเตเตอร์ ภายในประกอบด้วยขดลวดคัวร์มาเจอร์ และส่วนที่เป็นชุดตรวจจับสนามแม่เหล็ก

2.2 องศาทางไฟฟ้าและองศาทางกล

เมื่อโรเตอร์เคลื่อนที่เป็นระยะหนึ่งขั้ว (เป็นระยะขั้วแม่เหล็กถาวรหนึ่ง-คู่ที่โรเตอร์) จะเท่ากับเคลื่อนที่ครบ 360 องศาทางไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น องค์ทางไฟฟ้า = จำนวนคู่ขั้วของแม่เหล็ก x องค์ทางกล

$$\theta_c = \frac{P}{2} \theta_m \quad (1)$$

2.3 สนามแม่เหล็กหมุน

สนามแม่เหล็กหมุนที่สเตเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส เกิดจากการจ่ายไฟฟ้า กระแสสลับ 3 เฟส ให้กับขดลวด 3 ชุด คือ ชุด A, ชุด B และชุด C ที่หันอยู่ในร่องแกนเหล็กที่สเตเตอร์ โดยวางมุมห่างกัน 120 องศาไฟฟ้าซึ่งกันและกัน มีการต่อใช้งานได้ทั้งแบบสตาร์และเดลต้า นอกจากนี้ขดลวดทั้ง 3 ชุดจะมีคุณสมบัติทั้งขนาด ความต้านทาน และรีแอกแตนซ์ของขดลวดที่เหมือนกันทุกประการ ดังนั้น เมื่อจ่ายไฟให้กับขดลวดจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า และไหลในขดลวดทั้ง 3 ชุด ทำมุมห่างกัน 120 องศาไฟฟ้าเช่นเดียวกัน

2.4 ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็ก (Hall Sensor)

ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็ก (Hall sensor) ซึ่งทำงานโดยอาศัยหลักการของปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall effect) ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กเป็นวงจรรวมที่ทำให้เกิดความต่างศักย์ซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ผ่านในแนวตั้ง เมื่อนำตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กไปต่อกับโวลต์มิเตอร์ และนำไปวางใกล้บริเวณที่มีสนามแม่เหล็กจะทำให้ทราบค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กได้

2.5 วงจรขับมอเตอร์แบบฮับ

ในการศึกษามอเตอร์แบบฮับ จำเป็นต้องมีวงจรขับมอเตอร์ 6 รูปแบบ ซึ่งประกอบด้วยส่วนหลักๆ คือ ส่วนวงจรกำลัง ไอจีบีที (IGBT) และส่วนวงจรควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

IGBT เป็น อุปกรณ์ที่เกิดจากการนำส่วนที่ดีที่สุดของทรานซิสเตอร์สองชนิด คือ MOSFET โดยใช้ประโยชน์จากการมีค่า Input impedance และ Switching speeds ที่สูง กับ BJT โดยใช้ประโยชน์ของการมีค่าแรงดันอิมิตต์ที่ต่ำ เพื่อที่จะสร้างทรานซิสเตอร์รูปแบบใหม่ที่มีกระแสควบคุมได้ที่ Collector-Emitter สูง กับกระแสที่ต้องใช้ในการขับ Gate ที่ต่ำมาก กระแสที่ C-E สูงจะสามารถขับโหลดขนาดหนักได้ และกระแสที่ใช้ในการขับ Gate ต่ำทำให้ออกแบบวงจรภาค Gate driver จากสัญญาณ PWM ง่าย

ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) คืออุปกรณ์ควบคุมขนาดเล็ก มีความสามารถคล้ายคลึงกับคอมพิวเตอร์ ซึ่งรวมเอาซีพียู หน่วยความจำและพอร์ตเข้าไว้ในแผ่นเดียวกัน มีความสามารถในการประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย โดยการเขียนโปรแกรมคำสั่งเพื่อควบคุมการทำงานที่ขาอินพุตและเอาท์พุต ซึ่งนับว่าเป็นระบบที่สามารถประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายทั้งด้านอนาล็อกและดิจิทัล

2.6 การทดสอบภาระทางกล

หลักการทดสอบภาระทางกล ถ้า $n_s = 0$ rpm และแรงดึงในเส้นเชือกเท่ากันตลอดทั้งเส้นทำให้ได้ว่า

$$F = W = mg \quad (2)$$

โดย F คือ แรง, W คือ น้ำหนัก, m คือ มวลของลูกตุ้ม และ g คือ ความโน้มถ่วงพื้นผิว

แรงบิดหรือทอร์ก (τ) หรือ โมเมนต์ของแรง (Moment of force) คือ ความพยายามของแรงที่จะหมุนวัตถุรอบแกนหรือจุดหมุนหรือก็คือ โมเมนต์ของวัตถุที่เคลื่อนที่แบบหมุน มีหน่วย N.m เกิดจากผลคูณเชิงเวกเตอร์ของเวกเตอร์ตำแหน่ง r กับแรง F

$$\tau = r \times F \quad (3)$$

τ คือ ทอร์กของแรง หน่วยเป็น นิวตัน-เมตร

r คือ รัศมีการหมุนของวัตถุ หน่วยเป็นเมตร

F คือ แรงที่กระทำต่อวัตถุในทิศตั้งฉากกับรัศมีการหมุน หน่วยเป็นนิวตัน

ทำให้สามารถหาแรงบิดที่ขับภาระทางกล ได้จาก

$$\tau = r \times mg \quad (4)$$

3. การศึกษามอเตอร์แบบฮับ

อันดับแรกในการศึกษาโครงสร้างของมอเตอร์แบบฮับ ทำการจำลองการจ่ายกระแสแต่ละรูปแบบ ตามตารางที่ 1 เพื่อศึกษามอเตอร์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นที่สเตเตอร์ จากนั้นออกแบบวงจรเพื่อใช้ในการขับมอเตอร์แบบฮับ ซึ่งวงจรขับมอเตอร์ประกอบด้วยส่วนหลักๆ คือ ส่วนวงจรกำลัง ไอจีบีที (IGBT) และ ส่วน วงจร ควบคุม ด้วย ไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งเป็นวงจรขับแบบ 6 สวิตช์ ทำการทดสอบมุมของมอเตอร์แบบฮับ และทดสอบผลของตัวตรวจจับสนามแม่เหล็ก จากนั้นออกแบบและสร้างแทนทดสอบมอเตอร์แบบฮับ เพื่อทำการทดสอบสมรรถนะของมอเตอร์แบบฮับ โดยพิจารณา กระแสไฟฟ้า มุมของโรเตอร์ และแรงบิดทางกลที่ที่กักกำลังของมอเตอร์ที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 1 สัญญาณการจ่ายแรงดัน 6 รูปแบบสำหรับมอเตอร์แบบฮับ

Patterns	Phase A	Phase B	Phase C
1	$+V_a$	$-V_b$	$-V_c$
2	$+V_a$	$+V_b$	$-V_c$
3	$-V_a$	$+V_b$	$-V_c$
4	$-V_a$	$+V_b$	$+V_c$
5	$-V_a$	$-V_b$	$+V_c$
6	$+V_a$	$-V_b$	$+V_c$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ผลการศึกษามอเตอร์แบบฮับ

4.1 ผลการทดสอบวัดมุมทางกลของมอเตอร์แบบฮับ

มอเตอร์แบบฮับที่มี 46 ขั้วแม่เหล็กเมื่อทำงานครบ 1 รอบทางไฟฟ้า มอเตอร์จะหมุนไป 15.65217 องศาทางกล และเมื่อทำงานครบ 23 รอบทางไฟฟ้า มอเตอร์จะหมุนไป 360 องศาทางกลหรือ 1 รอบทางกล

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบวัดมุมทางกลของมอเตอร์แบบฮับ

รอบทางไฟฟ้า	รูปแบบ	มุมทางกล	มุมทางกลต่อรอบทางไฟฟ้า
1	1	2.5	15.5
	2	5.5	
	3	8	
	4	10.5	
	5	13	
	6	15.5	

4.2 ผลการทดสอบตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กของมอเตอร์แบบฮับ

แรงดันเอาต์พุตของตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กจะมีค่าอยู่ 2 ช่วงคือ ช่วงที่มีค่าประมาณ 0 V และค่าประมาณ 4.55 V ซึ่งจะแสดงให้เห็นว่าตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กที่มีในมอเตอร์แบบฮับเป็นแบบดิจิทัลและให้ค่าออกมาเป็น Low กับ High

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กของมอเตอร์แบบฮับ

รอบทางไฟฟ้า	รูปแบบ	แรงดันเอาต์พุตเฟส A	แรงดันเอาต์พุตเฟส B	แรงดันเอาต์พุตเฟส C
1	1	4.49	0.02	0
	2	4.56	4.56	0.01
	3	0.01	4.57	0.01
	4	0.01	4.55	4.57
	5	0.01	0.01	4.56
	6	4.57	0.01	4.57

4.3 ผลการทดสอบแรงบิดของมอเตอร์แบบฮับ

สำหรับมอเตอร์แบบฮับที่ได้นำมาทดสอบมีพิกัดกำลังขาออกเป็น 1000 W พิกัดแรงดัน 48 V ความเร็วรอบพิกัด 480 rpm จาก $P=VI$ จะได้กระแสพิกัดเป็น 20.83 A และจาก $P = T\omega$ โดย $\omega = (2\pi/60) n_r$ จะได้แรงบิดที่พิกัดเป็น 19.9045 N·m ซึ่งใกล้เคียงกับผลการทดสอบที่ 21 A ซึ่งมีค่าสูงสุดเฉลี่ยเป็น 20.3924 N·m

ตารางที่ 4 ตัวอย่างผลการทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับที่รูปแบบที่ 1

น้ำหนัก (kg)	แรงบิด (Nm)	มุมที่เปลี่ยนแปลงไป (องศา)	มุมทางไฟฟ้า (องศา)
0.20	0.2403	0.0	0.0
2.20	2.6429	0.4	9.2
4.20	5.0455	0.9	20.7
6.20	7.4482	1.4	32.2
8.20	9.8508	1.8	41.4
10.20	12.2534	2.6	59.8
11.70	14.0554	3.3	75.9
12.05	14.4758	3.5	80.5
12.15	14.5960	3.7	85.1
12.20	14.6560	3.9	89.7

5. สรุปผลการทดสอบ

จากการทดสอบมอเตอร์แบบฮับที่มีพิกัดกำลัง 1000 W พิกัดแรงดัน 48 V ความเร็วรอบพิกัด 480 rpm มีขั้วแม่เหล็กถาวรที่โรเตอร์ 46 ขั้วและมีตัวตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 ตัวติดอยู่ที่สเตเตอร์พบว่าการศึกษารโครงสร้างและจำลองการจ่ายแรงดัน 6 รูปแบบให้ขดลวดสเตเตอร์ จะเกิดขั้วแม่เหล็กที่สเตเตอร์ 46 ขั้วในทุกรูปแบบการจ่ายแรงดัน ซึ่งเป็นจำนวนที่เท่ากับขั้วแม่เหล็กที่โรเตอร์ และจากการทดสอบวัดมุมทางกลของมอเตอร์แบบฮับจะได้ว่าภาระของมอเตอร์แบบฮับจะหมุนไปเป็นมุมประมาณ 2.6 องศาทางกลต่อ 1 รูปแบบการจ่ายแรงดัน เมื่อจ่ายแรงดันครบ 6 รูปแบบจะถือเป็น 1 รอบทางไฟฟ้ามอเตอร์แบบฮับจะหมุนไปประมาณ 15.6 องศาทางกล และเมื่อจ่ายแรงดันครบ 23 รอบทางไฟฟ้า มอเตอร์แบบฮับจะหมุนครบ 1 รอบทางกลพอดี ซึ่งการหมุนของมอเตอร์แบบฮับนั้นเป็นไปตามทฤษฎีของสภาพทางกลและองศาทางไฟฟ้าของมอเตอร์ที่มี 46 ขั้วแม่เหล็ก สำหรับการทดสอบตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กของมอเตอร์แบบฮับพบว่าตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กทั้ง 3 ตัวที่สเตเตอร์จะทำหน้าที่ตรวจสอบสนามแม่เหล็กของขดลวดสเตเตอร์เฟสละ 1 ตัว โดยที่เมื่อขดลวดเฟสไหนมีการจ่ายแรงดันเป็นค่าบวก ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กของขดลวดเฟสนั้นจะให้ผลลัพธ์ออกมาเป็น High และเมื่อขดลวดเฟสไหนมีการจ่ายแรงดันเป็นค่าลบ ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กของขดลวดเฟสนั้นจะให้ผลลัพธ์ออกมาเป็น Low ซึ่งเราสามารถนำผลลัพธ์จากตัวตรวจสอบสนามแม่เหล็กไปใช้ในการควบคุมมอเตอร์แบบฮับได้ ส่วนในการทดสอบแรงบิดมอเตอร์แบบฮับพบว่าแรงบิดของมอเตอร์แบบฮับเมื่อเพิ่มภาระทางกลขึ้นเรื่อยๆ มุมที่เปลี่ยนไปของโรเตอร์จะเพิ่มขึ้นตามไปในลักษณะของฟังก์ชัน sine และแรงบิดของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอเตอร์แบบฮับจะเพิ่มขึ้นตามกระแสที่จ่ายให้มอเตอร์แบบฮับโดยที่ทั้ง 6 รูปแบบการจ่ายแรงดันให้มอเตอร์แบบฮับให้ผลการทดสอบแรงบิด เช่นเดียวกัน โดยให้แรงบิดสูงสุดที่ 21 A เฉลี่ยทั้ง 6 รูปแบบการจ่ายแรงดันเป็น 20.3924 N·m ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับเมื่อพิจารณาที่พิกัดของมอเตอร์แบบฮับที่หมุนที่ความเร็วพิกัด แรงดันพิกัด จะมีกระแส 20.83 A และแรงบิดที่พิกัดเป็น 19.9045 N·m แต่จะแตกต่างกันที่ในการทดสอบแรงบิดมอเตอร์ไม่หมุนทำให้กำลังที่มอเตอร์แบบฮับต้องการไม่ถึงกำลังพิกัด แรงดันที่จ่ายให้มอเตอร์แบบฮับในการทดสอบจึงมีค่าไม่ถึงค่าแรงดันพิกัด

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือจากหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งต้องขอขอบคุณ ดร. เปี่ยมภูมิ สฤกพลฤกษ์ อาจารย์ที่ปรึกษา และ รศ. พิชิต ล้ำของ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมขอขอบคุณ คุณเพชร กลั่นวิจิตร, คุณชาญปกรณ์ ณ นิโรจน์ ที่ๆ ประชุมโทในห้องปฏิบัติการ ที่ช่วยให้ข้อเสนอแนะ ข้อคิดเห็นในการปฏิบัติงาน

ขอขอบคุณเพื่อนๆ ในห้องปฏิบัติการทุกคน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง นาย วาทีต ฝั่งผาย ช่วยประดิษฐ์ชิ้นงาน เพื่อใช้ในการทดลองทำให้การทดลองเป็นไปได้อย่างสะดวกยิ่งขึ้น, นายสุรินทร์ แก้วผลึก ที่ช่วยทำการทดสอบในการทดสอบแรงบิดของมอเตอร์แบบฮับ, นาย พริษฐ์พงศ์ ทวีชัยยุทธ ที่ให้คำแนะนำในด้านภาษาอังกฤษที่ดีที่สุด

สุดท้ายนี้คณะผู้จัดทำ ขอกราบขอขอบคุณ บิดามารดา และครอบครัวซึ่งให้การสนับสนุนในด้านการเงินและให้กำลังใจ อีกทั้งเพื่อนๆ ที่ๆ น้องๆ ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านการจัดหาอุปกรณ์ต่างๆ ในการทำโครงการครั้งนี้จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

เอกสารอ้างอิง

- [1] พิชิต ล้ำของ, เครื่องจักรกลไฟฟ้า 1, กรุงเทพฯ, งานบริการการเรียนการสอน คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2553.
- [2] วิรัชชัย ชันเงิน, วุฒิปด ธาราธิธเรศรัฐ, อิเล็กทรอนิกส์กำลัง, พิมพ์ครั้งที่ 10, กรุงเทพฯ : สนพ. ห้างหุ้นส่วนจำกัด วี.เจ. พรินต์ติ้ง, 2553
- [3] B. Jayant Baliga, The IGBT Device: Physics, Design and Applications of the Insulated Gate Bipolar Transistor, 1st Ed., New York :William Andrew, 2015
- [4] Austin Hughes, William Drury, Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types and Applications, 4th Ed., UK :Newnes , 2013

- [5] T. J. E. MILLER, Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motor Drives, New York :Oxford University Press, 1989
- [6] William H. Hayt, Jr , Jack E. Kemmerly , Steven M. Durbin, Engineering Circuit Analysis, 8–th Ed., USA, 2012
- [7] Chang-liang Xia, Permanent Magnet Brushless DC Motor Drives and Controls, 1st Ed., USA :Wiley, 2012
- [8] R. Krishnan, Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives, 1st Ed., USA :CRC Press, 2017

ประวัติผู้เขียน



นางสาว วิสรา ชันชนมน้อย

เกิดวันที่ 12 ตุลาคม 2538

ระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนพระปฐมวิทยาลัย

ระดับปริญญาตรี วิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



นาย วีรภัทร ชุจนรินทร์

เกิดวันที่ 14 ตุลาคม 2538

ระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนพิษณุโลกพิทยาคม

ระดับปริญญาตรี วิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



นาย สรชญ เบ้าทอง

เกิดวันที่ 12 ตุลาคม 2538

ระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนมัธยมสาธิตมหาวิทยาลัยนเรศวร

ระดับปริญญาตรี วิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



นาย เอกสุวัชร รักษ์ชนเดช

เกิดวันที่ 7 มีนาคม 2539

ระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนบ้านฉางกาญจนกุลวิทยา

ระดับปริญญาตรี วิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน



นางสาว วริศรา ชื่นขมน้อย เกิดวันที่ 12 ตุลาคม 2538
 ระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนพระปฐมวิทยาลัย
 ระดับปริญญาตรี วิศวกรรมไฟฟ้า
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



นาย วีรภัทร สุขนรินทร์ เกิดวันที่ 14 ตุลาคม 2538
 ระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนพิษณุโลกพิทยาคม
 ระดับปริญญาตรี วิศวกรรมไฟฟ้า
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



นาย สรัญญ์ เบ้าทอง เกิดวันที่ 12 ตุลาคม 2538
 ระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนมัธยมสาธิตมหาวิทยาลัยนเรศวร
 ระดับปริญญาตรี วิศวกรรมไฟฟ้า
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



นาย เอกสุวัชร รักษะนเดช เกิดวันที่ 7 มีนาคม 2539
 ระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนบ้านฉางกาญจนกุลวิทยา
 ระดับปริญญาตรี วิศวกรรมไฟฟ้า
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้