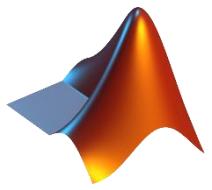


RMXplorer



LAB2 : DC Motor with WCS1700 Hall Current Sensor

Name

- นายกฤษณ์ ลีตระกูล 66340500002
- นายกิตติภานุ หลำพงษ์ 66340500004

จุดประสงค์

- สามารถอธิบายหลักการทำงานของ DC Motor และความสามารถของ Motor-Torque Constant และ Back-EMF Constant ของ DC motor ได้
- สามารถอธิบายความสัมพันธ์ของ Speed, Torque, Current, Power, %Efficiency ได้ เมื่อ Load Torque ที่กระทำต่อ DC Motor ผ่านการปรับ Load Torque ด้วย DC Motor เปลี่ยนแปลงไป และ แรงดันไฟฟ้า Input จากการปรับ Duty Cycle, Frequency ของ PWM ที่จ่ายเข้า DC Motor เปลี่ยนแปลงไป
- สามารถสามารถพิสูจน์ Motor Characteristic ที่หาได้จากใช้ Dynamic Torque Motor ในการทำให้เกิด Load ที่ต่างกัน
- สามารถอธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและความเร็วของ DC Motor
- สามารถอธิบายถึงความสัมพันธ์ของ Duty Cycle, Frequency, Speed, และ Current ทั้งในเงื่อนไขแบบ No Load และ Full Load
- สามารถอธิบายหลักการทำงาน H-Bridge Drive Mode ทั้ง 3 Mode ได้ (Sign-Magnitude, Locked Anti-Phase, Async Sign-Magnitude) และ ควบคุม DC Motor ได้ทั้ง 2 Mode (Sign-Magnitude, Locked Anti-Phase)
- สามารถอธิบายกระบวนการ Signal Conditioning, Signal Processing ทั้งหมดได้ตั้งแต่ต้นจนจบกระบวนการ ว่าค่าที่อ่านได้จาก Incremental Encoder, Hall Current Sensor มีที่มาอย่างไร อธิบายให้เห็นถึงวิธีคิดและขั้นตอนทั้งหมด ทั้งก่อนและ หลัง Calibrate Sensor หรือ วิธีจัดการข้อมูลที่ได้มา

จัดการอย่างไร รวมถึงหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์ใช้จริง กับแรงดันไฟฟ้าที่ออกมาจาก Hall Current Sensor และอธิบายกระบวนการ Unwrap ค่า

- สามารถเขียนโปรแกรมโดยประยุกต์ใช้ MATLAB และ Simulink ในการส่งการหรือรับค่า ร่วมกับบอร์ด Nucleo STM32G474RE โดยใช้สัญญาณจาก Incremental Encoder, Hall Current Sensor เป็น Input และแสดงสัญญาณ Output จากการ Log สัญญาณ และแสดงผลเป็นกราฟจาก Data Inspector ใน MATLAB Simulink และแสดงให้เห็นว่าสัญญาณ Output แปรผันตามสัญญาณ Input แบบ Real Time โดยมี Output เป็นความเร็วเฉลี่ม และกระแสไฟฟ้า ในหน่วย SI derived

การทดลองที่ 1 การทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมของ Brushed DC Motor และ Hall current Sensor

จุดประสงค์

- เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและพฤติกรรมของมอเตอร์
- เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และพฤติกรรมของมอเตอร์
- เพื่อศึกษาพฤติกรรมการทำงานของมอเตอร์ด้วยการควบคุมแบบ Sign Magnitude และ Lock-Anti Phase
- เพื่อศึกษาการควบคุมมอเตอร์ให้สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด

สมมติฐาน

- หากใช้งานมอเตอร์แบบ No-Load มอเตอร์จะมีความเร็วที่สูงที่สุดแล้วใช้กระแสไฟฟ้าน้อยที่สุดหรือไม่
- การปรับให้มี Dynamic Load ที่เท่ากับ Stall Torque ของมอเตอร์นั้น จะทำให้มอเตอร์หยุดหมุนได้หรือไม่
- เมื่อขณะที่ค่อยๆ ปรับ Dynamic Load ให้มีค่าเพิ่มขึ้น ผู้ทดลองจะเห็นได้ว่ามอเตอร์จะมีกระแสที่มากขึ้น ฉะนั้นความเร็วจะค่อยๆลดลงตามการเปลี่ยนแปลงของ Dynamic Load
- ความถี่ที่ต่างกันจะส่งผลต่อกระแสไฟฟ้าและความเร็วของมอเตอร์
- การควบคุมแบบ Sign Magnitude และ Lock-Anti Phase ให้ผลลัพธ์ที่ต่างกัน
- การเกิด Stall Torque จะส่งผลต่อกระแสไฟฟ้า

ตัวแปร

ตัวแปรต้น	Load, No Load และ Dynamic Load
ตัวแปรตาม	ความเร็ว และกระแสไฟฟ้า
ตัวแปรควบคุม	แรงดันไฟฟ้า และรูปแบบการควบคุม

นิยามศัพท์เฉพาะ

คำศัพท์	ความหมาย
คอมมิวเตอเรอร์ (Commutator)	เป็นอุปกรณ์กลไกที่ช่วยสับทิศทางกระแสไฟฟ้าในขดลวด เพื่อให้มอเตอร์หมุนอย่างต่อเนื่อง
ขดลวด (Winding)	ชุดลวดในมอเตอร์กระแสตรงแบบมีแปรงถ่านคือสายตัวนำที่พันรอบแกนเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า
Switching Loss	การสูญเสียพลังงานใน MOSFET หรือทรานซิสเตอร์ระหว่างการเปิด-ปิด
Load	แรงที่กระทำสวนทางกับที่มอเตอร์ทำงาน
Dynamic Load	Load ที่เปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาในระบบการทดลอง
MOSFET	เป็นทรานซิสเตอร์ที่ใช้ควบคุมกระแสไฟฟ้าในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ โดยมีการควบคุมการเปิด-ปิดผ่านแรงดันที่ขา Gate
bit	คือหน่วยข้อมูลที่เก็บที่สุดในระบบบิตติ้ล มีค่าได้เพียง 2 สถานะ คือ 0 หรือ 1

นิยามเชิงปฏิบัติการ

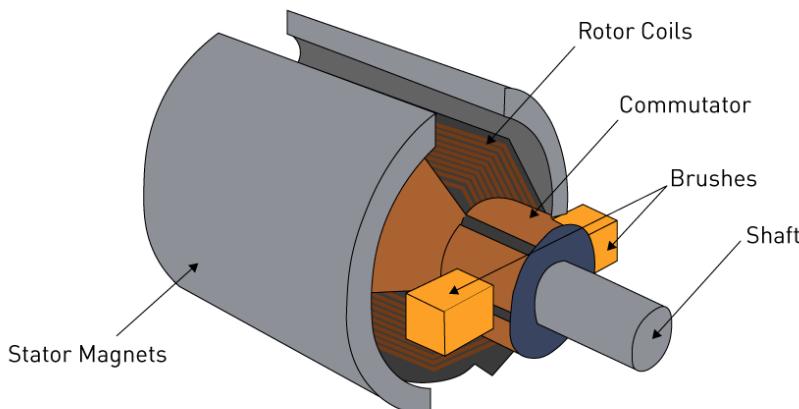
คำศัพท์	ความหมาย
Back EMF	คือ แรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Motor) หรือในกรณีนี้คือ Brushless DC Motor อันเนื่องมาจาก การหมุนของมอเตอร์ที่ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าในขดลวด
มอเตอร์ A	RS775 DC Brushed Motor
มอเตอร์ B	ZGA60FM DC Brushed Motor RS775-D60mm Gearhead

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. Brushed DC Motor

มอเตอร์กระแสตรงแบบมีแปรงถ่าน เป็นมอเตอร์ไฟฟ้าที่ทำงานด้วยไฟฟ้ากระแสตรง และใช้แปรงถ่านเพื่อส่งพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไปยัง Rotor ผ่าน Commutator ซึ่งช่วยในการสลับทิศทางของกระแสไฟฟ้าในชุดลวดเพื่อสร้างแรงบิดอย่างต่อเนื่อง โดย Brushed DC Motor มีส่วนประกอบดังนี้

- 1.1 โรเตอร์ (Rotor): เป็นส่วนที่หมุนของมอเตอร์ ประกอบด้วยชุดลวดทองแดงที่พันอยู่รอบแกนเพลา โดยกระแสไฟฟ้าไหลผ่านชุดลวดนี้เพื่อสร้างสนามแม่เหล็ก ทำให้เกิดแรงแม่เหล็กที่ทำให้โรเตอร์หมุน
- 1.2 สเตเตอร์ (Stator): เป็นส่วนที่อยู่กับที่ทำหน้าที่สร้างสนามแม่เหล็ก固定หัว rotor หรือสนามแม่เหล็กที่เกิดจากชุดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า โดยสนามแม่เหล็กนี้ทำปฏิกิริยากับสนามแม่เหล็กในโรเตอร์เพื่อสร้างแรงหมุน
- 1.3 คอมมูเตเตอร์ (Commutator): เป็นวงแหวนโลหะที่แบ่งเป็นหลายส่วนอยู่บนเพลาโรเตอร์ ทำหน้าที่เปลี่ยนทิศทางกระแสไฟฟ้าที่ไหลในชุดลวดโรเตอร์ เพื่อให้สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นเปลี่ยนทิศทาง และทำให้โรเตอร์หมุน
- 1.4 แปรงถ่าน (Brushes): ทำจากวัสดุที่นำไฟฟ้า เช่น Carbon หรือ Graphite ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมระหว่าง Commutator กับแหล่งจ่ายไฟ เมื่อมอเตอร์หมุน แปรงถ่านจะสัมผัสกับ Commutator เพื่อส่งกระแสไฟฟ้าไปยัง Rotor
- 1.5 เพลา (Shaft): เป็นแกนกลางของ Rotor ที่หมุนและถ่ายโอนแรงบิดไปยังอุปกรณ์อื่น เช่น เพื่องหรือใบพัด



รูปที่ 1 แสดงส่วนประกอบของ Brushed DC Motor

Brushed DC Motor	
ข้อดี	ข้อเสีย
สามารถควบคุมแรงบิดและความเร็วได้จ่ายด้วยการปรับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์	แปรรูปถ่านและคอมมิวเตเตอร์สึกหรอเมื่อใช้งานไปนานๆ ทำให้ต้องบำรุงรักษาอย่างสม่ำเสมอ
การออกแบบและผลิตไม่ซับซ้อน และมีต้นทุนต่ำ	เนื่องจากการสัมผัสระหว่างแปรรูปถ่านและ Commutator อาจเกิดประกายไฟและการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า
มีแรงบิดเริ่มต้นสูงเมื่อเปรียบเทียบกับมอเตอร์ประเภทอื่น	มีการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนจากแรงเสียดทานของแปรรูปถ่านและ Commutator
	เกิดเสียงจากการสัมผัสร่องแปรรูปถ่านและคอมมิวเตเตอร์

ตารางที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของ Brushed DC Motor

2. หลักการทำงานของ Brushed DC Motor

- กฎของฟาราเดีย (Faraday's Laws of Electromagnetic Induction) เป็นพื้นฐานของการสร้างแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำและแรงบิดที่ทำให้มอเตอร์หมุนได้อย่างต่อเนื่อง โดยมี 2 ข้อ ดังนี้

กฎข้อที่ 1 : “เมื่อสนามแม่เหล็กที่ผ่านพื้นที่วงบิดเปลี่ยนแปลง จะเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในวงจรนั้น”

กฎข้อที่ 2 : “แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในวงจรปิดจะมีค่าเท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านพื้นที่ของวงจรนั้น” ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

โดยที่

ε คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

Φ_B คือ พลักซ์แม่เหล็ก (Wb)

$\frac{d\Phi_B}{dt}$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กต่อเวลา

ขั้นตอนการทำงานของ Brushed DC Motor

- เมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเข้าสู่แปรรูปถ่าน กระแสไฟฟ้าจะถูกส่งไปยัง Commutator
- Commutator จะส่งกระแสไฟฟ้าไปยังชุดลวดของ Rotor
- กระแสไฟฟ้าที่ไหลในชุดลวดจะสร้างสนามแม่เหล็กใน Rotor สนามแม่เหล็กนี้จะทำปฏิกิริยากับสนามแม่เหล็กจาก Stator
- การผลัก-ดึงระหว่างสนามแม่เหล็กของ Rotor และ Stator จะสร้างแรงหมุน ทำให้ Rotor หมุน

2.5 เมื่อ Rotor หมุนผ่านตำแหน่งที่สนามแม่เหล็กเปลี่ยนทิศทาง Commutator จะสลับกระแสไฟฟ้าในขดลวดเพื่อให้ Rotor หมุนต่อไป

3. ความสัมพันธ์เชิงพลังงานในระบบของ Brushed DC Motor

มอเตอร์ เป็นอุปกรณ์ที่แปลงพลังงานรูปแบบหนึ่ง (ส่วนใหญ่เป็นพลังงานไฟฟ้า) ไปเป็น พลังงานกล เพื่อสร้าง แรง, แรงบิด, หรือ การเคลื่อนไหว ในลักษณะหมุนหรือเคลื่อนที่เชิงเส้น

3.1 การอนุรักษ์พลังงาน (ในอุดมคติ)

พลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์นั้นคำนวนได้จากการ

$$P_{electrical} = V \cdot I$$

โดยที่

$P_{electrical}$ คือ พลังงานไฟฟ้าที่จ่าย

V คือ แรงดันไฟฟ้า (v)

I คือ กระแสไฟฟ้า (A)

พลังงานกลที่ออกจากมอเตอร์นั้นคำนวนได้จากการ

$$P_{mechanical} = \tau \cdot \omega$$

โดยที่

$P_{mechanical}$ คือ พลังงานกลที่ผลิตได้

τ คือ แรงบิดที่เกิดจากมอเตอร์ (Nm)

ω คือ ความเร็วเชิงมุมของ Rotor (rad/s)

สมการพลังงานจากการอนุรักษ์พลังงาน

$$P_{electrical} = P_{mechanical}$$

โดยที่

$P_{electrical}$ คือ $V \cdot I$ (พลังงานไฟฟ้าที่จ่าย)

$P_{mechanical}$ คือ $\tau \cdot \omega$ (พลังงานกลที่ผลิตได้)

ดังนั้น

$$V \cdot I = \tau \cdot \omega$$

3.2 การอนุรักษ์พลังงาน (สถานการณ์จริง)

สำหรับมอเตอร์ในสถานการณ์จริง พลังงานที่ป้อนเข้าสู่ระบบไม่ได้ถูกแปลงทั้งหมดเป็นพลังงานกลที่ใช้งานได้ เนื่องจากมีการสูญเสียพลังงานในรูปแบบต่างๆ เช่น ความร้อน, แรงเสียดทาน, และการสูญเสียจากแม่เหล็ก

พลังงานที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$P_{input} = P_{mechanical} + P_{losses}$$

โดยที่

P_{input} คือ พลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้กับระบบ

$P_{mechanical}$ คือ พลังงานกลที่ผลิตได้

P_{losses} คือ พลังงานที่สูญเสียในระบบ

พลังงานที่สูญเสียในระบบ (P_{losses})

- การสูญเสียในขดลวด (Copper Loss): เกิดจากความต้านทานในขดลวด

สมการการหาค่า P_{copper}

$$P_{copper} = I^2 \cdot R$$

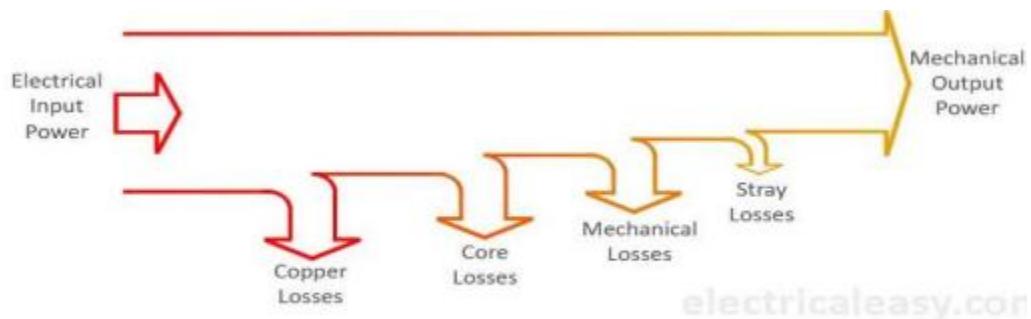
โดยที่

P_{copper} คือ การสูญเสียในขดลวด

I คือ กระแสไฟฟ้า

R คือ ความต้านทานของขดลวด

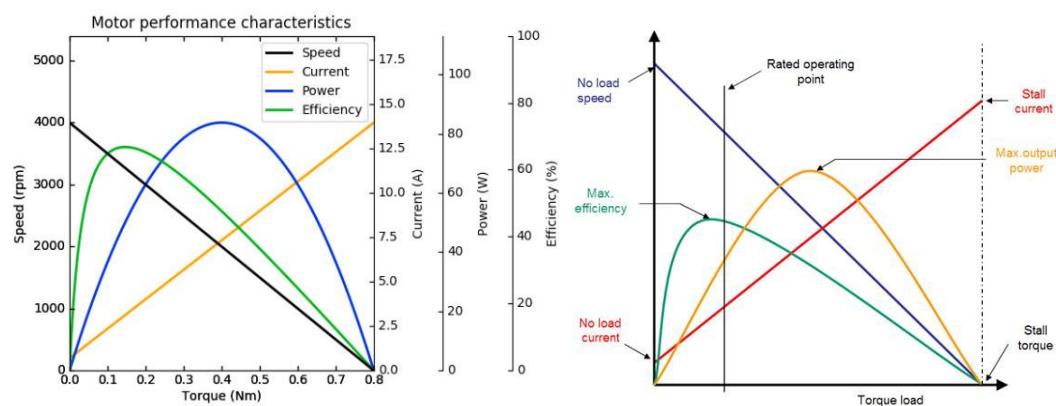
- การสูญเสียในแกนเหล็ก (Iron Loss): เกิดจาก Hysteresis Loss และ Eddy Current Loss ในแกนเหล็ก ซึ่งอยู่กับความถี่และความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก
- การสูญเสียจากแรงเสียดทานและการต้านลม (Friction and Windage Loss): เกิดจากแรงเสียดทานในเบริ่งหรือแรงต้านลมเมื่อโรเตอร์หมุน
- การสูญเสียเพิ่มเติม: เช่น การสูญเสียพลังงานในวงจรแปลงพลังงาน



Power flow diagram of a DC motor

รูปที่ 2 แสดงลำดับการสูญเสียพลังงานในระบบ

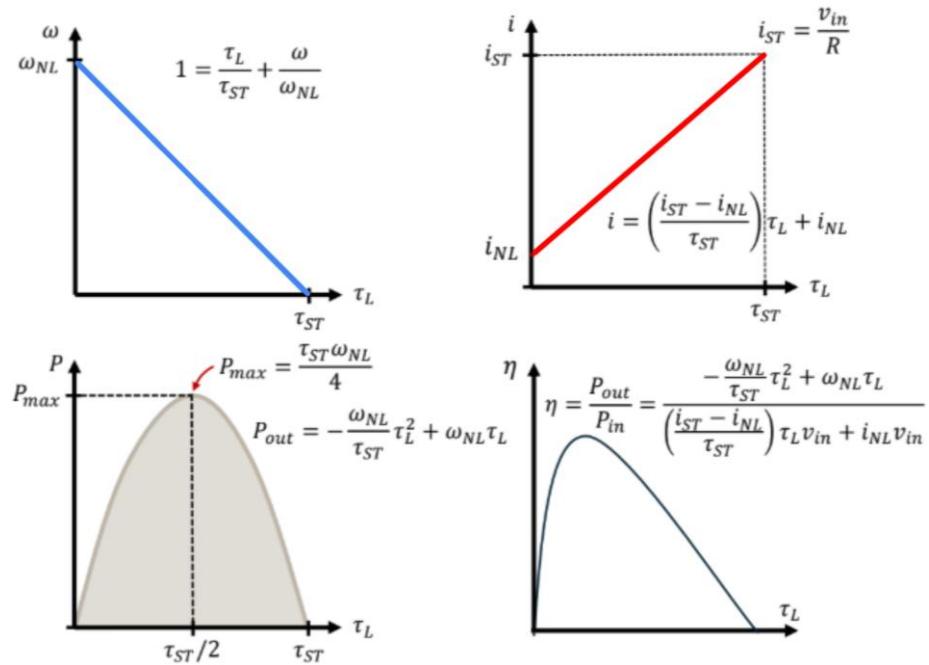
4. ลักษณะกราฟและข้อมูลจำเพาะของ Brushed DC Motor



รูปที่ 3 แสดงตัวอย่างกราฟความสามารถของ Brushed DC Motor

- Torque: ปริมาณแรงที่ทำให้เกิดการหมุนรอบแกนในระบบมอเตอร์ (Nm)
- Speed: หมายถึง ความเร็วการหมุนของ Rotor (RPM หรือ rad/s)
- Current: หมายถึง การไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านชุดลวดของมอเตอร์ (A)
- Power: หมายถึง กำลังไฟของมอเตอร์ (W)
- Efficiency: หมายถึง ประสิทธิภาพของมอเตอร์ DC (%)

โดยค่าเหล่านี้จะสามารถหาได้จากสมการดัง ต่อไปนี้



รูปที่ 4 แสดงสมการสำหรับการคำนวณหาลักษณะกราฟของมอเตอร์

5. ข้อมูลจำเพาะของ Brushed DC Motor

ข้อมูลจำเพาะของ Brushed DC Motor			
Operating Voltage	แรงดันไฟฟ้าที่มอเตอร์ใช้	Rated speed @12V	ความเร็วที่เหมาะสม
Recommended/Rated Voltage	แรงดันไฟฟ้าที่แนะนำ	Rated torque @12V	แรงบิดที่เหมาะสม
No-load current @12V	กระแสไฟฟ้าขณะที่ไม่มี Load	Rated power @12V	กำลังที่เหมาะสม
No-load speed @12V	ความเร็วขณะที่ไม่มี Load	Motor size	ขนาดมอเตอร์ (กว้าง x ยาว x สูง)
Stall current @12V	กระแสไฟฟ้าขณะที่เกิดแรงบิดสูงสุด	Shaft diameter	เส้นผ่านศูนย์กลางเพลา
Stall torque @12V	แรงบิดสูงสุดที่ทำให้มอเตอร์หยุดนิ่ง	Weight	น้ำหนัก

ตารางที่ 2 แสดงความหมายข้อมูลจำเพาะของ Brushed DC Motor



รูปที่ 5 แสดงตัวอย่าง Brushed DC Motor (Maxon RE40 12V 150 Watt No.148866)

ข้อมูลจำเพาะของ Maxon RE40 12V 150 Watt No.148866			
Operating Voltage	12 V	Rated speed @12V	6380 rpm
Recommended/Rated Voltage	12 V	Rated torque @12V	94.9 mNm
No-load current @12V	241 mA	Rated power @12V	150 W
No-load speed @12V	6920 rpm	Motor size	40 mm x 106.3 mm x 40 mm
Stall current @12V	105 A	Shaft diameter	6 mm
Stall torque @12V	1720 mNm	Weight	480 g

ตารางที่ 3 แสดงข้อมูลจำเพาะของ Brushed DC Motor (Maxon RE40 12V 150 Watt No.148866)

6. วงจรขับมอเตอร์ (Motor Driver)

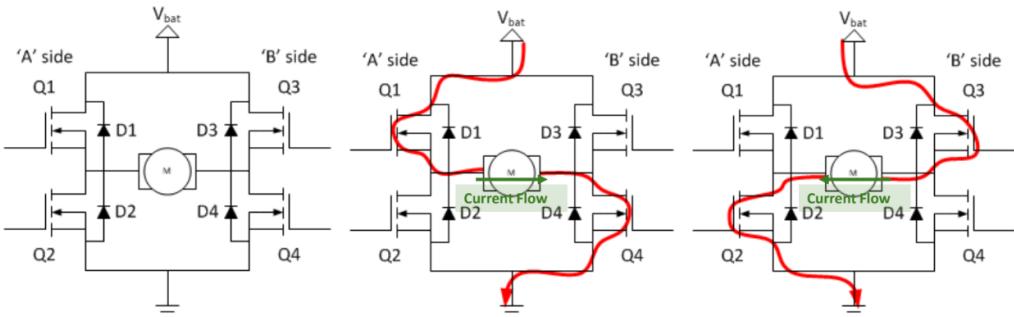
- H-Bridge Drive: คือ วงจรไฟฟ้าที่ใช้ควบคุมการหมุนของมอเตอร์กระแสตรง ทั้งในทิศทางเดินหน้าและถอยหลังโดยอาศัยการสลับทิศทางกระแสไฟฟ้าที่เหล่านมอเตอร์ วงจรนี้มักใช้ทรานซิสเตอร์หรือ MOSFET ทำงานโดยการเปิด-ปิดสวิตช์คู่ต่อตัวข้ามเพื่อควบคุมทิศทางกระแสไฟที่เหล่านมอเตอร์

○ Shoot-Through ใน H-Bridge Drive

Shoot-Through คือ สถานการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อสวิตช์คู่หนึ่งใน H-Bridge ซึ่งอยู่ในตำแหน่งเดียวกัน (เช่น Q1 และ Q2 หรือ Q3 และ Q4) เปิดพร้อมกัน ส่งผลให้กระแสไฟจากแหล่งจ่ายไฟหล่อผ่านสวิตช์ลงสู่กราวด์โดยตรง (short circuit) ซึ่งอาจทำให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ในวงจร เช่น MOSFET หรือทรานซิสเตอร์, แหล่งจ่ายไฟเสียหายหรือระบบหยุดทำงาน, เกิดความร้อนสูงในวงจร

○ การป้องกัน Shoot-Through ใน H-Bridge Drive

1. ตั้งเวลาให้สวิตช์ปิดก่อนเปิดตัวใหม่ (Dead-Time Insertion)
2. ติดตั้งไดโอดขนาดกับ MOSFET หรือทรานซิสเตอร์ เพื่อป้องกันแรงดันไฟฟ้ากระชาก (Flyback Diodes)



รูปที่ 6 แสดงตัวอย่าง H-Bridge Drive

- การควบคุมความเร็วด้วย PWM

เป็นเทคนิคที่ใช้ในการปรับความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้าโดยการเปลี่ยนความกว้างของสัญญาณพัลส์ที่จ่ายให้กับมอเตอร์ ทำงานโดยการสร้างสัญญาณดิจิทัลที่มีความถี่คงที่ และเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่างช่วงเวลาที่สัญญาณอยู่ในสถานะ "HIGH" และ "LOW" (เรียกว่า Duty Cycle) เพื่อปรับแรงดันเฉลี่ยที่มอเตอร์ได้รับ ซึ่งแรงดันนี้ส่งผลต่อความเร็วของมอเตอร์ ซึ่ง Duty Cycle สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\text{Duty Cycle} = \frac{T_{ON}}{T_{Period}} \times 100$$

โดยที่

T_{ON} คือ ช่วงเวลาที่สัญญาณเป็น HIGH

T_{Period} คือ คาบเวลารวมของสัญญาณ PWM

ตัวอย่าง

- Duty Cycle = 50% มอเตอร์ได้รับแรงดันเฉลี่ย 50% ของแรงดันเต็มที่
- Duty Cycle = 100% มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วสูงสุด

ความถี่ของ PWM (Pulse Width Modulation) มีผลต่อการทำงานของมอเตอร์และวงจรโดยรวมในหลายด้าน ทั้งความราบรื่นของการหมุน, ประสิทธิภาพ, เสียงรบกวน และการสูญเสียพลังงาน ดังนี้

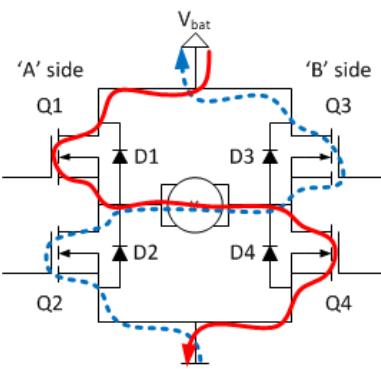
ผลกระทบจากช่วงความถี่ที่ต่างกัน		
ช่วงความถี่	ความถี่ต่ำ	ความถี่สูง
ความร้าบเรื่องของการ หมุนมอเตอร์	มอเตอร์อาจหมุนสะคุดหรือสั่น เนื่องจาก กระแสไฟฟ้าที่เข้าสู่คลาวด์ไม่เรียบ	กระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์ได้รับจะมีลักษณะใกล้เคียงกระแสคงที่มากขึ้น
เสียงรบกวน	มอเตอร์จะสร้างเสียงซึ่งเกิดจากการเปลี่ยน สถานะของสัญญาณ PWM	เสียงรบกวนลดลง เนื่องจากความถี่เกินขอบเขตการได้ยินของมนุษย์ ($>20\text{ kHz}$)
ประสิทธิภาพของ มอเตอร์	ขาดความมอเตอร์อาจไม่สามารถตอบสนองทัน กับการเปลี่ยนแปลงของ PWM	พลังงานถูกแปลงเป็นแรงบิดได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น
การสูญเสียในวงจรขับ มอเตอร์	Switching Loss ต่ำ	Switching Loss เพิ่มขึ้นตามความถี่ เนื่องจาก MOSFET หรือ ทรานซิสเตอร์ต้องทำงานเปิด-ปิดบ่อยขึ้น
การตอบสนองของ มอเตอร์	อาจหมายถึงโหลดที่ไม่ต้องการ การตอบสนองของ วงจรรีวิว เช่น พัดลมหรือปั๊ม	เหมาะสมสำหรับโหลดที่ต้องการ การตอบสนองเร็วและควบคุมได้ ละเอียด เช่น หุ่นยนต์หรือมอเตอร์ในระบบอัตโนมัติ

ตารางที่ 4 แสดงความแตกต่างของผลกระทบจากช่วงความถี่ที่ต่างกัน

7. โหมดการทำงาน (Motor Driver Drive Modes)

- Lock Anti-Phase

เป็นการควบคุมการทำงานและความเสถียรของมอเตอร์ ด้วยการควบคุมกระแสไฟฟ้าที่เข้าสู่มอเตอร์ในลักษณะ Anti-Phase หรือทิศทางตรงข้ามกัน ช่วยปรับการไหลของกระแสไฟฟ้าในแต่ละเฟสของมอเตอร์อย่างมีประสิทธิภาพ โดยทำให้การหมุนของมอเตอร์ราบรื่นและไม่สะດุด ในวงจร H-Bridge การควบคุมแบบ Anti-Phase สามารถทำได้โดยการเปิดสวิตซ์หนึ่งในแต่ละเฟสและปิดอีกเฟสหนึ่ง ในลักษณะสลับกัน ซึ่งจะช่วยป้องกันการลัดวงจรและเพิ่มความเสถียรในการทำงานของมอเตอร์ ซึ่งช่วยป้องกันปัญหาการย้อนกลับของพลังงาน (Back-EMF) และการเปิดสวิตซ์พร้อมกัน (Shoot-Through) ที่อาจก่อให้เกิดความเสียหาย



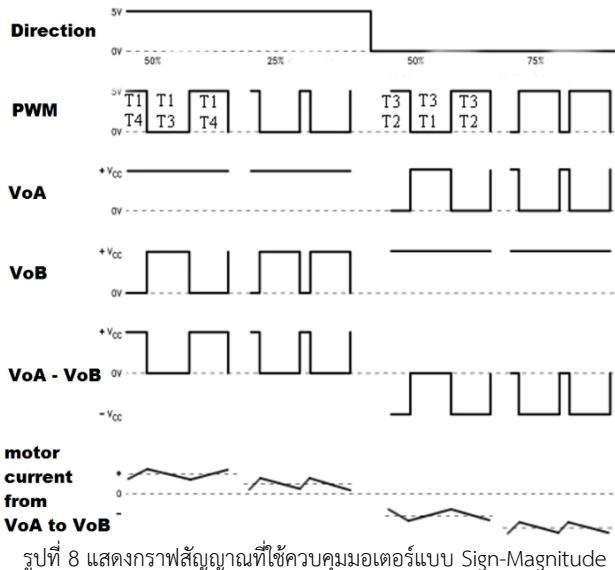
รูปที่ 7 แสดงลักษณะของโหมด Lock Anti-Phase

- Sign-Magnitude

เป็นวิธีการควบคุมความเร็วของมอเตอร์โดยใช้สัญญาณสองชั้นเพื่อบ่งบอกทิศทาง (Sign) โดย ใช้ bit หรือตัวบ่งชี้เพื่อตัดสินทิศทางของมอเตอร์ เช่น 0 สำหรับหมุนตามเข็มนาฬิกา และ 1 สำหรับหมุนวนเข็มนาฬิกา และระดับ (Magnitude) ใช้ตัวเลขหรือตัวบ่งชี้เพื่อบอกกรดับความเร็วของมอเตอร์ เช่น 0-255 สำหรับมอเตอร์ที่ควบคุมโดย PWM (Pulse Width Modulation) ในไมโครคอนโทรลเลอร์ ตัวเลขนี้ระบุความกว้างของสัญญาณพัลส์ PWM ซึ่งจะส่งผลต่อกระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์ได้รับ และส่งผลโดยตรงต่อความเร็วของมอเตอร์ของกระแสไฟฟ้าที่ส่งไปยังมอเตอร์

มอเตอร์จะได้รับกระแสไฟฟ้าที่มีความกว้างของพัลส์ (PWM Duty Cycle) และสลับข้ามทิศทางที่บ่งชี้โดย Sign เช่น PWM Duty Cycle = 30% ที่ Sign = 1 หมายถึงมอเตอร์หมุน

เร็วทวนเข็มนาฬิกา และ PWM Duty Cycle = 30% ที่ Sign = 0 หมายถึงมอเตอร์หมุนตามเข็มนาฬิกา



รูปที่ 8 แสดงกราฟสัญญาณที่ใช้ควบคุมมอเตอร์แบบ Sign-Magnitude

8. วัสดุและอุปกรณ์

8.1 Nucleo STM32G474RE

Nucleo STM32G474RE คือบอร์ดที่ใช้ในการออกแบบและพัฒนาไมโครคอนโทรลเลอร์ ที่ผลิตโดย STMicroelectronics ซึ่งเป็นบอร์ดที่ใช้โปรเซสเซอร์ ARM Cortex-M4 ที่รองรับการประมวลผลที่ซับซ้อน และเหมาะสมกับงานที่ต้องการการคำนวณอย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีหน่วยความทรงจำที่ประกอบไปด้วยแรมขนาด 128 KB และแฟลชเมมโมรีขนาด 512 KB รวมไปถึงพอร์ตต่าง ๆ อย่าง UART, I2C, SPI, CAN, USB และสามารถรองรับการเชื่อมต่อ กับอุปกรณ์ภายนอกได้ด้วยเช่นกัน



รูปที่ 9 แสดงภาพบอร์ด STM32 Nucleo-64 G474RE

8.2 ZGA60FM DC Brushed Motor RS775-D60mm Gearhead (มอเตอร์ B)

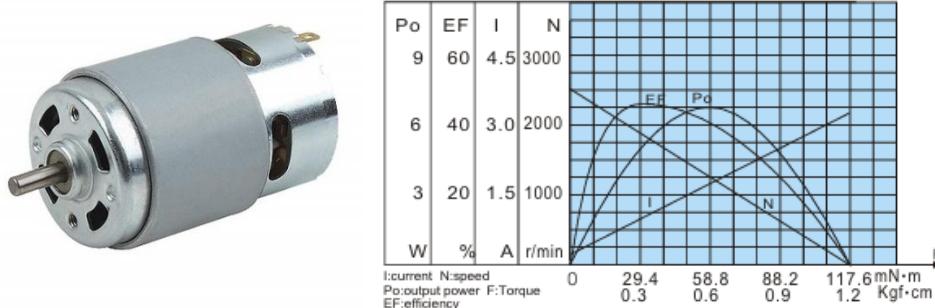


รูปที่ 10 แสดงมอเตอร์ ZGA60FM DC Brushed Motor RS775-D60mm Gearhead

ข้อมูลจำเพาะของ ZGA60FM DC Brushed Motor RS775-D60mm Gearhead			
Operating Voltage	6-20 V	Stall Current @12V	3.3 mA
Nominal Voltage	12 V	Rated Current @12V	2.31 A
No Load Current @12V	200 mA	Rated Speed @12V	42 rpm
No Load Speed @12V	60 rpm	Rated Torque @12V	18.75 Kg.cm

ตารางที่ 5 แสดงข้อมูลจำเพาะของ ZGA60FM DC Brushed Motor RS775-D60mm Gearhead

8.3 RS775 DC Brushed Motor (มอเตอร์ A)

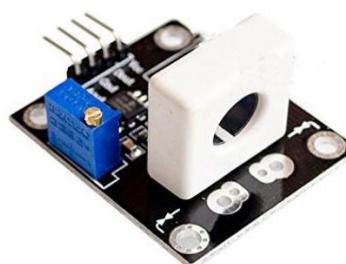


รูปที่ 11 แสดงมอเตอร์และกราฟของ RS775 DC Brushed Motor

ข้อมูลจำเพาะของ RS775 DC Brushed Motor			
Operating Voltage	6-20 v	Stall Current @12V	3.3 mA
Nominal Voltage	12 V	Rated Current @12V	0.9 mA
No Load Current @12V	200 mA	Rated Speed @12V	1,850 rev/min
No Load Speed @12V	2,500 rev/min	Rated Torque @12V	300 g/cm
Stall Torque @12V	1,200 g/cm	Rated Power @12V	5.6 W

ตารางที่ 6 แสดงข้อมูลจำเพาะของ RS775 DC Brushed Motor

8.4 WCS1700 Hall Current Sensor

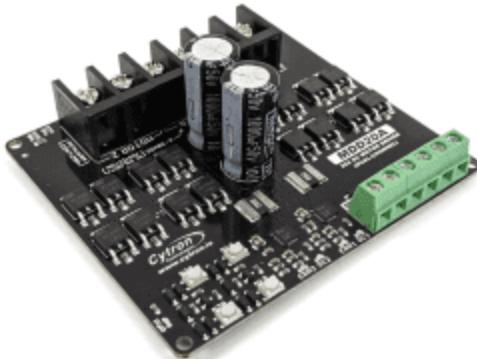


รูปที่ 12 แสดงภาพของ WCS1700 Hall Current Sensor

ข้อมูลจำเพาะของ WCS1700 Hall Current Sensor			
Current Measurement Range	± 70 A	Accuracy	$\pm 1\%$
Sensitivity	25 mV/A	Isolation Voltage	Up to 2000 V
Supply Voltage (Vcc)	$5 \text{ V} \pm 5\%$	Operating Temperature	-40°C to +85°C
Output Voltage Range	0 to 4.5 V	Overcurrent Capability	± 200 A
Response Time	<3 microsecond	Power Consumption	<20 mA
Bandwidth	DC to 200 kHz	Output Type	Analog Voltage

ตารางที่ 7 แสดงข้อมูลจำเพาะของ WCS1700 Hall Current Sensor

8.5 Cytron MDD20A Motor Driver



รูปที่ 13 แสดงภาพของ Cytron MDD20A Motor Driver

ข้อมูลจำเพาะของ Cytron MDD20A Motor Driver			
Input Voltage	6V to 27V DC	Control Mode	Sign-Magnitude, Lock Anti-Phase
Continuous Current	Up to 20A per channel	Reverse Polarity Protection	Yes
Peak Current	30A per channel	Overcurrent Protection	Yes
Control Voltage Logic Level	3.3V to 5V	Thermal Shutdown	Yes
PWM Frequency	Up to 20 kHz	Operating Temperature	-40°C to +85°C

ตารางที่ 8 แสดงข้อมูลจำเพาะของ Cytron MDD20A Motor Driver

8.6 Incremental Encoder AMT103-V



รูปที่ 14 แสดงภาพของ Incremental Encoder AMT103-V

ข้อมูลจำเพาะของ Incremental Encoder AMT103-V			
Output Format	Quadrature (A/B channels)	Current Consumption	10 mA
Resolution	Programmable: 48 to 2,048 pulses per revolution (PPR)	Index Signal	Z-channel (1 pulse per revolution)
Supply Voltage (Vcc)	3.3V to 5.5V	Operating Temperature	-40°C to +100°C
Output Voltage	TTL compatible	Mounting Options	Modular mounting system
Maximum Speed	10,000 RPM	Shaft Diameter Support	2mm to 8mm

ตารางที่ 9 แสดงข้อมูลจำเพาะของ Incremental Encoder AMT103-V

วิธีดำเนินการทดลอง

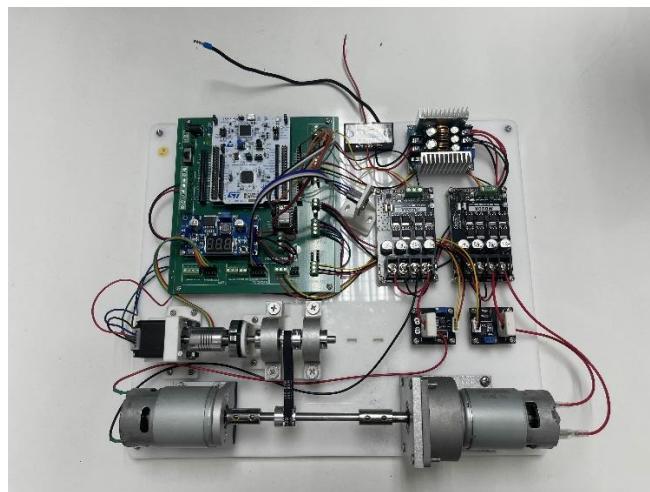
เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสงไฟฟ้าและพฤติกรรมของมอเตอร์ โดยวัดกระแสงไฟฟ้าที่เหลือเข้าสู่มอเตอร์ จากนั้นปรับค่ากระแสงทีละขั้นและบันทึกค่าความเร็วรอบ และแรงบิดที่วัดได้ โดยให้มอเตอร์หมุนเพื่อให้ค่าที่ติดกับเพลาของมอเตอร์เปิด Load cell เพื่อวัดแรงที่กดเพื่อสังเกตผลกระทบของกระแสงไฟฟ้าต่อพฤติกรรมของมอเตอร์ ต่อมาก็จะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์สร้างสัญญาณ PWM และปรับค่าความถี่ทีละระดับ (100 Hz, 1,000 Hz, 10,000 Hz, 100,000 Hz) และวัดค่าความเร็วและแรงบิดที่ความถี่ต่างๆ เพื่อนำผลลัพธ์มาวิเคราะห์ ในส่วนของการเปรียบเทียบการควบคุมแบบ Sign-Magnitude และ Lock Anti-Phase ตั้งค่าระบบควบคุมมอเตอร์ทั้งสองรูปแบบ โดยในหมวด Sign-Magnitude ควบคุมทิศทางและระดับความเร็วด้วยสัญญาณ PWM และ bit ทิศทาง ส่วนในหมวด Lock Anti-Phase ใช้สัญญาณ PWM ที่สร้างแรงดันตรงข้ามในชั้วทั้งสอง จากนั้นทดสอบพฤติกรรมมอเตอร์ในแต่ละหมวด บันทึกค่าความเร็ว แรงบิด ความเสถียร เพื่อนำมาเปรียบเทียบ

วัสดุและอุปกรณ์

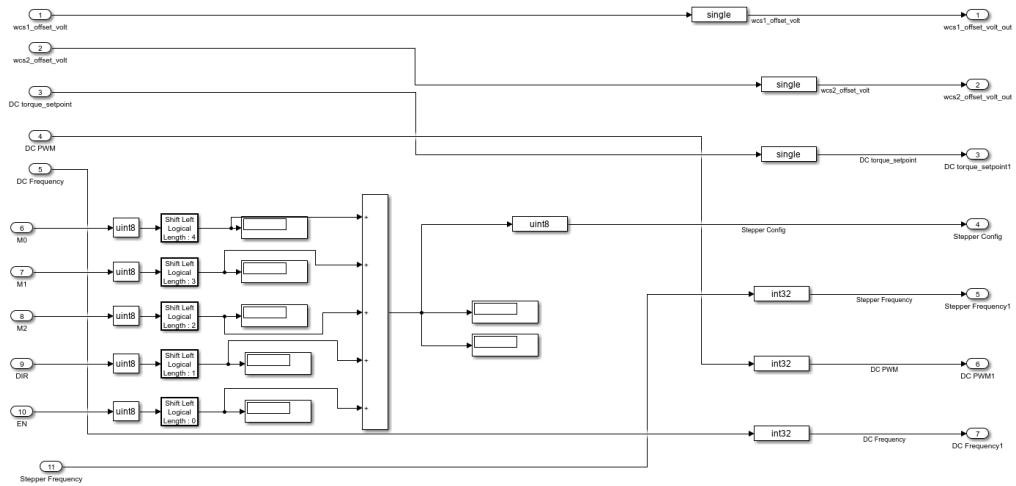
1. ZGA60FM DC Brushed Motor RS775-D60mm Gearhead 12 V จำนวน 1 อัน (มอเตอร์ B)
2. RS775 DC Brushed Motor จำนวน 1 อัน (มอเตอร์ A)
3. Incremental Encoder AMT103-V จำนวน 1 อัน
4. WCS1700 Hall Current Sensor จำนวน 1 อัน
5. Cytron MDD20A Motor Driver จำนวน 1 อัน
6. Nucleo STM32G474RE จำนวน 1 ชุด
7. MotorXplorer จำนวน 1 ชุด
8. LoadCellXplorer จำนวน 1 ชุด

ขั้นตอนการทดลองและผลการทดลอง

1. สั่งงานให้มอเตอร์ทำงานในโหมด Lock Anti-Phase และ Sign-Magnitude ด้วยความถี่ที่ 100 Hz, 1,000 Hz, 10,000 Hz, 100,000 Hz ตามลำดับ และเก็บค่า Duty Cycle ตั้งแต่ 0% - 100% จากการสั่งงานด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์, ความเร็วที่อ่านค่าจาก Incremental Encoder AMT103-V และกระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์ใช้อ่านค่าจาก WCS1700 Hall Current Sensor ผ่านโปรแกรม Simulink และ MATLAB

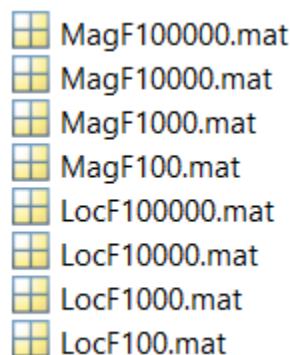


รูปที่ 15 แสดงภาพชุดการทดลองที่ใช้เก็บข้อมูลแบบ No Load

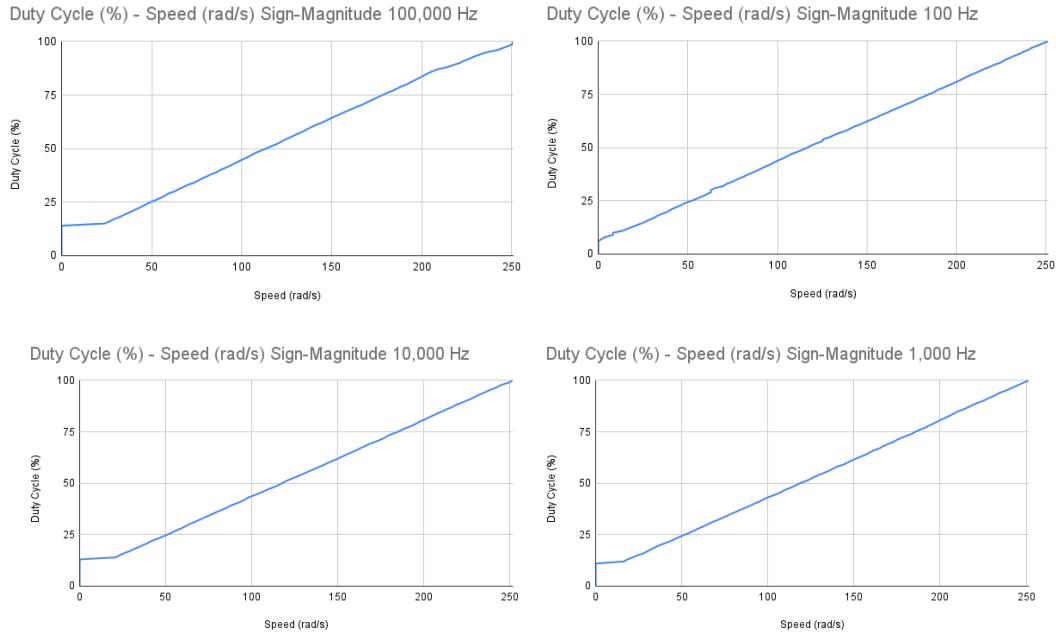


รูปที่ 16 แสดง Subsystem ภายในโปรแกรม SimuLink ที่ใช้ควบคุม Brushed DC Motor

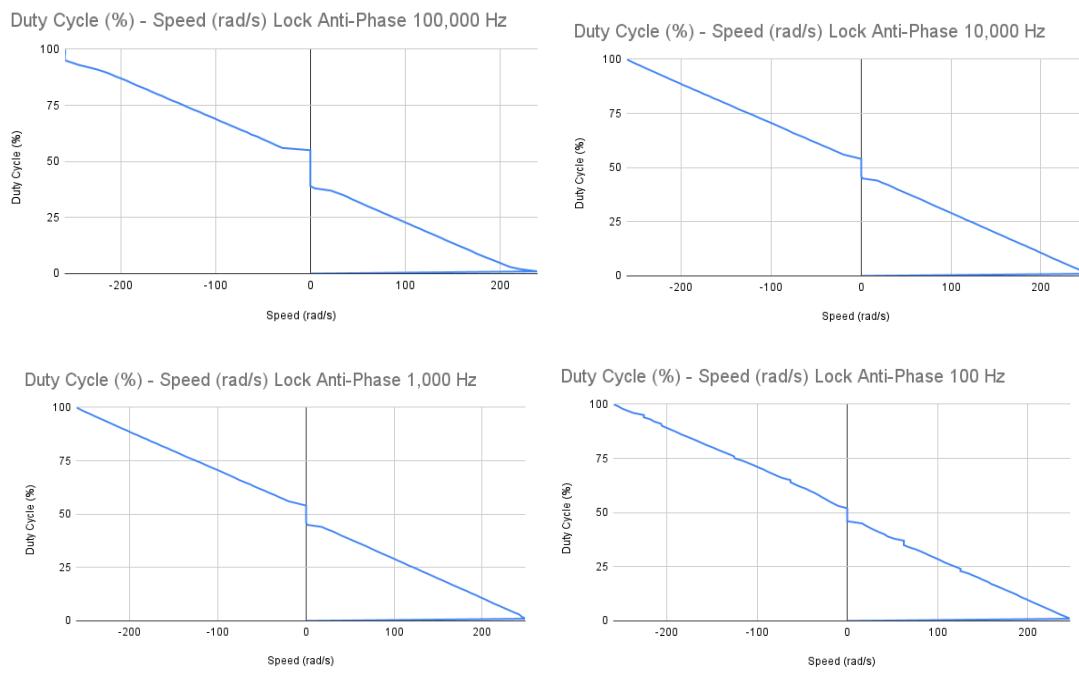
- โดยต่อมาผู้ทดลองเก็บค่าของความเร็วและกระแสไฟฟ้าด้วยการป้อนค่า Duty Cycle ตั้งแต่ 0%-100% แล้วนำไปสร้างกราฟเพื่อเปรียบเทียบแล้ววิจัยผลลัพธ์ดังนี้



รูปที่ 17 แสดงภาพผลข้อมูลที่เก็บค่ามาจากการทดลอง

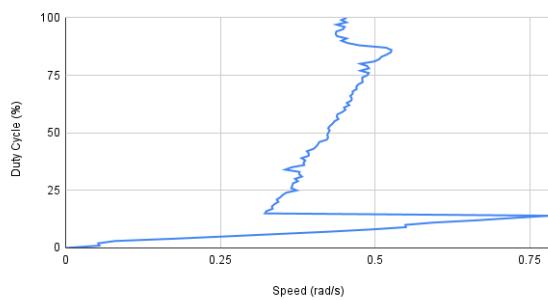


รูปที่ 18 แสดงกราฟความเร็วด้วยโหมด Sign Magnitude ที่ช่วงความถี่ต่างๆ

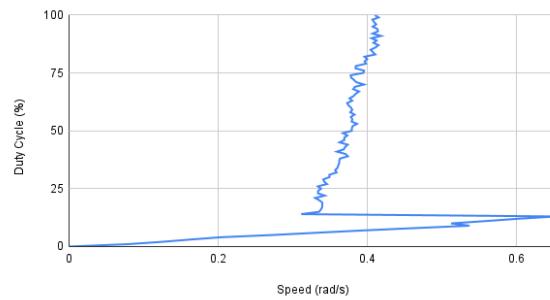


รูปที่ 19 แสดงกราฟความเร็วด้วยโหมด Lock Anti-Phase ที่ช่วงความถี่ต่างๆ

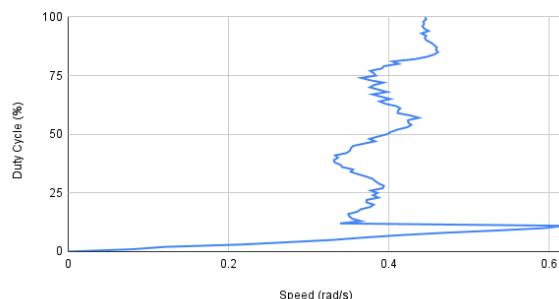
Duty Cycle (%) - Current (A) Sign-Magnitude 100,000 Hz



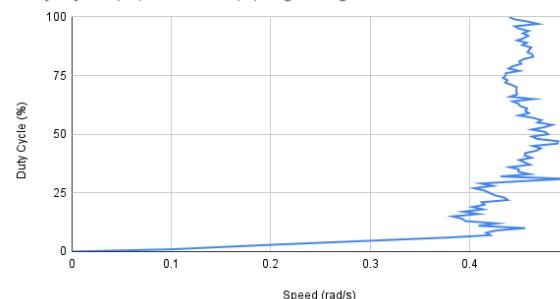
Duty Cycle (%) - Current (A) Sign-Magnitude 10,000 Hz



Duty Cycle (%) - Current (A) Sign-Magnitude 1,000 Hz

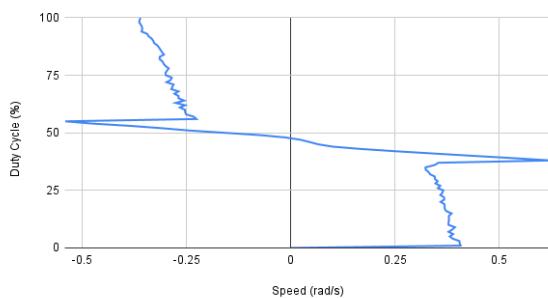


Duty Cycle (%) - Current (A) Sign-Magnitude 100 Hz

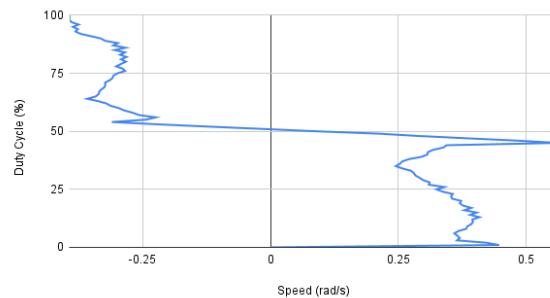


รูปที่ 20 แสดงกราฟกระแสไฟฟ้าด้วยโหนด Sign Magnitude ที่ช่วงความถี่ต่างๆ

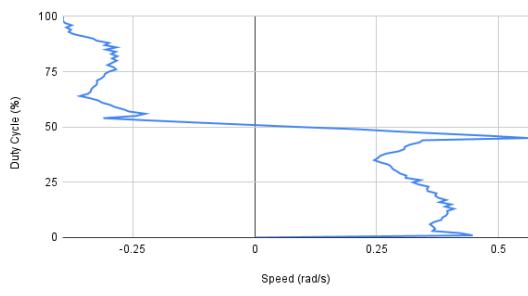
Duty Cycle (%) - Current (A) Lock Anti-Phase 100,000 Hz



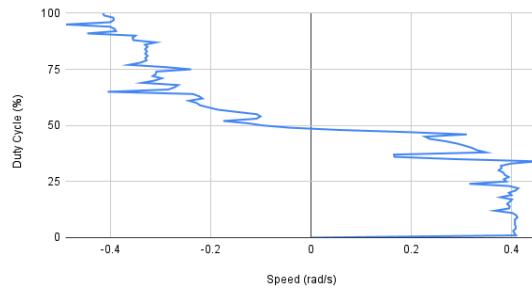
Duty Cycle (%) - Current (A) Lock Anti-Phase 10,000 Hz



Duty Cycle (%) - Current (A) Lock Anti-Phase 1,000 Hz



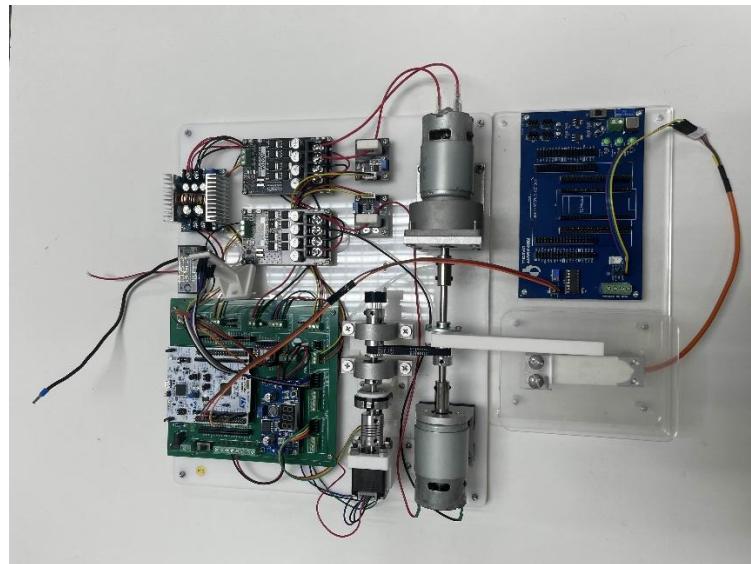
Duty Cycle (%) - Current (A) Lock Anti-Phase 100 Hz



รูปที่ 21 แสดงกราฟกระแสไฟฟ้าด้วยโหนด Lock Anti-Phase ที่ช่วงความถี่ต่างๆ

จากราฟจะเห็นได้ชัดเจนว่าการทำงานแบบ Sign Magnitude จะมีความเร็วและกระแสไฟฟ้าในทิศทางเดียวกันตลอดการป้อน Duty Cycle และในการทำงานแบบ Lock Anti-Phase จะพบว่าในช่วง Duty Cycle ประมาณ 0%-50 จะมีความเร็วและกระแสไฟฟ้าในทิศทางที่ตรงข้ามกับช่วง 50%-100% ซึ่งเป็นไปตามข้อมูลในเอกสารที่เกี่ยวข้อง

3. ผู้ทดลองสั่งงานมอเตอร์ด้วยโหมด Lock Anti-Phase ด้วย Duty Cycle 100% เพื่อเก็บค่าแบบ Dynamic Load ซึ่งสร้างโดยการสั่งงานให้มอเตอร์ B ให้สร้าง Dynamic Load ตั้งแต่ 0 Nm จนถึง 0.12 Nm เพราะเป็นแรงบิดสูงสุดที่มอเตอร์ A ทำได้ โดยเก็บค่าดังนี้ กระแสไฟฟ้า ความเร็วสูงสุดและแรงบิดสูงสุดที่เกิดขึ้นด้วยการหมุนให้ไปกดกับการทดลอง LoadCellXplorer ซึ่งผู้ทดลองเก็บค่าได้ดังนี้
 - No Load Speed @12V: 256.9 rad/s
 - No Load Current @12V: 0.4098 A
 - Stall Torque @12V: 0.12 Nm
 - Stall Current @12V: 5.433 A



รูปที่ 22 แสดงภาพชุดการทดลองที่ใช้เก็บข้อมูลแบบ Full Load

4. ต่อมาผู้ทดลองได้นำค่าที่วัดได้มาสร้างกราฟเพื่อศึกษาและเปรียบเทียบพฤติกรรมของ Brushed DC Motor ด้วยโปรแกรม MATLAB

5. คำนวณความสัมพันธ์ของความเร็วและแรงบิดที่เกิดขึ้นด้วยสมการต่อไปนี้ แล้วนำไปคำนวณและสร้าง

กราฟด้วยโปรแกรม MATLAB

$$1 = \frac{\tau_L}{\tau_{ST}} + \frac{\omega}{\omega_{NL}}$$

โดยที่

- τ_L คือ แรงบิดที่รับ Load ต่างๆ (Nm)
 τ_{ST} คือ แรงบิดที่รับ Full Load ต่างๆ (Nm)
 ω คือ ความเร็วเชิงมุมของ Rotor (rad/s)
 ω_{NL} คือ ความเร็วเชิงมุมของ Rotor ที่ No Load (rad/s)

```
%torque/speed
% Define torque values for plotting
t_l_values = linspace(0, t_st, 100); % Torque range from 0 to t_st

% Calculate speed for each torque value
w_values = w_nl * (1 - (t_l_values / t_st)); % Speed vs torque relationship

% Plot the torque-speed curve
figure;
hold on;
plot(t_l_values, w_values, 'b-', 'LineWidth', 2); % Torque-speed curve

% Add labels and title
xlabel('Torque [Nm]');
ylabel('Speed [rad/s]');
title('Torque-Speed Characteristic');
grid on;
```

รูปที่ 23 แสดงภาพโปรแกรมที่ใช้คำนวณความเร็วและสร้างกราฟความสัมพันธ์ของความเร็วและแรงบิด

6. คำนวณความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าและแรงบิดที่เกิดขึ้นด้วยสมการต่อไปนี้ แล้วนำไปคำนวณและสร้าง

กราฟด้วยโปรแกรม MATLAB

$$i = \left(\frac{i_{ST} - i_{NL}}{\tau_{ST}} \right) \tau_L + i_{NL}$$

โดยที่

- i คือ กระแสไฟฟ้า (A)
 i_{ST} คือ แรงบิดที่รับ Full Load ต่างๆ (Nm)
 i_{NL} คือ ความเร็วเชิงมุมของ Rotor (rad/s)
 τ_{ST} คือ แรงบิดที่รับ Full Load ต่างๆ (Nm)
 τ_L คือ แรงบิดที่รับ Load ต่างๆ (Nm)

```

% Define torque values for plotting
t_l_values = linspace(0, t_st, 100); % Torque range from 0 to t_st

% Calculate current for each torque value
i_values = ((i_st - i_nl) / t_st) * t_l_values + i_nl; % Torque-current relationship

% Plot the torque-current curve
figure;
plot(t_l_values, i_values, 'r-', 'LineWidth', 2); % Torque-current curve

% Add labels and title
xlabel('Torque [Nm]');
ylabel('Current [A]');
title('Torque-Current Characteristic');
grid on;

```

รูปที่ 24 แสดงภาพโปรแกรมที่ใช้คำนวณกระแสไฟฟ้าและสร้างกราฟความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าและแรงบิด

7. คำนวณความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าและแรงบิดที่เกิดขึ้นด้วยสมการต่อไปนี้ แล้วนำไปคำนวณและสร้างกราฟด้วยโปรแกรม MATLAB

$$P_{max} = \left(\frac{\tau_{ST}\omega_{NL}}{4} \right)$$

โดยที่

i คือ กระแสไฟฟ้า (A)

i_{ST} คือ แรงบิดที่รับ Full Load ต่างๆ (Nm)

i_{NL} คือ ความเร็วเฉิงมุมของ Rotor (rad/s)

τ_{ST} คือ แรงบิดที่รับ Full Load ต่างๆ (Nm)

τ_L คือ แรงบิดที่รับ Load ต่างๆ (Nm)

$$P_{out} = -\frac{\omega_{NL}}{\tau_{ST}}\tau_L^2 + \omega_{NL}\tau_L$$

โดยที่

ω_{NL} คือ ความเร็วเฉิงมุมของ Rotor ที่ No Load (rad/s)

τ_{ST} คือ แรงบิดที่รับ Full Load ต่างๆ (Nm)

τ_L คือ แรงบิดที่รับ Load ต่างๆ (Nm)

```
%power
% Define the range of t_st (stall torque) values for plotting
t_l_values = linspace(0, t_l, 100); % Stall torque range (avoid dividing by zero)

% Calculate p_out and p_max for each t_st
p_out_values = ((-w_nl / t_st)*power(t_l_values,2))+w_nl*t_l_values; % Linear equation for p_out
p_max_values = (t_st * w_nl) / 4; % p_max remains a reference

% Plot p_out and p_max
figure;
plot(t_l_values, p_out_values, 'g-', 'LineWidth', 2); % Linear curve for p_out
hold on;
plot(t_l_values, p_max_values, 'r--', 'LineWidth', 2); % Linear curve for p_max
grid on;
xlabel('Torque [Nm]');
ylabel('Power Output [W]');
title('Torque-Power Characteristic');
legend('p_{out}', 'p_{max}');
```

รูปที่ 25 แสดงภาพโปรแกรมที่ใช้คำนวณพลังงานและสร้างกราฟความสัมพันธ์ของพลังงานและแรงบิด

8. คำนวณความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพและแรงบิดที่เกิดขึ้นด้วยสมการต่อไปนี้ และนำไปคำนวณและสร้างกราฟด้วยโปรแกรม MATLAB

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{-\frac{\omega_{NL}}{\tau_{ST}} \tau_L^2 + \omega_{NL} \tau_L}{\left(\frac{i_{ST} - i_{NL}}{\tau_{ST}}\right) \tau_L V_{in} + i_{NL} V_{in}}$$

โดยที่

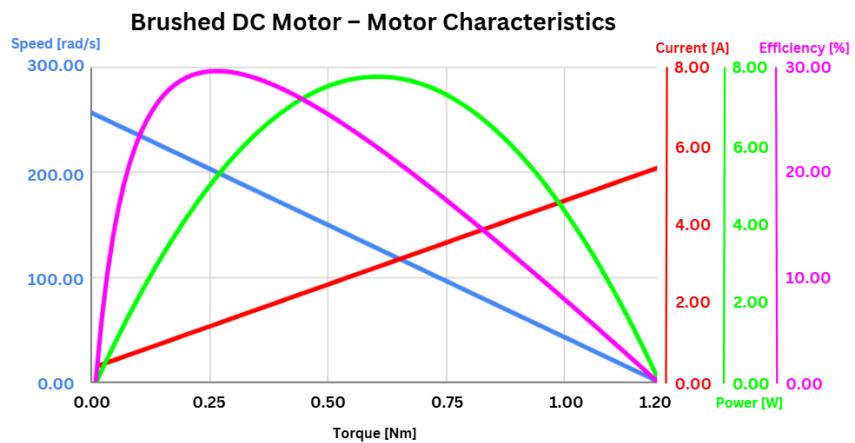
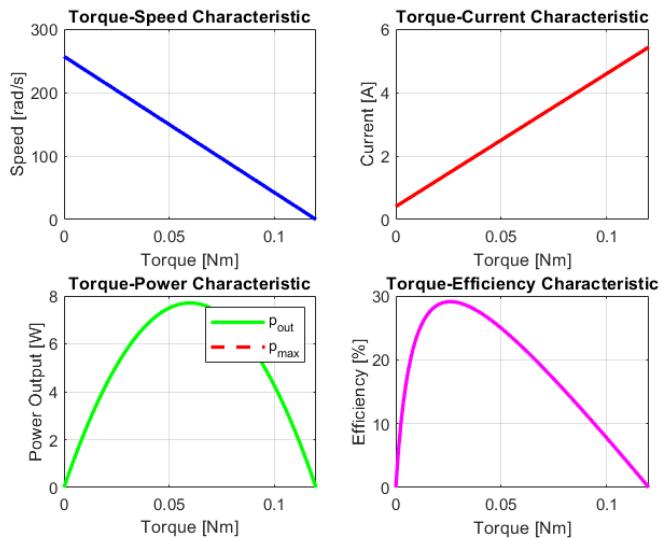
- V_{in} คือ แรงดันไฟฟ้าขาเข้า (V)
- ω_{NL} คือ ความเร็วเชิงมุมของ Rotor ที่ No Load (rad/s)
- i_{ST} คือ แรงบิดที่รับ Full Load ต่าทาง (Nm)
- i_{NL} คือ ความเร็วเชิงมุมของ Rotor (rad/s)
- τ_{ST} คือ แรงบิดที่รับ Full Load ต่าทาง (Nm)
- τ_L คือ แรงบิดที่รับ Load ต่าทาง (Nm)

```
%efficiency
% Calculate p_out and p_in
t_l_values = linspace(0, t_l, 100); % Stall torque range (avoid dividing by zero)
p_out_values = ((-w_nl / t_st) .* t_l_values.^2) + w_nl .* t_l_values; % Output power (W)
p_in_values = ((i_st - i_nl) / t_st) .* (t_l_values * v_in) + (i_nl * v_in); % Input power (W)

% Calculate efficiency for each value
eff = p_out_values ./ p_in_values; % Efficiency (as a fraction)

% Plot results
figure;
hold on;
plot(t_l_values, eff * 100, 'm-', 'LineWidth', 2); % Efficiency in percentage
grid on;
xlabel('Torque [Nm]');
ylabel('Efficiency [%]');
title('Torque-Efficiency Characteristic');
```

รูปที่ 26 แสดงภาพโปรแกรมที่ใช้คำนวณประสิทธิภาพและสร้างกราฟความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพและแรงบิด



รูปที่ 27 แสดงภาพกราฟความสัมพันธ์ของความเร็ว, กระแสไฟฟ้า, พลังงาน และประสิทธิภาพของมอเตอร์เบริ่งเทียบกับแรงบิด

สรุปผล

การทดลองการควบคุมมอเตอร์แบบ Sign-Magnitude และ Lock Anti-Phase

ความถี่ 100 Hz

- Sign Magnitude: มีความเร็วตอบไม่ราบรื่น เกิดการกระตุก เนื่องจากความถี่ต่ำทำให้มอเตอร์มีการตอบสนองแบบไม่ต่อเนื่องและมีเสียงรบกวนชัดเจนจากการสั่นสะเทือนของขดลวด
- Lock Anti-Phase: ความเร็วตอบมีความราบรื่นกว่า Sign-Magnitude ในระดับหนึ่ง แต่ยังคงมีการกระตุกเล็กน้อย มีเสียงรบกวนยังค่อนข้างชัดเจน แรงบิดมากขึ้นเล็กน้อยเนื่องจากการทำงานแบบสลับขั้วที่ต้องเนื่อง

ความถี่ 1,000 Hz

- Sign Magnitude: ความเร็วตอบราบรื่นขึ้น มีเสียงรบกวนลดลงเมื่อเทียบกับ 100 Hz แรงบิดเพิ่มขึ้น
- Lock Anti-Phase: ความเร็วตอบมีความเสถียรและราบรื่นมากกว่า 100 Hz แรงบิดมากขึ้น เสียงรบกวนลดลง

ความถี่ 10,000 Hz

- Sign Magnitude: ความเร็วตอบมีความราบรื่นและเสถียรมากขึ้น เสียงรบกวนลดลงจ แต่แรงบิดเหมาะสมสมสำหรับการใช้งานทั่วไป
- Lock Anti-Phase: ความเร็วตอบราบรื่นและเสถียรตีกว่า Sign-Magnitude แรงบิดตอบสนองได้ดีในสภาพแวดล้อมเปลี่ยนแปลง และเสียงรบกวนต่ำมาก

ความถี่ 100,000 Hz

- Sign-Magnitude: ความเร็วรอบและแรงบิดมีสเกลย์รูมาก เสียงรอบลดลง แต่มีความร้อนในมอเตอร์และวงจรขับ
- Lock Anti-Phase: ความเร็วและแรงบิดมีความเสถียรใกล้เคียงกับ Sign-Magnitude การตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของ Load ดีขึ้น และการสั่นสะเทือนของมอเตอร์ลดลง แต่มีความร้อนในมอเตอร์และวงจรขับ เช่นกัน

การทดลองศึกษาความสัมพันธ์และพฤติกรรมของมอเตอร์

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็ว

- เมื่อแรงบิดเพิ่มขึ้น ความเร็วรอบของมอเตอร์ลดลงในลักษณะของกราฟที่มีความสัมพันธ์ผกผัน
- ใน Load ที่ต่ำ มอเตอร์สามารถรักษาความเร็วสูงได้ แต่เมื่อเพิ่มแรงบิด ความเร็วลดลงอย่างชัดเจน
- มอเตอร์หยุดหมุนที่แรงบิดสูงสุด

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและกระแสไฟฟ้า

- กระแสไฟฟ้ามีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับแรงบิด
- กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของแรงบิด เนื่องจากแรงบิดที่สูงขึ้นทำให้มอเตอร์ต้องใช้กระแสไฟฟ้ามากยิ่งขึ้น
- การควบคุมแรงบิดสามารถทำได้โดยการควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและพลังงาน

- พลังงานที่ใช้เพิ่มขึ้นตามแรงบิดจนถึงจุดที่ความเร็วลดลง
- กราฟแสดงพลังงานสูงสุดในช่วงแรงบิดต่ำๆ กล่าวคือในช่วงแรงบิดต่ำๆ ความเร็วลดลงอย่างช้าๆ แต่เมื่อแรงบิดเพิ่มขึ้น ความเร็วจะลดลงอย่างรวดเร็ว
- แรงบิดสูงสุดที่สามารถผลิตได้โดยมอเตอร์จะขึ้นอยู่กับความสามารถของมอเตอร์

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและประสิทธิภาพ

- ประสิทธิภาพของมอเตอร์สูงสุดในช่วงแรงบิดปานกลางประมาณ 30%-40%
- ที่แรงบิดต่ำมาก มอเตอร์เสียพลังงานมากเพราะต้องใช้หนาแรงเสียดทานและการสูญเสียพลังงานในระบบ
- ที่แรงบิดสูงมาก ประสิทธิภาพลดลง เนื่องจากการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนและกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น

อภิรายผล

การทดลองการควบคุมมอเตอร์แบบ Sign-Magnitude และ Lock Anti-Phase

การทดลองเปรียบเทียบการควบคุมมอเตอร์แบบ Sign-Magnitude และ Lock Anti-Phase โดยใช้ความถี่ PWM ที่ต่างกัน ได้แก่ 100 Hz, 1,000 Hz, 10,000 Hz และ 100,000 Hz แสดงให้เห็นถึงผลกระทบที่ซัดเจนต่อพฤติกรรมของมอเตอร์ ความเร็ว แรงบิด ความราบรื่น และเสียงรบกวน สำหรับความถี่ 100 Hz พบร่วมกันว่า Sign-Magnitude ทำให้มอเตอร์มีความเร็วไม่ราบรื่น เกิดการกระตุก และเสียงรบกวนซัดเจน ขณะที่ Lock Anti-Phase ให้ความเร็วราบรื่นกว่าเล็กน้อยและแรงบิดดีขึ้นเนื่องจากการสลับขั้วแรงดันแบบต่อเนื่อง อย่างไรก็ตาม เสียงรบกวนยังคงมีอยู่ เมื่อเพิ่มความถี่เป็น 1,000 Hz ทั้งสองรูปแบบเริ่มแสดงความราบรื่นและลดเสียงรบกวนลง โดย Lock Anti-Phase ยังคงให้แรงบิดและการตอบสนองที่ดีกว่า สำหรับความถี่ 10,000 Hz มอเตอร์ทำงานได้อย่างราบรื่น เสียงรบกวนลดลง และแรงบิดตอบสนองได้ดีในทั้งสองรูปแบบ แต่ Lock Anti-Phase ให้การควบคุมแรงบิดที่ดีกว่าในกรณีที่ Load เปลี่ยนแปลง เมื่อใช้ความถี่สูงสุดที่ 100,000 Hz มอเตอร์มีความเร็วและแรงบิดเสถียรสูงสุด และเสียงรบกวนน้อย แต่ต้องระวังเรื่องความร้อนสะสมในมอเตอร์และวงจรขับเนื่องจากการสลับแรงดันด้วยความถี่สูง ทั้งนี้ Lock Anti-Phase ยังคงแสดงประสิทธิภาพดีกว่า Sign-Magnitude ในทุกช่วงความถี่ โดยเฉพาะในช่วงแรงบิดและความเสถียร การทดลองแสดงให้เห็นว่า การควบคุมด้วย Lock Anti-Phase เหมาะสำหรับงานที่ต้องการแรงบิดสูงและการตอบสนองต่อ Load ที่ดี ในขณะที่การใช้ความถี่ PWM สูงกว่า 10,000 Hz เหมาะสมสำหรับการลดเสียงรบกวนและเพิ่มความราบรื่นของมอเตอร์ แต่ต้องคำนึงถึงการจัดการความร้อนในระบบเพื่อลดความเสียหายที่อาจเกิดขึ้น

การทดลองศึกษาความสัมพันธ์และพฤติกรรมของมอเตอร์

การทดลองศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว กระแสไฟฟ้า พลังงาน และประสิทธิภาพของมอเตอร์เปรียบเทียบกับแรงบิด แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของมอเตอร์ภายใต้ Load ที่แตกต่างกัน โดยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วมีลักษณะผกผันอย่างชัดเจน เมื่อแรงบิดเพิ่มขึ้น ความเร็วของมอเตอร์ลดลงในลักษณะเชิงเส้นจนถึงจุดหยุดหมุน (Stall Torque) ซึ่งแสดงถึงแรงบิดสูงสุดที่มอเตอร์สามารถรองรับได้ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและกระแสไฟฟ้าพบว่าเป็นเชิงเส้นตรง กระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์ต้องการเพิ่มขึ้นตามแรงบิดที่สูงขึ้น เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กที่เพียงพอสำหรับการเจาะ茫茫แรงต้านของ Load ขณะที่กราฟแรงบิดกับพลังงานและประสิทธิภาพแสดงความสัมพันธ์เป็นเส้นโค้งรูประฆัง ค่าว่า โดยพลังงานและประสิทธิภาพสูงสุดจะอยู่ในช่วงแรงบิดปานกลาง และลดลงเมื่อแรงบิดสูงหรือใกล้จุดหยุดหมุน เนื่องจากพลังงานส่วนใหญ่สูญเสียไปในระบบ การทดลองนี้ทำให้เห็นว่า ช่วงแรงบิดปานกลางเป็นช่วงที่มอเตอร์สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยใช้ความเร็วที่เหมาะสม ใช้พลังงานคุ้มค่าที่สุด และมีการสูญเสียพลังงานน้อยที่สุด ทั้งนี้ การวิเคราะห์กราฟเหล่านี้ช่วยให้เข้าใจพฤติกรรมของมอเตอร์ได้ดีขึ้น และเป็นแนวทางสำคัญในการปรับแต่งระบบควบคุมมอเตอร์ให้เหมาะสมกับการใช้งานในสถานการณ์ต่างๆ

ข้อเสนอแนะ

ควรปรับใช้ความถี่ PWM ในช่วง 10,000 Hz ขึ้นไปเพื่อเพิ่มความราบรื่น ลดเสียงรบกวน และปรับปรุงการตอบสนองของมอเตอร์ อย่างไรก็ตาม หากใช้ความถี่สูงมาก เช่น 100,000 Hz จะเป็นต้องออกแบบวงจรที่สามารถจัดการความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

สำหรับการเลือกวิธีควบคุม 荷模 Lock Anti-Phase เหมาะสมกับงานที่ต้องการแรงบิดสูง ความเสถียร และการตอบสนองที่ดี ขณะที่ Sign-Magnitude เหมาะสมสำหรับงานที่ไม่ซับซ้อนและต้องการความง่ายในการออกแบบ วงจร นอกจากนี้ ควรทดสอบมอเตอร์ในช่วงแรงบิดปานกลาง เพราะเป็นช่วงที่มีประสิทธิภาพสูงสุด ลดการสูญเสียพลังงาน และเพิ่มความทนทานของมอเตอร์

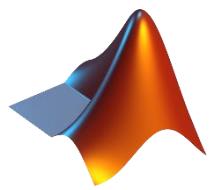
สร้างกราฟความสัมพันธ์เพิ่มเติม เช่น แรงดันไฟฟ้ากับความเร็ว หรือกระแสไฟฟ้ากับความร้อน เพื่อช่วยตรวจสอบการทำงานให้ละเอียดมากยิ่งขึ้น สำหรับการใช้งานจริง ควรเลือกวิธีการควบคุมและความถี่ PWM ให้เหมาะสมกับลักษณะงาน เช่น งานที่ต้องการความแม่นยำควรใช้ Lock Anti-Phase ร่วมกับความถี่ PWM สูง และในระบบที่ต้องการประสิทธิภาพพลังงานสูงควรออกแบบให้มอเตอร์ทำงานใกล้ช่วงประสิทธิภาพสูงสุด นอกจากนี้ การปรับปรุงการทดลองโดยเพิ่มการทดสอบในสภาวะ Dynamic Load และใช้เครื่องมือวัดที่แม่นยำยิ่งขึ้นจะช่วยให้ผลการทดลองสะท้อนพฤติกรรมของมอเตอร์ได้อย่างชัดเจนและนำไปสู่การพัฒนาระบบที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ในอนาคต

ปรับปรุงและติดตั้งชุดการทดลองให้แน่นหนาและมั่นคงมากยิ่งขึ้นเพื่อให้ค่าที่ได้จากการทดลองมีความแม่นยำและสร้างความน่าเชื่อถือให้กับผลการทดลองมากยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- <https://www.pcb-3d.com/wordpress/tutorials/what-is-a-h-bridge-sign-magnitude-and-locked-anti-phase-control-of-a-dc-motor/>
- <https://www.maxongroup.com/maxon/view/product/448590>
- <https://www.johnsonelectric.com/en/resources-for-engineers/dc-motors/dc-motors-performance>
- <https://ww2.mathworks.cn/matlabcentral/answers/67272-how-do-i-plot-parabolas-and-other-functions-in-matlab>
- https://www.handsontec.com/dataspecs/motor_fan/775-Motor.pdf
- https://roboeq.ir/files/id/3845/name/ZGB60FH-G%20_%20ZGA60FM-G.pdf/
- https://www.sanatbazar.com/components/com_jshopping/files/demo_products/RS775-datasheet.pdf
- <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/714468/WINSON/WCS1700.html0>
- https://docs.google.com/document/d/1YHKcs8N0UBrRI4r2OalqHs6m_B_NaVBF7EB5C3fPTG4/edit?tab=t.0
- https://th.mouser.com/datasheet/2/1628/amt10_v-3507795.pdf

RMXplorer



LAB2 : Stepper Motor

Name

- นายกฤษณ์ ลี้ทะภูต 66340500002
- นายกิตติภณ หลำพงษ์ 66340500004

จุดประสงค์

- นักศึกษาต้องสามารถอธิบายหลักการทำงานของ Stepper Motor ได้
- นักศึกษาต้องสามารถอธิบายความสัมพันธ์ของ Speed เมื่อ Frequency ของสัญญาณที่จ่ายเข้า Stepper Motor เปลี่ยนแปลงไป
- นักศึกษาต้องสามารถอธิบายหลักการทำงานของรูปแบบการ Drive แบบ Full-Step, Half-Step และ Micro-Step ได้ว่าส่งผลต่อการควบคุมความเร็วและตำแหน่งของ Stepper Motor อย่างไร

การทดลองที่ 1 การทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมของ Stepper Motor

จุดประสงค์

- เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และความเร็ว
- เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และพฤติกรรมของมอเตอร์
- เพื่อศึกษาการควบคุมมอเตอร์ให้สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด

สมมติฐาน

- การปรับความถี่ที่สูง ๆ ของในแต่ละโหมดการทำงานที่แตกต่างกัน จะทำให้เกิด Loss step ของความถี่ ณ ตำแหน่งที่แตกต่างกัน
- การปรับความถี่ที่เท่ากันทุกโหมดการทำงานจะพบความเร็วในการทำงานของ Stepper Motor ไม่เท่ากัน

- การปรับความถี่ที่มาก ๆ โดยเพิ่มแบบก้าวกระโดดนั้นมีผลต่อการเกิด Loss step

ตัวแปร

ตัวแปรต้น	ความถี่, โหมดการทำงาน
ตัวแปรตาม	ความเร็ว
ตัวแปรควบคุม	ทิศทางการหมุน, โครงในการยึดของมอเตอร์

นิยามศัพท์เฉพาะ

คำศัพท์	ความหมาย
Torque	คือ แรงที่ทำให้เกิดการหมุนรอบจุดหมุนหรือแกนหมุน
Pulse	คือ ลักษณะของสัญญาณที่เป็นสี่เหลี่ยม
Load	คือ น้ำหนักของวัตถุ
Magnet	คือ แม่เหล็ก

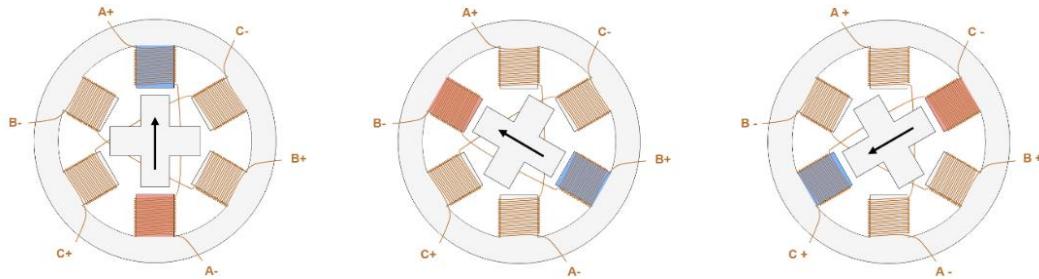
นิยามเชิงปฏิบัติการ

คำศัพท์	ความหมาย
Ramp	คือ ลักษณะของสัญญาณที่เป็นทางลาดขึ้นไป
Trapezoidal	คือ สี่เหลี่ยมคงที่

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. Stepper Motor

สเต็ปเพอร์มอเตอร์ (Stepper Motor) คือ มอเตอร์ชนิดหนึ่งที่แบ่งการหมุนออกเป็นสเต็ปหรืออย่าง โดยมอเตอร์ชนิดนี้จะมีลักษณะคล้ายคลึงกับ Brushless DC Motor แต่จะมีจำนวนสเต็ปที่หมุนไปทีละ 1 กัน และไม่จำเป็นต้องใช้เซนเซอร์ชนิดอื่น ๆ ในการหาองศา จึงทำให้มอเตอร์ชนิดนี้นั้นมีลักษณะที่ให้แรงบิดสูง รวมไปถึงมีมุมและตำแหน่งในการหมุนที่ชัดเจน

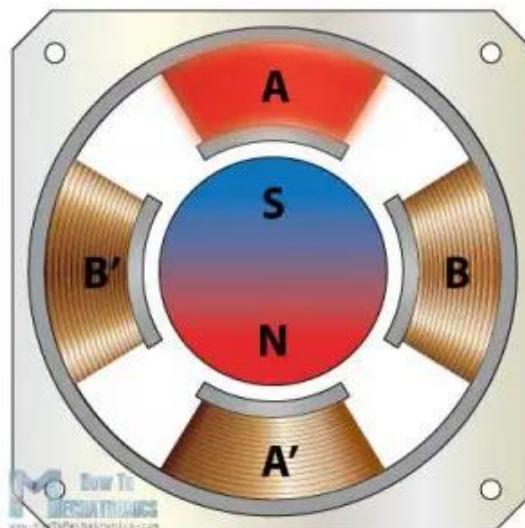


รูปที่ 1 แสดงหลักการทำงานของ Stepper Motor

เมื่อพิจารณาลักษณะของมอเตอร์จะพบว่าส่วนประกอบของมอเตอร์จะถูกแบ่งเป็น 3 ส่วนหลัก ๆ ประกอบไปด้วย Rotor, Stator, Winding โดยทั้ง 3 ส่วนนี้นั้นจะมีหน้าที่ในการทำให้มอเตอร์ทำงาน ซึ่งเกิดจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดหรือ Stator เพื่อทำให้ Rotor หมุนตามไป ซึ่งจะทำลักษณะการหมุนเป็นขั้นลำดับ รวมไปถึงลักษณะของมอเตอร์ชนิดนี้นั้นจะถูกแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ดังนี้

1.1 Permanent magnet rotor

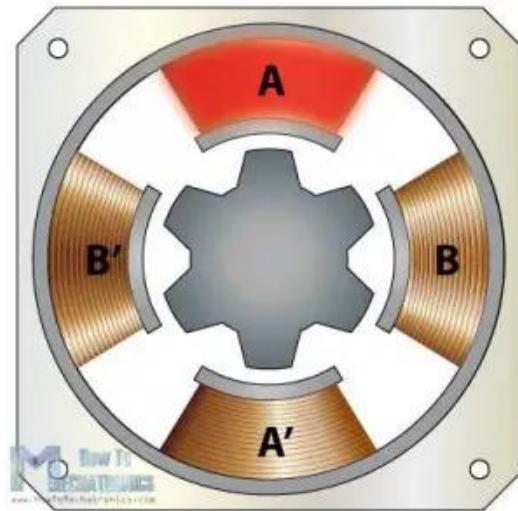
Permanent magnet rotor คือ ลักษณะของมอเตอร์ที่ ณ ตำแหน่ง Rotor เป็นแม่เหล็ก ซึ่งจะถูกหมุนกีดต่อเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับ Stator จากลักษณะการออกแบบที่เป็นเอกลักษณ์จึงทำให้มอเตอร์ชนิดนี้นั้นสามารถให้ Torque ที่มาก แต่มีข้อเสียในการทำความเร็ว เนื่องจากมีความเร็วและ Torque ที่จำกัดในการทำงาน จึงเหมาะสมสำหรับการทำงานในช่วงที่มีความถี่ต่ำ



รูปที่ 2 แสดงลักษณะของ Permanent magnet rotor

1.2 Variable reluctance rotor

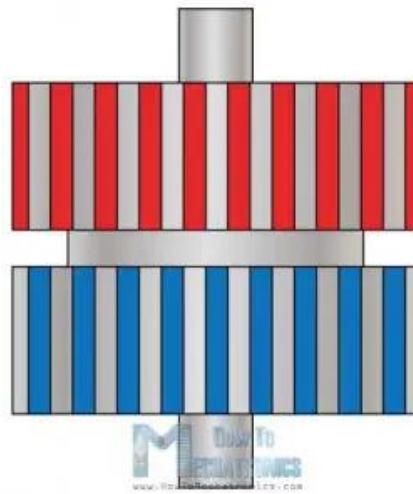
Variable reluctance rotor คือ ลักษณะของมอเตอร์อิเล็กทรอนิกส์ที่ ณ ตำแหน่งของ Rotor เป็นเหล็กอ่อน แต่จะมีลักษณะของ Rotor ที่เป็นชีพัน เพื่อใช้ในการงานที่ต้องการใช้ความเร็วสูง เนื่องจากไม่มี Permanent magnet จึงทำให้มี Back EMF ในการต้านกระแส รวมไปถึงมีข้อเสียกับงานที่จำเป็นต้องใช้ Torque เนื่องจาก Rotor ที่มีน้ำหนักเบาและไม่มี Permanent magnet ในการควบคุม Torque



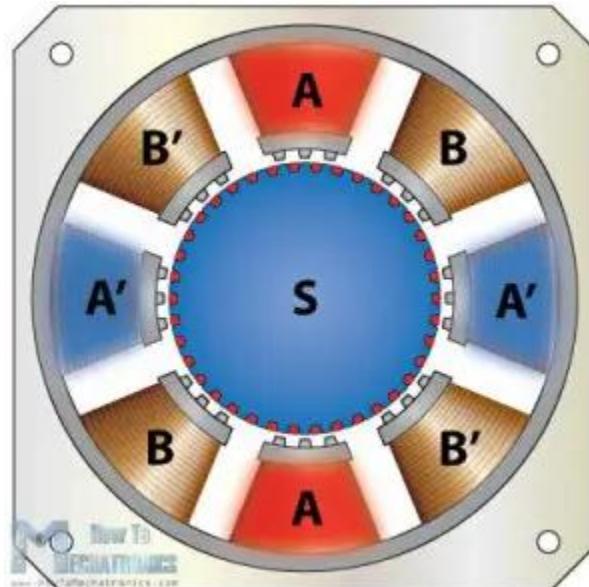
รูปที่ 2 แสดงลักษณะของ Variable reluctance rotor

1.3 Hybrid Synchronous motor

Hybrid Synchronous motor คือ ลักษณะของมอเตอร์อิเล็กทรอนิกส์ที่เกิดจากการรวมกันระหว่าง Permanent magnet rotor และ Variable reluctance rotor โดย ณ ตำแหน่งของ Rotor จะมีฟันที่เป็นแม่เหล็กประกอบรวมไปด้วยกัน 2 ชิ้น ซึ่งทำหน้าที่คล้ายกับเกียร์ที่หมุนไปในทิศทางเดียวกัน แต่มีฟันที่ตัดกันรวมไปถึง Stator ก็มีลักษณะเป็นชีพันด้วยเช่นกัน เพื่อมีจุดประสงค์ในการนำข้อดีของ Permanent magnet rotor และ Variable reluctance rotor มาใช้ เพื่อให้มี Torque และความเร็วที่ต้องการสูงสุดโดยไม่สูญเสียมากที่สุด



รูปที่ 3 แสดงลักษณะของ Hybrid Synchronous motor ณ ตำแหน่ง Top view



รูปที่ 4 แสดงลักษณะของ Hybrid Synchronous motor

2. Stepper motor Characteristic

หลักการทำงานของ Stepper motor คือ การที่จ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไปในแต่ละขดลวดของ Stator ทีละขั้นตอน ตามลำดับ จะพบว่า ณ ตำแหน่ง Stator จะเกิดการสร้างสนามแม่เหล็กและสร้างขั้วแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้น จึงทำให้ Rotor ที่มีลักษณะเป็นแม่เหล็กหรือเหล็กอ่อน เกิดการดึงดูดและหมุนตามทิศทางที่จ่ายกระแสไฟไปตามลำดับ จึงทำให้ถูกนำมาระบบงานที่ใช้ต้อง Torque หรือความเร็วเป็นส่วนใหญ่

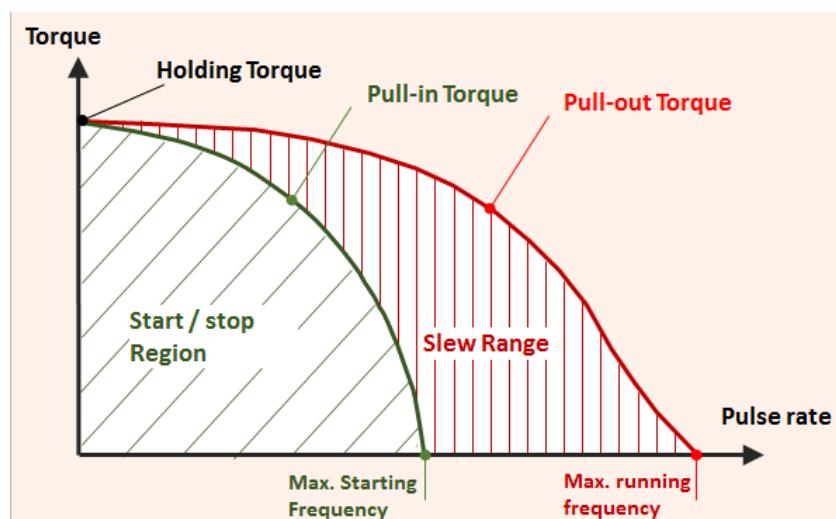
เมื่อพิจารณาลักษณะการทำงานของ Stepper motor นั้นจะพบว่าลักษณะการทำงานของมอเตอร์จะถูกควบคุมให้สามารถใช้ Torque และความเร็วควบคู่ไปกับ Driver ของมอเตอร์กับงานต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น ซึ่งจากลักษณะของการใช้งานที่เกิดขึ้นนั้น จึงนำไปสู่พฤติกรรมของมอเตอร์ที่เกิดขึ้น ดังนี้

2.1 Pull-in torque curve

Pull-in torque curve คือ ช่วงของ Torque ที่มอเตอร์สามารถให้ออกมาได้ในช่วงความถี่ที่ทำงานโดยอยู่ในช่วงที่มอเตอร์สามารถเริ่มต้นหรือหยุดได้พร้อมกับสัญญาณ Pulse ที่จ่ายเข้าไป โดยไม่เกิดการ Loss steps เกิดขึ้น รวมไปถึงถ้าลักษณะของเส้นกราฟต่างกว่าช่วงที่กำหนดนี้นั้น จะพบว่ามอเตอร์จะสามารถทำงานหรือหยุดได้ โดยไม่จำเป็นต้องมีความเร่งหรือความหน่วง

2.2 Pull-out torque curve

Pull-out torque curve คือ ช่วงของ Torque ที่มากที่สุดที่มอเตอร์สามารถทำได้ ณ ขณะที่หมุนโดยไม่เกิดการ Loss steps รวมไปถึงถ้าลักษณะของกราฟมีลักษณะที่เกินจุดนี้ไปแล้วนั้น มอเตอร์จะหยุดทำงาน

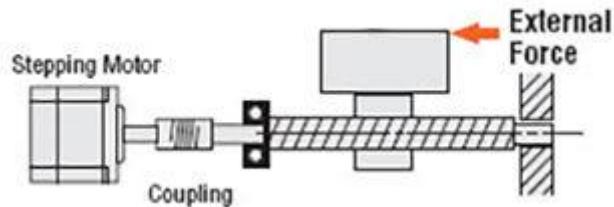


รูปที่ 5 แสดงลักษณะของกราฟเทียบความถี่และ Torque

เมื่อสังเกตจากการจะพบว่า Slew Range ไม่ใช่ช่วงในการเริ่มทำงานหรือหยุดทำงานของมอเตอร์เนื่องจากมอเตอร์ควรต้องเริ่มการทำงาน ณ ตำแหน่ง Start/Stop region โดยค่อย ๆ เพิ่มความเร่งเข้าไปให้จนกว่าจะถึง ณ ตำแหน่ง Slew Range หรือค่อย ๆ เพิ่มความหน่วงให้สามารถลดลงจาก Slew Range ลงไป เพื่อไม่ให้เกิดการ Loss Steps ขึ้นในมอเตอร์

2.3 Holding Torque

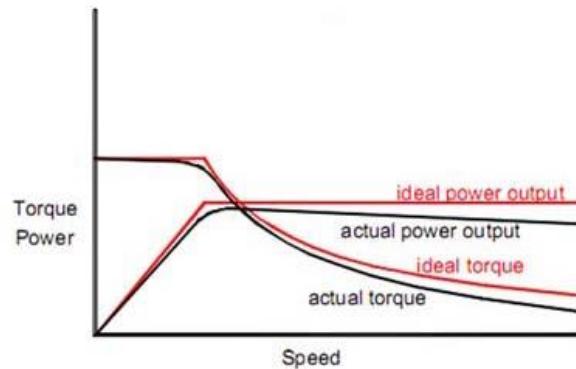
Holding Torque คือ คุณสมบัติของมอเตอร์ชนิดนี้ที่สามารถคง Load ของวัตถุให้สามารถอยู่กับที่เมื่อถูกจ่ายกระแสเอาไว้ได้ ผ่านแรงดึงดูดระหว่าง Rotor และ Stator ของมอเตอร์ โดย Torque นี้นั้นจะสูงกว่าลักษณะของ Torque ปกติที่ทำงานตอนหมุน



รูปที่ 6 แสดงลักษณะการ Holding Torque จากวัตถุภายนอก

2.4 Detent Torque

Detent Torque คือ คุณสมบัติอีกประเทหนึ่งของมอเตอร์ที่สามารถคง Load ของวัตถุให้สามารถอยู่กับที่ได้ โดยไม่จำเป็นต้องมีกระแสไฟฟ้าจ่ายเข้าไปในวงจร เนื่องจากการมี Magnet ติดอยู่ใน Rotor และ Stator ซึ่งคุณสมบัตินี้นั้นมักจะพบได้ใน Permanent magnet และ Hybrid stepper motors



รูปที่ 7 แสดงลักษณะของกราฟความเร็วเทียบกับ Torque

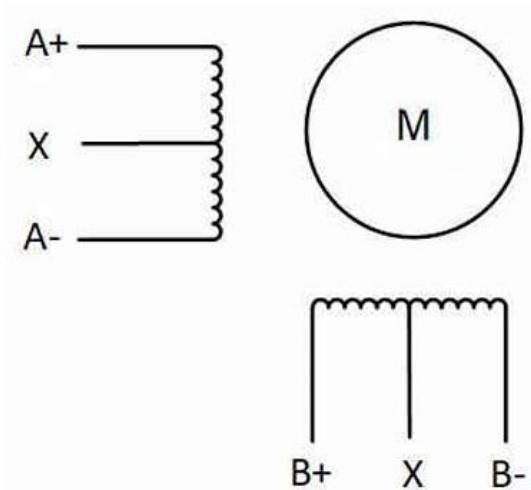
โดยจากลักษณะของกราฟแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของ Detent torque เนื่องจากจำเป็นที่จะต้องจ่ายกระแสไฟฟ้าให้มอเตอร์สามารถทำงานเกินจุด Torque ที่กำหนดนี้ รวมไปถึง Torque นี้นั้นก็ยังแปรผันตรงกับความเร็วของมอเตอร์ โดยยิ่งมอเตอร์หมุนเร็วเท่าไร Detent torque ก็จะมีผลต่อ Torque ที่ออกมากขึ้นตามไปด้วย รวมไปถึงยิ่ง Detent torque มีมากเท่าไรก็ส่งผลต่อการหยุดของมอเตอร์ด้วยเช่นกัน

3. Stepper Driver Type

Stepper Driver Type คือ อุปกรณ์ที่ใช้ในการสั่งงานให้ Stepper Motor ทำงาน ซึ่งโดยปกติแล้วนั้นจะเป็นการสั่งงานเพื่อให้ใช้ในการควบคุมทิศทาง, ความถี่, PWM ผ่านการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไปใน Stator สลับกันไป จึงทำให้เกิดเป็นลักษณะของการเปลี่ยนเฟสหรือเกิดการสลับกระแสไฟฟ้าจ่ายเข้าไป ซึ่งเกิดการส่งสัญญาณเป็น Step ให้มอเตอร์ทำงานตามทิศทางที่กำหนด รวมไปถึงการทำงานของ Driver นั้น ควรจำเป็นต้องสามารถควบคุมทิศทางการให้เหลื่อมกระแสไฟฟ้าที่ถูกจ่าย เพื่อที่จะสามารถกำหนดทิศทางของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดได้ จะสามารถใช้ได้กับมอเตอร์ที่มีลักษณะ ดังนี้

3.1 Unipolar Stepper Motor

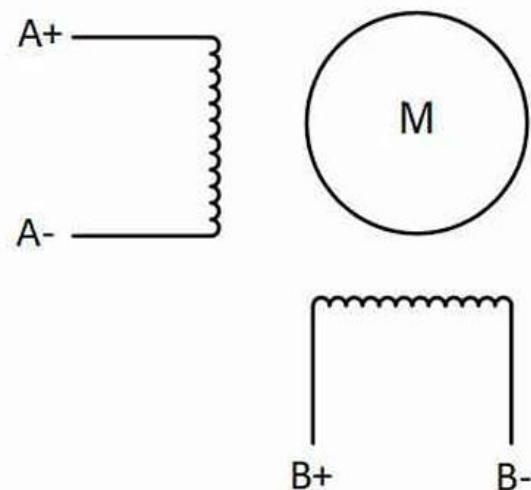
Unipolar Motor คือ ลักษณะของมอเตอร์ที่จะมีการเคลื่อนที่ของกระแส 2 ตำแหน่งต่อเฟส โดยจะมีด้วยกัน 4 สายที่เป็นสายที่กระแสจะเคลื่อนที่ ซึ่งประกอบไปด้วย A+, A-, B+, B- และสายที่อยู่ตำแหน่งตรงกลางของวงจร ซึ่งสายกลางของวงจรจะถูกต่อเข้ากับ Supply เพื่อทำให้กระแสไฟฟ้าไหลเข้าไปแค่ครึ่งหนึ่งของวงจร โดยที่สนามแม่เหล็กสามารถเปลี่ยนทิศทางในการทำงานได้ตามที่ต้องการได้โดยไม่จำเป็นต้องจ่ายกระแสตรงกันข้ามกับทิศทางการให้เหลื่อมกระแส แต่ถึงกระนั้นก็แลกมาด้วยการที่ได้ Torque และ Efficiency ที่ต่ำ



รูปที่ 8 แสดงลักษณะของมอเตอร์ที่เป็น Unipolar Motor

3.2 Bipolar Stepper Motor

Bipolar Stepper Motor คือ ลักษณะของมอเตอร์อิเล็กทรอนิกส์ที่จะมีการเคลื่อนที่ของกระแสน้ำ ตามแน่นต่อเฟส โดยจะมีด้วยกัน 4 สายที่กระแสเคลื่อนที่ผ่านด้วยเช่นกัน แต่ลักษณะนี้นั้นจะไม่มีสายกลางที่ต่อ กับ Supply แต่จะเป็นการใช้ H-bridge drive ในแต่ละเฟสที่เกิดการทำงาน เพื่อใช้ในการเปลี่ยนทิศทางของ สนามแม่เหล็ก รวมไปถึงจากการที่ไม่มีสายต่อเพิ่มเข้ามา จึงทำให้สามารถให้ Torque ที่มากกว่าแบบ Unipolar ได้



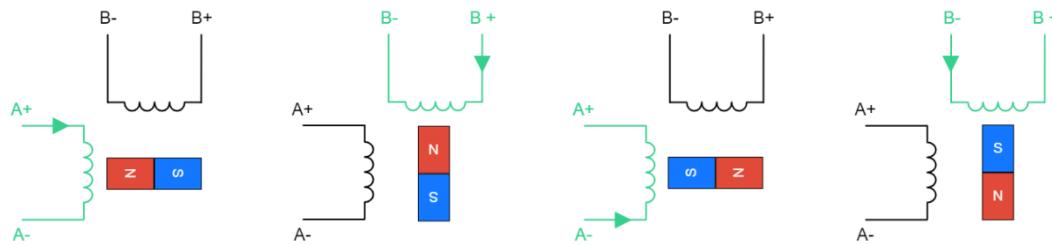
รูปที่ 9 แสดงลักษณะของมอเตอร์ที่เป็น Bipolar Motor

4. Stepper Driver Mode

Stepper Driver Mode คือ วิธีการควบคุมที่ใช้ในการควบคุม Stepper Motor ผ่าน Stator ของระบบ โดยจะแบ่งออกเป็น 4 ประเภท ดังนี้

4.1 Wave mode

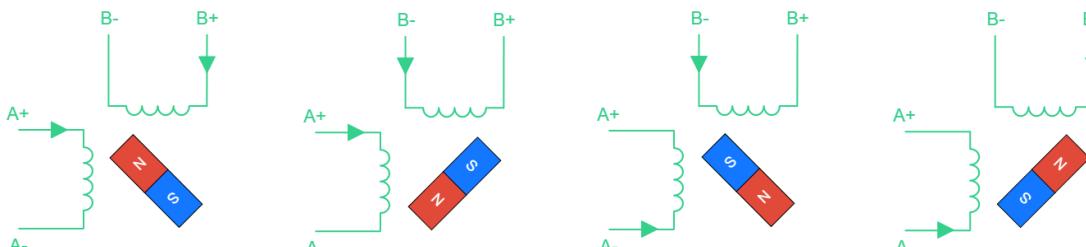
Wave mode คือ ลักษณะการควบคุมโดยการจ่ายกระแสจากวงก์ไปกลับหรือลوبไปกลับ ผ่านการเคลื่อนที่ของกระแสต่ำ Stator ทั้ง 2 ขดลวดต่อครั้ง โดยจะหมุนทวนเข็มหรือตามเข็มในการเปลี่ยนตำแหน่งของ Rotor ทุก ๆ 90 องศา



รูปที่ 10 แสดงลักษณะการทำงานของ Wave mode

4.2 Full-step mode

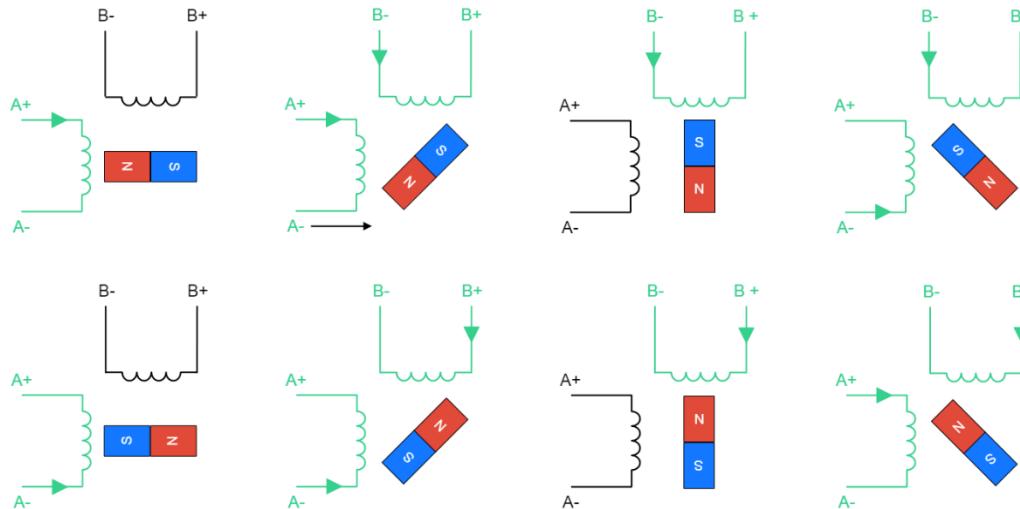
Full-step mode คือ ลักษณะการควบคุมโดยการจ่ายกระแสจากวงก์ไปกลับหรือลوبไปกลับ ผ่านการเคลื่อนที่ของกระแสต่ำ Stator ทั้ง 4 ขดลวดต่อครั้ง รวมไปถึงจากการที่ขดลวดถูกทำงานทั้งหมด จึงสร้างสนามแม่เหล็กและกระแสไฟฟ้าผ่านที่เยอะ จึงทำให้เกิด Torque เยอะตามไปด้วย



รูปที่ 11 แสดงลักษณะการทำงานของ Full-step mode

4.3 Half-step mode

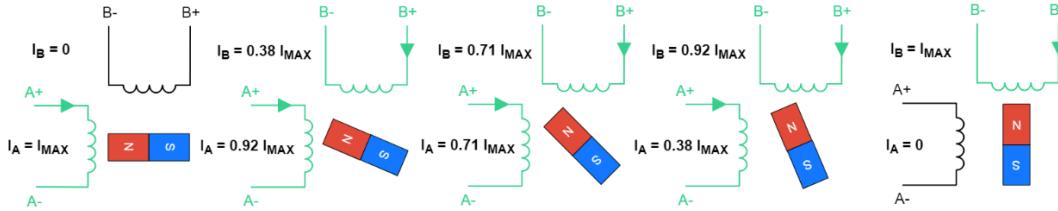
Half-step mode คือ ลักษณะการควบคุมที่นำการรวมกันระหว่าง Wave และ Full-step mode จึงทำให้ขนาดของ Step ถูกลดลงครึ่งหนึ่ง ซึ่งทำให้การหมุนทวนเข้าหรือตามเข้าในการเปลี่ยนตำแหน่งของ Rotor ทุก ๆ 45 องศา แต่มีข้อเสียจากการนำ Torque มาใช้เนื่อง Torque ที่ได้ออกมานั้นไม่คงที่ เนื่องจากช่วงในการจ่ายกระแสไฟไม่คงที่จากการที่มีบางช่วงต้องจ่ายกระแสทั้ง 4 ขดลวดแต่ก็มีบางช่วงที่ต้องจ่ายแค่ 2 ขดลวด



รูปที่ 12 แสดงลักษณะการทำงานของ Half-step mode

4.4 Micro-step mode

Micro-step mode คือ ลักษณะการควบคุมที่มีความคล้ายคลึงกับ Half-step mode แต่สามารถลดขนาดของ Step ลงได้มากกว่า รวมไปถึงมี Torque ที่คงที่ ซึ่งการที่จะสามารถใช้โหมดนี้ได้นั้นจำเป็นต้องเข้าใจปริมาณของกระแสที่ไหลเข้าไปในวงจรในแต่ละเฟส จากการสังเกตว่ากระแสที่ไหลเข้าไปที่มากที่สุดของระบบโดยเริ่มจากทางซ้ายว่าเป็นเท่าใด และจึงคำนวนหาค่าของกระแส ณ ตำแหน่งต่อไปที่จะทำให้ Rotor หมุนโดยอิงจากกระแสทั้งหมด ซึ่งจากการคำนวนนี้นั้นจะทำให้เกิดลักษณะขององศาที่ Rotor ต้องหมุนทุก ๆ 22.5 องศา และสามารถทำให้ขนาดของ Step ลงໄປได้มากกว่าของ Half-step mode และแม่นยำ แต่อย่างไรก็ตามก็มีข้อเสียในการสร้าง Torque เนื่องจาก Torque แปรผันตรงกับสนามแม่เหล็กที่เกิดจากการหมุนของ Stator และ Rotor จึงทำให้ Torque มีลักษณะที่น้อยตามไปด้วย ตามลักษณะขนาดของ Step และอาจจะทำให้เกิดกรณีที่ Rotor ไม่หมุนตาม Stator ที่ถูกสั่งให้เปลี่ยนไปตามเฟสที่กำหนด เนื่องจาก Torque ไม่พอที่จะหมุนให้เกิน Load ที่กำหนด

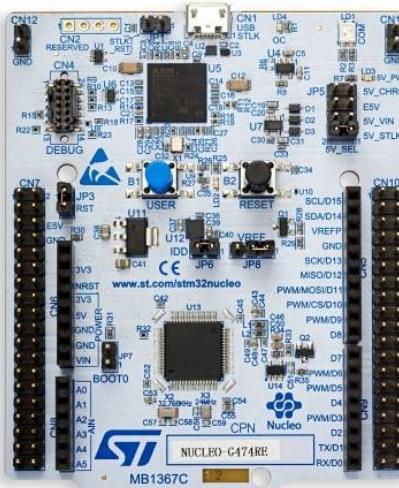


รูปที่ 13 แสดงลักษณะการทำงานของ Microstep mode

5. วัสดุและอุปกรณ์

5.1 Nucleo STM32G474RE

Nucleo STM32G474RE คือบอร์ดที่ใช้ในการออกแบบและพัฒนาไมโครคอนโทรลเลอร์ ที่ผลิตโดย STMicroelectronics ซึ่งเป็นบอร์ดที่ใช้ประชีสเซอร์ ARM Cortex-M4 ที่รองรับการประมวลผลที่ซับซ้อน และเหมาะสมกับงานที่ต้องการการคำนวณอย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีหน่วยความทรงจำที่ประกอบไปด้วยแรมขนาด 128 KB และแฟลชเมมโมรีขนาด 512 KB รวมไปถึงพอร์ตต่าง ๆ อย่าง UART, I2C, SPI, CAN, USB และสามารถรองรับการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอกได้ด้วยเช่นกัน



รูปที่ 14 แสดงภาพบอร์ด STM32 Nucleo-64 G474RE

5.2 Incremental Encoder AMT103-V

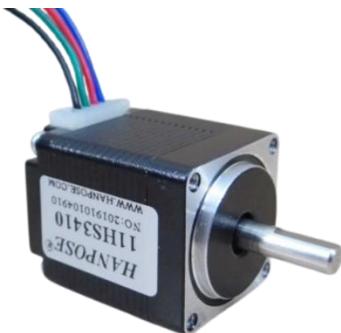


รูปที่ 15 แสดงภาพของ Incremental Encoder AMT103-V

ข้อมูลจำเพาะของ Incremental Encoder AMT103-V			
Output Format	Quadrature (A/B channels)	Current Consumption	10 mA
Resolution	Programmable: 48 to 2,048 pulses per revolution (PPR)	Index Signal	Z-channel (1 pulse per revolution)
Supply Voltage (Vcc)	3.3V to 5.5V	Operating Temperature	-40°C to +100°C
Output Voltage	TTL compatible	Mounting Options	Modular mounting system
Maximum Speed	10,000 RPM	Shaft Diameter Support	2mm to 8mm

ตารางที่ 1 แสดงข้อมูลจำเพาะของ Incremental Encoder AMT103-V

5.3 HANPOSE Stepper Motor 11HS3410

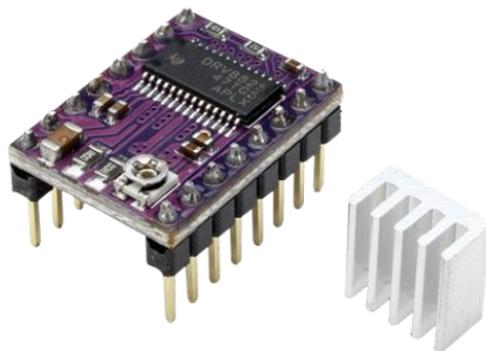


รูปที่ 16 แสดงภาพของ HANPOSE Stepper Motor 11HS3410

ข้อมูลจำเพาะของ ZGA60FM DC Brushed Motor RS775-D60mm Gearhead			
Step angle	1.8 +- 10%	Rated current	1.0 A
Number of the phase	2	Resistance per phase	4.0 Ohm +- 10%
Insulation Resistance	500V DC	Inductance per phase	4.2 MH +- 20%
Insulation class	Class B	Holding Torque	0.1 N.m
Step angle accuracy	+- 5%	Stepper Motor Type	28BYGH34P100
Weight	120 g		

ตารางที่ 2 แสดงความหมายข้อมูลจำเพาะของ HANPOSE Stepper Motor 11HS3410

5.4 DRV8825 Stepper Motor Drive



รูปที่ 17 แสดงภาพ DRV8825 Stepper Motor Drive

ข้อมูลจำเพาะของ DRV8825 Stepper Motor Drive ณ Maximum rate			
Power supply voltage	47 V	Power supply ramp rate	7 V/µs
Digital pin voltage	7 V	Input voltage	4 V
Operating junction temperature range	150 °C	Continuous motor drive output current	2.5 A

ตารางที่ 3 แสดงความหมายข้อมูลจำเพาะของ DRV8825 Stepper Motor Drive

วิธีดำเนินการทดลอง

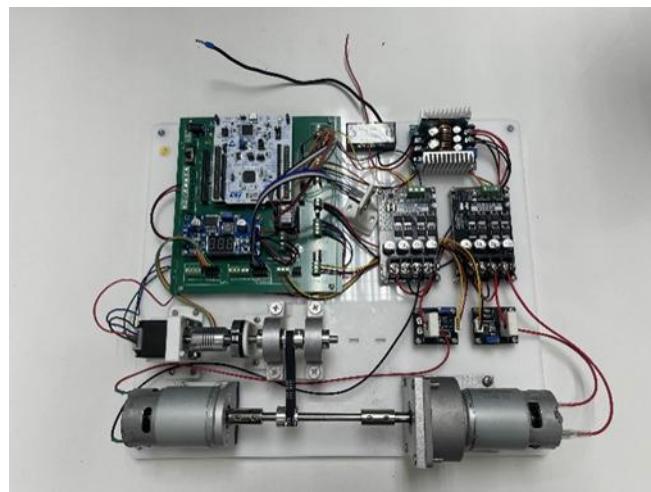
ในการทดลองเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และความเร็วที่เกิดขึ้นของมอเตอร์ โดยการใช้ STM32G474RE ในการส่งสัญญาณผ่าน MATLAB โดยมี DRV8825 ในการขับมอเตอร์ ซึ่งจะทำการส่งความถี่ไลต์ติ้งแต่ต่ำไปจนถึงสูงและสังเกตความเร็วและพฤติกรรมที่เปลี่ยนแปลงไปของมอเตอร์ จากนั้นจึงนำค่าที่ได้ไป Plot กราฟ และเปรียบกับค่าของ Datasheet เพื่อสังเกตความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และความเร็วที่เกิดขึ้น

วัสดุและอุปกรณ์

1. HANPOSE Stepper Motor 11HS3410 จำนวน 1 อัน
2. DRV8825 Stepper Motor Drive จำนวน 1 อัน
3. Incremental Encoder AMT103-V จำนวน 1 อัน
4. Nucleo STM32G474RE จำนวน 1 ชุด
5. MotorXplorer จำนวน 1 ชุด

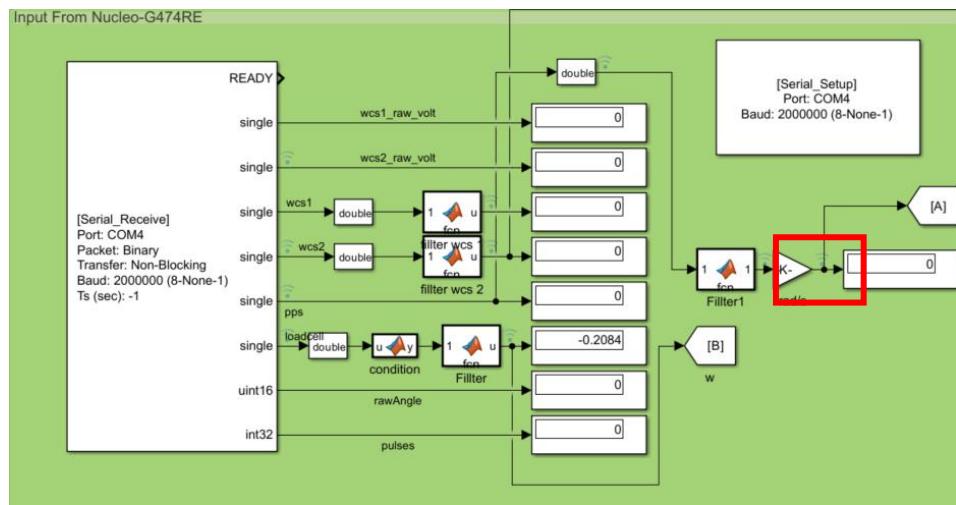
ขั้นตอนการทดลองและผลการทดลอง

1. เชื่อมต่อ Stepper Motor เข้ากับ Step drive ของมอเตอร์ รวมไปถึงต่อ DRV8825 เข้ากับ Analog Pin ของ STM32G474RE ด้วยสายจ้มเปอร์ต่าง ๆ



รูปที่ 18 แสดงภาพของบอร์ด MotorXploer

2. สร้าง Block ในการทำ Signal Conditioning ใน Simulink



รูปที่ 19 แสดงภาพ Output จาก Nucleo STM32G474RE

สร้าง MATLAB Function เพื่อใช้ในการทำ Signal Conditioning ให้กับสัญญาณความเร็วที่อ่านออกมายได้จาก Incremental Encoder โดยมีหลักการ ดังนี้

```

MotorXplore ▶ Filter1
function Output = fcn(Input)
    persistent Buffer
    persistent first
    persistent last
    persistent curr
    persistent tmp

    if isempty(Buffer)
        Buffer = [];
        first = 1;
        last = 1125;
        curr = 0;
        tmp = Input;
    end

    Buffer(end+1) = Input;

    if curr >= last
        first = first + 1;
        last = last + 1;
        tmp = mean(Buffer(first:last));
    end

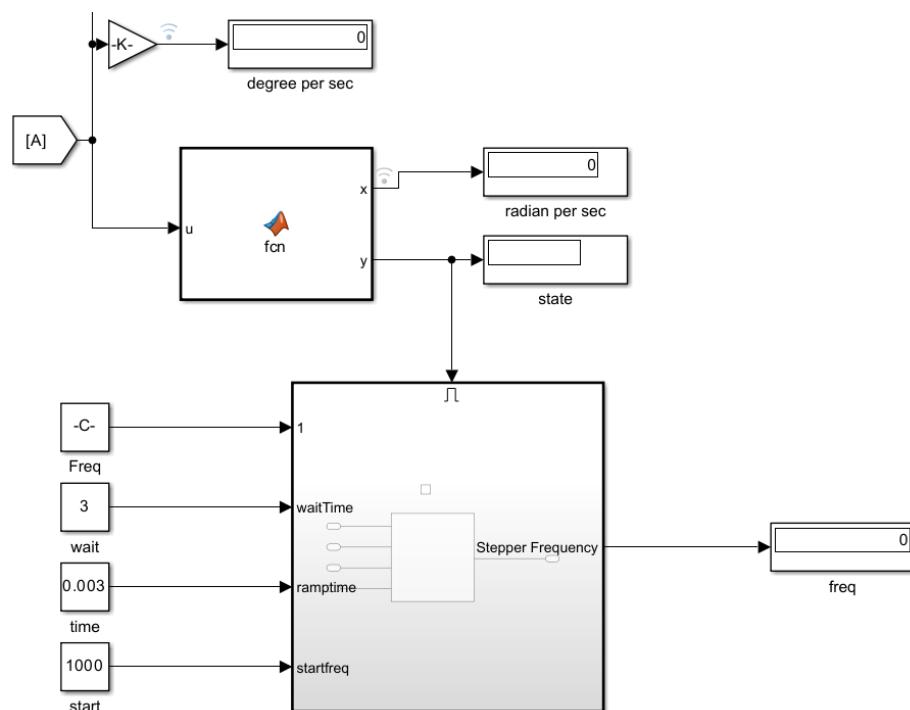
    curr = curr + 1;
    Output = tmp;
end

```

รูปที่ 20 แสดงภาพ Code การทำงาน

จากใน Code ของระบบนั้นจะมีหลักการทำงานจากการเก็บค่าจากตำแหน่งจุดอ้างอิงเทียบกับตำแหน่งจุดสุดท้าย เพื่อที่จะสามารถหาค่าเฉลี่ยของความเร็วที่เกิดขึ้นของมอเตอร์ออกมาได้ โดยที่ค่าของความเร็วไม่เวียงจนเกินไป จะทำให้ความเร็วเชิงมุมที่ออกมามีพิเศษเพื่อป้องกันไม่ให้เกินไป

3. สร้าง Block เพื่อนำค่าที่ได้ออกมาจาก Serial receiver มาเข้าฟังก์ชันสำหรับการหน่วงเวลา

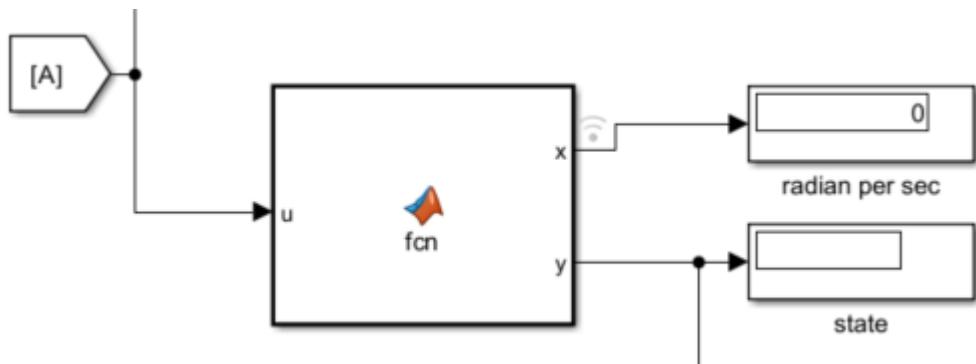


รูปที่ 21 แสดงภาพ Block ใน Simulink

ในระบบจะประกอบไปด้วยฟังก์ชันที่ใช้ในการควบคุมความถี่ให้กับ Stepper Motor โดยจะประกอบไปด้วย 2 ส่วนด้วยกัน คือ ส่วนที่ใช้ในการหาความเร็วเชิงมุมที่มากที่สุดของระบบ และส่วนของการเพิ่มค่าความถี่เข้าไปใน Stepper Motor

2.1 หาความเร็วเชิงมุมที่มากที่สุดของระบบ

ในส่วนนี้นั้นจะเป็นการตรวจจับความเร็วเชิงมุมที่มากที่สุดของระบบและจำกัดช่วงของความเร็วให้สามารถอยู่ในช่วงที่ต้องการ เพื่อนำไปใช้ในการแสดงค่าต่อไป ซึ่งมีลักษณะการทำงาน ดังนี้



รูปที่ 22 แสดงภาพ Block ใน Simulink

ในการทำงานของระบบนี้นั้น จะเริ่มจากการนำค่าความเร็วที่ได้มาจากการอ่านของ STM32G474RE มาเข้าใน MATLAB Function เพื่อหาความเร็วเฉลี่ยมุ่งที่มากที่สุดและควบคุมการเปิดและปิด Sub-system ต่อไป ซึ่งมีหลักการทำงานดังนี้

```

1  function [x,y] = fcn(u)
2      persistent prev
3      persistent state
4      persistent max
5
6      if isempty(prev)
7          prev = u*0.8;
8          state = 1;
9          max = prev/0.8;
10     end
11
12     if abs(u) < abs(prev)
13         state = 0;
14     end
15
16     if abs(max) < abs(prev/0.8)
17         max = prev/0.8;
18     end
19
20     x = max;
21     prev = u*0.8;
22     y = state;
23
24
25
26
27

```

รูปที่ 23 แสดงภาพ Code การทำงาน

หลักการทำงานของ Code จะประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลัก ๆ คือ ส่วนที่เป็นการสั่งเปิด-ปิด Sub-system และส่วนที่เป็นการหาค่าความเร็วเชิงมุมที่มากที่สุดของระบบ

ในส่วนแรกนั้นการสั่งเปิด-ปิด Sub-system นั้นจะเป็นส่วนที่จะถูกควบคุมผ่านการเก็บค่าความเร็วปัจจุบันที่เข้ามาเทียบกับความเร็วก่อนหน้า ซึ่งได้มีการตั้ง Threshold ให้กับความเร็วที่ 20% เพื่อเป็นเกณฑ์ในการไม่ทำให้ค่าของความเร็วมีลักษณะที่เกินไปมากกว่าที่กำหนด โดยถ้าค่าของความเร็ว ก่อนหน้ามีค่ามากกว่าความเร็ว ณ ปัจจุบันก็ให้ Sub-system ต่อไปหยุดการทำงาน เนื่องจากการที่ค่า ของความเร็ว ก่อนหน้า มีค่ามากกว่าความเร็ว ณ ปัจจุบันแสดงให้เห็นถึงความเร็วของ Stepper Motor ที่ ใกล้จะลดลง เนื่องจากการเกิด Loss step

```
if isempty(prev)
    prev = u*0.8;
    state = 1;
    max = prev/0.8;
end

if abs(u) < abs(prev)
    state = 0;
end
```

รูปที่ 24 แสดงภาพ Code การทำงาน

ในส่วนที่สองที่จะเป็นการเก็บค่าความเร็วนั้น จะมีเงื่อนไขว่าถ้าค่าของความเร็วเชิงมุมใหม่ที่เข้ามา นั้นมีค่ามากกว่าที่เก็บไว้อยู่ ให้เปลี่ยนเป็นค่าใหม่แทน

```
if abs(max) < abs(prev/0.8)
    max = prev/0.8;
end
```

รูปที่ 25 แสดงภาพ Code การทำงาน

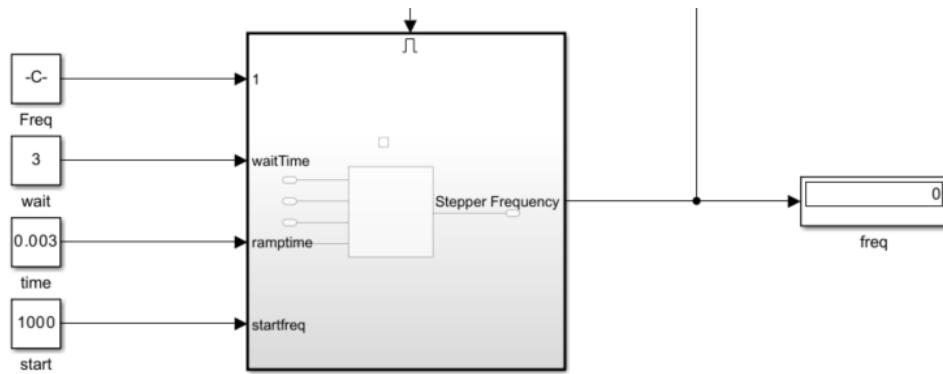
โดยหลังทำงานที่ครบทั้งสองส่วนแล้วนั้นระบบก็จะทำการส่งค่าที่กำหนดออกไปผ่าน Display และผ่าน Enable ของ Sub-system ต่อ ๆ ไป และทำงานวนซ้ำจนกว่าจะจบการทำงาน

```
x = max;
prev = u*0.8;
y = state;
```

รูปที่ 26 แสดงภาพ Code การทำงาน

2.2 เพิ่มความถี่ให้กับ Stepper Motor

ในส่วนนี้นั้นจะมีหน้าที่ในการเพิ่มความถี่ให้กับ Stepper Motor ในการทำงาน เพื่อใช้ในการควบคุมลักษณะการทำงานของ Stepper Motor โดยมีลักษณะการทำงาน ดังนี้



รูปที่ 27 แสดงภาพ Block ใน Simulink

ในส่วนของ Sub-system นี้นั้นจะเริ่มตัวยการนำค่าคงที่ที่กำหนดมาใช้ โดยมีความถี่ ณ ตำแหน่งสุดท้ายอยู่ที่ช่วง 200kHz ซึ่งมีช่วงเวลาอยู่ 3 วินาที ในการทำให้เวลาและความเร็วของทางผ่านไฟฟ้าและทางกลเท่ากัน เพื่อกัน Loss step รวมไปถึงมีช่วงเวลาในการต่อระดับความถี่อยู่ 0.003 วินาที เพื่อทำให้ความเร็วของ Stepper Motor เพิ่มขึ้นและมีความถี่เริ่มต้น 1kHz ซึ่งมีหลักการในการทำงานต่อไป ดังนี้

```

function Output = fcn(Input,waitTime,ramptime,startfreq)

persistent freq
persistent time
persistent mode
persistent prev

if isempty(freq)
    freq = 0;
    time = 0;
    mode = 0;
    prev = 0;
end

if mode == 0
    if time >= 0.1
        freq = freq + (startfreq * 0.05);
        time = 0;
        if freq == startfreq
            mode = 2;
            time = 0;
            prev = freq;
        end
    end
elseif mode == 1
    if time >= ramptime && freq < Input && (freq < 17000 || freq > 17999)
        freq = freq + 0.5;
        time = 0;
        if freq - prev == 1000.0
            prev = freq;
            mode = 2;
            time = 0;
        end
        elseif time >= ramptime && freq < Input && (freq >= 17000 && freq <= 17999)
            freq = freq + 500;
            time = 0;
            if freq - prev == 1000.0
                prev = freq;
                mode = 2;
                time = 0;
            end
        end
    else
        if time >= waitTime
            mode = 1;
            time = 0;
        end
    end
    time = time + 0.001;
    Output = freq;
end

```

รูปที่ 28 แสดงภาพ Code การทำงาน

หลักการทำงานของ Code จะประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลัก ๆ คือ ส่วนที่เป็นจุดเริ่มต้น, ส่วนส่วนที่ใช้ในการเพิ่มความถี่ และส่วนที่ใช้ในการหน่วงเวลา

ในส่วนแรกนั้นคือ Mode 0 คือโหมดที่ใช้ในการเริ่มต้นการทำงานของระบบ โดยทุก ๆ 0.1 วินาทีของระบบจะเพิ่มขึ้น 5% ของความถี่เริ่มต้น โดยจะออกจากโหมดนี้ได้นั้น ต้องอยู่ในเงื่อนไขว่า ถ้าความถี่ที่ค่อย ๆ เพิ่มนั้น มีค่าเท่ากับความถี่เริ่มต้น ให้รีเซ็ตเวลาเป็น 0 และเข้า Mode 2

```

if isempty(freq)
    freq = 0;
    time = 0;
    mode = 0;
    prev = 0;
end

if mode == 0
    if time >= 0.1
        freq = freq + (startfreq * 0.05);
        time = 0;
        if freq == startfreq
            mode = 2;
            time = 0;
            prev = freq;
        end
    end
end

```

รูปที่ 29 แสดงภาพ Code การทำงาน

โดยใน Mode 2 นั้น จะเป็นโหมดที่ทำงานต่อมาจาก Mode 0 เนื่องจากในโหมดนี้นั้นจะใช้ในการหน่วงเวลา เพื่อให้ความเร็วในการทำงานของทางกลและไฟฟ้ามีเวลาที่เท่ากัน เนื่องจากันเพื่อไม่ให้เกิด Loss step กับ Stepper Motor

```

else
    if time >= waitTime
        mode = 1;
        time = 0;
    end
end

time = time + 0.001;

```

รูปที่ 30 แสดงภาพ Code การทำงาน

ในส่วนสุดท้ายนั้นจะเป็น Mode 1 ซึ่งทำหน้าที่คล้าย ๆ กับ Mode 0 แต่จะทำงานจากช่วงความถี่ตั้งแต่ 1kHz เป็นต้นมา โดยต้องมีค่าที่น้อยกว่าของความถี่ในช่วง 17kHz ลงมาหรือมากกว่านั้นเนื่องจากการทดลองพบว่าระบบมีปัญหากับการหยุดทำงานที่ 17,500 Hz หากผู้ทดลองจึงกำหนดมาเป็นเงื่อนไขเพิ่มเติม เพื่อทำให้ระบบทำงานได้ดีขึ้น รวมไปถึงจะทำการหน่วงเวลาในการเพิ่มความถี่อยู่ที่ 0.003 วินาที โดยหลังจากการหน่วงจะมีการเพิ่มความถี่ทุก 0.5 Hz เพื่อกัน Loss step ที่จะเกิดขึ้น ซึ่งในทุก 1kHz ของความถี่ ให้ย้อนกลับทำงานใน Mode 2 เพื่อค่อย ๆ เพิ่มความเร็วของ Stepper Motor

```

elseif mode == 1
    if time >= ramptime && freq < Input && (freq < 17000 || freq > 17999)
        freq = freq + 0.5;
        time = 0;
        if freq - prev == 1000.0
            prev = freq;
            mode = 2;
            time = 0;
        end
    elseif time >= ramptime && freq < Input && (freq >= 17000 && freq <= 17999)
        freq = freq + 500;
        time = 0;
        if freq - prev == 1000.0
            prev = freq;
            mode = 2;
            time = 0;
        end
    end
end

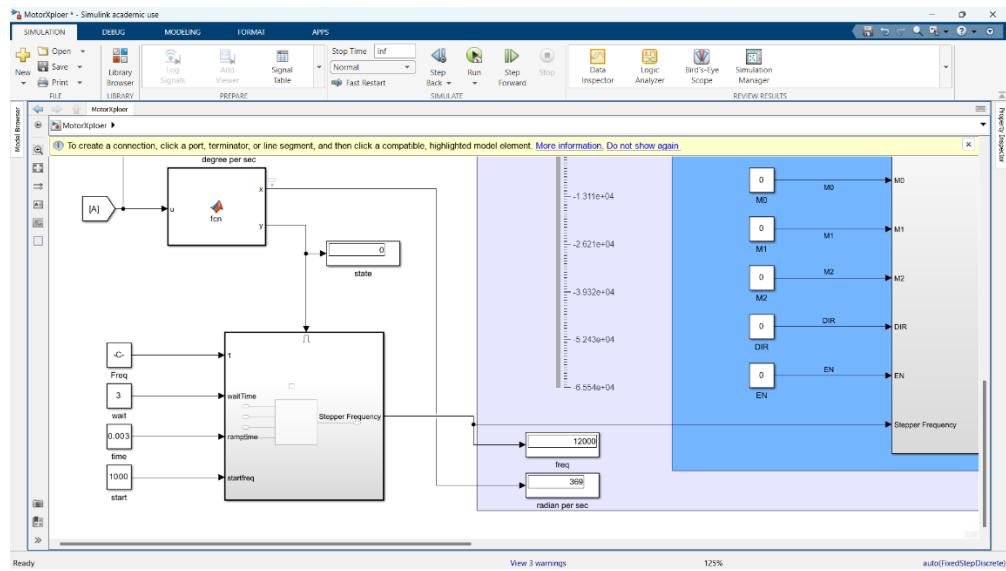
```

รูปที่ 31 แสดงภาพ Code การทำงาน

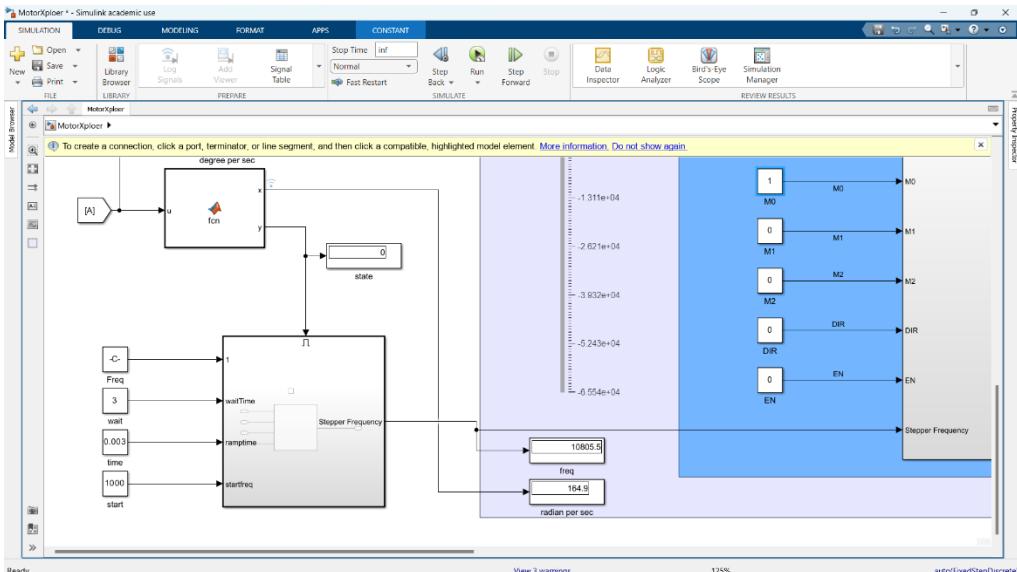
จากการที่กล่าวไปข้างต้นใน Mode 1 หากผู้ทดลองได้ทำการเพิ่มเงื่อนไขในช่วง 17,500 Hz เข้ามาเพื่อทำให้ระบบทำงานได้ดีขึ้นด้วยการที่เมื่ออยู่ช่วงตั้งแต่ 17,000Hz จนถึง 17,999 Hz ให้เพิ่มความถี่ไป 500 Hz เพื่อข้ามช่วงที่มีปัญหากับการทดลองที่เกิดขึ้น โดยถ้าจะออกจากเงื่อนไขนี้ก็จะตรวจสอบหาก 1kHz ของความถี่ ว่ามีค่าเท่ากับ 1kHz และหรือยัง โดยถ้าครบแล้วก็ให้ย้อนกลับทำงานใน Mode 2 เพื่อค่อย ๆ เพิ่มความเร็วของ Stepper Motor เช่นเดิม

ผลการทดลอง

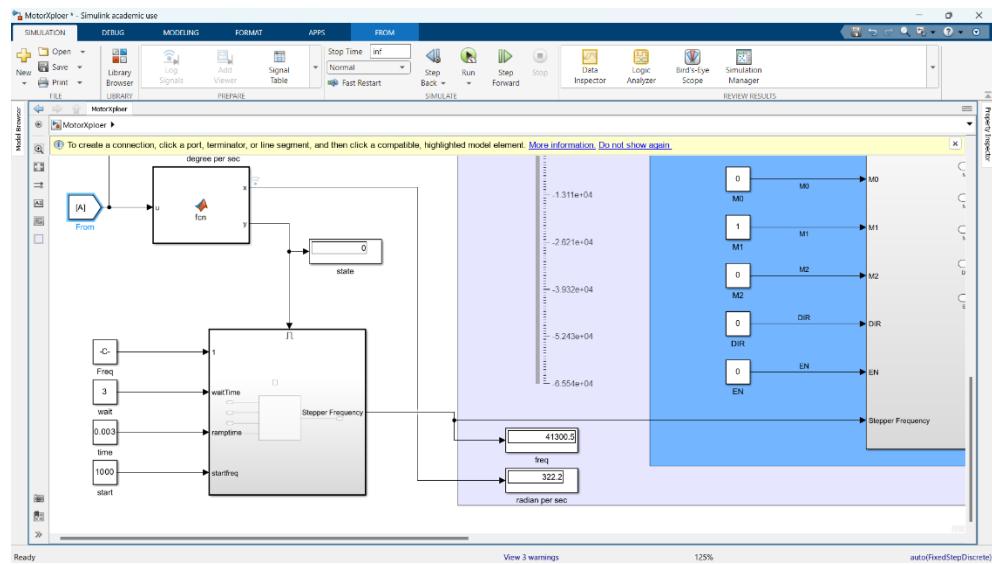
1. ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และความเร็วเข้ามุม



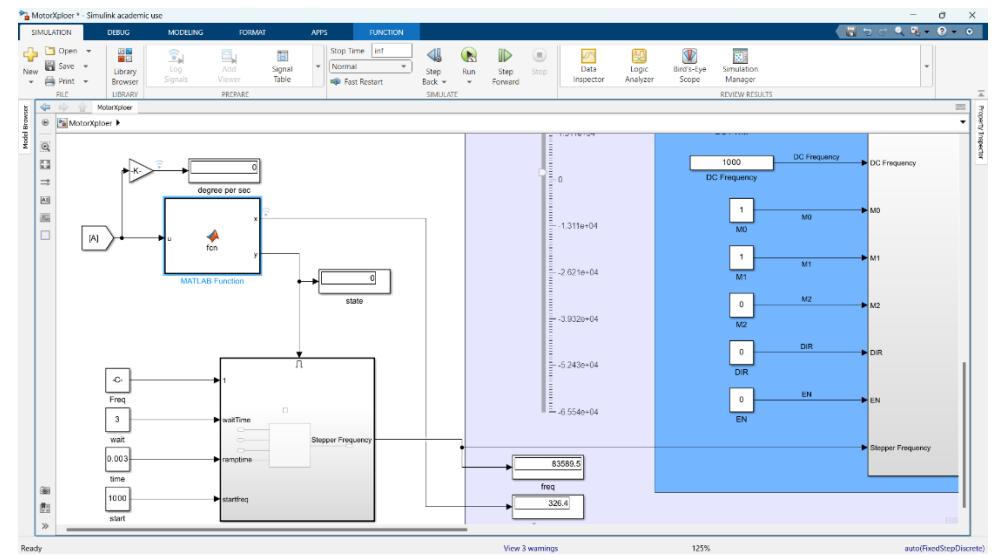
รูปที่ 32 แสดงภาพของความถี่และความเร็วที่ได้ออกมาจาก Sub-system ที่ทิศทางเข้ม



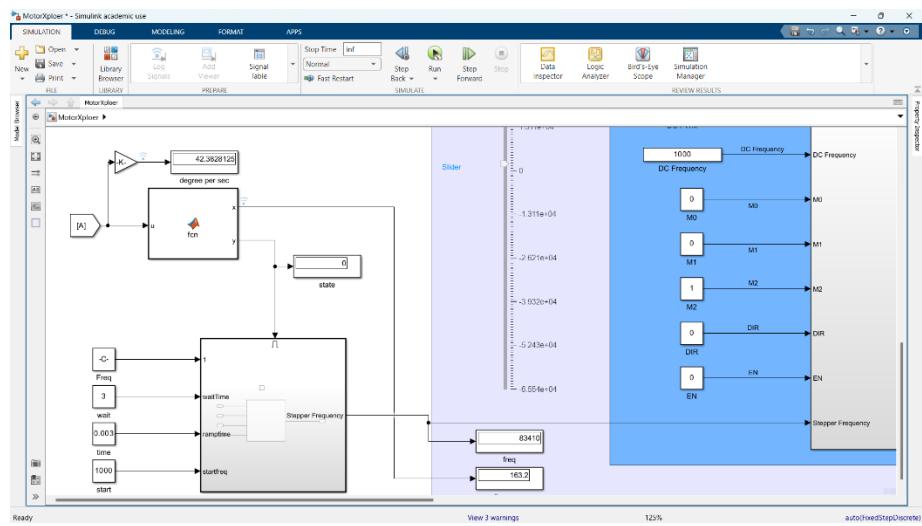
รูปที่ 33 แสดงภาพของความถี่และความเร็วที่ได้ออกมาจาก Sub-system ที่ทิศทางเข้ม



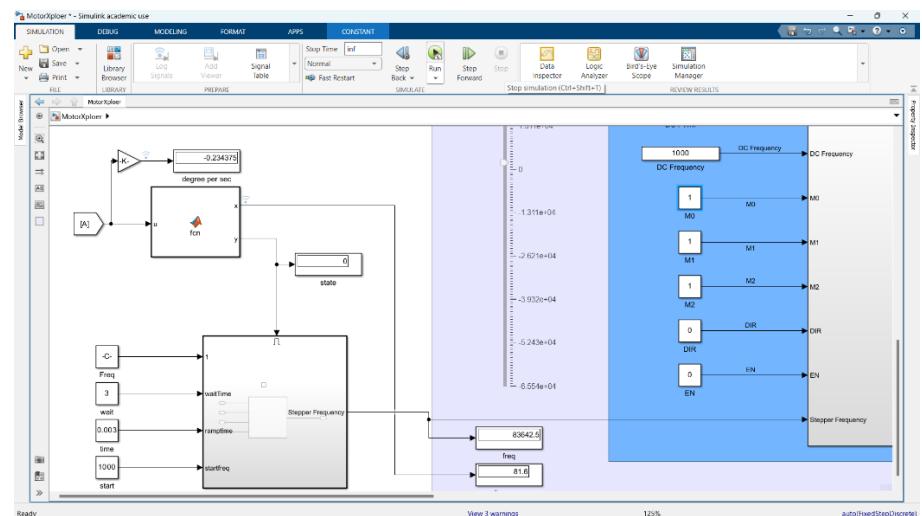
รูปที่ 34 แสดงภาพของความถี่และความเร็วที่ได้ออกมาจาก Sub-system ที่ศิษทวนเขียน



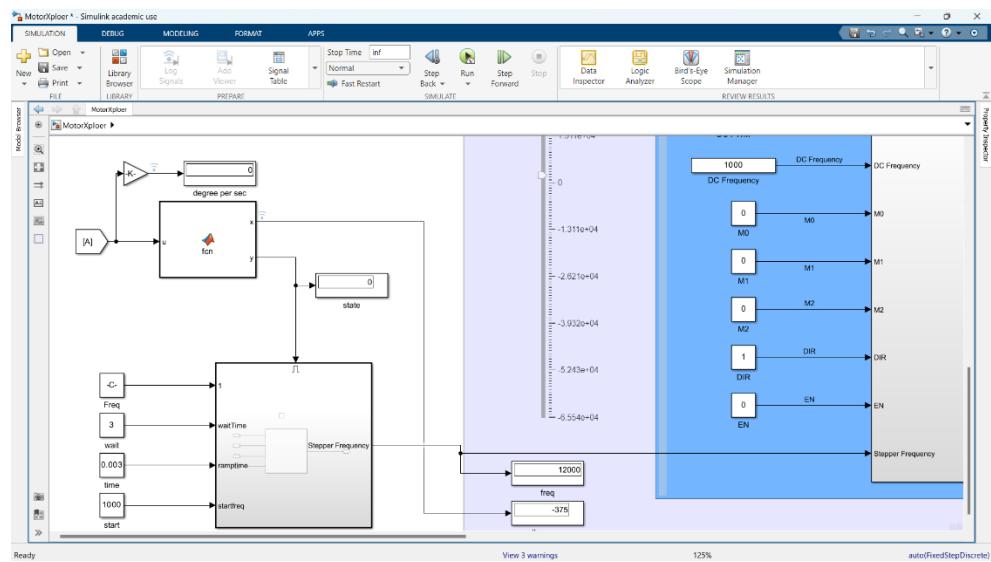
รูปที่ 35 แสดงภาพของความถี่และความเร็วที่ได้ออกมาจาก Sub-system ที่ศิษทวนเขียน



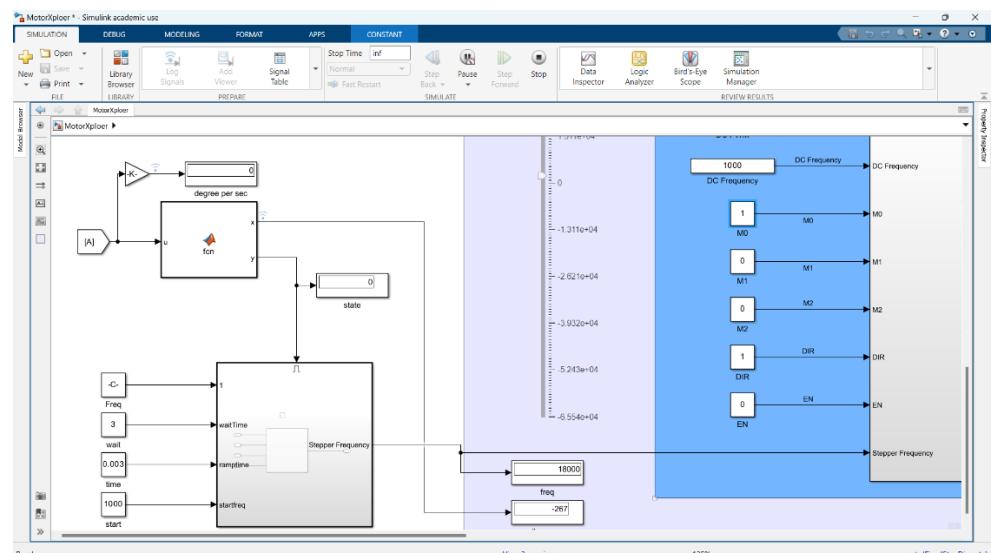
รูปที่ 36 แสดงภาพของความถี่และความเร็วที่ได้ออกมาจาก Sub-system ที่ทิศทางเข้ม



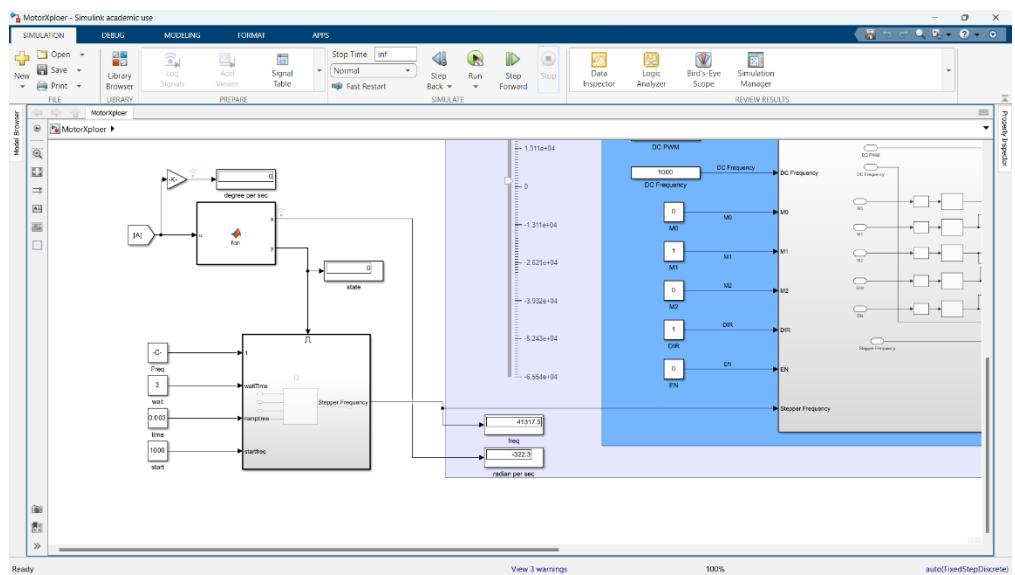
รูปที่ 37 แสดงภาพของความถี่และความเร็วที่ได้ออกมาจาก Sub-system ที่ทิศทางเข้ม



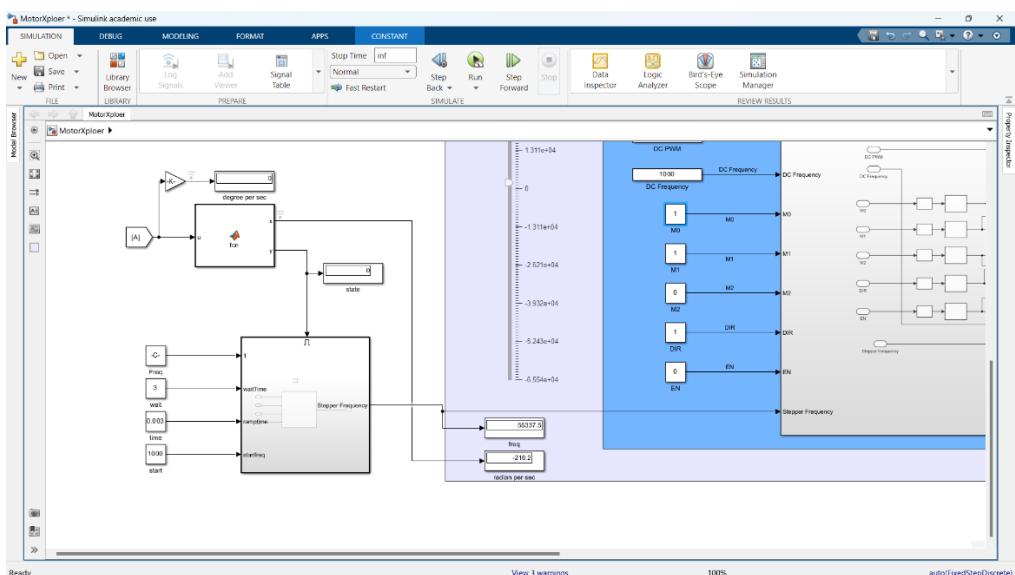
รูปที่ 38 แสดงภาพของความถี่และความเร็วที่ได้ออกมาจาก Sub-system ที่ทิศตามเข็ม



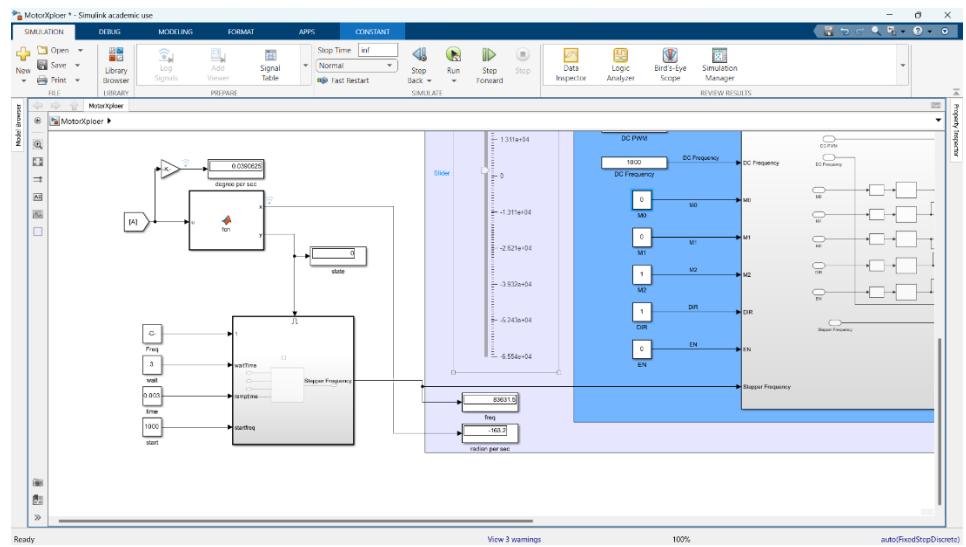
รูปที่ 39 แสดงภาพของความถี่และความเร็วที่ได้ออกมาจาก Sub-system ที่ทิศตามเข็ม



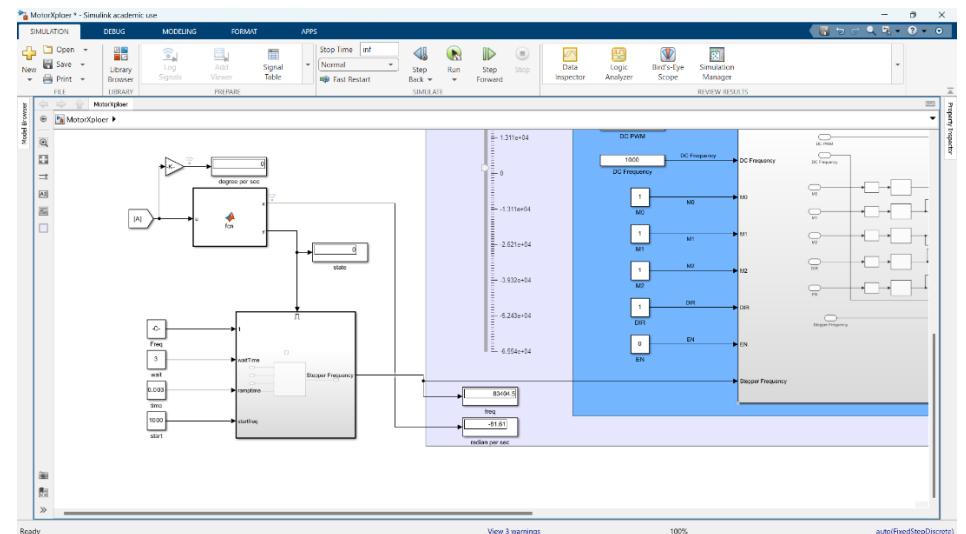
รูปที่ 40 แสดงภาพของความถี่และความเร็วที่ได้ออกมาจาก Sub-system ที่ทิศตามเข็ม



รูปที่ 41 แสดงภาพของความถี่และความเร็วที่ได้ออกมาจาก Sub-system ที่ทิศตามเข็ม



รูปที่ 42 แสดงภาพของความถี่และความเร็วที่ได้ออกมาจาก Sub-system ที่ทิศตามเข็ม



รูปที่ 43 แสดงภาพของความถี่และความเร็วที่ได้ออกมาจาก Sub-system ที่ทิศตามเข็ม

สรุปผล

จากการทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมของ Stepper Motor ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการปรับความถี่ที่จ่ายให้กับ Stepper Motor แบบก้าวกระโดด ซึ่งสามารถยืนยันตามสมมติฐานที่ว่างเอาไว้ว่าการปรับความถี่ที่มาก ๆ โดยไม่ได้รับความเร็วมีผลต่อการเกิด Loss step ของระบบ รวมไปถึงจากการทำการทดลองโดยการใส่ความถี่ที่สูงและความถี่ที่เท่ากัน ให้แก่โหมดการทำงานของ Stepper Motor ในแต่ละโหมด พบร่วมกับความถี่ที่ทำให้เกิดการ Loss step นั้นแตกต่างกัน และมีความเร็วในการทำงานที่แตกต่างกัน ตามลำดับ ซึ่งสามารถยืนยันได้จาก Display ที่ออกมาระบบใน Simulink

อภิปรายผล

จากการทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมของ Stepper Motor ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการปรับความถี่ที่จ่ายให้กับ Stepper Motor แบบก้าวกระโดดนั้น มอเตอร์จะหยุดทำงานและมีเสียงดังเกิดขึ้นตรงบริเวณ Rotor เนื่องจาก การเกิด Loss step ซึ่งมักจะเกิดขณะที่ความเร็วในการหมุนของ Rotor นั้นไม่สามารถถวигตามสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงไปของ Stator จากความถี่ที่จ่ายเข้าไป จึงต้องทำการหน่วงเวลาในการเพิ่มความเร็วให้แก่ Stepper Motor เพื่อที่จะสามารถให้เวลาในทางกลับทางไฟฟ้าสามารถเท่ากัน โดย ณ ขณะเดียวกันค่าของความถี่ที่เกิดขึ้นในแต่ละโหมดนั้นก็แสดงให้เห็นถึงค่าของความถี่ที่ใช้กันแตกต่างกันออกไป โดยยิ่งลงเอียดมากเท่าใด ลักษณะของความถี่ก็จะมากขึ้นด้วยเช่นกัน ซึ่ง มาจากการที่มีค่า ณ จุดสุดท้ายเหมือนกันแต่ความละเอียดในการการทำงานไม่เท่ากัน เพื่อป้องกันการ Loss step ที่จะเกิดขึ้น จึงทำให้ลักษณะของสัญญาณที่จะเกิดขึ้นของความเร็วจะมีลักษณะเป็น Ramp หรือมีลักษณะคล้ายคลึงกับ Trapezoidal ที่จะค่อย ๆ ไต่ความเร็วในการทำงานขึ้น ๆ ไปจนไปถึงจุด ณ ความเร็วและความถี่ที่สูงที่สุด นอกจากนี้ปัจจัยภายนอกก็มีผลต่อการทำงานมอเตอร์ เช่น การยึดติดของชิ้นงาน การสั่นสะเทือน อุณหภูมิ อาจจะส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการอ่านค่าสัญญาณที่เกิดขึ้น

ข้อเสนอแนะ

ควรมีลักษณะของการออกแบบชิ้นงานที่ยืดแหน่ง เพื่อลดปัจจัยภายนอกให้มากที่สุดและป้องกันความเสียหายที่อาจจะเกิดกับมอเตอร์ด้วยเช่นกัน หรืออาจหาวิธีในการกรอกสัญญาณให้ดีกว่านี้ เพื่อเพิ่มความแม่นยำให้กับสัญญาณที่ออกมาร่วมไปถึงความสามารถวัด Torque ที่ออกมาให้ชัดเจนกว่านี้ เพื่อให้สามารถเข้าใจได้ถึง พฤติกรรมในการทำงานและสามารถนำออกนำไปใช้ต่อได้

เอกสารอ้างอิง

<https://www.zonemaker.com/product/2749/hanpose-stepper-motor-nema11-E0%81%A3%E0%B8%87%E0%B8%9A%E0%B8%B4%E0%B8%94-10-n-cm-1-0a-11hs3410>

<https://www.allnewstep.com/product/873/drv8825-stepper-motor-drive-E0%9A%E0%B8%AD%E0%B8%A3%E0%B9%8C%E0%B8%94%E0%B8%82%E0%B8%B1%E0%B8%9A%E0%B8%A1%E0%B8%AD%E0%B9%80%E0%B8%95%E0%B8%AD%E0%B8%A3%E0%B9%8C-drv8825>

<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/drv8825.pdf>

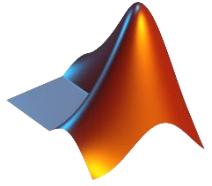
<https://howtomechatronics.com/how-it-works/electrical-engineering/stepper-motor/>

https://www.monolithicpower.com/en/learning/resources/stepper-motors-basics-types-uses?srsltid=AfmBOoqOBarJxblr_pXTJ7UA5fYUzWTwfoTXTlc29WOYPwS6Kxj5eZsA

https://www.ti.com/lit/an/sloa312/sloa312.pdf?ts=1734770372496&ref_url=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F

<https://www.linearmotiontips.com/stepper-motor-torque-speed-characteristics-explained/>

RMXplorer



LAB3 : Brushless DC Motor Report

Name

- นายกฤษณ์ ลีตระกูล 66340500002
- นายกิตติภณ หลำพงษ์ 66340500004

จุดประสงค์

- สามารถทำตามการวิเคราะห์ผลการเรียนรู้หลัก
- สามารถอธิบายหลักการทำงานของ Brushless DC Motor ได้
- สามารถเข้าใจวิธีการตั้งค่า Motor ในโปรแกรม Motor Workbench 6.3.2
- สามารถเข้าใจวิธีการตั้งค่า PWM Generation Frequency และ Speed Sensing
- สามารถเข้าใจ Electrical parameters, Mechanical parameters, และ Motor magnetic structure ของ Brushless DC Motor
- สามารถเข้าใจ Brushless DC Motor control types ทั้งในรูปแบบ Sensorless Control และ Sensor-based Control
- สามารถเข้าใจและอธิบายกราฟสัญญาณของ Brushless DC Motor ทั้ง 3 Phases จากพฤติกรรมที่สังเกตว่ามาจากการคุณแบบไหน และสาเหตุที่กราฟมีลักษณะเช่นนี้โดยละเอียด และวิเคราะห์โดยใช้ผลการเรียนรู้ย่อยที่เกี่ยวข้องมาอธิบายและอภิปรายในผลการทดลอง ครอบคลุมถึง
 - Brushless DC Motor
 - Trapezoidal Back EMF
 - Permanent Magnet Synchronous Machine (PMSM)
 - Trapezoidal Control
 - Field-Oriented Control (FOC)
 - Pulse Width Modulation (PWM)

- Commutation Logic
- Six-Step Commutation
- Space Vector Modulation (SVM)
- Sensorless Control
- Hall Effect Sensors
- โดยสามารถนำผลการทดลองไปเปรียบเทียบกับพัฒนาระบบควบคุม PMSM แบบ FOC ด้วยการสืบค้นจากแหล่งข้อมูลภายนอก เช่น MATLAB
- สามารถเข้าใจวิธีการคำนวณหาความเร็วของ Brushless DC Motor จาก Frequency ของสัญญาณที่อ่านได้จาก Oscilloscope
- สามารถเข้าใจวิธีการใช้งาน Oscilloscope 4 Channels ในการจับสัญญาณของ Brushless DC Motor ทั้ง 3 Phases

การทดลองที่ 1 การทดลองเพื่อศึกษาพัฒนาระบบควบคุมของ Brushless DC Motor

จุดประสงค์

- เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน Back EMF กับความเร็วรอบของ BLDC Motor
- เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน Back EMF กับตำแหน่ง BLDC Motor
- เพื่อศึกษาพัฒนาระบบการทำงานของ Brushless DC Motor
- เพื่อศึกษาและเข้าใจสัญญาณของ Brushless DC Motor ที่ใช้การ Commutation ผ่าน Trapezoidal control และแสดงผลออกมารูปกราฟ โดยเทียบกับลักษณะกับการควบคุมชนิดอื่น ๆ เพื่อแสดงให้เห็นลักษณะของสัญญาณ Output ที่ออกมานั้น

สมมติฐาน

- แรงดัน Back EMF ที่เกิดขึ้นใน Brushless DC Motor จะเพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบของมอเตอร์
- ทดลองเพื่อหาตำแหน่งของ Brushless DC Motor ด้วย Back EMF โดยใช้หลักการ Zero Crossing Detection
- การควบคุมแบบ 6-Step มีต้นทุนการพัฒนาที่ต่ำกว่าแบบ FOC
- การควบคุม Brushless DC Motor ในแต่ละแบบนั้นให้ผลลัพธ์และประสิทธิภาพที่แตกต่างกัน
- ลักษณะการควบคุมชนิดต่าง ๆ มีผลต่อลักษณะของสัญญาณ Output ที่ออกมานั้น

ตัวแปร

ตัวแปรต้น	ชนิดของการควบคุม, แรงดันไฟฟ้าขาเข้า (Input Voltage) กระแสไฟฟ้าขาเข้า (Input Current), ความถี่หรือรูปแบบของ PWM (Pulse Width Modulation)
ตัวแปรตาม	ความเร็วรอบ, แรงดัน Back EMF
ตัวแปรควบคุม	ชนิดของมอเตอร์ (Motor Type), แรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟ (Supply Voltage)

นิยามศัพท์เฉพาะ

คำศัพท์	ความหมาย
Binary code	คือ ระบบรหัสที่ใช้ตัวเลขเพียงสองตัว คือ 0 และ 1 เพื่อแสดงข้อมูลหรือคำสั่งในคอมพิวเตอร์และระบบดิจิตัลๆ ระบบนี้เรียกว่า เลขฐานสอง ซึ่งแตกต่างจากระบบเลขฐานสิบที่ใช้ตัวเลข 0-9
Torque	คือ แรงที่ทำให้เกิดการหมุนรอบจุดหมุนหรือแกนหมุน
Torque ripple	คือ ความไม่สม่ำเสมอหรือการเปลี่ยนแปลงของแรงบิด (Torque) ที่เกิดขึ้นระหว่างการทำงานของมอเตอร์
Quadrature axis	คือ หนึ่งในสองแกนแม่เหล็กไฟฟ้าสมมุติที่ใช้ในระบบควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าแบบซิงโครนัส (Synchronous Motor) หรือ มอเตอร์ Brushless DC Motor โดยยังอิงจาก D-Q Transformation หรือ Park Transformation
Space vector 2D	คือ วิธีการแทนสนามแม่เหล็กหรือสถานะของมอเตอร์ในระบบพิกัดเชิงชั้น (Complex Plane) หรือมิติสองมิติ (2D Plane)
Eddy current	คือ กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในวัสดุที่นำไฟฟ้าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก (Magnetic Flux) รอบวัสดุนั้น ตาม หลักการของ Faraday's Law of Induction
Direct axis	คือ แกนสมมุติที่กำหนดขึ้นในระบบพิกัด D-Q Transformation (Park Transformation) ซึ่งใช้ในการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าประเภทซิงโครนัส (Synchronous Motor) และ Brushless DC Motor
Flux	การไหลของสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field) ผ่านพื้นที่หนึ่ง ซึ่งเป็นปริมาณที่สำคัญในมอเตอร์ไฟฟ้าและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
Park Transformation	คือการแปลงพิกัดจากระบบสามเฟส (3-Phase) หรือระบบ $\alpha - \beta$ ไปสู่ระบบ $d - q$ (Direct-Quadrature Axes) เพื่อทำให้การวิเคราะห์และควบคุมมอเตอร์ง่ายขึ้น
Clarke Transformation	คือ การแปลงพิกัดจากระบบสามเฟส (3-Phase) ไปสู่ระบบสองแกน $\alpha - \beta$ ซึ่งเป็นพิกัดอยู่กับที่ (Stationary Reference Frame)

นิยามเชิงปฏิบัติการ

คำศัพท์	ความหมาย
Back EMF	คือ แรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Motor) หรือในการนิปปิ้งคือ Brushless DC Motor อันเนื่องมาจากการหมุนของมอเตอร์ที่ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าในชุด rotor
Zero crossing	คือ จุดที่สัญญาณไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้าผ่านค่าศูนย์ ในลักษณะการเปลี่ยนขั้วจากค่าบวกเป็นค่าลบ หรือจากค่าลบเป็นค่าบวกบนกราฟเวลาต่อแรงดันหรือกระแสไฟฟ้า
Voltage	แรงดันไฟฟ้า หรือความต่างศักย์ไฟฟ้าในวงจรไฟฟ้า มีหน่วยวัด คือ โวลต์ (V)
RPM หรือ rpm	Revolutions Per Minute คือ หน่วยที่ใช้วัดความเร็วซึ่งมุ่งของวัตถุหมุน โดยแสดงจำนวนรอบที่วัตถุหมุนในเวลา 1 นาที
Controller	คือ อุปกรณ์หรือซอฟต์แวร์ที่ใช้ควบคุมการทำงานของระบบหรืออุปกรณ์ เช่นมอเตอร์, ระบบอัตโนมัติ หรือวงจรไฟฟ้า โดยทำหน้าที่รักษาสถานะของระบบให้อยู่ในค่าที่ต้องการผ่านการควบคุมแบบ Feedback
Phase	คือ ความสัมพันธ์เชิงเวลา (หรือนิพจน์) ระหว่างสัญญาณไฟฟ้าสองสัญญาณหรือมากกว่านั้น ซึ่งเพิ่มบทบาทสำคัญในระบบไฟฟ้ากระแสสลับ (AC)

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. Brushless DC Motor

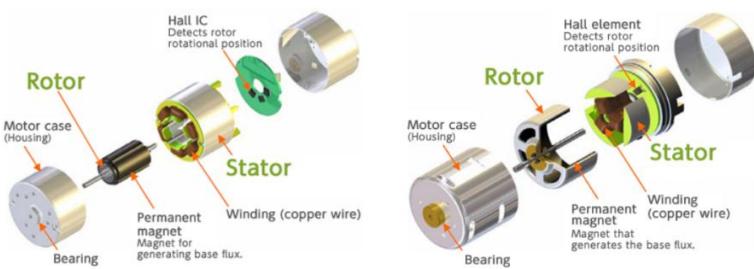
มอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน (Brushless DC Motor หรือ BLDC Motor) คือ มอเตอร์ชนิดหนึ่งที่มีหลักการทำงานโดยอาศัยสนามแม่เหล็กหมุน เพื่อสร้างแรงบิดในการขับเคลื่อน โดยแตกต่างจากมอเตอร์กระแสตรงแบบมีแปรงถ่านตรงที่ไม่มีส่วนประกอบของแปรงถ่าน ซึ่งเป็นส่วนที่ก่อให้เกิดการเสียดสีและเสียงหรืออีกทั้งไม่สามารถนิยมนำไปใช้ในอุตสาหกรรมที่ต้องการรักษาความสะอาดมากได้เนื่องจากการเสียดสีสีนั้นทำให้เกิดฝุ่นและไปปนเปื้อนในกระบวนการได้ จึงส่งผลให้อายุการใช้งานของ Brushless DC Motor ยาวนานกว่า มีประสิทธิภาพสูงกว่า สร้างเสียงรบกวนน้อยกว่า และปลดภัยต่อกระบวนการผลิตกว่า

โครงสร้างของ Brushless DC Motor ประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก 3 ส่วน ได้แก่

- Stator: ส่วนที่อยู่นิ่ง ประกอบด้วยแกนเหล็กที่พันด้วยชุดลวด ซึ่งชุดลวดเหล่านี้จะทำหน้าที่สร้างสนามแม่เหล็กหมุน
- Rotor: ส่วนที่หมุน ประกอบด้วยแม่เหล็กถาวรที่ติดตั้งอยู่บนแกนเหล็ก การออกแบบอาจเป็นได้ทั้ง Rotor ด้านใน (Inrunner) หรือด้านนอก (Outrunner) ขึ้นอยู่กับการเลือกใช้งาน

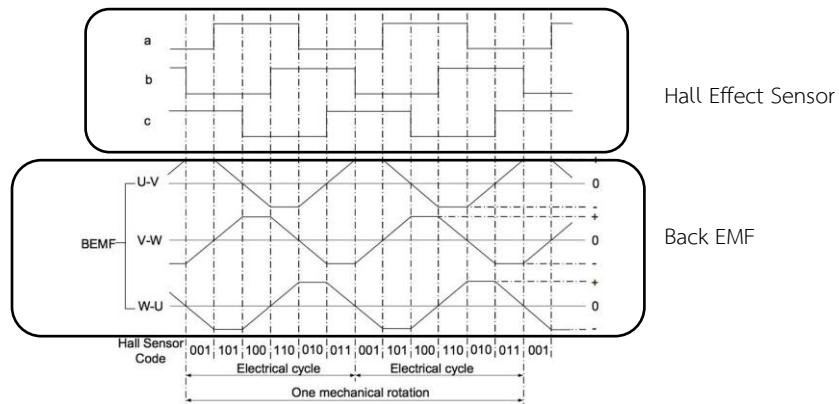
	Inrunner	Outrunner
ตำแหน่ง Rotor	อยู่ด้านใน	อยู่ด้านนอก
Torque	ต่ำกว่า	สูงกว่า
ความเร็วรอบ	สูงกว่า	ต่ำกว่า
ประสิทธิภาพ	สูงกว่า	ต่ำกว่าเล็กน้อย
เสียงรบกวน	ต่ำ	สูงกว่าเล็กน้อย
การระบายความร้อน	ปานกลาง	ดี
ราคา	สูงกว่า	ต่ำกว่า

ตารางที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบ Brushless DC Motor แบบ Inrunner และ Outrunner



รูปที่ 1 แสดง Brushless DC Motor แบบ Inrunner (ซ้าย) และ Outrunner (ขวา)

- Hall Effect Sensor: การติดตั้ง Hall Effect Sensor ใน Brushless DC Motor นั้นจะถูกติดตั้งรอบ Statorของมอเตอร์ โดยอยู่ที่ระยะห่าง 120° ไฟฟ้าในระบบ 3 Phase ซึ่งเซ็นเซอร์เหล่านี้จะตรวจจับสนามแม่เหล็กที่มาจากการ Rotorที่เป็นแม่เหล็กถาวร โดยทำงานเมื่อ Rotorหมุน สนามแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรข้ามเหนือและใต้จะเคลื่อนที่ผ่าน Hall Effect Sensors ซึ่งจะส่งสัญญาณไฟฟ้าค่า "สูง" (HIGH, 1) หรือ "ต่ำ" (LOW, 0) ขึ้นอยู่กับตำแหน่งสนามแม่เหล็ก โดยสัญญาณจากเซ็นเซอร์ 3 ตัวจะสร้างรหัสใบนาฬิกาที่ใช้ระบุตำแหน่งทางไฟฟ้าของ Rotor และนำค่าตำแหน่งที่ได้จาก Hall Effect Sensor ส่งไปยังตัวควบคุม เพื่อกำหนดลำดับการจ่ายกระแสให้กับชุดลวดใน Stator ดังตัวอย่างในรูปที่ 2



รูปที่ 2 แสดงภาพสัญญาณที่ใช้ในการสั่งงานให้มอเตอร์หมุน

ช่วงมุมไฟฟ้า	Phase A	Phase B	Phase C
$0^\circ - 60^\circ$	แรงดัน +	แรงดัน -	Zero Crossing (0)
$60^\circ - 120^\circ$	Zero Crossing (0)	แรงดัน -	แรงดัน +
$120^\circ - 180^\circ$	แรงดัน -	Zero Crossing (0)	แรงดัน +
$180^\circ - 240^\circ$	แรงดัน -	แรงดัน +	Zero Crossing (0)
$240^\circ - 300^\circ$	Zero Crossing (0)	แรงดัน +	แรงดัน -
$300^\circ - 360^\circ$	แรงดัน +	Zero Crossing (0)	แรงดัน -

ตารางที่ 2 แสดงลำดับการทำงานของแต่ละ Phase ในแต่ละช่วงตำแหน่ง สำหรับการหมุน 1 รอบ แบบ Sensorless

ช่วงมุมไฟฟ้า	Phase A	Phase B	Phase C	Binary code
$0^\circ - 60^\circ$	1	0	1	101
$60^\circ - 120^\circ$	1	0	0	100
$120^\circ - 180^\circ$	1	1	0	110
$180^\circ - 240^\circ$	0	1	0	010
$240^\circ - 300^\circ$	0	1	1	011
$300^\circ - 360^\circ$	0	0	1	001

ตารางที่ 3 แสดงลำดับการทำงานของแต่ละ Phase ในแต่ละช่วงตำแหน่ง สำหรับการหมุน 1 รอบ แบบ Sensor Base

หัวข้อ	Sensor Base	Sensorless
ความแม่นยำของตำแหน่ง	มีความแม่นยำระดับ 60° ไฟฟ้าในแต่ละช่วงของเซ็นเซอร์	ความแม่นยำขึ้นอยู่กับการวัด Back EMF
ช่วงความเร็ว	ทำงานได้ดีทั้งที่ความเร็วต่ำ และความเร็วสูง	ทำงานได้ดีที่ความเร็วปานกลางถึงสูง แต่ที่ความเร็วต่ำ Back EMF ต่ำเกินไป ทำให้ควบคุมยาก
ความซับซ้อนของวงจรควบคุม	วงจรควบคุมง่ายกว่า เนื่องจากไม่ต้องวิเคราะห์สัญญาณ Back EMF	ต้องการวงจรและซอฟต์แวร์ที่ซับซ้อนในการวิเคราะห์ Back EMF เพื่อระบุตำแหน่ง
ตันทุน	ตันทุนสูงกว่า เนื่องจากต้องใช้ Hall Effect Sensor และการติดตั้งที่ซับซ้อน	ตันทุนต่ำกว่า เนื่องจากไม่ต้องใช้เซ็นเซอร์
การใช้งาน	เหมาะสมสำหรับงานที่ต้องการการควบคุมที่แม่นยำและการเริ่มต้นที่ราบรื่น เช่น พัดลมไฟฟ้า ทุ่นยนต์	เหมาะสมสำหรับงานที่เน้นตันทุนต่ำหรือไม่ต้องการการควบคุมที่แม่นยำสูง เช่น เครื่องมือไฟฟ้า

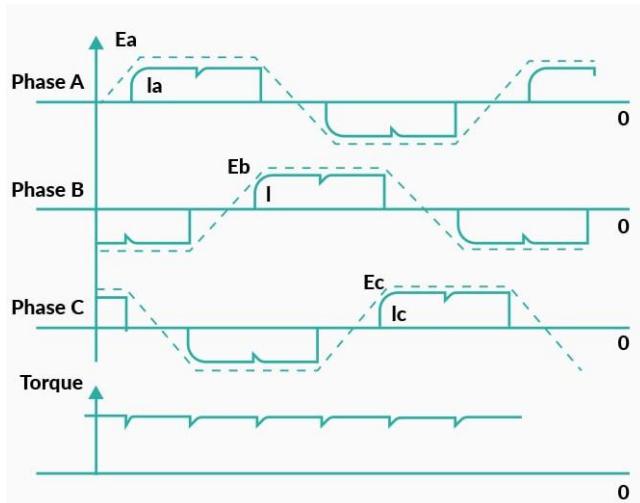
ตารางที่ 4 เปรียบเทียบความสามารถของแบบ Sensor Base และ Sensorless

2. Brushless DC Motor Control Techniques

Brushless DC Motor Control Techniques คือ วิธีการในการควบคุมความเร็ว Torque และทิศทางของมอเตอร์ ผ่านสัญญาณไฟฟ้าที่จ่ายเข้าไป โดย ณ ขณะเดียวกันก็สามารถจำลองการควบคุมกระแสผ่าน Vector 2 มิติ (Current space vector) เพื่ออธิบายถึงขนาดและทิศทางที่เปลี่ยนแปลงไปของ Electromagnetic ของกระแสที่เหลือผ่านชุดลวดของมอเตอร์ใน 2 มิติ โดยมีลักษณะ ดังนี้

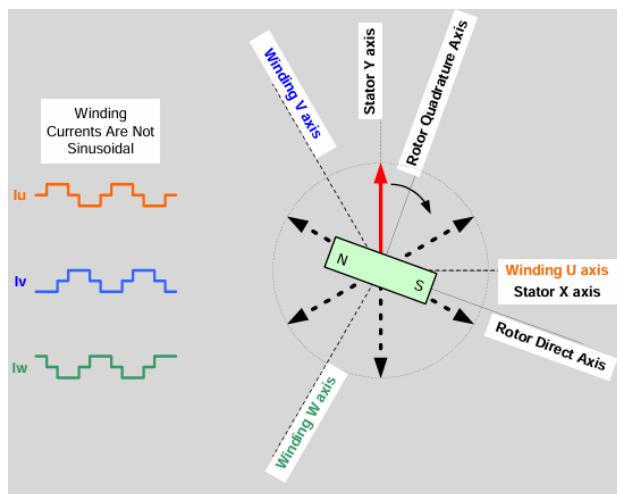
2.1 Trapezoidal Control หรือ 6-Step Commutation

Trapezoidal Control หรือ 6-Step Commutation คือ การควบคุมมอเตอร์ผ่านการจ่ายกระแสไฟหรือ PWM (Pulse Width Modulation) ให้ขาด漉ดในมอเตอร์ โดยจะทำการจ่ายกระแสไฟให้กับ 2 ชุดลวด และสลับสับเปลี่ยนตำแหน่งกันเป็นจำนวน 3 ครั้ง จึงทำให้เกิดการหมุนทั้งหมด 6 ครั้ง จึงจะครบหนึ่งรอบ Rotor หรือ 1 รอบการทำงาน เลยทำให้ลักษณะการทำงานจะอยู่ที่ช่วง 2 Phase เสมอ จากช่วงการทำงานทั้งหมด 3 Phase



รูปที่ 3 แสดงลักษณะการเปลี่ยน Phase ของกราฟ Trapezoidal Control

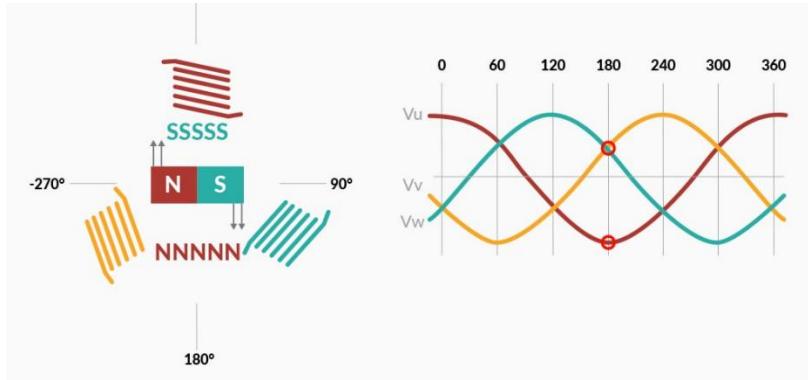
จากการที่กล่าวไปข้างต้น เมื่อพิจารณาลักษณะการเคลื่อนที่ของกระแสใน Space vector 2D นั้น จะพบว่า การหมุนของ Rotor จะมีการเปลี่ยนตำแหน่งของ Phase ทุก ๆ 120 องศา แต่จะมีช่วงเปลี่ยนตำแหน่งของขดลวดในวงจรที่ 60 องศา ซึ่งเนื่องจากการควบคุมแบบนี้สามารถเคลื่อนที่ไปตามที่ทิศทางได้แค่ 6 ตำแหน่งตามองศาที่ออกแบบไว้เท่านั้น จึงทำให้มีระยะห่างจาก Quadrature axis (Q-axis) ที่เหมาะสมอยู่ 0-30 องศา จึงทำให้เกิดระยะห่างระหว่างสนามแม่เหล็กของ Rotor และ Stator และเกิด Torque ripple อยู่ที่ 15% จึงทำให้การควบคุมแบบนี้นั้นทำงานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ ณ ช่วงความถี่น้อย



รูปที่ 4 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของ Trapezoidal Control

2.2 Sinusoidal Control

Sinusoidal Control คือ การควบคุมมอเตอร์อิเล็กטרิกประเภทหนึ่ง ที่มีลักษณะการทำงานที่คล้ายคลึงกับ Trapezoidal Control แต่มีความสมูทและแม่นยำมากกว่า รวมไปถึงไม่มี Torque ripple ที่เกิดขึ้นเนื่องจากต้องใช้การบอกระดับตำแหน่งที่ซัดเจนผ่าน Hall Sensor หรืออุปกรณ์ชนิดอื่น ๆ อย่างเช่น Encoder โดยลักษณะการทำงานควบคุมแบบนี้นั้นมักจะพบใน Permanent Magnet Synchronous Motors (PMSM) หรือ มอเตอร์ที่ติด Hall Sensor

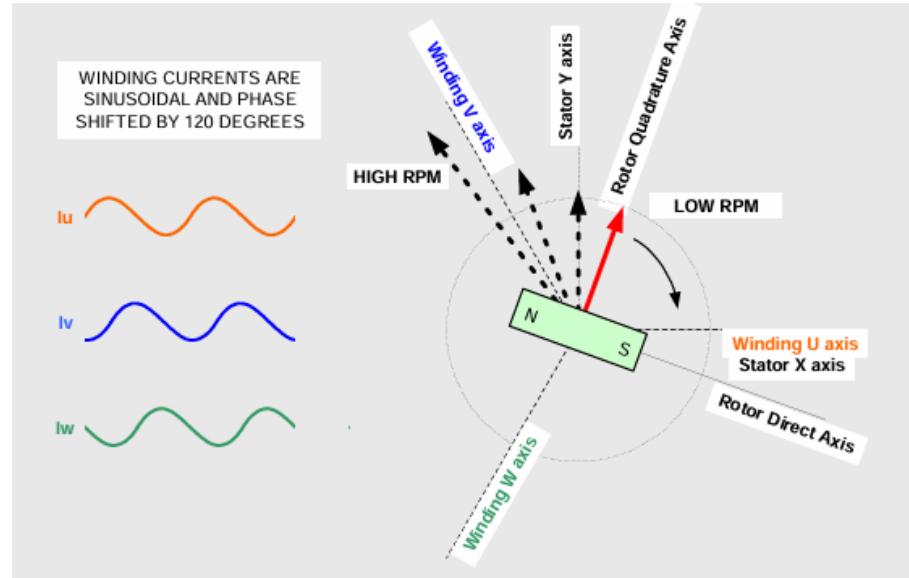


รูปที่ 5 แสดงลักษณะกราฟของ Sinusoidal Control

จากการที่กล่าวไปข้างต้น เมื่อพิจารณาลักษณะการเคลื่อนที่ของกระแสใน Space vector 2D นั้น จะพบว่า จากการที่ขัดลาวด Stator ที่ห่างกัน 120 องศา จึงทำให้เกิดช่วงของการเปลี่ยน Phase ทุก ๆ 120 องศารวมไปถึงจากการที่อุปกรณ์ชนิดอื่น ๆ อย่างเช่น Encoder, Hall effect สามารถหาตำแหน่งที่เกิดจากการหมุนได้ จึงทำให้สามารถรวมคลื่นที่เกิดขึ้นที่มีลักษณะที่ห่างกัน 120 องศา โดยมีจุดประสงค์ เพื่อที่จะทำให้กระแสไฟฟ้าที่จ่ายเข้าไปยังขดลวดนั้น สามารถคล้อยตามไปกับตำแหน่งของ Rotor ได้ จึง ในขณะเดียวกันก็สามารถทำให้ Torque สมูทและได้ตามขนาดตามความต้องการ โดยเมื่อสานมแม่เหล็กของ Rotor และ Stator ตั้งหากันจะเกิด Torque สูงสุด และจากพฤษติกรรมที่เกิดขึ้น จึงทำให้ลักษณะของกราฟในการทำงานมีความคล้ายคลึงกับ Sine wave

อย่างไรก็ตามการควบคุมแบบนี้นั้นมีประสิทธิภาพในช่วงที่ความเร็วไม่มาก เพราะในช่วงที่ความเร็วสูงนั้น Controller ของอุปกรณ์จะต้องติดตามช่วงความที่ถี่มากขึ้นของมอเตอร์ ซึ่งในขณะเดียวกับก็ต้องรับภาระจาก Back EMF ที่เพิ่มขึ้นตามไปด้วยเช่นกัน และจากการที่ Controller มีลิมิตในการตอบสนองต่ออัตราขยายและความถี่ จึงทำให้เกิดข้อผิดพลาดในการสร้างอัตราขยายในกระแสของมอเตอร์ รวมไปถึงทำให้ค่าของการเปลี่ยน Phase ที่ผิดเพี้ยนไป จึงทำให้ค่าของ Quadrature axis (Q-axis) ถูกเลื่อนออกไปจากค่าที่ควรจะเป็น และทำให้ Torque ตกลงไปด้วยเช่นกัน ซึ่งถ้าต้องการควบคุม Torque ให้

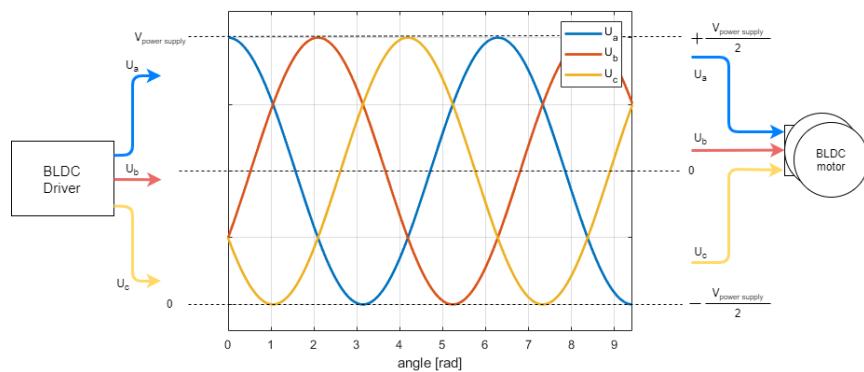
คงที่ มอเตอร์ก็จะกินกระแสเพิ่มขึ้น โดยยิ่งความเร็วเพิ่มขึ้น การเปลี่ยน Phase อาจจะคาดเคลื่อนไปได้ถึง 90 องศา และจะทำให้ Torque ที่เกิดมีค่าเท่ากับ 0



รูปที่ 6 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของ Sinusoidal Control

2.3 Field-Oriented Control (FOC)

Field-Oriented Control (FOC) คือ การควบคุมที่ลักษณะการทำงานแบบ Sinusoidal Control แต่จะควบคุมมอเตอร์ผ่านคณิตศาสตร์ขั้นสูง เพื่อเพิ่ม Torque สูงสุดจากการควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ถูกจ่ายให้กับ Stator ให้มีทิศทางตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กของ Rotor และเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานให้มอเตอร์ โดยลดพลังงานที่จะสูญเสียให้น้อยที่สุด เช่น การลดการเกิดกระแสไฟห้วน (Eddy current) รวมไปถึงมีแรงดันข้าออกเป็น PWM (Pulse Width Modulation)

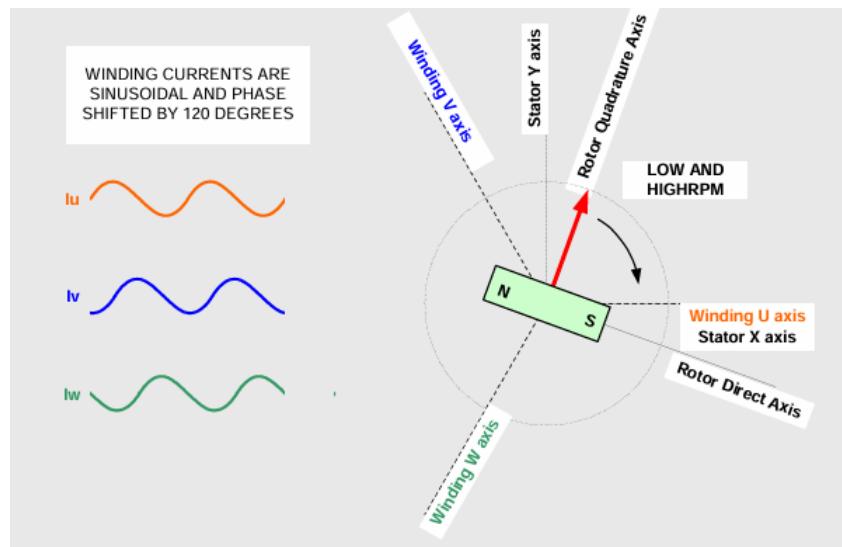


รูปที่ 7 แสดงลักษณะกราฟของ FOC

จากการที่กล่าวไปข้างต้น เมื่อพิจารณาลักษณะการเคลื่อนที่ของกระแสใน Space vector 2D นั้น จะพบว่า โดยการควบคุมแบบ Field-Oriented Control (FOC) นั้นจะทำงานด้วยการแปลงค่าคงที่ทาง คลีตสาสตร์ที่ได้จากการอ้างอิงในทั้ง 3 Phase ของ Stator มาเป็นการอ้างอิงที่ไม่เคลื่อนที่ (Stationary reference frame) ผ่าน Clarke Transformation เพื่อลดการคำนวณ Phase ให้เหลือ 2 Phase จากนั้นจึงใช้ Park Transformation เพื่อเปลี่ยนมาเป็นการอ้างอิงที่เกิดจากการหมุน (Rotating reference frame) เนื่องจากการใช้กรอบอ้างอิงที่มีการเคลื่อนที่ตลอดเวลา อาจจะทำให้ ค่าที่ได้ออกมาผิดเพี้ยนและควบคุมได้ยาก จึงต้องเปลี่ยนมาเป็นการอ้างอิงที่ไม่เคลื่อนที่ เพื่อที่จะควบคุม Rotor จากแกน D-Q axis โดยโฟกัสไปที่ขนาดและทิศทางในมุม Quadrature axis (Q-axis) ของ Rotor โดยไม่คำนึงถึงการหมุน เพราะใช้แกนอ้างอิง D-Q axis ในการออกแบบวิธีการควบคุม เนื่องจากมุม Direct axis (D-axis) และ Quadrature axis (Q-axis) นั้นเป็นค่าคงที่ และจะช่วยทำให้ Controller ไป ใช้แกนอ้างอิงที่กำหนดไว้ แทนการอ้างอิงจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าหรือ PWM (Pulse Width Modulation) โดยตรง รวมไปถึงการควบคุมแบบนี้นั้นก็สามารถกำจัดลิมิตที่เกิดขึ้นจาก Controller ได้ ด้วยเช่นกัน

เมื่อถูกแปลงมาเป็นการอ้างอิง D-Q axis แล้วนั้น จึงนำ Controller 2 ตัว มาควบคุมการทำงาน โดยทั้ง 2 ตัวนั้นมีหน้าที่ที่แตกต่างกันในการใช้งาน ซึ่งอันแรกจะถูกนำมาใช้กับ Direct axis (D-axis) เพื่อ ใช้ในการควบคุมแกนของ Rotor จากการที่ทำให้ค่าของฟลักซ์แม่เหล็ก (Flux) มีค่าเป็น 0 เพื่อให้กระแส ทั้งหมดถูกใช้เพื่อสร้าง Torque ที่ต้องการให้กับแกนอีกประเภทหรือ Quadrature axis (Q-axis) โดยมี ค่าที่ได้จาก Controller ทั้ง 2 เป็นแรงดันของ Rotor

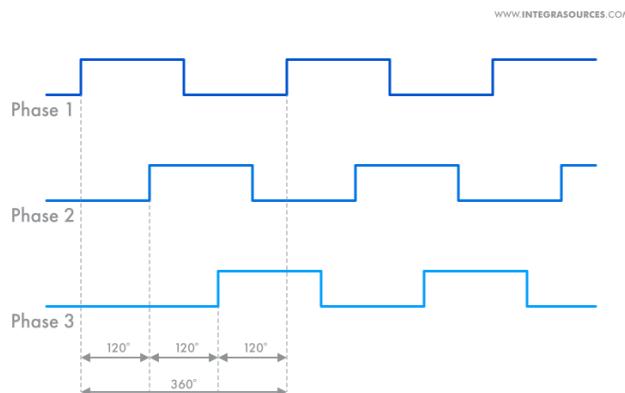
โดยเมื่อได้ค่าที่ได้จากการแปลงค่าในแกน D-Q axis และแรงดันที่ได้มาจากการ Controller ทั้ง 2 แล้ว นั้น ค่า D-Q axis ของ Rotor จะถูกเปลี่ยนกลับไปสู่แกน x-y ของ Stator และแรงดันจะถูกเปลี่ยนกลับไป เป็นค่าทางกายภาพของ U, V, W ที่ 120 องศาของขดลวดในมอเตอร์ โดยท้ายที่สุดแล้วนั้นก็จะสามารถ ทำให้ควบคุมมอเตอร์จากแรงดัน 3 Phase จาก PWM (Pulse Width Modulation) ได้



รูปที่ 8 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของ Field-Oriented Control (FOC)

2.4 PWM (Pulse Width Modulation)

PWM (Pulse Width Modulation) คือ การควบคุมแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่จ่ายให้มอเตอร์ผ่านสัญญาณช่วงเปิดต่อช่วงเวลาทั้งหมด หรือ Duty Cycle ด้วยความถี่ที่ต่ำจนถึงสูง เพื่อให้มอเตอร์สามารถทำงานได้อย่างราบรื่นและไม่มีเสียงรบกวน โดยสามารถควบคุมความเร็ว, Torque และกำลัง ให้มอเตอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 9 แสดงลักษณะกราฟของ PWM

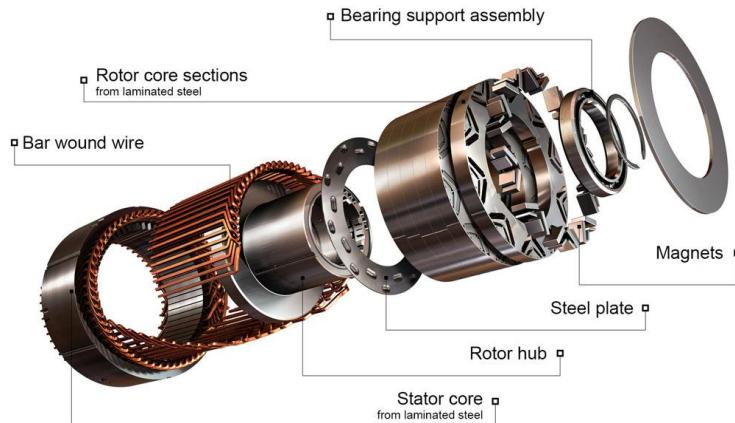
2.5 ตารางสรุปความแตกต่างของการควบคุม Brushless DC Motor ทั้ง 3 แบบ

เทคนิคการควบคุม	Torque Ripple	ประสิทธิภาพ	ความซับซ้อน	การใช้งานหลัก	ข้อดี	ข้อเสีย
Trapezoidal Control	สูง	ต่ำถึงปานกลาง	ไม่ซับซ้อน	- พัดลม - ปั๊ม - โดรน	- ใช้งานง่าย - ใช้ต้นทุนต่ำ - ใช้งานได้ทั้งแบบมีเซ็นเซอร์และไม่มีเซ็นเซอร์	- Torque Ripple สูง - เสียงดัง - ประสิทธิภาพลดลงเมื่อใช้ความเร็วสูง
Sinusoidal Control	ต่ำมาก	ปานกลางถึงสูง	ปานกลาง	- เหมาะกับงานในระบบปิด - งานที่มีต้นทุนต่ำ	- ใช้ต้นทุนต่ำ - ไม่ต้องบำรุงรักษาเซ็นเซอร์บ่อย	- ควบคุมที่ความเร็วต่ำได้ยาก - ต้องใช้การคำนวนสูงเพื่อความแม่นยำ
Field-Oriented Control (FOC)	ต่ำ	สูง	ซับซ้อนมาก	- หุ่นยนต์ - รถยกไฟฟ้า - ระบบขับเคลื่อน - อุตสาหกรรม - งานที่ต้องการความแม่นยำสูง	- Torque ที่ราบรื่น - การตอบสนองได้ไว - ควบคุมความเร็วได้ดี	- มีความซับซ้อนในการใช้งาน - ต้องใช้การประมวลผลสูง - ใช้ต้นทุนต่ำสูง

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบลักษณะการควบคุมแบบ Trapezoidal Control, Sinusoidal Control และ Field-Oriented Control (FOC)

3. PWSM (Permanent Magnet Synchronous Motor)

คือ มอเตอร์ซิงโครนัสที่ใช้แม่เหล็กถาวรชนิดเนODYMIUM เพื่อสร้างสนามแม่เหล็ก แทนการใช้กระแสไฟฟ้าเหมือนในมอเตอร์แบบเหนี่ยวน้ำ (Induction Motor) โดยมีข้อได้เปรียบในด้านประสิทธิภาพสูง แรงบิดต่อหน่วยน้ำหนักมาก และการทำงานที่เงียบ เนื่องจากไม่มีการสูญเสียพลังงานในรูปความร้อนจากการกระแสไฟฟ้าบนโรเตอร์ PWSM มีโครงสร้างของโรเตอร์แบบติดตั้งแม่เหล็กบนพื้นผิว (Surface-Mounted PMSM) และแบบฝังแม่เหล็กภายใน (Interior PMSM) ซึ่งเหมาะสมกับงานที่ต้องการความเร็วสูงและความทนทาน อย่างไรก็ตาม มอเตอร์ชนิดนี้มีต้นทุนที่สูงกว่า Induction Motor เนื่องจากการใช้แม่เหล็กถาวร เช่น นิโอไดเมียม (Neodymium) และมีข้อจำกัดด้านการทำงานเมื่ออุณหภูมิสูง PWSM นักใช้ในงานที่ต้องการความแม่นยำและประสิทธิภาพ เช่น รถยนต์ไฟฟ้า (EV) หุ่นยนต์ และกังหันลมโดยเฉพาะในรถยนต์ไฟฟ้า เนื่องจากให้แรงบิดสูงและประสิทธิภาพการใช้พลังงานดีเยี่ยม การควบคุม PWSM มักใช้เทคนิค Field-Oriented Control (FOC) หรือ Direct Torque Control (DTC) เพื่อจัดการแรงบิดและพลังงานอย่างแม่นยำ นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาแบบ Sensorless Control เพื่อเพิ่มความสะดวกและลดต้นทุนในการใช้งาน

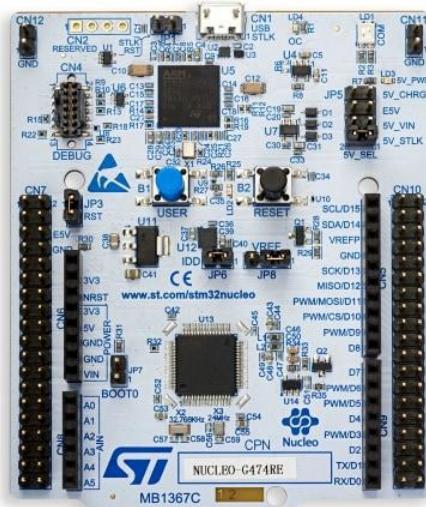


รูปที่ 10 แสดงโครงสร้างของ Permanent Magnet Synchronous Motor

4. วัสดุและอุปกรณ์

4.1 Nucleo STM32G474RE

Nucleo STM32G474RE คือบอร์ดที่ใช้ในการออกแบบและพัฒนาไมโครคอนโทรลเลอร์ ที่ผลิตโดย STMicroelectronics ซึ่งเป็นบอร์ดที่ใช้โปรเซสเซอร์ ARM Cortex-M4 ที่รองรับการประมวลผลที่ซับซ้อน และเหมาะสมกับงานที่ต้องการการคำนวณอย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีหน่วยความทรงจำที่ประกอบไปด้วยแรมขนาด 128 KB และแฟลชเมมโมรีขนาด 512 KB รวมไปถึงพอร์ตต่าง ๆ อย่าง UART, I2C, SPI, CAN, USB และสามารถรองรับการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอกได้ด้วยเช่นกัน



รูปที่ 11 แสดงภาพบอร์ด STM32 Nucleo-64 G474RE

4.2 Brushless DC motor A2212/13T 1000KV



รูปที่ 12 แสดงภาพ Brushless DC motor A2212/13T 1000KV

4.2.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้า

- แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ : 7.4 V – 11.1 V (Li-Polymer)
- ความเร็วรอบต่อนาทีต่อแรงดันไฟฟ้า : 1000 RPM/V
- ประสิทธิภาพสูงสุด : 80%
- ประสิทธิภาพกระแสไฟสูงสุด : 4 A – 10 A (>75%)
- การใช้กระแสไฟขณะที่ไม่มี Load : 0.5 A ที่ 10 V
- ค่าความต้านทาน : 0.090 ohms
- กระแสไฟสูงสุดที่รับได้ : 13 A / 60 วินาที
- พลังงานสูงสุดที่ใช้ : 150 W

4.2.2 คุณสมบัติทางกล

- น้ำหนัก : 52.7 g
- ขนาด : เส้นผ่านศูนย์กลาง 28 mm, ความยาว 28 mm
- เส้นผ่านศูนย์กลางเพลา : 3.2 mm
- จำนวนขั้วแม่เหล็ก : 14 ขั้ว
- จำนวนคู่ขั้วแม่เหล็ก : 7 คู่

4.3 X-NUCLEO-IHM08M1

X-NUCLEO-IHM08M1 เป็นบอร์ดขยายที่ช่วยลดความซับซ้อนของกระบวนการควบคุม Brushless DC Motor แบบ 3-phase ด้วยบอร์ด STM32 Nucleo บอร์ดนี้ใช้ MOSFET STL220N6F7 และ ไดรเวอร์ IC ที่ใช้ในบอร์ดขยายนี้คือไดรเวอร์เกต thaL-PBridجชิปเดี่ยว L6398 สำหรับ N-channel power MOSFET เพื่อรองรับการใช้กระแสไฟฟ้าสูง บอร์ดขยายนี้สามารถเชื่อมต่อกับบอร์ดขยายอื่นๆ หรือโมดูล Arduino UNO R3 ได้ด้วยขั้วต่อ ST morpho ผู้ใช้สามารถเลือกการควบคุม Brushless DC Motor แบบ 6 Step หรือเลือกควบคุมแบบ Field-Oriented Control (FOC) ได้



รูปที่ 13 แสดงภาพ X-NUCLEO-IHM08M1

4.4 Oscilloscope



รูปที่ 14 แสดงภาพ Oscilloscope

Oscilloscope คือเครื่องมือวัดทางอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการวิเคราะห์และแสดงภาพรูปคลื่นของสัญญาณไฟฟ้า โดยจะแสดงผลออกมาเป็นกราฟสองมิติบนหน้าจอ โดยแกนตั้งแต่งค่าแรงดันไฟฟ้า และแกนนอนแทนค่าเวลา ทำให้ผู้ใช้งานสามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าตามช่วงเวลาได้อย่างชัดเจน

วิธีดำเนินการทดลอง

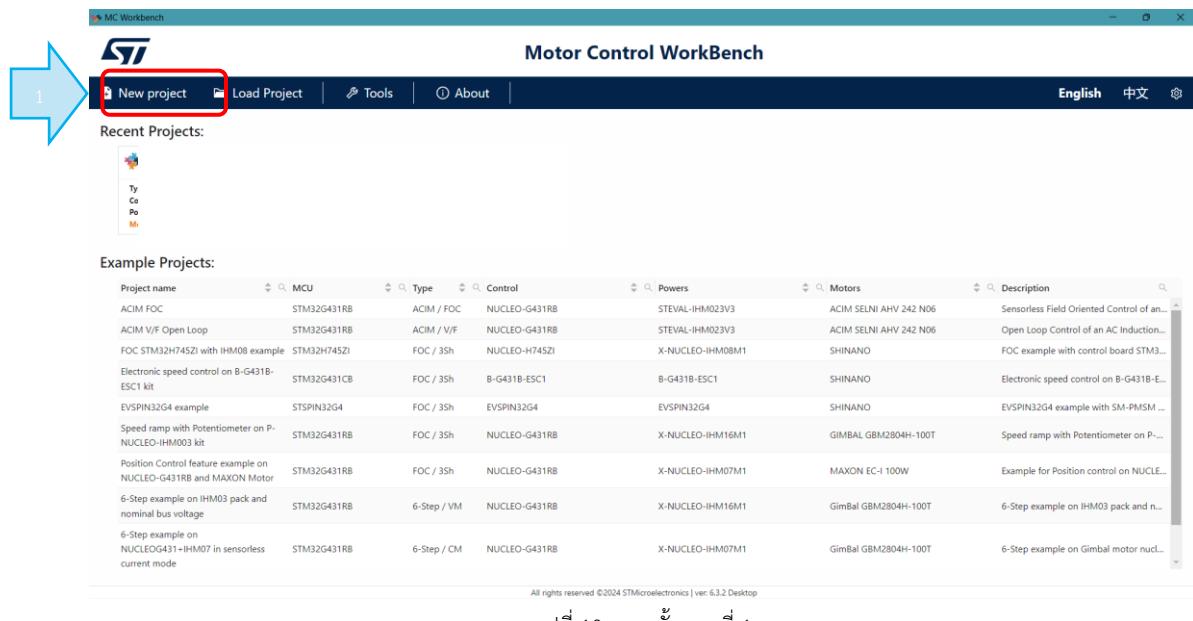
ทดลองหาความเร็วของ Brushless DC Motor ด้วย Back EMF อาศัยหลักการที่แรงดัน Back EMF มีความสัมพันธ์โดยตรงกับความเร็วรอบของ Rotor ดังนั้น การวัดและวิเคราะห์แรงดัน Back EMF จึงสามารถใช้คำนวณความเร็วของมอเตอร์ได้

วัสดุและอุปกรณ์

- Brushless DC motor A2212/13T 1000KV จำนวน 1 อัน
- STMICROELECTRONICS X-NUCLEO-IHM08M1 จำนวน 1 อัน
- Nucleo STM32G474RE พร้อมสายอัปโหลด จำนวน 1 ชุด
- Micsig STO1004 Handheld Oscilloscope จำนวน 1 ชุด
- BLDCXplorer จำนวน 1 ชุด - ฐานสามารถบรรจุบอร์ดควบคุม, Breadboard, 3D-Print ใช้สำหรับการประกอบกับ BLDC Motor

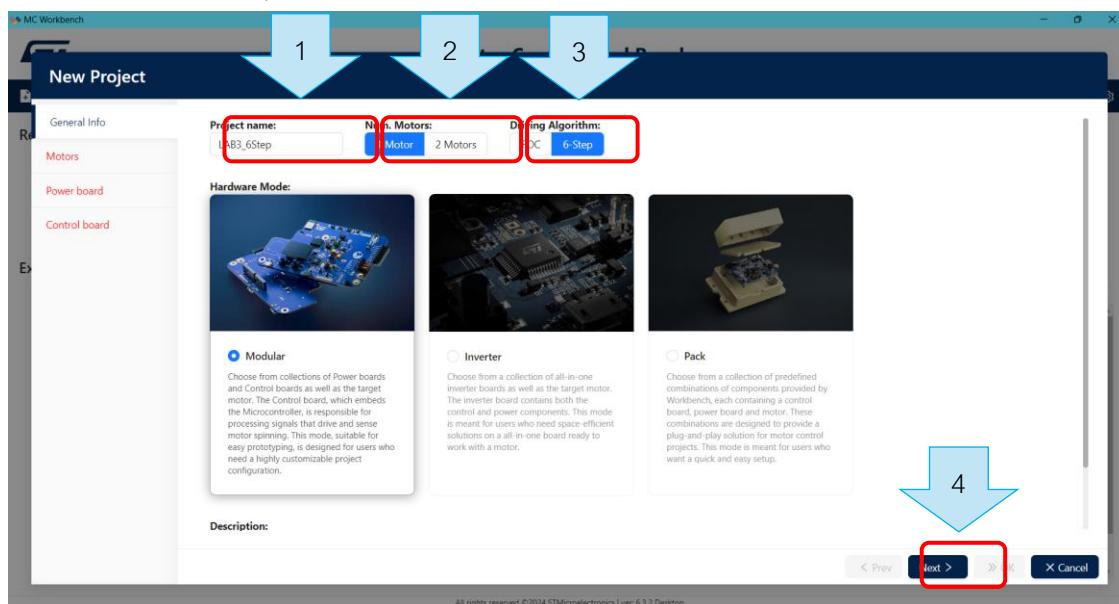
การเตรียมการทดลอง

- กดปุ่ม New project ภายในโปรแกรม MC Workbench



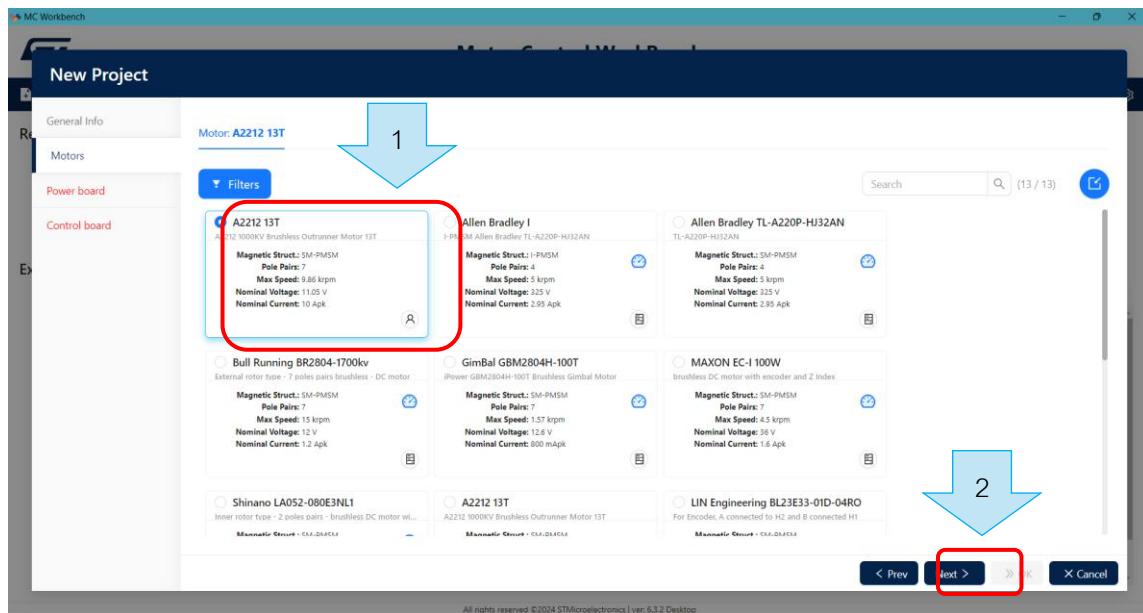
รูปที่ 10 แสดงขั้นตอนที่ 1

- ตั้งชื่อไฟล์ภายในช่อง Project name: จากนั้นกดเลือก Num. Motors: 1 Motor และเลือก Driving Algorithm แบบ 6-Step แล้วกด Next



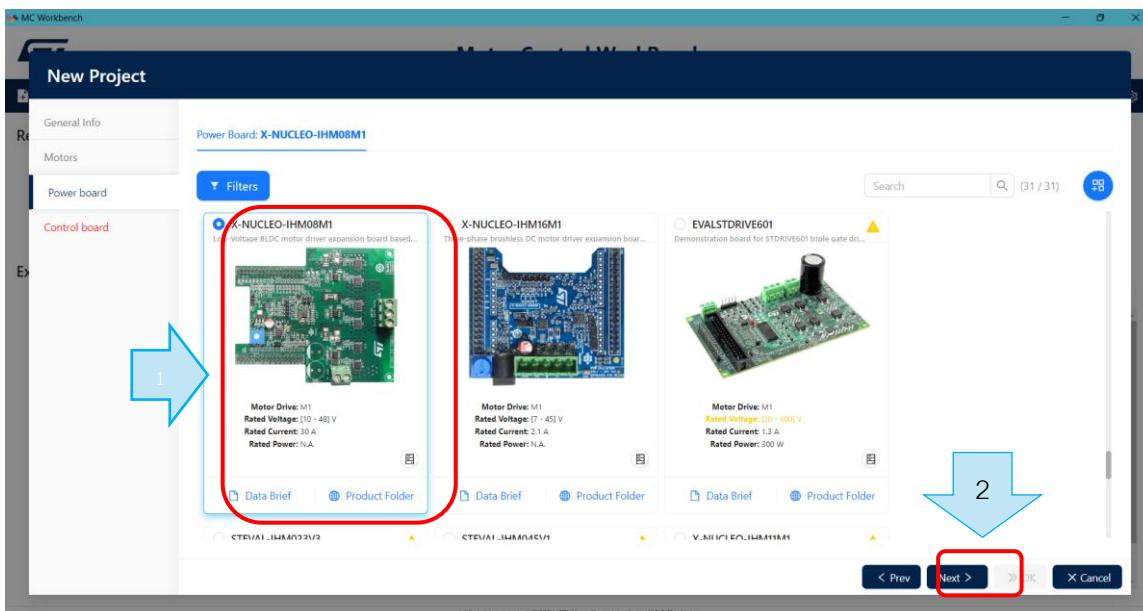
รูปที่ 11 แสดงขั้นตอนที่ 2

3. เลือกมอเตอร์ที่ใช้ โดยในการทดลองนี้ใช้ A2212 13T และกด Next



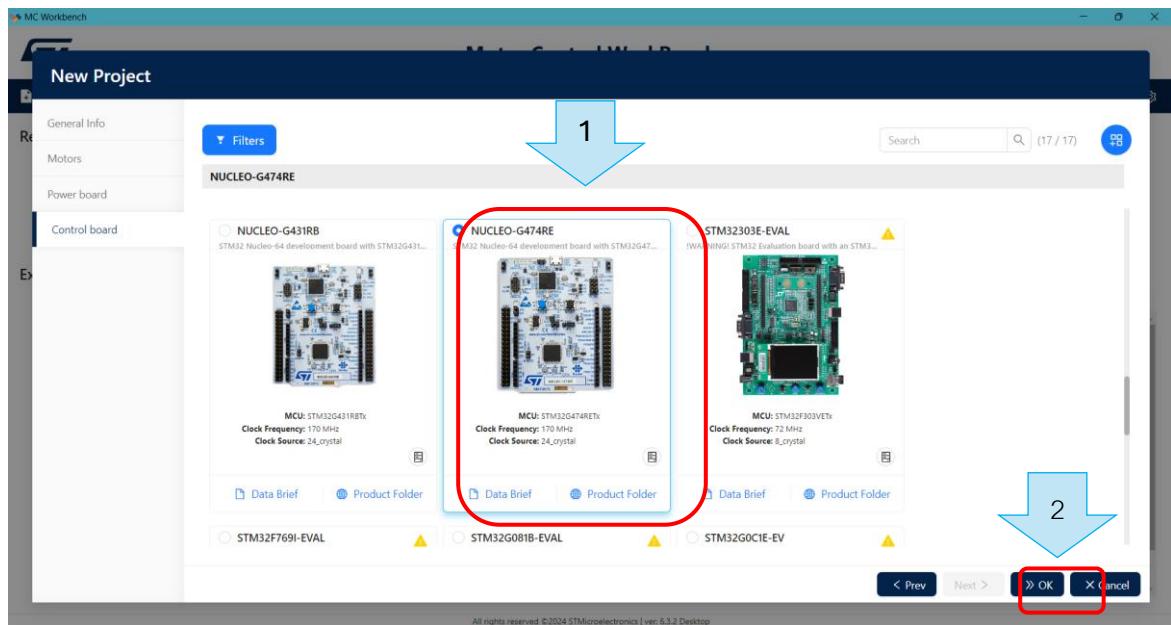
รูปที่ 12 แสดงขั้นตอนที่ 3

4. เลือก Power board โดยในการทดลองนี้ใช้ X-NUCLEO-IHM08M1 และกด Next



รูปที่ 13 แสดงขั้นตอนที่ 4

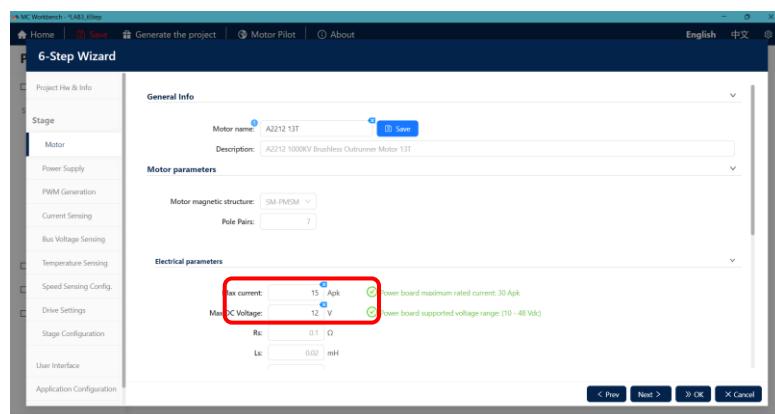
5. เลือกไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ โดยในการทดลองนี้ใช้ NUCLEO-G474RE และกด OK



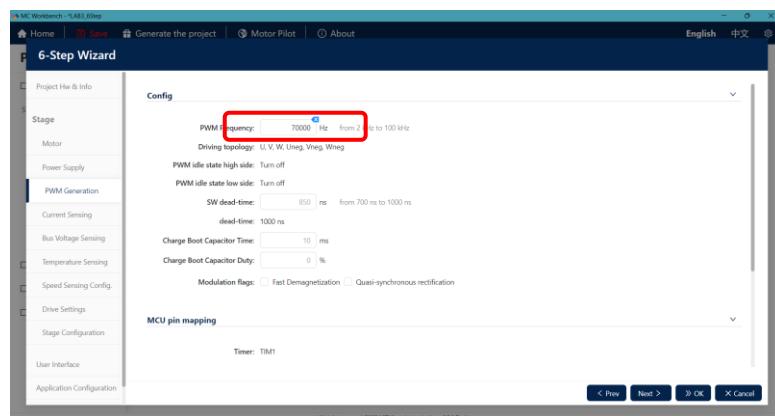
รูปที่ 14 แสดงขั้นตอนที่ 5

6. ตั้งค่าให้เหมาะสมตามการทดลอง ดังนี้

- Max current: 15 Apk เนื่องจาก Brushless DC Motor ชนิดนี้สามารถรับกระแสได้ 15 Apk
- Max DC Voltage: 12 V เนื่องจาก Brushless DC Motor ชนิดนี้สามารถทำงานได้ที่แรงดันไฟฟ้า 12 V
- PWM Frequency: 70,000 Hz

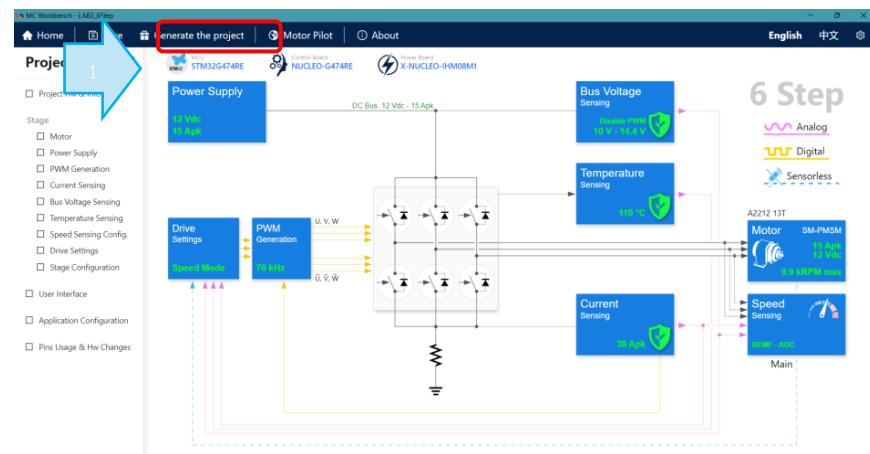


รูปที่ 15 แสดงขั้นตอนที่ 6

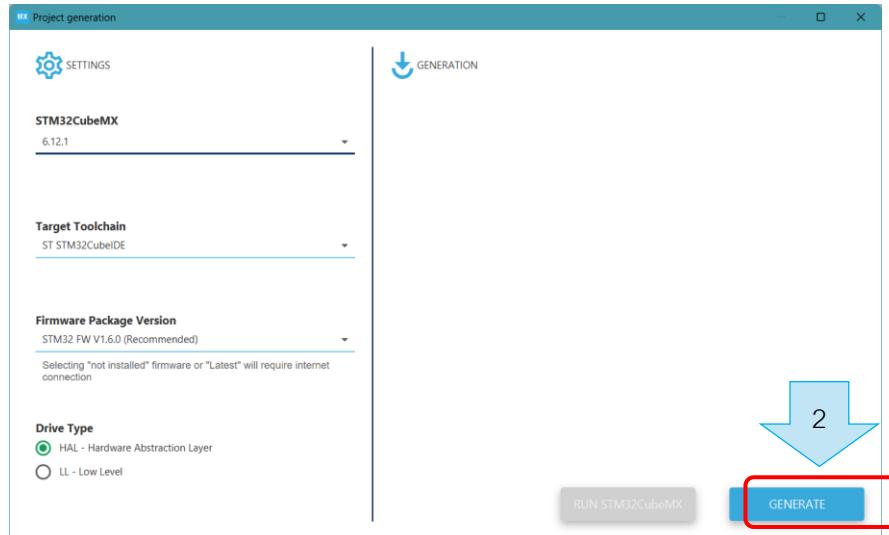


รูปที่ 16 แสดงขั้นตอนที่ 5

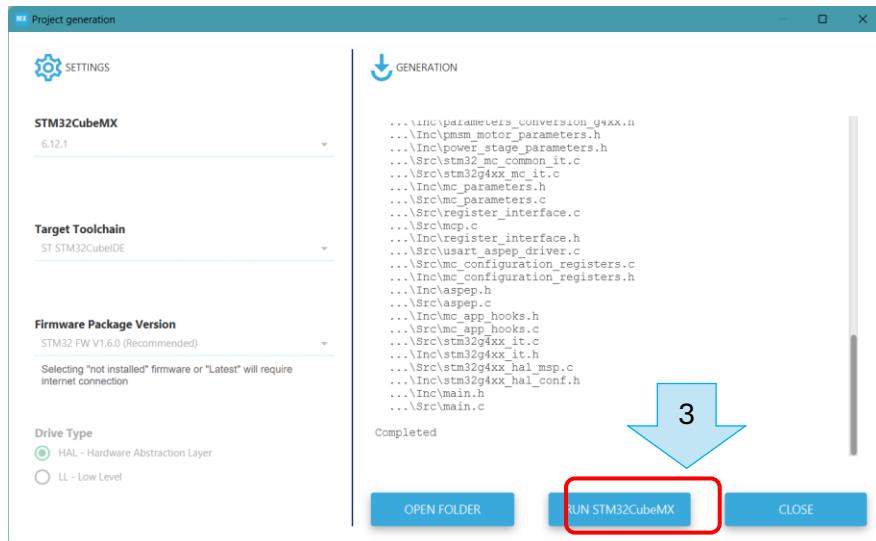
- กดตัวเลือก Generate the project เพื่อสร้างโปรแกรมสำหรับการสั่งควบคุม Brushless DC Motor ด้วยวิธีการควบคุมแบบ 6-Step จากนั้นกด Generate แล้วรอเพื่อให้โปรแกรมสร้างโปรแกรมที่ใช้สำหรับการกำหนดสถานะของขาต่างๆ เมื่อสร้างเสร็จแล้วให้กด RUN STM32CubeMX



รูปที่ 17 แสดงขั้นตอนที่ 6

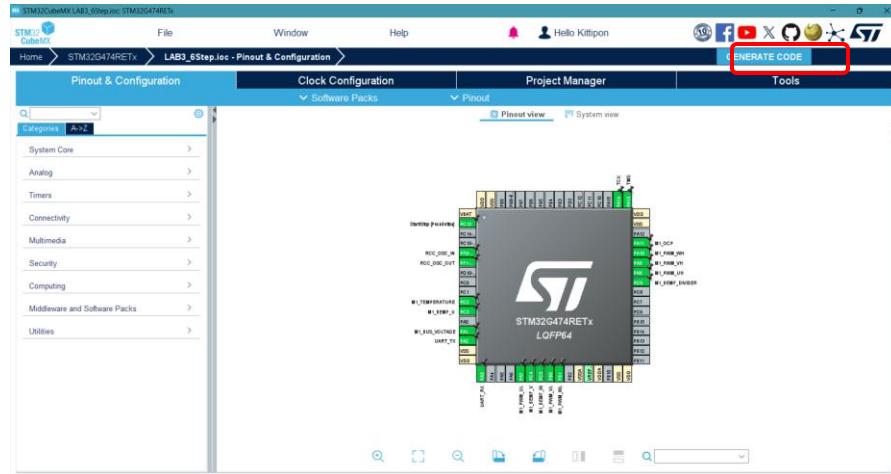


รูปที่ 18 แสดงขั้นตอนที่ 6

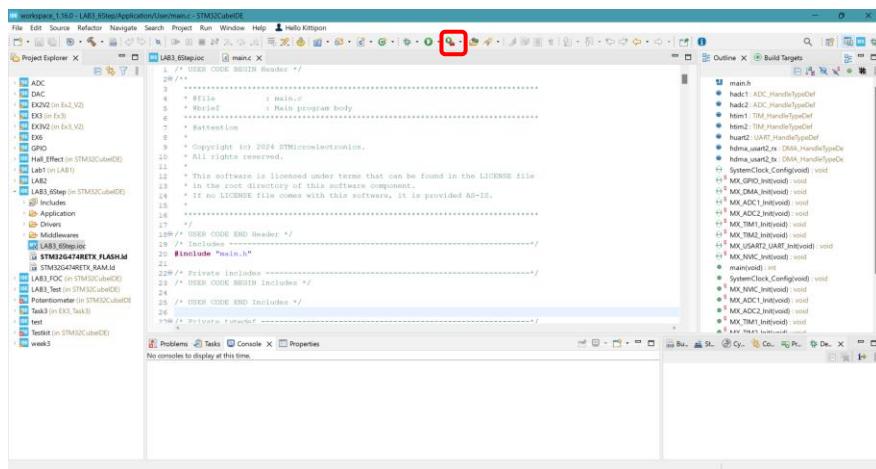


รูปที่ 19 แสดงขั้นตอนที่ 6

7. กด Generate Code หลังจากนั้นกดอัปโหลดโปรแกรมลงบูน์ไมโครคอนโทรลเลอร์

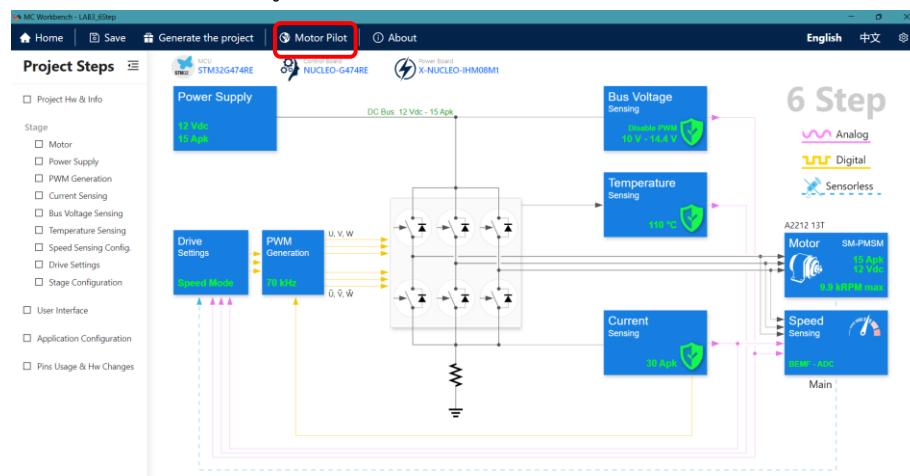


รูปที่ 20 แสดงขั้นตอนที่ 7



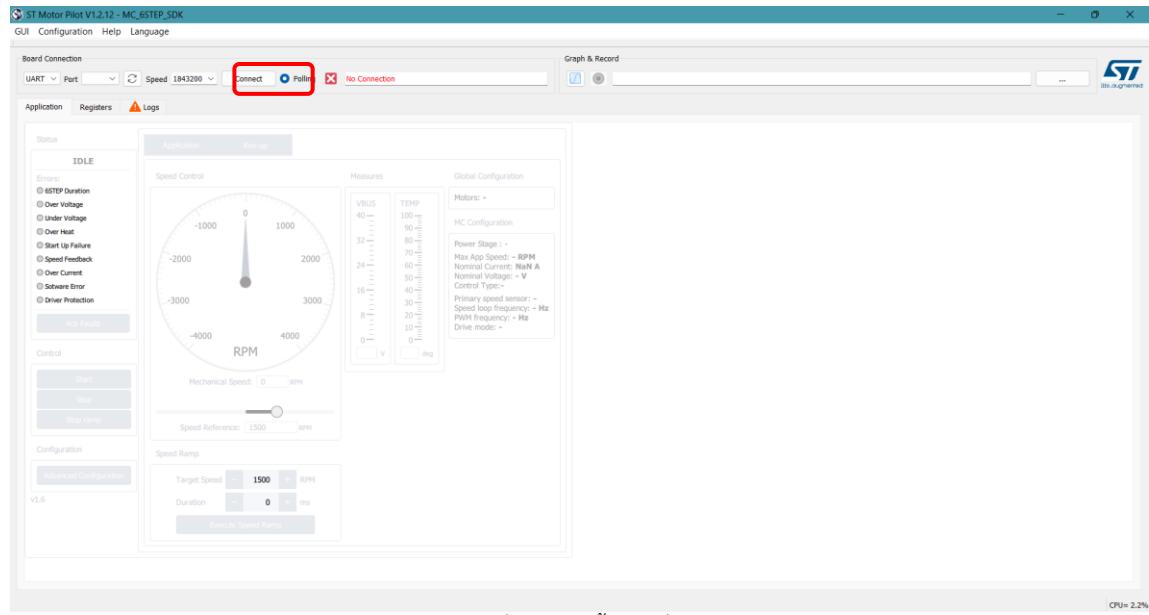
รูปที่ 21 แสดงขั้นตอนที่ 7

8. กดตัวเลือก Motor Pilot เพื่อเข้าสู่โปรแกรมสำหรับสั่งงานมอเตอร์



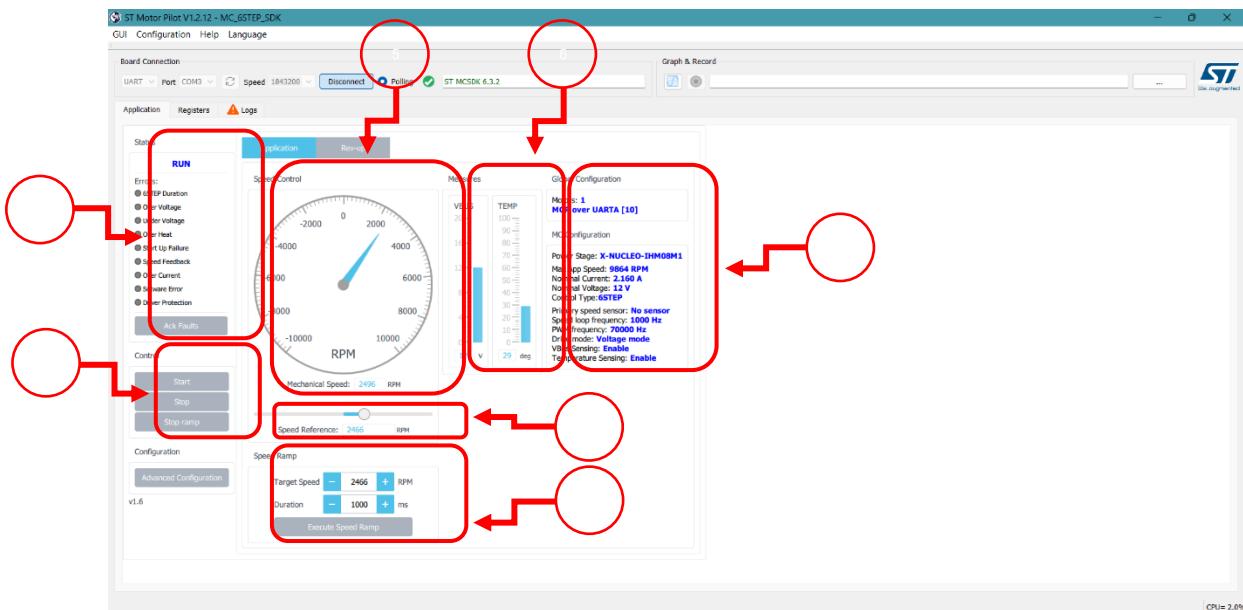
รูปที่ 22 แสดงขั้นตอนที่ 8

9. เมื่อโปรแกรม Motor Pilot เปิดขึ้นมาแล้ว กดปุ่ม Connect



รูปที่ 23 แสดงขั้นตอนที่ 9

10. สามารถควบคุมความเร็วได้ดังต่อไปนี้



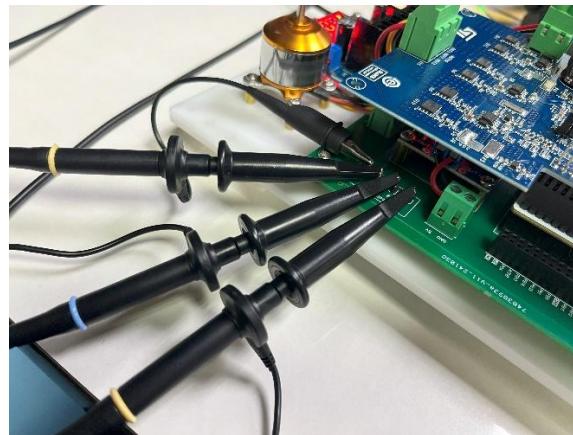
รูปที่ 24 แสดงเครื่องมือควบคุม

1) Control ผู้ใช้สามารถสั่งงานมอเตอร์ได้ดังนี้

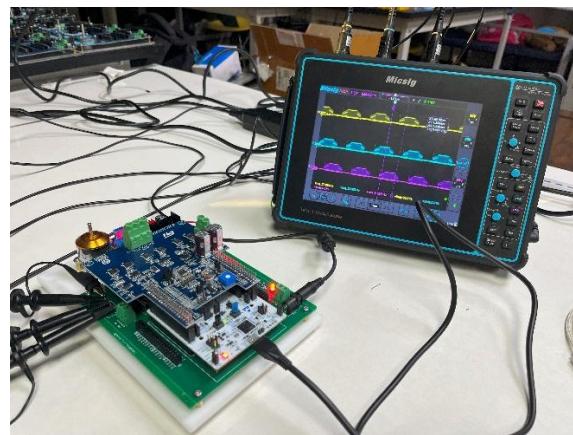
- Start สั่งให้มอเตอร์เริ่มทำงาน โดยจะหมุนไปถึงความเร็วตามที่กำหนดในช่องหมายเลข 3
- Stop สั่งให้มอเตอร์หยุดทำงาน
- Stop ramp สั่งให้มอเตอร์หยุดทำงานแบบค่อยๆ ปรับระดับ

- 2) Status ผู้ใช้งานสามารถดูสถานะที่ผิดพลาดของมอเตอร์ และกดปุ่ม Ack Faults เพื่อแก้สถานะที่ผิดพลาดได้ภายในช่องนี้
- 3) Speed Reference ผู้ใช้งานสามารถปรับความเร็ว (-9864 RPM ถึง 9864 RPM) ได้ด้วยการเลื่อนระดับภายในช่องนี้
- 4) Speed Ramp ผู้ใช้งานสามารถปรับความเร็วโดยกำหนดให้มอเตอร์เปลี่ยนความเร็วได้ตามที่กำหนดใน Target Speed ภายในเวลาที่กำหนดใน Duration
- 5) Speed Control หน้าปัดแสดงความเร็วของมอเตอร์ ณ เวลาขณะนั้น
- 6) Measures โดย VBUS แสดงแรงดันไฟฟ้า (V) ที่มอเตอร์ใช้ และ TEMP แสดงอุณหภูมิ (°C) ของมอเตอร์ ณ เวลาขณะนั้น
- 7) Global Configuration แสดงรายละเอียดต่างๆ ที่กำหนดภายในโปรแกรม MC Workbench

11. ต่อสายสัญญาณจากเครื่อง Oscilloscope เข้ากับชุดการทดลอง ดังนี้



รูปที่ 25 ต่อสายสัญญาณจากเครื่อง Oscilloscope เข้ากับชุดการทดลอง



รูปที่ 26 ต่อสายสัญญาณจากเครื่อง Oscilloscope เข้ากับชุดการทดลอง

12. ต่อสายส่งข้อมูลจากเครื่อง Oscilloscope เข้ากับคอมพิวเตอร์เพื่อเก็บข้อมูลการทดลองจาก Oscilloscope และสายส่งข้อมูลของชุดการทดลอง



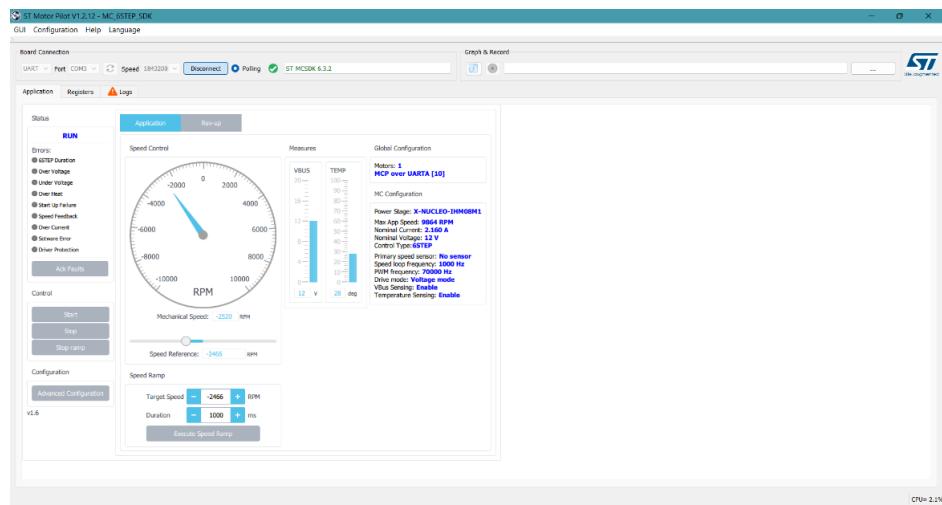
รูปที่ 27 ต่อสายสัญญาณจากเครื่อง Oscilloscope เข้ากับคอมพิวเตอร์

13. เก็บข้อมูลกราฟแรงดันไฟฟ้าเทียบกับเวลา ณ ขณะที่มอเตอร์ทำงานที่ความเร็วต่างๆ จากชุดการทดลองผ่าน Oscilloscope โดยเก็บข้อมูลตามความเร็วและทิศทางการหมุน 2 แบบ ได้แก่ หมุนตามเข็มนาฬิกาและหมุนทวนเข็มนาฬิกา โดยแต่ละแบบจะเก็บค่า 4 ค่า ตามระดับความเร็วรอบที่เพิ่มขึ้นทีละ 2,466 RPM หรือ 25% จนถึง 9,864 RPM หรือ 100% โดยสาเหตุที่เก็บทีละ 25% เพื่อให้เห็นความแตกต่างของแต่ละช่วงความเร็วให้มากที่สุด

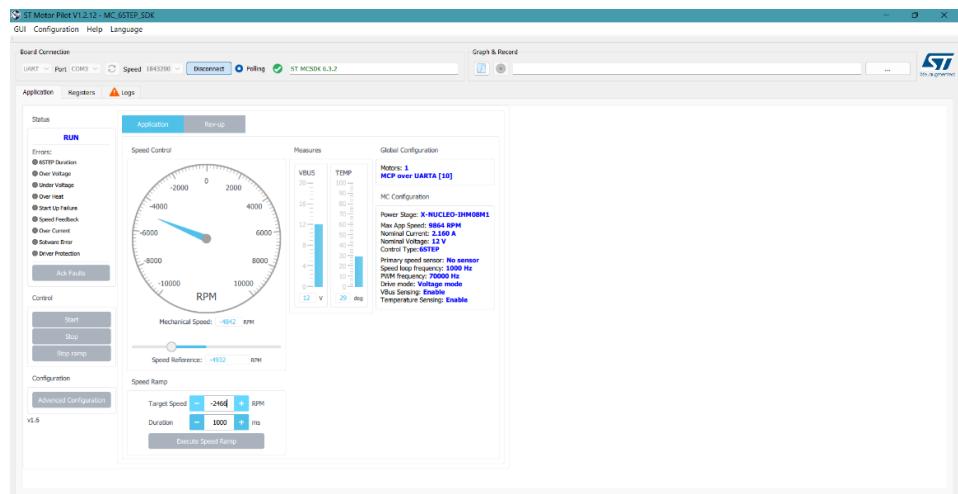
ขั้นตอนการทดลองและผลการทดลอง

ทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของมอเตอร์ และ Back EMF

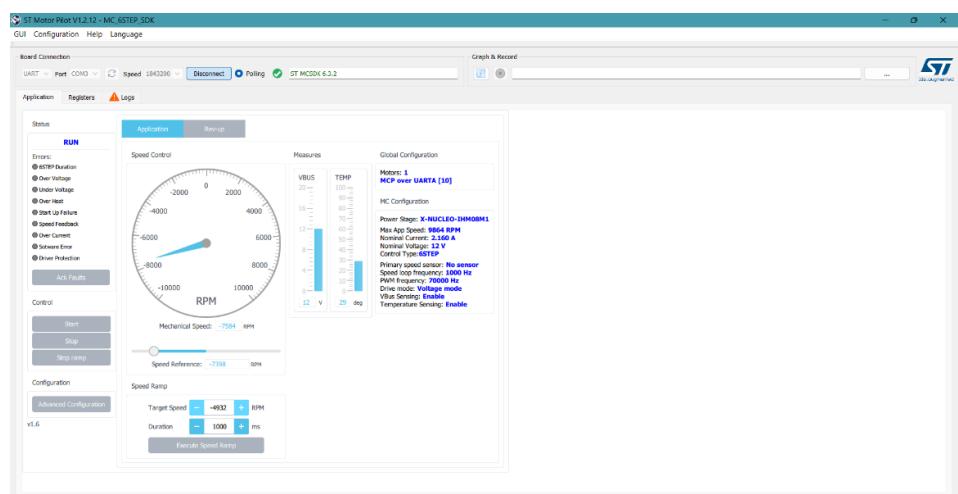
1. สั่งงานให้มอเตอร์ทำงานแบบ 6-Step ให้หมุนในช่วงความเร็วที่ 25%, 50%, 75% และ 100% ทั้งทิศทางตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกา แล้วบันทึกค่าความเร็วรอบจากโปรแกรมที่สั่งงานให้มอเตอร์หมุน และวัดแรงดัน Back EMF ด้วยการคำนวณย้อนกลับโดยใช้สมการคำนวณความเร็วรอบของมอเตอร์



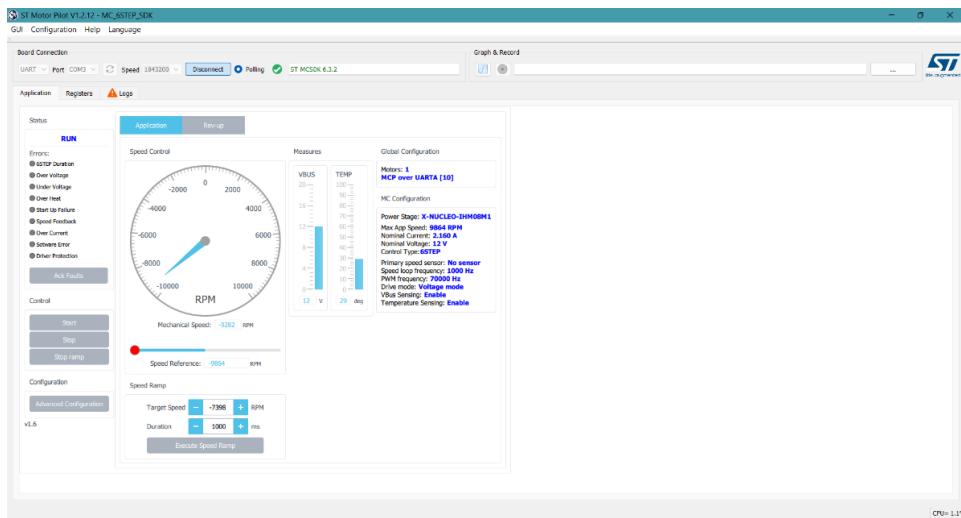
รูปที่ 28 แสดงสภาพการบันทึกการทดลองด้วยโปรแกรม Motor Pilot ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา ที่ช่วงความเร็ว 25%



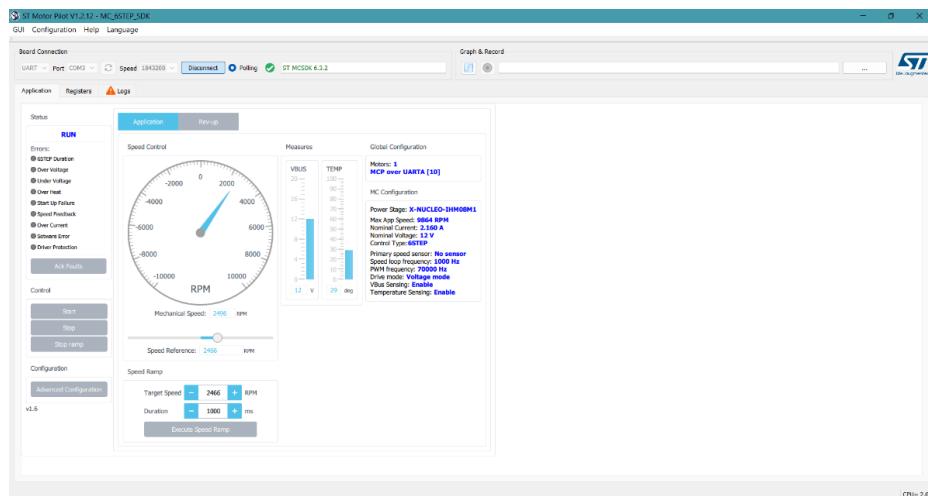
รูปที่ 29 แสดงสภาพการบันทึกการทดลองด้วยโปรแกรม Motor Pilot ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา ที่ช่วงความเร็ว 50%



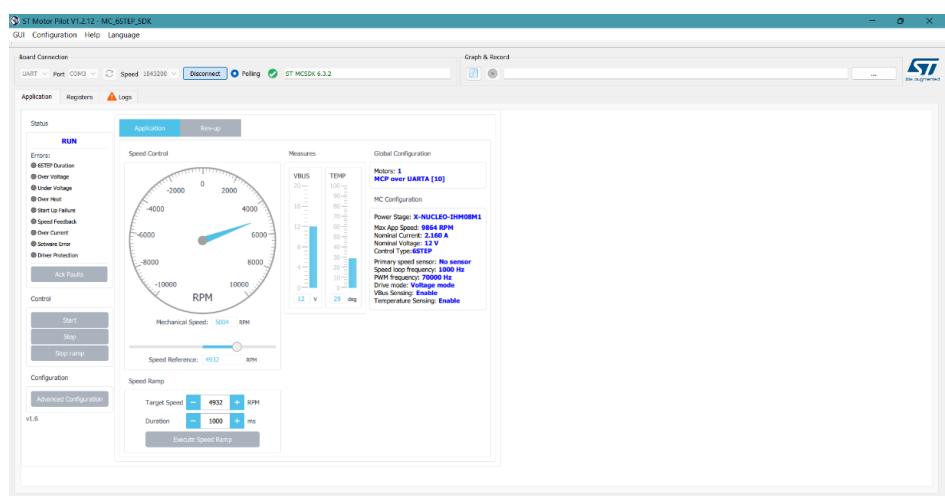
รูปที่ 30 แสดงสภาพการบันทึกการทดลองด้วยโปรแกรม Motor Pilot ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา ที่ช่วงความเร็ว 75%



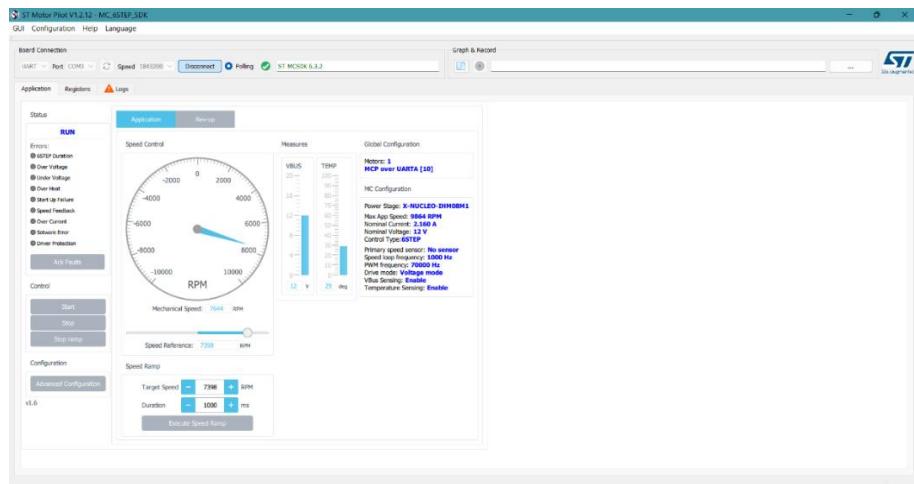
รูปที่ 31 แสดงสภาพการบันทึกการทดลองด้วยโปรแกรม Motor Pilot ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา ที่ช่วงความเร็ว 100%



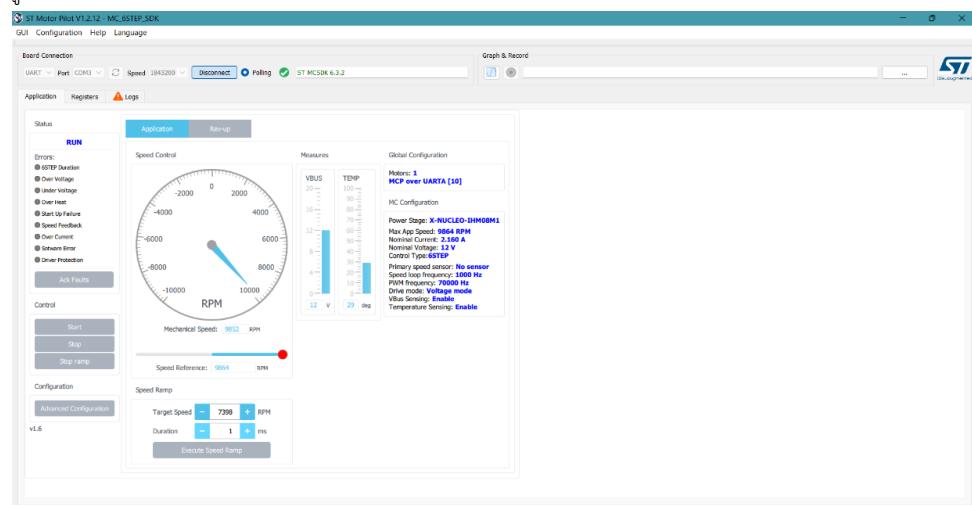
รูปที่ 32 แสดงสภาพการบันทึกการทดลองด้วยโปรแกรม Motor Pilot ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา ที่ช่วงความเร็ว 25%



รูปที่ 33 แสดงสภาพการบันทึกการทดลองด้วยโปรแกรม Motor Pilot ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา ที่ช่วงความเร็ว 50%



รูปที่ 34 แสดงสภาพการบันทึกการทดลองด้วยโปรแกรม Motor Pilot ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา ที่ช่วงความเร็ว 75%



รูปที่ 35 แสดงสภาพการบันทึกการทดลองด้วยโปรแกรม Motor Pilot ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา ที่ช่วงความเร็ว 100%

2. ทดลองหาความเร็วของ Brushless DC Motor ด้วย Back EMF อาศัยหลักการที่แรงดัน Back EMF มีความสัมพันธ์โดยตรงกับความเร็วรอบของ Rotor ดังนั้น การวัดและวิเคราะห์แรงดัน Back EMF จึงสามารถใช้คำนวณความเร็วของมอเตอร์ได้

สมการคำนวณความเร็วของมอเตอร์

$$\omega_{rpm} = K_v \cdot Back\ EMF$$

โดยที่

ω_{rpm} คือ ความเร็วรอบต่อนาที

K_v คือ ความเร็วรอบต่อนาทีที่ต่อแรงดันไฟฟ้า

$Back\ EMF$ คือ ค่าแรงดัน Back EMF

แทนค่าความเร็วรอบต่อนาทีที่กำหนดในแต่ละรอบที่เก็บค่าลงในสมการรายในโปรแกรม MATLAB ได้ผลลัพธ์ดังนี้

```
% Back EMF per Rotation speed
Kv = 1000;
rpm = [-9282, -7398, -4842, -2520, 2496, 5004, 7644, 9852];
bemf = zeros(1, length(rpm)); % Preallocate the bemf array
for i = 1:length(rpm) % Adjust indexing to start at 1
    bemf(i) = rpm(i) / Kv;
end
% Create the figure and plot the data
figure;
hold on;
%load("dataV");
plot(rpm, bemf, '-o', 'MarkerSize', 5, 'MarkerFaceColor', [1 .0 .0], 'LineWidth', 3);

% Set axis limits
xlim([-10000 10000]);
ylim([-12 12]);

% Add labels and title
xlabel('Speed (RPM)');
ylabel('Back EMF (V)');
title('Back EMF per Rotation speed');
% Turn on grid lines
grid on;
}
```

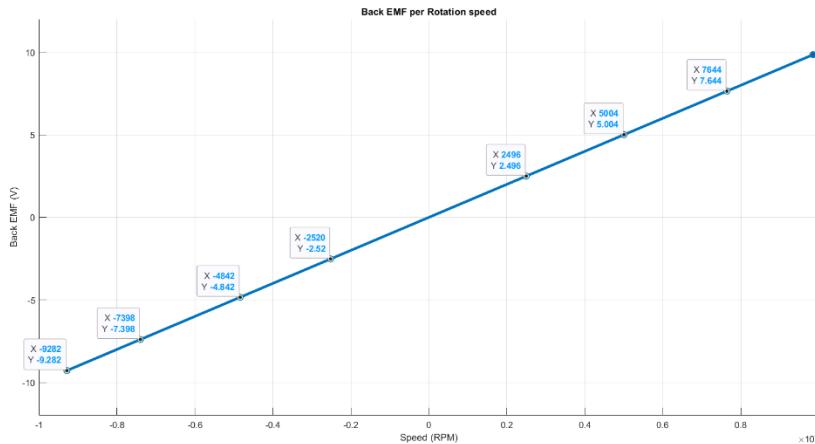
รูปที่ 36 แสดงภาพโปรแกรมที่นำมาใช้คำนวนแรงดัน Back EMF และสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์

ได้ผลลัพธ์ของแรงดัน Back EMF ในช่วงความเร็วที่ 25%, 50%, 75% และ 100% ทั้งทิศทางตามเข็มนาฬิกาและวนเข็มนาฬิกา ดังนี้

ทิศทางการหมุน	ทวนเข็มนาฬิกา				ตามเข็มนาฬิกา			
ความเร็วรอบ (RPM)	-9,282	-7,398	-4,842	-2,520	2,496	5,004	7,644	9,852
แรงดัน Back EMF	-9.282	-7.398	-4.842	-2.520	2.496	5.004	7.644	9.852

ตารางที่ 6 แสดงผลลัพธ์การเก็บค่าความเร็วรอบของมอเตอร์

3. ต่อมานำค่าแรงดัน Back EMF ที่คำนวนได้นั้นไปสร้างกราฟเปรียบเทียบกับความเร็วรอบของมอเตอร์จะได้ผลลัพธ์ ดังนี้ ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าแรงดัน Back EMF นั้นมีความสัมพันธ์ที่เพิ่มขึ้นตามความเร็วของมอเตอร์อย่างชัดเจน



รูปที่ 37 แสดงกราฟเปรียบเทียบแรงดัน Back EMF กับความเร็วรอบของมอเตอร์

ทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง Back EMF และ ตำแหน่งของมอเตอร์

- ทดลองหาตำแหน่งของ Brushless DC Motor แบบ Sensorless ด้วย Back EMF โดยใช้หลักการ Zero Crossing Detection ด้วยการวิเคราะห์กราฟแรงดัน Back EMF ที่เกิด Zero Crossing จะบ่งบอกถึงตำแหน่งของ Rotor ในแต่ละช่วงของคลาไฟฟ้า ดังตารางต่อไปนี้

ช่วงมุมไฟฟ้า	Phase A	Phase B	Phase C
0° – 60°	แรงดัน +	แรงดัน –	Zero Crossing (0)
60° – 120°	Zero Crossing (0)	แรงดัน –	แรงดัน +
120° – 180°	แรงดัน –	Zero Crossing (0)	แรงดัน +
180° – 240°	แรงดัน –	แรงดัน +	Zero Crossing (0)
240° – 300°	Zero Crossing (0)	แรงดัน +	แรงดัน –
300° – 360°	แรงดัน +	Zero Crossing (0)	แรงดัน –

ตารางที่ 7 แสดงผลลัพธ์การทำงานของแต่ละ Phase ในแต่ละช่วงตำแหน่ง สำหรับการหมุน 1 รอบ แบบ Sensor Base

- สั่งงานให้มอเตอร์ทำงานแบบ 6-Step ให้หมุนในช่วงความเร็วที่ 25%, 50%, 75% และ 100% ทั้งทิศทางตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกา แล้วบันทึกค่ากราฟแรงดัน Back EMF และสังเกตการเปลี่ยนแปลงของกราฟในแต่ละ Phase
- กราฟที่ได้มีแรงดัน Back EMF มีรูปแบบคล้ายคลื่น Trapezoidal และครบหนึ่งรอบใน 360 องศาไฟฟ้า ต่อหนึ่งรอบการหมุนของสนามแม่เหล็กใน Stator ผู้ทดลองจึงแบ่งกราฟแรงดันไฟฟ้าออกเป็นช่วงที่ละ 60° จึงจะสามารถแบ่งได้ 6 ช่วงตามตารางที่ 7 เพื่อให้สามารถระบุช่วงมุมไฟฟ้าได้



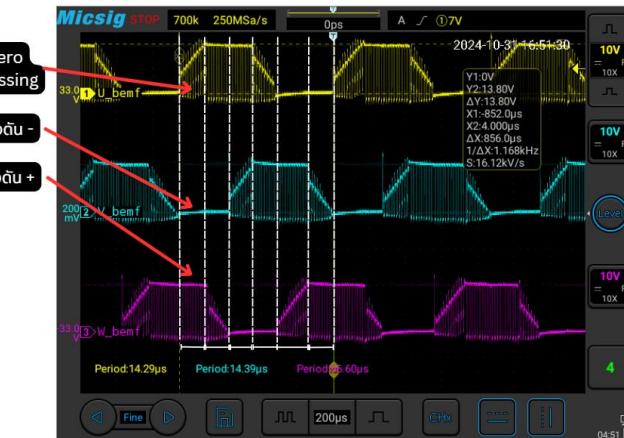
รูปที่ 38 แสดงกราฟแรงดันแต่ละ Phase ของมอเตอร์ที่ความเร็ว 25% ทิศทางทวนเข็มนาฬิกา



รูปที่ 39 แสดงกราฟแรงดันแต่ละ Phase ของมอเตอร์ที่ความเร็ว 50% ทิศทางทวนเข็มนาฬิกา



รูปที่ 40 แสดงกราฟแรงดันแต่ละ Phase ของมอเตอร์ที่ความเร็ว 75% ทิศทางทวนเข็มนาฬิกา



รูปที่ 41 แสดงกราฟแรงดันแต่ละ Phase ของมอเตอร์ที่ความเร็ว 100% ทิศทางทวนเข็มนาฬิกา



รูปที่ 42 แสดงกราฟแรงดันแต่ละ Phase ของมอเตอร์ที่ความเร็ว 25% ทิศทางตามเข็มนาฬิกา



รูปที่ 43 แสดงกราฟแรงดันแต่ละ Phase ของมอเตอร์ที่ความเร็ว 50% ทิศทางตามเข็มนาฬิกา



รูปที่ 44 แสดงกราฟแรงดันแต่ละ Phase ของมอเตอร์ที่ความเร็ว 75% ทิศทางตามเข็มนาฬิกา



รูปที่ 45 แสดงกราฟแรงดันแต่ละ Phase ของมอเตอร์ที่ความเร็ว 100% ทิศทางตามเข็มนาฬิกา

4. นำกราฟที่บันทึกและแบ่งช่วงมาประมาณตำแหน่งของมอเตอร์ โดยสังเกตจากการทำงานในแต่ละ Phase แล้วนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลการระบุตำแหน่งทางฟ้าของ Brushless DC Motor ดังตารางต่อไปนี้
5. เมื่อนำผลลัพธ์จากการแบ่งช่วงมาวิเคราะห์ว่าสามารถระบุตำแหน่งทางฟ้าของมอเตอร์ได้จากลักษณะของ กราฟได้หรือไม่ พบร้าสามารถระบุทิศทางและช่วงตำแหน่งทางฟ้าของมอเตอร์ได้ ดังตารางต่อไปนี้

ลำดับการหมุน	ความเร็ว			
	25%	50%	75%	100%
1	60° – 120°	60° – 120°	60° – 120°	60° – 120°
2	0° – 60°	0° – 60°	0° – 60°	0° – 60°
3	300° – 360°	300° – 360°	300° – 360°	300° – 360°
4	240° – 300°	240° – 300°	240° – 300°	240° – 300°
5	180° – 240°	180° – 240°	180° – 240°	180° – 240°
6	120° – 180°	120° – 180°	120° – 180°	120° – 180°

ตารางที่ 8 แสดงลำดับช่วงตำแหน่งที่มอเตอร์หมุน ในทิศทางเข็มนาฬิกา

ลำดับการหมุน	ความเร็ว			
	25%	50%	75%	100%
1	240° – 300°	240° – 300°	240° – 300°	240° – 300°
2	300° – 360°	300° – 360°	300° – 360°	300° – 360°
3	0° – 60°	0° – 60°	0° – 60°	0° – 60°
4	60° – 120°	60° – 120°	60° – 120°	60° – 120°
5	120° – 180°	120° – 180°	120° – 180°	120° – 180°
6	180° – 240°	180° – 240°	180° – 240°	180° – 240°

ตารางที่ 9 แสดงลำดับช่วงตำแหน่งที่มอเตอร์อยู่ ในทิศทางเข็มนาฬิกา

ทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง Back EMF และ ตำแหน่งของมอเตอร์

- ทดลองเก็บค่าของแรงดัน Back EMF ที่ได้ออกมาจากการ Trapezoidal control ในหนึ่งรอบตลอด 360 องศาของแรงดันไฟฟ้า โดยแบ่งช่วงทีละ 60° เป็นทั้งหมด 6 ช่วง



รูปที่ 46 แสดงกราฟแรงดันแต่ละ Phase ของมอเตอร์ที่ความเร็ว 25% ทิศทางทวนเข็มนาฬิกา



รูปที่ 47 แสดงกราฟแรงดันแต่ละ Phase ของมอเตอร์ที่ความเร็ว 50% ทิศทางทวนเข็มนาฬิกา



รูปที่ 48 แสดงกราฟแรงดันแต่ละ Phase ของมอเตอร์ที่ความเร็ว 75% ทิศทางทวนเข็มนาฬิกา



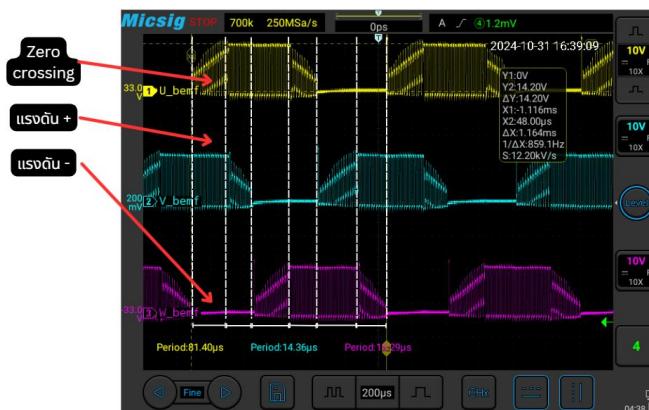
รูปที่ 49 แสดงกราฟแรงดันแต่ละ Phase ของมอเตอร์ที่ความเร็ว 100% ทิศทางทวนเข็มนาฬิกา



รูปที่ 50 แสดงกราฟแรงดันแต่ละ Phase ของมอเตอร์ที่ความเร็ว 25% ทิศทางตามเข็มนาฬิกา



รูปที่ 51 แสดงกราฟแรงดันแต่ละ Phase ของมอเตอร์ที่ความเร็ว 50% ทิศทางตามเข็มนาฬิกา



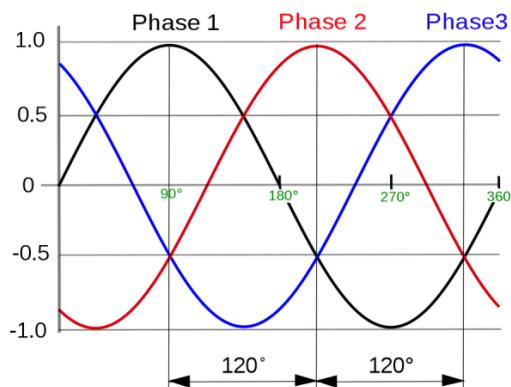
รูปที่ 52 แสดงกราฟแรงดันแต่ละ Phase ของมอเตอร์ที่ความเร็ว 75% ทิศทางตามเข็มนาฬิกา



รูปที่ 53 แสดงกราฟแรงดันแต่ละ Phase ของมอเตอร์ที่ความเร็ว 100% ทิศทางตามเข็มนาฬิกา

จากราฟจะเห็นได้ว่าลักษณะการควบคุมด้วย 6-Step Commutation นั้น ทำให้ลักษณะของกราฟถูกแบ่งออกเป็น 3 เฟสการทำงาน และมีลักษณะการของกราฟเป็นสี่เหลี่ยมคงที่

- วิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้จากการเปรียบเทียบค่าระหว่างการควบคุมแบบ 6-Step Commutation และ Field-oriented control (FOC)



รูปที่ 55 แสดงกราฟแรงดันแต่ละ Phase ของมอเตอร์ที่ควบคุมด้วย Field-oriented control (FOC)

จากลักษณะของกราฟที่ปรากฏในรูปที่ 55 แสดงให้เห็นว่าลักษณะของทั้ง 2 กราฟ มีลักษณะการทำงานอยู่ในช่วง 3 เฟสที่เหมือนกัน แต่มีลักษณะของกราฟที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งจะเปลี่ยนไปขึ้นอยู่กับวิธีการควบคุม

สรุปผล

ในการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าลักษณะของการควบคุมมอเตอร์มีผลต่อการทำงานของมอเตอร์ ผ่าน Back EMF โดยความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นนี้ ทำให้ทราบถึงลำดับของตำแหน่งและความเร็วในการควบคุมมอเตอร์ รวมไปถึงง่ายต่อการควบคุมความเร็วรอบให้กับมอเตอร์ เพราะจ่าย PWM (Pulse-width modulation) ให้กับมอเตอร์โดยตรง แต่มีข้อเสียในการใช้งานในช่วงความถี่ต่ำ เนื่องจากการควบคุมแบบนี้สามารถเคลื่อนที่ไปตามที่ทิศทางได้แค่ 6 ตำแหน่งตามศ้าที่ออกแบบไว้เท่านั้น ซึ่งแตกต่างจากการควบคุมแบบ Field-oriented control (FOC) ที่ลักษณะการทำงานที่ขึ้นอยู่กับแกนที่กำหนดใน Space Vector จึงทำให้มอเตอร์สามารถทำงานได้เต็มประสิทธิภาพและได้ Torque ตามที่กำหนด รวมไปถึงทั้ง 2 วิธีนี้นั้น ก็มีลักษณะของกราฟที่แสดงออกมาแตกต่างกันไป โดย Trapezoidal control มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมคงที่ แต่ Field-oriented control (FOC) มีลักษณะเป็น Sinusoidal จึงทำให้ความสมูหและการทำงานของมอเตอร์แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับวิธีที่เลือกใช้ในการควบคุม

อภิรายผล

จากการศึกษาวิธีการควบคุม Brushless DC Motor ที่เป็นชนิด Sensorless ด้วยวิธีการต่าง ๆ แสดงให้เห็นว่าการควบคุมแบบ Trapezoidal control นั้นสามารถแสดงให้เห็นว่าความเร็วและตำแหน่งการหมุนมีความสัมพันธ์ที่ตรงไปตรงมากับ Back EMF โดยจากการทดลอง พบว่าค่าของ Back EMF แปรผันตรงกับความเร็วโดยมีลักษณะของกราฟที่เป็นเส้นตรงและเพิ่มขึ้นอย่างคงที่ตามความเร็วรอบที่เพิ่มขึ้น รวมไปถึงจากการทดลองพบว่าสามารถหาตำแหน่งของมอเตอร์ได้ผ่าน Zero Crossing ของ Back EMF ได้ ผ่านการสังเกตจากตำแหน่งที่ Zero Crossing ของแต่ละเฟส เนื่องจาก ณ ตำแหน่งนั้น ๆ นั้นจะเป็น Floating period หรือช่วงที่มอเตอร์ไม่ได้ทำงานก่อนการเปลี่ยนเฟส จึงทำให้สามารถระบุตำแหน่งของ Rotor ที่ทำการเปลี่ยนตำแหน่งໄไปได้

โดยจากการทดลองเพื่อเทียบค่า Trapezoidal control และ Field-oriented control (FOC) พบว่าวิธีการ Commutation ด้วยวิธีการต่าง ๆ มีข้อได้เปรียบและเสียเปรียบที่แตกต่างกัน โดยจากการควบคุมแบบ Trapezoidal control นั้นจะมีการหมุนของ Rotor ที่ตำแหน่งของเฟสทุก ๆ 120 องศา และจะมีช่วงเปลี่ยนตำแหน่งของขดลวดในวงจรที่ 60 องศา โดย ณ ขณะเดียวกันการควบคุมแบบนี้สามารถเคลื่อนที่ไปตามที่ทิศทางได้แค่ 6 ตำแหน่งตามศ้าที่ออกแบบไว้เท่านั้น แต่จากการควบคุมด้วย Field-oriented control (FOC) ทำให้เห็นว่าลักษณะของการควบคุมมอเตอร์นั้นมีผลต่อ Torque, ลักษณะของกราฟ ที่แสดงออกมานี้ เนื่องจากการที่ขดลวด Stator ที่ห่างกัน 120 องศา จึงทำให้เกิดช่วงของการเปลี่ยนเฟสทุก ๆ 120 องศารวมไปถึงจากการที่

อุปกรณ์ชนิดอื่น ๆ อย่างเช่น Encoder, Hall effect สามารถหาตำแหน่งที่เกิดจากการหมุนได้ จึงทำให้สามารถรวมคลื่นที่เกิดขึ้นที่มีลักษณะที่ห่างกัน 120 องศา โดยมีจุดประสงค์เพื่อที่จะทำให้กระแสไฟฟ้าที่จ่ายเข้าไปยังชุดลวดนั้น สามารถคล้อยตามไปกับตำแหน่งของโรเตอร์ได้ ซึ่งในขณะเดียวกันก็สามารถทำให้แรงบิดสูงและได้ตามขนาดตามความต้องการ โดยเมื่อสนาમแม่เหล็กของ Rotor และ Stator ตั้งฉากกันจะเกิด Torque สูงสุด และจากพุติกรรมที่เกิดขึ้นจึงทำให้ลักษณะของกราฟในการทำงานมีความคล้ายคลึงกับ Sine wave รวมไปถึงมีหลักการจากการที่ทำงานด้วยการแปลงค่าคงที่ทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการอ้างอิงในทั้ง 3 เพสของ Stator มาเป็น Space vector 2D ผ่าน Space vector Modulation (SVM)

ข้อเสนอแนะ

ควรทำการทดลองเพื่อวัดลักษณะการทำงานของ Trapezoidal control ในช่วงความถี่ต่ำไปจนถึงสูง เพื่อทดสอบลักษณะการทำงานและลักษณะของ Back EMF ที่แสดงออกมา เพื่อดูพุติกรรมที่เกิดขึ้นมากว่ามีลักษณะอย่างไร

ควรทำการทดลองใน Space vector 2D ผ่าน Space vector Modulation (SVM) ให้เห็นถึงหลักการทำงานที่ซัดเจนกว่านี้ เพื่อให้เข้าใจถึงพุติกรรมที่เกิดขึ้นระหว่าง Trapezoidal control และ Field-oriented control (FOC)

เอกสารอ้างอิง

- https://www.researchgate.net/figure/Sequence-of-zero-crossing-of-back-EMF-and-phase-commutation_fig10_242545201
- <https://mechtex.com/blog/back-emf-in-bldc-motors-a-complete-guide>
- <https://www.tytorobotics.com/blogs/articles/how-to-calculate-motor-poles-and-brushless-motor-kv>
- https://www.ti.com/lit/ab/slvaeg3b/slvaeg3b.pdf?ts=1734254181276&ref_url=https%253A%252F%252E
- <https://www.bldcmotor.org/how-hall-sensor-works-in-brushless-dc-motor.html>
- <https://community.st.com/ysqtg83639/attachments/ysqtg83639/mcu-motor-control-forum/10084/1/motor%20A2212.pdf>
- <https://www.actronic-solutions.de/files/actronic/FTPROOT/Field-Oriented-Control.pdf>

- <https://www.pmdcorp.com/resources/type/articles/get/field-oriented-control-foc-a-deep-dive-article>
- <https://www.mathworks.com/help/mcb/gs/implement-motor-speed-control-by-using-field-oriented-control-foc.html>
- <https://bacancysystems.com/blog/trapezoidal-and-sinusoidal-bldc-motors>
- <https://circuitmaker.com/Projects/Details/StefanLuethi/BLDCControl>
- <https://eepower.com/technical-articles/how-to-control-brushless-dc-motors/#>
- <https://e2e.ti.com/support/motor-drivers-group/motor-drivers/f/motor-drivers-forum/994686/drv8316revm-how-to-get-trapezoidal-back-emf-waveform>
- <https://www.pw.live/physics-articles/fleming-left-hand-rule-and-fleming-right-hand-rule>