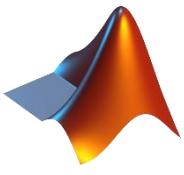


RMXplorer



LAB2: Motor Report

Name

- นายฉันท์ ออกรุ่งโรจน์ 66340500011
- นายพงษ์ณัฐ อารยางกูร 66340500032
- นายภาคนิค อินทร์วิเชียร 66340500039

Objectives

- ออกแบบและดำเนินการทดลองเกี่ยวกับพัฒนาระบบของมอเตอร์ได้อย่างครบถ้วน โดยกำหนดตัวแปรต้น, ตัวแปรตาม, และตัวแปรควบคุม ได้อย่างสมเหตุสมผล พร้อมทั้งสร้างสมมติฐานและจุดประสงค์การทดลองที่เชื่อมโยงกับทฤษฎีทางฟิสิกส์ เช่น หลักการทำงานของ Hall Sensor หรือ Current Sensor
- ใช้ MATLAB และ Simulink ในการเก็บผลการทดลองของมอเตอร์ เช่น ความเร็วรอบ, กระแสไฟฟ้า และแรงบิด รวมถึงตรวจสอบความเที่ยงตรงและความแม่นยำของผลการทดลอง พร้อมทั้งเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้กับข้อมูลจาก Datasheet หรือทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง
- อธิบายกระบวนการวัดและการแปลงค่าทางฟิสิกส์ในเซ็นเซอร์ที่เกี่ยวข้อง เช่น การใช้ Hall Sensor ในการวัดความเร็วของมอเตอร์ หรือการวัดกระแสไฟฟ้าด้วย Current Sensor ได้อย่างชัดเจนตั้งแต่ต้นจนจบกระบวนการ
- ออกแบบวิธีการทดลองที่เหมาะสมกับการตรวจสอบพัฒนาระบบของมอเตอร์ เช่น การปรับโหนดบนเพลาเพื่อทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและกระแสไฟฟ้า รวมถึงสามารถปรับปรุงและทำซ้ำการทดลองเพื่อยืนยันผลการทดลอง พร้อมอธิบายแหล่งที่มาของข้อมูลพิเศษและผลลัพธ์ได้อย่างเป็นเหตุเป็นผล
- นักศึกษาสามารถจัดทำรายงานผลการทดลองที่เกี่ยวข้องกับมอเตอร์ได้อย่างถูกต้อง เช่น การแสดงกราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับความเร็วรอบหรือแรงบิด การใช้สมการวิทยาศาสตร์สัญลักษณ์ และการจัดรูปแบบรายงานตามมาตรฐานสากล พร้อมสื่อสารข้อมูลที่ได้มาอย่างครบถ้วนและชัดเจน

Brushed DC Motor

วัตถุประสงค์

- เพื่อศึกษาและสามารถอธิบายลักษณะการทำงานของ Brushed DC Motor และความสามารถของ Motor Torque Constant และ Back-EMF Constant ของ DC Motor ได้
- เพื่อศึกษาและสามารถอธิบายความสัมพันธ์ของ Speed, Torque, Current, Power, %Efficiency ได้เมื่อ Load Torque ที่กระทำต่อ Brushed DC Motor ผ่านการปรับ Load Torque ด้วย Magnetic Particle Clutches เป็นลีนแอลจ์ไป และแรงดันไฟฟ้า Input จากการปรับ Duty Cycle, Frequency ของ PWM ที่จ่ายเข้า DC Motor เป็นลีนแอลจ์ไป
- เพื่อศึกษาและสามารถอธิบายหลักการทำงาน H-Bridge Drive Mode ทั้ง 3 Mode ได้ (Sign-Magnitude, Locked Anti-Phase, Async Sign-Magnitude) และควบคุม DC Motor ได้ทั้ง 2 Mode (Sign-Magnitude, Locked Anti-Phase)
- เพื่อศึกษาและสามารถอธิบายกระบวนการ Signal Conditioning, Signal Processing ทั้งหมดได้ตั้งแต่ต้นจนจบกระบวนการ ว่าค่าที่ อ่านได้จาก Incremental Encoder, Hall Current Sensor มีที่มาอย่างไร และอธิบายให้เห็นถึงวิธีคิดและขั้นตอนทั้งหมด ทั้งก่อน และหลัง Calibrate Sensor หรือวิธีจัดการข้อมูลที่ได้มา รวมถึงความสามารถความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์ใช้จริง กับแรงดันไฟฟ้าที่ออกมายจาก Hall Current Sensor และอธิบาย กระบวนการการ Unwrap ค่า

สมมติฐาน

- เมื่อโหลดแรงบิดเพิ่มขึ้น ความเร็วของมอเตอร์จะลดลง
- กระแสไฟฟ้าของมอเตอร์จะเพิ่มขึ้นตามค่าแรงบิดที่โหลด
- ประสิทธิภาพของมอเตอร์จะลดลง เมื่อโหลดแรงบิดเพิ่มขึ้น
- เมื่อปรับความถี่ของ PWM ต่ำลง กระแสจะมีแนวโน้มน้อยลงกว่าที่ควรจะเป็น
- เมื่อปรับ Duty Cycle แล้วแรงดันขาเข้าจะลดลงอย่างเป็นอัตราส่วน
- แรงดันขาเข้ามาก แรงบิดสูงสุด (Stall Torque) จะมาก
- การควบคุมแบบ Lock Anti-Phase สัญญาณ PWM จะไม่สามารถทำการควบคุมทิศทางได้ เนื่องจากเป็นการปรับ Duty Cycle จึงเป็นการควบคุมความเร็วเพียงอย่างเดียว

นิยามเชิงปฏิบัติการ

ค่าคงที่แรงบิดของมอเตอร์ (K_m)	คือ	ค่าคงที่พื้นฐานในมอเตอร์ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงบิด	มีหน่วยเป็น	Nm/A
แรงบิดจากมอเตอร์ (τ_m)	คือ	โมเมนต์รอบเพลาที่เกิดจากมอเตอร์	มีหน่วยเป็น	Nm
กระแสไฟฟ้า (i)	คือ	การไหลของประจุไฟฟ้า	มีหน่วยเป็น	A
แรงบิดจากโหลด (τ_L)	คือ	โมเมนต์รอบเพลาที่เกิดจากโหลด	มีหน่วยเป็น	Nm
โมเมนต์ความเนื่อยของชด漉วด อาร์เมเจอร์ (J)	คือ	ความเนื่อยที่เกิดจากชด漉วดอาร์เมเจอร์ภายในมอเตอร์	มีหน่วยเป็น	kgm^2
ความเร่งเชิงมุม (α)	คือ	การเปลี่ยนแปลงความเร็วเชิงมุมต่อเวลา	มีหน่วยเป็น	rad/s^2
ค่าสัมประสิทธิ์ของแเดมเปอร์ (B)	คือ	ค่าคงที่ที่กำหนดอัตราที่พลังงานถูกกระจายไปในระบบอันเนื่องมาจากแรงหน่วง	มีหน่วยเป็น	kgm^2/s
ความเร็วเชิงมุม (ω)	คือ	การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งเชิงมุมต่อเวลา	มีหน่วยเป็น	rad/s
ค่าคงที่แรงบิดของมอเตอร์ (K_b)	คือ	ค่าคงที่พื้นฐานในมอเตอร์ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า y อกลับ และความเร็วเชิงมุม	มีหน่วยเป็น	$Vrad/s$
แรงดันไฟฟ้า y อกลับ (V_{emf})	คือ	แรงดันไฟฟ้าที่สร้างขึ้นในมอเตอร์เมื่อมีการไหล y อกลับของกระแสไฟฟ้า เกิดจากการเหนี่ยวนำของชด漉วดภายในตัว	มีหน่วยเป็น	V
ความต้านทานภายใน (R)	คือ	คุณสมบัติการต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้าของชด漉วด	มีหน่วยเป็น	Ω
ความเหนี่ยวนำภายใน (L)	คือ	คุณสมบัติการเหนี่ยวนำไฟฟ้าของชด漉วด	มีหน่วยเป็น	H
แรงดันไฟฟ้าขาเข้า (v_{in})	คือ	แรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย	มีหน่วยเป็น	V
กฎของนิวตัน-ออยเลอร์	คือ	กฎข้อที่สองของนิวตันสำหรับการอธิบายการเคลื่อนที่ทั้งเชิงเส้น และทฤษฎีโมเมนต์ของออยเลอร์สำหรับการอธิบายการหมุนของวัตถุ เช่นที่อยู่ภายใต้แรงต่าง ๆ		
กฎแรงดันไฟฟ้าของเคอร์ซอฟฟ์	คือ	กฎพื้นฐานการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับแรงดันไฟฟ้าในวงจรของเคอร์ซอฟฟ์		

นิยามศัพท์เฉพาะ

Exponential	คือ ลักษณะของกราฟที่มีการเพิ่มขึ้นหรือลดลงแบบทวีคูณหรือเป็นกราฟเลขชี้กำลัง
Linear	คือ ลักษณะของกราฟที่มีการเพิ่มขึ้นหรือลดลงแบบเส้นตรง
เปิด MOSFET	คือ เปิดการใช้งาน MOSFET ให้กระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านได้
ปิด MOSFET	คือ ปิดการใช้งาน MOSFET ไม่ให้กระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านได้
เปิด Switch	คือ เปิดการใช้งาน Switch ให้กระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านได้
ปิด MOSFET	คือ ปิดการใช้งาน Switch ไม่ให้กระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านได้
วงจรปิด	คือ การที่วงจรเชื่อมต่อกันโดยสมบูรณ์ในเส้นทางการไหลของกระแสไฟฟ้า
วงจรเปิด	คือ การที่วงจรขาดการเชื่อมต่อกันในเส้นทางการไหลของกระแสไฟฟ้า
رابطเรียบ	คือ การที่สัญญาณ หรือคลื่นมีลักษณะเป็นกราฟไซน์ (Sine)
เที่ยงตรง	คือ ความสม่ำเสมอหรือความใกล้เคียงของค่าที่วัดได้เมื่อทำการทดลองหลายครั้ง
แม่นยำ	คือ ความใกล้เคียงระหว่างค่าที่วัดได้กับค่าจริง

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. Brushed DC Motor

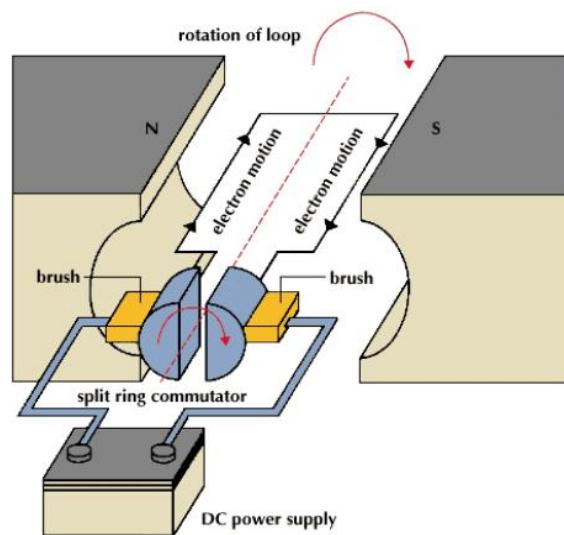


รูปที่ 1 Brushed DC Motor

ที่มา: <https://anaheimautomation.com/blog/post/brush-dc-motor-guide>

มอเตอร์กระแสตรงแบบมีแปรงถ่าน (Brushed DC Motor) หรือเรียกสั้นๆว่า “มอเตอร์ DC” คือ มอเตอร์ประเภทหนึ่งที่เรียบง่ายที่สุดทั้งในด้านหลักการทำงาน และด้านการใช้งาน มักขับเคลื่อนด้วยแบตเตอรี่ เป็นมอเตอร์ที่มีต้นทุนต่ำและขับเคลื่อนได้ง่าย อีกทั้งยังทำงานได้ดีในสภาพแวดล้อมการทำงานที่หลากหลาย

2. หลักการทำงานของ Brushed DC Motor



รูปที่ 2 Concepts of Brushed DC Motors

ที่มา: <https://engineeringnotesonline.com/dc-motors/> by Er.Sushil Neupane

เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้ามอเตอร์ DC กระแสจะไหลผ่านแปรงถ่าน (Brushes) ที่เชื่อมต่อไฟฟ้าระหว่างแหล่งพลังงานและคอมมิวเตเตอร์ (Commutator) ซึ่งหมุนพร้อมกับชุดลวดอาร์เมเจอร์ (Armature Coils) ภายใต้สนามแม่เหล็กจากแม่เหล็กการหรือชุดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า สนามแม่เหล็กในชุดลวดอาร์เมเจอร์จะมีปฏิสัมพันธ์กับสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวร ทำให้เกิดแรงผลักดันที่ทำให้โรเตอร์ (Rotor) และเพลามอเตอร์ (Shaft) หมุนกระแสไฟฟ้าในชุดลวดอาร์เมเจอร์สร้างสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนทิศตามการหมุนของคอมมิวเตเตอร์ ทำให้แรงบิด (Torque) ที่เกิดจากการมีปฏิสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กผลักดันโรเตอร์ให้หมุนต่อเนื่อง โดยความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กและจำนวนรอบของชุดลวดจะกำหนดคุณสมบัติต่างๆ อาทิ ความเร็วรอบ (Speed) และแรงบิด (Torque) ของมอเตอร์

3. Motor-Torque Constant

ค่าคงที่แรงบิดของมอเตอร์ หรือ (K_m) คือ ค่าคงที่พื้นฐานในมอเตอร์ที่สำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริบทของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแปรงถ่านและแบบไร้แปรงถ่าน ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเชิงไฟฟ้า (กระแสไฟฟ้า) ที่ส่งไปยังมอเตอร์ และปริมาณเชิงกล (แรงบิด) ที่มอเตอร์ผลิตขึ้น ดังสูตรต่อไปนี้

$$K_m = \frac{\tau_m}{i}$$

กำหนดให้ K_m	คือ ค่าคงที่แรงบิดของมอเตอร์	มีหน่วยเป็น Nm/A
τ_m	คือ แรงบิด	มีหน่วยเป็น Nm
i	คือ กระแสไฟฟ้า	มีหน่วยเป็น A

4. Back-EMF Constant

ค่าคงที่แรงเคลื่อนไฟฟ้ากลับ หรือ (K_v) คือ ค่าคงที่พื้นฐานในมอเตอร์ที่สำคัญ ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้ากลับของมอเตอร์ (ความต่างศักย์) และความเร็วของมอเตอร์ (ความเร็วเชิงมุม) ดังสูตรต่อไปนี้

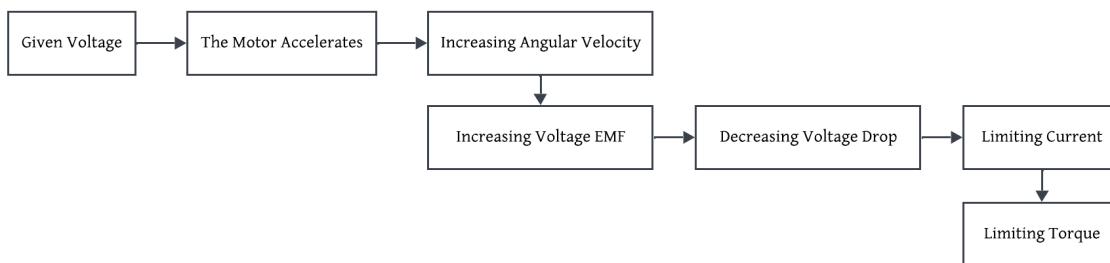
$$K_v = \frac{V_{emf}}{\omega}$$

กำหนดให้ K_v	คือ ค่าคงที่แรงบิดของมอเตอร์	มีหน่วยเป็น $Vrad/s$
V_{emf}	คือ แรงดันไฟฟ้า_y_onกลับ	มีหน่วยเป็น V
ω	คือ ความเร็วเชิงมุม	มีหน่วยเป็น rad/s

5. DC Motor Equation

สมการมอเตอร์ DC อย่างง่าย (Simplified DC Motor in Dynamics Equation Form) ใช้สำหรับการจำลองไม่เคลื่อนมอเตอร์ เพื่อคำนวณหาค่าตัวแปรต่างๆ ซึ่งเป็นการอนุพันธ์สมการค่าคงที่แรงบิดของมอเตอร์ และสมการค่าคงที่แรงเคลื่อนไฟฟ้ากลับของมอเตอร์ ด้วยกฎของนิวตัน-ออยเลอร์ และกฎแรงดันไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์

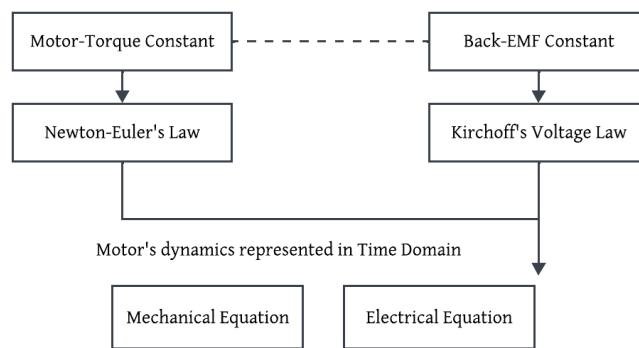
เนื่องจากสมการค่าคงที่ที่ก่อร่วมข้างต้น เป็นสมการที่สัมพันธ์กันเป็นลูกโซ่ผ่านตัวแปรในสมการ หรืออีกนัยหนึ่ง คือ สมการค่าคงที่ทั้ง 2 ทำหน้าที่เหมือนเป็นสะพานเชื่อมกันของการดำเนินการทางกล และทางไฟฟ้า ดังแผนภาพนี้



รูปที่ 2 Flowchart Case Study of the Motor-Torque Constant and Back-EMF Constant Bridge Relationship

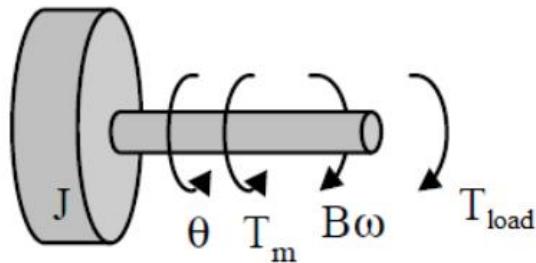
ที่มา: <https://lucid.app/lucidspark/>

จากแผนภาพข้างต้น เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าคงที่ให้กับมอเตอร์ ส่งผลให้เกิดความเร็วเชิงมุมรอบเพลาของมอเตอร์ จึงเกิดความเร็วเชิงมุมขึ้น ซึ่งทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับ เมื่อแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับสูงขึ้น แรงดันไฟฟ้าตกร่องตัวต้านทานจึงน้อยลง ส่งผลกระทบและไฟฟ้าถูกจำกัด แรงบิดจึงถูกจำกัดตามไปด้วย ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ที่ชัดเจนของสมการค่าคงที่แรงบิดของมอเตอร์ และสมการค่าคงที่แรงเคลื่อนไฟฟ้ากลับของมอเตอร์ จึงสามารถนำสมการทั้งสองแก้สมการเพื่อหา Motor Characteristic และ Motor Specification ซึ่งสามารถบ่งชี้ถึงคุณสมบัติของมอเตอร์ให้เหมาะสมกับงาน การเลือกซื้อมอเตอร์ DC และอื่นๆ



รูปที่ 2 Motor's Dynamics Represented in Time Domain Diagram

Motor's Dynamics Mechanical Equation หรือสมการ์ไดนามิกส์ของมอเตอร์ DC เชิงกล มาจากการอนุพันธ์สมการค่าคงที่แรงบิดของมอเตอร์ข้างต้น หรือ “Rotor Dynamic Model” ดังรูปที่_ เป็นสมการดังต่อไปนี้



รูปที่ 2 Rotor Dynamic Model

ที่มา: <https://www.sosw.poznan.pl/tfitzer/dcpid/>

จากกฎของนิวตัน-ออยเลอร์ (Newton-Euler's Law)

$$\sum \tau = J\alpha$$

จะได้สมการ์ไดนามิกส์ของมอเตอร์ DC เชิงกลในรูปแบบโดยเมณเวลา

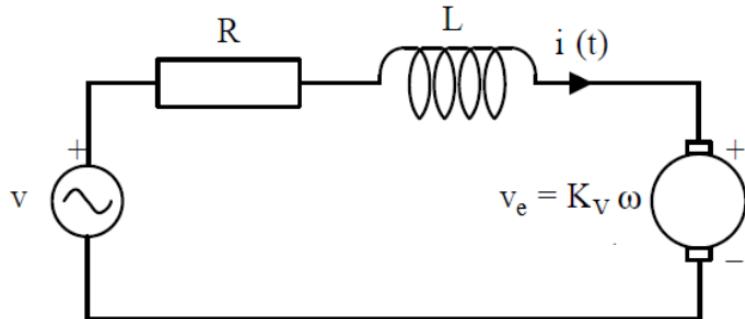
$$-B\omega - \tau_m - \tau_L = J\alpha$$

โดยสามารถเปลี่ยน τ_m เป็น $K_m i$ ได้ จึงได้สมการดังนี้

$$J\alpha + B\omega - K_m i = -\tau_L$$

กำหนดให้	K_m	คือ ค่าคงที่แรงบิดของมอเตอร์	มีหน่วยเป็น	Nm/A
	i	กระแสไฟฟ้า	มีหน่วยเป็น	A
	τ_m	แรงบิดของมอเตอร์	มีหน่วยเป็น	Nm
	τ_L	แรงบิดจากโหลด	มีหน่วยเป็น	Nm
	J	โมเมนต์ความเนื่อยของชุดลวดอาร์เมเจอร์	มีหน่วยเป็น	kgm^2
	α	ความเร่งเชิงมุม	มีหน่วยเป็น	rad/s^2
	B	ค่าสัมประสิทธิ์ของแเดมเปอร์	มีหน่วยเป็น	kgm^2/s
	ω	ความเร็วเชิงมุม	มีหน่วยเป็น	rad/s

Motor's Dynamics Electrical Equation หรือสมการไนนามิกส์ของมอเตอร์ DC เชิงไฟฟ้า มาจากการอนุพันธ์สมการค่าคงที่แรงเคลื่อนไฟฟ้ากลับของมอเตอร์ข้างต้น หรือ “Circuitry Dynamic Model” ดังรูปที่_ เป็นสมการดังต่อไปนี้



รูปที่ 2 Circuitry Dynamic Model

ที่มา: <https://www.sosw.poznan.pl/tfitzer/dcpid/>

จากกฎแรงดันไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchoff's Voltage Law)

$$-v_{in} + v_L + v_R + v_{emf} = 0$$

โดยสามารถเปลี่ยน $K_v \omega$ เป็น V_{emf} ได้ และเป็นสมการไนนามิกส์ของมอเตอร์ DC เชิงไฟฟ้าในรูปแบบโดเมนเวลา

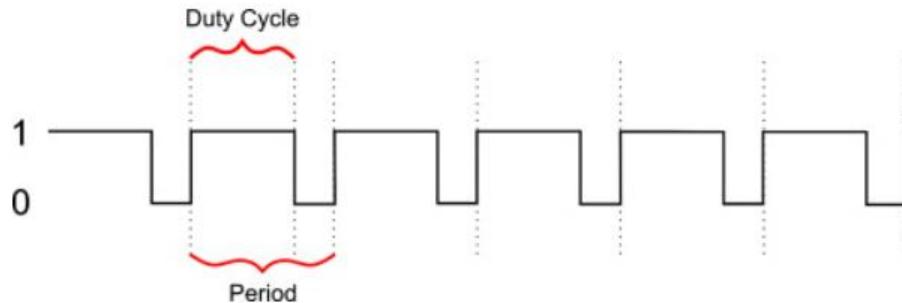
$$-v_{in} + v_L + v_R + K_v \omega = 0$$

แปลงสมการให้อยู่ในรูปของ RLC จึงได้สมการดังนี้

$$L \frac{di}{dt} + Ri + K_v \omega = v_{in}$$

กำหนดให้	K_v	คือ ค่าคงที่แรงเคลื่อนไฟฟ้ากลับ	มีหน่วยเป็น	$Vrad/s$
	ω	คือ ความเร็วเชิงมุม	มีหน่วยเป็น	rad/s
	V_{emf}	คือ แรงดันไฟฟ้าย้อนกลับ	มีหน่วยเป็น	V
	R	ความต้านทานภายใน	มีหน่วยเป็น	Ω
	i	กระแสไฟฟ้า	มีหน่วยเป็น	A
	L	ความเหนี่ยวนำภายใน	มีหน่วยเป็น	H
	v_{in}	แรงดันไฟฟ้าขาเข้า	มีหน่วยเป็น	V

6. Pulse Width Modulation

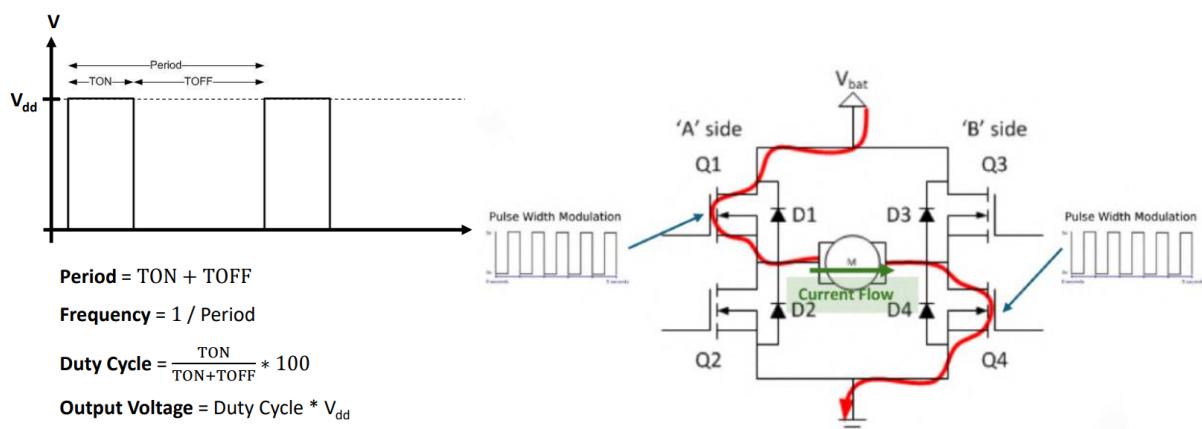


รูปที่ 3 Pulse Width Modulation

ที่มา: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/pulse-width-modulation>

การมอดูเลตความกว้างพัลส์ หรือเรียกสั้น ๆ ว่า “PWM” เป็นเทคนิคดิจิทัลที่ใช้ในการควบคุมสัญญาณโดยการสลับสถานะระหว่าง HIGH และ LOW ซ้ำ ๆ ในลักษณะควบคุมที่สม่ำเสมอ สามารถปรับให้สัญญาณดิจิทัล (Digital) มีลักษณะต่อเนื่องคล้ายกับสัญญาณแอนalog (Analogue) ผ่านการทำงานด้วยเวลาการเปิด-ปิดของสัญญาณภายในหนึ่งคาบ โดยสัญญาณ PWM มีตัวแปรหลักในการปรับแต่งสองตัวแปร ได้แก่ ความถี่ (Frequency) และอัตราการทำงาน (Duty Cycle) อย่างไรก็ตาม PWM สามารถเกิดปัจหายาในด้านการนำมาราทำ Speed Control ดังนี้

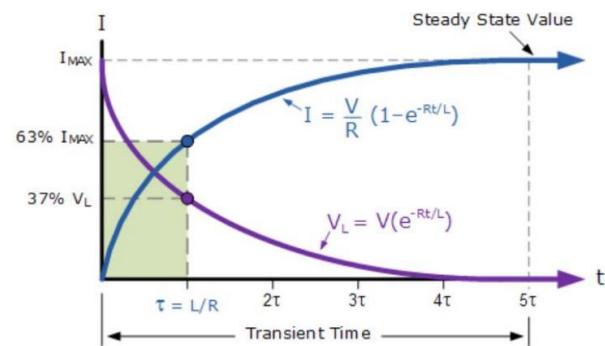
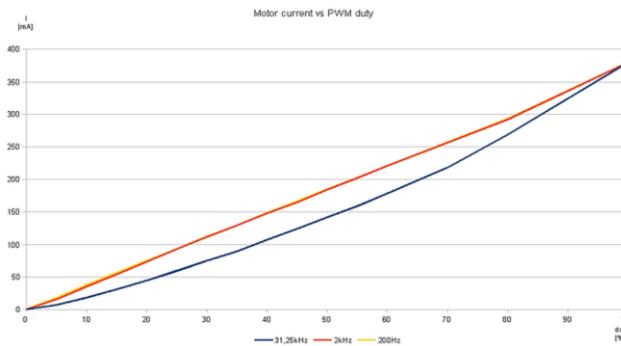
6.1. Speed Control Using Pulse Width Modulation



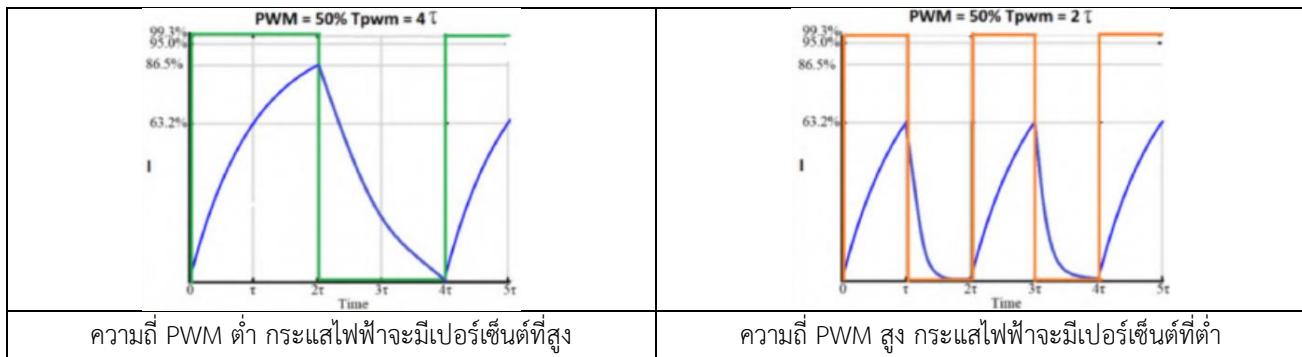
รูปที่ 4 และ 5 ตามลำดับ การใช้ PWM เพื่อควบคุมความเร็วผ่าน H-Bridge Drive

ที่มา: <https://www.modularcircuits.com/blog/articles/h-bridge-secrets/sign-magnitude-drive/>

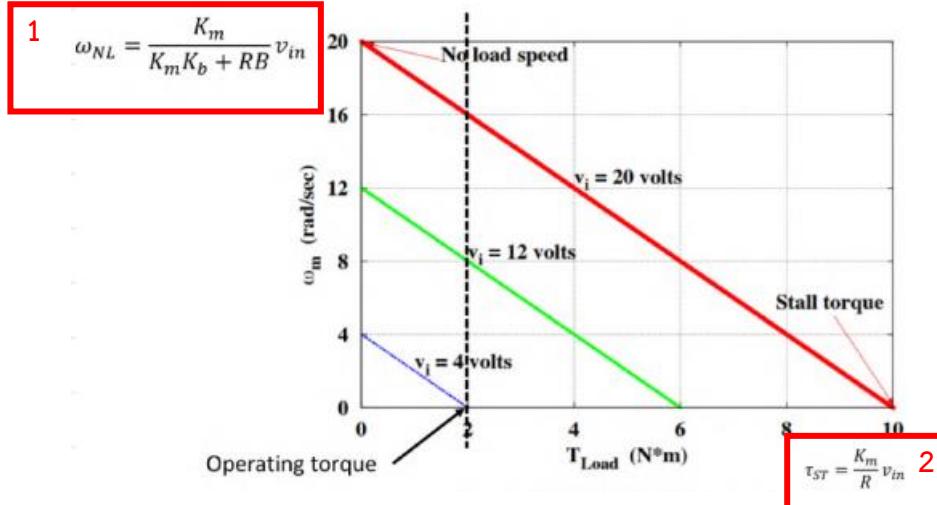
หากเราปรับความถี่ของ PWM ต่ำเกิน จะส่งผลให้กระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์เป็น Non-linear เนื่องจากกระแสไฟฟ้าไม่ถึงค่าสูงสุดที่ 5τ ซึ่งทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยต่ำกว่าที่ควรจะเป็น ซึ่งเป็นพฤติกรรมของตัวเหนี่ยวนำที่ไม่สามารถเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าทันทันใจ



รูปที่ 6 และ 7 ตามลำดับ พฤติกรรมของกระแสไฟฟ้าเมื่อจ่าย PWM



ตารางที่ 1 ความสัมพันธ์ของความถี่ของ PWM และกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ของแรงบิดจากโหลดกับความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์

ที่มา: <https://web.stanford.edu/class/me161/labs/Lab06MotorConstants.pdf>

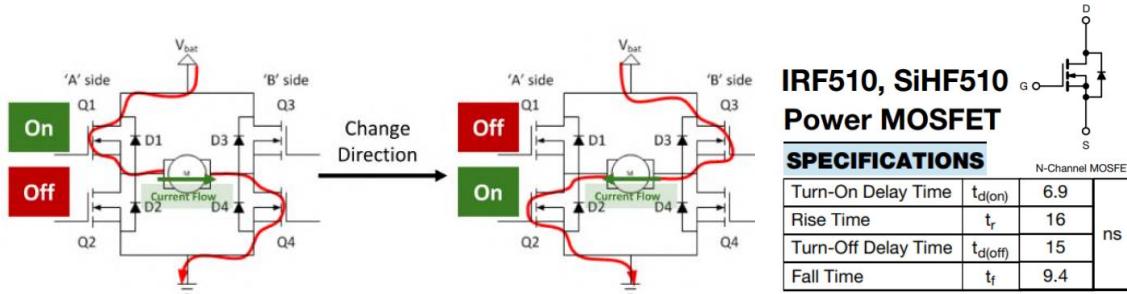
จากสมการที่ 1 และกราฟแสดงให้เห็น ω_{NL} แปรผันตรง V_{in} กับ ω_{NL} น้อยตามไปด้วย ในทางกลับกันถ้า V_{in} มาก ω_{NL} ก็จะมาก และจากสมการที่ 2 ให้เห็น τ_{ST} แปรผันตรง V_{in} หมายความว่า τ_{ST} ขึ้นกับ V_{in} เหมือนกัน

7. H-Bridge Drive

วงจรขั้บมอเตอร์ที่ใช้สำหรับควบคุมทิศทางการหมุนของมอเตอร์ DC และสามารถควบคุมการเปิด-ปิด หรือความเร็วได้ด้วยการปรับระดับแรงดันไฟฟ้า โดยวงจร H-Bridge เป็นที่นิยมในระบบควบคุมมอเตอร์ เนื่องจากสามารถควบคุมทิศทางของกระแสไฟฟ้าให้เหลื่อมทิศทางที่ต้องการได้อย่างง่ายดาย โดยมีโหมดการขับ หรือ H-Bridge Drive Mode 3 荷模 ได้แก่ Sign-Magnitude, Locked Anti-Phase และ Asynchronous Sign-Magnitude

อย่างไรก็ตาม สามารถเกิดปัญหาทางการควบคุม หรือ Direction Control ได้ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

7.1. Direction Control By H-Bridge Drive

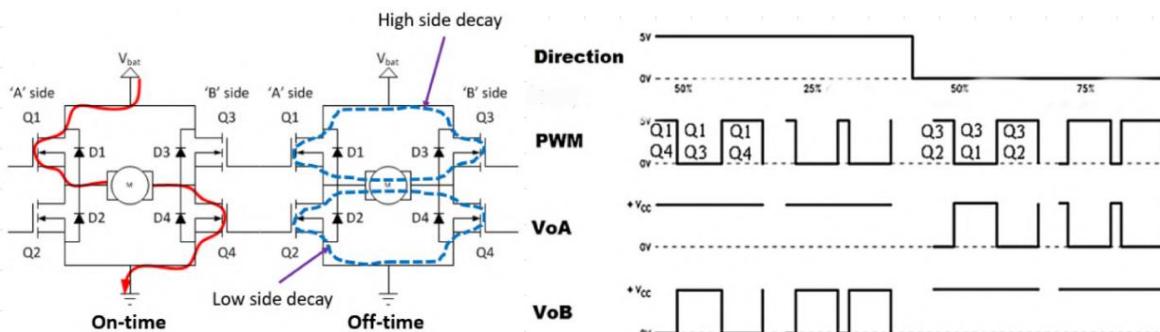


รูปที่ 9 และ 10 การควบคุมโดย H-Bridge Drive และการแสดงระยะเวลาเปิด-ปิดของ MOSFET

ปัญหา Turn-Off Delay Time > Turn-On Delay Time ถ้าเราสั่งให้มอเตอร์เปลี่ยนทิศทางทันที จะทำให้มีช่วงเวลาประมาณ $15 - 6.9 = 8.1$ ที่ MOSFET ทั้ง 4 ตัวจะเปิดพร้อมกัน ซึ่งทำให้เกิด Short Circuit ซึ่งสามารถแก้ได้โดยการทำให้ค่า Turn-Off Delay Time ไม่น้อยกว่า Turn-On Delay Time ทำการต่อ Capacitor เพื่อปรับให้ Turn-Off Delay Time และ Turn-On Delay Time ใกล้เคียงกัน

7.2. Sign-Magnitude

การควบคุมโดยใช้ PWM กำหนดความเร็ว และทิศทางการหมุนของมอเตอร์ 荷模ดังกล่าวเป็นการสลายพลังงานรูปแบบ Slow Decay เนื่องจากกระแสในขดลวดจะหมุนเวียนใน H-Bridge Drive

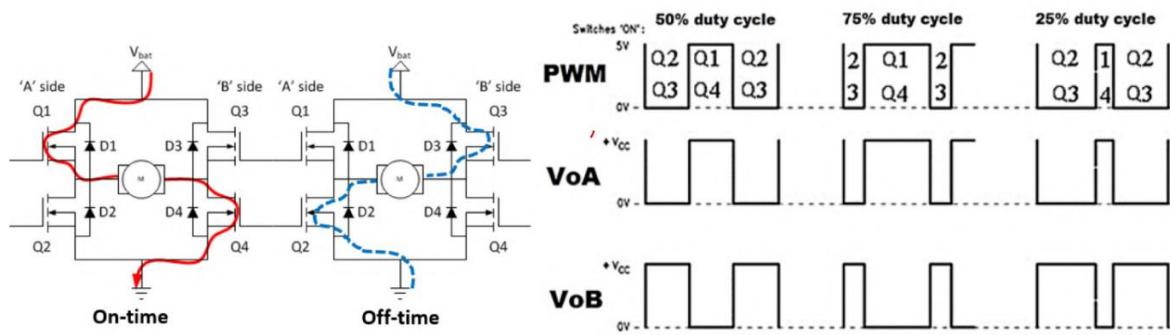


รูปที่ 11 และ 12 การควบคุมแบบ Sign-Magnitude

โดยในโหมดนี้จะใช้การควบคุมทิศทาง (Direction Control) ด้วยการจ่าย HIGH หรือ LOW หรือที่เรียกว่า Sign ซึ่งเป็นสัญญาณดิจิทัล อาทิ จ่าย HIGH มอเตอร์จะหมุนตามเข็มนาฬิกา หรือจ่าย LOW มอเตอร์จะหมุนทวนเข็มนาฬิกา

7.3. Locked Anti-Phase

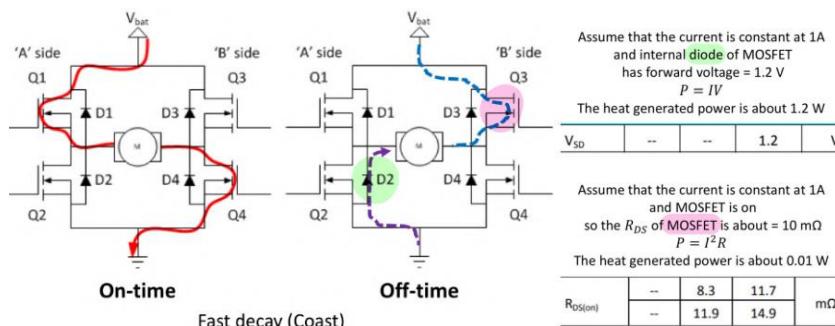
การควบคุมโดยใช้ PWM ในการควบคุมเพียงอย่างเดียวทั้งขนาด และทิศทาง โดยควบคุมขนาดโดยใช้ความต่างของ Duty Cycle ปัจจุบันจาก Duty Cycle ที่ 50% เมื่อมี Duty Cycle มากกว่า 50% มอเตอร์จะหมุนไปทางหนึ่ง ในทางกลับกัน ในกรณีที่น้อยกว่า 50% มอเตอร์จะหมุนไปในทิศตรงข้าม ซึ่งโหมดการควบคุมนี้เป็นแบบ Fast-Decay หรือสายพลังงานอย่างรวดเร็ว เนื่องจากกระแสไฟฟ้าจะไหลย้อนกลับเข้าแหล่งพลังงาน



รูปที่ 13 และ 14 การควบคุมแบบ Locked Anti-Phase

7.4. Asynchronous Sign Magnitude

การควบคุมแบบหยุดจ่ายไฟให้มอเตอร์ ซึ่งมอเตอร์จะหมุนไปเรื่อยๆ ตามความเชื่อของมอเตอร์ ซึ่งคล้ายคลึงกับรูปแบบ Free (High Impedance) โดยให้กระแสไฟฟ้าไหลย้อน 1 ตัว ซึ่งช่วยลดการสูญเสียพลังงาน



$$\begin{aligned} \text{Total heat generated power} &= 1.2 + 0.01 \\ &= 1.21 W \end{aligned}$$

รูปที่ 15 และ 16 การควบคุมแบบ Asynchronous Sign Magnitude และพลังงานที่เสียไป

8. Magnetic Particles Clutch



รูปที่ 17 Magnetic Particles Clutch

ที่มา: <https://placidindustries.com/products/clutches/magnetic-particle-clutches/>

คลัตช์แม่เหล็กไฟฟ้าประเภทนี้ ซึ่งใช้ออนุภาคแม่เหล็กที่อยู่ในรูปของวงเหลวหรือในรูปผง เพื่อส่งผ่านแรงบิดระหว่างชิ้นส่วนที่สามารถหมุนได้สองชิ้น โดยให้ระดับการส่งแรงบิดที่แปรผันได้อย่างคงที่และต่อเนื่อง จากการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าขาเข้า และมักใช้ในงานที่ต้องควบคุมแรงบิดอย่างราบรื่นและแม่นยำ อาทิ เครื่องจักรระบบอัตโนมัติ และระบบขับเคลื่อนอุตสาหกรรม

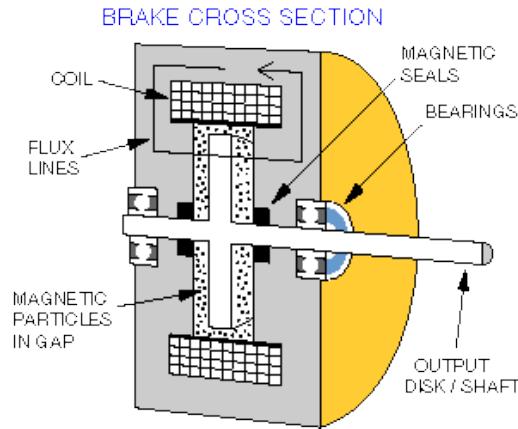
แต่ในการทดลองของ LAB Brushed DC Motor ด้วย MotorXplorer จะใช้เป็นมอเตอร์เกียร์ แกนเพลา 8 มิลลิเมตร รุ่น 12 VDC 1200 RPM ที่ผ่านการทำ Torque Control เพื่อทดสอบความสามารถของ Magnetic Particles Clutch ที่สามารถสร้าง Dynamic Load ได้



รูปที่ 18 และ 19 มอเตอร์เกียร์ แกนเพลา 8 มิลลิเมตร รุ่น 12 VDC 1200 RPM

ที่มา: <https://www.nattakit.com/16720920/zga60fm>

9. หลักการทำงานของ Magnetic Particles Clutch



รูปที่ 20 Concepts of Magnetic Particles Clutch

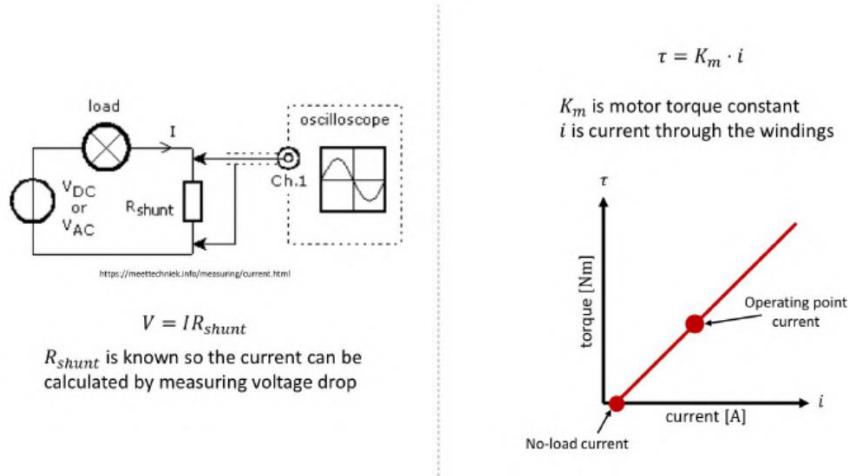
ที่มา: <https://placidindustries.com/engineering-resources/how-magnetic-particle-brakes-work/>

Magnetic Particle Clutch ทำงานโดยใช้อุณหภูมิที่เป็นส่วนประกอบของแม่เหล็ก ซึ่งเกี่ยวข้องกับการปรับความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก เพื่อควบคุมการส่งแรงบิดระหว่างเพลาอินพุตและเอาต์พุต เมื่อมีการจ่ายแรงดันไฟฟ้าจะไม่มีการใช้สนามแม่เหล็ก อนุญาตแม่เหล็กในช่องว่างระหว่างโรเตอร์อินพุต และเอาต์พุตจะยังคงหลวม ทำให้โรเตอร์หมุนได้อย่างอิสระ เมื่อخلดลงแม่เหล็กไฟฟ้าได้รับกระแสไฟฟ้า จะสร้างสนามแม่เหล็กที่ทำให้อนุญาตเรียงตัวกันอย่างแข็งแรง ทำให้เกิดการเชื่อมต่อกันของอนุญาตที่มั่นคงระหว่างโรเตอร์อินพุตและเอาต์พุต การเชื่อมต่อจะทำให้คลัตช์ส่งแรงบิดได้ตามสัดส่วน ขึ้นอยู่กับความแรงของสนามแม่เหล็ก ยิ่งแรงดันไฟฟ้าขาเข้ามาก ยิ่งส่งผลให้กระแสไฟฟ้ามากซึ่งจะยิ่งสนามแม่เหล็กแรงขึ้น และเมื่อทริปลโดยตรงกับการเรียงตัวของอนุญาตที่มากขึ้น จึงส่งผลให้ส่งแรงบิดได้สูงขึ้น ด้วยการปรับแรงดันไฟฟ้าขาเข้า คลัตช์จะควบคุมแรงบิดได้อย่างราบรื่น แม่นยำ และแปรผันอย่างคงที่

10. Torque Control

จากสูตร $\tau_L = K_m i$ สามารถคำนวณ i หรือกระแสไฟฟ้าของวงจรได้โดยการต่อ R_{shunt} กับมอเตอร์แล้ว วัดแรงดันตกคร่อม R_{shunt} จึงสามารถคำนวณกระแสไฟฟ้าจากสูตร $V = IR$

สาเหตุที่ต้องใช้เป็น R_{shunt} เนื่องจาก R_{shunt} มีค่าความต้านทานต่ำ ช่วยลดการสูญเสียพลังงานได้ อีกทั้งยังสามารถวัดกระแสไฟฟ้าได้อย่างแม่นยำ

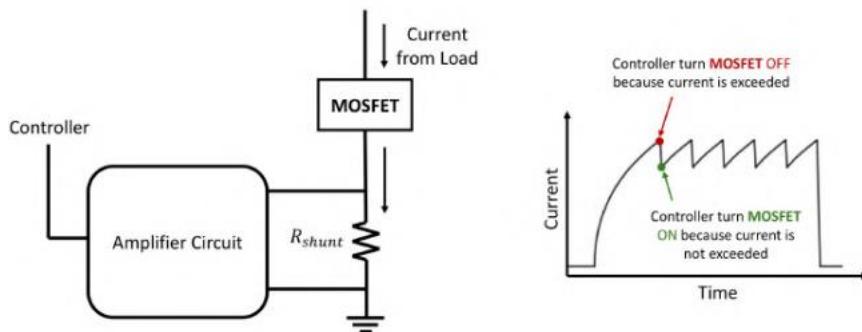


รูปที่ 21 R-shunt for Torque Control

ที่มา: file:///C:/Users/chant/Desktop/FIBO_Study/2Y_1/RMX/Lecture/Lecture9_Actuators-01_2024.pdf

11. Current Limit

ระบบป้องกันกระแสไฟฟ้าเกินมีหลักการ คือ เมื่อวัดแรงดันตกคร่อม R_{shunt} และนำไปคำนวณกระแสไฟฟ้า เมื่อกระแสไฟฟ้าถึงค่าที่กำหนด Controller จะสั่งปิด MOSFET ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าค่อยๆลดลง และพอดีลงจนต่ำกว่าค่าที่กำหนด Controller จะสั่งเปิด MOSFET กลับมาทำซ้ำ จึงสามารถควบคุมกระแสไฟฟ้าไม่ให้เกินได้



รูปที่ 22 R-shunt for Current Limit

ที่มา: file:///C:/Users/chant/Desktop/FIBO_Study/2Y_1/RMX/Lecture/Lecture9_Actuators-01_2024.pdf

วัสดุอุปกรณ์

ลำดับที่	ชื่อ	จำนวน	หน่วย
1	Nidec Components Geared DC Geared Motor, 12 V dc, 20 Ncm, 70 rpm, 6mm Shaft Diameter	1	อัน
2	Incremental Encoder AMT103-V	1	อัน
3	Warner Electric Magnetic Particle Clutches MPB12	1	อัน
4	WCS1700 Hall Current Sensor	1	อัน
5	Cytron MDD20A Motor Driver	1	อัน
6	Nucleo-STM32G474RE	1	บอร์ด
7	บอร์ดทดลอง MotorXplorer	1	บอร์ด
8	สายอัปโหลด	1	เส้น
9	สายจัมเบอร์ฟู-เมีย ความยาว 20 เมตร	3	เส้น
10	AC/DC Adapter 100-240VAC to 9VDC 2A	1	ชุด

ตารางที่ 2 วัสดุอุปกรณ์

ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาข้อมูลภาพรวมเกี่ยวกับ Brushed DC Motor, การใช้งาน Incremental Encoder AMT103-V, WCS1700 Hall Current Sensor และ Magnetic Particle Clutchches จากข้อมูลจำเพาะใน Datasheet
2. วางแผนการทดลองจาก สมมติฐานที่ตั้งขึ้น ผู้จัดทำจึงแบ่งการทดลองออกเป็น 3 การทดลองดังนี้
 - 2.1 การทดลองที่ 1 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของความเร็ว (Speed), แรงบิด (Torque), กระแสไฟฟ้า (Current), กำลังไฟฟ้า (Power) และประสิทธิภาพ (Efficiency) ของ Brushed DC Motor เมื่อโหลดแรงบิด (Load Torque) เปลี่ยนแปลงไป โดยการควบคุมผ่านมอเตอร์ที่มีการทำ Torque Control หรือ Dynamics Load
 - 2.2 การทดลองที่ 2 เพื่อสังเกตผลผลกระทบจากการปรับค่า Frequency ของสัญญาณ PWM ที่จ่ายให้กับมอเตอร์ต่อกุญแจบัดของมอเตอร์ขณะใช้งาน
 - 2.3 การทดลองที่ 3 เพื่อสังเกตผลผลกระทบจากการปรับค่า Duty Cycle ของสัญญาณ PWM ที่จ่ายให้กับมอเตอร์ต่อการเปลี่ยนแปลงของความเร็วมอเตอร์ และแรงบิด
 - 2.4 การทดลองที่ 4 เพื่อศึกษาการทำงานของ Motor Driver แบบ Sign-Magnitude และ Lock Anti-Phase กับสัญญาณ PWM
3. ทำการทดลองที่ 1 เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ของตัวแปรพื้นฐานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับ Brushed DC Motor โดยผ่านการประยุกต์ใช้ร่วมกับ MATLAB และ Simulink
4. ทำการทดลองที่ 2 เพื่อสังเกตผลผลกระทบจากการปรับค่า Frequency ของสัญญาณ PWM โดยผ่านการประยุกต์ใช้ร่วมกับ MATLAB และ Simulink
5. ทำการทดลองที่ 3 เพื่อสังเกตผลผลกระทบจากการปรับค่า Duty Cycle ของสัญญาณ PWM ที่จ่ายให้กับมอเตอร์ต่อการเปลี่ยนแปลงของความเร็วมอเตอร์ และแรงบิด
6. การทดลองที่ 4 เพื่อศึกษาการทำงานของ Motor Driver แบบ Sign-Magnitude และ Lock Anti-Phase กับสัญญาณ PWM
7. สรุปและอภิปรายผลการทดลอง

การทดลองที่ 1

จุดประสงค์การทดลอง

- เพื่อตอบสมมติฐานที่กล่าวไว้ข้างต้นว่า “เมื่อโหลดแรงบิดเพิ่มขึ้น ความเร็วของมอเตอร์จะลดลง”
- เพื่อตอบสมมติฐานที่กล่าวไว้ข้างต้นว่า “กระแสไฟฟ้าของมอเตอร์จะเพิ่มขึ้นตามค่าแรงบิดที่โหลด”
- เพื่อตอบสมมติฐานที่กล่าวไว้ข้างต้นว่า “ประสิทธิภาพของมอเตอร์จะลดลง เมื่อโหลดแรงบิดเพิ่มขึ้น”

ตัวแปร

ตัวแปรต้น: แรงบิดจากมอเตอร์ที่ผ่านการทำ Torque Control (Dynamics Load)

ตัวแปรตาม: ความเร็ว, แรงบิด, กระแสไฟฟ้า, กำลังไฟฟ้า, และประสิทธิภาพของมอเตอร์

ตัวแปรควบคุม: แรงดันที่จ่ายเข้ามอเตอร์, อุณหภูมิ, ชนิดของ Brushed DC Motor, Sign-Magnitude

วิธีดำเนินการทดลอง

1. ติดตั้งบอร์ด Nucleo-STM32 ลงบน MotorXplorer

- ติดตั้งบอร์ด Nucleo-STM32 ลงบน MotorXplorer ตามตำแหน่งที่จัดวางไว้
- Setup Hardware และ MATLAB

2. ตั้งค่าการใช้งานมอเตอร์ทดลองและ มอเตอร์ที่ผ่านการทำ Torque Control

- เชื่อมต่อเพลามอเตอร์ที่ต้องการจะทดลองกับมอเตอร์ที่ผ่านการทำ Torque Control และตั้งค่าเริ่มต้นแรงบิดที่ระดับต่ำสุด หรือ 0 Nm ดังที่กำหนดไว้ในระบบ

3. เก็บค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ เพื่อนำมาสร้างกราฟ Motor Characteristic แบบอุดมคติสำหรับเปรียบเทียบกับกราฟ Motor Characteristic การทดลองจากการเปลี่ยนแปลงของ Dynamics Load (การทดลองที่ 1)

- เก็บ Stall Current และ Stall Current
- เก็บ No Load Angular Velocity และ No Load Current

4. ตั้งค่าการวัดข้อมูล MATLAB และ Simulink

- ตั้งค่าการควบคุมและอ่านค่าตัวแปรต่าง ๆ ผ่าน MATLAB และ Simulink โดยใช้ Data Inspector ใน การสังเกตและบันทึกผลการทดลองแบบ Real-Time

5. เริ่มต้นวัดค่าแรงบิดที่ 10% ของแรงบิดสูงสุด

- เริ่มการทดลองโดยตั้งค่าแรงบิดที่ 10% ของแรงบิดสูงสุด หรือ 0.295 Nm (หลักเลี้ยงการวัดที่ 0% เนื่องจากอาจส่งผลให้ข้อมูลแสดงผลไม่ชัดเจนหรือค่าที่ได้ต่ำเกินไป)

6. ปรับเพิ่มแรงบิดทีละ 10%

- เพิ่มแรงบิดจากมอเตอร์ที่ผ่านการทำ Torque Control ทีละ 10% ของแรงบิดสูงสุด ตั้งแต่ 10% ไปจนถึง 100% ของแรงบิดสูงสุด โดยวัดและบันทึกค่าความเร็ว, แรงบิด, กระแสไฟฟ้า, กำลังไฟฟ้า, และ ประสิทธิภาพของมอเตอร์ในแต่ละระดับ

7. บันทึกค่าผลการทดลองในแต่ละระดับแรงบิด

- ใช้ Data Inspector และประยุกต์ใช้ MATLAB และ Simulink เพื่อบันทึกค่าต่าง ๆ ที่วัดได้ในแต่ละระดับ แรงบิด

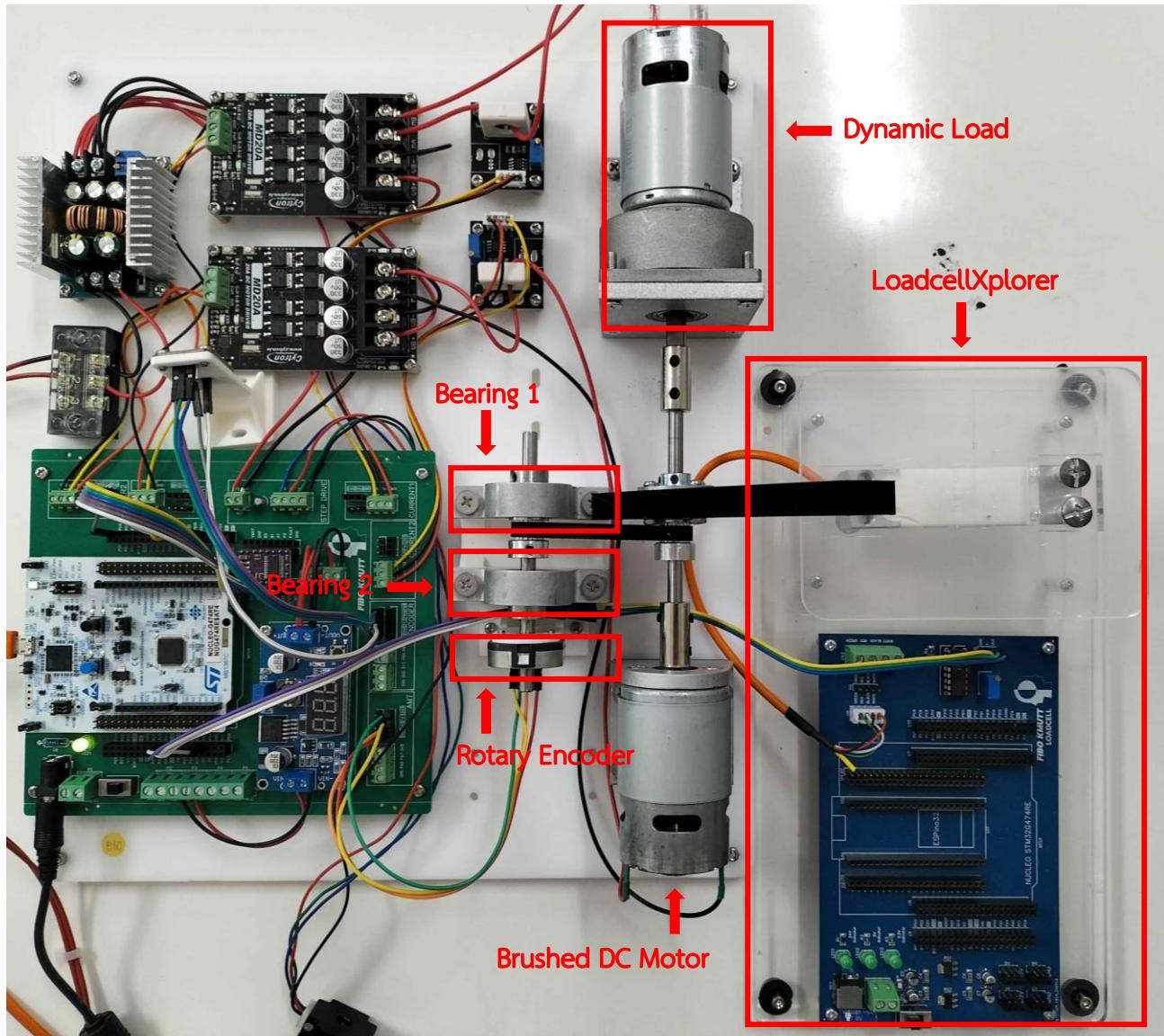
8. วิเคราะห์ข้อมูล

- นำค่าที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์โดยสร้างกราฟ เปรียบเทียบกับ Motor Characteristic ในอุดมคติ และอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับตัวแปรตาม อาทิ ความเร็ว กระแสไฟฟ้า และประสิทธิภาพ เพื่อ ยืนยันหรือหักล้างสมมติฐานที่ตั้งไว้

1. การ Setup Hardware และ MATLAB การทดลองที่ 1

1.1 Hardware Setup

ผู้จัดทำเริ่มจากเชื่อมต่อสายบัน MotorXplorer ให้ถูกต้องตามที่กำหนดไว้ และได้มีการตัดแปลงอุปกรณ์บนบอร์ดบางส่วน เพื่อให้เกิดความสะดวกในการใช้งาน และลด Noise ที่เกิดจากอุปกรณ์ได้ ซึ่งความฝืด (Friction) เป็นองค์ประกอบหลักของ Noise ในระบบนี้ ทางผู้จัดทำจึงได้ Setup บอร์ด MotorXplorer ที่ใช้ร่วมกับ LoadcellXplorer ดังรูป



รูปที่ 23 MotorXplorer ที่ถูกปรับแต่ง

1.2 MATLAB Setup

```

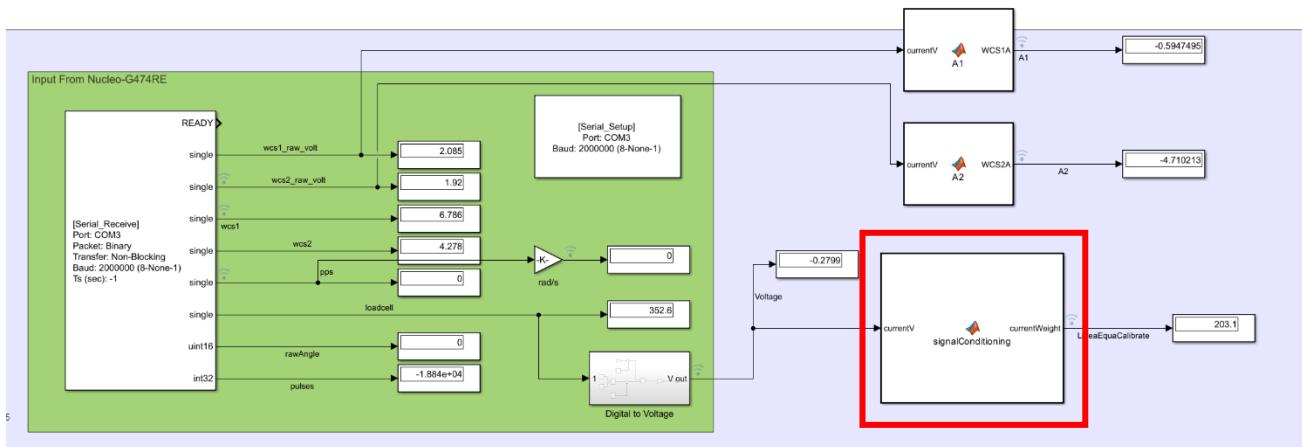
A = rms(ST_1{2}.Values.Data);
B = rms(ST_2{2}.Values.Data);
C = rms(ST_3{2}.Values.Data);

StallCurrent = (A+B+C)/3

```

Code ที่ 1 โปรแกรมหาค่าเฉลี่ย

Code ใน MATLAB สำหรับการนำการทดลอง 3 ครั้งไปทำการ RMS และจากนั้นเก็บในค่าตัวแปร A B และ C เพื่อทำการหาค่าเฉลี่ย แล้ววิจจะได้ค่าที่มีความแม่นยำ และถูกต้อง



Simulink ที่ 1 Signal Conditioning สำหรับ Loadcell

เนื่องจากต้องใช้ Loadcell ในการวัดน้ำหนัก เพื่อแปลงเป็นแรงบิด (Torque) จึงจำเป็นต้องมีการทำ Signal Conditioning ดัง LAB1 เพื่อให้น้ำหนักเกิดความแม่นยำตามที่ต้องการ ในกรณีนี้กำหนดให้น้ำหนักสูงสุดที่เท่ากับ 5 กิโลกรัม จะได้ 2.5 โวลต์

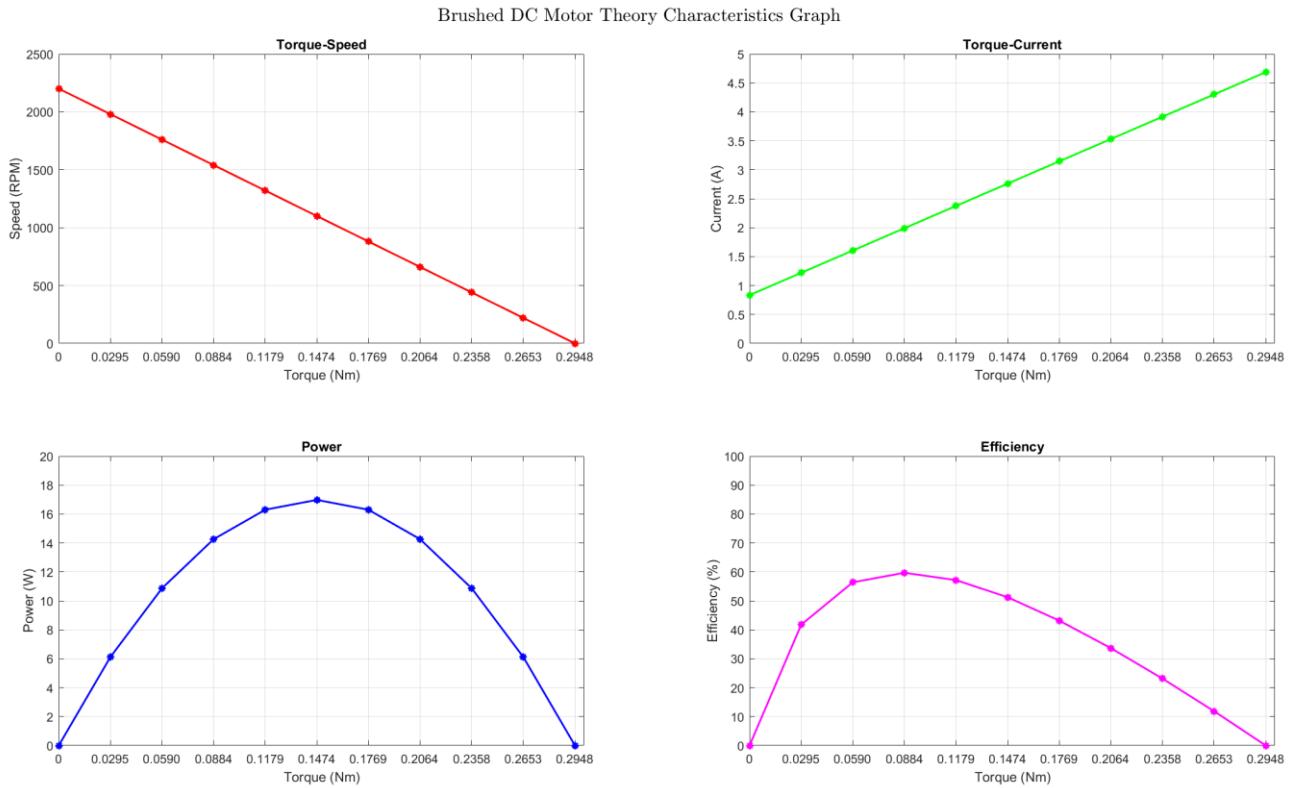


Simulink ที่ 2 และ 3 ตามลำดับ การกำหนดค่า PWM และ Duty Cycle และ DC Frequency

การกำหนด DC PWM สอดคล้อง Sign-Magnitude ซึ่งมีรูปแบบการกำหนดดังนี้

- 65535 คือ Duty Cycle ซึ่งเมื่อคูณกับพจน์หลัง ($\frac{100}{100}$) จะทำให้สามารถปรับเบอร์เซ็นต์ที่พจน์นี้ได้ทันที
- เครื่องหมายบวกและลบ (+/-) คือ บอกทิศทางการหมุนของมอเตอร์ ในกรณีนี้บวกจะหมุนตามเข็มนาฬิกา และลบจะหมุนทวนเข็มนาฬิกา

2. การหา Motor Characteristic แบบอุดมคติ



รูปที่ 24 Brushed DC Motor Theory Characteristics Graph

การหา Motor Characteristics ของผู้จัดทำเริ่มจากการหา Stall Torque และ Stall Current ก่อน จากนั้นจึงหา No Load Angular Velocity และ No Load Current เพื่อคำนวณหาค่าคงที่แรงบิด หรือ Motor-Torque Constant และนำค่าเหล่านี้มาทำการหา Line of Best Fit โดยมีรายละเอียดการหาค่าแต่ละตัวเปรียบเทียบดังนี้

2.1 หาค่า Stall Torque (τ_{ST}) และ Stall Current (i_{ST})

ผู้จัดทำได้เก็บค่าตัวแปรเหล่านี้ร่วมกัน เนื่องจากความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้า และแรงบิดที่แปรผันตรงกัน ตามสมการดังต่อไปนี้

สมการ Simple Motor's Equation

$$\tau = K_m i$$

แสดงให้เห็นว่า K_m เป็นค่าคงที่จึงกล่าวได้ว่า

$$\tau \propto i$$



รูปที่ 25 การแตกแร่งเพื่อหา Stall Torque และ Stall Current จาก CAD ไม้ตี Loadcell

จากภาพแร่งที่กระทำลงบน Loadcell เป็นดังเส้นสีแดง ซึ่งจำเป็นต้องแก้สมการทางฟิสิกส์ เพื่อหาแร่งที่เกิดขึ้น โดยเริ่มจากการวัดค่าบน Loadcell จากแร่งกระทำทั้งหมด 3 ครั้ง เก็บค่าครั้งละ 10000 ค่า เมื่อนำมาทำ RMS และหาค่าเฉลี่ยแล้ว จึงมีค่า Stall Weight เท่ากับ 269.88 กรัม จากนั้นนำหนักที่ได้ไปแปลงเป็นแร่งที่กระทำตั้งจากบน Loadcell ด้วยสูตรดังนี้

2.1.1 คำนวณ Stall Torque

คำนวณหาแร่งสูงสุดที่กระทำตั้งจากกับ Loadcell โดยกำหนดให้ความเร่งเท่ากับ 9.81 เมตรต่อวินาที กำลังสอง

$$\text{Stall Force} = (\text{Stall Weight} \times 10^{-3}) \times 9.81$$

แทน Stall Weight เท่ากับ 269.88 กรัม

$$\begin{aligned}\text{Stall Force} &= (269.88 \times 10^{-3}) \times 9.81 \\ \text{Stall Force} &= 2.65 N\end{aligned}$$

เมื่อได้แร่งสูงสุดที่กระทำตั้งจาก หรือ $F \cos \theta$ ดังรูปภาพ จึงนำไปคูณ $\arccos(6.76^\circ)$ และ ระยะทางที่ตั้งจากกับแนวแร่ง ซึ่งเท่ากับ 111.27 มิลลิเมตร

$$\text{Stall Torque} = \text{Stall Force} \times \arccos(6.76^\circ) \times 111.27 \times 10^{-3}$$

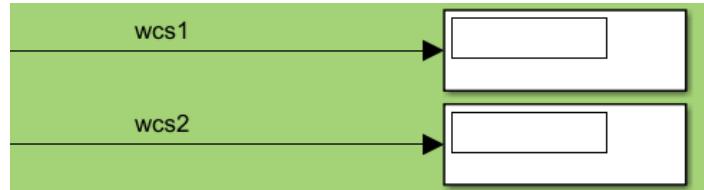
แทน Stall Torque เท่ากับ 2.65 นิวตัน

$$\begin{aligned}\text{Stall Torque} &= 2.65 \times \arccos(6.76^\circ) \times 111.27 \times 10^{-3} \\ \text{Stall Torque} &\approx 0.295 Nm\end{aligned}$$

\therefore ดังนั้นมีค่า Stall Torque ประมาณ 0.295 Nm

2.1.2 อ่านค่า Stall Current

ภายในโปรแกรม MATLAB ได้มีการอ่านค่ากระแสไฟฟ้าจาก WCS1700 Hall Current Sensor ซึ่งมีการนำไปคำนวณ RMS และเฉลี่ยแล้ว



รูปที่ 26 อ่านค่าจาก Display Block ที่ผ่าน WCS1700 Hall Effect Sensor

∴ ตั้งนี้มีค่า Stall Current ประมาณ 4.69 แอมป์

2.2 หาค่า No Load Angular Velocity (ω_{NL}) และ No Load Current (i_{NL})

ผู้จัดทำได้ทำการคลายน็อตที่ไม่มีตัว Loadcell เพื่อให้เกิดการ free และไม่เกิดแรงบิด โดยจากการทดลอง ความเร็วของมอเตอร์ และกระแสไฟฟ้าจะสามารถอ่านค่าได้จากใน Simulink ดังรูป



รูปที่ 27 อ่านค่าจาก Display Block ที่ผ่าน ppr (Pulse Per Revolution) ที่แปลงเป็น rad/s (Radian Per Second)

∴ ตั้งนี้มีค่า No Load Angular Velocity ประมาณ 230 เรเดียนต่อวินาที และมีค่า No Load Current ประมาณ 0.83 แอมป์

2.3 คำนวณค่าคงที่แรงบิดมอเตอร์ (K_m)

จากสมการความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด และกระแสไฟฟ้าที่ได้กล่าวไปในเอกสารและรายงานวิจัย ทำให้ได้สมการดังนี้

$$K_m = \frac{\tau}{i}$$

ซึ่งในกรณีนี้ ผู้จัดทำจะแทน τ ด้วย Stall Torque (τ_{ST}) และแทน i ด้วย Stall Current (i_{ST})

$$K_m = \frac{\tau_{ST}}{i_{ST}}$$

จากนั้นแทนค่าที่ได้จากการคำนวณ และอ่านค่าลงในสมการ

$$K_m = \frac{0.295 \text{ Nm}}{4.69 \text{ A}}$$

$$K_m = 0.0629 \text{ Nm/A}$$

∴ ตั้งนั้นมีค่า Motor-Torque Constant (K_m) เท่ากับ 0.0629 นิวตันเมตรต่อแอมป์

ผลการทดลองที่ 1 (Dynamic Load)

ผู้จัดทำได้พยายามอย่างยิ่งในการใช้มอเตอร์ทดเกียร์จาก MotorXplorer ในการทำ Dynamic Load แต่ผลสุดท้ายออกมากไม่สำเร็จ เนื่องด้วยการปรับจุนกระแสไฟฟ้า ด้วยเหตุนี้ผู้จัดทำจึงแก้ไข ออกแบบ และประยุกต์ความรู้ เพื่อให้ Torque Control สามารถใช้งานได้ โดยมีลำดับเหตุการณ์ดังนี้

1. WCS1700 Hall Effect Sensor ของ MATLAB ตั้งแบบ (TA ให้มา) ไม่สามารถปรับจุนให้ตรงหรือใกล้เคียงได้
 - เนื่องจาก WCS1700 ไม่ได้วัดกระแสโดยตรง เหมือนแอมป์มิเตอร์ และยังมีการคาดเคลื่อนที่สูงกว่า
2. ผู้จัดทำได้ทำการ Signal Conditioning ให้ตรงได้สำเร็จ แต่ไม่สามารถนำไปใช้ร่วมกับโปรแกรม Torque Control ของ TA ได้
 - เนื่องจากต้องแก้ไขมาก และเกินขอบเขตการทดลอง
3. พยายามทำ Torque Control แบบประยุกต์ด้วยตนเอง โดยการใช้ Step Down จากบอร์ด MotorXplorer ของเพื่อนร่วมทีมที่ทำการทดลองร่วมกัน (Super Group) แต่ไม่สำเร็จ
 - เนื่องจากการปรับค่าแรงดันผ่าน Step Down จำเป็นต้องปรับอย่างละเอียดด้วยตนเอง (Manual) อีกทั้งยังยากต่อการปรับค่าในการทดลองถัด ๆ ไป จึงไม่สามารถทำ Torque Control ได้

สรุปผลการทดลองที่ 1

จากการศึกษา อ่านค่าจาก Simulink และสังเกตพฤติกรรมของมอเตอร์ที่หมุนด้วยความเร็วคงที่ เมื่อได้รับโหลดที่เปลี่ยนแปลงไป หรือจาก Steady State Condition ไปยัง Condition อื่น ๆ ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้ง 3 ตัว ได้ดังนี้

$$\tau \propto i \propto \frac{1}{\omega}$$

จากความสัมพันธ์แสดงให้เห็นว่าเมื่อแรงบิดมาก กระแสที่อ่านค่าได้จะมากตามไปด้วย และความเร็วของมอเตอร์จะหมุนช้าลง ในทางกลับกันเมื่อแรงบิดน้อย หรือไม่มีโหลดที่แกนเพลามอเตอร์ กระแสที่อ่านค่าได้จะน้อยตาม และความเร็วจะสูงขึ้น ซึ่งสามารถแบ่งความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าและแรงบิดเป็นกรณีพิเศษอยู่กมาได้ดังนี้

- Stall Torque Condition จะมี $\omega = 0, i = i_{ST}, \tau = \tau_{max}$

เมื่อแทนลงในสมการมอเตอร์อย่างง่าย และทำการจัดรูปแล้วจะได้ว่า

$$i_{max} = i_{ST} = \frac{V_{in}}{R}$$

กล่าวคือ แรงดันขาเข้า หรือแรงดันจากแหล่งจ่าย จะไม่มีการถูกหักล้างด้วยแรงดันไฟฟ้า Back EMF เนื่องจากความเร็วของมอเตอร์เป็นศูนย์ มีเพียงแค่ตัวต้านทานของชุดลวดอะแมเจอร์เท่านั้น ที่จะจำกัดการไหลของกระแสไฟฟ้า จึงเกิดเป็นกระแสไฟฟ้าสูงสุดได้

- No Load Condition จะมี $\tau = 0, \omega = \omega_{max}, i = i_{NL}$

เมื่อแทนลงในสมการมอเตอร์อย่างง่าย และทำการจัดรูปแล้วจะได้ว่า

$$i_{min} = i_{NL} = \frac{BV_{in}}{BR + K_m K_v}$$

กล่าวคือ แรงดันขาเข้า หรือแรงดันจากแหล่งจ่าย มีการถูกหักล้างด้วยแรงดันไฟฟ้า Back EMF เนื่องจากความเร็วของมอเตอร์สูงสุด กระแสไฟฟ้าจึงน้อยที่สุด

การทดลองที่ 2

จุดประสงค์การทดลอง

- เพื่อตอบสมมติฐานที่กล่าวไว้ข้างต้นว่า “เมื่อปรับความถี่ของ PWM ต่ำลง กระแสจะมีแนวโน้มน้อยลงกว่าที่ควรจะเป็น”

ตัวแปร

ตัวแปรต้น: ค่า Duty Cycle ของสัญญาณ PWM, ความถี่ของสัญญาณ PWM

ตัวแปรตาม: กระแสไฟฟ้า

ตัวแปรควบคุม: แรงดันที่จ่ายเข้ามอเตอร์, อุณหภูมิ, ชนิดของ Brushed DC Motor

วิธีดำเนินการทดลอง

- ติดตั้งบอร์ด Nucleo-STM32 ลงบน MotorXplorer

- ติดตั้งบอร์ด Nucleo-STM32 ลงบน MotorXplorer ตามตำแหน่งที่กำหนด และเชื่อมต่อ Brushed DC Motor กับระบบควบคุม PWM

- เขียนโปรแกรมควบคุมผ่าน MATLAB และ Simulink

- ตั้งค่าให้ระบบควบคุมมอเตอร์ด้วย PWM ผ่าน MATLAB และ Simulink เพื่อให้สามารถปรับ Duty Cycle และความถี่ PWM ได้อย่างแม่นยำ พร้อมอ่านค่าตัวแปรต่าง ๆ แบบ Real-Time

- ตั้งค่าให้มอเตอร์ทำงานกับโหลดที่คงที่

- ตั้งค่ามอเตอร์ให้ทำงานกับโหลดคงที่ตลอดการทดลอง โดยกำหนดให้ใช้โหลดเท่ากับ 0 Nm เพื่อความแม่นยำในการเปรียบเทียบผลลัพธ์จากการปรับ Duty Cycle และความถี่ PWM

- ตั้งค่าปรับความถี่ PWM หลายระดับ

- เริ่มที่ 10 kHz 20 kHz จนถึง 40 kHz อ้างอิงจาก Datasheet

- ตั้งค่าปรับ Duty Cycle ที่ละ 20% และบันทึกค่าตัวแปร

- เริ่มจากปรับ Duty Cycle ที่ 0% และเพิ่มทีละ 20% ไปจนถึง 100%

6. ทำการทดลองขั้นตอนกว่าจะครบทุกรอบ

- ทำตามขั้นตอนข้างต้นจนได้ข้อมูลครบถ้วนทุกรอบด้วย Duty Cycle ของแต่ละความถี่ของ PWM และทำการ RMS และค่าเฉลี่ย

7. วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

- นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์สร้างกราฟเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง Duty Cycle, ความถี่ PWM และตัวแปรที่สนใจ คือกระแสไฟฟ้า เพื่อยืนยันหรือหักล้างสมมติฐาน

1. การ Setup Hardware และ MATLAB การทดลองที่ 1

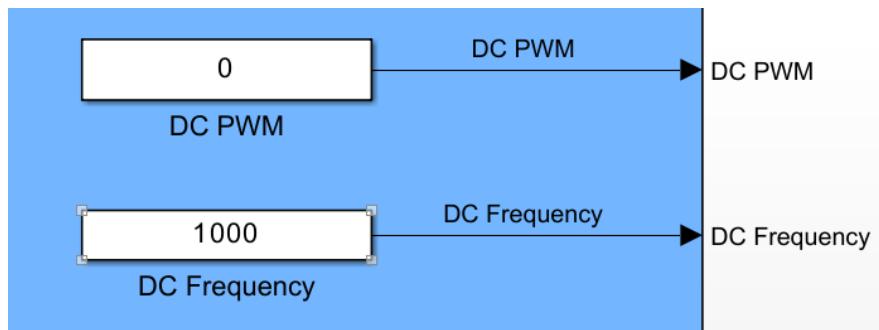
1.1. Hardware Setup

เนื่องจากการทดลองที่ 1 ได้ทำการคลายน็อตที่ไม่มีติด Loadcell เพื่อให้เกิดการ free ของ coupling ที่ยึดรับแกนเพลา จึงทำให้ในการทดลองส่วน Hardware ไม่จำเป็นต้อง Setup เพิ่มเติม



รูปที่ 28 MotorXplorer ที่ถูกปรับแต่ง (คลายน็อตไม่มีติด Loadcell)

1.2. MATLAB Setup

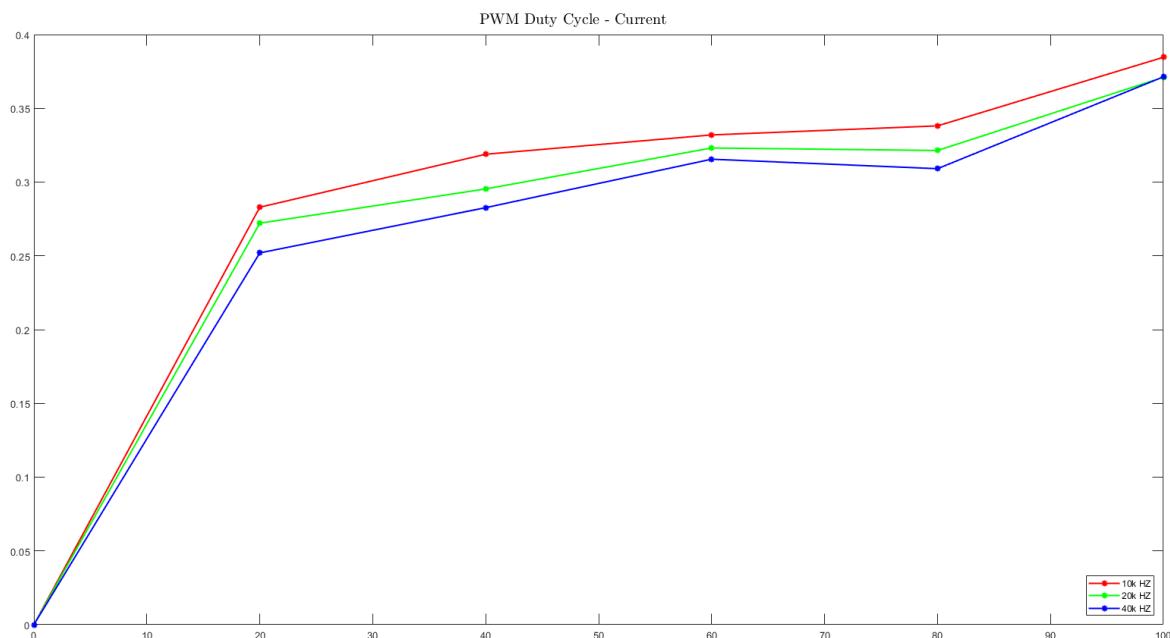


รูปที่ 29 กรอกค่า DC PWM และ DC Frequency

ผู้จัดทำได้ทำการปรับค่าผ่าน Block Input เหล่านี้ เพื่อให้เป็นไปตามที่กำหนด โดยมีการอธิบายรายละเอียดการตั้งค่า และการใช้งานแล้ว ใน การทดลองที่ 1

ผลการทดลองที่ 2

จากการทดลองจะได้กราฟ Effect of PWM Frequency โดยผู้จัดทำได้ทำการปรับค่า Duty Cycle ของแต่ละ DC Frequency จนถึง 100% จึงแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของกระแสไฟฟ้าที่ได้ (Motor Current) จากนั้นนำไป plot กราฟ จะมีพื้นที่กรุณาดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 30 Effect of PWM Frequency

เส้นสีแดงให้ความถี่ของ PWM ที่ 10 kHz เส้นสีเขียวความถี่ของ PWM ที่ 20 kHz และเส้นสีน้ำเงินความถี่ของ PWM ที่ 40 kHz และจากการทดลองพบว่าเมื่อนำกราฟจากการทดลองเทียบกับกราฟของทฤษฎี อาจมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน ทั้งนี้จะถูกอธิบายในส่วนอภิปรายผลการทดลอง

	20%	40%	60%	80%	100%
10kHz	0.28	0.32	0.33	0.34	0.38
20kHz	0.27	0.3	0.32	0.32	0.37
40kHz	0.25	0.28	0.32	0.31	0.37

ตารางที่ 3 ค่ากระแสไฟฟ้าจากการเปลี่ยนแปลง Duty Cycle ในแต่ละความถี่

สรุปผลการทดลองที่ 2

ตามทฤษฎีเส้นกราฟที่ความถี่สูงถึงจุดหนึ่งอาจเกิดการลดกระแส หรือกระแสไม่คงที่ได้ ซึ่งจากการศึกษาเพิ่มเติมพบว่าความถี่ PWM ที่สูงมากใน Brushed DC Motor อาจทำให้กระแสไม่คงที่ หรือลดลง เนื่องจากข้อจำกัดทางไฟฟ้าโดยส่วนใหญ่มักเป็นเรื่องของการตอบสนองของชด漉ด จุดนี้มักเกิดขึ้นที่ความถี่สูงกว่า 20-50 kHz ขึ้นอยู่กับลักษณะของมอเตอร์ และวงจรขับเคลื่อน การปรับลดความถี่ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมและปรับปรุงคุณสมบัติของระบบจะช่วยลดปัญหาได้

การทดลองที่ 3

จุดประสงค์การทดลอง

- เพื่อตอบสมมติฐานที่กล่าวไว้ข้างต้นว่า “เมื่อปรับ Duty Cycle แล้วแรงดันขาเข้าจะลดลงอย่างเป็นอัตราส่วน”
- เพื่อตอบสมมติฐานที่กล่าวไว้ข้างต้นว่า “แรงดันขาเข้ามาก แรงบิดสูงสุด (Stall Torque) จะมาก”

ตัวแปร

ตัวแปรต้น: ค่า Duty Cycle ของสัญญาณ PWM

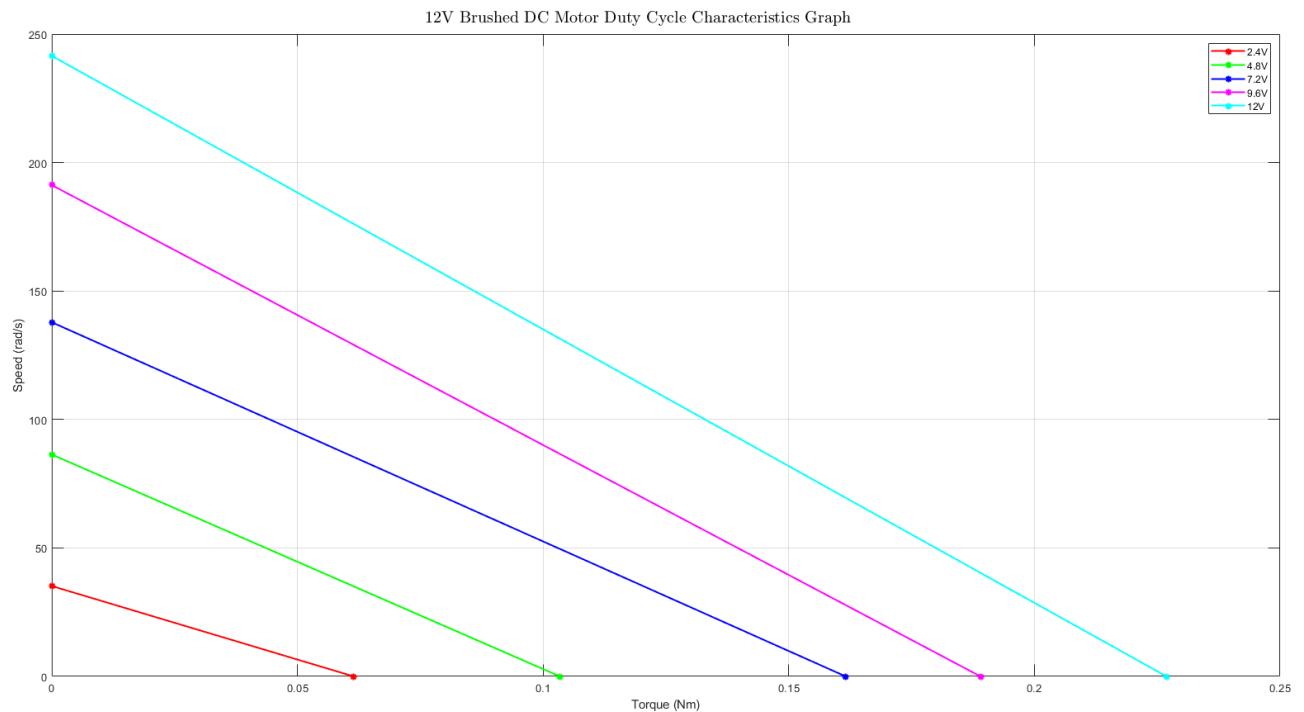
ตัวแปรตาม: ความเร็วของมอเตอร์, แรงบิด

ตัวแปรควบคุม: แรงดันที่จ่ายเข้ามอเตอร์, อุณหภูมิ, ชนิดของ Brushed DC Motor

วิธีดำเนินการทดลอง

1. ติดตั้งบอร์ด Nucleo-STM32 ลงบน MotorXplorer
 - ติดตั้งบอร์ด Nucleo-STM32 ลงบน MotorXplorer ตามตำแหน่งที่กำหนด และเชื่อมต่อ Brushed DC Motor กับระบบควบคุม PWM
2. เชื่อมต่อระบบควบคุมผ่าน MATLAB และ Simulink
 - ตั้งค่าให้ระบบควบคุมมอเตอร์ด้วย PWM ผ่าน MATLAB และ Simulink เพื่อให้สามารถปรับ Duty Cycle และความถี่ PWM ได้อย่างแม่นยำ พร้อมอ่านค่าตัวแปรต่าง ๆ แบบ Real-Time
3. ตั้งค่าให้มอเตอร์ทำงานกับโหลดที่คงที่
 - ตั้งค่ามอเตอร์ให้มีเซ็นเซอร์ Loadcell ติดไปที่ Loadcell เพื่อวัดแรงบิด และคลายนื้อตเพื่ออ่านค่าความเร็วของ มอเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงไป โดยใช้กับปรับแรงดันขาเข้า
4. ตั้งค่าปรับ Duty Cycle ที่ลิช 10% และบันทึกค่าตัวแปร
 - เริ่มจากปรับ Duty Cycle ที่ 10% และเพิ่มทีลิช 10% ไปจนถึง 100% ซึ่งสัมพันธ์กับแรงดันไฟฟ้าขาเข้า
5. ทำการทดลองขั้จักกว่าจะครบถ้วน
 - ทำซ้ำตามขั้นตอนข้างต้นจนได้ข้อมูลครบถ้วน และทำการหา RMS และค่าเฉลี่ย
6. วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง
 - นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์สร้างกราฟเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง Duty Cycle กับความเร็วของ มอเตอร์ และแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงไป

ผลการทดลองที่ 3



รูปที่ 31 Brushed DC Motor Duty Cycle Characteristic Graph

จากการภาพแสดงให้เห็นว่าแรงดันขาเข้าส่งผลต่อความเร็วเชิงมุม และแรงบิดโดยตรง กล่าวคือ ยิ่งแรงดันขาเข้ามาก ก็ยิ่งทำให้ No Load Angular Velocity และ Stall Torque มีค่ามาก ซึ่งสอดคล้องกับกราฟความสัมพันธ์ของแรงบิดจากโหลดกับความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์จากเอกสาร และรายงาน

โดยสีฟ้าอ่อน คือแรงดันขาเข้า 12V (Duty Cycle 100%) และค่อยๆ ลดลงไปทีละ 20% หรือเส้นสีแดงที่แรงดันขาเข้า 2.4V โดยกราฟจะเป็นฟังก์ชันลบ หมายความว่าความเร็วมอเตอร์ และแรงบิดจากโหลดแปรผกผันกัน

สรุปผลการทดลองที่ 3

จากการทดลองพบว่าแรงดันไฟฟ้าขาเข้าเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อทั้งความเร็วรอบ และแรงบิดของ Brushed DC Motor ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับความเร็วเป็นแบบเชิงเส้นในช่วงการทำงานปกติ ขณะที่แรงดันไฟฟ้ากับแรงบิดมีความสัมพันธ์เชิงเส้นในช่วงแรงดันเริ่มต้น แต่เข้าสู่จุดอิมตัวในช่วงแรงดันสูงสุด การเลือกใช้งานแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมจะเป็นสิ่งสำคัญเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของมอเตอร์ ลดความร้อนสะสม และยืดอายุการใช้งาน

การทดลองที่ 4

จุดประสงค์การทดลอง

- เพื่อตอบสมมติฐานที่กล่าวไว้ข้างต้นว่า “การควบคุมแบบ Lock Anti-Phase สัญญาณ PWM จะไม่สามารถทำ การควบคุมทิศทางได้ เนื่องจากเป็นการปรับ Duty Cycle จึงเป็นการควบคุมความเร็วเพียงอย่างเดียว”

ตัวแปร

ตัวแปรต้น: โหมดการควบคุม (Sign-Magnitude และ Lock Anti-Phase)

ตัวแปรตาม: วิธีการควบคุม

ตัวแปรควบคุม: แรงตันที่จ่ายเข้ามอเตอร์, อุณหภูมิ

วิธีดำเนินการทดลอง

- ติดตั้งบอร์ด Nucleo-STM32 ลงบน MotorXplorer

- ติดตั้งบอร์ด Nucleo-STM32 ลงบน MotorXplorer ตามตำแหน่งที่กำหนด และเชื่อมต่อ Brushed DC Motor กับระบบควบคุม PWM

- เขียนโปรแกรมควบคุมผ่าน MATLAB และ Simulink

- ตั้งค่าให้ระบบควบคุมมอเตอร์ด้วย PWM หรือการสั่ง Digital ผ่าน MATLAB และ Simulink เพื่อให้สามารถควบคุมตามโหมดการควบคุมได้

- ตั้งค่าให้มอเตอร์ทำงานกับโหลดที่คงที่

- ตั้งค่ามอเตอร์ให้ทำงานกับโหลดคงที่ตลอดการทดลอง โดยกำหนดให้ใช้โหลดเท่ากับ 0 Nm เพื่อความแม่นยำในการเปรียบเทียบผลลัพธ์ และง่ายต่อการทดลอง

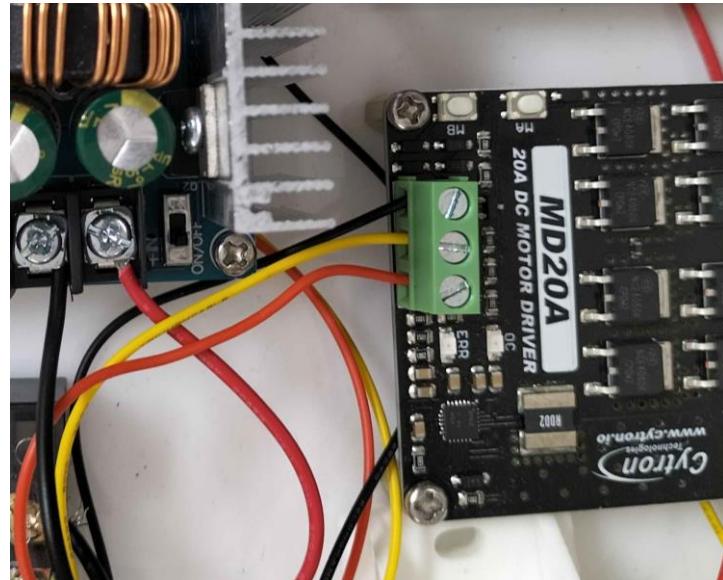
- วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

- นำข้อมูลที่ได้มาอธิบายการทำงานของโหมดการควบคุมทั้งสองรูปแบบอย่างชัดเจน

ผลการทดลองที่ 4

การทดลองนี้มีเพื่อพิสูจน์ว่าโหมดการทำงานแบบ Sign-Magnitude และ Lock Anti-Phase สามารถควบคุมได้จริงตามเอกสาร และรายงานที่ได้มีการอธิบายเอาไว้ข้างต้น

1.1 Sign-Magnitude

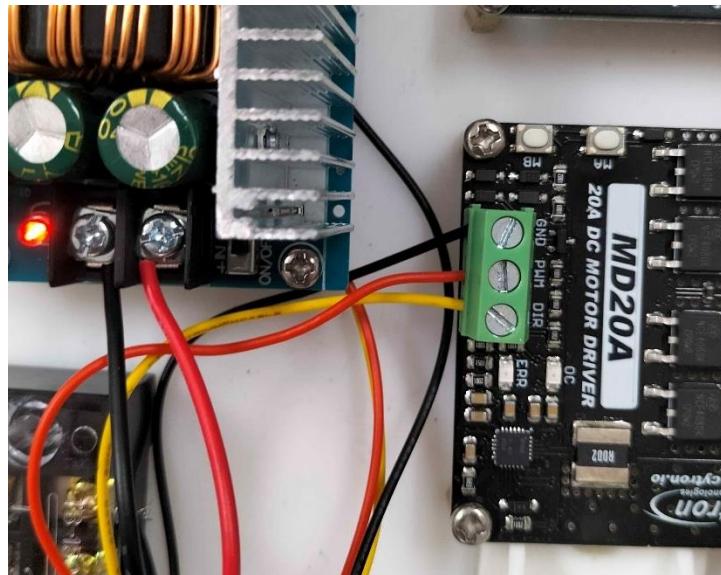


รูปที่ 32 การใช้โหมด Sign-Magnitude

จากการทดลองพบว่าการใช้โหมด Sign-Magnitude ต้องนำสายจ่ายสัญญาณ PWM (สีเหลือง) ต่อเข้าช่อง PWM และสายสัญญาณไฟเลี้ยง (สีแดง) ต่อเข้าช่อง DIR หรือ Direction โดยมีพัฒนาระบบที่เกิดขึ้นดังนี้

- สามารถใช้สัญญาณ PWM เพื่อควบคุมความเร็วได้ และใช้สัญญาณ Digital เพื่อควบคุมทิศทางได้จริง
- เมื่อ Duty Cycle มากขึ้น หรือเข้าใกล้ 100% จะส่งผลให้ความเร็วของมอเตอร์มากขึ้น หรือเข้าใกล้ความเร็วสูงสุด
- ในทางกลับกัน เมื่อ Duty Cycle น้อยลง หรือเข้าใกล้ 0% จะส่งผลให้ความเร็วของมอเตอร์น้อยลง หรือเข้าใกล้ความเร็วต่ำสุด
- Duty Cycle ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงทิศทางของการหมุนของมอเตอร์

1.2 Lock Anti-Phase



รูปที่ 33 การใช้โหมด Lock Anti-Phase

จากการทดลองพบว่าการใช้โหมด Lock Anti-Phase ต้องนำสายจ่ายสัญญาณ PWM (สีเหลือง) ต่อเข้าช่อง DIR หรือ Direction และสายสัญญาณไฟเลี้ยง (สีแดง) ต่อเข้าช่อง PWM โดยมีพฤติกรรมที่เกิดขึ้นดังนี้

- สามารถใช้สัญญาณ PWM เพื่อควบคุมความเร็ว และทิศทางได้
- เมื่อ Duty Cycle มากกว่า 50% จะทำให้มอเตอร์หมุนไปทิศทางตามเข็มนาฬิกา
- ในทางกลับกัน เมื่อ Duty Cycle น้อยกว่า 50% จะทำให้มอเตอร์หมุนไปทิศทางตรงข้าม หรือวนเข็มนาฬิกา
- Duty Cycle ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงทิศทางของการหมุนของมอเตอร์ และความเร็วของมอเตอร์

สรุปผลการทดลองที่ 4

1. Sign-Magnitude PWM เหมาะสำหรับการควบคุม Brushed DC Motor ในงานที่ต้องการความราบรื่นของความเร็วและการสูญเสียพลังงานต่ำ อาทิ ระบบควบคุมความเร็วของพัดลม
2. Locked Anti-Phase PWM เหมาะสำหรับงานที่ต้องการควบคุมแรงบิดอย่างแม่นยำ และเปลี่ยนทิศทางบ่อย ๆ อาทิ หุ่นยนต์หรือระบบควบคุมตำแหน่ง

การเลือกใช้เทคนิค PWM ควรขึ้นอยู่กับลักษณะงาน และข้อกำหนดทางเทคนิค โดยคำนึงถึงประสิทธิภาพ ความเสถียร และข้อจำกัดของระบบควบคุม

อกิจกรรมการทดลอง

1. เมื่อโหลดแรงบิดเพิ่มขึ้น ความเร็วของมอเตอร์จะลดลง

เมื่อโหลดแรงบิดเพิ่มขึ้น แรงด้านในระบบก็จะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้มอเตอร์ต้องใช้พลังงานมากขึ้นเพื่อรักษาความเร็ว รอบเดิม ในกรณีที่แรงดันไฟฟ้าและกระแสขาเข้าคงที่ ความเร็วของมอเตอร์จะลดลง เพราะพลังงานที่จ่ายไม่เพียงพอต่อ การเอาชนะแรงบิดที่เพิ่มขึ้น

2. กระแสไฟฟ้าของมอเตอร์จะเพิ่มขึ้นตามค่าแรงบิดที่โหลด

แรงบิดของมอเตอร์มีความสัมพันธ์โดยตรงกับกระแสไฟฟ้าที่โหลดผ่านชุดลวดมอเตอร์ เมื่อโหลดแรงบิดเพิ่มขึ้น มอเตอร์จะดึงกระแสไฟฟ้าสูงขึ้นเพื่อตอบสนองต่อความต้องการแรงบิดที่สูงขึ้น

3. ประสิทธิภาพของมอเตอร์จะลดลง เมื่อโหลดแรงบิดเพิ่มขึ้น

เมื่อโหลดแรงบิดเพิ่มขึ้น การสูญเสียพลังงานในมอเตอร์ (เช่น ความร้อนและการต้านทาน) จะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ พลังงานที่เปลี่ยนเป็นงานมีประสิทธิภาพลดลง เม็ดลังงานที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์จะเพิ่มขึ้น แต่สัดส่วนพลังงานที่สูญเสียก็ จะสูงขึ้นด้วย

4. เมื่อปรับความถี่ของ PWM ต่ำลง กระแสจะมีแนวโน้มน้อยลงกว่าที่ควรจะเป็น

ความถี่ PWM ที่ต่ำอาจทำให้กระแสไฟฟ้าภายในมอเตอร์ไม่ต่อเนื่องและเกิดแรงต้านแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้น (Ripple Current) ซึ่งอาจทำให้ค่าเฉลี่ยของกระแสลดลง แต่ในความเป็นจริง อาจเกิดความสูญเสียเพิ่มเติมในรูปของ ความร้อนและแรงสั่นสะเทือน

5. เมื่อปรับ Duty Cycle แล้วแรงดันขาเข้าจะลดลงอย่างเป็นอัตราส่วน

Duty Cycle เป็นตัวกำหนดสัดส่วนเวลาที่แรงดันไฟฟ้าถูกส่งไปยังมอเตอร์ โดยค่าเฉลี่ยของแรงดันขาเข้าจะเป็น สัดส่วนโดยตรงกับ Duty Cycle ดังนั้นเมื่อปรับ Duty Cycle แรงดันไฟฟ้าขาเข้าที่มอเตอร์จะลดลงตาม

6. แรงดันขาเข้ามาก แรงบิดสูงสุด (Stall Torque) จะมาก

Stall Torque เกิดจากกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่สามารถไหลผ่านชุดลวดมอเตอร์เมื่อโรเตอร์ไม่หมุน (Zero Speed) ซึ่งสัมพันธ์โดยตรงกับแรงดันไฟฟ้าขาเข้า แรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้นทำให้มอเตอร์สามารถสร้างกระแสสูงสุดได้มากขึ้น ส่งผลให้ Stall Torque เพิ่มขึ้น

7. การควบคุมแบบ Lock Anti-Phase สัญญาณ PWM จะไม่สามารถทำการควบคุมทิศทางได้ เนื่องจากเป็นการปรับ Duty Cycle จึงเป็นการควบคุมความเร็วเพียงอย่างเดียว

Locked Anti-Phase สามารถควบคุมทิศทางได้โดยใช้ Duty Cycle บวกและลบ (0% ถึง 50% สำหรับทิศทางหนึ่ง, 50% ถึง 100% สำหรับอีกทิศทางหนึ่ง) การปรับ Duty Cycle ในรูปแบบนี้ช่วยให้ควบคุมทั้งความเร็ว และทิศทางได้ในคราวเดียว โดยทิศทางขึ้นอยู่กับว่าสัญญาณ PWM ส่วนใหญ่เป็นบวกหรือลบ

ข้อเสนอแนะ

- การ Misalignment ที่เกิดขึ้นได้ร้ายมากในบอร์ด MotorXplorer ทำให้การทดลองได้ผลที่ค่อนข้างไม่ตรง หรือเกิด Error ได้ง่าย
- WCS1700 อาจจะไม่เหมาะสมกับบอร์ดนี้ เนื่องจากไม่ได้ทำการวัดกระแสโดยตรงเหมือน Ampmeter และเกิด Offset ค่าอยู่ป้อยครึ้ง
- การทำ Torque Control มีปัญหาสืบเนื่องจากการไม่สามารถเชื่อมค่า Offset เข้ากับ Code Torque Control ได้ ซึ่งทำให้การทดลองส่วนใหญ่ไม่สามารถทำได้
- การขันยึดสิ่งต่าง ๆ บน MotorXplorer ไม่มีความแน่นหนามากพอ ทำให้ในระหว่างการทดลองชิ้นส่วนบางอย่างหลุดออกจากที่ที่ควร สงผลให้ต้องทำการทดลองใหม่ ๆ ใหม่

Stepper Motor

วัตถุประสงค์

- เพื่อให้สามารถอธิบายหลักการทำงานของ Stepper Motor และความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับความถี่ของสัญญาณขับเคลื่อน
- เพื่อให้สามารถอธิบายการควบคุม Stepper Motor ในรูปแบบ Full-Step, Half-Step และ Micro-Step
- เพื่อให้สามารถอธิบายกระบวนการ Signal Conditioning และ Signal Processing ของข้อมูลจาก Incremental Encoder และ Hall Current Sensor
- เพื่อให้สามารถเขียนโปรแกรม MATLAB และ Simulink เพื่อควบคุมความเร็วและบันทึกผลการทำงานของ Stepper Motor ได้
- เพื่อให้สามารถประยุกต์ใช้ความรู้เชิงทฤษฎีร่วมกับการใช้งานจริงบนบอร์ด Nucleo STM32G474RE

สมมติฐาน

- ความเร็วเชิงมุมของ Stepper Motor จะแปรผันตรงกับความถี่ของสัญญาณขับเคลื่อน
- รูปแบบการขับเคลื่อน (Full-Step, Half-Step, Micro-Step) มีผลต่อความละเอียดและความแม่นยำของการควบคุมตำแหน่งและความเร็วของ Stepper Motor
- การ Loss Step จะเกิดขึ้นเมื่อความถี่ของสัญญาณขับเคลื่อนสูงเกินกว่าที่ Stepper Motor จะตอบสนองได้
- การ Loss Step มีโอกาสลดลงเมื่อใช้รูปแบบการขับเคลื่อนแบบ Micro-Step และความเร่งสัญญาณที่เหมาะสม

นิยามเชิงปฏิบัติการ

Nucleo-STM32	คือ Nucleo-STM32G474RE
มอเตอร์	คือ Stepper Motor
Back EMF	คือ แรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในมอเตอร์ขณะที่หมุนซึ่งเกิดจากการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า
MotorXplorer	คือ ฐานบรรจุบอร์ดควบคุม, Breadboard, 3D-Print ใช้สำหรับการประกอบกับมอเตอร์
บอร์ดทดลอง	คือ MotorXplorer
Noise	คือ สัญญาณไฟฟ้าในวงจรที่เกิดขึ้นนอกเหนือไปจากสัญญาณที่ได้ออกแบบการรับળหาง แม่เหล็กไฟฟ้าของอุปกรณ์ไฟฟ้า
Ground	คือ จุดอ้างอิงทางไฟฟ้า ซึ่งมีแรงดัน 0V
สายอัปโหลด	คือ สาย USB-A ถึง Micro-USB สำหรับส่งและรับข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์และ Nucleo-STM32G474RE
Pin	คือ ช่องเชื่อมต่อนบ Nucleo-STM32G474RE ซึ่งสามารถทำงานได้หลาย Function
Code	คือ ภาษาทางด้านคอมพิวเตอร์

นิยามศัพท์เฉพาะ

Linear	คือ ลักษณะของกราฟที่มีการเพิ่มขึ้นหรือลดลงแบบเส้นตรง
เที่ยงตรง	คือ ความสม่ำเสมอหรือความใกล้เคียงของค่าที่วัดได้เมื่อทำการทดลองหลายครั้ง
แม่นยำ	คือ ความใกล้เคียงระหว่างค่าที่วัดได้กับค่าจริง

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. Stepper Motor

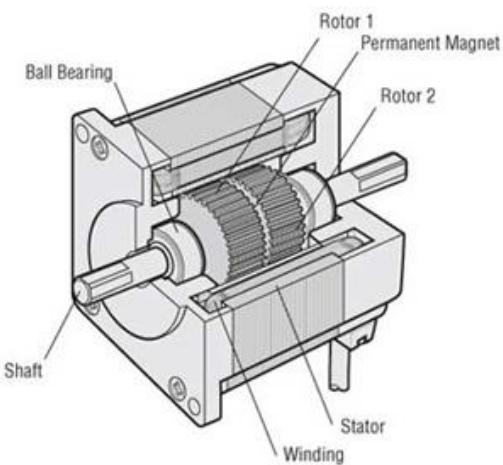


รูปที่ 1 Stepper Motor

ที่มา: <https://www.nanotec.com/eu/en/products/2877-stepper-motor-with-controller-drive>

Stepper Motor เป็นมอเตอร์ไฟฟ้าที่มีลักษณะเด่นคือ เพลาหมุนจะเคลื่อนที่เป็นลำดับขั้น โดยแต่ละขั้นจะหมุนในมุมองศาที่ถูกกำหนดไว้อย่างแน่นอน คุณลักษณะนี้เกิดจากโครงสร้างภายในของมอเตอร์ ซึ่งช่วยให้สามารถระบุตำแหน่งเชิงมุมของเพลาได้อย่างแม่นยำ เพียงแค่ตรวจสอบจำนวนขั้นที่หมุนไป โดยไม่จำเป็นต้องอาศัยเซ็นเซอร์ภายในก่อน เหมาะสมการนำไปใช้งานที่หลากหลาย เช่น เครื่องพิมพ์สามมิติหรือเครื่องจักรกลอัตโนมัติ

2. ส่วนประกอบของ Stepper Motor



รูปที่ 2 ส่วนประกอบของ Stepper Motor

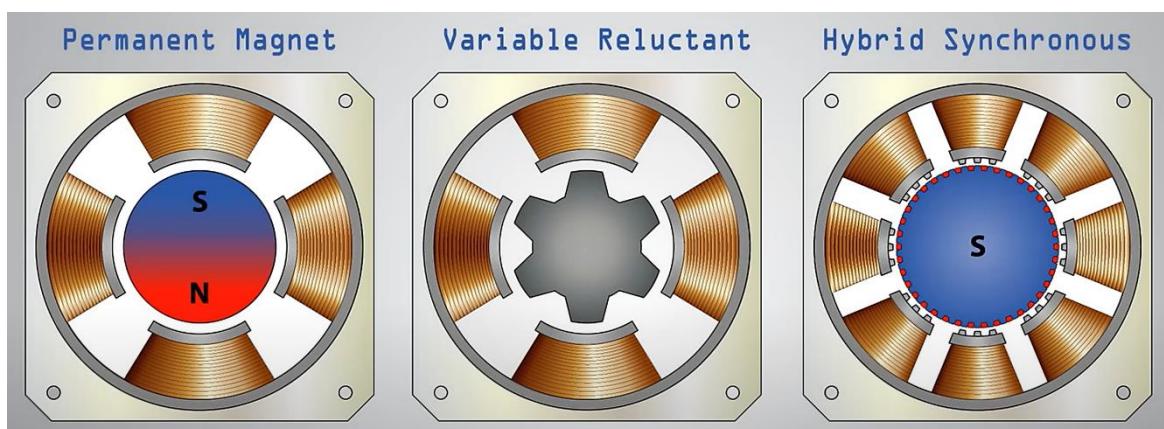
ที่มา: <https://www.orientalmotor.com/stepper-motors/technology/stepper-motor-overview.html>

ชื่อ	คำอธิบาย	หน้าที่
โรเตอร์ (Rotor)	ส่วนที่หมุนของมอเตอร์ ซึ่งมี 3 ชนิด	หมุนตามที่กำหนด
สเตเตอร์ (Stator)	ส่วนที่ไม่หมุนและมีขดลวดทองแดงพันอยู่	พันขดลวด และยึดningกับเคส
ลูกปืน (Ball Bearing)	ชิ้นส่วนลดแรงเสียดทานของเพลา	รองรับโรเตอร์ และลดแรงเสียดทาน
เส้นขดลวดทองแดง (Winding)	ขดลวดทำจากทองแดง มีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้า	สร้างสนามแม่เหล็กเมื่อกระแสไฟฟ้าผ่าน
เพลา (Shaft)	เพลาที่วางอยู่บนลูกปืนและยึดกับโรเตอร์โดยตรง	แสดงผลลัพธ์การหมุนของโรเตอร์

ตารางที่ 1 แสดงส่วนประกอบ และหน้าที่ของ Stepper Motor

3. ชนิดของ Stepper Motor

Stepper Motor แบ่งชนิดจากความแตกต่างของ Rotor ภายใน ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ชนิด ได้แก่ Permanent Magnet Stepper Motor, Variable Reluctant Stepper Motor และ Hybrid Synchronous Stepper Motor โดยส่วนใหญ่ Hybrid Synchronous จะเป็นที่นิยมที่สุด เนื่องจากนำเสนอข้อดีของทั้งสองแบบแรกมาประยุกต์ใช้ร่วมกัน โดย Rotor ทั้งสามแบบมีความแตกต่างกันดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ชนิดของ Stepper Motor โดยแบ่งตาม Rotor

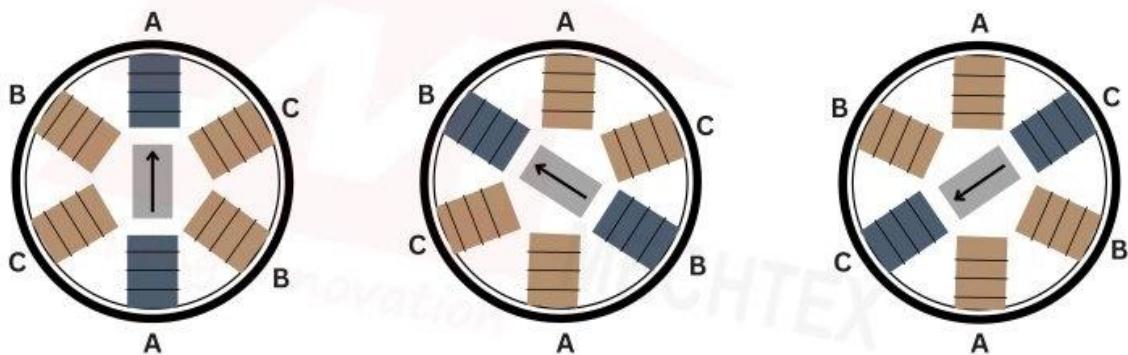
ที่มา: <https://www.youtube.com/watch?v=TWMaI3oirmM>

คุณสมบัติ / ชนิด	Permanent Magnet	Variable Reluctant	Hybrid Synchronous
คำอธิบาย	แม่เหล็กถาวร	วัสดุที่แม่เหล็กดึงดูดได้จำกัด และไม่ใช่แม่เหล็กถาวร ทำเป็นชีพัน	แม่เหล็กถาวรแบบมีชีพัน
ข้อดี	แรงบิดสูง	ความละเอียดสูง	แรงบิดสูง ความละเอียดสูง
ข้อเสีย	ขนาดแปรผันตามความละเอียด	แรงบิดต่ำ	-

ตารางที่ 2 ความแตกต่างของ Stepper Motor แต่ละชนิด

4. หลักการทำงานของ Stepper Motor

Stepper Motor ทำงานบนหลักการของแม่เหล็กไฟฟ้า โดยเมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านชุดลวดของ Stator จะเกิดสนามแม่เหล็กขึ้น ซึ่งทิศทางและความแรงของสนามแม่เหล็กขึ้นอยู่กับลักษณะของกระแสไฟฟ้า ด้วยการกระแสตุนชดลาดเหล่านี้ตามลำดับ จะสร้างสนามแม่เหล็กที่หมุนรอบ Stator ทำให้ Rotor เคลื่อนที่เป็นขั้น ๆ ซึ่งการเคลื่อนที่ของ Rotor ถูกควบคุมโดยตัวควบคุมภายนอกและจัดการลำดับการกระแสตุนชดลาดของ Stator กระบวนการนี้ทำให้ Stepper Motor สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างแม่นยำ

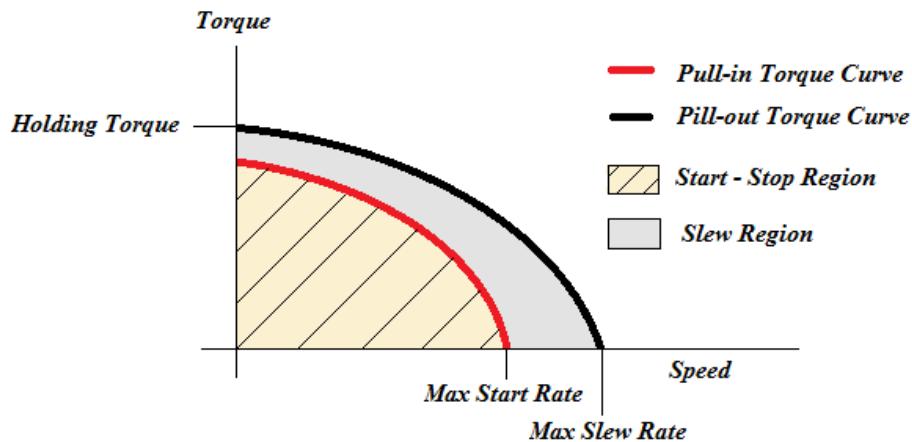


Working of Stepper Motor

รูปที่ 4 การทำงานของ Stepper Motor

ที่มา: <https://mechtex.com/blog/working-principle-of-stepper-motor>

5. พฤติกรรมทั่วไปของ Stepper Motor

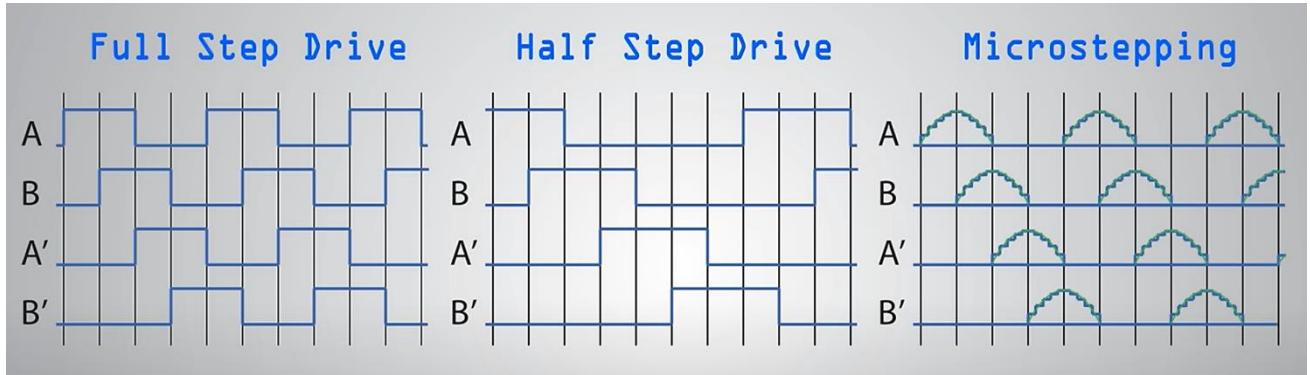


รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและแรงบิดของ Stepper Motor

ที่มา: https://www.researchgate.net/figure/Torque-vs-Speed-Characteristics-of-a-Stepper-Motor_fig5_318585925

ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับแรงบิดของ Stepper Motor แสดงให้เห็นว่าแรงบิดจะสูงในช่วงความเร็วต่ำ แต่จะลดลงเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาความเหนี่ยวนำจำกัดการเพิ่มของกระแสไฟฟ้า เส้นโค้งแรงบิดแบบ Pull-In แสดงแรงบิดสูงสุดที่มอเตอร์สามารถเริ่มหรือหยุดได้โดยไม่เกิดการ Loss Step ในขณะที่เส้นโค้งแรงบิดแบบ Pull-Out แสดงแรงบิดในขณะทำงานต่อเนื่อง การเร่งความเร็วอย่างค่อยเป็นค่อยไปจึงจำเป็นเพื่อหลีกเลี่ยงการ Loss Step ในส่วนของปัจจัยต่าง ๆ เช่น ค่าเหนี่ยวนำ แรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่าย และ荷ะดการขับเคลื่อน มีผลต่อประสิทธิภาพ โดย Micro-Stepping ช่วยเพิ่มความราบรื่นแต่ลดแรงบิด

6. Stepper Motor Drive Mode



รูปที่ 6 Stepper Motor Drive Mode

ที่มา: <https://www.youtube.com/watch?v=TWMa13oirmM>

โหมดการขับเคลื่อนของ Stepper Motor จะกำหนดวิธีการที่มอเตอร์ได้รับการจ่ายพลังงานเพื่อให้เกิดการเคลื่อนไหว โหมดการขับเคลื่อนหลัก ๆ สำหรับมอเตอร์สเต็ปเปอร์ จะมี 3 แบบ คือ Full-Step, Half-Step, และ Micro-Step ซึ่งแต่ละโหมดจะมีผลต่อความราบรื่นของการเคลื่อนไหว, แรงบิด, และความแม่นยำของมอเตอร์

6.1 Full-Step

มอเตอร์จะหมุนไปยังตำแหน่งเต็มหนึ่งสเต็ปสำหรับแต่ละ Pulse ที่ส่งไปยังชุดลวด ในโหมดนี้มอเตอร์จะเคลื่อนที่ไปยังมุมสเต็ปที่เฉพาะเจาะจงสำหรับแต่ละ Pulse ที่ส่งไปยังชุดลวด ซึ่งโดยปกติคือ 1.8° ต่อ Pulse โดยนี้จะให้แรงบิดที่ดีกว่า แต่การเปลี่ยนจากสเต็ปหนึ่งไปยังอีกสเต็ปหนึ่ง บางครั้งอาจทำให้เกิดเสียงและการสั่นสะเทือนได้ง่าย

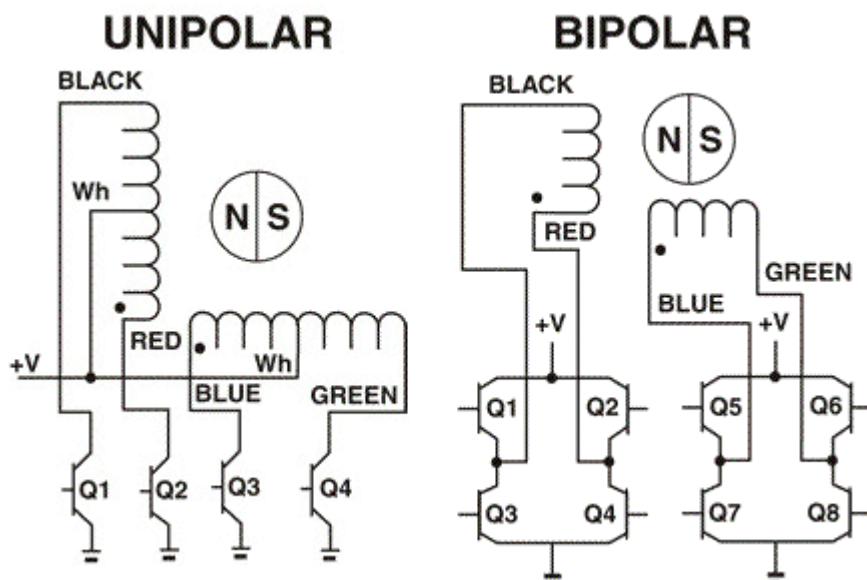
6.2 Half-Step

มอเตอร์จะหมุนไปยังตำแหน่งที่มีการเคลื่อนที่ครึ่งหนึ่งระหว่างสเต็ปเต็มหนึ่งสเต็ปสำหรับแต่ละ Pulse ที่ส่งไปยังชุดลวด ในโหมดนี้มอเตอร์จะเคลื่อนที่ไปยังมุมสเต็ปที่เฉพาะเจาะจงสำหรับแต่ละ Pulse ซึ่งจะมีการสลับระหว่างการหมุน Full-Step และ Half-Step โดยสลับกันไปตามลำดับ การเปลี่ยนระหว่างเต็มสเต็ปและครึ่งสเต็ปทำให้การเคลื่อนไหวมีความราบรื่นมากขึ้น แต่จะให้แรงบิดที่น้อยลงเมื่อเทียบกับโหมด Full-Step

6.3 Micro-Step

มอเตอร์จะหมุนไปยังตำแหน่งที่มีการเคลื่อนที่ในมุมที่เล็กกว่า Half-Step โดยจะมีการแบ่งการเคลื่อนไหวเป็นส่วนย่อยๆ เช่น 1/2, 1/4, 1/8, 1/16 หรือ 1/32 ของ Full-Step โดย Pulse ที่ส่งไปยังขดลวดจะเคลื่อนที่เร็วๆไปยังมุมที่มีความละเอียดสูงขึ้น (เช่น 0.056° ต่อ Pulse สำหรับการ Micro-Step 1/16) ทำให้การเคลื่อนไหวมีความราบรื่นและแม่นยำมากขึ้น nondesk Micro-Step ช่วยลดการสั่นสะเทือนและเสียงได้มากที่สุดเมื่อเทียบกับ nondesk Full-Step และ Half-Step เนื่องจากการเคลื่อนไหวไม่สอดคล้องกันในแต่ละ Micro-Step

7. Stepper Motor Driver Type



รูปที่ 7 Stepper Motor Driver Type

ที่มา: <https://www.oyostepper.com/article-1076-Some-differences-between-bipolar-and-unipolar-stepper-motor.html>

ภายใน Stepper Motor Driver จะมีการจัดการขดลวดเพื่อจ่ายไฟฟ้าอยู่สองชนิด คือ Unipolar และ Bipolar ซึ่งส่งผลต่อวิธีการควบคุม Stepper Motor

7.1 Unipolar

กระแสไฟฟ้าจะไหลในทิศทางเดียวกันในแต่ละครีบของขดลวด เนื่องจากขาดลวดของมอเตอร์ประเภทนี้มีการเชื่อมต่อกับจุดศูนย์กลางที่ช่วยแบ่งขดลวดออกเป็นสองส่วน โดยในแต่ละส่วนจะทำให้กระแสไฟฟ้าไหลในทิศทางเดียวกันเท่านั้น ซึ่งทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเป็นแบบหนึ่งทิศทาง การควบคุมมอเตอร์ในลักษณะนี้จะง่ายและไม่ซับซ้อน

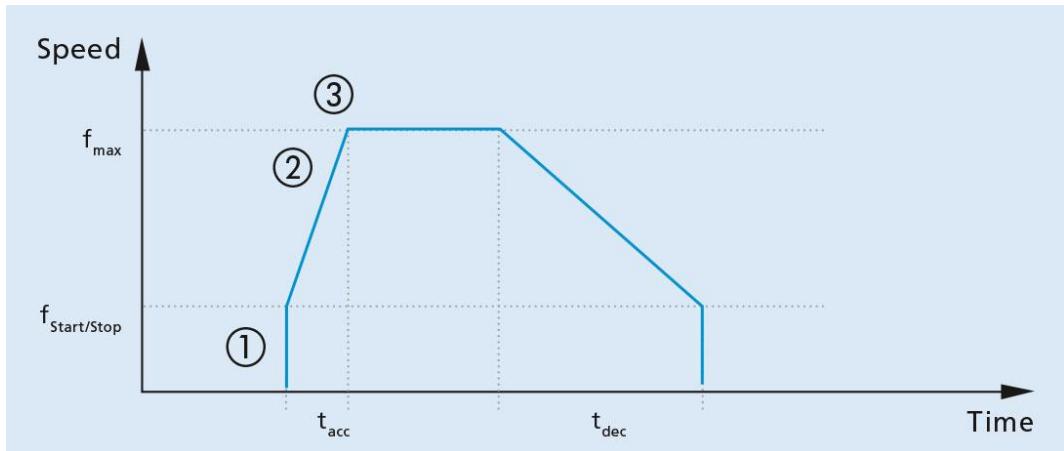
7.2 Bipolar

กระแสไฟสามารถไหลได้ทั้งสองทิศทางในแต่ละขดลวด เนื่องจากมอเตอร์ประเภทนี้ไม่มีจุดศูนย์กลางที่แบ่งขดลวดออกเป็นสองส่วนเหมือนแบบ Unipolar ดังนั้นในการหมุนของมอเตอร์ประเภทนี้ กระแสไฟฟ้าจะต้องพลิกทิศทางไปมาภายใต้ขดลวดทั้งหมด โดยการพลิกทิศทางของกระแสไฟฟ้าในขดลวดแต่ละชุดจะทำให้มอเตอร์หมุนไปในทิศทางที่ต้องการ การควบคุมการไหลของกระแสในทิศทางที่ถูกต้องจำเป็นต้องใช้วงจรที่ซับซ้อนมากขึ้นเมื่อเทียบกับมอเตอร์ประเภท Unipolar

8. การ Loss Step

การสูญเสียสเต็ป (Loss Step) ใน Stepper Motor เกิดขึ้นเมื่อมอเตอร์ไม่สามารถหมุนตามจำนวนสเต็ปที่กำหนดไว้ ซึ่งอาจเกิดจากแรงบิดของโหลดที่มากเกินไป ความเร็วของสัญญาณที่สูงเกินไปจนทำให้ขดลวดทำงานไม่ทันหรือกระแสไฟฟ้าที่ไม่เพียงพอ โดยการเร่งความเร็วที่รวดเร็วเกินไปก็เป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดปัญหาการ Loss step ได้

9. การป้องกันการ Loss Step ด้วยการควบคุมความเร็วด้วยความเร่ง

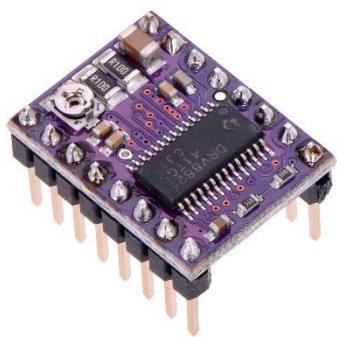


รูปที่ 8 การควบคุมความเร็วด้วยความเร่ง

ที่มา: <https://www.faulhaber.com/en/know-how/tutorials/stepper-motor-tutorial-how-to-prevent-step-losses-with-stepper-motors/>

การป้องกันการ Loss Step มีด้วยกันหลากหลายวิธี เช่น การเลือกมอเตอร์ให้เหมาะสมกับการใช้งาน หรือการเลือก Driver ที่เหมาะสม แต่วิธีการที่เป็นที่นิยมกันมากที่สุดก็คือ การควบคุมอัตราการเร่งและการชะลอความเร็วของมอเตอร์ให้ค่อย ๆ เพิ่มและลดลง ซึ่งช่วยป้องกันการกระชากที่อาจทำให้มอเตอร์เกิดการ Loss Step เนื่องจากการเพิ่มหรือลดความเร็วอย่างรวดเร็วเกินไปอาจทำให้มอเตอร์ไม่สามารถตามทันการเคลื่อนที่ที่ต้องการได้

10. DRV8825 Stepper Motor Driver (Bipolar Driver Type)



MODE0	MODE1	MODE2	Microstep Resolution
Low	Low	Low	Full step
High	Low	Low	Half step
Low	High	Low	1/4 step
High	High	Low	1/8 step
Low	Low	High	1/16 step
High	Low	High	1/32 step
Low	High	High	1/32 step
High	High	High	1/32 step

รูปที่ 9 การตั้งค่า Drive Mode ใน DRV8825

วัสดุอุปกรณ์

ลำดับที่	ชื่อ	จำนวน	หน่วย
1	RS PRO Hybrid, Permanent Magnet Stepper Motor, 0.22Nm Torque, 2.8 V, 1.8°, 42.3 x 42.3mm Frame, 5mm Shaft	1	ตัว
2	Incremental Encoder AMT103-V	1	อัน
3	Nucleo-STM32G474RE	1	บอร์ด
4	บอร์ดทดลอง MotorXplorer	1	บอร์ด
5	สายอัปโหลด	1	เส้น
6	AC/DC Adapter 100-240VAC to 12VDC 2.5A	1	ชุด
7	AC/DC Adapter 100-240VAC to 24VDC 10A	1	ชุด

ตารางที่ 3 วัสดุอุปกรณ์

ขั้นตอนการดำเนินงาน

- ศึกษาข้อมูลภาพรวมเกี่ยวกับ Stepper Motor
- วางแผนการทดลองจากสมมติฐานที่ตั้งขึ้น ได้ดังนี้
 - เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และความเร็วของ Stepper Motor
 - เพื่อเปรียบเทียบความละเอียดในการควบคุมตำแหน่งและความเร็วของแต่ละ Drive Mode
 - เพื่อศึกษาการ Loss Step ของ Stepper Motor
- ทำการทดลองที่ 1 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และความเร็วของ Stepper Motor
- ทำการทดลองที่ 2 เพื่อเปรียบเทียบความละเอียดในการควบคุมตำแหน่งและความเร็วของแต่ละ Drive Mode
- ทำการทดลองที่ 3 เพื่อศึกษาการ Loss Step ของ Stepper Motor
- สรุปและอภิปรายผลการทดลอง

การทดลองที่ 1

ตัวแปร

ตัวแปรต้น: ความถี่ของสัญญาณ Pulse (Hz)

ตัวแปรตาม: ความเร็วของมอเตอร์ (rad/s)

ตัวแปรควบคุม: Drive Mode, Driver Type, แรงดันไฟฟ้าที่ขับมอเตอร์, ระยะเวลาทดลอง

วิธีดำเนินการทดลอง

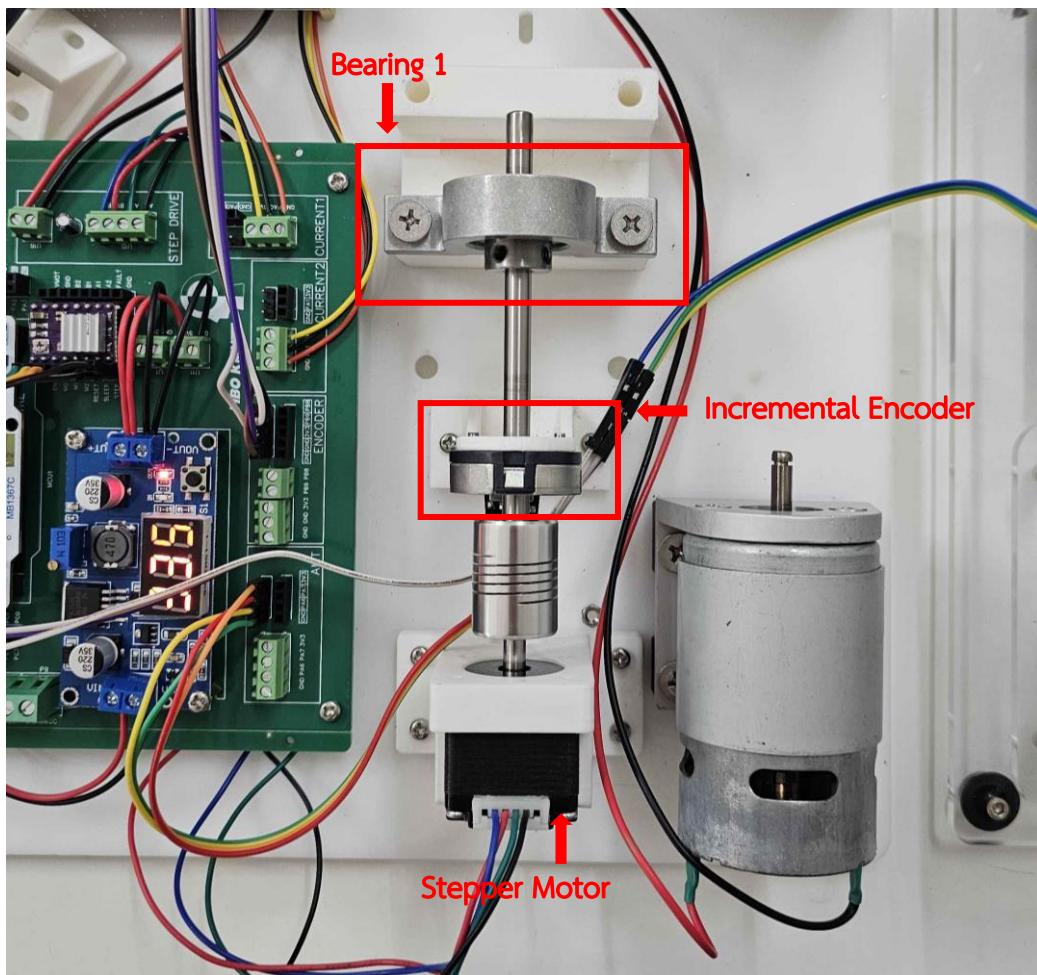
1. ติดตั้งบอร์ด Nucleo-STM32 ลงบน MotorXplorer ตามตำแหน่งที่จัดวางไว้
2. ติดตั้ง DRV8255 และ AMT-103V บน MotorXplorer
3. เสียบสายไฟจาก AC/DC Adapter 100-240VAC to 24VDC 10A เข้ากับ MotorXplorer เพื่อเลี้ยง Stepper Motor และเสียบสาย AC/DC Adapter 100-240VAC to 12VDC 2.5A เลี้ยง NUCLEO-STM32
4. เสียบสายอัปโหลดจากคอมพิวเตอร์เข้ากับ Nucleo-STM32
5. ปรับค่าความถี่ตามเวลาที่เปลี่ยนแปลงไปใน MotorXplorer Interface เป็นเวลา 10 วินาที
6. ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ยและเพิ่มความสมำเสมอของข้อมูล
7. บันทึกค่าความถี่ และความเร็วที่ได้ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์

1. การ Setup Hardware และ MATLAB การทดลองที่ 1

สำหรับการทดลองที่ 1 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และความเร็วของ Stepper Motor จะมีการใช้ MotorXplorer Interface ที่ TA ได้จัดเตรียมไว้ให้ในการควบคุมความถี่ของสัญญาณที่จ่ายให้กับ Stepper Motor และวัดค่าผ่าน Incremental Encoder บน MotorXplorer โดยมีรายละเอียด ดังนี้

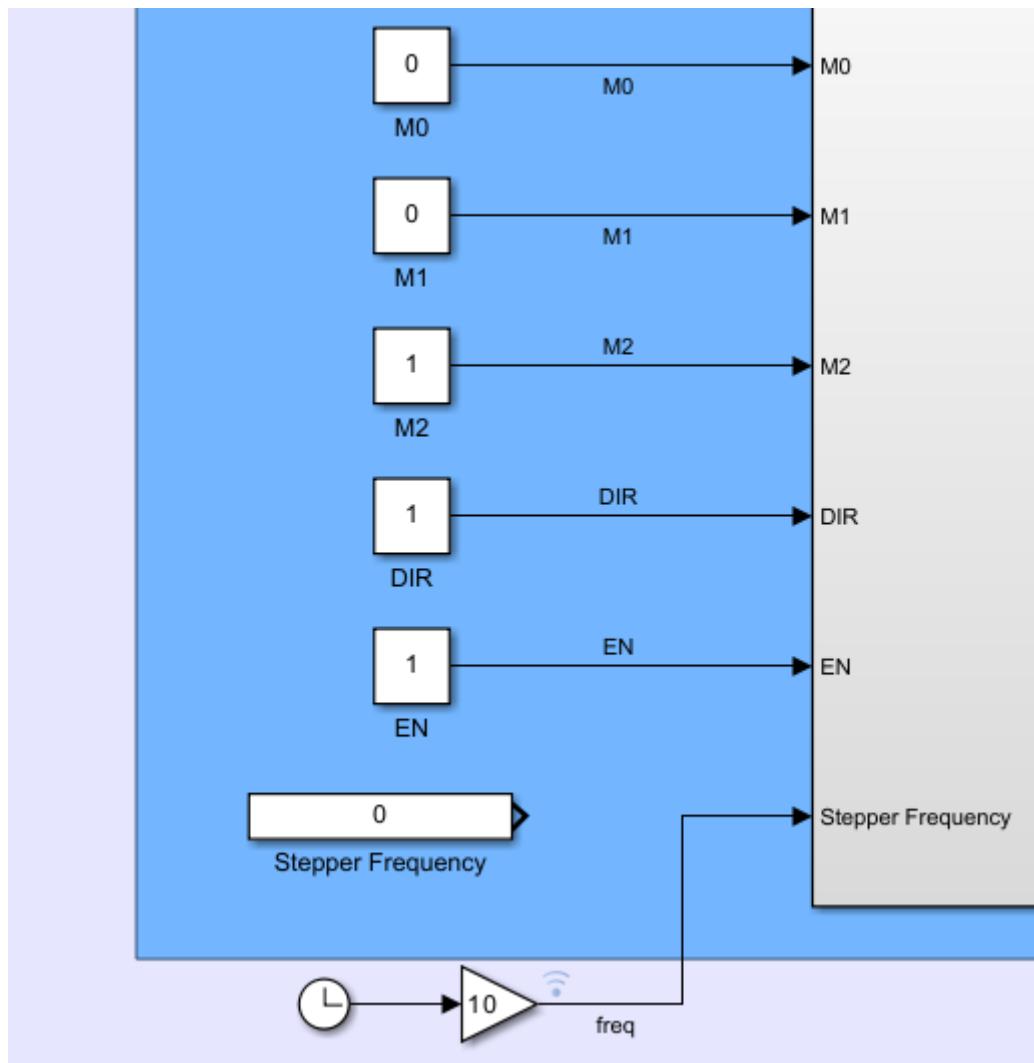
1.1 Hardware Setup

ผู้จัดทำเริ่มจากเชื่อมต่อสายบน MotorXplorer ให้ถูกต้องตามที่กำหนดไว้ และได้มีการตัดแปลงอุปกรณ์บนบอร์ดบางส่วน เพื่อให้เกิดความสะดวกในการใช้งาน และลด Noise ที่เกิดจากอุปกรณ์ได้ ซึ่งความฝืด (Friction) เป็นองค์ประกอบหลักของ Noise ในระบบนี้ ทางผู้จัดทำจึงได้ Setup บอร์ด MotorXplorer ดังรูป



รูปที่ 10 MotorXplorer ที่ถูกปรับแต่ง

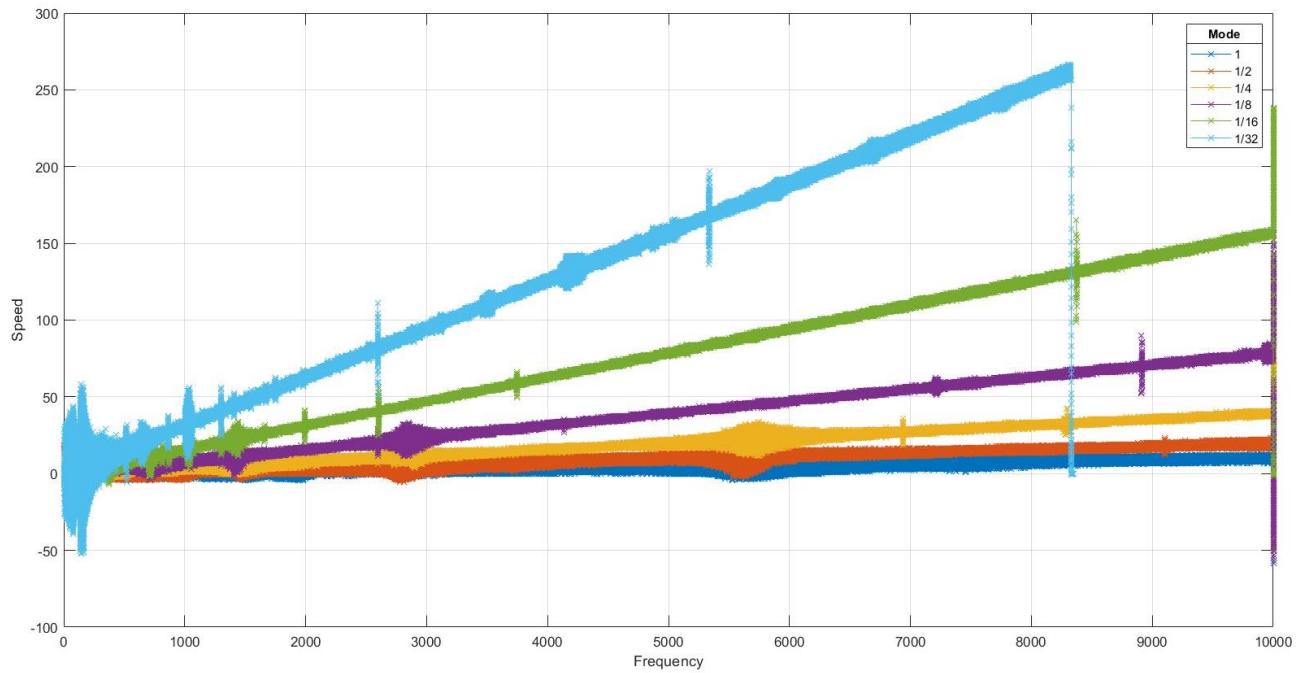
1.2 MATLAB Setup



Simulink ที่ 1 การกำหนดค่า Drive Mode, ทิศทาง, Enable Pin, และความถี่ของสัญญาณ

โดยทิศทางจะตั้งค่าเป็น 1 เสมอ และเนื่องจาก DRV8825 ทำงานแบบ Active-Low จึงตั้งค่า Enable Pin เป็น 0 เพื่อให้สามารถขับ Stepper Motor ได้ ส่วนการตั้งค่า Drive Mode จะเปลี่ยนไปตามที่ต้องการจะทดลอง และความถี่สัญญาณจะต่อเข้ากับ Block Clock เพื่อให้ความถี่เพิ่มขึ้นตามเวลาที่ผ่านไปแบบอัตโนมัติ ซึ่งต่อเข้ากับ Block Gain ซึ่งทำหน้าที่เป็นความเร่งของความถี่สัญญาณแบบปรับค่าได้ โดยสำหรับการทดลองนี้จะตั้งค่าไว้ที่ 50 Hz/s และเก็บค่าความเร็วและความถี่ผ่าน Data Inspector แบบ Real-Time

ผลการทดลองที่ 1



จากราฟคือความถี่ของสัญญาณที่จ่ายให้กับ Stepper Motor และความเร็วที่มอเตอร์หมุนไป ซึ่งตัดมาแค่ช่วง 0-10,000 Hz จะเห็นว่าความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของสัญญาณที่จ่ายให้กับมอเตอร์และความเร็วที่มอเตอร์หมุนไป จะมีความคงที่และแปรผันตรงกันแบบ Linear อยู่เสมอ ทั้งนี้ Drive Mode จะส่งผลต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร็ว

สรุปผลการทดลองที่ 1

จากการทดลองศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของสัญญาณที่จ่ายให้กับ Stepper Motor และความเร็วในการหมุน พบว่าความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นแบบแปรผันตรง กล่าวคือ เมื่อความถี่ของสัญญาณเพิ่มขึ้น ความเร็วในการหมุนของมอเตอร์ก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยลักษณะของกราฟที่ได้แสดงความสัมพันธ์แบบเส้นตรง (Linear) อย่างชัดเจนในช่วงความถี่ 0-10,000 Hz ที่ทดสอบ

ทั้งนี้ Drive Mode ที่ใช้ใน Stepper Motor มีผลกระทบต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร็ว กล่าวคือ ใน Drive Mode ที่ละเอียดขึ้น เช่น 1/16 หรือ 1/32 จะส่งผลให้มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วที่ต่ำลง เมื่อเทียบกับ Drive Mode ที่หยาบกว่า เช่น Full Step หรือ Half Step ภายใต้ความถี่เดียวกัน การเพิ่มความละเอียดของ Drive Mode ช่วยเพิ่มความนุ่มนวลในการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ แต่จะลดความเร็วลงตามไปด้วย

จากการทดลองนี้จึงสรุปได้ว่า Stepper Motor มีลักษณะการทำงานที่ตอบสนองต่อความถี่ของสัญญาณขับเคลื่อนในลักษณะแบบเส้นตรง โดย Drive Mode หน้าที่เป็นตัวกำหนดความละเอียดและความเร็วของการเคลื่อนที่ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่สามารถปรับให้เหมาะสมกับความต้องการในงานต่าง ๆ ได้

การทดลองที่ 2

ตัวแปร

ตัวแปรต้น: Drive Mode

ตัวแปรตาม: มุมที่มอเตอร์หมุนไป

ตัวแปรควบคุม: Driver Type, แรงดันไฟฟ้าที่ขับมอเตอร์

วิธีดำเนินการทดลอง

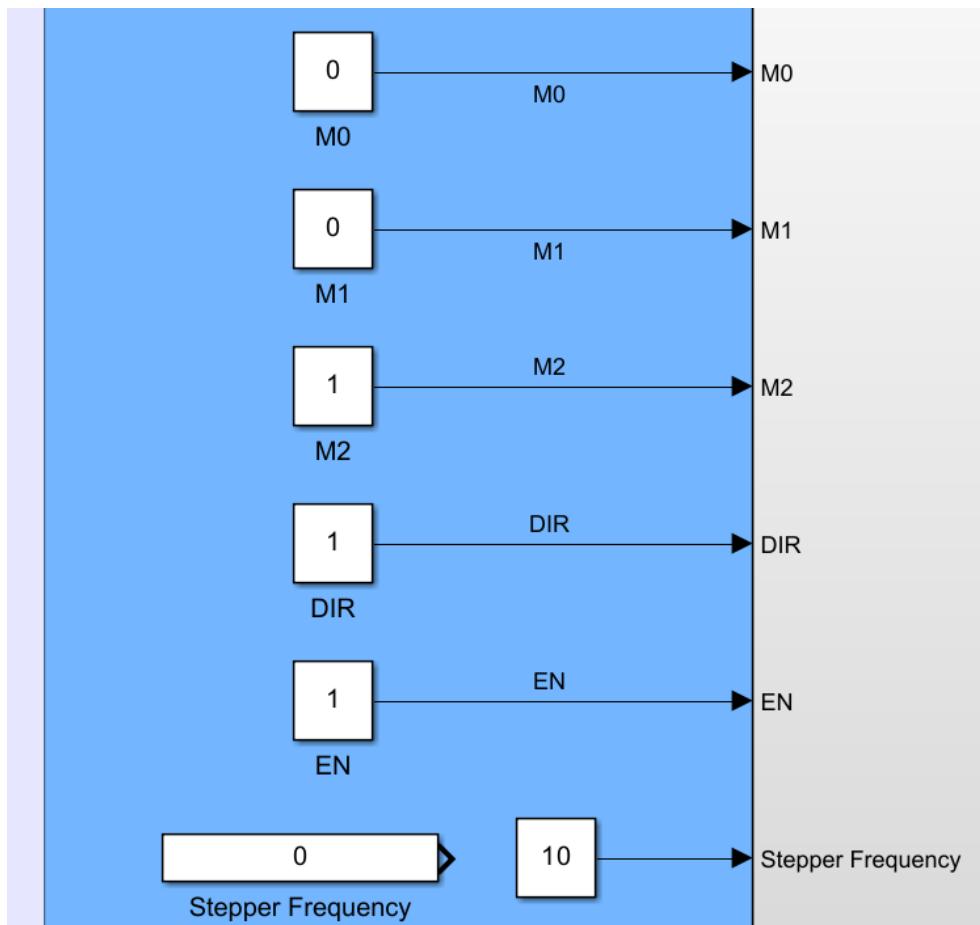
1. ติดตั้งบอร์ด Nucleo-STM32 ลงบน MotorXplorer ตามตำแหน่งที่จัดวางไว้
2. ติดตั้ง DRV8255 และ AMT-103V บน MotorXplorer
3. เสียบสายไฟจาก AC/DC Adapter 100-240VAC to 24VDC 10A เข้ากับ MotorXplorer เพื่อเลี้ยง Stepper Motor และเสียบสาย AC/DC Adapter 100-240VAC to 12VDC 2.5A เลี้ยง NUCLEO-STM32
4. เสียบสายอัปโหลดจากคอมพิวเตอร์เข้ากับ Nucleo-STM32
5. จ่ายสัญญาณ 10Hz เป็นเวลา 160 วินาทีเพื่อวัดค่าความลະเอียงของแต่ละ Drive Mode
6. ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ยและเพิ่มความสมำเสมอของข้อมูล
7. บันทึกค่ามุมที่เปลี่ยนแปลงไป เพื่อเปรียบเทียบ Drive Mode

1. การ Setup Hardware และ MATLAB การทดลองที่ 2

1.1 Hardware Setup

ในการทดลองที่ 2 จะใช้การ Setup Hardware เช่นเดียวกันกับการทดลองที่ 1

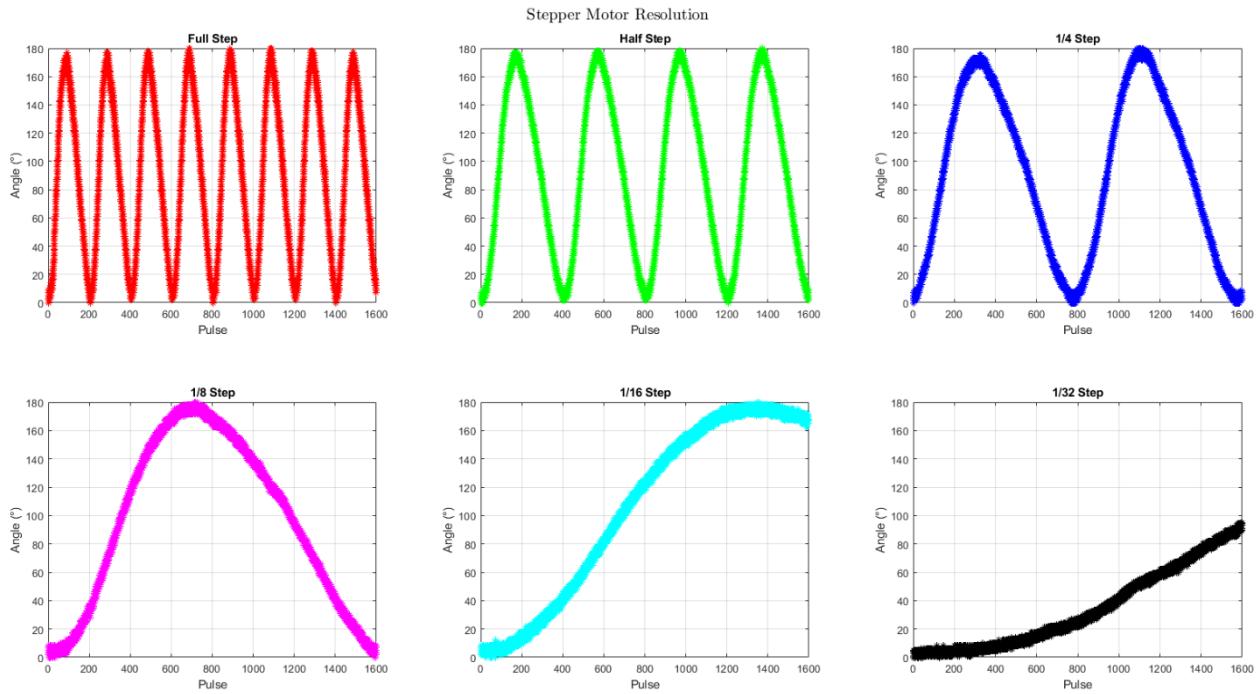
1.2 MATLAB Setup



Simulink ที่ 2 การกำหนดค่า Drive Mode, ทิศทาง, Enable Pin, และความถี่ของสัญญาณ

โดยทิศทางจะตั้งค่าเป็น 1 เมื่อ และเนื่องจาก DRV8825 ทำงานแบบ Active-Low จึงตั้งค่า Enable Pin เป็น 0 เพื่อให้สามารถขับ Stepper Motor ได้ ส่วนการตั้งค่า Drive Mode จะเปลี่ยนไปตามที่ต้องการจะทดลอง และความถี่สัญญาณจะต่อเข้ากับ Block Constant ให้เป็นความถี่ที่คงที่เพื่อให้ความเร็วที่มอเตอร์หมุนคงที่ โดยสำหรับการทดลองนี้จะตั้งค่าไว้ที่ 10 Hz และเก็บค่ามุมที่เปลี่ยนแปลงไปของแต่ละ Drive Mode ด้วย Magnetic Encoder ผ่าน Data Inspector แบบ Real-Time

ผลการทดลองที่ 2



จากราฟคือจำนวนของสัญญาณที่จ่ายให้กับ Stepper Motor และมุมที่มอเตอร์หมุนเปลี่ยนแปลงไป จะเห็นว่า ที่จำนวนสัญญาณเท่ากัน แต่ Drive Mode ต่างกัน จะส่งผลให้มุมที่มอเตอร์หมุนไปมีค่าไม่เท่ากัน ซึ่งใน Full Step Mode เมื่อผ่านไป 1600 Pulse มอเตอร์จะหมุนครบ 360° เป็นจำนวน 8 ครั้ง, ใน Half Step Mode จำนวน 4 ครั้ง, 1/4 Step Mode จำนวน 2 ครั้ง, 1/8 Step Mode จำนวน 1 ครั้ง, 1/16 Step Mode จำนวน $1/2$ ครั้ง, และ 1/32 Step Mode จำนวน $1/4$ ครั้ง

สรุปผลการทดลองที่ 2

จากการทดลองศึกษาความละเอียดในการควบคุมตำแหน่งของ Stepper Motor ด้วย Drive Mode ที่แตกต่างกัน พบว่า Drive Mode มีผลต่อมุมหมุนของมอเตอร์เมื่อจ่ายสัญญาณจำนวน Pulse เท่ากัน โดยใน Full Step Mode มอเตอร์จะหมุนครบ 360° ได้จำนวน 8 รอบ เมื่อจ่ายสัญญาณ 1600 Pulse ในขณะที่ Drive Mode ที่ละเอียดขึ้น เช่น 1/32 Step Mode มอเตอร์จะหมุนเพียง $1/4$ รอบเท่านั้นในจำนวน Pulse เดียวกัน

ลักษณะการหมุนนี้สะท้อนถึงความละเอียดที่แตกต่างกันของแต่ละ Drive Mode โดย Full Step Mode มีการหมุนที่ก้าวใหญ่ที่สุด ในขณะที่ Drive Mode ที่ละเอียดขึ้น เช่น 1/16 Step และ 1/32 Step จะทำให้มอเตอร์หมุนในแต่ละก้าวเล็กลง ซึ่งช่วยเพิ่มความแม่นยำในการควบคุมตำแหน่ง

จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่า Drive Mode มีบทบาทสำคัญในการกำหนดความละเอียดของการหมุน Stepper Motor Drive Mode ที่ละเอียดขึ้นหมายความว่าสำหรับงานที่ต้องการความแม่นยำสูง เช่น การควบคุมมุมหมุนเล็ก ๆ หรือการปรับตำแหน่งที่ต้องการความละเอียดสูง อย่างไรก็ตาม การเพิ่มความละเอียดอาจทำให้ต้องใช้ระยะเวลาในการหมุนให้ครบหนึ่งรอบ ซึ่งอาจไม่เหมาะสมกับงานที่ต้องการความเร็วในการหมุนสูง

การทดลองที่ 3

ตัวแปร

ตัวแปรต้น: ความเร่งของความถี่ของสัญญาณ Pulse (Hz/s), Drive Mode

ตัวแปรตาม: ความถี่ที่เกิดการ Loss Step

ตัวแปรควบคุม: Driver Type, แรงดันไฟฟ้าที่ขับมอเตอร์

วิธีดำเนินการทดลอง

1. ติดตั้งบอร์ด Nucleo-STM32 ลงบน MotorXplorer ตามตำแหน่งที่จัดวางไว้
2. ติดตั้ง DRV8255 และ AMT-103V บน MotorXplorer
3. เสียบสายไฟจาก AC/DC Adapter 100-240VAC to 24VDC 10A เข้ากับ MotorXplorer เพื่อเลี้ยง Stepper Motor และเสียบสาย AC/DC Adapter 100-240VAC to 12VDC 2.5A เลี้ยง NUCLEO-STM32
4. เสียบสายอัปโหลดจากคอมพิวเตอร์เข้ากับ Nucleo-STM32
5. ปรับค่าความเร่งของสัญญาณ และตั้งค่าให้ความถี่เปลี่ยนแปลงตามเวลาที่เปลี่ยนแปลงไปใน MotorXplorer Interface จนกว่าจะเกิดการ Loss Step
6. ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ยและเพิ่มความสม่ำเสมอของข้อมูล
7. บันทึกค่าความถี่ตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงจุดที่เกิดการ Loss Step

1. การ Setup Hardware และ MATLAB การทดลองที่ 3

1.1 Hardware Setup

ในการทดลองที่ 3 จะใช้การ Setup Hardware เช่นเดียวกับการทดลองที่ 1

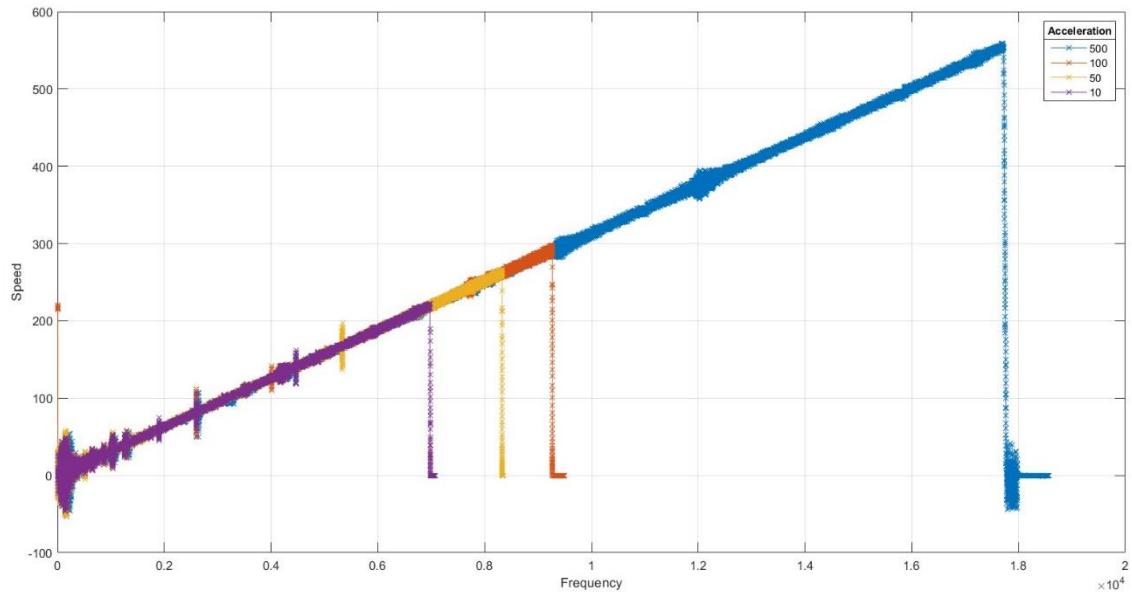
1.2 MATLAB Setup

ในการทดลองที่ 3 จะใช้การ Setup MATLAB เช่นเดียวกับการทดลองที่ 1

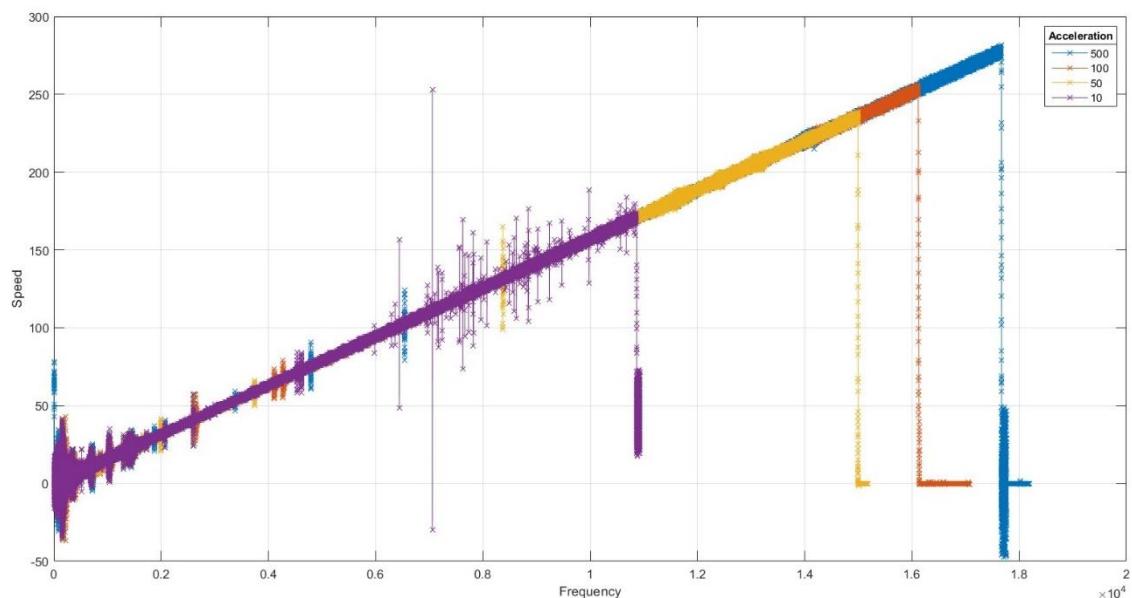
ผลการทดลองที่ 3

1. เปรียบเทียบการ Loss Step ของความเร่งของความถี่ที่ต่างกันในแต่ละ Drive Mode

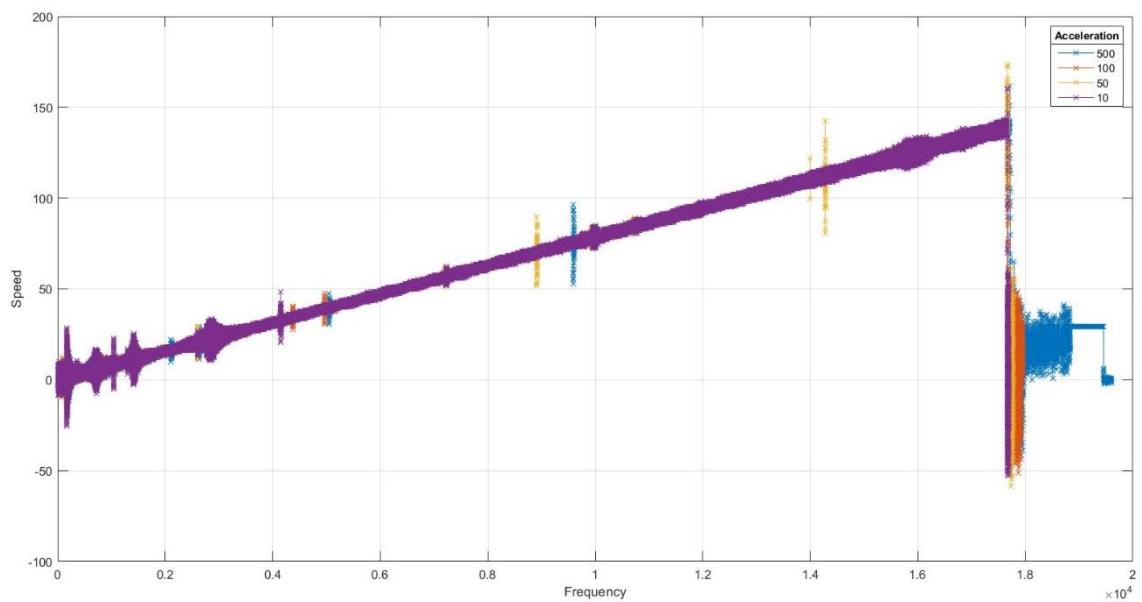
1.1 กราฟเปรียบเทียบการ Loss Step ของความเร่งของความถี่ที่ต่างกันใน Full Step Mode



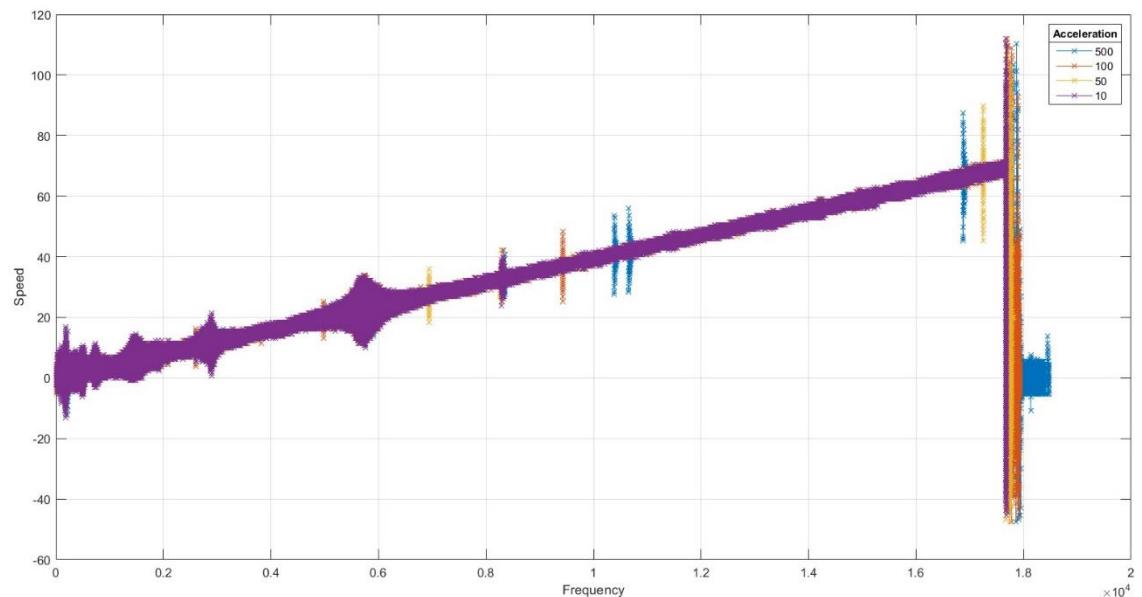
1.2 กราฟเปรียบเทียบการ Loss Step ของความเร่งของความถี่ที่ต่างกันใน Half Step Mode



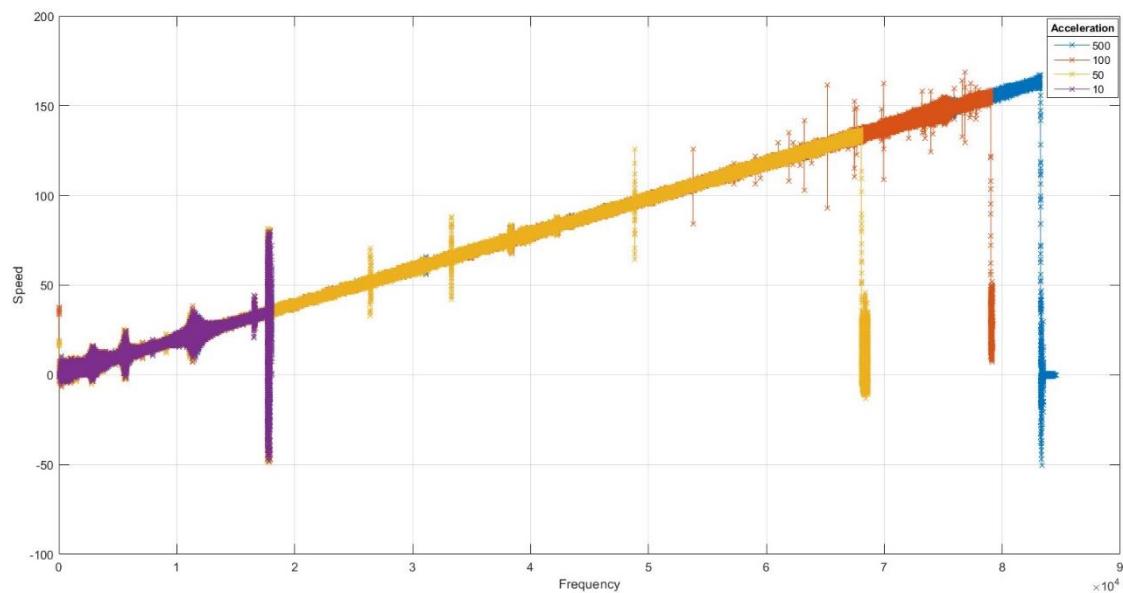
1.3 กราฟเปรียบเทียบการ Loss Step ของความเร่งของความถี่ที่ต่างกันใน 1/4 Step Mode



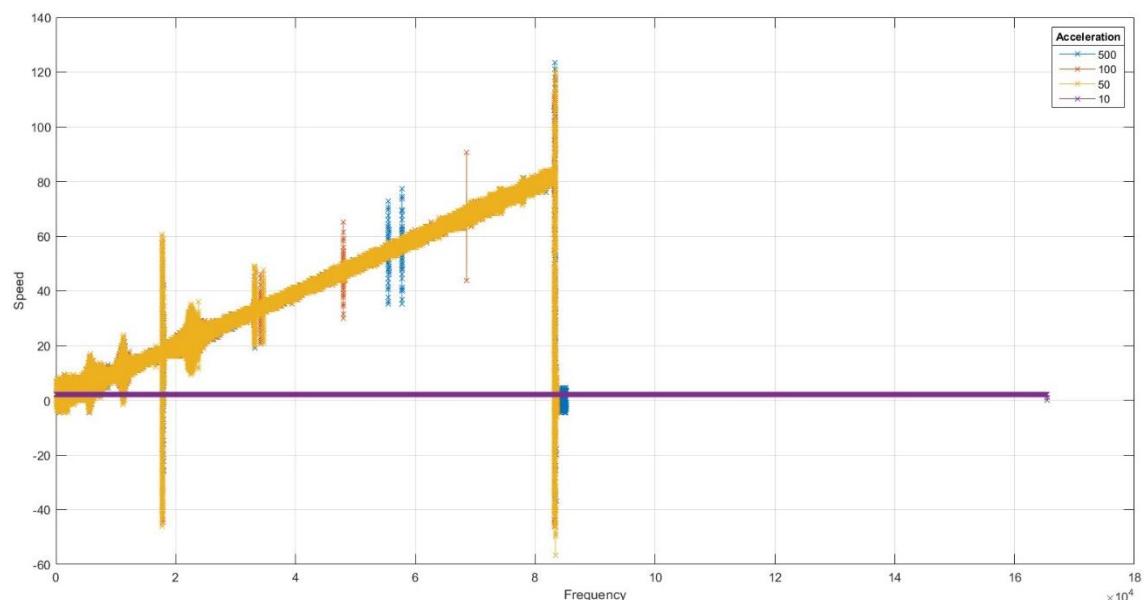
1.4 กราฟเปรียบเทียบการ Loss Step ของความเร่งของความถี่ที่ต่างกันใน 1/8 Step Mode



1.5 กราฟเปรียบเทียบการ Loss Step ของความเร่งของความถี่ที่ต่างกันใน 1/16 Step Mode

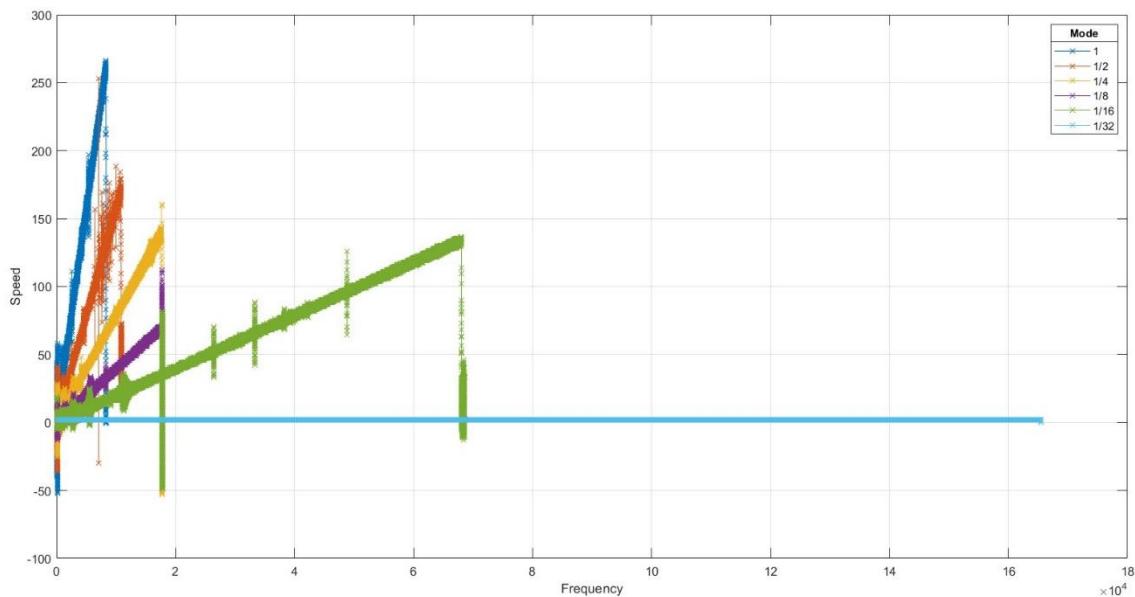


1.6 กราฟเปรียบเทียบการ Loss Step ของความเร่งของความถี่ที่ต่างกันใน 1/32 Step Mode

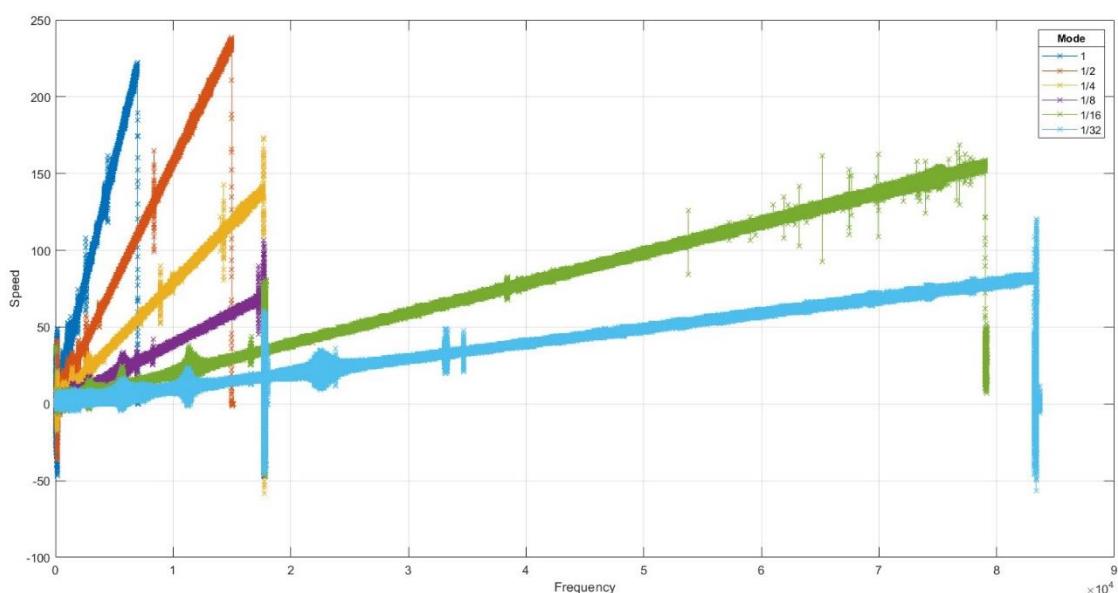


2. เปรียบเทียบการ Loss Step ของ Drive Mode ที่ต่างกันในแต่ละความเร่งของความถี่

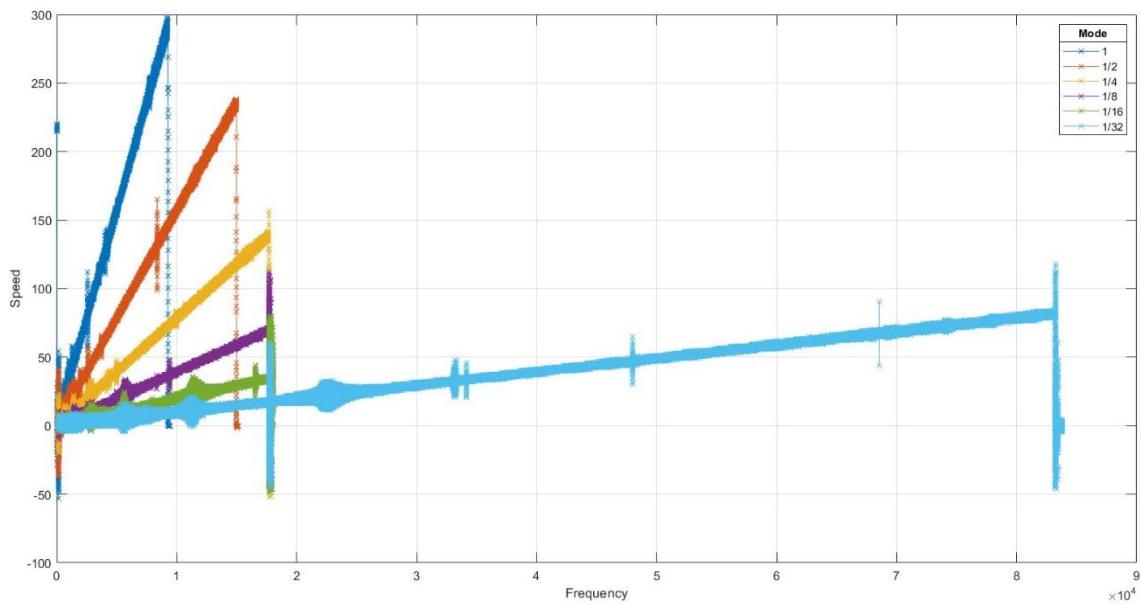
2.1 กราฟเปรียบเทียบการ Loss Step ของ Drive Mode ที่ต่างกันในแต่ละความเร่งของความถี่ 10 Hz/s



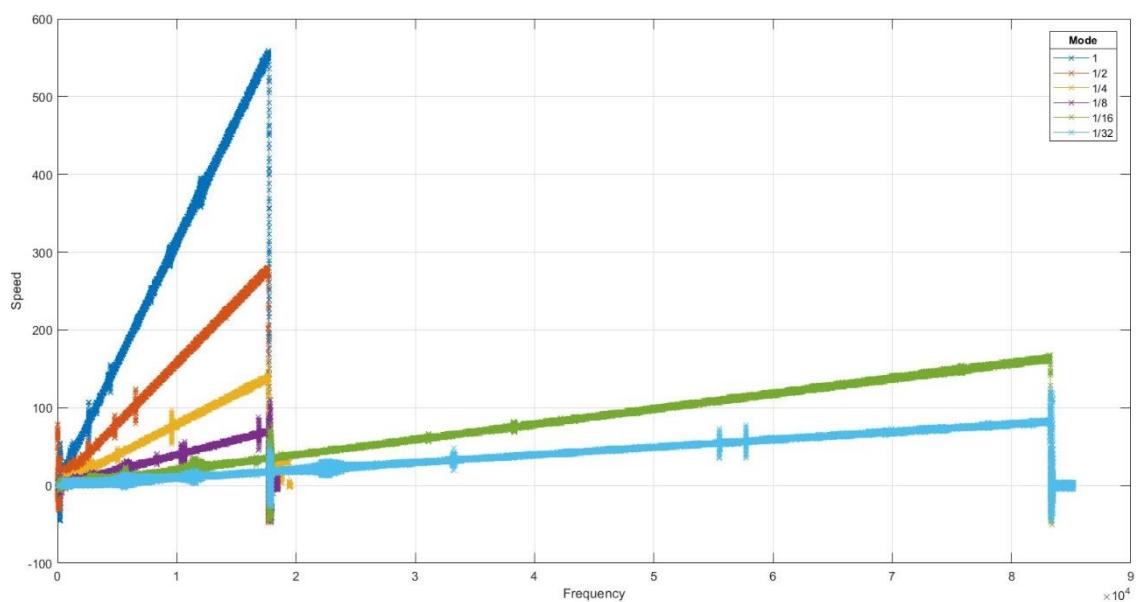
2.2 กราฟเปรียบเทียบการ Loss Step ของ Drive Mode ที่ต่างกันในแต่ละความเร่งของความถี่ 50 Hz/s



2.3 กราฟเปรียบเทียบการ Loss Step ของ Drive Mode ที่ต่างกันในแต่ละความเร่งของความถี่ 100 Hz/s



2.4 กราฟเปรียบเทียบการ Loss Step ของ Drive Mode ที่ต่างกันในแต่ละความเร่งของความถี่ 500 Hz/s



สรุปผลการทดลองที่ 3

จากการทดลองพบว่า ความเร่งของความถี่เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการ Loss Step โดยเมื่อความเร่งต่ำ Stepper Motor จะสามารถทำงานได้อย่างสม่ำเสมอและรักษาความแม่นยำของตำแหน่งได้ดี ไม่มีการ Loss Step เกิดขึ้นอย่างชัดเจน อย่างไรก็ตาม เมื่อความเร่งของความถี่เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในระดับสูงมาก เช่น 500 Hz/s มอเตอร์ในทุกโหมดการขับเคลื่อนเริ่มแสดงอาการสูญเสียก้าว โดยเฉพาะในโหมดที่ลากเอียงมาก เช่น 1/16 Step และ 1/32 Step ความสูญเสียก้าวนี้เกิดจากมอเตอร์ไม่สามารถติดตามคำสั่งที่ส่งมาได้ทัน อันเนื่องมาจากข้อจำกัดทางกายภาพ เช่น แรงเฉียบของขั้นส่วนเคลื่อนที่และแรงบิดที่ลดลง แต่ในบางกรณีความเร่งของความถี่ที่น้อยเกินไปอาจทำให้แรงบิดไม่เพียงพอที่จะต้านทานแรงเฉียบของ Rotor ได้เช่นเดียวกัน

ในส่วนของ Drive Mode ผลการทดลองยืนยันว่าโหมดการขับเคลื่อนที่มีระดับความละเอียดสูง เช่น 1/16 Step และ 1/32 Step ช่วยเพิ่มความละเอียดของตำแหน่งที่มอเตอร์หมุนได้อย่างมาก แต่ในขณะเดียวกัน แรงบิดต่อ Step ก็ลดลงอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับโหมดที่ลากเอียงน้อยกว่า แรงบิดที่ลดลงนี้ทำให้มอเตอร์ในโหมด Microstep สูงมีความเสี่ยงต่อการ Loss Step เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะเมื่อทำงานภายใต้ความเร่งของความถี่ที่สูงมาก เนื่องจากแรงบิดไม่เพียงพอที่จะต้านทานแรงเฉียบหรือแรงต้านภายนอก

ในโหมด Full Step พบว่าแรงบิดสูงสุดที่มอเตอร์สามารถสร้างได้ช่วยลดโอกาสการ Loss Step แม้ในสภาวะที่มีความเร่งสูง ซึ่งแตกต่างจากโหมด 1/32 Step ที่มีการ Loss Step ในสภาวะเดียวกัน ข้อสังเกตนี้แสดงให้เห็นว่าการเลือกโหมดการขับเคลื่อนที่เหมาะสมต้องคำนึงถึงลักษณะการใช้งาน หากต้องการความละเอียดและความแม่นยำสูงในตำแหน่ง อาจจำเป็นต้องใช้โหมดที่มีความละเอียดสูง แต่หากต้องการแรงบิดและความเสถียร อาจต้องเลือกโหมดที่มีระดับความละเอียดต่ำกว่า ผลการทดลองยังแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการตั้งค่าความเร่งของความถี่ หากความเร่งเกินขีดจำกัดของมอเตอร์จะส่งผลให้เกิดการ Loss Step อย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้

จากการทดลองนี้สามารถสรุปได้ว่าการควบคุม Stepper Motor ให้มีประสิทธิภาพสูงสุดจำเป็นต้องเข้าใจข้อจำกัดทางกายภาพของมอเตอร์ รวมถึงการตั้งค่าที่เหมาะสมสำหรับเงื่อนไขการทำงานที่แตกต่างกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนของ Drive Mode และความเร่งของความถี่ ซึ่งทั้งสองปัจจัยมีบทบาทสำคัญในการลดโอกาสการเกิด Loss Step และเพิ่มความแม่นยำของมอเตอร์ในภาพรวม

อภิปรายผลการทดลอง

1. ความเร็วเชิงมุมของ Stepper Motor จะแปรผันตรงกับความถี่ของสัญญาณขับเคลื่อน

จากการทดลอง พบร้าความเร็วเชิงมุมของ Stepper Motor มีความสัมพันธ์แบบแปรผันตรงกับความถี่ของสัญญาณที่จ่าย กล่าวคือ เมื่อความถี่เพิ่มขึ้น ความเร็วของมอเตอร์ก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยลักษณะความสัมพันธ์นี้ ปรากฏในรูป Linear อย่างชัดเจน ซึ่งสอดคล้องกับหลักการทำงานของ Stepper Motor ที่จำนวน Pulse มีผลโดยตรงต่อจำนวนก้าวที่มอเตอร์หมุน อย่างไรก็ตาม หากเปรียบเทียบความเร็วใน Drive Mode ที่แตกต่างกัน เช่น Full Step และ 1/16 Step จะพบว่าที่ความถี่เดียวกัน ความเร็วเชิงมุมใน Full Step จะสูงกว่า 1/16 Step เพราะในโหมดที่ละเอียดขึ้น มอเตอร์จะเคลื่อนที่ในแต่ละ Step ที่เล็กลง ทำให้ใช้จำนวน Step มากขึ้นในการหมุนครบหนึ่งรอบ ซึ่งเป็นข้อจำกัดของระบบ

ดังนั้น แม้ว่าความเร็วของมอเตอร์จะแปรผันตรงกับความถี่ของสัญญาณในทุก Drive Mode แต่ความลาดเอียงของกราฟหรืออัตราการเพิ่มความเร็วนั้นจะแตกต่างกัน โดยขึ้นอยู่กับ Drive Mode

2. รูปแบบการขับเคลื่อน (Full-Step, Half-Step, Micro-Step) มีผลต่อความละเอียดและความแม่นยำของการควบคุมตำแหน่งและความเร็วของ Stepper Motor

ผลการทดลองยืนยันว่า Drive Mode ส่งผลโดยตรงต่อความละเอียดและความแม่นยำในการควบคุมตำแหน่งของ Stepper Motor โดยหากเปรียบเทียบระหว่าง Full Step และ Micro-Step เช่น 1/32 Step จะพบความแตกต่างที่ชัดเจน:

- ใน Full Step Mode มอเตอร์หมุนครบ 360° ได้ 8 รอบ เมื่อจ่าย 1600 Pulse แสดงให้เห็นว่าในแต่ละ Pulse มอเตอร์เคลื่อนที่ในก้าวที่ใหญ่กว่า ทำให้การเคลื่อนที่รวดเร็วและใช้เวลาอ้อยลังในการหมุนครบหนึ่งรอบ แต่ข้อเสียคือ ความละเอียดของตำแหน่งจะต่ำกว่า และการเคลื่อนที่อาจไม่ราบรื่น
- ในทางกลับกัน 1/32 Step Mode เมื่อจ่าย 1600 Pulse มอเตอร์จะหมุนเพียง $1/4$ รอบเท่านั้นซึ่งแสดงถึงความละเอียดที่เพิ่มขึ้นอย่างมาก แต่ต้องแลกมาด้วยความเร็วที่ลดลง เพราะมอเตอร์ต้องเคลื่อนที่ในก้าวที่เล็กลงมาก นอกจากนี้ Micro-Step ยังช่วยให้การเคลื่อนที่มีความนุ่มนวลขึ้น ลดการสั่นสะเทือนของมอเตอร์

เมื่อเปรียบเทียบในภาพรวม Full Step เหมาะสำหรับงานที่ต้องการความเร็วและแรงบิดสูง ขณะที่ Micro-Step เหมาะสำหรับงานที่ต้องการความแม่นยำสูง และต้องการการควบคุมการเคลื่อนที่อย่างละเอียดและเสถียร

3. การ Loss Step จะเกิดขึ้นเมื่อความถี่ของสัญญาณขับเคลื่อนสูงเกินกว่าที่ Stepper Motor จะตอบสนองได้

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เมื่อความถี่ของสัญญาณขับเคลื่อนเพิ่มขึ้นจนเกินขีดจำกัดของมอเตอร์ เช่น ความเร่งที่ 500 Hz/s Stepper Motor จะเริ่มเกิดการ Loss Step โดยเฉพาะในโหมดที่มีความละเอียดสูง เช่น 1/16 และ 1/32 Step สาเหตุเกิดจากมอเตอร์ไม่สามารถตอบสนองต่อคำสั่งได้ทัน เนื่องจากขีดจำกัดทางกายภาพ เช่น แรงเฉียบของขั้นส่วนและแรงบิดที่ไม่เพียงพอ

หากเปรียบเทียบระหว่างโหมดละเอียดและโหมดหยาบในสถานการณ์ที่มีความเร่งสูง จะพบว่า Full Step มีโอกาสเกิด Loss Step ต่ำกว่า เนื่องจากแรงบิดในแต่ละ Step ช่วยให้มอเตอร์สามารถต้านทานแรงเฉียบได้ดีกว่า ขณะที่โหมดละเอียด เช่น 1/32 Step มีแรงบิดต่อ Step ที่ลดลง ทำให้มอเตอร์ Loss Step ได้ง่ายกว่าในความถี่เดียวกัน นอกจากนี้ในบางกรณีที่ความถี่ต่ำเกินไปก็อาจเกิดการ Loss Step ได้เช่นกัน โดยแรงบิดอาจไม่เพียงพอที่จะเออานะแรงเฉียบของ Rotor หากสัญญาณขับเคลื่อนข้ามเกินไป

4. การ Loss Step มีโอกาสลดลงเมื่อใช้รูปแบบการขับเคลื่อนแบบ Micro-Step และความเร่งสัญญาณที่เหมาะสม

Micro-Step แม้จะเพิ่มความละเอียดของตำแหน่ง แต่ไม่ได้ช่วยลดการ Loss Step เสมอไป Micro-Step จะเพิ่มโอกาสการ Loss Step ในสถานการณ์ที่มีความเร่งสูง เนื่องจากแรงบิดต่อ Step ลดลงอย่างมาก อย่างไรก็ตาม หากความเร่งของความถี่ถูกตั้งค่าให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม การใช้งาน Micro-Step จะช่วยให้มอเตอร์ทำงานได้อย่างราบรื่น ลดแรงสั่นสะเทือน และเพิ่มความแม่นยำ

โดยเมื่อเปรียบเทียบกับ Full Step หากต้องการลดการ Loss Step โดยไม่ต้องคำนึงถึงความละเอียด โหมด Full Step จะเป็นตัวเลือกที่ดีกว่าในสภาพความเร่งที่สูงมาก แต่หากต้องการความละเอียดในขอบเขตความเร่งให้อยู่ในขีดจำกัด Micro-Step จะสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและลดการ Loss Step ได้ดีกว่า

ข้อเสนอแนะ

- การขันยึดสิ่งต่าง ๆ บน MotorXplorer ไม่มีความแน่นหนามากพอ ทำให้ในระหว่างการทดลองชิ้นส่วนบางอย่างหลุดออกจากที่ที่ควร ส่งผลให้ต้องทำการทดลองนั้น ๆ ใหม่
- Bearing บางตัวบน MotorXplorer มีแรงเสียดทานภายในที่มากกว่าปกติ ทำให้ในบางการทดลอง ความเร็วลดลงอย่างรวดเร็วและกลับขึ้นมาหมุนต่อใหม่อีกครั้ง ส่งผลให้ข้อมูลที่ได้มีความสมำเสมอ
- ในบางครั้ง MotorXplorer Interface ไม่สามารถควบคุม Enable Pin ของ DRV8825 ได้แบบ Real-Time ทำให้ Stepper Motor ได้รับแรงดันไฟฟ้าอยู่ตลอดเวลา ส่งผลให้เกิดความร้อนมาก และอาจนำไปสู่การลดลงของประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์ในอนาคต
- สีบเนื่องจาก Bearing บางตัวที่มีแรงเสียดทานภายในมากกว่าปกติ เมื่อถอดออกจะทำให้ Incremental Encoder รับ Radial Load โดยตรง ซึ่งไม่ควรเกิดขึ้นอย่างยิ่ง เนื่องจากจะทำให้การอ่านค่าของ Encoder ผิดพลาดได้ และอายุการใช้งานของ Encoder จะน้อยลงอีกด้วย

Brushless DC Motor

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาหลักการทำงานและการควบคุมของ Brushless DC Motor
2. เพื่อศึกษารูปแบบการควบคุมที่แตกต่างกัน ได้แก่ Sensorless Control และ Sensor-based Control
3. เพื่อศึกษาเทคนิคการควบคุม BLDC Motor ได้แก่ Trapezoidal, Sinusoidal, Field Oriented Control
4. เพื่อศึกษาความแตกต่างของการควบคุม Six-Step Control และ FOC โดยเน้นถึงความแตกต่างในวิธีการเปลี่ยนและจัดการกับ Vector ของกระแสไฟฟ้าผ่านการอธิบายด้วย Space Vector Modulation (SVM)
5. เพื่อศึกษาความแตกต่างระหว่าง Trapezoidal และ Sinusoidal
6. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง Six-Step Control และ PWM
7. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง PWM และ Frequency Output (Back EMF และ Hall Sensor)
8. เพื่อศึกษาความแตกต่างระหว่าง Feedback จาก Back EMF และ Hall Sensor
9. เพื่อศึกษาการจัดการกับ Feedback ของ Sensor Control เพื่อหาตำแหน่งเทียบกับ Feedback ของ Sensor-based Control บน ESC และ MCU ในรูปแบบ Op-Amp และ Zero Crossing
10. เพื่อหาความเร็วจาก Feedback ของ Trapezoidal Control

สมมติฐาน

1. Brushless DC Motor มีประสิทธิภาพการทำงานสูงและสามารถควบคุมได้อย่างแม่นยำเมื่อใช้เทคนิคการควบคุมที่เหมาะสม
2. การควบคุมแบบ Sensor-based Control มีความแม่นยำสูงกว่า Sensorless Control ในกระบวนการบุต้าแห่ง และความเร็วของมอเตอร์ โดยเฉพาะที่ความเร็วต่ำ ซึ่งทำให้สามารถปรับความเร็วและตำแหน่งได้ดีกว่า
3. การควบคุมด้วย FOC โดยใช้ SVM สามารถจัดการ Vector ของกระแสไฟฟ้าได้อย่างแม่นยำกว่า Six-Step Control ส่งผลให้มีการควบคุมที่ราบรื่นและมีประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์สูงกว่า
4. การควบคุมแบบ Sinusoidal ช่วยให้ BLDC Motor ทำงานได้ราบรื่นกว่า Trapezoidal โดยลดแรงบิดที่กระตุกและเสียงรบกวนในระหว่างการหมุน
5. การใช้ PWM ร่วมกับ Six-Step Control สามารถปรับแรงดันไฟฟ้าได้ตามช่วงเวลาและความเร็วของมอเตอร์ ทำให้เกิดการควบคุมที่แม่นยำและประหยัดพลังงานมากขึ้น
6. ความถี่ของ PWM มีผลโดยตรงต่อ Frequency Output ของมอเตอร์ (เช่น Back EMF และการตรวจจับของ Hall Sensor) ซึ่งสามารถใช้เพื่อประเมินความเร็วและตำแหน่งของมอเตอร์ได้
7. Feedback จาก Hall Sensor มีความแม่นยำมากกว่า Back EMF ในกระบวนการบุต้าแห่ง เนื่องจาก Hall Sensor มีสัญญาณที่ชัดเจนมากกว่า
8. การประมวลผล Zero Crossing จาก Feedback ด้วย Op-Amp สามารถเพิ่มความแม่นยำในการระบุตำแหน่งเมื่อใช้ Sensorless Control ได้ ทำให้การควบคุมมอเตอร์มีเสถียรภาพมากขึ้น
9. การควบคุมแบบ Trapezoidal สามารถให้ Feedback ของความเร็วที่มีความแม่นยำในระดับที่ยอมรับได้ ทำให้สามารถคำนวณความเร็วได้อย่างมีประสิทธิภาพแม้ที่ความเร็วสูง

นิยามเชิงปฏิการ

Nucleo-STM32	คือ Nucleo-STM32G474RE
BLDC	คือ Brushless DC Motor
Back EMF	คือ แรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในมอเตอร์ขณะที่หมุนซึ่งเกิดจากการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า
BLDCXplorer	คือ ฐานบรรจุบอร์ดควบคุม, Breadboard, 3D-Print ใช้สำหรับการประกอบกับ BLDC
บอร์ดทดลอง	คือ BLDCXplorer
Noise	คือ สัญญาณไฟฟ้าในวงจรที่เกิดขึ้นนอกเหนือไปจากสัญญาณที่ได้ออกแบบการรับ握ทางแม่เหล็กไฟฟ้าของอุปกรณ์ไฟฟ้า
Ground	คือ จุดอ้างอิงทางไฟฟ้า ซึ่งมีแรงดัน 0V
สายอัปโหลด	คือ สาย USB-A ถึง Micro-USB สำหรับส่งและรับข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์และ Nucleo-STM32G474RE
Pin	คือ ช่องเชื่อมต่อบน Nucleo-STM32G474RE ซึ่งสามารถทำงานได้หลาย Function
Code	คือ ภาษาทางด้านคอมพิวเตอร์
Analog	คือ สัญญาณข้อมูลแบบต่อเนื่อง (Continuous Data) มีขนาดของสัญญาณไม่คงที่ มีการเปลี่ยนแปลงขนาดของสัญญาณแบบค่อยเป็นค่อยไป มีลักษณะเป็นสันโคน็อกต่อเนื่องกัน
Digital	คือ สัญญาณที่เกี่ยวข้องกับข้อมูลแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Data) ที่มีขนาดแน่นอนซึ่งขนาดตั้งกล่าวจะกระโดดไปมาระหว่างค่าสองค่า คือ สัญญาณระดับสูงสุดและสัญญาณระดับต่ำสุด ซึ่งสัญญาณดิจิตอลนี้เป็นสัญญาณที่คอมพิวเตอร์ใช้ในการทำงานและติดต่อสื่อสารกันเป็นค่าของเลขลงตัว โดยปกติมักแทนด้วยระดับแรงดันที่แสดงสถานะเป็น "0" และ "1"

นิยามศัพท์เฉพาะ

Exponential	คือ ลักษณะของกราฟที่มีการเพิ่มขึ้นหรือลดลงแบบทวีคูณหรือเป็นกราฟเลขชี้กำลัง
Linear	คือ ลักษณะของกราฟที่มีการเพิ่มขึ้นหรือลดลงแบบเส้นตรง
เปิด MOSFET	คือ เปิดการใช้งาน MOSFET ให้กระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านได้
ปิด MOSFET	คือ ปิดการใช้งาน MOSFET ไม่ให้กระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านได้
เปิด Switch	คือ เปิดการใช้งาน Switch ให้กระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านได้
ปิด MOSFET	คือ ปิดการใช้งาน Switch ไม่ให้กระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านได้
วงจรปิด	คือ การที่วงจรเชื่อมต่อกันโดยสมบูรณ์ในเส้นทางการไหลของกระแสไฟฟ้า
วงจรเปิด	คือ การที่วงจรขาดการเชื่อมต่อกันในเส้นทางการไหลของกระแสไฟฟ้า
رابطเรียบ	คือ การที่สัญญาณ หรือคลื่นมีลักษณะเป็นกราฟไซน์ (Sine)
เที่ยงตรง	คือ ความสม่ำเสมอหรือความใกล้เคียงของค่าที่วัดได้เมื่อทำการทดลองหลายครั้ง
แม่นยำ	คือ ความใกล้เคียงระหว่างค่าที่วัดได้กับค่าจริง

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. Brushless DC Motor คืออะไร



รูปที่ 1 Brushless DC Motor

ที่มา: <https://www.spektrumrc.com/product/avian-6362-200kv-outrunner-brushless-motor/SPMXAM4796.html>

มอเตอร์ไร้แปรงถ่าน (BLDC หรือ Brushless DC Motor) คือ มอเตอร์กระแสตรงชนิดหนึ่งที่ออกแบบมาให้มีประสิทธิภาพสูงกว่ามอเตอร์กระแสบิ๊ก ซึ่งต่างจากการมอเตอร์กระแสตรงแบบมีแปรงถ่าน หรือ Brushed DC Motor ที่ใช้แปรงถ่านในการสับขั้วแม่เหล็ก ทำให้มอเตอร์ BLDC มีความทนทาน และประสิทธิภาพสูงกว่ามอเตอร์กระแสบิ๊กในเชิงของการทำงานของแปรง

2. ส่วนประกอบของ Brushless DC Motor

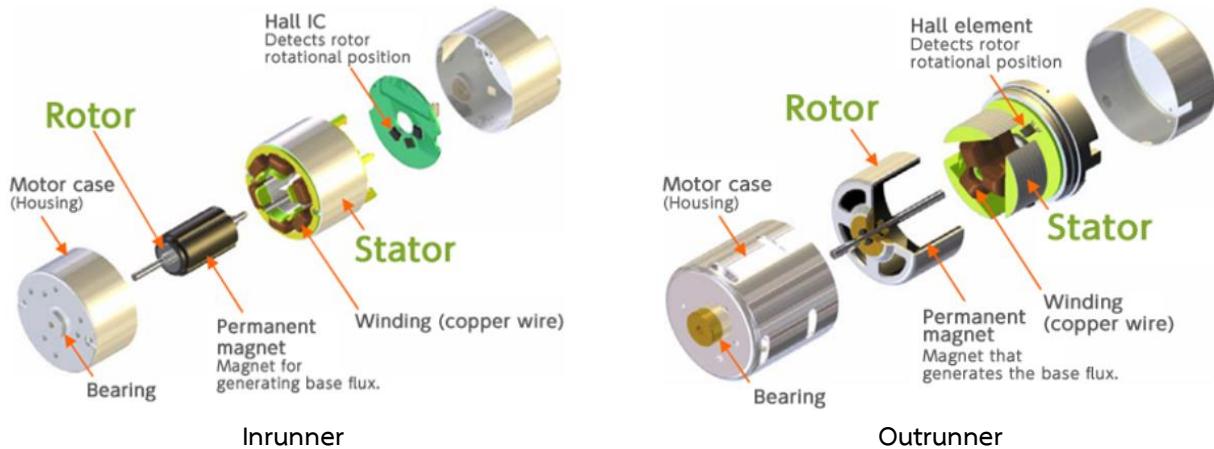
เนื่องจากมอเตอร์ไร้แปรงถ่านมีคุณสมบัติเหมือนกับมอเตอร์ทั่วไป คือ การแปลงพลังงานไฟฟ้าให้กลายเป็นพลังงานกล ส่วนประกอบโดยรวมจึงมีความคล้ายคลึงกับมอเตอร์ทั่วไป แต่มีการเพิ่มเติมส่วนประกอบที่สำคัญต่อ มอเตอร์ประเภทนี้ โดยมีชิ้นส่วน และหน้าที่ทั้งหมดมีดังตารางนี้

ชื่อ	คำอธิบาย	หน้าที่
โรเตอร์ (Rotor)	ส่วนที่หมุนของมอเตอร์	แสดงเอาต์พุตจากการหมุน
สเตเตอร์ (Stator)	ส่วนที่ไม่หมุนและมีชุดลวดทองแดงพันอยู่	พันชุดลวด และยึดning กับเคส
ลูกปืน (Bearing)	ชิ้นส่วนลดแรงเสียดทานของเพลา	รองรับโรเตอร์ และลดแรงเสียดทาน
เส้นชุดลวดทองแดง (Winding)	ชุดลวดทำจากทองแดง มีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้า	สร้างสนามแม่เหล็กเมื่อกระแสไฟฟ้าผ่าน
เคสมอเตอร์ (Case Motor)	กรอบโครงสร้างของมอเตอร์	ปกป้องอุปกรณ์ภายใน
แม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet)	แม่เหล็กที่สามารถสร้างสนามแม่เหล็กด้วยตัวเอง	สร้างสนามแม่เหล็กเพื่อผลักและดึงโรเตอร์
ฮอลล์เซ็นเซอร์ (Hall Sensor)	เซ็นเซอร์วัดความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก	บอกตำแหน่งโรเตอร์ เพื่อจ่ายเฟส

ตารางที่ 1 แสดงส่วนประกอบ และหน้าที่ของ Brushless DC Motor

3. ชนิดของ Brushless DC Motor

Brushless DC Motor มีอยู่ 2 ชนิด ได้แก่ Inrunner และ Outrunner โดยส่วนใหญ่ Outrunner จะเป็นที่นิยมมากกว่า เนื่องจากมีแรงบิดสูงกว่า โดยทั้งสองมีส่วนประกอบที่แตกต่างกันดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 เปรียบเทียบ Inrunner และ Outrunner

ที่มา: <https://www.nidec.com/en/technology/capability/brushless/>

การออกแบบมอเตอร์ BLDC ขาด漉วจะติดตั้งกับสเตเตเตอร์ตลอด เนื่องจากชิ้นที่เกิดการหมุนจะต้องเป็นแม่เหล็กถาวร ที่จะถูกสนานแม่เหล็กจากขด漉ดผลัก และดึงอย่างต่อเนื่อง

มอเตอร์ BLDC ทั้งสองชนิดจะมีตำแหน่งโรเตอร์ที่แตกต่างกัน เนื่องจาก Inrunner จะใช้แกนเพลาหมุนที่อยู่ภายใน สเตเตเตอร์ เพื่อส่งแรงเร้าต์พุตด้วยความเร็วสูงมากกว่า Outrunner แต่มอเตอร์ BLDC ชนิด Outrunner จะมีโรเตอร์อยู่ร่องนอก หรือล้อมรอบสเตเตเตอร์เพื่อใช้ในส่งแรงแทนโดยทั้งสองชนิดมีคุณสมบัติที่ว้าไปดังตารางที่ 2

คุณสมบัติ	Inrunner	Outrunner
ตำแหน่งของโรเตอร์	โรเตอร์อยู่ภายในสเตเตเตอร์	โรเตอร์อยู่ร่องนอกของสเตเตเตอร์
แรงบิด	แรงบิดต่ำ	แรงบิดสูง
ความเร็ว	ความเร็วสูง	ความเร็วต่ำถึงปานกลาง
การใช้งาน	รถบังคับ, เรือบังคับ, โดรนความเร็วสูง	เครื่องบินบังคับ, โดรน, จักรยานไฟฟ้า
ขนาด	ขนาดเล็ก	ขนาดใหญ่กว่า
น้ำหนัก	กะทัดรัด	หนักกว่า
การระบายความร้อน	ระบายความร้อนได้ไม่ดี	ระบายความร้อนได้ดี
ต้นทุน	ราคาถูกกว่าโดยทั่วไป	ราคากว่าโดยทั่วไป

ตารางที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติทั่วไปของ Inrunner และ Outrunner

4. หลักการทำงานของ Brushless DC Motor

หลักการทำงานของมอเตอร์ BLDC คือ การสร้างสนามแม่เหล็กจากการควบคุมกระแสในขดลวดของสเตเตเตอร์ ผ่านการสลับเฟส ซึ่งควบคุมโดย ESC ที่ประมวลผลตำแหน่งโรเตอร์ ทำให้มอเตอร์สามารถหมุนได้อย่างต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพสูง โดยมีขั้นตอน 4 ขั้นตอนดังนี้

4.1 การสร้างสนามแม่เหล็กในสเตเตเตอร์

- สเตเตเตอร์ของมอเตอร์ BLDC มีขดลวดหลายชุดโดยทั่วไปใช้ 3 เฟส (U V และ W) ห่างกัน 120 องศา ซึ่งจะถูกจ่ายกระแสไฟฟ้าในลำดับที่สลับกันเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กหมุน
- สนามแม่เหล็กในสเตเตเตอร์จะเป็นตัวดึงดูดและผลักดันโรเตอร์ที่มีแม่เหล็กการให้หมุนตามสนามแม่เหล็ก

4.2 การสลับเฟส

- การทำให้มอเตอร์หมุนต่อเนื่อง จะเป็นต้องมีการสลับกระแสที่จ่ายให้ขดลวดในสเตเตเตอร์เพื่อเปลี่ยนทิศทางสนามแม่เหล็ก
- การสลับเฟสจะถูกควบคุมโดย Electronic Speed Controller (ESC) ซึ่งจะทำหน้าที่ส่งกระแสไปยังขดลวดต่าง ๆ ในลำดับที่ถูกต้อง

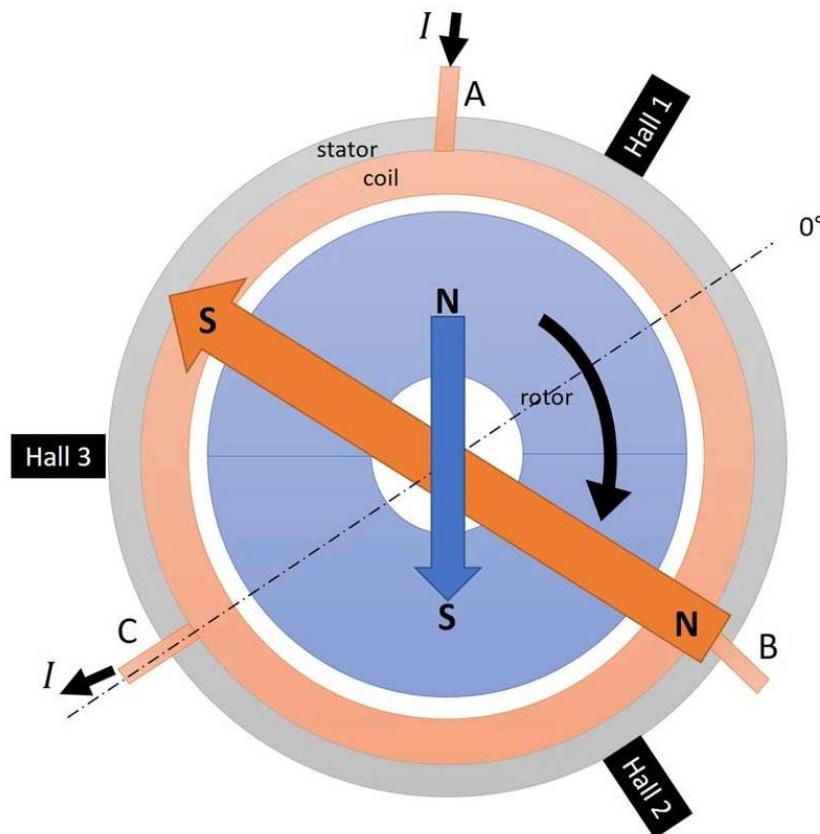
4.3 การตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์

- การสลับเฟสต้องอาศัยข้อมูลตำแหน่งของโรเตอร์ที่มีแม่เหล็กการ
- ตำแหน่งของโรเตอร์สามารถตรวจจับได้ 2 แบบ
 - การวัดสนามแม่เหล็ก หรือ Hall Sensor (Sensor-based Control)
 - การคำนวณจากแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับ หรือ Back EMF (Sensorless Control)

4.4 การควบคุมความเร็วและแรงบิดด้วย ESC

- ความเร็วของมอเตอร์สามารถควบคุมได้โดยการปรับแรงดัน หรือใช้การปรับความกว้างพัลส์ (PWM) ผ่าน ESC เพื่อควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้ขดลวด
- แรงบิดขึ้นอยู่กับกระแสที่จ่ายไปยังขดลวดมากน้อยตามความต้องการของเครื่องใช้งาน
- ESC จะประมวลผลข้อมูลตำแหน่งของโรเตอร์เพื่อส่งกระแสในลำดับที่เหมาะสมตลอดเวลา

จากหลักการทำงานที่ได้อธิบายไปจะเป็นการอธิบายหลักการทำงานเชิงกล ซึ่งในส่วนของเชิงไฟฟ้าการให้ผลของกระแสไฟฟ้าในมอเตอร์ BLDC มีความซับซ้อน เนื่องจากมีเทคนิคการพันขดลวด (Winding Technique) ที่เรียกว่า DLRK Winding หรือถ้ามองการเชื่อมต่อแบบภาพรวมก็จะเป็นการเชื่อมต่อแบบ Delta Connection ซึ่งส่งผลให้เกิดการให้ผลของทิศทางกระแสไฟฟ้าที่เข้า-ออกได้ 3 ทาง หรือสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้ 3 เฟส ได้แก่ U V และ W และทิศทางการหมุนของโรเตอร์ และสเตเตอร์ดังรูปที่ 3



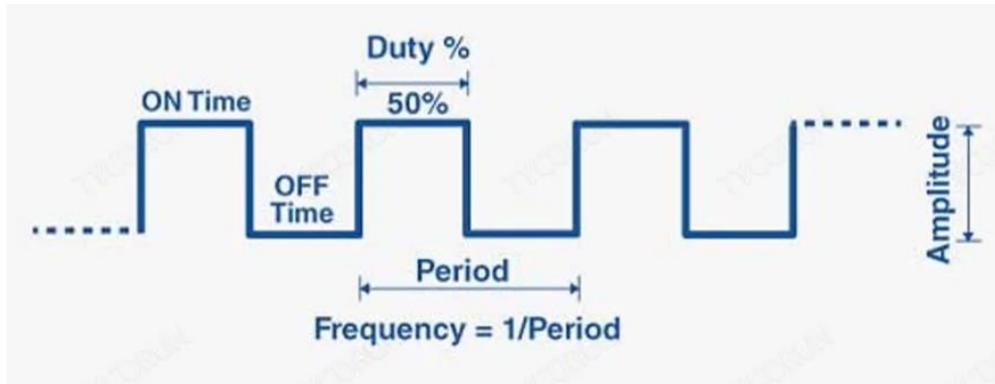
รูปที่ 3 หน้าตัดของมอเตอร์ BLDC ชนิด Outrunner และทิศทางการให้ผลของกระแสไฟฟ้าที่ส่งผลต่อทิศทางการหมุน

ที่มา: <https://www.portescap.com/en/newsroom/whitepapers/2021/10/understanding-the-effect-of-pwm-when-controlling-a-brushless-dc-motor>

จากการแสดงการทิศทางการให้ผลของกระแสไฟฟ้า (I) จากขดลวด U (ในรูปภาพคือ A) ไปขดลวด W (ในรูปภาพคือ C) และมีทิศทางของสนามแม่เหล็กของโรเตอร์ และสเตเตอร์ ซึ่งสนามแม่เหล็กนี้มีผลโดยตรงต่อการหมุนของโรเตอร์ในมอเตอร์ BLDC โดยที่ตำแหน่งของการจ่ายกระแสไฟฟ้า และการทำงานของขดลวดแต่ละเฟสจะถูกกำหนดโดย Commutation Sequence ที่สัมพันธ์กับตำแหน่งของโรเตอร์ ซึ่งการเปลี่ยนแปลง Commutation Sequence นี้จะขึ้นอยู่กับตำแหน่งการตรวจจับของ Hall Sensor ที่ถูกวางห่างกันอยู่ 120 องศา

5. Pulse Width Modulation (PWM)

การมอดูลูตความกว้างของพัลส์ เป็นเทคนิคที่ใช้ควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ส่งไปยังโหลด หรืออุปกรณ์ไฟฟ้า โดยการเปลี่ยนแปลง "ความกว้าง" หรือ "ระยะเวลาเปิด (ON)" ของสัญญาณพัลส์ในช่วงเวลาหนึ่ง (Duty Cycle) โดยสัญญาณ PWM เป็นคลื่นสีเหลืองที่มีการสลับระหว่างสถานะ ON และ OFF ตามความถี่ที่กำหนด



รูปที่ 4 Pulse Width Modulation

ที่มา: <https://www.tycorun.com/blogs/news/what-is-pwm>

5.1 หลักการทำงานของ PWM

มีการควบคุม 2 อย่างหลักๆ ในการใช้งาน PWM ได้แก่ Duty Cycle และความถี่ของ PWM โดย Duty Cycle คือ สัดส่วนของเวลาที่สัญญาณอยู่ในสถานะ ON เทียบกับหนึ่งรอบของสัญญาณ (Cycle) และความถี่ของ PWM คือ คือจำนวนรอบของสัญญาณ PWM ต่อวินาที มีหน่วยเป็นเฮิรตซ์ (Hz)

- **Duty Cycle**

ตัวอย่างการใช้ Duty Cycle 50% หมายถึงสัญญาณ ON 50% และ OFF 50% ในหนึ่งรอบ

- **ความถี่ของ PWM (PWM Frequency)**

ตัวอย่างการใช้ความถี่ของ PWM ให้ความถี่ที่ 70kHz หมายความว่า สัญญาณ PWM มีการเปลี่ยนแปลงรอบสัญญาณ (Cycle) จำนวน 70,000 รอบต่อวินาที หรือในหนึ่งวินาทีมีสัญญาณ PWM สลับสถานะระหว่าง ON และ OFF ถึง 70,000 ครั้ง

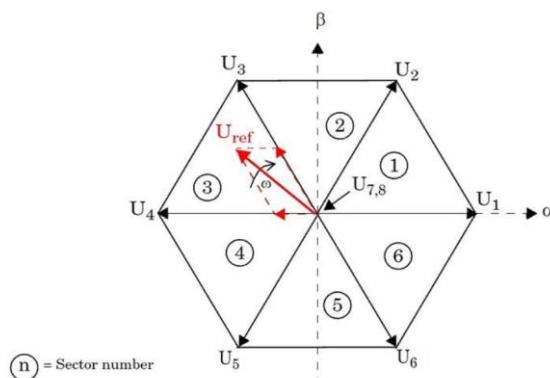
6. Space Vector Modulation (SVM)

เทคนิคการสร้างสัญญาณ PWM (Pulse Width Modulation) ขั้นสูงที่ใช้ในระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์ (Inverter) สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้า อาทิ มอเตอร์ BLDC โดยเฉพาะในระบบที่ต้องการประสิทธิภาพสูง เช่น รถยนต์ไฟฟ้า หรือหุ่นยนต์

6.1 หลักการทำงานของ SVM

SVM ใช้แนวคิดของ Space Vector ซึ่งเป็นตัวแทนของแรงดันที่ต้องการในรูปแบบของเวกเตอร์ในพิกัดเชิงพื้นที่ ($d-q$) หรือ (α, β) โดยแรงดันนี้จะถูกแปลงให้เป็นรูปแบบ PWM เพื่อจ่ายแรงดันให้กับขดลวดของมอเตอร์

- การแปลงแรงดันจากระบบ 3 เฟสเป็นระบบ 2 แกน
 - แรงดันไฟฟ้า 3 เฟส (A, B, C) จะถูกแปลงไปอยู่ในระบบแกนคงที่ 2 แกน (α, β) ซึ่งช่วยให้คำนวณเวกเตอร์แรงดันง่ายขึ้น
 - ระบบแกน (α, β) นี้จะใช้ในการวางแผนตำแหน่งของแรงดันบน Hexagon Vector Space ซึ่งจะอธิบายถึงตำแหน่งในเชิงมุมของแรงดัน
- การกำหนดตำแหน่งแรงดันในหกเหลี่ยม (Hexagon Vector Space)
 - แรงดันในระบบ 2 แกน (α, β) จะถูกแสดงเป็นเวกเตอร์ในหกเหลี่ยมเชิงพื้นที่ โดยมี Active Voltage Vectors 6 ทิศทางหลักที่ห่างกัน 60 องศา และ Zero Voltage Vectors หรือจุดศูนย์กลางของหกเหลี่ยม
 - ตำแหน่งของเวกเตอร์แรงดันที่ได้จะถูกคำนวณให้ตรงกับแรงดันเป้าหมายที่ต้องการสร้างโดยปรับทิศทางของแรงดันในหกเหลี่ยมนี้ให้ตรงกับการหมุนของสนามแม่เหล็กในมอเตอร์

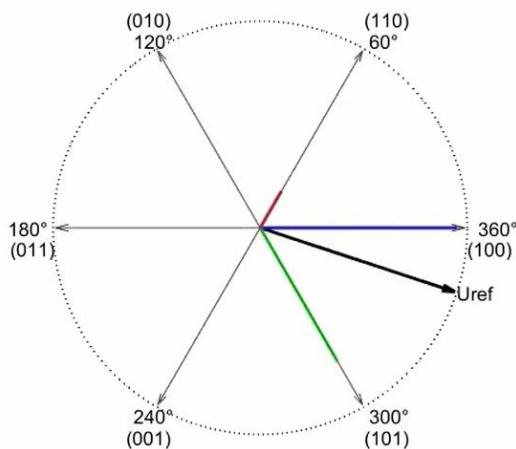


รูปที่ 5 เวกเตอร์รูปหกเหลี่ยม (Hexagon) ในอาณาบริเวณเวกเตอร์พื้นฐาน U_1-U_8

ที่มา: <https://www.mathworks.com/discovery/space-vector-modulation.html>

- การสร้างแรงดัน PWM ด้วยการสลับเวกเตอร์
 - ระบบ SVM จะใช้ PWM (Pulse Width Modulation) เพื่อควบคุมการเปิดและปิดของสวิตช์ในอินเวอร์เตอร์ตามตำแหน่งของเวกเตอร์ในหกเหลี่ยม ซึ่งจะช่วยสร้างแรงดันไฟฟ้าให้มีค่าใกล้เคียงกับค่าแรงดัน Sinusoidal ที่ต้องการตำแหน่งของเวกเตอร์แรงดันที่ได้จะถูกคำนวณให้ตรงกับแรงดันเป้าหมายที่ต้องการ

- SVM จะเลือกใช้การสมมติฐานระหว่าง Active Voltage Vectors และ Zero Voltage Vectors ในระยะเวลาที่เหมาะสม เพื่อให้ค่าเฉลี่ยแรงดันในช่วงเวลาหนึ่ง ๆ ใกล้เคียงกับแรงดันตามคลื่น Sinusoidal มากที่สุด
- การหมุนเวกเตอร์แรงดัน
 - เวกเตอร์แรงดันจะหมุนไปตามตำแหน่งของมอเตอร์ โดยอิงตามค่าแรงดันที่ต้องการ ซึ่งการหมุนนี้ช่วยให้เกิดคลื่นแรงดันที่ราบเรียบต่อเนื่อง ซึ่งส่งผลให้แรงบิดที่เกิดขึ้นในมอเตอร์มีความเสถียรมากขึ้น และแรงบิดแบบคงที่ (Constant Torque)



รูปที่ 6 เวกเตอร์พื้นที่อ้างอิงที่หมุน

ที่มา: <https://www.mathworks.com/discovery/space-vector-modulation.html>

- การเพิ่มประสิทธิภาพแรงดัน (DC Bus Voltage Utilization)
 - SVM ช่วยให้การใช้แรงดันจาก DC Bus Voltage สูงขึ้น (สูงถึง 15% มากกว่าการใช้ PWM แบบทวิภาค) ทำให้สามารถสร้างแรงดันได้มากขึ้นโดยไม่ต้องเพิ่มแรงดันไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้มอเตอร์มีกำลังเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับวิธีอื่น ๆ

7. เปรียบเทียบ PWM และ SVM ในการประยุกต์ใช้มอเตอร์ BLDC

หัวข้อ	PWM	SVM
หลักการทำงาน	ใช้สัญญาณ PWM เพื่อปรับ Duty Cycle ของแรงดันในแต่ละเฟสของ BLDC	ใช้เวกเตอร์แรงดันในระบบพิกัดเชิงพื้นที่ (Space Vector) เพื่อจ่ายแรงดัน
รูปแบบคลื่น (Waveform)	แรงดัน PWM เป็นคลื่นสี่เหลี่ยมคงที่หรือ Trapezoidal	แรงดันไคล์เดียงกับคลื่นไซโนไซด์ (Sinusoidal)
แรงบิด	อาจเกิด Torque Ripple หรือแรงบิดที่ไม่ราบรื่นในบางช่วง	ลด Torque Ripple ทำให้แรงบิดราบรื่นและคงที่
ประสิทธิภาพ มอเตอร์	ประสิทธิภาพปานกลาง เหมาะกับงานทั่วไป	ประสิทธิภาพสูงกว่า ลดการสูญเสียพลังงาน และแรงบิดสม่ำเสมอ
ความถี่การ สับเปลี่ยน	ความถี่ PWM อาจส่งผลต่อประสิทธิภาพ โดยเฉพาะที่ความเร็วต่ำ	สับเปลี่ยนได้ราบรื่นกว่าในช่วงความเร็วต่ำ
ต้นทุนและการ พัฒนา	ต้นทุนต่ำกว่า ง่ายต่อการพัฒนา	ต้นทุนสูงกว่า ต้องใช้ฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ที่ซับซ้อน
การประยุกต์ใช้งาน	เหมาะสมสำหรับมอเตอร์ BLDC ที่ใช้ Trapezoidal Waveform อาทิ พัดลมและปั๊มทั่วไป	เหมาะสมกับงาน BLDC ที่ต้องการความราบรื่นและประสิทธิภาพสูง อาทิ รถยนต์ไฟฟ้า

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบ PWM และ SVM ในการประยุกต์ใช้มอเตอร์ BLDC

จากตารางเปรียบเทียบระหว่าง PWM และ SVM ในการควบคุมมอเตอร์ BLDC สามารถสรุปได้ว่า SVM มีข้อได้เปรียบในด้านคุณภาพของแรงบิดและความราบรื่นของการหมุน ทำให้แรงบิดมีความเสถียรมากขึ้นและเหมาะสมสำหรับงานที่ต้องการความแม่นยำและประสิทธิภาพสูง

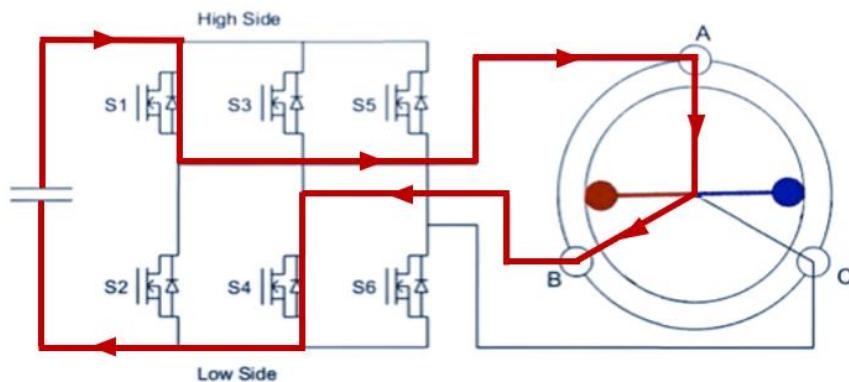
ในขณะที่ PWM มีความซับซ้อนน้อยกว่า ใช้ต้นทุนต่ำกว่า และง่ายต่อการพัฒนา แต่มีข้อเสียในเรื่องแรงบิดที่อาจไม่ราบรื่น (Torque Ripple) จึงเหมาะสมสำหรับงานทั่วไปที่ไม่ต้องการความแม่นยำสูง อาทิ พัดลม ปั๊ม และอุปกรณ์ทั่วไปที่เน้นความคุ้มค่าในการใช้งาน

8. หลักการทำงานของการควบคุม Brushless DC Motor (BLDC Motor Controlled Concepts)

การควบคุมการทำงานของ BLDC มอเตอร์ต้องใช้ ESC เพื่อสลับเฟสของกระแสในขดลวดของสเตเตอร์อย่างถูกต้อง และแม่นยำ ทำให้สามารถแม่เหล็กหมุนไปตามตำแหน่งของโรเตอร์อย่างต่อเนื่อง และรูปแบบการควบคุมมอเตอร์ BLDC ที่ใช้หลักมี 2 รูปแบบ ได้แก่ Six-Step Commutation และ Field-Oriented Control (FOC) โดยมีรายละเอียดดังนี้

8.1 Six-Step Commutation

Six-Step Commutation เป็นการควบคุมการสลับลำดับการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ชุดลวดของมอเตอร์ BLDC โดยจะมีการจ่ายที่ลิสต์ 2 เฟสพร้อมกัน ในขณะที่อีกเฟสจะปล่อยให้ลอยตัว (Floating) ซึ่งช่วยให้เกิดสนามแม่เหล็กในสเตเตอร์ที่ดึง หรือผลักกับสนามแม่เหล็กของโรเตอร์ ทำให้มอเตอร์หมุนไปตามทิศทางที่ต้องการ กระบวนการนี้จะทำซ้ำ ต่อเนื่องตามลำดับการควบคุม 6 ขั้นตอนตลอดเวลาที่มอเตอร์ทำงาน ซึ่งเส้นทางการไหลของกระแสไฟฟ้าจะผ่าน Three-Phase Inverter ไปยังมอเตอร์ BLDC ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 ภาพรวมของ Three-Phase Inverter (ทางซ้าย) ที่เชื่อมต่อกับ BLDC (ทางขวา)

ที่มา: <https://youtu.be/gNpoTPzEkco?si=eZ-MEhZjOVaAxTOb> (MATLAB Youtube Channel)

8.1.1 หลักการทำงานของ Six-Step Commutation

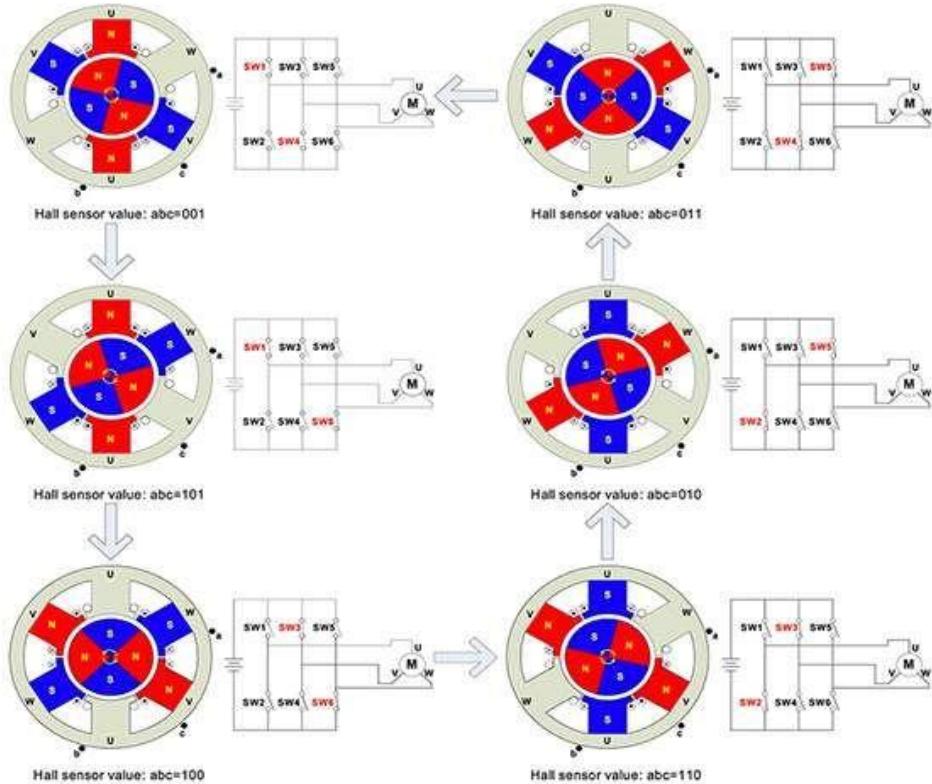
แบ่งออกเป็น 2 ขั้นหลักๆ ได้แก่ ลำดับการควบคุม และการสลับเปลี่ยนตำแหน่งการเปิด-ปิด จากนั้นจะเป็น การทำซ้ำไปเรื่อยๆ ซึ่งจะเน้นไปที่การจ่ายไฟอย่างถูกต้อง และต่อเนื่อง

- **ลำดับการควบคุม**

การควบคุมด้วย Six-Step Commutation จะใช้สัญญาณจาก Hall Sensor ที่ติดตั้งในมอเตอร์ BLDC เพื่อระบุตำแหน่งของโรเตอร์ในทุก ๆ 60 องศาไฟฟ้า เมื่อทราบตำแหน่งแล้ว ระบบจะสลับการเปิด-ปิดของ MOSFET หรือ Switch (SW) ตามลำดับที่กำหนดโดยไม่สามารถข้ามลำดับได้ เนื่องจากการข้ามลำดับจะทำให้มอเตอร์กระตุกหรือไม่หมุนตามที่ควร ส่งผลให้มอเตอร์สูญเสียการควบคุมและลดประสิทธิภาพในการทำงาน

- **การสลับเปลี่ยนตำแหน่งการเปิด-ปิด MOSFET ทั้งหมด 6 ขั้นตอน**

ในหนึ่งรอบของการหมุนสนามแม่เหล็กจะมีการเปิด-ปิด MOSFET ทั้งหมด 6 ครั้ง โดยแต่ละครั้งจะสลับลำดับการจ่ายกระแสไฟฟ้าตามตำแหน่งของโรเตอร์ที่ตรวจจับได้จาก Hall Sensor ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 Commutation Sequences ด้วยการควบคุมรูปแบบ Six-Step Commutation ของมอเตอร์ BLDC

ที่มา: <https://www.pinterest.com/pin/826621706577954524/>

โดยตัวอย่างจะเริ่มจาก $abc = 001$ (รูปซ้ายบนสุด) และแสดงการเปิด-ปิด Switch (SW) ดังต่อไปนี้

1. Hall Sensor ตรวจจับตำแหน่งแรก $abc = 001$ เปิด SW1 และ SW4 ให้กระแสไฟลจาก U ไปยัง W
2. Hall Sensor ตรวจจับตำแหน่งถัดไป เปิด SW2 และ SW4 ให้กระแสไฟลจาก V ไปยัง W
3. ทำการสับเปลี่ยนการจ่ายไฟอย่างต่อเนื่องไปเรื่อยๆ ตามลำดับ (ลูกศร)

ลำดับการเปิด-ปิดของ MOSFET จะวนซ้ำตามลำดับนี้ไปเรื่อยๆ โดยการควบคุมตำแหน่งนี้มีความสำคัญต่อการรักษาความสม่ำเสมอในการหมุน หากสับลำดับผิดหรือข้ามลำดับจะทำให้เกิดการกระตุกหรือการหยุดชะงักในการหมุน ซึ่งจะมีตารางความสัมพันธ์ของตำแหน่งโรเตอร์ และการจ่ายไฟดังรูปที่ 9

Rotor Position Sensing

Output State

Hall A	Hall B	Hall C	U	V	W
0	0	0		Invalid	
0	0	1	+	Z	-
0	1	0	Z	-	+
0	1	1	+	-	Z
1	0	0	-	+	Z
1	0	1	Z	+	-
1	1	0	-	Z	+
1	1	1		Invalid	

รูปที่ 9 Rotor Position Condition โดย Hall Sensor และ Output State ของรูปแบบการควบคุม Six-Step Commutation

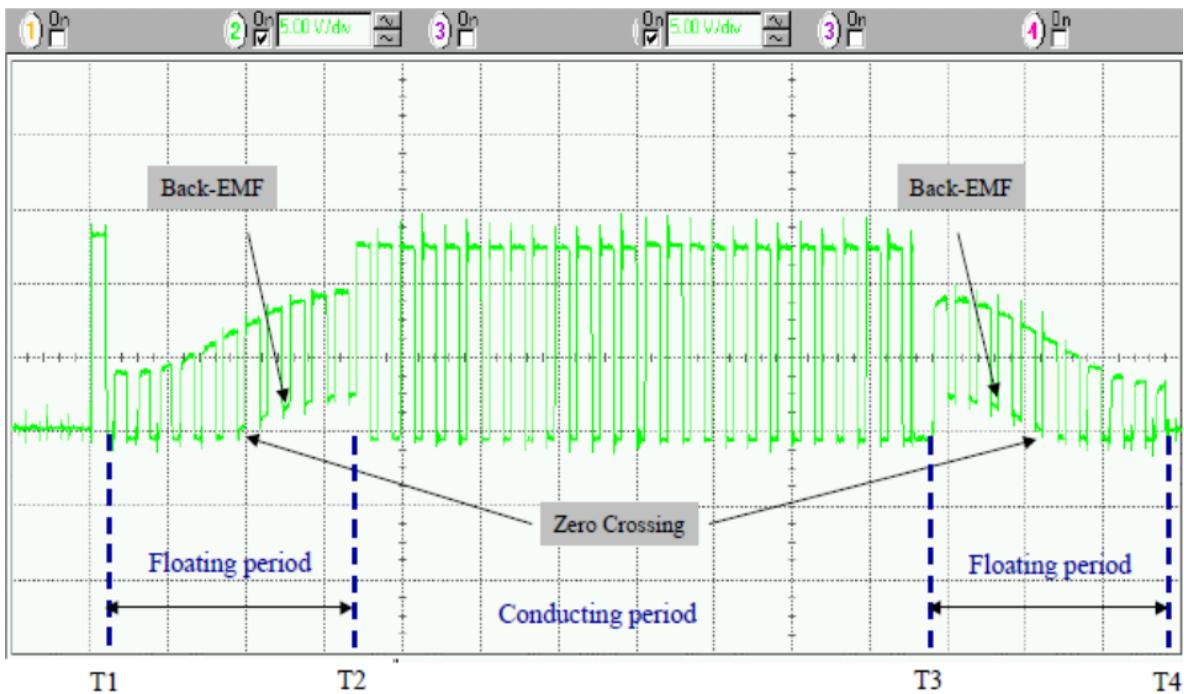
ที่มา: <https://youtu.be/xIORHY8li90?si=1FqpyJle1EF3LZl1> (Texas Instruments Youtube Channel)

8.1.2 ความสัมพันธ์ของ Six-Step Commutation และ PWM ในการมอเตอร์ BLDC

การควบคุมมอเตอร์ BLDC จำเป็นต้องใช้การกำหนดทิศทางการหมุน และการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ ซึ่ง Six-Step Commutation และ PWM เป็นสองเทคนิคที่สำคัญที่ต้องนำมาใช้ร่วมกัน ในการควบคุมทิศทางการหมุนของมอเตอร์ Six-Step Commutation จะเป็นตัวกำหนดลำดับการจ่ายกระแสไปยังชุดลวดในแต่ละเฟส เพื่อให้มอเตอร์หมุนไปในทิศทางที่ต้องการ โดยการสลับระหว่างเฟสจะทำให้มอเตอร์ หมุนตามทิศทางที่ต้องการ

ในขณะเดียวกัน PWM จะถูกใช้ในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์โดยการปรับ Duty Cycle ของสัญญาณ PWM ซึ่งจะกำหนดระยะเวลา On Time ในแต่ละรอบของสัญญาณ PWM โดยยิ่ง Duty Cycle สูงขึ้น (หรือ On Time นานขึ้น) ก็จะทำให้มอเตอร์ได้รับแรงดันมากขึ้น ส่งผลให้ความเร็วของมอเตอร์เพิ่มขึ้น ในทางกลับกัน ถ้า Duty Cycle ต่ำ ความเร็วของมอเตอร์จะลดลง

จากการทำงานร่วมกันของทั้งสองเทคนิคการควบคุมมอเตอร์ BLDC รวมเข้ากับรูปคลื่น Back EMF ทำให้ได้มาซึ่งรูปที่ 10



รูปที่ 10 Back EMF Waveform Anatomy

ที่มา: <https://www.ijert.org/research/optimized-design-of-the-bldc-motor-for-higher-efficiency-IJERTV2IS50171.pdf>

รูปคลื่นของ Back EMF ในมอเตอร์ BLDC เป็นผลมาจากการออกแบบแม่เหล็กถาวร และการพัฒนาด้วยของมอเตอร์ ซึ่งโดยปกติแล้วสามารถเป็นได้ทั้ง Trapezoidal และ Sinusoidal ขึ้นกับลักษณะการพัฒนาด้วยการใช้ Six-Step และ PWM ที่เหมาะสมกับการใช้ร่วมกับมอเตอร์ BLDC ที่ออกแบบมาดังกล่าว ทำให้เกิดเป็นรูปคลื่น Back EMF ข้างต้น

จากการอธิบายข้างต้น สามารถสรุปสั้นๆได้ 4 ข้อดังนี้

- รูปคลื่น Back EMF ดังรูปมีลักษณะเป็นรูปคลื่น Trapezoidal แต่ไม่ได้เกิดจากการใช้การควบคุมแบบ Six-Step Commutation แต่เกิดจากการออกแบบแม่เหล็กถาวร และการพัฒนาดัดแปลงของมอเตอร์
- Six-Step Commutation มีการจ่ายกระแสเป็นช่วงๆ ซึ่งสอดคล้องกับการออกแบบมอเตอร์ที่ให้รูปคลื่นเป็น Trapezoidal ที่มีช่วงคงที่ของแต่ละเฟส จึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้ควบคุมมอเตอร์ BLDC ที่ให้รูปคลื่น Trapezoidal
- PWM ควบคุมแรงดันเฉลี่ยที่จ่ายให้กับขดลวดมอเตอร์ BLDC ซึ่งทำให้รูปคลื่นแรงดันจ่ายไปยังเฟสมีลักษณะเป็น Square Wave (ภายใน Back EMF Waveform)
- การควบคุม Duty Cycle ใน PWM ยิ่งเปิด On Time มา ก จะจ่ายแรงดันมากขึ้น ทำให้มอเตอร์หมุนเร็วขึ้น ในทางกลับกันยิ่งเปิด On Time น้อย จะจ่ายแรงดันน้อยลง ทำให้มอเตอร์หมุนช้าลง

ความสัมพันธ์ระหว่าง PWM และ Frequency Output (Back EMF และ Hall Sensor) ได้ข้อสรุปตามนี้

1. PWM และ Back EMF

1. เมื่อ Duty Cycle สูงขึ้น แรงดันเฉลี่ยจะเพิ่มขึ้น จากนั้นกระแสเพิ่มขึ้น ความเร็วเกิดเพิ่มขึ้น Back EMF จึงเพิ่มตามไปด้วย
 - 1.1.1. ในการนี้ที่สูงเกินไปจะทำให้ Back EMF เทียบเท่าแรงดันแหล่งจ่าย ส่งผลให้มอเตอร์ไม่สามารถเพิ่มความเร็วได้อีกต่อไป แม้ว่าจะเพิ่ม PWM Duty Cycle
 - 1.1.2. ในการนี้ที่ต่ำเกินไป มอเตอร์อาจไม่เกิดการหมุนจากแรงบิดที่ไม่มากพอตอนเริ่มต้น ซึ่งทำให้แรงบิดมอเตอร์ไม่สม่ำเสมอ อาจเกิดการสั่นสะเทือน และเสียงรบกวนได้

2. PWM และ Hall Sensor

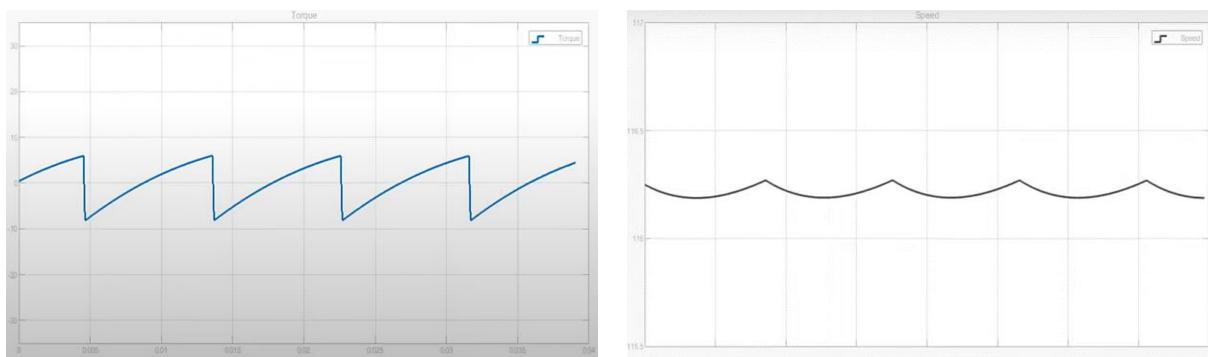
- 2.1. เมื่อจ่าย PWM สูงขึ้นจะทำให้ความเร็วของโรเตอร์สูง ซึ่งจะทำให้ความถี่ในการอ่าน Hall Sensor Feedback สูงขึ้นตามไปด้วย นั่นหมายความว่า การจ่าย PWM ที่ดีควรจะจ่ายในช่วงที่เหมาะสม
 - 2.1.1. ในการนี้จ่ายสูงไป อาจทำให้อ่าน Hall Sensor ไม่ทัน (Microcontroller มี Clock Speed ที่ต่ำ)
 - 2.1.2. ในการนี้ที่จ่ายต่ำเกินไปอาจทำให้หยุดหมุนได้ เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยในขดลวดไม่เสถียร ทำให้ Hall Sensor จับตำแหน่งผิดพลาด

8.1.3 ข้อดี-ข้อเสียของ Six-Step Commutation

หัวข้อ	ข้อดี	ข้อเสีย
การควบคุม	การควบคุมง่าย ไม่ซับซ้อน	การควบคุมแรงบิดไม่คงที่ เนื่องจากมีการกระเพื่อมของแรงบิด (Torque Ripple)
การคำนวณที่ใช้	ไม่ต้องการการคำนวณที่ซับซ้อน เพียงแค่ใช้สัญญาณจาก Hall Sensor	ขาดการควบคุมที่ละเอียดเมื่อเปรียบเทียบกับ FOC (Field-Oriented Control)
ประสิทธิภาพที่ความเร็วสูง	ประสิทธิภาพดีที่ความเร็วสูง ไม่มีปัญหาเกี่ยวกับการหมุนเร็ว	การควบคุมที่ความเร็วต่ำจะมีแรงบิดไม่เสถียรและการกระตุก
การหมุนที่ความเร็วต่ำ	สามารถใช้งานได้ที่ความเร็วสูงโดยไม่มีปัญหา แต่ไม่ราบรื่นเท่า FOC	การหมุนที่ความเร็วต่ำทำให้มอเตอร์กระตุกและไม่ราบรื่น (Unsteady Speed)
ความเสถียรของแรงบิด	สามารถใช้งานได้ดีในสภาพแวดล้อมที่ไม่ต้องการแรงบิดที่เสถียร	แรงบิดมีการกระเพื่อม ทำให้เกิดสั่นสะเทือนและเสียงรบกวน (Torque Ripple)
ความยืดหยุ่นในการใช้งาน	เหมาะสมสำหรับการใช้งานที่ไม่ต้องการการควบคุมแรงบิดที่ราบรื่น	ไม่เหมาะสมสำหรับการใช้งานที่ต้องการการควบคุมแรงบิดที่มีความแม่นยำสูง
Modulation	ใช้ได้แค่ PWM เท่านั้น	ไม่เหมาะสมกับการใช้ SVM เนื่องจาก SVM จำเป็นต้องมีรูปแบบคลื่นแบบ Sinusoidal จึงจะเกิดประสิทธิภาพ

ตารางที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียของ Six-Step Commutation

โดยปกติปัญหาที่สำคัญของการทำ Six-Step Commutation คือ การกระเพื่อมของแรงบิด (Torque Ripple) และความเร็วที่ไม่สม่ำเสมอ (Unsteady Speed) อันเกิดจากการที่มอเตอร์ BLDC มีการออกแบบให้เป็นรูปคลื่น Trapezoidal และจากการจ่ายกระแสแบบเป็นชั้นๆของ Six-Step ซึ่งไม่มีความต่อเนื่องในรูปแบบที่สามารถควบคุมแรงบิดได้อย่างราบรื่น จึงทำให้สามารถแม่เหล็กไม่สมดุล และส่งผลให้เกิดการกระตุก การกระเพื่อมของแรงบิด และความเร็วที่ไม่สม่ำเสมอ ดังรูปที่ 11 และ 12 ตามลำดับ



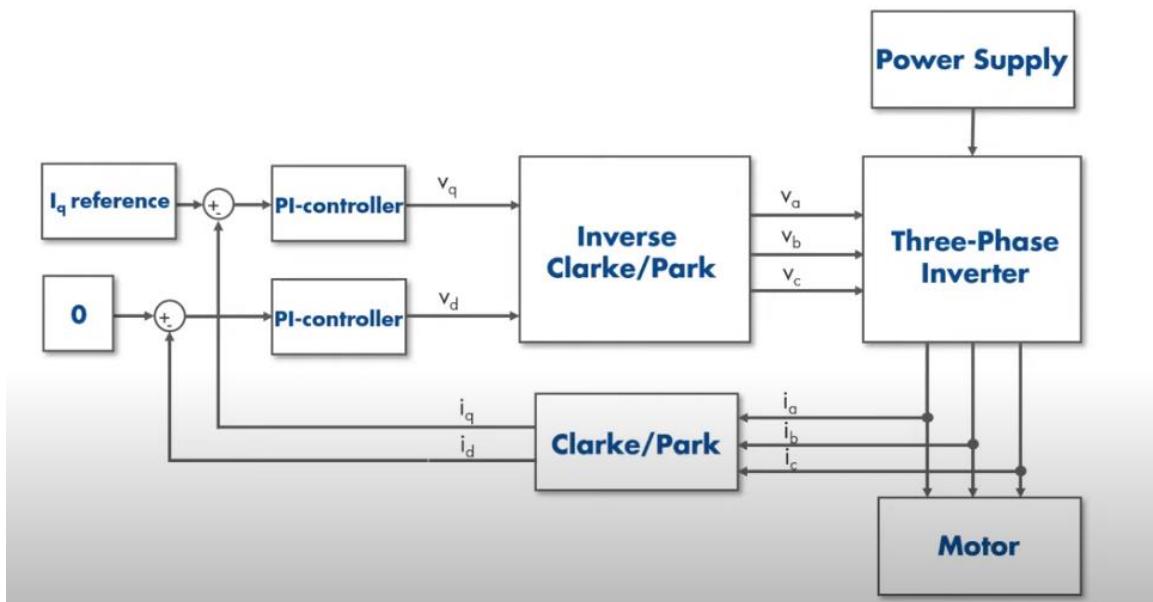
รูปที่ 11-12 Torque Ripple และ Unsteady Speed ที่เกิดจาก Six-Step Commutation

ที่มา: https://youtu.be/YPD1_rcXBIE?si=OEANZQos9tasobnV (MATLAB Youtube)

8.2 Field-Oriented Control (FOC)

การควบคุมมอเตอร์ BLDC อีกรูปแบบหนึ่งที่มีความซับซ้อนมากกว่า Six-Step Commutation โดยเน้นการควบคุมกระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าในลักษณะที่สอดคล้องกับสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น เพื่อให้เกิดการควบคุมแรงบิดและความเร็วที่แม่นยำและมีประสิทธิภาพสูง

8.2.1 หลักการทำงานของ Field-Oriented Control (FOC)



รูปที่ 13 แผนผังหลักการทำงานของ FOC

ที่มา: https://youtu.be/YPD1_rcXBI?si=VNXSGKsST_Z5skwj (MATLAB Youtube)

FOC จะควบคุมกระแสในมอเตอร์ให้ตรงกับตำแหน่งของสนามแม่เหล็กของโรเตอร์ โดยใช้การแปลงค่ากระแสจากระบบแกนหมุนจริง (U-V-W หรือเฟส 3 เฟส) ให้เป็นระบบแกน D-Q (Direct-Quadrature) ซึ่งสอดคล้องกับทิศทางสนามแม่เหล็ก ทำให้สามารถแยกการควบคุมแรงบิดและพลัง磁แม่เหล็กออกจากกันได้ ซึ่งมีขั้นตอนหลัก ๆ ตามแผนผังข้างต้น

- การแปลงค่าแกนด้วย Clarke and Park Transformation

กระแสในเฟส U, V, W จะถูกแปลงให้เป็นระบบแกนสองแกน (Alpha-Beta) หรือแกนแบบสถิต (Stationary Reference Frame) จากนั้นจึงแปลงเป็นระบบแกนหมุน (D-Q) หรือ Rotating Reference Frame โดยใช้การแปลงทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า Park Transformation

$$i_{\alpha} = \frac{2}{3} \cdot i_a - \frac{1}{3}(i_b - i_c)$$

$$i_{\beta} = \frac{2}{\sqrt{3}}(i_b - i_c)$$

$$i_o = \frac{2}{3}(i_a + i_b + i_c)$$

Clarke Transform

$$i_{sd} = i_{\alpha} \cdot \cos(\theta) + i_{\beta} \cdot \sin(\theta)$$

$$i_{sq} = -i_{\alpha} \cdot \sin(\theta) + i_{\beta} \cdot \cos(\theta)$$

Park Transform

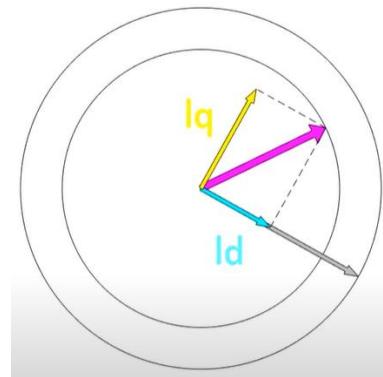
รูปที่ 14 Clarke and Park Transforms ใน Field Orientated Control (FOC)

ที่มา: <https://www.ti.com/lit/an/bpra048/bpra048.pdf> (Texas Instruments)

- การแยกการควบคุมแรงบิดและฟลักซ์ (Torque and Flux Control)

แบ่งออกเป็น 2 แกน ได้แก่ Direct Axis และ Quadrature Axis โดยมีรายละเอียดดังนี้

- แกน D (Direct Axis) ใช้ในการควบคุมฟลักซ์ หรือสนามแม่เหล็กหลักในสเตเตอร์ ซึ่งสอดคล้องกับขดลวดและสนามแม่เหล็กของโรเตอร์ (กำหนดให้ D เท่ากับ 0)
- แกน Q (Quadrature Axis) ใช้ในการควบคุมแรงบิด ดังนั้น FOC สามารถควบคุมแรงบิดได้อย่างแม่นยำโดยปรับกระแสที่จ่ายเข้าในแกน Q (กำหนดให้ Q เป็น Reference Axis)



รูปที่ 15 Direct Axis, Quadrature Axis, และ Stator Field (สีฟ้าคือ D สีเหลืองคือ Q และสีชมพูคือ Stator Field)

ที่มา: https://youtu.be/YPD1_rcXBI?si=VNXSGKsST_Z5skwj (MATLAB Youtube)

- การควบคุมกระแสด้วย PI Controller

กระแสที่แปลงมาในแกน D-Q จะถูกควบคุมผ่าน PI Controller เพื่อรักษาค่ากระแสให้ตรงตามที่ต้องการ จากนั้นจึงแปลงกลับไปเป็นระบบแกนสามเฟส (U-V-W) เพื่อใช้ในการควบคุมมอเตอร์จริง

- การแปลงกลับเป็นระบบสามเฟส (Inverse Clarke and Park Transformations)

เมื่อได้ค่ากระแสที่ต้องการแล้ว ระบบจะทำการแปลงกลับจากแกน D-Q ไปเป็นแกน (α, β) แล้ว กลับมาเป็นแกนสามเฟส (U-V-W) เพื่อจ่ายกระแสไปยังมอเตอร์อย่างถูกต้อง

8.2.2 ข้อดี-ข้อเสียของ Field-Oriented Control (FOC)

หัวข้อ	ข้อดี	ข้อเสีย
การควบคุม	การควบคุมแรงบิดและความเร็วที่แม่นยำและราบรื่น	การคำนวณที่ซับซ้อนและต้องการการควบคุมที่แม่นยำ
การคำนวณที่ใช้	สามารถใช้งานได้ในระบบที่ต้องการประสิทธิภาพสูง ในมอเตอร์สามเฟส	ต้นทุนสูงเนื่องจากต้องใช้ชาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ที่มีความซับซ้อน
ประสิทธิภาพที่ความเร็วสูง	ประสิทธิภาพดีเยี่ยมในช่วงความเร็วสูง เนื่องจาก การควบคุมที่แม่นยำ	ต้องการการคำนวณที่รวดเร็วเพื่อให้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพในความเร็วสูง
การหมุนที่ความเร็วต่ำ	สามารถทำงานได้ดีที่ความเร็วต่ำและแรงบิดมีความเสถียร	ต้องการการควบคุมที่ล้าเอี้ยดในทุกช่วงของการหมุน โดยเฉพาะที่ความเร็วต่ำ
ความเสถียรของแรงบิด	แรงบิดเสถียรและราบรื่น ไม่มีการกระเพื่อมของแรงบิด (Torque Ripple)	ความซับซ้อนในการออกแบบระบบและต้องการการตั้งค่าที่ถูกต้องในระบบควบคุม
ความยืดหยุ่นในการใช้งาน	สามารถปรับการควบคุมให้เหมาะสมกับการใช้งาน หลากหลายประเภท อาทิ มอเตอร์ในรถไฟฟ้า	ต้องใช้ระบบที่มีความแม่นยำและความซับซ้อนในการควบคุม ซึ่งอาจไม่เหมาะสมกับบางการใช้งาน
Modulation	ใช้ SVM หรือ PWM ในการกลั่นสัญญาณได้ทั้งคู่	อาจเหมาะสมกับการกลั่นสัญญาณบางรูปแบบเท่านั้น

ตารางที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียของ Field-Oriented Control (FOC)

จากการสรุปสามารถกล่าวได้ว่า FOC เหมาะสำหรับการใช้งานที่ต้องการความแม่นยำและเสถียรภาพสูง เช่น รถยนต์ไฟฟ้า หุ่นยนต์ หรืออุตสาหกรรมที่ต้องการการควบคุมแรงบิดที่ราบรื่นและใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ แต่ระบบ FOC มีความซับซ้อนและต้นทุนสูงกว่า จึงไม่เหมาะสมกับการใช้งานที่ไม่ต้องการความแม่นยำสูง

8.3 การเปรียบเทียบ Six-Step Commutation กับ Field-Oriented Control (FOC)

หัวข้อ	Six-Step Commutation	Field-Oriented Control (FOC)
การควบคุมแรงบิด	แรงบิดไม่เสถียรเนื่องจากมีการกระเพื่อม (Torque Ripple)	แรงบิดเสถียรและราบรื่น เนื่องจากควบคุมฟลักซ์ และแรงบิดแยกกันได้
ความเสถียรของความเร็ว	ความเร็วอาจไม่สม่ำเสมอ โดยเฉพาะที่ความเร็วต่ำและสูงสุด	ความเร็วสม่ำเสมอและเสถียรในทุกช่วงการหมุน
การคำนวณที่ใช้	การคำนวณไม่ซับซ้อน ใช้แค่สัญญาณจาก Hall Sensors และวงจรเปิด-ปิด	ต้องใช้การคำนวณที่ซับซ้อน เช่น การแปลงพิกัด d-q และการควบคุมแรงบิด
การประหยัดพลังงาน	ประสิทธิภาพพลังงานต่ำในบางกรณีที่มีการกระเพื่อมของแรงบิด	ประสิทธิภาพพลังงานสูง เนื่องจากการควบคุมฟลักซ์และแรงบิดได้อย่างมีประสิทธิภาพ
การควบคุมที่ความเร็วต่ำ	ความเร็วต่ำมีการกระตุกและการสั่นสะเทือน	ควบคุมที่ความเร็วต่ำได้ดี ไม่มีการกระตุกหรือสั่นสะเทือน
ความยืดหยุ่นในการใช้งาน	เหมาะกับการใช้งานที่ไม่ต้องการความแม่นยำสูง	เหมาะสมสำหรับการใช้งานที่ต้องการความแม่นยำสูงและการควบคุมที่ละเอียด
ความซับซ้อนในการออกแบบ	ออกแบบง่ายและมีต้นทุนต่ำ เนื่องจากใช้ Hall Sensors และวงจรจ่าย ๆ	การออกแบบซับซ้อนและต้องใช้ชาร์ดแวร์เพิ่มเติม เช่น เซ็นเซอร์ตำแหน่งโรเตอร์และคอนโทรลเลอร์ที่มีความสามารถ
เสียงและการสั่นสะเทือน	เสียงและการสั่นสะเทือนสูงจากการกระเพื่อมของแรงบิด	เสียงและการสั่นสะเทือนต่ำ เนื่องจากการควบคุมที่ราบรื่น
การใช้งานในระบบที่ต้องการความแม่นยำ	ไม่เหมาะสมสำหรับการใช้งานที่ต้องการความแม่นยำสูง	เหมาะสมสำหรับการใช้งานที่ต้องการความแม่นยำ เช่น รถไฟฟ้า หรือหุ่นยนต์
การควบคุมมอเตอร์สามเฟส	สามารถใช้งานได้กับมอเตอร์สามเฟสแต่ไม่สามารถควบคุมได้อย่างละเอียด	การควบคุมมอเตอร์สามเฟสได้อย่างละเอียดและมีประสิทธิภาพสูง

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบ Six-Step Commutation กับ Field-Oriented Control (FOC)

จากการเปรียบเทียบได้ข้อสรุปว่า FOC ดีกว่า Six-Step Commutation ในหลายด้าน อาทิ การควบคุมแรงบิดที่เสถียร ความเสถียรของความเร็วในทุกช่วงของการหมุน ทั้งความเร็วต่ำและสูง ประสิทธิภาพการใช้พลังงานที่ดีกว่า และสามารถควบคุมมอเตอร์ได้อย่างละเอียด ซึ่งเหมาะสมกับการใช้งานที่ต้องการความแม่นยำสูง เช่น มอเตอร์ในรถไฟฟ้าหรือหุ่นยนต์

อย่างไรก็ตาม Six-Step Commutation ก็ยังคงมีข้อดี คือ มีความง่ายในการออกแบบ และต้นทุนต่ำ แต่จำกัดไม่สามารถให้การควบคุมที่ละเอียด และเสถียรเท่ากับ FOC

8.4 การใช้ Space Vector Modulation (SVM) ใน Six-Step Commutation และ FOC

Six-Step Commutation และ Field-Oriented Control (FOC) มีวิธีการควบคุมที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยเฉพาะในวิธีการจัดการ และเปลี่ยนทิศทางของเวกเตอร์กระแสไฟฟ้า (Current Vector) ซึ่งส่งผลต่อแรงบิด และการหมุนของมอเตอร์ ในส่วนนี้ Space Vector Modulation (SVM) มีบทบาทสำคัญใน FOC แต่ไม่ได้ใช้ใน Six-Step Commutation เนื่องรูปคลื่นแรงดันไม่ตรงตามธรรมชาติของ Six-Step Commutation

8.4.1 Six-Step Commutation การจัดการเวกเตอร์แบบพื้นฐาน

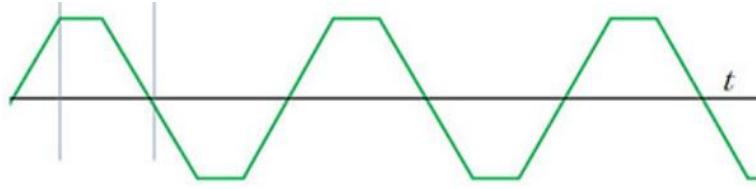
- **วิธีการทำงาน :** ใน Six-Step Control มอเตอร์จะถูกขับเคลื่อนโดยสลับการเปิด-ปิด MOSFET หรือ สวิตช์ต่าง ๆ เพื่อให้เกิดรูปคลื่น Trapezoidal ในแต่ละเฟส โดยระบบจะจัดให้กระแสสวิงไปยังเฟสที่กำหนด โดยใช้ตำแหน่งที่ได้จาก Hall Sensors เพื่อสร้างแรงบิด และทำให้มอเตอร์หมุนไปตามตำแหน่งที่ต้องการ
- **การเปลี่ยนเวกเตอร์กระแสไฟฟ้า :** การเปลี่ยนทิศทางเวกเตอร์กระแสจะเกิดขึ้นแบบคงที่ โดยเปลี่ยนการสลับของเฟสทุก 60 องศาไฟฟ้า ทำให้กระแสในแต่ละเฟสมีลักษณะเป็นบันได (Step) ที่มีแรงบิดไม่ต่อเนื่อง ซึ่งอาจเกิดการกระตุก และแรงบิดไม่เสถียรในช่วงที่เปลี่ยนเฟส
- **ข้อจำกัด :** เนื่องจากไม่มีการควบคุมทิศทาง และขนาดของเวกเตอร์กระแสไฟฟ้าแบบละเอียด จึงหมาย กับการใช้งานที่ไม่ต้องการแรงบิดที่เสถียร อาทิ พัดลม เป็นต้น

8.4.2 Field-Oriented Control (FOC) ด้วยการใช้ Space Vector Modulation (SVM)

- **วิธีการทำงาน :** FOC จะควบคุมทิศทางของกระแสไฟฟ้าโดยแปลงกระแสในพิกัด UVW (3 เฟส) มาเป็นพิกัด dq (Direct และ Quadrature) ด้วย Park Transformation ซึ่งทำให้สามารถควบคุมแรงบิด และพลังงานของมอเตอร์ได้อย่างเป็นอิสระจากกัน
- **การเปลี่ยนเวกเตอร์กระแสไฟฟ้าโดยใช้ SVM :** ใน FOC จะใช้ Space Vector Modulation (SVM) เพื่อควบคุมให้กระแสไฟฟ้าเปลี่ยนทิศทางได้อย่างราบรื่น และคงที่โดย SVM จะสร้างรูปคลื่นแบบ Sinusoidal ในพิกัด UVW ซึ่งช่วยให้แรงบิดเสถียรและแรงบิดไม่กระเพื่อม นอกจากนี้ SVM ยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานและลดความสูญเสียพลังงานในมอเตอร์
- **ข้อได้เปรียบของ SVM ใน FOC :** SVM ช่วยให้การควบคุม FOC สามารถเปลี่ยนเวกเตอร์กระแสไฟฟ้า ได้อย่างละเอียดและต่อเนื่องโดยไม่มีการกระตุก ทำให้มอเตอร์มีแรงบิดที่ราบรื่น และทำงานได้ดีทั้งที่ ความเร็วต่ำ และความเร็วสูง

9. Trapezoidal Waveform

คือรูปแบบของสัญญาณไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมคงที่ ประกอบด้วยส่วนต่างๆ ที่มีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันหรือตัวแปรไฟฟ้าอื่นๆ แบ่งเป็น 4 ส่วน ได้แก่ ส่วนเพิ่มขึ้น (Rising Edge) ส่วนคงที่ (Plateau) ส่วนลดลง (Falling Edge) และส่วนคงที่ที่ศูนย์ (Baseline) หรือดังรูปที่ 16



รูปที่ 16 Trapezoidal Waveform

ที่มา: https://www.nidec.com/en/technology/motor/glossary/item/trapezoidal_wave/

9.1 Trapezoidal Waveform กับมอเตอร์ BLDC

Trapezoidal Waveform สำหรับมอเตอร์ BLDC เกิดจากการออกแบบการพัฒนาลวดของมอเตอร์ BLDC ตัวนั้นๆ ซึ่งทำให้เกิดแรงบิด คงที่พอสมควรในช่วงหมุนที่กำหนด โดยใช้การควบคุมแบบ Six-Step Commutation เนื่องจากรูปคลื่น Back EMF ของมอเตอร์จะมีช่วงคงที่ในแต่ละเฟส ทำให้เหมาะสมกับการควบคุมรูปแบบนี้ เพราะมีการจ่ายแรงดันเป็นช่วง ๆ

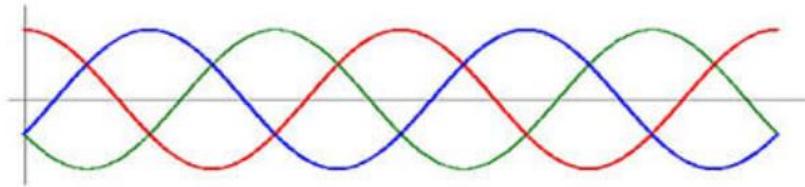
9.2 ข้อดี-ข้อเสียของการใช้ Trapezoidal Waveform

หัวข้อ	ข้อดี	ข้อเสีย
การควบคุม	การควบคุมง่ายกว่า เนื่องจากมีการคำนวณและคำนวณการจ่ายกระแสที่เม็ดข้อตอน	อาจเกิดการสั่นสะเทือนจากการเปลี่ยนผ่านของกระแส ทำให้มอเตอร์หมุนไม่ราบรื่น
ต้นทุน	ต้นทุนการพัฒนาวงจรควบคุมต่ำกว่าแบบชายน์ ทำให้เหมาะสมกับการใช้งานทั่วไป	อาจมีข้อจำกัดในด้านความแม่นยำและความราบรื่นของการหมุน
ประสิทธิภาพ	ประสิทธิภาพสูงในช่วงความเร็วสูงและขนาด มอเตอร์เล็กกว่าเมื่อให้แรงบิดสูง	ประสิทธิภาพในช่วงความเร็วต่ำอาจไม่ดีเท่า Sinusoidal Waveform และอาจเกิดความร้อนมากขึ้น
แรงบิด	สามารถสร้างแรงบิดได้สูงและคงที่พอสมควร ในลักษณะ Trapezoidal	ต้องการการควบคุมที่ละเอียดในทุกช่วงของการหมุน โดยเฉพาะที่ความเร็วต่ำ
การใช้งานทั่วไป	เหมาะสมสำหรับงานควบคุมมอเตอร์ในอุตสาหกรรมทั่วไปและต้นทุนต่ำ	ไม่เหมาะสมกับการใช้งานที่ต้องการความแม่นยำสูง เช่น เครื่องมือแพทย์หรืออุปกรณ์ที่ต้องการความราบรื่นมาก

ตารางที่ 7 ข้อดี-ข้อเสียของการใช้ Trapezoidal Waveform

10. Sinusoidal Waveform

คือรูปแบบสัญญาณที่มีลักษณะเป็นคลื่นไซน์ โดยมีลักษณะเป็นเส้นโค้งที่ต่อเนื่องและราบรื่น ซึ่งแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณในลักษณะที่เป็นไปตามฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ ดังรูปที่ 17



รูปที่ 17 Sinusoidal Waveform

ที่มา: https://www.nidec.com/en/technology/motor/glossary/item/torque_ripple/

10.1 Sinusoidal Waveform กับมอเตอร์ BLDC

Sinusoidal Waveform สำหรับมอเตอร์ BLDC เกิดจากการออกแบบการพัฒนาด้วยความรู้ที่มีอยู่แล้ว ตัวนั้นๆ ซึ่งทำให้เกิดแรงบิด คงที่เพื่อสมควรในช่วงหมุนที่กำหนด โดยเฉพาะกับวิธีการควบคุมแบบ FOC เนื่องจากรูปคลื่น Back EMF ของมอเตอร์จะมีช่วงคงที่ในแต่ละเฟส ทำให้เหมาะสมกับการควบคุมรูปแบบนี้ เพราะมีการจ่ายแรงดันเป็นช่วงๆ

10.2 ข้อดี-ข้อเสียของการใช้ Sinusoidal Waveform

หัวข้อ	ข้อดี	ข้อเสีย
การควบคุม	การควบคุมละเอียดและราบรื่นกว่า เนื่องจากการจ่ายกระแสเป็นไปอย่างต่อเนื่อง	การควบคุมที่ซับซ้อนกว่าและต้องการการคำนวณที่แม่นยำมากขึ้น
ต้นทุน	ประสิทธิภาพสูงในระยะยาว สามารถลดการสึกหรอของมอเตอร์ได้	ต้นทุนการพัฒนาจะควบคุมสูงกว่าการใช้ Trapezoidal Waveform
ประสิทธิภาพ	ประสิทธิภาพสูงในทุกช่วงความเร็ว โดยเฉพาะที่ความเร็วต่ำ	ต้องการฮาร์ดแวร์ที่มีความซับซ้อนและค่าใช้จ่ายสูงมากขึ้นในการควบคุมที่มีความแม่นยำ
แรงบิด	แรงบิดนุ่มนวลและสม่ำเสมอ ไม่มีการกระตุกหรือการเปลี่ยนแปลงที่ไม่พึงประสงค์	การขับมอเตอร์ด้วยคลื่นซิโนไซด์อาจมีความซับซ้อนในเรื่องของการคำนวณและการใช้งาน
การใช้งานทั่วไป	เหมาะสมสำหรับการใช้งานที่ต้องการความราบรื่นและความแม่นยำสูง เช่น ในเครื่องมือแพทย์	ไม่เหมาะสมกับการใช้งานที่ต้องการต้นทุนต่ำและการควบคุมที่ไม่ซับซ้อนมาก

ตารางที่ 8 ข้อดี-ข้อเสียของการใช้ Sinusoidal Waveform

11. เปรียบเทียบความแตกต่างของ Trapezoidal และ Sinusoidal

หัวข้อ	Trapezoidal Waveform	Sinusoidal Waveform
การควบคุม	การควบคุมง่ายกว่า ด้วยการคำนวณที่ไม่ซับซ้อน	การควบคุมซับซ้อนกว่า ต้องการการคำนวณที่แม่นยำ และละเอียด
ต้นทุน	ต้นทุนการพัฒนาวงจรควบคุมต่ำกว่า เหมาะสำหรับงานที่ไม่ต้องการความแม่นยำสูง	ต้นทุนการพัฒนาวงจรควบคุมสูงกว่า เหมาะสำหรับงานที่ต้องการความแม่นยำสูง
ประสิทธิภาพ	ประสิทธิภาพสูงในความเร็วสูง แต่ต่ำในความเร็วต่ำ	ประสิทธิภาพสูงในทุกช่วงความเร็ว
แรงบิด	แรงบิดไม่สม่ำเสมอและอาจเกิดการกระตุก (Cogging)	แรงบิดนุ่มนวลและสม่ำเสมอ ไม่มีการกระตุกหรือการเปลี่ยนแปลงที่ไม่พึงประสงค์
การใช้งานทั่วไป	เหมาะสมกับการใช้งานที่ไม่ต้องการความแม่นยำสูง และมีต้นทุนต่ำ	เหมาะสมกับการใช้งานที่ต้องการความราบรื่นและความแม่นยำสูง เช่น ในเครื่องมือแพทย์

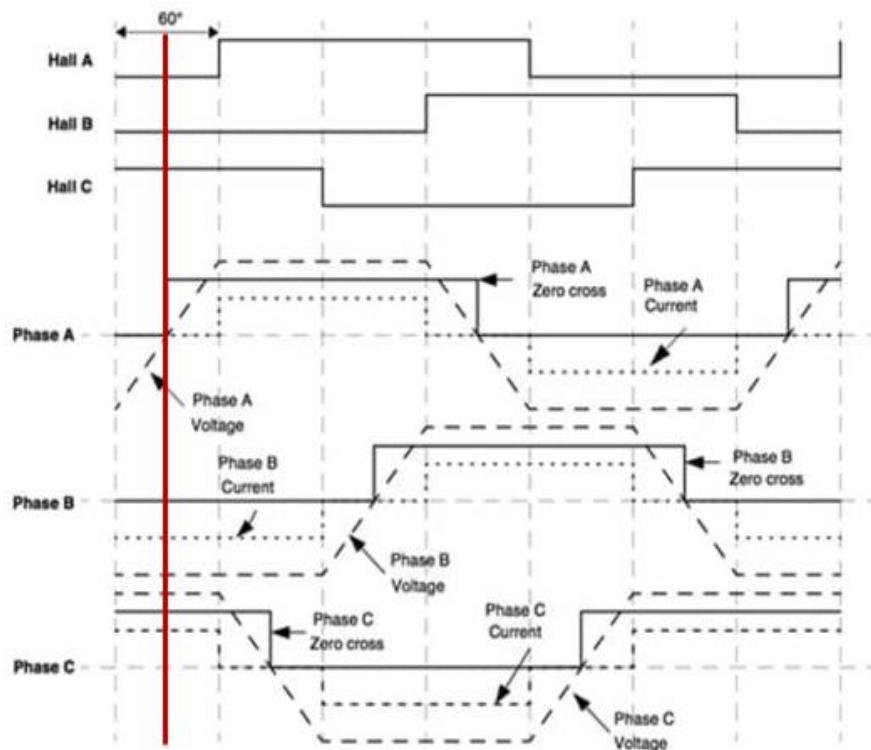
ตารางที่ 9 เปรียบเทียบความแตกต่างของ Trapezoidal และ Sinusoidal

จากการเปรียบเทียบดังตารางข้างต้นสรุปได้ว่า Sinusoidal เป็นรูปแบบคลื่นที่มีประสิทธิภาพในการใช้งานมากกว่า Trapezoidal อย่างชัดเจน โดยเฉพาะเรื่องความราบรื่น และความแม่นยำในการควบคุมมอเตอร์ BLDC

Sinusoidal จ่ายกระแสไฟฟ้าที่ต่อเนื่อง และเป็นคลื่นราบรื่น (Smooth) จึงทำให้การหมุนของมอเตอร์นุ่มนวล ไม่มีการกระตุกหรือสั่นสะเทือน (Cogging Torque) ซึ่งการกระตุก และสั่นสะเทือนมักพบใน Trapezoidal ที่เปลี่ยนกระแสแบบทันทีทันใด ส่งผลให้แรงบิดไม่สม่ำเสมอ

นอกจากนี้ Sinusoidal ยังเหมาะสมกับการใช้งานที่ต้องการความแม่นยำสูง อาทิ เครื่องมือแพทย์ หรือระบบควบคุมที่ละเอียด Sinusoidal ยังมีข้อดีสำคัญต่อการควบคุมมอเตอร์ BLDC คือในช่วงความเร็วต่ำ ซึ่งจะสามารถให้ประสิทธิภาพที่สูงได้เหมือนกับช่วงความเร็วสูง อย่างไรก็ตาม ทั้งสองรูปแบบคลื่นยังคงมีความสำคัญ และเหมาะสมกับงานที่แตกต่างกัน

12. การจัดการ Feedback ของมอเตอร์ BLDC



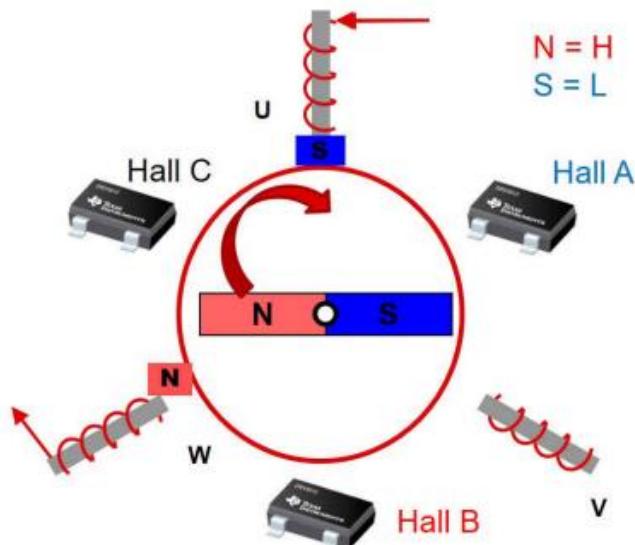
รูปที่ 18 Back EMF เปรียบเทียบกับ Hall Sensor 3 เพสของมอเตอร์ BLDC

ที่มา: <https://www.digikey.co.th/th/articles/controlling-sensorless-bldc-motors-via-back-emf>

จากภาพข้างต้น เพสของ Back EMF จะนำ Hall Sensor 30 องศาไฟฟ้า (ตามเส้นสีแดง) เป็นผลมาจากการออกแบบ และการควบคุมมอเตอร์ที่มีผลต่อการจ่ายกระแส และการคำนวณตำแหน่งของโรเตอร์ในมอเตอร์ BLDC การเลื่อนเฟส (Phase Shifting) เป็นสิ่งสำคัญในการควบคุมแรงบิด และความเร็วของมอเตอร์ โดยจะทำให้มอเตอร์ทำงานได้อย่างราบรื่น และมีประสิทธิภาพในการใช้งาน

โดยผู้จัดทำสามารถหาตำแหน่งโรเตอร์จากการทำ 2 รูปแบบ ได้แก่ Hall Sensor (Sensor-based) หรือ Back EMF (Sensorless) ด้วยการทำ Zero Crossing ผ่านการจัดการทาง Hardware (Op-Amp จัดการบน ESC) และทาง Software (Zero Crossing บน MCU)

12.1 การจัดการ Feedback ของ Hall Sensor ด้วยการทำ Zero Crossing บน ESC และ MCU



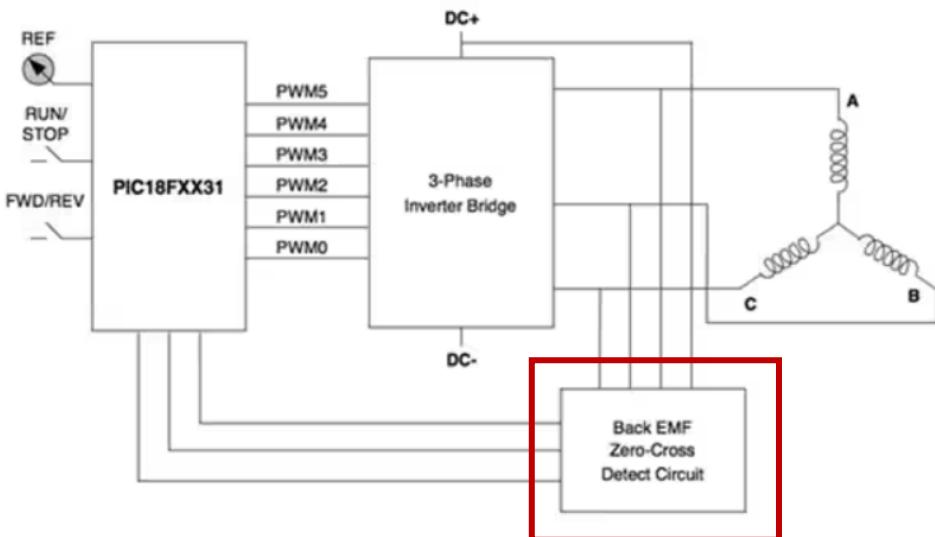
รูปที่ 19 ตำแหน่งของ Hall Sensor มอเตอร์ BLDC

ที่มา: https://www.ti.com/lit/ab/slvaeg3b/slvaeg3b.pdf?ts=1731815111167&ref_url=https%253A%252F%252F

Hall Sensor จะฝังอยู่ภายในมอเตอร์ BLDC โดยจะต้องห่างกัน 120 องศาไฟฟ้าเสมอ เพื่อให้สามารถระบุตำแหน่งของโรเตอร์ได้อย่างถูกต้อง ซึ่งจะใช้ความสามารถของ Hall Sensor ในการตรวจจับขั้วแม่เหล็ก โดยสามารถทำ Zero Crossing ได้ทั้งใน ESC และ MCU ดังต่อไปนี้

- Op-Amp : ใช้โหมด Comparator ในการวัด Hall Sensor Voltage โดยให้ Voltage Reference เป็นศูนย์ เนื่องจาก Hall Sensor จะให้ค่าบวก หรือลบ ขึ้นกับขั้วของแม่เหล็กจากโรเตอร์ที่สามารถอ่านได้
- Zero Crossing : ใช้ Signal Processing ในการทำให้สัญญาณพร้อมใช้งาน จากนั้นใช้ Interrupt เพื่อเอาข้อมูลของ Hall Sensor มาใช้งาน แต่โดยทั่วไปแล้วการอ่านจาก MCU จะใช้การ Sampling Time ลงไป หมายความว่าใช้การอ่านค่าแบบ Discrete (ไม่ต่อเนื่อง) ซึ่งจะทำให้ความแม่นยำ และความละเอียดน้อยลง

12.2 การจัดการ Feedback ของ Back EMF ด้วยการทำ Zero Crossing บน ESC และ MCU

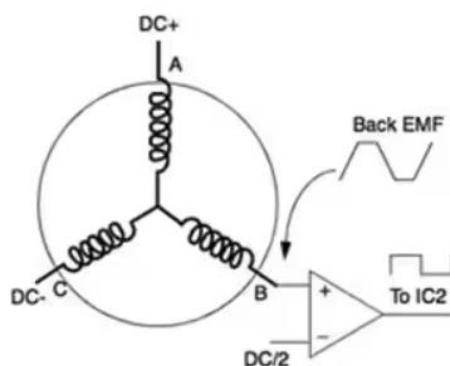


รูปที่ 20 วงจรควบคุมสำหรับมอเตอร์ BLDC ทั้ง 3 เฟส

ที่มา: <https://www.digikey.co.th/th/articles/controlling-sensorless-bldc-motors-via-back-emf>

การหาตำแหน่งด้วย Back EMF จะเป็นการนำ Feedback กลับมาทำ Zero Crossing โดยสามารถทำได้ทั้งบน ESC และ MCU ดังต่อไปนี้

- Op-Amp : เปรียบเทียบ DC Bus Voltage ด้วยโหมด Comparator ซึ่งภายใน Back EMF Zero-Cross Detect Circuit โดยให้ชุดลวด A เป็นไฟบวก ชุดลวด C เป็นไฟลบ และต่อชุดลวด B เข้าที่ขาแรงดันบวก ขาเข้า โดยจะให้ Voltage Reference เป็นครึ่งหนึ่งของ DC Bus Voltage ตั้งรูปที่ ก็จะสามารถหาตำแหน่งมอเตอร์ได้



รูปที่ 21 วงจรเปรียบเทียบอย่างง่ายสำหรับวัดค่า Back EMF ของมอเตอร์ BLDC

ที่มา: <https://www.digikey.co.th/th/articles/controlling-sensorless-bldc-motors-via-back-emf>

- Zero Crossing : ทำได้ด้วยการเชื่อมต่อสัญญาณจากมอเตอร์ไปยัง MCU และใช้ ADC อ่านค่าสัญญาณ จากนั้นตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่ผ่านจากบวกเป็นลบ หรือจากลบเป็นบวก (ข้ามศูนย์)

โดยใช้การเปรียบเทียบค่าปัจจุบันกับค่าก่อนหน้า หากเกิดการข้ามศูนย์ให้บันทึกเวลา และนำไปใช้ในการคำนวน RPM หรือ Commutation ของมอเตอร์ หากสัญญาณมีรบกวนสามารถใช้ Signal Processing เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการตรวจจับ

12.3 เปรียบเทียบการทำ Zero Crossing ของ Sensor-based และ Sensorless บน ESC และ MCU

หัวข้อ	Sensor-based - ESC	Sensor-based - MCU	Sensorless - ESC	Sensorless - MCU
วิธีการตรวจจับ Zero Crossing	ใช้ Op-Amp หรือวงจรเปรียบเทียบตรวจจับการข้ามศูนย์ของสัญญาณจาก Hall Sensor	ใช้ GPIO หรือ Input Pin ใน MCU อ่านสัญญาณจาก Hall Sensors	ใช้ Op-Amp ตรวจจับการข้ามศูนย์จากสัญญาณ Back EMF	ใช้ ADC หรือ Analog Pin ใน MCU อ่านสัญญาณจาก Back EMF
ข้อดี	- แม่นยำสูง - การตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ที่แน่นอน - ไม่ต้องประมวลผลมาก	- ใช้งานง่าย - ไม่ต้องใช้วงจรภายในอกระหับการตรวจจับ	- ง่าย และประหยัด - ไม่ต้องใช้เซ็นเซอร์	- ต้นทุนต่ำ - ใช้ MCU ในการประมวลผลแทนเซ็นเซอร์จากมอเตอร์
ข้อเสีย	- ต้องใช้ Hall Sensors ราคาจึงสูง	- ซับซ้อนขึ้นเมื่อทำงานในระดับสูง	- อาจไม่แม่นยำในบางกรณีที่ Back EMF ต่ำหรือสัญญาณไม่เสถียร	- ความแม่นยำลดลง เมื่อมอเตอร์หมุนช้า, ไม่มีโหลดและจากการอ่านค่าแบบ Discrete
สภาพที่ไม่มีโหลด	ทำงานได้ดี เนื่องจากสามารถตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ได้แม่นยำ	ทำงานได้ดี แต่อาจมีความแม่นยำที่ต่ำลงมาเนื่องจากการที่ MCU เป็นการอ่านค่าแบบ Discrete	มีปัญหาหาก Back EMF ต่ำในกรณีที่มอเตอร์หมุนช้า	ไม่สามารถตรวจจับได้อย่างแม่นยำที่ความเร็วต่ำหรือไม่มีโหลด
ความแม่นยำ	แม่นยำสูงในการตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์	ขึ้นอยู่กับสัญญาณที่ได้จาก Hall Sensors และการประมวลผลใน MCU	ความแม่นยำต่ำกว่าเมื่อ Back EMF ไม่เสถียร หรือมอเตอร์หมุนช้า	ความแม่นยำต่ำหากสัญญาณ Back EMF อ่อนหรือมีสัญญาณรบกวน

ตารางที่ 10 เปรียบเทียบการทำ Zero Crossing ของ Sensor-based และ Sensorless บน ESC และ MCU

12.4 เปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสีย และความแตกต่างของ Sensor-based กับ Sensorless

หัวข้อ	Sensor-based (Hall Sensor)	Sensorless (Back EMF)
ความแม่นยำในการตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์	แม่นยำสูง เพราะ Hall Sensors ใช้ในการวัดตำแหน่งที่แน่นอน	ต่ำกว่า เพราะขึ้นอยู่กับสัญญาณ Back EMF ที่อาจจะไม่เสถียรในบางกรณี
การติดตั้ง	ต้องใช้ Hall Sensors หลายตัว (3 ตัวในมอเตอร์ 3-phase)	ไม่ต้องใช้เซ็นเซอร์เพิ่มเติม ใช้แค่การอ่านสัญญาณจากมอเตอร์
ค่าใช้จ่าย	สูง เนื่องจากต้องใช้ Hall Sensors เพิ่มเติม	ต่ำ เพราะไม่ต้องใช้ Hall Sensors
การตอบสนองที่เร็ว	มีการตอบสนองที่ดี เพราะการตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ทำได้ทันที	มีการตอบสนองช้ากว่า เนื่องจากขึ้นอยู่กับ Back EMF และความเร็วในการหมุน
การใช้งานในสภาพที่ไม่มีโหลดหรือหมุนช้า	ทำงานได้ดี แม้ในสภาพที่ไม่มีโหลดหรือต่ำ	อาจมีปัญหาในกรณีที่มอเตอร์หมุนช้า หรือไม่มีโหลด เพราะ Back EMF ต่ำ
ความแม่นยำ	แม่นยามาก เนื่องจากการระบุตำแหน่งของ Hall Sensor	ต้องผ่านกระบวนการ Signal Processing หรือการประมวลผลสัญญาณ
ความเสถียรในการทำงาน	เสถียรกว่าในสภาพการทำงานที่หลากหลาย	อาจมีปัญหาหาก Back EMF ไม่คงที่หรือมีสัญญาณรบกวน

ตารางที่ 11 เปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสีย และความแตกต่างของ Sensor-based กับ Sensorless

13. หาความเร็วจาก Feedback ของ Trapezoidal Control

เนื่องจากความเร็วเชิงมุมสัมพันธ์กับความถี่ของการเปลี่ยนเฟสทางกลของโรเตอร์ซึ่งสามารถดูได้จากความถี่ของรูปคลื่น Back EMF ที่เป็น Trapezoidal จึงสามารถคำนวณ เพื่อหาความเร็วมอเตอร์ได้ ซึ่งอยู่ในหน่วย Round Per Minute (RPM) จากสูตรดังต่อไปนี้

$$\text{Motor Speed} = \frac{f \times 60}{N}$$

กำหนดให้ Motor Speed	คือ ความเร็วของมอเตอร์	มีหน่วยเป็น RPM
f	คือ ความถี่ของการเปลี่ยนเฟสทางกลของโรเตอร์	มีหน่วยเป็น Hz
N	คือ จำนวน Pole Pairs ของมอเตอร์	มีหน่วยเป็น Pole Pairs

วัสดุอุปกรณ์

ลำดับที่	ชื่อ	จำนวน	หน่วย
1	A2212 1000KV Brushless Outrunner Motor 13T	1	ตัว
2	STMICROELECTRONICS X-NUCLEO-IHM08M1	1	อัน
3	Nucleo-STM32G474RE	1	บอร์ด
4	บอร์ดทดลอง BLDCXplorer	1	บอร์ด
5	Micsig STO1004 Digital Smart Oscilloscope	1	อัน
6	สายอัปโหลด	1	เส้น
7	AC/DC Adapter 100-240VAC to 24VDC 10A	1	ชุด

ตารางที่ 12 วัสดุอุปกรณ์

ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาข้อมูลภาพรวมเกี่ยวกับ Brushless DC Motor

2. วางแผนการทดลองจากสมมติฐานที่ตั้งขึ้น ได้ดังนี้

2.1 การทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมของ BLDC บนบอร์ดทดลองโดยการตรวจสอบความเที่ยงตรงของสมการการหาความเร็วจากความถี่ของการเปลี่ยนเฟสทางกลของโรเตอเร่ใน Sensorless BLDC, ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง Duty Cycle ของสัญญาณ PWM และความเร็วของ BLDC ผ่านการขับด้วย Six-Step Commutation, ศึกษาส่วนประกอบและสิ่งที่เกิดขึ้นจากการสังเกตผ่านรูปสัญญาณ Back EMF บน Digital Smart Oscilloscope

3. ทำการทดลองที่ 1 เพื่อตอบสมมติฐานที่ตั้งไว้เกี่ยวกับพฤติกรรมของ Brushless DC Motor

4. สรุปและอภิปรายผลการทดลอง

การทดลอง

ตัวแปร

ตัวแปรต้น: RPM ที่ปรับภายใต้โปรแกรม Motor Pilot

ตัวแปรตาม: ความถี่ของคลื่น Feedback และ Duty Cycle ของสัญญาณ PWM ที่ใช้ในการขับ BLDC

ตัวแปรควบคุม: แรงดันที่จ่ายให้กับ Motor Driver, อุณหภูมิโดยรอบ

วิธีดำเนินการทดลอง

1. ติดตั้งบอร์ด Nucleo-STM32 ลงบน BLDCXplorer ตามตำแหน่งที่จัดวางไว้
2. ติดตั้งบอร์ด STMICROELECTRONICS X-NUCLEO-IHM08M1 บน Nucleo-STM32
3. เสียบสายไฟจาก AC/DC Adapter 100-240VAC to 24VDC 10A เข้ากับ BLDCXplorer
4. เสียบสายอัปโหลดจากคอมพิวเตอร์เข้ากับ Nucleo-STM32
5. คล้องสายไฟจาก Oscilloscope ช่องที่ 1, 2, 3 เข้ากับ BLDCXplorer ตามลำดับ
6. ตั้งค่า Oscilloscope ตามที่จะใช้งาน
7. เสียบสาย USB จาก Oscilloscope เข้ากับคอมพิวเตอร์
8. ปรับค่า RPM ภายใต้โปรแกรม Motor Control WorkBench ขึ้นทีละ 10 เปอร์เซ็นต์ ทั้งสองทิศทาง
9. บันทึกค่าความถี่และ Duty Cycle ของสัญญาณ PWM ที่ได้ทุก ๆ 10 เปอร์เซ็นต์ที่เปลี่ยนแปลงไป

1. การ Setup การทดลองโดยรวม

ดูค่าและบันทึกผลค่าความถี่ของการเปลี่ยนเฟสทางกลของโรเตอร์และ Duty Cycle ของสัญญาณ PWM ที่เปลี่ยนแปลงไปจากการปรับค่า RPM ภายในโปรแกรม Motor Control WorkBench ขึ้นที่ละ 10 เปรอร์เซ็นต์ จุดละ 5 ครั้งเพื่อตรวจสอบความสม่ำเสมอและความถูกต้องของข้อมูล โดยตั้งแรงดันที่ใช้ในการขับมอเตอร์ไว้ที่ 12 โวลต์

แล้วจึงนำค่าความถี่ของการเปลี่ยนเฟสทางกลของโรเตอร์และ Duty Cycle ของสัญญาณ PWM ที่ได้ไปหาค่าเฉลี่ยปกติ และนำค่าความถี่เฉลี่ยในแต่ละจุดที่วัดค่า ไปคำนวณย้อนกลับเพื่อหาความเร็วที่มอเตอร์หมุน จากสมการ

$$\text{Motor Speed} = \frac{f \times 60}{N}$$

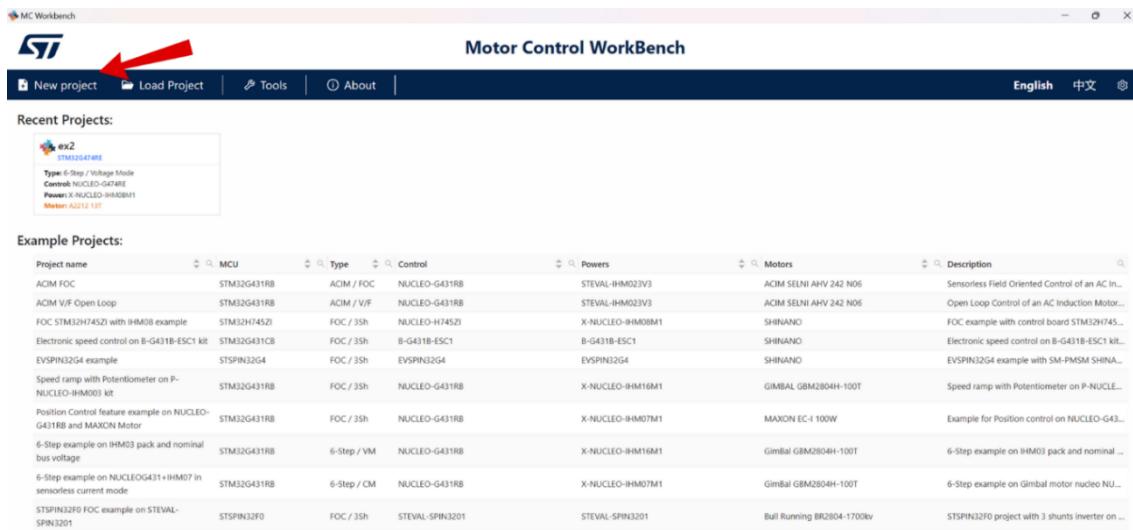
กำหนดให้ Motor Speed	คือ	ความเร็วของมอเตอร์	มีหน่วยเป็น	RPM
f	คือ	ความถี่ของการเปลี่ยนเฟสทางกลของโรเตอร์	มีหน่วยเป็น	Hz
N	คือ	จำนวน Pole Pairs ของมอเตอร์	มีหน่วยเป็น	Pole Pairs

$$\text{Motor Speed} = \frac{f \times 60}{7}$$

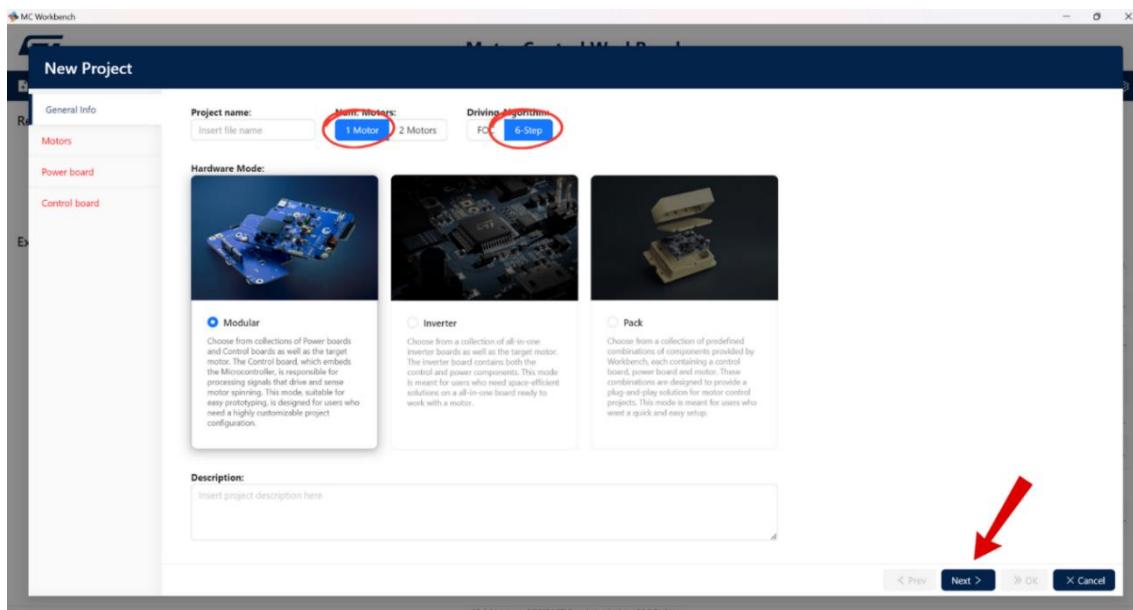
โดยในที่นี้จะแทน Motor Speed	เป็น	ความเร็วของมอเตอร์ที่ต้องการหา
f	เป็น	ความถี่เฉลี่ยในแต่ละจุดที่วัดค่า
N	เป็น	7 Pole Pairs อ้างอิงจาก Datasheet

2. การ Setup ซอฟต์แวร์ควบคุมมอเตอร์ BLDC

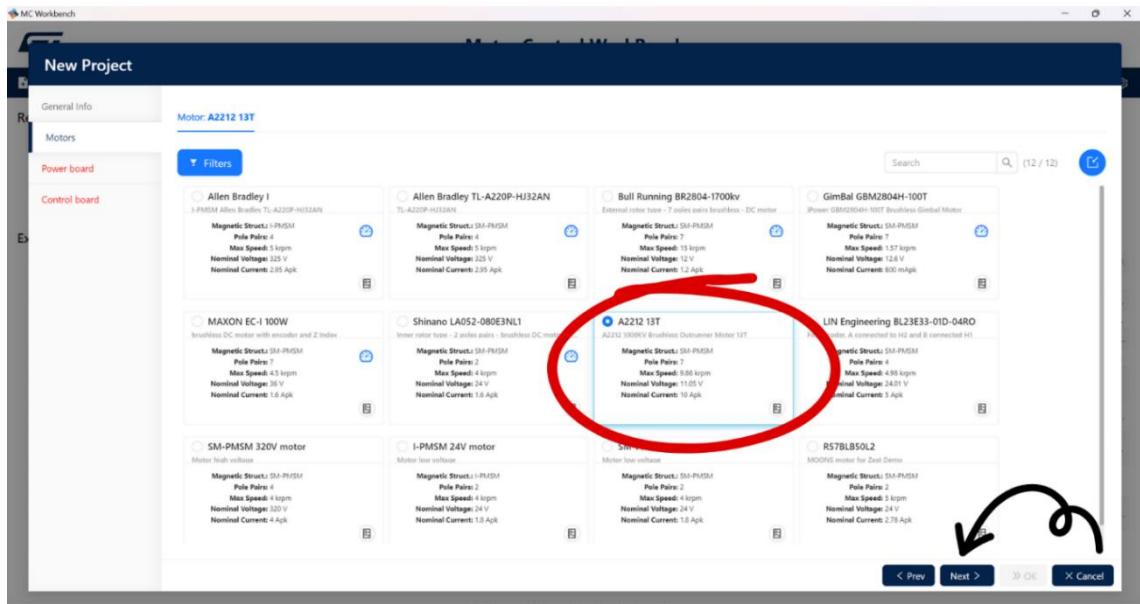
เพื่อศึกษาพัฒนาระบบของ Brushless DC Motor บนบอร์ดทดลอง มีการประยุกต์ใช้ซอฟต์แวร์ที่หลากหลาย โดยมีรายละเอียด ดังนี้



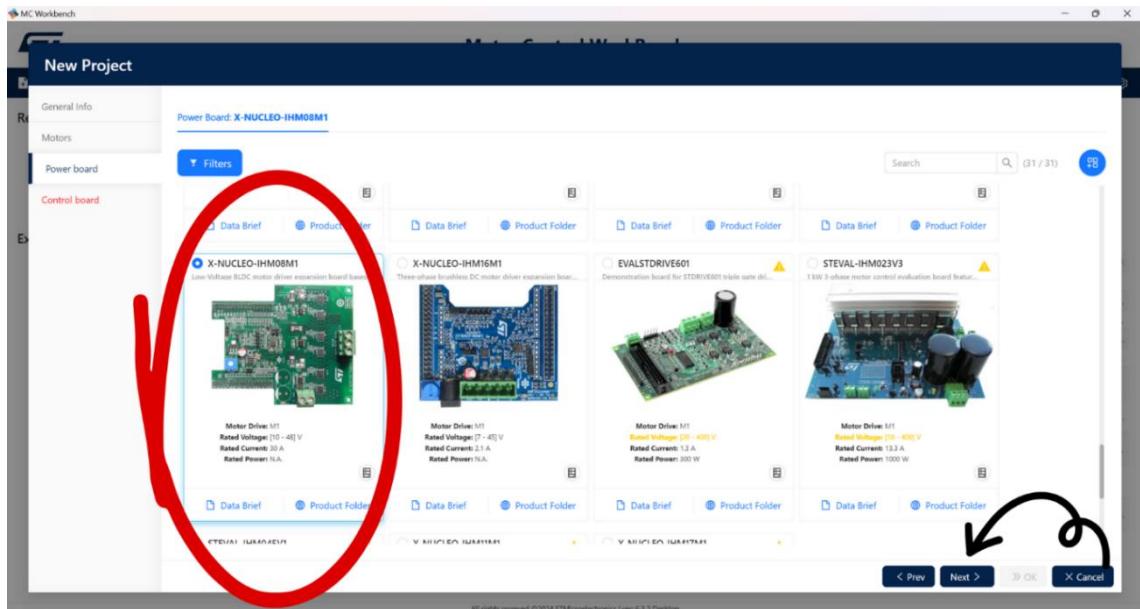
เริ่มต้นการใช้โปรแกรม Motor Control Workbench 6.3.2 บน Nucleo-STM32G474RE โดยการกด New project เพื่อสร้าง Project



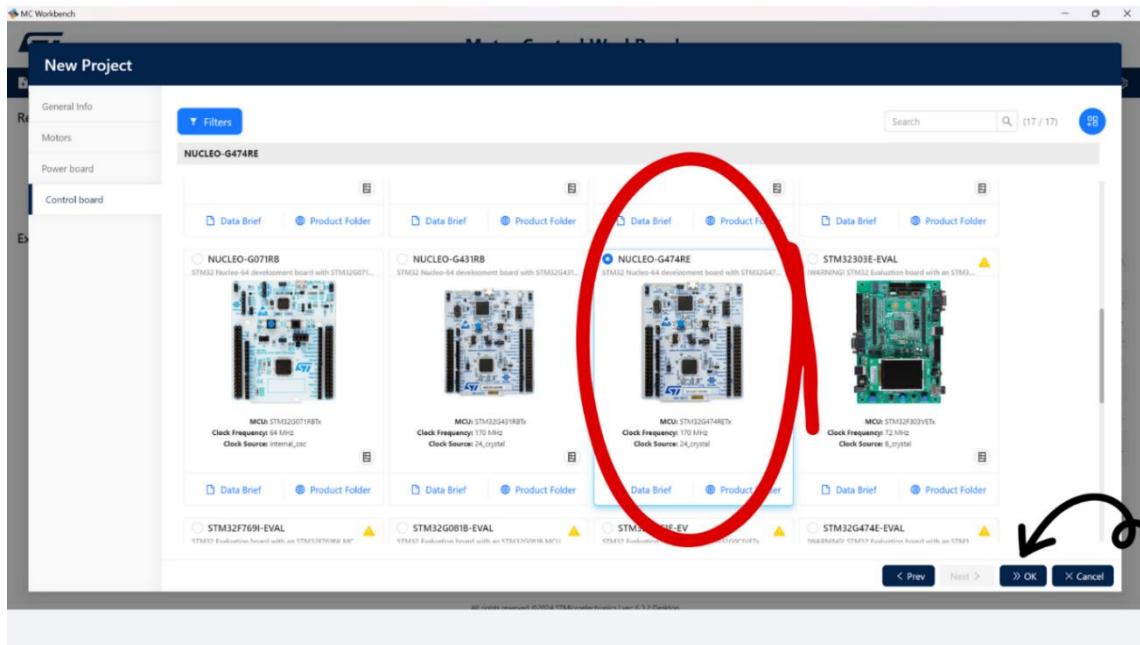
ตั้งค่าอุปกรณ์ตามที่ใช้ในการทดลอง เลือกจำนวนมอเตอร์ที่ต้องการจะใช้ ในการทดลองนี้มีการใช้มอเตอร์เพียงแค่ ตัวเดียว จางานนี้เลือก Driving Algorithm เป็น 6-Step และกด Next



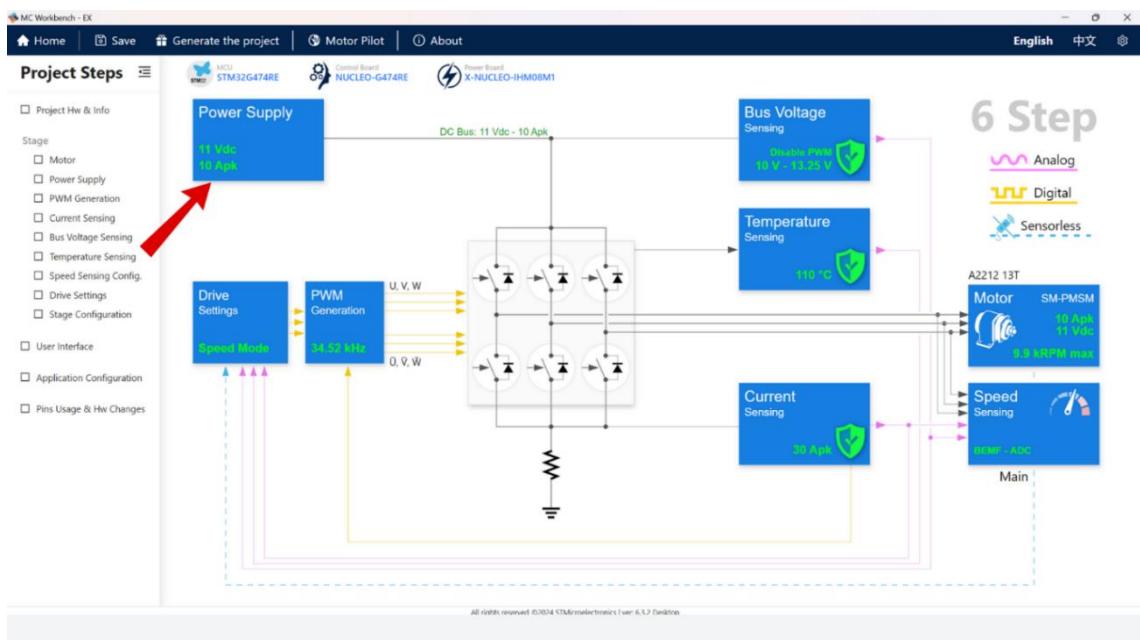
ทำการเลือกรุ่นของมอเตอร์ โดยในการทดลองนี้จะใช้ Motor Brushless รุ่น A2212 13T



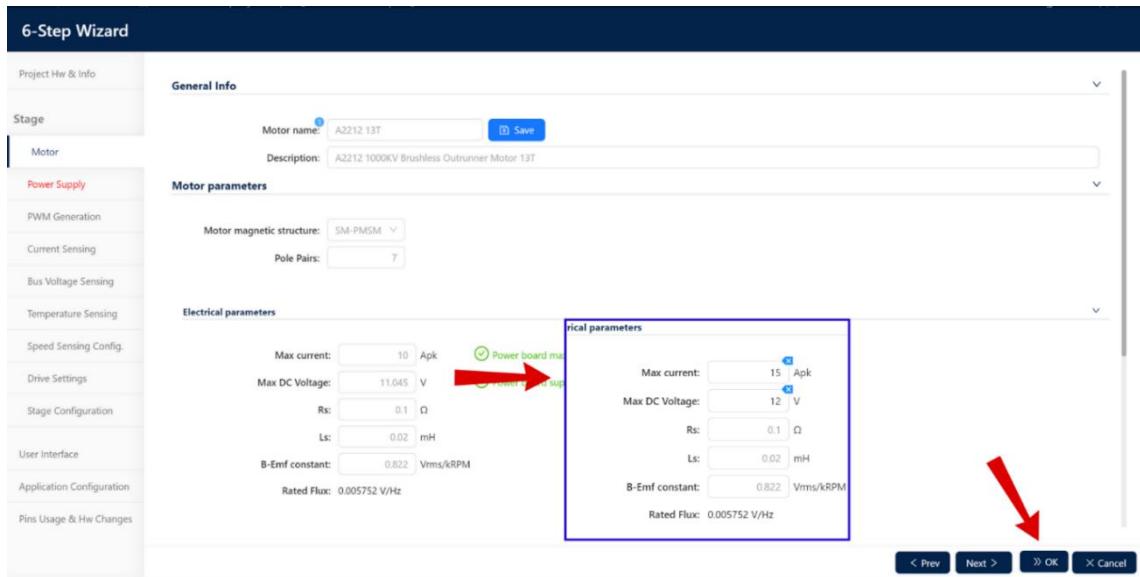
เลือก Power Board โดยในการทดลองนี้เป็นรุ่น X-NUCLEO-IHM08M1



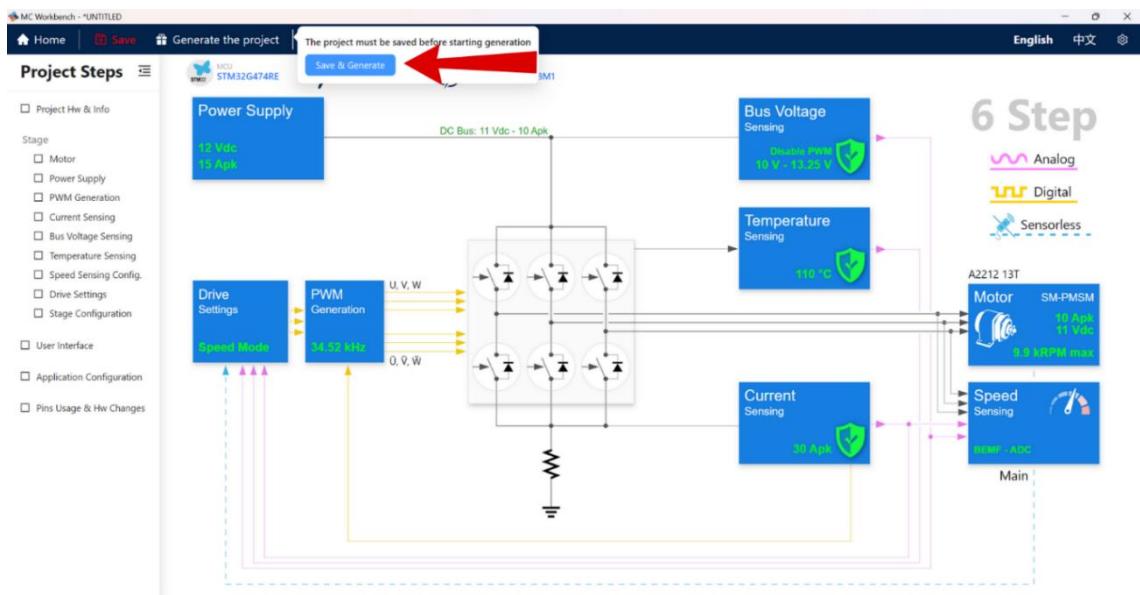
เลือก Control Board โดยในการทดลองนี้เป็นรุ่น STM32-NUCLEO-G474RE



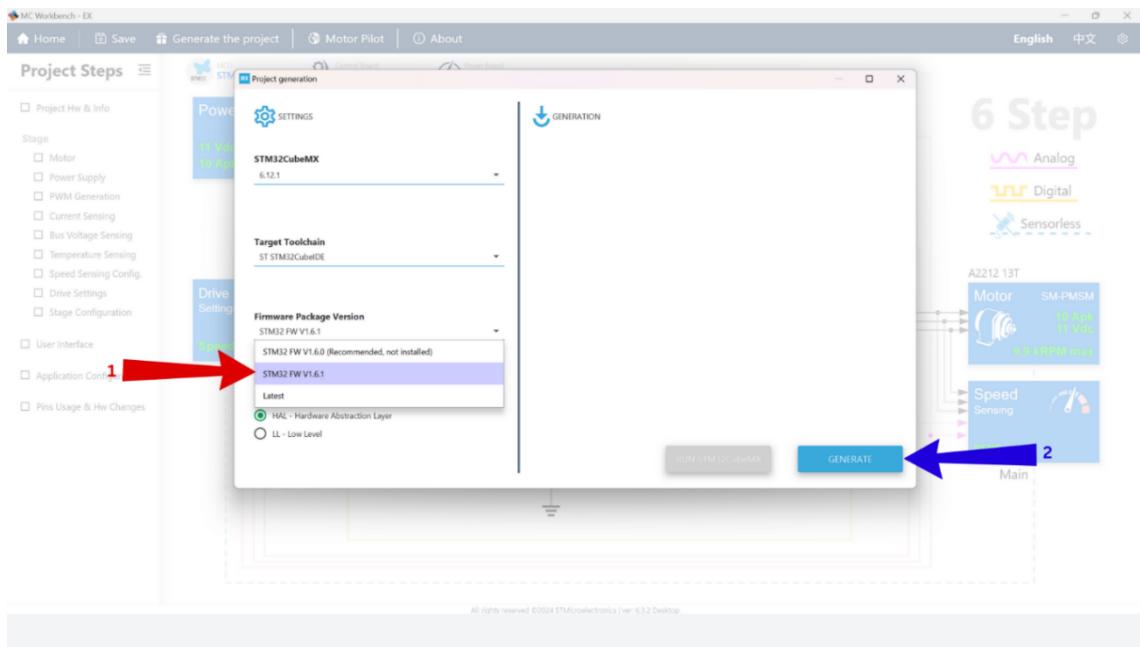
เมื่อเข้ามาในหน้า Project Steps ต้องทำการปรับแหล่งจ่ายไฟให้เหมาะสมกับบอร์ด



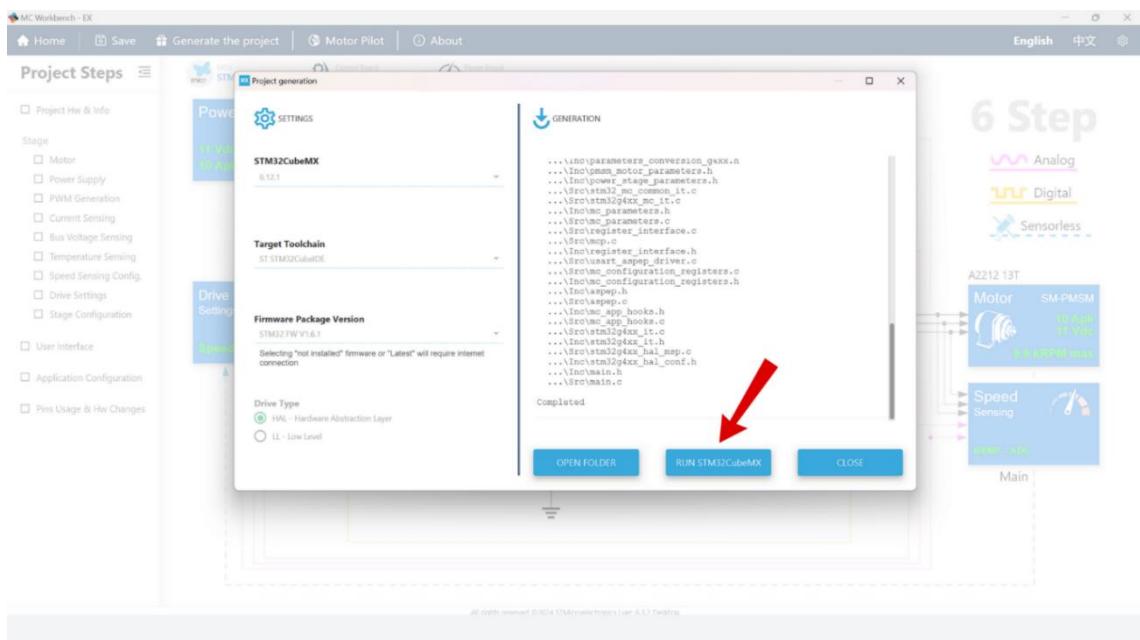
ตั้งค่า Max current เป็น 15 Amp Peak และ Max DC Voltage เป็น 12 Volts



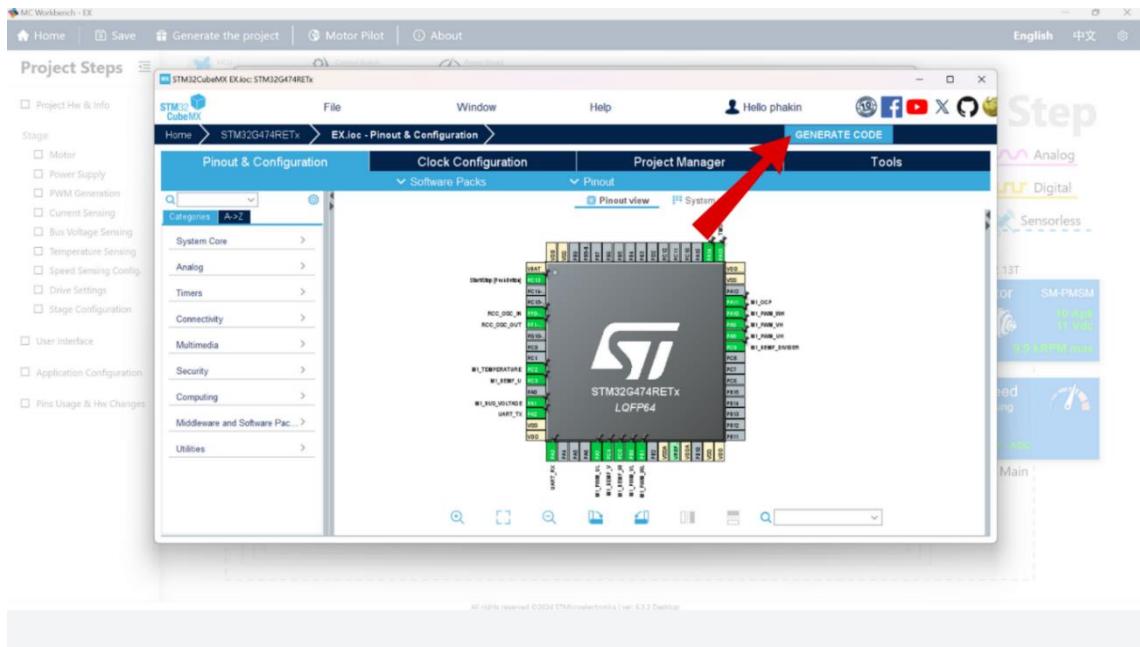
กด Generate the project เพื่อสร้างโปรแกรมสำหรับการควบคุมมอเตอร์



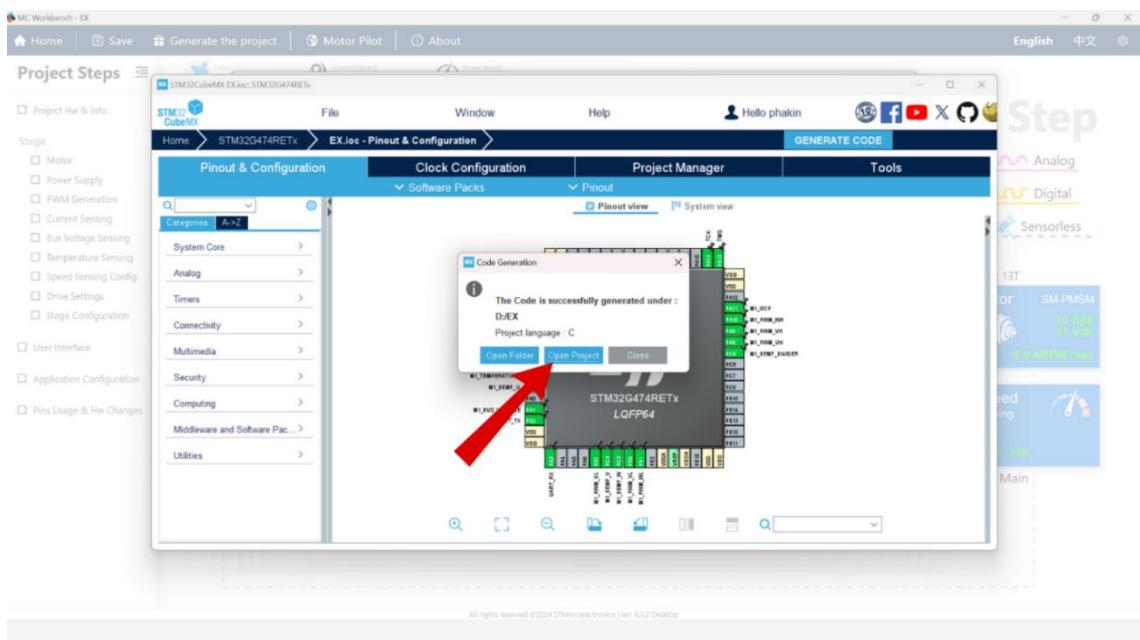
เลือก Firmware Package Version เป็น STM32 FW V1.6.1



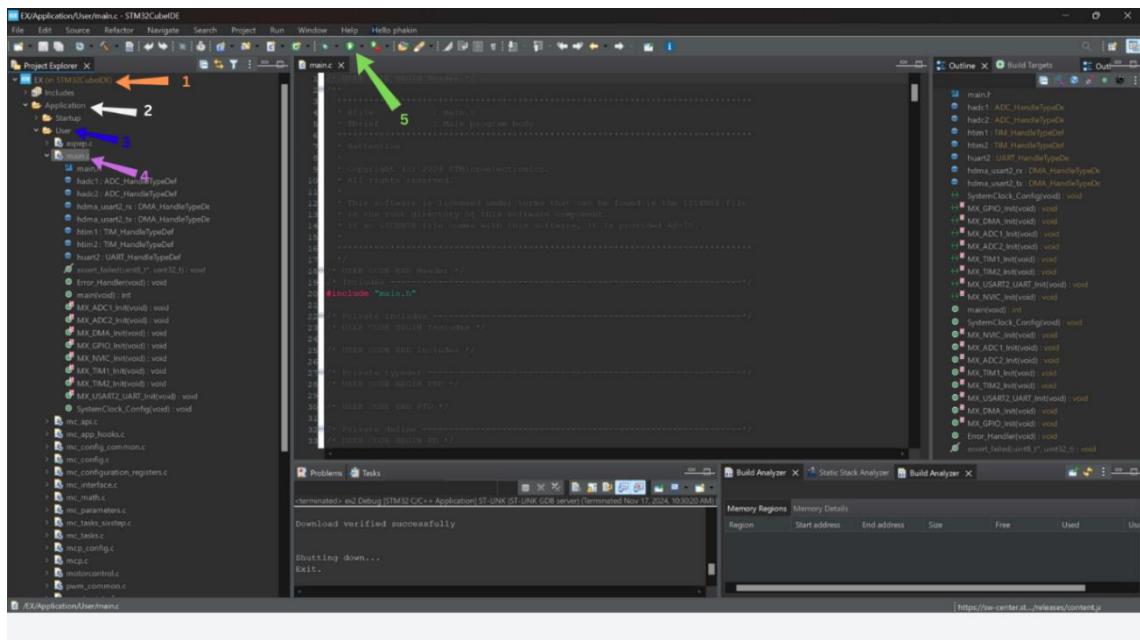
กด RUN STM32CubeMX



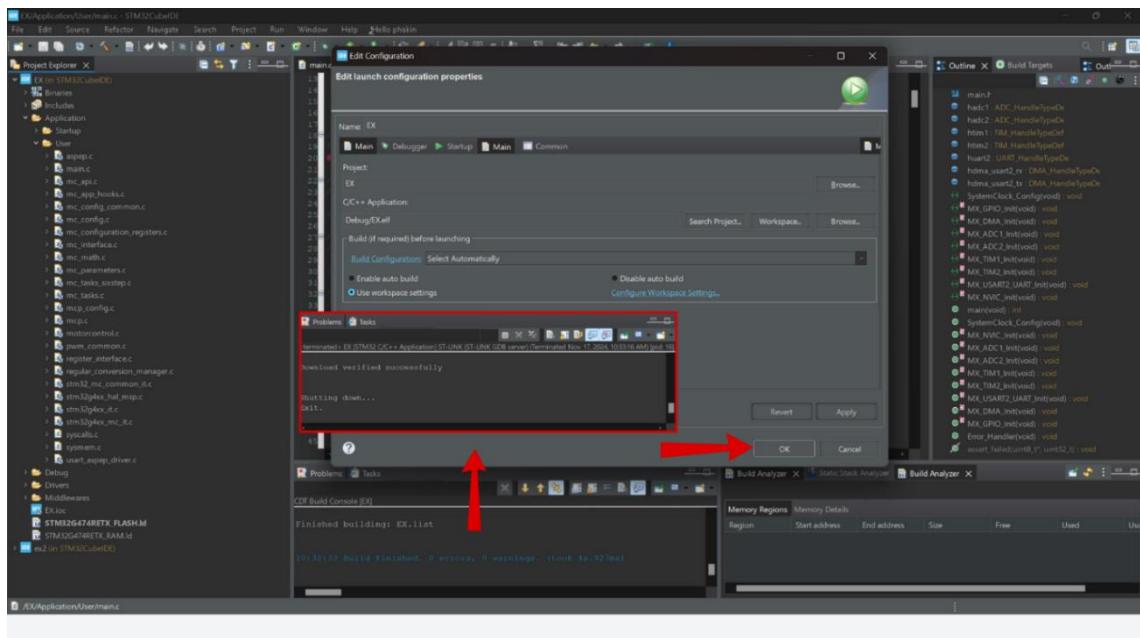
ໜັດ Generate Code



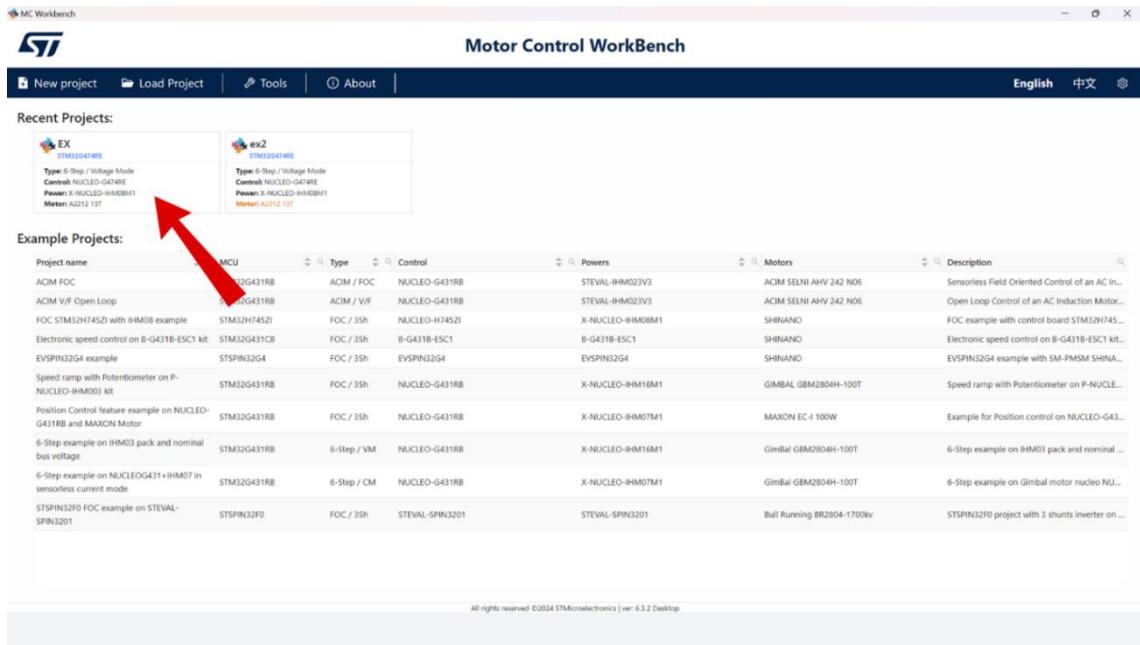
ໜັດ Open Project



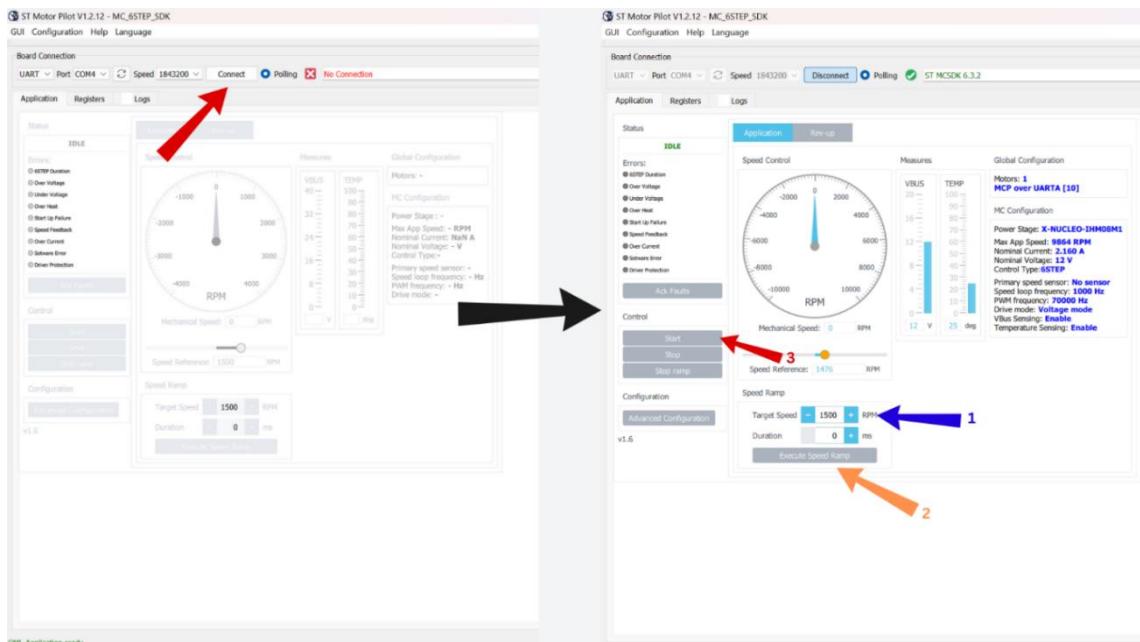
เลือกไฟล์ main.c จากนั้นกด Run



เมื่อ Download สำเร็จแล้ว กด OK



เลือก Project ที่ผู้จัดทำสร้าง หรือต้องการจะใช้งาน เป็นการเปิด Motor Pilot

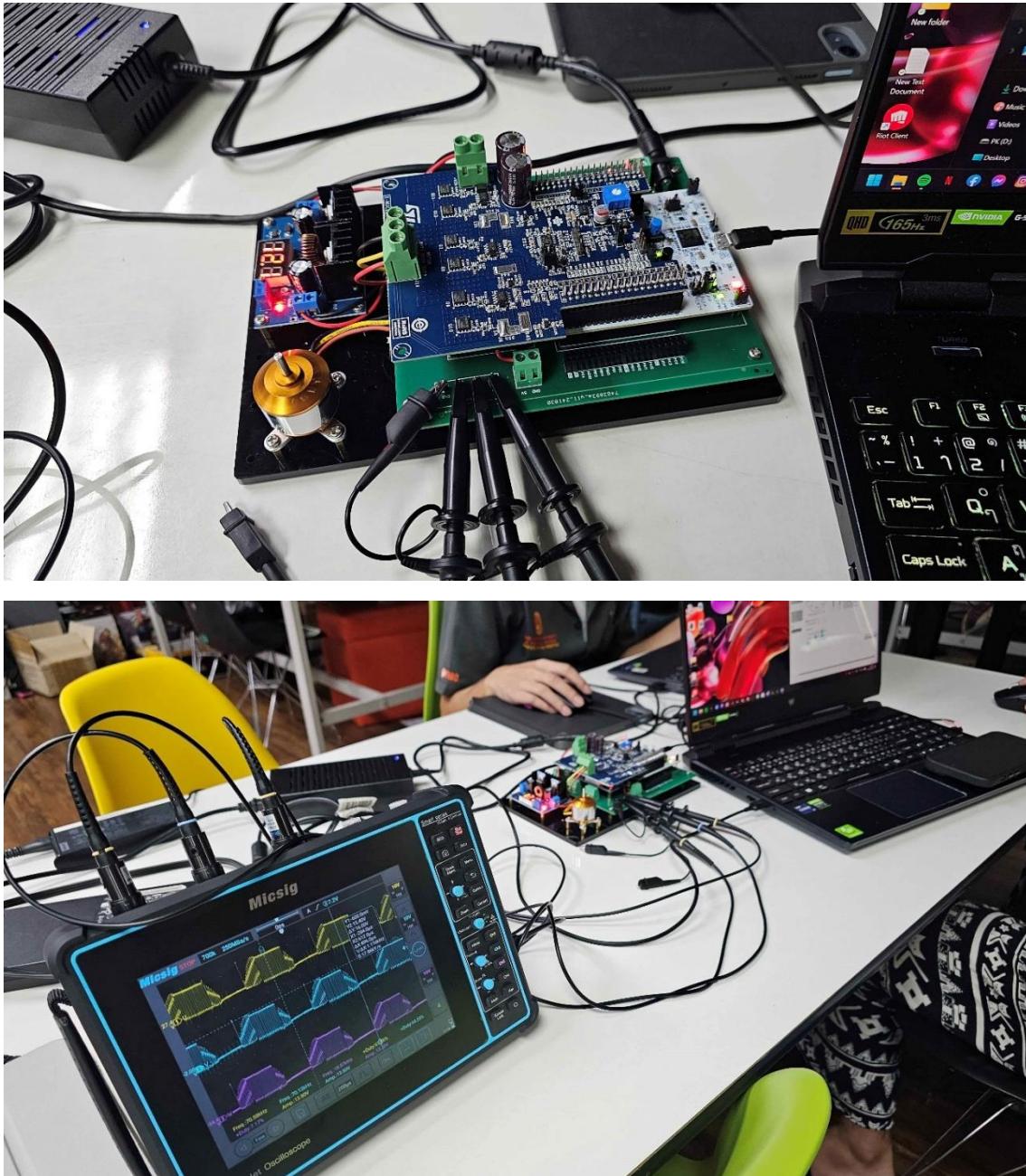


กด Connect จากนั้นให้ตั้งค่าตามลำดับต่อไปนี้

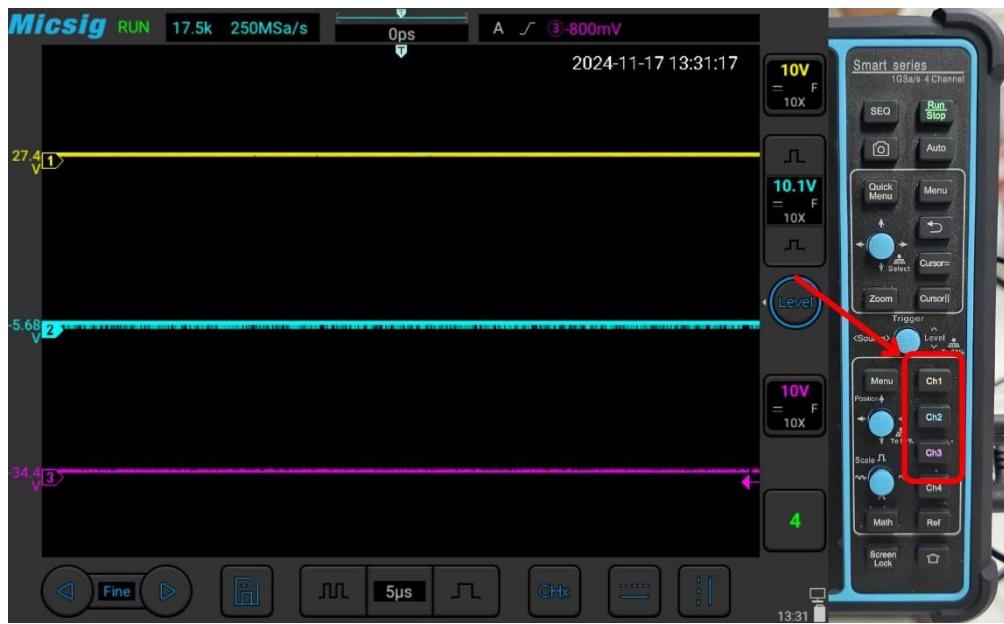
1. Target Speed ตั้งลูกศร 1
2. กด Execute Speed Ramp
3. กด Start เพื่อเริ่มการทำงาน

3. การ Setup Oscilloscope เพื่อถูรูปแบบสัญญาณของมอเตอร์ BLDC

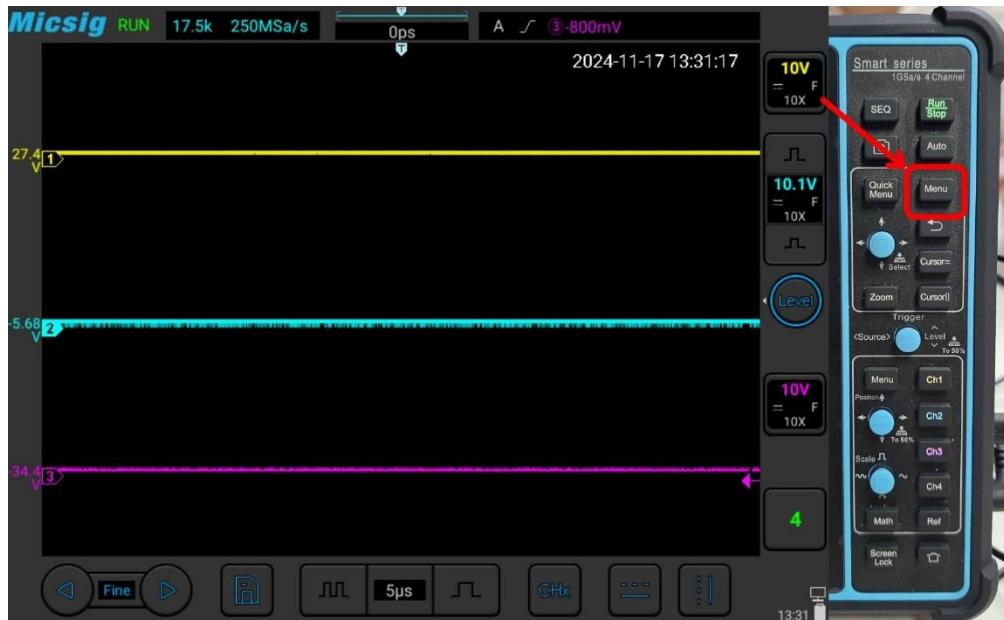
และยังมีการใช้อุปกรณ์ภายนอกซึ่งคือ Micsig STO1004 Digital Smart Oscilloscope ซึ่งต้องมีวิธีการใช้เบื้องต้นสำหรับการดูสัญญาณไฟฟ้าที่ใช้ในการควบคุม BLDC ดังนี้



การ Setup BLDCXplorer เพื่อการเก็บค่า



กดปุ่ม CH1, CH2, CH3 เพื่อเปิดเส้นสัญญาณขึ้นบนจอภาพ



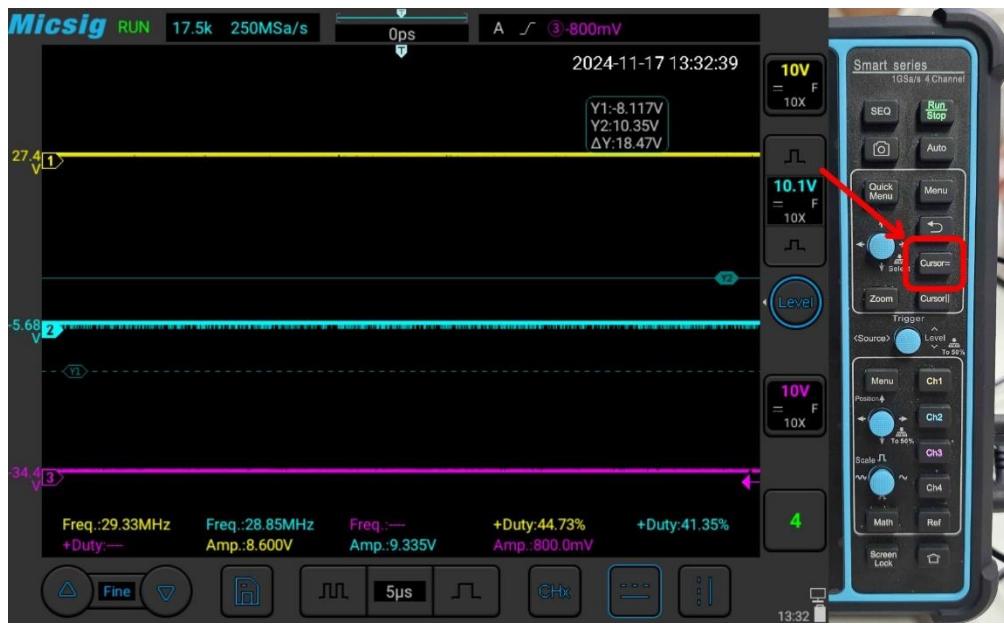
กดปุ่ม Menu เพื่อเลือกเปิดข้อมูลทั่วไปที่ต้องการศึกษา



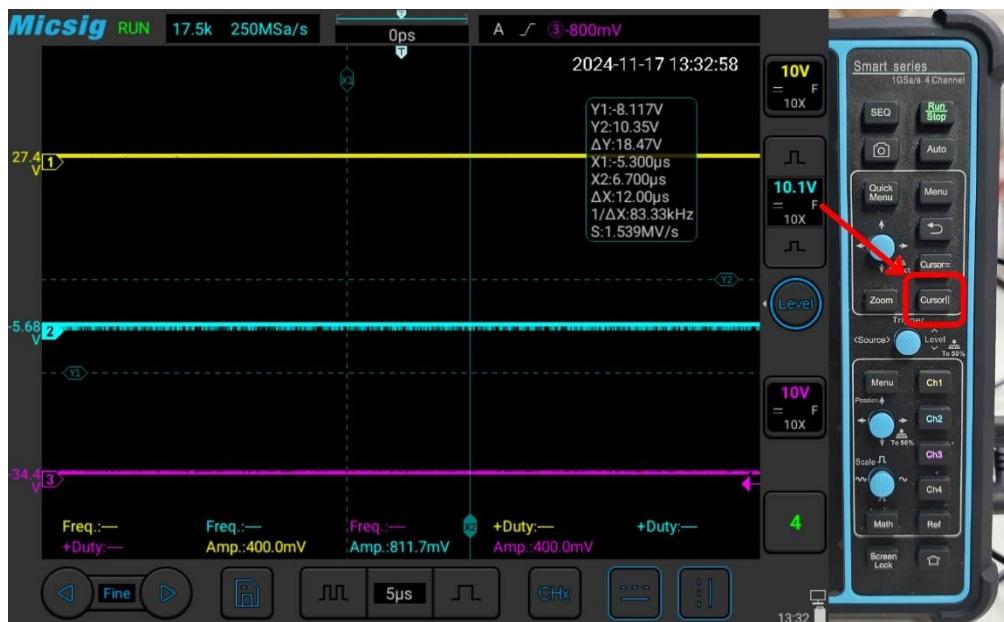
โดยในที่นี้ จะเลือกเป็น ความถี่, Duty Cycle On Time และ Amplitude เพื่อดูค่าเบื้องต้นของทุก Channel



จัดเรียงลำดับของข้อมูลตามความเหมาะสม เพื่อให้สามารถบอกรถีความแตกต่างได้สะดวก



กดปุ่ม Cursor แกน Y เพื่อใช้ในการวัดค่าของแรงดันที่เกิดขึ้น ซึ่งสามารถปรับระยะห่างของทั้งสองเส้นเพื่อวัดความต่างเฉพาะสองจุดนั้นได้



กดปุ่ม Cursor แกน X เพื่อใช้ในการวัดค่าและความถี่ ซึ่งสามารถปรับระยะห่างของทั้งสองเส้นเพื่อวัดความต่างเฉพาะสองจุดนั้นได้



หลังจากที่สัญญาณมีความคงที่และต้องการวัดสัญญาณ ณ ขณะหนึ่ง ให้กด Run/Stop เพื่อหยุด และทำการเลือน Cursor เพื่อดูค่าและบันทึกผล

ผลการทดลองที่ 1

1. ขั้บมอเตอร์ทวนเข็มนาฬิกา

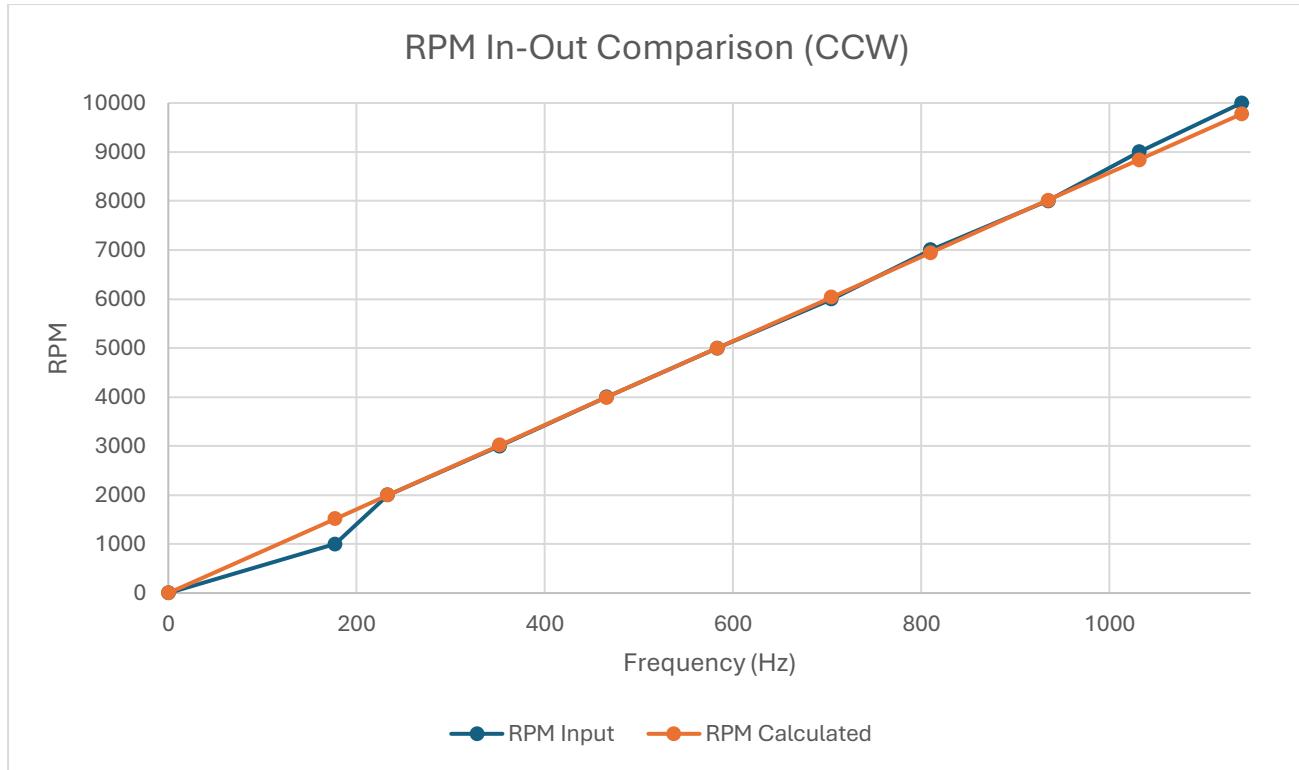
1.1 ตารางค่าความถี่ที่เกิดขึ้นจากการขับมอเตอร์ทวนเข็มนาฬิกาที่วัดได้ผ่าน Oscilloscope

RPM Input	Hz #1	Hz #2	Hz #3	Hz #4	Hz #5
0	0	0	0	0	0
1000	153.6	180.5	182.5	183.8	185.9
2000	233.6	232.6	232.6	233.6	233.6
3000	352.1	361	349.7	346	352.1
4000	460.8	469.5	469.5	465.1	463
5000	588.2	578	588.2	584.8	578
6000	704.2	708.2	704.2	704.2	702.2
7000	813	817	803.9	806.5	809.1
8000	925.9	950.6	932.8	932.8	932.8
9000	1042	1042	1037	1020	1016
10000	1136	1136	1142	1147	1142

1.2 ตารางความถี่เฉลี่ยที่เกิดขึ้นจากการขับมอเตอร์ทวนเข็มนาฬิกาและความเร็วที่คำนวณได้จากความถี่นั้น ๆ

RPM Input	Hz Average	RPM Calculated
0	0	0
1000	177.26	1519.37
2000	233.2	1998.86
3000	352.18	3018.69
4000	465.58	3990.69
5000	583.44	5000.91
6000	704.6	6039.43
7000	809.9	6942
8000	934.98	8014.11
9000	1031.4	8840.57
10000	1140.6	9776.57

1.3 กราฟเปรียบเทียบระหว่าง RPM ที่ปรับภายในโปรแกรม Motor Pilot กับ RPM ที่คำนวณได้จากการวัด เนื่องจากความถี่ที่เกิดขึ้นจากการขับมอเตอร์ทวนเข็มนาฬิกา



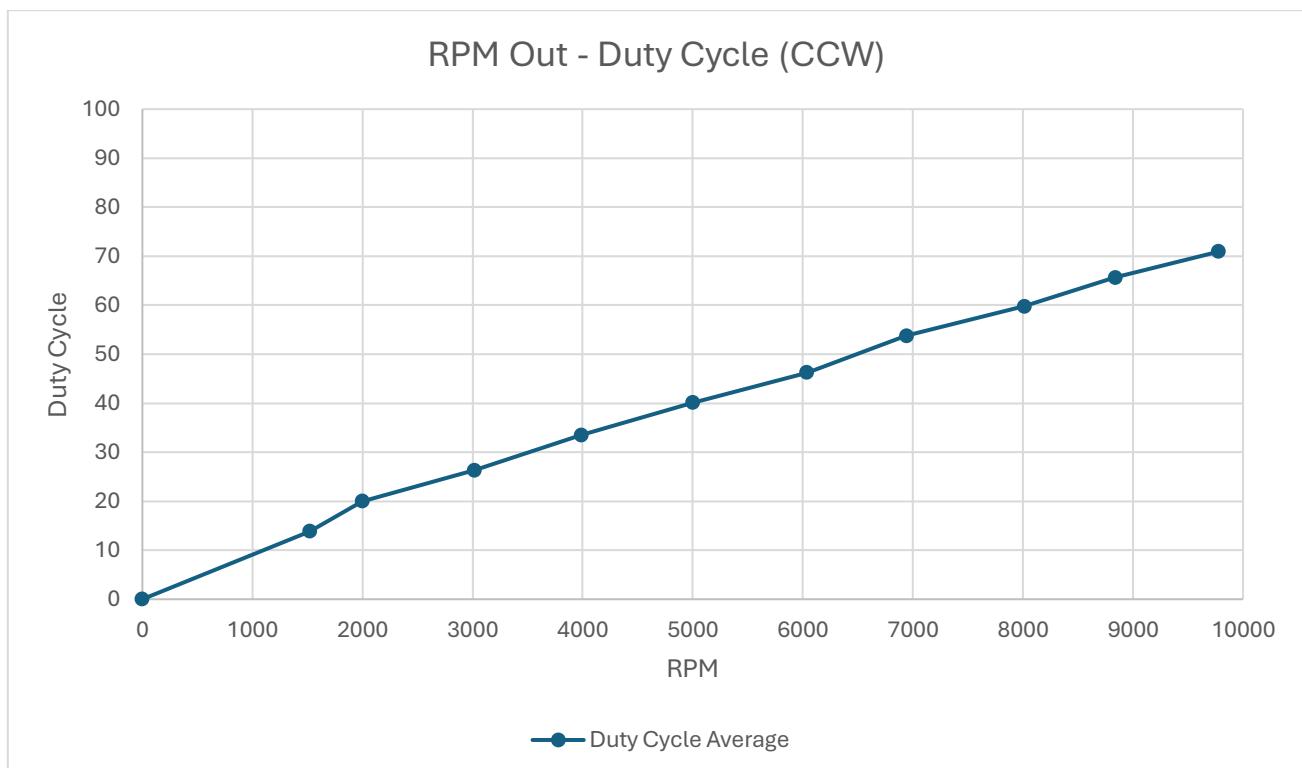
1.4 ตาราง Duty Cycle ของสัญญาณ PWM ที่ขับมอเตอร์ทวนเข็มนาฬิกาที่วัดได้ผ่าน Oscilloscope

RPM Input	Duty Cycle #1	Duty Cycle #2	Duty Cycle #3	Duty Cycle #4	Duty Cycle #5
0	0	0	0	0	0
1000	10.42	13.89	14.08	15.49	15.28
2000	18.06	20.55	19.44	20.83	21.13
3000	25.35	28.17	25.35	26.39	26.39
4000	33.33	35.21	33.33	32.39	33.33
5000	39.44	39.73	40.85	40.28	40.28
6000	46.48	47.22	45.83	45.07	46.48
7000	53.52	54.17	54.17	53.52	53.52
8000	56.94	59.72	61.11	60.56	60.56
9000	64.79	66.67	65.28	64.79	66.67
10000	70.83	72.22	70.83	71.23	69.44

1.5 ตาราง Duty Cycle เปลี่ยนของสัญญาณ PWM

RPM Input	Duty Cycle Average
0	0
1000	13.83
2000	20
3000	26.33
4000	33.52
5000	40.12
6000	46.22
7000	53.78
8000	59.78
9000	65.64
10000	70.91

1.6 กราฟเปรียบเทียบระหว่าง RPM ที่คำนวณได้จากความถี่แล้วกับ Duty Cycle ของสัญญาณที่ขับมอเตอร์ หวานเข้มนาฬิกา



2. ขั้บมอเตอร์ตามเข็มนาฬิกา

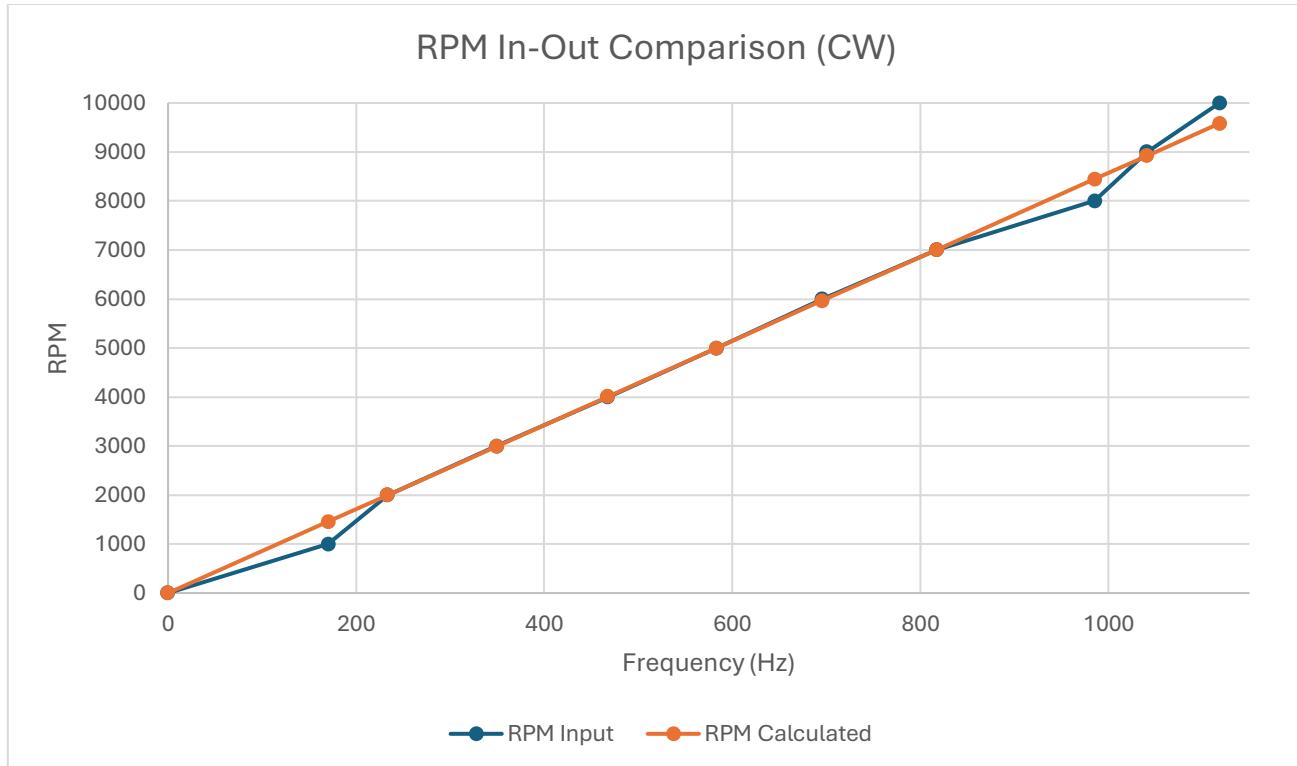
2.1 ตารางค่าความถี่ที่เกิดขึ้นจากการขับมอเตอร์ตามเข็มนาฬิกาที่วัดได้ผ่าน Oscilloscope

RPM Input	Hz #1	Hz #2	Hz #3	Hz #4	Hz #5
0	0	0	0	0	0
1000	115.5	186.6	184.2	185.9	179.2
2000	232	234.7	233.6	231.5	234.7
3000	349.7	349.7	349.7	348.4	349.7
4000	465.1	469.5	469.5	469.5	465.1
5000	588.2	580	585.5	578.7	584.1
6000	694.4	704.2	692.5	694.4	692.5
7000	813	819.7	817	819.7	817
8000	934.6	988.1	1008	984.3	1012
9000	1042	1042	1042	1037	1042
10000	1116	1111	1111	1111	1142

2.2 ตารางความถี่เฉลี่ยที่เกิดขึ้นจากการขับมอเตอร์ตามเข็มนาฬิกาและความเร็วที่คำนวณได้จากการความถี่นั้น ๆ

RPM Input	Hz Average	RPM Calculated
0	0	0
1000	170.28	1459.54
2000	233.3	1999.71
3000	349.44	2995.2
4000	467.74	4009.2
5000	583.3	4999.71
6000	695.6	5962.29
7000	817.28	7005.26
8000	985.4	8446.29
9000	1041	8922.86
10000	1118.2	9584.57

2.3 กราฟเปรียบเทียบระหว่าง RPM ที่ปรับภายในโปรแกรม Motor Pilot กับ RPM ที่คำนวณได้จากการถ่ายโอนอัตราการหมุนตามเข็มนาฬิกา



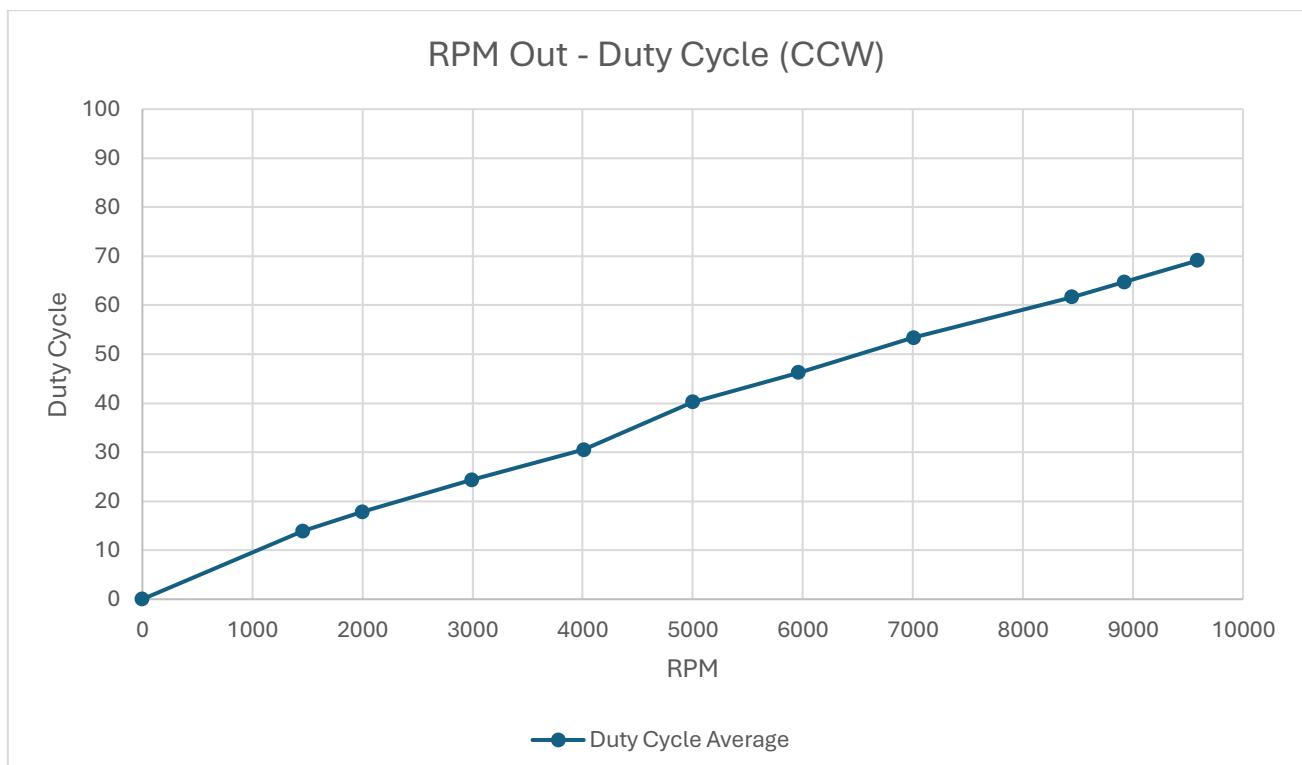
2.4 ตาราง Duty Cycle ของสัญญาณ PWM ที่ขับมอเตอร์ตามเข็มนาฬิกาที่วัดได้ผ่าน Oscilloscope

RPM Input	Duty Cycle #1	Duty Cycle #2	Duty Cycle #3	Duty Cycle #4	Duty Cycle #5
0	0	0	0	0	0
1000	12.68	14.08	15.07	15.28	12.5
2000	19.44	18.06	18.31	15.49	17.81
3000	25	26.76	23.61	23.61	22.86
4000	31.51	30.56	31.94	29.17	29.17
5000	39.44	40.28	40.85	40.28	40.28
6000	46.48	46.48	45.83	46.48	45.83
7000	53.52	54.17	52.78	52.78	53.52
8000	61.97	61.11	61.97	61.97	61.11
9000	66.2	61.11	66.2	66.2	63.89
10000	68.06	69.44	70.42	70.42	67.12

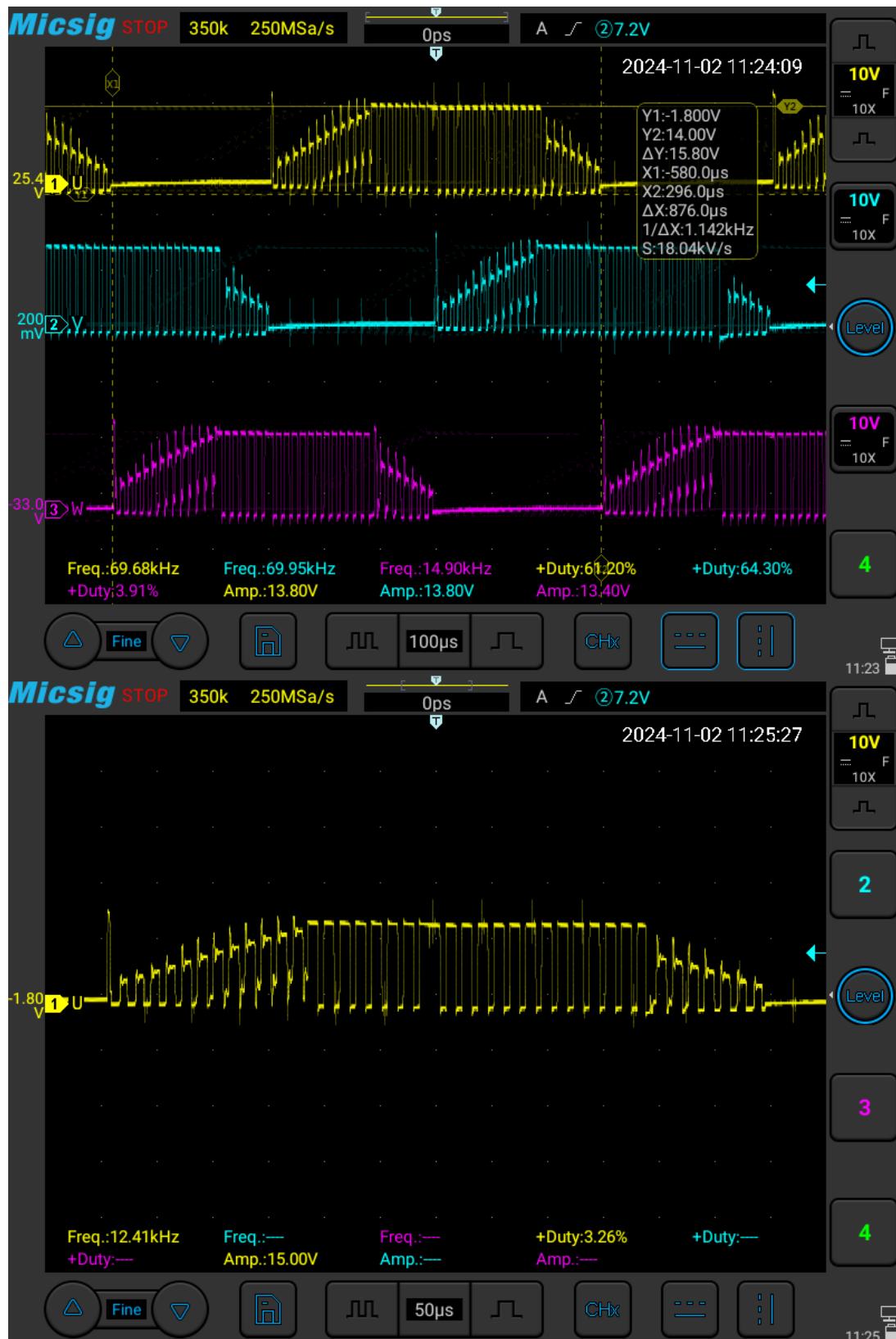
2.5 ตาราง Duty Cycle เฉลี่ยของสัญญาณ PWM

RPM Input	Duty Cycle Average
0	0
1000	13.92
2000	17.82
3000	24.37
4000	30.47
5000	40.23
6000	46.22
7000	53.35
8000	61.63
9000	64.72
10000	69.09

2.6 กราฟเปรียบเทียบระหว่าง RPM ที่คำนวณได้จากความถี่เฉลี่ยกับ Duty Cycle ของสัญญาณที่ขับมอเตอร์ตามเข็มนาฬิกา

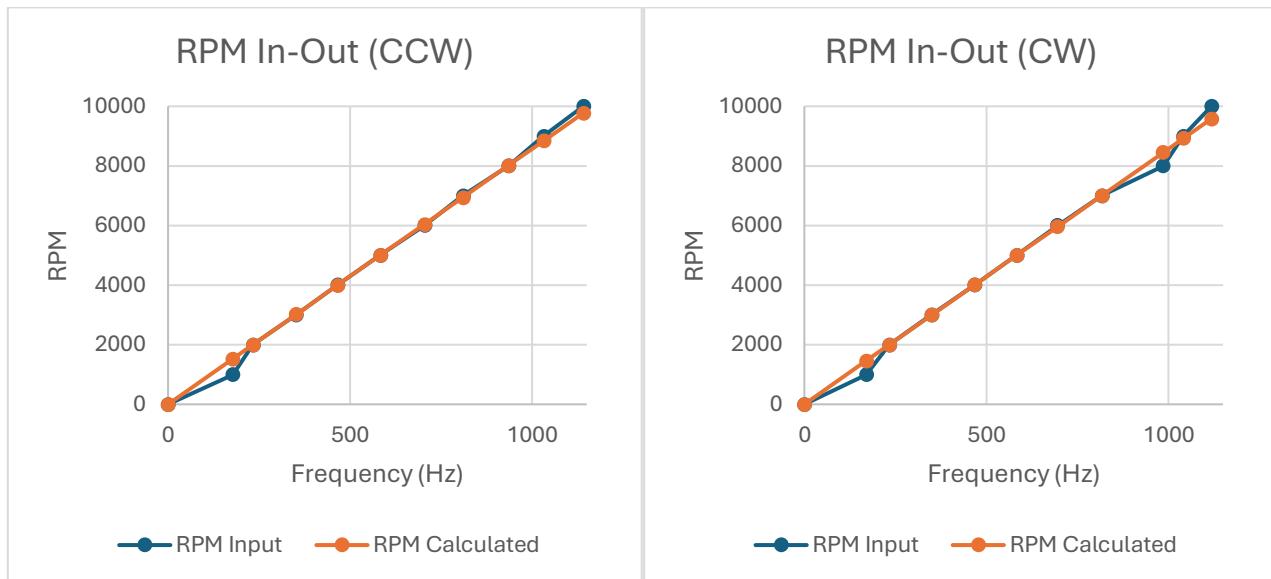


3. รูปสัญญาณ Trapezoidal ที่เกิดขึ้น



สรุปผลการทดลอง

1. ความถี่ที่เกิดขึ้นจากการขับมอเตอร์

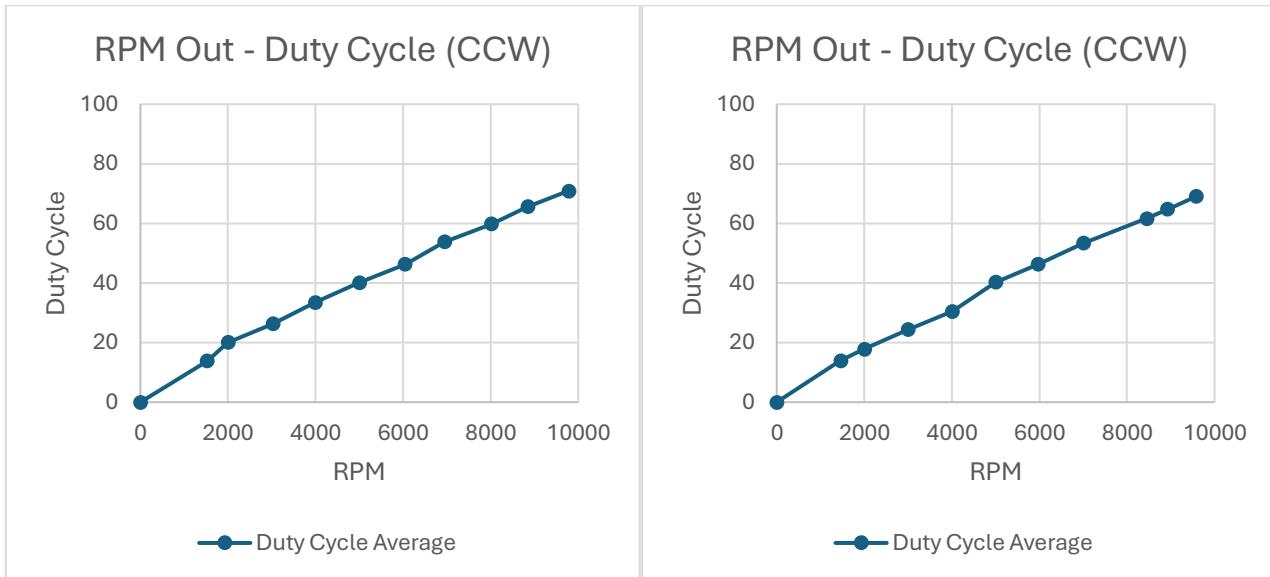


จากราฟที่ 1.3 และ 2.3 พบร่วมกันความเร็วที่ปรับในโปรแกรม Motor Pilot และความเร็วที่คำนวณได้จากการเปลี่ยนแปลงความถี่ที่เกิดขึ้นจากการขับมอเตอร์ในทั้งสองทิศทางมีแนวโน้มสอดคล้องกัน แสดงให้เห็นว่าการคำนวณความเร็วจาก Feedback ของ Trapezoidal Control ซึ่งสัมพันธ์กับความถี่ของรูปคลื่น Back EMF แบบ Trapezoidal สามารถประมาณค่าความเร็วของมอเตอร์ได้ค่อนข้างแม่นยำ

จากทั้งสองกราฟ เมื่อปรับ RPM ในโปรแกรม Motor Pilot ไปที่ 1000 RPM พบร่วมกันความเร็วที่คำนวณได้จากการเปลี่ยนแปลงความถี่ที่เกิดขึ้นจากการขับมอเตอร์อยู่ที่ประมาณ 1500 RPM สาเหตุเกิดจากมอเตอร์มีการร่างความเร็วในช่วงเริ่มต้นการหมุน และเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 8 วินาที มอเตอร์จะหยุดนิ่ง ซึ่งเป็นผลมาจากการที่ Duty Cycle ของสัญญาณ PWM ลดลงจนแรงต้นเฉลี่ยที่จ่ายให้มอเตอร์ไม่เพียงพอ กระแสในขดลวดจึงลดลง ส่งผลให้แรงบิดที่เกิดขึ้นลดลงจนไม่สามารถขับมอเตอร์ต่อไปได้

แต่การใช้สมการหาความเร็วจากความถี่ก็มีความแม่นยำอย่าง เมื่อความเร็วที่ BLDC หมุนเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้จากหลากหลายปัจจัย เช่น Sampling Rate ที่ Nucleo-STM32 สามารถอ่านค่าได้ไม่สูงพอที่จะจับรายละเอียดของสัญญาณได้ครบถ้วน สัญญาณรบกวนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กที่เร็วขึ้น หรือ Switching Frequency ของ PWM ที่เพิ่มขึ้น หรือ ความต้านทานภายใน BLDC ที่เพิ่มขึ้นตามความเร็ว รวมถึงขีดจำกัดของอุปกรณ์อ่านค่าอื่น ๆ ในวงจรอิกค์ด้วย

2. Duty Cycle ของสัญญาณ PWM ที่ขับมอเตอร์



จากราฟที่ 1.6 และ 2.6 สัญญาณ PWM ที่ขับมอเตอร์ในทั้งสองทิศทางแปรผันตรงกับความเร็วที่ปรับในโปรแกรม Motor Pilot โดยเริ่มต้นจาก 0% ที่ 0 RPM และสิ้นสุดที่ประมาณ 70% ที่ 10000 RPM เป็นผลมาจากการปรับแต่งค่า Parameter ที่เกี่ยวข้องกับการขับมอเตอร์ทั้งหมดภายในโปรแกรม Motor Pilot และต้นที่ถูกตั้งค่าไว้คือ 12 โวลต์ และ ค่า KV ของมอเตอร์คือ 1000 RPM/Volt อ้างอิงจาก Datasheet จึงสามารถหาความเร็วสูงสุดของมอเตอร์ได้จากการนี้

$$Max Speed = V \times KV$$

กำหนดให้	$Max Speed$	คือ ความเร็วสูงสุดของมอเตอร์	มีหน่วยเป็น	RPM
	V	คือ แรง	มีหน่วยเป็น	$Volt$
	KV	ค่าคงที่ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและ ความเร็วของ BLDC	มีหน่วยเป็น	$RPM/Volt$

$$Max Speed = 12 \times 1,000$$

โดยในที่นี้จะแทน	$Max Speed$	เป็น ความเร็วสูงสุดของมอเตอร์
	V	เป็น 12 Volt
	KV	เป็น 1,000 RPM/Volt อ้างอิงจาก Datasheet

$$Max Speed = 12,000 RPM$$

แล้วจึงหาสัดส่วนความเร็วที่มอเตอร์ขับจากโปรแกรมกับความเร็วสูงสุดของมอเตอร์ เพื่อคำนวนย้อนกลับหา Ideal Duty Cycle ตามสมการ

$$\text{Duty Cycle} = \frac{V_{out}}{V_{in}} \times 100$$

แต่เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าและผู้ตั้งค่าความเร็วของมอเตอร์จึงนำความเร็วมาใช้ในการคำนวนแทนแรงดันไฟฟ้า

$$\text{Duty Cycle} = \frac{RPM_{out}}{Max Speed} \times 100$$

กำหนดให้	$Duty Cycle$	คือ	Duty Cycle ของสัญญาณ PWM	มีหน่วยเป็น	%
	RPM_{out}	คือ	ความเร็วที่โปรแกรมขับมอเตอร์	มีหน่วยเป็น	Volt
	$Max Speed$	คือ	ความเร็วสูงสุดของมอเตอร์	มีหน่วยเป็น	RPM

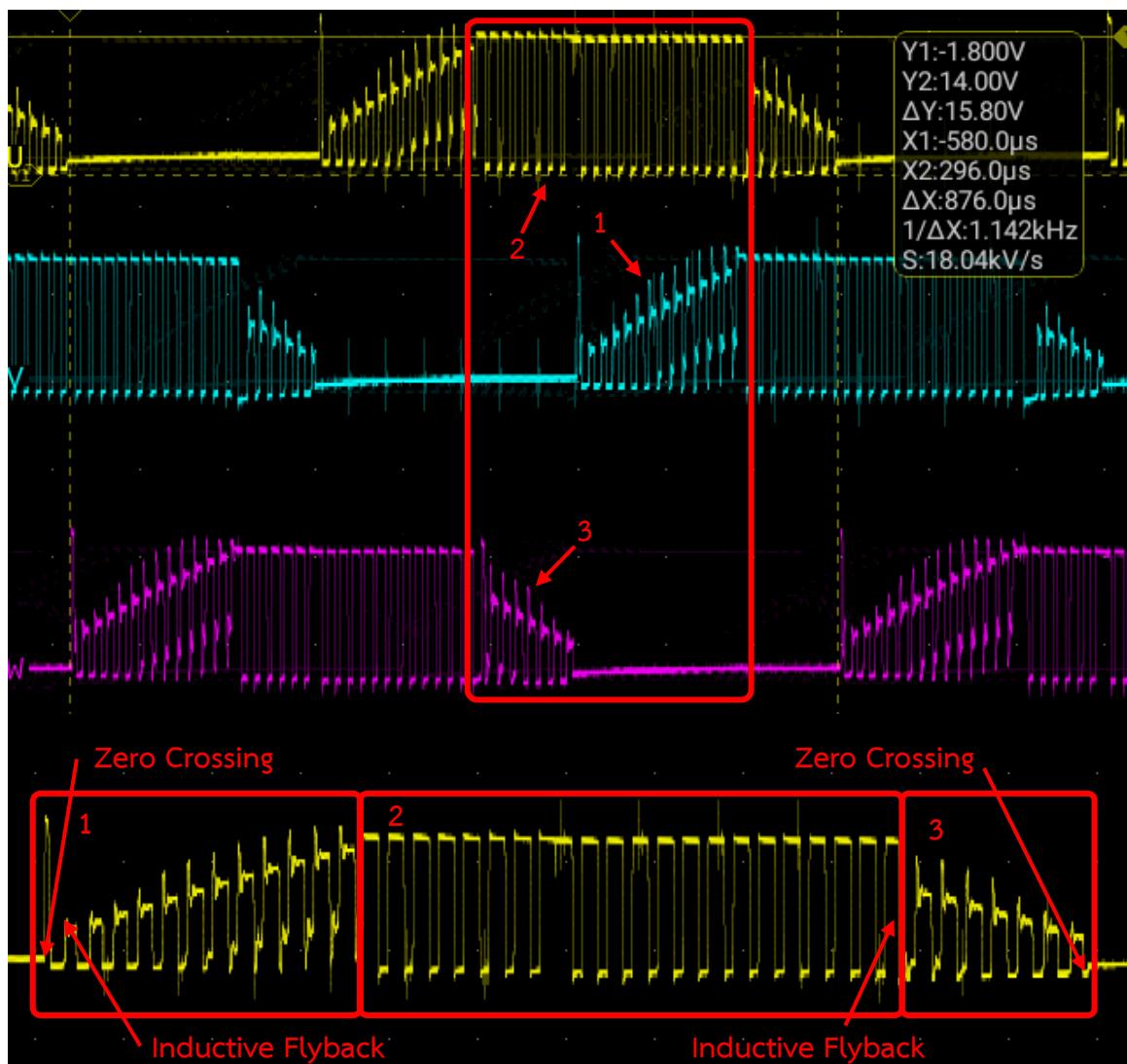
$$Duty Cycle = \frac{10,000}{12,000} \times 100$$

โดยในที่นี้จะแทน	$Duty Cycle$	เป็น	Duty Cycle ของสัญญาณ PWM
	RPM_{out}	เป็น	10,000 RPM
	$Max Speed$	เป็น	12,000 RPM

$$Duty Cycle = 83.33\%$$

แต่จากการทดสอบได้ว่าที่ความเร็วสูงสุดที่สามารถปรับค่าໄไปได้ มี Duty Cycle ของสัญญาณ PWM อยู่เพียง 70% ซึ่งต่างกับ Ideal Duty Cycle ถึง 13.33% ความคลาดเคลื่อนนี้สามารถเกิดขึ้นได้จากหลายปัจจัย เช่น ความเร็วของ BLDC ที่โดนโปรแกรมลิมิตໄไม่ให้ให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดและใช้งานได้ยาวนานที่สุด หรือคุณภาพของมอเตอร์ที่มีราคาถูกและข้อมูลใน Datasheet น้อยเกินไป

3. รูปสัญญาณ Trapezoidal ที่เกิดขึ้น



จากภาพข้างต้น ซึ่งคือรูปสัญญาณ Trapezoidal Back-EMF Waveform ที่เกิดขึ้นจากการขับ BLDC โดยตั้งแรงดันที่ใช้ในการขับไว้ที่ 12 โวลต์ เพื่อขับ BLDC ด้วย Six-Step Commutation จึงปรับความเร็วภายในโปรแกรม Motor Pilot ไปที่ 10,000 RPM ทำให้เกิด Duty Cycle ของสัญญาณ PWM อยู่ที่ประมาณ 70% เกิดความถี่ที่ 1,142 Hz และมีแอมเพลจุดอยู่ที่ 15.8 โวลต์

ในหนึ่งรอบของสัญญาณข้างต้นจะประกอบไปด้วย ช่วงที่ 2 คือ ช่วงที่เห็นว่ากระแสไฟฟ้าเป็นช่วงที่ขาด漉ด นั้น ๆ เห็นว่ากระแสไฟฟ้าอย่างถูกต้องตามลำดับของ Six-Step Commutation และช่วงที่ 1 และ 3 คือ ช่วงที่ขาด漉ดเกิดการ Floating เนื่องจากขาด漉ดอื่น ๆ กำลังเห็นว่ากระแสไฟฟ้าอยู่ ในตอนเริ่มต้นของช่วงที่ 1 และ 3 จะเกิดสัญญาณแรงดันไฟฟ้าสูง (Voltage Spike) เพราะแหล่งจ่ายไฟฟ้าหยุดลงอย่างฉับพลัน เรียกว่า Inductive Flyback

รูปสัญญาณ Back EMF ยังสามารถบอกร่องรอยได้จากการใช้ Zero Crossing จับสัญญาณขณะที่แรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงจากผ่านลับเป็นผ่านบวกหรือจากผ่านบวกเป็นผ่านลับ การทราบตำแหน่งของโรเตอร์จากวิธีการนี้

ช่วยให้การควบคุม BLDC แบบ Sensorless Control มีเสถียรภาพมากยิ่งขึ้น แต่สัญญาณจากรูปภาพจะเห็นเป็น Trapezoidal เฉพาะฝั่งบวกเท่านั้น เป็นผลมาจากการที่ Nucleo-STM32 ไม่สามารถอ่านสัญญาณที่มีค่าต่ำกว่าศูนย์โดยตรงได้

โดยในหนึ่งรอบของสัญญาณ จะมีการเปิด-ปิด Duty Cycle ของสัญญาณ PWM อยู่ตลอดเวลาที่มีแรงดันไฟฟ้าอยู่ในชุดลวด ซึ่งส่งผลต่อความเร็วของ BLDC และสาเหตุที่แอมเพลจูดของสัญญาณสามารถขึ้นไปถึง 15.8 โวลต์ถึงแม้ว่าแรงดันที่ใช้ในการขับจะอยู่ที่ 12 โวลต์ก็เกิดขึ้นจาก Back EMF ที่เกิดขึ้นจากการหมุนของชุดลวดภายใน BLDC นั้นเอง

อภิรายผลการทดลอง

1. Brushless DC Motor มีประสิทธิภาพการทำงานสูงและสามารถควบคุมได้อย่างแม่นยำเมื่อใช้เทคนิคการควบคุมที่เหมาะสม

Brushless DC Motor (BLDC) มีประสิทธิภาพสูง เนื่องจากไม่ใช้แปรงถ่านเหมือน Brushed DC Motor จึงลดการเสียดสีและการสึกหรอภายใน ทำให้มีอายุการใช้งานยาวนานขึ้น และประหยัดพลังงาน BLDC สามารถควบคุมได้อย่างแม่นยำหากใช้เทคนิคการควบคุมที่เหมาะสม เช่น Field-Oriented Control (FOC) หรือ Six-Step Control จึงเป็นที่นิยมใช้ในงานที่ต้องการความละเอียดและเสถียรภาพ เช่น ยานยนต์ไฟฟ้า หุ่นยนต์ และระบบอุตสาหกรรม

2. การควบคุมแบบ Sensor-based Control มีความแม่นยำสูงกว่า Sensorless Control ในการระบุตำแหน่งและความเร็วของมอเตอร์ โดยเฉพาะที่ความเร็วต่ำ ซึ่งทำให้สามารถปรับความเร็วและตำแหน่งได้ดีกว่า

Sensor-based Control: Sensor-based Control ใช้ Hall Sensor เพื่อตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์ ทำให้มีความแม่นยำสูงโดยเฉพาะในช่วงความเร็วต่ำ เนื่องจากสามารถตรวจจับสัญญาณสนามแม่เหล็กได้โดยตรง วิธีนี้เหมาะสมสำหรับงานที่ต้องการความแม่นยำ เช่น ระบบอุตสาหกรรมหรือยานยนต์ไฟฟ้า

Sensorless Control: Sensorless Control ใช้แรงดันย้อนกลับ (Back EMF) เพื่อตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ ข้อดีคือไม่ต้องใช้เซ็นเซอร์ ทำให้ลดต้นทุนฮาร์ดแวร์และเพิ่มความเรียบง่ายของระบบ แต่ที่ความเร็วต่ำ Back EMF อาจไม่เพียงพอต่อการตรวจจับตำแหน่งอย่างแม่นยำ จึงเหมาะสมสำหรับงานที่ไม่ต้องการความละเอียดสูง

3. การควบคุมด้วย FOC โดยใช้ SVM สามารถจัดการ Vector ของกระแสไฟฟ้าได้อย่างแม่นยำกว่า Six-Step Control ส่งผลให้มีการควบคุมที่ราบรื่นและมีประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์สูงกว่า

การควบคุมด้วย FOC โดยใช้ SVM สามารถจัดการ Vector ของกระแสไฟฟ้า ได้อย่างแม่นยำ ส่งผลให้การควบคุมแรงบิดและฟลักก์แม่เหล็กมีความราบรื่นและประสิทธิภาพของการทำงานของมอเตอร์สูงกว่า Six-Step Control ซึ่งมีข้อจำกัดในเรื่อง Torque Ripple และความแม่นยำในการควบคุมแรงบิดที่ลดลงที่ความเร็วต่ำ

4. การควบคุมแบบ Sinusoidal ช่วยให้ BLDC Motor ทำงานได้ราบรื่นกว่า Trapezoidal โดยลดแรงบิดที่กระตุกและเสียงรบกวนในระหว่างการหมุน

Sinusoidal Control: การควบคุมแบบ Sinusoidal ใช้รูปคลื่น Back EMF แบบ Sinusoidal ทำให้แรงบิดราบรื่น ลดเสียงรบกวน และไม่มีการกระตุกของมอเตอร์ เหมาะสำหรับงานที่ต้องการความแม่นยำและเสถียรภาพสูง เช่น เครื่องมือแพทย์ หรือระบบที่ต้องการแรงบิดคงที่ในทุกช่วงความเร็ว

Trapezoidal Control: การควบคุมแบบ Trapezoidal ใช้รูปคลื่น Back EMF แบบ Trapezoidal และมักใช้กับ Six-Step Control แม้จะควบคุมง่ายและต้นทุนต่ำ แต่เกิด Torque Ripple และเสียงรบกวนมากกว่า เหมาะสำหรับงานทั่วไป เช่น พัดลมหรือปั๊มน้ำ

5. การใช้ PWM ร่วมกับ Six-Step Control สามารถปรับแรงดันไฟฟ้าได้ตามช่วงเวลาและความเร็วของมอเตอร์ ทำให้เกิดการควบคุมที่แม่นยำและประหยัดพลังงานมากขึ้น

การใช้ PWM ร่วมกับ Six-Step Control สามารถให้การควบคุมที่แม่นยำและประหยัดพลังงานได้ในระดับหนึ่ง โดยการปรับแรงดันไฟฟ้าตามช่วงเวลาและความเร็วของมอเตอร์ แต่การควบคุมนี้มีข้อจำกัดในเรื่อง Torque Ripple และอาจไม่ได้ให้ความแม่นยำสูงสุดเมื่อเทียบกับเทคนิคการควบคุมที่ซับซ้อนกว่า เช่น FOC

6. ความถี่ของ PWM มีผลโดยตรงต่อ Frequency Output ของมอเตอร์ (เช่น Back EMF และการตรวจจับของ Hall Sensor) ซึ่งสามารถใช้เพื่อประเมินความเร็วและตำแหน่งของมอเตอร์ได้

ความถี่ของ PWM มีผลต่อ Frequency Output ของมอเตอร์ เช่น Back EMF และ Hall Sensor โดยความถี่ PWM ที่สูงเกินไปอาจทำให้ Nucleo-STM32 ไม่สามารถอ่านข้อมูลจาก Hall Sensor ได้ทัน ส่วนความถี่ที่ต่ำเกินไปอาจทำให้แรงดันไฟฟ้าไม่เสถียร ส่งผลให้มอเตอร์หยุดหมุนได้ในบางกรณี

7. Feedback จาก Hall Sensor มีความแม่นยามากกว่า Back EMF ในกระบวนการบุต้าแหนง เนื่องจาก Hall Sensor มีสัญญาณที่ชัดเจนมากกว่า

Hall Sensor ให้สัญญาณที่ชัดเจนและแม่นยำ โดยเฉพาะที่ความเร็วต่ำ ทำให้เหมาะสมกับงานที่ต้องการความแม่นยามาก เช่น ยานยนต์ไฟฟ้าและระบบควบคุมตำแหน่ง ในขณะที่ Back EMF มีข้อดีที่ต้นทุนต่ำและความเรียบง่าย แต่มีข้อจำกัดที่ความเร็วต่ำ เนื่องจากสัญญาณอาจไม่ชัดเจนพอสำหรับการระบุตำแหน่งที่แม่นยำ

8. การประมวลผล Zero Crossing จาก Feedback ด้วย Op-Amp สามารถเพิ่มความแม่นยำในการระบุตำแหน่งเมื่อใช้ Sensorless Control ได้ ทำให้การควบคุมมอเตอร์มีเสถียรภาพมากขึ้น

การประมวลผล Zero Crossing ใช้เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการระบุตำแหน่งของโรเตอร์ใน Sensorless Control โดยใช้ Op-Amp หรือไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อตรวจจับสัญญาณจาก Back EMF กระบวนการนี้ช่วยให้มอเตอร์มีเสถียรภาพในการทำงานมากขึ้น โดยเฉพาะในระบบที่ต้องการความแม่นยำสูง

9. การควบคุมแบบ Trapezoidal สามารถให้ Feedback ของความเร็วที่มีความแม่นยำในระดับที่ยอมรับได้ ทำให้สามารถคำนวณความเร็วได้อย่างมีประสิทธิภาพแม้ที่ความเร็วสูง

การควบคุมแบบ Trapezoidal สามารถให้ Feedback ของความเร็วที่มีความแม่นยำในระดับที่ยอมรับได้ และสามารถคำนวณความเร็วได้อย่างมีประสิทธิภาพที่ความเร็วสูง โดยเฉพาะในงานที่ไม่ต้องการความละเอียดสูงและยอมรับ Torque Ripple ได้ แต่สำหรับงานที่ต้องการความแม่นยำสูงและแรงบิดที่เสถียร FOC หรือ Sinusoidal Control จะเหมาะสมมากกว่า

ข้อเสนอแนะ

- การวัดความเร็วของ BLDC ที่เกิดขึ้นมีที่มาจากการคำนวณย้อนกลับ ซึ่งยังสามารถเกิดความคลาดเคลื่อนและความผิดพลาดของข้อมูลได้ จึงควรมีอุปกรณ์สำหรับวัดความเร็วภายนอก เช่น เครื่องวัดความเร็วรอบของมอเตอร์, Tachometer หรือ Encoder ที่สามารถรับความเร็วสูงได้
- เพื่อให้สามารถศึกษาพัฒนาระบบของ BLDC ได้ทั้งหมด จึงควรมีอุปกรณ์ที่สามารถขับ BLDC ด้วยวิธีอื่น ๆ ที่ซับซ้อนกว่าได้ รวมถึง BLDC ที่มี Hall Sensor ภายในตัวและรูปแบบของคลื่นที่รองรับการขับด้วยวิธีที่ซับซ้อนมากกว่า

เอกสารอ้างอิง

Brushed DC Motor

- <https://anaheimautomation.com/blog/post/brush-dc-motor-guide>
- <https://engineeringnotesonline.com/dc-motors/> by Er.Sushil Neupane
- <https://lucid.app/lucidspark/>
- <https://www.sosw.poznan.pl/tfitzer/dcpid/>
- <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/pulse-width-modulation>
- <https://www.modularcircuits.com/blog/articles/h-bridge-secrets/sign-magnitude-drive/>
- <https://web.stanford.edu/class/me161/labs/Lab06MotorConstants.pdf>
- <https://placidindustries.com/products/clutches/magnetic-particle-clutches/>

Stepper Motor

- https://www.monolithicpower.com/en/learning/resources/stepper-motors-basics-types-uses?srsltid=AfmBOoqzasnoWhOz50_AJpKBKI-yudn76sva7PXXxCw77Nv4HNp71HPjF
- <https://www.orientalmotor.com/stepper-motors/technology/stepper-motor-overview.html>
- <https://mechtex.com/blog/types-of-stepper-motor#:~:text=These%20motors%20are%20widely%20used,Synchronous%20or%20Hybrid%20Stepper%20Motor.>
- <https://mechtex.com/blog/explore-the-different-stepping-modes-of-a-stepper-motor>
- <https://www.portescap.com/en/newsroom/whitepapers/2021/07/difference-between-bipolar-drives-and-unipolar-drives-for-stepper-motors#:~:text=In%20unipolar%3A%20the%20current%20always,both%20directions%20in%20all%20coils.>
- <https://www.faulhaber.com/en/know-how/tutorials/stepper-motor-tutorial-how-to-prevent-step-losses-with-stepper-motors/>

Brushless DC Motor

- <https://www.spektrumrc.com/product/avian-6362-200kv-outrunner-brushless-motor/SPMXAM4796.html>
- <https://www.nidec.com/en/technology/capability/brushless/>
- <https://www.portescap.com/en/newsroom/whitepapers/2021/10/understanding-the-effect-of-pwm-when-controlling-a-brushless-dc-motor>
- <https://www.tycorun.com/blogs/news/what-is-pwm>
- <https://www.mathworks.com/discovery/space-vector-modulation.html>
- <https://youtu.be/gNpoTPzEkco?si=eZ-MEhZjOVaAxTOb>
- <https://www.pinterest.com/pin/826621706577954524/>
- <https://youtu.be/xIORHY8li90?si=1FqpyJle1EF3LZl1>
- <https://www.ijert.org/research/optimized-design-of-the-bldc-motor-for-higher-efficiency-IJERTV2IS50171.pdf>
- https://youtu.be/YPD1_rcXBIE?si=OEANZQos9tasobnV
- <https://www.ti.com/lit/an/bpra048/bpra048.pdf>
- <https://www.nidec.com/en/technology/motor/glossary/item/>
- <https://www.digikey.co.th/th/articles/controlling-sensorless-bldc-motors-via-back-emf>
- https://www.ti.com/lit/ab/slvaeg3b/slvaeg3b.pdf?ts=1731815111167&ref_url=https%253A%252F%252F